Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος

Πρακτικά

10ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής

«Η Συμβολή της Γεωργικής Μηχανικής στην Ανάπτυξη της Ελληνικής Γεωργίας»

Συνεδριακό Αμφιθέατρο
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
28 - 29 Σεπτεμβρίου 2017

Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος

Πρακτικά

10ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής

«Η Συμβολή της Γεωργικής Μηχανικής στην Ανάπτυξη της Ελληνικής Γεωργίας»

Επιμέλεια Έκδοσης:
Γ. Ξανθόπουλος, Επικ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Δ. Λέντζου, Υποψ. Διδάκτορας Γ.Π.Α.

Συνεδριακό Αμφιθέατρο, Γ.Π.Α.
28 - 29 Σεπτεμβρίου 2017

Πρόλογος

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (Ε.Γ.Μ.Ε.), ως επιστημονική εταιρεία, ιδρύθηκε το 1993 και είναι μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης Γεωργικών Μηχανικών (European Society of Agricultural Engineers, EurAgEng). Μία από τις δράσεις της εταιρείας είναι και η διοργάνωση ενός Πανελληνίου Συνεδρίου ανά διετία. Στόχος του Πανελληνίου Συνεδρίου είναι να φέρει σε επαφή ανθρώπους που δραστηριοποιούνται στον τομέα της Γεωργικής Μηχανικής, με απώτερο σκοπό τη σύναψη συνεργασιών που θα ενισχύσουν τη δραστηριότητά τους, προκειμένου να γίνει γνωστή η έρευνα που επιτελείται στη χώρα.

Το 10^{ο} Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής έλαβε χώρα στην Αθήνα στις 28 και 29 Σεπτεμβρίου 2017 με θέμα «*Η Συμβολή της Γεωργικής Μηχανικής στην Ανάπτυξη της Ελληνικής Γεωργίας*». Η γεωργία εξελίσεται και είναι επιτακτική η ανάγκη για καινοτόμες λύσεις στον τομέα των εδαφικών και υδατικών πόρων, στα γεωργικά μηχανήματα, στη συντήρηση των νωπών αγροτικών προιόντων και στο αγροτικό και αστικό περιβάλλον. Η εύρεση και εφαρμογή καινοτόμων λύσεων θα δώσει ώθηση στην ελληνική γεωργία μειώνοντας το κόστος παραγωγής, βελτιώνοντας την παραγωγή και την ποιότητα των αγροτικών προιόντων και τέλος προστατεύοντας το περιβάλλον. Οι προηγούμενες δράσεις μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση της ανταγωνιστικής της κατάταξης σε Ευρωπαϊκό αλλά και Διεθνές επίπεδο γεγονός το οποίο είναι απολύτου ανάγκης στη σύγχρονη Ελλάδα της οικονομικής ύφεσης και ανεργίας.

Ο παρών τόμος αποτελεί τα πρακτικά του 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, που έλαβε χώρα στην Αθήνα στις 28 και 29 Σεπτεμβρίου 2017 με τίτλο «*Η Συμβολή της Γεωργικής Μηχανικής στην Ανάπτυξη της Ελληνικής Γεωργίας*». Περιέχει 73 ερευνητικές εργασίες, οι οποίες εγκρίθηκαν για δημοσίευση μετά από κρίση από τα μέλη της Επιστημονικής Επιτροπής και άλλους ειδικούς επιστήμονες και παρουσιάστηκαν στη διάρκεια του συνεδρίου προφορικά και ως posters.

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τα μέλη της Οργανωτικής και Επιστημονικής Επιτροπής, τους προσκεκλημένους ομιλητές, τους συγγραφείς και τους κριτές των εργασιών, που αφιέρωσαν τον πολύτιμο χρόνο τους για την επιστημονικά αρτιότερη οργάνωση του συνεδρίου. Τέλος, ειλικρινείς ευχαριστίες εκφράζονται προς τους χορηγούς του συνεδρίου για την οικονομική τους ενίσχυση συμβάλλοντας στην επιτυχή πραγματοποίησή του, ιδιαίτερα σε μία τόσο δύσκολη οικονομική συγκυρία.

Σπύρος Φουντάς
Επίκουρος Καθηγητής Γ.Π.Α.
Πρόεδρος ΕΓΜΕ

Γιώργος Ξανθόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Γ.Π.Α.
Γεν. Γραμματέας ΕΓΜΕ

Οργανωτική Επιτροπή Συνεδρίου

Σπύρος Φουντάς, Επικ. Καθηγητής Γ.Π.Α., Πρόεδρος Ε.Γ.Μ.Ε.
Κων/νος Σαμαντούρος, Αντιπρόεδρος Ε.Γ.Μ.Ε.
Γεώργιος Ξανθόπουλος, Επικ. Καθηγητής Γ.Π.Α., Γεν. Γραμματέας Ε.Γ.Μ.Ε.
Αθανάσιος Μπαλαφούτης, Διδάκτωρ Γ.Π.Α., Ταμίας Ε.Γ.Μ.Ε.
Γεώργιος Παπαδάκης, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Δημήτριος Μπριασούλης, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κων/νος Αρβανίτης, Αναπλ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Σταύρος Αλεξανδρής, Επικ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Νικόλαος Δέρκας, Αναπλ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Γεώργιος Σταμάτης, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Διονύσιος Καλύβας, Αναπλ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κων/νος Φερεντίνος, Ερευνητής ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ

Επιστημονική Επιτροπή – Κριτές Επιστημονικών Εργασιών

Αγγελάκης Ανδρέας, Δρ. Γεωπόνος και Πολ. Μηχανικός, ΕΘΙΑΓΕ
Αλεξανδρής Σταύρος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Αλεξανδρίδης Θωμάς, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Αμπατζίδης Ιωάννης, Δρ. Γεωπόνος, California State University at Bakersfield
Αναστασιάδου – Παρθενίου Ευαγγελία, Ομ. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Αντωνιάδης Βασίλειος, Επ. Καθηγητής Π.Θ.
Αντωνόπουλος Βασίλειος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Αραμπατζής Γεώργιος, Κύριος Ερευνητής ΕΛ.Γ.Ο. Δήμητρα
Αρβανίτης Κωνσταντίνος, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Αργυροκαστρίτης Ιωάννης, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Ασχονίτης Βασίλειος, Δρ. Γεωπόνος, University of Ferrara
Βαλιάντζας Ιωάννης, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Βουγιούκας Σταύρος, Αν. Καθηγητής, University of California, Davis
Βουδούρης Κωνσταντίνος, Αν. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Βύρλας Παναγιώτης, Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Γασπαράτος Διονύσιος, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Γέμτος Θεοφάνης, Ομ. Καθηγητής Π.Θ.
Γεωργακάκης Δημήτριος, Ομ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Γεωργίου Πανταζής, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Γιαλαμάς Θεόδωρος, Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Γιαννόπουλος Σταύρος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Γιαννούλη Περσεφόνη, Επ. Καθηγήτρια Π.Θ.
Γράβαλος Ιωάννης, Αν. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Δαλέζιος Νικόλαος, Ομ. Καθηγητής Π.Θ.
Δαναλάτος Νικόλαος, Καθηγητής Π.Θ.
Δέρκας Νικόλαος, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Δημήρκου Ανθούλα, Καθηγήτρια Π.Θ.

Δημητριάδης Χρήστος, Καθηγητής Εφαρμογών Α.Τ.Ε.Ι.Θ.
Διαμαντοπούλου Μαρία, Δρ. Δασολόγος
Δουλγέρης Χαράλαμπος, Δρ. Γεωπόνος, Ε.Κ.Β.Υ.
Ελμαλόγλου Σταμάτιος, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Ευαγγελίδης Χρήστος, Αν. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ζαλίδης Γεώργιος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ζήσης Θωμάς, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Θεοδοσίου Νικόλαος, Αν. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Θεοχάρης Μενέλαος, Αν. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Ηπείρου
Καβαλιεράτου Σοφία, Δρ. Γεωπόνος, Ε.ΔΙ.Π. Α.Π.Θ.
Καλμπουρτζή – Γκαϊδατζή Κυριακή, Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Καλύβας Διονύσιος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Καλφούντζος Δημήτριος, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Καραβίτης Χρήστος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Καραγιάννης Ευάγγελος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Καρακώστας Θεόδωρος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Καραμούζης Διαμαντής, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Καραντούνιας Γεώργιος, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κάργας Γεώργιος, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Καρπούζος Δημήτριος, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Κατέρης Δημήτριος, Δρ. Γεωπόνος
Κατσιφαράκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Κατσούλας Νικόλαος, Αν. Καθηγητής Π.Θ.
Καυγά Αγγελική, Επ. Καθηγήτρια Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
Κερκίδης Πέτρος, Ομ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κίττας Κωνσταντίνος, Καθηγητής Π.Θ.
Κόκκορας Ιωάννης, τ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Κοσμάς Κωνσταντίνος, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κούγιας Παναγιώτης, Δρ. Γεωπόνος, DTU Δανία
Κωστοπούλου Σοφία, Αν. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Κωτσόπουλος Θωμάς, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Κωτσόπουλος Σπυρίδων, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Λαμπρινός Γρηγόριος, Ομ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Λεβίζου Ευθυμία, Λέκτορας Π.Θ.
Λεκάκης Εμμανουήλ, Δρ. Γεωπόνος
Λέλλης Θεμιστοκλής, τ. Αν. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Λουκάς Αθανάσιος, Καθηγητής Π.Θ.
Λύκας Χρήστος, Λέκτορας Π.Θ.
Μανάκος Αντώνιος, Δρ. Γεωλόγος
Μανωλάκος Δημήτριος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μανωλοπούλου Ελένη, Ομ. Καθηγήτρια ΑΤΕΙ Καλαμάτας
Μάρκου Γεώργιος, Δρ. Γεωπόνος, Γ.Π.Α.
Μαρτζόπουλος Γεράσιμος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ματσή Θεοδώρα, Αν. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Μαυρογιαννόπουλος Γεώργιος, Ομ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μισοπολινός Νικόλαος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μόσχου Δημήτριος, Αν. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Μουστάκας Νικόλαος, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μπαλτάς Ευάγγελος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Μπαμπατζιμόπουλος Χρήστος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπαξεβάνου Αικατερίνη, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Κ.Ε.Τ.Α.
Μπαρτζάνας Θωμάς, Δρ. Γεωπόνος Ε.Κ.Ε.Τ.Α.
Μπαρμπαγιάννης Νικόλαος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπίλας Γεώργιος, Δρ. Γεωπόνος, Ε.ΔΙ.Π. Α.Π.Θ.
Μπουρνάρης Θωμάς, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπόχτης Διονύσιος, Αν. Καθηγητής Aarhus University
Μπριασούλης Δημήτριος, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Νάνος Γεώργιος, Καθηγητής Π.Θ.
Νάτσης Αθανάσιος, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Νικήτα – Μαρτζοπούλου Χρυσούλα, Ομ. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Ντίνας Γεώργιος, Δρ. Γεωπόνος, Technological University of Munich
Ντιούδης Πασχάλης, τ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Ξανθόπουλος Γεώργιος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παναγάκης Παναγιώτης, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παναγόπουλος Ανδρέας, Κύριος Ερευνητής ΕΛ.Γ.Ο. Δήμητρα
Παναγιωτόπουλος Κυριάκος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Πανώρας Αθανάσιος, τ. Κύριος Ερευνητής ΕΛ.Γ.Ο. Δήμητρα
Παπαδάκης Γεώργιος, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαδόπουλος Αριστοτέλης, Κύριος Ερευνητής ΕΛ.Γ.Ο. Δήμητρα
Παπαδόπουλος Φραντζής, Κύριος Ερευνητής ΕΛ.Γ.Ο. Δήμητρα
Παπαϊωάννου Χρυσούλα, Αν. Καθηγήτρια Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Παπαμιχαήλ Δημήτριος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παπαναστασίου Δημήτρης, Ερευνητής Ε.Κ.Ε.Τ.Α.
Παρισόπουλος Γεώργιος, τ. Κύριος Ερευνητής ΕΛ.Γ.Ο. Δήμητρα
Πατέρας Δημήτριος, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Παυλάτου – Βε Αθηνά, Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Προδρόμου Κωνσταντίνος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μαρία, Καθηγήτρια Π.Θ.
Σαπουνάς Αθανάσιος, Δρ. Γεωπόνος
Σαπουντζής Μάριος, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Στάθης Δημήτριος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Στεφανίδης Παναγιώτης, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Στεφάνου Στέφανος, Επ. Καθηγητής Α.Τ.Ε.Ι.Θ.
Συγριμής Νικόλαος, Ομ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Συλαίος Γεώργιος, Αν. Καθηγητής Δ.Π.Θ.
Συλλαίος Νικόλαος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ταμβακίδης Στυλιανός, Δρ. Γεωπόνος, Δ/ντής Αγρ. Υπ. Κ.Μ.
Τελόγλου Ηλίας, Αν. Καθηγητής Α.Τ.Ε.Ι.Θ.
Τερζίδης Γεώργιος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τζιμόπουλος Χρήστος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τούλιος Λεωνίδας, Αν. Ερευνητής ΕΛ.Γ.Ο. Δήμητρα
Τσατσαρέλης Κωνσταντίνος, Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τσιρογιάννης Ιωάννης, Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Ηπείρου
Υψηλάντης Ιωάννης, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Φείδαρος Δημήτριος, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Κ.Ε.Τ.Α.
Φουντάς Σπύρος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Φράγκος Βασίλειος, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Χαϊντούτη Κωνσταντίνα, Ομ. Καθηγήτρια Γ.Π.Α.
Χαλκίδης Ηρακλής, Επ. Καθηγητής Π.Θ.
Χαρτζουλάκης Κωνσταντίνος, τ. Κύριος Ερευνητής ΕΛ.Γ.Ο. Δήμητρα
Χατζηγιαννάκης Ευάγγελος, Κύριος Ερευνητής ΕΛ.Γ.Ο. Δήμητρα
Ψιλοβίκος Άρης, Αν. Καθηγητής Π.Θ.
Ψυχογιού Μαρία, Επ. Καθηγήτρια Γ.Π.Α.

Επικοινωνία – Αλληλογραφία - Πληροφορίες

Γεώργιος Θ. Ξανθόπουλος,
Επικ. Καθηγητής Γ.Π.Α.

Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής,
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 11855, Βοτανικός

Τηλ: 2105294031
Φαξ: 2105294032
E-mail: xanthopoulos@aua.gr **//** info@egme.gr
Web: www.egme.gr

ΧΟΡΗΓΟΙ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται εκ μέρους της Οργανωτικής Επιτροπής του Συνεδρίου στους χορηγούς του 10ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής που βοήθησαν στην υλοποίησή του.

1. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
(www.aua.gr)

2. AXIATECH
(www.axiatech.gr)

3. Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος
(www.geotee.gr)

4. Πλαστικά Κρήτης Α.Ε.
(www.plastikakritis.com)

5. Σύνδεσμος Εισαγωγέων Αντιπροσώπων Μηχανημάτων
(www.seam.gr)

6. SCIENTACT A.E.
(www.scientact.gr)

7. Κ&Ν ΕΥΘΥΜΙΑΔΗΣ ΑΒΕΕ
(www.efthymiadis.gr)

8. Αγρότυπος Α.Ε
(www.agrotypos.gr)

9. Περιοδικό Γεωργία – Κτηνοτροφία
(www.agrotypos.gr/index.asp?mod=articles&id=48)

10. Ηλεκτρονική Εφημερίδα «Αγρότυπος»
(www.agrotypos.gr)

11. Εβδομαδιαία Εφημερίδα για την Αγροτική Ανάπτυξη, «Ύπαιθρος»
(www.ypaithros.gr)

12. Ηλεκτρονική Εφημερίδα για την Αγροτική Ανάπτυξη, «Ύπαιθρος»
(www.ypaithros.gr)

Περιεχόμενα

Υδατικοί Πόροι

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC-RAS
Κ. Σγουροπούλου & Δ. Μυρωνίδης..... 16
ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΞΗΡΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΣΕ ΕΝΑ ΓΥΜΝΟ ΚΑΙ ΜΕ ΖΙΖΑΝΙΑ ΠΗΛΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ
Γ. Κάργας, Κ. Σούλης & Π. Λόντρα.....26
ΤΟΠΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ
Δ. Καρπούζος & Π. Γεωργίου..... 35
ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ *CropSyst*
Π. Κουκούλη & Π. Γεωργίου..... 45
ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΜΝΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΩΝ
Δ. Παπαμιχαήλ, Β. Αντωνόπουλος, Π. Γεωργίου, Χ. Δουλγέρης & Δ. Παπαδήμος..... 55
ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΠΑΦΟΥ
Κ. Πέτρου & Π. Γεωργίου..... 66
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΩΦΕΛΙΜΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ
Δ. Χατζηγεωργίου & Π. Γεωργίου..... 77
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΣΕ ΝΕΡΟ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ
Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Β. Μπότα, Χ. Παπανικολάου, Β. Γιουβάνης & Ε. Χρισταντώνης.....87
ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΛΛΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΟΡΕΣΜΟ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
Γ. Κάργας, Π. Λόντρα, Ε. Αγαπητού & Κ. Σωτηράκογλου 96
ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ WET-2 ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΕΚΤΑΤΙΚΟΥ ΦΥΤΕΜΕΝΟΥ ΔΩΜΑΤΟΣ
Γ. Κάργας, Ν. Ντούλας, Κ. Μπριλάκη & Α. Τσαπατσούλη 105
TOPPS - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΑΠΟ ΜΗ ΟΡΘΗ ΧΡΗΣΗ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ
Χ. *Καβαλάρης, Δ. Μπαρτζιάλης, Κ. Γιαννούλης, Μ. Πελεκάνος, Φ. Υδραίου, Γ. Βλόντζος & Χ. Αθανασίου* 113

Αγροτικές Κατασκευές

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΕ ΑΥΤΟΠΡΟΣΑΡΜΟΖΟΜΕΝΑ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
Α. Γιαννούλης, Χ. Βατίστας, Α. Μυστριώτης & Δ. Μπριασούλης..... 122
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΒΙΟΓΕΝΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Α. Πικάση, Χ. Μπριασούλης, Α. Μυστριώτης & Δ. Μπριασούλης..... 133
ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΥΣ ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΛΑΧΑΝΙΚΩΝ ΣΕ ΘΑΛΑΜΟ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ
Ι. Γράβαλος, Θ. Γιαλαμάς, Α. Αυγουστής, Α. Μόλλα, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Ρ. Ανδριώτης & Π. Κασόλας..... 143

ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΜΕ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΜΑΤΑΣ
Γ. Ντίνας & Χ. Τσαντήλας..... 153
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΙΣ ΟΡΟΦΕΣ ΔΥΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ
Ι. Ντάντος, Γ. Ντίνας, Θ. Κωτσόπουλος, Ν. Μαλαματάρης & Β. Φράγκος..... 162
ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΤΟΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ
Α. Ελβανίδη, Ν. Κατσούλας, Θ. Μπαρτζάνας & Κ. Κίττας..... 172

Υδατικοί & Εδαφικοί Πόροι

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ CS655 ΣΕ ΕΝΑ ΠΗΛΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ
Γ. Κάργας..... 181
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ HILHORST ΣΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΤΥΡΦΗΣ
Γ. Κάργας, Γ. Κανέλης, Ι. Μαρκοπούλου & Π. Κερκίδης..... 190
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΖΩΤΟΥΧΟΥ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ
Β. Αντωνιάδης, Ε. Ξυράφης, Σ. Πετρόπουλος & Α. Δημήρκου..... 198
Η ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΦΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΡΙΖΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΜΠΕΛΩΝΩΝ
Μ. Κοζαΐτη & Σ. Κωστοπούλου..... 206
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΕ ΚΟΜΠΟΣΤ ΜΕ ΥΓΡΗ ΚΑΙ ΞΗΡΗ ΚΑΥΣΗ. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ
Ε. Χατζηγιαννάκης, Σ. Στεφάνου, Δ. Ιωαννίδης & Χ. Σμάγας..... 215
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΚΟΜΠΟΣΤΑΣ (ΑΠΟ OCEANICA POSIDONIA) ΚΑΙ ΖΕΟΛΙΘΟΥ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΠΝΟ
Ε. Γκόλια, Β. Αντωνιάδης, Α. Δημήρκου & Σ. Βλειώρας..... 224
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ AquaCrop ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ
Χ. Βαμβακούλας, Ι. Αργυροκαστρίτης, Γ. Παπαθεοχάρη & Σ. Αλεξανδρής..... 234
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΑΓΡΟΥ ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Α. Αγγελάκη, Α. Αναγνωστούλης & Β. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη 242

Γεωργικά Μηχανήματα – Εξοπλισμοί

ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΕΝ ΧΡΗΣΕΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΦΑΡΜΑΚΩΝ - ΣΤΑΘΜΟΙ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΩΤΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ
Γ. Μπουροδήμος, Μ. Γιαμούρη, Α. Μπαλαφούτης & Σ. Φουντάς..... 253
NON-CONTACT VIBRATION MEASUREMENTS OF A ROTOR-BEARING SYSTEM
I. Gravalos, T. Gialamas, A. Avgoustis, D. Kateris, P. Xyradakis, V. Dimou, L. Ioannidis & P. Pigis..... 264
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΔΙΑΒΑΘΜΗΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΟΧΗΜΑ
Θ Γιαλαμάς, Ι Γράβαλος, Δ Κατέρης, Α. Γιαλαμά, Μ. Γιαλαμά, Π. Πηγής & Π. Ξυραδάκης..... 272
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΔΟΝΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΚΙΒΩΤΙΟ ΣΧΕΣΕΩΝ
Δ. Κατέρης, Ι. Γράβαλος, Θ. Γιαλαμάς, Π. Ξυραδάκης & Δ. Μόσχου..... 281
TEReS - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΤΩΝ ΕΠΟΧΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΤΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ

Χ. Καβαλάρης, Α. Μπαλαφούτης, Μ. Μωραΐτης, Γ. Παπασταματίου, Ε. Τσιάτουρας & Σ. Φουντάς..... 291
ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Γ. Λαμπρινός..... 299

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Εξοικονόμηση Ενέργειας

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Β. Φιρφιρής, Σ. Καλαμάρας, Γ. Ντίνας, Α. Μαρτζοπούλου & Θ. Κωτσόπουλος..... 310
ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΑΓΡΟΤΙΚΑ ΚΛΑΔΕΜΑΤΑ
Ε. Καραμπίνης, Β. Γκαβίδου, Μ-Α. Κουγιουμτζής , Π. Γραμμέλης & Ε. Κακαράς..... 320
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΜΕ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Ε. Δημητρίου, Χ. Καραβάς, Ε. Mohamed & Γ. Παπαδάκης..... 329
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΒΑΘΜΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ RANKINE
Μ. Καραμποϊκη, Δ. Μανωλάκος & Γ. Παπαδάκης..... 339
ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ "ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ" ΤΟΥ ΓΕΩΠΟΝΙΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ
Χ-Σ. Καραβάς & Γ. Παπαδάκης..... 348
EXPERIMENTAL CULTIVATION OF PEPPERS IN LOW ENERGY DEMAND GREENHOUSES
K. Krinas, F. Evangelopoulou, A. Koulopoulos, A. Kavga & Y. Tripanagnostopoulos..... 358
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΛΕΒΗΤΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE
Π. Καλανζή , Δ. Μανωλάκος, Γ. Παπαδάκης & Κ. Αρβανίτης..... 367
ΜΕΛΕΤΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΟΥ ΕΚΤΟΝΩΤΗ ΤΥΠΟΥ SCROLL
Β. Γκαβίδου, Γ. Κοσμαδάκης, Δ. Μανωλάκος & Γ. Παπαδάκης..... 377
LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF BIOMASS PRODUCTION USING CONSERVATION AGRICULTURE. PART I: THE LCA MODEL
A. Vatsanidou, A.L. Fernando, C. Cavalaris & T. Gemtos..... 386
LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF BIOMASS PRODUCTION USING CONSERVATION AGRICULTURE. PART II: LCA OF BIOMASS PRODUCTION
A. Vatsanidou, A.L. Fernando, C. Cavalaris & T. Gemtos..... 394

Περιβάλλον - Εδαφικοί Πόροι

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΤΩΝ 2-ΦΑΣΙΚΩΝ ΚΑΙ 3-ΦΑΣΙΚΩΝ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΠΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.
Δ. Γεωργακάκης, Μ. Δρούγα & Γ. Μάρκου..... 404
ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΜΕΣΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΤΡΟΦΙΚΗΣ ΜΕΘΑΝΟΓΕΝΕΣΗΣ
Π. Κούγιας & Ε. Αγγελιδάκη..... 412
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΧΟΡΤΟΥ ΓΙΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ
Π. Τσαπέκος, Π. Κούγιας, & Ε. Αγγελιδάκη..... 420
ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF BEEKEEPING PRODUCTS AND SERVICES - A LIFE CYCLE ASSESSMENT CASE STUDY INCLUDING HONEY AND POLLINATION
I. Arzoumanidis, A. Raggi & L. Petti..... 426
ΔΙΕΥΡΥΝΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΙΖΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΗ-ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΤΑΦΡΟ "ΑΣΜΑΚΙΟΥ", ΘΕΣΣΑΛΙΑ, ΕΛΛΑΔΑ
Α. Αυγουστή, Σ. Παπαδόπουλος, Ι. Γράβαλος, Δ. Κατέρης, Α. Γεωργιάδης, Ζ. Τσιρόπουλος & Π. Ξυραδάκης..... 436

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΜΕΡΓΕΙΑΣ. ΜΙΑ ΟΛΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΟΝ ΓΕΩΡΓΙΚΟ ΤΟΜΕΑ
Α. Μαρτζοπούλου, Β. Φιρφιρής, Σ. Καλαμάρας & Β. Φράγκος..... 447
ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ (ETp) ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΧΩΡΙΚΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΚΑΙ ΚΡΗΤΗΣ
Σ. Αλεξανδρής, Σ. Βασιλάκης, Ε. Παπουτσή, Δ. Τσεσμελής, Ι. Αργυροκαστρίτης, Κ. Χατζηθωμάς, Η. Βιτωράτος..... 456
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΥ ΣΙΤΗΡΕΣΙΟΥ ΣΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΠΑΧΥΝΣΗΣ ΧΟΙΡΩΝ ΣΤΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΑΝΘΡΑΚΑ ΤΗΣ ΧΟΙΡΟΤΡΟΦΙΚΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ
Β. Ανέστης, Δ. Κ. Παπαναστασίου, Θ. Μπαρτζάνας, Ι. Σκούφος, Η. Γιάννενας, Α. Τζώρα, Π. Φλώρου-Πανέρη & Κ. Κίττας..... 468
ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ: ΠΙΘΑΝΕΣ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΥΠΟΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ
Κ. Γεωργόπουλος, Δ. Μητρόγιαννης, Μ. Ψυχογιού, Δ. Αλεξόπουλος, Ν. Κούκουζας, Γ. Οικονόμου & Ι. Μπαζιώτης..... 478
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΙΣΧΑΝΘΟΥ
Ε. Ροδιάς, P. Busato, R. Berruto, Μ. Λαμπρίδη, Γ. Βασιλειάδης & Δ. Μπόχτης..... 488
ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΚΧΥΛΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΜΟΡΦΩΝ Cu, Fe, Mn ΚΑΙ Zn ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ DTPA
Μ. Τζιουβαλέκας & Χ. Νούλας 497
A REVIEW OF GREEK WHEY CHEESES: A DESCRIPTION OF THEIR MAIN CHARACTERISTICS
A. Georgala & S. Kaminarides..... 506
Η ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ pH ΚΑΙ ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΔΑΦΗ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΑΡΔΕΥΣΗ ΜΕ ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΑΣΤΙΚΑ ΛΥΜΑΤΑ
Α. Τσιγκόιδα 514

Εδαφικοί Πόροι – Αρδεύσεις

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΥΒΡΙΔΙΟΥ ΤΟΜΑΤΑΣ "OASIS F1" ΣΕ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑ
Ε. Βαζανέλλη, Σ. Στεφάνου & Δ. Μαρκόπουλος..... 525
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΠΥΡΟΛΟΥΣΙΤΗ
Μ. Αληφραγκή, Α. Παυλάτου-Βε & Μ. Ορφανουδάκης..... 535
ΧΟΥΜΟΣ: Η ΛΥΣΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΓΙΑ ΥΨΗΛΟΤΕΡΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΙΣΟΡΡΟΠΗΜΕΝΕΣ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ
D.S. Walia & Κ. Σαμαντούρος..... 543
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΥΛΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΟΦΑΔΩΝ
Η. Χαλκίδης , Θ. Τσιάστας, Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη..... 552
Η ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΑ ΕΙΔΗ ΑΥΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΟΡΘΗΣ ΛΙΠΑΝΤΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ
Χ. Νούλας, Μ. Τζιουβαλέκας, Δ. Καλφούντζος & Α. Τσιτούρας 561

Μετασυλλεκτική - Μετασυγκομιστική Τεχνολογία

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΨΥΧΡΟΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΑ ΝΕΚΤΑΡΙΝΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
Μ. Κατσαλήρου, Γ. Ξανθόπουλος, Ε. Μπελτόγια, Χ. Τεμπλαλέξης, Δ. Λέντζου & Α. Μπουντουβής..... 573
ΞΗΡΑΝΣΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΩΣΜΩΤΙΚΑ ΑΦΥΔΑΤΩΜΕΝΟΥ ΙΠΠΟΦΑΟΥΣ ΜΕ ΣΤΕΒΙΑ 583

Δ. Λέντζου , Ο. Γεωργιάδου , Χ. Τεμπλαλέξης , Γ. Ξανθόπουλος .....
ΣΥΝΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟΥ ΣΤΑΦΥΛΙΟΥ ΣΕ ΔΥΟ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΧΡΟΝΙΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ
Α. Μεσημέρη, Ε. Καραγιάννη, Ε. Αναστασίου, Δ. Λέντζου, Χ. Τεμπλαλέξης, Φ. Πανίτσας, Γ. Ξανθόπουλος, Σ. Φουντάς..... 593

Καινοτομία και Νέες Τεχνολογίες

Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΗΣ ΝΕΦΟΫΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ: ΜΙΑ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ
Ε. Συμεωνάκη, Κ. Αρβανίτης & Δ. Πυρομάλης..... 604
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ VIS-NIR ΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΕΝΔΕΙΚΤΩΝ
Π. Βροχίδης, Ν. Τζιόλας, Ν. Τσακιρίδης, Θ. Αγγελοπούλου & Γ. Ζαλίδης..... 615
ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΝΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΑΣΘΕΝΕΙΩΝ ΦΥΤΩΝ
Κ. Φερεντίνος..... 625
AUTOMATED NITROGEN VARIABLE RATE APPLICATION ON WINTER WHEAT DRIVEN BY NDVI SENSOR DATA
D. Evangelopoulos, G. Varvarelis, D. Akridas, C. Karamoutis, T. Gemtos, C. Cavalaris & C. Antonopoulos..... 637
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΗΣ ΧΩΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΒΟΟΕΙΔΗ
Κ. Λιάκος, Σ. Μουστακίδης, Θ. Μπαρτζάνας & Δ. Μπόχτης..... 646
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ GOOGLE-MAPS® ΓΙΑ ΕΝΤΟΣ ΑΓΡΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ
Δ. Κατικαρίδης, Δ. Μπεχτσής, Κ. Λιάκος, Δ. Βλάχος & Δ. Μπόχτης..... 658
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΔΙΕΠΑΦΗΣ ΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (UGV)
Β. Μωυσιάδης, Δ. Μπεχτσής, Κ. Λιάκος, Δ. Βλάχος & Δ. Μπόχτης..... 665
ΑΝΤΙΛΗΨΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΕΩΠΟΝΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΞΥΠΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ
Ε. Κουτρίδη, Μ-Ν. Ντυκέν, Ο. Χριστοπούλου, & Σ. Φουντάς..... 672
ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΘΕΡΙΖΟΑΛΩΝΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΡΥΖΙΟΥ
Ε. Σιάφαλη, Ε. Καραγιάννης & Β. Γιαννούλας..... 683
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΑΓΡΟΤΩΝ ΣΕ ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΑΕΙΦΟΡΟ ΓΕΩΡΓΙΑ - ΜΕΛΕΤΗ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΕΡΓΟΥ SAGRI
Ε. Mohamed, Ε. Δημητρίου & Γ. Παπαδάκης..... 694
ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ
Π-Α. Καρνούτσος, Α. Δενιζοπούλου, Μ. Καραγιοβανίδης, Α. Μαρτζοπούλου & Β. Φράγκος.....702

10^{ο} Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC-RAS

Κ. Σγουροπούλου✉ & Δ. Μυρωνίδης
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστημιούπολη, 54124, Θεσσαλονίκη,
✉ksgouropoulou@*gmail.com*

Περίληψη

Τα φράγματα αποτελούν μια σπουδαία κατασκευή για την ανθρωπότητα. Ωστόσο μια επικείμενη αστοχία της κατασκευής ή μια σειρά έντονων επεισοδίων βροχόπτωσης μπορεί να προκαλέσουν τη θραύση του. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η ανάλυση μιας πιθανής αστοχίας του φράγματος, με σκοπό την αποφυγή δυσμενών συνεπειών στην κατάντη περιοχή. Το φράγμα που θα μελετηθεί είναι το υπό κατασκευή φράγμα του ποταμού Χαβρία στο νομό Χαλκιδικής. Στην παρούσα μελέτη θα ελεγχθεί η περίπτωση θραύσης με διασωλήνωση χρησιμοποιώντας το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS για τα σενάρια θραύσης του φράγματος στα 10, 25 και 51m από την ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα. Τέλος, εκτελείται η θραύση φράγματος και εξάγεται από το HEC-RAS ο χάρτης πλημμύρας. Με αυτόν τον τρόπο, η πολιτεία θα είναι σε θέση να λάβει τα απαραίτητα μέτρα αποφυγής των δυσμενών συνεπειών από τις εκτεταμένες πλημμύρες στους οικισμούς της Νέας Σερμύλης, των Ψακουδίων και του Νησιού.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση της θραύσης φράγματος, χαρτογράφηση πλημμυρικού κινδύνου, HEC-RAS, HEC-GeoRAS, Χαβρίας

DAM BREACH ANALYSIS USING THE HYDRAULIC MODEL HEC-RAS

K. Sgouropoulou✉ & D. Myronidis
Aristotle University of Thessaloniki, School of Forestry and Natural Environment, University Campus, 54124, Thessaloniki,
✉ksgouropoulou@*gmail.com*

ABSTRACT

Dams are a great construction for mankind as they have greatly contributed to its development. However, an impending construction failure or a series of severe rainfall episodes may cause them to break. For this reason, it is important to analyze a possible failure of the dam, so that we can eliminate the adverse consequences in the downstream area. The dam to be studied is the dam of the river Chavria in the prefecture of Chalkidiki. In the present study we will investigate the case of dam breach by piping, using mainly the hydraulic analysis model HEC-RAS for three different scenarios of dam failure at 10, 25 and 51m from the surface of reservoir. The produced map is overlaid on an aerial map to see towns and infrastructures that are affected by the flood. In this way, government could develop an emergency action plan that can help to avoid the bad consequences in case of a dam failure, especially at the settlements of Nea Sermili, Psakoudia and Nisi.

Keywords: Dam breach analysis, flood mapping, HEC-RAS, HEC-GeoRAS, Chavrias

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φράγματα είναι εν γένει εγκάρσιες κατασκευές ως προς τη ροή ενός ποταμού που ανέκαθεν αποτελούσαν σπουδαίο έργο και αναπόσπαστο κομμάτι της ιστορίας και της εξέλιξης των λαών. Η λειτουργικότητα των φραγμάτων είναι πολλαπλή μιας και προσφέρει ανεκτίμητες υπηρεσίες στον άνθρωπο. Αρχικά, τα φράγματα που κατασκευάστηκαν αποσκοπούσαν κυρίως στην παροχή αντιπλημμυρικής προστασίας και την αποθήκευση νερού για αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, για ιχθυοκαλλιέργειες, για τουρισμό και αναψυχή.

Όμως, τα φράγματα εμφανίζουν και την πιθανότητα καταστροφής τους, η οποία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Οι αστοχίες των φραγμάτων χαρακτηρίζονται ως γεγονότα «χαμηλής πιθανότητας, υψηλών απωλειών» (Committee of Safety existing dams, 1983). Τα αίτια της αστοχίας εξαρτώνται τόσο από τον τύπο του φράγματος όσο και από την ηλικία του. Συγκεκριμένα, για τα χωμάτινα φράγματα η διασωλήνωση (piping) και η υπερχείλιση του νερού πάνω από τη στέψη (overtopping) αποτελούν τις σημαντικότερες αιτίες αστοχίας (Πυθαρούλη, 2007). Οι αστοχίες φραγμάτων έχουν προκαλέσει πολλαπλές καταστροφές στις κατάντη κοιλάδες τόσο από άποψη απώλειας ζωών, όσο και για τις καταστροφές στις περιουσίες των κατοίκων, καθώς ακολουθείται διόδευση πλημμυρικού κύματος προς τις πεδινές περιοχές (Μπέλλος, 2005). Έτσι γίνεται αντιληπτό πως η ασφάλεια των φραγμάτων είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την κοινωνία και ταυτόχρονα είναι επιτακτική ανάγκη ο σχεδιασμός της προληπτικής δράσης μιας πιθανής θραύσης φράγματος (Michailidis and Mattas, 2007).

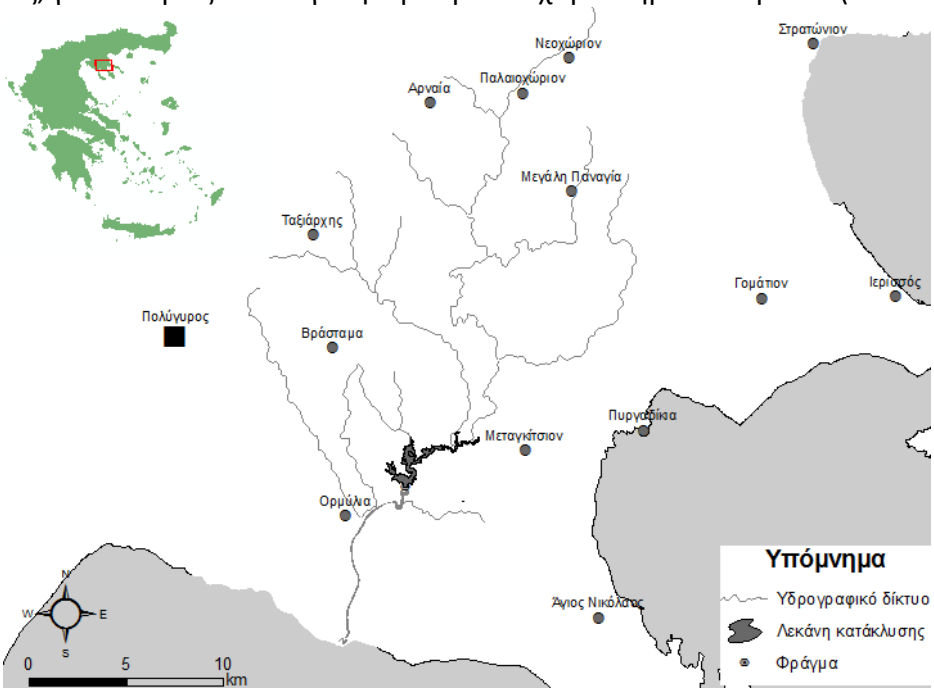
Η αξιολόγηση του κινδύνου πλημμύρας σε περίπτωση θραύσης φράγματος με την εφαρμογή μοντέλων πρόβλεψης αποτελεί μια σημαντική διαδικασία για την αποφυγή δυσμενών συνεπειών και καταστροφών στο ανθρωπογενές και φυσικό περιβάλλον. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60 οι περιοχές που διατρέχουν πλημμυρικό κίνδυνο πρέπει να εντοπιστούν και να συμπεριληφθούν σε χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας.

Πολλές έρευνες έχουν ασχοληθεί με την ανάλυση μιας υποθετικής θραύσης φράγματος χρησιμοποιώντας το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS καθώς και το ArcGIS. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η μελέτη δύο φραγμάτων στην περιοχή Βρετανικής Κολομβίας του Καναδά (Asnaashari et al, 2014) και ενός φράγματος στην Αλγερία (Derdous et al, 2015) με στόχο την ελαχιστοποίηση των καταστροφών. Επιπρόσθετα, πολλοί επιστήμονες ασχολούνται αποκλειστικά με την εκτίμηση του κινδύνου απώλειας ανθρώπινων ζωών(McClelland and Bowles, 2002). Από την άλλη ένα υποθετικό σενάριο θραύσης μπορεί να μελετηθεί με βάση τις πιθανές επιπτώσεις του από την κλιματική αλλαγή (Yerremilli, 2014). Τέλος, στον ελλαδικό χώρο πραγματοποιήθηκε η κατάρτιση των χαρτών πλημμύρας καθώς και το σχέδιο προειδοποίησης για την περίπτωση μιας υποθετικής θραύσης φράγματος με τη χρήση Γ.Σ.Π και σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων για την περιοχή του Κ. Νευροκοπίου (Μπενσασσών και Αθανασάκης, 2012).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση της θραύσης του υπο κατασκευή φράγματος του ποταμού Χαβρία στο νομό Χαλκιδικής, καθώς και η χαρτογράφηση του πλημμυρικού κινδύνου της ευρύτερης περιοχής σε περίπτωση θραύσης του φράγματος με τη βοήθεια του υδραυλικού μοντέλου HEC-RAS. Η μελέτη αυτή θα πραγματοποιηθεί για τρία διαφορετικά σενάρια θραύσης, δηλαδή τις περιπτώσεις που το φράγμα θα σπάσει στη βάση του, στο μέσο ή στην κορυφή του.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η λεκάνη απορροής του Χαβριά αναπτύσσεται στις νοτιοανατολικές προσβάσεις του ορεινού όγκου του Χολομώντα μεταξύ των κόλπων Σιγγιτικού και Τορωναίου. Το συνολικό μήκος του ποταμού είναι της τάξεως των 59km. Η συνολική λεκάνη απορροής του Χαβρία ανάντη της πεδινής κοίτης του είναι 475,3km^2 και το ύψος κυμαίνεται από τα 15m στην έξοδο του προς την πεδιάδα της Ορμύλιας εως τα 1.163m στην κορυφογραμμή του Χολομώντα. Η μορφολογία είναι λοφώδης, ημιορεινή με βαθιές και πολυσχιδείς χαραδρώσεις, γενικά όμως το ανάγλυφο μπορεί να χαρακτηρισθεί ομαλό. (ENVECO, 2009).



Σχήμα 1. Χάρτης Προσανατολισμού

Περίπου το 35% της λεκάνης προς τα βόρεια καλύπτεται από συμπαγείς δασικές εκτάσεις φυλλοβόλων δένδρων. Το 55% της λεκάνης προς το κέντρο καλύπτεται κυρίως από πεύκα, κουμαριές, πρίνους κλπ. Το υπόλοιπο 10% είναι γυμνό ή καλύπτεται από θάμνους.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής είναι 13,7^{o}C με θερμότερο μήνα τον Ιούλιο (23,5 ^{o}C) και ψυχρότερο τον Ιανουάριο (4,1 ^{o}C). Σχετικά με τις κατακρημνίσεις στη λεκάνη απορροής του ποταμού Χαβρία, παρατηρούνται σημαντικές ποσότητες βροχής ακόμη και τους καλοκαιρινούς μήνες, όπως 38,6mm για το μήνα Αύγουστο και 35,5mm για το μήνα Ιούνιο. Ο μήνας του έτους με τα περισσότερα κατακρημνίσματα είναι ο Δεκέμβριος με περίπου 78,8mm(ENVECO, 2009). Παρά το ότι ο χειμώνας είναι ιδιαίτερα υγρός, στην περιοχή εμφανίζεται μακρά ξηροθερμική περιόδος που διαρκεί από το Μάιο μέχρι και τον Οκτώβριο.

Το φράγμα του ποταμού Χαβρία έχει ύψος 76m από τη θεμελίωση και με υψόμετρο στέψης 83m. Ο όγκος του φράγματος ανέρχεται στα 1.800.000m^3, η λεκάνη κατάκλυσης καταλαμβάνει 2.050 στρέμματα σε περίπτωση πλημμυρικού φαινομένου και η χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι 36,55km^3.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Προ-επεξεργασία των δεδομένων με το λογισμικό HEC-GeoRAS

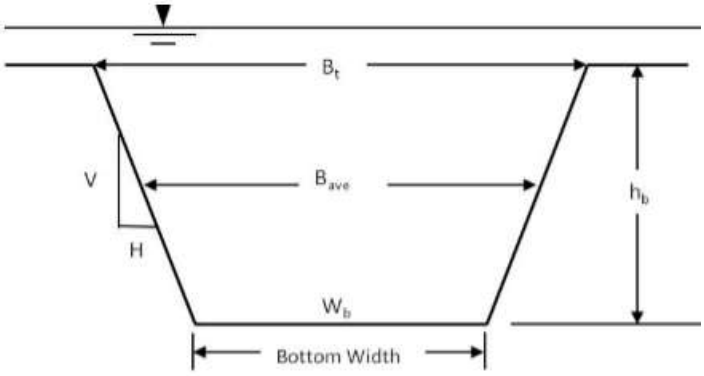
Το HEC-GeoRAS είναι μια επέκταση των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (GIS) σχεδιασμένη να επεξεργάζεται δεδομένα με σκοπό την μετ' έπειτα εισαγωγή τους στο

υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS. Η επέκταση αυτή επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργήσει ένα αρχείο που να περιέχει γεωμετρικά στοιχεία από το ήδη υπάρχον Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) (Hydraulic Engineering Center, 2005). Τα δεδομένα που απαιτούνται για την επεξεργασία μέσω του HEC-GeoRAS είναι το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και οι πληροφορίες των χρήσεων γης. Το αρχείο αυτό που θα δημιουργηθεί περιέχει πληροφορίες για την κεντρική κοίτη, τα πρανή, τις διατομές, τη διαδρομή της ροής και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά του ρέματος. Αφού δημιουργηθούν τα επίπεδα εισάγονται στο πρόγραμμα, όπου εκεί γίνεται η επιμέρους ψηφιοποίηση από το χρήστη.

Το επίπεδο της κεντρικής κοίτης (River) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ροής και σχεδιάζεται με κατεύθυνση προς τη φορά της κανονικής ροής. Παράλληλα στην κεντρική κοίτη ψηφιοποιούνται τα πρανή (Banks), δηλαδή η αριστερή και η δεξιά όχθη που περιορίζει τη ροή. Με βάση τα δύο παραπάνω επίπεδα σχεδιάζεται και η πιθανή πλημμυρική ροή (Flowpaths). Ακολούθως, ψηφιοποιούνται οι διατομές (XSCutLines), οι οποίες πρέπει να είναι κάθετα της κεντρικής κοίτης, καθώς κάθε μια από αυτές προσδιορίζει το προφίλ της επιφάνειας του εδάφους. Στη συνέχεια, δημιουργείται το επίπεδο του φράγματος που σχεδιάζεται ως γραμμικό (Inline Structure). Επιπλέον, δημιουργούμε την καμπύλη στάθμης και χωρητικότητας του ταμιευτήρα με στόχο να υπολογίσουμε με ακρίβεια για κάθε μέτρο ύψους φράγματος, τον όγκος και την επιφάνεια αντιστοιχούν (Μυρωνίδης, 2017).

3.2 Εκτίμηση παραμέτρων θραύσης

Η περιγραφή της θραύσης περιλαμβάνει το ύψος(hb), το μέσο πλάτος της θραύσης(Bavg), την κλίση των πρανών H:V καθώς και το χρόνο από την έναρξη της θραύσης έως και το τέλος, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2. Περιγραφή των παραμέτρων θραύσης

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων θραύσης υπάρχουν ποικίλες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε διάφορες μελέτες. Κάποιες από αυτές είναι οι εξισώσεις του Froehlich (1995 & 2008), των MacDonald and Langridge-Monopolis (1984), του Von Thun and Gillette (1990) και άλλες, οι οποίες προέκυψαν ύστερα από τη μελέτη δεδομένων άλλων φραγμάτων. Στην παρούσα έρευνα οι παράμετροι θραύσης θα υπολογιστούν με βάση τις εξισώσεις του Froehlich (2008), δεδομένου ότι εξαρτώνται μόνο από τον όγκο του ταμιευτήρα, το ύψος της θραύσης και την υποθετική κλίση της κάθε πλευράς. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή διαχωρίζει μεταξύ της διασωλήνωσης και της υπερχείλισης χρησιμοποιώντας ένας μεταβλητό συντελεστή, τον συντελεστή θραύσης, Ko.

Οι εξισώσεις του Froehich για το μέσο πλάτος θραύσης και το χρόνο είναι:

$$B_{avg} = 0{,}27K_oV_w^{0{,}32}h_b^{0{,}04} \quad (1)$$

$$t_f = 63{,}2\sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}} \quad (2)$$

όπου:

B_{avg}: Το μέσο πλάτος θραύσης (m)

K_o: Ο παράγοντας θραύσης, 1,3 για υπερχείλιση και 1 για διασωλήνωση

V_w: Ο όγκος του ταμιευτήρα τη στιγμή της θραύσης (m^3)

h_b: Ύψος της τελικής θραύσης (m)

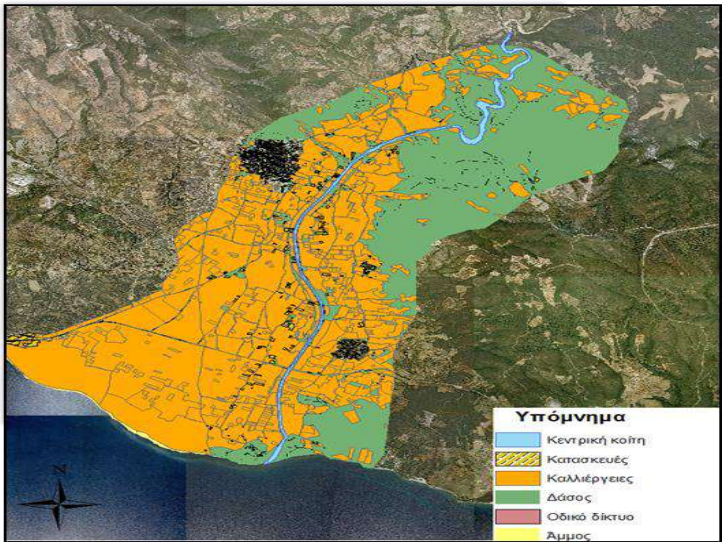
3.3 Υδραυλική Ανάλυση, δημιουργία χαρτών πλημμυρισμού και αξιολόγηση πλημμυρικού κινδύνου

Εφόσον γίνει η εκτίμηση των παραμέτρων θραύσης, τα αποτελέσματα εισάγονται στο λογισμικό HEC-RAS. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες θα σπάσει το φράγμα στην παρούσα εργασία είναι αυτές μιας ηλιόλουστης ημέρας, καθώς η θραύση πραγματοποιείται με τη διαδικασία της διασωλήνωσης (piping). Προκειμένου να υπολογιστεί η απορροή μετά από την θραύση, το πρόγραμμα του HEC-RAS χρησιμοποιεί πρώτα την εξίσωση της οπής που έχει δημιουργηθεί. Όταν η οπή αυτή μεγαλώσει αρκετά, τότε θεωρείται πως η θραύση έχει ολοκληρωθεί και το HEC-RAS χρησιμοποιεί πλέον διαφορετικές εξισώσεις οι οποίες προσομοιώνουν την θραύση του φράγματος και την μεγάλη αύξηση στην εκροή μέσω της θραύσης για το υπόλοιπο της προσομοίωσης. Συνεπώς, το HEC-RAS μοντελοποιεί με ένα υδρογράφημα στο κάταντες μέρος του φράγματος την μεταβολή της ροής ως συνέπεια των παραπάνω εξισώσεων (Asburry et al, 2009). Στη συνέχεια, το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS δημιουργεί ένα γράφημα το οποίο καθορίζει την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού προς την κάταντη πλευρά. Οι διατομές που προηγουμένως έχουν κατασκευαστεί ενώνονται με τα ύψη της επιφάνειας του νερού που απορρέει και δημιουργεί μια συνεχόμενη ροή. Επιπρόσθετα, η ροή συγκρίνεται με το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και έτσι ταυτοποιούνται τα σημεία στα οποία η επιφάνεια του νερού είναι υψηλότερη από αυτό του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους. Με τον τρόπο αυτό το υδραυλικό μοντέλο HEC-GeoRAS παράγει χάρτες πλημμύρας που απεικονίζονται η έκταση και το βάθος της πλημμύρας, ώστε να είμαστε σε θέση να αξιολογήσουμε τον πλημμυρικό κίνδυνο (Myronidis et al, 2016).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Προ-επεξεργασία των δεδομένων με το λογισμικό HEC-GeoRAS

Αρχικά για τη δημιουργία των επιπέδων του HEC-GeoRAS εισάγονται στο περιβάλλον του GIS οι ορθοφωτογραφίες του Εθνικού κτηματολογίου, το Triangulated Irregular Network (TIN) που προέκυψε από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και το επίπεδο των χρήσεων γης, το οποίο δημιουργήθηκε ύστερα από ψηφιοποίηση του υποβάθρου των ορθοφωτογραφιών (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Χρήσεις γης της περιοχής έρευνας

Ταυτόχρονα για κάθε μια διαφορετική κλάση των χρήσεων γης, αντιστοιχίστηκε ένας συντελεστής τραχύτητας Manning, όπου στην παρούσα περιοχή έρευνας οι κατηγορίες των χρήσεων γης που εντοπίστηκαν είναι οι καλλιέργειες με συντελεστή τραχύτητας 0,030, οι οποίες καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής, ενώ οι δασώδεις εκτάσεις και οι οικιστικές περιοχές καλύπτουν μικρότερα ποσοστά, με συντελεστές τραχύτητας 0,09 και 0,011 αντίστοιχα (Chow, 1960). Στη συνέχεια ψηφιοποιήθηκαν τα επίπεδα στο HEC-GeoRAS τα οποία είναι: η κεντρική κοίτη του ποταμού Χαβρία με μήκος 10,69km από το σημείο κατασκευής του φράγματος έως και την έξοδο του νερού, οι όχθες που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν τα όρια του κεντρικού ρέματος, ενώ οι 32 διατομές που σχηματίζονται κάθετα στην ροή του ρέματος με σκοπό να περιγράψουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προφίλ εδάφους (Hayimanot, 2015). Τέλος, ψηφιοποιήθηκε η θέση του φράγματος ως μια γραμμική κατασκευή, η οποία εξάγεται από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους.

4.2 Εκτίμηση των παραμέτρων θραύσης

Η εκτίμηση των παραμέτρων θραύσης είναι μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες που πρέπει να προηγηθούν πριν από την προσομοίωση θραύσης του φράγματος. Η εκτίμηση των παραμέτρων στην παρούσα διαδικασία θα γίνει με τη μέθοδο του Froehlich (2008) και η διαδικασία της θραύσης για το παρόν φράγμα είναι η διασωλήνωση. Αφού υπολογιστούν οι παράμετροι, χρησιμοποιούνται ως δεδομένο για το HEC-RAS. Οι παράμετροι αυτοί όπως το πλάτος θραύσης, η κλίση και ο χρόνος ολοκλήρωσης της θραύσης χρησιμοποιούνται ως γεωμετρικά δεδομένα κατά την ανάλυση της ασταθούς ροής καθώς η πλημμύρα είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ασταθούς ροής μιας και το ύψος ροής μπορεί να αλλάξει ακαριαία με την έλευση ενός κύματος διόδευσης (Chow, 1960).

Παράλληλα θα εξεταστούν τρία σενάρια θραύσης, το καθένα σε διαφορετικό ύψος του φράγματος. Το πρώτο σενάριο θα υπολογίσει τις παραμέτρους στην περίπτωση που το φράγμα θα σπάσει σε ύψος 10m, το δεύτερο σε ύψος 25m και το τρίτο σε ύψος 51m από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των παραμέτρων θραύσης που αφορούν τη διασωλήνωση σύμφωνα με τις αναθεωρημένες εξισώσεις 1 και 2 του Froehlich παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 1.

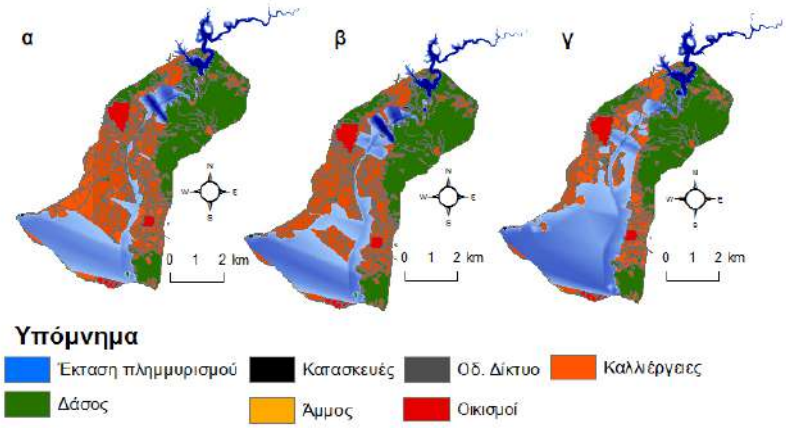
Πίνακας 1. Εκτίμηση παραμέτρων θραύσης με βάση τριών σεναρίων

Παράμετροι θραύσης	Hb=10m	Hb=25m	Hb=51m
Μέσο πλάτος θραύσης	60m	74m	80m
Μέση κλίση	0.7:1	0.7:1	0.7:1
Χρόνος ολοκλήρωσης θραύσης	2,13h	1,16h	0,63h

4.3 Υδραυλική ανάλυση, δημιουργία χαρτών πλημμυρισμού και αξιολόγηση του πλημμυρικού κινδύνου

Η ανάλυση της ασταθούς ροής της διασωλήνωσης για το φράγμα του ποταμού Χαβρία επιτυγχάνεται αφού εισάγουμε τα απαραίτητα στοιχεία στο υδραυλικό μοντέλο του HEC-RAS, τα οποία προηγουμένως έχουμε υπολογίσει με τις εξισώσεις του Froehlich. Στη συνέχεια, το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS δημιουργεί ένα γράφημα το οποίο καθορίζει την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού προς την κάταντη πλευρά και με βάση αυτού δίνονται οι πληροφορίες για τη χαρτογράφηση του πλημμυρικού κινδύνου, η οποία λαμβάνει χώρα στο υδραυλικό μοντέλο HEC-GeoRAS (HEC-RAS, 2014).

Τα δεδομένα που προέκυψαν από το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS επανεισάγονται στο HEC-GeoRAS για την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Ο χάρτης που δημιουργείται απεικονίζει τη μέγιστη επιφάνεια του νερού, όπου από εκεί και πάνω το νερό αρχίζει και απορρέει προς τα κατάντη. Το υπόβαθρο του χάρτη δημιουργείται με βάση τις πληροφορίες του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM). Οι χάρτες που παρατίθενται στη συνέχεια (Σχήμα 4) παρουσιάζουν κίνηση του νερού προς τα κατάντη σε περίπτωση που το φράγμα του Χαβρία υποστεί θραύση στα 10m, στα 25m και στα 51m αντίστοιχα από την ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα. Παρατηρούμε πως στην πρώτη περίπτωση οι δύο οικισμοί της Ορμύλιας και του Βατοπεδίου δεν πλήττονται, όμως στις επόμενες δύο περιπτώσεις η πλημμύρα πλησιάζει σε μεγάλο βαθμό τους οικισμούς. Τέλος, διαπιστώνουμε ότι και στα τρία σενάρια η παράκτια ζώνη πλήττεται από το ενδεχόμενο πλημμυρικό κύμα και ότι η πλημμύρα εκτείνεται σε έκταση 882ha για το σενάριο των 10m, 1.142ha για το σενάριο των 25m και στα 1.706ha για το σενάριο των 51m.



Σχήμα 4. Χαρτογράφηση πλημμυρικού κινδύνου για θραύση του φράγματος στα 10m (α), 25m(β) και 51m(γ) από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού αντίστοιχα

Επιπρόσθετα, στον κάτωθι πίνακα 2 παρουσιάζονται τα ποσοστά κάλυψης των χρήσεων γης από νερό για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, όπου η μεγαλύτερη έκταση που καλύπτεται από νερό είναι δασική. Στη συνέχεια παρατηρούμε πως και οι καλλιέργειες πλήττονται σε μεγάλο βαθμό, ειδικά στο σενάριο των 51 m, όπου το νερό καταλαμβάνει 235,35 ha από τα 1706 ha. Ακόμη σημαντικό ποσοστό του οδικού δικτύου επηρεάζεται, καθώς δημιουργούνται προβλήματα μεταφοράς των κατοίκων της περιοχής. Τέλος, παρόλο που οι οικισμοί δεν αντιμετωπίζουν εξ' ολοκλήρου προβλήματα από την πλημμυρική απορροή, η έκταση που τελικώς πλημμυρίζει δεν θεωρείται αμελητέα και πλήττει διάφορες εγκαταστάσεις της περιοχής, από κτηνοτροφικές μονάδες έως κατοικίες, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται σημαντικά οι δύο μεγάλοι οικισμοί της περιοχής και συγκεκριμένα στην ανατολική είσοδο του οικισμού Ορμύλιας και στη δυτική είσοδο του οικισμού Βατοπεδίου.

Πίνακας 2. Εκτάσεις χρήσεων γης σε εκτάρια (ha) που πλημμύρισαν για κάθε σενάριο

Χρήσεις γης	**10m**	**25m**	**51m**
Οικισμοί	42.24	48.53	84.95
Οδικό δίκτυο	66.76	93.87	117.54
Καλλιέργειες	129.123	183.06	235.25
Δάσος	643.15	815.38	1267.21
Άμμος	0.35	0.78	0.59
Σύνολο	**882**	**1142**	**1706**

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για τη σωστή διαχείριση των πλημμυρών εξαιτίας μιας επικείμενης θραύσης φράγματος και των συνεπειών της έχουν κατασκευαστεί αρκετά μοντέλα και εμπειρικές σχέσεις. Το πιο ευρέως διαδεδομένο υδραυλικό μοντέλο ανα τον κόσμο είναι το HEC-RAS που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πλημμυρικού κύματος, καθώς και για την ανάλυση της ροής του νερού.

Από τους χάρτες που έχουν δημιουργηθεί συνάγεται το συμπέρασμα πως μια επικείμενη πλημμύρα πλήττει εν μέρει τους δύο μεγάλους οικισμούς της περιοχής και συγκεκριμένα στην ανατολική είσοδο του οικισμού Ορμύλιας και στη δυτική είσοδο του οικισμού Βατοπεδίου. Καθώς το πλημμυρικό κύμα κατεβαίνει προς τα κατάντη, το νερό συσσωρεύεται στην πεδινή περιοχή και να δημιουργεί εκτεταμένες πλημμύρες οι οποίες επηρεάζουν τους οικισμούς της Νέας Σερμύλης, των Ψακουδίων και του Νησιού. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως η ευρύτερη περιοχή έρευνας είναι ιδιαίτερα πολυπληθής κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, με αποτέλεσμα ο κίνδυνος για την απώλεια ζωών να είναι μεγάλος και να ταξινομείται ως υψηλής επικινδυνότητας, σύμφωνα με τα επίπεδα ταξινόμησης της FEMA (2013). Τέλος, κρίνεται σημαντική η σύνταξη ενός σχεδίου αντιμετώπισης έκτακτων καταστάσεων, για την περίπτωση της θραύσης του φράγματος του Χαβρία με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι προβλεπόμενες καταστροφές και φυσικά οι απώλειες ανθρώπινων ζωών.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Asnaashari, A., D. Meredith & M. Scruton, 2014. *Dam breach inundation analysis using HEC-RAS and GIS two case studies in British Columbia, Canada. CDA 2014 Annual Conference Banff, Alberta.*

Asburry R. & C. Goodell, 2009. *Dam breach modelling using HEC-RAS and GIS.* Obras y proyectos, 5: 12-16.

Chow, V. T., 1960. *Open Channel Hydraulics*. (ed. Harmer E. Davis). New York: McGraw-Hill Book Company Inc.

Committee on Safety of Existing Dams, 1983. *Safety of existing dams.* National Academy Press, Washington, p. 354.

Derdous, O., L. Djemili, H. Bouchehed & S.E. Tachi, 2015. *A GIS based approach for the prediction of the dam break flood hazard – A case study of Zardezas reservoir «Skikda, Algeria».* Journal of water and land development 27: 15-20.

ENVECO Α.Ε.- ΤΟ.Π.Π.Ο.Σ. Α.Ε., 2009. *Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων φράγματος Χαβρία Χαλκιδικής.*

FEMA, 2013. *Federal guidelines for inundation mapping of flood risks associated with dam incidents and failures.* FEMA.

Froehlich, D., 1995. *Peak outflow from breached embankment dam.* ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, 121: 90- 97.

Froehlich, D., 2008. *Embankment dam breach parameters and their uncertainties.* Journal of hydraulic engineering, 134: 1708-1721.

Hayimanot, L., 2015. *Dam breach modelling and downstream risk analysis (For Arjo-Dedessa Dam)*. Addis Abbaba Institute of Technology. School of Environmental Engineering, 41pp.

HEC-RAS, 2014. *HEC-RAS river analysis system user manual*. US army corps of engineers institute for water resource hydrologic engineering center, HEC 609 Second Street Davis.

Hydraulic Engineering Center, 2005. *HEC-GeoRAS user's manual an extension for support of HEC-RAS using ArcGIS.* U.S. army corps of engineering hydrologic engineering center, HEC 609 Second st. Davis.

McClelland, D., D. Bowles, 2002. *Estimating life loss for dam safety risk assessment – A review and new approach.* US army corps of engineers. Institute for water resources. Utah State University Logan, Utah, USA.

MacDonald, T.C., Langridge-Monopolis, J., 1984. *Breaching characteristics of dam failures.* Journal of hydraulic engineering, 110: 567 - 586.

Michailidis, A. & K. Mattas, 2007. *Using real options theory to irrigation dam investment analysis: An application of binomial option pricing model.* Water resources management, 21: 1717-1733.

Myronidis, D., Stathis, D., M. Sapountzis, 2016. *Post evaluation of flood hazards induced by former artificial interventions along coastal Mediterranean settlement.* Journal of hydrologic engineering, 21(10).

Von Thun, J.L, Gillette, D.R., 1990. *Guidance on breach parameters*. Unpublished internal document, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO. March 1990, 17 pages.

Yerramilli, S., 2013. *Potential impact of climate changes on the inundation risk levels in a dam break scenario.* International journal of geo-information, 2:110-134.

Μπέλλος Κ., 2005, Στοιχεία Τεχνικής Υδρολογίας. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.

Μπενσασσών, Λ. & Μ. Αθανασάκης, 2012. *Χρήση σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων και Γ.Σ.Π. για την κατάρτιση χαρτών πλημμύρας και σχεδίου προειδοποίησης στα πλαίσια μελέτης θραύσης φράγματος*. 2ο Κοινό Συνέδριο ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ. Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων προς την Αειφόρο Ανάπτυξη, Πάτρα, σελ 1200-1211.

Μυρωνίδης Δ., 2017. *Δημιουργία διαγράμματος στάθμης-χωρητικότητας και οριοθέτηση της κατώτατης στάθμης υδροληψίας ταμιευτήρα.* Υδροτεχνικά, 26:3-13.

Πυθαρούλη Σ., 2007. *Μελέτη της μακροχρόνιας παραμόρφωσης του φράγματος Κρεμαστών με βάση ανάλυση γεωδαιτικών δεδομένων και μεταβολών στάθμης ταμιευτήρα.* Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, σελ 9.

ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΞΗΡΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΣΕ ΕΝΑ ΓΥΜΝΟ ΚΑΙ ΜΕ ΖΙΖΑΝΙΑ ΠΗΛΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ

Γ. Κάργας✉, Κ. Σούλης & Π. Λόντρα

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, ✉ kargas@aua.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι απώλειες νερού σε ένα πηλώδες έδαφος, το οποίο δεν αρδεύεται, κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου των ετών 2015 και 2016. Στην εδαφική επιφάνεια έχουν εφαρμοστεί δύο διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις: α) η εδαφική επιφάνεια είναι γυμνή από ζιζάνια και β) τα ζιζάνια αναπτύσσονται ελεύθερα στην εδαφική επιφάνεια. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι και στις δύο μεταχειρίσεις ο κύριος όγκος των απωλειών εδαφικού νερού πραγματοποιείται μέχρι τέλος Μαΐου, ενώ κατά την υπόλοιπη περίοδο οι απώλειες είναι πολύ μικρότερες. Ιδιαίτερα, η παρουσία ζιζανίων οδηγεί σε μεγαλύτερους ρυθμούς απωλειών, κυρίως λόγω αυξημένης διαπνοής στην αρχή της άνοιξης. Επίσης, εξετάστηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης της αθροιστικής εξάτμισης για το γυμνό έδαφος για τη χρονική περίοδο μέχρι τέλος Μαΐου.

Λέξεις κλειδιά: γυμνό έδαφος, αθροιστική εξάτμιση, μοντέλο

WATER LOSSES DURING THE DRY PERIOD IN A BARE AND WITH FREE NATURAL VEGETATION LOAM SOIL

G. Kargas✉, K. Soulis & P. Londra

Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, 75 Iera Odos, Athens 11855, Greece, ✉ kargas@aua.gr

In the present study, water losses on a Loam soil, that is not irrigated, during the dry season in 2015 and 2016 are investigated. Two different cultivation treatments have been applied to the surface: a) the soil surface is free of natural vegetation and b) the natural vegetation grows freely on the surface. Results showed that in both treatments the bulk of losses are realized by the end of May while they are much lower over the rest of the period. In particular, the presence of natural vegetation leads to higher rates of losses mainly due to increased transpiration at the beginning of Spring. Also, a cumulative evaporation prediction model until the end of May examined.

Keywords: bare soil, cumulative evaporation, model

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξάτμιση αποτελεί σημαντική παράμετρο του υδρολογικού ισοζυγίου, ειδικά στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές. Το φαινόμενο της εξάτμισης του εδαφικού νερού όταν δεν υπάρχει υψηλή υπόγεια στάθμη λαμβάνει χώρα σε τρία διακριτά στάδια (Philip, 1957; Ritchie, 1972). Κατά το πρώτο στάδιο, όπου το έδαφος έχει υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, π.χ μετά την άρδευση, η ταχύτητα εξάτμισης για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα είναι σχετικά σταθερή και σχεδόν ίδια με τον μέγιστο ρυθμό εξάτμισης, ο οποίος καθορίζεται από τις εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η ταχύτητα της εξάτμισης διατηρείται σταθερή παρόλη τη μείωση της επιφανειακής υγρασίας, επειδή η μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) αντισταθμίζεται από την αύξηση της κλίσης του υδραυλικού φορτίου. Από μια χρονική στιγμή και μετά, η μείωση της K δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από την αύξηση της κλίσης του υδραυλικού φορτίου με αποτέλεσμα το πρώτο στάδιο να τελειώσει και να έχουμε είσοδο στο δεύτερο στάδιο. Κατά το δεύτερο στάδιο υπάρχει διακριτή μείωση της ταχύτητας εξάτμισης και ο ρυθμός της εξαρτάται από τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους. Κατά το στάδιο αυτό όταν η επιφανειακή υγρασία γίνει πολύ μικρή, το πάχος της επιφανειακής ξηρής στρώσης αυξάνεται με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου. Το τρίτο στάδιο, χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μικρές ταχύτητες εξάτμισης και τη μετατόπιση της ζώνης ξήρανσης στο εσωτερικό του εδάφους (Hillel, 1989).

Η κατάσταση της εδαφικής επιφάνειας και το είδος του εδάφους επηρεάζουν σημαντικά τη χρονική διάρκεια του πρώτου σταδίου. Επίσης, εάν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επιβάλουν μικρή ταχύτητα εξάτμισης, η διάρκεια του πρώτου σταδίου για το ίδιο έδαφος είναι μεγαλύτερη. Η ταχύτητα εξάτμισης κατά το δεύτερο στάδιο είναι μειωμένη κατά 30-40% συγκριτικά με αυτή του πρώτου σταδίου (Ghildyal and Tripathi, 1987).

Οι Garder and Hillel (1962) πρότειναν μια λύση της μονοδιάστατης εξίσωσης ροής αγνοώντας την βαρύτητα και υπολόγισαν τη διάρκεια του πρώτου σταδίου και την κατανομή της υγρασίας κατά το τέλος του. Κατά το δεύτερο στάδιο, η εξίσωση ροής (εξ. 1) μπορεί να λυθεί αναλυτικά όταν ο συντελεστής διαχυτικότητας D είναι σταθερός (Black et al., 1969)

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) \tag{1}$$

και να δώσει την ταχύτητα εξάτμισης, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (εξ. 2) και με ολοκλήρωση την αθροιστική εξάτμιση, η οποία είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (εξ. 3)

$$E=(\theta_1-\theta_\alpha)\left(\frac{D}{\pi}\right)^{0.5}t^{-0.5} \tag{2}$$

$$E_c=2(\theta_1-\theta_\alpha)\left(\frac{D}{\pi}\right)^{0.5}t^{0.5} \tag{3}$$

όπου θ_1 και θ_α η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία κατά τη χρονική στιγμή t=0 και η τελική τιμή της υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους, αντίστοιχα. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται σαν μοντέλο της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (Square Root Time) (Torres and Calera, 2010). Πλεονεκτήματα του μοντέλου αποτελούν η απλότητά του και η ευκολία στην

εφαρμογή του. Όμως έχουν επισημανθεί και αδύνατα σημεία του, όπως ότι, από μαθηματική σκοπιά, η αθροιστική εξάτμιση από την εξίσωση (3) συνεχώς αυξάνεται με τον χρόνο, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η εξάτμιση ποτέ δεν μηδενίζεται ή ότι το μοντέλο δεν ενσωματώνει την επίδραση των ατμοσφαιρικών παραμέτρων.

Οι Black et al. (1969) παρουσίασαν πειραματικά αποτελέσματα από λυσίμετρα σε ένα αμμώδες έδαφος, όπου επιβεβαιώθηκε ότι η αθροιστική εξάτμιση είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου. Επίσης, οι Torres and Calera (2010) παρουσίασαν ανάλογη σχέση από μετρήσεις σε πηλώδες έδαφος.

Ο Ritchie (1972) παρουσίασε έναν αλγόριθμο υπολογισμού της αθροιστικής εξάτμισης βασισμένο στο μοντέλο SRT, ενώ οι Boesten and Stroosnijer (1986) πρότειναν μια τροποποίηση του μοντέλου SRT ενσωματώνοντας την αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας. Στην συνέχεια, οι Snyder et. al. (2000) και οι Ventura et. al. (2006) πρότειναν διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης της αθροιστικής εξάτμισης από γυμνό έδαφος.

Στην παρούσα εργασία, γίνεται προσπάθεια να διερευνηθούν οι απώλειες σε νερό σε ένα πηλώδες έδαφος κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, από αρχές της άνοιξης έως αρχές φθινοπώρου, κατά τα έτη 2015 και 2016, σε δύο καλλιεργητικές μεταχειρίσεις. Η διερεύνηση γίνεται για την περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει στάθμη του υπόγειου νερού κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, η οποία επηρεάζει σημαντικά το φαινόμενο της εξάτμισης. Επίσης, εξετάζεται η επίδοση του SRT μοντέλου. Κατά το διάστημα αξιολόγησης του μοντέλου τα γεγονότα βροχόπτωσης ήταν πολύ λίγα και με μικρό ύψος βροχής.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στον πειραματικό αγρό του εργαστηρίου της Γεωργικής Υδραυλικής σε δύο πειραματικά τεμάχια, Β1 και Β2. Στον Πίνακα 1 δίνεται η μηχανική ανάλυση του εδάφους κατά βάθος και ο αντίστοιχος τύπος του εδάφους. Στο τεμάχιο Β1 υπήρχε ελεύθερη ανάπτυξη των ζιζανίων, ενώ στο Β2 το έδαφος με χημική ζιζανιοκτονία παρέμενε γυμνό.

Πίνακας 1. Μηχανική ανάλυση εδάφους σε διάφορα βάθη και τύπος εδάφους.

Βάθος cm	Sand %	Silt %	Clay %	Τύπος
0-10	42.4	38.3	19.3	L
10-20	40.7	38.7	20.6	L
20-30	36.4	41.3	22.3	L
30-40	36.7	40.0	23.3	L
40-60	26.7	46.7	26.6	L-CL
60-100	24.4	36.0	39.6	CL

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε, κατά την περίοδο από αρχές της άνοιξης έως αρχές φθινοπώρου, τα έτη 2015 και 2016. Τα δύο πειραματικά τεμάχια ήταν διπλανά και είχαν διαστάσεις 5x5 m (Kargas et al., 2016). Στο κέντρο κάθε τεμαχίου τοποθετήθηκε ειδικός σωλήνας υποδοχής της διηλεκτρικής συσκευής PR2 (User manual for the Profile probe, Delta –T Device Ltd, 2008).

Η συσκευή PR2 μετρά την υγρασία (θ) σε καθορισμένα βάθη του εδάφους. Η διάμετρός της είναι περίπου 25 mm και το μήκος της 120 cm. Για τη μέτρηση της θ η συσκευή εισάγεται στον ειδικό σωλήνα και οι τιμές της λαμβάνονται με τη βοήθεια της φορητής

συσκευής HH2. Η PR2 λειτουργεί στη συχνότητα των 100 MHz και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται επεκτείνεται σε ακτίνα 10 cm γύρω από τη συσκευή. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η διηλεκτρική σταθερά (ε) του εδάφους που περιβάλλει τη συσκευή και διαμέσου της ε του μέσου με τη βοήθεια της βιομηχανικής βαθμονόμησης της συσκευής υπολογίζεται η υγρασία του εδάφους. Το σήμα εξόδου της συσκευής σε κάθε βάθος δίνεται σε Volts. Από τις τιμές των Volts, μέσω της παρακάτω εξίσωσης, υπολογίζεται η διηλεκτρική σταθερά:

$$\sqrt{\varepsilon}=1.125-5.536V+67.17V^2-234.42V^3+413.56V^4-356.68V^5+121.53V^6 \quad (4)$$

Η θ προσδιορίζεται από την εξίσωση (5)

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - \alpha_o}{\alpha_1} \quad (5)$$

Για την συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν σαν τιμές των α_0 και α_1 οι τιμές 1.6 και 8.4 αντίστοιχα, όπως προτείνονται από τον κατασκευαστή.

Για τον προσδιορισμό του ύψους του νερού (mm) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του τραπεζίου

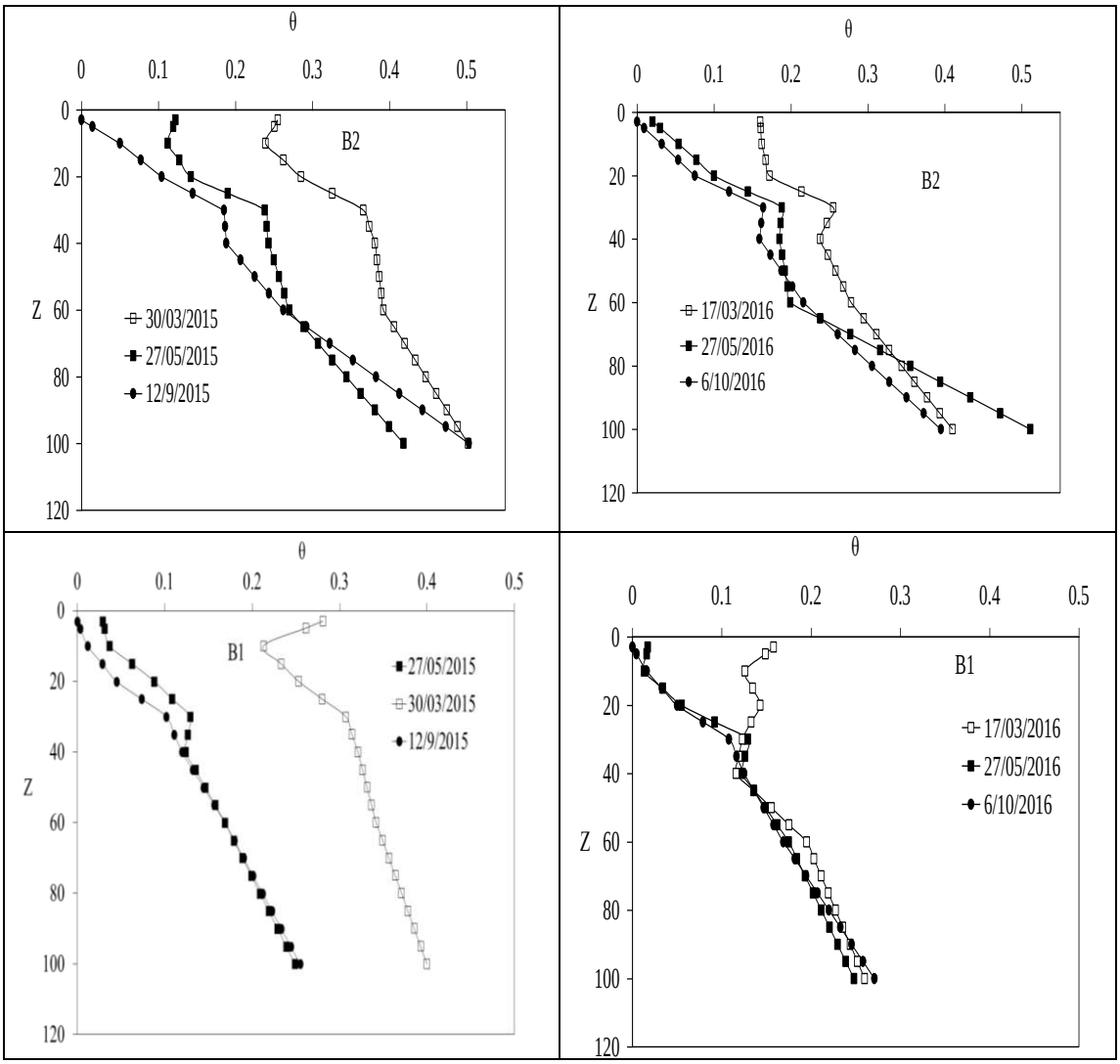
$$\int_a^b \theta dz = \frac{b-a}{2\nu}\left[\theta(\alpha)+2\theta(n_1)+2\theta(n_2)+....+2\theta(n_{n-1})+\theta(b)\right] \quad (6)$$

όπου ν είναι ο αριθμός των διαστημάτων που χωρίζεται το βάθος z και οι αριθμοί n_1, n_2 κ.λ.π. δηλώνουν τα διάφορα βάθη. Σαν Δz λαμβάνεται διάστημα 5 cm.

Επίσης, στον ίδιο χώρο έχει τοποθετηθεί και βροχογράφος για την καταγραφή του ύψους και της έντασης της βροχόπτωσης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για τα δύο πειραματικά τεμάχια τις δύο χρονικές περιόδους μελέτης. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο κύριος όγκος των απωλειών του νερού πραγματοποιείται περίπου μέχρι τέλος Μαΐου για τις δύο μεταχειρίσεις. Πιο συγκεκριμένα, κατά την ξηρή περίοδο του 2015, οι συνολικές απώλειες σε νερό στο γυμνό έδαφος (B2) ήταν 124 mm νερού, ενώ μέχρι τέλος Μαΐου ήταν 114 mm. Στο έδαφος με ζιζάνια (B1), οι αντίστοιχες τιμές ήταν 174 και 165 mm περίπου. Η μείωση της υγρασίας κατά βάθος, μεταξύ αρχής και τέλους της περιόδου, για το γυμνό έδαφος, αφορά όλη την εδαφική κατατομή, ενώ μεταξύ Μαΐου και Σεπτεμβρίου οι διαφορές αφορούν μικρές μειώσεις μέχρι το βάθος των 60 cm. Αντίστοιχα, για το καλυμμένο έδαφος με ζιζάνια, οι διαφορές είναι πολύ μεγάλες μεταξύ αρχής και τέλους της περιόδου, ενώ μικρές διαφορές των κατατομών μεταξύ Μαΐου και Σεπτεμβρίου αφορούν σε βάθος μέχρι 40 cm.



Σχήμα 1. Κατατομές υγρασίας του εδάφους με ζιζάνια (B1) και του γυμνού εδάφους (B2) κατά τις δύο χρονικές περιόδους μελέτης.

Κατά την ξηρή περίοδο του 2016, οι απώλειες και στις δύο περιπτώσεις ήταν πολύ μικρότερες. Στο B1 ήταν 27.4 mm, ενώ στο B2 ήταν 65.7 mm. Στο B2 οι απώλειες φτάνουν μέχρι το βάθος περίπου των 80 cm, ενώ στο B1 οι διαφορές μεταξύ των κατατομών είναι εμφανείς μόνο μέχρι το βάθος των 40 cm. Μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά στις δύο περιόδους. Έτσι, κατά το 2015, οι απώλειες είναι μεγαλύτερες στο B1, ενώ κατά το 2016 στο B2. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι κατά το 2016 μετά τον Μάρτιο έπεσε ύψος νερού περίπου 61 mm, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι στην περίπτωση του γυμνού εδάφους οδήγησε σε αύξηση της επιφανειακής υγρασίας και άρα διευκόλυνε την κίνηση νερού από βαθύτερα στρώματα εδάφους και την εξάτμισή του στην επιφάνεια, ενώ στην περίπτωση των ζιζανίων το φύλλωμα συγκράτησε μέρος της βροχής. Αν ληφθεί υπόψη ότι η κάλυψη του εδάφους από ζιζάνια εκείνη την περίοδο ήταν πολύ μεγάλη μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη η υπόθεση ότι μεγάλο μέρος του ύψους βροχής συγκρατήθηκε από το φύλλωμά τους (Soulis et al., 2017).

Η μεγάλη διαφορά των απωλειών μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων, τις δύο διαφορετικές περιόδους, μπορεί να αποδοθεί στο διαφορετικό ύψος νερού το οποίο είχε αποθηκευτεί στην εδαφική κατατομή στο τέλος της περιόδου των βροχών σαν αποτέλεσμα του διαφορετικού ύψους βροχόπτωσης το όποιο είχε πέσει την προηγούμενη χειμερινή

περίοδο. Πιο συγκεκριμένα, τη χειμερινή περίοδο 2014-αρχές 2015 είχε καταγραφεί αθροιστικό ύψος βροχής 476.2 mm, ενώ την αντίστοιχη περίοδο 2015-αρχές 2016 το αθροιστικό ύψος βροχής ήταν 277.8 mm. Τα αντίστοιχα ύψη νερού (mm) που είχαν αποθηκευτεί στις κατατομές 30/3/2015 ήταν για το Β1 τεμάχιο 309.2 mm και για το Β2, 364.4 , ενώ στις 17/3/2016 ήταν αντίστοιχα 167.7 και 259.9 mm (Πίνακας 2). Πρέπει να επισημάνουμε ότι ρόλο στο ύψος νερού που αποθηκεύεται στην εδαφική κατατομή δεν παίζει μόνο το ύψος νερού της βροχής, αλλά και η κατανομή και η ένταση των βροχοπτώσεων (Kargas et al., 2016).

Πίνακας 2. Αποθηκευμένο ύψος νερού στις κατατομές του εδάφους με ζιζάνια (Β1) και του γυμνού εδάφους (Β2) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης (mm) μεταξύ αυτών των χρονικών στιγμών.

	Ύψος νερού (mm)					
	30/3/15	**27/5/15**	**12/9/15**	**17/3/16**	**27/5/16**	**6/10/16**
Β1	309.2	144.3	135.4	167.7	140.3	140.7
Β2	364.4	250.4	240.4	259.9	223.2	194.2
Βροχόπτωση	476.2	8.4	34.6	277.8	19.7	41.2

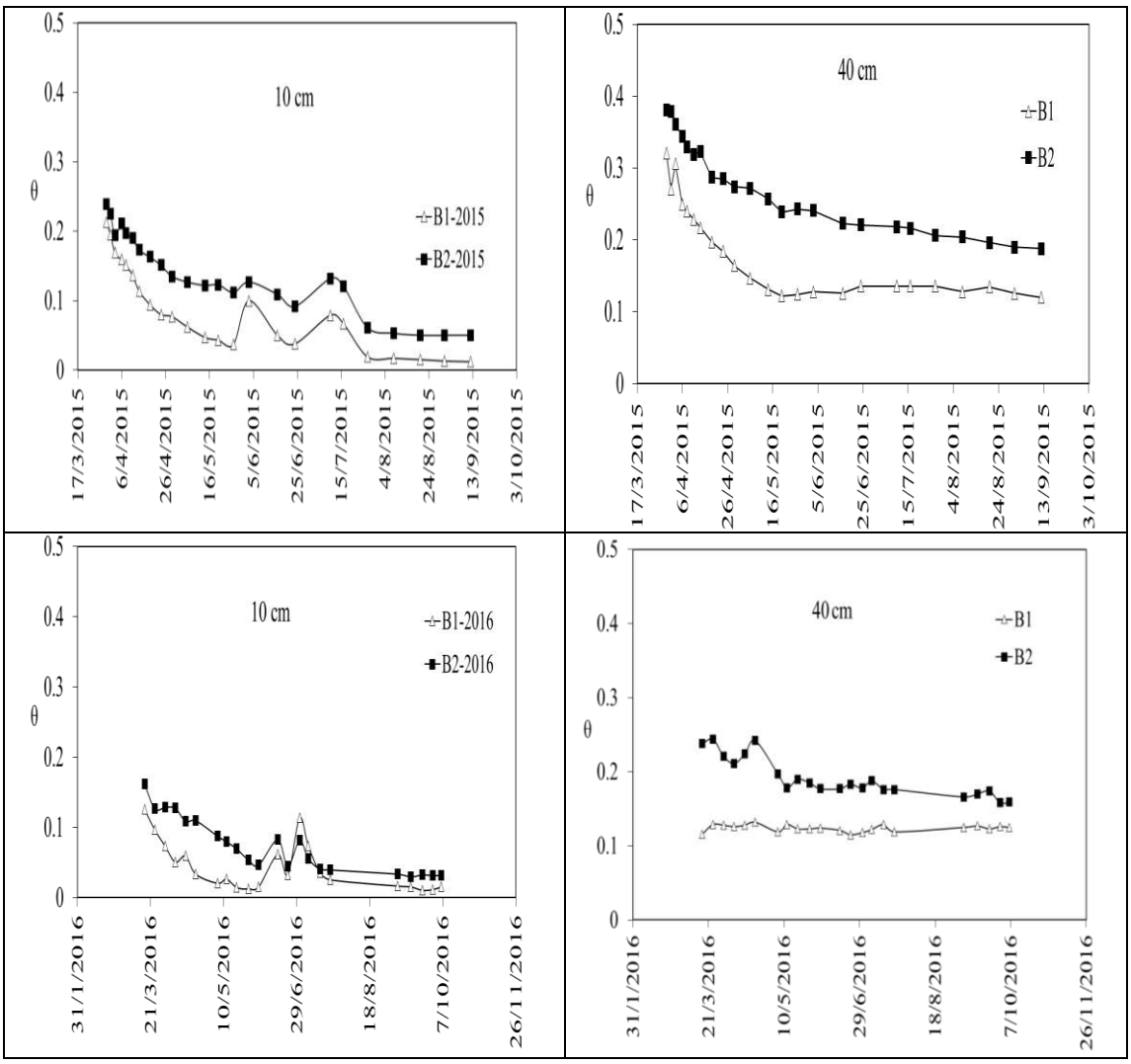
Από το Σχήμα 1 φαίνεται ότι και τις δύο ξηρές χρονικές περιόδους το τεμάχιο Β1 στο τέλος Μαΐου είχε πολύ μικρότερες τιμές επιφανειακής υγρασίας από το τεμάχιο Β2. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη των ζιζανίων τα οποία συμβάλουν με την διαπνοή τους στην απομάκρυνση του εδαφικού νερού πολύ πιο γρήγορα συγκριτικά με το γυμνό έδαφος. Αντίθετα, η μείωση των τιμών της θ στο γυμνό έδαφος γίνεται με βραδύτερο ρυθμό και η θ προσεγγίζει την τιμή του σημείου μάρανσης με βραδύτερους ρυθμούς. Από το χρονικό αυτό σημείο και έπειτα, στο γυμνό έδαφος, ο ρυθμός εξάτμισης μειώνεται σημαντικά, ενώ κατά βάθος διατηρούνται υψηλότερες τιμές θ.

Είναι πολύ βάσιμο να υποθέσουμε ότι το προφίλ υγρασίας του εδάφους στην περίπτωση των ζιζανίων θα εξαρτάται, εκτός από το ύψος του νερού της βροχής το οποίο έπεσε ειδικά κατά την χειμερινή περίοδο, και από το είδος των ζιζανίων το οποίο καθορίζει το είδος του ριζικού συστήματος που αναπτύσσεται. Είναι προφανές ότι ένα εκτεταμένο ριζικό σύστημα θα μειώνει σε μεγαλύτερο βάθος την εδαφική υγρασία. Επίσης, η ένταση των απωλειών, καθώς και οι διαφορές μεταξύ του γυμνού τεμαχίου και του καλυμμένου με ζιζάνια στην αρχική περίοδο μετά τον Μάρτιο, θα εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος των ζιζανίων κατά την είσοδο στην ξηρή περίοδο.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι μεταβολές των υγρασιών θ στα βάθη 10 και 40 cm των δύο μεταχειρίσεων σε διάφορες χρονικές στιγμές στις δύο διαφορετικές περιόδους. Όπως φαίνεται ο μεγαλύτερος ρυθμός μείωσης της θ παρατηρείται στο διάστημα μέχρι τέλος Μαΐου για τη μεταχείριση Β1, ειδικά για το βάθος των 10 cm. Ανάλογο φαινόμενο παρατηρείται και για το βάθος των 40 cm, αλλά με μικρότερη ένταση.

Πιο συγκεκριμένα, στο τεμάχιο Β1 η τιμή της θ στα 10 cm είναι μικρότερη από 0.1 m^3m^{-3} από τις 10 Απριλίου 2015 και παραμένει σε αυτά τα επίπεδα καθ' όλη την ξηρή περίοδο, ενώ στο Β2 η θ αποκτά τέτοιες τιμές από τα μέσα Ιουλίου. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει το Β1 καθ' όλη την ξηρή περίοδο του 2016, ενώ το Β2 διατηρεί επίπεδα υγρασίας μικρότερα του 0.1 m^3m^{-3} από τις αρχές Μαΐου και για όλη τη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Για το βάθος των 40 cm το 2015 στο Β1 η θ αποκτά στα μέσα Μαΐου τιμές περίπου 0.1 m^3m^{-3} και στη συνέχεια διατηρείται σταθερή, ενώ στο Β2 οι τιμές της θ είναι πάντα μεγαλύτερες από 0.2 m^3m^{-3}. Το 2016 λόγω μικρότερων βροχοπτώσεων η θ στο Β1 διατηρείται κοντά

στην τιμή 0.1 m^3m^{-3} καθ' όλη την ξηρή περίοδο, ενώ στο B2 αποκτά τιμές μικρότερες από 0.2 m^3m^{-3} μετά το τέλος Απριλίου.



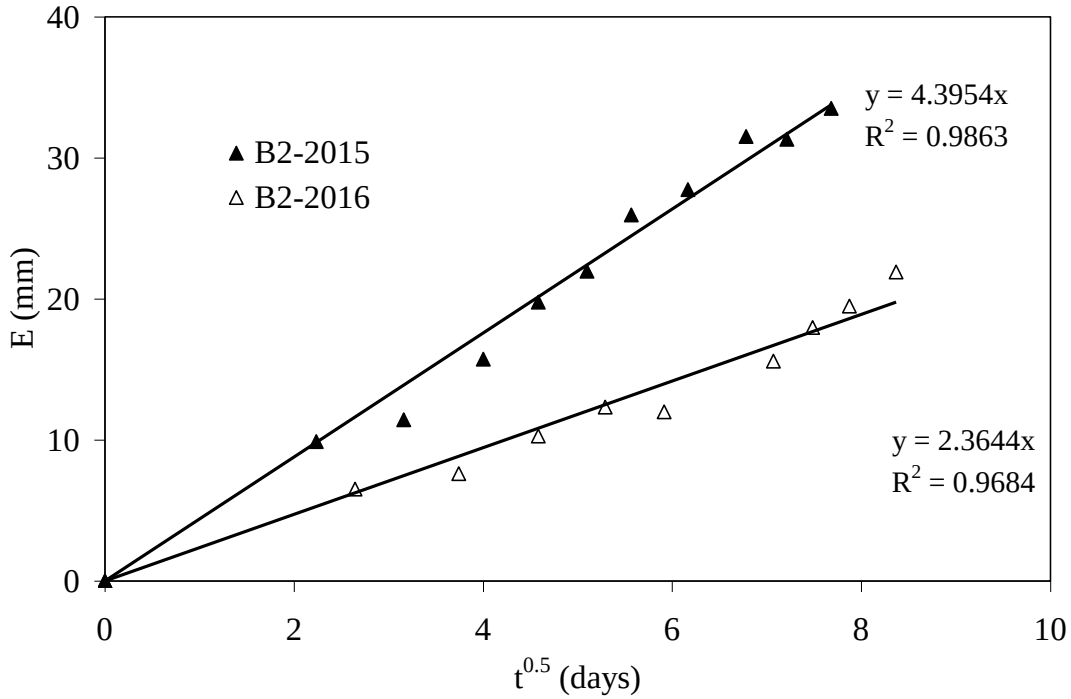
Σχήμα 2. Μεταβολές της υγρασίας (θ) στα βάθη 10 και 40 cm σε διάφορες χρονικές στιγμές για το έδαφος με ζιζάνια (B1) και για το γυμνό έδαφος (B2).

Ο Fulton (1966) παρουσίασε δεδομένα τριών χρόνων από λυσίμετρα για τις διαφορές των απωλειών νερού μεταξύ γυμνού εδάφους και εδάφους με καλλιέργεια ανοιξιάτικης πατάτας. Οι απώλειες από το γυμνό έδαφος αποτέλεσαν το 87.5% των απωλειών της καλλιέργειας. Η διαφορά αυτή προέκυψε από τη διαφορά των απωλειών για ένα μικρό χρονικό διάστημα στο μέσο της καλλιέργειας όπου υπήρχε πλήρης ανάπτυξή της.

Από τα δεδομένα της παρούσας εργασίας σε φυσικό έδαφος φαίνεται ότι οι απώλειες μεταξύ γυμνού εδάφους και ζιζανίων είναι πιο σύνθετο πρόβλημα, αφού το μέγεθος των απωλειών και ο ρυθμός τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της αθροιστικής εξάτμισης (E) και της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου για την περίπτωση του γυμνού εδάφους, B2, μέχρι το βάθος των 30 cm. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η σχέση είναι ισχυρά γραμμική αφού η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 είναι υψηλή και τις δύο χρονιές (0.986 και 0.968, αντίστοιχα). Από τα Σχήματα 1 και 3 φαίνεται ότι η αθροιστική εξάτμιση επηρεάζεται από την επιφανειακή υγρασία κατά την έναρξη της ξηρής περιόδου. Όσο μεγαλύτερη είναι η θ

τόσο μεγαλύτερη είναι και η αθροιστική εξάτμιση. Επίσης, από το Σχήμα 3 φαίνεται η ισχυρή εξάρτηση της κλίσης της γραμμικής σχέσης από την αρχική υγρασία. Η εξάρτηση αυτή εξηγείται εύκολα από την εξίσωση (3). Εάν τα πειράματα αυτά πραγματοποιηθούν κατά την ξηρή εποχή και σε άλλες χρονικές περιόδους, όπου όμως κατά των έναρξη των πειραμάτων θα υπάρχουν διαφορετικές επιφανειακές υγρασίες, τότε είναι πολύ βάσιμο να υποθέσουμε ότι μπορεί να προκύψει μια γραμμική σχέση μεταξύ της κλίσης και της αρχικής υγρασίας. Έτσι, θα είναι δυνατόν με την μέτρηση της αρχικής υγρασίας να μπορεί να προβλεφθεί η αθροιστική εξάτμιση κατά την ξηρή περίοδο, υπό την προϋπόθεση ότι δεν θα υπάρχουν γεγονότα βροχής με υψηλό ύψος.



Σχήμα 3. Σχέση μεταξύ της αθροιστικής εξάτμισης (E) και της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου ($t^{0.5}$) κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου των ετών 2015 και 2016 σε γυμνό έδαφος (B2).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο κύριος όγκος των απωλειών εδαφικού νερού και στις δύο μεταχειρίσεις πραγματοποιείται μέχρι τέλος Μαΐου. Όμως, ο ρυθμός μεταβολής, ειδικά της επιφανειακής θ, κατά την περίοδο αυτή φαίνεται να είναι υψηλότερος στην περίπτωση του εδάφους που έχει ζιζάνια λόγω συμβολής της διαπνοής. Στη μετέπειτα περίοδο, μέχρι την έναρξη των φθινοπωρινών βροχοπτώσεων, ο ρυθμός φαίνεται να είναι πολύ χαμηλός έως αμελητέος και στις δύο περιπτώσεις. Το είδος των ζιζανίων καθορίζει το βάθος στο οποίο θα εμφανιστεί η μείωση της εδαφικής υγρασίας. Όταν έχει μειωθεί σημαντικά η υγρασία σε αυτό το βάθος τότε μειώνεται σημαντικά η ταχύτητα εξάτμισης.

Στο γυμνό έδαφος, η ταχύτητα εξάτμισης, μετά από ένα πρώτο διάστημα όπου η υγρασία είναι σχετικά υψηλή, φαίνεται να έχει υψηλό ρυθμό, και εμφανίζεται μείωση του ρυθμού της από τα τέλη Μαΐου και μετά όπου η υγρασία έχει τιμές μικρότερες από 0.1 m^3m^{-3}.

Στο γυμνό έδαφος φαίνεται ότι η αθροιστική εξάτμιση μεταβάλλεται γραμμικά με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου και ότι η κλίση της γραμμικής σχέσης εξαρτάται από την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία της επιφανειακής στρώσης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Black T.A., Gardner W.R., and Thurtelly G.W., 1969. *The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil*. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 33: 655-660.

Boesten J.J., and Stroosnijer L., 1986. *Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate.* Netherlands J. Agric. Sci., 34: 75-90.

Fulton J.M., 1966. *Evaporation from bare soil compared with evapotraspiration from a potato crop*. Can. J. Soil Sci., 46: 199-204.

Gardner W.R, and Hillel D., 1962. *The relation of external evaporative conditions to the drying of soils.* J. Geophys. Res., 67: 4319-4325.

Ghildyal B.P., and Tripathi R.P., 1987. *Soil physics*. John Willey & Sons. USA.

Hillel D., 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, USA.

Kargas G., Kerkides P., Sotirakoglou K., and Poulovassilis A., 2016. *Temporal variability of surface soil hydraulic properties under various tillage systems.* Soil & Tillage Res., 158: 22-31.

Philip J.R., 1957. *Evaporation and moisture and heat fields in the soil*. J. Met., 14: 354-366.

Ritchie J.T., 1972. *Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover.* Water Resour. Res., 8(5): 1204-1213.

Snyder R., Bali K., Ventura F., and Gomez-MacPherson H., 2000. *Estimating evaporation from bare soil or nearly bare soil*. J. Irrig. Drain. Eng., 126: 399-403.

Soulis K., Ntoulas N., Nektarios P. and Kargas G. 2017.*Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover*. Ecological Engineering 102:80-89.

Torres E.A., and Calera A., 2010. *Bare soil evaporation under high evaporation demand: a proposed modification to the FAO-56 model*. Hydrological Sci. J., 55(3): 303-315.

User Manual for the Profile Probe. 2008. Delta Device Ltd. Cambridge, UK.

Ventura F., Snyder R., and Bali K., 2006. *Estimating evaporation from bare soil using soil moisture data*. J. Irrig. Drain. Eng., 132: 153-157.

ΤΟΠΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Δ. Καρπούζος✉, Π. Γεωργίου
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, 54124, Θεσσαλονίκη, ✉ dimkarp@agro.auth.gr

Περίληψη

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και κατ' επέκταση για την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας (R_s) αυτή συνήθως εκτιμάται μέσω γενικών εμπειρικών σχέσεων σε συνδυασμό με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους. Στην εργασία αυτή γίνεται διερεύνηση καθορισμού μίας τοπικής σχέσης συσχέτισης της ηλιακής ακτινοβολίας με περιορισμένο αριθμό μετεωρολογικών παραμέτρων. Η προσέγγιση της τοπικής σχέσης γίνεται μέσω γενετικού προγραμματισμού σε δεδομένα του Α.Μ.Σ. του Αγροκτήματος Α.Π.Θ. και συγκρίνεται με την ευρέως διαδεδομένη σχέση των Hargreaves-Samani. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο γενετικός προγραμματισμός μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση μετεωρολογικών παραμέτρων.

Λέξεις κλειδιά: ηλιακή ακτινοβολία, γενετικός προγραμματισμός, οικονομία παραμέτρων

LOCAL ESTIMATION OF SOLAR RADIATION USING GENETIC PROGRAMMING

D. Karpouzos✉, P. Georgiou
Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Department of Hydraulics, Soil science and Agricultural engineering, 54124, Thessaloniki, ✉ dimkarp@agro.auth.gr

Abstract

Solar radiation is a principal parameter used for the estimation of the reference evapotranspiration and therefore for the estimation of crop irrigation requirements. In case, where measurements of solar radiation are not available, its estimation is usually performed by means of general empirical equations in relation with other meteorological parameters. In this work, a local estimation relationship is investigated between solar radiation and a limited number of meteorological parameters. The methodological approach is based on genetic programming (G.P.) and the application is performed for a period of three years with data given by the Automatic Meteorological Station (A.M.S.) of Aristotle's University farm. The quality of the modelling approach is tested using various criteria and compared with the common used empirical equation of Hargreaves-Samani. Model results were encouraging and showed that GP can be a useful tool for the estimation of meteorological variables.

Key words: solar radiation, genetic programming, model parsimony

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υδατικοί πόροι χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των σε νερό αναγκών της γεωργίας, των αστικών και τουριστικών περιοχών, της βιομηχανίας και βιοτεχνίας αλλά και τη διατήρηση των περιβαλλοντολογικών ισορροπιών. Η γεωργία είναι ο κύριος χρήστης νερού, με συμμετοχή που στην Ελλάδα ανέρχεται πάνω από 80%. Για τη σωστή διαχείριση του αρδευτικού νερού απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ακριβής εκτίμηση των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών, οι οποίες εκφράζονται από την εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών. Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών (ET_c) γίνεται με τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) και των φυτικών συντελεστών (k_c) που αντιπροσωπεύουν τις ιδιαιτερότητες της κάθε καλλιέργειας.

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς υπολογίζεται με τη βοήθεια μόνο μετεωρολογικών παραμέτρων. Η ακριβέστερη σήμερα μέθοδος υπολογισμού της ET_o είναι η μέθοδος των ASCE-EWRI Penman – Monteith (Allen et al., 1998, ASCE-EWRI, 2005), για την εφαρμογή της οποίας απαιτούνται μετρήσεις των εξής μετεωρολογικών παραμέτρων: θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου και καθαρή ακτινοβολία. Από τις τέσσερεις παραμέτρους, η πιο δύσκολα μετρούμενη είναι αυτή της καθαρής ακτινοβολίας (R_n). Ειδικότερα οι μετρήσεις της θα πρέπει να γίνονται σε Αγρομετεωρολογικούς σταθμούς στους οποίους υπάρχει επαρκώς αρδευόμενη έκταση γρασιδιού για να καλύπτει τις απαιτήσεις της εξίσωσης των Penman-Monteith (υποθετική καλλιέργεια ύψους 12 cm, καθορισμένης αντίστασης φυτικής κόμης 70 s/m και συντελεστή ανάκλασης 0.23).

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μετρήσεις καθαρής ακτινοβολίας αυτή μπορεί να υπολογισθεί είτε με μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας (R_s) είτε με μετρήσεις πραγματικής ηλιοφάνειας (n) . Η πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι με μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας (R_s) καθώς με μετρήσεις ηλιοφάνειας απαιτείται ο υπολογισμός των συντελεστών του Angstrom. Οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας γίνονται με τη χρήση πυρανομέτρων, το κόστος των οποίων είναι υψηλό ενώ απαιτείται συνεχής βαθμονόμηση του οργάνου. Για τους λόγους αυτούς, πολλές φορές είτε δεν υπάρχουν μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας, είτε οι μετρήσεις παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα εξαιτίας της έλλειψης βαθμονόμησης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί πολλά μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας με τη βοήθεια εύκολα μετρούμενων μετεωρολογικών παραμέτρων όπως είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία κ.λπ. (Hargreaves and Samani, 1985; Hargreaves, 1994; Irmak et al., 2010; Thepadia and Martinez, 2011; Aladenola and Madramootoo, 2014, Tabari et al., 2016). Ορισμένα από τα μοντέλα αυτά είναι τοπικού ενδιαφέροντος (local) (Thepadia and Martinez, 2011), άλλα έχουν εφαρμογή σε ευρύτερες περιοχές (regional) (Aladenola and Madramootoo, 2014) ενώ άλλα έχουν παγκόσμια εφαρμογή (global) (Hargreaves and Samani, 1985; Hargreaves, 1994).

Στην εργασία αυτή επιχειρείται ο προσδιορισμός μιας σχέσης εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας R_s με δεδομένα μετεωρολογικές παραμέτρους που είναι εύκολα μετρούμενες (θερμοκρασία και σχετική υγρασία) μέσω γενετικού προγραμματισμού. Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα του Αυτόματου Μετεωρολογικού Σταθμού (Α.Μ.Σ.) του Αγροκτήματος του Α.Π.Θ.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Μετεωρολογικά δεδομένα

Στην εργασία αυτή, για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα του Αυτόματου Μετεωρολογικού Σταθμού (Α.Μ.Σ.) του Αγροκτήματος του Α.Π.Θ.. Στο Αγρόκτημα του Α.Π.Θ. και συγκεκριμένα στο χώρο πλησίον

του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, του Τμήματος Γεωπονίας, εγκαταστάθηκε τον Ιούνιο του 2007 Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός (Α.Μ.Σ.) στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος MEDDMAN, το οποίο ήταν μια διακρατική προσέγγιση στον τομέα της ξηρασίας και της διαχείρισης των υδατικών πόρων (Baltas et al., 2007; Kavalieratou et al., 2008).

Ο Α.Μ.Σ. του Αγροκτήματος Α.Π.Θ. βρίσκεται σε θέση με γεωγραφικό πλάτος $40^{o}32'$, γεωγραφικό μήκος $22^{o}00'$ και υψόμετρο 15 m. Τα δεδομένα καταγράφονται ανά λεπτό και η αποθήκευσή τους γίνεται ανά ώρα και με τη βοήθεια των ωριαίων τιμών αποκτούνται τα δεδομένα σε ημερήσια βάση. Τα στοιχεία που μετρούνται στο μετεωρολογικό σταθμό και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αναφέρονται στα έτη 2014, 2015 και 2016 και είναι: μέγιστη θερμοκρασία του αέρα T_{max} (^{o}C), ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα T_{min} (^{o}C), μέση σχετική υγρασία RH_{mean} (%), ηλιακή ακτινοβολία R_s (W/m^2).

Τα δεδομένα του Α.Μ.Σ. πριν χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία ελέγχθηκαν για σφάλματα και ασυνέπειες, σύμφωνα με τους κανόνες που περιγράφουν οι Liu et al. (2009). Συγκεκριμένα δεν χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα στις περιπτώσεις όπου:

- Δεν υπήρχαν μετρήσεις για κάποιες ώρες της ημέρας για όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους.
- Ο λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας προς την εξωγήϊνη ακτινοβολία (R_s/R_a) ήταν μεγαλύτερος από 1 και
- Ο λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας προς την εξωγήϊνη ακτινοβολία (R_s/R_a) ήταν μικρότερος από 0.03.

2.2 Γενετικός προγραμματισμός

Ο Γενετικός Προγραμματισμός (Γ.Π.) (Genetic Programming – G.P.) είναι μία τεχνική εξελικτικής υπολογιστικής, που μπορεί να επιλύει με αυτόματο τρόπο προβλήματα χωρίς να απαιτεί από το χρήστη να γνωρίζει ή να προσδιορίζει εκ των προτέρων τη μορφή ή τη δομή της λύσης (Koza, 1992; Poli,2008).

Οι βασικές αρχές του Γ.Π. βασίζονται σε αυτές του γενετικού αλγόριθμου καθώς στηρίζεται στην αρχή του Δαρβίνου περί επικράτησης του ισχυρότερου (καταλληλότερης λύσης), χρησιμοποιώντας ως βασικούς γενετικούς τελεστές την επιλογή, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη. Συνεπώς, ο Γ.Π. μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό μιας μη γραμμικής σχέσης (μη γνωστής μορφής) μεταξύ ενός συνόλου δεδομένων (inputs, outputs), τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευσή του, καταλήγοντας σε μια βέλτιστη λύση (σχέση) βάσει μιας συνάρτησης καταλληλότητας (αντικειμενική συνάρτηση).

Στο Γ.Π. εξελίσσουμε έναν πληθυσμό από προγράμματα υπολογιστή (πιθανές λύσεις του προβλήματος), όπου στην περίπτωσή μας είναι μη γραμμικές σχέσεις. Οι λύσεις που εξελίσσονται έχουν τη μορφή δέντρων. Η εκκίνηση του αλγορίθμου, δηλαδή ο αρχικός πληθυσμός (πρώτη γενεά) αποτελείται απο τυχαίες λύσεις και δεν απαιτείται κάποια προγενέστερη πληροφορία. Η εξέλιξη των λύσεων γίνεται ανά γενεές, χρησιμοποιώντας μέσω πιθανοτήτων τους γενετικούς τελεστές. Ο Γ.Π. έχει τη δυνατότητα μέσω της τυχαίας αλλά προκαθορισμένης εξελικτικής διαδικασίας να αποφύγει τοπικά ακρότατα, αντίθετα με τις ντετερμινιστικές μεθόδους, οι οποίες βασίζονται σε καθορισμένες αρχικές πληροφορίες, και να εξερευνήσει ευρύτερα το πεδίο λύσης. Στην παρούσα εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκε πολυγονιδιακός γενετικός προγραμματισμός (Searson et al., 2010; Pandey et al., 2015), δηλαδή η κάθε λύση του Γ.Π. αποτελείται απο περισσότερα από ένα γονίδια/δέντρα, τα οποία συνδυάζονται σε μια ενιαία μαθηματική σχέση, μέσω συμβολικής σταθμισμένης γραμμικής παλινδρόμησης:

$$y_{sim} = w_o + \sum_{i=1}^{N} w_i \cdot f_i(x_1, x_{2,} ..x_n) \quad (1)$$

όπου: y_{sim} είναι η προσομοιωμένη τιμή του μοντέλου συμβολικής παλινδρόμησης, N ο αριθμός των δέντρων (γονιδίων), x οι μεταβλητές εισόδου, $f_i()$ τα δέντρα (μαθηματικές συναρτήσεις), w_i οι συντελεστές βάρους των δέντρων (γονιδίων) $f_i()$ και w_o ένας σταθερός όρος. Οι συντελέστες βάρους στην παραπάνω σχέση υπολογίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Ο τελεστής της επιλογής, υλοποιήθηκε με τη μέθοδο του διαγωνισμού λαμβάνοντας υπόψη και την πολυπλοκότητα της λύσης (Luke and Panait ,2006). Η διαδικασία της διασταύρωσης και της μετάλλαξης στον Γ.Π. περιγράφονται σε μια γενική μορφή στο Σχήμα 1, όπου οι μεταβλητές x_i αντιπροσωπεύουν τα δεδομένα εισόδου (μετεωρολογικές παράμετροι στην παρούσα εφαρμογή).

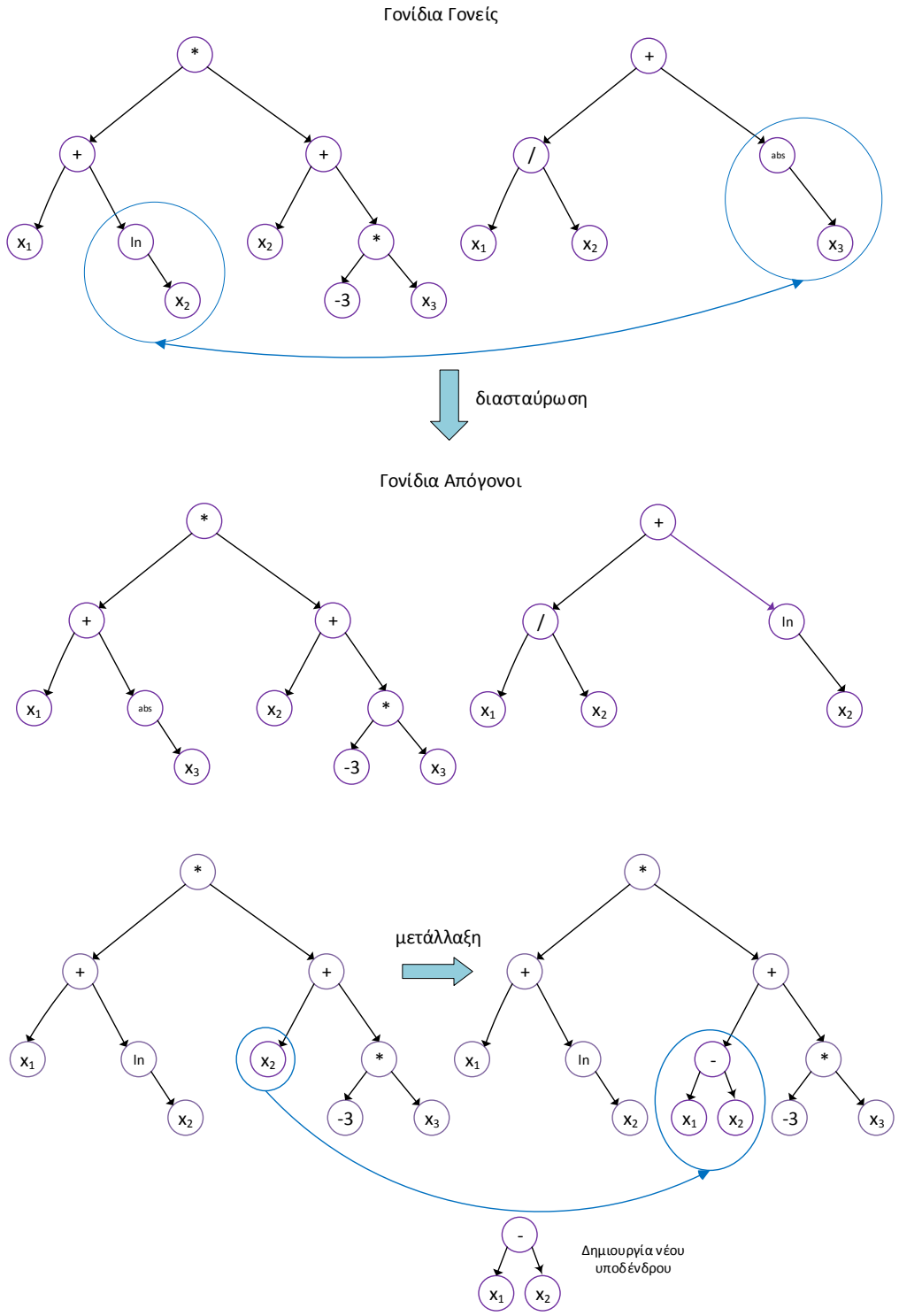
Στην παρούσα εφαρμογή του γενετικού προγραμματισμού, για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας R_s του Α.Μ.Σ. του Α.Π.Θ. σε ημερήσιο χρονικό βήμα για τη χρονική περίοδο 2014-2016, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου οι αντίστοιχες ημερήσιες τιμές τεσσάρων μετεωρολογικών παραμέτρων (μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, μέση σχετική υγρασία και θεωρητική ηλιοφάνεια). Τα δεδομένα αυτά (1203 ημερήσια δεδομένα για κάθε μεταβλητή), ύστερα από τυχαία ανακατανομή τους, το 70% χρησιμοποιήθηκε για εκπαίδευση, ενώ το υπόλοιπο 30% για επαλήθευση. Οι κύριες γενετικές παράμετροι οι οποίες θεωρήθηκαν κατά το σχεδιασμό του αλγορίθμου ήταν: μέγιστος αριθμός γενεών: 300, μέγεθος του πληθυσμού: 200, μέγεθος διαγωνισμού: 5, μέγιστος αριθμός δένδρων:7 και βάθος δένδρου: 5. Οι μαθηματικοί τελεστές και συναρτήσεις που εισήχθησαν για την κατασκευή των δένδρων των τεσσάρων μετεωρολογικών μεταβλητών ήταν: $\left\{+, -, /, *, \ln(\cdot), \sqrt{|\cdot|}, (\cdot)^2\right\}$.

2.3 Εμπειρική σχέση Hargreaves-Samani

Η προσέγγιση της τοπικής σχέσης που γίνεται μέσω γενετικού προγραμματισμού συγκρίνεται, με το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας, που είναι αυτό που προτάθηκε από τους Hargreaves and Samani το 1985 και δίνεται από τη σχέση:

$$R_s = k_{Rs} \cdot R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (2)$$

όπου: R_s η ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m^2day), k_{Rs} ο συντελεστής προσαρμογής, ο οποίος παίρνει τιμές από 0.16-0.19 ($^oC^{-0.5}$), T_{max} η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία (^oC), T_{min} η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία (^oC) και R_a η θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m^2day).



Σχήμα 1. Σχηματική περιγραφή των γενετικών τελεστών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης.

Ο συντελεστής προσαρμογής παίρνει την τιμή 0.16 για ορεινές περιοχές και 0.19 για παραθαλάσσιες. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε η γενική σχέση (2) για παραθαλάσσια περιοχή λόγω της γειτνίασης του Α.Μ.Σ. με τη θάλασσα. Επίσης, η σχέση (2) ρυθμίστηκε τοπικά για το σετ δεδομένων εκπαίδευσης του Α.Μ.Σ., μέσω μη γραμμικής παλινδρόμησης, έτσι ώστε να προκύψουν οι συντελεστές a και b της σχέσης:

$$R_s = a \cdot R_a \left(T_{max} - T_{min} \right)^b \quad (3)$$

Συνεπώς, η σχέση (3) αποτελεί την τοπικά προσαρμοσμένη σχέση των Hargreaves and Samani, η οποία για τις μετρήσεις του Α.Μ.Σ. του αγροκτήματος του Α.Π.Θ. έχει τη μορφή:

$$R_s = 0.12744 \cdot R_a \left(T_{max} - T_{min} \right)^{0.584007} \quad (4)$$

2.4 Στατιστικά κριτήρια ελέγχου καταλληλότητας

Ως αντικειμενική συνάρτηση στον αλγόριθμο του γενετικού προγραμματισμού, για την περίοδο εκπαίδευσής του θεωρήθηκε το στατιστικό κριτήριο της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE (root mean square error). Επιπλέον αυτού του κριτηρίου, χρησιμοποιήθηκαν και άλλα δύο στατιστικά κριτήρια για τον a posteriori έλεγχο της αξιοπιστίας της βέλτιστης λύσης του γενετικού προγραμματισμού.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 καθώς και ο συντελεστής αποδοτικότητας του μοντέλου ΜΕ (model efficiency) των Nash-Sutcliffe (Doulgeris et al., 2011; Karpouzos et al., 2011). Τα παραπάνω κριτήρια χρησιμοποιήθηκαν και για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου του γενετικού προγραμματισμού και των δυο σχέσεων (γενική και προσαρμοσμένη) των Hargreaves and Samani.

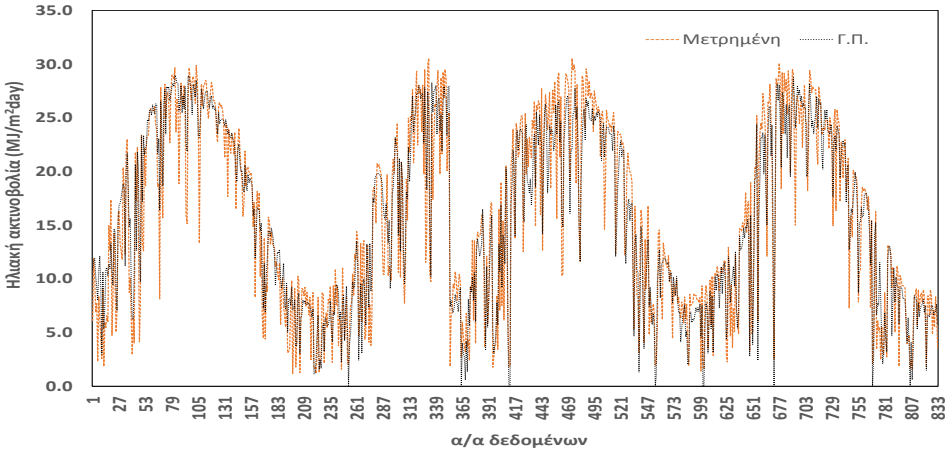
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο Γ.Π. όπως αναφέρθηκε, εφαρμόστηκε για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας R_s του Α.Μ.Σ. του Α.Π.Θ. σε ημερήσιο χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου τις ημερήσιες τιμές τεσσάρων μετεωρολογικών παραμέτρων (μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, μέση σχετική υγρασία και θεωρητική ηλιοφάνεια). Η βέλτιστη λύση που επιλέχθηκε από διαδοχικές εκτελέσεις Γ.Π. και λαμβάνοντας υπόψη και την πολυπλοκότητα πέραν της απόδοσης, κατά το στάδιο της εκπαίδευσης, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

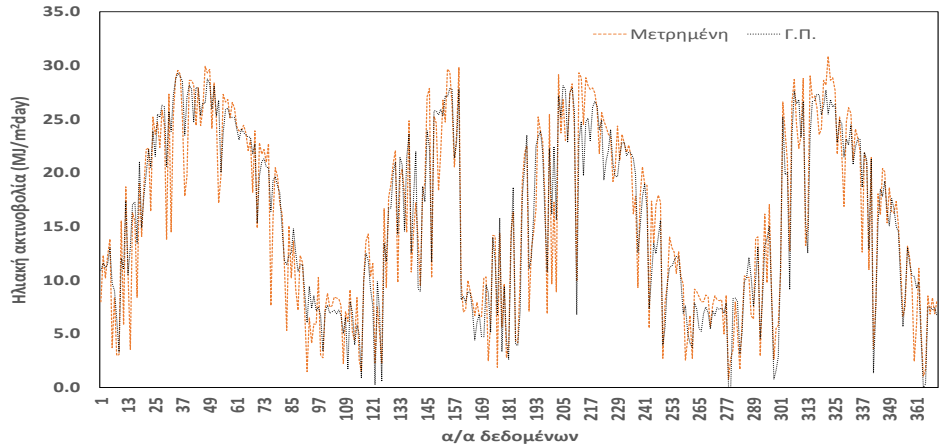
$$\begin{aligned} R_s &= 0.4401 \cdot RH_m + 38.07 \cdot \ln\left[N \ln(N)^2 \right] - 0.02822 \cdot \Delta T \left[T_{max} - \ln(N) \right] \\ &+ N \cdot RH_m (0.001706 \cdot \Delta T - 0.06597) + RH_m \cdot \Delta T (0.0004063 \cdot T_{min} - 4.386 \cdot 10^{-5} \cdot RH_m) \\ &- 133.5 \end{aligned} \quad (5)$$

όπου: R_s η ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m^{2}day), T_{max} η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία (^{o}C), T_{min} η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία (^{o}C), $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ (^{o}C), RH_m η μέση σχετική υγρασία (%), και N η θεωρητική ηλιοφάνεια (hrs).

Το RMSE της παραπάνω λύσης για την εκπαίδευση και την επαλήθευση είναι 2.69 και 2.71, αντίστοιχα. Στα Σχήματα 2 και 3 απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των μετρημένων τιμών και των υπολογισμένων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας με τη σχέση (5) του Γ.Π., για τα δεδομένα της εκπαίδευσης και της επαλήθευσης αντίστοιχα, όπου παρατηρείται μια αρκετά καλή προσομοίωση. Επίσης, η βέλτιστη λύση επιτυγχάνει υψηλές τιμές και στα άλλα δύο στατιστικά κριτήρια, καθώς τόσο ο συντελεστής προσδιορισμού όσο και ο συντελεστής αποδοτικότητας του μοντέλου είναι 0.90 για τα δεδομένα της εκπαίδευσης, ενώ για τα δεδομένα επαλήθευσης είναι 0.895 και 0.89 αντίστοιχα.

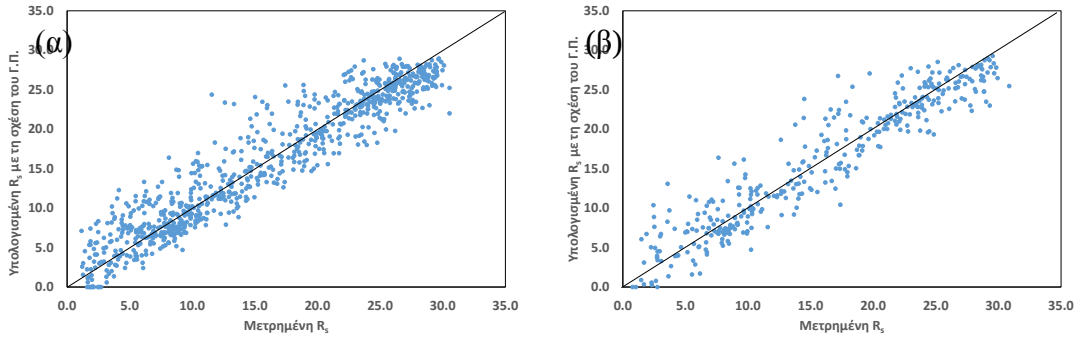


Σχήμα 2. Σύγκριση μεταξύ των μετρημένων τιμών και των υπολογισμένων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας με τη σχέση (5) του Γ.Π., για τα δεδομένα της εκπαίδευσης.

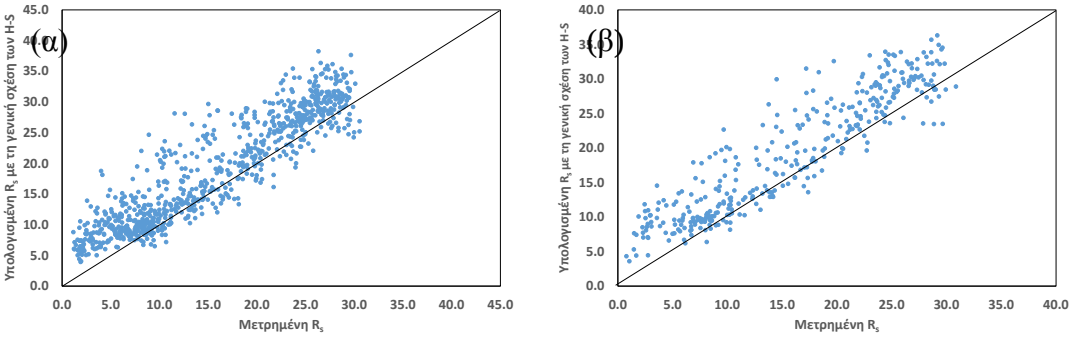


Σχήμα 3. Σύγκριση μεταξύ των μετρημένων τιμών και των υπολογισμένων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας με τη σχέση (5) του Γ.Π., για τα δεδομένα της επαλήθευσης.

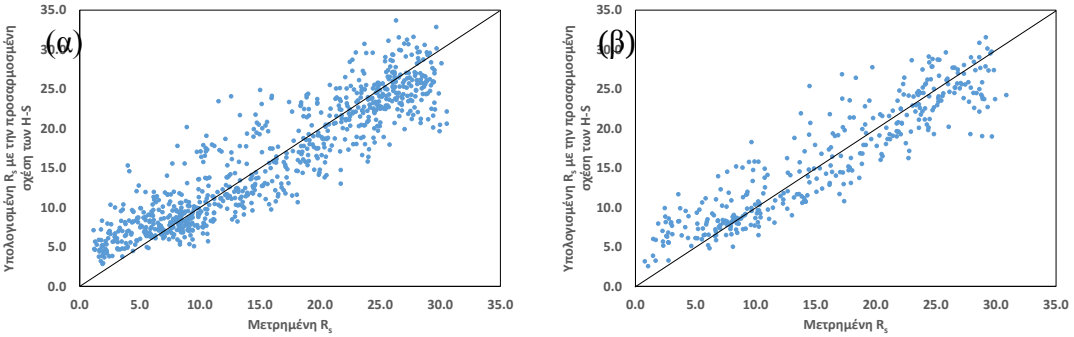
Η ποιότητα των αποτελεσμάτων των τριών σχέσεων εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας για τον υπό μελέτη Α.Μ.Σ., παρουσιάζεται εποπτικά και στα Σχήματα 4, 5 και 6 μέσω της σύγκρισης αυτών ως προς την ευθεία 1:1, όπου διακρίνεται η συγκριτικά καλύτερη προβλεπτική ικανότητα της σχέσης του γενετικού προγραμματισμού. Επιπλέον, σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα βάσει του Γ.Π. δεν εμφανίζουν κάποια συστηματική υπερ ή υποεκτίμηση των μετρήσεων, όπως παρατηρείται εμφανώς στις προβλέψεις της γενικής σχέσης των Hargreaves and Samani.



Σχήμα 4. Σύγκριση μεταξύ των μετρημένων τιμών και των υπολογισμένων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας με τη σχέση (5) του Γ.Π. και της ευθείας (1:1): (α) για τα δεδομένα της εκπαίδευσης και (β) για τα δεδομένα της επαλήθευσης.



Σχήμα 5. Σύγκριση μεταξύ των μετρημένων τιμών και των υπολογισμένων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας με τη γενική σχέση των Hargreaves and Samani και της ευθείας (1:1): (α) για τα δεδομένα της εκπαίδευσης και (β) για τα δεδομένα της επαλήθευσης.



Σχήμα 6. Σύγκριση μεταξύ των μετρημένων τιμών και των υπολογισμένων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας με την προσαρμοσμένη σχέση των Hargreaves and Samani και της ευθείας (1:1): (α) για τα δεδομένα της εκπαίδευσης και (β) για τα δεδομένα της επαλήθευσης.

Στους Πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές των στατιστικών κριτηρίων για τις σχέσεις που προκύπτουν από τον γενετικό προγραμματισμό και τις δύο εμπειρικές προσεγγίσεις των Hargreaves and Samani (γενική και τοπικά προσαρμοσμένη) για τα δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης, αντίστοιχα. Όπως προκύπτει, ο γενετικός προγραμματισμός επιτυγχάνει συγκριτικά καλύτερες τιμές απόδοσης μεταξύ των τριών προσεγγίσεων. Τέλος, όπως αναμενόταν η τοπικά προσαρμοσμένη μορφή της σχέσης των Hargreaves and Samani υπερτερεί της αντίστοιχης γενικής.

Πίνακας 1. Τιμές στατιστικών κριτηρίων για τα δεδομένα εκπαίδευσης

Μέθοδος/Κριτήρια	**R^2**	**RMSE**	**ME**
Γενετικός Προγραμματισμός	0.90	2.69	0.90
Hargreaves and Samani (γενική)	0.84	4.81	0.68
Hargreaves and Samani (προσαρμοσμένη)	0.84	3.41	0.84

Πίνακας 2. Τιμές στατιστικών κριτηρίων για τα δεδομένα επαλήθευσης

Μέθοδος/Κριτήρια	**R^2**	**RMSE**	**ME**
Γενετικός Προγραμματισμός	0.895	2.71	0.89
Hargreaves and Samani (γενική)	0.846	4.83	0.66
Hargreaves and Samani (προσαρμοσμένη)	0.848	3.27	0.85

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός μιας σχέσης εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω τοπικής συσχέτισης με εύκολα μετρούμενες μετεωρολογικές παραμέτρους με δεδομένα του Α.Μ.Σ. του αγροκτήματος του ΑΠΘ για την χρονική περίοδο 2014-16. Για το σκοπό αυτό εφαρμόσθηκε γενετικός προγραμματισμός, ο οποίος κατέληξε σε μια σχέση η οποία βάσει των στατιστικών κριτηριών έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτέλεσματα. Η καταλληλόλητα του αλγορίθμου επιβεβαιώθηκε και από τη σύγκριση της βέλτιστης επιτευχθείσας σχέσης του Γ.Π. με τις αντίστοιχες (γενική και προσαρμόσμενη) των Hargreaves and Samani. Με βάση τα παραπάνω ενθαρρυντικά αποτελέσματα, ο Γ.Π. μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο και εύχρηστο εργαλείο στην εκτίμηση μετεωρολογικών παραμέτρων σε τοπικό επίπεδο, χωρίς να απαιτεί μια προκαθορισμένη μορφή σχέσης και μεγάλο αριθμό παραμέτρων.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aladenola, O.O. and Madramootoo, C.A., 2014. *Evaluation of solar radiation estimation methods for reference evapotranspiration estimation in Canada.* Theoretical and applied climatology, 118(3): 377-385.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements.* FAO Irrigation and Drainage, 56, 300 p.

ASCE-EWRI, 2005. *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation.* Technical Committee Report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173p.

Baltas, E., Kavalieratou. S., Karpouzos. D.K. and Babajimopoulos, C., 2007. *Technical specifications of the monitorinq equipment: standards required for real time monitoring.* Integrated water resources management, development and confrontation of common and transnational methodologies for combating drought within the MEDOCC region, p. 24.

Doulgeris, Ch., Georgiou, P., Papadimos, D. and Papamichail, D., 2011. *Evaluating Three Different Model Setups in the MIKE 11 NAM model.* Advances in the Research of Aquatic Environment, (eds. N. Lambrakis, G. Stournaras, K. Katsanou), 1, 241-249.

Hargreaves, G.H., 1994. *Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe.* Departmental paper, Departmental of Biological and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan.

Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1985. *Reference crop evapotranspiration from temperature.* Applied Engineering in Agriculture, 1 (2): 96–99.

Irmak, S., Odhiambo, L.O. and Mutiibwa, D., 2010. *Evaluating the impact of daily net radiation models on grass and alfalfa-reference evapotranspiration using the Penman-Monteith equation in a subhumid and semiarid climate.* Journal of irrigation and drainage engineering, 137(2): 59-72.

Kavalieratou S., Karpouzos D.K. and Babajimopoulos, C., 2008. *Monitoring equipment installation.* Integrated water resources management, development and confrontation of common and transnational methodologies for combating drought within the MEDOCC region, p. 15.

Karpouzos, D.K., Baltas, E.A., Kavalieratou, S. and Babajimopoulos, C., 2011. *A hydrological investiga-tion using a lumped water balance model: the Aison River Basin case (Greece).* Water and Environment Journal, 25(3), pp. 297-307.

Koza, J.R., 1992. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press

Liu, X., Mei, X., Li, Y., Zhang, Y., Wang, Q., Jensen, J.R. and Porter, J.R., 2009. *Calibration of the Ångström–Prescott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin.* Agricultural and forest meteorology, 149(3), pp.697-710.

Luke S. and Panait, L.,2006. A comparison of bloat control methods for genetic programming. Evolutionary Computation, 14(3), pp. 309–344.

Poli, R., Langdon, W., McPhee, N., 2008. *A Field Guide to Genetic Programming*. Lulu Enterprises UK Ltd

Pandey, D. S., Pan, I., Das, S., Leahy, J. J. and Kwapinski, W., 2015. *Multi-gene genetic programming based predictive models for municipal solid waste gasification in a fluidized bed gasifier*. Bioresource technology, 179, pp. 524-533.

Searson, D.P., Leahy, D.E. and Willis, M.J., 2010. GPTIPS: an open source genetic programming toolbox for multigene symbolic regression, in: Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists.

Tabari, H., Hosseinzadehtalaei, P., Willems, P. and Martinez, C., 2016. *Validation and calibration of solar radiation equations for estimating daily reference evapotranspiration at cool semi-arid and arid locations.* Hydrological Sciences Journal, 61(3): 610-619.

Thepadia, M. and Martinez, C.J., 2011. *Regional calibration of solar radiation and reference evapotranspiration estimates with minimal data in Florida.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138(2), pp.111-119.

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ CropSyst

Π. Κουκούλη✉, Π. Γεωργίου
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, 54124, Θεσσαλονίκη, ✉ pkoukoul@agro.auth.gr

Περίληψη

Η αύξηση της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO_2 και οι συνεπαγόμενες αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες θα έχουν μια σημαντική επίδραση στην γεωργική παραγωγή. Στην παρούσα εργασία έγινε πρόβλεψη της απόδοσης του βαμβακιού στην περιοχή του Ν. Χαλκιδικής με το μοντέλο προσομοίωσης ανάπτυξης καλλιεργειών CropSyst για τα σενάρια Β1 (ευνοϊκό) και SRES A2 (δυσμενές) τα οποία προέκυψαν από το Μοντέλο Γενικής Κυκλοφορίας CGCM3.1/T63 για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 για δυο διαφορετικές ημερομηνίες σποράς. Η πρωϊμότερη ημερομηνία σποράς είναι ευνοϊκότερη για τη φυτική παραγωγή και μπορεί να θεωρηθεί ως μέσο προσαρμογής στις αρνητικές επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στην απόδοση για το μέλλον.

Λέξεις κλειδιά: κλιματική αλλαγή, CropSyst, απόδοση βαμβακιού

IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON COTTON YIELD USING CropSyst CROP SIMULATION MODEL

P. Koukouli✉, P. Georgiou
Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Department of Hydraulics, Soil science and Agricultural engineering, 54124, Thessaloniki, ✉ pkoukoul@agro.auth.gr

Abstract

Due to the atmospheric CO_2 concentration increase and the climate condition changes, the crop production is expected to be influenced. In the present paper, cotton yield was predicted using CropSyst - a cropping systems simulation model - in Chalkidiki area under the emission scenarios B1 (optimistic) and SRES A2 (pessimistic) from the General Circulation Model CGCM3.1/T63 for the climate change periods 2020-2050 and 2070-2100, for two planting dates. Earlier planting date seems to be more favorable for crop production and could serve as an adaptation strategy to the impacts of climate change on yield.

Key words: climate change, CropSyst, cotton yield

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή θεωρείται από τα σημαντικότερα προβλήματα του σύγχρονου πολιτισμού σε παγκόσμιο επίπεδο και ο έλεγχός της παραμένει μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει σήμερα η ανθρωπότητα. Η θέρμανση του πλανήτη αποτελεί πλέον αδιαμφισβήτητο γεγονός και επιβεβαιώνεται από παρατηρήσεις αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του αέρα και των ωκεανών, του εκτεταμένου λιωσίματος χιονιού και πάγου και της ανόδου της μέσης στάθμης της θάλασσας σε παγκόσμιο επίπεδο (IPCC, 2007). Αναγνωρίζεται ευρέως ότι η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας των τελευταίων πενήντα ετών οφείλεται, κατά μεγάλο μέρος, σε ανθρωπογενείς επιδράσεις λόγω της αύξησης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και κυρίως του CO_2. Σύμφωνα με την Πέμπτη Έκθεση Αξιολόγησης της «Διακυβερνητικής Επιτροπής για την κλιματική αλλαγή» (IPCC, 2013) η μέση παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας ήταν 0.85^{o}C για την περίοδο 1880 έως 2012 και η ανοδική της τάση θα συνεχιστεί στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη και κατά τον 21° αιώνα, με τη μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας να αναμένεται να αυξηθεί κατά 1.8-4°C (IPCC, 2007). Για τον ελλαδικό χώρο προκύπτει ότι κατά το τέλος του 21^{ου} αιώνα η θερμοκρασία του αέρα θα αυξηθεί μεταξύ 3.0^{o}C και 4.5^{o}C ενώ η βροχόπτωση θα μειωθεί μεταξύ 5% και 19% περίπου (Τράπεζα της Ελλάδος, 2011).

Η παγκόσμια εγρήγορση σχετικά με την κλιματική αλλαγή εντείνεται χρόνο με το χρόνο καθώς οι ενδείξεις για τη σοβαρότητα των επιπτώσεών της γίνονται όλο και πιο ανησυχητικές ιδιαίτερα για το γεωργικό τομέα ο οποίος θα υποστεί τις πλέον έντονες επιπτώσεις του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, η αλλαγή του κλίματος αναμένεται να αλλάξει σημαντικά τις συνθήκες της γεωργικής παραγωγής, με σημαντικές επιπτώσεις για την παγκόσμια ασφάλεια τροφίμων. Όλες οι μελέτες συγκλίνουν ότι τα επόμενα χρόνια η περιοχή της Νότιας Ευρώπης και ειδικότερα της Μεσογείου θα είναι ευάλωτη αναφορικά με τη φυτική παραγωγή (IPCC, 2013), γεγονός με εξαιρετική σημασία για την Ελλάδα.

Στην παρούσα εργασία έγινε εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στην απόδοση του βαμβακιού για τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100, στην περιοχή του Ν. Χαλκιδικής με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης ανάπτυξης καλλιεργειών CropSyst. Για την επίτευξη του στόχου αυτού λήφθηκαν δεδομένα από το Μοντέλο Γενικής Κυκλοφορίας (GCM) CGCM3.1/T63 (Flato et al., 2000) για δύο σενάρια ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (SRES B1 και A2) για δύο περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 και την περίοδο αναφοράς (1977-1997). Με βάση τα δεδομένα που λήφθηκαν από το CGCM3.1/T63, έγινε υποβιβασμός κλίμακας των κλιματικών παραμέτρων με τη γεννήτρια καιρού GlimGen για την παραγωγή συνθετικών σειρών, οι οποίες αποτελούν τις μελλοντικές εκτιμήσεις των κλιματικών παραμέτρων. Οι συνθετικές σειρές των κλιματικών παραμέτρων που προσομοιώθηκαν από το ClimGen χρησιμοποιήθηκαν από το μοντέλο ανάπτυξης καλλιεργειών CropSyst για την πρόβλεψη της απόδοσης του βαμβακιού. Η εκτίμηση της πιθανής επίδρασης των κλιματικών μεταβολών έγινε με την παραδοχή ότι οι διάφοροι καλλιεργητικοί χειρισμοί καθώς και η ποσότητα και η συχνότητα αρδεύσεων και λιπάνσεων θα παραμείνουν οι ίδιες συγκριτικά με τα σημερινά επίπεδα. Έγινε σύγκριση των αποδόσεων της χρονικής περιόδου 1977-1997 (περίοδος αναφοράς) με εκείνες των δυο σεναρίων SRES B1 και A2 των περιόδων κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 για δεδομένη ημερομηνία σποράς (21/04). Τέλος, οι αποδόσεις για τη συγκεκριμένη ημερομηνία σποράς συγκρίθηκαν με εκείνες για πρωϊμότερη σπορά (21/03) καθώς η προβλεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας στο μέλλον αναμένεται να πρωϊμίσει τις καλλιέργειες σε σχέση με το σημερινό κλίμα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Σενάρια κλιματικής αλλαγής

Προκειμένου να αναπτυχθούν ποσοτικές εκτιμήσεις των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος στις διαφορετικές ανθρώπινες δραστηριότητες και τα φυσικά συστήματα δημιουργήθηκαν τα **σενάρια εκπομπών SRES (Special Report on Emissions Scenarios)** (IPCC, 2000). Τα σενάρια SRES είναι εναλλακτικές εικόνες για το πώς μπορεί να εξελιχθεί το μέλλον και αποτελούν κατάλληλο εργαλείο για την ανάλυση της αλλαγής του κλίματος, συμπεριλαμβανομένων της αξιολόγησης των επιδράσεων, της προσαρμογής και του μετριασμού των επιπτώσεων (IPCC, 2000). Η κατασκευή των σεναρίων εκπομπών SRES βασίζεται στην επιστημονική άποψη ότι οι αλλαγές που έχουν παρατηρηθεί στο κλίμα, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, οφείλονται στην αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και κυρίως του CO_2. Τα σενάρια αυτά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα των αιτιών των μελλοντικών εκπομπών, όπως οι δημογραφικές αλλαγές, η τεχνολογική εξέλιξη και οι κοινωνικοοικονομικές αλλαγές οι οποίες θα καθορίσουν και κατ' επέκταση την εξέλιξη του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2000).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα σενάρια εκπομπών SRES B1 και A2, εκ των οποίων το πρώτο είναι ένα ήπιο σενάριο ανθρωπογενών εκπομπών και το δεύτερο είναι το ακραίο και δυσμενέστερο σενάριο (IPCC, 2000; 2007). Σύμφωνα με το SRES B1, σε παγκόσμιο επίπεδο σημειώνεται μείωση της χρήσης των συμβατικών πηγών ενέργειας και στροφή προς ανανεώσιμες πηγές και γενικά προς δραστηριότητες μειωμένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε αντίθεση με το SRES A2, όπου αυξάνεται η συσσώρευση των αερίων του θερμοκηπίου λόγω της χρήσης συμβατικών πηγών ενέργειας. Η αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα θα φθάσει το 2100 στο SRES B1 τα 550 ppm και στο SRES A2 τα 850 ppm.

Τα σενάρια εκπομπών SRES χρησιμοποιούνται στα **Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (General Circulation Models-GCMs)** τα οποία αποτελούν το κυριότερο εργαλείο στην πρόβλεψη του καιρού, στην κατανόηση του κλίματος και στην πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής. Τα GCMs, ένα είδος κλιματικών μοντέλων, είναι αριθμητικά μοντέλα που προσομοιώνουν το παγκόσμιο κλίμα υπολογίζοντας την εξελικτική πορεία της ατμόσφαιρας και στις τρεις διαστάσεις βασιζόμενα στους νόμους διατήρησης της ατμοσφαιρικής μάζας, της ορμής, της ολικής ενέργειας και της ποσότητας των υδρατμών (IPCC, 2007). Σήμερα, χρησιμοποιούνται τα Συζευγμένα Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (AOGCMs) τα οποία αποτελούν τα τελευταίας γενιάς μοντέλα με υψηλότερη οριζόντια και κάθετη διακριτοποίηση, χρησιμοποιούνται στις εκθέσεις της IPCC και είναι τα μόνα εργαλεία που θα μπορούσαν να παρέχουν λεπτομερείς τοπικές προβλέψεις της μελλοντικής κλιματικής αλλαγής.

Το μοντέλο CGCM3.1 αποτελεί ένα Συζευγμένο Ατμοσφαιρικό - Ωκεάνιο Μοντέλο Γενικής Κυκλοφορίας (AOGCM) τρίτης γενιάς και έχει δημιουργηθεί από το «Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis» (CCCma) (Flato et al., 2000). Το μοντέλο CGCM3.1 έχει δύο διαφορετικές εκδόσεις, την T47 και την T63 (IPCC, 2007). Η έκδοση T63 έχει κάνναβο για την ατμόσφαιρα με χωρική διακριτοποίηση 2.8^{o} και 31 κάθετα επίπεδα. Η ωκεάνια διακριτοποίηση είναι 1.4^{o} σε γεωγραφικό μήκος και 0.94^{o} σε γεωγραφικό πλάτος.

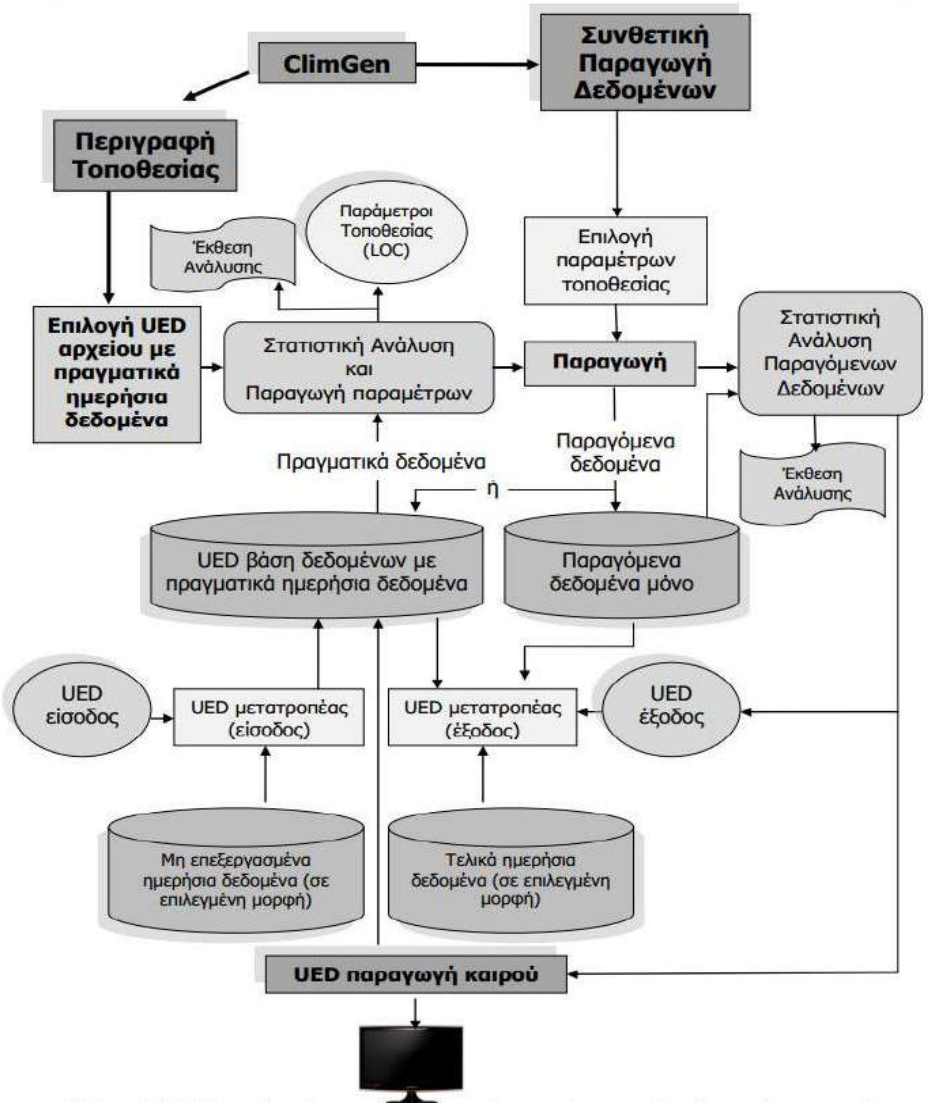
2.2 Γεννήτρια καιρού ClimGen

Τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας είναι αξιόπιστα σε παγκόσμια κλίμακα ενώ αποτυγχάνουν σε τοπική κλίμακα. Ένας από τους κυριότερους λόγους αποτυχίας των GCMs στην προσομοίωση και περιγραφή του κλίματος σε τοπική κλίμακα είναι ότι η δεδομένη

χωρική ανάλυσή τους (περίπου 280x280 km) δεν «ξεχωρίζει» την πολύπλοκη ορεογραφία μιας περιοχής. Οι αυξανόμενες, όμως, ανάγκες για την ανάπτυξη αξιόπιστων σεναρίων για το τοπικό κλίμα, με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση, ώθησε τους ερευνητές στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για την επίλυση του προβλήματος των αδυναμιών των GCMs. Έτσι, δημιουργήθηκαν και αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας (Downscaling Methods), οι οποίες αποτελούν μια μετάβαση από τη μεγάλη κλίμακα των GCMs σε μικρότερη τοπική κλίμακα. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως δύο μέθοδοι υποβιβασμού: **(1)** ο Δυναμικός υποβιβασμός κλίμακας ή Μοντέλα Περιοχικής-Τοπικής Κλίμακας, στον οποίο ένα Μοντέλο Τοπικής Κλίμακας (RCM) εμφυτεύεται μέσα σε ένα GCM (IPCC, 2001) και **(2)** ο Εμπειρικός-Στατιστικός, ο οποίος υιοθετεί ιστορικές εμπειρικές σχέσεις για τη μετάβαση από τη μεγάλη στη μικρή κλίμακα. Στην κατηγορία των στατιστικών μεθόδων ανήκουν οι εμπειρικές συναρτήσεις μετάβασης, η συνοπτική προσέγγιση και οι γεννήτριες καιρού (Γεωργίου κ.άλ., 2012; Κουκούλη, 2014; Κουκούλη και Γεωργίου, 2015) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Οι **γεννήτριες καιρού (Weather Generators)** αποτελούν στατιστικά μοντέλα για τη στοχαστική προσομοίωση και παραγωγή συνθετικών σειρών κλιματικών παραμέτρων (Γεωργίου, 2004; Georgiou and Papamichail, 2008) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα ανάπτυξης των καλλιεργειών έτσι ώστε να προβλέψουν τις γεωργικές αποδόσεις και στη διαχείριση της επικινδυνότητας που σχετίζεται με την παραλλακτικότητα του κλίματος.

Η γεννήτρια καιρού ClimGen (Σχήμα 1) (Stöckle et al., 1999; Nelson, 2002) είναι ένα στοχαστικό μοντέλο με ημερήσιο χρονικό βήμα το οποίο παράγει χρονοσειρές ημερήσιας βροχόπτωσης (Pr), ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας αέρα (T_{max} και T_{min}), ηλιακής ακτινοβολίας (R_s), ατμοσφαιρικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου με παρόμοιες στατιστικές ιδιότητες με αυτές των ιστορικών δεδομένων. Σύμφωνα με τη μέθοδο υποβιβασμού κλίμακας αυτής της κατηγορίας, αφού λήφθηκαν τα δεδομένα για την περίοδο αναφοράς και για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής από το CGCM3.1/T63, για τις διάφορες κλιματικές παραμέτρους, υπολογίσθηκε η μεταβολή που επέρχεται ανάμεσα στην περίοδο αναφοράς και την περίοδο της κλιματικής αλλαγής. Στη συνέχεια με βάση αυτή τη μεταβολή, διαταράχθηκε η ιστορική σειρά των δεδομένων της υπό μελέτη περιοχής. Η διαταραγμένη πλέον ιστορική σειρά χρησιμοποιήθηκε από τη γεννήτρια καιρού GlimGen για την παραγωγή συνθετικών σειρών, οι οποίες διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής σειράς μετά τη διατάραξή τους και αποτυπώνουν τη μελλοντική μεταβολή των διαφόρων κλιματικών παραμέτρων.



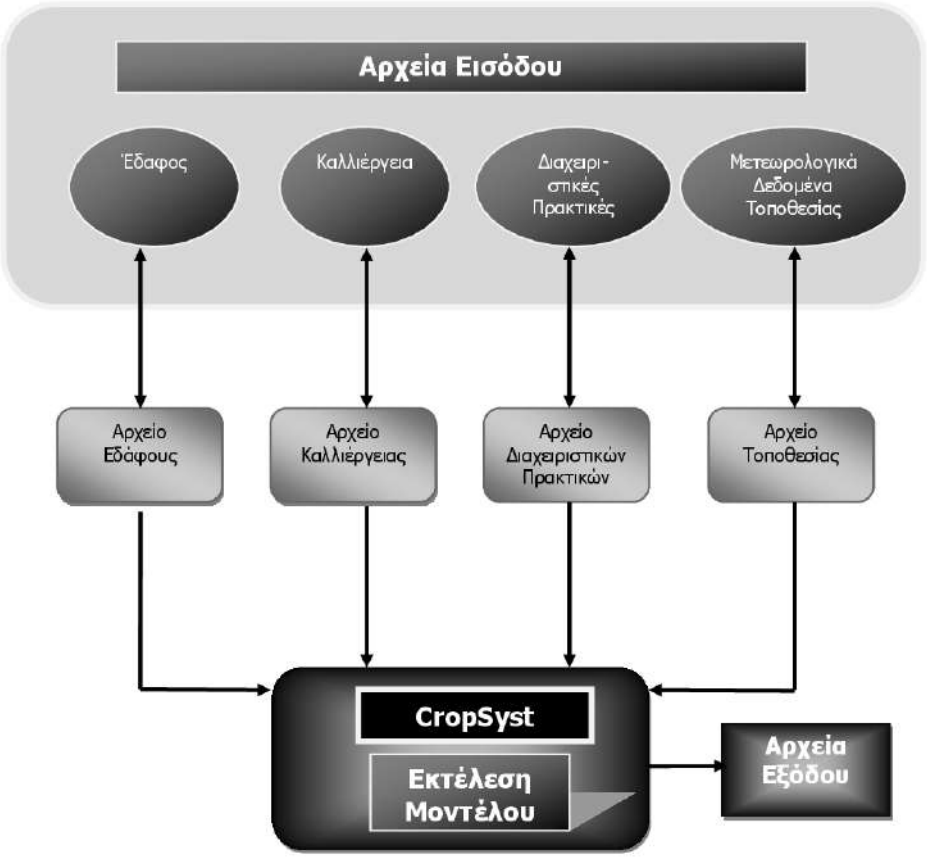
Σχήμα 1. Στάδια συνθετικής παραγωγής κλιματικών παραμέτρων κατά τη λειτουργία της γεννήτριας καιρού ClimGen.

2.3 Μοντέλο προσομοίωσης ανάπτυξης καλλιεργειών CropSyst

Δεδομένου ότι η κλιματική αλλαγή ασχολείται με μελλοντικά θέματα, η χρήση των μοντέλων προσομοίωσης ανάπτυξης των καλλιεργειών αποτελεί μια επιστημονική προσέγγιση για τη διερεύνηση των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος στη γεωργική παραγωγή, στη διαχείριση του αρδευτικού νερού και στην παγκόσμια ασφάλεια των τροφίμων. Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί στον τομέα της Γεωργίας για τη μελέτη της ανάπτυξης των καλλιεργειών, είναι μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα εντός του φυτού καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του φυτού και του περιβάλλοντος. Τα μοντέλα προσομοίωσης ανάπτυξης των καλλιεργειών αποτελούν μια ομάδα μοντέλων τα οποία έχουν σχεδιαστεί με σκοπό να μιμηθούν (προσομοιώσουν) τη συμπεριφορά ενός συστήματος. Τα μοντέλα αυτά συνήθως δίνουν τη δυνατότητα επιλογής διαχειριστικών πρακτικών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να διερευνηθεί ένα μεγάλο εύρος πρακτικών διαχείρισης.

Το **CropSyst (Cropping Systems Simulation Model)** (Stöckle and Nelson, 1999) είναι ένα ντετερμινιστικό μοντέλο προσομοίωσης ανάπτυξης των καλλιεργειών με ημερήσιο χρονικό βήμα και αναπτύχθηκε για να χρησιμοποιηθεί ως αναλυτικό εργαλείο για τη μελέτη της

επίδρασης του κλίματος, του εδάφους και των πρακτικών διαχείρισης στην απόδοση των καλλιεργειών αλλά και στο περιβάλλον. Το παραπάνω μοντέλο προσομοιώνει το ισοζύγιο εδάφους-νερού, το ισοζύγιο αζώτου στο σύστημα έδαφος-φυτό, την ανάπτυξη της υπέργειας φυτομάζας και του ριζικού συστήματος, τη φαινολογία της καλλιέργειας, την παραγωγή ξηρής βιομάζας, την απόδοση, την παραγωγή και την αποσύνθεση των φυτικών υπολειμμάτων και τη διάβρωση του εδάφους. Τα κύρια δεδομένα εισόδου είναι ημερήσια κλιματικά δεδομένα (βροχόπτωση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, μέγιστη και ελάχιστη σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία και ταχύτητα ανέμου). Για την εκτέλεση του CropSyst απαιτούνται τέσσερα αρχεία εισόδου (Σχήμα 2): τα αρχεία των μετεωρολογικών δεδομένων της τοποθεσίας, του εδάφους, της καλλιέργειας και των πρακτικών διαχείρισης (Stöckle and Nelson, 1999).



Σχήμα 2. Διαγραμματική απεικόνιση της προσομοίωσης της ανάπτυξης των καλλιεργειών από το μοντέλο CropSyst.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η περιοχή μελέτης αφορά την περιοχή του Αγίου Μάμα του Ν. Χαλκιδικής καθώς λειτουργεί μετεωρολογικός σταθμός με πλήρη μετεωρολογικά δεδομένα σε ημερήσιο χρονικό βήμα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των σεναρίων κλιματικής αλλαγής και την προσομοίωση της απόδοσης του βαμβακιού από το μοντέλο CropSyst.

Χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια δεδομένα από το CGCM3.1/T63 για την περίοδο αναφοράς (1977-1997) και για τις δύο περιόδους κλιματικής αλλαγής (2020-2050 και 2070-2100), για τα δύο σενάρια ανθρωπογενών εκπομπών SRES B1 και A2, σε σημεία (grid) που ήταν κοντύτερα προς την περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα, ο σταθμός του Αγίου Μάμα έχει συντεταγμένες 40°15’ N και 23°20’ E ενώ οι συντεταγμένες από το CGCM3.1/T63 είναι

40°46’ N και 22°50’ E. Οι κλιματικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν τη βροχόπτωση, τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, τη μέγιστη και ελάχιστη σχετική υγρασία και την ταχύτητα ανέμου. Η διαταραγμένη ιστορική σειρά των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε από τη γεννήτρια καιρού GlimGen για την παραγωγή 100 συνθετικών σειρών και στη συνέχεια υπολογίστηκε μια μέση συνθετική σειρά για κάθε κλιματική παράμετρο για το σταθμό του Αγίου Μάμα. Για την προσομοίωση της απόδοσης του βαμβακιού από το μοντέλο CropSyst χρησιμοποιήθηκαν εδαφολογικά δεδομένα και δεδομένα σχετικά με τις καλλιεργητικές πρακτικές του βαμβακιού (ημερομηνία σποράς, αρδεύσεις, λίπανση, συγκομιδή) από ερευνητικές εργασίες και βιβλιογραφικές πηγές. Ως ημερομηνία σποράς επιλέχθηκε η 21/04 και ως ημερομηνία συγκομιδής η 25/9. Για την διερεύνηση της πρωϊμότερης ημερομηνίας σποράς ως μέτρο προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή έγινε προσομοίωση της απόδοσης από το μοντέλο για ημερομηνία σποράς 21/3 και ημερομηνία συγκομιδής 25/8. Η εφαρμογή της άρδευσης έγινε σε 8 δόσεις και η συνολική ποσότητα νερού που εφαρμόσθηκε ήταν 473 mm.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων (Πίνακας 1) προκύπτει ότι η ετήσια βροχόπτωση θα μειωθεί από 18% έως 19% σύμφωνα με το SRES B1 και από 24% έως 43% σύμφωνα με το SRES A2 κατά τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100. Η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα αναμένεται να αυξηθεί κατά 1.74^{o}C-2.46^{o}C (SRES B1) και 2.12^{o}C-5.92^{o}C (SRES A2) κατά τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100. Η ελάχιστη θερμοκρασία θα εμφανίσει αύξηση που κυμαίνεται μεταξύ 1.74^{o}C-2.22^{o}C (SRES B1) και 1.88^{o}C-5.01^{o}C (SRES A2) κατά τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή προβλέπεται να αυξηθεί στο μέλλον με τη μεγαλύτερη αύξηση να παρατηρείται κατά τη χρονική περίοδο 2070-2100 (11% έως 27%) σε σχέση με την περίοδο 2020-2050 (3%-12%) με βάση τα SRES B1 και A2, αντίστοιχα. Οι αναμενόμενες μεταβολές των παραπάνω κλιματικών παραμέτρων και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής θα είναι μικρότερες για την πρωϊμότερη ημερομηνία σποράς (21/3). Η μείωση της ετήσιας βροχόπτωσης θα είναι 2% έως 4% για το SRES B1 και 12% έως 27% για το SRES A2 για τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100, αντίστοιχα. Η μέγιστη θερμοκρασία θα εμφανίσει μικρή μείωση κατά την περίοδο 2020-2050 ενώ αναμένεται να αυξηθεί (0.11^{o}C έως 3.43^{o}C) κατά την περίοδο 2070-2100. Η ελάχιστη θερμοκρασία προβλέπεται να αυξηθεί μεταξύ 0.09^{o}C και 0.51^{o}C (SRES B1) και 0.20^{o}C έως 3.22^{o}C (SRES A2) κατά τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100. Στην περίπτωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, η πρωϊμότερη ημερομηνία σποράς έχει ως αποτέλεσμα την αύξησή της κατά 5% για το SRES B1 κατά το 2070-2100 και 6% έως 20% για το SRES A2 κατά το 2020-2050 και 2070-2100, ενώ αναμένεται μικρή μείωση σύμφωνα με το SRES B1 για το 2020-2050.

Πίνακας 1. Τιμές της βροχόπτωσης (Pr), της μέγιστης (T_{max}) και ελάχιστης (T_{min}) θερμοκρασίας και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (ET_p) για τα SRES B1 και A2 για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 για τις δυο ημερομηνίες σποράς.

		SRES B1				**SRES A2**			
	Ιστορικά	**2020-2050**		**2070-2100**		**2020-2050**		**2070-2100**	
		21/4	21/3	21/4	21/3	21/4	21/3	21/4	21/3
Pr (mm)	**132**	**109**	**130**	**108**	**116**	**101**	**116**	**76**	**96**
		-18%	-2%	-19%	-12%	-24%	-12%	-43%	-27%
T_{max} (^{o}C)	**25.87**	**27.61**	**25.22**	**28.33**	**25.98**	**27.99**	**25.77**	**31.79**	**29.30**
		1.74	-0.65	2.46	0.11	2.12	-0.11	5.92	3.43
T_{min} (^{o}C)	**15.45**	**17.19**	**15.55**	**17.67**	**15.96**	**17.33**	**15.65**	**20.47**	**18.68**

		1.74	0.09	2.22	0.51	1.88	0.20	5.01	3.22
ET_p (mm)	**614**	**631**	**597**	**684**	**644**	**685**	**651**	**781**	**735**
		3%	-3%	11%	5%	12%	6%	27%	20%

Στον Πίνακα 2 δίνονται οι μέσες τιμές των αποδόσεων του βαμβακιού της περιόδου αναφοράς 1977-1997 και των περιόδων κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 σύμφωνα με τα σενάρια SRES B1 και A2 αντίστοιχα, για τις δύο διαφορετικές ημερομηνίες σποράς (21/04 και 21/03). Από την εφαρμογή του μοντέλου CropSyst διατηρώντας σταθερή την άρδευση, προέκυψε ότι με βάση το SRES B1 η παραγωγή βαμβακιού θα αυξηθεί (7%) κατά τη χρονική περίοδο 2020-2050 και θα μειωθεί (13%) κατά τη χρονική περίοδο 2070-2100 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Το παραπάνω μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι με βάση το σενάριο SRES B1 για την περίοδο 2020-2050 αναμένεται μικρότερη μείωση της βροχόπτωσης και μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας και της εξατμισοδιαπνοής. Σύμφωνα με το SRES A2 η απόδοση θα υποστεί μειώσεις (11% έως 41%) και κατά τις δύο περιόδους κλιματικής αλλαγής. Η μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης βάσει του σεναρίου εκπομπών SRES A2 κατά την περίοδο 2070-2100 οφείλεται στις αρνητικές επιδράσεις της μεγαλύτερης αύξησης της θερμοκρασίας και της εξατμισοδιαπνοής σε σχέση με την περίοδο 2020-2050. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της εξατμισοδιαπνοής και των δεικτών καταπόνησης της καλλιέργειας στο νερό και στη θερμοκρασία.

Πίνακας 2. Τιμές τις μέσης απόδοσης του βαμβακιού για τα SRES B1 και A2 για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς για τις δυο ημερομηνίες σποράς.

Απόδοση βαμβακιού (kg/στρ.)								
	SRES B1				**SRES A2**			
Ιστορικά	**2020-2050**		**2070-2100**		**2020-2050**		**2070-2100**	
	21/4	21/3	21/4	21/3	21/4	21/3	21/4	21/3
349	**375**	**415**	**304**	**337**	**311**	**343**	**208**	**245**
	7%	19%	-13%	-4%	-11%	-2%	-41%	-30%

Η απόδοση του βαμβακιού θα αυξηθεί περισσότερο (19% έναντι 7%) στο SRES B1 κατά τη χρονική περίοδο 2020-2050 και θα εμφανίσει μικρότερη μείωση (4% έναντι 13%) κατά την περίοδο 2070-2100 με την πρωίμιση της σποράς. Η αναμενόμενη μείωση της απόδοσης (SRES A2) κατά τις δύο περιόδους κλιματικής αλλαγής είναι μικρότερη (2%-30% έναντι 11%-41%) για πρωϊμότερη ημερομηνία σποράς όπου παρατηρείται μικρότερη μείωση της βροχόπτωσης. Το παραπάνω οφείλεται στο γεγονός ότι, με την πρωϊμότερη σπορά, τα φυτά αποφεύγουν τις αρνητικές επιπτώσεις των πολύ υψηλών θερμοκρασιών κατά την καλλιεργητική περίοδο. Επίσης, η πρώιμη ημερομηνία σποράς έχει το πλεονέκτημα να χρησιμοποιεί την πρώιμη βροχόπτωση η οποία οδηγεί σε ζωηρή βλαστική αύξηση κατά τη διάρκεια του σταδίου της ενεργής αύξησης. Το παραπάνω θα μπορούσε να οδηγήσει σε αυξημένη φυλλική επιφάνεια για φωτοσύνθεση. Επομένως, η πρωϊμότερη σπορά στο μέλλον μπορεί να αποτελέσει μέσο προσαρμογής για να αποτρέψει τις αρνητικές επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στην απόδοση.

Η μελλοντική αύξηση της θερμοκρασίας θα έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της διάρκειας των φαινολογικών σταδίων των καλλιεργειών και την πρωίμισή τους σε σχέση με το σημερινό κλίμα. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3, η άνθηση και η ωρίμανση θα

πραγματοποιηθούν νωρίτερα με αποτέλεσμα η καλλιέργεια να μην έχει αρκετή ενέργεια για την πλήρη ανάπτυξή της, γεγονός που συνεπάγεται τη χαμηλότερη απόδοση. Η μεγαλύτερη πρωίμιση στην καλλιέργεια του βαμβακιού παρατηρείται για το SRES A2 κατά την περίοδο 2070-2100 όπου παρατηρείται και η μεγαλύτερη μείωση στην απόδοση.

Πίνακας 3. Μέσες ημερομηνίες για τα φαινολογικά στάδια του βαμβακιού για την περίοδο αναφοράς και για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100.

Μέση Ημερομηνία Φαινολογικών Σταδίων Βαμβακιού					
Στάδιο Ανάπτυξης	**Ιστορικά**	**SRES B1**		**SRES A2**	
		2020-2050	**2070-2100**	**2020-2050**	**2070-2100**
Φύτρωμα	28 Απρ.	27 Απρ.	27 Απρ.	27 Απρ.	26 Απρ.
Άνθηση	9 Ιουν.	7 Ιουν.	6 Ιουν.	6 Ιουν.	3 Ιουν.
Ωριμότητα	27 Ιουλ.	25 Ιουλ.	23 Ιουλ.	24 Ιουλ.	21 Ιουλ.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην απόδοση του βαμβακιού κατά τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100 στην περιοχή του Αγίου Μάμα Χαλκιδικής. Η πρόβλεψη της απόδοσης του βαμβακιού έγινε με το μοντέλο προσομοίωσης ανάπτυξης καλλιεργειών CropSyst με την παραδοχή ότι οι διάφοροι καλλιεργητικοί χειρισμοί καθώς και η ποσότητα και η συχνότητα αρδεύσεων και λιπάνσεων θα παραμείνουν οι ίδιες συγκριτικά με τα σημερινά επίπεδα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αναμένεται μείωση των βροχοπτώσεων και αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα και της εξατμισοδιαπνοής για τις περιόδους κλιματικής αλλαγής 2020-2050 και 2070-2100 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Προέκυψε ότι, μεταξύ των δύο ακραίων σεναρίων, το SRES B1 είναι ευνοϊκό για τη φυτική παραγωγή κατά τη χρονική περίοδο 2020-2050. Αντιθέτως, η απόδοση του βαμβακιού θα μειωθεί κατά τη χρονική περίοδο 2070-2100 και για τα δύο σενάρια εκπομπών SRES εξαιτίας της μεγαλύτερης μείωσης της βροχόπτωσης και αύξησης της θερμοκρασίας. Η μελλοντική μείωση της απόδοσης είναι μικρότερη για πρωϊμότερη ημερομηνία σποράς και μπορεί να θεωρηθεί ως μέσο προσαρμογής στις αρνητικές επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στην απόδοση για το μέλλον.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γεωργίου Π.Ε., 2004. *Βελτιστοποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων για αρδευτικούς σκοπούς.* Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 341 σελ.

Γεωργίου, Π.Ε., Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Λιάπης, Α.Γ., 2012. *Επίδραση των κλιματικών αλλαγών στις ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών και στην οικονομική αξία του αρδευτικού νερού*. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ & ΕΕΔΥΠ, Πάτρα, σελ. 278-290.

Flato, G.M., Boer, G.J., Lee, W.G., McFarlane, N.A., Ramsden, D., Reader, M.C. and Weaver, A.J., 2000. *The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis global coupled model and its climate.* Climate Dynamics, 16: 451-467.

Georgiou, P.E. and Papamichail, D.M., 2008. *Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions.* Irrigation Science, 26(6): 487-504.

IPCC, 2000. *Special Report: Emissions scenarios*. In: N. Nakićenović and R. Swart (eds), A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK, 570 pp.

IPCC, 2001. *Climate change 2001: The scientific basis*. In: J.T. Houghton, Y. Ding, D.J Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Jonson (eds), Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.

IPCC, 2007. *Climate change 2007: Synthesis report*. In: R.K. Pachauri and A. Reisinger (eds), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC, 2013. *Climate change 2013: The physical science basis*. In: T.F. Stocker et al., (eds), Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Κουκούλη Π.Γ., 2014. *Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις στις ανάγκες σε νερό, στην απόδοση των καλλιεργειών και στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 312 σελ.

Κουκούλη, Π.Γ. και Γεωργίου, Π.Ε., 2015. *Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στις ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών και στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων.* Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Ένωση Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος, Θεσσαλονίκη, σελ 51-58.

Nelson, R., 2002. *Description of ClimGen: A weather generation program*. Available from http://www.bsyse.wsu.edu/climgen/documentation/description.htm.

Stöckle, C.O. and Nelson, R.L., 1999. *CropSyst user's manual*. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA.

Stöckle, C.O., Campbell G.S. and Nelson, R., 1999. *ClimGen Manual*. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA.

Τράπεζα της Ελλάδος, 2011. *Σενάρια ανθρωπογενούς παρέμβασης στην κλιματική αλλαγή και τα προγράμματα Prudence και Ensembles*. Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγή, 12 σελ.

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΜΝΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΩΝ

Δ. Παπαμιχαήλ[1], Β. Αντωνόπουλος[1], Π. Γεωργίου[1]✉, Χ. Δουλγέρης[2] & Δ. Παπαδήμος[2]

[1]Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη, ✉ pantaz@agro.auth.gr

[2]Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας, Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων Υγροτόπων (ΕΚΒΥ), 14ο χλμ. Θεσσαλονίκης-Μηχανιώνας, 57001, Θέρμη

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, ο καθορισμός της ελάχιστης στάθμης και της διακύμανσής της αφορά τις λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη και γίνεται με την εφαρμογή της μεθόδου των εκατοστημορίων (Οδηγία 40D-8.624), που βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα στάθμης των παραπάνω λιμνών. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται τα παρακάτω επίπεδα στάθμης των λιμνών: (α) Υψηλή Συνιστώμενη Στάθμη Λίμνης, (β) Υψηλή Ελάχιστη Στάθμη Λίμνης, (γ) Ελάχιστη Στάθμη Λίμνης και (δ) Χαμηλή Συνιστώμενη Στάθμη Λίμνης. Τα διάφορα επίπεδα στάθμης των λιμνών που υπολογίζονται έχουν ως σκοπό την εξασφάλιση των συνθηκών για τη διατήρηση μιας υγιούς και αειφόρου κατάστασης των λιμνών και την υιοθέτηση στρατηγικών διαχείρισης του νερού των λιμνών ούτως ώστε αφενός να επιτευχθεί η επαναφορά της στάθμης στο επιθυμητό επίπεδο, στο συντομότερο χρόνο και αφετέρου να εμποδισθεί η πτώση της στάθμης κάτω από ένα καθορισμένο επίπεδο.

Λέξεις κλειδιά: ελάχιστη στάθμη, εκατοστημόρια, Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα, Ζάζαρη

DETERMINATION OF THE MINIMUM WATER LEVEL AND ITS VARIATION OF LAKES BY APPLYING THE PERCENTILES METHOD

D. Papamichail[1], V. Antonopoulos[1], P. Georgiou[1]✉, C. Doulgeris[2] & D. Papadimos[2]

[1]Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, A.U.Th., 54124 Thessaloniki, ✉ pantaz@agro.auth.gr

[2]Greek Biotope/Wetland Centre, 14th km Thessaloniki-Thermi, 57001 Thermi, Greece

Abstract

In the present study, the determination of the minimum water level and its variation concerns the Vegoritida, Petron, Cheimaditida and Zazari lakes and is carried out by applying the Percentiles method (40D-8.624 Guidance and Minimum Levels for Lakes Directive), based on historic levels of the above lakes. In particular, the following levels of lakes are calculated: (a) High Guidance Lake Level (HGLL), (b) High Minimum Lake Level (HMLL), (c) Minimum Lake Level (MLL) and (d) Low Guidance Lake Level (LGLL). The various levels of the lakes that are calculated are designed to ensure the conditions for maintaining a healthy and sustainable status of the lakes and the adoption of lakes water management strategies so as to achieve a return to the desired level in the shortest time and, on the other hand, to prevent the level from falling below a certain level.

Key words: minimum water level, percentiles method, Vegoritida, Petron, Cheimaditida, Zazari

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές διαδικασίες και λειτουργίες των λιμνών, των ταμιευτήρων και των υγροτόπων, όπως η βιωτή (δηλαδή οι οργανισμοί και οι κοινότητες-ψάρια, φυτά, φύκη) που αναπτύσσονται και διατηρούνται στα παραπάνω υδάτινα συστήματα, η ποιότητα του νερού των συστημάτων, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους, η θερμική στρωμάτωση και τα φερτά υλικά εξαρτώνται από την ελάχιστη στάθμη και την διακύμανσή της. Η ελάχιστη στάθμη μιας λίμνης είναι διαφορετική για κάθε χρήση και αξία της λίμνης. Διαφορετική είναι η ελάχιστη στάθμη που απαιτείται για τη διατήρηση και την ανεμπόδιστη ανάπτυξη της ιχθυοπανίδας, διαφορετική είναι η ελάχιστη στάθμη που αφορά τη διατήρηση και ανάπτυξη των μακροφύτων (καλαμιώνων) που αποτελούν χώρο αναπαραγωγής και ενδιαιτήματος της ορνιθοπανίδας και ιχθυοπανίδας, διαφορετική είναι επίσης η στάθμη για τις διαφορετικές παραγωγικές χρήσεις και δραστηριότητες του νερού των λιμνών όπως η γεωργία, η βιομηχανία, η άντληση πόσιμου νερού και διαφορετική για αισθητικούς σκοπούς, όπως η αποκάλυψη των πρανών, η επίδραση σε παρόχθιες εγκαταστάσεις αναψυχής (όπως πλαζ ή χώρους άθλησης και περιπάτου) και διαφορετική για ποιοτικές και ποσοτικές διαφοροποιήσεις του υδατικού δυναμικού της λίμνης.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων υπάρχει η αναγκαιότητα καθορισμού της ελάχιστης στάθμης και της διακύμανσης αυτής με σκοπό την εξασφάλιση των συνθηκών για τη διατήρηση μιας υγιούς και αειφόρου κατάστασης των λιμνών. Ο καθορισμός της ελάχιστης παροχής των υδατορευμάτων και της ελάχιστης στάθμης νερού σε λίμνες, ταμιευτήρες και υγροτόπους είναι μία σημαντική και δύσκολη διαδικασία και υποχρέωση όλων των κρατών μελών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ και του νόμου εναρμόνισης Ν. 3199/2003 της Ελλάδας.

Μία προσπάθεια καθορισμού των ελάχιστων τιμών παροχής στους μεγάλους ποταμούς και της ελάχιστης στάθμης στις μεγάλες λίμνες της Μακεδονίας και Θράκης και της σύνδεσής τους με τη βιωτή του υγροτόπου και τους κινδύνους από τις ανθρώπινες επεμβάσεις στους ποταμούς και στις λίμνες και στην υδρολογική τους λεκάνη έγινε από τους Γεράκης κ.α. (2007). Πρόσφατα, οι Παπαδήμος κ.α. (2016) εκτίμησαν την ελάχιστη παροχή στους ποταμούς Αλιάκμονα και Αξιό με την εφαρμογή υδροδυναμικών ομοιωμάτων στο Δέλτα των ποταμών και οι Doulgeris et al. (2017) εκτίμησαν την ελάχιστη στάθμη στις λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη με βάση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των λιμνών.

Η ισχυρή εξάρτηση των οικοσυστημάτων των λιμνών από τη διακύμανση της στάθμης, έχει πλήρως επιβεβαιωθεί από πολλούς ερευνητές (Coops and Hosper, 2002; Aroviita and Hamalainen, 2008; Leira and Cantonati, 2008; Punning et al., 2008; Wantzen et al., 2008). Για τον καθορισμό της απαιτούμενης οικολογικής παροχής των υδατορευμάτων έχουν προταθεί πάνω από 200 μέθοδοι (Tharme, 2003; Jain, 2012). Για τον καθορισμό όμως της απαιτούμενης στάθμης των λιμνών έχουν προταθεί ελάχιστες μέθοδοι.

Μεταξύ των μεθόδων που έχουν προταθεί για τον καθορισμό της απαιτούμενης στάθμης των λιμνών είναι η μέθοδος των Εκατοστημορίων (Percentiles) που βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα στάθμης λιμνών (historical lake level method) (Southwest Florida Water Management District (2006) (Rule 40D-8.624 Guidance and Minimum Levels for Lakes); Southwest Florida Water Management District (2007, 2008); Leeper and Ellison, 2015; Liang et al., 2015), η ανάλυση χρονοσειρών μιας μεταβλητής (Antonopoulos et al., 2001; Antonopoulos and Papamichail, 2002), η υδρομορφολογική μέθοδος (lake morphology analysis method) (Shang, 2006, 2008, 2013) που βασίζεται στις καμπύλες στάθμης-επιφάνειας-αποθηκευμένου όγκου νερού της λίμνης, η μέθοδος του ισοζυγίου του νερού

(water balance method) (Papamichail and Antonopoulos, 1998; Αντωνόπουλος και Γιαννιού, 1999), η μέθοδος που βασίζεται σε μοντέλα ποιότητας νερού (water quality modeling), η μέθοδος που βασίζεται στην ανάλυση ενδιαιτημάτων (habitat analysis method) (Alan and Alcazar, 2010), η μέθοδος που βασίζεται σε μοντέλα ειδών περιβάλλοντος (species-environment models) (Ayllon et al., 2012) και η μέθοδος του συνδυασμού των παραπάνω μεθόδων (combination of the above methods) (Xu et al., 2004; Beca, 2008). Οι περισσότερες όμως από τις παραπάνω μεθόδους εξετάζουν μόνο μέρος των παραγόντων που επηρεάζουν το οικοσύστημα των λιμνών.

Στην παρούσα εργασία, για τον καθορισμό των διαφόρων επιπέδων στάθμης των λιμνών Βεγορίτιδα, Πετρών. Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Εκατοστημορίων (Percentiles) που βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα μηνιαίων υψομέτρων στάθμης των παραπάνω λιμνών.

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΩΝ (PERCENTILES)

Σύμφωνα με την Οδηγία 40D-8.624 Guidance and Minimum Levels for Lakes (Southwest Florida Water Management District (2006)) προτείνονται διαδικασίες για τον καθορισμό των διαφόρων επιπέδων στάθμης των λιμνών, με σκοπό την υιοθέτηση στρατηγικών διαχείρισης του νερού των λιμνών ούτως ώστε αφενός να επιτευχθεί η επαναφορά της στάθμης στο επιθυμητό επίπεδο, στο συντομότερο χρόνο και αφετέρου να εμποδισθεί η πτώση της στάθμης κάτω από ένα καθορισμένο επίπεδο. Ταυτόχρονα, η Οδηγία προτείνει την περιοδική επαναξιολόγηση και εφόσον χρειάζεται αναθεώρηση των προτεινόμενων επιπέδων στάθμης λιμνών. Επίσης, η Οδηγία παρέχει πρόσθετη καθοδήγηση για τη θέσπιση διαφόρων επιπέδων στάθμης των λιμνών. Η καθοδήγηση αυτή σχετίζεται με τις περιβαλλοντικές αξίες των λιμνών μεταξύ των οποίων είναι η οικολογία των λιμνών, η αναψυχή, η ιχθυοπανίδα, η άγρια ζωή των οικοτόπων των λιμνών, η πανίδα, η χλωρίδα, τα μακρόφυτα, η απορρόφηση θρεπτικών ουσιών και άλλων ρύπων, τα φορτία ιζημάτων, η ποιότητα του νερού και η πλοήγηση. Μεταξύ των διαδικασιών που προτείνονται από την οδηγία είναι αυτή που βασίζεται στα Εκατοστημόρια (Percentiles) που υπολογίζονται με τη βοήθεια δεδομένων στάθμης, μεγάλης χρονικής περιόδου. Συγκεκριμένα, η Οδηγία προτείνει τον καθορισμό των παρακάτω επιπέδων στάθμης λιμνών:

Η **Υψηλή Συνιστώμενη Στάθμη Λίμνης (High Guidance Lake Level) (HGLL)** προτείνεται ως συνιστώμενο υψηλό επίπεδο στάθμης για την κατασκευή των έργων υποδομής ανάπτυξης της λίμνης και τη λειτουργία των δομών διαχείρισης του νερού της λίμνης. Η Υψηλή Συνιστώμενη Στάθμη λίμνης είναι το επίπεδο της στάθμης της λίμνης που αντιστοιχεί στο P10 Εκατοστημόριο (P10 Percentile) που περιλαμβάνει τα επίπεδα της στάθμης του νερού της λίμνης που αναμένεται να ισούνται ή να το υπερβαίνουν, στο δέκα τοις εκατό του χρόνου (P10), σε δεδομένα στάθμης μεγάλης χρονικής περιόδου. Στην περίπτωση υφιστάμενων κατασκευών ελέγχου της στάθμης του νερού της λίμνης η Υψηλή Συνιστώμενη Στάθμη λίμνης αντιστοιχεί στη στάθμη λειτουργίας των κατασκευών ελέγχου.

Η **Υψηλή Ελάχιστη Στάθμη Λίμνης (High Minimum Lake Level) (HMLL)** είναι το επίπεδο της στάθμης της λίμνης που αντιστοιχεί στο P10 Εκατοστημόριο (P10 Percentile) που περιλαμβάνει τα επίπεδα της στάθμης του νερού της λίμνης που αναμένεται να ισούνται ή να το υπερβαίνουν, στο δέκα τοις εκατό του χρόνου (P10), σε δεδομένα στάθμης μεγάλης χρονικής περιόδου. Στην περίπτωση μη ύπαρξης κατασκευών ελέγχου της στάθμης του νερού της λίμνης, η Υψηλή Συνιστώμενη Στάθμη λίμνης ταυτίζεται με την Υψηλή Ελάχιστη Στάθμη Λίμνης.

Η **Ελάχιστη Στάθμη Λίμνης (Minimum Lake Level) (MLL)** είναι το επίπεδο της στάθμης της λίμνης που αντιστοιχεί στο P50 Εκατοστημόριο (P50 Percentile) που περιλαμβάνει τα επίπεδα της στάθμης του νερού της λίμνης που αναμένεται να ισούνται ή να το υπερβαίνουν, στο πενήντα τοις εκατό του χρόνου (P50), σε δεδομένα στάθμης μεγάλης χρονικής περιόδου.

Η **Χαμηλή Συνιστώμενη Στάθμη Λίμνης (Low Guidance Lake Level) (LGLL)** προτείνεται ως συνιστώμενο ελάχιστο επίπεδο στάθμης για την κατασκευή των έργων υποδομής ανάπτυξης της λίμνης και τη λειτουργία των δομών διαχείρισης του νερού της λίμνης. Η Χαμηλή Συνιστώμενη Στάθμη λίμνης είναι το επίπεδο της στάθμης της λίμνης που αντιστοιχεί στο P90 Εκατοστημόριο (P90 Percentile) που περιλαμβάνει τα επίπεδα της στάθμης του νερού της λίμνης που αναμένεται να ισούνται ή να το υπερβαίνουν, στο ενενήντα τοις εκατό του χρόνου (P90), σε δεδομένα στάθμης μεγάλης χρονικής περιόδου.

Για την εκτίμηση των Εκατοστημορίων (Percentiles), οι n τιμές των X_j υψομέτρων της στάθμης, της αντίστοιχης λίμνης, κατατάσσονται κατά φθίνουσα τάξη μεγέθους. Η εύρεση της τιμής X_j του υψομέτρου της στάθμης της λίμνης που αντιστοιχεί στο (P50 Εκατοστημόριο) (P50 Percentile) και αντιπροσωπεύει την Ελάχιστη Στάθμη Λίμνης, περιλαμβάνει τις τιμές των υψομέτρων της στάθμης του νερού της λίμνης που ισούνται ή υπερβαίνουν την τιμή X_j του υψομέτρου της στάθμης, στο πενήντα τοις εκατό του χρόνου (P50), και για τον υπολογισμό ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Για P50 Εκατοστημόριο: $q = P/100 = 50/100 = 0.5$

2. Αν $n \cdot q$ είναι ακέραιος τότε ο αύξων αριθμός της θέσης των τιμών των υψομέτρων της στάθμης, στη διατεταγμένη κατά φθίνουσα τάξη μεγέθους σειρά, είναι:

$$j_1 = n \cdot q \quad \text{και} \quad j_2 = 1 + n \cdot q$$

3. Η τιμή X_j του υψομέτρου της στάθμης της λίμνης που αντιστοιχεί στο P50 Εκατοστημόριο, είναι:

$$X_j = \frac{X_{j1} + X_{j2}}{2}$$

4. Αν $n \cdot q$ δεν είναι ακέραιος, τότε ο αύξων αριθμός της θέσης της τιμής του υψομέτρου της στάθμης, στη διατεταγμένη κατά φθίνουσα τάξη μεγέθους σειρά, είναι:

$j_1 = j_2 =$ (ο μεγαλύτερος του $n \cdot q$ ακέραιος – δεκαδικό μέρος του $n \cdot q$) + 1

5. Η τιμή X_j του υψομέτρου της στάθμης της λίμνης που αντιστοιχεί στο P50 Εκατοστημόριο, είναι:

$$X_j = X_{j1} = X_{j2}$$

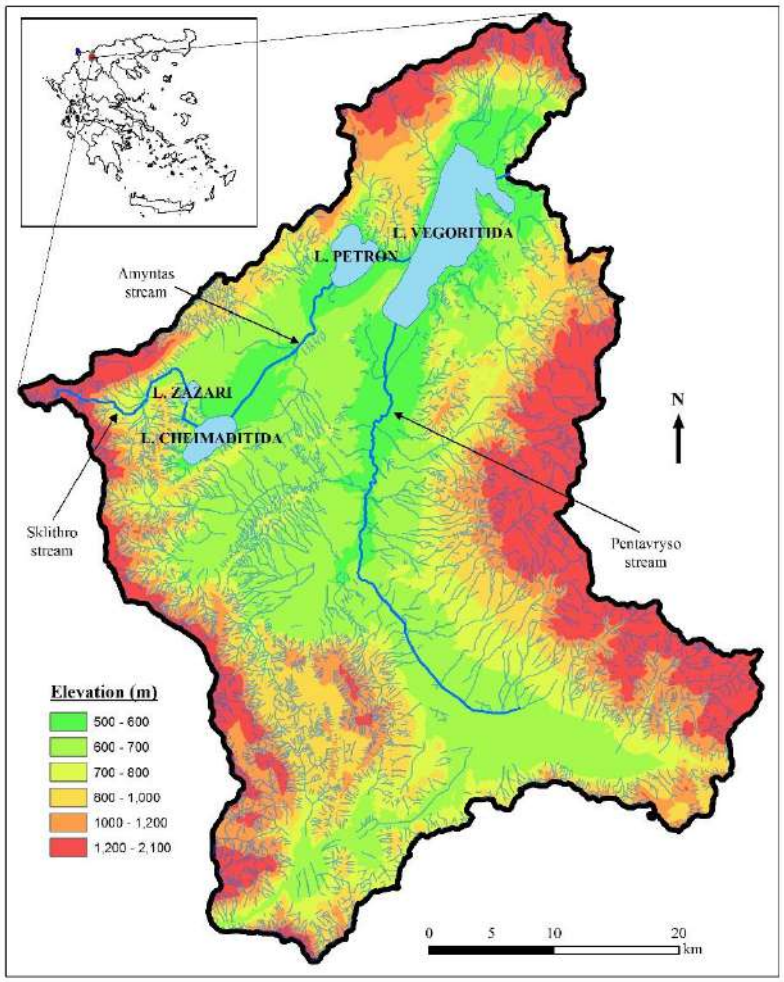
Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για την εύρεση των άλλων επιπέδων στάθμης της λίμνης.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ο καθορισμός των διαφόρων επιπέδων στάθμης, με την εφαρμογή της μεθόδου των Εκατοστημορίων (Percentiles), αφορά τις λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη. Οι παραπάνω λίμνες αποτελούν ένα σύμπλεγμα λιμνών που βρίσκεται στο Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Μακεδονίας, συνδέονται μεταξύ τους και περίσσεια των υδάτων τους μεταφέρεται από τη μία λίμνη στην άλλη (Χάρτης 1). Η υδρολογική λεκάνη απορροής των λιμνών καλύπτει μία έκταση 2145 km^2 και τα κύρια ρεύματα στη λεκάνη απορροής των λιμνών είναι: Σκλήθρο, Αμύντας, Πεντάβρυσος (ή Σουλού) (Χάρτης 1). Τα υδρομορφολογικά

χαρακτηριστικά και το μέγιστο βάθος, για το αντίστοιχο υψόμετρο στάθμης κάθε λίμνης, δίνονται στον Πίνακα 1.

Στην περίπτωση υφιστάμενων κατασκευών ελέγχου της στάθμης του νερού της λίμνης, όπως συμβαίνει με τις λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη, η Υψηλή Συνιστώμενη Στάθμη λίμνης ταυτίζεται με την Υψηλή Ελάχιστη Στάθμη λίμνης και αντιστοιχεί στη στάθμη λειτουργίας των κατασκευών ελέγχου και θεωρείται στην παρούσα εργασία ως Μέγιστη Στάθμη.



Χάρτης 1. Κύρια ρεύματα και υψομετρική κατανομή της υδρολογικής λεκάνης του συμπλέγματος των τεσσάρων λιμνών (Πηγή: Doulgeris et al., 2017)

Πίνακας 1. Υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά και μέγιστο βάθος των λιμνών Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη, για το αντίστοιχο υψόμετρο στάθμης κάθε λίμνης (Πηγή: ΕΚΒΥ, 2016)

Λίμνη	Υψόμετρο στάθμης (m)	Μέγιστο Βάθος (m)	Επιφάνεια Λίμνης(km^2)	Αποθηκευμένος Όγκος Νερού (hm^3)
Βεγορίτιδα	518.0	52.62	47.15	1,206.17
Πετρών	573.1	5.70	12.56	40.83
Χειμαδίτιδα	592.0	4.82	10.08	14.70
Ζάζαρη	599.7	7.79	2.03	9.71

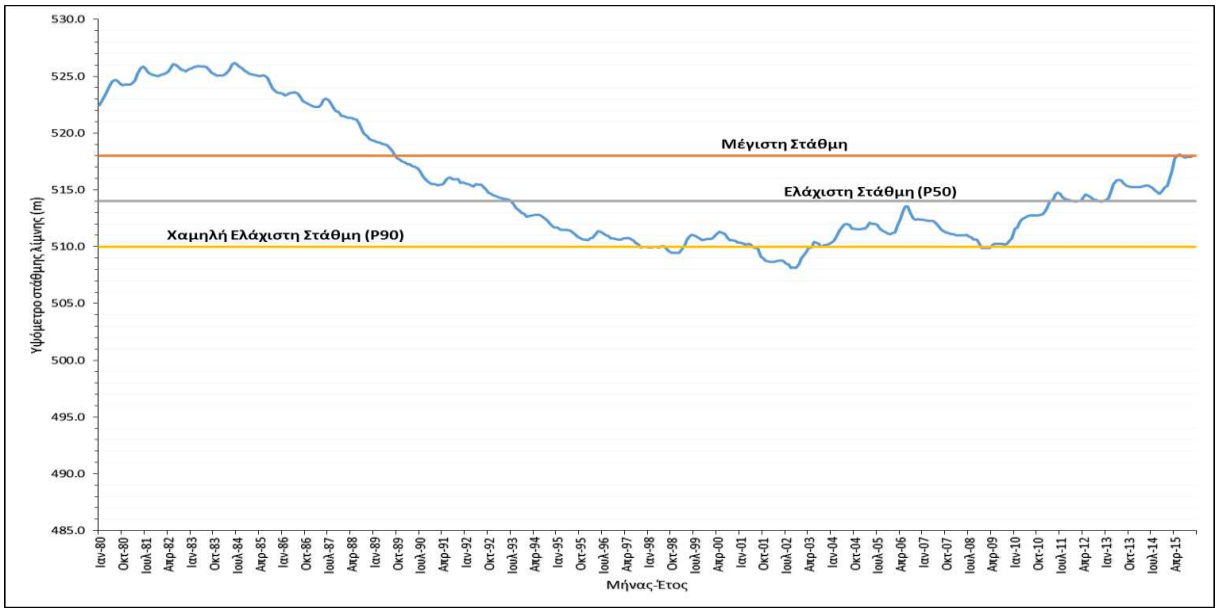
Λίμνη Βεγορίτιδα

Για τη λίμνη Βεγορίτιδα ως μέγιστη στάθμη παίρνεται το υψόμετρο στάθμης των 518 m, επειδή αφενός το υψόμετρο αυτό συνδέεται με το υψόμετρο λειτουργίας του βιολογικού σταθμού και αφετέρου η υπέρβασή του θα δημιουργήσει προβλήματα στις παραλίμνιες καλλιεργημένες εκτάσεις. Νερό από τη λίμνη Βεγορίτιδα στέλνονταν μέχρι το 1989 στη λίμνη του Άγρα, μέσω σήραγγας που κατασκευάστηκε το 1955, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του υδροηλεκτρικού σταθμού της ΔΕΗ. Αυτό οδήγησε σε σημαντική μείωση της στάθμης του νερού της λίμνης (Gianniou & Antonopoulos, 2007). Η σήραγγα έκλεισε στα τέλη της δεκαετίας του ’80, αλλά τέθηκε ξανά σε λειτουργία για ένα διάστημα το έτος 2015 μετά την άνοδο της στάθμης του νερού. Στον Πίνακα 2 δίνονται και στο Σχήμα 1 φαίνονται η μέγιστη στάθμη, η ελάχιστη στάθμη (P50) και η χαμηλή ελάχιστη στάθμη (P90) (απόλυτο υψόμετρο σε m) της λίμνης Βεγορίτιδας, που υπολογίσθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου των εκατοστημορίων (Percentiles) (Παράγραφος 2), στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης της Βεγορίτιδας, της χρονικής περιόδου 1980-2015.

Από το Σχήμα 1 και τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι για τα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης της λίμνης Βεγορίτιδας, της χρονικής περιόδου 1980-2015, το εύρος διακύμανσης μεταξύ της ελάχιστης στάθμης (P50) (514 m) και της χαμηλής ελάχιστης στάθμης (P90) (510 m) όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των εκατοστημορίων, είναι 4 m.

Πίνακας 2. Μέγιστη, ελάχιστη και χαμηλή ελάχιστη στάθμη (m) της λίμνης Βεγορίτιδας, υπολογισμένες με τη μέθοδο των εκατοστημορίων (Percentiles), στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης, της χρονικής περιόδου 1980-2015

ΒΕΓΟΡΙΤΙΔΑ (1980-2015)	
Μέγιστη Στάθμη	518.00 m
Ελάχιστη Στάθμη (P50)	514.00 m
Χαμηλή Ελάχιστη Στάθμη (P90)	510.00 m



Σχήμα 1. Μέγιστη, ελάχιστη (P50) και χαμηλή ελάχιστη (P90) στάθμη της λίμνης Βεγορίτιδας, της μεθόδου των εκατοστημορίων, στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης, της χρονικής περιόδου 1980-2015

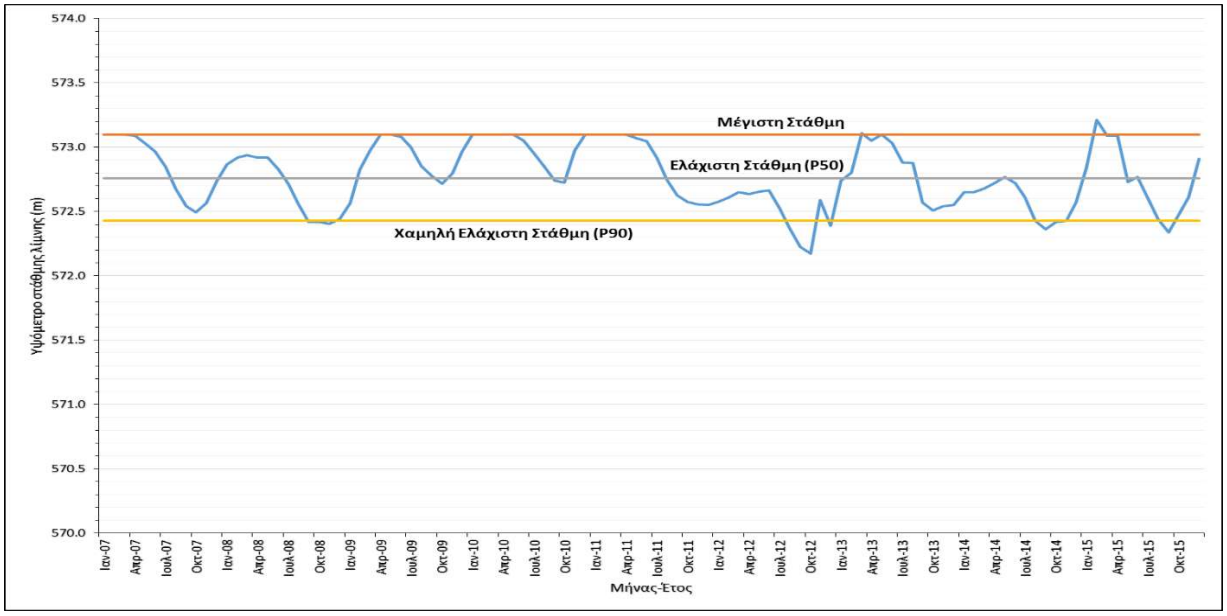
Λίμνη Πετρών

Για τη λίμνη Πετρών ως μέγιστη στάθμη παίρνεται το υψόμετρο στάθμης των 573.1 m. Από τη λίμνη Πετρών, μέσω μιας υπόγειας σήραγγας που κατασκευάστηκε το 1962-1963 και λειτουργεί με θυρόφραγμα (το οποίο βρίσκεται σε υψόμετρο 573.1 m.a.s.l.), διοχετεύεται νερό στη λίμνη Βεγορίτιδα. Στον Πίνακα 3 δίνονται και στο Σχήμα 2 φαίνονται η μέγιστη στάθμη, η ελάχιστη στάθμη (P50) και η χαμηλή ελάχιστη στάθμη (P90) (απόλυτο υψόμετρο σε m) της λίμνης Πετρών, που υπολογίσθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου των εκατοστημορίων (Percentiles) (Κεφάλαιο 2), στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης της λίμνης Πετρών, της χρονικής περιόδου 2007-2015.

Από το Σχήμα 2 και τον Πίνακα 3 προκύπτει ότι για τα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης της λίμνης Πετρών, της χρονικής περιόδου 2007-2015, το εύρος διακύμανσης μεταξύ της ελάχιστης στάθμης (P50) (572.76 m) και της χαμηλής ελάχιστης στάθμης (P90) (572.43 m) όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των εκατοστημορίων, είναι 0.33 m.

Πίνακας 3. Μέγιστη, ελάχιστη και χαμηλή ελάχιστη στάθμη (m) της λίμνης Πετρών, υπολογισμένες με τη μέθοδο των εκατοστημορίων (Percentiles), στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης, της χρονικής περιόδου 2007-2015

ΛΙΜΝΗ ΠΕΤΡΩΝ (2007-2015)	
Μέγιστη Στάθμη	573.10 m
Ελάχιστη Στάθμη (P50)	572.76 m
Χαμηλή Ελάχιστη Στάθμη (P90)	572.43 m



Σχήμα 2. Μέγιστη, ελάχιστη (P50) και χαμηλή ελάχιστη (P90) στάθμη της λίμνης Πετρών, της μεθόδου των εκατοστημορίων, στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης, της χρονικής περιόδου 2007-2015

Λίμνη Χειμαδίτιδα

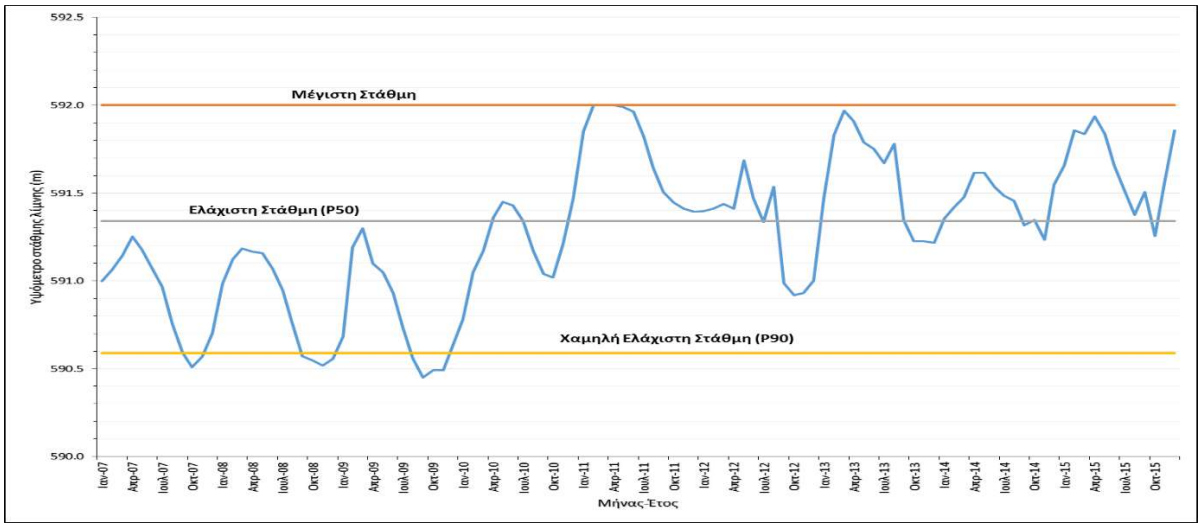
Για τη λίμνη Χειμαδίτιδα ως μέγιστη στάθμη παίρνεται το υψόμετρο στάθμης των 592 m. Η λίμνη Χειμαδίτιδα συνδέεται με τη λίμνη Πετρών καθώς τα νερά της με υπερχείλιση οδηγούνται μέσω μιας τάφρου στο ρέμα του Αμύντα (ο υπερχειλιστής βρίσκεται σε υψόμετρο 592 m.a.s.l. (Χάρτης 1)) και καταλήγουν στη λίμνη Πετρών. Στον Πίνακα 4 δίνονται και στο Σχήμα 3 φαίνονται η μέγιστη στάθμη, η ελάχιστη στάθμη (P50) και η

χαμηλή ελάχιστη στάθμη (P90) (απόλυτο υψόμετρο σε m) της λίμνης Χειμαδίτιδας, που υπολογίσθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου των εκατοστημορίων (Percentiles) (Κεφάλαιο 2), στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης της λίμνης Χειμαδίτιδας, της χρονικής περιόδου 2007-2015.

Από το Σχήμα 3 και τον Πίνακα 4 προκύπτει ότι για τα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης της λίμνης Χειμαδίτιδας, της χρονικής περιόδου 2007-2015, το εύρος διακύμανσης μεταξύ της ελάχιστης στάθμης (P50) (591.34 m) και της χαμηλής ελάχιστης στάθμης (P90) (590.59 m) όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των εκατοστημορίων, είναι 0.75 m.

Πίνακας 4. Μέγιστη, ελάχιστη και χαμηλή ελάχιστη στάθμη (m) της λίμνης Χειμαδίτιδας, υπολογισμένες με τη μέθοδο των εκατοστημορίων (Percentiles), στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης, της χρονικής περιόδου 2007-2015

ΛΙΜΝΗ ΧΕΙΜΑΔΙΤΙΔΑ (2007-2015)	
Μέγιστη Στάθμη	592.00 m
Ελάχιστη Στάθμη (P50)	591.34 m
Χαμηλή Ελάχιστη Στάθμη (P90)	590.59 m



Σχήμα 3. Μέγιστη, ελάχιστη (P50) και χαμηλή ελάχιστη (P90) στάθμη της λίμνης Χειμαδίτιδας, της μεθόδου των εκατοστημορίων, στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης, της χρονικής περιόδου 2007-2015

Λίμνη Ζάζαρη

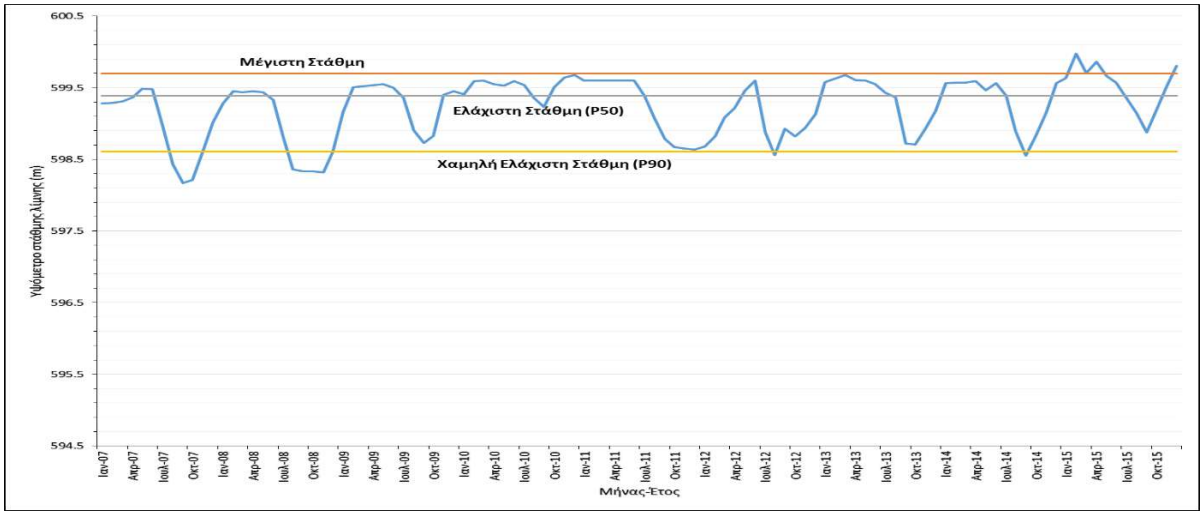
Για τη λίμνη Ζάζαρη ως μέγιστη στάθμη παίρνεται το υψόμετρο στάθμης των 599.7 m. Η λίμνη Ζάζαρη βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο και συνδέεται με τη λίμνη Χειμαδίτιδα μέσω μιας τεχνητής τάφρου που κατασκευάστηκε το 1960, μήκους περίπου 2 km. Ο υπερχειλιστής στην τάφρο βρίσκεται σε υψόμετρο 599.7 m.a.s.l. Στον Πίνακα 5 δίνονται και στο Σχήμα 4 φαίνονται η μέγιστη στάθμη, η ελάχιστη στάθμη (P50) και η χαμηλή ελάχιστη στάθμη (P90) (απόλυτο υψόμετρο σε m) της λίμνης Ζάζαρη, που υπολογίσθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου των εκατοστημορίων (Percentiles) (Κεφάλαιο 2), στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης της λίμνης Ζάζαρη, της χρονικής περιόδου 2007-2015.

Από το Σχήμα 4 και τον Πίνακα 5 προκύπτει ότι για τα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης της λίμνης Ζάζαρη, της χρονικής περιόδου 2007-2015, το εύρος

διακύμανσης μεταξύ της ελάχιστης στάθμης (P50) (599.39 m) και της χαμηλής ελάχιστης στάθμης (P90) (598.61 m) όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των εκατοστημορίων, είναι 0.78 m.

Πίνακας 5. Μέγιστη, ελάχιστη και χαμηλή ελάχιστη στάθμη (m) της λίμνης Ζάζαρη, υπολογισμένες με τη μέθοδο των εκατοστημορίων (Percentiles), στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης, της χρονικής περιόδου 2007-2015

ΛΙΜΝΗ ΖΑΖΑΡΗ (2007-2015)	
Μέγιστη Στάθμη	599.70 m
Ελάχιστη Στάθμη (P50)	599.39 m
Χαμηλή Ελάχιστη Στάθμη (P90)	598.61 m



Σχήμα 4. Μέγιστη, ελάχιστη (P50) και χαμηλή ελάχιστη (P90) στάθμη της λίμνης Ζάζαρη, της μεθόδου των εκατοστημορίων, στα δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης, της χρονικής περιόδου 2007-2015

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο καθορισμός των διαφόρων επιπέδων στάθμης με σκοπό την εξασφάλιση των συνθηκών για τη διατήρηση μιας υγιούς και αειφόρου κατάστασης των λιμνών, γίνεται για τις λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών. Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη, με την εφαρμογή της μεθόδου των Εκατοστημορίων (Percentiles) που βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα των μηνιαίων τιμών του υψομέτρου στάθμης, κάθε λίμνης. Η μέθοδος των εκατοστημορίων έχει προταθεί ως ενδεδειγμένη μέθοδος καθορισμού των διαφόρων επιπέδων στάθμης, σε περιπτώσεις πολλών λιμνών. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η αξιοπιστία της παραπάνω μεθόδου είναι άμεσα συνδεδεμένη αφενός με το μήκος της χρονικής περιόδου των δεδομένων στάθμης των λιμνών και αφετέρου με το βαθμό διαφοροποίησης της στάθμης εξαιτίας κλιματικών μεταβολών, υπόγειων διαφυγών ή αλλαγής των χρήσεων νερού των λιμνών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο πλαίσιο του έργου "Βελτίωση της γνώσης σχετικά με τον καθορισμό της ελάχιστα απαιτούμενης στάθμης/παροχής υδάτινων σωμάτων" (http://eordaia-nestos.gr), το οποίο χρηματοδοτείται από τον ΧΜ ΕΟΧ 2009-2014 και το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alan, A., Alcazar, J. 2010. *The basic flow method for incorporating flow variability environmental flows.* River Research and Applications, 28 , 93.

Αντωνόπουλος Β., Γιαννιού Σ., 1999. *Ισοζύγιο νερού και αλάτων στη λίμνη Κορώνεια της Βόρειας Ελλάδος. Πρακτικά 4ου Εθνικού Συνεδρίου Ελληνικής Επιτροπής για τη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Βόλος.*

Antonopoulos V., Papamichail, D., 2002. *Trend analysis of water quality parameters for two transboundary rivers in Northern Greece. Proceedings of Inter. Conference on Protection and Restoration of the Environment VI, Skiathos Island, Greece,* pp 83-90.

Antonopoulos, V.Z., Papamichail, D., Mitsiou, K., 2001. *Statistical and trend analysis of water quality and quantity data for the StrymonRiver in Greece.* Hydrology and Earth System Science*,* 5: 679-691.

Aroviita, J., Hämäläinen, H., 2008. *The impact of water-level regulation on littoral macro-invertebrate assemblages in boreal lakes.* Hydrobiologia 613:45-56.

Ayllon, D., Almovodar, A., Nicole, G.G., Elvira, B., 2012. *The influence of variable habitat suitability criteria and PHABSIM habitat index results.* River Research and Applications, 28, 1179,

Beca, 2008*. Draft Guidelines for the Selection of Methods to Determine Ecological Flows and Water Levels.* Report prepared by Beca Infrastructure Ltd for MfE. Wellington: Ministry for the Environment, 41-73.

Browne, R. A., 1981. *Lakes as islands: biogeographic distribution, turn-over rates, and species composition in the lakes of central New York.* Journal of Biogeography, 8(1): 75–83.

Coops, H. and Hosper, S.H., 2002. *Water-level management as a tool for the restoration of shallow lakes in the Netherlands.* Lake and Reservoir Management 18: 292–297.

Γεράκης, Π.Α., Σ. Τσιούρης και Β. Τσαούση (συντονιστές έκδοσης),2007*. Υδατικό καθεστώς και βιωτή υγροτόπων – Προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη λιμνών και παροχή ποταμών Μακεδονίας και Θράκης*. Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας/ Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων. Θέρμη, 256 σελ.

Doulgeris, C., Georgiou, P., Apostolakis, A., Papadimos, D., Zervas, D., Petriki, O., Bobori, D., Papamichail, D., Antonopoulos, V., Farcas, C., Stålnacke, P., 2017. Assessment of the environmentally minimum lake level based on morphological features. Accepted in the 10th EWRA Congress, 5-9 July, Athens.ΕΚΒΥ, 2016. *Υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά των φυσικών λιμνών της Ελλάδας. Αδημοσίευτα δεδομένα.* Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων.

Jain, S.K., 2012. *Assessment of environmental requirements.* Hydrological Processes, 26(22): 3472-3476.

Leeper, D. A., and Ellison, D.L., 2015. *Proposed Minimum and Guidance Levels for Lake Hancock in Polk County, Florida.* Southwest Florida Water Management District. Brooksville, Florida.

Leira, M., Cantonati, M., 2008. *Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography.* Hydrobiologia 613: 171-184.

Liang, J., Yu, X., Zeng,G., Wu, H., Lai, x., li, X., Huang, L., Yuan, Y., Guo, S., Dai, J.,, 2015. *A hydrologic index based method for determining ecologically acceptable water-level range of Donging Lake.* J. Limnol., 74(1): 75-84.

Papamichail, D.M., Antonopoulos, V.Z., 1998. *Analysis of Vegorotis lake water balance deficit. In Katsifarakis et al. (editors), Protection and Restoration of Environment, Proceeding of an International Conference,* p. 230-237.

Punning, J., Kapanen, G., Hang, T., Davydova, N., Kangur, M., 2008. *Changes in the water level of Lake Peipsi and their reflection in a sediment core.* Hydrobiologia 599:97-104**.**

Παπαδήμος, Δ., Χατζηχαραλάμπους, Ε, Δουλγέρης, Χ., Δημάκη, Μ., Ζέρβας, Δ., Κουτράκης, Εμ., Πουλής, Γ., Σαπουνίδης, Α., Βαρελτζίδου, Σ., Πανταζόπουλος, Χ., 2016. Εκτίμηση της Οικολογικής Παροχής σε Ποταμούς του Εθνικού Πάρκου Δέλτα Αξιού – Λουδία – Αλιάκμονα. 8ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οικολογίας, 20-23 Οκτωβρίου, Θεσσαλονίκη.

Shang, S H., 2006. *System Analysis of Water Resources: Methods and Applications.* Beijing: Tsinghua University Press, 135–137.

Shang, S H., 2008. *A multiple criteria decision-making approach to estimate minimum environmental flows based on wetted perimeter.* River Research and Applications, 24(1): 54–67.

Shang, S.H., 2013. *Lake surface area method to define minimum ecological lake level from level–area–storage curves.* Journal of Arid Land, 5(2): 133−142.

Southwest Florida Water Management District, 2006. *Rule 40D-8.624, Guidance and Minimum Levels for Lakes.*

Southwest Florida Water Management District, 2007. *Proposed Minimum and Guidance Levels for Lake Annie in Polk County, Florida. Brooksville, Florida.*

Southwest Florida Water Management District, 2008. *Minimum and Guidance Levels for Lakes Clinch, Eagle, McLeod and Wales in Polk County, and Lakes Jackson, Little Lake Jackson, Letta and Lotela in Highlands County, Florida. Brooksville, Florida.*

Tharme, R.E., 2003. *A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers.* River Res. Applic. 19:397-441.

Wantzen, K.M., Junk, W.J., Rothhaupt, K.-O., 2008. *An extension of the floodpulse concept (FPC) for lakes.* Hydrobiologia, 613:151–170.

Xu, Z.X., Chen, M.J., Dong, Z.C., 2004. *Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake.* ActaEcologicaSinica, 24(10), 2324-2328.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΠΑΦΟΥ

Κ. Πέτρου✉, Π. Γεωργίου
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, 54124, Θεσσαλονίκη
✉***kyriaki.s.petrou@gmail.com***

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης για τη διανομή του νερού στο Αρδευτικό Έργο Πάφου στην Κύπρο. Οι ολικές σε αρδευτικό νερό ανάγκες των καλλιεργειών για διάρκεια 18 ετών, υπολογίσθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος CROPWAT. Έγινε σύγκριση των ολικών αρδευτικών αναγκών με τον όγκο νερού που χορηγήθηκε για άρδευση στο Αρδευτικό Έργο Πάφου και παρατηρήθηκε ότι δεν καλύπτονταν οι ανάγκες αυτές. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος αναπτύχθηκε ένα μοντέλο βέλτιστης διαχείρισης του νερού. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση τη μεγιστοποίηση του κέρδους είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα και για την επίλυση του χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LINGO. Το μοντέλο βελτιστοποίησης αποτελεί ένα εργαλείο απόφασης για το ποιες καλλιέργειες και με ποια έκταση θα αρδευτούν και ένα εργαλείο προγραμματισμού των αρδεύσεων.

Λέξεις κλειδιά: βελτιστοποίηση, ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών, CROPWAT

OPTIMIZATION MODEL FOR WATER ALLOCATION OF PAPHOS IRRIGATION PROJECT

K. Petrou✉, P. Georgiou
Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, 54124, Thessaloniki ✉kyriaki.s.petrou@gmail.com

Abstract

The purpose of this paper is to develop an optimization model for water allocation of Paphos Irrigation Project in Cyprus. The total irrigation water requirements for all crops were estimated by CROPWAT model for 18 years. A comparison between total irrigation water requirements with irrigation water which allocated from Paphos Irrigation Project resulted a water shortage. For this purpose was developed an optimization model for water allocation. The optimization problem with objective function which maximizes the total farm income is non-linear and solved by LINGO software. The model can be used as a decision support tool for cropping patterns of an irrigated area and irrigation scheduling.

Keywords: optimization, crop water requirements, CROPWAT

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση του νερού, από την αρχαιότητα έως σήμερα, αποτελεί μείζον θέμα καθώς πρόκειται για αγαθό απαραίτητο για την επιβίωση και εξυπηρέτηση του ανθρώπου, ενώ παράλληλα τα υδατικά αποθέματα είναι εξαντλήσιμα σε σχέση με το χώρο και το χρόνο. Με τη συνεχή αύξηση των αναγκών σε νερό αλλά και τη μείωση των υδατικών πόρων επιβάλλεται η μελέτη και η ορθολογική διαχείριση του νερού που χορηγείται για αρδευτικούς σκοπούς. Στην Ελλάδα το νερό που χρησιμοποιείται για τη γεωργία ανέρχεται σε ποσοστό 80% των διαθέσιμων υδατικών πόρων και στην Κύπρο σε ποσοστό 69%. Πολλές φορές έχει παρατηρηθεί σπατάλη νερού στη γεωργία με τη διάθεση περισσότερου όγκου νερού από τις πραγματικές ανάγκες των καλλιεργειών χωρίς αυτό να συμβάλλει σε μεγαλύτερη απόδοση. Ο όγκος νερού που δίνεται για άρδευση πρέπει να είναι ανάλογος με τις ανάγκες σε νερό της κάθε καλλιέργειας, οι οποίες εκφράζονται από την εξατμισοδιαπνοή της. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας εξαρτάται από την καλλιέργεια και συγκεκριμένα τους φυτικούς συντελεστές, καθώς επίσης και από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς που καθορίζεται από κλιματικούς παράγοντες (Allen et al., 1998; Bos et al., 2009; Παπαμιχαήλ και Μπαμπατζιμόπουλος, 2014).

Στην παρούσα εργασία ο προσδιορισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας και των καθαρών και ολικών αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών του Αρδευτικού Έργου Πάφου της Κύπρου, έγινε με τη χρήση του προγράμματος CROPWAT 8.0 (Land and Water Development Division, 2015) με βάση τα στοιχεία του εδάφους, του κλίματος και των καλλιεργειών. Τα μετεωρολογικά δεδομένα πάρθηκαν από το Μετεωρολογικό Σταθμό Αεροδρομίου Πάφου, ο οποίος είναι ο πλησιέστερος σταθμός στην περιοχή έρευνας.

Οι ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες των καλλιεργειών συγκρίθηκαν με τον όγκο νερού που χορηγήθηκε για άρδευση στο Αρδευτικό Έργο Πάφου και παρατηρήθηκε ότι δεν καλύπτονταν οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών, κατά τους θερινούς μήνες ενώ παρουσιάστηκε υπερκατανάλωση νερού άρδευσης στους χειμερινούς μήνες. Για την αντιμετώπιση των πιο πάνω αναπτύχθηκε και επιλύθηκε ένα μοντέλο βέλτιστης διαχείρισης του νερού του Αρδευτικού Έργου Πάφου, το οποίο καλύπτει μια έκταση 55,860 στρεμμάτων με συνολικά 29 είδη καλλιεργειών. Η αντικειμενική συνάρτηση αφορά στη μεγιστοποίηση του κέρδους από την άρδευση των καλλιεργειών, η οποία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της πραγματικής απόδοσης των καλλιεργειών, της έκτασής τους και οικονομικών στοιχείων. Μεταβλητές απόφασης ήταν οι εκτάσεις των καλλιεργειών και οι απελευθερώσεις νερού από το αρδευτικό έργο για την άρδευσή τους σε κάθε χρονικό βήμα. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι μη γραμμικό και για την επίλυσή του χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Lingo. Το μοντέλο βελτιστοποίησης έχει ως σκοπό την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού του είδους και των εκτάσεων που θα καλλιεργηθούν, βασιζόμενο στην μέχρι τώρα επιλογή αυτών από το Αρδευτικό Έργο Πάφου, σύμφωνα πάντα με το νερό που είναι διαθέσιμο, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση κέρδους.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το Αρδευτικό Έργο Πάφου είναι ένα από τα μεγαλύτερα έργα της Κύπρου, το οποίο κατασκευάστηκε την περίοδο 1976-1982 με χρηματοδότηση από την Κυπριακή Κυβέρνηση και τη Διεθνή Τράπεζα με ολική δαπάνη περίπου 25 εκατομμυρίων λιρών Κύπρου. Η ευθύνη της κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης είναι του Τμήματος Αναπτύξεως Υδάτων και του Υπουργείου Γεωργίας και Φυσικών Πόρων της Κύπρου. Στο Σχήμα 1

φαίνεται το Αρδευτικό Έργο Πάφου καθώς και όλα τα μεγάλα υδατικά έργα της Κύπρου όπως δόθηκαν από το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων.

Σχήμα 1. Έργα παροχής νερού για ύδρευση και άρδευση στην Κύπρο (Πηγή: Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, 2002)

Το Αρδευτικό Έργο Πάφου καλύπτει έκταση 55,860 στρεμμάτων εύφορης γης στα παράλια της Πάφου από τα Κούκλια μέχρι τον Άγιο Γεώργιο Πέγειας δυτικά, σε μήκος 36 km και σε πλάτος 2 με 3 km. Το Αρδευτικό Έργο Πάφου περιλαμβάνει τις περιοχές: Κούκλια, Μαντριά, Τίμη, Αναρίτα, Αχέλεια, Αγία Βαρβάρα, Κολώνη, Γεροσκήπου, Πάφος, Έμπα, Κισσόνεργα, Πέγεια, Άγιος Γεώργιος, Μαυροκόλυμπος, το Τσιφλίκι των Κουκλίων και το Τσίφλικι της Αχέλειας. Το Αρδευτικό Έργο Πάφου περιλαμβάνει τα ακόλουθα επί μέρους έργα και κατασκευές (Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, 2002; Καλλή, 2009; Πέτρου, 2015):

- Το μεγάλο φράγμα του Ασπρόκρεμμου ωφέλιμης χωρητικότητας $22*10^6$ m^3 στον ποταμό Ξερό που είναι η κύρια πηγή νερού.
- Το κεντρικό σύστημα μεταφοράς του νερού που αποτελείται από :
  - ✓ Το μεγάλο κεντρικό κανάλι του φράγματος μήκους 12 km και αρχίζει από το φράγμα του Ασπρόκρεμμου και καταλήγει στην περιοχή της Γεροσκήπου, η παροχή του οποίου ανέρχεται στα 14400 m^3/hr.
  - ✓ Τον αγωγό άντλησης (δυτικό αγωγό) μήκους 21.5 km, μέγιστης διαμέτρου 900 mm που αρχίζει από το τέλος του καναλιού και επεκτείνεται μέχρι το δυτικό άκρο του έργου, τον Άγιο Γεώργιο Πέγειας και που τροφοδοτεί ολόκληρη τη δυτική περιοχή του έργου με παροχή 3000 m^3/hr.
  - ✓ Τους κεντρικούς σωληνωτούς αγωγούς μήκους 25 km.
- Συνολικά 24 γεωτρήσεις μέσα στην κοίτη των ποταμών Διαρίζου (13 γεωτρήσεις), Έζουσας (8 γεωτρήσεις) και Ξεροπόταμου (3 γεωτρήσεις) που μπορούν να αποδώσουν $10*10^6$ m^3 νερού το χρόνο.
- Τις γεωτρήσεις στην παραλιακή πεδιάδα που καταλαμβάνει το Αρδευτικό Έργο Πάφου που μπορούν να αποδώσουν $4*10^6$ m^3 νερού το χρόνο.
- Τα 16 αντλιοστάσια συνολικής ισχύος 7,370 HP, τα οποία τροφοδοτούν τα δίκτυα διανομής με πίεση 3.5 atm.

- Τις δεξαμενές αποθήκευσης και εξισορρόπησης (6 δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 28,000 m^3).
- Τις δεξαμενές ρύθμισης και αυτόματης λειτουργίας των αντλιοστασίων.
- Τα 20 ανεξάρτητα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα υπό πίεση. Το μήκος των σωληνωτών αγωγών των αρδευτικών δικτύων στην ανατολική περιοχή είναι 389 km και στην δυτική περιοχή είναι 150 km.
- Στο Αρδευτικό Έργο Πάφου έχει ενσωματωθεί από το 1988 και το παλαιότερο φράγμα Μαυροκόλυμπου κατασκευής 1966, χωρητικότητας $2.18*10^6$ m^3.

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. Ανάγκες σε Νερό των Καλλιεργειών

Σύμφωνα με τα μετεωρολογικά στοιχεία από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία, όπως τα κατέγραψε ο Μετεωρολογικός Σταθμός Αεροδρομίου Πάφου για περίοδο 18 ετών (1996-2013) και τους φυτικούς συντελεστές για κάθε καλλιέργεια (Allen et al., 1998; Παπαμιχαήλ και Μπαμπατζιμόπουλος, 2014) υπολογίστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος CROPWAT με τη μέθοδο FAO Penman-Monteith, η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) και η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c.) Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ωφέλιμη βροχόπτωση (USDA Soil Conservation Service, 1970), οι καθαρές ανάγκες κάθε καλλιέργειας (IR_n) και οι ολικές (IR_t) ανάγκες σε νερό άρδευσης των 29 καλλιεργειών του Αρδευτικού Έργου Πάφου (Πέτρου, 2015). Μετά από σύγκριση που έγινε μεταξύ των ολικών αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών με το νερό που χορηγήθηκε σε m^3 από το Αρδευτικό Έργο Πάφου, για την περίοδο 1996-2013 βρέθηκε ότι η άρδευση ήταν ελλειμματική.

Για να αντιμετωπισθεί η ελλειμματική άρδευση αλλά και να επιτευχθεί το μέγιστο οικονομικό κέρδος, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο βέλτιστης διαχείρισης του νερού του Αρδευτικού Έργου Πάφου με σκοπό τη μεγιστοποίηση κέρδους από την άρδευση των καλλιεργειών.

3.2. Μοντέλο Βέλτιστης Διαχείρισης Αρδευτικού Νερού

Το πρόβλημα διαχείρισης του αρδευτικού νερού αποτελεί κατεξοχήν πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση που η βέλτιστη διαχείριση αρδευτικού νερού αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση κέρδους η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να εκφρασθεί από τη σχέση:

$$Z^* = \max \sum_{i=1}^{n} \left[P_i * Y_{a_i} + SUB_i - C_i \right] A_i \qquad (1)$$

όπου: Z^*=συνολικό κέρδος (€), P = τιμή του προϊόντος (€/kg), Y_{a_i} = πραγματική απόδοση (kg/στρέμμα), SUB_i= επιδοτήσεις (€/ στρέμμα), C_i = συνολικό κόστος (€/ στρέμμα), A_i=καλλιεργούμενες εκτάσεις (στρέμματα), i= η κάθε καλλιέργεια και n= ο συνολικός αριθμός των καλλιεργειών.

Η πραγματική απόδοση των καλλιεργειών δίνεται από τις σχέσεις που συνδέουν την απόδοσή τους σε σχέση με τη διαθεσιμότητα νερού. Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της πραγματικής απόδοσης χρησιμοποιείται η σχέση απόδοσης του Jensen (Jensen, 1968; Γεωργίου, 2004; Georgiou and Papamichail, 2008) που δίνεται από τη σχέση:

$$Y_a = Y_m \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_i^{\lambda_i} \qquad (2)$$

όπου: Y_α= πραγματική απόδοση της καλλιέργειας κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες έλλειψης νερού σε kg/στρέμμα, Y_m= μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας, όταν το νερό δεν

είναι περιοριστικός παράγοντας σε kg/στρέμμα, ET_α= η πραγματική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, ET_m= η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, λ_i= συντελεστής ευαισθησίας της καλλιέργειας κατά το στάδιο i (που αντικατοπτρίζει την επίδραση της διαθεσιμότητας νερού στην παραγωγή) και n= ο συνολικός αριθμός των σταδίων.

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι συνάρτηση της μέγιστης εξατμισοδιαπνοής και της εδαφικής υγρασίας και δίνεται από τη σχέση (Allen et al., 1998):

$$ET_a = K_s ET_m \quad (3)$$

Ο συντελεστής έλλειψης εδαφικού νερού (K_s) σε συνθήκες έλλειψης νερού μπορεί να εκφρασθεί από τη σχέση:

$$K_s = \frac{TAW - p_s \cdot TAW}{TAW - p_m \cdot TAW} = \frac{1 - p_s}{1 - p_m} \quad (4)$$

όπου: ET_α= πραγματική εξατμισοδιαπνοή (mm), ET_m = μέγιστη εξατμισοδιαπνοή σε (mm), K_s= συντελεστής έλλειψης εδαφικού νερού, p_m= συντελεστής ωφελιμότητας της καλλιέργειας, ο οποίος αναφέρεται στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο ελλείμματος (κλάσμα της TAW κατά την οποία δεν υπάρχει κατάσταση έλλειψης νερού), p_s = επιτρεπόμενο επίπεδο έλλειψης νερού (κλάσμα της TAW σε συνθήκες έλλειψης νερού) και TAW= διαθέσιμη υγρασία στη ζώνη του ριζοστρώματος.

Οι περιορισμοί που τέθηκαν στο μοντέλο βελτιστοποίησης ήταν οι εξής:

- *Περιορισμός απόδοσης*: Για κερδοφόρα παραγωγή των διαφόρων καλλιεργειών, η σχετική απόδοση της κάθε καλλιέργειας θα πρέπει να είναι πάνω από μία ελάχιστη τιμή, δηλαδή θα πρέπει:

$$Y_{\min_i} * P_i + SUB_i - C_i > 0 \Rightarrow Y_{\min_i} \geq \frac{C_i - SUB_i}{P_i} \quad (5)$$

$$Y_{a_i} \geq Y_{\min_i} \Rightarrow Y_{m_i} \geq Y_{a_i} \geq Y_{\min_i} \quad (6)$$

- *Περιορισμός εκτάσεων:* Η έκταση που καταλαμβάνει κάθε καλλιέργεια καλείται να περιοριστεί ανάμεσα σε μία ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή.

$$A_{\min_i} \leq A_i \leq A_{\max_i} \quad (7)$$

- *Περιορισμός K_s*: Ο συντελεστής έλλειψης εδαφικού νερού θα πρέπει να κυμαίνεται από τιμές 0.5 έως και 1 για κάθε στάδιο κάθε καλλιέργειας.

$$0.5 \leq K_{s_{i,j}} \leq 1.0 \quad (8)$$

- *Περιορισμός p_s*: Το επιτρεπόμενο επίπεδο έλλειψης νερού σε συνθήκες ανεπάρκειας νερού, p_s, πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το επιτρεπόμενο επίπεδο έλλειψης νερού σε συνθήκες επάρκειας, p_m (συντελεστής ωφελιμότητας) για κάθε περίοδο ανάπτυξης.

$$p_{s_{i,j}} \geq p_{m_{i,j}} \quad (9)$$

- *Περιορισμός: η διαφορά της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής μείον την ωφέλιμη βροχόπτωση να είναι μικρότερη από τη μέγιστη εξατμισοδιαπνοή.*

Ο περιορισμός αφορά όλες τις καλλιέργειες και όλες τις περιόδους ανάπτυξης της βλαστικής περιόδου και δίνεται από τη σχέση:

$$ET_{a_{i,j}} - P_{e_{i,j}} \leq ET_{m_{i,j}} \quad (10)$$

- *Περιορισμός ποσότητας νερού:* Οι συνολικές ανάγκες σε νερό άρδευσης για όλες τις καλλιέργειες για όλες τις περιόδους ανάπτυξης θα πρέπει να είναι ίσες με τη διαθέσιμη ποσότητα νερού που χορηγήθηκε για άρδευση. Οι ανάγκες σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών θα εξαρτηθούν από το επίπεδο του ελλείμματος (που συμπεριλαμβάνεται

στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή όπως προαναφέρθηκε) και ο αντίστοιχος περιορισμός εκφράζεται ως εξής:

$$\sum_{x=1}^{m}\left[\left(\frac{ET_{a_{i,j}}-P_{e_{i,j}}}{d_{i,j}}\right)*days*A_i\right]=sw_t \qquad (11)$$

όπου: $P_{ei,j=}$ η ωφέλιμη βροχόπτωση για κάθε καλλιέργεια σε κάθε στάδιο σε mm, $d_{i,j}$= η διάρκεια του κάθε σταδίου για κάθε καλλιέργεια σε ημέρες, days= οι ημέρες του ημερολογιακού μήνα που καταλαμβάνει το στάδιο, A_i= η έκταση κάθε καλλιέργειας σε στρέμματα, sw_t= το διαθέσιμο νερό που δόθηκε για άρδευση από το αρδευτικό έργο σε m^3, i= η καλλιέργεια και j= η περίοδος ανάπτυξης της βλαστικής περιόδου, x= ο μήνας, m= το σύνολο των μηνών και t= το έτος ενώ τα υπόλοιπα είναι όπως έχουν οριστεί προηγούμενα.

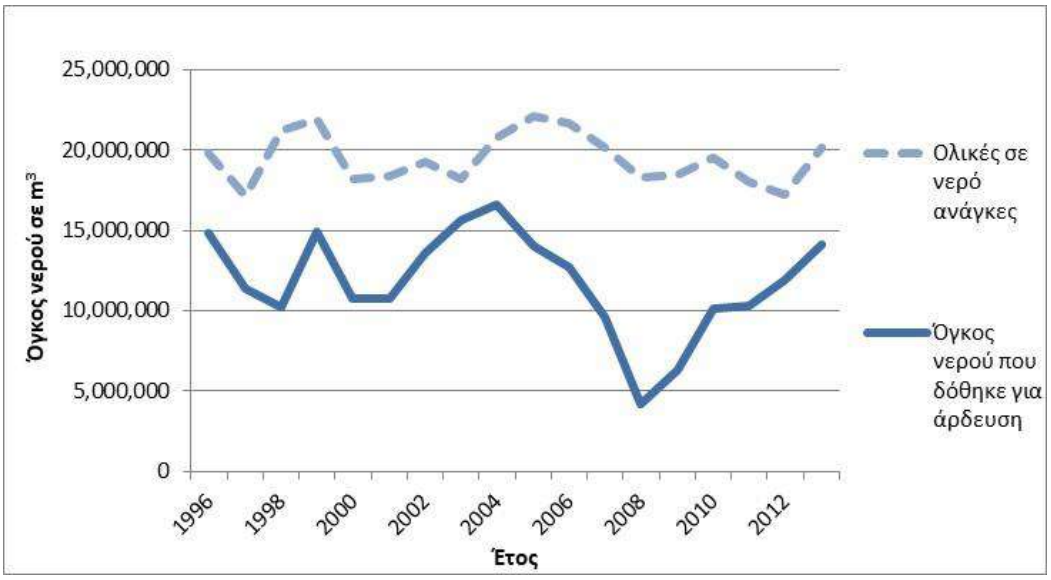
Πρόκειται για ένα μοντέλο όπου χρονικό βήμα είναι η περίοδος ανάπτυξης και μεταβλητές απόφασης είναι οι εκτάσεις των καλλιεργειών και το επιτρεπόμενο επίπεδο έλλειψης νερού p_s, μέσω του οποίου υπολογίζεται ο συντελεστής έλλειψης εδαφικού νερού K_s και επομένως η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ET_α, η οποία ταυτίζεται με την ποσότητα νερού που χορηγείται για άρδευση.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα και για την επίλυσή του χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LINGO 9.0 (Lindo Systems Inc, 2003) με την υπορουτίνα εύρεσης ολικού ακροτάτου.

Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα επιλογής είδους και εκτάσεων των καλλιεργειών που θα αρδευτούν και τη δυνατότητα εφαρμογής πλήρους ή ελλειμματικής άρδευσης, σύμφωνα με τους περιορισμούς του προβλήματος. Πρόκειται για ένα μοντέλο βελτιστοποίησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο λήψης απόφασης για το ποιες καλλιέργειες και με ποια έκταση θα αρδευτούν και ως εργαλείο προγραμματισμού των αρδεύσεων.

4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα υπολογίστηκαν οι ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες των 29 καλλιεργειών του Αρδευτικού Έργου Πάφου για την περίοδο 1996-2013, ενώ υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία από το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, Επαρχιακό Γραφείο Πάφου, της ποσότητας νερού που διατέθηκε για άρδευση των καλλιεργειών για κάθε μήνα για την ίδια περίοδο. Στο Σχήμα 2 φαίνεται η σύγκριση των αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών σε σχέση με το νερό που χορηγήθηκε από το Αρδευτικό Έργο Πάφου για την περίοδο 1996-2013.

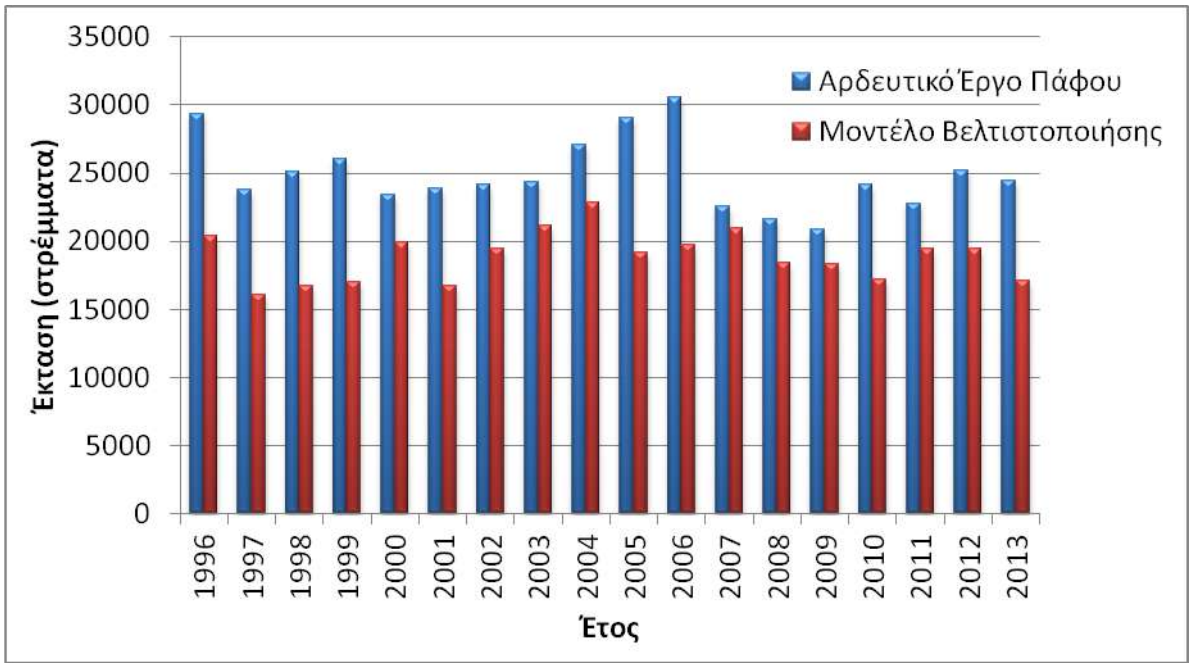


Σχήμα 2. Σύγκριση ολικών αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών σε σχέση με το νερό που χορηγήθηκε σε m^3 από το Αρδευτικό Έργο Πάφου την περίοδο 1996-2013.

Από το Σχήμα 2 είναι εμφανές ότι οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό άρδευσης την περίοδο που μελετήθηκε, 1996-2013, δεν καλύπτονταν από το νερό που δόθηκε για άρδευση.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε το μοντέλο βέλτιστης διαχείρισης του νερού του Αρδευτικού Έργου Πάφου όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Τα οικονομικά δεδομένα δόθηκαν από το Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών Κύπρου (Μάρκου και Παπαδαυίδ, 2011). Τα στοιχεία των εκτάσεων που δόθηκαν από το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων θεωρήθηκαν πως ήταν οι μέγιστες εκτάσεις που μπορούν να καλλιεργηθούν ενώ η ελάχιστη ήταν η μηδενική. Ο περιορισμός αυτός αφορούσε τις ετήσιες καλλιέργειες ενώ για τις μόνιμες καλλιέργειες η έκταση που χρησιμοποιήθηκε ήταν σταθερή. Οι τιμές της μέγιστης εξατμισοδιαπνοής και της ωφέλιμης βροχόπτωσης πάρθηκαν όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα CROPWAT.

Από τα αποτελέσματα που έδωσε το μοντέλο βελτιστοποίησης παρατηρήθηκε ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων επιλέχθηκαν να αρδευτούν κάποιες καλλιέργειες με τη μέγιστη έκταση ενώ οι υπόλοιπες να μην αρδευτούν το ίδιο έτος. Παρατηρήθηκε ότι οι καλλιέργειες φιστίκια, κουκιά ξερά, καρπούζια και πεπόνια επιλέχθηκαν από το μοντέλο να μην καλλιεργηθούν καθόλου στο σύνολο της περιόδου που εξετάστηκε (1996-2013). Από τις ετήσιες καλλιέργειες στις οποίες δόθηκε επιλογή της έκτασης που θα καλλιεργηθεί, στις καλλιέργειες φασολάκια και πατάτα χρησιμοποιήθηκε όλη η διαθέσιμη έκταση στα περισσότερα έτη. Στο Σχήμα 3 φαίνεται η συνολική έκταση όπως υπολογίστηκε με επίλυση του μοντέλου βελτιστοποίησης σε σχέση με τη συνολική έκταση που καλλιεργήθηκε από το Αρδευτικό Έργο Πάφου για τα έτη 1996-2013.

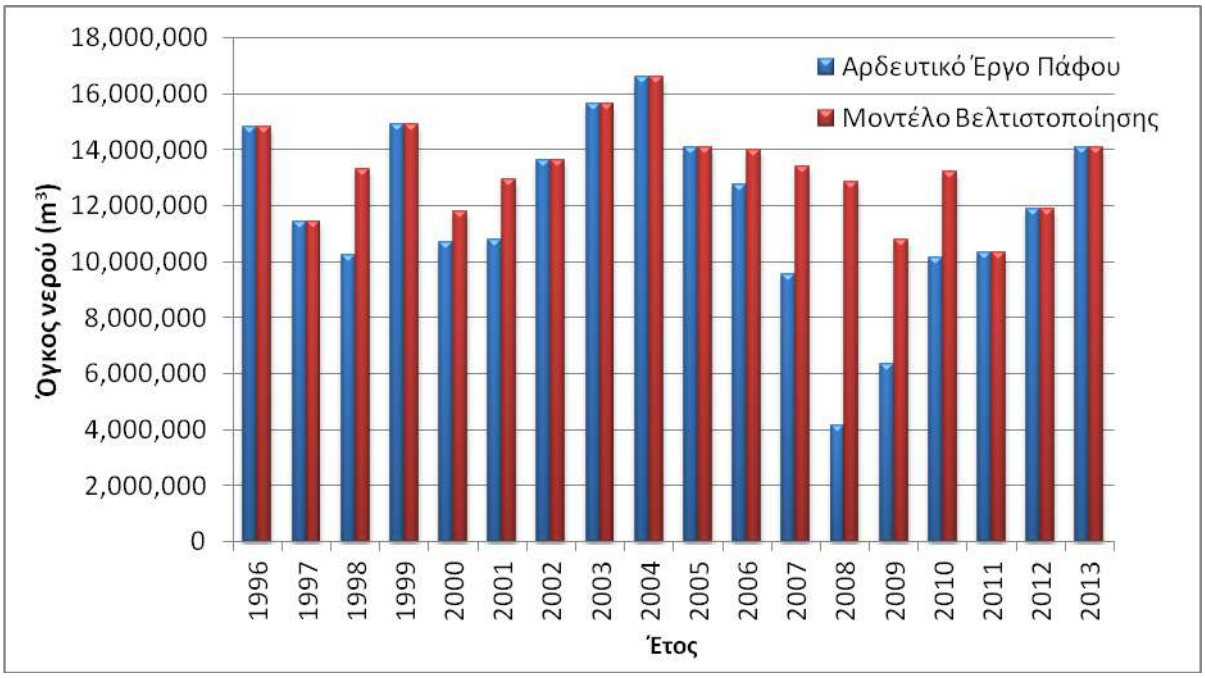


Σχήμα 3. Συνολική έκταση που καλλιεργήθηκε από το Αρδευτικό Έργο Πάφου σε σχέση με την έκταση όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο βελτιστοποίησης για τα έτη 1996-2013.

Από το Σχήμα 3 φαίνεται ότι το μοντέλο δεν χρησιμοποίησε όλη τη συνολική διαθέσιμη έκταση, το μέγιστο ποσοστό της συνολικής έκτασης που χρησιμοποίησε είναι 92.7 % (2007) ενώ το ελάχιστο σύμφωνα με τους περιορισμούς ήταν 64.6% (2006). Μέσος όρος της συνολικής έκτασης που χρησιμοποίησε το μοντέλο σε σχέση με τη συνολικά διαθέσιμη έκταση για κάθε έτος είναι της τάξης του 76.5 %. Παρουσιάστηκε δηλαδή μείωση της τάξης των 7 έως και 35 % σε σχέση με τις εκτάσεις που αρδεύτηκαν από το Αρδευτικό Έργο Πάφου.

Το K_s υπολογίζεται για κάθε περίοδο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Από τα αποτελέσματα του μοντέλου παρατηρήθηκε ότι στις περισσότερες καλλιέργειες εφαρμόστηκε πλήρης άρδευση (K_s=1), και μόνο σε μερικές ελλειμματική (K_s=0.5). Το μοντέλο έδωσε σε μερικές περιπτώσεις και ενδιάμεσες τιμές του συντελεστή έλλειψης νερού, K_s ($0.5<K_s<1$).

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης θεωρήθηκε δεδομένο το διαθέσιμο νερό όπως δόθηκε σε κάθε έτος από το Αρδευτικό Έργο Πάφου για την κάλυψη των αναγκών των καλλιεργειών. Λόγω όμως του περιορισμένου όγκου νερού που δόθηκε σε σχέση με τις ανάγκες και εφόσον δεν υπήρχε εφικτή λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης, σύμφωνα με τους περιορισμούς, κρίθηκε απαραίτητη η πρόσθεση νερού σε 8 έτη (1998, 2000, 2001, 2006-2010) ούτως ώστε να υπάρξει εφικτή λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο όγκος νερού που δόθηκε για άρδευση από το Αρδευτικό Έργο Πάφου σε σχέση με το νερό που διατέθηκε από το μοντέλο βελτιστοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 4, για την περίοδο 1996-2013. Στην εφαρμογή του αρδευτικού νερού λήφθηκε υπόψη η αποδοτικότητα άρδευσης E_f, με τιμή 0.9.



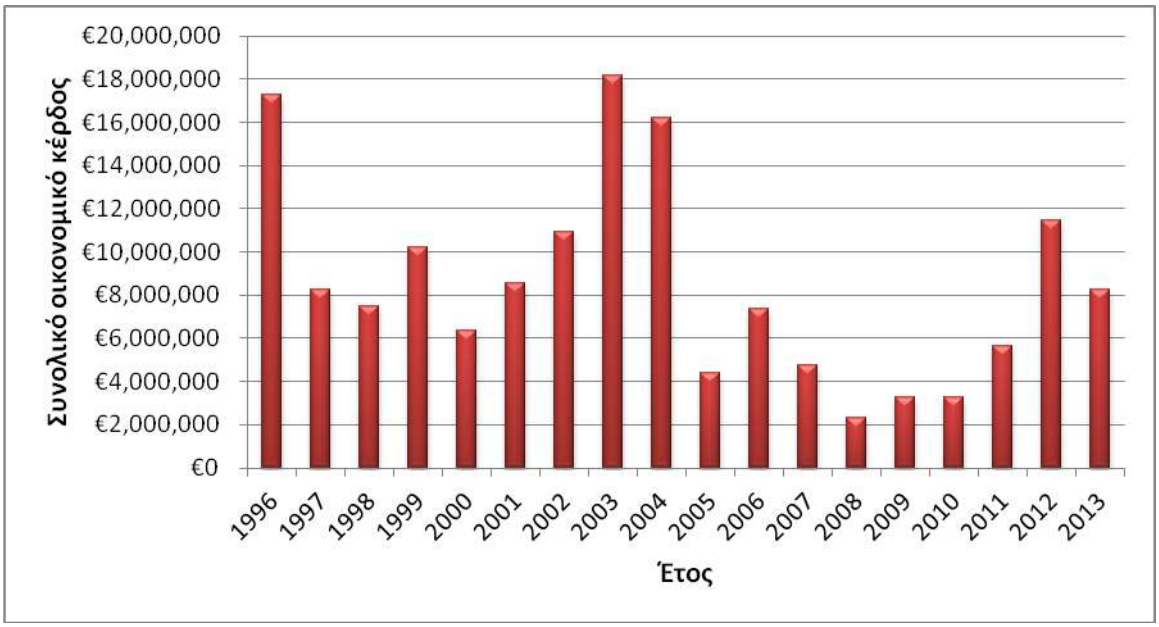
Σχήμα 4. Όγκος νερού που χορηγήθηκε για άρδευση από το Αρδευτικό Έργο Πάφου σε σχέση με τον όγκο νερού όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο βελτιστοποίησης για τα έτη 1996-2013.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4 για την ανάγκη επίλυσης του μοντέλου βελτιστοποίησης το 2008, ο όγκος του διαθέσιμου νερού αυξήθηκε σε ποσοστό 200%, δηλαδή για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ο τριπλάσιος όγκος νερού σε σχέση με το νερό που δόθηκε από το Αρδευτικό Έργο. Συγκεκριμένα το 2008, από τα 4,146,730 m^3 νερού που χρησιμοποιήθηκαν για άρδευση στο Αρδευτικό Έργο Πάφου, οι ανάγκες του μοντέλου σύμφωνα με τους περιορισμούς του έφτασαν τα 12,854,863 m^3 νερού. Η αναγκαία αυτή αύξηση μπορεί να αιτιολογηθεί από τη περιορισμένη εισροή λόγω βροχόπτωσης το 2008.

Το μέγιστο οικονομικό κέρδος όπως υπολογίσθηκε με την επίλυση του μοντέλου βελτιστοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 5. Το 2008 υπολογίσθηκε, από το μοντέλο βελτιστοποίησης, 2,321,229 € το χαμηλότερο οικονομικό κέρδος σε σχέση με τα υπόλοιπα χρόνια και αυτό μπορεί να οφείλεται στο περιορισμένο διαθέσιμο νερό λόγω μειωμένης βροχόπτωσης. Το 2003 σημειώθηκε η μέγιστη τιμή του οικονομικού κέρδους από όλες τις χρονιές με αποτέλεσμα 18,169,840 €. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 2008 το διαθέσιμο νερό άρδευσης ήταν 12,854,863 m^3 και η έκταση 18,448 στρέμματα ενώ το 2003 το διαθέσιμο νερό άρδευσης ήταν 15,621,698 m^3 και η έκταση 21,162 στρέμματα.

Σύμφωνα με τις καλλιέργειες που επιλέχθηκαν να αρδευτούν, την έκταση και το διαθέσιμο νερό, το 2004 παρόλο που η έκταση (22,806 στρέμματα) η οποία είναι μεγαλύτερη από την έκταση που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο το 2003 και ο συνολικός διαθέσιμος όγκος νερού (16,585,271 m^3) είναι επίσης μεγαλύτερος από το 2003, το μέγιστο κέρδος είναι μικρότερο (16,179,120 €) από ότι το 2003.

Για τη διάρκεια των 18 ετών ο μέσος όρος οικονομικού κέρδους όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο βελτιστοποίησης είναι 8,562,583 €.



Σχήμα 5. Μέγιστο οικονομικό κέρδος για κάθε έτος σε Ευρώ.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ανάπτυξη και επίλυση του μοντέλου βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας έγινε μια βέλτιστη κατανομή των εκτάσεων και του διαθέσιμου νερού για άρδευση καθώς και επιλογή των καλλιεργειών με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κέρδους του Αρδευτικού Έργου Πάφου. Για τη εύρεση του βέλτιστου οικονομικά αποτελέσματος κάποια είδη καλλιεργειών σύμφωνα με το σύνολο των παραμέτρων και των περιορισμών του προβλήματος, δεν συμπεριλήφθηκαν στο σχέδιο καλλιέργειας. Επίσης, παρατηρήθηκε μείωση στην συνολική καλλιεργήσιμη έκταση με την επίλυση του μοντέλου, αλλά η αύξηση του διαθέσιμου όγκου του νερού κρίθηκε αναγκαία σε κάποια έτη για να υπάρξει εφικτή λύση. Απαραίτητη κρίνεται η ορθολογική διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων, η οποία μπορεί να αφορά και την αποθήκευση νερού για χρήση του, όταν υπάρχουν ανάγκες από τα φυτά. Ελαχιστοποιώντας τις δυσμενείς επιπτώσεις των ακραίων ελλείψεων νερού στην απόδοση των καλλιεργειών, η ελλειμματική άρδευση έδειξε ότι μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη επιλογή για την αύξηση της παραγωγής των καλλιεργειών, τις αρδευόμενες εκτάσεις και τα καθαρά οικονομικά οφέλη από την περιοχή μελέτης. Το μοντέλο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία λειτουργεί ως ένα εργαλείο λήψης απόφασης για το ποιες καλλιέργειες και σε ποια έκταση θα αρδευτούν και ως ένα εργαλείο προγραμματισμού των αρδεύσεων, σύμφωνα με την ποσότητα νερού που χορηγείται για άρδευση κάθε έτος. Συνεπώς, το μοντέλο βελτιστοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο πρόβλεψης του είδους, των εκτάσεων των καλλιεργειών και της ποσότητας νερού άρδευσης στην αρχή της βλαστικής περιόδου για την επίτευξη του μέγιστου οικονομικού κέρδους, όταν είναι γνωστές οι κλιματολογικές συνθήκες και το διαθέσιμο νερό.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Allen, R.G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements.* FAO Irrigation and Drainage, 56, 300 p.

Bos, M.G., Kselik, R.A.L., Allen, R.G. and Molden, D. 2009. *Water Requirements for Irrigation and the Environment*. Springer, Dordrecht.

Γεωργίου, Π.Ε. 2004. *Βελτιστοποίηση Λειτουργίας Ταμιευτήρων για Αρδευτικούς Σκοπούς.* Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Σχολή Γεωτεχνικών Επιστημών. Τμήμα Γεωπονίας, 341 σελ.

Georgiou, P. E. and Papamichail, D. M. 2008. *Optimization Model of an Irrigation Reservoir for Water Allocation and Crop Planning under Various Weather Conditions*. Irrigation Science, 266, 487-504.

Jensen, M. E. 1968. *Water Consumption by Agricultural Plants.* In: T.T. Kozlowski ed., Water Deficits and Plants Growth, Vol. II. Academic Press, New York, 1-22.

Καλλή, Α. 2009. *Διαχείριση Υδατικών Πόρων Αρδευτικού Έργου Πάφου.* Πτυχιακή Διατριβή, Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 220 σελ.

Land and Water Development Division. 2015. *Cropwat 8.0, Software*. FAO WATER DEVELOPMENT AND MANAGEMENT UNIT, <http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html> Sep. 18, 2015.

Lindo Systems Inc. 2003. *LINGO: the Modeling Language and Optimizer*.

Μάρκου, Μ., και Παπαδαυίδ, Γ. 2011. *Τυπικές Εισροές-Εκροές για τις Κύριες Φυτικές και Ζωοκομικές Εκμεταλλευσεις της Κυπρου*. Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών.

Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Μπαμπατζιμόπουλος, Χ.Σ. 2014. *Εφαρμοσμένη Γεωργική Υδραυλική.* Εκδόσεις Ζήτη, 550 σελ.

Πέτρου, Κ. 2015. *Βέλτιστη Διαχείριση Νερού Αρδευτικού έργου Πάφου*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 246 σελ.

Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων. 2002. *Χρήση και Εξοικονόμηση Νερού στην Κύπρο*. Υπουργείο Γεωργίας Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

USDA Soil Conservation Service. 1970. *Irrigation Water Requirements.* Technical Release, 21, 92 p.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΩΦΕΛΙΜΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ

Δ. Χατζηγεωργίου✉, Π. Γεωργίου
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, 54124, Θεσσαλονίκη
✉dchatzige@agro.auth.gr

Περίληψη

Με την κατασκευή ενός φράγματος σε ένα υδατόρευμα δημιουργείται ανάντη μία τεχνητή λίμνη που ονομάζεται ταμιευτήρας και αποτελεί χώρο αποθήκευσης του νερού του υδατορεύματος. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων είναι η ωφέλιμη χωρητικότητα και η απόδοσή τους. Στην εργασία αυτή έγινε υπολογισμός της ωφέλιμης χωρητικότητας στον υπό σχεδιασμό ταμιευτήρα του ποταμού Ολυνθίου στη Χαλκιδική με μεθόδους, οι οποίες βασίζονται σε ιστορικές χρονοσειρές εισροών. Μέσω της βελτιστοποίησης επιλύθηκαν τα προβλήματα ελαχιστοποίησης της ωφέλιμης χωρητικότητας και μεγιστοποίησης της απόδοσης του ταμιευτήρα. Η περιγραφή της λειτουργίας του ταμιευτήρα έγινε με τη χρήση των δεικτών λειτουργίας αφού πρώτα γίνει η προσομοίωση της λειτουργίας του.

Λέξεις κλειδιά: Ωφέλιμη χωρητικότητα, Βελτιστοποίηση, Δείκτες λειτουργίας

COMPUTATION OF RESERVOIR ACTIVE STORAGE CAPACITY AND OPERATION ANALYSIS

D. Chatzigeorgiou✉, P. Georgiou
Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, 54124, Thessaloniki
✉dchatzige@agro.auth.gr

Abstract

With the construction of a dam in a stream is created upstream an artificial lake called reservoir and is stream's water storage. The main characteristics of reservoirs are active storage capacity and yield. In this paper the active storage capacity was computed with methods, which are based on historical time series inflows, in a planned reservoir on the Olynthios stream in Chalkidiki. The problems of minimizing the active storage capacity and maximizing the yield of the reservoir were resolved through optimization. The description of the reservoir's operation was performed using the performance indices after the simulation of its operation.

Keywords: Active storage capacity, Optimization, Performance indices

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την κατασκευή ενός φράγματος σε ένα υδατόρευμα δημιουργείται ανάντη μία τεχνητή λίμνη που ονομάζεται ταμιευτήρας (reservoir) και αποτελεί χώρο αποθήκευσης του

νερού του υδατορεύματος. Από τη σκοπιά του υδρολογικού σχεδιασμού ταμιευτήρα, εκείνο που έχει μεγάλη σημασία είναι η αξιόπιστη διαστασιολόγηση. Ο καθορισμός δηλαδή των διαστάσεων του όγκου αποθήκευσης του νερού, έτσι ώστε να είναι συμβατός με τα χαρακτηριστικά (κυρίως τα στατιστικά) της ιστορικής χρονοσειράς εισροών στον ταμιευτήρα, αλλά και να παρέχει μία αποδεκτή διακινδύνευση, πιθανότητα δηλαδή ότι ο όγκος θα επαρκεί για την ικανοποίηση μίας συγκεκριμένης ζήτησης.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων είναι η ωφέλιμη χωρητικότητα και η απόδοσή τους. Οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της χωρητικότητας – απόδοσης των ταμιευτήρων ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους οι οποίες βασίζονται σε ιστορικές χρονοσειρές εισροών και οι οποίες εφαρμόζονται στην παρούσα εργασία. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους που βασίζονται στη Θεωρία Αποθήκευσης του Moran (Moran, 1959; Γεωργίου, 1996; Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 2006). Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους οι οποίες βασίζονται σε συνθετικές σειρές εισροών (McMahon and Mein, 1978; Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 2000; Papamichail and Georgiou, 2001).

Στο σχεδιασμό ενός ταμιευτήρα, ιδιαίτερο βάρος δίνεται και στο χαρακτηρισμό της λειτουργίας του, στην πιθανότητα δηλαδή ότι ο ταμιευτήρας θα ανταποκριθεί στο έργο για το οποίο έχει κατασκευαστεί κάτω από ένα ευρύ πεδίο πιθανών αναγκών σε νερό και υδρολογικών καταστάσεων. Για την περιγραφή της λειτουργίας ενός ταμιευτήρα χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι δείκτες λειτουργίας (McMahon and Adeloye, 2005).

Η περιοχή μελέτης αφορά έναν υπό σχεδιασμό ταμιευτήρα, που τροφοδοτείται με νερό από τον ποταμό Ολύνθιο της Χαλκιδικής, ο οποίος πρόκειται να ικανοποιεί τις ανάγκες σε νερό τόσο για την ύδρευση της περιοχής όσο και για την άρδευση των καλλιεργειών. Στην παρούσα εργασία γίνεται υπολογισμός της ωφέλιμης χωρητικότητας του ταμιευτήρα με τις μεθόδους εκείνες που βασίζονται σε ιστορικές χρονοσειρές εισροών. Η επιλογή της ωφέλιμης χωρητικότητας γίνεται με βάση τη γεωλογία και τοπογραφία της περιοχής. Επιλύονται τα προβλήματα ελαχιστοποίησης της ωφέλιμης χωρητικότητας και μεγιστοποίησης της ζήτησης που ικανοποιείται από τον ταμιευτήρα μέσω της βελτιστοποίησης. Πραγματοποιείται μία προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα για διάφορες ωφέλιμες χωρητικότητες και εκτιμούνται οι δείκτες λειτουργίας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Μέθοδοι υπολογισμού της ωφέλιμης χωρητικότητας με βάση την ιστορική χρονοσειρά των εισροών

Οι μέθοδοι της κατηγορίας αυτής χαρακτηρίζονται από δύο προσεγγίσεις του προβλήματος της ωφέλιμης χωρητικότητας – απόδοσης ενός ταμιευτήρα (McMahon and Mein, 1978; Παπαμιχαήλ, 2004; McMahon and Adeloye, 2005). Κατά την πρώτη προσέγγιση, χρησιμοποιούνται οι ιστορικές εισροές και η προβλεπόμενη ζήτηση για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα. Η δεύτερη προσέγγιση έχει ως κοινό στοιχείο ότι χρησιμοποιούνται στην ανάλυση μόνο οι περίοδοι χαμηλών εισροών νερού.

Η μέθοδος της Αθροιστικής Καμπύλης (Διάγραμμα Rippl), ο Αλγόριθμος Ακολουθίας Αιχμής, η μέθοδος του Alexander και η μέθοδος της Γάμμα Κατανομής του Gould αποτελούν κάποιες από τις μεθόδους υπολογισμού της ωφέλιμης χωρητικότητας – απόδοσης ενός ταμιευτήρα.

2.1.1. Μέθοδος Αθροιστικής Καμπύλης (Διάγραμμα Rippl)

Η μέθοδος της Αθροιστικής Καμπύλης (Rippl, 1883) αποτελεί την πρώτη γνωστή μέθοδο εκτίμησης του μεγέθους της απαιτούμενης ωφέλιμης χωρητικότητας για μία δεδομένη ζήτηση. Τα στάδια της μεθόδου αυτής, έχουν ως εξής (McMahon and Mein, 1978; Παπαμιχαήλ, 2004; McMahon and Adeloye, 2005):

1. Για την προτεινόμενη θέση του φράγματος, σχεδιάζεται μία αθροιστική καμπύλη των ιστορικών εισροών. Σα γενικό κανόνα, η καμπύλη αυτή σχεδιάζεται χρησιμοποιώντας μηνιαίες εισροές.
2. Θέτεται επί της αθροιστικής καμπύλης η αθροιστική γραμμή της ζήτησης έτσι ώστε να εφάπτεται της αθροιστικής καμπύλης των εισροών σε κάθε κύρτωση.
3. Υπολογίζεται η μέγιστη απόσταση μεταξύ της αθροιστικής καμπύλης των εισροών και της αθροιστικής γραμμής της ζήτησης.

2.1.2. Αλγόριθμος Ακολουθίας Αιχμής

Η μέθοδος αυτή που προτάθηκε από τον Thomas (Thomas and Burden, 1963) και περιγράφεται από τον Fiering (1967) έχει ως εξής (McMahon and Mein, 1978; McMahon and Adeloye, 2005):

1. Υπολογίζεται η διαφορά X_i-D_i (δηλαδή, εισροή-ζήτηση) για i=1,2,…,2N και κατόπιν η καθαρή αθροιστική εισροή $\sum_{i=1}^{t}\left(X_i - D_i\right)$ για t=1,2,…,2N.
2. Εντοπίζεται η πρώτη αιχμή (τοπικό μέγιστο), P_1, των καθαρών αθροιστικών εισροών.
3. Εντοπίζεται η ακολουθία αιχμής, P_2, η οποία είναι η επόμενη αιχμή μεγαλύτερου μεγέθους από την πρώτη.
4. Μεταξύ αυτού του ζεύγους αιχμών βρίσκεται το κατώτερο σημείο (τοπικό ελάχιστο), T_1, και υπολογίζεται η διαφορά P_1-T_1.
5. Από το P_2, βρίσκεται η επόμενη ακολουθία αιχμής, P_3, η οποία είναι μεγαλύτερου μεγέθους από την P_2.
6. Βρίσκεται το κατώτερο σημείο, T_2, μεταξύ των P_2 και P_3 και υπολογίζεται η διαφορά P_2-T_2.
7. Από το P_3, βρίσκονται τα P_4 και T_3 και υπολογίζεται η διαφορά P_3-T_3.
8. Συνεχίζεται η διαδικασία αυτή της μεθόδου για 2N περιόδους.
9. Η απαιτούμενη ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι:

$$C = \max\left(P_k - T_k\right) \tag{1}$$

2.1.3. Μέθοδος Alexander

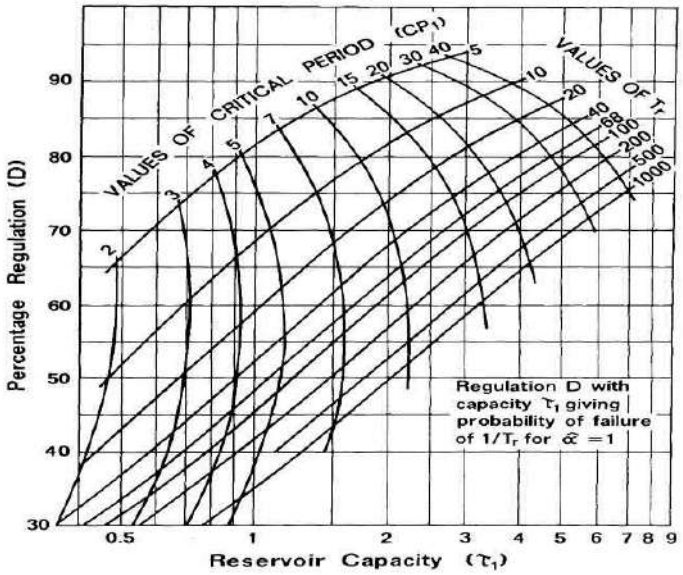
Ο Alexander (1962) υπέθεσε ότι οι ετήσιες εισροές θα μπορούσαν να αντιπροσωπευθούν από μία κατανομή πιθανοτήτων, τη Γάμμα κατανομή, από την οποία καθόρισε τις αθροιστικές εισροές για διάφορες περιόδους επαναφοράς. Τα στάδια υπολογισμού της ωφέλιμης χωρητικότητας έχουν ως εξής (McMahon and Mein, 1978):

1. Καθορίζεται το ποσοστό ρύθμισης, D, ως προς τη μέση εισροή. Αυτό πρέπει να είναι σταθερό.
2. Υπολογίζεται η παράμετρος σχήματος, $\hat{\alpha}$, της Γάμμα κατανομής για ετήσιες εισροές σύμφωνα με τη σχέση (Thom, 1958):

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4U}{3}}}{4U} \tag{2}$$

όπου U η διαφορά μεταξύ του λογαρίθμου της μέσης ετήσιας εισροής και της μέσης τιμής των λογαρίθμων των ετήσιων εισροών $\left(\ln \bar{x} - \ln G\right)$.

3. Καθορίζεται η πιθανότητα αποτυχίας ή η περίοδος επαναφοράς, T_r, της κρίσιμης περιόδου σχεδιασμού του ταμιευτήρα.
4. Εκτιμούνται για $\hat{\alpha} = 1$, η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα, τ_1, ως αναλογία της μέσης ετήσιας εισροής και η κρίσιμη περίοδος σε έτη, CP_1, σύμφωνα με τις καμπύλες της ωφέλιμης χωρητικότητας – ρύθμισης – πιθανότητας που φαίνονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Καμπύλες της ωφέλιμης χωρητικότητας – ρύθμισης – απόδοσης του Alexander.

5. Υπολογίζεται η απαιτούμενη ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα σε μονάδες όγκου από τη σχέση:

$$C = \frac{\tau_1}{\hat{\alpha}} \bar{x} \tag{3}$$

όπου $\bar{x}$ η μέση ετήσια εισροή.

6. Η αντίστοιχη κρίσιμη περίοδος σε έτη δίνεται ως εξής:

$$CP = \frac{CP_1}{\hat{\alpha}} \tag{4}$$

2.1.4. Μέθοδος Γάμμα Κατανομής του Gould

Η μέθοδος αυτή (Gould, 1964) χαρακτηρίζεται από τη χρησιμοποίηση της Κανονικής κατανομής στους υπολογισμούς, και έπειτα, από την εφαρμογή μίας διόρθωσης προσεγγίζοντας τη Γάμμα κατανομή. Η απαιτούμενη ωφέλιμη χωρητικότητα σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή είναι (McMahon and Mein, 1978; McMahon and Adeloye, 2005):

$$\frac{C}{\bar{x}} = \frac{z_p^{\,2}}{4(1-D)} C_v^{\,2} - d C_v^{\,2} \tag{5}$$

όπου C η μέγιστη απαιτούμενη ωφέλιμη χωρητικότητα (μονάδες όγκου), z_p η μεταβλητή της Κανονικής κατανομής για μία πιθανότητα εμφάνισης p (%), D η σταθερή ζήτηση ως αναλογία της μέσης ετήσιας εισροής νερού, C_v ο ετήσιος συντελεστής διακύμανσης και d η

διαφορά της κατώτερης εκατοστιαίας τιμής της εισροής μεταξύ της Γάμμα κατανομής και της Κανονικής κατανομής.

2.2. Σχεδιασμός των ταμιευτήρων μέσω της βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση είναι συνώνυμη του μαθηματικού προγραμματισμού (Wurbs, 1995) και αναφέρεται σε μία μαθηματική διατύπωση, στην οποία για τον υπολογισμό των τιμών μίας ομάδας μεταβλητών απόφασης οι οποίες ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν μία αντικειμενική συνάρτηση, κάτω από κάποιους περιορισμούς, χρησιμοποιείται ένας τυπικός αλγόριθμος. Η εφαρμογή της βελτιστοποίησης εστιάζεται σε δύο τύπους προβλημάτων, στην ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ωφέλιμης χωρητικότητας για μία δεδομένη ζήτηση και στη μεγιστοποίηση της ζήτησης που ικανοποιείται για μία δεδομένη ωφέλιμη χωρητικότητα ενός ταμιευτήρα.

2.2.1. Πρόβλημα ωφέλιμης χωρητικότητας – ζήτησης απλών ταμιευτήρων

Θεωρείται το κλασικό πρόβλημα καθορισμού της ωφέλιμης χωρητικότητας, S, ενός ταμιευτήρα για μία δεδομένη ζήτηση, D. Υποθέτεται ότι, η εξάτμιση, η απευθείας βροχή και η βαθιά διήθηση είναι αμελητέα. Επομένως, η διατύπωση του προβλήματος του γραμμικού προγραμματισμού έχει ως εξής (McMahon and Adeloye, 2005):

Ελαχιστοποίηση S (6)

με τους εξής περιορισμούς:

$$Z_{t+1} = Z_t + Q_t - D_t - O_t;\ \ t = 1,2,...,N \quad (7)$$

$$Z_t \le S;\ \ t = 1,2,...,N \quad (8)$$

$$Z_t, D_t, O_t \ge 0;\ \ t = 1,2,...,N \quad (9)$$

όπου D_t η σταθερή ζήτηση νερού ανά περίοδο, Q_t η εισροή κατά τη διάρκεια της περιόδου t (μήνας ή έτος), N ο αριθμός των περιόδων στην ανάλυση, Z_t ο όγκος νερού στην αρχή της περιόδου t, Z_{t+1} ο όγκος νερού στο τέλος της περιόδου t, O_t οι διαρροές και εκροές νερού πλην της ζήτησης κατά τη διάρκεια της περιόδου t και S η ωφέλιμη χωρητικότητα. Οι σχέσεις (7), (8) και (9) αποτελούν κατά σειρά τους περιορισμούς του υδατικού ισοζυγίου, της μη υπέρβασης του φυσικού μεγέθους της ωφέλιμης χωρητικότητας από τον αποθηκευμένο όγκο νερού και της μη αρνητικότητας των μεταβλητών απόφασης (S, Z_t, O_t).

2.2.2. Εναλλακτικό πρόβλημα ζήτησης απλών ταμιευτήρων

Το εναλλακτικό πρόβλημα έχει να κάνει με την εύρεση της ζήτησης που ικανοποιείται για μία δεδομένη ωφέλιμη χωρητικότητα στην περίπτωση ενός απλού ταμιευτήρα. Το πρόβλημα αυτό ακολουθεί την ίδια προσέγγιση με το προηγούμενο εκτός του ότι, εδώ είναι γνωστή η ωφέλιμη χωρητικότητα, S, και όχι η ζήτηση, D. Τότε, η αντικειμενική συνάρτηση θα έχει τη μορφή (McMahon and Adeloye, 2005):

Μεγιστοποίηση D

με τους περιορισμούς να είναι της ίδιας μορφής με τις σχέσεις (7), (8) και (9).

2.3. Ανάλυση της λειτουργίας ταμιευτήρων

Η ανάλυση της λειτουργίας ενός ταμιευτήρα αποτελεί μία απλή διαδικασία σύμφωνα με την οποία εμφανίζεται σαφώς η συμπεριφορά του αποθηκευμένου νερού. Οι μεταβολές του όγκου νερού υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη σχέση του υδατικού ισοζυγίου:

$$Z_{t+1} = Z_t + Q_t - D_t - \Delta E_t - L_t;\ \ 0 \le Z_{t+1} \le C \quad (10)$$

όπου Z_{t+1} ο όγκος νερού στο τέλος της t^{th} χρονικής περιόδου (όγκος νερού στην αρχή της $t+1^{th}$ περιόδου), Z_t ο όγκος νερού στην αρχή της t^{th} χρονικής περιόδου, Q_t η εισροή κατά τη διάρκεια της t^{th} χρονικής περιόδου, D_t η εκροή κατά τη διάρκεια της t^{th} χρονικής περιόδου, ΔE_t οι καθαρές απώλειες λόγω εξάτμισης από τον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της t^{th} χρονικής περιόδου, L_t οι άλλες απώλειες και C η ωφέλιμη χωρητικότητα. Στη διαδικασία αυτή γίνεται η παραδοχή ότι ο ταμιευτήρας είναι αρχικά γεμάτος με νερό.

2.4. Δείκτες λειτουργίας των ταμιευτήρων

Ο κύριος όρος με τον οποίο περιγράφεται η λειτουργία ενός ταμιευτήρα είναι η αξιοπιστία. Εκτός από την αξιοπιστία, χρησιμοποιούνται και διάφοροι άλλοι όροι μεταξύ των οποίων είναι η ελαστικότητα και η ευπάθεια (McMahon and Adeloye, 2005).

Η αξιοπιστία εκφράζει την πιθανότητα ότι ο ταμιευτήρας θα ανταποκριθεί στην κάλυψη των αναγκών σε νερό σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο (συνήθως, ένα έτος), χωρίς να ληφθεί υπόψη η περίοδος προσομοίωσης. Η αξιοπιστία που υπολογίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο είναι γνωστή ως αξιοπιστία με βάση το χρόνο, διότι η κάθε αποτυχία αναγνωρίζεται από αυτήν. Μία γενική σχέση υπολογισμού της αξιοπιστίας αυτής είναι:

$$R_t = \frac{N_s}{N} \tag{11}$$

όπου R_t η αξιοπιστία με βάση το χρόνο, N_s ο συνολικός αριθμός των χρονικών περιόδων κατά τις οποίες έχουν καλυφθεί οι ανάγκες σε νερό και N ο συνολικός αριθμός των χρονικών περιόδων στην προσομοίωση.

Η αξιοπιστία με βάση τον όγκο νερού εκφράζεται από το λόγο της πραγματικής συνολικής ποσότητας του τροφοδοτούμενου νερού ως προς τη συνολική ζήτηση αυτού κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου προσομοίωσης, δηλαδή:

$$R_v = 1 - \frac{\sum_{j \in f} \left(D_j - D_j'\right)}{\sum_{j \in N} D_j} \tag{12}$$

όπου R_v η αξιοπιστία με βάση τον όγκο νερού, f ο αριθμός των περιόδων αποτυχίας ($N-N_s$), D_j' η πραγματική τροφοδοσία νερού από τον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της j^{th} περιόδου αποτυχίας, D_j η προβλεπόμενη ζήτηση κατά τη διάρκεια της j^{th} περιόδου και N ο αριθμός των περιόδων προσομοίωσης.

Η ελαστικότητα χρησιμοποιείται ως ένας δείκτης της ταχύτητας επαναφοράς μετά από μία αποτυχία. Ο πιο διαδεδομένος ορισμός της ελαστικότητας οφείλεται στους Hashimoto et al. (1982), σύμφωνα με τον οποίο, η ελαστικότητα ορίζεται ως η πιθανότητα επαναφοράς του ταμιευτήρα μετά από μία αποτυχία, δηλαδή:

$$\phi = \frac{1}{\left(\frac{f_d}{f_s}\right)} = \frac{f_s}{f_d};\ \ 0 < \phi \le 1 \tag{13}$$

όπου φ η ελαστικότητα, f_s ο αριθμός των συνεχών ακολουθιών των περιόδων αποτυχίας και f_d η συνολική διάρκεια των αποτυχιών ($N-N_s$).

Οι Hashimoto et al. (1982) όρισαν την ευπάθεια ως το μέσο όρο των μέγιστων ελλείψεων νερού που προκύπτουν σε κάθε μία από τις συνεχείς περιόδους αποτυχίας, δηλαδή:

$$\eta' = \frac{\sum_{k=1}^{f_s} \max\left(sh_k\right)}{f_s} \tag{14}$$

όπου η΄ η ευπάθεια, max.(sh_k) η μέγιστη έλλειψη νερού κατά τη διάρκεια της k^{th} συνεχούς ακολουθίας αποτυχιών και f_s ο αριθμός των συνεχών ακολουθιών αποτυχίας στην προσομοίωση.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η εφαρμογή αφορά τον υπολογισμό της ωφέλιμης χωρητικότητας στον υπό σχεδιασμό ταμιευτήρα του ποταμού Ολυνθίου στη Χαλκιδική. Η εκτίμηση των εισροών στον ταμιευτήρα έγινε σε μηνιαία βάση για την περίοδο 1975-2005, με τη βοήθεια του υδρολογικού μοντέλου των Thornthwaite και Mather. Οι υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες εκτιμήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες ύδρευσης των οικισμών και τουριστικών εγκαταστάσεων της δυτικής Χαλκιδικής, και ειδικότερα των δήμων Ν. Μουδανιών, Ν. Καλλικράτειας και Ν. Τρίγλιας και τις ανάγκες άρδευσης των καλλιεργειών στις περιοχές της Ορμύλιας και των Καλυβών – Ν. Μουδανιών (Καραμούζης κ. άλ., 2008α). Για τα ημερολογιακά έτη 1975-2005, η μέση ετήσια εισροή ανέρχεται σε 22.57×10^6 m^3 και η ετήσια ζήτηση σε 16.80×10^6 m^3 (Καραμούζης κ. άλ., 2008β). Από την προμελέτη προκύπτει πως λόγω της γεωλογίας και τοπογραφίας της περιοχής, η ωφέλιμη χωρητικότητα συνίσταται σε ένα μέγεθος των 20.1×10^6 m^3. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα μεγέθη της ωφέλιμης χωρητικότητας που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων που περιγράφηκαν στις Παραγράφους 2.1.1.-2.1.4.

Πίνακας 1. Ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα του Ολυνθίου σύμφωνα με την εφαρμογή των μεθόδων διαστασιολόγησης.

Μέθοδος	Ωφέλιμη χωρητικότητα ($\times10^6$ m^3)
Αθροιστικής Καμπύλης (Διάγραμμα Rippl)	41.73
Αλγόριθμος Ακολουθίας Αιχμής	45.52
Alexander	31.29
Γάμμα Κατανομής του Gould	20.39

Σύμφωνα με τον Πίνακα 1, η μέγιστη ωφέλιμη χωρητικότητα πρόεκυψε από τη μέθοδο του Αλγορίθμου Ακολουθίας Αιχμής και η ελάχιστη από τη μέθοδο της Γάμμα Κατανομής του Gould. Τόσο η μέθοδος της Αθροιστικής Καμπύλης (Διάγραμμα Rippl) όσο και η μέθοδος του Αλγορίθμου Ακολουθίας Αιχμής λαμβάνουν υπόψη την εποχικότητα και άλλες παραμέτρους ροής στη διαδικασία υπολογισμού της ωφέλιμης χωρητικότητας. Η μέθοδος του Alexander είναι αρκετά ακριβής έτσι ώστε να εφαρμοστεί σε μία προκαταρκτική μελέτη αλλά όχι σε ένα τελικό στάδιο σχεδιασμού ενός ταμιευτήρα. Τέλος, η μέθοδος της Γάμμα Κατανομής του Gould παρέχει πολύ καλές εκτιμήσεις της ωφέλιμης χωρητικότητας σε όλο το φάσμα του πρακτικού ενδιαφέροντος.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν τα δύο προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού για τον ταμιευτήρα του Ολυνθίου για τα ημερολογιακά έτη 1975-2005. Όσον αφορά το πρώτο πρόβλημα, η ελαχιστοποίηση της ωφέλιμης χωρητικότητας αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση. Διατυπώθηκαν οι περιορισμοί, αυτός του υδατικού ισοζυγίου, της μη υπέρβασης του φυσικού μεγέθους της ωφέλιμης χωρητικότητας από τον αποθηκευμένο όγκο νερού και της μη αρνητικότητας των μεταβλητών απόφασης. Για το πρόβλημα αυτό απαιτούνται οι εισροές νερού στον ταμιευτήρα του Ολυνθίου και οι ανάγκες σε νερό (υδρευτικές και αρδευτικές). Το πρόβλημα επιλύθηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Lingo. Η απαιτούμενη ωφέλιμη χωρητικότητα που υπολογίστηκε ανέρχεται σε 45.52×10^6

m^3. Η μέθοδος της βελτιστοποίησης αποτελεί την καλύτερη μέθοδο υπολογισμού της ωφέλιμης χωρητικότητας ενός ταμιευτήρα διότι, με τη μέθοδο αυτή λαμβάνεται υπόψη η λειτουργία του ταμιευτήρα με την εφαρμογή της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου. Για το δεύτερο πρόβλημα, η μεγιστοποίηση της ζήτησης που ικανοποιείται αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση. Και σ' αυτό το πρόβλημα διατυπώθηκαν οι περιορισμοί, αυτός του υδατικού ισοζυγίου και της μη υπέρβασης του φυσικού μεγέθους της ωφέλιμης χωρητικότητας από τον αποθηκευμένο όγκο νερού. Για το πρόβλημα αυτό απαιτούνται οι εισροές νερού στον ταμιευτήρα του Ολυνθίου. Το πρόβλημα επιλύθηκε με χρήση του προγράμματος Lingo και στον Πίνακα 2 δίνονται τα μεγέθη της ζήτησης που ικανοποιούνται για τιμές ωφέλιμης χωρητικότητας των 20, 25, 30, 35 και 40×10^6 m^3.

Πίνακας 2. Το μέγεθος της ζήτησης που ικανοποιείται για τις ωφέλιμες χωρητικότητες των 20, 25, 30, 35 και 40×10^6 m^3.

Ωφέλιμη χωρητικότητα ($\times10^6$ m^3)	**Ζήτηση ($\times10^6$ m^3)**
20	10.64
25	13.14
30	14.90
35	16.49
40	17.65

Από τον Πίνακα 2 παρατηρείται ότι, εφόσον η ετήσια ζήτηση σε νερό ανέρχεται σε 16.80×10^6 m^3, για τις ωφέλιμες χωρητικότητες των 20, 25, 30, 35 και 40×10^6 m^3 ικανοποιείται ένα ποσοστό της τάξης των 63.3, 78.2, 88.7, 98.2 και 105.1 % της ετήσιας ζήτησης αντίστοιχα. Συνεπώς, ξεκινώντας από μία ωφέλιμη χωρητικότητα των 20×10^6 m^3 όπου το σύνολο των αναγκών σε νερό θα ικανοποιείται σημαντικά κατά ένα μεγάλο ποσοστό, φτάνουμε σε μία ωφέλιμη χωρητικότητα των 40×10^6 m^3 όπου στην περίπτωση αυτή η ικανοποίηση των αναγκών σε νερό θα είναι υπερπλήρης.

Έπειτα, έγινε η προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα του Ολυνθίου με την εφαρμογή του υδατικού ισοζυγίου, για την οποία απαιτούνται οι εισροές νερού, η απευθείας βροχή, οι ανάγκες σε νερό και οι απώλειες νερού λόγω εξάτμισης. Στον Πίνακα 3 δίνονται τα ποσοστά (%) των αναγκών που ικανοποιούνται αλλά και ο αντίστοιχος αριθμός των μηνών των δεδομένων (1975-2005) που περιλαμβάνονται σε κάθε ένα ποσοστό για τις ωφέλιμες χωρητικότητες των 20, 30 και 40×10^6 m^3.

Πίνακας 3. Ποσοστά ικανοποίησης των αναγκών και ο αντίστοιχος αριθμός των μηνών για τις ωφέλιμες χωρητικότητες των 20, 30 και 40×10^6 m^3.

Ποσοστό ικανοποίησης των αναγκών (%)	**Ωφέλιμη χωρητικότητα ($\times10^6$ m^3)**		
	20	30	40
	Μήνες		
100	318	352	360
80-99.9	3	-	-
50-79.9	2	1	1
<49.9	9	5	4
Καθόλου	40	14	7

Σύμφωνα με τον Πίνακα 3, από την προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα προκύπτει ότι, για την ικανοποίηση της μηνιαίας ζήτησης, το έργο παρουσιάζει 40 μήνες πλήρους αστοχίας ύδρευσης και άρδευσης για μία ωφέλιμη χωρητικότητα των 20×10^6 m^3

όταν για μία ωφέλιμη χωρητικότητα των 40×10^6 m^3 οι μήνες αυτοί είναι στο σύνολο μόνον 7. Επιπλέον, για μία ωφέλιμη χωρητικότητα των 40×10^6 m^3 οι μήνες φτάνουν τους 360 κατά τους οποίους παρουσιάζεται ένα ποσοστό ικανοποίησης των αναγκών σε νερό που φτάνει το 100 %, όταν για μία ωφέλιμη χωρητικότητα των 20×10^6 m^3 οι μήνες αυτοί είναι 318, αν και στην περίπτωση αυτή η ωφέλιμη χωρητικότητα είναι και πάλι πολύ ικανοποιητική.

Τέλος, στον Πίνακα 4 δίνονται οι δείκτες λειτουργίας που υπολογίστηκαν με βάση την προσομοίωση που έγινε στον ταμιευτήρα του Ολυνθίου για τις ωφέλιμες χωρητικότητες των 20, 30 και 40×10^6 m^3.

Πίνακας 4. Δείκτες λειτουργίας για τις ωφέλιμες χωρητικότητες των 20, 30 και 40×10^6 m^3.

Ωφέλιμη χωρητικότητα ($\times10^6$ m^3)	**Αξιοπιστία με βάση το χρόνο**	**Αξιοπιστία με βάση τον όγκο νερού**	**Ελαστικότητα**	**Ευπάθεια**
20	0.86	0.86	0.13	3.05
30	0.95	0.93	0.15	3.81
40	0.97	0.97	0.17	2.52

Από τον Πίνακα 4 παρατηρείται ότι, τόσο για την ωφέλιμη χωρητικότητα των 20×10^6 m^3 όσο και για αυτή των 40×10^6 m^3 η αξιοπιστία με βάση το χρόνο αλλά και τον όγκο νερού κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα χωρίς να υπάρχουν πολύ σημαντικές διαφορές, πράγμα το οποίο συγκλίνει στο ότι, η ωφέλιμη χωρητικότητα των 20×10^6 m^3 παρουσιάζεται ως αρκετά ικανοποιητική για το σκοπό του έργου (ύδρευση και άρδευση). Αυτό σημαίνει πως για μία ωφέλιμη χωρητικότητα των 20×10^6 m^3 ο ταμιευτήρας θα ανταποκριθεί στην κάλυψη των αναγκών σε νερό σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο. Επιπλέον, για τα δύο αυτά μεγέθη της ωφέλιμης χωρητικότητας φαίνεται ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά τόσο ως προς την ταχύτητα επαναφοράς του ταμιευτήρα μετά από μία αποτυχία ικανοποίησης της ζήτησης όσο και ως προς το μέγεθος των μέγιστων ελλείψεων νερού που προκύπτουν σε κάθε μία από τις συνεχείς περιόδους αποτυχίας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε η μελέτη του σχεδιασμού και της λειτουργίας του υπό σχεδιασμού ταμιευτήρα Ολυνθίου στη Χαλκιδική. Από την εφαρμογή των μεθόδων υπολογισμού της ωφέλιμης χωρητικότητας με βάση την ιστορική χρονοσειρά των εισροών, προέκυψαν τιμές ωφέλιμης χωρητικότητας που κυμαίνονται σε ένα εύρος των 20.39-45.52×10^6 m^3, με κάθε μία από τις μεθόδους να ακολουθεί τις δικές της υποθέσεις, περιορισμούς και γνωρίσματα. Η ωφέλιμη χωρητικότητα που υπολογίστηκε μέσω της βελτιστοποίησης είναι πιο αξιόπιστη καθώς λαμβάνεται υπόψη η λειτουργία του ταμιευτήρα με την εφαρμογή της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου. Από την βελτιστοποίηση αλλά και την προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα προέκυψε πως για μία ωφέλιμη χωρητικότητα της τάξης των 40×10^6 m^3, ο ταμιευτήρας θα λειτουργεί ικανοποιητικά κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό με αποτέλεσμα να ικανοποιείται και το σύνολο των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών χωρίς αυτό να σημαίνει ότι για μία ωφέλιμη χωρητικότητα της τάξης των 20×10^6 m^3 η αστοχία ικανοποίησης της ζήτησης είναι πολύ μεγάλη. Τέλος, από τους δείκτες λειτουργίας φαίνεται πως για μία ωφέλιμη χωρητικότητα των 20×10^6 m^3, η αξιοπιστία της λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι αρκετά

ικανοποιητική, πράγμα που έρχεται και σε συμφωνία με το μέγεθος της ωφέλιμης χωρητικότητας που προέκυψε από την προμελέτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alexander, G.N., 1962. The use of the Gamma distribution in estimating regulated outputs from storages. Civil Eng. Trans., Institution of Engineers, Australia, CE4 (1), 29-34.

Γεωργίου, Π.Ε., 1996. Διαστασιολόγηση ταμιευτήρων με τη μέθοδο Rippl σε συνθετικές σειρές εισροών και τη μέθοδο των πιθανοτήτων μετάβασης σε ιστορική σειρά. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 269 σελ.

Γεωργίου, Π.Ε. και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ, 2000. Διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα του Ολύνθιου με χρήση συνθετικών σειρών μηνιαίων εισροών. Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, Τόμος 11, Σειρά Ι, Νο 2/2000, Θεσσαλονίκη, 148-160.

Γεωργίου, Π.Ε. και Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2006. Υδρολογική Διαστασιολόγηση Ταμιευτήρων για την Ικανοποίηση Αρδευτικής Ζήτησης με τη Μέθοδο των Πιθανοτήτων Μετάβασης. Πρακτικά 10ου Πανελλήνιου Συνεδρίου ΕΥΕ, Ξάνθη, 201-208.

Fiering, M.B., 1967. Streamflow Synthesis, Macmillan, London.

Gould, B.W., 1964. Discussion of paper by G.N. Alexander. In Water Resources Use and Management, Melbourne University Press, Melbourne.

Hashimoto, T., J.R. Stedinger and D.P. Loucks, 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research, 18 (1), 14-20.

Καραμούζης, Δ., Παρισόπουλος, Γ., Μέρτζιου, Ε. κ. άλ., 2008α. Προμελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Φράγματος και Δικτύων Ολυνθίου, Θεσσαλονίκη. Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ./Γ.Γ..Δ.Ε./Γ.Δ.Υ.Ε. Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.

Καραμούζης, Δ., Παρισόπουλος, Γ., Δημόπουλος, Γ., Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., Γεωργίου, Π.Ε., Μακεδών, Θ., Χαραλαμπόπουλος, Ν. και Σαπουντζάκης, Γ., 2008β. Προκαταρκτική Μελέτη Φράγματος Ολύνθιου (Θέση Λουζίκι). Θεσσαλονίκη. Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ./Γ.Γ..Δ.Ε./Γ.Δ.Υ.Ε. Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.

McMahon, T.A. and A.J. Adeloye, 2005. Water Resources Yield. Water Resources Publications, LLC, Colorado, 220 p.

McMahon, T.A. and R.G. Mein, 1978. Reservoir Capacity and Yield. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 213 p.

Moran, P.A.P., 1959. The theory of storage. Methuen and Co. Ltd, London.

Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2004. Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη, 394 σελ.

Papamichail, D.M. and Georgiou, P.E., 2001. Seasonal ARIMA Inflow Models for Reservoir Sizing. Journal of the American Water Resources Association, 37 (4), 877-885.

Rippl, W., 1883. The capacity of storage reservoirs for water supply. Proc. Inst. Of Civil Engin., Vol. 71, 270-278.

Thom, H.S.C., 1958. A note on the gamma distribution. Monthly Weather Review, 86 (4), 117-122.

Thomas, H.A. and Burden, R.P., 1963. Operations Research in Water Quality Management. Harvard Water Resources Group.

Wurbs, R.A., 1995. Water Management Models: A Guide to Software. Prentice Hall, 239 p.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΣΕ ΝΕΡΟ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ

Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Β. Μπότα✉, Χ. Παπανικολάου, Β. Γιουβάνης & Ε. Χρισταντώνης
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα ΓΦΠΑΠ, Φυτόκου, 38446, Βόλος
✉vasbota@yahoo.com

Περίληψη

Η καλλιέργεια του αραβόσιτου είναι μεγάλης οικονομικής σημασίας και υπόσχεται υψηλές αποδόσεις όταν αρδεύεται επαρκώς. Στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας πραγματοποιήθηκε έρευνα όπου διερευνήθηκε η επίδραση της εφαρμογής τριών διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ETo) στην ανάπτυξη και απόδοση καλλιέργειας αραβόσιτου, με κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό στο 100% της πραγματικής ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ETc). Οι μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το απλό, το πλήρως αυτοματοποιημένο εξατμισίμετρο τύπου Α και η μέθοδος Penman-Monteith. Αξιολογήθηκε η αποδοτικότητα και η εξοικονόμηση της χρήσης του αρδευτικού νερού. Διαπιστώθηκε ότι η μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού πραγματοποιήθηκε με το αυτόματο εξατμισίμετρο τύπου Α και η μεγαλύτερη εξοικονόμηση νερού επιτεύχθηκε με το απλό εξατμισίμετρο τύπου Α.

Λέξεις κλειδιά: επιφανειακή στάγδην άρδευση, εξατμισίμετρο τύπου Α, μέθοδος Penman-Monteith, αποδοτικότητα και εξοικονόμηση νερού

COMPARISON OF EVAPOTRANSPIRATION CALCULATION METHODS FOR THE ESTIMATION OF MAIZE WATER REQUIREMENTS

M. Sakellariou-Makrantonaki, V. Bota✉, C. Papanikolaou, V. Giouvanis & E. Christantonis
[1]University of Thessaly, Department of ACPRE, Fytokou, 38446, Volos
✉vasbota@yahoo.com

ABSTRACT

The cultivation of maize is of great economic importance and promises high yields under adequate irrigation conditions. At the farm of the University of Thessaly a research was conducted in order to determine the effect of applying three different methods for the calculation of ETo on the growth and the yield of the maize cultivation, by covering the water needs at 100% of the actual daily evapotranspiration of the crop (ETc). The methods that were used were the simple, the automated Class A Evaporation Pan and the Penman-Monteith method. The water use efficiency and the water savings of irrigation water were evaluated. The greatest water use efficiency was observed in the automated Class A Evaporation Pan method and the greatest water saving was achieved with the simple Class A Evaporation Pan method.

Keywords: surface drip irrigation, Class A Evaporation Pan, Penman-Monteith method, water use efficiency and water saving

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου νερού παγκοσμίως χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, καθώς οι ανάγκες για σίτιση αυξάνονται ολοένα και περισσότερο (Sakellariou-Makrantonaki et al., 2012; Παπαζαφειρίου, 1999).

Οι πρακτικές που χρησιμοποιούνταν μέχρι προσφάτως στην καλλιέργεια του αραβόσιτου και γενικότερα στον τομέα των αρδεύσεων διέπονται από αλόγιστη χρήση του αρδευτικού νερού κι αυτό εξαιτίας της έλλειψης σωστού προγραμματισμού που είναι απόρροια του μη ακριβούς προσδιορισμού των αναγκών σε νερό της καλλιέργειας (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1996). Οι σημαντικότερες παράμετροι που θα πρέπει να εκτιμώνται προκειμένου να υπολογίζονται οι υδατικές απαιτήσεις ώστε να καταρτίζεται σωστά ένα πρόγραμμα άρδευσης είναι η δόση και ο χρόνος εφαρμογής της άρδευσης, ο οποίος καθορίζεται από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και τις βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, καθώς επίσης και η διάρκεια άρδευσης η οποία εξαρτάται από τη διηθητικότητα του εδάφους και την αρδευτική μέθοδο που εφαρμόζεται (Sakellariou-Makrantonaki et al., 2007; Παπαζαφειρίου, 1994, 1999).

Η εφαρμογή στάγδην άρδευσης είναι μια αυτοματοποιημένη εναλλακτική μέθοδος άρδευσης, η οποία έχει ως βασικό της στόχο, την προστασία του περιβάλλοντος αλλά και την αειφόρο ανάπτυξη και ως σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους εφαρμογής του νερού, την μείωση των απωλειών κατά τη διανομή και χορήγηση του νερού στα φυτά με αύξηση της παραγωγής και την εξοικονόμηση νερού (Chartzoulakis and Bertaki, 2015).

Ο αραβόσιτος μαζί με το σιτάρι και το βαμβάκι, καταλαμβάνουν περισσότερο από το 40% της ελληνικής αρόσιμης γης. Η καλλιεργούμενη έκταση το 2013 για την Ελλάδα ήταν 2.132.600 στρέμματα με την απόδοσή του να αγγίζει τα 2.275.200tn, σύμφωνα με την Ετήσια Γεωργική Στατιστική Έρευνα της ΕΛΣΤΑΤ. Οι απαιτήσεις του αραβόσιτου σε νερό κυμαίνονται από 500-900mm (Howell et al., 1996; Καραμάνος, 1999). Συγκεντρωτικές έρευνες των Coelho και Dale (1980) παρουσιάζουν την σχέση θερμοκρασιών και ρυθμού ανάπτυξης του καλαμποκιού και βρίσκουν ότι το μέγιστο της ανάπτυξης επέρχεται ανάμεσα στους 25-33°C. Για την παραγωγή σπόρου αν οι εδαφοκλιματικές συνθήκες είναι ιδανικές προτείνονται 7000 με 8000 φυτά ανά στρέμμα ενώ όταν το τελικό προϊόν προβλέπεται για ενσίρωμα προτείνονται 500 με 750 φυτά επιπλέον (Iowa State University, 2001). Η δόση σε κιλά σπόρου είναι περίπου 900 με 1100g/στρ. (FAO, 2005). Η συγκομιδή του αραβόσιτου πραγματοποιείται όταν η υγρασία του σπόρου κυμαίνεται από 20 ως 30% (Καραμάνος, 1999).

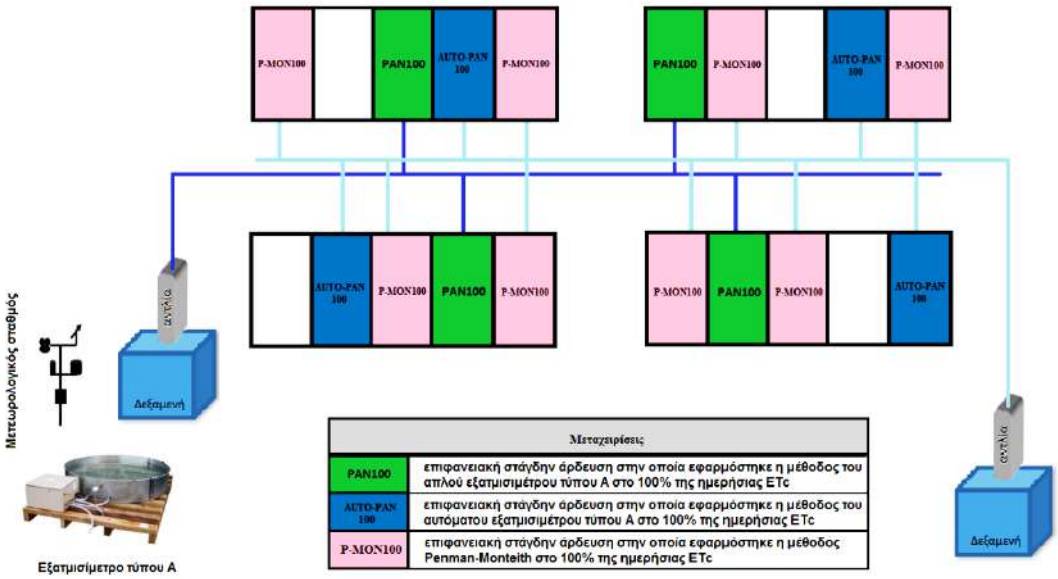
Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι η διερεύνηση της επίδρασης της εφαρμογής επιφανειακής στάγδην άρδευσης, με τρεις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού των αναγκών σε νερό στην ανάπτυξη και απόδοση της καλλιέργειας του φυτού αραβόσιτου (*Zea mays L.*) ποικιλίας NK Cisko και η αξιολόγηση της αποδοτικότητας και της εξοικονόμησης της χρήσης του αρδευτικού νερού.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Γενικά

Το πειραματικό μέρος της παρούσας έρευνας διεξήχθη στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βελεστίνο, κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2014. Το πειραματικό σχέδιο που επιλέχθηκε ήταν πλήρως τυχαιοποιημένων ομάδων (RCBD) και περιελάμβανε τρεις μεταχειρίσεις σε τέσσερις επαναλήψεις (Montgomery, 2012). Τρεις διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού της ΕΤ εφαρμόστηκαν με σκοπό την κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό ίση με το 100% της ημερήσιας υπολογιζόμενης

εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ETc). Οι μέθοδοι υπολογισμού της ΕΤ που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το απλό εξατμισίμετρο τύπου Α, το πλήρως αυτοματοποιημένο εξατμισίμετρο τύπου Α και η μέθοδος Penman-Monteith. Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήτοι: α) επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος του απλού εξατμισιμέτρου τύπου Α (PAN100), β) επιφανειακή στάγδην άρδευση στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος του αυτόματου εξατμισιμέτρου τύπου Α (AUTO-PAN100) και γ) επιφανειακή στάγδην άρδευση με την μέθοδο Penman-Monteith (P-MON100). Οι μέθοδοι υπολογισμού της ΕΤ που χρησιμοποιήθηκαν στις μεταχειρίσεις AUTO-PAN100 και P-MON100 ήταν αυτοματοποιημένες και ελέγχονταν από απόσταση (Καρατάσιου, 2010). Η διάταξη των πειραματικών τεμαχίων στον αγρό φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Διάταξη των πειραματικών τεμαχίων στον αγρό.

Το έδαφος του πειραματικού αγρού είχε υφή αμμοαργιλοπηλώδη έως αργιλώδη και κοκκομετρική σύσταση μετρίως λεπτόκοκκη έως λεπτόκοκκη. Ο βαθμός οξύτητας (pH) βρίσκονταν σε αλκαλικά επίπεδα (7,9-8,2). Η οργανική ουσία είχε τιμές μικρότερες του 1,1% και μειωνόταν με το βάθος (1,1%-0,3%) (Μήτσιος, 2000).

2.2. Καλλιεργητική πρακτική - Μετρήσεις

Το κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε εμβαδόν 30m^2 (10m x 3m). Περιελάμβανε 4 σειρές φυτών με αποστάσεις μεταξύ των γραμμών 75cm και 15,5cm επί των γραμμών (πυκνότητα σποράς 8580 φυτά/στρ.). Το επιφανειακό δίκτυο εφαρμογής αποτελούνταν από σταλακτηφόρους αγωγούς πολυαιθυλενίου ονομαστικής εξωτερικής διαμέτρου 20mm, οι οποίοι απείχαν μεταξύ τους 1,5m. Κάθε αγωγός εφαρμογής περιελάμβανε σταλακτήρες αυτορρυθμιζόμενους και αυτοκαθαριζόμενους που εξασφάλιζαν ρυθμό εφαρμογής του νερού άρδευσης ίσο με 2,3l/h. Η απόσταση μεταξύ τους ήταν 0,8m.

Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 17 Ιουνίου του 2014 με τετράσειρη πνευματική σπαρτική μηχανή ακριβείας. Η ποικιλία αραβόσιτου που επιλέχθηκε ήταν η NK Cisko της Syngenta, υβρίδιο μικρής διάρκειας βιολογικού κύκλου (102 ημερών). Μετά τη σπορά πραγματοποιήθηκε χημική ζιζανιοκτονία προφυτρωτικά, με εφαρμογή της ζιζανιοκτόνου ουσίας Pendimethalin (STOMP 330EC) με δόση 400cc σκευάσματος/στρ.. Μέχρι όμως τα φυτά να φτάσουν περίπου στο ύψος των 50cm, πραγματοποιήθηκαν ένα με δύο

σκαλίσματα για την απομάκρυνση των ζιζανίων. Επισημαίνεται πως καμία χημική λίπανση δεν πραγματοποιήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος στο πλαίσιο χαμηλών εισροών.

Στις μεθόδους υπολογισμού της ΕΤ που χρησιμοποιήθηκαν το πλήρως αυτοματοποιημένο εξατμισίμετρο τύπου Α και η μέθοδος Penman-Monteith χρησιμοποιήθηκε ένας data logger, ο οποίος κατέγραφε αυτόματα την ένδειξη του εξατμισιμέτρου, μέσω ενός αυτόματου αισθητήρα του εξατμισιμέτρου, με τον οποίο συνδεόταν, και ενεργοποιούσε το σύστημα άρδευσης μέσω μιας ηλεκτροβάνας.

Για την συλλογή των μετεωρολογικών στοιχείων της περιοχής (βροχόπτωση, σχετική υγρασία, ηλιοφάνεια, θερμοκρασία αέρα, κλπ.) χρησιμοποιήθηκε αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός, που βρίσκεται τοποθετημένος σε απόσταση περίπου 50m από το μέσον του πειραματικού αγρού.

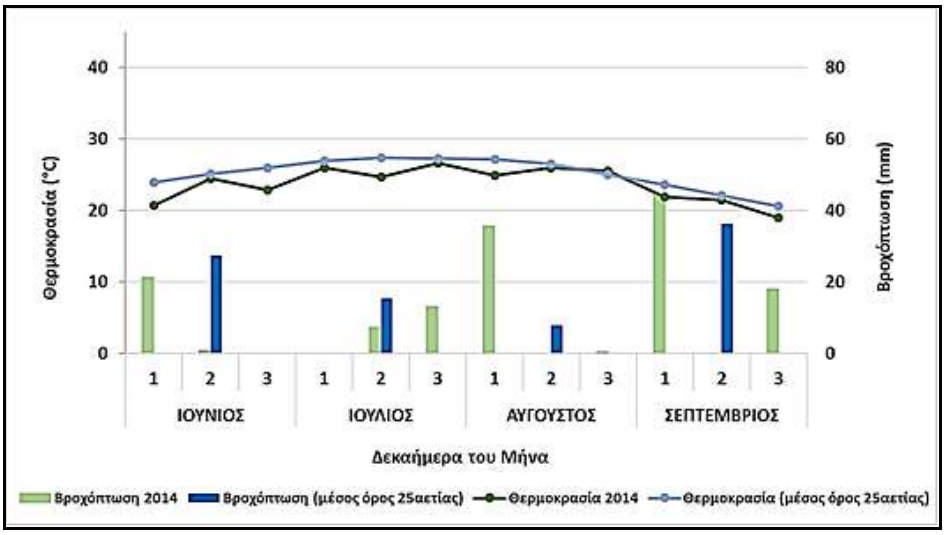
Η ανάλυση της παραλλακτικότητας και η σύγκριση των μέσων όρων των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS version 23 (κριτήριο Duncan σε επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου λαμβάνονταν εβδομαδιαίες μετρήσεις του ύψους του βλαστού των φυτών. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν σε φυτά που παρουσίαζαν ομοιόμορφη ανάπτυξη και σε αριθμό φυτών που αντιστοιχούσε σε επιφάνεια εδάφους $1m^2$, στις δύο μεσαίες γραμμές σποράς κάθε πειραματικού τεμαχίου, για την αποφυγή αλληλεπιδράσεων από γειτονικές γραμμές σποράς και γειτονικά πειραματικά τεμάχια. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ξηρής βιομάζας των βλαστών την ημέρα που έγινε και η συγκομιδή του καρπού της καλλιέργειας (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.ά., 2003; Sakellariou-Makrantonaki et al., 2007).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Κλιματολογικά δεδομένα

Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται το ομβροθερμικό διάγραμμα της καλλιεργητικής περιόδου του έτους 2014 (Ιούνιος-Σεπτέμβριος), βάσει των κλιματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Απεικονίζεται επίσης, ως μέτρο σύγκρισης, ο μέσος όρος των τιμών της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης ανά δεκαήμερο για τα τελευταία 25 έτη.

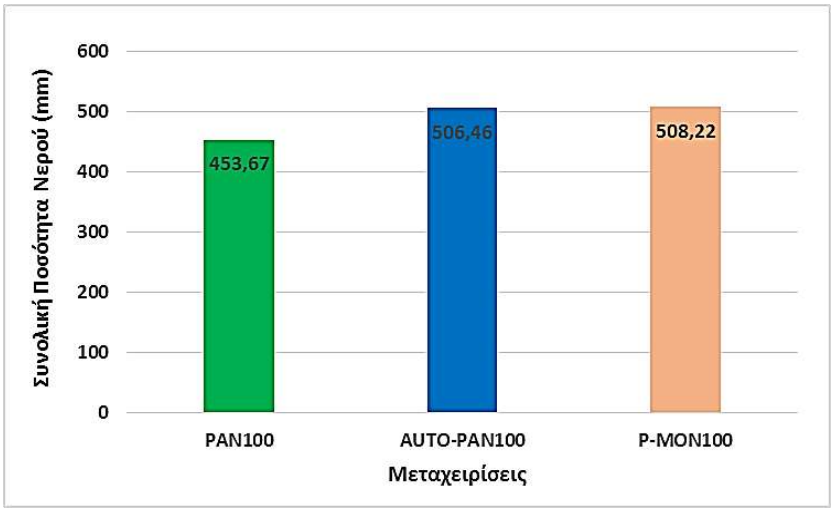


Σχήμα 2. Ομβροθερμικό διάγραμμα της καλλιεργητικής περιόδου του έτους 2014.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η καλλιεργητική περίοδος του έτους 2014 χαρακτηρίζεται από περίπου ίσες μέσες θερμοκρασίες αέρος και ποσότητας βροχής σε σχέση με τις μέσες τιμές θερμοκρασίας αέρος και βροχόπτωσης των τελευταίων 25 ετών. Επομένως οι κλιματολογικές συνθήκες δεν επηρέασαν τα αποτελέσματα τις συγκεκριμένης έρευνας.

3.2. Συνολική ποσότητα νερού

Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η συνολική ποσότητα νερού που δέχτηκε η καλλιέργεια ανά μεταχείριση.



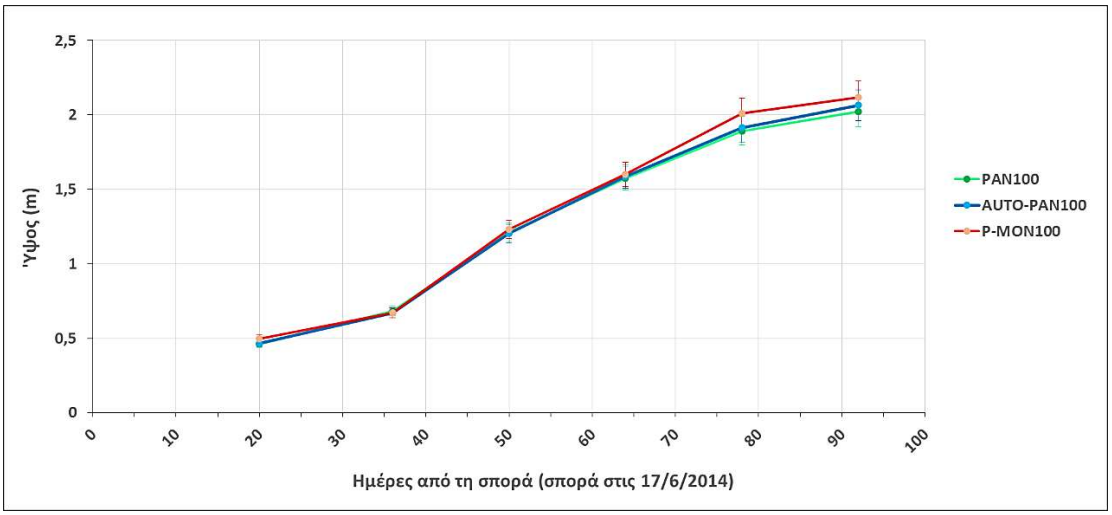
Σχήμα 3. Συνολική ποσότητα νερού ανά μεταχείριση (mm).

Η συνολική ποσότητα νερού που δέχτηκε η καλλιέργεια, ισούται με το άθροισμα της ποσότητας του νερού που εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια με τη μέθοδο του καταιονισμού (προφυτρωτικά), της επιφανειακής στάγδην άρδευσης και μέσω της ωφέλιμης ή ενεργούς βροχόπτωσης. Η συνολική ποσότητα του νερού που εφαρμόστηκε με τη μέθοδο του καταιονισμού σε όλες τις μεταχειρίσεις, ήταν ίση με 50mm ενώ η ωφέλιμη ή ενεργός βροχόπτωση ήταν ίση με 82,24mm. Η μικρότερη ποσότητα νερού εφαρμόσθηκε στην μεταχείριση PAN100, η οποία πραγματοποίησε και την υψηλότερη εξοικονόμηση νερού με κατανάλωση 453,67mm. Από την στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε δεν βρέθηκε να υπάρχουν στατιστικώς σημαντικά διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% μεταξύ των μεταχειρίσεων.

3.3. Ύψος φυτών

Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ύψους των φυτών του αραβοσίτου στις διάφορες μεταχειρίσεις.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2014 η μεταχείριση P-MON100 παρουσίασε μια τάση υπεροχής έναντι των υπολοίπων μεταχειρίσεων. Ειδικότερα, το υψηλότερο μέσο ύψος φυτών παρατηρήθηκε 92 ημέρες μετά από τη σπορά στη μεταχείριση P-MON100. Ακολουθούσε η μεταχείριση AUTO-PAN100 και η μεταχείριση PAN100.

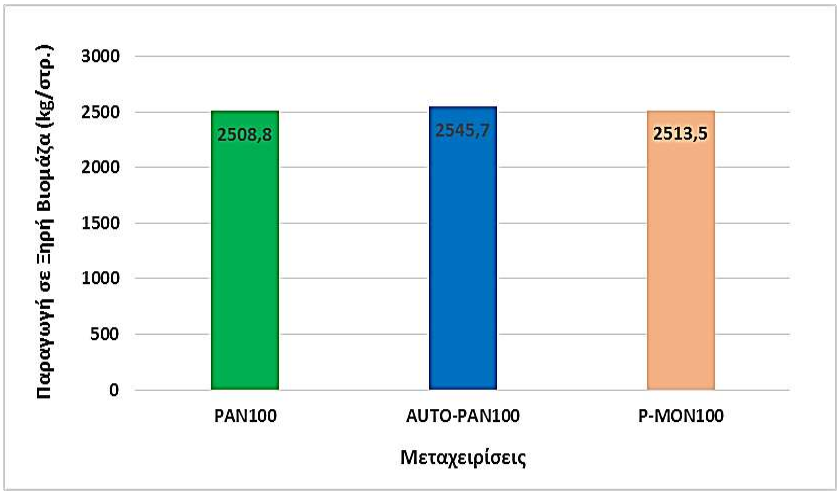


Σχήμα 4. Εξέλιξη του ύψους των φυτών στις μεταχειρίσεις PAN100, P-MON100 και AUTO-PAN100.

Από την στατιστική ανάλυση δεν βρέθηκαν στατιστικώς σημαντικά διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% ως προς το ύψος των φυτών μεταξύ των μεταχειρίσεων.

3.4. Παραγωγή σε ξηρή βιομάζα

Στο σχήμα 5 η ξηρή βιομάζα της μεταχείρισης PAN100 ανέρχεται στα 2508,8kg/στρ., της μεταχείρισης AUTO-PAN100 στα 2545,7kg/στρ. και της μεταχείρισης P-MAN100 στα 2513,5kg/στρ. Παρατηρείται ομοιότητα της παραγόμενης ξηρής βιομάζας και για τις τρεις μεταχειρίσεις του πειράματος. Στατιστικώς σημαντικά διαφορές δεν υπάρχουν σε επίπεδο σημαντικότητας 5%.

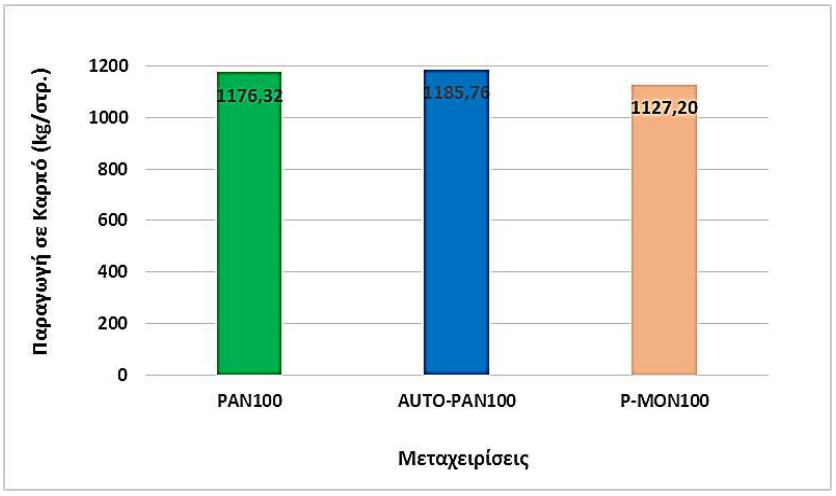


Σχήμα 5. Παραγωγή σε ξηρή βιομάζα της καλλιέργειας σε kg/στρ. ανά μεταχείριση.

3.5. Παραγωγή σε καρπό

Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η παραγωγή σε καρπό (kg/στρ.) της καλλιέργειας για τις διάφορες μεταχειρίσεις.

Παρατηρείται ότι η μεταχείριση AUTO-PAN100 εμφανίζει παραγωγή 1185,76kg/στρ. Ακολουθεί η μεταχείριση PAN100 με 1176,32kg/στρ. και η μεταχείριση P-MON100 με 1127,20kg/στρ..



Σχήμα 6. Παραγωγή σε καρπό της καλλιέργειας σε kg/στρ. ανά μεταχείριση.

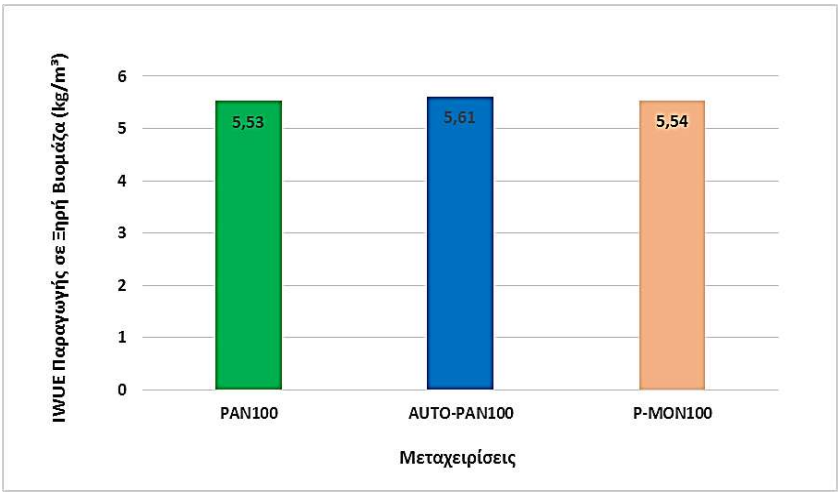
Όπως και στην παραγόμενη ξηρή βιομάζα, η παραγωγή σε καρπό διαφέρει ελάχιστα μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Από την στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι οι μεταχειρίσεις δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σε επίπεδο σημαντικότητας 5%.

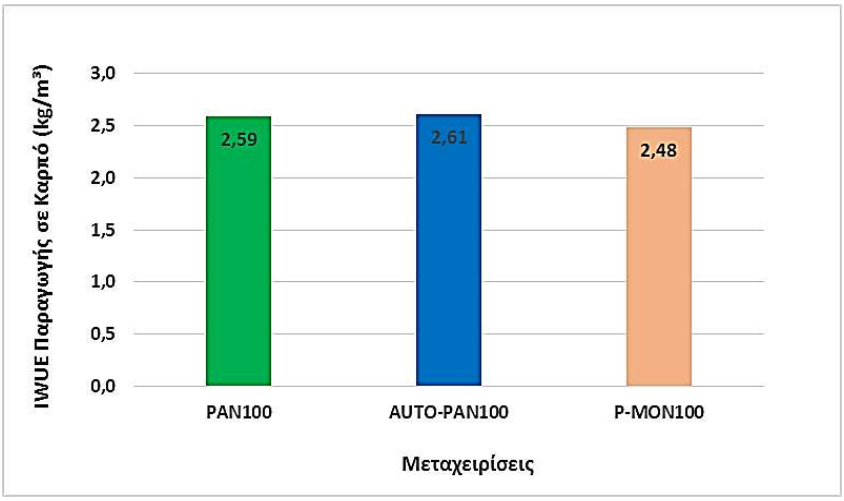
3.6. Αποδοτικότητα χρήσης νερού

Στα σχήματα 7 και 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την αποδοτικότητα χρήσης νερού (IWUE) της καλλιέργειας στις διάφορες μεταχειρίσεις βάσει της παραγωγής σε ξηρή βιομάζα και σε καρπό, τα οποία προέκυψαν έπειτα από την επεξεργασία και στατιστική ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας.

Για τους υπολογισμός χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του Bos (Bos, 1979) με αριθμητή την παραγωγή σε ξηρή βιομάζα ή σε καρπό της κάθε μεταχείρισης αντίστοιχα για κάθε περίπτωση και παρονομαστή την ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε συνολικά στην μεταχείριση.



Σχήμα 7. Μέσοι όροι της αποδοτικότητας χρήσης νερού της καλλιέργειας βάσει της παραγωγής σε ξηρή βιομάζα (kg/m^3) σε κάθε μεταχείριση.



Σχήμα 8. Μέσοι όροι της αποδοτικότητας χρήσης νερού της καλλιέργειας βάσει της παραγωγής σε καρπό (kg/m^3) σε κάθε μεταχείριση.

Από τα αποτελέσματα της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού (IWUE) τόσο για τον παραγόμενο καρπό όσο και για την παραγωγή σε ξηρή βιομάζα, προκύπτει ότι η εφαρμογή του αυτόματου εξατμισιμέτρου τύπου Α συνιστάται, επειδή το νερό της άρδευσης εφαρμόζεται αποδοτικότερα.

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διερευνήθηκε η επίδραση της εφαρμογής επιφανειακής στάγδην άρδευσης, με τρεις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού των αναγκών σε νερό στην ανάπτυξη και απόδοση της καλλιέργειας του αραβόσιτου και αξιολογήθηκε η εξοικονόμηση αρδευτικού νερού και η αποδοτικότητα χρήσης του.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτει πως η χρήση της μεθόδου του απλού εξατμισιμέτρου τύπου Α (PAN100), για τον υπολογισμό των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό, δεν διαφέρει στατιστικώς σημαντικά από τις υπόλοιπες μεθόδους άρδευσης στο σύνολο των χαρακτηριστικών που μετρήθηκαν και ως εκ τούτου η χρήση της προτείνεται για εφαρμογή από τους παραγωγούς, καθώς συγκαταλέγεται στις πιο απλές και οικονομικές μεθόδους άρδευσης.

Στην παρούσα έρευνα οι εξ' αποστάσεως μέθοδοι άρδευσης που χρησιμοποιήθηκαν στις μεταχειρίσεις AUTO-PAN100 και P-MON100 παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο ως προς την καταναλισκόμενη ποσότητα νερού όσο και ως προς την παραγωγή. Παρατηρείται πως οι μεγαλύτερες συνολικές ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν σε αυτές τις μεθόδους απέδωσαν και μεγαλύτερη παραγωγή σε βιομάζα. Η χρήση των μεθόδων αυτών έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως τη μείωση μετακινήσεων από και προς τον αγρό, τη βελτιστοποίηση της χρήσης νερού και την αποφυγή καταναλισκόμενης ενέργειας.

Η καλλιέργεια του αραβοσίτου στην Ελλάδα μπορεί να αποφέρει ακόμη σημαντικότερα κέρδη στον παραγωγό όταν με την εφαρμογή κατάλληλων καλλιεργητικών πρακτικών μειωθούν οι δαπάνες παραγωγής, αυξηθεί η παραγόμενη ποσότητα προϊόντος και η αποδοτικότητα χρήσης νερού.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bos, M.G. 1979. *Standards for Irrigation Efficiencies of ICID*. J. Irrig. Drain. Div., 105:37-43.

Coelho, D.T., Dale, R.F. 1980. *An energy-crop growth variable and temperature function for predicting maize growth and development: planting to silking*. Agronomy Journal, 72:503-510.

FAO, 2005. *Grassland Species Profiles. Detailed descriptions and photos of more than 600 grassland species*. FAO Publications.

Chartzoulakis, K. and Bertaki, M., 2015. *Sustainable water management in agriculture under climate change*. Agriculture and Agricultural Science Procedia 4:88-98.

Howell, T., Evett, S., Tolk, J., Schneider, A., Steiner, J., 1996. *Evapotranspiration of corn Southern high plains*. In: Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Nov. 3-6. American Society of Agricultural and Biological Engineers, San Antonio, TX, USA.

Iowa State University, 2001. *Corn Planting Guide*. Iowa State University Extension Service.

Montgomery, D.C., 2012. *Design and analysis of experiments (8th ed.)*. New York, NY: Wiley.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Giouvanis, V., Soulti, A., Papadakis, E., Koliou, A. 2012. *Water-saving by irrigating two varieties of Sorghum (Energy Plant) with treated municipal wastewater: A 3-years study in Central Greece*. Fresenius Environmental Bulletin 21(1A):205-207.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Papalexis, D., Nakos, N., Kalavrouziotis, I.K., 2007. *Effect of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum (var. Keller) on a dry year in Central Greece*. Agricultural Water Management 90:181-189.

Καραμάνος, Α.Ι. 1999. *Τα σιτηρά των θερμών κλιμάτων. Αραβόσιτος-Σόργο-Ρύζι–Κεχρί*. Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα.

Καρατάσιου, Ε., 2010. *Άρδευση με τηλεμετρία*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Μήτσιος, Ι.Κ., 2000. *Εδαφολογική μελέτη και εδαφολογικός χάρτης του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή Βελεστίνου*. Εκδόσεις Zymel, Αθήνα.

Παπαζαφειρίου, Ζ., 1994. *Αρχές και Πρακτική των Αρδεύσεων*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., 1996. *Άρδευση με σταγόνα. Άρδευση με αυλάκια*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Παπαλέξης, Δ., Δαναλάτος, Ν., Βουλτσάνης, Π., Νάκος, Ν., 2003. *Επίδραση επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή της ενεργειακής καλλιέργειας του σόργου στην Κεντρική Ελλάδα*. Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 2-5 Απριλίου, Θεσσαλονίκη, σ. 183-190.

ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΛΛΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΟΡΕΣΜΟ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Γ. Κάργας[1], Π. Λόντρα[1]✉, Ε. Αγαπητού[1] & Κ. Σωτηράκογλου[2]

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, [1]Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, [2]Τμήμα ΕΦΠ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,
✉v.londra@aua.gr

Περίληψη

Η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό (K_s), ειδικά της ανώτερης εδαφικής στρώσης, αποτελεί μια βασική παράμετρο στα μοντέλα κίνησης του νερού και μεταφοράς διαλυτών ουσιών στο έδαφος. Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε με στατιστικές μεθόδους η χωρική και χρονική παραλλακτικότητα της K_s στην ανώτερη εδαφική στρώση ενός πηλώδους εδάφους, που φέρει αυτοφυή βλάστηση (ζιζάνια) και δεν έχει υποστεί καμία καλλιεργητική διεργασία. Η K_s μετρήθηκε με περατόμετρο σταθερού φορτίου σε αδιατάρακτα δείγματα, που ελήφθησαν δύο φορές το χρόνο (καλοκαίρι και χειμώνα). Η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων έδειξε ότι οι τιμές της K_s ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή και εμφανίζουν έντονη χωρική παραλλακτικότητα και στις δύο χρονικές περιόδους μέτρησης, ενώ δεν υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά (α=0.05) μεταξύ της καλοκαιρινής και της χειμερινής δειγματοληψίας και ως εκ τούτου διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει χρονική παραλλακτικότητα της K_s.

Λέξεις κλειδιά: υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό, παραλλακτικότητα, περατόμετρο

spatial and temporal variability of saturated hydraulic conductivity of upper soil layer

G. Kargas[1], P. Londra[1]✉, E. Agapitou[1], & K. Sotirakoglou[2]

Agricultural University of Athens, [1]Department NRM & Ag.Eng., [2]Faculty of Crop Science, Iera Odos 75, 11855, Athens, ✉v.londra@aua.gr

ABSTRACT

Saturated hydraulic conductivity (K_s), especially in the upper soil layer, is a basic parameter for modeling water flow and solute transport within the soil. In the present study, spatial and temporal variability of K_s in the upper soil layer of a loam soil, which has native vegetation (weeds) and has not undergone any cultivation process, is statistically investigated. Saturated hydraulic conductivity of undisturbed samples, taken twice a year (summer and winter), was measured using a constant head permeameter. Statistical analysis of experimental measurements showed that K_s values follow lognormal distribution and exhibit significant spatial variability over the two time periods of measurement, whereas there is no statistically significant difference (α = 0.05) between summer and winter sampling and therefore there is no temporal variability of K_s.

Keywords: saturated hydraulic conductivity, variability, infiltrometer

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό (K_s) εκφράζει την ικανότητα του εδάφους στην μεταφορά του νερού κάτω από κορεσμένες συνθήκες και αποτελεί μια βασική παράμετρο στα μοντέλα κίνησης του νερού και μεταφοράς διαλυτών ουσιών στο έδαφος. Ειδικότερα, η K_s της ανώτερης εδαφικής στρώσης παίζει σημαντικό ρόλο στον επιμερισμό του νερού της βροχής σε διήθηση και επιφανειακή απορροή (Vauclin et al., 1994).

Η τιμή της K_s στα διάφορα μοντέλα θεωρείται σταθερή, αλλά υπάρχει το θέμα της παραλλακτικότητας της τιμής της στον χώρο και στον χρόνο που χρήζει διερεύνησης, αφού πολλές φορές λόγω παρεμβάσεων, φυσικών ή ανθρωπογενών, μεταβάλλεται η κατάσταση της ανώτερης εδαφικής στρώσης.

Κάθε μεταβολή της επιφανειακής εδαφικής στρώσης που προκαλείται είτε από φυσικούς παράγοντες, όπως η βροχόπτωση, είτε ανθρωπογενείς, όπως οι καλλιεργητικές μεταχειρίσεις, μπορεί να οδηγήσουν σε μεταβολές των χαρακτηριστικών του πορώδους της. Οι μεταβολές του πορώδους μπορεί να επιφέρουν σοβαρές αλλαγές των υδραυλικών ιδιοτήτων και να επηρεάσουν την αποθήκευση του νερού στο έδαφος.

Οι καλλιεργητικές μεταχειρίσεις προκαλούν αλλαγές που εντοπίζονται κυρίως σε μικρό σχετικά εύρος πίεσης κοντά στον κορεσμό (Lindstrom and Onstad, 1984; Mapa et al., 1986; Poulovassilis, 1990; Kargas et al., 2012). Οι διάφορες καλλιεργητικές επεμβάσεις στην επιφανειακή εδαφική στρώση μπορεί να μεταβάλλουν σημαντικά την κατανομή του μεγέθους των πόρων με άμεση συνέπεια τη μεταβολή των υδραυλικών ιδιοτήτων της. Η κατεργασία του εδάφους, έχει αναφερθεί από κάποιους ερευνητές ότι, προκαλεί αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας (Mc Garry et al., 2000; Kribaa et al., 2001; Moret and Arrue, 2007), ενώ από κάποιους άλλους ότι προκαλεί μείωση (Mapa et al., 1986; Benjamin, 1993; Mahboudi et al., 1993; Azooz and Arshad, 1996, 2001).

Για την εκτίμηση της K_s στον αγρό ή στο εργαστήριο χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές και συσκευές. Ανεξάρτητα όμως από τον τρόπο μέτρησης, η τιμή της K_s είναι αντιπροσωπευτική για το συγκεκριμένο σημείο και χρόνο στο οποίο πραγματοποιήθηκε η μέτρηση. Οι μετρήσεις της K_s έχει παρατηρηθεί ότι μεταβάλλονται χωρικά ακολουθώντας λογαριθμοκανονική κατανομή (Shouse and Mohanty, 1998; Τζιμόπουλος κ.α., 2000; Gupta et al., 2006; Bormann and Klaassen, 2008; Alletto and Coquet, 2009; Kargas et al., 2016). Από την έρευνα φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ της K_s και άλλων εδαφικών χαρακτηριστικών (π.χ. κοκκομετρική σύσταση εδάφους, οργανική ουσία, φαινόμενη πυκνότητα) δεν είναι τόσο δυνατή που να επιτρέπει, επαρκώς, ακριβείς προβλέψεις της (Chirico et al., 2007).

Για την μελέτη της χρονικής παραλλακτικότητας πολλοί συγγραφείς συμφωνούν ότι, στα γεωργικά εδάφη, η K_s μεταβάλλεται σύμφωνα με ένα εποχιακό μοτίβο και αναμένεται μια φθίνουσα τάση από την αρχή της καλλιέργειας μέχρι τη συγκομιδή, λόγω της συμπίεσης του εδάφους και της προοδευτικής απόφραξη των πόρων (Angulo-Jaramillo et al., 2000; Laloy and Bielides, 2008; Alletto and Coquet, 2009).

Μερικές από τις μελέτες που στοχεύουν στην διερεύνηση της εποχιακής συμπεριφοράς της K_s (χρονική παραλλακτικότητα) βασίζονται σε μετρήσεις που έγιναν για ένα μόνο χρόνο (π.χ. Bormann and Klaassen, 2008; Alletto and Coquet, 2009), υποθέτοντας ότι η K_s ακολουθεί ένα σταθερό κυκλικό μοτίβο, όπου οι παράγοντες που το επηρεάζουν είναι αναμενόμενοι. Ωστόσο, όταν οι μετρήσεις της K_s λαμβάνονται για πολλά χρόνια, μια περιοδική συμπεριφορά εμφανίζεται μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις (Olyphant, 2003;

Bagarello and Sgroi, 2004), ενώ συχνότερα απουσιάζει μια σαφής και σταθερή περιοδικότητα (π.χ. Fuentes et al., 2004; Gupta et al., 2006; Bagarello and Sgroi, 2007).

Οι Strudley et al. (2008) πραγματοποιώντας ανασκόπηση σε 80 εργασίες σχετικά με τις επιπτώσεις επιλεγμένων παραγόντων που επηρεάζουν τις υδραυλικές ιδιότητες γεωργικών εδαφών (καλλιέργεια εδάφους, συμπίεση εδάφους, άρδευση, διαχείριση υπολειμμάτων, τύπος καλλιέργειας, κλίμα, κοκκομετρική σύσταση και οργανική ουσία του εδάφους, τοπογραφία) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα των μελετών είναι τόσο αντιφατικά, ώστε κανένας γενικός κανόνας δεν μπορεί να βρεθεί. Επομένως, για να βελτιώσουμε τις γνώσεις μας, οι Strudley et al. (2008) συνιστούν να ενισχυθεί η συλλογή δεδομένων προκειμένου να διασαφηνιστούν οι χωρικές και χρονικές τάσεις και να εκτελούνται εποχιακές/ετήσιες μετρήσεις για την αποσαφήνιση των βραχυπρόθεσμων αποκρίσεων, αναφέροντας, επίσης, και άλλους δευτερεύοντες παράγοντες που ενδεχομένως επηρεάζουν τις μετρήσεις.

Μεταξύ αυτών, υπάρχουν σχετικά ανεξερεύνητοι παράγοντες που σχετίζονται με τη βιολογική δραστηριότητα, γεγονός που θα μπορούσε να εξηγήσει τουλάχιστον ένα μέρος της παρατηρούμενης χρονικής μεταβλητότητας της K_s. Πράγματι, η ανάπτυξη των ριζών, η αποσύνθεση των νεκρών ριζών και οι γαιοσκώληκες επιδρούν στο έδαφος, δημιουργώντας δίκτυα μακροπόρων που μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά στον χώρο και στον χρόνο την K_s του εδάφους (Chan, 2001; Wuest, 2001; Lichner et al., 2011).

Τέλος, υπάρχουν ενδείξεις ότι η βιοχημική δράση, που οφείλεται για παράδειγμα σε βακτηρίδια, ρίζες και μύκητες, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την υδραυλική συμπεριφορά του εδάφους (Rillig, 2005; Buczko et al., 2006; Hallett, 2007; Lichner et al. , 2011).

Στην παρούσα εργασία, γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης της χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας της K_s στην ανώτερη εδαφική στρώση ενός πηλώδους εδάφους που φέρει αυτοφυή βλάστηση (ζιζάνια) και δεν έχει υποστεί καμία καλλιεργητική διεργασία. Η K_s μετρήθηκε στο εργαστήριο με περατόμετρο σταθερού φορτίου σε αδιατάρακτα δείγματα, που ελήφθησαν δύο φορές το χρόνο (καλοκαίρι και χειμώνα).

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Καλλιεργητικές μεταχειρίσεις και δειγματοληψία

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε πειραματικό αγρό του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Το έδαφος είναι επίπεδο και χαρακτηρίζεται πηλώδες με κοκκομετρική σύσταση: 38.8% άμμο, 39.5% ιλύ και 21.7% άργιλο. Όσον αφορά στη μηχανική σύσταση, δεν υπάρχει χωρική παραλλακτικότητα στην έκταση του πειραματικού αγρού.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, το έδαφος ήταν καλυμμένο με αυτοφυή βλάστηση (ζιζάνια). Το έδαφος δεν υπέστη καμία καλλιεργητική μεταχείριση (άρδευση, λίπανση, όργωμα, κοπή) και τα ζιζάνια αναπτύχθηκαν ελεύθερα.

Σε τμήμα του αγρού, διαστάσεων 16x35 m^2, ελήφθησαν δείγματα τα οποία απείχαν οριζοντίως μεταξύ τους 4 μέτρα, ενώ καθέτως 5 μέτρα. Το κάθε αδιατάρακτο εδαφικό δείγμα είχε όγκο περίπου 166 cm^3 (7 cm ύψος, 5.5 cm διάμετρο).

Πραγματοποιήθηκαν δύο δειγματοληψίες. Μία κατά την ξηρή περίοδο στις 13/07/2015 και μία χειμερινή στις 11/12/2015.

Ο προσδιορισμός της K_s έγινε σε αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα με περατόμετρο σταθερού φορτίου (Ammozegar and Wilson, 1999).

2.2 Στατιστική ανάλυση

Με τη βοήθεια του t-test για εξαρτημένα δείγματα (paired t-test) εξετάστηκε εάν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο δειγματοληψιών (καλοκαιρινή-χειμερινή) στις τιμές της K_s. Ο έλεγχος κανονικότητας της κατανομής των δειγμάτων εξετάστηκε με το Shapiro-Wilk W τεστ. Επίσης, για την εκτίμηση της χωρικής παραλλακτικότητας της K_s υπολογίστηκε ο συντελεστής μεταβλητότητας CV (Coefficient of Variation).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των πειραματικών τιμών της K_s, για τις δύο δειγματοληψίες, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τιμές ασυμμετρίας (λοξότητα και κύρτωση), οι οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορισθεί εάν τα δείγματα προέρχονται από κανονικές κατανομές. Τιμές αυτών των στατιστικών παραμέτρων εκτός του εύρους -2 έως +2 υποδεικνύουν σημαντικές αποκλίσεις από την κανονικότητα, γεγονός που θα έτεινε να ακυρώσει τις δοκιμές που συγκρίνουν τις μέσες τιμές. Στην περίπτωσή μας, και τα δύο πειραματικά δείγματα (καλοκαιρινό, χειμερινό) έχουν τιμές λοξότητας εκτός του φυσιολογικού εύρους, ενώ το χειμερινό δείγμα εμφανίζει και τιμή κύρτωσης εκτός του κανονικού εύρους τιμών.

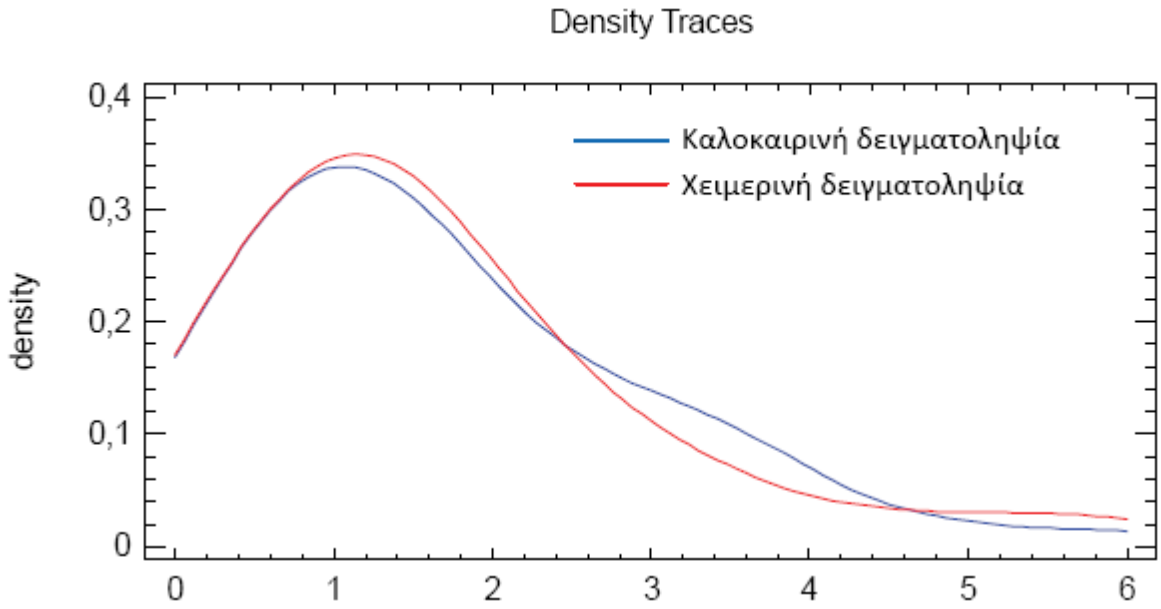
Πίνακας 1. Παράμετροι στατιστικής ανάλυσης πειραματικών μετρήσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό, K_s.

Δειγματοληψία	**Καλοκαίρι**	**Χειμώνας**
Αριθμός μετρήσεων	37	39
Μέσος όρος τιμών (cm min^{-1})	1.70	1.68
Τυπική απόκλιση (cm min^{-1})	1.22	1.31
Συντελεστής διακύμανσης (%)	72.15	77.65
Ελάχιστη τιμή (cm min^{-1})	0.25	0.16
Μέγιστη τιμή (cm min^{-1})	5.59	5.75
Εύρος τιμών (cm min^{-1})	5.34	5.59
Λοξότητα	**3.08**	**4.02**
Κύρτωση	1.78	**3.22**

Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται και οι συναρτήσεις πυκνότητας των δύο δειγμάτων, όπου φαίνεται ξεκάθαρα ότι δεν είναι συμμετρικές (λοξίζουν), επειδή τα δεδομένα ακολουθούν λογαριθμοκανονικές κατανομές. Στα ίδια αποτελέσματα έχουν καταλήξει και άλλοι ερευνητές μελετώντας τη χωρική παραλλακτικότητα της K_s (Kargas et al., 2016; Stekauerova and Mikulec, 2009; Rienzner and Gandolfi, 2013).

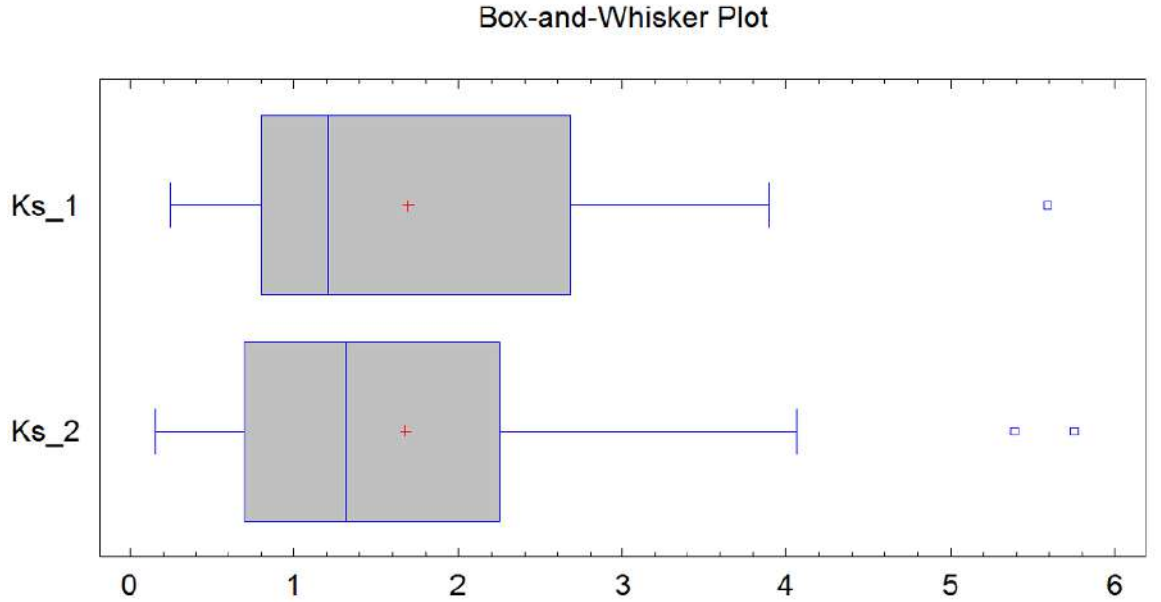
Επιπλέον, έγινε έλεγχος κανονικότητας της κατανομής και με το Shapiro-Wilk W τεστ ($p<0.001$) που έδειξε πάλι ότι η κανονική κατανομή δεν μπορεί να περιγράψει την χωρική παραλλακτικότητα της K_s.

Στη συνέχεια, για τη μελέτη της χρονικής παραλλακτικότητας μετασχηματίσαμε τα δεδομένα παίρνοντας τους λογαρίθμους των μετρήσεων και τις νέες τιμές τις συγκρίναμε με το t-test για εξαρτημένα δείγματα (paired t-test). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές της K_s μεταξύ των δύο δειγματοληψιών δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$.

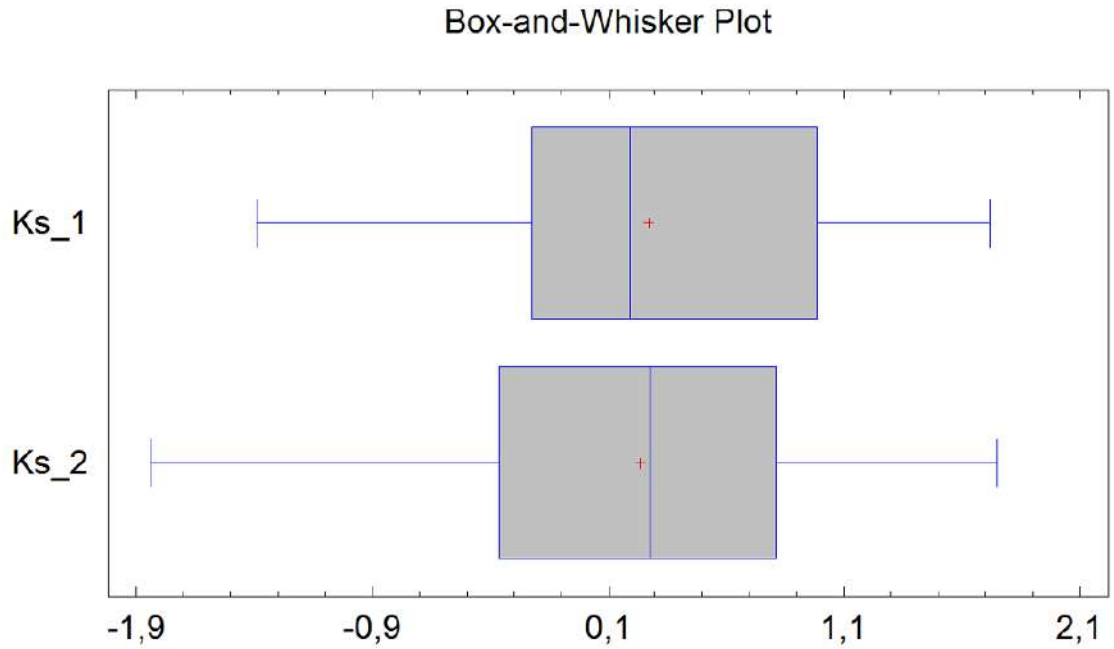


Σχήμα 1. Συναρτήσεις πυκνότητας των δύο δειγμάτων μετρήσεων υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό, K_s.

Στα θηκογράμματα (Box and Whisker plot) των Σχημάτων 2 και 3 που ακολουθούν, απεικονίζονται τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των δύο δειγμάτων (μέση τιμή, διάμεσος τιμή και τυπική απόκλιση) για τις κανονικές (Σχήμα 2) και λογαριθμημένες τιμές (Σχήμα 3) της K_s. Οι κόκκινοι σταυροί είναι οι μέσες τιμές και οι μπλε κάθετες γραμμές (μέσα στο τετράγωνο) είναι οι διάμεσοι (οι μεσαίες παρατηρήσεις). Όπως προκύπτει, δεν υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δύο δειγματοληψίες τις δύο διαφορετικές εποχές του έτους.



Σχήμα 2. Θηκόγραμμα μετρημένων τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό, K_s, κατά την καλοκαιρινή (Ks_1) και χειμερινή δειγματοληψία (Ks_2). (δεξιά αποτυπώνονται και 3 ακραίες τιμές)



Σχήμα 3. Θηκόγραμμα λογαριθμημένων τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό, K_s, κατά την καλοκαιρινή (Ks_1) και χειμερινή δειγματοληψία (Ks_2).

Ολοκληρώνοντας τη στατιστική ανάλυση των μετρήσεων, φαίνεται ότι οι τιμές της K_s εμφανίζουν έντονη χωρική παραλλακτικότητα και στις δύο χρονικές περιόδους μέτρησης, με τιμές συντελεστή μεταβλητότητας CV (Coefficient of Variation) 72.15% (καλοκαιρινή δειγματοληψία) και 77.65% (χειμερινή δειγματοληψία), ακολουθώντας λογαριθμοκανονικές κατανομές, ενώ δεν υπάρχει χρονική παραλλακτικότητα της K_s.

Από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί τόσο στον αγρό (π.χ. Rienzner and Gandolfi, 2013) όσο και στο εργαστήριο (π.χ. Kargas et al., 2016; Stekauerova and Mikulec, 2009) για την εκτίμηση της χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητα της K_s, παρατηρήθηκαν τα εξής: σε όλες τις περιπτώσεις έχει καταγραφεί σημαντική χωρική μεταβλητότητα της K_s, ανεξάρτητα από το είδος και το όργανο μέτρησης, ενώ δεν έχει καταγραφεί σε όλες τις περιπτώσεις χρονική μεταβλητότητα αυτής. Οι Zhou et al., (2008) εξέτασαν την χρονική παραλλακτικότητα σε τέσσερεις περιπτώσεις διαφορετικών χρήσεων γης. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι στην περίπτωση των δασικών εδαφών, στα οποία δεν υπάρχει ανθρώπινη δραστηριότητα και διατηρείται η βλάστηση σχεδόν όλο το έτος, δεν παρατηρείται χρονική παραλλακτικότητα της K_s σε αντίθεση με τις άλλες χρήσεις γης στις οποίες αναπτύσσεται ανθρώπινη δραστηριότητα. Η περίπτωση των δασικών εδαφών μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη με την περίπτωση την οποία εξετάσαμε στην συγκεκριμένη εργασία.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην ανώτερη εδαφική στρώση ενός πηλώδους εδάφους επιφάνειας 560 m^2, που φέρει αυτοφυή βλάστηση (ζιζάνια) και δεν έχει υποστεί καμία καλλιεργητική διεργασία, διερευνήθηκε η χωρική και χρονική παραλλακτικότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό, K_s.

Η K_s μετρήθηκε στο εργαστήριο με περατόμετρο σταθερού φορτίου σε αδιατάρακτα δείγματα, που ελήφθησαν δύο φορές το χρόνο (37 δείγματα το καλοκαίρι και 39 δείγματα τον χειμώνα).

Η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων έδειξε ότι οι τιμές της K_s εμφανίζουν έντονη χωρική παραλλακτικότητα και στις δύο χρονικές περιόδους μέτρησης, αφού ο συντελεστής παραλλακτικότητας (CV) είναι μεγαλύτερος από 50%, ενώ δεν εμφανίζουν χρονική παραλλακτικότητα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τζιμόπουλος Χ.Δ., Σακελλαρίου Μ., Γιαννόπουλος Σ., 2000. *Μελέτη της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού στο ύπαιθρο με στατιστικές και γεωστατιστικές μεθόδους*. Τεχνικά χρονικά, 1: 31-40.

Alletto L., and Coquet Y., 2009. *Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems*. Geoderma, 152: 85-94.

Amoozegar A., and Wilson G.V., 1999. *Methods for measuring hydraulic conductivity and drainable porosity*. In: Skaggs R.W., Schilfgaarde van J. (Eds), Agricultural drainage, Soil Science Society of America. Madison Inc., Wisconsin, pp. 1149-1207.

Angulo-Jaramillo R., Vandervaere J.P., Roulier S., Thony J.L., Gaudet J.P., and Vauclin M., 2000. *Field measurement of soil surface hydraulic properties by disk and ring infiltrometers – A review and recent developments*. Soil and Tillage Research., 55: 1-29.

Azooz R.H, and Arshad M.A., 1996. *Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no tillage and conventional tillage systems*. Canadian Journal of Soil Science, 76(2): 143-152.

Azooz R.H., and Arshad M.A., 2001. *Soil water drying and recharge rates as affected by tillage under continuous barley and barley-canola cropping systems in northwestern Canada*. Canadian Journal of Soil Science, 81(1): 45-52.

Bagarello V., Iovino M., and Elrick D., 2004. *A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity*. Soil Science Society of America Journal, 68(1): 66-73.

Bagarello V., and Sgroi A., 2007. *Using the simplified falling head technique to detect temporal changes in field-saturated hydraulic conductivity at the surface of a sandy loam soil*. Soil and Tillage Research, 94: 283-294.

Benjamin J., 1993. *Tillage effects on near surface soil hydraulic properties*. Soil and Tillage Research, 26: 277-288.

Bormann H., and Klaassen K., 2008. *Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils*. Geoderma, 145: 295–302.

Buczko U., Bens O., and Hüttl R.F., 2006. *Tillage effects on hydraulic properties and macroporosity in silty and sandy soils*. Soil Science Society of America Journal, 70: 1998-2007.

Chan K.Y., 2001. *An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils*. Soil and Tillage Research, 57: 179-191.

Chirico G.B., Medina H., and Romano N., 2007. *Uncertainty in predicting soil hydraulic properties at the hillslope scale with indirect methods*. Journal of Hydrology, 334: 405-422.

Fuentes J.P., Flury M., and Bezdicek D.F., 2004. *Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till, and no-till*. Soil Science Society of America Journal, 68: 1670-1688.

Gupta S.D., Mohanty B.P., and Köhne J.M., 2006. *Soil hydraulic conductivities and their spatial and temporal variations in a vertisol*. Soil Science Society of America Journal, 70: 1872–1881.

Hallett P.D., 2007. *An introduction to soil water repellency. Proceedings of the 8th International symposium on adjuvants for agrochemicals (ISAA2007)*. International society for agrochemical adjuvants. Columbus, Ohio, USA.

Kargas G., Kerkides P., and Poulovassilis A., 2012. *Infiltration of rain water in the semi arid area under three land surface treatments*. Soil and Tillage Research, 120:15-24.

Kargas G., Kerkides P., Sotirakoglou K., and Poulovassilis A., 2016. *Temporal variability of surface soil hydraulic properties under various tillage systems*. Soil and Tillage Research, 158:22-31.

Kribaa M., Hallaire V., Curmi P., and Lahmar R., 2001. *Effect of various cultivation methods on structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate*. Soil and Tillage Research, 60: 43-53.

Laloy E., Bielders C.L., 2008. *Plot scale continuous modelling of runoff in a maize cropping system with dynamic soil surface properties*. Journal of Hydrology, 349: 455-469.

Lichner L., Eldridge D.J., Schacht K., Zhukova N., Holko L., Šìr M., and Pecho J., 2011. *Grass cover influences hydrophysical parameters and heterogeneity of water flow in a sandy soil.* Pedosphere, 21(6): 719–729.

Lindstrom M., and Onstad C., 1984. *Influence of tillage systems on soil physical parameters and infiltration after planting*. Journal Soil Water Conservation, 39: 149-152.

Mahboubi A., Lal A., and Faussey N., 1993. *28 years of tillage effects on two soils in Ohio*. Soil Science Society of America Journal, 57(2): 506-512.

Mapa R., Green R., and Santo L., 1986. *Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage*. Soil Science Society of America Journal, 50: 1133-1138.

McGarry D., Bridge B.J., and Radford B.J., 2000. *Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics*. Soil and Tillage Research, 53: 105-115.

Moret D. and Arrue J.L., 2007. *Dynamics of soil hydraulic properties during fallow by tillage*. Soil and Tillage Research, 96: 103-113.

Olyphant G.A., 2003. *Temporal and spatial (down profile) variability of unsaturated soil hydraulic properties determined from a combination of repeated field experiments and inverse modelling*. Journal of Hydrology, 281: 23–35 31.

Poulovassilis A., 1990. *The effect of cultivation practices on the physical properties of the upper soil layer.* (Project No 5110). Final report. Laboratory of Agricultural Hydraulics. Agricultural University of Athens.

Rienzner M., and Gandolfi C., 2013. *Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale*. Soil and Tillage Research, 135: 28-40.

Rillig M.C., 2005. *A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency?* Pedobiologia, 49: 395-399.

Shouse P.J., and Mohanty B.P., 1998. *Scaling of near-saturated hydraulic conductivity measured using disc infiltrometers*. Water Resources Research, 34: 1195-1205.

Stekauerova V., and Mikulec V., 2009. *Variability of saturated hydraulic conductivities in the agriculturally cultivated soils*. Soil and Water Research, 4: S14-S21.

Strudley W.M., Green T.R., and Ascough J.C., 2008. *Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science*. Soil and Tillage Research, 99: 4-48.

Vauclin M., Elrick D.E., Thony J.L., Vachaud G., Revol Pf., Ruelle P., 1994. Hydraulic conductivity measurements of the spatial variability of a loamy soil. Soil Technology, 7: 181-195.

Wuest S.B., 2001. *Earthworm, infiltration, and tillage relationships in a drylan pea-wheat rotation*. Applied Soil Ecology, 18: 187-192.

Zhou X., Lin H., and White E., 2008. *Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes*. Catena, 73: 180-188.

ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ WET-2 ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΕΚΤΑΤΙΚΟΥ ΦΥΤΕΜΕΝΟΥ ΔΩΜΑΤΟΣ

Γ. Κάργας[1]✉, Ν. Ντούλας[2], Κ. Μπριλάκη[2] & Α. Τσαπατσούλη[2]

[1]Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα

[2]Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Εργαστήριο Ανθοκομίας & Αρχιτεκτονικής Τοπίου, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα

✉kargas@aua.gr

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι ο προσδιορισμός σε λυσίμετρα της ηλεκτρικής αγωγιμότητας υποστρώματος για φυτεμένα δώματα εκτατικού τύπου με τη χρήση του διηλεκτρικού αισθητήρα WET-2. Το υπόστρωμα τοποθετήθηκε σε δύο διαφορετικά βάθη (7,5 cm και 15 cm). Τα λυσίμετρα φυτοκαλύφθηκαν με το θερμόφιλο χλοοτάπητα *Paspalum vaginatum* 'Platinum TE'. Η άρδευση εφαρμοζόταν ανά δύο ημέρες σε ύψος 14 mm με νερό διαφορετικών ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων (EC_i): α) 0.3 dS m^{-1}, β) 6 dS m^{-1} γ) 12 dS m^{-1} και δ) 24 6 dS m^{-1}. Με βάση τις μετρήσεις της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ_b) και της διηλεκτρικής διαπερατότητας (ε_b) πραγματοποιήθηκε πρόβλεψη της αλατότητας του διαλύματος του υποστρώματος (EC_{sw}) με τη χρήση της μεθόδου του δείκτη αλατότητας (salinity index). Από τον προσδιορισμό της EC_{sw} διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή της μεθόδου του δείκτη αλατότητας προβλέπει σχετικά αξιόπιστα την EC_{sw}. Η προσέγγιση των τιμών της EC_{sw} ήταν καλύτερη για τα υψηλότερα επίπεδα αλατότητας.

Λέξεις κλειδιά: χλοοτάπητας, διηλεκτρική διαπερατότητα, δείκτης αλατότητας

USE OF WET-2 DIELECTRIC SENSOR FOR SALINITY DETERMINATION ON A GREEN ROOF SUBSTRATE

G. Kargas[1]✉, N. Ntoulas[2], K. Mprilaki[2] & A. Tsapatsouli[2]

[1] Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering, Lab. of Hydraulic Agriculture, Iera Odos 75, 118 55 Athens

[2] Agricultural University of Athens, Department of Crop Science, Lab. of Floriculture and Landscape Architecture, Iera Odos 75, 118 55 Athens

✉kargas@aua.gr

ABSTRACT

The aim of the present study was to determine the electrical conductivity of an extensive green roof substrate in lysimeters with the use of WET-2 dielectric senor. The green roof substrate was utilized in two substrate depths (7.5 cm or 15 cm). The warm season turfgrass *Paspalum vaginatum* 'Platinum TE' was established at the lysimeters and was hand irrigated every two days at a rate of 14 mm with water of different electrical conductivities (EC_i): a) 0.3 dS m^{-1}, b) 6 dS m^{-1} c) 12 dS m^{-1} and d) 24 6 dS m^{-1}. The EC_{sw} was predicted employing the salinity index method. From the determination of EC_{sw} of the leachate it was found that the use of the salinity index method predicts in a reliable manner the salinity. The estimation of EC_{sw} using the salinity index method was better for higher salinity levels.

Keywords: turfgrass, dielectric permittivity, bulk electrical conductivity, salinity index

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μαζική μετακίνηση πληθυσμών των τελευταίων δεκαετιών στα μεγάλα αστικά κέντρα είχε ως αποτέλεσμα την σταδιακή αντικατάσταση των χώρων πρασίνου, των αγροτικών περιοχών και των δασών, με κτιριακές υποδομές οι οποίες αποτελούνται από σκληρές και μη περατές επιφάνειες. Αντιλαμβανόμενοι τα πολλαπλά περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη των ελεύθερων χώρων πρασίνου εντός των σύγχρονων πόλεων παρουσιάζεται επιτακτική η ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών λύσεων αύξησης της βλάστησης στον ήδη δομημένο αστικό χώρο. Μία εξ αυτών των λύσεων αποτελεί και η εγκατάσταση φυτικού υλικού στη δομή των ίδιων των κτιρίων. Έτσι, στις σύγχρονες τάσεις σύμφωνα με τις αρχές της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης και της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής, συμπεριλαμβάνεται και η δημιουργία φυτεμένων δωμάτων (Dunnett and Kingsbury, 2010).

Σύμφωνα με τις υπάρχουσες κατευθυντήριες οδηγίες (FLL, 2008), τα φυτοδώματα εκτατικού τύπου θα πρέπει να έχουν ελάχιστες διαχειριστικές απαιτήσεις και εισροές φυσικών πόρων, όπως είναι για παράδειγμα το νερό άρδευσης. Παρόλα αυτά, στις νότιες ημι-ξηρικές ευρωπαϊκές χώρες οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλές καλοκαιρινές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με πλήρη έλλειψη βροχοπτώσεων, η εφαρμογή άρδευσης θεωρείται αναγκαία προκειμένου τα αβαθή εκτατικά φυτοδώματα να μην αντιμετωπίζουν προβλήματα βιωσιμότητας καθώς οι συνθήκες είναι αντίξοες για την ανάπτυξη των φυτών (Ntoulas et al., 2013).

Η άρδευση των φυτεμένων δωμάτων με ανακυκλωμένο νερό ή με νερό υποβαθμισμένης ποιότητας θα μπορούσε να συμβάλλει σημαντικά στη διατήρηση και προστασία των πολύτιμων αποθεμάτων πόσιμου νερού. Σημαντικό μειονέκτημα του ανακυκλωμένου νερού είναι συχνά η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επομένως, στις περιπτώσεις αυτές κρίνεται αναγκαίος ο ακριβής προσδιορισμός και η συνεχής παρακολούθηση της αλατότητας του υποστρώματος του φυτεμένου δώματος προκειμένου να εξασφαλισθεί η βιώσιμη ανάπτυξη του φυτικού υλικού.

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος υποστρώματος (EC_{sw}) κατάλληλου για φυτεμένα δώματα εκτατικού τύπου με την εφαρμογή της μεθόδου του δείκτη αλατότητας με την αξιοποίηση των μετρήσεων της σ_b και της ε_b από τον διηλεκτρικό αισθητήρα WET-2.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Η εκτίμηση της αλατότητας του εδαφικού διαλύματος κυρίως στηρίζεται στην μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εκχυλίσματος της εδαφικής πάστας κορεσμού, EC_e (U.S. Salinity Laboratory, 1954) η οποία έχει καθιερωθεί πλέον ως πρότυπη μέθοδος. Όμως, η μέθοδος αυτή είναι επίπονη και χρονοβόρα αφού περιλαμβάνει δειγματοληψία εδάφους, δημιουργία πάστας κορεσμού, συλλογή εκχυλίσματος και μέτρηση της EC_e του εκχυλίσματος (Kargas et al., 2017a). Ως αποτέλεσμα, αντί της EC_e, σε πολλές περιπτώσεις προσδιορίζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα με τη χρήση υδατικών διαλυμάτων εδάφους/νερού σε διάφορες αναλογίες. Η μέθοδος αυτή της έμμεσης εκτίμησης της EC_e είναι πρακτικά ευκολότερη αλλά απαιτεί να είναι γνωστή εκ των προτέρων η σχέση μεταξύ της EC_e και της EC της συγκεκριμένης αναλογίας για να μπορεί να είναι δυνατή η εκτίμηση της EC_e.

Οι διηλεκτρικές συσκευές έχουν δημιουργήσει δυνατότητες ταυτόχρονης μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς (ε_b), της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ_b) και της θερμοκρασίας στο ίδιο σημείο του εδάφους. Από την μέτρηση της σ_b μπορεί να υπολογιστεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος στους πόρους του εδάφους ή του υποστρώματος

(EC_{sw}) με την βοήθεια μοντέλων (Rhoades et.al., 1976; Malicki and Walczak, 1999; Hilhorst, 2000; Kargas and Kerkides, 2010, 2012; Kargas et al.,2017b).

Οι Malicki and Walczak (1999) εισηγήθηκαν την έννοια του δείκτη αλατότητας (salinity index, X_s), αξιοποιώντας τα δεδομένα (ε_b) και (σ_b) με την εφαρμογή της μεθόδου TDR (time domain reflectometry). Στην συνέχεια οι Wilczak et al., (2012) εφάρμοσαν την μέθοδο του δείκτη αλατότητας για τον υπολογισμό της EC_{sw} από δεδομένα (ε_b) και (σ_b) τα οποία αποκτήθηκαν από έναν αισθητήρα FDR (frequency domain reflectometry) ο οποίος δούλευε σε συχνότητα μέχρι 500 MHz.

Ο δείκτης αλατότητας ορίζεται ως η μερική παράγωγος της σ_b σε σχέση με την ε_b, όπου και οι δύο παράμετροι προσδιορίζονται από ένα διηλεκτρικό αισθητήρα την ίδια στιγμή και στο ίδιο σημείο του εδάφους.

$$X_s = \frac{\partial \sigma_b}{\partial \varepsilon_b} \quad (1)$$

Επίσης, οι Malicli and Walczak (1999) απέδειξαν ότι ο δείκτης αλατότητας (X_s) του εδάφους ως συνάρτηση του EC_{sw} είναι ανεξαρτήτως της κατ' όγκο υγρασίας του εδάφους και ότι ο X_s εξαρτάται από την αλάτότητα και την υφή του εδάφους.

Η σχέση μεταξύ της σ_b-ε_b αποδείχθηκε ότι είναι γραμμική και ότι η κλίση, η οποία αποτελεί το δείκτη αλατότητας, αυξάνει με την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος διαβροχής (EC_i) στο ίδιο πορώδες μέσο αλλά είναι διαφορετική για την ίδια τιμή της EC_i σε διαφορετικά πορώδη μέσα. Ο σταθερός όρος της γραμμικής σχέσης εξαρτάται επίσης από το είδος του μέσου και την τιμή της EC_i.

Όταν είναι γνωστή η τιμή του X_s και η κλίση (*l*) της σχέσης X_s-EC_i τότε είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή της EC_{sw} από την εξίσωση:

$$EC_{sw} = \frac{X_s}{l} \quad (2)$$

Οι Malicki and Walczak (1999) για την περίπτωση των ανόργανων εδαφών πρότειναν μια εξίσωση (εξ.3) για τον υπολογισμό του X_s (για τιμές σ_b>0.08 dS m^{-1} και ε_s>6.2)

$$X_s = \frac{\sigma_b - 0.08}{\varepsilon_s - 6.2} \quad (3)$$

όπου σ_b=0.08 dS.m^{-1}και ε_s=6.2 είναι το κοινό σημείο που συγκλίνουν οι ευθείες $\sigma_b\left(\varepsilon_s, EC_{sw}\right)$.

Επίσης έδειξαν ότι η κλίση *l* μπορεί να υπολογιστεί από μια εμπειρική σχέση με βάση την περιεκτικότητα σε άμμο του εδάφους.

Η προτεινόμενη τελική εξίσωση υπολογισμού της EC_{sw} είναι

$$EC_{sw} = \frac{Xs}{l} = \frac{\sigma_b - 0.08}{\left(\varepsilon_s - 6.2\right)\left(0.0057 + 0.00007S\right)} \quad (4)$$

όπου S είναι η περιεκτικότητα % σε άμμο του εδάφους.

Η ύπαρξη γραμμικής σχέσης σ_b-ε_b από δεδομένα του αισθητήρα WET-2 (Delta-T Devices, Cambridge, UK) ο οποίος λειτουργεί σε συχνότητα 20 MHz έχει επιβεβαιωθεί σε πολλές περιπτώσεις ανόργανων πορωδών μέσων (Kargas and Kerkides , 2010, 2012, Regalado et al., 2007). Παρόλα αυτά, δεν έχει εξεταστεί ποτέ μέχρι τώρα η μορφή της σχέσης με την χρήση του αισθητήρα WET-2 στην περίπτωση υποστρωμάτων κατάλληλων για φυτεμένα δώματα εκτατικού τύπου καθώς και η δυνατότητα χρήσης του εμπειρικού μοντέλου των Malicki and Walczak (1999) (εξ.4) στην πρόβλεψη της EC_{sw} σε τέτοιου είδους υποστρώματα. Όμως για την εύρεση μιας τέτοιας σχέσης απαιτείται να είναι γνωστό το σημείο τομής των γραμμικών

σχέσεων σ_b-ε_b όπως στα ανόργανα εδάφη αλλά και μια ανάλογη συσχέτιση της *l* με την περιεκτικότητα σε άμμο. Όμως στην περίπτωση των υποστρωμάτων η περιεκτικότητα σε άμμο είναι μηδενική οπότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 4. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να ευρεθεί μια εμπειρική σχέση που να συσχετίζει την *l* με μια άλλη ιδιότητα των υποστρωμάτων π.χ περιεκτικότητα σε άργιλο ή οργανική ουσία. Για να είναι δυνατόν να ευρεθεί τέτοια σχέση απαιτούνται πολύ περισσότερα πειραματικά δεδομένα από διαφορετικά υποστρώματα. Τέτοιες σχέσεις για την περίπτωση εδαφών έχουν παρουσιάσει οι Wilczak et al., (2012).

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε στον αγρό του Εργαστηρίου Ανθοκομίας και Αρχιτεκτονικής Τοπίου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών από την 7^{η} Ιουλίου 2015 έως 1^{η} Σεπτεμβρίου 2015. Η μελέτη περιελάβανε 48 κυλινδρικά λυσίμετρα, διαμέτρου 30 mm και εμβαδού 0.07 m^2. Τα λυσίμετρα ήταν τοποθετημένα σε πάγκους ρυθμιζόμενου ύψους ώστε να επιτευχθεί η οριζοντίωση τους και να αποφευχθούν φαινόμενα συσσώρευσης νερού στα άκρα του πυθμένα των λυσίμετρων. Εντός των λυσίμετρων είχε τοποθετηθεί πολυεπίπεδη διάστρωση αποστραγγιστικών διατάξεων όμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σε φυτεμένα δώματα εκτατικού τύπου. Οι διαστρώσεις αποτελούνταν από: α) το επίπεδο προστασίας το οποίο αποτελείτο από ύφασμα συνθετικών μη αποδομήσιμων ινών πολυεστέρα, πάχους 3 mm, το οποίο λειτουργεί ως δεξαμενή νερού με ικανότητα συγκράτησης 3 L m^{-2} (TSM32, Zinco, egreen, Αθήνα, Ελλάδα). Στη συνέχεια, πάνω από το ύφασμα προστασίας, τοποθετήθηκε αποστραγγιστική διάστρωση από ανακυκλωμένο πολυαιθυλένιο ύψους 25 mm (FD25, Zinco, egreen) με ανάγλυφο σχήμα το οποίο έχει την ικανότητα συγκράτησης του αποστραγγιζόμενου νερού καθώς και ανοίγματα για επαρκή αερισμό του υποστρώματος. Η αποστραγγιστική διάστρωση έχει την ικανότητα αποθήκευσης 3 L m^{-2} η οποία χρησιμεύει ως μία πρόσθετη δεξαμενή αποθήκευσης νερού. Η αποστραγγιστική διάστρωση καλύφθηκε από ένα μη υφαντό γεωύφασμα (SF, Zinco, egreen) το οποίο ήταν κατασκευασμένο από θερμικά ενισχυμένο πολυπροπυλένιο, πάχους 600 μm, με φαινόμενο μέγεθος ανοίγματος D_{90}= 95 μm και ταχύτητα διήθησης του νερού 0.07 m s^{-1} . Τα λυσίμετρα πληρώθηκαν με υπόστρωμα κατάλληλο για εκτατικού τύπου φυτεμένα δώματα σε βάθος 7.5 ή 15 cm. Το υπόστρωμα αποτελούταν από ελαφρόπετρα, ατταπουλγιτική άργιλο, ζεόλιθο και κομπόστα στέμφυλων σε κατ' όγκο αναλογίες 65:15:5:15 αντίστοιχα σύμφωνα με την ευρεσιτεχνία με αριθμό #1008610. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του υποστρώματος παρουσιάζονται στο Πίνακα 1. Στο κέντρο της κάτω επιφάνειας κάθε λυσιμέτρου έχει διανοιχθεί τρύπα διαμέτρου Φ10, στην οποία τοποθετήθηκε ειδικό μεταλλικό σπείρωμα και αντίστοιχης διαμέτρου σωληνάκι το οποίο χρησίμευε για την συλλογή του απορρέοντος νερού σε δοχεία.

Πίνακας 1. Ιδιότητες υποστρώματος εκτατικού φυτεμένου δώματος αποτελούμενο από ελαφρόπετρα, ατταπουλγιτική άργιλο, ζεόλιθο και κομπόστα στέμφυλων σε κατ' όγκο αναλογίες 65:15:5:15.

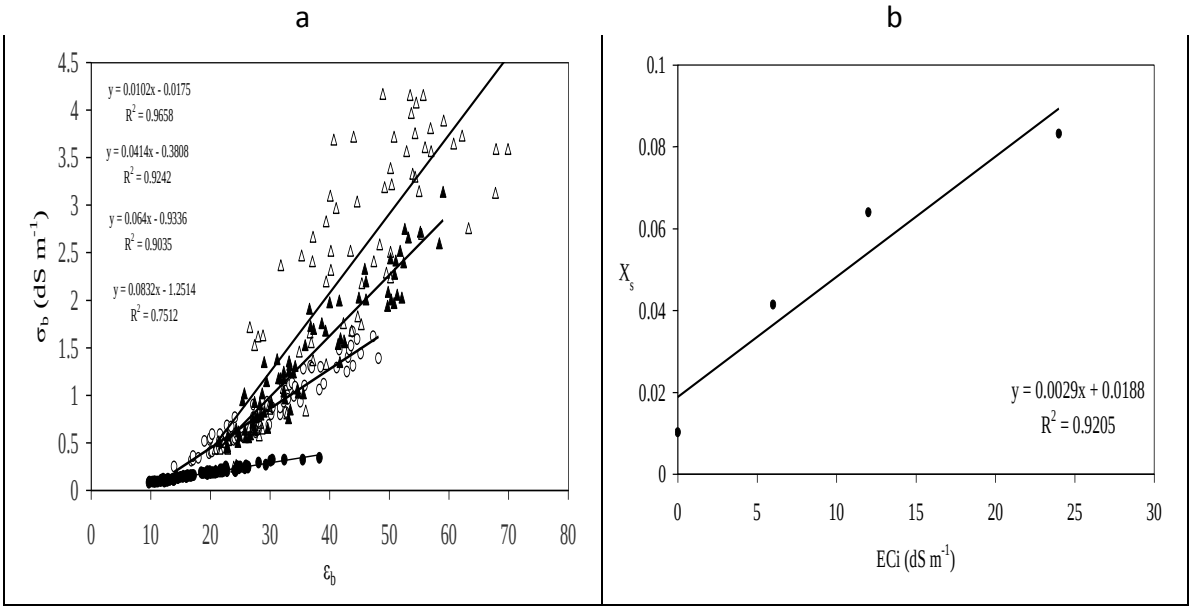
Μετρήσεις	Μονάδα μέτρησης	Τιμή (±SE)	Μηχανική ανάλυση	
			Μέγεθος κόκκων (mm)	%
pH		7,2 (±0,02)	9,5-6,3	1,9
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	$mS \cdot m^{-1}$	60 (±2,10)	6,3-3,2	23,6
Βάρος στον κορεσμό	$g \cdot cm^{-3}$	1,30 (±0,05)	3,2-2,0	17,3
Βάρος στη μέγιστη υδατοικανότητα	$g \cdot cm^{-3}$	1,20 (±0,03)	2,0-1,0	25,9
Ξηρό βάρος	$g \cdot cm^{-3}$	0,80 (±0,02)	1,0-0,25	20,4
Ολικό πορώδες	%	63,8 (±2,30)	0,25-0,05	4,4
Μέγιστη υδατοικανότητα	% vol.	54,2 (±1,65)	0,05-0,002	5,4
Υδραυλική αγωγιμότητα	$mm \cdot min^{-1}$	7,62 (±0,67)	<0,002	1,1

Στα λυσίμετρα εγκαταστάθηκε ο θεμόφιλος χλοοτάπητας *Paspalum vaginatum* 'Platinum TE'. Πρόκειται για ένα πολυετές γρασίδι, το οποίο παρουσιάζει αυξημένη αντοχή σε εκτεταμένες περιόδους ξηρασίας και άριστη αντοχή στην αλατότητα γεγονός που επιτρέπει την άρδευση του με ανακυκλωμένο ή υφάλμυρο νερό (Duncan and Carrow, 2000).

Κατά τη έναρξη της μελέτης όλα τα λυσίμετρα αρδεύτηκαν με πόσιμο νερό έως κορεσμό προκειμένου να εξασφαλιστούν ομοιόμορφες συνθήκες υγρασίας. Στη συνέχεια, ο χλοοτάπητας στα λυσίμετρα αρδεύονταν χειρωνακτικά ανά δύο ημέρες σε ύψος άρδευσης 14 mm (7 mm ανά ημέρα) με νερό διαφορετικών ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων (EC_i): α) 0,3 dS m^{-1}, β) 6 dS m^{-1} γ) 12 dS m^{-1} και δ) 24 6 dS m^{-1}. Για την παρασκευή των διαλυμάτων άρδευσής χρησιμοποιήθηκε NaCl.

Καθόλη τη διάρκεια της μελέτης και πριν την εφαρμογή άρδευσης, προσδιορίζονταν ο όγκος καθώς και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος έκπλυσης του κάθε λυσιμέτρου, το οποίο προέρχονταν από την προηγούμενη εφαρμογή άρδευσης και το οποίο συγκεντρώνονταν σε δοχεία τοποθετημένα κάτω από τα λυσίμετρα. Για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο διάλυμα έκπλυσης χρησιμοποιήθηκε φορητό αγωγιμόμετρο (CyberScan 200, Eutech Instruments, Singapore), το οποίο έκανε αυτόματα τη διόρθωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 25 ^{o}C. Παράλληλα με τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος έκλπυσης πραγματοποιούταν προσδιορισμός της διηλεκτρικής διαπερατότητας (ε_b) καθώς και της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (σ_b). Ο προσδιορισμός γινόταν, πριν την άρδευση, με τη χρήση του αισθητήρα WET-2 (Delta-T Devices, Cambridge, UK). Τα ραβδία του αισθητήρα έχουν μήκος 6,8 cm με αποτέλεσμα να δημιουργούν μια κυλινδρική περιοχή δειγματοληψίας βάθους 65 mm και πλάτους 45 mm. Ο αισθητήρας συνδέεται με HH2 φορητό μετρητή υγρασίας (Delta-T Devices). Στη συνέχεια μέσω των παραπάνω τιμών πραγματοποιούταν πρόβλεψη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος με τη χρήση της μεθόδου του δείκτη αλατότητας (salinity index, X_s), ο οποίος ορίζεται ως η μερική παράγωγος της σ_b σε σχέση με την ε_b.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ



Σχήμα 1. Αριστερά:Η σχέση μεταξύ της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ_b) και της διηλεκτρικής διαπερατότητας (ε_b) για τα διαφορετικά επίπεδα αλατότητας. Η κλίση των εξισώσεων αυξάνεται με την αύξηση της EC_i. Δεξια: Η σχέση μεταξύ του δείκτη αλατότητας (Xs) και της EC_i του διαλύματος διαβροχής.

Από το Σχήμα 1a φαίνεται ότι η σχέση σ_b-ε_b είναι ισχυρά γραμμική για τιμές της EC_i<24 dS.m^{-1} και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 μειώνεται με την αύξηση της EC_i. Ετσι για τιμές EC_i=0.3, 6, και 12 dS.m^{-1} οι τιμές του R^2 είναι 0.965, 0.924 και 0.903 αντίστοιχα. Η μεγάλη μείωση της τιμής του R^2(R^2=0.751) στην τιμή της EC_i=24 dS.m^{-1} πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές της ε_b είναι αξιόπιστες μέχρι την τιμή σ_b 3 dS.m^{-1} αφού για μεγαλύτερες τιμές σ_b εμφανίζεται μείωση της τιμής της ε_b (Kargas et al., 2014). Από την εξέταση των δεδομένων των μετρήσεων για EC_i=24 dS.m^{-1} φαίνεται ότι σε πολλές περιπτώσεις η τιμή της σ_b ήταν μεγαλύτερη από την τιμή 3 dS.m^{-1} με συνέπεια την εκδήλωση των αρνητικών επιπτώσεων της στην τιμή της ε_b. Συνεπώς ο αισθητήρας WET μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι αυτό το εύρος μετρήσεων της σ_b. Επίσης από το Σχήμα 1a φαίνεται ότι το σημείο τομής των σχέσεων σ_b-ε_b είναι αρκετά διαφορετικό από αυτό των ανόργανων εδαφών, οπότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση τω υποστρωμάτων η προτεινόμενη εξίσωση 3.

Επίσης από το σχήμα 1a φαίνεται ότι η κλίση της σχέσης σ_b-ε_b αυξάνεται με την αύξηση της τιμής EC_i. Δηλαδή η τιμή του δείκτη αλατότητας (Xs) αυξάνεται ανάλογα με την τιμή της EC_i και συνεπώς είναι ανάλογη του καθεστώτος αλατότητας που έχει διαμορφωθεί στο υπόστρωμα. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές του Xs μεταβάλλονται από 0.0102 έως 0.083 ανάλογα με την τιμή της EC_i.

Επίσης από τα δεδομένα φαίνεται ότι η τιμή του σταθερού όρου της γραμμικής σχέσης μειώνεται με την αύξηση της τιμής EC_i. Ετσι για τιμή EC_i=0.3 dS.m^{-1} ο σταθερός όρος έχει τιμή -0.0175 ενώ για EC_i=24 dS.m^{-1} έχει τιμή -1.2514.

Στο σχήμα 1b παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του δείκτη αλατότητας και της EC_i. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα η σχέση αυτή είναι γραμμική με R^2=0.92 και κλίση 0.0029.
Η τιμή της κλίσης για το υπόστρωμα είναι πολύ διαφορετική από αυτές που παρουσίασαν οι Malicki and Walczak (1999) για διάφορους τύπους εδαφών. Για αμμώδες έδαφος παρουσίασαν τιμές 0.0136 και 0.0126, για αμμοπηλώδες 0.0125, ενώ για πηλοαμμώδες

0.011. Συνεπώς η σχέση αυτή όπως και το σημείο τομής των ευθειών σ_b-ε_b εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου.

Συνεπώς λόγω των προαναφερομένων η εξίσωση 4 δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση των υποστρωμάτων επειδή αυτά έχουν τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά. Σαν μια πρώτη προσέγγιση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (2) για να εκτιμήσουμε την τιμή της EC_{sw} η οποία θα διαμορφωθεί στο υπόστρωμα για κάθε τιμή της EC_i. Από τα αποτελέσματα για υπόστρωμα βάθους 15 cm φαίνεται ότι οι προβλέψεις της EC_{sw} από το μοντέλο για τους αντίστοιχους δείκτες αλατότητας είναι 3.52, 14.1, 22 και 28.6 $dS.m^{-1}$.

Από μετρήσεις των όγκων εκροής και των τιμών των EC των εκροών την 27/7/2015 προκύπτει ότι η τιμή του κλάσματος έκπλυσης (Ογκος εκροής/Ογκος νερού άρδευσης) είναι περίπου 0.1 και οι τιμές της EC για τους αντίστοιχους δείκτες αλατότητας είναι 0.834, 13.2, 18.6 και 30.4 $dS.m^{-1}$. Συνεπώς μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το μοντέλο προβλέπει γενικά σωστά τις τιμές της EC_{sw} για μεγάλες τιμές ενώ υπερεκτιμά σημαντικά για την τιμή του δείκτη αλατότητας=0.0102 που αντιστοιχεί στην EC_i=0.28 $dS.m^{-1}$.

Για αυτές τις περιπτώσεις όπου η άρδευση γίνεται με μικρές τιμές EC_i η πρόβλεψη των τιμών της EC_{sw} μπορεί να γίνει με το μοντέλο Hilhorst (2000) το οποίο είναι ενσωματωμένο στον μετρητή HH2. Η μέση τιμή της EC_{sw} την οποία προβλέπει το μοντέλο Hilhorst είναι 0.98 $dS.m^{-1}$, δηλαδή πολύ κοντά στην μετρούμενη τιμή της EC_{sw}.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειραματικά δεδομένα σε υπόστρωμα εκτατικού φυτοδώματος προέκυψε ότι η σχέση σ_b-ε_b είναι γραμμική για κάθε επίπεδο EC_i και η κλίση της γραμμικής σχέσης αυξάνεται με την αύξηση της EC_i. Η γραμμικότητα διατηρείται μέχρι ένα επίπεδο τιμών σ_b, το οποίο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού αισθητήρα.

Για την πρόβλεψη της EC_{sw} όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εμπειρική σχέση που παρουσίασαν οι Malicki and Walczak (1999) για τα ανόργανα εδάφη επειδή η μορφή των σχέσεων υπολογισμού του δείκτη αλατότητας και της κλίσης *I* στα υποστρώματα διαφέρουν σημαντικά. Για την περίπτωση των υποστρωμάτων πρέπει να αναζητηθούν ανάλογες σχέσεις. Από την εφαρμογή του μοντέλου των Malicki and Walczak (1999) στην γενική μορφή προέκυψε ότι το μοντέλο προβλέπει γενικά σωστά τις τιμές της EC_{sw} για μεγάλες τιμές ενώ υπερεκτιμά σημαντικά στις πολύ χαμηλές τιμές.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Dunnett, N., and Kingsbury, N. (2010). *Planting Green Roofs and Living Walls*. Second Edition, Timber Press, Cambridge, U.K.

Duncan, R. R., and Carrow, R. N. (2000). *Seashore paspalum: The environmental turfgrass*. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ.

FLL-Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (2008). *Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. Richtlinien für Dachbegrünungen (Guideline for the planning, execution and upkeep of green-roof sites*), Bonn, Germany.

Hilhorst, M.A. (2000). *A pore water conductivity sensor*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 64: 1922-1925.

Kargas G. and Kerkides p. 2010. *Evaluation of a dielectric sensor for measurements of soil water electrical conductivity*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 136(8):553-558.

Kargas, G., Kerkides P. 2012. *Comparison of two models in predicting pore water electrical conductivity in different porous media*. Geoderma 189:563-573.

Kargas, G., Kerkides P. and M.S. Seyfried. 2014. *Response of Three Soil Water Sensors to Variable Solution Electrical Conductivity in Different Soils*. Vadose Zone Journal doi:10.2136/vzj2013.09.0169 September 2014, v. 13.

Kargas, G., Popescou, P., Kaliontzis, N., Marougas, D., Kerkides, P. 2017a. *Estimation of the electrical conductivity of saturated paste extract using a dielectric sensor.*Journal of Irrigation and Drainage Engineering 143(6) http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001156

Kargas G., Persson M., Kanelis G., Markopoulou I., Kerkides P. 2017b. *Prediction of soil solution electrical conductivity by the permittivity corrected linear model using a dielectric sensor*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering (In Press)

Ntoulas, N., Nektarios, P. A., Charalambous, E., & Psaroulis, A. (2013). *Zoysia matrella cover rate and drought tolerance in adaptive extensive green roof systems*. Urban forestry & urban greening, 12(4), 522-531.

Malicki, M., and Walczak, R. (1999). *Evaluating soil salinity status from electrical conductivity and permittivity*. Eur. Journal soil science 50:505-514.

Regalado, C., Ritter, A., and Rodriguez-Gonzalez, R. M. (2007). *Performance of the commercial WET capacitance sensor as compared with Time domain reflectometry in volcanic soils*. Vadoze zone Journal 6:244-254.

Rhoades, J., Ratts, P., and Prather R. (1976). *Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 40:651-655.

United State Salinity Laboratory Staff, (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook No 60. Riverside, California.

Wilczek A., Szyplowska A., Skierucha W., Ciesla J., Pichler V. and Janik G. 2012. *Determination of soil pore water salinity using an FDR sensor working at various frequencies up to 500 MHz*. Sensors 12:10890-10905.

TOPPS - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ διαχειρισησ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΑΠΟ ΜΗ ΟΡΘΗ ΧΡΗΣΗ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ

Χ. Καβαλάρης[1]✉, Δ. Μπαρτζιάλης[1], Κ. Γιαννούλης[1], Μ. Πελεκάνος[2], Φ. Υδραίου2, Γ. Βλόντζος[1] και Χ. Αθανασίου[1]

[1]Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα ΓΦΠΑΠ, Οδός Φυτόκου 38446, Βόλος

[2]Ελληνικός Σύνδεσμος Φυτοπροστασίας, Πατησίων 53, Αθήνα 104 33, email: info@esyf.gr

✉chkaval@uth.gr

Περίληψη

Η προστασία των υδάτων αποτελεί μία από τις βασικές προτεραιότητες της Ε.Ε. Στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας αναπτύχθηκαν τα διαδοχικά έργα TOPPS τα οποία χρηματοδοτήθηκαν από την ΕΕ και τον Ευρωπαϊκό Σύνδεσμο Φυτοπροστασίας (ECPA). Οι στόχοι του TOPPS είναι η ανάπτυξη και διάδοση των κατάλληλων Βέλτιστων Πρακτικών Διαχείρισης, των απαραιτήτων συστάσεων και του ανάλογου εκπαιδευτικού υλικού και η ενημέρωση και εκπαίδευση των άμεσα εμπλεκόμενων προσώπων (ψεκαστές, παραγωγοί, γεωπόνοι κ.λ.π). Η παρούσα εργασία εστιάζει στις συνιστώμενες Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης κατά τη διενέργεια ψεκασμών, όπως αυτές έχουν αποτυπωθεί μέσα από τις διεθνείς συνέργειες των έργων TOPPS, αναλύει τα προτεινόμενα μέτρα και τις τεχνολογίες και παρουσιάζει την βαρύτητα των μέτρων στην άμβλυνση του προβλήματος της ρύπανσης των υδάτων. Επιπλέον παρουσιάζει ένα διαδικτυακό εργαλείο που έχει αναπτυχθεί για τη διάγνωση και τη παροχή συστάσεων για τη μείωση της διασποράς του ψεκαστικού νέφους.

Λέξεις κλειδιά: Προστασία υδάτων, ασφαλής χρήση φυτοπροστατευτικών, ψεκασμοί

TOPPS – best management practises for water protection from the IMPROPER use of PLANT PROTECTION PRODUCTS

C. Cavalaris[1]✉,D. Bartzialis[1], K. Gianoulis[1], M. Pelekanos[2], F. Ydraiou[2], G. Vlontzos[1] and C. Athanasiou[1]

University of Thessaly, DACPRE, Fytokou str, 38446 Volos, Greece

Hellenic Crop Protection Association. Patision 53, 104 33 Athens Greece

✉chkaval@uth.gr

ABSTRACT

The protection of the natural water resources is among the main priorities for the EU environmental policy. To that fact the TOPPS – Life project concentrated to reduce losses of Plant Protection Products (PPP) to water. The project was funded by EU through the Life program and the ECPA (European Crop Protection Association). The main targets of the TOPPS were the development and dissemination of the Best Management Practices (BMP's) for water protection from the use of PPP's. Appropriate material was developed and trainings were carried out for farmers, advisors and stakeholders. The present work focuses on the BMP's developed for the program, analyses the suggested measures and the involved technologies and presents their impact on water protection. I also present a drift evaluation tool available at the web in order to assist users on their decisions.

Keywords: Water protection, safe use of PPP's, farm sprayers

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ TOPPS

Η προστασία των υδάτων αποτελεί μία από τις βασικές προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπως αυτή αποτυπώνεται στις σχετικές οδηγίες πλαίσιο περί υδάτων και ορθολογικής χρήσης των φυτοφαρμάκων (EC/127, 2009, EC/128, 2009, EC/60, 2000). Στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας αναπτύχθηκαν από το 2005 τα διαδοχικά έργα TOPPS (Train Operators to Promote Practices and Sustainability) με ποιο πρόσφατο το TOPPS Water Protection (2015-18) (Balsari and Marucco, 2007, www.TOPPS-life.org) που συντονίζεται από τον Ευρωπαϊκό Σύνδεσμο Φυτοπροστασίας (ECPA) και συμμετέχουν φορείς από δώδεκα Ευρωπαϊκές χώρες. Την Ελλάδα εκπροσωπούν ο Ελληνικός Σύνδεσμος Φυτοπροστασίας (ΕΣΥΦ) και το Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Οι στόχοι του TOPPS Water Protection είναι η ανάπτυξη και διάδοση των κατάλληλων μέτρων (Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης), των απαραιτήτων συστάσεων και του ανάλογου εκπαιδευτικού υλικού, ώστε να διασφαλιστεί η προστασία τόσο του χρήστη όσο και των υδάτων κατά τη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων (Roettele, 2008, Roettele et al., 2010a&b). Το πρόγραμμα απευθύνεται τόσο στους άμεσα εμπλεκόμενους (ψεκαστές, παραγωγούς, γεωπόνους, αρμόδιες Αρχές) αλλά και στους έμμεσα ενδιαφερόμενους (διαμορφωτές πολιτικής, καταναλωτές κ.λ.π.). Μέσα από δράσεις επιμόρφωσης και πρακτικών εκπαιδεύσεων γίνεται προσπάθεια ευαισθητοποίησης όλων των εμπλεκόμενων ενημέρωσης και κατάρτισης στα απαραίτητα μέτρα και πρακτικές για την άμβλυνση των κινδύνων.

2. ΠΗΓΕΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Το έργο TOPPS από την ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας κατέληξε στη διάκριση δύο βασικών πηγών κινδύνου για τη ρύπανση των υδάτων από τα φυτοπροστατευτικά (Müller et al., 2002). 1) Τις σημειακές πηγές ρύπανσης και 2) τις διάχυτες πηγές ρύπανσης (Σχήμα 1)

Σχήμα 1. Κύριες πηγές κινδύνων για ρύπανση των υδάτων από τη χρήση φυτοπροστατευτικών.

Οι σημειακές πηγές αποτελούν και τη σημαντικότερη πηγή κινδύνου η οποία έχει διαπιστωθεί ότι ευθύνεται για το 65% της ρύπανσης των υδάτων και οι οποίες σχετίζονται με τη διαχείριση των φυτοπροστατευτικών προϊόντων πρωτίστως στις εγκαταστάσεις του αγροκτήματος (Frede, 2006). Οι μεγαλύτεροι κίνδυνοι προέρχονται από το γέμισμα και το καθαρισμό, των ψεκαστικών καθώς, από τη διαχείριση του υπολειπόμενου όγκου του ψεκαστικού διαλύματος και από τη διαχείριση των γεμάτων/κενών συσκευασιών. Οι διάχυτες πηγές σχετίζονται με την επιφανειακή απορροή και τη διήθηση των φ/π

προϊόντων στον αγρό και με τη διασπορά του ψεκαστικού νέφους κατά τη διενέργεια των ψεκασμών (Nuyttens et al., 2011. Paulien et al., 2016). Από τις διάχυτες πηγές η σημαντικότερη είναι η επιφανειακή απορροή η οποία συχνά συνοδεύεται και με διάβρωση του εδάφους. Η επίγνωση των κινδύνων και της σημασίας του καθενός αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική πληροφορία, δοθέντος του ότι οι πληροφορίες αυτές θα πρέπει να προωθηθούν στους εμπλεκόμενους φορείς, με περαιτέρω στόχο την αναγνώριση και υλοποίηση των Βέλτιστων Καλλιεργητικών Πρακτικών για την αντιμετώπισή τους..

3. ΜΕΤΡΑ ΑΜΒΛΥΝΣΗΣ

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος το έργο TOPPS έχει αναπτύξει εργαλειοθήκες Βέλτιστων Πρακτικών Διαχείρισης ανάλογα με την πηγή του κινδύνου (www.TOPPS-life.org). Οι κίνδυνοι της ρύπανσης έχουν διαβαθμιστεί σε τρία επίπεδα επικινδυνότητας (χαμηλού, μέσου και υψηλού) και τα προτεινόμενες πρακτικές για την άμβλυνσή τους χαρακτηρίζονται ανάλογα ως Σημαντική, Πολύ σημαντική και Υποχρεωτική. Για τη κάθε κατηγορία χρησιμοποιείται ανάλογος χρωματικός κώδικας (Σχήμα 2)

Πηγή κινδύνου	Μέτρα άμβλυνσης
Χαμηλός κίνδυνος	Σημαντικό να εφαρμόζεται το μέτρο
Μέσος κίνδυνος	Πολύ σημαντική η εφαρμογή του μέτρου
Υψηλός κίνδυνος	Υποχρεωτική εφαρμογή του μέτρου

Σχήμα 2. Σημαντικότητα κινδύνων και μέτρων άμβλυνσης

3.1. Μέτρα άμβλυνσης των σημειακών πηγών ρύπανσης

Για τον περιορισμό των σημειακών πηγών ρύπανσης η εργαλειοθήκη περιλαμβάνει τα εξής μέτρα άμβλυσης:

Πλήρωση των ψεκαστικών	Πλήρωση των δοχείων των ψεκαστικών στον αγρό - Χρήση προ-αναδευτήρων των σκευασμάτων – Χρήση κλειστών συστημάτων εισαγωγής φ/π στο βυτίο του ψεκαστικού – Χρήση φυγοκεντρικών ακροφυσίων για καθαρισμό του φίλτρου στο στόμιο εισαγωγής – Χρήση μετρητών ροής νερού για επακριβή πλήρωση του βυτίου
Διαχείριση του υπολειπόμενου ψεκαστικού διαλύματος	Εφαρμογή της περίσσειας του ψεκαστικού διαλύματος (πλην του τεχνικά υπολειπόμενου όγκου) στον αγρό με μεγάλη ταχύτητα εργασίας - Αραίωση του τεχνικά υπολειπόμενου όγκου του ψεκαστικού διαλλείματος με τριπλό ξέπλυμα του δοχείου ή με συνεχή έκχυση καθαρού νερού και εφαρμογή του στον αγρό – Χρήση ψεκαστήρων με πρόσθετο δοχείο καθαρού νερού
Καθαρισμός των ψεκαστικών	Χρήση ψεκαστήρων με σύστημα εσωτερικού καθαρισμού των δοχείων (φυγοκεντρικά ακροφύσια) – Χρήση ψεκαστήρων με σύστημα διαρκούς καθαρισμού του δοχείου - Καθαρισμός του εξωτερικού του ψεκαστικού στον αγρό (χρήση ψεκαστικών με δοχείο καθαρού νερού και εξωτερικής παροχής (μάνικας) με εκτοξευτή (μπεκ) – Αποφυγή καθαρισμού κοντά σε σημεία υψηλού κινδύνου ρύπανσης – Καθαρισμός του ψεκαστήρα σε διαφορετικά σημεία του αγρού – Εγκατάσταση υποδομών για καθαρισμό του ψεκαστήρα στην έδρα της εκμετάλλευσης ή σε

	κοινόχρηστο σημείο (π.χ βιοκλίνες, Helliosec, Phytobag κ.α.)
Διαχείριση των γεμάτων/κενών συσκευασιών	Αποθήκευση των γεμάτων συσκευασιών σε ειδικό χώρο που τηρεί όλες τις απαραίτητες προδιαγραφές ασφαλείας – Μεταφορά των συσκευασιών είτε σφραγισμένων είτε σε ειδικά δοχεία ασφαλούς μεταφοράς - Τριπλό ξέπλυμα των κενών συσκευασιών – Συλλογή των κενών συσκευασιών σε ειδικούς σάκους και αποθήκευσή τους σε ασφαλές σημείο – Συμμετοχή στα προγράμματα συλλογής κενών συσκευασιών φ/π προιόντων.

3.2. Μέτρα άμβλυνσης της επιφανειακής απορροής και διήθησης

Για τον περιορισμό της επιφανειακής απορροής και της διήθησης η εργαλειοθήκη περιλαμβάνει τα εξής μέτρα:

Διαχείριση του εδάφους:	Μείωση της έντασης της κατεργασίας του εδάφους - Διαχείριση της συμπίεσης του εδάφους – αύξηση της διηθητικότητας - Δημιουργία τραχιάς σποροκλίνης - Εφαρμογή τροχιοδρόμων (tramlines) κάθετα στη κλίση του αγρού - Δημιουργία αναχωμάτων - Άροση κατά τις ισοϋψείς - Διαχείριση των ρωγμών του εδάφους
Καλλιεργητικές τεχνικές:	Εφαρμογή αμειψισπορών - Εγκατάσταση καλλιεργειών κατά λωρίδες - Εγκατάσταση καλλιεργειών φυτοκάλυψης
Φυτικές ζώνες ανάσχεσης & Τεχνητές δομές συγκράτησης:	Καθιέρωση ζωνών ανάσχεσης – Διατήρηση των ζωνών - Δημιουργία δομών συγκράτησης για την επιβράδυνση της κίνησης του νερού - Εφαρμογή μέτρων εκτός αγρού
Ορθή χρήση φ/π προϊόντων:	Εφαρμογή φ.π. σύμφωνα με την ετικέτα - Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση του χρονοδιαγράμματος εφαρμογής - Επιλογή των κατάλληλων φ.π. ή της κατάλληλης λύσης φυτοπροστασίας

3.3. Μέτρα άμβλυνσης της διασποράς του ψεκαστικού νέφους

Για τον περιορισμό της διασποράς του ψεκαστικού νέφους προτείνονται τα εξής μέτρα άμβλυνσης:

Περιβαλλοντικοί παράγοντες	Προσαρμογή του ψεκαστικού νέφους ανάλογα με την επιφάνεια στόχο, το βλαστικό στάδιο της φυτείας κ.λ.π. - Κάλυψη πηγαδιών, γεωτρήσεων - Έλεγχος των τοπικών κανονισμών και των απαιτήσεων που αναφέρονται στις ετικέτες των φ/π - Διατήρηση της υφιστάμενης βλάστησης ή δημιουργία ανεμοφρακτών -
Καιρικές συνθήκες	Έλεγχο της πρόγνωσης του καιρού κατά το σχεδιασμό του ψεκασμού – Επανέλεγχο πριν την έναρξη του ψεκασμού – Αναβολή του ψεκασμού όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει τις τοπικά συνιστώμενες τιμές - Ψεκασμός υπό σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες -
Δημιουργία ψεκαστικού νέφους	Χρήση ακροφυσίων με χαμηλό ποσοστό λεπτών σταγονιδίων (<100 μm) - Χαμηλή πίεση ψεκασμού – Χρήση ακροφυσίων χαμηλής αερομεταφοράς - Μείωση της ταχύτητας ροής του αέρα στους νεφελοψεκαστήρες - Χρήση εγκεκριμένων σκευασμάτων επιφανειοδραστικού παράγοντα για μείωση της διασποράς -
Εξοπλισμός του	Έλεγχος της εθνικής ταξινόμησης των τεχνολογιών μείωσης της

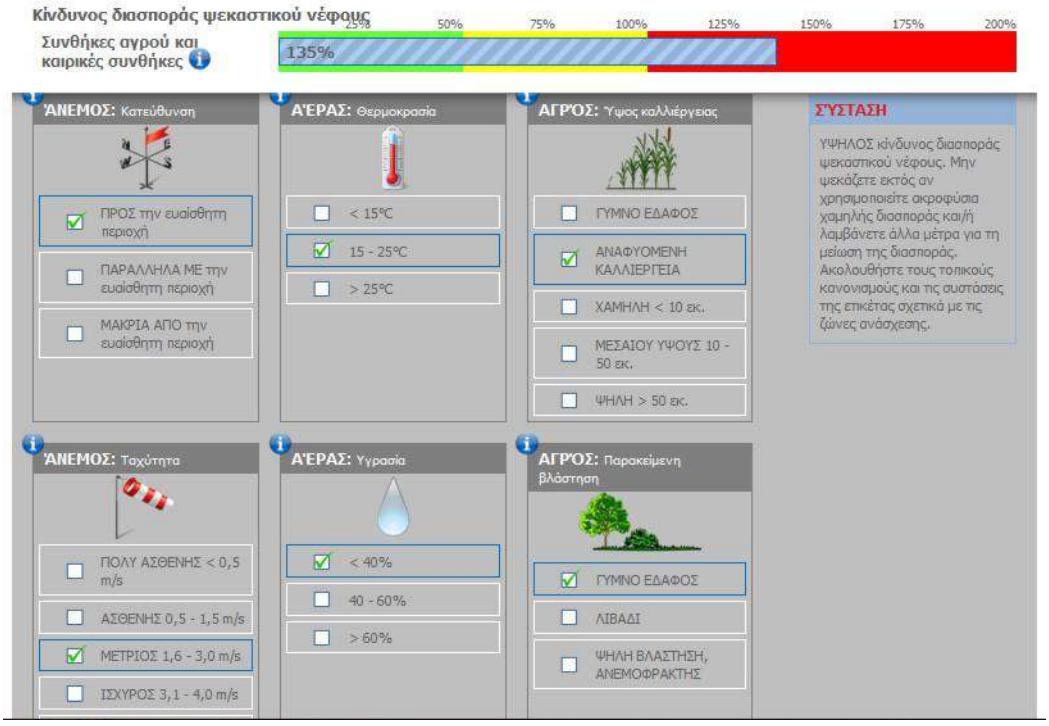
ψεκαστήρα	διασποράς του ψεκαστικού νέφους (SDRT) – Επιθεώρηση ψεκαστήρα – Χρήση τεχνικών ψεκασμού που περιορίζουν τα φ.π. – Χρήση ψεκαστήρων που φέρουν τεχνολογίες μείωσης της διασποράς – Χρήση ψεκαστήρων που υπόκεινται σε τακτικό έλεγχο – Χρήση ψεκαστήρων που πληρούν τα εναρμονισμένα πρότυπα EN - Χρήση ψεκαστήρων που διαθέτουν επίσημη πιστοποίηση – Χρήση ψεκαστήρων εξοπλισμένων με τμηματική αντιστάθμιση πίεσης – Χρήση ψεκαστήρων που φέρουν κεφαλές πολλαπλών ακροφυσίων - Χρήση ψεκαστήρων με σύστημα σταθεροποίησης του ψεκαστικού ιστού - Χρήση ψεκαστήρων με κατευθυνόμενους εγχυτήρες αέρα – Σε αροτριαίες καλλιέργειες χρήση ψεκαστήρων υποβοηθούμενων με ρεύμα αέρα - Χρήση ψεκαστήρων με ρυθμιζόμενη ταχύτητα ροής αέρα - Χρήση ψεκαστήρων εξοπλισμένων με σύστημα διακοπής ροής του αέρα και στις δύο πλευρές - Χρήση ψεκαστήρων με δυνατότητα μεμονωμένου ελέγχου σε καθένα από τα ακροφύσια – Χρήση ψεκαστήρων που επικαλύπτουν το πεδίο ψεκασμού με κατάλληλη καλύπτρα – Χρήση ψεκαστήρων με σύστημα κάμψης της καλλιέργειας (Crop-Tilter) – Χρήση ψεκαστήρω που ψεκάζουν «κατά λωρίδες» - Χρήση ψεκαστήρων με αισθητήρες ανίχνευσης του στόχου – Χρήση εξοπλισμού αυτόματου ελέγχου του ύψους του ψεκαστικού ιστού – Χρήση ψεκαστήρων ελεγχόμενων με GPS – Χρήση συστημάτων ανίχνευσης ζιζανίων – Χρήση ψεκαστήρων τύπου σήραγγας – Χρήση ψεκαστήρων με πολύστοιχες καλύπτρες -
Ρυθμίσεις του ψεκαστήρα	Βαθμονόμηση ψεκαστήρα με βασικό κριτήριο τη μείωση της διασποράς του ψεκαστικού νέφους - Χρήση της μικρότερης δυνατής απόστασης μεταξύ των ακροφυσίων και της επιφάνειας-στόχου - Χρήση της χαμηλότερης δυνατής ταχύτητας κίνησης του ψεκαστήρα – Εφαρμογή της μικρότερης δυνατής πίεσης ψεκασμού – Αποφυγή ψεκασμού σε αψέκαστες ζώνες και άλλες περιοχές μη στόχους – , Ρύθμιση της ταχύτητας ροής του αέρα ανάλογα με τις επικρατούσες κατά τον ψεκασμό συνθήκες – Ρύθμιση της κατεύθυνσης των ακροφυσίων και της ροής του αέρα στην επιφάνεια στόχο
Λειτουργία του ψεκαστήρα	Διακοπή ή μείωση της ροής του αέρα που πνέει προς τα έξω όταν ο ψεκασμός γίνεται στα όρια της φυτείας ή με κατεύθυνση σε ευαίσθητες περιοχές
Εξοπλισμός	Χρήση διχτυών αντιχαλαζιακής προστασίας ως εμπόδιο, για τον περιορισμό της διασποράς του ψεκαστικού νέφους - ψεκαστήρες τύπου «κανονιού» σε αγρούς που γειτνιάζουν με ευαίσθητες περιοχές

Ανάλογα με τη διάγνωση των κινδύνων ο ενδιαφερόμενος καλείται να επιλέξει και να προσαρμόσει στις τοπικές συνθήκες τα κατάλληλα μέτρα άμβλυνσης. Για να βοηθηθεί στις επιλογές αυτές έχουν παραχθεί μια σειρά από εγχειρίδια με αναλυτικές οδηγίες και ενημερωτικά φυλλάδια (ΕΣΥΦ ΕΚΔΟΣΕΙΣ). Επίσης έχει αναπτυχθεί ένα εργαλείο «DRIFT EVALUATION TOOL» διαθέσιμο στο διαδίκτυο το οποίο καθοδηγεί τους ενδιαφερόμενους στις ορθές επιλογές για την άμβλυνση του κινδύνου διασποράς του ψεκαστικού νέφους.

4. ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

Το εργαλείο με την ονομασία DIFT EVALUATION TOOL αναπτύχθηκε από το δίκτυο του Ευρωπαϊκού Συνδέσμου Φυτοπροστασίας (ECPA) στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού έργου TOPPS-Prowadis σε συνεργασία με εταίρους και εμπειρογνώμονες από 7 χώρες της ΕΕ για την αξιολόγηση του κινδύνου της διασποράς του ψεκαστικού νέφους (Doruchowski et al., 2013). Το εργαλείο μεταφράστηκε στα ελληνικά από τον Ελληνικό Σύνδεσμο Φυτοπροστασίας και το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ενώ είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο σε διάφορες γλώσσες (http://www.topps-drift.org).

Σχήμα 3. Τα τρία στάδια υλοποίησης της εφαρμογής



Σχήμα 4. Εισαγωγή στοιχείων στο δεύτερο στάδιο της εφαρμογής και διάγνωση του κινδύνου της διασποράς σε αροτριαίες καλλιέργειες

Το εργαλείο περιλαμβάνει τρεις εφαρμογές, ανάλογα με την καλλιέργεια-στόχο. Η πρώτη αφορά την εκτίμηση του κινδύνου της διασποράς σε φυτά μεγάλης καλλιέργειας, η δεύτερη σε οπωρώνα και η τρίτη σε αμπελώνα. Μέσα από απλά βήματα και επιλογές, οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να εισάγουν όλες τις παραμέτρους του ψεκασμού που σχετίζονται με τη διασπορά. Η εφαρμογή υλοποιείται σε 3 στάδια (Σχήμα 3). Στο πρώτο και δεύτερο στάδιο γίνεται ποσοτικοποίηση του κίνδυνου της διασποράς. Τα στοιχεία που εισάγονται αφορούν την τοποθεσία του ψεκασμού, τον εντοπισμό ευαίσθητων περιοχών, την ύπαρξη δομών και ζωνών ανάσχεσης, τη πυκνότητα της φυτοκόμης και τις μετεωρολογικές συνθήκες (ταχύτητα, κατεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία, σχετική υγρασία). (Σχήμα 4). Από τα στοιχεία αυτά, το εργαλείο προβαίνει σε ποσοτική αξιολόγηση του κινδύνου της διασποράς σε μια κλίμακα από 0-200 (0-50=χαμηλός κίνδυνος, 50-100=μέτριος κίνδυνος, 100-200= μεγάλος κίνδυνος) και ανάλογα με την εκτίμηση, οδηγείται σε συστάσεις για το αν οι συνθήκες επιτρέπουν ή όχι το ψεκασμό ή για το αν επιβάλλεται να ληφθούν κάποια μέτρα πρόληψης για την άμβλυνση των ρίσκων.

Στο τρίτο στάδιο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μέσα από μια σειρά από διαφορετικά προτεινόμενα μέτρα όπως χρήση ακροφυσίων χαμηλής διασποράς, επιλογή χαμηλότερης πίεσης, μείωση του αέρα στους νεφελοψεκαστήρες και επιλογή κατάλληλου σεναρίου εφαρμογής για μείωση της διασποράς και των επιπτώσεών της (Σχήμα 5). Στο τέλος, το εργαλείο συντάσσει μια έκθεση σε εκτυπώσιμη μορφή με όλες τις συνθήκες του ψεκασμού, την πιθανή διασπορά και τα επιλεχθέντα μέτρα άμβλυνσης.

Σχήμα 5. Επιλογή μέτρων μείωσης της διασποράς και άμβλυνση του κινδύνου

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα διαδοχικά έργα TOPPS αναπτύχθηκαν από το 2005 με στόχο την ανάπτυξη και διάδοση των κατάλληλων μέτρων (Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης), των απαραιτήτων συστάσεων και του ανάλογου εκπαιδευτικού υλικού, ώστε να διασφαλιστεί η προστασία τόσο του χρήστη όσο και των υδάτων κατά τη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας έχει παραχθεί σε συνεργασία με εταίρους και εμπειρογνώμονες από 7 χώρες της ΕΕ ένα πλούσιο υλικό που έχει μεταφραστεί σε διάφορες γλώσσες, μεταξύ των οποίων και η ελληνική. Μέσα από ημερίδες, εκπαιδεύσεις και δημοσιεύσεις στον

επιστημονικό τύπο και στα ΜΜΕ οι πρακτικές αυτές έχουν διαχυθεί σε μεγάλο βαθμό σε όλους του εμπλεκόμενους φορείς ευαισθητοποιώντας και εγείροντας την εφαρμογή των μέτρων προστασίας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

EC/127, 2009. Directive 2009/127/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 amending Directive 2006/42/EC with regard to machinery for pesticide application. Of. J. EU, 25.11.2009, L 310/29.

EC/128, 2009. Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. Of. J. EU, 24.11.2009, L 309/71.

EC/60, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Of. J. EU, 22.12.2000, L 327/1.

Balsari P, Marucco P. 2007. TOPPS: a European project aimed at reducing ppp point sources. XIII Symposium Pesticide Chemistry – Environ. Fate and Human Health. Piacenza Italy.

Doruchowski , G., Roettele, M., Herbst, A., & Balsari, P,. 2013. Drift evaluation tool to raise awareness and support training on the sustainable use of pesticides by drift mitigation. Computers and electronics in agriculture, 97, 27-34

Frede, H.G. 2006. Presentation on point sources significance. TOPPS National Forum, Bonn

Müller, K., Bach, M., Hartmann, H., Spiteller, M., Frede, H.G. 2002., Point and non-point source pesticide contamination in the Zwester Ohm Catchment (Germany). J. Environm. Quality, 31(1), 309-318.

Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Baetens, K., Brusselman, E., Dekeyser, D., Verboven, P., 2011. Drift from field crop sprayers using an integrated approach: results of a five-year study. Trans. ASABE 54 (2), 403–408.

Paulien I. Adriaanse, Robert C. Van Leerdam, Jos J.T.I. Boesten, 2016. The effect of the runoff size on the pesticide concentration in runoff water and in FOCUS streams simulated by PRZM and TOXSWA, Science of The Total Environment, Volume 584, 2017, p 268-281, http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.001

Roettele M., 2008. Strategies to reduce point source losses of ppp to water focus on "behaviour, technique and infrastructure": results and lessons learned from the TOPPS - project. Aspects of Applied Biology 84, International Advances in Pesticide Application, pp. 357–368.

Roettele, M., Balsari, P., Doruchowski, G., Petersen, P.H., 2010. Sprayer development needs more focus on mitigation of environmental risks arising from point source water pollution..International advances in pesticide application, Aspect of Applied Biology 99,, 357-368.

Roettele, M., Paolo Balsari, Doruchowski, G., Hans Joachim Wehmann, 2010. Spray technique a significant element in the risk mitigation of pesticide losses to water. Proc. Ageng Conf. 2010, Clermont Ferrand, France

www.TOPPS-life.org (Πληροφορίες και έντυπο υλικό από τα αποτελέσματα του έργου TOPPS).

www.topps-drift.org (Αρχικός ιστότοπος του drift evaluation tool)

http://topps.agr.uth.gr/ (Πληροφοριακό υλικό ως αναφορά τις δράσεις του TOPPS στην Ελλάδα)

http://esyf.gr/enimerosi/ekdoseis/ (πληροφορίες και έντυπο υλικό για την άμβλυνση των κινδύνων από τη μη ορθή χρήση των φ/π)

10ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΕ ΑΥΤΟΠΡΟΣΑΡΜΟΖΟΜΕΝΑ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Αναστάσιος Γιαννούλης ✉, Χρήστος Βατίστας, Αντώνης Μυστριώτης, Δημήτρης Μπριασούλης

Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής , Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα 1855, Ελλάδα. ✉agian@aua.gr

Περίληψη

Ένας νέος τύπος κατακόρυφου πλαισίου με αεροδυναμικά χαρακτηριστικά που προσαρμόζονται στην ένταση του προσπίπτοντος ανέμου παρουσιάζεται. Το πλαίσιο αποτελείται από σειρά παράλληλων περσίδων οι οποίες περιστρέφονται περί τον άξονα στήριξης στη μία πλευρά τους. Κατά την αλληλεπίδραση τους με τον άνεμο οι περσίδες ισορροπούν σε συγκεκριμένες γωνίες κλίσης για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Τα αποτελέσματα τρισδιάστατων αριθμητικών μοντέλων που προσομοιώνουν τη ροή του ανέμου γύρω από το πλαίσιο επαληθεύτηκαν με μετρήσεις σε ανεμοσήραγγα ανοιχτού τύπου. Η προστατευτική ικανότητα του πλαισίου με περσίδες συγκρίθηκε με συμβατικό αδιαπέραστο κατακόρυφο πλαίσιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η δυναμική απόκριση των περσίδων στον άνεμο προσφέρει βελτιωμένη προστασία της υπήνεμης περιοχής. Η υπολογιστική προσομοίωση έδειξε σημαντική μείωση της ταχύτητας του ανέμου υπήνεμα του πλαισίου (σχεδόν μηδενική τιμή).

Λέξεις- Κλειδιά: Ανεμοφράκτης, Υπολογιστική Ρευστομηχανική (CFD), ανεμοσήραγγα

NUMERICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF A VERTICAL PANEL WITH SELF-ADJUSTED AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

A. Giannoulis ✉, C. Vatistas, A. Mistriotis, D. Briassoulis

Department of Natural Resources and Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, Athens 11855, ✉agian@aua.gr

Abstract

A novel vertical wind-break panel able to adjust its aerodynamic characteristics to the wind velocity is presented. The panel consists of a series of parallel flaps. They are allowed to rotate with respect to their hinge supports along their longitudinal base when interacting with the wind, reaching equilibrium at a certain angle in response to the incoming wind velocity. The results of 3D steady state numerical simulations carried out to analyse the airflow around a panel with flaps were validated with wind tunnel measurements. Comparisons of the protection offered by the innovative panel with flaps with respect to a conventional vertical solid panel were carried out. The results showed that the dynamic interaction of the wind with the panel with flaps leads to an improved wake protection. Analysis of the numerical results showed that the air velocity drops significantly in the leeward region (almost to zero) for most of the protected area, confirming that the offered protection was more efficient as compared to a conventional solid panel.

Keywords: windbreak, CFD, wind tunnel

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται εκτεταμένη χρήση κατακόρυφων πλαισίων κυρίως στη γεωργία αλλά και σε πολλούς άλλους τομείς (Holmes, 2001; Letchford, 2001; Giannoulis et al. 2012). Το σημαντικό πλεονέκτημα των κατασκευών αυτών είναι η εύκολη, γρήγορη και χαμηλού κόστους εγκατάστασή τους.

Τα κατακόρυφα πλαίσια χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στην γεωργία για την προστασία από τον άνεμο τόσο κατασκευών όσο και καλλιεργειών. Χρησιμοποιούνται επίσης ως μέσο αποτροπής μεταφοράς σκόνης, απόσβεση θορύβου κ.λ.π... Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά τέτοιων περατών και μη κατασκευών παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία και αναλύονται λεπτομερώς από τους Giannoulis et al. 2013. Οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων ανέμου σχεδιασμού σε ανεμοφράκτες παρέχονται από κατασκευαστικούς κώδικες (CEN, 2005 ; ANSI, 2010)

Συμπαγείς συστοιχίες δέντρων στα όρια αγρών αποτέλεσαν την πρώτη μορφή ανεμοφρακτών (φυσικοί ανεμοφράκτες). Η προστασία που οι φυσικοί ανεμοφράκτες παρέχουν έχει μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία 30 χρόνια (Gardiner, 2004). Η ροή υπήνεμα ενός φυσικού ανεμοφράκτη, έχει επίσης διερευνηθεί (Baldwin, 1988; Stathopoulos et al, 1994). Στις συγκεκριμένες μελέτες ένα κατακόρυφο αδιαπέραστο πλαίσιο αντιπροσώπευε τον ανεμοφράκτη. Η συμπεριφορά ενός φυσικού ανεμοφράκτη όμως είναι δυναμική διότι τα δέντρα αποκρίνονται στον προσπίπτοντα άνεμο μεταβάλλοντας σχήμα και περατότητα και αποσβένοντας με τον τρόπο αυτό την κινητική του ενέργεια. Η αεροδυναμική συμπεριφορά ανεμοφρακτών με ελαστική απόκριση δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Μια ερευνητική εργασία στο συγκεκριμένο θέμα παρουσιάστηκε πρόσφατα (Giannoulis et. al, 2015).

Οι προσομοιώσεις με τη βοήθεια της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) αποτελούν ένα αποδοτικό, χαμηλού κόστους εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για την αναγνώριση και κατανόηση πολύπλοκων αεροδυναμικών φαινομένων. Η πολυπλοκότητα των τυρβωδών ροών όμως καθιστά αναγκαία την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των αριθμητικών μοντέλων με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα πλήρους κλίμακας ή αποτελέσματα πειραμάτων σε ανεμοσήραγγα. Η παρούσα ερευνητική εργασία έχει ως στόχο την αριθμητική μοντελοποίηση και ανάλυση της ροής του ανέμου δια μέσου μιας κατασκευής πλαισίου με περσίδες. Η αεροδυναμική περσίδων, πτερυγίων, αεροτομών έχει μελετηθεί σημαντικά λόγω της άμεσης συσχέτισης της με αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές (Shames, 1992). Σε καμία περίπτωση όμως οι προαναφερθείσες κατασκευές δε χρησιμοποιήθηκαν ως στοιχεία/μέλη κατακόρυφων πλαισίων είτε κατασκευών προστασίας από τον άνεμο εν γένει. Στην παρούσα εργασία αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του πλαισίου με περσίδες κατά την αλληλεπίδραση του με τον άνεμο, με στόχο τον σχεδιασμό αποδοτικότερων πλαισίων προστασίας.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Εργαστηριακά Πειράματα - Ανεμοσήραγγα

Στα εργαστηριακά πειράματα χρησιμοποιήθηκε ανεμοσήραγγα ανοιχτού τύπου κατασκευασμένη από διαφανές Πλεξιγκλάς με διατομή 0.5 x 0.5 m. Ένας κυλινδρικός ανεμιστήρας αξονικής ροής για εφαρμογές υψηλών πιέσεων δημιουργούσε τη ροή αέρα εντός της ανεμοσήραγγας (ισχύς 3kW) με αναρρόφηση από το ανοικτό άκρο της ανεμοσήραγγας-άκρο εισόδου (Εικόνα 1).

Εικόνα 1. Ανεμοσήραγγα ανοιχτού τύπου

Στο άκρο εισόδου τοποθετήθηκε εξομαλυντής της εισερχόμενης ροής (honeycomb – Εικόνα 2). Τα δείγματα,, υπό μελέτη πλαίσια, τοποθετήθηκαν σε απόσταση 2 m από το άκρο εισόδου του αέρα. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας αέρα στο εσωτερικό της διάταξης ήταν 5 m s^{-1}. Μετρήσεις ταχύτητας απουσία δείγματος παρουσίασαν την ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα σε μια τυπική διατομή της ανεμοσήραγγας να παραμένει σταθερή δεδομένου ότι οι μέγιστες αποκλίσεις μετρήθηκαν να κυμαίνονται σε τιμές μικρότερες του 5%.

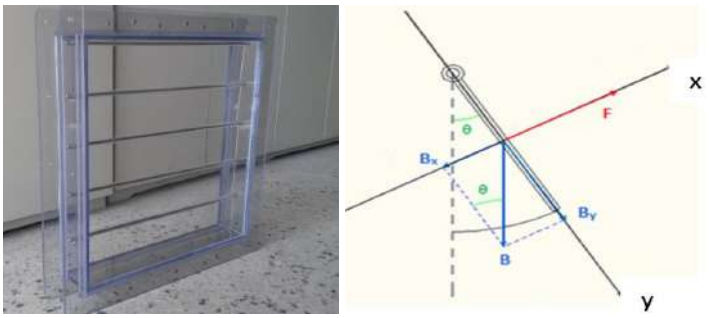
Εικόνα 2. Εξομαλυντής ροής εισερχόμενου αέρα – honeycomb

Ένα πλαίσιο διατομής 0.5 x 0.5 m στήριζε τις παράλληλες περσίδες για την ευκολότερη προσαρμογή τους στη διατομή της ανεμοσήραγγας (Εικόνα 3). Οι περσίδες μπορούσαν να περιστραφούν γύρω από άξονες προσαρμοσμένους στα άνω άκρα τους, ενώ ήταν κατασκευασμένες από συμπαγές φύλλο Πλεξιγκλάς πάχους 4 mm με διαστάσεις 0.5 x 0.1 m. Για μηδενικές ταχύτητες αέρα στο εσωτερικό της ανεμοσήραγγας (κλειστός ανεμιστήρας) οι περσίδες διατηρούσαν την κατακόρυφη θέση ισορροπίας με το βάρος να είναι η μόνη δύναμη που ασκείται πάνω τους. Όταν ο ανεμιστήρας ήταν σε λειτουργία, η ροή του αέρα ανάγκαζε τις περσίδες να περιστρέφονται περί τον άξονα στήριξης και να δημιουργούν ανοίγματα με γωνίες ισορροπίας σε σχέση με την κατακόρυφο ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα. Στην περίπτωση αυτή η ισορροπία εξασφαλιζόταν κάτω από την δράση της συνισταμένης των πιέσεων του αέρα και του βάρους του πλαισίου. Με τον τρόπο αυτό το πλαίσιο με τις περσίδες δρούσε ως περατό πλαίσιο με μεταβλητά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.

Η γωνία ισορροπίας των περσίδων, ϑ, εξαρτάται από το βάρος τους *B* που αντισταθμίζει τη συνισταμένη δύναμη *F* (λόγω της συνολικής πίεσης του αέρα πάνω τους) που εφαρμόζεται από τον εισερχόμενο αέρα στις περσίδες (Εικόνα 3β). Η γωνία ϑ υπολογίζεται από την Εξίσωση 1:

$$sin\theta = \frac{PA}{mg} \qquad (1)$$

Όπου *P (Pa)* είναι η συνολική αεροδυναμική πίεση στην περσίδα, *A* (m^2) και *m (kg)* είναι η επιφάνεια και μάζα της περσίδας αντίστοιχα και *g* ($m\ s^{-2}$) η επιτάχυνση βαρύτητας. Παρά το γεγονός ότι η πειραματική διάταξη, η οποία σχεδιάστηκε για πρακτικούς λόγους ως ένας απλός μηχανισμός, ανακατεύθυνε τη ροή προς τα κατώτερα τμήματα της ανεμοσήραγγας, τα αποτελέσματα στην πραγματικότητα αντιστοιχούν στην προς τα άνω ανακατεύθυνση της ροής του αέρα. Με τον τρόπο αυτό η ροή εντός της ανεμοσήραγγας και διαμέσου των περσίδων αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη αεροδυναμική συμπεριφορά ενός κατακόρυφου πλαισίου πλήρους κλίμακας με περσίδες ανοδικής ανακατεύθυνσης της ροής. Για την κατασκευή ενός τέτοιου πλαισίου ο μηχανισμός με τον οποίο οι περσίδες αποκτούν τις διάφορες κλίσεις ισορροπίας θα έπρεπε να είναι διαφορετικός και αρκετά πολύπλοκος.



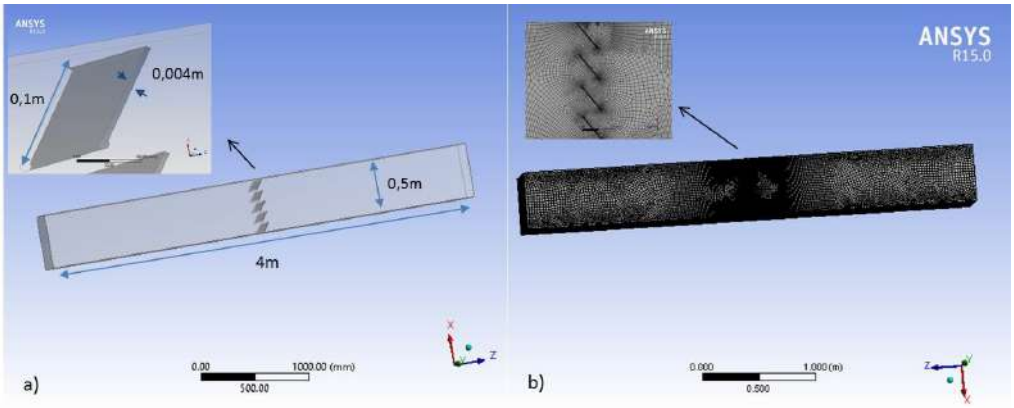
Εικόνα 3. α) Το πλαίσιο με περσίδες, β) Ισορροπία των δυνάμεων σε περσίδα

Η ταχύτητα του αέρα μετρήθηκε σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος της ανεμοσήραγγας με τη βοήθεια ανεμομέτρων (hotwire anemometer model: SwemaAir 40). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά 50 cm προσήνεμα του πλαισίου (βάσει του εισερχόμενου αέρα στην ανεμοσήραγγα) και σε θέσεις 50 και 150 cm υπήνεμα του πλαισίου και για τρεις διαφορετικές τιμές ταχύτητας αέρα: 1.5 m s^{-1}, 3 m s^{-1}, and 4.5 m s^{-1}. Η γωνία κλίσης στην ισορροπία για τις περσίδες καταγράφηκε με ψηφιακές εικόνες και η τιμή της γωνίας εκτιμήθηκε με επεξεργασία των συγκεκριμένων εικόνων.

2.2 Αριθμητική Προσομοίωση

Τρεις διαφορετικές αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε κατάσταση ισορροπίας (steady state) με το υπολογιστικό πακέτο ANSYS CFX 15.0. Η αρχική αριθμητική ανάλυση είχε στόχο την επιβεβαίωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Μια ακριβής απεικόνιση της ανεμοσήραγγας (Εικόνα 1) προσομοιώθηκε για την σύγκριση των προφίλ ταχύτητας του αέρα σε διαφορετικές θέσεις εντός της πειραματικής διάταξης από τα εργαστηριακά πειράματα και το αριθμητικό μοντέλο. Η επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των εκτιμήσεων της υπολογιστικής προσομοίωσης επέτρεψε τη χρήση της αριθμητικής ανάλυσης για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης παρόμοιων διατάξεων με τον άνεμο για παρεμφερείς τιμές του αριθμού Reynolds. Η γωνία κλίσης του αριθμητικού μοντέλου πλαισίου με περσίδες ορίσθηκε στις 35°. Η επιλογή της συγκεκριμένης γωνίας κλίσης ισορροπίας έγινε για την δημιουργία ανοιγμάτων μεταξύ των περσίδων ικανών να αποφέρουν σημαντική υπήνεμη προστασία και μείωση των ανεμοπιέσεων στο πλαίσιο. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της ροής διαμέσου και γύρω από ένα πλαίσιο με περσίδες και δεν περιλαμβάνει ανάλυση σχετικά με τις μειωμένες ανεμοπιέσεις στις οποίες το πλαίσιο με περσίδες υπόκειται. Η ανάλυση των φορτίων ανέμου αποτελεί μελέτη μείζονος ενδιαφέροντος και θα παρουσιασθεί σε ξεχωριστή ερευνητική εργασία.

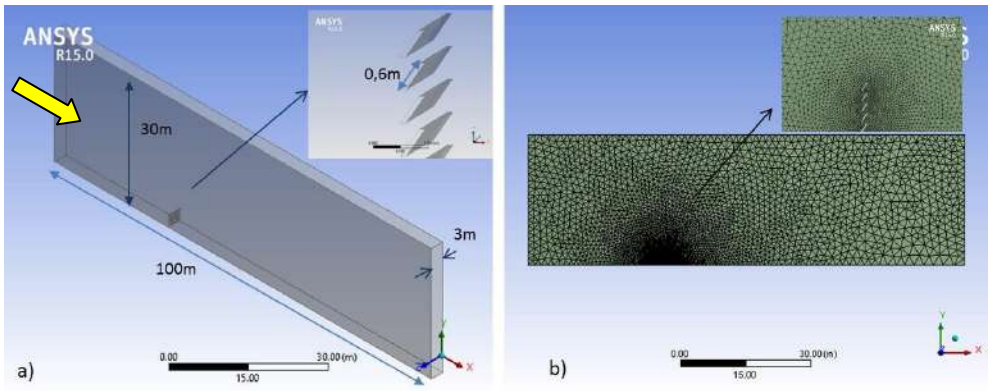
Οι διαστάσεις του μοντέλου ανεμοσήραγγας, η γεωμετρία των περσίδων και η θέση του πλαισίου/δείγματος στην αριθμητική προσομοίωση (Εικόνα 4) ήταν πανομοιότυπες με αυτές στην πραγματική ανεμοσήραγγα του εργαστηρίου (όπως δίνονται στην Παράγραφο 2.1). Η ταχύτητα εισόδου ορίσθηκε στην τιμή 2.3 m s^{-1}. Σε όλες τις επιφάνειες της ανεμοσήραγγας ορίσθηκε ίσο με μηδέν το διάνυσμα της ταχύτητας (no slip wall conditions). Στην έξοδο η οριακή συνθήκη ήταν η μηδενική πίεση. Χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά στοιχεία (tetrahedral elements) με το συνολικό αριθμό στο πλέγμα ίσο με 420000. Η έντονη τυρβώδης συμπεριφορά του αέρα κατά την αλληλεπίδραση του με τις περσίδες οδήγησε στην πύκνωση του πλέγματος γύρω από το πλαίσιο για την ακριβή απεικόνιση της ροής στην περιοχή.



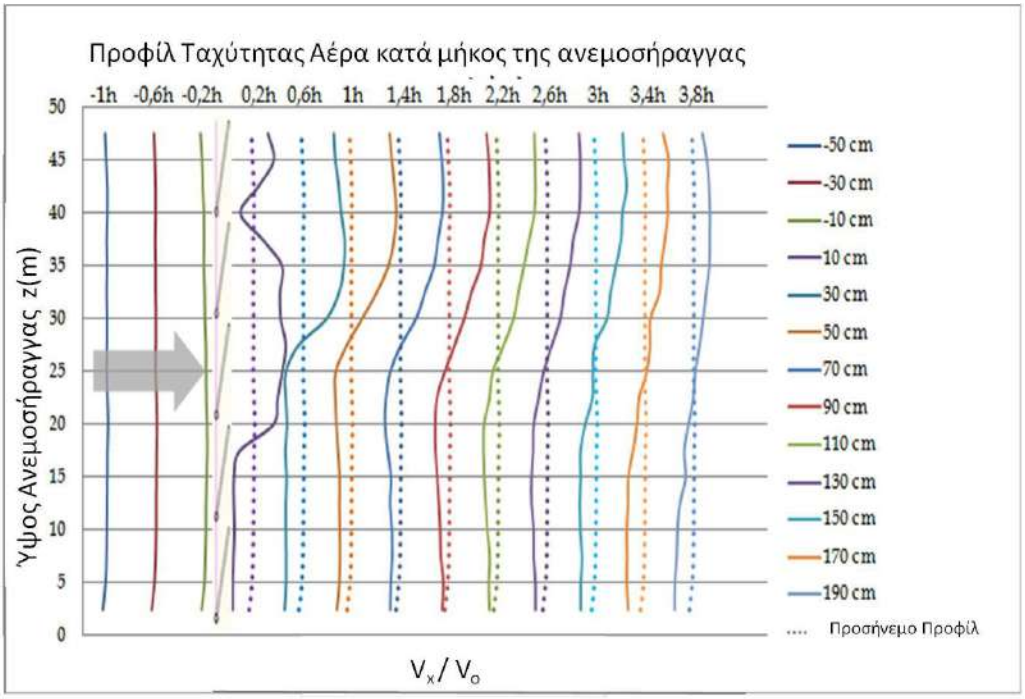
Εικόνα 4. α) Η γεωμετρία της ανεμοσήραγγας και της περσίδας του πλαισίου στο αριθμητικό μοντέλο, β) Το πλέγμα της αριθμητικής προσομοίωσης

Μελετήθηκαν δύο επιπλέον τρισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα πλήρους κλίμακας: ένα πλαίσιο με περσίδες αντίστοιχο του πλαισίου που μελετήθηκε στην ανεμοσήραγγα κι ένας τυπικός αδιαπέραστος ανεμοφράκτης. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν για την εκτίμηση της προστατευτικής ικανότητας κάθε κατασκευής. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση το μοντέλο πλαισίου αποτελούταν από 5 περσίδες ύψους 0.6 m (συνολικό ύψος 3 m), πλάτους 3 m και πάχους 0.1 m και βρισκόταν εντός παραλληλεπίπεδου χώρου μήκους 100 m και διατομής 30 m ύψους και 3 m πλάτους. Το πλαίσιο με περσίδες βρισκόταν σε απόσταση 30 m από την είσοδο. Η γωνία κλίσης των περσίδων ήταν 35° (Εικόνα 5). Στην είσοδο το προφίλ του ανέμου ορίστηκε να αυξάνει λογαριθμικά με το ύψος με z_o=0.05 (terrain roughness). Η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m για το λογαριθμικό προφίλ ήταν ίση με 3 m s^{-1} (ώστε η ταχύτητα ανέμου στο ύψος του πλαισίου να είναι ίση με 2.3 m s^{-1}). Στην κάτω επιφάνεια και τις περσίδες του πλαισίου η οριακή συνθήκη ήταν η μηδενική ταχύτητα (no slip condition), στην άνω επιφάνεια ορίσθηκε μόνο η κατακόρυφη ταχύτητα ίση με μηδέν (free slip condition) και στην έξοδο η πίεση ήταν μηδενική. Στα πλαϊνές επιφάνειες του παραλληλεπιπέδου που περιείχε το πλαίσιο με τις περσίδες ορίσθηκαν συνθήκες συμμετρίας (symmetry boundary condition). Τετραεδρικά στοιχεία (270000) αποτέλεσαν το πλέγμα.

Η τελευταία αριθμητική προσομοίωση αφορούσε το αδιαπέραστο κατακόρυφο πλαίσιο (ανεμοφράκτη). Η μοντελοποίηση του κλασσικού ανεμοφράκτη πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο όπως και του πλαισίου με περσίδες, με τις ίδιες οριακές συνθήκες, αντίστοιχο πλέγμα και παρόμοιο προφίλ ανέμου στην είσοδο (λογαριθμικό).



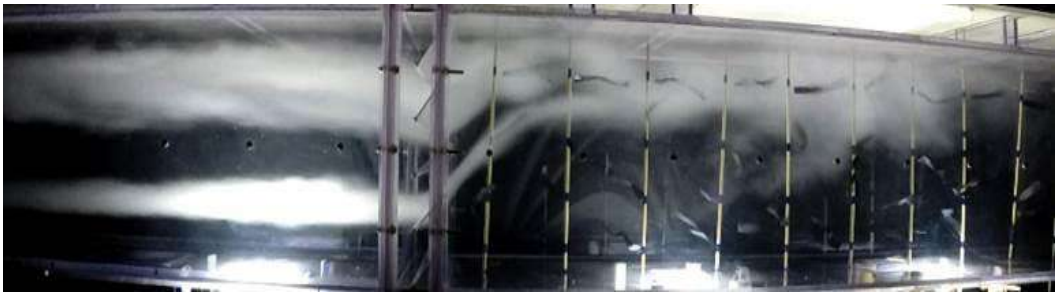
Εικόνα 5. α) Γεωμετρία του πλήρους κλίμακας αριθμητικού μοντέλου με 5 περσίδες, β) Το πλέγμα της αριθμητικής προσομοίωσης



Εικόνα 6. Προφίλ ταχύτητας ανέμου κατά μήκος της ανεμοσήραγγας όταν φράσσεται από το πλαίσιο με τις περσίδες

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η Εικόνα 6 παρουσιάζει το προφίλ της ταχύτητας του αέρα εντός της ανεμοσήραγγας καθώς ο αέρας διαπερνά το πλαίσιο με τις περσίδες. Για την ακρίβεια τα προφίλ της ταχύτητας του αέρα είναι ανεστραμμένα ώστε να παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με βάση την πραγματική διάταξη του πλαισίου που έχει ως στόχο την προς τα πάνω εκτροπή του αέρα. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα υποδηλώνουν την αλλαγή διεύθυνσης με παράλληλη επιτάχυνση της ροής του αέρα προς το άνω τοίχωμα της ανεμοσήραγγας μέσω της αλληλεπίδρασης του εισερχόμενου αέρα με τις περσίδες. Ένας μεγάλης κλίμακας στρόβιλος αλλά με τιμές ταχυτήτων μικρού μεγέθους εμφανίζεται στη χαμηλή ζώνη της ανεμοσήραγγας υπήνεμα των περσίδων. Το μέγεθος και το σχήμα του στροβίλου είναι ορατά στην Εικόνα 7, όπου παρουσιάζεται η οπτικοποίηση της ροής στην ανεμοσήραγγα με τη βοήθεια ξηρού πάγου.

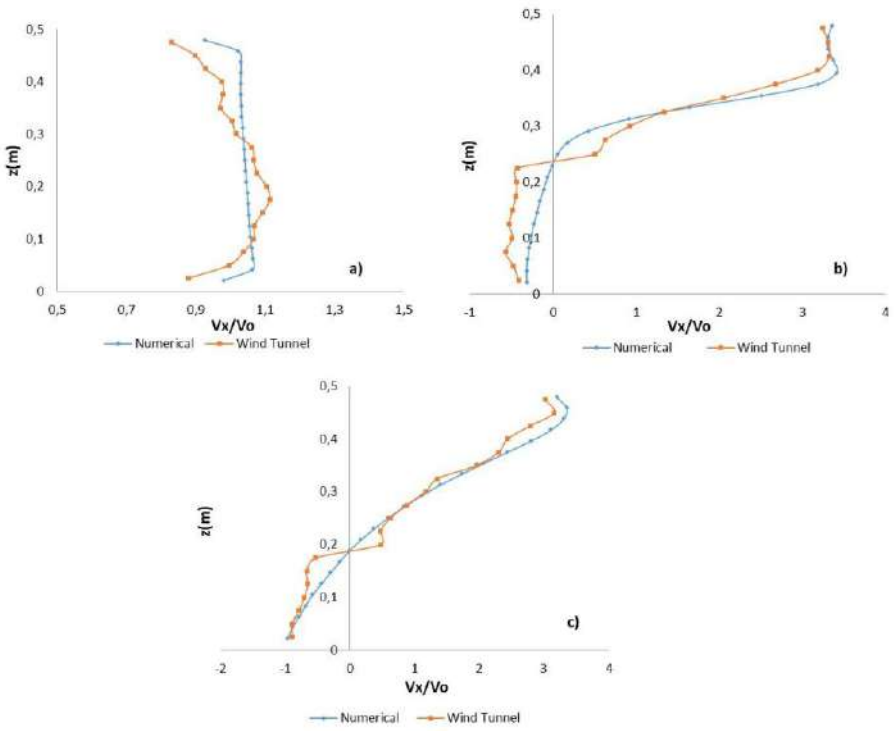


Εικόνα 7. Οπτικοποίηση της ροής αέρα διαμέσου του πλαισίου με περσίδες κατά μήκος της ανεμοσήραγγας

3.1 Ροή αέρα μέσω πλαισίου μεταβλητής περατότητας – Επιβεβαίωση αξιοπιστίας αριθμητικού μοντέλου

Η αριθμητική μέθοδος κρίθηκε αξιόπιστη μετά από σύγκριση με πειραματικά δεδομένα που μετρήθηκαν στην ανεμοσήραγγα. Το κατακόρυφο προφίλ της x-ταχύτητας (V_x) της ροής αέρα στο εσωτερικό της ανεμοσήραγγας καταγράφηκε σε τρεις διαφορετικές θέσεις: στα 50 cm προσήνεμα του πλαισίου με τις περσίδες και στα 50 και 150 cm υπήνεμα του πλαισίου. Σε κάθε θέση 25 μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με βήμα 0.025 m (ανά 2.5 cm καθ' ύψος) ξεκινώντας από το κάτω όριο της ανεμοσήραγγας μέχρι την πάνω επιφάνειά της. Η ταχύτητα του αέρα ορίσθηκε ίση με 2.3 m s^{-1} όπου οι περσίδες αποκτούσαν κλίση ισορροπίας σε γωνία ίση με $\vartheta = 35^o$. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα δεδομένα από τις πειραματικές μετρήσεις στην ανεμοσήραγγα στην Εικόνα 8.

Τα τρία διαγράμματα της Εικόνας 8 παρουσιάζουν το κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας V_x κανονικοποιημένο με την ταχύτητα εισόδου V_o (ίση με 2.3 m s^{-1}) σε συνάρτηση με την κατακόρυφη μετατόπιση κάθε μέτρησης, δηλαδή το ύψος z(m). Παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων και για τις τρεις θέσεις που ελέγχθηκαν. Μικρές αποκλίσεις οι οποίες παρατηρούνται στην Εικόνα 8 οφείλονται σε δύο λόγους: τα σφάλματα που ενέχουν οι μετρήσεις του ανεμομέτρου που χρησιμοποιήθηκε στην ανεμοσήραγγα και η δυναμική φύση του πειράματος. Η απόκριση των περσίδων σε διαφορετικές ταχύτητες εισόδου τις οδηγεί σε αντίστοιχες γωνίες ισορροπίας. Παρόλα αυτά, στη θέση ισορροπίας οι περσίδες διατηρούν μια ασθενή ταλάντωση περί τον άξονα περιστροφής τους. Αυτό εισάγει ένα επιπρόσθετο παράγοντα σφάλματος κατά τις μετρήσεις των τιμών ταχύτητας. Παρά τις μικρές αποκλίσεις όμως, οι συγκρίσεις της Εικόνας 8 επιβεβαιώνουν ότι η αριθμητική μέθοδος αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για τη μελέτη και ανάλυση αυτού του τύπου πλαισίων με περσίδες σε διάφορες γωνίες ισορροπίας, πλαίσια που τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά τους μεταβάλλονται κατά την αλληλεπίδρασή τους με τον άνεμο.

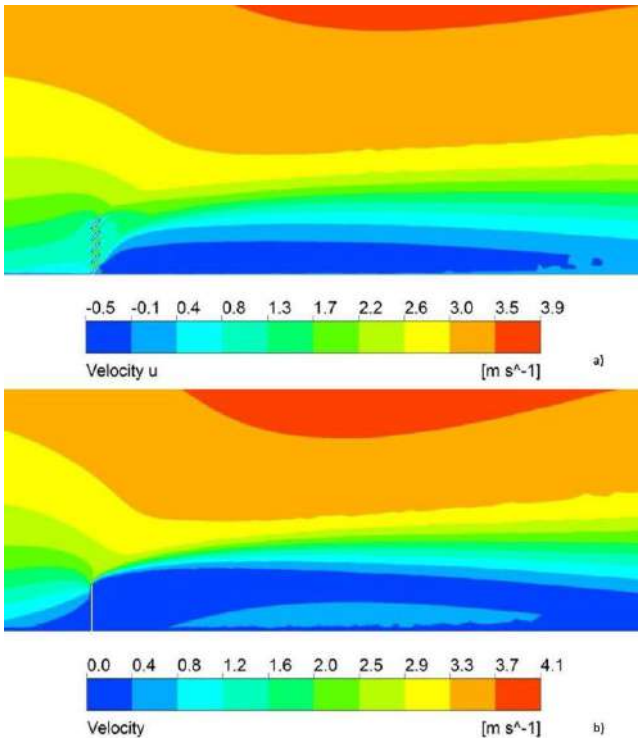


Εικόνα 8. Πειραματικές μετρήσεις και αριθμητικά αποτελέσματα του κατακόρυφου z(m) προφίλ της ταχύτητας κατά τον x-άξονα (V_x): α) 50 cm προσήνεμα ως προς τις περσίδες περσίδες, β) 50 cm υπήνεμα και γ) 150 cm υπήνεμα

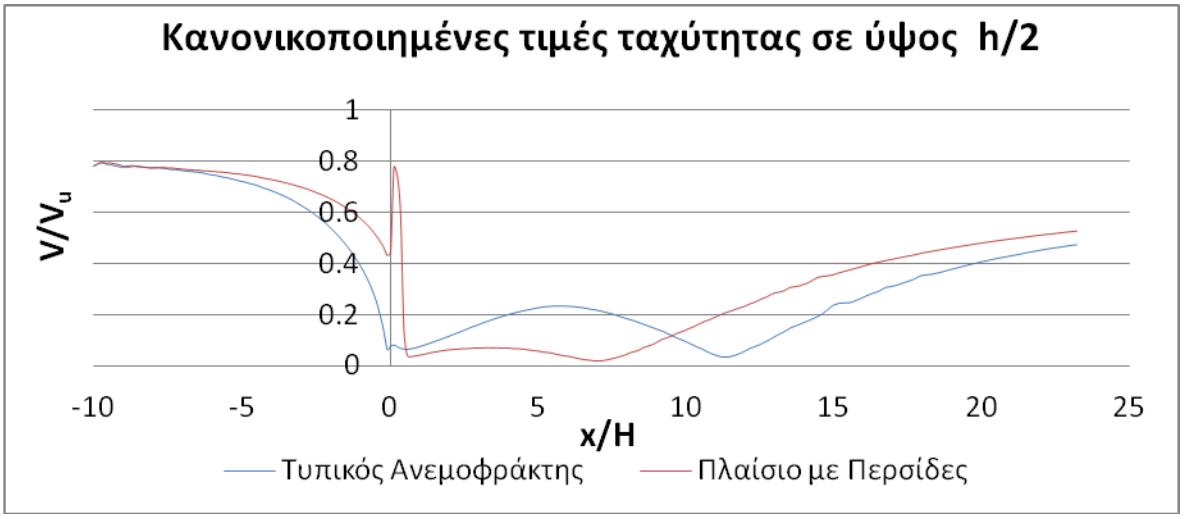
3.2 Αριθμητική προσομοίωση της ροής γύρω από ανεμοφράκτη μεταβλητών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών πλήρους κλίμακας

Πραγματοποιήθηκαν δυο τρισδιάστατες αριθμητικές προσομοιώσεις σε κατάσταση ισορροπίας (steady state). Η πρώτη για ένα συμβατικό αδιαπέραστο κατακόρυφο πλαίσιο και η δεύτερη για ένα πλαίσιο με περσίδες σταθερής γωνίας κλίσης. Οι υπήνεμες ταχύτητες ανέμου εξετάσθηκαν και συγκρίθηκαν για τις δυο περιπτώσεις ώστε να εκτιμηθεί η προστατευτική ικανότητα του καινοτόμου πλαισίου με περσίδες.

Η Εικόνα 9 παρουσιάζει τις ισοϋψείς καμπύλες ταχυτήτων γύρω από το τυπικό κατακόρυφο πλαίσιο και το αντίστοιχο με τις περσίδες. Και στις δυο περιπτώσεις είναι εμφανής η παρουσία στροβίλου υπήνεμα του πλαισίου. Στην περίπτωση του πλαισίου με περσίδες ο στρόβιλος εμφανίζεται πιο ασθενής με μικρότερο μήκος και ύψος συγκριτικά με το στρόβιλο στην περίπτωση του αδιαπέραστου κατακόρυφου πλαισίου. Η κλίση των περσίδων δίνει ένα ποσοστό περατότητας στο πλαίσιο καθιστώντας το ένα εμπόδιο με βελτιωμένη αεροδυναμική. Ο άνεμος αλληλεπιδρά πιο ομαλά με το πλαίσιο και παρά το γεγονός ότι η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται όταν περνά διαμέσου των περσίδων, η ροή εκτρέπεται προς τα άνω. Επίσης, η παρουσία των περσίδων και η εκτροπή της ροής έχει ως αποτέλεσμα ο στρόβιλος να μην επηρεάζει έντονα την υπήνεμη πλευρά του πλαισίου καθώς απωθείται σε κάποια απόσταση από αυτό. Αυτή η συμπεριφορά του πλαισίου με περσίδες μπορεί να αποφέρει τη μείωση στο κόστος της κατασκευής καθώς η απομάκρυνση του στροβίλου συνεπάγεται τη μείωση των συνολικών πιέσεων στο πλαίσιο αλλά και της πολύ καλή προστατευτική ικανότητα της περιοχής υπήνεμα του πλαισίου και κοντά σε αυτό.



Εικόνα 9. Ισοϋψείς καμπύλες ταχύτητας: α) πλαίσιο με περσίδες, β) τυπικό αδιαπέραστο πλαίσιο



Εικόνα 10. Κανονικοποιημένη ταχύτητα αέρα σε θέση ίση με το μισό τους ύψους του πλαισίου h/2 (1.5 m) για το τυπικό πλαίσιο και το πλαίσιο με περσίδες

Η Εικόνα 10 παρουσιάζει τις κανονικοποιημένες τιμές των ταχυτήτων σε ύψος ίσο με το μισό του ύψους του πλαισίου (h/2 = 1.5 m) κατά μήκος (x-διεύθυνση) του αριθμητικού πεδίου. Η ταχύτητα V_u αποτελεί την ταχύτητα είσοδο του αριθμητικού πεδίου (η ροή δε διαταράσσεται από το εμπόδιο) σε ύψος ίσο με το ύψος του πλαισίου h, δηλαδή 3 m. Υπήνεμα η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται σε τιμή σχεδόν ίση με το μηδέν για απόσταση ίση με 7.5 h για το πλαίσιο με τις περσίδες και έπειτα αυξάνεται. Για το τυπικό αδιαπέραστο πλαίσιο η ταχύτητα υπήνεμα μειώνεται σε χαμηλές τιμές μετά το πλαίσιο και αποκτά μεγαλύτερες τιμές μετά από μια απόσταση ίση με 11 h. Παρόλα αυτά, η ταχύτητα του

ανέμου για το πλαίσιο με περσίδες παραμένει σταθερά χαμηλότερη από αυτή του αδιαπέραστου πλαισίου για απόσταση 10 h όπου οι δυο καμπύλες τέμνονται. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 10 τα δυο πλαίσια παρέχουν αντίστοιχη περιοχή προστασίας αλλά το πλαίσιο με τις περσίδες πλεονεκτεί από τη στιγμή που στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής αυτής η ταχύτητα ουσιαστικά μηδενίζεται. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα σε συνδυασμό με τα ασθενέστερα τυρβώδη φαινόμενα όπως παρατηρήθηκαν υπήνεμα του πλαισίου με περσίδες έχει μεγάλο ενδιαφέρον ειδικά για περιπτώσεις πολύ ευαίσθητων καλλιεργειών ή σε περιπτώσεις που το πλαίσιο προστατεύει μια άλλη ελαφριά κατασκευή.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αεροδυναμική συμπεριφορά ενός πλαισίου με περσίδες μελετήθηκε με πειράματα σε ανεμοσήραγγα και αριθμητικές προσομοιώσεις. Τα πειραματικά δεδομένα επιβεβαίωσαν την αξιοπιστία του αριθμητικού μοντέλου. Η αριθμητική μέθοδος αναπαράγει ικανοποιητικά τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της αλληλεπίδρασης της ροής με τις περσίδες.

Μια ρεαλιστική περίπτωση ενός ανεμοφράκτη με περσίδες μελετήθηκε αριθμητικά και συγκρίθηκε με ένα συμβατικό αδιαπέραστο πλαίσιο (τυπικός ανεμοφράκτης). Για την περίπτωση του πλαισίου με περσίδες τα αποτελέσματα έδειξαν μεγαλύτερη μείωση των ταχυτήτων ανέμου σε υπό προστασία περιοχή μήκους ίση με το δεκαπλάσιο του ύψους του πλαισίου (10 h), ενώ τα τυρβώδη φαινόμενα στην υπήνεμη περιοχή εξασθενούν.

Οι ανεμοπιέσεις που αναπτύσσονται στο πλαίσιο με τις περσίδες αναμένονται να είναι μικρότερης έντασης συγκριτικά με τις ανεμοπιέσεις που αναπτύσσονται στο αδιαπέραστο πλαίσιο. Η ανάλυση των πιέσεων του ανέμου είναι σε εξέλιξη.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ANSI/SEI 7-10, (2010), Wind Loads on other structures and buildings appurtenances. In: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, The American National Standards Institute (ANSI), New York, N.Y. p. 307-314.

ANSYS (2013). ANSYS documentation, release 15.0, ANSYS Inc., Canonsburg, PA 15317, USA.

Baldwin, C.S. 1988. The influence of field windbreaks on vegetable and specialty crops, Agriculture, Ecosystems & Environment. 22-23: 191-203.

CEN (2005). EN 1991-1-4. Free-standing walls, parapets, fences and signboards. In: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1-4: General actions – Wind actions 1-1-4. Comite Europeen de Normalisation, Brussels. p. 61-64.

Gardiner, B. 2004. Windbreaks and Shelterbelts. p.1801-1806 . In: J. Burley, J. Evans and J.A. Youngquist (eds.), Encyclopedia of Forest Sciences, Elsevier, Oxford.

Giannoulis, A., Mistriotis, A., Briassoulis, D. 2015. Design and analysis of the response of elastically supported wind-break panels of two different permeabilities under wind load. Biosystems Engineering 129, 57–69

Giannoulis, A., Stathopoulos T., Briassoulis, D. and Mistriotis, A., (2012). Wind loading on vertical panels with different permeabilities. J. of Wind Engineering and Ind.l Aerod., 107–108:1-16.

Holmes, J.D. 2001. Wind loading of parallel free-standing walls on bridges, cliffs, embankments and ridges. J Wind Eng Ind Aerodyn., 89:1397-1407

Letchford, C.W. 2001. Wind loads on rectangular signboards and hoardings. J Wind Eng Ind Aerodyn., 89:135-151

Shames, I. H., (1992). *Mechanics of Fluids*, McGraw-Hill International Editions, Engineering Mechanics Series, Singapore.

Stathopoulos, T., Chiovitti, D., Dodaro, L. 1994. Wind shielding effects of trees on low buildings Building and Environment. 29: 141-150.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΒΙΟΓΕΝΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Αναστασία Πικάση[1], Χρήστος Μπριασούλης[1], Αντώνης Μυστριώτης[1], Δημήτριος Μπριασούλης[1]✉

[1]Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης και Φυσικών Πόρων, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,

✉e-mail: briassou@aua.gr

Περίληψη

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε ο ρυθμός βιοαποδόμησης βιογενών πλαστικών σε τρία χαρακτηριστικά θαλάσσια περιβάλλοντα (ζώνη ακτής, ζώνη ανοιχτού πελάγους και ζώνη βυθού), με πειράματα πλήρους κλίμακας υπό πραγματικές συνθήκες για δυο διαδοχικά έτη στη νότια περιοχή της νήσου Σαλαμίνας. Τα βιογενή υλικά που μελετήθηκαν ήταν ο μικροβιακός πολυεστέρας (PHB), ο αλειφατικός πολυεστέρας (PBSe) και ο αλειφατικός - αρωματικός συμπολυεστέρας (PBSeT) καθώς και το συμβατικό πολυμερές πολυαιθυλένιο (PE) ως μη βιοδιασπώμενο υλικό αναφοράς. Προσδιορίστηκαν χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες των υλικών και συσχετίσθηκαν με το βαθμό αποσύνθεσής τους που μετρήθηκε ως εκτίμηση του ρυθμού της βιοαποδόμησής τους. Τα τρία βιογενή υλικά βιοαποδομούνται με διαφορετικό ρυθμό που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και του υλικού.

Λέξεις κλειδιά: βιοαποδόμηση, βιογενή υλικά, πολυμερή, θαλάσσιο περιβάλλον

EXPERIMENTAL MONITORING OF THE BIODEGRADATION BEHAVIOR OF BIOBASED PLASTIC MATERIALS IN MARINE ENVIRONMENT

Anastasia Pikasi[1], Christos Briassoulis[1], Antonis Mistriotis[1], Demetres Briassoulis[1]✉

[1] Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources and Agricultural Engineering, Laboratory of Farm Structures, Iera Odos 75, 11855, Athens,

✉e-mail: briassou@aua.gr

ABSTRACT

In this study the rate of biodegradation of biobased plastics in three characteristic marine environments (eulittoral, pelagic and sublittoral zone) was investigated by means of in situ full-scale experiments for two consecutive years at the southern coast of Salamis island. The biobased materials that were studied included a microbial polyester (PHB), an aliphatic polyester (PBSe) and an aliphatic aromatic copolysester (PBSeT) as well as the conventional polymer polyethylene (PE) as a non-biodegradable reference material. Several characteristic physical properties of the materials were determined and were correlated with their degree of disintegration measured as an indication of their rate of biodegradation. The rate of biodegradation of the three biobased materials differs and depends on the characteristics of the environment and their intrinsic properties.

Keywords: biodegradation, biobased plastics, marine environments

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη εποχή τα πλαστικά αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της καθημερινής ζωής του ανθρώπου καθώς βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς της οικονομίας. Η αυτοκινητοβιομηχανία, η ιατρική, ο ηλεκτρονικός τομέας, οι κατασκευές και τα τρόφιμα είναι κάποια τυπικά παραδείγματα. Οι μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες όπως η υψηλή αντοχή, η διάρκεια ζωής, το χαμηλό βάρος και ταυτόχρονα το χαμηλό κόστος έχουν οδηγήσει στην ευρεία αποδοχή και χρήση τους (Andrady, 2009; Thompson et al., 2009). Ταυτόχρονα όμως, κάποιες από τις ιδιότητές τους καθιστούν αυτά τα υλικά ιδιαίτερα επιβαρυντικά για το περιβάλλον. Εξαιτίας του μεγάλου μοριακού βάρους, του μεγάλου αριθμού αρωματικών ομάδων στη δομή τους και της υψηλής σταθερότητάς τους, η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής τους μπορεί να φτάσει εκατοντάδες χρόνια (Deroine et al., 2015).

Το θαλάσσιο περιβάλλον επηρεάζεται ιδιαιτέρως από τα πλαστικά καθώς αποτιμάται ότι πάνω από το 10 % της συνολικής παραγωγής πλαστικών καταλήγει στους ωκεανούς (Derraik, 2002; Moore et al., 2008; Cole et al., 2011). Η επίδραση της ρύπανσης λόγω των πλαστικών στο θαλάσσιο οικοσύστημα είναι καταστροφική αφού εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους για τους ζωντανούς οργανισμούς (Derraik, 2002; Moore et al., 2009; Williams et al., 2011; Lazar, 2011; Codina et al., 2013; Waluda and Staniland, 2013). Διάφοροι τύποι υλικών έχουν προταθεί ως εναλλακτική επιλογή στη χρήση πλαστικών ώστε να μειωθεί αυτή η αρνητική επίδραση (Alvarez-Zeferino et al., 2015). Ένα παράδειγμα αποτελούν τα βιογενή και βιοδιασπώμενα πολυμερή (Deroine et al., 2015). Ένας μικρός αριθμός πειραμάτων έχουν πραγματοποιηθεί για την μελέτη βιοδιασπώμενων πολυμερών σε διαφορετικά θαλάσσια περιβάλλοντα κάτω από πραγματικές συνθήκες (Rutkowska et al., 1998; Imam et al., 1999; Tsuji and Suzuyoshi, 2002; Bernhard et al., 2008; Sekigushi et al. 2011). Η σχετική έρευνα είναι σε εξέλιξη καθώς υπάρχουν δυσκολίες για τον προσδιορισμό αξιόπιστων μεθόδων ανάλυσης και ελέγχου της βιοδιάσπασης υλικών σε θαλάσσια περιβάλλοντα λόγω της μεγάλης διαφοροποίησης περιβαλλοντικών και βιολογικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτά.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η πειραματική μελέτη της βιοδιάσπασης τριών διαφορετικών βιογενών πολυμερών σε τρία διαφορετικά θαλάσσια περιβάλλοντα σε πραγματικές συνθήκες.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

2.1. Υλικά

Τα υλικά που επιλέχθηκαν να μελετηθούν στα τρία διαφορετικά θαλάσσια περιβάλλοντα είναι πλαστικά φύλλα από τα εξής πολυμερή: Δυο βιοδιασπώμενα πολυμερή: α) το σεβακικό πολυβουτυλένιο (polybutylene sebacate (PBSe)) και β) το συμπολυμερές τερεφθαλικό σεβακικό πολυβουτυλένιο (polybutylene sebacate terephtalate (PBSeT)) και δυο υλικά με γνωστά χαρακτηριστικά βιοδιάσπασης που χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά αναφοράς, γ) το πολυ(3-υδροξυβουτυρικό οξύ) (PHB) (poly (3- hydroxy butyrate) χρησιμοποιήθηκε ως θετική αναφορά και δ) το χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (LDPE) χρησιμοποιήθηκε ως αρνητική αναφορά.

Η προμήθεια του πλαστικού φύλλου του πλέον κοινού τύπου πολυυδροξυαλκανοειδών, του πολυεστέρα (PHB) με 47.82 % συνολικό οργανικό άνθρακα (TOC) και πάχος προσεγγιστικά 80 μm έγινε από την εταιρία Metabolix, Inc. Η προμήθεια των φύλλων του αλειφατικού πολυεστέρα (PBSe) με 65.26 % TOC καθώς και του συμπολυεστέρα (PBSeT) με

65.25 % TOC, έγιναν από τη Novamont S.p.A. Χρησιμοποιήθηκαν φύλλα με πάχη προσεγγιστικά 25 μm και 100 μm και για τα δυο τελευταία υλικά. Το χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο περιείχε 85.03 % TOC και πάχος προσεγγιστικά 30 μm.

Το PHB είναι γνωστό ότι βιοδιασπάται σε πολλά περιβάλλοντα. Τα PBSe και PBSeT είναι γνωστό ότι βιοδιασπώνται σε γλυκό νερό και/ ή στο χώμα.

Δείγματα από τα τέσσερα υλικά εκτέθηκαν σε τρία διαφορετικά περιβάλλοντα σε φυσικές συνθήκες: στο βυθό ((benthic) ή (sublittoral)), στο ανοιχτό πέλαγος (pelagic) και στην ακτή ((tidal) ή (eulittoral)). Τα δείγματα εκτέθηκαν για διαφορετικές χρονικές περιόδους για να αξιολογηθεί η εξέλιξη της βιοδιάσπασης τους.

2.2. Τόπος διεξαγωγής του πειράματος

Το πείραμα διεξήχθη στην νότια ακτογραμμή της νήσου Σαλαμίνας (συντεταγμένες τοποθεσίας: 37° 53’ 33” N, 23 ^{o} 24’ 30” E). Η τοποθεσία επιλέχτηκε πλησίον των εγκαταστάσεων μονάδας ιχθυοκαλλιέργειας. Κατά αυτόν τον τρόπο, η εγκατάσταση του πειραματικού εξοπλισμού και των δειγμάτων, ο έλεγχος των πειραματικών εγκαταστάσεων, οι συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και οι δειγματοληψίες διευκολύνθηκαν καθώς τα πειράματα διεξήχθηκαν σε ελεγχόμενη και ασφαλή περιοχή.

2.3. Πειραματική διαδικασία

Τα δοκίμια των πλαστικών φύλλων διαστάσεων 25x35 cm τοποθετήθηκαν ανάμεσα σε δυο φύλλα πλαστικού διχτύου από πολυπροπυλένιο (PP) ίδιων διαστάσεων. Το όλο σύστημα των πλαστικών φύλλων και των υποστηρικτικών διχτυών συγκρατούνταν σε επίπεδη μορφή με τη βοήθεια πλαστικών πλαισίων. Αυτός ο σχεδιασμός διευκόλυνε την έκθεση των υλικών στα τρία περιβάλλοντα και την ανάκτηση των δειγμάτων κατά τη δειγματοληψία.

Κατά την έναρξη των πειραμάτων πέντε επαναλήψεις για κάθε υλικό και για κάθε περιβάλλον είχε σχεδιαστεί για περίοδο έκθεσης ενός χρόνου. Κάθε επανάληψη αποτελούνταν από τρία δείγματα (επαναλήψεις) για το κάθε υλικό. Το πείραμα διήρκεσε έναν χρόνο και στη συνέχεια επαναλήφθηκε για ένα δεύτερο χρόνο.

Τα τρία περιβάλλοντα στα οποία εκτέθηκαν τα τέσσερα πλαστικά έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Η ζώνη της ακτής (tidal) ή (eulittoral) ορίζεται κατά μήκος της ακτογραμμής σε μικρό πλάτος όπου το αμμώδες και χαλικώδες έδαφος περιοδικά ή κατά τακτά χρονικά διαστήματα καλύπτεται από θαλασσινό νερό εξαιτίας των κυμάτων ή της παλίρροιας. Η άμμος σε αυτήν τη ζώνη πάντα περιέχει υψηλά ποσοστά υγρασίας παρόλο που συχνά παραμένει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

2. Η ζώνη του ανοιχτού πελάγους (pelagic) με βάθος μεταξύ 10-50 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας είναι επαρκώς αεριζόμενη. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε βάθος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας.

3. Η ζώνη του βυθού (benthic) ή (sublittoral) βρίσκεται στον πυθμένα της θάλασσας κοντά στην ακτή όπου τα βάθη δεν ξεπερνούν τα 50 m. Αυτή η ζώνη είναι πολύ ενεργή βιολογικά, όπου πολλοί θαλάσσιοι οργανισμοί ζουν και αναπτύσσονται.

Τα τρία περιβάλλοντα στα οποία εκτέθηκαν τα δείγματα απεικονίζονται στο Σχήμα 1.

α) ακτή β) ανοιχτό πέλαγος γ) βυθός

Σχήμα 1. Έκθεση δειγμάτων πλαστικών σε τρία θαλάσσια περιβάλλοντα

2.4. Μέθοδοι

Ο βαθμός αποδόμησης (βιοαποδόμησης ή βιοδιάσπασης από βιολογικούς παράγοντες) των υλικών σε θαλάσσιο περιβάλλον προσδιορίζεται στο εργαστήριο με βάση διεθνή πρότυπα (ASTM D6691). Η βιοαποδόμηση ενός υλικού είναι επίσης δυνατόν να εκτιμηθεί μετρώντας την αποσύνθεση του σε φυσικό περιβάλλον με τη βοήθεια φυσικών μεθόδων σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO16929. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της αποσύνθεσης είναι::

Επεξεργασία εικόνας: Μια εύκολη στη χρήση και αποτελεσματική τεχνική για τη μελέτη των δειγμάτων ακόμα και για υψηλούς βαθμούς διάσπασης είναι η χρήση ψηφιακών εικόνων για τον υπολογισμό της υπολειπόμενης επιφάνειας των δοκιμίων. Το λογισμικό σύστημα Adobe Photoshop CS5 χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των ψηφιακών εικόνων. Με αυτόν τον τρόπο μετρήθηκε ο βαθμός αποσύνθεσης της επιφάνειας ως ένδειξη βιοαποδόμησης των υλικών και η εναπομένουσα περιοχή της επιφάνειας των δειγμάτων (ο βαθμός αποσύνθεσης των υλικών προσδιορίζεται στο εργαστήριο με τον ρυθμό έκλυσης CO_2, με βάση διεθνή πρότυπα (ISO 17088)).

Μέτρηση του πάχους: Ψηφιακό παχύμετρο τύπου Byko-test 4500 Fe/NFe με κλίμακα μέτρησης 0-999 μm (± 2 μm) χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του πάχους των δειγμάτων.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

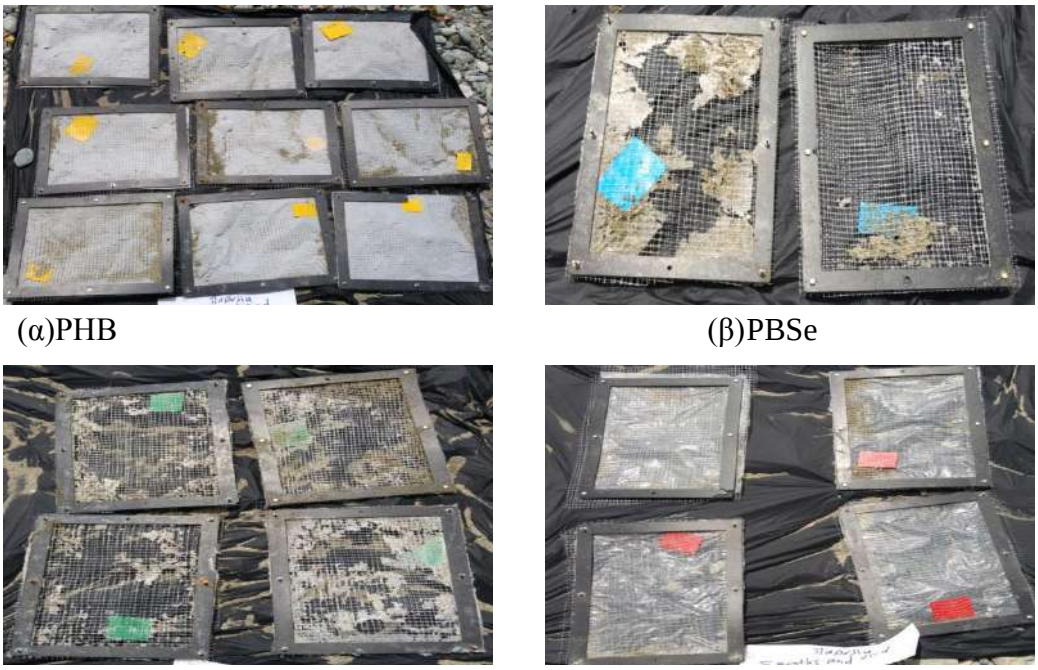
3.1. Επεξεργασία εικόνας

3.1.1. Ζώνη ακτής

Στο Σχήμα 2. και στο Σχήμα 3. απεικονίζονται τα ανακτημένα δείγματα των υλικών που εκτέθηκαν στη ζώνη της ακτής για 3 μήνες και για 5.67 μήνες αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται το PHB (80 μm) ακόμα και μετά από σχεδόν 5.5 μήνες δεν έχει υποστεί κάποια σημαντική αποδόμηση ενώ για τα PBSe και τα PBSeT (25 μm) η αποδόμηση έχει ξεκινήσει ήδη από τους 3 πρώτους μήνες και έχει φτάσει σε πολύ μεγάλο βαθμό στους 5.67 μήνες. Το πολυαιθυλένιο παρέμεινε άθικτο για όλη αυτήν τη χρονική περίοδο και όπως ήταν αναμενόμενο για όλη τη διάρκεια του πειράματος.

(α) PHB 3 μήνες (β) PBSe 3 μήνες (γ) PBSeT 3 μήνες

Σχήμα 2. Υλικά που ανακτήθηκαν μετά από 3 μήνες έκθεσης στη ζώνη της ακτής



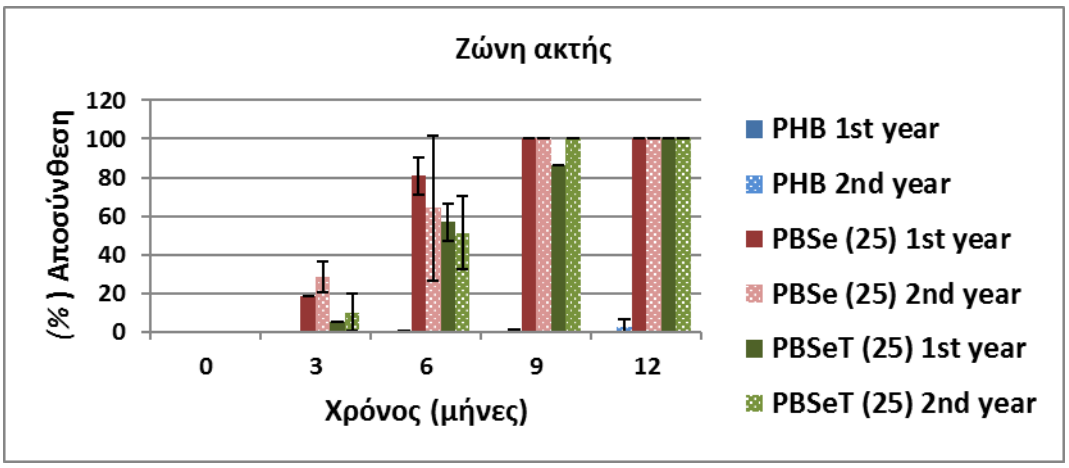
(α)PHB (β)PBSe

(γ)PBSeT (δ)PE

Σχήμα 3. Υλικά που ανακτήθηκαν μετά από 5.67 μήνες έκθεσης στη ζώνη της ακτής

Στο Σχήμα 4. παρουσιάζεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της αποδόμησης για τα δείγματα που εκτέθηκαν στη ζώνη της ακτής για τον 1^{ο} και το 2^{ο} χρόνο των πειραμάτων. Ο βαθμός αποδόμησης των υλικών βρέθηκε να είναι περίπου ο ίδιος παρά το γεγονός ότι η έκθεση έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια διαφορετικών περιόδων του έτους. Ειδικότερα, για το 1^{ο} χρόνο το πείραμα ξεκίνησε την καλοκαιρινή περίοδο του έτους 2014 ενώ το 2^{ο} χρόνο ξεκίνησε στο τέλος της φθινοπωρινής περιόδου του 2015. Έντονη αποδόμηση παρατηρείται για τα δείγματα των υλικών PBSe και PBSeT (πάχους 25 μm) μετά από περίπου 6 μήνες έκθεσης, με βαθμούς αποδόμησης πάνω από 50 % και για τα δυο έτη. Μετά από 9 μήνες έκθεσης ο βαθμός αποδόμησης είναι 100 % τόσο τον 1^{ο} όσο και το 2^{ο} χρόνο. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι για τα παραπάνω υλικά η αποδόμηση ξεκίνησε μετά από 3 μήνες έκθεσης και ολοκληρώθηκε μετά από 9 μήνες έκθεσης στη ζώνη της ακτής. Σε αυτό το περιβάλλον, το φύλλο PHB των 80 μm δεν είχε υποστεί σημαντική αποδόμηση ακόμα και μετά από 12 μήνες έκθεσης τόσο τον 1^{ο} όσο και το 2^{ο} χρόνο, εκτός από μικρές ρωγμές και οπές. Τα δείγματα πολυαιθυλενίου δεν έδειξαν κανένα σημείο αποδόμησης για όλη τη

χρονική περίοδο και των δυο επαναλαμβανόμενων πειραμάτων. Γενικά, συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα για τον 1^{ο} χρόνο είναι συγκρίσιμα με αυτά του 2^{ου} χρόνου.

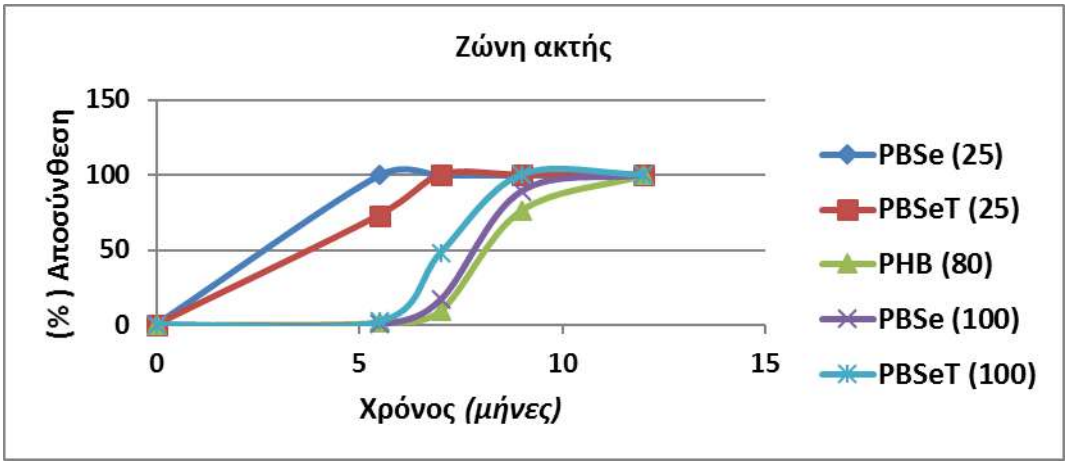


Σχήμα 4. Αποσύνθεση (%) (εκτίμηση Βιοαποδόμησης) των υλικών που εκτέθηκαν στη ζώνη της ακτής (σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του 1^{ου} και του 2^{ου} χρόνου)

Η επίδραση του πάχους για τα ίδια υλικά στο βαθμό αποδόμησης (π.χ. για τα PBSe και PBSeT) με διαφορετικό πάχος (25 μm και 100 μm) και για έκθεση στο ίδιο περιβάλλον παρουσιάζεται στο

Σχήμα 5. Η αύξηση του πάχους επηρεάζει αρνητικά το βαθμό βιοαποδόμησης / αποσύνθεσης όπως αναμενόταν.

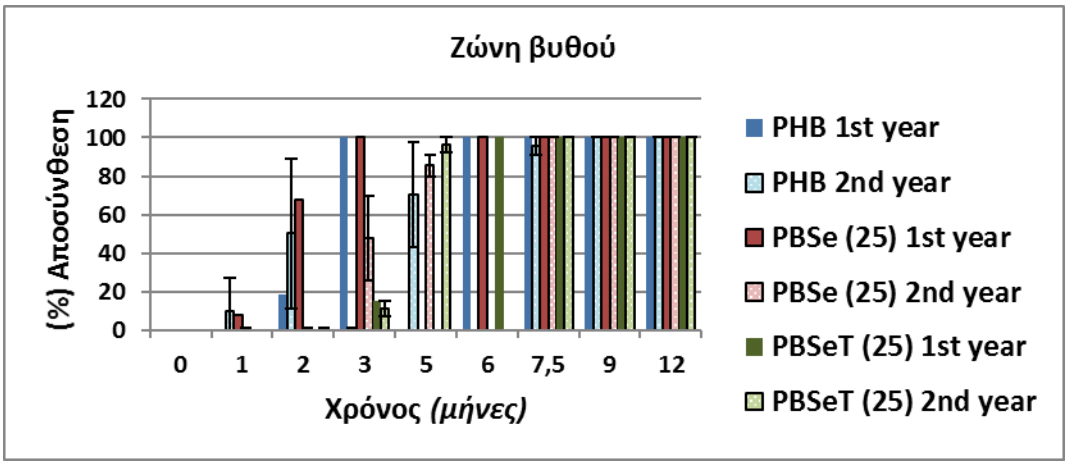
Τα παχιά φύλλα (PHB (80 μm), PBSe (100 μm) και PBSeT (100 μm)), αποσυντίθενται (σαν ένδειξη βιοαποδόμησης) πολύ αργά σε σύγκριση με τα λεπτά (PBSe και PBSeT (25 μm)).



Σχήμα 5. Αποσύνθεση (%) (εκτίμηση Βιοαποδόμησης) των υλικών σε συνάρτηση του πάχους στην ζώνη της ακτής

3.1.2. Ζώνη βυθού

Τα αποτελέσματα διάσπασης στη ζώνη του βυθού για τον 1^{ο} και το 2^{ο} χρόνο συγκρίνονται στο Σχήμα 6. Παρομοίως με τα αποτελέσματα για τη ζώνη ακτής, το γεγονός της διαφορετικής περιόδου έκθεσης (διαφορετικές εποχές του έτους) δεν φαίνεται να επηρεάζει τον βαθμό αποσύνθεσης (ενδεικτικό βιοαποδόμησης) καθώς αυτή εξελίχθηκε με παρόμοιο τρόπο.

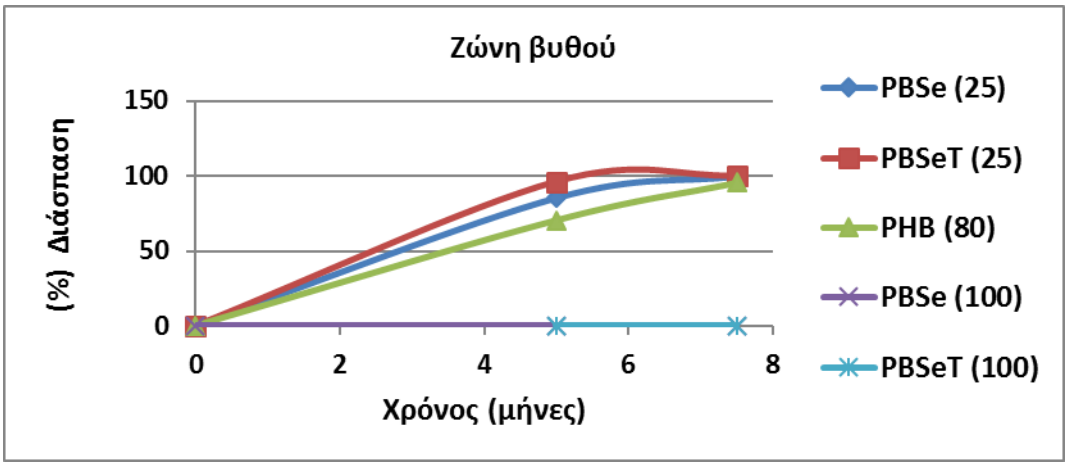


Σχήμα 6. Αποσύνθεση (%) (εκτίμηση Βιοαποδόμησης) των υλικών για έκθεση στο περιβάλλον του βυθού (σύγκριση μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} χρόνου)

Το υλικό PHB επιδεικνύει στους δυο πρώτους μήνες έκθεσης υψηλότερο βαθμό διάσπασης κατά το 2^{ο} χρόνο σε σύγκριση με τον 1^{ο} χρόνο. Αντιθέτως το PBSe (25 μm) για την ίδια χρονική περίοδο έκθεσης (2 μηνών) επιδεικνύει σημαντικά υψηλότερο βαθμό διάσπασης κατά τον 1^{ο} χρόνο σε σύγκριση με το 2^{ο}. Αυτές οι διαφορές μπορεί να εξηγηθούν λόγω του ότι τα δείγματα στο βυθό καλύπτονται περιοδικά και κατά τόπους από άμμο ανάλογα με τις περιοδικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτό το περιβάλλον (φυσική κίνηση του νερού και της άμμου). Μετά από ορισμένους μήνες έκθεσης, ένα στρώμα άμμου συνήθως καλύπτει την πλειοψηφία των δειγμάτων και συνεπώς αυτή η αβεβαιότητα λόγω των συνθηκών εξαλείφεται. Κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών, η εμφάνιση ενός στρώματος βιοφιλμ (biofilm) στην επιφάνεια ορισμένων ανακτημένων δειγμάτων έδειξε ότι αυτά τα δείγματα δεν είχαν πλήρως καλυφθεί από άμμο. Κατά τον 1^{ο} χρόνο μετά από 3 μήνες έκθεσης στο περιβάλλον του βυθού τα δείγματα PHB και PBSe (25 μm) είχαν πλήρως αποδομηθεί (100% αποσύνθεση) ενώ η αποδόμηση των δειγμάτων PBSeT (25μm) βρισκόταν υπό εξέλιξη.

Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα μετά από περίπου 5 μήνες έκθεσης, οι διαφορές στους βαθμούς αποσύνθεσης των ίδιων υλικών που παρατηρούνται κατά τους πρώτους μήνες έκθεσης εξομαλύνονται και παρουσιάζονται σχεδόν ίδια αποτελέσματα και για τα δυο έτη. Οι διακυμάνσεις στους βαθμούς αποσύνθεσης για την αρχική περίοδο των 3 μηνών οφείλονται στην τυχαία απόθεση άμμου πάνω στα δείγματα.

Η επίδραση του πάχους για τα ίδια υλικά (π.χ. PBSe και PBSeT), στο βαθμό αποσύνθεσης τους, για έκθεση στο περιβάλλον του βυθού, παρουσιάζεται στο Βάση δεδομένων **ProBas**. Όπως και στην περίπτωση της ζώνης ακτής, η αύξηση του πάχους επηρεάζει αρνητικά τους βαθμούς βιοαποδόμησης / αποσύνθεσης. Το υλικό PHB (80 μm) σε περιβάλλον βυθού αποτελεί μια ιδιαίτερη περίπτωση καθώς ο βαθμός βιοδιάσπασής του είναι παρόμοιος με αυτούς των λεπτών υλικών PBSe and PBSeT (25 μm). Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στη σύνθεσή του και στην έντονη δραστηριότητα μικροοργανισμών του περιβάλλοντος του βυθού και συμπεραίνεται ότι είναι ταχέως διασπώμενο υλικό σε συνθήκες βυθού.



Σχήμα 7. Αποσύνθεση (%) (εκτίμηση Βιοαποδόμησης) των υλικών σε συνάρτηση του πάχους στη ζώνη βυθού

3.1.3. Ζώνη πελάγους

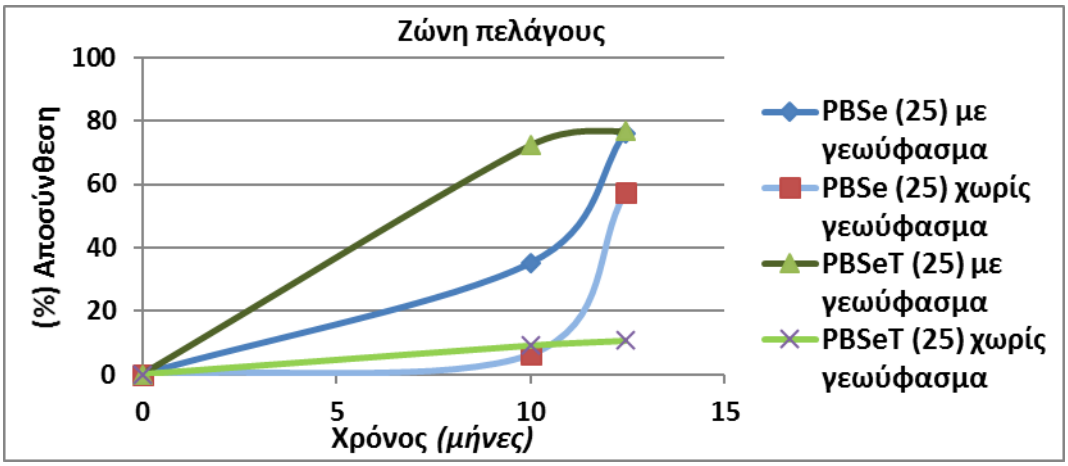
Η επίδραση της εμφάνισης βιοφιλμ (biofouling) στην επιφάνεια των δειγμάτων μελετήθηκε κατά το 2^{ο} χρόνο για τα υλικά που εκτέθηκαν στη ζώνη του πελάγους. Σε αυτά τα δείγματα τοποθετήθηκε ειδικό προστατευτικό κάλυμμα από γεωύφασμα. Με αυτόν τον τρόπο περιορίστηκε η επίδραση της δημιουργίας βιοφιλμ πάνω στα δείγματα και επιταχύνθηκε η αποδόμηση των δειγμάτων. Αντίθετα, η ανάπτυξη βιοφίλμ πάνω στο γεωύφασμα ακολουθήθηκε από βιολογικές εναποθέσεις (Biofouling) από άλγη (soft fouling) και μακροοργανισμούς (hard fouling) οι οποίες όμως δεν εμπόδισαν την αποδόμηση των δειγμάτων. Το φαινόμενο της ανάπτυξης βιολογικών εναποθέσεων πάνω στα δείγματα που εκτέθηκαν στη ζώνη του ανοιχτού πελάγους παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.

(α)χωρίς γεωύφασμα (β) με γεωύφασμα (γ) σύγκριση δειγμάτων με και χωρίς γεωύφασμα

Σχήμα 8. Βιολογικές εναποθέσεις πάνω στα δείγματα στη ζώνη πελάγους

(Στο (β) παρουσιάζεται η βιολογική εναπόθεση πάνω στο γεωύφασμα)

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται ο βαθμός βιοδιάσπασης (προσδιορισμένος με ανάλυση εικόνας της αποσύνθεσης της επιφάνειας του δείγματος) για 10 και 12.5 μήνες έκθεσης στη ζώνη του πελάγους για τα υλικά PBSe και PBSeT (25μm). Όπως συμπεραίνεται το γεωύφασμα μείωσε την κάλυψη των δειγμάτων από βιολογικές εναποθέσεις (biofouling) και έτσι αποφεύχθηκε ο περιορισμός του βαθμού αποδόμησής τους.



Σχήμα 9. Αποσύνθεση (%) (εκτίμηση Βιοαποδόμησης) των υλικών μετά από 10 και 12.5 μήνες έκθεσης στη ζώνη του πελάγους

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων πλήρους κλίμακας του 1ου και του 2ου χρόνου έκθεσης και ελέγχου αποδόμησης πλαστικών φύλλων σε τρεις διαφορετικές θαλάσσιες ζώνες υπό φυσικές συνθήκες επιβεβαίωσαν την συμπεριφορά βιοδιάσπασης των διαφορετικών υλικών. Αποδείχθηκε ότι τα τρία βιοδιασπώμενα υλικά (PHB, PBSe, και PBSeT) διασπώνται στα τρία εξεταζόμενα θαλάσσια περιβάλλοντα με διαφορετικό τρόπο στο καθένα από αυτά αλλά με παρόμοιο τρόπο για τα δυο επαναλαμβανόμενα πειράματα των δυο ετών. Ορισμένες διαφοροποιήσεις οφείλονται στις διαφορετικές καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τα δυο διαδοχικά έτη. Τα τρία πολυμερή εμφανίζουν συστηματικά διαφορετικούς και χαρακτηριστικούς, για κάθε υλικό, βαθμούς βιοαποδόμησης στα τρία περιβάλλοντα. Κατά τη διάρκεια του 2ου έτους, εξετάσθηκε η επίδραση ορισμένων επιπλέον παραμέτρων. Η αύξηση του πάχους των υλικών φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά τους βαθμούς αποδόμησης όπως αυτοί μετρώνται με τους ρυθμούς αποσύνθεσης της επιφάνειας των δειγμάτων, σε δεδομένο περιβάλλον. Η επίδραση της επικάλυψης της επιφάνειας των δειγμάτων από βιολογικές εναποθέσεις (Biofouling) ελέγχτηκε με την κάλυψη των δειγμάτων με ειδικό προστατευτικό πλαστικό γεωύφασμα με αποτέλεσμα τον περιορισμό του φαινομένου και την επιτάχυνση της βιοαποδόμησης.

Ευχαριστίες

Η έρευνα που παρουσιάζεται πραγματοποιήθηκε για το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Open-Bio (www.open-bio.eu) το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του 7ου Προγράμματος Πλαισίου με το συμβόλαιο αρ. 613677.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Rutkowska M., Jastrzebska M., Janik H., 1998. Biodegradation of polycaprolactone in sea water. Reactive & Functional Polymers, 38: 27 –30.

Imam S.H., Gordon S.H., Shogren R.L., Tosteson T.R., Govind N.S., Greene R.V., 1999. Degradation of Starch–Poly(β-Hydroxybutyrate-Co-β-Hydroxyvalerate) Bioplastic in Tropical Coastal Waters. Applied and Environmental Microbiology: 431 – 437.

Derraik G.B., 2002. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. Marine Pollution Bulletin, 44: 842–852.

Tsuji H., Suzuyoshi K., 2002. Environmental degradation of biodegradable polyesters 2. Poly(ε-caprolactone), poly[(R)-3-hydroxybutyrate], and poly(L-lactide) films in natural dynamic seawater. Polymer Degradation and Stability, 75: 357–365.

Bernhard M., Eubeler J. P., Zok S., Knepper T. P., 2008. Aerobic biodegradation of polyethylene glycols of different molecular weights in wastewater and seawater. Water Research 42: 4791-4801.

Moore C.J., 2008. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. Environmental Research, 108: 131–139.

Andrady, A.L., Neal,M.A., 2009. Applications and societal benefits of plastics. Philos. Trans. R. Soc., B 364: 1977–1984.

Moore E., Lyday S., Roletto J., Litle K., Parrish J.K., Nevins H., Harvey J., Mortenson J.,Greig D., Piazza M., Hermance A., Lee D., Adams D., Allen S., Kell S., 2009. Entanglements of marine mammals and seabirds in central California and the north-west coast of the United States 2001–2005. Mar. Pollut. Bull., 58 (7): 1045–1051.

Thompson R.C., Swan S.H., Moore C.J. and vom Saal F.S., 2009. Our Plastic Age. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364: 1973-1976.

Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway T.S., 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Marine Pollution Bulletin, 62: 2588–2597.

Lazar B. and Gračan R., 2011. Ingestion of Marine Debris by Loggerhead Sea Turtles, *Caretta caretta*, in the Adriatic Sea. Marine Pollution Bulletin, 62: 43-47.

Sekiguchi T., Saika A., Nomura K., Watanabe T., Fujimoto Y., Enoki M., Sato T., Kato C., Kanehiro H., 2011. Biodegradation of aliphatic polyesters soaked in deep seawaters and isolation of poly(ε-caprolactone)-degrading bacteria. Polymer Degradation and Stability, 96: 1397-1403.

Williams R., Ashe E. and O'Hara P.D., 2011. Marine Mammals and Debris in Coastal Waters of British Columbia, Canada. Marine Pollution Bulletin, 62: 1303-1316.

Codina-García M., Militão T., Moreno J. and González-Solís J., 2013. Plastic Debris in Mediterranean Seabirds. Marine Pollution Bulletin, 77: 220-226.

Waluda C.M. and Staniland I.J., 2013. Entanglement of Antarctic fur Seals at Bird Island, South Georgia. Marine Pollution Bulletin, 74: 244-252.

Alvarez-Zeferino J. C., Beltrán-Villavicencio M., Vázquez-Morillas A.,2015. Degradation of Plastics in Seawater in Laboratory. Open Journal of Polymer Chemistry, 5: 55-62.

Deroine M., César G., Le Duigou A., Davies P., Bruzaud S., 2015. Natural Degradation and Biodegradation of Poly(3-Hydroxybutyrate-co-3- Hydroxyvalerate) in Liquid and Solid Marine Environments. Journal Of Polymers And The Environment, 23: 493-505.ASTM D6691-09, 2009. Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in the Marine Environment by a Defined Microbial Consortium or Natural Sea Water Inoculum, ASTM International, West Conshohocken PA (www.astm.org)

ISO 17088:2012, Specifications for compostable plastics

ISO 16929, Plastics — Determination of the degree of disintegration of plastic materials under defined composting conditions in a pilot-scale test

ISO 20200, Plastics — Determination of the degree of disintegration of plastic materials under simulated composting conditions in a laboratory-scale test

ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΥΣ ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΛΑΧΑΝΙΚΩΝ ΣΕ ΘΑΛΑΜΟ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Ι. Γράβαλος✉, Θ. Γιαλαμάς, Α. Αυγουστής, Α. Μόλλα, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Ρ. Ανδριώτης & Π. Κασόλας

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλίας, Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων, 411 10, Λάρισα

✉ gravalos@teilar.gr

Περίληψη

Στόχος της εργασίας, είναι να αναπτύξει ένα σύστημα τεχνητού φωτισμού με οικονομικούς λαμπτήρες, για παραγωγή λαχανικών σε θάλαμο καλλιέργειας. Τα φυτά αναπτύχθηκαν σε απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού, με χρονικό προγραμματισμό έναυσης/σβέσης των λαμπτήρων. Το σύστημα φωτισμού μελετήθηκε με διαφορετικού τύπου λαμπτήρες. Οι απαιτήσεις σε ενέργεια του συστήματος φωτισμού καθώς και των άλλων υποσυστημάτων του θαλάμου καλύπτονταν από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η καλλιέργεια των λαχανικών εντός του θαλάμου με λαμπτήρες θερμοκρασίας χρώματος 3000 Κ, αναπτύχθηκε πολύ καλύτερα συγκριτικά με την αντίστοιχη υπαίθρια καλλιέργεια. Αντιθέτως, η καλλιέργεια των λαχανικών με λαμπτήρες θερμοκρασίας χρώματος 6500 Κ, δεν έδωσε τα ίδια ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η καλλιέργεια των λαχανικών σε θαλάμους με ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού είναι μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος η οποία όμως χρήζει περαιτέρω διερεύνηση.

Λέξεις κλειδιά: καλλιέργεια, θάλαμος, ελεγχόμενος φωτισμός, λαμπτήρες

ARTIFICIAL LIGHTING SYSTEM WITH ECONOMIC LAMPS FOR THE PRODUCTION OF VEGETABLE IN GROWING CHAMBER

I. Gravalos✉, Th. Gialamas, A. Avgoustis, A. Molla, D. Kateris, P. Xyradakis, R. Andriotis & P. Kasolas

Technological Educational Institute of Thessaly, Dep. of Agricultural Technologists, 411 10, Larissa

✉ gravalos@teilar.gr

Abstract

The object of this study is to develop an artificial lighting system which uses economic lamps for the production of vegetables in a growing chamber. The plants were grown in the chamber under completely controlled lighting conditions; the lamps were programmed to turn on/off depending on the requirements of plants. The lighting system was studied using different types of lamps. The energy requirements of the lighting system and other subsystems of the chamber were supplied by a solar PV power system. According to the results, the cultivation of vegetables in the chamber with color temperature lamps of 3000 K, showed better growth than the corresponding outdoor cultivation. In contrast, the cultivation of vegetables with color temperature lamps of 6500 K did not give the same satisfying results. The cultivation of vegetables in chambers under controlled lighting is a promising method but one that requires further investigation.

Keywords: cultivation, growing chamber, artificial lighting, economic lamps

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως λύση, για την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού (Godfray et al., 2010), προτείνεται η παραγωγή βασικών αγροτικών προϊόντων (λαχανικών) σε θαλάμους καλλιέργειας. Οι θάλαμοι καλλιέργειας είναι μία καινοτόμος μέθοδος δημιουργίας ιδανικού περιβάλλοντος για εσωτερικές καλλιέργειες (Kozai, 2013). Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα σε αγρότες, αλλά και σε κατοίκους αστικών κέντρων που στερούνται φυσικού χώρου, να καλλιεργούν μόνοι τους λαχανικά εξαιρετικής ποιότητας, καλύπτοντας με τον καλύτερο τρόπο τις διατροφικές τους ανάγκες (Foley et al., 2011).

Ο ρυθμός ανάπτυξης ενός φυτού περιλαμβάνει τρεις περιόδους: α) το φύτρωμα του σπόρου, β) την περίοδο του νεαρού φυτού και γ) την περίοδο του ώριμου φυτού. Η ανάπτυξη των φυτών επηρεάζεται τόσο από εσωτερικούς, όσο και από εξωτερικούς παράγοντες (Sims and Pearcy, 1993). Στους εσωτερικούς περιλαμβάνονται κυρίως γενετικοί παράγοντες και διάφορες ρυθμιστικές ουσίες. Η ρύθμιση και η σύνθεση των ουσιών αυτών εντός του φυτού καθορίζονται από τον γενότυπο και την αλληλεπίδρασή του με τους εξωτερικούς παράγοντες. Στους εξωτερικούς παράγοντες συγκαταλέγονται: η θερμοκρασία, η υγρασία, ο φωτισμός, οι θρεπτικές ουσίες και οι καλλιεργητικές τεχνικές. Από τους εξωτερικούς παράγοντες η θερμοκρασία και ο φωτισμός είναι αυτοί που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών (Björkman, 1981; Haferkamp, 1988). Ο έντονος φωτισμός επιβραδύνει την ανάπτυξη των φυτών, ενώ η κατάλληλη θερμοκρασία την επιταχύνει. Τμήματα του φυτού που εκτίθενται σε έντονο φωτισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας, αυξάνουν κατά τη διάρκεια της νύκτας, ευνοούμενα από τις χαμηλότερες θερμοκρασίες (Hatfield and Prueger, 2015). Συνήθως, τις ημέρες με περιορισμένο φως και τις νύκτες με υψηλή θερμοκρασία, ευνοείται κυρίως η ανάπτυξη του υπέργειου τμήματος (βλαστών και φύλλων) των φυτών. Αντιθέτως, τις ημέρες με έντονο φωτισμό (μεγάλη φωτοσύνθεση) και νύκτες με χαμηλή θερμοκρασία, ευνοείται η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος (Vogelmann, 1989).

Υπάρχουν φυτά τα οποία αναπτύσσονται καλύτερα σε περιοχές με ψυχρό χειμώνα και μεγάλη διάρκεια ημέρας κατά το θέρος. Τα φυτά αυτά ονομάζονται ψυχρόφιλα ή μακράς φωτοπεριόδου. Στην περίπτωση που επικρατήσουν συνθήκες με υψηλές θερμοκρασίες και ημέρες βραχείας διάρκειας, τα φυτά αυτά δεν ανθίζουν ή καθυστερεί η άνθησή τους (Yamori et al., 2009). Τα θερμόφιλα ή βραχείας φωτοπεριόδου φυτά επιταχύνουν την άνθησή τους όταν περιορίζεται η φωτοπερίοδος και συνάμα επικρατούν συνθήκες με υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος, υπάρχουν και τα φυτά που είναι αδιάφορα στον φωτοπεριοδισμό. Σήμερα, η έννοια της φωτοπεριόδου έχει απολέσει την σημασία της, καθώς οι γενετιστές μπόρεσαν να δημιουργήσουν ουδέτερες ποικιλίες φυτών που μπορούν να καλλιεργηθούν σε περιοχές με διαφορετικές συνθήκες (Hart, 1988).

Το ορατό φως είναι τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ανάμεσα στα μήκη κύματος από 380 έως 780 nm (Valberg, 2007). Κάθε μήκος κύματος αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο χρώμα. Τα χρώματα σε μικρότερα μήκη κύματος ονομάζονται ψυχρά (όπως, το μοβ και το μπλε), τα χρώματα σε μεγαλύτερα μήκη κύματος ονομάζονται θερμά (όπως, το πορτοκαλί και το κόκκινο) (Rainwater, 1971). Ο ήλιος και οι λαμπτήρες πυράκτωσης δίνουν το λεγόμενο "λευκό φως". Το λευκό φως αναλύεται σε ένα φάσμα που περιλαμβάνει όλα τα γνωστά χρώματα. Επίσης, κάθε χρώμα του φάσματος ονομάζεται ακτινοβολία (π.χ. πράσινη ακτινοβολία). Τα χρώματα του φάσματος εμφανίζονται κατά σειρά μείωσης του μήκους κύματος και είναι: το ερυθρό, το πορτοκαλί, το κίτρινο, το πράσινο, το κυανό και το ιώδες. Η ποιότητα του λευκού φωτός μπορεί να αποδοθεί με τη βοήθεια της θερμοκρασίας χρώματος (correlated color temperature, CCT). Η θερμοκρασία

χρώματος αποδίδει τη χρωματική εντύπωση που έχει μία πηγή φωτός και κυμαίνεται από 2700 έως 6000 K (Fotios, 2001). Μικρότερη θερμοκρασία χρώματος σημαίνει θερμότερο φως, υψηλότερη θερμοκρασία χρώματος σημαίνει ψυχρότερο φως. Η αναλογία του ερυθρού είναι υψηλότερη σε θερμό φως, ενώ η αναλογία του κυανού είναι υψηλότερη στο ψυχρό φως. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των φωτεινών πηγών είναι ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (color rendering index, CRI), ο οποίος είναι ένα ποσοτικό μέτρο της ικανότητας μιας φωτεινής πηγής στην απόδοση του χρώματος σε σχέση με μία ιδανική ή φυσική πηγή φωτός (πηγή αναφοράς) (Jou et al., 2011).

Ένας λαμπτήρας χαρακτηρίζεται από την ηλεκτρική απόδοση (electrical efficacy) και τη φωτεινή απόδοση (luminous efficacy). Φωτεινή απόδοση είναι ο λόγος της συνολικής φωτεινής ροής (lumen) που εκπέμπει ένας λαμπτήρας προς τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια (Watt) που καταναλώνει (Pohl and Zimmermann, 2003). Ένας καλός λαμπτήρας πρέπει να έχει πολύ καλή φωτεινή απόδοση και χρώμα. Επίσης, θα πρέπει να πληροί και μία σειρά από άλλες προϋποθέσεις, όπως: να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, να είναι συμπαγής, ελαφρύς, ανακυκλώσιμος, άμεσης απόκρισης, χαμηλού κόστους, κ.ά. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες λαμπτήρων και αρκετές ενδιάμεσες υποκατηγορίες αυτών (Aphalo et al., 2012): α) οι λαμπτήρες πυρακτώσεως (απλοί λαμπτήρες πυρακτώσεως και λαμπτήρες αλογόνου), β) οι λαμπτήρες εκκένωσης αερίων (λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης, λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης, λαμπτήρες μεταλλικών ατμών και λαμπτήρες υδραργύρου), γ) οι λαμπτήρες φθορισμού (σωληνωτοί λαμπτήρες φθορισμού και συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού). Επίσης, έχουμε τους λαμπτήρες ψυχρής καθόδου, λαμπτήρες νέον και λαμπτήρες LED (Mills, 2006).

Το σύστημα τεχνητού φωτισμού αποτελεί κεντρικό και ταυτόχρονα κρίσιμο στοιχείο για τον έλεγχο περιβάλλοντος των καλλιεργειών σε θάλαμο. Απόλυτη προϋπόθεση είναι να παρέχει φωτισμό που μιμείται το φως του ήλιου, τόσο σε ένταση όσο και σε φασματική ισορροπία. Όμως, υπάρχουν διαφορετικές επιστημονικές έρευνες που δείχνουν ότι οι λαμπτήρες παρουσιάζουν προβλήματα όσον αφορά τη φασματική ισορροπία και τις εκπεμπόμενες ποσότητες υπέρυθρης ενέργειας (Kim et al., 2004; Massa et al., 2006; Zabel et al., 2014). Ως εκ τούτου, οι περισσότερες έρευνες που αφορούν καλλιέργειες εντός θαλάμου έχουν πραγματοποιηθεί με επίπεδα φωτισμού που δεν προσομοιώνουν το φως του ήλιου, όσον αφορά την ένταση και το φάσμα. Η ανησυχία για την παγκόσμια κλιματική αλλαγή, ανανέωσε το ενδιαφέρον για την αναπαραγωγή/ προσομοίωση του ηλιακού φωτός από συστήματα τεχνητού φωτισμού, για τον έλεγχο περιβάλλοντος των καλλιεργειών σε θάλαμο.

Η εργασία στοχεύει, κατά πρώτο λόγο, να διερευνήσει τις δυνατότητες παραγωγής λαχανικών στις τεχνητές συνθήκες ενός θαλάμου καλλιέργειας. Παράλληλος στόχος είναι να αποδείξει ότι η παραγωγή λαχανικών σε θαλάμους πλεονεκτεί σε σχέση με τις αντίστοιχες υπαίθριες καλλιέργειες. Τέλος, στόχος της εργασίας είναι να αναπτύξει ένα σύστημα τεχνητού φωτισμού με οικονομικούς λαμπτήρες.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ως θάλαμος ανάπτυξης της καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκε ένας παλαιός κλίβανος ξήρανσης (Εικόνα 1(α)), στον οποίο έγιναν οι κατάλληλες μετατροπές και η εγκατάσταση πρόσθετων διατάξεων. Ειδικότερα, στην οροφή του θαλάμου τοποθετήθηκε μία βάση στερέωσης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων για 8 λαμπτήρες LED (Light Emitting Diodes). Η τροφοδοσία των λαμπτήρων LED με ρεύμα έγινε από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ (Εικόνα 1(β)) είτε από το δίκτυο με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή. Το φωτοβολταϊκό σύστημα

περιλαμβάνει έναν ελεγκτή φόρτισης- εκφόρτισης, έναν συσσωρευτή, έναν οδηγό συνεχούς ρεύματος (DC driver) και έναν χρονοδιακόπτη (συσκευή χρονικού προγραμματισμού έναυσης/σβέσης των λαμπτήρων). Επιπροσθέτως, στο πάνω μέρος του θαλάμου τοποθετήθηκε ένα σύστημα εξαερισμού για την ανακύκλωση του εσωτερικού αέρα. Τέλος, εντός του θαλάμου εγκαταστάθηκε ένα σύστημα στάγδην, αυτοματοποιόντας την άρδευση.

Εικόνα 1. α) Θάλαμος ανάπτυξης της καλλιέργειας, β) Φωτοβολταϊκό πάνελ.

Οι λαμπτήρες LED (Εικόνα 2) διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο παράγουν το φως σε σχέση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες. Πρόκειται για διόδους ημιαγωγών που απελευθερώνουν την ενέργεια με τη μορφή φωτονίων. Διακρίνονται στις εξής δυο βασικές κατηγορίες: α) LED χαμηλής ισχύος και β) LED υψηλής ισχύος. Τα LED υψηλής ισχύος (Power Led) τα βρίσκουμε σε διάφορες μορφές και μεγέθη. Για τη λειτουργία τους απαιτείται ένας μετασχηματιστής, ο οποίος μετατρέπει την τάση του δικτύου μεταξύ 2-4 V συνεχούς ρεύματος και την ένταση μεταξύ 200-1000 mA. Η ενεργειακή απόδοση των λαμπτήρων LED μετριέται στις μονάδες lumen ανά Watt (lm/W), δηλαδή είναι το φως που παράγεται για κάθε Watt της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται. Έτσι, ένα LED υψηλής ισχύος μπορεί να παράγει 50-190 lumen ανά 1 watt. Συνήθως, είναι ισχύος από 1-10 Watt. Το χρώμα που εκπέμπουν τα LED εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής των διόδων. Το κόκκινο χρώμα οφείλεται στο αρσενίδιο γαλλίου αργιλίου (AlGaAs), το κυανό χρώμα προέρχεται από το νιτρίδιο γαλλίου ίνδιου (InGaN) και το πράσινο από το φωσφίδιο γαλλίου αργιλίου (AlGaP). Τα τρία παραπάνω βασικά χρώματα μπορούν να δώσουν μέχρι και 16.000.000 συνδυασμούς αποχρώσεων. Το λευκό φως μπορεί να δημιουργηθεί από την επένδυση του κυανού LED με κίτρινο φωσφόρο. Αντιστοίχως, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως παρέχουν περίπου 15 lm/W, με θερμοκρασία χρώματος φωτισμού περίπου 2700 K και χρωματική απόδοση (CRI) κοντά στα 100. Οι λαμπτήρες φθορισμού (CFLs) παράγουν περίπου 50 lm/W σε θερμοκρασία χρώματος φωτισμού 2700-3000 K, με χρωματική απόδοση CRI τουλάχιστον 80. Στον παρακάτω Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των λαμπτήρων LED που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της καλλιέργειας των λαχανικών.

Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε δύο καλλιεργητικές περιόδους. Την πρώτη περίοδο, η οποία διήρκησε από τις 8/4/2016 έως τις 8/7/2016, χρησιμοποιήθηκαν με το σύστημα τεχνητού φωτισμού οι λαμπτήρες LED θερμού φωτός (3000 K). Τη δεύτερη περίοδο, που διήρκησε από τις 20/7/2016 έως τις 9/8/2016, χρησιμοποιήθηκαν οι λαμπτήρες LED ψυχρού φωτός (6000 K). Και στις δύο περιπτώσεις η διάρκεια λειτουργίας

του συστήματος τεχνητού φωτισμού ήταν 15 h/24 h. Η απόσταση των λαμπτήρων από τα φυτά κυμαίνονταν μεταξύ 4 cm και 8 cm ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών.

Εικόνα 2. Λαμπτήρες LED.
α) θερμού φωτός (3000 K) και β) ψυχρού φωτός (6000 K).

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά λαμπτήρων LED.

Λαμπτήρες LED	Ισχύς (W)	Ένταση δέσμης φωτός (lm)	Θερμοκρασία χρώματος (K)	Μήκος κύματος (nm)
Θερμού φωτός (3000K)	1.2 W	90 lm	3000 k	570 – 590 nm
Ψυχρού φωτός (6500 K)	1.5 W	80 lm	6500 k	550 – 610 nm

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν 6 πλαστικές γλάστρες ορθογωνίου σχήματος (60x19x16 cm) χωρητικότητας 13.5 lt. Ανά δύο γλάστρες φυτεύτηκαν σπόροι τριών διαφορετικών λαχανικών, όπως σέσκουλο (Beta vulgaris), μαρούλι (Lactuca sativa) και σπανάκι (Chenopodiaceae). Οι τρείς από τις γλάστρες τοποθετήθηκαν στον θάλαμο καλλιέργειας, ενώ οι υπόλοιπες τοποθετήθηκαν σε υπαίθριο χώρο για να χρησιμεύσουν ως μάρτυρες. Η άρδευση ήταν ομοιόμορφη σε όλα τα φυτά, εκτός κάποιων ημερών που οι απαιτήσεις των υπαίθριων φυτών σε αρδευτικό νερό ήταν αυξημένες λόγω μεγαλύτερης εξατμισοδιαπνοής. Επίσης, δεν πραγματοποιήθηκε κανενός είδους λίπανση.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

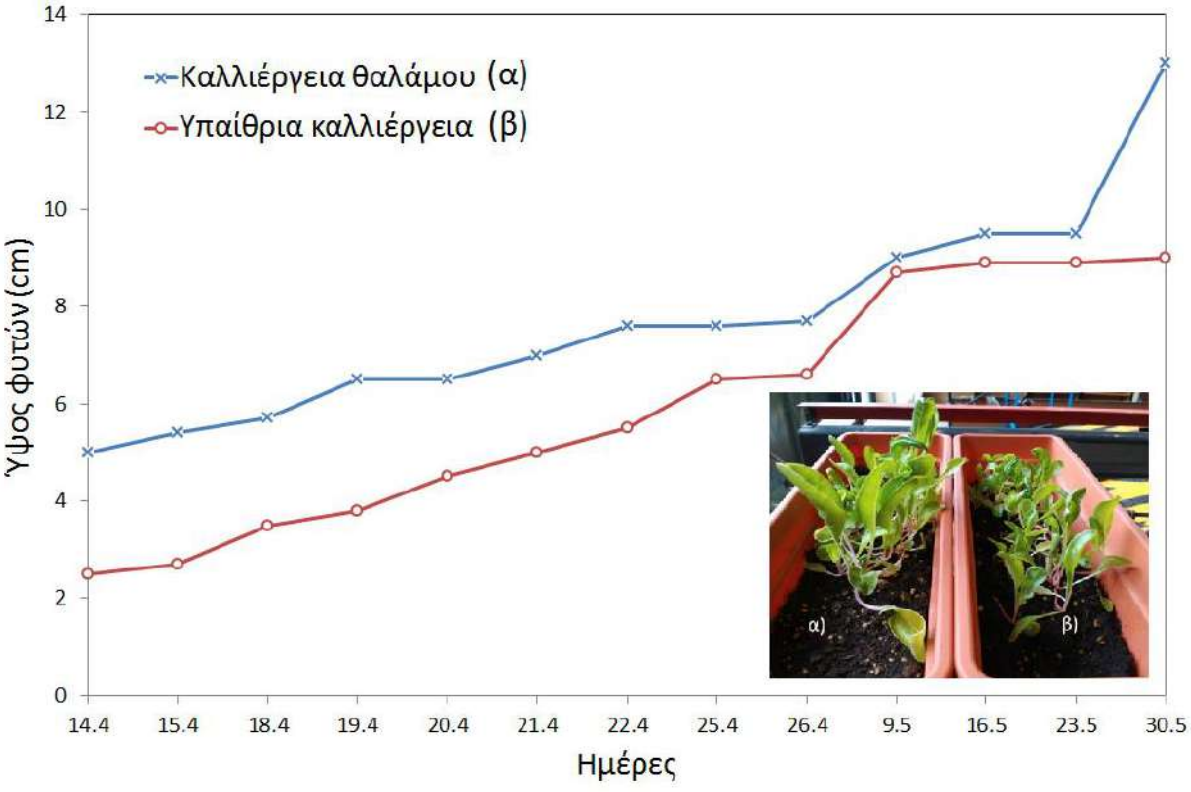
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή είναι τα πρώτα μίας ευρύτερης προσπάθειας του εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του Τμήματος Τεχνολόγων Γεωπόνων του ΤΕΙ Θεσσαλίας, που στοχεύει στην ανάπτυξη πλήρως αυτοματοποιημένων καλλιεργητικών συστημάτων εσωτερικού χώρου. Αρχικά αναλύονται τα αποτελέσματα της πρώτης περιόδου, που διήρκησε από τις 8/4/2016 έως τις 8/7/2016 και κατά την οποία στον θάλαμο καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκαν οι λαμπτήρες LED θερμού φωτός (3000 K).

Στην Εικόνα 3 παρατηρούμε, ότι τα φυτά σέσκουλου που αναπτύχθηκαν σε συνθήκες θαλάμου παρουσιάζουν αρχικά σημαντική διαφορά ύψους έναντι των φυτών του εξωτερικού χώρου, λόγω της διαφορετικής έντασης φωτός που δέχτηκαν. Όμως, μετά την 26/4, οι δύο καμπύλες αρχίζουν να συγκλίνουν. Προφανώς, τα φυτά της υπαίθριας

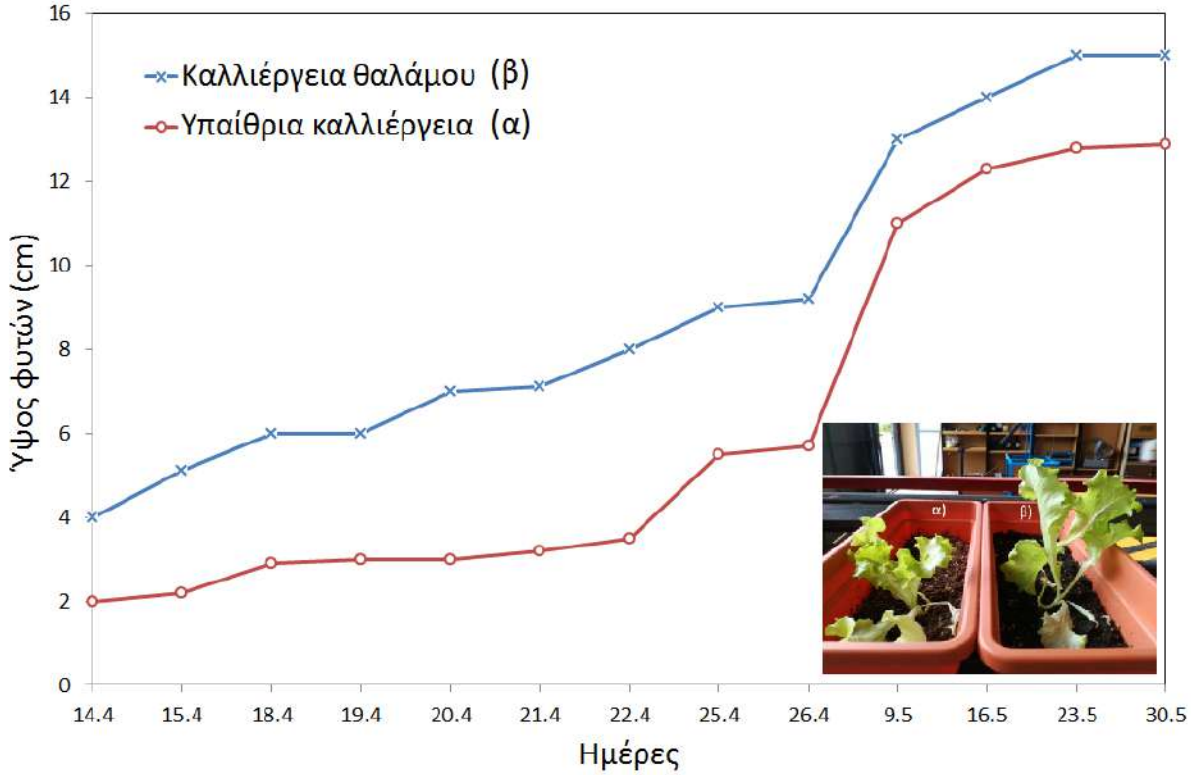
καλλιέργειας άρχισαν να αναπτύσσονται εξίσου καλά και γρήγορα, λόγω αύξησης της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του αέρα.

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι καμπύλες ανάπτυξης των φυτών μαρουλιού που καλλιεργήθηκαν ταυτόχρονα εντός του θαλάμου και στον εξωτερικό χώρο. Μέχρι την 26/4 τα φυτά μαρουλιού που αναπτύχθηκαν στις συνθήκες θαλάμου παρουσιάζουν σημαντική διαφορά ύψους έναντι των φυτών που αναπτύχθηκαν στον εξωτερικό χώρο. Στη συνέχεια, η διαφορά ανάπτυξης των φυτών εσωτερικού και εξωτερικού χώρου αρχίζει να μειώνεται σημαντικά, προφανώς γιατί αυξήθηκαν η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία του αέρα. Τέλος, στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάπτυξης των φυτών σπανακιού που καλλιεργήθηκαν ταυτόχρονα εντός του θαλάμου και στον εξωτερικό χώρο. Τα φυτά που αναπτύχθηκαν στις συνθήκες θαλάμου παρουσιάζουν μια σημαντική διαφορά ύψους έναντι των φυτών εξωτερικού χώρου καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

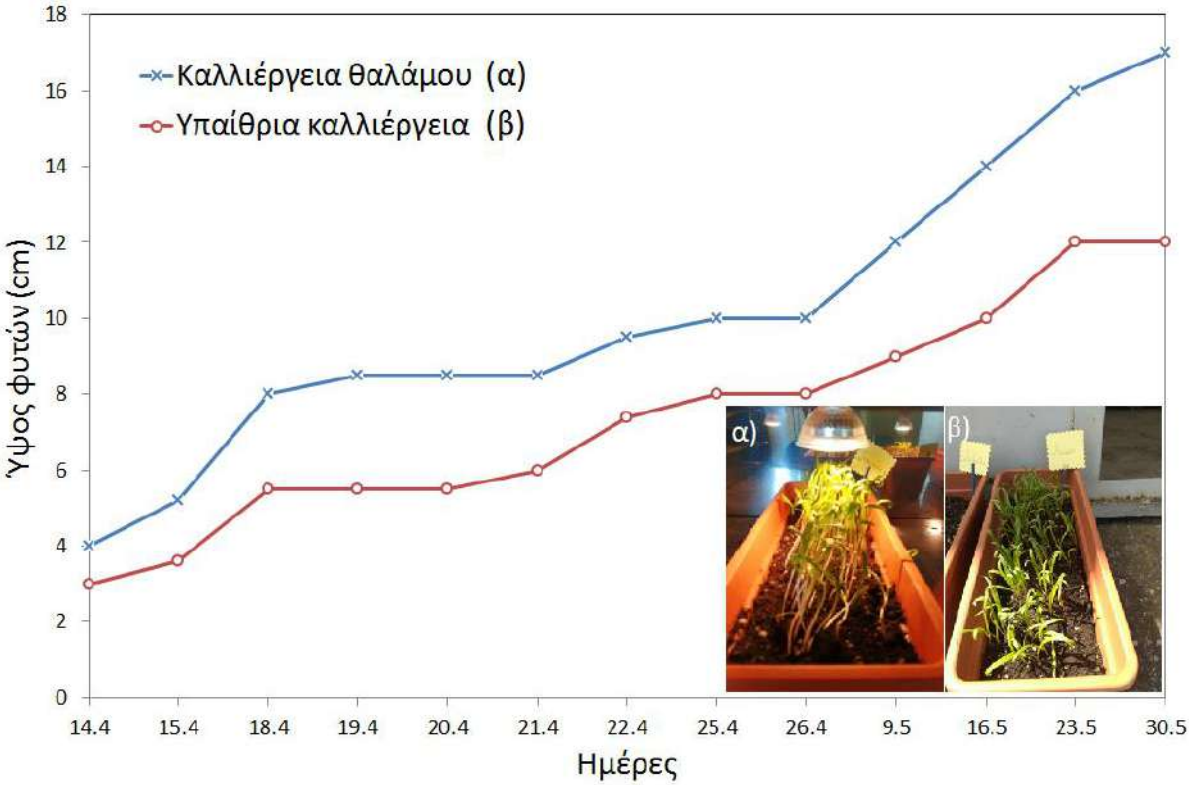
Τη δεύτερη περίοδο, η οποία διήρκησε από τις 20/7/2016 έως τις 9/8/2016, τόσο η καλλιέργεια των λαχανικών εντός του θαλάμου με λαμπτήρες ψυχρού φωτισμού (6500 K), όσο και η καλλιέργεια εξωτερικού χώρου δεν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η ανάπτυξη των φυτών ήταν περιορισμένη. Προφανώς, επειδή τα φυτά των τριών διαφορετικών λαχανικών ήταν εκτός καλλιεργητικής περιόδου και επηρεάστηκαν έντονα από τις υψηλές θερμοκρασίες του αέρα. Για τον λόγο αυτό, αποφασίσαμε να μην συμπεριλάβουμε τα αποτελέσματα αυτά στη συγκεκριμένη εργασία.



Εικόνα 3. Ύψος φυτών σέσκουλου που αναπτύχθηκαν σε συνθήκες θαλάμου και εξωτερικού περιβάλλοντος.



Εικόνα 4. Ύψος φυτών μαρουλιού που αναπτύχθηκαν σε συνθήκες θαλάμου και εξωτερικού περιβάλλοντος.



Εικόνα 5. Ύψος φυτών σπανακιού που αναπτύχθηκαν σε συνθήκες θαλάμου και εξωτερικού περιβάλλοντος.

Τα φυτά εξαρτώνται από το φως για την επιβίωσή τους. Τόσο η ένταση (ποσότητα), όσο και η φασματική σύσταση (ποιότητα) της ακτινοβολίας επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο των φυτών, το οποίο θα πρέπει να είναι θετικό, δηλαδή η εισροή ενέργειας μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης θα πρέπει να είναι επαρκής για να καλύψει τις ανάγκες ανάπτυξης των φυτών. Η ένταση της ακτινοβολίας που δέχονται τα φυτά προσδιορίζεται από την προσπίπτουσα ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας και ανά μονάδα χρόνου. Η ένταση της ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια του ημερήσιου ή ετήσιου κύκλου, ποικίλλει λόγω της κίνησης της γης και της νεφοκάλυψης. Τα φυτά που καλλιεργήθηκαν εντός του θαλάμου είχαν σταθερή ένταση ακτινοβολίας για 15 h/24 h και προφανώς αυτός ήταν ένας από τους παράγοντες που συνέβαλαν στην καλύτερη και γρηγορότερη ανάπτυξή τους.

Η ποιότητα της ακτινοβολίας προσδιορίζεται από τις φασματικές περιοχές. Τα φυτά απορροφούν επιλεκτικά συγκεκριμένα μήκη κύματος λόγω της δομής και της χημικής σύστασής τους. Για παράδειγμα, η λεπτή επιδερμίδα που περιβάλλει τα φύλλα επιτρέπει στο φως να εισχωρήσει στο μεσόφυλλο. Τα κύτταρα του μεσόφυλλου περιέχουν χλωροφύλλη, η οποία αντανακλά μέρος του πράσινου, ενώ απορροφά έντονα το κυανό και ερυθρό μήκος κύματος για τη φωτοσύνθεση. Επίσης, τα φυτά απορροφούν έντονα το μακρινό-υπέρυθρο μήκος κύματος και ασθενώς το εγγύς υπέρυθρο. Προφανώς, τα μήκη κύματος του φάσματος των λαμπτήρων LED παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών. Οι λαμπτήρες LED για να επιτύχουν το "λευκό φως" χρησιμοποιούν ως βάση το λεγόμενο "κυανό", το οποίο εκπέμπεται στα μικρά μήκη κύματος του φάσματος και έχει υψηλή ενέργεια. Προγενέστερες έρευνες έδειξαν ότι λαμπτήρες LED που εκπέμπουν στα 300-680 nm είναι κατάλληλοι για να επιτελέσουν τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης στα φυτά (Heuvelink et al., 2006). Ωστόσο, νεώτερες έρευνες δείχνουν ότι στα 660-680 nm, τα φυτά εμφανίζουν τη μέγιστη φωτοσυνθετική τους ικανότητα (Hogewoning et al., 2012). Οι λαμπτήρες LED θερμού και ψυχρού φωτισμού, που επιλέχθηκαν για το σύστημα τεχνητού φωτισμού του θαλάμου, έχουν μήκη κύματος 570-590 nm και 550-610 nm, αντιστοίχως. Επομένως, η φασματική σύσταση των λαμπτήρων LED δεν φαίνεται να επηρέασε την ανάπτυξη των φυτών εντός του θαλάμου.

Όσον αφορά τις διαφορές των θερμοκρασιών μεταξύ του θαλάμου καλλιέργειας και του εξωτερικού χώρου έχουμε να παρατηρήσουμε τα ακόλουθα: α) εντός του θαλάμου η θερμοκρασία παρέμεινε σε σταθερά επίπεδα ανεξαρτήτως των όποιων καιρικών μεταβολών και β) στον εξωτερικό χώρο η θερμοκρασία παρουσίασε μεγάλες διακυμάνσεις εντός της ίδιας ημέρας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας. Τον μήνα Απρίλιο, η θερμοκρασία εντός του θαλάμου κυμάνθηκε μεταξύ 23-25 ^{o}C, δηλαδή παρέμεινε σταθερή, παρόλο που στο εξωτερικό περιβάλλον υπήρχαν έντονες και διαρκείς μεταβολές της θερμοκρασίας (18-31 ^{o}C). Τον μήνα Μάιο, οι τιμές της θερμοκρασίας μεταξύ του θαλάμου καλλιέργειας και του εξωτερικού χώρου αρχίζουν να συγκλίνουν. Ειδικότερα, οι τιμές της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου κυμάνθηκαν από 21-28 ^{o}C με μέσο όρο τους 23.9 ^{o}C, ενώ στον εξωτερικό χώρο καταγράφηκαν τιμές που κυμαίνονταν από 19-33 ^{o}C και μέσο όρο 25.9 ^{o}C. Τους υπόλοιπους μήνες οι θερμοκρασίες που παρατηρούνται τόσο εντός του θαλάμου όσο και στον εξωτερικό χώρο κυμαίνονται σε υψηλότερα επίπεδα (κατά μέσο όρο από 27-32 ^{o}C).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι εσωτερικές καλλιέργειες με ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού αποτελούν μία εναλλακτική, συμπληρωματική μέθοδο καλλιέργειας, ιδίως σε περιοχές με περιορισμένο φως ημέρας (βόρεια γεωγραφικά πλάτη) ή σε περιοχές με δυσμενείς συνθήκες

περιβάλλοντος (έντονες ξηρασίες, πλημμύρες και αλατούχα εδάφη) ή σε πυκνο-κατοικημένες περιοχές με περιορισμένο χώρο, όπως είναι οι πόλεις. Τα πλεονεκτήματα των καλλιεργειών αυτών είναι: υψηλή απόδοση ανά έτος (λόγω βραχύτερης περιόδου καλλιέργειας υπό βέλτιστες συνθήκες), μεγαλύτερη επιφάνεια ανάπτυξης φυτών ανά m^2 (μεγάλη πυκνότητα φυτών, πολυεπίπεδη καλλιέργεια σε ράφια), αποτελεσματική χρήση θρεπτικών στοιχείων, εξοικονόμηση νερού, μικρότερες απώλειες και μη χρήση φυτοφαρμάκων. Επιπλέον, αυτές οι καλλιέργειες μπορούν να δώσουν προϊόντα υψηλής ποιότητας. Σε αντίθεση με τις υπαίθριες καλλιέργειες, οι καλλιέργειες εσωτερικού χώρου βασίζονται σε νέες πηγές φωτός, όπως είναι οι λαμπτήρες LED που βοηθούν αποτελεσματικά στην ανάπτυξη των φυτών (βλέπε ανωτέρω αποτελέσματα), μειώνοντας παράλληλα δραστικά την κατανάλωση ενέργειας.

Οι λαμπτήρες LED αποτελούν μια νέα πηγή τεχνητού φωτισμού για τα φυτά, ως κύρια ή ως συμπληρωματική πηγή, λόγω της έντασης, της φασματικής σύστασης, των ενεργειακών πλεονεκτημάτων, αλλά κυρίως λόγω της δυνατότητάς τους να επηρεάζουν τον μεταβολισμό των φυτών προκειμένου να βελτιστοποιηθούν η παραγωγικότητα και η ποιότητά τους. Οι λαμπτήρες LED μπορούν να βρουν εφαρμογή στα πράσινα φυλλώδη λαχανικά, βότανα και ανθοκομικά φυτά.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aphalo, P.J., Albert, A., Björn, L.O., McLeod, A., Robson, T.M. and Rosenqvist, E., 2012. *Beyond the visible: A handbook of best practice in plant UV photobiology*. COST Action FA0906 UV4growth. ISBN 978-952-10-8362-4, Helsinki: University of Helsinki, Division of Plant Biology, pp.36-44.

Björkman, O., 1981. *Responses to different quantum flux densities*. In Encyclopedia of Plant Physiology, New Series, Vol. 12A, ed. O. L. Large, P. S. Nobel, C. B. Osmond, H. Ziegler, Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag, pp. 57-107.

Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. and Zaks, D.P.M., 2011. *Solutions for a cultivated planet*. Nature, 478: 337-342.

Fotios, S.A., 2001. *Lamp colour properties and apparent brightness: a review*. Transactions of the Illuminating Engineering Society, 33(3): 163-178.

Godfray, H.C., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M. and Toulmin, C., 2010. *Food security: the challenge of feeding 9 billion people*. Science, 327: 812-818.

Haferkamp, M.R., 1988. *Environmental factors affecting plant productivity*. In: White RS, Short RE (eds) Achieving efficient use of rangeland resources. Fort Keogh Research symposium, Miles City, pp 27-36.

Hart, J.W., 1988. *Light and Plant Growth*. Springer Netherlands, pp. 1-219.

Hatfield, J.L. and Prueger, J.H., 2015. *Temperature extremes: Effect on plant growth and development*. Weather and Climate Extremes, 10: 4-10.

Heuvelink, E., Bakker, M.J., Hogendonk, L., Janse, J., Kaarsemaker, R. and Maaswinkel, R., 2006. *Horticultural lighting in The Netherlands: new developments*. Acta Hort., 711: 25-33.

Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Meinen, E. and van Ieperen, W., 2012. *Finding the optimal growth-light spectrum: open versus closed crop stands*. Acta Hort., 956: 359-365.

Jou, J.H., Shen, S.M., Lin, C.R., Wang, Y.S., Chou, Y.C., Chen, S.Z. and Jou, Y.C., 2011. *Efficient very-high color rendering index organic light-emitting diode*. Organic Electronics, 12(5): 865-868.

Kim, H.H., Goins, G.D., Wheeler, R.M. and Sager, J.C., 2004. *Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes*. HortSci, 39: 1617-1622.

Kozai, T., 2013. *Plant factory in Japan - current situation and perspectives*. Chronica Horticulturae, 53: 8-11.

Massa, G.D., Emmerich, J.C., Morrow, R.C., Mike Bourget, C. and Mitchell, C.A., 2006. *Plant-growth lighting for space life support: A review*. Gravitational and Space Biology, 19(2): 19-29.

Mills, A., 2006. *Developments in LEDs for Lighting*. Pira International Ltd, Surrey, UK, 80 pp.

Pohl, W. and Zimmermann, A., 2003. *SynthLight Handbook, Chapter 3: Artificial Lighting*. Project No: 4.1031/Z/01-123/2001, European Commission under the SAVE programme, pp.1-65.

Rainwater, C., 1971. *Light and color*. Western Publishing Company, Inc., Racine, Wisconsin, 160 pp.

Sims, D.A. and Pearcy, R.W., 1993. *Sunfleck frequency and duration affects growth-rate of the understorey plant, Alocasia-Macrorrhiza*. Funct. Ecol., 7: 683-689.

Valberg, A., 2007. *Light vision color*. John Wiley & Sons, pp.35-84.

Vogelmann, T.C., 1989. *Penetration of light into plants*. Photochem. Photobiol., 50: 895-902.

Yamori, W., Noguchi, K., Hikosaka, K. and Terashima, I., 2009. *Cold-tolerant crop species have greater temperature homeostasis of leaf respiration and photosynthesis than cold-sensitive species.* Plant Cell Physiol, 50: 203-215.

Zabel, P., Bamsey, M., Schubert, D. and Tajmar, M., 2014. *Review and analysis of plant growth chambers and greenhouse modules for space*. Proceedings of 44th International Conference on Environmental Systems, Tucson, Arizona, pp. 1-17.

ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΜΕ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΜΑΤΑς

Γ.Κ. Ντίνας[1,2,✉] & Χ.Δ. Τσαντίλας[2]

[1]Technische Universität München, TUM School of Life Sciences Weihenstephan, Research Department Plant Sciences, D-85354 Freising-Weihenstephan

[2]ΕΛΓΟ/ΔΗΜΗΤΡΑ, Ινστιτούτο Βιομηχανικών & Κτηνοτροφικών Φυτών, GR-41335, Λάρισα

✉ georgiosntinas@gmail.com

Περίληψη

Στόχος της παρούσας έρευνας ήταν να αξιολογηθεί η διαδικασία παραγωγής υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας σε θερμαινόμενο θερμοκήπιο, προκειμένου να εντοπιστούν δυνατότητες μείωσης του ενεργειακού κόστους και των εκπομπών CO_2 και αποδοτικότερης χρήσης νερού στη φάση καλλιέργειας. Έτσι, υπολογίστηκε το αποτύπωμα άνθρακα του θερμοκηπίου λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας, νερού, λιπασμάτων, φυτοπροστατευτικών ουσιών αλλά και των υλικών κατασκευής και του εξοπλισμού. Η χρήση φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση ήταν οι κύριοι συντελεστές των εκπομπών CO_2 με ποσοστά 86.5% και 9.9% αντίστοιχα, ενώ η κατανάλωση νερού, λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και τα κατασκευαστικά στοιχεία κατείχαν 0.1%, 0.8%, 0.04% και 2.6% αντίστοιχα.

Λέξεις κλειδιά: Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, Αειφόρος ανάπτυξη, Υδροπονία, Αποτύπωμα άνθρακα

cARBON FOOTPRINT OF A GREENHOUSE WITH HYDROPONIC TOMATO CULTIVATION

G.K. Ntinas[1,2,✉] & C.D. Tsantilas[2]

[1]Technische Universität München, TUM School of Life Sciences Weihenstephan, Research Department Plant Sciences, D-85354 Freising-Weihenstephan

[2]ELGO/DIMITRA, Institute of Industrial and Forage Plants, GR-41335, Larisa

✉ georgiosntinas@gmail.com

Abstract

The aim of the current research was to evaluate the production process in a heated greenhouse with hydroponic tomato cultivation in order to identify possibilities of reducing energy costs and CO_2 emissions and using water more efficient during the cultivation phase. Therefore, the carbon footprint of the greenhouse was calculated taking into account the consumption of energy, water, fertilizers, pesticides and of construction materials and equipment. The use of natural gas and electricity for heating was the main CO_2 emission contributors by 86.5% and 9.9% respectively, while water, fertilizer, pesticides and construction materials consumption contributed by 0.1%, 0.8% 0.04% and 2.6%, respectively.

Key words: Global warming potential, Sustainable production, Hydroponics, Carbon footprint

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καλλιέργεια λαχανικών είναι ένας απαιτητικός τομέας της γεωργικής παραγωγής, εξαιτίας της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας, νερού, λίπανσης αλλά και φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων. Οι παράγοντες αυτοί συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση μέσω αυξημένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και συντελούν στην υποβάθμιση των εδαφών. Οι θερμοκηπιακές υδροπονικές καλλιέργειες απαιτούν σημαντικά ποσά ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, αλλά ταυτόχρονα οδηγούν σε υψηλές αποδόσεις και περιβαλλοντικά οφέλη, αφού ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της υδροπονικής καλλιέργειας είναι η εξοικονόμηση νερού και οι μειωμένες εισροές νιτρικών στο έδαφος. Είναι σημαντικό να κατανοήσουν τόσο οι παραγωγοί όσο και οι εταιρείες του χώρου από πού προέρχονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και πώς μπορούν να τις μειώσουν, καθώς υπάρχουν ευκαιρίες για αύξηση της αποδοτικότητας και, συνεπώς, για μείωση του κόστους των εισροών στην εκμετάλλευση (Gunady et al., 2012). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να ανταποκριθούν σε μελλοντικές πολιτικές και εμπορικά πρότυπα (ISO) σχετικά με την τυποποίηση και εμπορία φρούτων και λαχανικών και την κλιματική αλλαγή προσφέροντας στους καταναλωτές προϊόντα με καλές, ανιχνεύσιμες περιβαλλοντικές επιδόσεις (Virtanen et al., 2011). Επιπλέον, πολλές χώρες έχουν υιοθετήσει πρωτόκολλα και οδηγίες (Kyoto, 1997/2005; 20-20-20 target) για την αντικατάσταση μέρους των ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή, γεωθερμική, αιολική, βιομάζα κλπ.). Τα διαφορετικά αέρια του θερμοκηπίου ορίζονται σε σχέση με το εκπεμπόμενο CO_2, με τη χρήση του ισοδύναμου-CO_2. Ο δείκτης που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι το ''αποτύπωμα του άνθρακα'' ή Carbon Footprint (CF), που ορίζεται ως το ποσό του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων αερίων του θερμοκηπίου (GHGs) που εκλύονται στην ατμόσφαιρα σε όλη τη διάρκεια μιας δραστηριότητας ή της παραγωγής ενός προϊόντος (ITC, 2012).

Η περιβαλλοντική επίδραση των θερμαινόμενων θερμοκηπιακών καλλιεργειών καθορίζεται, ως επί το πλείστον, από τη μέθοδο θέρμανσης (Mempel and Meyer, 2004; Antón et al., 2012; Torellas et al., 2012, Ntinas et al., 2017), συνεπώς η εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και η χρήση ανανεώσιμών πηγών ενέργειας, παρουσιάζει προφανώς μεγάλες δυνατότητες μείωσης αυτής της επίδρασης. Εκτός αυτού, η διαδικασία θέρμανσης αλλά και γενικότερα οι ενεργειακές ανάγκες είναι ένας σημαντικός παράγοντας κόστους στην παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων. Για τους λόγους αυτούς, πρέπει να καταβληθούν προσπάθειες για τη μείωση της χρήσης ενέργειας για θέρμανση των θερμοκηπίων, που οδηγεί τόσο σε βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων του θερμοκηπίου όσο και σε χαμηλότερο κόστος θέρμανσης για τον παραγωγό κηπευτικών. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί διάφορες τεχνικές που οδηγούν σε δραστική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για τη θέρμανση ενός θερμοκηπίου. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση του υλικού κάλυψης των θερμοκηπίων από γυαλί σε διπλή κάλυψη πλαστικού (PE ή F-clean) και θερμοκουρτίνες (Meyer et al., 2014) ή η εγκατάσταση συστημάτων που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Ntinas et al., 2011; 2014) συμβάλλουν θετικά στη μείωση των ενεργειακών αναγκών. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι η περιβαλλοντική επιβάρυνση της θερμοκηπιακής κατασκευής είναι υψηλότερη για θερμοκήπια με μέγιστη μόνωση, λόγω της χρήσης περισσότερων υλικών π.χ. πολλές θερμοκουρτίνες, ή εφαρμογή υλικών κάλυψης διπλού στρώματος μόνωσης.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να αξιολογηθεί η διαδικασία παραγωγής σε θερμαινόμενο θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας, προκειμένου να εντοπιστούν δυνατότητες μείωσης του κόστους της ενέργειας και των εκπομπών αερίων

του θερμοκηπίου και αύξησης της αποδοτικότητας της χρήσης νερού κατά μήκος της φάσης καλλιέργειας. Κατά συνέπεια, υπολογίστηκε το αποτύπωμα άνθρακα (Carbon Footprint, CF) στους καρπούς τομάτας από την κατανάλωση και εφαρμογή ενέργειας, νερού, λιπασμάτων, φυτοπροστατευτικών ουσιών, αλλά και από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του θερμοκηπίου και του αναγκαίου εξοπλισμού ανά m^2 καλυμμένου εδάφους και ανά kg τομάτας.

2.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Υπολογισμός αποτυπώματος άνθρακα

Το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (GWP) ενός προϊόντος περιλαμβάνει όλα τα εκπεμπόμενα αέρια του θερμοκηπίου που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή, για την οποία είναι υπεύθυνο το προϊόν. Το GWP είναι ένας δείκτης μέτρησης που βασίζεται στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των αερίων του θερμοκηπίου, που απορροφούν τη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία, που εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης, την ατμόσφαιρα και τα σύννεφα, και ως εκ τούτου, παγιδεύουν θερμότητα στο σύστημα επιφάνειας-τροπόσφαιρας (φαινόμενο του θερμοκηπίου). Τα διαφορετικά αέρια του θερμοκηπίου ορίζονται σε σχέση με το CO_2, με τη χρήση ισοδυνάμων-CO_2 (CO_2-eq). Το CO_2 χρησιμεύει έτσι ως αέριο αναφοράς με καθορισμένο GWP 1. Το GWP προσδιορίζονται με τη χρήση διαφορετικών χρονικών πλαισίων, όπως 20 χρόνια, 100 χρόνια ή 500 χρόνια. (IPCC, 2007). Στην παρούσα εργασία επιλέχτηκε το ευρέως χρησιμοποιούμενο πλαίσιο 100 GWP. Για τον υπολογισμό του αποτυπώματος άνθρακα χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις από την εργασία Ντίνας κ.α. (2015).

2.2. Τα όρια του συστήματος και οι λειτουργικές μονάδες

Σύμφωνα με τη μέθοδο αξιολόγησης κύκλου ζωής (AKZ), ορίστηκαν τα όρια του συστήματος και η λειτουργική μονάδα. Επειδή οι υπολογισμοί αφορούν στη φάση της καλλιέργειας τομάτας στο θερμοκήπιο (''πύλη σε πύλη'' ανάλυση), τα υπόλοιπα στάδια εκτός καλλιέργειας παραλήφθηκαν. Τα υλικά που συμμετείχαν στη συγκεκριμένη φάση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν δύο λειτουργικές μονάδες, μία χωρική "1 m^2 εδάφους", και μία ποσοτική ''1 kg τομάτες'' για την συνολική παραγωγή της καλλιέργειας. Αυτές οι λειτουργικές μονάδες χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά βάσει των οποίων εξομαλύνθηκαν οι ροές εισροών και εκροών υλικών και ενέργειας (ISO14040, 2006, ISO14044, 2006).

2.3. Συλλογή δεδομένων από το θερμοκήπιο υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας

Το θερμοκήπιο ήταν ένα τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο του Κέντρου Ελέγχου Γεωργικών Κατασκευών (40°32'N, 22°59'E) στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, με σκελετό από γαλβανισμένο σίδηρο, επιφάνεια δαπέδου 70 m^2 και υλικό κάλυψης πολυαιθυλένιο (PE) 180 μm. Για την κατασκευή των θεμελίων του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα, ενώ όλα τα μεταλλικά στοιχεία του θερμοκηπίου και των εξοπλισμών προήλθαν από ανακυκλωμένα υλικά. Στο δάπεδο εγκαταστάθηκε μαύρο/λευκό υλικό κάλυψης από πολυαιθυλένιο (PE) 92μm. Για τη θέρμανση του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε συμβατικό σύστημα θέρμανσης που αποτελείτο από καυστήρα φυσικού αερίου και δίκτυο μεταλλικών σωληνώσεων για τη μεταφορά του θερμικού μέσου (ζεστό νερό) εντός και εκτός του θερμοκηπίου και σωλήνων πολυπροπυλενίου για την κυκλοφορία του γύρω από τις γραμμές της καλλιέργειας. Ο χρόνος λειτουργίας του συμβατικού

συστήματος θέρμανσης καταγράφηκε με τη χρήση ωρομετρητή. Επίσης, ελήφθη υπόψη η ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης και του συστήματος άρδευσης.

Σχήμα 1. Παράγοντες που επηρεάζουν την περιβαλλοντική επίδραση κατά την παραγωγή θερμοκηπιακής τομάτας.

Στο θερμοκήπιο εγκαταστάθηκε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας (*Elpida* sp.) σε υποστρώματα πετροβάμβακα τα οποία τοποθετήθηκαν επάνω σε μεταλλικές υδρορροές. Η καλλιεργητική περίοδος διήρκεσε από το Νοέμβριο έως και το Απρίλιο. Για τις ανάγκες της άρδευσης, χρησιμοποιήθηκε νερό από το δίκτυο ύδρευσης το οποίο συλλέχθηκε σε δεξαμενή όπου προστίθεντο και τα θρεπτικά στοιχεία για τη δημιουργία του θρεπτικού διαλύματος που χορηγήθηκε στην καλλιέργεια τομάτας με σταλάκτες. Όσον αφορά τα λιπάσματα, υπολογίστηκαν οι συνολικές ποσότητες ανόργανων λιπασμάτων αποτελούμενες από N-λίπασμα, P-λίπασμα (P_2O_5×0,44) και K-λίπασμα (K_2O×0,83), ενώ συμπεριελήφθησαν οι εκπομπές λόγω παρασκευής και εφαρμογής τους στην καλλιέργεια. Επίσης, η συνολική ποσότητα φυτοφαρμάκων εξετάστηκε σε αυτή την εργασία. Οι κυριότερες ετήσιες εισροές στο θερμοκήπιο παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το θερμοκήπιο παρουσιάζονται στην εργασία των Ntinas et al. (2017).

2.4. Βάση δεδομένων ProBas

Η βάση δεδομένων ProBas (ProBas, 2015) είναι μια διαδικτυακή πύλη, που παρέχεται από την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Περιβάλλοντος της Γερμανίας και το Ινστιτούτο Εφαρμοσμένης Οικολογίας, η οποία χρησιμεύει ως τράπεζα δεδομένων για τα δεδομένα σχετικά με κύκλους ζωής. Η ProBas ενσωματώνει διάφορες πηγές δεδομένων που είναι δημόσια διαθέσιμες, όπως μεταξύ άλλων το GEMIS, ένα μοντέλο ανάλυσης ισοζυγίου ενέργειας και ροών υλικών, ώστε να παρέχει ένα ευρύ φάσμα συνόλων δεδομένων κύκλου ζωής (πάνω από 8000), τα οποία είναι προσβάσιμα δωρεάν για το ενδιαφερόμενο κοινό. Εκτός από τη επεξεργασία εισροών και εκροών, περιέχει τιμές για τις συντελεστές εκπομπών αερίων (μεταξύ άλλων και ισοδύναμου-CO_2).

Πίνακας 1. Δεδομένα ετήσιων εισροών ανά kg τομάτας και ανά m^2.

Υλικό	Ετήσια κατανάλωση	Εμπορεύσιμη παραγωγή	Ετήσια κατανάλωση	Επιφάνεια
		407 kg		70 m^2
Σκελετός	0.09	kg/kg	0.1	kg/m^2
Σκυρόδεμα	0.30	kg/kg	0.3	kg/m^2
Λάστιχο	0.0010	kg/kg	0.001	kg/m^2
Πολυαιθυλένιο	0.020	kg/kg	0.1	kg/m^2
Πετροβάμβακας	0.03	kg/kg	0.17	kg/m^2
Μεταλλικές υδρορροές	0.0	kg/kg	0.08	kg/m^2
Σωλήνες PVC	0.001	kg/kg	0.004	kg/m^2
Φυσικό αέριο	2.8	m^3/kg	16.5	m^3/m^2
Ηλ. Ενέργεια - θέρμανση	1.9	kWh/kg	10.8	kWh/m^2
Ηλ. Ενέργεια - άρδευση	0.001	kWh/kg	0.005	kWh/m^2
Νερό άρδευσης	34.5	L/kg	200	L/m^2
Ν -λίπανση	8.1	g/kg	49.7	g/m^2
Ρ- λίπανση	2.1	g/kg	12.8	g/m^2
Κ- λίπανση	13.6	g/kg	83.5	g/m^2
Φυτοφάρμακα	0.7	gr/kg	3.9	g/m^2

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα έρευνα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν στα ποσά της ''συνολικής κατανάλωσης εισροών'', δηλαδή της κατανάλωσης καυσίμου, ηλεκτρικής ενέργειας, νερού, λιπασμάτων, φυτοπροστατευτικών ουσιών αλλά και των κατασκευαστικών υλικών και εξοπλισμού και του αντίστοιχου ''ισοδύναμου-CO_2'' που υπολογίζονται σε θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας. Η συνολική λειτουργία του συστήματος θέρμανσης του θερμοκηπίου, η συνολική παράγωγη τομάτας και η συνολική παράγωγη ανά τετραγωνικό μέτρο παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά στοιχεία της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης στο θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας.

Λειτουργική μονάδα	Ποσότητα	Μονάδα
Συνολική λειτουργία	774	h
Επιφάνεια εδάφους	70	m^2
Συνολική παραγωγή	407	kg
Παραγωγή ανά m^2	5.8	kg/m^2

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης καυσίμου για τη συνολική διάρκεια της έρευνας, ανά m^2 καλλιεργούμενης επιφάνειας και ανά kg υδροπονικής τομάτας, παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Ως καύσιμο χρησιμοποιήθηκε φυσικό αέριο.

Πίνακας 3. Ποσότητα καυσίμου ανά m^2 και ανά kg τομάτας στο θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας.

Λειτουργική μονάδα	Ποσότητα	Μονάδα
Συνολική κατανάλωση	1152.8	m^3
Κατανάλωση ανά m^2	16.5	m^3/m^2
Κατανάλωση ανά kg	2.8	m^3/kg

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για τη συνολική διάρκεια της έρευνας, ανά m^2 καλλιεργούμενης επιφάνειας και ανά kg υδροπονικής τομάτας, παρουσιάζεται στον Πίνακα 4. Στο θερμοκήπιο, ελήφθη υπόψη η ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης και του συστήματος άρδευσης. Η ηλεκτρική ενέργεια για το σύστημα φυσικού αερισμού δεν μετρήθηκε, αλλά όπως και η ηλεκτρική ενέργεια για το σύστημα άρδευσης, το ποσό θεωρείται πολύ χαμηλό σε σύγκριση με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος θέρμανσης και συνεπώς δύναται να παραλειφθεί.

Πίνακας 4. Ηλεκτρική ενέργεια ανά m^2 και ανά kg τομάτας στο θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας.

Λειτουργική μονάδα	Ποσότητα	Μονάδα
Σύστημα θέρμανσης	754.7	kWh
Σύστημα άρδευσης	1.9	kWh
Συνολική κατανάλωση	756.6	kWh
Κατανάλωση ανά m^2	10.8	kWh/m^2
Κατανάλωση ανά kg	1.9	kWh/kg

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης νερού για τη συνολική διάρκεια της έρευνας, ανά m^2 καλλιεργούμενης επιφάνειας και ανά kg υδροπονικής τομάτας, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5. Για τις ανάγκες της άρδευσης, χρησιμοποιήθηκε νερό από το δίκτυο ύδρευσης το οποίο συλλέχθηκε σε μια δεξαμενή. Στην ίδια δεξαμενή προστίθεντο και τα θρεπτικά στοιχεία για τη δημιουργία του θρεπτικού διαλύματος που χορηγήθηκε στην καλλιέργεια τομάτας. Επίσης, ελήφθη υπόψη το νερό που χρησιμοποιήθηκε κατά την εφαρμογή φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων στο θερμοκήπιο.

Πίνακας 5. Κατανάλωση νερού στο θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας ανά m^2 και ανά kg τομάτας.

Λειτουργική μονάδα	Ποσότητα	Μονάδα
Νερό για άρδευση	14000	L
Νερό για φυτοφάρμακα	52.3	L
Συνολική κατανάλωση	14052.3	L
Κατανάλωση ανά m^2	200.7	L/m^2
Κατανάλωση ανά kg	34.5	kg/kg

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης αγροχημικών για τη συνολική διάρκεια της έρευνας, ανά m^2 καλλιεργούμενης επιφάνειας και ανά kg υδροπονικής τομάτας, παρουσιάζεται στους Πίνακες 6 και 7. Στην υδροπονική καλλιέργεια χρησιμοποιήθηκαν χημικά λιπάσματα, κατά κύριο λόγο NO_3, K, P και Ca.

Πίνακας 6. Κατανάλωση λιπασμάτων στο θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας ανά m^2 και ανά kg τομάτας.

Λειτουργική μονάδα	NO_3	K	P	Ca	Μονάδα
Συνολική κατανάλωση	3480	5848	893	2016	gr
Κατανάλωση ανά m^2	49.7	83.5	12.7	28.8	gr/m^2
Κατανάλωση ανά kg	3.8	6.4	1.0	2.2	gr/kg

Κατά τη διάρκεια της υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας στο θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκαν φυτοφάρμακα σε περιορισμένο βαθμό και πιο συγκεκριμένα τα εντομοκτόνα Confidor (Bayer) και Admiral (SCAE), τα μυκητοκτόνα Aliette (Bayer) και Antracol Combi (Bayer) και το ακαρεοκτόνο Vendex (BASF).

Πίνακας 7. Κατανάλωση φυτοφαρμάκων στο θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας ανά m^2 και ανά kg τομάτας.

Λειτουργική μονάδα	Confidor (x3)	Admiral	Aliette 80WG	Antracol +Combi	Vendex 55sc	Σύνολο	Μονάδα
Συνολική κατανάλωση	4.0	0.5	140.0	111.0	20.0	275.5	mL or gr
Κατανάλωση ανά m^2	0.01	0.001	0.344	0.273	0.049	0.677	gr/m^2
Κατανάλωση ανά kg	0.1	0.007	2.0	1.6	0.3	3.9	gr/kg

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης κατασκευαστικών υλικών και εξοπλισμού, ανά m^2 καλλιεργούμενης επιφάνειας και ανά kg υδροπονικής τομάτας, παρουσιάζεται στον Πίνακα 8. Η διάρκεια χρήσης ορίστηκε στα 20 έτη για τα κατασκευαστικά και λοιπά υλικά με εξαίρεση το PVC και το PE (10 και 6 έτη αντίστοιχα).

Πίνακας 8. Κατανάλωση κατασκευαστικών υλικών και εξοπλισμού στο θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας ανά έτος, ανά m^2 και ανά kg τομάτας.

Λειτουργική μονάδα	Γαλβανισμένος σίδηρος	Σκυρόδεμα	Λάστιχο	Πολυαιθυλένιο (PE)	PVC	Πετροβάμβακας
Συνολική κατανάλωση	40.3	120.0	0.5	6.2	0.3	12.0
Κατανάλωση ανά m^2	0.58	1.71	0.007	0.273	0.004	0.17
Κατανάλωση ανά kg	0.10	0.29	0.001	0.01	0.001	0.03

Για τον υπολογισμό του αποτυπώματος άνθρακα (CO_2-eq, kg) από τη χρήση των παραπάνω εισροών, χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές ''ισοδύναμου-CO_2'' από τη βάση δεδομένων ProBas. Το αποτύπωμα του άνθρακα για τη συνολική διάρκεια της έρευνας, ανά m^2 καλλιεργούμενης επιφάνειας και ανά kg τομάτας παρουσιάζεται στον Πίνακα 9. Οι υψηλές τιμές του CO_2-eq μπορεί να αποδοθούν στις υψηλές ανάγκες θέρμανσης λόγω της κάλυψης του θερμοκηπίου μόνο με απλό πολυαιθυλένιο, ενώ του CO_2-eq ανά kg τομάτας, ερμηνεύονται από τη χαμηλή παραγωγή της καλλιέργειας τομάτας.

Πίνακας 9. Αποτύπωμα Άνθρακα (Α.Α) ή ισοδύναμο του άνθρακα (CO_2-eq) κατά τη φάση της καλλιέργειας, ανά m^2 και ανά kg τομάτας.

Υλικό	kg CO_2-eq	kg CO_2-eq/kg	kg CO_2-eq/m^2
Καύσιμο	3554.2	8.733	50.774
Ηλεκτρική ενέργεια	407.7	1.002	5.824
Νερό	5.6	0.014	0.081
Λιπάσματα	34.5	0.080	0.493

Φυτοφάρμακα	1.7	0.004	0.024
Υλικά κατασκευής	106.9	0.263	1.527
Συνολικό Α.Α.	4110.6	10.1	58.7

Η χρήση ορυκτού καυσίμου φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση ήταν οι κύριοι συντελεστές των συνολικών εκπομπών CO_2 του θερμοκηπίου με ποσοστά συμμετοχής 86.5% και 9.9% αντίστοιχα, ενώ η κατανάλωση νερού, λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και τα κατασκευαστικά στοιχεία του θερμοκηπίου συμμετείχαν σε ποσοστό 0.1%, 0.8%, 0.04% και 2.6% αντίστοιχα.

Το υψηλό ποσοστό του ορυκτού καυσίμου καθιστά επιτακτική τη στροφή των παραγωγών θερμοκηπιακών προϊόντων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αφού, εκτός από εξοικονόμηση ενέργειας, συνεισφέρουν και σε χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα της τάξης του 0.4 kg CO_2-eq/kg τομάτας (Ntinas et al., 2017).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία προσδιορίστηκαν οι εισροές ενέργειας, νερού, λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και υλικών ενός θερμοκηπίου με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας όταν θερμαίνεται με συμβατικό σύστημα θέρμανσης που χρησιμοποιεί ως καύσιμο φυσικό αέριο. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το αποτύπωμα άνθρακα στη φάση της καλλιέργειας με βάση τη χρήση των εισροών στο θερμοκήπιο, στα πλαίσια μίας απλής ‘’πύλη σε πύλη’’ ανάλυσης κύκλου ζωής. Η χρήση φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση ήταν οι κύριοι συντελεστές των συνολικών εκπομπών CO_2 από το θερμοκήπιο με ποσοστά συμμετοχής 86.5% και 9.9% αντίστοιχα. Όπως ήταν αναμενόμενο, η κατανάλωση νερού, λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και τα κατασκευαστικά στοιχεία του θερμοκηπίου συμμετείχαν σε ποσοστό 0.1%, 0.8%, 0.04% και 2.6% αντίστοιχα στο αποτύπωμα άνθρακα του παρόντος θερμοκηπίου. Το υδροπονικό θερμοκήπιο παρουσιάζει, χαμηλότερη κατανάλωση νερού, αλλά υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και άρα εκπομπές CO_2 ανά kg τομάτας συγκριτικά με θερμοκήπια στα οποία καλλιεργείται τομάτα στο έδαφος και χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για την ενεργειακή βελτίωση του.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο-ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Πρόγραμμα: Εκπόνηση σχεδίων Ερευνητικών & Τεχνολογικών Αναπτυξιακών έργων Καινοτομίας (ΑγροΕΤΑΚ), Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ορθολογική Διαχείριση Λίπανσης - Θρέψης Καλλιέργειας Τομάτας: Διερεύνηση Εισροών Ενέργειας - Αγροχημικών και Προσδιορισμός των Αποτυπωμάτων Άνθρακα και Νερού για την Παραγωγή Προϊόντων με Υψηλή Προστιθέμενη Αξία. Φορέας χρηματοδότησης: Υπουργείο Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος & Ενέργειας, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός «ΔΗΜΗΤΡΑ». Θερμές ευχαριστίες στον κ. Ιωάννη Μπάτση της εταιρίας “Γεωθερμική Α.Ε.”, για την παροχή εξοπλισμού και την τεχνική βοήθεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Antón A., Torellas, M., Montero, J.I., Ruijs, M., Vermeulen, P. and Stanghellini, C., 2012. *Environmental Impact Assessment of Dutch Tomato Crop Production in a Venlo Glasshouse*. Acta Horticulturae, 927, 781-792.

Gunady, M.G., Biswas, W., Solah, V.A. and James, A.P., 2012. *Evaluating the global warming potential of the fresh produce supply chain for strawberries, romaine/cos lettuces (Lactuca sativa), and button mushrooms (Agaricus bisporus) in Western Australia using life cycle assessment (LCA)*. Journal of Cleaner Production, 28, 81-87.

IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Editors). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.

ITC, 2012. *Product carbon footprinting standards in the agri-food sector. Technical Paper*. Geneva: International Trade Center. Available online http://www.saiplatform.org/uploads/Modules/Library/product-carbon-footprinting_final.pdf, Accessed 25.06.2015.

ISO 14040, 2006-10a. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, International Organization for Standardization (ISO), Geneva.

ISO 14044, 2006-10b. *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and Guidelines*, International Organization for Standardization (ISO), Geneva.

Mempel, H. and Meyer, J., 2004: *Environmental System Analysis for Horticultural Crop Production*. Acta Horticulturae, 638, 69-75.

Meyer, J., Schockert, K., Laun, N., Schlüpen, M. and Kreuzpaintner, A., 2014. *Niedrigenergiegewächshaus mit CO2- neutralem Heizsystem in: ZukunftsInitiative NiedrigEnergieGewächshaus. Ansätze und Ergebnisse*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt S. 30-39.

Ntinas, G.K., Kougias, P.G. and Nikita-Martzopoulou, Ch., 2011. *Experimental performance of a hybrid solar energy saving system in greenhouses*. International Agrophysics, 25(3), 257-264.

Ntinas, G.K., Fragos, V.P. and Nikita-Martzopoulou, Ch., 2014. *Thermal analysis of a hybrid solar energy saving system inside a greenhouse*. Energy Conversion and Management, 81, 428-439.

Ntinas, G.K., Neumair, M., Tsadilas, C.D. and Meyer, J., 2017. *Carbon footprint and cumulative energy demand of greenhouse and open-field tomato cultivation systems under Southern and Central European climatic conditions*. Journal of Cleaner Production, 142(4), 3617-3626.

Prozessorientierte Basisdaten Für Umweltmanagement-Instrumente (PROBAS), 2015:Umweltbundesamt.URL:http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php (accessed 02.05.2017).

Torrellas, M., Antón, A., Ruijs, M., Victoria, N.G., Stanghellini, C. and Montero, J.I., 2012. *Environmental and economic assessment of protected crops in four European scenarios.* Journal of Cleaner Production, 28, 45-55.

Virtanen, Y., Kurppa, S., Saarinen, M., Katajajuuri, J.M., Usva, K., Mäenpää, I., Mäkelä, J., Grönroos, J. and Nissinen, A., 2011. *Carbon footprint of food-approaches from national input-output statistics and a LCA of a food portion*. Journal of Cleaner Production, 19(16), 1849-1856.

Ντίνας, Γ.Κ, Treutter, D. & Meyer, J. 2015. *Πρωτοκόλλα και Οδηγίες για την Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής σε Θερμοκήπια*. Πρακτικά 9ου Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Ένωση Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος, Θεσ/νίκη, σελ 499-506.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΙΣ ΟΡΟΦΕΣ ΔΥΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Ι.Ν. Ντάντος[1], Γ.Κ. Ντίνας[1,2], Θ.Α. Κωτσόπουλος[1], Ν.Α. Μαλαματάρης[3], Β.Π. Φράγκος[1]

[1]Τμήμα Γεωπονίας,, Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124, Θεσσαλονίκη, e-mail: (fragos@agro.auth.gr)

[2]Department of Engineering, Faculty Sciences and Technology, University of Aarhus, Blichers Allé 20, 8830 Tjele, Denmark

*[3]Department of Physics and Astronomy, School of Science, George Mason University, VA 22030 Fairfax, USA*e-mail: nmalamat@gmu.edu*

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια αριθμητικής προσέγγισης των κατανομών πιέσεων στις οροφές δύο διαδοχικών τροποποιημένων τοξωτών θερμοκηπίων με την απευθείας επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και της εξίσωσης συνέχειας. Το υπολογιστικό πεδίο με τις κατάλληλες οριακές και αρχική συνθήκες προσομοιώνει την ασυμπίεστη, δισδιάστατη, ασταθή, ιξώδη ροή αέρα γύρω από τις δύο διαδοχικές κατασκευές-μοντέλα εδρασμένες μέσα σε μια αεροσήραγγα. Από την επίλυση των εξισώσεων με την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, για αριθμό Reynolds 1284, προέκυψαν οι στιγμιαίες τιμές των ταχυτήτων και πιέσεων σε κάθε σημείο του υπολογιστικού πεδίου. Επίσης, από την στατιστική επεξεργασία των στιγμιαίων πιέσεων προέκυψαν οι κατανομές των μέσων τιμών του συντελεστή πίεσης στις οροφές των δυο διαδοχικών τροποποιημένων τοξωτών θερμοκηπίων. Για την ανάλυση και την εξαγωγή συμπερασμάτων οι κατανομές αυτές συγκρίθηκαν με αντίστοιχες τιμές που προτείνονται από τον ευρωκώδικα EN-13031-1:2001 για την περίπτωση ενός απλού τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου.

Λέξεις κλειδιά: θερμοκήπιο, συντελεστή πίεσης, εξισώσεις Navier-Stokes, πεπερασμένα στοιχεία

NUMERICAL APPROACH OF THE PRESSURE COEFFICIENT ON THE ROOFS OF THE TWO SUSSECCIVE GREENHOUSES

I.N. Dados[1], G.K. Ntinas [1,2],T.A. Kotsopoulos[1], N.A. Malamataris[3], V.P. Fragos[1],

[1]Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, Aristotle University Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece

[2]Department of Engineering, Faculty Sciences and Technology, University of Aarhus, Blichers Allé 20, 8830 Tjele, Denmark

*[3]Department of Physics and Astronomy, School of Science, George Mason University, VA 22030 Fairfax, USA*e-mail: nmalamat@gmu.edu*

ABSTRACT

In this work, we attempt to numerically approximate the pressure distributions on the roofs of two successive modified arched greenhouses by directly solving the Navier-Stokes equations and the continuity equation. The computational field, with the appropriate boundary and initial conditions, simulates the uncompressed, two-dimensional, unstable, viscous airflow around the two successive structures-model mounted into a wind tunnel.

From the solution of the equations with the finite element numerical method, for Reynolds number 1284, instantaneous values of velocities and pressures emerged at each point in the computational field. Also, the statistical processing of instantaneous pressures resulted in the distribution of mean values of the pressure coefficient on the roofs of the two successive modified arched greenhouses. In order to analyze and draw conclusions, these distributions have been compared with corresponding values proposed by Eurocode EN-13031-1:2001for the case of a simple modified greenhouse arc.

Keywords: greenhouse, pressure coefficient, Navier-Stokes equations, finite elements

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ασφάλεια και το κόστος των θερμοκηπίων επηρεάζεται άμεσα από την κατανομή των πιέσεων πάνω στα εξωτερικά τοιχώματά τους. Για το λόγο αυτό είτε μέσω πραγματικών ή εργαστηριακών μετρήσεων αλλά και είτε μέσω αριθμητικών προσεγγίσεων καθορίστηκαν οι επιτρεπτές τιμές των συντελεστών πίεσης για διάφορους τύπους και διατάξεις θερμοκηπιακών μονάδων (ευρωκώδικες), αλλά όχι όμως για τη διάταξη δύο διαδοχικών αγροτικών κατασκευών.

Η ροή του αέρα πάνω από διαδοχικά θερμοκήπια είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του ανέμου (ταχύτητα, κατεύθυνση κ.λπ.), τη γεωμετρία της αγροτικής κατασκευής και τον αριθμό των θερμοκηπίων (ένα ή δύο τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια).

Για τον υπολογισμό του φορτίου ανέμου χρησιμοποιείται ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης ανέμου. Ο συντελεστής πίεσης ανέμου λαμβάνεται από τον ευρωκώδικα EN-13031-1-2001, ο οποίος εξειδικεύεται στα θερμοκήπια. Ωστόσο, αυτές οι τιμές που δίνει ο ευρωκώδικας οδηγούν στο σχεδιασμό μεγάλης αντοχής κατασκευών, με συνέπεια το αντίθετο αποτέλεσμα στο κόστος κατασκευής (Kateris et al., 2012).

Ο ευρωκώδικας "EN 13031-1: 2001" σχετίζεται με τις δράσεις του ανέμου και αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για το σχεδιασμό και την κατασκευή θερμοκηπίων. Η αεροδυναμική ή οι συντελεστές πίεσης σχετίζονται με τα θερμοκήπια και αναφέρονται στον παραπάνω Ευρωκώδικα και συγκεκριμένα μελετώνται στις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Θερμοκήπια με επικλινείς οροφές, (απλό ή πολλαπλό θερμοκήπια)
2. Θερμοκήπια με παραβολικές οροφές, (απλό ή πολλαπλό θερμοκήπια)
3. Εξαεριστήρες
4. Διαπερατή επικάλυψη

Πολλοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει πειράματα είτε σε πλήρη κλίμακα είτε σε εργαστηριακές συνθήκες, προκειμένου να μελετήσουν τη ροή του αέρα πάνω από ένα θερμοκήπιο. Πειραματικές μετρήσεις πλήρους κλίμακας έχουν πραγματοποιηθεί από τους Aldrich and Wells (1979) και Molina-Aiz et al. (2004). Ενώ οι πειραματικές μετρήσεις σε αεροσήραγγα ή κανάλια έχουν διεξαχθεί από τους Vassiliou et al. (2000), Robertson et al. (2002), Ginger και Holmes (2003), και Blackmore and Tsokri (2006).

Στις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών δημιούργησε γόνιμο έδαφος για την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης, όπου οι εξισώσεις ορμής και συνέχειας επιλύονται μετά από διακριτοποίηση του πεδίου ροής με διαφορετικές μεθόδους όπως πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένες διαφορές, πεπερασμένος όγκος, Reichrath and Davies, (2002), Shklyar and Arbel (2004), Mistriotis and Briassoulis (2002), Fragos et al. (1997), Tieleman (2003), Kateris et al., (2012). Επιπλέον, οι Dados et al (2011)

μελέτησαν μόνο τα χαρακτηριστικά ροής αέρα σε δύο διαδοχικά θερμοκήπια τοποθετημένα μέσα σε αεροσήραγγα.
Στην Ελλάδα, πολλά θερμοκήπια τοποθετούνται πολύ κοντά μεταξύ τους. Ωστόσο, οι ευρωκώδικες δεν παρέχουν τιμές για αυτές τις περιπτώσεις. Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη του συντελεστή εξωτερικής πίεσης σε δύο διαδοχικά θερμοκήπια με παραβολικές οροφές με την άμεση αριθμητική προσομοίωση, για σταθερή και ασταθή κατάσταση. Από την ανάλυση των συνιστωσών ταχυτήτων προέκυψαν οι γραμμές ροής για σταθερή και ασταθή κατάσταση. Επίσης, οι υπολογισμένες τιμές των κατανομών του συντελεστή εξωτερικής πίεσης συγκρίθηκαν ποιοτικά και ποσοτικά με τα διαθέσιμα στοιχεία από τον EN-13031-1:2001, για απλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

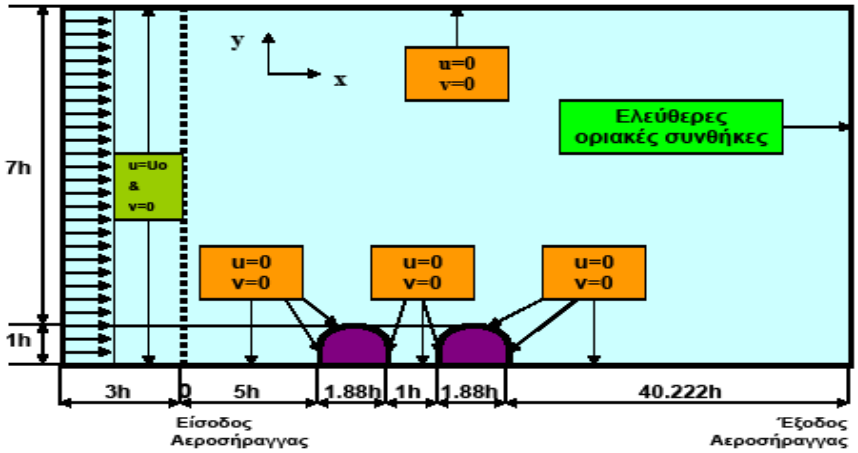
2.2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

2.2.1. Διέπουσες Εξισώσεις

Η δισδιάστατη, ιξώδης, ασυμπίεστη, σταθερής και ασταθούς κατάστασης ροή πάνω από δύο διαδοχικά εδρασμένα θερμοκήπια παραβολικής διατομής τοποθετημένα σε αεροσήραγγα, προσομοιώθηκε με το μαθηματικό μοντέλο που βασίζεται στην άμεση επίλυση των αδιαστατοποιημένων εξισώσεων Navier-Stokes (1), (2), αντίστοιχα και συνέχειας (3):

- $\mathbf{U}\bullet\nabla\mathbf{U} = -\nabla p + \frac{1}{Re}\nabla^2\mathbf{U},$ (1)
- $\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U}\bullet\nabla\mathbf{U} = -\nabla p + \frac{1}{Re}\nabla^2\mathbf{U},$ (2)
- $\nabla\bullet\mathbf{U} = 0,$ (3)

όπου U = (u, v) είναι το διάνυσμα της ταχύτητας του ρευστού, u = οριζόντια και υ = κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας, t = ο χρόνος, p = η πίεση και Re = ο αριθμός Reynolds.
Οι προηγούμενες εξισώσεις έχουν αδιαστατοποιηθεί, χρησιμοποιώντας τα ακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη (h, Uo, Po, Re), όπου: h = το ύψος της εμποδίου (m), U_o = η ομοιόμορφη ταχύτητα του ρευστού (ελεύθερη ταχύτητα του ρευστού στην είσοδο, m s^{-1}), $P_o = rV^2$ είναι η ένταση της πίεσης (N m^{-2}), ρ = η πυκνότητα του ρευστού (N m^{-4} s^2), $Re = U_o h /\nu$ είναι ο αριθμός Reynolds σε σχέση με το ύψος του εμποδίου (h) και ν = το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (m^2 s^{-1}). Τα αδιάστατα μήκη x* και y* έχουν οριστεί ως x* = x/h και y* = y/h, αντίστοιχα.
Η παρούσα εργασία μελετά την δισδιάστατη ασταθής και σταθερή ροή σε δύο διαδοχικά θερμοκήπια μέσα σε αεροσήραγγα για αριθμό Reynolds, Re=1284. Τα μοντέλα των διαδοχικών θερμοκηπίων έχουν κλίμακα 1:60 και διαστάσεις 0,063m × 0,0756m στην κατεύθυνση x και y, αντίστοιχα. Επίσης, το μήκος των θερμοκηπίων και της αεροσήραγγας στο αριθμητικό πείραμα ήταν 1.88H και 50H, αντίστοιχα (αδιάστατο). Το υπολογιστικό πεδίο ροής παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Υπολογιστική περιοχή λύσης και οριακές συνθήκες της δισδιάστατης ροής πάνω από δύο διαδοχικά τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια.

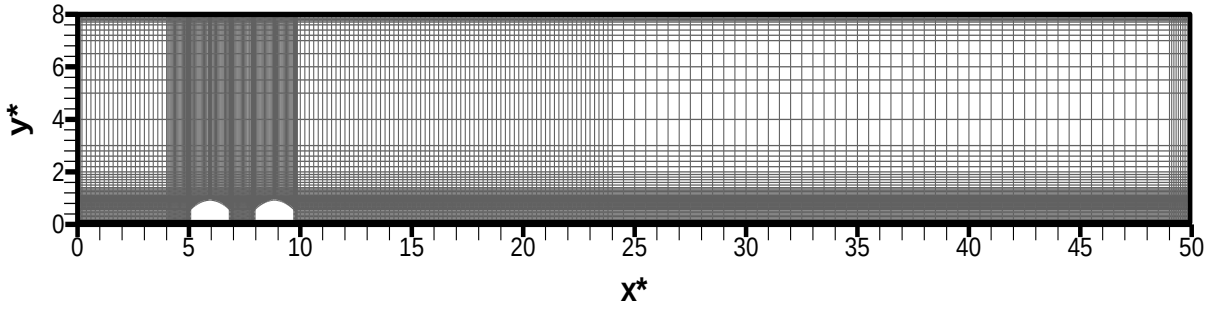
2.2.2. Υπολογιστικό πεδίο - Οριακές συνθήκες

Μια ομοιόμορφη ελεύθερη συνθήκη ροής χρησιμοποιείται ως οριακή συνθήκη στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου (Fragos et al. 1997). Οι οριακές συνθήκες μη ολισθήσεως εφαρμόζονται κατά μήκος των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας. Στην έξοδο της αεροσήραγγας, ορίστηκε ελεύθερη οριακή κατάσταση προκειμένου το ρευστό (αέρας) να εγκαταλείψει ελεύθερα τον υπολογιστικό πεδίο, χωρίς καμία παραμόρφωση (Malamataris 1991, Papanastasiou et al., 1992).

2.2.3. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων (1), (2) και (3) για 2D, σταθερή και ασταθούς ροής, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων Galerkin, μαζί με τις κατάλληλες αρχικές (Re=1) για την ασταθή κατάσταση ροής και οριακές συνθήκες (Owen and Hinton, 1980, Gresho and Sani, 1998, Zienkiewicz et al., 2000). Η λύση περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση (discritization) της περιοχής λύσης σε τετράπλευρα και τριγωνικά στοιχεία, (Σχήματα 2 α,β).

Ο κώδικας των πεπερασμένων στοιχείων γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού **VISUAL FORTRAN 90/95** και πραγματοποιήθηκε έλεγχος εγκυρότητας από τους Fragos et al. (1997), Dados et al. (2011) και Kateris et al. (2012). Το υπολογιστικό πλέγμα του πεδίου ροής απεικονίζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Διακριτοποίηση της περιοχής λύσης σε ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο ροής.

Πιο συγκεκριμένα, τα γειτονικά στοιχεία γύρω από την παραβολική οροφή των θερμοκηπίων είναι τριγωνικά με καμπύλες πλευρές ενώ στην υπόλοιπη περιοχή λύσης χρησιμοποιούνται τετράπλευρα στοιχεία. Με την παραπάνω μέθοδο επιτυγχάνεται η διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου ροής με το μικρότερο δυνατό σφάλμα.
Στον Πίνακα 1, δίνονται τα στοιχεία του υπολογιστικού πεδίου ροής, στο οποίο εφαρμόζονται οι παραπάνω εξισώσεις καθώς και η περιγραφή του προγράμματος σε γλώσσα **VISUAL FORTRAN 90/95**, για την επίλυση του αλγεβρικού προβλήματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι άγνωστες μεταβλητές **u***, και **v***, σε κάθε κόμβο των πεπερασμένων στοιχείων ενώ η **p*** μόνο στους κόμβους των άκρων των πεπερασμένων στοιχείων του υπολογιστικού πλέγματος, σε αδιάστατη μορφή.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά μεγέθη της εφαρμογής και των στοιχείων του κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων.

α/α	*Χαρακτηριστικά μεγέθη του υπολογιστικού πεδίου*	*Δύο τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια*
1.	Αδιάστατο ύψος υπολογιστικού πεδίου (H)	**8**
2.	Αδιάστατο μήκος υπολογιστικού πεδίου (L)	**50**
3.	Αριθμός Reynolds (Re)	**1284**
4.	Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων του υπολογιστικού πεδίου (NE)	**18.616**
5.	Πλήθος κόμβων του υπολογιστικού πεδίου (NH)	**75.137**
6.	Συνολικός αριθμός των αγνώστων του υπολογιστικού πεδίου (NP)	**169.255**
7.	Χρόνος για κάθε επανάληψη	**0.88 CPU min**
8.	Εύρος χωρικού βήματος τόσο κατά τον άξονα των x όσο και κατά τον άξονα των y	**$0.001 \leq \Delta x \leq 1$** **$0.001 \leq \Delta y \leq 1$**

Το σύστημα των μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτει από τον υπολογιστικό κώδικα, επιλύεται αριθμητικά με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson. Το μέγιστο σφάλμα της μεθόδου Newton-Raphson για τους υπολογισμούς των ταχυτήτων ήταν 10^{-6}, ενώ για την πίεσης ήταν $5x10^{-4}$. Κάθε επανάληψη χρησιμοποιήθηκε 0,88 CPU λεπτό, σε επιτραπέζιο υπολογιστή με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά, Intel® Core™ i7-3770 Processor @ 3,40 GHz και 12GB RAM.

2.2.3. Υπολογισμός συντελεστή πίεσης

Ο προσδιορισμός του συντελεστή εξωτερικής πίεσης στην οροφή των θερμοκηπίων βασίστηκε στις τιμές πίεσης που υπολογίστηκαν με την επίλυση των εξισώσεων του μαθηματικού μοντέλου. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή εξωτερικής πίεσης είναι η εξής:

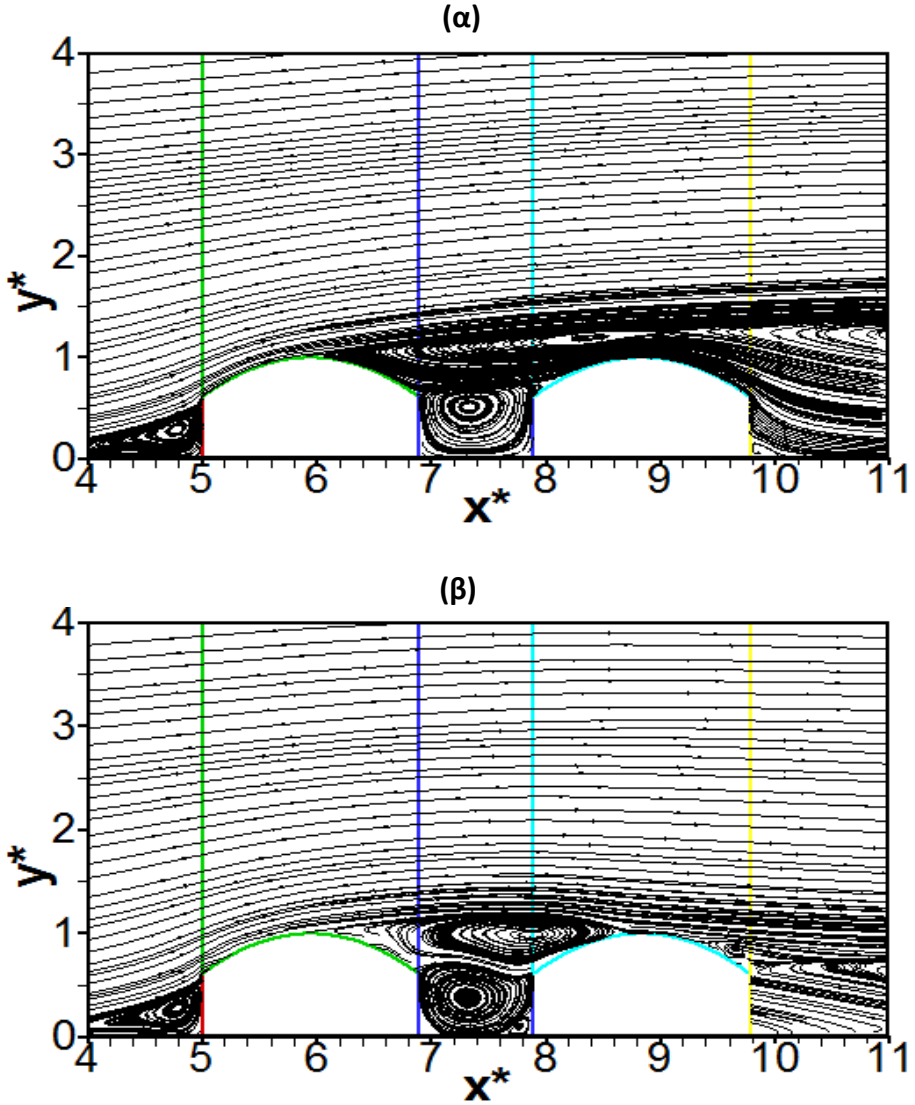
- $C_{pe} = 2(p - p_0)$, (4)

όπου C_{pe} είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης, p είναι η πίεση στην οροφή του θερμοκηπίου που υπολογίζεται από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων και p_o είναι η πίεση αναφοράς.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι υπολογιζόμενες γραμμές ροής γύρω από δύο διαδοχικά θερμοκήπια με παραβολικές οροφές για σταθερή ροή και οι μέσες τιμές της ασταθούς κατάσταση ροής, για Re=1284

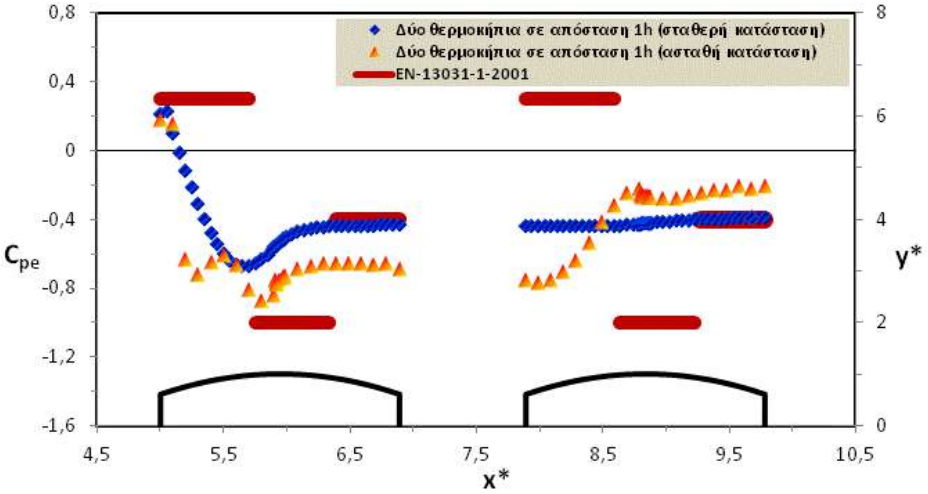
απεικονίζονται στα Σχήματα 3 α,β, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι ένας στρόβιλος αναπτύχθηκε ανάντη του πρώτου και κατάντη του δεύτερου θερμοκηπίου και για τις δύο περιπτώσεις ροής. Επιπλέον, αναπτύχθηκαν δύο στρόβιλοι μεταξύ των θερμοκηπίων και για τις δύο καταστάσεις ροής. Αναλυτικότερα στο Σχήμα 3α, διαπιστώνεται ότι έχουμε αποκόλληση της ροής από την κορυφή του πρώτου και προσκόλληση κατάντη του δευτέρου θερμοκηπίου. Σε αντίθεση με το Σχήμα 3β, όπου το φαινόμενο της αποκόλλησης αρχίζει (ξεκινάει) από την οροφή του πρώτου και προσκολλάται στην κορυφή του δευτέρου θερμοκηπίου.



Σχήμα 3 α,β. Γραμμές ροής γύρω από δύο διαδοχικά τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια για Re=1284: (α) σταθερή κατάσταση ροής και (β) ασταθής κατάσταση ροής.

Στο Σχήμα 4, παρουσιάζονται οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης, για σταθερή και ασταθή ροή, κατά μήκος της οροφής δύο διαδοχικών θερμοκηπίων σε απόσταση 1h και για Re=1284. Αναλυτικότερα συγκρίνονται με τις τιμές C_{pe} που δίνονται από τον ευρωκώδικα EN-13031-1:2001 για παραβολική διατομή. Επίσης, παρουσιάζονται οι τιμές του C_{pe} σε κάθε σημείο της οροφής των δύο θερμοκηπίων και για αριθμό Re=1284. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο ευρωκώδικας παρέχει τιμές του συντελεστή πίεσης μόνο για απλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές της κατανομής του συντελεστή

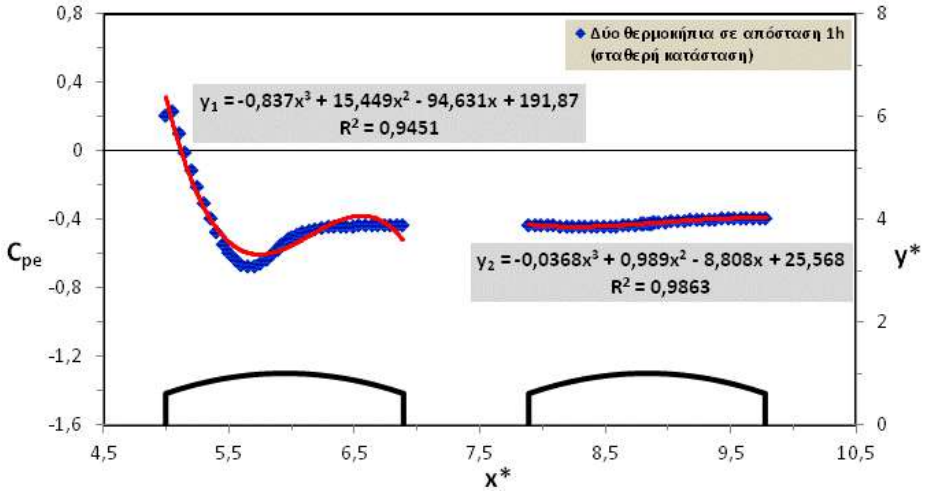
εξωτερικής πίεσης πάνω στη δεύτερη τροποποιημένη τοξωτή οροφή είναι ίδιες με τις τιμές που παρέχει ο ευρωκώδικας για το πρώτο θερμοκήπιο.



Σχήμα 4. Κατανομή του συντελεστή εξωτερικής πίεσης, C_{pe}, για δυο διαδοχικά τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια.

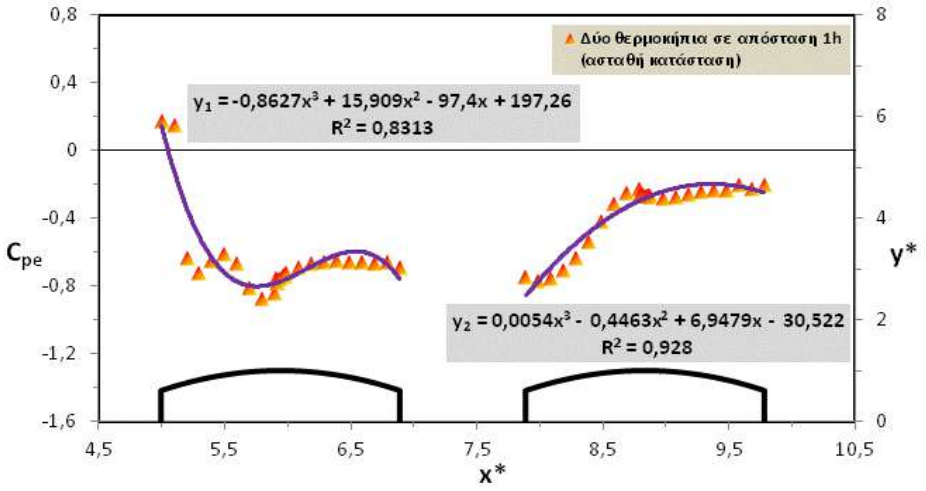
Όπως φαίνεται, η κατανομή των συντελεστών πίεσης που προέκυψαν από την άμεση αριθμητική προσομοίωση λαμβάνει κυρίως αρνητικές τιμές κατά μήκος των δύο οροφών. Η παραπάνω διαπίστωση βρίσκεται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις προτεινόμενες τιμές του ευρωκώδικα σε όλες τις περιπτώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αξίζει να σημειωθεί ότι μια έντονη μεταβολή των τιμών C_{pe} εμφανίζεται στην προσήνεμη πλευρά του πρώτου θερμοκηπίου και συγκεκριμένα για τις δύο καταστάσεις ροής (σταθερή και ασταθή), ιδιαίτερα στην κορυφή της οροφής, δηλαδή η καμπύλη λαμβάνει έντονα πολύ υψηλές αρνητικές τιμές μέχρι την κατάντη πλευρά του πρώτου θερμοκηπίου. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η κατανομή του C_{pe} πάνω από την οροφή του δεύτερου θερμοκηπίου παρουσιάζει ομαλότητα για την σταθερή κατάσταση και μικρές διακυμάνσεις για την ασταθή ροή. Επιπλέον, οι υπολογισμένες τιμές του C_{pe}, πάνω από τις δύο διαδοχικές τροποποιημένες τοξωτές οροφές, συγκρίθηκαν με τις υποτιθέμενες τιμές του Ευρωκώδικα EN-13031-1:2001, που ισχύουν για ένα απλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο. Οι υπολογιζόμενες τιμές πάνω από την πρώτη παραβολική οροφή είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με τις υποτιθέμενες τιμές. Αντίθετα, οι υπολογισμένες τιμές του C_{pe} πάνω από στη δεύτερη παραβολική οροφή ενώ βρίσκονται μέσα στα όρια των υποτιθέμενων τιμών που προτείνονται, παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από τις υποτιθέμενες μέγιστες και ελάχιστες τιμές, κυρίως στην ανάντη πλευρά της δεύτερης οροφής.

Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται η κατανομή του συντελεστή εξωτερικής πίεσης, C_{pe} για κατάσταση σταθερής ροής πάνω από δύο διαδοχικά θερμοκήπια σε απόσταση 1h για αριθμό Reynolds, Re=1284. Οι κατανομές του συντελεστή πίεσης πάνω από τις δύο τροποποιημένες τοξωτές οροφές εκφράζονται από ένα πολυώνυμο $3^{ου}$ βαθμού με συντελεστή συσχέτισης R^2 = 0,9451 ($1^{η}$ οροφή) και R^2 = 0,9863 ($2^{η}$ οροφή).



Σχήμα 5. Προσέγγιση της κατανομής εξωτερικής πίεσης, C_{pe}, με πολυωνυμική παλινδρόμηση (σταθερή κατάσταση ροής).

Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται η κατανομή του συντελεστή εξωτερικής πίεσης, C_{pe} για κατάσταση ασταθούς ροής πάνω από δύο διαδοχικά θερμοκήπια σε απόσταση 1h για αριθμό Reynolds, Re=1284. Οι κατανομές του συντελεστή πίεσης πάνω από τις δύο τροποποιημένες τοξωτές οροφές εκφράζονται από ένα πολυώνυμο $3^{ου}$ βαθμού με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0,8313$ ($1^{η}$ οροφή) και $R^2 = 0,928$ ($2^{η}$ οροφή).



Σχήμα 6. Προσέγγιση της κατανομής εξωτερικής πίεσης, C_{pe}, με πολυωνυμική παλινδρόμηση (ασταθούς κατάσταση ροής).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη, οι παράμετροι της ροής όπως οι γραμμές ροής και η κατανομή των συντελεστών εξωτερικής πίεσης, C_{pe} κατά μήκος της οροφής δύο διαδοχικών θερμοκηπίων σε απόσταση 1h υπολογίστηκε από την άμεση αριθμητική προσομοίωση. Οι προβλεπόμενες τιμές συγκρίθηκαν με εκείνες που δόθηκαν από τον ευρωκώδικα EN-13031-1:2001. Επιπλέον, μελετήθηκαν οι επιδράσεις της σταθερής και ασταθούς ροής στις παραμέτρους της ροής. Τα ακόλουθα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη είναι τα εξής:

1. Η διαμόρφωση των στροβίλων γύρω από την δεύτερη τροποποιημένη τοξωτή οροφή είναι διαφορετική συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις προσέγγισης της ροής (σταθερή και ασταθή κατάσταση) για τον ίδιο αριθμό Reynolds, Re=1284 .

2. Γενικά, οι προβλεπόμενες τιμές C_{pe} είναι εντός του εύρους τιμών που δίνονται από τον ευρωκώδικα, κυρίων για το πρώτο θερμοκήπιο.
3. Οι υπολογισμένες τιμές πίεσης της δεύτερης παραβολικής οροφής παρουσίασαν απόκλιση με τις υποτιθέμενες μέγιστες και ελάχιστες τιμές, που προτείνονται.
4. Οι κατανομές του συντελεστή πίεσης πάνω από τις δύο τροποποιημένες τοξωτές οροφές, για σταθερή και ασταθής κατάσταση ροής, εκφράζονται από ένα πολυώνυμο $3^{ου}$ βαθμού με συντελεστή συσχέτισης $R^2 > 0,92$ ($2^{η}$ οροφή), δηλαδή προσεγγίζοντας την μονάδα ενώ $R^2 > 0,83$ ($1^{η}$ οροφή).
5. Ο ευρωκώδικας διαιρεί την οροφή του θερμοκηπίου σε περιοχές και δίνει μόνο μία τιμή C_{pe} για κάθε περιοχή, ενώ με την άμεση αριθμητική προσομοίωση είναι δυνατόν να προβλεφθεί η τιμή για κάθε σημείο της οροφής.

Προτείνεται να πραγματοποιηθεί περαιτέρω διερεύνηση του ευρωκώδικα με σκοπό να δοθούν τιμές για διαδοχικά τροποποιημένα τοξωτά και αμφίρικτα θερμοκήπια, για το σχεδιασμό μεγαλύτερης αντοχής, ασφάλειας και βέλτιστο κόστος των κατασκευών. Επιπλέον, ο προτεινόμενος υπολογιστικός κώδικας μπορεί να βελτιωθεί με κατάλληλες τροποποιήσεις και εφαρμόζοντας παράλληλο προγραμματισμό, για την τρισδιάστατη μελέτη ροής γύρω από διαδοχικές αγροτικές κατασκευές.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aldrich, R.A., Wells D.A. 1979. Estimating Wind Loads on Glasshouses, Transactions of the ASAE. 1122-1128.

Blackmore, PA, Tsokri, E. 2006. Wind loads on curved roofs. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 94(11): 833-844.

Dados, J.N., Fragos, V.P., Ntinas, G.K., Papoutsi-Psychoudaki, S., Nikita-Martzopoulou, C. (2011). Numerical simulation of airflow over two successive tunnel greenhouses. Int. Agrophysics. 25(4), 333-342.

Fragos, V.P., Psychoudaki S., P., Malamataris, N.A. 1997. Computer-aided analysis of flow past a surface-mounted obstacle, Int. J. Num. Methods Fluids. 25: 495-512.

Ginger, J.D., Holmes, J.D. 2003. Effect of building length on wind loads on low-rise buildings with a steep roof pitch, J. Wind Eng. Ind. Aerod. 91: 1377-1400.

Gresho P.M. and Sani R.L. 1998. Incompressible Flow and The Finite Element Method. Wiley. New York. U.S.A.

EN-13031-1:2001. Greenhouses Design and construction-Part 1: Commercial production greenhouses.

Kateris D.L., Kotsopoulos T.A,. Fragos V.P, Nikita-Martzopoulou Ch, June 5-10, 2012 " Numerical Estimation of Pressure Coefficients over Single and Multispan Duo Pitched Roof Greenhouses", Acta Horticulture (ISHS), vol 952, pp 155-161.

Kateris, D.L., Fragos, V.P., Kotsopoulos, T.A., Martzopoulou, A.G., Moshou, D. (2012). Calculated external pressure coefficients on livestock buildings and comparison with Eurocode 1. Wind Struct. 15 (6), 481-494.

Malamataris, N.A. 1991. Computed-aided Analysis of Flows on Moving and Unbounded domains: Phase-change Fronts and Liquid Leveling, Ph. D. Thesis, Univ. of Mich. Ann Arbor.

Mistriotis, A., Briassoulis, D. 2002. Numerical estimation of the internal and external aerodynamic coefficients of a tunnel greenhouse structure with openings. Comput. Electron. Agr. 34(1-3): 191-205.

Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Alvarez, A.J. 2004. Measurement and simulation of climate inside Almeria type greenhouse using computational fluid dynamics. Agricultural and Forest Meteorology. 125: 33-51.

Owen, D.R.J., Hinton, E. 1980. Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice. Pineridge Pr. Ltd.: Swansea. U.K.

Papanastasiou, T.C., Malamataris, N., Ellwood, K. 1992. A new outflow boundary condition. Int. J. Num. Methods Fluids. 14: 587–608.

Reichrath, S., Davies, T.W. 2002. Computational fluid dynamics simulations and validation of the pressure distribution on the roof of a commercial multi-span Venlo-type glasshouse. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 90(3): 139-149.

Robertson, A P., Roux, Ph., Gratraud, J., Scarascia, G., Castellano, S., Dufresne de Virel, M., Palier P. 2002. Wind pressures on permeably and impermeably-clad structures, . J. Wind Eng. Ind. Aerod. 90: 461-474.

Shklyar, A., Arbel, A. 2004. Numerical model of the three-dimensional isothermal flow patterns and mass fluxes in a pitched-roof greenhouse. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 92(12): 1039-1059.

Tieleman, H.W., 2003. Wind tunnel simulation of wind loading on low-rise structures: a review. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 91(12-15): 1627-1649.

Vassiliou, N., N., Martzopoulos, G., Nikita-Martzopoulou C. 2000. Determination of natural ventilation rate in a double span arch type greenhouse. Acta Hort. 534: 171-180.

Zienkiewicz C.O. 2000. Finite element, 5rd ed, Mc Graw Hill, Inc New York et al. U.S.A.

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΤΟΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Ελβανίδη Α.[1], Κατσούλας Ν.[1]✉, Μπαρτζάνας Θ.[2], Κίττας Κ.[1]

[1]*Παν/μιο Θεσσαλίας, Τμ. Γεωπονίας Φυτ. Παραγ. και Αγρ. Περιβ., Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνίας Μαγνησίας, ✉nkatsoul@uth.gr*

[2]Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας (ΙΕΤΕΘ), Τμήμα Αγροτεχνολογίας, Δημητριάδος 95 και Π. Μελά, 38333, Βόλος

Περίληψη

Η συνεχής, άμεση και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση της ανταπόκρισης του φυτού, υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές και ριζικές συνθήκες, μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση του εναέριου και ριζικού περιβάλλοντος της καλλιέργειας, ελέγχοντας έτσι την εξέλιξη των παραμέτρων αυτών. Ο συνδυασμός της χρήσης υπερφασματικού οπτικού αισθητήρα, που μετράει την ανάκλαση του φυτού από απόσταση και μοντέλων δέντρου ταξινόμησης κρίνεται πρακτικά κατάλληλος λόγω αυτοματοποίησης της λήψης αποφάσεων. Στη συγκεκριμένη έρευνα, αξιολογήθηκαν δυο διαφορετικά σενάρια ταξινόμησης των δεικτών ανάκλασης, μέσω επιβλεπόμενης μεθόδου μηχανικής εκμάθησης, με βάση την ταξινόμηση δέντρου λήψης αποφάσεων, ώστε να επιχειρηθεί διάκριση μεταξύ των (α) μη καταπονημένων φυτών, (β) φυτών υδατικής καταπόνησης και (γ) καταπόνησης αζώτου. Για το λόγο αυτό, μετρήσεις ανάκλασης πραγματοποιήθηκαν σε φυτά τομάτας διαφορετικών μεταχειρίσεων υδατικής και αζωτούχας καταπόνησης.

Λέξεις κλειδιά: Δέντρο ταξινόμησης, δείκτες, υδατική καταπόνηση, καταπόνηση αζώτου.

CLASSIFICATION OF REFLECTANCE INDICES TO IDENTIFY WATER AND NITROGEN STRESS IN GREENHOUSE TOMATO CROP

Elvanidi A.[1], Katsoulas N.[1]✉, Bartzanas T.[2], Kittas C.[1]

[1]*University of Thessaly, Dep. Agr. Crop Prod. & Rur., Fytokoy Street, N. Ionia Magnesias 38446, ✉nkatsoul@uth.gr*

[2]*Center for Research & Technology (CERTH), Institute for Research & Technology – Thessaly, Department of Agrotechnology, 95 Dimitriados & P. Mela Street, 38333, Volos*

Abstract

Direct and real-time monitoring of plant responses and processes, under specific environmental and root conditions, could help to improve climate and irrigation control, and overall production over time and space. Hyperspectral remote sensing combined with a classification tree model, gave the opportunity for a real-time and cost effective way, to undertake large scale monitoring, in open field and greenhouse covered canopy. In this research, a comparison of two approaches for classification trees, in different fertigation treatments were imposed on tomato plants, of three predicted category: a) control plants under no fertigation stress, b) water stressed plants, and c) nitrogen stressed plants. For this reason, a large number of reflectance indices obtained from water and nitrogen stressed plants.

Key words: Classification tree, index, water stress, nitrogen stress.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι επιδράσεις που δέχονται τα φυτά από το περιβάλλον, διακρίνονται σε βιοτικές και αβιοτικές ή φυσικοχημικές και επηρεάζουν τις αλληλεπιδράσεις του φυτού, με το φυσικοχημικό περιβάλλον, στο οποίο αναπτύσσεται. Για να αποφευχθούν οι συνθήκες εκείνες που θα συντελέσουν στην εκδήλωση οποιασδήποτε μορφής καταπόνησης του φυτού, απαιτείται η βέλτιστη διαχείριση του εναέριου και ριζικού περιβάλλοντος της καλλιέργειας. Η συνεχής, άμεση και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση της ανταπόκρισης του φυτού, υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές και ριζικές συνθήκες, μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση αυτή, ρυθμίζοντας έτσι την αποδοτική δυναμική της καλλιέργειας. Η έγκαιρη ανίχνευση των ποικίλων καταπονήσεων μπορεί να επιτευχθεί, με την ανάπτυξη ενός συστήματος ανίχνευσης, εξοπλισμένο με μία πλατφόρμα πολλαπλών αισθητήρων, η οποία θα είναι σε θέση να κινείται πάνω από την καλλιέργεια.

Οι υπάρχων μέθοδοι μέτρησης των άμεσων και έμμεσων παραμέτρων φυσιολογίας του φυτού, όπως είναι ο ρυθμός φωτοσύνθεσης, η συγκέντρωση της χλωροφύλλης και η υγρασία στο περιβάλλον της ρίζας, είναι αρκετά περίπλοκοι και προβληματικοί, καθώς περιορίζονται σε σχετικά μικρή κλίμακα, καθιστώντας την εφαρμογή τους σε μια εμπορικής κλίμακα πολλαπλών αισθητήρων, μάλλον ανέφικτη. Η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων τεχνικής υπολογιστικής νοημοσύνης, όπως είναι ένα υπερφασματικό οπτικό σύστημα, το οποίο θα παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη μορφολογία (μέγεθος, σχήμα, υφή), τη φασματική ιδιότητα (χρώμα, θερμοκρασία, υγρασία) και τα δεδομένα ανάπτυξης, μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός συστήματος παρακολούθησης της φυσιολογίας της καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο, βασισμένο σε πλατφόρμες πολλαπλών αισθητήρων (Story & Kacira, 2015).

Με την άμεση διαθεσιμότητα των επίγειων αισθητήρων τηλεπισκόπισης συνεχής φασματικής ανάλυσης, ο σκοπός της μέχρι τώρα έρευνας ήταν η επιλογή των κατάλληλων ζωνών ή η σύνθεση εκείνων των δεικτών ανάκλασης (δείκτες ανάκλασης είναι ο λόγος ή κανονικοποίηση δύο ή περισσότερων περιοχών του φάσματος), που θα εκτιμούν από απόσταση τις άμεσες ή έμμεσες παραμέτρους της φυσιολογίας του φυτού (Kim et al., 2010; Kruse et al., 2004; Jain et al., 2007). Λόγω όμως της έντονης αλληλοεπικάλυψης που παρατηρείται μεταξύ των δομών του φύλλου, είναι αρκετές οι περιπτώσεις, όπου δεν είναι ξεκάθαρη η προέλευση της μεταβολής της ανάκλασης. Έρευνες έχουν δείξει (Amatyas et al., 2012; Genc et al., 2011; Jones et al., 2004) κοινές περιοχές του φάσματος, όπως είναι η κόκκινη, να ανιχνεύουν διαφορετικές παραμέτρους της φυσιολογίας του φυτού. Έτσι, αν και αρκετοί δείκτες έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί να εντοπίζουν υδατική καταπόνηση ή καταπόνηση αζώτου, ο καθένας από αυτούς παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όταν χρησιμοποιείται μεμονωμένα.

Για να επιτευχθεί διακριτός διαχωρισμός των συμβάντων, επιτακτική είναι η ανάγκη εκπαίδευσης ενός μοντέλου εποπτευόμενης μάθησης, όπου μέσω ενός αλγορίθμου κατηγοριοποίησης, θα είναι σε θέση να παραλείψει τον πιθανό θόρυβο του συνόλου των δεδομένων (είτε λόγω της αλληλοεπικάλυψης των στοιχείων στη δομή του φύλλου, είτε λόγω των σφαλμάτων της μέτρησης), ελαχιστοποιώντας τη σύγχυση που παρατηρείται μεταξύ των δεικτών ανάκλασης, εντοπίζοντας με αυτό τον τρόπο διακριτά, τις ποικίλες μορφές της καταπόνησης της καλλιέργειας. Η κατηγοριοποίηση των δεδομένων μέσω δέντρων ταξινόμησης (Classification Tree), είναι μια από τις μεθόδους εκπαίδευσης με επίβλεψη που είναι σε θέση να υπερνικά πολλά από τα ποσοτικά προβλήματα ανάλυσης, με ικανοποιητικά αποτελέσματα (Goel et al., 2003).

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η εκπαίδευση και η αξιολόγηση δέντρων ταξινόμησης (CT), που συνδυάζουν την πληροφορία που προκύπτει, από συσχετίσεις μεταξύ άμεσων και έμμεσων παραμέτρων φυσιολογίας του φυτού (όπως είναι η χλωροφύλλη και η υγρασία υποστρώματος) με ευρέως χρησιμοποιούμενους δείκτες ανάκλασης [με βάση τον σχετικό κατάλογο που συνέταξαν οι Katsoulas et al. (2016)]. Σκοπός είναι να αναδειχθεί το βέλτιστο δέντρο ταξινόμησης, σύμφωνα με το οποίο θα πραγματοποιείται πρόωρη ανίχνευση ποικίλων τύπων καταπόνησης, σε συνθήκες θερμοκηπίου (όπως είναι οι περιπτώσεις μη καταπονημένων φυτών, φυτών υδατικής καταπόνησης και φυτών καταπόνησης αζώτου). Στην παρούσα εργασία, η σύνθεση των δέντρων ταξινόμησης χωρίστηκε σε δύο φάσεις: (α) εκπαίδευση του μοντέλου και (β) αξιολόγηση του μοντέλου, ενώ η ανάλυση της αποτελεσματικότητας του κάθε μοντέλου, έγινε συγκρίνοντας το βαθμό του ρίσκου επικινδυνότητας και το ποσοστό πρόβλεψης των μοντέλων μεταξύ τους.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η ανάλυση της συγκεκριμένης έρευνας πραγματοποιήθηκε, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ανάκλασης της πειραματική διαδικασία που έλαβε χώρα, από τον Αύγουστο του 2014 έως τον Απρίλιο του 2016, στο θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ο θάλαμος ανάπτυξης φυτών εμβαδού 28m^2, βρίσκεται στο αγρόκτημα της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου, στο Βελεστίνο (συντεταγμένες: 39° 44’ Β, 22° 79’ Α, υψόμετρο 85m) και αποτελεί κλειστό περιβάλλον ελεγχόμενων συνθηκών, με ρυθμιζόμενη την ένταση της ακτινοβολίας μέσω λαμπτήρων νατρίου. Για τον σκοπό των συγκεκριμένων πειραμάτων, φυτεύτηκε τομάτα (*Solanum Lycopersium*), ποικιλία “Ελπίδα”. Το θρεπτικό διάλυμα [K 7.5 mmol/L, Ca 4.8 mmol/L, Mg 2.5 mmol/L, NO_3 12.9 mmol/L, NH_4 1 mmol/L, H_2PO_4 1.5 mmol/L] τροφοδοτήθηκε στην καλλιέργεια, μέσω του συστήματος στάγδην (8 αρδευτικά φαινόμενα ανά μέρα).

Η καταγραφή των δεδομένων αφορούσε φυτά τεσσάρων επιπέδων υδατικής καταπόνησης, [(α)100% (C100) και (β) 50% κάλυψη των αναγκών σε νερό (C50), καθώς και δύο κατηγορίες υδατικής καταπόνησης όπου τα φυτά αφήνονται να καταπονηθούν προοδευτικά αφαιρώντας τους σταλάκτες από το υπόστρωμα για αρκετές ημέρες, σε φυτά που προηγουμένως αρδεύονταν με συνεχή κάλυψη (γ) 100% (WS100) και (δ) 50% των αναγκών τους σε νερό (WS50)] και τριών επιπέδων καταπόνησης αζώτου [(α) 100% κάλυψη των αναγκών σε άζωτο (C100), (β) 1/3 κάλυψη της αρχικής δόσης αζώτου (NS1/3), σε φυτά που προηγουμένως λιπαίνονταν με πλήρης κάλυψηκαι (γ) μηδενική κάλυψη της αρχικής δόσης αζώτου (NS0), σε φυτά που προηγουμένως λιπαίνονταν με 1/3 δόση]. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει το ημερήσιο πρόγραμμα καταπονήσεων που εφαρμόστηκε σε κάθε μεταχείριση.

Για τη λήψη των δεδομένων ανάκλασης χρησιμοποιήθηκαν (α) υπερφασματική κάμερα Imspec V10 (Spectral Imaging Ltd, Finland) (φασματική ανάλυση 400 nm-1000 nm) και (β) φορητό σπεκτροραδιόμετρο (Analytical Spectral Devices, Boulder, CO, USA) (φασματική ανάλυση 350 nm-2500 nm). Η υγρασία του υποστρώματος (ϑ, %) εκτιμήθηκε μέσω φορητών αισθητήρων χωρητικότητας υγρασίας (WCM, Grodan Inc., The Netherlands), ενώ η συγκέντρωση χλωροφύλλης (Chl_a, μg cm^{-2}) μετρήθηκε μέσω αισθητήρα, που πραγματοποιεί μετρήσεις στο πεδίο, όντας σε επαφή με το φύλλο (CCM 200, Opti-Science, NH, USA). Οι Katsoulas et al. (2014; 2016) και Elvanidi et al. (2016a; 2016b) δίνουν επιπλέον πληροφορίες σχετικά με το πειραματικό πρωτόκολλο και τη διαδικασία της επεξεργασίας των δεδομένων που ακολουθήθηκε.

Πίνακας 1. Ημερήσιο πρόγραμμα υδατικής και αζωτούχας καταπόνησης (C: μεταχείριση μη καταπονημένων φυτών, WS: μεταχείριση υδατικά καταπονημένων φυτών, NS: μεταχείριση καταπονημένων φυτών λόγω αζώτου).

Καταπόνηση	**Υδατική**		**Υδατική**			**Αζώτουχα**		
Αισθητήρας	**Σπεκτροραδ.**		**Υπερφασματική κάμερα**			**Υπερφασματική κάμερα**		
Day	**C100**	**WS100**	**C100**	**WS100**	**WS50**	**Day**	**C100**	**NS**
1	100%	100%	100%	100%	100%	**1**	100%	100%
2	100%	100%	100%	100%	50%	**2**	100%	100%
3	100%	100%	100%	100%	50%	**3**	100%	100%
4	100%	0%	100%	0%	0%	**4**	100%	100%
5	100%	0%	100%	0%	0%	**5**	100%	100%
6	100%	0%	100%	0%	0%	**6**	100%	100%
7	100%	0%	100%	0%	0%	**7**	100%	100%
8	100%	0%	100%	0%	50%	**8**	100%	100%
9	100%	100%	100%	100%	50%	**9**	100%	(1/3)
10			100%	100%	50%	**10**	100%	(1/3)
11-15			100%	100%	50%	**11**	100%	(1/3)
16			100%	100%	50%	**12**	100%	(1/3)
17			100%	100%	50%	**13**	100%	(1/3)
18			100%	0%	0%	**14**	100%	(1/3)
19			100%	0%	0%	**15-25**	100%	(1/3)
20			100%	0%	0%	**26-34**	100%	(1/3)
21			100%	0%	0%	**35-40**	100%	0%
22			100%	0%	50%			
23-24			100%	100%	50%			

Στη συγκεκριμένη έρευνα, δέντρο ταξινόμησης συντάχθηκε μέσω της μεθόδου παλινδρόμησης (CRT). Το μοντέλο βαθμονομήθηκε, χρησιμοποιώντας δεδομένα εκπαίδευσης, ενώ επικυρώθηκε, σε διαφορετικό σύνολο δεδομένων. Συγκεκριμένα, το 75% του συνόλου (n = 141 σύνολο δεδομένων) χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα εκπαίδευσης και το 25% χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα για την αξιολόγησή του. Οι εσωτερικοί κόμβοι του δέντρου που προέκυψαν, αντιστοιχούσαν σε κάποιο γνώρισμα βασισμένο στη μεταβολή των δεικτών ανάκλασης. Στη συγκεκριμένη μελέτη, οι δείκτες ανάκλασης mrNDVI=(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2*R_{445}), TCARI=3[(R_{700}-R_{670})-0.2*(R_{700}-R_{550})*(R_{700}/R_{670})], MSAVI=1/2*(2*(R810+1)*2-8*(R_{810}-R_{690})), OSAVI=(1+0.16)*(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670}+0.16) και PRI=(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570}) ήταν τα διακριτά χαρακτηριστικά της ανεξάρτητης μεταβλητής που μελετήθηκαν. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω δείκτες για την εκπαίδευση του CT μοντέλου, ήταν γιατί παρουσίασαν γραμμική συσχέτιση με τουλάχιστον μια από τις παραμέτρους της φυσιολογίας του φυτού που μελετήθηκαν (όπως Chl_a και θ), με συντελεστή συσχέτισης μεγαλύτερο του 0.60.

Ως εξαρτημένη μεταβλητή, η οποία αποτελεί και τη συνθήκη ανάλυσης, ορίσθηκε ο τύπος καταπόνησης, όπου αφορούσε: (α) μη καταπονημένα φυτά, (β) υδατικά καταπονημένα φυτά, και (γ) φυτά που υφίστανται καταπόνηση αζώτου. Κάθε κατηγορία χαρακτηρίστηκε ως “C” (μη καταπονημένα φυτά), “WS” (υδατικά καταπονημένα φυτά) και “NS” (φυτά καταπόνησης αζώτου) για να απαντήσει στην ερώτηση, σε ποια μορφή καταπόνησης βρίσκεται η καλλιέργεια. Η κατηγοριοποίηση της εξαρτημένης μεταβλητής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεταβολή της υγρασίας υποστρώματος και της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης. Όταν η διαφορά θ μεταξύ των καταπονημένων και μη φυτών ήταν στατιστικά σημαντική (θ>3.5%) τότε η καλλιέργεια ορίσθηκε ως “WS”. Αντίστοιχα, όταν η διαφορά Chl_a μεταξύ των καταπονημένων και μη φυτών ήταν μεγαλύτερη του 2.8 % ($p<0.05$), τότε η καλλιέργεια ορίσθηκε ως “NS”. Τα μοντέλα

ταξινόμησης προέκυψαν, μέσω λογισμικού SPSS Statistics 21. Ο Loh (2011) και ο οδηγός IBM SPSS Statistics 21 (2012) δίνουν περισσότερες πληροφορίες για τη μέθοδο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

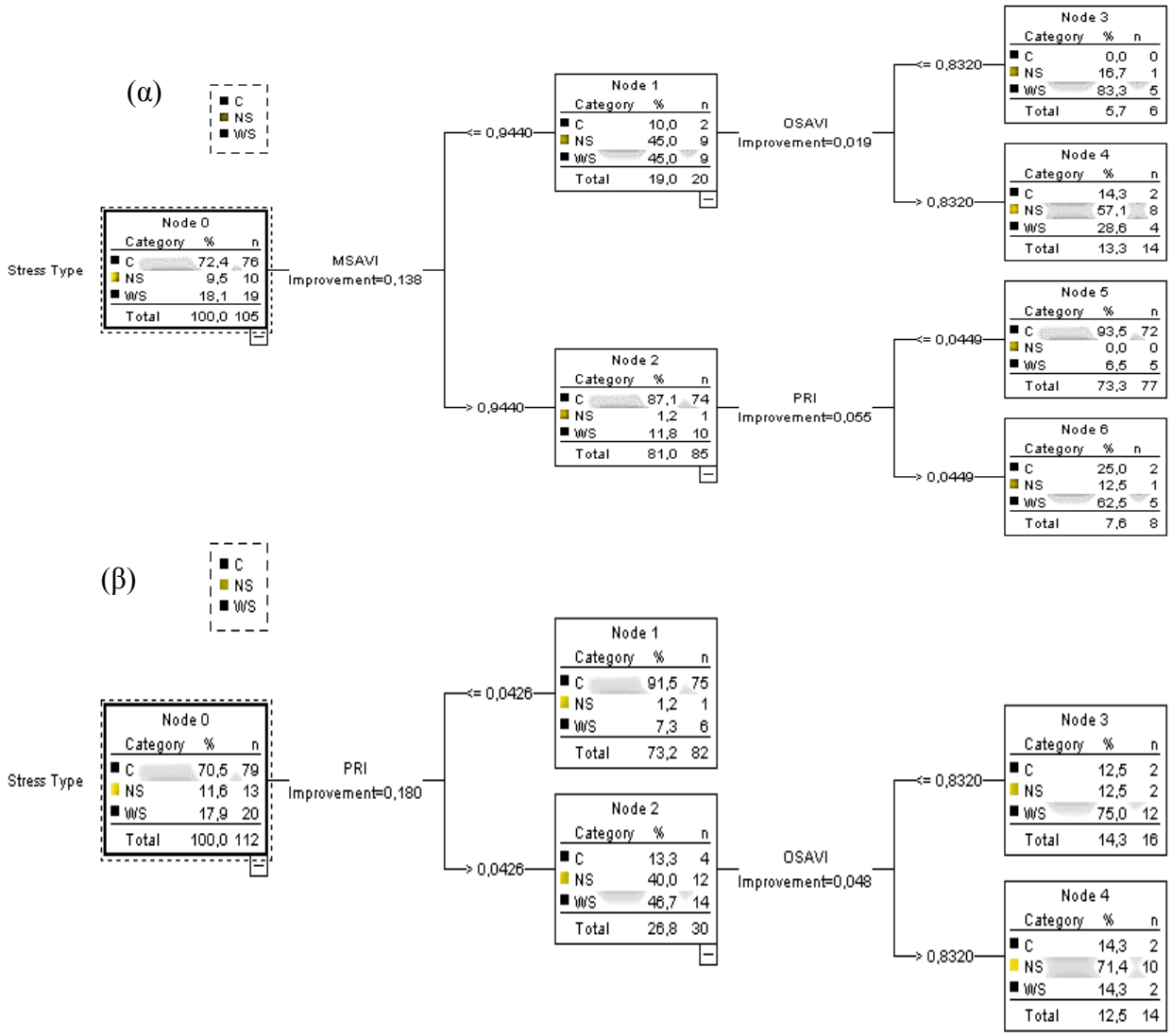
Στο Διάγραμμα 1α-β, παρατηρούνται δυο διαφορετικές δομές (Δομές 1 και 2) δέντρων ταξινόμησης των δεδομένων εκπαίδευσης, οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικό δείκτη εκκίνησης, ανάλογα με το πιθανό σενάριο, ενώ διαφορετικός είναι και ο αριθμός των κόμβων που παρουσιάζεται σε κάθε περίπτωση.

Συγκεκριμένα στο Διάγραμμα 1α, παρουσιάζεται η δομή ενός δέντρου ταξινόμησης (Δομή 1), με δείκτη εκκίνησης το MSAVI, και αποτελείται από εφτά κόμβους: (α) τον Κόμβο 0 όπου είναι η ρίζα του δέντρου, (β) δύο κόμβους με τουλάχιστον ένα παιδί (Κόμβος 1 και 2) και (γ) τέσσερις τερματικούς κόμβους (Κόμβος 3, 4, 5 και 6). Σύμφωνα με την ανάλυση του μοντέλου αυτού, υπολογίστηκε ότι το 19% των δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δέντρου, παρουσίασαν τιμή του MSAVI ≤0.944. Σε αυτή την περίπτωση, η ένδειξη του δείκτη OSAVI λήφθηκε υπόψη, για τον καθορισμό του τύπου της καταπόνησης των φυτών. Προέκυψε ότι, όταν η τιμή του OSAVI ήταν ≤0.832, τότε το δέντρο επέστρεψε “WS” στο 83.3% του δείγματος (Κόμβος 3). Στην αντίθετη περίπτωση, όπου η τιμή του OSAVI ήταν >0.832, ένα ποσοστό των δεδομένων εκπαίδευσης, μεγαλύτερο του 50%, βρίσκεται σε καταπόνηση αζώτου (NS) (Κόμβος 4). Οι Κόμβοι 3 και 4 θεωρούνται τερματικοί, καθώς οι κόμβοι δεν υφίστανται περαιτέρω διαχωρισμό. Από την άλλη πλευρά, όταν η τιμή του MSAVI ήταν >0.944, η τιμή του PRI λήφθηκε υπόψη. Σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο επέστρεψε “C” (93.5%), όταν η τιμή του PRI ήταν ≤0.045, καθώς καμία μορφή καταπόνησης ήταν εμφανής. Στην περίπτωση που η τιμή του PRI ήταν >0.045, το μεγαλύτερο ποσοστό του δείγματος εκπαίδευσης (62.5%) παρουσίασε υδατική καταπόνηση (WS). Παρόμοια με τους Κόμβους 3 και 4, οι Κόμβοι 5 και 6 θεωρούνται τερματικοί.

Στο Διάγραμμα 1β, παρουσιάζεται η δομή ενός δέντρου ταξινόμησης (Δομή 2), με δείκτη εκκίνησης το PRI. Το δέντρο αποτελείται από πέντε κόμβους (τη ρίζα, ένα κόμβο με τουλάχιστον ένα παιδί και τρεις τερματικούς κόμβους). Σύμφωνα με την ανάλυση του συγκεκριμένου μοντέλου, υπολογίστηκε ότι το 91.5% των δεδομένων του PRI (≤0.042), που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δέντρου ταξινόμησης, δεν παρουσίασαν κάποια μορφή καταπόνησης (C), όταν όμως η τιμή του PRI ήταν >0.042, η ένδειξη του OSAVI λήφθηκε υπόψη. Προέκυψε ότι, όταν η τιμή του OSAVI ήταν ≤0.832, τότε το δέντρο επέστρεψε “WS” στο 75.0% δείγματος (κόμβος 3). Στην αντίθετη περίπτωση, όπου η τιμή του OSAVI ήταν >0.832, το δέντρο επέστρεψε “NS” κατά 71.4% (Κόμβος 4).

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει την εκτίμηση του ρίσκου επικινδυνότητας και το ποσοστό πρόβλεψης, των δεδομένων εκπαίδευσης και δεδομένων αξιολόγησης των διαφορετικών δομών. Η εκτίμηση του ρίσκου επικινδυνότητας των τριών διαφορετικών δομών του δείγματος εκπαίδευσης αντανακλάται σε 0.14 και 0.16 για το πρώτο και δεύτερο δέντρο ταξινόμησης αντίστοιχα. Η εκτίμηση αυτή φανερώνει ότι, το ποσοστό πρόβλεψης του κάθε μοντέλου σφάλει στο 14% και 16% των περιπτώσεων του δείγματος. Το ποσοστό χαρακτηρίζεται σχετικά μικρό και για τις δυο περιπτώσεις. Επιπλέον, μικρές διαφορές παρατηρούνται μεταξύ των ποσοστών πρόβλεψης των διαφορετικών δομών. Συγκεκριμένα, το ποσοστό πρόβλεψης της Δομής 1 και 2, παρατηρήθηκε ίσο με 85.7% και 86.6%, αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτό ερμηνεύει κατά προσέγγιση, ότι το δέντρο της Δομής 2 πρόβλεψε αποτελεσματικότερα, με μικρές ωστόσο διαφορές, από τη Δομή 1, τις περιπτώσεις που εμφάνισαν ή όχι, κάποια μορφή καταπόνησης. Τα δέντρα ταξινόμησης

και των δυο δομών ωστόσο, υστερούσαν αρκετά ως προς τη δυνατότητα εκτίμησης των υδατικά καταπονημένων φυτών, καθώς το ποσοστό πρόβλεψης κυμάνθηκε μέχρι 60.0%.

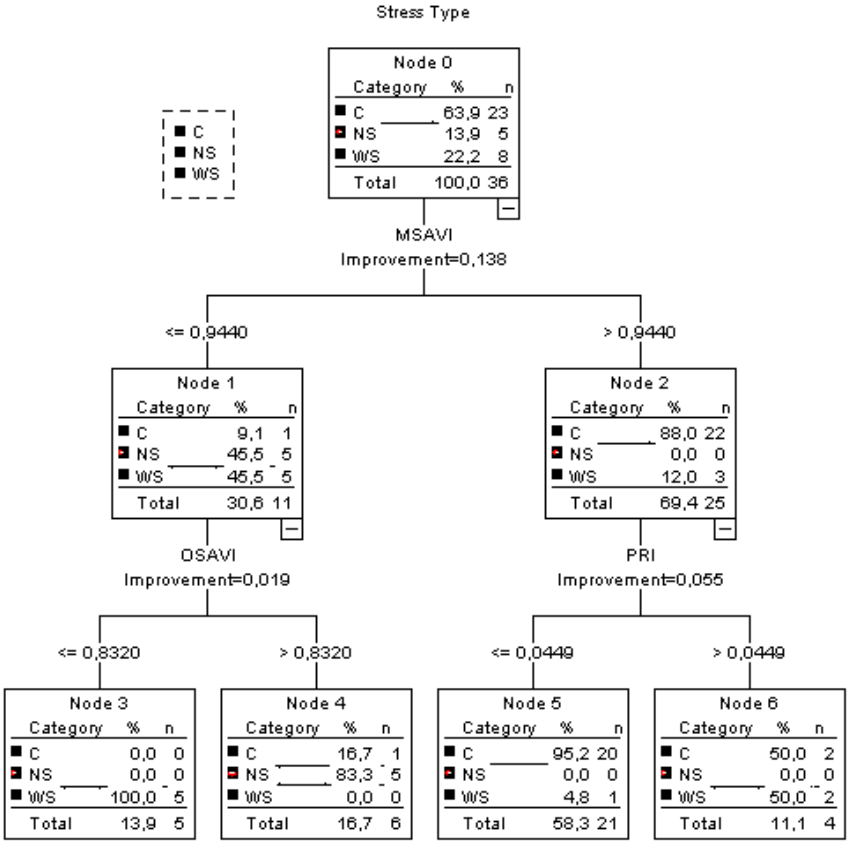


Διάγραμμα 1. (α) Δομή 1 και (β) Δομή 2 δέντρου ταξινόμησης των δεδομένων εκπαίδευσης, με εξαρτημένη μεταβλητή τον τύπο καταπόνησης της καλλιέργειας (C: φυτά χωρίς καταπόνηση, NS: φυτά καταπόνησης αζώτου, WS: φυτά υδατικής καταπόνησης) και ανεξάρτητη μεταβλητή τους δείκτες ανάκλασης.

Για την επιλογή του αποτελεσματικότερου δέντρου ταξινόμησης, το ρίσκο εκτίμησης επικινδυνότητας και το ποσοστό πρόβλεψης των δεδομένων του δείγματος αξιολόγησης, λήφθηκε υπόψη. Προκύπτει ότι, το δέντρο ταξινόμησης της Δομής 2, δεν παρουσίασε ικανοποιητικό βαθμό του ρίσκου επικινδυνότητας και του ποσοστού πρόβλεψής, στο σύνολο των δεδομένων αξιολόγησης (31.0% και 69.0% αντίστοιχα), παρότι οι αντίστοιχες τιμές στο σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης ήταν αρκετά ικανοποιητικές (13.4% και 86.6%). Σύμφωνα με τον Πίνακα 2, το δέντρο ταξινόμησης της Δομή 1 παρουσίασε ένα ικανοποιητικό βαθμό ρίσκου επικινδυνότητας (11.1%), με το μεγαλύτερο ποσοστό πρόβλεψης, ίσο με 88.9%. Στο Διάγραμμα 2 παρατηρείται η διάταξη του δέντρου ταξινόμησης της Δομής 1 που προέκυψε από το δείγμα αξιολόγησης.

Πίνακας 2. Εκτίμηση του ρίσκου επικινδυνότητας και ποσοστού πρόβλεψης των ορθών και εσφαλμένων συμβάντων για κάθε τύπο καταπόνησης.

Δείγμα	Δέντρο ταξινόμησης (CT)	Εκτίμηση ρίσκου επικινδυνότητας	Ποσοστό πρόβλεψης C	NS	WS	Συνολικά
Εκπαίδευσης	**Δομή 1**	0.143	94.7%	80.0%	52.6%	85.7%
	Δομή 2	0.134	94.9%	76.9%	60.0%	86.6%
Αξιολόγησης	**Δομή 1**	0.111	87.0%	100.0%	87.5%	88.9%
	Δομή 2	0.310	85.0%	100.0%	14.3%	69.0%



Διάγραμμα 2. Δομή 1 δέντρου ταξινόμησης των δεδομένων αξιολόγησης, με εξαρτημένη μεταβλητή τον τύπο καταπόνησης της καλλιέργειας (C: φυτά χωρίς καταπόνηση, NS: φυτά καταπόνησης αζώτου, WS: φυτά υδατικής καταπόνησης) και ανεξάρτητη μεταβλητή τους δείκτες ανάκλασης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης απέδειξαν ότι ο αλγόριθμος παλινδρόμησης (CRT) που χρησιμοποιήθηκε, για το σχηματισμό δέντρων ταξινόμησης, παρείχε δυναμικά μοντέλα πρόωρης ανίχνευσης ποικίλων τύπων καταπόνησης (μη καταπονημένα φυτά, φυτά υδατικής καταπόνησης και φυτά καταπόνησης αζώτου). Από τα δυο πιθανά σενάρια που μελετήθηκα, η Δομή 1 παρουσίασε το υψηλότερο ποσοστό πρόβλεψης του τύπου καταπόνησης και στα δύο σύνολα του δείγματος εκπαίδευσης και αξιολόγησης, με 85.7% και 88.9% αντίστοιχα. Αυτά τα ευρήματα ανοίγουν νέες δυνατότητες παρακολούθησης από απόσταση, της ανταπόκρισης των άμεσων και έμμεσων παραμέτρων φυσιολογίας του φυτού, υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές και ριζικές συνθήκες. Μέσω της χρήσης του μοντέλου εποπτευόμενης μάθησης, βελτιώνονται οι γνώσεις σχετικά με τη

σχέση μεταξύ των δεικτών ανάκλασης και των παραμέτρων αυτών, για την ανίχνευση των ποικίλων μορφών καταπόνησης.

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη έρευνα χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα και το Εθνικό Ταμεία μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - έργο «GreenSense», ΑΡΙΣΤΕΙΑ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Amatya, S., Karkee, M., Alva, A. K., Larbi, P., & Adhikari, B. (2012). Hyperspectral imaging for detecting water Stress in potatoes. *American Society of Agricultural and Biological Engineers, 12-1345197*.

Elvanidi, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., Ferentinos, K. P., & Kittas, C. (2016a). Assessment of crop water status by means of crop reflectance. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Organic Greenhouse Horticulture, Apri 11-14, 2016 Izmir, Turkey. Acta Horticulturae, in press.

Elavnidi, A. Katsoulas, N., Bartzanas, T., Ferentinos, K. P., & Kittas, C. (2016b). Crop water status assessment in controlled environment using crop reflectance and temperature measurements. Precision Agriculture, *18* (3), 332-349.

Genc, L., Demirel, K., Camoglu, G., Asik, S., & Smith, S. (2011). Determination of plant water stress using spectral reflectance measurements in watermelon (*Citrullus vulgaris*). *Journal of Agriculture and Environmental Science, 11(2),* 296-304.

Goel, P. K., Prasher, S. O., Patel, S. O., Landry, J. A., Bonnell, R. B., & Viau, A. A. (2003). Classification of hyperspecral data by decisions trees and artificial neural networks to identify weed stress and nitrogen status of corn.

Jain, N., Ray, S. S., Singh, J. P., & Panigrahy, S. (2007). Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. *Precision Agriculture, 8,* 225–239.

Jones, C. L., Weckler, P. R., Maness, N. O., Stone, M. L., & Jayasekara, R. (2004). Estimating water stress in plant using hyperspectral sensing. *Annual International Meeting Sponsored By ASAE/CSAE, Paper Number 043065, 2-11*.

IBM SPSS Decision Trees 21 guide, Copyright IBM Corporation 1989, 2012.

Katsoulas, N., Elvanidi A., Ferentinos, K. P., Kacira, M., Bartzans, T., & Kittas, C. (2016). Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review. *Biosystem Engineering, 151,* 374-398.

Katsoulas, N., Elvanidi, A., Ferentinos, K. P., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2014). Calibration methodology of a hyperspectral imaging system for greenhouse plant water stress estimation. In Proceedings of the 6th Balkan symposium on Vegetables and Potatoes, September 29 e October 2, 2014 Zagreb, Croatia. Acta Horticulturae, (ISHS) 1142,119-126.

Kim, Y., Glenn, D. M., Park, J., Ngugi, H. K., & Lehman, B. L. (2010). Hyperspectral image analysis for plant stress detection. *Annual International Meeting, Paper Number 1009114*.

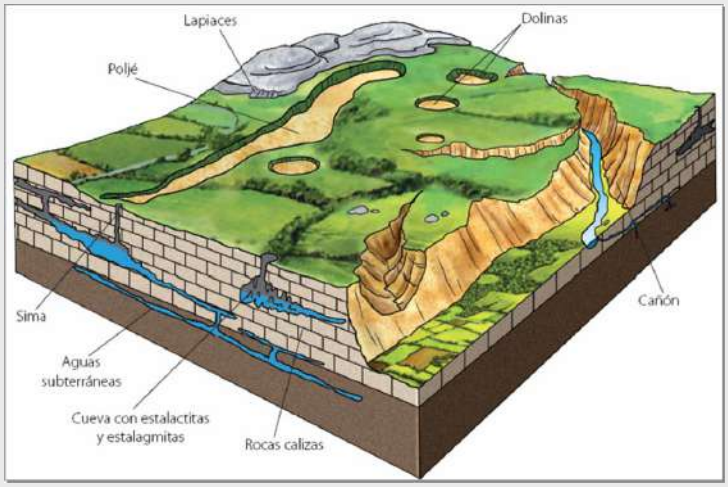
Kruse, J. K. (2004). Remote sensing of moisture and nutrient stress. *Retrospective Theses and Dissertations. Paper 1176.*

Loh, W. Y. (2011). Clasification and regression trees. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, 1(1), 14-23.

Story, D., & Kacira, M. (2015). Design and implementation of a computer vision-guided greenhouse crop diagnostics system. *Machine Vision and Applications, 26, 495-506*.

10ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

ΥΔΑΤΙΚΟΙ & ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ



ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ CS655 ΣΕ ΕΝΑ ΠΗΛΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ

Γ. Κάργας[1]

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,
kargas@aua.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται δύο μοντέλα πρόβλεψης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος (σ_p) σε ένα πηλώδες έδαφος σε πέντε διαφορετικά επίπεδα αλατότητας. Τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι α) Hilhorst (2000) β) Malicki and Walczak (1999). Οι παράμετροι για τον υπολογισμό των τιμών της σ_p από τα δύο μοντέλα αποκτήθηκαν από την διηλεκτρική συσκευή CS655 (Water Content Reflectometer) με συχνότητα λειτουργίας 175 MHZ, η οποία μετρά τη διηλεκτρική διαπερατότητα (ε_s) και τη φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ_b) του εδάφους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τουλάχιστον στις μεγάλες τιμές της σ_p το μοντέλο των Malicki and Walczak δίνει αρκετά καλύτερες προβλέψεις ενώ το μοντέλο του Hilhorst παρουσιάζει αυξανόμενη υποεκτίμηση με την αύξηση των τιμών της σ_p. Επιπλέον φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ της ε_s και της σ_b είναι ισχυρά γραμμική.

Λέξεις-κλειδιά:Εδαφική αλατότητα, μοντέλα, διηλεκτρική διαπερατότητα

COMPARISON BETWEEN TWO MODELS FOR THE PREDICTION OF SOIL SALINITY FROM THE CS655 SENSOR IN A LOAMY SOIL

G. Kargas[1]

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens,
kargas@aua.gr

In the present work, two models for the prediction of soil salinity (σ_p) in a loam soil for five different salinity levels are compared. The two models are a) Hilhorst (2000) b) Malicki and Walczak (1999). The data for the evaluation of σ_p are measured with CS655 dielectric sensor. These parameters are dielectric permittivity (ε_s) and bulk soil electrical conductivity (σ_b). From the results it was shown that the model Malicki and Walczak (1999) was better than the Hilhorst model (2000) especially in large σ_p values, where the Hilhorst model underestimate σ_p values. In addition the relationship ε_s-σ_b was strongly linear in all cases.

Keywords:soil salinity, model, dielectric permittivity

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εδαφική αλατότητα αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Η εκτίμησή της βασίζεται στην μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εκχυλίσματος της εδαφικής πάστας κορεσμού (EC_e) η οποία έχει καθιερωθεί σαν πρότυπη μέθοδος (U.S. Salinity Laboratory 1954). Όμως, η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος (σ_p) είναι καλύτερος δείκτης εκτίμησης της εδαφικής αλατότητας συγκριτικά με την EC_e αφού οι ρίζες των φυτών στην πραγματικότητα με αυτή την αλατότητα έρχονται σε επαφή. Η απόκτηση του εδαφικού διαλύματος για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ_p) είναι πρακτικά πολύ δύσκολή και μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σε υψηλές τιμές της εδαφικής υγρασίας (θ). Για το ξεπέρασμα της δυσκολίας άμεσου προσδιορισμού της σ_p χρησιμοποιούνται έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού οι οποίες βασίζονται στην μέτρηση της θ και της σ_b. Η σ_b μπορεί να θεωρηθεί το αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης της σ_p και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της στερεάς φάσης του εδάφους και της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους.

Ετσι η σ_b εξαρτάται από τη σ_p, την θ και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Για την μέτρηση της σ_b μέχρι πριν 30 περίπου χρόνια χρησιμοποιούνταν κυρίως η συσκευή Wenner και η μέθοδος των τεσσάρων ηλεκτροδίων (Corwin and Hendrickx 2002; Corwin 2002). Η ανάπτυξη της μεθόδου TDR (Time Domain Reflectometry) η οποία παρέχει τη δυνατότητα για αυτόματες και επί τόπου μετρήσεις ταυτόχρονα και στον ίδιο εδαφικό όγκο της σ_b και της θ διευκόλυνε σημαντικά την όλη διαδικασία εκτίμησης της σ_p και συνέβαλε καθοριστικά στη μελέτη της κίνησης των αλάτων στην εδαφική κατατομή.

Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για τη συσχέτιση της σ_b και της σ_p (Archie 1942; Rhoades et al. 1976; Rhoades et al. 1989; Mualem and Friedman 1991; Malicki et al. 1994; Malicki and Walczak 1999; Hilhorst 2000; Amente et al. 2000).

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση του μοντέλου των Malicki and Walczak (1999) και του Hilhorst (2000) ως προς την πρόβλεψη της σ_p σε ένα πηλώδες έδαφος σε διάφορα επίπεδα αλατότητας, όπου τα πειραματικά δεδομένα, σ_b και ε_s, αποκτήθηκαν με τον διηλεκτρικό αισθητήρα CS655.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Το μοντέλο των Malicki and Walczak (1999)

Οι Malicki and Walczak (1999) εισήγαγαν την έννοια του δείκτη αλατότητας (X_s) για την εκτίμηση της εδαφικής αλατότητας. Ο X_s είναι η κλίση της γραμμικής σχέσης σ_b-ε_s (εξίσωση 1) και είναι ανεξάρτητος από την θ για θ>0.2 $cm^3\ cm^{-3}$ (Wilczek et al., (2012)).

$$X_s = \frac{\partial \sigma_b}{\partial \varepsilon_s} \qquad (1)$$

Οι δύο παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του X_s μετρήθηκαν με την συσκευή TDR. Πρακτικά η τιμή του X_s υπολογίζεται από την εξίσωση 2

$$X_s = \frac{\sigma_b - 0.08}{\varepsilon_s - 6.2} \qquad (2)$$

όπου σ_b=0.08 $dS.m^{-1}$ και ε_s=6.2 είναι το σημείο σύγκλισης των ευθειών $\sigma_b\left(\varepsilon_s;\sigma_p\right)$.

Οι Malicki and Walczak (1999) αναφέρουν ότι ο X_s εξαρτάται κυρίως από την τιμή της σ_p και την υφή του εδάφους.

Η τιμή της σ_p για τα ανόργανα εδάφη μπορεί να υπολογιστεί εάν η τιμή του X_s και η κλίση ($l = \frac{\partial X_s}{\partial EC_i}$) της γραμμικής σχέσης μεταξύ του X_s και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του

διαλύματος διαβροχής (EC_i) του εδάφους είναι γνωστή. Η τιμή της κλίσης l επηρεάζεται από τον τύπο του εδάφους και μπορεί να υπολογιστεί σαν συνάρτηση της περιεκτικότητας σε άμμο του εδάφους από μια εμπειρική σχέση

$$l = 0.0057 + 0.000071S \quad (3)$$

Η προτεινόμενη σχέση για τον υπολογισμό της σ_p με την βοήθεια της εξίσωσης (2) είναι η εξίσωση (4)

$$\sigma_p = \frac{Xs}{l} = \frac{Xs}{0.0057 + 0.00007S} = \frac{\sigma_b - 0.08}{(\varepsilon_s - 6.2)(0.0057 + 0.00007S)} \quad (4)$$

όπου S είναι η περιεκτικότητα σε άμμο % κατά βάρος.

Οι Wilczek et al., (2012) εξέτασαν το μοντέλο των Malicki and Walczak (1999) με δεδομένα που αποκτήθηκαν από FDR αισθητήρες σε αμμώδη εδάφη και διαπίστωσαν ικανοποιητική επίδοση.

2.2 Το μοντέλο του Hilhorst (2000)

Ο Hilhorst (2000), στηριζόμενος στις εργασίες των Malicki et al. (1994) και Malicki and Walczak (1999), σύμφωνα με τις οποίες η σ_b και η ε_s σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό γραμμικά για ένα ευρύ φάσμα εδαφικών τύπων, παρουσίασε μια σχέση που συνδέει τις σ_p, σ_b και ε_s,

$$\sigma_p = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_s - \varepsilon_0}\sigma_b \quad (5)$$

όπου ε_p είναι η διηλεκτρική σταθερά του εδαφικού νερού, η οποία θεωρείται ότι είναι ίση με αυτή του νερού (ε_p =80), και ε_0 είναι η τιμή της ε_s όταν σ_b = 0. Λύνοντας την (5) ως προς ε_s, προκύπτει:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_p}\sigma_b + \varepsilon_0 \quad (6)$$

όπου η κλίση της γραμμικής σχέσης είναι αντιστρόφως ανάλογη της σ_p του εδαφικού νερού. Από τη γραμμική σχέση $\varepsilon_s = f(\sigma_b)$, μπορεί να βρεθεί η κλίση $\partial\varepsilon_s/\partial\sigma_b$ και ο σταθερός όρος (ε_0).

Ο Hilhorst βρήκε ότι η ε_0 παίρνει τιμές από 1.9 ως 7.6. Αν και η ε_0 μπορεί να βρεθεί πειραματικά για κάθε εδαφικό τύπο, προτάθηκε ως αντιπροσωπευτική τιμή για όλους τους τύπους εδαφών η τιμή 4.1. Η Εξίσωση (5) μπορεί να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις όπου θ > 0.1 $cm^3\ cm^{-3}$. Το μοντέλο του Hilhorst (2000) φαίνεται να είναι μια απλουστευμένη ειδική περίπτωση του μοντέλου των Rhoades et al. (1976), με την έννοια ότι δεν λαμβάνει υπόψη ότι η σ_p μπορεί να επηρεαστεί από την αγωγιμότητα της επιφάνειας των στερεών συστατικών του εδάφους την οποία θεωρεί 0 (Regalado et al., 2007).

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Αισθητήρας CS655

Ο CS655 περιλαμβάνει δύο ραβδία μήκους (L) 12 cm και διαμέτρου 3.2 mm, σε απόσταση 32 mm μεταξύ τους. Κάθε μέτρηση αντιστοιχεί σε 3600 cm^3 όγκου εδάφους. Ο αισθητήρας μετρά την θ, την σ_b και τη θερμοκρασία του εδάφους. Για τον υπολογισμό της θ σε εύρος (5-50%) χρησιμοποιείται η εξίσωση του Topp με ακρίβεια υπολογισμού της θ ±3%, για τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του εδαφικού διαλύματος EC ≤ 10 $dS.m^{-1}$, ενώ η ακρίβεια των μετρήσεων για την φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ±5% για εύρος τιμών μέχρι 3 dS m^{-1}, ενώ το εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας είναι από -10 έως 70°C (Instruction manual CS650 and CS655 Water Content Reflectometers,). Η συχνότητα λειτουργίας του αισθητήρα είναι 175 MHZ.

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο καταγραφέας δεδομένων (data logger) CR850 (Instruction manual CS650 and CS655 Water Content Reflectometers).
Ο CS655 μετρά τον αριθμό των παλμών που ανακλώνται ανά δευτερόλεπτο. Ο αριθμός αυτός διαιρούμενος με έναν παράγοντα κλιμάκωσης S_f δίνεται σαν περίοδος (P) από τον καταγραφέα. Ο χρόνος μεταφοράς του σήματος δίνεται από την εξίσωση (7) (Kelleners et al. 2005):

$$t = \frac{2}{f_r} = \frac{P}{S_f} = \frac{4L\sqrt{\varepsilon_s}}{c} + 2t_d \qquad (7)$$

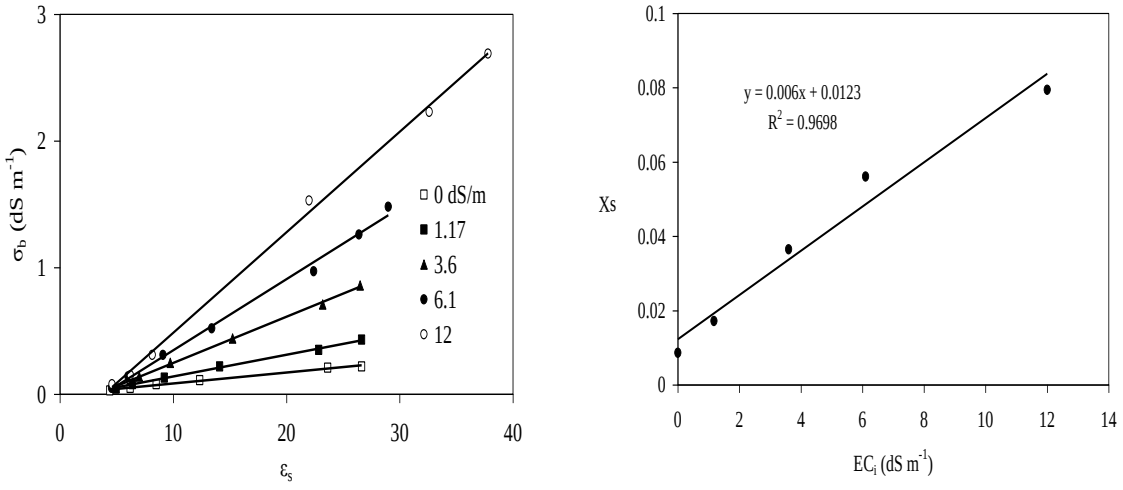
όπου t_d είναι ο χρόνος καθυστέρησης της εκπομπής μεταξύ δύο διαδοχικών σημάτων από την συσκευή και c η ταχύτητα του φωτός. Από την Εξ. (7) μπορεί να υπολογιστεί η ε_s.

3.2 Μετρήσεις στο έδαφος

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένα πηλώδες έδαφος. Το έδαφος αρχικά κοσκινίστηκε με κόσκινο 2 mm και στην συνέχεια έγινε ξήρανση σε φούρνο στους 105ºC για 24 ώρες. Σε ξηρά δείγματα, προστέθηκε διάλυμα KCl γνωστής συγκέντρωσης (EC_i =0, 1.17, 3.6, 6.1 και 12.0 $dS.m^{-1}$), ώστε να επιτευχθεί η προκαθορισμένη υγρασία, από μηδενική υγρασία ως σχεδόν τον κορεσμό, με σταθερά βήματα $\Delta\theta$=0.05 cm^3cm^{-3} για κάθε διάλυμα (Kargas and Kerkides (2010); (2012); Kargas et al., 2017). Για κάθε επίπεδο EC_i παρασκευάστηκαν 9 εδαφικές στήλες διαφορετικής υγρασίας. Στην μέγιστη τιμή της υγρασίας σε κάθε επίπεδο EC_i πραγματοποιήθηκε λήψη του εδαφικού διαλύματος με την εφαρμογή υποπίεσης και μετρήθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδαφικού διαλύματος (σ_p). Οι μετρήσεις σε κάθε επίπεδο θ για κάθε διάλυμα ελήφθησαν με τον καταγραφέα δεδομένων (data logger) CR850 (Instruction manual CS650 and CS655 Water Content Reflectometers) ενώ ο αισθητήρας CS655 είναι τοποθετημένος κάθετα στη μέση της κάθε στήλης. Σε κάθε τιμή της θ και EC_i μετρήθηκε η σ_b και υπολογίστηκε η σ_p με τα μοντέλα Malicki and Walczak (1999) και Hilhorst (2000).

4. Αποτελέσματα

Από το Σχήμα 1a και τον Πίνακα 1 προκύπτει ότι η σχέση σ_b-ε_s για κάθε επίπεδο EC_i για τιμές της ε_s>6 είναι ισχυρά γραμμική με R^2 σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερο από 0.992.



a b

Σχήμα 1. a.Η σχέση μεταξύ της σ_b και της ε_s για τα διάφορα επίπεδα EC_i του διαλύματος διαβροχής. **b**. Η σχέση μεταξύ του Xs και της EC_i

Επίσης η κλίση της γραμμικής σχέσης, δηλαδή ο δείκτης αλατότητας Xs, αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της EC_i και είναι ανεξάρτητη από την τιμή της θ (Πίνακας 1).

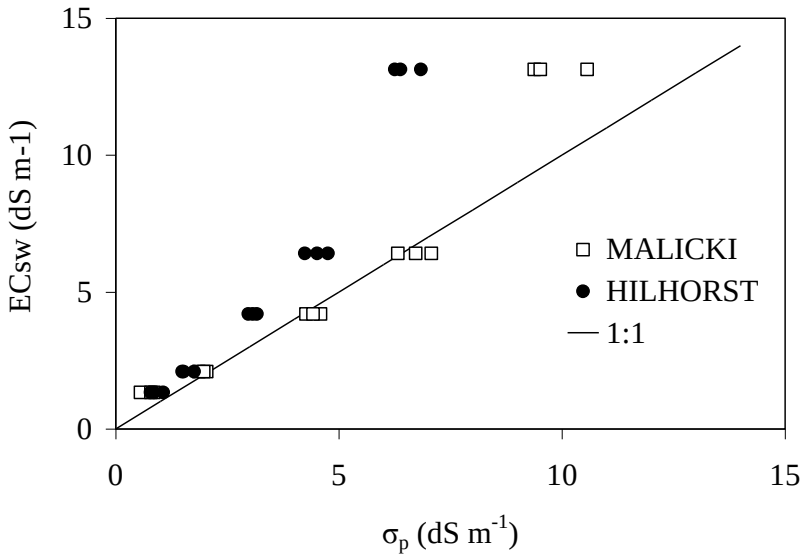
Πίνακας 1. Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος διαβροχής (EC_i), οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος οι οποίες αποκτήθηκαν με μύζηση στην μέγιστη θ, οι τιμές της κλίσης της γραμμικής σχέσης σ_b-ε_s καθώς και οι τιμές του R^2 σχέσης

EC_i (dS m^{-1})	σ_p (dS m^{-1})	Slope	R^2
0	1.33	0.0086	0.992
1.17	2.09	0.0172	0.997
3.60	4.20	0.0365	0.998
6.10	6.41	0.0561	0.994
12.0	13.12	0.0794	0.997

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η τιμή της κλίσης της γραμμικής σχέσης σ_b-ε_s επηρεάζεται από την τιμή της σ_p. Επίσης από το Σχήμα 1 φαίνεται ότι το σημείο που συγκλίνουν οι ευθείες σ_b-ε_s για τις διάφορες τιμές EC_i, παρόλο ότι τα δεδομένα αποκτήθηκαν από την συσκευή CS655, δεν διαφέρει σημαντικά από το σημείο σ_b=0.08 dS m^{-1} και ε_s=6 το οποίο αναφέρουν οι Malicki and Walczak (1999) με δεδομένα μετρήσεων από TDR.

Στο Σχήμα 1b παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του δείκτη αλατότητας και της EC_i. Από το Σχήμα 1b φαίνεται ότι η σχέση αυτή είναι ισχυρά γραμμική (R^2=0.967). Από τα δεδομένα των κλίσεων l τα οποία παρουσίασαν για διάφορα εδάφη παραπλήσιας μηχανικής σύστασης οι Malicki and Walczzak (Figure 2) φαίνεται ότι η τιμή της κλίσης l που προκύπτει από τον CS655 για το πηλώδες έδαφος είναι μικρότερη. Θεωρώντας ότι η τιμή της κλίσης l εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε άμμο, η οποία για το συγκεκριμένο έδαφος είναι 42%, μπορούμε όπως οι Malicki and Walczak (1999) να υπολογίσουμε με βάση την εξίσωση 4 την τιμή της σ_p.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της εξίσωσης 4. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι το μοντέλο των Malicki and Walczak (1999) προβλέπει την σ_p αρκετά ικανοποιητικά εκτός από την μέγιστη τιμή της EC_i. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο παρουσιάζει μικρή υποεκτίμηση στις μικρές τιμές της σ_p τιμές αλλά μεγάλη στην μέγιστη τιμή της EC_i. Οι αποκλίσεις αυτές πιθανότατα οφείλονται στο γεγονός ότι οι αντίστοιχες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της σ_p έχουν προκύψει από μετρήσεις με συσκευή TDR. Ετσι είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια το σημείο που συγκλίνουν οι ευθείες των σχέσεων σ_b-ε_s καθώς και η σχέση μεταξύ της κλίσης l και της περιεκτικότητας σε άμμο για την περίπτωση του αισθητήρα CS655. Για να μπορέσει να γίνει αυτό είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν αντίστοιχα πειράματα και σε άλλους τύπους εδαφών ώστε να προκύψουν αξιόπιστες σχέσεις.



Σχήμα 2. Σύγκριση μεταξύ μετρημένων τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος σ_p (ECsw) και των προβλέψεων των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος από τα δύο μοντέλα (σ_p)

Από την εφαρμογή του μοντέλου Hilhorst προκύπτει ότι οι κλίσεις των ευθειών ε_s-σ_b, όπως έχουμε προαναφέρει μεταβάλλονται με την EC_i αλλά ο σταθερός όρος είναι αρκετά διαφορετικός (μικρότερος) από την τιμή 4.1 σε όλες τις περιπτώσεις (Πίνακας 2). Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2 οι κλίσεις μικραίνουν με την αύξηση της EC_i ενώ ο σταθερός όρος ε_0 (εξίσωση 6) αυξάνεται. Από τις μετρημένες τιμές της σ_p, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 με σύμβολο EC_{sw}, με την βοήθεια της εξίσωσης 6, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι θεωρητικές τιμές των κλίσεων των ευθειών ε_s-σ_b. Από την σύγκριση των θεωρητικών αυτών τιμών με τις πειραματικές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 προκύπτει ότι οι πειραματικές είναι πάντα μικρότερες από τις θεωρητικά υπολογισμένες. Επίσης ο σταθερός όρος ε_0 της γραμμικής σχέσης σ' όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερος της τιμής 4.1 (Πίνακας 2). Από δεδομένα σε ανάλογα εδάφη αλλά με άλλον διηλεκτρικό αισθητήρα ο οποίος λειτουργεί σε μικρότερες συχνότητες (20 MHz) προκύπτει ότι οι κλίσεις είναι περίπου ίδιες ενώ η βασική διαφορά βρίσκεται στις αρκετά μεγαλύτερες τιμές του σταθερού όρου για τον αισθητήρα με μικρότερη συχνότητα λειτουργίας. Οι διαφορές αυτές πρέπει να εξεταστεί αν ισχύουν και σε άλλα εδάφη.

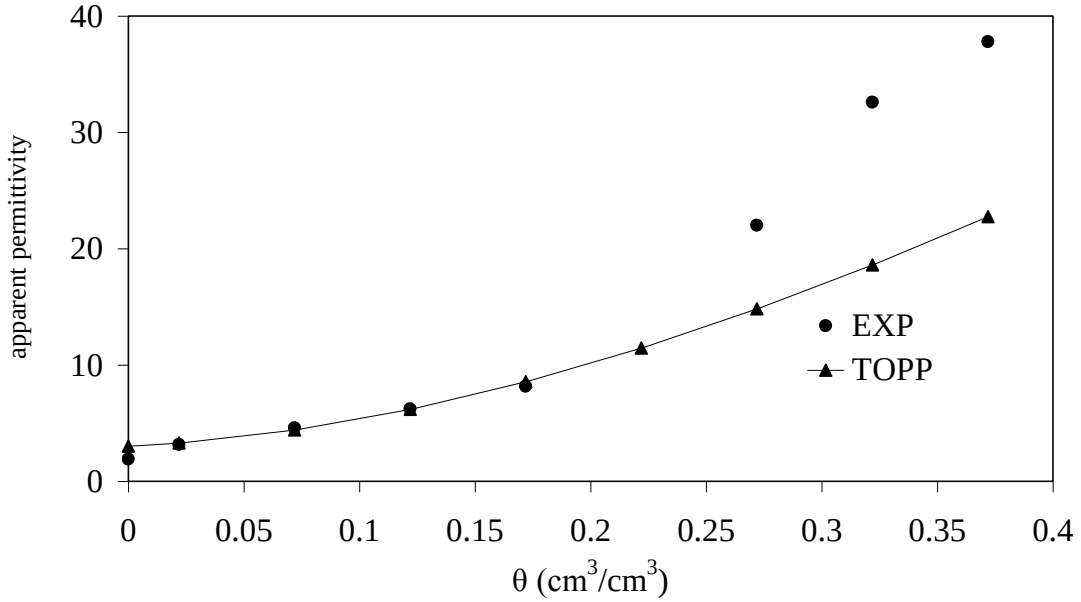
Πίνακας 2. Οι τιμές των κλίσεων και του σταθερού όρου στα διάφορα επίπεδα αλατότητας (ECi)

EC_i (dS m^{-1})	slope	ε_0
0	115.2	0.17
1.17	58.0	1.88
3.60	27.3	3.25
6.10	17.7	3.86
12.0	12.6	3.91

Από το Σχήμα 2 φαίνεται ότι το μοντέλο Hilhorst υποεκτιμά τις τιμές της σ_p με την αύξηση της EC_i.

Η τάση που εμφανίζεται για τα δύο μοντέλα να υποεκτιμούν σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό την σ_p πρέπει να αποδοθεί κυρίως στο γεγονός ότι η συσκευή CS655 λόγω της μικρότερης συχνότητας λειτουργίας μετρά αυξημένες τιμές της φαινόμενης διηλεκτρικής διαπερατότητας, σε αντίθεση με την TDR η οποία μετρά το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής διαπερατότητας αφού αυτή λειτουργεί σε μεγάλες συχνότητες. Ετσι στην περίπτωση του αισθητήρα CS655 λόγω της μικρότερης συχνότητας λειτουργίας υπάρχει σημαντική συμβολή του φανταστικού μέρους πάνω στην μετρούμενη διηλεκτρική διαπερατότητα με αποτέλεσμα αυτή να εμφανίζεται αυξημένη. Συνεπώς ο παρονομαστής των εξισώσεων (4) και (5) εμφανίζεται αυξημένος με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση της σ_p. Το ζήτημα αυτό απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση και ίσως μια ανάλογη διαδικασία με αυτή που παρουσίασαν οι Kargas et al., (2017) για άλλον διηλεκτρικό αισθητήρα να μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση του CS655 και να βελτιώσει τις προβλέψεις των μοντέλων υπολογισμού της σ_p.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα ε_s-πραγματικής υγρασίας (θm) όπως αποκτήθηκαν από τον αισθητήρα CS655 για το διάλυμα με EC_i=12 dS m^{-1} και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της εξίσωσης Topp (Topp et al., 1980) η οποία συνήθως χρησιμοποιείται σαν εξίσωση αναφοράς για την πρόβλεψη της θ. Από τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται ότι στις μεγάλες θ ο αισθητήρας CS655 προβλέπει πολύ μεγαλύτερες τιμές ε_s συγκριτικά με την εξίσωση Topp. Οι διαφορές στις μεγάλες θm μπορούν να αποδοθούν στην διηλεκτρική διασπορά (υψηλότερες τιμές ε_s σε χαμηλότερες συχνότητες) και στην επίδραση της αλατότητας. Στην περίπτωση του διαλύματος με EC_i=12 dS m^{-1} φαίνεται ότι η επίδραση είναι ιδιαίτερα σημαντική και δεν μπορεί να αγνοηθεί αφού η διαφορά των τιμών της ε_s μεταξύ της εξίσωσης Topp και του αισθητήρα CS655 είναι περίπου 13 διηλεκτρικές μονάδες στην μέγιστη θm



Σχήμα 3. Η σχέση μεταξύ ε_s-θm για τον αισθητήρα CS655 για EC_i=12 dS m^{-1} (EXP) και η αντίστοιχη σχέση με την εφαρμογή της εξίσωσης Topp

Πίνακας 3. Οι τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) στις διάφορες τιμές EC_i για τα δύο μοντέλα

EC_i (dS m^{-1})	Malicki	Hilhorst
0	0.607	0.444
1.17	0.147	0.510
3.60	0.264	1.133
6.10	0.427	1.916
12.0	3.351	6.640

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των δύο μοντέλων υπολογίστηκε η τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) στις διάφορες τιμές EC_i (Πίνακας 3). Από τις τιμές του RMSE φαίνεται ότι το μοντέλο Malicki and Walczak (1999) ακόμα και με τις εμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν από την συσκευή TDR δίνει σχετικά αξιόπιστες τιμές πρόβλεψης της σ_p.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειραματικά δεδομένα που αποκτήθηκαν με την διηλεκτρική συσκευή CS655 σ' ένα πηλώδες έδαφος φαίνεται ότι το μοντέλο των Malicki and Walczak (1999) δίνει αρκετά ικανοποιητικές προβλέψεις της σ_p συγκριτικά με το μοντέλο Hilhorst. Οι προβλέψεις μπορούν να βελτιωθούν ακόμα περισσότερο αν εξεταστούν περισσότερα εδάφη και προκύψουν για την συσκευή CS655 αντίστοιχες εμπειρικές σχέσεις με την συσκευή TDR.

Το μοντέλο Hilhorst φαίνεται να υποεκτιμά την σ_p στο μεγαλύτερο εύρος των τιμών της, ειδικά για τιμές σ_p>2 dS m^{-1}.

Επίσης από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι ο αισθητήρας CS655 προβλέπει μεγαλύτερες τιμές ε_s ειδικά στις μεγάλες τιμές θm συγκριτικά με την εξίσωση Topp.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Amente G, Baker M and C. Reece 2000. *Estimation of soil electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soil*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 64:1931-1939.

Archie G.E.1942. *The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*, Trans. Am. Inst. Min. Metll. Pet. Eng. 146:54-62.

Corwin D 2002. In Methods of soil analysis, Part 4-Physical Methods. Published by Soil Science Society of America, pp 1287-1289

Corwin D.and Hendrickx J. 2002. In Methods of soil analysis, Part 4-Physical Methods. Published by Soil Science Society of America, pp 1282-1287.

Hilhorst M.A. 2000. *A pore water conductivity sensor*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 64: 1922-1925.

Instruction manual, CS650 and CS655 *Water Content Reflectometers Revision*: 2/14, Copyright 2011 – 2014, Campbell Scientific, Inc

Kargas G. and Kerkides p. 2010. *Evaluation of a dielectric sensor for measurements of soil water electrical conductivity*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 136(8):553-558.

Kargas, G., P. Kerkides. 2012. *Comparison of two models in predicting pore water electrical conductivity in different porous media*. Geoderma 189:563-573.

Kargas G., Persson M., Kanelis G., Markopoulou I., Kerkides P. 2017. *Prediction of soil solution electrical conductivity by the permittivity corrected linear model using a dielectric sensor*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering (In Press)

Kelleners T, Seyfried M, Blonquist J, Bilskie J, Chandler D (2005). *Improved interpretation of water content reflectometer measurements in soils*. Soil Science Society of America Journal 69, 1684–1690.
Malicki M. and R. Walczak, 1999. *Evaluating soil salinity status from electrical conductivity and permittivity*. Eur. Journal soil science 50:505-514.
Mualem Y. and S. Friedman, 1991. *Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil*. Water Resour. Res. 27:2771-2777.
Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. 1980. *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*. Water Resour. Res., 16, 574–582.
Regalado C., A. Ritter and R. M. Rodriguez-Gonzalez, 2007. *Performance of the commercial WET capacitance sensor as compared with Time domain reflectometry in volcanic soils*. Vadoze zone Journal 6:244-254.
Rhoades J, P. Ratts and R. Prather, 1976. *Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity.* Soil Sci. Soc. Amer. Journal 40:651-655.
Rhoades J.D., Manteghi N.A, Shouse P.J., Alves W.J. 1989. *Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 53:433-439.
Wilczek A., Szyplowska A., Skierucha W., Ciesla J., Pichler V. and Janik G. 2012. *Determination of soil pore water salinity using an FDR sensor working at various frequencies up to 500 MHz*. Sensors 12:10890-10905.
U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Agric. Handb. 60. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ HILHORST ΣΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΤΥΡΦΗΣ

Γ. Κάργας, Γ. Κανέλης, Ι. Μαρκοπούλου και Π. Κερκίδης
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργ. Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα
kargas@aua.gr

Περίληψη

Ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος (σ_p) μπορεί να γίνει με άμεσες και έμμεσες μεθόδους. Οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού της σ_p βασίζονται στην μέτρηση της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ_b) του εδάφους. Η μέτρηση της σ_b σήμερα γίνεται κυρίως με την βοήθεια διηλεκτρικών συσκευών, οι οποίες επιτρέπουν ταυτόχρονα τη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς (ε_s) στον ίδιο εδαφικό όγκο. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μια τροποποιημένη εκδοχή του γραμμικού μοντέλου υπολογισμού της σ_p που βασίζεται σε δεδομένα τα οποία αποκτώνται από την διηλεκτρική συσκευή WET. Η αξιολόγηση της νέας μεθόδου έγινε σε ένα υπόστρωμα τύρφης και σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα αλατότητας (σ_w= 0.28, 1.2, 3 και 6 dS/m). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η νέα μέθοδος δίνει σε σχεδόν όλα τα επίπεδα αλατότητας πολύ καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με το κλασσικό γραμμικό μοντέλο.

Λέξεις Κλειδιά: Αλατότητα, γραμμικό μοντέλο, διαπερατότητα

EVALUATION OF THE HILHORST LINEAR MODEL FOR CALCULATING SOIL SALINITY AT ORGANIC POROUS MEDIA

G. Kargas, G. Kanelis, I. Markopoulou and P. Kerkides
Agricultural University of Athens
Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, 75 Iera Odos, Athens 11855, Greece, kargas@aua.gr

Abstract

The electrical conductivity of the soil solution (σ_p) could be determined by direct and indirect methods. Indirect methods based on measuring the apparent electrical conductivity (σ_b) soil. Measuring σ_b today is mostly done by means of dielectric devices, which allow simultaneously measuring the apparent dielectric permittivity (ε_s) in the same volume of soil. In the present study a modified version of the linear model for calculating the σ_p based on data obtained from the dielectric WET device is examined. The evaluation of the new method was made in one porous body at four different levels of salinity (σ_w = 0.28, 1.2, 3 and 6 dSm^{-1}). From the results it was shown that the new method gives for almost all levels of salinity much better results than the classical linear model.

Key Words: Salinity, linear model, permittivity

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εδαφική αλατότητα αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Η διαδικασία για την άμεση εκτίμηση της εδαφικής αλατότητας συνίσταται στην λήψη εκχυλίσματος από το εδαφικό διάλυμα στον αγρό η οποία όμως είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί, κυρίως γιατί απαιτείται ιδιαίτερος εξοπλισμός αλλά και γιατί η υγρασία του εδάφους πρέπει να είναι υψηλή για την απόκτηση ικανής ποσότητας διαλύματος για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς του (σ_p).

Για το ξεπέρασμα αυτής της δυσκολίας προσδιορισμού της σ_p αναπτύχθηκαν έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού της από την φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ_b). Η σ_b αποτελεί ένα μέτρο της αγωγιμότητας του εδάφους διαμέσου της υγρής, της στερεάς και της αλληλεπίδρασης της στερεάς και της υγρής φάσης. Η αέρια φάση δεν συμβάλει στην αγωγιμότητα και αγνοείται. Η σ_b εξαρτάται από τη σ_p, την κατ' όγκο υγρασία θ και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Για τη μέτρηση της σ_b μέχρι πριν 25 χρόνια περίπου χρησιμοποιείτο η συσκευή Wenner και η μέθοδος των τεσσάρων ηλεκτροδίων (Corwin and Hendrickx, 2002; Corwin, 2002). Η ανάπτυξη της μεθόδου TDR (Time Domain Reflectometry) η οποία παρέχει τη δυνατότητα για αυτόματες και επί τόπου μετρήσεις ταυτόχρονα και στον ίδιο εδαφικό όγκο της σ_b και της θ διευκόλυνε σημαντικά την όλη διαδικασία μέτρησης της σ_p και συνέβαλε σημαντικά στη μελέτη της κίνησης των αλάτων στην εδαφική κατατομή.

Παρόλα αυτά, η εκτίμηση της συγκέντρωσης των αλάτων από τη σ_b απαιτεί είτε καθορισμό σχέσης που να συνδέει απευθείας τη σ_b και τη συγκέντρωση των αλάτων είτε ένα ενδιάμεσο βήμα ώστε η συγκέντρωση να μπορεί να καθοριστεί από την ηλεκτρική αγωγιμότητα σ_p του νερού του εδαφικού πορώδους (Amente et. al. 2000).

Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για τη συσχέτιση της σ_b και της σ_p (Archie (1942); Rhoades et al., 1976; Rhoades et al., 1989; Mualem and Friedman 1991; Malicki et al., 1994; Malicki and Walczak 1999; Hilhorst 2000; Amente et al., 2000). Ο Hillhorst (2000) παρουσίασε ένα γραμμικό μοντέλο που συνδέει τη διηλεκτρική σταθερά (ε_s) του εδάφους με τη σ_b και τη σ_p. Ο Persson (2002), χρησιμοποιώντας μετρήσεις TDR, έδειξε ότι πράγματι η συνάρτηση $\varepsilon_s=f(\sigma_b)$ είναι γραμμική, αλλά η κλίση ήταν μικρότερη από ότι αναμενόταν. Οι Hamed et al., (2003) συνέκριναν το γραμμικό μοντέλο και το μοντέλο Rhoades et al. (1976) με μετρήσεις των συσκευών Sigma Probe και TDR, και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, αν και η σχέση $\varepsilon_s-\sigma_b$ ήταν γραμμική, το γραμμικό μοντέλο δε δίνει ικανοποιητικές προβλέψεις της σ_p. Οι Regalado et. al., (2007) έδειξαν ότι οι τιμές της σ_b που υπολογίστηκαν από τη συσκευή WET και από τη TDR συμπίπτουν, ενώ η σχέση $\varepsilon_s-\sigma_b$ ήταν γραμμική για δύο εδαφικούς τύπους. Όμως, το μοντέλο Hilhorst (2000) απέτυχε να προβλέψει τη σ_p και με τα δεδομένα των δύο συσκευών. Οι Kargas & Kerkides (2010) και (2012), χρησιμοποιώντας μετρήσεις από τον αισθητήρα WET έδειξαν ότι το γραμμικό μοντέλο μπορεί να προβλέψει τη σ_p με κάποια ακρίβεια στα χονδρόκοκκα πορώδη μέσα αλλά αποτυγχάνει στα λεπτόκκοκα και στις μεγάλες τιμές της αλατότητας. Επίσης συνέκριναν το γραμμικό μοντέλο με το μοντέλο του Rhoades (1976), αξιοποιώντας δεδομένα δύο διηλεκτρικών συσκευών. Το μοντέλο Rhoades et al. (1976) αποδείχτηκε πιο αξιόπιστο δίνοντας καλύτερα αποτελέσματα και με τις δύο συσκευές σε διαφορετικά εδάφη και επίπεδα αλατότητας. Οι Kargas et al., (2017) παρουσίασαν μια τροποποίηση του μοντέλου Hilhorst σε ανόργανα πορώδη μέσα με μετρήσεις από τον αισθητήρα WET η οποία έδωσε καλύτερα αποτελέσματα στην πρόβλεψη της σ_p ιδιαίτερα στις μεγάλες τιμές της.

Στόχος αυτής της μελέτης είναι η εκτίμηση της τροποποιημένης εκδοχής του γραμμικού μοντέλου του Hilhorst (2000) ως προς την πρόβλεψη της σ_p και η σύγκρισή της με τα αποτελέσματα του κλασσικού μοντέλου σε υπόστρωμα τύρφης.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

2.1 Γραμμικό μοντέλο του Hilhorst (2000)

Ο Hilhorst (2000), στηριζόμενος στις εργασίες των Malicki et al. (1994) και Malicki & Walczak (1999), σύμφωνα με τις οποίες η σ_b κι η ε_s σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό γραμμικά για ένα ευρύ φάσμα εδαφικών τύπων, παρουσίασε μία σχέση των σ_p-σ_b-ε. Η σχέση $\sigma_p = f\left(\sigma_b;\varepsilon_s\right)$ είναι:

$$\sigma_p = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_s - \varepsilon_0}\sigma_b \quad (1)$$

όπου ε_p είναι η διηλεκτρική σταθερά του εδαφικού νερού, η οποία θεωρείται ότι είναι ίση με αυτή του νερού (ε_p =80), και ε_0 είναι η τιμή της ε_s όταν σ_b = 0. Κατ' αυτό τον τρόπο η (1) μπορεί να λυθεί ως προς $\varepsilon_s = f(\sigma_b;\sigma_p)$

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_p}\sigma_b + \varepsilon_0 \quad (2)$$

και έτσι

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial \sigma_b} = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_p} \quad (3)$$

όπου η κλίση είναι αντιστρόφως ανάλογη της σ_p του εδαφικού νερού. Από τη γραμμική σχέση $\varepsilon_s = f(\sigma_b)$, μπορεί να βρεθεί η κλίση $\partial\varepsilon_s/\partial\sigma_b$ και ο σταθερός όρος (ε_0).

Ο Hilhorst βρήκε ότι η ε_0 παίρνει τιμές από 1.9 ως 7.6. Αν και η ε_0 μπορεί να βρεθεί πειραματικά για κάθε εδαφικό τύπο, προτάθηκε ως αντιπροσωπευτική τιμή για όλους τους τύπους εδαφών η τιμή 4.1. Η εξ.(1) μπορεί να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις όπου θ > 0.1 $cm^3\ cm^{-3}$. Το μοντέλο του Hilhorst φαίνεται να είναι μια απλουστευμένη ειδική περίπτωση του μοντέλου των Rhoades et al. (1976), με την έννοια ότι δεν λαμβάνει υπόψη ότι η σ_p μπορεί να επηρεαστεί από την αγωγιμότητα της επιφάνειας των στερεών συστατικών του εδάφους την οποία θεωρεί 0 (Regalado et al. 2007).

2.2. Η εξίσωση των Robinson et al. (1999)

Η αρχή λειτουργίας των διηλεκτρικών συσκευών στηρίζεται στον προσδιορισμό της διηλεκτρικής διαπερατότητας του μέσου (ε^*), όπου στην περίπτωσή μας είναι το έδαφος. Η ε^* είναι μια μιγαδική συνάρτηση. Με $j = \sqrt{-1}$, η ε^* γράφεται

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (4)$$

Διαιρώντας την εξίσωση (4) με τη διηλεκτρική διαπερατότητα του κενού ε_0 (ε_0=8.854*10^{-12} $F.m^{-1}$) επιτυγχάνεται η αδιαστατοποίηση της (σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα) και έτσι έχουμε

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (5)$$

Το νερό χαρακτηρίζεται από μια πολύ μεγάλη τιμή της σχετικής διηλεκτρικής διαπερατότητάς του (~80). Στα στερεά συστατικά του εδάφους η τιμή της κυμαίνεται από 2-5 ενώ στον αέρα έχει τιμή 1. Το πραγματικό μέρος της εξίσωσης (5) ε_r' έχει επικρατήσει να λέγεται διηλεκτρική σταθερά και ισούται με την ε_s που μετρά ο αισθητήρας όταν το

φανταστικό μέρος $\varepsilon_r^{''}$ είναι πολύ μικρό ή αμελητέο (Topp et.al., 1980). Αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις υψηλής συχνότητας λειτουργίας των αισθητήρων (TDR) και σε αδρανή πορώδη μέσα όπου $\varepsilon_r^{'} >> \varepsilon_r^{''}$. Σε αυτή την περίπτωση η σχέση θ=f($\varepsilon_r^{'}$), είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του εδάφους, την αλατότητα κλπ. εκτός των περιπτώσεων οργανικών εδαφών ή εδαφών με μεγάλη περιεκτικότητα σε σίδηρο (Topp et al. 1980). Το φανταστικό μέρος $\varepsilon_r^{''}$ σχετίζεται με την απώλεια ενέργειας λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) σε χαμηλής συχνότητας, ηλεκτροστατικό, πεδίο. Η $\varepsilon_r^{''}$ δίνεται από την σχέση

$$\varepsilon_r^{''} = \varepsilon_{r,mr}^{''} + \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (6)$$

όπου f η συχνότητα του Η/Μ πεδίου.

Ο πρώτος όρος $\varepsilon_{r,mr}^{''}$ επηρεάζεται ισχυρά από τη συχνότητα f στο εύρος συχνοτήτων 10-1000 MHz σε αυτό δηλαδή που κυρίως λειτουργούν οι συμβατικές διηλεκτρικές συσκευές υπολογισμού της θ (Kelleners et al., 2005;2009; Logsdon et al., 2010). Ο δεύτερος όρος, όπως ρητά φαίνεται, είναι αντιστρόφως ανάλογος της f. Και στις δύο περιπτώσεις η $\varepsilon_r^{''}$ μειώνεται με την αύξηση της f.

Οι σχέσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές αφού η μετρούμενη από τη συσκευή διηλεκτρική διαπερατότητα ε_s εξαρτάται και από τις δύο συνιστώσες της ε_r^*. Το τελικό αποτέλεσμα των διεργασιών αυτών είναι ότι η ε_s τείνει να μειώνεται καθώς η f αυξάνει (Kelleners et al. 2009). Πολλές διηλεκτρικές συσκευές προσδιορίζουν τις διηλεκτρικές ιδιότητες των εδαφών από μετρήσεις χωρητικότητας C ή αντίστασης R στο ηλεκτρικό κύκλωμα που δημιουργείται μεταξύ των ραβδίων των συσκευών, και στο οποίο παρεμβάλλεται το διηλεκτρικό μέσο. Οι διηλεκτρικές συσκευές (π.χ. χωρητικότητας) που λειτουργούν σε αρκετά χαμηλότερες συχνότητες συγκριτικά με τις συσκευές TDR είναι αρκετά πιο ευαίσθητες σε εδάφη υψηλής αλατότητας.

Από τα πιο πάνω καταδεικνύεται η επίδραση της σ_b στον αξιόπιστο προσδιορισμό της ε_s σε κάποιο ποσοστό θ. Οι Robinson et al., (1999) μετά από πειράματα σε αμμώδη εδάφη για τις διηλεκτρικές συσκευές χωρητικότητας πρότειναν την εξίσωση

$$\sqrt{\varepsilon_s} = \sqrt{\varepsilon_r^{'}} + 0.628\sigma_b \quad (7)$$

για να συμπεριλάβουν την επίδραση της σ_b (dS.m^{-1}).

Από την εξίσωση (7) φαίνεται ότι η αύξηση της σ_b οδηγεί σε αύξηση της ε_s. Στους διηλεκτρικούς αισθητήρες συνήθως θεωρείται ότι η τιμή της ε_s είναι ίση με την τιμή της $\varepsilon_r^{'}$ και αγνοείται η επίδραση της σ_b το οποίο ισχύει μόνο για την συσκευή TDR. Με την προτεινόμενη τροποποίηση αντικαθιστούμε στην εξίσωση 1 την τιμή της ε_s η οποία μετρήθηκε με την συσκευή WET με την τιμή της $\varepsilon_r^{'}$ όπως προκύπτει από την εξίσωση (7)

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. Αισθητήρας WET

Πρόκειται για έναν καινούριο διηλεκτρικό αισθητήρα, που εκτιμά τη διηλεκτρική σταθερά με ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας 20MHz. Ο αισθητήρας ανιχνεύει τις μεταβολές στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα και στέλνει την πληροφορία αυτή στο μετρητή υγρασίας HH2, με τον οποίο είναι συνδεδεμένος (Delta –T Devices Ltd, 2005). Η ε_0 έχει την προεπιλεγμένη τιμή 4.1. Η σ_p υπολογίζεται από το γραμμικό μοντέλο το οποίο εφαρμόζεται

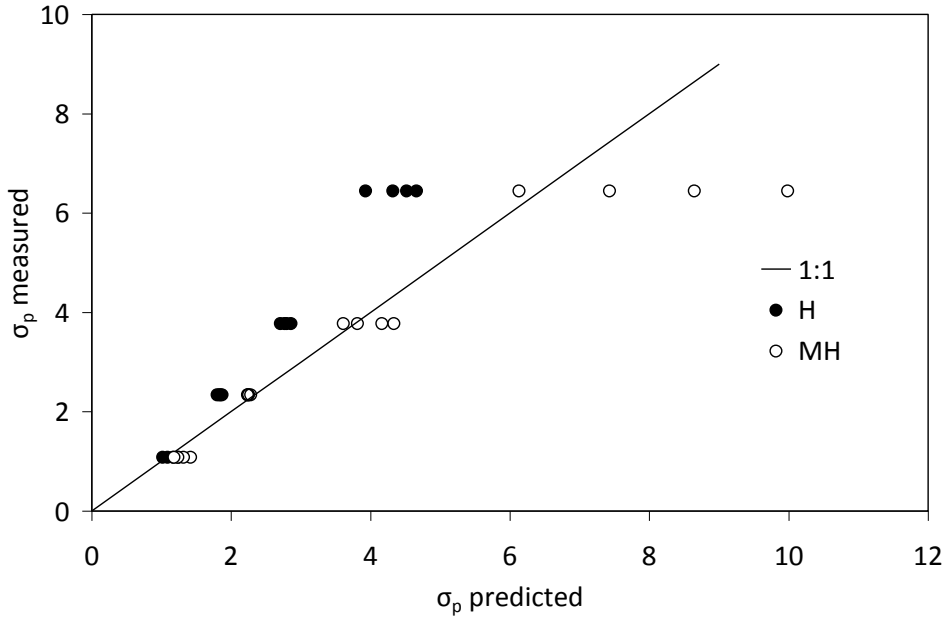
για θ>0.1 cm^3cm^{-3}. Οι μετρήσεις του αισθητήρα WET για την σ_b μπορούν να θεωρηθούν εξίσου καλές με αυτές της μεθόδου TDR, σύμφωνα με τους Regalado et. al., (2007).

3.2 Μετρήσεις στα εδάφη

Χρησιμοποιήθηκε ένα πορώδες μέσο (τύρφη). Το πορώδες μέσο αεροξηράνθηκε για αρκετές ημέρες. Έπειτα, συσκευάστηκε συγκεκριμένη μάζα του πορώδους μέσου σε γυάλινες κατασκευές διαμέτρου 10 cm και ύψους 7 cm, προκειμένου να έχουμε σταθερή φαινόμενη πυκνότητα για το πορώδες μέσο. Στα δείγματα, προστέθηκε διάλυμα KCl γνωστής συγκέντρωσης (σ_w=0.28, 1.2, 3 και 6 dSm^{-1}), ώστε να επιτευχθεί η προκαθορισμένη υγρασία, σχεδόν ως τον κορεσμό, με σταθερά βήματα Δθ=0.05 cm^3cm^{-3} για κάθε διάλυμα. Οι μετρήσεις πάρθηκαν με τη συσκευή ανάγνωσης δεδομένων HH2 αφού ο αισθητήρας WET είχε τοποθετηθεί κάθετα στη μέση της κάθε στήλης. Για κάθε επίπεδο υγρασίας και αλατότητας, εκτός από την ε_s και τη θ, προσδιορίστηκε η σ_b και υπολογίστηκε η σ_p με το γραμμικό μοντέλο Hilhorst (2000). Στην μέγιστη τιμή της θ, μετά τις μετρήσεις με τον αισθητήρα, με την τοποθέτηση της τύρφης σε χωνί Buchner έγινε λήψη του εκχυλίσματος με την εφαρμογή αρνητικής πίεσης. Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μετρήθηκε με αγωγιμόμετρο και θεωρείται η πραγματική τιμή της σ_p.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από το Σχήμα 1 φαίνεται ότι στα διάφορα επίπεδα αλατότητας εκτός των μικρών τιμών σ_p το τροποποιημένο μοντέλο του Hilhorst δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το κλασσικό μοντέλο. Το τροποποιημένο μοντέλο παρόλο ότι εμφανίζει σημαντική βελτίωση στις μεγάλες τιμές στην πρόβλεψη της σ_p, εμφανίζεται μια σχετική τάση υποεκτίμησης της στις χαμηλές τιμές υγρασίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανότατα στις μεγάλες τιμές της ε_s που μετρά η συσκευή WET λόγω επίδρασης και του είδους του υποστρώματος εκτός από την επίδραση της αλατότητας.



Σχήμα 3. Σύγκριση μεταξύ των τιμών της σ_p από το τροποποιημένο μοντέλο Hilhorst και το κλασσικό μοντέλο Hilhorst (οριζόντιος άξονας) με τις προκαθορισμένες τιμές της σ_p (1.08, 2.34, 3.77 και 6.44 dSm^{-1}) (κατακόρυφος άξονας). Τα αποτελέσματα του τροποποιημένου

γραμμικού μοντέλου παρουσιάζονται με κύκλο ενώ του κλασσικού μοντέλου με μαύρο κύκλο. Η ευθεία αναπαριστά την σχέση 1:1.

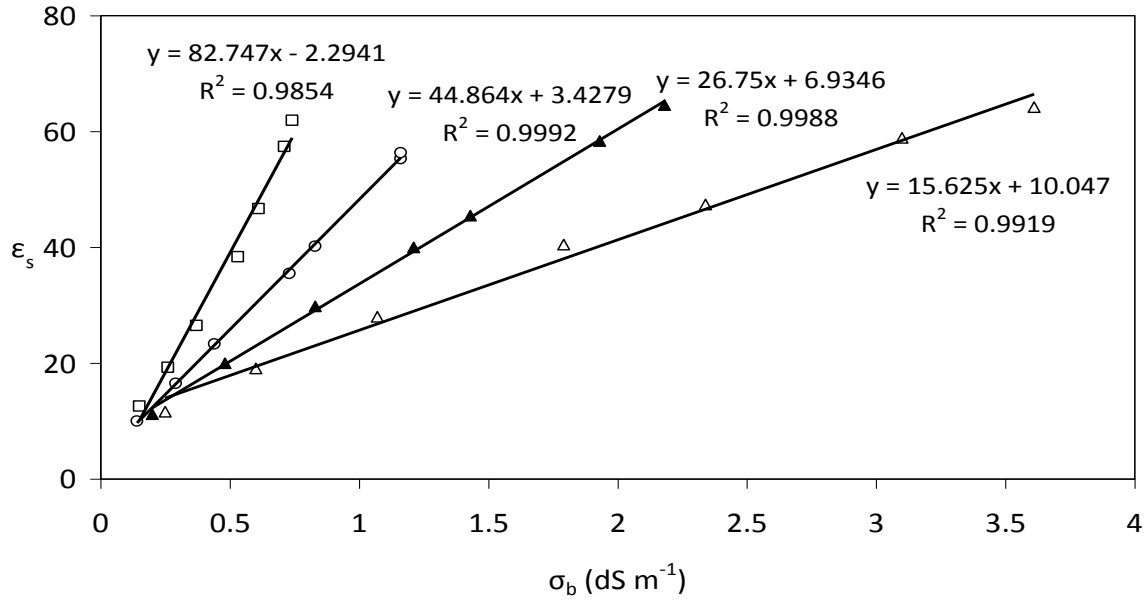
Το μοντέλο Hilhorst δείχνει να υποεκτιμά την αλατότητα όσο αυξάνεται η αλατότητα του διαλύματος [3 και 6 (dS m^{-1})] ενώ δίνει αρκετά ικανοποιητικές τιμές στις μικρότερες τιμές. Έτσι για μικρές τιμές της αλατότητας μπορεί να δώσει ικανοποιητικές προβλέψεις της σ_p. Η υποεκτίμηση της σ_p στις μεγάλες τιμές οφείλεται στην υπερεκτίμηση της ε_s με την αύξηση της αλατότητας με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο παρονομαστής της εξίσωσης (1).

Πρέπει να υπενθυμίζουμε ότι αυτές οι εκτιμήσεις ισχύουν για τιμές θ μεγαλύτερες από 0.20 cm^3 cm^{-3}. Η τιμή αυτή της θ δεν είναι ιδιαίτερα περιοριστική αφού στην αρδευόμενη γεωργία και τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες οι τιμές της θ είναι συνήθως μεγαλύτερες.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι οι δύο μέθοδοι με δεδομένα από τον αισθητήρα WET μπορούν να αξιοποιηθούν συμπληρωματικά. Για μικρές τιμές αλατότητας σ_p<1.2 dS m^{-1} μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κλασσικό γραμμικό μοντέλο ενώ για μεγαλύτερες τιμές το τροποποιημένο μοντέλο.

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των δύο μοντέλων υπολογίστηκε η τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) στις διάφορες τιμές σ_p. Από τις τιμές του RMSE φαίνεται ότι το τροποποιημένο μοντέλο δίνει πιο αξιόπιστες τιμές πρόβλεψης της σ_p εκτός από την χαμηλότερη τιμή της.

Από την εξέταση των κλίσεων της γραμμικής σχέσης $\varepsilon_s = f(\sigma_b)$ (εξ. 2) προκύπτουν για το τροποποιημένο μοντέλο τιμές 71.78, 35.01, 16.90 και 6.54 m.dS^{-1} ενώ για το κλασσικό μοντέλο προκύπτουν τιμές 82.74, 44.86, 26.75 και 15.62 m.dS^{-1} για τιμές της σ_p 1.08, 2.34, 3.77 και 6.44 dS.m^{-1} αντίστοιχα (Σχήμα 2). Από τα δεδομένα αυτά φαίνεται ότι το τροποποιημένο μοντέλο δίνει μικρότερες τιμές κλίσεων. Οι τιμές της σ_p είναι αυτές που προέκυψαν από την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο εκχύλισμα με την εφαρμογή αρνητικής πίεσης.



Σχήμα 2. Σχέση $\varepsilon_s=f(\sigma_b;\sigma_p)$ για την τύρφη για διάφορα επίπεδα αλατότητας του υδατικού διαλύματος (σ_p) χρησιμοποιώντας το κλασσικό γραμμικό μοντέλο του Hilhorst. Τα

διαφορετικά σύμβολα δείχνουν διαφορετικές τιμές της σ_p ($dS.m^{-1}$), ενώ οι συνεχείς γραμμές δείχνουν τη γραμμική παλινδρόμηση προς τα σημεία των δεδομένων.

Ο σταθερός όρος της γραμμικής σχέσης φαίνεται ότι αυξάνεται με την αύξηση της σ_p (Σχήμα 2). Επίσης οι τιμές του, όπως προκύπτει από το Σχήμα 2, φαίνονται να απέχουν από την τιμή 4.1 την οποία πρότεινε ο Hilhorst. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι χρειάζεται να γίνει περαιτέρω έρευνα για την τιμή του αφού για άλλες περιπτώσεις αισθητήρων έχει προταθεί άλλη σταθερή τιμή.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας φαίνεται ότι το μοντέλο Hilhorst αποτυγχάνει στην πρόβλεψη της σ_p ειδικά στις μεγάλες τιμές της. Η προτεινόμενη τροποποίηση φαίνεται ότι μπορεί να βελτιώσει την πρόβλεψη στις μεγάλες τιμές της σ_p ακόμα και στην περίπτωση ενός οργανικού υποστρώματος.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Amente G, Baker M. and C. Reece 2000. *Estimation of soil electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soil*. Soil Sci. Soc. Amer. Journal 64:1931-1939.

Archie G.E. 1942. *The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics,* Trans. Am. Inst. Min. Metll. Pet. Eng. 146:54-62.

Corwin D. (2002). In Methods of soil analysis, *Part 4-Physical Methods*. Published by Soil Science Society of America, pp 1287-1289.

Corwin D. and Hendrickx J. (2002). In Methods of soil analysis, *Part 4-Physical Methods*. Published by Soil Science Society of America, pp 1282-1287.

Delta –T Devices Ltd. 128. Low road Burwell CAMBRIDGE CB5 OEJ. UK. http://www.delta-t.co.uk. *User manual for the WET sensor (type WET-2),*2005.

Hamed Y, M. Persson and R. Berndtsson, 2003. S*oil solution electrical conductivity measurements using different dielectric techniques.* Soil Sci. Soc. Amer. Journal 67: 1071-1077.

Hilhorst M.A. 2000. *A pore water conductivity sensor.* Soil Sci. Soc. Amer. Journal 64: 1922-1925.

Kargas G. and Kerkides p. 2010. *Evaluation of a dielectric sensor for measurements of soil water electrical conductivity.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering 136(8):553-558.

Kargas, G., Kerkides P. 2012. *Comparison of two models in predicting pore water electrical conductivity in different porous media.* Geoderma 189:563-573.

Kargas G., Persson M., Kanelis G., Markopoulou I., Kerkides P. 2017. *Prediction of soil solution electrical conductivity by the permittivity corrected linear model using a dielectric sensor*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering (In Press)

Kelleners, T.J., D.A. Robinson, P.J. Shouse, J.E. Ayars, and T.H. Skaggs. 2005. *Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils.* Soil Science Society of America Journal 69:67-76.

Kelleners, T. J., Paige, G.B., Gray, S.T. 2009. *Measurement of the dielctric properties of Wyoming soil using electromagnetic sensors.* Soil Sci. Soc. Am. J. 73:1626-1637.10.2136/sssaj2008.0361.

Logsdon, S.D., T.R. Green, M. Seyfried, S.R. Evett and J. Bonta. 2010. *Hydra Probe and twelve-wire probe comparisons in fluids and soil cores.* Soil Science Society of America Journal 74:5-12.

Malicki M. and R. Walczak, 1999. *Evaluating soil salinity status from electrical conductivity and permittivity.* Eur. Journal soil science 50:505-514.

Malicki M., Walczak R, Koch S and Fluhler H. 1994. *Determining soil salinity from simultaneous readings of its electrical conductivity and permittivity using TDR.* In Proceedings of the symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications (Evanston, Illinois, 7-9 September, 1994),328-336. US Bureau of Mines, special publication SP 19-94, NTIS PB-105789.

Mualem Y. and S. Friedman, 1991. *Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil.* Water Resour. Res. 27:2771-2777.

Persson M., 2002. *Evaluating the linear dielectric constant – electrical conductivity model using time domain reflectometry.* Hydrological Sciences 47: 269-277.

Regalado C., A. Ritter and R. M. Rodriguez-Gonzalez, 2007. *Performance of the commercial WET capacitance sensor as compared with Time domain reflectometry in volcanic soils.* Vadoze zone Journal 6:244-254.

Rhoades J, P. Ratts and R. Prather, 1976. *Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity.* Soil Sci. Soc. Amer. Journal 40:651-655.

Rhoades J.D., Manteghi N.A, Shouse P.J., Alves W.J. 1989. *Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations.* Soil Sci. Soc. Amer. Journal 53:433-439.

Robinson D.A., Gardner C.M.K., Cooper J.D. 1999. *Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity.* Journal of Hydrology 223: 198-211.

Topp, G.C., J.I. Davis and A.P. Annan. 1980. *Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines.* Water Resources Research. 16:574-582.

U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* USDA Agric. Handb. 60. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΖΩΤΟΥΧΟΥ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ

Β. Αντωνιάδης, Ε. Ξυράφης, Σ. Πετρόπουλος & Α. Δημήρκου
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 384 46, Ν. Ιωνία, Βόλος
✉antoniadis@uth.gr

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας ήταν η σύγκριση τεσσάρων διαφορετικών μορφών αζωτούχου λίπανσης στην καλλιέργεια της βιομηχανικής τομάτας σε συνθήκες αγρού. Έγιναν συνολικά 5 μεταχειρίσεις: (1) μάρτυρας (Μ, καμία προσθήκη), (2) λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης (ΒΑ), (3) συμβατικό αμμωνιακό λίπασμα (ΣΛ), (4) αμμωνιακό λίπασμα σε συνδυασμό με ζεόλιθο (Ζ) και (5) κοπριά (Κ). Οι 4 μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε Ν δέχτηκαν συνολικά 200 kg N ha^{-1}. Κάθε μεταχείριση αποτελούνταν από 4 επαναλήψεις δηλαδή στο σύνολο διαμορφώθηκαν 20 πειραματικά τεμάχια. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η καλλιεργητική περίοδος διήρκεσε 90 ημέρες. Στο τέλος του πειράματος μετρήθηκε το βάρος των καρπών και της υπόλοιπης υπέργειας φυτομάζας, ο αριθμός των καρπών και τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά (pH και EC του χυμού, περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά στερεά συστατικά, οξύτητα, χρώμα και συνεκτικότητα). Επίσης έγιναν αναλύσεις εδάφους, φύλλων και καρπών όσο αφορά την περιεκτικότητά τους σε Ν, Ρ και Κ. Βρέθηκε ότι το ύψος των φυτών ήταν σημαντικά αυξημένο σε σχέση με το μάρτυρα σε όλες οι μεταχειρίσεις λίπανσης. Επίσης, η παραγωγικότητα της βιομηχανικής τομάτας στη μεταχείριση ΒΑ παρουσίασε την υψηλότερη απόδοση σε kg τομάτας ανά εκτάριο σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Ως προς τις φυτοκομικές αναλύσεις, στη μεταχείριση Ζ, το ποσοστό του αζώτου στον καρπό έφτασε στο 3%, τιμή ιδιαίτερα υψηλή για τον καρπό της τομάτας. Η μεταχείριση Ζ παρουσίασε τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα καλίου στον καρπό σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, ενώ ως προς την πρόσληψη του καλίου από τον καρπό παρουσιάστηκαν παρόμοια αποτελέσματα με τις μεταχειρίσεις ΒΑ και ΣΛ. Τέλος στις οργανοληπτικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον καρπό της τομάτας παρουσιάστηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Λέξεις κλειδιά:, ζεόλιθος, λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης, κοπριά, παραγωγικότητα

EFFECT OF NITROGEN FERTILIZATION IN PROCESSING TOMATO CULTIVATION

V. Antoniadis, E. Xyrafis, S. Petropoulos & A. Dimirkou
University of Thessaly, Department of Agriculture Plant Production and Rural Environment, Fytokou Street, 384 46, N. Ionia, Volos
✉e-mail: antoniadis@uth.gr

ABSTRACT

In this work we aimed at comparing four different sources of N to a cultivation of processing tomato. We had 5 treatments: (1) control (no additions), (2) ammonium-N slow-release fertilizer, (3) ammonium-N conventional fertilizer, (4) ammonium-N conventional fertilizer mixed with zeolite and (5) manure. In all four treatments where we added N, the rate was equal to 200 kg N ha^{-1}. Every treatment had 4 replicates, and this resulted to a total of 20

plots of 10 m^2 each. The experiment was conducted in the Farm of the University of Thessaly and lasted for 90 days. We measured the plant height, the weight and of fruits and of the rest of the aerial biomass, and the number of fruits and their chemical characteristics (pH, E.C., total dissolved solids, acidity, and colour). We also measured chemical properties and nutrient (N, P, K) content in soil, as well as nutrient content in fruits and leaves. We found that plant height was increased in all 4 N-added treatments compared to the control. The tomato productivity in kg ha^{-1} was higher in the slow-release fertilizer treatment compared to the other treatments. Nitrogen content in fruits was very high in the zeolite-added treatment, where also the content of K was the highest among the other treatments. However, K uptake in the zeolite-added treatment was similar with that of the slow-release and of the conventional fertilizers. As for the chemical characteristics of fruits, significant differences between the treatments were observed, including the control.

Keywords: zeolite; slow-release fertilizer; manure; productivity

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανική τομάτα (*Solanum lycopersicum*) είναι καλλιέργεια με πολλά πλεονεκτήματα, καθώς η συγκομιδή της γίνεται μία φορά (σε αντίθεση με την επιτραπέζια) και συνήθως έχει σταθερή τιμή λόγω συμβολαίων των παραγωγών με τις εταιρείες μεταποίησης. Σε μια τέτοια εκτατική και εντατικοποιημένη καλλιέργεια η εξοικονόμηση πόρων από καλή χρήση λιπασμάτων είναι σημαντική. Καθώς πρόκειται για καλλιέργεια με υψηλές αναμενόμενες αποδόσεις της τάξης των μερικών τόνων ανά στρέμμα, οι απαιτήσεις της σε θρεπτικά στοιχεία είναι εξίσου υψηλές. Συγκεκριμένα οι ανάγκες σε Ν ενδέχεται να φτάνουν τα 20 kg ανά στρέμμα (Cole et al., 2016). Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό να δοκιμαστούν συστήματα που είτε θα μειώνουν τις εισροές Ν για ένα συγκεκριμένο στόχο παραγωγής, είτε θα αυξάνουν την αποδοτικότητα του λιπάσματος (και άρα και την παραγωγή) για το ίδιο επίπεδο λίπανσης.

Στην βιβλιογραφία έχει κατά καιρούς δοκιμαστεί η χρήση λιπασμάτων βραδείας αποδέσμευσης (Li et al., 2017). Αυτά είναι λιπάσματα υψηλής τεχνολογίας, τα οποία περιέχουν ουσίες που παρεμποδίζουν κάποια από τα στάδια μετατροπής του αζώτου (Ν) στο έδαφος, έτσι ώστε να παρατείνεται η παραμονή στο έδαφος, άρα και η αποτελεσματικότητά του στην αφομοίωσή του από το φυτό. Ένα παράδειγμα αποτελούν τα αμμωνιακά λιπάσματα που περιέχουν παρεμποδιστή νιτροποίησης. Ωστόσο, το μειονέκτημα των λιπασμάτων αυτών είναι η υψηλή τους τιμή, η οποία δρα αποτρεπτικά για πολλούς παραγωγούς, ιδιαίτερα αυτών που ασχολούνται με εκτατικές καλλιέργειες.

Μία άλλη τεχνική που έχει δοκιμαστεί είναι η εφαρμογή ζεολίθου που έχει εμποτιστεί με NH_4^+ κατιόντα. Τα κατιόντα NH_4^+,μετά την εφαρμογή του ζεολίθου στο έδαφος, ενδέχεται να απελευθερώνονται με αργό ρυθμό και άρα η νιτροποίηση του προστιθέμενου Ν να καθυστερεί. Συνήθως όμως τέτοιες δοκιμές έχουν γίνει σε πειράματα σε γλάστρες όπου οι ποσότητες ζεολίθου που απαιτούνται είναι μικρές (Antoniadis et al., 2012). Σε εφαρμογή όμως σε αγρό, όπου απαιτούνται ποσότητες σε τάξη μεγέθους εκατοντάδων kg ανά στρέμμα, ο εμποτισμός του ζεολίθου είναι χρονοβόρος και κοστοβόρος και άρα καθόλου πρακτικός. Μία εναλλακτική λύση είναι η εφαρμογή ζεολίθου παράλληλα με την εφαρμογή αμμωνιακού λιπάσματος. Αυτή η διαδικασία είναι πιο εύκολη στη χρήση της και άρα πιο ελκυστική ως πρακτική, αλλά δεν έχει μελετηθεί επαρκώς ως προς την αποτελεσματικότητά της στο να καθιστά το Ν πιο αποδοτικό στην καλλιέργεια.

Μια τρίτη λύση για την παραμονή του Ν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στο έδαφος μπορεί να είναι η εφαρμογή κοπριάς, καθώς η απελευθέρωση Ν σε διαθέσιμη ανόργανη μορφή γίνεται βαθμιαία. Αυτές οι τρεις πηγές Ν πρέπει να δοκιμαστούν και να συγκριθούν σε σχέση με την αποδοτικότητα του συμβατικού λιπάσματος. Από όσο μπορούμε να γνωρίζουμε, δεν έχει γίνει τέτοια συγκριτική μελέτη σε συνθήκες αγρού.

Σκοπός της εργασίας ήταν η δοκιμή τεσσάρων πηγών Ν, και πιο συγκεκριμένα συμβατικού αζωτούχου λιπάσματος, ζεολίθου, λιπάσματος βραδείας αποδέσμευσης και κοπριάς για τη διερεύνηση της καλύτερης μεθόδου λίπανσης μιας καλλιέργειας υπαίθριας βιομηχανικής τομάτας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας εγκαταστάθηκε πείραμα με βιομηχανική τομάτα σε 5 μεταχειρίσεις:

(α) Μάρτυρας (Μ), όπου δεν έγινε καμιά προσθήκη λιπάσματος,

(β) Συμβατικό λίπασμα (ΣΛ), όπου προστέθηκε λίπασμα θειικής αμμωνίας (21-0-0) σε δόση ίση με 200 kg N ha^{-1},

(γ) Συμβατικό λίπασμα μαζί με ζεόλιθο (Ζ), όπου προστέθηκε ταυτόχρονα λίπασμα θειικής αμμωνίας (21-0-0) σε δόση ίση με 200 kg N ha^{-1} και ζεόλιθος σε δόση ίση με 5 t ha^{-1},

(δ) Λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης (ΒΑ; 46-0-0), σε δόση ίση με 200 kg N ha^{-1}, και

(ε) Κοπριά (Κ) σε τέτοια ποσότητα ώστε να χορηγεί 200 kg N ha^{-1}.

Κάθε μεταχείριση είχε 4 επαναλήψεις, και έτσι υπήρχαν 20 πειραματικά τεμάχια στον αγρό. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε διαστάσεις 3 m x 3 m, και οι γραμμές φύτευσης απείχαν μεταξύ τους 0,9 m. Σε κάθε γραμμή φύτευσης, εγκαταστάθηκαν φυτά τομάτας ανά 33 cm, και άρα υπήρχαν 30 φυτά σε κάθε πειραματικό τεμάχιο ή 33.670 φυτά ha^{-1}. Για τις δειγματοληψίες και τις μετρήσεις αγνοήθηκαν τα φυτά που ήταν στις άκρες του τεμαχίου. Ανάμεσα στα πειραματικά τεμάχια υπήρχαν ενδιάμεσες ζώνες για αποφυγή επιμόλυνσης. Η καλλιεργητική περίοδος διήρκεσε 90 ημέρες, από 7 Μαΐου (φύτευση) έως 5 Αυγούστου 2014 (συγκομιδή και τελική δειγματοληψία φυτών και εδάφους). Τα φυτά που εγκαταστάθηκαν ήταν της ποικιλίας Heinz 3402. Τονίζεται ότι το 2014 ήταν η δεύτερη χρονιά πειραματισμού. Προηγήθηκε το 2013 παρόμοιο πείραμα με ακριβώς τις ίδιες μεταχειρίσεις στα ίδια ακριβώς σημεία στον αγρό.

Στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, έγινε η συγκομιδή των καρπών, και δειγματοληψία φύλλων και εδάφους από καθένα από τα 20 πειραματικά τεμάχια. Μετρήθηκαν το βάρος και ο αριθμός των καρπών ανά τεμάχιο. Κατόπιν, 10 καρποί με παρόμοια εξωτερική εμφάνιση και μέγεθος από κάθε τεμάχιο τοποθετήθηκαν σε χάρτινες σακούλες για να γίνουν αναλύσεις οργανοληπτικών χαρακτηριστικών. Οι καρποί αυτοί τοποθετήθηκαν κατόπιν σε ψυγείο και οι οργανοληπτικές αναλύσεις έγιναν την επόμενη ημέρα της συγκομιδής. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν το χρώμα της σάρκας (Minolta CR-400 New Jersey, USA), η αντίσταση στη διείσδυση (TR-TURONY, Italy), το pH και η οξύτητα χυμού, και περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά στερεά (°Brix; ATAGO hand refractometer, Japan).

Μετά το πέρας των αναλύσεων αυτών, οι καρποί ξηράνθηκαν στους 70 °C, κονιορτοποιήθηκαν και τοποθετήθηκαν σε πλαστικές σακούλες μέχρι την ανάλυσή τους για την περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία. Στο τέλος του πειράματος επίσης έγινε κοπή της συνολικής υπέργειας βιομάζας και ζύγισή της ανά τεμάχιο. Κρατήθηκε ένα μικρό της βιομάζας για ξήρανση έτσι ώστε να υπολογιστεί η συνολική υπέργεια βιομάζα σε ξηρό βάρος. Κατόπιν ένα μέρος της αποξηραμένης βιομάζας κονιορτοποιήθηκε και κρατήθηκε σε

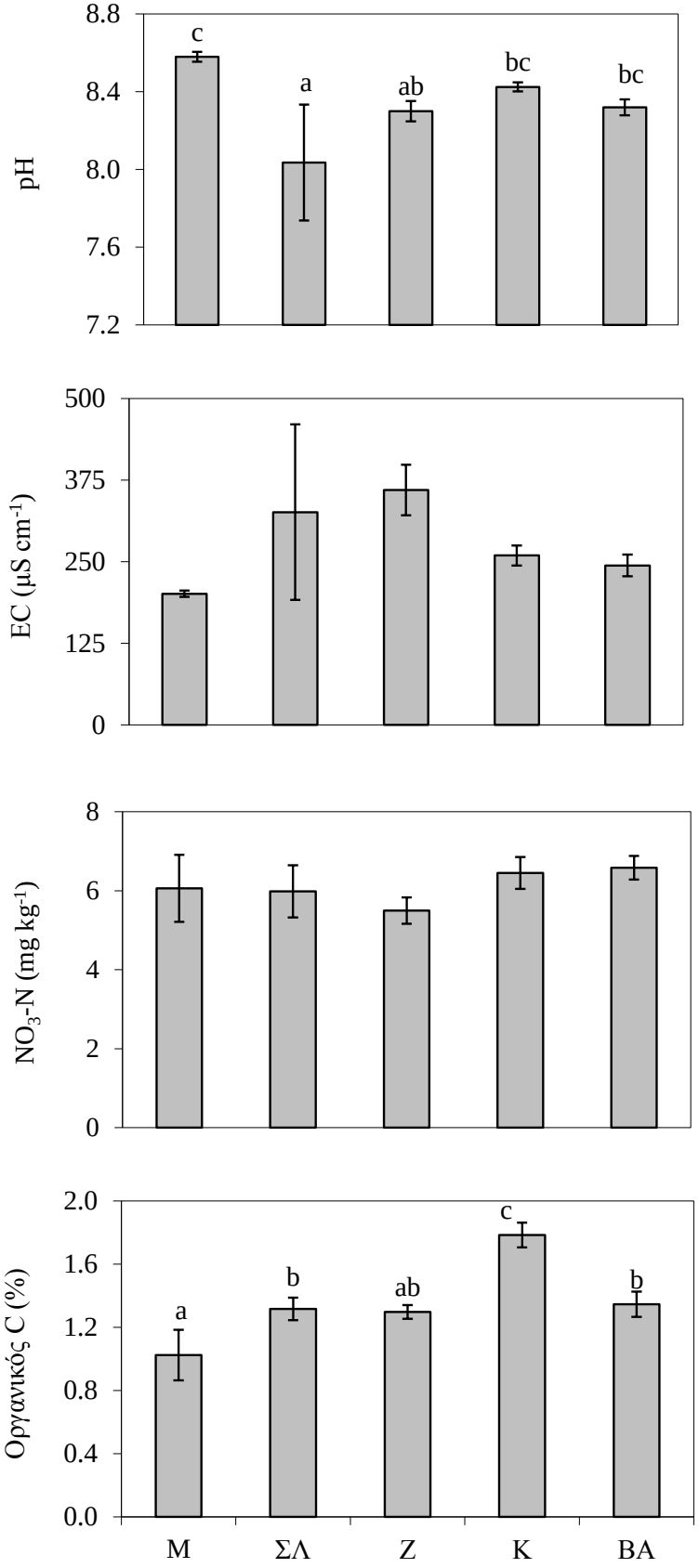
πλαστικές σακούλες μέχρι την ανάλυσή του. Στα φυτικά δείγματα καρπών και λοιπής βιομάζας έγινε εκχύλιση με τη μέθοδο dry ashing (αποτέφρωση στους 500 °C για 5 h και παραλαβή της τέφρας με 20 mL 20% HCl) και κατόπιν μέτρηση P (με ανάπτυξη κυανού χρώματος σε φασματοφωτόμετρο) και K (σε φλογοφωτόμετρο). Επίσης έγινε μέτρηση N στον κονιορτοποιημένο φυτικό ιστό κατά Kjeldahl σε τρία στάδια: πέψη 1 g φυτικού ιστού σε 20 mL πυκνού H_2SO_4, απόσταξη σε συσκευή Kjeldahl και ογκομέτρηση της αποσταγμένης αμμωνίας με αραιό οξύ (0,01 N H_2SO_4).

Όσον αφορά το έδαφος, ελήφθησαν 3 υποδείγματα με εδαφικό δειγματολήπτη από κάθε πειραματικό τεμάχιο, τα οποία ενσωματώθηκαν σε ένα κοινό δείγμα. Τα δείγματα αεροξηράνθηκαν, και πέρασαν από κόσκινο με ανοίγματα 2 mm. Κατόπιν έγιναν οι εξής αναλύσεις: pH (1:2,5 H_2O), E.C. (1:1 H_2O), οργανικός C (υγρή οξείδωση), P κατά Olsen (1:20 0,5 M $NaHCO_3$, pH 8,5), ανταλλάξιμο K (1:10 1 M CH_3COONH_4 pH 7) και NO_3–N (1:10 2 M KCl). Η μέτρηση P έγινε με ανάπτυξη κυανού χρώματος σε φασματοφωτόμετρο, του K σε φλογοφωτόμετρο και του NO_3 –N σε φασματοφωτόμετρο υπεριώδους φάσματος ως διαφορά της απορρόφησης σε μήκη κύματος 210 nm και 270 nm.

Στα δεδομένα έγινε ανάλυση της παραλλακτικότητας (ANOVA) και η σύγκριση των μέσων όρων των τιμών των διαφόρων παραμέτρων σύμφωνα με το Fisher's Least Significant Difference test σε επίπεδο σημαντικότητας $p<0.05$. Το στατιστικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Statgraphics 2.1.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τις εδαφικές παραμέτρους που μετρήθηκαν, η EC, και το NO_3–N δεν είχαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, σε αντίθεση με το pH και τον οργανικό C (Σχήμα 1). Η τιμή του pH μειώθηκε σημαντικά στη μεταχείριση του συμβατικού λιπάσματος (ΣΛ) σε σχέση με το μάρτυρα, ίσως λόγω της οξινοποιού επίδρασης της νιτροποίησης (Han et al., 2017). Η επίδραση αυτή είναι προσωρινή, και άρα αναμένεται να αποκατασταθεί η τιμή του pH στα επίπεδα του μάρτυρα. Στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε N υπήρξε μείωση του pH, η οποία όμως δεν ήταν σημαντική σε σχέση με το μάρτυρα στις μεταχειρίσεις της κοπριάς (K) και του λιπάσματος βραδείας αποδέσμευσης (ΒΑ). Αυτό αποτελεί μια ένδειξη ότι η διαδικασία νιτροποίησης ήταν έντονη στη μεταχείριση ΣΛ και λιγότερο έντονη στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις N. Πιθανόν στις μεταχειρίσεις K και ΒΑ κατά κύριο λόγο, αλλά και αυτή του ζεολίθου, προστατεύτηκε μέχρι έναν βαθμό το προστιθέμενο N από έντονη νιτροποίηση. Όταν το N προστατεύεται από το να αλλάξει μορφή στο έδαφος, υπάρχει περίπτωση να παραμείνει στο έδαφος και μετά το πέρας της καλλιεργητικής περιόδου, δίνοντας μικρότερη απόδοση στην καλλιέργεια, με υψηλό κίνδυνο έκπλυσης, όταν το έδαφος παραμείνει ακάλυπτο μετά το πέρας της καλλιεργητικής περιόδου. Στην περίπτωσή μας όμως, τα επίπεδα του υπολειμματικού N (με τη μορφή NO_3–N στο τέλος του πειράματος) δεν ήταν υψηλά σε καμιά από τις μεταχειρίσεις αυτές, κάτι που δείχνει ότι το N αξιοποιήθηκε ικανοποιητικά παρόλο το μικρότερο βαθμό νιτροποίησης στις μεταχειρίσεις Z, K και ΒΑ (Dong et al., 2016). Επίσης η αλατότητα του εδάφους δεν επηρεάστηκε αρνητικά στις μεταχειρίσεις του πειράματος, καθώς οι τιμές της EC δεν είχαν καμιά σημαντική μεταβολή σε σχέση με το μάρτυρα.

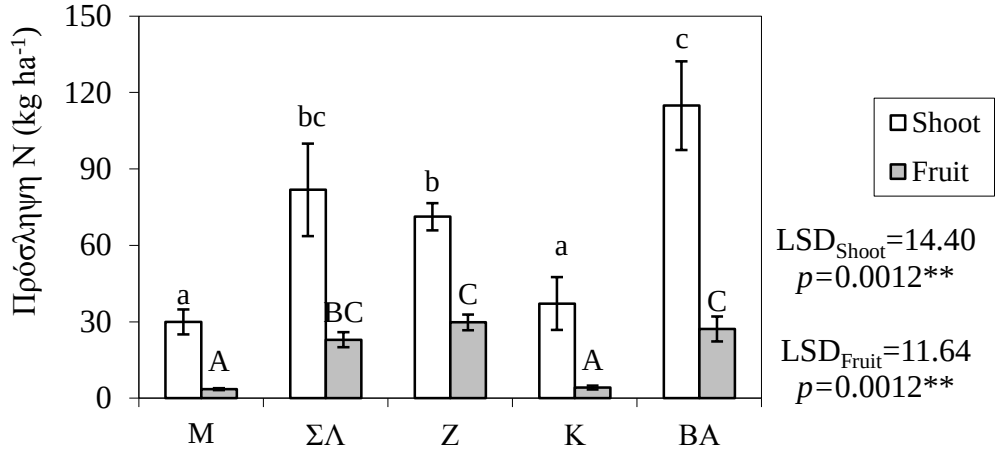


Σχήμα 1. Εδαφολογικά χαρακτηριστικά (pH, EC, NO_3–N, οργανικός C) στις 5 μεταχειρίσεις του πειράματος.

Οι εκχυλιζόμενες συγκεντρώσεις P και K δεν σημείωσαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, παρά την παράλληλη προσθήκη P και K σε όλες τις μεταχειρίσεις εκτός του μάρτυρα. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές βρέθηκαν όμως για τον οργανικό C, με τη μεταχείριση της κοπριάς (K) να έχει σημαντικά υψηλότερα ποσοστά σε σχέση με τις άλλες μεταχειρίσεις (Σχήμα 1). Η αύξηση της οργανικής ουσίας αποτελεί σημαντικό εύρημα και δικαιολογείται από το γεγονός ότι η χρονιά διεξαγωγής του παρόντος πειράματος ήταν η δεύτερη χρονιά πειραματισμού και άρα η δεύτερη χρονιά προσθήκης κοπριάς στα ίδια πειραματικά τεμάχια, κάτι που έχει βρεθεί και σε άλλες παρόμοιες εργασίες (Koutroubas et al., 2016). Σημαντική αύξηση οργανικού C σε σχέση με το μάρτυρα είχαν και μεταχειρίσεις ΣΛ και ΒΑ όπου προστέθηκε N, ίσως λόγω αυξημένων εισροών φυτικών υπολειμμάτων από την συνεχόμενη καλλιέργεια του εδάφους (ενσωμάτωση φυτικών υπολειμμάτων, υπολείμματα ριζών κ.ά).

Πίνακας 1. Απόδοση και χαρακτηριστικά καρπών τομάτας.

Μεταχειρίσεις	**Παραγωγή (kg ha^{-1})**	**Αριθμός καρπών x 1000 (ha^{-1})**	**Αριθμός καρπών ανά φυτό**	**Μέσο βάρος καρπού (g)**	**Τιμή (euro ton^{-1}) (τιμές 2016)**	**Κέρδος (euro ha^{-1})**
Μάρτυρας	7312 c	117.3 c	3.5 c	61.8 c	90.49	654.4
Κοπριά	7794 c	125.2 c	3.7 c	61.5 c	99.11	746.7
Ζεόλιθος	28141 a	389.8 b	11.6 b	72.03 a	86.49	2405.8
Συμβατικό λίπασμα	25130 b	377.2 b	11.2 b	67.4 b	94.33	2345.4
Λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης	29284 a	435.1 a	12.9 a	67.3 b	94.33	2732.9



Σχήμα 2. Πρόσληψης αζώτου από τους καρπούς και την υπόλοιπη βιομάζα, στις 5 μεταχειρίσεις του πειράματος.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας (Πίνακας 1), η απόδοση σε βάρος καρπών εκφρασμένο σε kg ha^{-1}, αυξήθηκε σημαντικά στις μεταχειρίσεις συμβατικού λιπάσματος (ΣΛ), ζεολίθου (Z) και λιπάσματος βραδείας αποδέσμευσης (ΒΑ) σε σχέση με το μάρτυρα. Μάλιστα η μεταχείριση ΒΑ είχε την υψηλότερη απόδοση, η οποία έφτασε τους 29 t ha^{-1} (με 28 στον Z και 25 t ha^{-1} στο ΣΛ, ενώ ο μάρτυρας απέδωσε μόλις 0.7 t ha^{-1}). Αυτό δείχνει ότι το εμπορικό λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης είχε την καλύτερη απόδοση. Ωστόσο η διαφορά της απόδοσης του ενός t ha^{-1} από τη μεταχείριση του ζεολίθου είναι μικρή, το κέρδος μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων διαφέρει κατά μόλις €300 και είναι πιθανό να κάνει την χρήση του λιπάσματος βραδείας αποδέσμευσης μη συμφέρουσα οικονομικά (στην παρούσα φάση δεν έγινε πλήρης οικονομική εκτίμηση). Επίσης τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μεταχείριση της κοπριάς δεν είχε σημαντική διαφορά με το μάρτυρα, και απέδωσε μόλις 0.8 t ha^{-1}(Πίνακας 1). Αυτό δείχνει μάλλον μια αστοχία στη χορήγηση της κοπριάς, η οποία φαίνεται και παρακάτω στα υπόλοιπα φυτοκομικά χαρακτηριστικά.

Η πρόσληψη N σε kg N ha^{-1} στους καρπούς και τη λοιπή βιομάζα, η μεταχείριση ΒΑ είχε την υψηλότερη τιμή, η οποία ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνες των άλλων μεταχειρίσεων (με εξαίρεση τη μεταχείριση ΣΛ και Z στον καρπό και ΣΛ στο βλαστικό μέρος, Σχήμα 2). Έφτασε τα 142 kg N ha^{-1} συνολικά φυτικούς ιστούς (71% επί του χορηγούμενου N ίσου με 200 kg N ha^{-1}), ενώ τα φυτά στη μεταχείριση του ΣΛ προσέλαβαν 105 (53% αποτελεσματικότητα) και αυτά του Z 101 kg N ha^{-1} συνολικά (53% αποτελεσματικότητα) (Abenavoli et al., 2016). Αυτό δείχνει ότι ο ζεόλιθος φαίνεται να συγκράτησε το χορηγούμενο N περισσότερο από ό,τι απαιτούσε η καλλιέργεια με συνέπεια να έχει μικρή αποτελεσματικότητα χρήσης, ενώ και το συμβατικό λίπασμα είχε και αυτό σχετικά χαμηλή αποδοτικότητα και παρόμοια με αυτή της μεταχείρισης του ζεολίθου. Στην περίπτωση της κοπριάς, είναι χαρακτηριστικό και πάλι ότι η τιμή του N που απορροφήθηκε ήταν ίδια με αυτή που παρατηρήθηκε στο μάρτυρα. Αυτό επιβεβαιώνει ότι υπήρξε μια αστοχία στην εφαρμογή της κοπριάς, πιθανόν γιατί η εφαρμογή της κατά τη βασική λίπανση δεν εξασφαλίζει την ομαλή διαθεσιμότητα του καθόλη τη διάρκεια της καλλιέργειας, ενώ παράλληλα είναι ευάλωτη σε έκπλυση κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η προσθήκη ζεολίθου κατάφερε να προστατέψει το χορηγούμενο N από έντονη νιτροποίηση, αλλά επίσης φαίνεται να το συγκράτησε τόσο ώστε το N να έχει χαμηλή αποτελεσματικότητα και απορρόφηση από την καλλιέργεια, καθώς αφομοιώθηκε το 53% του χορηγούμενου N.
- Το λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης προστάτευσε εξίσου το εδαφικό N από τη διαδικασία της νιτροποίησης, αλλά οδήγησε σε μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα απορρόφησης του χορηγούμενου N (71% του χορηγούμενου N). Επίσης το λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης έδωσε και μεγαλύτερη παραγωγικότητα (29 t καρπού ha^{-1}). Ωστόσο η διαφορά με τη μεταχείριση του ζεολίθου (όπου συγκομίστηκαν 28 t καρπού ha^{-1}) είναι πιθανό να καθιστούν τη χρήση του λιπάσματος βραδείας αποδέσμευσης ασύμφορο οικονομικά.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abenavoli, M.R., Longo, C., Lupini, A., Miller, A.J., Araniti, F., Mercati, F., Princi, M.P, and Sunseri, F., 2016. *Phenotyping two tomato genotypes with different nitrogen use efficiency*. Plant Physiology and Biochemistry 107, 21-32.

Antoniadis, V., Damalidis, K., and Koutroubas, S.D., 2012. *Nitrogen and phosphorus availability to ryegrass in an acidic and limed zeolite-amended soil.* Agrochimica 56, 309-318.

Cole, J.C., Smith M.W., Penn, C.J., and Cheary, B.S., 2016. *Nitrogen, phosphorus, calcium and magnesium applied individually or a slow release or controlled release fertilizer increase growth and yield and affect macronutrient and micronutrient concentration and content in field-grown tomato plants.* Scientia Horticulturae 211, 420-430.

Dong, Y.J., He, M.R., Wang, Z.L., Chen, W.F., Hou, J., Qiu, X.K., and Zhang, J.W., 2016. *Effects of new coated release fertilizer on the growth of maize.* Journal of Soil Science and Plant Nutrition 16, 637-649.

Han, J., Shi, J., Zeng, L., Xu, J., and Wu, L., 2017. *Impacts of continuous excessive fertilization on soil potential nitrification activity and nitrifying microbial community in greenhouse system.* Journal of Soils and Sediments 17, 471-480.

Koutroubas, S.D., Antoniadis, V., Damalas, C.A., and Fotiadis, S., 2016. *Effect of organic manure on wheat grain yield, nutrient accumulation and translocation.* Agronomy Journal 108, 615-625.

Li, Y., Sun, Y., Liao, S., Zou, G., Zhao, T., Chen, Y., Yang, J., and Zhang, L., 2017. *Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato.* Agricultural Water Management 186, 139-146.

Η ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΦΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΡΙΖΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΜΠΕΛΩΝΩΝ

Μ.Χ. Κοζαΐτη & Σ.Κ. Κωστοπούλου✉
ΑΠΘ, Τμήμα Γεωπονίας, Εργ. Εδαφολογίας, 54 124, Θεσσαλονίκη,
✉skostop@agro.auth.gr

Περίληψη

Μελετήθηκε η αλληλεπίδραση της υφής του εδάφους και της συμπύκνωσης σε ορισμένες φυσικές ιδιότητες του ριζοστρώματος τριών αμπελώνων αφού τα καλλιεργητικά οχήματα είχαν πραγματοποιήσει τρείς διελεύσεις από την αρχή της καλλιεργητικής περιόδου. Η συμπύκνωση αύξησε το ποσοστό των μεγάλων (8-2mm) σε βάρος των μικρών (2-0,25mm) μακροσυσσωματωμάτων και τη φαινομενική πυκνότητα. Οι πόροι στράγγισης κατέρρευσαν προς μικρότερους, γεγονός που μείωσε δραματικά την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό και αύξησε το διαθέσιμο νερό και το ποσοστό των πόρων υφής. Επίσης, η συμπύκνωση αύξησε την αντίσταση του εδάφους στη διείσδυση των ριζών. Η επίδραση της συμπύκνωσης ήταν μεγαλύτερη στα επιφανειακά εδάφη των πλέον λεπτόκοκκων αμπελώνων.

Λέξεις κλειδιά: συμπύκνωση, υφή του εδάφους, φυσικές ιδιότητες, ριζόστρωμα

THE INTERACTION OF SOIL TEXTURE AND COMPACTION ON SOME PHYSICAL PROPERTIES OF THE VINEYARD'S ROOT ZONE

M.C. Kozaiti, S.K. Kostopoulou✉
AUTH, Department of Agriculture, Soil Science Lab., 54 124, Thessaloniki,
✉skostop@agro.auth.gr

ABSTRACT

The interaction of soil texture and compaction on some physical properties of the root zone of vineyards was investigated. Soil samples were collected after three passes of agricultural vehicles from the beginning of the agricultural period. Compaction increased the percentage of big macro-aggregates (8-2 mm) in dispense of the smaller ones (2-0.25 mm) and soil bulk density. Drainage pores collapsed to smaller pores and saturated hydraulic conductivity of the top soil decreased dramatically while plant available water and textural porosity increased. Also, compaction increased soil penetration resistance to roots. The effect of compaction was more pronounced on the surface (0-25 cm) of the more fine textured soils.

Keywords: compaction, soil texture, physical properties, root zone

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στους αμπελώνες, εγκατεστημένους σε γραμμικό υποστηριγμένο σχήμα, η κυκλοφορία γεωργικών οχημάτων είναι συχνή και γίνεται σε μόνιμους διαδρόμους διέλευσης μεταξύ των σειρών των πρέμνων. Για την ακρίβεια, μπορεί να διακριθούν δύο ζώνες: η ζώνη όπου φύονται τα πρέμνα και γίνονται κατεργασίες για την αντιμετώπιση των ζιζανίων χημικά ή μηχανικά και η ζώνη ανάμεσα στις σειρές η οποία μπορεί να κατεργάζεται μηχανικά ή όχι την άνοιξη (Smith et al., 2008) και όπου γίνεται η κυκλοφορία των οχημάτων.

Η μακροχρόνια κυκλοφορία συντελεί στη συμπύκνωση του επιφανειακού εδάφους και του υπεδάφους κοντά στη σειρά των πρέμνων και μπορεί να επηρεάσει τις εδαφικές συνθήκες στο ριζόστρωμα (Van Dijck and Van Asch, 2002; Ferrero et al., 2005; Saffih-Hdadi et al., 2009). Η υφή του εδάφους καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επίδραση της συμπύκνωσης στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του εδάφους (Saffih-Hdadi et al., 2009).

Η συμπύκνωση προκαλεί μεταβολές στη συνέχεια και το δαιδαλώδες των πόρων, οι οποίες επιδρούν δυσμενώς στην αποθήκευση και τη διαθεσιμότητα του νερού (Siczek et al., 2015). Ο Miransari (2014) αναφέρει ότι κατά τη συμπύκνωση μειώνονται οι μακροπόροι και αυξάνονται οι μικροπόροι. Ειδικότερα, οι μεταβολές του πορώδους στο υπέδαφος θεωρούνται δύσκολα αντιστρέψιμες και διαρκούν για μεγάλο χρονικό διάστημα (Lipiec et al., 2012).

Επίσης, επηρεάζονται και άλλες εδαφικές ιδιότητες και λειτουργίες όπως η θερμοκρασία και η ροή θερμότητας, η αντίσταση στη διείσδυση και ο αερισμός οι οποίες μπορεί να γίνουν περιοριστικοί παράγοντες στην ανάπτυξη των φυτών όταν η συμπύκνωση είναι μεγάλη. Τα φυτά τίθενται σε συνθήκες υδατικής καταπόνησης με την αύξηση της μύζησης του εδαφικού νερού, λόγω αλλαγών του πορώδους (Siczek et al., 2015), καθώς μειώνεται η πρόσληψη νερού και θρεπτικών από τις ρίζες (Miransari, 2014). Επιπλέον, ελαχιστοποιούνται τα αποτελέσματα τις λίπανσης (Saffih-Hdadi et al., 2009). Εξαιτίας της μείωσης της κυκλοφορίας του αέρα στην εδαφική ατμόσφαιρα, προκύπτει έλλειψη οξυγόνου και υψηλό ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα που επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη του φυτού και την απόδοση της καλλιέργειας (Miransari, 2014).

Αξιόπιστοι δείκτες για την εκτίμηση της συμπύκνωσής και των επιπτώσεών της στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του εδάφους θεωρούνται: η υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία μειώνεται με την αύξηση της συμπίεσης (Van Dijck and Van Asch, 2002), η κατανομή μεγέθους των συσσωματωμάτων όπου όταν η συμπύκνωση αυξάνεται επικρατούν μεγαλύτερες τιμές μέσου μεγέθους συσσωματωμάτων (Lu, et al., 2015) και η αντίσταση στη διείσδυση που αυξάνεται με την συμπύκνωση (Barik, er al., 2014). Επίσης, από τις καλλιεργητικές πρακτικές επηρεάζονται η κατανομή μεγέθους των πόρων, το διαθέσιμο νερό και η φαινομενική πυκνότητα (Barik et al., 2014; Richard et al., 2001).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της συμπύκνωσης στο επιφανειακό (0-15 cm) και υποεπιφανειακό (15-30 cm) βάθος τριών αμπελώνων με διαφορετική υφή καθώς και των μεταβολών που προκαλούνται στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και κατ' επέκταση στις συνθήκες του ριζοστρώματος.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Πειραματικός Σχεδιασμός

Στην ευρύτερη περιοχή του Αμυνταίου Φλωρίνης επιλέχθηκαν τρεις συμβατικά καλλιεργούμενοι αμπελώνες των οποίων τα εδάφη διέφεραν ως προς την υφή: το πρώτο ήταν αργιλώδες (Cl), το δεύτερο αργιλοπηλώδες (ClL) και το τρίτο ιλυοπηλώδες (SiL) με

αυξημένο ποσοστό άμμου. Ορισμένα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των εδαφών φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφών των αμπελώνων σε βάθος 0-15 και 15-30cm.

Αμπελώνας	**Cl**		**ClL**		**SiL**	
Βάθος (cm)	**0-15**	**15-30**	**0-15**	**15-30**	**0-15**	**15-30**
Άμμος (%)[1]	18,25	22,80	25,25	24,20	41,20	34,30
Ιλύς(%)[1]	45,95	32,70	45,95	46,15	38,60	47,30
Άργιλος (%)[1]	31,45	40,20	26,50	28,10	12,55	12,60
Ο.Ου. (%)[2]	1,75	1,01	1,11	1,19	1,26	0,81
pH[3]	8,13	8,03	8,16	8,12	7,01	7,44
EC (μS/cm)[4]	747	554	733	461	403	370
$CaCO_3$ (%)[5]	6,14	9,65	42,28	41,91	0,00	0,00

[1]Μέθοδος σιφωνίου (Day, 1965), [2]υγρή οξείδωση (Nelson and Sommers, 1982) [3]Εδαφος-νερό 1:2,5 [4]Εκχύλισμα πάστας κορεσμού, [5]ηλεκτρονικό ασβεστόμετρο

Τα πρέμνα ήταν φυτεμένα σε σειρές και απείχαν μεταξύ τους 1,20m. Η απόσταση μεταξύ των σειρών κυμαίνονταν από 2,30 - 2,50m και αποτελούσε τον διάδρομο διέλευσης καλλιεργητικών οχημάτων. Η δειγματοληψία έγινε τον Μάϊο του 2016, κατά την άνθιση της αμπέλου και αφού τα καλλιεργητικά οχήματα είχαν πραγματοποιήσει τρείς διελεύσεις ανά διάδρομο, από την αρχή της καλλιεργητικής περιόδου. Από κάθε αμπελώνα ελήφθησαν σε τρεις επαναλήψεις αδιατάρακτα και διαταραγμένα εδαφικά δείγματα α) ασυμπίεστα (Α), μεταξύ των πρέμνων επάνω στη σειρά φύτευσης και β) συμπιεσμένα (Σ), στον διάδρομο διέλευσης μεταξύ των σειρών. Η δειγματοληψία έγινε σε δύο βάθη: επιφανειακό (0-15cm, βάθος 1) και υποεπιφανειακό (15-30 cm, βάθος 2).

2.2 Εκτίμηση της συμπίεσης

Τα διαταραγμένα εδαφικά δείγματα αεροξηράνθηκαν, προσδιορίσθηκε με ξηρό κοσκίνισμα η κατανομή μεγέθους των <8 mm συσσωματωμάτων (ΚΜΣ) σε μία σειρά κοσκίνων με άνοιγμα οπών διαμέτρου 4, 2, 1, 0,5 και 0,25 mm και υπολογίσθηκε ο Σταθμικός Μέσος Όρος μεγέθους συσσωματωμάτων (ΣΜΟ). Η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό (Ks) προσδιορίσθηκε με τη μέθοδο του περατομέτρου σταθερού υψομετρικού φορτίου (Klute and Dirksen, 1986) σε αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα ύψους 9,8 cm και διαμέτρου 7 cm, μόνον για το βάθος 0-15 cm.

Η χαρακτηριστική καμπύλη συγκράτησης του εδαφικού νερού κατασκευάσθηκε από ζεύγη τιμών μύζησης (h) και εδαφικής υγρασίας (θ). Χρησιμοποιήθηκαν αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα ύψους 4cm και διαμέτρου 5,5cm τα οποία εξισορρόπησαν σε μια σειρά μυζήσεων h_j = 0, 2, 4, 10, 30, 100, 300, 600 και 1500 kPa, με τη χρήση της τράπεζας μυζήσεων και της πιεζόμενης κεραμικής πλάκας υψηλών πιέσεων (Klute, 1986). Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες προσδιορίσθηκε το ολικό πορώδες, το διαθέσιμο νερό και η κατανομή μεγέθους των πόρων (ΚΜΠ) των εδαφικών δειγμάτων, κάνοντας χρήση της εξίσωσης τριχοειδούς ανύψωσης. Προσδιορίσθηκαν οι κλάσεις μεγέθους πόρων, ισοδύναμης διαμέτρου <0,02, 0,02-0,2, 0,2-0,5, 0,5-1, 1-3, 3-10, 10-30, 30-75, 75-150 και >150 μm και εκφράσθηκαν ως ποσοστό (%) του ολικού πορώδους. Τα ίδια δείγματα χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της φαινομενικής πυκνότητας (ΦΠ) από τον όγκο και το βάρος ξηρού εδάφους.

Πλησίον των σημείων δειγματοληψίας προσδιορίσθηκε η αντίσταση του εδάφους στη διείσδυση, από την επιφάνεια έως το βάθος των 60 cm, με φορητό διεισδυσίμετρο EijkelKamp με διατομή βάσης κώνου 1 cm^2 και γωνία κώνου 60^0. Η υγρασία του εδάφους των τριών αμπελώνων κυμαινόταν μεταξύ 11 και 15% κ.β..

2.3 Στατιστική επεξεργασία

Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε με ANOVA κατά έναν παράγοντα σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Φαινομενική Πυκνότητα και Υδραυλική Αγωγιμότητα

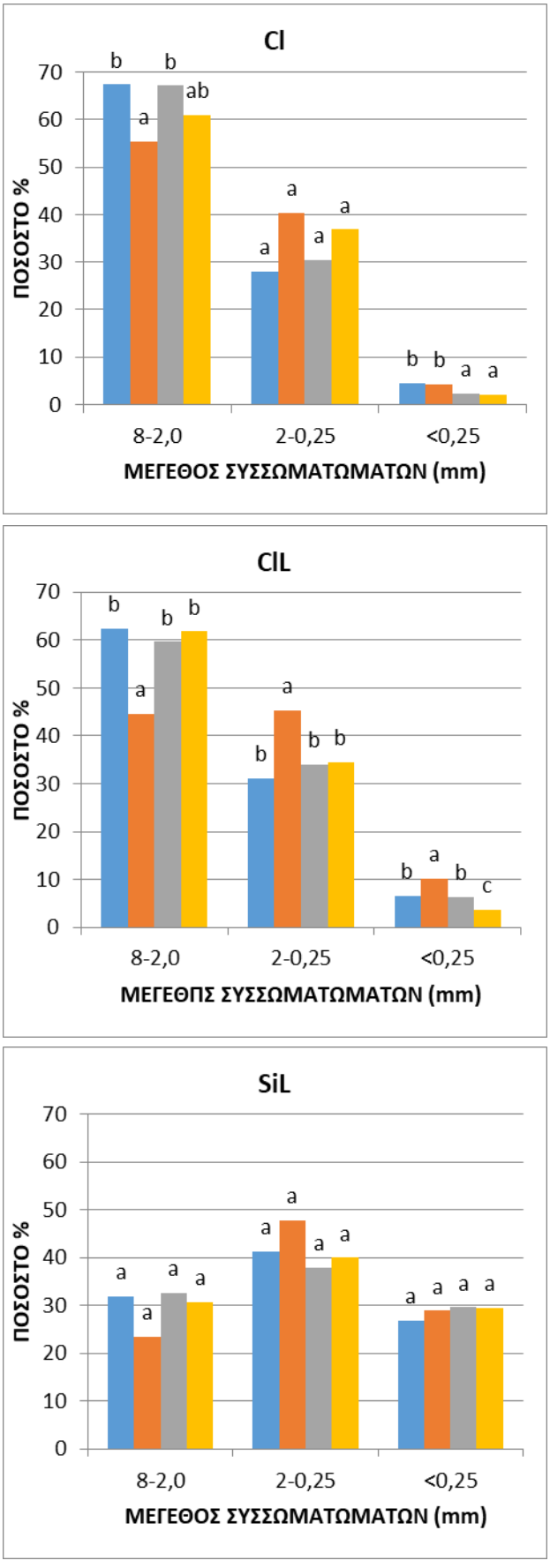
Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι μεταβολές από τη συμπύκνωση ορισμένων φυσικών ιδιοτήτων για τα εδάφη των τριών αμπελώνων στα δύο βάθη.

Πίνακας 2. ***Φυσικές ιδιότητες των ασυμπίεστων (Α) και συμπιεσμένων (Σ) επιφανειακών (1) και υποεπιφανειακών (2) εδαφών των αμπελώνων***

ΕΔΑΦΟΣ/ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ		Σ.Μ.Ο. (mm)	Φ.Π. (gr cm^{-1})	Υδραυλική Αγωγιμότητα (ml h^{-1})	Διαθέσιμο Νερό (ml ml^{-1})	Πόροι (ποσοστό%)	
						>10μm	<10μm
Cl	Σ1	3,58 c	1,34 b	0,0167 a	0,321 ab	19,51 ab	80,49 bc
	Α1	2,90 a	1,03 a	7,1867 b	0,297 a	41,68 c	58,32 a
	Σ2	3,53 b	1,33 b	-	0,344 bc	17,95 a	82,05 c
	Α2	3,12 ab	1,15 a	-	0,374 c	31,75 bc	68,25 ab
ClL	Σ1	3,35 b	1,39 b	0,0066 a	0,308 a	21,85 a	78,15 c
	Α1	2,43 a	1,08 a	33,9234 b	0,326 ab	46,15 c	53,85 a
	Σ2	3,20 b	1,33 b	-	0,386 c	16,95 a	83,05 c
	Α2	3,27 b	1,18 a	-	0,347 b	32,93 b	67,07 b
SiL	Σ1	1,78 a	1,60 b	0,3378 a	0,397 b	21,17 a	79,54 c
	Α1	1,41 a	1,21 a	14,9877 b	0,370 a	51,68 c	48,32 a
	Σ2	1,80 a	1,46 b	-	0,428 b	32,12 ab	67,88 bc
	Α2	1,72 a	1,49 b	-	0,370 a	35,09 b	65,01 b

Η φαινομενική πυκνότητα των συμπιεσμένων εδαφικών δειγμάτων αυξήθηκε σημαντικά και στα δύο βάθη για τους δύο λεπτόκοκκους αμπελώνες Cl και ClL, ενώ στον πλέον χονδρόκοκκο αμπελώνα (SiL με αυξημένο ποσοστό άμμου) η συμπύκνωση αύξησε σημαντικά τη φαινομενική πυκνότητα μόνο στο πρώτο βάθος (Πιν. 2). Οι Van Dijck and van Asch (2002) αναφέρουν ότι η κυκλοφορία οχημάτων στους αμπελώνες καταλήγει σε αυξημένες τιμές φαινομενικής πυκνότητας τόσο του επιφανειακού εδάφους όσο και του υπεδάφους η οποία οφείλεται στο φορτίο που ασκεί ο τροχός.

Και στους τρεις αμπελώνες, η αύξηση της ΦΠ των συμπιεσμένων επιφανειακών εδαφών μείωσε σημαντικά την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας τους στον κορεσμό σε σχέση με τα αντίστοιχα ασυμπίεστα εδάφη. Μικρότερη μείωση παρατηρήθηκε στο πλέον χονδρόκοκκο έδαφος (Πιν.2). Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με τους Menon et al. (2015), οι οποίοι σε συμπυκνωμένα πηλώδη μακροσυσσωματώματα βρήκαν αρνητική γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ΦΠ και του ρυθμού ροής του εδαφικού νερού.



Σχήμα 8. ***Η Κατανομή Μεγέθους Συσσωματωμάτων (ΚΜΣ) στα τρία εδάφη.***

3.2 Κατανομή μεγέθους συσσωματωμάτων

Στους δύο πλέον λεπτόκοκκους αμπελώνες (Cl και ClL) η συμπύκνωση ευνόησε τη δημιουργία μεγάλων συσσωματωμάτων στο πρώτο βάθος, όπως φαίνεται από τη σημαντικά μεγαλύτερη τιμή του Σ.Μ.Ο. των Σ1 έναντι των Α1 (Πιν. 2). Οι Lu et al. (2015), αναφέρουν ότι η μηχανική συμπύκνωση που προκαλείται μετά από τρεις διελεύσεις των ελκυστήρων, προωθεί τη δημιουργία μεγάλων συσσωματωμάτων σε σχέση με τα μικρότερα. Επίσης, στα ασυμπίεστα εδάφη όλων των αμπελώνων, παρατηρήθηκε υψηλότερη τιμή του ΣΜΟ του υποεπιφανειακού εδάφους (Α2) σε σχέση με το πρώτο βάθος (Α1) αλλά η διαφορά δεν ήταν πάντα σημαντική (Πιν. 2). Αυτό πιθανώς οφείλεται στη συμπίεση που ασκείται από το βάρος του υπερκείμενου επιφανειακού εδάφους. Τέλος, ο Σ.Μ.Ο. στο πλέον χονδρόκοκκο έδαφος (SiL) δεν επηρεάστηκε σημαντικά από τη συμπίεση.

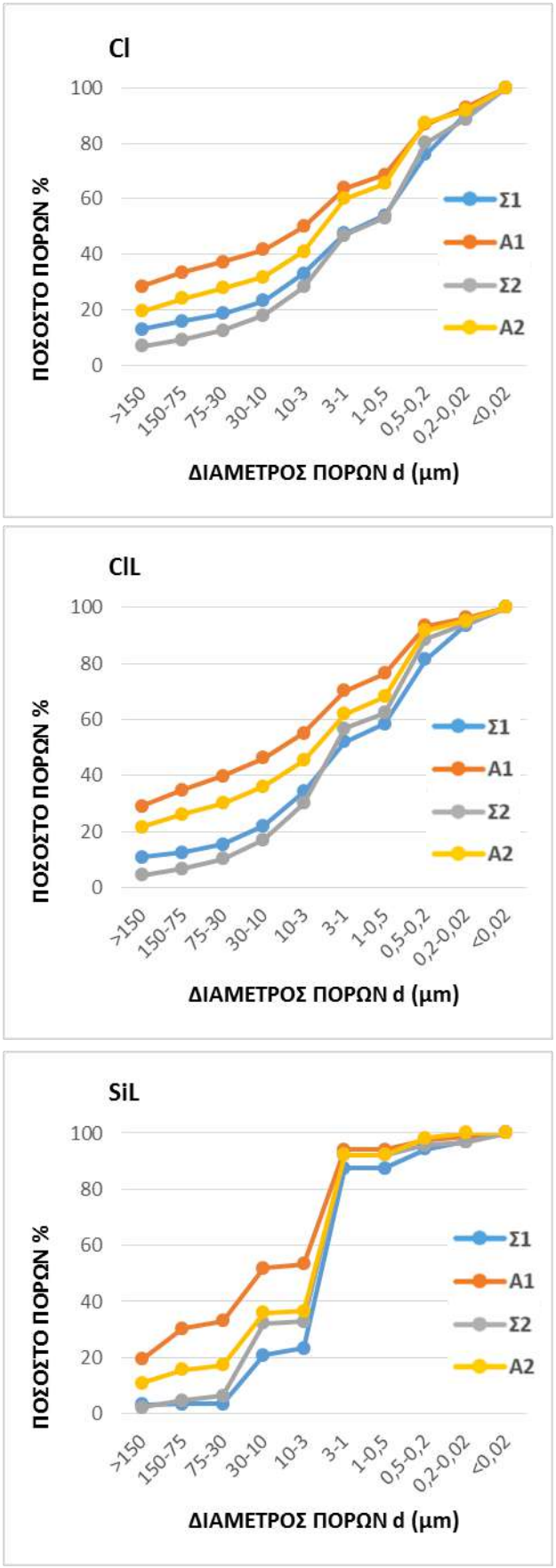
Στο Σχήμα 1 φαίνεται ότι στα επιφανειακά λεπτόκοκκα εδάφη η συμπίεση οδήγησε στην αύξηση της συμμετοχής στη ΚΜΣ των μεγάλων μακροσυσσωματωμάτων (8-2mm) σε βάρος των μικρών (2-0,25mm). Στο δεύτερο βάθος, επηρέασε την κατανομή μεγέθους των μακροσυσσωματωμάτων μόνο του αργιλώδους εδάφους αλλά η διαφορά δεν ήταν σημαντική.

3.3 Κατανομή μεγέθους πόρων και Διαθέσιμο Νερό

Η επίδραση της συμπίεσης στην ΚΜΠ φαίνεται στο Σχήμα 2, στο οποίο παρουσιάζεται η αθροιστική καμπύλη της ΚΜΠ για τα τρία εδάφη στις διάφορες μεταχειρίσεις. Και στους τρεις αμπελώνες το μεγαλύτερο ποσοστό πόρων μεγάλης διαμέτρου (>30 μm) έχουν τα Α1 Α2, ενώ ακολουθούνται από τα Σ1 και Σ2. Αντίθετα, η συμμετοχή των <30 μm πόρων στη ΚΜΠ αυξάνει με τη σειρά Α1<Α2<Σ1<Σ2. Τα ανωτέρω δείχνουν ότι η συμπίεση οδηγεί στη κατάρρευση των πόρων στράγγισης προς μικρότερους.

Η αύξηση της συμμετοχής των μικρότερων πόρων στη ΚΜΠ των συμπιεσμένων εδαφών είχε ως αποτέλεσμα την απουσία αρνητικής επίδρασης της συμπίεσης στο διαθέσιμο νερό. Από τον Πίνακα 2 φαίνεται ότι το διαθέσιμο στα φυτά νερό για τον αμπελώνα Cl δε διέφερε σημαντικά στο πρώτο βάθος μεταξύ συμπιεσμένου και ασυμπίεστου, ούτε και στο συμπιεσμένο κομμάτι σε πρώτο και δεύτερο βάθος. Σημαντικές διαφορές παρουσίασαν τα Α1 και Α2. Αυτό συμβαίνει διότι στο δεύτερο βάθος υπάρχουν περισσότεροι πόροι μεγέθους 30-2 μm που συγκρατούν και αποδίδουν το νερό στο φυτό (Σχ. 2) και πιθανώς οφείλεται στη συμπίεση του εδάφους από το υπερκείμενο στρώμα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πόρων μικρότερης διαμέτρου σε βάρος των >30 μm πόρων. Το διαθέσιμο νερό στο πηλώδες έδαφος δεν εμφάνισε σημαντικές διαφορές στο πρώτο βάθος (Σ1 – Α1) και στα Α1 – Α2, αλλά μόνο ανάμεσα στα Σ1 – Σ2. Το βάρος του υπερκείμενου εδάφους σε συνδυασμό με τη συμπύκνωση από τα γεωργικά μηχανήματα φαίνεται να αύξησε το ποσοστό των πόρων που συγκρατούν διαθέσιμο στα φυτά νερό (Σχ. 2). Τέλος, στο ελαφρύτερο έδαφος η συμπύκνωση έδρασε θετικά στην αύξηση του ποσοστού του διαθέσιμου νερού και στατιστικά σημαντική διαφορά παρατηρείται μόνο μεταξύ συμπιεσμένων και ασυμπίεστων δειγμάτων. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με τους Barik et al. (2014), οι οποίοι αναφέρουν αύξηση της κατ΄ όγκο υγρασίας του εδάφους μετά από συμπύκνωση αλλά έρχονται σε αντίθεση με τους Lipiec et al. (2012), οι οποίοι παρατήρησαν μείωση του διαθέσιμου νερού με τη συμπύκνωση.

Το ολικό πορώδες του εδάφους διακρίνεται σε πορώδες δομής (πόροι >9μm, μεταξύ των συσσωματωμάτων) και πορώδες υφής (πόροι <9μm, εντός των συσσωματωμάτων) (Leij et al., 2002). Η συμπίεση επηρέασε την κατανομή μεγέθους των πόρων (ΚΜΠ) σε όλους τους

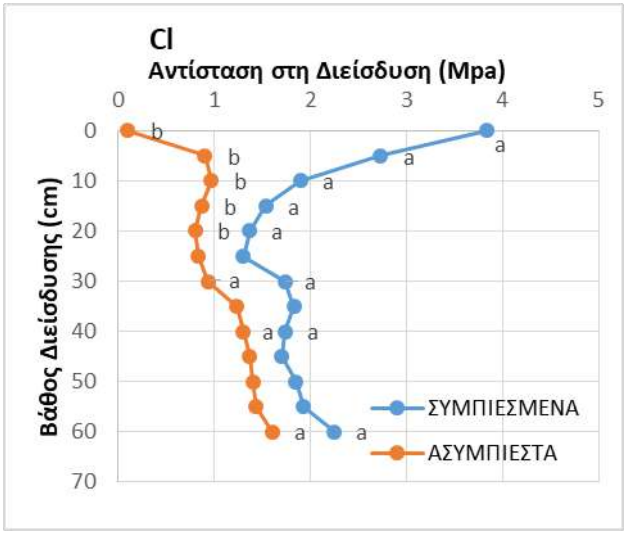


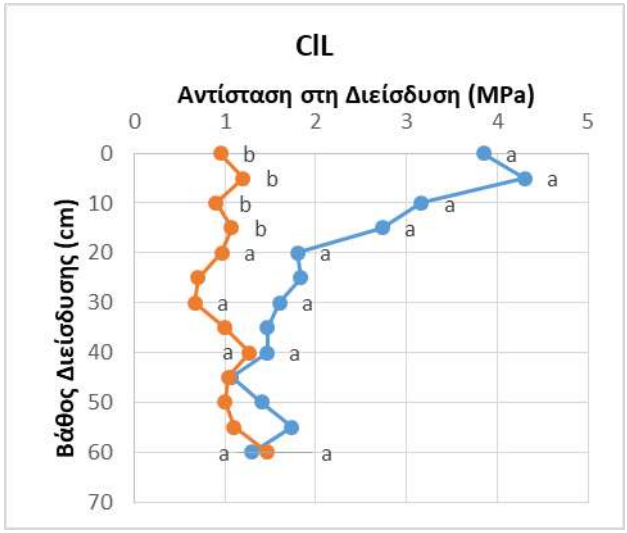
Σχήμα 9. ***Κατανομή Μεγέθους Πόρων (ΚΜΠ) στους τρεις αμπελώνες.***

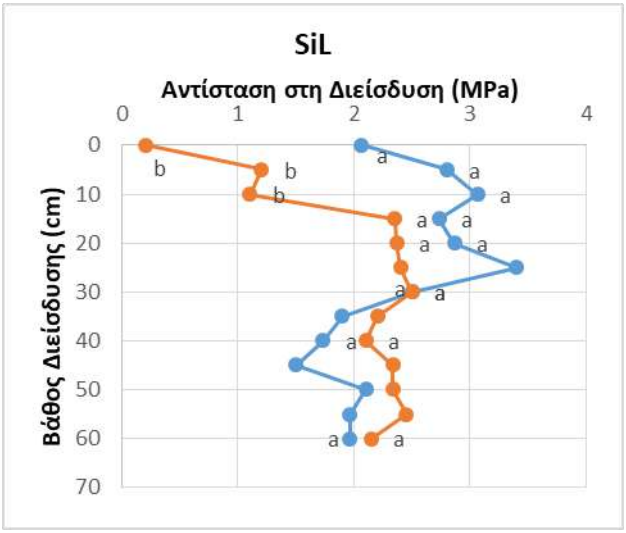
αμπελώνες μειώνοντας σημαντικά τους πόρους δομής (>10μm) και αυξάνοντας τους πόρους υφής (<10μm) στο πρώτο βάθος. Στο δεύτερο βάθος συνέβει το ίδιο μόνο για τους δύο λεπτόκοκκους αμπελώνες, ενώ στον χονδρόκοκκκο δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά (Πιν. 2). Σύμφωνα με τους Richard et al. (2001) η αύξηση των πόρων υφής οφείλεται στα υπολείμματα των πόρων δομής που καταστρέφονται κατά τη συμπίεση.

3.3 Αντίσταση στη Διείσδυση

Σημαντικές διαφορές στην αντίσταση στη διείσδυση μεταξύ συμπιεσμένων και ασυμπίεστων εδαφών (Van Dijck & Van Asch, 2002) εντοπίζονται και για τους τρεις αμπελώνες στα μικρότερα βάθη (Σχ. 3). Ο λόγος είναι ότι τα ανώτερα στρώματα του εδάφους δέχονται μεγαλύτερες τάσεις και συμπυκνώνονται περισσότερο λόγω της πιο άμεσης επαφής τους με τα καλλιεργητικά μηχανήματα (Barik et al., 2014). Η υφή του εδάφους φαίνεται πως επηρεάζει την τιμή της αντίστασης στη διείσδυση μετά από συμπίεση. Καθώς αυξάνει το ποσοστό της άμμου στην κοκκομετρική σύσταση των αμπελώνων μειώνεται το βάθος στο οποίο η διαφορά μεταξύ συμπιεσμένου και ασυμπίεστου είναι σημαντική (Cl 0-20 cm > ClL 0-15 cm > SiL 0-10 cm). Επίσης, ενώ στα πρώτα βάθη μεγαλύτερη αντίσταση στη διείσδυση ειδικά στα συμπιεσμένα εμφανίζουν οι αμπελώνες Cl και L, σε μεγαλύτερα βάθη μεγαλύτερη αντίσταση και στις δύο μεταχειρίσεις εμφανίζει το SiL έδαφος. Στους δύο λεπτόκοκκους αμπελώνες, η τιμή της αντίστασης στη διείσδυση υπερέβαινε την κρίσιμη για την ανάπτυξη των ριζών τιμή των 3MPa μόνο στο επιφανειακό έδαφος των διαδρόμων. Η μεγάλη αντίσταση στη διείσδυση μπορεί να λειτουργήσει αρνητικά στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών με αποτέλεσμα την κακή τους θρέψη και τη δυσκολία στην ανάπτυξή τους (Siczek et al., 2015).







Σχήμα 3. ***Η αντίσταση στη διείσδυση στους τρεις αμπελώνες (Cl, L & S).***

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συμπύκνωση μετέβαλλε τις φυσικές ιδιότητες του ριζοστρώματος των αμπελώνων αυξάνοντας τη φαινομενική πυκνότητα στο επιφανειακό (0-15 cm) και υποεπιφανειακό (15-30 cm) βάθος. Επίσης, αυξήθηκε το διαθέσιμο για τα φυτά νερό και οι μικροπόροι μέσα στα συσσωματώματα, γεγονός που δείχνει το μετασχηματισμό πόρων με μεγάλη διάμετρο σε μικρότερους πόρους. Ταυτόχρονα, αυξήθηκε ο Σ.Μ.Ο., λόγω συνένωσης μικρότερων συσσωματωμάτων, γεγονός που επίσης δικαιολογείται από τη μείωση των πόρων της δομής. Η συμπύκνωση έκανε τα εδάφη πιο ανθεκτικά στη διείσδυση, ειδικά στα ανώτερα στρώματα. Επίσης, μείωσε την υδραυλική αγωγιμότητα και στους τρεις τύπους εδαφών. Από τα ανωτέρω φαίνεται ότι η επίδραση της συμπύκνωσης στις φυσικές και υδραυλικές ιδιότητες που μελετήθηκαν ήταν μεγαλύτερη στα επιφανειακά λεπτόκοκκα εδάφη των αμπελώνων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barik, K., Aksakal, E. L., Islam, K. R., Sari, S., & Angin, I. (2014). Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations. Catena, 120, 122-133.

Day, P., 1965. Particle fractionation and particle size analysis. In: Methods of Soil Analysis Part 1 (C.A. Black et al., ed,) Am. Soc. Agr., Madison, Wis. pp. 545-567.

Ferrero, A., Usowicz, B., & Lipiec, J. (2005). Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. Soil and Tillage Research, 84(2), 127-138.

Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. Soil and tillage research, 82(2), 121-145.

Klute, A. (1986). Water retention: Laboratory methods. P. 597-. In: Klute, A. (Ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA ans SSSA, Madison, WI.

Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Am. Sco. Agron, Madison, WI, pp. 687-734.

Leij F.J., Ghezzehei T.A., Or D. Modelling the dynamics of the soil pore-size distribution. *Soil & Till. Res.* 2002; 64: 61-78.

Lipiec, J., Hajnos, M., & Świeboda, R. (2012). Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. Geoderma, 179, 20-27.

Lu, Q., Wang, E., & Chen, X. (2015). Effect of mechanical compaction on soil micro-aggregate composition and stability of black soil. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(11), 54-59.

McLean, E. O. (1982). Soil pH and Lime Requirement. In: Methods of Soil Analysis Part 2. (Ed. A.L. Page). Soil Sci. Soc. of Am. pp. 199-224.

Menon, M., Jia, X., Lair, G. J., Faraj, P. H., & Blaud, A. (2015). Analysing the impact of compaction of soil aggregates using X-ray microtomography and water flow simulations. *Soil and Tillage Research*, *150*, 147-157.

Miransari, M. (2014). Mycorrhizal Fungi to Alleviate Compaction Stress on Plant Growth. In Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses (pp. 165-174). Springer New York.

Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In: Methods of Soil Analysis Part 2 (Ed. A.L. Page). Soil Sci. Soc. of Am. pp. 539–580.

Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A., Guerif, J., 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. Eur. J. Soil Sci. 52, 49–58.

Saffih-Hdadi, K., Défossez, P., Richard, G., Cui, Y. J., Tang, A. M., & Chaplain, V. (2009). A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. Soil and Tillage Research, 105(1), 96-103.

Siczek, A., Horn, R., Lipiec, J., Usowicz, B., & Łukowski, M. (2015). Effects of soil deformation and surface mulching on soil physical properties and soybean response related to weather conditions. Soil and Tillage Research, 153, 175-184.

Smith, R., Bettiga, L., Baumgartner, K., Jackson, L., & Bensen, T. (2008). Vineyard floor management affects soil, plant nutrition, and grape yield and quality. California Agriculture, 62(4), 184-190.

Van Dijck, S. J. E., & Van Asch, T. W. (2002). Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. Soil and Tillage Research, 63(3), 141-153.

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΕ ΚΟΜΠΟΣΤ ΜΕ ΥΓΡΗ ΚΑΙ ΞΗΡΗ ΚΑΥΣΗ. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ.

Ε. Χατζηγιαννάκης[1], Σ. Στεφάνου[2]✉, Δ. Ιωαννίδης[2] & Χ. Σμάγας[3]

[1]Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, ΕΛΓΟ «ΔΗΜΗΤΡΑ», 57400 Σίνδος – Θεσσαλονίκη

[2]Αλεξάνδρειο Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων, Τ.Θ. 141, 57400, Θεσσαλονίκη

[3]Ιδιώτης Γεωπόνος, Αγ. Νικόλαος Χαλκιδικής, 63078

✉stefst2@cp.teithe.gr

Περίληψη

Σε 50 δείγματα κομπόστ από ισάριθμες οικιακές μονάδες (κάδους) παραγωγής εγκατεστημένες σε δήμους της Χαλκιδικής, προσδιορίστηκαν η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία με τις μεθόδους της ξηρής καύσης (Ξ.Κ.) και της υγρής καύσης (Υ.Κ.), καθώς και σε ολικό άζωτο (Ν) για τη μελέτη των μεταξύ τους σχέσεων. Η μέση περιεκτικότητα (%) σε οργ. ουσία στην Υ.Κ. είναι ίση με 17,63 ± 6,15 και στην Ξ.Κ. 22,73 ± 7,52, η δε συσχέτισή τους βρέθηκε στατιστικά σημαντική με R^2 = 0,655. Η μέση περιεκτικότητα (%) των δειγμάτων σε ολικό Ν βρέθηκε ίση με 1,214 ± 0,481, ενώ η μέση τιμή του λόγου C (Ξ.Κ.)/N είναι ίση με 9,80 και μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του λόγου C (Υ.Κ.)/N. Η συσχέτιση του ολικού Ν και της οργ. ουσίας (Ξ.Κ.) έδωσε R^2 = 0,674, πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τον αντίστοιχο στην περίπτωση της Υ.Κ. (0,411). Η μέθοδος της Ξ.Κ. μπορεί να θεωρηθεί πιο αξιόπιστη για τον προσδιορισμό της οργ. ουσίας στα κομπόστ σε σχέση με της Υ.Κ.

Λέξεις κλειδιά: οικιακά κομπόστ, οργανική ουσία, ολικό άζωτο, C/N

ORGANIC MATTER MEASUREMENT IN COMPOST SAMPLES USING WET OXIDATION AND DRY COMBUSTION METHODS. COMPARISON OF THE TWO METHODS AND DETERMINATION OF TOTAL NITROGEN.

E. Hatzigiannakis[1], S. Stefanou[2]✉, D. Ioannidis[2] & Ch. Smagas[3]

[1]Soil and Water Resources Institute, Hellenic Agricultural Organization-DG Research, 57400 Sindos

[2]Department of Agricultural Technology, Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki, 57400 Sindos - Thessaloniki

[3]Agronomist, 63078, Ag. Nikolaos Chalkidiki

Abstract

In 50 compost samples collected from household production units of Chalkidiki area, the organic matter content was assessed using dry combustion (D.C.) and wet oxidation (W.O.) methods. The results showed an average content (%) of organic matter (W.O.) 17.63 ± 6.15 and 22.73 ± 7.52 (D.C.), and their correlation was statistically significant (R^2 = 0.655). The average total N content (%) was 1.214 ± 0.481, while the mean C (D.C.)/N ratio is 9.80 and higher than the ratio of C (W.O.)/N. The correlation between total N and organic matter (D.C.) gave R^2 = 0.674, much higher than in the case of W.O. (R^2 = 0.411). The D.C. method could be considered more reliable compared to the W.O. one for the measurement of organic matter in compost.

Keywords: household compost, organic matter, total nitrogen, C/N

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους παράγοντες που ευνοούν την αύξηση της οργανικής ουσίας στα εδάφη, είναι η εφαρμογή κομπόστ. Πρόκειται για μίγματα ζωικών και φυτικών υπολειμμάτων κατάλληλα επεξεργασμένα, ώστε να έχουν χαμηλή τιμή λόγου C/N και να είναι απαλλαγμένα από το παθογόνο μικροβιακό τους φορτίο ή σπόρους ζιζανίων (Κεραμίδας, 1999). Στην ευρύτερη κατηγορία αυτών των υλικών υπάγονται τα κομπόστ από αστικά απορρίμματα ή οικιακά κομπόστ, δηλαδή υλικά που παράγονται από την αποσύνθεση και ανακύκλωση οικιακών οργανικών υλικών (φύλλα, κλαδιά, υπολείμματα κουζίνας: φρούτα, λαχανικά, τσόφλια αυγών κ.λπ.) και τα οποία χρησιμεύουν ως φυσικό λίπασμα, αλλά και για τη βελτίωση φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους.

Η διαδικασία της τεχνητής ανακύκλωσης κοινών οργανικών υλικών, όπως υπολειμμάτων κουζίνας, προϊόντων κλαδέματος, πεσμένων φύλλων, κοπριάς φυτοφάγων ζώων κτλ., είναι μία απομίμηση της διαδικασίας που λαμβάνει χώρα αυτόματα στη φύση και συνίσταται στην ταχεία αποδόμηση των οργανικών υλικών και τη μετατροπή τους σε κομπόστ (Βροντάνης, 2009). Κατά τη διαδικασία κομποστοποίησης, μικροοργανισμοί διασπούν και μετασχηματίζουν τα ανεπεξέργαστα υλικά σε νέα, με διαφορετικές ιδιότητες (κομπόστ) και ουδέτερο pH. Το περιβάλλον που απαιτείται πρέπει να είναι θερμό, υγρό και αεριζόμενο (F.A.O., 1987). Σύμφωνα, επίσης, με τον Βροντάνη (2009), το κομπόστ αυξάνει την ικανότητα του εδάφους να κατακρατά την απαραίτητη ποσότητα νερού και αέρα, βελτιώνει τη δομή και την υγεία του εδάφους, απελευθερώνει θρεπτικά στοιχεία σε αργούς ρυθμούς, περιέχει φυσικά μυκητοκτόνα και μικροοργανισμούς τα οποία προστατεύουν τα φυτά από ασθένειες και έντομα και εξυγιαίνει το επιβαρυμένο έδαφος (υπερλίπανση, τοξικά μέταλλα).

Με δεδομένο ότι σε οργανικά υλικά αυτού του τύπου, ο άνθρακας (οργανική ουσία) και το άζωτο παίζουν βασικό ρόλο, σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη των συγκεντρώσεων οργανικής ουσίας σε δείγματα οικιακών κομπόστ, καθώς και η σύγκριση μεταξύ των τιμών της που προσδιορίζονται με τις μεθόδους της υγρής και ξηρής καύσης. Επίσης, σκοπός είναι ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων του ολικού αζώτου, η μελέτη της σχέσης μεταξύ του ολικού αζώτου και της οργανικής ουσίας των κομπόστ όπως αυτή προσδιορίζεται με τις δύο μεθόδους και η μελέτη του λόγου C/N.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν 50 συνολικά δείγματα κομποστοποιημένου υλικού, τα οποία προήλθαν από ισάριθμες οικιακές μονάδες (κάδους) κομποστοποίησης από διάφορους δήμους της Χαλκιδικής. Σε αυτά τα δείγματα προσδιορίστηκε η οργανική ουσία με δύο μεθόδους: με υγρή καύση (μέθοδος της υγρής οξείδωσης) και με ξηρή καύση. Επίσης, σε όλα τα δείγματα πραγματοποιήθηκε και εργαστηριακός προσδιορισμός του ολικού αζώτου (N) με τη μέθοδο Kjeldahl. Πιο αναλυτικά:

Ο προσδιορισμός της οργανικής ουσίας του εδάφους βασίζεται στη μέτρηση του οργανικού C, δηλαδή του C των οργανικών ενώσεων του εδάφους (Αλεξιάδης, 1980; Ματσή, 2004). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του οργανικού C των εδαφών είναι η μέθοδος της υγρής οξείδωσης (μέθοδος Walkley & Black, Nelson and Sommers, 1996). Σύμφωνα με αυτή, γνωστή αρχική ποσότητα διαλύματος διχρωμικού καλίου ($K_2Cr_2O_7$) σε περίσσεια, φέρεται σε επαφή με το έδαφος. Ορισμένη ποσότητα (από την αρχική γνωστή) του διαλύματος $K_2Cr_2O_7$ αντιδρά με τον οργανικό C ($1^{η}$ αντίδραση οξειδοαναγωγής):

$$3C + 2K_2Cr_2O_7 + 8H_2SO_4 \rightarrow 2K_2SO_4 + 2Cr_2(SO_4)_3 + 3CO_2 + 8H_2O$$

Η υπόλοιπη ποσότητα του $K_2Cr_2O_7$ που περισσεύει, προσδιορίζεται με ογκομέτρηση με διάλυμα θειϊκού σιδήρου ($FeSO_4$) ($2^{η}$ αντίδραση οξειδοαναγωγής):

$$K_2Cr_2O_7 + 6FeSO_4 + 7H_2SO_4 \rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + 3Fe_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + 7H_2O$$

Στη μέθοδο της ξηρής καύσης, όπως περιγράφεται από τον Αλιφραγκή (2010), μία ορισμένη ποσότητα ξηρού εδαφικού δείγματος (ξήρανση στους 105°C), καίγεται για ορισμένο χρονικό διάστημα σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας (κλίβανο καύσης). Η απώλεια βάρους του δείγματος, λόγω της θέρμανσης, αποδίδεται στην καύση της οργανικής ουσίας. Ο τρόπος αυτός υπολογισμού της οργανικής ουσίας δίνει μία εκτίμηση της περιεχόμενης οργανικής ουσίας και δεν αποτελεί, ουσιαστικά, μέθοδο μέτρησης, γιατί υπεισέρχονται ορισμένα σφάλματα, όπως π.χ. ο υπολογισμός του στοιχειακού C σαν οργανική ουσία, οι απώλειες δομικού (κρυσταλλικού) νερού των ορυκτών και η διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$). Για τον περιορισμό των παραπάνω σφαλμάτων χρησιμοποιείται η χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία καύσης (400°C), με παράλληλη αύξηση της διάρκειας καύσης (16 h).

Ο προσδιορισμός του ολικού αζώτου έγινε με τη μέθοδο Kjeldahl (Bremner and Mulvaney, 1982).

Σημειώνεται ότι όλες οι αναλύσεις έγιναν στο διαπιστευμένο κατά ΕΛΟΤ ΕΝ ISO/IEC 17025 Εργαστήριο Φυσικοχημικών Δοκιμών Εδάφους – Νερού – Φυτικών Ιστών του Ινστιτούτου Εδαφοϋδατικών Πόρων (πρώην Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων) του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού "ΔΗΜΗΤΡΑ" στη Σίνδο Θεσσαλονίκης.

Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, καθώς και η παραγωγή των διαγραμμάτων έγινε με τη χρήση του Microsoft Excel και του στατιστικού προγράμματος SPSS 20.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά στατιστικά στοιχεία (ελάχιστες και μέγιστες τιμές, μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις) των μετρήσεων της οργανικής ουσίας με τις δύο μεθόδους (υγρή και ξηρή καύση), του ολικού N και του λόγου C/N.

Πίνακας 1. Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων.

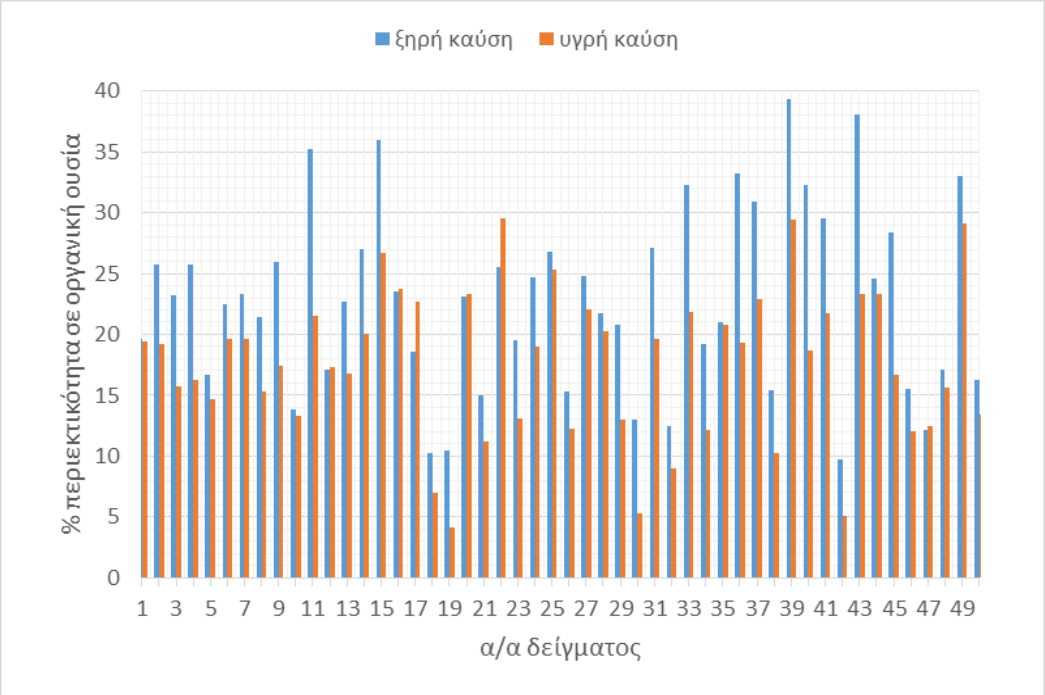
	Αριθμός δειγμάτων	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Οργανική ουσία, % (ξηρή καύση)	50	9,68	39,30	22,73	7,51
Οργανική ουσία, % (υγρή καύση)	50	4,10	29,48	17,63	6,15
Ολικό N, %	50	0,35	2,52	1,214	0,481
[1]C/N		5,57	15,41	9,80	2,30
[2]C/N		2,60	15,32	7,69	2,76

1. C (ξηρή καύση)
2. C (υγρή καύση)

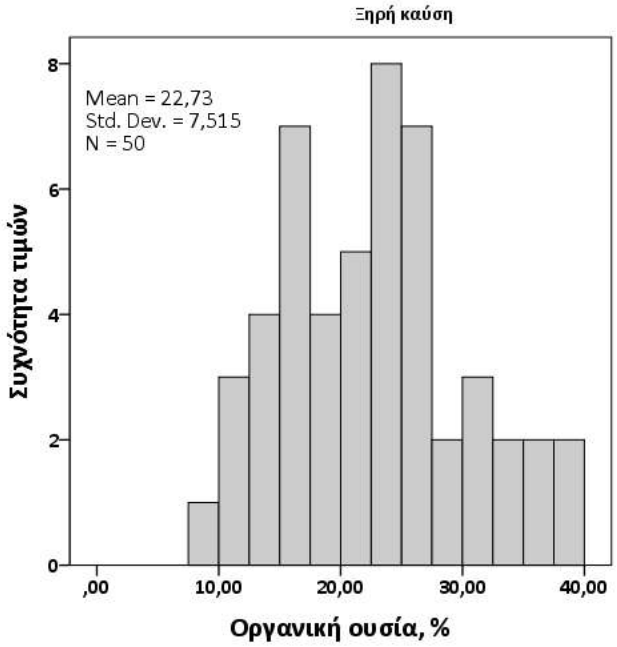
Στο σημείο αυτό να διευκρινιστεί ότι προκειμένου να εκτιμηθεί η τιμή του λόγου C/N στα δείγματα κομπόστ που υπέστησαν ξηρή καύση, ο υπολογισμός του οργανικού C έγινε έμμεσα και όχι άμεσα όπως στην περίπτωση της υγρής οξείδωσης.

Η σύγκριση των μέσων όρων των συγκεντρώσεων οργανικής ουσίας μεταξύ των δύο μεθόδων, έδειξε ότι η ξηρή καύση έδωσε μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την υγρή καύση και η διαφορά τους είναι στατιστικά σημαντική ($P < 0,05$). Στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρείται και στις τιμές C/N, με τη μεγαλύτερη μέση τιμή (9,80) να εμφανίζεται στα δείγματα κομπόστ των οποίων ο άνθρακας (οργανική ουσία) υπολογίστηκε με την ξηρή καύση. Η παραπάνω τιμή προσεγγίζει περισσότερο την τιμή 15 που δίνεται για το ώριμο οικιακό κομπόστ, σύμφωνα με στοιχεία που παρουσιάζονται από τους Brady and Weil (2011).

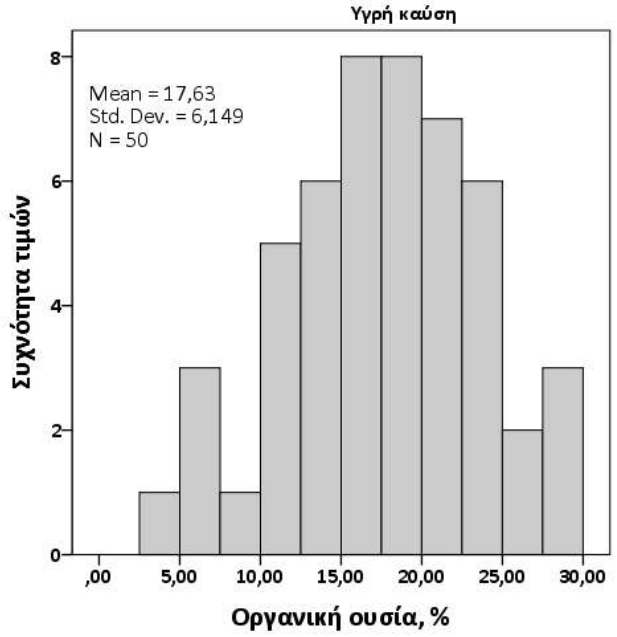
Στο Σχήμα 1α παρουσιάζεται η % περιεκτικότητα σε οργανική ουσία του συνόλου των δειγμάτων, όπως προσδιορίστηκε και με τις δύο μεθόδους, ενώ στα Σχήματα 1(β-δ) παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομών συχνοτήτων όλων των μετρούμενων παραμέτρων.



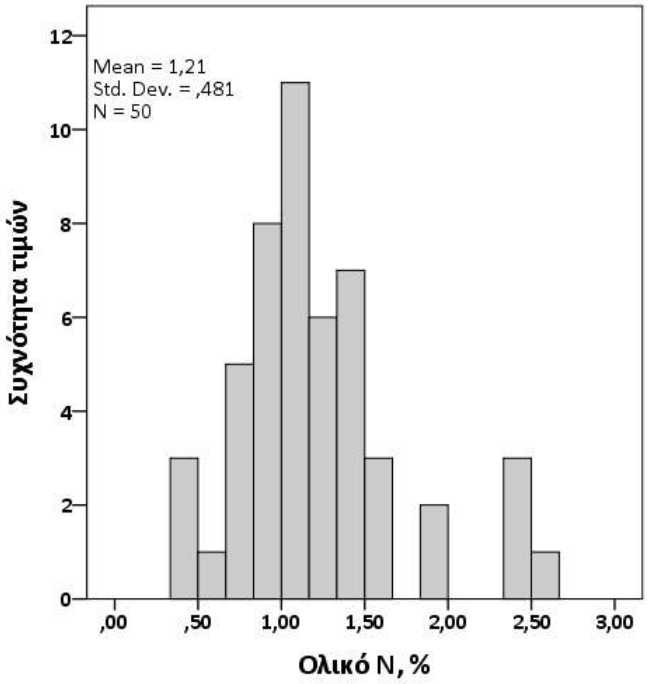
Σχήμα 1α. Αποτελέσματα προσδιορισμού, με ξηρή και υγρή καύση, της % περιεκτικότητας σε οργανική ουσία 50 δειγμάτων κομπόστ.



Σχήμα 1β. Κατανομή των συγκεντρώσεων οργανικής ουσίας (ξηρή καύση) στα δείγματα κομπόστ.

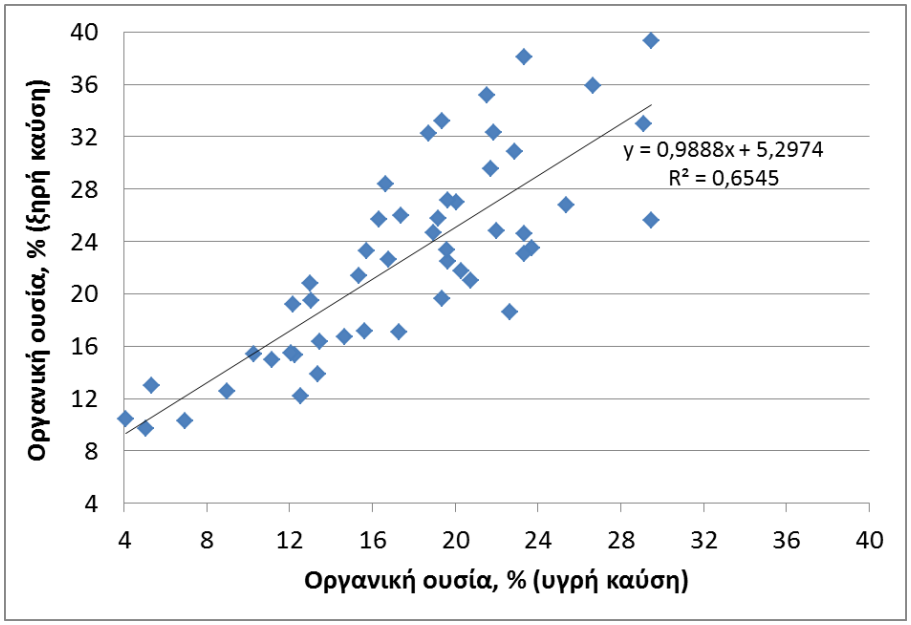


Σχήμα 1γ. Κατανομή των συγκεντρώσεων οργανικής ουσίας (υγρή καύση) στα δείγματα κομπόστ.



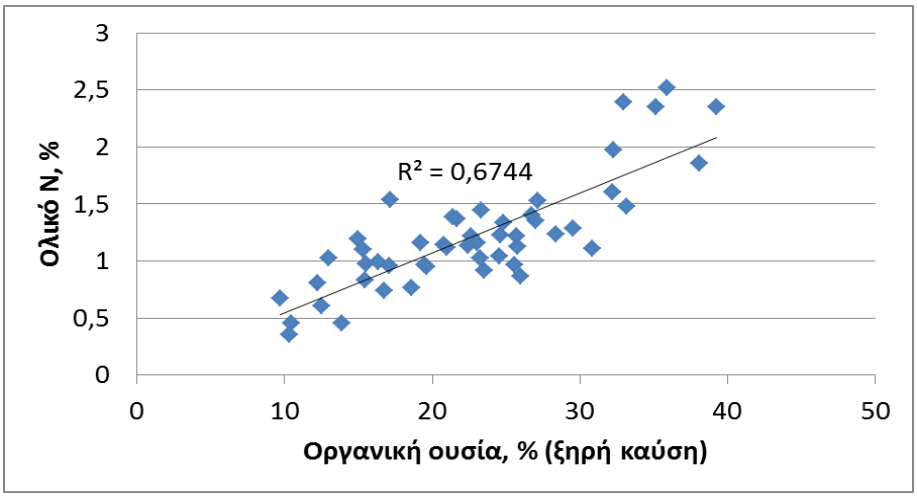
Σχήμα 1δ. Κατανομή των συγκεντρώσεων ολικού N στα δείγματα κομπόστ.

Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων οργανικής ουσίας που δίνουν οι δύο μέθοδοι. Από τη στατιστική επεξεργασία προκύπτει ότι υπάρχει θετική συμμεταβολή μεταξύ των δύο παραμέτρων (συντελεστής συσχέτισης R^2 = 0,655 ή προσαρμοσμένος συντελεστής συσχέτισης $R^2_{adj.}$ = 0,647 και τυπικό σφάλμα εκτίμησης, SEE = 4,463), η δε ανάλυση παραλλακτικότητας έδειξε ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική (P < 0,05).

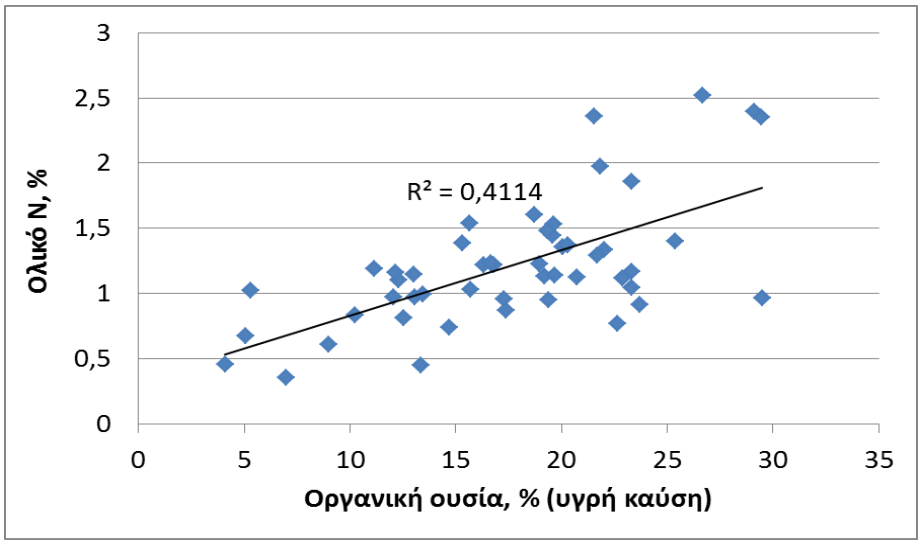


Σχήμα 2. Συσχέτιση των συγκεντρώσεων οργανικής ουσίας στα δείγματα κομπόστ.

Στο πλαίσιο της εργασίας μελετήθηκε, επίσης, η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων ολικού Ν και των συγκεντρώσεων οργανικής ουσίας, τόσο αυτών που προσδιορίστηκαν με την υγρή καύση, όσο και των αντίστοιχων της ξηρής καύσης. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 3 και 4.



Σχήμα 3. Σχέση μεταξύ οργανικής ουσίας (ξηρή καύση) και ολικού Ν.



Σχήμα 4. Σχέση μεταξύ οργανικής ουσίας (υγρή καύση) και ολικού Ν.

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως υπάρχει μεγαλύτερη συσχέτιση (R^2 = 0,674) μεταξύ των τιμών της οργανικής ουσίας που προσδιορίστηκε με την ξηρή καύση και των συγκεντρώσεων ολικού Ν, σε σχέση με την αντίστοιχη (R^2 = 0,411) που προκύπτει μεταξύ των τιμών της οργανικής ουσίας που προσδιορίστηκε με την υγρή καύση και του ολικού Ν. Και στις δύο περιπτώσεις, οι συσχετίσεις βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές ($P < 0,05$).

Μελέτες σε ελληνικά οργανικά εδάφη της περιοχής Φιλίππων Καβάλας (Karyotis et. al., 2005) δείχνουν ότι υπάρχει πολύ υψηλή συσχέτιση μεταξύ του οργανικού άνθρακα (οργανικής ουσίας) και του ολικού Ν (R^2 = 0,876). Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των μετρήσεων της παρούσας μελέτης, είναι φανερό πως στην περίπτωση των οικιακών κομπόστ οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης είναι χαμηλότεροι. Αυτή η διαφοροποίηση μπορεί να αποδοθεί στη μεγάλη σταθερότητα της οργανικής ουσίας στα οργανικά εδάφη,

καθώς ο σχηματισμός της είναι αποτέλεσμα διεργασιών που διαρκούν πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Αντίθετα, η παραγωγή οικιακού κομπόστ είναι μία διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε ετήσια βάση και, συνεπώς, το υλικό που υφίσταται κομποστοποίηση δεν βρίσκεται σε στάδιο ωριμότητας. Αυτό αποδεικνύεται και από τις τιμές του λόγου C/N, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της μελέτης σε 50 δείγματα κομπόστ από ισάριθμες οικιακές μονάδες (κάδους) παραγωγής, έδειξαν τα ακόλουθα: Η μέση περιεκτικότητα (%) σε οργανική ουσία, όπως αυτή προσδιορίστηκε με την υγρή καύση, είναι 17,63 ± 6,15, ενώ η αντίστοιχη στην περίπτωση της ξηρής καύσης είναι 22,73 ± 7,52. Σημειώνεται ότι οι μεγάλες διαφορές περιεκτικότητας σε οργανική ουσία των 50 δειγμάτων κομπόστ οφείλεται στη χρήση διαφορετικών υλικών (π.χ. φύκια σε παραθαλάσσιες περιοχές, υπολείμματα γκαζόν, φύλλα διαφορετικών φυτών κ.λπ.), αλλά και στις διαφορετικές διατροφικές συνήθειες που μεταβάλουν τα υπολείμματα που προστίθενται στους κάδους κομποστοποίησης. Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των συγκεντρώσεων οργανικής ουσίας των δύο μεθόδων έδειξε ότι υπάρχει αρκετά υψηλός βαθμός συσχέτισής τους (R^2 = 0,655 και προσαρμοσμένος συντελεστής συσχέτισης $R^2_{adj.}$ = 0,647), στατιστικά σημαντικός. Η μέση περιεκτικότητα (%) των δειγμάτων σε ολικό άζωτο βρέθηκε ίση με 1,214 ± 0,481. Η μέση τιμή του λόγου C (ξηρή καύση)/N βρέθηκε ίση με 9,80, είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του λόγου C (υγρή καύση)/N και η διαφορά τους είναι στατιστικά σημαντική. Σημειώνεται, επίσης, ότι η μέση τιμή του λόγου C/N δείχνει πως επικρατούν τα ζωικά υπολείμματα ή νωπά χόρτα στους οικιακούς κάδους κομποστοποίησης, θέματα που πρέπει να διορθωθούν αφού η άριστη αναλογία C/N των κομπόστ προς χρήση είναι 25-30/1 έτσι ώστε να μην εκλύεται το άζωτο στην ατμόσφαιρα. Η μέση περιεκτικότητα των δειγμάτων κομπόστ σε N (1,214%) δείχνει ότι υπάρχει μεγάλο ποσοστό νωπών και ξηρών φύλλων.

Η μελέτη της σχέσης μεταξύ του ολικού αζώτου και της οργανικής ουσίας που μετρήθηκε με την ξηρή καύση έδειξε ότι ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,674, ενώ στην περίπτωση της σχέσης μεταξύ του ολικού αζώτου και της οργανικής ουσίας που μετρήθηκε με την υγρή καύση, ο R^2 βρέθηκε σημαντικά μικρότερος (0,411). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καθώς και το γεγονός ότι στα οργανικά εδάφη υπάρχει πολύ υψηλός βαθμός συσχέτισης μεταξύ της οργανικής ουσίας και του ολικού αζώτου, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο προσδιορισμός της οργανικής ουσίας με ξηρή καύση στα δείγματα κομπόστ της μελέτης, αποτελεί πιο αξιόπιστη μέθοδο σε σχέση με την υγρή καύση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αλεξιάδης, Κ., 1980. *Φυσική και Χημική Ανάλυση Εδάφους*. Έκδοση Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Αλιφραγκής, Δ., 2010. *Περιγραφή – Δειγματοληψία, Εργαστηριακές Αναλύσεις Δασικών Εδαφών και Φυτικών Ιστών.* Εκδόσεις Αϊβάζη, Θεσσαλονίκη.

Brady, N.C. and Weil, R.R., 2011. *Η οργανική ύλη του εδάφους*. Η φύση και οι ιδιότητες των εδαφών (The Nature and Properties of Soils, 14th ed). Ελληνική έκδοση: ΕΜΒΡΥΟ, σελ. 495-541.

Βροντάνης, Π., 2009. *Εγχειρίδιο ανακύκλωσης οργανικών υλικών παραγωγής κομπόστας. Οικιακή και βιομηχανική ανακύκλωση*. Π. Βροντάνης & Σία, 80 σελ.

Bremner, J.M. and Mulvaney, C.S., 1982. *Nitrogen-total*. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (eds), Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy Madison, WI, USA, pp. 595–624.

F.A.O., 1987. *Soil management: compost production and use in tropical and subtropical environments*. F.A.O. Soils Bulletin No 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Karyotis, T., Charoulis, A., Mitsimponas, T. and Vavoulidou, E., 2005. *Nutrients and Trace Elements of Arable Soils Rich in Organic Matter*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 36: 403–414.

Κεραμίδας, Β., 1999. *Εναλλακτικές πηγές αζώτου στην αειφορική γεωργία.* Πρόγραμμα: Αειφορική γεωργία – Διαχείριση Εδαφικών Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ., 174 σελ.

Ματσή, Θ., 2004. *Αναλύσεις εδαφών, αρδευτικών νερών & φυτικών ιστών. Αναλυτικοί προσδιορισμοί & αναλυτικοί τύποι.* ΑΠΘ.

Nelson, D.W. and Sommers, L.E., 1982. *Total carbon, organic carbon and organic matter*. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties, pp. 539–577.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΚΟΜΠΟΣΤΑΣ (ΑΠΟ *OCEANICA POSIDONIA)* ΚΑΙ ΖΕΟΛΙΘΟΥ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΠΝΟ

Ευαγγελία Γκόλια[1]✉, Βασίλειος Αντωνιάδης[1], Ανθούλα Δημήρκου[1] & Σπυρίδων Βλειώρας[2]

[1]Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446 Ν. Ιωνία, Βόλος, e-mail: egol@uth.gr

[2]Περιφερειακό Κέντρο Προστασίας Φυτών & Ποιοτικού Ελέγχου Μαγνησίας, Τορούζια 7 Νικολαίδη, 38334 Πεδίον Άρεως, Βόλος

✉*egol@uth.gr*

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης μίγματος κομπόστας (από το φύκος *Oceanica posidonia)* και ζεόλιθου, στα επίπεδα βαρέων μετάλλων σε εδάφη και σε φύλλα καπνού διαφορετικών ποικιλιών. Μια σειρά από πειράματα πραγματοποιήθηκαν με γλάστρες, με έδαφος και μίγματα κομπόστας και ζεόλιθου και στη συνέχεια, καλλιεργήθηκε καπνός Bulrey, Virginia και ποικιλίας Ελασσόνας. Η συγκέντρωση των Ni, Zn και Cu προσδιορίστηκε στο εδάφος, στα στερεά μίγματα, αλλά και στους φυτικούς ιστούς. Παρατηρήθηκε μείωση των συγκεντρώσεων του Cu και του Zn στα φύλλα του καπνού Burley όταν χρησιμοποιήθηκε μίγμα κομπόστας και ζεολίθου σε αναλογία 80:20 (κατά βάρος). Μείωση έως και 50% παρατηρήθηκε στην περίπτωση του Ni στα φύλλα καπνού ποικιλίας Ελασσόνα, όταν χρησιμοποιήθηκαν ισόποσα μίγματα κομπόστας και ζεολίθου.

Λέξεις κλειδιά: βελτιωτικά εδάφους, νικέλιο, ψευδάργυρος, χαλκός

STUDY oF THE REDUCTION OF HEAVY METAL CONCENTRATIONS IN TOBACCO USING a mixture of compost (*OCEANICA POSIDONIA*) AND zeolite

E.E. Golia[1]✉, V. Antoniadis[1], A. Dimirkou[1] & S. Vleioras[2]

[1]University of Thessaly, Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment Laboratory of Soil Science,Fytokou Road, 36 446 N. Ionia Magnisias,Greece

[2] Regional Center of Plant Protection and Quality Control of Magnisia, Torouzia 7 Nikolaidi, 38334 Pedion Areos, Volos, Greece

✉ *egol@uth.gr*

ABSTRACT

The purpose of this paper was the study of the possible effect that the use of a mixture consisting of compost (based on Oceanica posidonia) and zeolite, may have on the levels of heavy metals in soils and tobacco leaves of different varieties. A series of experiments were carried out in pots, soil and mixtures of compost and zeolite, and three tobacco varieties (Bulrey, Virginia and Elassona-(Oriental)). The concentration of Ni, Zn and Cu was determined in the soil, in the solid mixtures, and also in the plant tissues.

In Burley tobacco leaves a great decrease upon Cu and Zn concentrations was observed, when a mixture consisting of compost and zeolite in 80:20 (by weight) portions was used. In Oriental (Elassona) tobacco plants, Ni concentration was reduced up to 50%, when a mixture of compost and zeolite, in equivalent portions, was used.

Keywords: amendments, Nickel, Zink, Copper

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νικέλιο, ο ψευδάργυρος και ο χαλκός χαρακτηρίζονται ως «εν δυνάμει τοξικά» στοιχεία, διότι σε υψηλές συγκεντρώσεις ενδέχεται να προκαλέσουν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα και φυσικά εγκυμονούν κινδύνους για την υγεία των ανθρώπων (Alloway, 1990; Alloway and Steinnes, 1999). Ο καπνός (*Nicotiana tabacum*) μπορεί να συσσωρεύει βαρέα μέταλλα και ιδιαίτερα κάδμιο, σε σχετικά υψηλά επίπεδα σε σύγκριση με άλλα φυτικά είδη. Οι συγκεντρώσεις του καδμίου στα φύλλα καπνού, συνήθως, κυμαίνονται από <0,5 έως 5 mg Cd / kg ξηράς ουσίας (Lugon-Moulin et al., 2004; Golia et al., 2007a). Η χρήση φωσφορικών λιπασμάτων στις καλλιέργειες είναι ένας από τους πρωταρχικούς παράγοντες που συντελούν στη ρύπανση των γεωργικών εδαφών και φυσικά μεταφέρουν τα επικίνδυνα αυτά στοιχεία στον καπνό (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007).

Πολλά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί ως βελτιωτικά για την αναβάθμιση της ποιότητας των γεωργικών εδαφών (οργανική ύλη, ασβέστης) (Gworek, 1992; Shaheen et al., 2015). Στα υλικά αυτά περιλαμβάνονται, συνήθως, οξείδια σιδήρου (Fe) και μαγγανίου (Mn), ανόργανα υλικά της αργίλου, ζεόλιθοι και φωσφορικά άλατα όπως ο απατίτης (Keller et al., 2005). Στα εδαφο βελτιωτικά πραγματοποιείται δέσμευση με φυσικοχημικό τρόπο, ανόργανων κυρίως ιόντων, καθώς, διαθέτουν μεγάλη επιφάνεια, αλλά και κατάλληλα δομημένες περιοχές, όπου τα μέταλλα μπορούν να απορροφηθούν και / ή να συμπλοκοποιηθούν (Cheng and Hseu, 2002; Kwon-Rae et al., 2012).

Οι ζεόλιθοι αποτελούν μια σημαντική κατηγορία φυσικών και συνθετικών αργιλοπυριτικών, κρυσταλλικών, μικροπορωδών υλικών (Haidouti, 1997; James and Sampath, 1999). Μελέτες έχουν δείξει ότι η προσθήκη φυσικού ζεόλιθου σε στερεά υλικά, όπως πχ σε ιλύ βιολογικού καθαρισμού, οδηγεί σε σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων. Αυτό συμβαίνει διότι η δομή του κλινοπτιλολιτικού ζεόλιθου περιλαμβάνει κανάλια και κοιλότητες, ειδικά διαμορφωμένες, ώστε να δεσμεύονται μόρια και ιόντα, όπως μόρια νερού, αλλά και μεταλλικά κατιόντα (Latifah et al., 2015).

Από την άλλη μεριά, είναι γνωστό ότι η χρήση κομπόστας, με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία, μπορεί επίσης να βελτιώσει τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (πορώδες, αερισμό, % υγρασίας, κλπ), αλλά και να ελαττώσει τις αρνητικές επιδράσεις ποικίλων οργανικών και ανόργανων ρυπαντών (Cheng and Hseu, 2002; Kwon-Rae et al., 2012; Mininni et al., 2014; Al Mamun et al., 2016).

Το φύκος *Oceanica Posidonia (L.)* διαθέτει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά, ώστε να χρησιμοποιηθεί για την Παρασκευή κομπόστας (Castaldi and Melis, 2004). Η *Oceanica Posidonia (L.)* είναι ένα από τα πιο άφθονα θαλάσσια φύκη στην Ελλάδα (Malea et al., 1994; Kariotis et al., 2006) και στη Σαρδηνία ή τη Μεσαία Αδριατική θάλασσα (Kljakovic-Gaspic et al., 2004). Επίσης, χρησιμοποιείται ως βιοδείκτης της παρακολούθησης της ποιότητας του νερού (Richir et al., 2015). Από χημική άποψη, είναι ιδιαίτερα πλούσιο σε διαρθρωτικούς υδατάνθρακες (λόγος C / N> 65%) και επομένως είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ως μέσο καλλιέργειας εφόσον συνδυαστεί, στις σωστές αναλογίες, με διάφορα άλλα ανόργανα υλικά (Castaldi and Melis, 2004). Η δέσμευση των μεταλλικών κυρίως ιόντων, στα κομποστοποιημένα υλικά, εξηγείται λόγω των φυσικοχημικών φαινομένων που αναπτύσσονται ανάμεσα στα μέταλλα και τις χαρακτηριστικές ομάδες που περιέχουν τα υλικά. Συγκεκριμένα, οι χουμικές ουσίες, που παράγονται κατά τη διαδικασία αποσύνθεσης των οργανικών υλικών, περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό κολλοειδών οργανικών πολυμερών (Al Mamun et al., 2016). Αυτά τα μόρια φέρουν αρνητικό φορτίο, που προκύπτει από καρβοξυλικές και φαινολικές λειτουργικές ομάδες, οι οποίες επιτρέπουν

στις χουμικές ουσίες να δεσμεύουν μεταλλικά κατιόντα από το διάλυμα (Kljakovic-Gaspic et al., 2004.; Mininni et al., 2014). Παράλληλα, πραγματοποιούνται αντιδράσεις (ειδική ρόφηση) ανάμεσα στα μεταλλικά κατιόντα και τις οργανικές ομάδες θείου R-SH, RSR, R-SS-R, αλλά και το ετεροκυκλικό S (Kabata-Pendias και Mukherjee, 2007; Al Mamun et al., 2016).

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα του μίγματος κομπόστας (από *Oceanica Posidonia (L.))* και ζεόλιθου, αναφορικά με τη μείωση των συγκεντρώσεων Ni, Zn και Cu σε ποικιλίες καπνού που καλλιεργήθηκαν σε έδαφος επιβαρυμένο με βαρέα μέταλλα.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με δείγμα εδάφους το οποίο συλλέχθηκε από την περιοχή του Αλμυρού Βόλου (Golia et al., 2009; Golia et al., 2016), κοντά σε περιοχή στην οποία υπάρχει βιομηχανική δραστηριότητα. Οι ιδιότητες του εδάφους μετρήθηκαν (Page et al., 1982), ως εξής: περιεκτικότητα σε άργιλο (%), οργανική ουσία (μέθοδος Walkley-Black), ηλεκτρική αγωγιμότητα και pH (1:1) (έδαφος: νερό). Το υδατοδιαλυτό κλάσμα των μετάλλων προσδιορίσθηκε χρησιμοποιώντας διάλυμα $CaCl_2$ 0,01M. Η διαθέσιμη προς τα φυτά συγκέντρωση των μετάλλων προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας διάλυμα διαιθυλενο-τριαμινο-πενταξικού οξέος (DTPA), του οποίου η τιμή pH ρυθμίστηκε στο 7,3 (Lindsay and Norvell, 1978). Η ολική συγκέντρωση μετάλλων προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εκχύλισης Aqua Regia (μίγμα HCl-HNO3, 3: 1) (ISO / DIS 11466 1994) μετά από πέψη στους 180 °C για 2 ώρες (Golia et al., 2007b). Όλα τα αντιδραστήρια ήταν αναλυτικής ποιότητας (Merck, Germany). Τα διαλύματα μετάλλων παρασκευάστηκαν από Merck "titrisol".

Το δείγμα ζεόλιθου που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα ήταν ένα ομογενοποιημένο δείγμα και περιείχε 61% ζεόλιθο τύπου HEU, 18% SiO_2, -φάσεις (κριστοβαλίτη, χαλαζία), 8% άστριο 13% φυλλοπυριτικά άλατα (μίκας, ορυκτά αργίλου) (Haidouti, 1997). Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε κομπόστα (Compost Hellas®, Κεφαλονιά), με βάση το φύκος *Oceanica Posidonia (L.)*.

Οι γλάστρες πληρώθηκαν με 4 kg εδάφους. Τρεις γλάστρες χρησιμοποιήθηκαν ως «μάρτυρες». Τρεις διαφορετικοί τύποι καπνού χρησιμοποιήθηκαν για καλλιέργεια: Burley, Virginia και Oriental (Ελασσόνα) (n = 9 για καθένα από αυτά). Οι σπόροι αναπτύχθηκαν σε υπόστρωμα χωρίς μέταλλα (τύρφη ή λίπασμα). Όταν τα φυτά είχαν αναπτύξει τρία ζεύγη φύλλων, μεταφέρθηκαν στις γλάστρες. Τα φυτά συλλέχθηκαν 85 ημέρες μετά τη μεταφύτευσή τους.

Τρία φύλλα καπνού από το κάθε «χέρι», με δύο επαναλήψεις το κάθε ένα, συλλέχθηκαν από τα φυτά. Το $1^{ο}$ «χέρι» περιελάμβανε τα χαμηλότερα φύλλα, ενώ το $3^{ο}$ «χέρι» τα ψηλότερα φύλλα. Τα φύλλα πλύθηκαν για να απομακρυνθούν τυχόν προσκολλημένα σωματίδια εδάφους και ξεπλύθηκαν με αποσταγμένο νερό. Κατόπιν, τοποθετήθηκαν σε χάρτινους σάκους, ξηράνθηκαν στους 75 °C για 12 ώρες και αλέστηκαν. Για την εκχύλιση των μετάλλων από τα δείγματα καπνού ακολουθήθηκε η μέθοδος που περιγράφεται από τους He και Singh (1994α). Στη συνέχεια, τόσο τα δείγματα εδάφους, όσο και τα δείγματα των μιγμάτων με ζεόλιθο και κομπόστα, αλλά και τα δείγματα των φύλλων καπνού, αναλύθηκαν προκειμένου να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των μεταλλικών στοιχείων Ni, Zn και Cu. Χρησιμοποιήθηκε φασματοφωτόμετρο Ατομικής Απορρόφησης (AAS), με εξάρτημα φλόγας (F-AAS) ή φούρνου γραφίτη (GF) (Lajunen, 1992). Για τη διόρθωση υποβάθρου σήματος χρησιμοποιήθηκε λυχνία Δευτερίου (AOAC, 1984).

Για την επαλήθευση της ακρίβειας της συγκέντρωσης των μετάλλων στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε πιστοποιημένο υλικό αναφοράς (CRM) (αριθ. 141R, BCR). Οι τιμές ανάκτησης υπολογίστηκαν από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των συγκεντρώσεων στο υλικό CRM με αυτές της πέψης Aqua Regia και κυμάνθηκαν από 95 έως 104%. Τα όρια ανίχνευσης, τα οποία υπολογίστηκαν ως το τριπλάσιο της τυπικής απόκλισης του λευκού δείγματος (n = 10) υπολογίστηκαν μεταξύ 0,08 και 1,1 μg L^{-1} (GF-AAS) αντίστοιχα.
Η σύγκριση των συγκεντρώσεων των μετάλλων, τόσο στα εκχυλίσματα εδάφους όσο και στα φύλλα καπνού, της μελέτης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη δοκιμή t (*t -τεστ*) σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 και 0,01, με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS® για Windows.

3. Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές των χημικών και φυσικών ιδιοτήτων του εδαφικού δείγματος. Το έδαφος είναι όξινο, έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα, ενώ η περιεκτικότητα σε άργιλο είναι < 20%. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για ένα τυπικό έδαφος, που συνήθως απαντάται στη χώρα μας και που είναι, ενδεχομένως, αντιπροσωπευτικό για την καλλιέργεια του καπνού. Ωστόσο, η επιλογή του συγκεκριμένου εδαφικού δείγματος έγινε με βάση το γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις των μεταλλικών στοιχείων είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές που συναντούμε στην περιοχή της κεντρικής Ελλάδας (Golia et al., 2009; Golia et al., 2016), ώστε να είναι εμφανείς οι επιδράσεις από τη χρήση των βελτιωτικών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

Πίνακας 1. Φυσικοχημικές ιδιότητες του εδαφικού δείγματος

pH	5,8
Οργανικός Άνθρακας C (%)	1,7
Άργιλος (%)	17
Ιλύς (%)	40
Άμμος (%)	43
Υδατοδιαλυτό Ni (mg/kg ξ. Εδ*.)	0,9
Υδατοδιαλυτός Zn (mg/kg ξ. εδ.)	0,8
Υδατοδιαλυτός Cu (mg/kg ξ. εδ.)	0,9
Διαθέσιμο Ni (mg/kg ξ. εδ.)	1,9
Διαθέσιμος Zn (mg/kg ξ. εδ.)	2,1
Διαθέσιμος Cu (mg/kg ξ. εδ.)	1,9
Ολικό Ni (mg/kg ξ. εδ.)	6,2
Ολικός Zn (mg/kg ξ. εδ.)	5,1
Ολικός Cu (mg/kg ξ. εδ.)	2,9

*ξ. εδ.: ξηρό έδαφος

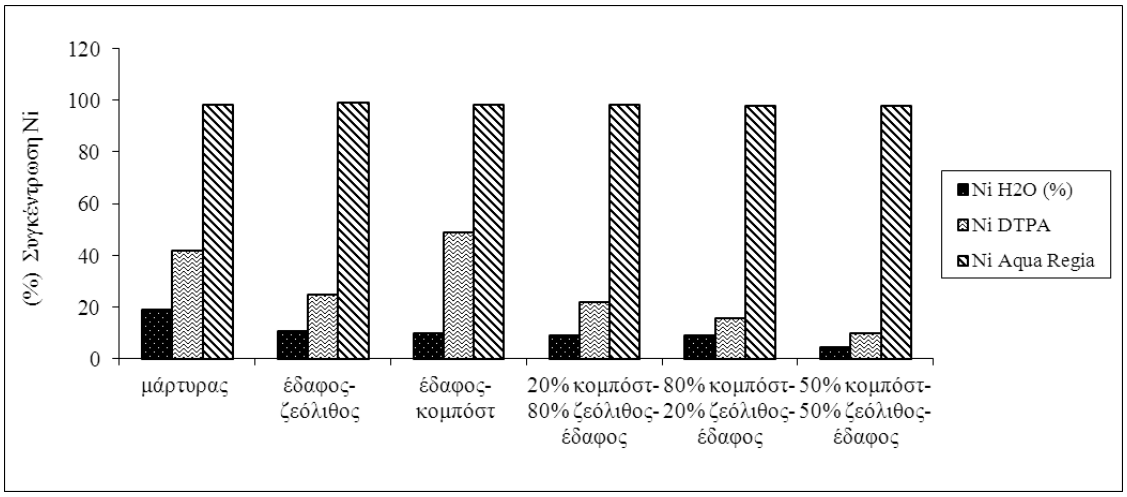
Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται το ποσοστό (%) της συγκέντρωσης των στοιχείων Ni, Zn και Cu σε σχέση με το δείγμα «μάρτυρα»-στο οποίο δηλ. δεν έγινε προσθήκη βελτιωτικών.

Παρατηρούμε ότι οι ολικές συγκεντρώσεις των μετάλλων (που εκχυλίστηκαν με τη χρήση του μίγματος Aqua Regia) δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ούτε σε 0,01 ούτε στα 0,05 επίπεδο σημαντικότητας) παρά τη χρήση ζεόλιθου ή κομπόστας. Τα αποτελέσματα αυτά συμπίπτουν μα τα αποτελέσματα και άλλων ερευνητών, με βάση τα οποία, η προσθήκη διαφόρων εδαφοβελτιωτικών (κομπόστας, κοπριάς, ασβέστη, ζεολίθου,

κλπ) δεν τροποποίησε στατιστικά τις συνολικές συγκεντρώσεις μεταλλικών στοιχείων στο έδαφος (Lin and Zhou, 2009; Mininni et al., 2014; Richir et al., 2015).

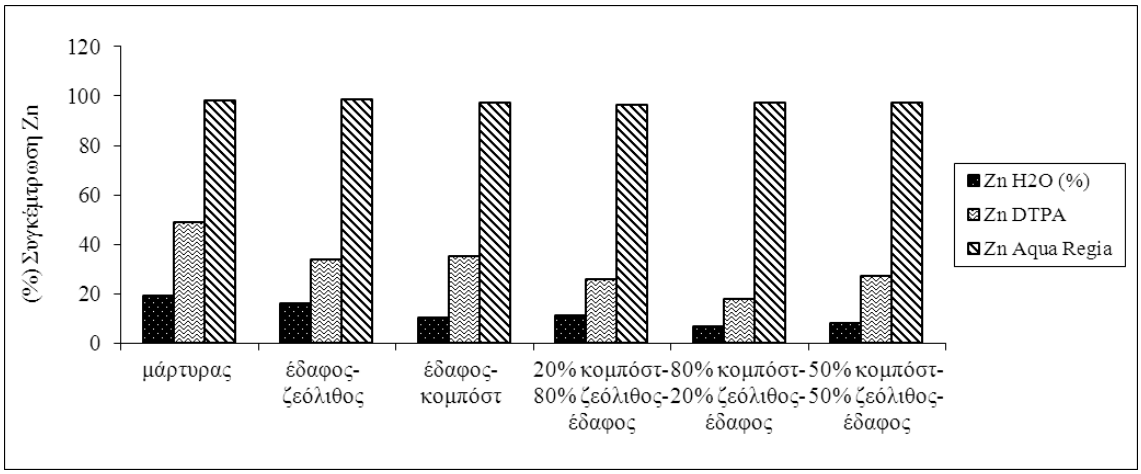
Η συγκέντρωση των υδατοδιαλυτών Ni, Zn και Cu, καθώς και η συγκέντρωση των μετάλλων που είναι διαθέσιμη προς τα φυτά, ήταν σε όλες τις περιπτώσεις, χαμηλότερες από τις αντίστοιχες ολικές τους συγκεντρώσεις, κάτι το οποίο είναι γνωστό από την παγκόσμια βιβλιογραφία και φυσικά αναμενόμενο. Η προσθήκη του ζεόλιθου και της κομπόστας οδήγησαν σε στατιστικά σημαντικές ελαττώσεις των συγκεντρώσεων και των τριών μεταλλικών στοιχείων (Mininni et al., 2014; Al Mamun et al., 2016).

Η προσθήκη του ζεόλιθου στην περίπτωση του Ni (Σχήμα 1α), οδήγησε την υδατοδιαλυτή συγκέντρωσή του σε ποσοστό 11% της ολικής και της διαθέσιμης σε ποσοστό 25% της ολικής, ενώ χωρίς την προσθήκη βελτιωτικών, τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν 19 % και 42% σε σχέση με την ολική συγκέντρωση του Ni. Η προσθήκη κομπόστας στο έδαφος οδήγησε σε ποσοστό 10% την υδατοδιαλυτή συγκέντρωσης τουNi, αλλά δεν οδήγησε σε μείωση της διαθέσιμης συγκέντρωσής του. Αποδείχτηκε ότι η μεταχείριση που ήταν η πλέον αποτελεσματική, ήταν η χρήση μίγματος κομπόστας και ζεόλιθου σε ίσες αναλογίες, καθώς οδήγησαν την υδατοδιαλυτή συγκέντρωση του Ni σε ποσοστό 4,4% και τη διαθέσιμη σε ποσοστό 10% της ολικής.



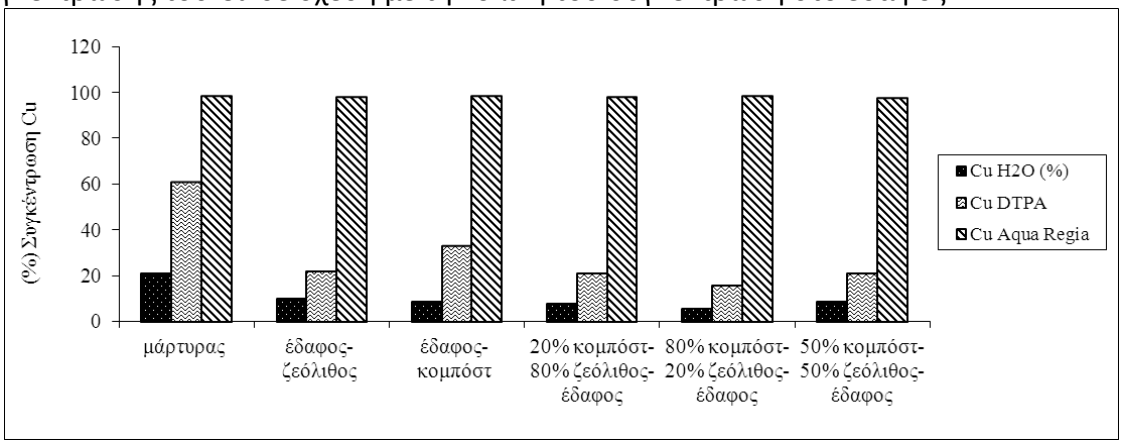
Σχήμα 1α: Απεικόνιση της υδατοδιαλυτής, διαθέσιμης και ολικής συγκέντρωσης Ni (%) στο έδαφος κατά την προσθήκη μίγματος ζεόλιθου και κομπόστας σε διαφορετικές αναλογίες.

Στην περίπτωση του Zn (Σχήμα 1β) παρατηρήθηκε ότι υπήρξε δραστική μείωση της υδατοδιαλυτής, αλλά και της διαθέσιμης συγκέντρωσής του, κατά την προσθήκη μίγματος αποτελούμενο από 80% κομπόστα και 20% ζεόλιθο. Στην περίπτωση της μεταχείρισης αυτής, παρατηρήθηκε ότι η υδατοδιαλυτή συγκέντρωση του Zn μειώθηκε στο 6,6% της ολικής συγκέντρωσης, ενώ η διαθέσιμη στο 18% της ολικής συγκέντρωσης του Zn στο έδαφος. Σε κάθε άλλη μεταχείριση, τα ποσοστά των αντίστοιχων συγκεντρώσεων ήταν υψηλότερα, ακόμη και στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε μόνο κομπόστα ως εδαφοβελτιωτικό (10,3% η υδατοδιαλυτή και 35% η διαθέσιμη συγκέντρωση Zn σε σχέση πάντα με την ολική του συγκέντρωση στο έδαφος).



Σχήμα 1β: Απεικόνιση της υδατοδιαλυτής, διαθέσιμης και ολικής συγκέντρωσης Zn (%) στο έδαφος κατά την προσθήκη μίγματος ζεόλιθου και κομπόστας σε διαφορετικές αναλογίες.

Στην περίπτωση του Cu (Σχήμα 1γ) παρατηρήθηκε ότι υπήρξε σημαντική μείωση της υδατοδιαλυτής, αλλά και της διαθέσιμης συγκέντρωσής του, κατά την προσθήκη μίγματος αποτελούμενο από 80% κομπόστα και 20% ζεόλιθο. Η χρήση του συγκεκριμένου μίγματος στο έδαφος οδήγησε σε ποσοστά 5,6% την υδατοδιαλυτή και 16% τη διαθέσιμη συγκέντρωσης του Cu σε σχέση με την ολική του συγκέντρωση στο έδαφος.



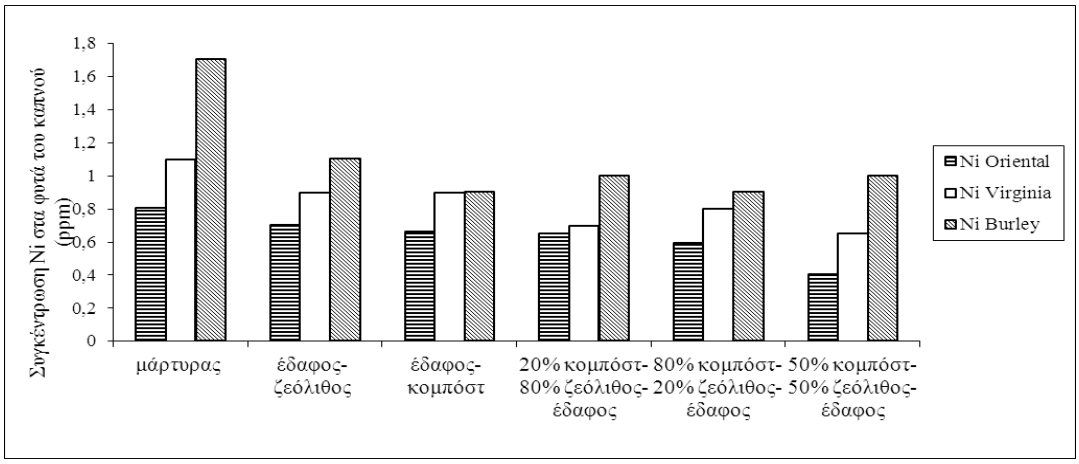
Σχήμα 1γ: Απεικόνιση της υδατοδιαλυτής, διαθέσιμης και ολικής συγκέντρωσης Cu (%) στο έδαφος κατά την προσθήκη μίγματος ζεόλιθου και κομπόστας σε διαφορετικές αναλογίες.

Από τη μελέτη των παραπάνω σχημάτων (Σχήματα 1 α, β, γ) είναι φανερό ότι η κομπόστα, σε συνδυασμό με το ζεόλιθο μπορούν να έχουν αποτελεσματική δράση στη μείωση των υδατοδιαλυτών και διαθέσιμων προς τα φυτά συγκεντρώσεων και των τριών μεταλλικών στοιχείων που μελετήθηκαν. Είναι γνωστό ότι η χρήση της κομπόστας οδηγεί σε ακινητοποίηση μεταλλικών ιόντων και γιαυτό και έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία σε πειράματα αποκατάστασης ρυπασμένων γεωργικών, αστικών και βιομηχανικών εδαφών (Lugon-Moulin et al., 2004) . Η πρόσληψη των μετάλλων από τα φυτά καθορίζεται κυρίως, από τη διαθέσιμη προς αυτά συγκέντρωση αλλά και από την υδατοδιαλυτή, και όχι από την ολική συγκέντρωση των μετάλλων (Kwon-Rae, K., 2012; Richir et al., 2015). Επίσης ήταν αναμενόμενο ότι τα ιόντα των Ni, Zn και Cu, να δεσμευτούν με σχετικά ισχυρούς δεσμούς

στις οργανικές ομάδες (Kabata-Pendias και Mukherjee, 2007), που υπάρχουν στην οργανική ουσία του εδάφους (Calkins, 1994; Shaheen, et al., 2015; Al Mamun, et al., 2016).

Στα Σχήματα 2 α, β και γ απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις των τριών μεταλλικών στοιχείων, που περιέχονται στα φύλλα των καπνών Oriental (Ελασσόνα), Virginia και Burley. Για την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων της μείωσης της συγκέντρωσης των μεταλλικών στοιχείων στον καπνό λόγω της προσθήκης των εδαφοβελτιωτικών της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιήθηκε μίγμα των τριών «χεριών» των φυτών του καπνού. Συγκεκριμένα, τα κατώτερα, μεσαία και ανώτερα φύλλα, αναμίχθηκαν σε ίσες αναλογίες, προκειμένου να γίνει ένα ενιαίο δείγμα και να υπολογιστούν τα επίπεδα των μετάλλων. Αυτό θα οδηγήσει σε περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα, τα οποία αφορούν στα επίπεδα των μετάλλων που ενδεχομένως έχουν ως τελικό αποδέκτη των άνθρωπο, καθώς ένα αντίστοιχο μίγμα όλων των φύλλων του καπνού χρησιμοποιείται ως χαρμάνι για την παρασκευή των τσιγάρων (Keller et al., 2005; Golia et al, 2007a; Golia et al, 2016).

Στο Σχήμα 2α παρουσιάζεται η συγκέντρωση του Ni στις τρεις ποικιλίες καπνού, κατά την προσθήκη των εδαφοβελτιωτικών (ζεόλιθου και κομπόστας) σε διαφορετικές αναλογίες.

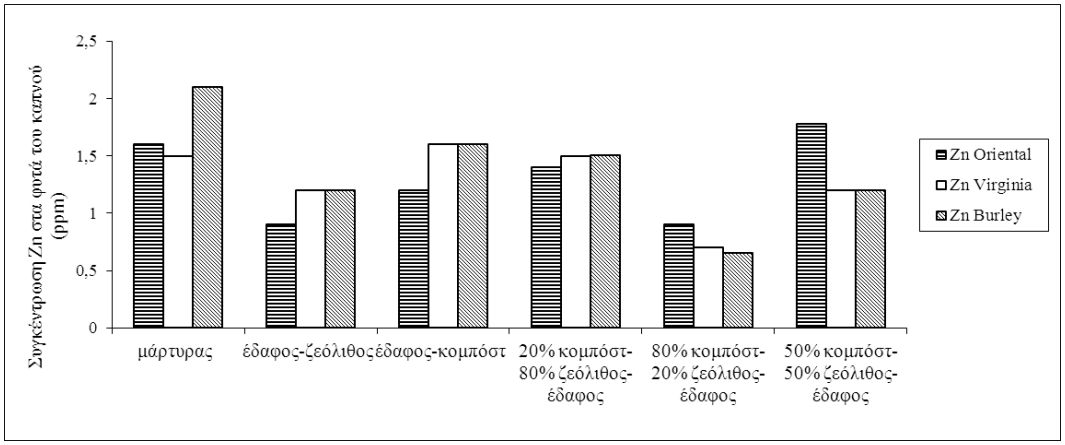


Σχήμα 2α: Συγκέντρωση Ni (ppm) στις τρεις ποικιλίες καπνού, κατά την προσθήκη μίγματος ζεόλιθου και κομπόστας σε διαφορετικές αναλογίες.

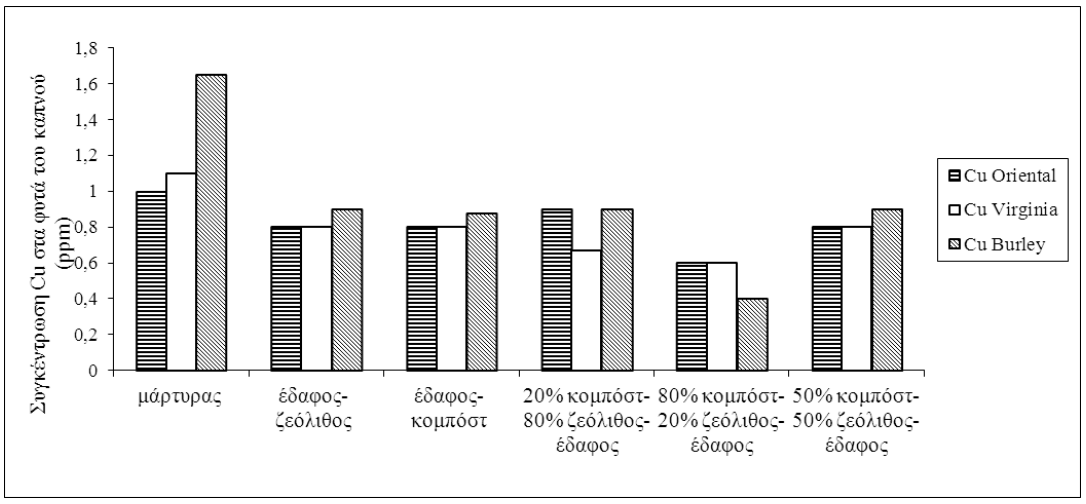
Από τη μελέτη του σχήματος 2α παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερη μείωση της συγκέντρωσης του Ni πραγματοποιήθηκε και στις τρεις ποικιλίες καπνού, όταν χρησιμοποιήθηκε ως εδαφοβελτιωτικό το μίγμα κομπόστας και ζεόλιθου, σε ισόποσες αναλογίες. Συγκεκριμένα, όταν χρησιμοποιήθηκε μίγμα αποτελούμενο από 50% κομπόστα και 50% ζεόλιθο (οι αναλογίες είναι εκφρασμένες κατά βάρος), παρατηρήθηκε μείωση των συγκεντρώσεων του Ni κατά 50% στα φύλλα του καπνού ποικιλίας Oriental (Ελασσόνα), Burley, 40,9% στα Virginia και 41,2% σε φύλλα καπνού Burley. Δηλαδή, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη μείωση των μετάλλων στην τοπική ποικιλία, κατόπιν στα καπνά τύπου Burley και μικρότερη στα καπνά τύπου Virginia.

Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, η συγκέντρωση και των τριών μεταλλικών στοιχείων ήταν υψηλότερη στα φύλλα καπνού Burley. Αυτά τα αποτελέσματα έχουν επίσης ληφθεί σε προηγούμενες έρευνες που έγιναν σε εδάφη της ίδιας περιοχής μελέτης (Golia et al., 2007a; Golia et al., 2016).

Στα σχήματα 2β και 2γ παρουσιάζεται η συγκέντρωση του Zn και του Cu , αντίστοιχα, στις τρεις ποικιλίες καπνού, κατά την προσθήκη των εδαφοβελτιωτικών (ζεόλιθου και κομπόστας) σε διαφορετικές αναλογίες.



Σχήμα 2β: Συγκέντρωση Zn (ppm) στις τρεις ποικιλίες καπνού, κατά την προσθήκη μίγματος ζεόλιθου και κομπόστας σε διαφορετικές αναλογίες.



Σχήμα 2γ: Συγκέντρωση Cu (ppm) στις τρεις ποικιλίες καπνού, κατά την προσθήκη μίγματος ζεόλιθου και κομπόστας σε διαφορετικές αναλογίες.

Από τη μελέτη των παραπάνω σχημάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι τόσο στην περίπτωση του Zn όσο και του Cu, μεγαλύτερη μείωση των επιπέδων τους στα φύλλα των τριών ποικιλιών καπνού, παρατηρήθηκε όταν χρησιμοποιήθηκε μίγμα αποτελούμενο από 80% κομπόστα (Richir et al., 2015; Shaheen, et al., 2015) και 20% ζεόλιθο. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μείωση των συγκεντρώσεων του Zn κατά 43,8% στα φύλλα του καπνού ποικιλίας Oriental (Ελασσόνα), 53,3% στα Virginia και 69% σε φύλλα καπνού Burley. Κατά τη χρησιμοποίηση του ίδιου μίγματος παρατηρήθηκε ελάττωση των συγκεντρώσεων του Cu κατά 40% στα φύλλα του καπνού ποικιλίας Oriental (Ελασσόνα), 45,5% στα Virginia και 75,8% σε φύλλα καπνού Burley.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η χρήση μίγματων ζεόλιθου και κομπόστας σε εδάφη που έχουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων, μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα σημαντική,

καθώς αυξάνουν τη συγκράτηση των στοιχείων στο έδαφος και μειώνουν σημαντικά τις συγκεντρώσεις των μετάλλων στον καπνό.

Η σημαντική μείωση που προκάλεσαν στις συγκεντρώσεις των μετάλλων αυτών στο εδαφικό δείγμα, αντανακλάται στο γεγονός ότι μειώθηκε τόσο η υδατοδιαλυτή όσο και η διαθέσιμη προς τα φυτά συγκέντρωσή τους.

Παράλληλα, η χρήση μίγματος 50% κομπόστας και 50% ζεόλιθου οδήγησε στη μεγαλύτερη μείωση των συγκεντρώσεων του Ni στα φύλλα του καπνού Ελασσόνα. Στην περίπτωση του Zn και του Cu, παρουσιάστηκαν ιδιαίτερα σημαντικές μειώσεις στις συγκεντρώσεις κυρίως του καπνού Burley, όταν χρησιμοποιήθηκε μίγμα αποτελούμενο από 80% κομπόστα και 20% ζεόλιθο.

Τα προτεινόμενα μίγματα κομπόστας από *Oceanica Posidonia (L.)* και ζεόλιθου αποτελούν ένα πολύ ενθαρρυντικό, φθηνό και άφθονο για τα ελληνικά δεδομένα, εργαλείο, σε ότι αφορά στη βελτίωση εδαφών από Ni, Zn και Cu.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alloway, B., 1990, *Heavy metals in soils*. Blackie, Glasgow, UK.

Alloway, B. and Steinnes, E., 1999. *Antropogenic Additions of Cadmium to Soils, Cadmium in Soils and Plant*. Springer.

Al Mamun, S., Chanson, G., Muliadi, Benyas, E., Aktar ,M., Lehto, N., McDowell, R., Cavanagh, Jo, Kellermann, L., Clucas, L. and Robinson, B., 2016. *Municipal composts reduce the transfer of Cd from soil to vegetables*. Environmental Pollution, 213, 8-15.

AOAC, 1984. *Official method of analysis 14th Ed*. Sidney Williams. Association of official chemists, Inc. Virginia, USA.

Calkins, W.H., 1994. *The chemical forms of sulfur in coal: a review*. Fuel 73, 475-484.

Castaldi, P. and Melis, P., 2004. *Growth and Yield Characteristics and Heavy Metal Content on Tomatoes Grown in Different Growing Media*. Communications in Soil Science Analysis 35 (1 & 2): 85–98.

Cheng, F.S. and Hseu, Z.Y., 2002. *In-situ immobilization of cadmium and lead by different amendments in two contaminated soils. Water, Air, and Soil Pollution,* 140: 73–84.

Golia, E.E., Dimirkou, A. and Mitsios, I.K., 2007a. *Accumulation of Heavy Metals on Burley, Virginia and Oriental Tobacco Leaves Grown in an Agricultural Area in Relation to Soil.* Bulletin of Environmental Contamination Toxicology, 79: 158–162.

Golia, E.E., Tsiropoulos, N.G,, Dimirkou, A. and Mitsios, I.K., 2007b. *Distribution of heavy metals of agricultural soils of central Greece using the modified BCR sequential extraction method*. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 87: 1053–1063.

Golia, E.E., Floras, S.A. and Dimirkou, A., 2009. *Monitoring the Variability of Zinc and Copper in Surface Soils from Central Greece.* Bulletin of Environmental Contamination Toxicology, 82:6–10.

Golia, E.E., Fuleky, G., Dimirkou, A. and Gizas, G., 2016. *Influence of zeolite and Posidonia oceanica (L.) in reduction of Cadmium uptake by tobacco (Nicotiana tabacum) plants of Central Greece.* Book of Proceedings of the *Cyprus 2016 International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, Limassol, Cyprus, 24-25 June 2016.

Gworek, B., 1992. *Lead inactivation in soils by zeolites*. Plant and Soil 143: 71-74.

Haidouti, C., 1997. *Inactivation of mercury in contaminated soils using natural zeolites*. Science of the Total Environment, 208: 105-109.

He, Q.B, ang Singh, B.R., 1994a. *Crop uptake of cadmium from phosphorus fertilizers: I. Yield and cadmium content*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 74: 251-265.

ISO/DIS 11466 , 1994. In *Environment Soil Quality*. ISO standards compendium, Switzerland

James, R. and Sampath, K., 1999. *Effect of Zeolite on the Reduction of Cadmium Toxicity in Water and a Freshwater Fish, Oreochromis mossambicus.* Bulletin of Environmental Contamination Toxicology, 62:222-229.

Kabata-Pendias, A. and Mukherjee, A.B., 2007. *Trace Elements from Soil to Human*. Springer Verlag

Kariotis, Th., Orfanidis, S. and Reizopoulou, S., 2006. *Marine benthic macrophytes as possible nitrogen source in agriculture*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 169, 557-563.

Keller, C., Marchetti, M., Rossi, L., Lugon-Moulin, N., 2005. *Reduction of cadmium availability to tobacco (Nicotiana tabacum) plants using soil amendments in low cadmium-contaminated agricultural soils: a pot experiment*. Plant and Soil, 276:69-84.

Kljakovic-Gaspic, Z., Antolic, B., Zvonaric, T. and Baric, A., 2004. *Distribution of cadmium and lead in Posidonia oceanica (L.) delile from the middle Adtiatic sea.* Fresenius Environmental Bulletin, 13 (11) 1210-1215.

Kwon-Rae, K., Jeong-Gyu, K., Jeong-Sik, P., Min-Suk, K., Gary, O., Gyu-Hoon, Y. and Jin-Su, L., 2012. *Immobilizer-assisted management of metal-contaminate agricultural soils for safer food production*, Journal of Environmental Management, 102, 88-95.

Latihaf, O., Ahmed, O.H., Susilawati, K. and Mjid, N.M., 2015. *Compost maturity and nitrogen availability by co-composting of paddy husk and chicken manure amended with clinoptilolite zeolite*. Waste Management & Research, 33(4), 322-331.

Lajunen, L.H.G., 1992, *Spectrochemical analysis by atomic absorption and emission; The Royal Society of Chemistry*: Cambridge, England.

Lindsay, W.L. and Norvell, W.A., 1978. *Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper*. American Journal of Soil Science, 42: 421-428.

Lin, D., and Zhou, Q., 2009. *Effects of soil amendments on the extractability and speciation of Cd, Pb and Cu in a contaminated soil*. Bulletin of Environmental Contamination Toxicology, 83, 136-140.

Lugon-Moulin, N., Zhang, M., Gadani, F., Rossi, L., Koller, D., Krauss, M., and Wagner, G.J,. 2004. *Critical review of the science and options for reducing cadmium in tobacco (Nicotiana tabacum L.) and other plants*. Advance Agronomy 83, 111-180.

Malea, P., Haritonidis, S., Kervekidis, T., 1994. *Seasonal and local variations of metal concentrations in the seagrass Posidonia oceanica (L.) Delile in the Antikyra Gulf, Greece*. Science of the Total Environment, 153, 225-235.

Mininni, C., Grassi, F., Traversa, A., Cocozza, C., Parente, A., Miano, T., and Santamaria, P., 2014. Posidonia oceanica (L.) based compost as substrate for potted basil production. Journal of Food Science and Agricultural, 95, 2041-2046.

Page, A.L., Miller, H.R., and Keeney, R.D, 1982. *Methods of soil analysis Part II -chemical and microbiological properties*. Inc. Soil Science of America, Madison, Wisconsin, USA.

Richir. J., Salivas-Decaux, M., Lafarbie, C., Lopez y Royo, C., Gobert, S., Pergent, G., Pergent-Martini, C., 2015. *Bioassessment of trace element contamination of Mediterranean coastal waters using the seagrass Posidonia oceanica.* Journal of Environmental Management, 151, 486-499.

Shaheen, S.M., Tsadilas, C.D., and Rinklebe, J., 2015. Immobilization of soil copper using organic and inorganic amendments. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 178, 112-117.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ AquaCrop ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ

Χ. Βαμβακούλας[1,✉], Ι. Αργυροκαστρίτης[1], Γ. Παπαθεοχάρη[2]& Σ.Αλεξανδρής[1]
Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, [1]Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής,
[2]Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Ιερά Οδός 75, Αθήνα, 118 55,
✉ *chrisvamva@aua.gr*

Περίληψη

Στόχος της εργασίας είναι η αξιολόγηση του μοντέλου AquaCrop με εισαγωγές πειραματικών δεδομένων που προέρχονται από καλλιέργεια υβριδίου σόγιας (*Glycine max L.*) για δύο συνεχόμενες καλλιεργητικές περιόδους (2014, 2015). Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν την φυτοκάλυψη και την επιφανειακή ξηρή βιομάζα, για μη καταπονημένη υδατικά καλλιέργεια. Εφαρμόστηκε απλό πειραματικό σχέδιο και η ρύθμιση του μοντέλου έγινε με χρήση των δεδομένων μιας ξηρής καλλιεργητικής περιόδου (2014) και μίας υγρής (2015). Η αξιολόγηση του μοντέλου έγινε με στατιστικά κριτήρια (Pearson correlation coefficient, root mean square error, normalized root mean square error, Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient και Willmotts index of agreement). Συμπερασματικά, φαίνεται ότι το μοντέλο AquaCrop υπερεκτίμησε την επιφανειακή φυτοκάλυψη και την παραγόμενη επιφανειακή ξηρή βιομάζα. Επίσης από την εργασία προκύπτει ότι το μοντέλο AquaCrop με κατάλληλη προσαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως βοηθητικό εργαλείο λήψης αποφάσεων για την καλλιέργεια της σόγιας στην κεντρική Ελλάδα.

Λέξεις κλειδιά: AquaCrop, σόγια, επιφανειακή ξηρή βιομάζα, Φυτοκάλυψη

EVALUATION OF AQUACROP MODEL FOR EXPERIMENTAL DATA OF SOYBEAN IN CENTRAL GREECE

Christos Vamvakoulas[1,✉], Ioannis Argyrokastritis[1],Yolanda Papatheohari[2], Stavros Alexandris[1]
Agricultural University of Athens,[1]Dep. of Natural Resources Development & Agricultural Engineering,
[2]Dep. of Crop Science, Iera Odos 75, 11855, Athens, Greece.
✉ *chrisvamva@aua.gr*

ABSTRACT

Aim of the study was the evaluation of the AquaCrop model to predict canopy cover and dry above-ground biomass. A simple experimental design with four replications was followed and the evaluation was done for 2014 and 2015 cultivation periods. The Pearson correlation coefficient, root mean square error, normalized root mean square error, Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient and Willmotts index of agreement were used to test the performance of the model. It was concluded that using AquaCrop model resulted in an overestimation of canopy cover and biomass. Also it is concluded that the model can be used by specialists for accurate predictions of yield and above-ground biomass at the farm level and for various local conditions, for the crop soybean in central Greece.

Keywords: AquaCrop, Soybean, Biomass, Canopy cover

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε ημίξηρα κλίματα όπως είναι της Ελλάδας και με τις κλιματικές παραλλαγές που τα τελευταία χρόνια εντατικοποιούνται, ο προγραμματισμός της άρδευσης γίνεται ολοένα και περισσότερο χρήσιμος ώστε να επιτευχθούν σταθερά υψηλές αποδόσεις των καλλιεργειών όπως είναι αυτή της Σόγιας. Η Σόγια είναι φυτό με πολύ μεγάλη οικονομική σημασία, αφού ο σπόρος της χρησιμοποιείται για την παραγωγή μεγάλου και ποικίλου εύρους προϊόντων, είναι πλούσιος σε πρωτεΐνη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για κατανάλωση από τον άνθρωπο όσο και για κτηνοτροφική χρήση.

Στα πλαίσια του προγραμματισμού της άρδευσης η εφαρμογή υπολογιστικών προγραμμάτων προσομοίωσης της παραγωγής μιας καλλιέργειας (crop productivity modeling), μπορεί να χρησιμοποιηθεί βοηθητικά ως ένα χρήσιμο εργαλείο λήψης αποφάσεων για την βελτιστοποίηση της παραγωγής. Ο οργανισμός τροφίμων και γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) στην προσπάθεια να διασφαλίσει την βέλτιστη χρήση του αρδευτικού νερού για την ανάπτυξη των καλλιεργειών, δημιούργησε το μοντέλο AquaCrop που σχετίζεται με την απόκριση των καλλιεργειών στο νερό (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009; Raes et al., 2012; Steduto et al., 2012).

Η λειτουργία του μοντέλου AquaCrop για το φυτό σόγια και για διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις έχει αξιολογηθεί σε αρκετές εργασίες σε διάφορες περιοχές του πλανήτη (Abi Saab et al., 2014; Kariyama et al., 2014; Paredes et al., 2015; Adeboye et al., 2017). Το μοντέλο AquaCrop σε αρκετές εργασίες αποδεικνύεται ότι προσομοιώνει επαρκώς την απόκριση των καλλιεργειών σε νερό υπό συνθήκες μη υδατικής καταπόνησης ενώ σε συνθήκες έντονης ανεπάρκειας εδαφικής υγρασίας το μοντέλο τείνει να μην κάνει καλή εκτίμηση της απόκρισης των φυτών σε νερό (Evett and Tolk, 2009).

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση του μοντέλου AquaCrop για ένα πρώιμο υβρίδιο σόγιας (PR91M10) για μη καταπονημένη υδατικά καλλιέργεια και δύο καλλιεργητικές χρονιές (2014,2015) στην κεντρική Ελλάδα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα διεξήχθη κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων 2014 και 2015 στον αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στο Κωπαϊδικό πεδίο (περιοχή της Αλιάρτου). Εφαρμόστηκε απλό πειραματικό σχέδιο με τέσσερις επαναλήψεις και μία υδατική μεταχείριση (100%). Ο πειραματικός αγρός διαχωρίστηκε σε πειραματικά τεμάχια μεγέθους εννέα m^2 το κάθε ένα. Σ' αυτά, σπάρθηκε στις 30 Μαΐου 2014 και 30 Μαΐου 2015 η πρώιμη ποικιλία (PR91M10).

Ο προγραμματισμός της άρδευσης έγινε με εφαρμογή ημερήσιου ισοζυγίου νερού και στοιχείων από τα αποτελέσματα του υπολογιστικού προγράμματος ISAREG (Pereira et al, 2003) το οποίο έτρεξε για μετεωρολογικά δεδομένα των 5 τελευταίων ετών (2011-2015). Τα μετεωρολογικά δεδομένα προήλθαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Γ.Π.Α. που βρίσκεται εντός του πειραματικού αγρού. Η σπορά πραγματοποιήθηκε με το χέρι σε 5 σειρές ανά τεμάχιο και σε αποστάσεις 75 cm μεταξύ των γραμμών και 25 cm επί της γραμμής.

Η άρδευση έγινε με σύστημα στάγδην. Στο δίκτυο εφαρμογής επιλέχθησαν σταλακτηφόροι αγωγοί διαμέτρου 16mm με αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες παροχής 4,5 l/h ανά 33cm. Το νερό, το οποίο εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια των μεταχειρίσεων για το 2014 ανέρχεται: για την 100% μεταχείριση στα 185mm (πλήρης άρδευση) και για το 2015 ανέρχεται : για την 100% μεταχείριση στα 265 mm (πλήρης άρδευση). Το έδαφος από

πλευράς μηχανικής σύστασης μετά από δειγματοληψία και ανάλυση χαρακτηρίστηκε ως αργιλώδες (C).

Περιοδικά, ανά 15 ημέρες περίπου, και με διεξαγωγή καταστροφικών δειγματοληψιών μετρήθηκε ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) και το επιφανειακό ξηρό βάρος των φυτών, σε 3 φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο. Οι δειγματοληψίες έγιναν 32, 47, 60 και 74 ημέρες μετά τη σπορά για το 2014 και 33, 48, 61, 74 αντίστοιχα για το έτος 2015. Στις 5/9/2014 (98 ημέρες μετά τη σπορά) έγινε η συγκομιδή για την πρώιμη ποικιλία PR91M10 και στις 9/9/2015 (102 ημέρες μετά τη σπορά) έγινε η συγκομιδή για την ίδια ποικιλία για την δεύτερη καλλιεργητική χρονιά. Κατά τις συγκομιδές συγκομίστηκαν 9 φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο στα οποία μετρήθηκαν το ολικό επιφανειακό ξηρό βάρος του φυτού (ton ha^{-1}). Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) που προσδιορίστηκε χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του ποσοστού φυτοκάλυψης CC (%) με χρήση της εξίσωσης των Hsiao et al., (2009) (εξίσωση 1):

$$CC = 1.005\ [1 - \exp(-0.6\ LAI)]^{1.2} \quad (1)$$

2.1 Περιγραφή του μοντέλου AquaCrop

Το μοντέλο AquaCrop υπολογίζει την επιφανειακή ξηρή βιομάζα και την σποροπαραγωγή της καλλιέργειας από την πραγματική διαπνοή T_r (mm). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να υπολογίζει ξεχωριστά την πραγματική διαπνοή T_r και την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους E_s (mm) για ημερήσια χρονικά βήματα. Η ημερήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή $ET_{c,act}$ (mm day^{-1}) είναι το άθροισμα των T_r και E_s που υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$T_r = K_s\ K_{c,Tr}\ ET_0 \quad (2)$$

και

$$E_s = K_r\ K_e\ ET_0 \quad (3)$$

Όπου το ET_0 είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς σε (mm day^{-1}) , το $K_{c,Tr}$ είναι ο συντελεστής διαπνοής της καλλιέργειας, το K_s είναι ένας συντελεστής υδατικής καταπόνησης, που παίρνει τιμές μικρότερες από 1 σε συνθήκες ανεπάρκειας εδαφικής υγρασίας, το K_e είναι ο συντελεστής εξάτμισης της επιφάνειας του εδάφους και το K_r είναι ο συντελεστής μείωσης της εξάτμισης, που παίρνει τιμές μικρότερες από 1 σε συνθήκες ανεπάρκειας εδαφικής υγρασίας για εξάτμιση από αυτό (Steduto et al., 2012; Raes et al., 2012).

Στο AquaCrop ο υπολογισμός της επιφανειακής ξηρής βιομάζας (B, ton ha^{-1}) γίνεται από τον τύπο :

$$B = Ks_b\ WP^* \sum \frac{T_r}{ET_o} \quad (4)$$

Όπου το Ks_b είναι ένας συντελεστής θερμοκρασιακής καταπόνησης, που παίρνει τιμές μικρότερες από 1 όταν λόγω ψύχους δεν συμπληρώνονται οι βαθμοημέρες ανάπτυξης για την επαρκή παραγωγή βιομάζας και το WP^* είναι η βιομάζα που παράγεται ανά μονάδα επιφάνειας αφού έχει ρυθμιστεί για το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0). Για τον υπολογισμό της τελικής παραγωγής (Y, ton ha^{-1}) χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$Y = HI \; B \qquad (5)$$

Όπου HI είναι ο δείκτης συγκομιδής που υποδεικνύει τι ποσοστό της τελικής ολικής παραγόμενης βιομάζας είναι η σποροπαραγωγή. Λεπτομερής περιγραφή του μοντέλου γίνεται από τους (Steduto et al., 2012; Raes et al., 2012).

2.1.1 Αξιολόγηση του μοντέλου AquaCrop

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο AquaCrop v5.0. Η αξιολόγηση έγινε με μια επαναληπτική διαδικασία για δεδομένα όπως προτείνεται από την μεθοδολογία του AquaCrop. Για το φυτό σόγια προσομοιώθηκαν τα φαινολογικά στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας, συγχρόνως με κλιματικά και εδαφολογικά δεδομένα, τα οποία ρυθμίστηκαν ώστε να ταιριάζουν με τα στοιχεία των δειγματοληψιών.

Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων του AquaCrop με σημεία από την πειραματική καμπύλη (Σχήματα 1 και 2) με μετρήσεις από τις δειγματοληψίες και την τελική παραγωγή αξιολογήθηκαν με τους στατιστικούς δείκτες που δίνει το μοντέλο AquaCrop (Raes et al., 2012). Ο συντελεστής προσδιορισμού (r^2) εκφράζεται ως :

$$r^2 = \left[\frac{\sum(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum(O_i - \bar{O})^2 \sum(P_i - \bar{P})^2}}\right]^2 \qquad (6)$$

Όπου, O_i= μετρημένες παρατηρήσεις, $\bar{O}$ = μέσος των μετρημένων παρατηρήσεων, P_i = αποτελέσματα προσομοίωσης, $\bar{P}$ = μέσος όρος των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Ο δείκτης παίρνει τιμές από 0 έως 1 με τιμές κοντά στο 1 να δείχνουν καλή συσχέτιση.

Ο επόμενος δείκτης είναι ο RMSE που εκφράζεται:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} \qquad (7)$$

όπου n = ο αριθμός των παρατηρήσεων. Ο δείκτης παίρνει τιμές από το 0 έως το άπειρο, με τιμές κοντά στο 0 να δείχνουν καλή λειτουργία του μοντέλου.

Ο $NRMSE$ που εκφράζεται:

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} \; 100 \qquad (8)$$

θεωρείται άριστος για τιμές κάτω του 10% ενώ όχι τόσο καλή σύγκριση για τιμές πάνω από 30%.

Ο EF που εκφράζεται:

$$EF = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \qquad (9)$$

Ο δείκτης παίρνει τιμές από το μείον άπειρο έως το ένα, με την τιμή 1 να είναι το άριστο.

Τέλος ο d που εκφράζεται από την εξίσωση:

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \qquad (10)$$

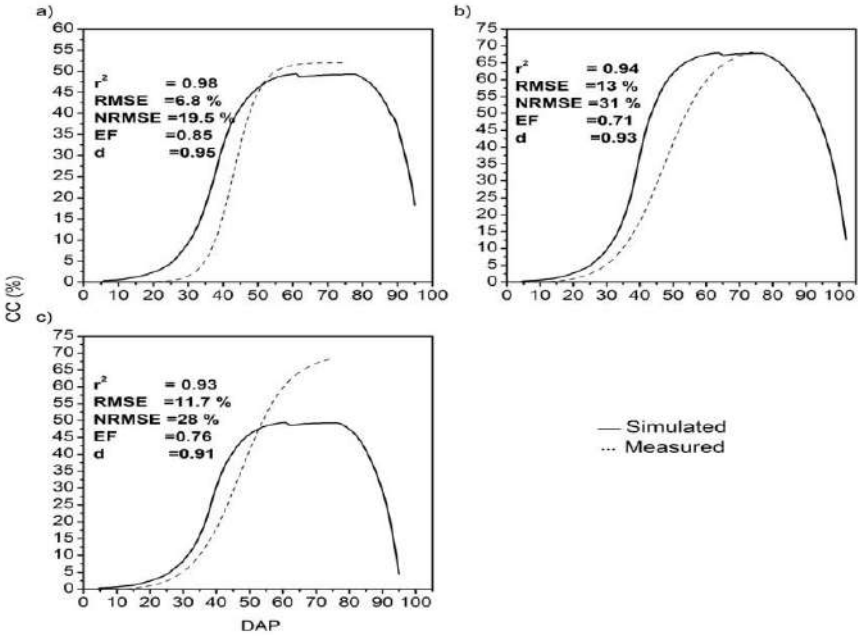
και παίρνει τιμές από 0 έως 1 με την τιμή 1 να είναι το άριστο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

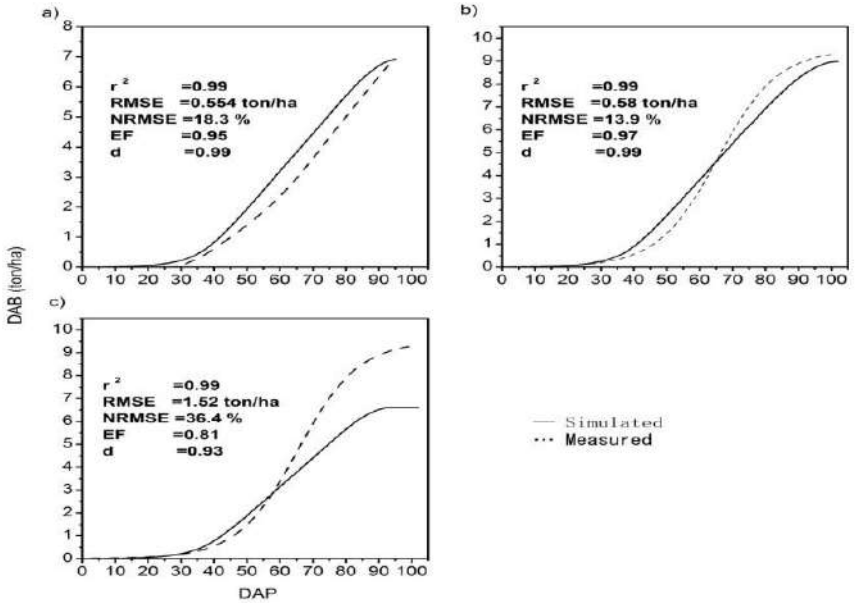
Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι φυτικοί παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν και για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους αντίστοιχα (2014-2015). Στο σχήμα 1 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο AquaCrop τείνει να υπερεκτιμήσει το ποσοστό φυτοκάλυψης και για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους. Σε παρόμοια αποτελέσματα έχουν καταλήξει και οι (Adeboye et al., 2017). Επίσης υπερεκτιμάει έως την 50 ημέρα μετά την σπορά (DAP) το ποσοστό φυτοκάλυψης, όταν το μοντέλο έτρεξε για την καλλιεργητική περίοδο 2015 με φυτικές παραμέτρους της καλλιεργητικής περιόδου 2014 (Σχήμα 1,c). Από τους πέντε στατιστικούς συντελεστές οι (r^2,EF,d) δίνουν πολύ καλή συσχέτιση για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους (2014-2015). Οι στατιστικοί δείκτες RMSE και NRMSE δεν δίνουν καλή συσχέτιση, αυτό οφείλεται στον σχετικά μικρό αριθμό των δειγματοληψιών.

Πίνακας 1. Φυτικοί παράμετροι του μοντέλου AquaCrop για την καλλιεργητική περίοδο 2014.

PR91M10	**2014**	**2015**	**Μονάδες**
Χαμηλότερο όριο θερμοκρασίας ανάπτυξης της καλλιέργειας	**10**	**10**	(ºC)
Υψηλότερο όριο θερμοκρασίας ανάπτυξης της καλλιέργειας	**30**	**30**	(ºC)
Αρχικό στάδιο φυτοκάλυψης (CCo)	**0.33**	**0.33**	%
Συντελεστής ανάπτυξης της φυτοκόμης (CGC)	13.5	13.6	ημέρα^{-1}
Συντελεστής μείωσης της ανάπτυξης της φυτοκόμης (CDC)	20	28	ημέρα^{-1}
Συντελεστής μέγιστης διαπνοής της καλλιέργειας	**1.1**	**1.1**	
Μείωση του συντελεστή της καλλιέργειας αφού φτάσει στο CCx (μέγιστη ανάπτυξη φυτοκόμης)	**0.32**	**0.32**	%
Συντελεστής παραγωγής ρυθμισμένος για το CO_2 και το ET_0	**17**	**17**	g m^{-2}
Ανώτερο όριο για την διακοπή της ανάπτυξης της φυτοκόμης	**0.25**	**0.25**	
Κατώτερο όριο για την διακοπή της ανάπτυξης της φυτοκόμης	**0.55**	**0.55**	
Αυξητικός συντελεστής καταπόνησης φυλλώματος	**3**	**3**	
Ανώτερο όριο για το κλείσιμο των στοματίων	**0.5**	**0.5**	
Ανώτατο όριο εξάντλησης του εδαφικού νερού στο στάδιο γήρανσης της φυτοκόμης	**0.85**	**0.85**	
Συντελεστής καμπύλης καταπόνησης των στοματίων	**3**	**3**	
Συντελεστής καμπύλης καταπόνησης της φυτοκόμης	**3**	**3**	
Συντελεστής που περιγράφει την θετική επίδραση στον HI στο στάδιο γεμίσματος των σπόρων	**small**	**small**	
Συντελεστής που περιγράφει την αρνητική επίδραση στον HI στο στάδιο γεμίσματος των σπόρων	**small**	**small**	
Μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση του δείκτη συγκομιδής (HI)	**15**	**15**	%
Μέγιστος συντελεστής της καλλιέργειας ρυθμισμένος στην αύξηση της φυτοκόμης (K_{cb})	**1.15**	**1.15**	
Διάρκεια από την σπορά μέχρι την βλάστηση του σπόρου	6	5	Ημέρες
Διάρκεια από την σπορά μέχρι την έναρξη της άνθισης	**47**	**47**	Ημέρες
Διάρκεια της άνθισης	29	35	Ημέρες
Χρόνος από την σπορά μέχρι την έναρξη της γήρανσης της καλλιέργειας	79	78	Ημέρες
Χρόνος από την σπορά μέχρι την ωρίμανση	95	100	Ημέρες
Διάρκεια συνεισφοράς στον δείκτη συγκομιδής (HI)	44	49	Ημέρες
Ελάχιστο βάθος ενεργού ριζοστρώματος	**0.3**	**0.3**	m
Μέγιστο βάθος ενεργού ριζοστρώματος	**0.7**	**0.7**	m



Σχήμα 1. Απεικόνιση της συσχέτισης της φυτοκάλυψης (CC,%) σε σχέση με τις ημέρες μετά την σπορά (DAP) για τις καλλιεργητικές περιόδους 2014 (a), 2015(b) και για αποτελέσματα του μοντέλου όπως έτρεξε για την καλλιεργητική περίοδο 2015 με φυτικές παραμέτρους της καλλιεργητικής περιόδου 2014 (c).



Σχήμα 2. Απεικόνιση της συσχέτισης της επιφανειακής ξηρής βιομάζας (DAB,ton/ha) σε σχέση με τις ημέρες μετά την σπορά (DAP) για τις καλλιεργητικές περιόδους 2014 (a), 2015(b) και για αποτελέσματα του μοντέλου όπως έτρεξε για την καλλιεργητική περίοδο 2015 με φυτικές παραμέτρους της καλλιεργητικής περιόδου 2014 (c).

Στο σχήμα 2 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο AquaCrop υπερεκτιμά την επιφανειακή ξηρή βιομάζα για την καλλιεργητική περίοδο 2014 (σχήμα 2α). Ενώ για την καλλιεργητική περίοδο 2015 σχήμα 2(b) και για αποτελέσματα του μοντέλου όπως έτρεξε για την καλλιεργητική περίοδο 2015 με φυτικές παραμέτρους της καλλιεργητικής περιόδου

2014 σχήμα 2(c), μέχρι την 60 DAP υπερεκτιμάει τα πειραματικά δεδομένα ενώ μετά την 60 DAP τείνει να τα υποτιμήσει.

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην πράξη η χρήση ενός μοντέλου όπως είναι το AquaCrop, το οποίο θεωρείται εύκολο στην χρήση του, απαιτεί ιδιαίτερες και αρκετές παρατηρήσεις των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας. Συνεπώς η εκτέλεση σεναρίων με την χρήση του μοντέλου χρειάζεται ακριβή διαχείριση των σταδίων που ακολουθούνται για την απόκτηση πειραματικών δεδομένων προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισαγωγής σ' αυτό.

Στην παρούσα εργασία έγινε ρύθμιση του μοντέλου AquaCrop και αξιολογήθηκε με βάση τους πέντε στατιστικούς δείκτες που δίνει το ίδιο το μοντέλο. Συμπερασματικά, μια καλή ρύθμιση του μοντέλου δίνει αποτελέσματα με εξαιρετική ακρίβεια για την επιφανειακή ξηρή βιομάζα και για την πορεία του ποσοστού φυτοκάλυψης για μη καταπονημένες καλλιέργειες.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν αποτελέσματα για τη ρύθμιση του μοντέλου στην κεντρική Ελλάδα και για το φυτό σόγια. Λαμβάνοντας υπόψη τους στατιστικούς δείκτες που χρησιμοποιεί το μοντέλο κρίνεται αναγκαίο να γίνουν και άλλα παρόμοια πειράματα για το φυτό σόγια με μεγαλύτερο αριθμό δειγματοληψιών και σε μεγαλύτερη έκταση.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abi Saab, M.T., Albrizio, R., Nangia, V., Karam, F., Rouphael, Y., 2014. *Developing scenarios to assess sunflower and soybean yield under different sowing dates and water regimes in the Bekaa valley (Lebanon)*: Simulations with AquaCrop International Journal of Plant Production (2014) 8(4): 457-482.

Adeboye, O.B., Schultz B., Adekalu K.O., Prasad K., 2017. *Modelling of response of the growth and yield of soybean to full and deficit irrigation by using AquaCrop.* Irrig. and Drain. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ird.2073.

Evett, S.R., Tolk, J.A., 2009. Introduction: *Can Water Use Efficiency Be Modeled Well Enough to Impact Crop Management?* Agron. J. 101, 423-425.

Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Roja-Lara, B., Raes, D., Fereres, E., 2009. *AquaCrop-The FAO model to simulate yield response to water: parametrization and testing for maize*. Agron. J. 101, 448-459.

Kariyama, I.D., 2014. *Simulations of Potential Yields of jenguma soybean variety in the upper west region using AquaCrop model*. International journal of scientific & technology research 3:5 101-106.

Paredes P, Wei Z, Liu Y, Xu D, Xin Y, Zhang B, Pereira LS. 2015. *Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in the North China Plain.* Agricultural Water Management 152(0): 57–71.

Pereira, L.S., Teodoro, P.R., Rodrigues, P.N., Teixeira, J.L., 2003. *Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG*. In: Rossi, G., Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 161-180.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009. *AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and soft ware description.* Agron. J. 101, 438-447.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2012. *AquaCrop—Reference Manual*. Available at: http://www.fao.org

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2009. *AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts*. Agron. J. 101, 426-437.

Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2012. *AquaCrop: concepts, rationale and operation*. In: Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D., Crop Yield Response to Water, FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. pp. 17-49.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΑΓΡΟΥ ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Αγγελάκη Α.[1], Αναγνωστούλης Β.[1], Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ.[1]

[1]Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, Ν. Ιωνία, Τ.Κ. 38446, Βόλος,
e-mail: anaggel@agr.uth.gr

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός του οριακού βρόχου της υστέρησης σε εδαφικά δείγματα αμμώδους πηλού, που συλλέχθηκαν από το Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βελεστίνο, σε βάθη από 0 έως 30 cm και από 30 έως 60 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Volumetric Porous Plate Extractor των Richards και Fireman. Μετά την κοκκομετρική και μηχανική ανάλυση, προσδιορίστηκε η υγρασία κορεσμού των εδαφικών δειγμάτων (θ_s). Ακολούθησαν οι διαδικασίες στράγγισης και διαβροχής εφαρμόζοντας μικρές μεταβολές πίεσης. Από τα πειραματικά δεδομένα προέκυψαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες διαβροχής – στράγγισης των εδαφικών δειγμάτων. Τα πειραματικά σημεία προσομοιώθηκαν με την εξίσωση των Mualem-vanGenuchten με πολύ καλό συντελεστή συσχέτισης.

Λέξεις κλειδιά: Συσκευή Richards & Fireman, βρόχος υστέρησης, χαρακτηριστικές καμπύλες, εξίσωση Mualem-vanGenuchten, προσομοίωση

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HYSTERESIS LOOP

Angelaki A.[1], Anagnostoulis V.[1], Sakellariou-Makrantonaki M.[1]

[1]Laboratory of Agricultural Hydraulics, Department of Agriculture, Crop Production & Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446, Volos, Greece
e-mail: anaggel@agr.uth.gr

ABSTRACT

The main purpose of this study was the experimental determination of the hysteresis loop of two soil samples, which were collected at depths 0 – 30 cm and 30 – 60 cm from the Farm of University of Thessaly, in Velestino (Magnesia Prefecture, Thessaly, Greece). The Richards & Fireman's Volumetric Porous Plate Extractor device was used, in order to conduct the experimental procedure at the laboratory. After the particle size and mechanical analysis of the two soils, soil moisture at saturation (θ_s) was obtained for both soil samples. Small adjustments of water pore pressure were applied and the soil moisture was measured during drainage and infiltration, for each soil sample. Using the experimental data, the characteristic curves of drainage and infiltration were obtained. The simulation of the experimental points using the Mualem-vanGenuchten equation gave very good approximation.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χαρακτηριστική καμπύλη h(θ) του εδάφους περιγράφει την κατάσταση ισορροπίας μεταξύ του ύψους πίεσης του νερού (απόλυτη τιμή) h των εδαφικών πόρων και της περιεχόμενης υγρασίας θ σε ακόρεστο έδαφος. Η καμπύλη που προκύπτει από τη στράγγιση (drainage), λέγεται και καμπύλη εκρόφησης (desorption) ή συγκράτησης (retention) ή ελευθέρωσης (release) του νερού (Αντωνόπουλος, 1999). Οι καμπύλες στράγγισης και διαβροχής έχουν συνήθως σιγμοειδή μορφή και ποτέ δε συμπίπτουν, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το φαινόμενο της υστέρησης. Η υστέρηση αποτελεί φυσικό φαινόμενο, το οποίο είναι πιο έντονο στα χονδρόκοκκα εδάφη (Τζιμόπουλος κ.α., 2000; Σακελλαρίου κ.α, 2000). Οι βρόχοι της υστέρησης που παρουσιάζονται μεταξύ της πίεσης του νερού των πόρων και της υγρασίας του εδάφους σε διαδοχικές στραγγίσεις-υγράνσεις του εδάφους, μελετήθηκαν για πρώτη φορά από τον Haines (Haines, 1930). Ο Haines θεώρησε ως αιτία του φαινομένου την αρχιτεκτονική του πορώδους μέσου. Σήμερα, είναι γνωστό ότι το φαινόμενο έχει σχέση με τη διαφορετική γωνία επαφής μεταξύ του νερού και των κόκκων του εδάφους *(rain drop effect)*. Το φαινόμενο της υστέρησης έχει αποδοθεί και σε επιπλέον παράγοντες όπως στον εγκλωβισμό αέρα σε τυφλούς πόρους, στην ανομοιόμορφη κατανομή του πορώδους και στο φαινόμενο της επίδρασης της φιάλης με μελάνι (the ink bottle effect), σύμφωνα με το οποίο, για το γέμισμα ενός πόρου απαιτείται πίεση μικρότερη από ότι για το άδειασμα του πόρου (Childs, 1969). Η ακόρεστη ροή περιγράφεται καλύτερα, όταν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της υστέρησης (Imbrahim & Brutsaert, 1968; Dane & Wieranga, 1975; Watson & Lee 1975; Gillham et. Al, 1979; Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη 1990). Η γνώση της εξίσωσης h(θ) είναι απαραίτητη για την εύρεση της ποσότητας νερού που μπορεί να συγκρατηθεί από το έδαφος και βοηθάει έμμεσα στον προσδιορισμό της κατανομής των πόρων του εδάφους, στην επιλογή του είδους της καλλιέργειας και στη μελέτη άρδευσης και στράγγισης του εδάφους (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1994). Στην Ελλάδα, πρώτος ο Πουλοβασίλης (Poulovassilis, 1962) μελέτησε το φαινόμενο της υστέρησης και εφάρμοσε στην ακόρεστη ροή τη θεωρία των ανεξάρτητων στοιχείων, η οποία είχε εφαρμοστεί από τον Everett (Everett & Whitton, 1952) για την υστέρηση σε ηλεκτρομαγνητικά συστήματα, ενώ αργότερα (Poulovassilis & Childs, 1971) εισήγαγε τη θεωρία των εξαρτημένων στοιχείων. Ο Philip (Philip, 1964) με βάση την υπόθεση ομοιότητος επιχειρεί πρόβλεψη της υστέρησης ξεκινώντας από μια οριακή καμπύλη, ενώ ο Mualem έχει προτείνει μοντέλα πρόβλεψης των διερευνητικών καμπυλών (Mualem, 1973; Mualem 1974; Mualem 1977; Mualem 1984; Mualem & Dagan 1975; Mualem & Miller 1979). Ο van Genuchten (1978, 1980) περιέγραψε τη χαρακτηριστική καμπύλη *Θ(h)* με την εμπειρική σχέση:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad (1)$$

όπου:

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad 0 < m < 1 \quad (2)$$

θ_s είναι η υγρασία κορεσμού του εδάφους, θ_r είναι η υπολειμματική υγρασία και *α, m, n* είναι παράμετροι. Η παράμετρος *α* προκαλεί παράλληλη μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης χωρίς να αλλοιώνει τη μορφή της, εφόσον οι άλλες παράμετροι παραμένουν

σταθερές. Η παράμετρος *n* είναι υπεύθυνη για την παραμόρφωση της καμπύλης (Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, 1986).

Η εξίσωση (1) μπορεί να λυθεί ως προς h:

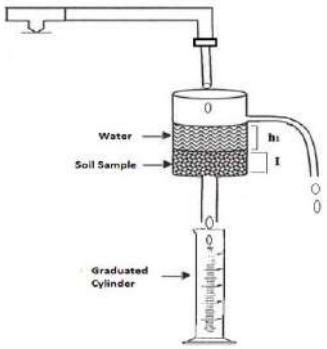
$$h = \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{1/m} - 1 \right]^{1/n} \cdot \frac{1}{\alpha} \qquad (3)$$

Το ενδιαφέρον των ερευνητών για τις υδροδυναμικές παραμέτρους, τις χαρακτηριστικές καμπύλες και το φαινόμενο της υστέρησης σε πορώδη μέσα παραμένει αμείωτο, με αποτέλεσμα να έχουν γίνει πειραματικές εργασίες, να έχουν προταθεί μοντέλα πρόβλεψης των χαρακτηριστικών καμπυλών, αλλά και να έχει γίνει έρευνα στις γωνίες διαβροχής και αποσύρσεως και στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν τους βρόχους υστέρησης. Ενδεικτικά, αναφέρονται μερικές από τις τελευταίες ενδιαφέρουσες εργασίες: Khalili et al, 2008; Argyrokastritis et al, 2009; Pedroso & Williams 2010; Valiantzas & Londra, 2012; Diamantopoulos & Durner 2013; Bourazanis et al, 2016; Azizi et al, 2017, Zhuang et al, 2017.

Καθώς οι πειραματικές εργασίες στην ύπαιθρο παρουσιάζουν πολλές δυσκολίες και αστάθμητους παράγοντες (καιρικές συνθήκες, κ.λπ.), που δυσχεραίνουν ακόμη περισσότερο τη διεξαγωγή των πειραμάτων, στην παρούσα εργασία έχουν γίνει πειραματικές μετρήσεις πίεσης και εδαφικής υγρασίας στο εργαστήριο, σε κύκλους διαδοχικών στραγγίσεων-διαβροχών σε δύο διαταραγμένα εδαφικά δείγματα που έχουν ληφθεί από το Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με σκοπό το σχεδιασμό των χαρακτηριστικών καμπυλών, την παρατήρηση του φαινομένου της υστέρησης, την προσέγγιση των πειραματικών τιμών με το μαθηματικό μοντέλο των Mualem-vanGenuchten και μελλοντικά την επίλυση των εξισώσεων κίνησης και την περεταίρω διερεύνηση προβλημάτων και συνθηκών άρδευσης-στράγγισης στο Αγρόκτημα.

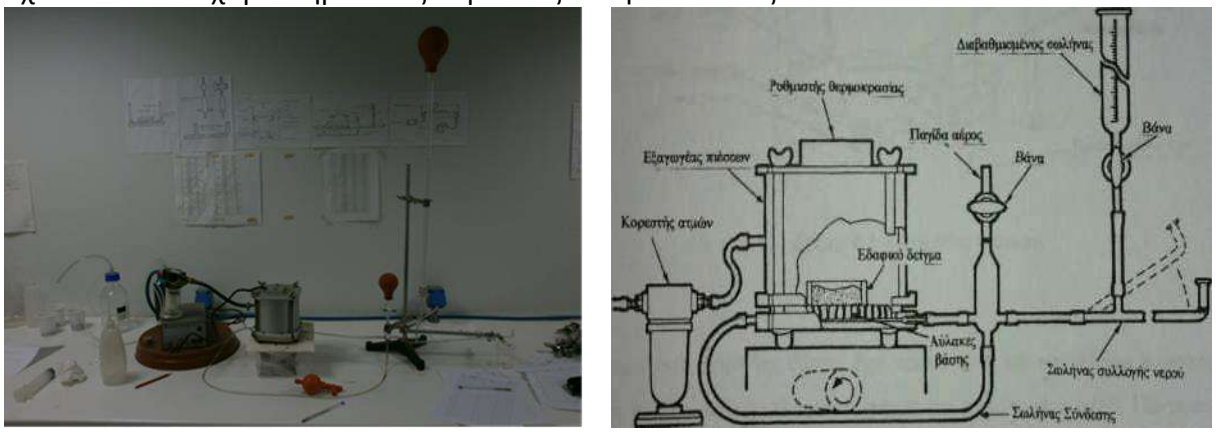
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ελήφθησαν εδαφικά δείγματα από το Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βελεστίνο, με σκοπό τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών διαβροχής-στράγγισης και τη μελέτη του φαινομένου της υστέρησης. Η συλλογή έγινε σε δύο διαφορετικά βάθη από την επιφάνεια του εδάφους: από 0 έως 30 cm και από 30 έως 60 cm. Πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική και μηχανική ανάλυση, ώστε να γίνει ο χαρακτηρισμός των εδαφών και στη συνέχεια προσδιορίστηκε η υγρασία κορεσμού τους (θ_s). Υπολογίστηκε πειραματικά στο εργαστήριο, η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού με τη μέθοδο σταθερού φορτίου (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού με τη μέθοδο σταθερού φορτίου

Κατόπιν, από την κατάσταση κορεσμού, ξεκίνησε η διαδικασία της στράγγισης για κάθε δείγμα ξεχωριστά, σε στάδια. Όταν το έδαφος έφτανε στην υπολειπόμενη υγρασία (θ_r), ξεκινούσε η διαδικασία της διαβροχής, σε στάδια. Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Volumetric Porous Plate Extractor των Richards και Fireman, η οποία βοηθά στη σύγκριση με ακρίβεια της μετακινούμενης ποσότητας νερού από και προς το δείγμα (Σχ. 2). Η μέθοδος αυτή αντιστοιχεί στον ξηρό και υγρό κύκλο που συμβαίνει στο έδαφος στον αγρό. Με τη συσκευή Richards και τα δεδομένα που προκύπτουν, μπορούν να σχεδιαστούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδαφών παντός τύπου.



Σχήμα 2. Συσκευή Volumetric Porous Plate Extractor των Richards και Fireman

Το όλο σύστημα συνδέεται με συμπιεστή αέρα (Compressor Model 500 Sevies), ο οποίος διοχετεύει πεπιεσμένο αέρα και με ρυθμιστή πιέσεων (Manifold Model 700-3) της Soil Moisture, με τη βοήθεια του οποίου επιτυγχάνεται ακρίβεια στην αυξομείωση των πιέσεων.

Το έδαφος αρχικά, πέρασε από κόσκινο με διαβαθμισμένες διαμέτρους οπών. Εξαιρέθηκαν τα κλάσματα με διάμετρο κόκκων 2 mm. Στη συνέχεια έγινε ξήρανση του εδάφους στους 105°C. Το κάθε δείγμα εδάφους τοποθετήθηκε σε δακτύλιο συγκράτησης ύψους 1 cm. Κάθε ξηρό εδαφικό δείγμα ζυγίστηκε και μετά αφέθηκε να κορεστεί σε απιονισμένο νερό για περίπου 24 ώρες και ξαναζυγίστηκε με σκοπό να υπολογιστεί η υγρασία κορεσμού. Στη συνέχεια ο δακτύλιος με το εδαφικό δείγμα τοποθετήθηκε πάνω στην κεραμική πορώδη πλάκα της συσκευής υστέρησης, η οποία είχε και αυτή κορεστεί προηγουμένως με απιονισμένο νερό. Αμέσως μετά, πληρώθηκαν οι εξωτερικοί σωλήνες της βάσης με απιονισμένο νερό και αφού σφραγίστηκε ο εξαγωγέας πίεσης, εφαρμόστηκε πίεση αέρος. Ξεκινώντας από μηδενική πίεση, αυξανόταν σταδιακά (με πολύ μικρές μεταβολές) η πίεση και ταυτόχρονα λαμβάνονταν μετρήσεις του νερού που στράγγιζε από το εδαφικό δείγμα. Η τελευταία μέτρηση έγινε σε πίεση 0,8 bar τόσο για το πρώτο, όσο και για το δεύτερο δείγμα. Σε αυτό το σημείο ξεκινούσε η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή εφαρμόστηκαν μικρές σταδιακές μειώσεις της πίεσης μέχρι την τιμή μηδέν. Σε αυτή τη διαδικασία, το εδαφικό δείγμα απορροφούσε νερό (διαβροχή). Η διαβροχή του εδαφικού δείγματος άρχισε από τα 0,8 bar για το πρώτο δείγμα και από τα 0,8 bar για το δεύτερο δείγμα. Κατά την διάρκεια του πειράματος, η θερμοκρασία του χώρου ήταν σταθερή στους 20 ^{o}C. Τα πειραματικά δεδομένα υγρασίας και πίεσης για την δεύτερη διαβροχή και τη δεύτερη στράγγιση προσεγγίστηκαν με την εξίσωση των Mualem-vanGenuchten με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου RETC (vanGenuchten et al, 1991).

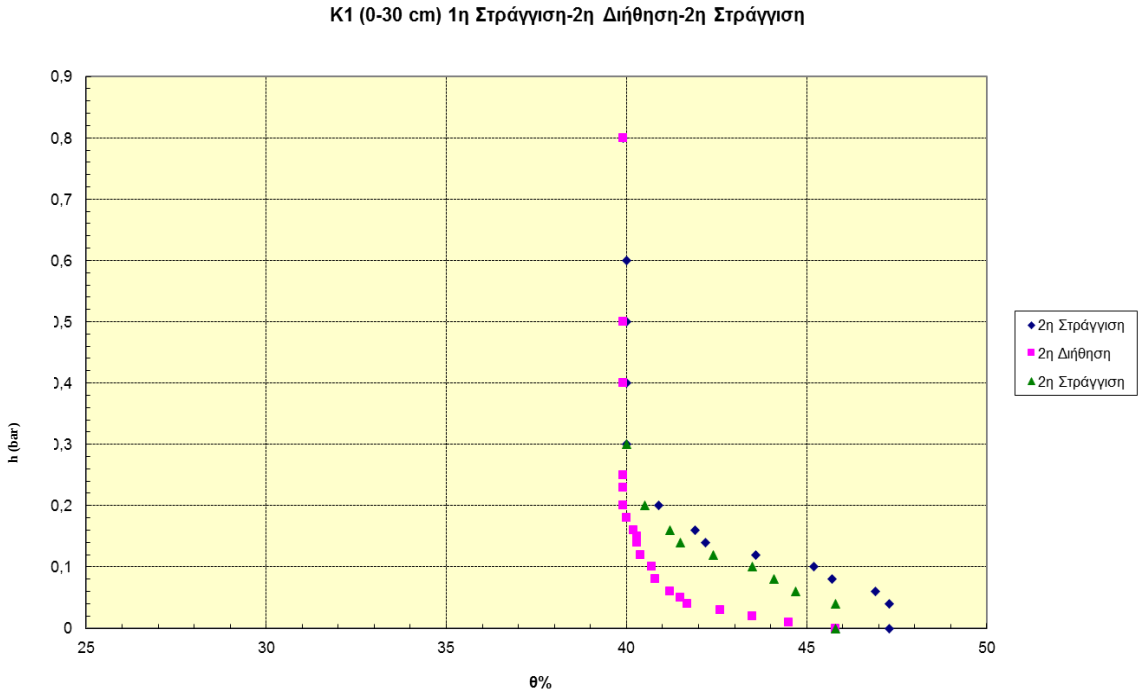
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για κάθε εδαφικό δείγμα αρχικά, μετρήθηκε πειραματικά η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού με τη μέθοδο σταθερού φορτίου και η υγρασία κορεσμού. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 1:

Πίνακας 1. Αποτελέσματα Μηχανικής Ανάλυσης, πειραματικών μετρήσεων Υδραυλικής Αγωγιμότητας Κορεσμού και Υγρασίας Κορεσμού

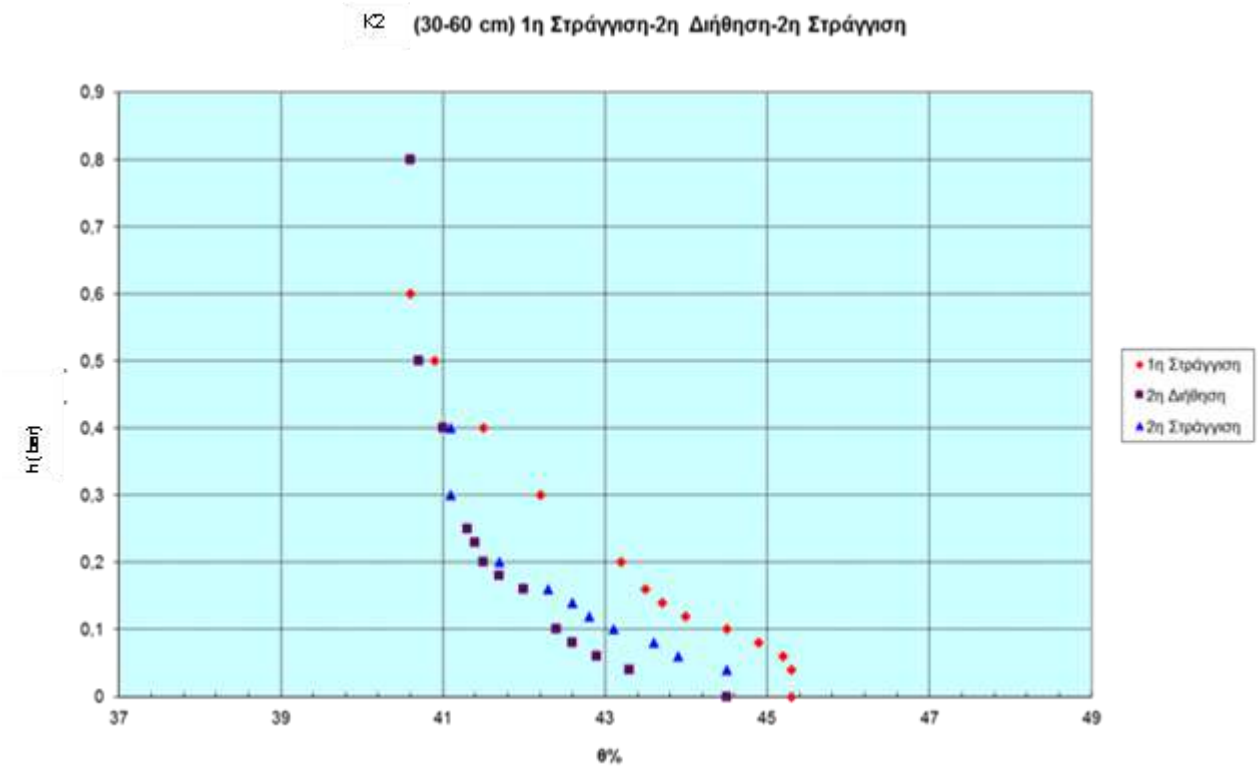
α/α	**Εδαφικό δείγμα**	**Χαρακτηρισμός εδάφους**	**Υδραυλική Αγωγιμότητα Κορεσμού (K_s) (cm/min)**	**Υγρασία κορεσμού (θs %) (cm^3/ cm^3)**
1	Κ1 (0-30 cm)	Αμμώδης πηλός (SL)	0,097	47,3
2	Κ2 (30-60 cm)	Αμμώδης πηλός (SL)	0,099	45,3

Εφαρμόζοντας μικρές μεταβολές στην πίεση, μετρήθηκε κάθε φορά η υγρασία που συγκρατεί το εδαφικό δείγμα κατά τον κύκλο στράγγισης-διαβροχής. Από τις πειραματικές μετρήσεις εξήχθησαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του πρώτου εδαφικού δείγματος (Κ1), για την 1η στράγγιση, τη 2η διαβροχή και τη 2η στράγγιση, όπου είναι εμφανής ο βρόχος της υστέρησης (Σχήμα 3). Το εύρος τιμών υγρασίας στο έδαφος αυτό, κυμαίνεται από περίπου 40% έως σχεδόν 47,2% που είναι περίπου η υγρασία κορεσμού. Από τις υψηλές υγρασίες φαίνεται, ότι η συμπεριφορά του εν λόγω δείγματος είναι πολύ βαρέως εδάφους. Ο εγκλωβισμός αέρα στο έδαφος είναι περίπου 1,3%.



Σχήμα 3. Οριακός βρόχος υστέρησης δείγματος Κ1

Στο Σχήμα 4 δίδεται η χαρακτηριστική καμπύλη, όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα της 1ης στράγγισης, 2ης διαβροχής και 2ης στράγγισης, για το δεύτερο εδαφικό δείγμα (Κ2). Το εύρος τιμών υγρασίας στο έδαφος αυτό, κυμαίνεται από περίπου 40,7% έως σχεδόν 45,3% που είναι περίπου η υγρασία κορεσμού. Επίσης, παρατηρείται εγκλωβισμός αέρα στο έδαφος ο όγκος του οποίου είναι 0,8% περίπου.



Σχήμα 4. Οριακός βρόχος υστέρησης δείγματος Κ2

Για κάθε εδαφικό δείγμα, οι πειραματικές τιμές υγρασίας και πίεσης της 2^{ης} Διαβροχής (2^{η} Δ) και της 2^{ης} Στράγγισης (2^{η} Σ), εισήχθησαν στο υπολογιστικό μοντέλο RETC, που υπολογίζει τις παραμέτρους θ_r, θ_s, α και n του μοντέλου των Mualem-vanGenuchten (εξίσωση (3)), οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2. Παράμετροι της εξίσωσης Mualem-vanGenuchten, όπως υπολογίστηκαν από το μοντέλο RETC για κάθε εδαφικό δείγμα

α/α	**Εδαφικό δείγμα**	**θ_r**	**θ_s**	**α**	**n**	**R^2**
1	Κ1 (0-30) 2^{η} Δ	0,39581	0,45700	0,06420	1,97244	0,99488
2	Κ1 (0-30) 2^{η} Σ	0,39463	0,45817	0,01042	3,30417	0,99276
3	Κ2 (30-60) 2^{η} Δ	0,39793	0,44491	0,02555	1,61870	0,98989
4	Κ2 (30-60) 2^{η} Σ	0,41294	0,44545	0,01108	2,94486	0,98678

Οι εξισώσεις των Mualem-vanGenuchten, ως προς την πίεση (h(θ)) για τη 2^{η} Διαβροχή (2^{η} Δ) και τη 2^{η} Στράγγιση (2^{η} Σ), για το εδαφικό δείγμα Κ1 (0-30 cm), δίνονται στον Πίνακα 3:

Πίνακας 3. Εξισώσεις 2^{ης} Διαβροχής και 2^{ης} Στράγγισης για το εδαφικό δείγμα Κ1

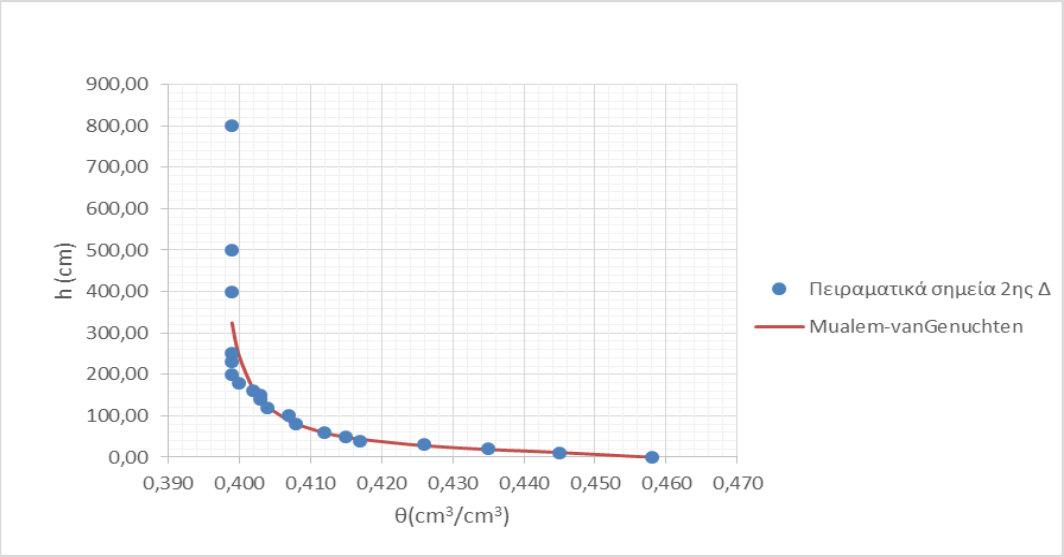
α/α	**Εδαφικό δείγμα Κ1 (0-30 cm)**		
1	**2^{η} Δ**	$h=\left[\left(\frac{0,06119}{\theta-0,39581}\right)^{2.02834}-1\right]^{0,50698}\cdot 15,57632$	(4)
2	**2^{η} Σ**	$h=\left[\left(\frac{0,06354}{\theta-0,39463}\right)^{1,43399}-1\right]^{0,30264}\cdot 95,96928$	(5)

Οι εξισώσεις h(θ) της 2^{ης} Στράγγισης, για το εδαφικό δείγμα Κ2 (30-60 cm) , δίνονται στον Πίνακα 4:

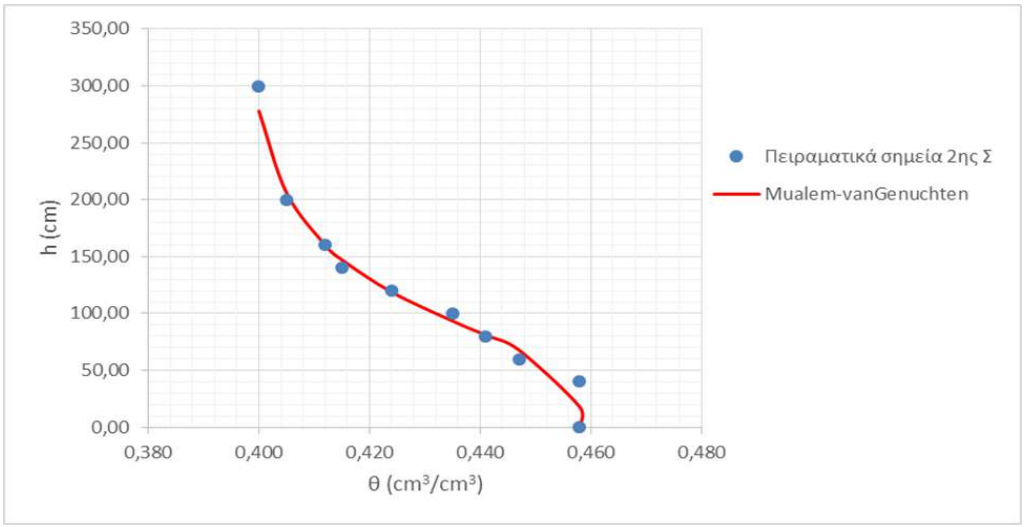
Πίνακας 4. Εξισώσεις 2ης Διαβροχής και 2ης Στράγγισης για το εδαφικό δείγμα Κ2

α/α	Εδαφικό δείγμα Κ2 (30-60 cm)		
1	2η Δ	$h=\left[\left(\frac{0,04698}{\theta-0,39793}\right)^{2,61629}-1\right]^{0,61777}\cdot 39,13894$	(6)
2	2η Σ	$h=\left[\left(\frac{0,03251}{\theta-0,41294}\right)^{1,51418}-1\right]^{0,33957}\cdot 90,25271$	(7)

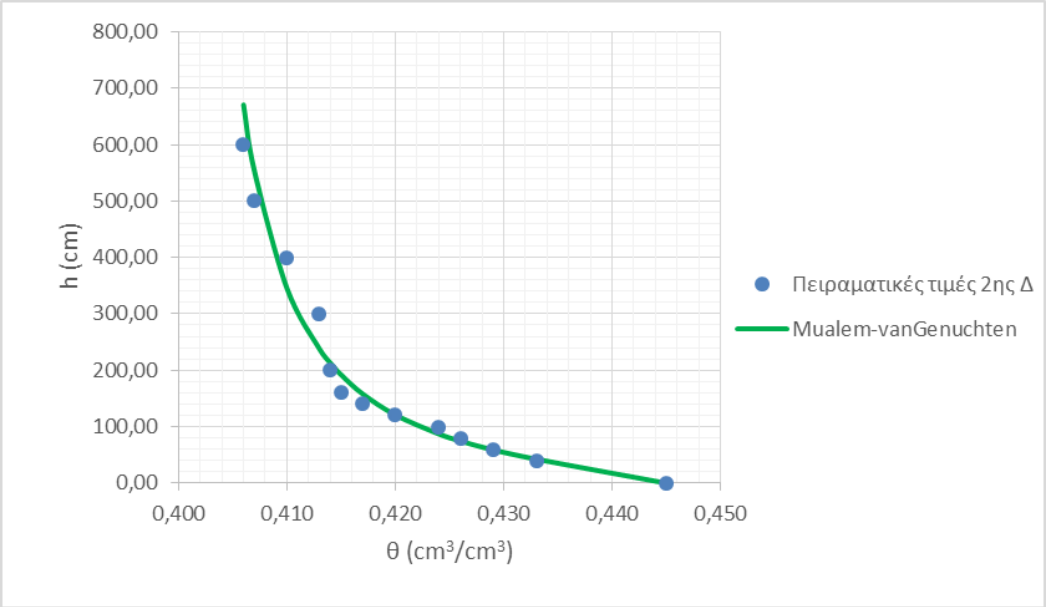
Στα Σχήματα 5 και 6 φαίνεται η προσέγγιση των πειραματικών σημείων της 2ης Διαβροχής και της 2ης Στράγγισης, με τις εξισώσεις Mualem-vanGenuchten για το εδαφικό δείγμα Κ1 αντίστοιχα. Η προσέγγιση των πειραματικών σημείων της 2ης Διαβροχής και της 2ης Στράγγισης για το εδαφικό δείγμα Κ2, με τις εξισώσεις Mualem-vanGenuchten φαίνεται στα Σχήματα 7 και 8.



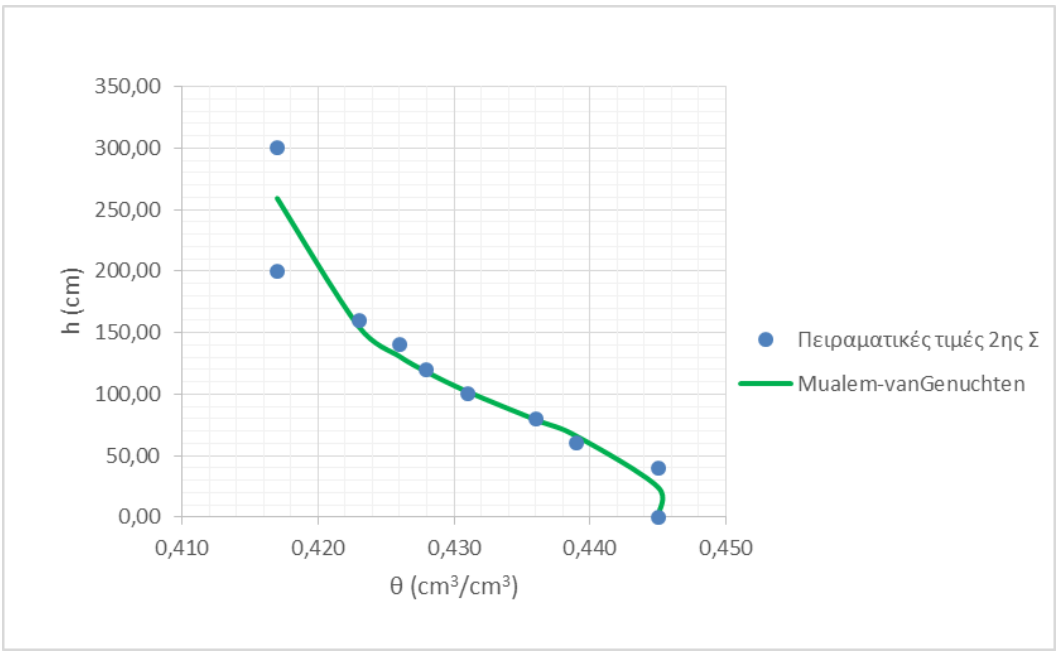
Σχήμα 4. Προσέγγιση των πειραματικών σημείων 2ης Διαβροχής με τη εξίσωση Mualem-vanGenuchten για το εδαφικό δείγμα Κ1



Σχήμα 5. Προσέγγιση των πειραματικών σημείων της 2ης Στράγγισης με τη εξίσωση Mualem-vanGenuchten για το εδαφικό δείγμα Κ1



Σχήμα 6. Προσέγγιση των πειραματικών σημείων 2ης Διαβροχής με τη εξίσωση Mualem-vanGenuchten για το εδαφικό δείγμα Κ2



Σχήμα 7. Προσέγγιση των πειραματικών σημείων της 2ης Στράγγισης με τη εξίσωση Mualem-vanGenuchten για το εδαφικό δείγμα Κ2

ΣΥΝΟΨΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο πειραματικός προσδιορισμός στο Εργαστήριο των οριακών χαρακτηριστικών καμπυλών δειγμάτων εδάφους του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η προσομοίωση των πειραματικών τιμών. Χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Volumetric Porous Plate Extractor των Richards και Fireman με σταδιακή εφαρμογή πιέσεων και μέτρηση της αντίστοιχης υγρασίας στο έδαφος. Κατά το σχεδιασμό των χαρακτηριστικών καμπυλών φάνηκε το φαινόμενο της υστέρησης και ο εγκλωβισμός αέρα. Τα πειραματικά δεδομένα εισήχθησαν στο υπολογιστικό μοντέλο RETC, που

υπολογίζει τις παραμέτρους θ_r, θ_s, α και n της εξίσωσης των Mualem-vanGenuchten για τη $2^η$ διαβροχή και τη $2^η$ στράγγιση, για κάθε εδαφικό δείγμα. Η εξισώση Mualem-vanGenuchten προσομοιώνει με πολύ καλό συντελεστή συσχέτισης τα πειραματικά δεδομένα. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του εδάφους προσδιορίζονται για να εκτιμηθεί η ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει το έδαφος κάτω από διαφορετικές τάσεις. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες αποτελούν απαραίτητα εργαλεία για τη διερεύνηση της κίνησης του νερού στο έδαφος και για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Αντωνόπουλος Β., 1999. Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους. Θεσσαλονίκη, 1999, σελ. 264.

Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Μ., 1986. Επίδραση των υδροδυναμικών παραμέτρων διαβροχής – στράγγισης σε προβλήματα αρδεύσεων. Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 215.

Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Μ., 1990. Επίδραση της υστέρησης στην εξομοίωση του προβλήματος της διαβροχής του νερού σε εδαφικό δείγμα εδραζόμενο επί πορώδους κάψας. 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΥΕ, σελ. 435-449.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Τερζίδης Γ., Τζιμόπουλος Χ. και Δέλλιος Μ., 1994. Προσδιορισμός υδροδυναμικών χαρακτηριστικών πειραματικού αγρού. Υδροτεχνικά, Τόμος 4, Τεύχος 1, σελ. 16 – 31.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Τζιμόπουλος Χ., Στεργιοπούλου Σ., 2000. Πειραματικός προσδιορισμός της τριχοειδούς υστέρησης και πρόβλεψη κατά Mualem διερευνητικών καμπυλών Α’ τάξης. 8^ο Συνέδριο ΕΥΕ, σελ. 427-434.

Τζιμόπουλος Χ., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Στεργιοπούλου Σ., 2000. Εκτίμηση οριακών βρόχων υστέρησης – αναλυτική και πειραματική προσέγγιση του προβλήματος. 2^ο Εθνικό Συνέδριο ΕΓΜΕ, σελ. 117 – 123.

Αγγλική

Argyrokastritis I., Kargas G., Kerkides P., 2009. Simulation of Soil Moisture Profiles Using K(h) from Coupling Experimental Retention Curves and One-Step Outflow Data. Water Resources Management, Volume 23, Issue 15, pp 3255–3266.

Azizi A., Jommi C., Musso G., 2017. A water retention model accounting for the hysteresis induced by hydraulic and mechanical wetting-drying cycles. Computers and Geotechnics 87: 86–98.

Bourazanis G., Londra P., Kargas G., Argyrokastritis I & Kerkides P., 2016. Evaluation of porous medium hydraulic properties using experimental methods and RETC code, Archives of Agronomy and Soil Science, 62:8, 1147-1157, DOI: 10.1080/03650340.2015.1124095

Childs, E. C., 1969. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. John Wiley, N.Y., pp 493.

Dane J.H. and Wieranga P.J., 1975. Effect of hysteresis on the prediction of infiltration, redistribution and drainage of water in a layered soil. J. of Hydrol., 25: 229-242.

Diamantopoulos E., Durner W., 2013. Physically-based model of soil hydraulic properties accounting for variable contact angle and its effect on hysteresis Advances in Water Resources 59:169-180.

Everrett D.H and Whitton W.I., 1952. A general approach to hysteresis. 1. Trans Faraday Soc., 48: 749-757.

Gillham R.W., Klute A. and Heermann D.F., 1979. Measurement and numerical simulation of hysteretic flow in a heterogeneous porous medium. Proc. Of Soil Sci. Soc. Am., 43: 1061-1067.

Haines W.B., 1930. Studies in the physical properties of soils. V. The hysteresis effect in capillary properties and the modes of moisture distribution associated there with, J. of Agr. Sci., 20: 97 -116.

Imbrahim H.A. and Brutsaert W., 1968. Intermittent infiltration into soils with hysteresis. J. of Hydraulic Div. Amer. Soc. Civil Eng, 94: 113-137.

Khalili N., Habte M.A., Zargarbashi S., 2008. A fully coupled flow deformation model for cyclic analysis of unsaturated soils including hydraulic and mechanical hysteresis Computers and Geotechnics 35: 872–889.

Mualem Y., 1973. Modified approach to capillary hysteresis based on similarity hypothesis. Water Resour. Res. 9 (5): 1324-1331.

Mualem Y., 1974. A conceptual model of hysteresis. Water Resour. Res. 10 (3): 514-520.

Mualem Y., 1977. Extension of similarity hypothesis used for modeling the soil water characteristics. Water Resour. Res. 13 (4): 773-780.

Mualem Y., 1984. A modified dependent-domain theory of hysteresis. Soil Sci. 137 (5): 283-291.

Mualem Y. and Dagan G., 1975. A dependent domain model of capillary hysteresis. Water Resour. Res. 11 (3): 452-460.

Mualem Y. and Miller E.E., 1979. A hysteresis model based on explicit domain-dependence function. J. of Soil Sci. Soc. Am. 43: 1067-1073.

Pedroso D.M., Williams D.J., 2010. A novel approach for modelling soil–water characteristic curves with hysteresis. Computers and Geotechnics 37: 374–380.

Philip J.R., 1964. Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous materials. J of Geophys. Res. 69 (8): 1553-1562.

Poulovassilis A., 1962. Hysterisis of pore water: an application of the concept of the independent domains. Soil Sci., (93), pp. 405-412.

Poulovassilis A. and Childs F.C, 1971. The hysterisis of pore water: the non-independence of domains. Soil Sci., (112), pp 301-312.

Valiantzas, J.D., Londra, P.A., 2012. Simplified equations for the determination of the hydraulic properties of horticultural substrates by one-step outflow experiments. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Volume 175, Issue 1: 49-52, DOI: 10.1002/jpln.201100186.

van Genuchten, M. Th., 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed – form analytical model. Dep. Civ. Eng., Princeton Univ., Princeton, N. J., Water Resour. Prog. Res. Rep., 78 –WR 08.

van Genuchten, M. Th., 1980. A closed – form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-898.

van Genuchten, M. Th., Leij, F. J. and Yates, S. R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, EPA|600|2-91|065, pp. 108.

Watson K.K. and Lee S.J., 1975. Simulation of rainfall-rainoff process using a hysteretic infiltration-redistribution model. Australian J. of Soil Sci Resear, vol 13: 133-170.

Zhuang L., Bezerra Coelho C.R., Hassanizadeh S.M. and van Genuchten M.Th., 2017. Analysis of the Hysteretic Hydraulic Properties of Unsaturated Soil. Vadose Zone Journal, DOI: 10.2136/vzj2016.11.0115

10^{ο} Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ-ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΙ

ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΕΝ ΧΡΗΣΕΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΦΑΡΜΑΚΩΝ - ΣΤΑΘΜΟΙ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΩΤΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ

Γ. Μπουροδήμος[1,2,✉], Μ. Γιαμούρη[1], Α. Μπαλαφούτης[2], Σ. Φουντάς[2]

[1]Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός "ΔΗΜΗΤΡΑ", Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής (Πρώην Ινστιτούτο Γεωργικών Μηχανών και Κατασκευών-ΙΓΕΜΚ), Δημοκρατίας 61, 13561 Άγιοι Ανάργυροι Αττικής. ✉ georgios.bourodimos@gmail.com

[2]Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα

Περίληψη

Η εργασία αφορά στο σύστημα επιθεώρησης του εν χρήσει εξοπλισμού εφαρμογής γεωργικών φαρμάκων στη χώρα μας, όπως αυτό θεσπίστηκε με την Αριθ. Ε8 1831/39763, ΦΕΚ 671/Β/21.04.2015 Υπουργική Απόφαση. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι αρμοδιότητες και υποχρεώσεις των εμπλεκόμενων μερών και η μεθοδολογία-διαδικασία που ακολουθείται για τη διενέργεια των επιθεωρήσεων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στην ταυτότητα των ιδρυθέντων Σταθμών Επιθεώρησης Εξοπλισμού Εφαρμογής Γεωργικών Φαρμάκων. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ελέγχων των εν χρήσει ψεκαστικών μηχανημάτων που έχουν πραγματοποιηθεί έως σήμερα και τα προβλήματα που έχουν ανακύψει. Διατυπώνονται προτάσεις που αφορούν στα μέτρα που θα πρέπει να ληφθούν για τη βελτίωση της υφιστάμενης κατάστασης στη χώρα μας.

Λέξεις κλειδιά: εν χρήσει ψεκαστικά μηχανήματα, ΥΑ Αριθ. Ε8 1831/39763, Εγχειρίδιο Επιθεώρησης, Σταθμοί Επιθεώρησης

INSPECTION OF IN-USE PESTICIDE APPLICATION EQUIPMENT - INSPECTION STATIONS AND RESULTS OF FIRST INSPECTIONS

G. Bourodimos[1,2,✉], M. Giamouri[1], A. Balafoutis[2], S. Fountas[2]

[1]Hellenic Agricultural Organization "DEMETER", Institute of Soil and Water Resources, Department of Agricultural Engineering (former Institute of Agricultural Machinery and Constructions-I.A.M.C.), 61 Democratias Str., 13561 Aghii Anargiri Attikis, Greece. ✉ georgios.bourodimos@gmail.com

[2]Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering, Laboratory of Farm Mechanization, 75 Iera Odos Str., 11855 Athens, Greece

Abstract

In this study the inspection system of in-use Pesticide Application Equipment that was established by the Ministerial Decision No. E8 1831/39763, Gazette 671/B/21.04.2015, is presented. Specifically, the role of every Pesticide Application Equipment stakeholder and the transactions that take place between stakeholders and the methodology that is followed for carrying out the inspections are described. Particularly, reference is made to the Pesticide Application Equipment Inspection Stations. Finally, the problems and the results of inspections until now are presented. Suggestions are made towards the necessary actions that will ensure improvements of the current situation in Greece.

Keywords: in-use sprayers, Ministerial Decision No. E8 1831/39763, Inspection Manual, Inspection Stations

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των φυτοφαρμάκων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης γεωργίας και συμβάλλει στην παραγωγικότητα και την ποιότητα των καλλιεργούμενων ειδών. Η κακή εφαρμογή της φυτοπροστασίας συνδέεται με υψηλό κόστος, κυρίως για το περιβάλλον, την υγεία των ανθρώπων και την υγιεινή των τροφίμων. Ο κατάλληλος εξοπλισμός εφαρμογής των φυτοπροστατευτικών προϊόντων συμβάλλει στον περιορισμό των αρνητικών αυτών επιπτώσεων, καθώς και στην εξασφάλιση μιας αποδοτικής και συγχρόνως οικονομικά βιώσιμης, κατά το δυνατόν, χρήσης των προϊόντων αυτών.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αντιλαμβανόμενη τη συμβολή των μηχανημάτων φυτοπροστασίας στην ορθή εφαρμογή των φυτοπροστατευτικών προϊόντων, θέσπισε νόμους και κανονισμούς που διέπουν την κατασκευή, τη συντήρηση, τη χρήση και τον έλεγχο των μηχανημάτων αυτών. Συγκεκριμένα, οι Οδηγίες 2006/42/ΕΚ και 2009/127/ΕΚ περιέχουν τις βασικές απαιτήσεις υγιεινής, ασφάλειας και περιβαλλοντικής προστασίας για το σχεδιασμό και την κατασκευή νέων μηχανημάτων εφαρμογής φυτοφαρμάκων, ενώ η Οδηγία 2009/128/ΕΚ προβλέπει τον τακτικό έλεγχο του εν χρήσει εξοπλισμού εφαρμογής γεωργικών φαρμάκων και την υποχρέωση των κρατών-μελών για την ανάπτυξη συστημάτων επιθεώρησης του εξοπλισμού αυτού. Παράλληλα η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) ανέπτυξε εναρμονισμένα πρότυπα που καθορίζουν τις απαιτήσεις και τις μεθόδους επιβεβαίωσής τους για τον έλεγχο των ψεκαστικών μηχανημάτων.

Ο Νόμος 4036/2012 που ενσωματώνει στην ελληνική νομοθεσία τις διατάξεις της Οδηγίας 2009/128/ΕΚ, καθιερώνει την τακτική επιθεώρηση του χρησιμοποιούμενου Εξοπλισμού Εφαρμογής Γεωργικών Φαρμάκων (ΕΕΓΦ). Η Διεύθυνση Αξιοποίησης Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Μηχανολογικού Εξοπλισμού του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (ΥΠΑΑΤ) ορίζεται ως αρμόδια αρχή για την τακτική επιθεώρηση του ΕΕΓΦ επαγγελματικής χρήσης. Μέχρι τις 26 Νοεμβρίου 2016 έπρεπε να έχει διενεργηθεί τουλάχιστον μια επιθεώρηση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Τα ψεκαστικά μηχανήματα που επιθεωρήθηκαν έως το 2016 θα πρέπει να επανελεγχθούν το 2020 και μετά ανά τριετία, ενώ τα ψεκαστικά μηχανήματα που θα ελεγχθούν για πρώτη φορά από το 2017 και μετά θα πρέπει να επανελέγχονται ανά 3 έτη.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Σύστημα επιθεώρησης εν χρήσει εξοπλισμού εφαρμογής γεωργικών φαρμάκων

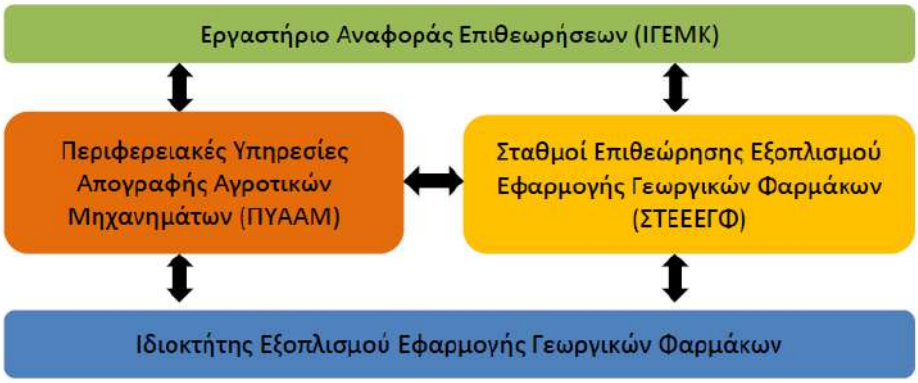
Με την Αριθ. Ε8 1831/39763, ΦΕΚ 671/Β/21.04.2015 Απόφαση του Αναπληρωτή Υπουργού Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Τροποποίηση ΥΑ Ε8 2010/50687, ΦΕΚ 1323/Β/11.05.2016), θεσπίζεται στη χώρα μας σύστημα περιοδικής επιθεώρησης του εξοπλισμού εφαρμογής γεωργικών φαρμάκων, το οποίο οδηγεί στη χορήγηση πιστοποιητικού επιθεώρησης και αυτοκόλλητου σήματος καταλληλότητας.

Με την ανωτέρω Υπουργική Απόφαση:

- Καθιερώνονται οι ελάχιστες απαιτήσεις σε προσωπικό και εξοπλισμό, που πρέπει να πληρούνται για την εξουσιοδότηση των Σταθμών Επιθεώρησης Εξοπλισμού Εφαρμογής Γεωργικών Φαρμάκων (ΣΤΕΕΕΓΦ).
- Δημιουργείται η μεθοδολογία-διαδικασία για τη διενέργεια των επιθεωρήσεων, την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την αξιοποίησή τους, ώστε να επιτευχθεί η χρήση για επαγγελματικούς σκοπούς, μόνο του ΕΕΓΦ που έχει υποβληθεί σε επιθεώρηση με επιτυχές αποτέλεσμα.
- Ορίζεται ως Εργαστήριο Αναφοράς Επιθεωρήσεων το Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής του ΕΛΓΟ-«ΔΗΜΗΤΡΑ» (ΚΥΑ 8197/90920/22.07.2013).

- Εξαιρούνται των επιθεωρήσεων ο φορητός ΕΕΓΦ και οι επινώτιοι ψεκαστήρες, εκτός αν κατά περίπτωση εκτιμηθεί ότι υπάρχει κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Τα εμπλεκόμενα μέρη του συστήματος επιθεώρησης εν χρήσει ΕΕΓΦ φαίνονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Σύστημα επιθεώρησης εν χρήσει ΕΕΓΦ

2.2. Εργαστήριο Αναφοράς Επιθεωρήσεων (ΙΓΕΜΚ)

Το Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής (πρώην ΙΓΕΜΚ) του ΕΛΓΟ-«ΔΗΜΗΤΡΑ», ως Εργαστήριο Αναφοράς Επιθεωρήσεων έχει τις κάτωθι αρμοδιότητες και υποχρεώσεις:

- Την κατάρτιση του εγχειριδίου επιθεώρησης ΕΕΓΦ, το οποίο χρησιμοποιείται για τη διενέργεια των επιθεωρήσεων.
- Τη χορήγηση μοναδικού αριθμού μητρώου σε κάθε ΣΤΕΕΕΓΦ που εξουσιοδοτείται για την εκτέλεση επιθεωρήσεων και την τήρηση πανελλαδικού μητρώου ΣΤΕΕΕΓΦ.
- Τον αρχικό έλεγχο των ΣΤΕΕΕΓΦ και την έκδοση του πρακτικού ελέγχου για τη χορήγηση εξουσιοδότησης.
- Τον έλεγχο της διαδικασίας και της ποιότητας των επιθεωρήσεων με την πραγματοποίηση επιτόπιων δειγματοληπτικών επανελέγχων σε ΣΤΕΕΕΓΦ καθώς και σε ΕΕΓΦ που ο εν λόγω ΣΤΕΕΕΓΦ έχει επιθεωρήσει.
- Την ενημέρωση του ΥΠΑΑΤ για την επιβολή των προβλεπόμενων κυρώσεων σε ΣΤΕΕΕΓΦ που δεν τηρούν τις υποχρεώσεις τους.

2.3. Περιφερειακές Υπηρεσίες Απογραφής Αγροτικών Μηχανημάτων (ΠΥΑΑΜ)

Οι Περιφερειακές Υπηρεσίες Απογραφής Αγροτικών Μηχανημάτων είναι αρμόδιες για:

- Την τήρηση, ενημέρωση και διαχείριση του Μητρώου Εξοπλισμού Εφαρμογής Γεωργικών Φαρμάκων (ΜΕΕΓΦ) στο οποίο καταγράφονται κάθε εν χρήσει ΕΕΓΦ και τα αποτελέσματα των επιθεωρήσεων που εκτελούν οι ΣΤΕΕΕΓΦ.
- Την έκδοση της εξουσιοδότησης για την λειτουργία των ΣΤΕΕΕΓΦ σύμφωνα με το πρακτικό ελέγχου του Εργαστηρίου Αναφοράς Επιθεωρήσεων.
- Την αποστολή του επικαιροποιημένου ΜΕΕΓΦ και αντίγραφου κάθε εξουσιοδότησης ΣΤΕΕΕΓΦ στο Εργαστήριο Αναφοράς Επιθεωρήσεων και στη Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφοϋδατικών Πόρων και Λιπασμάτων του ΥΠΑΑΤ.
- Την ενημέρωση του ΥΠΑΑΤ για τα αποτελέσματα των επιθεωρήσεων και για περιπτώσεις μη συμμορφούμενου ΕΕΓΦ.

2.4. Σταθμοί Επιθεώρησης Εξοπλισμού Εφαρμογής Γεωργικών Φαρμάκων (ΣΤΕΕΕΓΦ)

Οι ΣΤΕΕΕΓΦ μπορεί να λειτουργούν σε σταθερές ή κινητές εγκαταστάσεις και μπορεί να είναι φορείς του Δημοσίου ή/και του ιδιωτικού τομέα που ανήκουν σε φυσικά ή νομικά πρόσωπα, όπως κατασκευαστές μηχανημάτων φυτοπροστασίας, καταστήματα πώλησης γεωργικών φαρμάκων, τμήματα Πανεπιστημίων ή ΤΕΙ, Αγροτικές Συνεταιριστικές Οργανώσεις, υπηρεσίες των Περιφερειών της χώρας ή του ΥΠΑΑΤ κλπ.

Οι ΣΤΕΕΓΦ ελέγχονται από το Εργαστήριο Αναφοράς ως προς το προσωπικό, τον εξοπλισμό και τη μεθοδολογία επιθεώρησης. Το κόστος αρχικού ελέγχου καθορίζεται στα 1700€ πλέον ΦΠΑ και το κόστος ετήσιας επιτήρησης στα 300€ πλέον ΦΠΑ.

Οι ΣΤΕΕΕΓΦ λειτουργούν κατόπιν εξουσιοδότησης από την ΠΥΑΑΜ της Περιφερειακής Ενότητας στην οποία διατηρούν την έδρα τους, εφόσον στο πρακτικό ελέγχου του Εργαστηρίου Αναφοράς αναφέρεται ρητά η καταλληλότητα του ΣΤΕΕΕΓΦ. Η εξουσιοδότηση δίνει τη δυνατότητα δραστηριοποίησης σε όλη τη χώρα και έχει πενταετή διάρκεια.

Οι ΣΤΕΕΕΓΦ υποχρεούνται να ενημερώνουν την ΠΥΑΑΜ και το Εργαστήριο Αναφοράς Επιθεωρήσεων για τα αποτελέσματα των επιθεωρήσεων που έχουν διενεργήσει, να τηρούν αρχείο επιθεωρήσεων και να συνεργάζονται με το Εργαστήριο Αναφοράς Επιθεωρήσεων σε πιθανό έλεγχο.

Οι ΣΤΕΕΕΓΦ πρέπει να διαθέτουν το απαραίτητο προσωπικό για την εκτέλεση των επιθεωρήσεων, αποτελούμενο από τουλάχιστον ένα άτομο που καλείται επιθεωρητής. Ο επιθεωρητής πρέπει να είναι κάτοχος πτυχίου Πανεπιστημίου (Γεωπόνος, Μηχανολόγος Μηχανικός) ή πτυχίου ΑΤΕΙ (Τμήματος Τεχνολογίας Γεωπονίας ή Μηχανολόγων Μηχανικών). Ο επιθεωρητής παρίσταται σε κάθε επιθεώρηση ΕΕΓΦ και είναι αρμόδιος για την εκτέλεση των επιθεωρήσεων, τη σύνταξη των πιστοποιητικών επιθεώρησης και των εκθέσεων τεχνικού ελέγχου, τη διακρίβωση του εξοπλισμού κλπ.

Για τη διεξαγωγή των επιθεωρήσεων οι ΣΤΕΕΕΓΦ πρέπει να διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό. Ο εξοπλισμός και τα όργανα που χρησιμοποιούνται κατά τις επιθεωρήσεις πρέπει να είναι διακριβωμένα από τους επίσημους φορείς διακρίβωσης που έχουν διαπιστευτεί από το Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης (ΕΣΥΔ) ή από αντίστοιχους επίσημους φορείς διακρίβωσης του εξωτερικού. Ο εξοπλισμός πρέπει να περιλαμβάνει:

- Όργανα μέτρησης μήκους.
- Συσκευή ελέγχου μανομέτρων.
- Μανόμετρα ακριβείας, για τον προσδιορισμό των απωλειών πίεσης στους σωλήνες.
- Εργαλεία και συνδετικά εξαρτήματα ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση των διαφόρων οργάνων στον προς επιθεώρηση εξοπλισμό.
- Συσκευή για τη μέτρηση της παροχής ακροφυσίων που μπορεί να είναι:
  1. Εξοπλισμός χειροκίνητος και ατομικός (Δοχείο όγκου βαθμονομημένο και χρονόμετρο) ή
  2. Εξοπλισμός που διενεργεί τη μέτρηση επί του μηχανήματος (Όργανο για τον καθορισμό της παροχής των ακροφυσίων) ή
  3. Εξοπλισμός που απαιτεί την αφαίρεση των ακροφυσίων από το μηχάνημα (Τράπεζα ελέγχου της παροχής των ακροφυσίων) ή
  4. Τράπεζα για τη μέτρηση της ομοιομορφίας της κατανομής (αυτόματη ή χειροκίνητη, σταθερή ή σάρωσης) ή
  5. Χρονόμετρο, συλλέκτης και ζυγός.
- Όργανα μέτρησης της ικανότητας παροχής της αντλίας:
  1. Ροόμετρο ή
  2. Μανόμετρα ακριβείας.

- Ηλεκτρονικό αρχείο με τα στοιχεία των επιθεωρήσεων και τα αποτελέσματα αυτών.

2.5. Ιδιοκτήτης εν χρήσει Εξοπλισμού Εφαρμογής Γεωργικών Φαρμάκων

Ο Ιδιοκτήτης εν χρήσει ΕΕΓΦ οφείλει να μεριμνήσει για:

- Την καταγραφή του ΕΕΓΦ στο ΜΕΕΓΦ.
- Την επιθεώρηση του ΕΕΓΦ σε ΣΤΕΕΕΓΦ της επιλογής του.
- Την αποκατάσταση τυχόν ελλείψεων του ΕΕΓΦ που διαπιστώθηκαν κατά την επιθεώρηση, στην οποία πρέπει να είναι παρών.
- Την υποβολή Υπεύθυνης Δήλωσης στο ΣΤΕΕΕΓΦ η οποία αποστέλλεται στην ΠΥΑΑΜ, ότι δεν θα χρησιμοποιεί μη συμμορφούμενο ΕΕΓΦ μέχρι την επιτυχή του επιθεώρηση ή ότι επιθυμεί τη διαγραφή του από το ΜΕΕΓΦ.
- Τη συντήρηση, την καλή λειτουργική κατάσταση και την κατάλληλη βαθμονόμηση του ΕΕΓΦ πριν από κάθε εφαρμογή γεωργικών φαρμάκων, στα διαστήματα μεταξύ των τακτικών επιθεωρήσεων.
- Την τήρηση του προγράμματος των τακτικών επιθεωρήσεων που προβλέπει ο Νόμος 4036/2012.

2.6. Μεθοδολογία-διαδικασία των επιθεωρήσεων

Η επιθεώρηση του ΕΕΓΦ καλύπτει όλες τις παραμέτρους που έχουν σημασία για να επιτευχθεί υψηλό επίπεδο ασφάλειας και προστασίας της υγείας του ανθρώπου και του περιβάλλοντος.

Οι ΣΤΕΕΕΓΦ υποχρεούνται να διενεργούν τις επιθεωρήσεις του ΕΕΓΦ σύμφωνα με το εγχειρίδιο επιθεώρησης του Εργαστηρίου Αναφοράς Επιθεωρήσεων και τις απαιτήσεις του Νόμου 4036/2012.

Το εγχειρίδιο επιθεώρησης του Εργαστηρίου Αναφοράς καθορίζει τις απαιτήσεις και τις μεθόδους επιβεβαίωσής τους για την επιθεώρηση του εν χρήσει ΕΕΓΦ και έχει συνταχθεί με βάση τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα ΕΝ 13790-1:2003 και ΕΝ 13790-2:2003. Λόγω αντικατάστασης του EN 13790 από το EN ISO 16122, θα ακολουθήσει νέα έκδοση που θα στηρίζεται στο EN ISO 16122 και στα πρώτα συμπεράσματα από τη λειτουργία των ΣΤΕΕΕΓΦ. Τα βασικά σημεία ελέγχου για τα ψεκαστικά μηχανήματα δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Βασικά σημεία ελέγχου στα ψεκαστικά μηχανήματα

Εξαρτήματα μετάδοσης ισχύος	Φίλτρα
Αντλία	Βραχίονας ψεκασμού (ψεκαστικά μεγάλων καλλιεργειών)
Διάταξη ανάδευσης	
Δεξαμενή ψεκαστικού υγρού	Ακροφύσια
Συστήματα μέτρησης, ελέγχου και ρύθμισης	Κατανομή
Σωλήνες και εύκαμπτοι σωλήνες	Ανεμιστήρας (νεφελοψεκαστήρες)

Μετά την ολοκλήρωση της επιθεώρησης του ΕΕΓΦ, ο επιθεωρημένος εξοπλισμός κατατάσσεται σε μια από τις 4 κατηγορίες:

- **ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Ι:** Εξοπλισμός που πληροί τις προδιαγραφές του Νόμου 4036/2012. Χορηγείται Πιστοποιητικό Επιθεώρησης και αυτοκόλλητο σήμα καταλληλότητας, το οποίο επικολλάται σε εμφανές σημείο αυτού.
- **ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΙΙ:** Εξοπλισμός που παρουσιάζει ήσσονες αποκλίσεις από τις προδιαγραφές του Νόμου 4036/2012. Χορηγείται Πιστοποιητικό Επιθεώρησης στο οποίο αναγράφονται

οι αποκλίσεις και η υποχρέωση διόρθωσής τους μέχρι την επόμενη επιθεώρηση και αυτοκόλλητο σήμα καταλληλότητας, το οποίο επικολλάται σε εμφανές σημείο αυτού.

- **ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΙΙΙ:** Εξοπλισμός που παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από τις προδιαγραφές του Νόμου 4036/2012. Δεν χορηγείται αυτοκόλλητο σήμα καταλληλότητας και απαγορεύεται η χρήση του. Χορηγείται Πιστοποιητικό Επιθεώρησης στο οποίο αναγράφονται οι αποκλίσεις που υποχρεωτικά πρέπει να διορθωθούν στην περίπτωση που ο εξοπλισμός επανέλθει για επιθεώρηση, προκειμένου να ενταχθεί στις Κατηγορίες Ι ή ΙΙ. Ο ιδιοκτήτης καταθέτει Υπεύθυνη Δήλωση στο ΣΤΕΕΕΓΦ, η οποία αποστέλλεται στην ΠΥΑΑΑΜ, ότι δεν θα χρησιμοποιήσει τον εξοπλισμό μέχρι την επιτυχή του επιθεώρηση.
- **ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ IV:** Εξοπλισμός που έχει ενταχθεί στην Κατηγορία ΙΙΙ και ο ιδιοκτήτης του με Υπεύθυνη Δήλωση βεβαιώνει ότι επιθυμεί τη διαγραφή του από το ΜΕΕΦΓ και ότι δεν προτίθεται να προβεί σε επιδιόρθωσή του ούτε να τον χρησιμοποιήσει στο εξής.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

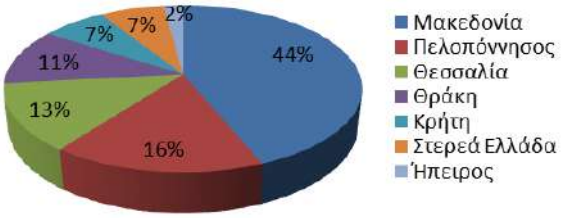
3.1. Ταυτότητα Σταθμών Επιθεώρησης Εξοπλισμού Εφαρμογής Γεωργικών Φαρμάκων

- *Αριθμός και κατανομή ΣΤΕΕΕΓΦ*

Οι ΣΤΕΕΕΓΦ που έχουν εξουσιοδοτηθεί στη χώρα μας από το 2015 έως το Μάιο του 2017 ανέρχονται σε 146. Η κατανομή των ΣΤΕΕΕΓΦ κατά γεωγραφικό διαμέρισμα παρουσιάζεται στον Πίνακα 2 (Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής, 2017). Έχουν ιδρυθεί ΣΤΕΕΕΓΦ σε 38 νομούς της χώρας. Συγκεκριμένα, υπάρχουν ΣΤΕΕΕΓΦ σε όλους τους νομούς της Θράκης, της Μακεδονίας, της Θεσσαλίας, της Πελοποννήσου και της Κρήτης. Δεν έχουν εξουσιοδοτηθεί ΣΤΕΕΕΓΦ στο νομό Θεσπρωτίας της Ηπείρου, στους νομούς Αττικής, Φωκίδας και Ευρυτανίας της Στερεάς Ελλάδας, καθώς και στα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου. Οι περισσότεροι ΣΤΕΕΕΓΦ βρίσκονται στους νομούς Πέλλας (17), Λάρισας (14), Ημαθίας (10) και Σερρών (10). Στο Σχήμα 2 εμφανίζονται οι ΣΤΕΕΕΓΦ ανά γεωγραφικό διαμέρισμα ως ποσοστό επί του συνόλου των ιδρυθέντων. Η πλειονότητα των ΣΤΕΕΕΓΦ (44%) βρίσκονται στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Μακεδονίας.

Πίνακας 2. Κατανομή ΣΤΕΕΕΓΦ κατά γεωγραφικό διαμέρισμα

Γεωγραφικό Διαμέρισμα	*Αριθμός ΣΤΕΕΓΦ*
Θράκη	16
Μακεδονία	64
Ήπειρος	3
Θεσσαλία	19
Στερεά Ελλάδα	10
Πελοπόννησος	24
Κρήτη	10
Νησιά Αιγαίου/Ιονίου	0
Σύνολο	*146*



Σχήμα 2. Κατανομή ΣΤΕΕΕΓΦ κατά γεωγραφικό διαμέρισμα

- *Εγκαταστάσεις ΣΤΕΕΕΓΦ*

Το σύνολο (100%) των ΣΤΕΕΕΓΦ είναι κινητοί.

- *Εξοπλισμός ΣΤΕΕΕΓΦ*

Πολύ μεγάλο ποσοστό των ΣΤΕΕΕΓΦ (98%) χρησιμοποιούν κατά τις επιθεωρήσεις εξοπλισμό και όργανα χαμηλού κόστους.

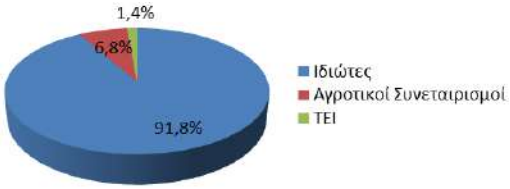
- *Ιδιοκτήτες ΣΤΕΕΕΓΦ*

- 134 ΣΤΕΕΕΓΦ ανήκουν σε Ιδιώτες.
- 10 ΣΤΕΕΕΓΦ ανήκουν σε Αγροτικές Συνεταιριστικές Οργανώσεις.
- 2 ΣΤΕΕΕΓΦ ανήκουν σε Ανώτατα Εκπαιδευτικά Ιδρύματα Τεχνολογικού Τομέα (ΑΤΕΙ).

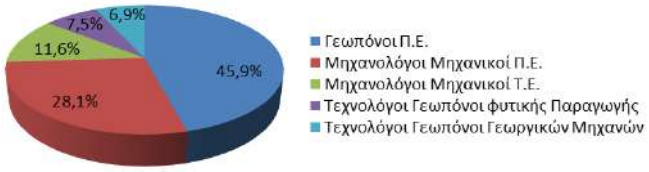
Στο Σχήμα 3 φαίνονται τα ποσοστά των ιδιοκτητών των ΣΤΕΕΕΓΦ. Η πλειονότητα των ιδιωτικών επιχειρήσεων που έχουν ιδρύσει ΣΤΕΕΕΓΦ είναι κατασκευαστές και έμποροι γεωργικών μηχανημάτων και ακολουθούν τα καταστήματα γεωργικών εφοδίων.

- *Επιθεωρητές ΣΤΕΕΕΓΦ*

Ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό των επιθεωρητών είναι κάτοχοι πτυχίου Γεωπόνου εκπαιδευτικού ιδρύματος Πανεπιστημιακού Τομέα. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η ποσοστιαία συμμετοχή των 5 κατηγοριών (σύμφωνα με το πτυχίο) επιθεωρητών.



Σχήμα 3. Ιδιοκτήτες ΣΤΕΕΕΓΦ



Σχήμα 4. Επιθεωρητές ΣΤΕΕΕΓΦ

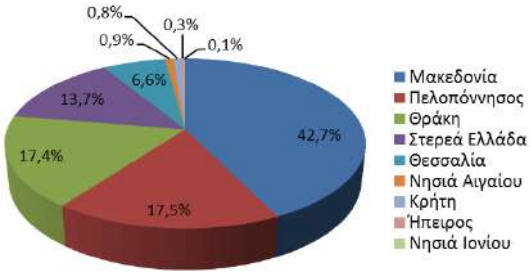
3.2. Επιθεωρημένος Εξοπλισμός Εφαρμογής Γεωργικών Φαρμάκων

- *Αριθμός και κατανομή ΕΕΓΦ*

Η δυσκολία προσδιορισμού του αριθμού των ψεκαστικών μηχανημάτων της χώρας μας δυσχεραίνει την ορθή εφαρμογή του συστήματος επιθεώρησης ΕΕΓΦ. Τα στοιχεία που δίνονται από διάφορους φορείς όπως Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ), ΜΕΕΓΦ, κατασκευαστές κλπ. διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ (2014), ο συνολικός αριθμός των ψεκαστικών μηχανημάτων στη χώρα μας ανέρχεται σε 151.437 (105.380 (69,6%) νεφελοψεκαστήρες και 46.057 (30,4%) μεγάλων καλλιεργειών), ενώ στο ΜΕΕΓΦ έχουν καταγραφεί 42.136 μηχανήματα. Ο Πίνακας 3 δίνει τον αριθμό και την κατανομή ανά γεωγραφικό διαμέρισμα του ΕΕΓΦ σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ, ενώ το Σχήμα 5 δείχνει την ποσοστιαία κατανομή των 42.136 μηχανημάτων σύμφωνα με το ΜΕΕΓΦ. Ο μεγαλύτερος όγκος του ΕΕΓΦ (ποσοστό >35%) βρίσκεται στη Μακεδονία.

Πίνακας 3. Αριθμός και κατανομή ψεκαστικών μηχανημάτων (Πηγή ΕΛΣΤΑΤ 2014)

Γεωγραφικό Διαμέρισμα	*Αριθμός ψεκαστικών*	*Ποσοστό (%) επί του συνόλου*
Θράκη	13.227	8,7
Μακεδονία	53.346	35,2
Ήπειρος	3.520	2,3
Θεσσαλία	11.146	7,4
Στερεά Ελλάδα	13.932	9,2
Πελοπόννησος	31.027	20,5
Κρήτη	20.698	13,7
Νησιά Αιγαίου	2.239	1,5
Νησιά Ιονίου	2.302	1,5
Σύνολο	*151.437*	*100*



Σχήμα 5. Κατανομή ΕΕΓΦ (Πηγή ΜΕΕΓΦ)

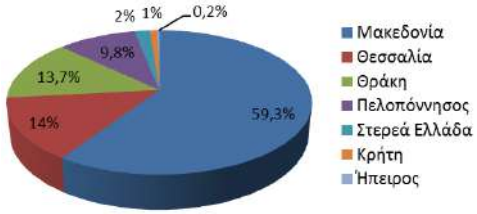
- *Αριθμός και κατανομή επιθεωρημένου ΕΕΓΦ*

Ο συνολικός αριθμός των ελεγχθέντων ψεκαστικών μηχανημάτων έως το Μάιο του 2017 είναι 12.231. Η κατανομή του επιθεωρημένου ΕΕΓΦ κατά γεωγραφικό διαμέρισμα παρουσιάζεται στον Πίνακα 4 (Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής, 2017).

Πίνακας 4. Κατανομή επιθεωρημένου ΕΕΓΦ κατά γεωγραφικό διαμέρισμα

Γεωγραφικό Διαμέρισμα	*Αριθμός καταγραφέντων ψεκαστικών μηχανημάτων (ΜΕΕΓΦ)*	*Αριθμός επιθεωρημένων ψεκαστικών μηχανημάτων*	*Ποσοστό (%) επιθεωρημένων επί των καταγραφέντων μηχανημάτων*
Θράκη	7.316	1.677	22,9
Μακεδονία	17.977	7.258	40,4
Ήπειρος	130	28	21,5
Θεσσαλία	2.793	1.716	61,4
Στερεά Ελλάδα	5.791	237	4,1
Πελοπόννησος	7.367	1.200	16,3
Κρήτη	341	115	33,7
Νησιά Αιγαίου	372	0	0
Νησιά Ιονίου	49	0	0
Σύνολο	*42.136*	*12.231*	*29*

Ο επιθεωρημένος ΕΕΓΦ ανά γεωγραφικό διαμέρισμα ως ποσοστό επί του συνόλου των ελεγχθέντων μηχανημάτων δίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. Κατανομή επιθεωρημένου ΕΕΓΦ

Ο μέσος όρος των ελεγχθέντων ψεκαστικών μηχανημάτων ανά ΣΤΕΕΕΓΦ είναι 83,8. Στον Πίνακα 5 φαίνεται ο μέσος όρος επιθεωρήσεων ανά ΣΤΕΕΕΓΦ και ανά γεωγραφικό διαμέρισμα. Τα στοιχεία είναι επισφαλή, γιατί ΣΤΕΕΓΦ δραστηριοποιούνται και εκτός των γεωγραφικών διαμερισμάτων που ανήκουν.

Πίνακας 5. Μέσος όρος ελεγχθέντων ψεκαστικών μηχανημάτων / ΣΤΕΕΕΓΦ και ανά γεωγραφικό διαμέρισμα

Γεωγραφικό Διαμέρισμα	*Μ. Ο. επιθεωρήσεων / ΣΤΕΕΕΓΦ*	*Γεωγραφικό Διαμέρισμα*	*Μ.Ο. επιθεωρήσεων / ΣΤΕΕΕΓΦ*
Θράκη	104,8	Στερεά Ελλάδα	23,7
Μακεδονία	113,4	Πελοπόννησος	50
Ήπειρος	9,3	Κρήτη	11,5
Θεσσαλία	90,3	Νησιά Αιγαίου/Ιουνίου	0

- *Τύπος επιθεωρημένου ΕΕΓΦ*

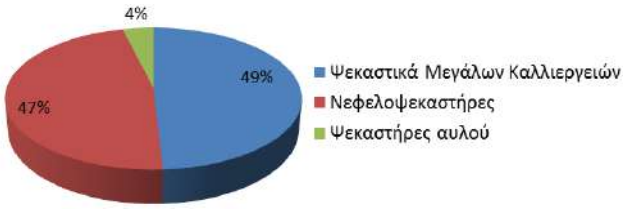
Ο επιθεωρημένος ΕΕΓΦ χωρίστηκε σε 3 ομάδες (Σχήμα 7):

- Ψεκαστικά Μεγάλων Καλλιεργειών, που αποτέλεσαν το 49% του δείγματος.
- Νεφελοψεκαστήρες, που αποτέλεσαν το 47% του δείγματος.
- Ψεκαστήρες Αυλού, που αποτέλεσαν το 4% του δείγματος.

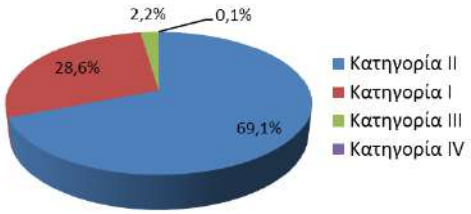
- *Κατάταξη επιθεωρημένου ΕΕΓΦ*

Υπάρχουν 4 κατηγορίες κατάταξης (Σχήμα 8):

- Κατηγορία Ι, το 28,6% του δείγματος.
- Κατηγορία ΙΙ, το 69,1% του δείγματος.
- Κατηγορία ΙΙΙ, το 2,2% του δείγματος.
- Κατηγορία ΙV, το 0,1% του δείγματος.



Σχήμα 7. Τύπος επιθεωρημένου ΕΕΓΦ



Σχήμα 8. Κατάταξη επιθεωρημένου ΕΕΓΦ

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα προαναφερθέντα έχουν ως εξής:

1. Ο αριθμός των ιδρυθέντων ΣΤΕΕΕΓΦ κρίνεται ικανοποιητικός, δε συμβαίνει το ίδιο και με την κατανομή τους ανά περιφερειακή ενότητα. Σε αρκετές περιοχές (κυρίως νησιωτικές) παρατηρείται έλλειψη Σταθμών Επιθεώρησης.
2. Η πλειονότητα των ιδρυθέντων ΣΤΕΕΕΓΦ χρησιμοποιεί εξοπλισμό χαμηλού κόστους, γεγονός που επηρεάζει το χρόνο και την ποιότητα των επιθεωρήσεων.
3. Οι ΣΤΕΕΕΓΦ που ανήκουν σε ιδιωτικές επιχειρήσεις με αντικείμενο την κατασκευή, επισκευή και εμπορία γεωργικών μηχανημάτων αποτελούν την πλειονότητα και βάσει των αποτελεσμάτων που αποστέλλουν στο Εργαστήριο Αναφοράς φαίνεται να εκτελούν πιο ενδελεχείς ελέγχους.
4. Ο αριθμός των ψεκαστικών μηχανημάτων που έχουν ελεγχθεί είναι ιδιαίτερα μικρός, έχοντας υπόψη ότι όλος ο ΕΕΓΦ έπρεπε να έχει ελεγχθεί μέχρι τις 26 Νοεμβρίου 2016.
5. Υπάρχουν ΣΤΕΕΕΓΦ με υπερβολικά υψηλό αριθμό επιθεωρήσεων, με αποτέλεσμα τη αμφισβητούμενη ποιότητα αυτών.
6. Υπάρχουν καταγγελίες στο Εργαστήριο Αναφοράς Επιθεωρήσεων και στο ΥΠΑΑΤ για ΣΤΕΕΕΓΦ που διενεργούν ελλιπείς επιθεωρήσεις ψεκαστικών μηχανημάτων.
7. Ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό μηχανημάτων (97,7%) κρίνεται κατάλληλο προς χρήση, κατατασσόμενο στις Κατηγορίες Ι και ΙΙ. Η πραγματική εικόνα των ψεκαστικών της χώρας μας δεν είναι αυτή.

Τα παραπάνω καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή κατάλληλης πολιτικής, ώστε να βελτιωθεί η υφιστάμενη κατάσταση στη χώρα μας και η ποιότητα των ψεκαστικών μηχανημάτων. Μέτρα και πρωτοβουλίες προς την κατεύθυνση αυτή θα μπορούσαν να είναι:

1. Η συστηματική ενημέρωση των αγροτών, όσον αφορά στον περιοδικό υποχρεωτικό έλεγχο του εν χρήσει εξοπλισμού εφαρμογής γεωργικών φαρμάκων και τις επιπτώσεις από την κακή χρήση του.

2. Η μέριμνα των ΣΤΕΕΕΓΦ για τη διαφύλαξη της αξιοπιστίας και της ακεραιότητας των επιθεωρήσεων.
3. Η καλύτερη συνεργασία των ΣΤΕΕΕΓΦ με το Εργαστήριο Αναφοράς (έγκαιρη αποστολή των αποτελεσμάτων επιθεωρήσεων, καταβολή του κόστους ετήσιας επιτήρησης κλπ).
4. Η καθιέρωση ανώτερου ορίου επιτρεπτών ημερησίων επιθεωρήσεων ανά ΣΤΕΕΓΦ, με βάση τις εργατοώρες που απαιτούνται για έναν πλήρη έλεγχο μηχανήματος.
5. Η τήρηση αρχείου με φωτογραφικό υλικό από τους ΣΤΕΕΓΦ, όπου θα διαπιστώνεται η ταυτότητα του ΕΕΓΦ, η παρουσία του επιθεωρητή κατά την εκτέλεση της επιθεώρησης, η σύνδεση των μετρητικών διατάξεων στον ΕΕΓΦ για τη διενέργεια των μετρήσεων, η πρότερη και μετέπειτα της επισκευής κατάσταση του μηχανήματος κλπ.
6. Η εντατικοποίηση των δειγματοληπτικών επανελέγχων σε ΣΤΕΕΕΓΦ από το Εργαστήριο Αναφοράς Επιθεωρήσεων.
7. Η επιμέλεια των επιθεωρητών για επικαιροποίηση των γνώσεων τους σύμφωνα με τις οδηγίες του Εργαστηρίου Αναφοράς και του ΥΠΑΑΤ.
8. Η παροχή κινήτρων για απόσυρση των παλαιών ψεκαστικών μηχανημάτων, με περισσότερα από 10 έτη λειτουργίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΣΤΑΤ, 2014. Ελληνική Στατιστική Αρχή. Ετήσια Γεωργική Έρευνα, Εξοπλισμός 2014. Αριθμός γεωργικών μηχανημάτων σε λειτουργία, κατά Περιφέρεια και Περιφερειακή Ενότητα, 2014. Αθήνα. http://www.statistics.gr

EN 13790-1, 2003. Agricultural machinery-Sprayers-Inspection of sprayers in use-Part 1: Field crop sprayers. Βρυξέλλες.

EN 13790-2, 2003. Agricultural machinery-Sprayers-Inspection of sprayers in use-Part 2: Air-assisted sprayers for bush and tree crops. Βρυξέλλες.

EN ISO 16122-1,2,3,4, 2015. Agricultural and forestry machinery - Inspection of sprayers in use. Βρυξέλλες.

Ευρωπαϊκή Ένωση, 2006. Οδηγία 2006/42/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 17ης Μαΐου 2006 σχετικά με τα μηχανήματα και την τροποποίηση της Οδηγίας 95/16/ΕΚ. Στρασβούργο.

Ευρωπαϊκή Ένωση, 2009. Οδηγία 2009/127/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21ης Οκτωβρίου 2009 για την τροποποίηση της Οδηγίας 2006/42/ΕΚ σχετικά με τα μηχανήματα για την εφαρμογή φυτοφαρμάκων. Στρασβούργο.

Ευρωπαϊκή Ένωση, 2009. Οδηγία 2009/128/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21ης Οκτωβρίου 2009 σχετικά με την κοινή θέση του Συμβουλίου που αφορά τον καθορισμό πλαισίου κοινοτικής δράσης με σκοπό την επίτευξη ορθολογικής χρήσης των γεωργικών φαρμάκων. Στρασβούργο.

Νόμος υπ' αριθ. 4036, 2012. ΦΕΚ 8/Α/27-01-2012. Διάθεση γεωργικών φαρμάκων στην αγορά, ορθολογική χρήση αυτών και συναφείς διατάξεις. Αθήνα.

Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής (πρώην ΙΓΕΜΚ)-Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, 2015. Εγχειρίδιο Επιθεώρησης εν χρήσει Εξοπλισμού Εφαρμογής Γεωργικών Φαρμάκων. Σύνταξη: Γ. Μπουροδήμος. Αθήνα.

Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής (πρώην ΙΓΕΜΚ)-Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, 2017. Πανελλαδικό Μητρώο ΣΤΕΕΕΓΦ, Αρχείο Πιστοποιητικών Επιθεώρησης και Εκθέσεων Τεχνικών Ελέγχων ΣΤΕΕΕΓΦ. Αθήνα.

ΥΠΑΑΤ, 2016. Απόφαση του Αναπληρωτή Υπουργού Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Αριθ. Ε8 2010/50687, ΦΕΚ 1323/Β/11.05.2016. Τροποποίηση της Αριθ. Ε8 1831/39763, ΦΕΚ 671/Β/21.04.2015 Υ.Α. Αθήνα.

ΥΠΑΠΕΝ, 2015. Απόφαση του Αναπληρωτή Υπουργού Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Αριθ. Ε8 1831/39763, ΦΕΚ 671/Β/21.04.2015. Σύστημα επιθεώρησης εξοπλισμού εφαρμογής γεωργικών φαρμάκων και διαδικασία χορήγησης πιστοποιητικού επιθεώρησης. Αθήνα.

NON-CONTACT VIBRATION MEASUREMENTS OF A ROTOR-BEARING SYSTEM

I. Gravalos✉, Th. Gialamas, A. Avgoustis, D. Kateris, P. Xyradakis,
V. Dimou, L. Ioannidis, & P. Pigis
Technological Educational Institute of Thessaly, School of Agricultural Technology,
Department of Biosystems Engineering, 411 10, Larissa
✉gravalos@teilar.gr

Abstract

This study presents an innovative non-contact and non-destructive experimental method, which allows measuring of the vibrations of a rotor-bearing system. The system is composed of a flexible steel shaft, and one rigid steel disk. The rotor is supported by two ball bearings. The system is driven via belt transmission by a DC electric motor. For each disk position, different motor speeds have been used and examined. During the experimental process, the PSV-400 scanning laser vibrometer (Polytec), and the AS-065 piezoelectric accelerometers (Brüel & Kjaer) were used to measure velocity and displacement of predefined points. The DC motor rotational speed is one of the most important parameters in the dynamic analysis of a rotor-bearing system and is useful for controlling the system vibrational response. The disk position is also an important parameter for the vibration analysis of a rotor-bearing system and should be carefully considered during the design stage.

Keywords: Jeffcott rotor, bearings, scanning laser vibrometer, accelerometers

ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΗ-ΕΠΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡΟΤΟΡΑ-ΕΔΡΑΝΩΝ

Ι. Γράβαλος✉, Θ. Γιαλαμάς, Α. Αυγουστής, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης,
Β. Δήμου, Λ. Ιωαννίδης & Π. Πηγής
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλίας, Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων, 411 10, Λάρισα
✉ gravalos@teilar.gr

Περίληψη

Η εργασία αυτή παρουσιάζει μια καινοτόμο μέθοδο μη-επαφής, η οποία επιτρέπει τη μέτρηση των δονήσεων ενός συστήματος ρότορα-εδράνων. Το σύστημα αποτελείται από έναν χαλύβδινο άξονα και έναν χαλύβδινο δίσκο. Ο ρότορας υποστηρίζεται από δύο έδρανα. Το σύστημα οδηγείται από ηλεκτροκινητήρα DC, μέσω ενός ιμάντα μετάδοσης κίνησης. Για κάθε θέση του δίσκου, μελετήθηκαν διαφορετικές ταχύτητες του κινητήρα. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ένας σαρωτής δονήσεων με λέιζερ PSV-400 (Polytec) και τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα AS-065 (Brüel & Kjaer) για τη μέτρηση της ταχύτητας και της μετατόπισης σε προκαθορισμένα σημεία. Η ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα DC είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους στη δυναμική ανάλυση του συστήματος ρότορα-εδράνων. Η θέση του δίσκου είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος για την ανάλυση των δονήσεων και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια της σχεδίασης.

Λέξεις κλειδιά: ρότορας Jeffcott, έδρανα, σαρωτής δονήσεων με λέιζερ, επιταχυνσιόμετρα

1. INTRODUCTION

High speed rotating machine elements supported by ball bearings has been widely used in rotating machinery systems (electric motors, gearboxes, etc.), because of ease of maintenance and reduced rotor dynamic instability (Lee and Choi, 1997). In the field of rotor dynamics (rotating machinery dynamics), many researchers have found that a large number of parameters, which include stiffness distribution of a rotating shaft, disk properties and bearing support stiffness can influence the dynamic behaviour of a rotor-bearing system (Gargiulo, 1980; Lim and Singh, 1990; Tiwari and Gupta, 2000; Sadeghi et al., 2010).

Jeffcott, (1919) considered the lateral vibrations of a flexible shaft in the vicinity of critical speeds. In his model, which consisted of a single disk centrally mounted on an isotropic simply-supported shaft, the disk did not wobble. Therefore, the angular velocity vector and the angular momentum vector were collinear and no gyroscopic moments were present. Föppl, (1896) showed that operation beyond the critical speed is a possibility where a significant reduction of vibrations can be expected. Studies on Jeffcott rotors have been reported by Al-Wedyan et al. (2008), who investigated the whirl phenomenon at constant speed under varying stiffness and damping combinations. Yücel, (2003) introduced the nature of rotor dynamic phenomena from comparatively simple analytic models. Starting with the simplest rotor model that is supported by two rigid bearings at its ends, the more realistic and more involved cases are considered by incorporating the effects of flexible bearings. Ortega et al., (2010) carried out an active vibration control model to reduce unbalance induced synchronous vibration in rotor-bearing systems supported by two ball bearings, one of which can be automatically moved to control the effective rotor length and, as an immediate consequence, the rotor stiffness.

Ball bearings are commonly used machine elements in rotating machinery systems. They have been employed as one of the essential parts in different mechanical equipments. Because of the requirement of acquiring higher performance in the design of rotor-bearing systems, the accurate prediction of vibration characteristics has become increasingly important (Bai et al., 2008). An analysis of ball bearing dynamic behavior is essential in order to predict the whole system response. The rotor- bearing system displays nonlinear behavior due to nonlinear contact force, which exists between the various components of the bearings: rotating elements, races and shafts (Harsha, 2005). The effect of varying compliance on bearing static equilibrium was studied by many researchers: Gupta, (1979) developed a dynamic model for dynamic performance simulations of a ball bearing. Gad et al., (1984) simulated the axial and radial vibration phenomena of a rotor supported by ideal or non-ideal ball bearings. Mul et al., (1989) presented a five degree of freedom model for calculation of the equilibrium and associated load distribution in ball bearings. Harsha et al., (2003) observed the effect of surface waviness and internal radial clearance of ball bearings on the vibration characteristics of a balanced rotor with two degrees of freedom. Purohit and Purohit (2006) developed a theoretical model to observe the effect of varying the preload and number of balls on the vibration characteristics of a defect free system.

This study presents an innovative non-contact and non-destructive experimental method, which allows measuring the vibrations of a rotor-bearing system. Furthermore, the effects of the vibration of the rotor on ball bearing dynamic characteristics are analyzed. The dynamic behavior of rotor-bearing system is investigated experimentally under different operating conditions (varying speed and disk position).

2. MATERIALS AND METHODS

The experimental set up of the rotor-bearing system is shown in Figure 1 (a). The rotor-bearing system was mounted on a cast-iron frame insulated from the surrounding environment with rubber dampers in order to remove possible external disturbances and was driven through belt transmissions by an electric 1.2 hp dc motor. A dc voltage controller was used to adjust the power supply so that the electric motor speed could be continuously increased or decreased in the range between 0 and 3800 rpm. Two dial gauge method is used to correct the shaft misalignment and the base line signal has been measured at different speeds 800, 1800 and 3600 rpm to check the concentricity. The rotor shaft was supported by two identical ball bearings and had a length of 466 mm with a diameter of 19 mm. The bearings were mounted on aluminium housings which were in turn fixed to the cast-iron frame. One massive disk of 160 mm in diameter and 19 mm in thickness was mounted separately or together on the rotor shaft at different positions (drive end bearing, shaft centre, and non-drive end bearing). Disk weighs around 3700 grams. The disk was clamped to the shaft by means of semicircular plates and bolts.

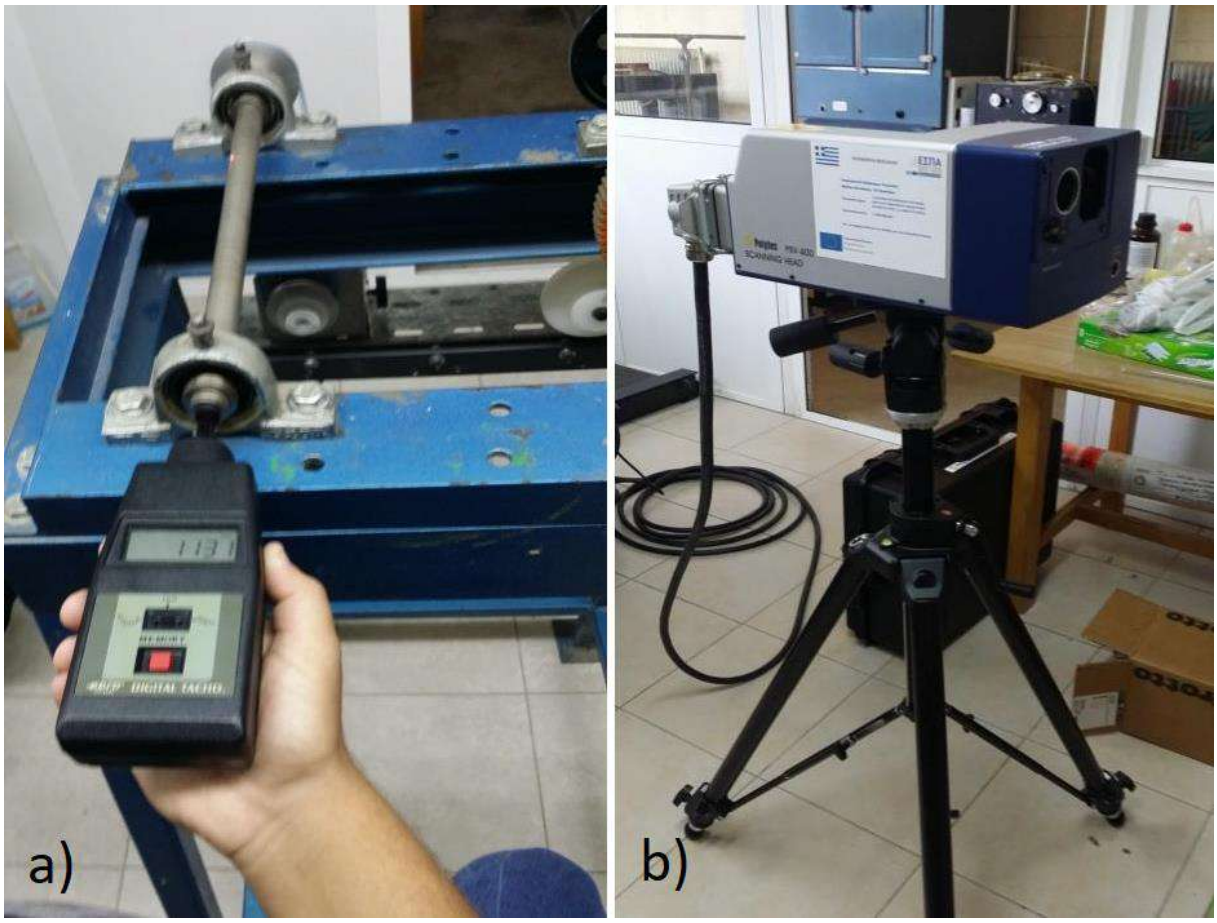


Figure 1. a) The experimental set up of the rotor-bearing system, b) The PSV-400 scanning laser vibrometer.

During the experimental process, the PSV-400 scanning laser vibrometer (Polytec), and the AS-065 piezoelectric accelerometer (Brüel & Kjaer) are used to measure vibration of predefined points on the rotor shaft and bearings, respectively. The PSV-400 scanning laser vibrometer (Figure 1 (b)) is a non-contact transducer for the vibration measurement of machine components. It is based on the laser Doppler effect, and it is equipped with a

computer controlled orientation system. It is inherently a sequential procedure making a set of point measurements. A CCD camera is used to view the illuminated object. The vibration measurement is performed at frequencies where maximal vibration occurs. To measure the vibration of the rotor system on ball bearings, the following instrumentation was used: a) a Vibrotest 60 (Brüel & Kjaer) portable data logger-analyser was used to monitor, record and distinguish the appropriate frequency ranges, and b) two single axis accelerometer sensors (type AS-065) with a frequency range from 1 Hz to 15 kHz. The vibration acceleration sensors were attached on the bearing housings. The bearing housings have threaded holes for the installation of the sensors. The vibrations were measured on the X-axis. Frequency spectra were analysed in one-third (1/3) octave bands, from 1 Hz to 4 kHz. The vibration magnitude was expressed in terms of Root Mean Square values (RMS). The rotor shaft speed is recorded with a portable digital tachometer.

Identification of dynamic behavior of rotor-bearing system is conducted under different operating conditions. Specifications for the two test cases are presented below:

- Test Case 1: Shaft-bearing system (without disk) at different dc motor speeds (500, 1000 and 1500 rpm).
- Test Case 2: Rotor-bearing system rotating at different dc motor speeds (500, 1000 and 1500 rpm) with disk assembled at different positions (drive end bearing, shaft centre, and non-drive end bearing).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Rotating machines are stable if their rotor performs a pure rotational motion around an axis at a required rotational speed and this motion is not accompanied by other sources of vibrations. Vibrations caused by mass imbalance are a common problem in rotating machines. When a rotor is mounted on a shaft its centre of mass does not usually coincide with the centre line of the shaft, so when shaft rotate a centrifugal force created which in some cases cause an unlimited growth in time of the amplitude of vibrations. The ranges of the spin speed in which this vibrations growth occurs are usually called instability ranges, and the speed at which the first of such field starts is the threshold of instability. Instability ranges must not be confused with critical speeds. Despite greatest care, rotors cannot be fully balanced dynamically and at high speeds, operative centrifugal actions tend to intensify vibrations. Most rotors are axisymmetric and their analysis is simpler. However, some rotors do not possess this symmetry with the result that much complication is introduced in their analysis. An accurate prediction of the dynamic characteristics is very important in design of rotating machines.

In the following Figures, we represent the mode shapes of the rotor-bearing system at different test cases. Figure 2 shows the mode shapes of the shaft-bearing system (without disk) rotating at 1500 rpm. Figure 3 shows the mode shapes of rotor-bearing system rotating at 1500 rpm with disk assembled at drive end bearing (disk off-center). Finally, Figure 4 shows the mode shapes of rotor-bearing system rotating at 1500 rpm with disk assembled at non-drive end bearing (disk off-center). The black line shows the shaft centerline shape at the maximum displacement. As it vibrates, it moves from this position to the same location on the opposite side of the undisplaced centerline, and back. One interesting feature of the mode shapes is how the rigid disk moves in all test cases. In the some mode shapes, the disk translates without rocking. In the other mode shapes, it rocks without translation. Also, we found that the motion is a mix of translation and rocking. This characteristic repeats as the frequency increases.

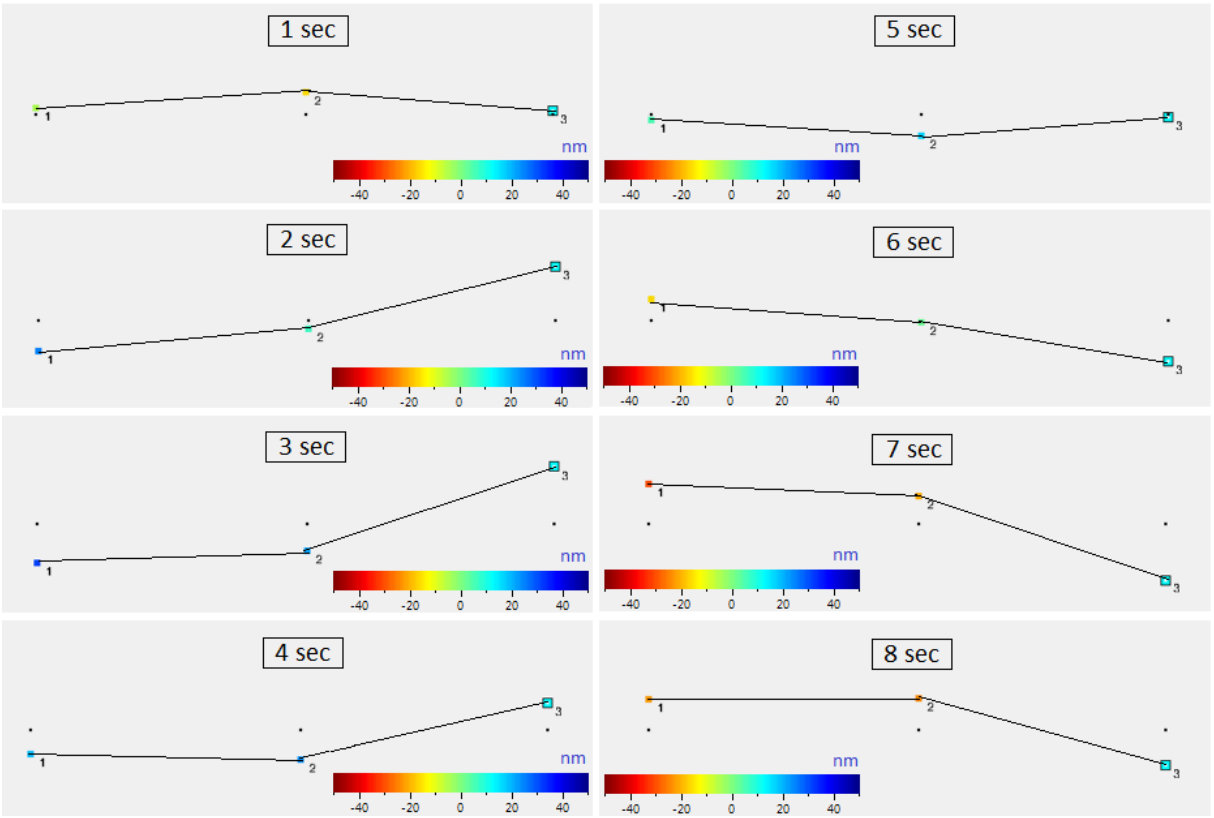


Figure 2. Mode shapes of shaft-bearing system (without disk) rotating at 1500 rpm.

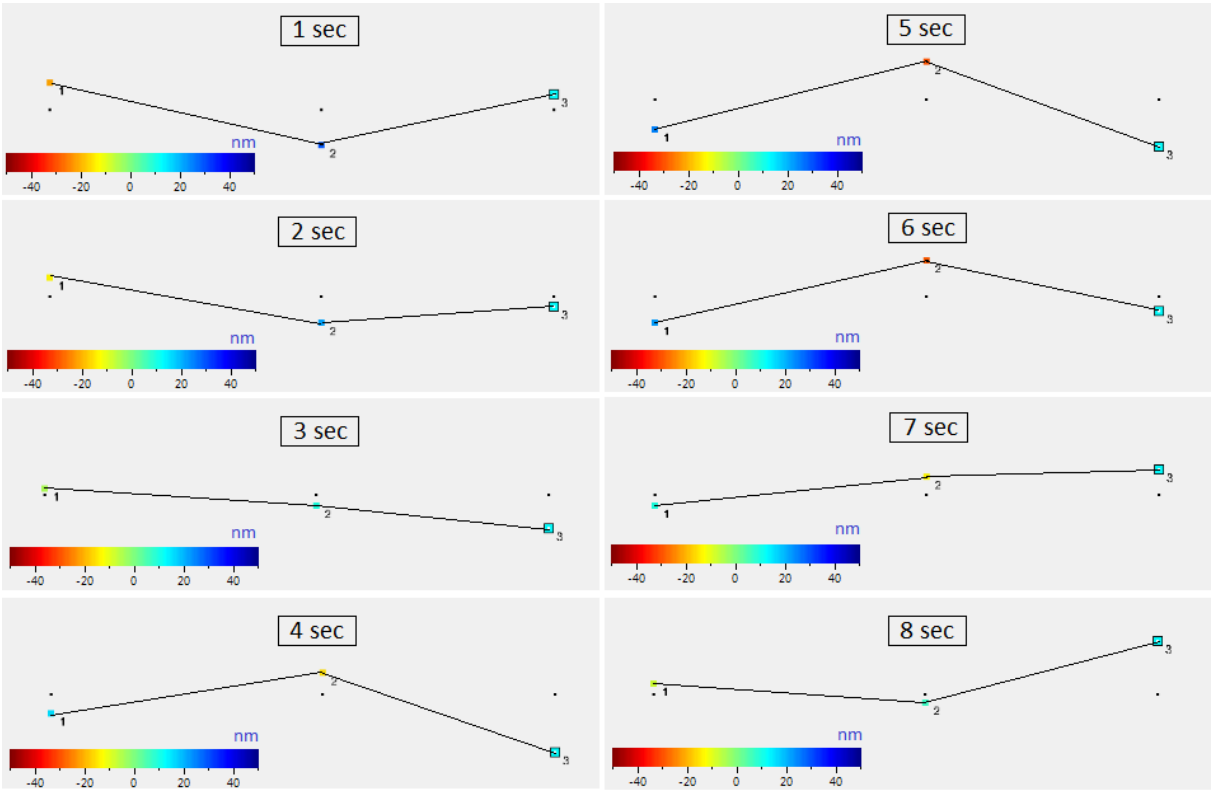


Figure 3. Mode shapes of rotor-bearing system rotating at 1500 rpm with disk assembled at drive end bearing (disk off-center).

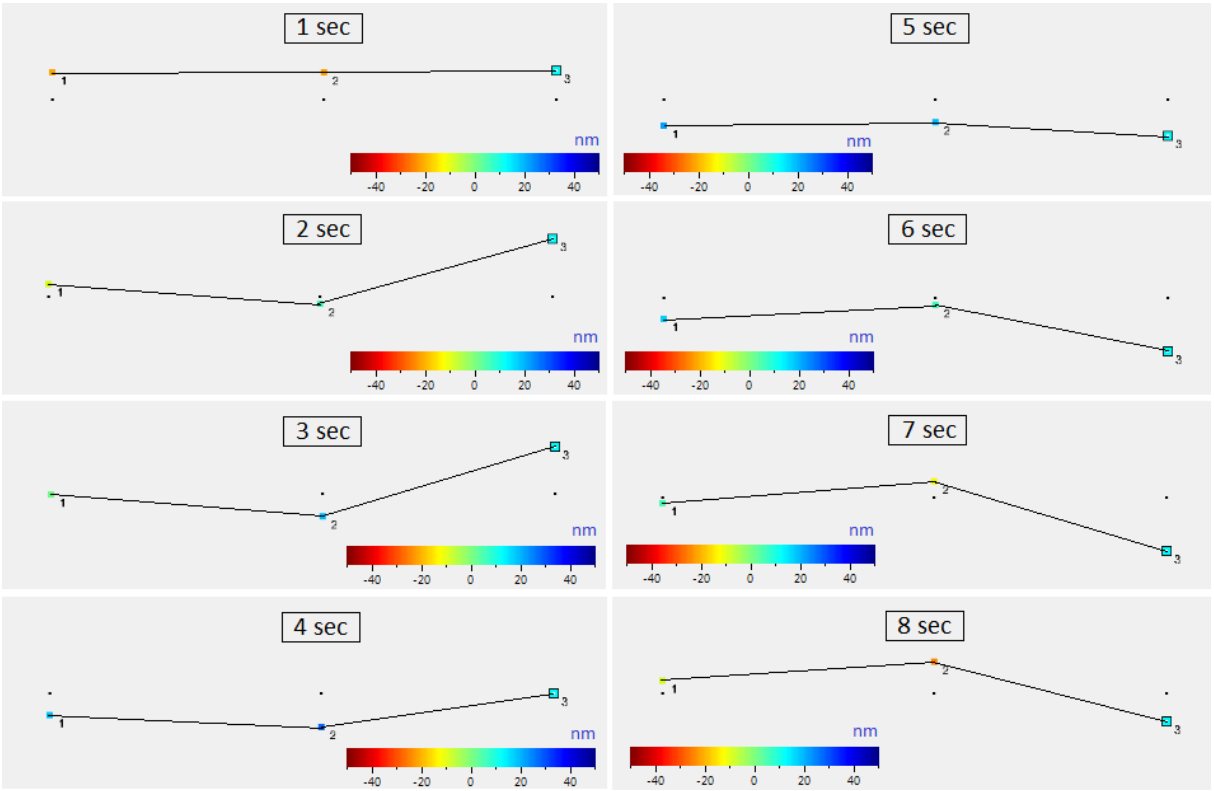


Figure 4. Mode shapes of rotor-bearing system rotating at 1500 rpm with disk assembled at non-drive end bearing (disk off-center).

Scanning laser vibrometry offers an attractive solution when radial vibration measurement directly from a rotor surface is required. It has demonstrated application on polished-circular rotors and rotors coated with retro-reflective tape. Rotors with surface roughness up to 10 nm satisfy the polished-circular rotor definition if vibration displacement is below 100% beam diameter, for a 90 mm beam, and below 40% beam diameter, for a 520 mm beam. On rotors with roughness between 10nm and 50nm, the polished-circular rotor definition is satisfied for vibration displacements up to 25% beam diameter, for a 90 mm beam, and up to 10% beam diameter, for a 520 mm beam. As roughness increases, cross-sensitivity increases but only rotors coated in retro-reflective tape satisfied the rough rotor definition fully. Consequently, when polished-circular surfaces are not available,rotor surfaces must be reated with retro-reflective tape and measurement spost-processed to resolve individual vibration components (Rothberg et al., 2012)

The rotor-bearing system has the outer race of the two ball bearings fixed to a rigid support and the inner race fixed rigidly to the shaft. A constant vertical radial force acts on each bearing. The excitation is due to the unbalance force which introduces the rotational frequency and the varying compliance vibrations of the bearing which arise because of the geometric and elastic characteristics of the bearing. Frequency spectra that are measured experimentally using the dual channel vibration analyzer (Vibrotest 60) are shown in Figure 5. It shows the response of rotor-bearing system rotating at 1500 rpm with one disk assembled at different positions (drive end bearing, shaft centre, and non-drive end bearing). The peak amplitude of vibration appears at drive end bearing when disk was assembled at shaft centre.

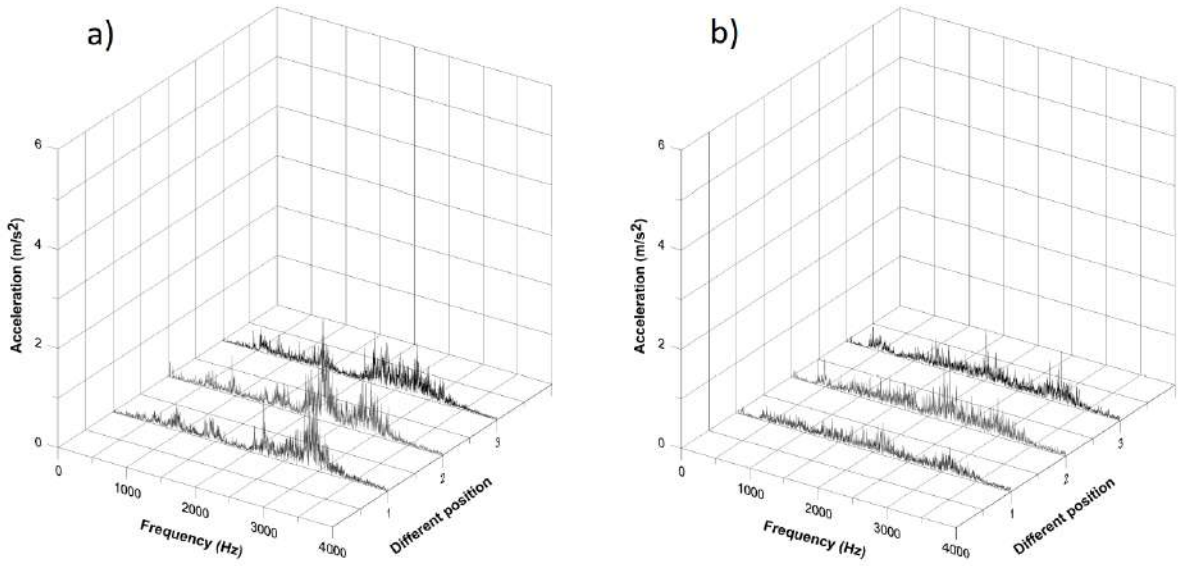


Figure 5. Frequency spectra of rotor-bearing system rotating at 1500 rpm with disk assembled at different positions. a) Drive end bearing, b) Non-drive end bearing.

4. CONCLUSIONS

In the present study, an innovative non-contact and non-destructive experimental method was investigated, which allows measuring the vibrations of a rotor-bearing system. It was shown that the mode shapes of rotor-bearing system at different test cases (varying speed and disk position) translates without rocking, rocks without translation or it is a mix of translation and rocking. The dynamic response of drive end bearing is found to be associated with the belt transmission frequency. The electric motor rotational speed is one of the most important parameters in the dynamic analysis of a rotor bearing-system and it is useful for controlling the system vibrational response. The disk position is also an important parameter for the vibration analysis of a rotor bearing-system and should be carefully considered during the design stage.

5. REFERENCES

Al-Wedyan, H.M., Tahat, M.S. and Mutasher, S.A., 2008. *The behaviour of the Jeffcott rotor under a vibrating base of fluid film bearing*. J. Sci. Technol., 15 (3): 167-176.

Bai, C., Zhang, H. and Xu, Q., 2008. *Effects of axial preload of ball bearing on the nonlinear dynamic characteristics of a rotor-bearing system*. Nonlinear Dyn, 53: 173-190.

Föppl, A., 1896. *Vereinfachte Darstellung meiner Theorie der Laval'schen Turbinenwelle.* Der Civilingenieur, 42: 249-252.

Gad, E.H., Fukata, S. and Tamura,H. 1984. *Computer simulation of rotor axial and radial vibrations due to ball bearings*. Mem. Fac. Eng. Kyushu Univ., 44(2): 169–189.

Gargiulo, E.E., 1980. *A simple way to estimate bearing stiffness*. Machine Design, 52: 107-110.

Gupta, P.L., 1979. *Dynamics of rolling element bearings, parts I to IV*. ASME J. Lubr. Technol., 101: 293–326.

Harsha, S.P., Sandeep, K. and Prakash,R., 2003. *The effect of speed of balanced rotor on nonlinear vibrations associated with ball bearings*. Int. J. Mech. Sci., 45: 725-740.

Harsha, S.P., 2005. *Nonlinear dynamic analysis of an unbalanced rotor supported by roller bearing*. Chaos, Solitons and Fractals, 26: 47-66.

Jeffcott, H.H., 1919. *The lateral vibration of the loaded shaft in the neighbourhood of a whirling speed*. Phil. Mag., 6(37): 304-314.

Lee, D.S. and Choi, D.H., 1997. *A dynamic analysis of a flexible rotor in ball bearings with nonlinear stiffness characteristics*. International Journal of Rotating Machinery, 3(2): 73-80.

Lim, T.C. and Singh, R., 1990. *Vibration transmission through rolling element bearing, Part I: Bearing stiffness formulation*. Journal of Sound and Vibration, 139 (2): 179-199.

Mul, J.M., Vree, J.M. and Maas, D.A., 1989. *Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction. Part I: general theory and application to ball bearings*. ASME J. Tribol., 111: 142-148.

Ortega, A.B., Carbajal, F.B., Navarro, G.S. and Salazar, M.A.O., 2010. *Active vibration control of a rotor-bearing system based on dynamic stiffness*. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, 55: 125-133.

Purohit, R.K. and Purohit, K., 2006. *Dynamic analysis of ball bearings with effect of preload and number of balls*. Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, 11(1): 77-91.

Rothberg, S.J., Halkon, B.J., Tirabassi, M. and Pusey, Ch., 2012. *Radial vibration measurements directly from rotors using laser vibrometry: The effects of surface roughness, instrument misalignments and pseudo-vibration*. Mechanical Systems and Signal Processing, 33: 109-131.

Sadeghi, M.H., Zehsaz, M. and Jafari, S., 2010. *The effect of bearing stiffness on the frequency response function of a turbo-pump shaft- comparative study*. European Journal of Scientific Research, 139(3): 381-395.

Tiwari, M. and Gupta, K., 2000. *Dynamic response of an unbalanced rotor supported on ball bearings*. Journal of Sound and Vibration, 238(5): 757-779.

Yücel, U., 2003. *Stability of rotor-bearing systems.* Journal of Engineering Sciences, 9(3): 387-392.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΔΙΑΒΑΘΜΗΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΟΧΗΜΑ

Θ. Γιαλαμάς✉, Ι. Γράβαλος, Δ. Κατέρης, Α. Γιαλαμά, Μ. Γιαλαμά, Π. Πηγής, & Π. Ξυραδάκης

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλίας, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας και Τεχνολογίας Τροφίμων και Διατροφής, Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, 41110, Λάρισα, ✉gialamas@teilar.gr

Περίληψη

Τα κλειστά υδροστατικά αδιαβάθμητα συστήματα μεταφοράς ισχύος εφαρμόζονται σε οχήματα στα οποία απαιτείται η αδιαβάθμητη μετάδοση της κίνησης. Στα οχήματα τα οποία εφαρμόζονται τα συστήματα αυτά είναι κυρίως τα γεωργικά μηχανήματα, τα χωματουργικά μηχανήματα καθώς και τα δασικά. Τα κλειστά συστήματα εμφανίζουν πάρα πολλά πλεονεκτήματα κυρίως στην ευκολία μεταβολής της ταχύτητας προς κάθε κατεύθυνση έμπροσθεν και όπισθεν αλλά και της αναπτυσσόμενης ροπής στρέψης στους κινητήριους τροχούς καθώς και την ευελιξία στην αλλαγή διεύθυνσης πορείας. Το καινοτόμο υδροστατικό ανοικτό σύστημα αδιαβάθμητης μεταφοράς ισχύος σε όχημα εμφανίζει όλα τα πλεονέκτημα των κλειστών υδροστατικών συστημάτων αλλά είναι πιο ευέλικτο και οικονομικό.

Λέξεις κλειδιά: κλειστό υδροστατικό σύστημα, ανοικτό υδροστατικό σύστημα, αδιαβάθμητη μετάδοση της κίνησης, ευελιξία στην αλλαγή διεύθυνσης πορείας

CONSTRUCTION OF INNOVATIVE OPEN LOOP HYDROSTATIC CONTINUOUSLY VARIABLE VECHICLE TRANSMISSION SYSTEM

Th. Gialamas✉, I. Gravalos, D. Kateris, A. Gialama, M. Gialama, P. Pigis & P. Xyradakis

Technological Educational Institute of Thessaly, Faculty of Technological Agronomy and Food Technology and Nutrition, Department of Biosystems Engineering, 41110, Larissa,
✉gialamas@teilar.gr

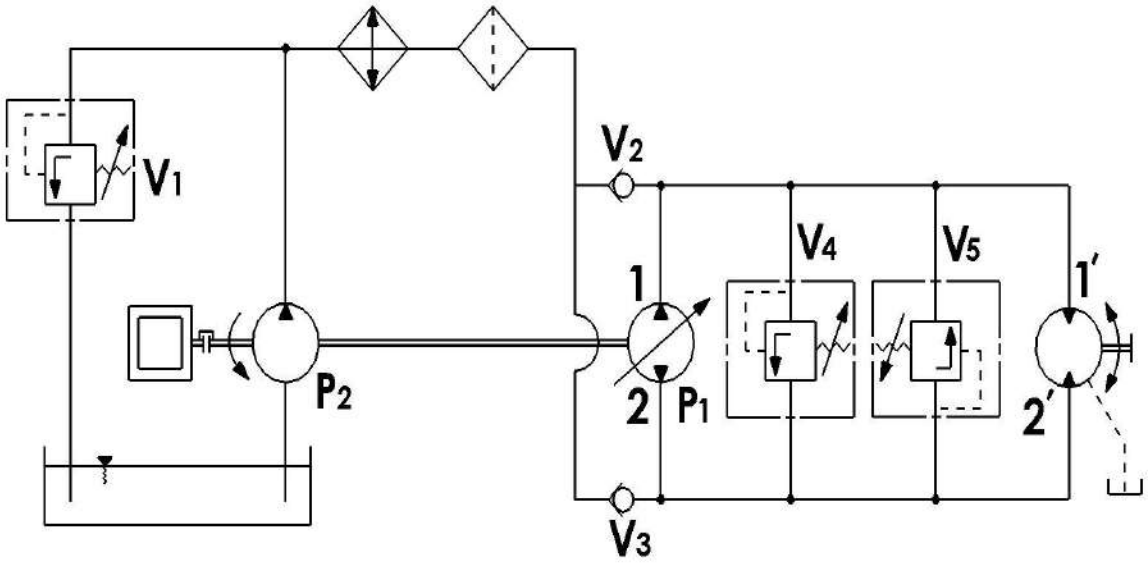
Abstract

Closed loop hydrostatic continuously variable transmission systems are used on vehicles which require continuously variable transmission. The vehicles onto which these systems are usually applied are mainly agricultural machines, earth-moving machinery as well as forestry machinery. Closed loop systems have numerous advantages, mainly the ease of changing the speed in every direction, front and rear and the developing torque on the drive wheels, but also the flexibility of shifting the direction of the course. This innovative open loop hydrostatic continuously variable vehicle transmission system displays all the advantages of closed loop hydrostatic systems, while being more flexible and economical.

Keywords: closed loop hydrostatic system, open loop hydrostatic system, continuously variable transmission, flexibility of shifting the direction of the course.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αδιαβάθμητα συστήματα μεταφοράς ισχύος που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση της κίνησης στα γεωργικά μηχανήματα, τα χωματουργικά μηχανήματα καθώς και τα δασικά μηχανήματα είναι κυρίως κλειστά υδροστατικά συστήματα υψηλής πίεσης. (Anderson, et al., 2002). Τα παραπάνω αναφερόμενα μηχανήματα διαθέτουν πάντοτε δύο υδραυλικά κυκλώματα μεταφοράς ισχύος απόλυτα συνεργαζόμενα μεταξύ τους δηλαδή διαθέτουν το κυρίως κύκλωμα και το βοηθητικό. (Murrenhoff, 1999; Dasgupta, et al., 2012). Η υδραυλική ενέργεια δημιουργείται στην υδραυλική αντλία του βοηθητικού κυκλώματος, παίρνοντας κίνηση (μηχανική ενέργεια) από την πηγή ισχύος του μηχανήματος. Η βοηθητική αντλία είναι σταθερής ειδικής παροχής q_p=[cm^3/στροφή] μιας διευθύνσεως της ροής η οποία αναρροφά το υδραυλικό υγρό από τη δεξαμενή και το καταθλίβει στην κύρια υδραυλική αντλία του κυρίως κυκλώματος (Σχήμα 1), η οποία είναι μεταβαλλόμενης ειδικής παροχής q_p #ct [cm^3/στροφή] διπλής διευθύνσεως της ροής. (Mandal, et al., 2012). Στην κύρια αντλία δημιουργείται η αύξηση της ενέργειας πίεσης καθώς και η μεταβολή της ειδικής παροχής, ελεγχόμενης από τον χειριστή (McCandlish and Dorey, 1981; Watton, 1988).



Σχήμα 1. Κλειστό αδιαβάθμητο σύστημα μεταφοράς ισχύος σε όχημα σύνδεση με το διαφορικό του οχήματος.

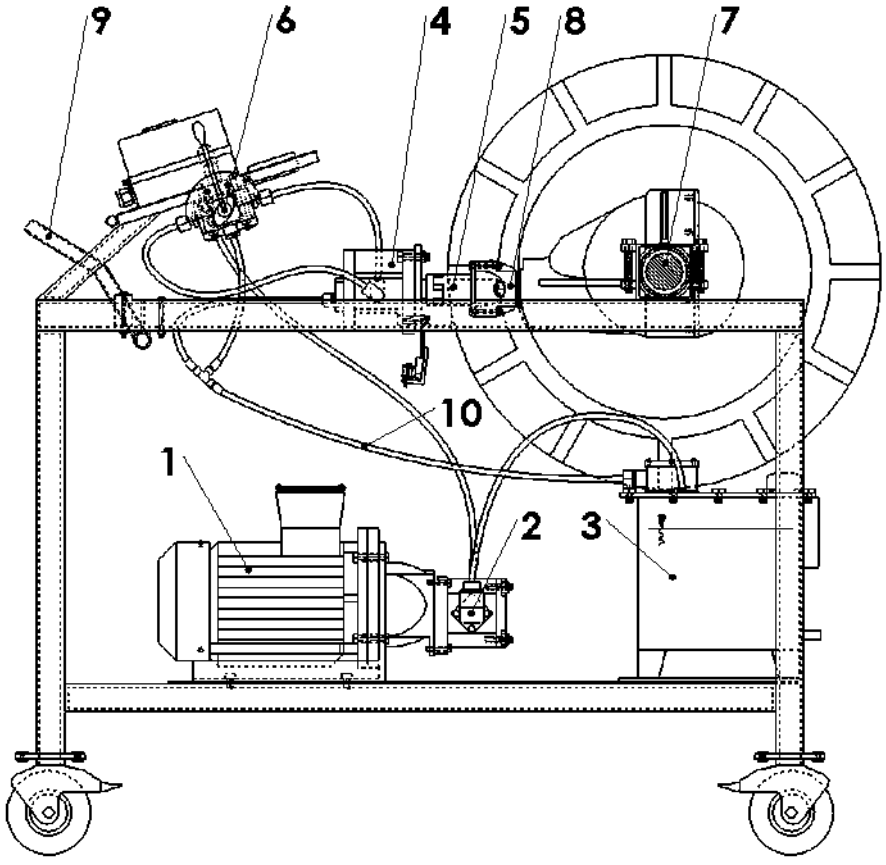
Η ενέργεια πίεσης δημιουργείται στην υδραυλική αντλία P_1 και μέσω των υδραυλικών αγωγών και των αναγκαίων βαλβίδων του κυκλώματος (V_4 & V_5) καταλήγει στον υδραυλικό κινητήρα στη θέση (1΄), ο οποίος μπορεί να συνδέεται: α) μέσω συνδέσμου κόπλερ με το διαφορικό, τις ακραίες τελικές μεταδόσεις και να καταλήγει στους τροχούς και β) εναλλακτικά με δύο υδραυλικούς κινητήρες οι οποίοι τοποθετούνται στην πλήμνη κάθε τροχού του οχήματος. Η μεταβολή της θέσης του χειρομοχλού που συνδέεται με το δίσκο μεταβολής της θέσης των εμβόλων προσδιορίζει την ελάχιστη και τη μέγιστη παροχή της υδραυλικής αντλίας και συμβάλει προοδευτικά στην μεταβολή της ροπής στρέψης και ταυτόχρονα στη μεταβολή της ταχύτητας κίνησης του οχήματος.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

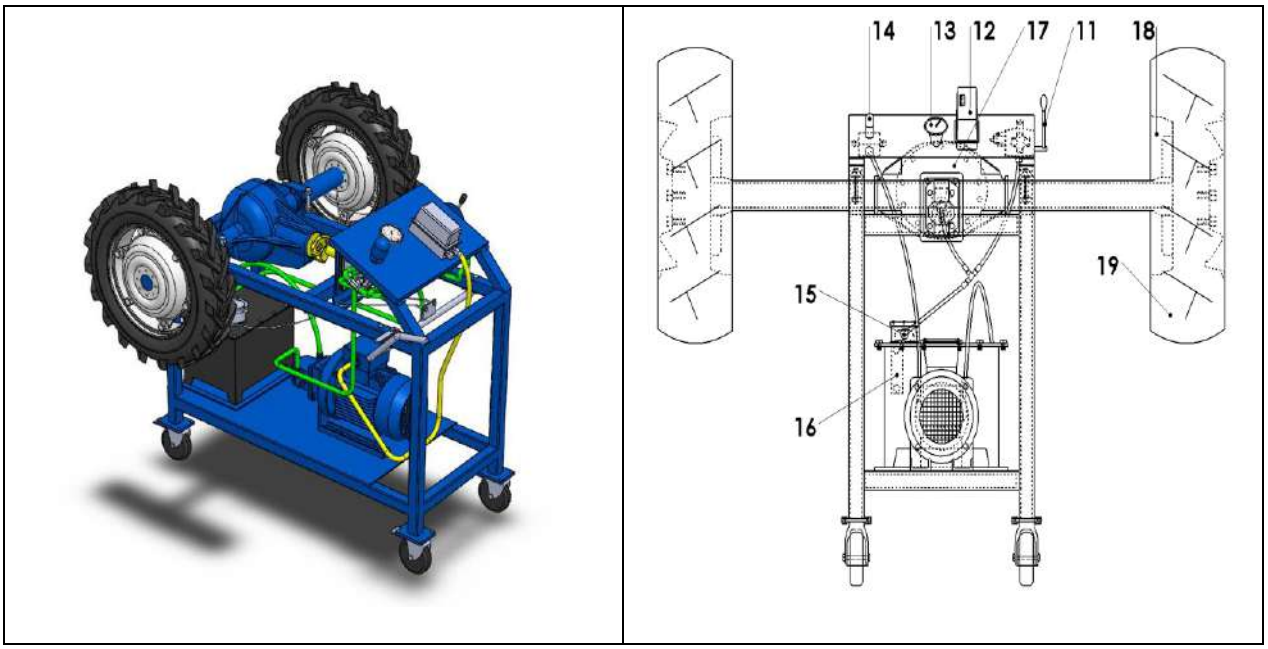
Το καινοτόμο υδροστατικό ανοικτό σύστημα αδιαβάθμητης μεταφοράς ισχύος (Σχήμα 2 και 3) κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Υδραυλικών Μηχανισμών Υψηλής Πίεσης του Τμήματος Μηχανικής Βιοσυστημάτων του Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας.

Η κατασκευή αυτή έχει τη δυνατότητα της αδιαβάθμητης μεταφοράς ισχύος δηλαδή της μετάδοσης της περιστροφικής κίνησης στους τροχούς του οχήματος χρησιμοποιώντας μόνο ένα υδραυλικό ανοικτό κύκλωμα (Σχήμα 4) το οποίο ελέγχεται μέσω μιας ειδικής βαλβίδας ελέγχου χειρισμού η οποία ελέγχει αδιαβάθμητα την παροχή της υδραυλικής αντλίας προς τον υδραυλικό κινητήρα (Σχήμα 4, Νο 10) προς κάθε κατεύθυνση από τον χειριστή.

Λόγω κόστους κατασκευής το σύστημα μελετήθηκε – σχεδιάστηκε – και κατασκευάστηκε να είναι ανοικτό δηλαδή χωρίς να υπάρχει βοηθητικό κύκλωμα παρά μόνο το κυρίως κύκλωμα στο οποίο η κύρια υδραυλική αντλία (Σχήμα 2 και 4, Νο 2), είναι σταθερής ειδικής παροχής. (Tomlinson, et al,. 1992). Ο υδραυλικός κινητήρας είναι και αυτός σταθερού απογεννωμένου όγκου και η άτρακτος του συνδέεται μέσω ενός συνδέσμου (κόπλερ) με το διαφορικό και μέσω των ημιαξονίων του με τους τροχούς του οχήματος. Η αδιαβάθμητη μεταφορά ισχύος προς κάθε κατεύθυνση (εμπρός και πίσω) επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μιας ειδικής βαλβίδας ελέγχου χειρισμού ελεγχόμενη από τον χειριστή (Σχήμα 2, Νο 6 και Σχήμα 4 συμβολικό υδροστατικό κύκλωμα Νο 8).



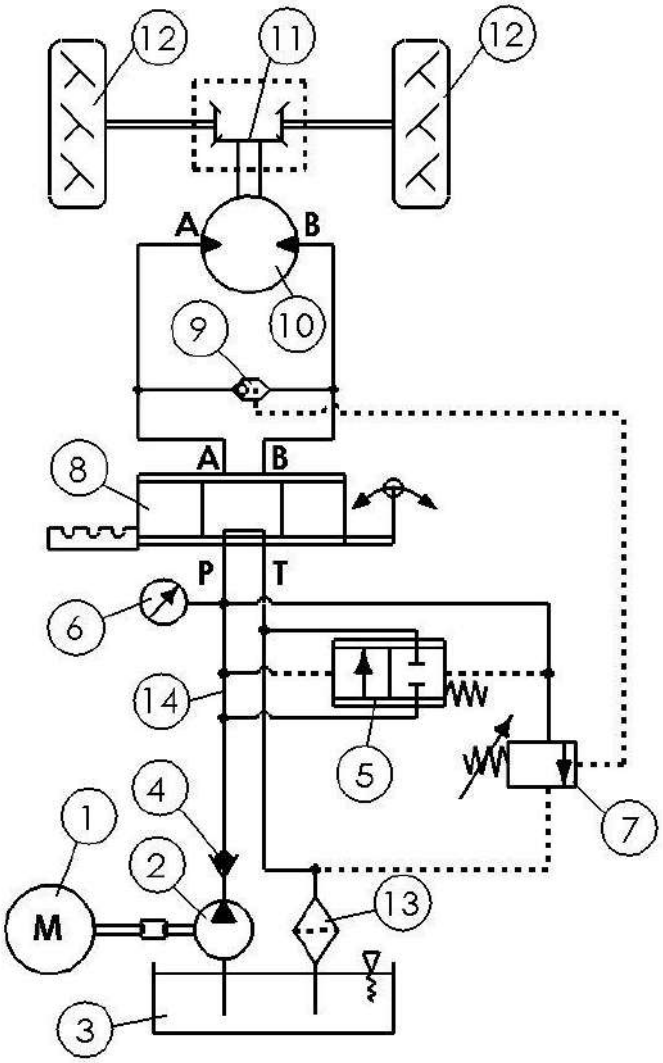
Σχήμα 2. Πρόοψη αδιαβάθμητου συστήματος μεταφοράς ισχύος με τους απαραίτητους Υδραυλικούς μηχανισμούς.



Σχήμα 3. Πλάγια όψη αδιαβάθμητου συστήματος μεταφοράς ισχύος με τους απαραίτητους υδραυλικούς μηχανισμούς.

Πίνακας 1. Βασικών εξαρτημάτων αδιαβάθμητου συστήματος μεταφοράς ισχύος.

α/α	Ονομασία εξαρτημάτων
1.	Ηλεκτροκινητήρας
2.	Υδραυλική αντλία σταθερού απογεννωμένου όγκου
3.	Δεξαμενή υδραυλικού υγρού
4.	Υδραυλικός κινητήρας σταθερού απογεννωμένου όγκου
5.	Σύνδεσμος μετάδοσης της κίνησης (κόπλερ)
6.	Βάση στήριξης βαλβίδας ελέγχου χειρισμού
7.	Βάση στήριξης ημιαξονίων
8.	Άξονας μετάδοσης της κίνησης στο διαφορικό
9.	Χειρομοχλός πεδήσεως
10.	Υδραυλικοί αγωγοί
11.	Χειρομοχλός αδιαβάθμητης βαλβίδας ελέγχου χειρισμού
12.	Ηλεκτρικός διακόπτης εκκινήσεως
13.	Μανόμετρο ένδειξης της πιέσεως
14.	Βαλβίδα ρυθμίσεως της πίεσης λειτουργίας
15.	Τάπα πληρώσεως δεξαμενής υδραυλικού υγρού
16.	Φίλτρο δεξαμενής υδραυλικού υγρού
17.	Διαφορικό συστήματος μετάδοσης της κίνησης
18.	Σώτρο (ζάντα) στήριξης ελαστικού επισώτρου
19.	Ελαστικό επίσωτρο



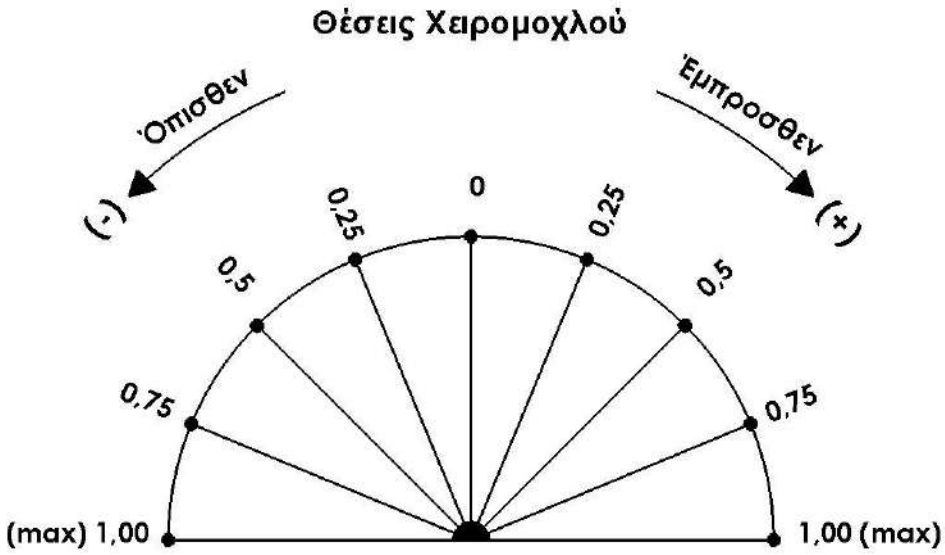
Σχήμα 4. Συμβολικός σχεδιασμός ανοικτού αδιαβάθμητου συστήματος μεταφοράς Ισχύος.

Πίνακας 2. Βασικά εξαρτήματα συμβολικού σχεδιασμού Σχήμα4, αδιαβάθμητου συστήματος μεταφοράς ισχύος.

α/α	Ονομασία εξαρτημάτων και τεχνικά χαρακτηριστικά
1.	Ηλεκτροκινητήρας 1,5 kw, RPM 1450
2.	Υδραυλική αντλία σταθερού απογεννωμένου όγκου qp = 7,2 cm^3
3.	Δεξαμενή υδραυλικού υγρού 20 lit
4.	Υδραυλική βαλβίδα μιας διευθύνσεως ή αντεπιστροφής
5.	Αδιαβάθμητη υδραυλική βαλβίδα διευθύνσεως της ροής 2/2
6.	Μανόμετρο για την ένδειξη της πίεσης λειτουργίας του υδρ. Συστήματος P=400 bar
7.	Υδραυλική βαλβίδα απελευθερώσεως της πιέσεως P=400 bar .
8.	Υδραυλική βαλβίδα ελέγχου χειρισμού 4/3 αδιαβάθμητη περιστροφικού τύπου
9.	Υδραυλική βαλβίδα μιας διευθύνσεως ενεργοποιημένη με την πίεση
10.	Υδραυλικός κινητήρας αμφίδρομος σταθερού απογεν/νου όγκου qp = 8,0 cm^3
11.	Σύστημα γωνιακής μετάδοσης διαφορικό συστήματος μεταφοράς ισχύος.
12.	Τροχοί οχήματος με ενεργό διάμετρο D = 0,57 m
13.	Φίλτρο υδραυλικού υγρού

3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Στις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ελήφθη υπόψη η θέση του χειρομοχλού της περιστροφικής βαλβίδας ελέγχου χειρισμού 4/3 ως προς τις δύο διευθύνσεις για την εμπρόσθια και την οπίσθια πορεία του οχήματος. Προσδιορίστηκε η μηδενική κατακόρυφη θέση της βαλβίδας όπου η δημιουργούμενη παροχή της υδραυλικής αντλίας επιστρέφει στη δεξαμενή μέσω της σύνδεσης (P→T) (Σχήμα4 No 8).



Σχήμα 5. Θέσεις χειρομοχλού βαλβίδας ελέγχου χειρισμού.

Μεταβάλλοντας τη θέση του χειρομοχλού προσδιορίστηκαν οι ενδιάμεσες θέσεις (Σχήμα 5), μέχρι την απόδοση της μέγιστης παροχής θέση 1,00 max για την εμπρόσθια και την οπίσθια κίνηση του οχήματος. Στα αδιαβάθμητα υδροστατικά συστήματα έχουμε το πλεονέκτημα της αδιαβάθμητης μεταβολής της ταχύτητας και της ροπής στρέψης σε συνάρτηση με την ταχύτητα κίνησης του οχήματος.

3.1. Προσδιορισμός της ταχύτητας κίνησης του οχήματος

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας κίνησης του οχήματος, καταγράφηκαν με πειραματικές δοκιμές οι στροφές των τροχών στις διαφορετικές θέσεις του χειρομοχλού (Σχήμα 5). Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ελήφθησαν για κάθε θέση τρείς (3) μετρήσεις και ελήφθει ο μέσος όρος Πίνακας 3.

Στοιχεία ηλεκτροκινητήρα της κατασκευής: Hellas Electric Power L.T.D. διαθέτει ισχύ 1,5 Ps και οι στροφές του είναι rpm=1450.
Στοιχεία τροχών: Ενεργός διάμετρος D = 0,57 m και η πίεση λειτουργίας της υδραυλικής βαλβίδας απελευθερώσεως της πιέσεως ρυθμίστηκε στα 15,0 bar.

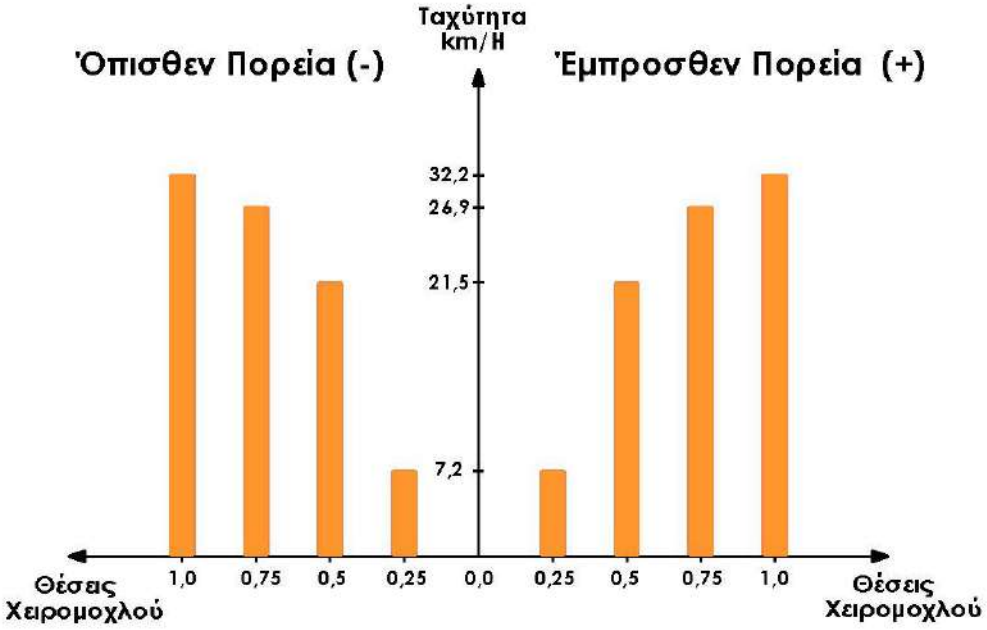
Η ταχύτητα κίνησης του οχήματος U σε km/h, δίνεται από τη σχέση:

$$U = \pi * D * n * 60/1000 \text{ km/h} \quad (1)$$

Από τη σχέση (1) προκύπτει ο Πίνακας 3.

Πίνακας 3. Καταγραφή των στροφών και της ταχύτητας συναρτήσει της θέσης του χειρομοχλού.

α/α	Έμπροσθεν Πορεία			Όπισθεν Πορεία		
	Θέσεις μοχλού	rpm	Ταχύτητα km/h	Θέσεις μοχλού	rpm	Ταχύτητα km/h
1	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
2	0,25	67	7,2	0,25	67	7,2
3	0,50	200	21,5	0,50	200	21,5
4	0,75	250	26,9	0,75	250	26,9
5	1,00	300	32,2	1,00	300	32,2



Σχήμα 6. *Αναπτυσσόμενες ταχύτητες για εμπρόσθια και οπίσθια πορεία του Οχήματος.*

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με τις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο καινοτόμο ανοιχτό υδροστατικό σύστημα μεταφοράς ισχύος δημιουργήθηκε ο Πίνακας 3, στον οποίο καταγράφονται οι στροφές στους τροχούς της κατασκευής σε σχέση με τη θέση του χειρομοχλού που ελέγχεται άμεσα από τον χειριστή.

Προσδιορίστηκε η μέγιστη διαδρομή ως προς τις δυο διευθύνσεις για την εμπρόσθια και την οπίσθια κίνηση. Στο τόξο αυτό της διαδρομής του χειρομοχλού προσδιορίστηκε η νεκρή θέση (0) και η μέγιστη θέση (1). Μεταξύ των δυο αυτών ακραίων θέσεων καθορίστηκαν αναλογικά οι ενδιάμεσες θέσεις (0,25), (0,50) και (0,75) (Σχήμα 5).

Σε κάθε θέση του χειρομοχλού καταγραφόταν ο αριθμός των στροφών σε κάθε τροχό. Σε κάθε θέση πραγματοποιήθηκαν 3 δοκιμές και ελήφθησαν οι μέσοι όροι. Από τους μέσους όρους των στροφών και τη σχέση (1) υπολογίστηκαν οι θεωρητικές αναπτυσσόμενες

ταχύτητες του οχήματος διότι δεν ήταν εφικτό να προσδιοριστούν οι πραγματικές διότι έπρεπε να ληφθούν υπόψη οι αντιστάσεις τριβών μεταξύ των τροχών του οχήματος και του εδάφους.

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών η πίεση λειτουργίας του υδραυλικού συστήματος ρυθμίστηκε στα 15,0 bar.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το καινοτόμο ανοιχτό αδιαβάθμητο υδροστατικό σύστημα μεταφοράς ισχύος με υψηλή πίεση λειτούργησε άψογα, μεταβάλλοντας την ταχύτητα κίνησης του οχήματος από την ακινησία μέχρι την μέγιστη ταχύτητα των 32,2 km/h αδιαβάθμητα κατά την εμπρόσθια και οπίσθια κίνηση του οχήματος (Σχήμα 6).

Η καινοτομία του ανοιχτού αδιαβάθμητου συστήματος μεταφοράς ισχύος είναι ότι παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα των αδιαβάθμητων κλειστών υδροστατικών συστημάτων μεταφοράς ισχύος (Σχήμα 1), τα οποία πάντα λειτουργούν με δυο υδροστατικά συστήματα το κυρίως και το βοηθητικό.

Στο καινοτόμο ανοιχτό αδιαβάθμητο υδροστατικό σύστημα μεταφοράς ισχύος με υψηλή πίεση χρησιμοποιήθηκε υδραυλική αντλία και υδραυλικός κινητήρας σταθερού απογεννωμένου όγκου δηλαδή σταθερής ειδικής παροχής.

Τα κλειστά αδιαβάθμητα υδροστατικά συστήματα μεταφοράς ισχύος υψηλής πίεσης για να λειτουργήσουν απαιτούν και τη συνεργασία των ανοιχτών υδροστατικών συστημάτων χαμηλής πίεσης. Τα ανοιχτά υδροστατικά συστήματα χαμηλής πίεσης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας στα συστήματα αυτά πληρούν με υδραυλικό υγρό το κυρίως υδροστατικό σύστημα υψηλής πίεσης.

Τα κλειστά αδιαβάθμητα υδροστατικά συστήματα μεταφοράς ισχύος υψηλής πίεσης για να λειτουργήσουν απαιτούν την υδραυλική αντλία να είναι παραλλάσσοντος απογεννωμένου όγκου, δηλαδή μεταβαλλόμενης ειδικής παροχής.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anderson, T.R., and Li, P., 2002. *Mathematical modelling of a two-spool flow control servo-valve using a pressure control pilot*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 124: 420–427.

Dasgupta, K., Mandal, S.K., Pan, S., 2012. *Dynamic analysis of a low speed high torque hydrostatic drive using steady-state characteristics,* The journal of Mechanism and Machine Theory 52: 1–17.

Murrenhoff, H., 1999. *Systematic approach to the control of hydrostatic drives,* Proc. of Inst. of Mech. Engrs., Journal of Systems and Control Engineering, 213(1): 333 – 347.

McCandlish, D. and Dorey, R.E., 1981. *Steady state losses in hydrostatic pumps and motors*, 6th International Fluid Power Symposium, Cambridge, UK, paper C3, 131 – 144.

Mandal, S.K., Singh, A.K., Dasgupta, K., Verma, Y., 2012. *Performance Investigation of Hydrostatic Transmission System as a Function of Pump Speed and Load Torque*, J. Inst. Eng. India Ser. C, 93(2): 187–193.

Tomlinson, S.P. and Burrows, C.R., 1992. *Achieving a Variable Flow Supply by Controlled Unloading of a Fixed-Displacement Pump*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, & Controls, 114: 166 – 171.

Watton, J., 1988. *Closed-Loop Design of an Electro hydraulic Motor drive using Open-Loop Steady-State Characteristics*, The Journal of Fluid Control, 20: 7 – 30.

Zarotti, G.L., Roberto, P., 1996. *In quest of the transmission size*, Third JHPS International Symposium, pp. 295 – 300.

ΔΙΕΡeΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΔΟΝΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΚΙΒΩΤΙΟ ΣΧΕΣΕΩΝ

Δ.Κατέρης[1,✉], Ι. Γράβαλος[2], Θ. Γιαλαμάς[2], Π. Ξυραδάκης[1] & Δ. Μόσχου[1]

[1]Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας, 54124, Θεσσαλονίκη, ✉dimkateris@gmail.com

[2]Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, 41110, Λάρισα

Περίληψη

Τα σημεία τοποθέτησης και ο αριθμός των αισθητήρων αποτελούν βασικές παραμέτρους στο σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού συστήματος παρακολούθησης της κατάστασης λειτουργίας ενός γεωργικού ελκυστήρα. Η σταθερότητα και η αξιοπιστία των πληροφοριών που συλλέγονται εξαρτώνται εξ ολοκλήρου τόσο από τη θέση όσο και από των αριθμό των αισθητήρων. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης που μπορεί να έχουν οι δύο προηγούμενοι παράγοντες στην αξιοπιστία της διάγνωσης βλαβών σε ένα μηχανικό κιβώτιο σχέσεων. Διερευνήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί συνδυασμοί αριθμού και θέσης επιταχυνσιομέτρων τα οποία τοποθετήθηκαν σε επιλεγμένα σημεία στο κέλυφος ενός μηχανικού κιβωτίου σχέσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η λήψη δεδομένων μόνο από τα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα δίνει σε όλες τις περιπτώσεις τα υψηλότερα ποσοστά επιτυχούς διάγνωσης σε σύγκριση με τους άλλους τρείς συνδυασμούς.

Λέξεις κλειδιά: παρακολούθησης κατάστασης λειτουργίας, θέση αισθητήρα, δόνηση, μηχανικό κιβώτιο σχέσεων, νευρωνικό δίκτυο

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ACCELEROMETER POSITION AND NUMBER IN FAULT DETECTION RELIABILITY OF A GEARBOX

D. Kateris[1,✉], I. Gravalos[2], Th. Gialamas[2], P. Xyradakis[1], & D. Moshou[1]

[1]Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Agricultural Engineering Laboratory, 54124, Thessaloniki, ✉dimkateris@gmail.com

[2]Technological Educational Institute of Thessaly, Department of Biosystems Engineering, 41110, Larissa,

ABSTRACT

The position and the number of sensors are basic parameters in designing an effective condition monitoring system. The stability and reliability of the collected information depends entirely on both the position and the number of sensors. The aim of this work is to investigate the effect that both the number and position of accelerometers may have on the reliability of fault diagnosis at a mechanical gearbox. Four different combinations of number and position of accelerometers were investigated which were placed at selected points on the shell of a mechanical gearbox. The results showed that the received data only from the monoaxial accelerometers give in all cases the highest rates of successful diagnosis compared to the other three combinations.

Keywords: condition monitoring, sensor location, vibration, mechanical gearbox, neural network

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος της συνεχούς παρακολούθησης ενός μηχανισμού – μηχανήματος είναι η ταχεία και ακριβής αξιολόγηση της λειτουργικής του κατάστασης αλλά και η παροχή χρήσιμων πληροφοριών οι οποίες ύστερα από αξιολόγηση θα βοηθήσουν στην λήψη αποφάσεων σχετικά με τις προτεραιότητες επισκευής και αντικατάστασης δομικών στοιχείων. Πολλές από τις τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση βλαβών απαιτούν τη χρήση δυναμικών χαρακτηριστικών ενός δυνητικά ελαττωματικού μηχανισμού προκειμένου να εκτιμηθεί η θέση και ο βαθμός της βλάβης σε σύγκριση με τη συμπεριφορά της υγειούς κατάστασης (Hameed et al., 2009).

Οι αισθητήρες αποτελούν βασικά στοιχεία κάθε μετρητικού συστήματος και χρησιμοποιούνται προκειμένου να μετατρέψουν τα διάφορα φυσικά μεγέθη (θέση, ταχύτητα, κ.λπ.) σε ηλεκτρικά σήματα. Ένα σύστημα παρακολούθησης της κατάστασης (Condition Monitoring System) βασίζεται αποκλειστικά στη χρήση τέτοιων αισθητήρων. Η θέση αλλά και ο αριθμός των αισθητήρων αυτών καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα του συστήματος παρακολούθησης. Η εσφαλμένη επιλογή τόσο της θέσης που θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες όσο και του αριθμού τους μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των παραμέτρων αναγνώρισης οδηγώντας σε εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με την λειτουργική κατάσταση του υπό παρακολούθηση μηχανισμού. Ως εκ τούτου, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακρίβεια και η ορθότητα των αποτελεσμάτων του συστήματος παρακολούθησης, είναι αναγκαίο να επιλεγεί ο βέλτιστος αριθμός των αισθητήρων και να μελετηθεί η θέση των σημείων που αυτοί θα τοποθετηθούν.

Η αποτελεσματική τοποθέτηση του αισθητήρα για την ανίχνευση σφαλμάτων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως: i) τη θέση των σφαλμάτων - βλαβών ii) τη σχετική πιθανότητα εμφάνισης της βλάβης στις διάφορες θέσεις, iii) την πηγή διέγερσης και iv) τους στόχους του συστήματος παρακολούθησης της κατάστασης λειτουργίας.

Το πρόβλημα του προσδιορισμού του βέλτιστου αριθμού αισθητήρων και των θέσεων τοποθέτησής τους τυγχάνει ιδιαίτερης προσοχής τα τελευταία χρόνια. Διάφορες μέθοδοι στηρίζονται στην ίδια κοινή βάση όσον αφορά την τοποθέτηση αισθητήρων στον τομέα της δομικής δυναμικής έχοντας σαν προτεραιότητα την ανίχνευση σφαλμάτων – βλαβών σε μηχανολογικές δομές (Worden and Burrows, 2006). Το 2008, οι Liu et al., ανέπτυξαν μια αποτελεσματική μέθοδος βασισμένη στην ομοιόμορφη μέθοδο σχεδιασμού για βέλτιστες τοποθετήσεις αισθητήρων. Βρέθηκε ότι η ομοιόμορφη μέθοδος σχεδιασμού μπορεί να μειώσει δραματικά την υπολογιστική προσπάθεια για βελτιστοποίηση της θέσης και του αριθμού των αισθητήρων.

Οι Flynn και Todd (2010) απέδειξαν ότι η κατάλληλη τοποθέτηση των αισθητήρων επηρεάζει σημαντικά την απόδοση ενός συστήματος παρακολούθησής της κατάστασης λειτουργίας. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να οριστούν με ακρίβεια οι συγκεκριμένοι περιορισμοί πριν από τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση του συστήματος παρακολούθησης. Οι Guratzsch και Mahadevan (2006) παρουσίασαν μια μεθοδολογία για τη βέλτιστη σχεδίαση της διάταξης των αισθητήρων των συστημάτων παρακολούθησης της κατάστασης υπό αβεβαιότητα. Η μεθοδολογία αυτή στοχεύει στη μεγιστοποίηση της πιθανότητας ανίχνευσης της βλάβης σε σχέση με τη θέση των αισθητήρων παρακολούθησης της κατάστασης. Με βάση το κριτήριο της βέλτιστης τοποθέτησης του αισθητήρα, ένας βελτιωμένος γενετικός αλγόριθμος προτάθηκε προκειμένου να βρεθεί η κατάλληλη θέση τοποθέτηση τους.

Για να επιλυθεί με επιτυχία το πρόβλημα βελτιστοποίησης όσον αφορά την τοποθέτηση και τον αριθμό των αισθητήρων σε ένα σύστημα παρακολούθησης της κατάστασης

λειτουργίας, είναι σημαντικό να εμπεδωθεί ότι ο καθορισμός των βέλτιστων θέσεων και του βέλτιστου αριθμού των αισθητήρων είναι δύο ξεχωριστά προβλήματα. Η γνώση και η εμπειρία των μηχανικών σε συνδυασμό με την επεξεργασία του σήματος επιλύουν τέτοιου είδους προβλήματα. Οι σχεδιαστές και οι τελικοί χρήστες των συστημάτων γνωρίζουν πού είναι οι κρίσιμες περιοχές των μηχανών που πρέπει να αναλυθούν, να ελεγχθούν και να παρακολουθηθούν. Στη συνέχεια, μια έξυπνη επεξεργασία σήματος θα μπορούσε να βοηθήσει προκειμένου να επιλεγούν οι καλύτερες θέσεις των αισθητήρων. Το πρόβλημα του βέλτιστου αριθμού των αισθητήρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας του σήματος (Staszewski, 2002). Από την άποψη της επεξεργασίας του σημάτων, η βέλτιστη θέση τοποθέτησης του αισθητήρα είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης ή / και επιλογής.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση, με τη βοήθεια ενός Bayesian πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου, της επίδρασης που μπορεί να έχει τόσο ο αριθμός όσο και η θέση που θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες μηχανικής δόνησης (επιταχυνσιόμετρα) στην αξιοπιστία της διάγνωσης βλαβών σε ένα μηχανικό κιβώτιο σχέσεων.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασίας αποτελείται από ένα μηχανικό κιβώτιο 6 σχέσεων (5 εμπρόσθιων και 1 όπισθεν), έναν τριφασικό ηλεκτροκινητήρα, ένα υδραυλικό δυναμόμετρο για την φόρτιση του κιβωτίου σχέσεων και ένα πλήρες καταγραφικό σύστημα δονήσεων της εταιρίας Brüel & Kjær (Type 3560C με 17 κανάλια) (Κατέρης κ.α., 2013; Κατέρης κ.α. 2015).

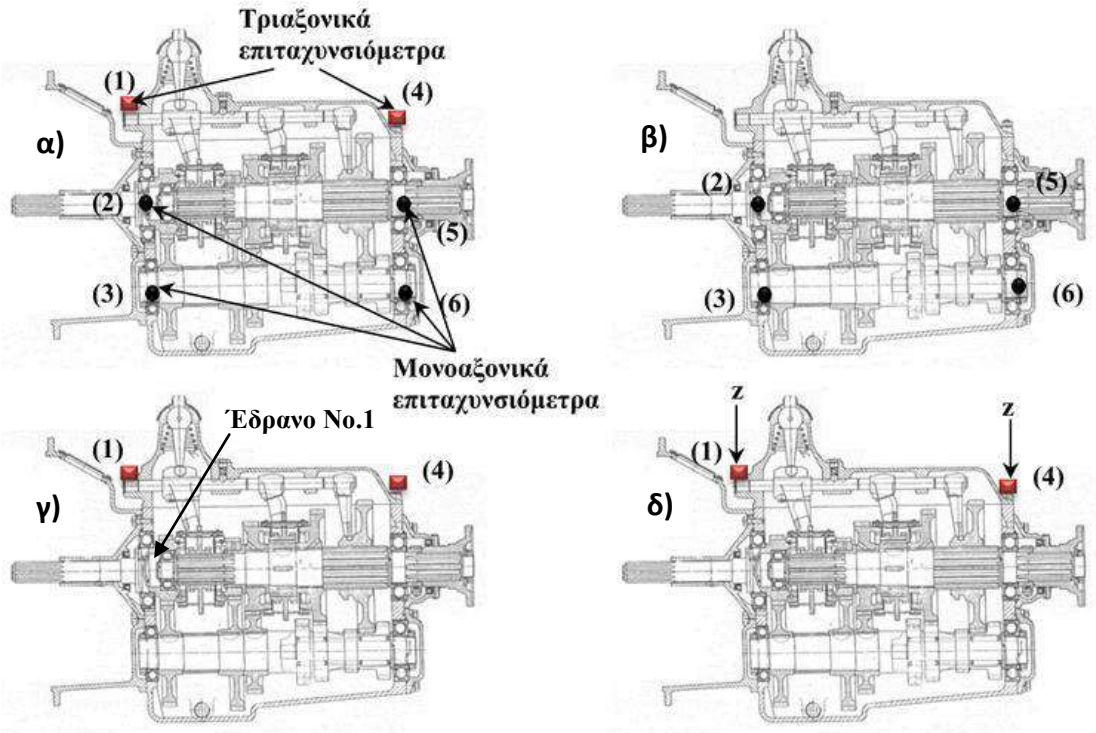
Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση τόσο του αριθμού όσο και της θέσης των αισθητήρων μηχανικής δόνησης (επιταχυνσιόμετρα) στην αξιοπιστία της διάγνωσης, διερευνήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί συνδυασμοί αριθμών και θέσεων επιταχυνσιομέτρων τα οποία τοποθετήθηκαν σε επιλεγμένα σημεία στο κέλυφος ενός μηχανικού κιβωτίου σχέσεων. α) Ο πρώτος συνδυασμός περιλάμβανε δύο τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα τοποθετημένα στις κατακόρυφες αξονικές των δύο εμπρόσθιων και των δύο οπίσθιων εδράνων κύλισης και τέσσερα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα, τοποθετημένα στην οριζόντια αξονική κάθε ενός εκ των τεσσάρων εδράνων κύλισης του κιβωτίου (Σχήμα 1α), β) ο δεύτερος συνδυασμός περιλάμβανε μόνο τα τέσσερα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 1β), γ) ο τρίτος μόνο τα δύο τριαξονικά (Σχήμα 1γ) και δ) ο τέταρτος μόνο τον κατακόρυφο άξονα των τριαξονικών επιταχυνσιομέτρων (Σχήμα 1δ).

Για κάθε ένα από τους τέσσερις προηγούμενους συνδυασμούς ελήφθησαν δεδομένα για όλες τις ακόλουθες λειτουργικές παραμέτρους του κιβωτίου (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί λειτουργικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια λήψης των πειραματικών μετρήσεων (αποκλειστικά για το έδρανο κύλισης No.1).

Στροφές στην είσοδο του κιβωτίου	Λειτουργική κατάσταση του εδράνου No. 1	Φορτίο στην έξοδο του κιβωτίου	Σχέση στο κιβώτιο	Διάρκεια σήματος
730 rpm 1370 rpm 2700 rpm	Υγιή κατάσταση (G) Μικρή βλάβη (S) (3mm πλάτος) Μεγάλη βλάβη (B) (6mm πλάτος)	0 Nm 5 Nm 10 Nm	$1^{η}$ $2^{η}$ $3^{η}$ $4^{η}$ $5^{η}$	1 s 10 s

Όλα τα δεδομένα που ελήφθησαν εισήχθησαν σε ένα σύστημα διάγνωσης βλαβών (πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο με αυτόματο προσδιορισμό συνάφειας, MLP-ARD) προκειμένου αυτό να εκπαιδευτεί σε όλες της προηγούμενες καταστάσεις. Στη συνέχεια το σύστημα τροφοδοτήθηκε με τυχαία σήματα που αντιστοιχούσαν σε διαφορετικές βλάβες προκειμένου να διαπιστωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος διάγνωσης κατά περίπτωση για κάθε έναν από τους τέσσερις συνδυασμούς αριθμών και θέσεων επιταχυνσιομέτρων.



Σχήμα 1. Διαφορετικοί συνδυασμοί επιταχυνσιομέτρων: α) όλα τα επιταχυνσιόμετρα, β) μόνο τα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα, γ) μόνο τα τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα και δ) μόνο οι κατακόρυφοι άξονες των τριαξονικών επιταχυνσιομέτρων.

2.2. Σύστημα διάγνωσης της βλάβης

Τα σήματα δόνησης που καταγράφηκαν, διάρκειας 1 και 10s με συχνότητα δειγματοληψίας 65.536Hz, χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών που τροφοδότησαν το σύστημα. Πρόκειται για υψηλής τάξης στατιστικά στοιχεία τα οποία εξήχθησαν από τα σήματα δόνησης τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας (μετά από μετασχηματισμό Fourier). Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν 26 χαρακτηριστικές, οι 14 εκ των οποίων στο πεδίο του χρόνου και οι υπόλοιπες 12 στο πεδίο της συχνότητας (Lei et al., 2008; Moshou et al., 2010).

Το σύστημα διάγνωσης βασίστηκε σε ένα Bayesian πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο με αυτόματο προσδιορισμό συνάφειας (MLP-ARD) με ένα κρυφό επίπεδο τον 10 νευρώνων. Ο αριθμός των νευρώνων στο επίπεδο εισόδου ήταν ίσος με τον αριθμό των χαρακτηριστικών που επιλέχθηκαν (24 χαρακτηριστικές).

Για την εκπαίδευση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν οι χαρακτηριστικές από όλα τα σήματα δόνησης όλων των επιταχυνσιομέτρων οι οποίες τροφοδότησαν το σύστημα. Όλες οι χρησιμοποιούμενες χαρακτηριστικές παρείχαν στατιστικές πληροφορίες σχετικά με τη φύση των δεδομένων, και διαπιστώθηκε ότι ήταν αρκετά καλές για την ανίχνευση σφαλμάτων. Οι χαρακτηριστικές εξήχθησαν για όλες τις περιπτώσεις και αποτέλεσαν

είσοδο για το σύστημα διάγνωσης προκειμένου αυτό να εκπαιδευτεί. Το σύστημα εκπαιδεύτηκε σε όλες τις καταστάσεις, υγιής κατάσταση (G) και δύο βλάβες στο έδρανο No.1 (μικρή βλάβη (S) - πλάτος αυλακιού 3mm και μεγάλη βλάβη (B)- 6mm στον εσωτερικό δακτύλιο του εδράνου κύλισης) για δύο φορτία στην έξοδο (0 και 10Nm), για όλες τις στροφές στην είσοδο του κιβωτίου (730, 1370 και 2700rpm), για όλες τις σχέσεις του κιβωτίου και για δύο διάρκειες σημάτων (1 και 10s).

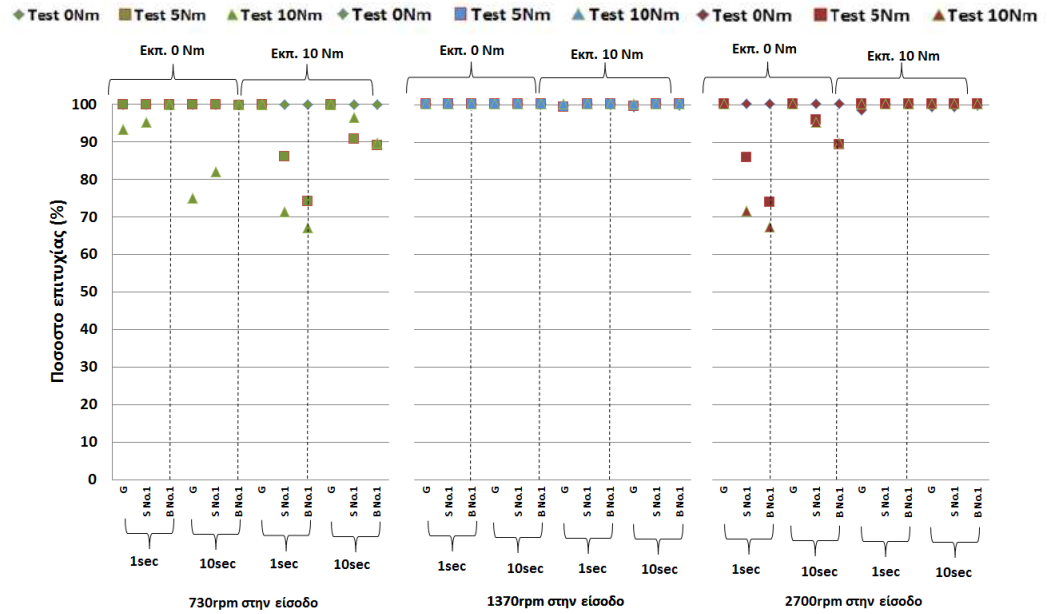
Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε τόσο για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών όσο και για το νευρωνικό δίκτυο ήταν γραμμένος σε Matlab. Όλες οι εκτελέσεις των σεναρίων που πραγματοποιήθηκαν έγιναν στον ίδιο σταθερό υπολογιστή με επεξεργαστή Intel Core i7, 2.93GHz και μνήμη 4 GB (Κατέρης, 2015).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Διερεύνηση της αποδοτικότητας του δικτύου MLP-ARD για επιλογή της 1ης σχέσης στο κιβώτιο με 730 - 1370 - 2700rpm στην είσοδο και εκπαίδευση στα 0 και 10Nm για σήματα διάρκειας 1s και 10s

Αρχικά πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της αποδοτικότητας του δικτύου MLP-ARD με επιλογή της 1ης σχέσης στο κιβώτιο, με 730 - 1370 - 2700rpm στην είσοδο και για εκπαίδευση του δικτύου σε συνθήκες 0 και 10Nm στην έξοδο του κιβωτίου για σήματα διάρκειας 1s και 10s. Στην ομάδα σχημάτων που ακολουθεί (Σχήμα 2 έως 5), η περίπτωση που δίνει τα μεγαλύτερα ποσοστά επιτυχίας στη διάγνωση είναι αυτή στην οποία χρησιμοποιούνται μόνο τα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα.

Με την χρήση **όλων** των επιταχυνσιομέτρων

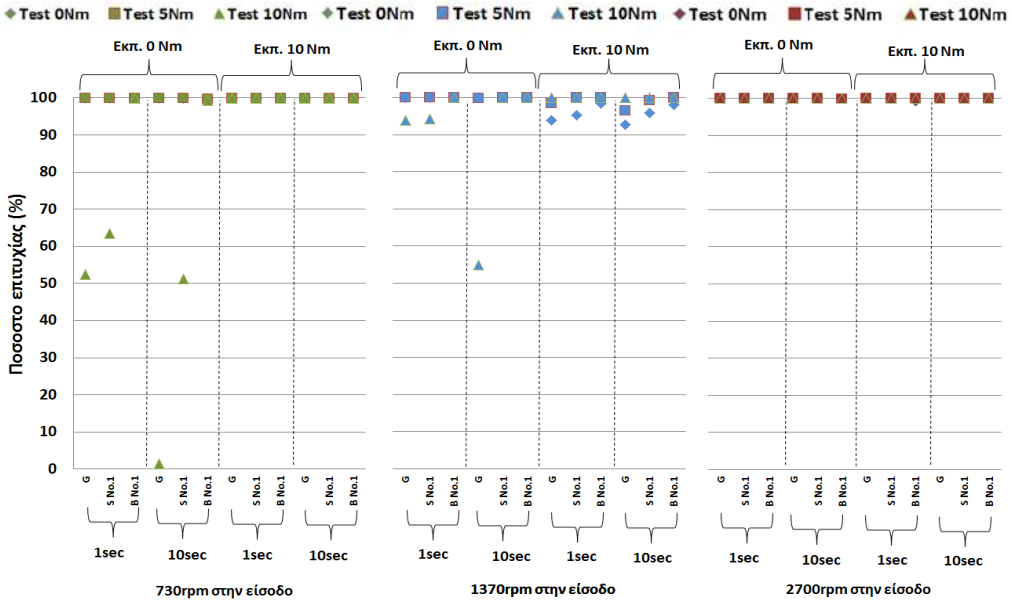


Σχήμα 2. Ποσοστά επιτυχίας διάγνωσης της κατάστασης για εκτέλεση MLP-ARD εκπαιδευμένου σε καταστάσεις φορτίου 0 και 10Nm στην έξοδο και για διαφορετικές στροφές στην εισόδου του κιβωτίου με χρήση **όλων** των επιταχυνσιομέτρων (G-Υγιή κατάσταση, S-Μικρή βλάβη, B-Μεγάλη βλάβη).

Ειδικά στην περίπτωση των 2700rpm τα ποσοστά επιτυχίας είναι 100%. Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και στην περίπτωση των 1370rpm για χρήση όλων των επιταχυνσιομέτρων. Αυτό πιθανολογείται ότι οφείλεται στη θέση όπου είναι τοποθετημένα τα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα επάνω στο κιβώτιο. Στις άλλες δύο περιπτώσεις τα χειρότερα

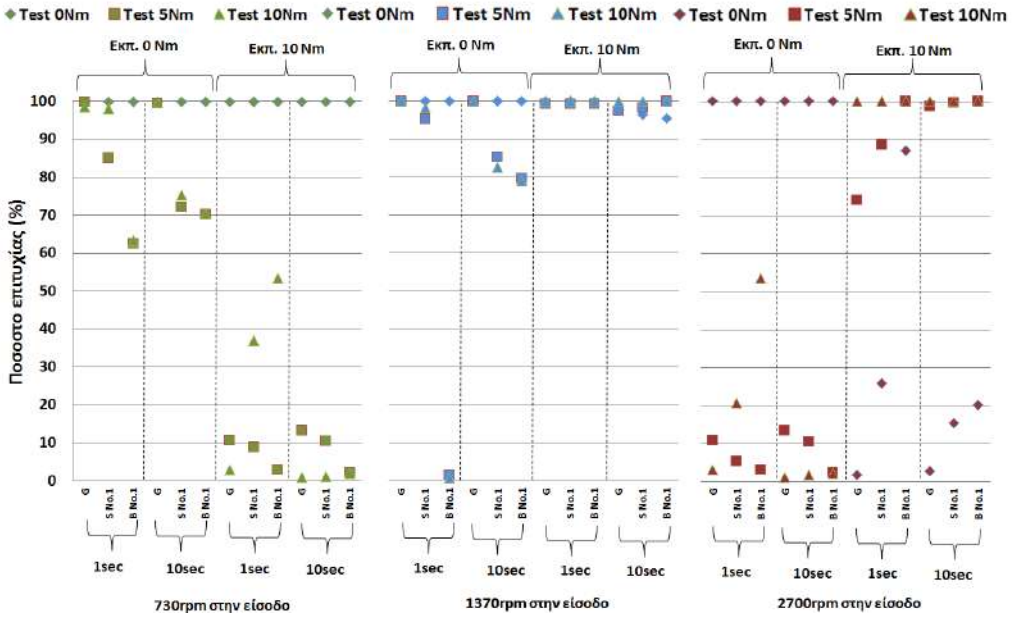
αποτελέσματα εμφανίζονται στην περίπτωση χρήσης μόνο των τριαξονικών επιταχυνσιομέτρων. Ένα άλλο σημείο που θα πρέπει να αναφερθεί είναι ότι το φορτίο στην έξοδο του κιβωτίου αποδεικνύεται ότι επηρεάζει το ποσοστό επιτυχίας του MLP-ARD. Κάτι όμως που σχετίζεται και με τις στροφές στην είσοδο. Συγκεκριμένα ενώ στην περίπτωση των τριαξονικών επιταχυνσιομέτρων στις 730rpm, στο φορτίο των 10Nm τα ποσοστά ανεξαρτήτως σήματος (1 ή 10s) είναι χαμηλά στην περίπτωση των 2700rpm με φορτίο 0Nm το φαινόμενο αντιστρέφεται.

Με τη χρήση **μόνο των μονοαξονικών** επιταχυνσιομέτρων



Σχήμα 3. Ποσοστά επιτυχίας διάγνωσης της κατάστασης για εκτέλεση MLP-ARD εκπαιδευμένου σε καταστάσεις φορτίου 0 και 10Nm στην έξοδο και για διαφορετικές στροφές στην εισόδου του κιβωτίου με χρήση **μόνο των μονοαξονικών** επιταχυνσιομέτρων (G-Υγιή κατάσταση, S-Μικρή βλάβη, B-Μεγάλη βλάβη).

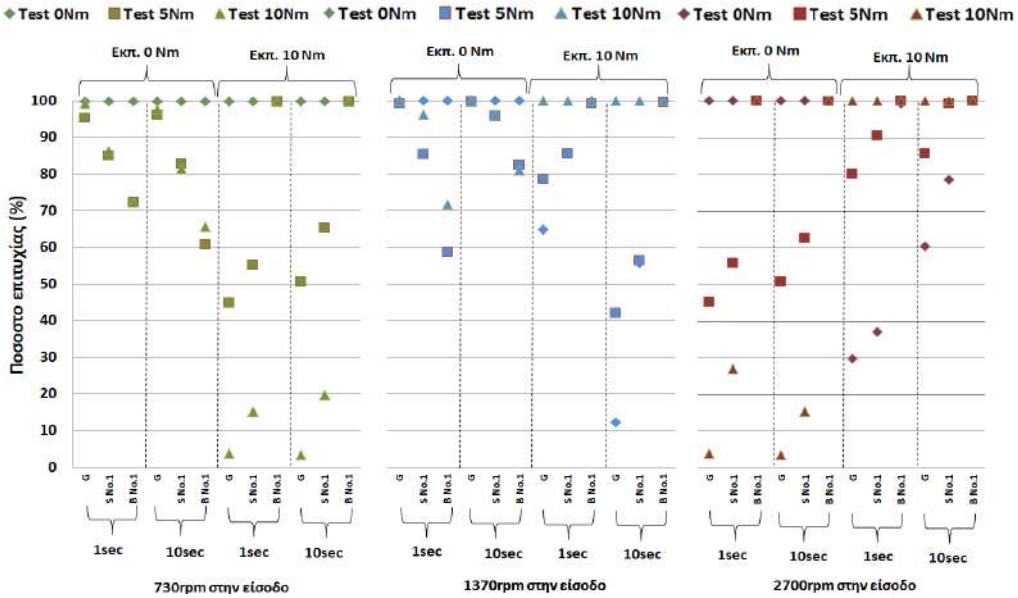
Με τη χρήση **μόνο των τριαξονικών** επιταχυνσιομέτρων



Σχήμα 4. Ποσοστά επιτυχίας διάγνωσης της κατάστασης για εκτέλεση MLP-ARD εκπαιδευμένου σε καταστάσεις φορτίου 0 και 10Nm στην έξοδο και για διαφορετικές

στροφές στην εισόδου του κιβωτίου με χρήση **μόνο των τριαξονικών** επιταχυνσιομέτρων (G-Υγιή κατάσταση, S-Μικρή βλάβη, B-Μεγάλη βλάβη).

Με τη χρήση **μόνο του κατακόρυφου άξονα των τριαξονικών** επιταχυνσιομέτρων

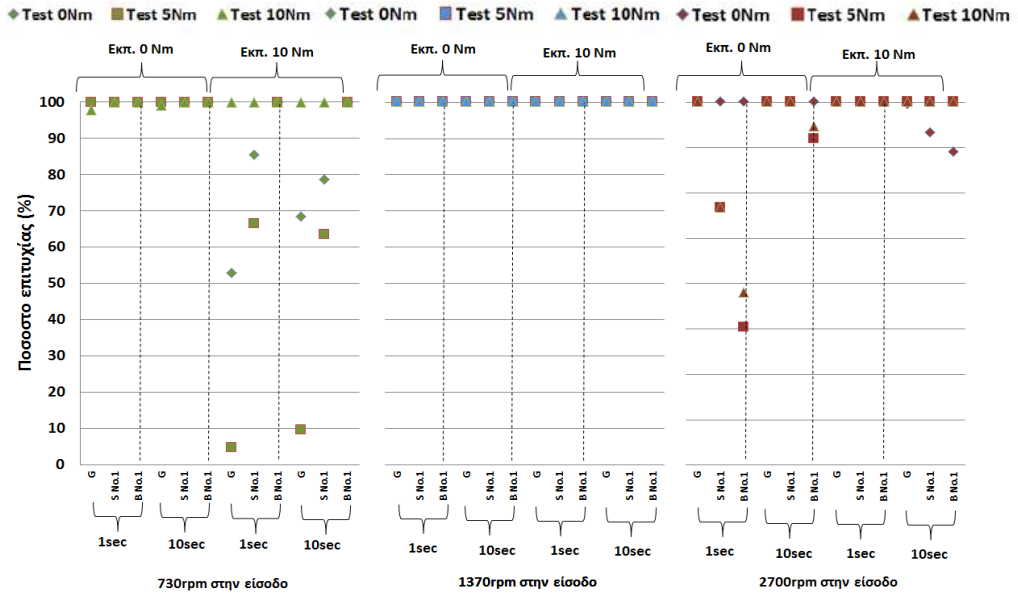


Σχήμα 5. Ποσοστά επιτυχίας διάγνωσης της κατάστασης για εκτέλεση MLP-ARD εκπαιδευμένου σε καταστάσεις φορτίου 0 και 10Nm στην έξοδο και για διαφορετικές στροφές στην εισόδου του κιβωτίου με χρήση **μόνο του κατακόρυφου άξονα των τριαξονικών** επιταχυνσιομέτρων (G-Υγιή κατάσταση, S-Μικρή βλάβη, B-Μεγάλη βλάβη).

4.2. Διερεύνηση της αποδοτικότητας του δικτύου MLP-ARD για επιλογή της $5^{ης}$ σχέσης στο κιβώτιο με 730 -1370 - 2700rpm στην είσοδο και εκπαίδευση στα 0 και 10Nm για σήματα διάρκειας 1s και 10s.

Στην περίπτωση επιλογής της $5^{ης}$ σχέσης τα συμπεράσματα είναι περίπου ίδια με την περίπτωση της $1^{ης}$ σχέσης (Σχήμα 6 έως 9).

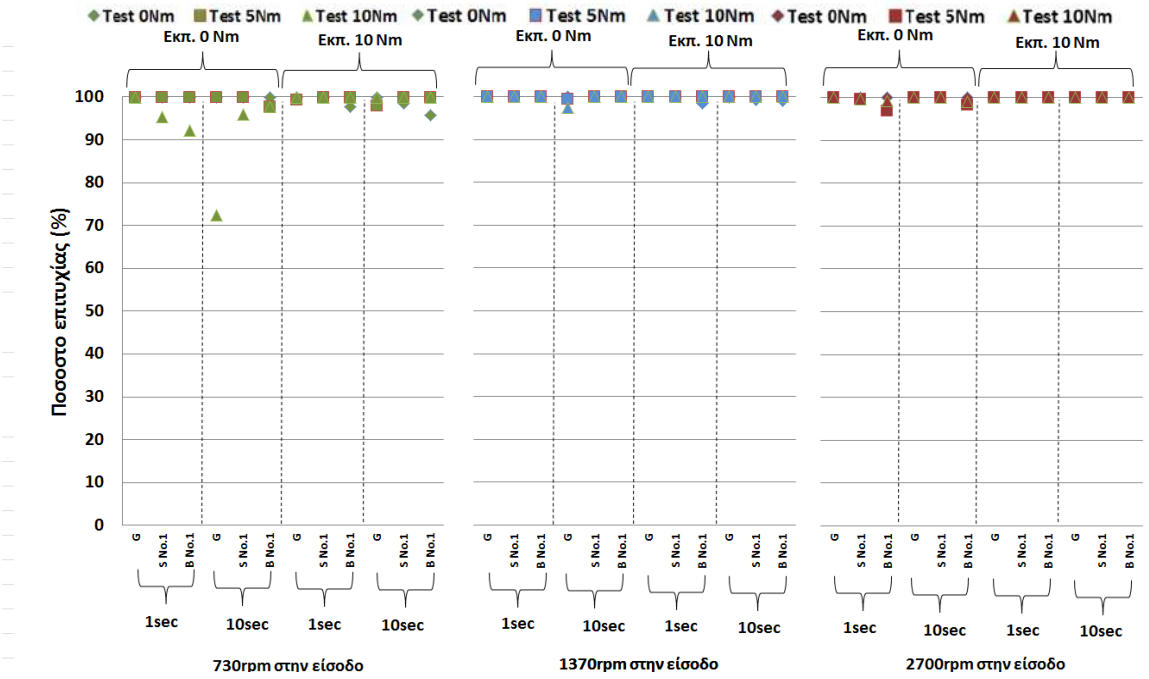
Με την χρήση **όλων** των επιταχυνσιομέτρων



Σχήμα 6. Ποσοστά επιτυχίας διάγνωσης της κατάστασης για εκτέλεση MLP-ARD εκπαιδευμένου σε καταστάσεις φορτίου 0 και 10Nm στην έξοδο και για διαφορετικές

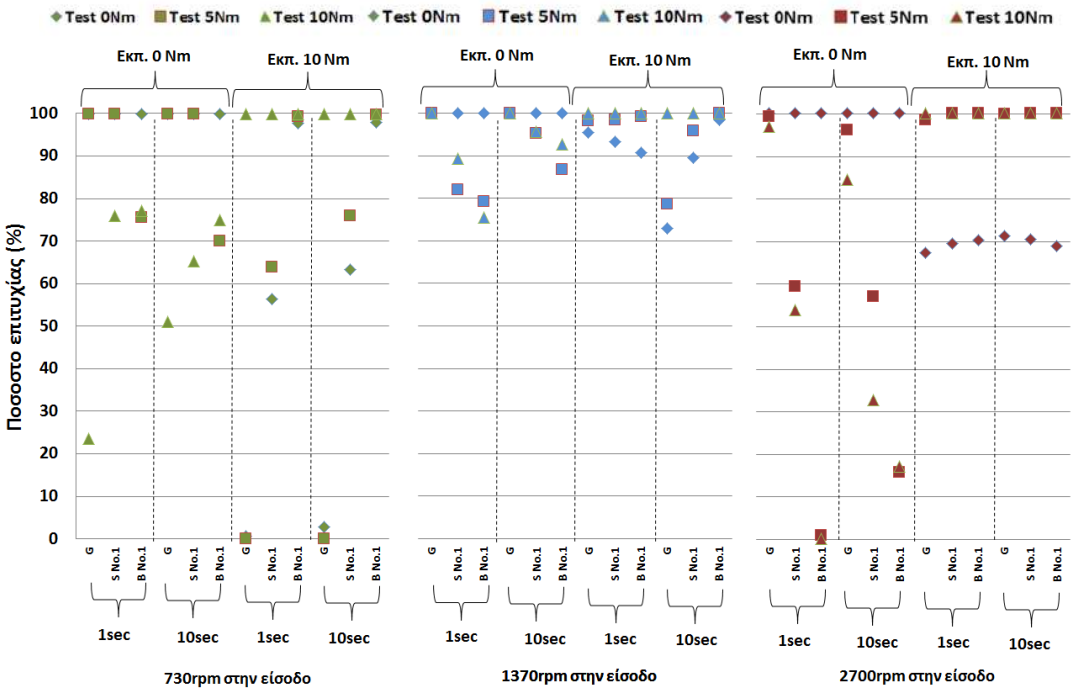
στροφές στην εισόδου του κιβωτίου με χρήση **όλων** των επιταχυνσιομέτρων (επιλογή 5ης σχέσης) (G-Υγιή κατάσταση, S-Μικρή βλάβη, B-Μεγάλη βλάβη).

Με τη χρήση **μόνο των μονοαξονικών** επιταχυνσιομέτρων



Σχήμα 7. Ποσοστά επιτυχίας διάγνωσης της κατάστασης για εκτέλεση MLP-ARD εκπαιδευμένου σε καταστάσεις φορτίου 0 και 10Nm στην έξοδο και για διαφορετικές στροφές στην εισόδου του κιβωτίου με χρήση **μόνο των μονοαξονικών** επιταχυνσιομέτρων (επιλογή 5ης σχέσης) (G-Υγιή κατάσταση, S-Μικρή βλάβη, B-Μεγάλη βλάβη).

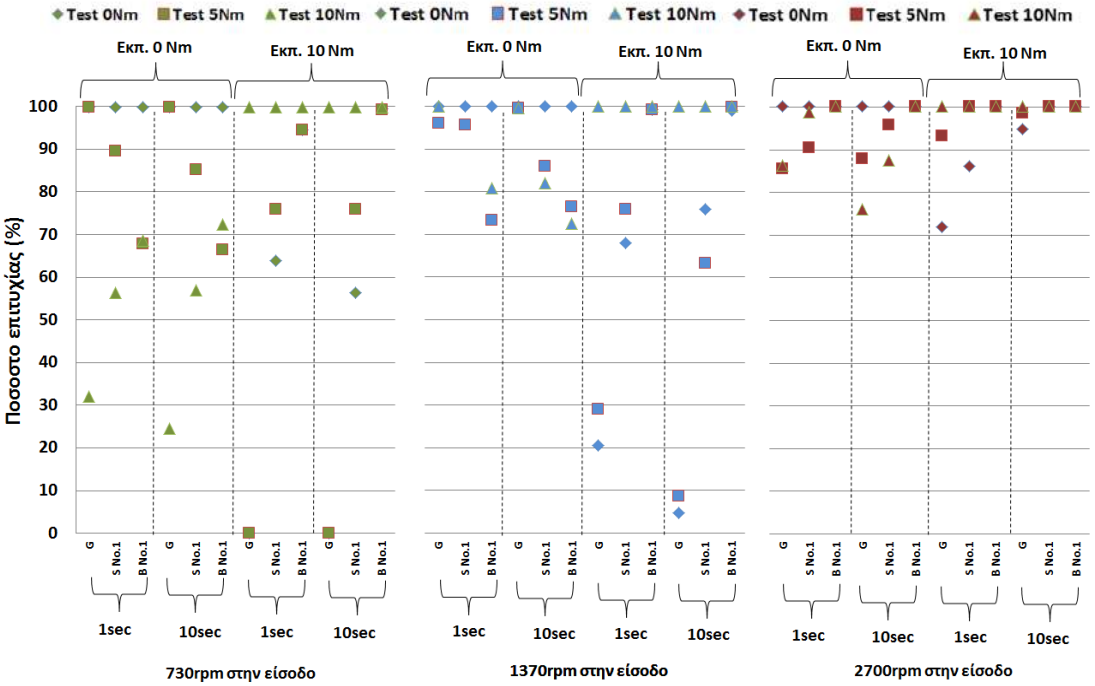
Με τη χρήση **μόνο των τριαξονικών** επιταχυνσιομέτρων



Σχήμα 8. Ποσοστά επιτυχίας διάγνωσης της κατάστασης για εκτέλεση MLP-ARD εκπαιδευμένου σε καταστάσεις φορτίου 0 και 10Nm στην έξοδο και για διαφορετικές

στροφές στην εισόδου του κιβωτίου με χρήση **μόνο των τριαξονικών** επιταχυνσιομέτρων (επιλογή 5ης σχέσης) (G-Υγιή κατάσταση, S-Μικρή βλάβη, B-Μεγάλη βλάβη).

Με τη χρήση **μόνο του κατακόρυφου άξονα των τριαξονικών** επιταχυνσιομέτρων



Σχήμα 9. Ποσοστά επιτυχίας διάγνωσης της κατάστασης για εκτέλεση MLP-ARD εκπαιδευμένου σε καταστάσεις φορτίου 0 και 10Nm στην έξοδο και για διαφορετικές στροφές στην εισόδου του κιβωτίου με χρήση **μόνο του κατακόρυφου άξονα των τριαξονικών** επιταχυνσιομέτρων (επιλογή 5ης σχέσης) (G-Υγιή κατάσταση, S-Μικρή βλάβη, B-Μεγάλη βλάβη).

Και εδώ η περίπτωση που δίνει τα μεγαλύτερα ποσοστά επιτυχίας στη διάγνωση είναι αυτή στην οποία χρησιμοποιούνται μόνο τα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα. Στις 1370 και 2700rpm τα ποσοστά επιτυχίας είναι περίπου 100%. Κάτι που συμβαίνει και στην περίπτωση των 1370rpm για χρήση όλων των επιταχυνσιομέτρων.

Τα χειρότερα αποτελέσματα εμφανίζονται στις άλλες δύο περιπτώσεις. Και εδώ το φορτίο στην έξοδο του κιβωτίου αποδεικνύεται ότι επηρεάζει το ποσοστό επιτυχίας του MLP-ARD. Στην περίπτωση χρήσης μόνο των τριαξονικών επιταχυνσιομέτρων τα υψηλά ποσοστά επιτυχίας εμφανίζονται στο μεγάλο φορτίο 10Nm ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνο ο κάθετος άξονας των τριαξονικών επιταχυνσιομέτρων το φαινόμενο αντιστρέφεται.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η λήψη δεδομένων από μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα δίνει σε όλες τις περιπτώσεις τα υψηλότερα ποσοστά επιτυχούς διάγνωσης σε σύγκριση με τους άλλους τρείς συνδυασμούς.

Επίσης το φορτίο στην έξοδο του κιβωτίου αποδεικνύεται ότι επηρεάζει το ποσοστό επιτυχίας του MLP-ARD. Κάτι όμως που σχετίζεται και με τις στροφές στην είσοδο. Συγκεκριμένα στην περίπτωση των μονοαξονικών επιταχυνσιομέτρων η καλύτερη απόδοση

εμφανίζεται στην περίπτωση που το φορτίο στην έξοδο είναι το μεγαλύτερο (10Nm). Κάτι που ισχύει τόσο για την $1^{η}$ όσο και για την $5^{η}$ σχέση στο κιβώτιο.

Η περίπτωση χρήσης των δεδομένων, για την τροφοδοσία του συστήματος, που προέρχονται μόνο από τον κατακόρυφο άξονας των τριαξονικών επιταχυνσιομέτρων δίνει σε όλες τις περιπτώσεις (σενάρια) διάγνωσης τα χαμηλότερα ποσοστά διάγνωσης επιβεβαιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την αρχική υπόνοια ότι κάτι τέτοιο οφείλεται στις θέσεις που αυτά έχουν τοποθετηθεί. Τα αποτελέσματα αυτά εμφανίζονται ανεξαρτήτως του φορτίου στην έξοδο του κιβωτίου και των στροφών στην είσοδο του κιβωτίου.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Flynn, E. B. and Todd, M. D., 2010. *A bayesian approach to optimal sensor placement for structural health monitoring with application to active sensing,* Renewable and Sustainable Energy Review, 24, 891–903.

Hameed, Z., Hong, Y. S., Cho, Y. M., Ahn, S. H. and Song, C. K., 2009. *Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms - a review*, Renewable and Sustainable Energy Review, 13, 1–39.

Guratzsch, R. F. and Mahadevan, S., 2006. *Sensor placement design for SHM under uncertainty*, in Third European Workshop on Structural Health Monitoring, Granada, Spain, July 5–7.

Κατέρης, Δ., Μόσχου, Δ., Γράβαλος, Ι., Γιαλαμάς, Θ. και Ξυραδάκης, Π., 2013. *Σύστημα διάγνωσης βλαβών σε μηχανικό κιβώτιο σχέσεων με τη χρήση πολυστρωματικών νευρωνικών δικτύων,* Παρακτικά $8^{ου}$ Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής (Ε.Γ.Μ.Ε.) 25-26 Σεπτεμβρίου 2013, Βόλος, 2-6.

Κατέρης, Δ., 2015. *Ευφυές σύστημα για την διάγνωση βλαβών στα μηχανικά υποσυστήματα του γεωργικού ελκυστήρα.* Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ., σελ. 357.

Κατέρης, Δ., Μόσχου, Δ., Γράβαλος, Ι., Γιαλαμάς, Θ. και Ξυραδάκης, Π., 2015. *Βελτίωση του χρόνου διάγνωσης βλαβών ενός ευφυούς συστήματος,* Πρακτικά $9^{ου}$ Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής (Ε.Γ.Μ.Ε.) 8-9 Οκτωβρίου 2015, Θεσσαλονίκη, 285-293.

Lei, Y., He, Z., Zi, Y., 2008. *A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery,* Expert Systems and Applications, 36, 1593-1600

Liu, W., Gao, W., Sun, Y. and Xu, M., 2008. *Optimal sensor placement for spatial lattice structure based on genetic algorithms, journal of sound and vibration,* Engineering Structures, 317, 175–189.

Moshou, D., Kateris, D., Gravalos,I., Loutridis, S., Sawalhi, N., Gialamas, Th., Xyradakis, P. & Tsiropoulos, Z., 2010. *Determination of fault topology in mechanical subsystems of agricultural machinery based on feature fusion and neural networks*. 4th International Conference TAE 2010, Czech University of Life Sciences Prague, 448-453.

Staszewski, W.J., 2002. *Intelligent signal processing for damage detection in composite materials,* Composites Science and Technology, 62, 941–950.

Worden, K. and Burrows, A. P., 2001. *Burrows, optimal sensor placement for fault detection,* Engineering Structures, 23, 885–901.

TERES – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΤΩΝ ΕΠΟΧΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΤΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ

Χ. Καβαλάρης[1]✉, Α. Μπαλαφούτης[2], Μ. Μωραΐτης[2], Γ. Παπασταματιου[3], Ε. Τσιατουρας[3], Σ. Φουντάς[2]

[1]Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα ΓΦΠΑΠ, Οδός Φυτόκου 38446, Βόλος

[2]Γεωπονικο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ & ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα

[3] Ειδική Υπηρεσία Εφαρμογής Προγράμματος Αγροτικής Ανάπτυξης 2014-2020, Λ. Αθηνών 58, 10441, Αθήνα

✉chkaval@uth.gr

Περίληψη

Η εκτίμηση της απαραίτητης ισχύος των γεωργικών ελκυστήρων αποτελεί ένα ιδιαίτερα δύσκολο εγχείρημα καθότι οι μεθοδολογίες που προτείνονται απαιτούν τη συγκέντρωση στοιχείων δύσκολων να ανακτηθούν. Παράδειγμα αποτελεί το κόστος εγκαιρότητας των επεμβάσεων που προϋποθέτει τη συγκέντρωση δεδομένων για το είδος της καλλιέργειας, την ποικιλία, την περιοχή και τις ημέρες υστέρησης κάθε εργασίας. Στη παρούσα μελέτη αναπτύχθηκε μια νέα μεθοδολογία και σχεδιάστηκε λογισμικό (TEReS) για την εκτίμηση της απαραίτητης ισχύος των ελκυστήρων η οποία βασίζεται στην κάλυψη των πραγματικών ενεργειακών αναγκών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η δοκιμή του λογισμικού με στοιχεία από πραγματικές γεωργικές εκμεταλλεύσεις απέδειξε ότι είναι σταθερό και αξιόπιστο. Η ισχύς που υπολογίστηκε με τη νέα μεθοδολογία κυμαίνονταν μεταξύ 0.28-0.62 Hp/στρ., ενώ με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται σήμερα είναι μεταξύ 0,46-4,54 Hp/στρ.

Λέξεις κλειδιά: ισχύς γεωργικού ελκυστήρα, εκτίμηση, διαχείριση γεωργικού εξοπλισμού

TEReS - TEMPORAL ENERGY REQUIREMENT SATISFACTION METHODOLOGY AND SOFTWARE DEVELOPMENT FOR ESTIMATING THE NECESSARY FARM POWER REQUIREMENTS OF AGRICULTURAL TRACTORS

C. Cavalaris[1]✉, A. Balafoutis[2], M. Moraitis[2], G. Papastamatiou[3], E. Tsiatouras[3], S. Fountas[2]

[1]University of Thessaly, DACPRE, Fytokou str, 38446 Volos, Greece

[2]Agricultural University of Athens, DNRAE, Iera Odos 75, 11855, Athens, Greece

[3]Hellenic Ministry of Agriculture, Leoforos Athinon 58, 10441, Athens, Greece

✉chkaval@uth.gr

ABSTRACT

Estimation of the appropriate farm tractor power is a particular complex undertaking, as most of the presented methodologies require the compilation of rare and often nonexistent information. For example, timeliness cost estimation requires detailed information of how crop, variety, region and each day of delay for every field task affect the crop production. On the present study, a new methodology was designed and appropriate software (TEReS) was developed in order to estimate the necessary tractor power. The methodology is based on the satisfaction of the temporal energy requirements of the farm and it was evaluated with data from real farms and proved to be stable and reliable. The tractor power calculated by TEReS is between 2.8-.6,2 Hp/ha, while the system already in use give 4,6-45,4 Hp/ha.

Keywords: Farm tractor power, estimation, farm machinery management

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα μελέτη επιχειρεί να αναπτύξει ένα κοινό σύστημα εκτίμησης της απαραίτητης ισχύος των γεωργικών ελκυστήρων με στόχο την παροχή ανάλογων οικονομικών ενισχύσεων στα πλαίσια των σχεδίων βελτίωσης των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Το ΥΠΑΑΤ μέχρι σήμερα πρότεινε τη μέθοδο του αρίστου κόστους (Σούτερ 1972, Τσατσαρέλης 2006). Το πρόβλημα με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία έγκειται στο γεγονός ότι πολύ σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της ισχύος του ελκυστήρα κατέχει το κόστος της εγκαιρότητας των επεμβάσεων. Το κόστος αυτό καθορίζεται από δύο ουσιαστικά παραμέτρους: (1) Την αναμενόμενη μείωση της παραγωγής από την μη έγκαιρη εκτέλεση μιας εργασίας και (2) την αξία του προϊόντος η οποία καθορίζει και την οικονομική ζημιά. Για τη πρώτη παράμετρο βασική προϋπόθεση είναι να είναι γνωστό το ποσοστό απώλειας της παραγωγής για κάθε καλλιέργεια, ποικιλία, περιβάλλον, εργασία και ημέρα καθυστέρησης. Όπως γίνεται κατανοητό, τέτοια στοιχεία είναι πολύ δύσκολο να υπάρξουν καθότι θα απαιτούνταν μεγάλος αριθμός πειραμάτων που να καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις. Παρόλο που προτείνονται κάποιοι συντελεστές στη βιβλιογραφία (Hunt, 1995, ASABE Standards 496.3 2006, Τσατσαρέλης 2006), αυτοί είναι ενδεικτικοί και ανεπαρκείς για να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικές συνθήκες. Η δεύτερη παράμετρος, η αξία της καλλιέργειας, μπορεί να έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην τιμή της ισχύος που υπολογίζεται καθώς επιβαρύνει το κόστος της εγκαιρότητας. Μια καλλιέργεια με υψηλή τιμή προϊόντος (π.χ. πατάτα, κηπευτικά, αρωματικά) οδηγεί σε ένα υπέρμετρο κόστος επιβάρυνσης από την μη έγκαιρη εκτέλεση των εργασιών, προϋποθέτοντας γεωργικό ελκυστήρα πολύ μεγάλης ισχύος. Επίσης, οι ίδιες οι τιμές παρουσιάζουν διακυμάνσεις με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται η εκτίμηση μια σταθερής ισχύος για το γεωργικό ελκυστήρα.

Στην παρούσα μελέτη ακολουθείται μια εναλλακτική προσέγγιση η οποία δίνει έμφαση στην κάλυψη των πραγματικών αναγκών σε ισχύ των γεωργικών εκμεταλλεύσεων μέσα από την εκτίμηση των εποχικών ενεργειακών απαιτήσεων και το διαθέσιμο χρονικό διάστημα για την εξασφάλιση αυτών. Λόγω περιορισμού χώρου, του μεγάλου πλήθους των στοιχείων και της συνθετότητας της μεθοδολογίας, στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι γενικές αρχές της μεθόδου και γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση ενδεικτικών αποτελεσμάτων.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Δύο επιλογές προτάθηκαν με σκοπό η ισχύς του ελκυστήρα να καλύπτει τις εποχικές ενεργειακές ανάγκες που σχετίζονται με τις εργασίες που εκτελούνται σε κάθε καλλιέργεια.

α) Να επιτραπεί στους παραγωγούς/μελετητές να καταγράφουν τις εργασίες που θα πρέπει να καλύψουν με ελκυστήρα. Η προσέγγιση αυτή είναι η πλέον ακριβής με την προϋπόθεση ότι γίνεται ειλικρινής καταγραφή των απαραίτητων εργασιών. Στη περίπτωση όμως που χρησιμοποιείται για τη παροχή επιδότησης αγοράς γ.ε., εμπεριέχει τον κίνδυνο της εσκεμμένης δήλωσης πολλών εργασιών σε σύντομα χρονικά διαστήματα.

β) Για κάθε καλλιέργεια, να γίνει εκτίμηση των «τυπικών εργασιών» με γ.ε. Η προσέγγιση αυτή εμπεριέχει τη δυσκολία της εκτίμησης των κοινών εργασιών για κάθε καλλιέργεια. Οι τεχνικές μπορεί να διαφέρουν μεταξύ περιοχών, αλλά και μεταξύ γεωργικών εκμεταλλεύσεων λόγω διαφορετικής διάρθρωσης και υποδομής. Εξασφαλίζει ωστόσο έναν γενικό και ενιαίο τρόπο εκτίμησης των ενεργειακών απαιτήσεων και δεν επιτρέπει την διαστρέβλωση αυτών. Έτσι, επιλέχθηκε η δεύτερη στρατηγική, και έγινε καταγραφή των εργασιών κάθε καλλιέργειας με την μορφή «Τυπικών ημερολογίων εργασιών».

2.1 Τυπικά ημερολόγια καλλιεργειών

Αρχικά, έγινε διάκριση 111 καλλιεργειών του καταλόγου των τυπικών αποδόσεων των καλλιεργειών που είναι καταγεγραμμένες στο Πληροφοριακό Σύστημα Κρατικών Ενισχύσεων. Οι καλλιέργειες χαρακτηρίστηκαν ως μονοετείς και πολυετείς και ως αροτριαίες, δενδροκομικές, αμπελουργικές, κηπευτικές και θερμοκηπίου. Στη συνέχεια έγιναν τηλεφωνικές συνεντεύξεις με παραγωγούς από όλη τη χώρα και αναδρομή σε στοιχεία από το διαδίκτυο για να καταγραφούν οι εργασίες που εκτελούνται σε κάθε καλλιέργεια. Έγιναν συνολικά 536 τηλεφωνικές συνεντεύξεις παραγωγών. Από το διαδίκτυο χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι ιστότοποι του gaiaΕΠΙΧΕΙΡΕΙΝ, ΑΓΡΟΣΥΜΒΟΥΛΟΣ και SYMAGRO. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές (Βασιλακάκης και Θεριός 2006, Βασιλακάκης 2006, Γαλανοπούλου – Σενδουκά 2002, Δαλιάνης 1999, Κατσιώτης και Χατζοπούλου 2010, Ποντίκης 1990, Χα & Πετρόπουλος, 2014). Τέλος, έγιναν επαφές με Καθηγητές στα γνωστικά αντικείμενα της Γεωργίας, Δενδροκομίας, Λαχανοκομίας και Αρωματικών Φυτών για συλλογή πληροφοριών για τη τεχνική των καλλιεργειών. Έτσι, συντάχθηκε έκθεση με τις καταγεγραμμένες εργασίες για κάθε καλλιέργεια του καταλόγου.

Στη συνέχεια έγινε έλεγχος των στοιχείων της έκθεσης για την ορθότητα τους και δημιουργήθηκε για κάθε καλλιέργεια το «Τυπικό ημερολόγιο» που περιλαμβάνει την αποτύπωση της κοινής καλλιεργητικής πρακτικής της καλλιέργειας, ανά δεκαήμερο και για όλη τη διάρκεια του έτους, όπου καταγράφονται το πλήθος των εργασιών. Για εργασίες που παρατείνονται πέραν του δεκαημέρου χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές (π.χ. 0,7 + 0,3) ανάλογα με την κατανομή στα δεκαήμερα. Δεν καταγράφονταν οι χειρονακτικές εργασίες και οι εργασίες που εκτελούνται με άλλα αυτοκινούμενα μηχανήματα (π.χ. συγκομιδή).

Για τις πολυετείς καλλιέργειες (πχ αμπέλι, οπωρώνες) με διάρκεια μεγαλύτερη των 6 ετών δεν λήφθηκε υπόψη η αρχική κατεργασία του εδάφους για την εγκατάσταση της καλλιέργειας, διότι δε δικαιολογείται οικονομικά η αγορά ελκυστήρα για εκτέλεση αυτών των εργασιών, αλλά η ενοικίαση. Στις καλλιέργειες αυτές, όπου η κατεργασία του εδάφους και η σπορά πραγματοποιούνται μια φορά κατά την εγκατάσταση της καλλιέργειας, για να αποφευχθεί η επιβάρυνση του συστήματος με σωρευμένες ενεργειακές απαιτήσεις σε ένα έτος, γίνεται η παραδοχή ότι η έκταση μοιράζεται σε τόσα τμήματα, όση είναι και η διάρκεια της καλλιέργειας και η εγκατάσταση στο κάθε τμήμα πραγματοποιείται σε διαδοχικά έτη, η οποία πρακτική είναι η ενδεδειγμένη για ένα σύστημα αμειψισποράς.

2.2 Εκτίμηση της ενέργειας των καλλιεργητικών εργασιών

Ανάλογα με τον τύπο του παρελκόμενου για κάθε εργασία εκτιμήθηκε η ισχύς στην έλξη, η ισχύς στο δυναμοδότη και η ισχύς στη κύλιση. Για όλα τα μηχανήματα τέθηκε μια «Τυπική ταχύτητα εργασίας» και μια «Ελάχιστη ταχύτητα εργασίας». Επίσης, για τα παρελκόμενα που εργάζονται κατά πλάτος τέθηκε ένα «Τυπικό πλάτος εργασίας» και ένα «Ελάχιστο πλάτος εργασίας». Το τυπικό και το ελάχιστο πλάτος επιλέχθηκαν ανάλογα και με τον τύπο καλλιέργειας. Για παράδειγμα το τυπικό πλάτος εργασίας ενός ψεκαστήρα για αροτριαίες καλλιέργειες θεωρήθηκε ίσο με 12m, για τις δενδροκομικές 5m και για τις αμπελουργικές 1,5m. Η τυπική ταχύτητα και το τυπικό πλάτος εργασίας είναι μείζονος σημασίας καθότι το τελικό ζητούμενο είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια η οποία αποτελεί συνάρτηση της ισχύος και του χρόνου. Μεγαλύτερη ταχύτητα και πλάτος εργασίας σημαίνει μεγαλύτερη απαιτούμενη ισχύς, για μικρότερο ωστόσο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα η κατανάλωση ενέργειας να μην επηρεάζεται. Για τις εργασίες κατεργασίας του εδάφους, πολλές φορές η αύξηση της ταχύτητας δεν οδηγεί σε αναλογική αύξηση της ισχύος, ωστόσο η επίδραση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική στα τυπικά εύρη ταχυτήτων και παραβλέφθηκε στη

παρούσα μελέτη. Η ελάχιστη ταχύτητα και πλάτος εργασίας για κάθε παρελκόμενο τέθηκε για την εκτίμηση της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος του ελκυστήρα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από την ελληνική αγορά γεωργικών μηχανημάτων. Για την άροση για παράδειγμα το ελάχιστο πλάτος του αρότρου τέθηκε στα 0,6m που αφορά ένα δίυνο άροτρο με υνιά 13 ιντσών και μια ελάχιστη ταχύτητα άροσης 4 km/h. Επίσης, για τα μηχανήματα κατεργασίας εδάφους τέθηκε ένα τυπικό βάθος κατεργασίας. Για την άροση για παράδειγμα τα τυπικό βάθος τέθηκε στα 30cm (τυπικό εύρος 25-35cm).

Για τα μηχανήματα που αξιοποιούν την έλξη υπολογίστηκε αρχικά η αντίσταση έλξης (D) (σε N) από τη σχέση (1) (ASABE D497.5 FEB2006)

$$D = F_i[A + B(S) + C(S)^2]WT$$

Οι παράμετροι του εδάφους (Fi) και του μηχανήματος (A,B,C) βρίσκονται από αντίστοιχο πίνακα των ASABE Standards (ASABE D497.5 FEB2006). Επιλέχθηκαν οι συντελεστές για το βαρύ τύπου εδάφους έτσι ώστε να καλυφθούν και οι πλέον αντίξοες συνθήκες. Το (S) είναι η ταχύτητα εργασίας (σε km/h) και (W) το τυπικό πλάτος εργασίας (σε m). Το (T) υποδηλώνει το βάθος εργασίας (σε cm) και για τα μηχανήματα επιφανειακής εργασίας (π.χ. σπαρτικές, σκαλιστήρια) λαμβάνει τη τιμή 1. Το γινόμενο της ελκτικής δύναμης με την ταχύτητα κίνησης δίνει την απορροφόμενη ισχύ στην έλξη. Η ισχύς στην έλξη ανάγεται σε ισοδύναμη ισχύ στο PTO με βάση του συντελεστές μετάδοσης Kepner (Τσατσαρέλης 2006).

Για τα ισχυοδοτούμενα από το PTO μηχανήματα η απορροφόμενη ισχύς P_{PTO} (kW) υπολογίστηκε από τη σχέση (Τσατσαρέλης 2006):

$$P_{PTO} = a + bw + cF$$

το w αναφέρεται στο τυπικό πλάτος εργασίας και το F στον τυπικό ρυθμό τροφοδοσίας για τα μηχανήματα που το έργο τους αφορά επεξεργασία υλικού (πχ ο ρυθμός τροφοδοσίας των χορτοδετικων μηχανών μικρών ορθογωνικών δεμάτων τέθηκε στους 7,6t/h). Οι συντελεστές a,b και c δίδονται από τον Τσατσαρέλη (2006).

Για τα παρελκόμενα που δεν χρησιμοποιούν ισχύ έλξης αλλά ο ελκυστήρας τα μεταφέρει στον αγρό (π.χ. ψεκαστικό, λιπασματοδιανομέας, κ.α.) συνεκτιμήθηκε και η αντίσταση κύλισης $D_{κυλ}$ (kN) στο χωράφι και χρησιμοποιήθηκε η σχέση (ASABE D497.5 FEB2006):

$$D_{κυλ} = W \cdot \frac{1}{B_n} + 0.04 + \frac{0.5sl}{\sqrt{B_n}}$$

όπου W το βάρος των μηχανημάτων (συμπεριλαμβανομένου του ελκυστήρα), Bn αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο εδάφους και που στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε ανάλογα με το αν η εργασία εκτελείται σε συμπαγές ή σε πρόσφατα κατεργασμένο έδαφος και sl η ολίσθηση η οποία επιλέχθηκε ανάλογα με τη φόρτιση του ελκυστήρα. Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιήθηκε επίσης για την εκτίμηση της ενέργειας κατά τις μεταφορές και μετακινήσεις, όπου υπολογίστηκε το πλήθος των μετακινήσεων για την ολοκλήρωση των εργασιών τόσο για τα τυπικά όσο και για τα ελάχιστα πλάτη και ταχύτητες εργασίας των μηχανημάτων (ανά στρέμμα). Στη συνέχεια υπολογίστηκε η συνολική διανυθείσα διαδρομή θεωρώντας μια μέση απόσταση μετακίνησης 3km. Ο συντελεστής B_n λήφθηκε για συμπαγές έδαφος. Το τυπικό βάρος του ελκυστήρα για τις αροτριαίες καλλιέργειες λήφθηκε ως 4t, για τις δενδροκομικές 2t, για τις αμπελουργικές 1,5t και για τις κηπευτικές 1t, ενώ προστέθηκε το τυπικό βάρος των παρελκομένων.

Για τις μεταφορές γεωργικών εφοδίων και παραγωγής (βάσει προϊόντος), εκτιμήθηκε το βάρος του φορτίου στη μια διαδρομή και η μετακίνηση μόνο των μηχανημάτων στην δεύτερη. Το φορτίο υπολογίστηκε ως 4 φορές το βάρος των μηχανημάτων. Ανάλογα με τη

τυπική απόδοση της καλλιέργειας εκτιμήθηκε το απαραίτητο πλήθος διαδρομών, η διανυθείσα διαδρομή και εν τέλει η απαραίτητη ισχύς και η κατανάλωση ενέργειας.

Και οι τρεις μορφές ισχύος που υπολογίστηκαν (έλξη, δυναμοδότη και κύλισης) ανήχθησαν σε ισχύ κινητήρα του ελκυστήρα χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους συντελεστές μετάδοσης (Τσατσαρέλης 2006), η οποία προσαυξήθηκε κατά 35% (5% για τα υποσυστήματα του κινητήρα και 30% ως ασφάλεια για τους συντελεστές υπολογισμών).

Έχοντας εκτιμήσει την ισχύ για τις διάφορες εργασίες και αναλόγως του απαιτούμενου χρόνου για την διεκπεραίωση τους υπολογίστηκε η καταναλισκόμενη ενέργεια ανά επέμβαση και ανά στρέμμα. Τα στοιχεία αυτά πολλαπλασιάστηκαν με το πλήθος των επεμβάσεων όπως αυτές αποτυπώθηκαν στα ημερολόγια εργασιών δίνοντας ένα νέο αντίστοιχο πίνακα με τη χρονική κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων ανά δεκαήμερο. Για τις εργασίες της κατεργασίας εδάφους και για όσα μηχανήματα υπολογίζεται η ισχύς κύλισης των τροχών του ελκυστήρα χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι εποχικοί συντελεστές προσαύξησης. Η ενέργεια για την άροση τους θερινούς μήνες (ξηρό έδαφος) υπολογίζεται προσαυξημένη κατά 30%, ενώ η ενέργεια για την κύλιση των τροχών του ελκυστήρα κατά την εφαρμογή λιπασμάτων το χειμώνα (υγρό έδαφος) προσαυξάνεται κατά 15%. Αθροίζοντας τη κατανάλωση ενέργειας για τις διάφορες επί μέρους εργασίες ανά δεκαήμερο προέκυψε το «ενεργειακό προφίλ» για κάθε καλλιέργεια του καταλόγου.

2.3 Εκτίμηση της ισχύος του/των γεωργικών ελκυστήρων

Η απαραίτητη ισχύς (P) για την παραγωγή έργου E ορίζεται από τη σχέση της Φυσικής

$$P = {}^{E}/_{t}$$

όπου t το διαθέσιμο χρονικό διάστημα για τη παραγωγή του έργου.

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος των ελκυστήρων. Το έργο E για κάθε καλλιέργεια έχει εκτιμηθεί βάσει της παραγράφου 2.2. Ο χρόνος t είναι συνάρτηση των διαθέσιμων ημερών για εργασία στον αγρό ανά δεκαήμερο.

2.4 Διαθέσιμες ημέρες και ώρες για εργασία στον αγρό

Για την εκτίμηση των διαθέσιμων ημερών για εργασία στο χωράφι χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία της ημερήσιας ηλιοφάνειας (ώρες ανά ημέρα) από την ΕΜΥ για μια 10ετή χρονοσειρά (2006-2015) από τους σταθμούς: Αλεξανδρούπολης, Ανδραβίδας, Αργοστολίου, Ηρακλείου, Ιωαννίνων, Καστοριάς, Λάρισας, Θεσσαλονίκης, Μυτιλήνης, Νάξου, Τανάγρας, Τρίπολης, Βέλου Κορινθίας. Η κάθε ημέρα του έτους, χαρακτηρίστηκε με την σχέση:

$$100 \times \frac{\text{ωρες ηλιοφάνειας}}{\text{διάρκεια της ημέρας}}$$

Όπου διάρκεια της ημέρας λογίζεται το διάστημα (σε ώρες) από την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου στη περιοχή. Αποδόθηκαν οι εξής τρεις χαρακτηρισμοί στις ημέρες:

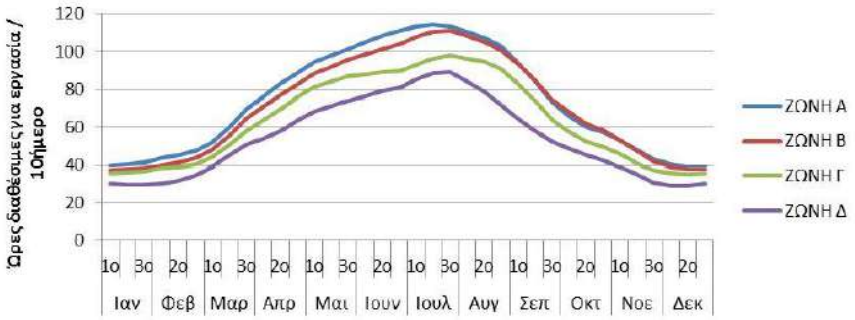
- Ημέρα με ηλιοφάνεια: Ώρες ηλιοφάνειας >80% της διάρκειας της ημέρες
- Ημέρα με μερική νέφωση: Ώρες ηλιοφάνειας <80% και >20% της διάρκειας της ημέρας
- Ημέρα με ολική νέφωση: Ώρες ηλιοφάνειας <20% της διάρκειας της ημέρας.

Οι τρεις κατηγορίες για κάθε έτος αθροίστηκαν ανά δεκαήμερο. Οι διαθέσιμες ημέρες για εργασία ανά δεκαήμερο εκτιμήθηκαν από τη σχέση (Τσατσαρέλης 2006).

$$\begin{bmatrix}\text{Διαθέσιμες}\\ \text{ημέρες για}\\ \text{εργασία}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{Ημέρες}\\ \text{με}\\ \text{ηλιοφάνεια}\end{bmatrix} + {}^{1}/_{2}\begin{bmatrix}\text{Ημέρες με}\\ \text{μερική}\\ \text{νέφωση}\end{bmatrix} + {}^{1}/_{10}\begin{bmatrix}\text{Ημέρες}\\ \text{με ολική}\\ \text{νέφωση}\end{bmatrix}$$

Οι υπολογισμοί έγιναν για κάθε περιοχή και για κάθε έτος. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν για κάθε περιοχή οι διαθέσιμες ημέρες με πιθανότητα εμφάνισης P=0,7. Στα στοιχεία αυτά εφαρμόστηκε εξομάλυνση κυλιόμενου μέσου με περίοδο τριών σημείων. Οι περιοχές ομαδοποιήθηκαν σε 4 κλιματικές ζώνες βάσει Τεχνικής Οδηγίας 20701-3/2010 του ΥΠΕΚΑ.

Ο διαθέσιμος ημερήσιος χρόνος εργασίας στον αγρό, εκτιμήθηκε από τη μέση διάρκεια της ημέρας (ανατολή - δύση του ηλίου) ανά δεκαήμερο. Για του μήνες Σεπτέμβριο – Μάιο, ο ημερήσιος χρόνος εργασίας θεωρήθηκε ίσος με 90% της μέσης διάρκειας της ημέρας (10% διακοπή για ανάπαυση). Για τη θερινή περίοδο (Ιουν – Αυγ) το διάστημα διακοπής συνδέθηκε με τις μεσημβρινές θερμές ώρες της ημέρας όπου η εργασία συνιστάται να αποφεύγεται. Από τις διαθέσιμες ημέρες και τον αντίστοιχο ημερήσιο χρόνο εργασίας υπολογίστηκαν οι διαθέσιμες ώρες για εργασία ανά 10ήμερο για τις 4 ζώνες (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Διαθέσιμες ώρες για εργασία στον αγρό ανά δεκαήμερο για τις 4 κλιματικές ζώνες της Ελλάδος και με πιθανότητα εμφάνισης P=0,7.

Να σημειωθεί ότι ο ημερήσιος χρόνος εργασίας υπερβαίνει το μέγιστο συνιστώμενο ημερήσιο χρόνο εργασίας ενός χειριστή γεωργικού ελκυστήρα που είναι 8 ώρες, ανάλογα βέβαια και με το είδος της εργασίας. Αυτό σημαίνει ότι σε εντατικές περιόδους ενδεχομένως να απαιτείται και 2^{ος} χειριστής. Επίσης, όπως αναφέρθηκε, η πιθανότητα εμφάνισης των διαθέσιμων ημερών για εργασία είναι P=0,7 που σημαίνει ότι στα 10 έτη, τα 7 τουλάχιστον θα εμφανίσουν το συγκεκριμένο αριθμό ημερών. Για τα δυσμενή έτη, που θα εμφανίσουν λιγότερες διαθέσιμες ημέρες θα πρέπει να αξιοποιηθεί η αδρανούσα δυναμικότητα των μηχανημάτων για επίσπευση των εργασιών με παράταση της εργασίας και πέρα από τη δύση του ηλίου, ή με ελαφρά αύξηση της ταχύτητας εργασίας.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Ανάπτυξη λογισμικού για την εκτίμηση της ισχύος γεωργικών ελκυστήρων

Εφόσον η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη βασίζεται στην αρχή της εξασφάλισης των ενεργειακών αναγκών των γεωργικών εκμεταλλεύσεων για τις εργασίες οι οποίες θα πρέπει να καλυφθούν με χρήση ελκυστήρα, βασικό στοιχείο είναι η αποτύπωση των συγκεκριμένων ενεργειακών αναγκών που σχετίζονται με το είδη των καλλιεργειών και την έκταση που καταλαμβάνει η κάθε μια. Επομένως, σχεδιάστηκε ένα λογισμικό σε περιβάλλον Excel στο οποίο δυνητικοί χρήστες (παραγωγοί /μελετητές /υπάλληλοι του ΥΠΑΑΤ) μπορούν να εισάγουν τα απαραίτητα στοιχεία σε μια φόρμα εισαγωγής και να λαμβάνουν τα αποτελέσματα της μεθόδου στην ίδια σελίδα. Τα στοιχεία των καλλιεργειών εισάγονται από τον χρήστη, ενώ μπορεί να επιλέξει έως 12 διαφορετικές καλλιέργειες. Καθότι όμως συχνά ο καταμερισμός των καλλιεργειών μεταβάλλεται μεταξύ των ετών, ζητείται από το χρήστη να εισάγει στο σύστημα τις καλλιέργειες και τις

αντίστοιχες εκτάσεις για τα τρία τελευταία έτη. Επίσης, καλείται να συμπληρώσει το ονοματεπώνυμο, τον κωδικό του ΟΣΔΕ (για ελέγχους από το ΥΠΑΑΤ) και το Νομό στον οποίο βρίσκεται η εκμετάλλευση. Το σύστημα υπολογίζει την ισχύ για τα 3 έτη και επιλέγει αυτόματα το έτος με τις υψηλότερες απαιτήσεις, χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων με τα ενεργειακά προφίλ των καλλιεργειών και τις διαθέσιμες ώρες για εργασία ανά δεκαήμερο για τη κλιματική ζώνη που ανήκει η εκμετάλλευση.

	Είδος καλλιέργειας		Στρέμματα		
			2016	2015	2014
1	ΑΜΠΕΛΙΑ	ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΙΝΟΥ	1.4	1.4	1.4
2	ΑΜΠΕΛΙΑ	ΚΕΡΑΣΙΕΣ	28.4	31.4	31.4
3	ΣΙΤΗΡΑ	ΚΡΙΘΑΡΙ	2.7	0	0
4	ΚΛΩΣΤΙΚΑ	ΜΗΛΑ	62.5	62.5	62.5
5	ΛΟΙΠΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ	ΡΟΔΑΚΙΝΙΕΣ	2.1	2.1	2.1
6	ΖΑΧΑΡΟΔΟΤΙΚΑ	ΠΑΤΑΤΑ	0	12.9	12.9
7	ΚΗΠΕΥΤΙΚΑ	ΡΟΔΑΚΙΝΙΕΣ	42.4	44.8	44.8
8	ΣΙΤΗΡΑ	ΣΙΤΟΣ ΣΚΛΗΡΟΣ	96.7	87.2	87.2
		ΣΥΝΟΛΟ ΣΤΡΕΜΜΑΤΩΝ	236.2	242.3	242.3

Σχήμα 2. Η κεντρική φόρμα διεπαφής του λογισμικού

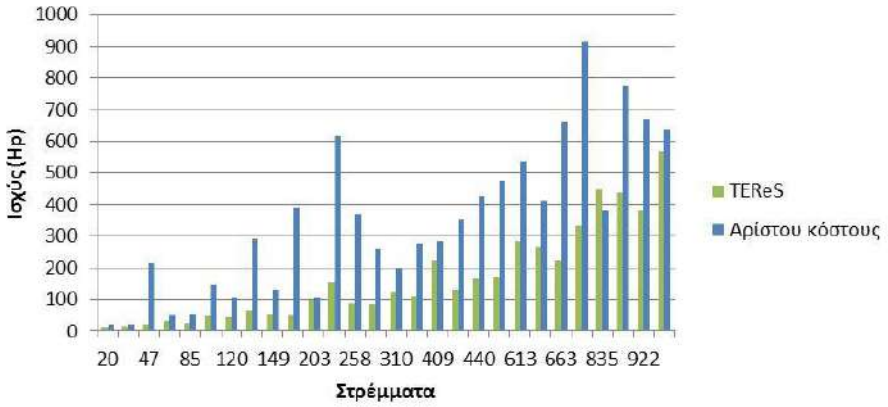
Κατά τον υπολογισμό διαχωρίζονται οι αροτριαίες και κηπευτικές καλλιέργειες από τις δενδροκομικές και αμπελουργικές. Για κάθε κατηγορία υπολογίζονται οι ενεργειακές ανάγκες και στη συνέχεια η ισχύς των ελκυστήρων. Μάλιστα το σύστημα υπολογίζει έναν ή περισσότερους ελκυστήρες ανάλογα με το μέγεθος και τη διάρθρωση της εκμετάλλευσης. Όταν οι ανάγκες επιβάλουν δύο ελκυστήρες προτείνεται ένας κύριος μεγάλης ισχύος και ένας μικρότερης (σε αναλογίες 2/3 και 1/3 της συνολικής εκτιμώμενης ισχύος). Για τις αροτριαίες καλλιέργειες το μέγιστο όριο ισχύος για τον κύριο ελκυστήρα τέθηκε στους 240Hp, διότι στις ελληνικές συνθήκες (κατακερματισμός των εκμεταλλεύσεων και μικρό μέγεθος αγροτεμαχίων) δεν εξυπηρετεί η χρήση μεγάλων παρελκομένων και επομένως δεν ενδείκνυται η χρήση ελκυστήρων υπερβολικά μεγάλης ισχύος. Για τις δενδροκομικές και αμπελουργικές καλλιέργειες το ανώτερο όριο ισχύος ανά ελκυστήρα τέθηκε στους 120Hp. Για έναν ή δύο ελκυστήρες το σύστημα προτείνει ακριβώς την ισχύ για το καθένα. Για πλέον των δύο ελκυστήρων προτείνεται η συνολική ισχύ και αφήνεται στο χρήστη η απόφαση.

3.2 Σύγκριση μεθόδου αρίστου κόστους και TEReS

Έγινε σύγκριση της μεθόδου αρίστου κόστους και της μεθόδου TEReS βάσει στοιχείων από 28 τυχαίες γεωργικές εκμεταλλεύσεις με διάφορες καλλιέργειες από το κατάλογο του ΟΣΔΕ (Σχήμα 4). Η κατάταξη των εκμεταλλεύσεων είναι ανάλογα με το μέγεθος ξεκινώντας από μια πολύ μικρή (20 στρεμ) και καταλήγοντας σε μια μεγάλη (922 στρεμ). Η μέθοδος TEReS εκτιμά σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερη ισχύ και σε ορισμένες περιπτώσεις έως και 4 φορές. Η μέση ισχύς που υπολογίστηκε με τη μέθοδο TEReS ήταν 0,42 Hp/στρέμμα, ενώ με τη μέθοδο αρίστου κόστους 1,12 Hp/στρέμμα. Επίσης, η μέθοδος αρίστου κόστους παρουσιάζει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις που δεν ακολουθούν την αύξηση του μεγέθους της εκμετάλλευσης.

Για παράδειγμα, για εκμετάλλευση 47 στρεμμάτων εκτιμά ισχύ 215 Hp, για εκμετάλλευση 203 στρεμμάτων, ισχύ 107 Hp και για εκμετάλλευση 242 στρεμμάτων ισχύ 616 Hp. Στη μέθοδο TEReS δε φαίνεται να υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις και η αύξηση της

ισχύος ακολουθεί σε γενικές γραμμές την αύξηση της έκτασης. Η διάρθρωση των εκμεταλλεύσεων και ο τύπος των καλλιεργειών συνεχίζουν να επηρεάζουν το μέγεθος του ελκυστήρα και η ισχύς που υπολογίζεται κυμαίνεται από 0.28-0.62 Hp/στρ έναντι 0,46-4,54 Hp/στρ με τη μέθοδο αρίστου κόστους.



Σχήμα 4. Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού της ισχύος των γεωργικών ελκυστήρων πραγματικών εκμεταλλεύσεων με τη νέα μέθοδο TEReS και τη μέθοδο του αρίστου κόστους

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μελέτη χρηματοδοτήθηκε στο πλαίσιο του Μέτρου 20 «Τεχνική Βοήθεια κρατών μελών» του Προγράμματος Αγροτικής Ανάπτυξης 2014-2020

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ASABE 2006 Standard EP496.3. Agricultural machinery management. St. Joseph Michigan.

ASABE 2006 Standard D497.5. Agricultural machinery management. St. Joseph Michigan.

ΑΓΡΟΣΥΜΒΟΥΛΟΣ http://agrosimvoulos.gr/

Βασιλακάκης Μ., και Θεριός Ι. (2006). Μαθήματα ειδικής δενδροκομίας. Εκδόσεις Αγις-Σάββας, Δ. Γαρταγάνης Θεσσαλονίκη

Βασιλακάκης Δ.Μ. (2006) Μικρά οπωροφώρα Εκδόσεις Αγις-Σάββας, Θεσσαλονίκη

Γαλανοπούλου – Σενδούκα Σ. (2002). Βιομηχανικά Φυτά. Εκδόσεις Σταμούλη Αθήνα

Δαλιάνης Δ.Δ. (1999) Ανοιξιάτικα σιτηρά. Εκδόσεις Σταμούλη Αθήνα

GaiaΕΠΙΧΕΙΡΗΝ http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index

Hunt, D. (1995). Power selection. In: Farm Power and Machinery Management. Iowa State University Press

Κατσιώτης Σ.Θ. και Χατζοπούλου Π.Σ. (2010). Αρωματικά φαρμακευτικά φυτά και αιθέρια έλαια Εκδόσεις Κυριακίδη, Θες/νίκη

Οργανισμός Κεντρικών Αγορών & Αλιείας http://www.okaa.gr/gr/multimedia/times-emporon/?category=1&item=139&user=0

Ποντίκης Κ.Α. (1990) Εσπεριδοειδή – Αθήνα 1990

Σούτερ Χ. (1972). Γεωργική μηχανολογία – Ελκυστήρες – Κινητήρες, Αθήνα 1972

SYMAGRO https://www.symagro.com/

Τσατσαρέλης (2006). Διαχείριση Γεωργικού Εξοπλισμού. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη

ΥΠΕΚΑ (2010). Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών. Τεχνική Οδηγία 20701-3/2010. http://www.helapco.gr/ims/file/installers/totee-klimatika.pdf

Χα Ι. & Πετρόπουλος Σ. (2014). Γενική Λαχανοκομία και υπαίθρια καλλιέργεια λαχανικών, Βόλος 2014, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας

ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Γρηγόριος Λαμπρινός
Γ.Π.Α., Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75,Τ.Κ. 11855, Αθήνα , ✉ refrigenergy@aua.gr

Περίληψη

Απώτερος σκοπός της εργασίας είναι αφ' ενός μεν να τονίσει τη σημασία της απόδοσης μιας μηχανής/διεργασίας στην «Συνολική Ισοδύναμη Επίδραση στην Παγκόσμια Θέρμανση-ΣΙΕΠΘ», αφ' ετέρου δε να παρουσιάσει τη μεθοδολογία αποτίμησης του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος διαφόρων κατηγοριών αγροτικών μηχανών/διεργασιών, ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση, η επιλογή και η βελτίωσή τους. Από την ανάλυση στην εργασία προκύπτει ότι η Συνολική Ισοδύναμη Επίδραση στην Παγκόσμια Θέρμανση εξαρτάται από τις πιθανές διαρροές αλογονούχων εργαζόμενων ρευστών, τη καύση ορυκτών καυσίμων, τη τιμή του δείκτη «δυναμικού συμβολής στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου» του ρευστού, την απόδοση της μηχανής και αυτή του «παράγοντα άνθρακα» της καταναλούμενης από την εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο το υψηλό ακόμη κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν τις καθιστά ελκυστικές ώστε να περιορισθεί η χρήση των ορυκτών καυσίμων. Παραμένει έτσι ως μέλημα η εστίαση στην απόδοση της μηχανής και γενικά στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: Αγροτική μηχανή, απόδοση, Φαινόμενο Θερμοκηπίου, περιβαλλοντικό αποτύπωμα

FARM ENGINES, ENERGY AND ENVIRONMENT

Gregory Lambrinos
Agricultural University of Athens, Department of NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, ✉refrigenergy@aua.gr

Abstract

The dual aim of this paper is, on the one hand, to highlight the importance of engine efficiency to the "Total Equivalent Warming Impact (TEWI)" and, on the other hand, to discuss the "environmental footprint" assessment methodology in relation to similar engines/processings in order to render their comparison, selection, and optimization possible. The analysis clearly indicates that the TEWI of a heat engine is dependent on the working fluid leakage and its GWP value, the use of fossil combustibles, engine efficiency, and/or the country "carbon factor" to generate electricity. As the current high cost of renewable energies still discourages the replacement of fossil combustibles, our focus remains on engine efficiency and the more generic area of energy savings.

Key words: Farm engine, efficiency, Greenhouse Effect, environmental footprint

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάδειξη μιας νέας τεχνολογίας όπως και η εκλογή μιας αγροτικής μηχανής ή νέας εγκατάστασης πρέπει σήμερα να βασίζονται σε δύο βασικά κριτήρια. Την ενεργειακή απόδοση και τον βαθμό επιβάρυνσης του περιβάλλοντος.

Σ' όλες τις εφαρμογές παραγωγής μηχανικής ισχύος, κλιματισμού, ξήρανσης, ανάκτησης ή αναβάθμισης θερμικής ενέργειας που ενδιαφέρουν την αγροτική παραγωγή και την αγροτοβιομηχανία, πέραν της απόδοσης και του ενεργειακού κόστους της εφαρμογής πρέπει να εκτιμάται και ο παράγων «Συνολική Ισοδύναμη Επίδραση στην Παγκόσμια Θέρμανση-ΣΙΕΠΘ(TEWI)» με όλες τις άμεσες και έμμεσες συνιστώσες του κατά τη κατασκευή, καθ' όλη τη περίοδο χρήσης της μηχανής/διεργασίας καθώς και μετά το τέλος της ζωής αυτής. Σε πολλές χώρες η μείωση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων που επιδρούν δυσμενώς στο περιβάλλον αποτελεί αναγκαιότητα ή και επιταγή.

Απώτερος σκοπός της εργασίας αυτής είναι αφ' ενός μεν να τονίσει τη σημασία της απόδοσης μιας μηχανής/διεργασίας στην «Συνολική Ισοδύναμη Επίδραση στην Παγκόσμια Θέρμανση-ΣΙΕΠΘ», αφ' ετέρου δε και κυρίως να παρουσιάσει τη μεθοδολογία αποτίμησης του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος διαφόρων κατηγοριών αγροτικών μηχανών/διεργασιών, ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση δύο ή περισσοτέρων τέτοιων εναλλακτικών διαδικασιών, βοηθώντας έτσι τόσο στη σύγκριση και επιλογή όσο και στη βελτίωσή τους.

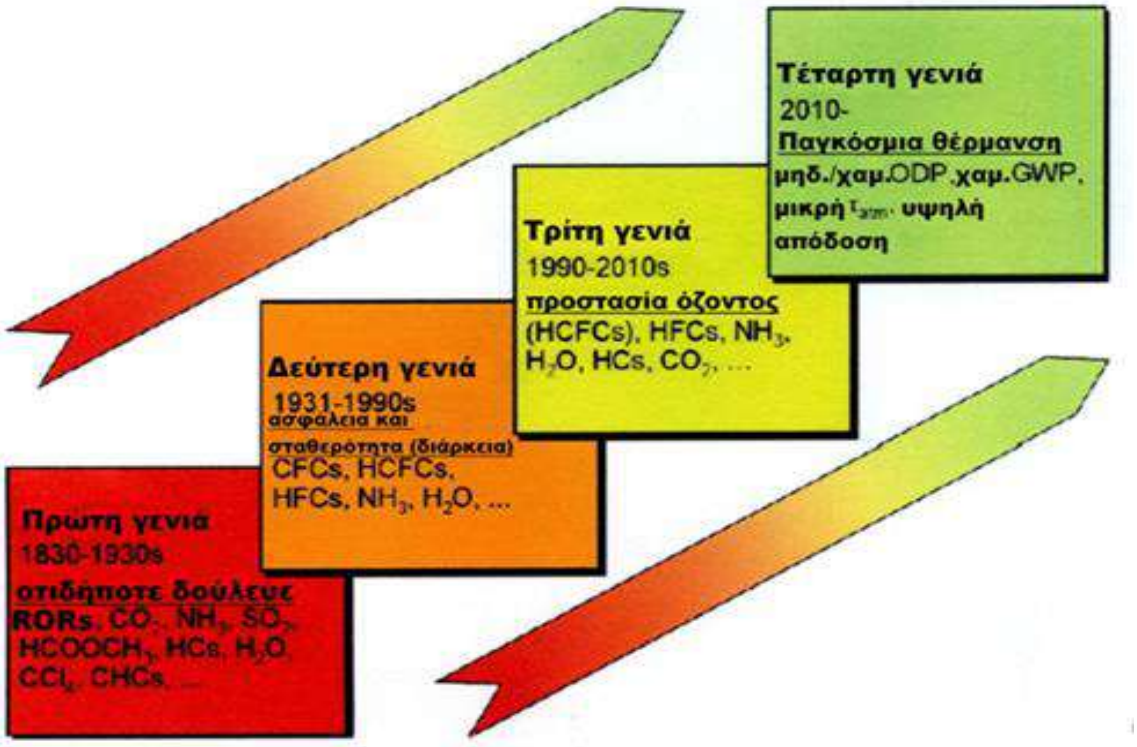
2. ΜΗΧΑΝΕΣ, ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ & ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΑ

Όπως είναι γνωστό, η διεργασία μεταφοράς θερμότητας στη φύση πραγματοποιείται προς μια και μόνο κατεύθυνση και η οποία είναι από ένα μέσο που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, προς ένα άλλο που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, γεγονός που εκμεταλλεύονται οι θερμικές μηχανές παραγωγής μηχανικής ισχύος οι οποίες, λειτουργώντας σε θερμοδυναμικό κύκλο, απορροφούν θερμότητα από ένα θερμοδοχείο, μετατρέπουν ένα μέρος της σε μηχανικό έργο (το οποίο είναι και η αποστολή τους), ενώ αποβάλλουν το υπόλοιπο αυτής σε ένα ψυχροδοχείο, διεργασία που πραγματοποιείται πάντοτε παρουσία κάποιου ρευστού το οποίο ονομάζεται 'εργαζόμενο ρευστό' και παίζει το ρόλο του υλικού φορέα της θερμότητας. Η αντίστροφη διεργασία, δηλαδή η μεταφορά θερμότητας από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας (ψυχροδοχείο) σε ένα μέσο υψηλής θερμοκρασίας (θερμοδοχείο), όπως συμβαίνει σε μία ψυκτική μηχανή/αντλία θερμότητας, είναι αδύνατο να γίνει αυτοδύναμα αλλά απαιτεί για την πραγματοποίησή της τη δαπάνη κάποιας μορφής ενέργειας.

Τα εργαζόμενα ρευστά, τα οποία χρησιμοποιούν οι παραπάνω αναφερθείσες μηχανές παραγωγής ή κατανάλωσης μηχανικής ισχύος είναι φυσικά ρευστά (νερό, αμμωνία, αέρας, ορυκτά καύσιμα, CO_2) ή οργανικές ουσίες με βάση τους υδρογονάνθρακες, που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στις ψυκτικές μηχανές και χαρακτηρίζονται ως 'ψυκτικά ρευστά'. Με βάση την επίδρασή τους στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου (ελεγχόμενο από το Πρωτόκολλο του Κιότο) και σ' αυτό που χαρακτηρίζεται ως «Τρύπα του Όζοντος» (που ελέγχεται από το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ) τα οργανικά εργαζόμενα ρευστά εξελίχθηκαν κατά τη τελευταία τριακονταετία όπως δείχνει η εικόνα 1.

Η ιστορική εξέλιξή τους περιλαμβάνει τέσσερεις γενιές, οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 1.

Σήμερα (τέταρτη γενιά), η επικρατούσα τάση προτάσσει τη χρήση κυρίως φυσικών ρευστών και την κατασκευή και χρήση οργανικών ουσιών οι οποίες να συμβάλουν πρωτίστως, κατά το ελάχιστο που μπορούν, στην περαιτέρω ενίσχυση του Φαινομένου του Θερμοκηπίου και την επακόλουθη υπερθέρμανση του πλανήτη, ενώ θεωρείται δεδομένη η μη συμμετοχή τους στην ελάττωση των συγκεντρώσεων του όζοντος στη στρατόσφαιρα (μηδενικό ή αμελητέο ODP, πολύ χαμηλό GWP). Παράλληλα είναι επιθυμητή η μικρή ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής τους, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι οι ουσίες αυτές θα υστερούν όσον αφορά την ενεργειακή τους αποδοτικότητα. (UNEP, 2010; UNEP, 2011; Venkatarathnam & Murthy, 2012)



Σχήμα 1. Εξέλιξη των οργανικών ρευστών (Πηγή Calm 2008)

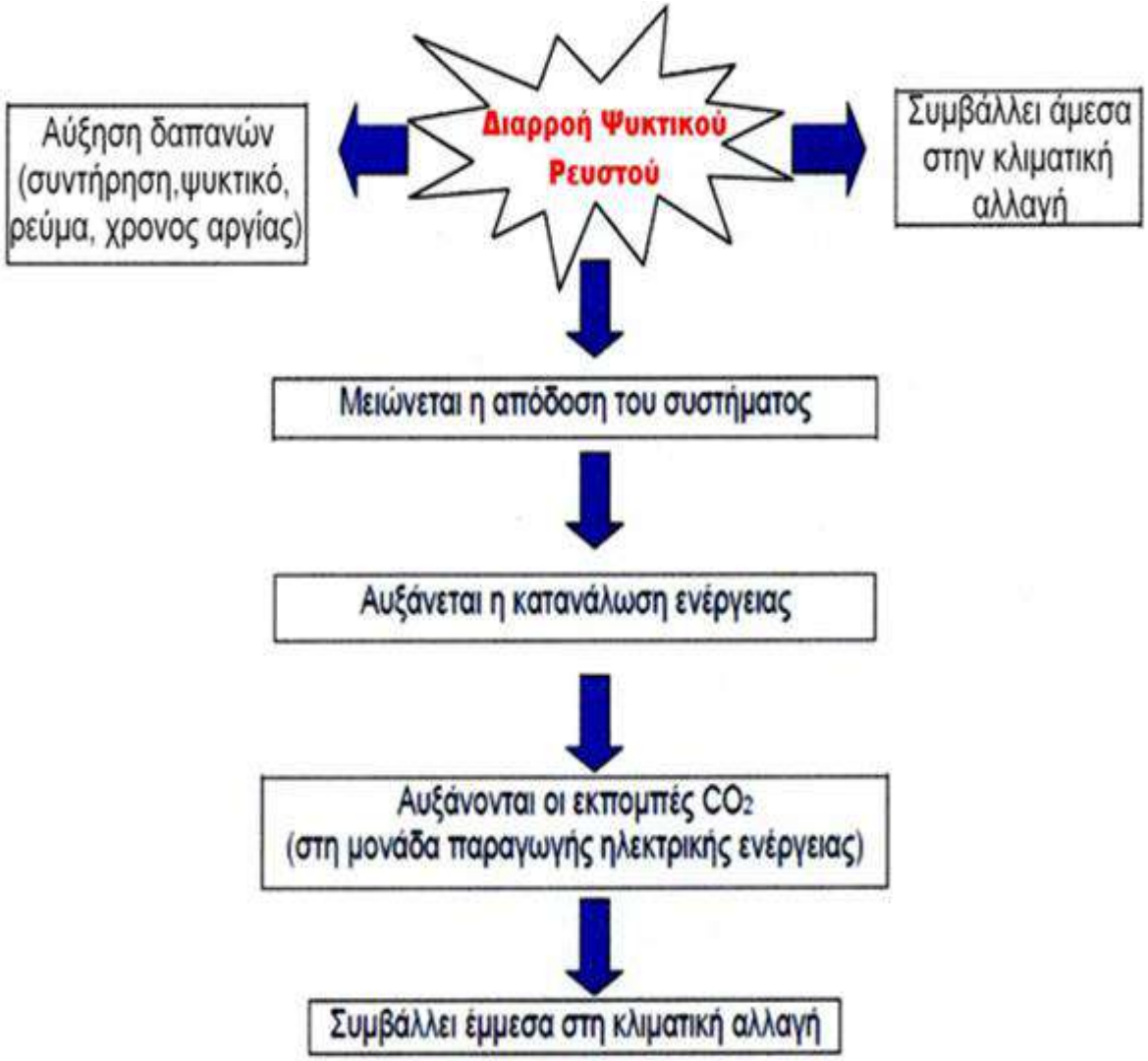
3. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ, ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι βασικοί δείκτες που ποσοτικοποιούν το περιβαλλοντικό πρόβλημα είναι δύο, αυτός του «Δυναμικού Ελάττωσης του Όζοντος (Ozone Depletion Potential, ODP)» και ο δείκτης «δυναμικού συμβολής στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου (Global Warming Potential, GWP)». Τα κριτήρια επιλογής των εργαζόμενων ρευστών είναι περιβαλλοντικά, θερμοδυναμικά, κριτήρια ασφαλείας, οικονομικά κριτήρια, καθώς και κριτήρια που σχετίζονται με ιδιαίτερα φυσικά και τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Στα τελευταία συμπεριλαμβάνονται και οι διαρροές τους από τις μηχανές/εγκαταστάσεις, διαρροές των οποίων οι αρνητικές τους επιπτώσεις παρουσιάζονται με αρκετά περιεκτικό τρόπο στο σχήμα 2.

Ο όρος “περιβαλλοντικό αποτύπωμα” έχει επικρατήσει να σημαίνει το σύνολο των εκπομπών του CO_2 και των υπολοίπων αερίων του θερμοκηπίου (εκφρασμένες σε ισοδύναμες ποσότητες CO_2) που οφείλονται στην λειτουργία μιας εγκατάστασης (Μάντζου

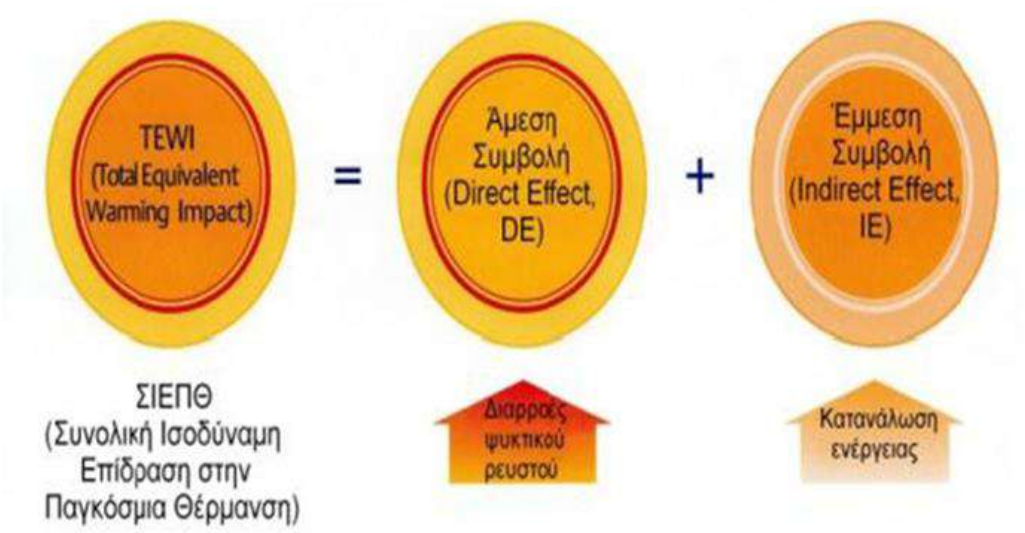
κ.ά., 2006; Wiedmann & Minx, 2008) και, συνήθως αναφέρεται στο ενισχυμένο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου.

Ο υπολογισμός και η σύγκριση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος γίνεται μέσω προσεγγιστικών μεθόδων και με τη χρήση τυποποιημένων διαδικασιών, συνήθως για τη διενέργεια συγκρίσεων μεμονωμένων μηχανολογικών εγκαταστάσεων (IPCC/TEAP, 2005).



Σχήμα 2. Επιπτώσεις της διαρροής ψυκτικού ρευστού (Πηγή : Δάλλας, 2010)

Η «Συνολική Ισοδύναμη Επίδραση στην Παγκόσμια Θέρμανση, ΣΙΕΠΘ» (Total Equivalent Warming Impact, TEWI), αποτελεί μια προσέγγιση η οποία ασχολείται με την επίδραση που ασκούν στην ενίσχυση του Φαινομένου του Θερμοκηπίου εργαζόμενα ρευστά τα οποία ανήκουν στον εξοπλισμό που εργάζονται ή την διαδικασία στην οποία συμμετέχουν. Η επίδραση αυτή μπορεί να είναι τόσο άμεση, από την απευθείας απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα, όσο και έμμεση, λόγω των ποσοτήτων CO_2 που εκλύονται κατά τη διαδικασία παραγωγής της ενέργειας (συνήθως ηλεκτρικής) που τροφοδοτεί τον εξοπλισμό ή απορροφάται από μια διαδικασία (σχήμα 3).



Σχήμα 3. Οι συνιστώσες του δείκτη ΣΙΕΠΘ ή TEWI (Πηγή:Beeton et al, 2008)

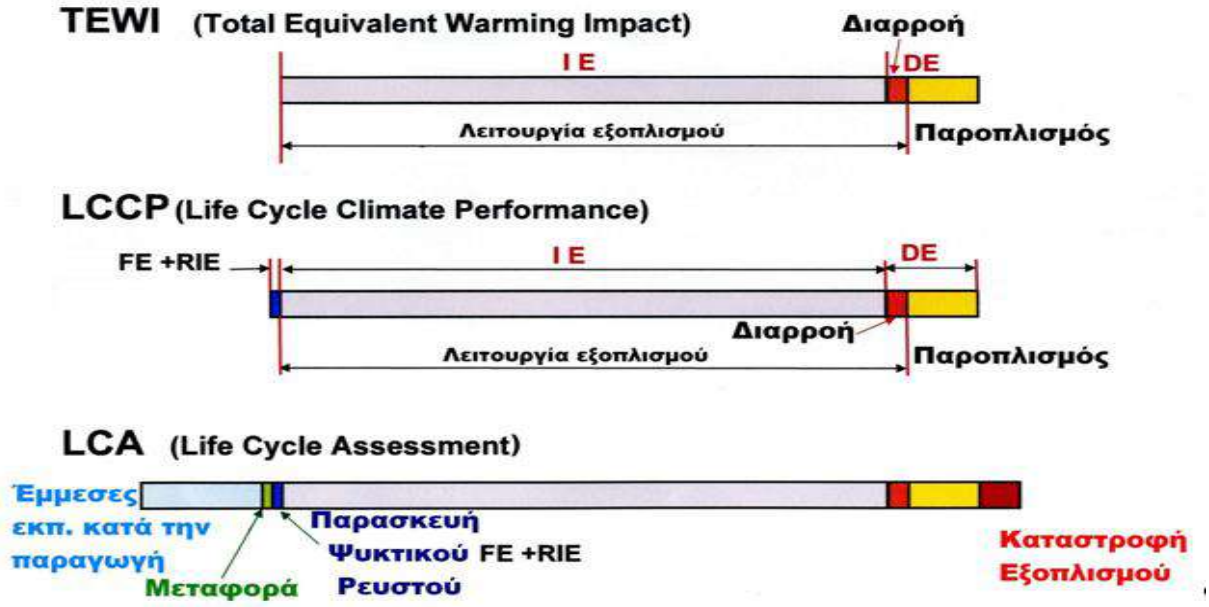
Παρόλο που ο δείκτης αυτός είναι κατάλληλος για τα περισσότερα κοινά συστήματα, δεν εξετάζει την περιβαλλοντική επίδραση κατά την παρασκευή του ρευστού ή/και την κατασκευή του εξοπλισμού, κατά την οποία υπάρχουν ανεξέλεγκτες εκπομπές και δαπανάται ενέργεια, η οποία ονομάζεται ενσωματωμένη ενέργεια του ρευστού και του εξοπλισμού, την οποία και απορρόφησαν προκειμένου να δημιουργηθούν. Σε κάποιες των περιπτώσεων, οι ποσότητες αυτής της ενέργειας μπορεί να είναι σημαντικές, όπως και οι ανεξέλεγκτες εκπομπές, γεγονός που οδήγησε στην προσέγγιση της «Κλιματικής Απόδοσης στον Κύκλο Ζωής, ΚΑΚΖ» (Life Cycle Climate Performance, LCCP).

Πίνακας 1. Επίδραση των διαφόρων θερμικών μηχανών στο περιβάλλον

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ		ΕΛΑΤΤΩΣΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	ΣΙΕΠΘ (TEWI)	
			ΑΜΕΣΗ ΣΥΜΒΟΛΗ	ΕΜΜΕΣΗ ΣΥΜΒΟΛΗ
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	$M E_{εσωτ} K$	-	+	-
	$M E_{εξωτ} K$	+ ?(1)	+ ?(1)	-
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ		+ ?(1)	+ ?(1)	+ (2)
ΛΟΙΠΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΟΥΜΕΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ		-	-	+ (2)
(1) Για εργαζόμενα ρευστά με Δυναμικό Ελάττωσης του Οζοντος (ODP) (2) Μηχανές που καταναλώνουν ηλεκτρική ισχύ				

Η «Εκτίμηση του Κύκλου Ζωής, ΕΚΖ» (Life Cycle Assessment, LCA) είναι η πιο περιεκτική και επίσημη προσέγγιση για την αξιολόγηση-εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων διαφόρων τεχνολογιών, ενώ είναι σαφώς και η ευρύτερη, αφού περιλαμβάνει τις

περιβαλλοντικές επιδράσεις και των υπολοίπων εισροών-εκροών του συστήματος, επιπλέον εκείνων που συνδέονται με την ενέργεια. Η μεθοδολογία αυτή αναπτύχθηκε και επισημοποιήθηκε από τις σειρές ISO14040 των διεθνών προτύπων, χαρακτηρίζεται δε ως μια προσέγγιση «από το λίκνο μέχρι τον τάφο», αφού ξεκινά με τη συγκέντρωση των πρώτων υλών από τη Γη, για τη δημιουργία του προϊόντος ή του εξοπλισμού, ενώ τελειώνει στο σημείο όπου όλα τα υλικά επιστρέφουν στη Γη. Έτσι, καθίσταται δυνατή τόσο η αποτίμηση των σωρευτικών περιβαλλοντικών επιδράσεων που απορρέουν από όλα τα στάδια ζωής ενός προϊόντος, μιας διαδικασίας ή μιας τεχνολογίας, αποτελώντας ένα χρήσιμο εργαλείο για τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιδράσεων δύο ή περισσότερων εναλλακτικών προϊόντων, διαδικασιών ή υπηρεσιών, βοηθώντας έτσι στην αποκάλυψη των ασθενών σημείων, στη βελτίωση των προϊόντων και των περιβαλλοντικών ιδιοτήτων, στη σύγκριση με άλλα εναλλακτικά πρότυπα και στην ανεύρεση εκείνων των (απαραίτητων) λόγων που θα δικαιολογούν τις συστάσεις δράσεων (Μάντζου κ.ά., 2006; Καραγιάννης, 2010). Στο σχήμα 4 απεικονίζονται οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων ΣΙΕΠΘ(TEWI), ΚΑΚΖ(LCCP) και ΕΚΖ(LCA) ενός εργαζόμενου (οργανικού) ρευστού και του εξοπλισμού στο οποίο αυτό περιέχεται (π.χ. μια αντλία θερμότητας). Η επιλογή μίας τέτοιας ψυκτικής εγκατάστασης έγινε σκόπιμα διότι όπως φαίνεται και στον πίνακα 1 αυτού του είδους η θερμική αυτή μηχανή είναι και η πλέον βλαπτική στο περιβάλλον. Όπως διαπιστώνεται εύκολα την μερίδα του λέοντος καταλαμβάνουν πάντοτε οι έμμεσες εκπομπές λόγω του μακρού χρόνου λειτουργίας της μηχανής, γεγονός που καθιστά πρωτεύουσα τελικά τη σημασία της απόδοσης(COP) μιας τέτοιας μηχανής.



Σχήμα 4. Διαφορές μεταξύ ΣΙΕΠΘ(TEWI), ΚΑΚΖ(LCCP) και ΕΚΖ(LCA), όπου DE είναι οι άμεσες εκπομπές (άμεση συμβολή), IE οι έμμεσες εκπομπές (έμμεση συμβολή), FE οι ανεξέλεγκτες εκπομπές και RIE οι εκπομπές της ενσωματωμένης ενέργειας (Πηγή : Onishi et al., 2004).

Η «Συνολική Ισοδύναμη Επίδραση στην Παγκόσμια Θέρμανση, ΣΙΕΠΘ» (Total Equivalent Warming Impact, TEWI), εκτιμάται από τη σχέση (Αναστασίου, Δ. και Λαμπρινός, Γρ., 2013Α και 2013Β):

$$TEWI = \underbrace{(n \times L \times m \times GWP)}_{\text{DE}} + \underbrace{(n \times E_{annual} \times EF)}_{\text{DI}} + \underbrace{(L_{demolition} \times m \times GWP)}_{\text{DEdemol}}$$

direct emissions due to leakage

Indirect emissions related to electricity generation

direct emissions at demolition

Όπου

n ο χρόνος λειτουργίας της εγκατάστασης (έτη)

L οι ετήσιες διαρροές ρευστού (%)

m η συνολική μάζα του ρευστού(kg)

GWP η συμβολή του ρευστού στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου, μέχρι τη πλήρη καταστροφή του έστω και μετά 100 έτη (kgισοδ CO2/kg ρευστού)

Eannual η μέση ετήσια κατανάλωση της μηχανής (kWh)

EF ο παράγων «άνθρακος» δηλ. η ποσότητα εκπεμπόμενου CO2 για παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας (kgισοδ CO2/kWh). Η τιμή αυτή για την Ελλάδα είναι περίπου 0.7 kgισοδ CO2/kWh ενώ ο μέσος όρος για την Ε.Ε. είναι 0.328 kgισοδ CO2/kWh.

Ldemol το ποσοστό του εργαζόμενου ρευστού που θα διαρρεύσει στο περιβάλλον κατά την καταστροφή της εγκατάστασης. Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς πρέπει ***Ldemol*** =0, δηλ. το ρευστό να ανακτάται πλήρως.

Στον πίνακα 2 γίνεται σύγκριση της τελικής τιμής του ΣΙΕΠΘ σε δύο ψυκτικές εγκαταστάσεις ισχύος 200kW που λειτουργούν επί 15 έτη με R-404A και R-717 αντίστοιχα, με ετήσιες διαρροές 5% και 15% σε κάθε περίπτωση και για δύο διαφορετικούς παράγοντες «άνθρακος» 0.33 και 0.7 kgισοδ CO2/kWh.

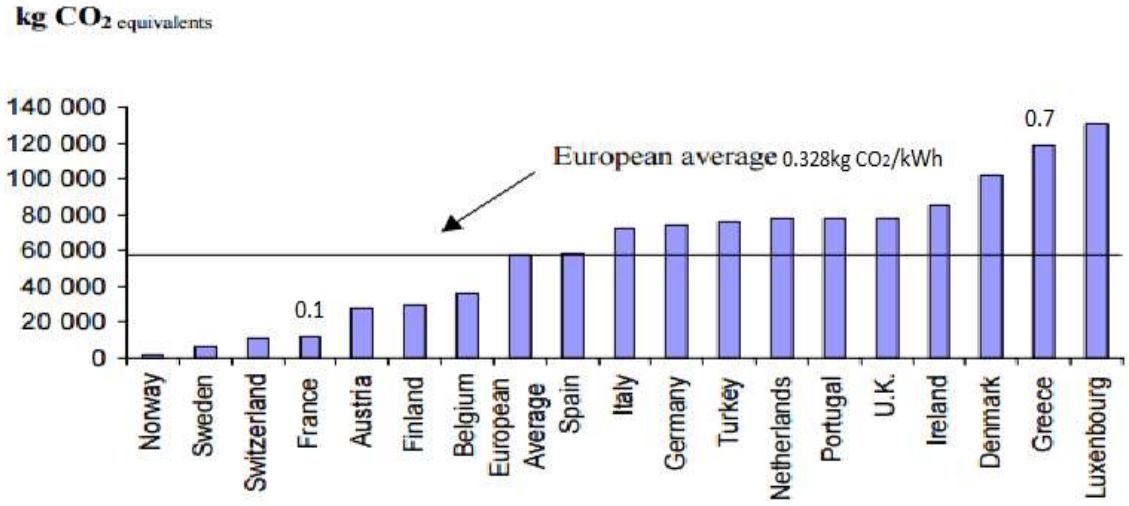
Πίνακας 2. Σύγκριση του ΣΙΕΠΘ σε δύο ψυκτικές εγκαταστάσεις που λειτουργούν με διαφορετικά ρευστά, R-404A και R-717.

Εργ. Ρευστό	R 404 A				R 717			
Ψυκτική Ισχύς (KW)	200				200			
Μάζα ρευστού εγκατάστασης (Kg)	150				150			
ΔΕΟ (ODP) (Kg ισοδ, CO_2 /Kg)	3943				0			
Ετήσιο Ποσοστό Διαρροών %	5%		15%		5%		15%	
COP ετήσιο	2.5		2.5		2.5		2.5	
Χώρα και Παράγων Άνθρακος	GR (0,7)	EE (0,33)	GR (0,7)	EE (0,33)	GR (0,7)	EE (0,33)	GR (0,7)	EE (0,33)
ΣΙΕΠΘ (TEWI) direct (t ισοδ. CO_2)	444	444	1331	1331	0	0	0	0
ΣΙΕΠΘ (TEWI) indirect (t ισοδ. CO_2)	3682	1724	3682	1724	3682	1724	3682	1724
ΣΙΕΠΘ (TEWI) ολικά	4126	2168	5013	3055	3682	1724	3682	1724

Από τον πίνακα 2 εύκολα διαπιστώνεται η σημασία των διαρροών, της τιμής του άμεσου ΣΙΕΠΘ και αυτής του παράγοντα άνθρακα.

Στο σχήμα 5 εμφανίζεται η ανά κεφαλή παραγωγή CO_2 των χωρών της Ευρώπης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πρακτικά κατ' αύξοντα "παράγοντα άνθρακα". Η Ελλάδα εμφανίζεται στο τέλος μεταξύ των χωρών με υψηλό παράγοντα άνθρακα υπερδιπλάσιο του

ευρωπαϊκού μέσου, καθώς χρησιμοποιεί σε μικρό ποσοστό «πράσινες» ενέργειες για παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι τρείς πρώτες χώρες έχουν «παράγοντα άνθρακα» πρακτικά μηδέν ενώ η Γαλλία που ακολουθεί έχει παράγοντα 0,1.



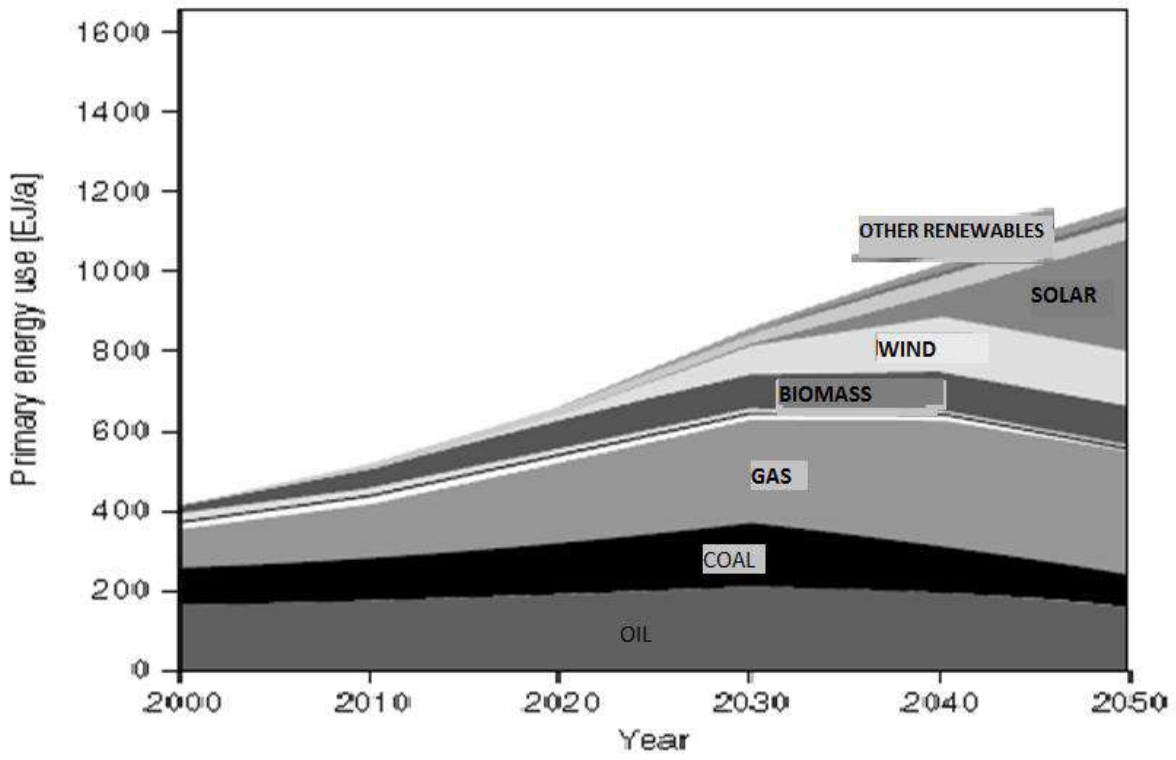
Σχήμα 5. Ανά κεφαλή παραγωγή ισοδυνάμου CO_2 των χωρών της Ευρώπης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (UNEP, 2011).

Πίνακας 3. Αποδόσεις και κόστος διαφόρων μεθόδων ηλεκτοπαραγωγής

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΗΧ. ΙΣΧΥΟΣ	Απόδοση Σε μηχανική ισχύ	Ηλεκτρογεν/τρια	Τελικός βαθμός απόδοσης (+μεταφορά ισχύος)	€/MWh Γερμανία	€/MWh Γαλλία	€/MWh Αγγλία
Φυσικό Αέριο (+ μεταφορά, διανομή)	0,30	0,90	0,25	-	61	85-190
Θερμοηλεκτρική Μονάδα άνθρακος (+ εξόρυξη και μεταφορά)	0,30	0,90	0,25	40-80	-	145-200
Πετρελαιοκίνηση	0,30	0,90	0,25	-	-	-
Υδροστρόβιλος	0,85	0,90	0,70	;	20	-
Ατμομηχανή Rankine	0,20	0,90	0,17	;	;	;
Φωτοβολταϊκά	-	-	0,14	80-150	290	90-120
Αιολικά	-	-	0,18	100-190	70	60-145
Πυρηνική Ενέργεια	;	0.90	;	;	50	

* Γερμανια Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems 2013
** Γαλλία : EDF 2015
*** Αγγλία : Department of Energy and Climate Change 2015

Από το σχήμα 6, όπου φαίνεται ότι σήμερα άνω του 70% της χρησιμοποιούμενης ενέργειας είναι ορυκτής προελεύσεως, προκύπτει πως με τις καλύτερες προβλέψεις θα περάσουν αρκετές δεκαετίες για να επικρατήσουν οι «πράσινες» ενέργειες. Αυτό βέβαια οφείλεται και στο υψηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές, όπως δείχνει και ο πίνακας 3. Το κόστος άλλωστε και στην χώρα μας 1 kWh που παράγεται από ανανεώσιμη ενέργεια είναι υπερτετραπλάσιο της αντίστοιχης που παράγεται από λιγνίτη.



Σχήμα 6. Εξέλιξη των χρησιμοποιούμενων μορφών ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο (Πηγή: World Energy Council, 2016)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμβολή στην ελάττωση του όζοντος παρουσιάζουν τόσο οι θερμικές Μηχανές Εξωτ. Καύσης (π.χ κύκλου Rankine) όσο και οι Θερμικές Μηχανές μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούν ακόμη ως εργαζόμενο ρευστό χλωριωμένους υδρογονάνθρακες με δείκτη ODP.

Άμεση συμβολή στη ΣΙΕΠΘ (TEWI) έχουν οι Μηχανές Εσωτ. Καύσης και από τις Μηχανές Εξωτ. Καύσης και τις Θ. Μηχανές Μεταφοράς Θερμότητας (Ψυκτικές Μηχανές) αυτές που χρησιμοποιούν οργανικά ρευστά με δείκτη «δυναμικού συμβολής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου», GWP.

Έμμεση συμβολή στη ΣΙΕΠΘ (TEWI) έχουν όλες οι μηχανές που είναι ηλεκτροκινούμενες. Τη μεγαλύτερη σημασία εδώ έχει ο «παράγοντας άνθρακα» παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας (kg ισοδCO_2/ KWh) που στη χώρα μας, με τιμή που υπερβαίνει το 0,7, είναι ο μεγαλύτερος της Ευρώπης (Μ.Ο Ευρώπης 0,33). Για να μειωθεί φυσικά αυτός πρέπει η χώρα να στραφεί σημαντικά προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που τις χρησιμοποιούμε σε πολύ μικρό ποσοστό. Το υψηλό όμως κόστος του ρεύματος που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές δεν τις καθιστά προς το παρόν καθόλου ελκυστικές ώστε γρήγορα να περιορισθεί η χρήση των ορυκτών καυσίμων. Προς το παρόν μόνη άμεση λύση που απομένει είναι να εστιάσουμε με κάθε τρόπο στις αποδόσεις των χρησιμοποιουμένων μηχανών και γενικότερα στην ενεργειακή εξοικονόμηση.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Beeton, W., Buynacek, B. and Monnier, K., 2008. *Refrigerants for Residential and Commercial Air Conditioning Applications*. Emerson Climate Technologies, Sidney, Ohio, USA, 30 p.p.

Calm, J.M., 2008. *The Next Generation of Refrigerants-Historical Review, Considerations, and Outlook*. International Journal of Refrigeration, 31: 1123-1133.

IPCC/TEAP, 2005. *Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons*. Cambridge University Press, UK, 478 p.p.

Onishi, H., Yajima, R. and Ito, S., 2004. *LCCP of Some HVAC & R Applications in Japan*. *Proceedings of the 15th Annual Earth Technologies Forum, April 2004, Washington D.C., USA*, pp.10-28.

UNEP, 2010. *Manual for Refrigeration Servicing Technicians*. United Nations Environment Programme, Division of Technology Industry and Economics (UNEP DTIE), OzonAction Branch, France, 150 p.p.

UNEP, 2011. *2010 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee*. United Nations Environment Programme (UNEP), Ozone Secretariat, Nairobi, Kenya, 195 p.p.

Venkatarathnam, G. and Murthy, S.S., 2012. *Refrigerants for Vapour Compression Refrigeration Systems*. Resonance, 17(2): 139-162.

Wiedmann, T. and Minx, J., 2008. *A Definition of 'Carbon Footprint'*. In: C. C. Pertsova (ed), Ecological Economics Research Trends: Chapter 1, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA, pp 1-11 .

World Energy Council, 2016. *World Energy Resources,* 102p.p.

Αναστασίου, Δ. και Λαμπρινός, Γρ., 2013. *Σημασία του δείκτη συνολικής ισοδύναμης επίδρασης στην παγκόσμια θέρμανση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μιας αγροτικής διεργασίας,* Πρακτικά 8ου Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, σελ 345-352.

Αναστασίου, Δ. και Λαμπρινός, Γρ., 2013. *Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μιας αντλίας θερμότητας*, Πρακτικά 8ου Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, σελ 337-344.

Γεντεκάκης, Ι., 2010. *Ατμοσφαιρική Ρύπανση : Επιπτώσεις, έλεγχος & εναλλακτικές τεχνολογίες, 2η έκδοση*. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 784 σελ.

Δάλλας, Φ., 2010. *Διαρροές Ψυκτικών Μέσων : Νομοθεσία και τρόποι αντιμετώπισης με Περιβαλλοντικά και Ενεργειακά Κριτήρια*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, 174 σελ.

10ο Πανελλήνιο Συνέδριο
Γεωργικής Μηχανικής

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Β. Φιρφιρής[1]✉, Σ. Καλαμάρας[1], Γ. Ντίνας[1], Α. Μαρτζοπούλου[2] & Θ. Κωτσόπουλος[1]

[1]Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Εργ. Γεωργικών Κατασκευών & Εξοπλισμού, 54124, Θεσσαλονίκη,

[2]Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Τομέας Πολεοδομίας, Χωροταξίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης

✉ *firfiris@agro.auth.gr*

Περίληψη

Η διαχείριση των αγροτικών αποβλήτων αποτελεί μία πρακτική η οποία διαδίδεται ταχύτατα παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια. Οι μονάδες διαχείρισης αποβλήτων στοχεύουν στην παραγωγή βιοαερίου το οποίο καίγεται σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι σήμερα, δεν παρουσιάζεται κάποιο ολοκληρωμένο πλάνο για την αξιοποίηση της απορριπτόμενης ενέργειας από τη διαδικασία εναλλαγής θερμότητας. Στην παρούσα εργασία αξιολογείται η αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων για τη θέρμανση θερμοκηπίου μέσω της μεθόδου της Καθαράς Παρούσας Αξίας της επένδυσης ενώ παράλληλα εξετάζεται το περιβαλλοντικό όφελος μέσω της μεθόδου καταγραφής του αποτυπώματος άνθρακα. Η συγκεκριμένη μελέτη δίνει αποτελέσματα για την εφαρμογή τέτοιων λύσεων στην Ελλάδα με ρεαλιστικό αποτέλεσμα.

Λέξεις κλειδιά: Απόβλητα, Βιοάεριο, Οικονομική απόδοση, Περιβάλλον

ECONOMICAL AND ENVIRONMENTAL ASSESEMENT OF A SYSTEM THAT EXPLOITS THE REJECTED HEAT OF A BIOGAS PLANT FOR AGRICULTURE APPLICATIONS

V. Firfiris✉, S. Kalamaras, G. Ntinas, A. Martzopoulou & T.Kotsopoulos

[1] Aristotle University of Thessaloniki, Department of Agriculture, Laboratory of Agricultural Structures and Equipment, 54124, Thessaloniki

[2] Aristotle University of Thessaloniki, School of Architecture, Faculty of Engineering, Department of Urban Planning

✉*firfiris@agro.auth.gr*

ABSTRACT

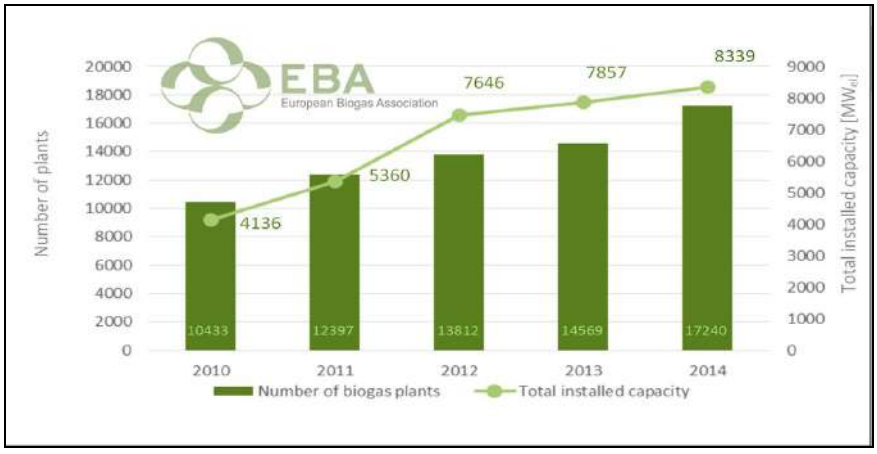
Agricultural waste management is a practice that has spread rapidly globally over the last few years. Waste management plants aim, is to produce biogas that is burned in Internal Combustion Engines for electricity generation purposes. Up to know, no integrated plan for exploiting the waste energy from the heat exchange process at the plants is presented. This paper evaluates the sustainability of the exhaust gases thermal energy utilization for greenhouse heating. The scenario is evaluated through the method of the Net Present Value of the investment while examining the environmental benefit through the method of recording the carbon footprint. This study gives results for the actual implementation of such solutions in Greece.

Keywords: Waste, Biogas, Profitability, Environment

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιώσιμη ανάπτυξη του σύγχρονου αγροτικού τομέα περνάει από την αξιοποίηση των αποβλήτων από τις σχετικές εκμεταλλεύσεις και δραστηριότητες. Οι βασικοί στόχοι ενός συστήματος διαχείρισης αποβλήτων είναι η μεγιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης της εκμετάλλευσης και να επωφεληθεί ο παραγωγός από τα αποτελέσματα της διαχείρισης αν αυτό είναι εφικτό (ενέργεια, λίπασμα κτλ). Παράλληλα θα πρέπει να καθίσταται η μονάδα σύννομη με τα αποδεκτά περιβαλλοντικά πρότυπα ενώ το σύστημα θα πρέπει να είναι πρακτικό και εύκολο στη λειτουργία. Η λανθασμένη μεταχείριση των αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντική επιβάρυνση του εδάφους, των υπόγειων υδάτων και του αέριου περιβάλλοντος. Η πιο συνήθης μορφή αποβλήτων είναι εκείνη που προέρχεται από ζωικές εκμεταλλεύσεις (κοπριά) αλλά και απόβλητα ζωοτροφών, παραπροϊόντα σφαγείων, εκχυλίσματα ενσίρωσης και απόβλητα επεξεργασίας γάλακτος (Jakobs.P, 2001). Το βιοάεριο μπορεί να παραχθεί και από φυτικά υπολείμματα μέσω κατάλληλης αλυσίδας εργασιών.

Σήμερα στην Ευρώπη παρατηρείται σημαντικό δυναμικό μονάδων βιοαερίου. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Βιοαερίου (European Biogas Association-EBA) μέχρι το τέλος του 2014 τα εγκατεστημένα εργοστάσια έφτανα τα 17240 σημειώνοντας αύξηση της τάξης του 18% από το 2013 και 23% από την προηγούμενη χρονιά. Στο γράφημα της Εικόνας 1.1 φαίνεται η εξέλιξη του αριθμού των μονάδων βιοαερίου για την περίοδο 2010-2014 όπως αποτυπώνεται από τον EBA.



Σχήμα 1.1 Εξέλιξη του αριθμού των μονάδων βιοαερίου από 2010-2014 στην Ευρώπη (EBA,2015)

Η αύξηση του αριθμού των μονάδων δεν πραγματοποιείται με τον ίδιο ρυθμό στην ευρωπαϊκή επικράτεια. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη παρατηρήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γαλλία και το Βέλγιο ενώ μικρότερη παρατηρείται στην Αυστρία, την Τσεχία και την Ουγγαρία. Η συνολική παραγόμενη ενέργεια από βιοαέριο εκτιμάται να φτάνει 63,3 TWh, αριθμός που αντιστοιχεί στην ετήσια κατανάλωση 14,6 εκατομμυρίων ευρωπαϊκών νοικοκυριών EBA, 2015. Στην Ελλάδα η ανάπτυξη μονάδων βιοαερίου δεν είναι υψηλή σε σχέση με εκείνη των υπολοίπων κρατών της Ε.Ε και βρίσκεται στην 20^{η} θέση μεταξύ των 27. Συγκεκριμένα σύμφωνα με στοιχεία του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) έως το 2010 η εγκατεστημένη ισχύς από μονάδες βιοαερίου στην Ελλάδα έφτανε τα 40,1MW. Μέχρι το 2012 είχαν κατατεθεί 248 αιτήσεις συνολικής ισχύος 2041,4MW (Ζαφείρης.Χ, 2012).

Η λειτουργία των μονάδων βιοαερίου βασίζεται σε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Σε πολλές μονάδες ΣΗΘ βιοαερίου παρατηρείται η λειτουργία κατά βάση για σκοπούς ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η λειτουργία τους να συνοδεύεται από την απόρριψη θερμότητας τόσο μέσω των καυσαερίων αλλά και μέσω της

εναλλαγής θερμότητας για την θέρμανση του αντιδραστήρα και άλλως διεργασιών. Η αξιοποίηση της απορριπτόμενης ενέργειας των καυσαερίων θα μπορούσε να επιτευχθεί αν γινόταν αποτελεσματική ανάκτηση της. Αρκετοί τρόποι έχουν προταθεί και διερευνηθεί γι' αυτό το σκοπό. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω μηχανικών μεθόδων, μέσω στροβιλοσυμπιεστών, θερμοηλεκτρικών υλικών και του οργανικού κύκλου Rankine (Benato.A and Macor.A, 2017). Κατασκευάστριες εταιρίες δίνουν περίπου ένα ποσοστό παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης του 40%, χρήσιμης θερμικής ενέργειας στο σύστημα περίπου 50% και απορριπτόμενης θερμότητας στο 10% (HAASE, 2010). Αυτό το ποσοστό όταν η μονάδα είναι μεγάλη θα μπορούσε να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμο σε παράπλευρες εφαρμογές όπου οι απώλειες θερμότητας δε θα ήταν ιδιαίτερα υψηλές από τη μεταφορά της. Τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να είναι αγροτικές εγκαταστάσεις όπως θερμοκήπια, κτηνοτροφικές μονάδες ή ξηραντήρια αγροτικών προϊόντων. Κοινός παρονομαστής των παραπάνω επιλογών είναι ότι δεν απαιτούν εντατική θέρμανση και μάλιστα το νερό της πηγής θέρμανσης δε χρειάζεται να είναι σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Μία εκ' των αγροτικών εφαρμογών που απαιτεί θέρμανση ιδιαίτερα σε ψυχρά κλίματα αλλά και σε περιοχές όπως αυτή της Βορείου Ελλάδας είναι τα θερμοκήπια. Οι ανάγκες θέρμανσης σε θερμοκήπια που βρίσκονται σε βόρεια ψυχρά κλίματα μπορεί να φτάσουν και το 65-85% (Karlsson.M, 2014). Ένα θερμοκήπιο 70 m^2 στην περιοχή της Θεσσαλονίκης καλυμμένο με μονό πλαστικό έχει ανάγκες θέρμανσης περί τα 12kW (Φιρφιρής., 2013) την ίδια στιγμή που στη Μεσσηνία η ανάγκη θέρμανσης για θερμοκήπιο 500m^2 φτάνει περίπου τα 40kW (Μπάκας.Ν και Μαρκόπουλος.Χ, 2011). Η αποφυγή θέρμανσης του θερμοκηπίου στη βόρεια Ελλάδα ενδεχομένως θα έχει αρνητικές επιπτώσεις στην παραγωγή. Γι' αυτό το λόγο οι παραγωγοί αναζητούν βιώσιμες λύσεις για τη θέρμανση των θερμοκηπίων. Οι λύσεις αυτές θα πρέπει να καλύπτουν αξιόπιστα τις ανάγκες του θερμοκηπίου υποστηρίζοντας την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Για την οικονομία της μονάδας θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος σε επίπεδο εγκατάστασης και λειτουργίας. Σήμερα αρκετοί παραγωγοί επιζητούν οι μονάδες και γενικά η παραγωγική διαδικασία να είναι ευθυγραμμισμένες με τις επιταγές της εποχής για προστασία του περιβάλλοντος προσδίδοντας με αυτό τον τρόπο και «πράσινη» επωνυμία στο προϊόν.

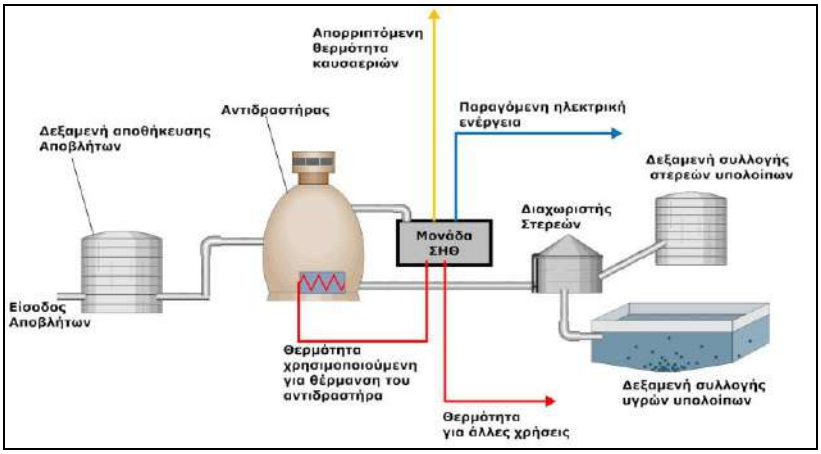
Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η βιωσιμότητα της αξιοποίησης της απορριπτόμενης ενέργειας από τις μονάδες βιοαερίου σε θερμοκήπια τομάτας. Η αξιολόγηση της βιωσιμότητας θα περιλαμβάνει την οικονομική και περιβαλλοντική αποτίμηση της χρήσης ενός τέτοιου συστήματος όπως και την εφικτότητα της υλοποίηση του. Τα αποτελέσματα της έρευνας κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικά καθώς προτείνουν την υιοθέτηση μιας ολιστικής προσέγγισης της αγροτικής παραγωγής αξιοποιώντας με τον πιο ορθολογιστικό τρόπο όλους τους πόρους που προκύπτουν από τις αγροτικές δραστηριότητες ώστε να καταστήσουν τον τομέα ισχυρό και βιώσιμο.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Παραγόμενη θερμότητα από μονάδες βιοαερίου ΣΗΘ

Οι σταθμοί ΣΗΘ (Συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας) αποτελούν την τυπική χρήση του βιοαερίου και θεωρούνται πολύ αποδοτικοί για την παραγωγή ενέργειας. Οι τεχνολογίες μετατροπής βιοαερίου σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα είναι πολυάριθμες και γενικά δεν είναι περίπλοκο να συνδεθούν με το ηλεκτρικό δίκτυο, αρκεί να καλύπτονται από σχετική νομοθεσία. Η πλειοψηφία των ΣΗΘ βασίζονται σε λειτουργία κινητήρων Diesel ή Otto που χρησιμοποιούν το βιοαέριο ως καύσιμο αντί του πετρελαίου

και της βενζίνης αντίστοιχα. Άλλες μέθοδοι είναι η χρήση αεριοστρόβιλων, κινητήρες Stirling, κύκλοι Rankine και κυψέλες καυσίμου (Rutz.D, 2015). Στο Σχήμα 2.1 αναπαρίσταται μία μονάδα ΣΗΘ σε μονάδα παραγωγής ενέργειας βιοαερίου.



Σχήμα 2.1 Μονάδα ΣΗΘ Βιοαερίου

Το βιοαέριο περιέχει συνήθως από 45 έως 70% μεθάνιο (CH_4) και από 30 έως 45% διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Ανάλογα με την πηγή, το βιοαέριο ενδέχεται να περιέχει άζωτο (N_2), υδρόθειο (H_2S) , αλογονωμένες ενώσεις και οργανικές ενώσεις πυριτίου αλλά και υγρασία (H_2O) (S. Rasi, 2009). Πριν από την χρήση του στη ΣΗΘ, το βιοαέριο υπόκειται σε διεργασία ξήρανσης. Στις περισσότερες τεχνολογίες υπάρχει επίσης ένα μέγιστο όριο για την περιεκτικότητα σε υδρόθειο, αλογονωμένους υδρογονάνθρακες και άλλα στοιχεία στο βιοαέριο. Στην ΣΗΘ, η παραγωγή θερμότητας είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η αναλογία είναι συνήθως 30-40% ηλεκτρισμού και 70-60% θερμότητας αντίστοιχα (Clarke Energy, 2013). Η θερμότητα που παράγεται είναι αποτέλεσμα της καύσης του CH4 αλλά και η ενέργεια των καυσαερίων.

Στη ΣΗΘ πρακτικά η θερμότητα της καύσης χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του αντιδραστήρα ή για άλλες χρήσεις θέρμανσης τοπικά. Σκοπός αυτής της πρακτικής είναι αφενός να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα η θερμότητα που παράγεται αλλά και να ψύχεται η μηχανή. Τα καυσαέρια της καύσης συνήθως απορρίπτονται. Η θερμότητα που παράγεται από την καύση ενός mol CH_4 είναι της τάξης των 802.3 kJ (Η αντίστοιχη ποσότητα σε gr είναι 50.1kj/ gr CH_4) (Baehr, 2001). Γενικά η παραγόμενη θερμότητα από την καύση αντιστοιχεί περίπου στο 67% της συνολικής παραγόμενης θερμικής ενέργειας και αξιοποιείται ενώ το υπόλοιπο 33% αντιστοιχεί κατά κανόνα στα καυσαέρια και η εκμετάλλευση του κρίνεται δυσκολότερη (HAASE, 2010;Clarke Energy, 2013). Η αξιοποίηση της παραγόμενης θερμότητας μπορεί να γίνει μέσω εναλλακτών θερμότητας που αποτελούν μία πλήρως ανεπτυγμένη τεχνολογία και η ανάλυση της λειτουργίας του δεν υπόκειται στα πλαίσια της εν' λόγω εργασίας.

2.2 Θέρμανση θερμοκηπίων

Η διατήρηση των συνθηκών του θερμοκηπίου στα βέλτιστα επίπεδα είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της παραγωγής στα επιθυμητά επίπεδα. Στον Πίνακα 2.1 δίνονται ενδεικτικά θερμοκρασιακά εύρη στα οποία δεν επηρεάζεται το φυτό, όπως καθορίζονται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Τροφίμων (FAO, 2014). Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει η εναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον να είναι μηδενική όταν η καλλιέργεια εντός του θερμοκηπίου φτάσει σ' αυτά τα επίπεδα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω προσθήκης τεχνητής θέρμανσης κατά τους χειμερινούς μήνες (κυρίως τις νυχτερινές ώρες) και δροσισμού το καλοκαίρι. Τα

συστήματα τεχνητής θέρμανσης που χρησιμοποιούνται κατά βάση στα θερμοκήπια βασίζονται σε συμβατικά καύσιμα (φυσικό αέριο, πετρέλαιο), ηλεκτρικό ρεύμα ή βιομάζα (Ξύλο, pellets ξύλου ή άλλων συστατικών).

Πίνακας 2.1 Θερμοκρασιακά εύρη για την ιδανική ανάπτυξη θερμοκηπιακών καλλιεργειών (FAO, 2014)

Είδος καλλιέργειας	Ιδανική θερμοκρασία (^oC)	
	Ημέρα	**Νύχτα**
Τομάτα	22-26^oC	13-16^oC
Αγγούρι	22-28^oC	18-20^oC
Πιπεριά	22-30^oC	14-16^oC
Μελιτζάνα	22-26^oC	15-18^oC
Μαρούλι	15-22^oC	15-22^oC
Λάχανο	15-20^oC	15-20^oC
Μπρόκολο	13-18^oC	13-18^oC

Ο τρόπος διανομής της θερμότητας ποικίλει ανάλογα με τον τρόπο που αξιοποιείται η θερμική ενέργεια. Συγκεκριμένα αν η θερμότητα προέρχεται από ηλεκτρική ενέργεια συνήθως χρησιμοποιούνται αερόθερμα. Αν η θερμότητα προέρχεται από θερμό νερό τότε η διανομή γίνεται με σωλήνες μέσω ενδοδαπέδιας, επιδαπέδιας ή επιτοίχιας τοποθέτησης. Τα συστήματα θερμού νερού μπορούν να υποστηρίξουν και αερόθερμα (National Greenhouse Manufacturers Association, 1998).

Σε πολλές περιπτώσεις ανά τον κόσμο παρατηρείται η αξιοποίηση τηλεθέρμανσης για τη θέρμανση θερμοκηπίων. Από τεχνικής άποψης δε διαφοροποιείται η λογική που περιγράφηκε παραπάνω καθώς πάλι αξιοποιείται το ζεστό νερό από κάποια πηγή (που είναι απομακρυσμένη) και γίνεται διανομή της θερμότητας μέσω των τυπικών συστημάτων διανομής. Το πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι το κόστος θέρμανσης περιορίζεται καθώς δεν απαιτείται η χρήση κάποιου καυσίμου. Η τηλεθέρμανση αποτελεί κλασσική περίπτωση αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας από μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (Martzopoulou.A and Kotsopoulos.T, 2015). Δεδομένου ότι η θέρμανση σε ένα θερμοκήπιο είναι απαραίτητη προκύπτουν και περιβαλλοντικά ζητήματα από τη χρήση των εκάστοτε συστημάτων. Η χρήση ορυκτών καυσίμων συνοδεύεται από παραγωγή CO_2, NOx τέφρας κτλ (Baehr, 2001). Το ίδιο συμβαίνει και με τη θέρμανση μέσω ηλεκτρισμού καθώς, αν και δεν υπάρχει τοπική επιβάρυνση της ατμόσφαιράς, ενισχύεται η επιβάρυνση στις περιοχές των κεντρικών μονάδων παραγωγής. Αυτό έχει δύο επακόλουθα- πρώτον επιβαρύνει το αέριο περιβάλλον τοπικά αλλά και σε εθνικό επίπεδο αυξάνοντας την παραγόμενη ποσότητα ρύπων της χώρας. Η διατήρηση των ρύπων σε συγκεκριμένα επίπεδα είναι σημαντική καθώς έχουν υπογραφεί σχετικές συνθήκες που δεσμεύουν τη χώρα στο κομμάτι αυτό.

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην παρούσα εργασία θα γίνει η οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση της χρήσης απορριπτόμενης θερμότητας από μία μονάδα βιοαερίου για τη θέρμανση παρακείμενων θερμοκηπίων. Για τους σκοπούς της έρευνας έγινε η υπόθεση ότι οι μονάδες θα κατασκευαστούν δίπλα από μία μονάδα η οποία έχει τη δυνατότητα να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης των θερμοκηπίων, ενώ θα εξεταστεί και η εναλλακτική να θερμανθούν με συμβατικό σύστημα πετρελαίου, σύστημα pellet και σύστημα υποστηριζόμενο από ηλεκτρική ενέργεια. Η μονάδα που επιλέγηκε είναι μία μονάδα 1,8 στρεμμάτων αποτελούμενη από 4 αμφίρηκτα θερμοκήπια με τις διαστάσεις και χαρακτηριστικά που

δίνονται στον Πίνακα 3.1. Σ' αυτές τις μονάδες θα θεωρηθεί ότι καλλιεργείται τομάτα στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Κατ' αυτό τον τρόπο θα καθοριστεί η βέλτιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου αλλά και ο υπολογισμός της επιπλέον θέρμανσης για τη διατήρηση της θερμοκρασίας αυτής. Στον Πίνακα 3.2 δίνονται τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής σε ετήσια βάση (ΤΕΕ, 2010).

Πίνακας 3.1 Στοιχεία δομικής μονάδας

Διάσταση δομικής μονάδας	**Τιμή (m)**
Μήκος	62.5
Πλάτος	18
Ύψος υδρορροής	2.5
Ύψος κορφιά	4

Πίνακας 3.2 Μέση ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία για την περιοχή της Θεσσαλονίκης (ΤΕΕ, 2010)

Μήνας	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
Μέση ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία [^{o}C]	1.4	2.3	4.6	7.6	12.3	16.5	18.8	18	15.1	11	7	3.0

3.1 Μέθοδος καθορισμού τεχνητής θέρμανσης θερμοκηπίου

Οι απώλειες θερμότητας από το θερμοκήπιο προκύπτουν από την εξίσωση 1 της συνολικής μετάδοσης θερμότητας (Νικήτα-Μαρτζοπούλου, 2006).

$$Q = U \times A \times (\theta_{εσ} - \theta_{εξ}) \quad \textbf{(1)}$$

U: Συντελεστής θερμοπερατότητας ($Wm^{-1}K^{-1}$)
A: Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας (m^2)
θεσ: Εσωτερική θερμοκρασία θερμοκηπίου (^{o}C)
θεξ: Εξωτερική θερμοκρασία θερμοκηπίου (^{o}C)

Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται σε τέτοιου τύπου υπολογισμούς καθώς κατ' αυτό τον τρόπο καθορίζεται η απώλεια κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία και παράλληλα οι αερισμοί είναι περιορισμένοι. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του πολυαιθυλενίου είναι περίπου 6.7 W $m^{-1}K^{-1}$ (Φιρφιρής, 2013). Για τον υπολογισμό απαιτείται και η συνολική επιφάνεια που προκύπτει από τη γεωμετρία της κατασκευής και τις συνολικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον. Για να καθοριστεί η ισχύς σε θέρμανση θα πρέπει να επιλεγούν οι θερμοκρασίες στις οποίες θα δουλεύει το σύστημα. Αυτό γίνεται βάσει της χαμηλότερης μέσης εξωτερικής θερμοκρασίας όπως αυτή προκύπτει από τον Πίνακα 3.2 αλλά και της βέλτιστης για την καλλιέργεια τομάτας στην περιοχή όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2.1. Αφού καθορισθεί η εγκατεστημένη ισχύς θα γίνει υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας μέσω των ωρών λειτουργίας βάσει στοιχείων θερμοκηπίων της περιοχής της Θεσσαλονίκης.

3.2 Μέθοδος αξιολόγησης της Επένδυσης

Η αξιολόγηση της επένδυσης θα γίνει μέσω της μεθόδου της Καθαρας Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) και θα συγκριθεί με την περίπτωση ενός τυπικού συμβατικού θερμοκηπίου που θα εγκατασταθεί στην περιοχή και θα θερμαίνεται με σύστημα ορυκτών καυσίμων. Η ΚΠΑ αποτελεί μία από τις πλέον αξιόπιστες μεθόδους σύγκρισης επενδύσεων. Συγκεκριμένα

λαμβάνει υπ' όψιν εισροές και εκροές χρήματος από μία επιχειρηματική δραστηριότητα ενώ λαμβάνει υπ' όψιν τόσο την αρχική επένδυση, τη σημερινή αξία του χρήματος και το επιτόκιο δανεισμού (Παπαδόπουλος.Α, 2003) . Η Εξίσωση 2 αποτυπώνει τον τρόπο που προκύπτει η ΚΠΑ για ένα επενδυτικό έργο, όπως και τα απαιτούμενα μεγέθη.

$$NPV=-CF_o+\frac{CF_1}{(1+0,04)^1}+\frac{CF_2}{(1+0,04)^2}+\frac{CF_3}{(1+0,04)^3}+\frac{CF_4}{(1+0,04)^4}+.....\frac{CF_n}{(1+0,04)^n} \quad \textbf{(2)}$$

NPV: Καθαρά παρούσα αξία
CFo: Αρχικό κόστος επένδυσης
CFn: Χρηματοροή για το έτος n (Έσοδα-Έξοδα)
n: έτος
Για τις ανάγκες της εργασίας θα θεωρηθεί σταθερή παραγωγή και από τις δύο περιπτώσεις θερμοκηπίων και πώληση προϊόντος στην ίδια τιμή. Στα έξοδα θα συμπεριληφθούν οι τυπικότερες δαπάνες κατά τη λειτουργία ενός θερμοκηπίου. Το κόστος ενέργειας για το συμβατικό θερμοκήπιο θα αφορά τη χρήση φυσικού αερίου, ηλεκτρικού ρεύματος και pellet.

3.3 Περιβαλλοντική αξιολόγηση

Ένας από τους πιο αξιόπιστους δείκτες εκτίμησης της περιβαλλοντικής αξιολόγησης μίας ενεργειακής εφαρμογής αποτελεί ο υπολογισμός των εκπεμπόμενων ρύπων CO_2. Ο λόγος είναι ότι προσεγγίζεται συνολικά το πρόβλημα των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων καθώς στις ποσότητες του CO_{2eq} περιλαμβάνονται όλοι οι παραγόμενοι αέριοι ρύποι. Παράλληλα η αέρια ρύπανση αποτελεί το κύριο ζήτημα περιβαλλοντικής επιβάρυνσης στην περίπτωση των συστημάτων θέρμανσης. Ο υπολογισμός των ρύπων CO_{2eq} θα γίνει μέσω των τιμών εκπεμπόμενων ρύπων όπως αυτοί προκύπτουν ανά καύσιμο από τη βιβλιογραφία (μονάδα: gr/ kWh καυσίμου) σε συνδυασμό με την κατανάλωση του καυσίμου για την κάλυψη των αναγκών του θερμοκηπίου μέσω της εξίσωσης (3) όπου θα προκύψει η ποσότητα (μονάδα: gr) των ρύπων (Blum et al., 2010).

Εκπομπές ρύπων CO_2 (gr)= Κατανάλωση ενέργειας (kWh)× Μέση εκπομπή CO_2 ανά μονάδα καυσίμου (gr CO_2 kWh^{-1}) **(3)**

Για την εξεταζόμενη περίπτωση και τα καύσιμα που θα εξεταστούν, οι παραπάνω τιμές περιγράφονται στον Πίνακα 3.3

Πίνακας 3.3 Εκπεμπόμενοι ρύποι ανά KWh παραγόμενης ενέργειας από συνήθη καύσιμα (IEA, 2012; AEBIOM, 2008; Ζιώμας, 2014)

Καύσιμο	Εκπεμπόμενοι ρύποι (kg CO_2/ kWh)
Πετρέλαιο	0.27
Ηλεκτρικό ρεύμα (Ελληνικό Δίκτυο)	0.99
Pellet	0.05
Μεθάνιο	0,185

4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η ανάγκη θέρμανσης για την περιοχή της Θεσσαλονίκης στα θερμοκήπια εντοπίζεται ανάμεσα στους μήνες Δεκέμβριο και Απρίλιο. Οι ώρες λειτουργίας του συστήματος εκτιμώνται στις **400hr**. Για το εξεταζόμενο θερμοκήπιο για την περιοχή της Θεσσαλονίκης η

εγκατεστημένη ισχύς υπολογίστηκε στα **325kW**. Συνεπώς η συνολική κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται στις **130000kWh** για ιδανική λειτουργία. Στον Πίνακα 4.1 αποτυπώνεται το κόστος ενέργειας για κάθε καύσιμο θέρμανσης (ΠΟΠΕΚ, 2017; Energ.gr,2017; ΔΕΗ, 2013) και στον Πίνακα 4.2 τα οικονομικά δεδομένα της μονάδας (Στα συστήματα θέρμανσης λήφθηκαν υπ' όψιν και οι βαθμοί απόδοσης για την τελική κατανάλωση- ενώ οι αρχικές τιμές προέκυψαν από αναζήτηση στο διαδίκτυο και εξαγωγή μέσου όρου από παρόμοιες συσκευές). Το κόστος θερμοκηπίου λογίζεται στις 15000 ευρώ/ στρέμμα (τιμές αγοράς 2017 όπως και οι λειτουργικές δαπάνες- από παραγωγούς). Στον Πίνακα 4.3 φαίνεται ο υπολογισμός της ΚΠΑ ανά περίπτωση επένδυσης- υποστήριξης με το συγκεκριμένο σύστημα θέρμανσης. Η περιβαλλοντική επιβάρυνση σε επίπεδο εκπεμπόμενων ρύπων CO_2 βάσει της μεθόδου που περιγράφηκε στην Ενότητα 3 συνοψίζεται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.1 Κόστος καυσίμων

Καύσιμο	**Απορριπτόμενη θερμότητα ΣΗΘ**	**Πετρέλαιο**	**Pellet**	**Ηλεκτρικό ρεύμα**
Κόστος	0	0,65 ευρώ/ λίτρο	0.25 ευρώ/kg	0.06412 ευρώ/kWh
kWh/ δομική μονάδα	-	11.1 kWh/lt	4.8 kWh/kg	-

Πίνακας 4.2 Οικονομικά δεδομένα μονάδας

ΔΑΠΑΝΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ (Ευρώ)	**Θέρμανση με απορριπτόμενη θερμότητα μονάδας ΣΗΘ**	***Θέρμανση με σύστημα πετρελαίου***	**Θέρμανση με σύστημα pellet**	**Θέρμανση με σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης**
ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ (ετήσια)	2250	2250	2250	2250
ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ(ετήσια)	550	550	550	550
ΦΥΤΙΚΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ(ετήσια)	550	550	550	550
ΑΡΔΕΥΣΗ(ετήσια)	250	250	250	250
ΗΛΕΚΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ(ετήσια)	450	450	450	450
ΕΡΓΑΤΙΚΑ(ετήσια)	1050	1050	1050	1050
ΑΛΛΑ ΕΞΟΔΑ(ετήσια)	200	200	200	200
ΚΟΣΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ(ετήσια)	0	8457	7522	8335
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (ετήσια)	1050	1050	1050	1050
ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ (αρχική)	16722	4312	9968	5671
ΕΤΗΣΙΑ ΕΣΟΔΑ (ετήσια)	18000	18000	18000	18000
ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΔΑΝΕΙΣΜΟΥ (Τράπεζα Πειραιώς, 2017)	7.6%	7.6%	7.6%	7.6%

Πίνακας 4.3 ΚΠΑ ανά περίπτωση για βάθος 10ετίας

Έτος	$1^{ο}$	$2^{ο}$	$3^{ο}$	$4^{ο}$	$5^{ο}$	$6^{ο}$	$7^{ο}$	$8^{ο}$	$9^{ο}$	$10^{ο}$	**ΑΞΙΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ**
Θέρμανση με απορριπτόμενη θερμότητα μονάδας ΣΗΘ	10837	10081	9377	8723	8114	7548	7022	6532	6076	5652	**36244**
Θέρμανση με σύστημα πετρελαίου	2970	2763	2570	2390	2224	2068	1924	1790	1665	1549	**-9394**
Θέρμανση με σύστημα pellet	3840	3572	3322	3091	2875	2674	2488	2314	2153	2002	**-8633**
Θέρμανση με σύστημα	3083	2868	2668	2482	2309	2147	1998	1858	1729	1608	**-9916,57**

ηλεκτρικής θέρμανσης				

Πίνακας 4.4 Εκπομπές CO_2 ανά εξεταζόμενο σύστημα θέρμανσης

Μέθοδος θέρμανσης	Εκπομπή gr CO_2/ kWh	Συνολική απαιτούμενη ενέργεια (kWh)	Συνολική καταναλισκόμενη συμπεριλαμβανομένου και του β.α	Συνολική ποσότητα ετήσιων εκπεμπόμενων ρύπων (gr)
Μέσω ΣΗΘ	0.185	130000	216666	40083
Πετρέλαιο	0.27	130000	141304	38152
Pellet	0.05	130000	147727	7386.35
Ηλεκτρικό ρεύμα	0.99	130000	130000	128700

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση των τεσσάρων περιπτώσεων σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα της χρήσης της απορριπτόμενης θερμότητας από ΣΗΘ βιοαερίου για τη θέρμανση θερμοκηπίων. Συγκεκριμένα φαίνεται ότι το μηδενικό κόστος αγοράς της ενέργειας καθιστά βιώσιμη την εξεταζόμενη επένδυση σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τρεις. Το κόστος ενέργειας δεν επιτρέπει σε καμία εκ' των τριών υποθέσεων εργασίας να καταστεί βιώσιμη σε βάθος δεκαετίας και μάλιστα η αρχική επένδυση δε φαίνεται να αποσβαίνεται βάσει της λειτουργίας που έχει επιλεγεί (400 ώρες/ έτος). Στην περίπτωση της αξιοποίησης της θερμότητας από ΣΗΘ η επένδυση αποσβαίνεται σε περίπου μία τετραετία και η αξία της επένδυσης σε βάθος δεκαετίας είναι θετική και πολύ κοντά στα επίπεδα της αρχικής δαπάνης. Σε περιβαλλοντικό επίπεδο πρακτικά οι μονάδες ΣΗΘ μονάδων βιοαερίου οδηγούν σε εξοικονόμηση και όχι επιβάρυνση ρύπων CO_2, καθώς ισοσκελίζουν την παραγωγή από τα απόβλητα όταν αυτά είναι εκτεθειμένα. Στην περίπτωση που εξετάστηκε λήφθηκε ισοδύναμη με τις εκπομπές από καύση CH_4. Η καύση των pellet οδηγεί στη χαμηλότερη ποσότητα ρύπων CO_2. Παρόλο που δεν λήφθηκε υπόψη η εξοικονόμηση ρύπων από τη διαχείριση αποβλήτων το σύνολο των εκπεμπόμενων ρύπων είναι συγκρίσιμο με εκείνο του πετρελαίου και φανερά καλύτερο από την περίπτωση χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου. Ειδικά στην περίπτωση του ηλεκτρικού ρεύματος όπου το μίγμα παραγωγής είναι υποβαθμισμένο ποιοτικά έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων. Η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας μονάδων ΣΗΘ βιοαερίου αποτελεί μία βιώσιμη λύση για τη θέρμανση θερμοκηπίων καθώς αποδεικνύεται συμφέρουσα οικονομικά και φιλική προς το περιβάλλον αν συμπεριληφθεί και η εξοικονόμηση ρύπων από τη διαχείριση των αποβλήτων. Τα ζητήματα που θα πρέπει να εξεταστούν είναι το κόστος εγκατάστασης που είναι σχετικά υψηλότερο από εκείνο των συμβατικών συστημάτων και ευκολία της αξιοποίησης της.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

European Biomass Association (AEBIOM), 2008, *A Pellet Roadmap for Europe*, AEBIOM

Baehr HD.,2001, *Θερμοδυναμική-Εισαγωγή στα Θεμελιώδη και στις Τεχνικές Εφαρμογές*, Εκδόσεις: Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη.

Benato.A, Macor.A, 2017, *Biogas Engine Waste Heat Recovery Using Organic Rankine Cycle*, 2017, Energies, 10 (3) 327.

Blum. P, Campillo. G, Münch. W, Kölbel. T, 2010, *CO_2 savings of ground source heat pump systems—a regional analysis*, Renewable Energy 35 (1) 122–127.

Clarke Energy-A Kohler Company,2013, *CHP efficiency for biogas*, Clarke Energy.

EBA, 2015 ,*European Biogas Association Report 2015,* European Biogas Association.
Energ.gr, 2017, *Οι τρέχουσες τιμές του pellet*, Energ.gr
FAO, 2014, *Small Scale Aquaponic Food Production: Appendix 1 – Vegetable production guidelines for 12 common aquaponic plants*, Italy, pp288
HAASE Energietechnik AG, 2010, CHP Container Unit-Non binding Price indication, HAASE Energietechnik AG.
Intenational Energy Agency, 2012, *CO2 Emissions from Fuel Combustion—Highlights,* IEA
Jacobs.P & Associates Ltd, 2012., *Agicultural Waste Management*, in: Canada-Prince Edward Island Water Annex to the Federal/ Provincial Framework Agreement for Environmental Cooperation in Atlantic Canada.Best Management Practices, Canada, 2001.
Karlsson.M., *Controlling the Greenhouse Environment,* 2014, Alaska Fairbanks Cooperative Extension Service in cooperation with the United States Department of Agriculture.
Martzopoulou.A and Kotsopoulos.T, 2015, *The use of teleheating for agricultural production: A case study in Ptolemaida Greece*, The Second International Symposium on Agricultural Engineering, Belgrade–Zemun, Serbia.
Rasi.S, *Biogas Composition and Upgrading to Biomethane*, 2009, Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science.
Rutz.D, 2015 *Sustainable Heat Use of Biogas Plants-A Handbook, 2nd Edition*, WIP Renewable Energies, Munich, Germany 92p.
ΔΕΗ, 2013, *Αγροτικό Τιμολόγιο - Διακοπτόμενο (Τ33/ΧΤ, Τ33Α/ΧΤ και λοιπά αγροτικά τιμολόγια χαμηλής τάσης)*, ΔΕΗ.
Ζαφείρης Χ., 2012, *Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου από απόβλητα αγροτοβιομηχανιών*, Ημερίδα βιομάζας, ΕΜΠ-Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΚΑΠΕ.
Ζιώμας.Α, 2014, *Τεχνολογίες μείωσης αέριας ρύπανσης σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών- ΕΜΠ, σελ 41.
Μπάκας Ν. και Μαρκόπουλος Χ., 2011, *Τεχνοοικονομική μελέτη δύο στρεμμάτων θερμοκηπίου με σύστημα επιπλέουσας υδροπονίας σε καλλιέργεια μαρουλιού*, Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καλαμάτας 65σελ.
Νικήτα-Μαρτζοπούλου.Χ, 2006, *Κτηντοτροφικές Κατασκευές*, Εκδόσεις: Γιαχούδη-Θεσσαλονίκη, σελ 438.
Τ.Ε.Ε, 2010, *Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών*, Τεχνική οδηγία Τ.Ε.Ε/ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-3/2010.
Παπαδόπουλος.Α, 2003, *Οικονομική ανάλυση ενεργειακών συστημάτων*,Σημειώσεις παραδόσεως στο μάθημα, Τμήμα εκδόσεων ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, σελ 227.
ΠΟΠΕΚ, 2017, *Τιμές καυσίμων λιανικής στην Ε.Ε*, ΠΟΠΕΚ, Ελλάδα
Τράπεζα Πειραιώς, 2017, *Επιτόκιο Αγροτικών δανείων για γη και εξοπλισμο 2017,* Ελλάδα
Φιρφιρής Β., 2013, *Σχεδιασμός και απόδοση ηλιακά υποβοηθούμενου συστήματος αβαθούς γεωθερμίας για θέρμανση και δροσισμό θερμοκηπίου,* (2013), Μεταπτυχιακη Διατριβή, Γεωπονική Σχολή ΑΠΘ, σελ 277.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΑΓΡΟΤΙΚΑ ΚΛΑΔΕΜΑΤΑ

Εμμανουήλ Καραμπίνης✉[1,2], Βασιλική Γκαβίδου[1], Μιχάλης-Αλέξανδρος Κουγιουμτζής[1,2], Παναγιώτης Γραμμέλης[1], Εμμανουήλ Κακαράς[1,2]

[1] Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, Αιγιαλείας 52, 15125, Αθήνα

2 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Αθήνα

✉ karampinis@certh.gr

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης παρουσιάζεται μια μεθοδολογία πραγματοποίησης μετρήσεων για την εκτίμηση της δυναμικότητας βιομάζας από τα κλαδέματα μόνιμων καλλιεργειών. Επίσης, παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα από μετρήσεις με εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής σε καλλιέργειες στην Ελλάδα και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες και συγκρίνονται με αποτελέσματα προηγούμενων μετρήσεων και βιβλιογραφικούς δείκτες. Οι μετρήσεις δυναμικού βιομάζας έχουν συγκεντρωθεί και οπτικοποιηθεί σε ένα διαδικτυακό εργαλείο – χάρτη (Παρατηρητήριο), το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού έργου uP_running.

Λέξεις κλειδιά: κλαδέματα, μόνιμες καλλιέργειες, ενεργειακή αξιοποίηση, δυναμικό βιομάζας

MEASUREMENT OF BIOMASS POTENTIAL FROM AGRICULTURAL PRUNINGS

Emmanouil Karampinis✉[1,2], Vasiliki Gavidou[1], Michalis-Alexandros Kougioumtzis[1,2] & Panagiotis Grammelis[1], Emmanuel Kakaras[1,2]

[1] Centre for Research and Technology Hellas, Chemical Process and Energy Resources Institute, Egialias 52, 15125, Athens

2 National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, Laboratory of Steam Boilers and Thermal Plants, Heroon Politechniou 9, 15780, Athens

✉ *karampinis@certh.gr*

ABSTRACT

The present study presents a methodology for performing field measurements related to the estimation of biomass potential from prunings of permanent crops. The first results from measurements performed using this methodology from different fields in Greece and other European countries are presented and compared with values obtained from previous measurements and literature ratios. The biomass productivity measurements have been collected and visualized in an online map tool (the Observatory), developed in the frame of the European project uP_running.

Keywords: prunings, permanent crops, energy production, biomass potential

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομάζα από τα αγροτικά κλαδέματα και τις εκριζώσεις παράγεται από αμπελώνες, ελαιώνες και οπωρώνες και αποτελεί έναν ενεργειακό πόρο που παραμένει ως επί το πλείστον ανεκμετάλλευτος, καθώς η συνηθέστερη πρακτική διαχείρισής τους είναι η καύση σε ανοιχτές εστίες στο χωράφι ή – σε μικρότερο ποσοστό - η ενσωμάτωσή τους στο έδαφος. Ωστόσο, οι ποσότητες κλαδεμάτων που παράγονται σε ετήσια βάση στην Ευρώπη είναι τεράστιες και αποτελούν ένα σημαντικό δυναμικό βιομάζας το οποίο θα μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά για την αύξηση της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.

Για να εκτιμηθεί η παραγωγικότητα βιομάζας από κλαδέματα, χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιβλιογραφία τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

Η πρώτη προσέγγιση αναφέρεται ως λόγος υπολειμμάτων προς επιφάνεια (Residue to Surface Ratio, RSR) και κάνει χρήση τιμών παραγωγής βιομάζας ανά εκτάριο (t/ha). Είναι σαφές ότι η τιμή του λόγου RSR επηρεάζεται έντονα από την πυκνότητα φύτευσης μιας καλλιέργειας. Προηγούμενη μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα πως οι δείκτες RSR δείχνουν μεγάλη μεταβλητότητα, επομένως, δε συνίσταται η χρήση μιας σταθερής τιμής RSR για την εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας σε μια μεγάλη περιοχή (García-Galindo et al., 2007). Ωστόσο οι δείκτες RSR χρησιμοποιούνται ευρέως, καθώς η χρήση τους για την εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας από κλαδέματα προϋποθέτει μόνο τη γνώση της καλλιεργούμενης έκτασης με κάποια μόνιμη καλλιέργεια. Επίσης, οι δείκτες RSR δίνουν μια άμεση ένδειξη του αποτελέσματος που έχει η προσπάθεια της συλλογής βιομάζας από μια δεδομένη επιφάνεια και συνδέονται έτσι άμεσα με βασικές οικονομικές παραμέτρους μιας εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας.

Η δεύτερη προσέγγιση αναφέρεται ως λόγος υπολείμματος προς προϊόν (Residue to Product Ratio, RPR) και συνδέει την ποσότητα υπολείμματος με το ύψος της παραγωγής καρπών (t residue / t fruit). Χαρακτηριστικές τιμές του λόγου αυτού για διάφορα είδη καλλιεργειών και για διάφορες χώρες ή περιοχές είναι επίσης διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Κατάλληλοι λόγοι RPR χρησιμοποιούνται ευρέως στις ετήσιες καλλιέργειες, όπου το κύριο προϊόν και το υπόλειμμα παράγονται σε ετήσια βάση. Ωστόσο, η χρήση τους στις μόνιμες καλλιέργειες όπου η συχνότητα κλαδέματος – και επομένως η παραγωγή υπολειμμάτων - μπορεί να μην είναι ετήσια δεν0 δίνει εξίσου καλά αποτελέσματα (Esteban et al., 2008). Επιπλέον, η χρήση λόγων RPR για την εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας προϋποθέτει τη μέτρηση ή τη γνώση της παραγωγής καρπών (EuroPruning, 2016).

Η τρίτη προσέγγιση παρουσιάζει την ποσότητα των κλαδεμάτων ανά δέντρο. Χαρακτηριστικές τιμές δίνονται στη βιβλιογραφία για διάφορα είδη καλλιεργειών. Γνωρίζοντας την πυκνότητα φύτευσης σε μια περιοχή ή το συνολικό αριθμό των δέντρων, είναι δυνατός ο υπολογισμός του δυναμικού βιομάζας από κλαδέματα (Esteban et al., 2008).

Σημειώνεται επίσης ότι η ποσότητα των κλαδεμάτων που παράγεται από μια έκταση που καλλιεργείται από κάποια μόνιμη καλλιέργεια εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την ηλικία των δέντρων, την ποικιλία της καλλιέργειας, το τοπικό κλίμα, τις συνθήκες και τη σύσταση του εδάφους, την εντατικοποίηση της καλλιέργειας, το είδος και τη συχνότητα του κλαδέματος, το επίπεδο άρδευσης, κλπ. οι οποίοι ποικίλουν από αγροτεμάχιο σε αγροτεμάχιο. Επομένως, είναι σαφές ότι η χρήση βιβλιογραφικών συντελεστών για την εκτίμηση της παραγωγής από κλαδέματα – είτε RSR είτε RPR – ενέχει τον κίνδυνο σημαντικών λαθών όταν το ζητούμενο είναι η εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας σε τοπικό

επίπεδο. Δυστυχώς, συστηματικές μετρήσεις πεδίου του δυναμικού κλαδεμάτων από μόνιμες καλλιέργειες δεν είναι γενικά διαθέσιμες.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται αποτελέσματα μετρήσεων της δυναμικότητας της βιομάζας από τα αγροτικά κλαδέματα που έχουν πραγματοποιηθεί την περίοδο 2016 – 2017 στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού έργου uP_running. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με χρήση μιας απλοποιημένης μεθοδολογίας μέτρησης και με τη χρήση ερωτηματολογίων για τη συλλογή πληροφοριών σχετικών με την καλλιέργεια. Τα αποτελέσματα - μαζί με πλήθος μετρήσεων από βιβλιογραφικές πηγές και προηγούμενες έρευνες – έχουν καταγραφεί σε ένα ευκολόχρηστο χάρτη-εργαλείο («Παρατηρητήριο») ώστε ένας χρήστης να μπορεί να δει με ευκολία τη διακύμανση της παραγωγικότητας βιομάζας ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες. Ο τελικός στόχος είναι να αποτελέσει το Παρατηρητήριο ένα χρήσιμο εργαλείο για όσους φορείς ενδιαφέρονται να προχωρήσουν στην ενεργειακή αξιοποίηση κλαδεμάτων, παρέχοντας ένα εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει στη διαστασιολόγηση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

1. ΜΕΘΟΛΟΓΙΑ

Στο πλαίσιο του έργου uP_running, αναπτύχθηκαν τρείς προτεινόμενες μέθοδοι για την εκτίμηση της παραγωγής βιομάζας από κλαδέματα σε ένα αγροτεμάχιο οι οποίες βασίζονται στη ζύγιση ποσότητας του παραγόμενου υπολείμματος.

Μέθοδος 1. Μέτρηση της βιομάζας ανά δένδρο: Επιλέγονται τυχαία δένδρα στο αγροτεμάχιο και πραγματοποιείται χειρωνακτική συλλογή και ζύγιση της βιομάζας. Συνίσταται η ζύγιση της βιομάζας από όσα περισσότερα δέντρα γίνεται, τα οποία πρέπει να επιλέγονται κατά το δυνατόν τυχαία. Ο λόγος RSR δίνεται από τη σχέση:

RSR (t/ha) = Μέσος όρος του [A (kg/δένδρο) * πυκνότητα (δένδρο/ha)] * 0.001 (t/kg)

Μέθοδος 2. Μέτρηση της βιομάζας ανά επιφάνεια: Επιλέγονται με τυχαίο τρόπο επιφάνειες που περιλαμβάνουν συνήθως από 4 εώς 10 δένδρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση συλλέγεται και ζυγίζεται μόνο η βιομάζα που περιλαμβάνεται μέσα στις επιλεγμένες επιφάνειες. Η δειγματοληψία εφαρμόζεται σε τουλάχιστον 2 με 3 επιφάνειες ανά αγροτεμάχιο και ο λόγος RSR δίνεται από τη σχέση:

RSR (t/ha) = Μέσος όρος (B (kg/επιφάνεια) /C (m^2/επιφάνεια)) * 10 (m^2/ha) (t/kg), όπου B= Συνολικό ποσό της βιομάζας ανά επιφάνεια, C= Μέγεθος επιφάνειας.

Μέθοδος 3. Μέτρηση της βιομάζας σε ολόκληρο το αγροτεμάχιο ή κατά μήκος γραμμών: Η συλλογή της βιομάζας προέρχεται από μια μεγάλη επιφάνεια η οποία μπορεί να είναι μια ή περισσότερες γραμμές ή ακόμα και ολόκληρο το χωράφι. Ο τύπος υπολογισμού του RSR είναι ως εξής:

RSR (t/ha) = [D (kg) / E (m^2)]* 10 (m^2/ha) (t/kg), όπου D= Συνολικό ποσό της βιομάζας που συλλέχθηκε, E = Μετρούμενη επιφάνεια.

Περισσότερες πληροφορίες για την υλοποίηση της κάθε μεθόδου μέτρησης περιγράφονται στον οδηγό που αναπτύχθηκε από το έργο uP_running (uP_running, 2017). Πέραν της μέτρησης, συλλέγονται με χρήση κατάλληλου ερωτηματολογίου κάποιες βασικές πληροφορίες σχετικά με την καλλιέργεια, το μέγεθος του αγροτεμαχίου, το σύστημα άρδρευσης αλλά και λίπανσης το οποίο ακολουθείται, τις αποστάσεις φύτευσης, την ετήσια και μέση στρεμματική απόδοση της κάθε καλλιέργειας, τις τεχνικές κλαδέματος που ακολουθούνται αλλά και πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο και το κόστος διαχείρισης της παραγόμενης βιομάζας.

Ο υπολογισμός του λόγου RPR μπορεί να γίνει με διαίρεση του λόγου RSR, όπως δίνεται από τους παραπάνω τύπους, με τη στρεμματική απόδοση (σε t/ha). Γενικά, χρησιμοποιείται

η στρεμματική απόδοση που αναφέρεται στην παραγωγική χρονιά πριν το κλάδεμα. Σε περίπτωση όμως που για κάποιο λόγο αυτή θεωρείται μη τυπική (π.χ. λόγω καταστροφής της καλλιέργειας από ασθένεια), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση στρεμματική απόδοση του αγροτεμαχίου. Τέλος, η εκτίμηση της παραγωγής βιομάζας ανά δέντρο – εφόσον δεν έχει χρησιμοποιηθεί η Μέθοδος 1 οπότε και υπάρχει μια άμεση εκτίμηση – πραγματοποιείται με διαίρεση του λόγου RSR με την πυκνότητα φύτευσης.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορούν να καταγραφούν σε ένα διαδικτυακό εργαλείο που αναπτύχθηκε από το έργο uP_running, το Παρατηρητήριο Βιομάζας από Μόνιμες Καλλιέργειες, το οποίο είναι προσβάσιμο μέσω της ιστοσελίδας http://www.up-running-observatory.eu/el/. Μέχρι σήμερα πάνω από 320 σημεία μέτρησης της παραγωγικότητας της βιομάζας από κλαδέματα έχουν καταγραφεί στο Παρατηρητήριο, εκ των οποίων 90 έχουν πραγματοποιηθεί από εταιρούς του έργου σε συνεργασία με αγρότες, αγροτικούς συνεταιρισμούς και άλλους φορείς που δραστηριοποιούνται στον αγροτικό τομέα σε έξι χώρες (Ελλάδα, Ιταλία, Ισπανία, Κροατία, Ουκρανία, Γαλλία και Πορτογαλία). Η πλειονότητα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε το χειμώνα και την άνοιξη του 2017. Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε ελαιόδεντρα και αμπέλια που πραγματοποιήθηκαν στην Ελλάδα.

2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.1 Παραγωγή κλαδεμάτων από ελαιόδεντρα

Οι μετρήσεις παραγωγής βιομάζας από κλαδέματα ελαιόδεντρων στην Ελλάδα πραγματοποιήθηκαν το πολύ δυο μέρες μετά την κοπή των κλαδιών, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι αναφέρονται σε τυπική υγρασία περίπου 35%. Επίσης, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αφού οι αγρότες είχαν απομακρύνει τα μεγαλύτερα κομμάτια ξύλου (τυπικής διαμέτρου άνω των 6 cm), τα οποία χρησιμοποιούνται ως καυσόξυλα. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων εφαρμόστηκε η Μέθοδος 1 (μέτρηση βιομάζας ανά δέντρο), καθώς θεωρήθηκε η πλέον κατάλληλη λόγω του όγκου των κλαδεμάτων. Τέλος, σημειώνεται ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ζυγίζοντας τα κλαδέματα μαζί με τα φύλλα τους.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην Ελλάδα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Ως προς την παραγωγή βιομάζας ανά δέντρο, φαίνεται ότι τα ελαιόδεντρα μικρής ηλικίας (κάτω των 15 ετών) παρουσιάζουν σχετικά μικρή παραγωγή βιομάζας, η οποία είναι της τάξεως των 8.0 – 8.8 ξηρά kg/δέντρο/έτος. Τα ελαιόδεντρα από ποικιλίες μέτριας ζωηρότητας (π.χ. Κορωνέικη, Κοθρέϊκη, Μεγαρίτικη) και τα οποία βρίσκονται σε παραγωγικές ηλικίες παρουσιάζουν παραγωγικότητα από 16.3 έως 21.1 ξηρά kg/δέντρο/έτος. Τέλος, τα ελαιόδεντρα από ιδιαίτερα ζωηρές ποικιλίες (Αμφίσσης, Καλαμών) παρουσιάζουν πολύ μεγάλη παραγωγικότητα, η οποία κυμαίνεται από 53.4 έως 65.0 ξηρά kg/δέντρο/έτος.

Όπως αναμενόταν, ο λόγος RSR παρουσιάζει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις, καθώς – εκτός της παραγωγικότητας των δέντρων – εξαρτάται πάρα πολύ και από την πυκνότητα φύτευσης. Η χαμηλότερη τιμή (2.44 t/ha) σημειώθηκε στη Λιβαδεία, σε περίπτωση όπου η συχνότητα του κλαδέματος είναι ετήσια. Αντίστοιχη τιμή καταγράφηκε και στους Μολάους (2.67 t/ha), παρόλο που η πυκνότητα φύτευσης είναι μόλις το ένα τρίτο της προηγούμενης περίπτωσης. Ωστόσο, στους Μολάους η συχνότητα κλαδέματος είναι διετής, γεγονός που πρακτικά διπλασιάζει την ποσότητα βιομάζας αμέσως μετά το κλάδεμα. Γενικά, μια καλή πυκνότητα φύτευσης και διετής συχνότητα κλαδέματος μπορεί να αυξήσει την

παραγωγικότητα βιομάζας σε t/ha, παρά τη σχετικά μικρή παραγωγή κλαδεμάτων ανά δέντρο. Η υψηλότερη τιμή του λόγου RSR καταγράφηκε στο Αγρίνιο και θεωρείται ότι προέρχεται από συνδυασμό δυο παραγόντων, της ζωηρής ποικιλίας ελιάς και των ιδιαίτερων κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής (υψηλό ύψος ετήσιας βροχόπτωσης), οι οποίες επιτρέπουν μια αρκετά πυκνή φύτευση.

Τέλος, ο λόγος RPR κυμάνθηκε στις περισσότερες περιπτώσεις από 0.50 έως 0.61 (ξηρά κλαδέματα προς καρπό), τιμή που βρίσκεται σε καλή συμφωνία με τη συμβατική τιμή του 0.66 που αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Αποστολάκης et al., 1987). Ωστόσο, υπάρχουν και σημεία μέτρησης όπου ο λόγος RPR έχει μεγαλύτερες τιμές, όπως 1.16 στο Αγρίνιο ή 2.20 στον Άγιος Σεραφείμ ή μικρότερες, όπως 0.26 στους Μολάους. Γενικά, η χρήση του βιβλιογραφικού λόγου RPR μπορεί να θεωρηθεί πως δίνει μια σχετικά καλή εκτίμηση του δυναμικού κλαδεμάτων ελαιόδεντρων σε επίπεδο χώρας, όμως είναι πολύ πιθανό να δώσει λανθασμένες ενδείξεις στην εκτίμηση τοπικών δυναμικών. Σημειώνεται πάντως ότι υπάρχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα ως προς τον υπολογισμό του λόγου RPR, καθώς βασίζεται σε λεγόμενα των αγροτών για την παραγωγικότητα των χωραφιών τους και δεν υποστηρίζεται από αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις παραγωγής ελαιοκαρπών.

Πίνακας 1. Μετρήσεις παραγωγής βιομάζας από κλαδέματα ελαιόδενδρων

Τοποθεσία	Ποικιλία / Ηλικία	Άρδρευση	Πυκνότητα φύτευσης (δένδρα/ha)	Συχνότητα κλαδέματος	Παραγωγή ξηρής βιομάζας		
					RSR (t/ha)	Ανά δέντρο (kg/δέντρο/έτος)	RPR
Κορωπί	Κορωνέικη / 15	×	300	Διετής	5.28	8.8	0.61*
Σκάλα Λακωνίας	Καλαμών / 10	✓	410	Ετήσια	3.26	8.0	0.54
Σπάρτη	Κορωνέικη / 25	×	220	Ετήσια	3.88	17.6	0.59*
Μολαοί	Κορωνέικη / 60	✓	53	Διετής	2.67	21.1	0.26
Λιβαδειά	Κοθρεική / 70	×	150	Ετήσια	2.44	16.3	0.70
Άγιος Σεραφείμ	Μεγαρίτικη / 30	✓	250	Ετήσια	4.39	17.6	2.20*
Άγιος Κωνσταντίνος	Αμφίσσης / 75	✓	85	Ετήσια	5.53	65.0	0.55
Άγιος Κωνσταντίνος	Καλαμών / 60	✓	85	Ετήσια	4.97	58.5	0.50
Αγρίνιο	Καλαμών / 40	✓	173	Ετήσια	9.31	53.4	1.16
*** Με βάση τυπική απόδοση καλλιέργειας**							

2.2 Παραγωγή κλαδεμάτων από αμπέλια

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων παραγωγής βιομάζας από κλαδέματα εφαρμόστηκαν κυρίως η Μέθοδος 1 (μέτρηση βιομάζας ανά δέντρο) και η Μέθοδος 3 (μέτρηση βιομάζας κατά μήκος σειρών). Η τελευταία ήταν σχετικά εύκολο να πραγματοποιηθεί λόγω της μικρής παραγωγής κλαδεμάτων ανά πρέμνο. Ανάλογα με τις μέρες που μεσολάβησαν από την κοπή των κλαδεμάτων μέχρι τη ζύγισή τους, η υγρασία τους κυμάνθηκε από 30% (παραμονή 45 ημερών) έως 50% (άμεση ζύγιση μετά την κοπή). Σε όλες τις περιπτώσεις, η συχνότητα κλαδέματος ήταν ετήσια.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην Ελλάδα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Η παραγωγή βιομάζας ανά πρέμνο κυμάνθηκε στις περισσότερες περιπτώσεις από 0.25 έως 0.43 kg. Η ποικιλία Sangiovese και στις δυο μετρούμενες τοποθεσίες έδωσε χαμηλές τιμές παραγωγικότητας (0.12 – 0.14 kg/πρέμνο), παρά το γεγονός ότι χαρακτηρίζεται γενικά ως ποικιλία μέτριας-υψηλής ζωηρότητας. Ωστόσο, ακριβώς εξαιτίας της ανάγκης περιορισμού της ζωηρότητας αυτής και της διατήρησης της ποιότητας του κρασιού, η ποικιλία φύεται συνήθως σε εδάφη χαμηλής παραγωγικότητας (Christensen, 2015). Η παραγωγικότητα σε σταφύλι στα δυο σημεία μέτρησης συνάδει με τη φύτευση σε εδάφη χαμηλής παραγωγικότητας, η οποία φαίνεται να επηρεάζει και την παραγωγή βιομάζας στα κλαδέματα. Η μεγαλύτερη παραγωγή κλαδεμάτων ανά πρέμνο παρατηρήθηκε σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε καλλιέργειες Ροδίτη, Ασσύρτικου και Ξινόμαυρου. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι για τις δυο τελευταίες ποικιλίες, υπήρχαν και άλλα σημεία μέτρησης όπου η παραγωγή κλαδεμάτων ανά πρέμνο ήταν η μισή. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται πιθανώς στη διαφορετική στρεμματική απόδοση των καλλιεργειών (για το Ξινόμαυρο, διπλάσια περίπου στη Νάουσα σε σχέση με το Καπανδρίτι) ή σε διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές (για την περίπτωση του Ασσύρτικου).

Ο λόγος RSR παρουσιάζει και στην περίπτωση των αμπελιών μεγάλες διακυμάνσεις και κυμαίνεται από 0.39 t/ha για την καλλιέργεια Sangiovese στα Σπάτα έως 2.12 t/ha στην ίδια περιοχή για την καλλιέργεια Ασσύρτικου με υψηλή πυκνότητα φύτευσης. Γενικά, ο λόγος RSR για τα κλαδέματα των αμπελιών χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για τα κλαδέματα των ελαιοδέντρων.

Τέλος, ο λόγος RPR κυμάνθηκε στις περισσότερες περιπτώσεις από 0.05 έως 0.11 (ξηρά κλαδέματα προς καρπό). Ο λόγος RPR αποτελεί ουσιαστικά το αντίστροφο του Δείκτη Ravaz, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρεώς για τα οινάμπελα. Γενικά, συνίσταται ο Δείκτης Ravaz να κυμαίνεται μεταξύ 5 – 10, καθώς μικρότερες τιμές αναφέρονται σε ελλιπές κλάδεμα, ενώ μεγαλύτερες τιμές σε υπερβολικό (Μπεκατώρου, 2016). Θεωρώντας τυπική υγρασία κλαδεμάτων 50%, οι συνιστώμενες τιμές του Δείκτη Ravaz αντιστοιχούν σε RPR μεταξύ 0.05 και 0.10. Στις δυο περιπτώσεις όπου παρατηρήθηκε ιδιαίτερα υψηλή παραγωγή βιομάζας ανά πρέμνο (Σπάτα / Ασσύρτικο, Νάουσα / Ξινόμαυρο), ο δείκτης RPR εμφάνισε πάντως μεγαλύτερες τμές (0.24 και 0.18 αντίστοιχα). Ο λόγος RPR στην περίπτωση της μέτρησης σε σταφιδάμπελο ανήλθε σε 0.4, αλλά στην περίπτωση αυτή δεν εφαρμόζονται κλαδευτικές πρακτικές που απορρέουν από τη χρήση του Δείκτη Ravaz. Σημειώνεται τέλος ότι η τυπική αναφορά (Αποστολάκης et al., 1987) για την αξιολόγηση της παραγωγής βιομάζας από κλάδεμα αμπελώνων στην Ελλάδα αναφέρει RPR ίσο με 0.50, πολύ μεγαλύτερο δηλαδή από τις μετρούμενες τιμές. Το γεγονός αυτό δίνει την ένδειξη ότι οι εκτιμήσεις δυναμικού κλαδεμάτων αμπελιών στην Ελλάδα που βασίζονται σε βιβλιογραφικές πηγές είναι μάλλον υπερεκτιμημένες.

Πίνακας 2. Μετρήσεις παραγωγής βιομάζας από κλαδέματα αμπελιών

Τοποθεσία	Ποικιλία	Άρδρευση	Πυκνότητα φύτευσης (πρέμνα/ha)	Παραγωγή ξηρής βιομάζας		
				RSR (t/ha)	Ανά πρέμνο (kg/πρέμνο/έτος)	RPR
Κορωπί	Sangiovese	×	2,750	0.39	0.14	0.06
Σπάτα	Sangiovese	✓	3,450	0.42	0.12	0.05
Σπάτα	Ασσύρτικο	✓	3,450	2.12	0.61	0.24*
Νάουσα	Ξινόμαυρο	✓	2,450	2.00	0.82	0.18
Λιβαδειά	Cabernet & Chardonnay	✓	3,320	1.04	0.31	0.13

Τοποθεσία	Ποικιλία	Άρδρευση	Πυκνότητα φύτευσης (πρέμνα/ha)	Παραγωγή ξηρής βιομάζας		
				RSR (t/ha)	Ανά πρέμνο (kg/πρέμνο/έτος)	RPR
Άγιος Σεραφείμ	Μερλό	✓	2,361	0.77	0.43	0.07
Καπανδρίτι	Ξινόμαυρο	✓	2,600	0.65	0.25	0.10
Καπανδρίτι	Αγιωργίτικο	✓	2,600	0.90	0.35	0.14
Σπάρτη	Αγιωργίτικο	✓	3,250	1.25	0.38	-
Σκάλα Λακωνίας	Ασσύρτικο	✓	2,000	0.66	0.33	-
Νεμέα	Αγιωργίτικο	✓	3,500	1.23	0.35	0.10
Νεμέα	Αγιωργίτικο	✓	3,500	1.31	0.37	0.11
Νεμέα	Κορινθιακή Σταφίδα	✓	3,500	1.39	0.40	0.40
Νεμέα	Ροδίτης	✓	3,200	1.82	0.57	0.07
*** Με βάση τυπική απόδοση καλλιέργειας**						

2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με βιβλιογραφικές πηγές

Εκτός των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην Ελλάδα, στο πλαίσιο του έργου uP_running έχει πραγματοποιηθεί ένας σημαντικός αριθμός μετρήσεων και σε άλλες χώρες. Επίσης, συγκεντρώθηκε ένας μέγαλος αριθμός τιμών που αφορούν την παραγωγικότητα βιομάζας από κλαδέματα από διάφορες βιβλιογραφικές πηγές (Acampora et al, 2013; Bilandzija et al, 2012; Magagnotti et al., 2013; Recchia et al, 2009; Spinelli et al, 2010; Spinelli and Picchi, 2010; Spinelli et al., 2011; Spinelli et al., 2013), καθώς και από προηγούμενες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού προγράμματος EuroPruning (García-Galindo D., 2016). Τέλος, εξετάστηκαν και άρθρα που συγκεντρώνουν τυπικές τιμές παραγωγικότητας βιομάζας από κλαδέματα είτε χωρίς αναφορά σε συγκεκριμένες μετρήσεις (Esteban et al., 2008), είτε από μεγάλο πλήθος μετρήσεων σε συγκεκριμένες καλλιέργειες (Velázquez-Martí et al., 2011), (Velázquez-Martí et al., 2013).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τους λόγους RSR και η παραγωγή κλαδεμάτων ανά δέντρο παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Γενικά, οι νέες μετρήσεις κυμαίνονται εντός των αναμενόμενων αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας, με την εξαίρεση ίσως της περίπτωσης των πολύ ζωηρών ποικιλιών ελαιόδεντρων (Αμφίσσης και Καλαμών) στην Ελλάδα που παρουσιάζουν υψηλή παραγωγικότητα ανά δέντρο. Σημειώνεται επίσης ότι από ανάλυση των αποτελεσμάτων παλαιότερης μελέτης (Αποστολάκης et al., 1987), τα κλαδέματα ανά δέντρο για εσπεριδοειδή, πυρηνόκαρπα και ακρόδρυα στην Ελλάδα υπολογίζονται μεταξύ 8.2 και 9.3 ξηρών kg ανά δέντρο (κοινά για όλες τις περιπτώσεις). Αν και οι τιμές αυτές είναι εντός του αναμενόμενου εύρους, θεωρείται μάλλον απίθανο το να καταφέρει η χρήση τους να καλύψει όλο το εύρος των τοπικών περιπτώσεων.

Πίνακας 3. Σύγκριση του εύρους της παραγωγικότητας βιομάζας από κλαδέματα.

Πηγή	Είδος Καλλιέργειας				
	Ελιές	Αμπέλια	Εσπεριδοειδή	Πυρηνόκαρπα	Ακρόδρυα
	RSR (ξηροί t/ha)				
uP_running (Ελλάδα)	2.2 – 9.3	0.4 – 2.1	-	-	-
uP_running (άλλες χώρες)	0.6 – 14.4	0.4 – 6.5	-	1.0 – 9.4	-

Πηγή	Είδος Καλλιέργειας				
	Ελιές	Αμπέλια	Εσπεριδοειδή	Πυρηνόκαρπα	Ακρόδρυα
Βιβλιογραφία και EuroPruning	0.4 – 10.9	0.1 – 2.7	0.6 – 5.1	0.01 – 15.1	0.2 - 6.9
(Velázquez-Martí et al., 2011)*, (Velázquez-Martí et al., 2013)*	0.4 – 4.6	-	2.4 – 4.7	-	-
	Βιομάζα (ξηρά kg/δέντρο/έτος)				
uP_running (Ελλάδα)	7.9 – 65.0	0.1 – 0.8	-	-	-
uP_running (άλλες χώρες)	3.9 – 19.4	0.1 – 1.2	-	0.4 – 15.7	-
Βιβλιογραφία και EuroPruning	1.6 – 28.7	0.03 – 1.4	1.5 – 12.3	~ 0 – 21.6	1.1 – 9.6
(Esteban et al., 2008)	7.0 – 15.0	0.3 – 0.7	1.5 – 2.5	2.0 – 3.0	0.5 – 1.0
(Velázquez-Martí et al., 2011)*, (Velázquez-Martí et al., 2013)*	1.3 - 26.2	-	4.1 – 9.4	-	-
* Αφορούν μόνο το ξυλώδες μέρος των κλαδεμάτων					

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραγωγικότητα βιομάζας από κλαδέματα μόνιμων καλλιεργειών παρουσιάζει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις καθώς εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων όπως το είδος της καλλιέργειας και η ποικιλία, οι τοπικές κλιματικές συνθήκες, οι αγρονομικές πρακτικές, η πυκνότητα φύτευσης, κτλ. Οι διακυμάνσεις είναι πολύ μεγάλες όταν εκφράζεται ως λόγος RSR (t/ha), μια παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά το κόστος συλλογής. Η μη σωστή εκτίμησή της μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικές προσδοκίες κατά την έναρξη μιας αξιακής αλυσίδας από κλαδέματα και επομένως και στη δυνητική της αποτυχία.

Στο πλαίσιο του έργου uP_running έχει γίνει μια συστηματική προσπάθεια καταγραφής των εμπειριών παραγωγικότητας βιομάζας που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία, καθώς και πραγματοποίηση αρκετών νέων μετρήσεων. Η καταγραφή των μετρήσεων αυτών πραγματοποιείται σε ένα διαδικτυακό εργαλείο (Παρατηρητήριο), το οποίο φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο σε όσους ενδιαφέρονται να ξεκινήσουν μια προσπάθεια εκμετάλλευσης της βιομάζας από τα κλαδέματα. Ιδίως όσον αφορά την Ελλάδα, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν δείχνουν ότι παλαιότερες, βιβλιογραφικές προσεγγίσεις δεν είναι επαρκείς για την σωστή εκτίμηση του τοπικού δυναμικού βιομάζας. Απαιτούνται πρόσθετες μελέτες και τη συγκέντρωση στατιστικών δεδομένων για τις εν Ελλάδι ποικιλίες προκειμένου να πραγματοποιηθούν ασφαλέστερες εκτιμήσεις για το δυναμικού βιομάζας από κλαδέματα.

4. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία έχει πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Έργου uP_running (http:www.up-running.eu), το όποιο έχει λάβει χρηματοδότηση από το Πρόγραμμα Πλαίσιο της ΕΕ για την Έρευνα και την Καινοτομία Horizon 2020 (αριθμός συμβολαίου 691748).

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Acampora A., Croce S., Assirelli A., Del Giudice A., Spinelli R., Suardi A., Pari L., 2013. *Product contamination and harvesting losses from mechanized recovery of olive tree pruning residues for energy use*. Renewable Energy 53, 350-353.

Bilandzija N, Voca N., Kricka T., Matin A., Jurisic V., 2012. *Energy potential of fruit tree pruned biomass in Croatia*. Spanish Journal of Agricultural Research 10(2), 292-298.

Christensen, L.P., 2015. Sangiovese. In: UC Integrated Viticulture. Available online at: http://iv.ucdavis.edu/files/24359.pdf

Esteban L.S., Ciria P., Carasco J.E. 2008. *An assessment of relevant methodological elements and criteria for surveying sustainable agricultural and forestry biomass byproducts for energy purposes*. BioResources 3: 910-928.

EuroPruning, 2016. *Deliverable Reporting: D3.1 Mapping and analysis of the pruning biomass potential in Europe*.

García-Galindo D., Pascual J., Asín J., García A., 2007. *Variability and confidence interval in the estimation of agricultural residual biomass at a municipality level in Teruel province (Spain)*. 15th European Biomass Conference. pp. 361-367.

García-Galindo D., 2016. *Biomass Ratios Database / EuroPruning project*.

Magagnotti N., Pari L., Picchi G., Spinelli R., 2013. *Technology alternatives for tapping the pruning residue resource*. Bioresource Technology 128, 697-702.

Recchia L., Daou M., Rimediotti M., Cini E., Vieri M., 2009. New shredding machine for recycling pruning residuals. Biomass and Bioenergy 33(1), 149-154.

Spinelli R., Magagnotti N., Nati C., 2010. *Harvesting vineyard pruning residues for energy use*. Biosystems Engineering 105(3), 316-322.

Spinelli R., Picchi G., 2010. *Industrial harvesting of olive tree pruning residue for energy biomass.* Bioresource Technology 101, 730-735.

Spinelli R., Magagnotti N., Nati C., Cantini C., Sani G., Picchi G., Biocca M., 2011. *Integrating olive grove maintenance and energy biomass recovery with a single-pass pruning and harvesting machine*. Biomass and Bioenergy 35(2), 808-813.

Spinelli R., Nati C., Pari L., Mescalchin E., Magagnotti N., 2012. *Production and quality of biomass fuels from mechanized collection and processing of vineyard pruning residues*. Applied Energy 89(1), 374-379.

uP_running, 2016. Οδηγίες μέτρησης της παραγωγής βιομάζας από Αγροτικά Κλαδέματα και Εκριζώσεις. http://www.up-running-observatory.eu/file_uploads/8_el_uP_running_guidelines_for_field_sampling_EL.pdf

Velázquez-Martí B., Fernández-González E., López-Cortés I., Salazar-Hernández D.M., 2011. Quantification of the residual biomass obtained from pruning of trees in Mediterranean olive groves. Biomass and Bioenergy 35(7), 3208-3217.

Velázquez-Martí B., Fernández-González E., López-Cortés I., Callejón-Ferre A.J., 2013. *Prediction and evaluation of biomass obtained from citrus trees pruning*. Food, Agriculture and Environment 11, 1485-1491.

Αποστολάκης Μ., Κυρίτσης Σ., Σούτερ Χ., 1987. *Το ενεργειακό δυναμικό της βιομάζας γεωργικών και δασικών υποπροϊόντων (Έρευνα στον Ελληνικό χώρο)*. Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας (ΕΛΚΕΠΑ), Αθήνα, 208 σελ.

Μπεκατώρου, Α., 2016. Θέμα Αμπελουργίας. Ανάπτυξη της αμπέλου. Υποκείμενα. Ποικιλίες. Πανεπιστήμιο Πατρών, upatras eclass.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΜΕ ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ευάγγελος Δημητρίου*, Χρήστος Καραβάς, Essam Sh. Mohamed & Γεώργιος Παπαδάκης
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής,
Ιερά οδός 75, 118 55 Αθήνα, τηλ. 210 5294046 *email: vdimt@aua.gr

Περίληψη

Οι μονάδες αφαλάτωσης με Αντίστροφη Όσμωση (ΑΟ) αποτελούν μια πετυχημένη προσέγγιση στη λύση του προβλήματος της λειψυδρίας κυρίως σε απομακρυσμένες νησιωτικές ή παραθαλάσσιες περιοχές. Οι μονάδες αυτές πολλές φορές διασυνδέονται με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Μονάδες αφαλάτωσης ΑΟ άμεσα συνδεδεμένες με τεχνολογίες ΑΠΕ μπορούν να μειώσουν δραστικά την ειδική κατανάλωση ενέργειας κυρίως κατά την λειτουργία τους σε μερικό φορτίο. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική αξιολόγηση μιας μονάδας ΑΟ, δυναμικότητας 150 L/h, η οποία είναι εφοδιασμένη με υδραυλικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας τύπου Clark pump. Επιπλέον η μονάδα αφαλάτωσης είναι συνδεδεμένη με μια υδραυλική αποθήκη ενέργειας, με τη μορφή αεροφυλακίων, η οποία είναι ικανή να κρατήσει την πίεση σταθερή για μικρά χρονικά διαστήματα (περίπου μισή ώρα). Ο βασικός στόχος της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση μιας μικρής κλίμακας μονάδας ΑΟ που τροφοδοτείται από ΑΠΕ με σκοπό την αυτόνομη λειτουργία της με την χαμηλότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: Αφαλάτωση Αντίστροφης Όσμωσης, Ανάκτηση ενέργειας, Υδραυλική αποθήκευση ενέργειας.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A REVERSE OSMOSIS DESALINATION UNIT WITH A SHORT TERM ENERGY STORAGE

Evangelos Dimitriou*, Christos Karavas, Essam Sh. Mohamed & George Papadakis
Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources and Agricultural Engineering,
75 Iera Odos Street, Athens 11855, Greece, Tel. + 30 2105294046 *email: vdimt@aua.gr

Abstract

Reverse Osmosis (RO) desalination units constitute a successful technology for covering the potable water needs of islands and coastal regions. RO units can be combined with Renewable Energy Sources (RES). Conventional RO units direct driven with RE technologies can decrease drastically the specific energy consumption under a part-load operation. In the current paper, an experimental evaluation of an RO desalination unit, with a capacity of 150 L/h, is realized, which is equipped with a hydraulic energy recovery device of the Clark Pump type. Furthermore the RO unit is also connected with a hydraulic pressure buffer in the form of pressure vessels' array which is able to keep the pressure constant for a time period of about half an hour. The main pursue of this experimental work is to investigate a small scale RO unit coupled with RE technologies in order to operate autonomously with the lowest specific energy consumption.

Key words: Reverse Osmosis Desalination, Energy recovery, Hydraulic energy storage.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πόσιμο νερό είναι από τα πιο σημαντικά αγαθά για μια κοινότητα, προκειμένου να ανθήσει και να ευδοκιμήσει οικονομικά και κοινωνικά. Πολλές περιοχές στον πλανήτη, όπως τα νησιά και οι παραθαλάσσιες περιοχές, αντιμετωπίζουν προβλήματα έλλειψης πόσιμου νερού. Εν τω μεταξύ, πολλές από αυτές τις περιοχές χαρακτηρίζονται επιπλέον και από την έλλειψη ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Οι μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση (ΑΟ) αποτελούν μια λύση στο πρόβλημα του πόσιμου νερού στις περιοχές αυτές. Μολονότι η ΑΟ είναι μια ενεργοβόρα μέθοδος, λόγω της υψηλής πίεσης που απαιτείται από το σύστημα αντλιών, οι τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) όπως τα φωτοβολταϊκά ή/και οι ανεμογεννήτριες μπορούν να παράγουν την απαιτούμενη ενέργεια για την λειτουργία μιας μικρής κλίμακας μονάδας αφαλάτωσης (Mohamed and Papadakis 2004, Manolakos et al. 2008). Ήδη υπάρχοντα συστήματα αφαλάτωσης τροφοδοτούμενα από φωτοβολταϊκά ή/και ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν υψηλές τιμές ειδικής κατανάλωσης ενέργειας (15 – 20 kWh/m^3) (Tzen et al. 2004). Η χρησιμοποίηση όμως συστημάτων ανάκτησης ενέργειας σε μονάδες μικρής κλίμακας ΑΟ θαλασσινού νερού μπορεί να μειώσει δραστικά την ειδική κατανάλωση ενέργειας (μικρότερη από 5 kWh/m^3) (Mohamed et al. 2006). Επιπλέον πειραματικές εργασίες έδειξαν ότι οι μονάδες μικρής κλίμακας ΑΟ θαλασσινού νερού που τροφοδοτούνται από ΑΠΕ και εφοδιασμένες με σύστημα ανάκτησης ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα σε πλήρες και μερικό φορτίο με την χαμηλότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας (Tzen et al. 2004, Mohamed et al. 2008, Dimitriou et al. 2014, Dimitriou et al. 2015).

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση μιας μονάδας αφαλάτωσης ΑΟ, θαλασσινού νερού, η οποία τροφοδοτείται αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά. Η μικρής κλίμακας μονάδα ΑΟ έχει δυναμικότητα 150L/h και είναι εφοδιασμένη με υδραυλικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας τύπου Clark, η οποία παίζει τον ρόλο της αντλίας υψηλής πίεσης σε ένα συμβατικό σύστημα ΑΟ. Η ισχύς που απαιτείται για την λειτουργία της μονάδας ΑΟ παράγεται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (1.6 kWp), η οποία είναι εγκατεστημένη στην οροφή του εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Επιπλέον, μονάδα ΑΟ είναι συνδεδεμένη με μια υδραυλική αποθήκη ενέργειας, με τη μορφή αεροφυλακίων, η οποία είναι ικανή να κρατήσει την πίεση σταθερή για περίπου μισή ώρα. Ο βασικός σκοπός της εργασίας αυτής είναι να καθοριστεί η συμπεριφορά μιας μικρής κλίμακας μονάδας ΑΟ που τροφοδοτείται αποκλειστικά από τεχνολογίες ΑΠΕ και εφοδιασμένη με ένα υδραυλικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, σε περίπτωση απώλειας ενέργειας από την φωτοβολταϊκή συστοιχία μια συννεφιασμένη ημέρα.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

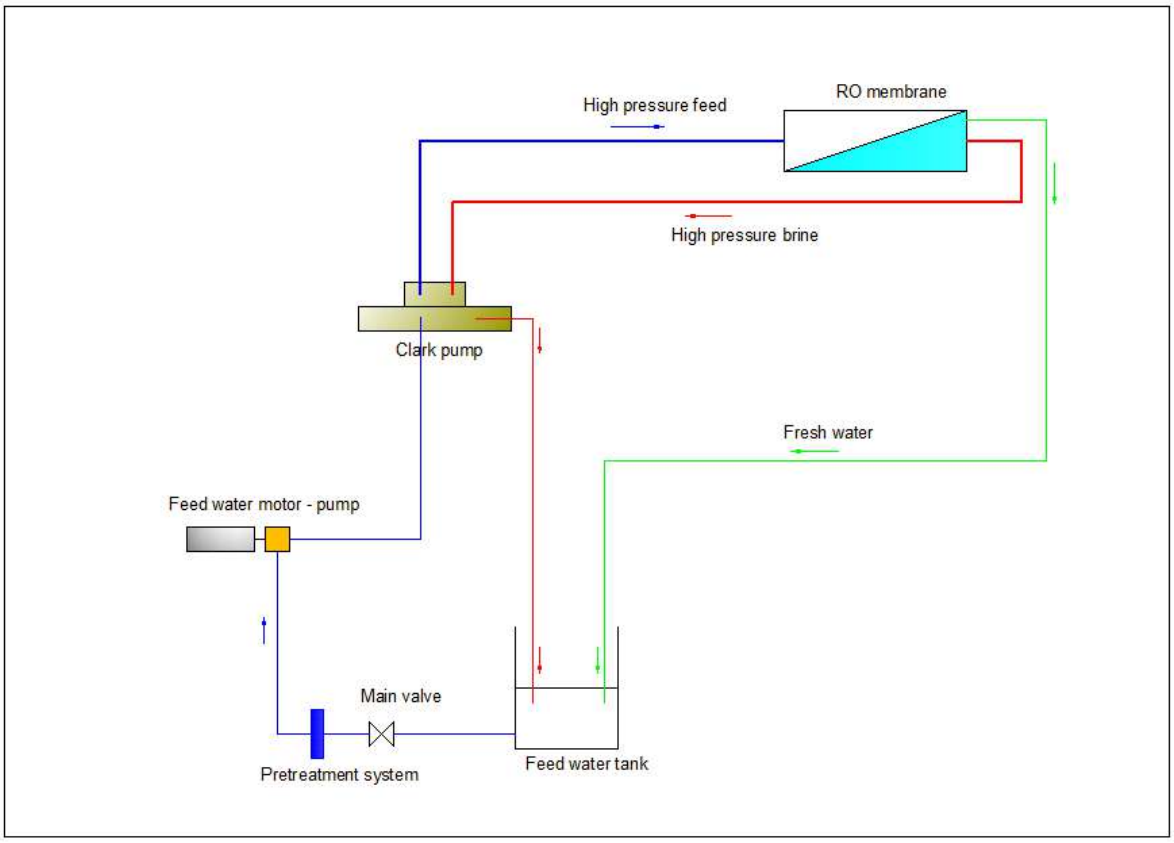
2.1. Γενική Περιγραφή

Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με μια μικρής κλίμακας μονάδα αφαλάτωσης, δυναμικότητας 150 L/h, η οποία είναι συνδεδεμένη με μια βραχύχρονη εναλλακτική αποθήκη υδραυλικής πίεσης με τη μορφή αεροφυλακίων με στόχο να κρατήσει την πίεση σταθερή για ένα χρονικό διάστημα μισής ώρας.

2.2. Περιγραφή μονάδας Αφαλάτωσης

Η μονάδα αφαλάτωσης ΑΟ αποτελείται από μια δεξαμενή τροφοδοσίας, μια αντλία τροφοδοσίας, το σύστημα προ-επεξεργασίας και ένα στοιχείο μεμβράνης σπειροειδούς

περιέλιξης. Η μονάδα ΑΟ είναι εφοδιασμένη επίσης με ένα υδραυλικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας τύπου Clark Pump, το οποίο παίζει το ρόλο της αντλίας υψηλής πίεσης σε μια συμβατική μονάδα αφαλάτωσης ΑΟ. Το σχηματικό διάγραμμα της μονάδας απεικονίζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Σχηματικό διάγραμμα μονάδας ΑΟ θαλασσινού νερού.

2.2.1 Δεξαμενή τροφοδοσίας

Η δεξαμενή τροφοδοσίας είναι κατασκευασμένη από μαύρο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, χωρητικότητας 1 m^3. Στη δεξαμενή αυτή παρασκευάζεται το τεχνητό θαλασσινό νερό τροφοδοσίας αγωγιμότητας 50 mS/cm, διαλύοντας χλωριούχο νάτριο (NaCl) στο νερό του δικτύου της πόλης. Η μέση θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας υπολογίστηκε γύρω στου 13 °C.

2.2.2 Αντλία τροφοδοσίας

Η αντλία τροφοδοσίας αντλεί το νερό από την δεξαμενή τροφοδοσίας και το οδηγεί προς την μονάδα Α.Ω. διαμέσου των φίλτρων και επίσης παρέχει την πίεση που απαιτείται στην είσοδο της αντλίας Clark. Η αντλία τροφοδοσίας αποτελείται από έναν μονοφασικό κινητήρα, ισχύος 0.75 kW και μια περιστροφική αντλία θετικής εκτόπισης. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας και του κινητήρα φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της αντλίας τροφοδοσίας

Αντλία τροφοδοσίας	
Τύπος αντλίας	Περιστροφική, Θετικής εκτόπισης
Μέγιστη πίεση	17 bar
Παροχή σε 1400 RPM	1 m^3/h
Κινητήρας Τροφοδοσίας	
Ονομαστική ισχύς	0.75 kW
Τάση κινητήρα	Μονοφασικός, 230 V, 50 Hz

2.2.3 Σύστημα προ-επεξεργασίας

Το σύστημα προ-επεξεργασίας αποτελείται από ένα φίλτρο κυτταρίνης 5μm με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και του χρόνου ζωής της μεμβράνης. Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο κυτταρίνης άνθρακα για την απομάκρυνση του ελεύθερου χλωρίου που υπάρχει στο νερό της πόλης πριν οδηγηθεί στη δεξαμενή τροφοδοσίας κατά την αρχική προετοιμασία του μίγματος.

2.2.4 Ανακτητής υδραυλικής ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μονάδα αφαλάτωσης είναι εξοπλισμένη με ένα υδραυλικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας, τύπου εναλλάκτη πιέσεως (Clark Pump), το οποίο αντικαθιστά την αντλία υψηλής πίεσης σε μια συμβατική μονάδα αφαλάτωσης ΑΟ. Ο ανακτητής ενέργειας είναι μια εμβολοφόρος αντλία που ανυψώνει την πίεση του νερού στην κατάλληλη τιμή για να εισέλθει στην μεμβράνη. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας Clark παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας Clark

Παράμετρος	Τιμή
Τύπος αντλίας	Αντλία τύπου Clark
Ονομαστική παροχή τροφοδοσίας	1080 L/h
Παροχή αφαλατωμένου νερού	150 L/h, ± 15 %
Ονομαστική πίεση εξόδου	55 bar
Ονομαστική πίεση εισόδου (πίεση τροφοδοσίας)	11 bar

2.2.5 Μεμβράνη

Η μονάδα αφαλάτωσης ΑΟ αποτελείται από ένα στοιχείο μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης. Η μεμβράνη είναι η καρδιά της μονάδας αφαλάτωσης ΑΟ και διαχωρίζει το εισερχόμενο νερό σε δύο ρεύματα, το αφαλατωμένο νερό και το απορριπτόμενο (άλμη) νερό. Επειδή το συγκεκριμένο σύστημα αφαλάτωσης χρησιμοποιείται για ερευνητικούς σκοπούς τα δύο ρεύματα από την μεμβράνη οδηγούνται ξανά στην δεξαμενή τροφοδοσίας για τη συνεχή προετοιμασία μείγματος (θαλασσινού νερού). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης

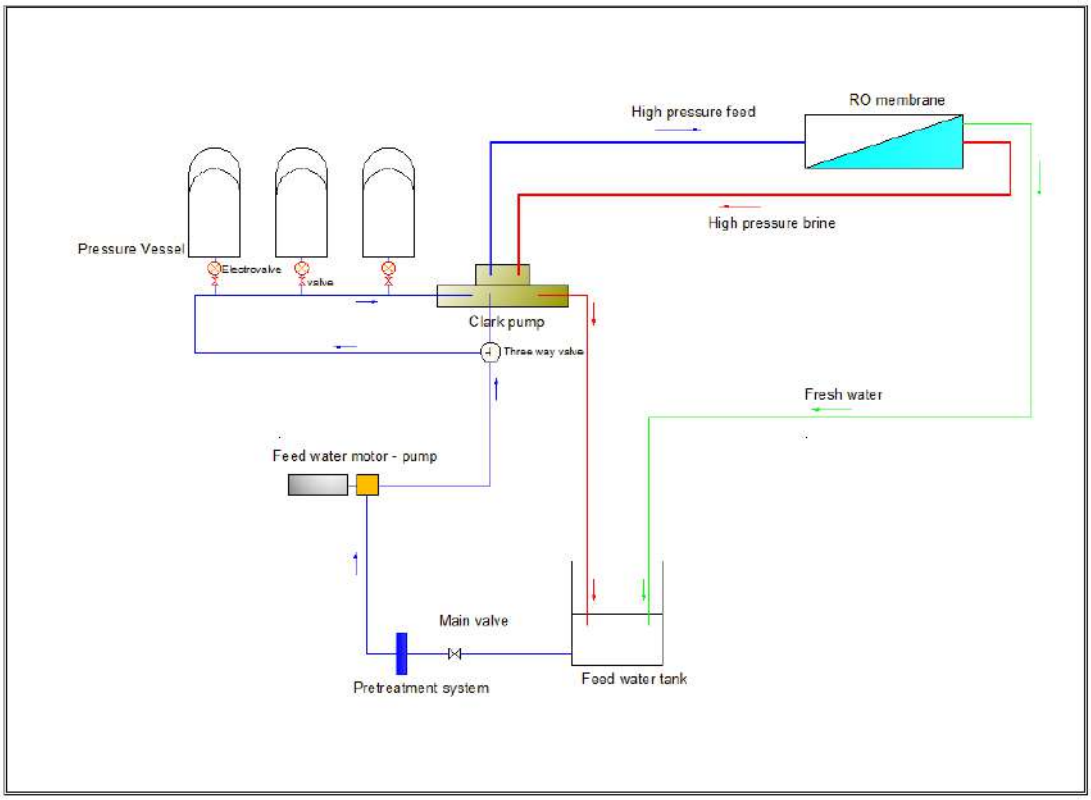
Παράμετρος	Τιμή
Τύπος μεμβράνης	Filmtec SW 30 - 4040
Μέγιστη πίεση	69 bar
Μέγιστη θερμοκρασία νερού	45°C
Μέγιστη παροχή τροφοδοσίας	3.6 m^3/h
Παροχή παραγόμενου νερού	300 L/h
Ικανότητα απόρριψης αλάτων	99.4 %
Ανάκτηση στοιχείου μεμβράνης	8 %

2.3. Αποθήκη υδραυλικής Ενέργειας

Μια υδραυλική αποθήκη ενέργειας με τη μορφή αεροφυλακίων είναι ικανή να κρατήσει την πίεση σχεδόν σταθερή για περίπου 30 λεπτά. Τρία αεροφυλάκια συνδεδεμένα παράλληλα χρησιμοποιούνται με σκοπό την βραχύχρονη αποθήκευση ενέργειας. Κάθε αεροφυλάκιο έχει χωρητικότητα 200 L και είναι ικανό να τροφοδοτήσει την ανακτητή υδραυλικής ενέργειας (Clark Pump) με την κατάλληλη πίεση (5 έως 14 bar) έτσι ώστε να λειτουργήσει η μονάδα αφαλάτωσης ΑΟ. Κάθε αεροφυλάκιο είναι εξοπλισμένο με ρυθμιστή πίεσης, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια ηλεκτροβάνα για τον έλεγχο και την ασφάλεια της ροής. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αεροφυλακίων φαίνονται στον Πίνακα 4. Το σχηματικό διάγραμμα της μονάδας αφαλάτωσης ΑΟ συνδεδεμένη με το σύστημα αποθήκευσης υδραυλικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 4. Τεχνικά χαρακτηριστικά των αεροφυλακίων

Παράμετρος	Τιμή
Τύπος	Bladder pressure tank
Μοντέλο	GT-U-200 PN 16 G 1 $^{1/4}$ V
Χωρητικότητα	180 L
Μέγιστη Πίεση	16 bar
Αρχική πίεση φόρτισης	4 bar
Τεμάχια	3
Υλικό Κατασκευή	Κατάλληλο για θαλασσινό νερό



Σχήμα 2. Σχηματικό διάγραμμα μονάδας ΑΟ συνδεδεμένη με το υδραυλικό συστημα αποθήκευσης ενέργειας

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

3.1. Σκοπός

Ο σκοπός της πειραματικής διερεύνησης είναι να καθοριστεί η συμπεριφορά της μονάδας αφαλάτωσης σε συνδυασμό με το σύστημα αποθήκευσης υδραυλικής ενέργειας καθώς και η διασύνδεσή του ολοκληρωτικού συστήματος με τεχνολογίες ΑΠΕ, όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες. Απώτερος στόχος της πειραματικής διεργασίας αυτής είναι η αυτόνομη λειτουργία του ολοκληρωτικού συστήματος με την χαμηλότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας με ταυτόχρονα αποδεκτής ποιότητας αφαλατωμένο νερό.

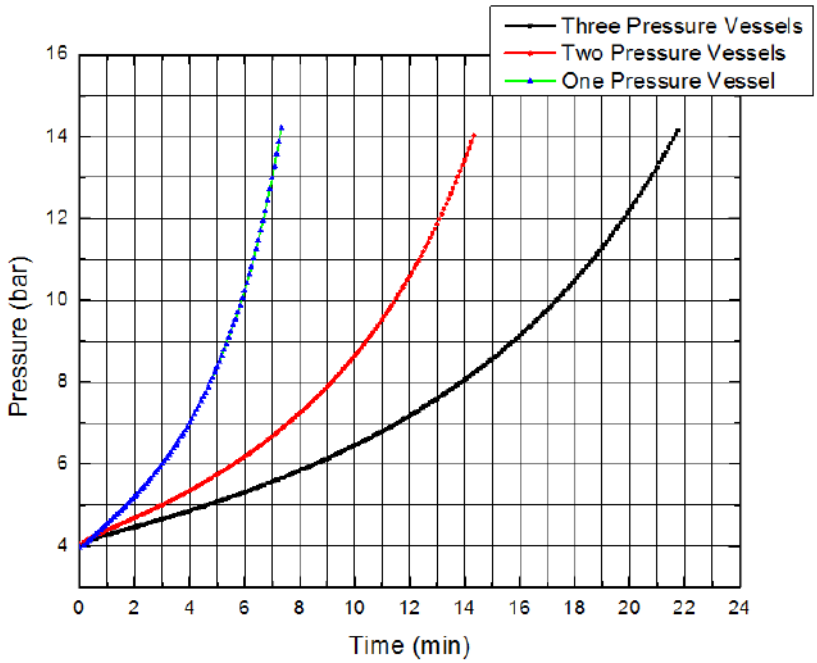
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετρήθηκε η φόρτιση και η εκφόρτιση ενός, δύο και τριών αεροφυλακίων μαζί έτσι ώστε να διερευνηθεί ο χρόνος που χρειάζεται για την αποθήκευση υδραυλικής ενέργειας. Επομένως καταγράφηκαν διάφοροι παράμετροι όπως η πίεση εισόδου/εξόδου των αεροφυλακίων, η παροχή και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού σε συνάρτηση με τον χρόνο.

3.2. Φόρτιση Αεροφυλακίων

Η αντλία τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκε για την φόρτιση των αεροφυλακίων με σταθερή παροχή 1000 L/h. Η ροή φόρτισης ήταν σταθερή λόγω της αρχής λειτουργίας της αντλίας θετικής εκτόπισης η οποία παίζει τον ρόλο της αντλίας τροφοδοσίας στην μονάδα ΑΟ. Ο σκοπός του πειράματος αυτού ήταν να καθοριστεί η ο απαιτούμενος χρόνος φόρτισης των αεροφυλακίων από την αρχική τιμή πίεσης (προ-φόρτιση 4 bar) στην μέγιστη τιμή πίεσης (14 bar). Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή η μέγιστη τιμή πίεσης του αεροφυλακίου είναι 16 bar. Παρόλα αυτά, για λόγους ασφαλείας, η φόρτιση των

αεροφυλακίων αποφασίστηκε να γίνει μέχρι την τιμή πίεσης 14 bar, η οποία είναι συμβατή με την πίεση λειτουργίας της αντλίας τύπου Clark.

Ο απαιτούμενος χρόνος φόρτισης ενός αεροφυλακίου από 4 σε 14 bar με σταθερή παροχή στα 1000 L/h, καταγράφηκε στα 7 λεπτά. Οι αντίστοιχες τιμές για τη φόρτιση δύο και τριών αεροφυλακίων μαζί είναι 14 και 21 λεπτά αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 3). Στο Σχήμα 3 παρατηρείται ότι ο χρόνος που απαιτείται για την φόρτιση των αεροφυλακίων είναι ανάλογος με τον αριθμό των αεροφυλακίων. Επιπλέον, η ποσότητα αποθήκευσης θαλασσινού νερού σε ένα, δύο και τρία αεροφυλάκια μαζί μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την μετρούμενη παροχή της αντλίας τροφοδοσίας και του χρόνου φόρτισης. Οι τιμές αποθήκευσης θαλασσινού νερού για ένα αεροφυλάκιο είναι 116.69 L, για δύο αεροφυλάκια είναι 233.38 L και για τρία αεροφυλάκια είναι 350.07 L. Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι μόνο το 65% από την ονομαστική χωρητικότητα των αεροφυλακίων είναι διαθέσιμο εξαιτίας της πίεσης προ-φόρτισης (4 bar) και της τελικής πίεσης φόρτισης μέχρι τα 14 bar αντί για 16 bar. Τα συμπεράσματα αυτά είναι σημαντικά για το μελλοντικό σχεδιασμό του μεγέθους των αεροφυλακίων.

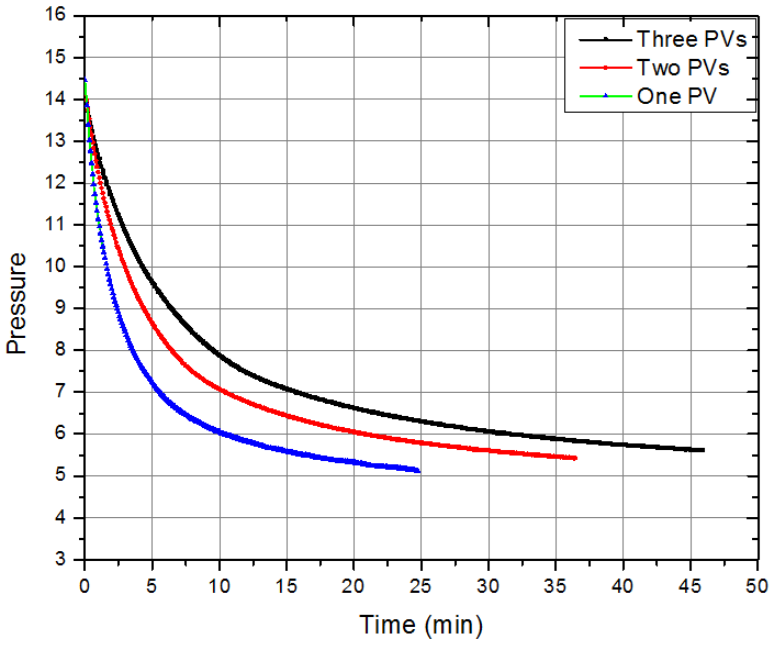


Σχήμα 3. Πίεση σε συνάρτηση με τον χρόνο φόρτισης των αεροφυλακίων

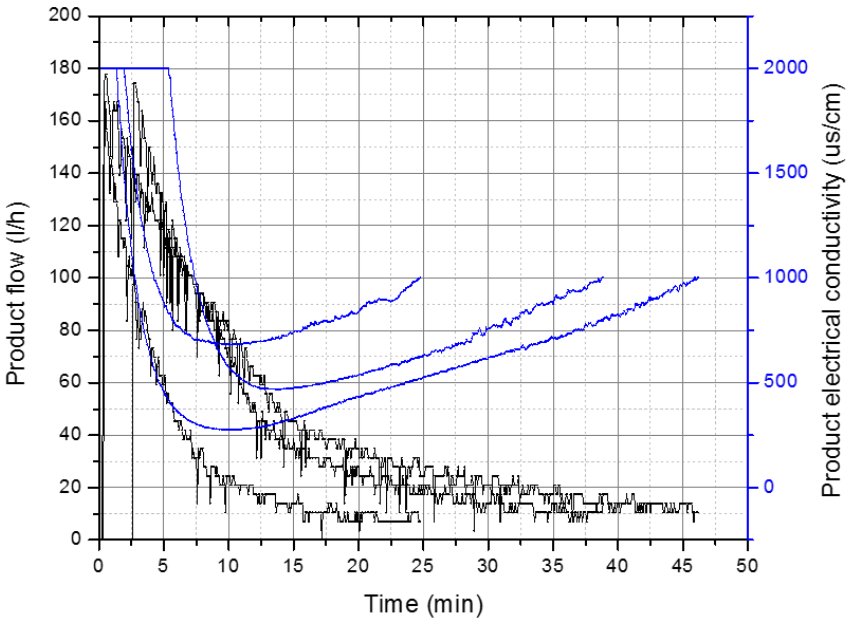
3.3. Εκφόρτιση Αεροφυλακίων

Κατά την εκφόρτιση των αεροφυλακίων, η μονάδα αφαλάτωσης είναι απευθείας συνδεδεμένη με τα αεροφυλάκια χωρίς τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης. Η τοπολογία αυτή προσομοιώνει την λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης σε περίπτωση απώλειας ισχύος της αντλίας τροφοδοσίας. Στόχος της πειραματικής διεργασίας αυτής ήταν να καταγραφεί ο απαιτούμενος χρόνος εκφόρτισης ενός, δύο και τριών αεροφυλακίων μαζί. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4 η πίεση λειτουργίας τείνει να ισορροπήσει με την αρχική τιμή πίεσης (προ – φόρτιση), όμως η διαδικασία εκφόρτισης εκτελέστηκε από την πίεση 14 bar έως 5 – 5.5 bar όπου οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού είναι υψηλότερες από 1000 mS/cm (όριο πόσιμου νερού σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) (WHO 2011). Ο χρόνος που απαιτείται για την εκφόρτιση ενός, δύο και τριών αεροφυλακίων είναι 25, 35 και 45 λεπτά αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά

έδειξαν ότι τα τρία αεροφυλάκια μαζί μπορούν να υποστηρίξουν τη μονάδα αφαλάτωσης για διακοπτόμενη λειτουργία 40 – 45 λεπτών. Το Σχήμα 5 δείχνει την παροχή και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού της μονάδας αφαλάτωσης κατά την διεργασία εκφόρτισης των αεροφυλακίων.



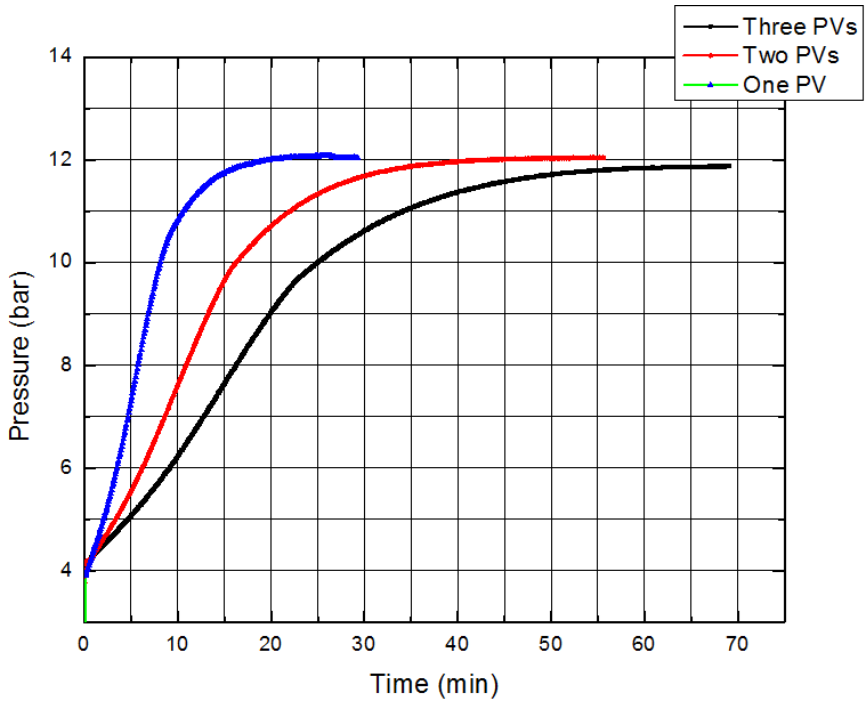
Σχήμα 4. Πίεση λειτουργίας σε συνάρτηση με τον χρόνο εκφόρτισης των αεροφυλακίων.



Σχήμα 5. Η ροή και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού κατά την διαδικασία εκφόρτισης των αεροφυλακίων.

3.4. Δυναμική λειτουργία των αεροφυλακίων

Δυναμική λειτουργία σημαίνει ότι η αντλία τροφοδοσίας και τα αεροφυλάκια λειτουργούν παράλληλα. Σκοπός της πειραματικής διεργασίας αυτής ήταν να αξιολογηθεί η συμπεριφορά φόρτισης των αεροφυλακίων κατά την λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης. Η μονάδα αφαλάτωσης τέθηκε σε λειτουργία με την αντλία τροφοδοσίας και με άδεια τα αεροφυλάκια. Ο απαιτούμενος χρόνος για την φόρτιση ενός, δύο και τριών αεροφυλακίων είναι 20, 40 και 60 λεπτά αντίστοιχα. Παρατηρείται στο Σχήμα 6 ότι η πίεση του συστήματος (αεροφυλάκια και μονάδα αφαλάτωσης) τείνει να ισορροπήσει στα 12 bar, το οποίο αποτελεί το σημείο λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης.



Σχήμα 6. Η πίεση λειτουργίας σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά τη δυναμική λειτρουργία των αεροφυλακίων

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πειραματική εργασία αυτή μπορούν να αξιολογηθούν για την ανάπτυξη ενός καινοτόμου μικρής κλίμακας συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, συνδεδεμένο με τεχνολογίες ΑΠΕ και υδραυλικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, με σκοπό να λειτουργεί αυτόνομα και ταυτόχρονά με την χαμηλότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας.

Αρχικά ο χρόνος που χρειάζεται για την φόρτιση ενός αεροφυλακίου καταγράφηκε ότι ήταν 7 λεπτά, ενώ η φόρτιση δύο και τριών αεροφυλακίων είναι 14 και 21 λεπτά αντίστοιχα. Επομένως ο χρόνος φόρτισης των αεροφυλακίων είναι ανάλογος με τον αριθμό των αεροφυλακίων.

Επιπλέον, κατά την εκφόρτιση των αεροφυλακίων ο χρόνος που καταγράφηκε για ένα, δύο και τρία αεροφυλάκια ήταν 25, 35 και 45 λεπτά αντίστοιχα. Επομένως μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης η οποία είναι συνδεδεμένη με μια βραχύχρονη εναλλακτική αποθήκη υδραυλικής πίεσης με τη μορφή αεροφυλακίων μπορεί να λειτουργεί πλήρως για περίπου 40 – 45 λεπτά σε περίπτωση απώλειας ισχύος της αντλίας τροφοδοσίας.

Κατά την δυναμική λειτουργία των αεροφυλακίων, ο απαιτούμενος χρόνος για την φόρτιση ενός, δύο και τριών αεροφυλακίων είναι 20, 40 και 60 λεπτά αντίστοιχα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

E. Dimitriou, E. Sh. Mohamed, C. Karavas and G. Papadakis (2015). *Experimental comparison of the performance of two reverse osmosis desalination units equipped with different energy recovery devices.* Desalination and Water Treatment **55**(11): 3019-3026.

E. Dimitriou, E. Sh. Mohamed, G. Kyriakarakos and G. Papadakis (2014). *Experimental investigation of the performance of a reverse osmosis desalination unit under full- and part-load operation.* Desalination and Water Treatment **53**(12): 3170-3178.

D. Manolakos, E. Sh. Mohamed, I. Karagiannis and G. Papadakis (2008). *Technical and economic comparison between PV-RO system and RO-Solar Rankine system. Case study: Thirasia island.* Desalination **221**(1–3): 37-46.

E. Sh. Mohamed and G. Papadakis (2004). *Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics.* Desalination **164**(1): 87-97.

E. Sh. Mohamed, G. Papadakis, E. Mathioulakis and V. Belessiotis (2006). *An experimental comparative study of the technical and economic performance of a small reverse osmosis desalination system equipped with an hydraulic energy recovery unit.* Desalination **194**(1–3): 239-250.

E. Sh. Mohamed, G. Papadakis, E. Mathioulakis and V. Belessiotis (2008). *A direct coupled photovoltaic seawater reverse osmosis desalination system toward battery based systems — a technical and economical experimental comparative study.* Desalination **221**(1–3): 17-22.

E. Tzen, D. Theofilloyianakos, M. Sigalas and K. Karamanis (2004). *Design and development of a hybrid autonomous system for seawater desalination.* Desalination **166**(0): 267-274.

World Health Organization (WHO). *Guidelines for Drinking-Water Quality,* 4th ed. World Health Organization, Geneva, 2011.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΒΑΘΜΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ RANKINE

Μ. Καραμποϊκη✉, Δ. Μανωλάκος & Γ. Παπαδάκης
Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,
✉*mkarampoiki@gmail.com*

Περίληψη

Μια πρωτότυπη διβάθμια μηχανή που βασίζεται στον οργανικό κύκλο Rankine έχει αναπτυχθεί για να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος θερμικού φορτίου που προέρχεται από διάφορες θερμικές πηγές, όπως ηλιακούς συλλέκτες-σωλήνων κενού. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εκτόνωσης του ψυκτικού ρευστού R245fa με δυο εκτονωτές που συνδέονται σε σειρά. Η έντονη διακύμανση της θερμοκρασίας και η θερμότητα που εισέρχεται υπαγορεύουν τη χρήση μιας διβάθμιας μηχανής για ευέλικτη και αποδοτική λειτουργία ακόμα και σε χαμηλό θερμικό φορτίο. Αυτές οι μηχανές εκτόνωσης λειτουργούν μέσα σε ένα στενό φάσμα λόγου πίεσης, έχοντας υψηλή απόδοση έως και 70%. Όταν η μηχανή λειτουργεί σε υψηλό θερμικό φορτίο λειτουργούν και οι δυο εκτονωτές, ενώ σε χαμηλό φορτίο παρακάμπτεται ο πρώτος. Η καθαρή ισχύς της μηχανής είναι 10 kWe όταν τροφοδοτείται με 100 kW σε θερμοκρασία 130°C.

Λέξεις κλειδιά: διβάθμια μηχανή, θερμικό φορτίο, απόδοση, θερμική ισχύς

EXPERIMENTAL EVALUATION OF TWO-STAGE ORGANIC RANKINE CYCLE ENGINE

M. Karampoiki✉, D. Manolakos & G. Papadakis
Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens,
✉*mkarampoiki@gmail.com*

ABSTRACT

A prototype two-stage heat-to-power engine based on the Organic Rankine Cycle (ORC) has been developed for operation at a wide thermal load input range, coming from variable thermal sources, such as evacuated tube solar collectors. The system is used to produce electrical energy through the expansion of a refrigerant (R245fa) in two scroll expanders which are connected in series. The intense fluctuation of the temperature and heat input dictates the use of a two-stage engine, for flexible and efficient operation even at low thermal load, thus these expansion machines can operate within a narrow pressure ratio range, showing high expansion efficiency up to 70%. When operating at high heat input both expanders operate, while for low heat input, the first expander is completely bypassed. The net capacity of the ORC engine is 10 kWe, when supplied with 100 kW of heat at a temperature of 130 ^{o}C.

Keywords: two-stage engine, thermal input, efficiency, net capacity

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

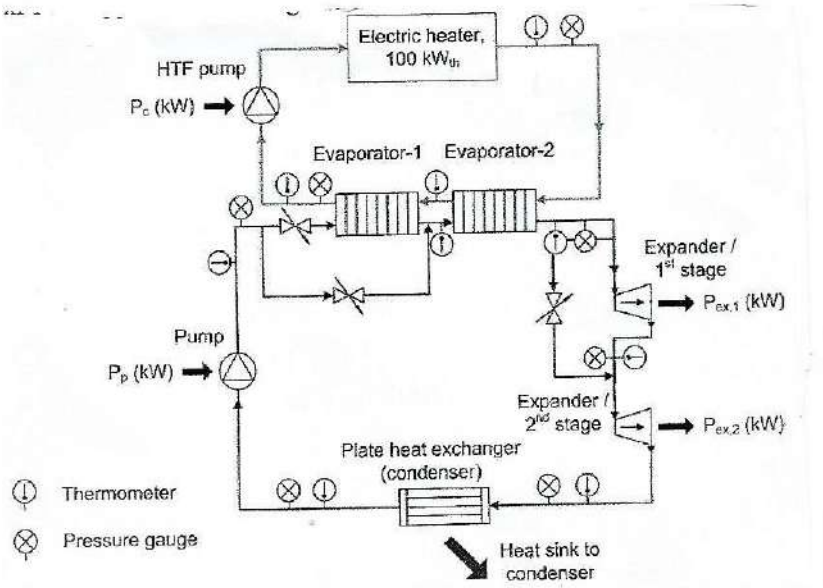
Τα τελευταία χρόνια ο οργανικός κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle) χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε διάφορες εφαρμογές εκμετάλλευσης πηγών ενέργειας χαμηλών θερμοκρασιών, όπως η γεωθερμία, η ηλιακή ενέργεια (συλλέκτες) αλλά και θερμότητα που απορρίπτεται στο περιβάλλον ως παραπροϊόν διαφόρων παραγωγικών διεργασιών. Για το λόγο αυτό η έρευνα εστιάζεται τόσο σε μονοβάθμια όσο και σε διβάθμια συστήματα Rankine. Ο μονοβάθμιος οργανικός κύκλος Rankine ο οποίος χρησιμοποιεί ηλιακούς συλλέκτες ως πηγή θερμότητας έχει αξιολογηθεί πειραματικά (Manolakos et al. 2005, 2007, 2009a, 2009b, Manolakos, 2006), μαζί με λεπτομερή προσομοίωση της απόδοσής του (Manolakos 2006, Manolakos et al. 2005, 2009a, 2009b). Όσον αφορά το διβάθμιο σύστημα Rankine, η έρευνα συνεχίζεται ως προς το σχεδιασμό και την προσομοίωση του, προκειμένου να εντοπιστεί η βελτίωση της απόδοσης σε σύγκριση με το μονοβάθμιο σύστημα Rankine (Kosmadakis et al., 2010). Στην παρούσα εργασία μια πρωτότυπη διβάθμια μηχανή Rankine έχει κατασκευαστεί ύστερα από εκτεταμένη έρευνα σχεδιασμού και προσομοίωσης, όπου αξιολογείται πειραματικά για τη λειτουργία των 70 ^{o}C, 95 ^{o}C, 110 ^{o}C και 130 ^{o}C. Η μηχανή εξετάστηκε στο εργαστήριο σε μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία. Για την προσομοίωση του θερμικού φορτίου χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικός θερμαντήρας ονομαστικής ισχύος 100 kW_{th}. Το διβάθμιο σύστημα επιλέχθηκε στο παρόν πείραμα για να εκτιμηθεί η προσφερόμενη ευελιξία του συστήματος, δεδομένου ότι ο σχεδιασμός του συστήματος υπόσχεται αποτελεσματική λειτουργία σε ένα ευρύ φάσμα θερμικής ισχύος. Ακόμα και σε χαμηλό θερμικό φορτίο ο πρώτος εκτονωτής μπορεί να παραληφθεί αν χρειαστεί, αφού μόνο και με τον δεύτερο εκτονωτή λειτουργεί επαρκώς. Ο εκτονωτής αποτελεί ένα βασικό στοιχείο της μηχανή. Η επιλογή του εκτονωτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας και από το μέγεθος της εγκατάστασης. Στο παρόν έργο, δυο ερμητικοί συμπιεστές λειτουργούν ως εκτονωτές με αναστροφή της λειτουργίας τους. Το εργαζόμενο ρευστό που χρησιμοποιήθηκε είναι το R-254fa.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η αξιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος κατά τη λειτουργία του σε ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας με σκοπό να μελετηθεί και να διερευνηθεί η μεταβολή του βαθμού απόδοσής του.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η διάταξη διβάθμιου οργανικού κύκλου Rankine στην οποία στηρίχθηκε το παρόν πείραμα βασίζεται στην χρήση ενός ενιαίου κυκλώματος με χρήση ενός οργανικού ρευστού και δυο εκτονωτές συνδεδεμένους σε σειρά, με οργανικό ρευστό το R-245fa. Η διάταξη αυτή αποδείχθηκε ότι αποτελεί την καλύτερη λύση, λόγω της απόδοσης σε όλο το εύρος του φορτίου, το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου. Σε φορτίο χαμηλότερο από 50-60% του ονομαστικού, παρακάμπτεται ο πρώτος εκτονωτής με τη χρήση ηλεκτροβάνας (by pass), οπότε η εκτόνωση του ατμοποιημένου οργανικού ρευστού πραγματοποιείται μόνο στον δεύτερο εκτονωτή. Έτσι, η διακύμανση του λόγου πίεσης από τον οποίο εξαρτάται η απόδοση του εκτονωτή, διατηρείται χαμηλή σε όλο το εύρος του φορτίου. Τα βασικά συνιστώμενα μέρη της μηχανής είναι η αντλία οργανικού ρευστού, ο ατμοποιητής, οι εκτονωτές τύπου scroll και ο συμπυκνωτής. Η αντλία οργανικού ρευστού που χρησιμοποιήθηκε είναι αντλία διαφράγματος της εταιρείας Wanner, η οποία εξασφαλίζει τη στεγανότητα της ογκομετρικής αυτής μηχανής. Επιπλέον, η αντλία αυτή λειτουργεί σε αρκετά υψηλές πιέσεις με χαμηλές παροχές, που είναι πολύ κοντά στα σημεία λειτουργίας του συστήματος που αναπτύχθηκαν στο παρόν έργο. Η μέγιστη παροχή όγκου είναι 29 L/min και η μέγιστη ισχύς του ηλεκτροκινητήρα που κινεί την αντλία είναι

2.2 kW στα 960 rpm (50 Hz). Οι εκτονωτές τύπου scroll είναι ερμητικοί συμπιεστές της εταιρείας Copeland οι οποίοι ύστερα από συγκεκριμένη διαμόρφωση λειτουργούν ως εκτονωτές με αναστροφή της λειτουργίας τους. Τα μοντέλα που έχουν επιλεχθεί είναι ZR125KCE-TFD για τον πρώτο εκτονωτή με μέγιστη πίεση 32 bar και ισχύς στον ονομαστικό λόγο πίεσης 6.15 kW (70.9% μέγιστος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης) και ZR190KCE-TFD για τον δεύτερο εκτονωτή με μέγιστη πίεση 32 bar και ισχύς στον ονομαστικό λόγο πίεσης 9.2 kW (69.2% μέγιστος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης). Και οι δυο εκτονωτές έχουν εσωτερικό λόγο όγκων 3. Ο δεύτερος εκτονωτής έχει μεγαλύτερο όγκο σάρωσης από τον πρώτο (249.16 cm^3 /rev ο δεύτερος και 167.15 cm^3 /rev ο πρώτος). Ο εναλλάκτης θερμότητας είναι ο EXL 1470 της εταιρείας CIAT με συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας ίση με 8.8 m^2 και ονομαστική θερμική ισχύ 100 kW. Μια τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Διάταξη οργανικού κύκλου Rankine με χρήση δυο εκτονωτών σε σειρά.

Για την προσομοίωση του θερμικού φορτίου που τροφοδοτεί τη μηχανή ORC χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικός θερμαντήρας ονομαστικής ισχύος 100 kW_{th}. Σε κάθε σημείο εισόδου και εξόδου των επί μέρους συνιστωσών της μηχανής τοποθετήθηκαν ειδικά όργανα μέτρησης θερμοκρασίας και πίεσης, των οποίων οι ψηφιακές ενδείξεις παρουσιάζονται στον ηλεκτρικό πίνακα της μηχανής. Επίσης, τρία inverter ένα για την αντλία και ένα για κάθε εκτονωτή, ρυθμίζουν τη συχνότητα λειτουργίας στις αντίστοιχες συνιστώσες της μηχανής. Η εναλλαγή μονοβάθμιας και διβάθμιας λειτουργίας γίνεται μέσω μιας ηλεκτροβάνας, η οποία επιτρέπει την πλήρη παράκαμψη του πρώτου εκτονωτή σε λειτουργία σε χαμηλό/μεσαίο θερμικό φορτίο. Δυο μικρότερες βάνες που απομονώνουν τον κλάδο του πρώτου εκτονωτή για συντήρηση ελέγχονται χειροκίνητα για επιπρόσθετη ασφάλεια στην αλλαγή λειτουργίας από διβάθμια σε μονοβάθμια.

Στα πειράματα που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο, δοκιμάστηκε η λειτουργία της μηχανής σε διάφορες συνθήκες και θερμοκρασίες και καταγράφηκαν οι ενδείξεις θερμοκρασίας και πίεσης που εμφανίστηκαν στον ηλεκτρικό πίνακα της μηχανής, οι οποίες στην συνέχεια επεξεργάστηκαν και προσδιόρισαν την κατάσταση του ρευστού σε κάθε σημείο της μηχανής. Επομένως, υπολογίστηκε η απόδοση και βρέθηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες για κάθε σημείο λειτουργίας. Στο παρόν έργο, η μηχανή εξετάστηκε για

θερμοκρασίες 70-130 ^{o}C. Στο Σχήμα 2, παρουσιάζεται η μηχανή που εγκαταστάθηκε στο εργαστήριο, αλλά και οι εκτονωτές τύπου scroll.

Σχήμα 2. Διβάθμια μηχανή Rankine και εκτονωτές τύπου scroll.

2.1 Υπολογισμός θερμικού βαθμού απόδοσης

Για να υπολογιστούν τα λειτουργικά μεγέθη χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω βασικές θερμοδυναμικές εξισώσεις-καταστάσεις:

- Παραγόμενη ισχύς των δυο εκτονωτών

$$W_{ex} = W_{ex,1} + W_{ex,2} = \dot{m}_{orc}(h_2 - h_3)n_{ex,m} + \dot{m}_{orc}(h_3 - h_4)n_{ex,m}$$

- Καταναλισκόμενη ισχύς της αντλίας

$$W_p = \frac{\dot{m}_{orc}(h_1 - h_5)}{\dot{n}_{p,m}}$$

- Προσδιδόμενη θερμική ισχύς

$$Q_{orc} = \dot{m}_{orc}(h_2 - h_1)$$

- Θερμική ισχύς συμπύκνωσης

$$Q_{out} = \dot{m}_{orc}(h_4 - h_5)$$

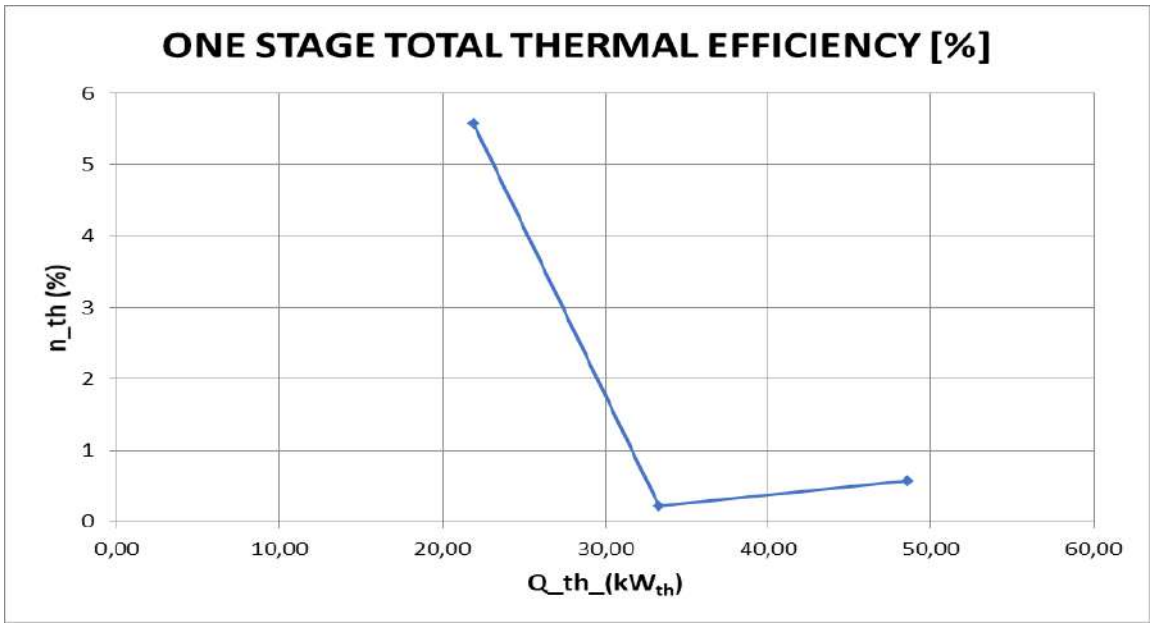
- Θερμικός βαθμός απόδοσης

$$n_{th} = \frac{W_{ex} - W_p}{Q_{orc}}$$

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

3.1 Λειτουργία στους 70°C

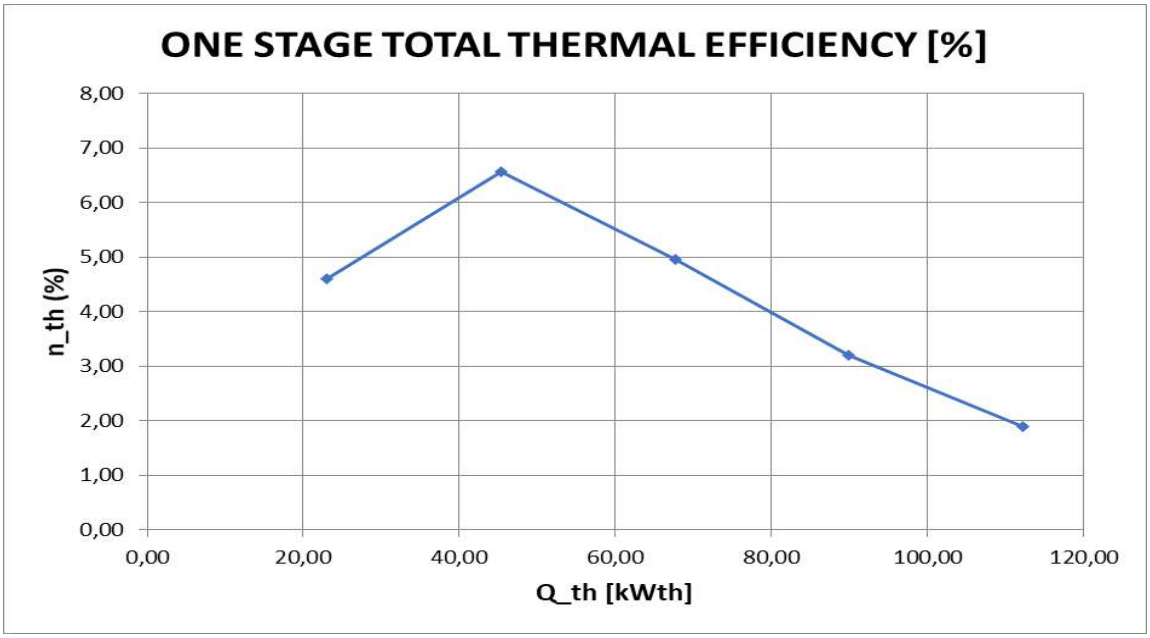
Στους 70°C το σύστημα λειτούργησε μόνο ως μονοβάθμιο με παράκαμψη του ενός εκτονωτή, γεγονός που αναμενόταν καθώς ο διβάθμιος κύκλος έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες της τάξεως των 120°-140°C, όπου ο συνολικός λόγος πίεσης είναι υψηλός. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης σε συνάρτηση με το διαθέσιμο θερμικό φορτίο. Παρατηρούμαι ότι για θερμικό φορτίο γύρω στα 20 kW_{th} ο θερμικός βαθμός απόδοσης μπορεί να φτάσει ακόμα και πάνω από 5% σε ορισμένες συνθήκες, ενώ αναμενόταν ένας θερμικός βαθμός απόδοσης 3%.



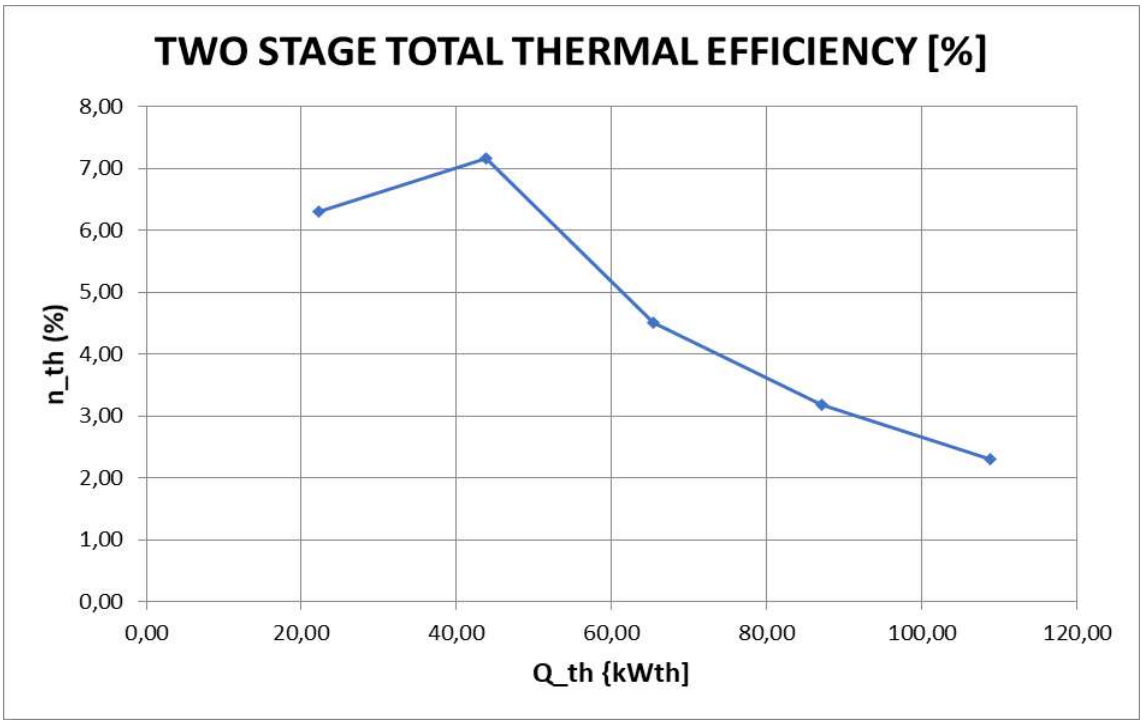
Σχήμα 3. Διάγραμμα θερμικού βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με το διαθέσιμο φορτίο, μονοβάθμια λειτουργία στους 70 ^{o}C.

3.2 Λειτουργία στους 95 ^{o}C

Στους 95 ^{o}C έγινε επίσης πειραματική δοκιμή σε μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία. Σε μονοβάθμια λειτουργία ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης του συστήματος φθάνει κοντά στο 6.8% για θερμική ισχύ γύρω στα 50 kW_{th} (Σχήμα 4), ενώ σε διβάθμια λειτουργία ο βαθμός αυξάνεται και φθάνει στο 7.2% για θερμική ισχύ κοντά στο 50 kWth (Σχήμα 5). Ο βαθμός απόδοσης μειώνεται με την αύξηση των στροφών της αντλίας, καθώς αυξάνονται και οι ιδιοκαταναλώσεις του συστήματος. Ακόμα, παρατηρείται και μια στιγμιαία αύξηση της θερμικής ισχύος πάνω από τα ονομαστικά 100 kW_{th} του θερμαντήρα καθώς η θερμοκρασία εισόδου του νερού δεν είναι απολύτως σταθερή.



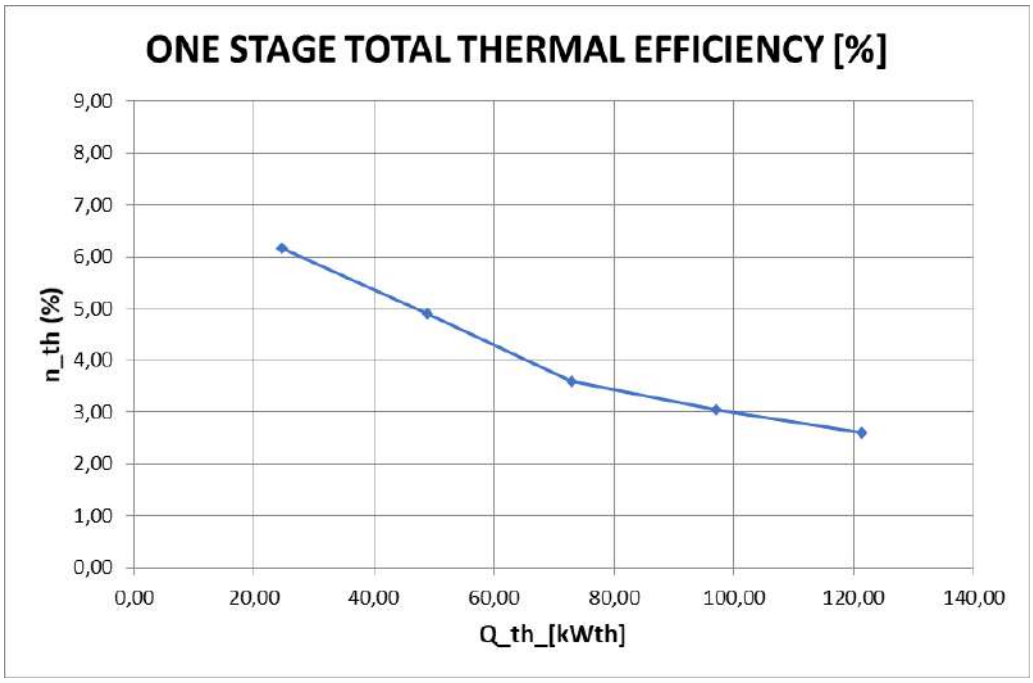
Σχήμα 4. Διάγραμμα θερμικού βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με το διαθέσιμο φορτίο, μονοβάθμια λειτουργία στους 95 ^{o}C.



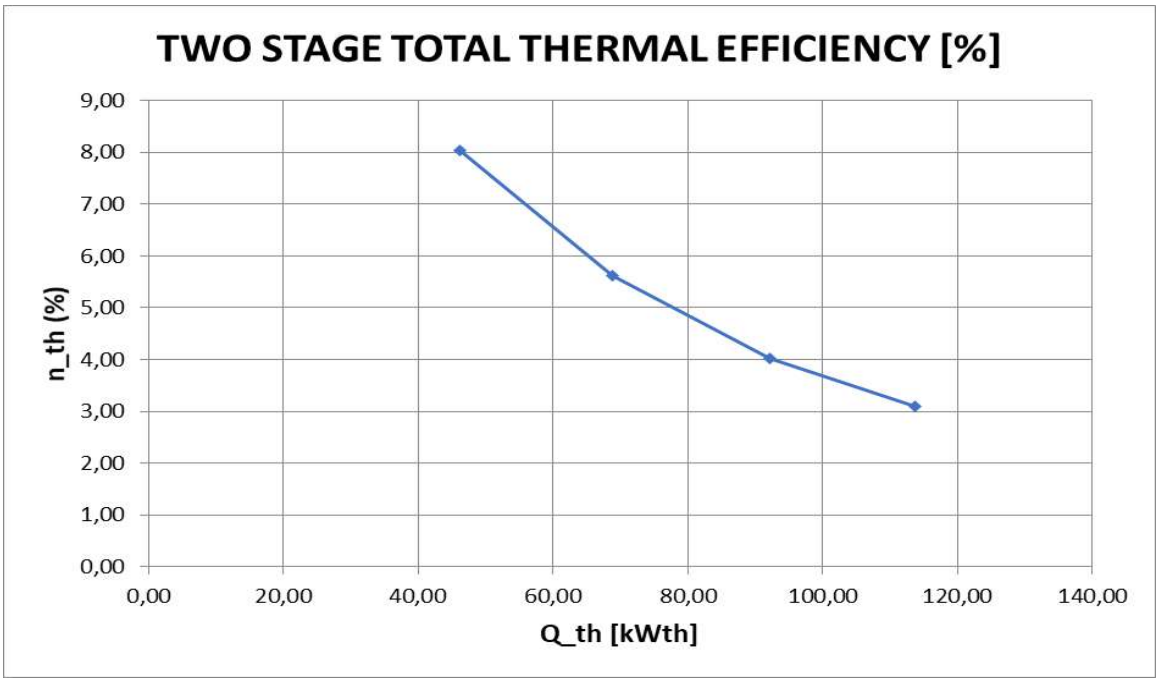
Σχήμα 5. Διάγραμμα θερμικού βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με το διαθέσιμο φορτίο, διβάθμια λειτουργία στους 95 ^{o}C.

3.3 Λειτουργία στους 110 ^{o}C

Στους 110 ^{o}C , το σύστημα εξετάζεται σε μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία όπου πλέον αρχίζει να λειτουργεί σε θερμοκρασίες πλησίον του σχεδιασμού του. Στη μονοβάθμια λειτουργία ο μέγιστος βαθμός απόδοσης παρουσιάζεται για χαμηλό θερμικό φορτίο και είναι 6% (Σχήμα 6) , ενώ στη διβάθμια λειτουργία φτάνει το 8% (Σχήμα 7),όπου είναι αρκετά κοντά στο αναμενόμενο 10% της διβάθμιας μηχανής που σχεδιάστηκε.



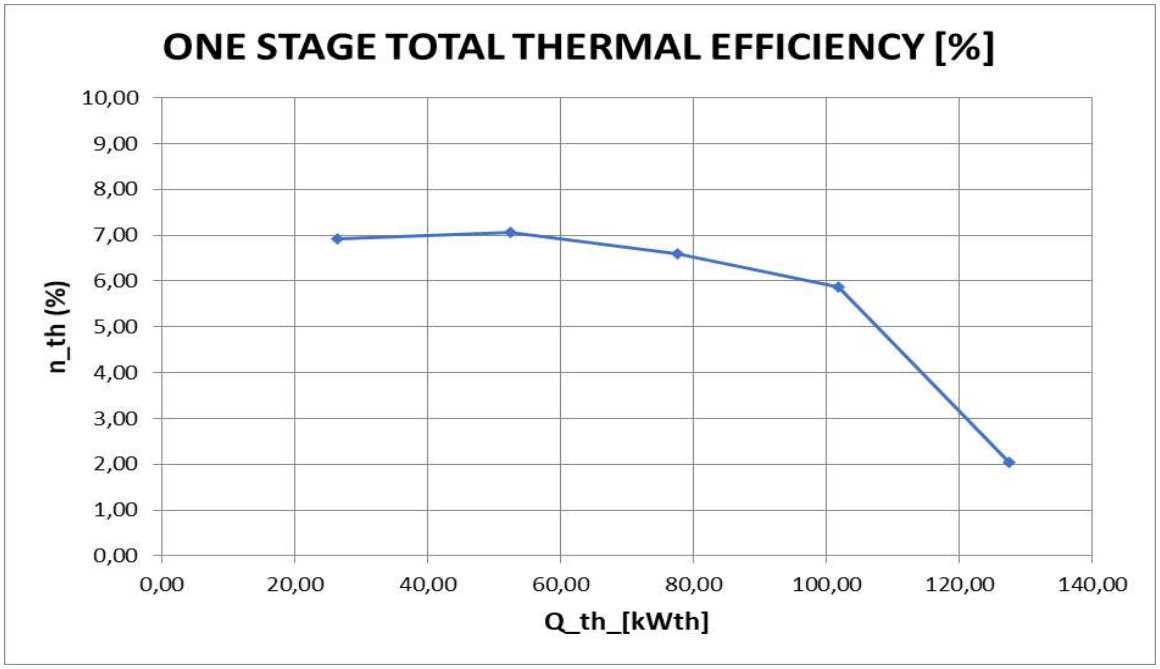
Σχήμα 6. Διάγραμμα θερμικού βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με το διαθέσιμο φορτίο, μονοβάθμια λειτουργία στους 110 ^{o}C.



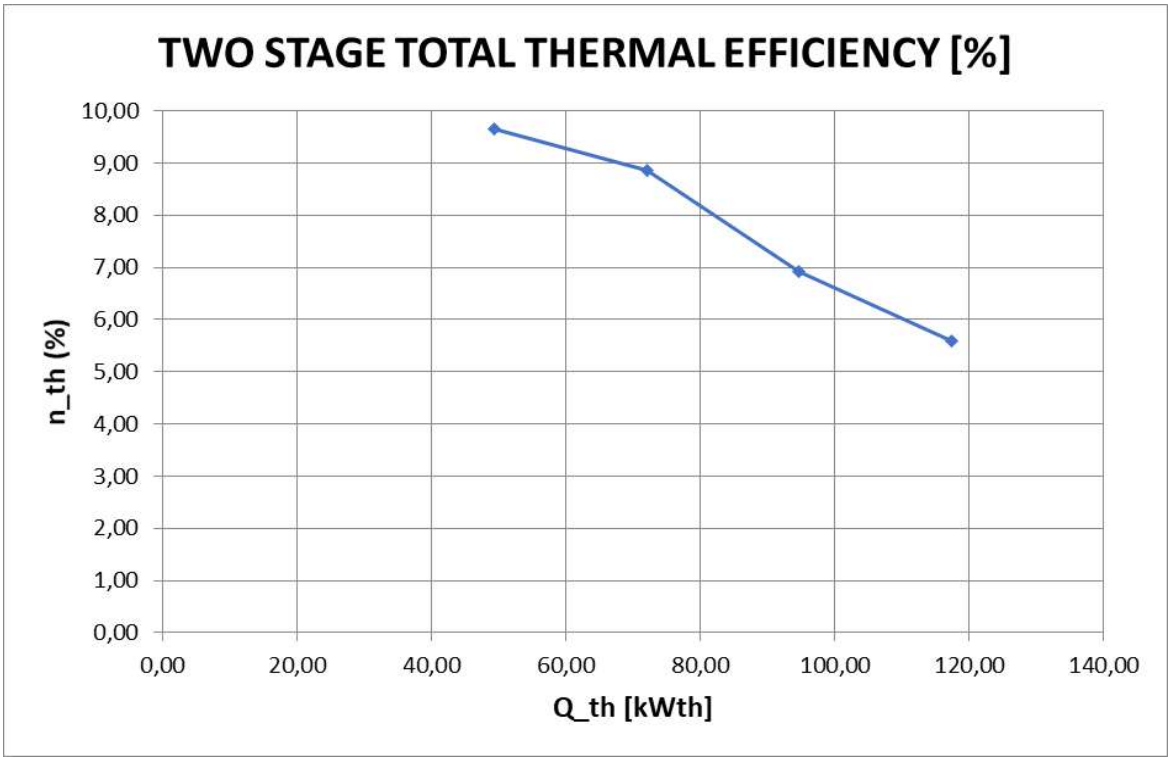
Σχήμα 7. Διάγραμμα θερμικού βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με το διαθέσιμο φορτίο, διβάθμια λειτουργία στους 110 ^{o}C.

3.4. Λειτουργία στους 130 ^{o}C

Στους 130 ^{o}C ο μέγιστος βαθμός που παρατηρήθηκε είναι 7% στη μονοβάθμια λειτουργία κοντά στα 60 kW_{th} (Σχήμα 8), ενώ στη διβάθμια λειτουργία πλησίασε το 10% κοντά στα 50 kW_{th} (Σχήμα 9). Για μια ακόμη φορά αποδεικνύεται η σωστή σύμφωνα με το σχεδιασμό λειτουργία του συστήματος στο εύρος των θερμοκρασιών για τις οποίες σχεδιάστηκε.



Σχήμα 8. Διάγραμμα θερμικού βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με το διαθέσιμο φορτίο, μονοβάθμια λειτουργία στους 130 ^{o}C.



Σχήμα 9. Διάγραμμα θερμικού βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με το διαθέσιμο φορτίο, διβάθμια λειτουργία στους 130 ^{o}C.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με όσα προέκυψαν από τα πειράματα στο εργαστήριο για διάφορες θερμοκρασίες, η μηχανή που σχεδιάστηκε λειτουργεί αρκετά αποδοτικά με τη χρήση του επιλεγμένου ρευστού R245fa, τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα στους 70°C, το σύστημα δεν λειτούργησε ως διβάθμιο καθώς έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί σε θερμοκρασίες της τάξεως των 120-140 ^{o}C, ενώ σε μονοβάθμια λειτουργία ο θερμικός βαθμός απόδοσης για θερμικό φορτίο στα 20 Kw_{th} ήταν 5%, ο οποίος ξεπέρασε το αναμενόμενο 3%. Στους 95°C στη διβάθμια λειτουργία, ο θερμικός βαθμός απόδοσης έφτασε στο 7.2% για θερμική ισχύς 50 kW_{th}, ενώ στη μονοβάθμια λειτουργία το 6.8% για θερμική ισχύς 112 Kw_{th}. Στους 110 ^{o}C ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ήταν 8%, ενώ στη διβάθμια λειτουργία 6%. Τέλος, στους 130 ^{o}C, ο θερμικός βαθμός απόδοσης πλησίασε το 10% στα 50 kW_{th} στη διβάθμια λειτουργία και στη μονοβάθμια το 7%.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μηχανή λειτούργησε αποδοτικά δίνοντας τον προβλεπόμενο θερμικό βαθμό απόδοσης 10%, ο οποίος είχε υπολογιστεί στη θεωρητική μελέτη του συστήματος.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Hung TC, Shai TY, Wang Sk., 1997, A review of organic Rankine cycle (ORCs) for the recovery of low grade waste heat, Energy, vol. 22, no.7: p.661-67

Manolakos D., Papadakis G., Mohamed Essam Sh., Kyritsis S., Bouzianas K., 2005, Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination. Desalination, vo.183,no.1-3: p.73-80.

Manolakos D., 2006, Development of an Autonomous Low Temperature Solar Rankine Cycle System for Reverse Osmosis Desalination. Ph.D thesis, Agricultural University of Athens (in Greek, http://www.aua.gr/~kyritsis/abstract_workshop_Manolakos.pdf).

Manolakos D., Papadakis G., Kyritsis S., Bouzianas K., 2007, Experimental evaluation of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination. Desalination, vol.203, no.1-3: p.203-366.

Mago P.J., Chamra L.M., Srinivasan C., 2008, An examination of regenerative organic Rankine cycle using dry fluids, Appl Therm Eng, vol. 28, no.8-9: p.998-1007.

Kosmadakis G., Manolakos D., Kyritsis S., Papadakis G., 2009, Comparative thermodynamic stydy of refrigerants to select the best for use in the high-temperature stage of a two-stage organic Rankine cycle for RO desalination. Deslination, vol. 243, no 1-3: p. 74-94.

Desai N.B., Bandyopadhyay S., 2009, Process integration of organic Rankine cycle, Energy, vol. 34, no.10: p.1674-1686

Manolakos D., Kosmadakis G, Kyritsis S., Papadakis G., 2009, On site experimental evaluation of a low-temperature solar organic Rankine cyce system for Ro desalination. Solar Energy, vol.83, no5: p.646-656.

Manolakos D., Kosmadakis G., Kyritsia S., Papadakis G., 2009, Identification of behavior and evaluation of performance of small scale, low temperature organic Rankine cycle system coupled with an RO desalination unit. Energy, vol.34, no.6: p767-774.

Lemort V., Quoilin S., Cuevas C. and Lebrun J., 2009, Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle, Applied Thermal Engineering, vol.29, no.14-15: p.3094-3102.

Kosmadakis G, Manolaos D.,Papadakis G., 2010, Parametric theoretical study of a two stage solar organic Rankine cycle for R desalination, Renewable Energy, vol. 35 no.5: p.989-996.

Kosmadakis G., Manolakos D., Davou E. and Papadakis G., 2013, Implementation of a two stage Organic Rankine Cycle using scroll expanders, operating under variable heat input, 2nd Int. Seminar on ORC Power Systems (ASME-ORC2013), Rotterdam, The Netherlands.

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ «ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ» ΤΟΥ ΓΕΩΠΟΝΙΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

Χρήστος – Σπυρίδων Καραβάς✉ & Γεώργιος Παπαδάκης
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,
✉*ckarav@aua.gr*

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό να παρουσιάσει τις παρεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν σε κτίρια και χώρους του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, εφαρμόζοντας συστήματα τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Οι παρεμβάσεις αυτές αφορούν την επιδεικτική, εκπαιδευτική και εμβληματική ενσωμάτωση ΑΠΕ στο ΓΠΑ, συμβάλλοντας σημαντικά στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων και εγκαταστάσεών του. Το έργο αναμένεται να αυξήσει τη διείσδυση των ΑΠΕ στο ΓΠΑ, να ενισχύσει την ευαισθητοποίηση και την εκπαίδευση των φοιτητών στις τεχνολογίες ΑΠΕ, να μειώσει το αποτύπωμα άνθρακα του ΓΠΑ και να αποτελέσει αναφορά για άλλες δραστηριότητες στο εγγύς μέλλον από το ίδιο το ΓΠΑ και άλλα πανεπιστήμια.

Λέξεις κλειδιά: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εξοικονόμηση ενέργειας, μικροδίκτυο

Integration of renewable energy technologies in the community of the Agricultural University of Athens

Christos – Spyridon Karavas✉ & George Papadakis
Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens,
✉*ckarav@aua.gr*

ABSTRACT

The present paper regards a project with a major purpose to demonstrate the application of renewable energy technologies at the campus of the Agricultural University of Athens (AUA), Greece. The proposed project concerns the feasible and educational integration of renewable energy technologies in the AUA campus in order to contribute to the reduction of the energy consumption of AUA's building and facilities, significantly. The project is expected to increase renewable energy penetration at the AUA campus, strengthen awareness and education on renewable energy technologies, decrease the carbon footprint of AUA and become a reference for other activities in the nearest future of AUA itself and other universities as well.

Keywords: Renewable energy sources, energy saving, microgrid

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών ως ένα σύγχρονο εκπαιδευτικό ίδρυμα και πρωτοπόρο στην ανάπτυξη γεωργικής τεχνολογίας και μεγάλη συμβολή στην αγροτική ανάπτυξη, αποτελεί ιδανικό μέρος για την δημιουργία χώρων στους οποίους οι φοιτητές του αλλά και οι επισκέπτες του, θα μπορούν να δουν τα οφέλη της εφαρμογής βιώσιμων ενεργειακών τεχνολογιών. Η εφαρμογή τεχνολογιών ΑΠΕ συνεισφέρει όχι μόνο στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος του Πανεπιστημίου, καθιστώντας το πρωτοπόρο ανάμεσα στα Ελληνικά Πανεπιστήμια, αλλά ευαισθητοποιήσει και τους νεαρούς επιστήμονες να ασχοληθούν τόσο ακαδημαϊκά όσο και επαγγελματικά με τις τεχνολογίες ΑΠΕ, δημιουργώντας κατάλληλες υποδομές για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών στον Ελλαδικό χώρο. Το αειφόρο σχέδιο ΑΠΕ στις εγκαταστάσεις του ΓΠΑ περιλάμβανε: (α) εγκατάσταση συστημάτων ΑΠΕ με σκοπό εξοικονόμηση ενέργειας, (β) κάλυψη μερικών θερμικών φορτίων μέσω συστημάτων βιομάζας, (γ) εγκατάσταση λαμπτήρων εξοικονόμησης ενέργειας για φωτισμό, (δ) εγκατάσταση σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και (ε) προμήθεια ηλεκτρικών οχημάτων για τις ενδοκοινοτικές μεταφορές και (ζ) δράσεις ενημέρωσης, ευαισθητοποίησης, διάδοσης και δικτύωσης σε θέματα ΑΠΕ. Η επίτευξη των στόχων αυτών υλοποιήθηκαν μέσω των ακόλουθων Υποέργων:

Υποέργο 1. Εγκατάσταση Αυτόνομου Φ/Β Συστήματος 100 kWp στο δώμα της βιβλιοθήκης του ΓΠΑ.

Υποέργο 2. Εγκατάσταση καυστήρα Βιομάζας για κάλυψη θερμικών αναγκών στην βιβλιοθήκη του ΓΠΑ.

Υποέργο 3. Εγκατάσταση αυτόνομου Φ/Β Συστήματος ισχύος 5 kWp σε ειδικό Στέγαστρο και 12 πυλώνων με λαμπτήρες τύπου LED για τη κάλυψη των αναγκών φωτισμού των αθλητικών εγκαταστάσεων του ΓΠΑ.

Υποέργο 4. Εγκατάσταση συστήματος (αστικού εξοπλισμού) για την τροφοδοσία 10 ηλεκτρικών ποδηλάτων και ενός ηλεκτρικού λεωφορείου με χρήση ηλιακής ενέργειας

Υποέργο 5. Παροχή υπηρεσιών εκπαίδευσης, διάχυσης και ευαισθητοποίησης των αποτελεσμάτων της Πράξης.

Για την υλοποίηση των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής επιλέχθηκε η τοπολογία μικροδικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα μικροδίκτυα είναι συνήθως ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα μικρής κλίμακας και χαμηλής τάσης, που επιτρέπουν την κατανεμημένη παραγωγή από ΑΠΕ και μπορούν να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα συμφόρησης του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου (Hatziargyriou et al., 2007; Guerrero et al., 2011; Lasseter, 2002; Karavas et al., 2015; Kyriakarakos et al., 2011; Kyriakarakos et al., 2013).

2. ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΗ «ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ» ΤΟΥ ΓΕΩΠΟΝΙΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

2.1 Υποέργο 1. Εγκατάσταση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος 100 kWp στο δώμα του κτιρίου της βιβλιοθήκης του ΓΠΑ

Στο πλαίσιο του Υποέργου 1 εγκαταστάθηκε ένα από τα μεγαλύτερα αυτόνομα (off grid) φωτοβολταϊκά συστήματα τοπολογίας μικροδικτύου στην Ελλάδα, ισχύος 100 kWp (Εικόνα 1). Το σύστημα εξυπηρετεί τις ανάγκες φωτισμού του κτιρίου της βιβλιοθήκης και του περιβάλλοντος χώρου της, καθώς και τις ανάγκες ηλεκτροδότησης βοηθητικών φορτίων (όπως πχ. ηλεκτρονικοί υπολογιστές).

Τα κύρια μέρη του αυτόνομου μικροδικτύου είναι τα παρακάτω.

α) Σύστημα φωτοβολταϊκών πλαισίων: 385 πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου, κάθε ένα ονομαστικής ισχύος 260 Wp,

β) Συστοιχίες συσσωρευτών: 216 συσσωρευτές OPzV, 2 V, C10 1643 Ah
γ) 5 Αναστροφείς φωτοβολταϊκών: 25 kW (98% απόδοση) ο καθένας
δ) 27 Αναστροφείς διαμόρφωσης μικροδικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος: 8 kW (96% απόδοση)
Η εγκατάσταση των αναστροφέων και των συσσωρευτών παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.

Εικόνα 1. Φωτοβολταϊκό σύστημα 100 kWp στο δώμα του κτιρίου της βιβλιοθήκης

Εικόνα 2. Αναστροφείς και συσσωρευτές του μικροδικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος

2.2 Υποέργο 2. Εγκατάσταση καυστήρα βιομάζας στο κτίριο της βιβλιοθήκης του ΓΠΑ

Στο πλαίσιο του Υποέργου 2 εγκαταστάθηκε ολοκληρωμένο σύστημα καύσης pellet, ισχύος 30 kW, απόδοσης έως και 90%, με έλεγχο λειτουργίας μέσω υπολογιστή με σκοπό το κτίριο της βιβλιοθήκης να υποβοηθηθεί στην κάλυψη των θερμικών του αναγκών (Εικόνα 3). Πρόκειται για μια σύγχρονη εφαρμογή ΑΠΕ, η οποία θα εξυπηρετήσει τόσο την υποστήριξη της κεντρικής θέρμανσης του κτιρίου, όσο και την επιστημονική ανάλυση της συμβολής της βιομάζας για την αποδοτική θέρμανση δημόσιων κτιρίων.

Εικόνα 3. Καυστήρας βιομάζας στο κτίριο της βιβλιοθήκης

2.3 Υποέργο 3. Εγκατάσταση αυτόνομου Φ/Β συστήματος 5 kWp σε στέγαστρο και 12 πυλώνων με λαμπτήρες τύπου LED για το φωτισμό των αθλητικών γηπέδων του ΓΠΑ

Αντικείμενο του Υποέργου 3 αποτελεί ο φωτισμός των τεσσάρων γηπέδων του ΓΠΑ (ένα γήπεδο βόλεϊ, ένα γήπεδο μπάσκετ και δύο γήπεδα τένις) με τη χρήση λαμπτήρων τύπου LED (Εικόνα 4). Η τροφοδοσία των λαμπτήρων πραγματοποιείται μέσω φωτοβολταϊκών πλαισίων συνολικής ισχύος 5 kWp που είναι εγκατεστημένα σε ειδικά σχεδιασμένο στέγαστρο. Το στέγαστρο τοποθετήθηκε μεταξύ των γηπέδων με σκοπό να μπορεί να χρησιμοποιείται από τη φοιτητική κοινότητα του ΓΠΑ.

Τα κύρια μέρη του αυτόνομου μικροδικτύου (μονοφασικό) είναι τα παρακάτω.

α) Σύστημα φωτοβολταϊκών πλαισίων: 20 πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου, κάθε ένα ονομαστικής ισχύος 250 Wp

β) Συστοιχίες συσσωρευτών: 48 συσσωρευτές OPzV, 2 V, C10 2160 Ah

γ) Αναστροφέας φωτοβολταϊκών: 5 kW (96.5% απόδοση)

δ) Αναστροφέας διαμόρφωσης μικροδικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος: 8 kW (96% απόδοση)

Το μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με το αυτόνομο μικροδίκτυο του κτιρίου της βιβλιοθήκης.

Εικόνα 4. Φ/Β σύστημα και πυλώνες φωτισμού για τις αθλητικές εγκαταστάσεις του ΓΠΑ

2.4 Υποέργο 4. Προμήθεια και εγκατάσταση ηλεκτρικών οχημάτων και συστήματος (αστικού εξοπλισμού) για την τροφοδοσία των οχημάτων με χρήση ηλιακής ενέργειας στο ΓΠΑ

Στο πλαίσιο του Υποέργου 4 έγινε προμήθεια 10 ηλεκτρικών ποδηλάτων που εξυπηρετούν το προσωπικό του ΓΠΑ στις μετακινήσεις τους εντός του campus και ένα ηλεκτρικό όχημα τύπου λεωφορείου (17 ατόμων) για να πραγματοποιεί δρομολόγια μεταξύ των κοντινών σταθμών ΜΕΤΡΟ και του ΓΠΑ για την εξυπηρέτηση του προσωπικού και των επισκεπτών του πανεπιστημίου (Εικόνα 5). Στο πλαίσιο του έργου οικοδομήθηκε ένας οικίσκος για την τοποθέτηση του εξοπλισμού του μικροδικτύου και κατασκευάστηκε παράλληλα ένα στέγαστρο για τη τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ισχύος 5 kWp (Εικόνα 6). Το στέγαστρο χρησιμοποιείται επίσης ως χώρος στάθμευσης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Εικόνα 4. Στέγαστρο ηλεκτρικού λεωφορείου και ηλεκτρικών ποδηλάτων

Τα κύρια μέρη του αυτόνομου μικροδικτύου (τριφασικό) είναι τα παρακάτω.

α) Σύστημα φωτοβολταϊκών πλαισίων: 20 πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου, κάθε ένα ονομαστικής ισχύος 250 Wp

β) Συστοιχίες συσσωρευτών: 24 συσσωρευτές OPzV, 2 V, C10 2160 Ah

γ) Αναστροφέας των φωτοβολταϊκών: 5 kW (96.5% απόδοση)

δ) Αναστροφείς διαμόρφωσης μικροδικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος: 8 kW (96% απόδοση) ο καθένας.

Εικόνα 4. Οικίσκος αυτόνομου μικροδικτύου και στέγαστρο ηλεκτρικών οχημάτων

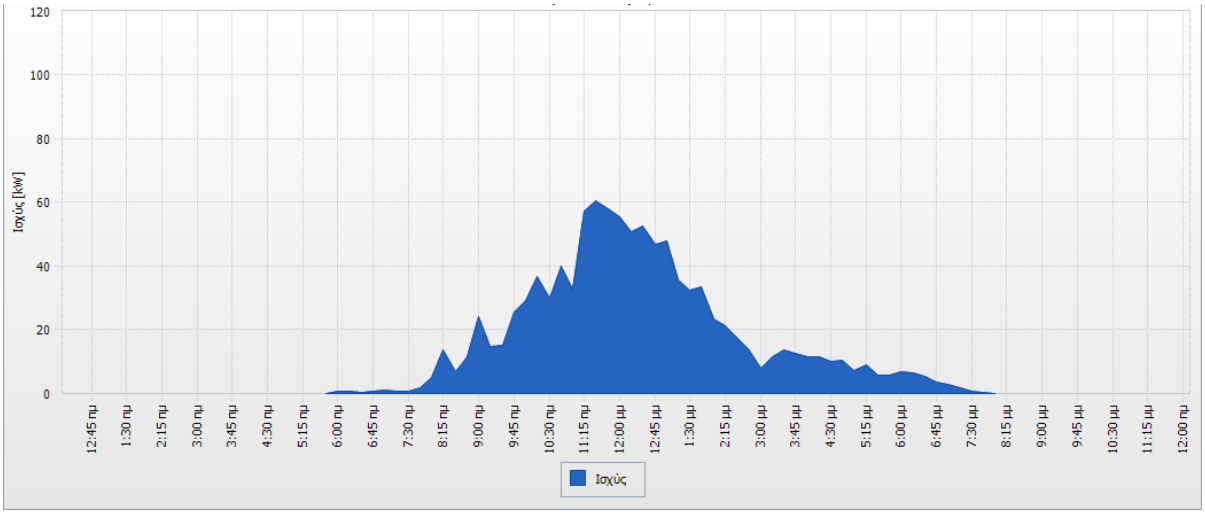
2.5 Υποέργο 5. Παροχή υπηρεσιών εκπαίδευσης, διάχυσης και ευαισθητοποίησης των αποτελεσμάτων της Πράξης

Στο πλαίσιο του Υποέργου 5, επιστημονικός και τεχνικός σύμβουλος επιλήφθηκε την παρακολούθηση και υποστήριξη της πράξης. Ο σύμβουλος ανέλαβε την υλοποίηση των παρακάτω εξειδικευμένων θεμάτων που απαιτούν ειδική τεχνογνωσία:

- Περιγραφή και τεκμηρίωση της επιστημονικής μεθοδολογίας για την πιστοποίηση των ενεργειακών αποτελεσμάτων μετά την υλοποίηση παρεμβάσεων, ώστε να τηρούνται οι δεσμευτικοί στόχοι της «κοινότητας» του ΓΠΑ.
- Συλλογή στοιχείων (από τους μετρητικούς εξοπλισμούς και από μετρήσεις), ανάλυση και ανάπτυξη του ενεργειακού ισοζυγίου στην “κοινότητα” του ΓΠΑ μετά την υλοποίηση των παρεμβάσεων.
- Έκθεση-καταγραφή και εκτίμηση των ενεργειακών μεγεθών ΠΡΙΝ και ΜΕΤΑ την υλοποίηση της πράξης.
- Εξειδικευμένες υπηρεσίες / κατευθύνσεις ώστε τα έργα και οι παρεμβάσεις να υλοποιούνται σύμφωνα με τις δεσμευμένες προδιαγραφές υλικών και τεχνολογιών που οδηγούν στο βέλτιστο τεχνικό, ενεργειακό και οικονομικό αποτέλεσμα
- Υποστήριξη στην παρακολούθηση των προμηθειών για εξειδικευμένα επιστημονικά θέματα.
- Υποστήριξη της αποστολής αναφορών από τον ΓΠΑ στον Διαχειριστή του Προγράμματος - Program Operator (ΚΑΠΕ) σε θέματα εξειδικευμένων επιστημονικών γνώσεων.
- Εξωτερική αξιολόγηση της επίτευξης των στόχων του προγράμματος.
- Εκπόνηση εμπειρογνωμοσύνων και τεχνικών προτάσεων – γνωμοδοτήσεων για την επιτυχή υλοποίηση των εγκεκριμένων πράξεων.
- Παρακολούθηση του συνολικού χρονοδιαγράμματος υλοποίησης των εγκεκριμένων πράξεων.
- Η σχεδίαση και εκτύπωση έντυπου υλικού (easytoread, braille, κ.α.) το οποίο διακινήθηκε σε τοπικό, περιφερειακό και διαπεριφερειακό επίπεδο.

- Διοργάνωση επιστημονικής ημερίδας με πρόσκληση πανεπιστημιακών ομιλητών. Η επιστημονική ημερίδα ήταν πολυθεματική και τονίστηκαν οι ευκαιρίες πράσινης επιχειρηματικότητας.

Στα Υποέργα 1, 2, 3 και 4 εγκαταστάθηκαν κατάλληλα συστήματα καταγραφής των δεδομένων της λειτουργίας των τεσσάρων συστημάτων. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η παραγόμενη ισχύς του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος του Υποέργου 1 κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του Ιουλίου. Κατά τη διάρκεια του Ιουλίου, από το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα 100 kWp της βιβλιοθήκης του ΓΠΑ αξιοποιήθηκαν 8.1 MWh και η ειδική απόδοση της εγκατάστασης ήταν 78.4 kWh/kWp.



Εικόνα 5. Παραγόμενη ισχύς του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος 100 kWp της βιβλιοθήκης του ΓΠΑ κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του Ιουλίου

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα εκτιμώμενα οφέλη από τη υλοποίηση των προτεινόμενων παρεμβάσεων είναι:

- *Αξιοποίηση θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από τεχνολογίες ΑΠΕ-Μείωση εκπομπών CO2*:

Μείωση του λειτουργικού κόστους για την κατανάλωση ενέργειας, της «Κοινότητας» του ΓΠΑ με την επίτευξη των παρακάτω:

- 117 MWh/έτος αξιοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από τεχνολογίες ΑΠΕ
- 13.96 MWh/έτος αξιοποίηση θερμικής ενέργειας παραγόμενης από τεχνολογίες ΑΠΕ
- Μείωση 1292.4 $tnCO_2$ το έτος.

- *Δημιουργία νέας επιχειρηματικότητας και θέσεων εργασίας:*

Ο «πράσινος» και επιδεικτικός χαρακτήρας των προτεινόμενων παρεμβάσεων στην «Κοινότητα» του ΓΠΑ, καθώς και η αναμενόμενη σημαντική δημοσιότητα και προβολή που πρόκειται να λάβει μπορεί να λειτουργήσει ενισχυτικά στον τομέα της πράσινης επιχειρηματικότητας καθώς δημιουργείται ένα ιδανικό περιβάλλον ανάπτυξης σε μια βιομηχανική περιοχή όπως ο Κεραμεικός, δεδομένου ότι στερείται παντελώς άλλων τέτοιων περιπτώσεων.

Συνεπώς, αναμένεται αύξηση και δημιουργία νέων θέσεων εργασίας σε καινοτόμους τομείς, με ιδιαίτερη βαρύτητα σε αυτόν των ΑΠΕ. Η δυνατότητα που προσφέρεται για την

χρήση ΑΠΕ, ιδιαίτερα στον κτιριακό τομέα, αποτελεί πολύ σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης «Κοινότητας» καθώς μειώνεται σημαντικά το κόστος κατανάλωσης ενέργειας στις υφιστάμενες και νέες εγκαταστάσεις.

Σημειώνεται επίσης, ο ενισχυτικός χαρακτήρας της δράσης στην καλλιέργεια του πνεύματος του «Επιχειρείν» σε νέους επιστήμονες, μιας και η πράξη θα υλοποιηθεί σε χώρους του ΓΠΑ, με πολλαπλασιαστικά οφέλη για την τοπική κοινωνία αλλά και την ευρύτερη περιοχή με ανάπτυξη ευκαιριών εργασίας σε νέους τομείς όπως αυτούς των Φ/Β, της βιομάζας κλπ. Τέλος, η υλοποίηση της προτεινόμενης παρέμβασης αναμένεται να δημιουργήσει σημαντικό αριθμό θέσεων εργασίας κατά την εγκατάσταση των προτεινόμενων τεχνολογιών ΑΠΕ. Επίσης, οι θέσεις εργασίας που δημιουργούνται κατά την κατασκευή έχουν τοπικό χαρακτήρα καθώς η τεχνολογική ωριμότητα των προτεινόμενων παρεμβάσεων δεν απαιτεί υψηλή εξειδίκευση τόσο για την υλοποίηση όσο και για την συντήρηση.

- *Βελτίωση της Ποιότητας Ζωής:*

Χωρίς αμφιβολία ένα από τα σημαντικότερα οφέλη της μετατροπής της πανεπιστημιακής «κοινότητας» σε πρότυπη «Πράσινη και Αειφόρο» αφορά τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των μελών της πανεπιστημιακής κοινότητας. Ειδικότερα, βελτιώνονται οι συνθήκες διαβίωσης καθώς οι επεμβάσεις σε χώρους όπου διαβιούν και εργάζονται άνθρωποι ενισχύουν την θερμική άνεση και το δομημένο περιβάλλον γενικότερα. Αναβαθμίζεται η αισθητική του ΓΠΑ μέσω των παρεμβάσεων, δίνεται η δυνατότητα πρόσβασης σε καινοτόμα μεταφορικά μέσα που ενσωματώνουν την ηλεκτροκίνηση με χρήση ΑΠΕ, προβάλλονται και επιδεικνύονται νέοι τομείς οικονομικής δραστηριότητας και βελτιώνεται το μικροκλίμα της περιοχής διαβίωσης. Δίνεται η δυνατότητα στους φοιτητές για συμμετοχή σε ένα καινοτόμο μοντέλο «Αειφόρου Κοινότητας», το οποίο πέραν των ενεργειακών χαρακτηριστικών περιλαμβάνει ευκαιρίες πολιτισμικής ανάπτυξης, ισότητα των φύλων, φιλικές γειτονιές και ιδιαίτερη ταυτότητα.

- *Αναβάθμιση εκπαιδευτικών και ερευνητικών οικονομικών δραστηριοτήτων:*

Όσον αφορά την ανάπτυξη, εκπαίδευση και προβολή νέων μορφών ακαδημαϊκής δραστηριότητας, η δημιουργία της «Πράσινης και Αειφόρου Κοινότητας» στο ΓΠΑ, πρόκειται να προσδώσει προστιθέμενη αξία στις παρεχόμενες υπηρεσίες του ιδρύματος, αναβαθμίζοντας έτσι την οικονομία των δραστηριοτήτων αυτών. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας, της βιομάζας κ.λπ. πρόκειται επίσης να λειτουργήσει επιδεικτικά ως καλή πρακτική στην τοπική κοινωνία, καταδεικνύοντας κατευθύνσεις και ευκαιρίες ανάπτυξης και της τοπικής οικονομίας (νέες ειδικότητες, μορφές απασχόλησης, νέες καλλιέργειες κλπ.).

- *Συμβολή στην επίτευξη των Εθνικών στόχων για το Περιβάλλον και την Ενέργεια:*

Τα αναμενόμενα αποτελέσματα από την δημιουργία της «Πράσινης και Αειφόρου Κοινότητας» του ΓΠΑ. πρόκειται να συμβάλουν στην επίτευξη των εθνικών στόχων για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Η εξοικονόμηση σχεδόν 200 MWh πρωτογενούς ενέργειας και 1700 tn CO2 ετησίως μπορεί να μην αποτελεί σημαντικό ποσοστό σε σχέση με την συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας της χώρας, όμως τα χαρακτηριστικά επίδειξης και προβολής του πιλοτικού προγράμματος και η επιλογή κατάλληλων παρεμβάσεων που διαθέτουν πολλαπλασιαστικό χαρακτήρα δημιουργούν τις ιδανικότερες συνθήκες προώθησης τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας και καινοτομικών συστημάτων Α.Π.Ε. που μπορούν άμεσα και εύκολα να επεκταθούν σε άλλες πανεπιστημιακές «κοινότητες», καθώς διαθέτουν την σχετική τεχνολογική αλλά και εμπορική ωριμότητα.

- *Επανεπένδυση νέων πράσινων ενεργειακών τεχνολογιών στο ΓΠΑ:*

Μέσω της προτεινόμενης πράξης υλοποιήθηκαν επενδύσεις ΑΠΕ καθώς και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΕΞΕ), με εγγυημένο ενεργειακό αποτέλεσμα, σε κτίρια του Δημόσιου, ιδιαίτερα σε μία περίοδο έλλειψης κεφαλαίων από το Δημόσιο τομέα και ιδιαίτερα στον τομέα της εκπαίδευσης, και εξοικονόμησης απαραίτητων πόρων για την επανεπένδυσή τους σε άλλες δραστηριότητες. Συγκεκριμένα οι πόροι που θα εξοικονομηθούν θα επανεπενδυθούν π.χ. για να στηριχτεί η εκπαιδευτική διαδικασία του ιδρύματος, ενώ θα γίνει προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν όλα τα σύγχρονα και καινοτόμα χρηματοδοτικά εργαλεία (ELENA, JESSICA, κλπ.) και εξειδικευμένα προγράμματα εκπαίδευσης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπό τις υπάρχουσες οικονομικο-πολιτικές συνθήκες, η επένδυση στον ενεργειακό τομέα μοιάζει να είναι η μοναδική διέξοδος για την αντιμετώπιση των πολλαπλών προκλήσεων και προβλημάτων που συνδέονται με τα διαρθρωτικά προβλήματα της οικονομίας. Ειδικότερα, μέσω της προτεινόμενης πράξης υλοποιήθηκαν επενδύσεις ΑΠΕ καθώς και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΕΞΕ), με εγγυημένο ενεργειακό αποτέλεσμα, σε κτίρια του ΓΠΑ, ιδιαίτερα σε μία περίοδο έλλειψης κεφαλαίων από το Δημόσιο τομέα και ιδιαίτερα στον τομέα της εκπαίδευσης, και εξοικονόμησης απαραίτητων πόρων για την επανεπένδυσή τους σε άλλες δραστηριότητες.

Τα αποτελέσματα έδειξαν:

- Την επιδεικτική και εμβληματική χρήση των πράσινων ενεργειακών τεχνολογιών (όπως ΑΠΕ), σε κομβικά σημεία μεγάλης επισκεψιμότητας και προσβασιμότητας στην «κοινότητα» ΓΠΑ, με πολλαπλασιαστικά οφέλη για όλους και συγκριμένα τους επαγγελματίες, μαθητές, νέους, επισκέπτες, πολίτες, κλπ.
- Τη προώθηση και ουσιαστική συμβολή του ΓΠΑ στην υλοποίηση ενός πλαισίου ισόρροπης ανάπτυξης και βελτίωση της ποιότητας ζωής, στο πλαίσιο των τοπικών, περιφερειακών, εθνικών και ευρωπαϊκών ενεργειακών στόχων του «20-20-20», με τελικό στόχο τη δημιουργία πρωτοπόρων οικονομιών.
- Την εμφανή αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ και εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους για τα κτίρια και εγκαταστάσεις που έγιναν οι παρεμβάσεις στην «κοινότητα» ΓΠΑ.
- Τη μείωση του λειτουργικού κόστους ενέργειας, της «Κοινότητας» του ΓΠΑ.
- Την επιδεικτική και εκπαιδευτική εξοικείωση των πολυπληθών ομάδων / χρηστών του ΓΠΑ με τις πρακτικές αειφόρου ενεργειακής ανάπτυξης.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του έργου «Ενσωμάτωση Τεχνολογικών ΑΠΕ στην «κοινότητα» του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών» που χρηματοδοτήθηκε από τον «Χρηματοδοτικό Μηχανισμό Ευρωπαϊκού Οικονομικού χώρου ΧΜ ΕΟΧ 2009-2014– GR03 Ανανεώσιμες Πήγες Ενέργειας», και συγκεκριμένα από τις χώρες ΕΟΧ-ΕΖΕΣ (Ισλανδία, Λιχτενστάιν, Νορβηγία, σε ποσοστό 85% και 15% από το Πρόγραμμα Δημόσιων Επενδύσεων (ΠΔΕ) της Ελληνικής Δημοκρατίας).

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids. IEEE power and energy magazine, 5(4), 78-94.

Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58(1), 158-172.

Lasseter, R. H. (2002). Microgrids. In Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE (Vol. 1, pp. 305-308). IEEE.

Karavas, C. S., Kyriakarakos, G., Arvanitis, K. G., & Papadakis, G. (2015). A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration microgrids. Energy Conversion and Management, 103, 166-179.

Kyriakarakos, G., Dounis, A. I., Rozakis, S., Arvanitis, K. G., & Papadakis, G. (2011). Polygeneration microgrids: a viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel. Applied Energy, 88(12), 4517-4526.

Kyriakarakos, G., Piromalis, D. D., Dounis, A. I., Arvanitis, K. G., & Papadakis, G. (2013). Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids. Applied Energy, 103, 39-51.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΉ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΠΙΠΕΡΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Κ. Κρινάς, Φ. Ευαγγελοπούλου, Α. Κουλόπουλος, Α. Καυγά✉ & Γ. Τρυπαναγνωστόπουλος+

ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων,
Θεοδωροπούλου Τέρμα, 27 200, Αμαλιάδα*, Ελλάδα,*
✉akavga@*teiwest.gr*

Περίληψη

Η κατανάλωση ενέργειας είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το οικονομικό ισοζύγιο των θερμοκηπίων και τα φωτοβολταϊκά (PV) μπορούν να θεωρηθούν ως εναλλακτική λύση για την κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμαντικών αναγκών τους. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία (IR) διαθέτουν το πλεονέκτημα της ακριβούς στόχευσης και της εστιασμένης αντιστάθμισης των ενεργειακών απωλειών και είναι κατάλληλα για τη δημιουργία τοπικών συνθηκών θερμοκρασίας σε ανοικτούς ή θερμικά μη προστατευμένους χώρους με αποτέλεσμα τη συνολική μείωση των θερμικών απωλειών και συνεπώς τη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για θέρμανση. Στόχος της έρευνας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός θερμοκηπίου χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης με χρήση θέρμανσης IR και κάλυψη των υπόλοιπων ενεργειακών αναγκών με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή του θερμοκηπίου. Επίσης, να διερευνηθεί η επίδραση της μερικής σκίασης που προκαλούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις παραμέτρους ανάπτυξης και στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται από μια πλήρη περίοδο καλλιέργειας μέσα σε δύο θερμοκήπια. Υλοποιήθηκαν δύο επιλογές θερμοκηπίου με και χωρίς φωτοβολταϊκά αντίστοιχα. Καλλιεργήθηκε πιπεριά (California Wonder L.) ως δοκιμαστική καλλιέργεια για μια περίοδο τριών μηνών. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τον φωτισμό του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου και την θερμοκρασία και ανάπτυξη των φυτών. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την κλασσική καλλιέργεια. Αναλύεται ο σχεδιασμός και η ενεργειακή απόδοση της ανωτέρω φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Λέξεις κλειδιά: ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκήπιο, υπέρυθρη ακτινοβολία, φωτοβολταϊκά, ποιότητα καλλιέργειας

EXPERIMENTAL CULTIVATION OF PEPPERS IN LOW ENERGY DEMAND GREENHOUSES

K. Krinas, F. Evangelopoulou, A. Koulopoulos, A. Kavga✉ & Y. Tripanagnostopoulos+

TEI of Western Greece, Department of Agricultural Technology, Theodoropoulou Terma, 27200, Campus Amaliada, Greece,
✉akavga@*teiwest.gr*

+ In memory of Professor Yiannis Tripanagnostopoulos

ABSTRACT

Energy demand of greenhouses is an important factor for their economics and photovoltaics (PV) can be considered an alternative solution to cover their electrical and heating needs. On the other hand, Infrared (IR) radiation heating systems possess the advantage of high directional control and focused compensation of energy losses, appropriate for creating local temperature conditions in open or thermally unprotected spaces resulting in an overall reduction of heat losses and consequently heating energy needs. The objective of this research is to develop a low energy demand greenhouse by using IR heating and the cover of remaining energy needs by the installation of PV panels on the greenhouse's roof. Also, to investigate the effect of PV panels induced partial shading on growth parameters and physiological characteristics of plants. Experimental results are presented from a full cultivation period inside two greenhouses, with and without PV correspondingly. Pepper (California Wonder L.) is used as the test crop for a three months period. The results include electrical energy output, greenhouse inside space lighting and temperature and plant growing. Results are compared to classical cultivation. The design and energy performance of the above PV installation modes is analyzed and results are presented.

Keywords: solar radiation, greenhouse, infrared radiation, photovoltaics, crop quality

1. INTRODUCTION

Greenhouses are intensive cultivation units for agricultural products, which require optimum combination of allocated particulars and proceeding, as lighting, heating, cooling and ventilation. The temperature of the inside air affects the canopy temperature and transpiration, influencing the plant growth. The temperature level inside the greenhouse depends on the solar input, as well as the ambient air temperature. The favorable temperature environment in the greenhouse is not always achieved and additional energy is necessary. Conventional fuels and electricity are usually the energy sources to cover the energy demand of greenhouses.

The climatic conditions of Mediterranean countries differ from those of Central and Northern European countries and both heating and artificial lighting in winter is needed, as well as cooling and lighting control for the summer. These conditions make more complex the control of internal space conditions and difficult to find a cost-effective solution.

IR heating systems can efficiently maintain favorable environmental conditions at the plant canopy. PV panels are suggested to be mounted on the roof of greenhouses and cover energy needs of greenhouses. Optimal PV installation is needed because the solar radiation that passes through cover and falls to the plants in the greenhouse is reduced. The combination of IR heating and PV panels on greenhouse roofs results in a low energy demand greenhouse and could be used for a wider application of them.

In this study, the application of photovoltaics on greenhouse's roof is suggested to be studied regarding their effect to plant growing. Greenhouses with IR heating, with same cultivation (pepper) with and without PV panels on their roofs give a low energy demand greenhouses, the effect of shading and of the energy gain by the roof mounted PV panels. The results from the tested low energy demand greenhouses greenhouses could be used for a wider application of them, considering their cost effectiveness.

2. THEORY

2.1 Infrared Radiadion (IR)

An alternative method of heating the plants in a greenhouse, which was originally proposed in the late 1970s as a result of the first oil crisis, is the use of low-intensity infrared (IR) radiation. The main potential advantage of IR heating is the direct delivery of thermal energy from the power source to the canopy, thus eliminating the need to increase the inside air temperature in order to deliver the necessary heat by convection. As a result, the cover and inside air may remain at significantly lower temperatures than the target value for the plants, with a concomitant reduction of energy losses. IR heating systems can efficiently maintain favorable environmental conditions at the plant canopy (microclimate), which promote the uniform, quantitative, and qualitative growth of plants and suppress plant pest and diseases. Moreover, when the canopy is retained at a higher temperature than the rest of the greenhouse, the possibility of moisture condensation on plants' surface is drastically reduced. Implementation of IR heating in experimental and production scale greenhouse has indicated energy savings in the range 40–50% and has contributed to improved product quality (Kavga et al, 2012, 2015). IR heating systems have only to compensate the heat losses of the canopy, with minimum requirements for supporting and auxiliary systems (boilers, transmissions, lines, fans, etc.) and therefore can respond very quickly to outside temperature changes.

2.2 Photovoltaics (PV)

Photovoltaics (PV) are less used in greenhouses compared to other type of buildings (Kylili and Fokaides, 2014), but they could be effectively used to cover their energy needs in electricity and heat. PV covered greenhouses showed the effectiveness of this application (Nayak and Tiwari, 2008; Yano et al., 2009; Fatnasi et al., 2015; Marucci and Cappuccini, 2016; Lamnatou and Chemisana, 2013; Hassanien et al., 2016). In the last years, greenhouses have been built with PV panels integrated on their roofs. Some of them use opaque (Cossu et. al., 2014) or semi-transparent (Marucci et al., 2012) Si PV panels, while others use transparent thin film or organic photovoltaics (OPVs) which appear colored because of their selective spectral absorption (Emmott et.al., 2013). In most Si PV covered greenhouse roofs, they are integrated on south facing roof, while in the case of OPVs they cover partially or totally the greenhouse roof.

The installation of PV panels on the roof of the greenhouses reduces solar radiation that passes through roof glazing and falls to the plants in the greenhouse. This reduction may be charged to the adequate plant lighting and optimal installation is needed. The electricity of PV panels is used for the operation of the required equipment, in order to achieve efficient operation of greenhouses (ventilators, heaters, heat pumps, lighting, etc), considering the mounting modes of PV panels on greenhouse roof. In Tripanagnostopoulos et al, 2017, a detailed study for using PV panels on greenhouse roof has given interesting results regarding, mainly, electricity production. There are several types of PV panels that could be used as covering material of greenhouses (typical flat type, tube type, semi-transparent, concentrating).

Photovoltaics can cover energy needs of greenhouses in dynamic ventilation, artificial lighting and other demands. PVs to greenhouse' roofs should be studied regarding installation modes, electricity output and effect to plant growing. PV panels are suggested to be mounted on the roof of greenhouses and cover a part of them, considering that the reduction of solar radiation entering the greenhouse interior space is as minimum as

possible. The greenhouses can have east-west orientation, with the solar system facing south or north-south orientation, where PV panels are mounted on east and west facing greenhouse roof surfaces. In this case the shading from the installed panels is “moving” during day, avoiding permanent shading of the plants

3. MATERIALS –METHODS

Two identical small-scale experimental greenhouses located in western Greece were used as the test bed of the two installation options with and without PV, namely glass and glass PV greenhouse correspondingly. Both greenhouses are constructed of aluminum framework, with 3mm thick glass panels. They have the same orientation and were located in the same field with a sufficient distance between them to avoid mutual interference. Their dimensions are width 2.13 m, length 2.00 m, eaves height 1.00 m and total height up to the top 1.50 m. The base area of each greenhouse Ap is equal to 4.26 m^2, the area of the greenhouse cover is Ac =14.05 m^2 and the volume of the greenhouse is V=5.33 m^3.

The experimental greenhouses are equipped with heating and ventilation systems. An IR heating system consisting of four lamps with blownbulb reflectors (1 kW total power, 50° beam angle) placed at the greenhouse corners and an elevation of 1 m above the plants. Ventilation during daytime is accomplished by opening of the roof windows and doors.

Two polycrystalline silicon (pc-Si) PV covering in total 0.8 m^2 were mounted on the roof of the one greenhouse, covering in total 0.8 m^2 of the roof surface. Thermocouples are attached on front and rear panel surface, to measure the PV temperature. In addition, a pyranometer is mounted parallel to panels, to measure the incoming solar radiation on it. Finally by measuring the output in electricity, the produced electrical power could be calculated.

Interior microclimatic parameters monitored in both greenhouses are the temperature at several locations at the canopy, inside the greenhouses and at the inside and outside surface of the greenhouse glazing cover and of PV panel, as well as the relative humidity and radiation fluxes (incoming solar radiation and photosynthetically active radiation). The outdoor environmental conditions including temperature, wind speed, relative humidity, sky temperature and rain are monitored at a height of 2.50 m above the ground level, on a meteorological mast close to the greenhouses.

For a three (3) months operation period for both configurations, all data were recorded every minute, and 10 min averages and were stored in a data logger with a relay analogue multiplexer. Overall day-time and night-time mean values were also computed from the respective time series, based on the interval between the steep radiation and temperature changes at sunrise and sunset. The Analyzer 4.5 Datalogger Software was used for the processing and statistical analysis of the experimental data.

Pepper, was used as the test crop. The plants are cultivated on the soil. In each greenhouse 16 young pepper plants were planted, forming four rows of four plants each and planting distances were 36 cm x 24cm. (plant by plant x line by line). A drip irrigation system was applied. The supply of each drip emitter was 2lit/h. The irrigation dose during the experiment was 3.6 lit per plant. Fertilizing of the plants was done with water-soluble fertilizers. During the cultivation, 120 gr N, 280 gr P, 160 gr K, 12 gr Mg and 18 gr Ca were administered on each plant. For the fertilization program, the results of soil analysis prior to the installation of the plants were taken into account. The full weight the length and the dry weight of the fruits were measured as well as the perimeter and the thickness.

Figure 1. The experimental setup with the cultivation.

4. Results

Investigation concerning the variation of the daily and nightly temperatures, the accumulated energy results of incoming and transmitted solar energy to greenhouses, PV input and output as well as the effect of shading produced by the PV to the plants grown has been performed.

4.1 Temperature and solar radiation results

In Figure 2 the variation of the daily and nightly temperatures during the three months period is shown. The presented graphs are for the ambient temperature Ta, the inside temperature of the reference greenhouse Ta glass and of the greenhouse with the photovoltaic's Ta glass PV. These diagrams show that the temperature inside the two greenhouses is almost at the same level, with slightly higher values inside the glass (reference) greenhouse. The observed slightly lower temperature difference is due to the PV shading and the ventilation that was kept in both greenhouses during the testing period, which resulted to have a continues refreshment of the inside air.

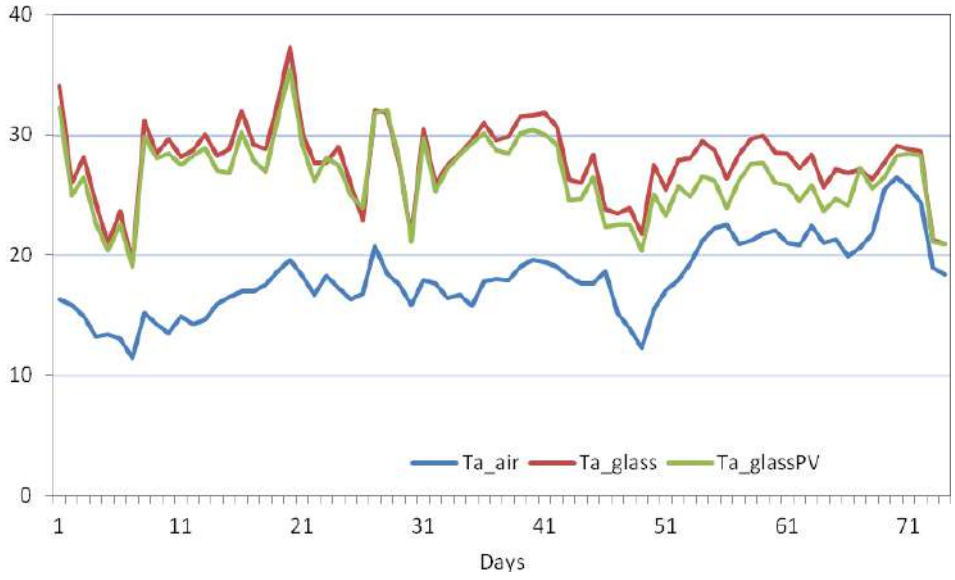


Figure. 2 Variation of daily ambient and inside greenhouses temperatures

In Figure 3 the variation of the nightly temperatures during the three months period is shown. these diagrams show that the inside air temperature is almost at the same level, in accordance with infrared radiation operation principles.

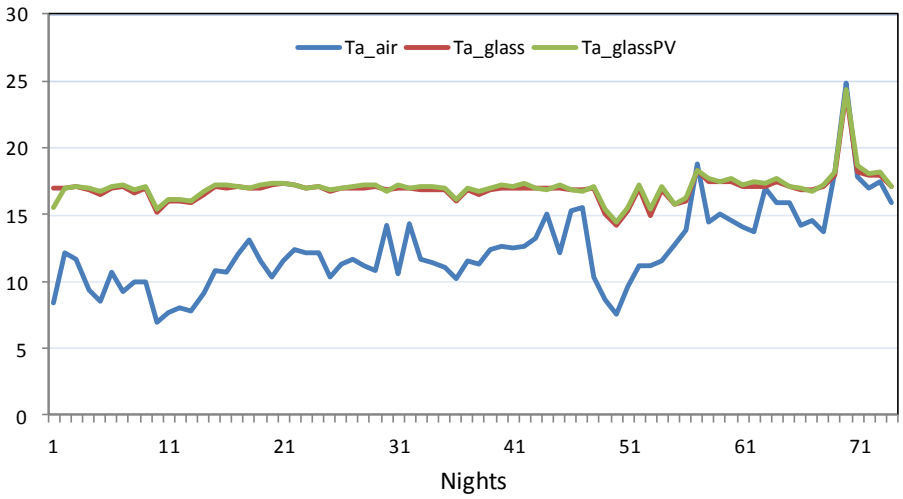


Figure. 3 Variation of nightly ambient and inside greenhouses temperatures

As depicted in Figure 4 the values of the transmitted solar radiation inside the reference and the greenhouse with PV panels are lower than the incoming radiation respectively, because of the reflection and absorption from the greenhouse glass cover. The total radiation that the pyranometer on the greenhouse roof with the same slope of PV panels (Sol PV) was recorded 434.11 $kWhm^{-2}$ and the total output electrical energy of the two PV panels (PV output) was 42.37 kWh (or 52.96 $kWhm^{-2}$). Based on the totally recorded data for the incoming solar radiation on PV panels and the output electricity, the PV system has produced electrical energy with efficiency of about 12.2%.

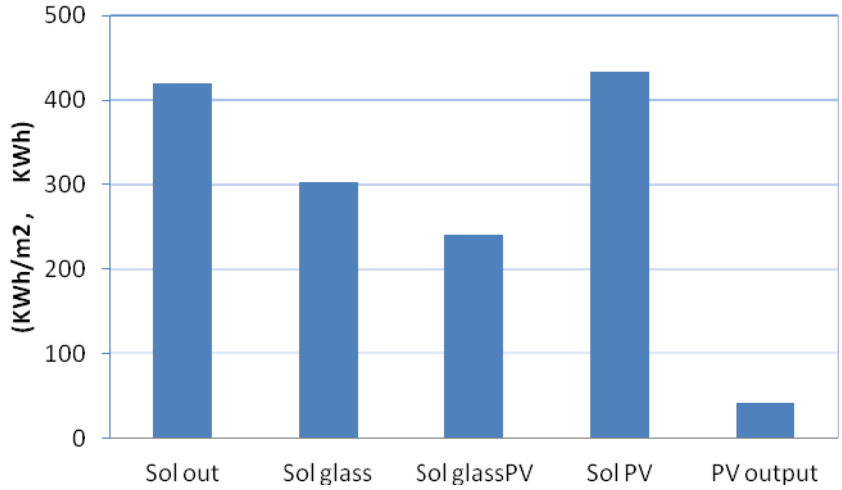


Figure 4. Accumulated energy results of incoming and transmitted solar radiation greenhouses and PV input and output.

4.2 Cultivation results

In Figure 5 the results for the quantity of fruits, the full and dry weight are presented. Especially, the results give a figure of increased fruit production in the PV greenhouse against the reference greenhouse. In these quantity results, the shaded greenhouse produced a larger number of fruits and as a natural consequence the weight of the fruits obtained from this greenhouse was higher than the reference greenhouse.

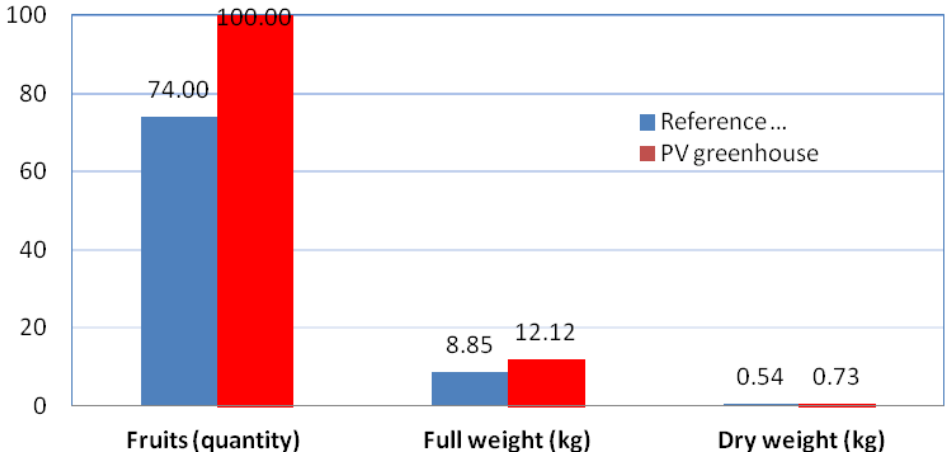


Figure 5. Total values of basic fruits grow indicators I

In Figure 6 the results regarding the average of full and dry weight and the average of perimeter height and thickness of fruits are shown. From these results it is noticed the almost same values of the fruits of PV greenhouse, compared to those of the fruits of the reference greenhouse. Observing the quality characteristics of the fruits of the two greenhouses, namely their average weight, their height, their perimeter and their thickness, we see that there are virtually no differences and that uniform fruits were produced.

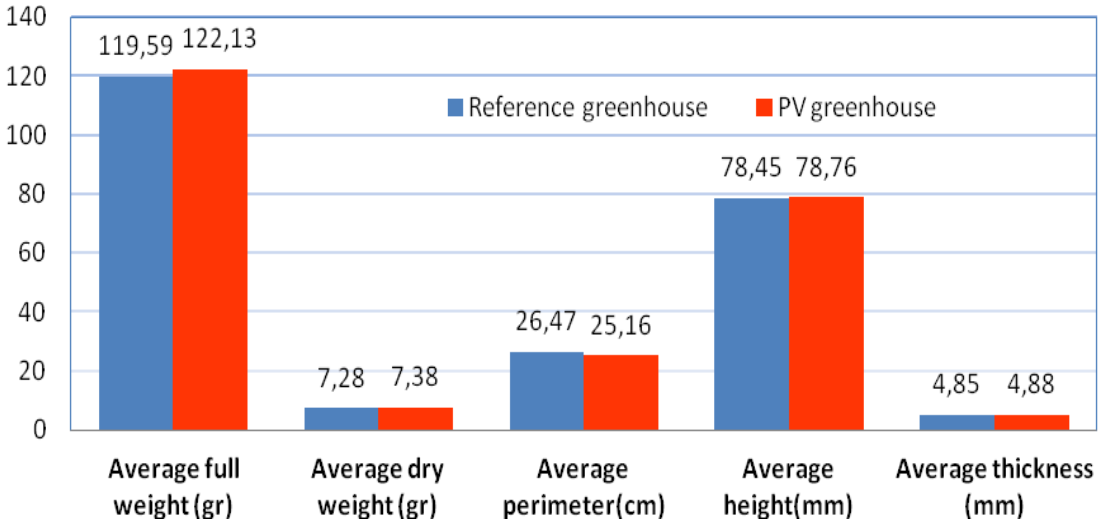


Figure 6. Average values of fruits grow indicators II

5. CONCLUSIONS

Photovoltaic can cover energy needs of greenhouses in heating, dynamic ventilation, artificial lighting and other energy demands. Two experimental greenhouses were tested, with and without PV, the reference greenhouse. PV panels of pc-Si type were used, covering a small part of the greenhouse roof surface. For the testing procedure, pepper plants were used to determine their growing effect due to PV shading. It was found that the PV greenhouse gave satisfactory results regarding the studied plant grow indicators. Based on above results can be concluded that for a low covering ratio of greenhouse roof by photovoltaic, as of 20%, a considerable energy contribution to the greenhouse demand without significant reduction effect to plant growing can be achieved. The obtained electrical energy from the greenhouse roof installed photovoltaic can cover a considerable part of greenhouse energy demand, or even the total energy needs for a low energy greenhouse.

An installation of PV panels on a greenhouse roof was studied regarding the effect to the transmitted solar radiation into greenhouse space, the variation of the daily and nightly temperatures, the electricity output and the effect to plant growing. For a low covering ratio of greenhouse roof 20% by photovoltaics, a considerable energy contribution to the greenhouse demand is achieved without significant effect to plant growing, under the mild weather conditions of south-west Greece.

Considering the results, it's observed that shading has positively influenced the productivity of the PV greenhouse, with no impact on the quality characteristics of the fruit.

6. REFERENCES

Cossu M., Murgia L., Ledda L., Deligios P.A., Sirigu A., Chessa F., and Pazzona A., 2014. *Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity*. Applied Energy, 133, 89-100.

Emmott Ch.J.M., Roehr J.A., Campoy-Quiles m., Kirchartz Th., Urbina A., Ekins-ankes N.J., and Nelson J. , 2013.*Organic photovoltaic greenhouses: a unique application for semi-transparent PV.* Energy Environ Sci. 8, 1317-1328.

Fatnasi H., Poncet Ch., Bazzano M. M., Brun R., and Bertin N. 2015. *A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate.* Solar Energy, 120, 575-584.

Hassanien Reda Hassanien Emam, Li Ming, and Lin Wei Dong. 2016. *Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 989-1001.

Kavga A., Alexopoulos G. , Bontozoglou B. , Pantelakis S. , Panidis Th, 2012. *Experimental Investigation of the Energy Needs for a Conventionally and an Infrared-Heated Greenhouse.* Advances in Mechanical Engineering, vol. 2012, Article ID 789515, 16 pages. doi:10.1155/2012/789515

Kavga A., and Panidis Th., 2015. *Implementation Results of Infrared Heating (IR) in a Production Greenhouse.* Applied Engineering in Agriculture, 31(1), 143-151

Kylili A., and Fokaides P. A. 2014. *Investigation of building integrated photovoltaics potential in achieving the zero energy building target*. Indoor and Built Environment, 23, 92-106.

Lamnatou Chr,and Chemisana D. 2013. Solar *radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fresnel lenses, NIR- and UV-blocking materials.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 271-287.

Marucci A., and Cappuccini A. Dynamic 2016. *photovoltaic greenhouse: Energy efficiency in clear sky conditions.* Applied Energy. 170, 362-376.

Marucci A., Monarca D., Cecchini M., Colantoni A., Manzo A., Cappuccini A. 2012.*The Semitransparent Photovoltaic Films for Mediterranean Greenhouse: A New Sustainable Technology.* Mathematical Problems in Engineering Volume. Article ID 451934.

Nayak S., and Tiwari G.N. 2008. *Energy and Exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse.* Energy and Buildings 40, 201-2021.

Trypanagnostopoulos G., Kavga A., Souliotis M., and Tripanagnostopoulos Y., 2017. *Contribution of roof installed photovoltaics to performance improvement of greenhouses.* Renewable Energy, 111, 724-731

Yano A., Furue A., Kadowaki M., Tanaka T., Hiraki E., Miyamoto M., and Ishizu F.Noda S. 2009. *Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north-south oriented greenhouse.* Biosystems Engineering, 103,228-238.

ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΛΕΒΗΤΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE

Π. Καλανζή✉ , Δ. Μανωλάκος, Γ. Παπαδάκης, Κ. Αρβανίτης
Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα,
✉e.kalanzh@gmail.com

Περίληψη

Στην εργασία αυτή συγκρίνεται το οικονομικό όφελος της εγκατάστασης ενός συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας σε θερμοκήπιο 8 στρεμμάτων με τη χρήση σύμπηκτων βιομάζας σε σχέση με ένα συμβατό σύστημα θέρμανσης, για δύο αντιπροσωπευτικές περιοχές της χώρας (Αττική, Καστοριά) που χαρακτηρίζονται από έντονα διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, η σύγκριση γίνεται μεταξύ της εγκατάστασης ενός λέβητα βιομάζας που το καύσιμο είναι σύμπηκτα ξύλου σε παράλληλη σύνδεση με μια μηχανή οργανικού κύκλου Rankine για την παραγωγή ισχύος, με μια συμβατική εγκατάσταση λέβητα πετρελαίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μια τέτοια εγκατάσταση συμπαραγωγής στην περιοχή της Αττικής δεν θα ήταν σε καμία περίπτωση οικονομικά πιο αποδοτική από το λέβητα πετρελαίου. Ωστόσο, στην περιοχή της Καστοριάς η επένδυση θα ήταν αποδοτικότερη του λέβητα πετρελαίου στην περίπτωση που το κόστος προμήθειας της μηχανής ORC είναι χαμηλότερο των 4000 €/kWe και η προμήθεια συμπήκτων βιομάζας γίνεται σε περίοδο χαμηλής ζήτησης και με τιμή αγοράς που δεν υπερβαίνει τα 0.27 €/kg.

Λέξεις κλειδιά: οργανικός κύκλος Rankine, θερμοκήπιο, σύστημα θέρμανσης, σύμπηκτα ξύλου

TECHNOECONOMIC DESIGN INSTALLATION IN A GREENHOUSE OF COMBINED SYSTEM BIOMASS BOILER AND ORGANIC RANKINE CYCLE MACHINE

P.Kalanzi✉, D.Manolakos, G.Papadakis, K.Arvanitis
Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens,
✉e.kalanzh@gmail.com

ABSTRACT

In this study compares the economic benefit of installation in a cogeneration system of electricity and heat in an 8 acre greenhouse using pellets biomass with a conventional heating system for two representative areas of the country (Attiki, Kastoria) which are characterized by intensely different climatic characteristics. Specifically, the comparison was drawn between the installation of a biomass boiler whose fuel is wood pellets connected parallel to an organic rankine cycle machine for the power generation, by a conventional oil boiler installation. The results show that such a cogeneration installation in Attiki would not in any way be more economical efficient than the oil boiler. However, in the region of Kastoria the investment would be more efficient than the oil boiler and the supply of ORC is less than 4000 €/kWe and supply of biomass pellets will be done in a low demand season and their market will amount to 0.27 €/kg.

Keywords: Organic rankine cycle, greenhouse, heating system, wood pellets

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων παγκοσμίως σε συνδυασμό με την προβλεπόμενη εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη από συμβατικές πηγές και περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν δημιουργηθεί λόγω της οικονομικής ανάπτυξης και των αλλαγών της καταναλωτικής συμπεριφοράς, οδηγούν στην ολοένα αυξανόμενη χρήση των Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Με τη χρήση των θερμοκηπίων είναι δυνατή η ανάπτυξη φυτών σε περιοχές με δυσμενείς γι' αυτά συνθήκες καθώς και η εκτός εποχής παραγωγή των καλλιεργειών. Η θερμοκρασία είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες, που επηρεάζουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών καθώς και τις άλλες λειτουργίες των φυτών. Υπάρχουν όμως και χρονικές περίοδοι μέσα στην ημέρα που η ακτινοβολία είναι περιορισμένη και η θερμοκρασία του χώρου βρίσκεται κάτω από τα επιθυμητά επίπεδα, συνεπώς τις χρονικές αυτές περιόδους γίνεται αναγκαία η ύπαρξη του συστήματος θέρμανσης. Κατά τη διάρκεια της νύχτας όλη η απαιτούμενη ενέργεια για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του χώρου στα επιθυμητά επίπεδα προέρχεται από το σύστημα θέρμανσης.

Από τη στιγμή που η εφαρμογή των συστημάτων θέρμανσης απαιτείται σχεδόν σε όλα τα θερμοκήπια, η κατανάλωση καυσίμων γίνεται ένας σημαντικός οικονομικός παράγοντας. Εξαιτίας του υψηλού κόστους και της αβεβαιότητας της διαθεσιμότητας των συμβατικών καυσίμων, σημαντική προσοχή έχει δοθεί στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως εναλλακτικοί τρόποι θέρμανσης των θερμοκηπίων

Συνεπώς στην εργασία μελετάτε το οικονομικό ενδιαφέρον της αντικατάστασης ενός λέβητα πετρελαίου από ένα λέβητα σύμπηκτων με συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας από μηχανή οργανικού κύκλου Rankine. Η μελέτη αφορά την θέρμανση θερμοκηπίου 8 στρεμμάτων (8000 m^2) το οποίο θα προορίζεται για επιχειρηματική καλλιέργεια τομάτας, που αποτελεί μια συνήθη επιλογή θερμοκηπίου για τα ελληνικά δεδομένα, για τις περιοχές της Αττικής και της Καστοριάς προκειμένου να αναλυθεί η επίπτωση των κλιματικών συνθηκών στην απόδοση της επένδυσης.

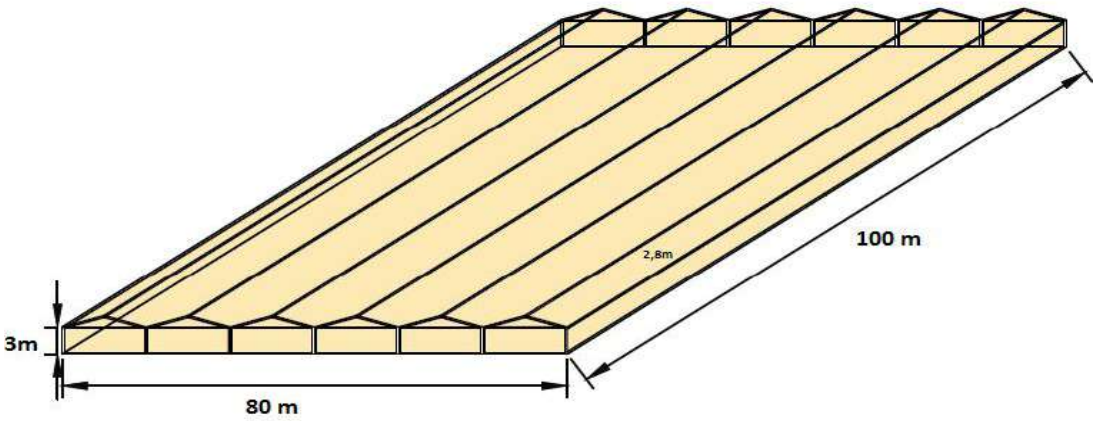
2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή του θερμοκηπίου

Το θερμοκήπιο που μελετάμε στην περιοχή της Αττικής και στην Καστοριά είναι ένα αμφίρριχτο θερμοκήπιο. Το θερμοκήπιο έχει διαμήκη προσανατολισμό τον άξονα Βορρά - Νότου.

Το θερμοκήπιο είναι υαλόφρακτο. Για τη κατασκευή του θερμοκηπίου έχει χρησιμοποιηθεί αλουμίνιο σε συνδυασμό με το χάλυβα. Από αλουμίνιο είναι κατασκευασμένα τα λεπτά στοιχεία του σκελετού πάνω στα οποία τοποθετούνται οι υαλοπίνακες ενώ από χάλυβα είναι κατασκευασμένα τα στοιχεία που σχηματίζουν το βασικό σκελετό του.

Ο αερισμός του θερμοκηπίου επιτυγχάνεται με φυσικό τρόπο, καθώς υπάρχουν ανοίγματα κατά μήκος της οροφής που ανοίγουν αυτόματα.



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση ολόκληρης της μονάδας του θερμοκηπίου των 8 στρεμμάτων με τη χρήση του AutoCAD.

2.2. Υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος του συστήματος θέρμανσης

Απαραίτητο ήταν να γνωστοποιήσουμε την απαιτούμενη ισχύς του συστήματος θέρμανσης του θερμοκηπίου συνεπώς για τον υπολογισμό της ώστε να παρέχει τη δυνατότητα ικανοποιητικής ρύθμισης της θερμοκρασίας του, έπρεπε να βρεθούν πρώτα οι μέγιστες απώλειες θερμότητας του συγκεκριμένου θερμοκηπίου στη μονάδα του χρόνου. Οι μέγιστες απώλειες συνήθως συμβαίνουν τη νύχτα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία φθάνει στην ελάχιστη τιμή της. Το σύστημα θέρμανσης θα πρέπει να καλύπτει πλήρως αυτές τις απώλειες.

Για τον υπολογισμό της ενέργειας, που καταναλίσκεται στη θέρμανση ενός θερμοκηπίου οποιαδήποτε χρονική στιγμή, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επιθυμητή θερμοκρασία μέσα στο θερμοκήπιο, η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα, καθώς και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση του θερμοκηπίου προέρχεται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία, όταν όμως δεν επαρκεί τότε συμμετέχει και το σύστημα θέρμανσης. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται από το σύστημα θέρμανσης.

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης θερμικής ισχύος του συστήματος θέρμανσης έγινε με βάση την εξίσωση :

$$\dot{q}_h = \left(\frac{A_c}{A_g}\right) U(T_i - T_o) - Ir(1-\Gamma)(1-\varepsilon)$$

$\dot{q}_h$ = η καταναλισκόμενη ενέργεια [J/m ^{2}].
Ag = η επιφάνεια του καλυμμένου εδάφους [m^2].
Ac = η επιφάνεια του καλύμματος του θερμοκηπίου [m^2].
U= Η μέση τιμή του ολικού συντελεστή μεταφοράς [W/ m^2 ^{o}C].
T_i = η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου [^{o} C].
T_o = η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα [^{o} C].
I = η ένταση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους, έξω από το θερμοκήπιο [W/m ^{2}].
r = η περατότητα του θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία [-].
Γ = ο συντελεστής ανακλαστικότητας του εσωτερικού του θερμοκηπίου [-].
ε = ο συντελεστής μετατροπής της ακτινοβολίας σε λανθάνουσα θερμότητα με τη διαπνοή μέσα στο θερμοκήπιο [-][1],[2], [3].

Η επιθυμητή θερμοκρασία για την καλλιέργεια της τομάτας $[T_i]$ κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι 14 ^oC.

Η περατότητα του θερμοκηπίου στην ακτινοβολία [r] για θερμοκήπια που καλύπτονται με μονό κάλυμμα είναι 0,5 .

Ο συντελεστής ανακλαστικότητας του εσωτερικού του θερμοκηπίου [Γ] έχει σταθερή τιμή 0,2.

Ο συντελεστής μετατροπής της ακτινοβολίας σε λανθάνουσα θερμότητα μέσα στο θερμοκήπιο [ε] κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,5-0,7 και εξαρτάται κυρίως από το δείκτη φυλλικής επιφάνειας, την υγρασία, την κίνηση του αέρα και την τροφοδοσία νερού στα φύλλα.

Η μέση τιμή του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για το συγκεκριμένο υαλόφρακτο θερμοκήπιο είναι U = 6,3 W/ m^2 ^oC.

Η επιφάνεια του καλυμμένου εδάφους Ag είναι 8000 m^2.

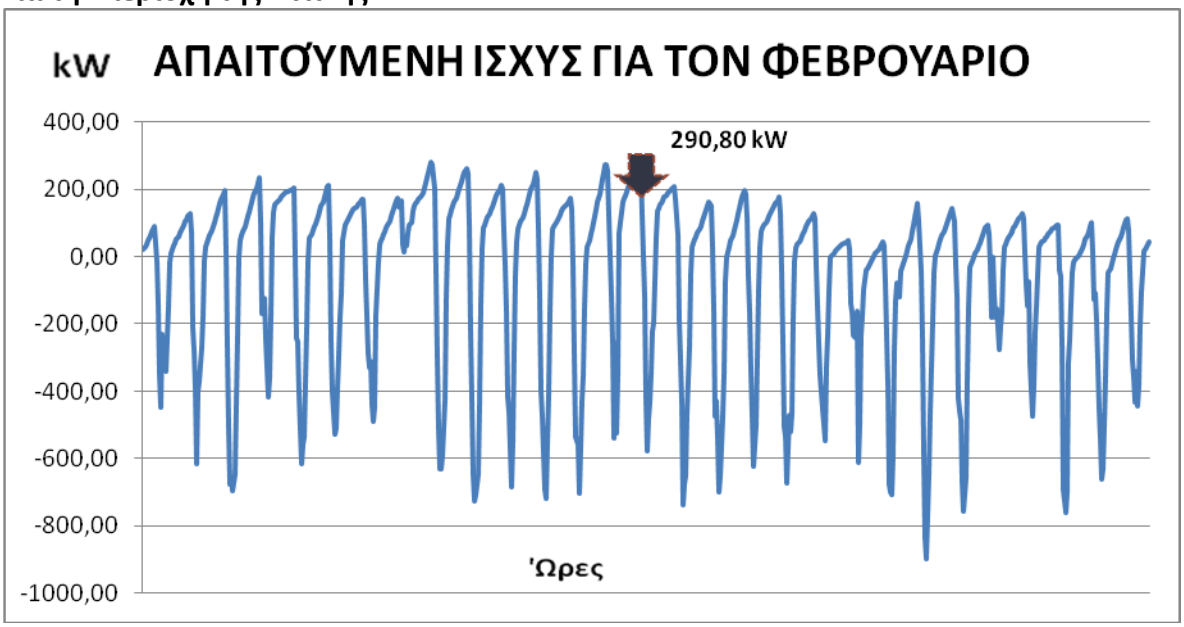
Εφόσον γνωρίζαμε τις διαστάσεις των πλευρικών τοιχωμάτων και της κάθε αψίδας του θερμοκηπίου υπολογίστηκε ότι η επιφάνεια του καλύμματος του θερμοκηπίου Ac είναι 3768 m^2.

Τα δεδομένα για την ένταση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους, καθώς και η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι από την γνωστή βάση δεδομένων Meteonorm και είναι δεδομένα Typical Meteorological Year (TMY2) δηλαδή τυπικού μετεωρολογικού έτους, από την έκδοση 5 του προγράμματος του TMY2 και αναφέρεται σε μέσους όρους των ετών 1961-1990.

Αφού υπολογίστηκε η θερμική ισχύς του θερμοκηπίου για κάθε ώρα του έτους, έγινε γνωστή η μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια για την θέρμανση του θερμοκηπίου για το έτος αυτό. Η μέγιστη απαιτούμενη ισχύς για τη θέρμανση του θερμοκηπίου για την περιοχή της Αττικής είναι 290,80 kW και για την περιοχή της Καστοριάς είναι 563,8 kW .

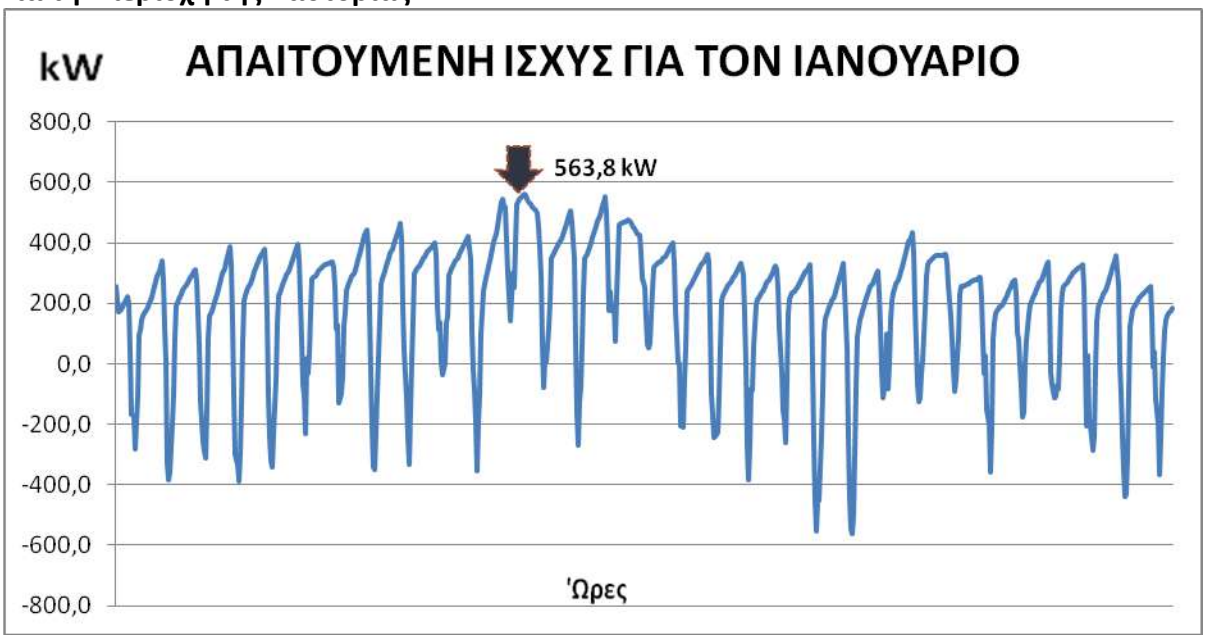
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των θερμικών απαιτήσεων των δύο θερμοκηπίων για τους ψυχρότερους μήνες.

Για την περιοχή της Αττικής



Σχήμα 2. Απαιτούμενη θερμική ισχύς το Φεβρουάριο για το θερμοκήπιο της Αττικής.

Για την περιοχή της Καστοριάς



Σχήμα 3. Απαιτούμενη θερμική ισχύς το Ιανουάριο για το θερμοκήπιο της Καστοριάς.

Για λόγους ασφαλείας προστέθηκε ένα 10% λόγω του ότι ένα μέρος της διαθέσιμης θερμότητας μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και προσθέτουμε και ένα 20% για να είμαστε σίγουροι ότι η θερμική ισχύς που θα παράγει ο λέβητας σύμπηκτων ξύλου θα είναι αρκετή για τις ανάγκες του θερμοκηπίου. Η επαύξηση αυτή είναι σύνηθες φαινόμενο στο σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων [4].

Συνεπώς, η μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση του θερμοκηπίου διαμορφώνεται στα 383,85 kW για την περιοχή της Αθήνας και στα 744,216 kW για την περιοχή της Καστοριάς.

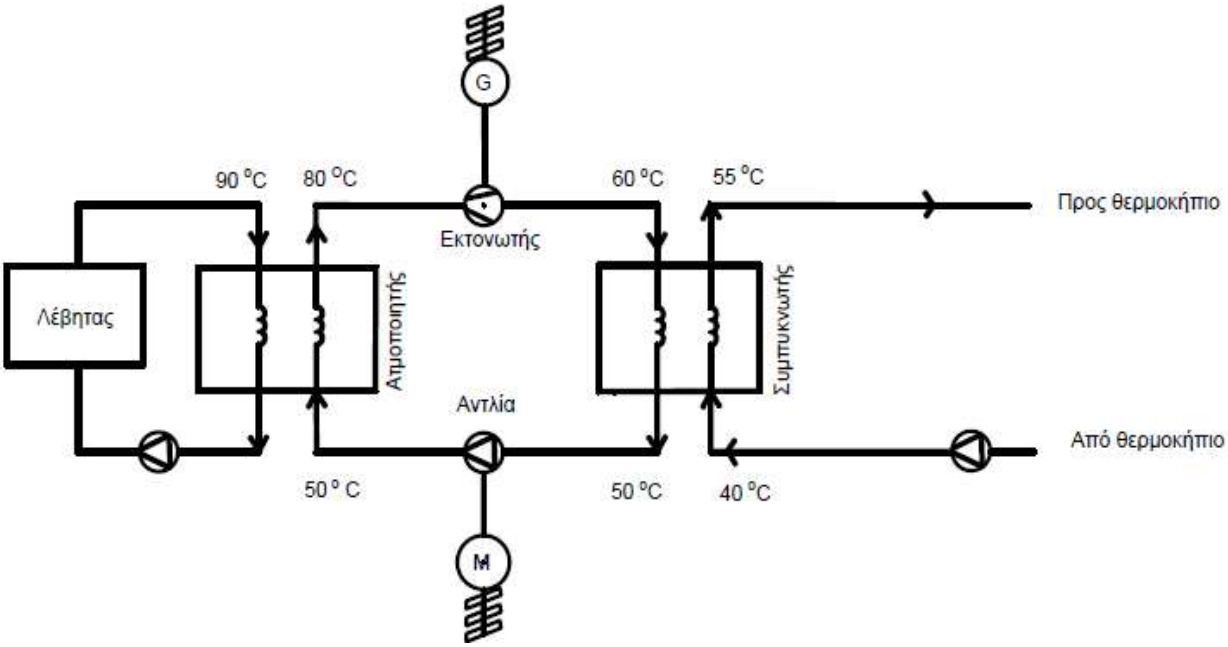
2.3. Επιλογή του λέβητα σύμπηκτων ξύλου και του ORC συστήματος.

Γνωρίζοντας την μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση του θερμοκηπίου επιλέχτηκε για εφαρμογή στο θερμοκήπιο των δύο περιοχών είναι το μοντέλο pellet star από την εταιρία Thermostahl. Είναι χαλύβδινος λέβητας, τριών διαδρομών καυσαερίων με καυστήρα pellet. Και πιο συγκεκριμένα για την περιοχή της Αττικής επιλέχθηκε το pelletstar 407 kW και για την περιοχή Καστοριάς επιλέχτηκε το pelletstar 814 kW.

Και στην συνέχεια η επιλογή του *ORC* συστήματος έγινε κατόπιν θεωρήσεως της απόδοσης του ίσης με 5% δηλαδή της παραγωγή του ηλεκτρισμού προς τη διαθέσιμη θερμότητα. Γνωρίζοντας την μέγιστη απαιτούμενη ισχύ για θέρμανση του θερμοκηπίου, οι απαιτήσεις ισχύος για την *ORC* εγκατάσταση στην περιοχή της Αττικής προκύπτει 19,19 kW. Και αντίστοιχα για την περιοχή της Καστοριάς οι απαιτήσεις ισχύος για την *ORC* εγκατάσταση στην περιοχή της Καστοριάς που προκύπτουν είναι 37,21 kW.

Οπότε επιλέχθηκε για το θερμοκήπιο της Αττικής το μοντέλο enefcogen green των 20 kWe από την εταιρία eneftech. Για το θερμοκήπιο της Καστοριάς επιλέχθηκαν δύο μηχανήματα του ίδιου μοντέλου διαφορετικής δυναμικότητας, πιο συγκεκριμένα ένα των 10 kWe και ένα των 30 kWe [5,6,7].

Σχήμα 4. Αριστερά απεικονίζεται το μοντέλο pelletstar και δεξιά το μοντέλο enefcogen green.



Σχήμα 5. Απεικόνιση του συστήματος θέρμανσης που μελετάτε.

3.Οικονομική μελέτη

3.1.Για το σύστημα λέβητα σύμπηκτων ξύλου

Γνωρίζοντας μέσω υπολογισμών τις ετήσιες απαιτήσεις θερμικής ενέργειας του θερμοκηπίου και βάση αυτών υπολογίστηκαν οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του λέβητα 211548,403 kWh για την περιοχή της Αττικής και 886539,94 kWh για την περιοχή της Καστοριάς.

Εφόσον, η απόδοση του λέβητα pelletstar των 407 kW και 814 kW είναι 92% και ότι η μέση θερμογόνος δύναμη για ένα κιλό σύμπηκτων είναι 5 kWh/kg, υπολογίστηκαν τα συνολικά κιλά των σύμπηκτων ξύλου που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα χρόνο για τη

λειτουργία του λέβητα για τα δύο θερμοκήπια. Πιο συγκεκριμένα υπολογίστηκε ότι χρειαζόμαστε 45988,78 kg και 192726,1 kg για την Αττική και την Καστοριά αντίστοιχα.

Συνεπώς, έπρεπε να κοστολογήσουμε το συνολικό κόστος θέρμανσης το κόστος αγοράς και συντήρησης. Η τιμή αγοράς του κιλού των σύμπηκτων ξύλου διαφοροποιείται κατά την περίοδο του έτους λόγω του ότι η ζήτηση τους αυξάνεται κατά την χειμερινή περίοδο σε αντίθεση με την καλοκαιρινή περίοδο που η ζήτηση είναι μειωμένη. Έτσι, το κόστος θέρμανσης υπολογίστηκε ξεχωριστά για την περίοδο αυξημένης (0,32 €/kg) και μειωμένης ζήτησης (0,27 €/kg) των σύμπηκτων ξύλου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Το κόστος θέρμανσης για τις περιόδους αυξημένης και χαμηλής ζήτησης των σύμπηκτων ξύλου.

Για την περιοχή της Αττικής		**Για την περιοχή της Καστοριάς**	
0,32 €/kg	14716,41 €	0,32 €/kg	61672,34 €
0,27 €/kg	12416,97 €	0,27 €/kg	52036,04 €

Το κόστος αγοράς του λέβητα pelletstar των 407 kW ανέρχεται στα 21313,44 € ενώ για τον λέβητα pelletstar των 814 kW ανέρχεται στα 35008,26 € και με παραδοχή ότι το κόστος συντήρησης αποτελεί το 2% της αρχικής τιμής του λέβητα και κοστολογείται στα 912 € και 1498 € αντίστοιχα.

3.2. Για το σύστημα ORC:

Υπολογίστηκε η παραγωγή του ηλεκτρισμού για ένα έτος από το ORC γνωρίζοντας ότι η ενέργεια που αξιοποιεί η εγκατάσταση του ORC από την παραγωγή που λέβητα βιομάζας είναι 5% και κατα συνέπεια τα έσοδα από την πώληση του ρεύματος που παράγεται από το ORC σύστημα και θα πωλούνται στην ΔΕΗ γνωρίζοντας ότι η χρέωση κάθε κιλοβατώρας είναι 0,17 € / kWhe.

Πίνακας 2. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από το ORC σύστημα και τα έσοδα από τη πώληση του ρεύματος.

Για την περιοχή της Αττικής		**Για την περιοχή της Καστοριάς**	
Παραγωγή ηλεκτρισμού (kWhe)	10577,42	**Παραγωγή ηλεκτρισμού(kWhe)**	44327
Έσοδα (€/ έτος)	1798,161	**Έσοδα (€/ έτος)**	7535,59

Όσον αναφορά την κοστολόγηση της αγοράς της εγκατάστασης του ORC χρησιμοποιήθηκαν κάποιες μέσες τιμές κόστους αγοράς ORC ανά kW και υπολογίστηκε το κόστος αγοράς του ORC όπως παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 3. Το κόστος αγοράς του ORC για την Αττική.

Ισχύς μονάδας ORC για την Αθήνα	Μέσο κόστος αγοράς ORC	Κόστος αγοράς ORC = Απόδοση ORC * Μέσο Κόστος αγοράς
19,19 kW	3000 € / kW	57570 €
	3500 € / kW	67165 €
	4000 € / kW	76760 €
	4500 € / kW	86355 €
	5000 € / kW	95950 €

Πίνακας 4. Το κόστος αγοράς του ORC για την Καστοριά.

Ισχύς μονάδας ORC για την Καστοριά	Μέσο κόστος αγοράς ORC	Κόστος αγοράς ORC = Απόδοση ORC * Μέσο Κόστος αγοράς
37,21 kW	3000 € / kW	111630 €
	3500 € / kW	130235 €
	4000 € / kW	148840 €
	4500 € / kW	167445 €
	5000 € / kW	186050 €

3.3. Υπολογισμός της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ).

Η ΚΠΑ είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των ταμειακών ροών της παρούσας μελέτης.

Η τεχνική της Καθαρής Παρούσας Αξίας μετατρέπει όλα τα κόστη (εκροές) και τα οφέλη (εισροές) της επένδυσης σε σημερινές αξίες, δηλαδή εκφράζει το καθαρό όφελος ή κόστος στη χρονική στιγμή που λαμβάνεται η απόφαση.

Η καθαρή παρούσα αξία συγκρίνει την σημερινή αξία του δολαρίου σε συνάρτηση με την αξία του ίδιου δολαρίου στο μέλλον, αφού λάβουμε υπόψη τον πληθωρισμό και τις επιστροφές χρημάτων (καθαρά κέρδη). Ο υπολογισμός της ΚΠΑ έγινε μέσω του παρακάτω τύπου:

$$\sum_{t=1}^{N} \frac{Ταμειακές\ εισροές}{(1+r)^t} - Αρχική\ Επένδυση$$

όπου,

t= χρονική περίοδος

N= χρονική διάρκεια της επένδυσης

r = προεξοφλητικό επιτόκιο

Εξετάστηκε αν η συγκεκριμένη επένδυση θα μπορέσει να αποσβέσει τα έξοδα που θα δημιουργηθούν για την λειτουργία της μέσα σε μια εικοσαετία (N=20), και συνεπώς υπολογίστηκε η ΚΠΑ για κάθε χρόνο ξεχωριστά (t=1, t=2 ... t=20).

Τα αποτελέσματα της ΚΠΑ μετά την παρέλευση της εικοσαετίας για τις δύο περιοχές για το λέβητα σύμπηκτων ξύλου με συμπαραγωγή ORC σε περίοδο μειωμένης αλλά και αυξημένης

ζήτησης με μεταβλητό το κόστος αγοράς του ORC καθώς και για το λέβητα πετρελαίου και με παραδοχή ότι το προεξοφλητικό επιτόκιο είναι 6% παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες 5,6[9,10]

Πίνακας 5. Τα αποτελέσματα της ΚΠΑ για το λέβητα πετρελαίου.

Για το λέβητα πετρελαίου	
Για την περιοχή της Αττικής	**Για την περιοχή της Καστοριάς**
-183.380,3	**-758.744,9**

Πίνακας 6. Τα αποτελέσματα της ΚΠΑ για το λέβητα σύμπηκτων ξύλου.

Για το λέβητα σύμπηκτων ξύλου					
Αττική	**Μειωμένη ζήτηση σύμπηκτων ξύλου**				
	-211.140	**-220.735**	**-230.330**	**-239.925**	**-249.520**
	Αυξημένη ζήτηση σύμπηκτων ξύλου				
	-237.515	**-247.110**	**-256.705**	**-266.300**	**-275.895**
Καστοριά	**Μειωμένη ζήτηση σύμπηκτων ξύλου**				
	-674.236	**-692.841**	**-711.446**	**-730.051**	**-748.656**
	Αυξημένη ζήτηση σύμπηκτων ξύλου				
	-784.764	**-803.369**	**-821.974**	**-840.579**	**-859.184**

4. Συμπέρασμα

Η παρούσα μελέτη δεν θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί σαν μια ολοκληρωμένη επένδυση, λόγω του ότι δεν έχουν συμπεριληφθεί τα έσοδα από την πώληση της παραγωγής των προϊόντων του θερμοκηπίου καθώς και τα έξοδα για την κατασκευή του θερμοκηπίου κ.α. Έτσι το αρνητικό πρόσημο που προκύπτει στην ΚΠΑ δεν πρέπει να μας παραπέμπει στο να απορρίψουμε αυτομάτως την ενδεχόμενη επένδυση. Αυτό που μας ενδιαφέρει ουσιαστικά είναι η ΚΠΑ της συμπαραγωγής του λέβητα βιομάζας με το *ORC* να βγαίνει λιγότερο αρνητική από την ΚΠΑ του λέβητα πετρελαίου για να κρίνουμε αν είναι οικονομικά συμφέρουσα[11].

Συνεπώς, η βιωσιμότητα της επένδυσης εξαρτάται:
Από το κόστος εγκατάστασης της μηχανής ORC (€/kWe)
Την τιμή των σύμπηκτων βιομάζας
Την τιμή αγοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής kWh από το δίκτυο

Βάσει της μελέτης που έγινε προέκυψε ότι:

Στην περιοχή της Αττικής μια τέτοια επένδυση συμπαραγωγής δεν θα ήταν σε καμία περίπτωση οικονομικά πιο αποδοτική από το λέβητα πετρελαίου.

Στην περιοχή της Καστοριάς, η επένδυση θα ήταν αποδοτικότερη του λέβητα πετρελαίου στην περίπτωση που το κόστος προμήθειας της μηχανής ORC είναι χαμηλότερο των 4500 €/kWe και η προμήθεια συμπήκτων βιομάζας γίνεται σε περίοδο χαμηλής ζήτηση και συνεπώς η τιμή τους είναι χαμηλότερη (0.27 €/kg αντί 0.32 €/kg της περιόδου υψηλής ζήτησης).

5. Βιβλιογραφία:

[1] Θερμοκήπια, Γ.Ν. Μαυρογιαννόπουλου, Αθήνα 2005.

[2] Θερμοκήπια, στοιχεία κατασκευής, λειτουργίας και καλλιέργειας, Θάνου Σ. Ευσταθιάδη, 1987

[3]http://www.minagric.gr/images/stories/docs/agrotis/thermokipia/texn_prod_thermokipion.pdf

[4] Πολυώροφη οικοδομή με έξι ορόφους με χρήση κατοικίας, καταστήματα στο ισόγειο και υπόγεια με χώρους στάθμευσης και αποθήκες, Κωνσταντίνος Στ. Ψωμόπουλος.

[5] Rozakis, S., Soldatos P., Papadakis G., Kyritsis S., Papantonis D., 1997. Evaluation of an Integrated Renewable energy System for Electricity Generation in Rural Areas. Energy Policy, 25 (3):337-347.

[6] https://www.environmental-expert.com/downloads/enefcogen-green-combined-production-of-heat-and-power-brochure-368466#.

[7] Σχεδιασμός ολοκληρωμένου συστήματος ηλιακού συλλέκτη - οργανικού κύκλου Rankine, Μαύρου Πασχαλιάς, 2013

[8] Heat resources and organic Rankine cycle machines, Bertand F. Tchanche, M. Petrissans, G.Papadakis, 2014.

[9] Οικονομοτεχνικές Μελέτες, Σωτήρης Κ. Καρβούνης, Αθήνα 2000.

[10]Μεθοδολογία εκπονήσεως οικονομοτεχνικών μελετών, Σωτήρης Κ. Καρβούνης, Αθήνα 1993.

[11] Αξιολόγηση Επενδύσεων, Νίκος Σακκάς, 2002.

ΜΕΛΕΤΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΟΥ ΕΚΤΟΝΩΤΗ ΤΥΠΟΥ SCROLL

Βασιλική Γκαβίδου✉, Γεώργιος Κοσμαδάκης, Δημήτρης Μανωλάκος & Γιώργος Παπαδάκης

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, ✉ gavidou@certh.gr

Περίληψη

Η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θερμότητα που προέρχεται από σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες αποτελεί αντικείμενο της παρούσας έρευνας. Στο παρόν άρθρο αξιολογείται η λειτουργία μιας νέας υπερκρίσιμης μηχανής οργανικού κύκλου Rankine (SCORC) στην οποία ενσωματώνεται εκτονωτής τύπου scroll, ο οποίος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου 11-ΣΥΝ7-278 της ΓΓΕΤ. Η μηχανή SCORC παρόλο που δεν μπόρεσε να λειτουργήσει στο πλήρες εύρος του φορτίου της (υψηλές στροφές του εκτονωτή και της αντλίας) παρουσίασε ικανοποιητική θερμική απόδοση, η οποία κυμάνθηκε περίπου στο 2%. Στις συνθήκες αυτές ο εκτονωτής έδειξε μια μέση απόδοση εκτόνωσης περίπου ίση με 35% ενώ η απόδοση της μηχανής SCORC ήταν σχεδόν διπλάσια από παρόμοιες μηχανές σε χαμηλό φορτίο και παραπλήσιες συνθήκες λειτουργίας.

Λέξεις κλειδιά: οργανικός κύκλος Rankine, νέος εκτονωτής τύπου Scroll

RANKINE ORGANIC CYCLE STUDY USING NEW SCROLL EXPANDER

Vasiliki Gavidou✉, George Kosmadakis, Dimitris Manolakos & George Papadakis

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, ✉ gavidou@certh.gr

ABSTRACT

The ability to generate electricity from heat from relatively low temperatures is a remarkable focal point of the research. In the present study we evaluated the operation of a new Rankine organic cycle engine in which the new Scroll type expander was developed for the first time and was designed and constructed in the framework of the GSRT research project 11-SYN7-278. Although the SCORC engine was unable to operate in its full load range (high rotor speed and pump speed), it had a satisfactory thermal efficiency of around 2%. Under these conditions, the expander exhibited a high efficiency, with an average discharge efficiency of about 35%, while the overall machine performance was almost double that of similar machines at low load and near conditions.

Keywords: organic Rankine cycle, new Scroll expander

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια ο οργανικός κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle) χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε διάφορες εφαρμογές εκμετάλλευσης πηγών ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας, όπως η γεωθερμία, η ηλιακή ενέργεια και η θερμότητα που απορρίπτεται στο περιβάλλον ως παραπροϊόν διαφόρων παραγωγικών διεργασιών. Η αρχή λειτουργίας ενός κύκλου ORC είναι ακριβώς η ίδια με ένα κύκλο Rankine νερού–υδρατμού, με μόνη διαφορά τη χρήση κάποιου οργανικού ρευστού ως εργαζόμενο μέσο (Cengel Yunus A. 1989).Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η πειραματική αξιολόγηση της μηχανής οργανικού κύκλου Rankine με νέο εκτονωτή τύπου scroll. Η μηχανή Rankine που αξιολογήθηκε κατασκευάστηκε εξαρχής βάσει σχεδιασμού που εκπονήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου 11-ΣΥΝ7-278. Ο εκτονωτής τύπου scroll και ο ατμοποιητής της μηχανής επίσης σχεδιάστηκεαν και κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο του ίδιου έργου. Ο στόχος του έργου ήταν η επίτευξη υπερκρίσιμων συνθηκών λειτουργίας προκειμένου να αποδειχθεί η βελτίωση στο θερμικό βαθμό απόδοσης της διεργασίας. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασίας αφορούν υποκρίσιμη λειτουργία, δεδομένου ότι υπερκρίσιμες συνθήκες ήταν δύσκολο να επιτευχθούν.

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΤΑΘΜΙΣΗ

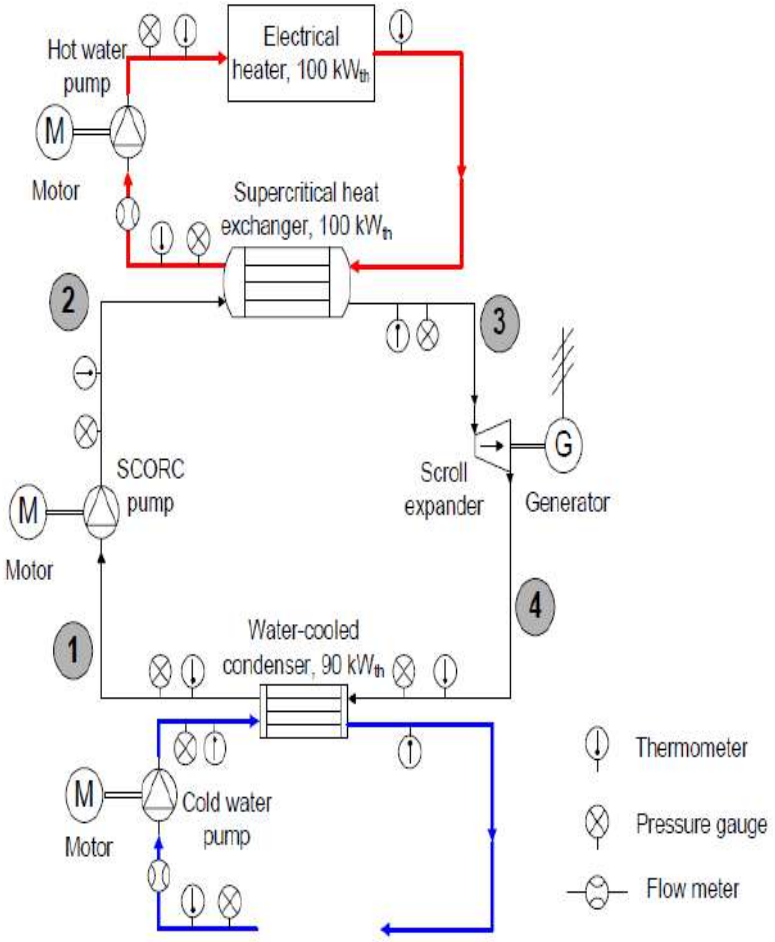
Από τη διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι μεγάλο μέρος των ερευνητικών δραστηριοτήτων επικεντρώνονται στη μεγιστοποίηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου ORC. Ήδη από το 2004 εως σήμερα είχε προηγηθεί η ανάπτυξη τριών μηχανών ORC στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών στο πλαίσιο αντίστοιχων ευρωπαϊκών κι εθνικών ερευνητικών έργων. Το πρώτο έργο αφορούσε στην ανάπτυξη ενός αυτόνομου συστήματος ηλιακού ORC χαμηλής θερμοκρασίας, όπου η μηχανική ισχύς του εκτονωτή τροφοδοτεί μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού(Manolakos et al. 2005b).

Το δεύτερο έργο αφορούσε στην ανάπτυξη διβάθμιου συστήματος ORC με στόχο την επίτευξη βελτιωμένης απόδοσης σε μερικά φορτία και λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Το σύστημα αποτελείται από ένα διβάθμιο ORC ονομαστικής ισχύος 10kW και τρείς μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης οι οποίες έχουν ατομική δυναμικότητα 0.7m^3/h καθαρού νερού και ανάκτηση νερού 32% ενώ η συνολική δυναμικότητα είναι 2.1 m^3/h (Kosmadakis et al. 2010).

Το τρίτο έργο αφορούσε στην εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας από συστοιχία συγκεντρωτικού Φ/Β συστήματος, μέσω της μετατροπής της σε ηλεκτρισμό με την χρήση μιας υπερκρίσιμης μηχανής ORC(Kosmadakis et al. 2016).

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Η επιθυμητή θερμότητα παρεχόταν από έναν ηλεκτρικό θερμαντήρα θερμικής ισχύος 100kW του οποίου το φορτίο ρυθμιζόταν μέσω 9 ηλεκτρικών αντιστάσεων. Στην Εικ. 1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα του συστήματος και αποτυπώνονται τα σημεία όπου καταγράφονται οι μετρήσεις (πίεσης, θερμοκρασίας).

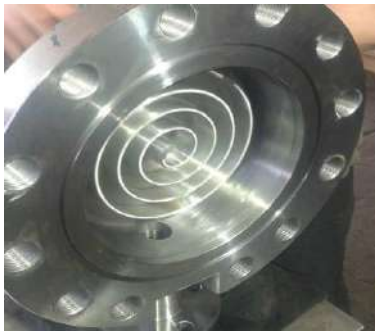


Σχήμα 1. Διάγραμμα υπερκρίσιμης μηχανής Rankine

Σε αρχικό στάδιο της έρευνας της μηχανής SCORC έγινε η επιλογή του κατάλληλου οργανικού ρευστού, το οποίο θα χρησιμοποιούνταν στη μηχανή SCORC. Το οργανικό αυτό ρευστό θα έπρεπε να πληρεί τις ισχύουσες περιβαλλοντικές προδιαγραφές (Protocol 2010), (EC 29 June 2000)Το οργανικό ρευστό το οποίο επιλέχθηκε ήταν το R404a, ένα ρευστό με ευρεία εφαρμογή σε ψυκτικές μηχανές και ικανοποιητική απόδοση σε σχετικά χαμηλή πίεση (Kosmadakis et al. 2009). Ως πηγή θερμότητας της μηχανής SCORC, χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρικός θερμαντήρας ονομαστικής θερμικής ισχύος 108 kWth, με μέγιστη πίεση λειτουργίας τα 6 bar. Ακολούθησε η κατασκευή του υπερκρίσιμου ατμοποιητή ο οποίος θα μετέφερε τη θερμότητα από το θερμό κύκλωμα του μίγματος νερού/γλυκόλης προς το οργανικό ρευστό. Ο υπερκρίσιμος ατμοποιητής ήταν ουσιαστικά ένας εναλλάκτης θερμότητας μέγιστης θερμικής ισχύος περίπου 102 kW και με 0.23 bar πτώση πίεσης στο πρωτεύον ρεύμα (νερού/γλυκόλης). Έπειτα ακολούθησε η επιλογή της κατάλληλης αντλίας για τη διακίνηση του οργανικού ρευστού στο κύκλωμα της μηχανής αλλά και η επιλογή του κατάλληλου συμπυκνωτή (Vincent Lemort 2010), (Wang XD 2010). Η αντλία που επιλέχθηκε ήταν αντλία διαφράγματος με ονομαστική κατανάλωση ισχύος 2.2kW. Ως συμπυκνωτής επιλέχτηκε ένας υδρόψυκτος πλακοειδής εναλλάκτης με πίεση συμπύκνωσης χαμηλότερη των 17 bar και απορριπτόμενη θερμότητα στον εναλλάκτη περίπου 90kWth. Η κύρια συνιστώσα παραγωγής ισχύος της μηχανής, ο εκτονωτής τύπου scroll, μελετήθηκε και κατασκευάστηκε εξ' αρχής στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου. Τα βασικά του τεχνικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Μέγιστος λόγο πίεσης: 2.2
- Μέγιστη παραγόμενη ισχύς: 6-7 kW
- Όγκος σάρωσης: 78.465 cm^3/rev

Πρόκειται για έναν εκτονωτή scroll ανοιχτού τύπου όπου ο άξονας του συμπλεκόταν με κατάλληλο ασύγχρονο διπολικό κινητήρα ονομαστικών στροφών 2900 rpm (στα 50 Hz) και ισχύος 9 kW (12.5 HP). Η ταχύτητα περιστροφής του εκτονωτή είναι 2000 rpm, και τόσο ο ηλεκτρομηχανικός όσο και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσής του είναι περίπου στο 85% (Manolakos et al. 2005a). Για την κατασκευή του σταθερού και περιστρεφόμενου scroll χρησιμοποιήθηκε κράμα αλουμινίου Fortal σειρά 7000 και κατεργάστηκε σε μηχανή CNC (Εικ. 2.α). Στην πίσω μεριά του δρομέα τοποθετήθηκε βελονωτό δακτυλιοειδές έδρανο (Εικ. 2.β) (ένσφαιρος τριβέας κύλισης-ρουλεμάν). Η συναρμολόγηση του εκτονωτή ξεκινά από το κομμάτι του κελύφους που συνδέεται με κατάλληλη κοχλιοσύνδεση στο στάτορα του scroll, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



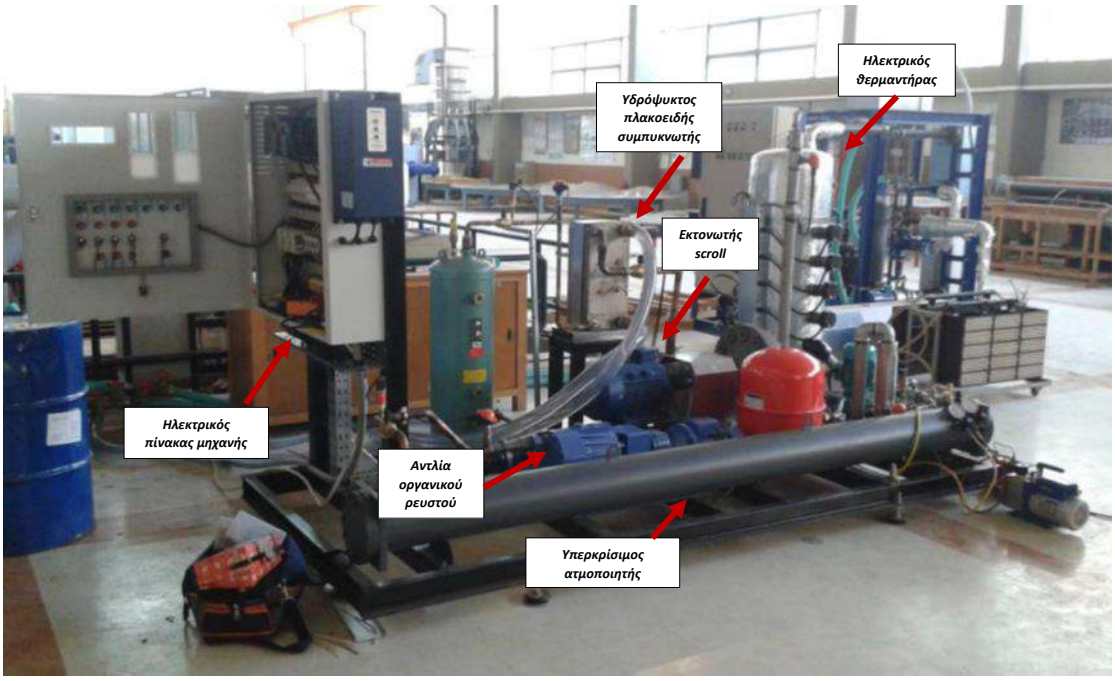
(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 2. (α) Περιστροφόμενο scroll (β) Έδρανο (γ) Εκτονωτή

Τέλος για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών μεγεθών της μηχανής χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα όργανα μέτρησης και διατάξεις όπως θερμόμετρα, ροπόμετρα, μετρητές πίεσης, ηλεκτρική πέδη κλπ. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της κάθε συνιστώσας της μηχανής ενώ στην Εικόνα 3 απεικονίζεται η μηχανή SCORC και οι βασικές της συνιστώσες.



Σχήμα 3. Άποψη της μηχανής SCORC

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής SCORC

Θερμό κύκλωμα	
Ρευστό	Μίγμα νερού γλυκόλης (20% κ.ό.)
Θερμοκρασία εισόδου ρευστού στον ατμοποιητή	100 ^{o}C
Παροχή μάζας θερμού ρευστού	2 kg/s
Προσδιδόμενη θερμότητα	100 kWth
Απόρριψη θερμότητας (συμπυκνωτής)	
Τύπος συμπυκνωτή	Υδρόψυκτος/πλακοειδής
Θερμοκρασία εισόδου νερού	15 ^{o}C
Παροχή μάζας νερού	5 kg/s
Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά ψυκτικού νερού/οργανικού ρευστού (pinch point)	10 K
Επιφάνεια συναλλαγής συμπυκνωτή	~12 m^{2}
Δυναμικότητα συμπυκνωτή	92 kWth
Αντλία μηχανής SCORC	
Υπόψυξη οργανικού ρευστού	5 K
Αδιάστατη μέγιστη πίεση	1.08 P/Pcr
Παροχή μάζας οργανικού ρευστού	~0.60 kg/s (~34 l/min)
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης	85%
Ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης	75%
Κατανάλωση ισχύος	2.277 kW
Ατμοποιητής	
Τύπος ατμοποιητή	Κελύφους αυλών (shell and tube)
Επιφάνεια συναλλαγής	~30-35 m^{2}
Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά θερμού νερού/οργανικού ρευστού (pinch point)	10 K
Εκτονωτής	

Τύπος εκτονωτή	Scroll (scroll συμπιεστής σε αντίστροφη λειτουργία)
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης	85%
Ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης	85%
Όγκος σάρωσης	78.465 cm^3/rev
Ονομαστικός λόγος πίεσης	2.77
Μηχανή SCORC	
Προσδιδόμενη θερμότητα	100 kWth
Ωφέλιμη παραγωγή	8.368 kW
Κατανάλωση αντλίας	2.277 kW
Καθαρή παραγωγή ισχύος	6.091 kW
Απόρριψη θερμότητας	91.86 kWth
Θερμικός βαθμός απόδοσης	6.091%

3.1Θερμοδυναμικές Εξισώσεις

Για να υπολογιστούν τα βασικά λειτουργικά μεγέθη μέσω εκείνων που μετρούνται συστηματικά χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω βασικές θερμοδυναμικές εξισώσεις.

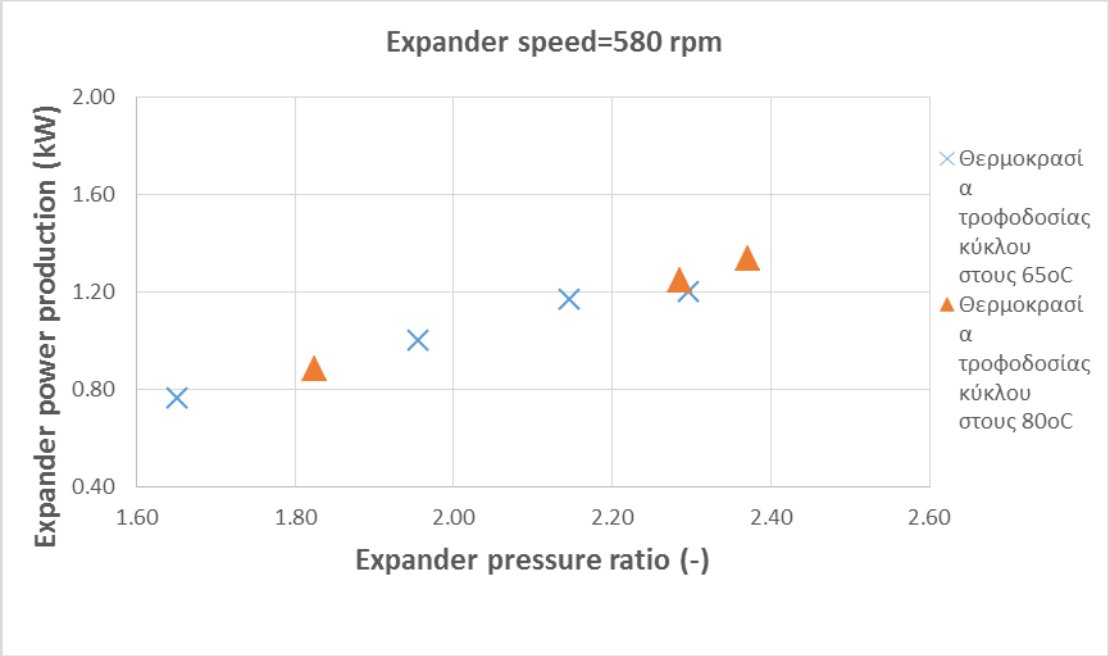
- Η ισχύς που καταναλώνεται στην αντλία της SCORC : $W_p = m_{ORC} * {}^{(h_2 - h_1)}/_{n_{p,m}}$
- Η προσδιδόμενη θερμότητα: $Q_{ORC} = m_{ORC} * (h_3 - h_2)$
- Παραγόμενη ισχύς από τον εκτονωτή: $W_{ex} = m_{ORC} * (h_3 - h_4) * n_{ex,m}$
- Η θερμότητα που απορρίπτεται στο συμπυκνωτή: $Q_{out} = m_{ORC} * (h_4 - h_1)$
- Η καθαρή ισχύς της SCORC μηχανής: $W_{net} = W_{ex} - W_p$
- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης της μηχανής: $n_{th} = \frac{\text{Wex - Wp}}{\text{QORC}}$
- Ισεντροπική απόδοση του στροβίλου: $n_t = \frac{(W_t/\dot{m})}{(W_t/\dot{m})_s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$
- Ισεντροπική απόδοση της αντλίας: $n_c = \frac{(W_c/\dot{m})_s}{(W_c/\dot{m})} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$

Ο υπολογισμός των ενθαλπιών έγινε με χρήση του λογισμικού REFPRO από τα μεγέθη της πίεσης και της θερμοκρασίας που μετρούνται και καταγράφονται σε επιλεγμένα σημεία του κυκλώματος (είσοδος- έξοδος βασικών συνιστωσών όπως οι εναλλάκτες ο εκτονωτής και η αντλία διακίνησης οργανικού ρευστού).

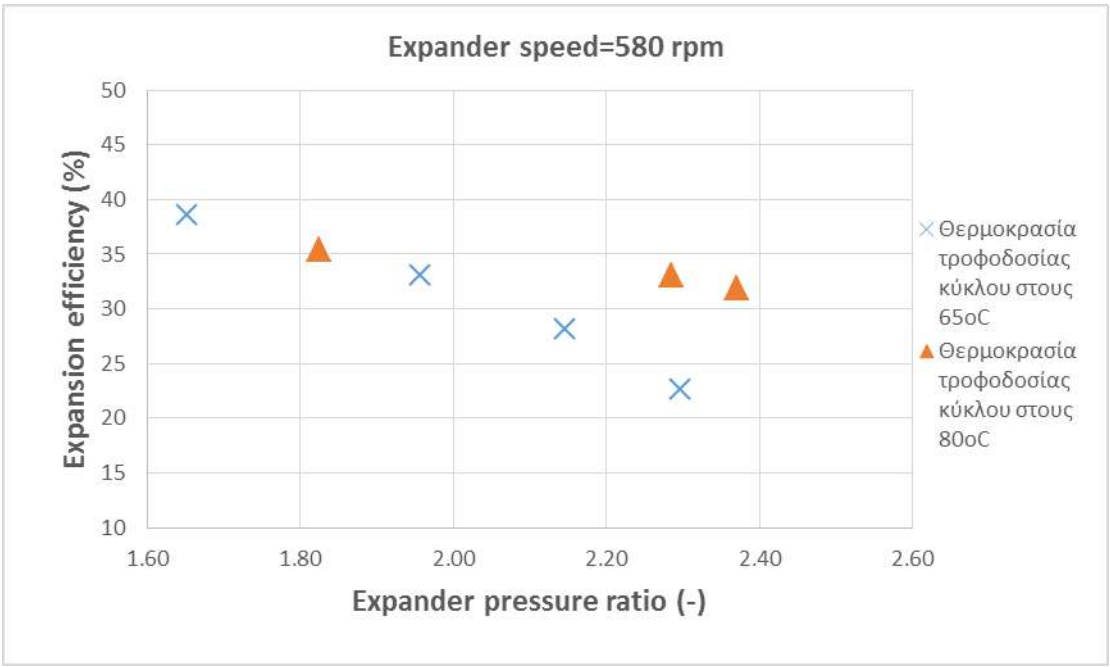
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η πίεση στο κύκλωμα του θερμού νερού κυμάνθηκε από 2.8 bar στο χαμηλό εύρος θερμοκρασίας , δηλαδή στους 65 ^oC, έως και 3.3 bar στο υψηλό εύρος, τους 80 ^oC, ενώ η παροχή του νερού κυμάνθηκε από 220 L/min στους 65 ^oC έως και 215 L/min στους 80 ^oC. Επειδή οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία νερού ψύξης 9-10^oC , η πίεση συμπύκνωσης ήταν αρκετά χαμηλή, περίπου 9.4 bar. Αυτό οδήγησε σε μια μέγιστη πίεση λειτουργίας της μηχανής κατά τις δοκιμές σχεδόν τα 26 bar, με λόγο πίεσης ίσο με 2.7 και κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος στην αντλία του οργανικού ρευστού χαμηλότερα του 1 kW. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας κυμάνθηκε από 37 έως 80%, μια γενικώς υψηλή τιμή που δείχνει την καλή ποιότητα κατασκευής της αντλίας, ενώ ο συνολικός βαθμός απόδοσης κυμάνθηκε μεταξύ 20-40% ανάλογα με τις στροφές λειτουργίας της αντλίας.

Προκειμένου να υπολογισθεί η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς χρησιμοποιήθηκε ο μετατροπέας συχνότητας (Kosmadakis, Manolakos, and Papadakis 2016). Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του εκτονωτή δεν ξεπερνά τα 2kW όπως φαίνεται Εικόνα 4 ενώ ο βαθμός απόδοσης της εκτόνωσης κυμάνθηκε από 20 έως 40% όπως διακρίνεται στην Εικόνα 5.

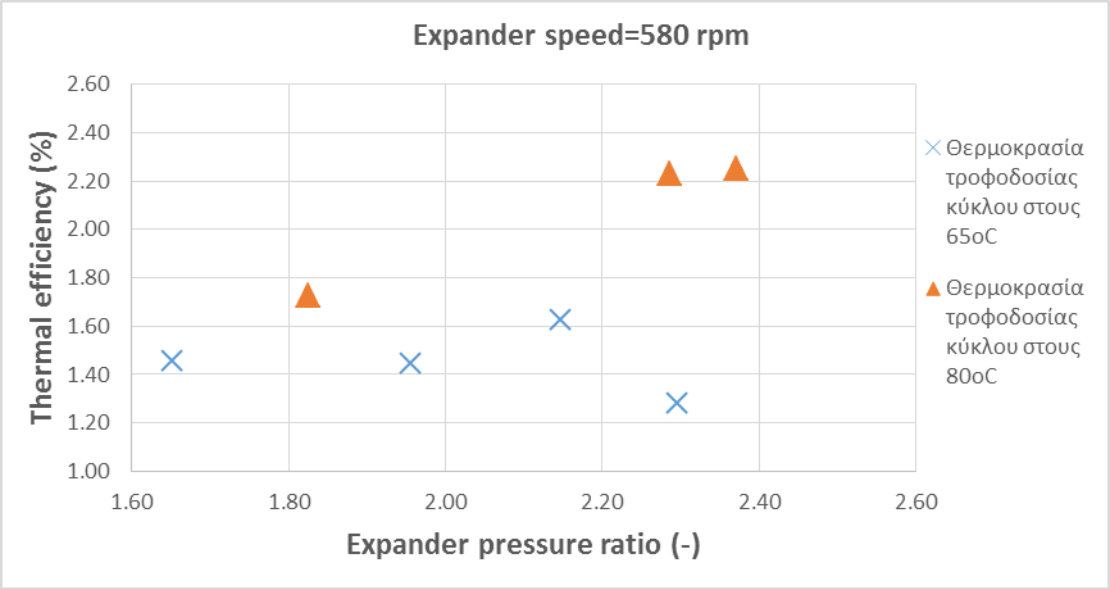


Εικόνα 4. Ηλεκτρική ισχύς σε συνάρτηση του λόγου πίεσης του εκτονωτή για θερμοκρασία τροφοδοσίας 65 και 80 ^{o}C

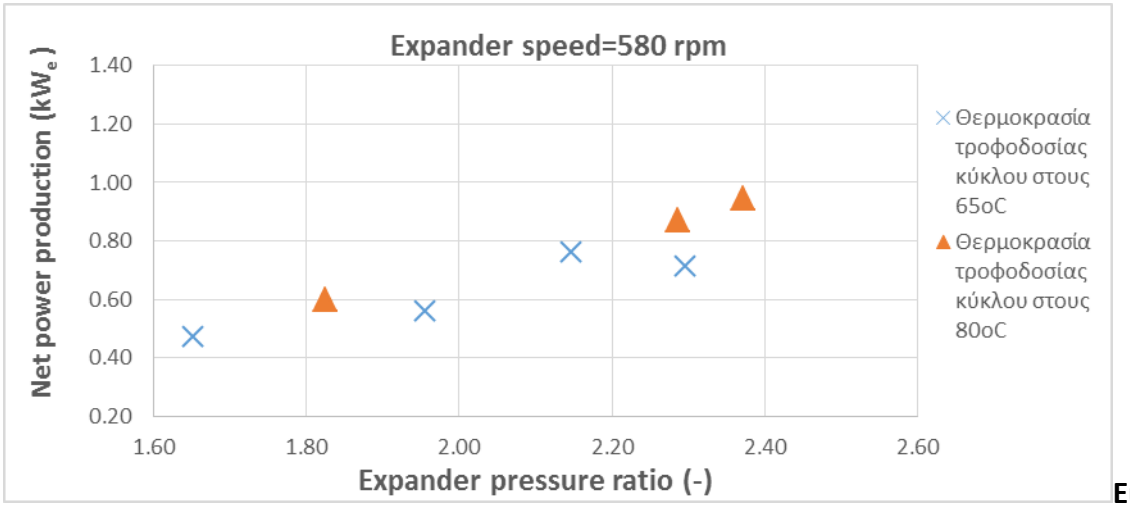


Εικόνα 5.Βαθμός απόδοσης εκτονωτή σε συνάρτηση του λόγου πίεσης για θερμοκρασία τροφοδοσίας 65 και 80 ^{o}C

Όσον αφορά τον συμπυκνωτή, η θερμοκρασία συμπύκνωσης μεταβάλλεται κατά ±1 oC και η πίεση κατά ±0.2 bar από τις μέσες τιμές τους. Συμπερασματικά καταλήγουμε πως ο θερμικός βαθμός απόδοσης της μηχανής κυμάνθηκε μεταξύ 1.4% και 1.8% και η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος κυμάνθηκε περίπου στο 0.7 kWe όπως φαίνεται στις εικόνες 6,7. Αξίζει να σημειωθεί πως η απόδοση της μηχανής SCORC θα ήταν σημαντικά υψηλότερη αν δεν υπήρχε ο περιορισμός των στροφών του εκτονωτή, όπου στις συνθήκες αυτές δεν λειτουργεί αποδοτικά και επιπλέον ο ασύγχρονος κινητήρας παρουσιάζει χαμηλή ηλεκτρική απόδοση, μειώνοντας περαιτέρω την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.



Εικόνα 6. Θερμικός βαθμός απόδοσης μηχανής σε συνάρτηση με τον λόγο πίεσης για θερμοκρασία τροφοδοσίας 65 και 80 ^{o}C .



Εικόνα 7. Καθαρή παραγωγή ισχύος σε συνάρτηση με τον λόγο πίεσης για θερμοκρασία τροφοδοσίας 65 και 80 ^{o}C

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έπειτα από την λεπτομερή αξιολόγηση της μηχανής SCORC προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ο εκτονωτής παρουσίασε υψηλή απόδοση, με μέση απόδοση εκτόνωσης περίπου ίση με 35% όταν σε παρόμοιες μηχανές η απόδοση της εκτόνωσης σε χαμηλό φορτίο κυμαίνεται σε εύρος 10-30%.
- Η αντλία της μηχανής λειτούργησε αρκετά αποδοτικά και με υψηλό βαθμό απόδοσης.
- Η απόδοση της μηχανής ORC κυμάνθηκε περίπου στο 2%, απόδοση σχεδόν διπλάσια από παρόμοιες μηχανές σε χαμηλό φορτίο και παραπλήσιες συνθήκες.
- Τέλος ο θερμικός βαθμός απόδοσης που προέκυψε είναι ικανοποιητικός κι επιτρέπει την περαιτέρω διερεύνηση και κατασκευή αντίστοιχων μηχανών που παρουσιάζουν κρίσιμα πλεονεκτήματα για εφαρμογή κυρίως στη βιομηχανία, όπου είναι διαθέσιμη απόβλητη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Cengel Yunus A., Boles Michael A. 1989. *Thermodynamics: An Engineering Approach (Mechanical Engineering)*.

EC. 29 June 2000. "Regulation No. 2037/2000 of the European Parliament and of the Council on substances that deplete the ozone layer." In.

Kosmadakis, G, D Manolakos, S Kyritsis, and G Papadakis. 2009. 'Comparative thermodynamic study of refrigerants to select the best for use in the high-temperature stage of a two-stage organic Rankine cycle for RO desalination', *Desalination*, 243: 74-94.

Kosmadakis, G., D. Manolakos, S. Kyritsis, and G. Papadakis. 2010. 'Design of a two stage Organic Rankine Cycle system for reverse osmosis desalination supplied from a steady thermal source', *Desalination*, 250: 323-28.

Kosmadakis, George, Arnaud Landelle, Marija Lazova, Dimitris Manolakos, Alihan Kaya, Henk Huisseune, Christos-Spyridon Karavas, Nicolas Tauveron, Remi Revellin, Philippe Haberschill, Michel De Paepe, and George Papadakis. 2016. 'Experimental testing of a low-temperature organic Rankine cycle (ORC) engine coupled with concentrating PV/thermal collectors: Laboratory and field tests', *Energy*, 117, Part 1: 222-36.

Kosmadakis, George, Dimitris Manolakos, and George Papadakis. 2016. 'Experimental investigation of a low-temperature organic Rankine cycle (ORC) engine under variable heat input operating at both subcritical and supercritical conditions', *Applied Thermal Engineering*, 92: 1-7.

Manolakos, D, G Papadakis, Essam Sh Mohamed, S Kyritsis, and K Bouzianas. 2005a. 'Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination', *Desalination*, 183: 73-80.

Manolakos, D., G. Papadakis, Essam Sh Mohamed, S. Kyritsis, and K. Bouzianas. 2005b. 'Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination', *Desalination*, 183: 73-80.

Protocol, Montreal. 2010. "Report of the Refrigeration, Air-Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee." In.

Vincent Lemort, Sylvain Quoilin, Cristian Cuevas, Jean Lebrun. 2010. 'Testing and modeling a scroll expander integrated into an organic rankine cycle', *Applied Thermal Engineering*, 29: 3094-102.

Wang XD, Zhao L, Wang JL, Zhang WZ, Zhao XZ, Wu W. 2010. 'Performance evaluation of a low-temperature solar Rankine cycle system utilizing R245fa', *Solar Energy*, 84: 353-64.

Life Cycle Assessment (LCA) of Biomass Production Using Conservation Agriculture. Part I: The LCA model

Anna Vatsanidou[1,*], Ana Luisa Fernando[3], Chris Cavalaris[2], Theofanis Gemtos[2]

[1]Center for Research and Technology-HELLAS, IRETETH, Dimitriados 95, 38333, Volos

[2]Laboratory of Farm Mechanization, Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytoko str., 38446 N. Ionia Magnesia, Greece

[3]Departamento de Ciências e Tecnologia da Biomassa Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal

Abstract

The use of biomass for energy production has been seen as a promising option to reduce the use of non-renewable energy sources and hence, the emissions from using fossil fuels. The Life Cycle Assessment methodology was chosen for the environmental impact assessment of using different tillage practices (Conventional tillage, CT, Reduced tillage, RT and No tillage, NT) for seedbed preparation, in a double cropping per year rotation for biomass production. The goal and scope of the study, along with the necessary functional unit and system boundaries were defined. Detailed data were collected for all inputs and practices and all the outputs and emissions were calculated, compiling the inventory of the study. The Sima Pro software was used for the analysis of the inventory data. In this first part the LCA model is presented in detail, and in the following 2nd part the main findings from the LCA study will be presented and discussed.

Life Cycle Assessment

Life Cycle Assessment (LCA) is an environmental management and decision support tool, which quantifies and compares, if needed, the environmental impact of products and services at all stages in their life cycle (Guinee et al., 2002). This approach considers the entire life cycle of a product from the design, raw material extraction and processing to manufacturing, packaging and distribution to the consumer, to product use, maintenance, and finally to the end-of-life (reuse, recycling or disposal) (Rebitzer et al., 2004). The development of an assessment tool like LCA, came as an answer to the question ''*how a product can be characterized as more or less environment friendly?*'', which was prompt from the general public concern of environmental issues like resource depletion, human health and nature protection (Baumann and Tillman, 2004). The main need for establishing LCA studies emerged from the need to quantify the environmental impact of a product in order to identify possible improvement opportunities for lowering these impacts and reducing resource consumption. The strength of LCA lies in a whole product system study, thus avoiding the sub-optimization or burden shifting that may be the result if only a part of a cycle or only few processes are considered. LCA evaluates all stages of a product's life accepting that they are interdependent, meaning that one operation leads to the next. Also, LCA enables the estimation of the cumulative environmental impact resulting from all stages in the product life cycle, often including impacts not considered in more traditional analyses (e.g., raw material extraction, material transportation, ultimate product disposal, etc.). By including the impacts throughout the product life cycle, LCA provides a comprehensive view of the environmental impact of the product or process and a more accurate picture of the true environmental trade-offs in product and process selection (Curran, 2006).

In ISO 14040 (2006) LCA is defined as the "compilation and evaluation of the inputs, outputs and potential environmental impacts of a product system throughout its life cycle". Thus, LCA is an assessment tool of the resources used and the environmental impacts throughout a product's life cycle that comprises four phases: (1) goal and scope definition, (2) inventory analysis, (3) impact assessment, and (4) interpretation (ISO, 14040:2006). In this paper (part I) the first two phases will be analysed, while the other two will be presented in a second paper (part II). The goal and scope definition for the LCA provides a description of the product system in terms of the system boundaries and a functional unit (FU). Here the initial choices which determine the working plan of the entire LCA are made, and also the temporal, geographical and technological coverage as well the level of sophistication are defined. The FU is a fundamental element in every LCA study; it is a reference to which all the input and output data are normalized (in a mathematical sense). The 'function' in the sense of an LCA function means to quantitatively and qualitatively specify the analysed product. This is generally done by naming and quantifying the qualitative and quantitative aspects of the function(s) along the questions of "what", of "how much", of "how well", and of "for how long" (Production Environmental Footprint Guide, PEF, 2013). The system boundary, as the second important step, determines which unit processes shall be included within the LCA. The selection of the system boundary shall be consistent with the goal of the study. Life Cycle Inventory (LCI), according to ISO (ISO, 14044:2006), involves the compilation and quantification of inputs and outputs of a product throughout its life cycle. The aim of the LCI is to calculate the quantities of different resources required and emissions and waste generated per functional unit. To make an inventory analysis means to construct a flow model of product system. The model of the product system is composed of unit processes, where each unit representing one or several activities, such as production processes, transport, or retail. For each unit process, data are recorded on the inputs of natural resources, the emissions, waste flows, and other environmental exchanges. All unit processes are linked through intermediate product flows. For product comparisons, the functional unit is translated to reference flows (Rebitzer et al., 2004).

Objectives-Functional Unit and System Boundary

The main objective of the present study was to compare the environmental profile of the different agricultural practices in a crop rotation system used for biomass production. The ultimate aim was to reveal and compare the environmental impacts of using different tillage practices for seedbed preparation (conventional and conservation tillage) in an innovative crop rotations system, combining winter and spring crops, in order to achieve a continuous over the years soil coverage of the field. One kg of biomass dry matter was chosen as the functional unit (FU). So, according to PEF guide (Production Environmental Footprint Guide, PEF, 2013) the answer to the question "what" was the harvested dry matter of biomass at field. The time period (the "how long") depended on the needs of the biofuel production market. The "how well", meaning the quality of biomass produced in the field was determined from chemical analysis, and more specific from carbon and ash content of biomass. The latter is a fundamental characteristic of biomass, since the high ash content can lead to problems in combustion, gasification and pyrolysis during the conversion of biomass to biofuels. The study under analysis was, a Cradle to Gate study, meaning an assessment of a partial life cycle of a product, from the extraction of raw materials (cradle) up to the production of the product, at the farm, "gate". In the current study the phase of the "gate" was the biomass production in the field, including the whole above ground plant

part of the plant in its entirety. Thus, all emissions and resource uses during biomass production and the supply chains of all inputs are included (e.g. fertiliser production from raw materials and fertiliser application equipment, production, maintenance, etc.). It is pointed out, that the CO_2 uptake of the plants is included, but reported separately, because the carbon is released as CO_2 when the biomass is used for generating energy, which nullifies this positive effect. The CO_2 captured in the soil, due to land use change was also included and reported separately. Seed, fertiliser and herbicide production are also included and the agricultural practices of soil seedbed preparation, sowing, irrigation, harvesting, baling, loading bales and, finally, transporting the biomass at the field temporary storage area. In the case of capital goods (or ancillaries), the production, use and maintenance phase of the machinery are being analysed, as well as the farming infrastructure (e.g. buildings, irrigation infrastructure, etc.) its production, use and maintenance. The environmental impacts of field operations by human labour were not considered, as well as the transportation of human labour to the field. All the processes included to the cradle-to gate analysis are presented in Figure 1. As for the time boundaries, the study considered the complete lifetime of whole year field cultivation.

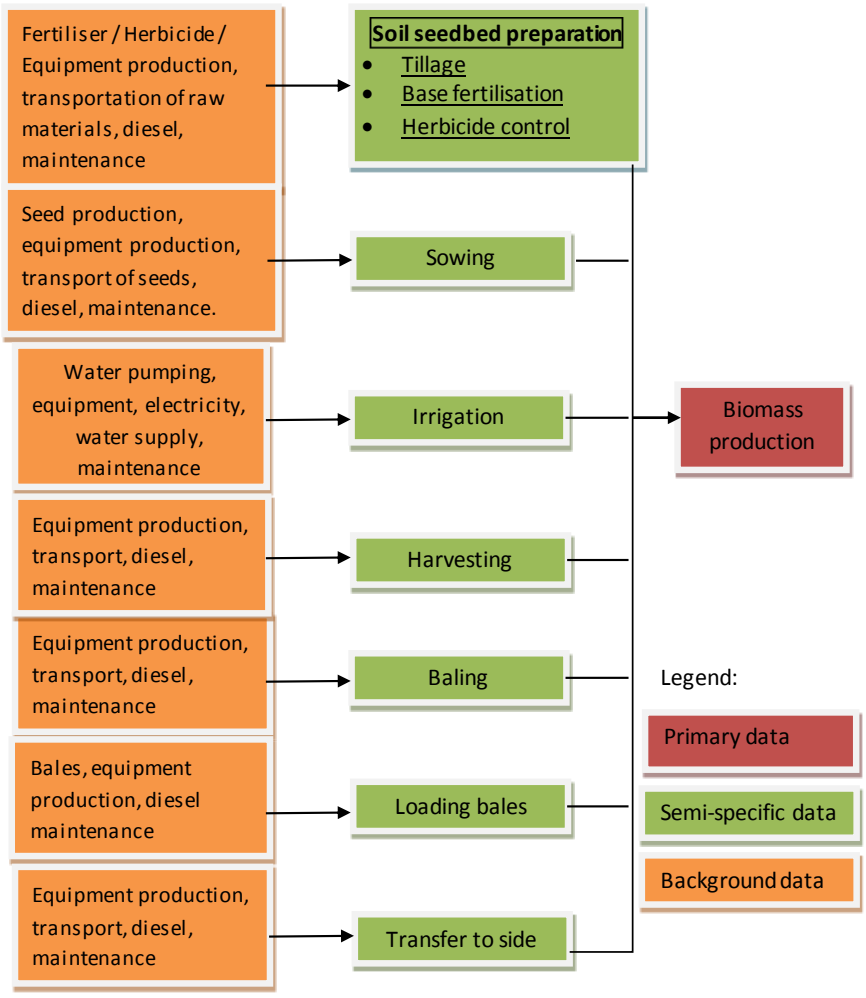


Figure 1: The processes included to the system boundaries for the biomass production

Inventory analysis

The data used to make the inventory were collected from one year of a three year crop rotation. Crop rotation used energy crops with double crops per year, one rain fed and one irrigated, in order to keep the soil covered all year round and simulate the conditions that will be created when second generation biofuels will be adopted.

Three categories of data were used in this study: the foreground data, the background data and the semi-specific data. The attributional modelling approach was used for compiling the inventory of the system under study. The foreground data concerned the primary data from the energy crop cultivation and were obtained via questionnaire based interview during the growing seasons 2012 and 2013. These foreground data, included amounts of all the crop production input/inflows categories- fertilisers, pesticides, machinery, irrigation, fuel consumption and transportation of agro-chemicals from the production site to the store and from the store to the farm.

The background data concerned all the information about the inputs production stage from raw material including the machinery and infrastructure production and all the operations under specific conditions. These data were taken from the Ecoinvent database, cut-off (also called recycled content) system model version 3.1 (Ecoinvent, 2014).

The semi-specific data concerned data coming from the ecoinvent background database adapted for the conditions of the present study. In Table 1 the inputs of the biomass study are presented, distinguished to the above data categories.

Table 1: Inputs inventory data of the study

Inputs	Background Data	Semi-specific Data	Foreground Data
Farm Machinery	Plough tillage/ Rotary harrowing/ Spring harrowing / Chiselling/ Rotary cultivator farm machinery production/ maintenance	*Plough* Tillage adapted from " Tillage ploughing, ROW, processing"; *Rotary* harrowing adapted from "Tillage harrowing by rotary harrow, ROW processing"; *Spring* harrowing adapted by "Tillage harrowing by spring tine harrow, ROW, processing"; *Chiselling* adapted from "Tillage, cultivating, chiselling, ROW, processing"; *Rotary* cultivator adapted from "Tillage rotary cultivator, ROW, processing";	Number of machinery used operations and the working hours Amount of diesel consumption
	Fertilising /Sowing farm machinery production/ maintenance	Fertilising /Sowing farm machinery adapted from "Sowing, ROW, processing"	Number of machinery used operations and the working hours
	Herbicide farm machinery production/ maintenance	Herbicide farm machinery use: adapted from "fertilising by broadcaster" with middle intensive fuel consumption;	Amount of diesel consumption
	Baling farm machinery production/ maintenance	*Baling*, adapted from "Baling, ROW, processing"	
	Bale loading farm machinery production/ maintenance		Number of machinery used operations and

	Transfer to side with tractor and trailer farm machinery production/ maintenance	*Transfer to side with tractor and trailer*, adapted from "Transfer to side with tractor and trailer, agricultural, GLO |market for.	the working hours Amount of diesel consumption Operations and the working hours Amount of diesel consumption
Fertilisation: **a.Macronutrients production** **N fertiliser** **P fertiliser** **K fertiliser** **b. Nutrients from resources**	Production of urea, ammonium sulphate, ammonium nitrate Production of superphosphate as P2O5 Production of Potassium sulphate as K2O		Amount of fertilisers as nitrogen Amount of fertilisers as phosphorous Amount of fertiliser as potassium Amount of N_2 formed from rhizobium released in soil
"CO2 from air" (from resources)			Amount of CO_2 from atmosphere bound to the biomass
Seed production	Sunflower seed, for sowing, |GLO| production Wheat seed, for sowing, |GLO| production		Amount of seeds used for sowing (Wheat seed production was used instead of oat/vetch seed production
Herbicide Production	Production of the 3 pesticide active ingredients		Amount of pesticides use
Irrigation	Irrigation supply	Irrigation processing adapted from " ES irrigation market" process	Amount of irrigation
Transportation From agri-store to farm	Vehicle production/ maintenance	Adapted the process of "transport passenger car"	Amount of gasoline consumption
Transportation From producer points to agri-stores	Transport, freight, lorry, production /maintenance		Total number of kilometres

In the farm machinery input category, as the Table 1 shows, the processes from the Ecoinvent data like, "Tillage, ploughing", "Tillage rotary and spring harrowing", "Tillage

chiselling and rotary cultivator", "Sowing", "fertilising by broadcaster", "Baling" and "Transfer to side" were adapted to the data of the study, mainly for fuel consumption. All the other characteristics of the machines, like tractor, agricultural implement, shed production and maintenance etc., remained the same as in the background data. This semi-specified farm machinery process was used as input for all the machinery use phase of the present study. For the fertilisers and herbicides application the background data were used, where different amounts of inputs within the inputs categories were distinguished, e.g. for N fertilisers we used N from urea, ammonium sulphate and ammonium nitrate, while for pesticides the pesticides' unspecified production and active ingredient compounds were used. Also for the seed production the background data were used. The irrigation process was adapted from the ecoinvent data base 'Spanish irrigation market' process, using the Greek conditions for irrigation and as source, a ground well for pumping water. Energy use for pumping included electricity-powered pumps, which were modelled with country-specific datasets using the country's electricity consumption mix and from diesel-powered pumps, were used generic data (diesel market 'Europe, without Swiss'). Regarding transportation from the place of production to the point of sale, global freight process from the background ecoinvent database was used. The pesticides assumed that have been produced in European countries and came to retail points by lorry. Likewise, the fertilisers assumed either they have been produced in EU or the raw materials were extracted in European countries and came to Greece by lorry. Transport passenger car was used as semi-specific process for the transportation of the fertilisers and pesticides from the agri-store to the field.

The inputs of water from precipitation, the land occupation, the land transformation, the C captured as CO_2 from the crops and the N_2 formed in the rhizobia of the cover winter crop, are considered inputs from natural resource (resource use type of elementary flows) meaning materials that have been drawn from the environment without previous human transformation or interventions that affect land dependent ecosystems. Precipitation was taken from weather data of the closest weather station. The fixed N_2 produced in the rhizobia formations of the winter crop was taken from literature, where it was accounted for 70% of the N uptake for Oat/vetch mix crop (Smith et al.,1987). The CO_2 fixation from the atmosphere was estimated according to the Agroscope report (Nemeck and Schnetzer 2012). For land transformation, which is a change from one land use type to another as a result of a human activity, we used the area of 1 ha, the area required to produce the biomass of crops of the present study. For land occupation (occupied area multiplied by time) the resource flow occupation, "occupation arable" was chosen to represent the cultivation of energy crops. It should be noticed that the two cultivations, spring crop and winter crop, occupied six and a half and five and a half months respectively, completing a whole year of cultivation.

The quantitative data of product output in the present study were defined as the kg dry matter of biomass produced in one ha and one year of cultivation. In the analysed cropping system, the biomass and the seeds are collected together, so the agricultural harvesting work includes the collection of the whole above-ground plant mass.

The emissions from the different agricultural practices into the environment (water, air, and soil) were estimated using the appropriate equations and emission factors (EF). The basic equation used to measure EF was:

Emissions = AD x EF (EMEP/EEA, 2013), where AD are the activity data

The emissions to water mainly concerned leaching of soluble nutrients to groundwater. Losses from run off or erosion were limited due to the flat terrain of the field (no slope). Two emissions to groundwater were estimated in the current study, phosphorus and nitrate. For phosphorus the default factor in the Agroscope report (Nemeck and Schnetzer 2012) was used. For nitrate the De Willigen (2000) equation for N leaching to groundwater was used and then the equation: ***NO_3- in groundwater = N_{tot} in fertiliser * (Nitrate-N leaching fraction) * (Conversion NO_3-N to NO_3-)***, where N_{tot} was the total N, NO_3 - N leaching fraction was the total NO_3-N, divided by the N_{tot} in fertilizer.

Direct and indirect emissions to air that included:

- Ammonia (NH_3) calculated based on the Agrammon model (Agrammon Group, 2009a,b),
- Dinitrogen monoxide or nitrous oxide (N_2O), using the equation from IPCC (2006):

  N_2O emission to air =Conversion N_2O-N to N_2O * Nitrogen in fertiliser * (direct N_2O + indirect NH_3 * NH_3-N fraction + indirect NO_3- * NO_3-N fraction)
- Nitrogen oxides (NOx), used the equation IPCC (2006):

  NOx emission to air=NOx emission factor * Nitrous oxide emissions to air
- Carbon dioxide from urea, defined as "carbon dioxide, fossil", according to the Ecoinvent report(Nemeck and Schnetzer 2012)
- Carbon dioxide from land transformation was calculated according to IPCC (2006) using the equation: ***CO_2 land transformation = C t/ha*44/12.***

Emissions to soil were considered all pesticides applied for crop production. The amounts of pesticides used as inputs were thus simultaneously calculated as outputs (emissions to agricultural soil). For almost all the active ingredients the chemical class of the pesticides/herbicides was used in the inventory. Only for the ingredient that the chemical class was unknown the "pesticides, unspecified" was used. In the current study it was assumed that there was no uptake of heavy metals from the crops and no emissions to the soil. This assumption was adapted after consulting the contribution analysis from defined processes in the ecoinvent database.

Sima Pro software

SimaPro is an LCA software package designed to be a source of science-based information, providing full transparency and avoiding black-box processes. SimaPro software allows you to model products and systems from a life cycle perspective and analyse complex life cycles in a systematic and transparent way using its unique features such as parameters[1] and Monte Carlo[2] analysis. SimaPro makes it easy to identify environmental hotspots (in a way it will be presented later in the next chapters) and evaluate different strategies for reducing environmental impact. The software includes a variety of LCI databases, such as ecoinvent v3, the sector-specific Agri-footprint database, ELCD and other and it is used for a variety of applications, like: sustainability reporting, carbon and Water footprint calculation, product design and eco-design, environmental Product Declarations (EPD), environmental impact of products or services, determining of key performance indicators.

[1]The SimaPro parameters provide an efficient way to build in parameters you can use as "switches", meaning a way of changing values. The advantage of using the parameter feature is that by changing the value of just one or more parameter, you can analyze different versions of the same product and find an optimal solution.

[2] Monte Carlo analysis is used to to evaluate uncertainties

References

Baumann, H., and Tillman, A.M., 2004. The Hitch Hiker's Guide to LCA. Studentlitteratur, Lund, Sweden, 2004.

Curran, M.A., 2006. Life cycle assessment: Principles and Practice. National risk management research laboratory office of research and development. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Cincinnati, Ohio 45268. EPA/600/R-06/060

Ecoinvent, 2014. Ecoinvent data v3.1., life cycle inventory database; https://v31.ecoquery,ecoinvent.org/ (accessed March 2015)

EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013.Technical guidance to prepare national emission inventories. European Environment Agency. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.

Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Sleeswijk, W.A., Suh, S., udo de Haes, A.H., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Lindeijer, E., Roorda, A.A.H., van der Ven, B.L., Weidema, P.P., 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Scientific background.

ISO 14040:2006 Environmental management -LCA- Principles and framework. Geneva, Switzerland

ISO 14044:2006 Environmental management -LCA -Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland

IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 11: N_2O Emissions from Managed Soils, and CO_2 Emissions from Lime and Urea Application

IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.Chapter5: Agriculture, Forestry and Other Land Use

Nemecek, T., Schnetzer,J., 2012. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Zurich.

Product Environmental Footprint Guide, PEF, 2013. Official Journal of the European Union, Volume 56, L 124, 4.5.

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.T Suh, S., Weidema B.P. and A.W. Pennington, 2004. A Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environment International, 30(5), 701-720.

Life Cycle Assessment (LCA) of Biomass Production Using Conservation Agriculture. Part II: LCA of biomass production

Anna Vatsanidou[1,*], Ana Luisa Fernando[3], Chris Cavalaris[2], Theofanis Gemtos[2]

[1]Center for Research and Technology-HELLAS, IRETETH, Dimitriados 95, 38333, Volos

[2]Laboratory of Farm Mechanization, Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytoko str., 38446 N. Ionia Magnesia, Greece

[3]Departamento de Ciências e Tecnologia da Biomassa Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal

Abstract

A three year experiment was carried out from 2012 till 2015 in Central Greece to assess the environmental impact of using different tillage practices (Conventional tillage, CT, Reduced tillage, RT and No tillage, NT) for seedbed preparation, in a double cropping per year rotation for biomass production. One kg of biomass dry matter was chosen as the functional unit (FU)(mass based FU). Taking into account that the FU selection can affect the environmental results in multifunctioning agricultural studies, a sensitivity analysis was performed considering two different FUs (area and energy value). The 1st year of the experiment reported here, showed that the most important impact categories contributing to the total environmental impact were: Fossil and Land transformation CO_2 (Climate Change), Human toxicity, Particular matter formation, Agricultural land occupation, Water, Metal and Fossil depletion. The emissions due to fertiliser application and diesel fuel consumption, as well as of their production, were the processes with the greater influence on the overall environmental burden. The comparison among the tillage treatments when a mass based FU was used revealed that RT, using strip tillage for spring crop and disc harrow for winter crops, had the best environmental performance, presenting the lowest emissions in all impact categories. When energy based FU (1MJ) was used the results was almost the same. However, when an area-based FU (1 ha) was used NT treatment found to have reduced environmental impacts in the most impact categories, since the inputs and not the productivity anymore was taken into account.

Introduction

The last few decades the use of biomass for energy production (bioenergy), such as electricity, heat and transport fuels, was seen as a promising option to reduce the use of non-renewable energy sources and the emissions from fossil fuel carbon (C) to the atmosphere (EC, 1997; EC, 2000). This perspective and the development by most EU governments of detailed bioenergy plans including alternative energy sources (EC, 2005), has resulted in an extensive research on raw material production, transformation to energy and environmental performance of biomass and energy crops. This research study was conducted to evaluate the environmental impact of cultivating energy crops for first and second generation biofuel production under different cultivation practices using Life Cycle Assessment (LCA).

The potential environmental benefits that can be obtained from replacing petroleum fuels with biofuels and bioenergy derived from renewable biomass sources have been the subject of research the last years. Dedicated energy crops have the benefit of providing specific ecosystem services (e.g. C sequestration, biodiversity enhancement, GHG emissions mitigation, enhancement of soil quality), the value of which are depended on the particular

bioenergy production system and the reference land use that it displaces (Cherubini et al, 2009). An LCA study offers a clear and comprehensive picture of the flows of energy and materials through a system and gives a holistic and objective basis for comparisons. The results of an LCA quantify the potential environmental impacts of a product system over the life cycle, help to identify opportunities for improvement and indicate more sustainable options where a comparison is made. It is widely accepted by the scientific community that LCA is one of the best methodologies to assess the performance of biomass and evaluation of the environmental burdens associated with biofuel production, by identifying energy and materials used as well as waste and emissions released to the environment (Cherubini et al., 2009).

Given the variety of processes leading to bioenergy, and the controversial discussion of their 'net benefit', several studies have already been undertaken using LCA methodology to analyse the processes in detail, in order to know which biofuels have more or less environmental impacts (Blottnitz von and Curran, 2007; Gasol et al., 2007; Quintero et al., 2008). With the exception of a few studies, most LCAs have found a significant net reduction in GHG emissions and fossil energy consumption when biofuels (bioethanol and biodiesel) were used to replace conventional diesel and gasoline (Kim and Dale, 2005; Blottnitz von and Curran, 2007; Weldemichael and Assefa, 2016; Gerssen-Gondelach et al., 2017). Several LCA studies have also examined life cycle impacts on other environmental aspects, including local air pollution, acidification, eutrophication, ozone depletion, land use, etc. (Reinhardt et al., 2004; Pimentel and Patzek, 2005; Farrell et al., 2006; Solinas et al., 2015). Site specific assumptions can influence the magnitude of the environmental burden when more impact categories are analyses than just GHG and energy consumption categories, showing that it is not easy to draw simplified conclusions. Studies that have examined environmental issues, like acidification, eutrophication, ozone depletion, land use, etc, have concluded that most, but not all, biofuels substituting fossil fuels will lead to increased negative impacts to environment (Larson, 2005; Zah et al., 2007). This is due to intensive use of inputs (fertilisers, compounds based on N and P and pesticides) that can cause contamination of water and soil resources. Therefore, it should always be acknowledged that the positive impacts on GHG emissions (from fossil fuels replacement) may carry a cost in other environmental areas. What it seems to be a solution is the introduction of sustainable intensification, that is yield increases without increased input, but through adopting practices which optimize the resource use efficiency and strengthen the productive capacity of the soil (Garnett et al., 2013; Hochman et al., 2013; Valin et al., 2013). These practices include Precision Agriculture (inputs site-specific management) or sustainable resource management, reduced or no tillage and crop rotation. The present report describes a simplified environmental impact research using the LCA methodology. The LCA was performed for one year of double crop in a crop rotation system using different tillage practices changing the use of land from the monoculture of cotton prevailing crop in Thessaly.

Materials and Method

The main objective of the present study was to reveal and compare the environmental impacts of using different tillage practices for seedbed preparation (conventional and conservation tillage) in an innovative crop rotations system, combining winter (vetch and oat mixture) and spring (sunflower) crops, in order to achieve a continuous over the years soil coverage of the field. The land use change concerned the change from monoculture conventional crop (cotton cultivation) to a crop rotation system.

The goal of the study was to perform a multiple impact category LCA following the ISO standards for LCA 14040 and 14044 as close as possible. The functional unit (FU) was defined as the 1 kg dry matter of biomass production at farm gate. This means that the LCA study was a cradle- to - gate study, which means that includes all the processes until the biomass was harvested at the farm. The FU, the system boundary, the inventory analysis, the assumptions and the used software are described in the 1st part of this paper. This paper refer to the last two phases of LCA methodology, that of Impact Assessment, and Interpretation. The Impact Assessment phase of an LCA aims at evaluating the significance of potential environmental impacts using the LCI results. In general, this process involves associating inventory data with specific environmental impact categories and category indicators, thereby attempting to understand these impacts. The selection of impact categories, category indicators and characterization models shall be both justified and consistent with the goal and scope of the LCA. This phase includes two mandatory steps (classification and characterization) and two optional steps (normalization and weighting). In Interpretation phase the results of all phases are interpreted according to the goal of the study, using sensitivity and uncertainty analysis (the latter not always performed). The outcome of the interpretation may be a conclusion serving as a recommendation to the decision makers, who will normally consider the environmental and resource impacts together with other decision criteria (like economic and environmental aspects), or could be a recommendation of a further iteration, reviewing and possibly revising the scope of the study, the collection of data for the inventory or the impact assessment.

Results

The ReCiPe 2008 method (Goedkoop et al., 2013) was chosen to perform the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) of the results, because the ReCiPe method analyses the data both at midpoint[3] and endpoint[1] level. The ReCiPe method was combined with the method of Pfister et al. (2010) in order to have more precise results for water depletion impact category. The results of the LCIA in the endpoint level are presented in Figure 1 for all the treatments of the study. In the endpoint level the impact categories are aggregated into three endpoint categories: a) damage to human health (HH), b) damage to ecosystem diversity (ED) and c) damage to resource availability (RA). It is showed (Fig.1) that the RT II (Disk harrow/strip tillage) treatment of the energy crop study had better performance compared to other treatments in the three areas of protection (AoPs), meaning that it was the least harmful treatment, according to the adapted ReCiPe endpoint method.

[3]When defining the impact categories, an indicator must be chosen somewhere in the environmental mechanism. Often indicators are chosen at an intermediate level somewhere along that mechanism, at **midpoint level**; sometimes they are chosen at **endpoint level**.

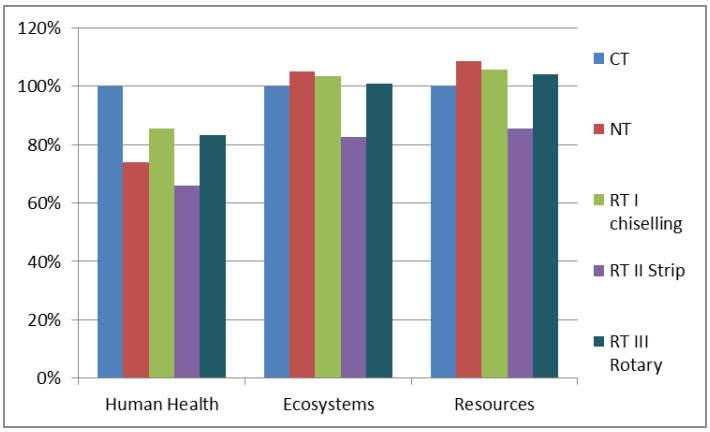


Figure 1: Results of Impact Assessment applied on energy crops study at the endpoint level using FU 1 kg of dry biomass

The most important impact categories distinguished from the endpoint level analysis, Fossil and Land transformation CO_2 (Climate Change), Human toxicity, Particular matter formation, Agricultural land occupation, Water, Metal and Fossil depletion, are the categories that was further analysed at the midpoint level. The results of the impact assessment using the adapted ReCiPe midpoint method (combined with Pfister method) are presented in Figure 2.

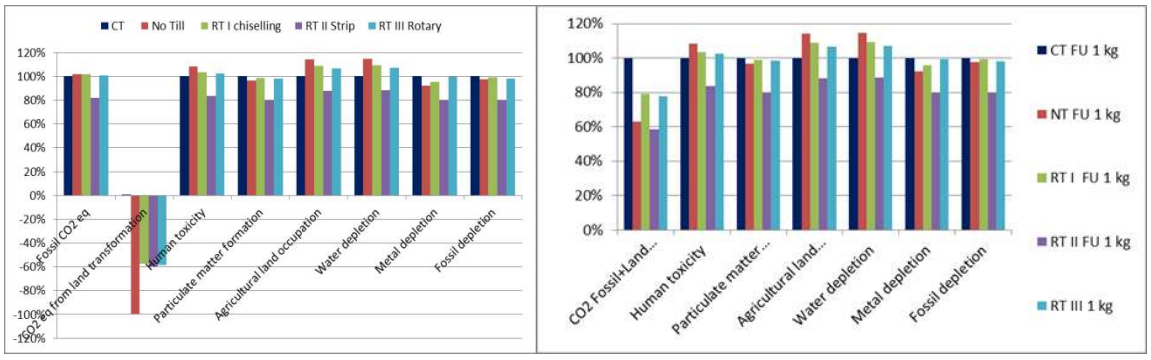


Figure 2: Comparison among the different tillage treatments, using FU 1 kg of dry biomass, showing CO_2 land transformation separated (left) and added to Fossil CO_2 (right)

The CO_2 from land transformation has negative sign (Fig. 2, right). This means that C is sequestered into the soil for all tillage treatments except of the CT. It is worthwhile to mention that the biggest reduction at the CO_2 was made by NT. Fossil CO_2 values (Fig. 2) were at the same level for all the treatments of the study (higher yield was combined with higher energy inputs or lower yield with lower energy inputs) except RT II (strip tillage), which was lower than the rest, probably due to the higher biomass production and the lower energy inputs.

The environmental profile of each treatment of the energy crop study is presented in Figures 3-7 for all the tillage treatments. Each graph depicts the contribution (in percentages) of each process group, like fertiliser production, field operations, etc., to the most important impact categories for the study. All the emissions of substances to air, water and soil from the biomass production phase in the different tillage treatments are represented by CT, RTI, RTII, RTIII and NT biomass group. The biomass production phase was almost exclusively responsible for the emissions in the Agricultural land occupation category and CO_2 from land transformation. These results are due to land use for specific period,

during growth cultivation and to the C sequestration in soil from land management change of use, respectively. Also biomass production group covers a part of Fossil CO_2 category with similar percentages (23-25%) for all the tillage treatments, and a part of Particulate matter formation ranged from 25-29% also for all the tillage treatments. The biomass production phase had no contribution to Human toxicity, meaning that production phase is not responsible for emissions included in this impact category.

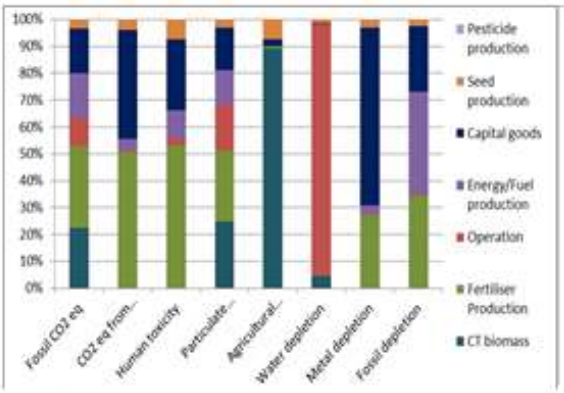


Figure 3: Processes contribution to the most significant impact categories for Conventional tillage treatment

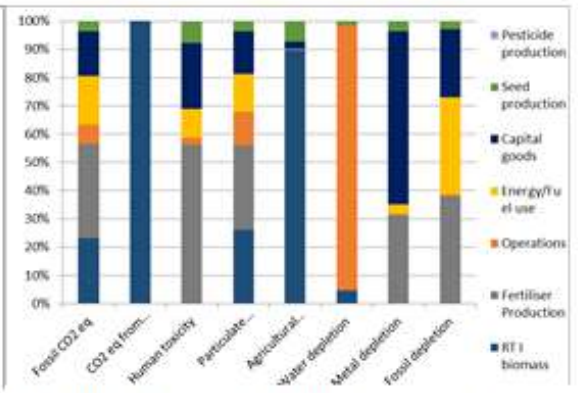


Figure 4: Processes contribution to the most significant impact categories for Reduced Tillage I (chiselling) treatment

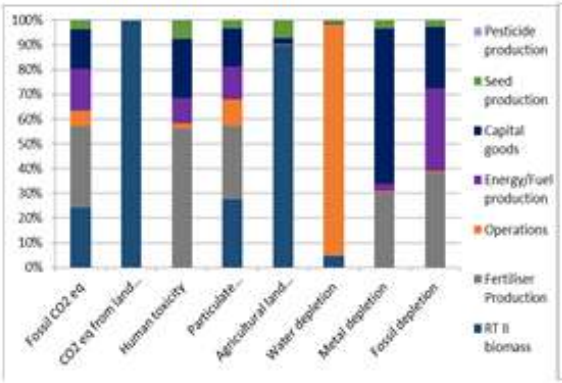


Figure 5: Processes contribution to the most significant impact categories for Reduced Tillage II S (disk harrow/strip) treatment

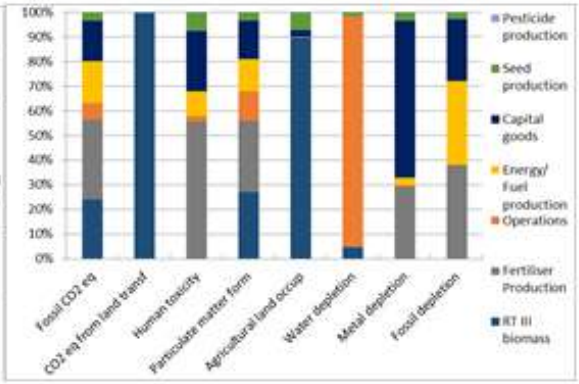


Figure 6: Processes contribution to the most significant impact categories for Reduced Tillage III (Rotary) treatment

The diesel consumption in tractor uses, gasoline consumption in transportation and electricity use in irrigation are represented from the Operation in the graphs. As it is depicted mainly in Water Depletion impact category and consequently in Particulate matter formation and Fossil CO_2, the operations showed significant contribution, with CT tillage treatment having the higher amounts in Particulate matter formation and Fossil CO_2 (17% and 10% respectively), while the lower was recorded in NT (7% and 4%). The agricultural machinery production and maintenance of all the equipment and machinery used are included in the Capital goods group and had an important contribution percentage in the majority of the impact categories in all the treatments.

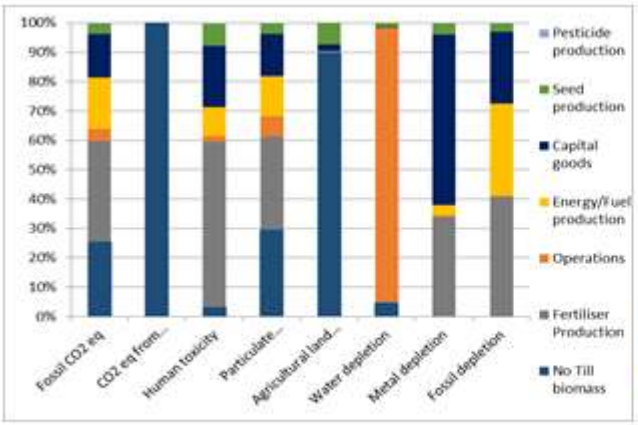


Figure 7: Processes contribution to the most significant impact categories for No-tillage treatment

A sensitivity analysis was performed considering two different FUs, one area-based (1 ha) and one energy-based (1 MJ). In Figure 8 the comparison of different tillage treatments with the FU 1 ha and FU 1MJ are presented. When these graphs are compared to the Figure 2 (right graph) FU is 1kg, we have similar results for energy value (FU 1 MJ), mainly due to the same energy value content of the crops, while they the results are differ when FU is 1ha.

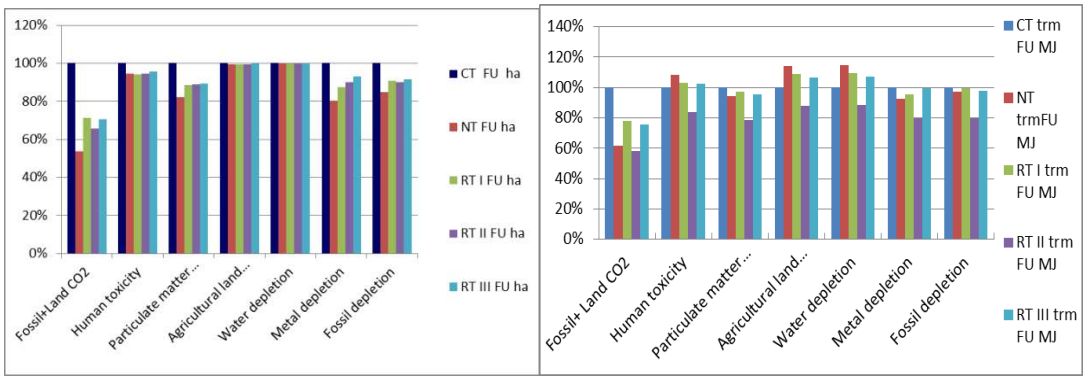


Figure 8: Comparison among the different tillage treatments, using FU 1 ha and 1 MJ

When FU is 1 kg, RT II S treatment presented the best environmental performance compared to all the other tillage treatments in all the most important impact categories. When the area based FU (1 ha) was used, NT treatment presented better environmental performance among the tillage treatments of the energy crop study in the most impact categories, especially in relation to total CO_2 emissions.

Discussion

The most contributing impact categories to the total environmental impact according to the impact assessment analysis were Climate Change (mainly CO_2 and N_2O emissions), Human toxicity, Particulate matter Formation, Agricultural land occupation and Water, Metal and Fossil depletion. The results from the adapted midpoint method for each treatment showed that background processes (i.e. groups of fertiliser, energy/fuel, seed production and capital goods, attributed to background processes) were almost exclusively responsible for the impacts of Human toxicity (this impact category is almost always dominated by waste treatment from coal power plants and coal mining wastes), and Metal and Fossil depletion impact categories (because the mineral and fossil resource extraction

take place in the mining processes). About Fossil depletion impact category, it should be clarified that fossil resources are needed for production and transportation of agricultural inputs and for machinery production. The foreground processes were represented by biomass production and operations groups. Biomass production group (including all inputs, land use and agricultural practices required for biomass production) was responsible for a substantial amount of Fossil CO_2 emissions (CT=23%, RTI, II, III=24%, NT=25%), mainly due to fertilisation. Also, it was exclusively responsible for CO_2 emissions from land transformation (resulting from land management change) and Agriculture land occupation categories. Biomass production group has a quite large participation in the Particulate matter formation (CT=25%, RTI, III=27%, RTII=28%, NT=29%), also due to fertiliser applications, but a small contribution to Water depletion. Water depletion impact category is attributed to the operation group mainly due to energy (electricity) needed for pumping the water. Also, operation group (including fuel and electricity consumption) contribute to Fossil CO_2 (CT=10%, RT I, III=7%, RT II=6%, NT=4%), and to particular matter formation impact categories (CT=17%, RTI, II=11%, RT III=12%, NT=7%), revealing the contribution of fuel consumption and the machinery exhaust gases respectively to Fossil CO_2 and Particulate matter impact categories.

Finally, the comparison among tillage treatments reveled that RT II using strip tillage presented the lowest emissions in all impact categories per kg biomass produced. It should be noticed, though, that NT had the lowest fuel consumption compared to CT (reduced by 71%), but produced the lowest biomass and ended with a medium environmental performance. When area based FU was used, NT had the lowest emissions, especially for CO_2. The different results when different FU used is mainly due to the productivity factor. When comparing cropping systems based on yield production, the system with higher production had better environmental impact profile. On the other hand, when area based FU was used, yield was no more the key driver of the comparison. Productivity per hectare is an important parameter that influences the impact per unit of the product. Productivity is also related to the amount of inputs that is used. Using hectare as the functional unit does not take the productivity into account. Then, the amounts of inputs used are considered the key issue. But this is not an LCA analysis anymore, since LCA is a product based method of assessment.

Conclusions

The objective of the second study was to compare the environmental profile of the different agricultural practices in a crop rotation system used for biomass production. The LCIA in the characterisation phase presented the results of the analysis using primary data of one year (including two successive crops; spring and winter crop). The main conclusions emerged from this LCA study is summed up below:

- When the cropping system was analysed concerning inputs and outputs the fertilisation was the main driver for environmental impacts followed by fuel consumption during the biomass production for all the treatments
- When the different tillage practices were compared, RT II using strip tillage treatment presented the best environmental performance compared to all the other tillage treatments in all the most important impact categories
- When the area based FU was used (1 ha) NT presented better environmental performance among the tillage treatments of the energy crop study in the most impact categories

References

Blottnitz von H, Curran MA. A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. J Cleaner Prod 2007;15:607–19.

Cherubini F., Neil D. Birda, D.N, Cowie, A., Jungmeier,G., Schlamadinger,B., SusanneWoess-Gallasch, S., 2009. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. Resources, Conservation and Recycling 53, 434–447.

EC, European Commission, 2005. Biomass action plan. COM(2005) 628, Brussels.

EC, European Commission, 1997. Energy for the future renewable sources of energy. White paper for a Community Strategy and Action Plan. COM (97)599, Brussels.

EC, European Commission, 2000. Towards a European strategy for the security of energy supply. Green Paper. COM (2000)769, Luxemburg.

Farrell AE, Plevin RJ, Turner BT, Jones AD, O'Hare M, Kammen DM. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. Science 2006;311:506–8.

Gasol C.M., Gabarrell X., Anton A., Rigola M., Carrasco J., Ciria P., 2007. Life cycle assessment of a Brassica carinata bioenergy cropping system in southern Europe. Biomass Bioenergy, 31(8), 543-55.

Garnett, T., Appleby MC, Balmford A et al., 2013. Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. Science, 341, 33-34.

Gerssen-Gondelach, S.J., Wicke, B., Faaij, A.P.C., 2017. GHG emissions and other environmental impacts of indirect land use change mitigation. GCB Bioenergy 9, 725–742.

Hochman, Z., Carberry, P.S., Robertson, M.J., Gaydon, D.S., Bell, L.W., McIntosh, P.C., 2013. Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. European Journal of Agronomy, 44, 109–123.

Kim S, and Dale, B.E., 2005. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: bioethanol and biodiesel. Biomass Bioenergy, 29,426–39.

Larson E., 2005. A review of LCA studies on liquid biofuels for the transport sector, Scientific and technical advisory panel of the global environment facility (STAP) workshop on liquid biofuels, 29 August to 1 September 2005, New Delhi, India.

Pimentel D, Patzek T., 2005. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. Nature Resource Res., 14(1), 65–76.

Quintero J.A., Montoya M.I., Sαnchez O.J., Giraldo O.H., Cardona C.A., 2008. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: comparative analysis for a Colombian case. Energy,33(3), 385–99.

Reinhardt, G., Quirin, M., Gartner, S., Pehnt, M., 2004. Comparison of well-to-wheel analyses of biofuels for transportation. In: Proceedings from: world conference and technology exhibition on biomass for energy, industry and climate protection.

Solinas, S., Fazio, S., Seddaiu, G., Roggero, P.P., Deligios, P.A., Doro, L., Ledda. L., 2015. Environmental consequences of the conversion from traditional toenergy cropping systems in a Mediterranean area. Europ. J. Agronomy 70, 124–135.

Valin, H., Peters, D., van den Berg, M., Frank, S., Havlik, P., Forsell, N., Hamelinck, C., 2015. The Land Use Change Impact of Biofuels Consumed in the EU. Quantification of area and greenhouse gas impacts. Ecofys, Utrecht, the Netherlands.

Weldemichael, Y.,and Assefa, G., 2016. Assessing the energy production and GHG (greenhouse gas) emissions mitigation potential of biomass resources for Alberta. Journal of Cleaner Production 112, 4257-4264.

Zah R, Boni H, Gauch M, Hischier R, Lehmann M, Wager P., 2007. Life Cycle Assessment of energy products: environmental assessment of biofuels, Final Report, EMPA—technology and society Lab, Auftrag des Bundesamtes fór Energie, des Bundesamtes fór Umwelt und des Bundesamtes fór Landwirtschaft, Bern;2007.

10ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ-ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΤΩΝ 2ΦΑΣΙΚΩΝ ΚΑΙ 3ΦΑΣΙΚΩΝ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΠΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

Δ. Γεωργακάκης(*), Μ. Δρούγα & Γ. Μάρκου
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ & ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα
(*)digeo@aua.gr

Περίληψη

Η διάδοση των εγκαταστάσεων παραγωγής βιοαερίου και στη χώρα μας τα τελευταία χρόνια και η λειτουργία των περισσότερων ως Τοπικών Κεντρικών Σταθμών (ΤΚΣ) συλλογής αποβλήτων ή/και υπολειμμάτων για τις ανάγκες τροφοδοσίας τους, ανοίγουν το δρόμο για αναθεώρηση των προτάσεων διαχείρισης των αποβλήτων των 2φασικών και 3φασικών ελαιοτριβείων. Στην παρούσα εργασία συνοψίζονται παλαιότερα ερευνητικά αποτελέσματα του Εργ. Γ. Κατασκευών για τα απόβλητα αυτά και διαμορφώνονται δύο εναλλακτικές προτάσεις διαχείρισης, μία για τα 3φασικά και μία για τα 2φασικά ελαιοτριβεία, με πρόβλεψη αποστολής του βαρέως κλάσματος των αποβλήτων και στις δύο περιπτώσεις στον πλησιέστερο ΤΚΣ.

Λέξεις κλειδιά : βιοαέριο, ελαιοτριβεία, ελαιοπυρηνόλυμα, χειρισμός αποβλήτων

ALTERNATIVE HANDLING METHODS OF 2PHASE AND 3PHASE OLIVE OIL MILL WASTES WITH THE COLLABORATION OF LOCAL CENTRAL STATIONS OF BIOGAS PRODUCTION

D. Georgakakis(*), M. Drouga & G. Markou
Agricult. Univ. of Athens, Dept. of Nat. Res. Mgnt, Iera Odos 75, 11855, Athens
(*)digeo@aua.gr

Abstract

The development of biogas production systems and in our country recently, systems recently in our country too, with most of them operating, as Local Central Stations (LCS) collecting wastes and/or residues for their feeding, open a new way for managing the 2- and 3 - phase olive oil mill wastes. In this work, older research data, of the Lab of Agric. Structures are summarized and two new waste management plans are proposed, one for 3-phase and one for 2-phase olive oil mills. In both cases, the resulting 'heavy' waste fraction is sent to the LCS for final treatment and use.

Keywords : biogas, olive oil mills, olive press cake, olive oil wastes handling

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σημερινά σύγχρονου τύπου ελαιοτριβεία λειτουργούν, είτε ως τριφασικά, αν τα υπολείμματα της διαδικασίας απομακρύνονται χωριστά σε δύο ανεξάρτητες φάσεις, μία για τα στερεά και μία για τα υγρά, είτε ως διφασικά, αν τα υπολείμματα απομακρύνονται, όλα μαζί σε μία κοινή φάση στερεών-υγρών. Η φάση των στερεών στα 3φασικά, δεν είναι τίποτε άλλο παρά ο γνωστός ελαιοπυρήνας, που με υγρασία 48% (38-64%), οδηγείται στα πυρηνελαιουργεία και που μετά από κατάλληλη επεξεργασία μετατρέπεται σε 2 τελικά εμπορικά προϊόντα, το πυρηνόξυλο και το πυρηνέλαιο. Αντίστοιχα, η φάση των υγρών ταυτίζεται με τα υγρά απόβλητα των 3φασικών ελαιοτριβείων και είναι υπεύθυνη για τα περιβαλλοντικά προβλήματα και τις ενοχλήσεις που δημιουργούνται από τα ελαιοτριβεία αυτά.

Τα διφασικά ελαιοτριβεία εμφανίστηκαν στη δεκαετία του 90’ και ο λόγος ήταν η ανάγκη περιορισμού ή και πλήρους εξάλειψης των υγρών αποβλήτων των τριφασικών, με συγχώνευση των δύο φάσεων σε μία, με κοινό προϊόν το ελαιοπυρηνόλυμα, στερεής μορφής, συνδυασμός ελαιοπυρήνα και υγρών αποβλήτων Λόγω της προέλευσής του, το ελαιοπυρηνόλυμα έχει περισσότερη υγρασία από τον ελαιοπυρήνα, 53,4% (64-77%) (Markou et al.,2009; Γεωργακάκης κ.ά., 2010)

Από τη φύση του, το ελαιοπυρηνόλυμα ανήκει, σαν σύνολο, στα πολύ βεβαρυμένα οργανικά κατάλοιπα της βιομηχανίας τροφίμων, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα δύσκολο στους χειρισμούς και την επεξεργασία του. Κύρια αιτία είναι η υπερβολική του υγρασία και τα ιδιαίτερα φυσικο-χημικά του χαρακτηριστικά, που δεν του επιτρέπουν να κομποστοποιηθεί ή να χρησιμοποιηθεί για απευθείας καύση, χωρίς προεπεξεργασία (κυρίως ελάττωση της υγρασίας του), με την ανάλογη οικονομική επιβάρυνση. Οι αρχικές ελπίδες της Πολιτείας και των Οικολόγων, πως με την μετατροπή των 3φασικών σε 2φασικά ελαιοτριβεία θα αντιμετωπιζόταν ριζικά το πρόβλημα των αποβλήτων, γρήγορα διαψεύσθηκαν, λόγω της κάθετης αρχικά άρνησης των πυρηνελαιουργείων να δέχονται το ελαιοπυρηνόλυμα, αντί του κλασικού ελαιοπυρήνα. Η δικαιολογία βάσιμη, δεν αναλάμβαναν το extra κόστος αφαίρεσης της επί πλέον υγρασίας του ελαιοπυρηνολύματος σε σχέση με τον ελαιοπυρήνα. Τελικά με την πάροδο του χρόνου επήλθε μια ισορροπία (;) με τα πυρηνελαιουργεία να πληρώνουν χαμηλότερη τιμή για την αγορά του ελαιοπυρηνολύματος, σε σχέση με την τιμή που δίνουν για τον ελαιοπυρήνα. Αλλά μια τέτοια μονοπωλιακού χαρακτήρα πρακτική, οδήγησε, τα πιο πολλά 2φασικά ελαιοτριβεία να ξαναγυρίσουν στην 3φασική δομή λειτουργίας, αναιρώντας όλα τα μέχρι τότε μέτρα προστασίας του Περιβάλλοντος, που επιδίωξε να εφαρμόσει η Πολιτεία, παρέχοντας κίνητρα για την μετατροπή τους σε 2φασικά. Έτσι τα προβλήματα παραμένουν και διογκώνονται συνεχώς σε βάρος του περιβάλλοντος από την διάθεση των υγρών αποβλήτων των ελαιοτριβείων (Markou κ.ά., 2010; Niaounakis et al, 2006).

Το Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών του ΓΠΑ ασχολήθηκε από πολύ νωρίς (δεκαετία του ‘80’) με τα υγρά απόβλητα των τριφασικών ελαιοτριβείων, συμπεριλαμβανομένης και της παραγωγής βιοαερίου, για τον χειρισμό των οποίων έχει ήδη καταλήξει σε τεχνική λύση από πολύ καιρό (Georgakakis, 2005), η οποία εμπίπτει γενικά στους στόχους και τις κατευθύνσεις που καθορίζονται στη νέα τροποποιητική ΚΥΑ (Φ 3924/7-12-2016/ ΤΕΥΧΟΣ Β’), που ισχύει σήμερα για τα υγρά απόβλητα των (3φασικών) ελαιοτριβείων. Αργότερα, με την εμφάνιση των διφασικών και της διαφαινόμενης εξάπλωσης των λεγόμενων τοπικών κεντρικών σταθμών (ΤΚΣ) παραγωγής βιοαερίου και στη χώρα μας, στράφηκε ερευνητικά και προς την κατεύθυνση των 2φασικών ελαιοτριβείων, σε μια προσπάθεια να συμβάλλει

στην επίλυση του προβλήματος χειρισμού του ελαιοπυρηνολύματος (Markou et al., 2009; Γεωργακάκης, 2010; Δρούγα κ.ά., 2015).

Με την παρούσα εργασία επιχειρείται η διαμόρφωση ολοκληρωμένης τεχνικής πρότασης για τα διφασικά ελαιοτριβεία, ώστε να μπορούν και αυτά να λειτουργούν, χωρίς περιορισμούς, αξιοποιώντας το ελαιοπυρηνόλυμά τους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Στο τέλος παρουσιάζεται η ήδη δημοσιοποιημένη τεχνική πρόταση του ως άνω Εργαστηρίου για τα 3φασικά ελαιοτριβεία, προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις της προαναφερθείσας τροποποιητικής ΚΥΑ για λόγους σύγκρισης.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η τεχνική πρόταση για τη διαχείριση του ελαιοπυρηνολύματος των 2φασικών ελαιοτριβείων επικεντρώνεται στο μηχανικό διαχωρισμό του σε δύο κλάσματα, στο στερεό κλάσμα (ΣΚ) διαχωρισμού και στο πυκνό υγρό κλάσμα (ΠΥΚ) διαχωρισμού και στη συνέχεια στο χωριστό χειρισμό κάθε ενός από αυτά. Ο μηχανικός διαχωρισμός έχει καθιερωθεί πλέον εδώ και αρκετά χρόνια ως η κύρια πρωτοβάθμια επεξεργασία των αποβλήτων των κτηνοτροφικών μονάδων (κυρίως χοιροστασίων και βουστασίων) και γενικότερα των βιομηχανιών τροφίμων (Γεωργακάκης, 2015; Hjorth et al, 2010). Με το μηχανικό διαχωρισμό απομακρύνονται από το ρεύμα των αποβλήτων αιωρούμενα, καθιζήσιμα και επιπλέοντα συστατικά και διευκολύνεται σημαντικά η παραπέρα επεξεργασία και χειρισμός των αποβλήτων. Είναι κατάλληλος για αραιά και για πυκνά υγρά απόβλητα, ακόμα και στερεής - ημιστερεής μορφής, στα τελευταία μετά όμως από κατάλληλη αραίωση με νερό /και άλλα υγρά απόβλητα.

Στην πράξη κυκλοφορούν πολλοί τύποι διαχωριστών από απλές σχάρες μέχρι τους διαχωριστές με κοχλία συμπίεσης προηγμένης τεχνολογίας (γ' γενιάς) ελεγχόμενου βαθμού μείωσης της υγρασίας του διαχωριζόμενου υλικού (Ford et al, 2002). Ιδιαίτερη εφαρμογή στα απόβλητα των χοιροστασίων και βουστασίων γαλακτοπαραγωγής στη χώρα μας έχουν δύο εξελιγμένοι τύποι διαχωριστών, ο διαχωριστής τύπου διπλού τυμπάνου με βούρτσες σάρωσης και κυλίνδρους συμπίεσης (β' γενιάς) και ο προαναφερθείς διαχωριστής γ' γενιάς.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των προηγμένης τεχνολογίας μηχανικών διαχωριστών είναι η ικανότητά τους να διαχωρίζουν δύσχρηστα, ανομοιογενή πυκνά απόβλητα (slurries) σε δύο κλάσματα, ένα αμιγώς στερεό και ένα αμιγώς υγρό (αραιό ή πυκνό ανάλογα της περιεκτικότητας της α' ύλης σε νερό), τα οποία είναι πολύ ευκολότερα διαχειρίσιμα από το αρχικό υλικό (Lo et al, 1983; Γεωργακάκης, 2015). Στην ίδια κατηγορία με τα πτηνο-κτηνοτροφικά εντάσσεται και το ελαιοπυρηνόλυμα των διφασικών ελαιοτριβείων, ως προς την μορφή και την υγρασία του. Είναι στερεής μορφής υπερδιπλάσιας πυκνότητας από τα απόβλητα των χοιροσταίων – βουστασίων και εφάμιλλο των αποβλήτων των πτηνοτροφείων αυγοπαραγωγής σε ολικά στερεά (25-35%). Λόγω της ομοιότητάς του με τα πτηνοτροφικά απόβλητα, το Εργαστήριο Γ. Κατασκευών δοκίμασε για πρώτη φορά το 2010 την εφαρμογή μηχανικού διαχωρισμού επί τόπου σε ελαιοπυρηνόλυμα διφασικού ελαιοτριβείου στη Θάσο, το οποίο διέθετε μηχανικό διαχωριστή τύπου κοχλία συμπίεσης (γ' γενιάς) με πολύ θετικά αποτελέσματα (Γεωργακάκης, 2010). Διαπιστώθηκε πως το 'στερεό' κλάσμα διαχωρισμού ήταν εφάμιλλο σε μορφή και υγρασία με τον ελαιοπυρήνα των 3φασικών ελαιοτριβείων και αυτό έλυνε τα χέρια των ελαιοτριβέων για απ'ευθείας διάθεσή του στα πυρηνελαιουργεία, ωσάν να ήταν από 3φασικό ελαιοτριβείο. Τους απέμενε όμως το υγρό κλάσμα διαχωρισμού, ένα πηχτό ομοιογενές υγρό, το οποίο θα έπρεπε να διαχειριστούν τα ίδια τα διφασικά ελαιοτριβεία. Είχε γίνει όμως ένα μεγάλο

βήμα, περίπου το μισό του ελαιοπυρηνολύματός τους θα μπορούσε να διατίθεται στα πυρηνελαιουργεία, αφήνοντάς τους ένα πυκνό κατάλοιπο μικρού όγκου στη θέση του υπερδιπλάσιου όγκου των υγρών αποβλήτων των 3φασικών.

Με την πάροδο του χρόνου άρχισαν σιγά σιγά να γίνονται πράξη και στη χώρα μας οι εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου για συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Κίνητρο η πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο της ΔΕΗ. Οι περισσότερες από τις εγκαταστάσεις αυτές συγκεντρώνουν και χρησιμοποιούν ως α' ύλες, μίγματα αποβλήτων οργανικής προέλευσης της ευρύτερης περιοχής λειτουργίας τους και έτσι εμπίπτουν στην κατηγορία του Τοπικού Κεντρικού Σταθμού (ΤΚΣ). Η παρουσία ενός ΤΚΣ μπορεί να 'ανακουφίσει' περιβαλλοντικά την περιοχή του εδραιώνοντας κοινωνικά την παρουσία του. Έτσι, η ελεγχόμενη αναερόβια χώνευση, που λαμβάνει χώρα μέσα σε κλειστού τύπου εγκαταστάσεις, τους αναερόβιους χωνευτήρες, εξελίσσεται σε μια πολύ ελκυστική βιοχημική διεργασία για την εξουδετέρωση του ρυπαντικού φορτίου οργανικών υπολειμμάτων και αποβλήτων και έχει καθιερωθεί διεθνώς, εδώ και δεκαετίες, στην 'σταθεροποίηση' των ιλύων, που προκύπτουν, στις εγκαταστάσεις 'βιολογικού καθαρισμού' των αστικών περιοχών (Wellinger et al, 2013; Deublein, 2008). Μετά την ενεργειακή κρίση του 1973 η παραγωγή βιοαερίου εξαπλώθηκε σταδιακά και στο χώρο της κτηνοτροφικής παραγωγής και της βιομηχανίας τροφίμων, λόγω των πλούσιων σε οργανικές ύλες αποβλήτων τους. Το μεγάλο πλεονέκτημα της ως άνω βιοχημικής διεργασίας, η οποία βασίζεται στην δράση αναερόβιων μικροβιακών πληθυσμών, έγκειται στην δυνατότητα εξουδετέρωσης μεγάλων ρυπαντικών (οργανικών) φορτίων.

Ιδιαίτερης σημασίας για την διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών ανάπτυξης και ομαλής συμβίωσης των διαφόρων μικροβιακών πληθυσμών μέσα στους αναερόβιους χωνευτήρες (ΑΧ), είναι το ευνοϊκό φυσικο-χημικό περιβάλλον για τους μικροοργανισμούς, όπως το ελαφρά αλκαλικό pH (7-8), η μεσόφιλη (35-38°C) ή θερμόφιλη θερμοκρασία (50 - 55°C) και ο κατάλληλος συνδυασμός των α' υλών, ώστε να εξασφαλίζεται ο επιθυμητός λόγος C/N (25-30/1). Είναι λοιπόν πολύ σημαντικό να γίνεται σωστή επιλογή των α' υλών με βάση την καταλληλότητα και τη διαθεσιμότητά τους, καθώς και το κόστος προμήθειας και μεταφοράς τους στους ΑΧ (Γεωργακάκης, 2015; Deublein, 2008; Angelidaki et al, 2011). Τυπικά κάθε ισορροπημένο μίγμα υλών οργανικής προέλευσης είναι κατάλληλο για παραγωγή βιοαερίου. Η ανάγκη όμως διατροφής του ανθρώπου και των διατηρούμενων από αυτόν παραγωγικών ζώων για την κάλυψη των επισιτιστικών τους αναγκών, περιορίζει το πεδίο επιλογής α' υλών για την παραγωγή βιοαερίου και στρέφει το ενδιαφέρον προς τις άχρηστες για τους προαναφερθέντες καταναλωτές ύλες, που δεν είναι άλλες από τα οργανικά απόβλητα ή υποπροϊόντα της παραγωγικής διαδικασίας. Εξαίρεση συνιστά το ενσίρωμα αραβοσίτου, που συγχρόνως είναι και πολύτιμη ζωοτροφή.

Στα πλαίσια αυτά το ΠΥΚ το οποίο απομένει μετά το μηχανικό διαχωρισμό του ελαιοπυρηνολύματος θα μπορούσε να αποτελέσει την α' ύλη τροφοδοσίας ενός ΤΚΣ, μόνο του ή μαζί με άλλες οργανικές ύλες. Για το λόγο αυτό διεξήχθη σειρά πειραμάτων παραγωγής βιοαερίου από διάφορες α' ύλες, στις εγκαταστάσεις του στο ΓΠΑ την 3ετία 2014-2016, μεταξύ των οποίων και το ΠΥΚ. (Δρούγα κ.α.,2015). Τα αποτελέσματα του τελευταίου παρουσιάστηκαν στο 9° Εθνικό Συνέδριο της ΕΓΜΕ στη Θεσαλονίκη (Δρούγα κ.ά, 2015). Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την καταλληλότητα των υγρών αυτών για παραγωγή βιοαερίου. Όσον αφορά στην παραγωγή βιοαερίου από μίγματα αραιών αποβλήτων, όπως είναι συγκριτικά τα υγρά απόβλητα των 3φασικών ελαιοτριβείων παραπέμπουμε σε παλαιότερες ερευνητικές εργασίες μας.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής εφαρμογής το 2010 μηχανικού διαχωρισμού στο ελαιοπυρηνόλυμα διφασικού ελαιοτριβείου της Θάσου, μετά από αραίωσή του σε αναλογία 1:1 κατ'όγκον με νερό φαίνονται στον Πίνακα 1 (διαχωριστής τύπου κοχλία συμπίεσης).

Πίνακας 1. Αποτελέσματα εφαρμογής μηχανικού διαχωρισμού σε ελαιοπυρηνόλυμα 2φασικού ελαιοτριβείου στη Θάσο (Γεωργακάκης, 2010)

	Παράμετρος	**Εύρος τιμών**
	Υγρασία ελαιοπυρηνολύματος	66,4% (65,3 - 67,5)
	Παροχή διαχωριστή	4,6 t/h (4,1 - 5,0)
	Υγρασία διαχωρισθέντος στερεού	50,1% (43,5 - 56,6)
	Παροχή διαχωρισθέντος στερεού	2,1 t/h (1,2 - 3,0)
	Πυκνότητα διαχωρισθέντος στερεού	1,0 kg/L (0,8 - 1,2)
	Παροχή παχύρρευστου υγρού, χυλώδους μορφής	2,6 t/h (3,0 - 2,2)
	Σχέση στερεού / παχύρρευστο υγρό	56,5 (40-73) / 43,5 (60-27)

Από τα στοιχεία του Πίνακα 1 προκύπτει ότι το στερεό κλάσμα διαχωρισμού έχει ποσοστό υγρασίας, κατά μέσον όρο 50,1% (43,5 – 56,6), παραπλήσιο με το μέσο ποσοστό υγρασίας (48,1%) του ελαιοπυρήνα των 3φασικών ελαιοτριβείων (Γεωργακάκης, 2009), ποσοστό με το οποίο τον παραλαμβάνουν τα πυρηνελαιουργεία. Ποσοτικά το στερεό κλάσμα διαχωρισμού αντιστοιχεί στο 56,5% (40-73%) του συνόλου του ελαιοπυρηνολύματος ή στο 56,5 x 0,75 = 42,38% (30-55) του επεξεργαζόμενου ελαιοκάρπου στο ελαιοτριβείο, συγκριτικά με το 47,5% (40-55%) του ελαιοκάρπου στο 3φασικό ελαιοτριβείο. Το συμπέρασμα λοιπόν είναι πως το στερεό κλάσμα μηχανικού διαχωρισμού, καθίσταται εφάμιλλο με τον ελαιοπυρήνα των 3φασικών ελαιοτριβείων με την παρεμβολή του μηχανικού διαχωριστή και τυπικά θα μπορούσε να διατίθεται χωρίς πρόβλημα στα πυρηνελαιουργεία. Προκύπτει όμως το ΠΥΚ κατά την διαδικασία, όπως προαναφέρθηκε, το οποίο θα πρέπει να διαχειριστούν τα ίδια τα ελαιοτριβεία. Το ΠΥΚ από τα στοιχεία του ΠΙΝΑΚΑ1 παράγεται σε ποσότητα 43,5% (27- 60%) του ελαιοπυρηνολύματος ή 43,5 x 0,75 = 32,63% (20 – 45%) του επεξεργαζόμενου ελαιοκάρπου στο 2φασικό ελαιοτριβείο, έναντι του 110% περίπου υγρών αποβλήτων των 3φασικών ελαιοτριβείων. Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν με βάση τις παραδοχές, πως το 40-55% του επεξεργαζόμενου ελαιοκάρπου στα 3φασικά ελαιοτριβεία είναι ελαιοπυρήνας και το 70-80% στα 2φασικά ελαιοπυρηνόλυμα (Γεωργακάκης, 2009).

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό, πως ο <u>συνδυασμός 2φασικού ελαιοτριβείου και μηχανικού διαχωρισμού</u> συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Για να διαπιστωθεί κατά πόσο το ΠΥΚ είναι αποδοτικό στην παραγωγή βιοαερίου, εγκαταστάθηκε πείραμα με 4 εργαστηριακούς αναερόβιους χωνευτήρες (ΑΧ) το 2015, στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Γ. Κατασκευών, για την αριστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου από το υλικό αυτό (Δρούγα κ.ά.,2015). Τα τελικά αποτελέσματα συνοψίζονται στο Πίνακα 2. Από τα στοιχεία του Πίνακα 2 προκύπτει η ειδική παραγωγή βιοαερίου/μεθανίου από το μίγμα ΠΥΚ και απόβλητα πτηνοτροφείου αυγοπαραγωγής: ΕΠΒ = 1,8/2,5 = 0,72 Nm^3/ kg ΠΣ – ημέρα

και ΕΠΜ = 1,2/2,5 = 0,48 Nm^3/kg ΠΣ – ημέρα. Οι τιμές αυτές είναι πολύ ικανοποιητικές συγκρινόμενες με τιμές της βιβλιογραφίας, όπως υγρά απόβλητα πτηνο-κτηνοτροφικών μονάδων (ΕΠΜ = 0,2 – 0,3), τυρόγαλα (ΕΠΜ = 0,33), ενσίρωμα αραβοσίτου (ΕΠΒ = 0,6-0,7) (Deublein et al, 2008; Wellinger et al, 2013).

Πίνακας 2. Αποτελέσματα παραγωγής βιοαερίου από το ΠΥΚ.

ΟΟΦ (kg ΠΣ/$m^3_{ΧΩΝ}$-ημ)	ΟΠΒ ($Nm^3/m^3_{ΧΩΝ}$-ημ)	ΟΠΜ ($Nm^3/m^3_{ΧΩΝ}$-ημ)	ΠΥΧΠ (ημέρεμς)	Λόγος ΠΣ
2,5	1,8	1,2	38	7,3/1

Σημειώνεται εδώ πως το ΠΥΚ υποστηρίχτηκε στη διαδικασία χώνευσής του από υδατικό εκχύλισμα πτηνοτροφικών αποβλήτων στην βέλτιστη αναλογία $ΠΣ_{ΕΛ}/ΠΣ_{ΠΤΗΝ}$ = 7,3/1. Συνεπώς η συμμετοχή τους κρατήθηκε στο ελάχιστο δυνατό ποσοστό στο μίγμα τροφοδοσίας του ΑΧ και χρησιμοποιήθηκε το πυκνό εκχύλισμά τους με νερό μόνο για την σταθερότητα της αναεροβιας χώνευσης. Στην πράξη ο λόγος ΠΣ μπορεί να μειώνεται δηλ. να αυξάνει η συμμετοχή των αποβλήτων πτηνοτροφείου στο μίγμα τροφοδοσίας του ΑΧ για διάφορους πρακτικούς λόγους πχ ανάγκη απορρόφησης αποβλήτων πτηνοτροφείου για κοινωνικούς λόγους σε μια περιοχή ή για λόγους οικονομίας κλπ). Οποιαδήποτε όμως αύξηση της ποσότητας των πτηνοτροφικών αποβλήτων στο μίγμα τροφοδοσίας μειώνει την ποιότητα του βιοαερίου ανάλογα (αυξημένη συγκέντρωση θειούχων, μείωση του ποσοστού μεθανίου στο βιοαέριο κλπ). Για παρόμοιους λόγους μπορεί αντί του εκχυλίσματος των πτηνοτροφικών αποβλήτων να εισέρχονται αυτούσια μέσα στον ΑΧ με τις ανάλογες επιπτώσεις όμως και εδώ στην ποιότητα του βιοαερίου (Γεωργακάκης, 2017). Συνεπώς η παραγωγή βιοαερίου, μέσω της αναερόβιας χώνευσης, παρέχει από τη φύση της, όλα τα εχέγγυα που απαιτούνται για την ορθολογική διαχείριση του μετά από προεπεξεργασία του με μηχανικό διαχωρισμό και αραίωση 1:1 κατ'ογκον τουλάχιστο του ελαιοπυρηνολύματος, χωρίς να διαταράσσεται η σχέση των ελαιοτριβείων με τα πυρηνελαιουργεία, αφού τα τελευταία θα εξακολουθούν να λαμβάνουν κανονικά τον ελαιοπυρήνα τους στη συνήθη περιεκτικότητα σε υγρασία.

4. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΠΡΟΤΑΣΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΟΛΥΜΑΤΟΣ

Με βάση τα προαναφερθέντα κατασκευάστηκε το διάγραμμα ροής των προτεινόμενων εγκαταστάσεων για τη διαχείριση του ελαιοπυρηνολύματος των 2φασικών ελαιοτριβείων ως εναλλακτική λύση, έναντι των προτεινόμενων για τα 3φασικά ελαιοτριβεία, όπως φαίνεται επίσης στο ίδιο διάγραμμα ροής. Η πρόταση του Εργαστηρίου Γ. Κατασκευών για τα 3φασικά ελαιοτριβεία έχει ξεκινήσει από το Συνεταιρισμό Πεζών Ηρακλείου Κρήτης το 1986 και πήρε την τελική του μορφή το 2002, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος της νομαρχίας Σάμου (Γεωργακάκης, 2005), όπως παρουσιάζεται στο ως άνω διάγραμμα ροής. Η πρόταση του Εργ. Γ. Κατασκευών επικεντρώνεται στην δεξαμενή φυσικού διαχωρισμού με καθίζηση, χωρητικότητας 10 ημερών ($ΔΦΔΚ_{10}$). Η $ΔΦΔΚ_{10}$ χωρίζεται σε 3 διαμερίσματα για διευκόλυνση της παραλαβής του διαφυγόντος ελαιολάδου και αποτελεσματικότερη καθίζηση. Και εδώ η παραγωγή βιοαερίου από το 'βαρύ' προκύπτον ίζημα, αντίστοιχο του ΠΥΚ, αλλά αραιότερο, είναι η απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική εφαρμογή της μεθόδου.

Από την ΔΦΔΚ$_{10}$ το υπερκείμενο υγρό (χαμηλού οργανικού φορτίου) θα υπερχειλίζει προς μια τελική αποθηκευτική δεξαμενή, την ΑΧΑΔ ΙΙ στο διάγραμμα ροής και από εκεί, σύμφωνα με την νέα ΚΥΑ θα διατίθεται για υδρολίπανση ελαιώνων. Η επιφανειακή επιπλέουσα ελαιώδης στρώση θα περνά από τους κατακόρυφους διαχωριστές του ελαιοτριβείου και μετά την αφαίρεση του διαφυγόντος ελαιολάδου θα επιστρέφει στην ΔΦΔΚ$_{10}$ για να καταλήξει τελικά και αυτή στην ΑΧΑΔ ΙΙ. Το απομένον ίζημα στον πυθμένα θα αντλείται προς τον πλησιέστερο ΤΚΣ παραγωγής βιοαερίου (Markou, 2009; Γεωργακάκης, 2015). Πέραν των δύο εναλλακτικών προτάσεων με συμμετοχή των ΤΚΣ, υπάρχει και τρίτη πρόταση συνύπαρξης 2φασικών και 3φασικών ελαιοτριβείων σε μια περιοχή, όπου συμμετέχει και το πυρηνελαιουργείο (Markou, 2009) με μικρότερες όμως πιθανότητες πρακτικής εφαρμογής του.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D.J., Plugge, C.M., Stams, A.J.M. 2011. Biomethanation and its potential. in: *Methods Enzymol.*, (Eds.) C.R. Amy, W.R. Stephen, Vol. Volume 494, Academic Press, pp. 327-351.

Deublein, D., Steinhauser, A. 2008. *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. *Second ed*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, GERMANY, 443 p.

Γεωργακάκης Δ., Δρούγα, Μ. 2010. *'Τα 2φασικά ελαιοτριβεία βρίσκουν επί τέλους το...'βηματισμό' τους ;* Περιοδικό Ελιά & Ελαιόλαδο, σελ.50-51

Γεωργακάκης Δ., 2015. *'ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ,* Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τεύχος Νο 2, Έκδοση Γ.Π.Α., Αθήνα.

Γεωργακάκης, Δ,. Δρούγα, Μ., & Κωσταρά, Ξ.,2017. (Πρόγραμμα Εργ. Γ. Κατ. σε εξέλιξη)

Δρούγα Μ., Μάρκου Γ., Γκεσούλη, Ε., Βασταρούχα Ε., Γεωργακάκης Δ., 2015. *Παραγωγή βιοαερίου από πυκνά εκχυλίσματα στερεών γεωργο-κτηνοτροφικών αποβλητων με πρόβλεψη διαχείρισης των υγρών εκροών.* Πρακτικά 9^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Ε.Γ.Μ.Ε., Θεσσαλονίκη, σελ. 589-596.

Georgakakis, D., 2005. '*Olive oil wastewatr production an handling in Greece'.* Proceedings of the Congress on Agricltural Recycling of Olive Oil Mill Wastewater.Faculta di Agraria, universita egli Studi 'Meditrranea', Reggio Calabria, ITALY.

Ford, M., Fleming, R. 2002.*'Mechanical solid-liqid separation of livestock manure. A Literature review'.* Ridgetown College, University of Guelph, Ridgetown, Ontario, CANADA.

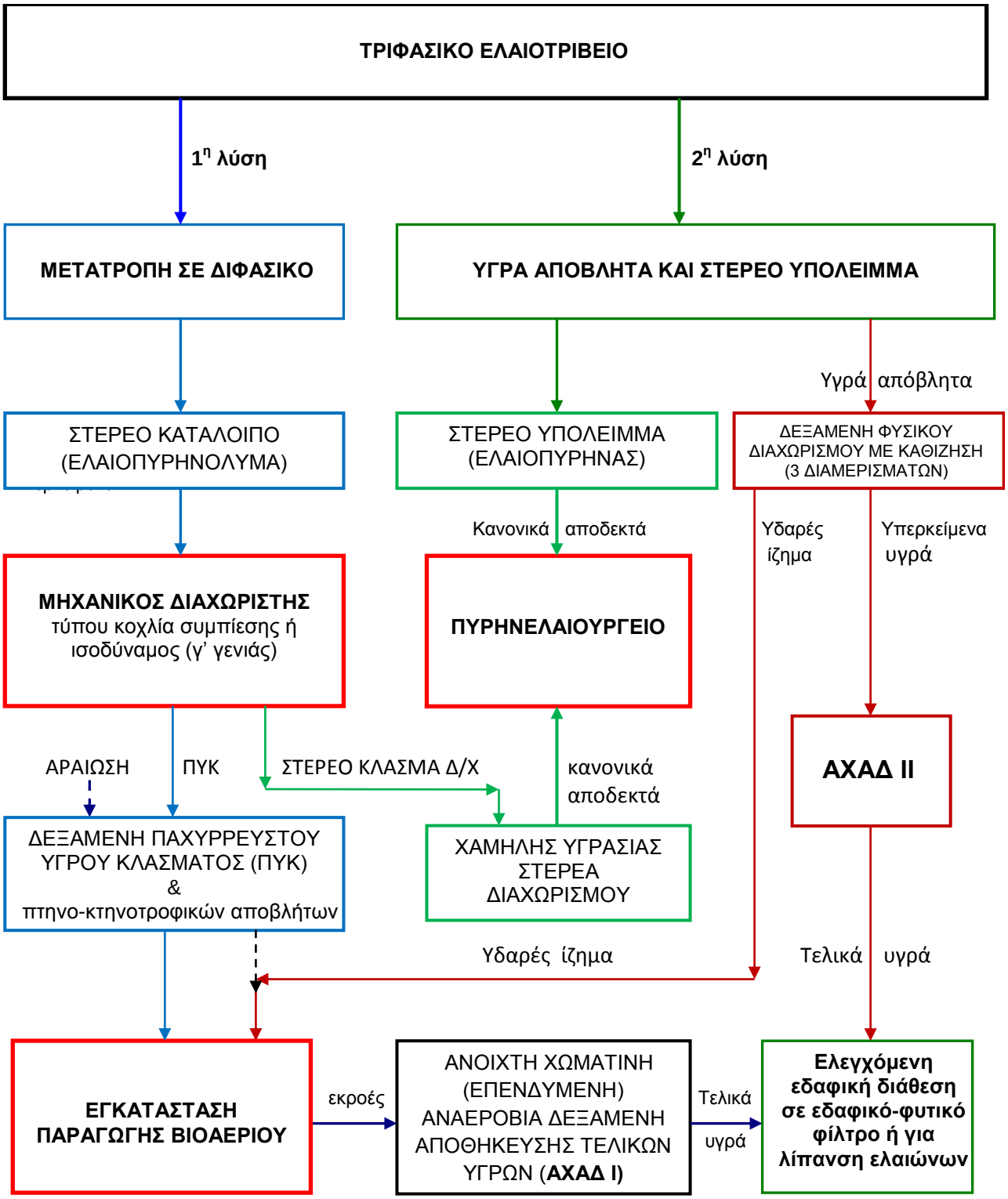
Hjorth, M., Christensen, K.V., Christensen, M.L., Sommer, S.G. 2010. *SEffectolid*–liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. Agron. Sustain. Dev., 30, 153-180.

Lo, K.V., Bulley, N.R., Liao, P.H., Whitehead, A.J. 1983. The effect of solids-separation pretreatment on biogas production from dairy manure. Agricultural Wastes, 8, 155-165.

Markou, G., Georgakakis, D., Plagou, K., Salakou, G., Christopoulou, N., 2010. *Balanced waste management of 2- and 3- phase olive oil millsin relation to the seed extraction plant'.*Terrestrial and Aquatic Environmental Toxicology, 4, 109-112.

Niaounakis, M., Halvadakis, C., P., 2006. *'Olive processing waste management'. Litratue Review and Patent Survey 2nd Edition, Pergamon, Amsterdam*

Wellinger, A,. Murphy, A., Baxter, D, 2013. *The biogas handbook.* Woodhead publihing series in Energy. Woodhead publishing Limited. Philadelphia, PA 19102-3406, USA, 476 p.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1. Διάγραμμα ροής των εγκαταστάσεων των προτεινόμενων τεχνικών λύσεων για την διαχείριση των αποβλήτων των 2φασικών και 3φασικών ελαιοτριβείων

ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΜΕΣΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΤΡΟΦΙΚΗΣ ΜΕΘΑΝΟΓΕΝΕΣΗΣ

Π.Γ. Κούγιας✉ & Ε. Αγγελιδάκη

Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering, Miljøvej Bld. 113, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark,

✉*panak@env.dtu.dk*

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αξιολόγησε την αποτελεσματικότητα δύο διαφορετικών διατάξεων αντιδραστήρων όσον αφορά την ex-situ αναβάθμιση και ενίσχυση παραγωγής βιοαερίου. Επιπλέον σκοπός ήταν η μελέτη της μικροβιακής κοινότητας η οποία συμμετείχε στην διαδικασία της αναερόβιας αποικοδόμησης. Βρέθηκε ότι η περιεκτικότητα σε μεθάνιο στο αναβαθμισμένο αέριο της πιο αποτελεσματικής διάταξης ήταν μεγαλύτερο από 98%, επιτρέποντας την εκμετάλλευση του ως υποκατάστατο φυσικού αερίου. Παράλληλα αποδείχθηκε ότι η εφαρμογή συστήματος επανακυκλοφορίας του αερίου αποτελεί στρατηγικό σημείο στο σχεδιασμό της διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί για την αναβάθμιση του βιοαερίου, καθώς βελτιώνει την αποδοτικότητα της διαδικασίας, λόγω αύξησης της μεταφοράς μάζας αερίου-υγρού. Ανάλυση του μικροβιακού πληθυσμού έδειξε ότι ο κυρίαρχος μεθανογόνος μικροοργανισμός ήταν ο *Methanothermobacter thermautotrophicus* ο οποίος είναι ικανός να σχηματίσει βιο-υμένα στην επιφάνεια του συστήματος έγχυσης αερίων μέσα στον αντιδραστήρα.

Λέξεις κλειδιά: Αναβάθμιση βιοαερίου, βιομεθάνιο, υδρογονοτροφική, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας

BIOLOGICAL SYSTEMS FOR BIOGAS UPGRADING VIA HYDROGENOTROPHIC METHANOGENESIS

P.G. Kougias✉ & I. Angelidaki

Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering, Miljøvej Bld. 113, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark,

✉*panak@env.dtu.dk*

ABSTRACT

The current work evaluated the effectiveness of two different reactor assemblies with regard to ex-situ biogas upgrading and enhancement. Additional aim of the study was to elucidate the microbial community participating in the process of anaerobic degradation. It was found that the methane content in the upgraded gas of the most efficient device was greater than 98%, allowing it to be exploited as a natural gas substitute. At the same time, it has been demonstrated that the implementation of a gas recirculation system is a strategic point in the design of the device to be used for the upgrading of biogas as it improves process efficiency due to increased gas-liquid mass transfer. Analysis of the microbial population showed that the predominant methanogenic microorganism was Methanothermobacter thermautotrophicus and it was found that the specific ancients are capable of forming biofilms on the surface of the gas injection system within the reactor.

Keywords: Biogas upgrading, biomethane, hydrogenotrophic, renewable energy

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το βιοαέριο χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμο για συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, στις μέρες μας υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση του βιοαερίου ως υποκατάστατο του φυσικού αερίου. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού είναι απαραίτητη η αύξηση της θερμογόνου ισχύος του βιοαερίου με απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα. Ως εκ τούτου, με τον όρο "αναβάθμιση βιοαερίου" καλούμε τη διαδικασία με την οποία το τελικώς παραγόμενο αέριο έχει υψηλότερη συγκέντρωση μεθανίου σε σύγκριση με το «ακατέργαστο» βιοαέριο, κυρίως λόγω της απομάκρυνσης ή μετατροπής του διοξειδίου του άνθρακα σε μεθάνιο (και συμπληρωματικά λόγω της απομάκρυνσης υδρατμών, υδρόθειου και σιλοξάνιου) (Kougias et al., 2017). Σε περίπτωση που η συγκέντρωση μεθανίου στο αναβαθμισμένο βιοαέριο ακολουθεί τα πρότυπα του φυσικού αερίου, τότε το τελικό προϊόν ονομάζεται βιομεθάνιο (Kougias et al., 2017).

Σήμερα, αρκετές εμπορικές ή ημι-εμπορικές τεχνολογίες αναβάθμισης βιοαερίου είναι διαθέσιμες. Πρόσφατη κοινή μελέτη από το IEA Bioenergy Task 40 και 37 κατέγραψε τη λειτουργία περίπου 280 μονάδων αναβάθμισης βιοαερίου σε παγκόσμιο επίπεδο στο τέλος του έτους 2012 (Thrän et al., 2014). Οι εμπορικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την αναβάθμιση του βιοαερίου είναι κυρίως απορροφητικές και προσροφητικές διεργασίες, καθώς και διεργασίες που βασίζονται σε διήθηση μέσω μεμβρανικών φίλτρων ή κρυογονικό διαχωρισμό (Sun et al., 2016; Wu et al., 2015). Παρόλα αυτά, αυτές οι υφιστάμενες εμπορικές τεχνολογίες αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και το λειτουργικό κόστος (Sun et al., 2015), οι οποίες μπορεί να προσθέσουν σημαντικό κόστος στο αναβαθμισμένο αέριο.

Μια ελκυστική εναλλακτική λύση για την αναβάθμιση του βιοαερίου είναι η βιολογική μέθοδος μέσω της υδρογονοτροφικής μεθανογένεσης. Σε αυτή την τεχνολογία, το CO_2 και το H_2 μπορούν να μετατραπούν βιολογικά σε μεθάνιο με τη δράση των αυτόχθονων υδρογονοτροφικών μεθανογόνων χωρίς οποιαδήποτε πρόσθετη εισροή ενέργειας σύμφωνα με την εξίσωση. (1)

$$4\,H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2\,H_2O \qquad \text{(Εξίσωση 1)}$$

Η παρούσα εργασία αξιολόγησε την αποτελεσματικότητα δύο διαφορετικών διατάξεων αντιδραστήρων όσον αφορά την ex-situ αναβάθμιση και ενίσχυση παραγωγής βιοαερίου. Στην παρούσα μέθοδο, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα εγχέονται σε βιοαντιδραστήρες και τελικώς μετατρέπονται βιολογικά σε μεθάνιο μέσω υδρογονοτροφικής μεθανογένεσης. Επιπλέον σκοπός ήταν η μελέτη της μικροβιακής κοινότητας, μέσω αλληλούχισης νέας γενιάς υψηλής απόδοσης του γονιδίου 16S rRNA, η οποία συμμετείχε στην διαδικασία της αναερόβιας αποικοδόμησης. Πρέπει να τονιστεί ότι στην παρούσα έρευνα δεν χρησιμοποιήθηκε συνθετικό διάλυμα για την παροχή θρεπτικών στοιχείων στη μικροβιακή κοινότητα των αντιδραστήρων. Αντιθέτως, όλα τα απαραίτητα μακροστοιχεία και μικροστοιχεία χορηγήθηκαν από την αξιοποίηση χωνεμένων αποβλήτων προερχόμενων από μονάδες παραγωγής βιοαερίου.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Χημική σύσταση αρχικού μολύσματος και θρεπτικού διαλύματος

Στην αρχή του πειράματος όλοι οι αντιδραστήρες εμβολιάστηκαν με θερμόφιλο μόλυσμα που προήλθε από τη μονάδα παραγωγής βιοαερίου πλήρους κλιμακας Snertinge, Δανία. Μετά την άφιξη του μολύσματος στο εργαστήριο και πριν την πλήρωσή του στους αντιδραστήρες, το μόλυσμα κοσκινίστηκε χρησιμοποιώντας ένα πλαστικό δίχτυ (2 mm) για

να αφαιρεθούν υπολείμματα μεγάλων διαστάσεων (π.χ. κλαδιά) που μπορούν να μπλοκάρουν τους σωλήνες της αντλίας και στη συνέχεια αποθηκεύτηκε στους -20 ° C. Το κατεψυγμένο μόλυσμα αποψύχθηκε στους 4 ° C για 2-3 ημέρες πριν από τη χρήση του ως θρεπτικό μέσο στους αντιδραστήρες. Η χημική σύσταση του μολύσματος δίδεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση αρχικού μολύσματος και θρεπτικού διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα.

Παράμετροι	**Τιμές**
ΟΣ (%)	3.4 ± 0.0
ΠΣ (%TS)	2.0 ± 0.0
pH	8.00 ± 0.08
Πτητικά Λιπαρά Οξέα (g/L)	0.37 ± 0.03

2.2 Πειραματική διάταξη αντιδραστήρων

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η απόδοση δύο διαφορετικών διατάξεων θερμόφιλων αντιδραστήρων. Ο πρώτος αντιδραστήρας (Α1) ήταν συνεχούς ροής και πλήρους ανάμιξης, ενώ ο δεύτερος αντιδραστήρας (Α2) ήταν ανοδικής ροής. Ο λειτουργικός όγκος κάθε αντιδραστήρα ήταν 1.2 L. Για την ex-situ αναβάθμιση του αερίου, οι αντιδραστήρες τροφοδοτούνταν με μίγμα αερίων 23:15:62 (%) που αντιστοιχούσε σε CH_4:CO_2:H_2. Η έγχυση του μίγματος αερίων μέσα σε κάθε αντιδραστήρα γινόταν με χρήση δύο ανοξείδωτων ψεκαστήρων, οι οποίοι ήταν εμβαπτισμένοι στην υγρή φάση των αντιδραστήρων. Ο ρυθμός της ροής τροφοδοσίας μίγματος αερίου ήταν 3 L / L-αντιδραστήρα /ημέρα. Προκειμένου να αξιολογηθεί η μεταφορά μάζας αερίου-υγρού, εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικοί ρυθμοί επανακυκλοφορίας του εσωτερικού αερίου των αντιδραστήρων. Έτσι, το πείραμα χωρίστηκε σε δύο περιόδους κατά τις οποίες ο ρυθμός ροής .ήταν 4 L / h (Περίοδος Ι) και 12 L / h (Περίοδος ΙΙ).Ο Α1 ήταν εξοπλισμένος και με σύστημα ανάδευσης για την για την πλήρη ανάμειξη του περιεχόμενού του.

2.3 Μέθοδος προσδιορισμού του δυναμικού παραγωγής μεθανίου από το θρεπτικό διάλυμα

Ο προσδιορισμός του δυναμικού παραγωγής μεθανίου διεξήχθη σύμφωνα με το πρωτόκολλο που περιγράφεται από τους Angelidaki et al. (2009). Αντιδραστήρες διαλείποντος έργου με λειτουργικό όγκο 200 mL χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα. Μετά την πλήρωση με υπόστρωμα, οι αντιδραστήρες τοποθετήθηκαν σε κλίβανο θερμοκρασίας (54 ± 1°C). Η μέτρηση της παραγόμενης ποσότητας μεθανίου γινόταν καθημερινά μέχρι την ολοκλήρωση της αναερόβιας διεργασίας.

2.4 Αναλυτικές μέθοδοι και υπολογισμοί

Η συγκέντρωση ολικών στερεών (ΟΣ) και πτητικών στερεών (ΠΣ) μετρήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται από τον APHA (2005). Η παραγωγή μεθανίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας αέριο χρωματογράφο (Shimadzu GC-8A, Tokyo-Japan) όπως έχει περιγραφεί από τους Kougias et al. (2014). Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των λιπαρών πτητικών οξέων έγινε με τη χρήση αέριου χρωματογράφου (Shimadzu GC-2010, Kyoto, Japan), εξοπλισμένου με ανιχνευτή ιονισμού φλόγας (Flame Ionisation Detector, FID) σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται από τους Kougias και συνεργάτες (2015). Όλες οι αναλύσεις έγιναν σε τρεις επαναλήψεις. Ο υπολογισμός του ρυθμού παραγωγής μεθανίου

που ήταν ισοδύναμος με τη συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων βασίστηκε στις παρακάτω αντιδράσεις μετατροπής:

Οξικό οξύ	CH_3COOH	→	$CH_4 + CO_2$
Προπιονικό οξύ	$CH_3CH_2COOH + 0.5\ H_2O$	→	$1.75\ CH_4 + 1.25\ CO_2$
Βουτυρικό οξύ	$CH_3CH_2CH_2COOH + H_2O$	→	$2.5\ CH_4 + 1.5\ CO_2$
Βαλερικό οξύ	$CH_3(CH_2)_3COOH + 1.5\ H_2O$	→	$3.25\ CH_4 + 1.75\ CO_2$

Τέλος, η συγκέντρωση του μεθανίου που περιεχόταν στο τελικό αέριο εκροής ($V_{CH_4,OUT}$) και στο αέριο τροφοδοσίας $V_{CH_4,IN}$, το δυναμικό παραγωγής αερίου από την αναερόβια αποικοδόμηση του θρεπτικού διαλύματος $V_{CH_4,BMP}$ και το ισοδύναμο μεθανίου από τη μετρούμενη συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων $V_{CH_4,VFA}$ σρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ποσότητας μεθανίου που προέκυψε αποκλειστικά και μόνο από την μετατροπή των H_2 και CO_2 ($V_{CH_4,UPGRADE}$) όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.

$$V_{CH_4,UPGRADE} = V_{CH_4,OUT} - V_{CH_4,IN} - \left(V_{CH_4,BMP} - V_{CH_4,VFA}\right) \quad \text{(Εξίσωση 2)}$$

2.5. Προσδιορισμός της σύνθεσης της μικροβιακής κοινότητας

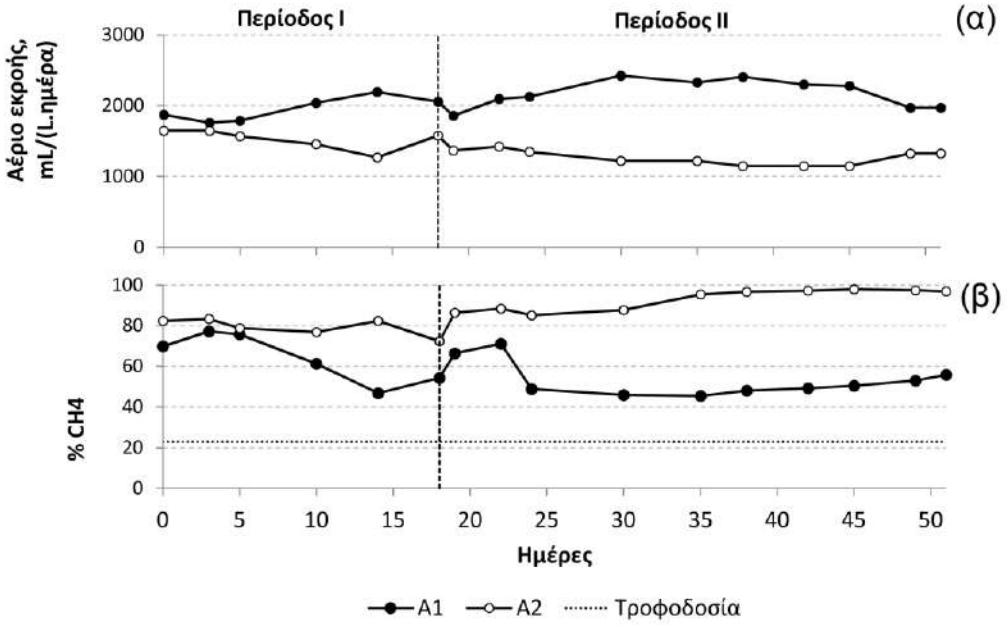
Δείγματα ελήφθησαν από όλους τους εξεταζόμενους αντιδραστήρες στο τέλος του πειράματος και το γενετικό υλικό (DNA) απομονώθηκε χρησιμοποιώντας το PowerSoil DNA Isolation Kit (MO BIO laboratories Inc., Carlsbad, CA USA) και ακολουθώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή με μικρές διαφοροποιήσεις. Η ταυτοποίηση και ο χαρακτηρισμός της μικροβιακής κοινότητας των αντιδραστήρων επιτεύχθηκε με τη χρήση αλληλούχισης υψηλής απόδοσης (high throughput sequencing) MiSeq platform (Illumina). Η ανάλυση ου γονιδίου 16S rRNA έγινε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα CLC Workbench software (V.8.0.2) με την επέκταση Microbial genomics module (QIAGEN). Η μέθοδος της ανάλυσης των αποτελεσμάτων περιγράφεται εκτενώς σε προηγούμενη εργασία των συγγραφέων (Kougias et al., 2017)

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Σύγκριση αποδοτικότητας στην αναβάθμιση της ποιότητας του βιοαερίου

Κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου, στην οποία ο ρυθμός επανακυκλοφορίας αερίου ρυθμίστηκε στα 4 L / h, καταγράφηκε αύξηση στην συγκέντρωση του CH_4 στο βιοαερίο εκροής και στους δύο τύπους αντιδραστήρων που εξετάστηκαν (Σχήμα 1). Με βάση το ισοδύναμο CH_4 από τη συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων, αποδείχθηκε ότι οι συνθήκες προσθήκης H_2 που εφαρμόστηκαν και ο ρυθμός επανακυκλοφορίας αερίου δεν ανέστειλαν τη διεργασία μετατροπής CO_2 σε CH_4. Συγκεκριμένα, το δυναμικό παραγωγής μεθανίου από την αναερόβια αποικοδόμηση του θρεπτικού διαλύματος ανήλθε σε περισσότερο από το 86% του θεωρητικού μέγιστου, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πείραμα διαλείποντος έργου (παραγωγή μεθανίου 2.5 ± 0.3 mL CH_4 / mL υπόστρωμα). Η πιο αποτελεσματική αναβάθμιση βιοαερίου επιτεύχθηκε στον αντιδραστήρα A2 καθώς το αέριο εκροής περιείχε CH_4 σε ποσοστό 74% (Σχήμα 1). Λαμβάνοντας υπόψη τη σύνθεση αερίου της τροφοδοτούμενης πρώτης ύλης (23% CH_4: 15%: $C0_2$: 62%: H_2), αποδείχθηκε ότι το 84% της ποσότητας του H_2 που προστέθηκε στον αντιδραστήρα καταναλώθηκε. Όσον αφορά τον αντιδραστήρα A1, η τελική περιεκτικότητα CH_4 στο τελικό αέριο εκροής έφθασε το 54%, ενώ η συγκέντρωση του CO_2 μειώθηκε από 15% σε 7.8% και το H_2 μειώθηκε από 62 σε 38% (Σχήμα 1). Η ελλιπής βιομετατροπή των H_2 και CO_2 οφειλόταν κυρίως στην περιορισμένο ρυθμό μεταφοράς μάζας αερίου-υγρού που προκαλείται από τη χαμηλή διαλυτότητα του H_2 στο υγρό μέσο. Προηγούμενη έρευνα

έδειξε ότι η αύξηση της ταχύτητας ανάδευσης σε αντιδραστήρες συνεχούς ροής οδηγεί σε υψηλότερο ρυθμό παραγωγής μεθανίου καθώς το H_2 κατανέμεται καλύτερα στο υγρό υπόστρωμα επιτρέποντας τη χρήση του από τους υδρογονοτροφικούς μικροοργανισμούς (Luo and Angelidaki, 2012). Παρόλα αυτά, η βέλτιστη ταχύτητα ανάδευσης που οδηγεί στην πιο αποτελεσματική αξιοποίηση H_2 μπορεί να μην αντιστοιχεί στη μέγιστη επιτεύξιμη ταχύτητα ανάμιξης από ένα αναδευτήρα (Szuhaj et al., 2016). Η αύξηση του ρυθμού επανακυκλοφορίας των αερίων σε 12 L / h στη δεύτερη πειραματική περίοδο οδήγησε σε περαιτέρω αύξηση της αναβάθμισης του βιοαερίου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με μια πρόσφατη μελέτη που αναφέρει ότι η επανακυκλοφορία του αερίου αποτελεί βασική παράμετρο της διαδικασίας αναβάθμισης του βιοαερίου καθώς παρατείνει τον χρόνο παραμονής του μεγιστοποιώντας την πρόσληψη H_2 από τους μεθανογόνους (Bassani et al., 2016). Συγκεκριμένα, στον αντιδραστήρα A2, η περιεκτικότητα CH_4 στο βιοαέριο στο τέλος της περιόδου ήταν 98%. Η ποιότητα του αναβαθμισμένου βιοαερίου είναι σε τέτοιο επίπεδο που επιτρέπει τη χρήση του ως υποκατάστατο του φυσικού αερίου. Για τον αντιδραστήρα A2 η περιεκτικότητα σε CH_4 στο τελικό βιοαέριο αυξήθηκε προσωρινώς σε ποσοστό 79% και ακολούθως υποτροπίασε και έφτασε στα ίδια επίπεδα όπως στο τέλος της πρώτης περιόδου. Δεδομένου ότι ο ρυθμός επανακυκλοφορίας αερίου ήταν υψηλός (δηλ. 80 φορές μεγαλύτερος από το ρυθμό τροφοδοσίας αερίου), η ανεπαρκής αποτελεσματικότητα αναβάθμισης του βιοαερίου μπορεί να αποδοθεί σε άλλους λόγους που οδήγησαν σε περιορισμένο ρυθμό μεταφοράς μάζας αερίου-υγρού. Έτσι, μπορεί να υποτεθεί ότι ο εμβαπτισμένος ψεκαστήρας που τοποθετήθηκε στον A1 δεν ήταν ικανός να διαλύσει επαρκώς το αέριο τροφοδοσίας στην υγρή φάση του αντιδραστήρα. Σύμφωνα με μια προηγούμενη μελέτη στην οποία χρησιμοποιήθηκε ψεκαστήρας με διατομή οπών μικρότερου μεγέθους, η μέγιστη δυνατή αύξηση του βιοαερίου έφτασε το 92% (Bassani et al., 2015). Συνεπώς, για να αυξηθεί ο ρυθμός μετατροπής H_2 και CO_2 σε CH_4 θα πρέπει να εφαρμοστούν επιπρόσθετες ενέργειες για να επιτευχθεί καλύτερη μεταφορά αερίου H_2-υγρού, όπως για παράδειγμα η εφαρμογή πολλαπλών ψεκαστήρων ή εναλλακτικά η έγχυση του αερίου μίγματος θα πρέπει να παρέχεται από ψεκαστήρες με μικρότερα μεγέθη οπών.



Σχήμα 1. Ποσότητα αερίου εκροής και ποσοστό CH_4 στο τελικό βιοαέριο.

3.2. Σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας

Το ποσοστό του βακτηριακού πληθυσμού στους αναερόβιους αντιδραστήρες ήταν κατά μέσο όρο 92% της συνολικής μικροβιακής κοινότητας. Σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (Campanaro et al., 2016; Sun et al., 2013), ο μικροβιακός πληθυσμός αποτελείται κυρίως από μικροοργανισμούς που ανήκουν στα φύλα *Firmicutes* (55.89%), *Bacteroidetes* (19.19%) και *Proteobacteria* (11.41%). Αντίθετα, μέλη των *Actinobacteria*, OP9, *Spirochaetes*, *Synergistetes* και *Tenericutes* απαντήθηκαν σε χαμηλότερες αναλογίες. Ο πιο άφθονος μικροοργανισμός ανήκε στην ταξινομική ομάδα MBA08 της κλάσης *Clostridia*. Μέλη της MBA08 έχουν βρεθεί σε προηγούμενες μελέτες που διεξήχθησαν σε μεσόφιλους αντιδραστήρες βιοαερίου με αυξημένα επίπεδα αμμωνίας (Müller et al., 2016) και σε θερμόφιλους αντιδραστήρες που επεξεργάζονταν κτηνοτροφικά απόβλητα και άχυρο (L. Sun et al., 2015). Παρόλα αυτά, στην παρούσα έρευνα η κατάσταση λειτουργίας των αντιδραστήρων ήταν εντελώς διαφορετική. Το θρεπτικό υλικό δεν ήταν πλούσιο σε αμμωνία και η πηγή άνθρακα προήλθε είτε από εξωτερικώς παρεχόμενο CO_2 είτε μερικώς από φιλτραρισμένο χωνεμένο απόβλητο (δηλαδή απουσίαζαν ίνες ή φυτικοί ιστοί από το υπόστρωμα τροφοδοσίας). Επομένως, η παρουσία αυτού του μικροοργανισμού και ειδικά σε μεγάλη αφθονία σε συστήματα υδρογονοτροφικής μεθανογένεσης είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Διεξάγοντας μία επιπλέον ανάλυση (BLASTn) χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων NCBI, το *Clostridia* sp. 1 ήταν 90% παρόμοιο με το πρόσφατα απομονωμένο αναερόβιο βακτήριο *Hydrogenispora ethanolica* (Liu et al., 2014). Ωστόσο, το αναφερόμενο επίπεδο ομοιότητας στην αλληλουχία ήταν μικρότερο σε σύγκριση ακόμα και με τα όρια που ορίζουν ταξινόμηση ενός μικροοργανισμού σε συγκεκριμένο γένος (> 94,5%) (Yarza et al., 2014). Αυτό δείχνει ότι αυτή η συγκεκριμένη ταξινομική μονάδα ανήκει σε άγνωστο είδος μικροοργανισμών που δεν έχει καταχωρηθεί σε δημόσια γονιδιωματική βάση δεδομένων. Δυστυχώς, η αλληλούχιση του γονιδίου 16S rRNA έχει μόνο φυλογενετική και ταξινομική αξία και δεν μπορεί να παράσχει προβλέψιμες πληροφορίες σχετικά με τα γονιδιωματικά χαρακτηριστικά και το λειτουργικό ρόλο του *Clostridia* sp. 1. Ωστόσο, η ταυτόχρονη αξιοσημείωτα υψηλή αφθονία του *Clostridia* sp. 1 μαζί με το υδρογονοτροφικό μεθανογόνο *Methanothermobacter thermautotrophicus* υποδεικνύει την ύπαρξη πιθανής συντροφικής αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτών των δύο μικροοργανισμών.

Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί αντιπροσώπευαν το 8% της συνολικής μικροβιακής κοινότητας. Είναι ενδιαφέρον ότι το πλέον κυρίαρχο μεθανογόνο αρχαίο ήταν κοινό και στους δύο αντιδραστήρες και ταυτοποιήθηκε ως *Methanothermobacter thermautotrophicus* αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 97% της συνολικής κοινότητας των μεθανογόνων. Επιπλέον, αναλύοντας τη μικροβιακή κοινότητα από τον βιο-υμένα που σχηματίστηκε πάνω στην επιφάνεια των ψεκαστήρων βρέθηκε ότι αποτελείται αποκλειστικά από το συγκεκριμένο μεθανογόνο μικροοργανισμό και από το βακτήριο *Clostridia* sp. 1, υποδηλώνοντας την ικανότητα του *M. thermautotrophicus* να συμμετέχει στη δημιουργία βιο-υμενων. Ο δεύτερος πιο άφθονος μεθανογόνος που βρέθηκε στους αντιδραστήρες ήταν ένας άλλος υδρογονοτροφικός μικροοργανισμός που ανήκει στο γένος *Methanoculleus* και σύμφωνα με τη βάση δεδομένων NCBI αναγνωρίστηκε ως *Methanoculleus palmolei* (100% ομοιότητα αλληλουχίας). Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας συμφωνούν με προηγούμενες μελέτες που εντόπισαν ότι μικροοργανισμοί που ανήκουν στα *Methanothermobacter* sp. και/ ή *Methanoculleus* sp. είναι κυρίαρχοι σε συστήματα αναβάθμισης βιοαερίου (Bassani et al., 2015; Treu et al., 2016).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία έρευνα απέδειξε την επιτυχή ex-situ αναβάθμιση του βιοαερίου που είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή τελικού αερίου με ποσοστό CH_4 > 98%. Διαπιστώθηκε επίσης ότι ο αυξημένος ρυθμός επανακυκλοφορίας αερίου ενίσχυσε την απόδοση αναβάθμισης του βιοαερίου. Ανάλυση του μικροβιακού πληθυσμού μέσω αλληλούχισης υψηλής του γονιδίου 16S rRNA έδειξε ότι οι πιο άφθονοι μικροοργανισμοί είναι ακαλλιέργητοι και για το λόγο αυτό δεν έχουν καταχωρηθεί σε δημόσιες γονιδιωματικές βάσεις δεδομένων. Αυτό το γεγονός αποδεικνύει ότι η μικροβιακή κοινότητα των συστημάτων βιολογικής αναβάθμισης του βιοαερίου κυριαρχείται από άγνωστα βακτήρια. Τέλος, όσον αφορά των πληθυσμό των αρχαίων, η ταξινομική μονάδα που ταυτοποιήθηκε ως *Methanothermobacter thermautotrophicus* ήταν η κυρίαρχη έναντι των υπόλοιπων μεθανογόνων και βρέθηκε ότι τα συγκεκριμένα αρχαία είναι ικανά να σχηματίσουν βιο-υμένα στην επιφάνεια του συστήματος έγχυσης αερίων (H_2 και CO_2) μέσα στον αντιδραστήρα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Angelidaki, I., Alves, M.M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J.L., Guwy, A.J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., Van Lier, J.B., 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. Water Sci. Technol. 59, 927–934.

APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington, DC, USA.

Bassani, I., Kougias, P.G., Angelidaki, I., 2016. In-situ biogas upgrading in thermophilic granular UASB reactor: key factors affecting the hydrogen mass transfer rate. Bioresour. Technol. 221, 485–491.

Bassani, I., Kougias, P.G., Treu, L., Angelidaki, I., 2015. Biogas Upgrading via Hydrogenotrophic Methanogenesis in Two-Stage Continuous Stirred Tank Reactors at Mesophilic and Thermophilic Conditions. Environ. Sci. Technol. 49, 12585–12593.

Campanaro, S., Treu, L., Kougias, P.G., De Francisci, D., Valle, G., Angelidaki, I., 2016. Metagenomic analysis and functional characterization of the biogas microbiome using high throughput shotgun sequencing and a novel binning strategy. Biotechnol. Biofuels 9, 26.

Kougias, P.G., Boe, K., Einarsdottir, E.S., Angelidaki, I., 2015. Counteracting foaming caused by lipids or proteins in biogas reactors using rapeseed oil or oleic acid as antifoaming agents. Water Res. 79, 119–127.

Kougias, P.G., Boe, K., Tsapekos, P., Angelidaki, I., 2014. Foam suppression in overloaded manure-based biogas reactors using antifoaming agents. Bioresour. Technol. 153, 198–205.

Kougias, P.G., Treu, L., Benavente, D.P., Boe, K., Campanaro, S., Angelidaki, I., 2017. Ex-situ biogas upgrading and enhancement in different reactor systems. Bioresour. Technol. 225, 429–437.

Liu, Y., Qiao, J.-T., Yuan, X.-Z., Guo, R.-B., Qiu, Y.-L., 2014. Hydrogenispora ethanolica gen. nov., sp. nov., an anaerobic carbohydrate-fermenting bacterium from anaerobic sludge. Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 64, 1756–1762.

Luo, G., Angelidaki, I., 2012. Integrated biogas upgrading and hydrogen utilization in an anaerobic reactor containing enriched hydrogenotrophic methanogenic culture. Biotechnol. Bioeng. 109, 2729–2736.

Müller, B., Sun, L., Westerholm, M., Schnürer, A., 2016. Bacterial community composition and fhs profiles of low- and high-ammonia biogas digesters reveal novel syntrophic acetate-oxidising bacteria. Biotechnol. Biofuels 9, 48. doi:10.1186/s13068-016-0454-9

Sun, L., Müller, B., Schnürer, A., 2013. Biogas production from wheat straw : community structure of cellulose-degrading bacteria. Energy. Sustain. Soc. 3, 1–11.

Sun, L., Pope, P.B., Eijsink, V.G.H., Schnürer, A., 2015. Characterization of microbial community structure during continuous anaerobic digestion of straw and cow manure. Microb. Biotechnol. 8, 815–827.

Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., Yu, X., 2015. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. Renew. Sustain. Energy Rev. 51, 521–532.

Sun, S., Ge, Z., Zhao, Y., Hu, C., Zhang, H., Ping, L., 2016. Performance of CO2 concentrations on nutrient removal and biogas upgrading by integrating microalgal strains cultivation with activated sludge. Energy 97, 229–237.

Szuhaj, M., Ács, N., Tengölics, R., Bodor, A., Rákhely, G., Kovács, K.L., Bagi, Z., 2016. Conversion of H2 and CO2 to CH4 and acetate in fed-batch biogas reactors by mixed biogas community: a novel route for the power-to-gas concept. Biotechnol. Biofuels 9, 102.

Thrän, D., Billig, E., Persson, T., Svensson, M., Daniel-Gromke, J., Ponitka, J., Seiffert, M., International Energy Agency Task Sustainable International Bioenergy Trade, International Energy Agency Task Energy from Biogas, 2014. Biomethane status and factors affecting market development and trade: a joint study. IEA Bioenergy.

Treu, L., Kougias, P.G., Campanaro, S., Bassani, I., Angelidaki, I., 2016. Deeper insight into the structure of the anaerobic digestion microbial community; The biogas microbiome database is expanded with 157 new genomes. Bioresour. Technol. 216, 260–266.

Wu, B., Zhang, X., Xu, Y., Bao, D., Zhang, S., 2015. Assessment of the energy consumption of the biogas upgrading process with pressure swing adsorption using novel adsorbents. J. Clean. Prod. 101, 251–261.

Yarza, P., Yilmaz, P., Pruesse, E., Glöckner, F.O., Ludwig, W., Schleifer, K.-H., Whitman, W.B., Euzéby, J., Amann, R., Rosselló-Móra, R., 2014. Uniting the classification of cultured and uncultured bacteria and archaea using 16S rRNA gene sequences. Nat. Rev. Microbiol. 12, 635–645.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΧΟΡΤΟΥ ΓΙΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

Π. Τσαπέκος, Π.Γ. Κούγιας✉ & Ε. Αγγελιδάκη
Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering, Miljøvej Bld. 113, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark,
✉*panak@env.dtu.dk*

Περίληψη

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα τριών εμπορικών μηχανημάτων συγκομιδής χόρτου ως μέθοδοι μηχανικής προεπεξεργασίας, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης μίας μονάδας παραγωγής βιοαερίου ανά εκτάριο χορτολιβαδικής έκτασης. Το μηχάνημα που αποτελείτο από περιστρεφόμενο σύστημα αξόνων αποδείχθηκε ως το πιο αποτελεσματικό αυξάνοντας την παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου κατά 16% συγκριτικά με το μάρτυρα. Παράλληλα βρέθηκε ότι η αξιοποίηση προεπεξεργασμένου χόρτου ως συμπληρωματικό υπόστρωμα σε αντιδραστήρες που τροφοδοτούνται με κτηνοτροφικά απόβλητα (λύματα βουστασίου, χοιροστασίου ή συνδυασμός αυτών) είχε θετικό αντίκτυπο στην τελική ενεργειακή απόδοση. Μία προκαταρκτική ανάλυση έδειξε ότι η προσθήκη χόρτου σε ποσοστό 10% οργανικής ουσίας στο μίγμα τροφοδοσίας θερμόφιλου αντιδραστήρα δύναται να οδηγήσει σε αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κατά 10%-20%. Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας συμβάλουν στην ανάπτυξη στρατηγικών συναποικοδόμησης σε μονάδες παραγωγής βιοαερίου πλήρους κλίμακας.

Λέξεις κλειδιά: Βιοαέριο, μεθάνιο, μηχανική προεπεξεργασία, ενέργεια

COMPARISON OF DIFFERENT MECHANICAL PRETREATMENT SYSTEMS FOR EXPLOITATION OF GRASSES IN BIOGAS PLANTS

P. Tsapekos, P.G. Kougias✉ & I. Angelidaki
Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering, Miljøvej Bld. 113, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark,
✉*panak@env.dtu.dk*

ABSTRACT

This study investigated the effectiveness of three commercial grass harvesting machines as mechanical pretreatment methods, aiming at increasing the energy efficiency of a biogas plant per hectare of grassland. A machine consisting of a rotating shaft system was proven to be the most efficient by increasing the production of biogas by 16% compared to the control. At the same time, it was found that the exploitation of pre-treated grass as a supplementary substrate in reactors fed with livestock wastes had a positive impact on the final energy efficiency. A preliminary analysis has shown that by adding 10% of meadow grass in terms of organic matter to the influent feed of a thermophilic reactor, this can lead to an increase in energy efficiency by 10% -20%. The results of this research contribute to the development of codigestion strategies in full-scale biogas plants.

Keywords: Biogas, methane, mechanical pretreatment, energy

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ολοένα και αυξανόμενη κατασκευή και λειτουργία νέων μονάδων παραγωγής βιοαερίου καθιστά αναγκαία την εξεύρεση επιπλέον πρώτης ύλης για την τροφοδοσία τους. Σε ορισμένες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.), όπως για παράδειγμα στη Γερμανία, η εθνική ενεργειακή πολιτική περιορίζει την παραγωγή βιοαερίου από ενεργειακές καλλιέργειες (Auer et al., 2017). Για τους λόγους αυτούς, η αξιοποίηση βιομάζας από μόνιμους βοσκοτόπους και λειμώνες μπορεί να αποτελέσει μία εναλλακτική πηγή πρώτης ύλης. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ε.Ε., το 34.2% της γεωργικής γης καλύπτεται από χορτολιβαδικές εκτάσεις (EUROSTAT, 2013). Η Ελλάδα βρίσκεται ανάμεσα στις χώρες που κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο και υπολογίστηκε ότι περίπου 2.1 εκατομμύρια εκτάρια γεωργικής γης καλύπτονται από μόνιμους βοσκοτόπους και λειμώνες (EUROSTAT, 2013). Παρόλο το υψηλό δυναμικό παραγωγής μεθανίου της συγκεκριμένης βιομάζας, είναι γνωστό ότι τα λιγνοκυτταρινούχα υποστρώματα πρέπει να υποστούν μία προηγούμενη επεξεργασία ώστε να βοηθηθεί η πρόσβαση των αναερόβιων μικροοργανισμών στο αποικοδομήσιμο κλάσμα της οργανικής ουσίας. Οι μηχανικές μέθοδοι προεπεξεργασίας χρησιμοποιούνται ευρέως διότι είναι φιλικές προς τον χρήστη, δεν απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις και δεν περιλαμβάνουν χρήση χημικών ουσιών ή ενζύμων που δυνητικά μπορούν να ανεβάσουν το κόστος εφαρμογής.

Για τους παραπάνω λόγους, η παρούσα εργασία είχε ως στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης εμπορικών μηχανημάτων συγκομιδής χόρτου στην αύξηση του ενεργειακού δυναμικού. Επιπλέον, αξιολογήθηκε η πλεονάζουσα ενέργεια η οποία μπορεί να προκύψει από την αναερόβια συναποικοδόμηση μηχανικώς προεπεξεργασμένου χόρτου με κτηνοτροφικά απόβλητα.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Χαρακτηριστικά βιομάζας και μέθοδοι μηχανικής προεπεξεργασίας

Τρία εμπορικά μηχανήματα χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκομιδή χόρτου από τέσσερις ανεξάρτητους αγρούς στην περιοχή Lintrup της Δανίας. Οι κλιματολογικές συνθήκες και στους τέσσερις αγρούς ήταν ίδιες και η συγκομιδή εφαρμόστηκε την ίδια χρονική περίοδο. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα ήταν α) ένα χορτοκοπτικό μηχάνημα με περιστρεφόμενες λεπίδες σε δίσκους (ΜΑ), β) ένα χορτοκοπτικό μηχάνημα με λεπίδες σε περιστρεφόμενο άξονα (ΜΒ) και γ) ένα τροποποιημένο μηχάνημα που απαρτιζόταν από το ΜΑ και επιπρόσθετα ένα περιστρεφόμενο σύστημα αξόνων που είχε ως σκοπό την εφαρμογή πίεσης και τελικώς σύνθλιψης του συγκομιζόμενου χόρτου (ΜΓ). Το μηχάνημα ΜΑ ουσιαστικά έκοβε το χόρτο χωρίς να ασκεί κάποια άλλη επίδραση στην επιφάνεια του φυτικού ιστού και για το λόγο αυτό θεωρήθηκε ως μεταχείριση μάρτυρας. Η καταναλισκόμενη ενέργεια για τη λειτουργία των μηχανημάτων καθώς και ο χρόνος συγκομιδής ήταν ίσοι για όλες τις μεταχειρίσεις, καθώς οι διαστάσεις του άξονα των μηχανημάτων και η ταχύτητα κίνησής τους στον αγρό ήταν ίδιες.

2.2 Μέθοδος προσδιορισμού του δυναμικού παραγωγής μεθανίου

Πειράματα για τον προσδιορισμό του δυναμικού παραγωγής μεθανίου διεξήχθησαν σύμφωνα με το πρωτόκολλο που περιγράφεται από τους Angelidaki et al. (2009). Οι αντιδραστήρες διαλείποντος έργου λειτουργούσαν σε θερμόφιλες συνθήκες (54 ± 1°C). Ο ολικός όγκος και ο λειτουργικός όγκος κάθε αντιδραστήρα ήταν 547 mL και 200 mL, αντίστοιχα. Το αρχικό οργανικό φορτίο ήταν 2 g Πτητικών Στερεών/L.

2.3 Αναλυτικές μέθοδοι

Η συγκέντρωση ολικών στερεών (ΟΣ) και πτητικών στερεών (ΠΣ) μετρήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται από τον APHA (2005). Η παραγωγή μεθανίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας αέριο χρωματογράφο (Shimadzu GC-8A, Tokyo-Japan) όπως έχει περιγραφεί από τους Kougias et al. (2014). Όλες οι αναλύσεις έγιναν σε τρεις επαναλήψεις.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι μέσες τιμές της απόδοσης παραγωγής μεθανίου από την αναερόβια αποικοδόμηση χόρτου που έχει υποστεί μηχανική προεπεξεργασία με διαφορετικά μηχανήματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Διαπιστώθηκε ότι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος μηχανικής προεπεξεργασίας ήταν το μηχάνημα ΜΓ το οποίο οδήγησε σε αύξηση της παραγόμενης ποσότητας μεθανίου κατά 16% και 6% σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του μηχανήματος ΜΑ και μηχανήματος ΜΒ, αντίστοιχα. Η αύξηση της παραγωγικότητας του μεθανίου είναι σύμφωνη με τα ευρήματα προηγούμενης μελέτης, η οποία ανέφερε ότι η εφαρμογή μηχανικής προεπεξεργασίας μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή μεθανίου από ενσίρωμα χόρτου κατά 8% -25% ((Tsapekos et al., 2015). Οι ενεργειακές αποδόσεις ανά εκτάριο, που μπορούν να ληφθούν από τη συνολική συγκομιδή, βασίζονται στην απόδοση των καλλιεργειών και υπολογίζονται για κάθε κύκλο καλλιέργειας σύμφωνα με τις μέσες τιμές ετήσιας απόδοσης. Υπολογίστηκε ότι η μέση απόδοση των καλλιεργειών στους τέσσερις αγρούς ήταν 5.7 τόνοι ξηράς ουσίας / εκτάριο και ως εκ τούτου η μέση απόδοση βιοαερίου από την εκμετάλλευση λιβαδικού χόρτου που προεπεξεργάστηκε από το μηχάνημα ΜΓ ήταν 1705 m^3 / εκτάριο. Τα συγκεκριμένο μηχάνημα απέδωσε την υψηλότερη παραγωγικότητα μεθανίου, που αντιστοιχεί σε περίπου 254 εκατ. m^3 CH_4 / έτος ή 218 χιλιάδες τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (ΤΙΠ) / έτος (Πίνακας 1). Η δεύτερη πιο αποτελεσματική μηχανή συγκομιδής (μηχάνημα ΜΒ) οδήγησε σε παραγωγικότητα μεθανίου ίση με 242 εκατ. m^3 CH_4 / έτος ή 208 χιλιάδες ΤΙΠ / έτος.

Πίνακας 1. Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου από χορτολιβαδικές εκτάσεις.

Παράμετροι	**ΜΑ**	**ΜΒ**	**ΜΓ**
ΟΣ (%)	60.0 ± 2.41	66.2 ± 3.12	63.9±1.37
ΠΣ (%TS)	91.71 ± 0.26	91.29 ± 1.77	92.85±3.06
Απόδοση μεθανίου (m^3/kgΠΣ)	0.292 ± 0.03	0.324 ± 0.03	0.346±0.04
Ενέργεια βιοαερίου (MJ/ton/έτος)	6070 ± 517	7370 ± 858	7742±749
Απόδοση βιοαερίου (m^3/εκτάριο/έτος)	1338 ± 146	1623 ± 191	1705±196
Ενεργειακή απόδοση (GJ/ εκτάριο/έτος)	33 ± 4	40 ± 5	42±5
Παραγωγικότητα μεθανίου (εκατομμύρια m^3/έτος) *	199 ± 24	242 ± 22	254 ± 29
ΤΙΠ (χιλιάδες tons/ έτος) *	171 ± 20	208 ± 25	218 ± 25

Οι τιμές που παρουσιάζονται αποτελούν τους μέσους όρους από τους τέσσερις αγρούς. Το σύμβολο ± υποδηλώνει την τυπική απόκλιση από το μέσο όρο.

* 1 m^3 CH_4 = 10 kWh, 1 kg ΤΙΠ = 11.63 kWh (Amon et al., 2007).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα διαλείποντος έργου, διενεργήθηκαν τρεις μελέτες περιπτώσεων που αφορούσαν την αξιοποίηση του μηχανήματος Γ για δυνητική τροφοδοσία μονάδας παραγωγής βιοαερίου πλήρους κλίμακας. Η εκμετάλλευση προκατεργασμένου χόρτου ως πρόσθετου υποστρώματος σε μονάδες βιοαερίου πλήρους κλίμακας που επεξεργάζονται κατά βάση κτηνοτροφικά απόβλητα εξετάστηκε με βάση τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις οι οποίες αφορούσαν: α) συναποικοδόμησή τους με απόβλητα βουστασίου (Περίπτωση 1), β) συναποικοδόμησή τους με απόβλητα χοιροστασίου (Περίπτωση 2) και γ) συναποικοδόμησή τους με μίγμα αποβλήτων χοιροστασίου και βουστασίου (Περίπτωση 3). Σε όλες τις περιπτώσεις, η εκάστοτε ενεργειακή απόδοση του συστήματος συναποικοδόμησης συγκρίθηκε με αντίστοιχο υπόστρωμα το οποίο περιείχε μη επεξεργασμένου χόρτο αντί για προεπεξεργασμένο.

Σε όλες τις μελέτες εξετάστηκε θερμόφιλος αντιδραστήρας βιοαερίου πλήρους κλίμακας με όγκο εργασίας 3000 m^3 ο οποίος λειτουργεί με υδραυλικό χρόνο παραμονής ίσο με 15 ημέρες. Για την παραγωγή ενέργειας θεωρήθηκε ότι ένα τυπικό σύστημα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας (CHP) μετατρέπει το παραγόμενο βιοαέριο σε περίπου. 40% ηλεκτρική ενέργεια και 45% -50% θερμότητα, ενώ το υπόλοιπο είναι απώλειες (10-15%). Τέλος, για τον υπολογισμό της παραγόμενη ποσότητας βιοαερίου χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα από προγενέστερες έρευνες στις οποίες βρέθηκε ότι το δυναμικό παραγωγής μεθανίου από απόβλητα βουστασίου και χοιροστασίου ήταν 399 mL CH_4 / g ΠΣ και 214 mL CH_4 / g ΠΣ αντίστοιχα (Kougias et al., 2014, 2010).

Βρέθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις, η αναερόβια διεργασία θα μπορούσε να επιτευχθεί σε μίγμα τροφοδοσίας, στο οποίο το ποσοστό οργανικού κλάσματος από το χόρτο ήταν έως 10% του ολικού οργανικού φορτίου (Πίνακας 2). Περαιτέρω αύξηση της ποσότητας χόρτου στο υπόστρωμα τροφοδοσίας θα οδηγούσε σε αύξηση της περιεκτικότητας των ΟΣ σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 11%, με αποτέλεσμα την πρόκληση λειτουργικών προβλημάτων στον αντιδραστήρα (π.χ. απόφραξη σωληνώσεων, κατάρρευση του συστήματος ανάμιξης) και σημαντική οργανική υπερφόρτωση. Στο Σενάριο 1, η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί υπολογίστηκε ότι ανέρχεται σε 280 GJ / ημέρα. Η συναποικοδόμηση του προεπεξεργασμένου χόρτου με το μηχάνημα Γ οδήγησε σε αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κατά 14% σε σύγκριση με την αντίστοιχη συναποικοδόμηση με μη επεξεργασμένο χόρτο (241 GJ / ημέρα). Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι το παραγόμενο βιοαέριο θα μπορούσε να παράγει 60 MWh / ημέρα θερμότητα και 48 MWh / ημέρα ηλεκτρική ενέργειας. Στην Περίπτωση 2, ο αντίκτυπος της προεπεξεργασίας στην παραγωγικότητα του μεθανίου ήταν υψηλότερος σε σύγκριση με το Σενάριο 1. Αποδείχθηκε ότι η προεπεξεργασία βελτίωσε την απόδοση ενέργειας κατά 20% σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο χόρτο. Επιπρόσθετα, οι ενεργειακές αποδόσεις που προέκυψαν από τη συναποικοδόμηση αποβλήτων χοιροστασίου αυξήθηκαν σημαντικά λόγω της προσθήκης χόρτου ως συμπληρωματικό υπόστρωμα τροφοδοσίας. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το χόρτο έχει υψηλότερο δυναμικό μεθανίου σε σύγκριση με τα απόβλητα χοιροστασίου. Επίσης τα λύματα των χοίρων έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε αμμωνία και συνεπώς η διαδικασία της συναποικοδόμησης με το χόρτο, το οποίο έχει υψηλή συγκέντρωση άνθρακα οδηγεί σε πιο ισορροπημένο λόγο C / N βελτιώνοντας τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης (Rahman et al., 2017). Η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου υπολογίστηκε ότι είναι 4968 m^3 / ημέρα (δηλαδή, 42 MWh / ημέρα θερμική ενέργεια και 34 MWh / ημέρα ηλεκτρική ενέργεια). Αντίστοιχα, στην Περίπτωση 3, στην οποία χρησιμοποιήθηκε μίγμα αποβλήτων χοιροστασίου και βουστασίου, η μέγιστη

ενεργειακή απόδοση με τη χρήση προεπεξεργασμένου χόρτου ανήλθε σε 234 GJ / ημέρα, η οποία ήταν κατά 17% υψηλότερη σε σύγκριση με σύστημα συναποικοδόμησης στο οποίο χρησιμοποιήθηκε μη επεξεργασμένο χόρτο. Το παραγόμενο βιοαέριο θα μπορούσε να παράγει 50 MWh / ημέρα θερμότητα και 40 MWh / ημέρα ηλεκτρική ενέργεια.

Πίνακας 2. Παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου στις μελέτες περιπτώσεων που εξετάστηκαν

Ποσοστό ΠΣ (%)		Απόβλητα βουστασίου		
Χόρτο	Απόβλητα	(1)	(2)	(3)
0	100	3192	127	
5	95	5112	203	10%
10	90	7032	280	14%
Ποσοστό ΠΣ (%)		Απόβλητα χοιροστασίου		
Χόρτο	Απόβλητα	(1)	(2)	(3)
0	100	899	36	
5	95	2934	117	17%
10	90	4968	198	20%
Ποσοστό ΠΣ (%)		Μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων (50:50)		
Χόρτο	Απόβλητα	(1)	(2)	(3)
0	100	1900	76	
5	95	3885	155	13%
10	90	5869	234	17%

(1) Παραγωγή CH_4, m^3/ημέρα
(2) Παραγόμενη ενέργεια, GJ/ημέρα
(3) Διαφορά (%)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μηχανική προεπεξεργασία μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την παραγωγή μεθανίου από βιομάζα που προέρχεται από χορτολιβαδικές εκτάσεις. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση ενός εμπορικού μηχανήματος είχε ως αποτέλεσμα 16% υψηλότερη απόδοση μεθανίου σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο χόρτο. Επιπρόσθετα, μελέτες περιπτώσεων έδειξαν ότι η αξιοποίηση μόνιμων λιβαδιών ως εναλλακτική πηγή συμπληρωματικού υποστρώματος σε μονάδες βιοαερίου πλήρους κλίμακας που επεξεργάζονται κτηνοτροφικά απόβλητα θα μπορούσε να ενισχύσει την παραγωγή ενέργειας και να οδηγήσει σε βιώσιμη παραγωγή βιοαερίου. Ειδικότερα, η προσθήκη επεξεργασμένου χόρτου στην τροφοδοσία ενός αντιδραστήρα βιοαερίου θα μπορούσε να αυξήσει την παραγωγή ενέργειας κατά 10% -20% σε σύγκριση με τις ίδιες διεργασίες, στις οποίες μη επεξεργασμένο χόρτο χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα τροφοδοσίας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Pötsch, E., Wagentristl, H., Schreiner, M., Zollitsch, W., 2007. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. Bioresour. Technol. 98, 3204–3212.

Angelidaki, I., Alves, M.M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J.L., Guwy, A.J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., Van Lier, J.B., 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. Water Sci. Technol. 59, 927–934.

APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington, DC, USA.

Auer, A., Vande Burgt, N.H., Abram, F., Barry, G., Fenton, O., Markey, B.K., Nolan, S., Richards, K., Bolton, D., De Waal, T., Gordon, S. V, O'Flaherty, V., Whyte, P., Zintl, A., 2017. Agricultural anaerobic digestion power plants in Ireland and Germany: policy and practice. J. Sci. Food Agric. 97, 719–723.

EUROSTAT, 2013. Utilised agricultural area (UAA), by land use and country [WWW Document]. Util. Agric. area. URL http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Utilised_agricultural_area_(UAA),_by_land_use,_by_country,_2013_(1_000_ha).png

Kougias, P.G., Boe, K., Tsapekos, P., Angelidaki, I., 2014. Foam suppression in overloaded manure-based biogas reactors using antifoaming agents. Bioresour. Technol. 153, 198–205.

Kougias, P.G., Kotsopoulos, T.A., Martzopoulos, G.G., 2010. Anaerobic co-digestion of pig waste with olive mill wastewater under various mixing conditions. Fresenius Environ. Bull. 19, 1682–1686.

Rahman, M.A., Møller, H.B., Saha, C.K., Alam, M.M., Wahid, R., Feng, L., 2017. Optimal ratio for anaerobic co-digestion of poultry droppings and lignocellulosic-rich substrates for enhanced biogas production. Energy Sustain. Dev. 39, 59–66. doi:10.1016/j.esd.2017.04.004

Tsapekos, P., Kougias, P.G., Angelidaki, I., 2015. Biogas production from ensiled meadow grass; effect of mechanical pretreatments and rapid determination of substrate biodegradability via physicochemical methods. Bioresour. Technol. 182, 329–335.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕΛΙΣΣΟΚΟΜΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΙ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΙΚΟΝΙΑΣΗ

Ι. Αρζουμανίδης✉, A. Raggi & L. Petti
Πανεπιστήμιο «G. d'Annunzio», Τμήμα Οικονομικών Σπουδών, Viale Pindaro 42, 65127, Πεσκάρα, Ιταλία
✉*i.arzoumanidis@unich.it*

Περίληψη

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων προϊόντων και υπηρεσιών, μεταξύ των οποίων τα συστήματα τροφίμων. Παρόλα αυτά, το μέλι φαίνεται να έχει αναλυθεί σπανίως. Ο ρόλος των μελισσών ως επικονιαστών είναι μια από τις λειτουργίες ενός μελισσοκομικού συστήματος και είναι υψίστης σημασίας για τα φυσικά οικοσυστήματα και τη γεωργία. Κατά την εφαρμογή μιας ΑΚΖ, η επικονίαση μπορεί να θεωρηθεί ως μια από τις λειτουργίες ενός πολυλειτουγικού συστήματος (με άλλες για παράδειγμα την παροχή μελιού και κεριού). Η παρούσα εργασία εξετάζει την οικονομική αξία της επικονίασης ως πιθανή βάση για τη διαχείριση της πολυλειτουργικότητας στη μοντελοποίηση των ΑΚΖ και την εφαρμογή της σε μια μελέτη περίπτωσης.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση Κύκλου Ζωής, μέλι, επικονίαση, πολυλειτουργικότητα

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF BEEKEEPING PRODUCTS AND SERVICES – A LIFE CYCLE ASSESSMENT CASE STUDY INCLUDING HONEY AND POLLINATION

I. Arzoumanidis✉, A. Raggi & L. Petti
University "G. d'Annunzio", Department of Economic Studies, Viale Pindaro 42, 65127, Pescara, Italy
✉*i.arzoumanidis@unich.it*

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) has been increasingly used for the improvement of the environmental performance of products and services, amongst which food systems. Nevertheless, honey appears to have been rarely analysed. Furthermore, the role of honey bees as pollinators can be regarded as one of the functions of an apiculture system and is undoubtedly of utmost importance both for natural ecosystems and agriculture. When implementing an LCA of an apiculture system, the pollination service can be considered as one of the functions of a multifunctional system (other functions including, e.g., the provision of honey, beeswax, etc.). This paper explores the economic value of pollination and the proposed calculation methods, as a potential basis for managing multifunctionality in LCA modelling and its application in a case study.

Keywords: Life Cycle Assessment, honey, pollination, multifunctionality

1. INTRODUCTION

Life Cycle Assessment (LCA) has been increasingly used for the improvement of the environmental performance of products and services, amongst which food systems. Indeed, a great number of food LCA case studies and reviews of case studies have been published in the scientific literature. Nevertheless, amongst the food products, honey appears to have been rarely analysed. Honey is a natural product, which is considered to have a great range of benefits for human health. Besides that, the role of honey bees as pollinators can be regarded as one of the functions of an apiculture system and is undoubtedly of utmost importance both for natural ecosystems and agriculture. The importance of the pollination service cannot be underestimated for most of the crops worldwide (Klein et al., 2007; Crenna et al., 2015), even though most crops are able to produce yield to some extent even in the absence of insect pollination (Hanley et al., 2015). The benefits of this service are indeed significant (Southwick and Southwick, 1992). For example, in its absence, fertilisers and labour requirements would have to be higher (ibid.). The economic importance of the service was already acknowledged in the past, e.g., Cheung indicates the existence of hives rent contracts, in the United States, between beekeepers and farmers in order for the formers to offer the service to the latter (Cheung, 1973).

When implementing an LCA of an apiculture system, the pollination service can be considered as one of the functions of a multifunctional system (other functions including, e.g., the provision of honey, beeswax, etc.) and the issue of how to deal with multifunctionality in the modelling of that system should be carefully considered.

When it comes to addressing the multifunctionality issue, various approaches are available (please refer to ISO, 2006a). One of the most consolidated approaches, given its simplicity, is the use of allocation (even if it is not the first suggested option in the ISO standard cited above). The allocation can be performed either based on physical relations (e.g., mass, volume) or economic ones. In the case of a service (such as pollination) a physical relation cannot be appointed to it. Therefore, only economic allocation can be applied, by means of the economic values of the various products, among which the pollination service, generated by the relevant multifunctional process.

The main objective of this paper is to explore, by means of a literature review, the economic value of pollination and the proposed calculation methods, as a potential basis for managing multifunctionality in LCAs. Furthermore, the application of this multifunctional system in a honey-related LCA case study is addressed.

This paper is structured as follows: in Section 2 the economic value of pollination is explored both in terms of calculation methods used for it and of its own inclusion in LCA studies (or in life cycle-based approaches, in general). Section 3 describes the implementation of LCA in a honey case study and the inclusion possibilities of the pollination service methodologically. Finally, in Section 4 the main conclusions and future developments of this article are drawn.

2. ECONOMIC VALUE OF POLLINATION

In this study, the economic value of the pollination service, which may be much higher than that of honey itself (Eardley et al., 2006; Hein, 2009), was investigated both in terms of its measurement methods and its inclusion in life cycle-based approaches via two different literature reviews, as described hereafter.

2.1 Measurement methods

In order to evaluate the various methods that measure the economic value of the pollination service, a literature review was carried out. This included databases such as the inter-database EBSCO Discovery Service and Google Scholar, using keywords such as ("honey" OR "bee") AND "pollinat*" AND "economic value" (and their combinations) for the years 1990-2016. The results were then evaluated with regard to their relevance to the topic. The screening resulted in 11 scientific articles (Southwick and Southwick, 1992; Greanleaf and Kremen, 2006; Vaissière et al., 2008; Gallai et al., 2009; Hein, 2009; Garratt et al., 2014; Majewski, 2014; Munyuli, 2014; Champetier et al., 2015; Giannini et al., 2015; Hanley et al., 2015), which were reviewed.

Giving a monetary value to a natural service, which is not tradable, is somehow challenging (Munyuli, 2014). However, as it can be deduced by the papers found, several methods have been used or developed for such a task, which can generally be divided in market and non-market ones (Hanley et al., 2015). The output of a crop depends on various inputs (e.g., labour hours, pesticides etc.), as well as on pollination services and stochastic factors, such as rainfall and temperature (ibid.). Commonly, the market value of pollination services reflects how a reduction in them can influence yields (Garratt et al., 2014). The non-market methods may include the consumers' Willingness To Pay (WTP) for environmental improvements or in order to avoid loss of pollinators (Hanley et al., 2015). The market-based methods are presented briefly hereafter.

2.1.1 Dependence Ratio

For a number of crops, production depends on the pollination service at a different degree for each crop (dependence ratio). This widely used method measures the proportion of crop output lost without pollination services (Gallai et al., 2009; Giannini et al., 2015; Hanley et al., 2015). Nonetheless, this method fails to include the marginal benefits of pollination or to account for all economically significant crop outputs that are affected by pollination, all inputs or producer costs (Hanley et al., 2015). In Gallai and Vaissière (2009) the dependence ratio (DR) is used for the calculation of what they propose as the Economic Value of Insect Pollinators (EVIP), using the following equation:

$$EVIP = TVC * DR \quad \text{(Eq. 1)}$$

where, TVC is the total value of crop, calculated as the product of the unit producer price (economic value/mass) times the production (mass) and DR reflects the dependence ratio of that crop upon pollination.

2.1.2 Yield Analysis

Yield Analysis (YA) assesses the per-hectare benefits of pollination based on comprehensive field studies that report the effect of market quality benefits, cultivar variations and storage life (Hanley et al., 2015). This method lacks the linking information between marginal changes in pollination services and output changes (ibid.).

2.1.3 Replacement Cost(s)

The Replacement Costs (CR) method examines the costs avoided by the presence of pollinators by estimating the costs of replacing them, e.g., manually (Hein, 2014; Hanley et al., 2015). In the case of wild pollinators, another way of calculating the replacement cost, apart from hand pollination, could be through the cost of bringing in managed bees (Hein, 2014). Nevertheless, hand pollination has demonstrated to be rather ineffective on several crops (Hanley et al., 2015) and is not widely conducted in the world (Hein, 2014).

2.1.4 Consumer Surplus

The Consumer Surplus (CS) method measures economically the excess of price that the public are theoretically willing to pay over the price that is actually paid for a good (Southwick and Southwick, 1992; Hein, 2009; Hanley et al., 2015). The econometric analysis required for this method has proven to be rather data-intensive and complex, in terms of trade effects (Southwick and Southwick, 1992; Hanley et al., 2015). The CS can be calculated through the equation proposed by Southwick and Southwick (1992):

$$CS = \int_{Q_0}^{Q_1} [P(demand) - P_1] dQ \qquad \text{(Eq. 2)}$$

where, Q_0 and Q_1 are the quantities the consumer buys before and after the pollination service is introduced, P(demand) represents the demand function, whilst P_1 is the price after the introduction of the pollination service.

2.1.5 Producer Surplus

The Producer surplus (PS) echoes "the amount of welfare a producer gains at a certain level of production and for a certain market price" (Hein, 2009; p.75). In other terms, this can be summarised as the gross revenues for the producer minus their production costs (ibid.). Munyuli (2014), in his study on coffee, suggested the following equation using PS in order to calculate the total value generated by pollination services:

$W = S * \Delta q * (p - c)$ (Eq. 3)

where, W is the welfare to producer or PS, S is the area under production, Δq reflects the increase in productivity as a consequence of the service, p is the farm-gate price of the crop and, finally, c are variable costs related to crop harvest.

2.1.6 Hybrid Seeds (sunflowers)

In this case, the pollination economic value is given by the proportion of pollinated florets (seeds per unit area divided by available florets) multiplied by the total value of the hybrid seed production industry (Greenleaf and Kremen, 2006).

2.1.7 Combinations

Finally, combinations of the DR, CS, RC and YA exist as well, as for example in the calculation of the economic value of the pollination service in the production of watermelons (Hanley et al., 2015).

2.2 Environmental Life Cycle Approaches and the economic value of the service of pollination

The second literature review was performed in order to identify the inclusion, if any, of the economic value of the pollination service in Environmental Life-Cycle-based studies. This included databases such as the inter-database EBSCO Discovery Service and Google Scholar, using keywords such as ("honey" OR "bee") AND ("lca" OR "life cycle assessment" OR "carbon footprint" OR "life cycle") for the years 1990-2016. The results were then evaluated with regard to their relevance to the topic. The review resulted in 2 scientific articles, both concerning the Life cycle-based approach of carbon footprint (Kendall et al., 2013; Mujica et al., 2016), but not the full LCA methodology.

In order to deal with the multifunctionality issue in the carbon footprint studies, the two peer-reviewed articles use different methods. In Kendall et al. (2013), the percentages (for honey and the pollination service) of the total income related to beekeeping is taken into

account for the use of economic allocation. These data were obtained from the beekeepers through the use of questionnaires. In the other article, Mujica et al. (2016) also propose the use of subdivision between the main product (honey) and pollination services. However, in order to deal with the hive management phase, they investigated two different hypothetical scenarios: one where the phase could be attributed 100% to honey and 0% to the pollination and one where the percentages are applied *vice versa* (ibid.).

Given the lack in honey LCA case-studies that take into account the pollination service, which was identified in the scientific literature, this paper examines the case of orange-blossom honey.

3. CASE STUDY

The case study presented here was performed with the aid of the SimaPro LCA software (Pré, 2017) and following the ISO 14040:2006 international standards (ISO, 2006b).

3.1 Goal and Scope Definition

The aim of the study was to identify the most critical phases of the life cycle of orange-blossom honey from an environmental point of view as well as the environmental impacts mostly affected by the product system examined. The intended audience of this study would be scientists, beekeeping companies and consumers. The Functional Unit (F.U.) was defined as a 250-g jar of honey including its primary, secondary and tertiary packaging. Furthermore, the system boundary included the following life cycle stages: honey collection, processing, packaging, distribution, and waste treatment. It can thus be called a "cradle-to-grave" analysis. For the flow chart of the life cycle of honey under study please refer to Fig. 1.

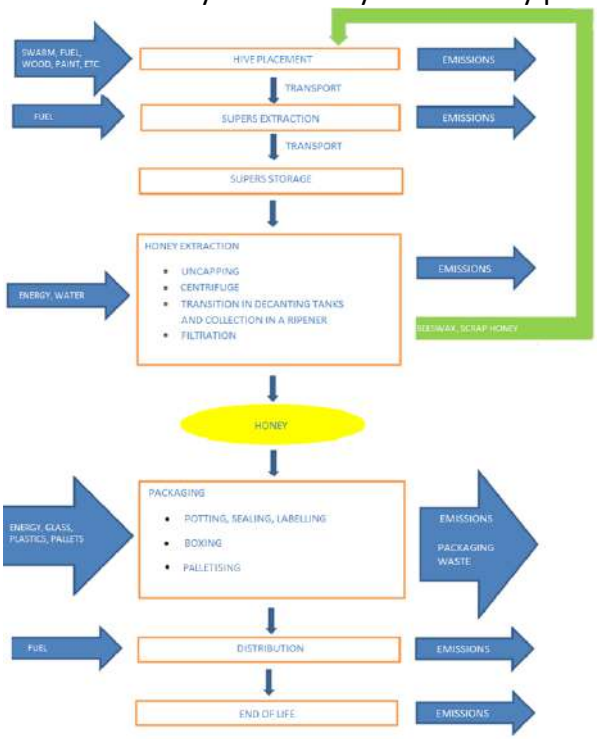


Figure 1. Life cycle flow chart of the product under study (orange-blossom honey).

As regards the multifunctionality issue the various functions of the system were identified as follows: production of honey and beeswax (the latter being returned as an input to the

system, in the “hive placement” phase) and provision of the pollination service. This issue was attempted to be dealt with via economic allocation (please refer to Section 3.2).

3.2 Life Cycle Inventory (LCI)

The LCI data were collected on-site at the firm *Finocchio* situated in Tornareccio, in the Italian region of Abruzzo. The hives containing the honeybees (*Apis mellifera*) are initially transported and placed in the region of Apulia at a distance of 180 km. The data for all necessary inputs and the relevant processes, such as transport-related fuel consumption, wood and paint for the hives structure, bee-specific medicines, etc., and their respective packaging and transport, where applicable, were collected on-site or carefully selected from the Ecoinvent 2.2 database (Ecoinvent Center, 2017), which is integrated in the software used. As far as the medicines are concerned, the relevant processes were selected on the basis of the different ingredients. One ingredient, namely oxalic acid, had to be excluded from the calculations since it was not found in the software database.

It is the first phase in the product life cycle where the pollination service occurs, as well. As described in Section 3.1, it was decided to apply an economic allocation. Given that the two products of this phase were honey and the pollination service, their economic value *per* F.U. had to be calculated. The market value of honey was obtained directly by the beekeeping company. On the other hand, the economic value of the pollination service had to be calculated from scratch. This was performed using (Eq.1), as defined in Section 2.1.1 for the DR method. As regards the calculation of TVC for Italy: (a) for the producer price per mass unit, given that no data were found for Italy, based on Gallai and Vaissière (2009) data from the FAO statistics website (FAO, 2017a) were acquired for Spain (the most important producing country of the relevant world region), calculating the average for the year 2013; (b) the Italian production of oranges in 2013 was obtained through the same source. As far as DR is concerned, the dependence upon animal pollination for oranges was taken from the tool (FAO, 2017b) proposed by Gallai and Vaissière (2009). (Eq.1) thus gave: EVIP = TVC * DR = [246.5 (US$/t) * 1,700,778 t] * 0.05 = US$ 20,945,081 or € 19,279,440 (exchange rate: 12/05/2017). In order for EVIP to be transformed as *per* F.U. and with the assumption that all orange pollination for that year derived from domesticated honeybees, the total orange-blossom honey production in Italy (or from citrus fruit, in general) had to be obtained; however, no specific data have been found. In order to calculate it, the total honey production in Italy for 2013 - that is 9,500,000 kg (OSN, 2017) - was considered. Furthermore, in a case study concerning an Italian region, the average percentage of citrus fruit honey was reported as 30% (Strano et al., 2015). Nonetheless, since the sample of firms taken into account in the cited case study was not specified, assuming the above percentage in calculations could introduce uncertainty in the results and their interpretation. In order to address that issue, a sensitivity analysis was carried out on the assumed percentage of 30%. According to this, nine scenarios were taken into consideration for different percentages: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% and 90% (0% and 100% were excluded because, in fact, these cannot be applicable in Italy). For each one of the scenarios, the calculations were made as follows: as the percentage of oranges in citrus fruit in Italy was calculated as 62.67% (ISTAT, 2014), the economic value of the pollination service per F.U. (i.e., per jar) could then be calculated as well. The economic allocation was therefore performed for the two values: one for honey and one for the pollination service.

In the next step of the life cycle, the beekeepers bring the hives back to the apiculture firm for the supers’ extraction phase and their storage. Here, primary inputs such as the

necessary gloves, lab coats, uniforms and internal transport (via forklifts) were included. No issues were encountered with finding the entries in the software.

The honeycombs are then uncapped in the successive phase. Here, energy consumption (electricity) due to machines, such as the uncapping machine, a press, a centrifuge and a chain and inputs regarding the filtration sub-phase, was included. At the end of the uncapping sub-phase, a specific amount of beeswax is obtained, which, after being processed at the premises of a firm in the region of Piedmont, returns to the beekeeping company as an input for the first stage (as aforementioned). These inputs were easily introduced in the software.

Once the honey is obtained, it is packaged using a glass jar, a plastic/aluminium lid, a paper label (as primary packaging), a cardboard box and adhesive tape (as secondary packaging) and a plastic film and pallets (as tertiary packaging). The relevant entries in the software were found without any obstacles.

The product is then distributed to its consumers, who reside both in Italy and abroad (e.g., the USA and France). The last phase includes the waste management of the final product, i.e., its packaging, since the product itself is consumed via the human metabolism.

Finally, regarding the quality of the data used in this study, the method used following the ILCD Handbook data quality indicators (European Commission, 2010) resulted in a “basic quality” score (Di Cesare, 2016).

3.3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

For this LCA case study, the calculations were performed using the ReCiPe Midpoint (H) method (Goedkoop et al., 2009). Therefore, the environmental impact categories taken into consideration were the ones selected by this method. In this part, the classification, characterisation and normalisation (calculated per European citizen) phases of LCIA were carried out. An example of the results (for the 30%-scenario) of the characterisation step is shown in Fig. 2, as they were exported from the software. The impacts for the various environmental impact categories are shown for the different life cycle phases, honey production (including hive placement, supers’ extraction & storage, honey extraction and packaging), distribution and waste management. These demonstrated that the production phase is the most impacting one for all categories. A deeper examination of the results showed that the most responsible aspect within the production phase was the use of electricity during the storage of supers in refrigerator rooms before they are used for each new cycle.

Regarding the normalisation results, the most affected environmental impact category appeared to be natural land transformation, followed by marine ecotoxicity, freshwater eutrophication and human toxicity (see Fig. 3).

3.4 Sensitivity Analysis

The nine scenarios were analysed in order to identify the importance for this case study of the percentage of citrus fruit honey within honey production in Italy. The results (see Fig. 3) showed that higher percentages mean higher environmental impacts allocated for the product (honey) for all environmental categories. This can be explained by the fact that higher percentages mean lower prices for the pollination service per kg (whilst the EVIP value is constant), which result in lower allocation percentages for the pollination service.

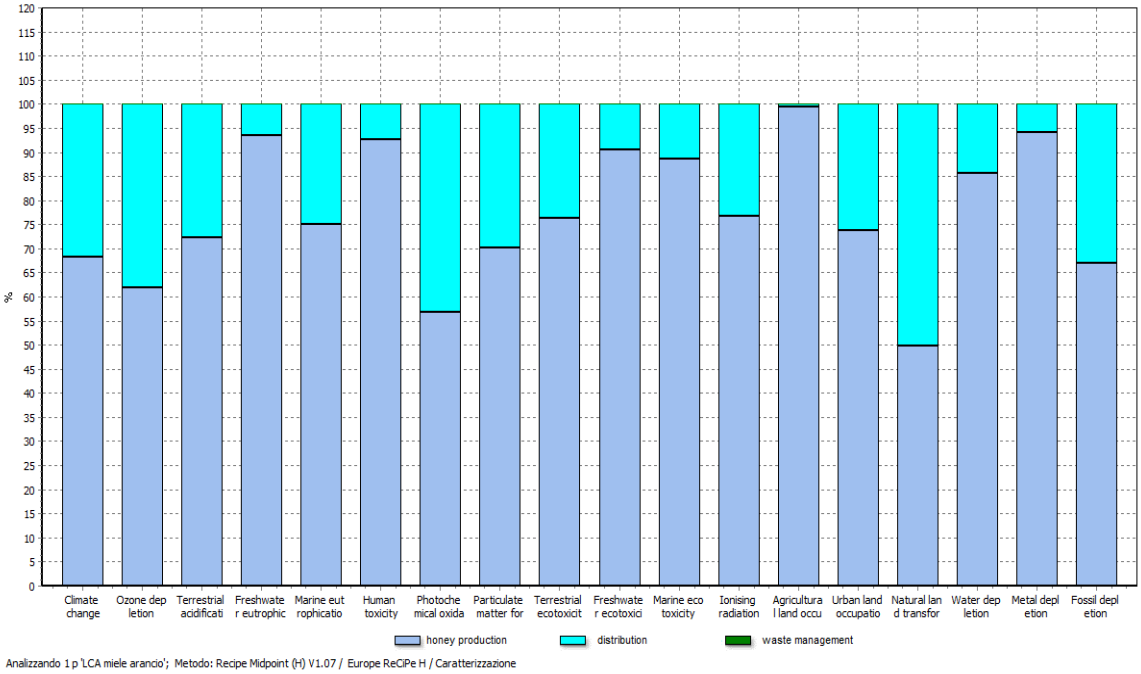


Figure 2. Characterisation results.

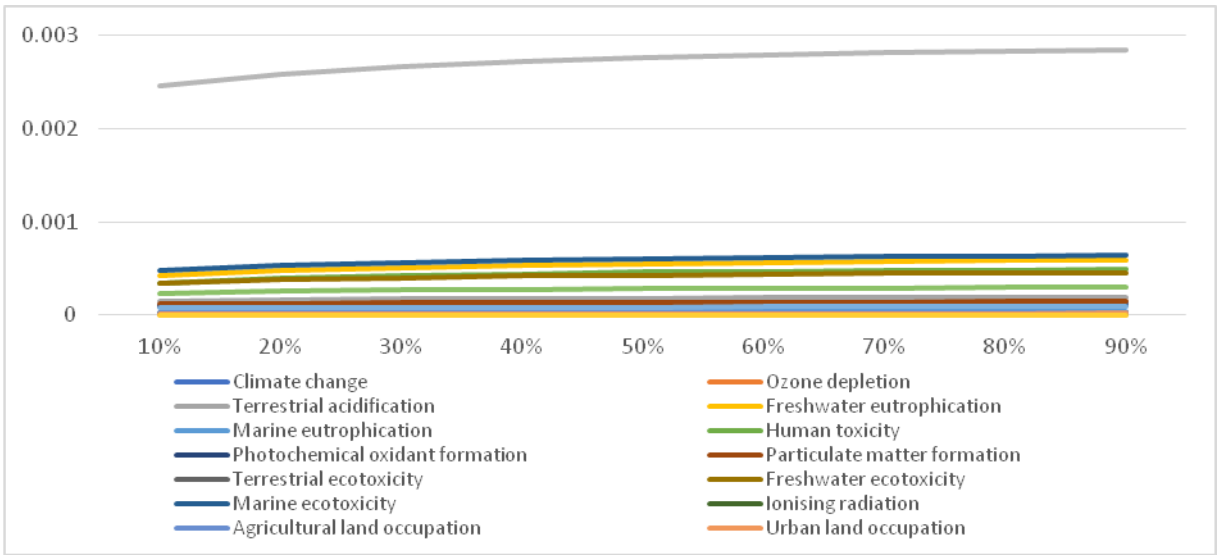


Figure 3. Normalisation results for the various scenarios (elaborated from SimaPro).

4. CONCLUSIONS

This article tackled the inclusion of the pollination service in honey LCA studies, as one of the functions of the system. The two literature reviews carried out showed that this issue has been rarely addressed so far, only in life cycle-based approaches (i.e., carbon footprint), but never in full LCAs and that there are several methods for the economic evaluation of the pollination service. Given the multifunctionality of the beekeeping system, an attempt was made to include the pollination service in an LCA case study in Italy. In order for this issue to be dealt with, the use of economic allocation was decided between the main product

(honey) and the pollination service. An attempt was then made for the economic value of pollination to be calculated using the DR method (found in the literature review).

At the end, an accurate implementation of this hypothesis was not feasible, because not all the necessary data for the transformation of the EVIP value per jar were available at the time of drafting this article. The sensitivity analysis for the missing datum showed that the order of importance of the various environmental impact categories did not depend on it; yet, in order for more reliable quantitative results to be obtained, an accurate calculation is required. Future developments may include the implementation of economic allocation for this and other types of honey, in order for robust conclusions to be drawn with regard to these methodological hypotheses.

5. REFERENCES

Champetier A., Sumner D.A., Wilen J.E., 2015. *The Bioeconomics of Honey Bees and Pollination*. Environmental and Resource Economics, 60: 143-164.

Cheung S., 1973. *The Fable of the Bees: An Economic Investigation*. Journal of Law and Economics, 16(1): 11-33.

Crenna E., Sala S., Polce C., Collina E., 2015. *Pollinators in LCA: towards a framework for impact assessment.* Proceedings of the International conference on Life Cycle Assessment as reference methodology for assessing supply chains and supporting global sustainability challenges, Stresa & Milan, Italy, 307-310.

Di Cesare F., 2016. *LCA del miele: dall'impollinazione al consumatore*. MSc thesis, University "G. d'Annunzio", 119 pp (in Italian).

Eardley C., Roth D., Clarke J., Buchmann S., Gemmill B., 2006. *Pollinators and pollination: A resource book for policy and practice*. African Pollinator Initiative (API), Pretoria, S. Africa.

Ecoinvent Center, 2017. *Ecoinvent Center—Database*. Available online at http://www.ecoinvent.org/database/ (accessed 10 May 2017).

European Commission, 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Specific guide for Life Cycle Inventory data sets*. First edition March 2010. EUR 24709 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.

FAO, 2017a. *Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAOSTAT*. Available online at http://www.fao.org/faostat/en/#home (accessed 10 May 2017).

FAO, 2017b. *Tool for Valuation of Pollination Services at a National Level*. Available online at: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/pollination/docs/POLLINATION_VALUE_ARRAY.xls (accessed 31 July 2017)

Gallai N., Vaissière B.E., 2009. *Guidelines for the economic valuation of pollination services at a national scale*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Gallai N., Salle J.-M., Settele J., Vaissière B.E., 2009. *Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline*. Ecological Economics, 68: 810-821.

Garratt M.P.D., Breeze T.D., Jenner, N., Polce C., Biesmeijer J.C., Potts S.G., 2014. *Avoiding a bad apple: Insect pollination enhances fruit quality and economic value*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 184: 34–40.

Giannini T.C., Saraiva A.M., Imperatriz-Fonseca V.L., Cordeiro G.D., Freitas B.M., 2015. *The Dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil*. Journal of Economic Entomology, 108(3): 849-857.

Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., Schryver A.D., Struijs J., van Zelm R., 2009. *ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category*

indicators at the midpoint and endpoint level. First edition, Report I, Characterisation, NL. Available online at http://www.lcia-recipe.net (accessed 10 May 2017).

Greenleaf S.S. e Kremen C., 2006. *Wild bees enhance honey bees' pollination of hybrid sunflower*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 103(37): 13890–13895.

Hanley N., Breeze T.D., Ellis C., Goulson D., 2015. *Measuring the economic value of pollination services: Principles, evidence and knowledge gaps*. Ecosystem Services, 14: 124–132.

Hein L., 2009. *The Economic Value of the Pollination Service, a Review Across Scales*. The Open Ecology Journal, 2009(2): 74-82.

ISO, 2006a. *Environmental management – Life Cycle assessment Requirements and guidelines*. International Organisation for Standardisation, Geneva.

ISO, 2006b. *Environmental management – Life Cycle assessment – Principles and framework*. Second edition. International Organisation for Standardisation, Geneva.

ISTAT, 2014. *Le principali coltivazioni legnose. Annata agraria 2011/2012*. Report, Italian National Statistical Institute, Rome (in Italian).

Kendall A., Yuan J., Brodt S.B., 2013. *Carbon footprint and air emissions inventories for US honey production: case studies*. International Journal of Life Cycle Assessment, 18: 392-400.

Klein A.M., Vaissière B.E., Cane J.H., Dewenter I.S., Cunningham S.A., Kremen C., Tscharntke T., 2007. *Importance of pollinators in changing landscapes for world crops*. Proceedings of the Royal Society B – Biological Sciences, 274: 303–313.

Majewski J., 2014. *Economic value of pollination of major crops in Poland in 2012*. Proceedings of the Economic Science for Rural Development Conference "Production and Co-operation in Agriculture", Jelgava, Latvia, 14-21.

Mujica M., Blanco G., Santalla E., 2016. *Carbon footprint of honey produced in Argentina*. Journal of Cleaner Production, 116: 50-60.

Munyuli B.M.T., 2014. *Social and Ecological Drivers of the Economic Value of Pollination Services Delivered to Coffee in Central Uganda*. Journal of Ecosystems, 2014: 1-23.

OSN, 2017. Il valore della Terra. Agricoltura e nuova ruralità – Economia e sostenibilità – qualità e consumo consapevole. Report 2/2016 of the Italian National Honey Observatory (OSN), Bologna (in Italian).

Pré, 2017. Software to measure and improve the impact of your product life cycle. Available online at https://www.pre-sustainability.com/simapro (accessed 9 May 2017).

Southwick E.E., Southwick L. Jr., 1992. *Estimating the economic value of honey bee (Hymenoptera: Apidae) as agricultural pollinators in the United States*. Journal of Economic Entomology, 85(3): 621-633.

Strano A., Stillitano T., De Luca A.I., Falcone G., Gulisano G., 2015. *Profitability Analysis of Small-Scale Beekeeping Firms by using Life Cycle Costing (LCC) Methodology*. American Journal of Agricultural and Biological Sciences, 10(3): 116-127.

Vaissière B., Salles J.-M., Settele J., 2008. *Economic value of insect pollination worldwide*. International Pest Control, 50(5): 240.

ΔΙΕΥΡΥΝΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΙΖΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΗ-ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΤΑΦΡΟ «ΑΣΜΑΚΙΟΥ», ΘΕΣΣΑΛΙΑ, ΕΛΛΑΔΑ

Α. Αυγουστή[1,✉], Σ. Παπαδόπουλος[2], Ι. Γράβαλος[1], Δ. Κατέρης[1], Α. Γεωργιάδης[1], Ζ. Τσιρόπουλος[1] & Π. Ξυραδακης[1]

[1]Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Τ.Ε.Ι. Λάρισας, 41100 Λάρισα
✉a.avgoustis@hotmail.com, avgoustis@teilar.gr
[2]ΠΕΓΕΑΛ Κεντρικής Ελλάδος Νομού Λάρισας, Ιωαννίνων και Αυλώνος 41334, Λάρισα

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων για τον προσδιορισμό των τιμών επτά βαρέων μετάλλων (Cd, Cr, Pb, Ni, Cu, Zn και Hg) και της οργανικής ουσίας στο ίζημα του τροποποιημένου υδάτινου οικοσυστήματος της κεντρικής αποστραγγιστικής - αρδευτικής τάφρου του «Ασμακίου» στη Θεσσαλία και σε παρακαμπτήριες τάφρους του (αποστραγγιστικές - αρδευτικές τάφροι 8Τ, 9Τ, 1Τ), κατά τη διάρκεια δύο ετών (Ιούλιος 2015 και 2016). Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο χρονικό διάστημα τα έτη 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 και 2014. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων χρόνο με το χρόνο παρουσιάζεται σταδιακή μείωση των τιμών οι οποίες σε όλες τις περιπτώσεις είναι χαμηλότερες από αυτές που έχουν ορισθεί από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα μέγιστα επιτρεπτά όρια χρησιμοποίησης της ιλύος στη γεωργία. Στην περιοχή μελέτης υπάρχει μεγάλη βιομηχανική, γεωργική και κτηνοτροφική δραστηριότητα, τα τελευταία χρόνια όμως έχουν αναστείλει τη λειτουργία τους σημαντικές βιομηχανίες.

Λέξεις κλειδιά: υγρότοπος, ρύπανση βαρέα μέταλλα, ίζημα

INVESTIGATION OF SEDIMENT POLLUTION WITH HEAVY METALS IN DRAINAGE, IRRIGATION DITCH “ASMAKIOU”, THESSALY, GREECE

A. Avgousti[1,✉], S. Papadopoulos[2], I. Gravalos1, D. Kateris[1], A. Georgiadis[1], Z. Tsiropoulos[1] & P. Xyradakis[1]

[1]Department of Biosystems Engineering, School of Agricultural Technology,
T.E.I. of Thessaly, Greece, ✉a.avgoustis@hotmail.com
[2]PEGEAL Central Greece Prefecture of Larissa, Ioanninon and Avlonos 41334, Larissa

Abstract

This paper presents the results of the chemical analyzes for the determination of the values of seven heavy metals (Cd, Cr, Pb, Ni, Cu, Zn and Hg) and the organic substance in the sediment in the modified aquatic ecosystem of the central drainage - Asmakion "in Thessaly and its siding ditches (drainage irrigation ditches 8T, 9T, 1T) over two years (July 2015 and July 2016). The results are then compared with corresponding measurements made in the same period in the years 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 and 2014. According to the results of the chemical analyses, year-on-year there is a gradual decrease in prices which are in all cases lower than those laid down in the European legislation on maximum permitted limits for the use of sludge in agriculture. There is a lot of industrial, χagricultural and livestock activity in the study area, but important industries have been suspended in recent years.

Key words*:* wetland, pollution, heavy metals, sediment

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως κυριότερες πηγές ρύπανσης με βαρέα μέταλλα θεωρούνται τα βιομηχανικά απόβλητα, τα αστικά λύματα, οι γεωργικές δραστηριότητες, ενώ δεν αποκλείονται και οι φυσικές πηγές όπως η αποσάθρωση των πετρωμάτων και η σύσταση του μητρικού υλικού. Ο προσδιορισμός των ολικών τιμών των βαρέων μετάλλων σε διάφορους υγροτόπους δείχνει το βαθμό ρύπανσης της περιοχής (Yu, et al., 2012; Jamshidi-Zanjani and Saeedi, 2013; Li et al., 2015).

Στη δεκαετία του 1970 εμφανίζονται πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα από τη βαθμιαία αύξηση των βαρέων μετάλλων στα ιζήματα και στο νερό των ποταμών και λιμνών. Η βιοσυσσώρευση στα ψάρια είχε ως αποτέλεσμα την ανάγκη επέμβασης στις πηγές ~~τους~~, ιδιαίτερα των πιο επιβλαβών μετάλλων, όπως ο υδράργυρος και ο μόλυβδος. Την ίδια περίοδο η ρύπανση του περιβάλλοντος εισέρχεται σε μια νέα φάση από την παραγωγή και χρήση πολλών συνθετικών ουσιών. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν αυτές παντού σήμερα στα υπόγεια και επιφανειακά νερά. Οι επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και των οικοσυστημάτων άρχισαν να μελετούνται εντατικά και η έρευνα για τον έλεγχο, μείωση ή περιορισμό τους αποτελούν την κύρια προσπάθεια των επόμενων ετών. (Αντωνόπουλος, 2003).

Οι σημαντικές επιπτώσεις από βαρέα μέταλλα σε διάφορα οικοσυστήματα, ενίσχυσαν την άποψη, ότι πρόκειται για μια από τις πιο επικίνδυνες μορφές ρύπανσης του περιβάλλοντος. Σε αντίθεση με τις περισσότερες τοξικές οργανικές ενώσεις, τα βαρέα μέταλλα και οι ενώσεις τους δεν αποικοδομούνται με φυσικές διεργασίες στα υδάτινα οικοσυστήματα, αλλά με διάφορους μηχανισμούς συσσωρεύονται στους οργανισμούς όπου και παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τοξικά μέταλλα όπως ο υδράργυρος, ο μόλυβδος, το κάδμιο και πολλά άλλα, καταλήγουν δια μέσου της τροφικής αλυσίδας, στα ανώτερά της μέλη και τέλος στον άνθρωπο, όπου και προκαλούν χρόνιες και οξείες βλάβες (Ray and White, 1976; Hejny et al., 1986; Sawidis et al., 1991; Sawidis et al., 2001).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο προσδιορισμός των τιμών επτά βαρέων μετάλλων στο ίζημα του τροποποιημένου υδάτινου σώματος της κεντρικής αποστραγγιστικής-αρδευτικής τάφρου του «Ασμακίου» (περιοχή Θεσσαλίας) και των παρακαμπτήριων αποστραγγιστικών-αρδευτικών τάφρων 8Τ, 9Τ, 1Τ, κατά τα διάρκεια δύο ετών (Ιούλιος 2015 και Ιούλιος 2016). Στην συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τα έτη 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 και 2014 και διερευνάται το κατά πόσον τα επίπεδα των τιμών επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση της ιλύος για γεωργικούς σκοπούς. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων έδειξαν τιμές πολύ κάτω των φυσιολογικών ορίων, κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι στην περιοχή δεν λειτουργούν μεγάλες βιομηχανίες των οποίων τα απόβλητα να περιέχουν σημαντικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιοχή μελέτης

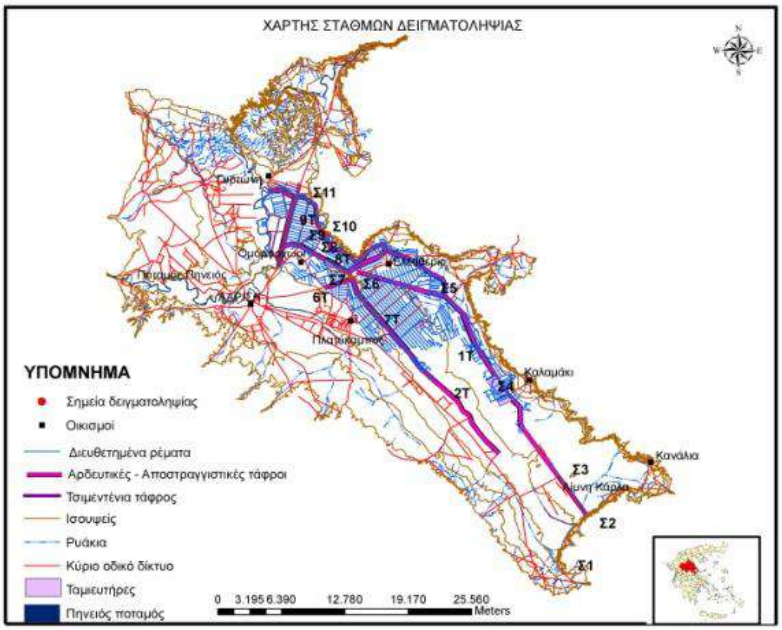
Η ευρύτερη περιοχή έρευνας εκτείνεται από την Βορειανατολική πλευρά της Λάρισας και φθάνει έως τη λίμνη Κάρλα. Πρόκειται για πεδινή έκταση, στην οποία καλλιεργούνται μονοετείς ως επί το πλείστον καλλιέργειες, με το βαμβάκι να κατέχει την πρώτη θέση με περίπου 70%, τον αραβόσιτο τη δεύτερη θέση με περίπου 20% και 10% διάφορες άλλες εποχιακές και δενδρώδεις καλλιέργειες (Τ.Ο.Ε.Β. Πηνειού).

Για την άρδευση των καλλιεργειών υπάρχουν πολλές αποστραγγιστικές τάφροι και δύο τσιμεντένιες αρδευτικές διώρυγες. Η κεντρική τάφρος του Ασμακίου (8Τ), μήκους περίπου

15 Km, άρχισε να λειτουργεί το 1967. Έως και το 2005 εξυπηρετούσε την άρδευση 140.000 περίπου στρεμμάτων (Σχήμα 1).

Το «Ασμάκι», ενώ είναι μια αποστραγγιστική τάφρος, στην πραγματικότητα λειτουργεί ως μια τεράστια λίμνη για σκοπούς αρδευτικούς, η οποία μαζί με τους ταμιευτήρες της περιοχής, φιλοξενεί, μεγάλο πλήθος και ποικιλία ειδών ορνιθοπανίδας. Τα τελευταία χρόνια, το «Ασμάκι», χρησιμοποιείται και για τη μεταφορά νερού στην ανασυσταθείσα λίμνη της Κάρλας.

Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας επιλέχθηκαν συνολικά 11 δειγματοληπτικοί σταθμοί. Ένα σημείο δειγματοληψίας (Σ1) βρίσκεται εκτός τους πεδίου μελέτης και πιο συγκεκριμένα Νοτιοδυτικά της λίμνης Κάρλας, πλησίον του εργοστασίου τσιμέντων «Ηρακλής». Οι σταθμοί δειγματοληψίας επιλέχθηκαν με βάση την τάξη του «αποστραγγιστικού – αρδευτικού δικτύου», την ύπαρξη σημειακών ή μη πηγών ρύπανσης και την ευκολία πρόσβασης (Σχήμα 1, Πίνακας 1).



Σχήμα 1. Περιοχή έρευνας.

Πίνακας 1. Οι σταθμοί δειγματοληψιών.

Α/Α	Σταθμοί	Θέση Σταθμού	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος
1.	Σ1	Πλησίον εργοστασίου τσιμέντων Ηρακλής	39° 24΄.085	22° 46΄.951
2.	Σ2	Σήραγγα Κάρλας (1Τ)	39° 27΄.044	22° 48΄.608
3.	Σ3	Γέφυρα Στεφανοβικείου (1Τ)	39° 28΄.825	22° 46΄.816
4.	Σ4	Καλαμάκι (1Τ)	39° 33΄.418	22° 43΄.390
5.	Σ5	Πλασιά (Συμβολή 1Τ και 8Τ)	39° 38΄.539	22° 39΄.036
6	Σ6	Γέφυρα Ελευθερίου (8Τ)	39° 39΄.756	22° 32΄.342
7.	Σ7	Πλησίον εργοστασίου ΟΙΝΟΠΝΕΥΜΑΤΟΣ «ΧΑΤΖΗΔΗΜΑΣ» (παρακαμπτήριος 8Τ)	39° 39΄.627	22° 29΄.709
8.	Σ8	Πλησίον «ΠΕΛΑΣΓΙΣ Α.Ε.Β.Ε – πλυντήριο, βαφείο Υφασμάτων (παρακαμπτήριος 9Τ)	39° 41΄.103	22° 29΄.424
9.	Σ9	Περ. βιομηχανίας “INTERCOM FOODS” (παρακαμπτήριος 9Τ)	39° 41΄.814	22° 29΄.905
10.	Σ10	Γεντίκι 9Τ	39° 42΄.289	22° 29΄.987
11.	Σ11	Πλησίον σφαγείου Γυρτώνης (9Τ)	39° 44΄.288	22° 28΄.226

2.2 Μεθοδολογία

Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν στις 21/07/2015 και 21/07/2016. Από κάθε δειγματοληπτικό σταθμό λήφθηκαν συνολικά τρία υποδείγματα 100 - 200 g επιφανειακού ιζήματος (μέχρι βάθους 5 cm) τα οποία αναμείχθηκαν. Αφού αφαιρέθηκαν πρώτα οι μεγάλες πέτρες και τα ξένα σώματα, στη συνέχεια ακολούθησε αεροξήρανση των δειγμάτων στο εργαστήριο με περιοδική ανακίνηση μέχρι σταθερού βάρους (48 περίπου ώρες) και τελικό ποσοστό υγρασίας 0 - 7%. Μετά την αεροξήρανση ακολούθησε ξήρανση σε κλίβανο στους 40 ^{o}C μέχρι σταθερού βάρους. Στα ξηρά δείγματα ακολούθησε λειοτρίβηση και κοσκίνιση με κόσκινο βρογχίδας 2 mm^2. Προδιαγραφές προετοιμασίας δειγμάτων ιζήματος ορίζονται στο ASTM C 999 (1983). Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε δοχεία πολυαιθυλενίου και φυλάσσονταν σε ξηραντήρα σε σκιερό μέρος.

Κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών υπήρχε επαρκής ροή νερού, ενώ σε πάρα πολλά σημεία υπήρχαν έντονα στοιχεία θερμικής διαστρωμάτωσης, αφού ως γνωστό το «Ασμάκι», (λόγω του ότι λειτουργεί ως αποθηκευτικός χώρος νερού για την άρδευση των παρακείμενων περιοχών), έχει την ιδιαιτερότητα να αποτελεί ταυτόχρονα ποτάμιο και λιμναίο οικοσύστημα.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια του Περιφερειακού Εργαστηρίου Γεωργικών Εφαρμογών και Αναλύσεως Λιπασμάτων (Π.Ε.Γ.Ε.Α.Λ.). Το εργαστήριο εφαρμόζει σύστημα ποιότητας κατά ISO 17025: Για τον προσδιορισμό των μετάλλων χρησιμοποιήθηκε μέθοδος η οποία βασίζεται στη κατεργασία του δείγματος με 4M HNO_3 (Sposito et al., 1982). Χρησιμοποιήθηκαν 2 g δείγματος ιλύος που τοποθετήθηκαν σε σωλήνες φυγοκέντρησης των 50 mℓ με πώμα (τύπου falcon) και προστέθηκαν 12,5 mℓ HNO_3 4M. Οι φιάλες πωματίστηκαν και ανακινήθηκαν ελαφρά. Στη συνέχεια οι σωλήνες τοποθετήθηκαν σε φούρνο για 16 ώρες σε θερμοκρασία 80 ^{o}C. Τα ολικά μέταλλα Cd, Cr, Pb, Ni, Cu, Zn και Hg προσδιορίσθηκαν στην ατομική απορρόφηση (VARIAN 220 FS). Προσδιορίσθηκε ακόμα η οργανική ουσία με την μέθοδο Walkley & Black.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (Πίνακας 2 έως 8) δείχνουν ότι όλες οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στην ιλύ είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις οριακές τιμές για χρησιμοποίηση της ιλύος στη γεωργία (οδηγία 86/278/ΕΟΚ η οποία επικυρώθηκε με την Υ.Π. 80568/4225/7-8-91). Με την ΚΥΑ 80568/4225/91 ενσωματώθηκε στην Ελληνική νομοθεσία η Οδηγία 86/278/ΕΟΚ, χωρίς τροποποιήσεις. Έχει γίνει μόνο προσθήκη ορίων για το χρώμιο: 500 mg/kg ξηράς ουσίας για το Cr(III) και 10 mg/kg ξηρού για το Cr(VI). Οι τιμές επίσης είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές των προηγούμενων ετών. Αυτό πιθανόν να εξηγείται από το γεγονός ότι στην περιοχή έχουν αναστείλει τη λειτουργία τους δύο μεγάλα εργοστάσια (παραγωγής οινοπνεύματος και βαφής ενδυμάτων).

Ειδικότερα, σε ό,τι αφορά την σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των ετών 2008-2009 και 2011-2012, διαπιστώνεται ότι σε 60 περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων παρουσίασαν μείωση και σε 50 αύξηση. Πιο συγκεκριμένα στο σταθμό Σ1 παρατηρήθηκε αύξηση της τιμής του Cr, Pb και Cu, στους σταθμούς Σ2, Σ3 και Σ4 του Ni και του Cu, στο σταθμό Σ5 του Cr και Cu, στο σταθμό Σ6 του Cr, Ni και Cu, στο σταθμό Σ7 του Cr και Ni, στο σταθμό Σ8 του Pd και Νι, στο σταθμό Σ9 του Cr, Ni και Pd, στο σταθμό Σ10 του Cr και Ni και στο σταθμό Σ11 του Pd και Cu. Στο σταθμό Σ7 παρατηρήθηκε πολύ μικρότερη συγκέντρωση Cu, κάτι που εξηγείται από το γεγονός της αναστολής λειτουργίας του εργοστασίου παραγωγής οινοπνεύματος, που βρίσκεται δίπλα ακριβώς από το συγκεκριμένο δειγματοληπτικό σταθμό. Σημειώνεται ότι η παρουσία Cu έχει άμεση σχέση

με την προσθήκη $CuSO_4.5H_2O$ (ένυδρος θειικός χαλκός) που χρησιμοποιείται για την παραγωγή οινοπνεύματος.

Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των ετών 2015 και 2016 με όλα τα προηγούμενα, σε όλες τις περιπτώσεις διαπιστώνεται σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και μικρή αύξηση της οργανικής ουσίας. Η αύξηση του ποσοστού της οργανικής ουσίας που είναι από τους κύριους παράγοντες ισχυρής συγκράτησης των στοιχείων στο έδαφος, έχει σχέση με την αύξηση της ροής νερού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Επισημαίνεται ότι η απευθείας εφαρμογή της ιλύος στο έδαφος υπόκειται στους περιορισμούς της ΚΥΑ 80568/4225/91. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων στο έδαφος.

Σημείωση: Οι τιμές του Zn και του Hg μετρήθηκαν μόνο κατά τα έτη 2013, 2014, 2015 και 2016.

Πίνακας 2. Μετρηθείσες τιμές Cd/έτος σε 11 σταθμούς.

	Cd/ Έτος							
	2008	2009	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Σ1	0,16	0,18	0,76	0,78	0	0	0	0
Σ2	0,14	0,13	0	0	0	0	0	0
Σ3	0,4	0,5	0	0	0	0	0	0
Σ4	0,12	0,15	0	0	0	0	0	0
Σ5	0,05	0,05	0	0	0	0	0	0
Σ6	0,12	0,13	0	0	0	0	0	0
Σ7	0,5	0,54	0,11	0,13	0	0	0	0
Σ8	0,11	0,11	0	0	0	0	0	0
Σ9	0,12	0,11	0	0	0	0	0	0
Σ10	0,14	0,13	0	0	0	0	0	0
Σ11	0,12	0,18	0,1	0,09	0	0	0	0

Πίνακας 3. Μετρηθείσες τιμές Cr/έτος σε 11 σταθμούς.

	Cr/ Έτος							
	2008	2009	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Σ1	155	158	64,1	60,1	63	60	53	50
Σ2	98	100	80,8	85,8	80	78	60	68
Σ3	111	120	101,2	102,4	81	83	71	81
Σ4	126	129	90,9	92,9	90	82	80	80
Σ5	131	131	91	95	71	70	651	70
Σ6	106	110	204,8	202,8	104	102	101	98
Σ7	120	124	130,4	135,4	80	72	70	72
Σ8	130	131	120,4	122,4	110	102	105	100
Σ9	140	141	191,7	193,7	100	110	100	108
Σ10	122	126	180,1	171,1	80	73	80	71
Σ11	106	158	74,4	79,4	70	79,4	70	74,4

Πίνακας 4. Μετρηθείσες τιμές Ph/έτος σε 11 σταθμούς.

	Pb/ Έτος							
	2008	2009	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Σ1	14	14	49,1	48,1	68	64	66	62
Σ2	11	10	9,1	9,2	19	20	18	19
Σ3	12	13	8	8,6	60	53	59	51
Σ4	14	15	10,4	11,6	68	43	65	42
Σ5	14	14	10,1	12,1	100	98	99	96
Σ6	11	13	6,4	7,4	16	20	14	19
Σ7	58	69	33,8	31,8	33	26	31	24
Σ8	11	12	22,3	24,3	25	23	23	22
Σ9	12	14	14,6	12,7	24	30	22	29
Σ10	16	17	10,1	12	40	32	39	31
Σ11	18	14	26,4	29,4	22	52	20	50

Πίνακας 5. Μετρηθείσες τιμές Ni/έτος σε 11 σταθμούς.

	Ni/ Έτος							
	2008	2009	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Σ1	150	152	73,1	79,1	30	20	28	18
Σ2	200	201	211,4	218,4	162	154	142	144
Σ3	153	158	203,2	200	33	24	31	20
Σ4	190	191	201,7	205,8	43	42	40	40
Σ5	213	219	189,1	195,1	34	30	32	28
Σ6	220	223	760,7	769,8	40	40	38	29
Σ7	230	232	260,3	271,3	102	165	100	155
Σ8	241	242	250,2	255,3	140	138	130	128
Σ9	247	249	500,1	505,2	30	33	28	31
Σ10	228	230	430,6	451,4	153	149	150	139
Σ11	207	152	161,2	179,4	53	52	51	50

Πίνακας 6. Μετρηθείσες τιμές Cu/έτος σε 11 σταθμούς.

	Cu/ Έτος							
	2008	2009	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Σ1	35	36	63	60	70	69	67	67
Σ2	40	40	62	67	67	9	65	8
Σ3	46	46	53,1	54,9	34	28	32	27
Σ4	43	45	43	48,1	28	11	26	10
Σ5	47	48	54,3	50,6	30	16	28	15
Σ6	36	37	40,5	42,3	32	17	30	16
Σ7	426	430	89,1	199,3	102	92	100	90
Σ8	42	44	40,4	42,9	52	46	50	43
Σ9	45	47	40,1	43	43	22	41	20
Σ10	69	71	43	45	35	31	33	30
Σ11	47	36	59,1	57,4	50	29,4	48	26,4

Πίνακας 7. Μετρηθείσες τιμές Zn/έτος σε 11 σταθμούς.

	Zn/ έτος			
	2013	2014	2015	2016
Σ1	350	300	340	270
Σ2	63	53.0	62	50.0
Σ3	103	100	100	90
Σ4	150	105	140	101
Σ5	99	105	97	102
Σ6	160	150	150	154
Σ7	76	116	75	112
Σ8	150	142	148	132
Σ9	200	205,2	198	200,2
Σ10	150	135	140	133
Σ11	141	149	140	143

Πίνακας 8. Μετρηθείσες τιμές Hg/έτος σε 11 σταθμούς.

	Hg / έτος			
	2013	2014	2015	2016
Σ1	0	0	0	0
Σ2	0	0	0	0
Σ3	0	0	0	0
Σ4	0	0	0	0
Σ5	0	0	0	0
Σ6	0	0	0	0
Σ7	0	0	0	0
Σ8	0	0	0	0
Σ9	0	0	0	0
Σ10	0	0	0	0
Σ11	0	0	0	0

Πίνακας 9. Μετρηθείσες τιμές οργανικής ουσίας/έτος σε 11 σταθμούς.

	Οργανική ουσία (%) έτος 2009	Οργανική ουσία (%) έτος 2012	Οργανική ουσία (%) έτος 2014	Οργανική ουσία (%) έτος 2016
Σ1	0,8	4,5	5,0	5,0
Σ2	0,5	1,2	1,8	2,0
Σ3	7,3	8,8	8,5	8,0
Σ4	1,1	1,3	2,0	2,5
Σ5	1,1	1,5	1,6	1,8
Σ6	4,4	0,9	2,0	2,5
Σ7	6,4	4,0	4,0	5,0
Σ8	1,1	3,4	4,0	5,0
Σ9	4,9	6,4	6,0	6,5
Σ10	8,0	6,8	7,0	7,0
Σ11	3,0	5,2	5,3	6,0

Πίνακας 10. Οριακές τιμές βαρέων μετάλλων σε ιλύ και έδαφος (Οδηγία 86/278/ΕΟΚ).

Α/Α	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΟΡΙΑΚΗ ΤΙΜΗ ΙΛΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΗ	ΟΡΙΑΚΗ ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΕΔΑΦΟΣ Ν.2950/01
1.	Χαλκός (Cu)	1000-1750	50-100
2.	Κάδμιο (Cd)	20-40	-
3.	Μόλυβδος ()	750-1200	50-300
4.	Νικέλιο (Ni)	300-400	30-75
5.	Υδράργυρος (Hg)	16-25	-
6.	Αρσενικό (As)		-
7.	Ψευδάργυρος (Zn)	2500-4000	160-300

3.1 Στατιστική ανάλυση

Πίνακας 11. Στατιστική Ανάλυση σταθμικών μέτρων Cd/έτος.

Cd									
	Mean	StDev	Q1	Median	Q3	IQR	Minimum	Maximum	Range
2008	0,18	0,138058	0,12	0,12	0,16	0,04	0,05	0,5	0,45
2009	0,200909	0,161954	0,11	0,13	0,18	0,07	0,05	0,54	0,49
2011	0,088182	0,226752	0	0	0,1	0,1	0	0,76	0,76
2012	0,090909	0,232914	0	0	0,09	0,09	0	0,78	0,78
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Σχόλιο: Η τυπική απόκλιση (StDev) παρουσιάζει χαμηλές τιμές. Αυτό οφείλεται στην ομοιομορφία των τιμών των αναλύσεων του Cd. Δηλαδή, η χαμηλή τυπική απόκλιση υποδηλώνει ότι τα σημεία των δεδομένων τείνουν να είναι κοντά στο μέσο όρο του συνόλου,

Το Ενδοτεταρτημοριακό εύρος IQR περιλαμβάνει το 50% των παρατηρήσεων που βρίσκονται γύρω από τη διάμεσο.

Σταδιακά ανά έτος παρατηρούμε ότι οι τιμές μηδενίζονται, λόγω μηδενισμού των δεδομένων των αναλύσεων για το συγκεκριμένο στοιχείο Cd.

Πίνακας 12. Στατιστική Ανάλυση σταθμικών μέτρων Cr/έτος.

Cr									
	Mean	StDev	Q1	Median	Q3	IQR	Minimum	Maximum	Range
2008	122,272	16,6918	106	122	131	25	98	155	57
2009	129,818	17,7303	120	129	141	21	100	158	58
2011	120,890	49,8252	80,8	101,2	180,1	99,3	64,1	204,8	140,7
2012	121,909	48,1422	85,8	102,4	171,1	85,3	60,1	202,8	142,7
2013	84,4545	14,9289	71	80	100	29	63	110	47
2014	82,8545	15,5200	72	79,4	102	30	60	110	50
2015	131	173,293	70	80	101	31	53	651	598
2016	79,3090	16,8050	70	74,4	98	28	50	108	58

Σχόλιο : Η υψηλή τυπική απόκλιση υποδεικνύει ότι τα στοιχεία εκτείνονται πάνω από ένα ευρύτερο φάσμα των τιμών. Για την επάρκεια της περιγραφής της κατανομής λαμβάνουμε υπόψη το μέτρο διασποράς, το εύρος, το οποίο εμφανίζεται με υψηλές τιμές καθώς έχουμε υψηλή διακύμανση των τιμών των αναλύσεων και επηρεάζεται από τις ακραίες τιμές.

Το Ενδοτεταρτημοριακό εύρος IQR περιλαμβάνει το 50% των παρατηρήσεων που βρίσκονται γύρω από τη διάμεσο.

Πίνακας 13. Στατιστική Ανάλυση σταθμικών μέτρων Pd/έτος.

	Pd								
	Mean	StDev	Q1	Median	Q3	IQR	Minimum	Maximum	Range
2008	17,36364	13,66216	11	14	16	5	11	58	47
2009	18,63636	16,79448	13	14	15	2	10	69	59
2011	18,20909	13,46599	9,1	10,4	26,4	17,3	6,4	49,1	42,7
2012	18,83636	12,94768	9,2	12,1	29,4	20,2	7,4	48,1	40,7
2013	43,18182	27,06961	22	33	68	46	16	100	84
2014	41,90909	23,81367	23	32	53	30	20	98	78
2015	41,45455	27,15645	20	31	65	45	14	99	85
2016	40,45455	23,46642	22	31	51	29	19	96	77

Σχόλιο : Η υψηλή τυπική απόκλιση υποδεικνύει ότι τα στοιχεία εκτείνονται πάνω από ένα ευρύτερο αλλά καθορισμένο φάσμα τιμών καθώς παρατηρούμε συγκεκριμένο εύρος στις τιμές της τυπικής απόκλισης StDev και εδώ δεν λείπουν όμως οι ακραίες τιμές του Pd.

Πίνακας 14. Στατιστική Ανάλυση σταθμικών μέτρων Ni/έτος.

	Ni								
	Mean	StDev	Q1	Median	Q3	IQR	Minimum	Maximum	Range
2008	207,181	32,3011	190	213	230	40	150	247	97
2009	204,454	36,3520	158	219	232	74	152	249	97
2011	294,690	195,708	189,1	211,4	430,6	241,5	73,1	760,7	687,6
2012	302,8	197,067	195,1	218,4	451,4	256,3	79,1	769,8	690,7
2013	74,5454	53,6961	33	43	140	107	30	162	132
2014	77	60	30	42	149	119	20	165	145
2015	70	49,8618	31	40	130	99	28	150	122
2016	71,0909	56,8180	28	40	139	111	18	155	137

Σχόλιο : Η υψηλή τυπική απόκλιση υποδεικνύει ότι τα στοιχεία εκτείνονται πάνω από ένα ευρύτερο φάσμα των τιμών. Για την επάρκεια της περιγραφής της κατανομής λαμβάνουμε υπόψη, πέρα από τα μέτρα απόκλισης και θέσης και το μέτρο διασποράς, το εύρος, το οποίο εμφανίζεται με υψηλές τιμές καθώς έχουμε υψηλή διακύμανση των τιμών των αναλύσεων και επηρεάζεται από τις ακραίες τιμές.
Το Ενδοτεταρτημοριακό εύρος IQR περιλαμβάνει το 50% των παρατηρήσεων που βρίσκονται γύρω από τη διάμεσο

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:
Έχουμε φθίνουσα «εξομάλυνση» των τιμών κατά τα τελευταία έτη και αυτό παρατηρείται από τον έλεγχο του πρώτου και τρίτου τεταρτημορίου (Q1 και Q3).

Πίνακας 15. Στατιστική Ανάλυση σταθμικών μέτρων Cu/έτος.

	Cu								
	Mean	StDev	Q1	Median	Q3	IQR	Minimum	Maximum	Range
2008	79,6363	115,225	40	45	47	7	35	426	391
2009	80	116,486	37	45	48	11	36	430	394
2011	53,4181	14,8412	40,5	53,1	62	21,5	40,1	89,1	49
2012	64,5909	45,3917	43	50,6	60	17	42,3	199,3	157
2013	49,3636	22,6507	32	43	67	35	28	102	74
2014	33,6727	25,9017	16	28	46	30	9	92	83
2015	47,2727	22,5614	30	41	65	35	26	100	74
2016	32,0363	25,5330	15	26,4	43	28	8	90	82

Σχόλιο : Παρατηρούμε υψηλή τυπική απόκλιση που υποδεικνύει άπλωμα τιμών αλλά σταθεροποίησή της κατά τα έτη 2013, 2014, 2015 και 2016.

Πίνακας 1. Στατιστική Ανάλυση σταθμικών μέτρων Zn/έτος.

	Zn								
	Mean	StDev	Q1	Median	Q3	IQR	Minimum	Maximum	Range
2013	149,272	77,8011	99	150	160	61	63	350	287
2014	141,836	64,9761	105	135	150	45	53	300	247
2015	144,545	75,5372	97	140	150	53	62	340	278
2016	135,2	59,1080	101	132	154	53	50	270	220

Σχόλιο : Παρατηρούμε υψηλή τυπική απόκλιση που υποδεικνύει ότι τα στοιχεία εκτείνονται πάνω από ένα ευρύτερο φάσμα των τιμών, μεγάλο εύρος Range, αποτέλεσμα της μεγάλης ανομοιομορφίας τιμών των αναλύσεων Zn ανά σταθμό.

Πίνακας 17. Στατιστική Ανάλυση σταθμικών μέτρων οργανικής ουσίας/έτος.

	ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΟΥΣΙΑ (%)								
	Mean	StDev	Q1	Median	Q3	IQR	Minimum	Maximum	Range
2009	3,509091	2,822926	1,1	3	6,4	5,3	0,5	8	7,5
2012	4	2,639697	1,3	4	6,4	5,1	0,9	8,8	7,9
2014	4,290909	2,315364	2	4	6	4	1,6	8,5	6,9
2016	4,663636	2,16207	2,5	5	6,5	4	1,8	8	6,2

Σχόλιο : Παρατηρείται σταθερότητα των τιμών της οργανικής ουσίας στο φάσμα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τα έτη 2009, 2012, 2014 και 2016.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των βαρέων μετάλλων στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης δείχνουν μια προοδευτική μείωση από έτος σε έτος, με τις τιμές τους να είναι σε όλες τις περιπτώσεις κατά πολύ μικρότερες από τις επιτρεπόμενες για την απευθείας εφαρμογή της ιλύος στο έδαφος. Η σταδιακή και σταθερή μείωση των τιμών, φαίνεται να οφείλεται στην ελάττωση της βιομηχανικής δραστηριότητας στην περιοχή που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια.

Μετά από βιβλιογραφική αναζήτηση δεν βρέθηκαν άλλες εργασίες που να περιλαμβάνουν μετρήσεις για την εν λόγω περιοχή.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αντωνόπουλος, Β., 2010. *Υδραυλική περιβάλλοντος και ποιότητα επιφανειακών υδάτων,* Εκδόσεις Τζιόλα, 488 σελ.

Hejny, S., Raspopon, I. M. and Knet, J., 1986. *Studies on shallow lakes and ponds*. Academia, Praha.

Jamshidi-Zanjani, A and Saeedi, M., 2013. *Metal pollution assessment and multivariate analysis in sediment of Anzali international wetland.* Environmental Earth Sciences, 70(4), 1791-1808.

Κουτρουβέλης, Ι., 1999. *Βασικά εργαλεία και μέθοδοι για τον έλεγχο της ποιότητας. Τόμος Α. Πιθανότητες και στατιστική Ι.* Μεταπτυχιακό πρόγραμμα Διασφάλιση Ποιότητας, 147-161 σελ.

Li, P., Qian, H., Howard, K. and Wu, J., 2015. *Heavy metal contamination of Yellow River alluvial sediments, northwest China,* Environmental Earth Sciences, 73: 3403-3415.

Ray, S. and White, W., 1976. *Selected aquatic plants as indicator species for heavy metal pollution,* Journal of Environmental Science and Health, 11(12), 717-725.

Sawidis, T., Stratis, I. and Zachariadis, G. A., 1991. *Distribution of heavy metals in sediments and aquatic plants of the river Pinios (Central Greece).* Science of the Total Environment, 102: 261-266.

Sawidis, T., Brown, M. T., Zachariadis, G. and Stratis, I., 2001. *Trace metal concentrations in marine macroalgae from different biotopes in the Aegean Sea.* Environment International, 27: 43 – 47.

Sposito, G., Lund, L., Chang, A., 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. Soil Science Society of America Journal, 46: 260–264.

Walkley, A. and Black, I.A., 1934. *An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method.* Soil Science, 3: 29–37.

Yu, J., Huang, Z., Chen, T., Qin, D., Zeng, X. and Huang, Y., 2012. *Evaluation of ecological risk and source of heavy metals in vegetable growing soils in Fujian province, China.* Environmental Earth Sciences, 65: 29–37.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΜΕΡΓΕΙΑΣ. ΜΙΑ ΟΛΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΟΝ ΓΕΩΡΓΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

Α. Μαρτζοπούλου[1]✉, Β. Φιρφιρής[2], Σ. Καλαμάρας[2] & Β. Φράγκος[2]

[1]Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124. Θεσσαλονίκη

[2]Τμήμα Γεωπονίας, Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124, Θεσσαλονίκη

✉*amartzopoulou@arch.auth.gr*

Περίληψη

Η ανάλυση εμέργειας είναι μια ολιστική προσέγγιση που περιλαμβάνει οικονομικά, ενεργειακά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά για τη διαχείριση των εισροών που αποβλέπουν στην αύξηση της ανταγωνιστικότητας και της βιωσιμότητας των επιχειρήσεων, καθώς και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Πολλές αγροτικές, και όχι μόνο, εκμεταλλεύσεις χρησιμοποιούν περισσότερα υλικά και ενέργεια από αυτά που απαιτούν οι παραγωγικές τους διεργασίες, λόγω απαρχαιωμένων και αναποτελεσματικών τεχνολογιών. Παρόλα τα πλεονεκτήματα της ανάλυσης εμέργειας, και σε αντίθεση με άλλες χώρες, στην Ελλάδα έχουν γίνει ελάχιστες χρήσεις αυτού του εργαλείου αξιολόγησης παραγωγικών δραστηριοτήτων. Στόχος της εργασίας αυτής είναι η γνωστοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου για την ευρύτερη χρήση της στην αξιολόγηση παραγωγικών διεργασιών και εκμεταλλεύσεων του γεωργικού τομέα, καθώς γίνονται και συγκεκριμένες προτάσεις εφαρμογής στον γεωργικό τομέα της χώρας μας.

Λέξεις κλειδιά: ανάλυση εμέργειας, περιβαλλοντική αξιολόγηση, διαχείριση αγρο-οικοσυστημάτων

EMERGY ANALYSIS. A HOLISTIC EVALUATION METHOD OF PRODUCTION PROCESSES IN AGRICULTURE

Martzopoulou [1], V. Firifiris[2], S. Kalamaras[2] & V. Fragos[2]

[1]School of Architecture, Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, P.C. 54124 Thessaloniki

[2]School of Agriculture, Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki P.C. 54124 Thessaloniki

✉*amartzopoulou@arch.auth.gr*

ABSTRACT

Emergy analysis is a holistic approach that includes economic, energy and environmental characteristics, to manage the inputs of a system in order to increase competitiveness and sustainability, as well as to reduce environmental impacts. Many farm businesses use more materials and energy than their productive processes require, due to obsolete and inefficient technologies. Despite the advantages of emergy analysis, and unlike other countries, in Greece there has been little use of this production process assessment tool. The aim of this work is to present this method for its wider use in the evaluation of production processes and systems in the agricultural sector and specific proposals in the agricultural sector of our country are introduced for this reason.

Keywords: emergy analysis, environmental impact assessment, agro-ecosystem management

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση εμέργειας είναι μια ολιστική προσέγγιση που περιλαμβάνει οικονομικά, ενεργειακά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, συγχρόνως και σε συνδυασμό, προκειμένου να αξιολογήσει μια παραγωγική διαδικασία ή ένα σύστημα. Για τον ίδιο σκοπό έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες μέθοδοι όπως η «Ανάλυση Ενσωματωμένης Ενέργειας» (Embodied Energy Analysis), η «Ανάλυση Εξέργειας» (Exergy Analysis), η «Ανάλυση Κύκλου Ζωής» (Life Cycle Assessment), το «Οικολογικό Αποτύπωμα» (Ecological Footprint). Σε όλες αυτές τις μεθοδολογίες υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά και η κάθε μια μπορεί να προσφέρει απαντήσεις σε συγκεκριμένα θέματα. Η ανάλυση της εμέργειας είναι ένα ολιστικό εργαλείο για την έρευνα της βιωσιμότητας ενός συστήματος, της κατανόησης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της ανθρώπινης δραστηριότητας και των επιδράσεων της στους φυσικούς πόρους, και τέλος αξιολογεί την οικονομική δραστηριότητα του συστήματος.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1. Ιστορική εξέλιξη

Ο Howard T. Odum, ένας οικολόγος και καθηγητής Πανεπιστημίου στις Η.Π.Α. επικέντρωσε, επί 35 χρόνια, την έρευνά του στην ποιότητα της ενέργειας. Ο Odum κατανόησε πλήρως ότι όλες οι μορφές ενέργειας δεν έχουν την ίδια ικανότητα να παράξουν έργο και ότι ήταν αναγκαίο να γίνουν «διορθώσεις ποιότητας» εάν κάποιος ήθελε να προβεί σε συγκρίσεις. Ήταν ο πρώτος που επισήμανε τις πλάνες των ενεργειακών τεχνολογιών που υποσχέθηκαν απεριόριστη ενέργεια για την κοινωνία.

Οι σημαντικές προσπάθειες του, τη δεκαετία του 1970 στόχευαν στον καθορισμό ποσοτικά της ποιότητας της ενέργειας. Θεώρησε ότι ένα σύστημα οργανωμένο να χρησιμοποιεί συμπυκνωμένη ενέργεια, όπως τα ορυκτά καύσιμα, δεν μπορεί να επεξεργασθεί μια αραιότερη μορφή ενέργειας, όπως ο ήλιος.

Οι προσπάθειες του οδήγησαν στην έννοια της ποιότητας της ενέργειας, η οποία ονομάστηκε EMERGY (εμέργεια) (Odum, 1996). Από το 1983 και μέχρι σήμερα, η μεθοδολογία της εμέργειας συνεχώς μετασχηματίζεται. Στο Πανεπιστήμιο της Φλώριδας (Florida) σύμφωνα με τους Brown and Ulgiati (2004) τα τελευταία 35 περίπου χρόνια, έγιναν συστηματικά σεμινάρια σχετικά με τις έννοιες και τη θεωρία της εμέργειας. Ο Odum με συναδέλφους του αλλά και φοιτητές, μέσω συνεχούς διαλόγου, ανέπτυξε τη μεθοδολογία της εμέργειας. Ο Brown υπήρξε και αυτός μαθητής του Odum και γι αυτό συνέχισε το έργο του. Σήμερα υπάρχουν αρκετοί ερευνητές στην Ευρώπη, στην Νότια Αμερική και Κίνα που ασχολούνται με την εμέργεια.

2.2. Θεωρία της ανάλυσης εμέργειας (Ορισμοί)

Εμέργεια είναι η διαθέσιμη ενέργεια ενός είδους που απαιτείται προηγουμένως άμεσα ή έμμεσα για την παραγωγή ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας (Odum, 1998).

Εμέργεια είναι το σύνολο όλων των εισροών ενέργειας που άμεσα ή έμμεσα απαιτούνται από μια διαδικασία, για να παράγουν ένα συγκεκριμένο προϊόν, όταν οι εισροές εκφράζονται με την ίδια μορφή ενέργειας, συνήθως ηλιακή ενέργεια. Πολύ συχνά, οι εισροές σε μια διαδικασία είναι το αποτέλεσμα άλλων διαδικασιών, στις οποίες η ενέργεια έχει συμπυκνωθεί ή αναβαθμισθεί. (Brown and Ulgiati, 1997).

Η *μονάδα της εμέργειας* είναι το emjoule, μια μονάδα που αναφέρεται στη διαθέσιμη ενέργεια ενός είδους που καταναλώθηκε σε μετασχηματισμούς. Πιο συγκεκριμένα, το emjoule παρουσιάζει την ενέργεια που καταναλώθηκε για να παραχθεί ένα προϊόν ή υπηρεσία και η ενέργεια αυτή είναι ενσωματωμένη σε αυτό. Για παράδειγμα, ήλιος, καύσιμα, ηλεκτρισμός και ανθρώπινες υπηρεσίες μπορεί να τοποθετηθούν σε μια κοινή βάση, μετασχηματισμένα σε emjoules ηλιακής ενέργειας η οποία απαιτείται για να παραχθεί το καθένα από αυτά. Στην περίπτωση αυτή η μονάδα είναι ηλιακή εμέργεια και εκφράζεται σε ηλιακά emjoules (seJ: solar emergy joules). Η μονάδα αυτή επικράτησε και χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις αν και χρησιμοποιήθηκαν και άλλες μονάδες όπως emjoules άνθρακα ή ηλεκτρισμού κλπ. Οι τιμές της μονάδας εμέργειας υπολογίζονται με βάση την εμέργεια που απαιτείται για να παραχθεί μια μονάδα εκροής.

Μετασχηματικότητα (transformity): είναι μια εισροή εμέργειας ανά μονάδα εκροής διαθέσιμης ενέργειας (εξέργειας). Η μετασχηματικότητα συχνά εκλαμβάνεται ως μέτρο της ποιότητας της ενέργειας. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της μετασχηματικότητας, τόσο μεγαλύτερη είναι η εμέργεια για την παραγωγή ενός προϊόντος. Ως ηλιακή μετασχηματικότητα ορίζεται «η Ηλιακή Εμέργεια που απαιτείται για να γίνει ένα J προϊόντος ή υπηρεσίας (Odum, 1996). Η μετασχηματικότητα ενός προϊόντος είναι η ηλιακή του εμέργεια διαιρούμενη από τη διαθέσιμη ενέργειά του, που είναι (Hau and Bakshi, 2004): $M = \tau \times B$, όπου M: εμέργεια, τ: μετασχηματικότητα, B: διαθέσιμη ενέργεια.

Εμέργεια ανά μονάδα χρήματος είναι η εμέργεια που απαιτείται για να παραχθεί μια μονάδα ενός οικονομικού προϊόντος. Είναι χρήσιμο μέγεθος, γιατί μπορεί κανείς να μετατρέψει τις πληρωμές σε μονάδες εμέργειας.

Η σχέση εμέργεια/χρήματα ποικίλει κάθε χρόνο, διότι ο πληθωρισμός ενσωματώνεται στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν κάθε χώρας (Odum et al., 1995; Hau and Bakshi, 2004): $M=F(M_{nation}/F_{nation})$, όπου M: εμέργεια, F: οικονομική εισροή, M_{nation}: Εμέργεια χώρας και F_{nation}: Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν χώρας (ΑΕΠ χώρας)

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΜΕΡΓΕΙΑΣ

Η μεθοδολογία της εμεργειακής ανάλυσης περιλαμβάνει τέσσερα στάδια: α) απόκτηση δεδομένων, β) δημιουργία διαγράμματος με όλες τις ροές και τα αποθέματα του συστήματος, γ) χρήση της μετασχηματικότητας για τη μετατροπή όλων των ροών ενέργειας σε ισοδύναμες εμέργειες και, δ) αξιολόγηση του συστήματος με τον προσδιορισμό και την ερμηνεία των εμεργειακών δεικτών.

3.1. Απόκτηση δεδομένων

Όπως και σε άλλες προσεγγίσεις περιβαλλοντικής ανάλυσης π.χ. στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής ή στην Ανάλυση της Εξέργειας έτσι και στην Εμεργειακή Ανάλυση, το πρώτο βήμα είναι η συγκέντρωση στοιχείων και πληροφοριών για το σύστημα. Η διαθεσιμότητα των δεδομένων, η ποιότητα τους και η αξιοπιστία τους αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Τα στοιχεία που συγκεντρώνονται αξιολογούνται και στη συνέχεια κατηγοριοποιούνται σε διάφορες ομάδες. Οι ομάδες αυτές περιλαμβάνουν τις ανανεώσιμες εισροές, τις μη ανανεώσιμες εισροές, τα αγορασμένα εφόδια, τις εισροές εργασίας και υπηρεσιών και τέλος τις εκροές.

3.2. Δημιουργία εμεργειακού διαγράμματος

Η εμεργειακή προσέγγιση ξεκινά με την κατασκευή του διαγράμματος το οποίο παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για το επόμενο στάδιο που είναι η δημιουργία των

εμεργειακών πινάκων. Το εμεργειακό διάγραμμα παρουσιάζει τις διάφορες ροές του συνολικού συστήματος. Καθορίζονται οι εισροές και εκροές, τα στοιχεία του συστήματος, οι αλληλοεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών και των τελικών προϊόντων. Οι ροές οργανώνονται δεξιόστροφα, από αριστερά προς τα δεξιά σύμφωνα με την αυξανόμενη μετασχηματικότητα τους. Η στρατηγική αυτή βοηθά στην απλούστευση των διαγραμμάτων και αποτρέπει τις ροές να διασταυρώνονται μεταξύ τους.

Η ιεραρχία της ενέργειας, η οποία παρουσιάζεται στα εμεργειακά διαγράμματα, κάνει την παραδοχή ότι κάθε είδος ενέργειας μετασχηματίζεται από ένα καθεστώς ενέργειας σε ένα άλλο. Η ιεραρχία της ενέργειας ερμηνεύεται ως εξής: (Losowska, 2011) κάποια joules ηλιακής ενέργειας απαιτούνται για να γίνει ένα joule οργανικής ύλης, έπειτα πολλά joules οργανικής ύλης απαιτούνται για να γίνει ένα joule ηλεκτρικής ενέργειας κ.ο.κ. Επίσης μαζί με την ιεραρχία ενέργειας παρουσιάζεται και η ροή της ενέργειας στα εμεργειακά διαγράμματα. Η ποιότητα είναι καλύτερη πηγαίνοντας προς τη δεξιά πλευρά.

3.3. Χρήση της μετασχηματικότητας για τη μετατροπή όλων των ροών σε ισοδύναμες εμέργειες

Το τρίτο στάδιο της εμεργειακής ανάλυσης είναι η δημιουργία ενός πίνακα για την αξιολόγηση της εμέργειας. Πρέπει να κατηγοριοποιηθούν τα δεδομένα σε διαφορετικές ομάδες, όπως ανανεώσιμες πηγές, μη ανανεώσιμες πηγές, αγορασμένα εφόδια, οικονομικές αποδόσεις κλπ. Μόλις αναπτυχθούν οι ομάδες, τα δεδομένα πρέπει να κωδικοποιηθούν και να καταγραφούν σε μορφή πίνακα. Μη έγκυρα ή ανακριβή στοιχεία πρέπει να διαγράφονται για να μην αλλοιωθεί το αποτέλεσμα της ανάλυσης. Νέα δεδομένα μπορεί να προστίθενται και άλλα να διαγράφονται με βάση μια θερμοδυναμική αξιολόγηση της διαδικασίας. Ο πίνακας όταν ολοκληρωθεί πρέπει να περιγράφει τις πραγματικές ροές των υλικών, της εργασίας και των υπηρεσιών. Για να μετατραπούν οι διάφορες εισροές σε κοινές μονάδες εμέργειας (ηλιακές) πρέπει οι μονάδες κάθε ροής να πολλαπλασιάζονται με τις κατάλληλες μετασχηματικότητες.

Ένας κλασικός πίνακας αποτελείται από έξι στήλες. Η 1^{η} στήλη συμπεριλαμβάνει τον αριθμό κάθε δεδομένου. Η 2^{η} την ονομασία των δεδομένων. Η 3^{η} στήλη τις μονάδες δεδομένων. Η 4^{η} τον συντελεστή μετασχηματικότητας και η 5^{η} την αντίστοιχη εμέργεια. Η τιμή της εμέργειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της στήλης τρία (3^{η} στήλη) με την στήλη τέσσερα (4^{η} στήλη). Η μονάδα της 5ης στήλης είναι sej/yr. Η 6^{η} στήλη, η οποία είναι προαιρετική, παρουσιάζει την εμέργεια ανά χρηματική μονάδα π.χ. Emdollars. Ενδεικτικά, ένας χαρακτηριστικός εμεργειακός πίνακας είναι ο Πίνακας 1.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικός Εμεργειακός (Ulgiati et al., 2009)

#	Αντικείμενο	Μονάδα	Ποσότητα (μονάδα/έτος)	Ένταση ηλιακής εμέργειας (seJ/μονάδα)*	Ηλιακή Εμέργεια (seJ)
Ανανεώσιμες (R) ή αργά-ανανεώσιμες (SR) αποθήκες					
1.	Φρέσκο Νερό	J	1.64E+23	3.06E+04	5.01E+27
2.	Οργανική ουσία εδάφους	J	3.10E+22	1.24E+05	3.85E+27
3.	Βιομάζα Φυτών	J	4.16E+22	1.68E+04	6.99E+26
4.	Βιομάζα Ζώων	J	4.55E+19	1.68E+06	7.64E+25
		Υποσύνολο R και SR αποθηκών [§]			**5.01E+27**
Μη Ανανεώσιμες (NR) Αποθήκες					
4.	Αργό Πετρέλαιο	J	5.82E+21	9.07E+04	5.28E+26

5. Φυσικό Αέριο	J	5.28E+21	8.06E+04	4.26E+26
6. Άνθρακας	J	2.16E+22	6.72E+04	1.45E+27
7. Ορυκτό Ουράνιο	J	8.35E+20	3.01E+03	2.51E+24
10. Φωσφορικό Πέτρωμα	G	1.10E+16	5.19E+09	5.71E+25
12. Μέταλλα (Al, Cu, Pb, Fe Zn)	G	1.74E+17	1.68E+09	2.92E+26
	Υποσύνολο NR αποθηκών			**2.76E+27**
	ΣΥΝΟΛΟ ΑΠΟΘΗΚΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ			**1.24E+28**

* Ένταση Εμέργειας από δημοσιευμένη βιβλιογραφία

§ Μέγιστη ροή μεταξύ των αντικειμένων 1 έως 4, σύμφωνα με την εμεργειακή άλγεβρα

3.4. Προσδιορισμός εμεργειακών δεικτών

Διάφοροι δείκτες βασισμένοι στην εμέργεια, έχουν προταθεί για να αναλύσουν και να ποσοτικοποιήσουν την οικονομική και οικολογική δυνατότητα καθώς και τη βιωσιμότητα ενός συστήματος (Ulgiati et al., 1995; Brown and Ulgiati, 1997). Οι δείκτες αυτοί απεικονίζουν τη δομή, λειτουργία και αποδοτικότητα ενός σύνθετου συστήματος και αναλύουν ποσοτικά την παραγωγή, την επιβάρυνση του περιβάλλοντος, τη βιωσιμότητα και κατά συνέπεια την οικονομικότητα ενός παραγωγικού συστήματος.

Οι τρεις κλασσικοί εμεργειακοί δείκτες είναι ο EYR (Emergy Yield ratio), ο ELR (Environmental Loading Ratio) και ο EIS (Emergy Index of Sustainability).

Η μαθηματική έκφραση του EYR είναι (Odum, 1996):

$$EYR = Y/F = (R+N+F)/F \quad (1)$$

όπου: Y: παραγωγή, F: αγορασμένες εισροές (αγορασμένα εφόδια), R: ανανεώσιμες πηγές (πόροι) και N: μη ανανεώσιμοι πόροι.

Ο EYR είναι ο λόγος της συνολικής χρησιμοποιούμενης εμέργειας που αξιοποιείται από τη διαδικασία (Y) προς την εμέργεια (F) που επενδύεται από έξω από το σύστημα. Ο EYR παρουσιάζει την εικόνα σχετικά με το καθαρό όφελος των διαφόρων διαδικασιών παραγωγής προς την κοινωνία. Όταν πρόκειται για παραγωγική διαδικασία μετρά την ικανότητα του συστήματος να στηριχθεί στους τοπικούς πόρους. Ο δείκτης EYR δεν κάνει διακρίσεις μεταξύ ανανεώσιμων και μη ανανεώσιμων ροών, παρά μόνον μεταξύ τοπικών και εισαγόμενων ροών ενέργειας. Μετρά το καθαρό όφελος για την οικονομία, δηλαδή το ποσό των τοπικών πόρων εκμετάλλευσης, που προκύπτει από το ποσό της επένδυσης.

Ο δεύτερος παραδοσιακός δείκτης ELR είναι η αναλογία των μη ανανεώσιμων πόρων (N) και των αγορασμένων εισροών (F) προς τις ανανεώσιμες πηγές (R) (Odum,1996).

$$ELR = (N+F)/R \quad (2)$$

Είναι ένας δείκτης που εκφράζει την πίεση στο περιβάλλον λόγω της οικονομικής δραστηριότητας. Όταν οι τοπικές ανανεώσιμες πηγές R είναι μεγάλης αξίας οδηγούν σε έναν μικρό δείκτη ELR, δηλαδή σε μικρή περιβαλλοντική πίεση. Ενώ μεγάλης αξίας τοπικές μη ανανεώσιμες πηγές N οδηγούν σε έναν υψηλό δείκτη ELR, δείχνοντας μεγάλη περιβαλλοντική πίεση.

Όταν ο δείκτης EYR είναι υψηλός, λόγω της μεγάλης αξίας των τοπικών ανανεώσιμων πόρων, τότε ο ELR είναι μικρός, δείχνοντας έτσι, ότι το στρες του περιβάλλοντος είναι μικρό. Αντίθετα, όταν στον EYR συμμετέχουν τοπικοί μη ανανεώσιμοι πόροι μεγάλης αξίας, τότε ο δείκτης ELR αυξάνεται αποκαλύπτοντας τη μεγάλη επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Επομένως, όταν χρησιμοποιούνται μη ανανεώσιμοι πόροι (N) υπάρχει περίπτωση και οι δύο δείκτες EYR και ELR να αυξάνονται ταυτόχρονα, διότι το N βρίσκεται στον αριθμητή των μαθηματικών εκφράσεων και των δύο δεικτών. Στην περίπτωση αυτή το στρες του περιβάλλοντος μπορεί να είναι μεγάλο. Αντίθετα, όταν ο EYR αυξάνεται και ο ELR μειώνεται, η διαδικασία του συστήματος δεν επιβαρύνει το περιβάλλον.

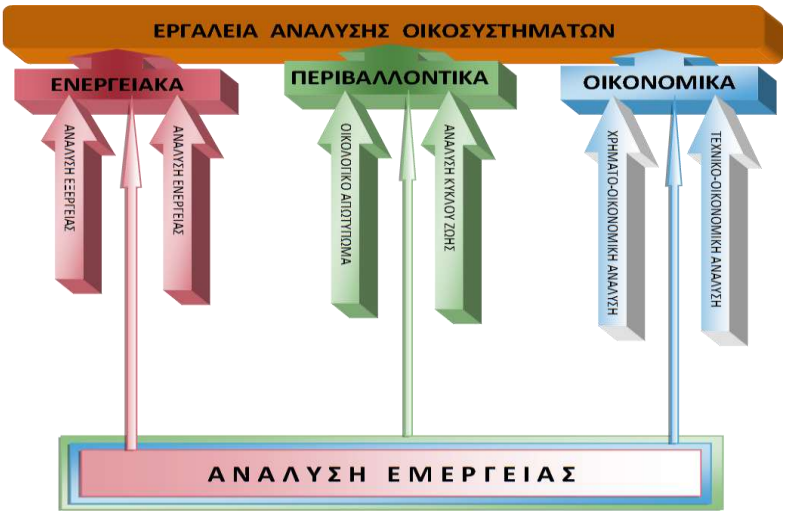
Ο τρίτος παραδοσιακός δείκτης EIS μετρά την παραγωγή εμέργειας ανά μονάδα περιβαλλοντικού φορτίου:

EIS=EYR/ELR (3)

Ο δείκτης αυτός είναι πιο νέος, καθορίσθηκε για πρώτη φορά από τους Brown και Ulgiati το 1997 και δείχνει τη βιωσιμότητα του συστήματος. Εάν είναι μικρότερος από ένα δείχνει ότι το προϊόν ή η διαδικασία δεν έχει βιωσιμότητα. Εάν είναι μεγαλύτερος από ένα δείχνει ότι υπάρχει βιωσιμότητα και επομένως θετική επίδραση στην οικονομία. Ο δείκτης EIS εάν κυμαίνεται μεταξύ ένα και πέντε υποδηλώνει ότι το σύστημα έχει μέτρια βιωσιμότητα. Εάν είναι μεγαλύτερος του πέντε τότε σημαίνει ότι προϊόντα και υπηρεσίες αναλογικά έχουν μεγαλύτερη βιωσιμότητα.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ –ΚΡΙΤΙΚΗ

4.1. Πλεονεκτήματα της ανάλυσης εμέργειας



Σχήμα 1. Σχηματικό διάγραμμα εργαλείων ανάλυσης οικοσυστημάτων.

Εκείνο που καθιστά την ανάλυση εμέργειας ξεχωριστή από τα άλλα εργαλεία αξιολόγησης είναι ότι ενσωματώνει ταυτόχρονα πολλά από τα στοιχεία άλλων μεθόδων, οι οποίες τα εξετάζουν η κάθε μια ξεχωριστά, και συγκεκριμένα οικονομικά, ενεργειακά και περιβαλλοντικά (Σχήμα 1).

Ορισμένα από τα πιο εντυπωσιακά χαρακτηριστικά της ανάλυσης της εμέργειας είναι τα ακόλουθα (Hau and Bakshi, 2004; Brown and Ulgiati, 2004):

- Αποτελεί τη γέφυρα που συνδέει τα οικονομικά και οικολογικά συστήματα. Μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με μια κοινή μονάδα και έτσι επιτρέπει τη σύγκριση των οικονομικών και οικολογικών παραμέτρων ενός συστήματος, ανεξάρτητα από τη νομισματική τους αξία. Βέβαια, αναγνωρίζει τις διάφορες ποιότητες ενέργειας ή τις ικανότητες να παράξουν προϊόντα, πχ ότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι καλύτερης ποιότητας από την ηλιακή.
- Επικεντρώνεται στο ρόλο του περιβάλλοντος που στηρίζει τις ανθρώπινες δραστηριότητες (διαχείριση των παραγόντων μόλυνσης) και αξιολογεί την περιβαλλοντική επίδραση διεργασιών που βασίζονται σε πόρους υψηλής ή χαμηλής ποιότητας.
- Περιλαμβάνει δραστηριότητες με τις οποίες μπορεί να αξιολογηθούν μη-εμπορικές εισροές, χωρίς τη χρήση της χρηματικής τους αξίας.
- Περιλαμβάνει την αυστηρότητα των μεθόδων της θερμοδυναμικής.
- Αξιολογεί την ποιότητα των ροών και αποθεμάτων, εκείνων των πόρων, που δεν προέρχονται από την αγορά, όπως το καθαρό νερό, το γόνιμο επιφανειακό στρώμα

εδάφους και τα οποία δεν μπορεί να αξιολογηθούν με νομισματικό τρόπο, ενώ παράλληλα περιλαμβάνει την εμέργεια της ανθρώπινης εργασίας και των υπηρεσιών.

- Ερευνά το επίπεδο της ανανεωσιμότητας των πόρων. Ως βάση λαμβάνονται υπόψη ο χρόνος και ο χώρος που απαιτούνται για να δημιουργηθούν αυτοί.
- Η ανάλυση της εμέργειας είναι η πιο ολιστική μέθοδος σε σχέση με άλλες μεθόδους ανάλυσης. Όλες οι παραπάνω ιδιότητες επεκτείνονται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη μεθοδολογία ανάλυσης, παρέχοντας ένα δυναμικό και ολοκληρωμένο εργαλείο για την έρευνα των συστημάτων. Οι περισσότερες υπάρχουσες μέθοδοι, όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής και η Ανάλυση της Εξέργειας έμμεσα περιλαμβάνουν την κατανάλωση των ακατέργαστων υλικών, τη χρήση ενέργειας και τις εκπομπές των στοιχείων/παραμέτρων ρύπανσης (ρυπαντές-pollutants) της ατμόσφαιρας. Όμως, οι μέθοδοι αυτές επικεντρώνονται περισσότερο στις εκπομπές και την επίδρασή τους, ενώ αγνοούν τη σημαντική συμμετοχή των οικοσυστημάτων στην ανθρώπινη ποιότητα ζωής.

4.2. Κριτική της ανάλυσης εμέργειας

Η θεωρία της εμέργειας, εκτός από τους ένθερμους υποστηρικτές της, δέχθηκε και κριτική από κάποιους αντίθετους ως προς την έννοιά της (Ayres, 1998; Hau and Bakshi, 2004). Σε πάρα πολλές κριτικές υπήρξαν δημοσιευμένες αντικρούσεις (Patten,1993; Odum, 1995). Είναι παρά πολύ βασικό να αναφερθεί ότι παρόμοιες κριτικές έχουν καταγραφεί και για άλλες μεθόδους, που έχουν χρησιμοποιηθεί στα βιομηχανικά και περιβαλλοντικά συστήματα, όπως την Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Εξέργειας, Ροής των Υλικών κ.λπ.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΜΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΓΕΩΡΓΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

Οι Ortega et al. (2005) χρησιμοποίησαν την εμεργειακή ανάλυση για να αξιολογήσουν τέσσερα διαφορετικά συστήματα παραγωγής σόγιας στη Βραζιλία. Οι Rydberg et al. (2006) παρουσίασαν εμεργειακή αξιολόγηση της Δανίας και της Δανέζικης γεωργίας, για τα έτη 1936, 1970 και 1999. Η αξιολόγηση επικεντρώθηκε στην αλλαγή της συσχέτισης μεταξύ της γεωργίας και της κοινωνίας κατά τη διάρκεια της περιόδου που μελετήθηκε. Οι Agostino et al. (2008) χρησιμοποίησαν εμεργειακή ανάλυση και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) για να βελτιώσουν την αξιολόγηση οικογενειακής μορφής αγροτικών επιχειρήσεων, οι οποίες υιοθετούν άλλοτε οικολογικά και άλλοτε χημικά μοντέλα παραγωγής. Οι Pizzigalo et al. (2008) αξιολόγησαν δυο αγροτοβιομηχανικές διαδικασίες (μια οργανική και μια ημι - βιομηχανική) παραγωγής οίνου στην περιοχή Siena της Ιταλίας με εμεργειακή ανάλυση σε συνδυασμό με την ανάλυση κύκλου ζωής. Οι Chen et al. (2006) με την εμεργειακή εξέτασαν τη βιωσιμότητα του αγροτικού τομέα της Κίνας, από το 1980 μέχρι το 2000.

Ειδικότερα, η ανάλυση εμέργειας έχει εφαρμοστεί και σε περιπτώσεις του γεωργικού τομέα με έμφαση στη χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Οι Franzese et al. (2009) εστίασαν στην αειφόρο παραγωγή της βιομάζας. Χρησιμοποίησαν δύο μεθόδους, την απαίτηση της ακαθάριστης ενέργειας (Gross Energy Requirement) και την εμεργειακή ανάλυση, για να αξιολογήσουν τη δυνατότητα να παρέχουν ολοκληρωμένη αξιολόγηση της λειτουργίας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας διαδικασιών παραγωγής. Οι Coppola et al. (2009) μελέτησαν με εμεργειακή ανάλυση τη βιωσιμότητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής της βιομεθανόλης από φυτικά υπολείμματα σίτου.

Η ανάλυση εμέργειας στην Ελλάδα έχει χρησιμοποιηθεί ελάχιστα και μόνο με απλές προσεγγίσεις σε γεωργικές εφαρμογές. Το 2003 οι Khalaf et al. έκαναν μια προκαταρκτική μελέτη για την παραγωγή της ελιάς και του ελαιολάδου σε τρεις χώρες (Ισπανία, Ιταλία, Ελλάδα). Η Καμπράγκου Ε. (2006), χρησιμοποίησε την ανάλυση εμέργειας για τη γεωργική

χρήση του νερού στο Νέστο. Οι Bakalianos et al. (2008) και Vagiona et al. (2008) εξέτασαν τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών σε αρδευόμενες εκτάσεις της λίμνης Κάρλας και του ποταμού Σπερχειού. Τέλος η Menegaki (2008) δημοσίευσε μια εργασία για την αξιολόγηση της ανανεώσιμης ενέργειας, στην οποία πραγματοποιεί μια συγκριτική επισκόπηση των υπαρχόντων μεθοδολογιών αξιολόγησης. Ειδικά για την ανάλυση της εμέργειας διατυπώνει ότι πρόκειται για μια οικολογική μέθοδο, βασισμένη στην περιβαλλοντική μηχανική η οποία έχει συγχρόνως αξιόλογες διασυνδέσεις με την οικονομία.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η ανάλυση εμέργειας είναι μια ολιστική προσέγγιση που περιλαμβάνει οικονομικά, ενεργειακά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, για τη διαχείριση των ενεργειακών εισροών και των περιβαλλοντικών διεργασιών. που αποβλέπουν στην αύξηση της ανταγωνιστικότητας και της βιωσιμότητας των επιχειρήσεων αλλά και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων παράλληλα. Οι γεωργικές επιχειρήσεις, ακόμα και αυτές με πολύ χαμηλές εισροές υλικών και ενέργειας, δημιουργούν απόβλητα και ρύπανση που μπορεί να βλάψουν το τοπικό περιβάλλον και το προσωπικό.

Επειδή στην Ελλάδα η ανάλυση εμέργειας έχει χρησιμοποιηθεί ελάχιστα και μάλιστα όχι στο σύνολο της σαν μεθοδολογία, η συγκεκριμένη ερευνητική ομάδα αποφάσισε την εφαρμογή της για την αξιολόγηση των παρακάτω γεωργικών συστημάτων: α) Πτηνοτροφείο εγκατεστημένου στα Βασιλικά της Θεσσαλονίκης, β) Γεωθερμικό θερμοκήπιο «GEOCLIMA 2014" της εταιρίας «ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ» και γ) Μονάδα παραγωγής βιοαερίου από αγροκτηνοτροφικά απόβλητα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agostino, F., Diniz, G., Siche, R., Ortega, E., 2008. *The use of emergy assessment and the Geographical Information System in the diagnosis of small family farms in Brazil*. Ecological Modelling, 210: 37-57.

Ayres, R.U., 1998. *Ecology vs. Economics: Confusing Production and Consumption. Center of the Management of Environmental Resource*s, INSEAD, Fontainebleau, France.

Bakalianos, D., Loukas, A., Vagiona, D., 2008. *Emergy analysis as a tool for the evaluation of environmental and economic sustainability of crops in two irrigated agricultural areas*. Protection and Restoration of the Environment IX, Kefalonia, Greece, 29 June – 3 July.

Brown, M.T., Ulgiati, S., 1997. *Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation.* Ecological Engineering, 9: 51-69.

Brown, M.T., Ulgiati, S., 2004. *Energy Quality, Emergy and Transformity: H.T. Odum's contribution to quantifying and understanding systems.* Ecological Modelling, 178(1-2): 201-213.

Chen, G.Q., Jiang, M.M., Chen, B., Yang, F.Z., Lin, C., 2006. *Emergy analysis of Chinese agriculture.* Agriculture, Ecosystems and Environment, 115: 161-173.

Coppola, F., Bastianoni, S., Hanne, Ø., 2009. *Sustainability of bioethanol production from wheat with recycled residues as evaluated by Emergy assessment.* Biomass and Bioenergy, 33(11): 1626-1642.

Franzese, P.P., Rydberg, T., Russo, F.G., Ulgiati, S., 2009. *Sustainable biomass production: A comparison between Gross Energy Requirement and Emergy Synthesis methods.* Ecological Indicators 9: 959-970.

Hau, J.L., Bakshi, B.R., 2004. *Promise and problems of emergy analysis.* Ecological Modeling, 178: 215-225.

Καμπράγκου, Ε., 2006. *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εφαρμογή του Πίνακα Ισορροπημένης Στοχοθεσίας στη λεκάνη απορροής του Νέστου*. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Khalaf, D., Metzidakis, J., Ortega, E., Sfakiotakis, E., 2003. *Emergy analysis of irrigated organic and conventional production of olive and olive oil in Crete, Greece "Preliminary Study".* ISHS Acta Horticulturae 608: 199-205.

Losowska M., 2011. *Embodied energy counting of sustainable heat, power and steel processes.* Master Thesis at RES/School for Renewable Energy Science, University of Iceland and University of Akureyzi.

Μαρτζοπούλου, Α., 2013. *Διαχείριση Ενέργειας και Περιβάλλοντος σε Βιομηχανικές Συγκεντρώσεις,* Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Menegaki, A., 2008. *Valuation for renewable energy: A comparative review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 12: 2422-2437.

Odum, H.T., 1995. *Energy systems concepts and self-organization: a rebuttal.* Oecologia, 104(4): 518-522.

Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting. Emergy and Environmental Decision Making.* John Wiley and Sons, New York.

Odum, H.T., 1998. Emergy Evaluation. International Workshop on Advances in Energy Studies: Energy flows in ecology and economy, Porto Venere, Italy, May 27.

Odum, H.T., Brown, M.T., Whitfield, D.E., Lopez, S., Woithe, R., Doherty, S., 1995. *Ecological Energetic Evolution of Urban Systems: Cross Comparison of Chinese and American Societies.* A Report to the Chiang Ching-Kuo International Scholar Exchange Foundation Taipei, Taiwan.

Ortega, E., Cavalett, O., Bonifacio, R., Watanabe, M., 2005. *Brazilian Soybean Production: Emergy Analysis with an Expanded Scope.* Bulletin of Science, Technology and Society, 25(4): 323-334.

Patten, B.C., 1993. *Toward a More Holistic Ecology, and Science-the Contribution of Odum, H.T*. Oecologia, 93(4): 597-602.

Pizzigallo, A.C.I., Granai, C., Borsa, S., 2008. *The joint use of LCA and emergy evaluation for the analysis of two Italian wine farms.* Environmental Management, 86: 396-406.

Rydberg, T., Haden, C.A., 2006. *Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society.* Agriculture, Ecosystems and Environment, 117: 145-158.

Ulgiati, S., Brown, M.T., Bastianoni, S., Marchettini, N. 1995. *Emergy – based indices and ratios to evaluate sustainable use of resources.* Ecological Engineering, 5: 497-517.

Ulgiati, S., Zucaro, A., Franzese, P.P., 2009. *Emergy and a Policy for the Commons. Emergy Synthesis: Theory and Applications of Emergy Methodology. Proceedings of the 5th Biennial Emergy Analysis Research Conference*, Gainesville, FL M.T. Brown (ed). Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.

Vagiona, D., Bakalianos, D., Loukas, A., 2008. *Evaluation of Alternative scenarios of water resources management and crop patterns in lake Karla basin through emergy analysis.* International Conference on Agricultural Engineering. Crete, Greece, 23-25 June.

ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ (ETp) ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΧΩΡΙΚΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΚΑΙ ΚΡΗΤΗΣ

Σ. Αλεξανδρής✉, Σ. Βασιλάκης, Ε. Παπουτσή, Δ. Τσεσμελής, Ι. Αργυροκαστρίτης Κ. Χατζηθωμάς, Η. Βιτωράτος
Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,
✉stalex@*aua.gr*

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι χωρικές εκτιμήσεις της ETp σε δύο περιφέρειες υψηλού υδρολογικού ενδιαφέροντος με διαφορετική γεωμορφολογία και κλιματικό καθεστώς (Θεσσαλία και Κρήτη). Για την εκτίμηση της ETp χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια δεδομένα θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και ακτινοβολίας από χωρικό πλέγμα 31 κελιών (grid cells) για την Θεσσαλία, και αντίστοιχα 20 κελιών για την Κρήτη (ανάλυση πλέγματος 0.25^{o}Χ0.25^{o}). Τα ημερήσια χωρικά δεδομένα, προέρχονται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (ECMWF). Η εκτίμηση της ETp έγινε με τρία εμπειρικά μοντέλα (Copais, Valiatzas, Hargreaves) για την περίοδο Μάϊο έως Οκτώβριο του ετους 2013. Εν συνέχεια, παρουσιάστηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές ETp σε 2D χάρτες συγκριτικά. Τα αποτελέσματα της χωρικής ανάλυσης αποτύπωσαν με ακρίβεια την ετερογένεια των εκτιμήσεων στις δυο περιοχές συγκριτικά με τις εκτιμήσεις ETp, που προέκυψαν από επίγειες παρατηρήσεις δεδομένων.

Λέξεις κλειδιά: Δυνητική εξατμοδιαπνοή (ETp), χωρική εκτίμηση ETp, εμπειρικές μέθοδοι ET, Kriging

ESTIMATES OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION (ETp) USING SPATIAL METEOROLOGICAL DATA IN THE REGION OF THESSALY AND CRETE

S. Alexandris✉, S. Vasilakis, E. Papoutsi, D. Tsesmelis, I. Argyrokastritis, C. Chatzithomas, H. Vitoratos
Agricultural University of Athens ,Department of NRWM-AE, Iera Odos 75, 11855, Athens,
✉stalex@*aua.gr*

Abstract

This paper presents spatial estimates of ETp in two regions with high hydrological interest, different geomorphology and climatic regime (Thessaly and Crete). Data in a daily time step (Temperature, Relative Humidity and Solar radiation from 31 grid cells for Thessaly and 20 cells for Crete respectively, were used to estimate daily ETp (mm/day). The spatial data emanate from the European Center for Medium-term Meteorological Forecasts (ECMWF). The ETp estimation was made using three empirical models (Copais, Valiatzas, Hargreaves) for the period May to October 2013. Then, the mean monthly values of ETp were presented in 2d maps comparatively. The results of the spatial analysis accurately reflected the heterogeneity of the estimates for the two regions compared to ETp estimates derived from surface data observations.

Keywords: Potential Evapotranspiration, (ETp), ETp spatial measurements, ET empirical methods, Kriging

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Δυνητική Εξατμοδιαπνοή (ETp ή PET) χρησιμοποιείται ευρέως από γεωτεχνικούς για την εκτίμηση της μέγιστης υδατοκατανάλωσης των καλλιεργειών, στον προγραμματισμό άρδευσης, καθώς και από υδρολόγους για την παρακολούθηση της ξηρασίας και εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Ωστόσο θα πρέπει να υπάρξει σαφής διαχωρισμός της ETp από την εξατμοδιαπνοή που προέρχεται από καλλιέργεια επιφάνειας αναφοράς (ETo). Η ETo ενσωματώνει και τυποποιεί όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά μιας καλλιέργειας αναφοράς, (γρασίδι, μηδική) ενώ η ETp αναφέρεται γενικά σε μια χαμηλή βλάστηση που καλύπτει πλήρως το έδαφος. Και στις δύο περιπτώσεις απαραίτητη προϋπόθεση είναι η μέγιστη διαπνοή από την επιφάνεια κάλυψης, που προϋποθέτει επάρκεια εδαφικού νερού. (Penman, 1948; Hargreaves, 1994; Allen et al, 1998; Irmak and Haman, 2003; Allen and Jensen, 2015). Δυστυχώς υπάρχουν πολλές εργασίες και αναφορές σε διεθνή περιοδικά όπου η χρήση του όρου ETo σε συνδυασμό με μη τυποποιημένες παρατηρήσεις, προκαλούν σύγχυση και λανθασμένες εκτιμήσεις ως προς την απόδοση του όρου(Xu et al, 2006; Vicente-Serrano et al, 2014). Η πλέον αποδεκτή μέθοδος Penman-Monteith (Allen et al, 1998) που έχει προταθεί, για ακριβείς εκτιμήσεις της ETo μπορεί να καλύψει μόνο μια περιορισμένη έκταση και με την προϋπόθεση ύπαρξης καλλιέργειας αναφοράς. Ωστόσο, εκτεταμένες περιοχές με ιδιαίτερη γεωμορφολογία απαιτούν σημαντικό αριθμό θέσεων παρατήρησης λόγω της ετερογένειας του τοπίου και συνεπώς της μεγάλης διαφοροποίησης στην διαδικασία που μεταφέρεται η ενέργεια (Detto et al., 2006). Επιπλέον σε πολλές υδρομετεωρολογικές εφαρμογές, δεν είναι πάντα δυνατό να αποκτηθεί πρόσβαση στις τοπικές μετρήσεις και ειδικότερα σε λεκάνες με υψηλό υδρολογικό ενδιαφέρον και με ανύπαρκτο δίκτυο τυποποιημένων μετεωρολογικών παρατηρήσεων. Η χρήση χωρικών παρατηρήσεων σε συνδυασμό με την χρήση γεωστατιστικών μεθόδων παρεμβολής (Kriging, Inverse distance) θα μπορούσε να μειώσει την αβεβαιότητα εκτίμησης της ETp, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχουν ελάχιστες διαθέσιμες ή ακατάλληλες μετεωρολογικές παρατηρήσεις. Επιπλέον η χωρική αποτύπωση αποδίδει και αναδεικνύει με ακρίβεια τις διαφοροποιήσεις των απωλειών νερού από μια ετερογενή εκτεταμένη επιφάνεια βλάστησης με διαφορετικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Πρόσφατα, έχουν γίνει προσπάθειες για να διαπιστωθεί η χωρική και χρονική μεταβλητότητα της ETp μέσω μέσης κλίμακας μοντέλων όπως το MM5 (Ishak et al., 2010; Niyogi et al., 2009)

Κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι να αναδειχθεί και να διερευνηθεί η αξιοπιστία και αντιπροσωπευτικότητα των εκτιμήσεων της ETp που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τις ελλείψεις χρονικής ασυνέχειας βασικών δεδομένων, την απόσταση μεταξύ των μετεωρολογικών σταθμών του δικτύου (κάλυψη) και τον περιορισμό επιλογής αξιόπιστων μεθόδων ETp σε μικρό χρονικό βήμα εκτίμησης (ημερήσιο). Οι περισσότερες προσπάθειες χωρικών εκτιμήσεων στην Ελλάδα εκτίμησης της ETp (Dalezios et al.,2002; Papadopoulou et al,. 2003; Mardikis et al., 2005) περιορίζονται σε μια σφαιρική προσέγγιση της ETp ως μια αγρο-κλιματική αποτύπωση χωρίς τους προαναφερόμενους περιορισμούς, δίνοντας περισσότερο έμφαση στην χρήση των γεωστατιστικών προσεγγίσεων και μεθοδολογιών, παρά στην ακριβή προσέγγιση της ETp (ή ETo) για τον προγραμματισμό άρδευσης σε ημερήσιο βήμα εκτίμησης. Η εκτίμηση της πραγματικής ET_{actual} στην Θεσσαλία (Tsouni et al., 2008) με χρήση δορυφορικών δεδομένων από εικόνες αισθητήρων (NOAA-AVHRR) έδωσε αποτυπώσεις στην γεωγραφική κατανομή της ET με αρκετή διακριτική ικανότητα πλέγματος, έστω και αν τα επίγεια δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν τα πλέον κατάλληλα για εκτίμηση της ET.

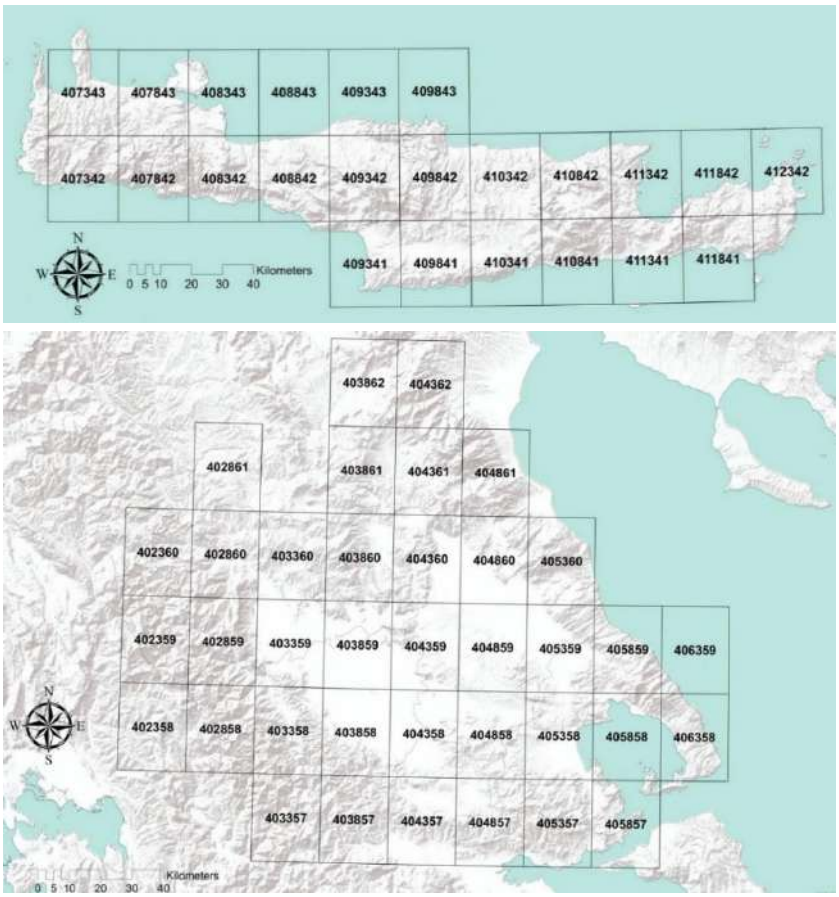
Στην παρούσα εργασία για την χωρική εκτίμηση της ETp επιλέχθηκαν δυο μεγάλες περιφέρειες της Χώρας (Θεσσαλία και Κρήτη) με έντονο γεωργικό ενδιαφέρον αλλά συγχρόνως με τελείως διαφορετικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια δορυφορικά δεδομένα, (προσφορά της Sygenta Hellas) τα οποία προέρχονται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (ECMWF).

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

2.1. Περιοχή Μελέτης

Για την εργασία αυτή επιλέχθηκε η περιφέρεια της Θεσσαλίας, με συνολική έκταση 13.745 km^2 και αντιπροσωπεύει περίπου το 11% της συνολικής έκτασης της ελληνικής επικράτειας. Η δεύτερη περιοχή που επιλέχθηκε, είναι η νήσος Κρήτη με έκταση 8334 km^2 με τελείως διαφορετική τοπολογία.

Τα ημερήσια χωρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται σε μετρήσεις θερμοκρασίας (Ta), σχετικής υγρασίας (RH) και ολικής εισερχόμενης ακτινοβολίας (Rs), από χωρικό πλέγμα 36 κελιών (grid cells) για την Θεσσαλία και αντίστοιχα 23 κελιών για την Κρήτη. Η χωρική ανάλυση κάθε κελιού είναι 0.25^{o}Χ0.25^{o} που αντιστοιχεί σε έκταση κατά μέσο όρο, περίπου 597 Km^2 για την Θεσσαλία και 628 Km^2 για την Κρήτη. Η διαφοροποίηση αυτή εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος. Η τιμή κάθε κλιματικής παραμέτρου ορίσθηκε στο κέντρο κάθε κελιού. Το πλέγμα των κελιών και ο αριθμός ταυτότητας κάθε κελιού (ID) των δύο περιοχών εμφανίζεται στην Εικ.1.



Εικόνα 1. Το Πλέγμα και ο αριθμός των κελιών στις δύο επιλεγμένες περιοχές Το σύστημα συντεταγμένων για τις χωροθετήσεις είναι το ΕΓΣΑ87

2.2. Κλιματικά δεδομένα

Όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία καλύπτουν το διάστημα των θερμών μηνών του έτους, δηλαδή από τον Μάιο έως και τον Οκτώβριο του 2013.

2.2.1.Δεδομένα Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων

Τα ημερήσια δορυφορικά δεδομένα είναι πλήρη και προέρχονται από το κέντρο ECMWF (European Center of Medium Range Weather Forecasts) Το σύνολο για κάθε κλιματική παράμετρο για την Θεσσαλία είναι 7704 τιμές (214ημ. Χ 34 κελιά). Η αντίστοιχη τιμή για την Κρήτη είναι 4922 (214 Χ 23). Το ECMWF έχει αναπτύξει ένα σύστημα αριθμητικού μοντέλου για την επιχειρησιακή πρόγνωση του καιρού περισσότερο από 30 έτη αναλύοντας και επαναπροσδιορίζοντας όλες τις καιρικές συνθήκες των παρελθόντων ετών. Η ακρίβεια αποτελεί την πρώτη προϋπόθεση για το αριθμητικό μοντέλο για προβλέψεις υψηλής ποιότητας. Έχει αναγνωρισθεί ως ένα από τα καλλίτερα κέντρα παραγωγής αριθμητικών προγνώσεων καιρού σε όλο τον κόσμο. Για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η αρχική κατάσταση της ατμόσφαιρας όσο το δυνατόν ακριβέστερα, το κέντρο ECMWF έχει αναπτύξει μια εξελιγμένη μέθοδο ενσωμάτωσης όλων των διαθέσιμων μετεωρολογικών παρατηρήσεων στο σύστημα του μοντέλου που χρησιμοποιεί. Περίπου 300 εκατομμύρια καθημερινές παρατηρήσεις λαμβάνονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία για να καθορισθεί η κατάσταση της ατμόσφαιρας όσο το δυνατόν ακριβέστερα. Το ECMWF παράλληλα εξελίσσει μέσω λογισμικού εκ νέου ανάλυση προηγούμενων παρατηρήσεων.

2.2.2. Επίγεια δεδομένα

Τα επίγεια δεδομένα προέρχονται από το Δίκτυο της ΕΜΥ και έχουν επιλεχθεί όλοι οι μετεωρολογικοί σταθμοί εντός των δύο περιφερειών.

Για την Θεσσαλία οι σταθμοί της Λάρισας (ID.16648, 39.65N, 22.46E) και της Αγχιάλου (ID.16665, 39.22N, 22.79E). Για την Κρήτη οι σταθμοί Ηρακλείου (ID.16754, 35.34N, 25.18E) , της Σητείας (ID.16757, 35.22N, 26.10E) και της Σούδας (ID.16476, 35.53N, 24.15E).

Από την ΕΜΥ δόθηκαν ημερήσια δεδομένα Tmax, T_{min}, T_{avg}, RH, και ωρών ηλιοφάνειας (n). Εκτός από την απουσία μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας (Rs) διαπιστώθηκαν σημαντικές ελλείψεις τιμών. Τα δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας παρουσίαζαν έλλειψη τιμών (11,14%). Στο σταθμό Αγχιάλου υπήρχε πλήρης έλλειψη μετρήσεων ηλιοφάνειας (100%) που είχε ως συνέπεια να μην είναι δυνατή η χρήση του σταθμού. Για το σταθμό Τρικάλων δεν δόθηκαν δεδομένα. Ανάλογες ελλείψεις παρουσίασαν και τα δεδομένα των σταθμών της Κρήτης. Για το Ηράκλειο (8,7%), για την Σούδα (8,3%) και για την Σητεία 20,7%. Χαρακτηριστικά, για την Σητεία, δεν υπάρχουν μετρήσεις ωρών ηλιοφάνειας για το μισό μήνα Αύγουστο. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε να μη χρησιμοποιηθεί.

Τέλος μέσες μηνιαίες τιμές από την βάση δεδομένων του FAO (ClimaWat2) περιόδου (1975-2000), χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ETP ως ενδεικτικές για τους αντιστοιχους σταθμούς της ΕΜΥ.

2.3. Μέθοδοι Δυνητικής Εξατμοδιαπνοής (ETP)

Για τον υπολογισμό της ETP χρησιμοποιήθηκαν οι εμπειρικές μέθοδοι Hargreaves-Samani [HARG], Copais [COP]και Valiantzas [VAL].

2.3.1. Hargreaves (Hargreaves-Samani, 1985)-[HARG]

Η εξίσωση Hargreaves (1975) η οποία τροποποιήθηκε το 1985 για συνθήκες γρασιδιού και απαιτεί μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας ακολουθεί την εξίσωση 1.

$$ET_o = 0.0023\left(T_{max} - T_{min}\right)^{0.5}\left(T_{avg} + 17.8\right)R_a \qquad (1)$$

Tavg, Tmax και Tmin είναι η μέση, η μέγιστη και η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα (^oC) αντίστοιχα και η Ra (mm/day) είναι η ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας εκτιμώμενη από το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) και την ημέρα του έτους (DOY).

2.3.2.Copais (Alexandris et al., 2006) –[COP]

Η τελική μορφή της συγκεκριμένης μεθόδου για τον υπολογισμό της ημερήσιας ETo εκφράζεται από την εξίσωση 2 καθώς και από τις εξισώσεις 3 και 4.

$$ET_o = m_1 + m_2C_2 + m_3C_1 + m_4C_1C_2 \qquad (2)$$

Όπου m_1 = 0.057, m2 = 0.277, m3 = 0.643, m4 = 0.0124 και

$$C_1 = 0.6416 - 0.00784RH + 0.372R_s - 0.00264R_sRH \qquad (3)$$

$$C_2 = -0.0033 + 0.00812T + 0.101R_s + 0.00584R_sT \qquad (4)$$

Όπου m1 = 0.057, m2 = 0.277, m3 = 0.643, m4 = 0.0124 και

2.3.3. Valiantzas (Valiantzas, 2013) – [VAL]

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου εκφράζεται από την εξίσωση (5) η οποία δεν απαιτεί δεδομένα για τη ταχύτητα ανέμου.

$$\mathrm{ET}_o \approx 0{,}0393R_s\sqrt{T+9{,}5} - 0{,}19R_s^{0.6}\varphi^{0{,}15} + 0{,}078\left(\mathrm{T}+20\right)\left(1-\frac{RH}{100}\right) \qquad (5)$$

Όπου, Rs $\left(\mathrm{MJm^{-2}day^{-1}}\right)$ είναι η μέση ηλιακή εισερχόμενη ακτινοβολία, φ το γεωγραφικό πλάτος σε rad, RH (%) η μέση σχετική υγρασία, και T(^oC) η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα.

2.4. Μεθοδολογία χωρικής ανάλυσης

Η συνήθης γεωστατιστική μέθοδος Kriging (ordinary) επιλέχθηκε για την χωρική ανάλυση των εκτιμήσεων της ETp. Είναι μια προηγμένη διαδικασία που παράγει (προβλέπει) μια κατ' εκτίμηση επιφάνεια από ένα διάσπαρτο σύνολο γνωστών σημείων (X,Y) μιας φυσικής μετρούμενης μεταβλητής. Τα εργαλεία της μεθοδολογίας "Kriging" περιλαμβάνουν ουσιαστικά ένα διαδραστικό εργαλείο διερεύνησης της χωρικής συμπεριφοράς της φυσικής μεταβλητής που αντιπροσωπεύεται από τις τιμές (Z) πριν την επιλογή της καλύτερης μεθόδου εκτίμησης για τη δημιουργία της επιφάνειας που θα παραχθεί. Εξαιτίας αυτού, οι γεωστατιστικές τεχνικές δεν έχουν μόνο τη δυνατότητα να παράγουν μια προβλέψιμη επιφάνεια, αλλά και να παρέχουν κάποιο μέτρο της βεβαιότητας ή ακρίβειας των προβλέψεων.

3.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Χωρικές εκτιμήσεις ETp

Στην εργασία αυτή δεν επιχειρείται η αξιολόγηση των μεθόδων σε σχέση με μια αποδεχτή μέθοδο αναφοράς (π.χ. FAO56-PM). Συγκριτική αξιολόγηση με την χρήση ίδιου τύπου δεδομένων, αλλά και οι προϋποθέσεις και τα κριτήρια των μεθόδων έχουν ήδη δημοσιευθεί πρόσφατα. (Αλεξανδρής &συν.,2013;2015.) Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια να αναδειχθεί ο ρόλος των εμπειρικών σχέσεων ETp με ελάχιστες απαιτήσεις βασικών δεδομένων τα οποία σήμερα είναι διαθέσιμα για χωρική ανάλυση σε λεκάνες

όπου δεν υπάρχει πρόσβαση ή έλλειψη μετρήσεων. Η ανάκτηση ημερήσιων μετεωρολογικών δεδομένων από την ECMWF δίνει μια νέα διάσταση στην εκτίμηση της εξατμοδιαπνοής, όπως έδειξε και σχετική εργασία (Srivastava et al., 2013).

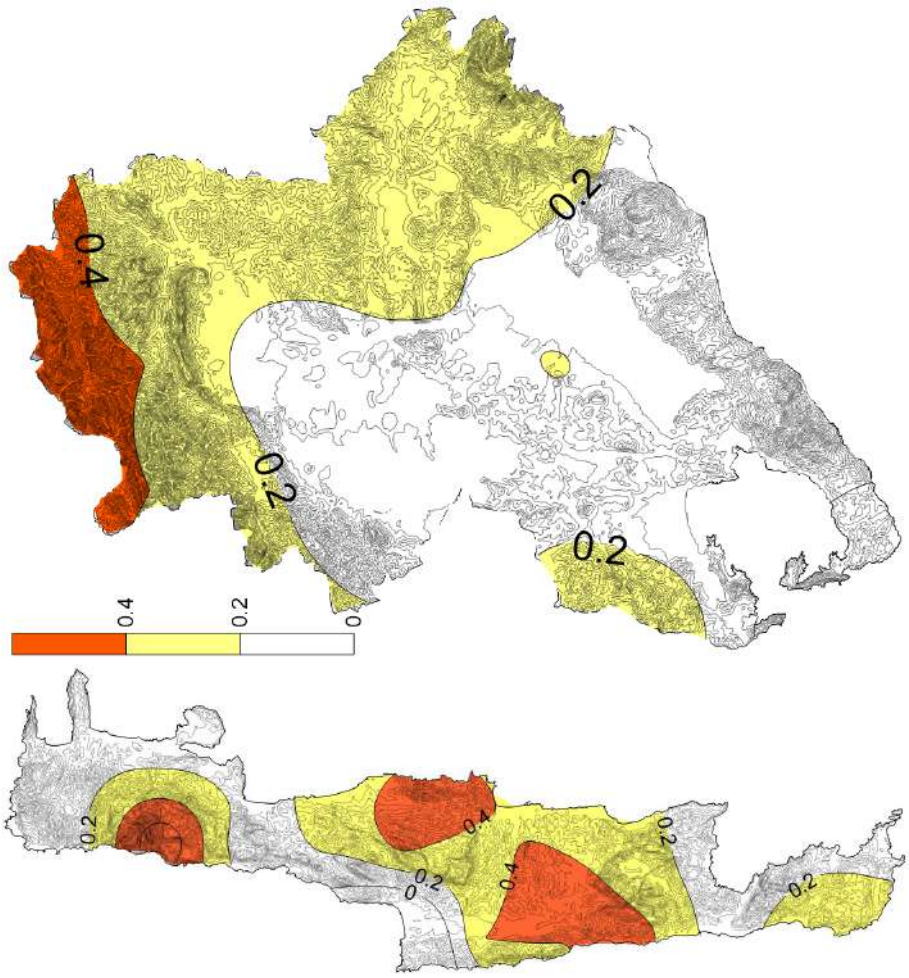
Για τις χωρικές εκτιμήσεις της ETp για κάθε κελί χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες τιμές για κάθε παράμετρο (R_s, T_{avg}, T_{max}, T_{min}, RH). Επίσης υπολογίστηκε για τις αντίστοιχες ημέρες και η ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας (R_a) για το γεωγραφικό πλάτος κάθε περιοχής. Με τις τρείς μεθόδους (COP,VAL,HARG) υπολογίσθηκαν, 21828 τιμές ETp για την Θεσσαλία, και 14.766 τιμές αντίστοιχα για την Κρήτη, για όλα τα κελιά του πλέγματος των δύο περιοχών, στο διάστημα των 6 μηνών. Η μέση ημερήσια τιμή PET για κάθε μήνα για κάθε κελί χρησιμοποιήθηκε για τη χωρική αποτύπωση όλων των μεθόδων (ETp) για τους αντίστοιχους μήνες (Μάιος–Οκτώβριος). Η μέση μηνιαία τιμή ETp χωροθετήθηκε στο κέντρο κάθε κελιού του πλέγματος. Έτσι με την τεχνική kriging το πλέγμα των δεδομένων (ETp) ορίσθηκε περίπου σε ορθογώνιο 21 X 27 Km. Για την βέλτιστη παρεμβολή επιλέχθηκε διανυσματική απεικόνιση με διάστημα πρόβλεψης περίπου 0.2 Km, όπως αποτυπώνεται και στην ανάλυση της διαδικασίας Kriging (output grid file), ως κατευθυντική μεροληψία (directional bias) των δεδομένων. Συνολικά προέκυψαν 36 διανυσματικοί χάρτες με ίσο-συγκεντρωτικές καμπύλες (iso-ETp) σε mm/day με ισοδιάσταση (contour interval) 0.25 mm/day. Από τους 36 χάρτες (2D) που δημιουργήθηκαν επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν μόνο 12 συγκριτικές εκτιμήσεις αποτυπώσεων, μεταξύ των δύο μεθόδων [COP] και [HARG] και για τους 6 μήνες λόγω περιορισμένου χώρου. Ο πρώτος λόγος για την επιλογή αυτή είναι οι διαπιστώθηκε ελάχιστη διαφορά χωρικών εκτιμήσεων ETρμεταξύ μεθόδων των [COP] και [VAL] και ο δεύτερος λόγος ήταν ότι η [HARG] παρουσιάζει αισθητά υποτιμώμενες εκτιμήσεις έναντι των υπολοίπων μεθόδων σε όλο το διάστημα των έξι μηνών. Αντίθετα οι εκτιμήσεις [COP] και [VAL], έχουν σχεδόν ίδιες εκτιμήσεις με την [COP] να διαφοροποιείται ελάχιστα (+0.1 - 0.2 mm/day) Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στον Πίνακα 1 όπου παρουσιάζεται συνοπτικά ο συνολικός όγκος νερού σε εκατομμύρια m^3/day που δαπανάται κάθε μήνα σε εξατμοδιαπνοή (ETp) όπως υπολογίστηκε για κάθε μέθοδο. Επίσης η δεύτερη στήλη εμφανίζει αντίστοιχα την συνολική μέση μηνιαία τιμή ETp σε mm/day.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Μέσος Ημερήσιος όγκος ETp (10^6 $m^3 day^{-1}$) και μέση μηνιαία σε $mm day^{-1}$

	ΘΕΣΣΑΛΙΑ						ΚΡΗΤΗ					
ΜΗΝΑΣ	COP		VAL		HAG		COP		VAL		HAG	
ΜΑΪ	78.5	5.7	73.3	5.3	70.2	5.1	49.5	5.9	46.9	5.6	36.9	4.4
ΙΟΥΝ	87.2	6.3	83.5	6.1	80.0	5.8	55.2	6.6	53.1	6.4	39.5	4.7
ΙΟΥΛ	92.1	6.7	89.0	6.5	82.0	6.0	54.9	6.6	53.9	6.5	38.1	4.6
ΑΥΓ	90.1	6.6	88.1	6.4	76.2	5.5	51.8	6.2	51.7	6.2	35.0	4.2
ΣΕΠ	63.9	4.7	63.5	4.6	56.7	4.1	41.3	5.0	41.8	5.0	29.1	3.5
ΟΚΤ	36.9	2.7	36.4	2.7	33.4	2.4	26.9	3.2	27.5	3.3	19.5	2.3
ΣΥΝ/Μ.Ο	449	5.4	434	5.3	399	4.8	280	5.6	275	5.5	198	4.0

Στην εικόνα 2 εμφανίζεται η μεγαλύτερη διαφορά που παρατηρήθηκε μεταξύ των μεθόδων [COP] και [VAL] των εκτιμήσεων ETp στο μήνα Ιούλιο. Όπως γίνεται φανερό η μικρή αυτή μηνιαία διαφορά, 0.4 mm αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στα μεγαλύτερα υψόμετρα και των δύο περιοχών, με μέγιστη ETp 0.44 mm για την Ανατολική Θεσσαλία (Ορεινός όγκος Τζουμέρκα) και 0.78 mm αντίστοιχα για την ανατολική Κρήτη (περιοχή Λευκού όρους). Μηδενικές διαφορές στις εκτιμήσεις διαπιστώθηκαν στις πεδινές και παράκτιες περιοχές.

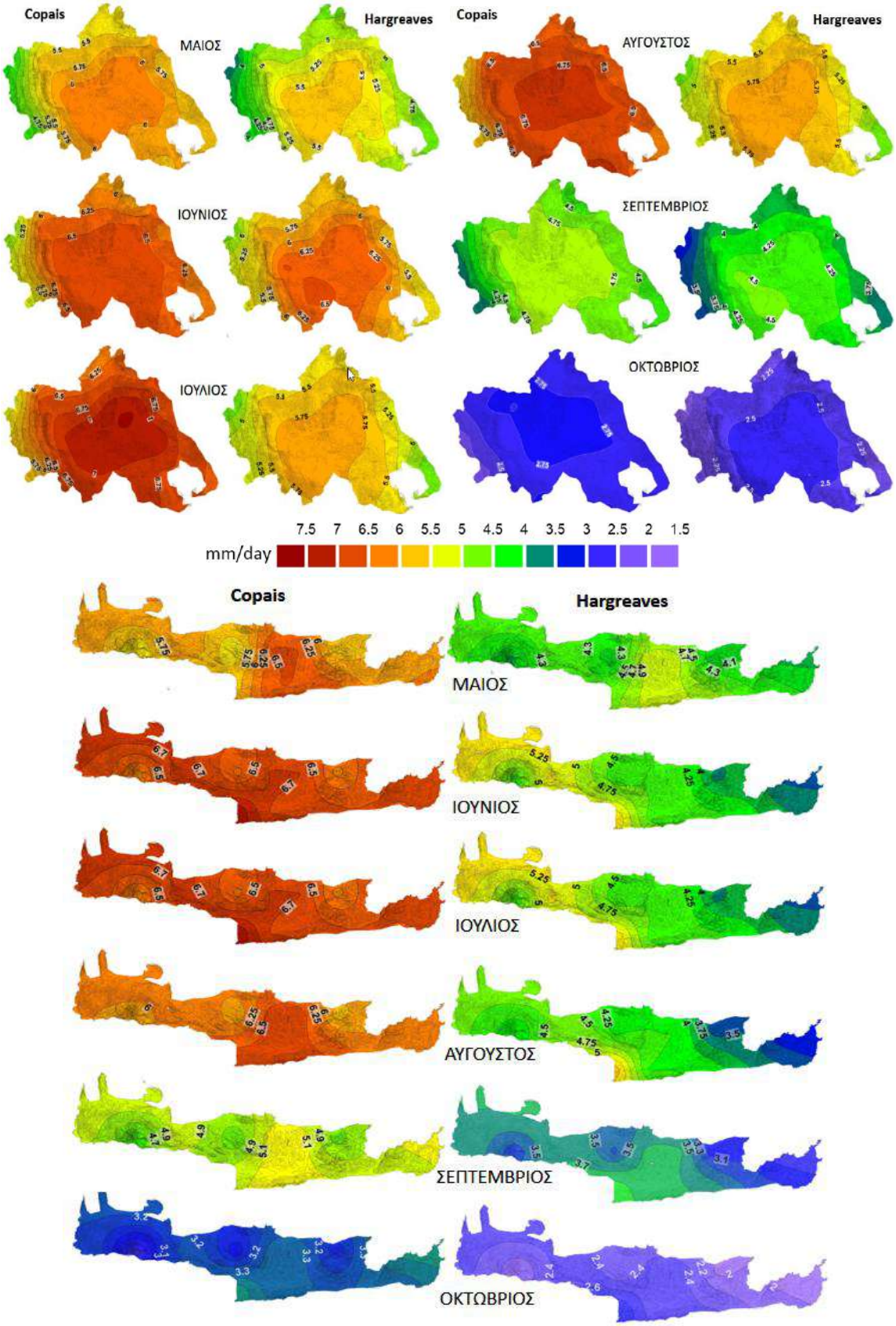
Επίσης άξιο παρατήρησης είναι η διαφορά που αποτυπώθηκε στην αστική περιοχή της Λάρισας, (> 0.2 mm) μεταξύ των δύο μεθόδων (COP,VAL) συγκριτικά με τον υπόλοιπο κάμπο όπου η διαφορά παρέμεινε σχεδόν μηδενική.



Εικόνα 2. Χωρική αποτύπωση (2D) διαφοράς εκτιμήσεων ETp τον μήνα Ιούλιο 2013 μεταξύ των μεθόδων [COP&VAL] στις περιφέρειες Θεσσαλίας και Κρήτης, σε mm/day

Στην εικόνα 3, αποτυπώνονται σε αντιπαράθεση οι μεγαλύτερες μηνιαίες διαφορές ETp που διαπιστώθηκαν από τον Μάιο έως και τον Οκτώβριο τoy 2013 μεταξύ των μεθόδων [COP] και [HAG]. Η μέθοδος [HAG] δίνει υποεκτιμούμενες τιμές ETp κατά την διάρκεια των θερμότερων μηνών του έτους ιδιαίτερα στις ποιο ξηρές συνθήκες της Κρήτης. Η χρωματική κλίμακα έχει διατηρηθεί ενιαία και στις δύο περιοχές για λόγους σύγκρισης. Σύγκλιση όλων των μεθόδων παρατηρείται στους φθινοπωρινούς μήνες, όπου ο ρυθμός ETp είναι αρκετά μειωμένος. Όπως έχει αναφερθεί στην διεθνή βιβλιογραφία και πολλές φορές έχει επισημανθεί από πολλούς ερευνητές (Jensen et al., 1997; Allen et al., 1998; Droogers and Allen, 2002; Temesgen et al.,2005; Garcia et al., 2004; Alexandris et al.,2006), η μέθοδος [HAG] υπερεκτιμά σε υγρά και απάνεμα καθεστώτα και υποεκτιμά σε ξηρότερα και με υψηλές μέσες ταχύτητες ανέμου Η μεγαλύτερη υποεκτίμηση της HAGR είναι ιδιαίτερα εμφανής στους θερμούς και ξηρότερους μήνες στην Κρήτη συγκριτικά με την περιοχή της Θεσσαλίας όπου η ύπαρξη της άρδευσης εκτεταμένες εκτάσεις (καταιονισμός) να διατηρεί αυξημένα τα ποσοστά της ατμοσφαιρικής υγρασίας που έχει ως αποτέλεσμα σε κάποιο

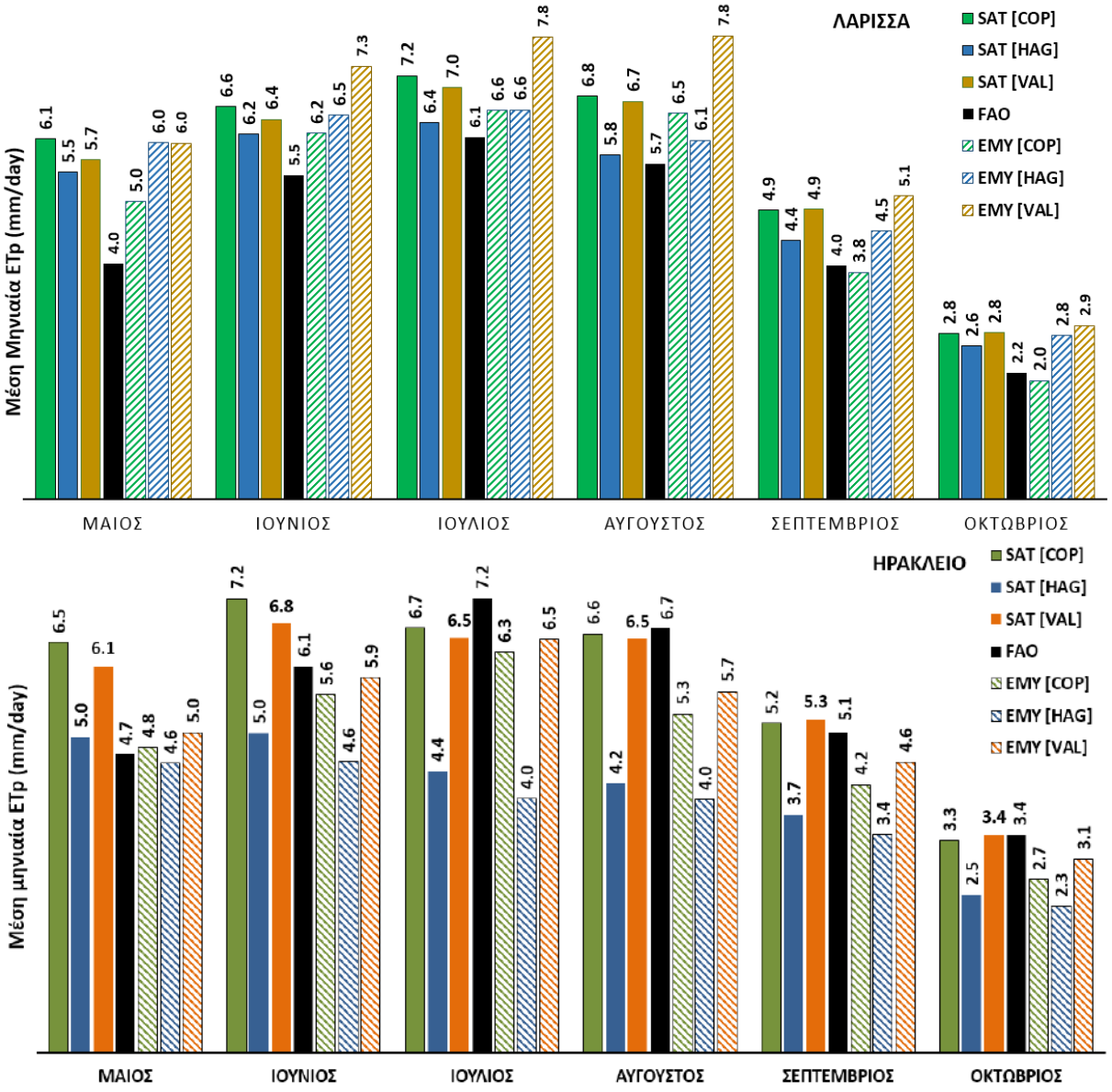
βαθμό την διακύμανση μεταξύ της αισθητής και λανθάνουσας ενέργειας εξάτμισης στο ισοζύγιο επιφάνειας.



Εικόνα 3. Μηνιαίες χωρικές εκτιμήσεις Δυνητικής Εξατμοδιαπνοής (ETp) σε mm/day, για τους μήνες Μάιο έως και Οκτώβριο του 2013 με τις μεθόδους [COP] και [HARG] στις περιφέρεια Θεσσαλίας και Κρήτης.

3.2. Επίγειες εκτιμήσεις ETp (EMY & FAO)

Εκτιμήσεις ETp που υπολογίστηκαν με τις τρείς μεθόδους από δεδομένα EMY των μετεωρολογικών σταθμών Λάρισας και Ηρακλείου για το έτος 2013 (EMY[COP], EMY[VAL EMY[HAG]), καθώς και αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές ETp που υπολογίστηκαν με την μέθοδο FAO-56PM (CROPWAT) από κλιματοσειρά (CLIMWAT, 1975-2000, Larisa, Iraklio) παρουσιάζονται και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες χωρικές μηνιαίες τιμές ETp που προέκυψαν από τα αντίστοιχα κελιά που περιέχονται οι Μ. σταθμοί Λάρισα (404859) και Ηράκλειο (410432). Όλες οι εκτιμήσεις εμφανίζονται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4. Μηνιαίες τιμές ETp από δορυφορικά δεδομένα (SAT) και (EMY) για τα κελιά 404859 & 410432 που ανήκουν οι Μ. σταθμοί Λάρισας & Ηρακλείου (2013) καθώς και εκτιμήσεις CROPWAT(FAO) για τις αντίστοιχες θέσεις.

Τα γραφήματα της εικόνας 4 δείχνουν μια συνέπεια των μεθόδων COP &VAL στην εκτίμηση της ETp (SAT) για όλους τους μήνες όπως προκύπτει από την με μέση τιμή του λόγου COP/VAL είναι 1.02 για την Κρήτη και 0.98 για Θεσσαλία. Ο αντίστοιχος λόγος για τα δεδομένα (EMY) ήταν 0,98 (Κρήτη) και 0.80 (Θεσσαλία). Αυτό προκύπτει από αισθητή υπερεκτίμηση της VAL για τους 3 μήνες του θέρους από τα δεδομένα της EMY . Οι εκτιμήσεις της HAG, αποτελούν ένα δείκτη για τις ξηρές ή υγρές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή. Τα αποτελέσματα της ETp (FAO) προέρχονται από μηνιαίο βήμα εκτίμησης, που μάλλον αποτελεί μια κλιματική ένδειξη μιας γεωγραφικής ζώνης παρά ένα εργαλείο ορθολογικού προγραμματισμού άρδευσης.

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία για πρώτη φορά γίνεται χρήση ημερήσιων χωρικών δεδομένων για την εκτίμηση της Δυνητικής εξατμοδιαπνοής (ETp) στην Ελληνική επικράτεια και συγκεκριμένα στις περιφέρειες Θεσσαλίας και Κρήτης με υψηλή ανάλυση πλέγματος 0.25^{o}X0.25^{o} και σε ισοδιάσταση πλέγματος πρόβλεψης μικρότερη του 1 Km. Τα χωρικά ημερήσια δεδομένα (Rs, T και RH) που προέρχονται από Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (ECMWF) επιτρέπουν την χρήση νέων εμπειρικών μοντέλων ETp και ETo που χρησιμοποιούν επιπλέον δεδομένα σχετικής υγρασίας (RH). Τα δεδομένα που προέρχονται από πραγματικές παρατηρήσεις (δορυφόρων και επίγειων σταθμών) ενός από τα κορυφαία κέντρα αριθμητικής μοντελοποίησης παγκοσμίως (ECMWF), σε συνδυασμό με την ανάλυση επαναπροσδιορισμού των παρελθόντων καιρικών γεγονότων σε χωρικό επίπεδο, προσδιορίζουν την κατάσταση της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια όσο το δυνατόν ακριβέστερα καθώς ενσωματώνονται με όλα τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα παρατήρησης στη βάση καταγραφής.

Συνοπτικά μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι μέθοδοι COP και VAL έδειξαν την ίδια συνέπεια στις ποσοτικές εκτιμήσεις της ETp και στις δύο περιοχές με την χρήση των δορυφορικών δεδομένων (SAT) Οι διακυμάνσεις που παρατηρήθηκαν μεταξύ των δύο μεθόδων με χρήση επίγειων δεδομένων (EMY) μπορούν να εξηγηθούν από τη θεωρητική βάση και τις παραδοχές που εξήχθη η κάθε μέθοδος, αλλά και από την ακαταλληλότητα των δεδομένων για εκτίμηση ETp και ETo.
- Το υψόμετρο αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην διακύμανση του ρυθμού της ETp. Συνεπώς η σημειακή παρατήρηση και η πυκνότητα παρατήρησης οδηγεί σε τεράστια σφάλματα και σε μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας την εκτίμηση της ETp, σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Επιπλέον επιδεινώνεται η ποιότητα των εκτιμήσεων όταν η παρατήρηση προέρχεται από μετεωρολογικούς σταθμούς εντός αστικού ιστού και ακατάλληλης θέσης.
- Η μέθοδος Hargreaves-Samani κατά μέσο όρο υποεκτιμά κατά 11,2% και 8,1% τις τιμές της ETp σε σχέση με την μέθοδο Copais και Valiantzas στην Θεσσαλία και αντίστοιχα 29% και 28% στην Κρήτη. Ωστόσο, η μέθοδος Hargreaves αποτελεί παγκοσμίως ένα χρήσιμο εργαλείο σε περιοχές με ελάχιστα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα. Η βαθμονόμηση της μεθόδου σε τοπικά κλιματικά καθεστώτα προτείνεται ανεπιφύλακτα.
-

Τέλος η χρήση ημερήσιων χωρικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης σε συνδυασμό με εμπειρικές μεθόδους εξατμοδιαπνοής με ελάχιστες απαιτήσεις δεδομένων, όχι μόνο μπορούν να προσδιορίσουν το υδατικό ισοζύγιο σε ένα υδατικό διαμέρισμα αλλά θα αποδειχθούν στο μέλλον χρήσιμα εργαλεία για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη των καθημερινών απαιτήσεων των καλλιεργειών σε νερό.

5.ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά την εταιρεία Syngenta Hellas A.E.B.E. για τη συνεργασία και την παραχώρηση των δεδομένων για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alexandris S., Kerkides, P., and Liakatas, A. 2006. Daily reference evapotranspiration estimates by the "Copais" approach. Agricultural Water Management, Volume 82, Issue 3, 24, Pages 371-386

Allen, R., & Jensen, M. E. (2015, November). *ASCE Manual 70–Second Edition: Evaporation, Evapotranspiration and Irrigation Requirements*. In 2015 ASABE/IA Irrigation Symposium: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation-A Tribute to the Career of Terry Howell, Sr. Conference Proceedings (pp. 1-16). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Allen, R.G., Pereir, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. *Crop evapotranspirtion: Guidelines for computing crop requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.

Dalezios, Nicolas R., Athanasios Loukas, and Dimitrios Bampzelis. "Spatial variability of reference evapotranspiration in Greece." Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 27.23 (2002): 1031-1038.

Detto M, Montaldo N, Albertson JD, Mancini M, Katul G. 2006. *Soil moisture and vegetation controls on evapotranspiration in a heterogeneous Mediterranean ecosystem on Sardinia, Italy*. Water Resources Research 42(8): W08419

Droogers, P., Allen, R.G., 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrig. Syst. 16: 33–45.

Garcia, M., Raes, D., Allen, R., Herbas, C., 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). Agric. Forest Meteorol. 125, 67–82.

Hargreaves, G.H., and Z.A. Samani., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. in Agr., 1(2):96-99.

Hargreaves, George H. *Defining and using reference evapotranspiration*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 120.6 (1994): 1132-1139.

Irmak, S., & Haman, D. Z. (2003). *Evapotranspiration: potential or reference*. IFAS Extension, ABE, 343.

Ishak AM, Bray M, Remesan R, Han D. 2010. *Estimating reference evapotranspiration using numerical weather modelling*. Hydrological Processes 24(24): 3490–3509.

Jensen, D. T., Hargreaves, G. H., Temesgen, B., & Allen, R. G. (1997). Computation of ETo under nonideal conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 123(5), 394-400.

Mardikis, M. G., Kalivas, D. P., & Kollias, V. J. (2005). Comparison of interpolation methods for the prediction of reference evapotranspiration—an application in Greece. *Water Resources Management*, *19*(3), 251-278.

Niyogi D, Alapaty K, Raman S, Chen F. 2009. *Development and evaluation of a coupled photosynthesis-based gas exchange evapotranspiration model (GEM) for mesoscale*

weather forecasting applications. Journal of Applied Meteorology and Climatology 48(2):349–368.

Papadopoulou, E., Varanou, E., Baltas, E., Dassaklis, A., & Mimikou, M. (2003, September). Estimating potential evapotranspiration and its spatial distribution in Greece using empirical methods. In Proc, 8th Int. Conf. on Environmental Science and Technology (pp. 650-658).

Penman, H.L. 1948. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proceedings of the Royal Society of London, A193: 120-146.

Srivastava, P. K., Han, D., Rico Ramirez, M. A., & Islam, T. (2013). *Comparative assessment of evapotranspiration derived from NCEP and ECMWF global datasets through Weather Research and Forecasting model*. Atmospheric Science Letters, 14(2), 118-125.

Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B., Frame, K., 2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. J. Irrig. Drain. Eng. 131 (1), 73–84.

Tsouni, A., Kontoes, C., Koutsoyiannis, D., Elias, P., & Mamassis, N. (2008). Estimation of actual evapotranspiration by remote sensing: Application in Thessaly Plain, Greece. Sensors, 8(6), 3586-3600.

Valiantzas, J.D., 2013. Simple ETo Forms of Penman's Equation without Wind and/or Humidity Data. II: Comparisons with Reduced Set-FAO and Other Methodologies. J. Irrig. Drain Eng. 2013.139:9-19.

Vicente-Serrano, S. M., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., López-Moreno, J. I., González-Hidalgo, J. C., ... & Espejo, F. (2014). *Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961–2011*. Global and Planetary Change, 121, 26-40.

Xu, C. Y., Gong, L., Jiang, T., Chen, D., & Singh, V. P. (2006). *Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang* (Yangtze River) catchment. Journal of Hydrology, 327(1), 81-93.

Αλεξανδρής Σ., , Ν. Προύτσος, , Χ. Καραβίτης, Ι. Τσίρος, και Δ. Σταματάκος, (2013). Λόγοι Εσφαλμένης Εκτίμησης Εξατμοδιαπνοής Αναφοράς στον Ελλαδικό Χώρο. 8ο Εθνικό Συνέδριο Ε.Γ.Μ.Ε. (Βόλος, 25-26 Σεπτεμβρίου 2013).

Αλεξανδρής Σ., Δ. Τσεσμελής, Ν. Προύτσος, Κ. Χατζηθωμάς, Ν. Σκόνδρας,Δ. Σταματάκος, Κ. Βασιλάκου, Ι. Γκώτσης, Β. Φασούλη, Η. Βιτωράτος. (2016). Συμβολή της χρήσης εμπειρικών μεθόδων και δορυφορικών δεδομένων στην εκτίμηση της ημερήσιας Εξατμοδιαπνοής Αναφοράς. ΥΔΡΟΤΕΧΝΙΚΑ 24, 72-84

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΥ ΣΙΤΗΡΕΣΙΟΥ ΣΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΠΑΧΥΝΣΗΣ ΧΟΙΡΩΝ ΣΤΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΑΝΘΡΑΚΑ ΤΗΣ ΧΟΙΡΟΤΡΟΦΙΚΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ

Β. Ανέστης[1, 2] ✉, Δ. Κ. Παπαναστασίου[1,2], Θ. Μπαρτζάνας[1], Ι. Σκούφος[3], Η. Γιάννενας[4], Α. Τζώρα[3], Π. Φλώρου-Πανέρη[4] & Κ. Κίττας[2]

[1]ΕΚΕΤΑ, ΙΕΤΕΘ, Δημάρχου Γεωργιάδου 118, 38333, Βόλος
[2]ΠΘ, ΤΓΦΠΑΠ, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία, Βόλος
[3]ΤΕΙ Ηπείρου, ΤΤΓ, Κωστακιοί Άρτας, 47100, Άρτα
[4]ΑΠΘ, ΤΚ, 54124, Θεσσαλονίκη
✉vanestis@ireteth.certh.gr

Περίληψη

Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε μια «cradle to farm gate» Ανάλυση Κύκλου Ζωής για να εξεταστεί η επίδραση της παροχής Εναλλακτικού Σιτηρεσίου (ΕΣ) [εισαγωγή ατταπουλγίτη και βενζοϊκού οξέος, ελάττωση καρπού καλαμποκιού, ενεργειακά ισοδύναμο του συμβατικού σιτηρεσίου (ΣΣ)], κατά το στάδιο πάχυνσης χοίρων σε μια Ελληνική εκμετάλλευση, στο Αποτύπωμα Άνθρακα (ΑΑ) του ζώντος βάρους (ζ.β.) των πωλούμενων χοιριδίων. Η ανάλυση έδειξε ότι η χρήση του ΕΣ πιθανώς να οδηγεί σε χαμηλότερο ΑΑ ανά kg ζ.β. πωλούμενων χοιριδίων (7,41 και 7,02 kg CO_2 eq για το ΣΣ και το ΕΣ, αντίστοιχα). Το ΕΣ προτείνεται να δοκιμαστεί ως εναλλακτική διατροφική λύση, στην κατεύθυνση της περιβαλλοντικής και της οικονομικής βιωσιμότητας της συγκεκριμένης εκμετάλλευσης.

Λέξεις κλειδιά: Αποτύπωμα Άνθρακα, Ανάλυση Κύκλου Ζωής, χοιρίδια πάχυνσης, σιτηρέσιο

EFFECT OF SUPPLYING ALTERNATIVE RATION DURING THE PIGLETS' FATTENING STAGE ON THE CARBON FOOTPRINT OF THE PIG FARM

V. Anestis[1, 2]✉, D. K. Papanastasiou[1,2], T. Bartzanas[1], I. Skoufos[3], I. Giannenas[4], A. Tzora[3], P. Florou-Paneri[4] & C. Kittas[2]

[1]CERTH, IRETETH, Dimarhou Georgiadou 118, GR-38333, Volos
[2]UTH, DACPRE, Fytokou St., N. Ionia, GR-38446, Volos
[3]TEI of Epirus, DAT, Kostakioi, GR-47100, Arta
[4]AUTH, SVM, GR-54124, Thessaloniki
✉vanestis@ireteth.certh.gr

ABSTRACT

In this study, a cradle-to-farm-gate Life Cycle Assessment approach was applied in order to examine the effect of supplying an Alternative Ration (AR) [introducing attapulgite and benzoic acid, decreasing maize grain quantity, energetically equivalent to the conventional ration (CR)], during the piglets fattening stage in a Greek farm, on the Carbon Footprint (CF) of the sold piglets live-weight (LW). The analysis showed that the supply of the AR potentially induced a CF reduction per kg of sold piglets LW (7.41 and 7.02 kg CO_2 eq for the CR and the AR, respectively). The AR is suggested as an alternative feed solution towards the environmental and economic sustainability of the specific farm.

Keywords: Carbon Footprint, Life Cycle Assessment, fattening piglets, ration

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΟΡΕΩΝ

ΕΚΕΤΑ:	Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης
ΙΕΤΕΘ:	Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας
ΠΘ:	Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
ΤΓΦΠΑΠ:	Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος
ΤΤΓ:	Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων
ΑΠΘ:	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
ΤΚ:	Τμήμα Κτηνιατρικής,
CERTH:	Centre for Research and Technology Hellas
IRETETH:	Institute for Research and Technology Thessaly
UTH:	University of Thessaly
DACPRE:	Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment
DAT:	Department of Agricultural Technology
AUTH:	Aristotle University of Thessaloniki
SVM:	School of Veterinary Medicine

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χοιροτροφία αποτελεί έναν από τους δυναμικότερους κλάδους της κτηνοτροφίας στην Ελλάδα. Το μοντέλο εκτροφής που κυριαρχεί στη χώρα είναι το εντατικό (Βακάκης, 2008). Το εντατικό, βιομηχανικό σύστημα παραγωγής συνδέεται με αυξημένη πυκνότητα στο ζωικό κεφάλαιο που εκτρέφεται και με αυξημένες αποδόσεις σε προϊόν, αλλά οδηγεί σε αυξημένη ρύπανση του αέρα, των υδάτων και του εδάφους (Basset-Mens and van der Werf, 2005).

Ανάμεσα στις διαφορετικές μεθόδους που έχουν προταθεί για την αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων προϊόντων, η τυποποιημένη κατά ISO μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), έχει αναγνωριστεί ως ένα πολύτιμο εργαλείο (van der Werf and Petit, 2002). Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος αποτιμώνται ποσοτικοποιώντας τους πόρους που καταναλώθηκαν και τις εκπομπές ρύπων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του – από την εξόρυξη πόρων, την παραγωγή των πρώτων υλών για την παραγωγή του προϊόντος, την παραγωγή του προϊόντος, τη χρήση του στην επαναχρησιμοποίησή του, την ανακύκλωση και την τελική διάθεσή του (Guinée et al., 2002). Η μεθοδολογία ΑΚΖ έχει τη δυναμική να εφαρμοστεί για την πιστοποίηση της καλής περιβαλλοντικής επίδοσης ενός κτηνοτροφικού προϊόντος, και επομένως να προσφέρει προστιθέμενη αξία και να βοηθήσει στην ανταγωνιστικότητά του στην εγχώρια και διεθνή αγορά. Ωστόσο, υπάρχει έλλειψη εργασιών ΑΚΖ που αναφέρονται σε εγχώρια γεωργικά και κτηνοτροφικά αγαθά ή στη βιομηχανία τροφίμων, με τις εργασίες των Anestis et al. (2015) και Giannenas et al. (2017) να είναι οι πιο χαρακτηριστικές εφαρμογής της ΑΚΖ σε Ελληνικά κτηνοτροφικά προϊόντα.

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να εφαρμόσει τη μεθοδολογία ΑΚΖ για να εξετάσει την επίδραση ενός εναλλακτικού σιτηρεσίου κατά το στάδιο πάχυνσης των εκτρεφόμενων χοιριδίων, ενεργειακά ισοδύναμου του συμβατικού, στο Αποτύπωμα Άνθρακα (ΑΑ) του παραγόμενου προϊόντος (δηλ. του ζώντος βάρους (ζ.β.) των πωλούμενων χοιριδίων) μίας Ελληνικής χοιροτροφικής εκμετάλλευσης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιγραφή συστήματος χοιροτροφικής εκμετάλλευσης

Οι χοιροτροφικές εγκαταστάσεις της εμπορικής εκμετάλλευσης ενδιαφέροντος βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή της Άρτας. Σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά της

εκτροφής τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά της χοιροτροφικής εκμετάλλευσης

Τεχνικό χαρακτηριστικό	**Μέση Τιμή**
Χοιρομητέρες (αριθμός)	410
Βάρος χοιρομητέρας (κιλά)	180
Διάρκεια εγκυμοσύνης (ημέρες)	115
Διάρκεια περιόδου γαλουχίας (ημέρες)	28
Ρυθμός αντικατάστασης χοιρομητέρων (%)	40
Τοκετοί, (αριθμός ανά έτος)	3
Διάρκεια περιόδου μεταξύ τοκετού και επόμενης εγκυμοσύνης (ημέρες)	9
Γεννημένα χοιρίδια/χοιρομητέρα/τοκετό (αριθμός)	11,9
Ρυθμός θνησιμότητας χοιριδίων πριν τον απογαλακτισμό (%)	10,9
Βάρος νεογέννητων χοιριδίων (κιλά)	1,4

Η ανάλυση βασίστηκε σε πειραματική διαδικασία η οποία είχε ως στόχο να μελετήσει την επίδραση ενός εναλλακτικού σιτηρεσίου στο στάδιο πάχυνσης των χοιριδίων της εκμετάλλευσης αυτής τόσο στην απόδοση (βάρος πώλησης, κατανάλωση τροφής) των χοιριδίων όσο και στην ποιότητα του σφάγιου (χημική και μικροβιολογική σύσταση). Τα συστατικά και κάποιες παράμετροι της χημικής σύστασης του συμβατικού και του εναλλακτικού σιτηρεσίου που μελετήθηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Οι διαφορές στα συστατικά των δύο σιτηρεσίων παρουσιάζονται με έντονη γραμματοσειρά.

Πίνακας 2. Συστατικά και παράμετροι χημικής σύστασης του συμβατικού και του εναλλακτικού σιτηρεσίου που παρέχεται στο στάδιο πάχυνσης των χοιριδίων

	Σιτηρέσια σταδίου πάχυνσης	
Συστατικά (g/kg)	**Συμβατικό**	**Εναλλακτικό**
Καλαμπόκι καρπός	**390**	**381**
Κριθάρι καρπός	300	300
Πίτυρα σιταριού	150	150
Σογιάλευρο 48%	100	100
Σογιέλαιο	5	5
Μαρμαρόσκονη 37%	5	5
Ισορροπιστής	50	50
Ατταπουλγίτης	**0**	**4**
Βενζοϊκό οξύ	**0**	**5**
Χημική ανάλυση (%)		
Υγρασία	12,23	12,29
Ολική τέφρα	5,39	5,35
Ολικές αζωτούχες ουσίες	15,00	14,50
Πεπτή ενέργεια (MJ/kg)	12,6	12,7

Στην εκμετάλλευση αυτή, τα χοιρίδια προς πάχυνση τρέφονται από την $7^{η}$ ημέρα ζωής τους με διαφορετικά σιτηρέσια στα στάδια γαλουχίας ($7^{η}$ – $26^{η}$ ημέρα ζωής), απογαλακτισμού ($27^{η}$ – $66^{η}$ ημέρα ζωής), προπάχυνσης ($67^{η}$ – $111^{η}$ ημέρα ζωής) και πάχυνσης ($112^{η}$ – $165^{η}$ ημέρα ζωής). Διατρεφόμενα με τα συμβατικά σιτηρέσια, τα χοιρίδια

προς πάχυνση παρουσιάζουν μέση ημερήσια ανάπτυξη ίση με 0,22, 0,52, 0,58 και 0,84 kg στα στάδια γαλουχίας, απογαλακτισμού, προπάχυνσης και πάχυνσης, αντίστοιχα. Το μέσο βάρος των χοιριδίων προς πώληση (166^{η} ημέρα ζωής)τα οποία διατρέφονται με τα συμβατικά σιτηρέσια είναι 102,7 kg/κεφαλή. Για το εναλλακτικό σιτηρέσιο, το μέσο βάρος πώλησης των χοιριδίων προσδιορίστηκε ίσο με 106,2 kg/κεφαλή, οδηγώντας σε μία μέση ημερήσια ανάπτυξη ίση με 0,93 kg. Η μέση κατανάλωση του συμβατικού σιτηρεσίου κατά τη διάρκεια του σταδίου πάχυνσης (54 ημέρες) είναι 185 kg/χοιρίδιο, ενώ για το εναλλακτικό σιτηρέσιο προσδιορίστηκε ίση με 174 kg/χοιρίδιο.

Έχοντας ως βάση τα διαφορετικά σιτηρέσια, μπορούν να καθοριστούν δύο συστήματα προς αποτίμηση του δείκτη ΑΑ χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία AKZ: α) το σύστημα συμβατικού σιτηρεσίου (ΣΣ) και β) το σύστημα εναλλακτικού σιτηρεσίου (ΕΣ).

2.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Ακολουθήθηκε μία 'cradle-to-farm-gate' προσέγγιση για τα χοιρίδια προς πώληση από την εκμετάλλευση. Ο όρος 'cradle-to-farm-gate' αναφέρεται στα όρια του συστήματος και υποδεικνύει ότι όλες οι διεργασίες της αλυσίδας παραγωγής μέχρι και την πώληση των χοίρων από τη μονάδα πρέπει να συμπεριληφθούν στην ανάλυση. Το σύστημα προς ανάλυση μπορεί να χωριστεί σε δύο συστήματα: α) το σύστημα προσκηνίου και β) το σύστημα παρασκηνίου. Το σύστημα προσκηνίου περιλαμβάνει την αποθήκευση των συστατικών σιτηρεσίου για τις διάφορες ομάδες ζωικού κεφαλαίου, την παρασκευή των σιτηρεσίων, την αναπαραγωγή και εκτροφή του ζωικού κεφαλαίου καθώς και τη διαχείριση της κοπριάς του στο χώρο της εκμετάλλευσης. Το σύστημα παρασκηνίου αφορά στις παραγωγικές αλυσίδες των εισροών στην εκμετάλλευση και πιο συγκεκριμένα των συστατικών σιτηρεσίου, της ηλεκτρικής ενέργειας και όλες τις σχετικές διεργασίες μεταφοράς.

Επιλέχθηκε η ροή αναφοράς (*reference flow*) να οριστεί σύμφωνα με τη λειτουργική μονάδα (*functional unit*) η οποία αντιπροσωπεύει τη λειτουργία (*function*) της παραγωγής ζ.β. προς σφαγή από το σύστημα. Η συντριπτική πλειοψηφία του ζ.β. που πωλείται προέρχεται από χοίρους πάχυνσης, επιτρέποντας να οριστεί ως ροή αναφοράς η ποσότητα «1 kg ζ.β χοίρου πάχυνσης».

Η προσέγγιση μοντελοποίησης χαρακτηρισμού (*attributional modelling*) χρησιμοποιήθηκε για τη σύνταξη της Απογραφής Κύκλου Ζωής (LCI) του συστήματος, σύμφωνα με την οποία η περιβαλλοντική του επίδοση αξιολογείται για την ήδη υπάρχουσα κατάσταση (π.χ. Thomassen et al., 2008).

Για την κατανομή του περιβαλλοντικού φορτίου μεταξύ των προϊόντων της εκμετάλλευσης χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση της οικονομικής κατανομής (*economic allocation*), υποθέτοντας ότι ο χοιροτρόφος αμείβεται το ίδιο ανά kg ζ.β. τόσο για τις χοιρομητέρες όσο και για τους χοίρους πάχυνσης που πωλούνται (97% κατανομή στο ζ.β. των χοίρων). Οπουδήποτε στο σύστημα παρασκηνίου υπάρχει ζήτημα πολύ-λειτουργικότητας, αυτό επιλύεται χρησιμοποιώντας επίσης την προσέγγιση οικονομικής κατανομής.

Ο προσδιορισμός του ΑΑ συνδέεται με τη λήψη αποτελεσμάτων Αποτίμησης Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (LCIA) μεσαίας κλίμακας (*mid-point level*). Η σχετική κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι η Παγκόσμια Υπερθέρμανση (Global Warming).

2.2.1 Σύνταξη Απογραφής Κύκλου Ζωής

Για τη σύνταξη της απογραφής κύκλου ζωής (LCI), πραγματοποιήθηκε σειρά από παραδοχές για το σύστημα παρασκηνίου, με βάση τις πρακτικές που εφαρμόζονται από την εκμετάλλευση, μερικές εκ των οποίων οι ακόλουθες:

- Το σύστημα βασίζεται σε εγχώρια παραγωγή δημητριακών (καλαμπόκι, κριθάρι, σιτάρι). Το καλαμπόκι και το κριθάρι παράγονται σε γειτονικές εκτάσεις μέσης απόστασης 15km από τη χοιροτροφική μονάδα. Η εγκατάσταση από την οποία παράγεται η ποσότητα των πιτύρων σίτου, βρίσκεται επίσης σε απόσταση 15km. Η καλλιέργεια σίτου βρίσκεται σε απόσταση 15km από την εγκατάσταση παραγωγής σιτάλευρου. Οι παραγωγικές αλυσίδες των δημητριακών αυτών προσομοιώθηκαν έχοντας ως βάση αντίστοιχες παραγωγικές αλυσίδες της LCI βάσης Agri-footprint (Blonk Agri-footprint BV, 2014). Πραγματοποιήθηκε επίσης τροποποίηση των αλυσίδων αυτών λαμβάνοντας υπόψη τις εγχώριες αποδόσεις ανά ha οι οποίες είναι διαθέσιμες από τον FAO (FAOSTAT, 2017).
- Το σογιάλευρο παράγεται κατά 10% στην Ελλάδα και εισάγεται με πλοίο κατά 90% από Αργεντινή και Βραζιλία. Η ποσότητα που παράγεται στην Ελλάδα, θεωρήθηκε ότι προέρχεται από μόνο μία εγκατάσταση παραγωγής (Μύλοι Σόγιας ΑΕ) που βρίσκεται στο Καλαμάκι Κορίνθου και ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται αποκλειστικά σόγια που εισάγεται με πλοίο από την Αργεντινή, τη Βραζιλία και τις ΗΠΑ (κάθε χώρα συνεισφέρει το ίδιο ποσοστό στις εισαγωγές). Όλη η ποσότητα, συγκεντρώνεται σε εγκατάσταση παραγωγής ζωοτροφής που βρίσκεται στο γεωγραφικό κέντρο της χώρας, και από εκεί μεταφέρεται στη χοιροτροφική μονάδα. Το σογιέλαιο θεωρείται ότι παράγεται εξολοκλήρου στην Ελλάδα από την ίδια εγκατάσταση, και από εκεί μεταφέρεται απευθείας στη χοιροτροφική μονάδα. Οι αλυσίδες παραγωγής του σογιάλευρου και σογιέλαιου προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας ως βάση τις αντίστοιχες διαθέσιμες της LCI βάσης Agri-footprint (Blonk Agri-footprint BV, 2014).
- Ο ατταπουλγίτης παράγεται στην Ελλάδα σε λατομείο που βρίσκεται σε απόσταση 180km από τη χοιροτροφική μονάδα (Γρεβενά). Επειδή η παραγωγή του ατταπουλγίτη δεν υπήρχε ως διαθέσιμη διεργασία στις βάσεις δεδομένων του λογισμικού SimaPro, έγινε η υπόθεση ότι οι εισροές και εκροές της συναφούς διεργασίας παραγωγής αργίλου μπεντονίτη (bentonite clay) της βάσης Ecoinvent (Ecoinvent, 2017), μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση αυτών της παραγωγής αργίλου ατταπουλγίτη (attapulgite clay).
- Το βενζοϊκό οξύ εισάγεται εξολοκλήρου από τη Δυτική Ευρώπη (Γερμανία) τόσο με πλοίο όσο και με τραίνο (ίδια συνεισφορά από τα δύο μεταφορικά μέσα), συγκεντρώνεται σε αποθήκη που βρίσκεται στο γεωγραφικό κέντρο της χώρας, και από εκεί μεταφέρεται στη χοιροτροφική μονάδα. Ως βάση για την παραγωγική του αλυσίδα, θεωρήθηκε η αντίστοιχη στη βάση δεδομένων Ecoinvent (Ecoinvent, 2017).
- Για την εκτίμηση των αποστάσεων μεταφοράς των εισροών των οποίων η αλυσίδα παραγωγής ξεκινά από το εξωτερικό εφαρμόστηκε η προσέγγιση που έχει προταθεί στην έκθεση των Vellinga et al. (2013).
- Όλη η απαιτούμενη ενέργεια από τη χοιροτροφική μονάδα καλύπτεται από τη χρήση της εγχώρια παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (δίκτυο ΔΕΗ, μέσης τάσης). Σχετικά με το ηλεκτρικό ρεύμα που λήφθηκε από την εκμετάλλευση, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μίγματος αγοράς για την Ελλάδα που είναι διαθέσιμο στην LCI βάση Ecoinvent (Ecoinvent, 2017). Το μοντέλο αυτό τροποποιήθηκε ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα πιο πρόσφατα στατιστικά (έτος 2014) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης που είναι διαθέσιμα για την Ελλάδα από το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA, 2017). Η

ποσότητα για την ηλεκτρική ενέργεια εκτιμήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την καταναλισκόμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια ανά kg εκτρεφόμενου χοιριδίου που προτείνεται στην αντίστοιχη διεργασία παραγωγής χοιριδίων της βάσης δεδομένων Agri-footprint (Blonk Agri-footprint BV, 2014).

Θεωρώντας ότι το εναλλακτικό σιτηρέσιο προσφέρεται σε όλα τα χοιρίδια προς πάχυνση της εκμετάλλευσης για όλο το έτος, οι ροές υλικών και ηλεκτρικής ενέργειας και οι ροές προϊόντων της εκμετάλλευσης για τα δύο συστήματα προς εξέταση παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Ο προσδιορισμός των εισροών συστατικών τροφής βασίστηκε στη σύσταση των σιτηρεσίων με τα οποία τράφηκαν οι διάφορες κατηγορίες χοίρων και τις παρεχόμενες ποσότητές τους, θεωρώντας απώλειες 2% κ.β. τόσο κατά το σχηματισμό τους στην εκμετάλλευση όσο και κατά την κατανάλωσή τους.

Πίνακας 3. Ετήσιες ροές υλικών, ηλεκτρικής ενέργειας και προϊόντων της εκμετάλλευσης

Ροή	**Σύστημα**		**Μονάδα μέτρησης**
	Συμβατικό	**Εναλλακτικό**	
Εισροές			
Καλαμπόκι, καρπός	2069,7	1982,5	τ/έτος
Κριθάρι, καρπός	1326,7	1277,6	τ/έτος
Πίτυρα σιταριού	716,5	692,0	τ/έτος
Σογιάλευρο 48%	580,3	563,9	τ/έτος
Σογιέλαιο	36,6	35,8	τ/έτος
Μαρμαρόσκονη 37%	21,1	20,3	τ/έτος
Ισορροπιστής	255,3	247,1	τ/έτος
Ρεγγάλευρο	48,2	48,2	τ/έτος
Γάλα υποκατάστατο	21,9	21,9	τ/έτος
Ορός γλυκός γάλακτος	29,6	29,6	τ/έτος
Ατταπουλγίτης		10,4	τ/έτος
Βενζοϊκό οξύ		12,9	τ/έτος
Ηλεκτρισμός	1460000	1510000	kWh/έτος
Προϊόντα			
Χοίροι πάχυνσης	1460	1510	τ/έτος
Χοιρομητέρες	30,5	30,5	τ/έτος

Σχετικά με το σύστημα προσκηνίου, εκτιμήθηκαν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [μεθάνιο (CH_4) και υποξείδιο του αζώτου (N_2O)] και άλλων αερίων ρύπων [αμμωνία (NH_3) και οξειδίων του αζώτου εκτός του N_2O (NO_x)]. Ο προσδιορισμός των εκπομπών CH_4 λόγω εντερικής ζύμωσης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το μέσο ετήσιο συντελεστή εκπομπής που προτείνεται για χοίρους από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) (μεθοδολογία Tier 1) (Dong et al., 2006). Οι εκπομπές CH_4 από τη διαχείριση κοπριάς στην εκμετάλλευση εκτιμήθηκαν αναπτύσσοντας ετήσιους συντελεστές εκπομπής σύμφωνα με την Tier 2 μέθοδο που προτείνεται από την IPCC (Dong et al., 2006) και λαμβάνοντας υπόψη τις δύο διαφορετικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης κοπριάς της εκμετάλλευσης (στερεή κατάσταση σε κοπροσωρό, υγρή κατάσταση σε χωμάτινες ανοιχτές δεξαμενές). Για τον προσδιορισμό των εκπομπών NH_3, NO_x και άμεσου N_2O από τη διαχείριση της κοπριάς στην εκμετάλλευση ακολουθήθηκε η προσέγγιση ροών αζώτου (N) όπως προτείνεται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environmental Agency, EEA) (Amon et al., 2016). Χρησιμοποιήθηκαν οι προκαθορισμένοι από τον EEA

μέσοι συντελεστές εκπομπής για κάθε κατηγορία εκτρεφόμενου χοίρου, οι οποίοι αναφέρονται στις εγκαταστάσεις στέγασης ζωικού κεφαλαίου και αποθήκευσης κοπριάς. Οι εκπομπές έμμεσου N_2O από το συνολικό σύστημα διαχείρισης κοπριάς της εκμετάλλευσης προσδιορίστηκαν από το άθροισμα των εκπομπών NH_3-N και NO-N, χρησιμοποιώντας τον προκαθορισμένο μέσο συντελεστή εκπομπής που προτείνεται από την IPCC (Dong et al., 2006)**.**

Η ανάλυση LCI καθώς και η LCIA, έλαβαν χώρα χρησιμοποιώντας το λογισμικό SimaPro (έκδοση 8.0.4.26 PhD) (Pré, 2017). Για την LCIA, εφαρμόστηκε η μέθοδος χαρακτηρισμού IPCC 2013 GWP 100a v.1 για τον προσδιορισμό του Δυναμικού Παγκόσμιας Υπερθέρμανσης σε χρονικό πλαίσιο 100 ετών (GWP_{100}). Μεταξύ δύο όμοιων συστημάτων για τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί οι ίδιες παραδοχές και μέθοδοι υπολογισμού, καλύτερη επίδοση έχει εκείνο στο οποίο ο GWP_{100} (υπολογιζόμενος ως προς τη ροή αναφοράς) λαμβάνει με στατιστική βεβαιότητα μικρότερες τιμές. Η αβεβαιότητα στα αποτελέσματα της AKZ είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο ζήτημα, το οποίο έχει συζητηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία (Giannenas et al., 2017). Τέτοια ανάλυση είναι εκτός των στόχων του άρθρου αυτού. Στο παρόν άρθρο η AKZ χρησιμοποιήθηκε ως περιγραφική ανάλυση και οι σημειακές εκτιμήσεις του GWP_{100} που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης των εξεταζόμενων κύκλων ζωής με το λογισμικό SimaPro θεωρήθηκαν ενδεικτικές της επίδοσης των μελετώμενων συστημάτων όσον αφορά στο συγκεκριμένο δείκτη.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον Πίνακα 4 φαίνονται οι εκτιμήσεις ανά kg ζ.β. πωλούμενων χοίρων πάχυνσης για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και αμμωνίας οι οποίες προσδιορίστηκαν για την εκμετάλλευση αλλά υφίστανται και στις παραγωγικές αλυσίδες των εισροών της.

Πίνακας 4. LCI αερίων του θερμοκηπίου και αμμωνίας των δύο συστημάτων (εκτιμήσεις σε mg/kg ζ.β. χοιριδίου στην πύλη της εκμετάλλευσης)

Εκπομπές	Σύνολο	Εκμετάλλευση	Καλαμπόκι	Κριθάρι	Πίτυρα σίτου	Σογιάλευρο	Σογιέλαιο	Ρεγγάλευρο	Μαρμαρόσκονη	Μεταφορές	Ηλεκτρισμός	Ατταπουλγίτης	Βενζοϊκό Οξύ
Συμβατικό σύστημα													
CH_4	124748	121693	513	203	344	345	44	69	0,45	32	1505	-	-
N_2O	2553	294	835	786	346	232	32	0,83	0,02	0,62	25	-	-
NH_3	32479	19230	3415	5288	1715	2483	342	0,03	0,07	0,23	5	-	-
Εναλλακτικό Σύστημα													
CH_4	117321	114307	475	189	321	324	41	67	0,41	31	1505	0,16	60
N_2O	2369	265	774	732	324	218	31	0,80	0,02	0,61	25	0,005	0,09
NH_3	29635	17283	3163	4924	1602	2333	323	0,03	0,07	0,22	5	10^{-3}	0,05

Το ΑΑ ανά kg ζ.β. χοιριδίου που πωλείται από την εκμετάλλευση για τα δύο συστήματα που εξετάστηκαν, εκτιμήθηκε ίσο με 7,41 kg CO_2 eq και 7,02 kg CO_2 eq για το συμβατικό και το εναλλακτικό σύστημα, αντίστοιχα. Έτσι, το σύστημα που ορίζεται από τη διατροφή με ατταπουλγίτη και βενζοϊκό οξύ στο στάδιο πάχυνσης των χοιριδίων, εκτιμήθηκε με καλύτερη επίδοση από ότι το συμβατικό σχετικά με την κατηγορία Παγκόσμιας Υπερθέρμανσης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εκτιμήσεις της επίδοσης των συστημάτων εκφράζονται ανά kg ζ.β. χοιριδίου που πωλείται, η αλλαγή της απόδοσης στην εκτροφή χοιριδίων σε σχέση με το συμβατικό σύστημα τις επηρεάζει. Το ίδιο ισχύει και για τις ποσότητες των εισροών. Για το σύστημα του εναλλακτικού σιτηρεσίου, παρατηρήθηκαν αύξηση στο ετήσιο πωλούμενο ζ.β. χοίρων πάχυνσης και μείωση στην πλειοψηφία των ετήσιων εισροών σε σχέση με το συμβατικό σύστημα (Πίνακας 3). Το γεγονός αυτό εξηγεί τη βελτίωση της επίδοσης (ελάττωση του ΑΑ) του εναλλακτικού συστήματος και υποδεικνύει μικρή συνεισφορά των αλυσίδων παραγωγής ατταπουλγίτη και βενζοϊκού οξέος στο συνολικό ΑΑ του παραγόμενου προϊόντος.

Κατόπιν, μελετήθηκε η συνεισφορά των βασικότερων εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου (CH_4, N_2O και CO_2) και των διαφόρων διεργασιών του κύκλου ζωής στο ΑΑ του μελετώμενου προϊόντος. Προσδιορίστηκε ότι το (βιογενές) CH_4 από την εκμετάλλευση αντιστοιχεί στο 41.5% και 41.1% της εκτίμησης του GWP_{100} ενώ το N_2O από την εκμετάλλευση στο 1.05% και το 1.0% για τα συστήματα συμβατικής και εναλλακτικής διατροφής, αντίστοιχα. Επιπλέον, προσδιορίστηκε ότι το σύστημα διαχείρισης κοπριάς της εκμετάλλευσης είναι υπεύθυνο για το 87.9% και το 87.5% της συνεισφοράς της εκμετάλλευσης στις εκπομπές βιογενούς CH_4 των συστημάτων συμβατικής και εναλλακτικής διατροφής, αντίστοιχα καθώς και για τη συνολική συνεισφορά της εκμετάλλευσης στις εκπομπές N_2O. Η ανάλυση έδειξε επίσης ότι το CO_2 εξαιτίας αλλαγής χρήσης γης από την αλυσίδα παραγωγής σογιάλευρου αντιστοιχεί στο 19.8% και 19.6% του συνολικού GWP_{100} για το συμβατικό και το εναλλακτικό σύστημα, αντίστοιχα. Οι διεργασίες καλλιέργειας σόγιας στην Αργεντινή και τη Βραζιλία ευθύνονται κατά βάση για τις εκπομπές CO_2 εξαιτίας αλλαγής χρήσης γης και συνεισφέρουν το 21.7% και 21.6% του συνολικού GWP_{100} για το συμβατικό σύστημα και το εναλλακτικό σύστημα, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, προσδιορίστηκε ότι οι εκπομπές CO_2 λόγω καυσίμων από τις εγχώριες αλυσίδες παραγωγής καρπού καλαμποκιού, καρπού κριθαριού και πιτύρων σίτου αντιστοιχούσαν στο 9.9% και 9.7% GWP_{100} για το συμβατικό σύστημα και το εναλλακτικό σύστημα, αντίστοιχα. Η διεργασία καύσης του ντίζελ σε γεωργικό μηχανολογικό εξοπλισμό και η καύση του βαρύ μαζούτ για την παραγωγή ατμού (παραγωγή πιτύρων σίτου) βρέθηκε ότι αποτελούν σημαντικές διεργασίες από τις οποίες προκύπτουν αυτές οι εκπομπές CO_2. Η διεργασία καύσης του ντίζελ σε γεωργικό μηχανολογικό εξοπλισμό συνεισέφερε το 3.02% και 2.98% (συνολικά, σε όλες τις διεργασίες που συμμετείχε), ενώ η καύση του βαρύ μαζούτ για την παραγωγή ατμού το 1.19% και 1.17% (συνολικά, σε όλες τις διεργασίες που συμμετείχε) του συνολικού GWP_{100} για το συμβατικό και το εναλλακτικό σύστημα, αντίστοιχα. Το N_2O από τις εγχώριες παραγωγικές αλυσίδες καρπού καλαμποκιού και καρπού κριθαριού βρέθηκε ότι αντιστοιχούσε στο 4.6% και το 4.5% της συνολικής εκτίμησης του GWP_{100} για το συμβατικό και το εναλλακτικό σύστημα, αντίστοιχα. Σημαντικές διεργασίες για την εκπομπή N_2O από τις αλυσίδες αυτές ήταν οι εγχώριες καλλιέργειες καλαμποκιού και κριθαριού. Η καλλιέργεια καλαμποκιού συνεισέφερε το 2.76% και το 2.70% ενώ η καλλιέργεια κριθαριού το 2.71% και το 2.66% της συνολικής εκτίμησης του GWP_{100} για το συμβατικό και το εναλλακτικό σύστημα, αντίστοιχα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σύστημα που ορίζεται από το ΕΣ ατταπουλγίτη και βενζοϊκού οξέος στο στάδιο πάχυνσης των χοιριδίων πιθανώς να συνδέεται με χαμηλότερο ΑΑ από ότι το σύστημα που ορίζεται από το συμβατικό σιτηρέσιο. Αυτό οφείλεται στην ελάττωση της μέσης συνολικής κατανάλωσης του σιτηρεσίου στο στάδιο πάχυνσης (και επομένως της προμήθειας των

αντίστοιχων συστατικών σιτηρεσίων) καθώς και στην αύξηση του μέσου τελικού βάρους των χοιριδίων κατά την πώληση. Έτσι, το εναλλακτικό σιτηρέσιο προτείνεται να δοκιμαστεί ως εναλλακτική διατροφική λύση σε επίπεδο εκμετάλλευσης, εφόσον φαίνεται να βελτιώνει την απόδοση των χοιριδίων και να ελαττώνει το αποτύπωμα άνθρακα του προσφερόμενου προϊόντος της. Μελέτη περισσότερων κατηγοριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς και των οικονομικών επιπτώσεων που συνδέονται με το εναλλακτικό σιτηρέσιο θα μπορούσαν να συνεισφέρουν επιπλέον στην εξέταση υιοθέτησής του από τη συγκεκριμένη εκμετάλλευση.

Η ανάλυση συνεισφοράς που πραγματοποιήθηκε ανέδειξε τα ακόλουθα σημεία ως αδύναμα στις αλυσίδες παραγωγής των συστημάτων που εξετάστηκαν: α) το σύστημα διαχείρισης κοπριάς λόγω της μέγιστης συνεισφοράς του στις συνολικές εκπομπές βιογενούς μεθανίου, β) οι διεργασίες καλλιέργειας σόγιας στην Αργεντινή και τη Βραζιλία (χώρες από όπου προέρχεται το σογιάλευρο) λόγω της σημαντικής συνεισφοράς του διοξειδίου του άνθρακα το οποίο οφείλεται στην αλλαγή χρήσης γης προς όφελος των καλλιεργειών αυτών, στο συνολικό αποτύπωμα άνθρακα των εξεταζόμενων συστημάτων, γ) η καύση ντίζελ στο μηχανολογικό εξοπλισμό των γεωργικών διεργασιών (κυρίως εγχώριων) και η καύση μαζούτ για την παραγωγή ατμού στην εγχώρια βιομηχανία παραγωγής συστατικών σιτηρεσίων, λόγω της αυξημένης συμμετοχής τους στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από καύσιμα και δ) οι εγχώριες καλλιέργειες καλαμποκιού και κριθαριού, λόγω της αυξημένης συμμετοχής τους στις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου (εξαιτίας της λίπανσής τους) των συστημάτων που εξετάστηκαν. Τα σημεία αυτά αποτελούν προτεραιότητα στην αναζήτηση λύσεων οι οποίες θα οδηγήσουν σε ελάττωση του CF.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Amon, B., Hutchings, N., Dämmgen, U., Webb, J., Seedorf, J., Hinz, T., Van Der Hoek, K., Gyldenkærne, S., Mikkelsen, M.H., Dore, C., Sánchez Jiménez, B., Menzi, H., Dedina, M., Haenel, H.-D., Röseman, C., Groenestein, K., Bittman, S., Hobbs, P., Lekkerkerk, L., Bonazzi, G., Couling, S., Cowell, D., Kroeze, C., Pain, B., Klimont, Z., 2016. *3B. Manure Management,* in: EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016. Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories. European Environment Agency, Luxembourg: Publications Office of the European Union, pp. 62.

Anestis, V., Bartzanas, T., Kittas, C., 2015. *Life Cycle Inventory Analysis for the Milk Produced in a Greek Commercial Dairy Farm - The Link to Precision Livestock Farming,* in: Guarino, M., Berckmans, D. (Eds.), 7th European Conference on Precision Livestock Farming (EC-PLF). University of Milan, Milan, Italy, pp. 670–680.

Basset-Mens, C., van der Werf, H.M.G., 2005. *Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France*. Agric. Ecosyst. Environ., 105: 127–144.

Blonk Agri-footprint BV, 2014. *Agri-footprint - Part 2 - Description of data - Version 1*. Blonk Agri-footprint BV, Gouda, The Netherlands, pp. 129.

Dong, H., Mangino, J., McAllister, T.A., Hatfield, J.L., Johnson, D.E., Lassey, K.R., de Lima, M.A., Romanovskaya, A., Bartram, D., Gibb, D., Martin, J.H.J., 2006. *Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management*, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Vol. 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Hayama, Japan, pp. 89.

Ecoinvent, 2017. *Ecoinvent version 3* [WWW Document]. URL http://www.ecoinvent.org/ (accessed 5.17.17).

FAOSTAT, 2017. *Production / Crops* [WWW Document]. URL http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E (accessed 5.17.17).

Giannenas, I., Bonos, E., Anestis, V., Filioussis, G., Papanastasiou, D.K., Bartzanas, T., Papaioannou, N., Tzora, A., Skoufos, I., 2017. *Effects of Protease Addition and Replacement of Soybean Meal by Corn Gluten Meal on the Growth of Broilers and on the Environmental Performances of a Broiler Production System in Greece*. PLoS One 12, e0169511.

Guinée, J.B., Marieke, G., Reinout, H., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Lindeijer, E., Roorda, A.A.H., van der Ven, B.L., Weidema, B.P., 2002. *Hanbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards.* Centre of Environmental Science, Leiden University, Leiden, The Netherlands, pp. 692.

IEA, 2017. Greece: Electricity and Heat for 2014 [WWW Document]. URL http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=GREECE&product=electricityandheat&year=2014 (accessed 5.15.17).

Pré, 2017. About SimaPro [WWW Document]. URL https://simapro.com/about/ (accessed 5.15.17).

Thomassen, M., Dalgaard, R., Heijungs, R., Boer, I., 2008. *Attributional and consequential LCA of milk production.* Int. J. Life Cycle Assess., 13: 339–349

van der Werf, H.M.G., Petit, J., 2002. *Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods.* Agric. Ecosyst. Environ., 93: 131–145.

Vellinga, T. V, Blonk, H., Marinussen, M., van Zeist, W.J., de Boer, I.J.M., Starmans, D., 2013. *Report 674. Methodology used in FeedPrint: a tool quantifying greenhouse gas emissions of feed production and utilization*. Wageningen UR Livestock Research, Wageningen, pp. 108.

Βακάκης, Φ., 2008. *Ελληνική χοιροτροφία: Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές*. Γεωργία – Κτηνοτροφία, 1: 62–75.

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ: ΠΙΘΑΝΕΣ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΥΠΟΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ

Κωνσταντίνος Γεωργόπουλος[1]✉, Δημήτρης Μητρόγιαννης[1], Μαρία Ψυχογιού[1], Δημήτριος Αλεξόπουλος[2], Νικόλαος Κούκουζας[2], Γεώργιος Οικονόμου[3], Ιωάννης Μπαζιώτης[1]

[1]Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, kostasgeorgo@gmail.com ✉

[2]Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ)/Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ), Αιγιαλείας, 15125 Μαρούσι, Αθήνα

[3]Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Ολυμπιακό Χωριό Αχαρναί, 13677, Αθήνα

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η προσρόφηση φωσφορικών ανιόντων (PO_4-P) από υδατικά διαλύματα χρησιμοποιώντας συνθετικό ζεόλιθο (ZFA) από υδροθερμικά επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα. Η απομάκρυνση του φωσφόρου (P) ανήλθε έως και 100%. Η προσρόφηση P ήταν ενδόθερμη διεργασία η οποία δεν επηρεάστηκε από το αρχικό pH του διαλύματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των φασματοσκοπικών αναλύσεων και των πειραμάτων εκρόφησης, η απομάκρυνση του P οφείλεται τόσο στην κατακρήμνιση φωσφορικού ασβεστίου στην υγρή φάση όσο και στην προσρόφηση του P στην επιφάνεια του ZFA.

PHOSPHATE SORPTION USING HYDROTHERMALLY TREATED FLY ASH: IMPLICATIONS FOR AGRICULTURAL USAGE OF LIGNITE BYPRODUCTS

Konstantinos Georgopoulos[1]✉, Dimitris Mitrogiannis[1], Maria Psychoyou[1], Dimitris Alexopoulos[2], Nikolaos Koukouzas[2], Georgios Oikonomou[3], Ioannis Baziotis[1]

[1]Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering, 75 Iera Odos, 11855 Athens Greece, kostasgeorgo@gmail.com✉

[2]Centre of Research and Technology Hellas (CERTH)/Chemical Process and Energy Resources Institute (CPERI), 52 Egialias Str., 15125 Marousi, Athens, Greece

[3]Institute of Geology and Mineral Exploration, Olympic Village Acharnae, Athens P.C. 13677, Greece

Abstract

In the present study, the adsorption of phosphate anions (PO_4-P) from aqueous solutions was studied using zeolite synthesized from hydrothermally treated fly ash (ZFA). Phosphorus (P) removal reached up to 100%. The sorption of P was an endothermic process which was not affected by the initial solution pH. According to the results of the spectroscopic analyses and desorption experiments, P removal is due to both the precipitation of calcium phosphate in the liquid phase and P adsorption on the ZFA surface.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα (FA: fly ash) αποτελεί στερεό απόβλητο που παράγεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς (ΑΗΣ) καύσης λιγνίτη της ΔΕΗ (Itskos et al., 2010). Η διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας συνιστά παγκοσμίως περιβαλλοντικό πρόβλημα (Tsitouridou and Georgiou, 1988) λόγω επιβάρυνσης των χωματερών με μεγάλες ποσότητες FA (Querol et al., 2002). Η ιπτάμενη τέφρα έχει ποζολανικές ιδιότητες και υψηλή περιεκτικότητα σε Al και Si, που την καθιστά ιδανικό υλικό στην παραγωγή τσιμέντου, δομική, οδοποιία και στη σύνθεση υλικών προστιθέμενης αξίας (πχ. ζεόλιθος) για εφαρμογές περιβαλλοντικής τεχνολογίας (Koukouzas et al., 2010; Querol et. al., 2002).

Η σύνθεση ζεολίθου από ιπτάμενη τέφρα (zeolite fly ash: ZFA) συμβάλλει στη παραγωγή υλικών χαμηλού κόστους με ιδιότητες ιοντο-ανταλλαγής και προσρόφησης ρύπων από υγρά απόβλητα. Τα υγρά απόβλητα οικιακής, βιομηχανικής και γεωργικής προέλευσης, ως ρυπαντές των επιφανειακών υδάτων, περιέχουν θρεπτικά στοιχεία (κυρίως άζωτο-Ν και φώσφορο-Ρ) που προκαλούν ευτροφισμό (Zamparas and Zacharias, 2014). Η απομάκρυνση και ανάκτηση αυτών των θρεπτικών στοιχείων από τα υγρά απόβλητα αποτελεί ζήτημα προτεραιότητας της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την ποιότητα των υδάτων (Οδηγία 2000/60/ΕC και 91/271/ΕΕC) (Zamparas and Zacharias, 2014). Ερευνητικό ενδιαφέρον υπάρχει επίσης για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως εδαφοβελτιωτικό με σκοπό τη συγκράτηση θρεπτικών στοιχείων σε αμμώδη εδάφη κατά την εφαρμογή λιπασμάτων ή επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και για τις επιπτώσεις της στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους (Cheung and Venkitachalam, 2006; Yunusa et al., 2011).

Η ρόφηση φωσφορικών ανιόντων (PO_4-P) από συνθετικούς ζεολίθους έχει μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια κυρίως μετά από τροποποίηση τους με άλατα Fe^{3+}, Mg^{2+} και La^{3+}. Σε πρόσφατες έρευνες μελετήθηκαν οι μηχανισμοί προσρόφησης PO_4-P από υδατικά διαλύματα σε μπετονίτη και ζεόλιθο μετά από επεξεργασία με διάλυμα $Ca(OH)_2$ (Markou et al., 2016; Mitrogiannis et al., 2017). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η χρήση ZFA από την ίδια πηγή παραγωγής FA για απομάκρυνση Ρ από υγρά απόβλητα δεν έχει μελετηθεί.

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση της προσροφητικής ικανότητας φωσφορικών από συνθετικό ζεόλιθο (ZFA) που προέρχεται από υδροθερμικά επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα. Η απομάκρυνση Ρ από υδατικά διαλύματα έχει μελετηθεί σε παλαιότερη έρευνα με χρήση ιπτάμενης τέφρας από τον ΑΗΣ Καρδιάς (Tsitouridou and Georgiou, 1988) χωρίς να γίνει όμως αναλυτική μελέτη των μηχανισμών ρόφησης και κατακρήμνισης του Ρ. Η προσροφητική ικανότητα του ZFA μελετήθηκε υπό διαφορετικές πειραματικές συνθήκες (pH, αρχική συγκέντρωση Ρ, δόση ZFA, θερμοκρασία). Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης προσδοκούμε να αποτελέσουν τη βάση για τη διερεύνηση της χρήσης των παραπροϊόντων λιγνίτη ως εδαφοβελτιωτικά υλικά στη γεωργία και στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Προέλευση ιπτάμενης τέφρας και σύνθεση ζεολίθου

Για τη σύνθεση ζεολίθου χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα (FA) από τον ΑΗΣ Καρδιάς (Ν. Κοζάνης), η οποία είχε συλλεχθεί από το Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ). Η χημική σύσταση (σε % κ.β.) της FA του ΑΗΣ Καρδιάς είναι: 31.35 SiO_2, 17,78 Al_2O_3, 7.09 Fe_3O_3, 31.87 CaO, 6.34 MgO και 3.07 SO_3 (Tsitouridou and Georgiou, 1988).

Εφαρμόστηκε η μέθοδος της αλκαλικής υδροθερμικής επεξεργασίας με βάση τη μελέτη των Koukouzas et al. (2010). Αρχικά τοποθετήθηκαν 400 ml NaOH 2 mol/L και 40 g ιπτάμενης τέφρας σε ποτήρι ζέσεως 500 ml και έγινε ανάδευση στους 90 °C για 24 ώρες. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε φιλτράρισμα του μίγματος σε αντλία κενού με χρήση διηθητικού χαρτιού. Τέλος έγινε επαναλαμβανόμενη έκπλυση του στερεού κλάσματος με απιονισμένο νερό και τοποθέτησή του σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας για ξήρανση στους 35 °C.

2.2 Πειράματα προσρόφησης

Στα πειράματα προσρόφησης PO_4-P, μελετήθηκε η επίδραση του pH, του χρόνου επαφής, της αρχικής συγκέντρωσης P, της δόσης ροφητή και της θερμοκρασίας στη ροφητική ικανότητα του ZFA. Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

Εκτός από τις δοκιμές μελέτης της επίδρασης της δόσης του ροφητή, σε όλα τα υπόλοιπα πειράματα η συγκέντρωση του ZFA ήταν 5 g/L (0.1 g/20 ml). Οι δοκιμές ρόφησης πραγματοποιήθηκαν σε δοχεία πολυαιθυλενίου (HDPE) με πώμα χωρητικότητας 30 ml τοποθετώντας 0.1g (ZFA) και 20 ml διαλύματος φωσφορικών (KH_2PO_4). Τα δοχεία αναδεύθηκαν σε οριζόντιο αναδευτήρα στις 200 στροφές ανά λεπτό (rpm), ο οποίος τοποθετήθηκε σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας.

Η κινητική της ρόφησης μελετήθηκε στους 25 °C σε διάλυμα αρχικής συγκέντρωσης 300 mg P/L και pH 7. Δείγματα (50 μL) διαλύματος ελήφθησαν στις 0.25, 0.30, 1, 2, 4, 24, 48 και 72 h με σκοπό τη μέτρηση της υπολειμματικής συγκέντρωσης του P στο διάλυμα.

Τα πειράματα σε διαφορετικά pH πραγματοποιήθηκαν σε αρχική συγκέντρωση P 100 mg/L και τιμές pH 4-8. Το pH του διαλύματος ρυθμίστηκε με διαλύματα NaOH και HCl πριν την προσθήκη του στα δοχεία που περιείχαν το ροφητή.

Οι ισόθερμες ρόφησης μελετήθηκαν σε 3 διαφορετικές θερμοκρασίες (15, 25 και 35 °C), με 5 διαφορετικές αρχικές συγκεντρώσεις P (100, 200, 300, 400 και 500 mg/L). Τα πειράματα με διαφορετικές συγκεντρώσεις ZFA (1.25, 2.5, 5 και 10 g/L) πραγματοποιήθηκαν στους 25 °C, σε διάλυμα αρχικής συγκέντρωσης 300 mg P/L. Όλες οι σειρές των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν σε τρεις επαναλήψεις και εδώ παρουσιάζεται ο μέσος όρος των τριών τιμών.

Η προσροφητική ικανότητα του ZFA δοκιμάστηκε σε συνθετικό απόβλητο με την εξής σύσταση (Huang et al., 2014): 500 mg/L COD (χημικά απαιτούμενο οξυγόνο ως γλυκόζη: $C_6H_{12}O_6$), 50 mg/L Ca ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$), 50 mg/L Na (NaCl), 20 mg/L Mg ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), 100 mg/L HCO_3^- ($NaHCO_3$), 200 mg/L NH_4-N (NH_4Cl), 100 mg/L PO4-P (KH_2PO_4) και 1 mL/L διάλυμα ιχνοστοιχείων. Το διάλυμα ιχνοστοιχείων περιείχε: 30 mg/L Cu ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), 50 mg/L Zn ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$), 50 mg/L Mn ($MnCl_2$ $4H_2O$), 50 mg/L B ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)). Το συνθετικό απόβλητο προσομοιώνει υγρά εκροής από αναερόβια χώνευση αποβλήτων μετά τον εξαερισμό της αμμωνίας (ammonia stripping).

Η ποσοστιαία απομάκρυνση (R%) του P από το διάλυμα και η ροφητική ικανότητα του ZFA για P στην κατάσταση ισορροπίας, q_e (mg/g), και σε χρόνο t, q_t (mg/g), υπολογίστηκαν από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$R\% = 100 \times (C_0 - C_e)/C_0 \quad (1)$$

$$q_e = (C_0 - C_e)/C_s \quad (2)$$

$$q_t = (C_0 - C_t)/C_s \quad (3)$$

όπου C_0 (mg/L) η αρχική συγκέντρωση του P, C_e (mg/L) η συγκέντρωση του P στην κατάσταση ισορροπίας, C_t (mg/L) η συγκέντρωση του P σε χρόνο t και C_s (g/L) η συγκέντρωση του ροφητή (ZFA) στο διάλυμα.

Δοκιμές εκρόφησης P προσροφημένου στο ZFA πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας 0.1 M HCl και δείγματα ZFA που προέκυψαν μετά τη ρόφηση σε 300 και 500 mg/L P για 24 ώρες. Το ποσοστό εκρόφησης του προσροφημένου φωσφόρου από το συνθετικό ζεόλιθο υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση:

$$D(\%)= 100 \times C_{des}/C_{ads}, = 100 \times C_{des}/(C_0-C_e) \quad (4)$$

Όπου C_{des} η συγκέντρωση του P στο διάλυμα εκρόφησης και C_{ads} η συγκέντρωση του προσροφημένου P.

2.3 Αναλυτικές μέθοδοι

Η μέτρηση της υπολειμματικής συγκέντρωσης του φωσφόρου (P) στο διάλυμα πραγματοποιήθηκε σε φασματοφωτόμετρο UV-vis (Hach Lange 2800) σύμφωνα με τη μέθοδο του ασκορβικού οξέος (APHA 1995). Για το σκοπό αυτό, 10 mL υπερκείμενου διαλύματος συλλέχθηκαν από το διάλυμα ρόφησης και φυγοκεντρήθηκαν στις 4000 rpm για 5 min.

Η μορφολογία και η χημική σύσταση της επιφάνειας του ZFA πριν και μετά τη ρόφηση P μελετήθηκε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, JEOL JSM 5600) στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Ορυκτολογικά η FA και ο ZFA μελετήθηκαν με περιθλασιμετρία ακτινών-Χ (XRD, Siemens D 500) στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ) Πτολεμαΐδας.

2.4 Μοντέλα προσρόφησης

Για την αξιολόγηση των πειραματικών δεδομένων στην κατάσταση ισορροπίας (24 h) χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα ισόθερμων Langmuir, Freundlich και Temkin, τα οποία περιγράφονται από τις παρακάτω γραμμικές εξισώσεις (Mitrogiannis et al. 2017):

Langmuir: $1/q_e = 1/q_{max} + 1/(q_{max}\ bC_e)$ (5)

Freundlich: $\ln q_e = \ln K_F + 1/n\ (\ln C_e)$ (6)

Temkin: $q_e = RT/b_T(\ln A_T) + RT/b_T(\ln C_e)$ (7)

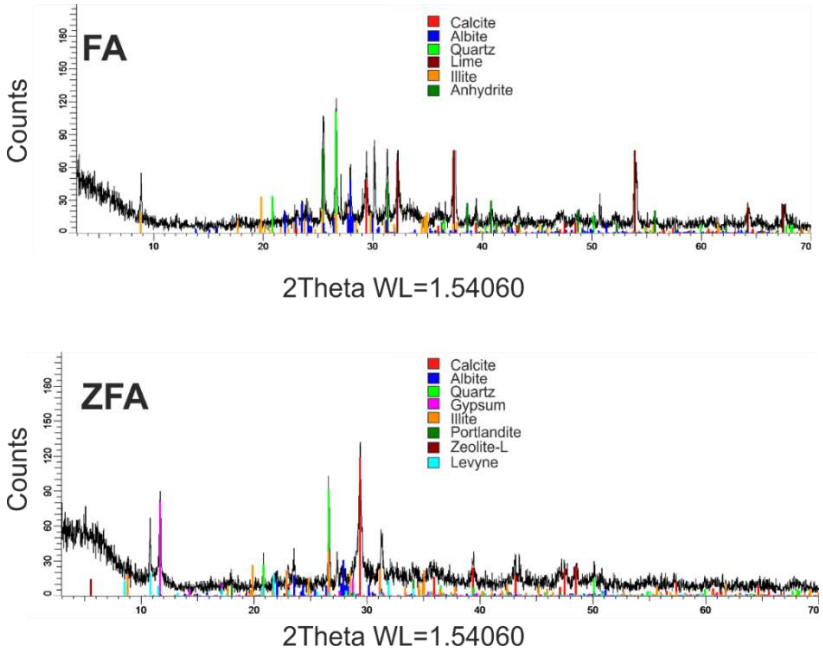
Όπου q_m (mg/g) είναι η μέγιστη θεωρητική ροφητική ικανότητα σε μοναδιαία στοιβάδα ομοιογενούς επιφάνειας του ροφητή, b (L/mg) είναι σταθερά που σχετίζεται με την ενέργεια σύνδεσης, K_F [(mg/g)(L/mg)$^{-1/n}$] είναι η σταθερά που αντιπροσωπεύει την ικανότητα ρόφησης σε πολλαπλή στοιβάδα, n είναι αδιάστατη σταθερά που σχετίζεται με την ένταση της ρόφησης και την ετερογένεια της επιφάνειας του ροφητή, A_T (L/mg) είναι η σταθερά σύνδεσης στην κατάσταση ισορροπίας που σχετίζεται με τη μέγιστη ενέργεια προσρόφησης του ρύπου στο ροφητή, b_T (J/mol) είναι σταθερά που σχετίζεται με τη θερμότητα της προσρόφησης, T η θερμοκρασία του διαλύματος (K) και R η παγκόσμια σταθερά των αερίων [8.314 J/(K mol)]. Η σταθερά b της ισόθερμης Langmuir χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του αδιάστατου παράγοντα διαχωρισμού R_L που υποδεικνύει εάν είναι ευνοϊκή η ρόφηση μιας διαλυτής ουσίας (Zhang et al., 2011):

$$R_L=1/(1+bC_0) \quad (8)$$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

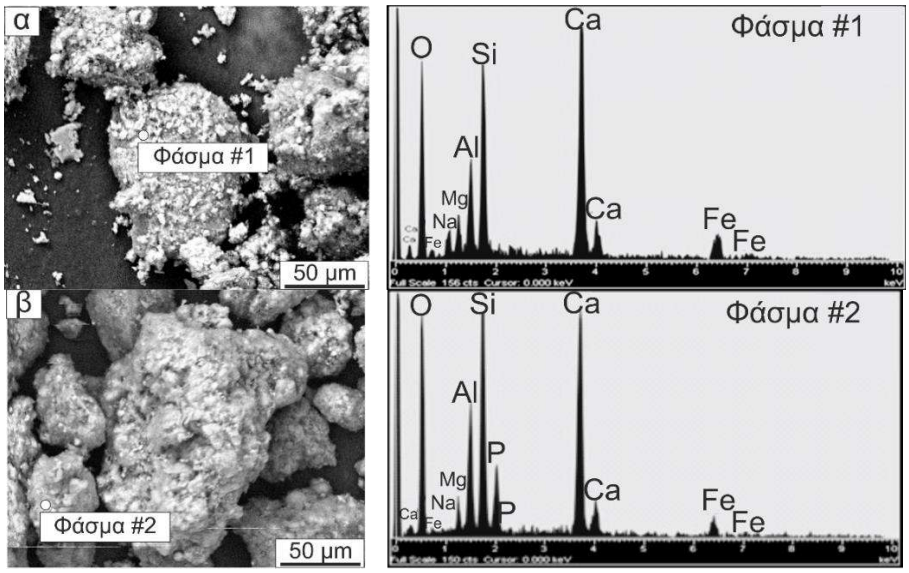
3.1 Χαρακτηρισμός ιπτάμενης τέφρας και συνθετικού ζεολίθου

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου XRD, τα ορυκτά που διαπιστώθηκαν στην FA είναι χαλαζίας, ασβεστίτης, αλβίτης, CaO, ιλλίτης και ανυδρίτης ενώ στην ZFA είναι ζεόλιθος (levyne, Zeolite-L), άμορφη αργιλοπυριτική φάση, χαλαζίας, ασβεστίτης, αλβίτης, γύψος, ιλλίτης, και πορτλανδίτης. Επομένως, ο ZFA αποτελείται από ζεολιθικές και μη ζεολιθικές φάσεις. Η απομάκρυνση ανιόντων όπως τα φωσφορικά οφείλεται σε μη ζεολιθικές φάσεις όπως CaO, $CaSO_4$, $CaCO_3$, Al_2O_3 και Fe_2O_3 που υπήρχαν ήδη στη FA και τροποποιήθηκαν εν μέρει ή παρέμειναν αμετάβλητες μετά τη σύνθεση του ZFA. Παρόμοια συμπεράσματα αναφέρονται στη μελέτη των Xie et al. (2014). Τα οξείδια Ca και Al κυριαρχούν στην ελληνική FA, ιδίως στην FA από τις περιοχές της Καρδιάς και Πτολεμαΐδας (Itskos et al., 2015)



Σχήμα 1. Ακτινοδιαγράμματα περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ από την ιπτάμενη τέφρα (FA) και το συνθετικό ζεόλιθο (ZFA).

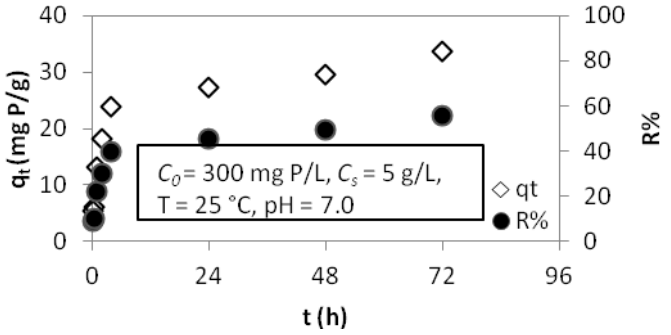
Η ανάλυση των δειγμάτων με SEM-EDS έδειξε την παρουσία P στα σωματίδια του ZFA μετά τη ρόφηση σε υδατικά διαλύματα (Σχήμα 2) και σε συνθετικό απόβλητο. Συνθετικοί ζεόλιθοι που προέρχονται από FA με υψηλή περιεκτικότητα σε Ca^{2+} παρουσιάζουν μεγαλύτερη ροφητική ικανότητα για P σε σύγκριση με τους ZFA από FA με χαμηλή περιεκτικότητας σε Ca^{2+} (Zhang et al., 2011).



Σχήμα 2. Φωτογραφίες SEM για το συνθετικό ζεόλιθο πριν (α) και μετά (β) την προσρόφηση φωσφόρου, καθώς και τα αντίστοιχα φάσματα EDS.

3.2 Κινητική της προσρόφησης

Στην αρχική φάση της προσρόφησης, η απομάκρυνση P από το υδατικό διάλυμα πραγματοποιήθηκε με υψηλό ρυθμό επιτυγχάνοντας q_t (προσροφητική ικανότητα) 23.96 mg/g P και ποσοστό απομάκρυνσης 40% στις 4 h (Σχήμα 3). Η ταχεία αρχική φάση της κινητικής της ρόφησης οφείλεται, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, στη διαλυτοποίηση ιόντων Ca^{2+} από το CaO, $CaSO_4$ και $CaCO_3$ της επιφάνειας του ZFA (π.χ.: CaO (s) + H_2O → $Ca(OH)_2$ (s) → Ca^{2+} + $2OH^-$) και στην αλληλεπίδρασή τους με ταφωσφορικά ανιόντα (Lu et al., 2009; Hermassi et al., 2017). Η άνοδος του pH του διαλύματος σε αλκαλικές τιμές (>11), όπως διαπιστώθηκε μετά από 24 ώρες (βλ. Ενότητα 3.4), ευνόησε την κατακρήμνιση διαφόρων φάσεων Ca-P στην υγρή φάση και στην επιφάνεια του ZFA. Η δεύτερη και πιο αργή φάση της κινητικής μέχρι τις 72 ώρες (με R% =55.92% και q_t = 33.55 mg/g P) οφείλεται στην προσρόφηση του P σε διάφορες λειτουργικές ομάδες της επιφάνειας μέσω χημικών δεσμών και στην ενδοσωματιδιακή διάχυση των φωσφορικών στο εσωτερικό του ZFA (Hermassi et al., 2017). Η συνεισφορά της προσρόφησης και της κατακρήμνισης στη συνολική απομάκρυνση του P εκτιμήθηκε στην Ενότητα 3.6. μέσω της εκρόφησης του προσροφημένου P από το ZFA.



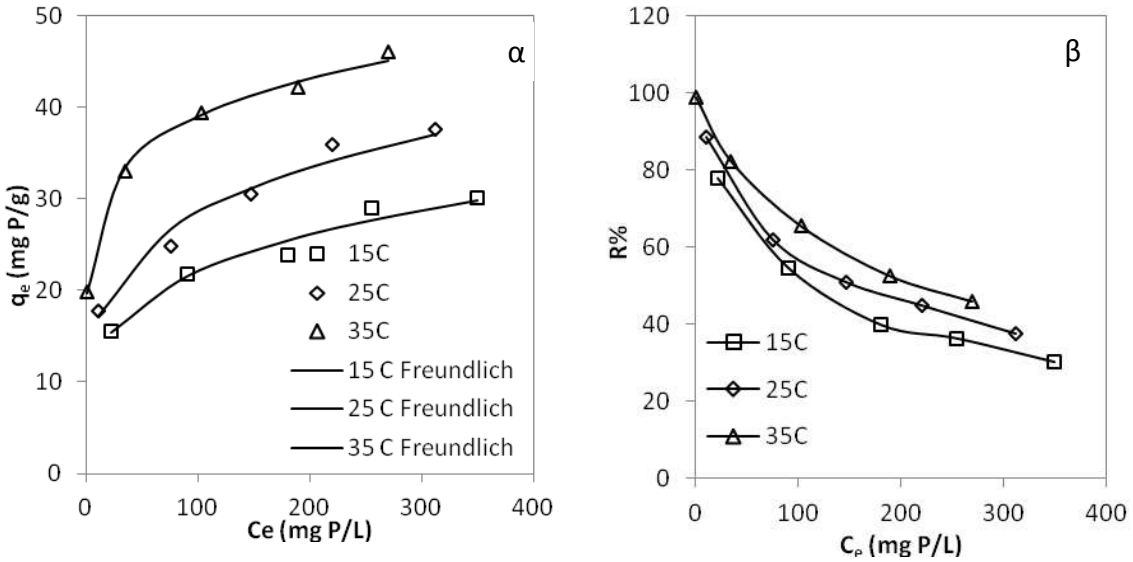
Σχήμα 3. Κινητική απομάκρυνσης και ρόφησης P στο ZFA.

3.3 Ισόθερμες προσρόφησης

Σε όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες, η προσροφητική ικανότητα (q_e) του ZFA για P αυξήθηκε με την αύξηση της αρχικής συγκέντρωσης του P από 100 σε 500 mg/L (Σχήμα 4). Αντίθετα, η ποσοστιαία απομάκρυνση του P από το διάλυμα μειώθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης P λόγω πεπερασμένων θέσεων ρόφησης σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις διαλυτής ουσίας, και κυμάνθηκε από 30.15-77.9%, 37.58-88.6% και 46.05-99.1% στους 15, 25 και 35 °C, αντίστοιχα (Σχήμα 4β). Επίσης, παρατηρήθηκε μικρότερη αύξηση στο τελικό pH του διαλύματος με την αύξηση της συγκέντρωσης P. Οι τιμές του pH μετά από 24 ώρες κυμάνθηκαν μεταξύ 11.6 και 10.8 για 100 και 500 mg/L P, αντίστοιχα.

Η αύξηση των q_e και R% με τη θερμοκρασία (Σχήμα 4) δείχνει την ενδόθερμη φύση της διεργασίας ρόφησης. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να οφείλεται στην ενισχυμένη διάχυση των φωσφορικών ανιόντων στους πόρους του ZFA με αποτέλεσμα την πρόσβαση σε περισσότερες θέσεις σύνδεσης. Επιπλέον, η επεξεργασία συνθετικού αποβλήτου με C_0 = 100 mg/L P χρησιμοποιώντας ZFA οδήγησε σε ποσοστό απομάκρυνσης P (*R%*) κατά 98.9% μετά από 24 h στους 25 °C.

Τα πειραματικά δεδομένα προσομοιώνονται καλύτερα από την ισόθερμη Freundlich η οποία παρουσίασε μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού (R^2) σε σχέση με τις Langmuir και Temkin (Πίνακας 1). Οι υψηλές τιμές της αδιάστατης σταθεράς *n* (>1) και οι τιμές της R_L (0< R_L <1) υποδεικνύουν ευνοϊκή ρόφηση. Η πολύ καλή περιγραφή των δεδομένων από το μοντέλο Freundlich οφείλεται αφενός στην ανομοιογενή κατανομή των ενεργών θέσεων σύνδεσης στην επιφάνεια του συνθετικού ζεολίθου, ο οποίος αποτελείται από διαφορετικής ενεργότητας ορυκτολογικές φάσεις, και αφετέρου στη ρόφηση ή κατακρήμνιση του P στην επιφάνεια σε πολλαπλές στοιβάδες (Lu et al., 2009; Mitrogiannis et al., 2017).



Σχήμα 4. Ισόθερμες ρόφησης (α) και ποσοστό απομάκρυνσης P (β) ως συνάρτηση της υπολειμματικής συγκέντρωσης P σε τρεις θερμοκρασίες. Στο α) τα σημεία απεικονίζουν τις πειραματικές τιμές του q_e και οι καμπύλες τις θεωρητικές τιμές του μοντέλου Freundlich (χρόνος επαφής = 24h, C_0 = 100-500 mg/L P, T = 15-35 °C).

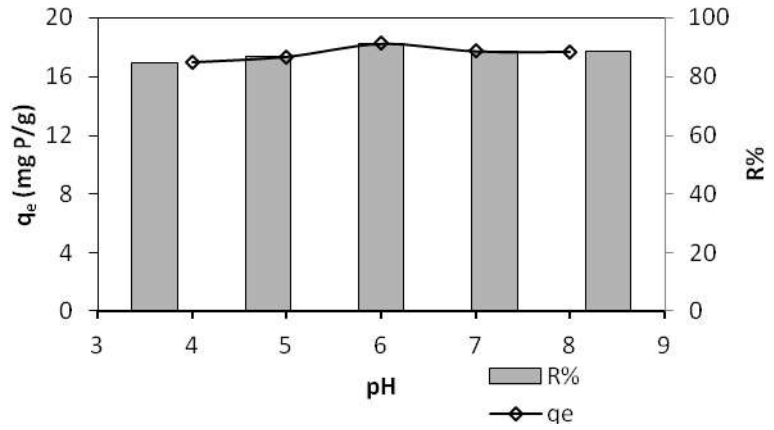
Πίνακας 1. Παράμετροι των ισόθερμων ρόφησης P στο συνθετικό ζεόλιθο (C_s = 5 g/L, pH = 7.0).

Ισόθερμη	Παράμετρος	15°C	25°C	35°C
	q_e (mg/g)*	30.15	37.58	46.05
Langmuir	q_m (mg/g)	28.81	33.94	40.03
	b (L/mg)	0.052	0.093	1.040
	R_L	0.037-0.16	0.034-0.3	0.01-0.09
	R^2	0.924	0.881	0.935
Freundlich	K_F (mg/g)(L/mg)$^{-1/n}$	7.36	9.76	19.88
	n	4.18	4.30	6.83
	R^2	0.976	0.975	0.997
Temkin	A_T (L/mg)	0.78	1.30	76.95
	b_T (J/mol)	457.30	408.96	577.91
	R^2	0.949	0.938	0.978

*C_0 = 500 mg/L P

3.4 Επίδραση pH διαλύματος

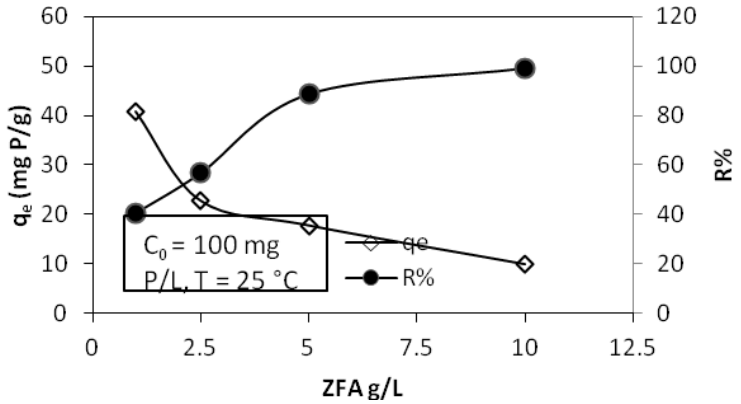
Η τιμή του q_e αυξήθηκε από 16.96 σε 18.24 mg/g P με την αύξηση του pH από 4 σε 6 και στη συνέχεια ελαττώθηκε σε 17.68 mg/g P σε pH 8 (Σχήμα 5). Το τελικό pH του διαλύματος (μετά από 24 ώρες) αυξήθηκε σε 11.1-11.6 για όλες τις τιμές του αρχικού pH. Η μικρή επίδραση του αρχικού pH στο q_e και *R%* οφείλεται τόσο στις αλκαλικές ιδιότητες του αρχικού υλικού (FA) όσο και στην ενίσχυσή τους στο ZFA λόγω της υδροθερμικής επεξεργασίας της FA, με αποτέλεσμα την αύξηση του τελικού pH σε αλκαλικές τιμές (Lu et al., 2007).



Σχήμα 5. Επίδραση του αρχικού pH του διαλύματος στη ρόφηση P από το ZFA (C_0 = 100 mg/L P, C_s = 5 g/L, T = 25 °C).

3.5 Επίδραση συγκέντρωσης του ροφητή

Το σχήμα 6 παρουσιάζει την επίδραση της δόσης του ροφητή (C_s) στη προσροφητική ικανότητα (q_e) του ZFA και στην ποσοστιαία απομάκρυνση P από το διάλυμα. Παρατηρήθηκε μείωση του q_e όταν η συγκέντρωση του ZFA αυξήθηκε από 1 σε 10 g/L. Η μείωση του q_e ήταν αναμενόμενη λόγω μη κορεσμένων θέσεων ρόφησης σε υψηλότερες δόσεις ροφητή. Αντίθετα, η αύξηση του *R%* με την αύξηση της δόσης του ZFA οφείλεται στην αύξηση της διαθέσιμης επιφάνειας και του αριθμού των θέσεων ρόφησης για δεδομένο όγκο διαλύματος ρόφησης (Zhang et al., 2011).



Σχήμα 6. Επίδραση της δόσης ZFA στη ρόφηση P.

3.6 Πειράματα εκρόφησης

Οι δοκιμές εκρόφησης πραγματοποιήθηκαν για την εκτίμηση της συμβολής της κατακρήμνισης του P στην υγρή φάση εκτός επιφάνειας του ροφητή. Η εκρόφηση P με 0.1 M HCl έδειξε ότι μόνο 61.6% και 54.6% του συνολικά απομακρυσμένου P ανακτήθηκε για αρχικές συγκεντρώσεις P 300 και 500 mg/L, αντίστοιχα. Τα παραπάνω ποσοστά εκρόφησης υποδεικνύουν ότι ένα σημαντικό μέρος του συνολικά αφαιρούμενου P (38.4% και 45.4%) απομακρύνθηκε από το διάλυμα λόγω κατακρήμνισης ως φωσφορικό ασβέστιο και όχι λόγω προσρόφησης στο ZFA (Lu et al., 2009). Επομένως, οι τιμές του q_e και των παραμέτρων των ισόθερμων έχουν υπερεκτιμηθεί όπως υποδεικνύουν τα ποσοστά εκρόφησης. Τα κατακρημνίσματα απομακρύνθηκαν κατά το πλύσιμο των δειγμάτων του ZFA που συλλέχθηκαν μετά τη ρόφηση και συνεπώς δεν συμμετείχαν στη διεργασία της εκρόφησης. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται από την υψηλή περιεκτικότητα του ZFA σε ασβεστίτη/ανυδρίτη και γύψο που αποτελούν τις κυρίαρχες ορυκτολογικές φάσεις της FA και ZFA αντίστοιχα (Σχήμα 1). Οι φάσεις αυτές οι οποίες παρέμειναν και στο ZFA έχουν την ιδιότητα προσρόφησης φωσφορικών.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν πως ο συνθετικός ζεόλιθος παρουσίασε σημαντική προσροφητική ικανότητα για φωσφορικά ανιόντα. Η ροφητική ικανότητα του ZFA και το ποσοστό απομάκρυνσης του P από το διάλυμα αυξήθηκαν με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από την αλλαγή του pH του διαλύματος. Ο ZFA είναι ένα προϊόν προστιθέμενης αξίας που προκύπτει από την αξιοποίηση ενός στερεού αποβλήτου (ιπτάμενη τέφρα) μειώνοντας τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη διάθεσή του σε ΧΥΤΑ. Εμφανίζει εν δυνάμει σημαντικά πλεονεκτήματα στην ταυτόχρονη ρόφηση κατιονικών και ανιονικών ρύπων. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την χρήση του ZFA ως εδαφοβελτιωτικό υλικό σε γεωργικά εδάφη και στην επεξεργασία πραγματικών αποβλήτων.

5. Βιβλιογραφία

APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington DC.

Cheung, K. C., & Venkitachalam, T. H. (2006). Kinetic studies on phosphorus sorption by selected soil amendments for septic tank effluent renovation. *Environmental geochemistry and health*, *28*(1), 121-131.

Hermassi, M., Valderrama, C., Moreno, N., Font, O., Querol, X., Batis, N.H., & Cortina, J.L. (2017). Fly ash as reactive sorbent for phosphate removal from treated waste water as a potential slow release fertilizer. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5**(1), 160-169.

Itskos, G., Koutsianos, A., Koukouzas, N., & Vasilatos, C. (2015). Zeolite development from fly ash and utilization in lignite mine-water treatment. International Journal of Mineral Processing, 139, 43-50.

Itskos, G., Itskos, S., & Koukouzas, N. (2010). Size fraction characterization of highly-calcareous fly ash. *Fuel Processing Technology*, *91*(11), 1558-1563.

Koukouzas, N., Vasilatos, C., Itskos, G., Mitsis, I., & Moutsatsou, A. (2010). Removal of heavy metals from wastewater using CFB-coal fly ash zeolitic materials. *Journal of Hazardous Materials*, *173*(1), 581-588.

Lu, S. G., Bai, S. Q., Zhu, L., & Shan, H. D. (2009). Removal mechanism of phosphate from aqueous solution by fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, *161*(1), 95-101.

Markou, G., Inglezakis, V. J., Mitrogiannis, D., Efthimiopoulos, I., Psychoyou, M., Koutsovitis, P & Baziotis, I. (2016). Sorption mechanism(s) of orthophosphate onto $Ca(OH)_2$ pretreated bentonite. RSC Advances, 6(27), 22295-22305.

Mitrogiannis, D., Psychoyou, M., Baziotis, I., Inglezakis, V. J., Koukouzas, N., Tsoukalas, N., Palles D., Kamitsos, E., Oikonomou, G., & Markou, G. (2017). Removal of phosphate from aqueous solutions by adsorption onto $Ca(OH)_2$ treated natural clinoptilolite. *Chemical Engineering Journal*, *320*, 510-522.

Querol, X., Moreno, N., Umaña, J. T., Alastuey, A., Hernández, E., Lopez-Soler, A., & Plana, F. (2002). Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. *International Journal of coal geology*, *50*(1), 413-423.

Tsitouridou, R., & Georgiou, J. (1988). A contribution to the study of phosphate sorption by three Greek fly ashes. *Toxicological & Environmental Chemistry*, *17*(2), 129-138.

Xie, J., Wang, Z., Wu, D., & Kong, H. (2014). Synthesis and properties of zeolite/hydrated iron oxide composite from coal fly ash as efficient adsorbent to simultaneously retain cationic and anionic pollutants from water. *Fuel*, *116*, 71-76.

Yunusa, I. A., Manoharan, V., Odeh, I. O., Shrestha, S., Skilbeck, C. G., & Eamus, D. (2011). Structural and hydrological alterations of soil due to addition of coal fly ash. *Journal of soils and sediments*, *11*(3), 423-431.

Zamparas, M., & Zacharias, I. (2014). Restoration of eutrophic freshwater by managing internal nutrient loads. A review. *Science of the Total Environment*, *496*, 551-562.

Zhang, M., Zhang, H., Xu, D., Han, L., Zhang, J., Zhang, L., Wu, W., & Tian, B. (2011). Removal of phosphate from aqueous solution using zeolite synthesized from fly ash by alkaline fusion followed by hydrothermal treatment. *Separation Science and Technology*, *46*(14), 2260-2274.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΙΣΧΑΝΘΟΥ

Ε. Ροδιάς[1,✉], P. Busato[1], R. Berruto[1], Μ. Λαμπρίδη[2], Γ. Βασιλειάδης[2]& Δ. Μπόχτης[2]
[1]University of Turin, Department of Agriculture, Forestry and Food Science (DISAFA), Largo Braccini 2, 10095, Grugliasco, Italy
[2]Εθνικο Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης – ΕΚΕΤΑ, Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας – ΙΕΤΕΘ, Δημητριαδος 95, 38333, Βόλος, Ελλάδα
✉erodias@unito.it

Περίληψη

Ένα σημαντικό μερίδιο στη σύγχρονη γεωργία είναι, άμεσα ή έμμεσα, συνδεδεμένο με την παραγωγή ενέργειας από βιομάζα από ενεργειακές καλλιέργειες, από αξιοποίηση γεωργικών υπολλειμμάτων κ.α.. Οι ενεργειακές καλλιέργειες θεωρούνται από τις πιο σημαντικές πηγές βιομάζας. Εντούτοις, υπάρχει πάντα ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος από την παραγωγή οποιασδήποτε καλλιέργειας. Στην παρούσα εργασία, ο μίσχανθος ως μια ενεργειακή καλλιέργεια επιλέχθηκε να αξιολογηθεί σε επίπεδο περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Με τη χρήση ενός μαθηματικού εργαλείου αναλύθηκαν σε βάθος και αξιολογήθηκαν όλες οι ενεργειακές εισροές που συνεισφέρουν στο σύστημα με βάση όλες τις καλλιεργητικές εργασίες, τόσο εντός του χωραφιού, όσο και οι εργασίες μεταφοράς. Τέλος, εκτιμώνται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται σε κάθε εργασία ήταν από 60 εως 2,600 kg CO_2/ha-έτος κατά την διάρκεια της μελετώμενης καλλιεργητικής περιόδου.

Λέξεις κλειδιά: ενέργεια, CO_2, εκπομπές, διοξείδιο του άνθρακα

ENVIRONMENTAL IMPACT OF MISCANTHUS CROP PRODUCTION

E. Rodias[1, ✉], P. Busato[1], R. Berruto[1], M. Lampridi[2] & G. Vasiliadis[2], D. Bochtis[2]
[1]University of Turin, Department of Agriculture, Forestry and Food Science (DISAFA), Largo Braccini 2, 10095, Grugliasco, Italy
[2]Centre for Research & Technology Hellas – CERTH, Institute for Research and Technology - Thessaly IRETETH, Dimitriados Str. 95, 38333, Volos, Greece
✉ erodias@unito.it

ABSTRACT

A significant share in modern agriculture is, directly or indirectly, connected with biomass energy production by energy crops, by proper utilization of crop residues, etc. Energy crops are considered one of the most substantial sources in biomass energy production. Though, there is always an environmental impact derived by any crop production. In this paper, miscanthus, as an energy crop, was selected to be assessed against the environmental impact criterion. A mathematical tool was applied in order to in-depth analyze and evaluate all the energy inputs that contribute into the system by all dedicated to the production field operations (both in-field and transport operations). As a result, the CO_2 emissions that produced in every operation (varying from 60 to 2,600 kg CO_2/ha-year) during this production period are estimated.

Keywords: energy, CO_2, emissions, carbon dioxide

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό πριν την εγκατάσταση μιας οποιασδήποτε καλλιέργειας να αξιολογείται η κατανάλωση ενέργειας ή/και η περιβαλλοντική επίπτωση από την εν δυνάμει καλλιέργεια καθόλη τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας (φύτευση/σπορά, καλλιεργητικές εργασίες, λίπανση, άρδευση, συγκομιδή κλπ). Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να γίνεται είτε άμεσα είτε έμμεσα. Άμεση εισροή ενέργειας ονομάζεται η ενέργεια που χρησιμοποιείται απευθείας κατά την όποια εργασία ή διαχείριση και συνήθως αναφέρεται στην ενέργεια του πετρελαίου, ή του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου καυσίμου και του ηλεκτρισμού (Barber, 2004). Από την άλλη, η έμμεση εισροή ενέργειας αναφέρεται στην ενέργεια που μπαίνει στο σύστημα με έμμεσους τρόπους, όπως η ενέργεια που περιέχεται στα μηχανήματα ή στα αγροχημικά και αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της συνολικής εισροής ενέργειας (Kitani, 1999). Όσον αφορά στην περιβαλλοντική επίπτωση μιας διεργασίας/διαχείρισης μπορεί να εκτιμηθεί είτε ως αποτύπωμα άνθρακα είτε ως εκπομπές CO_2. Οι εκπομπές CO_2 συνδέονται άμεσα με την κατανάλωση ενέργειας σε ένα σύστημα. Ο Barber δηλώνει ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ ενέργειας και εκπομπών άνθρακα, καθώς επίσης, αναλύει τους βασικούς δείκτες άνθρακα που εμπλέκονται στις γεωργικές εργασίες από διάφορες πηγές (Barber, 2004). Ο Lal επίσης υπολόγισε τις εκπομπές άνθρακα από διάφορες γεωργικές εργασίες (Lal, 2004).

Η αξιολόγηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σχετίζεται με οποιαδήποτε διεργασία του πρωτογενούς τομέα, είτε κατά την παραγωγή στο χωράφι, είτε κατά την φάση της μεταποίησης και περαιτέρω επεξεργασίας ενός αγροτικού προιόντος. Οι Karakaya & Ozilgen αξιολόγησαν τις εκπομπές CO_2 κατά την διάρκεια παραγωγής νωπής αλλά και επεξεργασμένης τομάτας (ξεφλουδισμένες, κομμένες σε κύβους, σε χυμο κλπ) (Karakaya & Ozilgen 2011).

Εκτός, όμως, από τις καλλιέργειες που σχετίζονται με προιόντα που προορίζονται για τροφή, είναι σημαντικό να ακολουθείται παρόμοια αξιολόγηση και μελέτη για τις ενεργειακές καλλιέργειες που προορίζονται κυρίως για παραγωγή βιομάζας. Οι ενεργειακές καλλιέργειες διαχωρίζονται σε εκείνες που αξιοποιούνται για την εξαγωγή φυτικού ελαίου από τους σπόρους και την παραγωγή καυσίμου (ελαιοκράμβη, αγριοαγκινάρα) και σε εκείνες στις οποίες αξιοποιείται το στέλεχος του φυτού για την παραγωγή στερεης βιομάζας (μισχανθος, καλάμι, αγριοαγκινάρα). Οι Angelini et al. βρήκαν μέση ενεργειακή απόδοση ίση με 467 GJ/ha το έτος για 12-ετή αξιολόγηση καλλιέργειας μίσχανθου (Angelini et al., 2009). Οι Mantineo et al. κατέληξαν σε μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση 221 GJ/ha για τα πρώτα 3 χρόνια της παραγωγής μισχάνθου (Mantineo et al., 2009). Ως ενεργειακή απόδοση ορίζεται η διαφορά των συνολικών εκροών ενέργειας μείον των συνολικών εισροών ενέργειας(Angelini et al. 2009; Mantineo et al. 2009).

Γενικότερα, διαφαίνεται ότι υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξυ των αποτελεσμάτων διαφόρων αναφορών. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της πολυπαραμετρικής φύσης των γεωργικών συστημάτων παραγωγής. Υπάρχουν πολλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις απαιτήσεις σε εισροές αλλα και σε εκροές σε γεωργικά συστήματα παραγωγής βιομάζας (Busato & Berruto, 2014; Ren et al., 2015).

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περιβαλλοντική επίπτωση ως κατανάλωση ενέργειας και ως εκπομπές CO_2 σε 10-ετή αξιοποίηση καλλιέργειας μίσχανθου και περιλαμβάνει μια σε βάθος ανάλυση των εμπλεκόμενων καλλιεργητικών διεργασιών εντός και εκτός χωραφιού.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι κύριες εισροές στο σύστημα σχετίζονται με τα γεωργικά μηχανήματα, τα καύσιμα και τα αγροχημικά-λιπάσματα. Στο παρόν σύστημα, οι γεωργικές εργασίες που συμπεριλήφθηκαν είναι οι βασικές εργασίες οι οποίες αφορούν την μεταφορά από την έδρα του παραγωγού στο χωράφι και αντίστροφα, τις γεωργικές εργασίες εντός του χωραφιού και τις εργασίες μεταφοράς της παραγόμενης βιομάζας κατά την συγκομιδή προς το εργοστάσιο επεξεργασίας.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα υπολογιστικό εργαλείο με χρήση του λογισμικού MatLab Mathworks© έτσι ώστε να υπολογιστούν οι εισροές ενέργειας και οι εκπομπές CO_2 σε κάθε γεωργική εργασία με οσο το δυνατόν υψηλή ακρίβεια και λεπτομέρεια για την εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων. Στο εργαλείο αυτό χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα από παραγωγούς, από την βιβλιογραφία αλλά και από εμπορικές πηγές. Οι εργασίες χωρίστηκαν σε εκείνες που λαμβάνουν χώρα εντός του χωραφιού και στις εργασίες μεταφοράς. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι βασικοί συντελεστές μετατροπής των εισροών ενέργειας σε εκπομπές CO_2 (Barber 2004; Saunders et al. 2006; Robertson et al. 2017).

Πίνακας 1. Συντελεστές μετατροπής των εισροών ενέργειας σε εκπομπές CO_2

Συντελεστής	Ενέργεια-CO_2	Μονάδα μέτρησης
Πετρέλαιο	0.0651	kg CO_2/MJ
Λιπαντικά	0.0332	kg CO_2/MJ
Ηλεκτρική ενέργεια	0.0415	kg CO_2/MJ
Αζωτούχος λίπανση	0.05	kg CO_2/MJ
Φωσφ./Καλιούχος λίπανση	0.06	kg CO_2/MJ
Μέσα αναπαραγωγής (ριζώματα)	0.000952	kg CO_2/m^2-year
Αρδευτικό σύστημα (PVC)	0.073	kg CO_2/MJ
Ζιζανιοκτόνο (Gliphosate)	0.06	kg CO_2/MJ
Ελκυστήρες	0.09	kg CO_2/MJ
Παρελκόμενο	0.10	kg CO_2/MJ

2.1 Καλλιεργητικές εργασίες (εντός του χωραφιού)

Οι εργασίες που γίνονται εντός του χωραφιού μπορούν να διαχωριστούν σε εκείνες που υπάρχει εφαρμογή κάποιου υλικού, όπως αγροχημικά (π.χ. λίπανση) και σε εκείνες που δεν υπάρχει εφρμογή υλικού (π.χ. δισκοσβάρνισμα). Και στις δυο περιπτώσεις οι κύριες εισροές (ενέργειας και CO_2) που πρέπει να υπολογιστούν σχετίζονται με τα καύσιμα-λιπαντικά και τις ενσωματωμένες εισροές στα μηχανήματα ανάλογα με τον χρόνο χρήσης τους. Στη περίπτωση που υπάρχει εφαρμογή υλικού πρέπει να υπολογιστούν και οι εισροές που σχετίζονται με τα εκάστοτε υλικά και τις ποσότητες εφαρμογής τους.

Για κάθε εργασία υπολογίζεται η χρονική διάρκεια της στην οποία συμπεριλαμβάνονται ο αποδοτικός χρόνος εργασίας (ο χρόνος που ένα γεωργικό μηχάνημα κάνει μια εργασία εντός του χωραφιού) και ο μη-αποδοτικός χρόνος (ο χρόνος φόρτωσης/εκφόρτωσης – στην περίπτωση εργασιών που περιλαμβάνουν υλικά, ο χρόνος ρύθμισης/προσαρμογής του παρελκομένου στον ελκυστήρα και ο χρόνος που καταναλώνεται στις στροφές κατά την μετάβαση από σειρά σε σειρά εντός του χωραφιού). Η σχέση μεταξύ αποδοτικού και μη-αποδοτικού χρόνου περιγράφεται με τον όρο χρονική αποδοτικότητα (time efficiency) που είναι ο λόγος του αποδοτικού χρόνου που ένα γεωργικό μηχανημα εκτελει μια εργασία προς τον συνολικό χρόνο που καταναλώθηκε για την συγκεκριμένη εργασία (Hunt, 1995).

Με βάση την χρονική αποδοτικότητα μπορεί να υπολογιστεί η δυναμικότητα (field capacity) (ha/h) μιας εργασίας λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα εφαρμογής καθώς και το πλάτος εφαρμογής. Για τον υπολογισμό της δυναμικότητας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τα πρότυπα ASABE (ASAE, 2003).

Η μέση διάρκεια ζωής των ελκυστήρων και των παρελκομένων θεωρήθηκε ότι είναι 14,000 και 1,800 ώρες ζωής, αντίστοιχα. Θεωρήθηκε ότι τόσο οι ελκυστήρες όσο και τα παρελκόμενα δεν χρησιμοποιούνται σε άλλη καλλιέργεια αλλά μόνο στις ώρες που απαιτούνται στην μελετώμενη καλλιέργεια.

Όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου ενός γεωργικού μηχανήματος χρησιμοποιήθηκε η σχετική εξίσωση με βάση τα πρότυπα ASABE: $2.64 + 3.91 - 0.203\sqrt{738X + 173}$ (l/KW·h), όπου *X* είναι το ποσοστό της απαιτούμενης ισοδύναμης ισχύος στο PTO που απαιτείται σε μια καλλιεργητική διαχείριση προς τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ στο PTO (ASAE, 2003). Λαμβάνοντας υπόψιν το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου (στη προκειμένη περίπτωση του πετρελαίου), το χρόνο εργασίας, την ισχύ του ελκυστήρα και τον συντελεστή εκπομπών για το πετρέλαιο υπολογίζονται οι εκπομπές CO_2 για κάθε γεωργική εργασία. Εκτός, όμως, από τις εκπομπές που προέρχονται από τα καύσιμα, πρέπει να υπολογιστούν και οι εκπομπές που σχετίζονται με τη χρήση λιπαντικών στα γεωργικά μηχανήματα. Η κατανάλωση λιπαντικών μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση της σχετικής εξίσωσης που παρέχεται από την ASABE για γεωργικά μηχανήματα με μηχανές πετρελαίου: $0.00059P + 0.02169$ (l/h) (ASAE, 2003). Με τη χρήση αυτής της εξίσωσης, του ενεργειακού περιεχομένου για τα λιπαντικά, του χρόνου εργασίας, της ισχύος του ελκυστήρα,και του συντελεστή εκπομπών για τα λιπαντικά υπολογίζονται οι συνολικές εκπομπές CO_2 ανα γεωργική εργασία.

Μια ακόμα πολύ σημαντική κατηγορία που συμβάλλει στις συνολικές εκπομπές CO_2 είναι εκείνη που σχετίζεται με τις εκπομπές που παράγονται κατά την συνολική παραγωγή (συμπεριλαμβανομένων της μεταφοράς και συντήρησής του) κάθε γεωργικού μηχανήματος και ελκυστήρα που χρησιμοποιείται σε μια καλλιέργεια (embodied emissions). Αυτός ο συντελεστής είναι ανάλογος με το βάρος του ελκυστήρα και το χρόνο εργασίας. Έτσι, μπορούν να υπολογιστούν οι ενσωματωμένες εκπομπές που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη διάρκεια χρήσης του ελκυστήρα-μηχανήματος ανά γεωργική εργασία.

Όσον αφορά στον ανθρώπινο παράγοντα, στην παρούσα εργασία δεν υπολογίζεται στις συνολικές εκπομπές.

Στη περίπτωση γεωργικών εργασιών που υπάρχει εφαρμογή υλικών, πέρα από τα ανωτέρω, λαμβάνονται υπόψη και οι εκπομπές που σχετίζονται με τα υλικά (μέσα αναπαραγωγής, λιπάσματα, αγροχημικά) αναλογικά με τις χρησιμοποιούμενες ποσότητες κατά περίπτωση. Αυτές οι εκπομπές σχετίζονται με την παραγωγή του εκάστοτε υλικού.

2.2 Μεταφορά από την έδρα στο χωράφι

Ο κύκλος μεταφοράς από την έδρα του παραγωγού στο χωράφι κι αντίστροφα πρέπει να συμπεριληφθεί σε κάθε γεωργική εργασία. Ο υπολογισμός των εκπομπών CO_2 για αυτή τη μεταφορά ποικίλλει ανάλογα με το αν η γεωργική εργασία συμπεριλαμβάνει την εφαρμογή ή μη γεωργικών υλικών (π.χ. λιπάσματα). Οι κύριες εισροές και στις δυο περιπτώσεις, αν και διαφέρουν, σχετίζονται με την κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικών καθώς και με την ενσωματωμένη ενέργεια των μηχανημάτων.

Πιο αναλύτικά, στη περίπτωση που υπάρχει εφαρμογή υλικού, για τον υπολογισμό των εκπομπών που σχετίζονται με την κατανάλωση καυσίμου λαμβάνονται υπόψη το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου, η κατανάλωση καυσίμου/διαδρομή, το πλήθος των

διαδρομών, ο μέγιστος όγκος του βαγονιού μεταφοράς (για την φύτευση), ο μέγιστος όγκος της δεξαμενής (στη περίπτωση ψεκασμού λιπαντικών και αγροχημικών) και ο συντελεστής εκπομπών για το πετρέλαιο. Ανάλογα για τα λιπαντικά περιλαμβάνονται το ενεργειακό τους περιεχόμενο, η ισχύς του ελκυστήρα, το πλήθος των διαδρομών, η απόσταση έδρα-χωράφι, η μέση ταχύτητα ταξιδίου και ο συντελεστής εκπομπών για τα λιπαντικά. Όσον αφορά στον υπολογισμό των ενσωματωμένων εκπομπών συμβάλλουν η ενσωματωμένη ενέργεια των ελκυστήρων βαγονιών/δεξαμενών, οι χρόνοι ζωής τους, τα βάρη τους, το πλήθος των διαδρομών, η απόσταση έδρα-χωράφι, η μέση ταχύτητα ταξιδίου και ο συντελεστής που σχετίζεται με τις ενσωματωμένες εκπομπές.

Αντίθετα, σχετικά με τη μεταφορά έδρα-χωράφι για εργασίες που δεν περιλαμβάνουν εφαρμογή υλικού, μόνο μια πλήρης διαδρομή (μετ'επιστροφής) υπολογίζεται για κάθε εργασία και δεν υπάρχουν εκπομπές λόγω υλικών. Πρέπει να σημειωθεί ότι και στις δυο περιπτώσεις (εφαρμογή ή μη γεωργικών υλικών) κάθε σκέλος της διαδρομής θεωρείται ότι είναι πανομοιότυπο, δηλαδή ο ελκυστήρας με το οποιοδήποτε παρελκόμενο ακολουθεί την ίδια ακριβώς διαδρόμη από την έδρα προς το χωράφι κι αντίστροφα.

2.3 Μεταφορά από το χωράφι στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης-επεξεργασίας

Κατά την εκτέλεση της μεταφοράς από το χωράφι προς τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης δαπανώνται σημαντικά ποσά ενέργειας και κατ'επέκταση παράγονται εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Πιο αναλυτικά, στον υπολογισμό των εκπομπών που σχετίζονται με τα καύσιμα εντάσσονται το ενεργειακό περιεχόμενο καυσίμου, ο συντελεστής *X*, η ισχύς του ελκυστήρα, η δυναμικότητα της εργασίας της συγκομιδής, δηλαδή ο ρυθμός εκτέλεσης της συγκομιδής, η καλλιεργούμενη επιφάνεια, η κατανάλωση καυσίμου/διαδρομή, το πλήθος των διαδρομών, η χωρητικότητα σε όγκο του βαγονιού και ο συντελεστής εκπομπών καυσίμου. Για τον υπολογισμό των εισροών ενέργειας αλλά και των εκπομπών CO_2 χρησιμοποιήθηκαν το ενεργειακό περιεχόμενο των λιπαντικών, η ισχύς του κινητήρα του ελκυστήρα, η δυναμικότητα της εργασίας της συγκομιδής, η καλλιεργούμενη επιφάνεια, το πλήθος των διαδρομών, ο χρόνος μιας πλήρους διαδρομής, ο χρόνος που απαιτείται για να φορτωθεί ένα βαγόνι και ο συντελεστής εκπομπών για τα λιπαντικά. Η μέση διάρκεια ζωής των ελκυστήρων και των βαγονιών που χρησιμοποιήθηκαν στη μεταφορά θεωρήθηκε ότι είναι 12,000 και 3,000 ώρες ζωής, αντίστοιχα. Όσον αφορά στις ενσωματωμένες εκπομπές βασίστηκαν στην ενσωματωμένη ενέργεια των μηχανημάτων και των ελκυστήρων, στους χρόνους ζωής τους, στα βάρη τους, στον χρόνο μιας πλήρους διαδρομής, στον χρόνο που απαιτείται για την πλήρωση ενός βαγονιού, στην δυναμικότητα της εργασίας της συγκομιδής, στην καλλιεργούμενη επιφάνεια και στον συντελεστή ενσωματωμένων εκπομπών.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Το παρόν σύστημα παραγωγής είναι ένα προσομοιωμένο σύστημα παραγωγής που βασίζεται σε πρακτικές που ακολουθούνται από διάφορους παραγωγούς στην Ιταλία. Οι διάφορες παράμετροι του παρόντος συστήματος παραγωγής καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο ουτως ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό. Η μελετώμενη περίοδος για την καλλιέργεια θεωρήθηκε ότι είναι μια δεκαετία, δεδομένου ότι ο μίσχανθος είναι μια πολυετής καλλιέργεια. Οι καλλιεργητικές εργασίες που εφαρμόστηκαν στην δεδομένη περίοδο παρουσιάζονται παρακάτω.

Πιο αναλυτικά, για την προετοιμασία του χωραφιού απαιτείται βασική διαχείριση του εδάφους (Angelini et al., 2009), κι επομένως θεωρήθηκε ότι εφαρμόστηκε όργωμα σε

βάθος 20 cm κι ακολούθως δισκοσβάρνισμα. Πριν την εγκατάσταση της καλλιέργειας είναι σημαντικό να γίνει έλεγχος των ζιζανίων που ίσως επηρεάσουν αρνητικά την καλλιέργεια σε πρωταρχικό στάδιο. Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε μια και μοναδική εφαρμογή του ζιζανιοκτόνου Gliphosate προφυτευτικά, σε ποσότητα 20 kg/ha. Σε επόμενα έτη δεν απαιτείται να εφαρμοστεί κάποιο αγροχημικό για τα ζιζάνια δεδομένου ότι η καλλιέργεια ανταγωνίζεται επαρκώς τα ζιζάνια.

Για την φύτευση μπορεί να υιοθετηθεί η γραμμική φυτευτική μηχανή που χρησιμοποιείται στην πατάτα. Ο επιθυμητός πληθυσμός των φυτών, δεδομένου ότι επιζούν 60-70% των φυτών (Pyter et al., 2009; Caslin et al. ,2010), θεωρήθηκε ότι είναι 16,000 ριζώματα/εκτάριο.

Για την άρδευση της καλλιέργειας θεωρήθηκε ότι εφαρμόστηκε σύστημα μικροάρδευσης για να καλύψει τις ετήσιες ανάγκες σε νερό με στόχο την αυξημένη παραγωγή.

Ο μίσχανθος έχει χαμηλές απαιτήσεις σε λίπανση. Ωστόσο, ακολουθήθηκε ετήσια λίπανση της καλλιέργειας ως εξής: 50 kg N,21 kg P_2O_5 και 45 kg K_2O ανα εκτάριο, δεδομένου ότι αρκούν για να αποδόσουν ικανοποιητική παραγωγή(Puigjaner et al., 2015).

Η συγκομιδή της καλλιέργειας συνήθως γίνεται κατ'έτος, ξεκινώντας από το δεύτερο έτος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμβατικές μηχανές συγκομιδής για κοπή και τεμαχισμό της βιομάζας (σιλοκοπτικό). Η συγκομιδή υποστηρίζεται κι από συνδυασμούς ελκυστήρα-βαγονιού μεταφοράς που κινούνται παράλληλα με την μηχανή συγκομιδής για την άμεση φόρτωση της βιομάζας. Η απόδοση της καλλιέργειας θεωρήθηκε ότι είναι ίση με 21.87 t/ha για κάθε έτος με το ενεργειακό περιεχόμενο της παραγόμενης βιομάζας να είναι ίσο με 16.4 MJ/kg ξηρής βιομάζας (Mantineo et al., 2009).

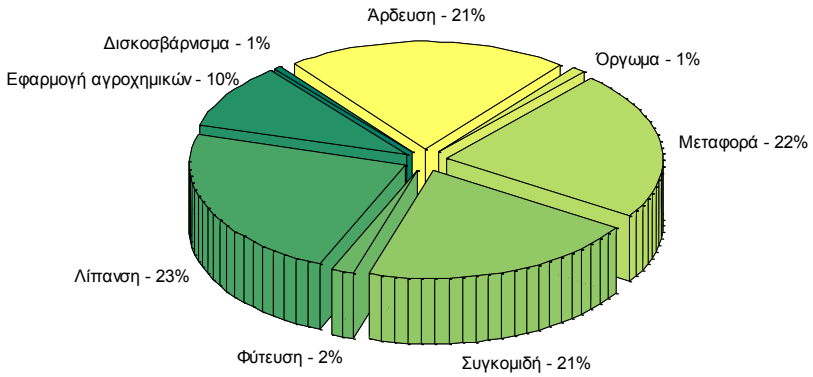
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, θεωρήθηκε μια μοναδιαία καλλιεργούμενη επιφάνεια συνολικής έκτασης ενός εκταρίου (10,000 m^2). Θεωρήθηκε ότι η δεδομένη έκταση βρίσκεται σε απόσταση 2 km από την έδρα του παραγωγού και σε απόσταση 10 km από την μονάδα αποθήκευσης-επεξεργασίας βιομάζας. Δεδομένων όλων των ενεργειακών εισροών και άλλων παραμέτρων υπολογίστηκε η κατανάλωση ενέργειας σε GJ για κάθε εργασία για την μελετώμενη περίοδο (Πίνακας 2) και οι αντίστοιχες εκπομπές CO_2 για κάθε εργασία ως ποσοστά των συνολικών εκπομπών (Σχήμα 1). Πρέπει να τονιστεί ότι η συνολική ενέργεια ανα εργασία στον Πίνακα 2 συμπεριλαμβάνει και την ενέργεια από τα λιπαντικά καθώς και την καταναλισκόμενη ενέργεια από το ανθρώπινο δυναμικό. Επίσης, για την άρδευση, ως 'καύσιμα' λαμβάνεται υπόψη η ηλεκτρική ενέργεια κι όχι το πετρέλαιο.

Πίνακας 2. Κύριες κατηγορίες **κ**ατανάλωσης ενέργειας σε GJ για κάθε εργασία

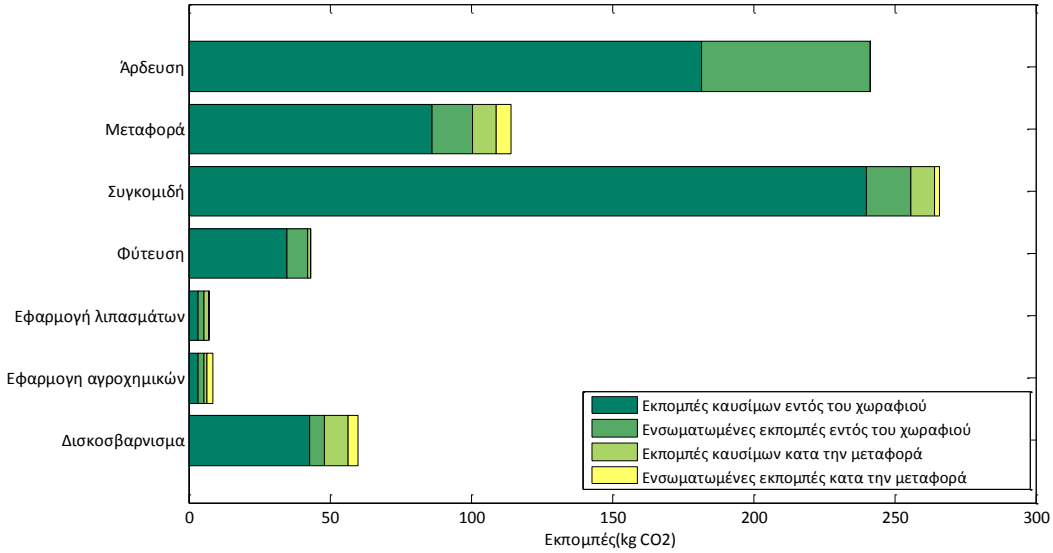
Εργασίες	Καύσιμα	Ενσωματωμένη Ενέργεια	Γεωργικά υλικά	Σύνολο
Όργωμα	1.440	0.202	-	1.647
Δισκοσβάρνισμα	0.773	0.093	-	0.869
Φύτευση	0.549	0.099	0.069	0.720
Εφαρμογή λίπανσης	0.752	0.912	48.869	50.543
Εφαρμογή αγροχημικών	0.068	0.042	18.160	18.271
Άρδευση	43.740	8.202	-	51.942
Συγκομιδή	34.243	1.586	-	35.927
Μεταφορά	9.364	22.927	-	32.607

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται σε 18.92 GJ/ha-έτος και οι συνολικές εκπομπές CO_2 ανέρχονται σε 1.14 τόνους CO_2/ha-έτος εκφρασμένα ως οι μέσες ετήσιες τιμές για την δεκαετία. Αυτό υποδηλώνει ότι και η κατανάλωση ενέργειας αλλά και οι εκπομπές CO_2 μπορεί να διαφέρουν από έτος σε έτος λόγω των διαφορετικών γεωργικών εργασιών που εκτελούνται αλλά και λόγω των μεταβλητών γεωργικών υλικών ή αγροχημικών που μπορεί να εφαρμόζονται κάθε έτος. Δεδομένης της παραγόμενης βιομάζας σε ετήσια βάση, οι παραγόμενες εκπομπές CO_2 που αντιστοιχούν σε κάθε kg βιομάζας ανέρχεται σε 0.5238 kg CO_2/kg προιόντος.



Σχήμα 1. Εκπομπές CO_2 για κάθε γεωργική εργασία (ως ποσοστό %).

Μια άλλη προσέγγιση στα πλαίσια της παρούσας μελέτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2 όπου φαίνονται οι δυο κύριες κατηγορίες-πηγές εκπομπών CO_2 (εκπομπές από τα καύσιμα και από την ενσωματωμένη ενέργεια) τόσο μέσα στα όρια του χωραφιού όσο και στα πλαίσια της μεταφοράς των γεωργικών μηχανημάτων από την έδρα του παραγωγού στο χωράφι κι αντίστροφα. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν συμπεριλμβάνεται στον συγκεκριμένο σχήμα τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν στη μεταφορά του συγκομισμένου προιόντος προς την μονάδα επεξεργασίας βιομάζας. Οι εκπομπές καυσιμων αναφέρονται στις εκπομπές που προέρχονται από την καταναλισκόμενη ενέργεια μέσω των καυσίμων. Από την άλλη, οι ενσωματωμένες εκπομπές αναφέρονται στις εκπομπές που προέρχονται από την ενσωματωμένη ενέργεια των μηχανημάτων και λοιπών πηγών (π.χ. αγροχημικά, λιπάσματα).



Σχήμα 2. Κατανομή των εκπομπων CO_2 για τις διάφορες γεωργικές εργασίες.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έδειξαν ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την αξιοποίηση μιας ενεργειακής καλλιέργειας όπως αυτή του μίσχανθου σε επίπεδο δεκαετίας έχει ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον κι από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας κι από πλευράς εκπομπών CO_2.Η σημαντικότητα της παρούσας μελέτης έγκειται στο γεγονός ότι συμπεριλήφθηκαν οι βασικές και συνήθως εφαρμοζόμενες καλλιεργητικές εργασίες καθώς και οι εργασίες μεταφοράς αναλυόμενες σε βάθος. Με βάση αυτό, μπορεί να γίνει μια ευθεία σύγκριση των ενεργειακών καλλιεργειών που αξιοποιούνται για την παραγωγή πράσινης ενέργειας. Ωστόσο, όπως φάνηκε, οι πιο σημαντικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην περιβαλλοντική επιβάρυνση συνολικά είναι τα καύσιμα (εντός κι εκτός χωραφιού), οι ενσωματωμένες ενέργειες τόσο από τα μηχανήματα όσο και από τα αγροχημικά και τα λιπάσματα. Παρόμοιες μελέτες μπορούν να διεξαχθούν για οποιαδήποτε ενεργειακή καλλιέργεια με στόχο να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία στη λήψη αποφάσεων των ιδιαίτερα σημαντικών συστημάτων παραγωγής βιομάζας. Παράλληλα, μέσα από μια τέτοια μελέτη προβάλλονται τα σημεία που χρήζουν βελτιστοποίησης καθώς επίσης και μπορεί να λειτουργήσει σαν μια βάση για την πολλαπλή αξιολόγηση ποικίλλων καλλιεργειών που βρίσκονται σε μια ακτίνα γύρω από ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας με στόχο την ελαχιστοποίηση των εκπομπών και την παραγωγή πιο πράσινης ενέργειας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Angelini L.G., Ceccarini L., Di Nasso N.N. and Bonari E., 2009. *Comparison of Arundo donax L. and Miscanthus x giganteus in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance.* Biomass and Bioenergy, 33: 635–643.

ASAE D 497.4: *Agricultural Machinery Management Data.* In ASAE Standards; American Society of Agricultural Engineers (ASAE): St. Joseph, MI, USA, 2003.

Barber, A., 2004. *Seven Case Study Farms : Total Energy & Carbon Indicators for New Zealand Arable & Outdoor Vegetable Production*. New Zealand.

Busato P., & Berruto R., 2014. *A web-based tool for biomass production systems*. Biosystems Engineering, 120: 102–116.

Caslin B., Finnan J. and Easson L., 2010. *Miscanthus Best Practice Guidelines.* Agri-Food and Biosciences Institute.

Hunt D., 1995. *Farm power and machinery management*. Ames, Iowa State University Press.

Karakaya A. and Ozilgen M., 2011. *Energy utilization and carbon dioxide emission in the fresh, paste, whole-peeled, diced, and juiced tomato production processes.* Energy, 36:5101–5110.

Kitani, O., 1999. *CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume V*, American Society of Agriculture Engineers, Michigan, USA.

Lal R., 2004. *Carbon emission from farm operations.* Environment International, 30:981–990.

Mantineo M., D'Agosta G.M., Copani V., Patanè C. and Cosentino S.L, 2009. *Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment.* Field Crops Research, 114:204–213.

Puigjaner L., Pérez-Fortes M. and Laínez-Aguirre J.M., 2015. *Towards a carbon-neutral energy sector: Opportunities and challenges of coordinated bioenergy supply Chains-A PSE approach.* Energies, 8:5613–5660.

Pyter R., Heaton E., Dohleman F., Voigt T. and Long S, 2009. *Agronomic experiences with Miscanthus x giganteus in Illinois, USA.* Methods in molecular biology (Clifton, N.J.), 581: 41–52.

Ren L., Cafferty K., Roni M., Jacobson J., Xie G., Ovard L. and Wright C., 2015. *Analyzing and comparing biomass feedstock supply systems in China: Corn stover and sweet sorghum case studies.* Energies, 8:5577–5597.

Robertson A., Whitaker J., Morrison R., Davies C., Smith P. and McNamara N., 2017. *A Miscanthus plantation can be carbon neutral without increasing soil carbon stocks.* GCB Bioenergy, 9: 645–661.

Saunders C., Barber A. & Taylor G., 2006. *Food Miles – Comparative Energy / Emissions Performance of New Zealand ' s Agriculture Industry*, New Zealand.

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΣΤΗΝ ΕΚΧΥΛΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΜΟΡΦΩΝ CU, FE, MN ΚΑΙ ZN ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ DTPA

Μ. Τζιουβαλέκας✉& Χρ. Νούλας

ΕΛΓΟ «Δήμητρα», Ινστιτούτο Βιομηχανικών και Κτηνοτροφικών Φυτών (ΙΒΚΦ), Θεοφράστου 1, 41335, Λάρισα, ✉mtzouvalekas@gmail.com.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται η ενδεχόμενη επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην εκχυλισιμότητα των διαθέσιμων μορφών χαλκού (Cu), σιδήρου (Fe), μαγγανίου (Mn) και ψευδαργύρου (Zn) με τη μεθοδο DTPA σε 14 επιφανειακά (0-30 εκ.) δείγματα εδάφους. Οι βέλτιστες συνθήκες για τη συγκεκριμένη εκχύλιση απαιτούν ένα θερμοκρασιακό εύρος 23±2 ^{o}C. Υπάρχουν όμως αποκλίσεις όταν υπερβαίνουμε αυτά τα όρια. Κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθούν αυτές οι τάσεις σεπειράματα εκχύλισης μεμεγάλο θερμοκρασιακό εύρος και η επίδραση από κάποιες φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (οξύτητα, κοκκομετρική σύσταση). Τα πρωταρχικά αποτελέσματα δείχνουν ισχυρή θετική γραμμική συσχέτιση της συγκεντρωσης του Fe και του Mn με τη θερμοκρασία. Ισχυρότερη συσχέτιση καταγράφεται στα αλκαλικά, μέτριας σύστασης εδάφη.

Λέξεις-κλειδιά: διαθέσιμα μικροθρεπτικά εδάφους, θερμοκρασία, συνθήκες εκχύλισης, εδαφικές ιδιότητες.

IMPACT OF AMBIENT AND EXTRACTIVE TEMPERATURE ON RECOVERY OF THE AVAILABLE FORMS OF Cu, Fe, Mn AND Zn OFSOIL SAMPLES

M. Tziouvalekas✉& Ch. Noulas

ELGO “Demeter”, Industrial and Fodder Crops Institute (IFCI), 1 Theophrastosstr., 41335 Larissa,✉mtzouvalekas@gmail.com.

Abstract

In this paper, the possible influence of the ambient temperature on the extractability of the available forms of copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn) and zinc (Zn) by the DTPA method is being studied in 14 surface soil samples (0-30 cm). The optimum extraction conditions require a temperature range of 23 ± 2 °C with deviations beyond these limits. It was considered appropriate to investigate these trends in extraction experiments with a larger temperature range and the effect of some physico-chemical soil properties (acidity, soil texture). Preliminary results show a strong positive linear correlation of Fe and Mn concentration with temperature. A stronger correlation is recorded in alkaline, medium-textured soils.

Keywords: soil available micronutrients, temperature, extraction conditions, soil properties.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος των Lindsay και Norvell (1978) (γνωστή και ως μέθοδος DTPA; diethylenetriaminepentaacetic acid, triethanolamine method) χρησιμοποιείται ευρύτατα από τα εδαφολογικά εργαστήρια σε όλη την υφήλιο. Είναι μια καθιερωμένη μέθοδος για την εκτίμηση της περιεκτικότητας του εδάφους στις διαθέσιμες μορφές Cu, Fe, Mn, και Zn, παράμετροι ιδιαίτερα χρήσιμες για τις πολυετείς καλλιέργειες. Πολλοί ερευνητές τις τελευταίες δεκαετίες προσπάθησαν να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα της ανωτέρω μεθόδου (Haynes, 1983; de Abreu et al., 1997; Menzies et al., 2007) να τη συγκρίνουν με άλλες παρόμοιες (Cancela et al., 2002; Feng et al., 2005), να προσδιορίσουν την επίδραση των ιδιοτήτων του εδάφους (Joshietal., 1983), ή τέλος να εκτιμήσουν την επίδραση των διαφορετικών συνθηκών εκχύλισης (Soltanpour et al., 1976; Leggett and Argyle, 1983; de Abreu et al., 1997).

Οι Lindsay και Norvell (1978) συστήνουν την πραγματοποίηση της εκχύλισης σε θερμοκρασία δωματίου (23°C), ή έστω μέσα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος 23±2 ^{o}C (Leggett and Argyle, 1983). Είναι επίσης γνωστό ότι η ποσότητα του εκχυλίσιμου με τη μέθοδο του DTPA σιδήρου εξαρτάται ισχυρά από οποιονδήποτε παράγοντα της εκχύλισης είναι δυνατό να επηρεάσει την ταχύτητα της αντίδρασης, όπως το μέγεθος των κόκκων, ο χρόνος και η ταχύτητα ανακίνησης (Soltanpour et al., 1976). Είναι κατανοητό ότι ακόμη και όταν η εκχύλιση πραγματοποιηθεί στα στενά προτεινόμενα θερμοκρασιακά όρια θα υπάρχουν αποκλίσεις στις μετρούμενες τιμές. Το ερώτημα που τίθεται είναι τι ακριβώς συμβαίνει όταν για κάποιο λόγο η απαίτηση αυτή δεν μπορεί να ικανοποιηθεί;

Αφορμή για τις σκέψεις αυτές στάθηκαν οι παρατηρήσεις των τάσεων των διαγραμμάτων ελέγχου που τηρεί το διαπιστευμένο Εργαστήριο Αναλύσεων Εδαφών του Ινστιτούτου Βιομηχανικών και Κτηνοτροφικών Φυτώντου ΕΛ.Γ.Ο. «Δήμητρα». Παρατηρήθηκε διαφοροποίηση των περιεκτικοτήτων ανάλογα με την εποχή των προσδιορισμών ακόμη και μέσα στο θερμοκρασιακό όριο που απαιτεί η μέθοδος. Συγκεκριμένα οι μετρούμενες περιεκτικότητες κυρίως του Mn και του Fe μειωνόταν κατά τους χειμερινούς μήνες. Κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η παρατηρούμενη τάση, με πειράματα εκχύλισης σε τιμές θερμοκρασιών ακόμη και έξω από τα επιτρεπόμενα από τη μέθοδο όρια. Στη βιβλιογραφία (διεθνή και εγχώρια) ελάχιστες αναφορές υπάρχουν για μειωμένη διαθεσιμότητα των στοιχείων αυτών σε σχέση με τη θερμοκρασία (κυρίως για το Mn) (Reid and Racz, 1985., Tong et al, 1995).

Το κρίσιμο ερώτημα που προκύπτει είναι αν μπορεί να αποτυπωθεί η παρατηρούμενη τάση, από μια γραμμική ή μη σχέση, της περιεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία της εκχύλισης. Θα ήταν ιδανικό εάν ο πειραματισμός μπορούσε να καταλήξει σε κάποιους συντελεστές διόρθωσης που θα μπορούσαν να προβλέπουν την πραγματική διαθέσιμη ποσότητα των μικροστοιχείων ξεπερνώντας τις επιπτώσεις της διαφοράς θερμοκρασίας στην εκχύλιση.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην εκχυλισιμότητα των διαθέσιμων μορφών Cu, Fe, Mn και Zn με τη μέθοδο DTPA σε 14 επιφανειακά δείγματα εδάφους ακόμη και έξω από τα επιτρεπόμενα από τη μέθοδο όρια αλλά και η επίδραση από κάποιες φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (οξύτητα, κοκκομετρική σύσταση).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των διαθέσιμων μορφών των στοιχείων Cu, Fe, Mn και Zn χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Lindsay και Norvell (1978). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη ανάλυση είναι διαπιστευμένη στο εργαστήριό μας από το 2012 σύμφωνα με το πρότυπο διασφάλισης ποιότητας ISO 17025, καθώς και ότι όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου.

Επιλέχθηκαν να εξεταστούν 14 επιφανειακά (0-30 εκ.) δείγματα καλλιεργούμενων εδαφών από πεδινές ή ημιορεινές περιοχές της Θεσσαλίας, με κριτήριο τη διασπορά κάποιων κρίσιμων ιδιοτήτων όπως η οξύτητα ($pH_{1:1}$ από 5.3 έως 8.6; Thomas, 1996) και η κοκκομετρική τους σύσταση [στην πλειονότητά τους λεπτόκοκκα (αργιλώδη), μετρίως λεπτόκοκκα (αργιλοπηλώδη ή αμμοαργιλοπηλώδη) και μέσης σύστασης (πηλώδη) εδάφη] (Bouyoucos, 1962). Επίσης, στα ανωτέρω εδάφη η οργανική ουσία κυμαίνεται από 0,66 έως 2,50 % (Walkley-Black; Nellson και Sommers, 1996). (Πίνακας 1).

Σχεδιάστηκε μια πειραματική διαδικασία 10 ή 12 μετρήσεων που θα διατρέχουν όλο το ημερολογιακό έτος ξεκινώντας από το καλοκαίρι του 2016, με σκοπό να υπάρξει η ακόλουθη μεταβολή στη θερμοκρασία: καθοδική κατά τους χειμερινούς μήνες και ξανά ανοδική κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι του 2017. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιούνται οι εκχυλίσεις είναι επί σκοπό «ακραίες», δηλαδή πραγματοποιούνται τους χειμερινούς μήνες τις πρωινές ώρες πριν θερμανθεί ο χώρος του εργαστηρίου και αντίστοιχα το καλοκαίρι σε θερμές ώρες της ημέρας χωρίς κλιματισμό, με σκοπό να υπάρξει μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών στον πειραματισμό μας. Μέχρι στιγμής έχουν πραγματοποιηθεί οκτώ εκχυλίσεις-μετρήσεις και η διαδικασία είναι σε εξέλιξη.

Για κάθε εκχύλιση ζυγίστηκαν με ακρίβεια 15,0 g δείγματος με δύο επαναλήψεις ανά δείγμα και τοποθετήθηκαν σε κωνικές φιάλες των 250 mL. Στη συνέχεια στη φιάλη προστέθηκε με σιφώνιο 30 mL εκχυλιστικού διαλύματος το οποίο είχε παρασκευαστεί την αμέσως προηγούμενη ημέρα. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν για ανακίνηση διάρκειας ακριβώς 2 ωρών με ρυθμό 180 στροφές/λεπτό. Στη διαδικασία συμπεριλήφθησαν επίσης δύο «λευκά» δείγματα. Τη στιγμή έναρξης και λήξης της ανακίνησης έγινε θερμομέτρηση του χώρου καθώς και του εκχυλιστικού διαλύματος. Ο χώρος θερμομετρείται επίσης και κάθε 15 min κατά τη διάρκεια της ανακίνησης. Όλες οι καταγεγραμμένες θερμοκρασίες χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθεί η μέση τιμή της θερμοκρασίας εκχύλισης (περιβάλλοντος και εκχυλιστικού). Αμέσως μετά τη λήξη της ανακίνησης πραγματοποιήθηκε φυγοκέντρηση των δειγμάτων με ταχύτητα 2400 στροφές/λεπτό. Ακολούθησε διήθηση με ηθμούς τύπου Whatman No42. Το διήθημα συλλέχτηκε σε σωλήνες falcon των 50 mL και μετρήθηκε αμέσως μετά τη διήθηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης με τεχνική φλόγας.

Για την μέτρηση χρησιμοποιήθηκε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης Thermo iCE 3000 series. Παρασκευάστηκαν μικτά πρότυπα των τεσσάρων μετάλλων σε έξι ή επτά επίπεδα συγκεντρώσεων (βλ. Πίνακα 2). Οι καμπύλες αναφοράς γίνονται δεκτές μόνο όταν ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) είναι ≥ 0,995. Οι δύο επαναλήψεις ανά δείγμα δίνουν το μέσο όρο της μέτρησης με την προϋπόθεση οι δύο μετρήσεις να βρίσκονται μέσα στα επίπεδα επαναληψιμότητας της επικυρωμένης μεθόδου για κάθε μέταλλο. Εάν αυτό δε συμβαίνει τότε λαμβάνεται υπόψη μόνο η μία μέτρηση η οποία ταιριάζει με τα επίπεδα μέτρησης του ίδιου δείγματος στις προηγούμενες μετρήσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο αυτό μέχρι στιγμής έχει εμφανισθεί σε πολύ μικρό ποσοστό (<1%) κάτι που είναι

αποδεκτό από το επίπεδο εμπιστοσύνης που έχει χρησιμοποιηθεί κατά την επικύρωση της μεθόδου (95%).

Πίνακας 1. Οι ιδιότητες των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται στο πείραμα.

α/α	Κωδικός δείγματος	Κοκκομετρικήσύσταση			Εδαφικός τύπος	pH	Οργανική ουσία (%)
		Άμμος %	Άργιλος %	Ιλύς %			
1	S741	43	25	32	Πηλώδες(L)	5.3	0.66
2	S783	38	45	17	Αργιλώδες (C)	5.7	1.4
3	S798	24	47	29	Αργιλώδες (C)	6.1	1.6
4	S125	26	54	20	Αργιλώδες (C)	6.5	2.5
5	S228	25	39	36	Αργιλοπηλώδες (CL)	6.6	1.9
6	S805	51	30	19	Αμμοαργιλοπηλώδες (SCL)	6.6	1.5
7	S263	38	28	34	Αργιλοπηλώδες (CL)	6.8	1.2
8	S1	20	56	24	Αργιλώδες (C)	7.4	1.8
9	S765	50	24	26	Αμμοαργιλοπηλώδες (SCL)	7.5	0.97
10	S115	20	48	32	Αργιλώδες (C)	7.8	1.6
11	S31	34	38	28	Αργιλοπηλώδες (CL)	8.0	1.4
12	S481	36	24	40	Πηλώδες (L)	8.3	1.3
13	S549	29	14	57	Ιλυοπηλώδες (SiL)	8.4	1.7
14	S490	50	37	13	Αμμοαργιλώδες (SC)	8.6	0.77

Πίνακας 2. Τα επίπεδα συγκεντρώσεων των διαλυμάτων βαθμονόμησης για τα τέσσερα μέταλλα (σε mg/L).

Διαλύματα βαθμονόμησης	Cu	Fe	Mn	Zn
1°	0.25	1.0	1.0	0.25
2°	0.50	2.0	2.0	0.50
3°	1.0	4.0	4.0	1.0
4°	2.0	8.0	8.0	1.5
5°	4.0	16	16	2.0
6°	8.0	32	24	2.5
7°		60	40	

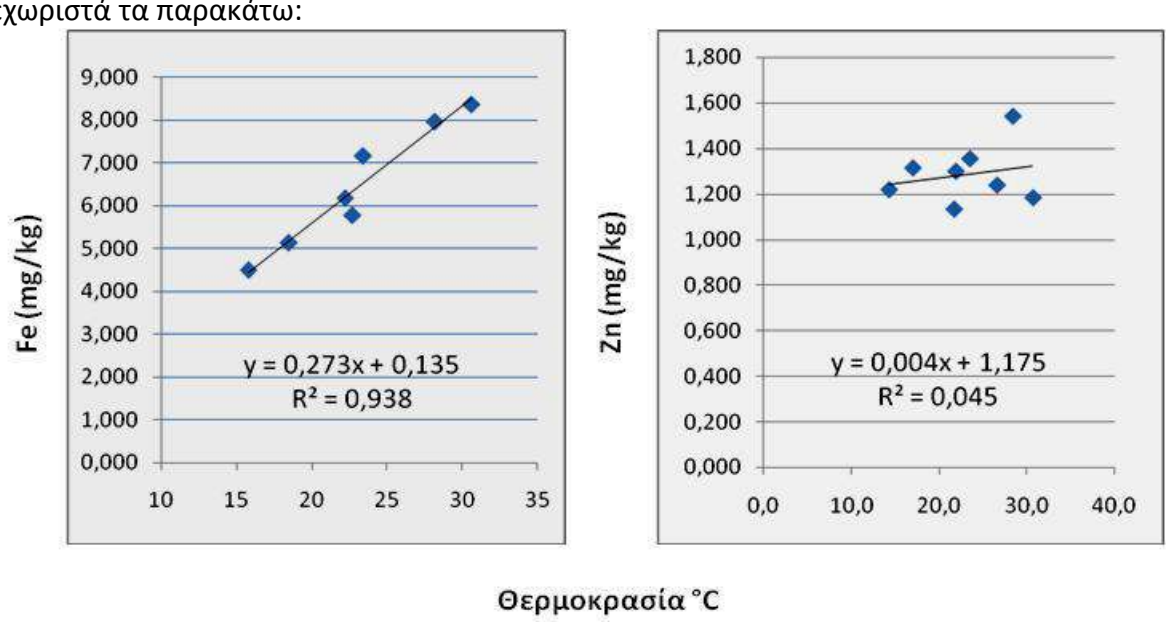
Πίνακας 3. Παράδειγμα καταγραφής των μετρήσεων για το δείγμα S1.

Μέτρηση	1η	2η	3η	4η	5η	6η	7η	8η
Θερμοκρασία (Μ.Ο. °C)	28,2	30,6	23,4	22,2	15,8	18,5	22,7	26,5
Μέση τιμή Cu (mg/L)	1,87	1,78	1,72	1,62	1,38	1,575	1,71	1,77
Μέση τιμή Fe (mg/L)	7,52	7,26	6,77	5,97	4,43	5,28	6,10	6,60
Μέση τιμή Mn (mg/L)	11,61	15,48	9,09	8,11	4,44	5,56	7,20	9,82
Μέση τιμή Zn (mg/L)	1,21	1,07	1,10	1,04	0,94	0,96	0,77	0,90

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την εξάρτηση των σχέσεων αυτών από την οξύτητα και την κοκκομετρική σύσταση των δειγμάτων γίνεται η ταξινόμηση των συντελεστών προσδιορισμού και σε άλλους δύο πίνακες. Στον πρώτο βρίσκονται τα δείγματα ταξινομημένα σύμφωνα με το pH (Πίνακας 5) και στον δεύτερο είναι ομαδοποιημένα σύμφωνα με τον εδαφικό τους τύπο (Πίνακας 6).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των πρώτων οκτώ μετρήσεων έδειξαν αναλυτικά για κάθε στοιχείο ξεχωριστά τα παρακάτω:



Σχήμα 1. Συσχέτιση της συγκέντρωσης του Fe (δείγμα S549) και του Zn (S741), με τη θερμοκρασία εκχύλισης.

α) Για το Fe: υπάρχει ισχυρή θετική γραμμική συσχέτιση των περιεκτικοτήτων με τη θερμοκρασία (Μ.Ο.: R^2: 0,836, μέγιστη 0,938 – ελάχιστη 0,289). Για ένα μόνο δείγμα (αρκετά όξινο και πηλώδες έδαφος) η τιμή του R^2 πέφτει κάτω από το 0,718 υποβιβάζοντας και το μέσο όρο. Οι Leggett και Argyle (1983) αναφέρουν ότι ο εκχυλίσιμος Fe αυξήθηκε γραμμικά κατά τη διάρκεια της θερμοκρασίας ξήρανσης από 22 έως 100 °C. Επίσης οι ίδιοι συγγραφείς βρήκαν ότι η αύξηση του εκχυλίσιμου Fe με την αυξανόμενη θερμοκρασία ξήρανσης ήταν μεγαλύτερη σε εδάφη με υψηλότερα αρχικά επίπεδα Fe. Παρόμοιες αυξήσεις αναφέρθηκαν από τους Khan και Soltanpour (1978) μεταξύ εδαφών που είχαν ξηρανθεί με αέρα και φούρνο.

β) Για το Mn: και εδώ υπάρχει ισχυρή θετική γραμμική συσχέτιση των περιεκτικοτήτων με τη θερμοκρασία, ελαφρά μικρότερη από αυτή του σιδήρου (Μ.Ο.: R^2: 0,724, μέγιστη 0,921 – ελάχιστη 0,030). Στην περίπτωση του Mn έχουμε καλύτερους συσχετισμούς κυρίως σε αλκαλικά εδάφη, ενώ αντίθετα σε αρκετά όξινα (<6,0) η συσχέτιση είναι σχεδόν μηδενική. Όπως αναφέρει ο Shuman, (1980) αλλά και οι Reid and Racz (1985) το εκχυλίσιμο Mn σε εδάφη που δεν εφαρμόζεται Mn αυξάνει όταν οι θερμοκρασία εκχύλισης αυξάνει. Οι Leggett και Argyle (1983) βρίσκουν ότι το Mn αυξήθηκε με ακανόνιστο τρόπο σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 22 έως 100 °C.

γ) Για το Cu: η συσχέτιση είναι σημαντικά ασθενέστερη σε σχέση με τα δύο προηγούμενα στοιχεία (Μ.Ο.:R^2: 0,622, μέγιστη 0,923 – ελάχιστη 0,044). Το R^2 εμφανίζει σταθερά υψηλές τιμές σε αλκαλικά εδάφη με μία μόνο εξαίρεση (S765) ενώ όπως και στο Mn σε αρκετά όξινα εδάφη (<6,0) η συσχέτιση είναι σχεδόν μηδενική.

δ) Για τον Zn: η συσχέτιση σε όλες τις περιοχές του pH είναι μάλλον ανύπαρκτη με ελάχιστες εξαιρέσεις που προσεγγίζουν ή ξεπερνούν το 0,4 (Μ.Ο.: R^2: 0,235, μέγιστη 0,701 – ελάχιστη 0,015). Επίσης, όπως αναφέρουν οι Ma και Uren (1997) οι συγκεντρώσεις του εκχυλίσιμου Zn (DTPA) αυξήθηκαν γραμμικά με τη συγκέντρωση του προστιθέμενου Zn. Η αναλογία του προστιθέμενου Zn στο κλάσμα που εκχυλίζεται με DTPA μειώθηκε με την αύξηση του χρόνου επώασης και με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, οι μακροπρόθεσμες επιδράσεις της θερμοκρασίας στην εκχυλίση του Zn δεν έχουν ακόμη μελετηθεί λεπτομερώς. Για το Cu και τον Zn οι τιμές άλλαξαν μόνο ελαφρά σε εύρος θερμοκρασιών από 22 έως 100 °C (Leggett και Argyle, 1983).

Πίνακας 4. Οι συντελεστές προσδιορισμού (R^2) και οι εξισώσεις των γραφημάτων μετά από τις οκτώ μετρήσεις. Με έντονη γραφή σημειώνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των συντελεστών προσδιορισμού για κάθε στοιχείο.

	Cu	Fe	Mn	Zn
S1	0,834 y=0,028x+1,014	0,903 y=0,198x+1,572	**0,921** y=0,685x-7,200	0,059 y=0,005x+0,837
S31	0,862 y=0,047x+1,019	0,890 y=0,555x-1,692	0,916 y=1,403x+3,612	0,452 y=0,016x+0,730
S115	0,890 y=0,076x+2,095	0,860 y=0,987x-1,470	0,892 y=1,056x+0,215	**0,701** y=0,016x+0,289
S125	0,719 y=0,025x+1,307	0,913 y=1,687x-4,192	0,879 y=1,401x+30,09	0,032 y=0,002x+0,735
S228	0,736 y=0,037x+1,442	0,925 y=2,112x-11,45	0,917 y=2,084x+4,639	0,225 y=0,007x+0,546
S263	0,599 y=0,044x+0,814	0,846 y=1,501x-6,379	0,488 y=1,211x+18,69	0,067 y=0,016x+2,567
S481	0,865 y=0,045x+0,659	0,909 y=0,580x-2,300	0,912 y=0,991x-6,129	0,314 y=0,016x+0,631
S490	0,768 y=0,042x+1,608	0,718 y=0,324x+0,029	0,892 y=0,817x-4,757	0,295 y=0,011x+0,568
S549	**0,923** y=0,033x+0,622	**0,938** y=0,273x+0,135	0,919 y=0,820x-7,916	0,508 y=0,010x+0,639
S741	0,086 y=0,005x+0,896	**0,289** y=2,785x+12,19	**0,030** y=0,136x+52,37	0,041 y=0,005x+1,164

S765	0,538 y=0,014x+0,418	0,880 y=1,068x-6,472	0,808 y=0,799x+9,387	0,143 y=0,013x+0,739
S783	**0,044** y=0,005x+1,209	0,851 y=1,949x-4,624	0,085 y=0,268x+44,36	**0,015** y=0,001x+0,695
S798	0,495 y=0,024x+1,612	0,886 y=2,294x-5,591	0,666 y=0,855x+36,44	0,411 y=0,007x+0,533
S805	0,342 y=0,019x+1,586	0,901 y=2,158x-0,670	0,808 y=0,906x+11,09	0,023 y=0,001x+0,537

ε) Συγκρινόμενα τα αποτελέσματα με βάση την κοκκομετρική σύσταση των εδαφών, δεν είναι ορατή κάποια τάση με δεδομένο ότι σε κάθε κατηγορία εδάφους υπάρχουν αντικρουόμενες τιμές. Ενδεχομένως αν ο αριθμός των δειγμάτων ήταν μεγαλύτερος να ήταν δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Πίνακας 5. Οι συντελεστές προσδιορισμού (R^2) μετά από τις οκτώ μετρήσεις με κριτήριο το pH των δειγμάτων.Με έντονη γραφή σημειώνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των συντελεστών προσδιορισμού για κάθε στοιχείο

	pH	Cu	Fe	Mn	Zn
S741	5,3	0,086	**0,289**	**0,030**	0,041
S783	5,7	**0,044**	0,851	0,085	**0,015**
S798	6,1	0,495	0,886	0,666	0,411
S125	6,5	0,719	0,913	0,879	0,032
S228	6,6	0,736	0,925	0,917	0,225
S805	6,6	0,342	0,901	0,808	0,023
S263	6,8	0,599	0,846	0,488	0,067
S1	7,4	0,834	0,903	**0,921**	0,059
S765	7,5	0,538	0,880	0,808	0,143
S115	7,8	0,890	0,860	0,892	**0,701**
S31	8,0	0,862	0,890	0,916	0,452
S481	8,3	0,865	0,909	0,912	0,314
S549	8,4	**0,923**	**0,938**	0,919	0,508
S490	8,6	0,768	0,718	0,892	0,295

Πίνακας 6. Οι συντελεστές προσδιορισμού (R^2) μετά από τις οκτώ μετρήσεις με κριτήριο τον εδαφικό τύπο των δειγμάτων.

	Εδαφικός τύπος	Cu	Fe	Mn	Zn
S1		0,834	0,903	**0,921**	0,059
S115		0,890	0,860	0,892	**0,701**
S125	Αργιλώδη	0,719	0,913	0,879	0,032
S783		**0,044**	0,851	0,085	**0,015**
S798		0,495	0,886	0,666	0,411
S31	Αργιλοπηλώδη	0,862	0,890	0,916	0,452

S228		0,736	0,925	0,917	0,225
S263		0,599	0,846	0,488	0,067
S765	Αμμοαργιλοπηλώδη	0,538	0,880	0,808	0,143
S805		0,342	0,901	0,808	0,023
S481	Πηλώδη	0,865	0,909	0,912	0,314
S741		0,086	**0,289**	**0,030**	0,041
S490	Αμμοαργιλώδες	0,768	0,718	0,892	0,295
S549	Ιλυοπηλώδες	**0,923**	**0,938**	0,919	0,508

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

α) Αποδεικνύεται ότι οι παρατηρήσεις μας σχετικά με τη μεταβλητότητα των τιμών για κάποια από τα μέταλλα έχει όντως πραγματική βάση. Η μέθοδος των Lindsay and Norvell (1978) προτείνει ένα στενό θερμοκρασιακό πλαίσιο για την εκχύλιση των μετάλλων, το οποίο δύσκολα μπορεί να τηρηθεί σε οποιοδήποτε εργαστήριο. Για το λόγο αυτό είναι χρήσιμα τα συμπεράσματα της έρευνας αυτής.

β) Η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων αναφορικά με την επίδραση της θερμοκρασίας εκχύλισης στην ανάκτηση των διαθέσιμων μετάλλων και τη συσχέτιση της επίδρασης αυτής με τις ιδιότητες των εδαφών είναι υπόθεση που απαιτεί πολύ εντατική προσπάθεια. Επίσης χρειάζεται επέκταση του όλου σκεπτικού στην εκτίμηση της θεωρητικής βάσης του φαινομένου. Πιθανότατα η απάντηση να βρίσκεται στις επισημάνσεις των Soltanpour κ.ά. (1976) που αναφέρονται στην εισαγωγή.

γ) Διαφαίνεται μια σημαντική γραμμική συσχέτιση σε αλκαλικά εδάφη για το Fe και το Mn κατά κύριο λόγο και δευτερευόντως για το Cu. Για το Fe η παρατήρηση αυτή εκτείνεται και για ελαφρώς όξινα εδάφη. Δεν φαίνεται όμως να υπάρχει συσχέτιση για τον Zn.

δ) Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της διακύμανσης των ανακτήσεων στο εργαστήριο είναι απαραίτητη η διατήρηση των θερμοκρασιών εκχύλισης αυστηρά στα προτεινόμενα από τη μέθοδο πλαίσια. Σε αυτό μπορεί να συντελέσει η χρήση θερμοστατούμενων συσκευών ανακίνησης.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agron. J. 54:464-465.

Cancela R.C. et al., 2002. DTPA and Mehlich-3 micronutrient extractability in natural soils. Commun. Soil Sci. and Plant Anal. 33. 15-18.

de Abreu C.A. et al. 1997. The effects of the DTPA extraction conditions on the determination of micronutrients in Brazilian soils. Commun. in Soil Science and Plant Anal. 28. 1-11.

de Abreu C.A. et al., 1996. Efficiency of multinutrient extractants for the determination of available copper in soils. Commun. Soil Sci. and Plant Anal. 27. 763-771.

Feng M.H. et al., 2005. A comparison of the rhizosphere-based method with DTPA, EDTA, CaCl2, and NaNO3 extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley. Environ. Pollution. 137, 231-240.

Haynes R.J. & Swift R.S. 1983. An evaluation of the use of DTPA and EDTA as extractants for micronutrients in moderately acid soils. Plant and Soil 74, 111-122.

Joshi et al., 1983. Influence of soil parameters on DTPA extractable micronutrients in arid soils. Plant and Soil 72. 31-38.

Khan, A., and P.N. Soltanpour. 1978. Effect of wetting and drying on DTPA-extractable Fe, Zn, Mn and Cu in soils. Cornmun. Soil Sci. Plant Anal. 9:193-202.

Leggett, G. E., and D. P. Argyle. 1983. The DTPA-extractable iron, manganese, copper, and zinc from neutral and calcareous soils dried under different conditions. Soil Sci. Soc. Am. J. 47, 518-522.

Lindsay, W. L. and W. A. Norwell, 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42:421-428.

Ma, Y.B. και Uren N.C. 1997. The effects of temperature, time and cycles of drying and rewetting on the extractability of zinc added to a calcareous soil. Geoderma 75, 89-97.

Menzies et al., 2007. Evaluation of extractants for estimation of the phytoavailable trace metals in soils. Environ. Pollution. 145, 121-130.

Nelson D.W. & Sommers L.E, 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods, SSSA. Chapter 34. Third edition.

Reid, J. M. & Racz, G. J., 1985. Effects of soil temperature on manganese availability to plants grown on an organic soil. Can. J. Soil Sci. 65.769-775.

Shuman, L.M. 1980. Effects of soil temperature, moisture and air-drying on extractable manganese, iron, copper, and zinc. Soil Sci. 130. 336-343.

Soltanpour P.N. et al., 1976. Factors affecting DTPA-extractable Zn, Fe, Mn and Cu from soils. Commun. Soil Sci. and Plant Anal. 7. 797-821.

Thomas G.W., 1996. Soil pH and soil acidity. Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods, SSSA. Chapter 16. Third edition.

Tong Y, Rengel Z. & Graham R.D., 1995. Effects of temperature on extractable manganese and distribution of manganese among soil fractions, Commun. in Soil Science and Plant Anal. 26. 1963-1977.

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΕ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΤΥΡΙΑ ΤΥΡΟΓΑΛΑΚΤΟΣ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥΣ.

Α. Γεωργάλα & Σ. Καμιναρίδης
Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΕΤΔΑ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,
georgala@aua.gr

Περίληψη

Το τυρόγαλα είναι το υδαρές μέρος του γάλακτος που απομένει μετά την πήξη του γάλακτος, τον τεμαχισμό και την απομάκρυνση του τυροπήγματος. Το τυρόγαλα περιέχει το ήμισυ σχεδόν των στερεών συστατικών του γάλακτος. Οι πρωτεΐνες του τυρογάλακτος έχουν μεγαλύτερη θρεπτική αξία από την καζεΐνη του τυριού γιατί έχουν όλα τα απαραίτητα αμινοξέα και σε μεγαλύτερη αναλογία απ' ότι η καζεΐνη. Ένας από τους σημαντικούς τρόπους αξιοποίησης τυρογάλακτος είναι η παραγωγή των τυριών τυρογάλακτος που βασίζεται στην μετουσίωση και την πήξη των υδατοδιαλυτών πρωτεϊνών που υπάρχουν στο τυρόγαλα όταν αυτό θερμαίνεται σε θερμοκρασίες των 88-90^{0}C για 30-45 λεπτά. Στην Ελλάδα παράγονται περίπου 250.000 τόνοι τυριά τυρογάλακτος κυρίως από πρόβειο τυρόγαλα. Τα πιο γνωστά παραδοσιακά ελληνικά τυριά τυρογάλακτος είναι η Μυζήθρα, ο Ανθότυρος, και δύο τυριά με προστατευόμενη ονομασία προέλευσης, το Μανούρι και η Ξυνόμυζήθρα Κρήτης. Στην παρούσα μελέτη περιγράφονται τα κύρια χημικά και μικροβιακά χαρακτηριστικά των ελληνικών τυριών τυρογάλακτος που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Λέξεις κλειδιά: Ελληνικά τυριά τυρογάλακτος, μικροβιολογία, χημεία

A REVIEW OF GREEK WHEY CHEESES: A DESCRIPTION OF THEIR MAIN CHARACTERISTICS.

A. Georgala & S. Kaminarides
Agricultural University of Athens Department Food Sci. & Hum. Nutr., Iera Odos 75, 11855, Athens,
georgala@aua.gr

ABSTRACT

Whey is the watery portion of milk remaining after milk coagulation, cutting and removal of the curd. The whey contains about the half of milk dry matter. Whey proteins have a higher nutritive value than cheese casein as they contain all the essential amino acids and in a greater ratio than casein. One of the important ways whey valorization is the production of whey cheeses which based on denaturation and coagulation of the water soluble milk proteins present in the whey when it is heated at temperatures 88-90 ^{0}C for 30-45 min. In Greece, approximately 250,000 tons of whey cheeses are produced, mainly from ewes' whey. The most known traditional Greek whey cheeses are Myzithra, Anthotyros and two cheeses with a protected designation of origin (P.D.O.), the Manouri cheese and the Xynomyzithra Kritis cheese. The present study describes the main chemical and microbial characteristics of the Greek whey cheeses mentioned in the literature.

Keywords: Greek whey cheeses, microbiology, chemistry

1. INTRODUCTION

Whey is the watery portion of milk remaining after milk coagulation and removal of the curd and its world production is approximately 120,000,000 tons per annum and the major whey producers were the EU and the US (FAO, 1999; Stiles, 2012). There are numerous whey cheeses produced as a result of various traditional protocols and methodology used for their manufacture. In the Mediterranean region whey cheeses are mainly manufactured from ewes' whey due to the economic importance of ewes' ruminants in this area as well as to its high protein content. In Greece whey production, as a by-product of cheese making, is about 700,000 tons per year of which it is estimated that 250,000 tons are used for the production of different types of whey cheeses. The production of whey cheeses in Greece is currently about 15,000 tons a year. Greek whey cheeses are produced particularly from ovine or caprine whey. Whey proteins have a higher nutritive value than casein and due to their amino acid composition, represent one of the best-quality sources of readily available proteins. Ewe's as well as goat's whey have a unique protein composition as compared to cow's whey (Moatsou et al., 2005). The most known traditional types of Greek whey cheeses are Myzithra, Anthotyros, Manouri-a product with a protected designation of origin (P.D.O.) and a mature P.D.O. whey cheese named 'Xynomyzithra'. The fat and moisture contents of Greek traditional whey cheeses are variable, depending on the manufacturing procedure and the origin of whey (Zerfiridis, 1976; Kandarakis, 1981). Myzithra cheese is manufactured all over the Greece from the whey derived from cheese production of ewe's, goat's or cow's milk or mixtures of them. The whey is heated under continuous stirring to obtain a temperature of 88-90°C within 30-45 minutes. However, for a better quality of Myzithra, whole milk in a portion of 3-5% is added to the whey when it obtains the temperature to 65°C. Also, salt in a portion of 1-1.5% could be added to the whey while it is heated. There are two types of Myzithra. Fresh myzithra contains maximum moisture content of 70% and fat on dry matter at least 50%, is unsalted or slightly salted and is consumed a few hours or days after its manufacture. Dried myzithra has a maximum moisture content of 40% and a minimum fat in dry matter of 50%, is sufficiently salted, dried and consumed as grated cheese. (Zygouris, 1956). Manouri is a Protected Designation of Origin (P.D.O.) whey cheese that has many similarities with Myzithra cheese, but it is creamier than myzithra and less salty, with a delicate texture and superior sensory quality. Manouri is a traditional product of Western Macedoniaand it has long been made from the whey obtained during the production of Batzos, a semihard cheese derived from mixtures of caprine and ovine milks. The overall technology of Manouri manufacture has much in common with the process for making Myzithra, but the final moisture content (50–60%) is lower than that of the latter cheese. Anthotyros is a traditional Greek whey cheese made from the whey of hard cheeses manufactured from either ewe's or goat's milk. Initially Anthotyros is manufactured all over the Greece (Anifantakis, 1991). There are two types of Anthotyros; the fresh Anthotyros and the dried Anthotyros. Fresh Anthotyros contains an increased fat content compared to that of Myzithra and moisture content not greater than 70% and has a soft texture, mild taste, very pleasant organoleptic properties and is consumed as table cheese or used in the preparation of cheese-pies. Dried Anthotyros contains moisture up to 40% and fat in dry matter content at least 65%, has a hard texture, a salty taste, a very rich flavor and is consumed as grated or table cheese. Xynomyzithra is a type of Myzithra cheese, a traditional product of Crete that is made from the whey obtained during the production of Kefalotyri and Graviera from ewe's and goat's milk. For the production of Xynomyzithra, Myzithra is first made, but the Myzithra cheese is heated and

drained more severely, and then it is pressed for 1 week. Salt is added, and the cheese is mixed. Then it is placed in barrels, which are transferred to ripen at 5 to 10°C for a period of 2 months. During this time, it also turns sour (xino means sour). The present study describes the main chemical and microbial characteristics of the Greek whey cheeses mentioned in the literature.

2. RESULTS AND DISCUSSION

Kalogridou-Vassiliadou et al. (1994) studied the microbiological and physicochemical characteristics of 'Anthotyros' cheese. Fifty (50) samples of Anthotyros cheese (ten samples per month) taken from from Crete island and North Greece creameries over a five months' period were studied. The microbiological examination of Anthotyros cheeses (Table 2) showed that the mean log of the microbial groups was 7.84, 7.18 and 5.78 for total microbial counts, lactic acid bacteria and enterococci, respectively. The coliform bacteria, the yeasts and the micrococcaceae were the microbial groups found in high amounts in Anthotyros cheeses with a mean log count of 6.74, 5.48 and 4.48, respectively. The lactic acid bacteria isolates were characterized as enterococci (44.3%), lactococci (*L. lactis* subsp. *lactis*) (13.5%), Leuconostoc (*Lc. paramesenteroides*) (27.9%) and heterofermentative lactobacilli (14.4%). The strains mostly found were *Leuconostoc paramesenteroides* and *Enterococcus faecalis*. Kaminarides (2015) studied the modified form of a Myzithra cheese (named M) that was produced by substituting the fresh cheese whey by dried whey protein concentrate 65% (WPC 65%). The proportion of the materials used in the production of the modified Myzithra cheese blend was: 16.1% WPC, 49.9% water, 8.0% ovine milk and 26.0% ovine cream. The mixture was placed in polyethylene package before being subjected to heat treatment at 90°C for 30 minutes. Also, a control Myzithra cheese (named C) was produced according to the traditional way of Myzithra cheese making. The microbiological (Table 2), physicochemical and rheological characteristics (Table 1) of both cheeses (modified and control cheese) as well as organoleptic tests one day after their production and 25 days after their cold storage were studied. The modified Myzithra cheese (M) had a higher lactose, potassium and sodium content and lower total bacteria, protein, ash, calcium, hardness and adhesiveness than the control Myzithra cheese (C), while yeasts and moulds were absent. Also, the modified Myzithra cheese (M) remained unchanged organoleptically and texturally during cold storage, whereas the control Myzithra cheese was deteriorated. The sensory evaluation showed that the M-Myzithra cheese was of good quality. However, one day after Myzithra preparation, the M-Myzithra cheese had a lower flavour score as compared with the control Myzithra cheese. However, this could be improved by adding flavoring substances to the modified Myzithra cheese (M). This study showed that it is possible to success a fully use of WPCs to prepare a modified form of Myzithra cheese that will meet consumer demand for Myzithra cheese throughout the year. This may also help to address problems of seasonality as well as exploitating the WPCs. An advantage of the modified Myzithra cheese (M) was that there were no losses during its manufacture and it could be stored better than the traditional Myzithra cheese. Kaminarides et al. (2013) studied the effect of added milk and cream on the physicochemical, rheological and volatile compounds of Greek whey cheeses (Table 1). The whey cheeses produced differed in composition and texture according to the amounts of milk and cream added to the whey. Concerning cheese yield, moisture, fat, acidity, total protein, lactose, ash, hardness and elasticity statistically significant differences were also observed. The addition of milk to whey increased the cheese hardness. In contrast, the addition of cream to whey reduced cheese hardness. The

addition of milk and cream led to higher yields. PAGE profiles of whey cheese proteins revealed the presence of as-CN, thus permitting the detection of milk addition to whey and possibly the quantity of added milk. Kaminarides et al. (2015) studied the effect of addition of skimmed milk on the characteristics of Myzithra cheese (Table 1). Three types of Myzithra cheeses were produced. Cheese A: 100% whey; Cheese B: 90% whey + 10% ovine milk and cheese C: 90% whey + 10% skimmed ovine milk. The produced cheese C based on the addition of 10% skimmed milk to the whey, was produced for the first time in literature during Myzithra cheese manufacture. So, a new dietary product that contained 9.24% fat was made. This product had a good quality, a harder texture and a high nutritional value. It has a high calcium (378.42 mg/100 g) and magnesium (29.18 mg/100 g of cheese) content, higher than those of the experimental cheeses A and B. Generally, the produced Myzithra cheeses differed in fat contents, yield, ash, Ca, Mg, K, hardness, gumminess, texture and flavour. Also, the examined cheeses had a low microbial flora. The analysis by electrophoresis and RP-HPLC revealed the presence of as-CN, thus permitting the detection of whole milk when added to whey for better quality, or skimmed milk for dietetic and nutritional reasons. Also, the analysis of the Myzithra cheese proteins by sodium dodecyl sulphate–PAGE permitted the separation of the protein complexes that formed during the thermal process of Myzithra cheese production. Lioliou et al. (2001) studied the microbial flora of Manouri cheese during its storage at 4°C for 20 days (Table 2). Six batches of Manouri cheese were made. The mean pH values were found to be 6.78–7.33. These values favored the growth of different microbial groups. The population of all microbial groups significantly increased ($P< 0.05$) throughout storage and reached higher levels in cheeses that were made in the summer time than in those made in the spring season. It was also observed a better development of microorganisms on the cheeses surface than in the interiors, especially in the summer time. Lactic acid bacteria (LAB) were the major microflora in Manouri cheeses made in the spring season (Litopoulou-Tzanetaki and Tzanetakis, 2014) as shown in Table 2. Even though LAB multiplied to high levels during the storage period, the pH did not seem to decline them, possibly because of the presence of lactic acid-utilizing yeasts (Litopoulou-Tzanetaki and Tzanetakis, 2014). The salt in-moisture ratio was between 2.53 and 3.72 % and did not appear to be sufficient to influence the growth of microorganisms. Additionally, the combined effect of salt, pH, and low temperature was not effective in controlling the growth of enteric pathogens in Manouri cheese (Litopoulou-Tzanetaki and Tzanetakis, 2014). Analyses of Manouri cheeses made in the spring and summer indicated the survival of heat-sensitive microorganisms, such as *Enterobacteriaceae* and yeasts. Hafnia was the main species of *Enterobacteriaceae* found in Manouri cheese in an amount of 68.75%. However, the isolates from the Baird–Parker medium were mainly staphylococci. A great diversity of yeast species was observed. The initial mean log counts of yeasts in the interior of Manouri cheeses were 4.65 and 2.41 in the spring and summer time, respectively (Table 2). The higher numbers of yeasts in the spring time were expected. This was due to the fact that the airborne yeast flora tends to be highest in the spring, following the opening of leaf and flower buds. *Debaryomyces hansenii* and *Pichia membranefasciens* were the most abundant yeast species found in Manouri cheese. The results of the study of Lioliou et al. (2001) showed that in the Manouri cheese made by the traditional method an extensive growth of microbial populations was observed. A significant increase of microbial populations, mainly on cheeses surface, during Manouri storage was observed (Table 2). This shortened the shelf life of Manouri cheeses by forming visible colonies. *Enterobacteriaceae*, yeasts and staphylococci were found to be a significant part of the cheese microflora (Table

2). However, these groups of microorganisms showed only limited degradation of the cheese constituents due to their enzyme activities appeared to occur during product storage. Lioliou et al. (2001) refer that high levels of enterobacteriaceae are of great concern for the dairy industry because of their technological and public health significance. According to these authors, the use of starter cultures or acidification of the whey combined with a better packaging, could be contribute in securing improvements in the microbiological quality of the traditional Manouri cheese and increase its yield. In the Table 1 the mean composition of Xynomyzithra cheese was found to be the following: pH: 4.75 (range, 4.40 to 5.50); moisture: 38.6% (range, 33 to 41.2%); NaCl:1.86% (range, 1.45 to 2.35%); fat in dry matter:30 to 34% (range, 26.86 to 34.88%) (Litopoulou-Tzanetaki and Tzanetakis, 2014).

3. CONCLUSION

The results of this review showed that Myzithra is a fresh whey cheese with a high moisture 68% (65%-70% range) content and a limited fat content 12% (10%-14% range) in Myzithra cheese made from whey without any addition of milk or fat content 17% (15-19% range) in Myzithra cheese made from whey to which 10% milk was added. Anthotyros is a fresh whey cheese with a lower amount of moisture 62% (60-64% range) and a higher amount of fat 20%-25% against of Myzithra cheese. Manouri is a fresh whey cheese of quality superiority with a high amount of fat 30%-35% and moisture 48%-60%. For the production of Manouri cheese the addition of cream to the whey is required. Xynomyzithra is a mature whey cheese with pH 4.7 (4.4-5.5 range) with lower moisture 38% (33%-55%) against Myzithra cheese and NaCl content 1.8% (1.4%-2.5% range). From the microbial flora of whey cheeses the thermotolerant lactic acid bacteria dominated. Whey cheeses are susceptible to microbial spoilage owing to contamination of different microorganisms (enterobacteria, staphylococci and yeasts). The total bacterial count is low in the first day after cheese making (3-4 log cfu g^{-1}) that is due to the heating of cheese at high temperature. Afterwards it increased significantly during cheese storage. The traditional way of making fresh whey cheeses is of limited life time (10 days).

4. REFERENCES

Anifantakis, E. M., 1991. *Greek cheeses: A Tradition of Centuries.* National Committee of Greece, Athens.

FAO, 1999. *Production Year Book, 1998. FAO Statistics Series* no. 148, vol. 52, pp.212-216. Food Agriculture Organization, Rome.

Kalogridou-Vassiliadou, D., Tzanetakis, N. and Litopoulou-Tzanetaki, E., 1994. *Microbiological and physicochemical characteristics of Anthotyros, a Greek traditional whey cheese.* Food Microbiology, 11, 15–19.

Kaminarides, S., Nestoratos, K. and Massouras, T., 2013. *Effect of added milk and cream on the physicochemical, rheological and volatile compounds of Greek whey cheeses*. Small Ruminant Research, 113, 446-453.

Kaminarides, S., 2015. *A modified form of Myzithra cheese produced by substituting the fresh cheese whey by dried whey protein concentrate and ovine milk and cream.* Small Ruminant Research, 131, 118-122.

Kaminarides, S., Ilias-Dimopoulos, E., Zoidou, E. and Moatsou, G., 2015. *The effect of addition of skimmed milk on the characteristics of Myzithra cheeses.* Food Chemistry, 180, 164-170.

Kandarakis, J.G., 1981. *Contribution to the study of the technology of a cheese type Manouri with the traditional way and the use of U.F.* Ph.D. Agricultural University of Athens, Greece.

Lioliou, K., Litopoulou-Tzanetaki, E., Tzanetakis, N. and Robinson, R.K., 2001. *Changes in the microflora of manouri, a traditional Greek whey cheese, during storage.* International journal of Dairy Technology, 54, 100-106.
Litopoulou-Tzanetaki, E. and Tzanetakis, N., 2011. *Microbiological characteristics of Greek traditional cheeses.*Small Ruminant Research, 101, 17-32.
Litopoulou-Tzanetaki, E. and Tzanetakis, N., 2014. *The microfloras of traditional Greek cheeses.* Microbiology Spectrum, 2, 1-34.
Moatsou, G., Hatzinaki, A., Samolada, M. and Anifantakis, E., 2005. *Major whey proteins in ovine and goat acid wheys from indigenous Greek breeds.* International Dairy Journal, 15, 123-131.
Stiles, K., 2012. *US Dairy Export Council. NCCIA Annual Conference.*
Zerfiridis, G., 1976. *Study of the technology of a new type of whey cheese from cow's whey.* Ph.D. University of Thessaloniki, Greece.
Zygouris, N.P., 1956. *Milk Industry.* Ministry of Agriculture, Athens, Greece

Table 1. Yield and physicochemical and textural characteristics of whey cheeses 1 day after production made from whey without or with the addition of milk or milk and cream and whey protein concentrate

Characteristics	Whey cheeses								
	Myzithra				Anthotyros		Manouri		Xyno-myzithra
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	******	******	******	*****	***	**	***	*	****
Cheese yield (%)	4.88	7.28	6.76	-	13.65	-	14.90	-	-
Moisture (%)	67.06	66.70	69.88	67.00	60.55	65.24	52.76	53.23	38.60
Fat (%)	12.17	14.33	9.24	16.63	25.0	-	34.25	32.45	-
Fat in dry matter (%)	37.28	43.06	30.33	50,37	63.42	-	72.48	69.38	-
Total protein (%)	15.61	15.78	15.89	11.38	10.10	-	9.06	9.85	-
Lactose (%)	3.82	3.84	3.76	4.64	3.40	-	3.10	3.43	-
Ash (%)	0.81	1.11	1.39	0.72	0.95	-	0.83	1.19	-
NaCl (%)	-	-	-	-	-	-	-	0.83	1.86
Lactic acid (%)	0.074	0.064	0.071	0.09	0.10	-	0.11	0.11	-
Cl (%)	0.113	0.105	0.112	-	-	-	-	-	-
Ca (mg/100 g)	165.9	271	378.42	82,44	-	-	-	-	-
Mg (mg/100 g)	17.57	22.67	29.18	17,01	-	-	-	-	-
Na (mg/100 g)	36.87	29.04	29.04	38,94	-	-	-	-	-
K (mg/100 g)	48.41	23.26	85.46c	132,25	-	-	-	-	-
pH	6.4	6.5	6.4	6,10		6,17		5.53	4.75
Hardness (N)	3.59	3.22	4.25	2.39	0.75	-	0.53	-	-
Adhesiveness (N mm)	6.96	12.3	9.37	6.99	-	-	-	-	-
Cohesiveness (N mm)	0.37	0.42	0.46	0.43	0.38	-	0.45	-	-

A: From 100% whey; **B**: From 90% whey + 10% ovine milk; **C**: From 90% whey + 10% skimmed ovine milk; **D**: From 49.9% distilled water + 16 .1% whey protein concentrate 65% + 8% ovine milk + 26% ovine cream; **E**: From 82% whey + 15% milk + 3% cream; **F**: Samples from North Greece; **G**: From 79% whey + 15%milk + 6% cream; **H**: From 50% ultrafitrated whey (1:20) + 50% ovine cream with 60% fat; **I**: Samples from Crete island. * Kandarakis, 1981, ** Kalogridou-Vassiliadou et al.,1994 ***Kaminarides et al.,2013, ****Litopoulpu-Tzanetaki & Tzanetakis, 2014, *****Kaminarides, 2015, ******Kaminarides et al., 2015

Table 2. Log counts (log_{10} cfu / g) of microbial groups obtained from samples of Greek whey cheeses during their storage.

Microbial group	Greek whey cheeses										
	Modified Myzithra (M)		Traditional Myzithra (C)		Manouri						Anthtyr
	*				**, ***						****
	Days				Season	Sample from	Days				
	1	25	1	25			0	5	10	20	
Total bacteria	2.46	5.22	3.61	8.94	Spring	Surface	4.25	6.01	6.69	7.32	7.84
						Interior	4.73	5.10	5.82	6.878.	
					Summer	Surface	4.83	6.45	7.48	34	
						Interior	4.91	6.25	6.31	6.33	
Lactic acid bacteria					Spring	Surface	5.07	5.52	5.76	6.54	7.18
						Interior	4.98	5.10	5.05	5.17	
					Summer	Surface	4.13	5.01	5.71	7.05	
						Interior	5.17	4.76	5.23	5.16	
Lactococci					Spring	Surface	3.97	5.52	5.78	7.025.	
						Interior	3.08	4.55	5.09	36	
					Summer	Surface	4.16	4.73	6.11	8.21	
						Interior	4.45	4.95	5.10	6.40	
Lactobacilli											

*Kaminarides (2015); **Lioliou et al. (2001); ***Litopoulou-Tzanetaki and Tzanetakis (2011); ****Kalogridou-Vassiliadou et al. (1994); *****Litopoulou-Tzanetaki and Tzanetakis (2014)

Table 2. Continued: Log counts (log_{10} cfu / g) of microbial groups obtained from samples of Greek whey cheeses during their storage.

Microbial group	Greek whey cheeses											
	Modified Myzithra (M)		Traditional Myzithra (C)		Manouri						Anthtyros	X
	*				**, ***						****	
	Days				Season	Sample from	Days					
	1	25	1	25			0	5	10	20		
Enterococci					Spring	Surface	2.90	7.97	5.15	6.424.	5.78	6.63
						Interior	2.25	2.65	3.30	66		
					Summer	Surface	2.50	4.26	5.30	7.17		
						Interior	2.86	2.54	4.26	4.75		
Enterobacteriaceae					Spring	Surface	2.67	3.04	5.65	7.26		6.00
						Interior	0.00	2.93	5.14	5.37		
					Summer	Surface	3.16	5.69	7.14	8.32		
						Interior	1.59	2.94	5.32	589		
Coliforms	0	0	0	3.60	Spring	Surface	2.28	3.45	4.39	5.34	6.74	6.00
						Interior	0.98	3.29	2.41	1.78		
					Summer	Surface	3.06	5.12	6.59	8.32		
						Interior	1.17	2.47	5.65	5.75		
Microccocaceae											4.48	

*Kaminarides (2015); **Lioliou et al. (2001); ***Tzanetaki and Tzanetakis (2011); ****Kalogridou-Vassiliadou et al. (1994); *****Tzanetaki and Tzanetakis (2014)

Table 2. Continued: Log counts (log_{10} cfu / g) of microbial groups obtained from samples of Greek whey cheeses during their storage.

Microbial group	Greek whey cheeses										
	Modified Myzithra (M)		Traditional Myzithra (C)		Manouri						Anthtyr
	*				** , ***						****
	Days				Season	Sample from	Days				
	1	25	1	25			0	5	10	20	
Yeasts and moulds	0	0	2.04	6.28	Spring	Surface	4.90	5.30	4.93	6.46	
						Interior	4.65	4.85	4.67	5.40	
					Summer	Surface	3.53	5.41	5.65	6.81	
						Interior	2.41	4.65	5.22	5.34	
Staphylococci					Spring	Surface	4.06	6.21	5.924.	6.68	
						Interior	3.92	3.89	15	5.12	
					Summer	Surface	3.64	5.49	5.63	6.64	
						Interior	3.37	3.43	4.12	4.39	

*Kaminarides (2015); **Lioliou et al. (2001); ***Litopoulou-Tzanetaki and Tzanetakis (2011); ****Kalogridou-Vassiliadou et al. (1994); *****Litopoulou-Tzanetaki and Tzanetakis (2014)

Η ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ pH ΚΑΙ ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΔΑΦΗ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΑΡΔΕΥΣΗ ΜΕ ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΑΣΤΙΚΑ ΛΥΜΑΤΑ

Αφροδίτη Τσιγκόιδα ✉

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,

✉*tsigoida@aua.gr*

Περίληψη

Προκειμένου να μελετηθούν οι χημικές παράμετροι του εδάφους μετά από υπεδάφια άρδευση με αστικά λύματα εγκαταστάθηκε πείραμα στο θερμοκήπιο του Γεωπονικού Πανεπιστημίου. Διαμορφώθηκε ένα αυτοσχέδιο σύστημα, όπου διοχετεύονταν σε γλάστρες με υπόγεια άρδευση, αστικό λύμα (ανεπεξέργαστο λύμα (U), επεξεργασμένο (T) και νερό βρύσης ως μάρτυρας (W)), στα βάθη 10 και 20 cm. Τα λύματα μεταφέρονταν από τον βιολογικό σταθμό επεξεργασίας λυμάτων Λυκόβρυσης Αττικής (ΚΕΡΕΦΥΤ). Στις γλάστρες τοποθετήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι εδάφους, έδαφος (α) (sandy loam) και έδαφος (β) (Loamy Sand). Στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας, λήφθηκαν εδαφικά δείγματα και εξετάστηκαν οι παρακάτω παράμετροι: Το pH, το ολικό άζωτο, ο προσδιορισμός του αμμωνιακού αζώτου (NH_4 -N), ο προσδιορισμός του αζώτου των νιτρικών (NO_{3-} N). Στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p<0,05$) παρουσιάζουν η περιεκτικότητα σε ολικό N % και τα αμμωνιακά μόνο στο έδαφος β.

Λέξεις κλειδιά: αστικά λύματα, άρδευση, έδαφος, χημικοί παράμετροι

THE CHANGE OF pH AND TOTAL NITROGEN AFTER IRRIGATION WITH TREATED AND UNTREATED MUNICIPAL WASTEWATER IN TWO DIFFERENT SOIL TYPES.

Afroditi Tsigoida✉

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens,

✉*tsigoida@aua.gr*

ABSTRACT

In order to study some chemical properties in the soil, after six months irrigation with wastewater, a specific system was installed in a greenhouse of the Agricultural University of Athens. This system was used for the subsurface application of wastewater into the soil mass. The soil was packed into pots and sub-irrigation was applied in the depths of 10 and 20 cm. Three treatments were used: Untreated wastewater (U), Treated wastewater (T) and tap water (W) as control. Two different types of soil were packed into the pots. Soil (a) was characterized as sandy loam and soil (b) which was characterized as Loamy sand. At the end of the experiment, soil samples were taken for the measurement the following parameters: The total N%, the ammonia nitrogen (NH_4-N), the nitrogen nitrate (NO_3-N) and the pH. Statistically significant differences ($p <0.05$) show the total N% content and the ammonia only for the soil (b).

Keywords: municipal wastewater, sub- irrigation, soil, chemical parameters

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. Το νερό είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που περιορίζουν τη γεωργική παραγωγή τροφίμων στις αναπτυσσόμενες χώρες όπου ο υποσιτισμός παίζει σημαντικό ρόλο στο θάνατο των παιδιών, εκτιμάται ότι 10,4 εκατομμύρια παιδιά κάτω των 5 ετών πεθαίνουν κάθε χρόνο (Rice et al, 2000 ; Berkman et al., 2002) ενώ πλήττει περίπου 800 εκατομμύρια ανθρώπους ή το 20 % των ανθρώπων στον αναπτυσσόμενο κόσμο. Η ανατολική περιοχή της Μεσογείου κατά τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας WHO είναι η φτωχότερη περιοχή στον κόσμο σε υδάτινους πόρους ανά κάτοικο. Τα αστικά λύματα, με την κατάλληλη επεξεργασία, μπορεί να είναι μια εναλλακτική πηγή νερού, διότι σε πολλές περιπτώσεις το νερό και τα θρεπτικά συστατικά που περιέχει, μπορεί να έχουν ευεργετικές επιδράσεις (ακόμη και σε μεγάλο βαθμό) στις καλλιέργειες, από την άλλη πλευρά όμως μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ασφάλεια των τροφίμων, από την άποψη της Δημόσιας Υγείας λόγω των παθογόνων που μεταφέρουν (Buechler and Devi, 2003).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση κάποιων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του εδάφους μετά την χρήση των αστικών λυμάτων (επεξεργασμένων και ανεπεξέργαστων) με την μέθοδο της υπάρδευσης.

2. ΘΕΩΡΙΑ

Η χρήση των λυμάτων για άρδευση στην Γεωργία, είναι μια διαδεδομένη πρακτική. Η συνεχής άρδευση μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στη σύσταση των εδαφών με κίνδυνο την υποβάθμιση της ποιότητάς του σε μακροπρόθεσμη βάση (Friedel et al., 2000). Τα λύματα όταν εφαρμοστούν στο έδαφος ακολουθούν την κίνηση του νερού η οποία εξαρτάται από τον τύπο και την κατανομή των πόρων, την ποσότητα όπως και την συχνότητα εφαρμογής τους. Οι απόψεις όσον αφορά την επίδραση των λυμάτων στις ιδιότητες του εδάφους, διίστανται. Υπό κατάλληλες συνθήκες μπορεί οι επιπτώσεις να είναι θετικές, όχι μόνο στην ποιότητα του εδάφους, αλλά και σε κοινωνικό επίπεδο ενώ συμβάλλει στην διατήρηση της αρδευόμενης γεωργίας (Hidri et al., 2013). Από την άλλη πλευρά η άρδευση με αστικά λύματα μπορεί να αλλάξει τις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους, όπως διαπιστώθηκε όταν η εφαρμογή έγινε σε δύο διαφορετικά εδάφη (Magesan et al., 2001). Κατά τους (Galavi, et al. 2010) παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση σε όλες τις παραμέτρους του εδάφους (N, P, K, Ca, Na, Mg, SAR, EC, OC%) ($p \leq 0.05$) ενώ μειώθηκε το pH και αυξήθηκε η αλατότητα του εδάφους (Munir et al., 2003). Επίσης σε έδαφος (clay loam (CL)) προκλήθηκε αύξηση των μακρο- και μικρο- στοιχείων πολλές φορές σε κρίσιμα επίπεδα, εκτός από τον P, τον Zn και το Cd των οποίων οι συγκεντρώσεις ποικίλουν (Kalavrouziotis et al., 2008). Ακόμη αυξήθηκαν τα ανταλλάξιμα στοιχεία σε όλα τα εδάφη, ενώ υπήρξε συγκέντρωση βαρέων μέταλλων στον επιφανειακό ορίζοντα (Jian Xua, 2010). Τα ανεπεξέργαστα λύματα μετά από μακροχρόνια άρδευση επιφέρουν συσσώρευση αλάτων και αλλαγές στην υδροφοβικότητα του εδάφους (Travis et al., 2010). Σύμφωνα με τους ερευνητές το ανεπεξέργαστο λύμα με την σωστή διαχείριση άρδευσης και τον περιοδικό έλεγχο των παραμέτρων της ποιότητας του εδάφους, μπορεί να ελαχιστοποιηθούν οι δυσμενείς επιπτώσεις στο έδαφος.

2a. Το Άζωτο στο έδαφος μετά την άρδευση με αστικά λύματα

Στα απόβλητα το άζωτο κυμαίνεται από 20- 100 mg/l ανάλογα με τις διατροφικές συνήθειες των ανθρώπων της περιοχής (Pettygrove and Asano, 1985). Το άζωτο περιέχεται σε τρεις

μορφές: οργανικό, αμμωνιακό και νιτρικό άζωτο, των οποίων η σχετική αναλογία μεταβάλλεται, ανάλογα με το είδος και την επεξεργασία των λυμάτων. Η βασική μορφή είναι η αμμωνιακή σε συγκεντρώσεις 5-40 mg/l αζώτου. Όλες οι μορφές είναι εύκολα μετατρέψιμες σε αμμωνιακά με την δράση των μικροοργανισμών στο νερό η στο έδαφος. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών κυμαίνονται από 0-30 mg/l αζώτου. Μέρος του αμμωνιακού αζώτου μετατρέπεται σε νιτρικό με την διεργασία της νιτροποίησης από τα νιτροβακτήρια στην περίπτωση που γίνεται αναερόβια επεξεργασία. Συνήθως δεν συμβαίνει αθροιστική συσσώρευση των προσροφημένων αμμωνιακών επειδή η συγκράτηση είναι προσωρινή και γίνονται πιο ευκίνητα διότι οξειδώνονται από τα νιτροβακτήρια και απομακρύνονται με το νερό. Σε PH του εδάφους μεγαλύτερο από 7, ένα μέρος του αμμωνιακού αζώτου των αποβλήτων, μπορεί να χαθεί ως αέριο (αμμωνία NH_3) (Bali et al., 2011)

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Προκειμένου να μελετηθούν οι αλλαγές των παραπάνω φυσικοχημικών παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι εδάφους, χρήση υπόγειας άρδευσης και αστικά λύματα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας και ανεπεξέργαστα. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 36 γλάστρες (χωρητικότητας 11.8 λίτρων) οι οποίες τοποθετήθηκαν στο θερμοκήπιο του Γεωπονικού Πανεπιστήμιου Αθηνών. Συλλέχτηκε χώμα, το οποίο μετά τον καθαρισμό, ομογενοποιήθηκε σε σωρούς, κοσκινίστηκε με επικλινές κόσκινο τετραγωνικών οπών, με διαστάσεις οπής 1,0 X 1,0 cm και αεροξηράνθηκε (Chen et al., 2004). Κατόπιν ζυγίστηκε και τοποθετήθηκε σε κάθε γλάστρα 13 kg εδάφους, εξασφαλίζοντας έτσι ίση ποσότητα σε όλες γλάστρες. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι εδάφους. Έδαφος (α) (sandy loam) και έδαφος (β) (loamy sand). Το έδαφος (β) είναι το ίδιο έδαφος με το έδαφος (α), αναμεμιγμένο με άμμο σε ποσοστό 25%, ώστε να γίνει πιο περατό στα υγρά διαβροχής. Από τις 36 γλάστρες οι 18 γέμισαν με έδαφος (α) και οι υπόλοιπες 18 με έδαφος (β). Με αυτοσχέδιο σύστημα το λύμα και νερό διοχετεύονταν στις γλάστρες, με υπάρδευση. Διαμορφώθηκαν τρεις σειρές, στην πρώτη σειρά διοχετεύονταν ανεπεξέργαστο λύμα (untreated wastewater (U)), στην δεύτερη σειρά επεξεργασμένο λύμα (treated wastewater (T)) ενώ στην τρίτη σειρά νερό βρύσης ως μάρτυρας (control water (W)). Σε κάθε σειρά υπήρχαν 12 γλάστρες με τρεις επαναλήψεις για κάθε επέμβαση. Υπολογίστηκε ότι κάθε γλάστρα που ποτίζονταν με τα παραπάνω υγρά κάθε φορά, για να φτάσει το έδαφος στην υδατοϊκανότητά του (Θ_{FC}), δηλ. στο 70-75% περίπου της υγρασίας κορεσμού, χρειάστηκε να αρδευτεί με παροχή 3 l/h επί μία ώρα (Allen et al., 1998). Χρησιμοποιήθηκαν σταλακτήρες (NETAFIM (tech flow junior CNL dripper) με παροχή 3 l/h. Συνεπώς ο κάθε σταλλακτήρας παρείχε 3 l/h του λύματος όπως και νερό βρύσης, ώστε η διαθέσιμη υγρασία του περιεχομένου εδάφους να μην ξεπεράσει την τιμή 70-75% της υγρασίας κορεσμού. Το σύστημα είχε οριστεί να είναι σε λειτουργία για 1 h, τρείς μέρες την εβδομάδα. Για την τροφοδοσία του λύματος χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί σωλήνες διαμέτρου ∅ 32, και τύπου spaghetti (∅ 6). Στους σωλήνες spaghetti τοποθετήθηκαν οι σταλακτήρες οι οποίοι διοχέτευαν το λύμα υπεδαφίως στα 10 cm και 20 cm. Στην περίπτωση του ανεπεξέργαστου λύματος, προκειμένου να μην βουλώσουν οι σταλακτήρες, χρησιμοποιήθηκε μια πολύ λεπτή σήτα. Χρησιμοποιήθηκε αστικό λύμα από τον Σταθμό Επεξεργασίας Λυμάτων της Λυκόβρυσης, το οποίο μεταφερόταν σε δοχεία στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο, την ίδια ημέρα πριν από κάθε πότισμα. Το πείραμα διήρκησε έξι μήνες. Στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας, μετά την άρδευση με τα τρία υγρά διαβροχής, δηλ. τον μάρτυρα αρδευτικό νερό (W), επεξεργασμένο λύμα (T) και ανεπεξέργαστο λύμα (U), συλλέχτηκαν τα εδαφικά δείγματα των γλαστρών και μεταφέρθηκαν στο εδαφολογικό εργαστήριο, όπου

αναλύθηκαν προκειμένου να διερευνηθεί αν μεταβλήθηκε η σύσταση του εδάφους. Τα δείγματα του εδάφους μεταφέρθηκαν σε πλαστικά σακουλάκια. Κατόπιν αεροξηράνθηκαν, λειοτριβήθηκαν σε γουδί από πορσελάνη και κοσκινίστηκαν με κόσκινο, ανοίγματος οπών 2mm. Στο κλάσμα του εδάφους που προέκυψε (με διάμετρο κόκκων<2 mm) προσδιορίστηκαν οι χημικοί παράμετροι. Όλοι οι προσδιορισμοί έγιναν σύμφωνα με το "Methods of soil analysis"(Page et al., 1982) με κάποιες προσαρμογές στις μεθόδους.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η μέτρηση των παραμέτρων (pH, ολικό N %, NO_3^--N μg/g και NH_4^+-N μg/g) για το έδαφος (α) και έδαφος (β), έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα**.** Στους πίνακες 1.α και 1.β φαίνονται οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων από την χημική ανάλυση των παραπάνω παραμέτρων του εδάφους (α) και (β), μετά την άρδευση με τα τρία υγρά διαβροχής, καθώς και η τυπική απόκλιση αυτών.

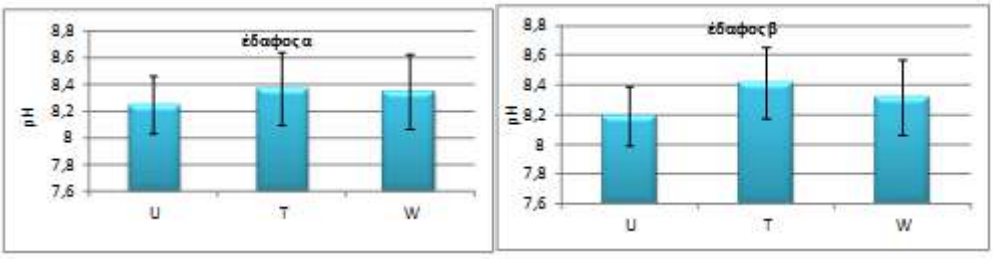
Πίνακας 1.α.: Τα χημικά συστατικά του εδάφους (α), μετά τα υγρά διαβροχής, ανεπεξέργαστο λύμα (U), επεξεργασμένο(T) και νερό, μάρτυρας (W).

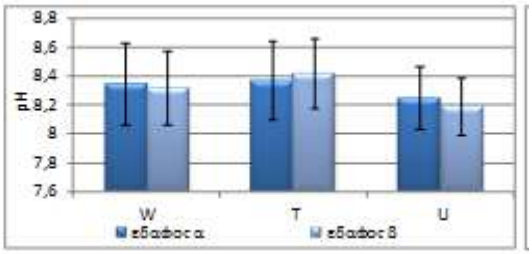
Παράμετρος	Ανεπεξέργαστο λύμα (U)		Επεξεργασμένο λύμα (T)		Μάρτυρας (W)	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
pH	8,24	0,21	8,37	0,27	8,34	0,28
ολικό N %	0,117	0,01	0,110	0,01	0,108	0,03
NO_3^--N μg/g	4,88	1,94	4,049	1,61	3,71	1,66
NH_4^+-N μg/g	1,74	0,47	1,73	0,54	1,58	0,41

Πίνακας 1.β: Τα χημικά συστατικά του εδάφους (β), με τα υγρά διαβροχής, ανεπεξέργαστο λύμα (UW), επεξεργασμένο(TW) και νερό (W).

Παράμετρος	Ανεπεξέργαστο υγρό απόβλητο (U)		Επεξεργασμένο υγρό απόβλητο (T)		Μάρτυρας (W)	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
pH	8,19	0,19	8,41	0,23	8,31	0,25
ολικό N %	0,121	0,00	0,112	0,00	0,110	0,00
NO_3^--N μg/g	4,18	1,58	5,04	1,29	4,12	2,00
NH_4^+-N μg/g	1,67	0,31	1,66	0,37	1,17	0,53

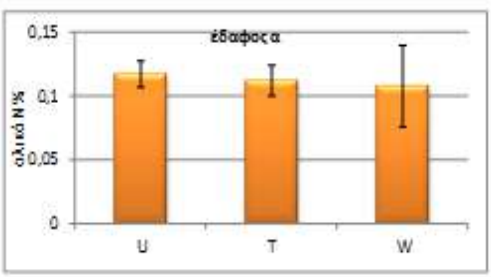
Για να αξιολογηθούν οι διαφορές στις χημικές ιδιότητες του εδάφους χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA). Όλες οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για επίπεδο σημαντικότητας p ≤ 0,05. Όταν προσδιορίστηκαν σημαντικές επιδράσεις (P≤0,05) με μέσο όρο πολλαπλών συγκρίσεων, εφαρμόστηκε η δοκιμή Tukey's test. Στατιστικό πακέτο: SIGMA STAT Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η μεταβολή των παραπάνω χημικών παραμέτρων του εδάφους (α) και (β) (στατιστική ανάλυση: one way analysis of variance (ANOVA) :

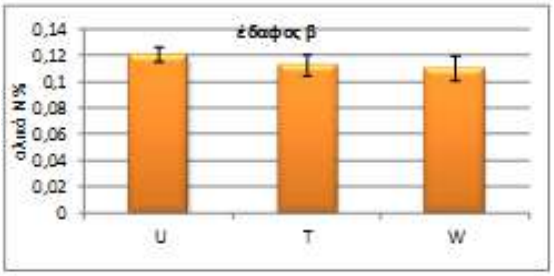


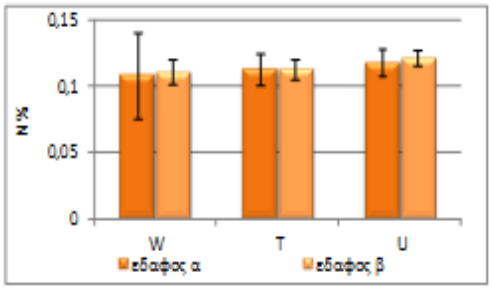


Διαγράμματα 1,2,3: η μεταβολή του pH στο έδαφος α και έδαφος β και μεταξύ των δύο εδαφών, μετά τα τρία υγρά διαβροχής (W, T, U). Οι κάθετες μπάρες αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών (n=3).

Στα δυο εδάφη (α) και (β), φαίνεται ότι το ρΗ (διαγράμματα 1,2,3) έχει την ίδια συμπεριφορά, μείωση στο έδαφος που αρδεύτηκε με ανεπεξέργαστο λύμα (U), και αύξηση στο έδαφος με το επεξεργασμένο (T), σε σχέση με τον μάρτυρα (W). Από την στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι οι μεταχειρίσεις στο κάθε έδαφος, δεν διαφέρουν σημαντικά p>0.05 (P=0.590) &(P=0.31). Επίσης οι μεταχειρίσεις μεταξύ των δύο εδαφών, δεν διαφέρουν σημαντικά (p>0.05).

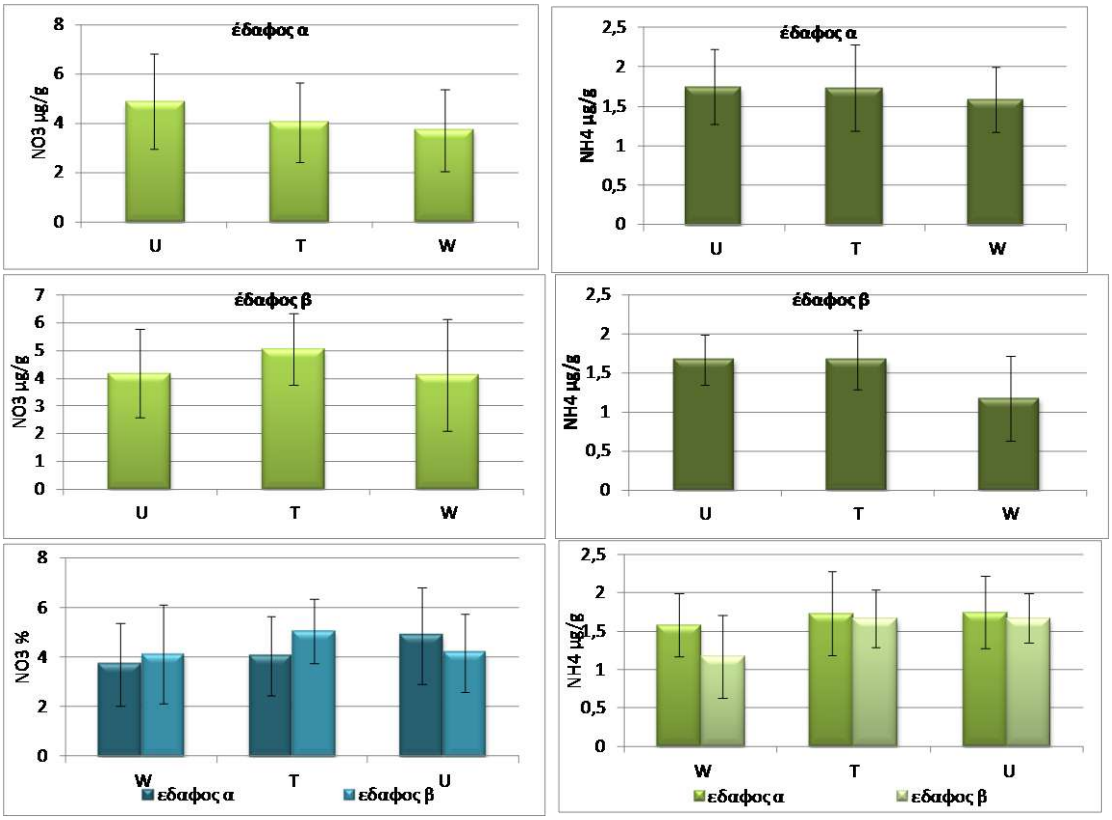






Διαγράμματα 4,5,6: η μεταβολή του ολικού Ν %, στο έδαφος α και έδαφος β καθώς και μεταξύ των δύο εδαφών, μετά τα τρία υγρά διαβροχής (W, T, U). Οι κάθετες μπάρες αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών (n=3).

Η περιεκτικότητα σε ολικό Ν % (διάγραμμα 4,5,6) στα δύο εδάφη (α) και (β), δείχνει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά, δηλ. αύξηση και στις δύο μεταχειρίσεις (T,U), με μεγαλύτερη αύξηση στην μεταχείριση με ανεπεξέργαστο, σε σχέση με τον μάρτυρα (W). Για το έδαφος (α) οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, δεν στατιστικά σημαντικές, p>0.05 (P=0.862 (normality failed) Kruskal-Wallis one way analysis of Variance on Ranks p=0.499) ενώ για το έδαφος (β) είναι στατιστικά σημαντικές (p<0.05) (normality failed) tukey test P=0.004, Kruskal-Wallis one way analysis of Variance on Ranks p=0.002) (πίνακας 1.β).Όταν όμως συγκρίνονται τα δύο εδάφη μεταξύ τους, ο μάρτυρας έχει στατιστικά σημαντική διαφορά (One way Analysis of Variance-ANOVA p<0.05). Normality failed, Tukey, Kruskal-Wallis one way on Ranks P=<0.032)



Διαγράμματα 7,8,9,10,11,12: μεταβολή των NO3 μg/g και NH4 μg/g , στο έδαφος α και στο έδαφος β καθώς και μεταξύ των δύο εδαφών, μετά τα τρία υγρά διαβροχής (W, T, U). Οι κάθετες μπάρες αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών (n=3).

Τα αμμωνιακά και νιτρικά (διαγράμματα 7,8) στο έδαφος (α), δείχνουν αύξηση στις δύο μεταχειρίσεις (T, U) και κυρίως τα νιτρικά δείχνουν μεγαλύτερη ιδιαίτερα στην περίπτωση άρδευσης με τα ανεπεξέργαστα, όχι όμως στατιστικά σημαντική, p>0.05 (νιτρικά P=0.234 και αμμωνιακά P=0.664). Στο έδαφος (β), τα νιτρικά (διάγραμμα 9), δείχνουν αύξηση και στις δυο περιπτώσεις άρδευσης (T, U) σε σχέση με τον μάρτυρα (W), μεγαλύτερη όμως στην περίπτωση της άρδευσης με το επεξεργασμένο λύμα (T) αλλά όχι στατιστικά σημαντική (p>0.05) P=0.629. Ενώ τα αμμωνιακά (διάγραμμα 10) εμφανίζουν αύξηση και στις δύο περιπτώσεις άρδευσης με λύματα (T, U) σε σχέση με τον μάρτυρα (W), στατιστικά σημαντική (p<0.05) (Normality passed equal Variance test passed, Tukey test p=0.009). Στα δυο εδάφη (α) και (β), τα νιτρικά (διάγραμμα 11) δείχνουν αύξηση στις δυο περιπτώσεις άρδευσης (T, U) ιδιαίτερα στο έδαφος (β) η αύξηση είναι μεγαλύτερη στο επεξεργασμένο σε σχέση με το ανεπεξέργαστο, ενώ μεταξύ των μεταχειρίσεων τα δύο εδάφη δεν έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (p>0.05). Τα αμμωνιακά (διάγραμμα 12) εμφανίζουν αύξηση στις δυο περιπτώσεις άρδευσης (T, U) στα δυο εδάφη (α) και (β), σε σχέση με τον μάρτυρα W. Μεταξύ των μεταχειρίσεων τα δύο εδάφη δεν έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (p>0.05).

Το pH στα δυο εδάφη (α) και (β), φαίνεται ότι έχει την ίδια συμπεριφορά. Στην περίπτωση που το έδαφος αρδεύτηκε με ανεπεξέργαστο λύμα (U) παρατηρείται μια μείωση, ενώ το έδαφος που αρδεύτηκε με το επεξεργασμένο (T), παρατηρείται μια αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα W. Όχι όμως στατιστικά σημαντικές για τους δύο χειρισμούς (P=0.590 και P=310). Επίσης μεταξύ των μεταχειρίσεων στα δύο εδάφη, δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (p>0.05). Στο ίδιο συμπέρασμα επίσης κατέληξαν οι (Chahal et al., 2011; Belaid et al., 2012) καθώς επίσης και οι (Bedbabis et al.,2014;Hidri et al., 2013). Η μείωση του pH

αποδίδεται στην οξείδωση των οργανικών ενώσεων και στην νιτροποίηση της αμμωνίας (Mohammad and mazahreh, 2003) ή μπορεί να οφείλεται στην αποσύνθεση της οργανικής ουσίας και την παραγωγή οργανικών οξέων (Vaseghi et al., 2005) η ακόμη, στην υψηλή περιεκτικότητα ανιόντων του αμμωνίου στα λύματα, η νιτροποίηση του οποίου χρησιμεύει ως πηγή ιόντων υδρογόνου, προκαλώντας έτσι μείωση του pH του εδάφους, ως μια άλλη πηγή η οξίνισης του εδάφους (Rusan et al., 2007). Σε γενικές γραμμές, η μείωση του ρΗ εξηγείται από τη χαμηλή αναλογία C/N των λυμάτων και την ακόλουθη ενίσχυση των οργανικών ουσιών με ανόργανες ουσίες (Herpin et al., 2007). Το ολικό άζωτο (ολικό N%) στα δύο εδάφη (α) και (β)δείχνει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά, δηλ. αύξηση και στις δύο μεταχειρίσεις (T, U), με μεγαλύτερη αύξηση στην άρδευση με ανεπεξέργαστο, σε σχέση με τον μάρτυρα (W). Για το έδαφος (α) όχι στατιστικά σημαντική (P=0.862 (normality failed) Kruskal-Wallis one way analysis of Variance on Ranks p=0.499) αλλά για το έδαφος (β) στατιστικά σημαντική (normality failed) tukey test P=0.004, Kruskal-Wallis one way analysis of Variance on Ranks p=0.002). Σύμφωνα με πειράματα άλλων ερευνητών, κατά την άρδευση με λύματα υπήρξε σημαντική αύξηση στο N ($p \leq 0.05$) (Galavi et al. 2010;Abegunrin, 2016) Επίσης κατά τους (Alrajhi, 2015) το ολικό N του εδάφους αυξήθηκε κατά 4%. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η πρόσθεση των λυμάτων στο έδαφος, επιφέρει αύξηση της συγκέντρωσης του αζώτου (Cooper et al., 2015). Η αύξηση αυτή του αζώτου στο έδαφος, μπορεί να αποδοθεί στην άφθονη ουρία και το άζωτο, τα οποία περιέχονται στα αστικά λύματα (Bernala et al., 2006). Σε ορισμένες περιπτώσεις από την εφαρμογή των λυμάτων**,** παρέχεται έως 4, 8 και 10 φορές περισσότερο άζωτο από ότι χρειάζονται τα κτηνοτροφικά φυτά, τα οποία αρδεύτηκαν με λύματα (Rusan *et al.,*2007). Αντίθετα σε άλλη μελέτη δεν υπήρξε σημαντική επίδραση στο ολικό N στο έδαφος, μετά την άρδευση με λύματα. Οι συγκεντρώσεις του αζώτου επηρεάζονται από την κίνηση του νερού, από τις συγκεντρώσεις τους στο νερό άρδευσης καθώς και από την πρόσληψη τους από τα φυτά (Heidarpour et al., 2007), όπως και σε εδαφικές στήλες, το ολικό N διατηρήθηκε στα ίδια επίπεδα μεταξύ εισροής και εκροής του λύματος (Lian,2013). Τα νιτρικά δείχνουν αύξηση στις δυο περιπτώσεις άρδευσης (T,U) σε σχέση με τον μάρτυρα W και στα δυο εδάφη (α) και (β). Στο έδαφος (α)**,** φαίνεται αύξηση στις δύο μεταχειρίσεις και κυρίως δείχνει μεγαλύτερη αύξηση στην περίπτωση άρδευσης με τα ανεπεξέργαστα λύματα. Ενώ στο έδαφος (β) η αύξηση είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της άρδευσης με το επεξεργασμένο λύμα (T), σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα λύματα. Δεν είναι όμως στατιστικά σημαντικές (P>0.05) (P=0.234 και P=0.629 για το έδαφος (α) και το έδαφος (β) αντίστοιχα). Με το παραπάνω συμπέρασμα συμφωνούν και οι Qian and Mecham, (2005). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στα ανεπεξέργαστα λύματα οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, είναι πολύ χαμηλότερες από ό, τι στα επεξεργασμένα (Yadav et al., 2002). Ακόμη η συγκέντρωση των νιτρικών σε δυο εδάφη (αμμώδες, ασβεστολιθικό- αργιλώδες) αυξήθηκε σε όλο το βάθος, σύμφωνα δε με τους (Lado et al., 2012) η αύξηση αυτή στο έδαφος συμβαίνει λόγω της νιτροποίησης. Τα αμμωνιακά εμφανίζουν σημαντική αύξηση και στις δυο περιπτώσεις άρδευσης με λύματα (T, U) και στα δυο εδάφη (α) και (β), σε σχέση με τον μάρτυρα (W). Για το έδαφος (α) η αύξηση αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τον μάρτυρα, αλλά όχι στατιστικά σημαντική (για το έδαφος (α) (P=0.664) ενώ για το έδαφος β είναι στατιστικά σημαντική (Normality passed equal Variance test passed, Tukey test p=0.009). Το ίδιο παρατήρησαν και οι (Bali et al., 2011), ενώ σε στήλες εδάφους τα αμμωνιακά παρακρατήθηκαν κατά 97,37 έως 98,74 % (Nola et al., 2006).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο έδαφος α όταν χρησιμοποιήθηκε ανεπεξέργαστο λύμα, φαίνεται ότι υπάρχει μικρή μείωση στο pH και αύξηση στο ολικό N, στα νιτρικά και αμμωνιακά. Όταν χρησιμοποιήθηκε επεξεργασμένο λύμα φαίνεται ότι αυξήθηκαν όλες οι παράμετροι. Δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p>0.05$).
Στο έδαφος β όταν χρησιμοποιήθηκε ανεπεξέργαστο λύμα, φαίνεται ότι μειώθηκε το pH ενώ αυξήθηκαν το ολικό άζωτο, τα νιτρικά και αμμωνιακά. Ενώ όταν χρησιμοποιήθηκε επεξεργασμένο λύμα αυξήθηκαν (pH, ολικό άζωτο, νιτρικά και αμμωνιακά). Στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p<0,05$) παρουσιάζουν μόνο η περιεκτικότητα σε ολικό N % και τα αμμωνιακά.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abegunrin, T.P., G.O. Awe , D.O. Idowu, M.A. Adejumobi. 2016. Impact of wastewater irrigation on soil physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria. Catena. Volume 139, Pages 167–178

Alrajhi A., S. Beecham, Nanthi S. Bolan, A. Hassanli. 2015. Evaluation of soil chemical properties irrigated with recycled wastewater under partial root-zone drying irrigation for sustainable tomato production. Agricultural Water Management. Volume 161, Pages 127–135

Bali,M., M., Gueddari, and R. Boukchinam 2011. Removal of contaminants and pathogens from secondary effluents using intermittent sand filters. Water Science and Technology. 64. 2038-2043.

Bedbabis Saida, Béchir Ben Rouina, Makki Boukhris, Giuseppe Ferrara. 2014. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. Journal of Environmental Management. Journal of Environmental Management 133. 45-50

Belaid N., C. Neel , J.F. Lenain, R. Buzier , M. Kallel , T. Ayoub, A. Ayadi, M. Baudu. 2012. Assessment of metal accumulation in calcareous soil and forage crops subjected to long-term irrigation using treated wastewater: Case of El Hajeb-Sfax, Tunisia. Agriculture, Ecosystems and Environment 158. 83–93

Berkman DS, Lescano AG, Gilman RH, Lopez SL, Black MM. Effects of stunting, diarrhoeal disease, and parasitic infection during infancy on cognition in late childhood: a follow-up study. Lancet. 2002 Feb 16;359 (9306):564-71

Bernala, A. D., Ramosa, S. M. C., Tapiaa, N. T., Portugalb, V. O., Hernandezc, J. T. F., & Dendoovena, L. 2006. Effects of tanneries wastewater on chemical and biological soil characteristics. Applied Soil Ecology, 33, 269-277

Buechler, S.; Gayathri Devi, M. 2003. Wastewater as a source of multiple livelihoods? : a study in rural Andhra Pradesh, South India. In Devi, R.; Ahsan, N. (Eds.), Water and wastewater: developing country perspectives. London, UK: International Water Association. pp. 939-947.

Chahal Maninder K. , Gurpal S. Toor , Peter Nkedi-Kizza and Bielinski M. Santos. 2011. Effect of Tomato Packinghouse Wastewater Properties on Phosphorus and Cation Leaching in a Spodosol. Journal of Environmental Quality. Vol. 40 No. 3, p. 999-1009

Chen Y, Wang CX, Wang ZJ, 2004. Assessment of the contamination and genotoxicity of soil irrigated with wastewater. Plant and Soil, 261: 189-196.

Cooper JA, Loomis GW, Kalen DV, Amador JA. 2015. Evaluation of water quality functions of conventional and advanced soil-based onsite wastewater treatment systems. J Environ Qual. 2015 May;44(3):953-62. doi: 10.2134/jeq2014.06.0277.

Friedel J.K., T. Langer, C. Siebe, K. Stahr. 2000. Effects of long-term waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in central Mexico .Biol Fertil Soils 31:414–421

Galavi Mohammad, Abbas Jalali & Mahmmod Ramroodi, Sayed Roholla Mousavi, Hadi Galavi. September 2010. Effects of Treated Municipal Wastewater on Soil Chemical Properties and Heavy Metal Uptake by Sorghum (Sorghum Bicolor L.) Journal of Agricultural Science Vol. 2, (3).

Heidarpour M., B. Mostafazadeh-Fard, J. Abedi Koupai, R. Malekian. 2007. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. agricultural water management. vol. 90, p.87–94

Herpin, U., Gloaguen, T.V., da Fonseca, A.F., Montes, C.R., Mendonça, F.C., Piveli, R.P., Breulmann, G., Forti, M.C. and Et Melfi, A.J. 2007. Chemical effects on the soil-plant system in a secondary treated wastewater irri-gated coffee plantationcA pilot field study in Brazil. Ag-riculture Water Management, 89, 105-115.

Hidri Yassine, Olfa Fourti, Naceur Jedidi and Abdenaceur Hassen. 2013. Effects of ten years treated wastewater drip irrigation on soil microbiological properties under Mediterranean conditions African Journal of Biotechnology. Vol. 12(39), pp. 5761-5770, 25.

Jian Xua, Laosheng Wub, Andrew C. Changb, Yuan Zhanga. 2010. Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary assessment Journal of Hazardous Materials 183, 780–786

Kalavrouziotis et al., 2008; Kalavrouziotis, I.K.,P. Robolas, P.H. Koukoulakis, A.H. Papadopoulos. 2008. Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro- and micro-elements status of soil and of Brassica oleracea var. Italica, and B. oleracea var. Gemmifera. agricultural water management 95 . 419- 426

Lado M. A Zapateira A. Azenkot S. Assouline I. Ravina Y. Erner P. Fine S. Dasberg M. Ben-Hur 2012. Changes in Chemical Properties of Semiarid Soils under Long-Term Secondary Treated Wastewater Irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J. 76.1358–1369

Lian, J., Luo, Z., Jin, M. 2013. Transport and fate of bacteria in SAT system recharged with recycling water. International Biodeterioration and Biodegradation 76, pp. 98-101

Magesan G.N, 2001. Changes in soil physical properties after irrigation of two forested soils with municipal wastewater. New Zealand forest Research Institute. Issue 2. 762-767.

Mohammad MJ, Mazahreh N, 2003. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater, Comm. Soil Sci. Plant Anal., 34 (9 & 10):1281–1294.

Munir J.M., Mazahreh N. 2003. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. vol. 34, 9-10, pp. 1281-1294 [14 page(s) (article)] (38 ref.)

Nola, M., Njiné, T., Kemka, N., (...), Messouli, M., Boutin, C. 2006. Retention of staphylococci and total coliforms during wastewater percolation through equatorial soil in Central Africa: The role of the soil column near soil surface and that closely above groundwater table. Water, Air, and Soil Pollution 171 (1-4), pp. 253-271

Pettygrove, G.S. and T. Asano. 1985. Irrigation with reclaimed municipal wastewater - a guidance manual. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI, USA.

Qian Y. L. and B. Mecham. 2005. Long-Term Effects of Recycled Wastewater Irrigation on Soil Chemical Properties on Golf Course Fairways. Agron. J. 97, 717–721

Rice Peter, Ian Longden, Alan Bleasby.2000. EMBOSS: The European Molecular Biology Open Software Suite. Resource INTERNET. TIG June 2000, volume 16, No. 6

Rusan, M. J. M., Hinnawi, S., & Rousan, L. 2007. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. Desalination, 215, 143–152

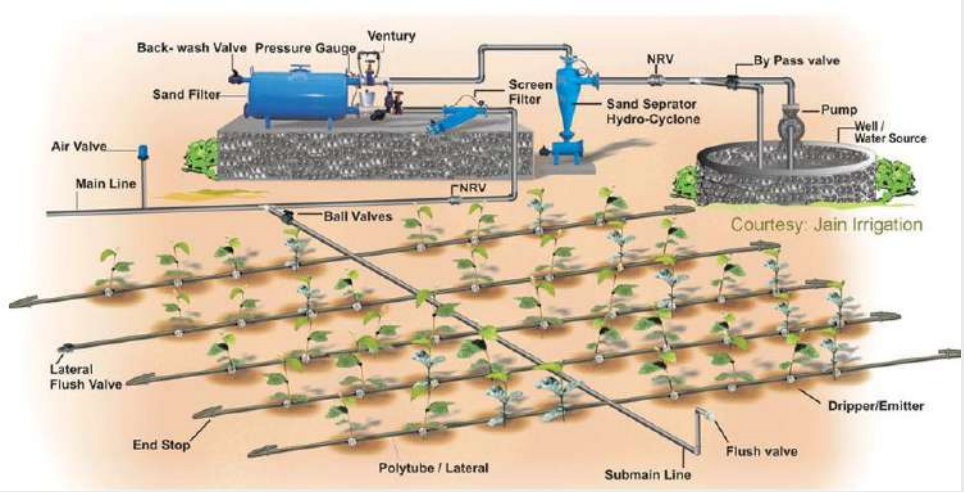
Travis Micheal J., Alit Wiel-Shafran, Noam Weisbrod, Eilon Adar, Amit Gross. 2010. Greywater reuse for irrigation: Effect on soil properties. Science of the Total Environment 408, 2501–2508.

Vaseghi S, Afyuni M, Shariatmadari H, Mobli M, 2005. Effect of sewage sludge on some nutrients concentration and soil chemical properties. Journal of Isfahan Water and Wastewater, 53: 15-19 (in Persian).

Yadav, B., Goyal, R.K., Sharma, S.K., Dubey, P.S. and Minhas, R.K. 2002. Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground- water—A case study. Environment International, 28, 481- 486.

10ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ-ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ



ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΥΒΡΙΔΙΟΥ ΤΟΜΑΤΑΣ «OASIS F1» ΣΕ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑ

Ειρήνη Βαζανέλλη[1], Στέφανος Στεφάνου[1]✉ & Δημήτριος Μαρκόπουλος[2]

[1]Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων, Τ.Θ. 141, 57400, Θεσσαλονίκη

[2]AGRIS Α.Ε., Επαρχιακή οδός Πλατάνου - Κλειδίου, 59300, Αλεξάνδρεια Ημαθίας

Περίληψη

Σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια φυτών του νέου υβριδίου τομάτας "OASIS F1" σε έδαφος και υδροπονία, μελετήθηκαν μορφολογικά χαρακτηριστικά και η περιεκτικότητα καρπών σε σάκχαρα, με σκοπό τη σύγκριση ανάμεσα στα δύο μέσα ανάπτυξης. Εξετάστηκαν δύο ομάδες φυτών, δεκαπέντε (15) φυτά στην υδροπονία και εικοσιτέσσερα (24) στο έδαφος. Το έδαφος είναι ιλυοπηλώδες (SiL), μέτρια αλκαλικό και αλατούχο (EC > 4 $mS.cm^{-1}$). Η υδροπονική καλλιέργεια υπερτέρησε στα κριτήρια «ύψος φυτών», «πάχος βλαστού βάσης», «αριθμός καρπών» (στατιστικά σημαντικές διαφορές) και «πάχος βλαστού κορυφής», «αριθμός ταξιανθιών», «αριθμός ανοιχτών ανθέων» (στατιστικά μη σημαντικές διαφορές). Η καλλιέργεια στο έδαφος υπερτέρησε μόνο ως προς την περιεκτικότητα των καρπών σε σάκχαρα, οι διαφορές όμως δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.

Λέξεις κλειδιά: υβρίδιο τομάτας, θερμοκήπιο, έδαφος, υδροπονία

CULTIVATION OF TOMATO HYBRID «OASIS F1» IN SOIL AND HYDROPONICS

Irini Vazanelli[1], Stefanos Stefanou[1]✉ & Dimitrios Markopoulos[2]

[1]Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki, Department of Agricultural Technology, 57400 Sindos - Thessaloniki

[2]AGRIS A.E., 59300, Alexandria Imathias

Abstract

Some morphological characteristics and the fruit sugars content were measured on plants of the new tomato hybrid "OASIS F1" cultivated in a greenhouse on soil and hydroponics, in order to compare the two growth media. The measurements were carried out on two groups of plants, fifteen (15) plants cultivated in hydroponics and twenty-four (24) in the soil. The soil is silty loam, moderately alkaline and saline (EC > 4 $mS.cm^{-1}$). Hydroponic cultivation outweighed the soil in the criteria of "plant height", "stem base thickness", "number of fruits" (statistically significant differences) and "stem top thickness", "number of inflorescences", "number of open flowers" (statistically non significant differences). Tomato plants cultivated in soil gave more fruit sugars content but differences were not statistically significant.

Keywords: tomato hybrid, greenhouse, soil, hydroponics

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μετάβαση από την θερμοκηπιακή καλλιέργεια στο έδαφος σε υδροπονικά συστήματα έχει επικρατήσει παγκόσμια, ενώ τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται και στα σύγχρονα ελληνικά θερμοκήπια. Καθώς οι υδροπονικές καλλιέργειες καταλαμβάνουν ολοένα και περισσότερο έδαφος στον ελλαδικό χώρο, το κυριότερο λαχανοκομικό είδος που καλλιεργείται σε αυτά τα συστήματα είναι η τομάτα (*Solanum lycopersicum* L.) (Chatzivassiliou et al., 2000).

Σκοπός της παρούσας έρευνας, ήταν να μελετηθούν ορισμένα φυτικά μορφολογικά χαρακτηριστικά και η περιεκτικότητα σε σάκχαρα καρπών του νέου υβριδίου τομάτας «OASIS F1», στην υδροπονική και στην εδαφική καλλιέργεια, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα της μίας ή της άλλης καλλιεργητικής μεθόδου που εφαρμόστηκαν σε σύγχρονο πειραματικό θερμοκήπιο.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Υδροπονία

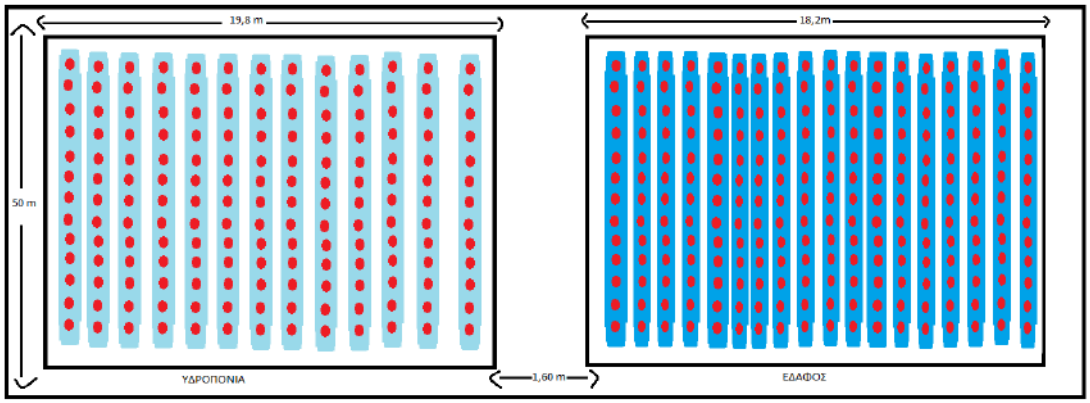
Η υδροπονία αναφέρεται σε οποιαδήποτε μέθοδο καλλιέργειας φυτών χωρίς τη χρήση του εδάφους ως μέσου ανάπτυξης των ριζών (Savvas, 2013). Αυτός ο σχετικά απλός ορισμός περικλείει ένα ευρύ φάσμα συστημάτων τα οποία γενικά περιλαμβάνουν και την ανάπτυξη των ριζών μέσα σε ένα πορώδες μέσο που καλείται “υπόστρωμα” ή “μέσο ανάπτυξης” (Barrett et al., 2016). Σε σχέση με την καλλιέργεια σε έδαφος, η παραγωγή σε υδροπονικά συστήματα μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικότερη (Grafiadellis, 2000), προσφέροντας υψηλότερες αποδόσεις και ταχύτητες συγκομιδής από μικρότερες εκτάσεις γης (Raviv and Lieth, 2008; Nejad and Ismaili, 2014). Τα υδροπονικά συστήματα, πέρα από τη γενικά υψηλότερη αποτελεσματικότητα χρήσης νερού και θρεπτικών στοιχείων (Savvas, 2002), παρέχουν τη δυνατότητα καλλιέργειας φυτών σε περιοχές με προβληματικά (αλατούχα, άγονα κ.λπ.) εδάφη (Olympios, 1999).

2.2 Υπόστρωμα πετροβάμβακα

Τα υποστρώματα έχουν πρακτική σημασία αφενός για την στήριξη του φυτού και αφετέρου για την συγκράτηση των θρεπτικών στοιχείων που προέρχονται από το θρεπτικό διάλυμα, το οποίο περιοδικά διαβρέχει το υλικό του υποστρώματος (Κίττας, 2002). Ο πετροβάμβακας αποτελεί το πιο δημοφιλές και αποτελεσματικό υλικό που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα (Gajc-Wolska et al., 2015). Πρόκειται για διογκωμένο ανόργανο και ινώδες υλικό, το οποίο αποτελείται από 60% βασάλτη, 20% ασβεστόλιθο και 20% γαιάνθρακα και προκύπτει ύστερα από θερμική επεξεργασία. Η χημική του σύσταση είναι παραπλήσια με εκείνη του ανόργανου εδάφους, καθώς συνίσταται από οξείδια διαφόρων ανόργανων στοιχείων και, κυρίως, του πυριτίου, του ασβεστίου, του σιδήρου, του μαγνησίου και του αργιλίου. Ο πετροβάμβακας δεν έχει εναλλακτική ικανότητα, γι’ αυτό και θεωρείται ότι είναι ένα χημικά αδρανές, αποστειρωμένο υλικό, τυποποιημένο και με σταθερή ποιότητα. Συνεπώς, το θρεπτικό διάλυμα όταν βρίσκεται σε κατάλληλη σύσταση μπορεί να ελεγχθεί και να ρυθμιστεί πλήρως για την θρέψη των φυτών. Δεν παρουσιάζει βιολογική διάσπαση, απορροφάει πολύ εύκολα το νερό και έχει ολικό πορώδες 96%. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε υδροπονικό σύστημα, γιατί συγκρατεί 10-14 φορές περισσότερο νερό και διατηρεί 20% αέρα. Επίσης, είναι δυνατή η χρήση του σε περισσότερες από μία καλλιεργητικές περιόδους, αλλά θα πρέπει να αντικαθίσταται κάθε 2 ή 3 έτη (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

3. ΥΛΙΚΑ - ΜΕΘΟΔΟΙ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πειραματικό θερμοκήπιο της "AGRIS Α.Ε.", στην περιοχή Κλειδί Ημαθίας, έναν υπερσύγχρονο πειραματικό σταθμό ο οποίος συνδυάζει ολοκληρωμένη διαχείριση της γεωργικής παραγωγής και παράλληλα διαθέτει εξειδικευμένο εξοπλισμό. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα της διάταξης του συνόλου των καλλιεργούμενων φυτών στο θερμοκήπιο. Από αυτά μελετήθηκαν συνολικά τριάντα εννέα (39) φυτά της ποικιλίας τομάτας "OASIS F1", εκ των οποίων τα δεκαπέντε (15) φυτά αναπτύχθηκαν στην υδροπονία και τα είκοσι τέσσερα (24) στο έδαφος (Εικόνα 1).



Σχήμα 1. Διαστάσεις του θερμοκηπίου και θέσεις των φυτών.

Εικόνα 1. Διάταξη φυτών τομάτας "OASIS F1" στην υδροπονία (αριστερά) και στο έδαφος (δεξιά).

Η παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων για τη λίπανση των φυτών τόσο στην υδροπονία, όσο και στο έδαφος, πραγματοποιούνται σε ειδικές δεξαμενές (Εικόνα 2).

Εικόνα 2. Εγκαταστάσεις παρασκευής θρεπτικών διαλυμάτων.

Στον πειραματικό σταθμό εφαρμόζεται ανοιχτό υδροπονικό σύστημα, δηλαδή το απορρέον θρεπτικό υλικό δεν επαναχρησιμοποιείται. Η λίπανση στην υδροπονία είναι ενσωματωμένη στην άρδευση και με αυτήν εξασφαλίζεται η συνεχής θρέψη των φυτών με όλα τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία. Στο θρεπτικό διάλυμα πραγματοποιούνται περιοδικές μετρήσεις pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC). Η λίπανση των φυτών που αναπτύσσονται στο έδαφος πραγματοποιείται μέσω συστήματος στάγδην άρδευσης.

Όσον αφορά στο έδαφος, πραγματοποιήθηκαν εδαφολογικές αναλύσεις σε μηνιαία βάση για τον έλεγχο του pH και της EC, καθώς και για τον έλεγχο της περιεκτικότητας σε θρεπτικά στοιχεία. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο της AGROLAB στη βιομηχανική περιοχή της Σίνδου Θεσσαλονίκης και στο Εργαστήριο Εδαφολογίας του Τμήματος Τεχνολόγων Γεωπόνων του ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης. Πιο συγκεκριμένα, προσδιορίστηκαν η μηχανική σύσταση με τη μέθοδο του πυκνόμετρου (Gee and Bauder, 1986), η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία με τη μέθοδο της υγρής οξείδωσης (Nelson and Sommers, 1996), το pH του εδάφους στο εκχύλισμα της πάστας κορεσμού (McLean, 1982). Στο εκχύλισμα της πάστας κορεσμού μετρήθηκε, επίσης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, EC_{se} (Rhoades, 1996). Το νιτρικό άζωτο (NO_3-N) εκχυλίστηκε με διάλυμα KCl 1M και ο προσδιορισμός του πραγματοποιήθηκε φασματοφωτομετρικά (Clesceri et al., 1989), ο αφομοιώσιμος φώσφορος (P) προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Olsen (Olsen and Sommers, 1982) και η μέτρησή του έγινε, επίσης, φασματοφωτομετρικά. Τα ανταλλάξιμα κατιόντα K^+, Ca^{++} και Mg^{++} εκχυλίστηκαν με διάλυμα CH_3COONH_4 1N, pH 7 (Thomas, 1982) και ο προσδιορισμός τους έγινε σε ICP-OES. Τέλος, τα μικροθρεπτικά Fe, Cu, Zn, Mn εκχυλίστηκαν με διάλυμα DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) και μετρήθηκαν σε ICP-OES, ενώ το B εκχυλίστηκε με ζέον ύδωρ (Bingham, 1982) και ο προσδιορισμός του έγινε φασματοφωτομετρικά.

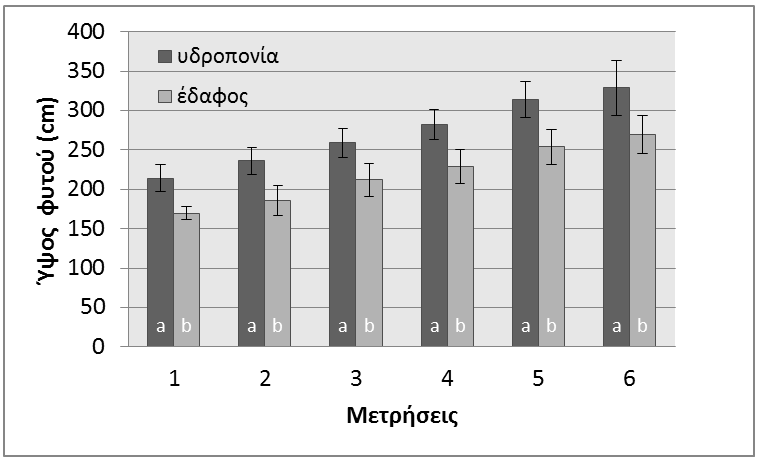
Κατά το δίμηνο Απριλίου – Μαΐου 2016 πραγματοποιήθηκαν εβδομαδιαίες μετρήσεις σε ορισμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων φυτών, όπως ύψος φυτού (cm), πάχος βλαστού βάσης και κορυφής (mm), αριθμός ταξιανθιών, αριθμός ανοικτών ανθέων ανά ταξιανθία, μήκος φύλλων (cm), αριθμός καρπών ανά ταξιανθία, καθώς και περιεκτικότητας των καρπών σε σάκχαρα. Σε αυτό το διάστημα πραγματοποιήθηκαν έξι (6) συνολικά μετρήσεις στα προαναφερόμενα φυτικά χαρακτηριστικά. Η $1^η$ μέτρηση έγινε στις 6/4/2016, η $2^η$ στις 13/4/2016, η $3^η$ στις 20/4/2016, η $4^η$ στις 26/4/2016, η $5^η$ στις 4/5/2016 και η $6^η$ στις 11/5/2016. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν οκτώ (8) μετρήσεις περιεκτικότητας των καρπών σε σάκχαρα.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

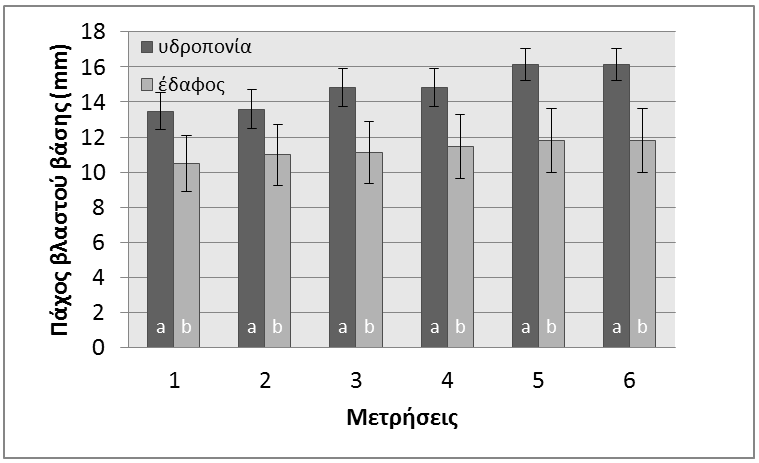
Οι εδαφολογικές αναλύσεις έδειξαν ότι το έδαφος του θερμοκηπίου είναι ιλυοπηλώδες (SiL), μέτρια αλκαλικό (7,7-8,0), έχει ικανοποιητική περιεκτικότητα σε οργανική ουσία (2,5-4%), επαρκή επίπεδα $CaCO_3$ (5-10%) και είναι αλατούχο (EC > 4 $dS.m^{-1}$). Η μέγιστη τιμή EC που μετρήθηκε ήταν 7,5 $dS.m^{-1}$. Η αλατότητα του εδάφους στο θερμοκήπιο αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, καθώς σε κάποιες ποικιλίες τομάτας που δεν αναφέρονται στην παρούσα μελέτη, εμφανίστηκαν σημάδια τοξικότητας. Στην αυξημένη αλατότητα πιθανώς συνέβαλε και η επιφανειακή λίπανση με χορήγηση αζώτου σε νιτρική μορφή, γι' αυτό και περιορίστηκε η χρήση του. Οι προσδιορισμοί των διαθέσιμων θρεπτικών στοιχείων έδειξαν υψηλά επίπεδα NO_3-N, P, K, Mg, Cu, Mn και επαρκή επίπεδα Fe, Zn και B.

Στο θρεπτικό διάλυμα της υδροπονίας, οι καταγραφόμενες τιμές του pH ξεκίνησαν από περίπου 7,5 στην αρχή των μετρήσεων, κατέληξαν περίπου στο 5,5 στο μέσο περίπου της περιόδου μελέτης, ενώ στη συνέχεια παρέμειναν σταθερές. Το εύρος των τιμών EC κυμάνθηκε από 4 $dS.m^{-1}$ έως 6 $dS.m^{-1}$. Η μέγιστη τιμή EC που σηματοδοτεί τη συσσώρευση αλάτων στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα, μετρήθηκε περίπου στα τέλη Απριλίου και στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε γύρω στα 4-4,5 $dS.m^{-1}$ με τη χρήση όξινου νερού. Το προαναφερόμενο εύρος τιμών EC σε θρεπτικά διαλύματα δεν είναι ασυνήθιστα υψηλό στις υδροπονικές καλλιέργειες, καθώς από διαθέσιμα στοιχεία της εταιρίας AGRIS αναφέρονται και περιπτώσεις άλλων θερμοκηπιακών μονάδων υδροπονίας με μετρούμενες τιμές EC από 5,5 έως 7 $dS.m^{-1}$. Όχι σπάνια, όταν το νερό άρδευσης περιέχει ιόντα σε υψηλά επίπεδα, όπως Cl^-, Na^+, HCO_3^-, Ca^{2+}, Mg^{2+} ή SO_4^{2-} τότε η EC του νερού είναι αυξημένη με αποτέλεσμα το θρεπτικό διάλυμα που προκύπτει να έχει υπερβολικά υψηλή EC (Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών Κύπρου, 2014).

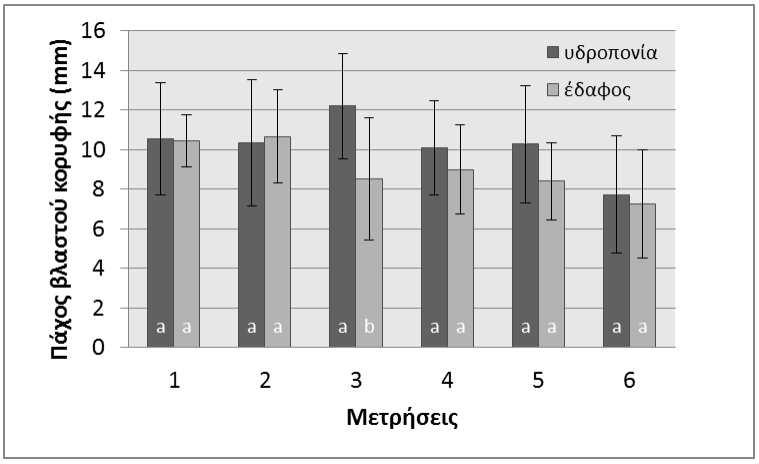
Στα παρακάτω Σχήματα (2-8) παρουσιάζονται οι μεταβολές των μετρούμενων παραμέτρων (μέσοι όροι) στα φυτά της τομάτας που αναπτύσσονται τόσο στο έδαφος, όσο και στην υδροπονία. Η σύγκριση των τιμών των φυτικών παραμέτρων μεταξύ υδροπονικής και εδαφικής καλλιέργειας έγινε για κάθε μέτρηση ξεχωριστά, οι δε τιμές που συνοδεύονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά ($p < 0,05$).



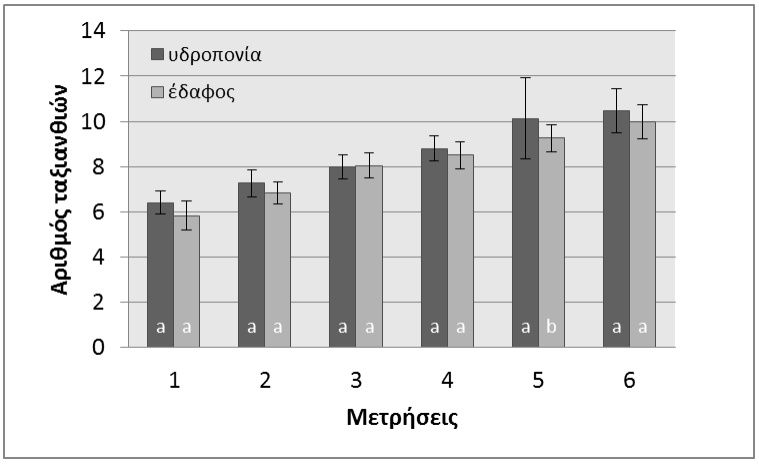
Σχήμα 2. Μέσοι όροι ύψους φυτών στην υδροπονία και στο έδαφος στις έξι μετρήσεις.



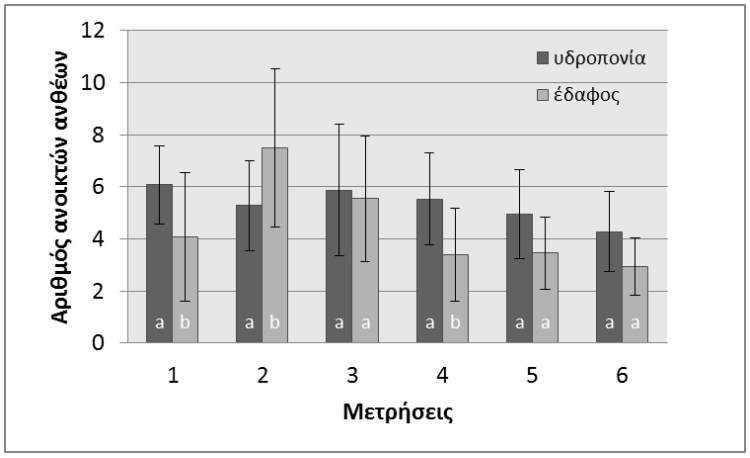
Σχήμα 3. Μέσοι όροι πάχους βλαστού βάσης στην υδροπονία και στο έδαφος στις έξι μετρήσεις.



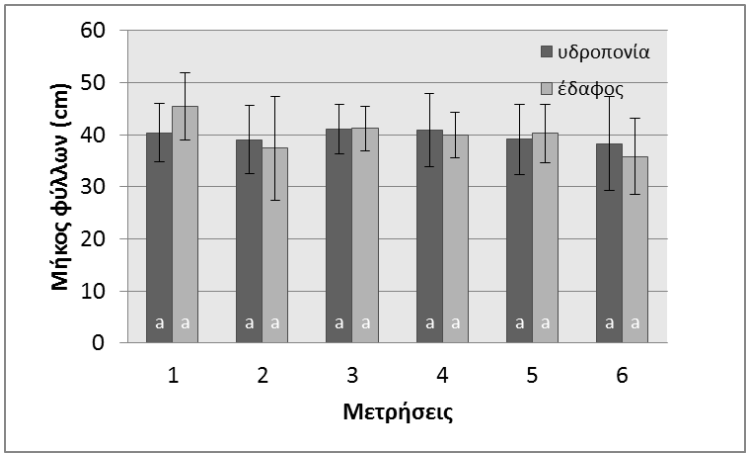
Σχήμα 4. Μέσοι όροι πάχους βλαστού κορυφής στην υδροπονία και στο έδαφος στις έξι μετρήσεις.



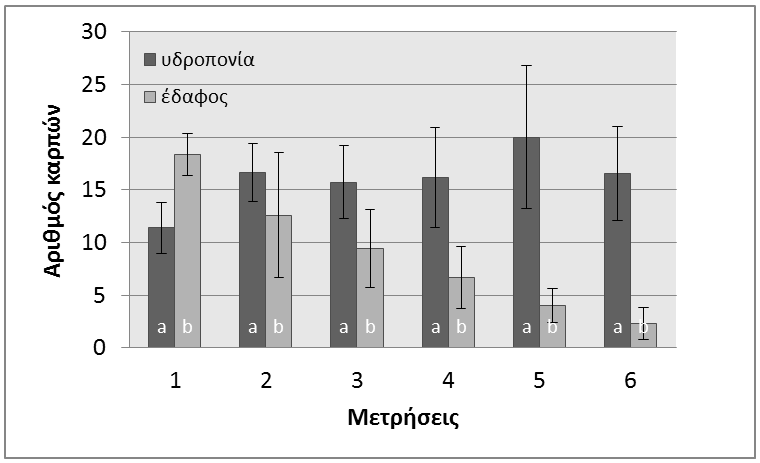
Σχήμα 5. Μέσοι όροι αριθμού ταξιανθιών στην υδροπονία και στο έδαφος στις έξι μετρήσεις.



Σχήμα 6. Μέσοι όροι αριθμού ανοικτών ανθέων στην υδροπονία και στο έδαφος στις έξι μετρήσεις.



Σχήμα 7. Μέσοι όροι μήκους φύλλων στην υδροπονία και στο έδαφος στις έξι μετρήσεις.

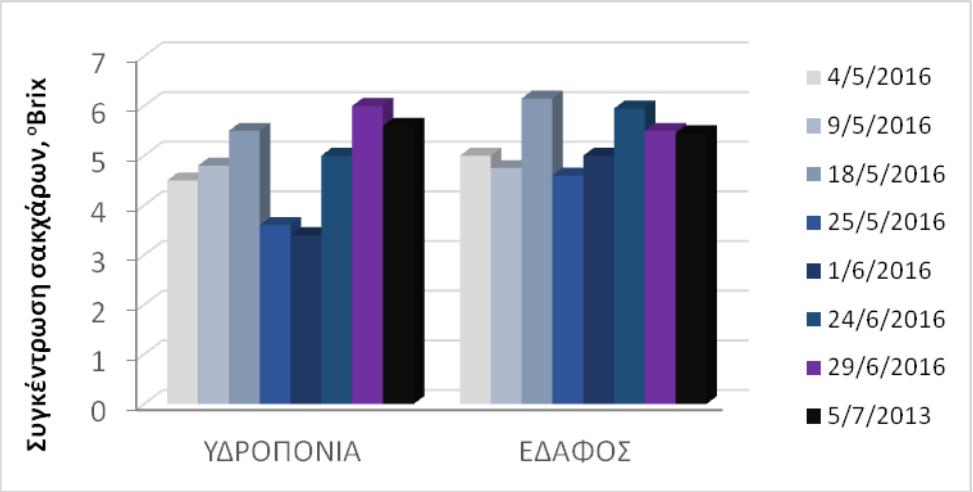


Σχήμα 8. Μέσοι όροι αριθμού καρπών στην υδροπονία και στο έδαφος στις έξι μετρήσεις.

Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα, το ύψος των φυτών, το πάχος βλαστού βάσης και ο αριθμός καρπών ήταν μεγαλύτερα στην υδροπονία σε σύγκριση με το έδαφος

(Σχήματα 2, 3 και 8) και οι διαφορές ήταν στατιστικά σημαντικές. Στην περίπτωση του μέσου αριθμού καρπών (Σχήμα 8) είναι αξιοσημείωτη η αυξανόμενη διαφορά στον αριθμό καρπών μεταξύ υδροπονικής και εδαφικής καλλιέργειας, ιδίως από την 3η μέτρηση και μετά. Η υδροπονία έδωσε, επίσης, μεγαλύτερες τιμές στα κριτήρια «πάχος βλαστού κορυφής», «αριθμός ταξιανθιών» και «αριθμός ανοιχτών ανθέων» (Σχήματα 4, 5 και 6), οι διαφορές όμως δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές. Όσον αφορά στο κριτήριο «μήκος φύλλων», δεν υπήρχαν διαφορές ανάμεσα στα δύο μέσα ανάπτυξης (Σχήμα 7).

Στο Σχήμα 9 παριστάνεται γραφικά η μεταβολή της περιεκτικότητας σε σάκχαρα (σε βαθμούς Brix) στους καρπούς τομάτας σε χρονικό διάστημα δύο μηνών, στην υδροπονία και στο έδαφος. Οι μετρήσεις έδειξαν υψηλότερα ποσοστά σακχάρων στους καρπούς των φυτών που αναπτύχθηκαν στο έδαφος σε σχέση με την υδροπονία, οι διαφορές όμως δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.



Σχήμα 9. Συγκέντρωση σακχάρων (°Brix) στους καρπούς, στην υδροπονία και στο έδαφος.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια φυτών τομάτας της νέας ποικιλίας "OASIS F1" σε έδαφος και σε υδροπονία έδειξε ότι στα έξι από τα συνολικά επτά μετρούμενα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών, η καλλιέργεια στην υδροπονία υπερτέρησε έναντι της καλλιέργειας στο έδαφος. Στις παραμέτρους «ύψος φυτών», «πάχος βλαστού βάσης» και «αριθμός καρπών», οι διαφορές βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές, ενώ στις παραμέτρους «πάχος βλαστού κορυφής», «αριθμός ταξιανθιών» και «αριθμός ανοιχτών ανθέων», οι διαφορές ήταν μη σημαντικές. Όσον αφορά στην παράμετρο «μήκος φύλλων» δεν υπήρξαν διαφορές. Η καλλιέργεια στο έδαφος υπερτέρησε μόνο ως προς την περιεκτικότητα των καρπών σε σάκχαρα, όμως οι διαφορές δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barrett, G.E., Alexander, P.D., Robinson, J.S. and Bragg, N.C., 2016. *Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems – A review.* Scientia Horticulturae, 212: 220-234. DOI: 10.1016/j.scienta.2016.09.030

Bingham, F.T., 1982. *Boron*. In: A.L. Page (ed) Methods of soil analysis, Part 2 - Chemical and Microbiological Properties, Agronomy 9 (2nd ed). Soil Science Society of America, Agronomy Society of America, Madison, WI, pp. 431-447.

Chatzivassiliou, E.K., Livieratos, I., Jenser, G., and Katis, N.I., 2000. *Ornamental plants and thrips population associated with tomato spotted wilt virus in Greece*. Phytoparasitica, 28: 257-264.

Clesceri, L.S., Greenberg, A.E., and Truseell, R.R., 1989. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* 17th Edition. APHA, AWWA, WPCF. Washington, DC, USA.

Gajc-Wolska, J., Kowalczyk, K., Marcinkowska, M., Radzanowska, J., and Bujalski, D., 2015. *Influence of growth conditions and grafting on the yield, chemical composition and sensory quality of tomato fruit in greenhouse cultivation.* Journal of Elementology, 20(1): 73 - 81, DOI: 10.5601/jelem.2014.19.4.565

Gee, G.W., and Bauder, J.W., 1986. *Particle-size Analysis*. In: A. Klute (ed) Methods of Soil Analysis, Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph 9 (2nd ed). American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 383-411.

Grafiadellis, I., Mattas, K., Maloupa, E., Tzouramani, I., and Galanopoulos, K., 2000. *Aneconomic analysis of soilless culture in Gerbera production*. HortScience, 35 (2): 300–303.

Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών, 2014. Εγχειρίδιο Υδροπονίας. Εκπαιδευτικό Κέντρο Υδροπονίας ΙΓΕ, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Αγροτικής Ανάπτυξης Κύπρου, Λευκωσία, 103 σελ.

Κίττας, Κ., 2002. *Υδροπονία και υδροπονικές καλλιέργειες*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, σελ. : 6-9.

Lindsay, W.L., and Norvell, W.A., 1978. *Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper*. Soil Science Society of America Journal, 42: 421-428.

Μαυρογιαννόπουλος, Γ.Ν., 2005. *Θερμοκήπια*. Πανεπιστημιακές σημειώσεις Γ.Π.Α., 719 σελ.

McLean, E.O., 1982. *Soil pH and lime requirement*. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds) Methods of Soil Analysis, Part 2, Agronomy Monograph 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 199-224.

Nejad, A.R., and Ismaili, A., 2014. *Changes in growth, essential oil yield and composition of geranium (Pelargonium graveolens L.) as affected by growing media*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 94 (5): 905–910.

Nelson, D.W., and Sommers, L.E., 1996. *Total carbon, organic carbon and organic matter*. In: D.L. Sparks et al. (eds) Methods of Soil Analysis, Part 3 - Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Series No. 5, pp. 961-1010.

Olsen, S.R., and Sommers, L.E., 1982. *Phosphorus*. In: A.L. Page et al. (eds) Methods of Soil Analysis, Part 2 – Chemical and Microbiological Properties, Agronomy 9 (2nd ed). Soil Science Society of America, Agronomy Society of America, Madison, WI, pp. 403-430.

Olympios, C.M., 1999. *Overview of soilless culture: advantages, constraints, and perspectives.* In: R. Choukr-Allah (ed) Protected cultivation in the Mediterranean region. Paris : CIHEAM / IAV Hassan II, p. 307-324 (Cahiers Options Méditerranéennes; n. 31).

Raviv, M., and Lieth, J.H., 2008. *Significance of soilless cultivation in agriculture*. In: M. Raviv, J.H. Lieth (eds) Soilless Culture: Theory and Practice. Academic Press, San Diego, USA, pp. 1–11.

Rhoades, J.D., 1996. *Salinity: Electrical conductivity and total dissolved salts*. In: D.L. Sparks et al. (eds) Methods of Soil Analysis, Part 3 - Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Series No. 5, pp. 417-436.

Savvas, D., 2002. *Nutrient solution recycling*. In: D. Savvas, H.C. Passsam (eds) Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 299–343.

Savvas, D., Gianquinto, G., Tuzel, Y., and Gruda, N., 2013. *Soilless culture. Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops, Principles for Mediterranean Climate Areas, 217*. FAO Plant Production and Protection Paper, pp. 303–354. http://www.fao.org/3/a-i3284e.pdf (accessed 15.02.16.).

Thomas, G.W., 1982. *Exchangeable cations*. In: A.L. Page et al. (eds) Methods of Soil Analysis, Part 2 – Chemical and Microbiological Properties, Agronomy 9 (2nd ed). Soil Science Society of America, Agronomy Society of America, Madison, WI, pp. 159-166.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΠΥΡΟΛΟΥΣΙΤΗ

Μ.Γ. Αληφραγκή[1]✉, Α.Κ. Παυλάτου-Βε[1] & Μ. Ορφανουδάκης[2]
[1] Α.Π.Θ., Γεωπονική Σχολή, 54124 Θεσσαλονίκη,
[2]Δ.Π.Θ., Τμήμα Δασολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, 68200, Ορεστιάδα
✉ maria_alif@hotmail.com

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της βλάστησης στις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες μίγματος κάλυψης λατομικού χώρου ασβεστόλιθου που αποτελείτο σε ποσοστό 70% από παραπροϊόντα πυρολουσίτη. Για το σκοπό αυτό στον υπό ανάπλαση χώρο φυτεύτηκαν τρία δασικά είδη: πεύκο, κυπαρίσσι και σπάρτο. 3,5 χρόνια μετά την φύτευση, η μικροβιακή βιομάζα, η αναπνοή, η δραστηριότητα των αλκαλικών και όξινων φωσφατασών και η συγκέντρωση Fe, Mn και Cu αυξήθηκαν στην περιοχή της ριζόσφαιρας των φυτών. Αντίθετα, το pH (H_2O), pH ($CaCl_2$) και η συγκέντρωση διαθέσιμου P μειώθηκαν σημαντικά, ενώ ιδιότητες όπως η σταθερότητα συσσωματωμάτων και η συγκέντρωση νιτρικού και αμμωνιακού N δεν παρουσίασαν σημαντική μεταβολή με το χρόνο. Τέλος, στην ριζόσφαιρα του κυπαρισσιού οι τιμές κάποιων ιδιοτήτων (βασική και συνολική αναπνοή: 112,80 μg CO_2-C g^{-1} d^{-1} και 679,40 Σμg CO_2-C g^{-1} αντίστοιχα, C_{org}: 0,77%, P: 19,48 mg/kg) ήταν στατιστικώς σημαντικά μεγαλύτερες, σε σχέση με των άλλων δύο ειδών.

Λέξεις κλειδιά: φυτοαποκατάσταση, οξείδια Mn, ιδιότητες υποστρώματος

EFFECT OF VEGETATION ON PROPERTIES OF PYROLUSITE'S BY-PRODUCTS SUBSTRATE

M.G. Alifragki[1] ✉, A.K. Pavlatou-Ve[1] and M Orfanoudakis [2]
[1]Laboratory of Soil Science, School of Agriculture, A.U.Th., 54124 Thessaloniki, Greece
[2]Department of Forestry and Management of the Environment and Natural Resources, D.U.Th., Orestiada, Greece,
✉ *maria_alif@hotmail.com*

ABSTRACT

In this study, the effect of vegetation on the physical, chemical and biological properties of a limestone quarry cover mix, consisting of 70% pyrolusite's by-products, was investigated. In the experimental area we planted three forest species: pine, cypress and broom. 3,5 years after planting, microbial biomass, respiration activity, alkaline and acid phosphatase activities and Fe, Mn and Cu concentrations increased in the plant rhizosphere. Contrary to that, values of pH (H_2O) and pH ($CaCl_2$) and of available P decreased significantly. Aggregate stability and nitrate and ammonium concentrations did not change significantly over time. Finally, the values of some properties (basic and total respiration: 112.80 μg CO_2-C g^{-1} d^{-1} and 679.40 Σμg CO_2-C g^{-1} respectively; C_{org}: 0.77%; P: 19.48 mg/kg) in the rhizosphere of cypress were significantly higher compared to those in the other two species.

Keywords: phytoremediation, Mn oxides, substrate properties

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υποβάθμιση των εδαφών είναι αναπόφευκτη συνέπεια της εξόρυξης και η εκ νέου βλάστηση των περιοχών που έχουν διαταραχθεί είναι συχνά δύσκολη. Ένας βασικός παράγοντας της υποβάθμισης είναι η απώλεια της φυτικής κάλυψης που οδηγεί σε αύξηση της διάβρωσης (Sinha κ.ά., 2009). Η παρουσία βλάστησης είναι σημαντική, δεδομένου ότι παρέχει φυσική προστασία και συμβάλει στην περιεκτικότητα του εδάφους (ή άλλου υποστρώματος) σε οργανική ουσία, που ενισχύει την ικανότητα συγκράτησης του νερού και τη γονιμότητά του (Garcia κ.ά., 1994). Δεδομένου ότι σε περιοχές όπου έχει γίνει εξόρυξη η πρόοδος των φυσικών διεργασιών βλάστησης είναι αργή, τις περισσότερες φορές είναι επιθυμητή η φύτευση κατάλληλων γηγενών ειδών που να έχουν την ικανότητα να συντηρηθούν μόνα τους μετά την αρχική περίοδο εγκατάστασης (3-4 χρόνια) (Singh, 2004).

Η ανάπτυξη μικροβιακής δραστηριότητας στη ριζόσφαιρα των δενδρωδών ειδών είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στην επιβίωση και ανάπτυξη αυτών (Sinha κ.ά., 2009). Οι μικροοργανισμοί του εδάφους διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στην ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων και στην ανάπτυξη της βλάστησης. Η μικροβιακή βιομάζα, η έκλυση CO_2-C από τη βασική (π.χ. Susyan κ.ά., 2011) και τη συνολική (π.χ. Garcia κ.ά., 1994, Fereidooni κ.ά., 2013) αναπνοή και η ενζυμική δραστηριότητα (Hinojosa κ.ά., 2004) έχουν χρησιμοποιηθεί ως βιολογικοί δείκτες, σε μελέτες αποκατάστασης.

Από τις πρώτες μελέτες αποκατάστασης είναι γνωστή η αύξηση της μικροβιακής βιομάζας με το πέρασμα του χρόνου, η οποία αποδίδεται στην επίδραση της ριζόσφαιρας (de Mora κ.ά., 2005). Ομοίως, η έκλυση CO_2-C μέσω της αναπνοής (π.χ. Graham & Haynes, 2004, Maharana & Patel, 2013) και η δραστηριότητα των φωσφατασών (Izquierdo κ.ά., 2005, Baldrian κ.ά., 2008) αυξάνεται με το χρόνο, ακολουθώντας την ανάπτυξη των φυτών (Garcia κ.ά., 1994, Niemeyer κ.ά., 2012, Haripal & Sahoo, 2014).

Οι Garcia κ.ά. (2005) ανέφεραν ότι η ριζόσφαιρα είναι μια ζώνη ενισχυμένης μικροβιακής δραστηριότητας λόγω των ριζικών εκκρίσεων, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα από τους μικροοργανισμούς, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό τους στην περιοχή αυτή. Ωστόσο, η φύση και η ποσότητα των ριζικών εκκρίσεων επηρεάζονται από την ηλικία και το είδος του φυτού, αλλά και από εδαφικούς και κλιματικούς παράγοντες (Pandey & Palni, 2007). Συνεπώς, τα είδη των μικροοργανισμών που βρίσκονται στη ριζόσφαιρα και η δραστηριότητά τους εξαρτάται από το είδος και την ηλικία του φυτού και τον τύπο του υποστρώματος (Garcia κ.ά., 2005, Sinha κ.ά., 2009).

Τέλος, η φυτοαποκατάσταση μεταβάλει εκτός από τις βιολογικές και κάποιες φυσικές και χημικές ιδιότητες (π.χ. σταθερότητα των συσσωματωμάτων στη διαβροχή, pH, C_{org}, P, N) του υποστρώματος, ανάλογα με τις συνθήκες αυτού και τα χαρακτηριστικά της βλάστησης που εγκαθίσταται (Garcia κ.ά., 2005, Sinha κ.ά., 2009).

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να μελετηθεί η επίδραση της βλάστησης στις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του μίγματος κάλυψης ενός λατομικού χώρου 3,5 χρόνια μετά την εγκατάσταση της βλάστησης.

2. ΥΛΙΚΑ – ΜΕΘΟΔΟΙ

Η πειραματική επιφάνεια αποτελεί μέρος λατομείου ασβεστόλιθου, στην Βόρειο Ελλάδα (40ο44΄96.21¨Β και 23ο04΄13.34¨Α). Το μίγμα κάλυψη του λατομικού χώρου αποτελείτο από 70% παραπροϊόντα ηλεκτρολυτικής επεξεργασίας πυρολουσίτη (MnO_2), 10% άμμο (για την βελτίωση των συνθηκών αερισμού του μίγματος), 10% έδαφος (για τον εφοδιασμό με τους απαραίτητους μικροοργανισμούς), και 10% ρυζοφλοιό (για την αύξηση της οργανικής ουσίας και τη βελτίωση της βιολογικής δραστηριότητας του μίγματος).

Ο υπό μελέτη χώρος χωρίσθηκε σε 6 ίσα τετράγωνα όπου με τυχαία επιλογή φυτεύτηκαν 3 δασικά φυτικά είδη σε δύο επαναλήψεις. Τα είδη φυτικά είδη ήταν: πεύκο (*Pinus brutia*), κυπαρίσσι (*Cupressus sempervirens*) και σπάρτο (*Spartium junceum*). Η εγκατάσταση του πειράματος (κάλυψη λατομικού χώρου και εγκατάσταση βλάστησης) έγινε τον Απρίλιο του 2011, περίοδο που χρησιμοποιείται ως Μάρτυρας. 3,5 χρόνια αργότερα, το φθινόπωρο του 2014, έγινε δειγματοληψία μίγματος κάλυψης από την περιοχή της ριζόσφαιρας των παραπάνω φυτών.

Μέρος κάθε δείγματος μίγματος κάλυψης παρέμεινε υγρό, διατηρήθηκε σε ψύξη και σε αυτό προσδιορίστηκε το ποσοστό (%) υγρασίας (Αλεξιάδης, 1977), η μικροβιακή βιομάζα (C_{mic}) (Rowell, 1994) και η δραστηριότητα των όξινων και αλκαλικών φωσφατασών σε δείγματα μίγματος που διατηρούσαν την υγρασία τους (συνθήκες αγρού) [όξινες, pH=6,5 (ΦΟ) και αλκαλικές pH=11 (ΦΑ), Tabatabai, 1994].

Το άλλο μέρος των δειγμάτων του μίγματος αεροξηράνθηκε και κοσκινίστηκε με κόσκινα 2mm (ή 10 mesh). Εκεί προσδιορίσθηκαν: το pH ηλεκτομετρικώς σε αιώρημα υλικού 1:2,5 H_2O και 1:2,5 $CaCl_2$ (McLean, 1982), το ποσοστό (%) του οργανικού άνθρακα (C_{org}) με τη μέθοδο της υγρής οξείδωσης (Nelson & Sommers, 1982), το ποσό του διαθέσιμου P (Olsen & Sommers 1982), η συγκέντρωση νιτρικού ($N\text{-}NO^-_3$) και αμμωνιακού ($N\text{-}NH_4$) αζώτου σε εκχύλισμα εδάφους με διάλυμα 1 M KCl (Norman κ.ά., 1985, Nelson, 1983, αντίστοιχα), η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (Thomas, 1982), τα ιχνοστοιχεία Mn, Fe και Cu με τη μέθοδο DTPA pH 7,3 (Lindsay & Norvell,1978), η σταθερότητα των συσσωματωμάτων (1-2 mm) στη διαβροχή (ΣΣ) (Kemper & Rosenau, 1986) και η έκλυση CO_2-C από τη βασική (24 ώρες) και τη συνολική (15 ημέρες) αναπνοή (Rowell, 1994). Όλες οι αναλύσεις του μίγματος υποστρώματος έγιναν σε 3 επαναλήψεις.

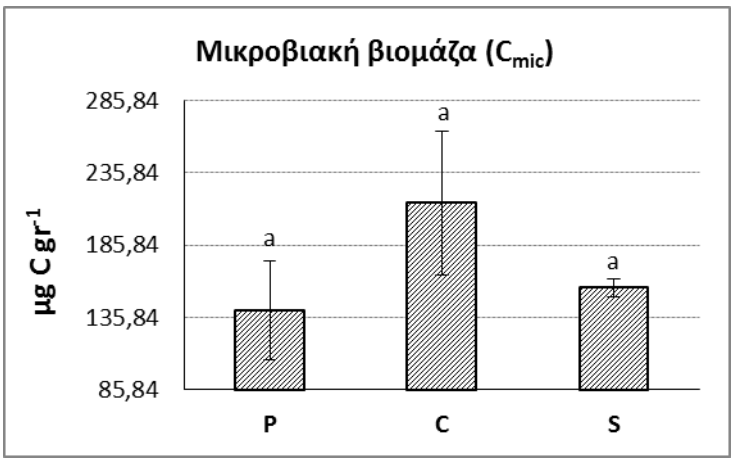
Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων έγινε με ανάλυση παραλλακτικότητας κατά ένα παράγοντα (ANOVA), με χρήση του προγράμματος Statgraphics. Ο έλεγχος των σημαντικών διαφορών έγινε με τη δοκιμασία της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς (LSD-test), για επίπεδο σημαντικότητας 95% ($p<0,05$).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

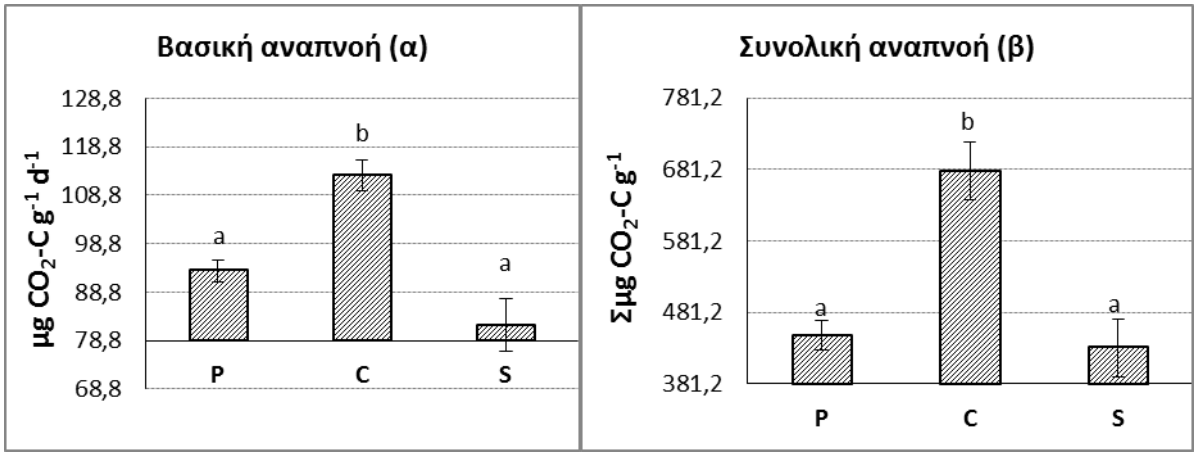
Η μικροβιακή βιομάζα (C_{mic}) του μίγματος κάλυψης του λατομικού χώρου στην αρχή του πειράματος (Μάρτυρας) ήταν 85,84 (±11,29) μg C g^{-1} και 3,5 χρόνια (φθινόπωρο 2014) αργότερα κυμάνθηκε από 140,33 (±34,10) (πεύκο) έως 214,94 (±49,94) μg C g^{-1} (κυπαρίσσι). Στο Σχήμα 1 φαίνεται η μεταβολή της μικροβιακής βιομάζας στην περιοχή της ριζόσφαιρας των τριών φυτικών ειδών 3,5 χρόνια μετά την εγκατάσταση βλάστησης, σε σχέση με του Μάρτυρα (σημείο τομείς των αξόνων). Η μικροβιακή βιομάζα δηλαδή στην περιοχή της ριζόσφαιρας των τριών φυτικών το φθινόπωρο του 2014 αυξήθηκε σε σχέση με του Μάρτυρα σε όλες τις φυτικές μεταχειρίσεις. Μεταξύ αυτών δεν διαπιστώθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές το φθινόπωρο του 2014 (Σχήμα 1).

Η έκλυση CO_2-C από τη βασική και την συνολική αναπνοή του Μάρτυρα (σημείο τομείς των αξόνων) ήταν 78,80 (±9,02) μg CO_2-C g^{-1} d^{-1} και 381,20 (±35,61) Σμg CO_2-C g^{-1}, αντίστοιχα (Σχήμα 2). Ομοίως με τη μικροβιακή βιομάζα, η έκλυση CO_2-C από τη βασική και την συνολική αναπνοή του μίγματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας και των τριών φυτικών ειδών το φθινόπωρο του 2014 αυξήθηκε σε σχέση με του Μάρτυρα (Σχήμα 2). Μεταξύ των φυτικών ειδών διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές. Δηλαδή, το φθινόπωρο του 2014 η έκλυση CO_2-C από τη βασική και συνολική αναπνοή στην περιοχή της ριζόσφαιρας του κυπαρισσιού [112,80 (±3,20) μg CO_2-C g^{-1} d^{-1} και 679,40 (±40,77) Σμg CO_2-C g^{-1}, αντίστοιχα] ήταν σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με του πεύκου [93,20 (±2,21) μg CO_2-C g^{-1} d^{-1} και

448,80 (±20,36) Σμg CO_2-C g^{-1}, αντίστοιχα] και του σπάρτου [82,00 (±5,32) μg CO_2-C g^{-1} d^{-1} και 432,10 (±40,29) Σμg CO_2-C g^{-1}, αντίστοιχα] (Σχήμα 2).



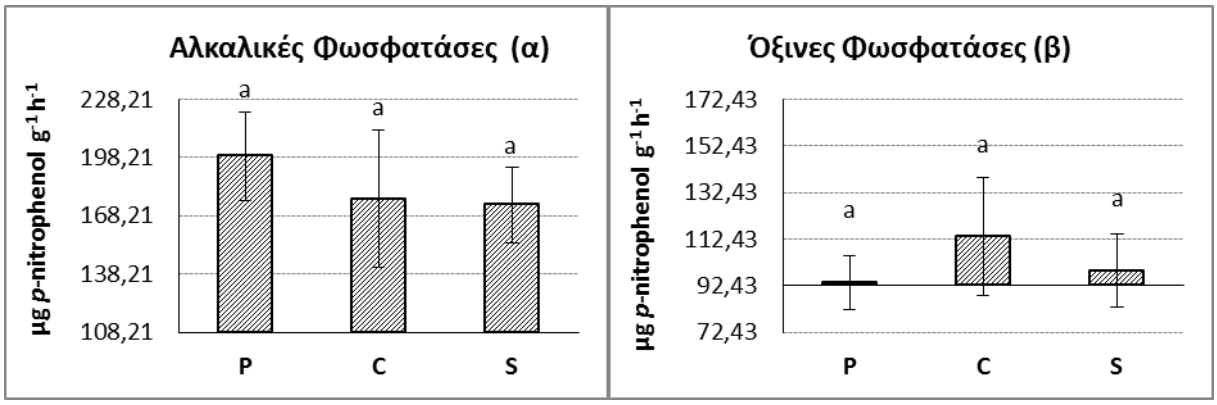
Σχήμα 1. Μεταβολή της μικροβιακής βιομάζας (C_{mic}) του μίγματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας των *Pinus brutia* (P), *Cupressus sempervirens* (C), και *Spartium junceum* (S), το φθινόπωρο του 2014, σε σχέση με το Μάρτυρα (άνοιξη 2011). Οι μπάρες δείχνουν το τυπικό σφάλμα και φυτικές μεταχειρίσεις με το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους, σε επίπεδο σημαντικότητας P <0,05.



Σχήμα 2. Μεταβολή της έκλυσης CO_2-C από τη βασική (α) και συνολική (β) αναπνοή του μίγματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας των *Pinus brutia* (P), *Cupressus sempervirens* (C), και *Spartium junceum* (S), το φθινόπωρο του 2014, σε σχέση με το Μάρτυρα (άνοιξη 2011). Οι μπάρες δείχνουν το τυπικό σφάλμα και φυτικές μεταχειρίσεις με το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους, σε επίπεδο σημαντικότητας P <0,05.

Η δραστηριότητα των αλκαλικών και όξινων φωσφατασών του Μάρτυρα ήταν 108,21 (±8,19) και 92,43 (±10,20) μg *p*-nitrophenol g^{-1} h^{-1}, αντίστοιχα (σημείο τομείς των αξόνων) (Σχήμα 3). 3,5 χρόνια αργότερα η δραστηριότητα των ενζύμων αυξήθηκε σε σχέση με του Μάρτυρα σε όλες τις περιπτώσεις (Σχήμα 3). Το φθινόπωρο του 2014 η δραστηριότητα των αλκαλικών φωσφατασών του μίγματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας κυμάνθηκε από 173,88 (±19,46) (σπάρτο) έως 198,92 (±22,68) μg *p*-nitrophenol g^{-1} h^{-1} (πεύκο), ενώ των όξινων φωσφατασών κυμάνθηκε από 93,75 (±11,51) (πεύκο) έως 113,62 (±25,25) μg *p*-nitrophenol g^{-1} h^{-1} (κυπαρίσσι) και δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ των φυτικών μεταχειρίσεων (Σχήμα 3).

Η αύξηση της μικροβιακής βιομάζας, της έκλυσης CO_2-C από τη βασική και την συνολική αναπνοή, της δραστηριότητας των αλκαλικών και όξινων φωσφατασών με το πέρασμα του χρόνου και την ανάπτυξη της βλάστησης έχει αναφερθεί και σε άλλες μελέτες (Graham & Haynes, 2004, de Mora κ.ά., 2005, Baldrian κ.ά., 2008, Maharana & Patel, 2013).



Σχήμα 3. Μεταβολή της δραστηριότητας αλκαλικών (α) και όξινων (β) φωσφατασών του μίγματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας των *Pinus brutia* (P), *Cupressus sempervirens* (C), και *Spartium junceum* (S), το φθινόπωρο του 2014, σε σχέση με το Μάρτυρα (άνοιξη 2011). Οι μπάρες δείχνουν το τυπικό σφάλμα και φυτικές μεταχειρίσεις με το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους, σε επίπεδο σημαντικότητας P <0,05.

Πίνακας 1. Μέσοι όροι (± τυπικό σφάλμα) pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), ποσοστού οργανικού C (C_{org}), σταθερότητας των συσσωματωμάτων (ΣΣ) στη διαβροχή, Ι.Α.Κ., συγκεντρώσεων του διαθέσιμου P, νιτρικού ($N\text{-}NO^-_3$) και αμμωνιακού ($N\text{-}NH^+_4$) αζώτου, διαθέσιμου Mn, Fe και Cu (DTPA) του Μάρτυρα και του μίγματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας των *Pinus brutia*, *Cupressus sempervirens*, και *Spartium junceum*, το φθινόπωρο του 2014.

		Άνοιξη 2011	**Φθινόπωρο 2014**		
		Μάρτυρας	***P. brutia***	***C. sempervirens***	***S. junceum***
pH (H_2O)		8,14 (±0,02) b*	7,67 (±0,02) a	7,68 (±0,00) a	7,69 (±0,01) a
pH ($CaCl_2$)		8,02 (±0,03) b	7,63 (±0,01) a	7,62 (±0,01) a	7,61 (±0,01) a
ΣΣ	%	85,47 (±0,20) a	85,23 (±0,74) a	83,59 (±0,74) a	85,09 (±0,95) a
C_{org}	%	0,68 (±0,03) b	0,47 (±0,04) a	0,77 (±0,08) b	0,44 (±0,05) a
Ι.Α.Κ.	$cmol_c$/kg	75,93 (±4,76) b	65,95 (±2,64) b	74,42 (±5,24) b	54,30 (±2,14) a
P	mg/kg	21,46 (±0,88) c	16,30 (±0,41) a	19,49 (±0,41) b	15,60 (±0,62) a
$N\text{-}NO^-_3$	mg/kg	5,96 (±0,16) ab	3,73 (±0,33) a	5,83 (±0,52) b	5,06 (±1,01) ab
$N\text{-}NH^+_4$	mg/kg	14,40 (±1,03) a	14,58 (±0,47) a	16,02 (±0,58) a	14,61 (±0,67) a
Fe	mg/kg	39,46 (±0,65) a	47,73 (±0,65) b	51,24 (±1,80) c	48,13 (±0,70) bc
Mn	mg/kg	40,85 (±1,06) a	53,52 (±1,86) b	59,27 (±1,52) c	54,64 (±2,25) bc
Cu	mg/kg	4,31 (±0,03) a	5,47 (±0,15) bc	5,91 (±0,26) c	5,10 (±0,13) b

*Τιμές στην ίδια γραμμή με το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικών σημαντικά, σε επίπεδο σημαντικότητας P <0,05.

Το pH (H_2O) και το pH ($CaCl_2$) το φθινόπωρο του 2014 δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ των τριών φυτικών μεταχειρίσεων. Οι τιμές του pH (H_2O) ήταν από 7,67 (±0,02) (πεύκο) έως 7,69 (±0,01) (σπάρτο) και του pH ($CaCl_2$) από 7,61 (±0,01) (σπάρτο) έως 7,63 (±0,01) (πεύκο) και μειώθηκαν σημαντικά σε σχέση με του Μάρτυρα [8,14 (±0,02) και 8,02 (±0,03), αντίστοιχα] (Πίνακας 1). Η μείωση αυτή είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης των φυτών που μέσω των

ριζικών εκκρίσεων μεταβάλλεται το pH στην περιοχή της ριζόσφαιρας (Pandey & Palni, 2007).

Σημαντική ήταν η μείωση και της συγκέντρωσης διαθέσιμου P στην περιοχή της ριζόσφαιρας των φυτικών ειδών, σε σχέση με του Μάρτυρα [21,46 (±0,88) mg/kg] (Πίνακας 1). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η συγκέντρωση διαθέσιμου P στην περιοχή της ριζόσφαιρας του κυπαρισσιού [19,49 (±0,41) mg/kg] ήταν στατιστικώς σημαντικά μεγαλύτερη από του πεύκου [16,30 (±0,41) mg/kg] και του σπάρτου [15,60 (±0,62) mg/kg].

Ιδιότητες όπως το ποσοστό σταθερότητας συσσωματωμάτων στη διαβροχή (ΣΣ) και η συγκέντρωση νιτρικού ($N\text{-}NO^-_3$) και αμμωνιακού ($N\text{-}NH^+_4$) αζώτου δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά με το χρόνο (Πίνακας 1). Μεταξύ των φυτικών μεταχειρίσεων διαπιστώθηκε ότι το φθινόπωρο του 2014, μόνο η συγκέντρωση νιτρικού ($N\text{-}NO^-_3$) αζώτου στην περιοχή της ριζόσφαιρας του κυπαρισσιού [5,83 (±0,52) mg/kg] διέφερε στατιστικώς σημαντικά από του πεύκου [3,73 (±0,33) mg/kg].

Το ποσοστό του οργανικού C (C_{org}) στην περιοχή της ριζόσφαιρας του πεύκου [0,47 (±0,04) %] και του σπάρτου [0,44 (±0,05) %] το φθινόπωρο του 2014 ήταν στατιστικώς σημαντικά μικρότερο από του Μάρτυρα [0,68 (±0,03) %]. Επίσης, το ποσοστό C_{org} στην περιοχή στη ριζόσφαιρας του κυπαρισσιού [0,77 (±0,08) %] δεν διέφερε από του Μάρτυρα και ήταν στατιστικώς σημαντικά μεγαλύτερο από του πεύκου και του σπάρτου (Πίνακας 1).

Η Ι.Α.Κ. στην περιοχή της ριζόσφαιρας του σπάρτου [54,30 (±2,14) $cmol_c/kg$] ήταν σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με αυτήν της περιοχής ριζόσφαιρας του πεύκου [65,95 (±2,64) $cmol_c/kg$] και του κυπαρισσιού [74,42 (±5,24) $cmol_c/kg$], αλλά και του Μάρτυρα [75,93 (±4,76) $cmol_c/kg$], οι οποίες δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας 1).

Τέλος, οι τιμές των συγκεντρώσεων διαθέσιμου Fe, Mn και Cu (DTPA) του Μάρτυρα [39,46 (±0,65), 40,85 (±1,06) και 4,31 (±0,03) mg/kg, αντίστοιχα] ήταν σημαντικά μικρότερες από αυτές που προσδιορίσθηκαν 3,5 χρόνια αργότερα (Πίνακας 1). Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων διαθέσιμου Fe και Mn στην περιοχή της ριζόσφαιρας του κυπαρισσιού [51,24 (±1,80) και 59,27 (±1,52) mg/kg, αντίστοιχα] ήταν στατιστικώς σημαντικά μεγαλύτερες από του πεύκου [47,73 (±0,65) και 53,52 (±1,86) mg/kg, αντίστοιχα]. Η μέση συγκέντρωση διαθέσιμου Cu στην περιοχή της ριζόσφαιρας του κυπαρισσιού [5,91 (±0,26) mg/kg] ήταν στατιστικώς σημαντικά μεγαλύτερη από του σπάρτου [5,10 (±0,13) mg/kg].

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με το πέρασμα του χρόνου και την ανάπτυξη της βλάστησης αυξήθηκε η μικροβιακή δραστηριότητα του μίγμα που αποτελείτο από παραπροϊόντα πυρολουσίτη και χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη λατομικού χώρου. Η παρουσία βλάστησης μετέβαλλε κάποιες χημικές ιδιότητες του μίγματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας των φυτών. Τέλος, οι διαφορές μεταξύ των φυτικών μεταχειρίσεων που παρουσίασαν κάποιες από τις ιδιότητες που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, δείχνουν ότι κάθε είδος δημιουργεί διαφορετική ριζόσφαιρα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αλεξιάδης, Κ., 1977. *Φυσική και Χημική Ανάλυση του Εδάφους*, Θεσσαλονίκη.

Baldrian P., Trögl J, Frouz J., Šnajdr J., Valášková V., Merhautová V., Cajthaml T., and Herinková J., 2008. *Enzyme activities and microbial biomass in topsoil layer during spontaneous succession in spoil heaps after brown coal mining*. Soil Biology & Biochemistry, 40:2107-2115.

de Mora A.P., Ortega – Calvo J.J., Cabrera F., and Medejón E., 2005. *Changes in enzyme activities and microbial biomass after "in situ" remediation of a heavy metal – contaminates soil*. Applied Soil Ecology, 28:125-137.

Fereidooni M., Raiesi F., and Fallah S., 2013. *Ecological restoration of soil respiration, microbial biomass and enzyme activity through broiles litter application in a calcareous soil cropped with silage maize*. Ecological Engineering, 58: 266-277.

Garcia C., Hernandez T., and Costa F., 1994. *Microbial activity in soils under Mediterranean environmental conditions*. Soil Biology & Biochemistry, 26: 1185– 1191.

Garcia C., Roldan A., and Hernandez T., 2005. *Ability of different plant species to promote microbiological processes in semiarid soil*. Geoderma, 124:193–202.

Graham M.H., and Haynes R.J., 2004. *Organic matter status and the size, activity and metabolic diversity of the soil microflora as indicators of the success of rehabilitation of sand dunes.* Biology & Fertility of Soils, 39: 429-437.

Haripal K., and Sahoo S., 2014. *Microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus dynamics along a chronosequence of abandoned tropical agroecosystems*. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 3: 956-970.

Hinojosa M.B., Carreira J.A., García-Ruíz R., and Dick R.P., 2004. *Soil moisture pre-treatment effects on enzyme activities as indicators of heavy metal-contaminated and reclaimed soils*. Soil Biology & Biochemistry, 36: 1559-1568.

Izquierdo I., Caravaca F., Alguacil M.M., Hernandez G., and Roldan A., 2005. *Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions*. Applied Soil Ecology, 30: 3–10.

Kemper W.D., and Rosenau R.C., 1986. *Aggregate stability and size distribution*. In: A. Klute (ed) Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA, pp. 425-442.

Lindsay W.L., and Norvell W.A., 1978. *Development of DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper*. Soil Science Society of America Journal, 42: 421-428.

Maharana J.K., and Patel A.K., 2013. *Microbial biomass, microbial respiration and organic carbon indicates nutrient cycling in a chronosequence coal mine overburden spoil*. International Journal of Environmental Science, 4: 171-184.

McLean E.O., 1982. *Soil pH and lime requirement*. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, (eds) Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbial Properties. Agronomy. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison Wisconsin USA, pp. 199-224.

Nelson, D.W. and Sommers, L.E., 1982. *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds) Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbial Properties. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA, pp. 565-573.

Nelson D.W., 1983. *Determination of ammonium in KCl extracts of soils by the salicylate method.* Communications in Soil Science and Plant Analysis, 14: 1051-1062.

Niemeyer J.C., Lolata G.B., De Carvalho G.M., Da Silva E.M., Sousa J.P., and Nogueira M.A., 2012. *Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil*. Applied Soil Ecology, 59: 96-105.

Norman R.J., Edberg J.C., and Stucki J.W., 1985. *Determination of nitrate in soil extracts by dual-wavelength ultraviolet spectrophotometry*. Soil Science Society of America Journal, 49:1182-1185.

Pandey, S., and Palni, L.M.S., 2007. *The rhizosphere effect in trees of the Indian Central Himalaya with special reference to altitude*. Applied Ecology and Environmental Research, 5: 93–102.

Pascual J.A., Garcia C., Hernandez T., Moreno J.L., and Ros M., 2000. *Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remendiation processes*. Soil Biology & Biochemistry, 32: 1877-1883.

Olsen S.R., and Sommers L.E., 1982. *Phosphorus*. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, (eds) Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbial Properties). Agronomy. American Society of Agronomy, Soil Science of America, Madison Wisconsin USA, pp. 403-407.

Rowell, D.L., 1994. *Soil Science: Methods and Applications.* Longman Group UK, Limited, Harlow, UK.

Singh S., 2004. *Biological reclamation of degraded mined land. A sustainability indicator*. Archives of Environmental News, Newsletter of ISEB, vol. 10, no. 1, India.

Sinha S., Masto R.E., Ram L.C., Selvi V.A., Srivastava N.K., Tripathi R.C., and George J., 2009. *Rhizosphere soil microbial index of tree species in an coal mining ecosystem*. Soil Biology & Biochemistry, 41: 1824-1832.

Susyan E.A., Wirth S., Ananyeva N.D., and Stolnikova E.V., 2011. *Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ration, and basal CO_2 respiration activity*. European Journal of Soil Biology, 47: 169-174.

Tabatabai M.A., 1994. *Soil enzymes*. In: R.W. Weaver, J.S. Angle and P.S. Bottomley (eds), Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. SSSA Book Series, No 5. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA, pp. 775-859.

Thomas G.W., 1982. *Exchangeable cations*. In: A.L. Page (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, 2nd edition. Agronomy Monograph. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, Wisconsin USA, pp. 159-164.

ΧΟΥΜΟΣ : Η λύση παγκοσμίως για τη βελτίωση και εξυγίανση των καλλιεργούμενων εδαφών για υψηλότερες καλλιεργητικές αποδόσεις, με οικολογικά ισορροπημένες γεωργικές πρακτικές.

Daman S. Walia[1], Κωνσταντίνος Σαμαντούρος[2]✉
[1]Πρόεδρος της ARCTECH Inc. ΗΠΑ
[2]Γεωπόνος MSc.-Αντιπρόεδρος Ε.Γ.Μ.Ε., Αθήνα
✉agrekae@gmail.com

Περίληψη

Τελευταία, η βιολογική γεωργία αναπτύσσεται λόγω της αυξημένης ζήτησης για ασφαλέστερα τρόφιμα και οι κυβερνητικές πολιτικές σχεδόν σε παγκόσμιο επίπεδο επιδιώκουν να ρυθμίσουν τις εισροές. Έτσι, σήμερα, οι αγρότες καλούνται να αυξήσουν τις αποδόσεις, μειώνοντας τις εισροές, διατηρώντας παράλληλα την οικονομική βιωσιμότητα των αγροτικών περιοχών, που αντιμετωπίζουν όλο και περισσότερα προβλήματα λόγω της κλιματικής αλλαγής και τη χρήση εδαφών φτωχών. Βασισμένοι στην αρχαία ελληνική γνώση των πλεονεκτημάτων του χούμου (humus) και της προόδου της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας, η παγκόσμια χρήση βιολογικών χουμικών προϊόντων αποδεικνύεται μια οικονομικά βιώσιμη λύση σε αυτό το σύγχρονο γεωργικό πρόβλημα. Τα προϊόντα αυτά προέρχονται από μια ποικιλία φυσικών οργανικών υλών και κάρβουνο προσφέρουν την πλουσιότερη πηγή καθώς και την πιο οικονομική. Τα βιολογικά χουμικά προϊόντα, συνηθέστερα αποτελούμενα από χουμικά και φουλβικά οξέα, είναι τα ενεργά συστατικά του χούμου, παρέχουν πολλαπλά βιολογικά, χημικά και φυσικά οφέλη λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών τους, οδηγώντας σε υψηλότερες αποδόσεις και κέρδη με την παροχή αποτελεσματικής διατροφής, σταδιακής βελτίωσης της ποιότητας του εδάφους, με αποτέλεσμα να προκύπτουν υγιέστερα φυτά. Η εργασία αυτή θα παρουσιάσει έρευνες σχετικά με τη χρήση βιολογικών χουμικοφουλβικών προϊόντων σε διάφορες παγκόσμιες καλλιέργειες στις οποίες οι εισροές μειώθηκαν κατά 20-25% ενώ και η απόδοση τους αυξήθηκε από 10-30% , ενώ ταυτόχρονα είχαν αυξημένη ανοχή στην αλατότητα και τις ξηρές συνθήκες.

INTRODUCTION

The UNFAO reported that global food production is being undermined by land degradation, loss of humus organic matter, shortages of farmland and water resources, making feeding the world's rising population – projected to reach nine billion by 2050 – a daunting challenge (Figure 1, [1]). In 2000 the UNFAO reported almost 25 billion tons of soil loss worldwide, six billion in US and made a case for the critical need to enhance soil fertility in order to feed world's growing population. In December 5, 2014 and at a forum marking World Soil Day, Maria-Helena Semedo, deputy director general of natural resources of the Food and Agriculture Organization said that about a third of the world's soil has already been degraded. Ms. Semedo also warned that if current rates of soil degradation continue all of the world's top soil could be gone within 60 years. This is of great ecological concern as

Figure 1. Land Degradation, UNFAO

one inch of topsoil can take 500 years to form naturally [2].

To meet these challenges, recently, the 68th UN General Assembly declared 2015 the International Year (IYS) of Soils. The United Nations Food and Agriculture Organization has been nominated to implement IYS, within the framework of the Global Soil Partnership and in collaboration with Governments and the secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification.

Approaches such as no-till farming and cover crops act as barriers against soil erosion and provide remedies for environmental protection and soil conservation. Cover crops can improve the soil by adding organic matter, nutrients, and stability and by acting as scavengers to trap leftover nutrients that otherwise might leach out. However, cover crops can interfere with growth of primary crops before emergence of the main crop. Commonly used methods to suppress main crop interference such as tillage, mowing, herbicides, or winter-kill species selection have a short life cycle [3] and increase the cost of crop production. The addition of animal manure or compost as soil amendments increases organic matter results in the spread of diseases to plants and humans, as well as increased emergence of weeds. The use of sewage sludge etc. requires caution to decrease the run off of unacceptable levels of toxic metals. Several other farm wastes and organic materials are used as soil amendment for disposal purposes.

Conservation and environmental impacts are directly related to soil health and protection of land degradation. Soil health is referred to as soil quality that is the ability of a specific soil to function, within natural or managed ecosystem boundaries, to maintain plant and animal productivity, enhance water and air quality. Soil does all of these activities through five essential functions [4]:

1.Regulating water 2.Sustaining plant and animal life 3.Filtering potential pollutants 4.Cycling nutrients 5.Supporting structures

The inherent and dynamic soil properties are indicators of the quality of soil. Inherent soil properties form over thousands of years and change very little [4 and 5]. Inherent soil properties result mainly from the soil forming factors including climate, topography, parent material, biota and time. Soil texture, type of clay, depth to bedrock, and drainage class are examples of inherent soil properties. Dynamic soil properties are affected by natural disturbances and human management over a single year or growing season.

The average content of the soil organic matter in fertile soils is 6% and about 35 - 55% of the non-living part of organic matter is humus [6]. Schulten and Schnitzer reported that soil organic matter contains humic acid plus carbohydrates plus proteins. They indicated that soil containing 3% organic matter has 2.5% humic acid plus 0.25% carbohydrates plus 0.25% proteins [7]. Research on radiocarbon dating [8] proves that organic matter comprises of two main components. A short lived, labile component is an energy source for soil microbes [9] from plant residues. The second component (≥400 year old) namely humic substances is protected from microbial degradation. The 14C data confirms that humic substances are long lived and represent the baseline of organic matter in soil [5]. A recent study on 24 agriculture top soil samples from 24 counties in Southern Idaho indicated that samples contain 0.31 to 9.8 % humic acid with a grand average of 1.9 ± 1.1% av. deviation (55 samples). Excluding the samples with an average of 9.8% humic acid, the average for the rest 53 samples drops to 1.6 ± 0.8% [10].

The soil conservation and environmental programs under Natural Resources Conservation Service , Agricultural Research Service (ARS) are leading efforts to improve nation's natural resources and save many soils by encouraging best management practices through

multipronged approaches, including use of amendments to improve the soil health. However, despite the NRCS efforts, 1.8 billion tons of soil is still lost from cropland, and 120 million acres of cropland are eroding at a rate greater than tolerable soil loss rates (Figure 2, [9]).

Organic matter consists of plant and animal material and when it has fully decomposed it is called humus. Humus is important for soil structure because it holds individual mineral particles together in aggregates. Soil aggregates allow water to drain through it, and allow oxygen and carbon dioxide to move freely between spaces within the soil and the air above. Humus is also considered as nutrient bank and it helps soil hold important plant nutrients and improves the ability of the sandy soil to retain water. There are several ways to increase the amount of humus including the addition of (a). Compost (decomposed organic material);(b).Plant and animal material and waste; (c).Green manure. Humus content of the above mentioned soil amendments is low and is not readily available.

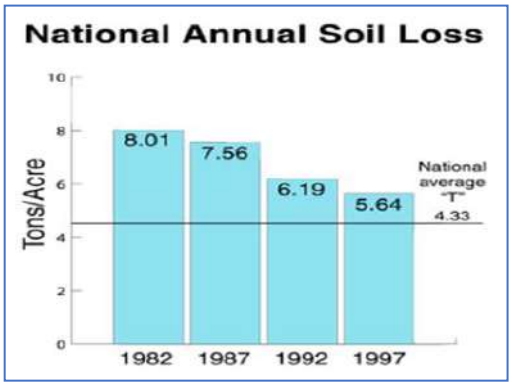


Figure2. National Annual Soil Loss

Humus is a relatively stable component formed by humic substances, including humic acids, fulvic acids, and humins [11]. The humic substances in soil are the fourth largest storehouse of carbon in our planet after sedimentary rocks, fossil fuels, and oceans [12]. One of the most striking characteristics of humic substances is their ability to interact with nutrient ions, hydroxides, and organic compounds, to form water-soluble and water-insoluble complexes. Through the formation of these complexes, humic substances can dissolve, mobilize, and transport nutrients and organics in soils and waters. This influences nutrient availability, especially those nutrients only present at microconcentrations. [13].

Humic acid is the largest and most active component of the soil organic matter along with minor fulvic acid and inert humin component.Humic acid plays a major role at all stages of the growth cycle of a plant.

Biological Benefits

Accelerates plant cell division and promotes growth
Stimulates hormonal activity as a supplemental auxin
Stimulates growth & proliferation of soil microorganisms
Aids in photosynthesis.

Chemical Benefits

Increases cation exchange capacity & chelation of plant nutrients
Improves photosynthesis
Converts phosphorus into plant available form
Improves buffering properties of soils
Increases water uptake in high salinity soils and irrigation water by modulating osmotic pressure

Physical Benefits:

Increases moisture holding capacity and enhanced drought resistence
Improves soil tilth & infiltration of compacted soils

So even on application of small amounts of humic acid, the first benefits result from the biological activities and then on cumulative addition additions of humic acid results in

imparting chemical benefits and then physical benefits to the soils. Physical benefits result in agglomerating the soil (improves tilth and improves infiltration of soils) especially soils compacted with high Na and salt build up, by increasing moisture holding capacity- thus resistant to drought, decreases soil erosion. Chemical benefits result by increasing EC of soils, nutrient up take especially P, mproving buffering capacity. It is being recognized that the use of humic acid products in water soluble liquid form provide more economical benefits comparing to the use of only 1-5 gallons per acre as foliar and in soils then addition of powder/granular humic products in soils which require both right conditions and long periods for providing benefits. Today worldwide the use of HA products are being recognized as excellent natural biostimulant. However, they do more by providing multiple benefits as described above and improving the soil quality which imparts five essential functions: 1. Regulating water 2.Sustaining plant and animal life 3. Filtering potential pollutants 4.Cycling nutrients 5.Supporting structures. Its these multifunctional benefits though being supported by science still not well recognized compared to primarily single benefit use product inputs in use today. These benefits include slow release of the micronutrients which are made available for the plants. For example, humic acid increases the availability of phosphate, which is a stimulator of seed germination and root initiation by breaking the bond between the phosphate ion and iron or calcium. In addition, humic acid is very effective in the conversion of iron into suitable forms to protect the plants from chlorosis, even in the presence of high concentrations of the phosphate ion. Humic acid contributes to mineralization and immobilization of nitrogen in soil. The complexes formed between ammonium ions and humic acid are reported to release nitrogen slowly into the soil. Humic acid serves as a slow release nitrogen carrier in the soil in this respect.

These properties are of great importance, not only in controlling the uptake of nutrients by the plant and their retention in the soil, but also in suppressing the deleterious effect of soil acidity. Humic acid mitigates the negative effect of high salinity on plants. The Humic Acid optimum efficacy and positive effect, on increasing yield and quality of plants depends critically on its concentration at the time of application. At high concentration, humic acid has herbicidal effect and can cause phytotoxicity to the plants. Optimum application rate ranges from 800 ppm for foliar applications to 1500 ppm for soil applications. Many scientific research studies show that the optimum application rates of HA for plant growth have been reported to range from 50 to 350 ppm.

Humic and fulvic acids enhance plant growth directly through physiological and nutritional effects. Some of these substances function as natural plant hormones (auxines and gibberillins) and are capable of improving seed germination, root initiation, uptake of plant nutrients and can serve as sources of N, P and S [10 and 12]. Indirectly, they affect plant growth through modifications of physical, chemical and biological properties of the soil. For example, it enhanced soil water holding capacity and CEC, improved tilth and aeration, through good soil structure [13]. About 35-55 % of the non-living part of organic matter is humus. It is an important buffer, reducing fluctuations in soil acidity and nutrient availability.

Humic acid has several functional groups such as carboxyl and hydroxyl and considered as the most active component of organic matter in soil. As a nutrient binder, and absorbent, humic acid is essential to maintenance of fertile soils and can serve as sources of plant nutrients. The versatile characteristic properties of humic acid include: a high cation exchange capacity, the ability to chelate nutrients. These properties were demonstrated in ARCTECH's laboratory with humic acid amendment. As shown in Figure 4, Humic acid binds

to primary nutrients [N (24%), P (45%) and K (40%)], and micro nutrients [(Mn (60%); Cu, Zn and Fe (>90%)} and then release it slowly to plants. Therefore, the use of humic acid not only increase crop yield and quality, but also decreases the use of inorganic fertilizers and prevents leaching.

Role of humic acid in plant growth: Humic acid plays an important role of electron acceptor for enhancing microbial population. Also, Humic acid helps in accelerating plant cell division. The Effects of humic acid on the growth of the unicellular green algae Dunaliella Salina as a model organism to provide growth information on plant root and shoot was studied by Professor Anastasios Melis, Professor of Plant Biology, Department of Plant Biology, University of California, Berkely, CA. Professor Melis reported that the addition of humic acid and humic acid plus micronutrients increased the algal growth by 25 to 50% over the control.

In order to demonstrate the need for building the long lived and representative of the baseline of organic matter in soil, we undertook a systematic effort to collect soil samples from the cultivated farms for various crops in Virginia. The soil samples were analyzed by the Loss in Ignition Method for soil organic matter and for humic acid by the American Society of Soil Agronomy. The soil analysis presented in the following Table (1) shows that not only the organic matter is lower today than historical averages of about 8-20% for fertile soils but today the humic acid content is none to less than 1% or almost negligible.

Table 1. Conten of Organic mater and Humic Acid in different samples

Farm	SAMPLE LOCATION	Organic Matter, % Loss-On-Ignition*	Organic Matter, % Humic Acid**
Chad Francis Farm	Alpha Hay Field	2.2	0.04
	Sweet Corn Field	2.3	0.39
	Fescue Pasture	2.1	0.12
Rosemary Dairy	Fescue Hay Field	3.2	0
	Clover Hay Field	5.4	0.606
Wayne Kendrick Farm	Flue Cured Tobacco	2.3	0.17
	Burly Tobacco Field	2.2	0.39
	Soybean Field	2.5	0.14
	Corn Field	4.6	0.2
Bit By Bit Farm	Soybean Field	2.9	0.79
	Produce Field Tomato/ pumpkin	3.2	0.15
	Cornfield	1.1	0

**Loss-On-Ignition (LOI), a gravimetric, dry oxidation method, was used to estimate percentage of Soil Organic Matter by Virginia Tech.*

***Humic Acid Analysis Method by Alkali Extraction per American Society of Soil Agronomy analysis*

EXAMPLES: USA, ARCTECH, Inc 14100 Park Meadow Drive • Chantilly, Virginia 20151 USA www.arctech.com

The effect of humic acid was tested on nutrient retention and organic matter content in sandy soils planted with tobacco (Figure 3). Over 90 days, the addition of humic acid doubled organic matter content in soil and retained more P, K , Mg , Ca, and Zn than the control. In addition, there was increased root mass and 10% increase in height and corresponding weight.

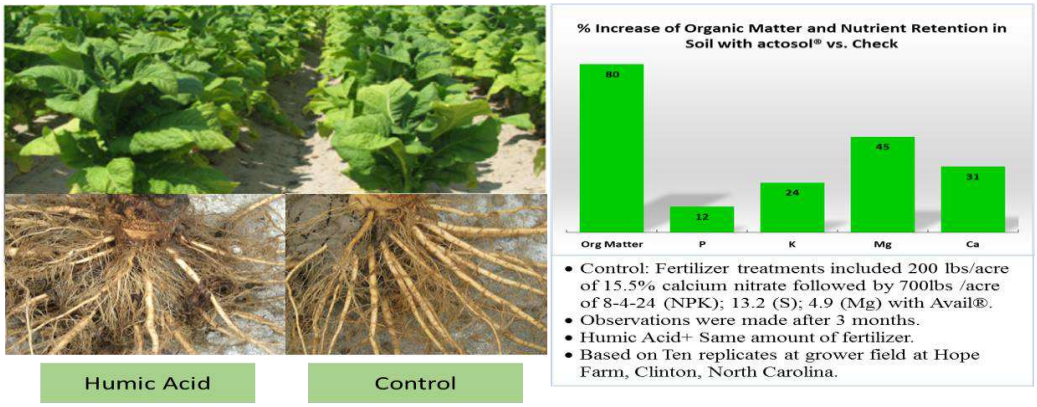
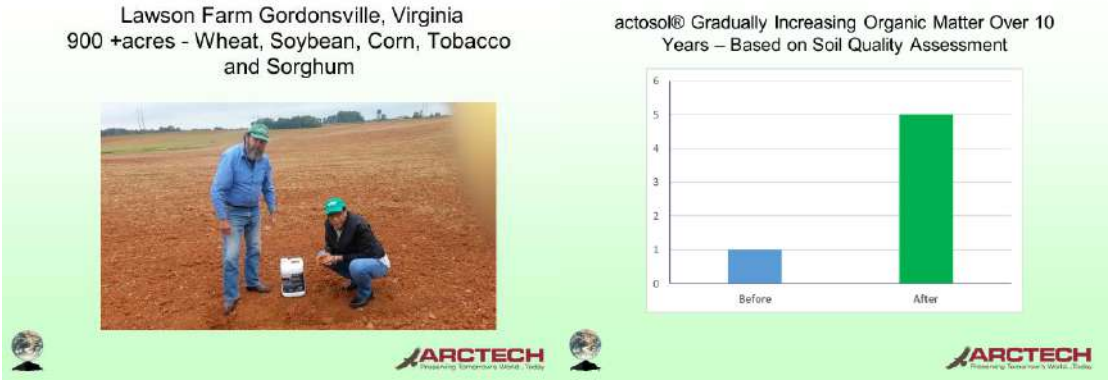
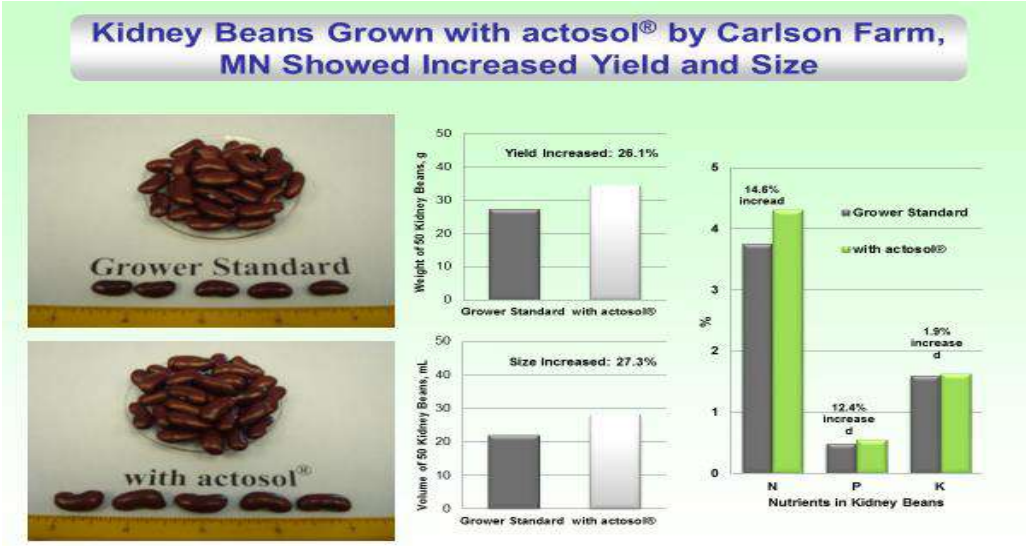


Figure 3. Humic Acid Amendment Increased Organic Matter and Nutrient Retention in the Soil and Plant Biomass.

At a 360 acres Lawson Farm in Gordonsville, Virginia , improved soil health has resulted with cumulative use of actosol organic humic and fulvic product over ten years along with only liquid based mineral nutrition and other inputs for growing Wheat, Soybean, Corn, Tobacco and Milo (Sorghum used for animal feed, bread making and whiskey). The resultant benefits observed at the farm are: improved regulation of water and increased drought resistance, nutrient recycling and reduction and markedly improved soil tilth. Yield increased from 50 bushels per acre to 100 bushels per acre with 1.5 gallons of actosol® per acre in fall and 1.5 gallons of actosol® per acre in spring, along with other liquid inputs of mineral nutrition and protection chemicals. No granular fertilizers are applied. The protein increased by 3.5 %. In case of Corn, resulted in 30 times values than the cost of actosol®. In case of Tobacco, gain is 12 times more than cost of actosol®.





Egypt:

More than ten years of research experiments and fields trials show that actosol products have an effective role in solving some of the problems that faces the agriculture sector in Egypt, like reducing the amount of chemical fertilizers and irrigation water, increasing the yield, improving crop quality and increasing the storability of fruits and vegetables. In addition, the results show that the treated plants have a high tolerance for salinity and adverse weather conditions and a higher resistance to diseases especially to soil diseases. Moreover, the results confirmed that actosol can be used as a robust substitute to animal manures, which results in contaminating newly reclaimed desert lands since they contain weed seeds, nematodes, soil diseases and insects. Furthermore, actosol increases the soil fertility and enhances its physical, chemical and biological properties, which is a driving factor for increasing growth and production especially in calcareous soils.

These results were documents in more than 40 peer-reviewed articles in national and international journals, 2 PhD dissertations and 6 MSc theses. Arctech's research experiments were conducted in different soil types and different governorates in Egypt. The research work covered field crops, sugar crops, vegetables and fruits, aromatic and medicinal plants, ornamental plants, green areas and woody trees. This vast research work was conducted indifferent academic and research institutes in Egypt, which are the Agriculture Research Center, the National Research Center, Cairo University, Ain Shams University, Mansoura University, the African Studies Institute and the Desert Research Center. The following Table (2) summarizes the key results of more than ten years of research work on the actosol products in Egypt for some selected crops [17].

Table2. Results of the use of humic acids (actosol®) in different crops

Crop	Location (Soil Type)	Crop Increase [ton/acre]	Crop Increase [%]	Extra Revenue from Crop Increase [LE/acre]	Chemical Fertilizers Reduction [%]	Chemical Fertilizers Savings [LE/acre]	Cost of Organic manure [LE/acre]	Cost of actosol [LE/acre]
Wheat & wheat hay	Valley	0.39	14.4	1500	30	150	400	240
Rice	Valley	0.75	18.5	1500	50	250	400	240
Sugarcane	Valley	5.7	11.8	2300	25	300	800	400
Potatoes	Desert	2.5	17.8	2500	25	300	1500	480
Cucumber	Desert	2	20	2400	25	300	1500	480
Pears	Desert	1.8	12	2700	25	150	1000	400
Orange	Desert	2	11.1	2000	20	150	1000	400
Grapes	Desert	2	20	2500	20	150	1000	400
Apple	Desert	3.3	52	3000	20	100	1000	400
Mango	Desert	0.65	16.25	3200	25	150	1000	400

US 1$ = 7.14 LE (Egyptian Pound)

In recent years', scientific research by academics and commercial users is resulting in increasing acceptance of use of humic acid as amendment, bio stimulant and for improved nutrient uptake by the regulators in the United States e.g. the USDA and the EPA approved laws administering the use of organic humic acid and its humate salts for agriculture application. Per the USDA National Organic Program, the input of humic acid is allowed for organic food production and is also listed in the Organic Materials Review Institute (OMRI). Humic acid is approved by US EPA under FIFRA for combining with pesticide formulations as UV protectant and adjuvant and is exempt from residue tolerance requirement. Recently, humic acid and humates are approved as part of the fertilizer by the Association of American Plant Food Control Officials (AAPFCO). This organization is the national organization of fertilizer control officials from each state, Puerto Rico and Canada responsible for administering fertilizer law and regulation. AAPFCO allowed the inclusion of humic acid and humates in labeling of fertilizers.

Both scientific research and real world applications are proving out that humic substances products derived from humic-rich low rank coals are beneficial in agriculture applications in US and other countries to restore soil health and improve crop yield. These coals, which are especially prevalent in the US coal fields, have very high content of humus and contain 20-80% extractable humic acid in water soluble liquid form. In this approach toxic metals contained in the mineral matter of coals remain part of the solid residue, so the liquid extracted humic acid is free of them. The use of these amendments at low inputs of about 2-5 gallons per acre are available to farmers at very low costs averaging US $10 to US $30 per acre, with an increase in crop yields even during droughts. Many users are reporting realization of 3-10 times increased value. Today with decreasing crop prices and increased conservation mandates, adopting this added value generation approach even in one crop cycle will incentivize farmers to use these amendments for sustained soil health improvement and facilitate conservation practices.

REFERENCES

1. The State of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) - managing systems at Risk. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and London: Earth scan, 2011. (http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=40533)
2. Smolka, J. and Schueller, G. (2001). Eating Locally | DiscoverMagazine.com. [online] Discover Magazine. Available at: http://discovermagazine.com/2001/may/feateatlocal

3.Ag Communications and Marketing 2006. Cover crops for conservation tillage systems. Cooperative Extension, College of Agriculture Sciences, The Pennsylvania State University, Conservation tillage series # 5, Code # UC128 R1M3/11mpc4142. (http://pubs.cas.psu.edu/freepubs/pdfs/uc128.pdf)
4.Friedman, D.; Hubbs, M.; Tugel, A; Seybold, C.; and Sucik M. 2001. PART I Introduction to soil quality P. 3. In Betty Joubert (ed.), guidelines for soil quality assessment in conservation planning. USDA, NRCS, Soil Quality Institute.
5.Zaccone C, Casiello G, Longobardi F, BragazzaL, Sacco A, Miano TM. Evaluating the 'conservative' behavior of stable isotopic ratios (δ13C, δ15N, and δ18O) in humic acids and their reliability as paleoenvironmental proxies along a peat sequence. Chem. Geol., 2011, 285: 124-132.
6.FAO SOILS BULLETINS 2005 (E) The importance of soil organic matter – key to drought-resistant soil and sustained food production.
7.Schulten, H. R. and Schnitzer, M. 1997. The chemistry of soil organic matter and soils. Soil Sci. 162, 115-130
8.Campbell CA, Paul E, Rennie DA, McCallum P., 1967. Applicability of the carbon-dating method of analysis to soil humus studies. Soil Sci., 1967, 104: 217-24 http://soils.usda.gov/sqi/concepts/soil_organic_matter/som_manage.html.
9.Ghabbour, E.; Davies, G., Dagget, J. Jr.; Worgul, C.; Wyant, G.; and Sayedbagheri, M.i-M. 2012. Measuring the humic acids content of commercial lignites and agriculture top soils in the national soil project. Annals of Environmental Science, Vol. 6: page 1-12.
10.Tan, K.H. 1994. Environmental soil science. New York, USA, Marcel Dekker Inc. pp 304.
11.Bolin, B., Changes of Land Biota and Their Importance for the Carbon Cycle. In Science, 196: 613, 1977: B. Bolin and R. B. Cook (Eds.), The Major Biogeochemical Cycles and Their Interactions, Wiley, New York, 1983.
12.Schnitzer, M. 1986. The synthesis, chemical structure, reactions and functions of humic substances. In R.G. Burns, G. dell'Agnola, S. Miele, S. Nardi, G. Savoini, M. Schnitzer, P. Sequi, D. Vaughan & S.A. Visser, eds. Humic substances: effect on soil and plants. Congress on Humic Substances. March 1986, Milan, Italy.
13.Stevenson, F.J. 1994. Humus chemistry. genesis, composition, reactions. 2nd edition. New York, USA, Wiley Interscience. pp 512.
14. Bernard, R.; Ahmed, O. H.; Majid, N.; and Jalloh, M. B. 2009 Reduction of ammonia loss from urea through mixing with humic acids isolated from peat soil (Saprist). American Journal of Environmental Science 5 (3) 393-397.
15.Kasim, S.; Ahmed, O. H.; Majid, N. ; Yusop, M. and Jalloh, M. B. 2009 Reduction of ammonia loss by mixing urea with liquid humic and fulvic acids isolated from tropical peat soil). American Journal of Agricultural and Biological Science 4 (1) 18-23.
16.Olk, D.C. and Dinnes, D. L. 2012. Filed evaluation of a humic acid product in Iowa corn field. Abstract. Humic Science & technology fifteen, March-14-16,Northeastern University,Boston, MA
17. ARCTECH, Inc 14100 Park Meadow Drive • Chantilly, Virginia 20151 USA www.arctech.com

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΥΛΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΟΦΑΔΩΝ.

Χαλκίδης Ηρακλής , Τσιάστας Θωμάς, Μαρία Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη

Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Φυτόκο, οδός Φυτόκου, 38334, Βόλος,
ichalkidis@uth.gr, tsiastasm@gmail.com

Περίληψη

Στη συγκεκριμένη εργασία διερευνάτε το πρόβλημα απωλειών νερού λόγο των βλαβών στους αγωγούς του αρδευτικού δικτύου της Λίμνης Σμοκόβου στη περιοχή του Δήμου Σοφάδων. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται, το πλήθος των υδραυλικών πληγμάτων ανά μήνα λειτουργίας και ανά έτος, το κόστος αυτών για τα αντίστοιχα έτη (2014-2016), ο χρόνος αποκατάστασης αυτών και τέλος τα πρακτικά και κοινωνικά προβλήματα που δημιουργούνται εξαιτίας αυτής της νοοτροπίας αντιμετώπισης των βλαβών. Η νέα παγκόσμια τάση για τη λεγόμενη «επιθεώρηση αρδευτικών δικτύων» είναι μια πιθανή λύση του προβλήματος

Λέξεις κλειδιά: αρδευτικό δίκτυο, απώλειες, επιθεώρηση δικτύων, Σμόκοβο

I. Chalkidis, Th. Tsiastas, M. Sakellariou - Makrantonaki
University of Thessaly, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, Nea Ionia, 38446 Volos,
ichalkidis@uth.gr, tsiastasm@gmail.com

Abstract

In this paper we investigate the problem of water losses due to damages in the pipes of the irrigation network of Lake Smokovo in the area of the Municipality of Sofades. More specifically, the number of hydraulic shocks per operating month and year is presented, as well as, the cost of these for the respective years (2014-2016), the time of their rehabilitation and finally the practical and social problems created by this defect mentality. The new global trend for the so-called "Irrigation Auditing» is a possible solution to the problem.

Key words: irrigation network, losses, Irrigation Auditing, Smokovo

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Θεσσαλία είναι ο μεγαλύτερος παραγωγικός κάμπος της χώρας με δυνατότητα επιπλέον ανάπτυξης των αρδευόμενων εκτάσεων της. Δυστυχώς, το υδατικό ισοζύγιο της είναι αρνητικό κατά περίπου $20x10^6 m^3$. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εφαρμογή της Οδηγία 2000/60 που αποτελεί τη θέσπιση πλαισίου για την προστασία των εσωτερικών επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων (Οδηγία 2000/60 Ε.Κ., Βοϊβόντας Δ., Ασημακόπουλος Δ., 2002, Ασημακόπουλος, 2006, Δέρκας, Ν.,

κ.α. 2007), ο περιορισμός των απωλειών αρδευτικού νερού στα αρδευτικά δίκτυα είναι μείζονος σημασίας.

Το αρδευτικό δίκτυο των Σοφάδων στη Θεσσαλία, το οποίο διερευνάτε στην παρούσα εργασία, είναι ένα τυπικό παράδειγμα για τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι διαχειριστές των αρδευτικών δικτύων στη Θεσσαλία.

2. ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ

Παγκοσμίως, η νέα τάση στη διαχείριση υδατικών πόρων είναι η μείωση των απωλειών στα υπάρχοντα έργα και όχι η κατασκευή νέων έργων. Επίσης η πρόληψη για συντήρηση και καλή λειτουργία των υδραυλικών έργων μειώνει κόστος και απώλειες. Πλέον σε Αμερική και Αυστραλία για την συντήρηση και καλή λειτουργία των αρδευτικών δικτύων λύση αποτελεί η επιθεώρηση των δικτύων το οποίο διενεργείται από ιδιωτικές ή μη εταιρείες με εξειδικευμένο προσωπικό με σκοπό την καταγραφή των ευπαθών σημείων, την μελέτη αυτού για συγκεκριμένες προτάσεις βελτίωσης έως και την επισκευή ή βελτίωση του αρδευτικού δικτύου. Στην Ευρώπη μια πρώτη προσπάθεια γίνεται με το πρόγραμμα <<IRMA>> (http://www.irrigation-management.eu/component/content/article/9-static-articles/63-irmasys-support-gr)

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

3.1. Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

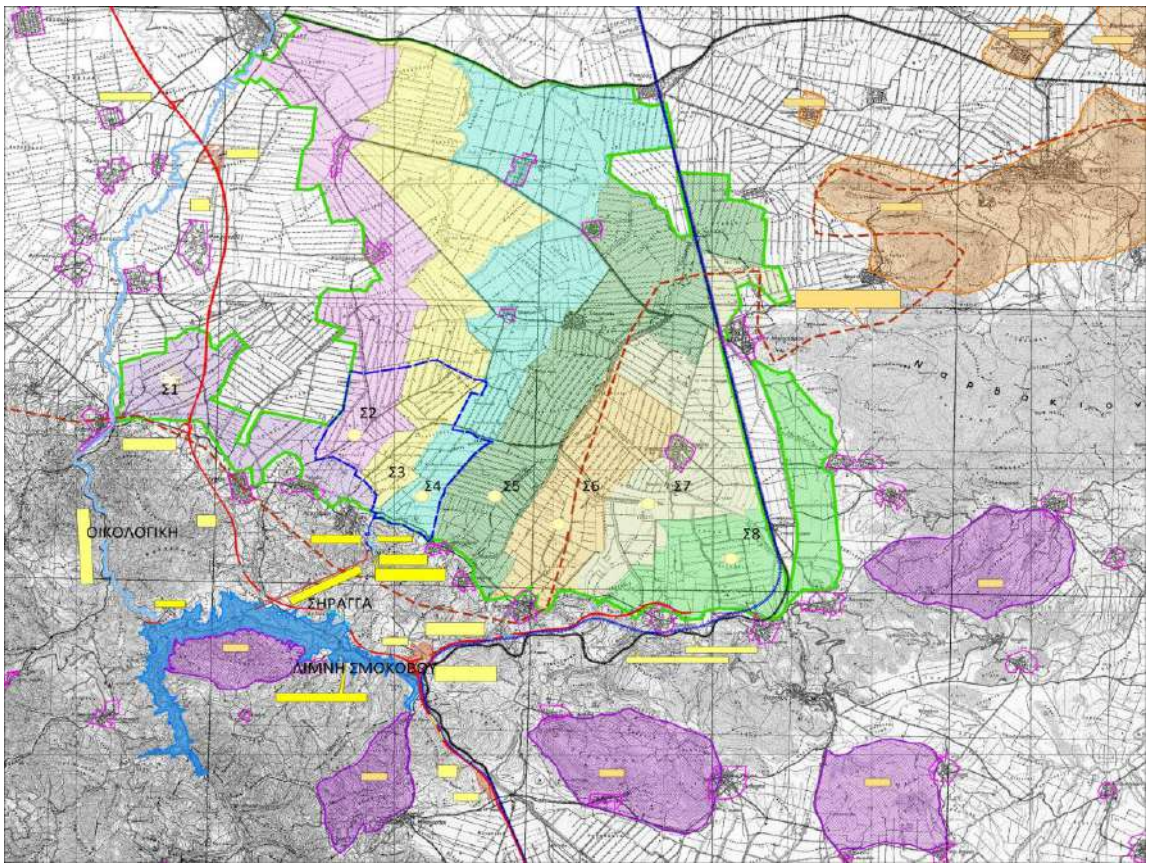
Η περιοχή διερεύνησης βρίσκεται στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Το 36,0% του εδάφους της Θεσσαλίας είναι πεδινό, το 17,1% ημιορεινό, ενώ το 44,9% είναι ορεινό. Η εδαφική της διαμόρφωση είναι τέτοια ώστε ψηλά βουνά περιβάλλουν το Θεσσαλικό κάμπο, ο οποίος αποτελεί τη μεγαλύτερη πεδιάδα της χώρας που διαρρέεται δυτικά προς τα ανατολικά από τον ποταμό Πηνειό που είναι ο τρίτος μεγαλύτερος ποταμός της Ελλάδας. Τα ψηλότερα όρη είναι τμήμα του Ολύμπου, το νότιο τμήμα της οροσειράς της Πίνδου, ο Ίταμος, το Πήλιο και η Όθρυς.

Η Θεσσαλία αποτελεί ένα εκτεταμένο ενδοορεινό βύθισμα της Κεντρικής Ελλάδας, το οποίο οριοθετείται στα ανατολικά από τους ορεινούς όγκους της Πελαγονικής και δυτικά από τους ορεινούς όγκους της Πίνδου. Το βύθισμα αυτό δεν είναι γεωμορφολογικά ενιαίο και χωρίζεται στα επιμέρους βυθίσματα της Δυτικής και Ανατολικής Θεσσαλικής Θεσσαλίας (Ψιλοβίκος, 1991). Η Θεσσαλική πεδιάδα χωρίζεται σε δύο επιμέρους λεκάνες. Την ανατολική λεκάνη της Λάρισας και τη δυτική λεκάνη με την πεδιάδα των Τρικάλων – Καρδίτσας – Σοφάδων. Η πεδιάδα Τρικάλων – Καρδίτσας – Σοφάδων είναι μια επίπεδη περιοχή που στο νοτιότερο άκρο της τοποθετείται γεωγραφικά ο Δήμος Σοφάδων. Στο ανάγλυφο της πεδινής περιοχής παρατηρούνται πολύ μικρές κλίσεις και όλα τα ρέματα - ποτάμια έχουν μικρή μεταφορική ικανότητα σχηματίζοντας κοίτες με μαιανδρική μορφή ενώ σχεδόν στο σύνολο των κοιτών έχει πραγματοποιηθεί ευθυγράμμιση της κοίτης και κατασκευή πλευρικών αναχωμάτων.

3.2. Αρδευτικό δίκτυο λίμνης Σμοκόβου (Δήμος Σοφάδων)

Ο δήμος Σοφάδων βρίσκεται στη ΝΑ πλευρά του Νομού Καρδίτσας στη Δ.Ε Ταμασίου. Τα έργα κατασκευής του αρδευτικού δικτύου κατασκευάστηκαν στην περιοχή του φράγματος Σμοκόβου. Η τροφοδοσία του δικτύου πραγματοποιείται από την σήραγγα μεταφοράς νερού Λεονταρίου. Με την κατασκευή του ταμιευτήρα του φράγματος Σμοκόβου, ύψους 105 μέτρων δημιουργήθηκε ταμιευτήρας ωφέλιμου όγκου 200 εκατομμυρίων κυβικών

μέτρων. Μέσω της σήραγγας Λεονταρίου μήκους 4,170 μέτρων, μεταφέρεται νερό στα αρδευτικά έργα κεφαλής και στη συνέχεια διανέμεται στα δίκτυα. Σε πλήρη ανάπτυξη, τα αρδευτικά δίκτυα θα καλύψουν αρδευόμενη έκταση 225 χιλιάδων στρεμμάτων στους Νομούς Καρδίτσας, Φθιώτιδας και Λάρισας. Στο χάρτη 3.1. παρουσιάζεται ο αρχικός σχεδιασμός του αρδευτικού δικτύου λίμνης Σμοκόβου της περιοχής του Δήμου Σοφάδων.



Χάρτης 3.1 αρδευτικό δίκτυο Λίμνης Σμοκόβου

Το αρδευτικό δίκτυο της λίμνης Σμοκόβου (χάρτης 3.1) χωρίζεται σε οκτώ (8) ζώνες οι οποίες αποτελούν πέντε υποπεριοχές που περιλαμβάνουν τις ζώνες αυτές δηλαδή:

✓ Ζώνες Σ1+Σ2+Σ3+Σ4 που βρίσκονται κεντρικά στο μέτωπο εξόδου της σήραγγας Λεονταρίου με συνολική έκταση 132.700στρ.

✓ Ζώνη Σ5 που βρίσκεται ανατολικά των ανωτέρω ζωνών Σ1 έως Σ4 με συνολική έκταση 49.800 στρ.

✓ Η ζώνη Σ6 που βρίσκεται ανατολικά της Σ5 με συνολική έκταση 19,900στρ.

✓ Η ζώνη Σ7 που βρίσκεται ανατολικά της Σ5 με συνολική έκταση 24,600στρ.

✓ Η ζώνη Σ8 που βρίσκεται στο ανατολικό άκρο όλης της περιοχής και ανατολικά της ζώνης Σ7 με συνολική έκταση 25,600στρ.

Στη παρούσα φάση ολοκληρώθηκαν τα χαλύβδινα σωληνωτά δίκτυα των ζωνών Σ2 και Σ3 και έγινε επέκταση κατά περίπου 2,5 χλμ του κεντρικού τροφοδοτικού αγωγού της ζώνης Σ4 (ELECTROWATT –ΥΠΕ 1970, Κουκουβίνος, Α. 2006, Δ. Κουτσογιάννης κ.α 2008 α,β , Α. Ευστρατιάδης, 2008)

3.3. Λειτουργικά προβλήματα αρδευτικού δικτύου Σμοκόβου

Κατά την διερεύνηση των λειτουργικών προβλημάτων του αρδευτικού δικτύου Σμοκόβου, μελετήθηκε ο αριθμός των βλαβών που παρουσιάστηκαν στο δίκτυο για κάθε μήνα λειτουργίας του δικτύου τα έτη 2014 έως 2016.

Πίνακας 3.1 βλάβες κλειστού δικτύου Μαΐου 2014

ΜΑΙΟΣ 2014			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ2	Χ:338365, Υ:4343172	ΑΝΑΒΡΑΣ
2η	Σ2	Χ:338714, Υ:4342337	ΑΝΑΒΡΑΣ
3η	Σ2	Χ:337584, Υ:4340650	ΑΧΛΑΔΙΑ
4η	Σ2	Χ:338823, Υ:4341441	ΑΧΛΑΔΙΑ
5η	Σ2	Χ:338162, Υ:4341828	ΑΧΛΑΔΙΑ
6η	Σ2	Χ:339160, Υ:4343018	ΑΝΑΒΡΑΣ
7η	Σ3	Χ:341931, Υ:4342283	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
8η	Σ4	Χ:341861, Υ:4340271	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

Πίνακας 3.2 βλάβες κλειστού δικτύου Ιουνίου 2014

ΙΟΥΝΙΟΣ 2014			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ3	Χ:341796, Υ:4341598	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
2η	Σ3	Χ:341001, Υ:4342195	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
3η	Σ3	Χ:340313, Υ:4340237	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

Πίνακας 3.3 βλάβες κλειστού δικτύου Ιουλίου 2014

ΙΟΥΛΙΟΣ 2014			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ3	Χ:342156, Υ:4342502	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

Για το έτος 2014 συνολικά, όπως προκύπτει από τους παραπάνω πίνακες, συγκεντρώθηκαν συνολικά 12 βλάβες. Ο μήνας που είχε τις περισσότερες βλάβες όπως φαίνεται είναι ο μήνας Μάιος ο οποίος είναι και ο μήνας που είχαμε έναρξη αρδευτικής χρονιάς. Συνήθως αυτό συμβαίνει σε κάθε έναρξη αρδευτικής περιόδου, όταν γίνεται η πλήρωση των δικτύων.

Στους παρακάτω πίνακες 3.4, 3.5, 3.6 και 3.7 απεικονίζονται αναλυτικά όλες οι βλάβες για το έτος 2015.

Πίνακας 3.4 βλάβες κλειστού δικτύου Απριλίου 2015

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2015			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ**

	(Σ2,Σ3,Σ4)	ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)	ΒΛΑΒΗΣ
1η	Σ4	Χ:341138, Υ:4338103	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
2η	Σ4	Χ:340121, Υ:4340684	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
3η	Σ4	Χ:339564, Υ:4340557	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
4η	Σ2	Χ:340394, Υ:4343061	ΑΧΛΑΔΙΑ
5η	Σ2	Χ:337765, Υ:4341021	ΑΧΛΑΔΙΑ
6η	Σ2	Χ:338078, Υ:4341115	ΑΧΛΑΔΙΑ

Πίνακας 3.5 βλάβες κλειστού δικτύου Μαΐου 2015

ΜΑΙΟΣ 2015			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ2	Χ:338608, Υ:4341040	ΑΧΛΑΔΙΑ
2η	Σ3	Χ:341223, Υ:4343016	ΑΧΛΑΔΙΑ
3η	Σ3	Χ:340773, Υ:4340658	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

Πίνακας 3.6 βλάβες κλειστού δικτύου Ιουνίου 2015

ΙΟΥΝΙΟΣ 2015			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ2	Χ:338821, Υ:4341427	ΑΧΛΑΔΙΑ
2η	Σ3	Χ:342209, Υ:4342814	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
3η	Σ3	Χ:340853, Υ:4342744	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
4η	Σ3	Χ:342492, Υ:4341516	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

Πίνακας 3.7 βλάβες κλειστού δικτύου Ιουλίου 2015

ΙΟΥΛΙΟΣ 2015			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ3	Χ:339797, Υ:4340292	ΑΧΛΑΔΙΑ

Για το 2015 όπως φαίνεται και από τους παραπάνω πίνακες, συγκεντρώθηκαν συνολικά 14 βλάβες**.** Ο μήνας που είχε τις περισσότερες βλάβες ο Απρίλιος ο οποίος είναι και ο μήνας που είχαμε έναρξη αρδευτικής χρονιάς.

Στους παρακάτω πίνακες 3.8, 3.9, 3.10 και 3.11 απεικονίζονται αναλυτικά όλες οι βλάβες του 2016 ανά αγρόκτημα και αρδευτικής ζώνης.

Πίνακας 3.8 βλάβες κλειστού δικτύου Απριλίου 2016

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2016			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ4	Χ:341242, Υ:4339303	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
2η	Σ3	Χ:340289, Υ:4339768	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
3η	Σ3	Χ:340718, Υ:4341428	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

4η	Σ3	Χ:340769, Υ:4341377	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
5η	Σ3	Χ:340647, Υ:4341504	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
6η	Σ3	Χ:341548, Υ:4342323	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
7η	Σ4	Χ:342181, Υ:4340027	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

Πίνακας 3.9 βλάβες κλειστού δικτύου Μαΐου 2016

ΜΑΙΟΣ 2016			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ2	Χ: 339831, Υ:4340976	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
2η	Σ4	Χ: 344088,Υ: 4342905	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
3η	Σ3	Χ: 342218, Υ: 4342569	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

Πίνακας 3.10 βλάβες κλειστού δικτύου Ιουνίου 2016

ΙΟΥΝΙΟΣ 2016			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ4	Χ: 342129, Υ: 4340457	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

Πίνακας 3.11 βλάβες κλειστού δικτύου Ιουλίου 2016

ΙΟΥΛΙΟΣ 2016			
Α/Α (βλάβες)	**ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ (Σ2,Σ3,Σ4)**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΒΛΑΒΗΣ (ΕΓΣΑ ΄87)**	**ΑΓΡΟΚΤΗΜΑ ΒΛΑΒΗΣ**
1η	Σ2	Χ: 340298, Υ:4340055	ΛΕΟΝΤΑΡΙ
2η	Σ4	Χ: 340008, Υ: 4338494	ΛΕΟΝΤΑΡΙ

Το 2016 συγκεντρώθηκαν συνολικά 13 βλάβες. Ο μήνας που είχε τις περισσότερες βλάβες όπως φαίνεται είναι ο μήνας Απρίλιος μήνας έναρξης αρδευτικής περιόδου. Στην Εικόνα 3.1 εμφανίζεται μια βλάβη αγωγού στη ζώνη Σ2.

Εικόνα 3.1 βλάβη αγωγού στη ζώνη Σ2.

3.4. Κόστος επισκευής

Το κόστος συντήρησης όλων των βλαβών από τις 3 αρδευτικές χρονιές που παρουσιάστηκαν παραπάνω συνοψίζεται στους παρακάτω πίνακες 3.12 έως 3.14 αναλυτικά για την κάθε χρονιά.

Πίνακας 3.12 κόστος βλαβών 2014

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΠΑΣΙΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΧΡΟΝΙΑ 2014	
Υδραυλικός Α	12.278 €
Υδραυλικός Β	4.500 €
Εργολάβος σκαπτικού μηχανήματος	7.824 €
Ανταλλακτικά υδραυλικού εξοπλισμού σπασιμάτων Α	4.350 €
Ανταλλακτικά υδραυλικού εξοπλισμού σπασιμάτων Β	1.333 €
ΣΥΝΟΛΟ	**30.285 €**

Πίνακας 3.13 κόστος βλαβών 2015

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΠΑΣΙΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΧΡΟΝΙΑ 2015	
Υδραυλικός Α	10.455 €
Υδραυλικός Β	4.500 €
Εργολάβος σκαπτικού μηχανήματος	9.806 €
Ανταλλακτικά υδραυλικού εξοπλισμού σπασιμάτων Α	10.602 €
Ανταλλακτικά υδραυλικού εξοπλισμού σπασιμάτων Β	500 €
ΣΥΝΟΛΟ	**35.863 €**

Πίνακας 3.14 κόστος βλαβών 2016

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΠΑΣΙΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΧΡΟΝΙΑ 2016	
Υδραυλικός Α	11.607 €
Υδραυλικός Β	4.500 €
Εργολάβος σκαπτικού μηχανήματος	11,997 €
Ανταλλακτικά υδραυλικού εξοπλισμού σπασιμάτων Α	3,726 €
Ανταλλακτικά υδραυλικού εξοπλισμού σπασιμάτων Β	1,000 €
ΣΥΝΟΛΟ	**32.830 €**

Μπορούμε να διακρίνουμε από τους πίνακες κόστους σε κάθε αρδευτική χρονιά ότι το κόστος κυμαίνεται ανάλογα με το πλήθος των ζημιών . Στην αρδευτική χρονιά του 2014 συνολικά είχαμε *12* βλάβες με συνολικό κόστος 30,285€, το 2015 είχαμε συνολικά 14 βλάβες με συνολικό κόστος 35,863€ που ήταν και το μεγαλύτερο στην τριετία και το 2016 είχαμε 13 βλάβες με κόστος 32,830 €. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι στα γενικά έξοδα συντήρησης όλου του μηχανολογικού υδραυλικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού προστίθεται και η αμοιβή (40.000€) του ναυπηγού-τεχνικού υποστήριξης όλων αυτών.
Συνεπώς, το πραγματικό κόστος για την αντιμετώπιση των βλαβών ανέρχεται σε 70,000 έως 75,000 ανά έτος. Δυστυχώς πέραν του κόστους επειδή οι βλάβες γίνονται εντός αρδευτικής περιόδου υπάρχουν και πολλές διενέξεις με τους παραγωγούς.

3.5. Χρόνος επισκευής βλαβών

Ο χρόνος αποκατάστασης των βλαβών, στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν ξεπερνούσε το μέγιστο την μια ημέρα και το ελάχιστο τις 4 ώρες. Η γρήγορη και έγκαιρη αποκατάσταση των βλαβών είναι αναγκαία διότι κατά τη διάρκεια των επισκευών έπαυαν να εξυπηρετούνται μεγάλα τμήματα του αρδευτικού δικτύου. Αυτό το γεγονός, δημιουργεί ανεπιθύμητες προστριβές με τους παραγωγούς που δεν μπορούν να αρδεύσουν σύμφωνα με τον προγραμματισμό.
Όμως υπάρχουν, πιο σπάνια και βλάβες που ο χρόνος αποκατάστασης είναι πολύ περισσότερος της ημέρας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η φθορά του ελαστικού παρεμβύσματος του φ1200 αγωγού το έτος 2015 όπου για να αποκατασταθεί χρειάστηκαν 10 ημέρες.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόβλημα του νερού άρδευσης στην Θεσσαλία, οφείλεται στο γεγονός ότι το υδατικό ισοζύγιο τις υδρολογικής λεκάνης είναι αρνητικό. Η άρδευση από τη λίμνη Σμοκόβου βοηθάει στην αντιμετώπιση του προβλήματος και η επέκταση λειτουργίας του αρχικά σχεδιασμένου αρδευτικού δικτύου είναι ελπιδοφόρο για τη Θεσσαλία.
Ένα σημαντικό πρόβλημα πάντοτε παραμένει με τις απώλειες των αρδευτικών δικτύων λόγο κακής συντήρησης και άναρχης επέκτασης.
Επίσης η νοοτροπία επεμβαίνω μόνο όταν παρουσιάζεται το πρόβλημα και όχι ένα σχέδιο επιτήρησης και συντήρησης, για το αρδευτικό δίκτυο του Σμοκόβου, προκαλεί:

- μεγάλο αριθμό βλαβών, 12 με 13 ανά έτος,
- μεγάλο κόστος επισκευής 70.000€ έως 75.000€
- χρόνος αποκατάστασης βλαβών από 4 ώρες έως μια ημέρα, χωρίς να αποκλείονται περιπτώσεις αποκατάστασης 10 ημερών

- διαμαρτυρίες παραγωγών για κακή λειτουργία του δικτύου και μη εξυπηρέτηση τους

Με την επιθεώρηση των αρδευτικών δικτύων θα υπήρχε η δυνατότητα έγκαιρης επισκευής του δικτύου με πιθανότητα πολύ χαμηλού κόστους από το ετήσιο κόστος των βλαβών που κυμαίνεται περίπου από 70,000 έως 75,000 ευρώ το χρόνο. Έτσι, θα αποφεύγονταν οι διενέξεις και η δυσαρέσκεια των παραγωγών, αλλά και οι απώλειες νερού τις κρίσιμες περιόδους των αρδεύσεων.

5.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ασημακόπουλος, Δ., 2006. *Οικονομικά εργαλεία στη διαχείριση υδατικών πόρων- Η Οδηγία 2000/60 και η ανάκτηση κόστους στην ελληνική πραγματικότητα*, Διαθέσιμο από: http:/www.ekke.gr

Βοϊβόντας, Δ., Ασημακόπουλος, Δ., 2002. *Ανάκτηση κόστους και τιμολόγηση νερού στα πλαίσια της Οδηγίας 2000/60*, Ημερίδα «2000/60 Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά-Εναρμόνιση με την ελληνική πραγματικότητα», Μάιος 2002, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Δέρκας, Ν., Λόντρα, Π., Καραμάνος, Α., 2007. *Προτάσεις βελτίωσης της διαχείρισης του αρδευτικού νερού στο πλαίσιο της οδηγίας 2000/60.*

Οδηγία 2000/60 Ε.κ, του Ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου, 2000. *Θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης, στον τομέα της πολιτικής των υδάτων*.

Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, και Δ. Κουτσογιάννης, 2008. *Εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης και βέλτιστης λειτουργίας ταμιευτήρα Σμοκόβου και συναφών έργων, Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Τεύχος 3, 104 σελ..

Κουκουβίνος, Α., Α. Ευστρατιάδης, Λ. Λαζαρίδης, και Ν. Μαμάσης, 2006. *Έκθεση δεδομένων, διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου, ΤΟΕΒ ΘΕΣΣΑΛΙΩΤΙΔΟΣ, υπάρχων αρδευτικό δίκτυο, προσωρινός φορέας διαχείρισης Λίμνης Σμοκόβου.* Τεύχος 1, 66 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. Ιανουάριος 2006.

Κουτσογιάννης, Δ., Ν. Μαμάσης, Α. Κουκουβίνος, και Α. Ευστρατιάδης, 2008. *Συνοπτική έκθεση, Αθήνα, Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου,* Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 37 σελ..

Κουτσογιάννης, Δ., Ν. Μαμάσης, Α. Κουκουβίνος, και Α. Ευστρατιάδης, 2008. *Τελική έκθεση, Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου,* Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Τεύχος 4, 66 σελ..

Ψιλοβίκος, Α., 1991. *Η εξέλιξη του Πηνειού ποταμού της Θεσσαλίας.* Πρακτικά 2ου Συμποσίου Τρικαλινών Σπουδών, Τρίκαλα.

ELECTROWATT, 1970. *αξιοποίηση πεδιάδος Θεσσαλίας, Προμελέτη φράγματος Σμοκόβου*, ΥΠΕ,.

IRMA (http://www.irrigation-management.eu/component/content/article/9-static-articles/63-irmasys-support-gr)

Η ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΑ ΕΙΔΗ ΑΥΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΟΡΘΗΣ ΛΙΠΑΝΤΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ

Χρ. Νούλας[1]✉, Μ. Τζιουβαλέκας[1], Δ. Καλφούντζος[2] & Αλ. Τσιτούρας[1]

[1]ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ - Ινστιτούτο Βιομηχανικών και Κτηνοτροφικών Φυτών - Θεοφράστου 1, 41335, Λάρισα. ✉ noulaschristos@gmail.com. [2] Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, Τ.Κ. 41110, Λάρισα. dkalf@teilar.gr

Περίληψη

Η εδαφοανάλυση αποτελεί ένα αξιόπιστο οδηγό για την αναπλήρωση των αποθεματικών των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος μέσω των λιπάνσεων. Ωστόσο, η λήψη αντιπροσωπευτικών εδαφικών δειγμάτων είναι μια δύσκολη διαδικασία εξαιτίας της μεταβλητότητας των εδαφικών ιδιοτήτων τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο. Το προηγούμενο, σε συνδυασμό με τις διαφορές στη διαχείριση των αγρών υποδεικνύουν ότι δεν υπάρχει ενιαία και βέλτιστη στρατηγική για τη συλλογή των δειγμάτων εδάφους σε όλα τα συστήματα παραγωγής. Η καλύτερη κατανόηση των στρατηγικών δειγματοληψίας βοηθά στον προσδιορισμό εκείνων που ταιριάζουν στους στόχους της κάθε έρευνας. Στη βιβλιογραφία παρέχονται χρήσιμες τεχνικές πληροφορίες για την δειγματοληψία των γεωργικών εδαφών ωστόσο οι πληροφορίες είναι συνήθως αποσπασματικές ή ελλιπείς και αφορούν στενά γεωγραφικά όρια. Η εργασία σκοπό έχει να περιγράψει τα βασικά είδη δειγματοληψίας εδάφους και να παράσχει σειρά κριτηρίων επιλογής του ορθότερου προγράμματος για την διαμόρφωση ολοκληρωμένης πρότασης λιπαντικής αγωγής.

Λέξεις κλειδιά: Μέθοδοι δειγματοληψίας εδαφών, αντιπροσωπευτικότητα δειγματοληψίας, ανάλυση γεωργικών εδαφών.

TYPES OF SOIL SAMPLING AS A BASIS FOR RATIONAL FERTILIZER RECOMMENDANTIONS

Ch. Noulas[1]✉, M. Tziouvalekas[1], D. Kalfountzos[2] & A. Tsitouras[1],

[1]ELGO DEMETER - Industrial and Forage Crops Institute – 1, Theophrastos Str., 41335, Larissa. ✉ noulaschristos@gmail.com. [2] University of Applied Sciences of Thessaly (TEI of Thessaly), School of Agricultural Technology, Department of Biosystems Engineering, 41110, Larissa. dkalf@teilar.gr

ABSTRACT

Soil analysis is a reliable guide to replenishment of soil nutrient reserves through fertilization. However, obtaining representative soil samples is a difficult process due to the variability of soil properties both in time and space. The later, combined with the differences in field management indicate that there is no single and optimal strategy for collecting soil samples in all production systems. A better understanding of sampling strategies helps to identify those that fit the objectives of each survey. The literature provides useful technical information on the sampling of agricultural soils but the information is usually fragmentary or incomplete and involves narrow geographical boundaries. The aim of the present work is to describe the main types of soil sampling and to provide a series of criteria for selecting the most appropriate program for the development of an integrated fertilizer recommendation.

Key words: Soil sampling methods, sampling representativeness, analysis of agricultural soils.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η 68η Γενική Συνέλευση των Ηνωμένων Εθνών ανακήρυξε το έτος 2015 ως το «Διεθνές Έτος των εδαφών» (http://www.fao.org/soils-2015/about/en/). Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) ορίστηκε ως συντονιστής για την υλοποίηση της εν λόγω Δράσης (International Year of Soils - IYS 2015). Ο σκοπός της δράσης εστιαζόταν στην αύξηση της ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης ώστε να γίνει κατανοητή η σημασία του εδάφους για την ασφάλεια των τροφίμων και των βασικών λειτουργιών του οικοσυστήματος. Η εξασφάλιση τροφής για τον ολοένα αυξανόμενο πληθυσμού της γης, η παραγωγή ποιοτικών προϊόντων και η διατήρηση ή ενίσχυση της φυσικής γονιμότητας των εδαφών έχουν καταστήσει τη διαδικασία της λίπανσης απαραίτητη γεωργική πρακτική. Με την εφαρμογή της λίπανσης να αποτελεί μια από τις σημαντικότερες και πιο δαπανηρές επενδύσεις (εισροές) στην καλλιεργητική πρακτική κρίνεται σκόπιμο να ερευνάται η αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του λιπάσματος που εφαρμόστηκε (Miller, 2013).

Η σύσταση της ορθότερης λιπαντικής αγωγής βασίζεται στην κατά το δυνατό αντιπροσωπευτικότερη δειγματοληψία του γεωργικού εδάφους. Ο απώτερος σκοπός της λήψης εδαφικών δειγμάτων είναι ο καθορισμός με το χαμηλότερο δυνατό κόστος και τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, της συνολικής ή μέσης περιεκτικότητας του εδάφους σε διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία και ο χαρακτηρισμός της εν γένει γονιμότητάς του (Swenson et al., 1984; Carr et al., 1991).

Η ανάλυση του εδάφους παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τις φυσικοχημικές ιδιότητες και την γονιμότητα του εδάφους, την καταλληλότητά του για κάθε καλλιέργεια και περιλαμβάνει τα παρακάτω τέσσερα βασικά στάδια: 1) τη συλλογή αντιπροσωπευτικών εδαφικών δειγμάτων, 2) την εργαστηριακή ανάλυση, 3) την ερμηνεία των αναλυτικών αποτελεσμάτων και 4) τις προτάσεις για τη διαχείριση του εδάφους και σύσταση λιπαντικής αγωγής (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2001; Χατζηγιαννάκης κ.ά., 2012; Τσίρμπας, 2014; Σωτηρόπουλος, 2015).

Η εργασία σκοπό έχει να περιγράψει τα βασικά είδη και προγράμματα δειγματοληψίας εδάφους και να παράσχει σειρά κριτηρίων επιλογής του ορθότερου προγράμματος συλλογής αντιπροσωπευτικών εδαφικών δειγμάτων για την διαμόρφωση ολοκληρωμένης πρότασης λιπαντικής αγωγής.

2. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗ ΛΙΠΑΝΣΗ

Η εδαφοανάλυση αποτελεί ένα «κατάλογο απογραφής» των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος, αλλά και άλλων χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τη γονιμότητα αυτού, όπως το pH, η οργανική ουσία και η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (Ι.Α.Κ.). Η ανάλυση του εδάφους για το διαθέσιμο άζωτο (N), τον φωσφόρο (P), και το κάλιο (K) γίνεται για να προσδιοριστούν οι θρεπτικές απαιτήσεις των καλλιεργειών αλλά και να προσδιοριστούν οι προηγούμενες πρακτικές διαχείρισης. Τα δευτερεύοντα μακροθρεπτικά στοιχεία και τα ιχνοστοιχεία αναλύονται μερικές φορές για τη διάγνωση ελλείψεων θρεπτικών συστατικών στα φυτά (*nutrient deficiencies*) (Follett and Westfall, 1986; Jones et al., 2014**)**.

Η ανάλυση του εδάφους για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων είναι μια δύσκολη και μερικές φορές «*ασυνεπής*» διαδικασία, εν μέρει επειδή διαφορετικές αναλυτικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του ίδιου διαθέσιμου θρεπτικού στοιχείου. Όπως για παράδειγμα ο διαθέσιμος φωσφόρος (P) προσδιορίζεται με διαφορετική μέθοδο (τεστ "Bray»), για τα όξινα από ότι στα κανονικά μη όξινα εδάφη (μέθοδος "Olsen P"). Συνεπώς, το εργαστήριο που επιλέγεται πρέπει να είναι εξοικειωμένο

με τις συνιστώμενες δοκιμές από τις περιοχές από τις οποίες συλλέχθηκαν τα εδαφικά δείγματα ώστε να ακολουθείται η κατάλληλη αναλυτική διαδικασία (Davis et al., 1999; Jones et al., 2014).

Οι συστάσεις λιπασμάτων στη συνέχεια παρέχονται από το εργαστήριο ή μπορούν να υπολογιστούν από τον τελικό χρήστη των δεδομένων των εδαφοαναλύσεων. Η σύσταση λιπαντικής αγωγής μπορεί να ποικίλλει σε κάποιο βαθμό μεταξύ των εργαστηρίων για το ίδιο έδαφος, εν μέρει λόγω της διαφορετικής ακολουθητέας φιλοσοφίας στην λίπανση των καλλιεργειών (Davis et al., 1999; Jacobsen et al., 2002). Συστήνεται να υποβάλλονται στο εργαστήριο συμπληρωματικές οδηγίες σχετικά με το έδαφος (π.χ. ιστορικό μεταχειρίσεων, παρελθοντικές επεμβάσεις λίπανσης) και το είδος της προηγούμενης καλλιέργειας ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία της χορηγούμενης λιπαντικής αγωγής.

Η αξιοπιστία της εδαφολογικής ανάλυσης εξαρτάται άμεσα από το πόσο αντιπροσωπευτικό της έκτασης που μας ενδιαφέρει είναι το εδαφικό δείγμα που αποστέλλεται στο εργαστήριο. Γίνεται αντιληπτό ότι από μια σχετικά μικρή ποσότητα εδάφους πρέπει να εξαχθούν συμπεράσματα για ολόκληρο τον αγρό. Άρα το τελικό εδαφικό δείγμα που συλλέγεται βασίζεται σε επιμέρους δείγματα που έχουν επιλεγεί ώστε να είναι ισοβαρή, να έχουν ληφθεί με τυχαίο τρόπο, να προέρχονται από το ίδιο βάθος και το τμήμα του αγρού από τον οποίο προέρχονται να είναι ομοιογενές (Ζαχαρίας και Νικολάου, 2009; Μπαρούχας κ.ά., 2011).

3. ΤΑ ΕΙΔΗ ΚΑΙ Ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος δειγματοληψίας εδαφών εξαρτάται πρωταρχικά από την σκοπό της έρευνας αλλά και από το κόστος διεξαγωγής της. Σε γενικές γραμμές η δειγματοληψία του εδάφους ενός αγρού για τη σύσταση ορθής λιπαντικής αγωγής μπορεί να υποδιαιρεθεί σε δυο βασικές κατηγορίες (Franzen and Cihaek, 1998):

1. Δειγματοληψία εδάφους για την εκτίμηση του επιπέδου των θρεπτικών στοιχείων σε ολόκληρο το αγροτεμάχιο (*whole field nutrient values*). Στην κατηγορία αυτή ανήκει η τυχαία δειγματοληψία (*Random Composite Sampling*) για την δημιουργία ενός σύνθετου δείγματος που τελικά αναλύεται στο εργαστήριο και,
2. Δειγματοληψία εδάφους για τις περιπτώσεις εκτίμησης του επιπέδου θρεπτικών στοιχείων σε προκαθορισμένες θέσεις εντός του αγροτεμαχίου (*within-field nutrient levels*). Η δειγματοληψία αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που μας ενδιαφέρει η ειδική διαχείριση του αγρού κατά περιοχές (*site specific farming*) ή η εφαρμογή μεταβλητών ποσοτήτων λιπασμάτων εντός του αγρού (*variable rate fertilizer application*). Εδώ διακρίνονται δυο είδη δειγματοληψίας:

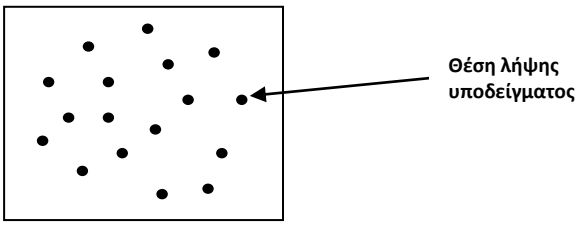
   (α) δειγματοληψία σε ειδικές περιοχές-ζώνες (*Directed sampling, or zone sampling or smart sampling or smart zones*) και

   (β) δειγματοληψία σε προκαθορισμένες θέσεις με τη διαμόρφωση σε κάναβο (*Grid sampling*).

3.1. Εκτίμηση θρεπτικών σε ολόκληρο το αγροτεμάχιο – Τυχαία δειγματοληψία

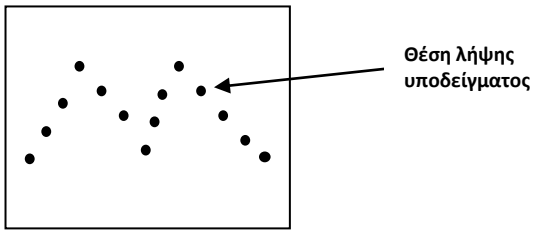
Στην πρώτη περίπτωση ανήκει η τυχαία δειγματοληψία εδάφους (*Random Composite Sampling*) από ένα ομοιόμορφο αγρό ή από το μεγαλύτερο μέρος του αγρού με ομοιόμορφα χαρακτηρίστηκα (π.χ. ως προς την κλίση, την σύσταση, τον βαθμό διάβρωσης, την ομοιομορφία του συστήματος καλλιέργειας στο πρόσφατο παρελθόν, την λιπαντική αγωγή κλπ) και τη δημιουργία ενός σύνθετου δείγματος από την ανάμειξη διαφορετικών επιμέρους δειγμάτων (πρωταρχικών δειγμάτων) χωρίς ωστόσο να γίνεται ανάμειξη από

διαφορετικά βάθη. Η τυχαία δειγματοληψία εδάφους θεωρείται μια από τις πιο ταχείες και οικονομικότερες μεθόδους δειγματοληψίας (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Τυχαία δειγματοληψία σε ομοιόμορφη έκταση αγρού 40-50 στρ. (15-20 τυχαία επιλεγόμενα επί μέρους δείγματα για τη παρασκευή ενός τελικού σύνθετου δείγματος).

Παραλλαγή της τυχαίας δειγματοληψίας είναι η «επιλεκτικά» τυχαία δειγματοληψία (*Selectively Random Composite Sampling*). Με τον όρο «επιλεκτικά» τυχαία δειγματοληψία εννοούμε την δειγματοληψία κατά την οποία για να αποφευχθεί οποιαδήποτε περίπτωση προκατάληψης και για είναι το σύνθετο τελικό εδαφικό δείγμα κατά το δυνατό πιο αντιπροσωπευτικό (τυχαιοποίηση), κατά την λήψη των επιμέρους δειγμάτων (πρωταρχικών δειγμάτων) εδάφους (για τη δημιουργία του σύνθετου δείγματος) ακολουθούμε μια προκαθορισμένη πορεία τύπου «zig-zag» (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Τυχαία δειγματοληψία σε ομοιόμορφη έκταση αγρού με πορεία τύπου «zig-zag»

Η «επιλεκτικά» τυχαία δειγματοληψία θεωρείται κατά παράδοση ο πλέον διαδεδομένος τρόπος δειγματοληψίας και μπορεί να εφαρμοστεί σε ολόκληρη την έκταση του αγρού εφόσον παρουσιάζει ομοιομορφία ως προς τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά (π.χ. ως προς την κλίση, την σύσταση, τον βαθμό διάβρωσης, κλπ) αλλά και σε ειδικές περιοχές-ζώνες στις οποίες χωρίζεται ο αγρός που παρουσιάζουν ομοιόμορφα χαρακτηριστικά (Σχήμα 3) (Warncke 2000).

Κατά την τυχαία δειγματοληψία για να γνωρίζουμε τις μακροπρόθεσμες τάσεις στα δεδομένα των θρεπτικών συστατικών του εδάφους, τα σημεία λήψης του εδαφικού δείγματος μπορούν να ληφθούν με GPS (*Global Positioning Systmem*) και η δειγματοληψία να επαναλαμβάνεται στις ίδιες θέσεις κατά τα επόμενα έτη.

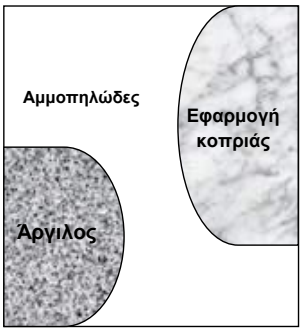
Τα πλεονεκτήματα χρήσης του «σύνθετου εδαφικού δείγματος» για τη σύσταση λιπαντικής αγωγής κατά την τυχαία δειγματοληψία σχετίζονται:

- Με το σχετικά χαμηλό κόστος.
- Την ταχύτητα λήψης του δείγματος καθώς 20 περίπου επιμέρους δείγματα είναι αρκετά ώστε να αντιπροσωπεύουν ένα αγροτεμάχιο έκτασης πχ 50 στρ.
- Απαιτείται μόνο μία ανάλυση για κάθε σύνθετο δείγμα.
- Τα αποτελέσματα μπορούν εύκολα να παρακολουθούνται από έτος σε έτος.

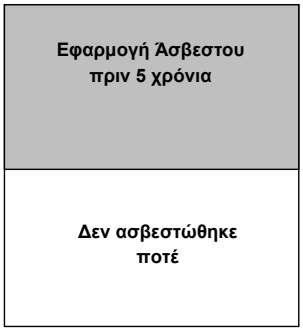
Ωστόσο παρουσιάζονται αρκετά εγγενή μειονεκτήματα χρήσης του σύνθετου δείγματος εδάφους:

Σχήμα 3 (α-στ) (δεξιά). Τυχαία δειγματοληψία σε περιοχές-ζώνες με ομοιόμορφα χαρακτηριστικά (πχ. κλίση, βαθμό διάβρωσης, δυναμικό παράγωγης, σύσταση εδάφους, μεταχειρίσεις κλπ).

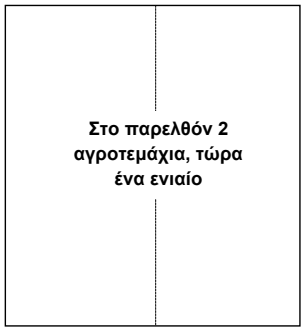
- Οι περιοχές που αποφεύγεται η δειγματοληψία (κοντά σε δρόμους, στάβλους, σε αυλάκια ή διαβρωμένες και με ένδειξη αλατότητας περιοχές, κλπ) μπορεί να αντιπροσωπεύουν σημαντική έκταση σε ένα αγροτεμάχιο.
- Μεγάλα τμήματα του αγροτεμαχίου μπορεί να υπερ-ή υπο-λιπαίνονται.
- Υπάρχει ένα χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης όταν για παράδειγμα οι υψηλές τιμές των αναλύσεων εδάφους αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος του πεδίου.
- Μερικές φορές είναι δύσκολο να ιεραρχηθεί ποιες περιοχές είναι εκείνες από τις οποίες θα πρέπει να αποφεύγεται η δειγματοληψία.



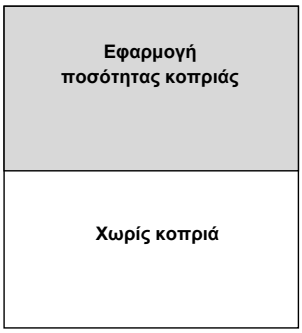
α. Τρία σύνθετα δείγματα



β. Δύο σύνθετα δείγματα

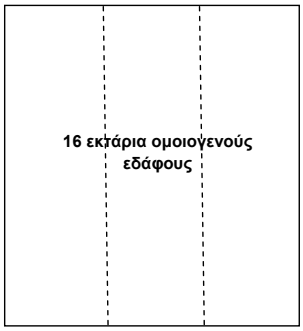


γ. Δυο σύνθετα δείγματα



δ. Δύο σύνθετα δείγματα

ε. Τρία σύνθετα δείγματα



στ. Τρία σύνθετα δείγματα

3.2. Εκτίμηση θρεπτικών σε προκαθορισμένες θέσεις εντός του αγροτεμαχίου.

Οικονομικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες επιβάλλουν σήμερα την εξεύρεση εναλλακτικών τρόπων κατεργασίας και λίπανσης των εδαφών όπως για παράδειγμα είναι η μειωμένη (*reduced tillage*) και η μηδενική (*zero tillage*) κατεργασία εδάφους, αλλά και η τεχνολογία εφαρμογής μεταβλητής ποσότητας του λιπάσματος στο έδαφος (*variable rate fertilization*). Στις ανωτέρω περιπτώσεις η δειγματοληψία του εδάφους πρέπει να είναι πληρέστερη (μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων) και αρκετά πιο εντατική (σε περισσότερες θέσεις) σε σχέση με την τυχαία δειγματοληψία για την ακριβέστερη εφαρμογή λιπασμάτων και εδαφοβελτιωτικών εδάφους.

Για την εξάλειψη των μειονεκτημάτων κατά τη χρήση σύνθετου δείγματος από την τυχαία δειγματοληψία αλλά και εξαιτίας της ολοένα αυξανόμενης απαίτησης για μεγαλύτερη ακρίβεια και οικονομία που προέρχεται από την χορήγηση μεταβλητών ποσοτήτων λίπανσης σε μια έκταση, εφαρμόζεται η δειγματοληψία εδάφους σε προκαθορισμένες θέσεις εντός μιας αγροτικής έκτασης. Γενικά υπάρχουν δυο στρατηγικές δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται για την δειγματοληψία εδάφους σε προκαθορισμένες θέσεις εντός της έκτασης του αγροτεμαχίου:

(α) η δειγματοληψία σε ειδικές περιοχές-ζώνες (*Directed sampling, or zone sampling or smart sampling or smart zones*) και

(β) η δειγματοληψία σε προκαθορισμένες θέσεις με τη διαμόρφωση σε κάναβο (*Grid sampling*).

3.2.1. Δειγματοληψία σε ειδικές περιοχές-ζώνες (zone sampling)

Η δειγματοληψία σε ειδικές περιοχές-ζώνες (*zone sampling*) αναφέρεται στην βιβλιογραφία και ως «κατευθυνόμενη» δειγματοληψία (*Directed sampling*), η «έξυπνη» δειγματοληψία (*smart sampling*) ή «έξυπνες ζώνες» (*smart zones*) (Franzen and Cihaek 1998; Franzen, 2008). Η δειγματοληψία σε ειδικές περιοχές ζώνες εφαρμόζεται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι δύσκολο εκ των προτέρων να προσδιοριστεί μια κυρίαρχη περιοχή που αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος του αγρού που μας ενδιαφέρει.

Η δειγματοληψία κατά ζώνες χρησιμοποιεί μια πιο υποκειμενική και «διαισθητική» προσέγγιση για την διαίρεση οποιουδήποτε πεδίου-αγρού σε μικρότερες περιοχές-ζώνες. Τα εδαφικά δείγματα (πρωταρχικά δείγματα) από κάθε «ζώνη» συλλέγονται με τυχαίο τρόπο (πχ όπως και στην τυχαία δειγματοληψία ακολουθώντας μια προκαθορισμένη πορεία «zig-zag») και αφού αναμειχτούν και ομογενοποιηθούν ανά βάθος αναλύονται για να παρέχουν μια μέση τιμή των εδαφικών ιδιοτήτων που μας ενδιαφέρουν ανά ζώνη. Η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει ότι η μεταβλητότητα των εδαφικών ιδιοτήτων σε μια αγροτική έκταση μπορεί να εντοπιστεί εύκολα μακροσκοπικά. Για παράδειγμα, τα εδάφη με διαφορετικά ποσοστά της οργανικής ύλης μπορούν να διακριθούν από το χρώμα και ως εκ τούτου, μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο ξεχωριστής δειγματοληψίας. Τα σημεία δειγματοληψίας μπορούν να γεωαναφερθούν (*georeferenced*) με τη χρήση GPS (παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης). Τα κριτήρια για την επιλογή της δειγματοληψίας του εδάφους κατά ζώνες είναι (Jones et al., 2014):

- Όταν πρωτίστως ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε ευκίνητα στο έδαφος στοιχεία όπως για παράδειγμα το άζωτο (N). Η δειγματοληψία εδάφους κατά ζώνες υπήρξε πολύ αποτελεσματική στον εντοπισμό του μοτίβου και των υπολειμματικών συγκεντρώσεων νιτρικών ιόντων στον αγρό.
- Για τον προσδιορισμό της οργανικής ουσίας και του pH.
- Στις περιπτώσεις άγνωστου ή πολύχρονου καλλιεργητικού ιστορικού.
- Όταν στο ιστορικό καλλιέργειας δεν αναφέρεται εφαρμογή κοπριάς.
- Στις περιπτώσεις που γνωρίζουμε εξ αρχής (από εμπειρία του καλλιεργητή) ότι υπάρχει υψηλή παραλλακτικότητα των ιδιοτήτων εντός του αγροτεμαχίου.
- Όταν έχουν καταγραφεί εφαρμογές χαμηλών επίπεδων λιπασμάτων (χαμηλότερα και από τα επίπεδα της λίπανσης συντήρησης).
- Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η χρήση της τηλεπισκόπησης (*Remote sensing*) ή η καταγραφή πληροφοριών των αποδόσεων καλλιέργειας υποδεικνύει σχέση αυτής με το ανάγλυφο της περιοχής.

Είδη και στρατηγική δειγματοληψίας εδάφους κατά ζώνες:

α. Δειγματοληψία κατά ζώνες με βάση το ανάγλυφο και την τοπογραφία

Η επιλογή της δειγματοληψίας εδάφους κατά ζώνες βασίζεται στην επίδραση της τοπογραφίας και του ανάγλυφου στα επίπεδα των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους, και κυρίως στο άζωτο (NO_3-N). Το pH του εδάφους είναι γενικά μια σταθερή εδαφική

παράμετρος και ο φώσφορος (P), το κάλιο (K), και ο ψευδάργυρος (Zn) είναι μη ευκίνητα στοιχεία στο έδαφος. Τα επίπεδα και οι μορφές των μη ευκινήτων θρεπτικών στο έδαφος παραμένουν σχεδόν αμετάβλητα από έτος σε έτος. Ωστόσο, η συγκέντρωση των ευκίνητων στοιχείων (εκείνων που είναι αρκετά υδατοδιαλυτά) στο έδαφος (όπως NO_3-N, S και Cl) μεταβάλλεται συνεχώς. Ο ρυθμός μεταβολής μεταξύ των διαφόρων μορφών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από περιβαλλοντικούς παράγοντες και την τοπογραφία. Για τα στοιχεία αυτά η δειγματοληψία εδάφους κατά ζώνες ίσως θεωρείται η πιο κατάλληλη, διότι τα επίπεδα αυτών συχνά σχετίζονται με σταθερές παραμέτρους του εδάφους.

Μελέτες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα μόνιμα χαρακτηριστικά (τοπογραφία) ή οι σχετικά σταθερές ιδιότητες του εδάφους, όπως η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία, και οι χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), σχετίζονται με τη χωρική μεταβλητότητα των νιτρικών, θειϊκών, και χλωριούχων ιόντων στο έδαφος. Η τοπογραφία επηρεάζει την κίνηση των ευδιάλυτων θρεπτικών συστατικών. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία είναι συνήθως υψηλότερη σε χαμηλές περιοχές ή κοιλότητες (*depressions*) από ότι στις υψηλότερες θέσεις μιας αγροτικής έκτασης. Σε ξηρότερα κλίματα, τα ευκίνητα θρεπτικά συστατικά (NO_3-N, S και Cl) τείνουν να συσσωρεύονται στις χαμηλότερες (*depressional*) περιοχές. Με την βροχόπτωση ή την άρδευση τα ευκίνητα θρεπτικά συστατικά μπορεί να χαθούν μέσω της έκπλυσης με αποτέλεσμα, τα επίπεδα αυτών να είναι χαμηλότερα ή να απαντώνται σε μεγαλύτερα βάθη του εδάφους στις συμπιεσμένες περιοχές (*depressional*) περιοχές (Fasching, 2007).

Οι διαφορές των αγροτεμαχίων ως προς τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά τους όπως είναι το υψόμετρο, το λοφώδες, η κλίση κλπ επηρεάζουν και τις εδαφικές ιδιότητες και συνεπώς αξιοποιούνται τα χαρακτηριστικά αυτά και χρησιμοποιούνται ως κριτήριο για τον καθορισμό των ζωνών δειγματοληψίας.

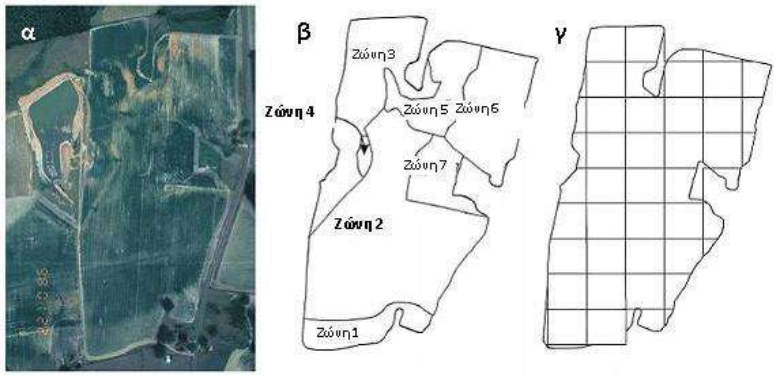
Διακρίνονται δυο διαφορετικοί τύποι δειγματοληψίας κατά ζώνες με βάση το ανάγλυφο και την τοπογραφία: Δειγματοληψία με βάση την έκταση (*area-based*) και σημειακή δειγματοληψία (με βάση το σημείο) (*point-based sampling*).

β. Άλλες μέθοδοι και εργαλεία για την δειγματοληψία εδάφους κατά ζώνες:

Η δειγματοληψία εδάφους κατά ζώνες θα πρέπει να θεωρείται μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία (μια διαδικασία που απαιτεί πάνω από μία προσπάθειες), και κατά την οποία οι πληροφορίες προστίθενται σταδιακά στη γενική γνώση της έκτασης του αγρού που μας ενδιαφέρει. Αρκετές μέθοδοι και εργαλεία θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ζωνών διαχείρισης που σε συνδυασμό με την τοπογραφία θα βοηθήσουν τον παραγωγό να κρίνει ποιες περιοχές είναι σημαντικές κατά την δειγματοληψία του εδάφους (Franzen and Cihaek 1998):

- *Δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες*. Οι αεροφωτογραφίες (*Aerial photography*) και οι δορυφορικές εικόνες (*satellite imagery*) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δείξουν περιοχές σε μια έκταση που εμφανίζουν διαφορές στο χρώμα του εδάφους ή διαφορές στην ανάπτυξη και τον χρωματισμό της φυλλικής επιφάνειας των καλλιεργειών.
- *Εδαφολογικοί χάρτες και εδαφολογικές μελέτες*. Οι εδαφολογικές μελέτες και οι εδαφολογικοί χάρτες (οριοθέτηση χαρτογραφικών μονάδων) της κάθε περιοχής (κλίμακας 1:5.000) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για τον ορισμό των ζωνών δειγματοληψίας του εδάφους.
- *Χαρτογράφηση των αποδόσεων*. Η χαρτογράφηση της συχνότητας απόδοσης (*Yield frequency mapping*) μέσω της καταγραφής των δεδομένων απόδοσης (μοτίβα απόδοσης των καλλιεργειών) μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τον σχεδιασμό ζωνών διαχείρισης των καλλιεργειών και των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους.

- *Ηλεκτρική αγωγιμότητα και αισθητήρες μαγνητικής ροής.* Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εδάφους (EC) και ηλεκτρομαγνητικοί αισθητήρες εδάφους (EM) έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την ανάπτυξη ζωνών διαχείρισης καλλιεργειών αλλά και ζωνών διαχείρισης θρεπτικών στοιχείων του εδάφους.
- *Ζώνες Διαχείρισης*. Χρήσιμες πληροφορίες για τη δειγματοληψία εδάφους κατά ζώνες μπορούμε να αντλήσουμε και από τις πρακτικές του παρελθόντος σχετικά με τη διαχείριση του εδάφους και το ιστορικό της καλλιέργειας. Επίσης μπορούν να συνδυαστούν οι προαναφερόμενες τεχνικές για τη δημιουργία μοναδικών ζωνών διαχείρισης και κατά συνέπεια αξιόπιστων ζωνών δειγματοληψίας εδαφών (Σχήμα 4β). Έτσι, ο συνδυασμός της προηγούμενης εμπειρίας, των εδαφολογικών χαρτών και μελετών, των χαρτών αποδόσεων, της τοπογραφίας, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (μέτρο της αλατότητας) μέσω ειδικών αισθητήρων, αλλά και των διαφορετικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι όλα χρήσιμα εργαλεία για την κατάρτιση πολλαπλών επίπεδων πληροφοριών και την ανάπτυξη αξιόπιστων ζωνών δειγματοληψίας εδαφών (Dinkins and Jones 2008).



Σχήμα 4. (α) Αεροφωτογραφία αγροτικής έκτασης 27 εκταρίων στην Αμερική (β) Διαχωρισμός της έκτασης σε ζώνες διαχείρισης και (γ) Διαχωρισμός της έκτασης και διαμόρφωση ενός μοτίβου πλέγματος (κάναβου) έκτασης 8 στρ. το καθένα (Rains and Thomas, 2001).

3.2.2. Δειγματοληψία σε προκαθορισμένες θέσεις σε κάναβο (Grid sampling).

Η δειγματοληψία εδάφους σε προκαθορισμένες θέσεις που ορίζονται με τη διαμόρφωση ενός κάναβου-πλέγματος (*Grid*) (Σχήμα 4γ) χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις κατά την χορήγηση μεταβλητών ποσοτήτων λίπανσης (*variable rate fertilization*). Θωρείται μια συστηματική, ακριβής αλλά και πιο δαπανηρή μέθοδος σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους δειγματοληψίας του εδάφους (Franzen and Peck, 1995; Franzen and Cihaek 1998). Χρησιμοποιεί τεχνικές για την διερεύνηση της γονιμότητας και την δειγματοληψία του εδάφους χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά μιας αγροτικής έκτασης (το υψόμετρο, το λοφώδες, η κλίση κλπ) που χρησιμοποιούνται ως κριτήριο για τον καθορισμό των διαφορετικών ζωνών όπως στην περίπτωση της δειγματοληψίας εδάφους κατά ζώνες. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή η αγροτική έκταση χωρίζεται σε τετράγωνα ή ορθογώνια τμήματα (κυψελίδες) ίσου μεγέθους (συνήθως αναφέρονται και ως «*grid cells*» στην διεθνή βιβλιογραφία) ενώ παράλληλα γίνεται η παραδοχή ότι η παραλλακτικότητα ορισμένων ιδιοτήτων του εδάφους όπως του pH και των μη ευκίνητων στο έδαφος θρεπτικών στοιχείων (όπως πχ του φώσφορου) δεν μπορεί εύκολα να εντοπιστεί. Γενικά τα εδαφικά δείγματα συλλέγονται μέσα από κάθε κυψελίδα

(*grid*) ενώ στη συνέχεια η τοποθεσία της κάθε κυψελίδας μπορεί να γεωαναφερθεί χρησιμοποιώντας την τεχνολογία GPS (*Global Positioning System*).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δειγμάτων εδάφους που συλλέγονται με τη συγκεκριμένη στρατηγική δειγματοληψίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για τη σύσταση λίπανσης (αντιμετωπίζοντας την κάθε κυψελίδα σαν ένα μικρό ξεχωριστό αγροτεμάχιο), ή μπορούν να καταχωρηθούν σε ένα πρόγραμμα χαρτογράφησης που χρησιμοποιεί την γεωστατιστική (σύνολο στατιστικών τεχνικών που σχετίζονται με μεταβλητές που μεταβάλλονται στο χώρο) για να γίνει η εξαγωγή των ορίων λίπανσης και να καθοριστεί η κατάλληλη λιπαντική αγωγή. Πιο συγκεκριμένα μπορούν να εισαχθούν σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) και σε συνδυασμό με πρόσθετα γεωχωρικά δεδομένα, όπως η υφή του εδάφους, η απόδοση των καλλιεργειών, αναλύσεις φύλλων, κ.λ.π., να χρησιμοποιούνται σε συστήματα γεωργίας ακριβείας (*precision agriculture*) για τη εφαρμογή μεταβλητών ποσοτήτων των λιπασμάτων και άλλων εισροών των καλλιεργειών.

Η δειγματοληψία σε προκαθορισμένες θέσεις με τη διαμόρφωση σε κάναβο (*Grid sampling*) χρησιμοποιείται με βάση τα εξής κριτήρια (Jones et al., 2014):

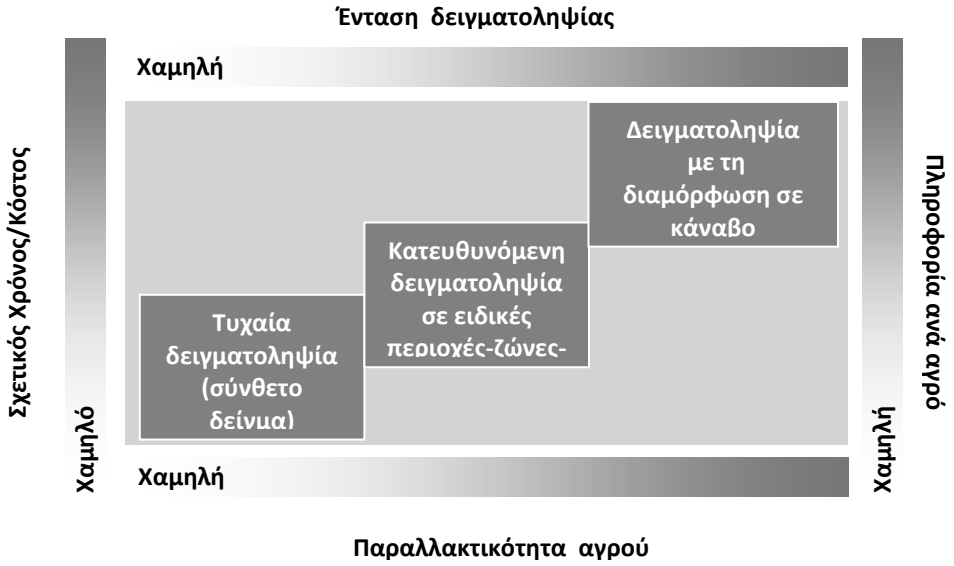
- όταν μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε κυρίως μη ευκίνητα θρεπτικά στοιχεία στο έδαφος [π.χ. ο φώσφορος (P), το κάλιο (K), και ο ψευδάργυρος (Zn)].
- Όταν υπάρχει ευρεία διακύμανση των αποτελεσμάτων των δοκιμών και η διακύμανση αυτή εμφανίζεται σε μεγάλο τμήμα της αγροτικής έκτασης που εξετάζουμε.
- Όταν υπάρχει ιστορικό χρήσης της κοπριάς ως λίπανση.
- Κατά την ενοποίηση μικρότερων αγροτεμαχίων σε μεγαλύτερα. Ενδέχεται η διαχείριση αυτών κατά το παρελθόν να έχει μεγαλύτερη επίδραση στα επίπεδα των δοκιμών εδάφους από ότι η φυσική παραλλακτικότητα.
- Όταν το ιστορικό του αγρού είναι άγνωστο.

Τα οικονομικά οφέλη της δειγματοληψίας με τη διαμόρφωση σε κάναβο δεν είναι ξεκάθαρα. Για να είναι συμφέρουσα η επιλογή ενός τέτοιου εντατικού προγράμματος το οποίο είναι πιο δαπανηρό έναντι των συμβατικών μεθόδων δειγματοληψίας, πρέπει να υπάρχουν αντισταθμιστικά οικονομικά πλεονεκτήματα είτε από την αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών, ή από τη μείωση του κόστους των λιπασμάτων.

4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Κριτήρια αποτελούν το επίπεδο της λεπτομέρειας που εξυπηρετεί τους σκοπούς της έρευνας καθώς επίσης και το κόστος διεξαγωγής της (Σχήμα 5). Κατά την επιλογή θα πρέπει να απαντηθούν μια σειρά από ερωτήματα όπως:

- Υπάρχουν τμήματα εντός της αγροτικής έκτασης με διαφορετική γονιμότητα;
- Είναι τα ανωτέρω τμήματα ή οι περιοχές αυτές αρκετά μεγάλες για να έχει νόημα η οριοθέτησή τους και η ξεχωριστή δειγματοληψία τους;
- Έχει νόημα ειδικότερα για κάθε περιοχή η εφαρμογή ξεχωριστού προγράμματος διαχείρισης θρεπτικών στοιχείων (*site-specific nutrient management*);
- Υπάρχει η δυνατότητα χορήγησης μεταβλητών ποσοτήτων λίπανσης στα τμήματα με έδαφος διαφορετικής γονιμότητας που ενδέχεται να προκύψουν;



Σχήμα 5. Καταλληλότητα των διαφόρων στρατηγικών δειγματοληψίας

Τα ομοιογενή ή μη τμήματα μιας αγροτικής έκτασης αναγνωρίζονται από τις διαφορές στην τοπογραφία, το μητρικό υλικό, το ιστορικό της διαχείρισης του εδάφους, ή το ιστορικό απόδοσης. Μπορεί να είναι αδύνατο να υποδιαιρεθεί μια αγροτική έκταση σε μικρότερα τμήματα εάν δεν υπάρχει προηγούμενη γνώση του αγρού ή δεν υπάρχουν σαφείς και εμφανείς διαφορές στην τοπογραφία ή στο μητρικό υλικό. Στις περιπτώσεις αυτές η δειγματοληψία σε προκαθορισμένες θέσεις με τη διαμόρφωση σε κάναβο (*Grid sampling*) παρέχει μεγαλύτερη χωρική λεπτομέρεια (*spatial detail*) αλλά είναι η πιο δαπανηρή μέθοδος δειγματοληψίας και συνήθως δεν είναι οικονομικά εφικτή για αναλύσεις ρουτίνας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Carr, P.M., Carlson, G.R., Jacobsen, J.S., Nielsen, G.A. and Skogley, E.O., 1991. *Farming soils, not fields: a strategy for increasing fertilizer profitability*. Journal of Production Agriculture, 4: 57-61.

Davis, J.G., Bosley, D.B., Buhler, R., Cooley, A.W., Macklin, T., Meyer, R.F., Sobolik, F. and Iversen, K.V., 1999. *Comparison of soil testing laboratories*. In Proceedings of the Western Nutrient Management Conference. 3, March 4-5. Salt Lake City, Utah. Potash & Phosphate Institute, Brookings, South Dakota.

Dinkins, P. and Jones, C., 2008. *Soil Sampling Strategies*. Montana State University. Extension. MontGuide. MT200803AG New 4/08.

Fasching, R.A., 2007. *Soil sampling for variable rate fertilizer application*. Natural Resources Conservation Service (NRCS). Nutrient Management. Agronomy Technical Note No 80.5.

Follett, R.H. and Westfall D.G., 1986. *A procedure for conducting fertilizer recommendation comparison studies*. Journal of Agronomic Education, 15: 27-29.

Franzen, D.W. and Cihaek L.J., 1998. *Soil Sampling as Basis for Fertilizer Application*. North Dakota State University, NDSU Extension Service, SF-990 (revised). Available online at: http://www.prosodol.gr/sites/prosodol.gr/files/Soil%20Sampling%20as%20a%20Basis%20for%20Fertilizer%20Application.pdf

Franzen, D.W. and Peck T.R., 1995. *Field soil sampling density for variable rate fertilization*. Journal of Production Agriculture, 8: 568-574.

Franzen, D.W., 2008. *Developing Zone Soil Sampling Maps*. Extension Service North Dakota State University. SF-1176-2 (Revised). Available online at https://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/soilfert/sf1176-2.pdf

Jacobsen, J.S., Lorbeer, S.H., Schaff, B.E. and Jones C.A., 2002. *Variation in soil fertility test results from selected Northern Great Plains laboratories*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 33: 303-319.

Jones, C., Jacobsen J. and Olson-Rutz K. 2014. *Soil Sampling and Laboratory Selection*. Nutrient Management Module No. 1. Montana State University Extension Publication 4449-1.

Κουκουλάκης, Π.Χ. και Παπαδόπουλος, Α.Η., 2001. *Η Ερμηνεία της Ανάλυσης του Εδάφους*. Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα. ISBN: 9603513423. Σελίδες 372.

Miller, R., 2013. *Reliability of soil and plant analyses for making nutrient recommendations.* Western Nutrient Management Conference. March 7-8, 2013. Reno, Nevada.

Μπαρούχας, Π., Κουλόπουλος Αθ., Μαλάμος Ν., Τσακαλίδη–Λιόπα Α., 2011. *Εγχειρίδιο Ορθών πρακτικών Δειγματοληψίας εδάφους. Επιστημονική Υποστήριξη Νέων Αγροτών. Καινοτόμες μέθοδοι καλλιέργειας*. Ειδική Έκδοση. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Μεσολογγίου. Μεσολόγγι, Σελίδες 9.

Swenson, L.J., Dahnke, W.C. and Patterson, D.D., 1984. *Sampling for Soil Testing.* North Dakota State University, Department of Soil Sciences, Research Report No. 8.

Σωτηρόπουλος, Θ., 2015. *Εγχειρίδιο Λίπανσης Φυλλοβόλων Οπωροφόρων Δένδρων*. Ειδική Έκδοση του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού Δήμητρα. Ινστιτούτο Γενετικής Βελτίωσης & Φυτογενετικών Πόρων. Τμήμα Φυλλοβόλων Οπωροφόρων Δένδρων Νάουσας. Σελίδες 24. http://www.nagref.gr/journals/publications/egxeiridio_lipansis_fyllov_opwrof.pdf

Τσίρμπας, Α., *Η ανάλυση εδάφους ως κριτήριο επιλογής*. Fertilizer Management. Έκτακτη Έκδοση της εφημερίδας Agrenda, Φύλλο 29 Μαρτίου 2014. Σελ., 28.

Warncke, D.D., 2000. *Sampling Soils for Fertilizer and Lime Recommendations.* Crop & Soil Sciences Dept. Michigan State University Extension, Extension Bulletin E498, Reprinted September 2000.

Χατζηγιαννάκης, Ε., Ηλίας, Α., Βρουχάκης, Ι., 2012. *«Οδηγίες Δειγματοληψίας και Προκατεργασίας Εδάφους»*. Ειδική έκδοση του ΙΕΒ (ΕΛΓΟ «Δήμητρα») στα πλαίσια του έργου LIFE09 ENV/GR/000302 με τίτλο «Establishment of Impact Assessment as a tool for the sustainability of agro ecosystem: The case of Mediterranean Olives" Procedure και ακρωνύμιο SAGE 10. Θεσσαλονίκη, Σελίδες 16. http://www.sage10.gr/images/orthes-praktikes/soil-sampling-protocol.pdf

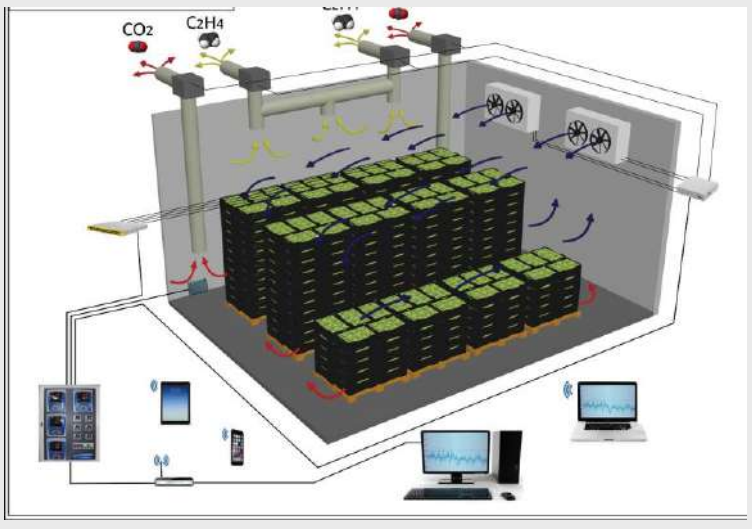
Ζαχαρίας, Μ. και Νικολάου, Α., 2009. *Δειγματοληψία εδάφους και φύλλων*. Έκδοση 16/2009. Υπουργείο Γεωργίας Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος. Λευκωσία Κύπρος. http://www.bioma.gr/images/docs/kalliergitikes_texnikes/Digmatolipsies_Edafous_Fyllon.pdf

Ιστοχώροι:

https://www.youtube.com/watch?v=LDo2m9s_SQg
http://www.cropnutrition.com/efu-soil-sampling#sampling-procedures
http://www.extension.umn.edu/agriculture/nutrient-management/
http://www.fao.org/soils-2015/about/en/

10ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

ΜΕΤΑΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ-ΜΕΤΑΣΥΓΚΟΜΙΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΨΥΧΡΟΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΑ ΝΕΚΤΑΡΙΝΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Μ. Κατσαλήρου[1], Γ. Ξανθόπουλος[2,✉], Ε. Μπελτόγια[2], Χ. Τεμπλαλέξης[2], Δ. Λέντζου[2] & Α.Γ. Μπουντουβής[1]

[1]Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Ζωγράφου, ✉boudouvi@chemeng.ntua.gr

[2]Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, ✉xanthopoulos@aua.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν οι υδατικές απώλειες μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης της διάχυσης του νερού από το εσωτερικό προς την επιφάνεια ψυχρο-συντηρούμενων νεκταρινιών. Η ψυχρο-συντήρηση έλαβε χώρα στους 0 ^{o}C και σε τέσσερα επίπεδα σχετικής υγρασίας 45%, 50%, 80% και 95%. Η υπολογιστική προσομοίωση των απωλειών νερού έγινε με το πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Comsol Multiphysics 4.3b. Ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς μάζας k_m και του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης του νερού D_{eff} έγινε μέσω μη γραμμικής βελτιστοποίησης *Levenberg-Marquardt* και το πρόβλημα επιλύθηκε ως ένα αντίστροφο πρόβλημα μεταφοράς μάζας. Από τη βελτιστοποίηση προσδιορίστηκαν οι συντελεστές D_{eff}, 2.93×10^{-12}-1.06×10^{-10} m^2/s και k_m, 1.73×10^{-10}-6.29×10^{-10} m/s. Τέλος, έγινε υπολογισμός του αναπνευστικού ρυθμού και ποσοτικοποίηση των απωλειών νερού λόγω αναπνοής και λόγω του ελλείμματος πίεσης των υδρατμών.

Λέξεις κλειδιά: ψυχρο-συντήρηση νεκταρινιού, βελτιστοποίηση, αντίσταση φλοιού, μεταφορά μάζας.

Analysis of mass losses during cold storage of nectarines by COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

M. Katsalirou[1], G. Xanthopoulos[2,✉], E. Beltogia[2], Ch. Templalexis[2], D. Lentzou[2] & A.G. Boudouvis[1]

[1]National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering, 9 Heroon Polytechniou Str., 15780, Zografou, Greece, ✉boudouvi@chemeng.ntua.gr

[2]Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, ✉xanthopoulos@aua.gr

ABSTRACT

In this study takes place the analysis of water loss during the cold storage of nectarines. This analysis is based on experimental data as well as on the computational simulation of water diffusion from the flesh of the fruit to its surface. Cold storage of the nectarines took place at 0 °C and at 45%, 50%, 80% και 95% relative humidities. The computational simulation of water loss conducted with Comsol Multiphysics 4.3b. *Levenberg-Marquardt* non-linear optimization was applied to calculate the aforementioned coefficients and the problem was solved as a reverse mass transport problem. From the simulation, the effective diffusion coefficient D_{eff} is calculated as 2.93×10^{-12}-1.06×10^{-10} m^2/s while the mass transfer coefficient k_m ranged between 1.73×10^{-10}-6.29×10^{-10} m/s. Finally, the respiratory rate was evaluated and water loss due to respiration and water vapour pressure deficit were calculated.

Keywords: cold storage of nectarines, optimization, peel resistance, mass transfer.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα νεκταρίνια χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε νερό (85-95% φ.κ.) και είναι ευάλωτα στην απώλεια νερού. Η απώλεια νερού συντελείται μετά τη συλλογή τους και αποδίδεται στους μηχανισμούς της αναπνοής και διαπνοής ενώ προκαλεί οπτική υποβάθμιση και στην υφή λόγω συρρίκνωσης με συνακόλουθη απώλεια εμπορευσιμότητας. Σύμφωνα με τον Ben-Yehoshua (1987), απώλεια 3-10% νωπού βάρους αρκεί για να ξεκινήσει ο μαρασμός και η ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος. Για να αυξηθεί η συντηρησιμότητα των ευπαθών προϊόντων, ο ρυθμός απώλειας του νερού ελαχιστοποιείται μέσω κερώματος και κατάλληλων συνθηκών αποθήκευσης (θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας). Η διαπνοή θεωρείται ως η πιο σημαντική διεργασία απώλειας νερού από τα φρέσκα φρούτα και λαχανικά. Ωστόσο, στην πλειονότητα των αναφερθέντων περιπτώσεων εκτίμησης της διαπνοής, η αναπνοή δεν θεωρείται αυτοτελής μηχανισμός απώλειας ύδατος, αλλά η συμβολή της στη συνολική απώλεια νερού εκλαμβάνεται ως αμελητέα. Σύμφωνα με τους Veraverbeke et al. (2003) η διαπνοή περιλαμβάνει μεταφορά νερού ως υγρό ή και ατμό από τους μεσοκυττάριους χώρους έως την επιδερμίδα, διαλυτοποίηση και διάχυση των μορίων νερού μέσα και κατά μήκος της επιδερμίδας. Οι Sastry & Buffington (1982 & 1983) ανέφεραν ότι η διαπνοή επηρεάζεται από *εγγενείς* παράγοντες όπως ο λόγος επιφάνειας προς όγκο ή επιφάνειας προς μάζα, οι επιφανειακές βλάβες, τα μορφολογικά και ανατομικά χαρακτηριστικά (επιδερμικοί κηροί, ρωγμές, φακίδια κ.λ.π.) και το στάδιο ωριμότητας καθώς και *εξωτερικούς* παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του αέρα. Οι Song et al. (2002) σχολίασαν τη σύνθετη φύση της απώλειας νερού μετασυλλεκτικά, επισημαίνοντας την αλληλεπίδραση της εξάτμισης υγρασίας στην επιφάνεια του προϊόντος λόγω του ελλείμματος υδρατμών και της αναπνευστικής δραστηριότητας. Έτσι, η εμπορική ζωή των καρπών υψηλής περιεχόμενης υγρασίας όπως είναι τα φρούτα εξαρτάται εκτός από τη θερμοκρασία και από την υγρασία του αέρα συντήρησης, η οποία πρέπει κατά περίπτωση να κυμαίνεται μεταξύ 85-95%.

Η αναπνοή είναι η οξειδωτική διάσπαση σύνθετων μορίων υποστρώματος (άμυλο, σάκχαρα οργανικά οξέα κ.λπ.) σε απλούστερα όπως το CO_2 και το H_2O με ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και ενδιαμέσων μορίων για τη συνέχιση των αναβολικών αντιδράσεων που είναι απαραίτητες για τη διατήρηση της κυτταρικής οργάνωσης και ακεραιότητας της μεμβράνης στα ζωντανά κύτταρα (Kader & Saltveit, 2003). Η αναπνοή επηρεάζεται από παράγοντες που διακρίνονται σε *εσωτερικούς* όπως το είδος του προϊόντος και ο γονότυπος, το στάδιο ανάπτυξης κατά τη συγκομιδή, η κλιμακτηριακή φύση, η χημική συνάφεια και *εξωτερικούς* όπως η θερμοκρασία, τα επίπεδα O_2 και CO_2 καθώς και του C_2H_4 ειδικότερα στα κλιμακτήρια φρούτα και τέλος την παρουσία τραυμάτων και μωλώπων σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες αποθήκευσης καθώς και η φυσική καταπόνηση που προκαλεί στρες έλλειψης νερού. Η αναπνοή επηρεάζει τη διαπνοή και τις συνολικές απώλειες υγρασίας, καθώς κατά τις χημικές διεργασίες και αντιδράσεις που τη συνιστούν παράγεται νερό, CO_2 και θερμότητα που μεταβάλλονται με την ένταση αυτής. Η αντίδραση που περιγράφει τον οξειδωτικό μεταβολισμό της γλυκόζης και φρουκτόζης δίνεται ως

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2835.3kJ \quad (1)$$

Σκοπός της μελέτης είναι η ανάλυση και ποσοτικοποίηση της απώλειας νερού σε ψυχρο-συντηρούμενα νεκταρίνια λόγω των μηχανισμών αναπνοής και διαπνοής αλλά και η προσομοίωση του φαινομένου της διάχυσης των υδρατμών στο εσωτερικό του καρπού. Για το σκοπό αυτό έλαβε χώρα συντήρηση νεκταρινιών ποικιλίας *Big Top* σε θερμοκρασία συντήρησης 0 ^{o}C και σε τέσσερα επίπεδα σχετικής υγρασίας 45%, 50%, 80% και 95%.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν νεκταρίνια (*Prunus persica cvar. Big Top*) μάζας 108-164 g. Οι καρποί μετά την αγορά τους από τοπικό παραγωγό, μεταφέρθηκαν στον εργαστηριακό χώρο «Μετασυλλεκτικών και Μετασυγκομιστικών Χειρισμών» του Γ.Π.Α. όπου πραγματοποιήθηκε διαλογή για την απομάκρυνση ακατάλληλων καρπών ενώ οι εναπομείναντες καθαρίστηκαν προσεκτικά με απορροφητικό χαρτί. Στη συνέχεια έγινε ταξινόμησή τους κατά μέγεθος και ακολούθησε ζύγιση και διαχωρισμός τους σε ομάδες ανά επίπεδο υγρασίας για τη συντήρηση στους 0 ^{o}C. Οι καρποί χωρίστηκαν σε ομάδες των τριών και τοποθετήθηκαν σε ψυκτικό θάλαμο και περιέκτες σταθερής σχετικής υγρασίας Xanthopoulos et al (2017) με την εφαρμογή υπέρκορων διαλυμάτων αλάτων (NaCl: 80% και $MgCl_2$*H_2O: 50%) και απιονισμένου νερού (95%). Μια σειρά καρπών συναποθηκεύτηκε ασυσκεύαστη (45%) για την προσομοίωση των τυπικών συνθηκών ψυχροσυντήρησης. Η συνολική διάρκεια συντήρησης των καρπών ήταν 19 ημέρες. Οι ζυγίσεις για τον υπολογισμό των απωλειών μάζας γίνονταν καθημερινά με ηλεκτρονικούς ζυγούς (KERN, PCB-440, Japan), ακριβείας ±0.01 g τοποθετημένους στους ψυκτικούς θαλάμους για να αποφευχθούν συμπυκνώματα στις επιφάνειες των καρπών και των ζυγών. Το ποσοστό των απωλειών μάζας (%) εκφράστηκε ως προς την αρχική μάζα των δειγμάτων. Η ογκομέτρηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της εκτόπισης νερού ενώ με το πέρας των πειραμάτων υπολογίστηκαν και οι όγκοι των πυρήνων των δειγμάτων. Για τον υπολογισμό της επιφάνειας τα δείγματα αποφλοιώθηκαν με το πέρας των πειραμάτων. Τα κομμάτια του φλοιού ανά δείγμα τοποθετήθηκαν σε λευκό χαρτόνι και φωτογραφήθηκαν με ψηφιακή κάμερα Konica Minolta Dimage Z2 (4.0 Mpixel). Ακολούθησε επεξεργασία με το λογισμικό επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας ImageJ 1.46 (Research Services Branch, NIH, MD, USA). Ο μέσος όρος της επιφάνειας των δειγμάτων ήταν 116.4±10.3 cm^2.

Ο αναπνευστικός ρυθμός μετρήθηκε με τη φορητή πειραματική διάταξη RICLOS κλειστού τύπου (Mitropoulos et al., 2000). Μέσα στα αναπνευστικά κελιά τοποθετήθηκαν ατομικά τα νεκταρίνια και στη συνέχεια κάθε κελί έκλεισε ερμητικά για να καταγραφεί η αρχική συγκέντρωση CO_2 (ppm). Από τις μετρήσεις αυτές καθώς και τις διαδοχικές σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα υπολογίστηκε ο αναπνευστικός ρυθμός RR ($mLCO_2$/100 g h). Στα νεκταρίνια τα μεταβολικά υποστρώματα που καταναλώνονται κατά την αναπνοή είναι κυρίως η γλυκόζη και το ισομερές της η φρουκτόζη, αφού οι συγκεντρώσεις των υπολοίπων είναι αμελητέες (USDA, 2016). Επειδή η φρουκτόζη και η γλυκόζη είναι ισομερή ($C_6H_{12}O_6$), η οξείδωσή τους μοιράζεται την ίδια στοιχειομετρική εξίσωση οξείδωσης, για αυτό και ως αναπνευστικό υπόστρωμα θεωρήθηκε το άθροισμα των δυο ισομερών. Η εύρεση της περιεκτικότητας των σακχάρων βασίστηκε σε βιβλιογραφικές πηγές και σε εργαστηριακές αναλύσεις δειγμάτων από την ίδια ομάδα με αυτά που εισήχθησαν στο θάλαμο ψυχροσυντήρησης. Η ανάλυση των σακχάρων έδειξε ότι περιέχονται 9.85 g/100 g νωπού προϊόντος, ενώ στη βιβλιογραφία καταγράφονται τιμές από 7.89 g/100 g νωπού προϊόντος έως και 10.79 g/100 g νωπού προϊόντος.

Από την στοιχειομετρική Εξίσωση 1 προκύπτει ότι για κάθε γραμμομόριο υποστρώματος (=180 g), παράγονται 6 γραμμομόρια H_2O (=108 g), 6 γραμμομόρια CO_2 (=134.4 L) και 2,835 kJ υπό τη μορφή θερμότητας. Επομένως απαιτούνται 1.34×10^{-3} g υποστρώματος για την παραγωγή 1 mL CO_2. Συνδυάζοντας τα δεδομένα από τη στοιχειομετρία με τη σύσταση των σακχάρων (USDA, 2016) προκύπτει ότι παράγονται 5.91 g νερού ανά 100 g νωπού προϊόντος. Ενσωματώνοντας τον αναπνευστικό ρυθμό και με τις απαραίτητες μετατροπές μέσω της περιεχόμενης υγρασίας ώστε να μετατραπούν τα g ξηράς ουσίας σε g νωπού

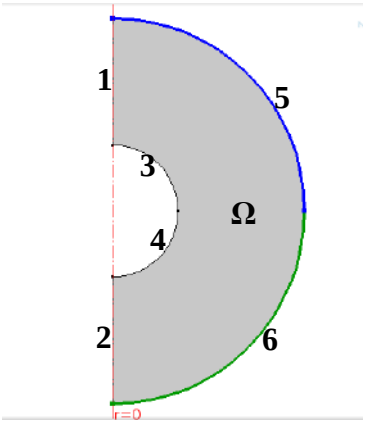
προϊόντος προκύπτει η Εξίσωση 2 υπολογισμού της απώλειας υγρασίας μέσω του αναπνευστικού ρυθμού, RR.

$$WL=0.0063784 \times RR \quad (2)$$

όπου WL η απώλεια νερού σε g H_2O/h kg νωπού καρπού και RR ο αναπνευστικός ρυθμός σε (mL CO_2/100 g h). Η ενεργότητα του νερού, a_w υπολογίστηκε στους 10 ^oC με μετρητή ενεργότητας Hygrolab C1 (Rotronic AG, Schweiz) σε τρία δείγματα αρχικά, παράλληλα με άλλες μετρήσεις που έλαβαν χώρα σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Η θερμοκρασία και η υγρασία στους ψυκτικούς θαλάμους και στους περιέκτες καταγράφονταν με ενσύρματους αισθητήρες Hobo 8H (Onset Computer Corp. Massachusetts, USA) οι οποίοι συνδέονταν σε σταθμό αποθήκευσης δεδομένων Hobo Micro-station (Onset Computer Corp. Massachusetts, USA).

2.1 Περιγραφή υπολογιστικού προβλήματος

Η προτυποποίηση του υπολογιστικού προβλήματος έγινε με τις παραδοχές ότι τα δείγματα είναι 'κούφιες' σφαίρες και ομογενή μέσα, η μεταφορά μάζας (νερού) εντός του προϊόντος γίνεται μέσω διάχυσης και δεν υφίσταται μεταφορά μάζας μεταξύ σάρκας και του πυρήνα (no flux flow). Η αναπαράσταση του υπολογιστικού χωρίου (Σχήμα 1) έγινε σε δύο διαστάσεις ως δύο ομόκεντροι κύκλοι ακτίνας ίσης με τη φαινόμενη ακτίνα των καρπών (εξωτερικός κύκλος) και την αντίστοιχη ακτίνα του πυρήνα (εσωτερικός κύκλος) για κάθε πειραματική σειρά. Για την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου επελέγησαν στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3b το μοντέλο μεταφοράς μάζας μέσω διάχυσης νερού και το μοντέλο βελτιστοποίησης. Η θεμελιώδης εξίσωση διάχυσης, όπως ορίζεται στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3b από τη σχέση $\partial c_i/\partial t+\nabla\cdot(D_i\nabla c_i)=0$, όπου D_i ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης (m^2/s), c_i η συγκέντρωση υγρασίας (mol/m^3) και t ο χρόνος ξήρανσης (s), επιλύθηκε στο υπολογιστικό χωρίο Ω.



Σχήμα 1. Επιλογή αξονικής συμμετρίας (1,2), αδιαπέρατων (3,4) και περατών (5,6) ορίων στη μεταφορά υδρατμών από το εσωτερικό του δείγματος προς τον περιβάλλοντα χώρο

Στις συνοριακές συνθήκες (Σχήμα 1) επελέγη αξονική συμμετρία [Axial Symmetry] (όρια 1,2), αδιαπέρατη στη ροή υδρατμών μεταξύ σάρκας και πυρήνα [No flux] (όρια 3,4) και ροή υδρατμών [Flux] (mol/m^2s) από το εσωτερικό των δειγμάτων προς τον περιβάλλοντα αέρα, εξωτερικά όρια 5 και 6 του χωρίου Ω (επιφάνεια δειγμάτων) σύμφωνα με το ισοζύγιο μάζας $-\mathbf{n}\cdot(D\nabla c_i)=k_{c,j}(c_{b,j}-c_i)$ όπου **n** το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου Ω, $k_{c,j}$ ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (m/s), $c_{b,j}$ η συγκέντρωση της υγρασίας στον

εξωτερικό (περιβάλλοντα) αέρα (mol/m^3), c_i η συγκέντρωση υγρασίας στην επιφάνεια του δείγματος (mol/m^3).

Η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου έγινε μέσω πλέγματος τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων (free triangular finite elements) ο αριθμός των οποίων ήταν περίπου 2,850 στοιχεία, επιλογή που βασίστηκε σε λύση ανεξάρτητη του πλέγματος (grid independent solution). Για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος, επελέγη το μοντέλο Optimization και σε αυτό ορίστηκαν αρχείο με τις πειραματικές τιμές της περιεχόμενης υγρασίας επί ξηράς ουσίας και του χρόνου ψυχροσυντήρησης (s) βάσει του οποίου λάμβανε χώρα η βελτιστοποίηση ενώ στη συνέχεια εισήχθησαν και οι αντίστοιχες παράμετροι βελτιστοποίησης (k_m, D_{eff}) με τις αρχικές τους τιμές. Στη μέθοδο βελτιστοποίησης επελέγη το μοντέλο βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt ταχείας σύγκλισης για διακριτές τιμές (gradient based, discreet values). Η μέθοδος βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt χρησιμοποιεί το κριτήριο σύγκλισης $\|\nabla F\|\infty = \|x\|_\infty / |F|$ όπου F είναι η αντικειμενική συνάρτηση και x οι μεταβλητές ελέγχου. Η βελτιστοποίηση του υπολογιστικού προβλήματος βασίστηκε σε δύο περιορισμούς: **1**) ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης $D_{eff} \in (10^{-11}\text{-}10^{-8})$ m^2/s (Sabarez, 2012) και **2**) το μέσο σχετικό σφάλμα μεταξύ προβλεπόμενης και πειραματικής περιεχόμενης υγρασίας για κάθε πειραματική σειρά να είναι κάτω από το 5.0%.

Ο υπολογισμός των αρχικών προσεγγίσεων (αρχικές τιμές) για το συντελεστή διάχυσης, D_{eff}, έλαβε χώρα μέσω της αναλυτικής επίλυσης του Νόμου του Fick. Για αυτό το λόγο, ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} εκτιμήθηκε αρχικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των κλίσεων (*method of slopes*) (Karathanos et al., 1990; Perry and Green, 1999; Xanthopoulos et al., 2009). Στην περίπτωση του νεκταρινιού η αναλυτική επίλυση του N. Fick έγινε για "κούφια σφαίρα" όπως αυτή προτάθηκε από τους Lü and Bülow (2000) μέσω της ελαχιστοποίησης της διαφοράς μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών περιεχόμενης υγρασίας για συμπαγή σφαίρα και τις αντίστοιχες (μέσω της ισοδύναμης ακτίνας σφαίρας) για "κούφια" σφαίρα. Βάσει της προηγούμενης προσέγγισης η ισοδύναμη ακτίνα σφαίρας δίνεται από την εξίσωση $r_e=b-a^3/b^2$ όπου a η εσωτερική και b η εξωτερική ακτίνα, θεωρώντας την εσωτερική επιφάνεια της "κούφιας" σφαίρας αδιαπέρατη στην κίνηση της υγρασίας και την εξωτερική επιφάνεια σε σταθερή υγρασία. Για κάθε πειραματική περίπτωση ως Global Control Variables (παράμετροι για βελτιστοποίηση) ορίζονται τα k_m και D_{eff} των οποίων οι αρχικές τιμές εισάγονται στον επαναληπτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης και στο τέλος της προσομοίωσης λαμβάνεται ως αποτέλεσμα ένας πίνακας με ζεύγη λύσεων για τα οποία υπάρχει σύγκλιση βάσει των περιορισμών που προαναφέρθηκαν. Οι αρχικές τιμές για τις παραμέτρους k_m και D_{eff}, όπως υπολογίστηκαν για τις πειραματικές περιπτώσεις ήταν **α)** ΣΥ=45%, $k_m=7.5\ 10^{-10}$ m/s και $D_{eff}=1.13\ 10^{-11}$ m^2/s, **β)** ΣΥ=50%, $k_m=7.5\ 10^{-10}$ m/s και $D_{eff}=7.81\ 10^{-12}$ m^2/s, **γ)** ΣΥ=80%, $k_m=7.5\ 10^{-10}$ m/s και $D_{eff}=3.0\ 10^{-12}$ m^2/s, **δ)** ΣΥ=95%, $k_m=7.5\ 10^{-10}$ m/s και $D_{eff}=1.43\ 10^{-12}$ m^2/s.

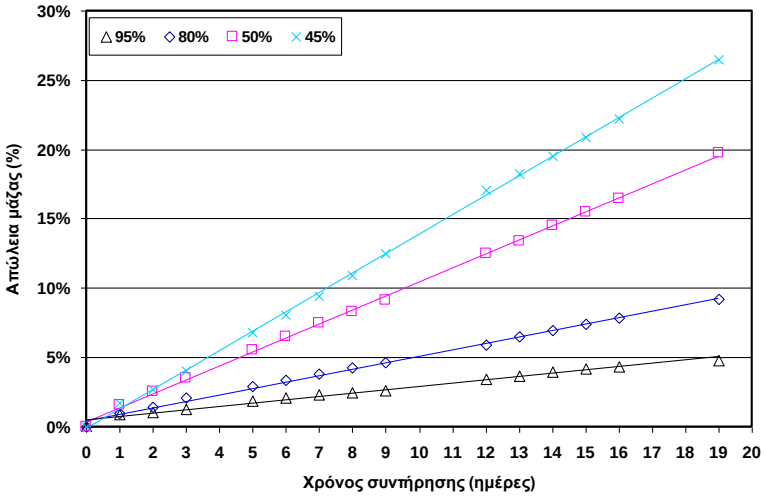
2.2 Υπολογισμός της αντίστασης του φλοιού

Ο αντίστροφος του συντελεστή μεταφοράς μάζας (k_m) στην επιφάνεια του προϊόντος αποτελεί την εξωτερική ή επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας (r_{total}) η οποία αποτελείται από την αντίσταση του φλοιού (r_{peel}) και αυτή του διαχυτικού οριακού στρώματος σε επαφή με το φλοιό του προϊόντος (r_{dbl}). Η επιφανειακή αντίσταση υπολογίστηκε ως δυο αντιστάσεις σε σειρά ($r_{total}=r_{peel}+r_{dbl}$), σύμφωνα με τον Van der Sman (2003). Από τον υπολογισμό της αντίστασης της μεταφοράς μάζας (r_{dbl}) στο διαχυτικό στρώμα γύρω από σφαίρα διαμέτρου 2R βρέθηκε ότι αντιστοιχεί στο εύρος $6.0\text{-}7.0\times10^2$ s/m

για θερμοκρασίες 55-65 ^{o}C τιμή κατά προσέγγιση τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτήν της υπολογισθείσας αντίστασης του φλοιού (r_{peel}) και για αυτό θεωρήθηκε ότι η επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας οφείλεται εξ' ολοκλήρου στην αντίσταση του φλοιού $r_{total}=r_{peel}$. Έτσι η επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας υπολογίζεται από τη σχέση $r_{total}=r_{peel}=1/k_m$ όπου r_{peel} η αντίσταση στην εξωτερική επιφάνεια του προϊόντος σε (s/m) και k_m ο συντελεστής μεταφοράς μάζας όπως αυτός υπολογίζεται από τη μέθοδο βελτιστοποίησης σε (m/s).

3. Αποτελέσματα

Οι απώλειες μάζας όπως αυτές υπολογίστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή στο Σχήμα 1 με το χρόνο συντήρησης. Παρατηρείται ότι οι απώλειες μάζας των καρπών στις τέσσερις συνθήκες σχετικής υγρασίας αυξάνονται γραμμικά με το χρόνο συντήρησης. Οι καρποί που βρίσκονταν σε συνθήκες χαμηλής σχετικής υγρασίας 45% εμφάνισαν τις μεγαλύτερες απώλειες μάζας οι οποίες έφτασαν στο τέλος της συντήρησης (20^{η} ημέρα) το 30% του αρχικού βάρους λόγω του υψηλότερου ελλείμματος πίεσης υδρατμών. Διαπιστώνεται επίσης ότι μετά την πειραματική σειρά των 45% Σ.Υ, ακολουθεί αυτή των 50%, μετά αυτή των 80% και τελευταία αυτή των 95% όσο αφορά τις ποσοστιαίες απώλειες μάζας. Για τις περιπτώσεις όπου η σχετική υγρασία ήταν μεγαλύτερη του 80% οι απώλειες υγρασίας ήταν μέσα στα πλαίσια των επιτρεπόμενων (<10%) για τη διατήρηση της εμπορικής αξίας του τελικού προϊόντος.



Σχήμα 1. Ημερήσιες απώλειες μάζας (πειραματικές) συναρτήσει του χρόνου συντήρησης στους 0 ^{o}C και σε 4 επίπεδα σχετικής υγρασίας (ΣΥ: 45, 50, 80, 95%)

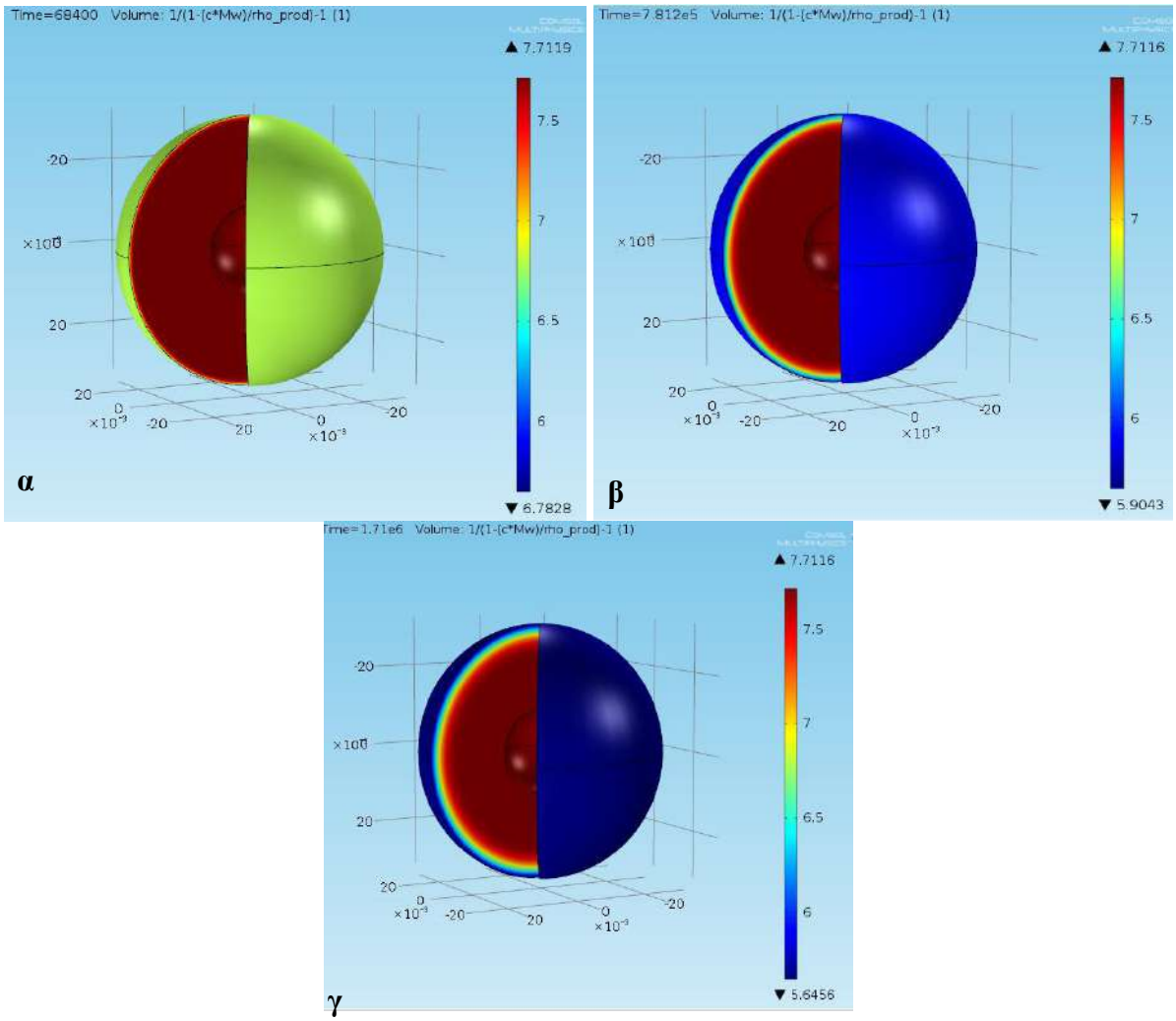
Από τη μη-γραμμική βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα των απωλειών μάζας ως μάρτυρα για όλες τις πειραματικές σειρές υπολογίστηκαν ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης (D_{eff}) καθώς και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (k_m) όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Με την αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα συντήρησης (μείωση του ελλείμματος πίεσης υδρατμών) παρατηρείται μείωση του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης, D_{eff} λόγω της αντίστοιχης μείωσης της υγρασιακής κλίσης από το εσωτερικό προς την επιφάνεια των δειγμάτων (Σχήμα 2). Οι αριθμητικές και οι αναλυτικές λύσεις για το D_{eff} εμφανίζουν εγγύτητα στα υψηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας, ενώ για τα χαμηλά διαφέρουν κατά μία τάξη μεγέθους. Η συγκεκριμένη τάση επαληθεύει την υπόθεση ότι στις υψηλές υγρασίες συντήρησης (Σ.Υ>80%) υφίσταται άμεσα

υγρασιακό ισοζύγιο μεταξύ της επιφάνειας του συντηρούμενου καρπού και της ατμόσφαιρας του θαλάμου συντήρησης σε αντίθεση με τις περιπτώσεις όπου υφίσταται μεγάλο έλλειμμα πίεσης υδρατμών.

Πίνακας 1. Τιμές από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος για το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης, το συντελεστή μεταφοράς μάζας και την αντίσταση του φλοιού

Σχετική Υγρασία (%)	k_m (m/s)	$r_{total}=r_{peel}=1/k_m$ (s/m)	D_{eff} (m^2/s)		Σχετικό σφάλμα (%)
			Αναλυτική λύση	Αριθμητική λύση	
45	6.29×10^{-10}	1.59×10^{9}	1.13×10^{-11}	1.06×10^{-10}	0.3
50	4.60×10^{-10}	2.17×10^{9}	7.81×10^{-12}	7.91×10^{-11}	0.04
80	4.72×10^{-10}	2.12×10^{9}	3.00×10^{-12}	2.93×10^{-12}	0.03
95	1.73×10^{-10}	5.78×10^{9}	1.43×10^{-12}	2.48×10^{-12}	0.006

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, η επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας οφείλεται εξ' ολοκλήρου στην αντίσταση του φλοιού η οποία βέβαια εξαρτάται τόσο από τη φυσιολογική κατάσταση του ίδιου του προϊόντος όσο και από την επεξεργασία που μπορεί να υποστεί πχ. κατά την ξήρανσή του.

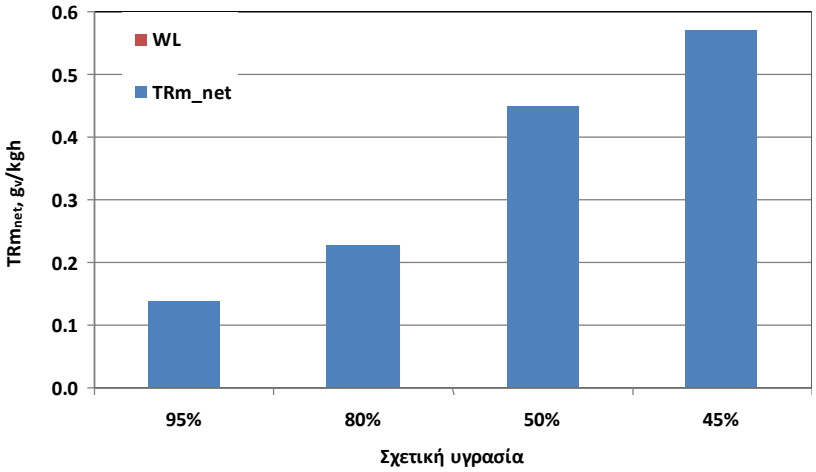


Σχήμα 2. Στιγμιότυπα προσομοίωσης της απώλειας νερού σε ψυχρο-συντηρούμενα νεκταρίνια [**α**: t=19h, **β**: t=9d, **γ**: t=20 d] σε συνθήκες 0 ^{o}C και Σ.Υ. 95%. Η κλίμακα αντιστοιχεί στην περιεχόμενη υγρασία επί ξηράς ουσίας ($kg_{νερού}/kg_{ξο}$)

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι η παραλλακτικότητα στην αντίσταση του φλοιού δεν είναι δυνατόν να ταυτοποιηθεί παρά μόνο εφόσον έχει γίνει πειραματική και μαθηματική προσομοίωση. Σε αυτό το σημείο, περαιτέρω έρευνα στην μεταβολή της αντίστασης με το χρόνο συντήρησης αλλά και τη φυσιολογική κατάσταση αυτού θα ήταν χρήσιμη για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της αφυδάτωσης.

Για την αξιολόγηση των αναπνευστικών ρυθμών, υπολογίστηκε ο μέσος αναπνευστικός ρυθμός και συγκρίθηκε με αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές οι οποίες είναι μεταξύ 0.2 και 0.3 mL CO_2/100g h στους 0 ^{o}C έως -1 ^{o}C και Σ.Υ.=90-95% συνθήκες που αποτελούν ενδεδειγμένες για την αποθήκευση των νεκταρινιών. Ειδικότερα, οι μέσοι αναπνευστικοί ρυθμοί που καταγράφηκαν στις εξεταζόμενες συνθήκες συντήρησης ήταν **α)** ΣΥ=45%, RR=0.37±0.1 mLCO_2/100g h, **β)** ΣΥ=50%, RR=0.30±0.06 mLCO_2/100g h, **γ)** ΣΥ=80%, RR=0.24±0.04 mLCO_2/100g h, **δ)** ΣΥ=95%, RR=0.32±0.06 mLCO_2/100g h.

Οι απώλειες νερού όπως καταγράφηκαν περιλαμβάνουν το νερό που απωλέσθηκε λόγω διαπνοής και αναπνοής του προϊόντος. Για το διαχωρισμό αυτών των δύο διεργασιών αφαιρέθηκε από το συνολικό ρυθμό διαπνοής, TRm (gH_2O/kgh) το νερό που παράχθηκε (WL) από την αερόβια αναπνοή (Εξίσωση 2), δηλαδή TRm_{net}=TRm-WL (gH2O/kg · h). Κατά αυτόν τον τρόπο ποσοτικοποιήθηκαν οι επιμέρους συνεισφορές στην απώλεια νερού από το φυσικό φαινόμενο της εξάτμισης νερού λόγω του ελλείμματος πίεσης των υδρατμών και του αντίστοιχου φυσιολογικού φαινομένου απώλειας νερού λόγω αναπνοής.



Σχήμα 3. Ποσοτικοποίηση των απωλειών νερού κατά τη συντήρηση σε 4 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας. Με κόκκινο απεικονίζεται η συμβολή της αναπνοής στη συνολική απώλεια νερού

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι επιμέρους απώλειες νερού για όλες τις πειραματικές περιπτώσεις. Από την ποσοτικοποίηση αυτή προκύπτει ότι οι απώλειες νερού λόγω αναπνοής εκτιμώνται στο 0.7 % επί των συνολικών απωλειών για ΣΥ 80%, στο 0.4% για ΣΥ 50%, στο 1.5% για ΣΥ 95% και στο 0.4 % για ΣΥ 45%. Οι μεγαλύτερες συνολικές απώλειες νερού, σε απόλυτες τιμές, απαντώνται στις περιπτώσεις με μεγάλο έλλειμμα πίεσης υδρατμών (ΣΥ 50% και 45%). Στις περιπτώσεις με μικρότερο έλλειμμα υδρατμών (ΣΥ 80% και 95%), οι απώλειες λόγω αναπνοής, αποτελούν μεγαλύτερο τμήμα των συνολικών υδατικών απωλειών (0.7% και 1.5%, αντίστοιχα). Τα ποσοστά αυτά επαληθεύουν την

αρχική υπόθεση ότι σε μηδενικά ή σχεδόν μηδενικά ελλείμματα πίεσης υδρατμών (RH=95%) οι απώλειες νερού υφίστανται ακόμα και σε πολύ μικρές τιμές.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το προτεινόμενο υπολογιστικό μοντέλο έχει τη δυνατότητα να εκτιμά αρκετά καλά τα πειραματικά δεδομένα αφυδάτωσης κατά την ψυχρο-συντήρηση νεκταρινιών εφόσον το υπολογιζόμενο σφάλμα σε όλες τις περιπτώσεις δεν ξεπέρασε το 1.0%. Ο υπολογιζόμενος μέσος συντελεστής διάχυσης D_{eff} κυμάνθηκε μεταξύ 2.93×10^{-12} - 1.06×10^{-10} m^2/s και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας k_m κυμάνθηκε μεταξύ 1.73×10^{-10} - 6.29×10^{-10} m/s. Η αντίσταση του φλοιού r_{total} κυμάνθηκε μεταξύ 1.59×10^{9} - 5.78×10^{9} s/m. Από την ποσοτικοποίηση των απωλειών μάζας (νερού) λόγω διαπνοής και αναπνοής βρέθηκε ότι οι απώλειες νερού λόγω της αναπνοής ήταν κάτω του 1.5% σε σχέση με αυτές λόγω της διαπνοής επιβεβαιώνοντας την αρχική υπόθεση ότι ακόμα και σε μηδενικά ή σχεδόν μηδενικά ελλείμματα πίεσης υδρατμών (RH=95%) οι απώλειες νερού υφίστανται ακόμα και σε πολύ μικρές τιμές.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AOAC, 1997. *Official Methods of Analysis, 16th ed*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.

Grabowski, S.G., Marcotte, M and Ramaswamy, S.H., 2003. *Drying of fruits, vegetables and spices.* In: A. Chakraverty, A.S. Mujumdar, G.S.V. Raghavan and H.S. Ramaswamy (eds), Handbook of postharvest technology: cereals, fruits, vegetables, tea and spices. Marcel Dekker, Inc. New York, 653-695.

Λέντζου Δ., 2015. Μελέτη της αντίστασης του φλοιού νωπών σύκων στο ρυθμό ξήρανσης με ρεύμα θερμού αέρα. Μεταπτυχιακή εργασία, Γ.Π.Α., 80 σελ. (αδημοσίευτη).

Cefola, M., Pace, B., Sergio, L., Baruzzi, F., Gatto, M. A., Carito, A., ... & Di Venere, D. (2014). Postharvest performance of fresh-cut 'Big Top'nectarine as affected by dipping in chemical preservatives and packaging in modified atmosphere. *International journal of food science & technology*, *49*(4), 1184-1195.

Maskan, M., 2001. *Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying*. Journal of Food Engineering, 48(2), 169-175.

Mayor L. and Sereno A.M., 2004. *Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review*. Journal of food engineering, 61, 373-386

Pham, Q.T., Bulens, I., Ho, T.Q., Verlinde, B.E., Verboven, P. and Nicolai, B., 2009. *Simultaneous measurement of ethane diffusivity and skin resistance of 'Jonica' apples by efflux experiment*. Journal of food engineering, 95, 471-478.

Quintero-Ramos, A., De La Veja, C., Hernandez, E., and Anzaldua- Morales, A., 1993. *Effect of conditions of osmotic treatment on the quality of dried apple dices.* Aiche Symposium Series, 89, 108–113.

Sabarez, H.T., 2012. *Computational modeling of the transport phenomena occurring during convective drying of prune*. Journal of food engineering, 111, 279-288.

Schotsmans, W., Verlinden, B.E., Lammertyn, J., Peirs, A., Janksok, P.T., Scheerlink, N., Nicolai, B.M., 2002. *Factors affecting skin resistance measurements in pipfruit.* Postharvest Biology and Technology, 25, 169–179.

Van der Sman, R.G.M., 2003. *Simple model for estimating heat and mass transfer in regular-shaped foods*. Journal of food engineering, 60, 383-390.

Xanthopoulos G., Templalexis C., Aleiferis N-P, Lentzou D., 2017. The contribution of transpiration and respiration in water loss of perishable agricultural products: The case of pears, Biosystems Engineering, 158, 76-85.

Xanthopoulos G., Lambrinos Gr., and Manolopoulou H., 2007. *Evaluation of thin layer Models for mushroom (Agaricus Bisporus) Drying*. Drying technology, 25: 1471-1481.

Xanthopoulos G., Yanniotis S., and Lambrinos Gr., 2009. *Water diffusivity and drying kinetics of air drying of figs.* Drying Technology, 27(3), 502-512.

Xanthopoulos, G., Yanniotis, S. and Boudouvis, A.G., 2012. *Numerical simulation of variable water diffusivity during drying of peeled and unpeeled tomato*. Journal of food science, 77(10), E287-E296.

Xanthopoulos G., Nastas C.V., Boudouvis A.G. and Aravantinos-Karlatos E., 2014. *Color and Mass Transfer kinetics during air drying of pretreated oyster mushrooms (Pleurotus ostreatus spp).* Drying Technology: An International Journal, 32 (1), 77-88.

ΞΗΡΑΝΣΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΩΣΜΩΤΙΚΑ ΑΦΥΔΑΤΩΜΕΝΟΥ ΙΠΠΟΦΑΟΥΣ ΜΕ ΣΤΕΒΙΑ

Λέντζου Δ., Γεωγιάδου Ο., Τεμπλαλέξης Χ., Ξανθόπουλος Γ. ✉
Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,
✉*xanthopoulos@aua.gr*

Περίληψη

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά ιπποφαούς (*Hippophae L., var. Chuyskaya*), το οποίο είχε υποστεί ωσμωτική αφυδάτωση με υπέρτονο διάλυμα στέβια, 30 και 15 ^{o}Brix, στους 40 ^{o}C και ξήρανση με θερμό αέρα σε φούρνο, στους 50 ^{o}C. Εξετάστηκαν 4 πειραματικές σειρές, 2 για κάθε τύπο διαλύματος, η διαφορά μεταξύ των 2 πειραματικών σειρών σε κάθε περίπτωση είναι η εφαρμογή ή μη ζεματίσματος με ατμό. Σε κάθε περίπτωση μετρήθηκαν τα ολικά διαλυτά στερεά συστατικά, η οξύτητα και η βιταμίνη C, πριν και μετά από κάθε επεξεργασία (ώσμωση, ξήρανση), και υπολογίστηκαν η απώλεια νερού (WL %), η αύξηση της συγκέντρωσης των σακχάρων (SG) κατά την ώσμωση, η περιεχόμενη υγρασία κατά την ξήρανση καθώς και ο αδιάστατος λόγος της υγρασίας MR. Τέλος, έγινε σύγκριση των πειραματικών δεδομένων ξήρανσης με το λογαριθμικό μοντέλο ξήρανσης.

Λέξεις κλειδιά: ιπποφαές, στέβια, ωσμωτική αφυδάτωση, ξήρανση

DRYING AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF OSMOTICALLY DEHYDRATED SEABUKTHORN WITH STEVIA

Lentzou D., Georgiadou O., Templalexis Ch., Xanthopoulos G. ✉
Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens,
✉*xanthopoulos@aua.gr*

In this study, were studied the quality characteristics of sea buckthorn (*Hippophae L., var. Chuyskaya*) dehydrated osmotically in 30% and 15% brix solutions of stevia, at 40 ° C and then air dried in an oven at 50 ° C. Four experimental rows, 2 for each type of solution, were examined, the difference between the 2 experimental rows in each case was the application or not of steam blanching. In each case the total soluble solids, acidity and vitamin C were measured before and after each treatment (osmosis, drying) and then calculated water loss (WL%), the increase of the sugar concentration (SG) during osmosis , the moisture content (MC) on drying and the ratio of moisture MR. Finally, the experimental drying data compared with the logarithmic model of drying.

Keywords: sea buckthorn, stevia, osmotic dehydration, drying

1. Εισαγωγή

Το ιπποφαές (*Hippophaes rhamonides L)* θεωρείται η σημαντικότερη από τις υπερτροφές (**superfoods**) και καλλιεργείται για τον καρπό και τα φύλλα του. Καταναλώνεται ώριμος, νωπός ή αποξηραμένος και χρησιμοποιείται για φαρμακευτικούς και καλλωπιστικούς σκοπούς. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το ιπποφαές περιέχει 190 βιοενεργά συστατικά, από τα οποία 106 βρίσκονται στο έλαιο που περιέχεται στους καρπούς και τα φύλλα του φυτού. Αναλύοντας τα θρεπτικά του συστατικά, διαπιστώνεται ότι στον καρπό του εντοπίζεται υψηλή περιεκτικότητα σε βιταμίνη C, έως και δεκαπέντε φορές υψηλότερη από το πορτοκάλι. Το συγκεκριμένο στοιχείο αποδεικνύει ότι αποτελεί μία από τις πιο πλούσιες πηγές βιταμίνης C (100-2750 mg/100g καρπού) χωρίς να απουσιάζουν και άλλα πολύτιμα θρεπτικά στοιχεία όπως τα καροτενοειδή, όλο το σύμπλεγμα της βιταμίνης Β, η βιταμίνη Ε, αμινοξέα, μέταλλα (K, Na, Mg, Ca, Fe, Zn, Se), μονοσακχαρίτες, οργανικά οξέα (μηλικό και κιτρικό κυρίως), ελεύθερα αμινοξέα, πτητικές ενώσεις, διάφορα φλαβονοειδή, λιπαρά οξέα, τριγλυκερίδια, γλυκεροφωσφολιπίδια, φυτοστερόλες, εστέρες, ζεαξανθίνη και άλλες φαινολικές ενώσεις, β-σιτοστερόλη, και 32% πρωτεΐνη. Επίσης περιέχει περισσότερα από 15 υπεραντιοξειδωτικά, εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες των λιπαρών οξέων Ω (Ω-3 σε ποσότητα 17-20%, Ω-6 σε ποσότητα 36-40%, Ω-9 και Ω-7) (Αποστολίδου & Γιορμπαλίδου, 2012). Οι καρποί δεν θεωρούνται πλούσιοι σε σάκχαρα. Η μέση περιεκτικότητα σε σάκχαρα κυμαίνεται από 2.0 έως 3.26% και μπορεί να φτάσει μέχρι και 7.0% σε ρωσικές ποικιλίες οι οποίες θεωρούνται πιο γλυκές σε γεύση (Zeb, 2004).

Η στέβια (Stevia) είναι ένα φυσικό γλυκαντικό που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία των τροφίμων και ποτών ως υποκατάστατο της ζάχαρης καθώς οργανοληπτικά μια ποσότητα στέβια έχει 15 έως και 30 φορές περισσότερη γλυκύτητα από μια ίση ποσότητα σακχαρόζης (Savita et al., 2004). Το φυτό στέβια (*Stevia rebaudiana Bertoni*) ανήκει στην οικογένεια Compositae ή Asteraceae και στην υποοικογένεια Eupatorieae (Ευπατόριες). Υπάρχουν περίπου 280 είδη του γένους στέβια αλλά μόνο η Stevia rebaudiana έχει αυτή την ισχυρή γλυκαντική δύναμη (Lemus et al., 2012). Τα φυτά στέβια είναι μια καλή πηγή υδατανθράκων, πρωτεϊνών, ακατέργαστων ινών, μετάλλων, απαραίτητων και μη αμινοξέων που είναι σημαντικά για την ανθρώπινη διατροφή. Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά της εκχυλισμένης στεβιοσίδης καθώς και η σταθερότητα της σε διάφορες θερμοκρασίες και pH, μαζί με τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της, επιτρέπουν την εφαρμογή αυτής της γλυκαντικής ουσίας ως υποκατάστατο της σακχαρόζης σε διάφορα ποτά, αναψυκτικά και προϊόντα αρτοποιίας (Abou-Arab et al., 2010).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της μεταβολής των ποιοτικών χαρακτηριστικών ραγών ιπποφαούς ποικιλίας Chuyskaya κατά την ωσμωτική αφυδάτωσή τους σε υδατικό διάλυμα στέβια 15 και 30 ^{o}Brix στους 40 ^{o}C και την μετέπειτα ξήρανσή τους στους 50 ^{o}C, συγκρίνοντας την επίδραση που είχε σε αυτά η εφαρμογή ή μη ζεματίσματος με ατμό. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι επιδράσεις των χειρισμών αυτών στην απώλεια μάζας (water loss), στην περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά στερεά (Brix), στην οξύτητα, στη συγκέντρωση της βιταμίνης C και στην απορρόφηση σακχάρων (sugar gain) από το προϊόν.

2. Υλικά και Μέθοδοι

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν καρποί ιπποφαούς ποικιλίας Chuyskaya, προέλευσης Καρδίτσας Θεσσαλίας. Η προμήθεια των καρπών έγινε από τοπικό παραγωγό. Οι καρποί μετά τη συγκομιδή τους μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο όπου έλαβε χώρα η αρχική διαλογή για την απομάκρυνση ακατάλληλων καρπών με ασθένειες, τραυματισμένων και υπερώριμων. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο ομάδες καρπών νωπού

δείγματος των 50 τεμαχίων έκαστη. Συγκεκριμένα στην Α ομάδα, οι ράγες ζύγιζαν 38.15 g και στη Β 35.77 g, η τιμή των ΟΔΣΣ ήταν 9.1% και 8.2% ^{o}Brix αντίστοιχα, το μηλικό οξύ ήταν 0.34% ενώ το κιτρικό οξύ 0.54% για την Α ομάδα ενώ για την Β ήταν 0.31% ενώ το κιτρικό οξύ 0.51%, η βιταμίνη C βρέθηκε ως 487.2 ppm και 490.9 ppm αντίστοιχα για την κάθε ομάδα.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τέσσερις πειραματικές σειρές ωσμωτικής αφυδάτωσης, δυο σειρές σε υδατικό διάλυμα στέβια των 30 °Brix στους 40 °C και ξήρανσης σε ρεύμα θερμού αέρα στους 50 °C και δυο σε διάλυμα 15 °Brix στους 40 °C και ξήρανσης αντίστοιχα στους 50 °C. Η κάθε σειρά αποτελούνταν από 6 δείγματα των 25 g. Η διαφορά των δυο πειραματικών ομάδων για κάθε τύπο διαλύματος ήταν η εφαρμογή ή όχι ζεματίσματος με ατμό διάρκειας 3 min. Μετά την εφαρμογή ή μη προχειρισμού τα δείγματα τοποθετούνταν σε μικρές διάτρητες συσκευασίες. Ακολουθούσε το στάδιο της ωσμωτικής αφυδάτωσης για 6 h, με τη βύθιση των συσκευασιών σε βάζα με υπέρτονο υδατικό διάλυμα στέβια και ανά μια ώρα πραγματοποιούνταν ζυγίσεις των δειγμάτων. Στο τέλος της διεργασίας αυτής ζυγίζονταν τα ωσμωτικά αφυδατωμένα δείγματα τα οποία τοποθετούνταν σε κώδωνα με silica gel ώστε να μην υπάρξουν μεταβολές στην υγρασία του προϊόντος. Την επόμενη μέρα, από τα αφυδατωμένα δείγματα, το ένα τοποθετούταν σε φούρνο κενού με συνθήκες θερμοκρασίας 70 ^{o}C και πίεσης 0.01mbar για τη μέτρηση της ξηράς ουσίας, στα άλλα δύο δείγματα γίνονταν μετρήσεις ΟΔΣΣ, οξύτητας και βιταμίνης C και τα υπόλοιπα τρία τοποθετούνταν σε φούρνο για ξήρανση στους 50 ^{o}C.

Κατά τη ξήρανση αυτών, πραγματοποιούνταν ωριαίες μετρήσεις βάρους των δειγμάτων. Στο τέλος της επεξεργασίας τα αποξηραμένα δείγματα παρέμεναν ξανά σε κώδωνα και την επόμενη μέρα αφού ζυγίζονταν, γίνονταν μετρήσεις, οξύτητας, ΟΔΣΣ και βιταμίνης C. Τα τελικά δείγματα σε κάθε περίπτωση πολτοποιούνταν και στη συνέχεια το καθένα από τα πολτοποιημένα δείγματα διηθούνταν για τη λήψη χυμού με τον οποίον πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις των ΟΔΣΣ, της οξύτητας και της βιταμίνης C. Στην περίπτωση των αποξηραμένων δειγμάτων προηγούνταν της διήθησης αραίωση του πολτού με 10 ml απιονισμένου νερού.

2.1 Απώλειες μάζας και περιεχόμενη υγρασία

Η μέτρηση μάζας των δειγμάτων πραγματοποιούταν με ηλεκτρονικό ζυγό KERN (PCB-440, Japan) με ακρίβεια ±0.01g, η μέτρηση μάζας των υπέρτονων διαλυμάτων γινόταν με ηλεκτρονικό ζυγό OHAUS Chap II και η μέτρηση μάζας της ξηράς ουσίας με ηλεκτρονικό ζυγό AND (FA-2000, Japan) με ακρίβεια ±0.01 g.

Οι απώλειες μάζας υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη σχέση $WL=[(M_o-m_o)-(M_o-m_t)]/M_o$, η περιεχόμενη υγρασία σύμφωνα με τη σχέση $MC=(M_t-m_t)/m_t$ και το υγρασιακό πηλίκο από τη σχέση $MR=MC_o/MC_t$ όπου: M_o η μάζα του νωπού προϊόντος, m_o η μάζα ξηράς ουσίας του νωπού προϊόντος, M_t η μάζα του αποξηραμένου δείγματος, m_t η μάζα ξηράς ουσίας του προϊόντος, MC_o η αρχική περιεχόμενη υγρασία επί ξηράς ουσίας (t=0) και MC_t η περιεχόμενη υγρασία επί ξηράς βάσης την χρονική στιγμή t.

2.2 Ωσμωτική αφυδάτωση

Η ωσμωτική αφυδάτωση πραγματοποιήθηκε με την εμβάπτιση των έξι δειγμάτων σε βάζα με υπέρτονο διάλυμα στέβια 30 και 15 °Brix. Το διάλυμα των περιεκτών αποτελούταν από 500 ml απιονισμένου νερού και 209 g στέβια στο διάλυμα των 30 °Brix και 91 g αντίστοιχα στέβια για το διάλυμα των15 °Brix. Τα βάζα τοποθετήθηκαν σε υδατόλουτρο στους 40 °C. Η παρασκευή των διαλυμάτων έγινε με χρήση θερμαινόμενου μαγνητικού

αναδευτήρα RCT basic, ο οποίος είχε ρυθμιστεί στους 40 °C. Ο υπολογισμός πρόσληψης σακχάρων (SG) κατά την ωσμωτική αφυδάτωση υπολογίστηκε σύμφωνα με την σχέση $SG=(m_t-m_o)/m_o$, όπου m_o η μάζα ξηράς ουσίας του νωπού προϊόντος και m_t η μάζα ξηράς ουσίας ωσμωτικά αφυδατωμένου προϊόντος.

2.3. Ξήρανση με θερμό αέρα

Η ξήρανση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε απλό ξηραντήρα Heraeus T5028 για διάστημα 15 h στους 50 °C. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για προσδιορισμό της ξηράς ουσίας εισήλθαν σε φούρνο κενού Binder VD 53 για 24 h στους 70 °C και πίεση 0.01 mbar, σύμφωνα με το πρωτόκολλο AOAC (1997).

Το καταλληλότερο μοντέλο για την περιγραφή της ξήρανσης με θερμό αέρα όπως έχει αποδειχτεί είναι το λογαριθμικό, $MR=a\times\exp(-b\times t)+c$, όπου τα a και c είναι αδιάστατες σταθερές, b η σταθερά ξήρανσης (h^{-1}) και t ο χρόνος ξήρανσης (Xanthopoulos et al., 2007a & b; Xanthopoulos et al., 2010; Xanthopoulos et al., 2012). Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για την προτυποποίηση των δεδομένων επειδή απέδιδε υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού R^2_{adj}=0.96-0.98.

2.4. Ολικά Διαλυτά Στερεά Συστατικά (ΟΔΣΣ) και οξύτητα

Οι μετρήσεις για τα ολικά διαλυτά στερεά (ΟΔΣΣ) των ωσμωτικά αφυδατωμένων και αντίστοιχα αποξηραμένων καρπών πραγματοποιούνταν με την τοποθέτηση δείγματος διηθημένου χυμού, στην ειδική υποδοχή ενός ψηφιακού διαθλασιμέτρου (SR-400, Japan) διακριτικής ικανότητας 0.1 °Brix και ακρίβειας ± 0.25 °Brix, ώστε να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των ολικών διαλυτών στερεών στο χυμό. Η μεταβολή των ολικών διαλυτών στερεών εκφράζεται σε % ^{o}Brix (g σακχάρων ανά 100 g χυμού).

Η μέτρηση της οξύτητας πραγματοποιήθηκε με ψηφιακό οξύμετρο (GMK-708, UK) με διακριτική ικανότητα ±0.01 % και ακρίβεια ±0.05%. Με τη βοήθεια μιας πιπέτας, λαμβανόταν χυμός 0.33 ml και ακολουθούσε αραίωσή του στα 20 ml. Στη συνέχεια λαμβανόταν μικρή ποσότητα με τη βοήθεια πιπέτας και τοποθετούταν το δείγμα στην υποδοχή του οξύμετρου. Οι τιμές που λαμβάνονταν αφορούσαν το μηλικό και το κιτρικό οξύ

2.6. Υπολογισμός βιταμίνης C

Η μέτρηση της βιταμίνης C πραγματοποιήθηκε με αυτόματο σύστημα τιτλοδότησης HANNA HI902C και χρήση ρυθμιστικού διαλύματος ιωδίνης 0.02 N. Ο τιτλοδότης έφερε θερμόμετρο (AISI 316 από ανοξείδωτο χάλυβα), για την καταγραφή της θερμοκρασίας κατά την τιτλοδότηση, αναδευτήρα ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή του ρυθμιστικού διαλύματος ιωδίνης στο δείγμα του χυμού και πεχάμετρο ακρίβειας ±0.001 pH. Για την μέτρηση της βιταμίνης C γνωστή ποσότητα διηθούμενου χυμού τοποθετούταν σε ποτήρι ζέσεως, χωρητικότητας 250 ml, αραιωνόταν με απιονισμένο νερό μέχρι την ένδειξη των 100 ml και προστίθονταν 8ml διαλύματος θειικού οξέος 16 % και 3 g ιωδιούχου καλίου.

2.2.8. Στατιστική ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων

Η ανάλυση διακύμανσης (**AN**alysis **O**f **VA**riance - **ANOVA**) των πειραματικών δεδομένων έγινε με το στατιστικό πρόγραμμα Statgraphics Centurion XVI (Statpoint Technologies, Virginia, USA) σε επίπεδο σημαντικότητας $P\leq0.05$. Επίσης για την επεξεργασία των

δεδομένων χρησιμοποιήθηκε και το πρόγραμμα Curve Expert 1.4, με το οποίο λάμβανε χώρα γραμμική και μη παλινδρόμηση των πειραματικών δεδομένων.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Μεταβολή ολικών διαλυτών στερεών (ΟΔΣΣ)

Η ανάλυση διασποράς (ANOVA) έδειξε ότι η μεταβολή των ολικών διαλυτών στερεών συστατικών, σε κάθε περίπτωση, εξαρτάται κυρίως από την εφαρμογή ή όχι προχειρισμού (P-value<0.05). Οι τέσσερις πειραματικές σειρές, όσον αφορά τη μεταβολή των ολικών διαλυτών στερεών (^{o}Brix), είχαν στατιστική διαφορά τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με το μάρτυρα. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση των ολικών διαλυτών στερεών κατά την ωσμωτική αφυδάτωση ήταν υψηλότερη στα δείγματα που εφαρμόστηκε ο προχειρισμός του ζεματίσματος με ατμό σε σχέση με αυτά που δεν εφαρμόστηκε. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς με την εφαρμογή του προχειρισμού η επιδερμίδα του ιπποφαούς εμφάνισε ρωγμές διευκολύνοντας την εισχώρηση των σακχάρων του διαλύματος στον καρπό. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με πρόσφατη εργασία των Araya-Farias et al. (2014), σύμφωνα με τους οποίους το ζεμάτισμα με ατμό, συνέβαλε αποτελεσματικά ως προχειρισμός στην αύξηση των ολικών διαλυτών στερεών σε ράγες ιπποφαούς. Επίσης, παρατηρήθηκε διαφορά στην τιμή των ολικών διαλυτών στερεών και για τη διεργασία της ξήρανσης, καθώς η ξήρανση των καρπών στους οποίους είχε γίνει προχειρισμός παρουσίασε την υψηλότερη τιμή στα ολικά διαλυτά στερεά (πίνακας 1).

Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε πως η αύξηση της ξηράς ουσίας του προϊόντος μέσω της απορρόφησης σακχάρων (sugar gain) που επιτεύχθηκε κατά την ωσμωτική αφυδάτωση, επηρεάστηκε σημαντικά από την εφαρμογή ή μη του προχειρισμού. Όπως υπολογίστηκε, από την σχέση που αναφέρθηκε παραπάνω, οι καρποί οι οποίοι τοποθετήθηκαν στα διαλύματα 30 ^{o}Brix και στους οποίους εφαρμόστηκε ζεμάτισμα με ατμό παρουσίασαν αύξηση 82% της ξηράς ουσίας ενώ στην περίπτωση μη εφαρμογής ζεματίσματος παρουσίασαν αύξηση της ξηράς ουσίας 53%. Αντίστοιχα στους καρπούς που τοποθετήθηκαν σε διαλύματα 15 ^{o}Brix παρουσιάστηκε αύξηση ξηράς ουσίας 84% στην περίπτωση εφαρμογής προχειρισμού και 39% αύξηση στην περίπτωση μη εφαρμογής προχειρισμού.

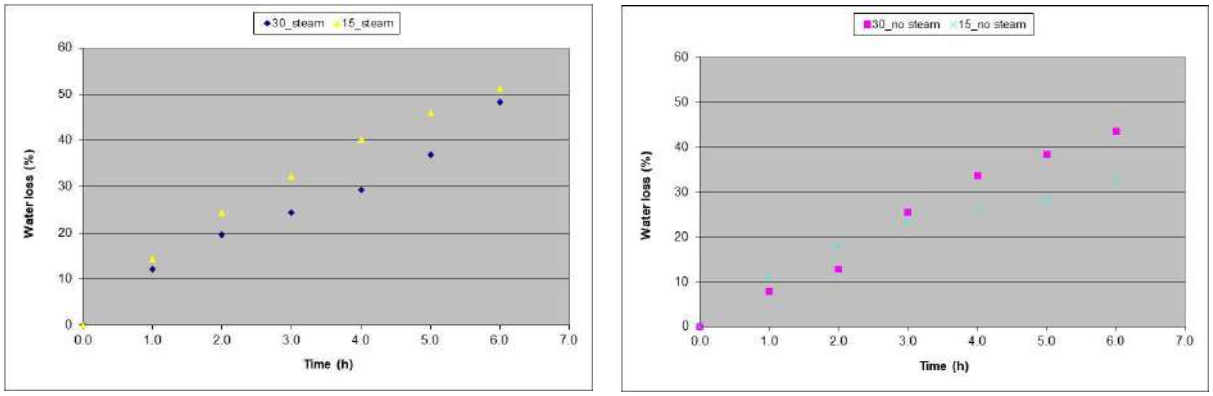
Πίνακας 1: Βαθμοί Brix ανά χειρισμό.

Χειρισμός	Διαλύματα 30 ^{o}Brix ^{o}Brix δείγματος	Διαλύματα 15 ^{o}Brix ^{o}Brix δείγματος
Νωπό δείγμα	8.90	8.90
Μετά από Ω.Α. Ζ.	12.75	9.50
Μετά από Ω.Α. Χ.Ζ.	11.55	10.50
Μετά από Ω.Α. Ζ και Ξ	7.53	7.17
Μετά από Ω.Α. Χ.Ζ και Ξ	11.73	12.27

3.2. Απώλεια νερού (WL)

Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζονται οι τιμές της απώλειας νερού όπως υπολογίστηκαν κατά την ωσμωτική αφυδάτωση. Κάθε τιμή αντιστοιχεί στο μέσο όρο των έξι ωσμωτικά αφυδατωμένων δειγμάτων. Παρατηρείται ότι η εφαρμογή του προχειρισμού σε κάθε περίπτωση επηρεάζει την απώλεια νερού, καθώς απομακρύνεται μεγαλύτερο ποσοστό νερού, 48.05% και 51.04% για τα διαλύματα των 30 και 15 ^{o}Brix αντίστοιχα, σε σχέση με τις

σειρές δειγμάτων όπου δεν έγινε προχειρισμός με ατμό, 43.38% και 32.39% για διαλύματα 30 και 15 ^{o}Brix αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στη ρήξη των κηρών στην επιδερμίδα του ιπποφαούς που συνήθως συμβαίνει κατά το ζεμάτισμα. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με αυτά των Araya-Farias et al. (2014), οι οποίοι παρατήρησαν επίσης πως το ζεμάτισμα με ατμό είναι πολύ αποτελεσματικός προχειρισμός για την διευκόλυνση της ωσμωτικής αφυδάτωσης όσον αφορά την απώλεια νερού.



Σχήμα 1: Απώλεια νερού κατά την ωσμωτική αφυδάτωση

3.3. Βιταμίνη C

Η ανάλυση διασποράς (ANOVA) έδειξε ότι οι πειραματικές σειρές είχαν στατιστική διαφορά και μεταξύ τους και σε σχέση με τον μάρτυρα όσον αφορά τη μεταβολή της βιταμίνης C ($P<0.05$). Όπως φαίνεται και στον πίνακα 2 τα δείγματα στα οποία πραγματοποιήθηκε ζεμάτισμα με ατμό έχουν διαφορά στις τιμές της συγκέντρωσης της βιταμίνη C σε σχέση με εκείνα στα οποία δεν εφαρμόσθηκε ζεμάτισμα με ατμό. Τα αφυδατωμένα δείγματα στα οποία εφαρμόστηκε ζεμάτισμα είχαν ποσοστό απώλειας της βιταμίνης C 70.6% και 51.8% για υδατικά διαλύματα στέβια 30 και 15 Brix αντίστοιχα. Η αυξημένη απώλεια της βιταμίνης C σύμφωνα με τους Santos & Silva (2008) συμβαίνει λόγω των αυξημένων απωλειών υγρασίας κατά 50% περίπου για κάθε τύπο διαλύματος λόγω εφαρμογής ζεματίσματος και πρόκλησης λόγω αυτού ρωγμών στην εξωτερική επιφάνεια των καρπών. Στα δείγματα χωρίς ζεμάτισμα παρατηρήθηκε ποσοστό απώλειας βιταμίνης 28.4% και 23.4% για υδατικά διαλύματα στέβια 30 και 15 Brix. Στην περίπτωση μη εφαρμογής προχειρισμού σύμφωνα με τους Santos & Silva (2008) η αυξημένη διατήρηση της βιταμίνης C στο τελικό προϊόν παρατηρείται λόγω της δημιουργίας ενός στρώματος σακχάρων στην περιφέρεια του προϊόντος που μπορεί να λειτουργήσει ως εμπόδιο στην μεταφορά και υποβάθμιση του ασκορβικού οξέος.

Τα αποξηραμένα δείγματα στα οποία εφαρμόστηκε ζεμάτισμα είχαν μεγαλύτερες απώλειες μετά την διεργασία της ξήρανσης σε θερμό αέρα, 91.1% και 94% για τα διαλύματα των 30 και 15 ^{o}Brix αντίστοιχα ενώ τα αποξηραμένα δείγματα στα οποία δεν εφαρμόστηκε ζεμάτισμα είχαν απώλεια 64.9% και 80.5% αντίστοιχα. Η σημαντική μείωση της βιταμίνης C οφείλεται στο γεγονός ότι η βιταμίνη C είναι θερμικά ευαίσθητη και έχει εξαιρετικά ακόρεστη φύση, καθιστώντας την συνεπώς ευαίσθητη σε αποδόμηση που οφείλεται σε οξείδωση ή θερμικές επεξεργασίες όπως είναι η ξήρανση. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με εκείνα των Araya-Farias et al. (2011) και Santos & Silva (2008), οι οποίοι παρατήρησαν πως εκτός από την θερμοκρασία και ο χρόνος επεξεργασίας είχε επιπτώσεις στην διατήρηση των θρεπτικών συστατικών των ραγών του ιπποφαούς, ειδικά όσον αφορά στην συγκέντρωση της βιταμίνης C, καθώς η μεταβολή υπόκειται στην

επίδραση του ολοκληρώματος θερμοκρασίας-χρόνου επίδρασης καθώς και η τελική περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος.

Πίνακας 2: Μέσος όρος βιταμίνης C ανά χειρισμό.

Χειρισμός	Διαλύματα 30 ^{o}Brix Βιταμίνη C (mg/l)	Διαλύματα 15 ^{o}Brix Βιταμίνη C (mg/l)
Νωπό δείγμα	495.03	495.03
Μετά από Ω.Α. Ζ.	432.87	238.481
Μετά από Ω.Α. Χ.Ζ.	379.16	354.441
Μετά από Ω.Α. Ζ και Ξ	44.04	26.421
Μετά από Ω.Α. Χ.Ζ και Ξ	173.70	96.549

3.4. Οξύτητα

Η ανάλυση διασποράς (ANOVA) έδειξε ότι οι πειραματικές σειρές είχαν στατιστική διαφορά και μεταξύ τους και σε σχέση με τον μάρτυρα για κάθε περίπτωση όσο αφορά τη μεταβολή του λόγου της οξύτητας και των ολικών διαλυτών στερεών συστατικών τόσο για τη συγκέντρωση σε μηλικό οξύ όσο και για τη συγκέντρωση σε κιτρικό οξύ (P=0.0015 για το μηλικό οξύ και P<0.05 για το κιτρικό οξύ). Επίσης η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι σε όλες τις πειραματικές σειρές η οξύτητα και ο λόγος οξύτητας ολικών διαλυτών στερεών επηρεάστηκε και από το είδος του υδατικού διαλύματος στέβια που χρησιμοποιήθηκε στην ωσμωτική αφυδάτωση (P<0.05 και για τους δυο λόγους οξέων ολικών διαλυτών στερεών).

Πίνακας 3: Μέσος όρος λόγων οξύτητας ολικών διαλυτών στερεών συστατικών.

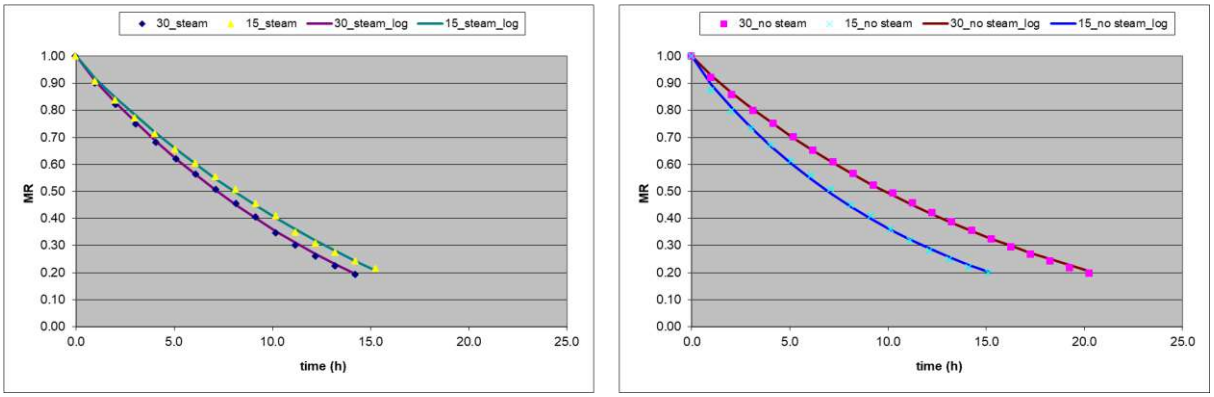
Χειρισμός	Διαλύματα 30 ^{o}Brix		Διαλύματα 15 ^{o}Brix	
	Κιτρικό οξύ	Μηλικό οξύ	Κιτρικό οξύ	Μηλικό οξύ
Νωπό δείγμα	0.06	0.04	0.06	0.04
Μετά από Ω.Α. Ζ.	0.04	0.02	0.05	0.03
Μετά από Ω.Α. Χ.Ζ.	0.04	0.02	0.04	0.02
Μετά από Ω.Α. Ζ και Ξ	0.02	0.01	0.05	0.03
Μετά από Ω.Α. Χ.Ζ και Ξ	0.03	0.02	0.04	0.02

3.5. Προτυποποίηση των πειραματικών δεδομένων ξήρανσης σε θερμό αέρα

Η μέση αρχική περιεχόμενη υγρασία των αφυδατωμένων δειγμάτων τα οποία αποξηράθηκαν και στα οποία εφαρμόστηκε προχειρισμός κυμάνθηκε μεταξύ 2.19 και 2.55 kg_w/kg_{dm} στην περίπτωση υδατικών διαλυμάτων 30 ^{o}Brix και αντίστοιχα μεταξύ 2.50 και 3.81 kg_w/kg_{dm} στην περίπτωση υδατικών διαλυμάτων 15 ^{o}Brix. Για τα αφυδατωμένα δείγματα στα οποία δεν εφαρμόστηκε ζεμάτισμα με ατμό οι τιμές κυμάνθηκαν για την πρώτη περίπτωση μεταξύ 1.95 και 2.65 kg_w/kg_{dm} ενώ στη δεύτερη περίπτωση κυμάνθηκαν μεταξύ 2.28 και 2.50 kg_w/kg_{dm}.

Στο σχήμα 2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μεταβολές του υγρασιακού πηλίκου συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης καθώς και οι προβλεπόμενες τιμές αυτού όπως υπολογίστηκαν από το λογαριθμικό μοντέλο το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω. Από το σχήμα παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση των διαλυμάτων 30 ^{o}Brix το επιθυμητό υγρασιακό πηλίκο επιτεύχθηκε για μεν τους καρπούς οι οποίοι είχαν υποστεί ζεμάτισμα στις 14h ξήρανσης ενώ για αυτούς που δεν υπέστησαν ζεμάτισμα το υγρασιακό πηλίκο επιτεύχθηκε στις 20h ξήρανσης. Αντίθετα στην περίπτωση ωσμωτικά αφυδατωμένων καρπών σε διάλυμα 15 ^{o}Brix δεν παρατηρήθηκε διαφορά στο χρόνο επίτευξης του

επιθυμητού υγρασιακού πηλίκου, 15h ξήρανσης, μεταξύ των καρπών που υπέστησαν ζεμάτισμα και εκείνων που δεν υπέστησαν προχειρισμό. Επίσης, από το σχήμα 2 παρατηρείται πως οι τιμές και στην περίπτωση εφαρμογής ζεματίσματος με ατμό και στην περίπτωση χωρίς αυτό σχεδόν συμπίπτουν σε όλες τις πειραματικές σειρές, γεγονός το οποίο επαληθεύει το λογαριθμικό μοντέλο πρόβλεψης.



Σχήμα 2: Πειραματικές (σημεία) και προβλεπόμενες (γραμμές) τιμές υγρασιακού πηλίκου

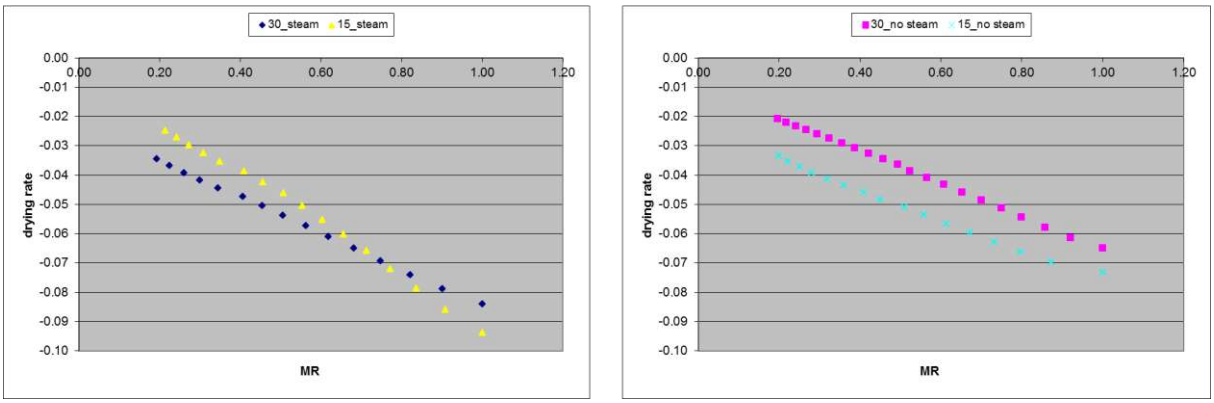
Οι τιμές των συντελεστών a, b, c για τις τέσσερις πειραματικές σειρές (με και χωρίς ζεμάτισμα) όπως αυτές προέκυψαν από τη μη γραμμική παλινδρόμηση, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4: Συντελεστές λογαριθμικού μοντέλου για κάθε πειραματική σειρά.

	Χειρισμός	**a**	**b**	**c**
Διαλύματα 30 ^{o}Brix	Z.	1.35	6.22×10^{-2}	-3.64×10^{-1}
	X.Z.	1.15	5.63×10^{-2}	-1.63×10^{-1}
Διαλύματα 15 ^{o}Brix	Z.	1.44	5.10×10^{-2}	-4.55×10^{-1}
	X.Z.	1.07	8.65×10^{-2}	-8.70×10^{-2}

3.6. Ρυθμός ξήρανσης

Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται ο ρυθμός ξήρανσης (dMR/dt) σε σχέση με το υγρασιακό πηλίκο για τις 4 πειραματικές σειρές. Παρατηρείται πως ο ρυθμός ξήρανσης των δειγμάτων στα οποία εφαρμόστηκε ζεμάτισμα με ατμό, είναι μεγαλύτερος, καθώς η κλίση είναι πιο απότομη. Η γρήγορη αυτή ελάττωση του ρυθμού ξήρανσης της πρώτης σειράς σε σχέση με τη δεύτερη οφείλεται στον προχειρισμό ο οποίος διευκόλυνε τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας καθώς διέρρηξε την κηρώδη επιδερμίδα του ιπποφαούς που είναι η κύρια αντίσταση στη μεταφορά υδρατμών. Επίσης, σύμφωνα και με πειράματα των Kyriakopoulou et al., (2013), είναι γνωστό πως οι θερμικές επεξεργασίες μειώνουν την αντίσταση στην ροή του νερού αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα ξήρανσης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της δημιουργιας πολλών ξηρών περιοχών στο κύτταρο, της ρήξης των κυτταρικών μεμβρανών και της μείωσης της συνεκτικότητας των πολυσακχαριτών των κυτταρικών τοιχωμάτων.



Σχήμα 3: Ρυθμός ξήρανσης συναρτήσει υγρασιακού πηλίκου για όλες τις πειραματικές σειρές.

3.7. Συμπεράσματα

Σε κάθε περίπτωση η μεταβολή των ολικών διαλυτών στερεών επηρεάστηκε από την εφαρμογή ή όχι προχειρισμού καθώς στην περίπτωση εφαρμογής προχειρισμού υπήρξε αύξηση της ξηράς ουσίας, λόγω εισροής σακχάρων στους καρπού, 82 και 84% αντίστοιχα για κάθε τύπο διαλύματος.

Επίσης λόγω εφαρμογής ζεματίσματος τα δείγματα αυτά εμφάνισαν μεγαλύτερες απώλειες νερού, κατά την ωσμωτική αφυδάτωση λόγω διάρρηξης του εξωτερικού φλοιού των καρπών, σε σχέση με εκείνα που δεν υπέστησαν προχειρισμό. Ακόμη για τον ίδιο λόγο παρατηρήθηκε ότι κατά την ξήρανση δείγματα τα οποία είχαν υποστεί ζεμάτισμα με ατμό εμφάνισαν μεγαλύτερο ρυθμό ξήρανσης σε σχέση με εκείνα που δεν είχαν υποστεί προχειρισμό.

Η μείωση της συγκέντρωσης σε βιταμίνη C ήταν πολύ μεγαλύτερη μετά από ωσμωτική αφυδάτωση και ξήρανση στα δείγματα που είχαν ζεματιστεί σε σχέση με τα δείγματα που δεν υπέστησαν ζεμάτισμα λόγω της μεγάλης ευαισθησίας της σε θερμικές επεξεργασίες και του σχισίματος της κηρώδους επιδερμίδας. Τα δείγματα που υπέστησαν ζεμάτισμα με ατμό εμφάνισαν ποσοστό απωλειών σχεδόν της τάξης 90-95% σε σχέση με το νωπό προϊόν ενώ τα δείγματα της δεύτερης σειράς, μετά από ωσμωτική αφυδάτωση και ξήρανση, εμφάνισαν ποσοστό απωλειών περίπου 65% για δείγματα αφυδατωμένα σε διάλυμα 30 oBrix και 80.5% για δείγματα αφυδατωμένα σε διάλυμα 15 o Brix.

Ο λόγος των οξέων προς τα ολικά διαλυτά στερεά (και στην περίπτωση του μηλικού οξέος και στην περίπτωση του κιτρικού) παρατηρήθηκε πως επηρεάζεται τόσο από την εφαρμογή ή όχι προχειρισμού όσο και από τη συγκέντρωση σακχάρων στο διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε κατά την ωσμωτική αφυδάτωση.

Τέλος, παρατηρήθηκε πως οι πειραματικές τιμές και στην περίπτωση του ζεματίσματος με ατμό και στην περίπτωση χωρίς αυτό σχεδόν συμπίπτουν με τις τιμές του λογαριθμικού μοντέλου που επιλέχθηκε, γεγονός το οποίο επαληθεύει επιτυχώς το χρησιμοποιηθέν μοντέλο πρόβλεψης.

Βιβλιογραφία

Abou-Arab, A. E., Abou-Arab, A. A., & Abu-Salem, M. F. (2010). Physico-chemical assessment of natural sweeteners steviosides produced from Stevia rebaudiana Bertoni plant. African Journal of Food Science, 4(5), 269-281.

Araya-Farias, M., Makhlouf, J., & Ratti, C. (2011). Drying of seabuckthorn (Hippophae rhamnoides L.) berry: Impact of dehydration methods on kinetics and quality. Drying Technology, 29(3), 351-359.

Araya-Farias, M., Macaigne, O., & Ratti, C. (2014). On the development of osmotically dehydrated seabuckthorn fruits: Pretreatments, osmotic dehydration, postdrying

AOAC, (1997): *Official Methods of Analysis, 16th ed*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC

Kyriakopoulou, K., Pappa, A., Krokida, M., Detsi, A., & Kefalas, P. (2013). Effects of drying and extraction methods on the quality and antioxidant activity of sea buckthorn (Hippophae rhamnoides) berries and leaves. Drying Technology, 31(9), 1063-1076.

Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., Zura-Bravo, L., & Ah-Hen, K. (2012). Stevia rebaudiana Bertoni, source of a high-potency natural sweetener: A comprehensive review on the biochemical, nutritional and functional aspects. Food Chemistry, 132(3), 1121-1132.

Santos, P. H. S., & Silva, M. A. (2008). Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables—A review. Drying Technology, 26(12), 1421-1437.

Savita, S. M., Sheela, K., Sunanda, S., Shankar, A. G., & Ramakrishna, P. (2004). Stevia rebaudiana–A functional component for food industry. J. Hum. Ecol, 15(4), 261-264.

Xanthopoulos G., Lambrinos Gr., and Manolopoulou H. (2007a): Evaluation of thin layer Models for mushroom (Agaricus Bisporus) Drying. Drying technology, 25: 1471-1481.

Xanthopoulos G., Oikonomou N. and Lambrinos G. (2007b): Applicability of a single layer drying model to predict the drying rate of whole figs. Journal of food engineering, 81: 553-559.

Xanthopoulos G., Yanniotis S., and Lambrinos Gr. (2010): Study of the drying behavior in peeled and unpeeled whole figs. Journal of food engineering, Elsevier, 97(3), 419-424

Xanthopoulos G., Yanniotis, S. and Talaiporou E., (2012): Influence of salting on drying kinetics and diffusivity of tomato halves. International Journal of Food Properties, 15(4): 847-863.

Zeb, A. (2004). Chemical and nutritional constituents of sea buckthorn juice. Pakistan Journal of Nutrition, 3(2), 99-106.

Αποστολίδου Α., Γιορμπαλίδου Γ. (2012): Ιπποφαές : Ιδιότητες-συστατικά-εφαρμογές. Πτυχιακή εργασία, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης.

Συντηρησιμότητα επιτραπέζιου σταφυλιού σε δύο καλλιεργητικές χρονιές συναρτήσει του τύπου εδάφους

Μεσημέρη Α., Καραγιάννη Ε., Αναστασίου Ε., Πανίτσας Φ., Λέντζου Δ., Τεμπλαλέξης Χ., Ξανθόπουλος Γ., Φουντάς Σ.

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,
✉*xanthopoulos@aua.gr*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διετή εργασία μελετήθηκαν η μεταβολή των ποιοτικών χαρακτηριστικών επιτραπέζιων σταφυλιών ποικιλίας *Thompson Seedless*, τα οποία συγκομίστηκαν από δυο τύπους εδαφών το 2015 και το 2016 και συντηρήθηκαν σε συνθήκες 0 ^{o}C και 90-95% Σ.Υ. καλυμένα με φύλλα αργής αποδέσμευσης SO_2. Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι στο αμμοαργιλοπηλώδες (SCL) και τις δύο καλλιεργητικές χρονιές καταγράφηκε μεγαλύτερο ποσοστό αφυδάτωσης σε σχέση με το αργιλοπηλώδες (CL) έδαφος με μεγαλύτερη απώλεια νερού (7.71%) να σημειώνεται το 2016. Από τα ΟΔΣΣ, μεγαλύτερη τιμή 23.2 ^{o}Brix, παρουσίασε το έδαφος Α το 2016. Ο λόγος των ΟΔΣΣ/οξύτητας το πρώτο έτος κυμάνθηκε από 59 έως 198 ενώ το δεύτερο έτος κυμάνθηκε από 59 έως 122. Η δύναμη συμπίεσης σε δεδομένη παραμόρφωση (μη καταστροφική δοκιμή) το πρώτο έτος ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με το δεύτερο έτος. Από την στατιστική επεξεργασία αναπτύχθηκαν χρήσιμες συσχετίσεις μεταξύ μη-καταστροφικών δοκιμών και του χρόνου συντήρησης όσο και της απώλειας μάζας και της μέγιστης δύναμης αποκοπής, η τελευταία δε με πολύ μεγάλο R^2_{adj} >90%. Οι σχέσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της εμπορευσιμότητας των επιτραπέζιων σταφυλιών χωρίς να είναι αναγκαία η καταστροφή των προϊόντων.

Λέξεις κλειδιά: σταφύλια, απώλεια μάζας, σάκχαρα, οξύτητα, αντίσταση στη συμπίεση, δύναμη αποκοπής μίσχου.

Storability of seedless table grapes during two cultivation years and two soil types

Mesimeri A., Karagianni E., Anastasiou E., Panitsas F., Lentzou D., Templalexis C., Xanthopoulos G., Fountas S.

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens,
✉*xanthopoulos@aua.gr*

ABSTRACT

In the present study, quality changes of table grapes var. *Thompson Seedless*, harvested from two soil types during 2015 and 2016 and cold stored at 0 °C and 90-95% RH was studied. The grapes were covered with slow release SO_2 sheets. From the data processing, it was found that in the sandy-clay-loam soil (SCL) in both cultivation years a higher dehydration rate was achieved than in the clay-loam (CL) with the highest water loss (7.71%) to be in the 2016. The highest TSS, 23.2 ^{o}Brix, was found regarding CL soil in 2016. The ratio of the TSS/acidity was ranged from 59 to 198 in 2015 and from 59 to 122 in 2016. The deformation force (non-destructive test) was found to be greater in the first year than in the second. From the statistical analysis, useful correlations were developed between the non-destructive tests and cold-storage time, as well as mass loss and maximum detachment

force, the latter being very large R^2_{adj} > 90%. These relationships can be used to assess the marketability of table grapes without employing destructive tests.

Keywords: table grapes, mass loss, TTS, acidity, deformation force, detachment force.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βοτανικά το αμπέλι (*Vitis vinifera*) είναι ένα αναρριχώμενο φυτό τη οικογένειας *Vitaceae* η οποία ανήκει στη τάξη *Ramnales*. Περιλαμβάνει 14 γένη από τα οποία μόνο το γένος *Vitis* ενδιαφέρει την αμπελουργία. Το αμπέλι είναι ένα πολυετές φυλλοβόλο φυτό που αναπτύσσεται σε σχετικά θερμά κλίματα. Καλλιεργείται για κατανάλωση ως επιτραπέζιο, για παραγωγή κρασιού ή για παραγωγή προϊόντων που έχουν υποστεί ζύμωση. Οι σπουδαιότεροι λόγοι που καθιστούν το καρπό αυτό μοναδικό είναι ότι περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε σάκχαρα και πηκτίνες όταν είναι ώριμος καθώς και ένα ευρύ φάσμα αρωματικών ενώσεων. Ο καρπός του αμπελιού είναι ένας αληθινός καρπός (berry). Η ράγα (berry) που αναπτύσσεται από το γονιμοποιημένο άνθος έχει ένα κηρώδες εξωτερικό περίβλημα, την επιδερμίδα η οποία συντελεί στη μείωση της αφυδάτωσης καθώς και στην αποτροπή εισόδου παθογόνων μικροοργανισμών ενώ περιέχει ενώσεις που καθορίζουν το επιδερμικό χρώμα και την γεύση της ράγας (Possingham et al., 1967, Blanke & Leyhe, 1988). Τα σπέρματα των ραγών περιέχουν μεγάλο αριθμό φαινολικών ενώσεων, υψηλά επίπεδα ταννινών (5-8%), ελαίων (10-20%), φυτορρυθμιστικών ουσιών (Winkler et al., 1974) καθώς και το έμβρυο το οποίο μπορεί να αναπτυχθεί ως ένα νέο φυτό αμπέλου.

Το επιτραπέζιο σταφύλι (*Vitis Vinifera L.*) είναι ένας μη κλιμακτήριος καρπός με σχετικά χαμηλά επίπεδα φυσιολογικής δραστηριότητας. Τα κριτήρια συλλεκτικής ωριμότητας ποικίλουν ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται. Για τα επιτραπέζια σταφύλια η συγκομιδή γίνεται με βάση την καρπική περίοδο (ημέρες από την άνθιση έως τη συγκομιδή), το μέγεθος της ράγας, το χρώμα το οποίο είναι χαρακτηριστικό για την κάθε ποικιλία, το ποσοστό των ολικών διαλυτών στερεών συστατικών (ΟΔΣΣ) και οξύτητας καθώς και το λόγο των ΟΔΣΣ/οξύτητα. Όταν οι ράγες είναι ώριμες παρατηρείται μεταχρωματισμός στον ποδίσκο ο οποίος αποκτά χρώμα ξύλου ενώ η συγκομιδή τους γίνεται σε 2-3 χέρια.

Σκοπός του πειράματος ήταν η καταγραφή της μεταβολής των ποιοτικών χαρακτηριστικών σε επιτραπέζια σταφύλια κατά τη διάρκεια συντήρησης τους στη διάρκεια δύο διαδοχικών καλλιεργητικών ετών τα οποία καλλιεργούνται σε δύο εδαφικούς τύπους, αργιλοπηλώδες (CL) και αμμοαργιλοπηλώδες (SCL), εντός των γεωγραφικών ορίων της καλλιέργειας.

3.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

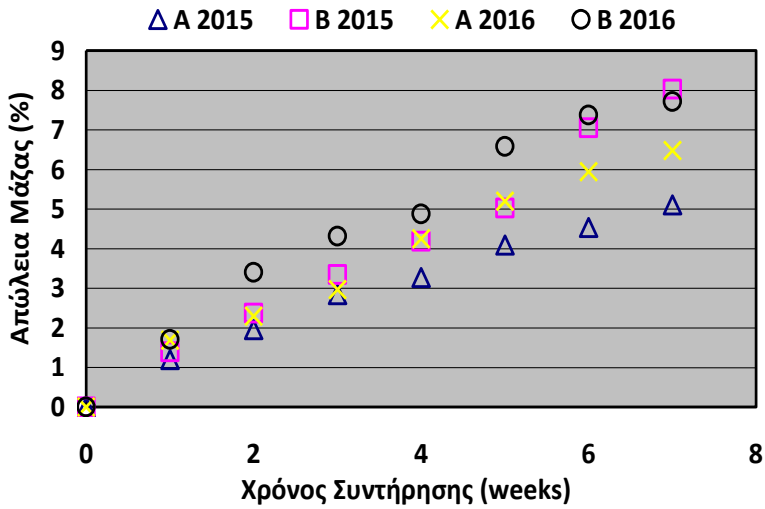
Στη εργασία αυτή μελετήθηκε επιτραπέζιο σταφύλι ποικιλίας *Thompson seedless*. Συλλέχτηκε από τοπική καλλιέργεια, 10 στρεμμάτων, στο Κιάτο Κορινθίας, 37°54.532’ (Β), 22°44.798’ (Α) από δύο τύπους εδαφών εντός των γεωγραφικών ορίων της καλλιέργειας, ένα αργιλοπηλώδες (CL, Clay Loam-έδαφος Α) και ένα αμμοαργιλοπηλώδες (SCL, Sandy Clay Loam-έδαφος Β). Αμέσως μετά τη συγκομιδή, οι βότρυες μεταφέρθηκαν ψυχόμενοι στον εργαστηριακό χώρο των «Μετασυλλεκτικών και Μετασυγκομιστικών Χειρισμών» του Εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών όπου έγινε διαλογή και απομακρύνθηκαν οι τραυματισμένες και προσβεβλημένες από ασθένειες και έντομα ράγες. Ακολούθησε διαχωρισμός των βοτρύων ανάλογα με τον τύπο του εδάφους από τον οποίο συλλέχθηκαν και τοποθετήθηκαν σε ψυκτικό θάλαμο στους 0 °C και σχετική υγρασία 90-95% αφού πρώτα ο κάθε βότρυς καλύφθηκε με φύλλο αργής απελευθέρωσης διοξειδίου του θείου (SO_2), το οποίο δρα μυκητοστατικά. Οι πειραματικές μετρήσεις

πραγματοποιούνταν κάθε εβδομάδα για 12 εβδομάδες συντήρησης όσο αφορά την πειραματική σειρά του 2015 και τις 7 εβδομάδες όσο αφορά την πειραματική σειρά του 2016. Για το πείραμα και στις δύο καλλιεργητικές χρονιές (2015 και 2016) χρησιμοποιήθηκαν 18 τυχαία επιλεγμένοι βότρυες από κάθε εδαφικό τύπο ένας εκ των οποίων αποτελούσε το μάρτυρα για τον προσδιορισμό της απώλειας μάζας και της ραγόπτωσης. Η απώλεια μάζας εκφράστηκε σε ποσοστό επί της αρχικής ως $\Delta ML=(m_o-m_t)/m_o$ όπου m_o η αρχική μάζα του μάρτυρα και m_t η μάζα του τη δεδομένη χρονική στιγμή t. Κάθε εβδομάδα λαμβανόταν τυχαίο δείγμα 50 ραγών από 17 βότρυες για κάθε εδαφικό τύπο (Α και Β) (εκτός του μάρτυρα) και στη συνέχεια πραγματοποιούνταν σειρά αναλύσεων. Αρχικά τα δείγματα ζυγίζονταν σε ηλεκτρονικό ζυγό KERN (μοντέλο PCB-440, Japan, ακρίβειας ±0.01 g) και στη συνέχεια υπολογιζόταν η διάμετρος των ραγών με επεξεργασία ψηφιακής φωτογραφίας του δείγματος των 50 ραγών μέσω του λογισμικού ανάλυσης εικόνας ImageJ (Research Services Branch, NIH, MD, USA). Στη συνέχεια στο μισό δείγμα (25 ράγες) πραγματοποιούνταν μετρήσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης δύναμης αποκοπής του ποδίσκου από τη ράγα, ενώ στο άλλο μισό (25 ράγες) καταγραφή της παραμόρφωσης μέσω δοκιμής συμπίεσης στην ελαστική ζώνη (δύναμη/παραμόρφωση) με αναλυτή υφής (TA-XT2i, Stable Micro Systems Ltd., UK). Η μη καταστροφική δοκιμή αφορούσε καταγραφή της κλίσης της δύναμης (N) για δεδομένη παραμόρφωση 1.0 mm (ζώνη ελαστικής παραμόρφωσης). Στη συνέχεια, ολόκληρο το δείγμα των 50 ραγών ογκομετρούνταν με τη μέθοδο της εμβάπτισης. Μετά την ογκομέτρηση οι ράγες πολτοποιούνταν και συλλέγονταν το γλεύκος τους στο οποίο λάμβανε χώρα μέτρηση των ολικών διαλυτών στερεών συστατικών με ψηφιακό διαθλασίμετρο (μοντέλο SR-400, Japan, ακρίβειας ±0.25 Brix), του pH με ψηφιακό πεχάμετρο (μοντέλο CyberScan pH 500, Eutech Instruments, Singapore, ακρίβεια ±0.01) και της ολικής οξύτητας (τρυγικό οξύ) με ψηφιακό οξύμετρο (μοντέλο GMK-708, UK, ακρίβειας ±0.05%). Τέλος η στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έγινε με το στατιστικό πρόγραμμα Statgraphics Centurion XVI (Statpoint Technologies, USA) σε επίπεδο σημαντικότητας $P\leq0.05$.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Απώλεια Μάζας

Η απώλεια μάζας (νερού) κατά την μετασυλλεκτική διαχείριση έχει ως συνέπεια την απώλεια μάζας, το καφέτιασμα των βλαστών, το σχίσιμο καθώς και την παραμόρφωση των ραγών. Ειδικά οι βλαστοί είναι πλέον επιδεκτικοί στην αφυδάτωση λόγω της μεγάλης επιφάνειας προς τον όγκο καθώς και λόγω του κατά 15 φορές μεγαλύτερου αναπνευστικού ρυθμού από τον αντίστοιχο των ραγών (Winkler et al., 1974). Στην εργασία αυτή η απώλεια μάζας υπολογίστηκε στο σύνολο των βλαστών και ραγών. Για τον υπολογισμό της απώλειας μάζας χρησιμοποιήθηκε ένας μάρτυρας (ολόκληρος βότρυς) από κάθε εδαφικό τύπο ανά καλλιεργητική χρονιά. Οι αρχικές μάζες για το 2015 για το έδαφος Α (αργιλοπηλώδες) ήταν 3.17 kg και για το έδαφος Β (αμμοαργιλοπηλώδες) 2.87 kg ενώ για το 2016 ήταν αντίστοιχα 2.96 kg και 2.76 kg. Από την καταγραφή της μεταβολής μάζας καθ' όλη την ψυχρο-συντήρηση σε όλες τις πειραματικές σειρές (εδαφικός τύπος × καλλιεργητική χρονιά), Διάγραμμα 1, παρατηρείται ότι το έδαφος Β και τις δύο καλλιεργητικές χρονιές παρουσίασε το μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας μάζας (νερού) 8.0% και 7.7% κατά την ψυχρο-συντήρηση για την πρώτη (2015) και τη δεύτερη καλλιεργητική χρονιά (2016) αντίστοιχα σε σχέση με το έδαφος Α.



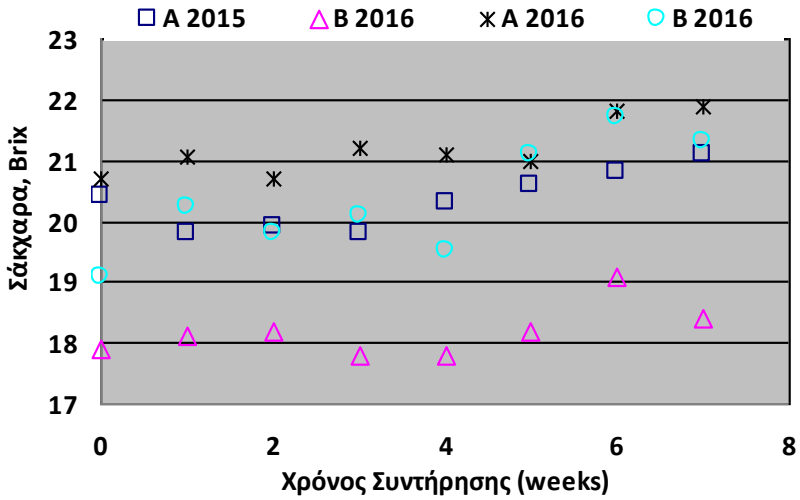
Διάγραμμα 1. Απώλεια μάζας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης για τους δύο εδαφικούς τύπους Α και Β και τις δύο καλλιεργητικές χρονιές 2015 & 2016.

4.2. Ολικά Διαλυτά Στερεά Συστατικά

Η συγκέντρωση των σακχάρων είναι το πλέον σημαντικό μετασυλλεκτικό κριτήριο για τη συγκομιδή του σταφυλιού. Τα Ολικά Διαλυτά Στερεά Συστατικά (ΟΔΣΣ) αντιστοιχούν στη συγκέντρωση των σακχάρων στο σταφύλι και ειδικότερα στη φρουκτόζη και γλυκόζη (Jayasena and Cameron, 2008).

Πίνακας 1. Ανάλυση διασποράς των ΟΔΣΣ συναρτήσει προ- και μετα-συλλεκτικών παραγόντων κατά την ψυχρο-συντήρηση σταφυλιών

Κύριοι Παράγοντες	F-Ratio	P-Value
A: Καλλιεργητική χρονιά	52.51	≤0.001
B: Έδαφος	51.90	≤0.001
C: Χρόνος συντήρησης	3.80	0.0025



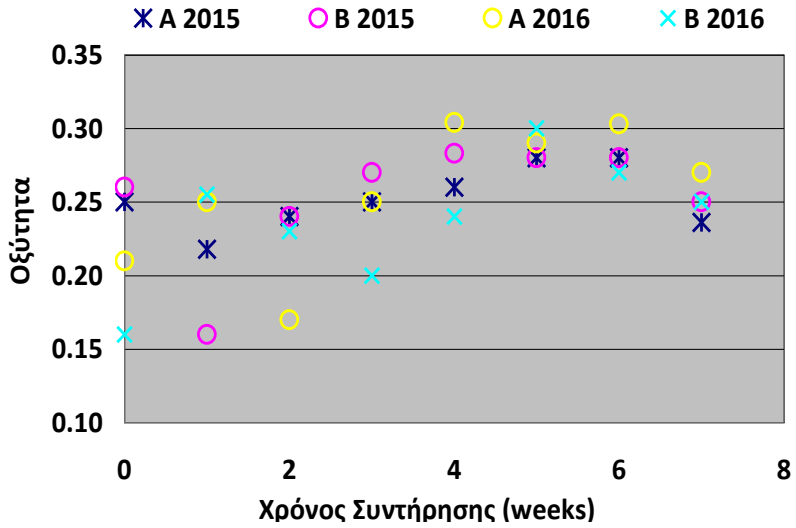
Διάγραμμα 2: Μεταβολή των ΟΔΣΣ συναρτήσει του χρόνου συντήρησης.

Από την ανάλυση της διασποράς (Πίνακας 1) των ΟΔΣΣ προκύπτει ότι τη σημαντικότερη επίδραση έχει η καλλιεργητική χρονιά (F-ratio=52.51 και P-Value ≤0.001) ακολουθώντας ο

τύπος εδάφους (F-ratio=51.90 και P-Value ≤0.001) και τέλος ο χρόνος συντήρησης. Από την ανάλυση των μετρήσεων διαπιστώθηκε ότι ο εδαφικός τύπος Β (αμμοαργιλοπηλώδες) την καλλιεργητική χρονιά 2016 είχε την μικρότερη περιεκτικότητα σε ΟΔΣΣ ενώ ο εδαφικός τύπος Α (αργιλοπηλώδες) την καλλιεργητική χρονιά 2016 είχε την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ΟΔΣΣ η οποία έφτασε στην τιμή των 23.2 ^{o}Brix. Από το Διάγραμμα 2 παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα σε ΟΔΣΣ κυμάνθηκε σε όλες τις περιπτώσεις (εδαφικός τύπος × καλλιεργητική χρονιά) μεταξύ 17.8 και 22.0 ^{o}Brix και συγκεκριμένα μεταξύ 19.8-21.5 ^{o}Brix για το αργιλοπηλώδες και 17.8-20.3 ^{o}Brix για το αμμοαργιλοπηλώδες. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η συγκέντρωση των ΟΔΣΣ στα σταφύλια που αναπτύχτηκαν στο αργιλοπηλώδες έδαφος ήταν μεγαλύτερη συγκριτικά με την αντίστοιχη στο αμμοαργιλοπηλώδες. Το αργιλοπηλώδες έδαφος σε συνδυασμό με την πολύ καλή δομή του λόγω και των σημαντικών ποσοτήτων ανθρακικού ασβεστίου που περιέχει εφοδιάζει ως ιδανικός ρυθμιστής της υγρασίας τα πρέμνα με νερό και θρεπτικά συστατικά εμποδίζει την ακραία υδατική καταπόνηση στην τελευταία φάση της ωρίμασης μετά τον περκασμό.

4.3. Οξύτητα

Η ολική οξύτητα αποτελεί επίσης ένα σημαντικό κριτήριο ωρίμασης καθώς κατά την ωρίμανση τα οξέα μετατρέπονται σε σάκχαρα ενώ επηρεάζουν σημαντικά την αποδοχή των επιτραπέζιων σταφυλιών από τον καταναλωτή (Winkler *et al.*, 1974). Το τρυγικό (tartaric) και μηλικό (malic) οξύ αποτελούν περίπου το 90% των ολικών οξέων ωστόσο αυτό εξαρτάται και από την καλλιεργούμενη ποικιλία.



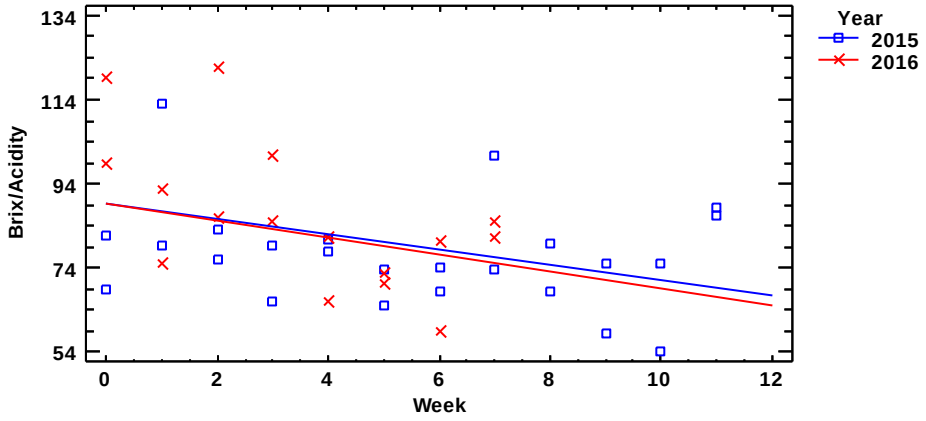
Διάγραμμα 3. Μεταβολή της οξύτητας με το χρόνο συντήρησης.

Στο Διάγραμμα 3 διαπιστώνεται ότι οι τιμές της οξύτητας για όλες τις πειραματικές περιπτώσεις (καλλιεργητική χρονιά × εδαφικός τύπος) κυμάνθηκαν μεταξύ 0.15% και 0.32%.

4.4. Λόγος ΟΔΣΣ/Οξύτητα

Ο λόγος των ΟΔΣΣ/οξύτητα έχει ταξινομηθεί ως ένα από τα σημαντικότερα μετασυλλεκτικά κριτήρια ωριμότητας στα επιτραπέζια σταφύλια καθώς τους προσδίδει την χαρακτηριστική γεύση που επιδιώκουν οι καταναλωτές (Jayasena and Cameron, 2008). Και στις δύο καλλιεργητικές χρονιές και τους δυο εδαφικούς τύπους ο λόγος των ΟΔΣΣ/οξύτητα

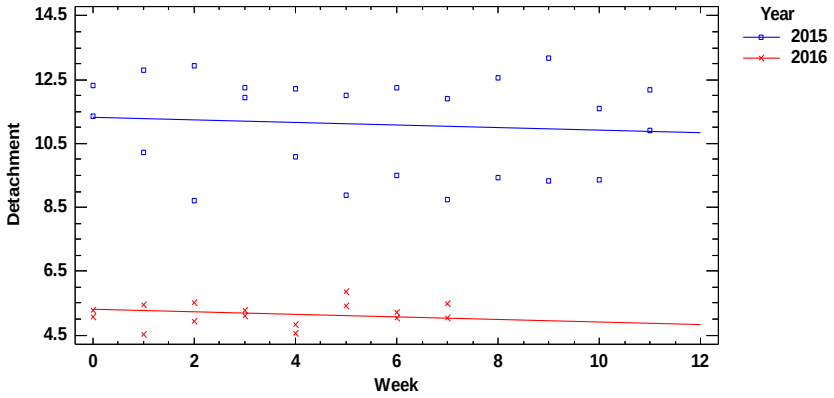
ήταν μεγαλύτερος του 54 και μικρότερος του 130. Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζονται οι μεταβολές του λόγου ΟΔΔΣ/οξύτητα ανά καλλιεργητική χρονιά. Από την ανάλυση αυτή παρατηρείται ότι στην πρώτη καλλιεργητική χρονιά (2015) η κλίση του λόγου ΟΔΣΣ/οξύτητα είχε τιμή -1.8 μικρότερη από την αντίστοιχη του έτους 2016 με τιμή -2.0. Ως μη κλιμακτήριος καρπός το σταφύλι δεν ωριμάζει κατά τη συντήρησή του οπότε η μείωση στο λόγο των ΟΔΣΣ/οξύτητα μπορεί να οφείλεται σε άλλες βιολογικές μεταβολές ή και την αφυδάτωση κατά την ψυχρο-συντήρησή του.



Διάγραμμα 4. Μεταβολή του λόγου των ΟΔΣΣ/οξύτητα με το χρόνο συντήρησης. Τα σημεία αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά δεδομένα και οι γραμμές τις τάσεις.

4.5. Αντίσταση στη αποκοπή του ποδίσκου

Η δύναμη αποκοπής του ποδίσκου συνδέεται με τη ραγόπτωση, ένα σημαντικό ποιοτικό μετασυλλεκτικό χαρακτηριστικό των επιτραπέζιων σταφυλιών. Κατά το έτος 2015 σύμφωνα με την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων προκύπτει ότι η δύναμη αποκοπής του ποδίσκου των ραγών ήταν πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με το έτος 2016 και στους δύο εδαφικούς τύπους παρουσιάζοντας ίδια κλίση μείωσης σύμφωνα με την στατιστική επεξεργασία. Οι τιμές στο πρώτο έτος κυμάνθηκαν στο εύρος 8.7-12.9 N ενώ στο δεύτερο έτος μεταξύ 4.5-5.9 N.

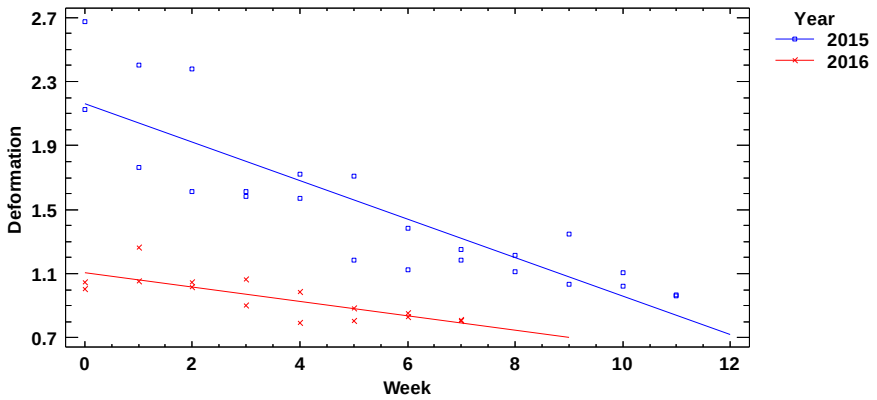


Διάγραμμα 5. Μεταβολή της δύναμης αποκοπής του ποδίσκου (N) συναρτήσει του χρόνου συντήρησης. Τα σημεία αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά δεδομένα και οι γραμμές τις τάσεις.

Η παρατήρηση αυτή εξηγεί και την μεγαλύτερη συντηρησιμότητα της πρώτης πειραματικής σειράς που ήταν 12 εβδομάδες σε σχέση με τη 2^{η} σειρά που ήταν 7 εβδομάδες.

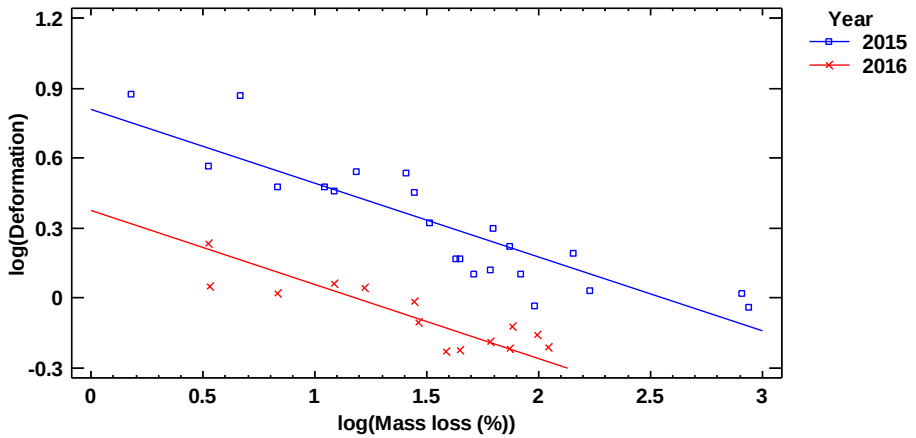
4.6. Μεταβολή της δύναμης συμπίεσης σε δεδομένη παραμόρφωση

Τα τοιχώματα των ραγών αποτελούνται από 90% πολυσακχαρίτες (cellulose & polygalacturonans) και λιγότερο από 10% πρωτεΐνες. Αν και ο βαθμός απώλειας σκληρότητας κατά το στάδιο ωρίμασης εξαρτάται από την ποικιλία έχει καταγραφεί κα αποδειχθεί μετασυλλεκτικά ότι οφείλεται κυρίως στην αφυδάτωση και δευτερευόντως στη μεταβολή της σύνθεσης των κυτταρικών τοιχωμάτων (Nunan *et al.* 1997). Επιπλέον, η επιδερμίδα των ραγών που αναπτύσσονται σε καλώς στραγγιζόμενα εδάφη παρουσιάζει μικρότερο ποσοστό σχισμών λόγω της αφυδάτωσης, συνεπώς οι ράγες έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και αντοχή στις προσβολές (Gonzalez et al., 2015).



Διάγραμμα 6. Μεταβολή της δύναμης συμπίεσης σε δεδομένη παραμόρφωση (κλίση) (N/mm) συναρτήσει του χρόνου συντήρησης. Τα σημεία αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά δεδομένα και οι γραμμές τις τάσεις.

Από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων (Διάγραμμα 6) προκύπτει ότι οι τιμές της δύναμης συμπίεσης σε δεδομένη παραμόρφωση (μη καταστροφική δοκιμή) κατά το έτος 2015 ήταν πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες στο έτος 2016 και στους δύο εδαφικούς τύπους παρουσιάζοντας μεγαλύτερη κλίση το έτος 2015, -0.12 συγκριτικά με το έτος 2016, -0.04. Οι τιμές στο πρώτο έτος κυμάνθηκαν στο εύρος 1.0-2.7 N/mm ενώ στο δεύτερο έτος μεταξύ 0.8-1.3 N/mm.



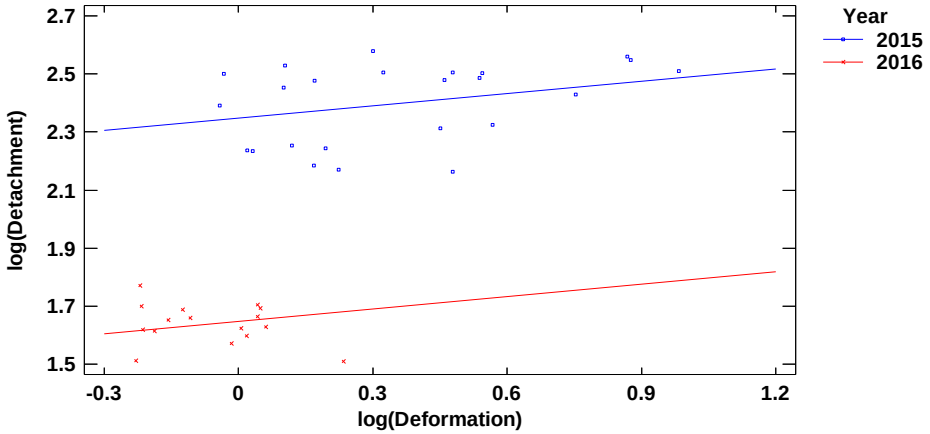
Διάγραμμα 7. Μεταβολή της δύναμης συμπίεσης σε δεδομένη παραμόρφωση (κλίση) (N/mm) συναρτήσει της απώλειας μάζας (αφυδάτωση). Τα σημεία αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά δεδομένα και οι γραμμές τις τάσεις.

Από τη συσχέτιση της απώλειας μάζας (%) με την παραμόρφωση των ραγών (N/mm) εξήχθη το Διάγραμμα 7 με τις αντίστοιχες συσχετίσεις όπως αυτές παρατίθενται παρακάτω.

- Έτος = 2015, ln[Mass loss (%)] = 2.33 - 2.43 × ln[Deformation],
- Έτος = 2016, ln[Mass loss (%)] = 1.23 - 2.43 × ln[Deformation], με R^2_{adj} =76.2%, SEE=0.30

και P-value≤0.05. Η P-value για την κλίση των δύο συσχετίσεων (επίπεδα 2015 και 2016) ήταν μεγαλύτερη του P-value=0.1 συνεπώς δεν υπήρχε σημαντική διαφορά μεταξύ τους γεγονός που σημαίνει ότι μετασυλλεκτικά ο μηχανισμός της αφυδάτωσης οφείλεται στο έλλειμμα πίεσης των υδρατμών ενώ η αρχική τιμή των κλίσεων (ποσοστό αφυδάτωσης=0%) ήταν σημαντικά διαφορετική (P-value≤0.001) και για τα δύο έτη (2015 και 2016) οφειλόμενη σε άλλους προσυλλεκτικούς παράγοντες. Η αντίστοιχη ανάλυση αλλά με παράγοντα διαφοροποίησης τον εδαφικό τύπο (A και B) έδωσε μη σημαντική διαφορά τόσο ως προς τις κλίσεις (P-value=0.54>0.1) όσο και ως προς τις αρχικές τιμές των συσχετίσεων (P-value=0.26>0.1).

Από τη συσχέτιση της δύναμης συμπίεσης σε δεδομένη παραμόρφωση (κλίση) (N/mm) συναρτήσει της δύναμης αποκοπής του ποδίσκου (N) εξήχθη το Διάγραμμα 8 με τις αντίστοιχες συσχετίσεις όπως αυτές παρατίθενται παρακάτω.



Διάγραμμα 8. Μεταβολή της δύναμης συμπίεσης σε δεδομένη παραμόρφωση (κλίση) (N/mm) συναρτήσει της δύναμης αποκοπής του ποδίσκου (N). Τα σημεία αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά δεδομένα και οι γραμμές τις τάσεις.

- Έτος = 2015, ln[Detachment] = 2.34 + 0.14 × ln[Deformation],
- Έτος = 2016, ln[Detachment] = 1.64 + 0.14 × ln[Deformation], με R^2_{adj} =91.87%, SEE=0.11

και P-value≤0.05. Η P-value για την κλίση των δύο συσχετίσεων (επίπεδα 2015 και 2016) ήταν μεγαλύτερη του P-value=0.16>0.1 συνεπώς δεν υπήρχε σημαντική διαφορά μεταξύ τους γεγονός που σημαίνει ότι τουλάχιστον μετασυλλεκτικά είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ραγόπτωσης χρησιμοποιώντας δεδομένα από μια μη καταστροφική δοκιμή ενώ η αρχική τιμή των κλίσεων ήταν σημαντικά διαφορετική (P-value≤0.001) για τα δύο έτη (2015 και 2016) η οποία πιθανόν να οφείλεται σε άλλους προσυλλεκτικούς παράγοντες. Η αντίστοιχη ανάλυση αλλά με παράγοντα διαφοροποίησης τον εδαφικό τύπο (A και B) έδωσε μη σημαντική διαφορά τόσο ως προς τις κλίσεις (P-value=0.77>0.1) όσο και ως προς τις αρχικές τιμές των συσχετίσεων (P-value=0.71>0.1).

5. Συμπεράσματα

Σε γενικές γραμμές βρέθηκε καλύτερη μετασυλλεκτική συμπεριφορά των επιτραπέζιων σταφυλιών που μελετήθηκαν στο αργιλοπηλώδες (CL) έδαφος συγκριτικά με το αμμοαργιλοπηλώδες (SCL). Το αργιλοπηλώδες έδαφος σε συνδυασμό με την πολύ καλή δομή του λόγω και των σημαντικών ποσοτήτων ανθρακικού ασβεστίου που περιέχει, εφοδιάζει ως ιδανικός ρυθμιστής της υγρασίας τα πρέμνα με νερό και θρεπτικά συστατικά ενώ εμποδίζει την ακραία υδατική καταπόνηση στην τελευταία φάση της ωρίμασης. Η μεγάλη διαφορά τώρα στα ποιοτικά χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν όσο αφορά το πρώτο καλλιεργητικό έτος σε σχέση με το δεύτερο οφείλεται πιθανόν σε εξωγενείς περιβαλλοντικούς παράγοντες δοθέντος ότι ακολουθήθηκαν ίδιοι καλλιεργητικοί χειρισμοί και στις δύο χρονιές. Τέλος, σημαντικές πληροφορίες για την ποιότητα των ψυχρο-συντηρούμενων σταφυλιών κατά τις δύο καλλιεργητικές χρονιές βρέθηκαν από τη συσχέτιση της δύναμης παραμόρφωσης των ραγών, με την αντίστοιχη δύναμη αποκοπής του μίσχου των ραγών και την απώλεια μάζας αυτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βασιλακάκης, Μ. (2014*)*, *Μετασυλλεκτική Φυσιολογία, Μεταχείριση Οπωροκηπευτικών και Τεχνολογία. Διαιτητική Αξία Οπωροκηπευτικών,* Εκδόσεις Γαρταγάνη. Θεσσαλονίκη. Ελλάς. Ε.Ε.

Λαμπρινός Γ., Μανωλοπούλου Ε. (1989), *Ποιότητα οπωροκηπευτικών προϊόντων*, Παραδόσεις προπτυχιακού μαθήματος Γ.Π.Α., Αθήνα.

Μεσημέρη Α. (2017), *Συντηρησιμότητα επιτραπέζιου σταφυλιού (v. Thomson Seedless) συναρτήσει προσυλλεκτικών χειρισμών*, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Blanke, M. M., & Leyhe, A. (1988). Stomatal and cuticular transpiration of the cap and berry of grape. *Journal of plant physiology*, *132*(2), 250-253.

Chervin, C., Aked, J., & Crisosto, C. H. (2012). Grapes. *Crop post-harvest: science and technology*, 187-211.

Creasy, G. L., & Creasy, L. L. (2009). *Grapes* (Vol. 16). CABI..

González-Barreiro, C., Rial-Otero, R., Cancho-Grande, B., & Simal-Gándara, J. (2015). Wine aroma compounds in grapes: a critical review. *Critical reviews in food science and nutrition*, *55*(2), 202-218.

Gross, K. C., Wang, C. Y., & Saltveit, M. E. (2004). USDA Handbook 66: The commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery.

Jayasena, V., & Cameron, I. (2008). ° Brix/acid ratio as a predictor of consumer acceptability of Crimson Seedless table grapes. *Journal of Food Quality*, 31(6), 736-750.

Kliewer, W. M. (1965). Changes in Concentration of Glucose, Fructose, and Total Soluble Solids in Flowers and Berries of *Vitis Vinifera*. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(2), 101-110.

Nunan, K. J., Sims, I. M., Bacic, A., Robinson, S. P., & Fincher, G. B. (1997). Isolation and characterization of cell walls from the mesocarp of mature grape berries (*Vitis vinifera*). *Planta*, *203*(1), 93-100.

Possingham, J. V., Chambers, T. C., Radler, F., & Grncarevic, M. (1967). Cuticular transpiration and wax structure and composition of leaves and fruit of *Vitis vinifera*. *Australian Journal of Biological Sciences*, *20*(6), 1149-1154.

Terral, J.F., Tabard, E., Bouby, L., Ivorra, S., Pastor, T., Figueiral, I., ... & Tardy, C. (2009). Evolution and history of grapevine (Vitis vinifera) under domestication: new morphometric

perspectives to understand seed domestication syndrome and reveal origins of ancient European cultivars. *Annals of botany*, 105(3), 443-455

Winkler, A.J., Cook, J.A., Kliewer, W.M. & Lider, L.A. (1974). *General Viticulture*. University of California Press. Berkley, CA.

10ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΗΣ ΝΕΦΟΫΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ: ΜΙΑ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Ε. Συμεωνάκη[1 2], Κ. Αρβανίτης[1]& Δ. Πυρομάλης [1 2]

[1] Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,

[2] Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ., Τμήμα Μηχ. Αυτοματισμού Τ.Ε., Θηβών 250 & Π. Ράλλη, Τ.Κ. 12244, Αιγάλεω, karvan@aua.gr@aua.gr

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες πολλοί τομείς έχουν επωφεληθεί από τις συνεχώς αναπτυσσόμενες εφαρμογές των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (Τ.Π.Ε.). Η ένταξη των νέων αυτών τεχνολογιών στο γεωργικό τομέα υπό την έννοια της Γεωργίας Ακριβείας αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερη σημασία, απασχολώντας ιδιαίτερα την επιστημονική έρευνα, καθώς κατατάσσεται ανάμεσα στις πλέον σύγχρονες μεθόδους γεωργικής πρακτικής, όντας σχετιζόμενη άμεσα με τη βελτίωση της παραγωγικότητας. Ειδικότερα η αξιοποίηση του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT) στη γεωργία, μέσω της αυτοματοποίησης και πλήρους ψηφιακής διαχείρισης της γεωργικής παραγωγής με τη χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN) για τη συλλογή και παρακολούθηση δεδομένων σχετικών με τις καιρικές και εδαφικές συνθήκες καθώς και την εφαρμογή των τεχνολογιών νεφοϋπολογιστικής για τη μεταφορά, αποθήκευση και επεξεργασία αυτών των δεδομένων με χρήση του διαδικτύου, αποτελεί ένα καινοτόμο ερευνητικό πεδίο το οποίο απασχολεί ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα. Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης των επιστημονικών προσεγγίσεων και των ερευνητικών πρακτικών όσον αφορά την αξιοποίηση του Διαδικτύου των Αντικειμένων στον τομέα της Γεωργίας Ακριβείας, εστιάζοντας ιδιαίτερα στη μελέτη και διερεύνηση των αναγκών των πραγματικών εφαρμογών στο πεδίο της γεωργίας σχετικά με τον εξ' αποστάσεως έλεγχο και τις τεχνολογίες Νεφοϋπολογιστικής Μηχανικής.

Λέξεις κλειδιά: Γεωργία Ακριβείας, Διαδίκτυο των Αντικειμένων, Νεφοϋπολογιστική Μηχανική, Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

THE DEVELOPMENT OF INTERNET OF THINGS AND CLOUD COMPUTING APPLICATIONS IN PRECISION AGRICULTURE: A REVIEW

E. Symeonaki [1 2], K. Arvanitis [1] & D. Piromalis [1 2]

[1] Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens

[2] PUAS, Dept. of Automation Engineering, 250 Thivon & P. Ralli, 12244, Aigaleo karvan@aua.gr@aua.gr

ABSTRACT

During the recent past decades several various areas have seen benefits from the progressive development of Information and Communication Technologies (ICT) applications. The integration of these new technologies in the agricultural sector within the meaning of Precision Agriculture is of particular importance and employs considerably the scientific research, as it ranks among the most innovative methods of agricultural practice,being directly related to the productivity improvement by maximizing the efficiency inputs and minimizing their environmental impacts. In particular the development of

Internet of Things (IoT) in agriculture, through the automation and total digital management of agricultural production using Wireless Sensor Networks (WSN) in order to acquire and monitor data concerning the weather and soil conditions, as well as through the employment of Cloud Computing applications for transferring, storing and processing these data using the Internet, is without any doubt an innovative research field which concerns deeply the scientific community. In this paper an attempt is made to review scientific approaches as well as research practices regarding the integration of Internet of Things on the grounds of Precision Agriculture, focusing particularly on the study and examination of real applications needs in agriculture with regard to remote control and Cloud Computing engineering technologies.

Keywords: Precision Agriculture, Internet of Things, Cloud Computing, Wireless Sensor Networks.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία αποτελεί ίσως το σημαντικότερο τομέα της πρωτογενούς βιομηχανίας, ο οποίος όμως χαρακτηρίζεται ως ευάλωτος, ασταθής, πολύπλοκος, δυναμικός, και εξαιρετικά ανταγωνιστικός καθώς οι γεωργοί είναι αναγκασμένοι να λαμβάνουν αποφάσεις τόσο με βραχυπρόθεσμο όσο και με μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα. Σε εβδομαδιαία, μηνιαία, αλλά και σε ετήσια βάση, πρέπει να λαμβάνονται αποφάσεις σχετικά με τους συνδυασμούς στις σπορές, τις καλλιεργητικές περιόδους, τη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων, τη χρήση γεωργικών μηχανημάτων, τη συλλογή, την αποθήκευση και τη διάθεση των προϊόντων στα κανάλια της εφοδιαστικής αλυσίδας, κ.λπ.

Ειδικά κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, η γεωργία από ένας τομέας παραδοσιακά βασισμένος στην ένταση εργασίας μετατράπηκε σε έναν τομέα υψηλής τεχνολογικής έντασης. Η ένταξη στο γεωργικό τομέα των συνεχώς αναπτυσσόμενων συνδυασμένων λύσεων των εφαρμογών Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (Τ.Π.Ε.), όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN) και το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things – IoT), οδήγησε στην εμφάνιση νέων πεδίων έρευνας και εφαρμογών υπό τις έννοιες ευφυής γεωργία (smart agriculture), γεωργία της ακριβείας (precision agriculture), καλλιέργεια της ακριβείας (precision farming), κ.λπ. Η ενσωμάτωση των νέων αυτών τεχνολογιών στο γεωργικό τομέα έχει δώσει τη δυνατότητα καινοτόμων μορφών διαχείρισης, σε επίπεδα λεπτομέρειας που δεν ήταν δυνατόν να επιτευχθούν πριν μερικά χρόνια και αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερη σημασία, απασχολώντας ιδιαίτερα την επιστημονική έρευνα, καθώς κατατάσσεται ανάμεσα στις πλέον σύγχρονες μεθόδους γεωργικής πρακτικής. Με την εφαρμογή των λύσεων έξυπνης γεωργίας παρέχεται η δυνατότητα αποτελεσματικότερης λειτουργίας και διαχείρισης της εκμετάλλευσης των πόρων στη γεωργική παραγωγή υπό τη μορφή της καλύτερης λήψης αποφάσεων, διασυνδέοντας τους τομείς της τεχνολογίας των πληροφοριακών συστημάτων διοίκησης (Management Information Systems – MIS), της γεωργίας ακριβείας και των γεωργικών αυτοματισμών.

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Εξαιτίας της ραγδαίας ανάπτυξης των τεχνολογιών επεξεργασίας και αποθήκευσης καθώς και της επιτυχίας του Διαδικτύου, οι υπολογιστικοί πόροι έχουν γίνει οικονομικότεροι, πιο ισχυροί και διαθέσιμοι από ποτέ.

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things – IoT) και η τεχνολογία νεφοϋπολογιστικής μηχανικής (Cloud computing) είναι δύο έννοιες αιχμής οι οποίες

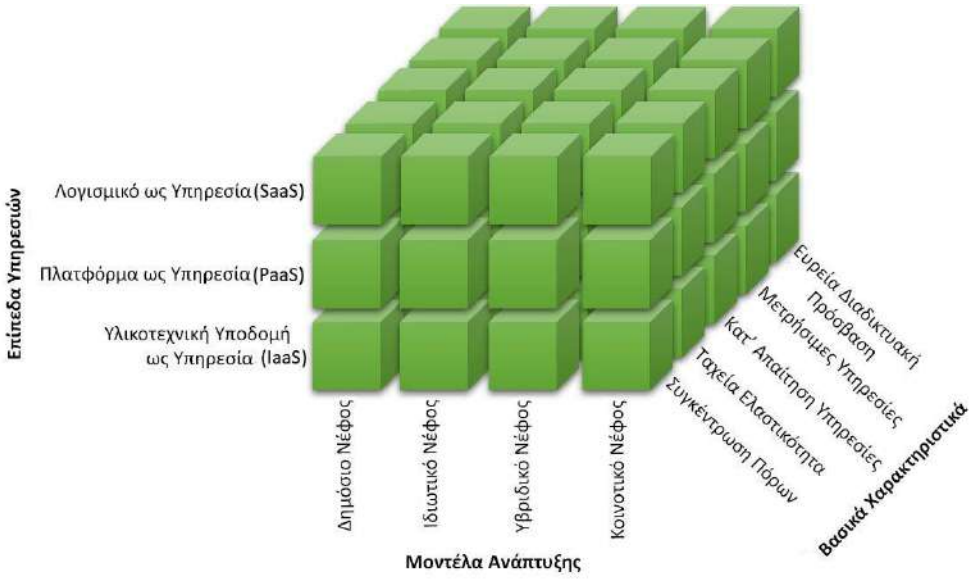
αποτελούν τον πυρήνα της βιομηχανίας της πληροφορικής τεχνολογίας νέας γενιάς. Το Διαδίκτυο το Αντικειμένων σχετίζεται άμεσα με τη νεφοϋπολογιστική μηχανική καθώς μέσω αυτής αποκτά ισχυρά υπολογιστικά εργαλεία ενώ η τεχνολογία νέφους βρίσκει το καλύτερο κανάλι πρακτικής βασιζόμενη στο Διαδίκτυο των Αντικειμένων.

1.1 Νεφοϋπολογιστική Μηχανική

Η δυνατότητα χρήσης του διαδικτύου για τη μεταφορά, αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων εντάσσεται στην έννοια της νεφοϋπολογιστικής μηχανικής (cloud computing).

Αν και η έννοια της νεφοϋπολογιστικής μηχανικής εμφανίστηκε μόλις τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη της απαιτούμενης τεχνολογίας είχε ξεκινήσει δύο έως τρεις δεκαετίες νωρίτερα (Kleinrock, 2005; Armbrust et al., 2009; Wheeler and Waggener, 2009).

Όπως προκύπτει από την έρευνα της βιβλιογραφίας υπάρχουν διάφορες απόψεις σχετικά με τον ορισμό της τεχνολογίας νέφους (Staten, 2008; Vouk, 2008; Armbrust et al., 2009; Buyya et al., 2009; Plummer et al., 2009; Vaquero et al., 2009; Mell and Grance, 2010) με επικρατέστερη αυτή που έχει διατυπωθεί από τους P. Mell και T. Grance για λογαριασμό του U.S. National Institute of Standards and Technology (NIST). Σύμφωνα με αυτή την άποψη η τεχνολογία νέφους αναφέρεται σε ένα μοντέλο για την παροχή εύκολης, κατ' απαίτηση (on-demand) διαδικτυακής πρόσβασης σε μια κοινόχρηστη δεξαμενή παραμετροποιήσιμων υπολογιστικών πόρων (π.χ., δίκτυα, εξυπηρετητές, αποθηκευτικός χώρος, εφαρμογές και υπηρεσίες) που μπορούν να τροφοδοτούνται και να διαχέονται άμεσα με ελάχιστη προσπάθεια διαχείρισης ή παροχή υπηρεσιών αλληλεπίδρασης. Ένα τυπικό μοντέλο τεχνολογίας νέφους προωθεί την προσβασιμότητα και αποτελείται από πέντε βασικά χαρακτηριστικά, τρία επίπεδα υπηρεσιών και τέσσερα μοντέλα ανάπτυξης όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Ανατομία Τεχνολογίας Νέφους σύμφωνα με το NIST (Craig-Wood, 2010)

Στην ουσία, η τεχνολογία νέφους βασίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό κατανεμημένων ηλεκτρονικών υπολογιστών υψηλού κόστους καθώς και σε εξοπλισμό δικτύωσης και διαχείρισης των πόρων αποθήκευσης για να υποστηρίξει μια ποικιλία εφαρμογών μέσω του Διαδικτύου ώστε να παρέχει στους τελικούς χρήστες υψηλής ποιότητας υπηρεσίες (Rajkumar et al., 2009).

Μερικά από τα χαρακτηριστικά που καθιστούν τη χρήση της τεχνολογίας νέφους ελκυστική σε διάφορους τομείς τις παραγωγικής διαδικασίας είναι τα ακόλουθα (Lin and Chang, 2012):

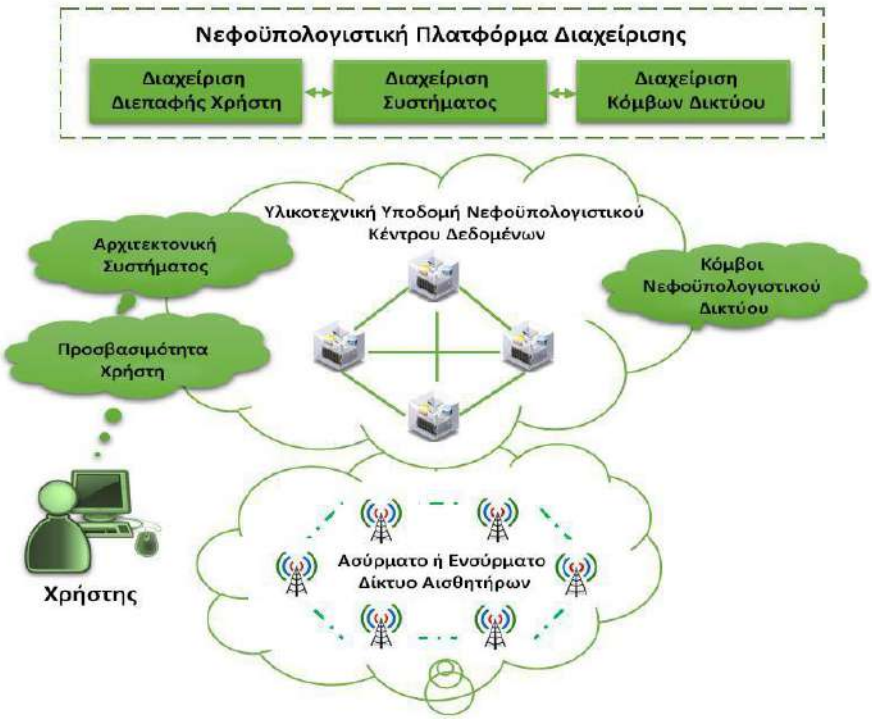
- δεν απαιτείται καμία αρχική επένδυση για την εφαρμογή της,
- έχει μειωμένο λειτουργικό κόστος,
- έχει δυνατότητες εξαιρετικής επεκτασιμότητας,
- παρέχει εύκολη προσβασιμότητα και
- έχει μειωμένους επενδυτικούς κινδύνους και χαμηλό έως μηδαμινό κόστος συντήρησης.

1.2 Διαδίκτυο των Αντικειμένων

Παρόλο που ο όρος Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things – IoT) χρησιμοποιείται όλο και πιο ευρέως, δεν προκύπτει από την έρευνα της βιβλιογραφίας ένας κοινός ουσιαστικός ορισμός αναφορικά με αυτό ή μια κοινή επιστημονική αποδοχή για το τι πράγματι περιλαμβάνει.

Η προέλευση του όρου αποδίδεται στο ερευνητικό έργο των Auto-ID Labs του Massachusetts Institute of Technology (MIT) σχετικά με τις υποδομές δικτυακής ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (Radio-Frequency Identification - RFID) πριν από 15 περίπου χρόνια (Atzori et al., 2010; Mattern and Floerkemeier, 2010). Έκτοτε, το φάσμα εφαρμογής του Διαδικτύου των Αντικειμένων αναπτύχθηκε πέρα από το πεδίο των τεχνολογιών RFID. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU), για παράδειγμα, ορίζει το Διαδίκτυο των Αντικειμένων ως «μια παγκόσμια υποδομή για την Κοινωνία της Πληροφορίας, η οποία επιτρέπει προηγμένες υπηρεσίες μέσω της διασύνδεσης φυσικών και εικονικών αντικειμένων που βασίζονται σε υπάρχουσες και εξελισσόμενες, διαλειτουργικές τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών» (ITU, 2012). Παράλληλα, έχουν προταθεί διάφοροι εναλλακτικοί ορισμοί, ορισμένοι εκ των οποίων δίνουν έμφαση στα αντικείμενα που συνδέονται με το Διαδίκτυο των Αντικειμένων, ενώ άλλοι επικεντρώνονται σε θέματα του Διαδικτύου των Αντικειμένων που σχετίζονται με το Ίντερνετ, όπως τα διαδικτυακά πρωτόκολλα και η τεχνολογία δικτύων ή σε σημαντικές προκλήσεις που αφορούν, π.χ., την αποθήκευση, την αναζήτηση και την οργάνωση μεγάλων όγκων πληροφοριών (Atzori et al., 2010).

Ο ορισμός του Διαδικτύου των Αντικειμένων αλλάζει με την έλευση της νεφοϋπολογιστικής τεχνολογίας καθώς πλέον καθορίζεται από το συνδυασμό της τεχνολογίας νέφους, του απανταχού δικτύου (ubiquitous network) και των έξυπνων δικτύων αισθητήρων. Ειδικότερα όσον αφορά το απανταχού δίκτυο, αυτό περιλαμβάνει 3G, LTE, GSM, WLAN, WPAN, WiMax, RFID, Zigbee, NFC, Bluetooth και άλλες τεχνολογίες πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας καθώς επίσης και τεχνολογίες πρωτοκόλλων ενσύρματης επικοινωνίας όπως για παράδειγμα τα οπτικά καλώδια (Cai, 2012). Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η αρχή της τεχνολογίας νέφους για το Διαδίκτυο των Αντικειμένων.



Σχήμα 2. Αρχή λειτουργίας του Υπολογιστικού Νέφους για το Διαδίκτυο των Αντικειμένων

2. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Με την εφαρμογή των λύσεων έξυπνης γεωργίας (smart agriculture) παρέχεται η δυνατότητα αποτελεσματικότερης λειτουργίας και διαχείρισης της εκμετάλλευσης των πόρων στη γεωργική παραγωγή υπό τη μορφή της καλύτερης λήψης αποφάσεων, διασυνδέοντας τους τομείς της τεχνολογίας των πληροφοριακών συστημάτων διοίκησης (Management Information Systems – MIS), της γεωργίας ακριβείας (precision agriculture) και των γεωργικών αυτοματισμών (agricultural automation).

Συγκεκριμένα, η γεωργία ακριβείας (precision agriculture) αναφέρεται στη βελτίωση της γεωργικής παραγωγής μέσω της μεγιστοποίησης της αποδοτικότητας των εισροών και της ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων, αξιοποιώντας τις δυνατότητες που παρέχουν οι νέες τεχνολογίες για την αναγνώριση της ανομοιογένειας των αναγκών της καλλιέργειας (McBratney et al., 2005).

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους γεωργικής παραγωγής, όπου οι εισροές παρέχονται ενιαία, με την παραδοχή μιας κάποιας αποδεκτής ομοιογένειας των εδαφολογικών ιδιοτήτων (όπως για παράδειγμα η γονιμότητα του εδάφους, η εδαφική υγρασία, τα χαρακτηριστικά των φυτών, κ.λπ.), η γεωργία ακριβείας διαχειρίζεται τον αγρό σε διαχειριστικές ζώνες οι οποίες όντως εμφανίζουν σχετική ομοιογένεια μεταξύ τους, ανταποκρινόμενη περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες. Έτσι, με τη γεωργία ακριβείας επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη διαχείριση της τοπικής ανομοιογένειας των αναγκών μιας καλλιέργειας, με στόχο την αύξηση στην απόδοση της παραγωγής, τη βελτίωση της ποιότητας των γεωργικών προϊόντων, την ορθολογική και αποτελεσματικότερη χρήση των χημικών εισροών, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και την προστασία του εδάφους και των υπογείων υδάτων (Blackmore, 1994; Davis et al., 1998).

Ανάμεσα στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας για τον έλεγχο εφαρμογής των εισροών περιλαμβάνονται εκτός άλλων συστήματα εντοπισμού θέσης (Global Positioning Systems – GPS), γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (Geographic

Information Systems – GIS), συστήματα τηλεμετρίας (telemetry systems), συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support Systems – DSS), ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN), τεχνολογία μεσισμικού (middleware) το οποίο συνεργάζεται με τις συγκεκριμένες δομές υλικού (hardware), τεχνολογίες νεφοϋπολογιστικής μηχανικής (cloud computing), το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things) κ.λπ. (Stafford, 2000; Taylor et al., 2013).

2.1 Εφαρμογές της Νεφοϋπολογιστικής στη Γεωργία Ακριβείας

Όσον αφορά την έρευνα σχετικά με την εφαρμογή της τεχνολογίας νέφους στη γεωργία έχουν παρουσιαστεί αρκετά επιτεύγματα:

Ι. Υπηρεσίες πληροφόρησης στην ύπαιθρο

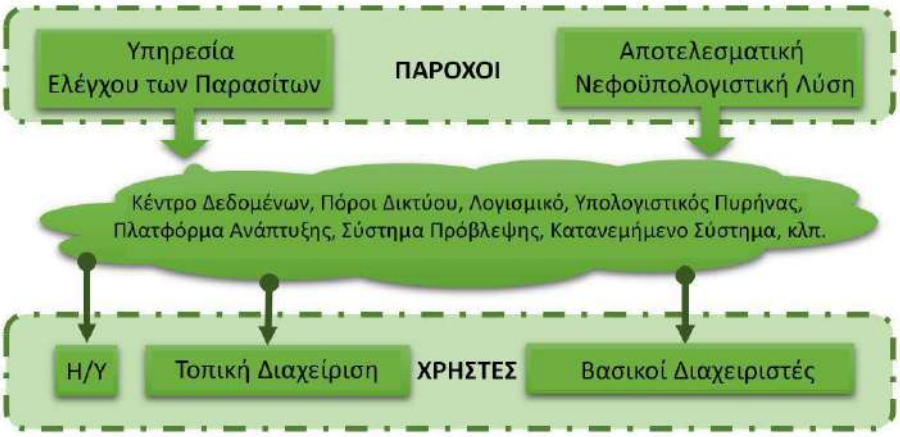
Η προώθηση των υπηρεσιών πληροφόρησης στην ύπαιθρο είναι καθοριστική για την υλοποίηση ενός σχεδίου ενίσχυσης των υπανάπτυκτων περιφερειών. Συνδυάζοντας την προηγμένη αρχιτεκτονική της νεφοϋπολογιστικής και τις υπηρεσίες του Διαδικτύου με το μοντέλο υπηρεσιών SaaS, είναι εφικτή η δημιουργία ενός απρόσκοπτου πληροφοριακού συστήματος υψηλής ταχύτητας μεταξύ των κρατικών φορέων, των προμηθευτών υπηρεσιών και των αγροτών, προκειμένου να επιταχυνθεί ο ρυθμός της πληροφοριοποίησης στη γεωργία μέσω της ανταλλαγής και απομακρυσμένης αποθήκευσης δεδομένων, της αλληλεπίδρασης με τους αγρότες και της διαχείρισης των αγρών. Οι υπηρεσίες εφαρμογών νεφοϋπολογιστικής και ειδικότερα το μοντέλο “Software as a Service (SaaS)” διαθέτουν πλεονεκτήματα όπως είναι το χαμηλό εκ των προτέρων κόστος, η μεγιστοποίηση της απόδοσης και η διαθεσιμότητα υπηρεσιών (Feng, 2010).

ΙΙ. Έλεγχος Φυτικών Παρασίτων

Η πρόβλεψη για τον έλεγχο των φυτικών παρασίτων βασίζεται στο άθροισμα συσσωρευμένων δεδομένων τα οποία αυξάνονται τόσο γρήγορα ώστε να αντιμετωπίζεται εξαιρετικά μεγάλο φορτίο στη διαχείριση των πληροφοριών. Τα μειονεκτήματα των υφιστάμενων πληροφοριακών συστημάτων διαχείρισης φυτικών παρασίτων, όπως το υψηλό κόστος και η ελλιπής αξιοποίηση τους, είναι επίσης δύσκολο να ξεπεραστούν.

Ενώ η αξιοποίηση της υφιστάμενης νεφοϋπολογιστικής τεχνολογίας αποτελεί μια καλή

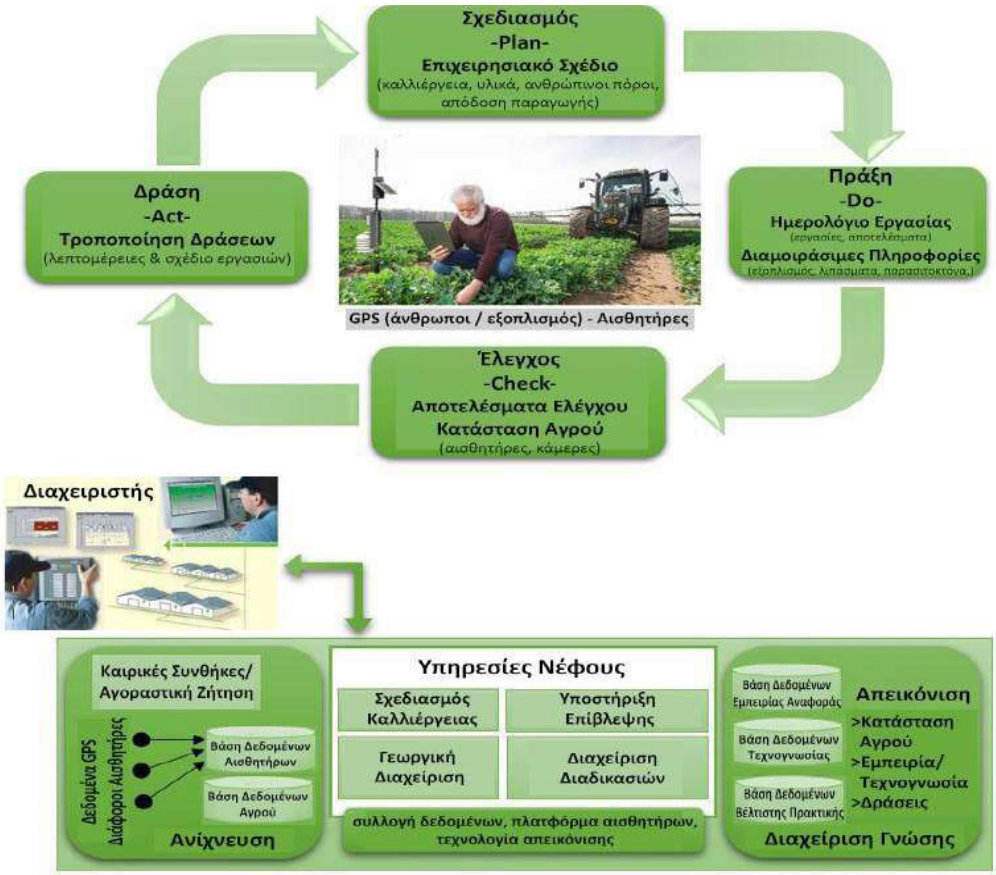
μέθοδο διαχείρισης των υφιστάμενων πόρων, πρέπει να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της αναγωγής από εθνικό σε τοπικό επίπεδο καθώς ο έλεγχος των επιβλαβών οργανισμών μπορεί να διαφέρει ανά περιοχή. Η ιδέα ενός εξειδικευμένου υπολογιστικού νέφους για τον έλεγχο των φυτικών παρασίτων το οποίο δίνει λύση στα προαναφερόμενα προβλήματα απεικονίζεται στο Σχήμα 3 (Jiang et al., 2009).



Σχήμα 3. Μοντέλο Εξειδικευμένου Υπολογιστικού Νέφους

III. Γεωργική Παραγωγή

Όπως προκύπτει από την έρευνα της βιβλιογραφίας, δεν υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων πληροφοριών σχετικά με τις εφαρμογές της νεφοϋπολογιστικής τεχνολογίας στη γεωργική παραγωγή. Μια μελέτη η οποία εξέτασε το σημείο σύνδεσης μεταξύ της τεχνολογίας νέφους και της γεωργικής παραγωγής προτείνοντας ένα μοντέλο του κύκλου PDCA (Plan-Do-Check-Act) και των υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους στη γεωργική παραγωγή, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία γεωργικής παραγωγής, για την παροχή υπηρεσιών νέφους χρησιμοποιούνται κυρίως βασικές τεχνικές ανίχνευσης και διαχείρισης της γνώσης (Hori et al., 2010).



Σχήμα 4. Κύκλος PDCA και υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους στη γεωργία

2.2 Εφαρμογές του Διαδικτύου των Αντικειμένων στη Γεωργία Ακριβείας

Τα τελευταία χρόνια, το Διαδίκτυο των Αντικειμένων έχει βρει εφαρμογή σε διάφορους τομείς της γεωργίας.

Ι. Ασφάλεια στη Γεωργική Παραγωγή

Προκειμένου να εξασφαλισθεί η ασφάλεια των γεωργικών προϊόντων πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι ατυχημάτων και να ενισχυθεί η διαχείριση της γεωργικής παραγωγικής διαδικασίας.

Μια εφαρμογή του Διαδικτύου των Αντικειμένων στην ασφάλεια της γεωργικής παραγωγής αποτελεί το σύστημα ανιχνευσιμότητας της ασφάλειας των τροφίμων. Για παράδειγμα το University of Arizona των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής βοηθά τους αγρότες να εκτιμούν την κατάσταση του εδάφους με την τεχνολογία RFID και GPS, επιτρέποντας στους εμπόρους λιανικής να ανιχνεύσουν την αλυσίδα εφοδιασμού, τον τόπο και τον χρόνο συγκομιδής καθώς και άλλες πληροφορίες που αφορούν το γεωργικό προϊόν (Nolte, 2009).

ΙΙ. *Μετάδοση γεωργικών πληροφοριών και Ευφυής ανίχνευση*

Η σύγχρονη γεωργία δεν μπορεί να αναπτυχθεί χωρίς την συνεχή παροχή πληροφόρησης. Οι πληροφορίες που αφορούν το κλίμα, την εδαφική οξύτητα και αλκαλικότητα, την επιλογή των σπόρων και του λιπάσματος, τον έλεγχος των εντόμων και των παρασίτων, τη σπορά και τη συγκομιδή της καλλιέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τους αγρότες. Με τη χρήση της τεχνολογίας του Διαδικτύου των Αντικειμένων σε συνδυασμό με αισθητήρες πραγματικού χρόνου για την παρακολούθηση της κατάστασης των καλλιεργειών κατά την άρδευση και τον αερισμό του εδάφους καθώς και τη συλλογή δεδομένων που αφορούν τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ισχύ του ανέμου, την ατμόσφαιρα, την πιθανότητα βροχόπτωσης, τη συγκέντρωση αζώτου και την τιμή pH του εδάφους παρέχεται η δυνατότητα σωστής πρόβλεψης και αποφυγής των καταστροφών (Wen and Long, 2010).

ΙΙΙ. Ευφυής Έλεγχος Καλλιέργειας

Ο ευφυής έλεγχος καλλιέργειας είναι σημαντικός για τη σύγχρονη γεωργία. Εγκαθιστώντας ασύρματους αισθητήρες καθώς και άλλα ευφυή συστήματα ελέγχου είναι δυνατή η παρακολούθηση των καλλιεργειών και η έγκαιρη συλλογή παραμέτρων που επηρεάζουν το περιβάλλον των αγρών (Piromalis and Arvanitis, 2015). Οι υποδομές, όπως τα συστήματα άρδευσης και συντήρησης θερμότητας, ελέγχονται σύμφωνα με αυτές τις παραμέτρους, προκειμένου να διασφαλίσουν τις βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας και την υψηλής ποιότητας αγροτική παραγωγή (Xing et al., 2010). Επιπλέον καθώς η ανάγκη για υποστήριξη αποφάσεων στη γεωργία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με την εποχή, η τεχνολογία νέφους μπορεί, μέσω της πρόβλεψης, να αλλάξει γρήγορα τον αριθμό των απαιτούμενων εξυπηρετητών και των άλλων πόρων, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες (Qing et al., 2015).

ΙV. Άρδευση Ακριβείας

Η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων του Διαδικτύου των Αντικειμένων μπορεί να συνεισφέρει στην υποστήριξη λήψης αποφάσεων στα συστήματα άρδευσης ακριβείας.

Ένα δίκτυο αισθητήρων αποκτά πρόσβαση στο Διαδίκτυο μέσω μιας υπηρεσίας ανταλλαγής δεδομένων (service-based data sharing) επιτρέποντας στους χρήστες να λαμβάνουν απευθείας, παραμέτρους σχετικές με την καλλιέργεια. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποστέλλονται στο διακομιστή ενώ τα αποκλίνοντα δεδομένα που μπορεί να οφείλονται σε σφάλματα επικοινωνίας ή μετατόπισης της θερμοκρασίας των αισθητήρων μπορούν να αντιμετωπιστούν με φίλτρο. Για την προώθηση της αποδοτικότητας της

άρδευσης, οι χρήστες μπορούν να έχουν εξ αποστάσεως πρόσβαση σε όλες τις παραμέτρους των καλλιεργειών και τη χρήση των γεωργικών μηχανημάτων μέσω B/S, C/S ή PDA (Xu et al., 2010).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα ερευνητική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη της αξιοποίησης του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT) και των εφαρμογών της νεφοϋπολογιστικής στη γεωργία ακριβείας. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία τα υπολογιστικά νέφη διαθέτουν πλεονεκτήματά όσον αφορά το εύρος της κλίμακας εφαρμογής τους, την απεικόνιση, την υψηλή αξιοπιστία, την επεκτασιμότητα, και την υψηλή οικονομοτεχνική αποδοτικότητα, η δημιουργία εξειδικευμένων εφαρμογών για τη γεωργία, βασισμένων στην τεχνολογία νέφους μπορεί να προωθήσει την ανταλλαγή πόρων, την εξοικονόμηση κόστους και να προάγει τη δημιουργία γεωργικών καλλιεργειών υψηλής απόδοσης. Επιπλέον, η εξέλιξη του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT), μέσω των τεχνολογιών RFID και των ασύρματων

αισθητήρων, μπορεί να επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στη μετάδοση γεωργικών πληροφοριών και την ευφυή ανίχνευση, στον ευφυή έλεγχο των καλλιεργειών καθώς στην άρδευση ακριβείας, όχι μόνο να αλλάζοντας τον παραδοσιακό τρόπο της γεωργικής διαχείρισης αλλά ενισχύοντας παράλληλα την ασφάλεια της ποιότητας των γεωργικών προϊόντων.

Από όλες τις ερευνητικές μελέτες που εξετάσθηκαν, προκύπτει ότι η εφαρμογή τόσο της τεχνολογίας νέφους όσο και του Διαδικτύου των Αντικειμένων στη γεωργία είναι μεμονωμένη, έχοντας ιδιαίτερη μορφή και χαρακτηριστικά σε κάθε περίπτωση. Ο συνδυασμός των συγκεκριμένων τεχνολογιών για την ολοκλήρωση λύσεων στο πεδίο της γεωργίας ακριβείας θα μπορούσε να αποτελέσει μια μεγάλη καινοτομία και ως εκ τούτου είναι πολύ σημαντικό να ενταθούν οι ερευνητικές προσπάθειες για την εφαρμογή συνδυαστικών λύσεων της νεφοϋπολογιστικής και του Διαδικτύου των Αντικειμένων στη γεωργία.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A.D., Katz, R., Konwinski, A., et al., 2009. Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing, Available at: www.eecs. berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-28.pdf [Accessed May 2, 2017].

Atzori, L., Iera, A., Morabito, G., 2010. The internet of things: a survey, Comput Netw, 54, 2787–2805.

Blackmore, S., 1994. Precision farming: an introduction, Outlook on Agriculture Journal, 23, 275-280.

Buyya, R., Yeo, C.S., Venugopal, S., Broberg, J., Brandic, I., 2009. Cloud Computing and Emerging IT Platforms: Vision, Hype, and Reality for Delivering Computing as the 5th Utility, Future Generation Computer Systems (25)6, 599–616.

Cai, K., 2012. Internet of Things Technology Applied in Field Information Monitoring, Advances in information Sciences and Service Sciences AISS, 4(12), 405-414.

Craig Wood, K., 2010. Definition of Cloud Computing, incorporating NIST and G-Cloud views, Available at http://www.katescomment.com/definition-of-cloud-computing-nistg-cloud [Accessed May 2, 2017].

Davis, G., Casady, W., Massey, R., 1998. Precision agriculture: An introduction, WQ450, New. University of Missouri Extension. Available at: http://extension.missouri.edu/ publications/DisplayPub.aspx?P=WQ450 [Accessed 2 May 2017]

Feng, D., 2010. Innovative Research on Rural Information Service Mode Based on Cloud Computing, Science & Technology Information, 18, 214-217.

Hori, M., Kawashima, E., Yamazaki, T., 2010. Application of Cloud Computing to Agriculture and Prospects in Other Fields, FUJITSU Sci.Tech, 46(4), 446-454.

ITU, 2012. New ITU standards define the internet of things and provide the blueprints for its development. Available at: http://www.itu.int/ITU-T/newslog/New?ITU?Standards?Define?The?Internet?Of?Things?And?Provide?The?Blueprints?For?Its?Development.aspx [Accessed 2 May 2017]

Jiang, S.C., Fang, L.M, Huang, X.Y., 2009. An Idea of Special Cloud Computing in Forest Pests' Control, Computer Science, 5931, 615-620.

Kleinrock, L., 2005. A Vision of the Internet, ST Journal of Research (2)1, 4–5.

Lin, Y.K., Chang, P.C., 2012. Evaluation of system reliability for a cloud computing system with imperfect nodes, Systems Engineering 15(1), 83–94.

Mattern, F., Floerkemeier, C., 2010. From the internet of computers to the internet of things, Informatik-Spektrum 33(2), 107–121.

McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., Bouma, J., 2005. Future Directions of Precision Agriculture, Precision Agriculture, 6, 7–23.

Mell, P., Grance , T., 2010. The NIST Definition of Cloud Computing, Communications of the ACM (53)6, 50.

Nolte, K., 2009. Assessing a Site-Specific Yield Determination and Field-Level Tracking System for Iceberg Lettuce Production In the Desert Southwest, 2009 ASHS Annual Conference, Available at: https://agriculture.az.gov/sites/default/files/08-10_Final_AILRC.pdf [Accessed May 2, 2017].

Piromalis, D.D., Arvanitis, K.G., 2015. Radio Frequency Identification and Wireless Sensor Networks Application Domains Integration using DASH7 Mode 2 Standard in Agriculture", International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics, 1(2), 178-189.

Plummer, D.C., Smith, D.M., Bittman, T.J., Cearley, D.W., Cappuccio, D.J., Scott, D., et al., 2009. Five Refining Attributes of Public and Private Cloud Computing, Available at: http://www.gartner.com/DisplayDocument?doc_cd= 67182&ref=gfromdoc [Accessed May 2, 2017]

Qing, P., Ye, M., Liu, G., 2015. Study on the Agriculture Information Cloud Architecture and Application", Gen M., Kim K., Huang X., Hiroshi Y. (eds) Industrial Engineering, Management Science and Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, 349.

Rajkumar, B., Shin, Y.C., Srikumar, V., 2009. Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility, Future Generation Computer Systems-The International Journal of Grid Computing-Theory Methods and Applications 25(6), 599–616.

Stafford, J.V., 2000. Implementing Precision Agriculture in the 21st Century, Journal of Agricultural Engineering Research, 76(3), 267-275.

Staten, J., 2008. Is Cloud Computing Ready for the Enterprise? Available at: http://vu2aut.persiangig.com/ECommerce/Forrester-Cloud-computing-report080 307%5B1%5D.pdf [Accessed May 2, 2017].

Taylor, K., Griffith, C., Lamb, D., Falzon, G., Trotter, M., 2013. Farming the Web of Things, IEEE Intelligent Systems, 28(6), 12-19.

Vaquero, L., Rodero–Merino, L., Morán, D., 2011. Locking the Sky: A Survey on IaaS Cloud Security, Computing. Archives for Informatics and Numerical Computation (91)1, 93.

Vouk, M.A., 2008. Cloud Computing—Issues,Research and Implementations, Journal of Computing and Information Technology (4), 235–246.

Wen, L.M., Long, Y.L., 2010. Applications of Internet of Things in Agriculture, Modern Agricultural Sciences and Technology, 15, 55-56.

Wheeler, B., Waggener, S., 2009. Above Campus Services: Shaping the Promise of Cloud Computing for Higher Education, EDUCAUSE Review 44(6), 52-53.

Xing, F.X., Pang, J., Zhang, B.Q., 2010. Application about the Objects Internet Technology in the Modern Agricultural Production, Agricultural Technology & Equipment, 8, 1617-1618.

Xu, G., Chen, L.P., Zhang, R.R., Guo, J.H., 2010. Application of Internet of Things for Precision Irrigation, Journalof Computer Research and Development, 47(z2), 333-337.

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ Vis-NIR ΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΕΝΔΕΙΚΤΩΝ

Π. Βροχίδης[1], Ν. Τζιόλας[1], Ν. Τσακιρίδης[2], Θ. Αγγελοπούλου[1], Γ. Ζαλίδης[1]

[1]Σχολής Γεωπονίας, Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος ΑΠΘ, Τμήμα Γεωπονίας, Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης Φασματοσκοπίας και ΓΣΠ, 54124 Θεσσαλονίκη,
[2]Πολυτεχνική Σχολή ΑΠΘ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εργαστήριο Αυτοματοποίησης και Ρομποτικής, 54124 Θεσσαλονίκη,
✉*pvrochid@gmail.com*

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση της συνολικής ποσότητας άνθρακα προς τη συνολική ποσότητας αζώτου σε γεωργικά εδάφη κάνοντας χρήση φασματοσκοπίας στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Για την καλύτερη και αντιπροσωπευτικότερη μελέτη της σχέσης άνθρακα-αζώτου, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εντός πειραματικού αγρού με διαφοροποιημένη λίπανση σε διάφορα στάδια της καλλιεργητικής περιόδου. Η συλλογή των φασματικών μετρήσεων των εδαφικών δειγμάτων πραγματοποιήθηκε βάση διεθνών προτύπων, ενώ με χρήση του αλγόριθμου μηχανικής μάθησης Cubist, αναπτύχθηκαν μοντέλα με μεγάλη ακρίβεια πρόβλεψης για τον άνθρακα (R^2=0.8743), το άζωτο (R^2=0.7487) και το μεταξύ τους λόγο (R^2=0.76) με χρήση της τεχνικής της αναδιπλωμένης διασταυρωμένης επικύρωσης.

Λέξεις κλειδιά: φασματοσκοπία, λόγος άνθρακα-άζωτο, αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης

UTILIZATION OF Vis-NIR SPECTROSCOPY FOR THE ESTIMATION OF SOIL INDICES

P. Vrochidis[1], N. Tziolas[1], N. Tsakiridis[2], Th. Angelopoulou[1], G. Zalidis[1]

[1]Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, Faculty of Agriculture, Lab. of Remote Sensing and GIS 54124 Thessaloniki,
[2]Faculty of Engineering AUTH, Department of Electrical and Computer Engineering, Lab. Of Automation and Robotics, 54124 Thessaloniki,
✉*pvrochid@gmail.com*

Abstract

The overarching objective of the current study is to estimate the total amount of soil carbon and nitrogen, using Vis-NIR spectroscopy and machine learning algorithms. The data was collected in an experimental field, in which variable level of fertilization was applied in different subplots in order to obtain a representative dataset. The soil spectra were acquired using a standard global protocol in the laboratory. The cubist algorithm was utilized to develop high performance regression models for organic carbon (R^2=0.8763), total nitrogen (R^2=0.7487) and the ratio between them (R^2=0.76) using a double cross-validation scheme.

Keywords: soil spectroscopy, carbon-nitrogen ratio, cubist models

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος αποτελεί σημαντικό φυσικό πόρο συνεισφέροντας καθοριστικά στη λειτουργία των αγροσυστημάτων. Η συνεχής υποβάθμιση των εδαφικών πόρων το εντεινόμενο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής καθώς και η μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις απειλούν βασικές εδαφικές λειτουργίες. Ως εκ τούτου, για την αποτελεσματικότερη διαχείριση των φυσικών πόρων, είναι αναγκαία η συμμόρφωση με τους νέους κανονισμούς «πρασίνου» όπως αυτοί περιγράφονται στην Κοινή Αγροτική Πολιτική και τονίζονται στην Συμφωνία των Παρισίων για την κλιματική αλλαγή.

Η συστηματική παρακολούθηση της οργανικής ουσίας και της περιεκτικότητας των εδαφών σε θρεπτικά, εξασφαλίζει ένα πλήθος από ουσιώδης πληροφορίες προκειμένου να καθοριστούν διαφορετικές ζώνες διαχείρισης εντός του αγροτεμαχίου, να διασφαλιστούν οι κατάλληλες συνθήκες ανάπτυξης των καλλιεργειών και να διατηρηθεί η απαιτούμενη εδαφική ποιότητα. Υπό το πρίσμα των παραπάνω, προκύπτει ότι ο οργανικός άνθρακας του εδάφους (C) και το διαθέσιμο ολικό άζωτο (N) αποτελούν σημαντικούς ενδείκτες για την ποιότητα των γεωργικών εδαφών όπως αντίστοιχα η υγρασία, το οξυγόνο και το pH. Με βάση προηγούμενες έρευνες, η συνολική ποσότητα άνθρακα προς τη συνολική ποσότητα αζώτου (C/N) υποδηλώνει τον ρυθμό αποδόμησης της οργανικής ουσίας, τα επίπεδα αζώτου που είναι αφομοιώσιμα από τα φυτά και μπορεί να χαρακτηριστεί ως δείκτης ομαλής ανάπτυξης των φυτών (Bo et.al. 2016).

Για την καλύτερη κατανόηση των εδαφικών ιδιοτήτων και τις διάφορες λειτουργίες που πραγματοποιούνται σε ποικίλες χωροχρονικές κλίμακες είναι αναγκαία η ανάπτυξη αποτελεσματικών και αξιόπιστων μεθόδων μέτρησης και παρακολούθησης (Lyons et al., 2011). Οι συμβατικές μέθοδοι εδαφικών αναλύσεων αξιολογούνται ως δαπανηρές και χρονοβόρες ιδιαίτερα όσον αφορά την παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων (Viscarra Rossel and McBratney, 1998a). Στο πλαίσιο αυτό, η ραγδαία ανάπτυξη των αισθητήρων καταγραφής φασματικών υπογραφών εκ τους σύνεγγυς, την τελευταία δεκαπενταετία, εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα για τον τομέα της γεωργίας (Nocita et al., 2015). Ειδικότερα, η χρήση φασματοσκοπίας ανάκλασης εδάφους στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο (350-2500 nm) είναι πολλά υποσχόμενη όσον αφορά τις εφαρμογές που σχετίζονται με τα γεωργικά εδάφη. Οι φασματικές υπογραφές σε αυτήν την περιοχή επηρεάζονται κυρίως από τις δονήσεις των δεσμών μεταξύ των ατόμων του C και του N, καθώς και από το στάδιο αποσύνθεσης του C (Ben-Dor et al., 1997). Αντίστοιχα, έχει παρατηρηθεί από την ακαδημαϊκή κοινότητα ότι το έδαφος έχει παρόμοια ανάκλαση σε ακτινοβολίες μεταξύ 1100-2500 nm και παρουσιάζει 3 περιοχές απορρόφησης στα 1400, 1900 και 2200 nm τα οποία θεωρούνται ιδιαιτέρως σημαντικά για την βαθμονόμηση και την μελέτη του άνθρακα και του αζώτου σε αυτά τα μήκη κύματος (Ben-Dor and Banin, 1995).

Οι πληροφορίες που αντλούνται από τα δεδομένα ανάκλασης της ορατής και κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας (Vis-NIR) έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης της επιστημονικής κοινότητας τα τελευταία χρόνια για τον προσδιορισμό των εδαφικών ιδιοτήτων σε εργαστηριακό επίπεδο (Rossel et al., 2006) και σε επίπεδο τοπικών εφαρμογών (Barnes et al., 2003). Στο πλαίσιο αυτό, αναγνωρίστηκαν οι σημαντικές δυνατότητες που μπορούν να παρέχουν οι φασματικές βιβλιοθήκες εδαφικών δειγμάτων σχετικά με την πρόβλεψη της ποιότητας, των ιδιοτήτων και των συστατικών των εδαφών τα οποία είναι εξαιρετικής χρησιμότητας για τη γεωργία (Viscarra Rossel et. al. 2016).

Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία η χρήση μεθοδολογιών για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης εδαφικών χαρακτηριστικών μέσω συσχέτισής του με φασματικές υπογραφές θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα ώριμο πεδίο έρευνας στην γεωργία και σε άλλες επιστήμες. Όσο αφορά τον τομέα της γεωργίας κρίνεται αναγκαία η δημιουργία λεπτομερών χαρτών εδάφους ώστε να απεικονίζονται με σαφήνεια οι παράμετροι που θα μελετηθούν έτσι ώστε να ληφθούν στοχευμένα αποτελέσματα για την περαιτέρω μελέτη του και αξιοποίηση του για τις γεωργικές καλλιέργειες. Παράλληλα έχουν δημιουργηθεί νέες προοπτικές έρευνας σχετικά με την αξιοποίηση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (Tsakiridis et.al. 2017a). Σε αντίθεση με τα διαδεδομένα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αναδεικνύουν συσχετίσεις ανάμεσα στις εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές ακόμη και όταν αυτές δεν είναι διακριτές με συνήθεις στατιστικές μεθόδους, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια των προβλέψεων.

Η συγκεκριμένη έρευνα εστιάζει στην ανάπτυξη φασματικών βιβλιοθηκών εδαφικών δειγμάτων στο φάσμα της ορατής και κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας και τη χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την ταυτόχρονη εξέταση των ποσοτήτων C και N, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και με μεγάλη ακρίβεια πρόβλεψης.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

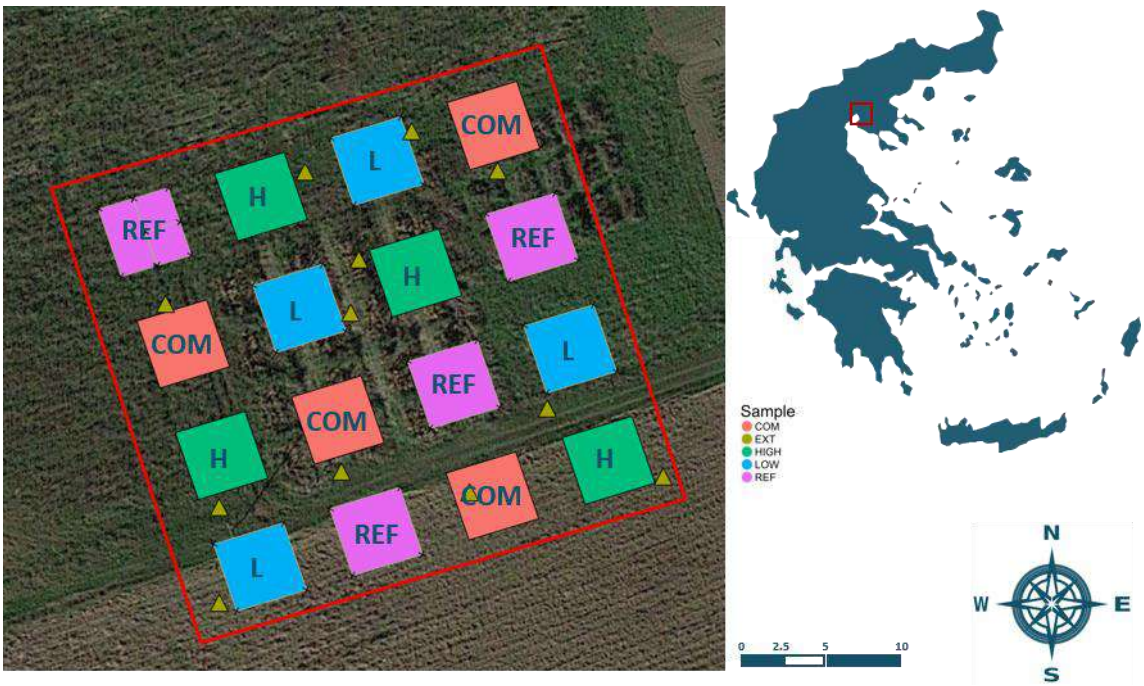
2.1 Περιοχή Μελέτης

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε αγροτεμάχιο ενός στρέμματος περίπου του Αγροκτήματος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (40° 32'Β, 29ο 59'Ε) κατά την θερινή καλλιεργητική περίοδο του 2016. Τα plots που χρησιμοποιήθηκαν για την περαιτέρω πορεία της έρευνας ακολούθησαν μια διάταξη 4x4. Για την μελέτη του λόγου C/N και την επίτευξη μεγαλύτερης παραλλακτικότητας χρησιμοποιήθηκε διαφορετική λίπανση για το κάθε plot ακολουθώντας το πλήρως τυχαιοποιημένο πειραματικό σχέδιο όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.

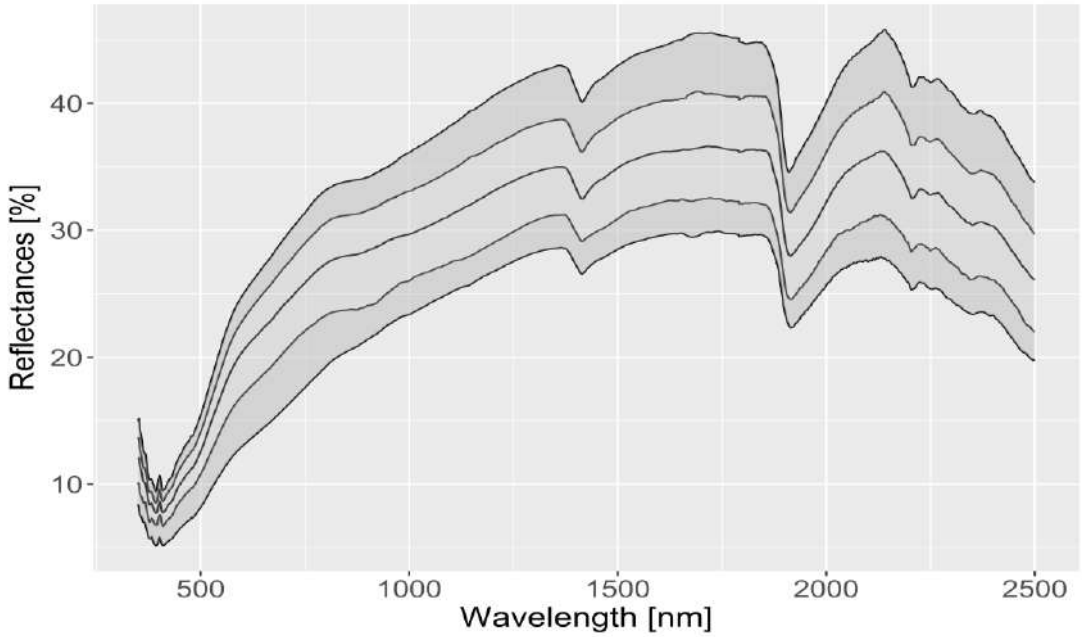
Συγκεκριμένα με -COM- παρουσιάζονται τα plots που χρησιμοποιήθηκε ανόργανη λίπανση 24-12-0 με 2,5 κιλά ανά plot. -H- και -L- είναι τα plot που χρησιμοποιήθηκε οργανική λίπανση με compost όπου η περιεκτικότητα ήταν 31,25 και 15,62 κιλά αντίστοιχα για κάθε plot. Τέλος με -REF- συμβολίζονται τα φυτά μάρτυρες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση του πειράματος. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 4 δειγματοληψίες σε διαφορετικά φαινολογικά στάδια του καλαμποκιού στην φυτική αύξηση, στην ανάπτυξη και στο θυσσάνωμα, στην τελική μορφή της καλλιέργειας και στην ωρίμανση της.

Πριν τις φασματοσκοπικές μετρήσεις του εδάφους, τα δείγματα που παραλήφθηκαν, αεροξηράνθηκαν και περάστηκαν από κόσκινο 2mm για την απομάκρυνση βόλων και φυτικών υπολειμμάτων και εν συνεχεία λειοτριβήθηκαν. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του φασματοφωτόμετρου PSR +3500, Spectral Evolution, σε συνθήκες εργαστηρίου ακολουθώντας το πρωτόκολλο μετρήεων που προτείνεται από τους Kopačková & Ben-Dor (2016). Το φασματοφωτόμετρο τοποθετήθηκε σε ειδικά διαμορφωμένο σκοτεινό θάλαμο με τεχνητό φωτισμό από δύο λυχνίες αλογόνου - βολφραμίου. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του οργάνου ενώ στη συνέχεια δύο τύποι εδάφους με γνώστες και χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες μετρήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ως εσωτερικές σταθερές. Τέλος, το κάθε εδαφικό δείγμα (n=50) μετρήθηκε τρεις φορές και υπολογίστηκε η μέση τιμή της φασματικής του υπογραφής. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται ανά πέντε δείγματα εδάφους. Στην Εικόνα 2

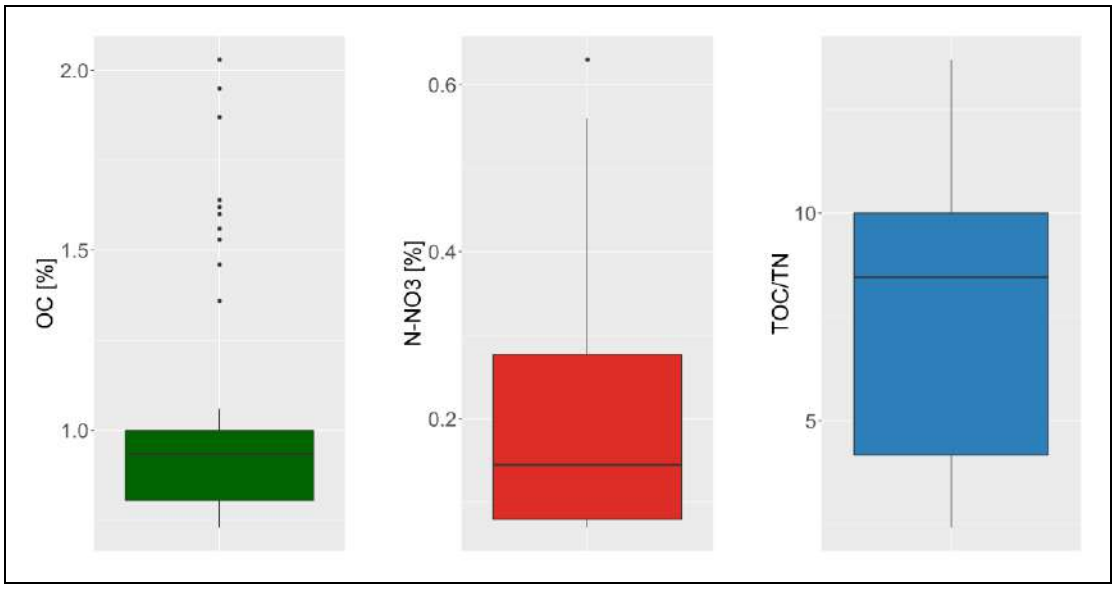
παρουσιάζεται μια γενική εκτίμηση των φασματικών υπογραφών όλων των εδαφικών δειγμάτων.



Εικόνα 1: Αποτύπωση της παραλλακτικότητας λίπανσης σε επίπεδο plot εντός του πειραματικού αγρού



Εικόνα 2: Συνολική παρουσίαση των φασματικών υπογραφών των 50 εδαφικών δειγμάτων (5°, 16° μέσος όρος 50° , 84° και 95° εκατοστημόριο)



Εικόνα 3: Παρουσίαση εργαστηριακών αποτελεσμάτων των εδαφικών παραμέτρων.

Για την σύγκριση των μοντέλων και των φασματικών υπογραφών χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που προέκυψαν από αναλύσεις στο εδαφολογικό εργαστήριο. Αναλυτικότερα οι μετρήσεις της διαθεσιμότητας του οργανικού άνθρακα (OC) πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο Walkley-Black, (Walkley & Black, 1934). Ο προσδιορισμός του αζώτου (N) έγινε με τη μέθοδο Kjeldahl, και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μεταξύ τους λόγος. Τα αποτελέσματα του εργαστηρίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 3 και η στατιστική τους ανάλυση στον Πίνακα 1. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων του εργαστηρίου έδωσε αποτελέσματα για τις ελάχιστες τιμές και των τριών μεταβλητών, το Q25 που αποτελεί το 25% των αποτελεσμάτων που βρίσκονται κάτω από το μέσο όρο τιμών των μεταβλητών, τις μέσες τιμές των μεταβλητών, το Q75 που δίνει τιμές για το 25% των αποτελεσμάτων που βρίσκονται πάνω από το μέσο όρο των τιμών των μεταβλητών, της τυπικής απόκλισης που δείχνει την διασπορά των τιμών και τέλος της λοξότητας που δείχνει την κατανομή της πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής σχετικά με τον μέσο όρο της.

Πίνακας 1: Στατιστικά εξαρτημένων μεταβλητών.

	Min	Q25	Median	Q75	Max	STD	Skewness
TOC (% C)	0.730	0.805	0.933	1.000	2.030	0.341	1.565
NO3 (% N)	0.070	0.080	0.145	0.278	0.630	0.146	1.332
TOC/TN	2.430	4.170	8.455	10.000	13.700	3.552	0.102

2.2 Λογισμικό και Μέθοδοι

Για την ανάπτυξη των αλγοριθμικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού R, και ειδικότερα το πακέτο caret. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των μοντέλων ήταν ο Cubist, ο οποίος λειτουργεί με τρόπο παρόμοιο με αυτόν των μοντέλων παλινδρόμησης δέντρων αποφάσεων, βασίζεται στον αλγόριθμο M5, που αναπτύχθηκε από τον Quinlan (1992) και χρησιμοποιείται με επιτυχία σε αναλύσεις φασματοσκοπίας εδάφους Vis-NIR. Ο Cubist έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί υποσύνολα δειγμάτων του αρχικού συνόλου δεδομένων που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά αναπτύσσοντας κανόνες γραμμικής παλινδρόμησης βάση της επιλογής των βέλτιστων

μεταβλητών πρόβλεψης που θα χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές παλινδρόμησης μεταξύ όλων των φασματικών μεταβλητών. Το μοντέλο του Cubist είναι ικανό να ανακαλύψει χαρακτηριστικά φασμάτων που συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό σε μια συγκεκριμένη ιδιότητα εδάφους και είναι σε θέση να κατασκευάσει ένα μοντέλο πολλαπλών μεταβλητών για την πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής.

Η αξιολόγηση των μοντέλων πρόβλεψης πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Leave One Out Cross Validation (LOO-CV), η οποία ενδείκνυται σε περιπτώσεις με μικρό αριθμό δειγμάτων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί το ίδιο δείγμα για την βαθμονόμηση και αξιολόγηση του μοντέλου εκ περιτροπής. Τα σφάλματα πρόβλεψης των μοντέλων συγκρίθηκαν μεταξύ τους βάση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE), του συντελεστή προσδιορισμού R^2 και την αναλογία απόδοσης προς την απόκλιση (Ratio of Performance to Deviation, RPD).

Το RMSE αντιπροσωπεύει την τυπική απόκλιση του δείγματος των τιμών μεταξύ των προβλεπόμενων και των παρατηρούμενων τιμών. Χρησιμοποιείται για την σύγκριση σφαλμάτων πρόβλεψης διαφορετικών μοντέλων για μία συγκεκριμένη μεταβλητή. Είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου των τετραγωνικών διαφορών μεταξύ πρόβλεψης και πραγματικής παρατήρησης και προκύπτει από τον τύπο:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

Το μειονέκτημα της χρήσης του RMSE είναι ότι μπορεί να κάνει εσφαλμένη εκτίμηση και λόγω μεγάλης ευαισθησίας να δώσει βαρύτητα και στις ακραίες τιμές (Bermejo & Cabestany, 2001).

Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 υποδεικνύει την αναλογία της διακύμανσης στην εξαρτώμενη μεταβλητή που είναι προβλέψιμη από την ανεξάρτητη μεταβλητή (Nagelkerke, 1991) και χρησιμοποιείται είτε για την πρόβλεψη μελλοντικών αποτελεσμάτων, είτε για την δοκιμή των μοντέλων με την βοήθεια περισσότερων πληροφοριών και προκύπτει από τον τύπο:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}$$

όπου στον αριθμητή υπολογίζεται το άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων και στον παρανομαστή το άθροισμα των τετραγώνων παλινδρόμησης. Στην προκειμένη περίπτωση μας παρέχει ένα μέτρο με το πόσο καλά παρατηρούνται τα αποτελέσματα στο μοντέλο, με βάση το ποσοστό της συνολικής μεταβολής των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο εκάστοτε μοντέλο.

Το RPD είναι ο λόγος της τυπικής απόκλισης των δειγμάτων προς το πρότυπο σφάλμα της πρόβλεψης και δίνεται από τον τύπο:

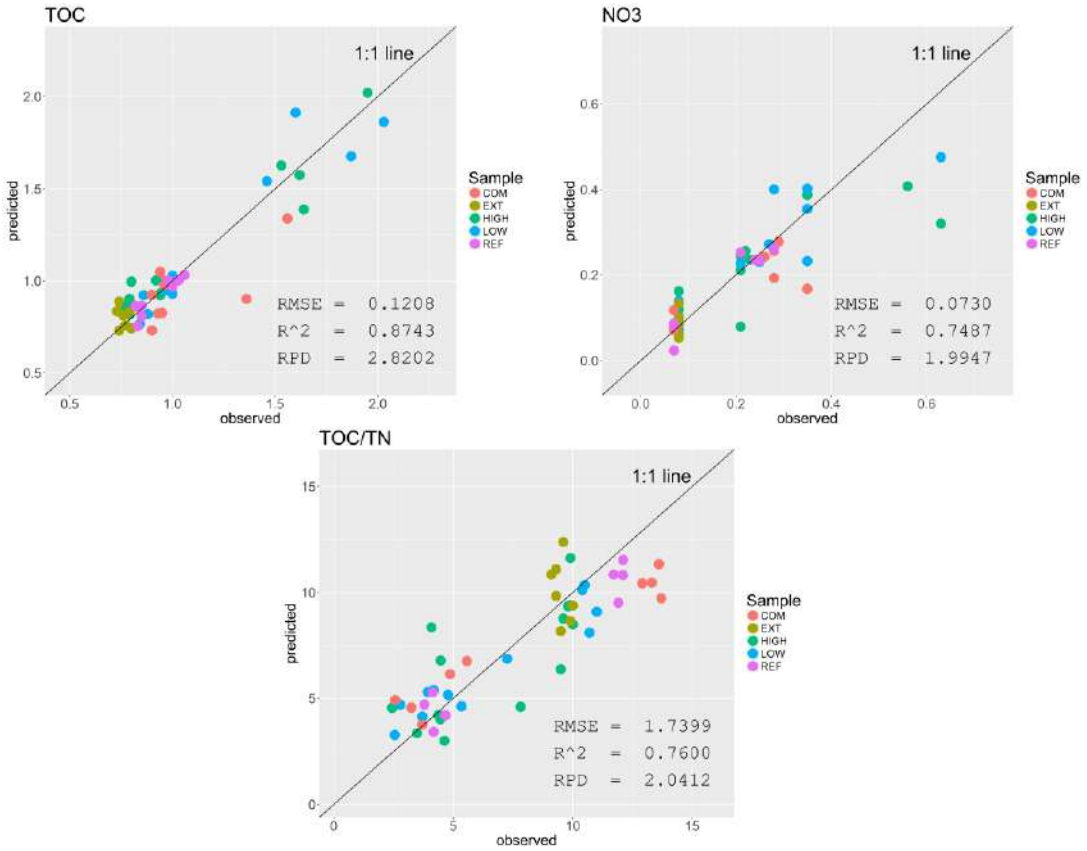
$$RPD = \frac{SD}{RMSE}$$

Στη περίπτωση που το σφάλμα στην εκτίμηση είναι μεγάλο σε σύγκριση με την τυπική απόκλιση, τότε το μοντέλο δεν έχει καλή απόδοση. Τα μοντέλα βάση αξιοπιστίας σύμφωνα με Chang et al. (2001) ταξινομούνται σε εξαιρετικά όταν RPD> 2, σε κανονικά μοντέλα όταν 1,4<RPD<2 και σε μη αξιόπιστα μοντέλα όταν RPD<1,4.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Έπειτα από την ανάλυση των δεδομένων με το μαθηματικό μοντέλο του Cubist προκύπτουν για την κάθε παράμετρο ξεχωριστά τα διαγράμματα διασποράς. Η αναλογία

μεταξύ των προσδιορισμένων τιμών ύστερα από τις μετρήσεις του εδαφολογικού εργαστηρίου παρουσιάζεται συγκριτικά με τις προβλεπόμενες μετρήσεις. Χαρακτηριστικό σε όλες τις περιπτώσεις αποτελεί ότι τα αποτελέσματα εμφανίζουν ικανοποιητική ακρίβεια. Τα διαγράμματα διασποράς για τον οργανικό άνθρακα, το άζωτο και τον λόγο μεταξύ τους παρουσιάζονται αντίστοιχα στην Εικόνα 4.



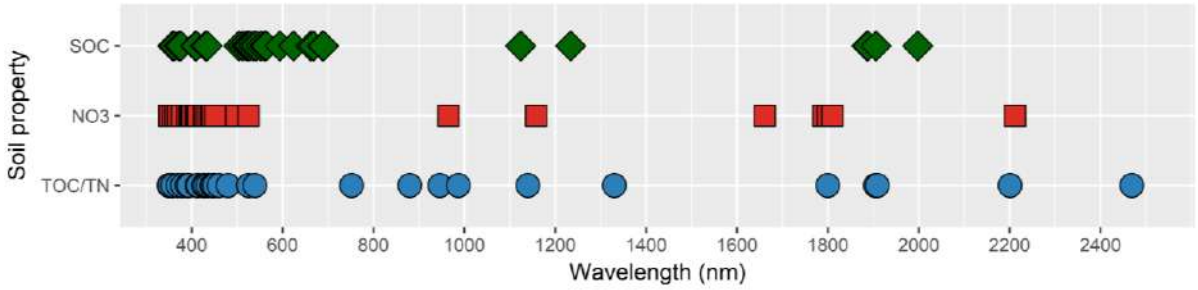
Εικόνα 4: Διαγράμματα διασποράς μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεφθείσων τιμών με το μοντέλο Cubist.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου Cubist της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά πραγματοποιήθηκε μελετώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2. Ειδικότερα, την υψηλότερη συσχέτιση παρουσίασε ο οργανικός άνθρακας (R^2=0,8743) ωστόσο R^2 με υψηλές τιμές και στατιστικά σημαντικό εμφανίζεται αντίστοιχα και για το N (R^2=0.7487) και το λόγο C/N (R^2=0.76). Ομοίως συγκρίνοντας και το RPD φαίνεται πως το μοντέλο του οργανικού άνθρακα εμφανίζει τη μεγαλύτερη αξιοπιστία από τα υπόλοιπα (RPD=2.82), χωρίς όμως να θεωρούνται λιγότερο αξιόπιστα τα άλλα δυο μοντέλα, όπως προκύπτει και από τις τιμές του RPD=1.9947 και RPD 2.0412 για το N και το λόγο C/N, αντίστοιχα. Όσον αφορά το λόγο C/N παρατηρείται ότι έχει τη μεγαλύτερη τιμή μέσου τετραγωνικού σφάλματος από τα υπόλοιπα μοντέλα και όπως φαίνεται στην Εικόνα 4 παρόλο που υπάρχει διασπορά στις τιμές του παρουσιάζει καλή συσχέτιση, ενώ δεν παρατηρούνται ακραίες τιμές για καμία κλάση που να υποδηλώνουν την ύπαρξη σφάλματος.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα του αλγόριθμου Cubist ανά εδαφική ιδιότητα.

	RMSE	R^2	RPD
TOC	0.1208	0.8743	2.8202
NO3	0.0730	0.7487	1.9947
TOC/TN	1.7399	0.7600	2.0412

Στη συνέχεια, εξετάσαμε τις βέλτιστες μεταβλητές πρόβλεψης ανά εδαφική ιδιότητα. Για κάθε εδαφική ιδιότητα εξήχθησαν οι 30 επικρατέστερες μεταβλητές όλων των μοντέλων που αναπτύχθηκαν με την μέθοδο Leave One Out Cross Validation (LOO-CV). Οι επικρατέστερες μεταβλητές προκύπτουν από τον γραμμικό συνδυασμό των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται τόσο στο προκείμενο όσο και στο συμπέρασμα του κάθε κανόνα, μέσω της εντολής varImp του πακέτου caret. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 5. Αναφορικά με τον TOC τα μήκη κύματος που κρίθηκαν σημαντικά είναι στις περιοχές του ορατού φάσματος (400-700 nm) καθώς και σε συγκεκριμένες περιοχές του υπέρυθρου (γύρω στα 1200, 1900 και 2000 nm) Παρόμοια για το NO3 επιλέχθηκαν από το ορατό φάσμα (400-600 nm) καθώς και από διακριτές περιοχές του υπέρυθρου (γύρω στα 1000, 1200, 1800 και 2200 nm) που συμφωνεί με την διεθνή βιβλιογραφία (Soriano-Disla et al., 2014). Όσο αφορά το λόγο τους έχουν επιλεγεί μήκη κύματος που είναι ως επί το πλείστον σημαντικά και για τις δύο ιδιότητες του εδάφους (πχ ορατό φάσμα, 1000, 1200, 1800, 1900 και 2000 nm), καθώς και κάποια επιπρόσθετα (1300 και 2450 nm).



Εικόνα 5: Οι βέλτιστες μεταβλητές πρόβλεψης ανά εδαφική ιδιότητα που προέκυψαν από τα μοντέλα του Cubist.

Η παρούσα εργασία συμφωνεί με τα αποτελέσματα της εργασίας των Tsakiridis et. al. (2017b) όπου η συνδυαστική χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και φασματοσκοπικών μετρήσεων ανάκλασης εδάφους στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο έδωσε επίσης ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την εκτίμηση του C. Ειδικότερα, το μαθηματικό μοντέλο Cubist που χρησιμοποιήθηκε έδωσε αξιόλογα αποτελέσματα και για τις τρεις παραμέτρους που μελετήθηκαν ενώ παράλληλα αξιολογήθηκε η ακρίβεια του.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα έρευνα παρουσιάζεται μια σύγχρονη μέθοδος καταγραφής της οργανικής ουσίας και των διαθέσιμων θρεπτικών σε εδαφικά συστήματα για τον καθορισμό ζωνών διαχείρισης προκειμένου να εφαρμοστούν στοχευμένες παρεμβάσεις που θα οδηγήσουν σε μείωση του κόστους παραγωγής και παράλληλα αποφυγή της περαιτέρω υποβάθμισης των εδαφών. Η συστηματική συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων όπως παρουσιάζεται μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για διαχειριστές γεωργικής γης και γεωργικούς

συμβούλους καθώς επιτρέπει το γρήγορο και κατ' εκτίμηση υπολογισμό εδαφικών ενδεικτών αποφεύγοντας τις χρονοβόρες και δαπανηρές δειγματοληψίες αγρού. Τέλος, αξιολογείται ως ένα χρήσιμο εργαλείο υλοποίησης της εθνικής στρατηγικής στους τομείς της αγροδιατροφής και του περιβάλλοντος καθώς επιτρέπει τη συστηματική παρακολούθηση για τη μελέτη χωρικών και χρονικών μεταβολών των γεωργικών γαιών, συνεισφέροντας στην κατάρτιση και επικαιροποίηση απαραίτητων διαχειριστικών σχεδίων καθώς και στην παρακολούθηση και καταγραφή δεικτών που σχετίζονται με τους στόχους αειφόρους ανάπτυξης (Sustainable Development Goals).

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barnes E.M., Sudduth K.A., Hummel J.W., Lesch S.M., Corwin D.L., Yang C., Daughtry C.S.T., Bausch W.C. *Remote and ground-based sensor techniques to map soil properties. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, (2003), pp. 619-630.

Ben-Dor, E., Banin, A., 1995. *Near infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties*. Soil Science Society of America Journal 59, 364–372. Ben-Dor, E., Inbar, Y., Chen, Y., 1997. *The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400–2500) during a controlled decomposition process.* Remote Sensing of Environment 61, 1–15.

Bermejo, S., & Cabestany, J. (2001*). Oriented principal component analysis for large margin classifiers.* Neural Networks, 14(10), 1447e1461.

Bo Zheng, Petra Marschner, (2016). *Previous residue addition rate and C/N ratio influence nutrient availability and respiration rate after the second residue addition.* School of Agriculture, Food and Wine, University of Adelaide, South Australia 5005, Australia. Chang, C. - W., Laird, D. A., Mausbach, M. J., Hurburgh C. R., 2001. *Near-infrared reflectance spectroscopy- Principal components regression analyses of soil properties.* Soil Science Society of America Journal 65, 480- 490.

D. Lyons, G. Rayment, R. Hill, B. Daly, J. Marsh, C. Ingram Aspac *soil proficiency testing program report* 2007–08.

Kopačková, V., & Ben-Dor, E. (2016). *Normalizing reflectance from different spectrometers and protocols with an internal soil standard.* International Journal of Remote Sensing, 37(6)

Workman, J., ReevesIII III, J.B. (Eds.), Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture. A Three Society Monograph (ASA, SSSA, CSSA), Madison, USA, pp. 729–784.Nagelkerke, N. J. (1991). *A note on a general definition of the coefficient of determination*. Biometrika, 78(3), 691e692.

Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., Barthès Bernard, Ben Dor E., Brown D.J., Clairotte M., Csorba A., Dardenne P., Demattê J.A.M., Genot V., Guerrera C., Knadel M., Montanarella L., Noon C., Ramirez-Lopez L., Robertson J., Sakai H., Soriano-Disla J.M., Shepherd K.D., Stenberg B., Towett E.K., Vargas R., Wetterlind, J. (2015). *Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring* (pp. 139–159).

Quinlan, J.R. (1992) *Learning with continuous classes*, Proc. of the 5th Australian Joint Conference on AI, 343-348. [M5].

Reeves, J.B., McCarty, G.W., Meisinger, J.J., 1999. *Near infrared reflectance spectroscopy for the analysis of agricultural soils.* Journal of Near Infrared Spectroscopy 7, 179–193.Rossel, R.A.V., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006*. Visible, near*

infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma 131, 59–75.

Soriano-Disla, J. M., Janik, L. J., Viscarra Rossel, R. a., Macdonald, L. M., McLaughlin, M. J., *"The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties,"* Applied Spectroscopy Reviews 49(2), 139–186 (2014).

Tsakiridis Nikolaos L., Nikolaos Tziolas, Agathoklis Dimitrakos, Georgios Galanis, Eleftheria Ntonou, Anastasia Tsirika, Evangelia Terzopoulou, Eleni Kalopesa and George C. Zalidis *"Predicting soil properties for sustainable agriculture using vis-NIR spectroscopy - a case study in northern Greece" Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment* (RSCy2017), (March 20-23 2017a).

Tsakiridis Nikolaos L., Nikolaos Tziolas, George Galanis, Eyal Ben-Dor, George C. Zalidis, *Soil Spectral Libraries for monitoring and reporting on Sustainable Development Goal indicators in Northern Greece, Global Symposium on Soil Organic Carbon*, Rome, Italy, 21-23 March 2017b, http://www.fao.org/3/a-br990e.pdf

Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B., 1998a. *Soil chemical analytical accuracy and costs: implications from Precision Agriculture.* Australian Journal of Experimental Agriculture 38, 765–775

Viscarra Rossel, T. Behrensb, E. Ben-Dorc, D.J. Brownd, J.A.M. Demattêe, K.D. Shepherdf, Z. Shig, B. Stenbergh, A. Stevensi, V. Adamchukj, H. Aïchik, B.G. Barthèsl, H.M. Bartholomeusm, A.D. Bayern, M. Bernouxl, K. Böttchero, p, L. Brodskýq, C.W. Dur, A. Chappella, Y. Fouads, V. Genott, C. Gomezu, S. Grunwaldv, A. Gublerw, C. Guerrerox, C.B. Hedleyy, M. Knadelz, H.J.M. Morrásaa, M. Nocitaab, L. Ramirez-Lopezac, P. Roudiery, E.M. Rufasto Camposad, P. Sanbornae, V.M. Sellittoaf, K.A. Sudduthag, B.G. Rawlinsah, C. Walters, L.A. Winowieckif, S.Y. Hongai, W. Jia, g, j., 2016. *A global spectral library to characterize the world's soil Earth-Science Reviews* Volume 155, April 2016, Pages 198–230.

Walkley, A. & Black, I.A. 1934. *An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method.* Soil Science, 37, 29–38.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΝΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΑΣΘΕΝΕΙΩΝ ΦΥΤΩΝ

Κ. Φερεντίνος
ΕΛ.Γ.Ο. - ΔΗΜΗΤΡΑ, Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής,
Λ. Δημοκρατίας 61, Αγ. Ανάργυροι, 13561, Αθήνα.
kpf3@cornell.edu

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν εξειδικευμένα μοντέλα συνελικτικών νευρωνικών δικτύων (Convolutional Neural Networks), για την αναγνώριση ασθενειών φυτών από απλές φωτογραφίες φύλλων υγιών ή προσβεβλημένων φυτών, μέσω διαδικασιών βαθιάς μάθησης (deep learning). Η εκπαίδευση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μιας ανοιχτής βάσης δεδομένων 87.848 φωτογραφιών. Στα δεδομένα αυτά περιλαμβάνονται 25 φυτά σε 58 διαφορετικές κλάσεις συνδυασμών της μορφής [φυτό, ασθένεια], συμπεριλαμβανομένων και υγιών φυτών. Εκπαιδεύτηκαν διάφορα μοντέλα, με το αποδοτικότερο να παρουσιάζει ποσοστό επιτυχίας 99,5% στην αναγνώριση των σωστών ζευγών [φυτού, ασθένειας] (ή υγιούς φυτού). Το υψηλό αυτό ποσοστό επιτυχίας καθιστά το μοντέλο ένα πολύ χρήσιμο συμβουλευτικό εργαλείο για τον εξειδικευμένο γεωπόνο.

Λέξεις κλειδιά: μηχανική μάθηση, βαθιά μάθηση, τεχνητή νοημοσύνη, αναγνώριση ασθενειών φυτών, αναγνώριση προτύπων

A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK MODEL FOR PLANT DISEASE DETECTION AND DIAGNOSIS

K.P. Ferentinos
Hellenic Agricultural Organization “Demeter”, Institute of Soil & Water Resources, Dept. of Agricultural Engineering, 61 Dimokratias Av., 13561, Athens, Greece.
kpf3@cornell.edu

ABSTRACT

In this study, convolutional neural network models were developed, to perform plant disease detection and diagnosis using simple leaves photographs of healthy and diseased plants, through deep learning methodologies. Training of the neural networks was performed with the use of an open database of 87,848 photographs, containing 25 different plants in a set of 58 different classes of [plant, disease] combinations, including healthy plants. Several models were trained, with the best performance reaching a 99.5% success rate in identifying the corresponding [plant, disease] combination (or healthy plant). The significantly high success rate, makes the model a very useful advisory tool for the specialized agronomist.

Keywords: machine learning, deep learning, artificial intelligence, plant disease detection, pattern recognition

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία της διάγνωσης ασθενειών φυτών μέσω οπτικής παρατήρησης των συμπτωμάτων των φύλλων τους, εμπεριέχει πολύ υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας. Ακόμα και έμπειροι Γεωπόνοι, τόσο λόγω της πολυπλοκότητας της όλης διαδικασίας, όσο και λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού καλλιεργούμενων φυτών και των αντίστοιχων φυτοπαθολογικών προβλημάτων τους, πολλές φορές αδυνατούν να ολοκληρώσουν επιτυχώς κάποια διάγνωση και οδηγούνται σε λάθος συμπεράσματα. Η ύπαρξη ενός αυτοματοποιημένου, υπολογιστικού συστήματος διάγνωσης ασθενειών, θα μπορούσε να αποτελέσει έναν πολύτιμο αρωγό για τον γεωπόνο που καλείται να κάνει αντίστοιχες διαγνώσεις ασθενειών φυτών μέσω οπτικής παρατήρησης των φύλλων τους. Εάν μάλιστα το σύστημα ήταν απλό στη χρήση του και εύκολα προσβάσιμο μέσω μιας απλής εφαρμογής κινητού τηλεφώνου, θα μπορούσε να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο για παραγωγούς σε μέρη του κόσμου που στερούνται των κατάλληλων υποδομών ως προς τις γεωπονικές παροχές και την προσφορά φυτοπαθολογικών συμβουλών. Επίσης, για καλλιέργειες μεγάλων εκτάσεων, το σύστημα θα μπορούσε να λειτουργήσει σε συνδυασμό με κάποιο αυτόνομο γεωργικό όχημα, ώστε να μπορεί να εντοπίζει φυτοπαθολογικά προβλήματα σε συγκεκριμένα σημεία της καλλιέργειας μέσω συνεχών λήψεων φωτογραφιών, έγκαιρα και στοχευμένα. Όλα αυτά φυσικά προϋποθέτουν την υψηλή απόδοση του συστήματος και την ευκολία χρήσης του σε πραγματικές συνθήκες (π.χ., στον αγρό).

Με την εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων των τελευταίων ετών, και κυρίως των ενσωματωμένων επεξεργαστών στις κάρτες γραφικών (GPU), οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence) που σχετίζονται με τη Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) έχουν γνωρίσει αλματώδη ανάπτυξη, οδηγώντας στη δημιουργία μεθόδων και μοντέλων που εντάσσονται πλέον σε μια νέα κατηγορία, αυτή της Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning) (LeCun et al., 2015). Η ανάπτυξη αυτή έχει φέρει επανάσταση σε τομείς όπως η αναγνώριση εικόνων (LeCun et al., 1998; Dan et al., 2011), η αναγνώριση φωνής (Hinton et al., 2012), και άλλες αντίστοιχα πολύπλοκες διεργασίες που σχετίζονται με την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων (LeCun & Bengio, 1995), δίνοντας τεράστια ώθηση σε εφαρμογές που κάνουν χρήση αυτών των διεργασιών, όπως π.χ. η αυτόνομη οδήγηση οχημάτων, η αυτόματη μετάφραση και μεταγλώττιση, κ.α. Η επιτυχία των υπολογιστικών συστημάτων στις εφαρμογές αυτές έχει ανέλθει σε πολύ υψηλά επίπεδα, καθιστώντας τα σε συγκεκριμένες περιπτώσεις ικανά, αν όχι να αντικαταστήσουν πλήρως τον ανθρώπινο παράγοντα, τουλάχιστον να τον βοηθήσουν επιτυχώς σε πολύ υψηλό βαθμό.

Η είσοδος των τεχνικών αυτών της βαθιάς μάθησης στη γεωπονία και συγκεκριμένα στον τομέα της διάγνωσης ασθενειών φυτών, έχει αρχίσει να λαμβάνει χώρα μόλις την τελευταία διετία, και μάλιστα σε αρκετά περιορισμένο βαθμό. Ο βασικός λόγος που η ανάπτυξη των γεωπονικών εφαρμογών τέτοιου τύπου δεν συμβαδίζει με τις αντίστοιχες εφαρμογές άλλων τομέων, είναι πιθανότατα το περιορισμένο εύρος ερευνητικού δυναμικού του γεωπονικού χώρου που κατέχει τις κατάλληλες εξειδικευμένες γνώσεις τεχνητής νοημοσύνης που απαιτούνται για την ανάπτυξη των απαραίτητων υπολογιστικών συστημάτων. Ταυτόχρονα, οι συνεργασίες μεταξύ γεωπόνων και επιστημόνων της πληροφορικής και ειδικότερα της τεχνητής νοημοσύνης, είναι αρκετά περιορισμένες. Τέλος, ένας ακόμη λόγος της περιορισμένης χρήσης τέτοιων τεχνικών βαθιάς μάθησης στη γεωπονία είναι το γεγονός ότι η ανάπτυξη των τεχνικών αυτών είναι πάρα πολύ πρόσφατη, και όπως είναι λογικό, η εφαρμογή τους ξεκίνησε από τομείς με μεγαλύτερη σύνδεση και συσχέτιση με την πληροφορική.

Ένα από τα βασικά εργαλεία βαθιάς μάθησης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα (convolutional neural networks) (LeCun et al., 1998), τα οποία αποτελούν μία από τις ισχυρότερες τεχνικές μοντελοποίησης πολύπλοκων διεργασιών και αναγνώρισης προτύπων σε εφαρμογές μεγάλου όγκου πολύπλοκων δεδομένων, όπως αυτή της αναγνώρισης προτύπων σε εικόνες. Μετά την επιτυχία τους στους διάφορους τομείς εφαρμογών που αναφέρθηκαν παραπάνω, ξεκίνησαν μόλις πρόσφατα να χρησιμοποιούνται σε γεωπονικές εφαρμογές που σχετίζονται με ανάλυση εικόνων φυτών. Οι Lee et al. (2015) παρουσίασαν ένα σύστημα συνελικτικών δικτύων για την αυτόματη αναγνώριση φυτών με βάση φωτογραφίες φύλλων. Οι Grinblat et al. (2016) ανέπτυξαν ένα σχετικά απλό αντίστοιχο νευρωνικό δίκτυο για την αναγνώριση τριών διαφορετικών ειδών οσπρίων με βάση τα μορφολογικά πρότυπα των αγγείων των φύλλων τους. Οι Mohanty et al. (2016) συνέκριναν δύο γνωστές και δοκιμασμένες αρχιτεκτονικές συνελικτικών δικτύων για την αναγνώριση 26 ασθενειών φυτών χρησιμοποιώντας μια ανοιχτή βάση δεδομένων φωτογραφιών φύλλων δεκατεσσάρων διαφορετικών φυτών. Τα αποτελέσματά τους ήταν πολύ ενθαρρυντικά, με ποσοστά επιτυχίας στην αυτόματη αναγνώριση έως και 99.35%, με σημαντικό όμως αρνητικό σημείο το γεγονός ότι το σύνολο του φωτογραφικού υλικού της βάσης δεδομένων τους αποτελούνταν από φωτογραφίες φύλλων σε εργαστηριακές συνθήκες και όχι σε πραγματικές συνθήκες στον αγρό. Οι Sladojevic et al. (2016) ανέπτυξαν παραπλήσιου τύπου μεθοδολογία για την αναγνώριση ασθενειών μέσω φωτογραφιών φύλλων χρησιμοποιώντας αντίστοιχο όγκο δεδομένων διαθέσιμων στο Διαδίκτυο, αλλά μικρότερου εύρους ασθενειών (δεκατριών) και διαφορετικών φυτών (πέντε). Το ποσοστό επιτυχίας των μοντέλων τους κυμαίνεται μεταξύ 91% και 98%, ανάλογα με τα δεδομένα στα οποία δοκιμάστηκαν. Ακόμη πιο πρόσφατα, οι Pawara et al. (2017) συνέκριναν την απόδοση κάποιων κλασικών τεχνικών ταξινόμησης προτύπων με αυτή αντίστοιχων μοντέλων συνελικτικών νευρωνικών δικτύων στην αναγνώριση φυτών, χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές, αν και αρκετά περιορισμένου μεγέθους, βάσεις δεδομένων με φωτογραφίες είτε ολόκληρων φυτών και καρπών, είτε φύλλων φυτών, συμπεραίνοντας ότι τα συγκεκριμένα νευρωνικά δίκτυα υπερτερούν κατά πολύ σε απόδοση των κλασικών μεθόδων.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν εξειδικευμένα μοντέλα συνελικτικών νευρωνικών δικτύων για την αναγνώριση ασθενειών φυτών μέσω απλών φωτογραφιών φύλλων υγιών ή προσβεβλημένων φυτών. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των συνελικτικών νευρωνικών δικτύων, οι αρχιτεκτονικές που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την υλοποίηση του συστήματος αυτόματης διάγνωσης ασθενειών φυτών, καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και δοκιμή των μοντέλων. Στη συνέχεια, η τρίτη ενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εφαρμογής του τελικού μοντέλου διάγνωσης, ενώ η εργασία κλείνει με τα σχετικά συμπεράσματα και τις κατευθύνσεις της μελλοντικής έρευνας και εξέλιξης του συστήματος που αναπτύχθηκε.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα και αρχιτεκτονική μοντέλων

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks) αποτελούν μαθηματικά μοντέλα που μιμούνται τη γενική αρχή λειτουργίας του εγκεφάλου, με τους νευρώνες και τις συνάψεις που τους συνδέουν, και έχουν ως βασική ιδιότητα την ικανότητα εκπαίδευσής τους μέσω της διαδικασίας της εποπτευόμενης μάθησης (supervised learning). Κατά τη διαδικασία αυτή, τα νευρωνικά δίκτυα «εκπαιδεύονται» στο να μοντελοποιούν κάποιο

σύστημα μέσω υπαρχόντων δεδομένων που αποτελούν συγκεκριμένες αντιστοιχίσεις εισόδων με εξόδους του προς μοντελοποίηση συστήματος.

Τα συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μετεξέλιξη των κλασικών τεχνητών νευρωνικών δικτύων, επικεντρωμένη σε εφαρμογές κυρίως αναγνώρισης εικόνας. Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι ότι με τη μεθοδολογία που ακολουθούν στη στρωμάτωση των επιπέδων της αρχιτεκτονικής τους, καταφέρνουν να μειώνουν δραστικά τα απαραίτητα δομικά στοιχεία (πλήθος τεχνητών νευρώνων) που θα απαιτούνταν από τα κλασικά νευρωνικά δίκτυα για την είσοδο σε αυτά δεδομένων εικόνων, αλλά και αντίστοιχων δεδομένων μεγάλων διαστάσεων που περιέχουν επαναλαμβανόμενα στοιχεία σε διάφορα σημεία τους.

Για εφαρμογές που σχετίζονται με την αναγνώριση εικόνας, έχουν αναπτυχθεί διάφορες βασικές αρχιτεκτονικές συνελικτικών νευρωνικών δικτύων, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε σύνθετα προβλήματα τέτοιου τύπου. Οι βασικές αρχιτεκτονικές που δοκιμάστηκαν στο πρόβλημα της αναγνώρισης ασθενειών φυτών από φωτογραφίες φύλλων τους, είναι οι εξής: i) AlexNet (Krizhevsky et al., 2012), ii) AlexNetOWTBn (Krizhevsky, 2014), iii) GoogLeNet (Szegedy et al., 2015), iv) Overfeat (Sermanet et al., 2013), v) VGG (Oxford Visual Geometry Group: http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/very_deep).

Τα μοντέλα συνελικτικών νευρωνικών δικτύων που δοκιμάστηκαν, καθώς και η διαδικασία εκπαίδευσης και δοκιμής τους, αναπτύχθηκαν με χρήση του υπολογιστικού εργαλείου μηχανικής μάθησης Torch (http://torch.ch), το οποίο χρησιμοποιεί τη γλώσσα προγραμματισμού LuaJIT (http://www.lua.org). Οι αλγόριθμοι εκμάθησης (training algorithms) εφαρμόστηκαν σε GPU κάρτας γραφικών NVIDIA GTX1080 με χρήση της πλατφόρμας παράλληλου προγραμματισμού CUDA®, σε περιβάλλον Linux (Ubuntu 16.04 LTS).

2.2 Δεδομένα εκπαίδευσης και αξιολόγησης συστήματος

Για την εκπαίδευση και δοκιμή των νευρωνικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκε μία ανοιχτή βάση δεδομένων που περιέχει 87.848 φωτογραφίες φύλλων υγιών και προσβεβλημένων φυτών. Μια αρχική έκδοση της βάσης δεδομένων, με μικρότερο αριθμό φωτογραφιών, περιγράφεται από τους Hughes & Salathé (2015). Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε περιέχει 58 διαφορετικές κλάσεις, όπου η κάθε κλάση ορίζεται από τον συνδυασμό φυτού και συγκεκριμένης ασθένειας, ενώ υπάρχουν και κλάσεις που περιέχουν υγιή φυτά. Ο Πίνακας 1 (α & β) παρουσιάζει τους 58 διαφορετικούς συνδυασμούς φυτών/ασθενειών που περιέχονται στη βάση δεδομένων, καθώς και κάποια βασικά στατιστικά στοιχεία των 58 αυτών κλάσεων, όπως το πλήθος των διαθέσιμων φωτογραφιών, και τα ποσοστά φωτογραφιών που έχουν ληφθεί σε εργαστηριακές συνθήκες ή σε πραγματικές συνθήκες στον αγρό. Στις 58 κλάσεις περιέχονται 25 διαφορετικά υγιή ή προσβεβλημένα φυτά. Όπως φαίνεται και από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, περισσότερες από το 1/3 των διαθέσιμων φωτογραφιών της βάσης δεδομένων (37,3%) έχουν ληφθεί σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας στον αγρό. Η Εικόνα 1 παρουσιάζει ένα δείγμα μιας τυχαίας κλάσης όπου φαίνεται μία χαρακτηριστική φωτογραφία που έχει ληφθεί σε εργαστηριακές συνθήκες, και μία σε πραγματικές συνθήκες.

Το φωτογραφικό υλικό της βάσης δεδομένων, χωρίστηκε αρχικά σε δύο σύνολα: α) το σύνολο εκπαίδευσης (training set) και το σύνολο δοκιμής (testing set). Για τη δημιουργία των δύο αυτών συνόλων, οι 87.848 φωτογραφίες διαχωρίστηκαν με τυχαίο τρόπο, σε

ποσοστά 80% στο training set και 20% στο testing set. Επομένως, για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιήθηκαν 70.300 φωτογραφίες, ενώ 17.548 φωτογραφίες κρατήθηκαν για να χρησιμοποιηθούν στη δοκιμή της απόδοσης των εκπαιδευμένων μοντέλων. Για τον διαχωρισμό των δύο συνόλων με τυχαίο τρόπο αναπτύχθηκε ένα απλό Python script που χρησιμοποιούσε ψευδοτυχαίους αριθμούς ομοιόμορφης κατανομής, επομένως τα ποσοστά μεταξύ φωτογραφιών σε εργαστηριακές συνθήκες και σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας για κάθε κλάση, παρέμειναν, και για τα δύο σύνολα (training και testing), παραπλήσια με αυτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Επιπρόσθετα, δοκιμάστηκε και η δημιουργία αντίστοιχης κατανομής των συνόλων εκπαίδευσης και δοκιμής, αλλά με αρχική επεξεργασία των φωτογραφιών που περιελάμβανε μείωση του μεγέθους τους και αποκοπή μέρους τους ώστε να είναι τετραγωνισμένες με μέγεθος 256x256 pixels.

Τέλος, για να εξεταστεί η σημαντικότητα του τύπου και χώρου λήψης των φωτογραφιών των φύλλων, δηλαδή το εάν έχουν ληφθεί σε εργαστηριακές συνθήκες ή σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας, πραγματοποιήθηκε ένας επιπλέον διαχωρισμός των δεδομένων: Από τις 58 διαθέσιμες κλάσεις της μορφής [φυτό, ασθένεια] επιλέχθηκαν οι 12 οι οποίες περιέχουν φωτογραφίες και των δύο τύπων λήψης (οι υπόλοιπες κλάσεις αποτελούνται είτε αποκλειστικά από εργαστηριακές φωτογραφίες, είτε αποκλειστικά από φωτογραφίες αγρού, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1). Με αυτές τις 12 κλάσεις, πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα και αναπτύχθηκαν αντίστοιχα δύο μοντέλα συνελικτικών νευρωνικών δικτύων: ένα το οποίο εκπαιδεύτηκε αποκλειστικά με φωτογραφίες σε εργαστηριακές συνθήκες και δοκιμάστηκε αποκλειστικά σε φωτογραφίες πραγματικών συνθηκών, και ένα ακριβώς αντίθετο, δηλαδή που εκπαιδεύτηκε αποκλειστικά με φωτογραφίες πραγματικών συνθηκών και δοκιμάστηκε αποκλειστικά σε φωτογραφίες εργαστηριακών συνθηκών. Και για τις δύο περιπτώσεις η κατανομή των δεδομένων δεν ήταν ιδανική, αφού στις 12 αυτές κλάσεις το ποσοστό εργαστηριακών φωτογραφιών ήταν 55,8%, και πραγματικών συνθηκών 44,2%, επομένως η κατανομή απείχε αρκετά από την 80/20 (training/testing) που χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη του βασικού μοντέλου. Ειδικά στη δεύτερη περίπτωση, το training set ήταν μικρότερο του testing set, κάτι το οποίο γενικά δεν είναι αποδεκτό, όμως παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα, όπως παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα, ήταν ενδεικτικά.

Εικόνα 1. Παράδειγμα φωτογραφιών φύλλων σε εργαστηριακές συνθήκες (αριστερά) και σε πραγματικές συνθήκες στον αγρό (δεξιά) [κλάση c_49 – τομάτα με αλτερναρίωση]

Πίνακας 1α. Πληροφοριακά και στατιστικά στοιχεία της βάσης δεδομένων φωτογραφιών φύλλων

Κλάση	Φυτό (κοινή ονομασία)	Φυτό (επιστημ/κή ονομασία)	Ασθένεια (κοινή ονομασία)	Ασθένεια (επιστημονική ονομασία)	Φωτογραφίες (πλήθος)	Εργαστηριακές συνθήκες (%)	Πραγματικές συνθήκες (%)
c_0	Μηλιά	Malus domestica	-	-	1835	89.7	10.3
c_1	Μηλιά	Malus domestica	Φουζικλάδιο	Venturia inaequalis	630	100.0	0.0
c_2	Μηλιά	Malus domestica	Σκωρίαση	Gymnosporangium juniperi-virginianae	276	100.0	0.0
c_3	Μηλιά	Malus domestica	Μαύρη σήψη	Botryosphaeria obtusa	712	87.2	12.8
c_4	Μπανανιά	Musa paradisiaca	-	-	1643	0.0	100.0
c_5	Μπανανιά	Musa paradisiaca	Μαύρη σιγκατόκα	Musa paradisiaca	240	0.0	100.0
c_6	Μπανανιά	Musa paradisiaca	Banana speckle	Mycosphaerella musae	3284	0.0	100.0
c_7	Blueberry	Vaccinium spp.	-	-	1735	86.7	13.3
c_8	Λάχανο	Brassica oleracea	-	-	420	0.0	100.0
c_9	Λάχανο	Brassica oleracea	Μαύρη σήψη	Xanthomonas campestris	64	0.0	100.0
c_10	Πεπονιά	Cucumis melo	-	-	1055	0.0	100.0
c_11	Κασάβα	Manihot esculenta	Βακτηριακή κηλίδωση	Cercosporidium henningsii	43	100.0	0.0
c_12	Κασάβα	Manihot esculenta	Τετράνυχος	Mononychellus tanajoa & progresivus	892	100.0	0.0
c_13	Σέλινο	Apium graveolens	Κερκόσπορα	Cercospora apii	1204	0.0	100.0
c_14	Κερασιά	Prunus spp.	-	-	854	100.0	0.0
c_15	Κερασιά	Prunus spp.	Ωίδιο	Podosphaera spp.	1052	100.0	0.0
c_16	Αραβόσιτος	Zea mays	-	-	4450	26.1	73.9
c_17	Αραβόσιτος	Zea mays	Κερκόσπορα	Cercospora zeae-maydis	1457	35.2	64.8
c_18	Αραβόσιτος	Zea mays	Σκωρίαση	Puccinia sorghi	1614	73.9	26.1
c_19	Αραβόσιτος	Zea mays	Ελμινθοσπορίωση	Exserohilum turcicum	985	100.0	0.0
c_20	Αγγουριά	Cucumis sativus	-	-	267	0.0	100.0
c_21	Αγγουριά	Cucumis sativus	Περονόσπορος	Pseudoperonospora cubensis	1318	0.0	100.0
c_22	Μελιτζάνα	Solanum melongena	-	-	515	0.0	100.0
c_23	Κολοκυθιά	Langenaria spp.	Περονόσπορος	Pseudoperonospora cubensis	114	0.0	100.0
c_24	Αμπέλι	Vitis vinifera	-	-	613	69.0	31.0
c_25	Αμπέλι	Vitis vinifera	Μαύρη σήψη	Guignardia bidwellii	1180	100.0	0.0
c_26	Αμπέλι	Vitis vinifera	Ίσκα	Phaeomoniella chlamydospora	1384	100.0	0.0
c_27	Αμπέλι	Vitis vinifera	Κερκόσπορα	Pseudocercospora vitis	1076	100.0	0.0
c_28	Κρεμμύδι	Allium cepa	-	-	154	0.0	100.0
c_29	Πορτοκαλιά	Citrus sinensis	Huanglongbing	Candidatus Liberibacter	5507	100.0	0.0

Πίνακας 1β. Πληροφοριακά και στατιστικά στοιχεία της βάσης δεδομένων φωτογραφιών φύλλων (συνέχεια)

Κλάση	Φυτό (κοινή ονομασία)	Φυτό (επιστημ/κή ονομασία)	Ασθένεια (κοινή ονομασία)	Ασθένεια (επιστημονική ονομασία)	Φωτογραφίες (πλήθος)	Εργαστηριακές συνθήκες (%)	Πραγματικές συνθήκες (%)
c_30	Ροδακινιά	Prunus persica	-	-	360	100.0	0.0
c_31	Ροδακινιά	Prunus persica	Βακτηριακή κηλίδωση	Xanthomonas campestris	2297	100.0	0.0
c_32	Πιπεριά	Capsicum annuum	-	-	2029	72.8	27.2
c_33	Πιπεριά	Capsicum annuum	Βακτηριακή κηλίδωση	Xanthomonas campestris	997	100.0	0.0
c_34	Πατάτα	Solanum tuberosum	-	-	152	100.0	0.0
c_35	Πατάτα	Solanum tuberosum	Περονόσπορος	Phytophthora infestans	1000	100.0	0.0
c_36	Πατάτα	Solanum tuberosum	Αλτεναρίωση	Alternaria solani	3167	31.6	68.4
c_37	Νεροκολόκυθο	Cucurbita spp.	Μωσαϊκό αγγουριάς	Cucumber mosaic virus (CMV)	2387	0.0	100.0
c_38	Βατόμουρο	Rubus spp.	-	-	371	100.0	0.0
c_39	Σόγια	Glycine max	-	-	6235	81.6	18.4
c_40	Σόγια	Glycine max	Περονόσπορος σόγιας	Peronospora manshurica	851	0.0	100.0
c_41	Σόγια	Glycine max	Κερκόσπορα	Cercospora sojina	2023	0.0	100.0
c_42	Σόγια	Glycine max	Καστανή κηλίδωση	Septoria glycines	3565	0.0	100.0
c_43	Κολοκυθιά	Cucurbita spp.	-	-	264	0.0	100.0
c_44	Κολοκυθιά	Cucurbita spp.	Ωίδιο	Erysiphe cichoracearum, Sphaerotheca fuliginea	1835	100.0	0.0
c_45	Φράουλα	Fragaria spp.	-	-	456	100.0	0.0
c_46	Φράουλα	Fragaria spp.	Leaf scorch	Diplocarpon earlianum	3396	29.7	70.3
c_47	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	-	-	1592	100.0	0.0
c_48	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	Βακτηριακή κηλίδωση	Xanthomonas campestris pv. Vesicatoria	2127	100.0	0.0
c_49	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	Αλτερναρίωση	Alternaria solani	2579	38.8	61.2
c_50	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	Περονόσπορος	Phytophthora infestans	1910	100.0	0.0
c_51	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	Σεπτόρια	Septoria lycopersici	1771	100.0	0.0
c_52	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	Τετράνυχος	Tetranychus urticae	1653	100.0	0.0
c_53	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	Μωσαϊκό της τομάτας	Tomato mosaic virus (ToMV)	373	100.0	0.0
c_54	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	Κλαδοσπορίωση	Fulvia fulva	952	100.0	0.0
c_55	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	Κηλίδωση	Corynespora cassiicola	1404	100.0	0.0
c_56	Τομάτα	Lycopersicum esculentum	TYLCV	Begomovirus (Fam. Geminiviridae)	5357	100.0	0.0
c_57	Καρπουζιά	Citrullus lanatus	-	-	172	0.0	100.0
				ΣΥΝΟΛΟ	*87848*	*62.7*	*37.3*

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές συνελικτικών νευρωνικών δικτύων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα εκπαιδεύτηκαν, κατόπιν διάφορων πειραματισμών, με τις παρα-μέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, οι οποίες έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα. Η σύγκριση των μοντέλων έγινε με βάση τις επιδόσεις τους στο testing set (όλα τα μοντέλα πέτυχαν ποσοστό ακρίβειας 100% στο training set). Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα ποσοστά επι-τυχίας κατά τη δοκιμή των διαφόρων αρχιτεκτονικών, για τις δύο βασικές προσεγγίσεις εκπαίδευσης/δοκιμής των 58 κλάσεων (διαχωρισμός συνόλων training/testing σε ποσοστά 80/20, με τις πρωτότυπες εικόνες στην πρώτη περίπτωση, και τις επεξεργασμένες τετραγω-νικές και μικρότερες εικόνες στη δεύτερη περίπτωση). Στον πίνακα παρουσιάζονται τα ποσοστά επιτυχίας στην αναγνώριση της σωστής κλάσης [φυτού, ασθένειας], τα αντίστοιχα μέσα σφάλματα των μοντέλων σε ολόκληρο το testing set, η επανάληψη (epoch) στην οποία επιτεύχθηκαν οι συγκεκριμένες επιδόσεις, και ο μέσος χρόνος (δευτερόλεπτα ανά επανά-ληψη) που διήρκησε η εκπαίδευση του κάθε μοντέλου. Από τα αποτελέσματα αυτά γίνεται σαφές ότι γενικά τα μοντέλα επιτυγχάνουν καλύτερα ποσοστά αναγνώρισης των φυτών/ασθενειών με χρήση των πρωτότυπων φωτογραφιών, με το επακόλουθο φυσικά μειονέκτημα της απαίτησης περισσότερου χρόνου για την εκπαίδευσή τους. Τα υψηλότερα ποσοστά επιτυχίας επιτεύχθηκαν με τις αρχιτεκτονικές VGG (υψηλότερο ποσοστό επιτυχίας) και AlexNetOWTBn (μικρότερο τελικό μέσο σφάλμα δοκιμής), οι οποίες και εκπαιδεύτηκαν περαιτέρω, με χρήση αποκλειστικά των πρωτότυπων φωτογραφιών και για μεγαλύτερο αριθμό epochs. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4, το τελικό υψηλότερο ποσοστό επιτυχίας (99,53%) επιτεύχθηκε με το μοντέλο VGG, το οποίο αποτέλεσε και το τελικό μοντέλο αναγνώρισης ασθενειών φυτών. Τα αποτελέσματα δοκιμής των δύο μοντέλων κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσής τους, παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.

Πίνακας 2. Τελικές τιμές παραμέτρων εκπαίδευσης συνελικτικών νευρωνικών δικτύων.

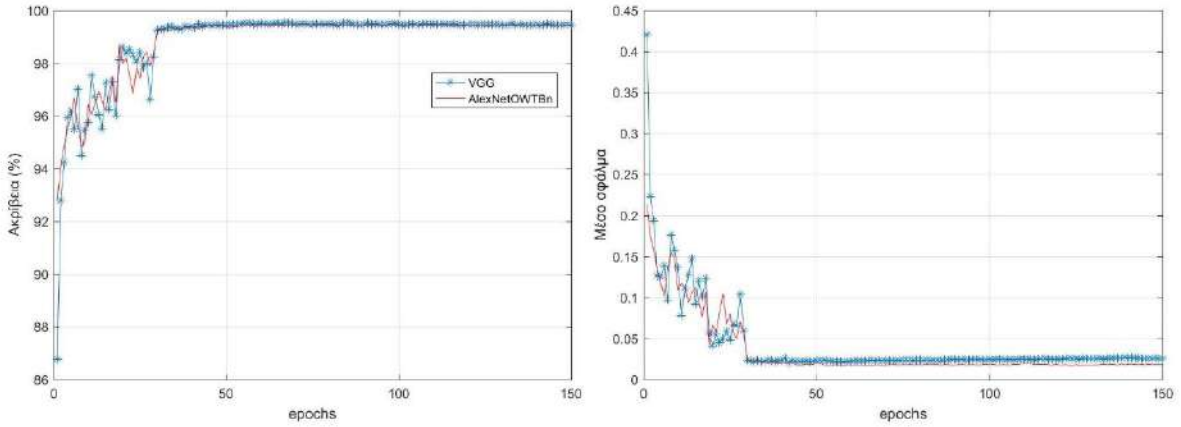
Παράμετρος	Τιμή
Batches / epoch	10.000
Batch size	32
Momentum	0,9
Weight decay	0,0005

Πίνακας 3. Επιδόσεις διαφορετικών αρχιτεκτονικών μοντέλων συνελικτικών νευρωνικών δικτύων στην αναγνώριση [φυτών, ασθενειών] στο testing data set.

	Πρωτότυπες φωτογραφίες				Επεξεργασμένες φωτογραφίες			
Μοντέλο	**Ποσοστό επιτυχίας**	**Μέσο σφάλμα**	**Epoch**	**Χρόνος (s/epoch)**	**Ποσοστό επιτυχίας**	**Μέσο σφάλμα**	**Epoch**	**Χρόνος (s/epoch)**
AlexNet	99,06%	0,0354	47	7034	98,64%	0,0658	50	1022
AlexNetOWTBn	99,44%	**0,0192**	46	7520	99,07%	0,0332	45	1125
GoogLeNet	97,27%	0,0957	45	7845	97,06%	0,0984	40	2670
Overfeat	98,96%	0,0412	45	6204	98,26%	0,0848	49	1570
VGG	**99,48%**	0,0223	48	7294	98,87%	0,0542	49	4208

Πίνακας 4. Επιδόσεις τελικών μοντέλων στο testing data set, εκπαιδευμένων με τις πρωτότυπες φωτογραφίες.

Μοντέλο	**Ποσοστό επιτυχίας**	**Μέσο σφάλμα**	**Epoch**	**Χρόνος (s/epoch)**
AlexNetOWTBn	99,49%	**0,0174**	121	6647
VGG	**99,53%**	0,0223	67	7034



Εικόνα 2. Ποσοστά επιτυχίας (ακρίβεια) και μέσα σφάλματα των τελικών μοντέλων στο testing set, κατά την εκπαίδευσή τους.

Οι δύο αυτές πιο επιτυχημένες αρχιτεκτονικές (VGG και AlexNetOWTBn) δοκιμάστηκαν και στη διαδικασία διερεύνησης της σημαντικότητας του τύπου λήψης των φωτογραφιών, όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 2. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα ποσοστά επιτυχίας είναι αισθητά πιο χαμηλά από αυτά που επιτυγχάνονται με τη χρήση συνδυασμού φωτογραφιών εργαστηριακών και πραγματικών συνθηκών στον αγρό, παρόλο τον μικρότερο αριθμό διαφορετικών κλάσεων (12 έναντι 58). Από τα αποτελέσματα γίνεται σαφές ότι τα μοντέλα επιτυγχάνουν καλύτερα αποτελέσματα στην περίπτωση που εκπαιδεύονται με φωτογραφίες πραγματικών συνθηκών (στον αγρό) και καλούνται να αναγνωρίσουν φωτογραφίες εργαστηριακών συνθηκών (ποσοστό επιτυχίας έως και σχεδόν 66%), ενώ όταν έχουν εκπαιδευτεί αποκλειστικά σε εργαστηριακές φωτογραφίες, τα ποσοστά επιτυχίας τους σε φωτογραφίες αγρού είναι πολύ χαμηλότερα (περίπου 33%). Αυτό αποδεικνύει το αναμενόμενο γεγονός ότι η αναγνώριση φωτογραφιών σε πραγματικές συνθήκες είναι πιο δύσκολη από την περίπτωση εργαστηριακών φωτογραφιών, και κάνει σαφή τη σημαντικότητα ύπαρξης φωτογραφιών σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας για την ανάπτυξη χρήσιμων και επιτυχημένων συστημάτων αυτόματης αναγνώρισης ασθενειών φυτών.

Πίνακας 5. Επιδόσεις τελικών μοντέλων με διαχωρισμό φωτογραφιών εργαστηριακών συνθηκών και πραγματικών συνθηκών στον αγρό, ως προς την εκπαίδευση και δοκιμή.

	Training: Εργαστ/κές - Testing: Αγρού				**Training: Αγρού - Testing: Εργαστ/κές**			
Μοντέλο	**Ποσοστό επιτυχίας**	**Μέσο σφάλμα**	**Epoch**	**Χρόνος (s/epoch)**	**Ποσοστό επιτυχίας**	**Μέσο σφάλμα**	**Epoch**	**Χρόνος (s/epoch)**
AlexNetOWTBn	32,23%	**3,5484**	53	4375	62,57%	**1,9369**	104	-
VGG	**33,27%**	7,8541	54	4901	**65,69%**	2,6786	134	-

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν εξειδικευμένα μοντέλα συνελικτικών νευρωνικών δικτύων για την αναγνώριση ασθενειών φυτών μέσω απλών φωτογραφιών φύλλων υγιών ή προσβεβλημένων φυτών. Η εκπαίδευση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μιας ανοιχτής βάσης δεδομένων 87.848 φωτογραφιών, τραβηγμένων τόσο σε εργαστηριακές συνθήκες όσο και σε πραγματικές συνθήκες στον αγρό. Στα δεδομένα αυτά περιλαμβάνονται 25 φυτά σε 58 διαφορετικές κλάσεις συνδυασμών της μορφής [φυτό, ασθένεια], συμπερι-λαμβανομένων και υγιών φυτών. Το πιο αποδοτικό μοντέλο, ένα

συνελικτικό νευρωνικό δίκτυο αρχιτεκτονικής VGG, παρουσίασε ποσοστά επιτυχίας 99,53% στην αναγνώριση των σωστών ζευγών [φυτού, ασθένειας] (ή υγιούς φυτού) στα δεδομένα δοκιμής (ένα σύνολο 17.548 φωτογραφιών). Με βάση τον εξαιρετικά υψηλό βαθμό επιτυχίας του τελικού μοντέλου, γίνεται σαφής η καταλληλότητα της προσέγγισης της βαθιάς μάθησης με χρήση συνελικτικών νευρωνικών δικτύων για τη συγκεκριμένη διεργασία, η οποία θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω με την προσθήκη μεγαλύτερου αριθμού φυτικών ειδών και ασθενειών. Επίσης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των υπόλοιπων πειραματισμών, έγινε σαφές ότι η επιτυχής αναγνώριση φωτογραφιών που έχουν ληφθεί σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας είναι δυσκολότερη από την περίπτωση εργαστηριακών φωτογραφιών, ενώ η ύπαρξη μεγαλύτερων ποσοστών τέτοιων φωτογραφιών πραγματικών συνθηκών στα δεδομένων εκπαίδευσης των μοντέλων αυξάνει δραστικά τον γενικό βαθμό επιτυχίας τους, και θα αποτελέσει τον βασικό στόχο εξέλιξης του παρόντος συστήματος.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Dan, C., Meier, U., Masci, J., Gambardella, L.M., Schmidhuber, J. 2011. Flexible, high performance convolutional neural networks for image classification. Proceedings of the 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence, vol. 2, pp. 1237-1242.

Grinblat, G.L., Uzal, L.C., Larese, M.G., Granitto, P.M. 2016. Deep learning for plant identification using vein morphological patterns. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 127, pp. 418-424.

Hinton, G., Deng, L., Yu, D., Dahl, G.E., Mohamed, A.R., Jaitly, N., Senior, A., et al. 2012. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 29(6), pp. 82-97.

Hughes, D.P., Salathé, M. 2015. An open access repository of images on plant health to enable the development of mobile disease diagnostics. arXiv:1511.08060.

Krizhevsky, A. 2014. One weird trick for parallelizing convolutional neural networks. arXiv:1404.5997.

Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G.E. 2012. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In: Advances in Neural Information Processing Systems, Eds. F. Pereira, C.J.C. Burges, L. Bottou, and K.Q. Weinberger (Curran Associates, Inc.), pp. 1097–1105.

LeCun, Y., Bengio, Y. 1995. Convolutional networks for images, speech, and time series. In: The handbook of brain theory and neural networks, vol. 3361(10).

LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. 2015. Deep learning. Nature, vol. 521, pp. 436-444, doi: 10.1038/nature14539.

LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., Haffner, P. 1998. Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, vol. 86(11), pp. 2278-2324.

Lee, S.H., Chan, C.S., Wilkin, P., Remagnino, P. 2015. Deep-plant: Plant identification with convolutional neural networks. 2015 IEEE Intl Conf. on Image Processing, pp. 452-456.

Mohanty, S.P., Hughes, D.P., Salathé, M. 2016. Using deep learning for image-based plant disease detection. Frontiers in Plant Science, vol. 7, Article: 1419, doi: 10.3389/fpls.2016.01419.

Pantazi, X.E., Moshou, D., Tamouridou, A.A., Kasderidis, S. 2016. Leaf disease recognition in vine plants based on local binary patterns and one class support vector machines. 12th IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI 2016), Sept. 16-18, Thessaloniki Greece, Proceedings, Springer, pp. 319-327.

Pawara, P., Okafor, E., Surinta, O., Schomaker, L., Wiering, M. 2017. Comparing local descriptors and bags of visual words to deep convolutional neural networks for plant recognition. 6th Intl Conf. on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM 2017).

Sermanet, P., Eigen, D., Zhang, X., Mathieu, M., Fergus, R., & LeCun, Y. 2013. Overfeat: Integrated recognition, localization and detection using convolutional networks. arXiv:1312.6229.

Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., et al. 2015. Going deeper with convolutions. Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.

Sladojevic, S., Arsenovic, M., Anderla, A., Culibrk, D., Stefanovic, D. 2016. Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification. Computational Intelligence and Neuroscience, Article ID: 3289801, doi: 10.1155/2016/3289801.

AUTOMATED NITROGEN VARIABLE RATE APPLICATION ON WINTER WHEAT DRIVEN BY NDVI SENSOR DATA

D. Evangelopoulos[1]✉, G. Varvarelis[1], D. Akridas[1], C. Karamoutis[2], T. Gemtos[2], C. Cavalaris[2] & C. Antonopoulos[1]

[1]University of Thessaly, Dep. of Electrical and Computer Engineering, Glavani 37, 38221 Volos, ✉dimitris@evangelopoulos.net

[2]University of Thessaly, Dep. Crop Production and Rural Environment, Fytokou, 38446 Volos,

Abstract

The objective of the present publication is to build a hardware prototype and develop software that exploits remote NDVI sensing to apply variable rate nitrogen on winter wheat. The system uses a sigmoid model to estimate the potential yield (YP_0) from the NDVI index. It estimates nitrogen rates (NR) according to the difference between the maximum potential yield (YP_N) and the (YP_0). The raw NDVI data are loaded to an ARM-based micro-computer running the model and controlling an electric linear actuator operating the port lever of a centrifugal spreader. A hall-effect sensor adapted on the tractor wheels monitors the working speed (WS). The system was calibrated to apply the desired amount of fertilizer according to (WS), the spreading width (W) and the (NR) estimated by the model. The system was tested on 5 pilot fields and the results showed a good correspondence on the necessary spatial changes for VRF applications, an improvement in grain yields and on NUE.

Keywords: Variable rate fertilization, Winter wheat, Precision agriculture

ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΖΩΤΟΥΧΟΥ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΟ ΣΙΤΑΡΙ ΚΑΘΟΔΗΓΟΥΜΕΝΟ από ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ NDVI

Δ.Ευαγγελόπουλος[1]✉, Γ.Βαρβαρέλης[1], Δ.Ακρίδας[1], Χ.Καραμούτης[2], Θ.Γέμτος[2], Χ.Καβαλάρης[2] & Χ.Αντωνόπουλος[1]

[1]Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ, Γκλαβάνη 37, 38221 Βόλος, ✉dimitris@evangelopoulos.net

[2]Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Φυτικής Παραγ. και Αγρ. Περιβάλλοντος, οδ. Φυτόκου, 38446 Βόλος,

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας δημοσίευσης είναι η ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου για την εφαρμογή μεταβλητής λίπανσης στο σιτάρι. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα σιγμοειδές μοντέλο για να εκτιμήσει την πιθανή απόδοση (YP_0) από το δείκτη NDVI. Η δόση του αζώτου (NR) εκτιμάται ανάλογα με τη διαφορά μεταξύ μιας μέγιστης ικανής απόδοσης (YP_N) και της (YP_0). Ένας παλμικός αισθητήρας στους τροχούς του ελκυστήρα καταγράφει την ταχύτητα (WS). Τα δεδομένα φορτώνονται σε μικρο-ελεγκτή βασισμένο σε επεξεργαστή ARM που εκτελεί τους υπολογισμούς και ελέγχει έναν ηλεκτρικό βραχίονα γραμμικής μετατόπισης στο μοχλό των θυρίδων ενός λιπασματοδιανομέα. Η δόση λιπάσματος ρυθμίζεται ανάλογα με τη ταχύτητα WS, το εύρος διανομής και τη τιμή NR. Το σύστημα δοκιμάστηκε σε 5 πιλοτικούς αγρούς και παρουσίασε ικανοποιητική απόκριση στις απαραίτητες χωρικές μεταβολές, αύξηση των αποδόσεων και βελτίωση του συντελεστή αξιοποίησης του αζώτου.

Λέξεις κλειδιά: Μεταβλητή λίπανση σιτηρών, Γεωργία ακριβείας

1. INTRODUCTION

Precision agriculture is a key element to increase the efficiency of N fertilizer use in cereal crops. Remote sensing is among the most common used techniques to monitor crop conditions. In winter wheat the nitrogen needs can be sufficiently estimated by optical sensing in visible and infrared spectra and estimating various vegetation indices. The most common used indicator is the normalized difference vegetation index (NDVI). A lot of effort is carried out during the past decade and various solutions are presented. Yara N-Sensor (http://www.yara.co.uk) and Isaria (http://www.cffertilisers.co.uk) are two commercial products already in use. The developed technology though is still new and a lot of improvement is to be done. According to Franzen et al (2016), the first official report on the use of a passive sensor for the evaluation of NDVI was made by Rouse et al (1974). This work has recognized that healthy vegetation absorbs most of the light in some visible bands of the spectrum and reflects a large portion of the near infrared band. Since 1999, Raun has been working with various collaborators to develop methodologies to predict cereal production using optical parameters and to develop algorithms for the adapt of nitrogen fertilization to improve nitrogen utilization efficiency (NUE) (Raun and Johnson, 1999 , Raun et al., 2001; Raun et al., 2005). Other researchers have also worked in this direction by presenting algorithms to provide fertilizer dosage recommendations according to NDVI (Lukina et al., 2001, Holland and Scheppers, 2010). In addition, an attempt was made to incorporate other parameters beyond NDVI such as sowing date, date of observation, Growing Degree Days, rainfall, etc. (Girma et al., 2006, Solari et al., 2008, Bushong et al., 2015). With the development of active optical sensors, a new impetus has been given to the possibility of taking measurements of NDVI and other indicators and the development of simple computational schemes for the provision of fertilizer dosage recommendations (Arnall et al., 2006).

The objective of the present work was to develop a prototype for variable nitrogen application in wheat. A commercial NDVI sensor (Crop Circle) was used for N-sensing by implementing a general algorithm (Solie et al, 2012). The prototype is simple and adjustable at almost every kind of centrifugal spreader. This prototype shall be used as a basic concept for further improvements by testing alternative sensors and carrying out investigation to incorporate other parameters except NDVI.

2. THEORY

Solie et al (2012) attempted to present a general form of an algorithm that estimates the amount of nitrogen required based on measurements of the NDVI vegetation index in wheat and maize crops. This general algorithm has also been chosen for the present publication since there is not any specific investigation taken place in Greece. The algorithm takes into account NDVI's relationships with the biomass of the crop, the potential production and management of nitrogen. This relationship is expressed in the form of the curve of Figure 1.

The algorithm developed by Solie et al (2012) is summarized in the following steps:

Step 1

- Installation of sampling points in the field where nitrogen sufficiency is ensured by successive fertilization throughout the growing season.
- Estimation of the maximum potential yield YP_{max} from the experience of the producer and / or the farm advisor.

Step 2

- Measurement of the nitrogen rich NR_{NDVI} with optical sensor within the sampling points
- Determination of the Inf and K coefficients from the equations (1) & (2)

$$Inf = 0.808 \cdot NR_{NDVI} - 0.0477 \quad (1)$$

$$K = 0.1923 \cdot NR_{NDVI} - 0.00113 \quad (2)$$

- Determination of the maximum potential yield YP_N from the equation (3)

$$YP_N = \frac{YP_{max}}{1 + \exp\left[-\frac{NR_{NDVI} - Inf}{K}\right]} \quad \mathbf{(3)}$$

Step 3

- Measurement of farmer practice NDVI (FP_{NDVI}) with optical sensor in the field during fertilization
- Determination of potential yield YP_o for each point on the field from eq. (4)

$$YP_{\mathbf{0}} = \frac{YP_{max}}{1 + \exp\left[\frac{FP_{NDVI} - Inf}{K}\right]} \quad \mathbf{(4)}$$

Step 4

- Estimation of possible production loss Y_D for each point from equation (5).

$$Y_D = YP_N - YP_0 \quad (5)$$

- Calculation of the required nitrogen rates (NR) from the equation (6)

$$NR = \frac{Y_D \cdot \%N}{NUE} \quad (6)$$

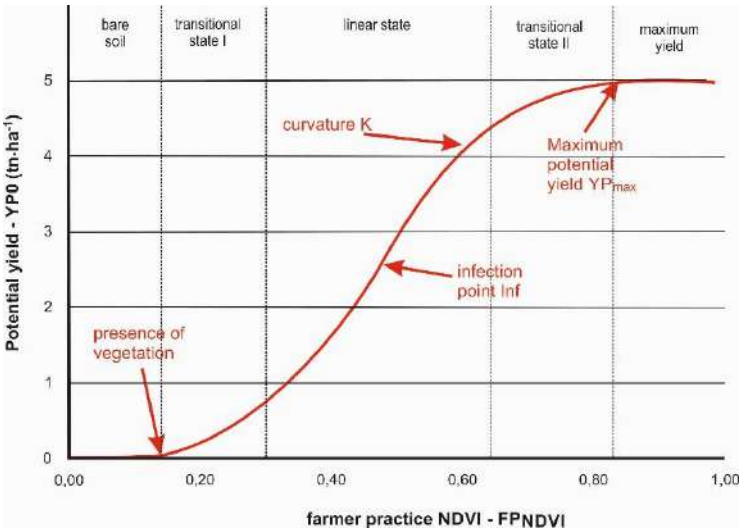


Figure 1. Sigmoid yield model with critical parameters (adapted by Solie et al. 2012)

3. MATERIALS AND METHODS

3.1 Hardware development

The system was designed to operate in real time and consists of 3 distinct parts: the NDVI sensor, the micro-controller and the electric actuator (Figure 2). A Speed sensor and a GPS module was also included in the implementation.

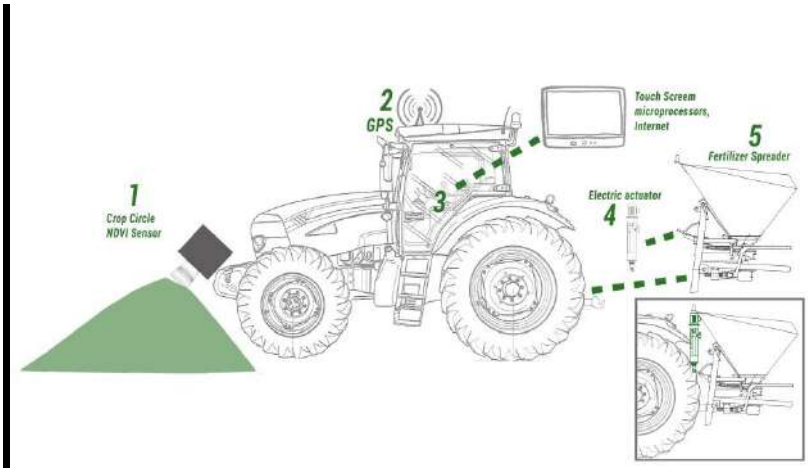


Figure 2 – System Architecture

Optical sensor: We selected a Crop Circle sensor (Holland Scientific Co.) to measure the NDVI. To read the signal from the sensor in real time, an RS485 to RS232 converter had to be developed (Evangelopoulos et al 2016). The converter was connected in series with the sensor and the microcontroller "serving" the signal in RS232 format as shown in Figure 3

Micro-controller. The micro-controller of the system is a Raspberry Pi 3 Model B. This particular microcontroller has enabled easy implementation of interfaces between system components, because of the GPIO connectivity provided and of course due to the already implemented open source libraries.

Linear Actuator: In order to change the dose of fertilizer, a linear actuator (CAHB-10 – SKF) was adapted on the hand lever that controls the hopper ports of a centrifugal spreader. The actuator was able to exercise 500N force in both directions. It was necessary to use a set of 4

relays to drive the actuator. This is because raspberry pi uses 3.3Volt level control signals while the actuator uses 12V. Another relay wiring was constructed as shown in Figure 4 to reverse polarity on the motor when opening or closing the actuator.

Position Feedback: It is of great value to know every time the current shift of the electric actuator from its original position in order to execute the next directive accurately. This was made possible by reading an analog value from a variable resistor included in the actuator. By applying a reference voltage, the output voltage changes according to its location. Raspberry pi is not able to read analog signals so, MCP3002 analog to digital converter IC was used to convert the analog input into a 10bit digital input.

Speed measurement. In order monitor the instant speed of the tractor a Reed Switch coupled with powerful magnets were fitted on the inner part of the tractor's front wheel.

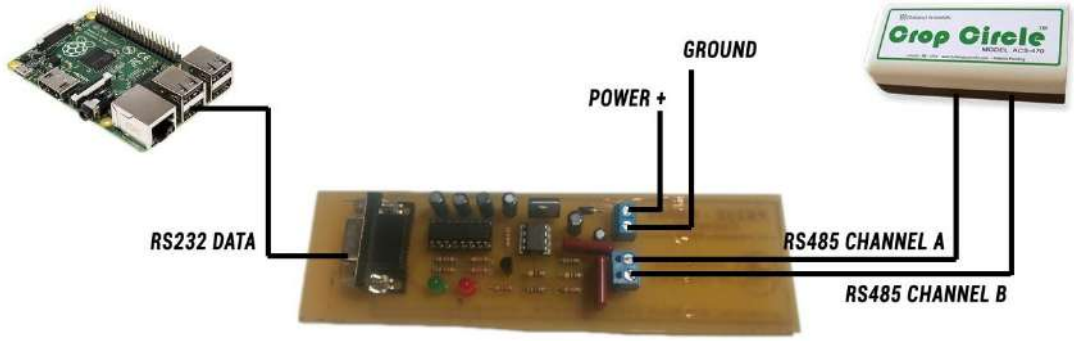


Figure 3 – RS485 to RS232 connection diagram

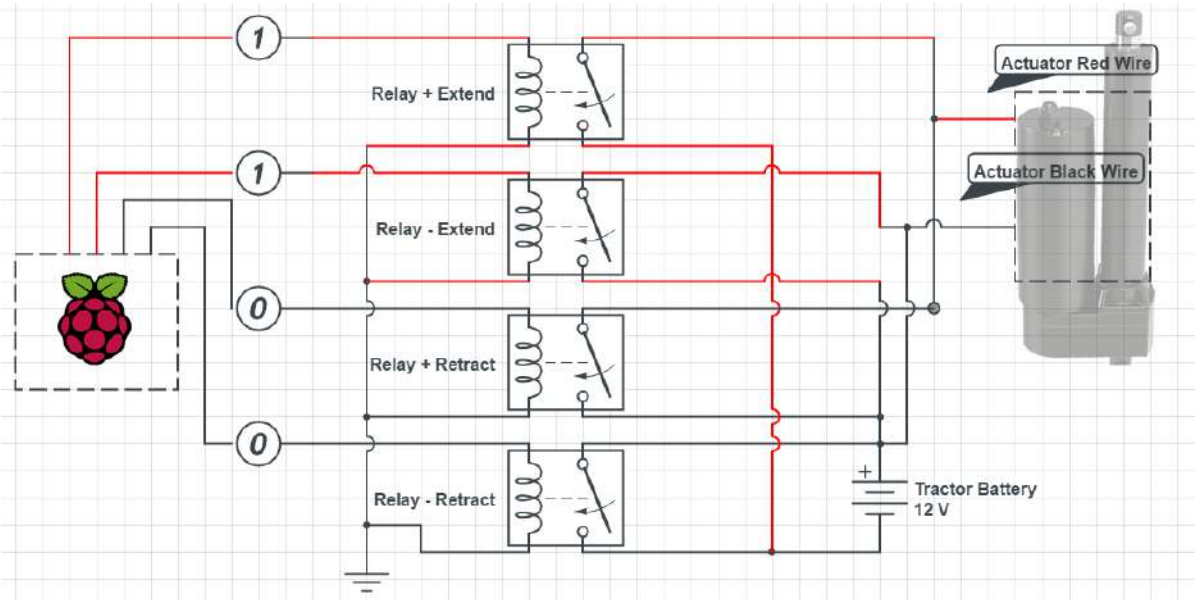


Figure 4 – Relay board and connections used to control the actuator

3.2 Software development

In addition to the necessary hardware, the appropriate software was developed to make it possible to communicate with the NDVI, speed sensors and the actuator. The basic thread of operation as well as the architecture of the whole software of the micro-controller is shown in Table 1 and Figure 5. Figure 6 illustrates the work flow of the main thread.

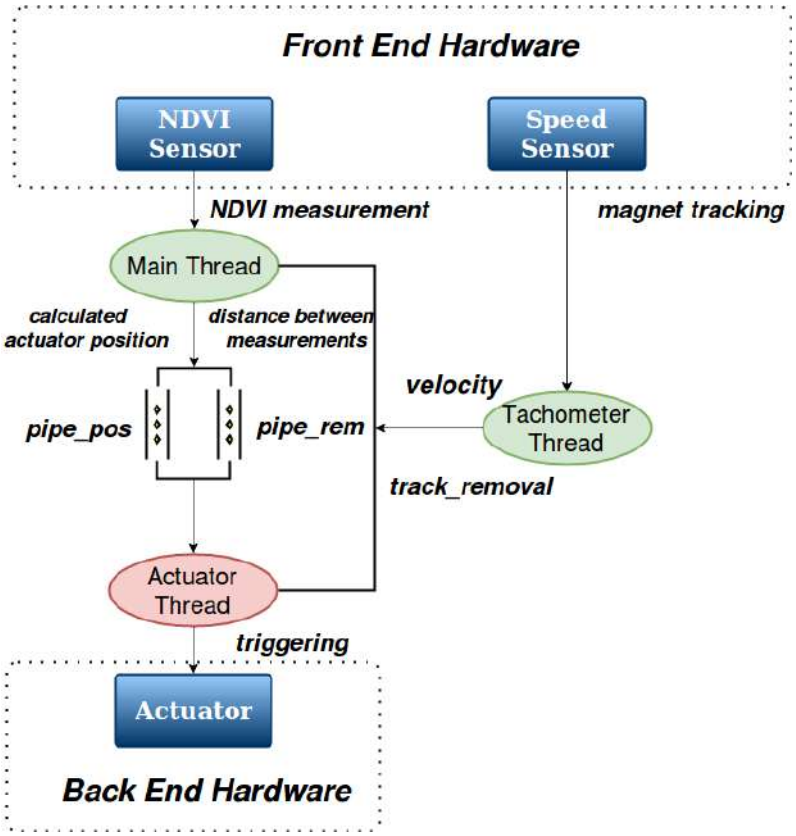


Figure 5 – Software architecture

Table 1 – Software threads overview

System threads	**Function**
Main Thread	NDVI measurement reading and actuator position
Actuator Thread	Enable of the linear actuator in order to reach the right position
Tachometer Thread	Speed and displacement calculation

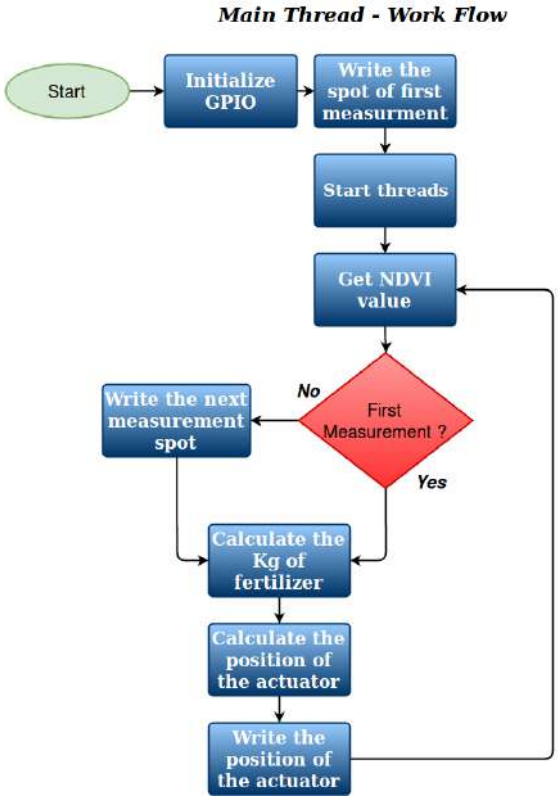


Figure 6 - Main system thread flow diagram

3.3. Calibration of fertilizer spreader

An appropriate algorithm was developed in order to correlate the actual position of the actuator and thus the opening of the hopper port with the actual dose of the fertilizer applied to the field. For this calibration process, a metal frame was constructed to surround the fertilizer spreader. The fertilizer was collected in the base of the metal construction where an electronic scale was placed. The sampling was done by capturing the scale readings with timer readings in a video. By repeating the process several times for several port openings, the appropriate equations were derived and placed into the system software.

3.4. Field tests

Field tests were designed in order to assess the actual performance of the system. Pilot plots were established on five farmers' fields. Each field was divided into two sub-plots. Apparent soil electric conductivity mapping were performed with an EM-38 sensor (Geonics Ltd,) prior dividing the fields in order to allocate the plots in regions with similar soil properties. In the first plot, the farmers followed their traditional fertilization practices without given any instructions. In the second plot the nitrogen fertilization was applied with one or two side dressings on March and April with the novel developed system (Table 2). Basic fertilization with P and K and all the rest cultivation practices were similar for both plots. The two plots were harvested and weighed separately to determine the grain yields.

4. RESULTS AND DISCUSION

The first results are encouraging and support the effectiveness of the novel fertilization system. The results present consistency and indicate a yield improvement in all the tested fields. Grain yields were 3.8-9.4% higher in the variable rate plots compared to the traditional (Table 2). Nitrogen doses were general lower with the variable rate system

compared to traditional except for Farm 4. The greater yields and the lower nitrogen rates resulted on increased nitrogen use efficiency NUE even for Field 4. It should be noted that in the present study, except for one case (Farm 2), the effects on seed quality wasn't studied. However, the data from this single field highlighted a potential additional benefit for the farmer and especially for the food industry. Protein levels for the variable rate plot were 15.4% compared to 13.2% for the traditional part. Higher levels of protein mean higher product quality that gives an extra advantage to producers to negotiate better prices and be more flexible on product selling.

Table 2. N-rates, Yields and Nitrogen use efficiency (NUE) for the five tested fields

	N application (kg/ha)		Yield kg/ha		NUE	
	Variable rate	Tradi-tional	Variable rate	Tradi-tional	Variable rate	Tradi-tional
Farm 1	274	350	4909	4645	46	35
Farm 2	360	400	6112	5873	45	39
Farm 3	273	300	5415	5216	51	45
Farm 4	390	370	5146	4761	35	34
Farm 5	123	200	3383	3090	27	15

Beyond the apparent benefits from the new presented system, a number of weak points have been identified during the tests that need further investigation. For example, the use of a single NDVI sensor to scan an area about half a meter wide and from that, get decisions to spread the fertilizer to a 10m wide (and for some spreaders even on 24m wide) is an inaccurate and highly biased approach. A solution to the problem could be to install more than one sensor on the tractor. This approach though would lead to an excessive increase in the cost of the system. Alternatively, a hyperspectral or multi-spectral camera may be tested to monitor the area and retrieve NDVI. Another identified problem was that the system doesn't account for crop density. Low NDVI indices sometimes were related with poor soil coverage. An effort will be made to utilize the hyperspectral camera also for this information

5. CONLUSIONS

A prototype system for variable rate nitrogen application in winter wheat was developed. The system utilizes a Crop Circle sensor and a general algorithm to estimate the nitrogen needs from NDVI sensing. The flexibility of the developed system allows it to be adjusted at almost every centrifugal fertilizer spreader. Field tests proved the efficiency of the system by increasing grain yields from 3.8-9.4% and increasing nitrogen use efficiency up to 12%. Except for the NDVI sensor the system's components are rather cheap. This prototype shall be used as basic concept for further improvements by checking the possibility to use alternative and cheaper NDVI sensors and conduct investigation to incorporate other crop parameters except NDVI.

6. LITERATURE

Arnall, D.B., W.R. Raun, J.B. Solie, M.L. Stone, G.V. Johnson, K. Desta et al. 2006. Relationship between coefficient of varia- tion measured by spectral reflectance and plant density at

early growth stages in winter wheat. J. Plant Nutr. 29:1983–1997. doi:10.1080/01904160600927997

Bushong, J.T., J.L. Mullock, E.C. Miller, W.R. Raun, A.R. Klatt, and D. B. Arnall. 2015. Development of an in-season estimate of yield potential utilizing optical crop sensors and soil moisture data for winter wheat. Prec. Agric. doi:10.1007/s11119-016-9430-4

Franzen, D., Kitchen, N., Holland, K., Schepers, J., Raun, W., 2016. Algorithms for in-season nutrient management in cereals. Agron. J. 108, 1775–1781. doi:10.2134/agronj2016.01.0041

Girma, K., K.L. Martin, R.H. Anderson, D.B. Arnall, K.D. Brixey, M.A. Casillas et al. 2006. Mid-Season Prediction of Wheat Grain Yield Potential Using Plant, Soil, and Sensor Measurements. J. Plant Nutr. 29:873–897. doi:10.1080/01904160600649187

Evangelopoulos D. 2016. RS485 to RS232 Converter with automatic TX/RX Control. Non published element

Holland, K.H., and J.S. Schepers. 2010. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. Agron. J. 102:1415–1424. doi:10.2134/agronj2010.0015

ISARIA http://www.cffertilisers.co.uk/advice-services/advice/precision-farming/

Lukina, E.V., K.W. Freeman, K.J. Wynn, W.E. Thomason, R.W. Mullen, A.R. Klatt et al. 2001. Nitrogen fertilization opti- mization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. J. Plant Nutr. 24:885–898. doi:10.1081/ PLN-100103780

Raun, W.R., and G.V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use effi- ciency for cereal production. Agron. J. 91:357–363. doi:10.2134/ agronj1999.00021962009100030001x

Raun, W.R., G.V. Johnson, M.L. Stone, J.B. Solie, E.V. Lukina, W.E. Thomason, and J.S.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Scheel, and D.W. Deering (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, Washington, DC. Vol. 1. 10–14 Dec. 1973. Goddard Space Flight Ctr., Greenbelt, MD. p. 48–62.

Schepers. 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. Agron. J. 93:131–138. doi:10.2134/agronj2001.931131x

Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen et al. 2005. Optical sensor based algorithm for crop nitro- gen fertilization. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 36:2759–2781. doi:10.1080/00103620500303988

Solari, F., J. Shanahan, R. Ferguson, J. Schepers, and A. Gitelson. 2008. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. Agron. J. 100:571–579. doi:10.2134/ agronj2007.0244

Solie, J.B., Dean Monroe, A., Raun, W.R., Stone, M.L., 2012. Generalized algorithm for variable-rate nitrogen application in cereal grains. Agron. J. 104, 378–387. doi:10.2134/agronj2011.0249

YARA N-Sensor http://www.yara.co.uk/crop-nutrition/Tools-and-Services/n-sensor/

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΗΣ ΧΩΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΒΟΟΕΙΔΗ

Κ. Λιάκος✉, Σ. Μουστακίδης, Θ. Μπαρτζάνας, Δ. Μπόχτης
Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης – ΕΚΕΤΑ, Ινστιτούτο Έρευνας & Τεχνολογίας Θεσσαλίας – iBO, 10ο χλμ. Θεσσαλονίκης-Θέρμης, BALCAN Center, Κτήριο Δ, 57001, Θεσσαλονίκη,
✉ kliakos@ireteth.certh.gr

Περίληψη

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η συστηματική αγελαδοτροφία στις μέρες μας και ασχολείται η επιστήμη της Κτηνοτροφίας Ακριβείας, είναι η αναγνώριση της χωλότητας των βοοειδών. Στόχος της παρούσας έρευνας είναι να παρουσιαστεί μια νέα ισχυρή ολοκληρωμένη υπολογιστική ανάλυση που βασίζεται σε μεθόδους μηχανικής μάθησης. Ο νέος αλγόριθμος δοκιμάστηκε σε σύνολα δειγμάτων από υγιή και μη υγιή βοοειδή. Η νέα υπολογιστική ανάλυση χρησιμοποιεί τέσσερα ισχυρά χαρακτηριστικά: «βήματα ανά ημέρα» (αδιαστ.), «συνολικό περπάτημα ανά ημέρα» (m), «ξεκούραση ανά ημέρα» (min) και «βόσκηση ανά ημέρα» (min). Στόχος των τεσσάρων χαρακτηριστικών ήταν να βοηθήσουν τον αλγόριθμο να ξεχωρίσει τα δείγματα, όσο το δυνατόν καλύτερα. Το αποτέλεσμα που προέκυψε είναι αισιόδοξο, διότι ο αλγόριθμος μπορεί και αναγνωρίζει εξίσου καλά τόσο τα θετικά δείγματα (βοοειδή που είναι υγιή), όσο και τα αρνητικά δείγματα (βοοειδή που πάσχουν από χωλότητα).

Λέξεις κλειδιά: χωλότητα, μηχανική μάθηση, Random Forest, ANN, LIBSVM

COMPUTATIONAL ANALYSIS BASED ON MACHINE LEARNING METHODS FOR CATTLE LAMENESS PREDICTION

K. Liakos✉, S. Moustakidis, T. Bartzanas, D. Bochtis
Centre for Research & Technology Hellas – CERTH, Institute for Research and Technology Thessaly – iBO, 10th km Thessaloniki - Thermi Rd, BLDG D, 57001, Thessaloniki, Greece,
✉ kliakos@ireteth.certh.gr

ABSTRACT

A significant problem that the systematic cattle farming is facing and the science of Livestock Precision Farming is trying to solve, is the identification of lameness in cattle. The aim of this research is to present a novel integrated computational analysis for lameness prediction based on machine learning methods. The new algorithm was tested on data sets of healthy and unhealthy cattle. The new computational analysis uses four features: «steps per day» (dimensionless), «overall walking per day» (m), «lying per day» (min) and «eating per day» (min). The aim of these four features was to help the algorithm to separate the samples, in the best possible way. The result which was obtained was encouraging since the algorithm can identify equally well the positive samples (healthy cattle) and the negative samples (cattle suffering from lameness).

Keywords: lameness, Random Forest, ANN, LIBSVM

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιστήμη των υπολογιστών χρόνο με το χρόνο παρουσιάζει σπουδαία ανάπτυξη τόσο σε μηχανικό όσο και σε αλγοριθμικό επίπεδο κυρίως στον τομέα της μηχανικής μάθησης. Χάρη σε αυτή τη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης έχουν εξελιχθεί τομείς και από άλλα επιστημονικά πεδία. Τα τελευταία χρόνια σημαντικές έρευνες έχουν αναπτυχθεί που αφορούν την επιστήμη της Κτηνοτροφίας Ακριβείας και κυρίως την επιστήμη Γεωργίας Ακριβείας που βασίζονται σε μηχανική μάθηση. Στόχος των ερευνών που αναπτύχθηκαν στις παραπάνω επιστήμες είναι η επίλυση προβλημάτων με αυτοματοποιημένες διαδικασίες.

Η μηχανική μάθηση έχει εφαρμοστεί περισσότερο σε τομείς που αφορούν την επιστήμη της Γεωργίας Ακριβείας. Παραδείγματος χάρη η μηχανική μάθηση εφαρμόζεται στην επιστήμη Γεωργίας Ακριβείας για τον ακριβή υπολογισμό της θερμοκρασίας του εδάφους (Nahvi et al., 2016). Άλλη μια εφαρμογή έχει να κάνει με την αξιολόγηση της ξηρασίας του εδάφους (Coopersmith et al., 2014) ή την πρόβλεψη της θερμοκρασίας σημείου δρόσου σε καθημερινή βάση (Mohammadi et al., 2015). Ακόμη η μηχανική μάθηση εφαρμόζεται για την ακριβή πρόβλεψη της παραγωγής σίτου (Pantazi et al., 2016) και την σωστή πρόβλεψη της εξατμισοδιαπνοής (Patil & Deka, 2016).

Στην επιστήμη της Κτηνοτροφίας Ακριβείας η μηχανική μάθηση εφαρμόζεται σπανιότερα και αφορά κυρίως την αυτοματοποιημένη ατομική παρακολούθηση των ζώων φάρμας. Μερικές έρευνες που εφαρμόζεται μηχανική μάθηση στην Κτηνοτροφία Ακριβείας έχουν σχέση με την αναγνώριση της συμπεριφοράς των βοοειδών. Συγκεκριμένα, στην έρευνα (Dutta et al., 2015) εφαρμόζεται μηχανική μάθηση σε δεδομένα που συλλέχθηκαν από 3-αξόνων επιταχυνσιόμετρα και μαγνητόμετρα, για να διακρίνουν πότε τα βοοειδή αναζητούν τροφή, βόσκουν, ξεκουράζονται και περπατάνε. Άλλες έρευνες που εφαρμόζεται μηχανική μάθηση έχουν σχέση με την σωστή ταυτοποίηση βοοειδών με βιομετρικά χαρακτηριστικά, για παράδειγμα στην έρευνα (Gaber, Tharwat, Hassanien, & Snasel, 2016) με τη βοήθεια μηχανικής μάθησης προσπαθούν να αναγνωρίσουν τα χαρακτηριστικά της κεφαλής ενός βοοειδούς με χρήση βιομετρικών χαρακτηριστικών. Ακόμη η μηχανική μάθηση εφαρμόζεται και σε έρευνες βιολογικού επιπέδου στην Κτηνοτροφία Ακριβείας. Παράδειγμα στην έρευνα (Meher, Sahu, Rao, & Wahi, 2016) έχουν ως στόχο τη σωστή αναγνώριση των κωδικών περιοχών από των μη κωδικών περιοχών για τα βοοειδή με τη βοήθεια δυο χαρακτηριστικών, τη δομή των κωδικόνιων και τις μεταλλάξεις της μεθυλίωσης. Όμως από τα πιο σημαντικά θέματα που απασχολεί την επιστήμη της Κτηνοτροφίας Ακριβείας είναι η δημιουργία αυτοματοποιημένων συστημάτων, που σχετίζονται με την ευημερία και την υγεία των ζώων, όπως παράδειγμα η χωλότητα.

Η χωλότητα είναι ένα από τα πιο σημαντικά θέματα, όσο αφορά στην υγεία των ζώων φάρμας. Τα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω της χωλότητας στην παραγωγή είναι καταστροφικά για τον ιδιοκτήτη της φάρμας βοοειδών. Παρατηρείται μείωση του κέρδους (Bruijnis, Hogeveen, & Stassen, 2010), λόγω μείωσης της παραγωγής γάλακτος και κρέατος και αύξηση των εξόδων, λόγω της ιατροφαρμακευτικής περίθαλψης των βοοειδών. Οι ασθένειες που σχετίζονται με τη χωλότητα ανά ζώο κοστίζουν 66 ευρώ εκ των οποίων το 32% των εξόδων διατίθενται για την ιατροφαρμακευτική περίθαλψη (Bruijnis et al., 2010). Είναι σημαντικό να ανιχνεύεται η χωλότητα έγκαιρα και έγκυρα (Booth et al. 2004, Holzhauer et al. 2004, Tasch & Rajkondawar 2004), ώστε να μειώνεται το κόστος, αλλά και να διασφαλίζεται και η υγεία του ζώου. Έχει παρατηρηθεί ότι τα ζώα που πάσχουν από χωλότητα παρουσιάζουν κάποια συμπτώματα, όπως δυσκολία στο περπάτημα (Walker et al., 2008), ξαπλώνουν περισσότερο (Walker et al. 2008, Ito et al. 2010, Chapinal et al. 2009),

στέκονται λιγότερο (Walker et al., 2008), βόσκουν λιγότερο (Miguel-Pacheco et al., 2014). Μέχρι σήμερα πολλές έρευνες έχουν ασχοληθεί με στόχο την σωστή πρόβλεψη της χωλότητας. Οι μέθοδοι, όμως που υπάρχουν είναι ασαφείς και μη αξιόπιστες (Schlageter-Tello et al., 2014) και κυρίως αυτές που προσεγγίζουν τη χωλότητα μέσω υπολογιστικής ανάλυσης.

Οι μέθοδοι που προσπαθούν να αναγνωρίσουν τη χωλότητα στα βοοειδή διαφέρουν από έρευνα σε έρευνα. Κάποιες έρευνες τη χωλότητα με τη χρήση οπτικών μέσων. Παράδειγμα στην έρευνα (Song et al., 2008) προσπαθούν με τη χρήση εικόνων και ταινιών καταγραφής να παρατηρήσουν ποια βοοειδή έχουν χωλότητα ή στην έρευνα του (Viazzi et al., 2014) που προσπαθούν να εντοπίσουν τη χωλότητα με χρήση 2 διαστάσεων και 3 διαστάσεων κάμερες. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης της χωλότητας είναι με τη χρήση αισθητήρων, όπως συνέβη στην έρευνα (Pastell et al., 2008), όπου με τη χρήση αισθητήρων δύναμης προσπάθησαν να καταγράψουν και να ξεχωρίσουν τα ζώα με χωλότητα.

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης υπολογιστικής ανάλυσης, που βασίζεται σε μεθόδους μηχανικής μάθησης με στόχο τη σωστή αναγνώριση των υγιή βοοειδών σε σχέση με τα βοοειδή που πάσχουν από χωλότητα.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Παρακάτω παρουσιάζεται μια νέα ολοκληρωμένη υπολογιστική ανάλυση, που βασίζεται σε μεθόδους μηχανικής μάθησης. Ο αλγόριθμος αποτελείται από το υπολογιστικό μοντέλο (LP, Πίνακας 1). Για την εκπαίδευση και τη δοκιμή του δοκιμάστηκαν τρείς μέθοδοι μηχανικής μάθησης, Artificial Neural Networks , Random Forest & Library for Support Vector Machines, ώστε να διαπιστωθεί ποιο θα είναι το τελικό μοντέλο, το οποίο θα αποδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τέσσερα χαρακτηριστικά, για το διαχωρισμό των δειγμάτων (Πίνακας 1), παράδειγμα της αρχικής μορφής των χαρακτηριστικών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Παρουσίαση των χαρακτηριστικών για το Υπολογιστικό Μοντέλο LP.

Υπολογιστικό Μοντέλο LP	
Χαρακτηριστικό 1	Βήματα ανά ημέρα
Χαρακτηριστικό 2	Περπάτημα ανά ημέρα (m)
Χαρακτηριστικό 3	Ξεκούραση ανά ημέρα (min)
Χαρακτηριστικό 4	Βόσκηση ανά ημέρα (min)

Πίνακας 2. Παράδειγμα περιεχομένου ενός συνόλου δειγμάτων με τέσσερα χαρακτηριστικά.

Κατάσταση Βοοειδούς	Βήματα ανά ημέρα (αδιαστ)	Περπάτημα ανά ημέρα (m)	Ξεκούραση ανά ημέρα (min)	Βόσκηση ανά ημέρα (min)
Υγιές	2900	3700	660	178
Με πρόβλημα στις οπλές	600	2350	830	168

Για την δημιουργία του υπολογιστικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δύο σύνολα δειγμάτων, ένα για την εκπαίδευση και ένα για την δοκιμή, για να διεκπεραιωθεί κατά πόσο μπορούν τα τέσσερα χαρακτηριστικά να ξεχωρίσουν τα υγιή από τα βοοειδή που πάσχουν από χωλότητα.

Το μέγεθος των δύο δειγμάτων είναι μικρό, διότι η έρευνα είναι υποθετική και βασίζεται στην μεθοδολογία των (Frondelius et al., 2015), στην οποία παρατήρησαν την καθημερινότητα των βοοειδών με την χρήση αισθητήρων

Πιο συγκεκριμένα στην μεθοδολογία των (Frondelius et al., 2015), για τον εντοπισμό της θέσης των βοοειδών σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας Ubinese. Για τον υπολογισμό των βημάτων ανά ημέρα, του περπατήματος ανά ημέρα (m) και της ξεκούρασης ανά ημέρα (min), χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας RumiWatch, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των επιταχυνσιόμετρων και πιο συγκεκριμένα είναι βηματομετρητής. Τέλος για τον υπολογισμό του χρόνου που τρέφεται ένα ζώο ανά ημέρα (min), χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας Insentec, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των Roughage Intake Control (RIC) αισθητήρων.

Τα σύνολα δειγμάτων εκπαίδευσης και δοκιμής παρουσιάζονται στους Πίνακες 3 και Πίνακες 4.

Πίνακας 3. Παρουσίαση του συνόλου δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των μοντέλων.

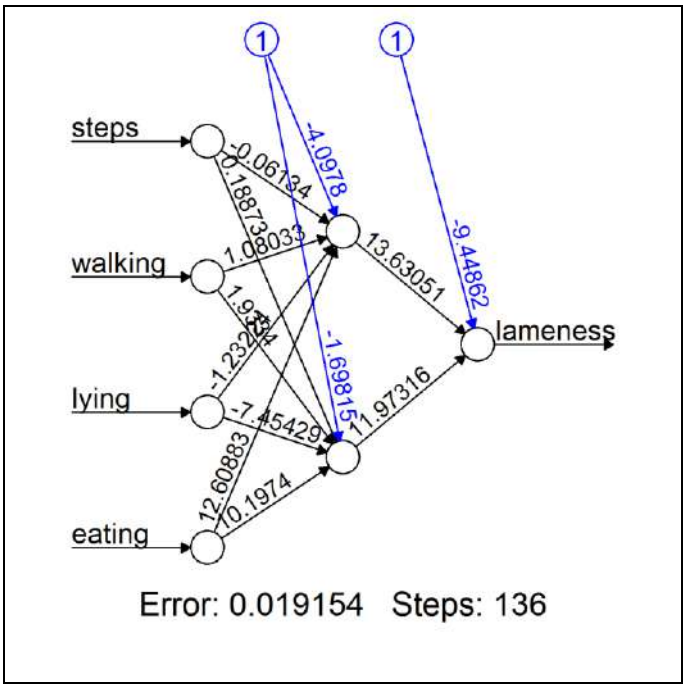
Σύνολο δειγμάτων εκπαίδευσης	
Θετικά δείγματα	6 υγιή βοοειδή
Αρνητικά δείγματα	6 βοοειδή με χωλότητα

Πίνακας 4. Παρουσίαση του συνόλου δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή των μοντέλων.

Σύνολο δειγμάτων δοκιμής	
Θετικά δείγματα	2 υγιή βοοειδή
Αρνητικά δείγματα	2 βοοειδή με χωλότητα

2.1 Artificial Neural Networks

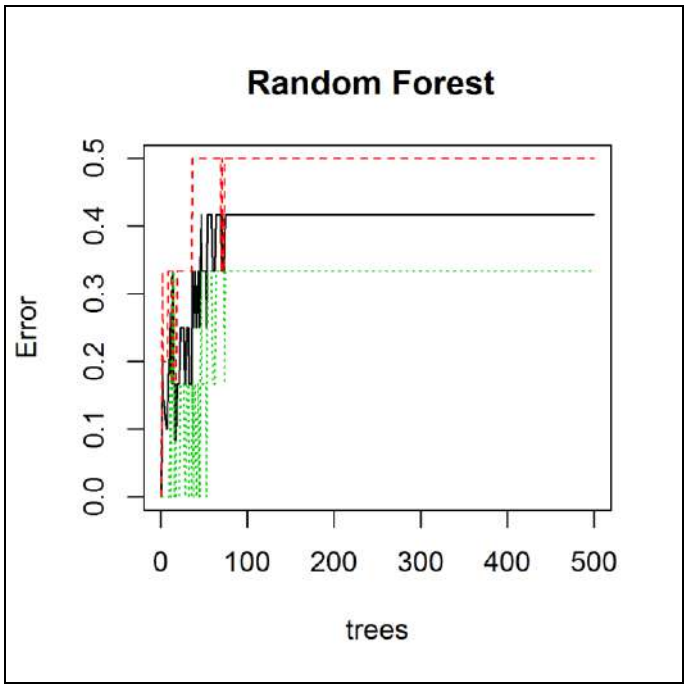
Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του υπολογιστικού μοντέλου LP, ήταν η μέθοδος των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Αρχικά έγινε κανονικοποίηση των δεδομένων μεταξύ του διαστήματος [0, 1]. Δοκιμάστηκαν διάφορες αρχιτεκτονικές, η αρχιτεκτονική που προτιμήθηκε αποτελείται από, τέσσερις νευρώνες εισόδου, ένα κρυφό επίπεδο αποτελούμενο από δύο κρυφούς νευρώνες και ένα νευρώνα εξόδου (Σχήμα 1). Τα πειράματα έδειξαν ότι ο αλγόριθμος Resilient Backpropagation (Riedmiller & Braun, 1993) φέρει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον αλγόριθμο Backpropagation, γι’ αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Τέλος ο αριθμός των επαναλήψεων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του ANN, ήταν 10-fold Cross Validation.



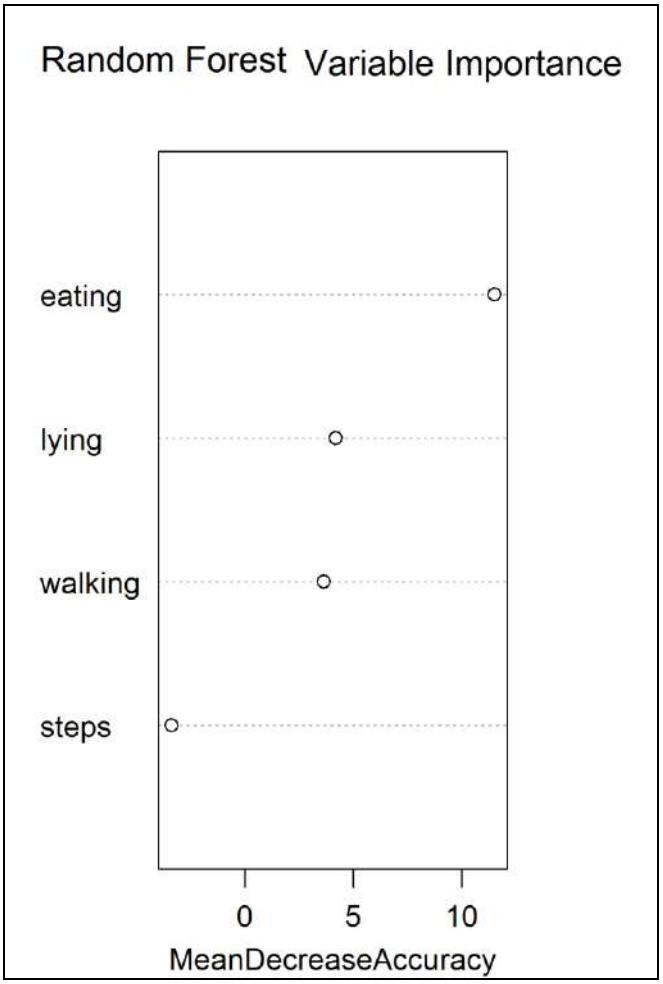
Σχήμα 1. Η αρχιτεκτονική ANN του μοντέλου LP για την ανίχνευση της χωλότητας στα βοοειδή.

2.2 Random Forest

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του υπολογιστικού μοντέλου LP, ήταν η μέθοδος των τυχαίων δασών. Αρχικά, όπως και στην πρώτη μέθοδο ANN, έτσι και εδώ έγινε κανονικοποίηση των δεδομένων μεταξύ του διαστήματος [0, 1]. Χρησιμοποιήθηκε παλινδρόμηση για την εκπαίδευση των δεδομένων και το δάσος αποτελείται από 500 δέντρα (Σχήμα 2). Ακόμη, στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η ισχύς των τεσσάρων χαρακτηριστικών, για την μέθοδο Random Forest.



Σχήμα 2. Η αρχιτεκτονική Random Forest του μοντέλου LP για την ανίχνευση της χωλότητας στα βοοειδή.



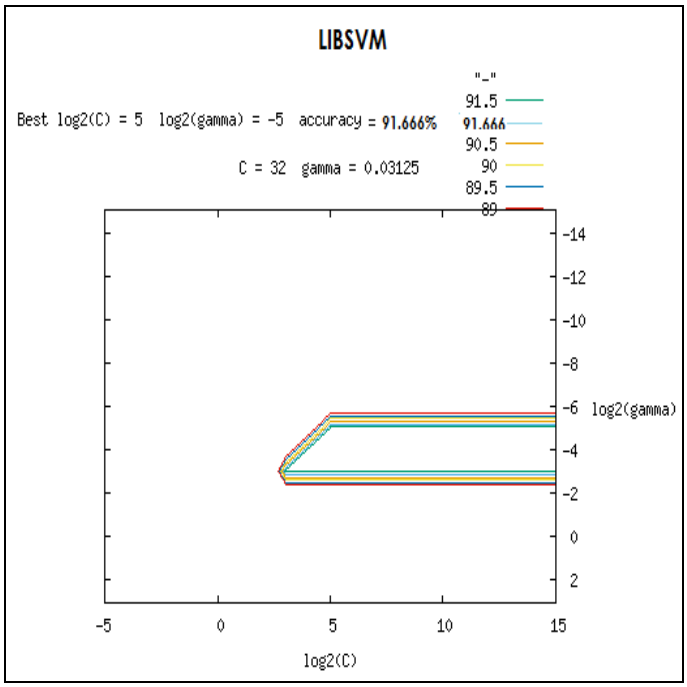
Σχήμα 3. Παρουσίαση των πιο ισχυρών χαρακτηριστικών σύμφωνα με την μέθοδο Random Forest.

2.3 Library for Support Vector Machines

Η τρίτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του μοντέλου LP, ήταν η μέθοδος LIBSVM.

Για τη μέθοδο μηχανικής μάθησης LIBSVM χρησιμοποιήθηκε ένα πρωτοποριακό μοντέλο παράλληλου προγραμματισμού, το GPU-LIBSVM (Athanasopoulos & Dimou, 2011). Είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται το GPU-LIBSVM μοντέλο για την υπολογιστική ανάλυση της χωλότητας σε ζώα φάρμας. Το GPU-LIBSVM μοντέλο εφαρμόστηκε για την εκπαίδευση και για την πρόβλεψη των δύο μοντέλων. Το πρωτοποριακό αυτό μοντέλο μηχανικής μάθησης LIBSVM, δίνει τη δυνατότητα να δημιουργούνται και να δοκιμάζονται περισσότερα υπολογιστικά μοντέλα με πολλά χαρακτηριστικά Χ30 φορές πιο γρήγορα.

Όπως και παραπάνω, έτσι και εδώ αρχικά έγινε κανονικοποίηση των δεδομένων μεταξύ του διαστήματος [-1, 1]. Όσο αφορά τη μέθοδο Library for Support Vector Machines, τα καλύτερα αποτελέσματα επιστράφηκαν με τη χρήση των παρακάτω, SVM type: One-Class και Kernel type: Linear. Η καλύτερη τιμή C είναι: log2(C)= 5 και η καλύτερη τιμή gamma είναι log2(gamma)= -5, (Σχήμα 4). Τέλος ο αριθμός των επαναλήψεων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του LIBSVM, ήταν 10-fold Cross Validation.



Σχήμα 4. Παρουσίαση των τιμών C και gamma, που χρησιμοποιήθηκαν για την μέθοδο LIBSVM για την εκπαίδευση του μοντέλου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου LP, για τα σύνολα δειγμάτων εκπαίδευσης και δοκιμής, με στόχο να παρατηρηθεί ποια μέθοδος μηχανικής μάθησης μπορεί να προβλέψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη χωλότητα στα βοοειδή.

Το υπολογιστικό μοντέλο δημιουργήθηκε στις γλώσσες προγραμματισμού Perl, Python και R.

3.1 Υπολογιστικό Μοντέλο LP

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου LP σε σχέση με το σύνολο δειγμάτων εκπαίδευσης (Πίνακας 3) και δοκιμής (Πίνακας 4).

Πίνακας 5. Το κατώφλι των μεθόδων μηχανικής μάθησης για το υπολογιστικό μοντέλο LP και το σύνολο δειγμάτων εκπαίδευσης.

Υπολογιστικό μοντέλο LP και σύνολο δειγμάτων εκπαίδευσης											
M.L Method	Threshold	TP	FP	TN	FN	Sensitivity	Specificity	Precision	Recall	Accuracy	AUC
ANN	0.5	6	0	6	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RF	0.5	6	0	6	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LIBSVM	0.5	6	0	6	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Πίνακας 6. Μέσος όρος σκορ πρόβλεψης των μεθόδων μηχανικής μάθησης του υπολογιστικού μοντέλου LP, για το σύνολο δειγμάτων εκπαίδευσης.

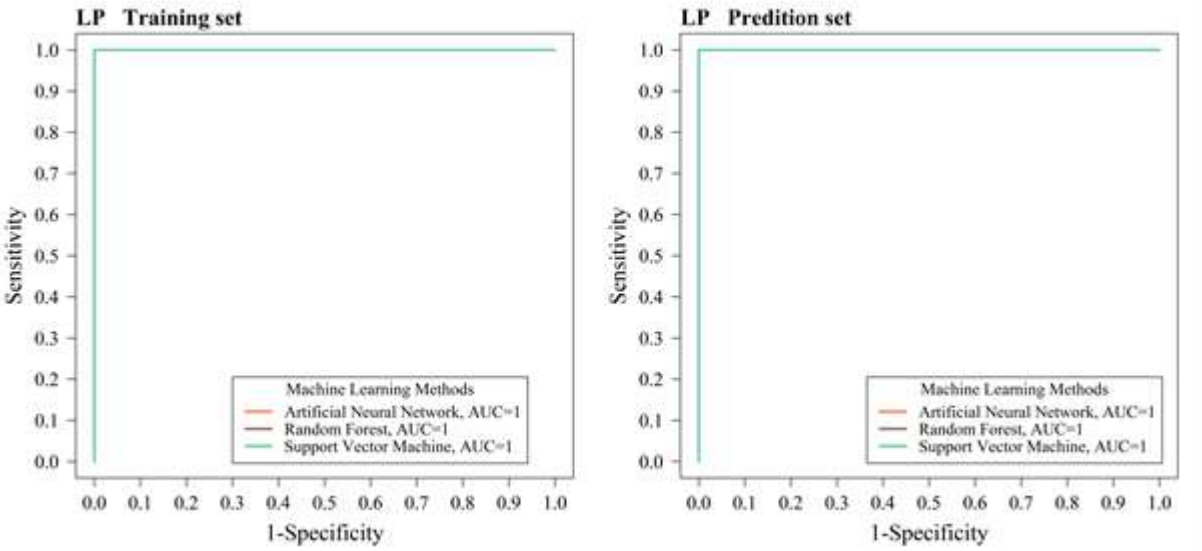
M.L Method	Μέσος όρος σκορ πρόβλεψης Θετικών δειγμάτων	Μέσος όρος σκορ πρόβλεψης Αρνητικών δειγμάτων
ANN	0.95	0.05
RF	0.86	0.14
LIBSVM	0.80	0.20

Πίνακας 7. Το κατώφλι των μεθόδων μηχανικής μάθησης για το υπολογιστικό μοντέλο LP και το σύνολο δειγμάτων δοκιμής.

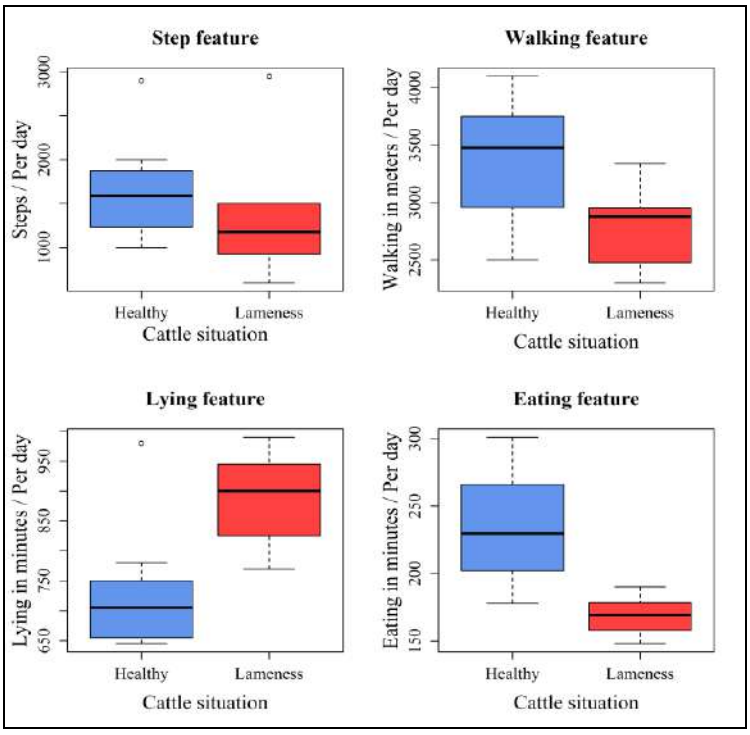
Υπολογιστικό μοντέλο LP και σύνολο δειγμάτων δοκιμής											
M.L Method	Threshold	TP	FP	TN	FN	Sensitivity	Specificity	Precision	Recall	Accuracy	AUC
ANN	0.5	2	0	2	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RF	0.5	2	0	2	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LIBSVM	0.4	2	0	2	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Πίνακας 8. Μέσος όρος σκορ πρόβλεψης των μεθόδων μηχανικής μάθησης του υπολογιστικού μοντέλου LP, για το σύνολο δειγμάτων δοκιμής.

M.L Method	Μέσος όρος σκορ πρόβλεψης Θετικών δειγμάτων	Μέσος όρος σκορ πρόβλεψης Αρνητικών δειγμάτων
ANN	0.975	0.025
RF	0.935	0.065
LIBSVM	0.755	0.245



Σχήμα 5. Διαγράμματα Sensitivity 1-Specificity των μεθόδων μηχανικής μάθησης για το υπολογιστικού μοντέλου LP και το σύνολο δειγμάτων εκπαίδευσης και δοκιμής.



Σχήμα 6. Box plots με τα τέσσερα χαρακτηριστικά από το σύνολο δειγμάτων εκπαίδευσης & δοκιμής.

Τα αποτελέσματα τα οποία παρατηρούνται στον Πίνακα 5 και Πίνακα 7 και απεικονίζονται στο Σχήμα 5 χαρακτηρίζονται αισιόδοξα. Ο λόγος είναι, ότι όσο αφορά το υπολογιστικό μοντέλο (LP, Πίνακας 1) και οι τρείς μέθοδοι μηχανικής μάθησης μπορούν να ξεχωρίσουν εξίσου καλά το σύνολο δειγμάτων εκπαίδευσης (Πίνακας 3) και το σύνολο δειγμάτων δοκιμής (Πίνακας 4). Η πιο σημαντική πληροφορία που προέκυψε από τα παραπάνω αποτελέσματα και από το Σχήμα 6, είναι ότι το τέταρτο χαρακτηριστικό «βόσκηση ανά ημέρα (min)», είναι το πιο δυνατό χαρακτηριστικό και βοηθάει και τις τρείς μεθόδους μηχανικής μάθησης να ξεχωρίσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα θετικά από τα αρνητικά δείγματα. Το δεύτερο πιο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι το «ξεκούραση ανά ημέρα (min)». Μια ακόμη σημαντική πληροφορία που προκύπτει είναι, ότι λόγο της χρήσης του τέταρτου ισχυρού χαρακτηριστικού παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση στη διαφορά των τιμών πρόβλεψης και από τις τρείς μεθόδους μηχανικής μάθησης (Πίνακας 6 και Πίνακας 8).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την απεικόνιση των σχημάτων και των πινάκων για το υπολογιστικό μοντέλο (LP, Πίνακας 1) είναι ότι, οι τρείς μέθοδοι μηχανικής μάθησης, Artificial Neural Network, Random Forest και Library for Support Vector Machines, μπορούν να διακρίνουν με ακρίβεια τα θετικά από τα αρνητικά δείγματα. Ο λόγος είναι τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν από το υπολογιστικό μοντέλο, κυρίως όμως τα δύο ισχυρά χαρακτηριστικά, «βόσκηση ανά ημέρα (min)» και «ξεκούραση ανά ημέρα (min)» τα οποία ενισχύουν σημαντικά τον αλγόριθμο ώστε να διακρίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα θετικά από τα αρνητικά δείγματα.

Ακόμη πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος επιστρέφει ασυνήθιστα μεγάλες τιμές στο σετ δοκιμής, επειδή το σετ εκπαίδευσης και δοκιμής είναι μικρό σε μέγεθος. Μελλοντικός στόχος, είναι η δημιουργία μιας μεγάλης βάσης δεδομένων με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά και να μελετηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η αποτελεσματικότητα τους, σε

ότι αφορά τον ακριβή διαχωρισμό των υγιών βοοειδών σε σχέση με τα βοοειδή που πάσχουν από χωλότητα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αποτέλεσμα της παρούσας μελέτης ήταν η δημιουργία μιας νέας ολοκληρωμένης και αξιόπιστης υπολογιστικής ανάλυσης για τον εντοπισμό της χωλότητας σε βοοειδή, που βασίζεται σε μηχανική μάθηση. Δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο, (LP, Πίνακας 1) και χρησιμοποιήθηκαν τρείς μέθοδοι μηχανικής μάθησης, Artificial Neural Network, Random Forest και Library for Support Vector Machines, οι τρείς μέθοδοι μηχανικής μάθησης μπορούν να ξεχωρίσουν εξίσου καλά το σύνολο δειγμάτων. Το υπολογιστικό μοντέλο χρησιμοποιεί τέσσερα ισχυρά χαρακτηριστικά, «βήματα ανά ημέρα (αδιαστ.)», «περπάτημα ανά ημέρα (m)», «ξεκούραση ανά ημέρα (min)» και «βόσκηση ανά ημέρα (min)», για να διαχωρίσει τα θετικά από τα αρνητικά δείγματα. Στόχος των τεσσάρων χαρακτηριστικών ήταν να βοηθήσουν τον αλγόριθμο να ξεχωρίσει τα δείγματα όσο το δυνατόν καλύτερα. Το τελικό αποτέλεσμα που προέκυψε είναι αισιόδοξο, διότι ο αλγόριθμος μπορεί και αναγνωρίζει εξίσου καλά τα θετικά δείγματα (υγιή), όσο και τα αρνητικά δείγματα (μη-υγιή), όπως προκύπτει από τη μεγάλη αύξηση της διαφοράς των σκορ πρόβλεψης για τα θετικά από τα αρνητικά δείγματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο νέος αλγόριθμος να μπορεί να ξεχωρίζει με ακρίβεια τα βοοειδή που είναι υγιή από τα πάσχοντα με χωλότητα βοοειδή.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Athanasopoulos, A., & Dimou, A. (2011). GPU acceleration for support vector machines. *WIAMIS 2011: 12th …*, (April). Retrieved from http://repository.tudelft.nl/view/conferencepapers/uuid:6716875f-5b40-4e7b-9f9d-24a85c02ee3b/

Booth, C. J., Warnick, L. D., Grohn, Y. T., Maizon, D. O., Guard, C. L., & Janssen, D. (2004). Effect of lameness on culling in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *87*(12), 4115–4122. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73554-7

Bruijnis, M. R., Hogeveen, H., & Stassen, E. N. (2010). Assessing economic consequences of foot disorders in dairy cattle using a dynamic stochastic simulation model. *Journal of Dairy Science*, *93*(6), 2419–2432.

Chapinal, N., de Passillé, a M., Weary, D. M., von Keyserlingk, M. a G., & Rushen, J. (2009). Using gait score, walking speed, and lying behavior to detect hoof lesions in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *92*(9), 4365–4374. https://doi.org/10.3168/jds.2009-2115

Coopersmith, E. J., Minsker, B. S., Wenzel, C. E., & Gilmore, B. J. (2014). Machine learning assessments of soil drying for agricultural planning. *Computers and Electronics in Agriculture*, *104*, 93–104. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.04.004

Dutta, R., Smith, D., Rawnsley, R., Bishop-Hurley, G., Hills, J., Timms, G., & Henry, D. (2015). Dynamic cattle behavioural classification using supervised ensemble classifiers. *Computers and Electronics in Agriculture*, *111*, 18–28. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.002

Frondelius, L., Kajava, S., Lindeberg, H., Mononen, J., & Pastell, and M. (2015). Measuring the Effect of Hoof Lesions on Cow ' s Walking , Lying and Eating Behavior, (September).

Gaber, T., Tharwat, A., Hassanien, A. E., & Snasel, V. (2016). Biometric cattle identification approach based on Weber's Local Descriptor and AdaBoost classifier. *Computers and Electronics in Agriculture*, *122*, 55–66. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.022

Holzhauer, M., Middelesch, H., Bartels, C., & Frankena, K. (2004). Evaluation of a Dutch claw health scoring system in dairy cattle. In *Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants*. Retrieved from email: m.holzhauer@gdvdieren.nl\nhttp://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=lah&AN=20043084821&site=ehost-live

Ito, K., von Keyserlingk, M. a G., Leblanc, S. J., & Weary, D. M. (2010). Lying behavior as an indicator of lameness in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *93*(8), 3553–3560. https://doi.org/10.3168/jds.2009-2951

Meher, P. K., Sahu, T. K., Rao, A. R., & Wahi, S. D. (2016). Discriminating coding from non-coding regions based on codon structure and methylation-mediated substitution: An application in rice and cattle. *Computers and Electronics in Agriculture*, *129*, 66–73. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.09.013

Miguel-Pacheco, G. G., Kaler, J., Remnant, J., Cheyne, L., Abbott, C., French, A. P., … Huxley, J. N. (2014). Behavioural changes in dairy cows with lameness in an automatic milking system. *Applied Animal Behaviour Science*, *150*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2013.11.003

Mohammadi, K., Shamshirband, S., Motamedi, S., Petković, D., Hashim, R., & Gocic, M. (2015). Extreme learning machine based prediction of daily dew point temperature. *Computers and Electronics in Agriculture*, *117*, 214–225. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.008

Nahvi, B., Habibi, J., Mohammadi, K., Shamshirband, S., & Al Razgan, O. S. (2016). Using self-adaptive evolutionary algorithm to improve the performance of an extreme learning machine for estimating soil temperature. *Computers and Electronics in Agriculture*, *124*, 150–160. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.025

Pantazi, X. E., Moshou, D., Alexandridis, T., Whetton, R. L., & Mouazen, A. M. (2016). Wheat yield prediction using machine learning and advanced sensing techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*, *121*, 57–65. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.018

Pastell, M., Kujala, M., Aisla, A. M., Hautala, M., Poikalainen, V., Praks, J., … Ahokas, J. (2008). Detecting cow's lameness using force sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, *64*(1), 34–38. https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.007

Patil, A. P., & Deka, P. C. (2016). An extreme learning machine approach for modeling evapotranspiration using extrinsic inputs. *Computers and Electronics in Agriculture*, *121*, 385–392. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.016

Riedmiller, M., & Braun, H. (1993). A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. *IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings*, *1993–January*, 586–591. https://doi.org/10.1109/ICNN.1993.298623

Schlageter-Tello, A., Bokkers, E. A. M., Koerkamp, P. W. G. G., Van Hertem, T., Viazzi, S., Romanini, C. E. B., … Lokhorst, K. (2014). Manual and automatic locomotion scoring systems in dairy cows: A review. *Preventive Veterinary Medicine*. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.06.006

Song, X., Leroy, T., Vranken, E., Maertens, W., Sonck, B., & Berckmans, D. (2008). Automatic detection of lameness in dairy cattle-Vision-based trackway analysis in cow's locomotion. *Computers and Electronics in Agriculture*, *64*(1), 39–44. https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.016

Tasch, U., & Rajkondawar, P. G. (2004). The development of a SoftSeparator™ for a lameness diagnostic system. *Computers and Electronics in Agriculture*, *44*(3), 239–245. https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.04.001

Viazzi, S., Bahr, C., Van Hertem, T., Schlageter-Tello, A., Romanini, C. E. B., Halachmi, I., … Berckmans, D. (2014). Comparison of a three-dimensional and two-dimensional camera system for automated measurement of back posture in dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture*, *100*, 139–147. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.11.005

Walker, S. L., Smith, R. F., Routly, J. E., Jones, D. N., Morris, M. J., & Dobson, H. (2008). Lameness, Activity Time-Budgets, and Estrus Expression in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, *91*(12), 4552–4559. https://doi.org/10.3168/jds.2008-1048

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΕΣΙΩΝ GOOGLE-MAPS® ΓΙΑ ΕΝΤΟΣ ΑΓΡΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ

Δ. Κατικαρίδης✉, Δ. Μπεχτσής, Κ. Λιάκος, Δ. Βλάχος & Δ. Μπόχτης
Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης – ΕΚΕΤΑ, Ινστιτούτο Έρευνας & Τεχνολογίας Θεσσαλίας – iBO, 10ο χλμ. Θεσσαλονίκης-Θέρμης, BALCAN Center, Κτήριο Δ, 57001, Θεσσαλονίκη,
✉dkatikaridis@gmail.com

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η ανάπτυξη λογισμικού σταδιακής προσομοίωσης για τον τομέα εντός αγρού μεταφορών. Το νέο εργαλείο συνδυάζει τεχνικές καθοδήγησης δορυφορικών συστημάτων που βασίζονται στην χρήση των υπηρεσιών Google Maps σε συνδυασμό με τη χρήση αλγορίθμων σε επίπεδο κεντρικού εξυπηρετητή, επιτρέποντας έτσι την εφαρμογή των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων στην άμεση καθοδήγηση ενός φυσικού οχήματος. Το νέο εργαλείο σε αντίθεση με τα ήδη υπάρχοντα, συνδέει εύκολα το προσομοιωμένο περιβάλλον με τον φυσικό κόσμο, είναι φιλικό ως προς τον χρήστη και επιτρέπει την παροχή εναλλακτικών διαδρομών για την πλοήγηση των αγροτικών οχημάτων UGV σε ιδιωτικούς αγροτικούς χώρους που παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες.

Λέξεις κλειδιά: UGV, λογισμικό, πλοήγηση, προσομοίωση

A GOOGLE-MAPS® BASED SOFTWARE TOOL FOR IN-FIELD LOGISTICS

D. Katikaridis✉, D. Bectsis, K. Liakos, D. Vlachos & D. Bochtis
Centre for Research & Technology Hellas – CERTH, Institute for Research and Technology Thessaly – iBO, 10th km Thessaloniki - Thermi Rd, BLDG D, 57001, Thessaloniki, Greece,
✉dkatikaridis@gmail.com

ABSTRACT

This paper presents a new progressive simulation tool for in-field logistics. The tool combines GPS coordinates enabled by the Google Maps service and routing algorithms executed on a server level. This approach leads to direct guidance of a physical vehicle through simulation. The tool easily connects the simulated environment with the physical world, is user-friendly, and allows for the assessment of alternative routes for agricultural UGVs navigation in customized field areas under various morphological features.

Keywords: UGV, software, navigation, simulation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το άρθρο γίνεται η παρουσίαση ενός νέου λογισμικού το οποίο επιτρέπει τους αγρότες να ελέγχουν την κατάσταση των χωραφιών τους και να μπορούν να καθοδηγήσουν με μεγάλη ακρίβεια ένα αυτόνομο σύστημα που σχετίζεται στον τομέα των εσωτερικών αγρό μεταφορών (IAL). Το νέο λογισμικό, παρέχει μια διαδικτυακή διεπαφή για τον εντοπισμό των φυσικών οντοτήτων που μπορεί να βρίσκονται στο χωράφι (όπως, τα όρια του χωραφιού, εμπορεύματα και οχήματα) και προσομοιώνει μια επιθυμητή διαδρομή για να καθοδηγήσει ένα γεωργικό μηχάνημα στο να εκτελέσει με επιτυχία συγκεκριμένες λειτουργίες.

Οι τεχνολογίες του διαδικτύου βοηθούν στην δημιουργία καινοτόμων υπολογιστικών εφαρμογών και εξειδικευμένων αυτοματισμών σε υπολογιστικό περιβάλλον τύπου "cloud" (Sarangi, Umadikar and Kar, 2016) και ως εκ τούτου δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για την εξέλιξη του αγροτικού τομέα (Ruiz-Canales and Ferrández-Villena, 2015).

Πιο συγκεκριμένα στον τομέα των εντός αγρού μεταφορών γίνεται χρήση αυτόνομων οχημάτων (unmanned ground vehicles - UGVs) με αισθητήρες με στόχο, τον εντοπισμό της ποιότητας του εδάφους, τον ψεκασμό φυτοφάρμακων για τον έλεγχο των ζιζανίων, την λίπανση του εδάφους ή την αυτόματη φόρτωση και εκφόρτωση αγαθών συγκομιδής στα αντίστοιχα σημεία φορτώματος και μεταφοράς.

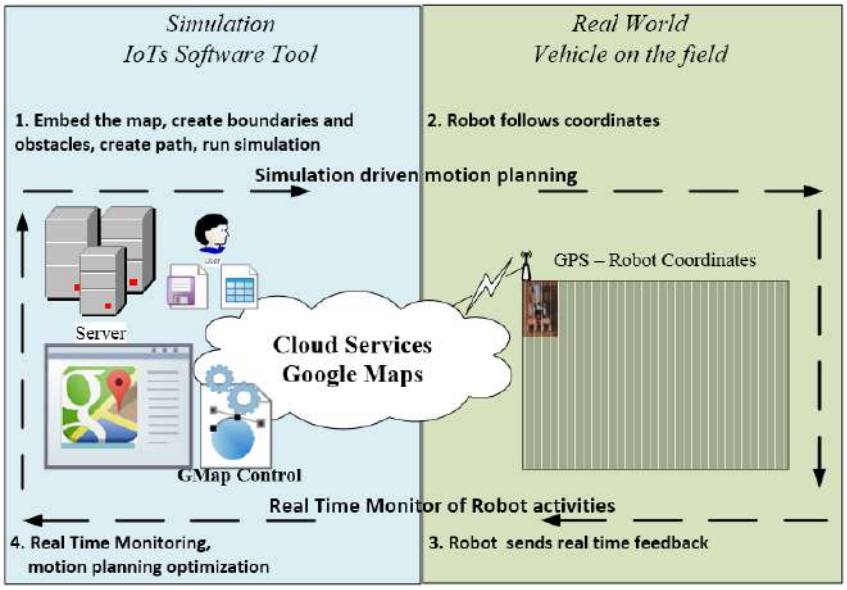
Τα UGVs έχουν τη δυνατότητα να κινούνται ελεύθερα στο χώρο και να πλοηγούνται στον αγρό, σε συνδυασμό με οπτικούς αισθητήρες όπως, Light Detection And Ranging LiDAR, αισθητήρες θέσης - GPS, ελεγκτές (Gomez-gil et al., 2011), αισθητήρες καθοδήγησης αδράνειας, όπως επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια.

Οι ρομποτικές λύσεις προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε ότι αφορά τις γεωργικές εργασίες (Bechar and Vigneault, 2016), αλλά ακόμα ο ρόλος τους είναι περιορισμένος (Xiang, Jiang and Ying, 2014). Κυρίως, λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας των απαιτήσεων που χρειάζονται για την μοντελοποίηση τους. Απαιτήσεις που προκύπτουν από τα φυσικά αίτια που βρίσκονται στο περιβάλλον (Bechar and Vigneault, 2017). Μερικά φυσικά αίτια που επηρεάζουν την πολυπλοκότητα είναι, η ποικιλομορφία των σχημάτων, το μέγεθος, φρούτα τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή ποικιλομορφία σε βαθμό που επηρεάζουν τόσο πολύ την συμπεριφορά των ρομποτικών μηχανημάτων που δεν μπορούν να τα καθορίσουν. Οι παραπάνω προκλήσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με την χρήση αυτόνομων οχημάτων, γεγονός το οποίο θα προήγαγε την αειφόρο γεωργία (Bechtsis et al., 2017). Οι κύριοι λόγοι οι οποίοι περιορίζουν την χρήση των αυτόνομων οχημάτων στην γεωργία, έγκειται στην ανεπαρκείς παραγωγή καθώς και σε οικονομικούς λόγους, λόγω της ελάχιστης χρήσης των UGV από τους αγρότες κάθε χρόνο (Bechar and Vigneault, 2016).

Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψιν, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση ενός νέου λογισμικού καθημερινής χρήσης για την επίλυση γεωργικών εργασιών που σχετίζονται με την πλοήγηση αυτόνομων συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα το νέο λογισμικό μπορεί μέσω διαδικτυακού περιβάλλοντος να εντοπίζει τα φυσικά εμπόδια και μη, τα οποία βρίσκονται σε μια περιοχή. Ακόμη, κάνοντας χρήση των υπηρεσιών από τους χάρτες της Google, το λογισμικό παρέχει στον χρήστη την κάτοψη του εδάφους, τις συντεταγμένες που βρίσκονται των αντικειμένων στο χώρο, καθώς και παρακολούθηση του χώρου σε αληθινό χρόνο. Τέλος με την βοήθεια των απόλυτων συντεταγμένων γίνεται χρήση εξειδικευμένων αλγορίθμων, για την καθοδήγηση και την προσομοίωση του οχήματος.

2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Στην συγκεκριμένη έρευνα παρουσιάζεται ένα εργαλείο προσομοίωσης το οποίο συνδυάζει τεχνικές κινήσεως GPS μέσω των υπηρεσιών των χαρτών της Google, μαζί με αλγορίθμους δρομολόγησης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την καθοδήγηση των UGV σε αγροτικές περιοχές. Στο σχήμα 1, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος.



Σχήμα 1. Η αρχιτεκτονική του συστήματος.

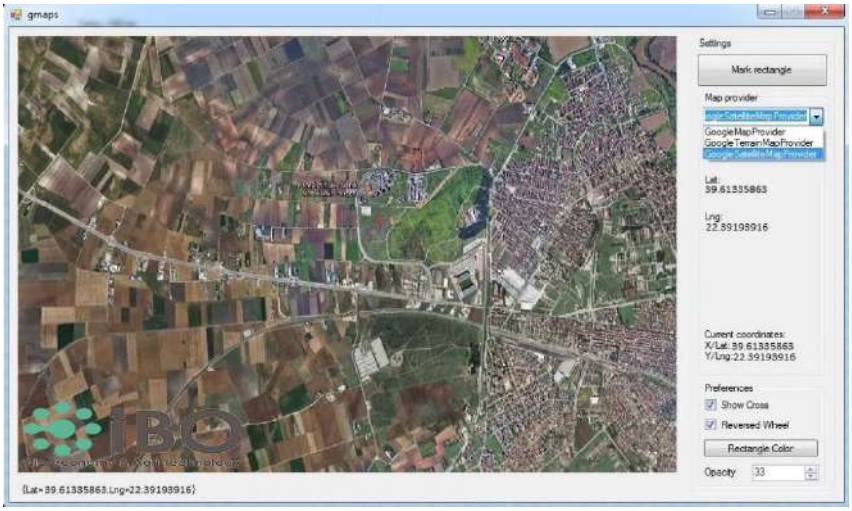
Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα μπορεί να προσομοιώσει τις αληθινές συντεταγμένες και να δημιουργήσει ένα περιβάλλον προσομοίωσης, ίδιο με τις πραγματικές συνθήκες.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα δημιουργήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C#, σε περιβάλλον Microsoft Visual Studio 2013. Το πρόγραμμα επιτρέπει την είσοδο συγκεκριμένων οχημάτων, εμποδίων και φορτίων. Ακόμη στο πρόγραμμα ενσωματώνονται χάρτες μέσο του λογισμικού GreatMaps. Το GreatMaps λειτουργεί ως ενδιάμεσο λογισμικό το οποίο δίνει την δυνατότητα σε λογισμικά, να χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες που προσφέρονται από του ψηφιακούς χάρτες όπως, (Google, ArcGIS, Bing, OpenStreetMap, Yahoo και πολλά άλλα) και των διαφόρων σε είδος χαρτών όπως, (πολιτικοί χάρτες, χάρτες εδάφους, χάρτες μεταφοράς, δορυφορικοί χάρτες). Τέλος, για την προσομοίωση της κίνησης ενός εικονικού UGV, εφαρμόζονται οι αλγόριθμοι δρομολόγησης, οι οποίοι καθοδηγούν το προσομοιωμένο όχημα στο προσομοιωμένο περιβάλλον. Ακόμη για κάθε ένα βήμα που εκτελείται στο εικονικό περιβάλλον, γίνεται η αποθήκευση των συντεταγμένων X,Y σε ένα αρχείο, το οποίο μπορεί να δοθεί ως είσοδος σε ένα αληθινό UGV και να κινηθεί με βάση τις παραπάνω συντεταγμένες.

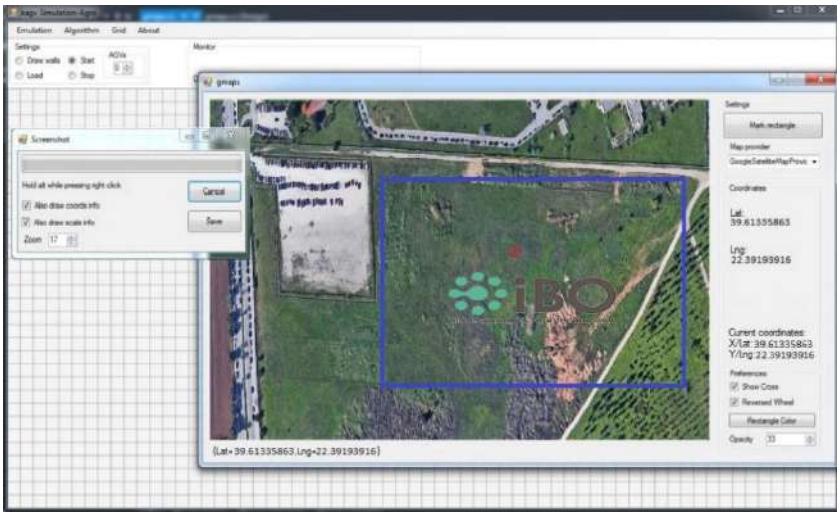
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Αρχικά, το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης της υπηρεσίας Google Maps, ώστε να είναι σε θέση να παρέχει τόσο την κάτοψη του φυσικού χώρου κίνησης του οχήματος όσο και τις συντεταγμένες της απόλυτης θέσης του UGV. Οι συντεταγμένες σε μεταγενέστερη φάση παρέχονται στο όχημα ως είσοδος του αισθητήρα GPS για τη εύρεση της επιθυμητής διαδρομής. Ο χρήστης είναι σε θέση να εντοπίσει αρχικά την ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 2), έπειτα να επιλέγει την συγκεκριμένη αγροτική περιοχή που επιθυμεί (Σχήμα 3) και τέλος να εισάγει την εικόνα του χωραφιού της επιλογής του στο

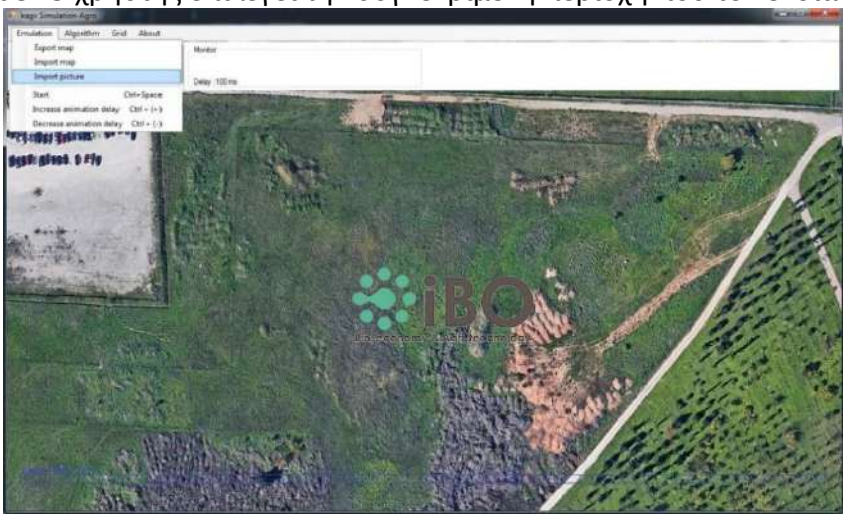
εργαλείο προσομοίωσης για περαιτέρω επεξεργασία (Σχήμα 4). Ακόμη εξάγονται στο εργαλείο μέσω των υπηρεσιών Google Maps οι απόλυτες τιμές των συντεταγμένων μήκους και πλάτους για τα όρια της επιλεγμένης περιοχής.



Σχήμα 2. Ο χρήστης εντοπίζει την ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, στους Χάρτες Google.



Σχήμα 3. Ο χρήστης επιλέγει την συγκεκριμένη περιοχή που τον ενδιαφέρει.



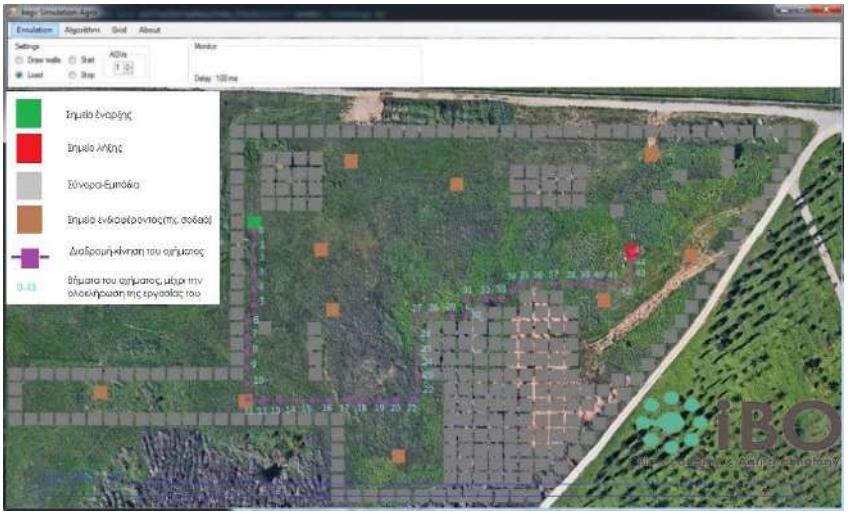
Σχήμα 4. Ο χρήστης αποθηκεύει στο νέο εργαλείο την επιλεγμένη περιοχή που τον ενδιαφέρει για μελλοντική χρήση.

Σε δεύτερη φάση ο χρήστης παρέχει ανατροφοδότηση και συνεργάζεται με το σύστημα, με την επισήμανση σημείων πάνω στο ενσωματωμένο στρώμα πλέγματος που παρέχει το εργαλείο και τις επιλογές αυτές τις εφαρμόζει στην επιλεγμένη εικόνα που απεικονίζει τον αγροτικό χώρο. Τα επιλεγμένα σημεία υποδεικνύουν τα όρια του χώρου, δείχνουν την θέση από πιθανά εμπόδια στο χώρο, επισημαίνουν την ακριβή τοποθεσία αγαθών τα οποία πρέπει να μεταφερθούν και τέλος δείχνουν την αρχική και την τελική θέση του UGV (Σχήμα 5). Κάθε σημείο στο πλέγμα μπορεί να έχει διαφορετικές ιδιότητες που περιγράφουν τα αντικείμενα του φυσικού κόσμου όπως, αντικείμενο φραγής για την δημιουργία των ορίων του χώρου, αντικείμενο εμπόδιο για την επισήμανση των εμποδίων στο χώρο και θέση έναρξης και λήξης του UGV. Ακόμη, κάθε κελί στο πλέγμα διαθέτει τις αντίστοιχες συντεταγμένες γεωγραφικού πλάτους και μήκους που διαμορφώνονται από τις αρχικές απόλυτες συντεταγμένες. Αυτή η απεικόνιση επιτρέπει την απόλυτη τοποθέτηση όλων των σημείων ενδιαφέροντος και παρέχει έναν απόλυτο μηχανισμό εντοπισμού του UGV εντός του χώρου. Χρησιμοποιώντας αυτά τα αντικείμενα ο χρήστης δημιουργεί έναν χάρτη με την διάταξη του χώρου και οριοθετεί την περιοχή που θα ενεργεί το UGV.

Σε τρίτη φάση, το UGV είναι σε θέση να πλοηγηθεί στην ενεργή περιοχή ακολουθώντας την επιχειρησιακή λογική που του έχει δοθεί μέσα από το εργαλείο. Τέλος, οι επιθυμητές λειτουργίες και μετρήσεις απόδοσης λαμβάνονται υπόψη για να γίνει η τελική αξιολόγηση της εκτέλεσης των εργασιών.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ένα επιλεγμένο σενάριο μεταφοράς αγαθών σε προκαθορισμένο χώρο εξετάζεται ως μελέτη περίπτωσης. Το φορτίο τοποθετείται σε συγκεκριμένα σημεία στην ενεργή περιοχή του AGV και γίνεται αίτημα μεταφοράς τους προς σε αυτό. Το UGV αρχίζει από το σημείο έναρξης και δημιουργεί μια βέλτιστη διαδρομή χρησιμοποιώντας μια παραλλαγή του αλγορίθμου A*. Το UGV φτάνει στο φορτίο και έπειτα το μεταφέρει στο σημείο λήξης (Σχήμα 5). Η διαδικασία θα συνεχιστεί μέχρι να μεταφερθούν όλα τα διαθέσιμα φορτία. Κατά την διάρκεια κίνησης του UGV οι απόλυτες συντεταγμένες της διαδρομής αποθηκεύονται σε μια λίστα με σκοπό να καθοδηγηθεί το κανονικό UGV. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή μπορεί να λειτουργήσει και αντίστροφα υπό την έννοια ότι κατά τη διάρκεια της κίνησης του UGV στο χωράφι, η θέση του UGV μπορεί να παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο από το εργαλείο-λογισμικό.



Σχήμα 5. Ο χρήστης καθορίζει τα χαρακτηριστικά του χωραφιού.

Το λογισμικό προτείνει τη χρήση διαδρομών για την πλοήγηση των αγροτικών UGV σε εξωτερικούς χώρους. Όπως αναλύθηκε οι υπηρεσίες χαρτών της Google μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εικονικό περιβάλλον το οποίο θα συνδέσει το περιβάλλον προσομοίωσης με το φυσικό κόσμο. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν στο περιβάλλον προσομοίωσης μπορούν να δοκιμαστούν στο περιβάλλον προσομοίωσης και σε δεύτερο χρόνο να καθοδηγήσουν το όχημα στο φυσικό του περιβάλλον. Οι απόλυτες θέσεις των συντεταγμένων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν ανατροφοδότηση σε φυσικές οντότητες, να δημιουργήσουν τη διαδρομή που πρέπει να κινηθεί το UGV, ή τέλος, να ενημερώσουν το χρήστη για την ακριβή θέση του οχήματος στον πραγματικό κόσμο και να καταγράφουν κάθε κίνηση του UGV μέσω του προτεινόμενου λογισμικού.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα έρευνα συμβάλλει στον τομέα της έρευνας των επιχειρήσεων, επιτρέποντας την άμεση εφαρμογή των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων για την καθοδήγηση ενός φυσικού οχήματος. Σε αντίθεση με τα ήδη υπάρχοντα εξελιγμένα εργαλεία, ο νέος μηχανισμός πλοήγησης είναι φιλικός προς το χρήστη και μπορεί να πολύ εύκολα να εφαρμοστεί για εξωτερική πλοήγηση.

Το εργαλείο παρέχει μια διεπαφή σε πραγματικό χρόνο στη μηχανή των χαρτών της Google για να χειριστεί τα όρια του πεδίου, να χαρτογραφήσει τις συντεταγμένες των εμποδίων και να αποκλείσει συγκεκριμένες περιοχές από τη διαδρομή του οχήματος. Χρησιμοποιείται σε πραγματικό χρόνο η καταγραφή της τοποθεσίας του οχήματος για την παρακολούθηση της κατάστασης του και για την παροχή ανατροφοδότησης πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο στον αλγόριθμο καθοδήγησης (Edwards et al., 2016; Zhe et al., 2015).

Το προτεινόμενο εργαλείο θα μπορούσε να εξελιχθεί σε ένα εμπορικό σύστημα πλοήγησης για γεωργικά μηχανήματα το οποίο θα παρέχει ένα φιλικό περιβάλλον στον χρήστη καθώς και εξελιγμένους αλγορίθμους για τον έλεγχο της καθοδήγησης της κίνησης λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη όλους τους κατάλληλους περιορισμούς που υπάρχουν στον γεωργικό τομέα.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bechar, A. and Vigneault, C. (2016) Agricultural robots for field operations: Concepts and components. Biosystems Engineering, 149, p.94-111.

Bechar, A. and Vigneault, C. (2017) Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. Biosystems Engineering, 153, p.110-128.

Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D. and Iakovou, E. (2017) Sustainable supply chain management in the digitalisation era: The impact of Automated Guided Vehicles. Journal of Cleaner Production, 142, Part 4, p.3970-3984.

Edwards, G.T.C., Hinge, J., Skou-nielsen, N. (2016). Route planning evaluation of a prototype optimised infield route planner for neutral material flow agricultural operations. ScienceDirect, 3, 3–11.

Gomez-Gil, J., Alonso-Garcia, S., Gómez-Gil, F.J., Stombaugh, T., Engineering, T. (2011) A simple method to improve autonomous GPS positioning for Tractors. Sensors, 11, p.5630–5644.

Ruiz-Canales, A. and Ferrández-Villena, M., 2015. New proposals in the automation and remote control of water management in agriculture: Agromotic systems. Agricultural Water Management, 151, pp.1-3.

Sarangi, S., Umadikar, J. and Kar, S., 2016. Automation of Agriculture Support Systems using Wisekar: Case study of a crop-disease advisory service. Computers and Electronics in Agriculture, 122, pp.200-210.

Xiang, R., Jiang, H. and Ying Y. (2014) Recognition of clustered tomatoes based on binocular stereo vision. Computers and Electronics in Agriculture, 106, p.75-90.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΔΙΕΠΑΦΗΣ ΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (UGV)

Β. Μωυσιάδης✉, Δ. Μπεχτσής, Κ. Λιάκος, Δ. Βλάχος & Δ. Μπόχτης
Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης – ΕΚΕΤΑ, Ινστιτούτο Έρευνας & Τεχνολογίας Θεσσαλίας – iBO, 10ο χλμ. Θεσσαλονίκης-Θέρμης, BALCAN Center, Κτήριο Δ, 57001, Θεσσαλονίκη,
✉v.s.moisiadis@gmail.com

Περίληψη

Οι γεωργικές εργασίες εμφανίζουν εγγενείς δυσκολίες, όπως η μορφολογία του εδάφους και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι δυσκολίες αυτές ενισχύονται και από τον ανθρώπινο παράγοντα ως σχεδιαστή και εκτελεστή των διαφόρων εργασιών. Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να συμβάλλει στις λειτουργίες της αειφόρου γεωργίας ακριβείας παρέχοντας ένα καινοτόμο εργαλείο προγραμματισμού και ελέγχου πραγματικού χρόνου για την πλοήγηση των αγροτικών οχημάτων σε προσαρμοσμένες γεωργικές εκτάσεις και κάτω από διαφοροποιημένες επιχειρησιακές συνθήκες. Το υπό ανάπτυξη εργαλείο παρέχει, σε πρώτη φάση ανεξάρτητη χαρτογράφηση του εδάφους σε πραγματικό χρόνο, σε δεύτερη φάση είναι σε θέση να αποτυπώσει την καθολικά βέλτιστη διαδρομή των μηχανημάτων για την εκτέλεση των εργασιών του και τέλος διατηρεί την τροχιά της βέλτιστης διαδρομής λαμβάνοντας υπόψη το εκάστοτε τοπικό βέλτιστο κατά τη διάρκεια της κίνησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και την αύξηση των επιπέδων ασφαλείας στις γεωργικές εργασίες.

Λέξεις κλειδιά: ROS, SLAM, γεωργία ακριβείας

DEVELOPMENT OF VIRTUAL INTERFACE FOR THE DESIGN AND THE CONTROL NAVIGATION OF AUTONOMOUS AGRICULTURAL VEHICLES (UGV)

V. Moisiadis✉, D. Bechtsis, K. Liakos, D. Bochtis & D. Vlachos
Centre for Research & Technology Hellas – CERTH, Institute for Research and Technology Thessaly – iBO, 10th km Thessaloniki - Thermi Rd, BLDG D, 57001, Thessaloniki, Greece,
✉v.s.moisiadis@gmail.com

ABSTRACT

Productivity of agricultural field operations is affected by inherent difficulties, such as land morphology and operational uncertainties. Moreover, significant problems derive from the human factor. This paper contributes to precision farming operations by providing a novel tool for the real-time planning and control for agricultural machinery UGV navigation in agricultural fields under various operational uncertainties. The tool is able to provide, in a first stage, independent mapping of a field at hand in real time, in a second stage it generates a globally optimal path for the execution of the operations, and finally is able to keep track of the optimal path by taking into account the each-time corresponding local optimal path during the motion execution. The implementation of the tool provides could result in the reduction of the energy consumption and the increase of the safety levels during field operations.

Keywords: ROS, SLAM, precision farming

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα έρευνα ασχολείται με την διαχείριση και τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο των δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται από αυτόνομα οχήματα (unmanned ground vehicles UGVs) σε γεωργικές εκτάσεις και κάτω από διάφορες επιχειρησιακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η παρουσίαση ενός εργαλείου για την πλοήγηση των UGVs σε πραγματικό χρόνο με στόχο την βελτιστοποίηση της απόδοσης των λειτουργιών τους καθώς και την μεγιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής σε ένα ασφαλές περιβάλλον λειτουργίας.

Οι εργασίες στο πεδίο της γεωργίας αναμφίβολα εξαρτώνται από εγγενείς δυσκολίες, όπως, παραδείγματος χάρη, τη μορφολογία του εδάφους και τις περιβαλλοντικές αβεβαιότητες (ασταθείς καιρικές συνθήκες κινούμενα και σταθερά εμπόδια, κ.α.). Ωστόσο, η έλλειψη της ακρίβειας στο χειρισμό των γεωργικών μηχανημάτων από τους αγρότες καθώς και η έλλειψη της κατάλληλης ανάδρασης μπορεί να οδηγήσει σε ανθρώπινα λάθη, όπως η απώλεια της ανθρώπινης αντίληψης (Walker et al., 2008), την μείωση των αντανακλαστικών (Finomore et al., 2009), τον εφησυχασμό (Kaber and Endsley, 2004), ή την υποβάθμιση των ικανοτήτων (Billings et al., 1996). Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψιν αντιλαμβανόμαστε ότι τα ημι-αυτόνομα ή τα αυτόνομα οχήματα τα οποία ελέγχονται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές (Ho, Liu and Yih, 2012), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση των παραπάνω δυσκολιών καθώς και για την αύξηση της απόδοσης των εργασιών στη γεωργία (Zheng, Negenborn and Lodewijks et al., 2016).

Πιο συγκεκριμένα, τα UGVs είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για την αποτελεσματική εκτέλεση των στρατηγικών στον τομέα της διαχείρισης καθώς και στον τομέα των γεωργικών λειτουργιών, δεδομένου ότι τα UGVs: (i) παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις παραμέτρους του χωραφιού, (ii) χειρίζονται καλύτερα την αστάθεια στην απόδοση, (iii) μπορούν να λειτουργούν 24/7 με αξιοπιστία, (iv) καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια σε σχέση με την συμβατική ανθρώπινη οδήγηση των γεωργικών μηχανημάτων, (v) συνάδουν με την εξέλιξη της ευφυούς γεωργίας και τέλος (vi) βελτιώνουν τα επίπεδα ασφαλείας στο χωράφι.

Εκτός από πλεονεκτήματα υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα σε ότι αφορά την χρήση των αυτόνομων μηχανημάτων στο κομμάτι της γεωργίας. Σύμφωνα με την έρευνα των (Bochtis and Sørensen, 2009) η χρήση αυτόνομων μηχανισμών στο πεδίο της γεωργίας μπορεί να φέρει δυσκολίες τόσο λόγω της γεωμετρίας του χωραφιού όσο και λόγω των μορφολογικών ιδιαιτεροτήτων του. Ακόμη δυσκολίες δημιουργούνται από περιβαλλοντικές αβεβαιότητες, όπως οι μεταβλητές καιρικές συνθήκες καθώς και από τα τυχαία εμπόδια και αντικείμενα που βρίσκονται στο πεδίο (Bochtis, Sørensen and Busato, 2014). Λόγω των παραπάνω απαιτούνται αυτοματοποιημένα συστήματα με δυνατότητες προγραμματισμού και ελέγχου των πληροφοριών τα οποία θα προσδιορίζουν και θα λαμβάνουν εναλλακτικές αποφάσεις στο κομμάτι της πλοήγησης και θα βασίζονται σε ανατροφοδότηση πραγματικού χρόνου λαμβάνοντας υπόψιν τους, δεδομένα που αφορούν την κατάσταση του εδάφους και των καλλιεργειών (Wulfsohn et al., 2012). Ωστόσο, τα ήδη υπάρχοντα συστήματα δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα όπως, χάρτες με χαμηλή ανάλυση, χαμηλή ακρίβεια προσδιορισμού θέσης, χαμηλού βαθμού διαδικασία αυτοματοποίησης και εσφαλμένες ή ελλιπείς μετρήσεις.

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι η παρουσίαση ενός συστήματος αποφάσεων για τον προγραμματισμό και τον έλεγχο των αγροτικών UGVs με στόχο την εκτέλεση εργασιών στο τομέα της γεωργίας ακριβείας με όσο το δυνατό βέλτιστο τρόπο. Η κύρια ιδέα της έρευνας βασίζεται στην υπόθεση, ότι μια αγροτική περιοχή παρουσιάζει εμπόδια

(τυχαία και στατικά) τα οποία ένα UGV θα πρέπει να εντοπίσει και να υπολογίσει εκ νέου τη βέλτιστη διαδρομή για την εκτέλεση των αγροτικών εργασιών. Ακόμη γίνεται θεωρητική αναφορά για την δημιουργία λογισμικού αποφάσεων ενός UGV με στόχο την αναγνώριση του χώρου, σε πραγματικό χρόνο και την βέλτιστη καθοδήγηση του, εκτελώντας τις αγροτικές εργασίες με μεγαλύτερη ακρίβεια.

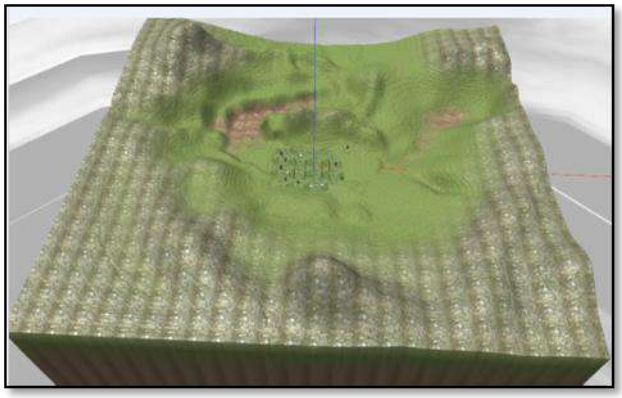
2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιείται το λογισμικό ανοιχτού κώδικα Robot Operating System (ROS) για προσομοίωση αυτοματοποιημένων γεωργικών εργασιών σε καλλιέργειες. Το μοντέλο προσομοίωσης κατασκευάστηκε στο λογισμικό προσομοίωσης Gazebo. Για να εντοπιστεί η καθολικά βέλτιστη διαδρομή του UGV, χρησιμοποιείται η διαδικασία χαρτογράφησης του ROS, Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), με τη χρήση του αλγορίθμου Gmapping και AMCL σε συνεργασία με το navigation stack του ROS, η οποία υποστηρίζει την κίνηση του UGV κατά τη διαδικασία χαρτογράφησης.

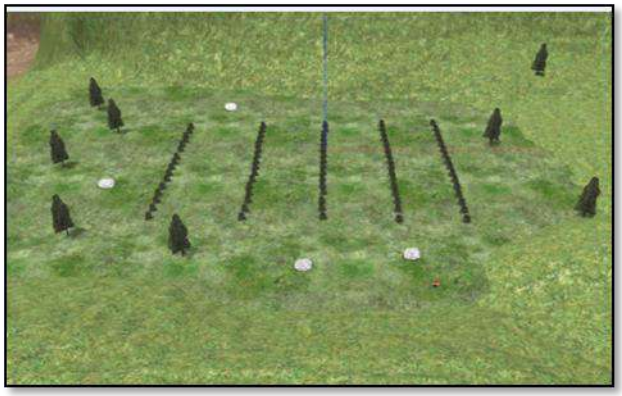
Το λογισμικό ROS είναι ένα ισχυρό λογισμικό ρομποτικού προγραμματισμού ανοικτού κώδικα, το οποίο υποστηρίζει επιπρόσθετα εργαλεία τρίτων κατασκευαστών και υποστηρίζεται από μια κοινότητα ερευνητών ιδρυμάτων αλλά και απλών χρηστών. Ακόμη, πολλά έτοιμα ρομποτικά συστήματα εξωτερικής χρήσης είναι συμβατά με το ROS, γεγονός που καθιστά τη χρήση του ακόμη πιο ελκυστική. Ενδεικτικά μερικά έτοιμα ρομποτικά συστήματα που υποστηρίζουν την λειτουργία της είναι το ρομποτικό όχημα Husky που δημιουργήθηκε από την ρομποτική εταιρεία Clearpath (https://www.clearpathrobotics.com) καθώς και το πολλαπλών χρήσεων γεωργικό ρομποτικό όχημα Thorvald, το οποίο δημιουργήθηκε από την εταιρεία ρομποτικής SAGA (https://sagarobotics.com). Η μέθοδος της προσομοίωσης προσφέρει ένα πεδίο δοκιμής για την ανάπτυξη αλγορίθμων και δοκιμάζει τις ιδιότητες του UGV σε διάφορους τομείς (Farinelly et al., 2016). Οι ερευνητές επεξεργάζονται τις ιδέες τους και με ασφάλεια τις προσομοιώνουν σε επίπεδο εργαστηρίου, πριν τις δοκιμάσουν στο χωράφι. Τα UGVs μπορούν να ενσωματωθούν στις καθημερινές γεωργικές δραστηριότητες και να προσφέρουν καινοτόμες υπηρεσίες στη γεωργία.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 1 φαίνεται η γεωμορφολογία του εδάφους και στο Σχήμα 2 απεικονίζεται το πειραματικό πεδίο, το οποίο αποτελείται από γραμμική καλλιέργεια πέντε-σειρών.

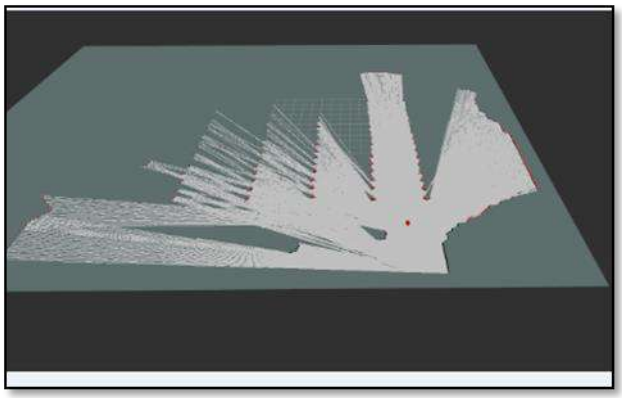


Σχήμα 1. Η γεωμορφολογία του πεδίου.

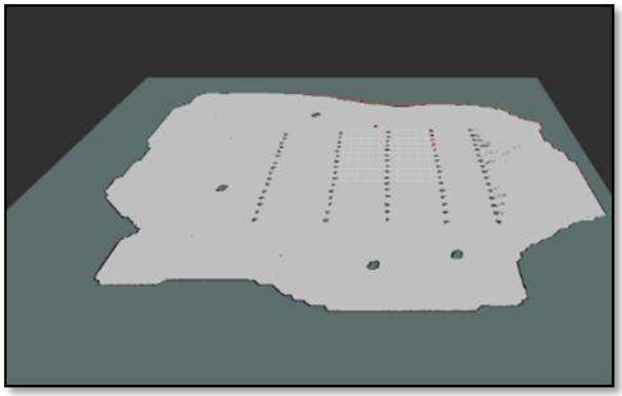


Σχήμα 2. Καλλιέργεια σοδειάς πέντε σειρών.

Το εννοιολογικό UGV που σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της προσομοίωσης είναι εφοδιασμένο με αισθητήρα ανίχνευσης απόστασης με χρήση ακτινών φωτός (SCIP 2.0-compliant Hokuyo laser range finder). Ο αισθητήρας αυτός, τοποθετήθηκε στο όχημα, προγραμματίστηκε και δοκιμάστηκε στο προτεινόμενο γεωργικό πεδίο. Ο αλγόριθμος αυτόματης χαρτογράφησης που αναπτύχθηκε δέχεται ως είσοδο τα δεδομένα του αισθητήρα, ώστε να ανιχνεύει το τοπίο σε πραγματικό χρόνο και σταδιακά δημιουργεί την χαρτογράφηση του περιβάλλοντος μέχρι να ολοκληρωθεί το πεδίο του ενδιαφέροντος. Ο αλγόριθμος τερματίζει την χαρτογράφηση αυτόματα, όταν διαπιστωθεί ότι δεν υπάρχει περαιτέρω βελτιστοποίηση . Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η έναρξη της διαδικασίας της χαρτογράφησης, κατά την οποία το UGV εκκινεί για πρώτη φορά τις δέσμες του αισθητήρα, ώστε να αρχίσει η δημιουργία της σχεδιαστικής απεικόνισης του χωραφιού. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η τελική χαρτογράφηση του πεδίου ενδιαφέροντος.



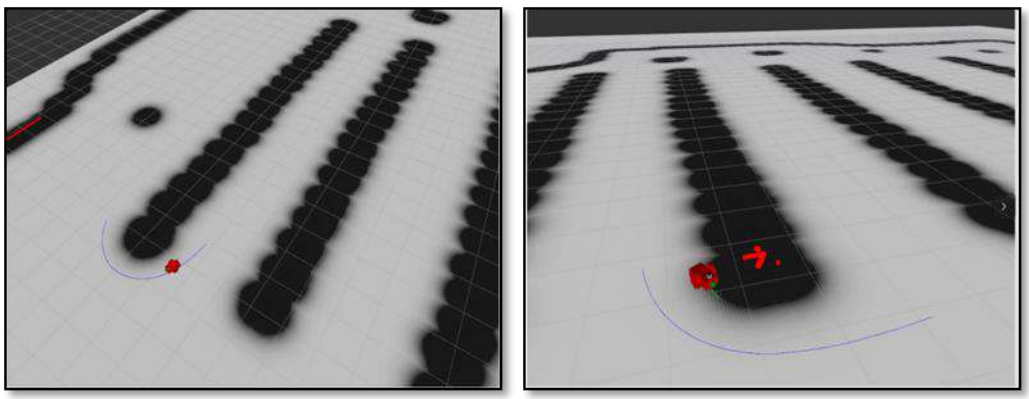
Σχήμα 3. Η διαδικασία χαρτογράφησης του πεδίου.



Σχήμα 4. Η τελική διαμόρφωση της χαρτογράφησης του πεδίου.

Ο χάρτης διαμορφώνεται ως εξής: Αρχικά χρησιμοποιείται γκρι χρώμα για τον προσδιορισμό των αχαρτογράφητων περιοχών και σταδιακά οι λευκές περιοχές δημιουργούν τις χαρτογραφημένες περιοχές στο χάρτη, ενώ οι μαύρες γραμμές παρουσιάζουν τους χώρους που δεν μπορεί να κινηθεί το όχημα (τις σειρές των φυτών και το περίγραμμα των εμποδίων). Τέλος η μαύρη γραμμή, που ορίζει τα όρια του χάρτη, διαμορφώνεται από τις υψομετρικές διαφορές που οφείλονται στη μορφολογία εδάφους.

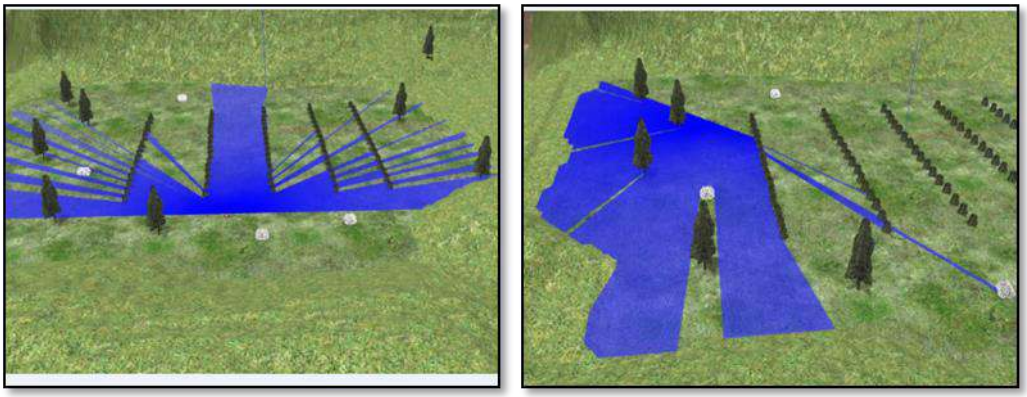
Η διαμόρφωση της διάταξης του τελικού χάρτη γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού ROS, το οποίο υπολογίζει τον τελικό χάρτη και κατασκευάζει την καθολικά βέλτιστη διαδρομή που μπορεί να ακολουθήσει το UGV. Επιπλέον, προκειμένου να διατηρηθεί μια απόσταση ασφαλείας από τα αναγνωρισμένα εμπόδια ο καθολικός χάρτης κόστους που καθορίζει και την καθολικά βέλτιστη διαδρομή, λαμβάνει υπόψη του το μέγεθος του UGV και παράλληλα με την ανίχνευση των εμποδίων, διογκώνει τα εμπόδια, ώστε αποφεύγονται οι συγκρούσεις με τα σταθερά σημεία του χάρτη. Η δημιουργία της καθολικά βέλτιστης διαδρομής εκτελείται από το ROS και ακολουθεί μια εσωτερική σειρά, που σχηματίζει την καθολικά βέλτιστη διαδρομή (Σχήμα 5), η οποία χρησιμοποιείται για την εφαρμογή των προγραμματισμένων δραστηριοτήτων σύμφωνα με το πλάνο εργασιών που έχει δοθεί. Μια τοπικά βέλτιστη διαδρομή (η πράσινη σε χρώμα γραμμή η οποία συνδέεται με το όχημα Σχήμα 5) ανανεώνεται δυναμικά καθώς το UGV προσπαθεί να ακολουθήσει την προγραμματισμένη καθολικά βέλτιστη διαδρομή.



Σχήμα 5. Η διογκωμένη διάταξη με ROS της παγκόσμιας και τοπικής διαδρομής.

Οι αγροτικές εργασίες μπορούν να προγραμματιστούν βήμα προς βήμα με υψηλή ακρίβεια καθώς το όχημα διέρχεται από τις καλλιεργήσιμες περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, στο λογισμικό του UGV εισάγονται οι συντεταγμένες των σημείων ενδιαφέροντος του

χωραφιού, με στόχο την ακριβή εκτέλεση αγροτικών εργασιών όπως, η άρδευση και εφαρμογή φυτοφαρμάκων. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται σε πραγματικό χρόνο η λειτουργία της διαδικασίας SLAM που ακολουθεί το UGV στο χωράφι καθώς ο αισθητήρας σαρώνει για τυχόν συγκρούσεις με δυναμικά εμπόδια ή με αλλαγές σε σταθερά σημεία, που ανιχνεύονται σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 6. Η λειτουργία του SLAM σε πραγματικό χρόνο για την πλοήγηση του UGV.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα έρευνα συμβάλλει στις λειτουργίες της γεωργίας ακριβείας, παρέχοντας ένα εργαλείο για τον προγραμματισμό και τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο της πλοήγησης των αυτόνομων γεωργικών οχημάτων σε προσαρμοσμένες γεωργικές εκτάσεις κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Ακόμη εξετάζονται οι παράμετροι βιωσιμότητας σε οικονομικό επίπεδο (βελτιστοποίηση των επιδόσεων και αύξηση της παραγωγής), περιβαλλοντικό (βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε UGV και εξοπλισμό σε επιχειρησιακό επίπεδο) και κοινωνικό (αύξηση των επιπέδων ασφάλειας, βελτίωση της εργονομίας για τους ανθρώπους).

Πιο συγκεκριμένα, το νέο εργαλείο μπορεί και λαμβάνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, χάρη στο γεγονός ότι καταναλώνει λίγο χρόνο για τους υπολογισμούς των διεργασιών του. Τέλος, το αναπτυχθέν σύστημα έχει την δυνατότητα να επεκταθεί και να βελτιστοποιηθεί σε ότι αφορά το κομμάτι του ανεφοδιασμού στον γεωργικό τομέα (Bechtsis et al., 2017).

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D. and Iakovou, E. (2017). Sustainable supply chain management in the digitalization era: The impact of Automated Guided Vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 142, Part 4, 3970-3984.

Billings, C.E., 1996. *Aviation automation: The search for a human-centered approach*. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, USA.

Bochtis, D.D. and Sørensen, C.G. (2009). The vehicle routing problem in field logistics part I. Biosystems Engineering, 104, 4, pp.447-457.

Bochtis, D.D., Sørensen, C.G. and Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. Biosystems Engineering, 126, pp.69-81.

Farinelli, A., Boscolo, N., Zanotto, E., Pagello, E., 2016. Advanced approaches for multi-robot coordination in logistic scenarios, Robotics and Autonomous Systems, In press.

Finomore, V., Matthews, G., Shaw, T. and Warm, J., 2009. Predicting vigilance: a fresh look at an old problem. *Ergonomics*, 52, pp.791-808.

Ho, Y.-C., Liu, H.-C. and Yih, Y. (2012). A multiple-attribute method for concurrently solving the pickup-dispatching problem and the load-selection problem of multiple-load AGVs. *Journal of Manufacturing Systems*, 31, 3, 288-300.

Kaber, D.B. and Endsley, M.R., 2004. The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5, pp.113-153.

Walker, G.H., Stanton, N.A. and Young, M.S., 2008. Feedback and driver situation awareness (SA): a comparison of SA measures and contexts. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 11, pp.282-299.

Wulfsohn, D., Aravena Zamora, F., Potin Téllez, C., Zamora Lagos, I. and García-Fiñana, M. (2012). Multilevel systematic sampling to estimate total fruit number for yield forecasts. *Precision Agriculture*, 13(2), pp.256-275.

Zheng, H., Negenborn, R.R. and Lodewijks, G., 2016. Closed-loop scheduling and control of waterborne UGVs for energy-efficient Inter Terminal Transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Article In Press.

ΑΝΤΙΛΗΨΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΕΩΠΟΝΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΞΥΠΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Ε. Κουτρίδη[1], Μ-Ν. Ντυκέν[1], Ο. Χριστοπούλου[1], & Σ. Φουντάς[2]
[1]Παν/μιο Θεσσαλίας, Τμήμα ΜΧΠΠΑ, Πολυτεχνική Σχολή, Πεδίο Άρεως, 383 34, Βόλος
[2]Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ- ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 118 55, Αθήνα,
e-mail: koutridh@hotmail.com

Περίληψη

Ο ρόλος που θα κληθούν να διαδραματίσουν οι γεωπόνοι στη διάδοση των Τεχνολογιών Έξυπνης Γεωργίας (ΤΕΓ) είναι θεμελιώδης. Η ανάλυση και αξιολόγηση των στάσεων που έχουν ήδη διαμορφώσει αναδύεται ως μείζον ζήτημα προς συζήτηση, δεδομένου ότι και άλλοι επαγγελματικοί κλάδοι εμπλέκονται στην γεωργική παραγωγική διαδικασία. Σε αυτή την έρευνα, επιχειρείται η διερεύνηση των δυνατοτήτων που αναγνωρίζουν οι γεωπόνοι στις ΤΕΓ ως μοχλού ανάπτυξης της γεωργικής παραγωγικότητας με θετικό οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτέλεσμα. Η ανάλυση βασίζεται σε δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω ερωτηματολογίου σε δείγμα 201 γεωπόνων από όλη την Ελλάδα και τα αποτελέσματα συνάδουν με την υπόθεση ότι οι γεωπόνοι γνωρίζουν τις ΤΕΓ, αλλά σε ποσοστό 70% δεν έχουν την θεωρητική υποδομή και πρακτική γνώση για να τις υποστηρίξουν.

Λέξεις Κλειδιά: Αντιλήψεις- στάσεις γεωπόνων, Τεχνολογίες Έξυπνης Γεωργίας, Υιοθέτηση Καινοτομίας, Διάδοση Τεχνολογίας.

PERCEPTION AND ATTITUDES OF AGRICULTURISTS REGARDING SMART FARMING TECHNOLOGIES ADOPTION FROM FARMERS IN GREECE

E. Koutridi[1], M-N. Duquenee[1], O. Christopoulou[1], & S. Fountas[2]
[1]University of Thessaly, Department PRD, School of Engineering, Pedion Areos, 383 34, Volos
[2]Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens,
e-mail: koutridh@hotmail.com

Abstract

The role that agriculturists will have to play in the dissemination of Smart Farming Technologies (SFT) is fundamental. The analysis and evaluation of the attitudes they have already established emerges as a major issue for discussion as other professional sectors are involved in the agricultural production process. In this research, an attempt has been made to investigate the potential that agriculturists recognize in SFT as a lever for the agricultural productivity development with a positive economic and environmental impact. The statistical analysis is based on primary data gathered through a questionnaire on a sample of 201 agriculturists from all geographical areas of Greece and the results are consistent with the assumption that the agriculturists know the SFT, but at a rate of 70% do not have the theoretical infrastructure and practical knowledge to support it.

Keywords: Agriculturists perceptions - attitudes, Smart Farming Technologies, Adoption of Innovation, Technology Dissemination.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υιοθέτηση των Τεχνολογιών Έξυπνης Γεωργίας (ΤΕΓ) από τους Έλληνες παραγωγούς γεωργικών προϊόντων βρίσκεται σε εμβρυακό ακόμη στάδιο. Ωστόσο, έχουν διεξαχθεί έρευνες σχετικά με την στάση που τηρούν απέναντι σε αυτές καθώς και την πρόθεσή τους να τις εφαρμόσουν στις εκμεταλλεύσεις τους (Μουρτζίνης κ.α., 2007; Lawson, et al., 2011; Κουτρίδη κ.α., 2016). Δεν έχει διερευνηθεί όμως η αντίληψη των γεωπόνων για τις ΤΕΓ, καθώς και ο βαθμός εμπιστοσύνης που αποδίδουν σε αυτές.

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται στη χρήση πολυκριτηριακών στατιστικών μεθόδων προκειμένου να διερευνηθούν και να αξιολογηθούν οι αντιλήψεις και στάσεις του επιστημονικού προσωπικού που απασχολείται με την πρωτογενή παραγωγή, αναφορικά με την νέα αυτή πρακτική. Η ανάλυση βασίζεται σε δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω ερωτηματολογίου σε αντιπροσωπευτικό δείγμα γεωπόνων από όλα τα γεωγραφικά διαμερίσματα της Ελλάδας.

Αρχικά, αποτιμάται ο βαθμός της γνώσης που κατέχουν σε σχέση με τα βασικά γνωστικά αντικείμενα των νέων τεχνολογιών όπως η Γεω-πληροφορική, η Τηλεπισκόπηση, τα Έξυπνα Συστήματα Λήψης αποφάσεων, οι νέες γεωργικές τεχνικές καθώς και την πρακτική γνώση τους στην Γεωργία Ακριβείας. Στη συνέχεια, επιχειρείται μια ανίχνευση της γνώσης των γεωπόνων για τους τρείς άξονες της πρακτικής της Γεωργίας Ακριβείας: της Χωρικής Παραλλακτικότητας, της Αυτόματης Πλοήγησης και της Εφαρμογής Μεταβλητών Δόσεων (Φουντάς, κ.α., 2015), αλλά και το αν μπορούν να υποστηρίξουν ως σύμβουλοι ή ως επόπτες την εφαρμογή των νέων τεχνολογιών, ή απαιτείται να εκπαιδευτούν/ εξειδικευθούν. Τέλος βάση των αντιλήψεων των ίδιων των γεωπόνων, γίνεται προσπάθεια εκτίμησης της δυνατότητας για τους παραγωγούς τόσο να τηρούν τα προβλεπόμενα από τις κοινοτικές διατάξεις Μητρώα και Ημερολόγια Εργασιών (ΚΑΝ.1306/2013), όσο και να μπορούν πρακτικά να εφαρμόσουν μηχανογραφημένες εφαρμογές για την τήρησή τους.

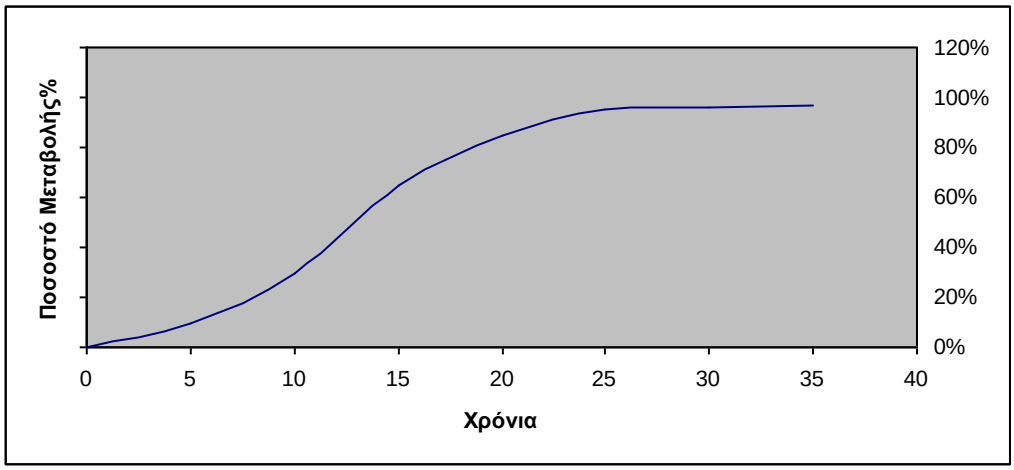
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Ο γεωργικός τομέας στην Ελλάδα έχει ως κύρια χαρακτηριστικά τον μικρό και πολύ τεμαχισμένο κλήρο, τις μικρές γεωργικές εκμεταλλεύσεις με τον μέσο όρο του γεωργικού κλήρου να ανέρχεται σε 68 στρέμματα, κατά πολύ υπολειπόμενο από τον Ευρωπαϊκό μέσο όρο των 161 στρεμμάτων των 26 κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Commission 2016). Η γεωργική παραγωγική διαδικασία δυσχεραίνεται κατά πολύ και από τον γερασμένο πληθυσμό των ατόμων που απασχολούνται στην γεωργία (μόλις το 5,2% από αυτούς να ανήκει στην ηλικιακή ομάδα <35 ετών), καθώς και από το γεγονός ότι το 78% της συνολικά χρησιμοποιούμενης γεωργικής έκτασης (UAA- Utilized Agricultural Area) συμπίπτει χωρικά με περιοχές φυσικών περιορισμών όπως π.χ. οι ευαίσθητες ζώνες σε νιτρικά γεωργικής προέλευσης ή το δίκτυο ΦΥΣΗ- NATURA2000 (http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/AgriculturalcensusinGreece).

Οι παραγωγικοί συντελεστές στην Ελλάδα, όπως το κεφάλαιο- εν μέσω της μεγαλύτερης ίσως χρηματοπιστωτικής κρίσης των τελευταίων δεκαετιών-, το έδαφος, η εργασία, η γνώση, το υλικό και το πάγιο κεφάλαιο συνθέτουν μια παραγωγική εξίσωση που βαίνει σταθερή ή πολλές φορές και μειούμενη χρόνο με το χρόνο, καθώς οι οικονομικές αποδόσεις των προϊόντων που απολαμβάνουν οι παραγωγοί τα τελευταία χρόνια και η πιστοληπτική τους ικανότητα συμβαδίζει όλο και περισσότερο με την λήψη επιδοτήσεων και όχι με το κέρδος από το παραγόμενο προϊόν (Φουντάς, κ.α., 2015).

Η ποσότητα ενός προϊόντος που διατίθεται στην αγορά καθορίζεται από τη διαδικασία λήψης αποφάσεων του παραγωγού της παραγωγικής μονάδας, η οποία είναι άμεσα

συνδεδεμένη με την ζήτηση για εισροές εντός της (Chambers, 1992). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι βασικές εισροές σε τεχνολογική πρόοδο στην γεωργική παραγωγή είθισται να αφορούν όχι σε πάγιο υλικό κεφάλαιο αλλά σε ενδιάμεσα προϊόντα όπως τα λιπάσματα, τα φυτοφάρμακα και οι σπόροι, καθώς και σε γνώση χρήσιμη για την παραγωγή (Λιανός, 2009).



Σχήμα 1: Λογιστική καμπύλη διάδοσης νέας τεχνολογίας (Πηγή: Λιανός,2009).

Ο γεωργικός τομέας της φυτικής παραγωγής στην Ελλάδα αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό παραγωγικών μονάδων. Η σύνδεση των συντελεστών παραγωγής με την τεχνολογική μεταβολή ή άλλως με την εισροή νέων τεχνολογιών βάσει του νεοκλασικού υποδείγματος του τέλειου ανταγωνισμού, συναντάται συχνά στην παγκόσμια βιβλιογραφία (Ζουμπουλάκης, 2010).

Η τεχνολογική μεταβολή είναι ενδογενής στο οικονομικό σύστημα, όπου και παρατηρείται συχνά η υποκατάσταση μιας εισροής από την τεχνολογία να δύναται να μετακινήσει θετικά την καμπύλη ίσου προϊόντος ή ίσης παραγωγής. Η επίδραση της τεχνολογίας μεταθέτει έτσι την καμπύλη προσφοράς δεξιότερα ώστε για δεδομένη τιμή προϊόντος να προσφέρεται μεγαλύτερη ποσότητα προϊόντος. Έχει παρατηρηθεί λοιπόν ότι η εφαρμογή νέων τεχνολογικών μεθόδων στην διαδικασία της παραγωγής ακολουθεί λογιστική καμπύλη, δηλαδή μια πορεία που βαίνει αργά στην αρχή, επιταχύνεται στην συνέχεια και μετά από ορισμένο σημείο επιβραδύνεται και πάλι. Η μορφή γενικά διάδοσης της τεχνολογικής εξέλιξης φαίνεται στο Σχήμα 1 (Mergos, 1991). Η δε διαθεσιμότητα των νέων τεχνολογιών ως συντελεστών παραγωγής είναι άμεσα εξαρτώμενη με την παροχή τους ως υλικές μονάδες, την εκπαίδευση των παραγωγών καθώς και την τεχνική και υλική υποστήριξη από το επιστημονικό προσωπικό που παρέχει υπηρεσίες αρωγής στον γεωργικό κλάδο δηλαδή τους Γεωτεχνικούς (Kitchen et al,2002).

Αυτό το θεωρητικό μοντέλο κρίνεται αξιόπιστο όσον αφορά την εισροή των Τεχνολογιών Έξυπνης Γεωργίας, δηλαδή την λογιστική καμπύλη διάδοσής τους, από τα αποτελέσματα μελέτης που συνεχίζεται τα τελευταία 17 έτη στις Η.Π.Α. από το Πανεπιστήμιο του Purdue σε συνεργασία με το Center for Food and Agricultural Business (Erickson et al, 2015). Με σκοπό την μελέτη στις Ηνωμένες Πολιτείες, της υιοθέτησης από τους παραγωγούς στην γεωργική πρακτική των μεθόδων της Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ), που αφορούν σε χωρικά και χρονικά εντοπισμένους χειρισμούς των καλλιεργειών, πραγματοποιήθηκε έρευνα ανάμεσα σε εμπόρους που διαθέτουν σε παραγωγούς ΤΕΓ (τα τεχνολογικά μέσα/προϊόντα για την εφαρμογή της ΓΑ- αισθητήρες, συστήματα εφαρμογής μεταβλητών δόσεων, GNSS- GPS, UAV's, κ.λπ.) από την οποία και παρατίθενται εδώ τα βασικά συμπεράσματα. Όσον αφορά

χρονικά το μερίδιο της αγοράς στις τεχνολογίες αυτόματης πλοήγησης, της χαρτογράφησης παραγωγής και των εφαρμογών μεταβλητής δόσης, η διάθεση αυτών των τεχνολογιών παρουσίασε τα πρώτα 5 έτη (2005-2009) σταθερή καμπύλη ανόδου με βήμα τις τάξης του 3% ανά έτος και για τα επόμενα 6 έτη παρατηρήσεων το βήμα ανόδου αυξήθηκε σε ποσοστό 10%. Σχετικά με την εκτιμώμενη από τους ερωτηθέντες μελλοντική κατάσταση, αυτοί είκασαν ότι θα κυμανθεί έως το έτος 2018 και πάλι ανοδικά με βήμα >10%, ενώ στην περίπτωση των αισθητήρων των εφαρμοστών εισροών (σπόρων, λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων, κλπ) μεταβλητών δόσεων εκτιμάται ότι το βήμα ανόδου θα προσεγγίζει το 18%. Τέλος παρατηρήθηκε ότι το μερίδιο αγοράς που κατείχαν οι υπηρεσίες που παρέχονται για τις ΤΕΓ στις Η.Π.Α., αρχής γενομένης το έτος 2000 με ποσοστό 12%, βαίνει αυξητικά με ρυθμό 2-3% κάθε χρόνο και εκτιμήθηκε από τους εκεί εμπόρους που διαθέτουν σε παραγωγούς ΤΕΓ, ότι οι υπηρεσίες χαρτογράφησης της χωρικής παραλλακτικότητας και οι προσαρμοσμένες μηχανογραφικές εφαρμογές στις νέες τεχνολογίες θα προσεγγίζουν μερίδια αγοράς έως και 54% και 71% αντίστοιχα μέχρι το έτος 2018. Κατά την τελευταία δεκαετία, η διαθεσιμότητα των ΤΕΓ, εμφανίζει αυξητικές τάσεις. Η εξέλιξη αυτή οφείλεται στην ακμάζουσα ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα της Γεωργίας Ακριβείας, των συστημάτων εντοπισμού θέσης (GNSS- GPS), των αισθητήρων, της τηλεπισκόπησης, των μηχανογραφικών εφαρμογών βάσεων δεδομένων για φορητούς μικροεπεξεργαστές (ACI-APPs) καθώς και των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (ΓΠΣ- GIS). Η διάδοση τέτοιου είδους νέων εισροών στην γεωργική παραγωγική διαδικασία, όπως οι ΤΕΓ, καθώς και η τάση για υιοθέτησή τους από τους παραγωγούς είθισται να διέρχεται μέσα από το «γραμμικό μοντέλο διάδοσης καινοτομίας» με μεταφορείς τους Γεωπόνους- συμβούλους, τους γεωργοεφαρμοστές (Röling, 1998).

Με την εισαγωγή όμως στη γεωργία της μεθοδολογίας της έρευνας γεωργικών συστημάτων (farming systems research), η οποία προσεγγίζει την «παραδοσιακή» γεωργία μέσα από τις θεωρητικές βάσεις της οικολογίας και της γενικής θεωρίας των συστημάτων, αναθεωρήθηκε το πιο πάνω μοντέλο διάδοσης των εισροών (Σιάρδος κ.α., 2004). Βάση αυτής, οι παραγωγοί καινοτομούν στο πλαίσιο της τεχνικής γνώσης και των δυνατοτήτων τους, λαμβάνοντας υπόψη τους και τους διαθέσιμους πόρους και το φυσικό και κοινωνικοοικονομικό περιβάλλον προς μια μεγέθυνση των αποδόσεων του αγροτικού νοικοκυριού. Ως εκ τούτου η προσέγγιση της έρευνας και των πρακτικών γεωργικών εφαρμογών τείνει να μεταβάλλεται σε πολυεπιστημονική και συμμετοχική διαδικασία (Παπασπύρου, 2015).

3. ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

Η εισροή της τεχνολογίας ως καινοτομική δράση με σκοπό τη μεγέθυνση του γεωργικού εισοδήματος και επομένως ως συνιστώσα της αναπτυξιακής διαδικασίας, αποτελεί εδώ και χρόνια αντικείμενο μελέτης στις αναπτυγμένες χώρες (Cook et al, 2003; European Parliament Department B Structural and Cohesion Policies, 2014). Όμως έως και σήμερα δεν έχει γίνει στην Ελλάδα κάποια προσπάθεια, έστω, ανίχνευσης της αντίληψης των γεωπόνων σε ότι αφορά τις νέες τεχνολογίες και την στάση που έχουν διαμορφώσει για την μελλοντική συμμετοχή των ΤΕΓ στην παραγωγική διαδικασία.

Στόχος της παρούσας έρευνας είναι η ανάδειξη της στάσης κα των αντιλήψεων των ελλήνων γεωπόνων σχετικά με τις δυνατότητες ανάπτυξης αυτών των νέων τεχνολογιών. Δύο είναι οι βασικές υποθέσεις εργασίας:

(α) οι γεωπόνοι στην Ελλάδα αναγνωρίζουν την μελλοντική συμβολή των ΤΕΓ στην γεωργική πρακτική και

(β) δεν έχουν σε μεγάλο βαθμό την θεωρητική υποδομή και πρακτική γνώση για να την υποστηρίξουν.

4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίστηκε σε εμπειρική έρευνα με ερωτηματολόγιο που διατέθηκε σε γεωπόνους όλων των εκπαιδευτικών βαθμίδων μέσω διεύθυνσης URL (διαδικτυακά). Οι γεωπόνοι εντοπίστηκαν μέσω των Συλλογικών τους οργάνων, των εκπαιδευτικών δομών καθώς και μέσω διαδικτυακών τόπων πληροφόρησης. Το δείγμα αποτελείται από 201 γεωπόνους και το μέγεθος του αντιστοιχεί σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και σφάλμα δειγματοληψίας της τάξης του 8%. Το δείγμα καλύπτει περίπου το 10% του συνόλου των γεωπόνων της χώρας (www.geotee.gr/NT_StatsMain.aspx), επίπεδο αρκετά ικανοποιητικό για να θεωρηθεί ότι, οι αντιλήψεις των γεωπόνων που συμμετείχαν στην έρευνα αντανακλούν σε σημαντικό βαθμό το σύνολο του πληθυσμού αναφοράς.

Αρχικά παρουσιάζονται κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά των συμμετεχόντων, ενώ στην συνέχεια, με την χρήση του ελέγχου ANOVA, εξετάστηκε σε ποιο βαθμό οι βασικές δεξιότητες που δύνανται να έχουν για να υποστηρίξουν τις νέες τεχνολογίες διαφέρουν ανάλογα με το κοινωνικοοικονομικό τους προφίλ. Με τον έλεγχο του Chi-Square αναδεικνύονται τα ιδιαίτερα γνωστικά αντικείμενα που κατέχουν οι γεωπόνοι και συσχετίζονται ισχυρά με την πρακτική γνώση των ΤΕΓ.

Πίνακας 1: Κοινωνικό- Οικονομικό προφίλ του δείγματος.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ(%)
ΗΛΙΚΙΑ	24-30	38	18,9
	31-35	33	16,4
	36-45	81	40,3
	46-55	39	19,4
	>56	10	5,0
ΗΛΙΚΙΑ ΠΕΡΙΛΗΨΗ	N= 201 Min= <25 Max= >65	Average= 40,1	Std. Dev.= 9
ΦΥΛΛΟ	ΑΝΔΡΑΣ	107	53,2
	ΓΥΝΑΙΚΑ	94	46,8
ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ	ΤΕΙ/ ΑΤΕΙ	25	12,4
	ΑΕΙ	73	36,3
	ΜΕΤΑΠΤ/ΚΟ	87	43,2
	ΔΙΔΑΚ/ΚΟ	16	8,0
ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ ΠΤΥΧΙΟΥ	ΦΥΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	118	58,7
	ΖΩΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	17	8,5
	ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ	24	11,9
	ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ	22	10,9
	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ	15	7,5
	ΑΛΛΑ	1	0,5
	ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	4	2,0
ΚΛΑΔΟΣ ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΗΣ	ΝΠΔΔ/ ΝΠΙΔ	68	33,8
	ΕΤΑΙΡΕΙΑ/ ΚΑΤΑΣΤΗΜΑ	39	19,4
	ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ	12	6,0
	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ/ ΣΥΜΒΟΥΛΟΣ	22	10,9
	ΟΜΑΔΑ ΠΑΡ/ΓΩΝ- ΣΥΝ/ΜΟΣ	22	10,9
	ΑΝΕΡΓΟΣ	30	14,9
	Άλλο	8	4,0

ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	0-2 ΕΤΗ	36	17,9
	3-5 ΕΤΗ	33	16,4
	6-10 ΕΤΗ	28	13,9
	11-15 ΕΤΗ	40	19,9
	16-25 ΕΤΗ	46	22,9
	>25 ΕΤΗ	18	9,0

Το δείγμα αποτελείται από άνδρες σε ποσοστό 53,23% και η μέση ηλικία των ατόμων ανέρχεται περίπου στα 40 έτη. Το 43,28% κατέχει Μεταπτυχιακό τίτλο σπουδών, οι απόφοιτοι ΑΕΙ συμμετέχουν σε ποσοστό 36,32% και οι απόφοιτοι ΤΕΙ σε ποσοστό 12,44%. Η ειδικότητα πτυχίου που απαντάται συχνότερα είναι η Φυτική Παραγωγή και η εξειδίκευση στην Γεωργία Ακριβείας των ατόμων αφορά σε ποσοστό 1,99% , κυρίως προερχόμενο από άτομα με Μεταπτυχιακό Διδακτορικό τίτλο που εργάζονται στην Τριτοβάθμια εκπαίδευση.

Το ένα τρίτο το ατόμων απασχολείται σε ΝΠΔΔ και ΝΠΙΔ και σε ποσοστό περίπου 20% σε εταιρείες ή καταστήματα γεωργικών εφοδίων. Σε ποσοστό 22,9% έχουν προϋπηρεσία στον κλάδο τους άνω των 16 ετών, ενώ η ηλικιακή ομάδα 31-35 ετών σε ποσοστό 67,4% δεν ξεπερνά σε έτη προϋπηρεσίας τα πέντε.

Ο χρόνος προϋπηρεσίας και ο τομέας απασχόλησης συσχετίζονται άμεσα με την ηλικία (p-value του Chi-square= 0,000***). Κατά μέσο όρο, ο χρόνος προϋπηρεσίας ανέρχεται σε δώδεκα έτη, ενώ περίπου το 40% των γεωπόνων του δείγματος απασχολούνται στον Δημόσιο Τομέα. Οι άνεργοι φτάνουν το 14,9%, από τους οποίους οι μισοί είναι αρκετά νεαροί (25-30 ετών) και σε ποσοστό 26,7% προέρχονται από την ηλικιακή ομάδα 36-45 ετών.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

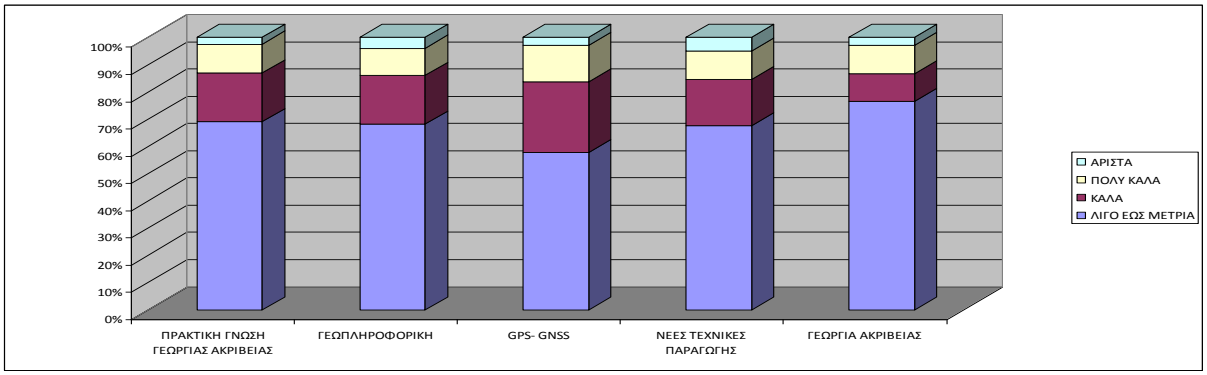
Οι γνώσεις που κατέχουν τα άτομα του δείγματος, σχετίζονται σημαντικά με το γένος (φύλο) και την ειδίκευση τους (Πίνακας 2). Η γνώση της Γεωπληροφορικής, των συστημάτων εντοπισμού θέσης, των νέων τεχνολογιών (τηλεπισκόπηση, έξυπνα συστήματα λήψης αποφάσεων, κ.λπ.) καθώς και η πρακτική γνώση της ΓΑ, αποτελούν βασικούς παράγοντες για την ουσιαστική κατανόηση του ρόλου των ΤΕΓ για το μέλλον της γεωργίας, ειδικά από τους γεωπόνους με εξειδίκευση στη Γεωργικής μηχανική και a-priori για τους εξειδικευμένους σε θέματα ΓΑ. Επίσης όπως προκύπτει από τον ακόλουθο πίνακα, φαίνεται ότι, σύμφωνα με τις ίδιες τις εκτιμήσεις των ερωτηθέντων, οι άνδρες δηλώνουν καλύτερο επίπεδο γνώσης σε σχέση με τις γυναίκες.

Πίνακας 2: Αξιολόγηση βασικών γνώσεων για την κατανόηση των ΤΕΓ κατά φύλλο και εξειδίκευση(*μέση αξιολόγηση σε κλίμακα Likert βαθμ/σης 1 έως 7, με 1 την μη γνώση).

	Γεωπλη/ρικη	GPS	Νέες Τεχνικές Παραγωγής	Νέες Τεχνολογίες	Πρακτική γνώση ΓΑ
Σύνολο	3,7	4,0	3,8	3,5	3,7
Άνδρες	4,0	4,3	4,2	3,7	4,0
Γυναίκες	3,4	3,7	3,5	3,2	3,2
ANOVA (p-value)	0,005**	0,002**	0,002**	0,038*	0,000***
Φυτική παρ/γή	3,7	4,0	4,0	3,6	3,7
Ζωική παρ/γή	3,3	3,8	3,5	2,8	2,9
Αγρ/κή οικονομία	4,0	4,0	3,8	3,1	3,8

Γεωργική Μηχ/κή	3,9	4,1	4,2	4,0	4,2
Τεχ/γία Τροφίμων	2,3	3,5	2,7	2,4	2,7
Άλλο	6,0	6,0	1,0	4,0	4,0
Γεωργία Ακριβείας	6,2	6,0	3,7	5,7	5,7
ANOVA (p-value)	0,000***	0,098*	0,019*	0,001***	0,003**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η κατανόηση και η διάδοση των ΤΕΓ από τους γεωπόνους απαιτεί συγκεκριμένες γνώσεις. Από την έρευνα, προκύπτει ότι οι ερωτηθέντες αναγνωρίζουν ότι δεν έχουν αποκτήσει σε μεγάλο βαθμό τον απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο και την πρακτική γνώση που θα τους επέτρεπε όχι μόνο να τις κατανοήσουν αλλά και να συμβουλεύουν και να υποστηρίξουν τους αγρότες (Πίνακας 3). Περίπου το 70% από αυτούς δηλώνουν μέτριες γνώσεις σε αυτά τα γνωστικά αντικείμενα όταν παράλληλα το 70% αναγνωρίζει ότι οι γνώσεις τους σχετικά με την εφαρμογή της Γεωργίας Ακριβείας είναι περιορισμένες έως μέτριες (Σχήμα 2). Κατά συνέπεια, επιβεβαιώνεται η υπόθεση ότι οι γεωπόνοι δεν έχουν αποκτήσει σε ικανοποιητικό βαθμό την θεωρητική υποδομή και πρακτική γνώση των ΤΕΓ προκειμένου να τις κατανοήσουν και να τις υποστηρίξουν. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των γνώσεων γεωπληροφορικής και των διαφορών ειδικοτήτων (p-value = 0,000***).

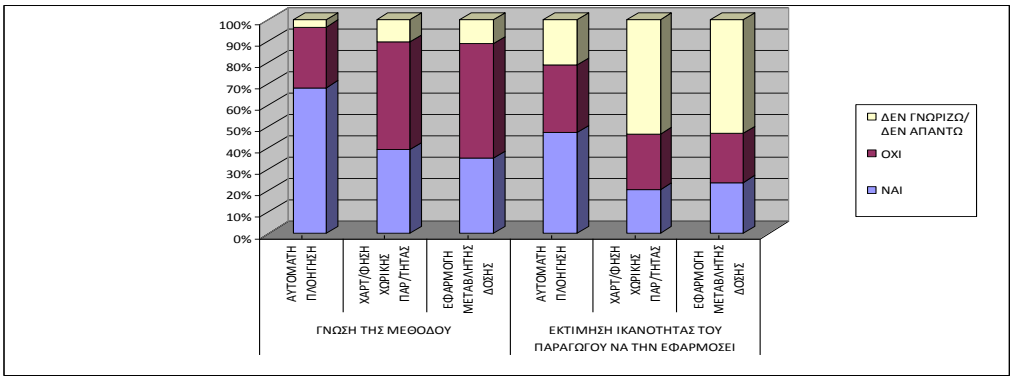


Σχήμα 2: Επίπεδο γνώσης βασικών επιστημονικών πεδίων για τις ΤΕΓ.

Πίνακας 3: Συσχέτιση με έλεγχο του Chi-square της πρακτικής γνώσης της ΓΑ με τα απαραίτητα γνωστικά αντικείμενα για την κατανόηση και πρακτική εφαρμογή των ΤΕΓ.

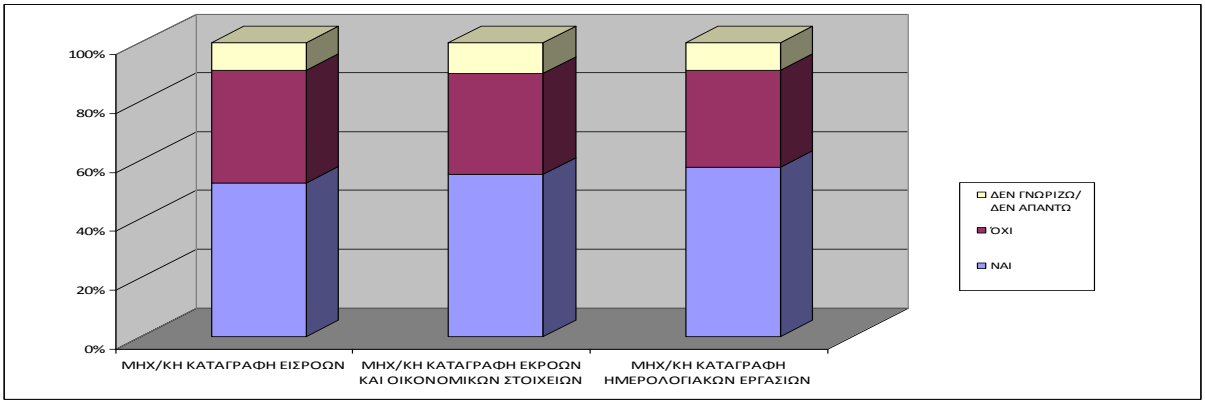
Χαρακτηριστικό (Πρακτική γνώση ΓΑ)	X^2	Βαθμοί ελευθερίας	p- value
Γνώσεις Γεωπληροφορικής	104,634	36	0,000***
Γνώσεις GPS- GNSS	99,793	36	0,000***
Γνώσεις νέων Τεχνικών παραγωγής	155,133	36	0,000***
Γνώσεις Γεωργίας Ακριβείας	187,639	36	0,000***

Η γνώση για κάθε ένα από τους τρείς άξονες της εφαρμογής της Γεωργίας Ακριβείας διαφέρει σημαντικά. Πάνω από τα δυο τρίτα των γεωπόνων γνωρίζουν την τεχνική της Αυτόματης Πλοήγησης (Σχήμα 3), ενώ υπάρχει σημαντική έλλειψη γνώσης για τις δυο άλλες τεχνικές: Χωρική Παραλλακτικότητα (39,3%) και Εφαρμογή Μεταβλητών δόσεων (35,3%).

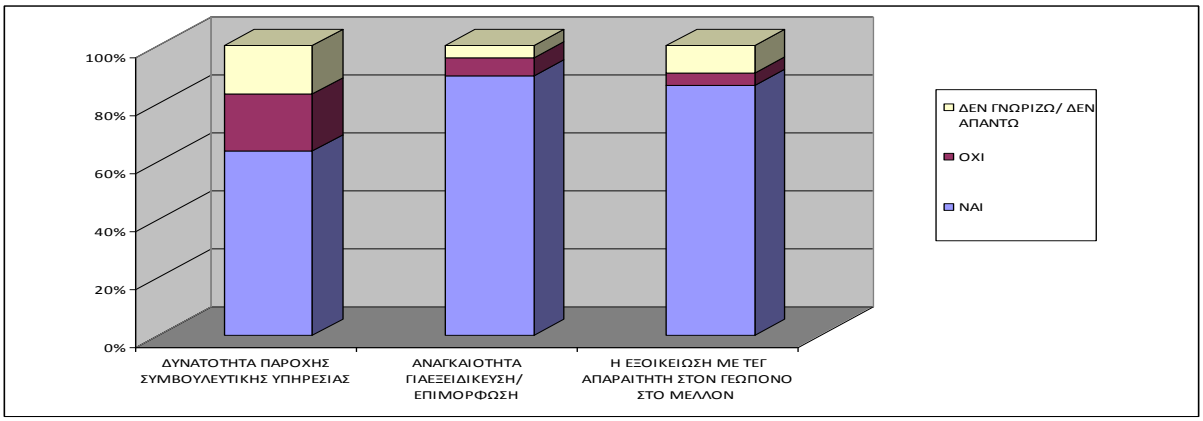


Σχήμα 3: Γνώση των γεωπόνων σχετικά με τις βασικές μεθόδους της ΓΑ και αντίληψή τους όσον αφορά την ικανότητα των παραγωγών να τις εφαρμόσουν.

Αν και η μέθοδος της Αυτόματης Πλοήγησης, είναι πλέον ευρέως διαδεδομένη στην Ελλάδα και με ικανό αριθμό εφαρμογών διαθέσιμων τα τελευταία χρόνια, εκτιμούν οι γεωπόνοι, ότι υπάρχουν σημαντικές αδυναμίες ως προς την εφαρμογή από τους παραγωγούς. Μόνο το 43% των γεωπόνων διαπιστώνουν ότι οι παραγωγοί είναι σε θέση να την εφαρμόσουν. Ακόμη πιο αρνητική είναι η αντίληψή τους σχετικά με την ικανότητα των παραγωγών να εφαρμόσουν τις πιο εξειδικευμένες μεθόδους την Χαρτογράφηση της Χωρικής Παραλλακτικότητας και την Εφαρμογή των Μεταβλητών Δόσεων (Σχήμα 3).
Η διαμορφωμένη αντίληψη που έχουν οι γεωπόνοι για την ικανότητα των παραγωγών να τηρούν οι ίδιοι οι παραγωγοί μέσω μηχανογραφικών εφαρμογών τα προβλεπόμενα από τον ΚΑΝ 1306/2013 Μητρώα εισροών- εκροών και οικονομικών στοιχείων καθώς και να καταγράφουν ημερολογιακά τις εργασίες στις εκμεταλλεύσεις τους, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Προκύπτει από τα στοιχεία αυτά, ότι οι γεωπόνοι έχουν εμπιστοσύνη σε ποσοστό που φτάνει στο 50% και άνω, στην ικανότητα των παραγωγών να αυτό-διαχειρίζονται τα στοιχεία του κύκλου εργασιών της εκμετάλλευσής τους αν και μια κατηγορία των ερωτηθέντων της τάξης περίπου του 10% προτιμάει να μην διατυπώσει την αντίληψή της επί του θέματος που συστηματικά αφορά σε γυναίκες, ανέργους και άτομα με ελάχιστη εργασιακή εμπειρία (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Αντίληψη των γεωπόνων όσον αφορά την ικανότητα των παραγωγών να τηρούν μηχανογραφημένες εφαρμογές στο πλαίσιο του ΚΑΝ1306/2013.



Σχήμα 5: Δυνατότητά γεωπόνων να παρέχουν συμβουλευτική, την αναγκαιότητα που αισθάνονται να εξειδικευθούν και την προοπτική που αναγνωρίζουν για την εξοικείωση που πρέπει να έχουν με τις ΤΕΓ στο μέλλον.

Η πλειονότητα των γεωπόνων (πάνω από 80%) θεωρούν ότι η εισροή των ΤΕΓ, η εξειδίκευσή τους καθώς και η εξοικείωση με αυτές αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για το μέλλον τους (Σχήμα 5). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι γυναίκες ηλικιών 31- 55 ετών, που απασχολούνται κυρίως στον Δημόσιο Τομέα και χωρίς ιδιαίτερη εξοικείωση με τις νέες τεχνολογίες καθώς και οι γεωπόνοι άνω των 55 ετών δεν θεωρούν τόσο σημαντική την εξοικείωση με αυτές τις τεχνολογίες. Περίπου ίδια είναι και η σύνθεση του πληθυσμού που απαντάει αρνητικά στην ερώτηση για το αν μπορούν να υποστηρίξουν ως σύμβουλοι ή ως επόπτες την εφαρμογή των νέων τεχνολογιών, ή απαιτείται να εκπαιδευτούν/ εξειδικευθούν.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το γεωργικό εισόδημα τείνει να συρρικνωθεί και η ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών στην γεωργική πρακτική παρατηρείται βιβλιογραφικά ότι δύναται να αποτελέσει μοχλό μεγέθυνσης του. Οι ΤΕΓ βάσει των παρατηρήσεων σε αναπτυγμένες χώρες έχουν υποβοηθήσει προς αυτή την κατεύθυνση και η ανάγκη για εξειδικευμένη επιστημονική στήριξη αναδύεται. Η Ε.Ε. αξιολογεί ως χρήσιμη την νέα αυτή πρακτική, ενισχύει και ενσωματώνει σε Δράσεις του Δεύτερου Πυλώνα της Αγροτικής Ανάπτυξης τις γεωργικές πρακτικές της Γεωργίας Ακριβείας, μάλιστα σε μελέτη της το 2014 αναφέρεται ότι «…εξετάζονται εναλλακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση της υιοθέτησης της ΓΑ, συμπεριλαμβανομένων των μέτρων στο πλαίσιο της νομοθεσίας της ΚΑΠ για την περίοδο 2014-2020 και της σημαντικής συμβολής των συμβουλευτικών υπηρεσιών σε ολόκληρη την Ευρώπη..» (European Parliament Department B Structural and Cohesion Policies, 2014).

Σε ποσοστό που φτάνει το 70%, οι γεωπόνοι στην Ελλάδα, γνωρίζουν λίγο έως μέτρια την επιστήμη της Γεωπληροφορικής, τα συστήματα εντοπισμού θέσης, τις νέες τεχνολογίες (τηλεπισκόπηση, έξυπνα συστήματα λήψης αποφάσεων, κ.λπ.), και τέλος δεν έχουν γνώση των πρακτικών εφαρμογών της ΓΑ και συνεπώς και των ΤΕΓ. Δεν έχουν την θεωρητική υποδομή στο βασικό γνωστικό αντικείμενο, την Γεω-πληροφορική, αποδεικνύεται δε ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ αυτής και των διάφορων ειδικοτήτων (p-value = 0,000***). Έτσι επιβεβαιώνεται η υπόθεση ότι οι γεωεφαρμοστές/ γεωπόνοι δεν έχουν αποκτήσει σε ικανοποιητικό βαθμό την θεωρητική υποδομή και πρακτική γνώση των ΤΕΓ προκειμένου να τις κατανοήσουν και να τις υποστηρίξουν.

Σε μεγάλο βαθμό (άνω του 80%) αξιολογούν ότι οι ΤΕΓ αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για τους γεωπόνους στο μέλλον, ενώ κρίνουν αναγκαία την εξειδίκευσή τους

σε αυτές. Έχουν την πεποίθηση, τέλος, ότι σε ποσοστό άνω του 50% μπορούν να δραστηριοποιηθούν επαγγελματικά στην παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών στον τομέα των ΤΕΓ, μετά από εξειδίκευση σε αυτές.

Ως εκ τούτων, και με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας μελλοντικά θα υπάρξει ανάγκη εξειδίκευσης των γεωεφαρμοστών/ γεωπόνων στις νέες τεχνολογίες και η αντίληψη που οι ίδιοι έχουν διαμορφώσει συμβαδίζει με τη υπόθεση που τέθηκε αρχικά ότι αν και αναγνωρίζουν την μελλοντική συμβολή των ΤΕΓ στην γεωργική πρακτική, δεν έχουν σε μεγάλο βαθμό την θεωρητική υποδομή και πρακτική γνώση για να την υποστηρίξουν.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ζουμπουλάκης Μ., Βαρουφάκης Γ., Θεοχάρακης Ν., Τσαλίκη Π., Τσουλφίδης Λ., Βεληζιώτης Μ., Τσακαλώτος Ε., Χλέτσος Μ., Παπαγεωργίου Α., (2010). *Σύγχρονη πολιτική οικονομία*. Εκδ. Πατάκη, Αθήνα.

Κουτρίδη Ε. , Χριστοπούλου Ο., Ντυκέν Μ-Ν., (2016). *Διερεύνηση των στάσεων και των απόψεων των παραγωγών στην Γεωργία Ακριβείας- Η περίπτωση της Στερεάς Ελλάδας*. Πρακτικά 14ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Αγροτικής Οικονομίας , σελ 13-14.

Σιάρδος Γ., Κουτσούρης Α., (2004) *Αειφορική γεωργία & Ανάπτυξη*, Ζυγός, θεσσαλονίκη.

Λιανός Θ., Δαμιανός Δ., Μέργος Γ., Ντεμούσης Μ., Κατρανίδης Σ., (2009). *Αγροτική Οικονομική Θεωρία και Πολιτική* Εκδ. Ε. Μπένου, Αθήνα.

Μουρτζίνης Σπ., Φουντάς Σπ., Γέμτος Θ., (2007). *Αντίληψη ελλήνων αγροτών για την Γεωργία Ακριβείας*. Πρακτικά 5ου Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, (185) 850-857.

Παπασπύρου Σ., (2015). *Ο ρόλος των υποκειμενικών αντιλήψεων περί εκπαίδευσης ανηλίκων σε σχέση με την δράση των γεωπόνων γεωργικών εφαρμογών.* Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών Σχολή Τροφίμων Γεωτεχνολογίας και Ανάπτυξης, Τμήμα Αγροτικής Οικονομίας και Ανάπτυξης 333 σελ.

Φουντάς Σπ., Γέμτος Θ., (2015). *Γεωργία Ακριβείας*. Εκδόσεις ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΓΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΒΟΗΘΗΜΑΤΑ, ΣΕΑΒ, Αθήνα.

Cook, S. E., O'Brien, R., Corner, R. J., Oberthur, T. (2003). *Is precision agriculture relevant to developing countries.* Stafford, J.Werner, A. eds. Precision Agriculture Proceedings of the 4th European Conference on Precision AgricultureWageningen Academic PublishersThe Netherlands115119.

Erickson B., Widmar D.A., (2015). *2015 Precision Agricultural Services Dealership Survey Results.* Sponsored by CropLife Magazine and the center for Food and Agricultural Business. Dept. of Agricultural Economics, Pardue University West Lafayette, Indiana.

European Parliament Department B Structural and Cohesion Policies, (2014). *Study: "Precision Agriculture An Opportunity For EU Farmers- Potential Support with the CAP 2014-2020"*. http://www.europarl.europa.eu/studies European Parliament, Brussels 2014.

Chambers R., (1992). *Duality and Modern Economics.* Cambridge University Press, Cambridge UK

Kitchen N.R., Snyder C.J., Franzen D.W., Wiebold W.J.,(2002). *Educational Needs of Precision Agriculture.* Precision Agriculture , Volume 3, Issue 4, pp 341–351.

Lawson L.G., Pedersen S.M., Sorensen C. G., Pesonen L., Fountas S., Werner A., Oudshoorn F.W., Herold L., Chatzinikos T., Kirketerp I.M., Blackmore S., (2011). *A four nation survey of farm information management and advanced farming systems: A descriptive analysis*

of survey responses. Computers and Electronics in Agriculture 77 (2011) 7-20. Science Direct, Elsevier, UK.

Mergos G., (1991). *Output supply and Input Demand in Greek Agriculture- A Profit Function Approach.* Centre of Planning and Economic Research, Athens.

Röling, N. (1988) *Extension science: Information systems in agricultural development*. New York: Cambridge University Press

http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures (Τρίτη 25/4/2017 ΩΡΑ: 13:30)

http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agricultural_census_in_Greece (Τρίτη 25/4/2017 ΩΡΑ: 15:30)

www.geotee.gr/NT_StatsMain.aspx (Τρίτη 25/4/2017 ΩΡΑ: 10:00)

ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΘΕΡΙΖΟΑΛΩΝΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΡΥΖΙΟΥ

Ε.Θ. Σιάφαλη✉, Ε.Α. Καραγιάννης & Β.Ι. Γιαννούλας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, 54124, Θεσσαλονίκη, ✉esiafali@for.auth.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία ερευνάται η αποδοτικότητα και η οικονομικότητα θεριζοαλωνιστικής μηχανής με την χρήση καταστροφέα, ώστε να αποφευχθεί η καύση των υπολειμμάτων η οποία προκαλεί ατμοσφαιρική μόλυνση. Για την επίτευξη των σκοπών της έρευνας έγιναν χρονικές σπουδές σε αγροτεμάχιο έκτασης 40 στρεμμάτων, το οποίο χρησιμοποιείται για ρυζοκαλλιέργεια, στην περιοχή Νέα Μάλγαρα Θεσσαλονίκης. Υπολογίσθηκαν οι σταθεροί και οι μεταβλητοί χρόνοι και οι καθυστερήσεις, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση της θεριζοαλωνιστικής μηχανής. Επίσης, υπολογίσθηκαν τα σταθερά και τα μεταβλητά έξοδα, καθώς και το κόστος χειριστή. Όλες οι βασικές παράμετροι και λειτουργίες του μηχανήματος αναλύονται στην IntelliVIEW ™ IV οθόνη. Από την έρευνα προέκυψε ότι στην συγκομιδή ρυζιού με την βοήθεια της σύγχρονης τεχνολογίας οι ταχύτητες εργασίας είναι μεγαλύτερες, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου, την βελτίωση και αύξηση της απόδοσης και της παραγωγικότητας, τη μείωση των εργατοωρών, της κατανάλωσης καυσίμων και γενικότερα του κόστους λειτουργίας του μηχανήματος, καθώς αυξάνονται οι ώρες εργασίας.

Λέξεις κλειδιά: θεριζοαλωνιστική μηχανή, γεωργία ακριβείας, GPS, λογισμικό επιφανείας PFS

EFFICIENCY AND ECONOMIC PERFORMANCE OF MODERN TECHNOLOGY COMBINE HARVESTER IN RICE HARVEST

E.T. Siafali, E.A. Karagiannis & V.I. Giannoulas
Aristotle University of Thessaloniki, School of Forestry and Natural Environment, Laboratory of Mechanical Science and Topography, 54124, Thessaloniki, esiafali@for.auth.gr

Abstract

In this study is being investigated the efficiency and economic performance of combine harvesters by using stalk choppers to avoid the burning of residues that causes atmospheric contamination. For the purposes of the research, was applied the time method on a plot of 40 acres, which is used for rice cultivation, in Nea Malgara, Thessaloniki. Fixed and variable times and delays were calculated to evaluate the performance of the combine harvester. Fixed and variable costs, as well as operator costs, were also calculated. All basic parameters and functions of the machine are being analyzed on the IntelliVIEW ™ IV screen. The research has shown that in the rice harvest, with the help of modern technology, the labor speeds are higher, thus saving time, improving yield crop and increasing productivity, reducing labor hours and fuel consumption and in general reducing operating costs of the harvester as hours of work increase.

Key words: combine harvester, precision agriculture, GPS, PFS surface software

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Γεωργία ακριβείας (Precision Agriculture) βασίζεται στην παρατήρηση, στις μετρήσεις και στην αντιμετώπιση της μεταβλητότητας των καλλιεργειών. Τα οφέλη προκύπτουν κυρίως από την αύξηση της αποδοτικότητας της παραγωγής και του κέρδους για τον αγρότη, αλλά και από την βελτίωση των συνθηκών εργασίας (http://www.europarl.europa.eu). Στόχο έχει να αναδιοργανώσει το συνολικό σύστημα γεωργίας προς την κατεύθυνση μιας βιώσιμης γεωργίας χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης (Shibusawa, 1998). Το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) καθιστά περισσότερο έγκυρες τις αγροτεχνολογικές αποφάσεις και συνεισφέρει θετικά προς αυτή την κατεύθυνση (Yousefi and Razdari, 2014).

Οι σύγχρονης τεχνολογίας θεριζοαλωνιστικές μηχανές συγκομιδής ρυζιού μειώνουν τις εργατοώρες λόγω αύξησης της ταχύτητας εργασίας, μειώνουν την κατανάλωση καυσίμων έως 10% σε σχέση με παλιότερα μοντέλα της συγκεκριμένης εταιρίας, η δεξαμενή αποθήκευσης καρπού είναι κατά 9,5% μεγαλύτερης χωρητικότητας από τα προηγούμενα μοντέλα, με αποτέλεσμα την μείωση των διαδρομών και του χρόνου συγκομιδής. Ακόμη, η συγκεκριμένη θεριζοαλωνιστική μηχανή διαθέτει συνδυασμό τεχνολογίας Opti-Clean^{TM} και Opti-Fan^{TM} για να αποδίδει καθαρότερο καρπό χωρίς πέτρες και άλλα υλικά και κατ' επέκταση μεγαλύτερη απόδοση και υψηλότερη τιμή πώλησης ρυζιού(http://d3u1quraki94yp.cloudfront.net). Η καύση των υπολειμμάτων από την συγκομιδή του ρυζιού γίνεται για την εξόντωση των εστιών των βλαβερών εντόμων, για τον έλεγχο των ζιζανίων και των ασθενειών του καρπού. Στην ουσία όμως η καύση προκαλεί μόλυνση της ατμόσφαιρας, παράγοντας έκλυσης 13tn/ha διοξειδίου του άνθρακα CO_2. Επιπλέον, η ατελής καύση των υπολειμμάτων παράγει μονοξείδιο του άνθρακα CO και άκαυστους υδρογονάνθρακες οι οποίοι προκαλούν καρκινογένεση (Shehata, 2016). Αντίθετα, η ενσωμάτωση των υπολειμμάτων στο έδαφος, επιστρέφει το μεγαλύτερο μέρος των θρεπτικών συστατικών και συμβάλλει μακροπρόθεσμα στη διατήρηση των αποθεμάτων θρεπτικών ουσιών στο έδαφος (Dobbermann and Fairhurst, 2002). Τα υπολείμματα ρυζιού είναι μια σημαντική πηγή λίπανσης, επειδή περιέχουν 70% κάλιο και σχεδόν όλη την ποσότητα πυριτίου που απορροφά το φυτό για τις ανάγκες ανάπτυξής του. Λιγότερο άζωτο μπορεί να εφαρμοστεί στα πεδία όπου έχει ενσωματωθεί το άχυρο, με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους παραγωγής, αλλά και την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ρύπανσης των υδάτων (G.F. Botta at al., 2015). Η θεριζοαλωνιστική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκομιδή ρυζιού διαθέτει το σύστημα Dual-Chop^{TM} και εξασφαλίζει άριστο διασκορπισμό των υπολειμμάτων, επομένως δεν εφαρμόζεται καύση στο αγροτεμάχιο.

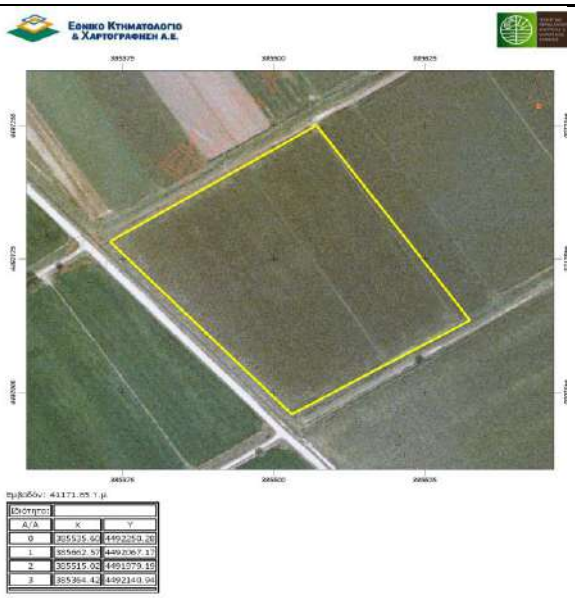
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ

2.1. Περιοχή έρευνας

Ως περιοχή έρευνας επιλέχτηκε αγροτεμάχιο έκτασης 40 στρεμμάτων περίπου, κλίσεως 0%, αρδευόμενο με μονοετή καλλιέργεια, στην περιοχή Νέων Μαλγάρων Ν. Θεσσαλονίκης, στο οποίο τον Οκτώβριο του 2016 ήταν σε εξέλιξη εργασίες συγκομιδής ρυζιού. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι συντεταγμένες του αγροτεμαχίου σε ΕΓΣΑ 87, στον Πίνακα 2 δίνονται τα δεδομένα εδαφοανάλυσης του αγροτεμαχίου, στο Σχήμα 1 απεικονίζεται το απόσπασμα κτηματολογικού χάρτη από την ΕΚΧΑ Α.Ε. σε κλίμακα 1:2.500.

Πίνακας 1. Συντεταγμένες αγροτεμαχίου σε ΕΓΣΑ 87 (Κρατικό σύστημα συντεταγμένων)(Πηγή: προσωπικό αρχείο)

	X	Y
Α	385535,60	4492250,28
Β	385562,57	4492067,17
Γ	385515,02	4491979,19
Δ	385364,42	4492140,94



Σχήμα 1. Απόσπασμα κτηματολογικού χάρτη αγροτεμαχίου σε κλίμακα 1:2.500 (Πηγή: ΕΚΧΑ Α.Ε.)

Πίνακας 2. Δεδομένα εδαφοανάλυσης αγροτεμαχίου περιοχής έρευνα

	ΓΕΝΙΚΕΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ								
ΒΑΘΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	**Άμμος %**	**Άργιλος %**	**Ιλύς %**	**Οξύτητα Εδάφους pH**	**Αλατότητα Εδάφους mS/cm**	**Οργανική Ουσία %**	**Ολικό $CaCO_3$ %**	**Ενεργό $CaCO_3$ %**	**ΦΕΒ g/cm^3**
0 - 30 cm	50	12	38	7,94	0,636	2,41	2,7		1,45
30 - 60 cm									
60 - 90 cm									
Χαρακτηρισμός:	**M (L)**								
ΘΡΕΠΤΙΚΟ:	**ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΑΚΡΟΘΡΕΠΤΙΚΩΝ (σε βάθος εδάφους 0 - 30 cm)**								
	Άζωτο N-NO_3 (K_2SO_4 1M & UV_VIS) ppm	**Φωσφόρος (P_Olsen) ppm**	**Κάλιο K (NH_4OAc) ppm**	**Εναλ. Μαγνήσιο Mg (NH_4OAc) ppm**	**Εναλ. Ασβέστιο Ca (NH_4OAc) ppm**				
Τιμή στο Έδαφος:	5	8	82	195	>2000				
ΘΡΕΠΤΙΚΟ:	**ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΙΚΡΟΘΡΕΠΤΙΚΩΝ (σε βάθος εδάφους 0 - 30 cm)**								
	Σίδηρος Fe (Διαθέσιμος, DTPA) ppm	**Ψευδάργυρος Zn (Διαθέσιμος, DTPA) ppm**	**Μαγγάνιο Mn (Διαθέσιμο, DTPA) ppm**	**Χαλκός Cu (Διαθέσιμος, DTPA) ppm**	**Βόριο B (Διαθέσιμο, Ζέον Ύδωρ) ppm**				
Τιμή στο Έδαφος:	103,41	2,34	8,61	4,85	0,13				

Συνοπτικά πρόκειται περί εδάφους μέσης μηχανικής σύστασης ((L), αλκαλικής αντίδρασης (pH), μέσης περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο, υψηλής περιεκτικότητας σε οργανική ουσία και κανονικής αλατότητας.

2.2. Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της έρευνας ήταν:

- Θεριζοαλωνιστική μηχανή τύπου New Holland CX8090, 6 αχυροτιναχτών με διπλό κοχλία περιστρεφόμενων, η οποία έχει κινητήρα FTP-Cursor 10, μέγιστης ισχύος 430kW, με προσαρμοσμένο αναδιπλούμενο μαχαίρι (3,85m) Cressoni CRX rice συνολικού μήκους 7,20m, αλλά και καταστροφέα για λεπτό τεμαχισμό και εξαίρετο διασκορπισμό του αχυροστρώματος
- Επιπλέον εγκατεστημένο λογισμικό επιφάνειας εργασίας PFS, σύμφωνα με το πακέτο PLM (Precision Land Management) για τον προσδιορισμό της απόδοσης της θεριζοαλωνιστικής
- Χρονόμετρο χειρός για να υπολογισθούν οι σταθεροί χρόνοι

2.2.1. Χαρακτηριστικά θεριζοαλωνιστικής

Η τεχνολογία ECOBlue ™ SCR μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου έως 10% (μετά από επικοινωνία με ιδιοκτήτες του συγκεκριμένου μοντέλου θεριζοαλωνιστικής μηχανής, οι ίδιοι επιβεβαιώνουν την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου σε σχέση με προηγούμενα μοντέλα της ίδιας εταιρίας). Η προηγμένη τεχνολογία PLM® εξασφαλίζει ότι οι κεφαλές της μηχανής είναι στο 100% για το 100% του χρόνου, για βέλτιστη κάλυψη πεδίου (http://d3u1quraki94yp.cloudfront.net).

Το σύστημα τροφοδοσίας IntelliCruise ™, με τη βοήθεια ενός αισθητήρα, αυτόματα προσαρμόζει την ταχύτητα της θεριζοαλωνιστικής μηχανής προς τα εμπρός ανάλογα με το φορτίο του καρπού.

Το σύστημα Opti-Clean ™ βελτιστοποιεί τη διαδρομή και τις γωνίες ρίψης στο σύστημα καθαρισμού του καρπού και βελτιώνει τον βαθμό καθαρισμού μέχρι 20%.

Η σειρά θεριζοαλωνιστικών μηχανών CX Elevation έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της γεωργίας ακριβείας. Οι πληροφορίες απόδοσης ενημερώνονται συνεχώς και εμφανίζονται στην οθόνη IntelliView ™ IV. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να αποθηκευτούν και να αναλυθούν με λογισμικό Γεωργίας Ακριβείας, για να δημιουργηθούν ακριβείς χάρτες αποδόσεων. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση των εσόδων, για τη μεγιστοποίηση των αποδόσεων και την ελαχιστοποίηση του κόστους εισροών (http://d3u1quraki94yp.cloudfront.net).

Οι κατασκευαστές εξοπλισμού GPS έχουν αναπτύξει πολλά εργαλεία για να βοηθήσουν τους αγρότες και τις αγροτικές επιχειρήσεις να γίνουν περισσότερο παραγωγικές και αποτελεσματικές. Σήμερα, πολλοί αγρότες στις γεωργικές δραστηριότητες χρησιμοποιούν συστήματα GPS (Yousefi and Razdari, 2014).

Τα ολοκληρωμένα συστήματα της συγκεκριμένης θεριζοαλωνιστικής μηχανής έχουν σχεδιαστεί να παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για μεγιστοποίηση της απόδοσης του καρπού και του λοιπού εξοπλισμού(http://d3u1quraki94yp.cloudfront.net). Έτσι, ο αγρότης μπορεί:

- Να καταγράφει μόνιμα την απόδοση της παραγωγής σε ακριβείς τοποθεσίες και να την αποθηκεύει για μελλοντική αναφορά
- Να αναλύει συνεχώς τις πληροφορίες υγρασίας σε πραγματικό χρόνο για να εξασφαλίσει ότι η σοδειά συλλέγεται πάντα σε συνθήκες αιχμής

- Να προετοιμάζει τους χάρτες εφαρμογής για ακριβή, ειδικά για τη λίπανση, σπορά και ψεκασμό σε σχέση με την πραγματική απόδοση με σκοπό την αύξηση των κερδών

Στον πίνακα 3 δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της θεριζοαλωνιστικής CX8090.

Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά θεριζοαλωνιστικής CX8090 (Πηγή: Βιβλίο οδηγιών χειρισμού CX8090, 06/09):

ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	
Τύπος	FTP-CURSOR 10
Συνολική ισχύς @2100rpm (ISO TR14396)	430kW
Δεξαμενή καυσίμου	1.000 λίτρα
ΑΧΥΡΟΚΟΠΤΙΚΟ & ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΤΗΣ	
Ταχύτητα	3.500 rpm
Τύπος ρότορα	6 σειρών
Αριθμός μαχαιριών ρότορα	88
Αριθμός κόντρα μαχαιριών	33

Η δεξαμενή καρπών είναι χωρητικότητας 11.500 λίτρων στο μοντέλο CX8090 με το οποίο έγινε η συγκομιδή. Η παρακολούθηση και ο έλεγχος στο επίπεδο πλήρωσης της δεξαμενής δημητριακών, γίνεται με κάμερες και εμφανίζεται στην οθόνη IntelliView ™ IV. Η ταχύτητα εκφόρτωσης κυμαίνεται στα 125 l/s. Στη συγκομιδή χρησιμοποιήθηκε καταστροφέας για λεπτό τεμαχισμό και εξαίρετη διασκορπισμό του αχυροστρώματος. Το σύστημα Dual-Chop ™ εξασφαλίζει εξαιρετικά λεπτό τεμαχισμό του υλικού (http://d3u1quraki94yp.cloudfront.net).

Εικόνα 1. Θεριζοαλωνιστική μηχανή (Πηγή: προσωπικό αρχείο)

2.3. Μέθοδος έρευνας

Στο πεδίο εφαρμόστηκε η μέθοδος των χρονικών σπουδών, κατά την οποία χρησιμοποιήθηκαν το κέντρο ελέγχου εντός της θεριζοαλωνιστικής και χρονόμετρο χειρός. Η μεθοδολογία των χρονικών σπουδών συνίσταται στον ακριβή προσδιορισμό του χρόνου εκτελέσεως μιας συγκεκριμένης εργασίας και στον συσχετισμό του προς την αντίστοιχη παραγωγή. Το σύνολο της εργασίας της μηχανής διαιρέθηκε σε επιμέρους φάσεις με βάση την διεύθυνση κίνησή της. Έτσι, η μηχανή κινήθηκε στα όρια του αγρού σε δύο διαδρομές και παράλληλα κατά τον άξονα Χ σε 25 διαδρομές. Υπολογίσθηκαν οι σταθεροί χρόνοι, οι μεταβλητοί χρόνοι και οι καθυστερήσεις, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση της θεριζοαλωνιστικής μηχανής. Επίσης, υπολογίσθηκαν τα σταθερά και τα μεταβλητά έξοδα,

καθώς και το κόστος χειριστή. Για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας του μηχανήματος συγκεντρώθηκαν στοιχεία που αφορούν το κόστος προμήθειας, συντήρησης και επισκευών, το ωρομίσθιο του χειριστή και το κόστος των καυσίμων και των λιπαντικών (τιμές ΑΤΕΟ 4^{ου} τριμήνου 2012) και χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που δίνει ο Miyata (1980). Η επεξεργασία των στοιχείων έγινε με το λογισμικό επιφάνειας εργασίας PFS, σύμφωνα με το πακέτο PLM (Precision Land Management), που σημαίνει ακριβής διαχείριση εκτάσεων. Η τεχνολογία αυτή καλύπτει όλες τις γεωργικές εφαρμογές ακριβείας και τις εφαρμογές αυτόματης καθοδήγησης. Στο κέντρο ελέγχου η ευφυής αυτοματοποίηση εξοικονομεί χρόνο και βελτιώνει και αυξάνει την απόδοση της συγκομιδής. Όλες οι βασικές παράμετροι και λειτουργίες του μηχανήματος μπορούν να αναλυθούν στην IntelliVIEW ™ IV οθόνη, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία του New Holland IntelliSteer® συστήματος αυτόματης πλοήγησης, το οποίο επιτρέπει τον προγραμματισμό διαδρομών, από την ευθεία A-B προς πιο σύνθετες προσαρμοστικές καμπύλες. Ο δέκτης λαμβάνει DGPS και GLONASS σήματα και είναι πλήρως συμβατός με EGNOS, Omnistar ή RTK. Το πακέτο περιλαμβάνει (Βιβλίο οδηγιών χειρισμού CX8090, 06/09):

- ✓ Τον αισθητήρα υγρασίας
- ✓ Την οθόνη IntelliVIEW ™ IV
- ✓ Την κεραία D-GPS
- ✓ Το πακέτο υποστήριξης πελάτη PLM

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Αποδοτικότητα του μηχανήματος

Η κατανομή του συνολικού χρόνου εργασίας της θεριζοαλωνιστικής μηχανής σε δευτερόλεπτα κυμάνθηκε ως εξής:

- Χρόνος κίνησης παράλληλα κατά τον άξονα X: 3.884"
- Χρόνος κίνησης στα όρια του αγρού: 1.436,4"
- Συνολικός χρόνος καθυστερήσεων: 900"
- Συνολικός χρόνος εργασίας(Kg/40 στρ.): 6.220,4 "(1h 43' 48")

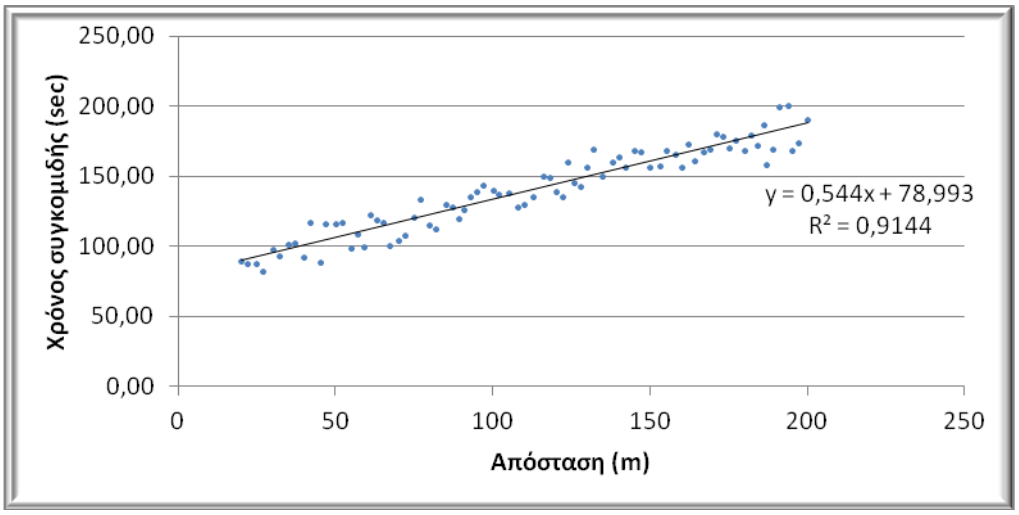
Στον Πίνακα 4 υπολογίζονται οι μεταβλητοί, οι σταθεροί χρόνοι και οι χρόνοι καθυστερήσεων και ο συνολικός χρόνος εργασίας για τον συγκεκριμένο αγρό.

Πίνακας 4. Κατανομή συνολικού χρόνου εργασίας θεριζοαλωνιστικής μηχανής σε δευτερόλεπτα

Διαδρομή	Χρόνος κίνησης παράλληλα κατά τον άξονα Χ(sec)	Χρόνος κίνησης στα όρια του αγρού(sec)	Συνολικός χρόνος καθυστερήσεων(sec)	Συνολικός χρόνος εργασίας (sec)
1	-	732	900	1632
2	-	704,4	-	704,4
3	160	-	-	160
4	159	-	-	159
5	158	-	-	158
6	159	-	-	159
7	158	-	-	158
8	174	-	-	174
9	169	-	-	169
10	180	-	-	180
11	166	-	-	166
12	165	-	-	165
13	167	-	-	167
14	160	-	-	160
15	172	-	-	172
16	226	-	-	226
17	171	-	-	171
18	164	-	-	164
19	176	-	-	176
20	126	-	-	126
21	162	-	-	162
22	132	-	-	132
23	152	-	-	152
24	128	-	-	128
25	130	-	-	130
26	100	-	-	100
27	70	-	-	70
Σύνολα	**3.884**	**1.436,4**	**900**	**6.220,4 (1h 43' 48")**

Η συγκομιδή του καρπού επιτεύχθηκε σε 1h 43' 48", με μέση ταχύτητα 3,2 km/h, οι στροφές του κινητήρα της θεριζοαλωνιστικής κυμάνθηκαν στις 2.100 rpm. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μέση απόδοση του μηχανήματος κυμάνθηκε στα 23,14 στρέμματα ανά ώρα. Η συνολική απόδοση της παραγωγής για την ποικιλία Ronaldo έφτασε στα 37.790Kg, δηλαδή 944,75Kg/στρέμμα.

Στο Σχήμα 2 υπολογίσθηκε η αποδοτικότητα της θεριζοαλωνιστικής μηχανής σε διάφορες αποστάσεις σε σχέση με τον χρόνο συγκομιδής.



Σχήμα 2. Αποδοτικότητα της θεριζοαλωνιστικής μηχανής σε διάφορες αποστάσεις σε σχέση με τον χρόνο συγκομιδής

Από το Σχήμα 2 προκύπτει ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ της απόστασης που διανύει η θεριζοαλωνιστική μηχανή και του χρόνου συγκομιδής, η οποία εκφράζεται με την εξίσωση του σχήματος 3 (R^2=0, 9144).

3.2. Κόστος λειτουργίας του μηχανήματος

Στον Πίνακα 5 δίνεται ο υπολογισμός των εξόδων λειτουργίας της θεριζοαλωνιστικής (Miyata, 1980).

Στον Πίνακα 6 και στο Σχήμα 3 φαίνεται το κόστος λειτουργίας του μηχανήματος σε σχέση με τις ώρες ετήσιας απασχόλησής του. Να τονισθεί ότι χωρίς την χρήση του καταστροφέα η θεριζοαλωνιστική καταναλώνει καύσιμα 45 l/h ενώ με την χρήση καταστροφέα καταναλώνει καύσιμα 60 l/h.

Πίνακας 5. Υπολογισμός εξόδων λειτουργίας θεριζοαλωνιστικής μηχανής (Miyata, 1980)

Είδη εξόδων	Έξοδα ανά έτος	Έξοδα ανά ώρα	Μηχάνημα: Θεριζοαλωνιστική μηχανή
1. Σταθερά έξοδα ΣΚ			
• Απόσβεση ΑΚ	Α/Ν	ΑΚ/ΩΛΕ	Α= 364.000 €
• Τόκος κεφαλαίου ΤΚ	Α . (Ν+1)/2Ν . $P_κ$	ΤΚ/ΩΛΕ	Η= 10.000 ώρες
• Ασφάλεια κεφαλαίου $A_σK$	Α . (Ν+1)/2Ν . $P_α$	$A_σK$/ΩΛΕ	Ν= 20 χρόνια
• Αποθήκευση $A_πK$	συνολικά	$A_πK$/ΩΛΕ	$P_κ$= 3%
			$P_α$= 0,2%
Σύνολο ΣΚ	**ΣΚ ανά έτος**=27.755€/έτος	**$ΣΚ_ω$**=55,51 €/h	
2. Μεταβλητά έξοδα ΜΚ			
• Συντήρηση, επισκευή $E_πK$		$E_π$. ΑΚ/Η	$E_π$= 0,8
• Καύσιμα $K_αK$		$K_αΩ$. $K_αK_λ$	$K_αΩ$=60 l/h
• Λιπαντικά ΛΚ		$Λ_π$. $K_αK$	$K_αK_λ$= 1,2276 €/ℓ
			$Λ_π$ = 0,2
Σύνολο ΜΚ	$ΜΚ_ω$. ΩΛΕ =58.760€/έτος	**$ΜΚ_ω$**=117,512 €/h	
3. Έξοδα μετακίνησης μηχανήματος $M_εK$		**$M_εK_ω$** συνολικά=64,45 €/h	**$M_εK_ω$**
4. Έξοδα προσωπικού ΠΚ			$A_ρΠ$= 1 χειριστής βαριού μηχανήματος
• Αριθμός εργατών		$A_ρΠ$. $Ω_ρΠ$(ΩΧΕ/ΩΛΕ)	$Ω_ρΠ$= 20,77 €/h
• Οδηγός οχήματος μετακίνησης			ΩΛΕ/ΩΧΕ=0,84
Σύνολο ΠΚ		**$ΠΚ_ω$**=17,45 €/h	
Συνολικά έξοδα ανά ώρα λειτουργίας: $ΣΚ_ω$+ $ΜΚ_ω$+ $M_εK_ω$+ $ΠΚ_ω$ =254,92 €/h			

Α Έξοδα προμήθειας (€): 364.000€
Ν Χρόνος απόσβεσης (έτη): 20 έτη
Η Διάρκεια συνολικής εργασίας (ώρες):10.000h
$E_π$ Παράγοντας επισκευής: 0,8
$P_κ$ Επιτόκιο κεφαλαίου: 3%
$P_α$ Επιτόκιο ασφάλισης: 0,2%
ΩΧΕ Ώρες χρησιμοποίησης ανά έτος
ΩΛΕ Ώρες λειτουργίας ανά έτος

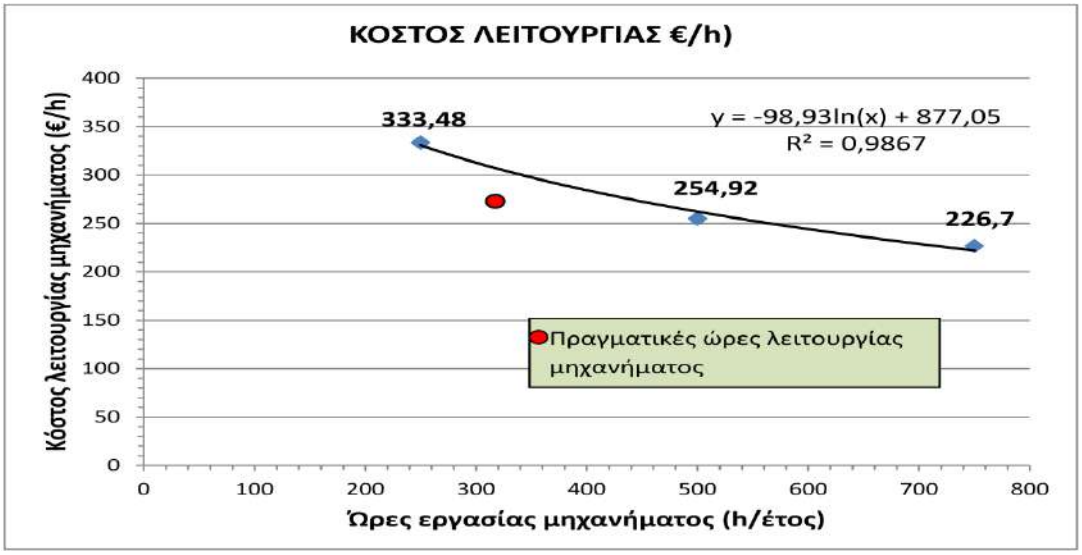
ΜΚ Μεταβλητά έξοδα
$E_πK$ Έξοδα συντήρησης/επισκευής: 29,12€/h
$K_αK$ Έξοδα καυσίμων: 73,66€/h
$K_αΩ$ Απαιτούμενα καύσιμα ανά ώρα: 60 lt/h
$K_αK_λ$ Κόστος καυσίμων ανά λίτρο: 1,2276 €/h
$Λ_π$ Παράγοντας λιπαντικών: 0,2
ΛΚ Έξοδα λιπαντικών: =14,732€/h

ΣΚ Σταθερά έξοδα
ΑΚ Έξοδα απόσβεσης: 18.200€/έτος, 36,4€/h
ΤΚ Τόκος κεφαλαίου: 5.733€/έτος, 11,466€/h
$A_σK$ Έξοδα ασφάλισης: 3.822€/έτος, 7,644€/h
$M_εK$ Έξοδα μετακίνησης: 64,45€/h

ΠΚ Έξοδα προσωπικού
$Ω_ρΠ$ Ωρομίσθιο προσωπικού: 20,77€/h
$A_ρΠ$ Αριθμός ατόμων: 1 (μέγεθος ομάδας εργασίας)
ΩΧΕ/ΩΛΕ Σχέση Ωρών χρησιμοποίησης/Ωρών λειτουργίας= (1/βαθμός εκμετάλλευσης)

Πίνακας 6. Ώρες εργασίας και κόστος λειτουργίας μηχανήματος

Ώρες εργασίας ανά έτος (h/έτος)	Κόστος λειτουργίας (€/h)
750	226,70
500	254,92
250	333,48
320 (πραγματικές ώρες λειτουργίας μηχανήματος)	273,92



Σχήμα 3. Κόστος λειτουργίας μηχανήματος σε σχέση με τις ώρες απασχόλησης

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για 250h, 500h και 750h απασχόλησης, το κόστος λειτουργίας του μηχανήματος είναι 333,48 €/h, 254,92 €/h και 226,70 €/h αντίστοιχα και μειώνεται όσο αυξάνονται οι ώρες ετήσιας απασχόλησής του, ενώ για τις πραγματικές ώρες λειτουργίας του μηχανήματος (320 h) το πραγματικό κόστος λειτουργίας είναι 273,92 €/h και υπολείπεται του θεωρητικού κόστους (306,39 €/h) κατά 32,47 €/h ή ποσοστό 10,60% .

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας προέκυψε ότι στην συγκομιδή ρυζιού, με την βοήθεια της σύγχρονης τεχνολογίας, οι ταχύτητες εργασίας είναι μεγαλύτερες, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου, την βελτίωση και αύξηση της απόδοσης και της παραγωγικότητας, τη μείωση των εργατοωρών και της κατανάλωσης καυσίμων και γενικότερα του κόστους λειτουργίας του μηχανήματος καθώς αυξάνονται οι ώρες εργασίας.

Συγκεκριμένα η μέση ταχύτητα κίνησης της θεριζοαλωνιστικής μηχανής ήταν 3,2 χλμ/ώρα και οι στροφές του κινητήρα της θεριζοαλωνιστικής κυμάνθηκαν στις 2.100 ανά λεπτό. Η μέση απόδοση του μηχανήματος κυμάνθηκε στα 23,14 στρέμματα ανά ώρα και η μέση απόδοση συγκομιδής της μηχανής κυμάνθηκε στα 37.790Kg, δηλαδή 944,75Kg/στρέμμα.

Ο χρόνος συγκομιδής είναι αντιστρόφως ανάλογος της απόστασης που διανύει η θεριζοαλωνιστική μηχανή και υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ αυτών των δύο παραγόντων.

Το ωριαίο κόστος λειτουργίας της θεριζοαλωνιστικής μηχανής μειώνεται με την αύξηση των ετήσιων ωρών απασχόλησης του μηχανήματος και το πραγματικό κόστος λειτουργίας της θεριζοαλωνιστικής μηχανής υπολείπεται κατά 10,60% του θεωρητικού κόστους.

Η σωστή διαχείριση των υπολειμμάτων του ρυζιού και όχι η καύση τους εμπλουτίζουν το έδαφος με θρεπτικά στοιχεία, με αποτέλεσμα την μείωση των εξόδων λίπανσης, την προστασία της ατμόσφαιρας από τα βλαβερά αέρια που εκλύονται, καθώς και του υδροφόρου ορίζοντα από την μείωση της λίπανσης.

Η εφαρμογή νέων τεχνολογιών στο σύστημα της Γεωργίας και συγκεκριμένα η Γεωργία Ακριβείας (Precision Agriculture), σε συνδυασμό με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS), της

τηλεπισκόπησης, των φορητών υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιών, δίνει τη δυνατότητα στους αγρότες να διαχειριστούν την χωρική μεταβλητότητα και το πλήθος πληροφοριών, να συγκρίνουν τις αποδόσεις παραγωγής μέσα από τους χάρτες εφαρμογών και βελτιώσουν τον προγραμματισμό των εργασιών και την αποδοτικότητα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

G.F. Botta, A. Tolón-becerra, X. Lastra-bravo, R. Hidalgo, D. Riveroe, D. Agnes, 2015. Alternatives for handling rice (Oryza sativa L.) straw to favor its decomposition in direct sowing systems and their incidence on soil compaction. Geoderma 239–240, 213–222

Dobbermann, Fairhurst, 2002. Rice straw management. Better Crops Int. 16. Special Supplement, May 2002.

Miyata, E. Σ., 1980. Determining fixed and operating costs of logging equipment. General Technical Report NC-55, USDA, Forest Service, 16 p.

Mohammad Reza Yousefi, 2014. Application of GIS and GPS in Precision Agriculture (A Review). International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research Volume 2, Issue 4(2), : 473-476

New Holland Agriculture, (Greek 06/09). Βιβλίο οδηγιών χειρισμού CX8090, Print No. 84220680, 4th edition. Από τη σειρά με αριθμό 1720

Shibusawa, S., 1998. Precision Farming and Terra- mechanics. Fifth ISTVS Asia-Pacific Regional Conference in Korea, October 20-22

Salwa Mostafa Shehata, 2016. Straw Wastes from an Environmental Disaster to ECO-Board towards a Systainable Urban Environment. Procedia Environmental Sciences 34 (2016), 539-546.

Ιστοσελίδες

http://www.cressoni.it/download_pdf/CRESSONI_CRX_RICE.pdf (23/1/2017)
http://d3u1quraki94yp.cloudfront.net/nhag/eu/en-uk/assets/pdf/combine-harvesters/CXElevation_132006_INB_2.pdf (Ημ/νία ανάκτησης: 23/1/2017)
http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT(2014)529049_EN.pdf (Ημ/νία ανάκτησης: 22/01/2017)
http://www.ijabbr.com/article_12516_2a5ce07582300658c478705d7c31218e.pdf (Ημ/νία ανάκτησης: 22/01/2017)

ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΑΓΡΟΤΩΝ ΣΕ ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΑΕΙΦΟΡΟ ΓΕΩΡΓΙΑ – ΜΕΛΕΤΗ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΕΡΓΟΥ SAGRI

Essam Sh. Mohamed* Ευάγγελος Δημητρίου & Γεώργιος Παπαδάκης
*Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, *email: esamsh@aua.gr*

Περίληψη

Η σχέση μεταξύ γεωργίας και περιβάλλοντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον όρο «αειφόρος γεωργία». Όλα τα συστήματα καλλιέργειας, από την συμβατική έως την οργανική καλλιέργεια, έχουν τη δυνατότητα να είναι τοπικά βιώσιμα. Στην πράξη, η χρήση των συστημάτων αυτών εξαρτάται από αγρότες οι οποίοι έχουν αποκτήσει γνώση στην κατάλληλη τεχνολογία σε συγκεκριμένο αγρο-οικολογικό περιβάλλον. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι η εκπαίδευση στη γεωργία παίζει σημαντικό ρόλο για την προετοιμασία των αγροτών, των ερευνητών και των γεωπόνων εφαρμογών με σκοπό να συνεισφέρουν στην παραγωγή. Το χρηματοδοτούμενο έργο SAGRI «Skills Alliance for Sustainable Agriculture» στοχεύει στην προώθηση των δεξιοτήτων των εργαζομένων στη γεωργία (κυρίως αγρότες) και των γεωπόνων εφαρμογών μέσω της ανάπτυξης νέων προγραμμάτων σπουδών και διδακτικών προγραμμάτων που ενσωματώνουν με πρακτικό τρόπο τις τελευταίες εξελίξεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις εφαρμογές τους στην γεωργία. Ο σκοπός είναι να παρέχει στους αγρότες και αγροτικούς φορείς τις γνώσεις, δεξιότητες και ικανότητες στον τομέα της αγρο-περιβαλλοντικής τεχνολογίας για την αειφόρο γεωργία.

Λέξεις κλειδιά: Εκπαίδευση στην γεωργία, βιωσιμότητα, πιστοποίηση δεξιοτήτων

Education in New technologies for Sustainable Agriculture – The case study of the SAGRI project

Essam Sh. Mohamed* Evangelos Dimitriou & George Papadakis
*Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, *email: esamsh@aua.gr*

ABSTRACT

This paper presents the SAGRI project (Skills Alliance for Sustainable Agriculture) objectives and methodology. The SAGRI project aims at advancing the skills of European agricultural workers and agricultural extension staff through the development of new curricula and teaching programmes that integrate, in a practical way, the latest developments in agricultural applied research. The purpose is to provide farmers and agricultural stakeholders with knowledge, skills and competencies in the field of agro-environmental technology for sustainable agriculture. Renewable energy (RE) including bioenergy is considered one of the main billers for ensuring sustainability in agriculture. Therefore, dedicated educational modules are developed for renewable and bioenergy applications in agriculture along with other educational modules for sustainable agriculture, such as precision technology, remote sensing, integrated pest management and drip irrigation and water-conservation technologies.

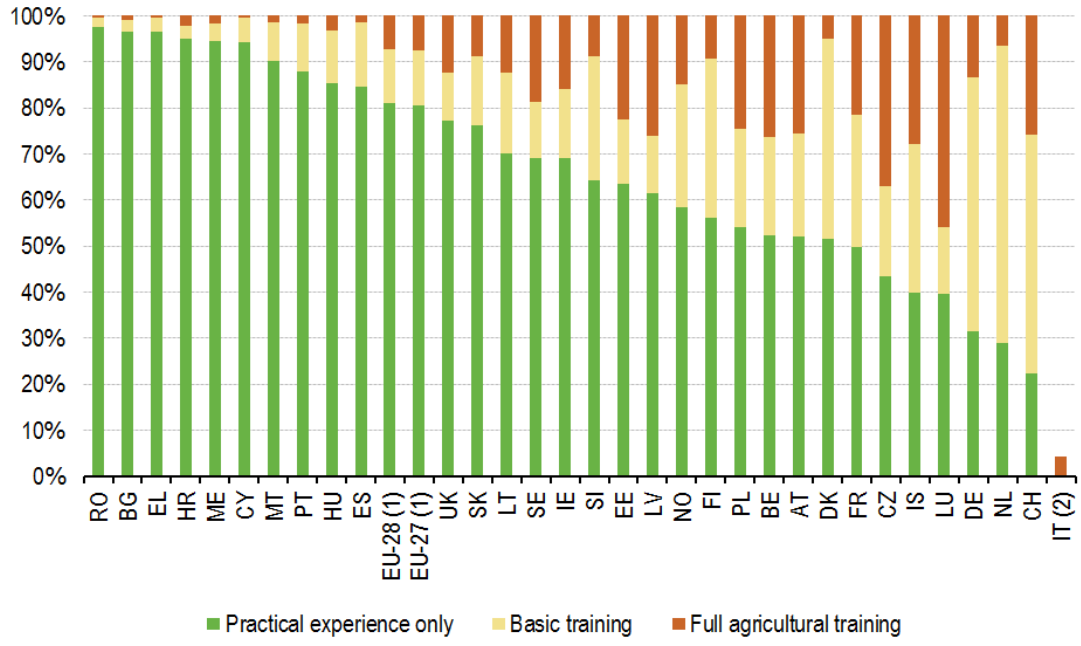
Keywords: agriculture education, renewable energy, sustainability, skills certification.

1. INTRODUCTION

Agriculture plays a key role in land management and has a huge responsibility in the preservation of natural resources. Agriculture is both extremely vulnerable to climate change and a major contributor to it. It is also a major user and polluter of water, a driver of deforestation and of loss of biodiversity.

The desired relationship between agriculture and the environment can be captured by the term "sustainable agriculture". All farming systems, from intensive conventional farming to organic farming, have the potential to be locally sustainable. Whether they are in practice depends on farmers adopting the appropriate technology in the specific agro-ecological environment. Thus, education in agriculture plays an important role in preparing agricultural workers, researchers and extension staff to make productive contributions.

A critical issue in the 21st century is the changes and adaptations required in agricultural education in order to be more effectively and to contribute to improved sustainable agricultural production and rural development [1]. According to Rogers, [2] "poor training of agricultural extension staff has been identified as part of the problem of the relative ineffectiveness of much of extension in the field". This applies not only to extension staff, but also to agricultural professionals in general. Unfortunately, training of human resources in agriculture is often not a priority in countries' development plans. In agriculture, only 17 % of farmers in EU finished basic or full training in agriculture-related disciplines [3].



(1) Excluding Italy.
(2) In Italy different definitions have been used for the levels practical experience and basic training, data of Italy on these categories are therefore not comparable with data of other countries and are therefore not displayed.

Fig. 1. Share of farm managers having as highest training level basic training, practical experience or full agricultural training, EU-28, Source: Eurostat

Thankfully, recent developments in science and technology have provided the technological tools to overcome significant obstacles of the past and to enhance sustainable farming: 1) Precision technology. Adjustments in volume and timing of fertilizer and pesticide inputs and limited input leakage to environment are expected in precision agriculture, 2) Remote sensing to assess land capability 3) Integrated pest management in plant protection, 4) Agricultural reuse of organic residuals, 5) Drip irrigation and water-conserving technologies, 6) Renewable energy and its application as green agricultural energy source, 7) Bioenergy and energy crops. Nevertheless, not all agricultural stakeholders have been introduced to them or have been trained to use them. Furthermore, novel environmental technologies and agricultural solutions, products of research in this area, remain unutilized because of the difficulty in communicating those results to the farmers.

The SAGRI project bridges the gap between new development in agriculture science and farmers and agriculture extension staff education by introducing educational tools that contain conventional lectures in classroom, training the trainers sessions, the development of e-learning platform and accreditation and certification of training and trainers according to the EQF/ECVET framework.

A consortium from three countries, Greece, Italy and Portugal, implements the SAGRI project. The Agricultural University of Athens – AUA (Greece), coordinates the project activities with the participation of: EUROTRAINING EDUCATIONAL ORGANIZATION (Greece); PANHELLENIC CONFEDERATION OF UNIONS OF AGRICULTURAL COOPERATIVES – INASO-PASEGES (Greece); SWISS APPROVAL TECHNISCHE BEWERTUNG S.A. (Greece); UNIVERSITY OF ÉVORA (Portugal); REGIBIO - Formação e Consultadoria (Portugal); CONFEDERATION OF PORTUGUESE FARMERS (Portugal); UNIVERSITY OF BASILICATA (Italy); E.Ri.Fo - Ente di RIcerca e FOrmazione (Italy); Confederazione Generale dell'Agricoltura Italiana (Italy).

2. METHODOLOGY

In order to achieve the SAGRI project objectives, the waterfall methodology is used. The waterfall methodology is a group of sequential; non-iterative processes, in which the progress of work is directed downwards (waterfall) from analysis, design, construction, testing, implementation to maintenance, see Fig. 2.

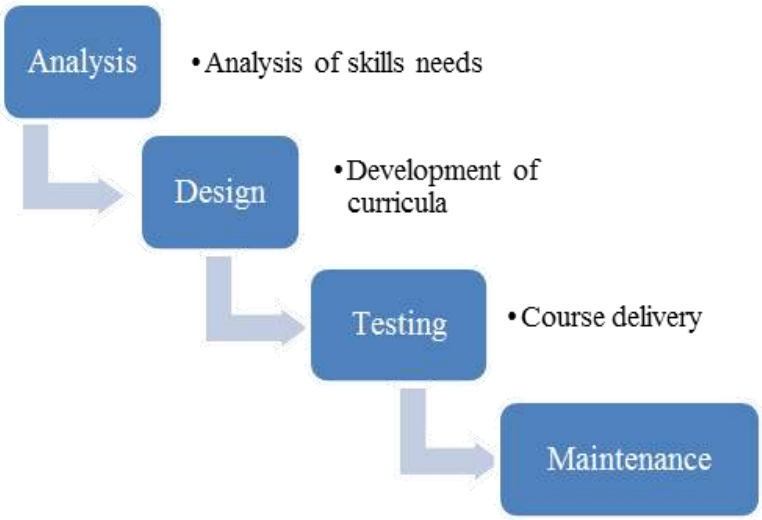


Fig. 2. Waterfall methodology of the SAGRI project

2.1 Analysis of skills needs for agricultural workers

According to the EU skills panorama 2014 [4], the SAGRI project has identified and analyzed the job-specific skills required for agriculture workers. These skills fall under two major categories:

1. Green skills. In this category agriculture workers need to have a holistic awareness of sustainability, which includes measures for the reduction of CO2 emissions, extensive use of renewable energy, biofuels, rational use of water resources and ecosystem. Furthermore, the agriculture workers need to be aware of new regulations and legislations linked to the sustainability agenda, which will require regular updating of skills and accreditation of those skills.

2. Skills on agriculture technologies (agri-tec). These types of skills constitute a crucial challenge for the agriculture sector, due to the fact of increasing implementation of technology. The skilled workers will need to be able to understand and apply these technologies, including those related to remote sensing and precision agriculture.

Therefore, seven (7) training modules have been identified for future agriculture workers: 1) Precision technology; 2) Remote sensing to assess land capability; 3) Integrated pest management in plant protection; 4) Agricultural reuse of organic residuals; 5) Drip irrigation and water-conserving technologies; 6) Renewable energy and its application as green agricultural energy source; 7) Bioenergy and energy crops;

2.2 Development of curricula

Based on the research outputs and needs identified in the previous in the design stage, the SAGRI curriculum will have a specific character and be designed in terms of tangible learning outcomes for EQF (European Qualifications Framework for lifelong learning) level 4 to 5, taking into account the complexity, range and level of learning expected to be achieved by the agricultural workers. It will be broken down into four main sections dedicated to:

1. Referential of activities and tasks;
2. Description of the units of learning outcomes in terms of knowledge, skills and competences;
3. Specification of the number of total learning hours, including classroom hours, hands-on practice, self-study and assessment, and allocate respective ECVET (European Credit System for Vocational Education and Training) points;
4. A glossary with key-terms will be also developed.

The SAGRI curricula will be an Open Educational Resources (OER) available in all partners' languages for consultation and/or download from the SAGRI OER platform Partners will reproduce, print and distributed the printed material to stakeholders during the multiplier events. The aim of the SAGRI OER platform is to offer an interactive resource for promoting the project idea and virtual learning, making all training resources widely available as Open Educational Resources. It will raise national, European and international awareness of the project in order to ensure maximum outreach, longer impact and sustainability.

2.3 Course Delivery

The main objectives of this process are the delivery, pilot testing, assessment and review of the trainee programme in Greece, Portugal and Italy. The training and assessment material developed in the previous stage is utilized and revised.

The course delivery includes:

- Delivery of curricula to the agricultural extension staff (training the trainers).
- Delivery of the curricula to the agriculture workers (farmers)
- Feedback collection and adjustments of both curricula according to the evaluation process. This feedback and evaluation process constitutes the final stage of the waterfall methodology introduced in Fig. 2.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 General

The qualitative results expected will significantly improve:

1. the VET sectors courses delivery, and
2. the skills of agricultural workers with particular focus on “green skills” and “digital skills” for sustainable agriculture.

These results can be translated into quantitative targets concerning:

a) the number of agricultural workers participating to VET (according to studies the transition/access of agricultural workers to VET, is very low),
b) the number of agricultural workers that will obtain the SAGRI certificate, and
c) the rise to the share of employment of agricultural workers (which, according to studies is correlated to the level of VET attainment and specific job specific skills including “green skills” and “digital skills”).

3.2 Targeted Number of trainees and accreditation

At the end of the previous stage (course delivery), it is expected that 600 agricultural workers (200 per partner country) and 150 agriculture extension staff (50 per partner country) will be trained. All agriculture extension staff will be have to follow all the seven modules, while the agriculture workers could choose from one to seven modules according to their background and time availability.

The main aim of the accreditation is set the platform for the development of the curriculum using EQF/ECVET standards as well as setting the rules for the accreditation of the agriculture workers and the agriculture extension staff.

3.3 Dedicated number of learning hours and assessment

Each module will require 10 hours of learning efforts per week. This includes classroom hours, hands-on practice, self-study, self and peer assessment. One day of the training for each module will be dedicated to field visit, where selected new technologies are going to be demonstrated in practice.

The training courses of the agriculture extension staff will be delivered twice during the lifetime of the project. Each training course will have a duration of two months. The training courses of the farmers will be delivered in four periods of two months each.

Both agriculture extension staff and agriculture workers will navigate through the SAGRI open educational resources platform during the self-study hours. The users will navigate the SAGRI OER platform, which contains massive Online Open Course (MOOC). Moreover, it will contain the teaching and assessment material. It will also contain a virtual community space.

3.4. Renewable energy education

One of the main goals of training future sustainable agriculture workers is to raise the awareness regarding the environment. This may relate to understanding of the global warming phenomena, the reduction of carbon emissions, energy efficiency and penetration of renewable energy (RE).

There are two out of the seven modules of the training course that directly deal with the renewable energy education. Namely, module No.6 “Renewable energy and its application as green agricultural energy source” and “Bioenergy and energy crops”. The main topics of renewable energy education are the various types of renewable energy sources, environmental awareness, renewable energy applications, legislations and safety.

3.5. Applications of RE in agriculture

The agriculture extension staff will train the agriculture workers on the various applications of renewable energy in agriculture. One of the most widely applied RE applications in agriculture is water pumping. Photovoltaics, wind and hybrid RE systems can supply power to surface or submerged pumps to cover water needs for irrigation, see Fig. 3. Furthermore, in case when the ground water is not suitable for irrigation, water desalination can be connected to renewable energy sources. This finds many applications especially in vegetable and floriculture greenhouse, applying hydroponic technologies. Other applications of renewable energy in agriculture include, but not limited to, drying of agricultural products, space heating with geothermal energy, rural electrification and refrigeration.

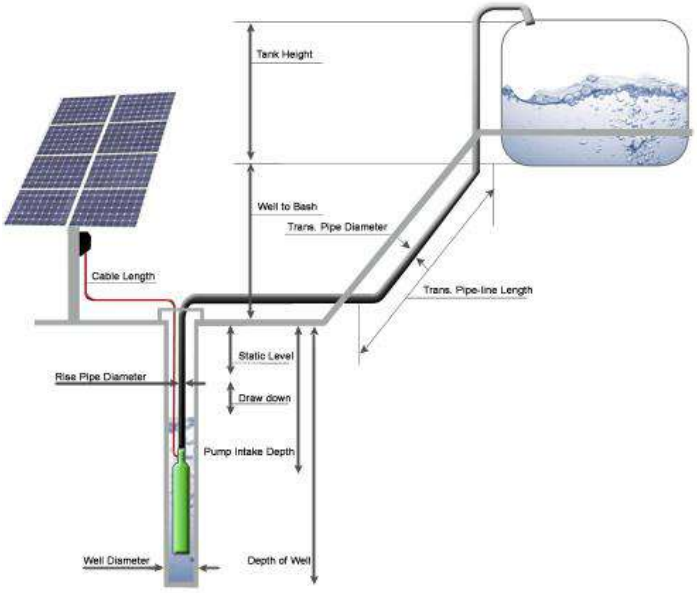


Fig. 3. Photovoltaic water pumping systems, indicating the simplicity of the system design, *Source:* Noor power energy [5]

3.6 Bioenergy and energy corps

The term bioenergy refers to energy derived from any organic matter that is available on a renewable basis, including forest and mill residues, agricultural crops and associated field as well as processing residues, wood and wood waste, animal excreta, aquatic plants, fast-

growing trees and herbaceous crops, municipal and industrial wastes amongst others [6]. The farmers will be trained on the various sources of bioenergy (animal wastes, agriculture residues and energy crops). They will be introduces to the various technologies of the physical and chemical transformation of biomass to heat or biofuels. Furthermore, they will be introduced to the handling, transport and storage of biomass, bioenergy products and by-products, see Fig. 4.

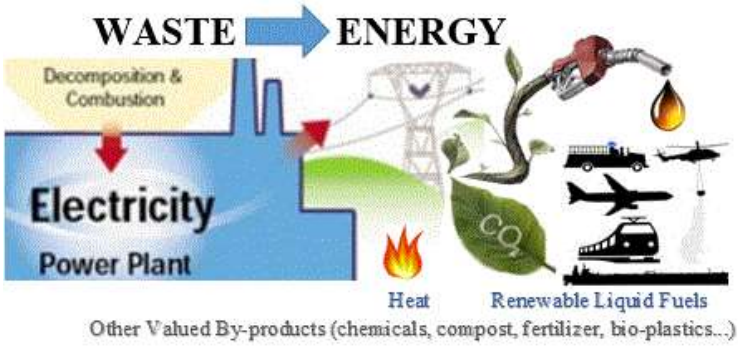


Fig. 4. Biomass to energy illustration, Source: Vermont Bioenergy Initiative (VBI) [7]

4. CONCLUSION

The SAGRI project aims at advancing the skills of European agricultural workers and agricultural extension staff through the development of new curricula and teaching programmes. The SAGRI project bridges the gap between new development in agriculture science and farmers and agriculture extension staff education by introducing educational tools that contain conventional lectures in classroom, training the trainers sessions, the development of e-learning platform and accreditation and certification of training and trainers according to the EQF/ECVET framework.

Renewable energy education in agriculture within the SAGRI project aims at introducing the various types of renewable energy sources, environmental awareness, renewable energy applications, legislations and safety to farmers and agriculture extension staff.

Bionenergy has a dedicated educational module as renewable energy source. Trainees will be introduced to the various technologies of the physical and chemical transformation of biomass to heat or biofuels. Furthermore, they will be introduced to the handling, transport and storage of biomass, bioenergy products and by-products.

ACKNOLEDGEMENT AND DISCLAIMER

This work is co-funded by the Erasmus+ programme of the European Union, KA2: Cooperation for innovation and the exchange of good practices – Sector Skills Alliances, agreement number 2016-2987/001-001.

Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

The European Commission support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and

the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

REFERENCES

[1] Van Crowder, L, Lindley, W. I., Bruening, T. H., & Doron, N. (1999). Agricultural education for sustainable rural development: Challenges for developing countries in the 21st century, [Online], 14 pages. Extension, Education, and Communication Service (SDRE) FAO Research, Extension and Training Division.

[2] Poor training of agricultural extension staff has been identified as part of the problem of the relative ineffectiveness of much of extension in the field.

[3] Eurostat, Agri-environmental indicator - farmers' training and environmental farm advisory services. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Share_of_farm_managers_having_as_highest_training_level_basic_training,_practical_experience_or_full_agricultural_training,_EU-28,_IS,_NO,_CH,_ME,_2010.png

[4] EU Skills Panorama (2014) Skilled agricultural workers analytical highlight, prepared by ICF and Cedefop for the European Commission http://skillspanorama.cedefop.europa.eu/en/analytical_highlights/prospects-skilled-agricultural-workers).

[5] Solar-powered water pumps. Noor Power Energy, http://www.noorpower.com/solar/waterpump.html.

[6] ILO, 2011. Study of occupational and skill needs in renewable energy: final report / International labour office, ILO skills and employability Department (EMP/SKILLS), European Commission. Geneva.

[7] Vermont Bioenergy Initiative (VBI) http://vermontbioenergy.com/category/field-notes/.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

Καρνούτσος Παναγιώτης-Αναστάσιος[1], Δενιζοπούλου Αναστασία[1], Καραγιοβανίδης Μάριος[1], Μαρτζοπούλου Αναστασία[2], Φράγκος Βασίλειος[1]

[1]Τμήμα Γεωπονίας, Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124, Θεσσαλονίκη, email : karnouts@agro.auth.gr

[2]Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124. Θεσσαλονίκη , email : amartzopoulou@arch.auth.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στον σχεδιασμό και τον προγραμματισμό μιας συσκευής ανοιχτού κώδικα (Arduino) η οποία τοποθετήθηκε σε πτηνοτροφική μονάδα βιολογικών κοτόπουλων. Η συσκευή αυτή μαζί με κατάλληλο σύστημα αισθητήρων μπορεί να ελέγχει το εσωτερικό περιβάλλον μιας κτηνοτροφικής μονάδας, όσον αφορά τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας και να τα αποθηκεύει, εύκολα και με μικρό κόστος. Τέλος, από την εφαρμογή του συστήματος της συσκευής ανοικτού κώδικα και των αισθητήρων υγρασίας προέκυψαν πειραματικά δεδομένα για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Μέσω της ανάλυσης και τη σύγκριση των δεδομένων αυτών διαπιστώθηκε η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος μέτρησης όσον αφορά τον έλεγχο και τη ρύθμιση της σχετικής υγρασίας.

Λέξεις κλειδιά: σχετική υγρασία, συσκευή ανοιχτού κώδικα, πτηνοτροφική μονάδα, έλεγχος περιβάλλοντος

HYMIDITY MEASUREMENT IN A LIVESTOCK BUILDING USING AN OPEN SOURCE DEVICE

Karnoutsos Panagiotis-Anastasios[1], Denizopoulou Anastasia[1], Karagiovanidis Marios[1], Martzopoulou Anastasia[2], Fragos Vasilios[1]

[1]Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki P.C. 54124 Thessaloniki email karnouts@agro.auth.gr

[2]Faculty of Architecture. Polytechnic School, Aristotle University of Thessaloniki, P.C. 54124 Thessaloniki, email amartzopoulou@arch.auth.gr

ABSTRACT

The specific project is based on the design and programming of an open source device (Arduino) which was placed in a poultry farm unit of organic animals. This device, along with a suitable sensor system, can control the internal environment of a livestock unit, in terms of the relative humidity and it is able to store them easily and at low cost as well. Finally, a series of experimental data in a specific period has emerged through the implementation of the open source device system and the humidity sensors. Through the analysis and comparison of the specific data, the efficiency of the suggested measurement system for controlling and regulating relative humidity was ascertained. Keywords: relative humidity, open source device, poultry, microclimate control

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στο περιβάλλον μιας κτηνοτροφικής κατασκευής είναι η υγρασία. Η σχετική υγρασία είναι μία σημαντική παράμετρος του μικροκλίματος μιας κτηνοτροφικής μονάδας και πρέπει να ρυθμίζεται και να ελέγχεται καθώς η υψηλή σχετική υγρασία εγκυμονεί πολλούς κίνδυνους για τα ζώα αλλά και για την πρόωρη φθορά των κατασκευαστικών στοιχείων της μονάδας. Σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, τα ζώα δυσκολεύονται να αποβάλουν θερμότητα μέσω της εξάτμισης, ενώ όλα τα υλικά της κατασκευής φθείρονται (κυρίως τα μεταλλικά στοιχεία, λόγω οξείδωσης). Η σχετική υγρασία ρυθμίζεται με τη χρήση αερισμού και μόνωσης ενώ σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και η θέρμανση. (Χρυσούλα Νικήτα- Μαρτζοπούλου, 2006). Τα περισσότερα αυτόνομα όργανα μέτρησης της υγρασίας που υπάρχουν στην αγορά δεν καταγράφουν τις τιμές, παρά μόνο έχουν άνω και κάτω όρια συναγερμού και πιθανόν οπτική ένδειξη της μετρούμενης τιμής για εποπτεία από άνθρωπο σε πραγματικό χρόνο. Ολοκληρωμένα συστήματα, μέτρησης, ελέγχου αλλά και καταγραφής των τιμών για μελλοντική χρήση και ανάλυση, απαιτούν είτε διασύνδεση με μονάδες καταγραφής, είτε τον σχεδιασμό και υλοποίηση συστημάτων με Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές (Programmable Logic Controller- PLC). Το κόστος των ολοκληρωμένων συστημάτων ή ορισμένων αυτόνομων συσκευών με αυξημένα χαρακτηριστικά είναι ιδιαίτερα αυξημένο και καταλήγει απαγορευτικό για μικρές μονάδες.

Οι Bajer και Krejcar (2015) σχεδίασαν και κατασκεύασαν συσκευή ανοιχτού κώδικα (Arduino) με σκοπό την καταγραφή και αποθήκευση των συνθηκών του περιβάλλοντος ενός θερμοκηπίου. Η συγκεκριμένη διάταξη είχε τη δυνατότητα να μετρά περισσότερες παραμέτρους, να οπτικοποιεί τα δεδομένα και να είναι πλήρως επεκτάσιμη. Η συσκευή εγκαταστάθηκε σε πραγματικό θερμοκήπιο, με αξιόπιστα αποτελέσματα τόσο στις μετρήσεις όσο και την εξοικονόμηση χρημάτων και χρόνου από το χρήστη, στο επίπεδο γρήγορου, πρωτότυπου σχεδιασμού (ο οποίος μπορεί να αποτελέσει τη βάση για σχεδιασμό εξοπλισμού βιομηχανικού επιπέδου). Όπως αποδεικνύεται από τα συμπεράσματα της εργασίας η χρήση των μικροελεγκτών της οικογένειας Arduino είναι ιδανική και για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Οι Jackman et al. (2015) πραγματοποίησαν μια ολοκληρωμένη σειρά πειραματικών εργασιών για τη συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία του αέρα, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα και η συγκέντρωση αμμωνίας από μια τυπική μονάδα κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής στην Ιρλανδία. Τα δεδομένα από τους αισθητήρες συγχωνεύθηκαν με τα δεδομένα των οργάνων ζύγισης της μονάδας πάχυνσης σε ένα σύστημα αποθήκευσης δεδομένων και έτσι ένα μοντέλο πρόβλεψης του μέσου βάρους των πτηνών από τα μετρούμενα περιβαλλοντικά δεδομένα μπορούν να βαθμονομηθούν και να επικυρωθούν. Με βάση τα παραπάνω κατασκευάστηκε ένα ειδικό προγνωστικό μοντέλο για κάθε πτηνοτροφείο που να μπορεί να προβλέψει περιβαλλοντικές παραμέτρους δίνοντας αρκετό χρόνο στους παραγωγούς να λάβουν τα απαραίτητα διορθωτικά μέσα.

Οι Mirzaee-Ghaleh et al. (2014) ανέπτυξαν ένα σύστημα παρακολούθησης της διαχείρισης του εσωτερικού κλίματος και σύγκρισης ασαφούς λογικής (fuzzy logic controllers) και συμβατικών εντός/εκτός λειτουργίας ελεγκτών (on/off controllers) χρησιμοποιώντας το λογισμικό LabVIEW σε ένα πρότυπο πτηνοτροφείο στο Ιράν. Οι μεταβλητές που μετρήθηκαν ήταν η θερμοκρασία, η υγρασία, οι συγκεντρώσεις CO_2 και NH_3. Η συλλογή δεδομένων ήταν συνεχής κατά τη διάρκεια τριών εβδομάδων του Φεβρουαρίου και όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι ελεγκτής ασαφούς λογικής παρέχει καλύτερη απόκριση ως προς τη θερμοκρασία και την

υγρασία. Επίσης έδειξαν επίσης ότι η μέση τιμή της συγκέντρωσης του CO_2 με τον εντός/εκτός λειτουργίας ελεγκτή ήταν χαμηλότερη από εκείνη με τον ασαφούς λογικής ελεγκτή ενώ η συγκέντρωση NH_3 ήταν η ίδια και για τα δυο συστήματα ελέγχου. Η μέση τιμή της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τους μετατροπείς για το ασαφές σύστημα ελέγχου βρέθηκε να είναι 42% χαμηλότερη από εκείνη του εντός/εκτός λειτουργίας αντίστοιχου συστήματος.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η κατασκευή μιας συσκευής Arduino για την μέτρησης της υγρασίας του περιβάλλοντος μιας κτηνοτροφικής κατασκευής. Το Arduino είναι μια συσκευή ανοιχτού κώδικα που με την σύνδεση κατάλληλων αισθητήρων και τον κατάλληλο προγραμματισμό μπορεί να μετρήσει τις τιμές τις υγρασίας και να τις καταγράψει-αποθηκεύσει με αξιοπιστία και ακρίβεια. Η συσκευή είναι πολύ οικονομική και κοστίζει τέσσερις φορές λιγότερο από μια επαγγελματική συσκευή μέτρησης υγρασίας. Οι μετρήσεις έγιναν σε μια βιολογική πτηνοτροφική μονάδα της περιοχής του Νομού Θεσσαλονίκης.

2.. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Συσκευή ανοιχτού κώδικα

Η εξέλιξη της τεχνολογίας συνέβαλε στην εμφάνιση συσκευών ανοιχτού κώδικα στην αγορά. Μια από τις πιο διαδεδομένες είναι η συσκευή Arduino. Η συσκευή αυτή με απλή λειτουργία λαμβάνει σήματα από διάφορες πηγές και αισθητήρες και έχει τη δυνατότητα να τα μετατρέπει σε εντολές μέσω κατάλληλου προγραμματισμού. Προορίζεται για αρχάριους χρήστες στον προγραμματισμό και στην ηλεκτρονική. Έχει σαν βάση τον μικροελεγκτή AT mega της εταιρείας Atmel του οποίου τα ηλεκτρονικά σχέδια κυκλοφορούν ελευθέρα στο διαδίκτυο για όσους χρήστες επιθυμούν να τον προγραμματίσουν μόνοι τους. Το διαδίκτυο επίσης προσφέρει τη δυνατότητα επικοινωνίας και παροχή βοήθειας σε χρήστες που ασχολούνται με projects και προγραμματισμό των συγκεκριμένων συσκευών. Η συσκευή Arduino λειτουργεί με ρεύμα τάσης 5 Volt το οποίο μπορεί να πάρει είτε από τη θύρα USB είτε από εξωτερική τροφοδοσία. Έχει μνήμη flash on-board έχει θύρες τόσο αναλογικού όσο και ψηφιακού σήματος αλλά και θύρα USB για την επικοινωνία. (Καρνούτσος Παναγιώτης 2016)

Για την κατασκευή του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συσκευές

- Μία πλακέτα Arduino Mega 2560 ως συσκευή ανοιχτού κώδικα
- 3 αισθητήρες θερμοκρασίας-υγρασίας τύπου DHT 11 για την καταγραφή των μετρήσεων
- Breadboard Mini για την στήριξη και τη σύνδεση των αισθητήρων
- 1 microSD Shield για την αποθήκευση των δεδομένων σε κάρτα microSD
- 1 Breadboard για τη σύνδεση της εξωτερικής τροφοδοσίας ρεύματος των αισθητήρων και της πλακέτας του Arduino.
- 1 μετασχηματιστής τάσης 5 Volt με τροποποιημένη την έξοδο USB σε jumper wires για Breadboard για την τροφοδοσία ρεύματος
- Jumper wires για τη σύνδεση και την επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων και του Arduino αλλά και την παροχή ρεύματος.
- Καλώδιο τύπου «συναγερμού» 4x0,22 + 2x0.50 το οποίο έχει μαγνητική θωράκιση, με σκοπό την αποφυγή παρεμβολών.

2.2 Προγραμματισμός συσκευής ανοιχτού κώδικα

Ο προγραμματισμός του Arduino επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής Arduino Ide που είναι διαθέσιμη δωρεάν στο διαδίκτυο και είναι πολύ εύκολη στη χρήση. Για την λειτουργία του συστήματος, συγγράφηκε ένας κώδικας ο οποίος διαβάζει το analog out από κάθε αισθητήρα DHT11 , το μετατρέπει σε τιμές υγρασίας χρησιμοποιώντας τα τεχνικά στοιχεία των αισθητήρων και μαθηματικές αναλογίες και αποθηκεύει τις συγκεκριμένες τιμές ανά 5 λεπτά στην κάρτα micro SD.

2.3 Διάταξη πειραματικών μετρήσεων

Η μονάδα στην οποία εγκαταστάθηκε η συσκευή είναι η πτηνοτροφική μονάδα «Αγρόκτημα Αραμπατζή» στην περιοχή της Λακκιάς στη Θεσσαλονίκη. Ο χώρος έχει διαστάσεις 18 × 8m με προσανατολισμό ανατολικό-δυτικό. Το ύψος του κτιρίου είναι 2,70mτην έκταση. Το πτηνοτροφείο αερίζεται φυσικά με 7 παράθυρα (100 × 42cm) κατά μήκος του δυτικού πλευρικού τοιχώματος και 16 κατά μήκος του ανατολικού πλευρικού τοιχώματος σε δύο σειρές, 8 (90 × 50cm) και άλλα 8 πάνω τους (145 × 50cm). Επιπλέον, στο κάτω μέρος κατά μήκος της ανατολικής πλευράς υπάρχουν 11 παράθυρα εξόδου για τις κότες (50,5 × 60cm). Υπάρχουν επίσης 6 κυκλικοί αεραγωγοί οροφής (διαμέτρου 22εκ.) στο μέσο της οροφής της μονάδας. Το υπόστρωμα στο δάπεδο είναι πριονίδι. Η συνολική έκταση της μονάδας είναι 144m^2 και περιείχε 8 στρογγυλές ποτίστρες και 11 στρογγυλές τροφοδοσίες τροφής ομοιόμορφα κατανεμημένες.

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε σύστημα που καταγράφει τις τιμές της υγρασίας που επικρατούν μέσα στην πτηνοτροφική μονάδα σε 3 σημεία και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο τύπου .txt, ανά 5 λεπτά της ώρας 24 ώρες το 24ωρο. Η συσκευή τοποθετήθηκε ακριβώς στο κέντρο της μονάδας όπως και ο πρώτος αισθητήρας. Ο δεύτερος αισθητήρας τοποθετήθηκε στη μέση της απόστασης από την άκρη της μονάδας και το κέντρο δηλαδή περίπου στα 2 μέτρα. Παρόμοια τοποθετήθηκε και ο τρίτος αισθητήρας από την άλλη άκρη της μονάδας. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα παράθυρα της κατασκευής παρέμειναν ανοιχτά καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος εκτός από τις ημερομηνίες και ώρες που αναφέρονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 : Ημερομηνίες και ώρες που παρέμειναν κλειστά τα παράθυρα.

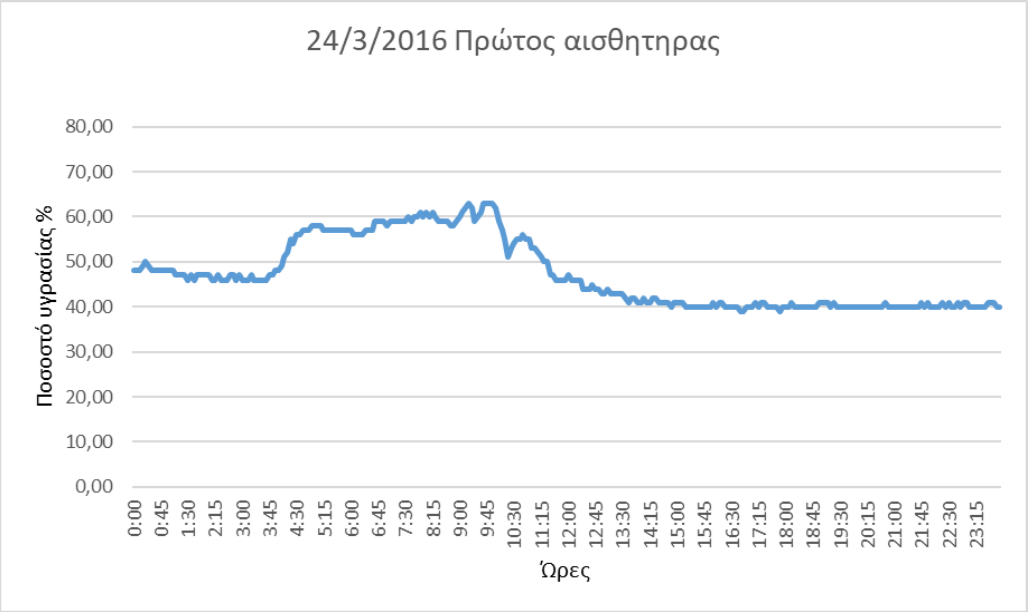
Ημερομηνία	**Ώρα**
24/3/2016	9:10-10:10
26/3/2016	10:30-11:30
27/3/2016	11:00-12:00
2/4/2016	11:30-12:30

3. Αποτελέσματα

3.1 Μετρήσεις σχετικής υγρασίας

Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής υγρασίας όπως προέκυψε από τον πρώτο αισθητήρα κατά τη χρονική περίοδο από την 0:00/24-3-2016 έως την 23:59/24-3-2016. Στη συγκεκριμένη περίοδο, όπως προαναφέρθηκε στον πίνακα 1, τα παράθυρα της κτηνοτροφικής κατασκευής παρέμειναν κλειστά από τις 9:10 έως τις 10:10. Τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 1 παρατηρείται αύξηση της υγρασίας κατά 15%, ενώ μετά τις 10:10 όταν τα παράθυρα ήταν ανοιχτά, η υγρασία έπεσε σε φυσιολογικά επίπεδα. Αυτό δείχνει ότι ο φυσικός αερισμός της κατασκευής είναι

ικανοποιητικός. Η μέγιστη τιμή είναι 63% ενώ η ελάχιστη 39%. Η μέση τιμή είναι 47,1 που θεωρείται φυσιολογική.

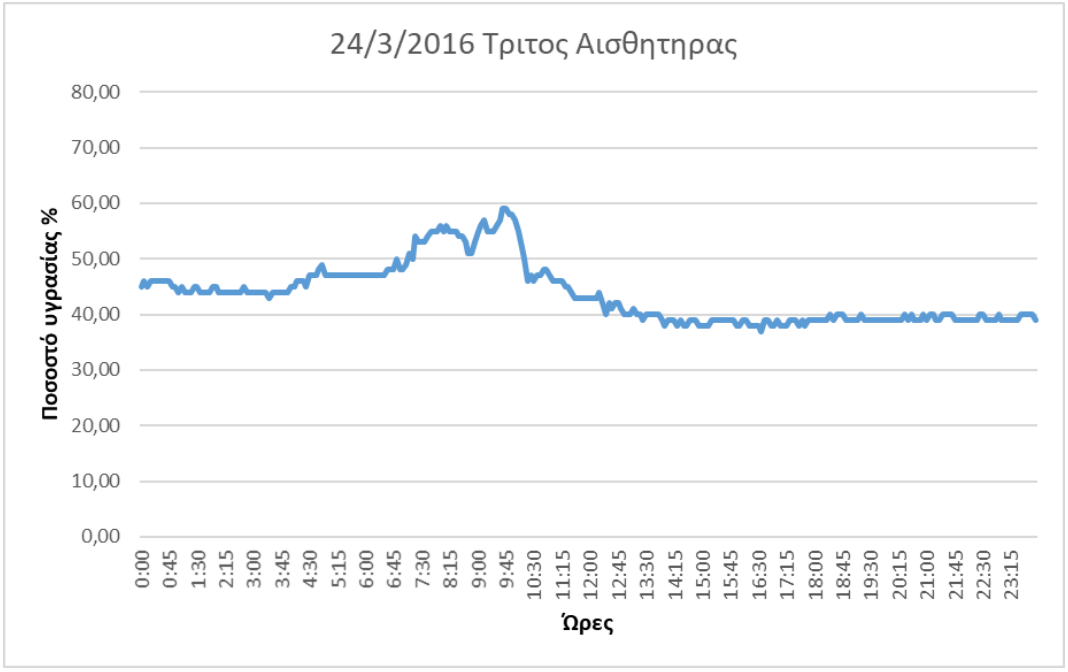


Διάγραμμα 1: Κατανομή της σχετικής υγρασίας στη θέση του πρώτου αισθητήρα για τη χρονική περίοδο από την 0:00/24-3-2016 έως την 23:59/24-3-2016

Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζονται οι τιμές της σχετικής υγρασίας για τη χρονική περίοδο από την 0:00/24-3-2016 έως την 23:59/24-3-2016. Τη συγκεκριμένη ημέρα τα παράθυρα της κτηνοτροφικής κατασκευής παρέμειναν κλειστά από τις 9:10 έως τις 10:10. Στο διάστημα αυτό, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 2 υπάρχει αύξηση της υγρασίας σε μεγάλο βαθμό, ενώ μετά τις 10:10 που τα παράθυρα ήταν ανοιχτά η υγρασία έπεσε σε φυσιολογικά επίπεδα. Η μέγιστη τιμή είναι 61% ενώ η ελάχιστη 40%. Η μέση τιμή είναι 47,2 % που θεωρείται φυσιολογική.

Διάγραμμα 2 Κατανομή της σχετικής υγρασίας στη θέση του δεύτερου αισθητήρα για τη χρονική περίοδο από την 0:00/24-3-2016 έως την 23:59/24-3-2016

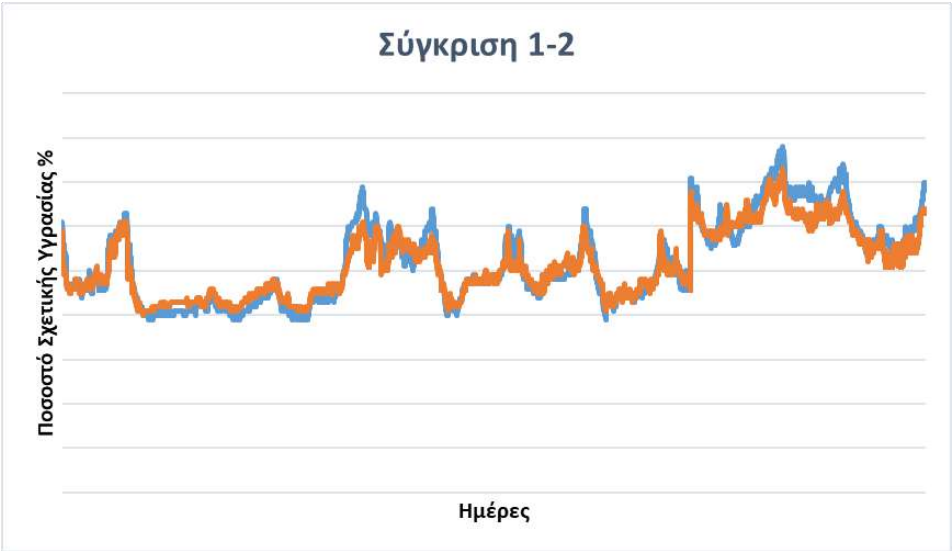
Στη χρονική περίοδος που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3 τα παράθυρα της κτηνοτροφικής κατασκευής παρέμειναν κλειστά από τις 9:10 έως τις 10:10, γεγονός που δικαιολογεί την αύξηση της υγρασίας, ενώ μετά τις 10:10 που τα παράθυρα έμειναν ανοιχτά, η υγρασία έπεσε σε φυσιολογικά επίπεδα. Η μέγιστη τιμή είναι 59% ενώ η ελάχιστη 37%. Η μέση τιμή είναι 43,6 % που θεωρείται φυσιολογική.



Διάγραμμα 3 Κατανομή της σχετικής υγρασίας στη θέση του τρίτου αισθητήρα για τη χρονική περίοδο από την 0:00/24-3-2016 έως την 23:59/24-3-2016

3.2 Συσχέτιση μεταξύ των τιμών των αισθητήρων

Συσχετίζοντας τις τιμές που παρουσιάζει ο πρώτος αισθητήρας σε σχέση με τις τιμές που παρουσιάζει ο δεύτερος (χρήση λογισμικού Microsoft Office Excel και κατάλληλων συναρτήσεων) προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα 4:



Διάγραμμα 4: Σύγκριση τιμών σχετικής υγρασίας μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου αισθητήρα

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της σχετικής υγρασίας που προέκυψαν από τον σταθμό του αεροδρομίου Μακεδονία, ο οποίος είναι ο κοντινότερος μετεωρολογικός σταθμός στην κτηνοτροφική μονάδα.
Στον πίνακα 2, παρουσιάζεται η βασική επεξεργασία των τιμών της υγρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος και των μετρούμενων τιμών από τους τρεις αισθητήρες. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της σχετικής υγρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος δεν διαφέρει σημαντικά από τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές των τριών αισθητήρων, ενώ στις μέσες και ελάχιστες τιμές έχουμε μια διαφορά της τάξης των 10 μονάδων. Οι αναλυτικοί πίνακες τιμών και στατιστικής επεξεργασίας της σχετικής υγρασίας καθώς και άλλων παραμέτρων(θερμοκρασία, αμμωνία, ταχύτητα ανέμου) δεν παρουσιάζονται εδώ, καθώς αποτελούν τμήμα άλλης εργασίας υπό κρίση για δημοσίευση σε διεθνές περιοδικό του κλάδου.

Πίνακας 2 : Στατιστική Επεξεργασία τιμών σχετικής υγρασίας των τριών αισθητήρων και του εξωτερικού περιβάλλοντος

24/3/2016	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	56,511	2,992	64,400	51,800
Α ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ	47,184	7,577	63,000	39,000
Β ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ	47,240	6,355	61,000	40,000
Γ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ	43,653	5,379	59,000	37,000

Μέσω της συνάρτησης συσχέτισης (correlation function) προκύπτει συσχέτιση με τιμή 0,964. Δεδομένης αυτής της τιμής, υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των τιμών του πρώτου και του δευτέρου αισθητήρα όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 4.

Παρόμοιες τιμές συσχέτισης παρουσιάζουν και τοι τιμές μεταξύ του πρώτου και του τρίτου αισθητήρα, και του δεύτερου με τον τρίτο. Από τη σύγκριση των τριών αισθητήρων προκύπτει το συμπέρασμα ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση τιμών μεταξύ τους. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την καταμέτρηση των τιμών μόνο ο δεύτερος αισθητήρας που βρίσκεται στο κέντρο της κτηνοτροφικής κατασκευής και να προκύψουν το ίδιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων συνδυαστικά με τη χρήση στατιστικών στοιχείων οδήγησε στη διεξαγωγή των παρακάτω συμπερασμάτων :

- Το διάστημα που τα παράθυρα παρέμεναν κλειστά υπήρχε απότομη αύξηση της υγρασίας ενώ όσο έμεναν ανοιχτά οι τιμές της υγρασίας κυμαίνονταν σε φυσιολογικά επίπεδα. Συνέπεια των παραπάνω αποτελεί το γεγονός πως δεν είναι απαραίτητη η εγκατάσταση τεχνητού αερισμού στην μονάδα.
- Η σύγκριση των τιμών της υγρασίας μεταξύ των τριών αισθητήρων, απέδειξε τη μεγάλη συσχέτιση τους. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ο ένας από τους τρεις αισθητήρες και οι μετρήσεις να είναι το ίδιο αξιόπιστες και ικανοποιητικές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά

1. Jackman, P., Ward, S., Brennan, L., Corkery, G., & McCarthy, U. (2015). *Application of wireless technologies to forward predict crop yields in the poultry production chain*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 17(2).
2. Bajer, L., & Krejcar, O. (2015). *Design and Realization of Low Cost Control for Greenhouse Environment with Remote Control. IFAC-PapersOnLine*, *48*(4), 368-373.
3. Mesas-Carrascosa, F. J., Santano, D. V., Merono, J. E., de la Orden, M. S., & García-Ferrer, A. (2015*) Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture*. Biosystems Engineering, *137*, 73-83.
4. Mirzaee-Ghaleh, E., Omid, M., Keyhani, A., & Dalvand, M. J. (2015) *Comparison of fuzzy and on/off controllers for winter season indoor climate management in a model poultry house. Computers and Electronics in Agriculture*, *110*, 187-195.
5. Ali, Akram Syed, et al. "*Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection*." Building and Environment 100 (2016): 114-126.

Βιβλία

1. Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ., (2006). “Κτηνοτροφικές κατασκευές”, Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.

Site

1. https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560,2016,30/6/2016

Μεταπτυχιακή Διατριβή

1. Καρνούτσος Π., 2016. *Έλεγχος Περιβάλλοντος Κτηνοτροφικών Κατασκευών με χρήση συσκευής ανοιχτού κώδικα.* Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 90σελ.