



Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος

11^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

Η Γεωργική Μηχανική
βασικό στοιχείο
αιεφόρου ανάπτυξης
της γεωργίας

ΒΙΒΛΙΟ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ

Βόλος 8 Νοε. 2019

Συνδιοργάνωση:



Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παράγωγης
& Αγροτικού Περιβάλλοντος -
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΧΟΡΗΓΟΙ ΤΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

ΧΡΥΣΟΙ ΧΟΡΗΓΟΙ



ΑΡΓΥΡΟΙ ΧΟΡΗΓΟΙ



ΧΟΡΗΓΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ





ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ
HELLENIC SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS

Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, Βόλος
Τηλ: 2421093228, Fax: 2421093144, e-mail: gemots@uth.gr, nkatsoul@uth.gr

11^ο Πανελλήνιο Συνέδριο

Συνδιοργάνωση:

Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής & Ζωικής Παραγωγής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βόλος, 8 Νοεμβρίου 2019

**Σχολή Γεωπονικών Επιστημών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**

Επιμέλεια έκδοσης: Ανθούλα Γιάκα
Χρήστος Καβαλάρης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η γεωργία σήμερα βρίσκεται σε ένα κρίσιμο σταυροδρόμι όπου θα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες επιλογές που θα εξασφαλίσουν τη συνέχεια και τη βιωσιμότητα του γεωργικού συνόλου. Από τη μια οι αυξημένες διατροφικές ανάγκες ενός ολοένα αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού και από την άλλη η υπερεκμετάλλευση των φυσικών πόρων πιέζουν να βρεθούν οι βέλτιστες λύσεις που θα επιτύχουν να αυξήσουν μεν την παραγωγή των τροφίμων, προστατεύοντας παράλληλα τους φυσικούς πόρους και εξασφαλίζοντας την αειφορία της γεωργικής παραγωγής. Οι λύσεις μπορούν να προέλθουν μόνο μέσα από τη συστηματική επιστημονική έρευνα και οι Γεωργικοί Μηχανικοί ή Μηχανικοί Βιοσυστημάτων καλούνται να διαδραματίσουν ένα κρίσιμο και καθοριστικό ρόλο συνδυάζοντας τις γνώσεις τους στις επιστήμες της Γεωπονίας, της Βιολογίας, της Μηχανικής και του Περιβάλλοντος για να προτείνουν νέες τεχνολογίες και συστήματα παραγωγής που θα αυξήσουν την αποτελεσματικότητα της παραγωγής γεωργικών προϊόντων με ορθολογικότερη διαχείριση των φυσικών πόρων, διασφαλίζοντας παράλληλα τη δημόσια υγεία και ενδυναμώνοντας την εμπιστοσύνη των καταναλωτών.

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος έχει καταφέρει μέσα από τα τακτικά της συνέδρια να συγκεντρώσει μια πλούσια βιβλιογραφία πάνω σε μια ευρεία θεματολογία όπως οι εδαφικοί και οι υδατικοί πόροι, η ενέργεια, το περιβάλλον, τα γεωργικά μηχανήματα και οι εξοπλισμοί, οι σύγχρονες τεχνολογίες, η αποθήκευση και μεταποίηση των γεωργικών προϊόντων κ.α. Κατάφερε παράλληλα να δώσει το κίνητρο και το μέσο σε πολλούς επιστήμονες και ερευνητές να δημοσιοποιήσουν τα αποτελέσματα των ερευνών τους στον Ελλαδικό χώρο. Το 11ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΓΜΕ που πραγματοποιείται στο Βόλο, στις 8 Νοεμβρίου 2019, στις εγκαταστάσεις της Γεωπονικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, φιλοδοξεί να συνεχίσει αυτή τη παράδοση, συγκεντρώνοντας τα ποιο πρόσφατα επιτεύγματα και αποτελέσματα των ερευνών. Επιπλέον, φιλοδοξεί να φέρει σε επαφή τους ανθρώπους που δραστηριοποιούνται στον τομέα της Γεωργικής Μηχανικής να καλλιεργήσει νέες συνεργασίες και να αναπτύξει δίαυλους επικοινωνίας με τη βιομηχανία και τον κλάδο του εμπορίου ώστε να γίνει εφικτή η διάχυση της έρευνας και η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων αυτής προς όφελος του ευρύτερου κοινωνικού συνόλου.

Στο παρόν τεύχος των πρακτικών περιέχονται 57 περιλήψεις των εργασιών που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια του 11^ο Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής. Τα πλήρη κείμενα των εργασιών, έπειτα από την κρίση των κριτών, αποθέτονται σε ανοικτή βάση δεδομένων και μπορούν να αναζητηθούν στη ιστοσελίδα της ΕΓΜΕ <https://egme.gr/proceedings/>

Βόλος, Νοέμβριος 2019

Δρ. Χρ. Καβαλάρης

Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής.

ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Χ. Καβαλάρης – Δρ. Ε.ΔΙ.Π., Π.Θ.
Β. Αντωνιάδης – Επ. Καθηγητής, Π.Θ.
Ν. Κατσούλας – Αν. Καθηγητής, Π.Θ.
Θ. Μπαρτζάνας – Αν. Καθηγητής, Γ.Π.Α.
Χ. Καραμούτης – Ε.ΤΕ.Π., Π.Θ.
Ε. Γκόλια – Δρ. Ε.ΔΙ.Π., Π.Θ.
Α. Αγγελάκη – Δρ. Ε.ΔΙ.Π., Π.Θ.
Α. Γιάκα – Τεχν. Γεωπόνος
Δ. Κατέρης – Ερευνητής ΕΚΕΤΑ
Α. Ταγαράκης – Ερευνητής ΕΚΕΤΑ
Γ. Θαλασσινός – Υπ. Διδάκτορας Π.Θ.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αγγελάκη Αναστασία, Δρ. Ε.ΔΙ.Π., Π.Θ.
Αντωνιάδης Βασίλειος, Επ. Καθηγητής Π.Θ.
Αντωνόπουλος Βασίλειος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Αρβανίτης Κωνσταντίνος, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Βλόντζος Γεώργιος, Α. Καθηγητής Π.Θ.
Βύρλας Παναγιώτης, Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Γέμτος Θεοφάνης, Ομ. Καθηγητής Π.Θ.
Γεωργίου Πανταζής, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Γιαλαμάς Θεόδωρος, Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Γκόλια Ευαγγελία, Δρ. Ε.ΔΙ.Π. Π.Θ.
Γράβαλος Ιωάννης, Αν. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Δημήρκου Ανθούλα, Καθηγήτρια Π.Θ.
Ζήσης Θωμάς, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Καβαλάρης Χρήστος, Δρ. Ε.ΔΙ.Π. Π.Θ.
Καλφούντζος Δημήτριος, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας
Κάργας Γεώργιος, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κατέρης Δημήτριος, Δρ. Γεωπόνος
Κατσούλας Νικόλαος, Αν. Καθηγητής Π.Θ.
Καυγά Αγγελική, Επ. Καθηγήτρια Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
Κίττας Κωνσταντίνος, Καθηγητής Π.Θ.
Κυπαρρίσης Άρης, Αναπ. Καθηγητής Π.Θ.
Κωστοπούλου Σοφία, Αν. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Λεβίζου Ευθυμία, Λέκτορας Π.Θ.
Μπαλαφούτης Αθανάσιος, Ερευνητής ΕΚΕΤΑ
Μπαρμπαγιάννης Νικόλαος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπαρτζάνας Θωμάς, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μπόχτης Διονύσιος, Διευθυντής ΙΒΟ ΕΚΕΤΑ
Μπριασούλης Δημήτριος, Ομοτ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Ξανθόπουλος Γεώργιος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαδάκης Γεώργιος, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαϊωάννου Χρυσούλα, Αν. Καθηγήτρια Π.Θ.
Παυλάτου Βε Αθηνά, Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Σακελλαρίου –Μακραντωνάκη Μαρία, Καθηγήτρια Π.Θ.
Ταγαράκης Αριστοτέλης – Ερευνητής ΕΚΕΤΑ
Φουντάς Σπύρος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.

Ευχαριστίες

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος εκφράζει τις θερμές της ευχαριστίες προς όλους τους συγγραφείς των εργασιών, τους κριτές, τα μέλη της Οργανωτικής και της Επιστημονικής Επιτροπής που αφιέρωσαν τον πολύτιμο χρόνο τους για να συμμετάσχουν και να βοηθήσουν στο συνέδριο και στους χορηγούς που με την οικονομική τους συνδρομή συνέβαλαν στην άρτια διοργάνωση και την επιτυχία του συνεδρίου. Τέλος, ευχαριστούμε ιδιαίτερα το Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που ανέλαβε την συνδιοργάνωση του 11^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της ΕΓΜΕ ενισχύοντας σημαντικά την όλη προσπάθεια

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΣΗΓΗΤΩΝ

GaschkA.	Δόλιας Γ.
Kitić G.	Δουγκά Γ.
Kostić M.	Δουλγέρης Χ
Ljubičić N.	Ελβανίδη Α.
SihagP.	Ευθυμίου Ε.
ΑγγελάκηΑ.	Ζαλίδης Γ.
Αγγελοπούλου Θ.	Ζαχαρόπουλος Ι.
Αλεξόπουλος Δ.	Ζιάκας Ν.
Αληφραγκή Μ.	Ζούντα Δ.
Αναγνώστης Α.	Καβαλάρης Χ.
Αναγνωστόπουλος Δ.	Καλαμαράς Σ.
Αναστασίου Ε.	Καλορίζος Β.
Ανέστης Β.	Καλφούντζος Δ.
Αντωνιάδης Β.	Καμίτσος Ε.
Αντωνόπουλος Β.	Κάντζου Ο.Δ.
Αντωνόπουλος Β.Α.	Καράλη Ι.
Αντωνόπουλος Β.Ζ.	Καραμανώλη Κ.Ι.
Αντωνόπουλος Ζ.Β.	Καραμούζης Δ.
Αποστολίδου Η.Γ.	Καραμούτης Χ.
Αρβανίτης Κ.	Καραμπατζάκης Η.
Αρβανίτης Χ.	Καραπαναγιωτίδης Ι.
Ασημινάρη Γ.	Καρατσιβου Ε.
Ασλανίδου Μ.	Καργάς Γ.
Ασχονίτης Β.	Καρπούζος Δ.
Βαξεβάνου Σ.	Κατέρης Δ.
Βαρλάγκας Τ.	Κατικαρίδης Δ.
Βασιλειάδης Γ.	Κατσούλας Ν.
Βατσανιδου Α.	Καυγά Α.
Βλόντζος Γ.	Καυσοσιδέρης Φ.
Βύρλας Π.	Κίττα Ε.
Γέμτος Θ.	Κίττας Κ.
Γεωργακάκης Κ.	Κόκκορα Μ.
Γεωργίου Π.	Κολοβός Δ.
Γεωργίου Π.Ε.	Κοτσιφάκη Β.
Γιακουμάκης Σ.	Κουϊμτζή Μ.
Γιαλαμάς Θ.	Κούκουζας Ν.
Γιαννούλης Α.	Κουκούλη Π.
Γιοβά Ε.	Κωνσταντάκος Σ.
Γκόλια Ε.	Κωστάκος Ε.
Γκούση Ν.	Κωστοπούλου Σ.
Γράβαλος Ι.	Κωτσόπουλος Θ.
Γριβάκης Κ.	Λακιώτης Κ.
Δάρρα Ν.	Λαμπρίδη Μ.
Δεμερτζή Κ.	Λεβίζου Ε.
Δημήρκου Α.	Λιούπης Μ.

Λόντρα Π.
Λυκοσκούφης Ι.
Μαμαλούδης Χρ.
Μαρκούση Μ.
Μαρτζοπούλου Α.
Μενεξές Ι.
Μετσοβίτη Ν.Μ.
Μητρογιάννης Δ.
Μπαζιώτης Ι.
Μπαλαφούτης Α.
Μπαμπάκος Κ.
Μπανιάς Γ.
Μπαρτζάνας Θ.
Μπόλης Ι.
Μπόχτης Δ.
Μπριασούλης Δ.
Μυρεσιώτης Χ.
Μυστριώτης Α.
Μωυσιάδης Β.
Ντότα Δ.Α.
Ντυκέν Μ.Ν.
Ξανθόπουλος Γ.
Οικονομίδης Α.
Ορφανουδάκης Μ.
Παλλές Δ.
Παναγάκης Π.
Πανγκά Δ.
Παπαγεωργίου Ε.
Παπαδόπουλος Α.
Παπαιωάνου Ι.
Παπαμιχαήλ Δ.
Παπαναστασίου Δ.Κ.
Παπαπολυμέρου Γ.

Πικάση Α.
Παυλάτου-Βε Α.
Ραχμανίδης Κ.
Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ.
Σιμιτζής Π.
Σιούρας Α.
Σκούφος Ι.
Σούλης Κ.
Σπαθάρας Σ.
Σπύρου Χρ.
Σταμούλης Δ.
Σταφύλη Ε.
Στεφανίδης Ρουσέτος Μ.
Στεφανοπούλου Μ.
Ταγαράκης Α.
Ταγαράκης Α.Χ.
Τζανιδάκης Χ.
Τζιάκας Σ.
Τζιόλας Ν.
Τζόρα Α.
Τσικνίδης Μ.
Τσούλιας Ν.
Τσουμαλάκου Ε.
Φιδάρος Δ.
Φιρφιρής Β.
Φουντάς Σπ.
Χαλκίδης Η.
Χαρτοδιπλωμένου Μ.Α.
Χατζηνικολάου Μ.
Χισκάκης Μ.
Χρήστου Μ.
Ψηρούκης Β.
Ψυχογιού Μ.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΝΟΤΗΤΑ 1^η

ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΡΟΤΡΑΙΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ Ταγαράκης Α., MarkoKostić, NatasaLjubičić & GoranKitić	14
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΕ ΚΕΡΑΣΕΩΝΑ Φουντάς Σπ., Ν. Δάρρα & Η. Καραμπατζάκης	21
ΠΑΡΑΚΟΥΛΟΥΘΗΣΗ ΑΜΠΕΛΩΝΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ Δάρρα Ν., Σπ. Φουντάς & Ε. Αναστασίου	30
ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΟΠΩΡΩΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΕΝΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ Μουσιδής Β., Κατκαριδής Δ., Βασιλειάδης Γ., Ταγαράκης Α.Χ. & Μπόχτης Δ.	42
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ NDVI ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ Δάρρα Ν., Σ. Φουντάς, Β. Ψηρούκης, Κ. Γριβάκης	50
ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ Αγγελοπούλου Θ., Τζιόλας Ν., Μπαλαφούτης Α., Ζαλίδης Γ. & Μπόχτης Δ.	61
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΜΕ ΣμηΕΑ ΣΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΠΟΛΕΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΑΚΟΥ ΤΗΣ ΕΛΙΑΣ ΚαβαλάρηςΧ.	68
ΜΕΛΕΤΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΗ ΕΛΑΦΡΟΥ ΤΥΠΟΥ Λαμπρίδη Μ., Κατέρης Δ., Τζιάκας Σ. & Μπόχτης Δ.	77
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΣΕ ΦΥΛΛΑ ΚΑΡΥΔΙΑΣ ΜΟΛΥΣΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΩΣΗ Αναγνώστης Α. Ασημινάρη Γ., Δόλιας Γ., Αρβανίτης Χ., Παπαγεωργίου Ε., Μυρεσιώτης Χ. & Μπόχτης Δ.	85
APPLICATIONS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN PRECISION CROP FARMING Bartzanas Th	93

PRECISION LIVESTOCK FARMING (PLF) TECHNIQUES IN PIG HUSBANDRY Tzanidakis Ch., P. Simitzis, K. Arvanitis & P. Panagakis.....	102
ΡΟΜΠΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Μενεξές Ι., Καλορίζος Β., Αρβανίτης Χ., Μπανιάς Γ., Κατέρης Δ. & Μπόχτης Δ.	115
ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΚΕΦΑΛΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΚΟΡΥΦΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΦΥΛΛΙΖΙΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΠΝΟ Ζιάκας, Ν., Δ. Κολοβός, Δ. Σταμούλης, Τ. Βαρλάγκας, Θ. Γιαλαμάς & Ι. Γράβαλος	123
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΟΠΙΩΡΩΝΩΝ Βασιλειάδης Γ., Κατκαρίδης Δ., Μουσιάδης Β., Κατέρης Δ. & Μπόχτης Δ.....	132
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ CCCΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟ ΣΤΑΦΥΛΙ Οικονομίδης Α., Αναστασίου Ε., Τσούλιας Ν., Ξανθόπουλος Γ. & Φουντάς Σ.	140
IMPACT OF DROUGHT ON CROP WATER REQUIREMENTS USING REMOTE SENSING AND GIS Στεφανίδης-Ρουσέτος Μ.& Γιακουμάκης Σ.	151
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΚΛΗΡΟΥ ΣΙΤΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΟΡΥΦΟΡΟ SENTINEL-2 Κυπαρρίσης Α., Χ. Καβαλάρης &Κ. Ανατολίτης	169

ΕΝΟΤΗΤΑ 1^η

ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΡΟΤΡΑΙΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ

Αριστοτέλης Ταγαράκης^{1,2}, Marko Kostić³, Natasa Ljubičić², Goran Kitić²

¹Ινστιτούτο Βιοοικονομίας και Αγροτεχνολογίας (iBO), Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), e-mail: a.tagarakis@certh.gr

²University of Novi Sad, BioSense Institute, Serbia

³University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Serbia

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ενεργοί εκ του σύνεγγυς οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για την παροχή χρήσιμων πληροφοριών σχετικών με τις ιδιότητες του φυλλώματος και της κατάστασης των φυτών. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η λειτουργία ενός νέου πολυφασματικού, ενεργού οπτικού αισθητήρα με την ονομασία Plant-O-Meter. Ο αισθητήρας δοκιμάστηκε στο εργαστήριο, σε ελεγχόμενες συνθήκες, συγκρινόμενος με τον GreenSeeker handheld και με υπερφασματικό οπτικό αισθητήρα. Επίσης πραγματοποιήθηκαν πειράματα αγρού για την αξιολόγηση της λειτουργίας του αισθητήρα σε πραγματικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά υποδεικνύοντας τη δυνατότητα χρήσης του Plant-O-Meter για εκτίμηση της παραγωγής και για μεταβλητές εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο στα πλαίσια εφαρμογής γεωργίας ακριβείας.

Λέξεις κλειδιά: οπτικοί αισθητήρες, πολυφασματικός αισθητήρας, γεωργία ακριβείας, πρόβλεψη παραγωγής

LOW COST MULTISPECTRAL SENSOR FOR YIELD ESTIMATION IN ARABLE CROPS

Aristotelis C. Tagarakis^{1,2}, Marko Kostić³, Natasa Ljubičić², Goran Kitić²

¹Institute for Bio-economy and Agri-technology, Center for Research and Technology Hellas e-mail: a.tagarakis@certh.gr

²University of Novi Sad, BioSense Institute, Serbia

³University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Serbia

ABSTRACT

Active proximal sensors are increasingly used to provide useful information on the crop canopy properties and the condition of the plants in a range of crops. This paper presents the operation of a new multi-spectral, active optical sensor called PlantOmeter. The sensor was tested in the laboratory under controlled conditions, compared to the GreenSeeker handheld commercial sensor and the SPECIM hyperspectral camera. Field experiments were performed to evaluate the sensor's operation in real-field conditions. The results were very encouraging, indicating the possibility of using Plant-O-Meter for yield estimation and for real-time variable applications in the context of applying precision farming.

Keywords: optical sensors, multispectral sensor, precision agriculture, yield estimation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για τη διάγνωση της κατάστασης των φυτών. Ο απλός χειρισμός και η φύση της μεθόδου μέτρησης η οποία είναι μη καταστρεπτική τους καθιστά κατάλληλους για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διαφορετικές καλλιέργειες (Magney et al., 2016, Kostić et al., 2016). Τα αποτελέσματα πολυάριθμων μελετών για τη χρήση οπτικών αισθητήρων στη γεωργία έχουν προσφέρει αριθμό μοντέλων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην πρόβλεψη της ωριμότητας, του δυναμικού παραγωγής, της εκτίμησης της υγείας των φυτών κλπ. (Zecha et al., 2018). Η φασματική ανάλυση της ανάκλασης της φωτεινής ακτινοβολίας από τα φυτά είναι πολύτιμη στην αναγνώριση των φασματικών "δακτυλικών αποτυπωμάτων", τα οποία συμβάλλουν στον εντοπισμό ορισμένων βιοτικών ή αβιοτικών διεργασιών των φυτών. Οι ενεργοί πολυφασματικοί αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης της θρεπτικής κατάστασης των φυτών και των αναγκών σε άζωτο (N) σε αρχικά στάδια ανάπτυξης βελτιστοποιώντας τη διαχείριση του αζώτου (Bean et al., 2018). Επιπλέον, οι ενεργοί οπτικοί αισθητήρες δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες φωτισμού του περιβάλλοντος, γεγονός που τους καθιστά ιδανική λύση για μεταβλητές εφαρμογές αζωτούχου λίπανσης σε πραγματικό χρόνο (Solarí et al., 2008). Ως εκ τούτου, η ενεργή εκ του σύνεγγυς ανίχνευση χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στη γεωργία για την εκτίμηση της κατάστασης και της ανάπτυξης των καλλιεργειών και έχει αποδειχθεί ότι είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την εκτίμηση της παραγωγής σε ένα ευρύ φάσμα καλλιεργειών (Tagarakis and Ketterings, 2017). Οι ενεργοί οπτικοί αισθητήρες εκπέμπουν το δικό τους φως και μετρούν την ανάκλαση συγκεκριμένων φασμάτων φωτός από το φύλλωμα της καλλιέργειας, συνήθως στο ορατό και εγγύς-υπέρυθρο, παρέχοντας μια σειρά δεικτών βλάστησης. Διάφοροι δείκτες έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της παραγωγής σε αριθμό καλλιεργειών με τον δείκτη βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI; Rouse et al., 1973) να είναι ο πιο διαδεδομένος (Hatfield et al., 2008). Ο NDVI έχει συσχετιστεί με την περιεκτικότητα των φυτών σε άζωτο, την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, τη βιομάζα και την φυλλική επιφάνεια, σε μικροσκοπική και μακροσκοπική κλίμακα (Solarí et al., 2008; Wang et al., 2016).

Η εκτίμηση της παραγωγής από φασματικές μετρήσεις του φυλλώματος στα μέσα της καλλιεργητικής περιόδου έχει ιδιαίτερη σημασία δεδομένου ότι είναι το πρώτο βήμα στην ανάπτυξη αλγορίθμων για εφαρμογές μεταβλητής λίπανσης αζώτου σε πραγματικό χρόνο (Moges et al., 2007). Η στιγμή της μέτρησης, όσον αφορά το στάδιο ανάπτυξης του φυτού, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των προβλέψεων τη παραγωγής από τα δεδομένα των αισθητήρων (Raun et al., 2005). Προηγούμενες μελέτες σε καλλιέργεια αραβοσίτου υπέδειξαν τα V7 - V8 (7-8 πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα, σύμφωνα με την κλίμακα Ritchie; Ritchie et al., 1993) ως τα στάδια ανάπτυξης που παρέχουν την υψηλότερη ακρίβεια στην εκτίμηση της παραγωγής και το V6 (6 πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα) ως το στάδιο με την υψηλότερη παραλλακτικότητα στις μετρήσεις NDVI (Tagarakis and Ketterings, 2017; Raun et al., 2005), σημαντικά στοιχεία για τη μεγιστοποίηση του οφέλους όταν εφαρμόζεται μεταβλητή λίπανση σε πραγματικό χρόνο.

Οι Raun et al. (2002) εισήγαγαν τον ορισμό «In Season Estimated Yield» (INSEY) ως μια προσέγγιση που κανονικοποιεί τις μετρήσεις NDVI σε σχέση με το χρόνο και τις διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στους διάφορους αγρούς (Teal et al., 2006). Ο νέος κανονικοποιημένος δείκτης λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες της καλλιέργειας από τη φύτευση έως την ανίχνευση παρέχοντας εκτίμηση της πρόσληψης αζώτου ανά ημέρα (Lukina et al., 2001) και τη βιομάζα που παράγεται ανά ημέρα (Raun et al., 2005).

Οι Teal et al. (2006) ανέπτυξαν μοντέλα για την πρόβλεψη της παραγωγής αραβοσίτου με βάση τους δείκτες NDVI, και INSEY παρουσιάζοντας παρόμοια καλά αποτελέσματα (ο R^2 κυμαίνονταν από 0,73 έως 0,77). Σε πρόσφατη μελέτη που διεξήχθη από τον Rogers (2016) επετεύχθη καλή συσχέτιση ($R^2 > 0,68$) μεταξύ της τελικής παραγωγής και συνδυασμένων μετρήσεων NDVI που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια δύο σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας αραβοσίτου, V6 έως V8. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν από τους Tagarakis και Ketterings (2017), οι οποίοι

καθόρισαν το V7 ως το στάδιο ανάπτυξης που παρέχει την ακριβέστερη εκτίμηση της παραγωγής για τον αραβόσιτο ($R^2 = 0,78$).

Οι περισσότεροι ενεργοί αισθητήρες ποικίλλουν ως προς τα κεντρικά μήκη κύματος και το εύρος του φάσματος στα οποία ανιχνεύουν για τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης (Kim et al., 2010; Yao et al., 2013). Ως εκ τούτου, η παρούσα εργασία έχει διεξαχθεί για να αξιολογήσει τη λειτουργία του πρόσφατα αναπτυγμένου ενεργού πολυφασματικού αισθητήρα με την ονομασία Plant-O-Meter τόσο σε ελεγχόμενο περιβάλλον όσο και σε πραγματικές συνθήκες αγρού.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Ο αισθητήρας Plant-O-Meter αναπτύχθηκε πρόσφατα από το ινστιτούτο BioSense. Είναι ενεργός, πολυφασματικός, οπτικός αισθητήρας που προορίζεται για γεωργική χρήση. Είναι εφοδιασμένος με 4 λυχνίες LED οι οποίες εκπέμπουν φωτεινή ακτινοβολία και στοιχείο αισθητήρα το οποίο ανιχνεύει σε τέσσερα φάσματα, στις περιοχές του μπλε, πράσινου, κόκκινου και υπέρυθρου. Παρέχει την ανάκλαση ξεχωριστά για κάθε φάσμα, προσφέροντας τη δυνατότητα υπολογισμού περισσότερων από 20 διαφορετικών δεικτών. Συνδέεται μέσω Bluetooth με συσκευές Android για καταγραφή, επεξεργασία, γεωαναφορά και αποθήκευση των μετρήσεων καθώς και για την αποστολή των δεδομένων στο cloud. Λεπτομέρειες και αναλυτικές πληροφορίες για τη λειτουργία και τις ιδιότητες του αισθητήρα αναφέρονται από τους Kitić et al. (2019).

Η λειτουργία του αισθητήρα εξετάστηκε σε ελεγχόμενο περιβάλλον, σε σκοτεινό θάλαμο, όπου συγκρίθηκε με τον εμπορικό αισθητήρα GreenSeeker handheld (Trimble Inc., CA, USA) και με τον υπερφασματικό οπτικό αισθητήρα SPECIM (Specim, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland) τόσο σε συνθήκες φωτισμού όσο και σε συνθήκες πλήρους συσκότισης. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δεκατρείς στόχοι μεγέθους 2m x 0,8m διαφορετικού χρώματος ώστε να διαφέρουν οι φασματικές υπογραφές τους με στόχο να καλυφθεί το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος σε μετρήσεις NDVI.

Έπειτα από τον έλεγχο της λειτουργίας στο εργαστήριο, ακολούθησαν πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας αραβόσιτου (*Zea mays* L.). Η μελέτη διεξήχθη σε δύο πειραματικούς αγρούς στο Bajmok και το Ravno Selo, που βρίσκονται αντίστοιχα στη βόρεια και κεντρική περιοχή της Βοϊβοδίνια, στη Σερβία. Οι αποστάσεις σποράς ήταν 70 εκατοστά μεταξύ των γραμμών και 20 εκατοστά μεταξύ των φυτών στη γραμμή. Η μελέτη περιελάμβανε πέντε διαφορετικές δόσεις αζωτούχου (N) λίπανσης (0, 5, 10, 15 και 20 kg N ανά στρέμμα) που εφαρμόστηκαν αμέσως μετά τη σπορά με ενσωμάτωση ουρίας (46% N) σε κοκκώδη μορφή. Ακολούθησε το πειραματικό σχέδιο randomized complete block design (RCBD) με τρεις επαναλήψεις.

Στα πειράματα αγρού μετρήθηκε ο δείκτης βλάστησης NDVI σε τρία διαφορετικά στάδια ανάπτυξης του αραβόσιτου, V5, V6 και V8 (όταν τα φυτά είχαν 5, 6, και 8 πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα αντίστοιχα). Για τις μετρήσεις αντανάκλασης του φυλλώματος χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα ο Plant-O-Meter και ο GreenSeeker handheld ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τους δύο αισθητήρες.

Ο αισθητήρας GreenSeeker handheld είναι ενεργός αισθητήρας χειρός που μετρά την αντανάκλαση του φυλλώματος στα 660 nm (R) και 770 nm (NIR) υπολογίζοντας τον NDVI (Tremblay et al., 2009). Επειδή ο συγκεκριμένος αισθητήρας δεν παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής, γεωδαισίας και αποθήκευσης δεδομένων, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν καταγράφοντας χειροκίνητα τέσσερις μέσες τιμές NDVI από κάθε πειραματικό τεμάχιο. Αντίθετα ο Plant-O-Meter έχει τη δυνατότητα αυτόματης συλλογής γεωδαισίας και αποθήκευσης μετρήσεων, συνεπώς με τον συγκεκριμένο αισθητήρα χαρτογραφήθηκε ο NDVI κατά μήκος ολόκληρων των πειραματικών αγρών και ακολούθησε ανάλυση των δεδομένων με χρήση του λογισμικού γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών QGIS (QGIS Development Team, 2018). Ο αισθητήρας μετρούσε με συχνότητα 1 Hz καταγράφοντας περίπου 1 μέτρηση/m. Οι μετρήσεις NDVI και με τα δύο όργανα έγιναν κοντά στο μεσημέρι, μεταξύ 11:00 π.μ. και 13:00 μ.μ. κρατώντας τον κάθε

αισθητήρα σταθερά σε απόσταση περίπου 60 cm από το φύλλωμα με τη δέσμη σάρωσης κάθετη προς τη φορά των γραμμών της καλλιέργειας.

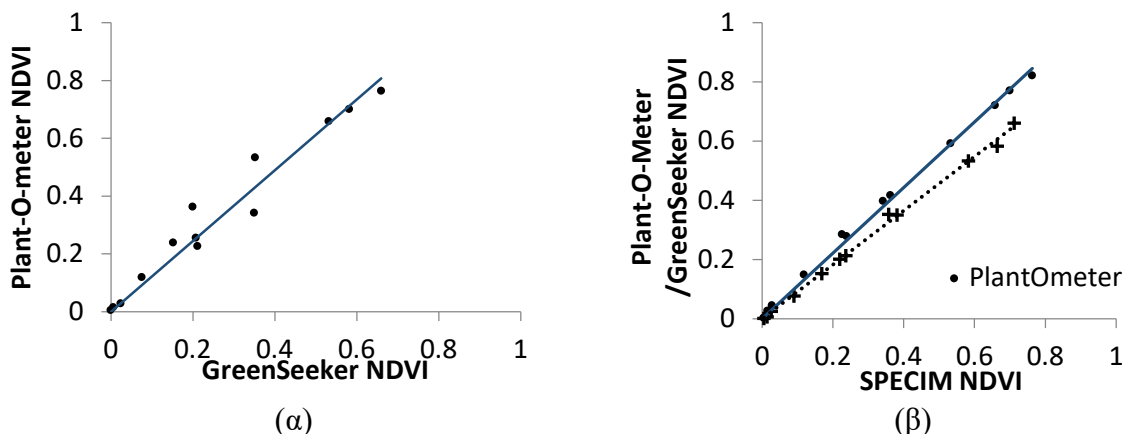
Στο στάδιο της ωρίμανσης, συγκομίστηκαν με το χέρι οι σπάδικες από το κεντρικό τμήμα, μήκους 6 μέτρων, των δύο μεσαίων σειρών σε κάθε πειραματικό τεμάχιο. Μετρήθηκε το μεικτό βάρος κάθε πειραματικού τεμαχίου και το περιεχόμενο αλωνίστηκε για να υπολογιστεί το καθαρό βάρος των σπόρων. Η περιεκτικότητα του σπόρου σε υγρασία μετρήθηκε από τον αισθητήρα GAC® 2500-INTL (Dickey-John, IL, U.S.A.) και η τελική παραγωγή κανονικοποιήθηκε σε ποσοστό υγρασίας 14%.

Για την ανάλυση των δεδομένων, οι μετρήσεις των αισθητήρων μετασχηματίστηκαν σε $INSEY_{DAP}$ διαιρώντας τον NDVI με τον αριθμό ημερών από τη σπορά. Η χρήση του INSEY κανονικοποίησε τις μετρήσεις των αισθητήρων για τους δύο πειραματικούς αγρούς (Tagarakis and Ketterings, 2017). Χρησιμοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ των μετρήσεων NDVI του GreenSeeker και του Plant-O-Meter. Επιπλέον, μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκαν για τις σχέσεις μεταξύ της τελικής παραγωγής και του INSEY για κάθε στάδιο ανάπτυξης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

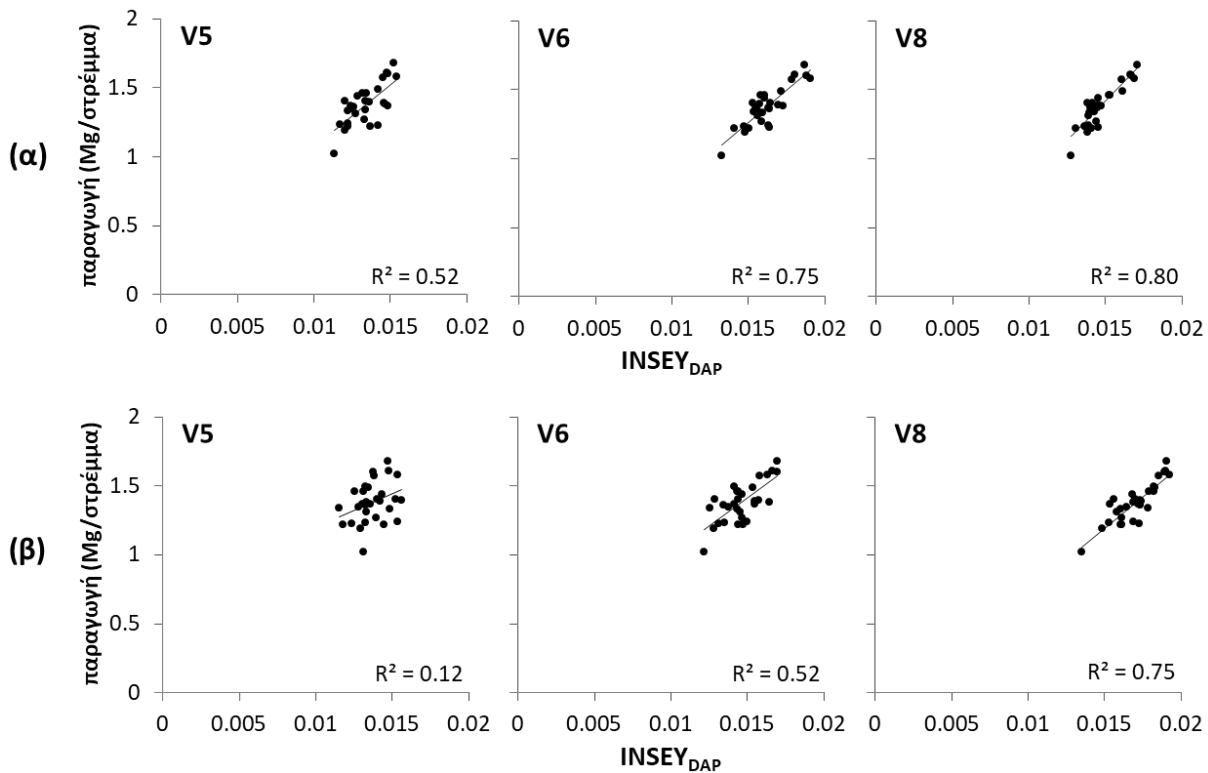
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων, το φως του περιβάλλοντα χώρου δεν επηρεάζει τις μετρήσεις τόσο του Plant-O-Meter όσο και του GreenSeeker. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι και οι δύο αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον αγρό χωρίς να επηρεάζονται από τις συνθήκες φωτισμού που επικρατούν την στιγμή που γίνεται η μέτρηση. Η ανάλυση των δεδομένων των εργαστηριακών μετρήσεων του δείκτη NDVI έδειξαν υψηλή συσχέτιση ($R^2 = 0,95$) μεταξύ των δύο αισθητήρων χειρός (Plant-O-Meter και GreenSeeker) (Σχ 1α).

Ακόμη καλύτερη συσχέτιση έδειξαν οι μετρήσεις NDVI μεταξύ των αισθητήρων Plant-O-Meter και GreenSeeker με τον υπερφασματικό αισθητήρα SPECIM ($R^2 = 0.997$ και στις δύο περιπτώσεις) (Σχήμα 1β). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την δυνατότητα που έχουν οι δύο αισθητήρες να παρέχουν άμεσα και με ακρίβεια μετρήσεις αντανάκλασης από την επιφάνεια των φυτών.



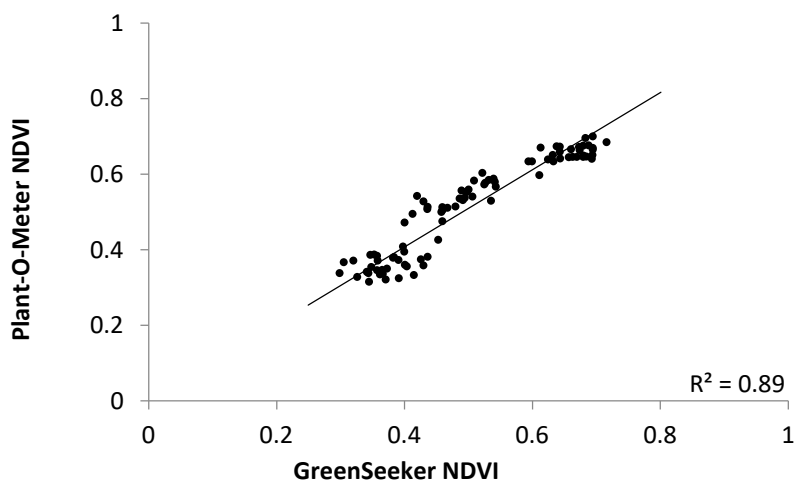
Σχήμα 1. Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των εργαστηριακών μετρήσεων NDVI (α) του αισθητήρα Plant-O-Meter με τον GreenSeeker και (β) των αισθητήρων Plant-O-Meter και GreenSeeker με τον υπερφασματικό αισθητήρα SPECIM.

Η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ του $INSEY_{DAP}$ και της τελικής παραγωγής έδειξε ότι και για τους δύο αισθητήρες μπορεί να επιτευχθεί καλή εκτίμηση της απόδοσης από μετρήσεις που πραγματοποιούνται έπειτα από το στάδιο ανάπτυξης V6. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τα αποτελέσματα από τους Tagarakis και Ketterings (2017).



Σχήμα 2. Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της τελικής παραγωγής και του δείκτη $INSEY_{DAP}$ από τις μετρήσεις των αισθητήρων (α) Plant-O-Meter και (β) GreenSeeker για τα τρία στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας αραβοσίτου που εξετάστηκαν στην έρευνα (V5, V6 και V8).

Η πιο ακριβής εκτίμηση της παραγωγής και για τους δύο αισθητήρες επιτεύχθηκε στο στάδιο ανάπτυξης V8 (ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 ήταν 0,8 και 0,75 για τους Plant-O-Meter και GreenSeeker αντίστοιχα) (Σχήμα 2) όμοια με τα ευρήματα προηγούμενων μελετών (Teal et al., 2006). Σε γενικές γραμμές, ο Plant-O-Meter φάνηκε να παρέχει καλύτερη εκτίμηση της παραγωγής και για τα τρία στάδια ανάπτυξης του αραβοσίτου. Ωστόσο, η μέτρηση με τον GreenSeeker πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα παρέχοντας μόνο τέσσερις μετρήσεις για κάθε πειραματική μονάδα, σε αντίθεση με τον Plant-O-Meter που παρείχε αυτόματα σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων οδηγώντας σε μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης, για την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος η έρευνα πρέπει να επαναληφθεί σε διάφορες περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες.



Σχήμα 3. Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ του δείκτη NDVI που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις του αισθητήρα Plant-O-Meter και GreenSeeker.

Ανάλυση απλής γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε και για τη σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων των δύο αισθητήρων σε συνθήκες αγρού (Σχήμα 3). Παρά το γεγονός ότι οι δύο αισθητήρες μετρούν την ανάκλαση του φυλλώματος σε διαφορετικά μήκη κύματος, τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι παρέχουν παρόμοιες μεταξύ τους μετρήσεις NDVI ($R^2 = 0,89$).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκε η λειτουργία του πολυφασματικού, ενεργού οπτικού αισθητήρα Plant-O-meter. Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, σε ελεγχόμενες συνθήκες, αποδείχθηκε ότι ο αισθητήρας παρείχε παρόμοιες μετρήσεις τόσο με τον εμπορικό αισθητήρα χειρός GreenSeeker όσο και με τον υπερφασματικό αισθητήρα SPECIM. Επίσης, το φως του περιβάλλοντα χώρου δεν επηρέασε τις μετρήσεις των δύο ενεργών αισθητήρων γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για χρήση σε αγροτικά περιβάλλοντα.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν από τους πειραματικούς αγρούς για την καλλιέργεια αραβοσίτου, ήταν δυνατή η επίτευξη αξιόπιστης εκτίμησης της τελικής παραγωγής από μετρήσεις του δείκτη NDVI στο μέσο της καλλιεργητικής περιόδου. Η βέλτιστη στιγμή για τη λήψη των μετρήσεων ήταν μεταξύ των σταδίων ανάπτυξης V7 και V8. Τέλος, ο πολυφασματικός αισθητήρας Plant-O-Meter παρείχε παρόμοιες μετρήσεις με τον εμπορικό αισθητήρα GreenSeeker σε συνθήκες αγρού. Σύμφωνα με τα συνολικά αποτελέσματα της έρευνας, οι δύο φορητοί ενεργοί οπτικοί αισθητήρες παρέχουν αξιόπιστες μετρήσεις σχετικές με την κατάσταση και την δυναμικότητα των φυτών, υποδεικνύοντας τη δυνατότητα χρήσης τους για εκτίμηση της παραγωγής και για μεταβλητές εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο στα πλαίσια εφαρμογής γεωργίας ακριβείας.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μία πρώτη μελέτη για την εκτίμηση της λειτουργίας και των δυνατοτήτων του πρόσφατα ανεπτυγμένου πολυφασματικού αισθητήρα Plant-O-Meter. Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για να δοκιμαστεί και να αξιολογηθεί η λειτουργία του αισθητήρα σε όλες τις πιθανές συνθήκες που συναντώνται σε γεωργικά περιβάλλοντα, εμπλουτίζοντας την βάση δεδομένων για την εξαγωγή της εξίσωσης για την ακριβέστερη πρόβλεψη της παραγωγής. Επιπλέον, το χαμηλό κόστος και η ευκολία χρήσης του αισθητήρα αναμένεται να τον καταστήσουν αξιόπιστη και οικονομικά προσιτή λύση για μικρούς και μεσαίους παραγωγούς.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bean, G.M., Kitchen, N.R., Camberato, J.J., Ferguson, R.B., Fernandez, F.G., Franzen, D.W., Laboski, C.A.M., Nafziger, E.D., Sawyer, J.E., Scharf, P.C., Schepers, J. and Shanahan, J. S., 2018. *Active-optical reflectance sensing corn algorithms evaluated over the United States Midwest corn belt*. *Agronomy Journal*, 110, pp. 2552–2565.
- Hatfield, J.L., Gitelson, A.A., Schepers, J.S. and Walthall, C.L., 2008. *Application of spectral remote sensing for agronomic decisions*. *Agronomy Journal*, 100, pp. 117–131. doi: 10.2134/agronj2006.0370c.
- Kim, Y., Huete, A., Miura, T. and Jiang, Z., 2010. *Spectral compatibility of vegetation indices across sensors: band decomposition analysis with Hyperion data*. *Journal of Applied Remote Sensing* 4(1) 043520. doi: 10.1117/1.3400635.
- Kitić G., Tagarakis A., Cselyuszka N., Panić M., Birgermajer S., Sakulskia D., Matović J. (2019). A new low-cost portable multispectral optical device for precise plant status assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 300-308.
- Kostić, M., Rakić, D., Savin, L., Dedović, N. and Simikić, M., 2016. *Application of an original soil tillage resistance sensor in spatial prediction of selected soil properties*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, pp. 615-624. doi: 10.1016/j.compag.2016.07.027.

- Lukina, E.V., Freeman, K.W., Wynn, K.J., Thomason, W.E., Mullen, R.W., Stone, M.L., Solie, J.B., Klatt, A.R., Johnson, G.V., Elliott, R.L. and Raun, W.R., 2001. *Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake*. Journal of Plant Nutrition, 24(6), pp. 885-898. doi: 10.1081/PLN-100103780.
- Magney, S.T., Eitel J.U.H., Huggins D.R., Vierling L.A., 2016. *Proximal NDVI derived phenology improves in-season predictions of wheat quantity and quality*. Agricultural and Forest Meteorology, 217, pp. 46–60. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.11.009.
- Moges, S.M., Girma, K., Teal, R.K., Freeman, K.W., Zhang, H. and Arnall, D.B., 2007. *In-season estimation of grain sorghum yield potential using a hand-held optical sensor*. Arch. of Agron. and Soil Sci., 53(6), pp. 617–628. doi: 10.1080/03650340701597251.
- QGIS Development Team, 2018. <https://qgis.org/en/site/>
- Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Mullen, R.W. and Freeman, K.W., 2002. *‘Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application*. Agron. J., 94, pp. 815–820. doi: 10.2134/agronj2002.8150.
- Raun, W. R., Solie, J.B., Martin, K.L., Freeman, K.W., Stone, M. L., Johnson, G.V. and Mullen, R.W., 2005. *Growth stage, development, and spatial variability in corn evaluated using optical sensor readings*. J. Plant Nutr., 28, pp. 173-182. doi: 10.1081/PLN-200042277.
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J., and Benson, G.O., 1997. *How a Corn Plant Develops*, Special Report No. 48, Iowa State University Cooperative Extension Service: Ames, IA, USA, 1997.
- Rogers, N.G., 2016. *Sensor Based Nitrogen Management for Corn Production in Coastal Plain Soils*. MSc. Clemson University, All Theses. 2579.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W., 1973. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., 1, 309–317.
- Solari, F., Shanahan, J., Ferguson, R.B., Schepers, J.S. and Gitelson, A.A., 2008. *Active sensor reflectance measurements to corn nitrogen status and yield potential*. Agronomy Journal, 100, pp. 571–579. doi: 10.2134/agronj2007.0244.
- Tagarakis A.C. and Ketterings Q.M., 2017. *In-season estimation of corn yield potential using proximal sensing*. Agronomy Journal, 109(4), 1323-1330. doi: 10.2134/agronj2016.12.0732.
- Teal, R.K., Tubana, B., Girma, K., Freeman, K.W., Arnall, D.B., Walsh, O. and Raun, W.R., 2006. *In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index*. Agron. J., 98, pp. 1488–1494. doi: 10.2134/agronj2006.0103
- Tremblay N., Wang Z., Ma, B.L., Belec, C. and Vigneault, P., 2009. *A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application*. Precision Agriculture, 10, pp. 145-161. doi: 10.1007/s11119-008-9080-2
- Wang, R., Cherkauer, K.A. and Bowling, L.C., 2016. *Corn Response to Climate Stress Detected with Satellite-Based NDVI Time Series*. Remote Sensing, 8(4), pp. 269. doi: 10.3390/rs8040269.
- Yao, X., Yao, X., Jia, W., Tian, Y., Ni, J., Cao, W. and Zhu, Y., 2013. *Comparison and intercalibration of vegetation indices from different sensors for monitoring above-ground plant nitrogen uptake in winter wheat*. Sensors, 13(3), pp. 3109-3130. doi: 10.3390/s130303109.
- Zecha, C.W., Peteinatos, G.G., Link, J. and Claupein, W., 2018. *Utilisation of ground and airborne optical sensors for nitrogen level identification and yield prediction in wheat*. Agriculture, 8(6) pp. 79. doi: 10.3390/agriculture8060079.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΕ ΚΕΡΑΣΕΩΝΑ

Ηλίας Καραμπατζάκης, Σπυρίδων Φουντάς, Νικολέτα Δάρρα

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, e-mail:
sfountas@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ήταν η εφαρμογή μεθόδων Γεωργίας Ακριβείας σε κερασεώνα στο Αχλαδοχώρι Πέλλας, στους πρόποδες του όρους Πάικο. Κύριος στόχος της εργασίας ήταν η μελέτη και χαρτογράφηση της χωρικής παραλλακτικότητας της συνολικής παραγωγής του κερασεώνα για το έτος 2018 και η συσχέτιση αυτής με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του βάρους, του μεγέθους και της περιεκτικότητας σε σάκχαρα (βαθμοί BRIX) των καρπών. Μελετήθηκαν και χαρτογραφήθηκαν επίσης η κοκκομετρική σύσταση και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους. Η ανάλυση των δεδομένων έφερε στο φως σημαντική χωρική παραλλακτικότητα στα υπό μελέτη μεγέθη παρά το μικρό μέγεθος του κερασεώνα.

Λέξεις κλειδιά: Γεωργία Ακριβείας, καλλιέργεια κερασιάς, χωρική παραλλακτικότητα χαρτογράφηση παραγωγής

APPLICATION OF PRECISION AGRICULTURE IN A SWEET CHERRY ORCHARD

I.Karampatzakis, S. Fountas, N. Darra

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, e-mail:
sfountas@aua.gr

ABSTRACT

This research is related to the application of precision agriculture methods in a sweet cherry orchard at the region of Pella, and more specific Achladochori village at the foothills of mount Paiko. The main purpose was to map the spatial variability of 2018 yield and correlate it with the cherry fruit quality parameters of weight, size and sugar content (BRIX). Soil texture and EC were mapped too. Data analysis brought out a significant spatial variability despite the small size of the orchard.

Keywords: Precision Agriculture; cherry orchard; spatial variability; yield mapping

1. INTRODUCTION

Cherry orchards occupy a small share of the cultivating area in Greece, approximately 14,000 out of almost 3 million cultivated hectares, but this area is enough to place Greece at the 10 biggest producers and exporters worldwide. Therefore, the adoption of PA practices in agricultural production is necessary in order to maintain the competitive advantages and reap more benefits, such as managerial improvements, higher yields, lower costs, minimization of environmental impacts and quality improvements. However, the implementation of these methods in Greek agricultural sector are still at the embryonic stage. Specifically, the application of Precision Agriculture methods in Greece has started in 2001 in cotton cultivation (Markinos et al., 2003) and during the last decades has expanded to other crops, such as apple orchards (Rappos et al., 2004; Angelopoulou et al., 2005;

Tanos et al., 2005), olive orchards (Fountas et.al 2011, Hadjipapadopoulos & Protonarios, 2017) and pear orchards (Vatsanidou et.al, 2014).

The main objective of this study is the investigation of the spatial variability of a cherry orchard, according to the principal methods of precision agriculture. The cherry orchard that was selected included three different planted varieties; ‘Early Bigi’ as the main variety and ‘Bigarreau Burlat’ and ‘Lapins’ as pollinators. Delineation of management zones, as well as yield and quality measurements were exploited, allowing the monitoring of significant parameters for the growth of the cultivation. Furthermore, Soil Electrical Conductivity (EC) measurements together with soil sampling were conducted, by using a GPS for the geo-reference of all the measurements. The analysis of the collected data for the map creation was applied to ArcGIS (ESRI) software and a statistical analysis was performed to determine data correlations.

2. MATERIALS AND METHODS

The research was carried out in a 0.4 ha commercial cherry orchard during 2018. The orchard is located in the Achladochori village, near Giannitsa, at the foothills of mountain Paiko (40°49'11.5"N, 22°19'14.9"E). It is consisted by 204 trees that were planted during the year 2012 on a 4 x 5 m grid; 104 are ‘Early Bigi’, 52 are ‘Bigarreau Burlat’ and 52 are ‘Lapins’. All trees are grafted on ‘MxM 14’ rootstock.

The orchard has 8 rows and every row consists of 26 cherry trees. The odd rows consist of the main variety ‘Early Bigi’, and the pollinators ‘Lapins’ and ‘Bigarreau Burlat’ are planted as pairs from the same variety succeeding one another on the even rows to achieve maximum pollination of ‘Early Bigi’ flowers. Due to mice infestation, a percentage of 17.64% (36 trees) were dried. A total of 32 out of 104 (31 ‘Lapins’ and 1 ‘Bigarreau Burlat’) pollinator trees have been drought, since most of whom were not grafted on the selected rootstock of ‘MxM 14’ due to poor management decisions.

The orchard was divided into 32 grid cells (Figure 1) for optimal data management and high accuracy of the results. Every row consists of four grid cells and every gridcell is composed of 6 or 7 trees spreading to an area of 0.012 ha (24 x 5 m) and 0.014 ha (28 x 5 m) respectively; the 1st and 3rd grid cells contain 6 trees while the 2nd and 4th grid cells contain 7 trees. Due to the aforementioned problems, no pollinator grid cell is in its full capacity and 3 of them lack any ‘Lapins’ trees (Figure 2). Cherry harvesting of the orchard took place in seven stages during the period May 4th to May 30th with high frequency of rainfalls. Harvest was performed manually by workers. Cherries were harvested in buckets and then putted in cases especially made for cherries. Each measurement was georeferenced using GPS and the weight of cherries was measured by using a certified professional weight scale. The total case weight (approximately 0.35 kg per case) was subtracted by the total weight measurement to calculate the net cherry weight. After every day’s harvest three random cherries from each grid cell were picked and examined for the determination of quality parameters. The weight was measured using a smaller weight scale of high accuracy. The size was measured by using an electronic caliper and the sugar content (BRIX) of the cherries was measured by using an analog refractometer.

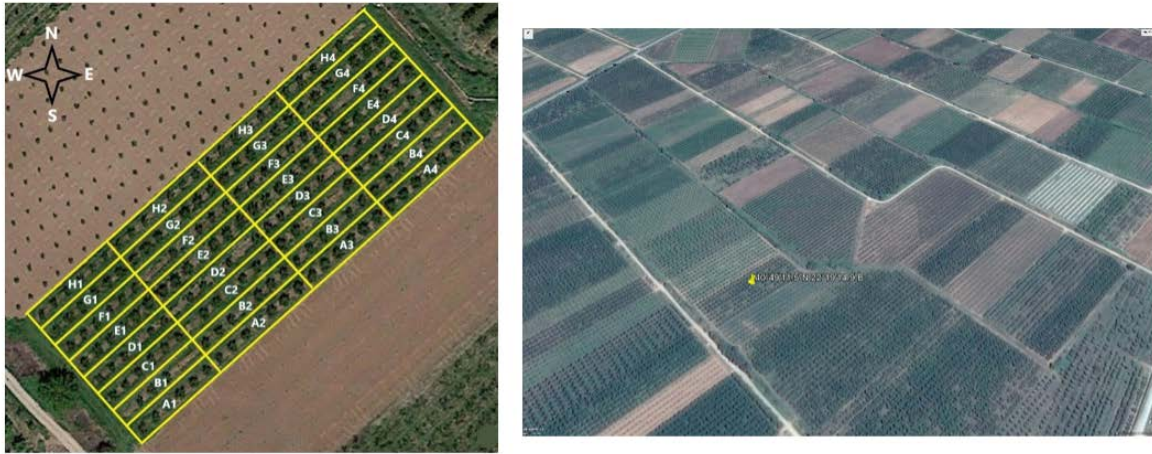


Figure 1. Aerial photograph of the orchard taken by Google Earth, and the 32 grid cells of the experiment.

The same geo-reference method was applied for the soil sampling when samples were collected by two or three different spots of every cell during January of 2019. The samples were collected at the 0 – 30 cm depth below surface level using a small garden spade. Then, the samples were drought for three days in room temperature (20 °C). Soil texture was determined using the Bouyoucos (1936, 1962) method.

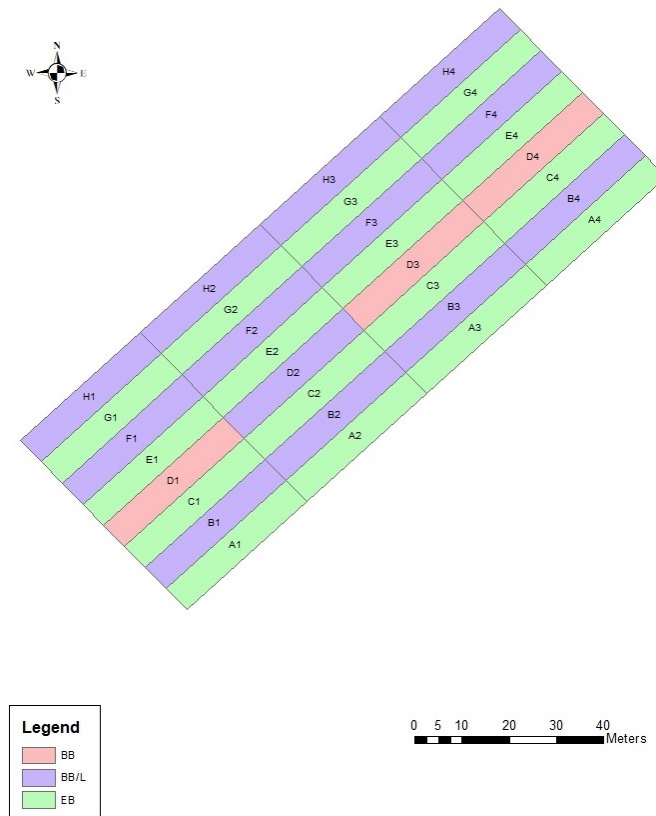


Figure 2. The variety map of the orchard (‘BB’=‘Bigarreau Burlat’, ‘L’=‘Lapins’, ‘EB’=Early Bigi)

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Soil EC

Soil EC mapping (Figure 3) revealed a slight variability of EC in the orchard as in 56% of it, EC varies between 2 and 15 dS/m. The biggest EC rates are recorded at the south-east part of the orchard, something that may be induced by the small inclination that the orchards of this area have for a better water drainage. Moreover, the A and H groups of grid cells are flanked by other orchards being watered by the old method of flood and are always more humid. The first tree of every grid cell from A1 to H1 is planted in a distance of 6 m from the artificial drainage waterways that every orchard in the area has.

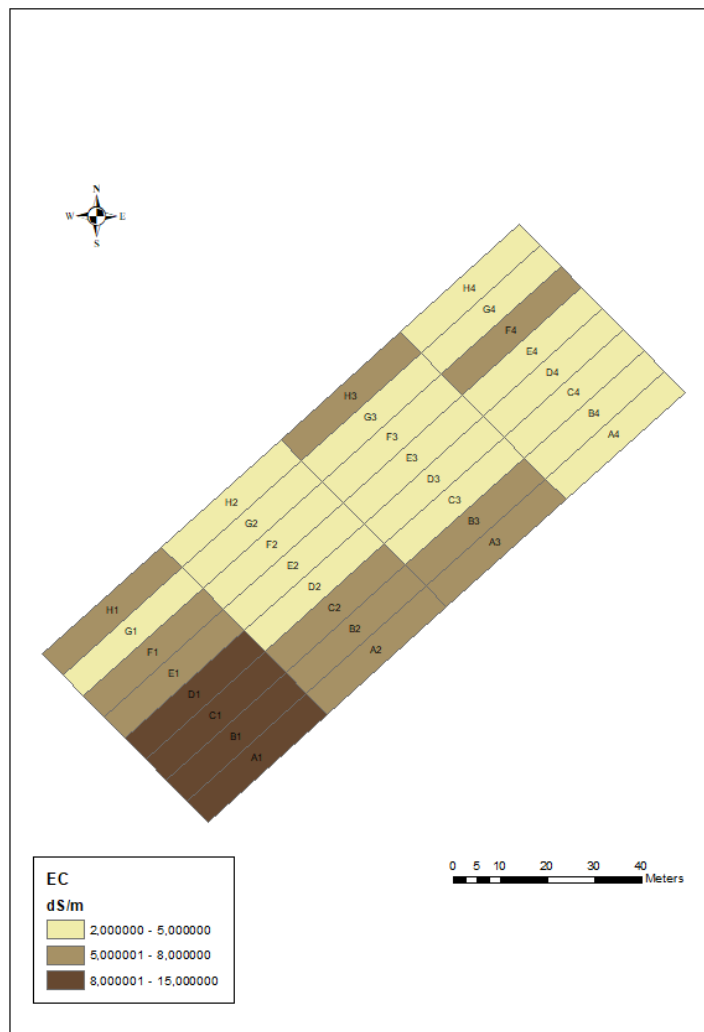


Figure 3. Soil EC mapping

3.2 Soil texture

Sand, silt and clay demonstrate different spatial variability (Figure 4) and slight or no correlation with soil EC, as the results of Pearson correlation have shown (Table 1).

Clay percentage ranges between 28.5% and 32% and spreads almost equally in more than 65% of the orchard. The north-east and south-east parts of the orchard differ with a percentage of clay lower than 28.5% and only one grid cell demonstrated higher amount of clay (Figure 4a).

The central and north/ north-east parts of the orchard display the bigger amount of silt percentages and combined in the orchard are recorded middle and high percentages of silt at the 75% of it. Only the south-west area has smaller concentrations of silt and some grid cells dispersed at the central and east parts of the orchard (Figure 4b).

Most parts of the orchard have middle and high content of sand and only 18% of it has lower sand content, especially the grid cells directly after the middle of the orchard (A3-H3) (Figure 4c).

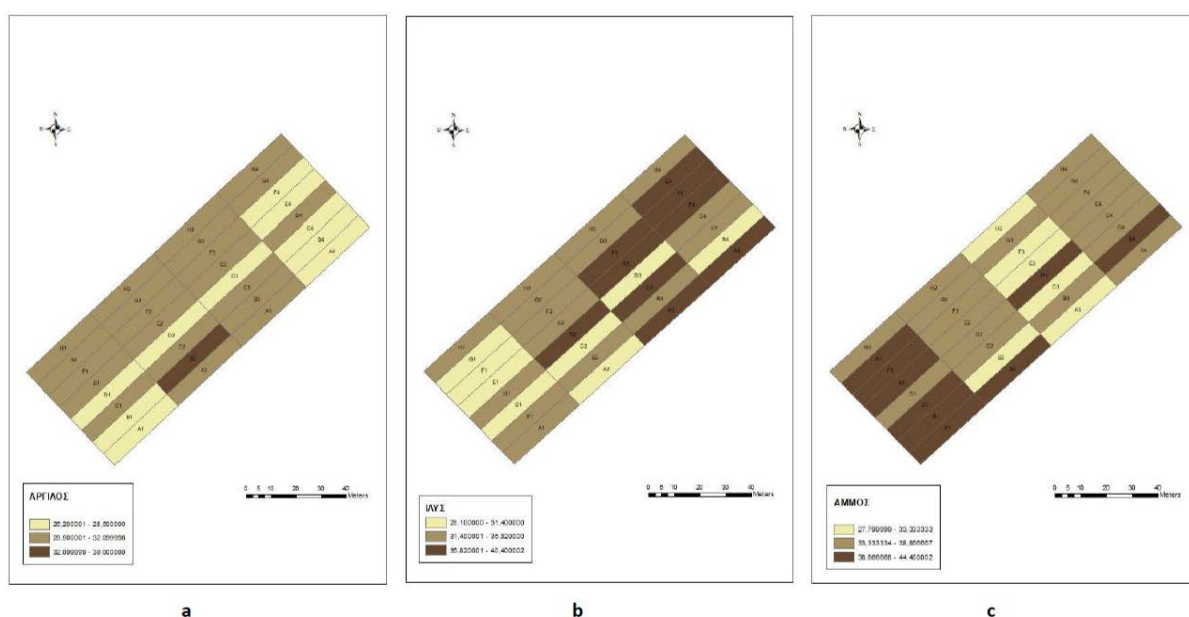


Figure 4. Soil texture in % of clay (a), silt (b) and san (c)

Pearson method have shown moderate and strong negative correlation between sand, silt and clay and no correlation between silt and clay. There is a relatively low correlation between EC, sand, silt and clay.

Table 1. Correlations between soil EC and texture

	EC	Sand	Silt	Clay	Silt and Clay
EC	1.000	0.354	-0.341	-0.128	-0.354

3.3 Yield

Yield during the year of 2018 showed significant spatial variability for all cultivated varieties (Figure 5), especially for ‘Early Bigi’, which is the main variety. The harvested quantities of ‘Early Bigi’ seem to stay unaffected by the number of pollinators, an advantage for a self-incompatible variety.

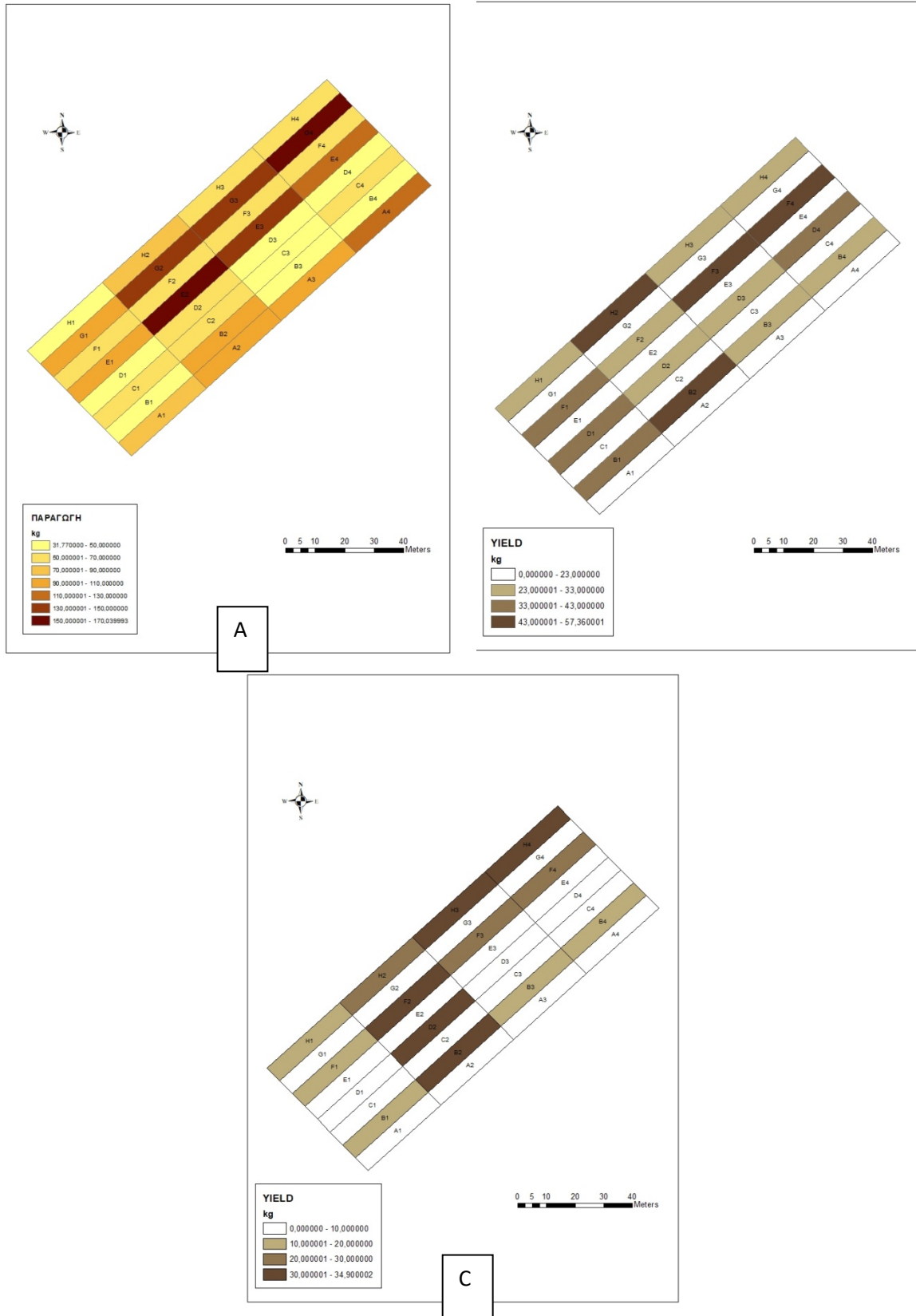


Figure 5. 2018 yield mapping A) Orchard overall by the 3 different varieties B) 'Bigarreau Burlat' C) 'Lapins'

Descriptive statistics indicate that the minimum harvested quantity in a grid cell was 31.86 kg and the maximum was 170.04 kg, but the average per cell yield was 68.53 kg (Table 2).

Table 2. Descriptive statistics for yield

	N	Mean	SE Mean	SD	Min	Mid	Max	Skewness	Kurtosis
Yield	32	83.44	7.07	39.98	31.86	68.53	170.04	0.75	-0.48

Yield variability is not affected by soil texture of EC as the Pearson method showed low negative correlation between yield EC and sand, low positive correlation with silt and no correlation with clay (Table 2).

Table 3. Correlations between yield, soil EC and soil texture

	EC	Sand	Silt	Clay	Silt and Clay
Yield	-0.155	-0.257	0.248	0.092	0.257

Examining each variety individually to find out how quantity and quality characteristics relate only in ‘Lapins’ there are strong correlations amongst productivity, fruit size, weight and BRIX (Table 6).

‘Early Bigi’ presents strong correlations between fruit size and weight but BRIX seems to stay unaffected by variety productivity. BRIX of ‘Early Bigi’ cherries are slight related with fruit size and weight, but tree productivity and fruit size and weight are high moderate related (Table 4).

‘Bigarreau Burlat’ finally, shows strong correlation between fruit size and weight. Fruit weight seems to stay unaffected by the tree productivity, but there are very low correlations between productivity fruit size and BRIX and moderate correlations amongst BRIX, fruit size and weight (Table 5).

Table 4. ‘Early Bigi’ quantity and quality correlations

	Yield	Fruit size	Fruit weight	BRIX
Yield	1.000	-0.626	-0.588	-0.168
Fruit size	-0.626	1.000	0.968	0.241
Fruit weight	-0.588	0.968	1.000	0.314
BRIX	-0.168	0.241	0.314	1.000

Table 5. ‘Bigarreau Burlat’ quantity and quality correlations

	Yield	Fruit size	Fruit weight	BRIX
Yield	1.000	-0.179	-0.023	0.281
Fruit size	-0.179	1.000	0.928	-0.410
Fruit weight	-0.023	0.928	1.000	-0.369
BRIX	0.281	-0.410	-0.369	1.000

Table 6. ‘Lapins’ quantity and quality correlations

	Yield	Fruit size	Fruit weight	BRIX
Yield	1.000	0.770	0.770	0.762
Fruit size	0.770	1.000	0.993	0.997
Fruit weight	0.770	0.993	1.000	0.985
BRIX	0.762	0.997	0.985	1.000

4. CONCLUSION

Spatial variability of soil texture, EC and yield indicates that even small fields like the examined one can be separated to management zones for a better farm management and variable rate application of inputs and cultivation practices.

Soil texture and EC have a very small interference with cherry yield but yield and quality characteristics act upon each other for all three studied varieties. For ‘Early Bigi’, fruit weight and size are altered depending the cherry production volume per tree. On the other hand, in ‘Bigarreau Burlat’ fruit size and weight are not affected by the yield rather than each other in a positive correlation. ‘Lapins’ variety seems to have the biggest interdependence amongst quantity and quality, and quality characteristics themselves.

The results indicate that apart from spatial management zones, in cases that orchards are being planted in a pattern like the studied one every variety shall be managed particularly.

5. REFERENCES

Bouyoucos, G.J. 1936. *Directions for Making Mechanical Analysis of Soils by the Hydrometer Method*. Soil Science 4: 225-228.

- Bouyoucos, G.J. 1962. *Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils*. Agronomy Journal 54: 464-465
- Fountas, S., Aggelopoulou, K., Bouloulis, K., Nanos, G.D., Wulfsohn, D., Gemtos, T.A., Paraskevopoulos, A., Galanis, M., (2011). Site-specific management in olive tree plantation. Journal of Precision Agriculture, 12(2), Pages 179-195: <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9167-4>
- Markinos, A. T. (2003). A precision farming application in cotton in the small farms of Greece. 4th European Conference on Precision Agriculture, Berlin, Germany, 15-19 June 2003.
- Vatsanidou A ; S. Fountas¹ ; G. Nanos² ;T. Gemtos¹ (2014)Variable Rate Application of Nitrogen Fertilizer in a commercial pear orchard:
- Αγγελοπούλου Α., Blackmore S., Φουντάς Σ., Γέμτος Θ. και Νάνος Γ., 2007. Μελέτη χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας παραγωγής και ποιότητας σε σπωρώνες μηλιάς. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα
- Ράππος Ε., Αγγελοπούλου Α., Παπαθανασίου Ι., Γέμπος Θ., Νάνος Γ., 2005. Συμβολή στη Γεωργία Ακριβείας χαρτών παραγωγής και ποιοτικών χαρακτηριστικών δύο ποικιλιών μήλων. 40 Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 6-8 Οκτωβρίου 2005 Αθήνα.
- Τάνος Α., Αγγελοπούλου Α., Φουντάς Σ., Γέμπος Θ., Νάνος Γ. και Χατζινίκος Α., 2007. Ζώνες διαχείρισης βάση χαρτών παραγωγής, ποιοτικών χαρακτηριστικών και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα.
- Χατζηπαπαδόπουλος, Φ., Πρωτονοτάριος, Β., (2017). Η Ευφυής Γεωργία στην καλλιέργεια της ελιάς. Σε Ζαμπούνη Β. (Συντ.), Εγκυκλοπαίδεια Ελαιοκομίας: Το ελαιόλαδο (σελ. 79-93). Άξιον Εκδοτική, Ελλάδα, 2017.

ΠΑΡΑΚΟΥΛΟΥΘΗΣΗ ΑΜΠΕΛΩΝΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

Ν. Δάρρα, Σ. Φουντάς, Ε. Αναστασίου

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, e-mail:
nicoletadarra@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη αξιοποιήθηκαν μέθοδοι Γεωργίας Ακριβείας σε καλλιέργεια επιτραπέζιου σταφυλιού (*Vitisviniferacv. ThompsonSeedless*), με στόχο την παρακολούθηση της χωρικής παραλλακτικότητας του αμπελώνα από την άνθιση έως τη συγκομιδή. Η μελέτη έλαβε χώρα στην ευρύτερη περιοχή του Κιάτου σε έναν εμπορικό αμπελώνα 14 στρεμμάτων κατά τη διάρκεια του έτους 2017. Στο πλαίσιο της έρευνας, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις για τον υπολογισμό του Δείκτη Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI) και τη χαρτογράφηση της τελικής παραγωγής. Ο δείκτης NDVI υπολογίστηκε με τη χρήση δορυφορικών εικόνων (Sentinel 2) και του επίγειου αισθητήρα CropCircleACS 470, έτσι ώστε να αξιολογηθούν οι συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών NDVI και της παραγωγής. Η παραγωγή του αγροτεμαχίου παρουσίασε υψηλό βαθμό χωρικής παραλλακτικότητας σε σχέση με το μέγεθος του, ενώ οι δείκτες NDVI παρουσίασαν διαφορετικούς βαθμούς συσχετίσεων σε διαφορετικές ημερομηνίες μέτρησης και μεθόδους τηλεπισκόπησης.

Λέξεις κλειδιά: Γεωργία Ακριβείας, επιτραπέζιο σταφύλι, δείκτης NDVI, τηλεπισκόπηση, χαρτογράφηση παραγωγής

VINEYARD MONITORING BY USING PROXIMAL DATA AND SATELLITE IMAGERY

N. Darra, S. Fountas, E. Anastasiou

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, e-mail:
nicoletadarra@aua.gr

ABSTRACT

In this study, Precision Agriculture methods were exploited in table grape vineyard (*Vitis vinifera cv. Thompson Seedless*) in order to monitor the spatial variation of the crop from veraison to harvest. The study took place in the district of Kiato and more specifically in a commercial vineyard of 14 acres during the year 2017. Experimental measurements were performed for the calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the yield mapping. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated by employing satellite imagery (Sentinel 2) and proximal sensing (Crop Circle ACS 470) to assess the correlation between the NDVI index and the yield of table grapes. The yield of the study area exhibited high degree of spatial variability considering the small size of the vineyard, while NDVI index revealed different degrees of correlations with different measurement dates and sensing methods.

Keywords: Precision Agriculture; table grape; NDVI index; remote sensing; yield mapping

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξιοποίηση μεθόδων Γεωργίας Ακριβείας στην αμπελοκαλλιέργεια ορίζεται ως Αμπελουργία Ακριβείας και στοχεύει στη βελτιστοποίηση της καλλιέργειας της αμπέλου. Η Αμπελουργία Ακριβείας, όπως και οι περισσότερες εφαρμογές της Γεωργίας Ακριβείας, είναι μια συνεχής κυκλική διαδικασία (Bramley *al.*, 2003) που συνήθως περιλαμβάνει τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων, τη δημιουργία και σχεδιασμό διαφορετικών ζωνών διαχείρισης, τις αποφάσεις διαχείρισης και την αξιολόγηση των εφαρμοσμένων πρακτικών.

Η Αμπελουργία Ακριβείας πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στην Αυστραλία και στις ΗΠΑ (Καλιφόρνια) το 1999 σε αμπελώνες που η συγκομιδή γινόταν μηχανικά (Bramley 2001a, Wample 1999) και ακολούθησε η εφαρμογή της στην Γαλλία (Tisseyre *et al.*, 2001). Το 2001 στη Χιλή πραγματοποιήθηκαν πειράματα χωρικής παραλλακτικότητας της παραγωγής και ποιότητας των καρπών (Ortega *et al.*, 2003), ενώ στην Ισπανία η εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2002 (Arnó *et al.*, 2005). Πολλά ερευνητικά προγράμματα που αφορούν στην Αμπελουργία Ακριβείας υπάρχουν ήδη πλέον σχεδόν σε όλες τις σημαντικές περιοχές παραγωγής κρασιού του κόσμου συμπεριλαμβανομένων, της Γαλλίας (Bobillet *et al.*, 2003; Tisseyre *et al.*, 2005; Goutouly Gaudilliere, 2006), της Ισπανίας (Arnó *et al.*, 2005), των ΗΠΑ (Johnson *et al.*, 2003), της Χιλής (Ortega-Farias *et al.*, 2003), της Νότιας Αφρικής (Strever *et al.*, 2004), της Νέας Ζηλανδίας (Pratt *et al.*, 2004) και της Αυστραλίας (Taylor and Tisseyre, 2005), όπου η υιοθέτηση αυτών των μεθόδων φαίνεται να είναι πιο προχωρημένη.

Στην Ελλάδα η Αμπελουργία Ακριβείας εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Θεσσαλία και συγκεκριμένα στο Δαμάσι Τυρνάβου και στην Ραψάνη Λάρισας για την καλλιεργητική περίοδο 2004-2005 σε αμπελώνες έκτασης 6,5 και 7 στρεμμάτων αντίστοιχα. Παρόλο που η έκταση των αμπελώνων που μελετήθηκαν ήταν μικρή, διαπιστώθηκε μεγάλη χωρική παραλλακτικότητα τόσο στην παραγωγή όσο και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά, ικανή να οδηγήσει σε διαμόρφωση ζωνών διαχείρισης (Tagarakis *et al.*, 2006). Επομένως, η μελέτη της χωρικής παραλλακτικότητας ακόμα και σε μικρά αγροτεμάχια εντείνει την ανάγκη για διαφοροποιημένη μεταχείριση και εφαρμογή αρχών Γεωργίας Ακριβείας.

Η ΑΑ παρουσίασε ταχεία εφαρμογή σε αμπελώνες με οινοποιήσιμες ποικιλίες αμπέλου λόγω του υψηλού επιπέδου εκμηχάνισης που παρουσιάζουν. Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμένες μελέτες σχετικά με την εφα. περαιτέρω έρευνα αυτών των εφαρμογών στη συγκεκριμένη καλλιέργεια. Επομένως, η παρούσα μελέτη λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω εστίασε στην εφαρμογή μεθόδων Γεωργίας (Αμπελουργία) Ακριβείας σε αμπελώνα φυτεμένο με επιτραπέζια ποικιλία. Ο κύριος στόχος της έρευνας που εκπονήθηκε ήταν ο προσδιορισμός της χωρικής παραλλακτικότητας της παραγωγής, καθώς και του δείκτη βλάστησης NDVI, ο οποίος υπολογίστηκε βάσει δεδομένων δύο διαφορετικών πηγών (επίγεια και δορυφορικά). Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δεικτών βλάστησης NDVI από τις δύο διαφορετικές πηγές δεδομένων, καθώς και συσχέτιση των αποτελεσμάτων με την παραγωγή σταφυλιών. Για τον προσδιορισμό των συσχετίσεων και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων αξιοποιήθηκαν στατιστικές και γεωστατιστικές μέθοδοι (περιγραφική στατιστική, χωρική αυτοσυσχέτιση, χωρική παρεμβολή).

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Η πειραματική διαδικασία διεξήχθη το έτος 2017, σε αμπελώνα 1,4 εκταρίων που βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του Κιάτου Κορινθίας με γεωγραφικές συντεταγμένες $37^{\circ} 54.532' \text{N}$, $22^{\circ} 44.798' \text{E}$ (Εικόνα 1). Τα αμπέλια φυτεύτηκαν το 2006 με την επιτραπέζια ποικιλία *Vitis vinifera* L. cv. Thompson seedless. Κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκαν σημαντικές ποσότητες φωτορυθμιστικών ενώσεων και λιπασμάτων για την επίτευξη εμπορικών προδιαγραφών όσον αφορά στη διάμετρο των ραγών και στην περιεκτικότητα των σταφυλιών σε σάκχαρα. Επιπλέον, εφαρμόστηκαν 16 ψεκασμοί διαφυλλικής λίπανσης, ρυθμιστών ανάπτυξης και φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Το αγροτεμάχιο παρουσιάζει μεταβολή της σύστασης του εδάφους με δύο διαφορετικούς τύπους εδάφους (αμμοαργιλοπηλώδες και αργιλοπηλώδες). Ένα πλέγμα 36 κελιών ($298\text{-}404 \text{ m}^2$ ανά κελί) δημιουργήθηκε για να διευκολύνει τις μετρήσεις πεδίου, τη διαχείριση των δεδομένων, τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων και την αξιολόγηση της παραλλακτικότητας του αμπελώνα (Εικόνα 1). Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε επίσης από τους Tagarakis et al. (2013) και Farid et al. (2016).



Εικόνα 1: Η περιοχή μελέτης σε περιβάλλον Google Earth χωρισμένο σε ένα πλέγμα 36 κελιών

Στη συνέχεια έγιναν τέσσερις μετρήσεις κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου με την βοήθεια του αισθητήρα Crop Circle ACS-470, με στόχο τον προσδιορισμό της ευρωστίας των φυτών. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων με τις ίδιες περίπου ημερομηνίες λήψης (άνθιση, περκασμός, ωρίμανση και τεχνολογική ωρίμανση).

2.1 Μετρήσεις αισθητήρα Crop Circle

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο ενεργητικού τύπου αισθητήρας Crop Circle ACS-470 (Holland Scientific Inc., Lincoln, NE, USA), ο οποίος εκπέμπει ακτινοβολία και καταγράφει την ανάκλαση της ακτινοβολίας αυτής από το φύλλωμα. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας για τον υπολογισμό πληθώρας δεικτών βλάστησης. Στη συνέχεια τα δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό ArcGIS 10.2 (ESRI Inc., Redlands, CA, USA) για την επεξεργασία τους και την εξαγωγή θεματικών χαρτών. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων αφαιρέθηκαν οι ακραίες και μη αποδεκτές τιμές οι οποίες δημιουργούνται στην άνω και κάτω πλευρά του αμπελώνα λόγω της στροφής για αλλαγή γραμμής ενώ ο αισθητήρας συνεχίζει να καταγράφει.

2.2 Γεωστατιστική Ανάλυση

Στη συνέχεια ακολούθησε γεωστατιστική ανάλυση δεδομένων και πιο συγκεκριμένα χωρική παρεμβολή IDW. Η ακανόνιστη κατανομή των θέσεων των μετρήσεων, αποτελεί το σημαντικότερο ζήτημα για την εφαρμογή της χωρικής παρεμβολής, επομένως προσδιορίστηκε αρχικά ο βαθμός χωρικής εξάρτησης των δεδομένων του αισθητήρα. Για τον προσδιορισμό του βαθμού της χωρικής αυτοσυσχέτισης των δεδομένων πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του δείκτη Moran's I ο οποίος είναι γνωστός από το εκτενές ερευνητικό έργο των Cliff & Ord (1973, 1981) και στη συνέχεια εφαρμόστηκε χωρική παρεμβολή IDW.

2.3 Μετρήσεις τηλεπισκόπησης

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα μελέτη προέρχονται από τον δορυφόρο Sentinel 2 και διατίθενται μέσω του Sentinels Scientific Data Hub ως σύνολα δεδομένων ορθοεικόνων των 100 km² σε UTM/WGS84. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες Level 2A οι οποίες έχουν υποστεί ατμοσφαιρική και ραδιομετρική διόρθωση. Επιπλέον οι εικόνες όλων των φασματικών καναλιών ενώθηκαν σε ένα ενιαίο dataset, με χωρική ανάλυση 10m και προβολικό σύστημα αναφοράς του WGS84, UTM Zone 34. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν 3 φασματικά κανάλια (Band 4,7) για την εξαγωγή του δείκτη NDVI. Η χρήση των επιπλέον καναλιών (Band 3,4,6,8) έγινε για την εμβάθυνση της ανάλυσης και τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων με την παραγωγή.

2.4 Μετρήσεις παραγωγής

Για τις μετρήσεις της παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν πλαστικές κλούβες χωρητικότητας 25 κιλών, μια ηλεκτρονική ζυγαριά τοποθετημένη σε ένα καροτσάκι και ένα GPS. Οι εργάτες αφού γέμιζαν πλήρως τους κλωβούς, τους τοποθετούσαν κατά μήκος κάθε γραμμής και γινόταν καταγραφή συγκομιδής για κάθε κελί ξεχωριστά. Έπειτα σε κάθε σημείο που ζυγίζονταν μια κλούβα παίρνονταν οι συντεταγμένες του σημείου με την χρήση GPS. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στη δημιουργία των χαρτών, ζυγίστηκε μια άδεια πλαστική κλούβα, έτσι ώστε να αφαιρεθεί το βάρος της από τη γεμάτη κλούβα και να υπολογιστεί το ακριβές βάρος των σταφυλιών.

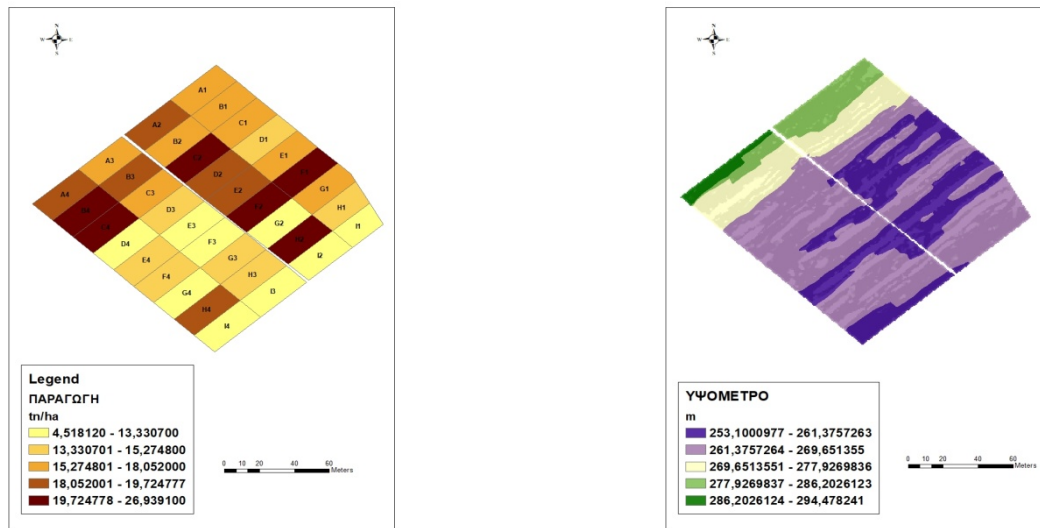
2.5 Στατιστική Ανάλυση

Για την εκτίμηση της συσχέτισης μεταξύ των αποτελεσμάτων των δορυφορικών εικόνων και του αισθητήρα Crop circle, εκτελέστηκε στατιστική ανάλυση, περιλαμβανομένων περιγραφικών στατιστικών και συντελεστή συσχέτισης. Ο συντελεστής συσχέτισης r των δορυφορικών εικόνων και των δεδομένων αισθητήρα υπολογίστηκε προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δυο πηγών δεδομένων. Η στατιστική ανάλυση διεξήχθη με στατιστικό λογισμικό (Statgraphics 16, StatPoint Technologies Inc., Warrenton, VA, USA).

3. Αποτελέσματα

3.1 Μετρήσεις παραγωγής

Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε τον Αύγουστο, όπου έγινε χαρτογράφηση με σκοπό να γίνει συσχέτιση των δορυφορικών δεδομένων, καθώς και των δεδομένων του αισθητήρα με την παραγωγή. Στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 2α) παρατηρούμε τη χωρική παραλλακτικότητα της παραγωγής του αγροτεμαχίου για το έτος 2017 του πειράματος.



Εικόνα 2: α)Χάρτης παραγωγής για την ποικιλία *Thompson seedless* για το έτος 2017, β) Υψομετρικός χάρτης του αγροτεμαχίου.

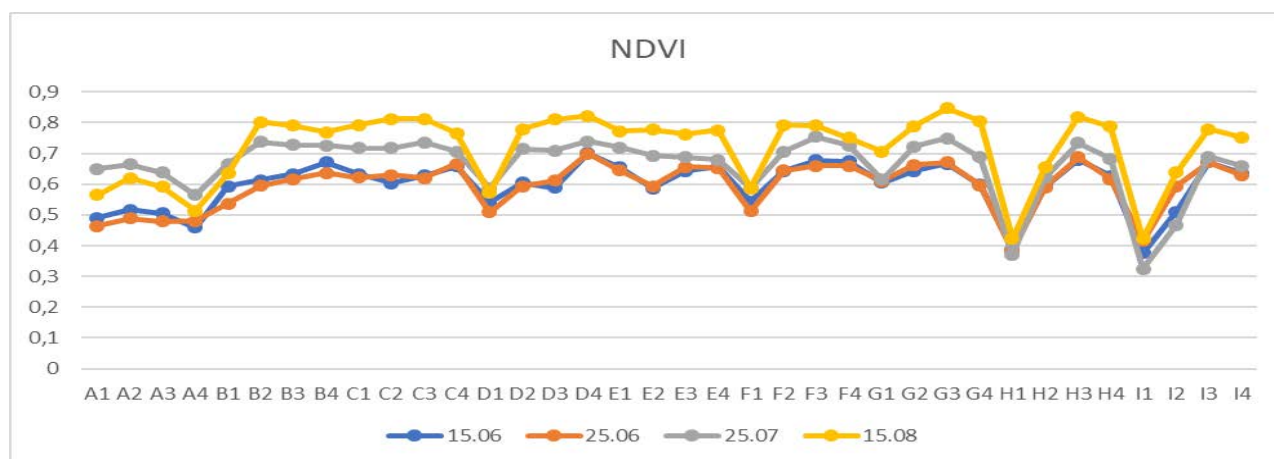
Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στα κελιά B4 και H2, ενώ οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στα κελιά G2, I1. Η συνολική παραγωγή για το έτος 2017 κυμάνθηκε από 4,52-2,700 τόνους/εκτάριο και φαίνεται να υπάρχει μια τάση προς το νότιο τμήμα του αμπελώνα όπου χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη παραγωγή σε σχέση με το βόρειο τμήμα του.

Η παραλλακτικότητα αυτή σημαίνει ότι η μέθοδος διαχείρισης που εφαρμόζεται στον αμπελώνα μελέτης δεν παρέχει τις κατάλληλες καλλιεργητικές τεχνικές σε όλες τις περιοχές του αγρού. Δεδομένου ότι ο αμπελώνας χαρακτηρίζεται από μικρή κλίση η οποία εκτείνεται στο κεντρικό τμήμα του αγροτεμαχίου με φορά από Βορρά προς Νότο θεωρούμε ότι η τοπογραφία του ίσως επηρεάζει την παραγωγή (Εικόνα 2β). Επιπλέον, οι ιδιότητες του εδάφους είναι πολύ πιθανό να αλλάζουν από σημείο σε σημείο του αγρού με αποτέλεσμα να επηρεάζουν και την παραγωγή. Επίσης, οι καλλιεργητικές φροντίδες όπως λίπανση και άρδευση αν δεν εφαρμόζονται σωστά παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική παραγωγή. Τέλος, τυχόν παρασιτισμοί σε συγκεκριμένα σημεία του αγρού έχουν ως αποτέλεσμα την επιρροή στη χωρική κατανομή της παραγωγής.

Από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης φαίνεται ότι η ποικιλία *Thompson seedless* είχε κατά μέσο όρο για το έτος 2017 παραγωγή 16,23 τόν/εκτ. Η παραγωγή θεωρείται μικρή, καθώς τα προηγούμενα δυο χρόνια η μέση παραγωγή, για το συγκεκριμένο αγροτεμάχιο ξεπερνούσε τους 20 τόν/εκτ. Ο συντελεστής παραλλακτικότητας ήταν γύρω στο 27,93% που είναι υψηλός αν ληφθεί υπόψη η έκταση του αμπελώνα που είναι μόλις 1,4 εκτάρια.

3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων δορυφορικών εικόνων Sentinel

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1) παρατηρούμε τις τιμές του NDVI_{sen} οι οποίες προήλθαν από τα δεδομένα του Sentinel 2 δορυφόρου. Παρατηρούμε ότι η κατανομή των τιμών για όλες τις ημερομηνίες και τα κελιά ακολουθούν όμοια πορεία εμφανίζοντας παραλλακτικότητα στα διαφορετικά κελιά του αγροτεμαχίου. Στο σχήμα αποτυπώνεται η σταδιακή αύξηση της τιμής του δείκτη από τον Ιούνιο μέχρι τον Αύγουστο, όπου εμφανίζονται και οι υψηλότερες τιμές. Ο δείκτης εμφανίζει χαμηλότερες τιμές στα ακραία κελιά του πλέγματος και πιο συγκεκριμένα στα κελιά A4, D1, F1, H1 και I1. Τα κελιά που χαρακτηρίζονται από τις υψηλότερες τιμές είναι τα B2, C2, C3, C4, D3, D4, F2, G3, H3.



Σχήμα 1: Η κατανομή των τιμών NDVI από τα δεδομένα του δορυφόρου Sentinel 2.

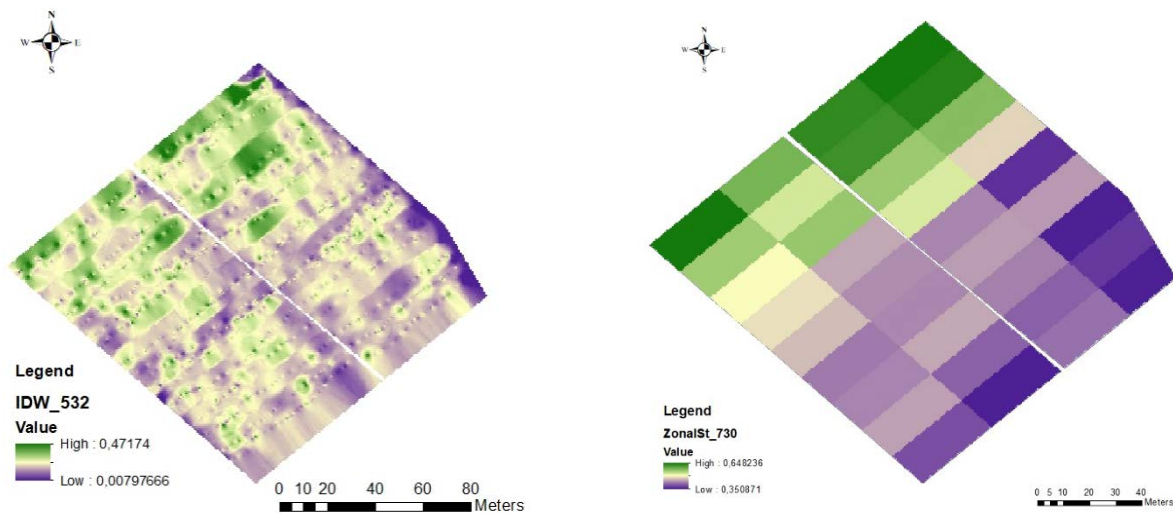
Από τα περιγραφικά στατιστικά (Πίνακας 1) του δείκτη NDVI_{sen} φαίνεται ότι η μικρότερη τιμή σημειώθηκε στις 25.07.17, ενώ η μέγιστη τιμή NDVI ήταν 0,85 και σημειώθηκε στις 14.08.17 στο στάδιο της συγκομιδής. Ο συντελεστής παραλλακτικότητας CV κυμάνθηκε μεταξύ 13,3-15,9%

Πίνακας 1: Περιγραφικά στατιστικά του δείκτη NDVI_{sen} για το έτος 2017.

	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Παραλλακτικότητας
15.06.2017	0,59	0,37	0,70	0,079	13,28%
25.06.2017	0,59	0,38	0,70	0,079	13,24%
25.07.2017	0,66	0,32	0,75	0,098	14,84%
14.08.2017	0,72	0,42	0,85	0,114	15,90%

3.3 Συγκριση αποτελεσμάτων αισθητήρα Crop Circle

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της χωρικής αυτοσυσχέτισης, οι τιμές του ολικού δείκτη Moran's I (global Moran's I) εμφάνισαν εύρος από 0,21 μέχρι 0,82 με p-value μικρότερο του 0,01 σε κάθε περίπτωση, γεγονός που υποδεικνύει θετική χωρική αυτοσυσχέτιση, η οποία είναι στατιστικά σημαντική στις περισσότερες περιπτώσεις. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε χωρική παρεμβολή IDW (Εικόνα 3α) και χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία Zonal Statistics (Εικόνα 3β) και Zonal Statistics as Table για να υπολογιστούν οι μέσες τιμές ανάκλασης ανά κελί. Αυτή η διαδικασία έγινε για όλα τα μήκη κύματος και όλες τις ημερομηνίες. Οι υψηλές τιμές απεικονίζονται με σκούρο πράσινο, ενώ οι χαμηλές με σκούρο μωβ.



Εικόνα 3: α) Χωρική παρεμβολή IDW των τιμών ανάκλασης για μήκος κύματος 535 nm, β) Zonal Statistics για τα εξής μήκη κύματος 535 nm.

Στο τελευταίο στάδιο αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές (ρ) σε 2 μήκη κύματος (670nm , 760nm) για την εξαγωγή του δείκτη NDVI μέσω της παρακάτω εξίσωσης.

$$NDVI = \frac{\rho_{760} - \rho_{670}}{\rho_{760} + \rho_{670}}$$

Η κατανομή των τιμών για όλες τις ημερομηνίες και τα κελιά εμφανίζουν μικρή παραλλακτικότητα στα διαφορετικά κελιά του αγροτεμαχίου. Επιπλέον οι τιμές του δείκτη NDVI αυξάνονται σταδιακά από τον Ιούνιο μέχρι τον Αύγουστο όπου εμφανίζονται και οι υψηλότερες τιμές. Οι χαμηλότερες τιμές εντοπίζονται στα ακραία κελιά του πλέγματος και πιο συγκεκριμένα στα κελιά H1 και I1 την περίοδο της άνθισης.

Από τα περιγραφικά στατιστικά του δείκτη NDVI_{cc} για το έτος 2017 (Πίνακας2) φαίνεται ότι η μικρότερη τιμή NDVI_{cc} σημειώθηκε στις 15.06.17 στο στάδιο της άνθισης, ενώ η μέγιστη τιμή του δείκτη NDVI_{cc} ήταν 0,74 και σημειώθηκε στις 14.08.17. Ο συντελεστής παραλλακτικότητας CV κυμάνθηκε μεταξύ 1,99- 6,61 %, γεγονός που θεωρείται λογικό καθώς ο αισθητήρας ήταν στραμμένος αποκλειστικά στη κόμη.

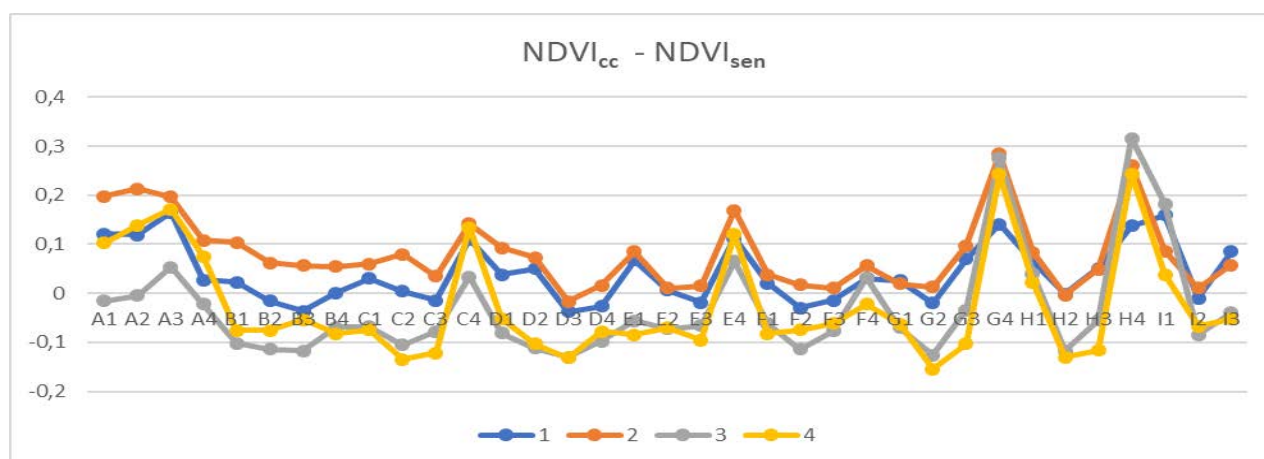
Πίνακας 2 Περιγραφικά στατιστικά του δείκτη $NDVI_{cc}$ για το έτος 2017.

Ημερομηνία	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής Παραλλακτικότητας
15.06.2017	0,64	0,51	0,72	0,036	5,61%
22.06.2017	0,68	0,57	0,70	0,022	3,32%
26.07.2017	0,65	0,59	0,74	0,043	6,61 %
16.08.2017	0,70	0,61	0,74	0,027	3,84%

3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων αισθητήρα Crop Circle και Sentinel

Για την περαιτέρω διερεύνηση των δεδομένων βρέθηκε η διαφορά των τιμών $NDVI$ από τις δύο πηγές δεδομένων για το κάθε κελί. Οι τιμές του διαγράμματος προέκυψαν από την παρακάτω εξίσωση η οποία εφαρμόστηκε για όλες τις ημερομηνίες των μετρήσεων.

$$Y = NDVI_{cc} - NDVI_{sen}$$



Σχήμα 2: Η διαφορά των τιμών $NDVI$ μεταξύ των δεδομένων των δυο πηγών ανά μέτρηση.

Παρατηρούμε ότι όλες οι μετρήσεις ακολουθούν το ίδιο μοτίβο γεγονός που υποδεικνύει ότι η απόκλιση των δύο δεικτών ακολουθεί όμοιο μοτίβο σε όλες τις μετρήσεις και είναι σταθερή (Σχήμα 2: 2). Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται στα κελιά C4, E4, G4, H4 και φτάνουν την τιμή $Y = 0,3$. Οι διαφορές των τιμών πιθανότατα οφείλονται στην επίδραση της ανάκλασης της ακτινοβολίας από το γυμνό έδαφος γεγονός που επηρεάζει όλες τις μετρήσεις των δορυφορικών εικόνων. Αντίθετα, ο αισθητήρας Crop Circle είναι στραμμένος αποκλειστικά στην κόμη των φυτών και οι μετρήσεις δεν επηρεάζονται από την ανάκλαση του εδάφους. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι οι μεγαλύτερες διαφορές σημειώνονται στα όρια του αγροτεμαχίου και αμβλύνονται καθώς προχωράμε στο κέντρο του. Επιπλέον παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες αποκλίσεις εμφανίζονται στη τελευταία μέτρηση τον Αύγουστο.

3.5 Συντελεστής συσχέτισης

Για να ελέγξουμε πόσο ισχυρές είναι οι σχέσεις μεταξύ των δεικτών NDVI χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (Pearson Correlation). Πιο αναλυτικά, στον παρακάτω πίνακα (Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.3) φαίνεται ο συντελεστής συσχέτισης για κάθε ζεύγος μεταβλητών και η τιμή P-value η οποία έχει υπολογιστεί για κάθε συντελεστή ξεχωριστά με επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας 95%.

Πίνακας 3: Γραμμικός συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των δεικτών $NDVI_{cc}$ και $NDVI_{sen}$.

Μετρήσεις	Συντελεστής Συσχέτισης	P-Value
1 ^H	0,67	0,000
2 ^H	0,47	0,004
3 ^H	-0,27	0,107
4 ^H	0,34	0,043

Είναι φανερό ότι οι ισχυρότερες συσχετίσεις μεταξύ των δυο δεικτών NDVI παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια της άνθισης με μέγιστη τιμή την ημερομηνία 15.06.2017. Η συσχέτιση μεταξύ των δυο δεικτών NDVI κυμάνθηκε από $r= 0,13$ μέχρι $r= -0,27$. Ωστόσο στην 3η μέτρηση όπου ο συντελεστής συσχέτισης είναι αρνητικός η τιμή P-value είναι μεγαλύτερη από 0,05 γεγονός που υποδεικνύει ότι ο συντελεστής που έχει υπολογιστεί δεν είναι στατιστικά σημαντικός. Η χαμηλή συσχέτιση των δεδομένων της τρίτης μέτρησης μπορεί να αποδίδεται στο γεγονός ότι οι καλλιεργητικές φροντίδες όπως η άρδευση, ψεκασμοί, κλάδεμα επηρέασαν τις τιμές ανάκλασης.

Όσον αφορά στη συσχέτιση της παραγωγής με τους δείκτες NDVI από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι οι τιμές του NDVI σε όλα τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας είχαν θετική συσχέτιση με την παραγωγή. Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ ενδιαφέρον διότι μας δείχνει ότι η τιμή του NDVI φαίνεται να συσχετίζεται με την παραγωγή ανεξάρτητα από τις ενδιάμεσες καλλιεργητικές φροντίδες. Οι συσχετίσεις που βρέθηκαν ήταν θετικές αλλά όχι σημαντικές. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής συσχέτισης κυμάνθηκε από $r=0,1$ μέχρι $r=0,3$ για όλες τις μετρήσεις.

Τα δορυφορικά δεδομένα έδωσαν την δυνατότητα για την εμβάθυνση της ανάλυσης και την εξαγωγή περαιτέρω αποτελεσμάτων, αφού το εύρος του μήκους κύματος που καλύπτουν είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό του αισθητήρα. Γι' αυτό το λόγο εξετάστηκαν και άλλοι συνδυασμοί φασματικών καναλιών οι οποίοι εμφάνισαν υψηλότερη συσχέτιση με την παραγωγή. Η ανάλυση εστίασε στα φασματικά κανάλια B6 και B7 τα οποία αντιστοιχούν στο εγγύς υπέρυθρο (γνωστό και σαν «κόκκινη ακμή»), όπου η υγιής βλάστηση εμφανίζει απότομη αύξηση (Mather, 1987). Η συσχέτιση των φασματικών καναλιών με την παραγωγή μας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ο γραμμικός συντελεστής συσχέτισης του δείκτη έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα ιδιαίτερα για την περίοδο της άνθισης και της συγκομιδής. Αυτά τα αποτελέσματα αποτελούν ένδειξη ότι τα συγκεκριμένα φασματικά κανάλια του δορυφόρου θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για να γίνει πρόβλεψη της παραγωγής σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Αυτό το γεγονός είναι πολύ σημαντικό για τον παραγωγό γιατί μπορεί να επέμβει με διάφορες καλλιεργητικές φροντίδες με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της κατάστασης των φυτών και κατ' επέκταση της παραγωγής.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα έρευνα έγινε καταγραφή της χωρικής παραλλακτικότητας της παραγωγής, καθώς και υπολογισμός του NDVI από δορυφορικές εικόνες Sentinel 2 και τον αισθητήρα Crop Circle, φερόμενο από γεωργικό ελκυστήρα. Από το ένα έτος του πειράματος παρατηρήθηκε ότι υπάρχει σημαντική χωρική παραλλακτικότητα στην παραγωγή και στο NDVI, παρά το μικρό μέγεθος του αμπελώνα. Τα συμπεράσματα της έρευνας είναι τα εξής:

- 1 Το ποσοστό της χωρικής παραλλακτικότητας που εμφάνισε η παραγωγή (28%) ήταν υψηλό για το μικρό μέγεθος του αγροτεμαχίου. Η ύπαρξη αυτού του βαθμού παραλλακτικότητας υποδηλώνει ότι μπορούν να αξιοποιηθούν συστήματα Γεωργίας Ακριβείας για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του αμπελώνα.
- 2 Ο δείκτης NDVI που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις του αισθητήρα Crop Circle εμφάνισε μικρή παραλλακτικότητα (6,61%). Αυτό το αποτέλεσμα είναι λογικό καθώς ο αισθητήρας ήταν στραμμένος αποκλειστικά στην κόμη των φυτών. Επιπλέον έχουμε σταδιακή αύξηση των τιμών του NDVI από τον Ιούνιο μέχρι τον Αύγουστο.
- 3 Ο δείκτης NDVI που υπολογίστηκε από τις δορυφορικές εικόνες εμφάνισε μεγαλύτερη παραλλακτικότητα (15,90%). Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στην επίδραση της ανάκλασης του εδάφους. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι οι υψηλότερες τιμές του δείκτη NDVI εντοπίστηκαν στο κέντρο του αγροτεμαχίου, ενώ οι χαμηλότερες στα εξωτερικά κελιά του πλέγματος. Όπως και στην περίπτωση του αισθητήρα, έχουμε σταδιακή αύξηση των τιμών του NDVI από τον Ιούνιο μέχρι τον Αύγουστο.
- 4 Η ανάλυση συσχέτισης για το κάθε στάδιο ανάπτυξης ξεχωριστά είχε ως στόχο να αναδείξει την σημαντικότερη περίοδο για την εξέλιξη και την παραγωγή της καλλιέργειας. Με βάση τα αποτελέσματα, οι μετρήσεις κατά την περίοδο της άνθισης θα μπορούσε να αποτελέσει αξιόπιστη πηγή πληροφοριών για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ανάπτυξη της καλλιέργειας.
- 5 Η σύγκριση των δυο δεικτών του NDVI έδειξε υψηλότερη συσχέτιση μεταξύ τους την περίοδο της άνθισης και όχι μεταγενέστερα γεγονός που μπορεί να οφείλεται στις καλλιεργητικές επεμβάσεις που έλαβαν χώρα την περίοδο που ακολούθησε. Οι τιμές του δείκτη NDVI που υπολογίστηκαν από τον αισθητήρα ήταν υψηλότερες από αυτές του δείκτη των δορυφορικών δεδομένων σε κάθε περίπτωση.
- 6 Η διαφορά των τιμών μεταξύ των δύο δεικτών φαίνεται να ακολουθεί σταθερή πορεία με υψηλότερες αποκλίσεις να εμφανίζονται στα ακραία κελιά. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να οφείλεται στην επίδραση της ανάκλασης του εδάφους η οποία επηρέασε και τις τέσσερις μετρήσεις. Επιπλέον, άλλος ένας πιθανός παράγοντας ο οποίος δύναται να επηρεάζει σταθερά τις τιμές των μετρήσεων και στις τέσσερις περιπτώσεις μπορεί να είναι το τοπογραφικό ανάγλυφο. Τέλος, οι δορυφορικές εικόνες αποτυπώνουν τις τιμές του δείκτη που αντιστοιχούν στην ανάκλαση της άνω κόμης, ενώ οι μετρήσεις του αισθητήρα αποτυπώνουν τις τιμές του δείκτη που αντιστοιχούν στην ανάκλαση της πλάγιας κόμης.
- 7 Οι συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών NDVI και της παραγωγής ήταν θετικές ωστόσο δεν ήταν στατιστικά σημαντικές ($r=10\%-30\%$). Από τις συσχετίσεις μεταξύ παραγωγής και NDVI ο μικρότερος συντελεστής συσχέτισης ήταν για την τρίτη μέτρηση και για τις δυο πηγές δεδομένων, ενώ η μέγιστη τιμή εμφανίστηκε στην πρώτη μέτρηση την περίοδο της άνθισης. Επομένως, ο χάρτης NDVI θα μπορούσε να μας δώσει πληροφορίες για την εξέλιξη της καλλιέργειας και κατ' επέκταση της παραγωγής σε πρόωρο στάδιο της καλλιεργητικής περιόδου.
- 8 Εμφανίστηκε υψηλή συσχέτιση (53,91%) μεταξύ της παραγωγής και τον μετασχηματισμό των φασματικών καναλιών B6 και B7 του δορυφόρου. Αυτό είναι λογικό καθώς η ανάκλαση της

υγιούς βλάστησης προς το τέλος της περιοχής του κόκκινου φάσματος αυξάνει απότομα. Επομένως, η αξιοποίηση των συγκεκριμένων καναλιών σε μελλοντικές έρευνες μπορεί να αξιοποιηθεί με κάποιον μετασχηματισμό όπως έγινε σε αυτήν την έρευνα για την δημιουργία καινούργιων δεικτών βλάστησης, με απώτερο σκοπό την πρόβλεψη της παραγωγής.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bramley, R.G.V., 2001a. Progress in the development of precision viticulture variation in yield, quality and soil properties in contrasting Australian vineyards. In: Currie, L.D., & Loganathan, P. (Eds), Precision tools for improving land management, Occasional report No. 14. Fertilizer and Lime Research Centre (pp. 25- 43), Massey University, Palmerston North.
- Bramley, R.G.V., Pearse, B., and Chamberlain, P., 2003. Being profitable precisely - a case study of precision viticulture from Margaret River. Australian and New Zealand Grape grower and Winemaker – Annual Technical Issue 473(a), 84-87
- Cliff, A.D., & Ord, J.K. (1973). Spatial autocorrelation. London: Pion.
- Cliff, A.D., & Ord, J.K. (1981). Spatial processes: models and applications. London: Pion.
- Farid, H.U.; Bakhsh, A.; Ahmad, N.; Ahmad, A.; Mahmood-Khan, Z. Delineating site-specific management zones for precision agriculture. J. Agric. Sci. 2016, 154, 273–286.
- Farid, H.U.; Bakhsh, A.; Ahmad, N.; Ahmad, A.; Mahmood-Khan, Z. Delineating site-specific management zones for precision agriculture. J. Agric. Sci. 2016, 154, 273–286.
- Goutouly, J.P., Drissi, R., Forget, D. and Gaudillière, J.P. (2006). Characterisation of vine vigor by ground based NDVI measurements. In proceeding of VIth International Terroir Congress. ENITA, Bordeaux, p. 237-242
- J. Arno, X. Bordes, M. Ribes-Dasi, R. Blanco, J.R. Rosell, and J. Esteve, 2005. Obtaining grape yield maps and analysis of within field variability in Raimat (Spain). Proceedings of 5th European Conference on Precision Agriculture, Upsala, Sweden, pp. 899-906.
- Mather, P., 1987. Computer Processing of Remotely Sensed Images, An Introduction. John Wiley and Sons.
- Ortega, R.A., Esser, A. and Santibanez, O., 2003. Spatial variability of wine grape yield and quality in Chilean vineyards: economic and environmental impacts. 4th European Conference on Precision agriculture, Berlin, Germany, pp. 499-506
- Pelletier, G. a. (1999). Development of a tomato load/yield monitor. Computers and Electronics in Agriculture, 23: 103-107.
- Ortega-Farias, S., Rigetti, T., Sasso, F., Acevedo, C., Matus, F. and Moreno, Y., (2003). Site-specific management of irrigation water in grapevines. IX Latin American Congress on Viticulture and Enology; Symposium on Precision Viticulture, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. 55-71
- Tagarakis, A., Chatzinikos, A., Fountas, S. and Gemtos, T. A., 2006. Deliniation of management zones in precision viticulture. HAICTA 2006 Conference, Volos, Greece, pp 547-554.
- Tagarakis, A.; Liakos, V.; Fountas, S.; Koundouras, S.; Gemtos, T.A. Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. Precis. Agric. 2013, 14, 18–39.
- Tisseyere, B. M. (2001). Yield and harvest quality measurement in precision viticulture- application for a selective vintage. 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France, pp. 133-138.
- Tisseyre, B., Ojeda, H., Carillo, N., Deis, L. and Heywang, M. (2005). Precision viticulture and water status: mapping the predawn water potential to define within vineyard zones. Proceedings of the Fruits and nuts and vegetable production engineering TIC (Frutic05) Conference, Montpellier, p. 719-736.
- Tisseyre, B., Ojeda, H., Carillo, N., Deis, L. and Heywang, M. (2005). Precision viticulture and water status: mapping the predawn water potential to define within vineyard zones. Proceedings

- of the Fruits and nuts and vegetable production engineering TIC (Frutic05) Conference, Montpellier, p. 719-736
- W. Bobillet, J.P. Da Costa, C. Germain, O. Laviolle, and G. Grenier, 2003. Row detection in high resolution remote sensing images of vine fields. Proceeding of the 4th European conference on Precision Agriculture, Berlin, Germany pp. 81-87
- Wample, R.L., Mills, L. and Davenport, J.R. (1999). Use of precision farming practices in grape production. In: P. Robert, R.H. Rust & W.E. Larson (Eds.), Proceedings of the IV International Conference on Precision Agriculture, pp. 897-905. Minneapolis, USA.
- Praat, J.P., Bollen, F. and Irie, K. (2004). New approaches to the management of vineyard variability in New Zealand. 12th Australian Wine Industry Technical Conference.
- Strever, A., (2004). Assessing and managing within-vineyard variability in South Africa with remote sensing- a tool for research and practice. 12th Australian Wine Industry Technical Conference.
- Taylor, J., Tisseyre, B. and Praat, J.P., (2005). Bottling Good Information: mixing Tradition and Technology in vineyards. Proceedings of the Fruits and nuts and vegetable production engineering TIC (Frutic05) Conference, Montpellier, p. 719-736.
- Johnson, L. F., Roczen, D. E., Youkhana, S. K., Nemani, R. R. and Bosch, D. F. (2003). Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. Computers and Electronics in Agriculture, 38, 33-44.

ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΟΠΩΡΩΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΕΝΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Β. Μουσιάδης, Δ. Κατικαρίδης, Γ. Βασιλειάδης, Α.Χ. Ταγαράκης, Δ. Μπόχτης
 Ινστιτούτο Βιοοικονομίας και Αγροτεχνολογίας (iBO), Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής
 Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Δημάρχου Γεωργιάδου 118, 38333, Βόλος, e-mail: v.moisiadis@certh.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι απαιτητική φύση των γεωργικών εργασιών σε συνδυασμό με το συνεχώς μεταβαλλόμενο επιχειρησιακό περιβάλλον εντός αγρού, καθιστούν την πληροφορία σχετικά με τη χωρική ανάπτυξη του αγρού απαραίτητη για την αυτοματοποιημένη πλοήγηση ρομποτικών οχημάτων. Για τον σκοπό αυτό, τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα αποτελούν μια εναλλακτική λύση για την εύκολη και άμεση εξαγωγή της απαραίτητης πληροφορίας. Σε αυτή την εργασία προτείνεται η έννοια της ενδο-επικοινωνίας ανάμεσα σε επίγεια και εναέρια ρομποτικά οχήματα με σκοπό την υποστηρικτική συνεργασία των δύο συστημάτων για αυτόματη χαρτογράφηση και αναγνώριση του περιβάλλοντος στο οποίο θα πλοηγηθεί το επίγειο ρομποτικό όχημα για την εκτέλεση γεωργικών εργασιών.

Λέξεις κλειδιά: χαρτογράφηση, αυτόνομη πλοήγηση, UAV, UGV

COLLABORATIVE OPERATION OF UGV AND UAV FOR ORCHARDS MAPPING

V. Moysiadis, D. Katikaridis, G. Vasileiadis, A. C. Tagarakis, D. Bochtis

Institute for Bio-economy and Agri-technology (iBO), Center for Research and Technology Hellas (CERTH), Dimarchou Georgiadou 118, 38333, Volos, e-mail: v.moisiadis@certh.gr

ABSTRACT

The constantly changing operational environment of the agricultural fields, make topological mapping procedure essential for the automated navigation of the unmanned ground vehicles (UGVs). To that end, unmanned aerial vehicles (UAVs) constitute an alternative solution for the immediate extraction of the abovementioned data. In this paper, the concept of the intercommunication between UAV UGV is proposed. The aim of this work is the UAV-UGV collaboration for the environment awareness task, as a prerequisite for the subsequent task of navigation for the UGV.

Keywords: perception mapping, autonomous navigation, UAV, UGV

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την εισαγωγή της έννοιας της ευφυούς γεωργίας (ή Γεωργία 4.0 σε αντιστοιχία του όρου Βιομηχανία 4.0), εφαρμόζονται σταδιακά καινοτόμες τεχνολογίες προερχόμενες από πολυάριθμα επιστημονικά πεδία προς βελτίωση των παραδοσιακών γεωργικών μεθόδων (Weltzien, 2016; Ozdogan, Gacar and Aktas, 2017). Τα ρομποτικά συστήματα (τόσο εδάφους όσο και εναέρια) αποτελούν μια εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές γεωργικές εργασίες που πραγματοποιούνται στους αγρούς.

Η θεμελιώδης λειτουργία ενός κινούμενου ρομποτικού οχήματος είναι η πλοήγησή του μέσα στον επιχειρησιακό χώρο. Η χαρτογράφηση του φυσικού περιβάλλοντος των αγρών αποτελεί βασικό στάδιο για την αυτοματοποιημένη πλοήγηση ρομποτικών τεχνολογιών μέσα σε αγροτικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα (Kurashiki et al., 2010; Hansen et al., 2013; Tokekar et al., 2016). Όσο αφορά σε εργασίες εσωτερικού χώρου, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι για μη επανδρωμένα οχήματα εδάφους (UGVs) για τη χαρτογράφηση του επιχειρησιακού περιβάλλοντος (Grisetti, Stachniss and Burgard, 2005; Demim, Nemra and Louadj, 2016; V. Moisiadis D. Bechtsis, 2017). Σε αντίθεση μετά παραπάνω, το περιβάλλον του αγρού, πέραν των χαρακτηριστικών του ανοιχτού και μη ελεγχόμενου χώρου, παρουσιάζει επιπλέον σημαντικές δυσκολίες για τη χρήση UGV. Βασικός λόγος είναι ο μεγάλος αριθμός παραγόντων που επηρεάζουν τη μορφολογία του αγρού η οποία μεταβάλλονται σημαντικά και διαρκώς. Οι συνεχώς μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες που λαμβάνουν χώρα στους αγρούς έχουν οδηγήσει, προς το παρόν, στην πιο διαδεδομένη χρήση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs) έναντι των UGVs για γεωργική χρήση.

Η συνεχώς αυξανόμενη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς διευκολύνει την ανάπτυξη μεθοδολογιών βαθιάς μάθησης (Deep Learning, DL) σε διάφορες γεωργικές εφαρμογές για την υποστήριξη πρακτικών διαχείρισης των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Επί του παρόντος, έχει αναπτυχθεί πληθώρα ερευνητικών εργασιών στον τομέα της χαρτογράφησης του περιβάλλοντος σε οπωρώνες οι οποίες επικεντρώθηκαν στην αναγνώριση των δένδρων (Liakos et al., 2018). Οι Yang et al., (2009) πρότειναν ένα σύστημα που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Adaboost για την ανίχνευση δέντρων από αεροφωτογραφίες. Ο ίδιος αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε από τους Greenberg et al., (2005) με τις ανάλογες τροποποιήσεις αφού προηγουμένως όλες οι εικόνες μετατράπηκαν στο χρωματικό χώρο CIE $L^* a^* b^*$ για την εξάλειψη του φαινομένου της σκίασης. Επιπλέον, πρότειναν μια μέθοδο εντοπισμού προκειμένου να εκτιμηθεί το πραγματικό μέγεθος των αναγνωρισμένων δένδρων. Οι Amorós López et al., (2011) πρότειναν ένα σύστημα εντοπισμού των δέντρων για καλλιέργειες εσπεριδοειδών. Η προτεινόμενη μέθοδος περιελάμβανε την ενσωμάτωση εικόνων RGB και NIR ως εισόδους για την εκπαίδευση του μοντέλου. Επιπλέον, δοκιμάστηκαν τρεις μέθοδοι μηχανικής μάθησης προκειμένου να βελτιστοποιηθούν τα παραγόμενα αποτελέσματα: ένα νευρωνικό δίκτυο Perceptron MultiLayer (Duda et al., 2001), ένας αλγόριθμος Classification and Regression Tree (CART) (Breiman et al., 2017) και ένας αλγόριθμος μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines, SVM), ο οποίος και αποδείχτηκε ότι παρέχει τα πιο ακριβή αποτελέσματα.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η ανάπτυξη ενός συστήματος για την άμεση επικοινωνία και συνεργατική λειτουργία μεταξύ UAV και UGV. Το προτεινόμενο σύστημα παρέχει τη χαρτογράφηση των στοιχείων του περιβάλλοντος του αγρού με χρήση UAV το οποίο παρέχει τις απαραίτητες χωρικές πληροφορίες για τη χάραξη της βέλτιστης διαδρομής και αυτόματη πλοήγηση του UGV. Το σύστημα δοκιμάστηκε σε εμπορικούς οπωρώνες καρδιάς για την αξιολόγηση της λειτουργίας του.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Η συλλογή δεδομένων για την επικύρωση του προτεινόμενου συστήματος πραγματοποιήθηκε το 2018 - 2019 με πτήσεις σε τρεις εμπορικούς οπωρώνες καρδιάς που είναι εγκατεστημένοι στην περιοχή της Μαγνησίας. Οι επιφάνειες του εδάφους ήταν επίπεδες και δεν υπήρχαν σημαντικές γεωμορφολογικές διαφοροποιήσεις. Το πρώτο βήμα αυτής της εργασίας περιλάμβανε τη συγκέντρωση δεδομένων για την εκπαίδευση του μοντέλου. Για την λήψη των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το αυτόνομο εναέριο όχημα σταθερής πτέρυγας eBee+ (SenseFly, Switzerland) το οποίο εξοπλίστηκε με ψηφιακή κάμερα RGB υψηλής ανάλυσης (S.O.D.A., SenseFly, Switzerland). Το ρομπότ Husky (Clearpath Robotics, CA) χρησιμοποιήθηκε ως το UGV για την επαλήθευση της λειτουργικότητας της διασύνδεσης με το UAV και της διαδρομής εντός του οπωρώνα (Σχήμα 1).



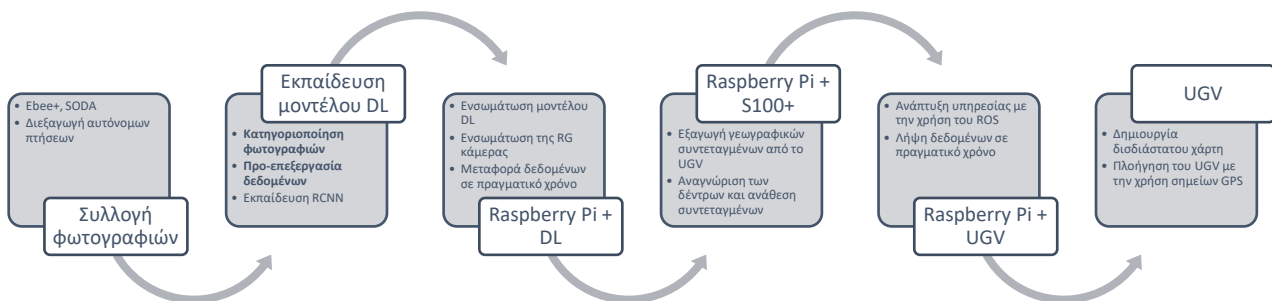
α



β

Σχήμα 1. Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός: UAV (α) και UGV (β).

Ένας αλγόριθμος μηχανικής μάθησης εκπαιδεύτηκε για την αναγνώριση και τον εντοπισμό των δέντρων. Το παραγόμενο μοντέλο ενσωματώθηκε σε ένα Raspberry Pi μαζί με την RGB φωτογραφική μηχανή και το υποσύστημα ενσωματώθηκε στο UAV. Το γενικό πλαίσιο αυτού του υποσυστήματος ήταν να λαμβάνει ως είσοδο τα δεδομένα από την RGB κάμερα σε πραγματικό χρόνο και να εξάγει τη θέση των δέντρων. Για την δημιουργία της αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ του UAV και του UGV αναπτύχθηκε και ενσωματώθηκε ένας αλγόριθμος στον υπολογιστή του UGV για την επεξεργασία των αεροφωτογραφιών που λαμβάνονται από το UAV και τη δημιουργία του δισδιάστατου χάρτη. Η όλη διαδικασία του προτεινόμενου συστήματος περιγράφεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Σχηματική περιγραφή του προτεινόμενου συστήματος.

2.1 Συλλογή φωτογραφιών

Για την συγκέντρωση των απαραίτητων δεδομένων που απαιτούνται για την εκπαίδευση του μοντέλου, έγιναν πολυάριθμες αυτοματοποιημένες πτήσεις σε οπωρώνες καρυδιάς (Σχήμα 3). Η συλλογή των δεδομένων που απαιτούνται για την ανάπτυξη του μοντέλου έλαβε χώρα σε τρία διαφορετικά στάδια ανάπτυξης των δέντρων, τον Μάιο μετά την έκπτυξη των φύλλων, το Νοέμβριο, όταν τα φύλλα ήταν αποχρωματισμένα και τα δέντρα άρχισαν να χάνουν τα φύλλα τους και το Δεκέμβριο όταν τα δέντρα ήταν πλήρως αποφυλλωμένα.



Σχήμα 3. Σχέδια πτήσης UAV για τους τρεις οπωρώνες καρυδιάς που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη, εκπαίδευση και επαλύθευση του συστήματος.

2.2 Ανάπτυξη λογισμικού

2.2.1 Αλγόριθμος βαθιάς Μάθησης (Deep Learning – DL)

Κατά τη διαδικασία συλλογής των δεδομένων, ελήφθησαν συνολικά από τους τρεις οπωρώνες για τα τρία στάδια ανάπτυξης (Αύγουστος, Νοέμβριος, Δεκέμβριος) 1869 φωτογραφίες. Το 75% των εικόνων που συγκεντρώθηκε ταξινομήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του μοντέλου και το 25% χρησιμοποιήθηκε για την επικύρωση του. Κατά το στάδιο της προ-επεξεργασίας, όλες οι εικόνες μετασχηματίστηκαν στο χρωματικό χώρο HSV (Hue-Saturation-Value color space) για την διακριτοποίηση των περιοχών ενδιαφέροντος.

Το προτεινόμενο σύστημα χρησιμοποιεί αλγόριθμο αναγνώρισης και εντοπισμό αντικειμένων RCNN (Convolutional Neural Networks) για εντοπισμό και αναγνώριση των δέντρων του οπωρώνα αξιοποιώντας για την εκπαίδευση του μοντέλου την συνάρτηση ενεργοποίησης ReLU και 100 epoch.

2.2.2 Μικροϋπολογιστή μονάδα

Το μοντέλο DL που αναπτύχθηκε, ενσωματώθηκε σε μία μικροϋπολογιστή μονάδα Raspberry Pi 3 η οποία συνδέθηκε με την κάμερα RGB. Έτσι, τα δεδομένα της RGB κάμερας μεταφέρονται απ' ευθείας στο Raspberry Pi για την αναγνώριση των δέντρων σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, το Raspberry Pi λαμβάνει αυτόματα τα δεδομένα της θέσης και κατεύθυνσης του UAV από τον αυτόματο πιλότο του UAV.

Παράλληλα, αναπτύχθηκε αλγόριθμος για την αντιστοίχιση συντεταγμένων σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας και την εξαγωγή των συντεταγμένων των δέντρων που ανιχνεύονται από το σύστημα. Τέλος, οι συντεταγμένες από τα αναγνωρισμένα δέντρα μεταφέρονται στο UGV με τη χρήση του λειτουργικού συστήματος Robot Operating System (ROS) και ενός συμβατού πακέτου (mavROS) για την ενσωμάτωση του πρωτοκόλλου τηλεμετρίας που χρησιμοποιείται από το UAV για την επικοινωνία του με τον επίγειο σταθμό.

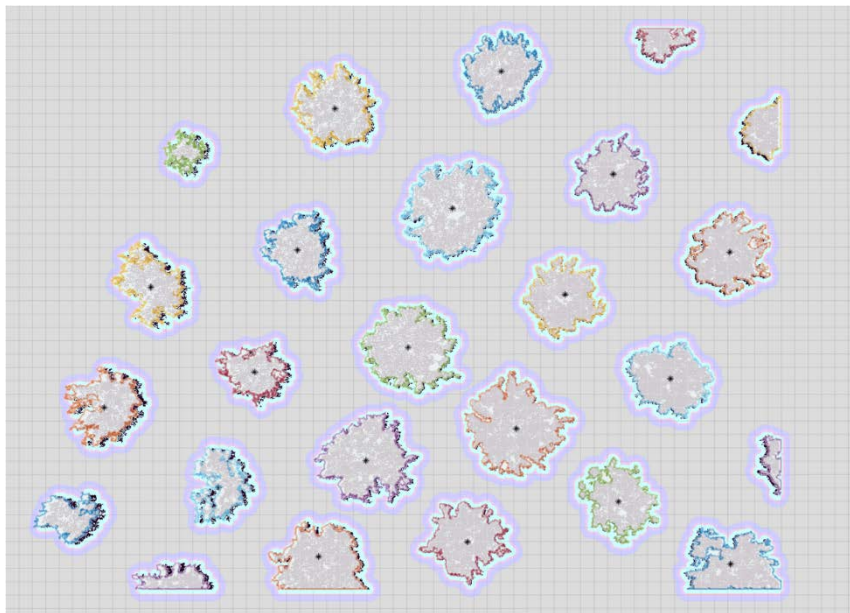
2.3 Τροποποίηση εξοπλισμού

Το UAV που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το οκτακόπτερο DJI S1000+ (SZ DJI Technology Co., Ltd., Shenzhen, China) εξοπλισμένο με Pixhawk 2.1 autopilot (Proficnc®), Here+ GPS (Proficnc®) και την Sony Cyber-shot RX100 III digital camera (SONY, Minato, Tokyo) και τροποποιήθηκε προκειμένου να ενσωματωθεί το Raspberry Pi. Όλες οι αυτοματοποιημένες πτήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση του QGroundControl. Επιπροσθέτως, για την εξασφάλιση επαρκούς ακρίβειας στις αεροφωτογραφίες ορίστηκε ανάλυση εδάφους ανά εικονοστοιχείο στα 0.9 cm και ποσοστό αλληλοεπικάλυψης των φωτογραφιών 75%.

Για την ορθή λήψη των δεδομένων, αναπτύχθηκε υπηρεσία στο λειτουργικό σύστημα ROS η οποία απαιτεί “boolean handshake” για την έναρξη της αποστολής των δεδομένων. Πρόκειται για μια προσέγγιση σε πραγματικό χρόνο σύμφωνα με την οποία, καθώς εντοπίζονται τα δέντρα από το σύστημα, διατάσσονται άμεσα στο χώρο για να δημιουργήσουν τον δισδιάστατο χάρτη με τις θέσεις των δέντρων.

Τέλος, για την επιβεβαίωση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το επίγειο ρομποτικό σύστημα Husky εξοπλισμένο με RTK GPS (με ρυθμό ανανέωσης θέσης 10Hz), μονάδα μέτρησης αδράνειας (IMU) και ένα τρισδιάστατο (3D) σαρωτή λέιζερ Velodyne για την αποφυγή εμποδίων σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες αγρού για την αξιολόγηση: α) της αποτελεσματικότητας στην αναγνώριση των δέντρων εντός του οπωρώνα, β) της διαδικασίας ανάλυσης των πρωτόγεννών δεδομένων και γ) της επικοινωνίας μεταξύ UAV και UGV.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Σχήμα 4 Ταυτοποίηση αναγνωρισμένων δέντρων με την χρήση του χάρτη που δημιουργήσαν από τον σαρωτή λέιζερ του UGV

Για την εξέταση της ακρίβειας της λειτουργίας και την επικύρωση του προτεινόμενου συστήματος, συγκεντρώθηκαν εικόνες από τους τρεις οπωρώνες καρυδιάς οι οποίοι παρουσίαζαν διαφορετικές ιδιότητες. Επιπλέον, ανακτήθηκε ο παραγόμενος δισδιάστατος χάρτης από το UGV για την επικύρωση των παραγόμενων συντεταγμένων. Στην παρακάτω απεικονίζονται τα αναγνωρισμένα δέντρα (στα οποία έχει εφαρμοστεί μια “μάσκα” για την εξαγωγή του περιγράμματος της φυτοκόμης) τα οποία ταυτίζονται με τον παραγόμενο χάρτη του UGV ο οποίος δημιουργήθηκε με την χρήση του σαρωτή λέιζερ.

Τα αποτελέσματα από την αναπτυγμένη διαδικασία ανάλυσης εικόνας συγκρίθηκαν με τις πραγματικές καταγεγραμμένες θέσεις των δέντρων.



Σχήμα 5. Αναγνωρισμένα δέντρα με την χρήση του αλγορίθμου βαθιάς μάθησης για τους μήνες Μάιο (Άνω αριστερά), Νοέμβριο (Άνω δεξιά) και Δεκέμβριο (Κάτω).

Στο σύνολο δεδομένων των εικόνων που αποκτήθηκαν τον Μάιο, όταν αναπτύχθηκε η φυτοκόμη, ο αλγόριθμος αποκρίθηκε άριστα, εντοπίζοντας τα δέντρα με υψηλή ακρίβεια (100%). Η ακρίβεια αναγνώρισης των δέντρων ήταν επαρκής, αλλά σημαντικά χαμηλότερη σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του Μαΐου, για τα δεδομένα του Νοεμβρίου (85,7%). Αυτό οφείλεται στο γεγονός της πτώσης και του αποχρωματισμού των φύλλων, καθιστώντας δύσκολη τη διάκριση. Ακόμη πιο δύσκολο για τον αλγόριθμο ήταν το σύνολο δεδομένων που συλλέχθηκαν τον Δεκέμβριο διότι είχε ολοκληρωθεί η πτώση των φύλλων από τα δέντρα, με αποτέλεσμα να είναι ορατή μόνο η πανοραμική όψη των κορμών και κλαδιών των δέντρων γεγονός που επηρέασε σημαντικά την ακρίβεια αναγνώρισης (32,7%).

Πίνακας 1. Ακρίβεια αναγνώρισης δέντρων με την χρήση αλγορίθμου βαθιάς μάθησης για την εικόνες που ελήφθησαν κατά τους μήνες Μάιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο.

Μήνες	Ακρίβεια (%)
Μάιος	92,8
Νοέμβριος	85,7
Δεκέμβριος	32,7

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη προσέγγιση αποτελεί μια ελπιδοφόρα λύση για την χαρτογράφηση του επιχειρησιακού περιβάλλοντος οπωρώνων σε πραγματικό χρόνο. Το βασικό πλεονέκτημα του συστήματος χαρτογράφησης που αναπτύχθηκε είναι η ανεξαρτησία του συστήματος από λογισμικά τρίτων και λογισμικά κλειστού κώδικα. Αναλυτικά, η φύση ανοιχτού κώδικα παρέχει εύκολη περεταίρω ανάπτυξη και ενσωμάτωση του συστήματος για ποικίλες μελέτες διαφορετικών περιπτώσεων. Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου συστήματος είναι η ενσωμάτωση του ROS και στα δυο αυτόνομα οχήματα (UAV και UGV). Βάσει του ανοιχτού κώδικα του ROS γίνεται ευκολότερη η ενσωμάτωση νέων λειτουργιών και αλγορίθμων στο σύστημα.

Τα παραγόμενα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τα προτερήματα των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για εφαρμογές τμηματοποίησης εικόνας. Το αναπτυγμένο σύστημα ανταπεξήλθε ικανοποιητικά στην αναγνώριση των δέντρων από τις εικόνες που αποκτήθηκαν όταν τα δέντρα είχαν πλήρως αναπτυγμένη φυτοκόμη. Τέλος, η ακρίβεια μειώθηκε έπειτα από τον αποχρωματισμό και την πτώση των φύλλων καθιστώντας απαγορευτική τη χρήση του συστήματος σε αυτή την περίπτωση.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου "Ερευνητική Συνέργεια για την Αντιμετώπιση των Μεγάλων Προκλήσεων του Πλέγματος (NEXUS): Ενέργεια-Περιβάλλον-Αγροτική Παραγωγή (Τροφή, Νερό, Υλικά) (NEXUS)", με χρηματοδότηση της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) - Κωδικός Έργου: MIS 5002496.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Amorós López, J., Izquierdo Verdiguier, E., Gómez Chova, L., Muñoz Marí, J., Rodríguez Barreiro, J. Z., Camps Valls, G. and Calpe Maravilla, J. (2011) 'Land cover classification of VHR airborne images for citrus grove identification', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Elsevier, 66(1), pp. 115–123. doi: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2010.09.008.
- Demim, F., Nemra, A. and Louadj, K. (2016) 'Robust SVSF-SLAM for Unmanned Vehicle in Unknown Environment', *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier, 49(21), pp. 386–394. doi: 10.1016/J.IFACOL.2016.10.585.
- Duda, R. O., Hart, P. E., Peter, E. and Stork, D. G. (2001) *Pattern classification*. 2nd Edition.

- Greenberg, J. A., Dobrowski, S. Z. and Ustin, S. L. (2005) 'Shadow allometry: Estimating tree structural parameters using hyperspatial image analysis', *Remote Sensing of Environment*. Elsevier, 97(1), pp. 15–25. doi: 10.1016/J.RSE.2005.02.015.
- Grisetti, G., Stachniss, C. and Burgard, W. (2005) 'Improving grid-based SLAM with Rao-Blackwellized particle filters by adaptive proposals and selective resampling', *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 2432–2437. doi: 10.1109/ROBOT.2005.1570477.
- Hansen, K. D., Garcia-Ruiz, F., Kazmi, W., Bisgaard, M., la Cour-Harbo, A., Rasmussen, J. and Andersen, H. J. (2013) 'An Autonomous Robotic System for Mapping Weeds in Fields', *IFAC Proceedings Volumes*. Elsevier, 46(10), pp. 217–224. doi: 10.3182/20130626-3-AU-2035.00055.
- Kurashiki, K., Fukao, T., Ishiyama, K., Kamiya, T. and Murakami, N. (2010) 'Orchard traveling UGV using particle filter based localization and inverse optimal control', in *2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. IEEE, pp. 31–36. doi: 10.1109/SII.2010.5708297.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S. and Bochtis, D. (2018) 'Machine Learning in Agriculture: A Review', *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 18(8), p. 2674. doi: 10.3390/s18082674.
- Moisiadis V. and Bechtsis D. (2017) 'Intelligent autonomous vehicles in industrial environments', *Conference: 6th ICMEN International Conference*, In Thessaloniki, Greece
- Ozdogan, B., Gacar, A. and Aktas, H. (2017) 'DIGITAL AGRICULTURE PRACTICES IN THE CONTEXT OF AGRICULTURE 4.0', *Journal of Economics, Finance and Accounting-JEFA*, 4(2), pp. 184–191. doi: 10.17261/Pressacademia.2017.448.
- Tokekar, P., Hook, J. Vander, Mulla, D. and Isler, V. (2016) 'Sensor Planning for a Symbiotic UAV and UGV System for Precision Agriculture', *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), pp. 1498–1511. doi: 10.1109/TRO.2016.2603528.
- Weltzien, C. (2016) 'Digital agriculture-or why agriculture 4.0 still offers only modest returns'. doi: 10.15150/lt.2015.3123.
- Yang, L., Wu, X., Praun, E. and Ma, X. (2009) 'Tree detection from aerial imagery', in *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM, pp. 131–137.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ NDVI ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ

Ν. Δάρρα, Σ. Φουντάς, Β. Ψηρούκης, Κ. Γριβάκης

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, e-mail:
nicoletadarra@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη αξιοποιήθηκαν μέθοδοι Γεωργίας Ακριβείας σε καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας, με στόχο την παρακολούθηση της χωρικής παραλλακτικότητας της καλλιέργειας από το στάδιο της μεταφύτευσης έως τη συγκομιδή. Η μελέτη έλαβε χώρα στην ευρύτερη περιοχή της Λάρισας σε μια έκταση τριών εκταρίων κατά τη διάρκεια του έτους 2019. Στο πλαίσιο της έρευνας, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις για τον υπολογισμό του Δείκτη Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI) και τη χαρτογράφηση της τελικής παραγωγής. Ο δείκτης NDVI υπολογίστηκε με τη χρήση δορυφορικών εικόνων (Sentinel 2) και ενός επίγειου αισθητήρα Crop circle ACS 470, έτσι ώστε να αξιολογηθούν οι συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών NDVI και της παραγωγής. Η παραγωγή του αγροτεμαχίου παρουσίασε έντονη χωρική παραλλακτικότητα, ενώ οι δείκτες NDVI παρουσίασαν διαφορετικούς βαθμούς συσχέτισης ανά διαφορετικές ημερομηνίες μέτρησης και μεθόδους τηλεπισκόπησης.

Λέξεις κλειδιά: Γεωργία Ακριβείας, βιομηχανική τομάτα, δείκτης NDVI, τηλεπισκόπηση, χαρτογράφηση παραγωγής

COMPARISON OF NDVI DERIVED FROM PROXIMAL DATA AND SATELLITE IMAGERY IN PROCESSING TOMATO CULTIVATION

N. Darra, S. Fountas, V. Psiroukis, K. Grivakis

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, e-mail:
nicoletadarra@aua.gr

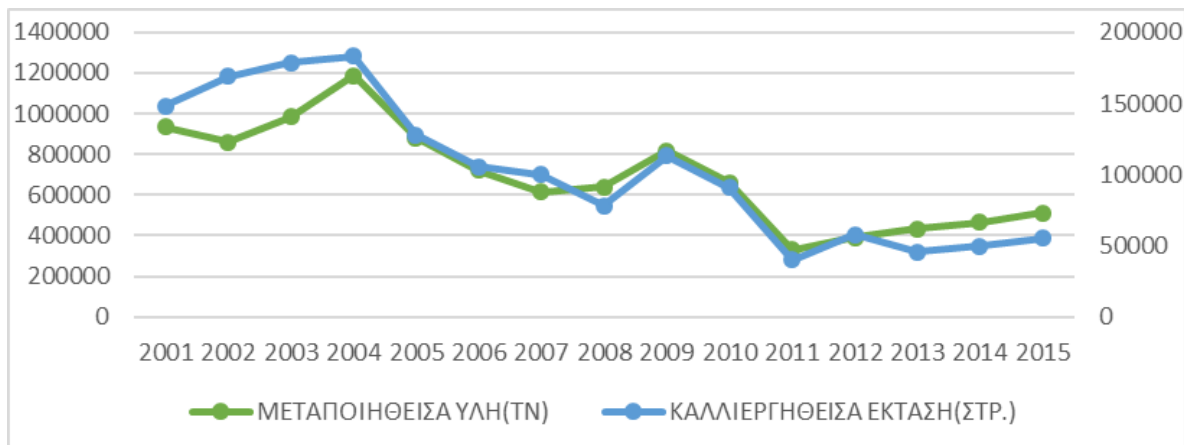
ABSTRACT

In this study, Precision Agriculture methods were exploited in a processing tomato field in order to monitor the spatial variability of the crop from transplanting to harvest. The study took place in the region of Larissa and more specifically in an area of three hectares during the year of 2019. Experimental measurements were performed for the calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the yield mapping. The NDVI was calculated by employing satellite imagery (Sentinel 2) and proximal sensing (Crop circle ACS 470) to assess the correlation between the NDVI index and the yield of processing tomatoes. The yield of the study area exhibited high level of spatial variability, while NDVI index demonstrated different degrees of correlations with different measurement dates and sensing methods.

Keywords: Precision Agriculture; processing tomato; NDVI; remote sensing; yield mapping

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα ο τομέας παραγωγής τομάτας για μεταποίηση κατείχε περίοπτη θέση μεταξύ των κλάδων της αγροτικής οικονομίας της χώρας, για μια μεγάλη σειρά ετών έως και το έτος 2004, χρονιά που αποτέλεσε αφετηρία συνεχούς πτωτικής πορείας (Σχήμα 1). Έτσι ενώ το 2004 καλλιεργήθηκαν 183.000 στρέμματα με παραγωγή 1.187.000 τόνους πρώτης ύλης και 237.000 τόνους τελικών προϊόντων, το 2015 κατέληξε να καλλιεργηθεί έκταση μόλις 55.200 στρεμμάτων με την παραγωγή να κυμαίνεται στους 512.695 τόνους. Σύμφωνα με το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης ένας από τους παράγοντες που οδήγησαν στη μείωση των καλλιεργειών βιομηχανικής τομάτας, είναι η αυξανόμενη εμφάνιση ακραίων κλιματικών φαινομένων με μεγάλη μεταβλητότητα οι οποίες πλήττουν τις συγκομιζόμενες ποσότητες πρώτης ύλης και επιδρούν δυσμενώς στην ποιότητα τους (χαμηλός βαθμός brix). Επιπλέον, τα διαρθρωτικά προβλήματα της γεωργίας στην χώρα μας (μικρός κλήρος, μεγάλης ηλικίας αγρότες, χαμηλές στρεμματικές αποδόσεις), έχουν αρνητικό αντίκτυπο στη ορθή διαχείριση των καλλιεργειών. Για τον λόγο αυτόν η αξιοποίηση μεθόδων Γεωργίας Ακριβείας οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τις διαφοροποιημένες ανάγκες της καλλιέργειας ακόμα και σε μικρά αγροτεμάχια συνιστά απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάκτηση της ανταγωνιστικότητας και τη βελτίωση της απόδοσης των καλλιεργειών βιομηχανικής τομάτας και την βιωσιμότητα της εκμετάλλευσής.



Σχήμα 1: Στοιχεία για την καλλιεργηθείσα έκταση και τη μεταποιηθείσα ύλη της βιομηχανικής τομάτας τα έτη 2001-2015. Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων

Η Γεωργία Ακριβείας είναι μια σχετικά νέα μέθοδος γεωργικής πρακτικής, η οποία χρησιμοποιεί πληροφορία με σαφήνεια προσδιορισμένη ως προς τον χώρο και τον χρόνο, προκειμένου να μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα των εισροών και να ελαχιστοποιήσει τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις (Καρύδας και Συλλαίος, 2000). Οι πρακτικές της Γεωργίας Ακριβείας εφαρμόζονται εμπορικά κυρίως στα σιτηρά από τις αρχές της δεκαετίας του '90, ενώ επεκτάθηκαν σε άλλες καλλιέργειες στο τέλος της δεκαετίας του '90 και τις αρχές του 2000 (Griffin et al., 2004). Αρχικά η έρευνα επικεντρώθηκε στα σιτηρά, ενώ αργότερα άρχισαν να χρησιμοποιούνται αισθητήρες, σε καλλιέργειες βαμβακιού (Tomasson et al., 1999; Vellidis et al., 2003), σε ζαχαρότευτλα (Hoffman et al., 1995), σε βιομηχανική τομάτα (Pelletier et al., 1999), σε χορτοδοτικά φυτά (Auernhammer et al., 1995; Kromer et al., 1999; Lee et al., 2005) και σε φιστίκια (Vellidis et al., 2001). Στην Ελλάδα η

εφαρμογή της Γεωργίας Ακρίβειας ξεκίνησε το έτος 2001 σε καλλιέργεια βαμβακιού (Μαρκινός κ.α., 2003) και τις τελευταίες δεκαετίες επεκτάθηκε σε οπωρώνες μηλιάς (Ράππος κ.α., 2005; Αγγελούπουλου κ.α., 2005; Τάνος κ.α., 2005), ελιάς (Fountas et.al, 2011; Χατζηπαπαδόπουλος & Πρωτονοτάριος, 2017) και αχλαδιάς (Vatsanidou et.al, 2014).

Στην παρούσα έρευνα, αξιοποιήθηκαν μέθοδοι Γεωργίας Ακρίβειας σε αγροτεμάχιο βιομηχανικής τομάτας έκτασης τριών εκταρίων, με στόχο τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της καλλιέργειας. Το επιλεγμένο αγροτεμάχιο ελέγχθηκε ως προς τη χωρική παραλλακτικότητα της παραγωγής και του δείκτη βλάστησης NDVI, ο οποίος υπολογίστηκε βάσει δεδομένων δύο διαφορετικών πηγών (επίγεια και δορυφορικά). Στο τελικό στάδιο, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των δεικτών βλάστησης NDVI από τις δυο διαφορετικές πηγές δεδομένων, καθώς και η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με την παραγωγή. Για τον προσδιορισμό των συσχετίσεων και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων αξιοποιήθηκαν στατιστικές και γεωστατιστικές μέθοδοι (περιγραφική στατιστική, χωρική αυτοσυσχέτιση, χωρική παρεμβολή).

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Η πειραματική διαδικασία διεξήχθη το έτος 2019, σε καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας τριών εκταρίων που βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της Λάρισας με γεωγραφικές συντεταγμένες 39° 35.914'N, 22° 34.293'E (Εικόνα 1). Η βιομηχανική τομάτα φυτεύτηκε τον Απρίλη του 2019 και κατά την διάρκεια της καλλιέργειας εφαρμόστηκαν 7 ψεκασμοί φυτοπροστατευτικών προϊόντων για την επίτευξη εμπορικών προδιαγραφών όσον αφορά στην ποσότητα παραγωγής. Ένα πλέγμα 30 κελιών (1000 τ.μ. ανά κελί) δημιουργήθηκε για να διευκολύνει τις μετρήσεις πεδίου, τη διαχείριση των δεδομένων, τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων και την αξιολόγηση της παραλλακτικότητας της καλλιέργειας (Εικόνα 1). Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε επίσης από τους Tagarakis et al. (2013) και Farid et al. (2016).



Εικόνα 1: Η περιοχή μελέτης σε περιβάλλον Google Earth χωρισμένο σε ένα πλέγμα 30 κελιών

Στη συνέχεια έγιναν τέσσερις μετρήσεις κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου με την χρήση του αισθητήρα Crop Circle ACS-470, με στόχο τον προσδιορισμό της ευρωστίας των φυτών. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων για τις ίδιες περίπου ημερομηνίες.

2.1 Μετρήσεις πεδίου

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ευρωστίας χρησιμοποιήθηκε ο ενεργητικού τύπου αισθητήρας Crop circle ACS-470 (Holland Scientific Inc., Lincoln, NE, USA), ο οποίος εκπέμπει ακτινοβολία και καταγράφει την ανάκλασή της από το φύλλωμα στα εξής μήκη κύματος: 550 nm, 670 nm, 760 nm. Στη συνέχεια τα δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό ArcGIS 10.2 (ESRI Inc., Redlands, CA, USA) για την επεξεργασία τους και την εξαγωγή θεματικών χαρτών. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων αφαιρέθηκαν οι ακραίες και μη αποδεκτές τιμές οι οποίες δημιουργούνται στην άνω και κάτω πλευρά της καλλιέργειας καθώς γίνεται στροφή και αλλαγή γραμμής. Στη συνέχεια ακολούθησε γεωστατιστική ανάλυση δεδομένων και πιο συγκεκριμένα χωρική παρεμβολή IDW για τον υπολογισμό των τιμών σε θέσεις που δεν έχουν καταγραφεί. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Zonal Statistics, το οποίο λαμβάνοντας υπόψη το πλέγμα των 30 κελιών που σχεδιάστηκε και το raster που δημιουργήθηκε με τη χωρική παρεμβολή, υπολογίζει τα περιγραφικά στατιστικά για το κάθε κελί ξεχωριστά. Η μέση τιμή που προέκυψε για κάθε κελί χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του δείκτη NDVI.

Για τη χαρτογράφηση της παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν πλαστικές σακούλες για τη συλλογή των καρπών, μια ηλεκτρονική ζυγαριά για τον υπολογισμό του βάρους τους και ένα GPS για την ακριβή εύρεση των κελιών. Κατά τη διάρκεια της συγκομιδής πραγματοποιήθηκε μία δειγματοληψία ανά κελί. Η συλλογή των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε έκταση ενός τετραγωνικού μέτρου m^2 και οι τιμές των δειγμάτων κανονικοποιήθηκαν.

2.2 Μετρήσεις τηλεπισκόπησης

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα μελέτη προέρχονται από τον δορυφόρο Sentinel 2 και διατίθενται μέσω του Sentinels Scientific Data Hub ως σύνολα δεδομένων ορθοεικόνων των 100 km^2 σε UTM/WGS84. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες Level 2A οι οποίες έχουν υποστεί ατμοσφαιρική και ραδιομετρική διόρθωση. Επιπλέον οι εικόνες όλων των φασματικών καναλιών ενώθηκαν σε ένα ενιαίο dataset (resample) με χωρική ανάλυση 10m, αξιοποιώντας την εργαλειοθήκη του λογισμικού SNAP (ESA, 2017). Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο δείκτης NDVI με τη χρήση των φασματικών καναλιών 8 και 4 που αντιστοιχούν στις φασματικές περιοχές του υπέρυθρου και του κόκκινου αντίστοιχα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των εικόνων στο λογισμικό ArcGIS, με στόχο τη χρήση του εργαλείου Zonal Statistics, το οποίο υπολογίζει τα περιγραφικά στατιστικά για το κάθε κελί ξεχωριστά.

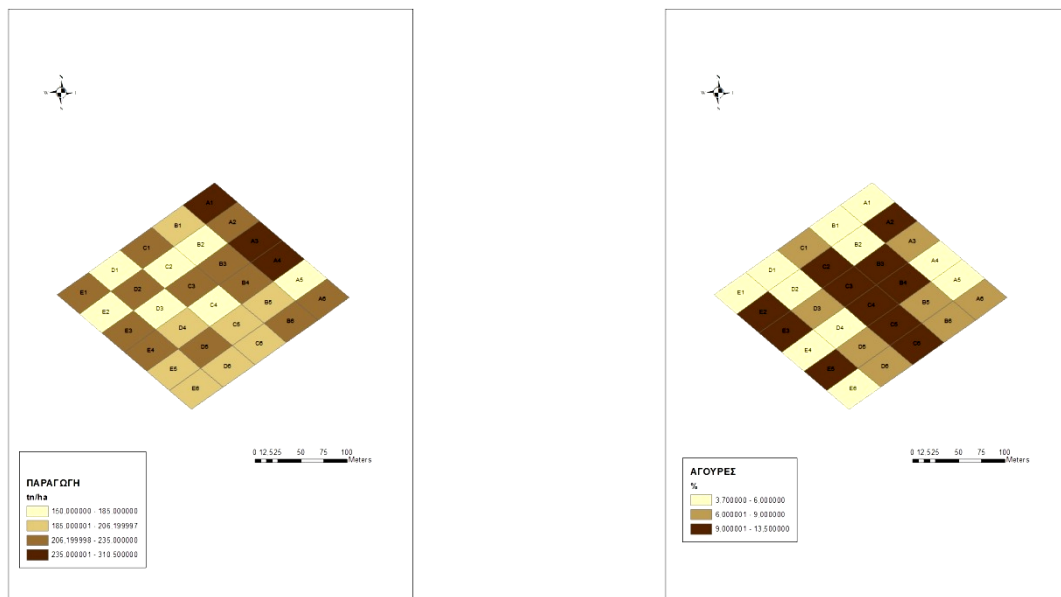
2.3 Στατιστική Ανάλυση

Για την εκτίμηση της συσχέτισης μεταξύ των αποτελεσμάτων των δορυφορικών εικόνων και του αισθητήρα Crop circle, χρησιμοποιήθηκε το πλέγμα των 30 κελιών ως χωρική μονάδα σύγκρισης. Στο πλαίσιο αυτό, εκτελέστηκε στατιστική ανάλυση, συμπεριλαμβανομένων περιγραφικών στατιστικών και συντελεστή συσχέτισης. Ο συντελεστής συσχέτισης r των δορυφορικών εικόνων και των δεδομένων αισθητήρα υπολογίστηκε προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δεικτών από τις δυο πηγές δεδομένων. Η στατιστική ανάλυση διεξήχθη με στατιστικό λογισμικό (Statgraphics 16, StatPoint Technologies Inc., Warrenton, VA, USA).

3. Αποτελέσματα

3.1 Χαρτογράφηση παραγωγής

Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε τέλη Ιουλίου, όπου έγινε χαρτογράφηση με σκοπό να γίνει συσχέτιση των δορυφορικών δεδομένων καθώς και των δεδομένων του αισθητήρα με την παραγωγή. Στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 2α) παρατηρούμε τη χωρική παραλλακτικότητα της παραγωγής του αγροτεμαχίου καθώς και το ποσοστό των άγουρων καρπών ανά κελί (Εικόνα 2β).



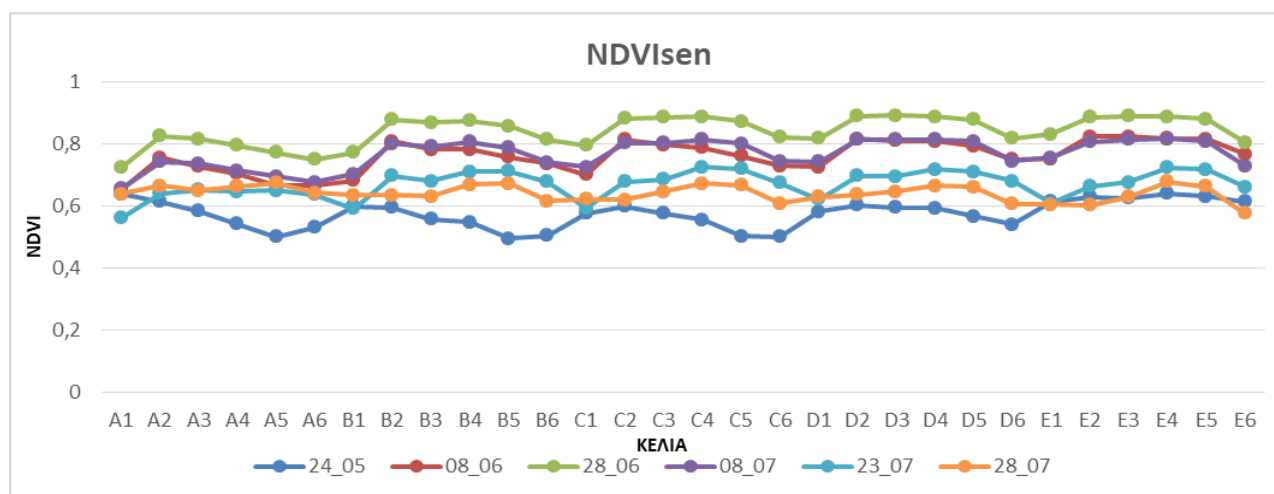
Εικόνα 2: α) Χάρτης παραγωγής βιομηχανικής τομάτας για το έτος 2019, β) Χάρτης ποσοστού άγουρων τοματών.

Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στα κελιά του βορειοανατολικού τμήματος του αγροτεμαχίου ενώ οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στα κελιά D1, D3, C4, C2, B2, A5, E2. Η συνολική παραγωγή για το έτος 2019 κυμάνθηκε από 150-310,5 τόν/εκτ. και φαίνεται να υπάρχει μια τάση προς το νοτιοδυτικό τμήμα της καλλιέργειας όπου χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη παραγωγή σε σχέση με το βόρειο τμήμα του. Επιπλέον παρατηρούμε παραλλακτικότητα στο ποσοστό ωρίμανσης των τοματών που έχει εύρος 3,7 μέχρι 13,5 %. Το μικρότερο ποσοστό των άγουρων τοματών εμφανίστηκε στο δυτικό τμήμα της καλλιέργειας ενώ το υψηλότερο ποσοστό εμφανίστηκε στο κεντρικό τμήμα.

Από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης φαίνεται ότι η ποικιλία είχε κατά μέσο όρο για το έτος 2019 παραγωγή 210 τόν/εκτ.. Ο συντελεστής παραλλακτικότητας ήταν γύρω στο 14,90% που είναι υψηλός αν ληφθεί υπόψη ότι η έκταση του χωραφιού που είναι μόλις 3 εκτάρια.

3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων δορυφορικών εικόνων

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2) παρατηρούμε τις τιμές του NDVI_{sen} οι οποίες προήλθαν από τα δεδομένα του Sentinel 2 δορυφόρου.



Σχήμα 2: Η κατανομή των τιμών NDVI από τα δεδομένα του δορυφόρου Sentinel 2.

Παρατηρούμε ότι η κατανομή των τιμών για όλες τις ημερομηνίες και τα κελιά ακολουθούν όμοια πορεία εμφανίζοντας παραλλακτικότητα στα διαφορετικά κελιά του αγροτεμαχίου. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται τον Ιούνιο όπου η βλάστηση είναι υψηλή ενώ στην συνέχεια ακολουθεί μια πτωτική τάση έως τη συγκομιδή. Ο δείκτης εμφανίζει χαμηλότερες τιμές στα ακραία κελιά του πλέγματος και πιο συγκεκριμένα στις σειρές που αντιστοιχούν στο 1 και το 6.

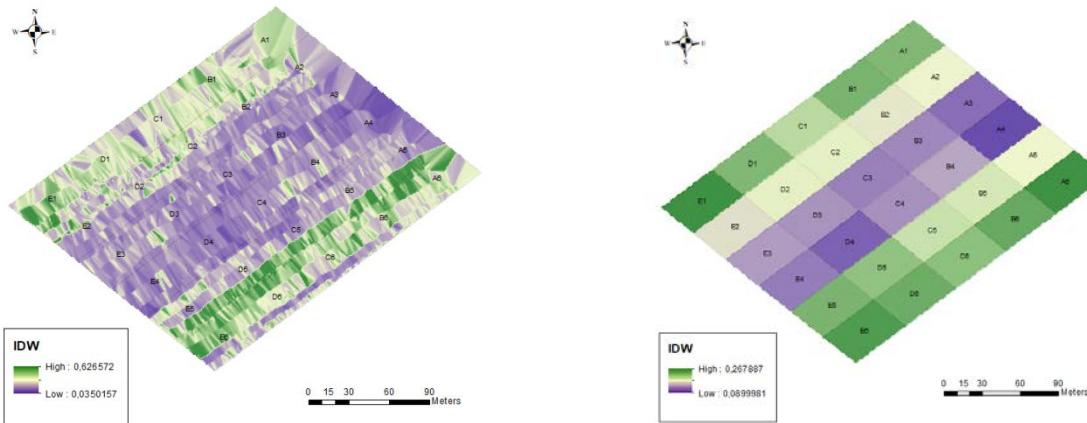
Πίνακας 1: Περιγραφικά στατιστικά του δείκτη NDVI_{sen} για το έτος 2019.

	Ημερομηνία	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Παραλλακτικότητας
1 ^η	24.05.2019	0,57	0,49	0,64	0,044	7,77%
2 ^η	08.06.2019	0,76	0,65	0,82	0,052	6,85%
3 ^η	28.06.2019	0,84	0,72	0,89	0,048	5,71%
4 ^η	08.07.2019	0,76	0,65	0,81	0,047	6,20%
5 ^η	23.07.2019	0,67	0,56	0,72	0,043	6,45%
6 ^η	28.07.2019	0,64	0,57	0,67	0,026	4,05%

Από τα περιγραφικά στατιστικά (Πίνακας 1) του δείκτη NDVI_{sen} φαίνεται ότι η μικρότερη μέση τιμή σημειώθηκε στις 24.05.19, ενώ η μέγιστη τιμή NDVI ήταν 0,84 και σημειώθηκε στις 28.06.19 είκοσι μέρες μετά τη φύτευση. Ο συντελεστής παραλλακτικότητας CV κυμάνθηκε μεταξύ 4,05-7,77%

3.3 Συγκριση αποτελεσμάτων αισθητήρα Crop circle.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε χωρική παρεμβολή IDW (Εικόνα 3) και χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία Zonal Statistics (Εικόνα 3β) και Zonal Statistics as Table (Εικόνα 3β) για να υπολογιστούν οι μέσες τιμές ανάκλασης ανά κελί. Αυτή η διαδικασία έγινε για όλα τα μήκη κύματος και όλες τις ημερομηνίες. Οι υψηλές τιμές απεικονίζονται με σκούρο πράσινο ενώ οι χαμηλές με σκούρο μωβ.

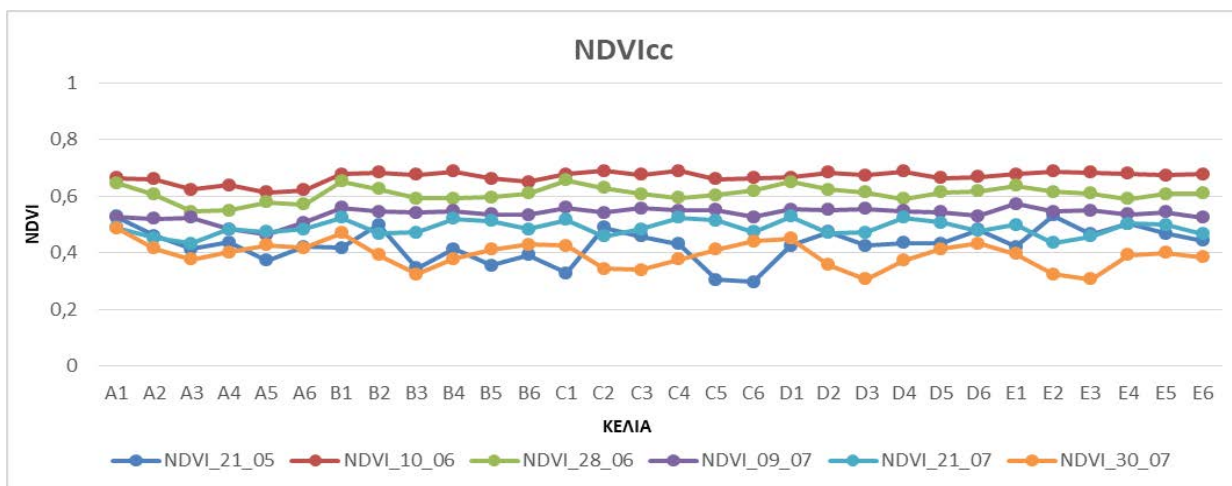


Εικόνα 3: α) Χωρική παρεμβολή IDW των τιμών ανάκλαστικότητας για μήκος κύματος 670 nm, β) Zonal Statistics για μήκος κύματος 670 nm.

Στο τελευταίο στάδιο αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές ανακλαστικότητας (ρ) σε 2 μήκη κύματος (670nm , 760nm) για την εξαγωγή του δείκτη NDVI μέσω της παρακάτω εξίσωσης.

$$NDVI = \frac{\rho_{760} - \rho_{670}}{\rho_{760} + \rho_{670}}$$

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3) παρατηρούμε τις τιμές του NDVIcc εμφανίζοντας παραλλακτικότητα στα διαφορετικά κελιά του αγροτεμαχίου. Η υψηλότερη τιμή εμφανίζεται τον Ιούνιο και πιο συγκεκριμένα στις 10.06.2019 την περίοδο της άνθισης, ενώ στην συνέχεια παρατηρείται μια πτωτική τάση έως τη συγκομιδή.



Σχήμα 3: Η κατανομή των τιμών NDVI από τα δεδομένα αισθητήρα Crop circle.

Από τα περιγραφικά στατιστικά του δείκτη NDVI_{cc} για το έτος 2019 (Πίνακας2) φαίνεται ότι η μικρότερη τιμή NDVI_{cc} σημειώθηκε στις 30.07.19 στο στάδιο της συγκομιδής ενώ η μέγιστη τιμή του δείκτη NDVI_{cc} ήταν 0,67 και σημειώθηκε στις 10.06.19. Ο συντελεστής παραλλακτικότητας CV κυμάνθηκε μεταξύ 1,99- 13,98 %.

Πίνακας 2: Περιγραφικά στατιστικά του δείκτη NDVI_{cc} για το έτος 2019.

	Ημερομηνία	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής Παραλλακτικότητας
1 ^η	21.05.2019	0,43	0,29	0,53	0,060	13,98%
2 ^η	10.06.2019	0,67	0,61	0,69	0,020	3,04%
3 ^η	28.06.2019	0,60	0,54	0,66	0,027	4,41%
4 ^η	09.07.2019	0,53	0,46	0,57	0,022	4,16%
5 ^η	21.07.2019	0,48	0,43	0,53	0,026	5,48 %
6 ^η	30.07.2019	0,39	0,30	0,49	0,004	11,52%

3.4 Στατιστική ανάλυση

Για την περαιτέρω διερεύνηση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση μεταξύ των τιμών NDVI από τις δύο πηγές δεδομένων για όλες τις ημερομηνίες συνολικά. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση μεταβλητότητας (ANOVA) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας3).

Πίνακας 3: Ανάλυση μεταβλητότητας (ANOVA) μεταξύ των δεικτών NDVI_{cc} και NDVI_{sen}.

Πηγή μεταβλητότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Μέσος Τετραγώνων	F	P-Value
Μοντέλο	0,531356	0,531356	231,70	0,0000
Σφάλμα	0,408199	0,00229325		
Σύνολο	0,939555			

Για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε την εξίσωση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ τους χρησιμοποιούμε μια συγκεκριμένη στατιστική μέθοδο, την ανάλυση παλινδρόμησης.

Πίνακας 3: Συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των δεικτών NDVI_{cc} και NDVI_{sen}.

Συντελεστής Συσχέτισης	R	R ² (Τροποποιημένος)	Εξίσωση	P-VALUE
0,752024	56,188	55,9419	NDVI _{sen} = (0,985933 + 0,215822*ln(NDVI _{cc}))^2	0,0000

3.5 Συντελεστής συσχέτισης

Για να ελέγξουμε πόσο ισχυρές είναι οι σχέσεις μεταξύ των μεταξύ των δεικτών NDVI για κάθε μέτρηση ξεχωριστά χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (Pearson Correlation). Αναλυτικότερα, στον παρακάτω πίνακα (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**4) φαίνονται οι συντελεστές συσχέτισης για τα ζεύγη των μεταβλητών που εμφάνισαν τις υψηλότερες τιμές, καθώς και οι τιμές P-value οι οποίες έχουν υπολογιστεί για κάθε συντελεστή ξεχωριστά, με επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας 95%.

Πίνακας 4: Γραμμικός συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των δεικτών $NDVI_{cc}$ και $NDVI_{sen}$.

Μετρήσεις	Συντελεστής Συσχέτισης	P-Value
1 ^η	0,73	0,000
2 ^η	0,68	0,000
4 ^η	0,55	0,001

Είναι φανερό ότι οι ισχυρότερες συσχετίσεις μεταξύ των δυο δεικτών NDVI παρατηρήθηκαν στις δυο πρώτες μετρήσεις την περίοδο της άνθισης. Η συσχέτιση μεταξύ των δυο δεικτών NDVI κυμάνθηκε από $r = 0,55$ μέχρι $r = 0,73$. Αυτά τα αποτελέσματα αποτελούν μια ένδειξη ότι η χρήση των συγκεκριμένων φασματικών καναλιών του δορυφόρου θα μπορούσε να αξιοποιηθούν για να γίνει πρόβλεψη της παραγωγής από το πρώιμο στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Αυτό το γεγονός είναι πολύ σημαντικό για τον παραγωγό γιατί μπορεί να επέμβει με διάφορες καλλιεργητικές φροντίδες με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της κατάστασης των φυτών και κατ' επέκταση της παραγωγής.

Όσον αφορά στη συσχέτιση της παραγωγής με τους δείκτες NDVI που υπολογίστηκαν με τα δυο διαφορετικά μέσα, από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι οι τιμές του NDVI σε όλα τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας είχαν θετική συσχέτιση με την παραγωγή. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής συσχέτισης κυμάνθηκε από $r=0,1$ μέχρι $r=0,3$.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα έρευνα έγινε καταγραφή της χωρικής παραλλακτικότητας της παραγωγής, καθώς και ο υπολογισμός του NDVI από δορυφορικές εικόνες και τον αισθητήρα Crop circle. Τα συμπεράσματα της έρευνας είναι τα εξής:

1. Το ποσοστό της χωρικής παραλλακτικότητας που εμφάνισε η παραγωγή (15%) ήταν υψηλό για το μικρό μέγεθος του αγροτεμαχίου. Η ύπαρξη αυτού του βαθμού παραλλακτικότητας υποδηλώνει ότι μπορούν να αξιοποιηθούν συστήματα Γεωργίας Ακριβείας για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του χωραφιού.

2. Ο δείκτης NDVI που υπολογίστηκε από τις δορυφορικές εικόνες εμφάνισε μικρή παραλλακτικότητα (7,77%) ενώ ο δείκτης NDVI που υπολογίστηκε από τον αισθητήρα Crop circle εμφάνισε παραλλακτικότητα από 3,04 μέχρι 13,98%.
3. Στην περίπτωση των δορυφορικών εικόνων έχουμε σταδιακή αύξηση των τιμών του NDVI μέχρι τον Ιούνιο και στην συνέχεια παρατηρείται πτωτική πορεία μέχρι την συγκομιδή. Αυτό ισχύει και για τον δείκτη που υπολογίστηκε από τον αισθητήρα Crop circle με την μόνη εξαίρεση ότι η υψηλότερη τιμή εμφανίστηκε νωρίτερα στις 10.06.2019. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στον ψεκασμό που πραγματοποιήθηκε δύο μέρες πριν την επόμενη μέτρηση στις 28.06.2019, είτε στο γεγονός ότι ο επίγειος αισθητήρας ήταν σε θέση να ανιχνεύσει νωρίτερα την καθοδική πορεία του δείκτη και κατ' επέκταση της βλάστησης.
4. Για την ανάλυση παλινδρόμησης το μοντέλο που επιλέχθηκε ήταν μη γραμμικό και ο τροποποιημένος συντελεστής προσδιορισμού R^2 που εξήχθη ήταν υψηλός (55,54%) γεγονός που επιβεβαιώνει την ισχυρή σχέση των δεικτών του NDVI που υπολογίστηκαν από τα δυο διαφορετικά μέσα.
5. Η ανάλυση συσχέτισης για το κάθε στάδιο ανάπτυξης ξεχωριστά είχε ως στόχο να αναδείξει την σημαντικότερη περίοδο για την εξέλιξη και την παραγωγή της καλλιέργειας. Με βάση τα αποτελέσματα, οι μετρήσεις κατά την περίοδο της άνθισης θα μπορούσε να αποτελέσει αξιόπιστη πηγή πληροφοριών για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ανάπτυξη της καλλιέργειας.
6. Οι τιμές του δείκτη NDVI που υπολογίστηκαν από τα δορυφορικά δεδομένα ήταν υψηλότερες από αυτές του δείκτη του αισθητήρα σε κάθε περίπτωση.
7. Οι συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών NDVI και της παραγωγής ήταν θετικές ωστόσο δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε από την εταιρεία Corteva agriscience-Pioneer Hi-Bred Hellas.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Auernhammer, H. D. (1995). *Yield measurement on self-propelled forage harvesters*. St. Joseph, Michigan. ASAE: ASAE Paper No. 95-1757.
- Farid, H.U.; Bakhsh, A.; Ahmad, N.; Ahmad, A.; Mahmood-Khan, Z. *Delineating site-specific management zones for precision agriculture*. *J. Agric. Sci.* 2016, 154, 273-286.
- Fountas, S., Aggelopoulou, K., Bouloulis, K., Nanos, G.D., Wulfsohn, D., Gemtos, T.A., Paraskevopoulos, A., Galanis, M., (2011). *Site-specific management in olive tree plantation*. *Journal of Precision Agriculture*, 12(2), Pages 179-195: <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9167-4>
- Griffin, T. L.-D. (2004). *Adoption, Profitability, and Making Better Use of Precision Farming Data*. Staff Paper #04-06. Department of Agricultural Economics, Purdue University.
- Hofman A. R., Penigrahi, S., Gregor, B. and Walker, J., 1995. *In field Monitoring Sugar Beets*. ASAE paper, 95-2114, ASAE, St. Joseph Michigan.
- Kromer, K. H., O. Schmittmann, and A. M. Osman., 1999. *Crop yield monitoring on forage harvesters*. ASAE Paper No. 99-1051. St. Joseph, Mich.: ASAE. Lee W. S., S. J. (2005). *Wagon-Based Silage Yield Mapping System*. *Agricultural Engineering International: the CIGR EJournal*. Vol. VII Manuscript IT 05 003.

- Lee W. S., S. J. (2005). *Wagon-Based Silage Yield Mapping System. Agricultural Engineering International: the CIGR EJournal. Vol. VII Manuscript IT 05 003.*
- Lee W. S., S. J. (2005). *Wagon-Based Silage Yield Mapping System. Agricultural Engineering International: the CIGR EJournal. Vol. VII Manuscript IT 05 003.*
- Markinos, A. T. (2003). *A precision farming application in cotton in the small farms of Greece. 4th European Conference on Precision Agriculture, Berlin, Germany, 15-19 June 2003.*
- Pelletier, G. and Upadyaya, S. K., 1999. *Development of a tomato load/yield monitor. Computers and Electronics in Agriculture, 23: 103-107.*
- Tagarakis, A.; Liakos, V.; Fountas, S.; Koundouras, S.; Gemtos, T.A. *Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. Precis. Agric. 2013, 14, 18–39.*
- Tomasson J.A., P. D. (1999). *Cotton mass flow measurements: Experiments with two optical devices. Appl. Eng in Agric. , σσ. 11-17.*
- Vatsanidou A ; S. Fountas1 ; G. Nanos2 ;T. Gemtos1 (2014)*Variable Rate Application of Nitrogen Fertilizer in a commercial pear orchard:*
- Velidis, G. C. (2003). *Simultaneous assessment of cotton yield monitors. . Applied Engineering in Agriculture, 19(3): 259-272.*
- Velidis, G. C., Perry, D., Thomas, D. L., Wells, N. and Kvien, C. K., 2003. *Simultaneous assessment of cotton yield monitors. Applied Engineering in Agriculture, 19(3): 259-272.*
- Velidis, G., Perry, C. D., Durrence, J. S., Thomas, D. L., Hill, R. W., Kwien, C. K. and Rains, G., 2001. *Field testing the peanut yield monitoring. In: Robert, P.C., Rust, R. H., Larson, W. E (Eds). Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, USA, pp. 835-844.*
- Αγγελοπούλου Α., Blackmore S., Φουντάς Σ., Γέμτος Θ. και Νάνος Γ., 2007. *Μελέτη χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας παραγωγής και ποιότητας σε σπωρώνες μηλιάς. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα*
- Καρυδάς, Χ. Γ. (Οκτώβριος 2000). *Γεωργία Ακριβείας: Περιγραφή της μεθόδου - Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές. 2ο Ειδικό Συνέδριο Πληροφοριακών Συστημάτων στη Γεωργία. Χανιά.*
- Ράππος Ε., Αγγελοπούλου Α., Παπαθανασίου Ι., Γέμπος Θ., Νάνος Γ., 2005. *Συμβολή στη Γεωργία Ακριβείας χαρτών παραγωγής και ποιοτικών χαρακτηριστικών δύο ποικιλιών μήλων. 40 Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 6-8 Οκτωβρίου 2005 Αθήνα.*
- Τάνος Α., Αγγελοπούλου Α., Φουντάς Σ., Γέμπος Θ., Νάνος Γ. και Χατζινίκος Α., 2007. *Ζώνες διαχείρισης βάση χαρτών παραγωγής, ποιοτικών χαρακτηριστικών και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα.*
- Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων
- Χατζηπαπαδόπουλος, Φ., Πρωτονοτάριος, Β., (2017). *Η Ευφύης Γεωργία στην καλλιέργεια της ελιάς. Σε Ζαμπούνη Β. (Συντ.), Εγκυκλοπαίδεια Ελαιοκομίας: Το ελαιόλαδο (σελ. 79-93). Άξιον Εκδοτική, Ελλάδα, 2017.*

ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ

Θ. Αγγελοπούλου^{1,2}, Ν. Τζιόλας², Α. Μπαλαφούτης¹, Γ. Ζαλίδης², Δ. Μπόχτης¹

¹Ινστιτούτο Βιο-οικονομίας και Αγρο-Τεχνολογίας (iBO), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), 57001, Θέρμη, Θεσσαλονίκη, e-mail: d.angelopoulou@certh.gr

²Τμήμα Γεωπονίας, Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης, Φασματοσκοπίας και ΓΣΠ, Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση των δυνατοτήτων μιας πολυφασματικής κάμερας (400-810 nm) για τον προσδιορισμό της εδαφικής οργανικής ουσίας. Πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση με φασματικές μετρήσεις σε επίπεδο εργαστηρίου, καλύπτοντας την περιοχή VNIR-SWIR (400-2500 nm), σε 18 δείγματα εδάφους που συλλέχθηκαν από το ίδιο αγροτεμάχιο. Παράλληλα, τα εδαφικά δείγματα αναλύθηκαν και με τις κλασικές εργαστηριακές μεθόδους προκειμένου να βαθμονομηθούν τα μοντέλα πρόβλεψης. Για την βαθμονόμηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (SVR), με τα δεδομένα της πολυφασματικής κάμερας, τις εργαστηριακές φασματικές υπογραφές και τους παραγόμενους φασματικούς δείκτες ως δεδομένα εισόδου.

Λέξεις κλειδιά: εδαφική οργανική ουσία, πολυφασματικά δεδομένα, φασματικοί δείκτες.

SOIL ORGANIC MATTER ESTIMATION BASED ON MULTISPECTRAL CAMERA MOUNTED ON UNMANNED AERIAL SYSTEM

Th. Angelopoulou^{1,2}, N. Tziolas², A. Balafoutis¹, G. Zalidis², D. Bochtis¹

¹Institute for Bio-economy and Agri-technology (iBO), Centre for Research and Technology – Hellas (CERTH), 57001, Thessaloniki, e-mail: d.angelopoulou@certh.gr

²Laboratory of Remote Sensing, Spectroscopy and GIS, School of Agriculture, Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, 54124

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the capabilities of multispectral imagery (400-810 nm) predictive ability for soil organic matter estimation. A comparative analysis was performed with laboratory spectral measurements of 18 soil samples collected from the same field covering the complete VNIR-SWIR range (400-2500 nm). The soil samples were also determined by wet chemistry methods to calibrate the developed prediction models. Considering imagery data values, laboratory spectral signatures and the produced spectral indices as input features, a support vector machine algorithm was used for model calibration.

Keywords: soil organic matter, multispectral data, spectral indices.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους στη γεωργική παραγωγή που εκτελεί διάφορες οικολογικές και μη οικολογικές λειτουργίες και θεωρείται σε μεγάλο βαθμό μη ανανεώσιμος πόρος (Blum, 2005). Η εδαφική οργανική ουσία (ΕΟΟ) είναι σημαντική παράμετρος του εδάφους που επηρεάζει τη γονιμότητα του, τη βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Ως εκ τούτου, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον σχετικά με τα επίπεδα της ΕΟΟ, καθώς η σωστή διαχείριση του εδαφικού οργανικού άνθρακα, εκτός των προαναφερθέντων, συμβάλει επιπλέον στην μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (Johnston et al., 2009, Muñoz-Rojas et al., 2017). Τα ελληνικά εδάφη παρουσιάζουν χαμηλή περιεκτικότητα σε ΕΟΟ που κυμαίνεται μεταξύ 1,0-1,5% (Tsadilas et al., 2005). Συνεπώς, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την επιλογή της κατάλληλης πρακτικής για την επίτευξη βιώσιμης διαχείρισης του εδάφους προκειμένου να διατηρηθούν ή και ενδεχομένως να αυξηθούν τα επίπεδα της ΕΟΟ. Ωστόσο, οι συμβατικές εδαφολογικές αναλύσεις στο εργαστήριο είναι χρονοβόρες και το κόστος είναι αρκετά υψηλό προκειμένου να εξασφαλιστούν οι απαιτούμενες πληροφορίες στο επίπεδο της χωρικής παραλλακτικότητας (Viscarra Rossel et al., 2006). Ως εκ τούτου, νέες τεχνικές αξιολογούνται ως εναλλακτικές και οικονομικά αποδοτικές μέθοδοι. Η φασματοσκοπία ανάκλασης εδάφους, για παράδειγμα, έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς, από εργαστηριακές συνθήκες έως εφαρμογές εκ του σύνεγγυς στον αγρό και εφαρμογές τηλεπισκόπησης. Έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον στην επιστήμη της εδαφολογίας λόγω των πλεονεκτημάτων της έναντι των συμβατικών μεθόδων, καθώς απαιτεί ελάχιστη έως καθόλου προετοιμασία του δείγματος και παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης πολλών παραμέτρων σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων μέσα σε μία ημέρα. Επίσης, η μη χρήση χημικών αντιδραστηρίων εξασφαλίζει ένα ασφαλέστερο περιβάλλον εργασίας (McBratney et al., 2006).

Η ανάγκη εφαρμογής νέων τεχνολογιών στη γεωργία για παρακολούθηση και καταγραφή των ιδιοτήτων της καλλιέργειας και του εδάφους έχει στρέψει το ενδιαφέρον στη χρήση αισθητήρων που τοποθετούνται σε συστήματα μη επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) για τη δημιουργία χαμηλού κόστους και υψηλής ανάλυσης χαρτών. Η χρήση τους έχει αυξηθεί λόγω της υψηλής χωρικής ανάλυσης που παρέχουν και της ευελιξίας στο χρονικό διάστημα απόκτησης δεδομένων (Angelopoulou et al., 2019). Πρόσφατες μελέτες προτείνουν τη χρήση φασματικών δεικτών, που προκύπτουν από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων φασματικών ζωνών, προκειμένου να ενισχυθεί η παραγόμενη πληροφορία (Gholizadeh et al., 2018). Στη βάση της γνώσης των συγγραφέων, υπάρχουν περιορισμένες μελέτες για την εκτίμηση της ΕΟΟ με τη χρήση ΣμηΕΑ σε πραγματικές συνθήκες (Aldana-Jague et al., 2016).

Σε αυτή τη μελέτη επιχειρήθηκε η σύγκριση της ακρίβειας της φασματοσκοπίας ανάκλασης εδάφους στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο μήκος κύματος, σε συνθήκες εργαστηρίου με την αντίστοιχη πολυφασματικών εικόνων που αποκτήθηκαν από κάμερα τοποθετημένη σε ΣμηΕΑ για την πρόβλεψη της ΕΟΟ. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν 14 φασματικοί δείκτες και αξιολογήθηκαν ως προς τη συμβολή τους στην εκτίμηση της ΕΟΟ.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιοχή Μελέτης

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε το Δεκέμβριο του 2018 σε αγροτεμάχιο 60 στρεμμάτων καλλιέργειας σιταριού στον Ριζομύλο Μαγνησίας στην Θεσσαλία (Σχ 1). Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε συνθήκες γυμνού εδάφους, στο στάδιο της σποροκλίνης ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις διαφόρων επιφανειακών συνθηκών, όπως η τραχύτητα εδάφους και η ύπαρξη φυτών ή φυτικών υπολειμμάτων.



Σχήμα1. Περιοχή μελέτης

2.2 Δειγματοληψία εδάφους και εργαστηριακές αναλύσεις

Συνολικά συλλέχθηκαν 18 δείγματα επιφανειακού εδάφους (0-30 εκ.) με δειγματολήπτη ολλανδικού τύπου, ακολουθώντας διαμόρφωση τύπου «ρόμβου» η οποία θεωρείται κατάλληλη για την κάλυψη σχετικά μικρών εκτάσεων. Τα εδάφη αναλύθηκαν για τον προσδιορισμό της μηχανικής σύστασης με τη μέθοδο του Βουγιούκου και ο εδαφικός οργανικός άνθρακας προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Walkley-Black. Η μετατροπή του εδαφικού οργανικού άνθρακα σε ΕΟΟ έγινε σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο :

$$\text{Εδαφική Οργανική Ουσία (\%)} = \text{Ολικός Εδαφικός Οργανικός Άνθρακας (\%)} \times 1.724 \text{ (Wiley, 1906)}$$

2.3 Μετρήσεις με την πολυφασματική κάμερα

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε η πολυφασματική κάμερα Parrot Sequoia + (Parrot SA, Παρίσι, Γαλλία). Η κάμερα διαθέτει τέσσερις ξεχωριστούς αισθητήρες που καλύπτουν τις περιοχές του πράσινου (530-570nm), του ερυθρού (640-680nm), τις παρυφές του ερυθρού (730-740nm) και του κοντινού υπέρυθρου (770-810nm). Τοποθετήθηκε στο ΣμηΕΑ τύπου eBee (Sensefly, Λωζάνη, Ελβετία) ενώ το υψόμετρο πτήσης ήταν στα 50 m. Η φωτογραμμετρική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε στα ανεπεξέργαστα δεδομένα των εικόνων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PiX4D (PiX4D SA, Πριλύ, Ελβετία) το οποίο τροφοδοτήθηκε με τα δεδομένα των αεροφωτογραφιών και τα αντίστοιχα μεταδεδομένα προσανατολισμού.

2.4 Φασματοσκοπικές μετρήσεις σε συνθήκες εργαστηρίου

Για τις εργαστηριακές φασματοσκοπικές μετρήσεις, ακολουθήθηκε το πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε από τους Ben Dor, Ong και Lau, (2015). Το φασματοφωτόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη ήταν το μοντέλο PSR +3500 (Spectral Evolution, Haverhill, MA, USA) με εύρος φασματικής περιοχής μεταξύ 350-2500 nm. Η διαδικασία ήταν η εξής: (i) μέτρηση λευκού αναφοράς για τη βαθμονόμηση του οργάνου, (ii) φασματοσκοπική μέτρηση των δύο εσωτερικών σταθερών για την τυποποίηση των φασματικών υπογραφών του εδάφους, και (iii) μέτρηση του δείγματος εδάφους. Η προαναφερθείσα διαδικασία βαθμονόμησης και τυποποίησης επαναλήφθηκε για κάθε πέντε δείγματα εδάφους.

2.4 Χρήση φασματικών δεικτών

Συνδυάζοντας τις διάφορες φασματικές ζώνες της πολυφασματικής κάμερας και τις αντίστοιχες των φασματοσκοπικών εργαστηριακών μετρήσεων, υπολογίστηκαν 14 φασματικοί δείκτες με στόχο τη βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης της ΕΟΟ. Οι φασματικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ακόλουθοι: normalized difference vegetation index (NDVI), Green normalized difference vegetation index (GNDVI), transformed vegetation index (TVI), soil-adjusted vegetation index (SAVI), CRI, normalized difference red edge index (NDRE), NIR/red (SR), NIR/rededge (SR_E), rededge/NIR (CSM), (NIR/red edge)⁻¹ (CI), optimized soil adjusted vegetation index (OSAVI), renormalized difference vegetation index (RDVI), weighted difference vegetation index (WDVI) και bright related index (BI2). Οι προαναφερθέντες δείκτες επιλέχθηκαν λόγω της ευαισθησίας τους στις μεταβολές της συγκέντρωσης της ΕΟΟ καθώς και δείκτες φωτεινότητας που συσχετίζονται έμμεσα με την ΕΟΟ όπως προέκυψε από την βιβλιογραφία (Levin et al., 2007, Gholizadeh et al., 2018).

2.5 Παλινδρόμηση και γεωστατιστική ανάλυση

Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου επιλέχθηκε αλγόριθμος μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης (SVR) με πυρήνα “radial basis”, λόγω της ικανότητάς του να γενικεύει άγνωστα δεδομένα. Λαμβάνοντας υπόψη το χαμηλό αριθμό δειγμάτων, επελέγη η μέθοδος επικύρωσης “leave-one-out cross-validation” (Soriano-Disla et al., 2014). Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του συντελεστή προσδιορισμού R^2 , το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και το δείκτη συνεκτικότητας “ratio of performance to inter-quartile” (RPIQ). Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για τις φασματικές μετρήσεις τόσο στο εργαστήριο όσο και με τις μετρήσεις μέσω του ΣμηΕΑ στον αγρό. Για τη χαρτογράφηση της παραλλακτικότητας της ΕΟΟ από τις εργαστηριακές φασματικές μετρήσεις ακολουθήθηκε η διαδικασία παρεμβολής Inverse Distance Weighting (IDW).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Φυσικοχημική ανάλυση των εδαφικών δειγμάτων

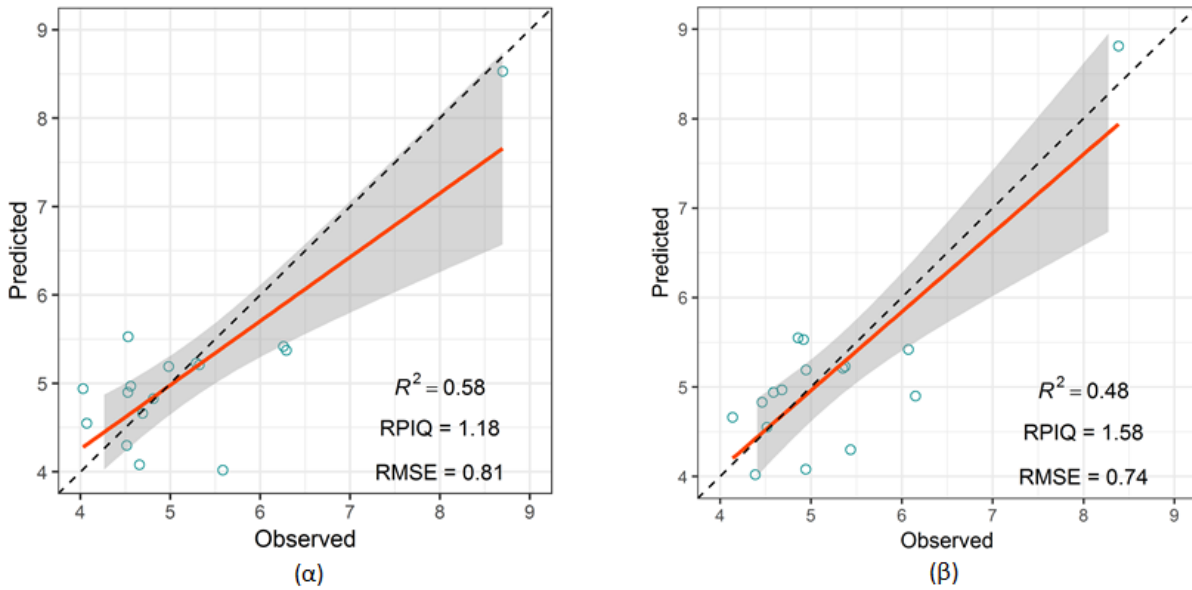
Η μηχανική σύσταση του εδάφους χαρακτηρίζεται αργιλοπηλώδης έως αμμοαργιλοπηλώδης με το ποσοστό της αργίλου να κυμαίνεται από 20,1% έως 38,1% και την περιεκτικότητα σε άμμο από 22,3% έως 45,6%. Η περιεκτικότητα της ΕΟΟ βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 3,74 - 8,81% που θεωρείται ικανοποιητική για τις περισσότερες καλλιέργειες.

3.2 Πρόβλεψη της εδαφικής οργανικής ουσίας με την χρήση φασματοσκοπικών δεδομένων

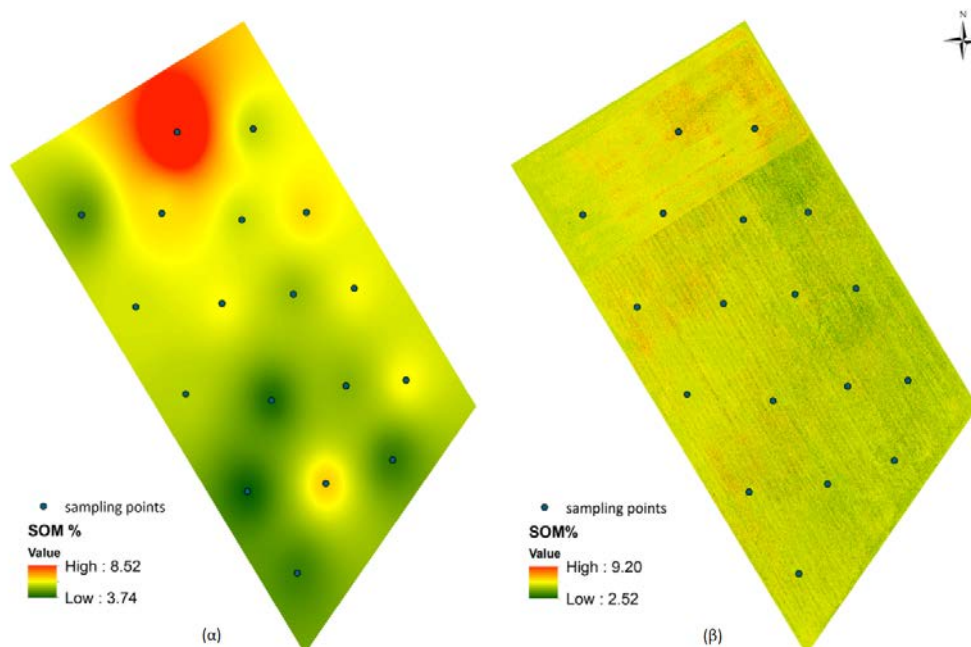
Η εκτίμηση της ΕΟΟ χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις εργαστηριακές φασματικές μετρήσεις με τη συνδυασμένη χρήση των φασματικών δεικτών παρείχε σχετικά καλά αποτελέσματα με την χρήση του SVR ($C = 32$, $\sigma = 0.1218$). Η στατιστική ακρίβεια ($R^2 = 0.58$, $RMSE = 0.81\%$ και $RPIQ = 1.18$) έδειξε ότι το μοντέλο πρόβλεψης μπορεί να κάνει διάκριση μεταξύ υψηλών και χαμηλών τιμών ΕΟΟ (Σχήμα 2α). Σε σύγκριση με άλλες μελέτες (Nawar et al., 2016), τα αποτελέσματα δείχνουν χαμηλότερη ακρίβεια, η οποία θα μπορούσε να αποδοθεί στο μικρό αριθμό δεδομένων, τη χαμηλή παραλλακτικότητα και το μικρό εύρος των τιμών της ΕΟΟ.

Η χρήση του αλγορίθμου SVR ($C = 16$, $\sigma = 0.084$) για την πρόβλεψη της ΕΟΟ από τα πολυφασματικά δεδομένα της κάμερας έδειξε χαμηλότερο συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,48$. Ωστόσο, το RMSE ήταν χαμηλότερο ($RMSE = 0,74\%$) και το $RPIQ = 1,58$ υψηλότερο σε σύγκριση με τις εργαστηριακές μετρήσεις. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι δύο προσεγγίσεις παρήγαγαν παρόμοια αποτελέσματα (Σχήμα 2β). Μια σχετική μελέτη από τους Aldana-Jague et al. (2016) έδειξε μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά αφορούσε σε μακροπρόθεσμο πείραμα που διεξήχθη στο Rothamsted του Ηνωμένου Βασιλείου χρησιμοποιώντας δεδομένα με μεγάλη

παραλλακτικότητα στην περιεκτικότητα του εδαφικού οργανικού άνθρακα. Επιπλέον, η περιοχή μελέτης ήταν σημαντικά μεγαλύτερη. Μεταξύ των φασματικών δεικτών, ο δείκτης SAVI παρείχε την υψηλότερη συσχέτιση με την ΕΟΟ. Αυτό συμφωνεί και με προηγούμενες μελέτες (Gholizadeh et al., 2018).



Σχήμα2. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεφθέντων τιμών της ΕΟΟ με τη χρήση του αλγορίθμου SVR (α) για τις φασματοσκοπικές εργαστηριακές μετρήσεις και (β) για τις μετρήσεις με τη χρήση του ΣμηΕΑ



Σχήμα3. Χάρτες παραλλακτικότητας της ΕΟΟ με τη χρήση (α) εργαστηριακών και (β) UAV μετρήσεων

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι χάρτες παραλλακτικότητας της ΕΟΟ που δημιουργήθηκαν από τα μοντέλα πρόβλεψης των φασματοσκοπικών μετρήσεων (α) του εργαστηρίου και (β) της πολυφασματικής κάμερας. Η χωρική κατανομή της ΕΟΟ που προέκυψε από τη χρήση της μεθόδου IDW φανερώνει ότι το μοντέλο πρόβλεψης από τα εργαστηριακά δεδομένα έχει υποεκτιμήσει τις υψηλότερες τιμές της ΕΟΟ. Από την άλλη μεριά το μοντέλο με τη χρήση των δεδομένων του ΣμηΕΑ υπερεκτίμησε τις προβλεπόμενες τιμές όταν η ΕΟΟ ήταν υψηλή και τις υποεκτίμησε όταν η συγκέντρωση της ΕΟΟ ήταν χαμηλή. Αυτό μπορεί επίσης να παρατηρηθεί στο διάγραμμα διασποράς (Σχήμα 2β). Συγκρίνοντας τις δύο εικόνες παρατηρείται πως και οι δύο προσεγγίσεις έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο άνω μέρος του αγροτεμαχίου, παρουσιάζοντας την προοπτική της χρήσης του ΣμηΕΑ για τον προσδιορισμό της ΕΟΟ.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα προκαταρκτικά αποτελέσματα, τόσο οι εργαστηριακές όσο και οι φασματικές μετρήσεις με τη χρήση πολυφασματικής κάμερας προσαρτημένης σε ΣμηΕΑ ήταν σχετικά αποδεκτά για την εκτίμηση της ΕΟΟ. Λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική κατανομή της ΕΟΟ που προκύπτει και από τους δύο αισθητήρες μέσω της μοντελοποίησης, φαίνεται τα αποτελέσματα να είναι παρόμοια, με την εργαστηριακή μέθοδο να υπερτερεί σε μικρό βαθμό. Το πρωτόκολλο συλλογής των δεδομένων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της εκτίμησης των εδαφικών παραμέτρων υπό πραγματικές συνθήκες πεδίου και η πρακτικότητά της εξαρτάται από παράγοντες όπως είναι η κατάλληλη ραδιομετρική βαθμονόμηση και διορθώσεις που είναι απαραίτητες στα στάδια πριν και μετά την πτήση (π.χ. γεωμετρικές διορθώσεις για την επίτευξη επιστημονικά αποδεκτών αποτελεσμάτων). Παρόλο που η πολυφασματική απεικόνιση στερείται φασματικών πληροφοριών σε σύγκριση με τη φασματοσκοπία εδάφους σε επίπεδο εργαστηρίου, έχει τη δυνατότητα να παρέχει δεδομένα με υψηλότερη χωρική ανάλυση καταβάλλοντας σημαντικά λιγότερη προσπάθεια. Σε αυτό το πλαίσιο, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα ΣμηΕΑ παρέχουν τη δυνατότητα μεγάλης χωρικής κάλυψης για την εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων ανοίγοντας το δρόμο για συνεχή παρακολούθηση και χαρτογράφηση του εδάφους. Για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων είναι επιτακτική η διεξαγωγή πειραμάτων σε περιοχές με διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές και μεγάλο εύρος συγκέντρωσης της ΕΟΟ. Η ευθυγράμμιση των πολυφασματικών τηλεσκοπικών δεδομένων με εργαστηριακά φασματικά δεδομένα είναι ο τομέας στον οποίο η επιστήμη έχει στρέψει την προσοχή της, προκειμένου να αξιοποιήσει τις μεγάλες φασματικές βιβλιοθήκες εδάφους που έχουν δημιουργηθεί σε όλο τον κόσμο.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου «Ερευνητική Συνέργεια για την Αντιμετώπιση των Μεγάλων Προκλήσεων του Πλέγματος: ενέργεια-περιβάλλον-αγροτική Παραγωγή (Τροφή, Νερό, Υλικά)» - NEXUS, που χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) - Κωδικός Έργου: MIS 5002496.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aldana-Jague, E., Heckrath, G., Macdonald, A., van Wesemael, B., Van Oost, K. (2016) 'UAS-based soil carbon mapping using VIS-NIR (480-1000 nm) multi-spectral imaging: Potential and limitations', *Geoderma*, 275, pp. 55–66. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.04.012.
- Angelopoulou, T., Tziolas, N., Balafoutis, A., Zalidis, G., Bochtis, D. (2019) 'Remote Sensing Techniques for Soil Organic Carbon Estimation: A Review', *Remote Sensing*, 11(6), p. 676. doi: 10.3390/rs11060676.

- Blum, W. E. H. (2005) 'Functions of Soil for Society and the Environment', *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. Kluwer Academic Publishers, 4(3), pp. 75–79. doi: 10.1007/s11157-005-2236-x.
- Ben Dor, E., Ong, C. and Lau, I. C. (2015) 'Reflectance measurements of soils in the laboratory: Standards and protocols', *Geoderma*, 245–246. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.01.002.
- Gholizadeh, A., Žižala, D., Saberioon, M., Borůvka, L. (2018) 'Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging', *Remote Sensing of Environment*, 218(September), pp. 89–103. doi: 10.1016/j.rse.2018.09.015.
- Johnston, A. E., Poulton, P. R. and Coleman, K. (2009) 'Chapter 1 Soil Organic Matter: Its Importance in Sustainable Agriculture and Carbon Dioxide Fluxes', *Advances in Agronomy*. Academic Press, 101, pp. 1–57. doi: 10.1016/S0065-2113(08)00801-8.
- Levin, N., Kidron, G. J. and Ben-Dor, E. (2007) 'Surface properties of stabilizing coastal dunes: combining spectral and field analyses', *Sedimentology*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 54(4), pp. 771–788. doi: 10.1111/j.1365-3091.2007.00859.x.
- McBratney, A. B., Minasny, B. and ViscarraRossel, R. (2006) 'Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis', *Geoderma*, 136(1), pp. 272–278. doi: 10.1016/j.geoderma.2006.03.051.
- Muñoz-Rojas, M., Abd-Elmabod, S.K., Zavala, L.M., De la Rosa, D., Jordán, A. (2017) 'Climate change impacts on soil organic carbon stocks of Mediterranean agricultural areas: A case study in Northern Egypt', *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Elsevier, 238, pp. 142–152. doi: 10.1016/J.AGEE.2016.09.001.
- Nawar, S., Buddenbaum, H., Hill, J., Kozak, J., Mouazen, A.M. (2016) 'Estimating the soil clay content and organic matter by means of different calibration methods of vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy', *Soil and Tillage Research*. Elsevier, 155, pp. 510–522. doi: 10.1016/J.STILL.2015.07.021.
- Soriano-Disla, J.M., Janik, L.J., ViscarraRossel, R.A., Macdonald, L.M., McLaughlin, M.J. (2014) 'The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties', *Applied Spectroscopy Reviews*. Taylor & Francis, 49(2), pp. 139–186. doi: 10.1080/05704928.2013.811081.
- Tsadilas, C. D., Mitsios, I. K. and Golia, E. (2005) 'Influence of Biosolids Application on Some Soil Physical Properties', *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Taylor & Francis Group, 36(4–6), pp. 709–716. doi: 10.1081/CSS-200043350.
- Tsakiridis, N.L., Theocharis, J.B., Ben-Dor, E., Zalidis, G.C. (2019) 'Using interpretable fuzzy rule-based models for the estimation of soil organic carbon from VNIR/SWIR spectra and soil texture', *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. Elsevier, 189, pp. 39–55. doi: 10.1016/J.CHEMOLAB.2019.03.011.
- ViscarraRossel, R.A., 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(1), pp. 59–75. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.03.007.
- Wiley, H. W. (1906) *Principles and practice of agricultural analysis; a manual for the study of soils, fertilizers, and agricultural products; for the use of analysts, teachers, and students of agricultural chemistry*. 2d ed., re. Easton, Pa.: The Chemical publishing co. Available at: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/75931>.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΜΕ ΣμηΕΑ ΣΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΠΟΛΕΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΑΚΟΥ ΤΗΣ ΕΛΙΑΣ

Χρήστος Καβαλάρης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος,
Οδός Φυτόκου, 38446 Βόλος, e-mail: chkaval@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ψεκασμοί με Συστήματα μη επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ ή κοινώς drones), στη γεωργία είναι μια καινοτόμα ανερχόμενη τεχνολογία της οποίας όμως το κόστος εφαρμογής είναι σχετικά ασαφές. Στην παρούσα μελέτη γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού κρίσιμων στοιχείων και παραμέτρων για την ενδεχόμενη περίπτωση χρήσης ΣμηΕΑ στην καταπολέμηση του δάκου της ελιάς, με σκοπό την εκτίμηση του κόστους της επέμβασης και της σύγκρισης αυτού, με το κόστος δύο παραδοσιακών μεθόδων: ψεκασμοί με επινώτιους ψεκαστήρες και ψεκασμοί με γεωργικό και ελκυστήρα και αυλούς που χειρίζονται εργάτες. Η περίπτωση της δακοπροστασίας επιλέχθηκε διότι η χρήση εργατών ανεβάζει το κόστος και αφετέρου, ο δολωματικούς χαρακτήρας των ψεκασμών δεν επιβάλλει πλήρη κάλυψη της κόμης, γεγονός που τη καθιστά ιδεατή για ψεκασμούς με ΣμηΕΑ. Προσδιορίστηκε το κόστος της εργασίας, η ανάλωση του κεφαλαίου, τα κόστη επισκευών και συντήρησης, το κόστος των καυσίμων (πετρελαίου και ηλεκτρικού ρεύματος) και το κόστος των τελών και των εισφορών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κόστος της επέμβασης με ΣμηΕΑ ήταν 64% υψηλότερο από το κόστος των παραδοσιακών ψεκασμών κυρίως εξαιτίας της περιορισμένης διάρκειας οικονομικής ζωής του εξοπλισμού και την υψηλότερη αμοιβή των πιστοποιημένων χειριστών ΣμηΕΑ.

COST ANALYSIS OF UAV SPRAYING IN THE CASE OF OLIVE FRUIT FLY CONTROL

Chris Cavalaris

University of Thessaly, Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, Fytokou str, 38446 Volos, e-mail: chkaval@uth.gr

ABSTRACT

Spraying with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in agriculture is a novel upcoming technology but the cost of the application is yet rather uncertain. The present study aims to access some critical components and parameters in the potential case of using UAVs for control of olive fruit fly in order to access the cost of the operation and compare this, with the costs of two methods of traditional spraying; man spaying with backpack sprayers and man spraying with tractor assisted lances. The case of olive fruit fly was selected because it involves costly man spraying whereas the bait character of spraying doesn't imply full canopy coverage, making it ideal for UAV applications. Costs of labour, capital spending, repair and maintenance, fuel and electricity and taxes and fees were estimated for each of the three methods. The results showed that the cost of spraying with UAVs was 64% higher than the traditional methods, mainly because the low economic life of the equipment and the higher wages for the skilled UAV pilots.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ ή κοινώς drone) αναμένεται να αναλάβουν σημαντικούς ρόλους στη γεωργία του μέλλοντος είτε συμμετέχοντας στην τηλεπισκόπηση των καλλιεργειών, είτε υποκαθιστώντας τα επίγεια μηχανήματα σε διάφορες καλλιεργητικές εργασίες όπως οι ψεκασμοί, η διανομή λιπασμάτων και η σπορά [1]. Στην Ευρώπη, μέχρι το 2035, περίπου 25.000 ΣμηΕΑ αναμένεται να επιχειρούν στο γεωργικό τομέα εκτελώντας γεωργικές εργασίες [2]. Τα ΣμηΕΑ αναμένεται να εγκαινιάσουν μια νέα εποχή στη φυτο-προστασία παρέχοντας αποτελεσματικές, χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικά ασφαλείς λύσεις, ειδικά εναντίων συστηματικών εχθρών όπως ο δάκος της ελιάς.

Παραδοσιακά, η προστασία από το δάκο της ελιάς (*Dacus oleae*) βασίζεται σε επίγειους δολωματικούς ψεκασμούς που διεξάγονται από εργάτες με επινώτιους ψεκαστήρες ή με αυλούς που συνδέονται σε φερόμενο σε γεωργικό ελκυστήρα ψεκαστήρα. Οι ψεκασμοί αποφασίζονται με βάση στοιχεία της εξέλιξης του πληθυσμού που συλλέγονται από δίκτυα παγίδων. Η απόφαση είναι καταφατική όταν σε διάστημα 5-6 ημερών καταμετρηθούν 5-20 έντομα στις παγίδες λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη το στάδιο της καλλιέργειας, την αναμενόμενη καρποφορία, την ποικιλία και τις καιρικές συνθήκες. Συνήθως 4-7 ψεκασμοί ετησίως είναι απαραίτητοι για την αποτελεσματική δακοπροστασία. Οι ψεκασμοί γίνονται στο 1/3 των δένδρων ακολουθώντας κανονικοποιημένα σχήματα και καλύπτοντας τμήματα της κόμης. Ξεκινούν νωρίς το πρωί και διακόπτονται προς το μεσημέρι, μετά από 5-6 ώρες, όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 28°C διότι παύει η δραστηριότητα του εντόμου. Η κάθε επέμβαση θα πρέπει να έχει ολοκληρωθεί σε ένα σύντομο διάστημα 5-6 ημερών.

Η δακοκτονία προϋποθέτει την περιστασιακή απασχόληση εργατών που πολλές φορές δεν είναι διαθέσιμοι και που βέβαια, ανεβάζουν σημαντικά το κόστος της επέμβασης. Εκτός αυτού, οι εργάτες αποφεύγουν την δακοκτονία διότι εκθέτουν τον εαυτό τους στον κίνδυνο της χρήσης επικινδύνων για την υγεία αγροχημικών. Από την άλλη πλευρά, η χρήση των ΣμηΕΑ σε εφαρμογές ψεκασμών, είναι μια ανερχόμενη νέα τεχνολογία που υπόσχεται ταχείς, αποτελεσματικές και ασφαλείς επεμβάσεις. Ο δολωματικός χαρακτήρας των ψεκασμών στη δακοκτονία δεν επιβάλλει πλήρη κάλυψη της καλλιέργειας καθιστώντας τη ιδανική περίπτωση για την χρήση ΣμηΕΑ. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι να εντοπίσει και να καταγράψει κρίσιμες παραμέτρους των ψεκασμών στη δακοκτονία για δύο παραδοσιακές μεθόδους και μια καινοτόμο μέθοδο ψεκασμού με ΣμηΕΑ με σκοπό την ανάπτυξη ενός υπολογιστικού μοντέλου για την εκτίμηση του κόστους για κάθε μια από αυτές και την αξιολόγηση της οικονομικής σκοπιμότητας του ψεκασμού με ΣμηΕΑ.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Μελετήθηκαν 3 εναλλακτικές περιπτώσεις

- Παραδοσιακός ψεκασμός με επινώτιους ψεκαστήρες
- Παραδοσιακός ψεκασμός με γεωργικό ελκυστήρα και εργάτες
- Καινοτόμος μέθοδος ψεκασμού με ΣμηΕΑ

Για όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε συμβατική ελαιοκαλλιέργεια με 175 δένδρα ανά (διάταξη πλέγματος 8x8m).

2.1 Περιγραφή περιπτώσεων

Περίπτωση Ι. Ψεκασμός με επινώτιους ψεκαστήρες

Ο ψεκασμός διεξάγεται από εργάτες που φέρουν επινώτιους ψεκαστήρες. Συγκροτούνται συνεργεία από 3-6 ψεκαστές, έναν οδηγό αγροτικού αυτοκινήτου (α.α.) ή γεωργικού ελκυστήρα (γ.ε.) που μεταφέρει τον εξοπλισμό και έναν αρχιεργάτη που συντονίζει την επιχείρηση. Κάθε συνεργείο είναι υπεύθυνο για έναν “Τομέα” έκτασης 80-150ha. Περίπου 300ml ψεκαστικού διαλύματος εφαρμόζεται σε κάθε δένδρο (ανάλογα με το μέγεθος της κόμης) με μέσου μεγέθους σταγονίδια 500μm. Η ποσότητα αυτή ισοδυναμεί με $17.5 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$ για τον ψεκασμό του 1/3 των δένδρων. Στην ουσία, ένας ψεκαστής που φέρει μια ψεκαστήρα 18 λίτρων ψεκάζει περίπου 60 δένδρα, και καλύπτει μια έκταση 1,03ha σε περίπου 40min. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη 10min για επαναγέμισμα των ψεκαστήρων και ανάπαυση των εργατών, υπολογίζεται ότι 6 ψεκαστήρες μπορούν να εφαρμοσθούν ημερησίως από έναν εργάτη σε διάστημα 5h και 22min. Πέντε ψεκαστές ενός συνεργείου μπορούν να καλύψουν 30,9ha.

Περίπτωση ΙΙ. Ψεκασμός με γεωργικό ελκυστήρα και εργάτες

Ο ψεκασμός διεξάγεται από εργάτες που φέρουν αυλούς οι οποίοι τροφοδοτούνται από μηχανοκίνητο ψεκαστήρα φερόμενο σε γ.ε. Συγκροτούνται συνεργεία με έναν ή δύο επίγειους ψεκαστές που βαδίζουν παράλληλα με τον γ.ε. και έναν οδηγό για τον γ.ε. ο οποίος συνήθως αναλαμβάνει και το ρόλο του αρχιεργάτη. Το μέγεθος των σταγονιδίων και η ποσότητα του ψεκαστικού διαλύματος είναι όμοια με την προηγούμενη περίπτωση. Ένα βυτίο ψεκαστήρα 500 λίτρων μπορεί να παρέχει ψεκαστικό διάλυμα για τον ψεκασμό 1670 δένδρων, την προστασία 5000 δένδρων και την κάλυψη 28,6 εκταρίων. Λαμβάνοντας υπόψη 15λεπτα διαλλείματα ανάπαυσης των εργατών ανά ώρα, υπολογίζεται ότι ένα βυτίο 500 λίτρων δύναται να εφαρμοστεί ημερησίως σε διάστημα 5 ωρών και 19 λεπτών καλύπτοντας μια συνολική έκταση 28.6 εκταρίων.

Περίπτωση ΙΙΙ. Ψεκασμός με ΣμηΕΑ

Ο ψεκασμός δύναται να εφαρμοστεί με ένα ΣμηΕΑ με δυνατότητα ψεκασμού το οποίο χειρίζεται ένας πιστοποιημένος χειριστής ΣμηΕΑ. Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε το πολυκόπτερο ΣμηΕΑ DJI Agras MG1 [3]. Η εφαρμογή γίνεται και πάλι στο 1/3 των δένδρων. Αυτό προϋποθέτει την καταγραφή της ακριβούς θέσης του κάθε δένδρου και των διαστάσεων της κόμης αυτού σε ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών στο οποίο θα καταστρωθούν επίσης τα σχέδια πτήσης του ΣμηΕΑ και οι στόχοι του ψεκασμού. Η χρήση ενός συστήματος σχετικού κινηματικού προσδιορισμού της γεωγραφικής θέσης (RTK-GPS) κρίνεται απαραίτητη για την επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας τόσο κατά το στάδιο της καταγραφής όσο και κατά το στάδιο της εφαρμογής. Το ΣμηΕΑ έχει τη δυνατότητα να προσεγγίζει πλησιέστερα στη κόμη των δένδρων, σε σχέση με τους επίγειους ψεκασμούς, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση μικρότερων σταγονιδίων που επιτυγχάνουν μεγαλύτερη κάλυψη του φυλλώματος. Επιπλέον, το καθοδικό ρεύμα από τους έλικες του ΣμηΕΑ ενισχύει την διείδυση του ψεκαστικού νέφους στη κόμη. Το MG1 Agras φέρει ένα δοχείο ψεκαστικού διαλύματος 10l και μια αντλία που τροφοδοτεί 4 ακροφύσια (τύπου Teejet XR11001) ικανά να παράγουν σταγονίδια κατώτατου μεγέθους 130μm με μια παροχή $0.451 \cdot \text{min}^{-1}$ [4]. Επομένως, μόλις 75ml ανά δένδρο ή $4.41 \cdot \text{ha}^{-1}$ είναι ικανά να επιτύχουν όμοια φυτοκάλυψη με αυτή που πετυχαίνεται με 300ml ανά δένδρο από σταγονίδια 500μm που παράγονται από αυλούς. Και για τις δύο περιπτώσεις δεν λήφθηκε υπόψη η επίδραση της διασποράς τους ψεκαστικού νέφους. Με τα 4 ακροφύσια σε λειτουργία και τη μικρότερη παροχή, το ΣμηΕΑ ψεκάζει $1.8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ καταφέροντας μια αυτονομία 25 λεπτών μέχρι να αδειάσει το δοχείο (λαμβάνοντας επίσης υπόψη

και τους χρόνους για τη μετάβαση από το ένα δένδρο στο 3ο επόμενο). Η ονομαστική αυτονομία όμως των ηλεκτρικών συσσωρευτών του αεροσκάφους, για αποτελεσματικό ψεκασμό είναι μόλις 15min. Επομένως, ο περιοριστικός παράγοντας για τη διάρκεια μιας πτήσης δεν είναι η χωρητικότητα του δοχείου αλλά η αυτονομία του συσσωρευτή. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι σε κάθε 15λεπτη πτήση μπορούν να ψεκαστούν 109 δένδρα και να προστατευθούν 327 δηλαδή 1,87ha. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη 10λεπτα μεσοδιαστήματα για την επιστροφή του ΣμηΕΑ στο σημείο απογείωσης, το επαναγέμισμα του δοχείου και την αλλαγή του συσσωρευτή, 1 λεπτό για τη μετάβαση στο επόμενο σημείο απογείωσης καθώς επίσης 20 λεπτά για την ανάπτυξη του εξοπλισμού στο πεδίο στην αρχή της ημέρας και την συγκέντρωσή του στο τέλος, υπολογίζεται ότι ημερησίως δύνανται να πραγματοποιηθούν 12 πτήσεις σε ένα διάστημα 5,5 ωρών καλύπτοντας μια συνολική έκταση 22,4ha. Η προ-προγραμματισμένη πλοήγηση του ΣμηΕΑ επιτρέπει την όλη επιχείρηση να πραγματοποιηθεί και να ελέγχεται από έναν μόνο χειριστή δίχως την ανάγκη για βοηθό πτήσης.

Για την αξιολόγηση των τριών περιπτώσεων αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο σε φύλλο εργασίας Excel. Στο **Πίνακα 1** παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στο υπολογιστικό μοντέλο κατά τη παρούσα μελέτη.

Πίνακας 1. Παράμετροι ψεκασμού για τις τρεις εναλλακτικές περιπτώσεις

	με επινώτιους ψεκαστήρες (περ. I)	με γ.ε. και εργάτες (περ. II)	με ΣμηΕΑ (περ. III)
Αριθμός εργατών	7 ^[a]	3 ^[b]	1
Μέγεθος σταγονιδίων (μm)	500	500	130
Παροχή ακροφυσίων (l min ⁻¹)	1.2	2.8	0.45
Δόση ψεκασμού (l ha ⁻¹)	17.5	17.5	4.4
χωρητικότητα δοχείου (l)	18	500	10
Δένδρα που ψεκάζονται με ένα δοχείο	60	1669	109 ^[c]
Δοχεία που εφαρμόζονται ημερησίως	30	1	12
Εκτάρια (ha) που ψεκάζονται ημερησίως	30.9	28.6	22.4
Ημερήσιος χρόνος ψεκασμού (h)	5.37	5.32	5.51

^[a] 5 ψεκαστές, 1 οδηγός, 1 αρχιεργάτης ^[b] 2 ψεκαστές 1 οδηγός ^[c] με ένα συσσωρευτή (μπαταρία)

2.2. Ανάλυση κόστους

2.2.1. Εργασία

Οι ψεκαστές με επινώτιους ψεκαστήρες ή αυλούς και οι οδηγοί των οχημάτων είναι κυρίως ανειδίκευτοι εργάτες με σχετικά χαμηλούς μισθούς. Οι αρχιεργάτες διαθέτουν κάποια εμπειρία και γ' αυτό αμείβονται ελαφρώς καλύτερα. Οι χειριστές ΣμηΕΑ ωστόσο είναι ειδικευμένο και πιστοποιημένο προσωπικό που απαιτεί υψηλότερες αμοιβές. Για την παρούσα μελέτη, τα ημερομίσθια για δωρη ημερήσια απασχόληση του ανειδίκευτου προσωπικού λήφθηκαν 50€, των αρχιεργατών 60€ και των χειριστών ΣμηΕΑ 120€. Τα ημερομίσθια προσαρμόστηκαν ανάλογα με τον πραγματικό ημερήσιο χρόνο απασχόλησης.

2.2.2. Ανάλωση κεφαλαίου

Ένα συνεργείο με επινώτιους ψεκασθήρες χρειάζεται ψεκασθήρες για κάθε εργάτη, ένα βυτίο 500 περίπου λίτρων για καθαρό νερό και έναν γ.ε. ή ένα αγροτικό Ι.Χ. για μεταφορά του εξοπλισμού. Ένα συνεργείο με γ.ε. χρειάζεται ένα γ.ε. και το παρελκόμενο ψεκαστήρα. Ο ψεκασμός με ΣμηΕΑ εμπλέκει ένα ΣμηΕΑ με εξαρτήματα ψεκασμού, ικανό αριθμό συσσωρευτών και σταθμό επαναφόρτισης για διαρκή λειτουργία, ένα RTK GPS και ένα αγροτικό Ι.Χ. για σταθμό βάσης και μεταφορά του εξοπλισμού. Η ανάγκη για περισσότερους συσσωρευτές όμως δεν επηρεάζει την ανάλωση κεφαλαίου διότι το κόστος εκφράζεται ανά ώρες χρήσης.

Πίνακας 2. Παράμετροι του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού για τις 3 περιπτώσεις.

		με επινώτιους ψεκασθήρες (περίπτωση I)	με γ.ε. και εργάτες (περίπτωση II)	με ΣμηΕΑ (περίπτωση III)
Τιμή αγοράς (Q ₀) (€):	Μονάδα ψεκασμού	50 ^[a]	8000 ^[b]	9000 ^[c]
	γ.ε. / α.α.	30000.0	45000.0	20000 ^[d]
	Συσσωρευτές ΣμηΕΑ			800
	Σταθμός φόρτισης			1500
	RTK GPS			6000
Οικονομική ζωή (OZ)(h):	Μονάδα ψεκασμού	1500 ^[a]	1500 ^[b]	4 ^[c] (έτη)
	γ.ε. / α.α.	16000	16000	10000 ^[d] (ώρες)
	Συσσωρευτές ΣμηΕΑ			300 (ώρες)
	Σταθμός φόρτισης			4 (έτη)
	RTK GPS			10 (έτη)
Ετήσια χρήση (ώρες):	Μονάδα ψεκασμού	116 ^[a]	130 ^[b]	91 ^[c]
	γ.ε. / α.α.	25.3	137.6	1.6 ^[d]
	Συσσωρευτές ΣμηΕΑ			91
	Σταθμός φόρτισης			135
	RTK GPS			95
Υπολειμματική αξία (% της τιμής αγοράς)	Μονάδα ψεκασμού	0	10	20
	γ.ε. / α.α.	10	10	10
	Συσσωρευτές ΣμηΕΑ			0
	Σταθμός φόρτισης			20
	RTK GPS			20

^[a] επινώτιοι ψεκασθήρες, ^[b] φερόμενος ψεκαστήρας γ.ε., ^[c] ΣμηΕΑ ψεκασμών, ^[d] αγροτ. αυτ.

Οι υπολογισμοί για την ανάλωση του κεφαλαίου βασίστηκαν σε ένα ονομαστικό επιτόκιο 5% και ένα συντελεστή πληθωρισμού 1%. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τιμές αγοράς (Q_0) για το έτος 2019, η οικονομική ζωή (OZ) και η υπολειμματική αξία. Η OZ (σε ώρες) για το γ.ε. και τον φερόμενο ψεκαστήρα λήφθηκαν από τα ASABE standards [5]. Για τους επινώτιους ψεκαστήρες θεωρήθηκε επίσης η OZ του μηχανοκίνητου ψεκαστήρα. Για το ΣμηΕΑ η OZ εκλήφθηκε στα 4 έτη εξαιτίας του καινοτόμου της τεχνολογίας που συνεπάγεται ταχεία τεχνολογική παλαίωση [6] [7]. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι η ετήσια χρήση αλλά η παλαιότητα που καθορίζει το όριο της OZ. Το ίδιο ισχύει και για το σταθμό φόρτισης που συνήθως συνοδεύει τους συσσωρευτές του ΣμηΕΑ. Το RTK-GPS περιλαμβάνει σχετικά ωριμότερη τεχνολογία και γι' αυτό η OZ εκλήφθηκε στα 10 έτη [8]. Οι γ.ε. με τους παρελκόμενους ψεκαστήρες βέβαια, όπως και τα α.α., δεν χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στους ψεκασμούς. Αντιθέτως, η χρήση τους στον ψεκασμό αποτελεί συνήθως πολύ μικρό τμήμα της συνολικής ετήσιας χρήσης αυτών. Για έναν "δίκαιο" επιμερισμό του κόστους στις άνωθεν περιπτώσεις υπολογίστηκε η «Υποθετική οικονομική ζωή» (YOZ) του εξοπλισμού, δηλαδή τα έτη ζωής υποθέτοντας αποκλειστική χρήση στις υπό μελέτη εργασίες και αγνοώντας την τεχνολογική παλαίωση. Η YOZ (σε έτη) υπολογίστηκε ως ο λόγος OZ (σε ώρες) / (ώρες ετήσιας χρήσης) και η ετήσια απόσβεση ως ο λόγος Q_0 / YOZ . Η ανάλωση του κεφαλαίου περιλαμβάνει την ετήσια απόσβεση και τους τόκους του κεφαλαίου. Για την αποφυγή στρεβλώσεων το τελευταίο υπολογίστηκε για τη πραγματική OZ. Η υπολειμματική αξία του εξοπλισμού εκλήφθηκε 20% της τιμής αγοράς για το ΣμηΕΑ και τα εξαρτήματά του (εκτός από τους συσσωρευτές που λήφθηκε 0%), 10% για το γ.ε. τον ψεκαστήρα και το I.X. και 0% για τους επινώτιους ψεκαστήρες. Η υψηλότερη υπολειμματική αξία για το ΣμηΕΑ και τα εξαρτήματα οφείλεται στην περιορισμένη OZ που δίνει περιθώρια για αξιοποίηση σε λιγότερο απαιτητικές εργασίες ή πώληση των ανταλλακτικών τους.

2.2.3. Επισκευές και συντήρηση R&M

Για την εκτίμηση του κόστους των επισκευών και της συντήρησης του ψεκαστήρα, του γ.ε. και του α.α. χρησιμοποιήθηκε η σχέση των ASABE Standards D497.5 [5].

$$C_{rm} = (RF_1)Q_0 \left[\frac{h}{1000} \right]^{(RF_2)}$$

	RF ₁	RF ₂
Ψεκαστήρας γ.ε.	0.410	0.005
Γεωργ. ελκ. / αγρ. αυτ.	1.300	2.000

όπου C_{rm} το σωρευτικό κόστος επισκευών και συντήρησης Q_0 η τιμή αγοράς, h οι συνολικές ώρες χρήσης και RF_1 , RF_2 σταθερές που σχετίζονται με τον εξοπλισμό. Για τους επινώτιους ψεκαστήρες και τα ΣμηΕΑ που δεν υπάρχουν στοιχεία για τα κόστη επισκευών & συντήρησης αυτά υπολογίστηκαν στο 50% της τιμής αγοράς [7].

Οι επισκευές συχνά εμπλέκουν ένα δεύτερο, έμμεσης μορφής κόστος το οποίο προέρχεται από την ακινησία του εξοπλισμού εξαιτίας βλάβης. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις, η απώλεια εισοδήματος από την μη έγκαιρη εκτέλεση μιας εργασίας μπορεί να είναι υψηλότερη ακόμη και από το ίδιο το κόστος της αντικατάστασης του εξοπλισμού που υπέστη βλάβη. Ιδανικά, θα πρέπει πάντα να υπάρχει διαθέσιμος εφεδρικός εξοπλισμός. Αυτό είναι εύκολα εφικτό για χαμηλού κόστους εξοπλισμό όπως οι επινώτιοι ψεκαστήρες η ακόμη και για ακριβότερο εξοπλισμό όπως οι γ.ε. και οι φερόμενοι σε γ.ε. ψεκαστήρες, διότι συνήθως υπάρχει πληθώρα παρόμοιων μηχανημάτων στις αγροτικές περιοχές που μπορούν ακόμα και να μισθωθούν σε περίπτωση ανάγκης. Δεν ισχύει όμως το ίδιο για τα ΣμηΕΑ και τον συνοδό τους εξοπλισμό. Σε αυτή τη περίπτωση, ο διαχειριστής θα πρέπει να διαθέτει εφεδρικά στοιχεία για όλο το χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό. Για τα ΣμηΕΑ, η

συχνότητα βλαβών είναι $1/10^3$ [9]. Λαμβάνοντας υπόψη ένα μήνα ακινησίας για το αεροσκάφος μέχρι την επισκευή, υπολογίζεται ότι απαιτείται ένα εφεδρικό ΣμηΕΑ για κάθε σμήνος από 33 ΣμηΕΑ. Στη περίπτωση της δακοκτονίας που εξετάζεται, ωστόσο, είναι απίθανο ένας διαχειριστής να διαθέτει περισσότερα από 5 ΣμηΕΑ. Η ανάλωση του κεφαλαίου για το ΣμηΕΑ επομένως προσαυξήθηκε κατά 1/5, ώστε να συμπεριλάβει και το κόστος του εφεδρικού ΣμηΕΑ και το ίδιο έγινε και για το συνοδό εξοπλισμό.

2.2.4. Ενέργεια

Ο γ.ε. και το α.α. καταναλώνουν καύσιμο ντήζελ ενώ το ΣμηΕΑ χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια. Η κατανάλωση καυσίμου υπολογίστηκε για κάθε μια από τις παρακάτω περιπτώσεις: μετακίνηση στο χωράφι, μετακίνηση σε αγροτικό δρόμο, ισχυροδότηση του φερόμενου ψεκαστήρα. Η απόδοση του οχήματος, η ώθηση των τροχών, η ολίσθηση και η απορροφόμενη ισχύς υπολογίστηκαν από τις σχέσεις που δίδονται στα ASABE D497.5 Standards [5]. Η απορροφόμενη ισχύς εκφράστηκε σε ισοδύναμη στο δυναμοδότη ισχύ, για το γ.ε. και ισχύ στο σφόνδυλο για το α.α. και από εκεί υπολογίστηκε η ειδική κατανάλωση καυσίμου και εν τέλει, η κατανάλωση καυσίμου. Λαμβάνοντας υπόψη μια τιμή για το ντήζελ, 1,65€/l, υπολογίστηκε το κόστος του καταναλισκόμενου καυσίμου.

Το ΣμηΕΑ DJI Agras MG1 είναι ένα οκτακόπτερο με συνολική ισχύ κινητήρων 3.25KW με πλήρη φορτίο [3] ή 1.95kW για μισό φορτίο. Υπολογίζεται ότι το ΣμηΕΑ θα πρέπει να βρίσκεται σε αιώρηση περίπου 3h από τις 5,5h που διαρκεί ο ημερήσιος ψεκασμός. Ως εκ τούτου, η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται στις 5.85kWh και η ετήσια κατανάλωση στις 180kWh. Λαμβάνοντας υπόψη μια τιμή κιλοβατώρας 0.1892€/kWh, υπολογίστηκε το ετήσιο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για το ΣμηΕΑ.

2.2.5. Φόροι και εισφορές

Οι γεωργικοί ελκυστήρες και τα αγροτικά αυτοκίνητα επιβάλλεται να διαθέτουν ασφάλεια αστικής ευθύνης η οποία χονδρικά εκτιμάται στο $2.5/1000$ της τιμής αγοράς. Τα ΣμηΕΑ επιβάλλεται επίσης να διαθέτουν ασφάλεια η οποία, σε τιμές 2019, στοιχίζει 300€ το έτος. Επιπλέον, σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία, όταν ένα ΣμηΕΑ χρησιμοποιείται για εμπορικούς σκοπούς, πρέπει να διαθέτει πιστοποιητικό πτητικής επάρκειας το οποίο κοστίζει 180€ το έτος και ο χειριστής είναι αναγκασμένος να ανανεώνει την άδεια χειριστού κάθε τρία έτη, με κόστος 20€

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το συνολικό κόστος του παραδοσιακού ψεκασμού με επινώτιους ψεκαστήρες υπολογίστηκε στα 8.82€/ha (Πίνακας 3). Από αυτό, τα 8,06€/ha, ποσοστό 91% επί του συνολικού, αφορά την αμοιβή της εργασίας. Το υπόλοιπο 6,4% αφορούσε την ανάλωση του κεφαλαίου και τις επισκευές και συντήρηση και 2,5% τα καύσιμα και την ασφάλεια του οχήματος.

Για τον ψεκασμό με γ.ε. το συνολικό κόστος υπολογίστηκε στα 8.81€/ha, σχεδόν όμοιο με τη προηγούμενη περίπτωση. Το κόστος της εργασίας βέβαια είναι ασφαλώς μικρότερο, 3.49€/ha, καθότι εμπλέκονται λιγότεροι εργάτες αλλά υπάρχει ένα σημαντικά αυξημένο κόστος από την ανάλωση του κεφαλαίου και τις επισκευές και συντήρηση που ανέρχεται στα 2.61€/ha και ένα εξίσου υψηλό κόστος καυσίμου ίσο με 2.58€/ha. Η εργασία αντιπροσωπεύει το 39.9% του συνολικού κόστους η ανάλωση κεφαλαίου και οι επισκευές & συντήρηση το 29% και τα καύσιμα το 29.5%

Το συνολικό κόστος του ψεκασμού με ΣμηΕΑ ήταν σημαντικά υψηλότερο από το κόστος των δύο παραδοσιακών μεθόδων και υπολογίστηκε στα 14.46€/ha. Αξιοσημείωτο είναι ότι το κόστος της εργασίας με ΣμηΕΑ ήταν επίσης υψηλότερο από το κόστος του ψεκασμού με γ.ε. παρότι εμπλέκεται ένας εργάτης αντί για τρεις. Τούτο οφείλεται στην υψηλότερη αμοιβή του εξειδικευμένου χειριστή ΣμηΕΑ που ήταν 15€/h σε σύγκριση με τα 6.25€/h για τους ανειδίκευτους εργάτες. Το κόστος της εργασίας για τον ψεκασμό με ΣμηΕΑ αφορά το 27,5% του συνολικού κόστους της επέμβασης. Παρόλα αυτά, η υψηλότερη συμμετοχή, 65% επί του συνολικού, προέρχεται από την ανάλωση του κεφαλαίου (6.54€/ha) και τις επισκευές & συντήρηση (2.80€/ha). Το υψηλό κόστος του κεφαλαίου οφείλεται στην σύντομη οικονομική ζωή του εξοπλισμού που περιλαμβάνει καινοτόμες τεχνολογίες οι οποίες υπόκεινται σε υψηλές τεχνολογικές αβεβαιότητες όπως αξιοπιστία, λειτουργικές αστοχίες, συμβατότητα, ελλειπής υποστήριξη και υποκατάσταση από νεότερες τεχνολογίες [8]. Το υψηλό κόστος επισκευών & συντήρησης επίσης προέρχεται από τον υψηλό κίνδυνο βλάβης ή ατυχήματος του ΣμηΕΑ κατά τη διάρκεια της πτήσης [9]. Οι φόροι και οι ασφαλιστικές εισφορές για το ΣμηΕΑ είναι επίσης υψηλές και ανέρχονται στα 1.08€/ha, 7.5% του συνολικού κόστους. Το χαμηλότερο κόστος προέρχεται από τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, 0.06€/ha.

Η εργασία, οι επισκευές και η συντήρηση και η ενέργεια συνιστούν το μεταβλητό κόστος των επεμβάσεων που είναι άμεσα συνυφασμένο με την ετήσια χρήση του εξοπλισμού. Η ανάλωση του κεφαλαίου, οι φόροι και οι εισφορές συνιστούν το σταθερό κόστος των επεμβάσεων το οποίο είναι ανεξάρτητο από την ετήσια χρήση. Η μέθοδος ψεκασμού με ΣμηΕΑ περιλαμβάνει ένα σημαντικό υψηλό σταθερό κόστος, μεγαλύτερο του 50%, γεγονός που σημαίνει ότι η επένδυση στη νέα τεχνολογία, πριν από τη λήψη όποιων αποφάσεων, θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί και εξετασθεί προσεκτικά με γνώμονα τη μέγιστη αξιοποίηση του εξοπλισμού στη διάρκεια του έτους.

Πίνακας 3. Κόστος λειτουργίας για τις τρεις εναλλακτικές μεθόδους ψεκασμού

	κόστος χρήσης (€/ha)		
	με επινώτιους ψεκαστήρες	με γ.ε. και εργάτες	με ΣμηΕΑ
Εργασία	8.06	3.49	3.98
Ανάλωση κεφαλαίου	0.34	1.67	6.54
Επισκευές & συντήρηση	0.20	0.94	2.80
Ενέργεια	0.13	2.58	0.06
Φόροι και εισφορές	0.08	0.13	1.08
Σύνολο	8.82	8.81	14.46

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κόστος ψεκασμού με ΣμηΕΑ για την καταπολέμηση του δάκου της ελιάς ανέρχεται στα 14.46€/ha, 64% υψηλότερο από τον παραδοσιακό ψεκασμό με επινώτιους ψεκαστήρες (8.82€/ha) ή με γ.ε (8.81€/ha). Το υψηλότερο κόστος οφείλεται στην αυξημένη ανάλωση κεφαλαίου εξαιτίας της σύντομης οικονομικής ζωής της νέας τεχνολογίας και εξαιτίας των υψηλότερων αμοιβών για τους επαγγελματίες χειριστές ΣμηΕΑ. Το κόστος των εισφορών είναι επίσης σχετικά υψηλό. Η ανάλωση

κεφαλαίου και οι εισφορές συνιστούν το σταθερό κόστος της επέμβασης που αποτελεί το 53% επί του συνολικού. Υψηλά σταθερά κόστη επιβάλλουν προσεκτικό σχεδιασμό των επενδύσεων.

Η παρούσα μελέτη βασίστηκε σε παραδοχές παραμέτρων οι οποίες ενδεχομένως υπόκεινται σε περαιτέρω συζήτηση. Για παράδειγμα, ποια θα ήταν η επίπτωση στο κόστος ψεκασμού με ΣμηΕΑ εάν η οικονομική ζωή ήταν μεγαλύτερη των τεσσάρων ετών; Ποια θα ήταν η επίπτωση αν η διάρκεια πτήσης ήταν μεγαλύτερη; Αυτά και άλλα στοιχεία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης η οποία είναι δυνατή με το παρόν υπολογιστικό μοντέλο, ξεφεύγει όμως από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας λόγω περιορισμών χώρου.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον Διευθυντή ΔΑΟΚ Τριφυλίας, κο Αντώνιο Παρασκευόπουλο για τα στοιχεία και τις πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τους συμβατικούς ψεκασμούς δακοκτονίας, που βοήθησαν σημαντικά στη διαμόρφωση του υπολογιστικού μοντέλου με τρόπο που αυτό να ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] FAO, E-agriculture in Action: Drones for Agriculture (Sylvester G. Edr), ISBN 978-92-5-130246-0s
- [2] SESAR Joint undertaking, 2016. European Drones Outlook Study - Unlocking the value for Europe https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European_Drones_Outlook_Study_2016.pdf
- [3] DJI AGRAS MG1 <https://www.dji.com/gr/mg-1>
- [4] Teejet Technologies – Nozzles https://www.teejet.com/CMSImages/TEEJET/documents/catalogs/broadcast_nozzles-m.pdf
- [5] ASABE Standard D497.5 Agricultural Machinery Management Data
- [6] Borgogno Mondino, E., Gajetti, M., 2017. Preliminary considerations about costs and potential market of remote sensing from UAV in the Italian viticulture context. Eur. J. Remote Sens. doi:10.1080/22797254.2017.1328269
- [7] UAVs: Total Cost of Ownership (TCO) <https://www.auav.com.au/articles/UAVs-total-cost-ownership-tco/>
- [8] Pedersen, S.M.; Medici, M.; Anken, T.; Tohidloo, G.; Pedersen, M.F.; Carli, G.; Canavari, M.; Tsiropoulos, Z. and Fountas, S. (2019). Financial and environmental performance of integrated precision farming systems. In: Precision agriculture '19 (Stafford, John V. ed.), Wageningen Academic Publishers, pp. 833–839.
- [9] Petritoli, E., Leccese, F., Ciani, L., 2018. Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles. Sensors (Switzerland) 18, 1–16. doi:10.3390/s18093171

ΜΕΛΕΤΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΛΑΦΡΟΥΣ ΜΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΗ ΕΛΑΦΡΟΥ ΤΥΠΟΥ

Μ. Λαμπρίδη^{1,2}, Δ. Κατέρης¹, Σ. Τζιάκας¹ & Δ. Μπόχτης¹

¹Ινστιτούτο Βιο-οικονομίας και Αγρο-τεχνολογίας (iBO), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), 57001, Θέρμη, Θεσσαλονίκη, e-mail: m.lampridi@certh.gr

²Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της οικονομικής σκοπιμότητας της αντικατάστασης συμβατικών γεωργικών μηχανημάτων και ανθρώπινης εργασίας με «ευφυή» γεωργικά συστήματα. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε υιοθετεί τις αρχές υπολογισμού του κόστους χρήσης των συμβατικών γεωργικών μηχανημάτων. Σε αυτή τη βάση, γίνεται εκτίμηση του κόστους εκτέλεσης μίας συμβατικής καλλιεργητικής εργασίας με τη χρήση ενός ρομποτικού οχήματος για μία σειρά από διαφορετικά σενάρια παραγωγής με βάση την έκταση της καλλιέργειας και την εφαρμογή διαφορετικών συστημάτων λειτουργικής διαχείρισης. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν την επίδραση της λειτουργικής διαχείρισης στην συνολική αποδοτικότητα τέτοιων συστημάτων η οποία με τη σειρά της επηρεάζει το χρόνο εκτέλεσης της εργασίας και το τελικό κόστος της.

Λέξεις κλειδιά: Μη-επανδρωμένο επίγειο όχημα, οικονομική ανάλυση, γεωργία ακριβείας, ρομποτικό σύστημα

ECONOMIC FEASIBILITY ASSESSMENT OF ROBOTIC VEHICLE USE FOR LIGHT SOIL CULTIVATION

M. Lampridi^{1,2}, D. Kateris¹, S. Tziakas¹ & D. Bochtis¹

¹Institute for Bio-economy and Agri-technology (iBO), Center for Research & Technology Hellas (CERTH), 57001, Thermi, Thessaloniki, e-mail: m.lampridi@certh.gr

²Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki

ABSTRACT

The aim of the paper is to assess the economic feasibility of replacing conventional agricultural machinery and human labour with “smart” farming systems. The methodology used adopts the principles of conventional agricultural machinery cost calculation. On this basis, the cost of performing a conventional agricultural operation with the use of a robotic vehicle is estimated for a variety of different production scenarios on the basis of the cultivation size and the application of different operation management schemes. The results highlight the effect of operation management in the overall efficiency of such systems which eventually affects the operation duration and the resulting cost.

Keywords: UGV, economic analysis, precision farming, robotic system

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων συνδέεται με την ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας και τη στροφή σε ένα παραγωγικό μοντέλο όπου όλες οι λειτουργίες είναι αυτοματοποιημένες και διασυνδεδεμένες (Ampatzidis et al., 2017; Bochtis et al., 2015; Bochtis et al., 2014). Για αυτό το λόγο, όλες οι πτυχές, τόσο της παραγωγής όσο και των υπηρεσιών, τείνουν προς τη «ρομποτοποίηση» ώστε να συνεισφέρουν αποτελεσματικότερα στην αυξανόμενη ζήτηση (Qureshi and Syed, 2014; Marinoudi et al., 2019). Η στροφή προς τη ρομποτοποίηση είναι επίσης εμφανής και στον αγροτικό τομέα, αφού η ανάγκη για αύξηση της αποδοτικότητας των γεωργικών εργασιών με την μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση οδηγεί στην εξέλιξη της τεχνολογίας προς ολοκληρωμένα ευφυή γεωργικά συστήματα που αντικαθιστούν τα συμβατικά γεωργικά μηχανήματα και τις αντίστοιχες πρακτικές (Bochtis et al., 2011; Toledo et al., 2014). Τεχνικές γεωργίας ακριβείας που χρησιμοποιούν ρομποτικά γεωργικά συστήματα έχουν εισαχθεί για τη μείωση των εισροών λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική κατάσταση και τις ανάγκες του αγρού (Bongiovanni and Lowenberg-Deboer, 2004). Παρόλα αυτά, όπως συμβαίνει με όλες τις νέες τεχνολογίες, είναι σημαντικό να εξεταστεί η σκοπιμότητα τους ώστε να υποστηριχθεί η υιοθέτηση και η αποδοχή τους από τον ευρύτερο τομέα (Moradi et al., 2018). Επίσης, στο πλαίσιο μιας ευρύτερης αξιολόγησης της αιεφορίας είναι σημαντικό να καθοριστεί η οικονομική σκοπιμότητα των ρομποτικών συστημάτων και να εξεταστεί η σχέση κόστους-οφέλους που χαρακτηρίζει τη χρήση τους.

Στον αγροτικό τομέα, οι Pedersen et al. (2006) επιχείρησαν μια ανάλυση της οικονομικής σκοπιμότητας συγκρίνοντας τρία συμβατικά γεωργικά συστήματα με τα αντίστοιχα αυτόνομα συστήματα καταλήγοντας ότι τα δεύτερα ήταν πιο οικονομικά αποδοτικά σε σχέση με τα συμβατικά σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Οι Toledo et al. (2014) αξιολόγησαν ένα πρότυπο ηλεκτροκίνητο μηχανικό σύστημα ελέγχου ζιζανίων, για να καθορίσουν το ενεργειακό κόστος της λειτουργίας του καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η εξέλιξη των αυτόνομων οχημάτων μπορεί να μειώσει περαιτέρω το ενεργειακό κόστος. Οι Lampridi et al. (2019) πρότειναν μία μεθοδολογία για την οικονομική ανάλυση της απασχόλησης ρομποτικών συστημάτων σε αροτριάιες καλλιέργειες υιοθετώντας τη μεθοδολογία εκτίμησης του κόστους συμβατικών γεωργικών μηχανημάτων.

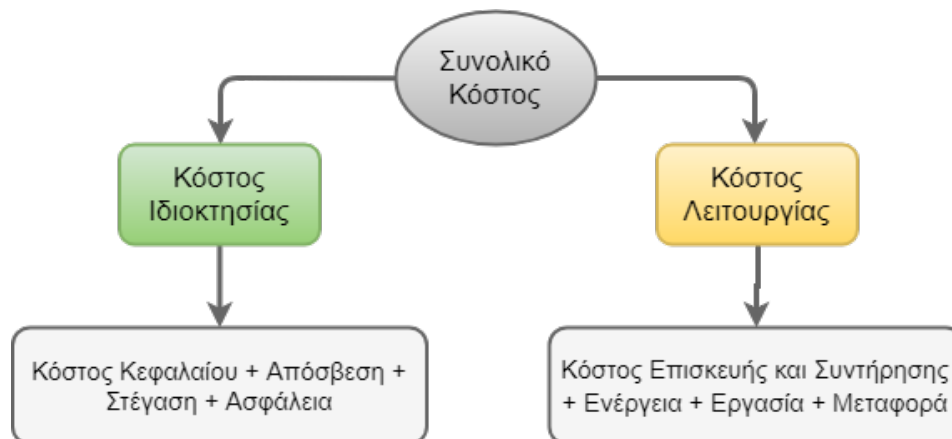


Εικόνα 1. Μη-επανδρωμένο επίγειο όχημα (Unmanned Ground Vehicle-UGV)

Με την παρούσα εργασία επιχειρείται η εξέταση της σκοπιμότητας χρήσης ρομποτικών συστημάτων για μια σειρά από διαφορετικά επιχειρησιακά σχήματα που σχετίζονται με τη λειτουργικότητα ενός ρομποτικού συστήματος. Το ρομποτικό σύστημα που εξετάζεται για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας είναι ένα μη-επανδρωμένο επίγειο όχημα (Unmanned Ground Vehicle-UGV) όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1 που εκτελεί την εργασία της κατεργασίας του εδάφους με καλλιεργητή ελαφρού τύπου (Grimstad and From, 2017). Η εφαρμογή του συστήματος εξετάζεται σε μικρή και μεγάλη κλίμακα και συγκρίνεται με την αντίστοιχη συμβατική εφαρμογή.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Προκειμένου να υπολογιστεί το κόστος χρήσης του ρομποτικού συστήματος για την κατεργασία του εδάφους με καλλιεργητή ελαφρού τύπου χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Το μοντέλο μαζί με τις σχετικές μαθηματικές εξισώσεις περιγράφεται με λεπτομέρεια από τους Lampridi et al. (2019). Κατ' αναλογία με τον υπολογισμό του κόστους εκτέλεσης μιας συμβατικής καλλιεργητικής εργασίας, το συνολικό κόστος αποτελείται από το κόστος ιδιοκτησίας του εξοπλισμού και το κόστος χρήσης του. Το κόστος ιδιοκτησίας αποτελείται από το κόστος κεφαλαίου, το κόστος απόσβεσης καθώς και το κόστος στέγασης και ασφάλειας του εξοπλισμού και του χειριστή. Αυτά τα κόστη μπορούν να χαρακτηριστούν και ως σταθερά κόστη αφού δεν σχετίζονται με την εκτελούμενη εργασία αλλά καθορίζονται από το κόστος αγοράς των μηχανημάτων και άλλων οικονομικών παραμέτρων όπως το επιτόκιο και ο πληθωρισμός.



Σχήμα 1. Μοντέλου Εκτίμησης Κόστους

Από την άλλη πλευρά, το λειτουργικό κόστος καθορίζεται από τη φύση της εκτελούμενης εργασίας. Αποτελείται από το κόστος της ενέργειας, το κόστος εργασίας, το κόστος μεταφοράς και το κόστος επισκευών και συντήρησης. Για τον υπολογισμό του κόστους επισκευών και συντήρησης στην περίπτωση των συμβατικών μηχανημάτων χρησιμοποιούνται τα πρότυπα ASABE (ASABE, 2011). Παρόλα αυτά στην περίπτωση των ρομποτικών συστημάτων δεν μπορούν να ακολουθηθούν αυτά τα πρότυπα. Για αυτό το σκοπό ακολουθήθηκε η προσέγγιση των Bubeck et al. (2016) σύμφωνα με την οποία το κόστος συντήρησης και επισκευών υπολογίζεται ως ποσοστό του αντίστοιχου συμβατικού κόστους.

3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του κόστους εκτέλεσης της κατεργασίας του εδάφους με καλλιεργητή ελαφρού τύπου με τη χρήση ενός μη-επανδρωμένου οχήματος εδάφους σε διαφορετικά συστήματα λειτουργικής διαχείρισης. Με σκοπό τη διατήρηση βάσης αναφοράς τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν σε περίπτωση εκτέλεσης της εργασίας με ένα συμβατικό καλλιεργητικό σύστημα. Το σύστημα εξετάστηκε σε δύο διαφορετικές κλίμακες αναφορικά με την καλλιεργούμενη έκταση. Η μικρή κλίμακα αφορά έκταση 10 εκταρίων (10 ha) ενώ η μεγάλη κλίμακα αφορά έκταση 100 εκταρίων (100 ha). Στην περίπτωση του ρομποτικού συστήματος το ίδιο ρομποτικό όχημα χρησιμοποιείται στην εφαρμογή μικρής και μεγάλης κλίμακας ενώ στην περίπτωση του συμβατικού συστήματος χρησιμοποιούνται διαφορετικοί ελκυστήρες. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του κόστους των σεναρίων βάσης. Πιο συγκεκριμένα για την μικρή κλίμακα χρησιμοποιείται ελκυστήρας ισχύος 40 kw ενώ για τη μεγάλη κλίμακα χρησιμοποιείται ελκυστήρας 80 kw. Και οι δύο ελκυστήρες φέρουν καλλιεργητή ελαφρού τύπου (C-shank). Σε όλα τα σεναρία που εξετάστηκαν το επιτόκιο ήταν 9%, ο πληθωρισμός 4% και η οικονομική ζωή του εξοπλισμού 15 χρόνια.

Πίνακας 1. Παράμετροι εισόδου του οικονομικού μοντέλου

		Σύστημα		
		Ρομποτικό	Συμβατικό Μικρή	Συμβατικό Μεγάλη
Λειτουργικές παραμέτροι αγρού	Πλάτος εργασίας (m)	1,2	2,6	6,0
	Ταχύτητα (km h ⁻¹)	4	8	8
	Κόστος αγοράς (€)	50.000	40.000	130.000
Παράμετροι επένδυσης και ιδιοκτησίας	Κόστος αγοράς παρελκόμενου (€)	1.000	3.000	6.000
	Παραμένουσα αξία (%)	10,9 ^{1,2}	10	10
	Συντελεστής στέγασης	2,25	0,75	0,75
	Συντελεστής ασφάλειας	0,75	0,25	0,25
	Παράγοντες επισκευών και συντήρησης	-	0,003	0,003
Παράμετροι μηχανημάτων		-	2	2
	Παράγοντες επισκευών και συντήρησης παρελκόμενου	0,17	0,17	0,17
	Ισχύς Μηχανής (KW)	2,2	2,2	2,2
	Κόστος ενέργειας (€ KWh ⁻¹)	3,4	40	80
	Κόστος εργασίας (€ h ⁻¹)	0,145	0,496	0,496
		7,5 ¹	15	15

¹ (Lampridi et al., 2019) ² (Propfe et al., 2012)

Το μη-επανδρωμένο όχημα είχε συνολική ισχύ κινητήρα 3,4 kw και φέρει συσσωρευτή λιθίου-ιόντων 40V χωρητικότητας 70 Ah. Λαμβάνοντας υπόψη ότι για την επέκταση της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή θα αποφορτίζεται μέχρι το 80% της χωρητικότητας της πριν τη φόρτιση και ότι το όχημα δεν λειτουργεί πάντα στο μέγιστο της ισχύος του, με βάση πειραματικές μετρήσεις σε διάφορους τύπους εδάφους και διάφορες καταστάσεις του εδάφους (σε σχέση με την υγρασία του) το όχημα μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ως το ασφαλές όριο των 1,34 h. Επιπρόσθετα, η μέση διάρκεια φόρτισης μετρήθηκε στις 3,7 h, θεωρώντας ωριαίο ρυθμό φόρτισης 15 A/h. Η συναρμολόγηση και την αποσυναρμολόγηση του εξοπλισμού απαιτεί συνολικά 2 h. Το όχημα είναι εξοπλισμένο με καλλιεργητή ελαφρού τύπου. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι το όχημα έχει τη δυνατότητα να φέρει και δεύτερο συσσωρευτή χωρίς να χρειάζεται προσαρμογή, διπλασιάζοντας έτσι τον χρόνο λειτουργίας του. Ένας εργαζόμενος θεωρήθηκε για την εποπτεία του εξοπλισμού, για τη φόρτιση και την αντικατάσταση των συσσωρευτών. Το ωρομίσθιο του θεωρήθηκε το μισό από το αντίστοιχο συμβατικό λόγω της δυνατότητας παράλληλης εργασίας.

Για την παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σύγκριση των σεναρίων βάσης με πέντε εναλλακτικά σενάρια που αφορούν την λειτουργικότητα του ρομποτικού συστήματος σε εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν εναλλακτικά σενάρια που αυξάνουν την απόδοση του ρομποτικού συστήματος. Τα εναλλακτικά σενάρια περιλαμβάνουν:

Σενάριο 1: Εγκατάσταση δεύτερου συσσωρευτή της ίδιας χωρητικότητας με σκοπό το διπλασιασμό της διάρκειας εργασίας.

Σενάριο 2: Λειτουργία των ρομποτικών οχημάτων που φέρουν ένα συσσωρευτή σε ζευγάρια. Σε αυτό το σενάριο για κάθε όχημα που επιχειρεί στον αγρό, υπάρχει ένα ακόμα που φορτίζει σε αναμονή ώστε να αντικαταστήσει αυτό που επιχειρεί. Με αυτό το σενάριο ο νεκρός χρόνος φόρτισης μειώνεται από 3,7 h σε 1,02 h.

Σενάριο 3: Λειτουργία των ρομποτικών οχημάτων που φέρουν δύο συσσωρευτές σε ζευγάρια. Το σενάριο αυτό είναι ίδιο με το προηγούμενο αλλά διπλασιάζεται ο χρόνος λειτουργίας του ρομποτικού συστήματος.

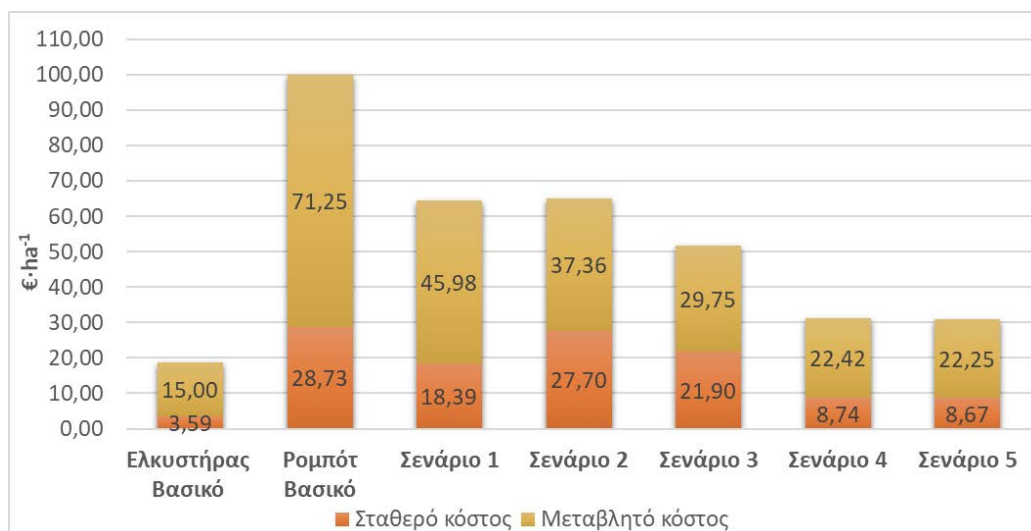
Σενάριο 4: Αντικατάσταση του συσσωρευτή του οχήματος που επιχειρεί (το όχημα φέρει ένα συσσωρευτή). Σε αυτό το σενάριο το όχημα φέρει έναν συσσωρευτή ο οποίος αντικαθίσταται μόλις αποφορτιστεί ώστε να αποφευχθεί ο νεκρός χρόνος της φόρτισης. Παρόλα αυτά και σε αυτό το σενάριο θεωρείται νεκρός χρόνος 0,1 h ο οποίος χρειάζεται για την αντικατάσταση του συσσωρευτή.

Σενάριο 5: Αντικατάσταση του συσσωρευτή του οχήματος που επιχειρεί (το όχημα φέρει δύο συσσωρευτές). Το τελευταίο σενάριο είναι ίδιο με το σενάριο 4 με τη διαφορά ότι το όχημα φέρει δύο συσσωρευτές. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται νεκρός χρόνος ίσος με 0,2 h.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

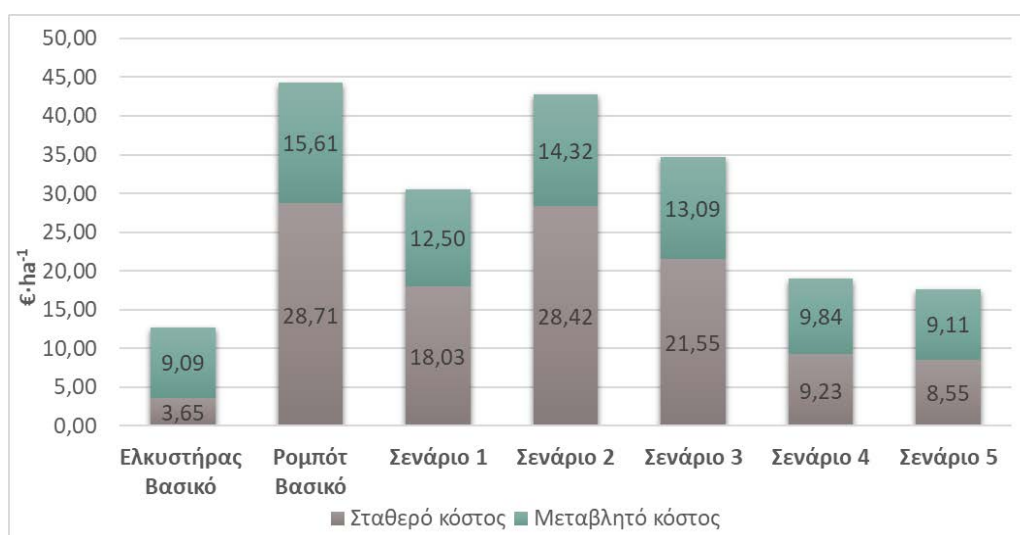
Το Σχήμα 2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για τα σενάρια που αφορούν την εφαρμογή μικρής κλίμακας. Λαμβάνοντας υπόψη το σενάριο βάσης, το ρομποτικό σύστημα είναι 5,3 φορές πιο ακριβό από το συμβατικό.

Αυτό οφείλεται στην χαμηλή απόδοση του ρομποτικού συστήματος (περίπου 25,6%) που συνδέεται με τη μικρή διάρκεια συνεχούς λειτουργίας πριν χρειαστεί φόρτιση (1,34 h) και τη μεγάλη διάρκεια φόρτισης η οποία ανέρχεται συνολικά σε 59,20 h για την ολοκλήρωση της εργασίας.



Σχήμα 2. Συνολικό κόστος – Εφαρμογή Μικρής Κλίμακας (10ha)

Το συνολικό λειτουργικό κόστος ανέρχεται σε 99,97 €·ha⁻¹ για το ρομποτικό σύστημα ενώ το αντίστοιχο κόστος για το συμβατικό ανέρχεται σε 18,58 €·ha⁻¹. Παρόλα αυτά, με την εγκατάσταση ενός δεύτερου συσσωρευτή (Σενάριο 1) το συνολικό κόστος μειώνεται σε 64,37 €·ha⁻¹ και ο λόγος σε 3,46 φορές, ενώ η απόδοση του συστήματος αυξάνεται σε 39,3%. Η απόδοση του συστήματος αυξάνεται περαιτέρω (52,18%) όταν τα ρομποτικά οχήματα επιχειρούν σε ζεύγη φέροντας ένα συσσωρευτή το καθένα (Σενάριο 2), αλλά λόγω του υψηλού κόστους επένδυσης το συνολικό κόστος παραμένει 3,5 φορές πιο μεγάλο από το συμβατικό. Η απόδοση του συστήματος φτάνει στο 66% στο σενάριο 3 ενώ το κόστος μειώνεται στο 51,65 €·ha⁻¹. Στα τελευταία σενάρια (4 και 5) η απόδοση αυξάνεται στο 82,67% και 83,3% αντίστοιχα, γίνεται δηλαδή παρόμοια με την απόδοση των συμβατικών συστημάτων. Το σχετικό κόστος είναι 1,7 φορές πιο μεγάλο από το αντίστοιχο συμβατικό (31,17 €·ha⁻¹ για το σενάριο 4 και 30,92 €·ha⁻¹ για το σενάριο 5).



Σχήμα 3. Συνολικό κόστος – Εφαρμογή Μεγάλης Κλίμακας (100ha)

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή μεγάλης κλίμακας. Κατ' αρχήν, το ρομποτικό σύστημα είναι 3,48 φορές πιο ακριβό από το συμβατικό, απαιτώντας 7 μονάδες για να εκτελεστεί η εργασία σε δεδομένο χρονικό διάστημα, παρόλα αυτά, ο λόγος αυτός μειώνεται σε 2,4 όταν εγκαθίσταται δεύτερος συσσωρευτής στο μη-επανδρωμένο όχημα (Σενάριο 1). Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός των απαιτούμενων οχημάτων μειώνεται σε 5. Στο σενάριο 2, χρειάζονται 8 οχήματα για να εκτελέσουν την εργασία με κόστος $42,74 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$, (λαμβάνοντας υπ' όψη ότι 4 οχήματα επιχειρούν και 4 βρίσκονται σε αναμονή για να αντικαταστήσουν), υπογραμμίζοντας το γεγονός ότι το υψηλό κόστος επένδυσης είναι καθοριστικός παράγοντας για τη σκοπιμότητα των ρομποτικών συστημάτων. Αντίστοιχα στο σενάριο 3 το κόστος μειώνεται σε $34,64 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$, εξαιτίας της αυξημένης απόδοσης του συστήματος (50,8% στο σενάριο 2 και 67,1% στο σενάριο 3). Όπως και στην περίπτωση της εφαρμογής μικρής κλίμακας, τα σενάρια 4 και 5 έχουν την μεγαλύτερη απόδοση (78,3% και 84,5% αντίστοιχα) ενώ το κόστος τους είναι μόνο 1,49 και 1,38 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο συμβατικό αναδεικνύοντας τις δυνατότητες του ρομποτικού συστήματος.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία έχει σαν σκοπό να εξελίξει την εξέταση της σκοπιμότητας της υιοθέτησης μη-επανδρωμένων οχημάτων σε συμβατικές καλλιεργητικές εργασίες. Σύμφωνα με τα σενάρια που παρουσιάστηκαν υπάρχει ένα ελπιδοφόρο δυναμικό, εντούτοις, το κόστος αυτών των συστημάτων, τα οποία ακόμα δεν παράγονται μαζικά, είναι υψηλό καθιστώντας τα ασύμφορα σε σύγκριση με τα συμβατικά. Επιπρόσθετα, υπάρχουν ακόμα τομείς που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης για τον ακριβή υπολογισμό του κόστους, όπως για παράδειγμα για τον υπολογισμό του κόστους συντήρησης και επισκευών και της παραμένουσας αξίας. Ωστόσο, τεχνικές βελτιώσεις μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση της αποτελεσματικότητάς τους και στην ενδεχόμενη αποδέσμευση τους από τον χειριστή μειώνοντας έτσι περαιτέρω το λειτουργικό κόστος.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το έργο ““Ερευνητική Συνέργεια για την Αντιμετώπιση των Μεγάλων Προκλήσεων του Πλέγματος (NEXUS): Ενέργεια-Περιβάλλον-Αγροτική Παραγωγή (Τροφή, Νερό, Υλικά) (NEXUS)”, Χρηματοδοτήθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) - Κωδικός έργου MIS 5002496.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ampatzidis, Y., De Bellis, L., & Luvisi, A. (2017). iPathology: Robotic Applications and Management of Plants and Plant Diseases. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su9061010>
- ASABE. (2011). Agricultural Machinery Management Data. In *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. <https://doi.org/10.1126/science.85.2210.446-a>
- Bochtis, D. D., Sørensen, C. G., Jørgensen, R. N., Nørremark, M., Hameed, I. A., & Swain, K. C. (2011). Robotic weed monitoring. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*. <https://doi.org/10.1080/09064711003796428>

- Bochtis, D., Griepentrog, H. W., Vougioukas, S., Busato, P., Berruto, R., & Zhou, K. (2015). Route planning for orchard operations. *Computers and Electronics in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.024>
- Bochtis, Dionysis D., Sørensen, C. G. C., & Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.012>
- Bongiovanni, R., & Lowenberg-Deboer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>
- Bubeck, S., Tomaschek, J., & Fahl, U. (2016). Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany. *Transport Policy*, 50, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.05.012>
- Grimstad, L., & From, P. (2017). The Thorvald II Agricultural Robotic System. *Robotics*, 6(4), 24. <https://doi.org/10.3390/robotics6040024>
- Lampridi, M. G., Kateris, D., Vasileiadis, G., Marinoudi, V., Pearson, S., Sørensen, C. G., ... Bochtis, D. (2019). A Case-Based Economic Assessment of Robotics Employment in Precision Arable Farming. *Agronomy*, 9(4), 175. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040175>
- Marinoudi, V., Sørensen, C. G., Pearson, S., & Bochtis, D. (2019). Robotics and labour in agriculture. A context consideration. *Biosystems Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.013>
- Moradi, M., Moradi, M., & Bayat, F. (2018). On robot acceptance and adoption: A case study. *2018 Artificial Intelligence and Robotics, IRANOPEN 2018 and the 8th Conference on Artificial Intelligence and Robotics*, 21–25. <https://doi.org/10.1109/RIOS.2018.8406626>
- Pedersen, S. M., Fountas, S., Have, H., & Blackmore, B. S. (2006). Agricultural robots - System analysis and economic feasibility. *Precision Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/s11119-006-9014-9>
- Propfe, B., Redelbach, M., Santini, D. J., Friedrich, H., Characteristics, V., Sh, M., & Mercedes, S. (2012). Cost Analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values Implementing Agreement on Hybrid and Electric Vehicles. *Proceedings of 26th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, 5, 6862. <https://doi.org/10.3390/wevj5040886>
- Qureshi, M. O., & Syed, R. S. (2014). The impact of robotics on employment and motivation of employees in the service sector, with special reference to health care. *Safety and Health at Work*. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.07.003>
- Toledo, O. M., Steward, B. L., Gai, J., & Tang, L. (2014). Techno-economic analysis of future precision field robots. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2014, ASABE 2014*. Montreal, Quebec Canada, 13-15, July, 2014.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΣΕ ΦΥΛΛΑ ΚΑΡΥΔΙΑΣ ΜΟΛΥΣΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΩΣΗ

**Α. Αναγνώστης^{1,2}, Γ. Ασημινάρη¹, Γ. Δόλιας¹, Χ. Αρβανίτης¹, Ε. Παπαγεωργίου^{1,3},
Χ. Μυρεσιώτης¹ & Δ. Μπόχτης¹**

¹Ινστιτούτο Βιο-οικονομίας και Αγρό-τεχνολογίας, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής
Ανάπτυξης, 6^ο χιλ. Χαριλάου-Θέρμης, Θεσσαλονίκη, e-mail:
a.anagnostis@certh.gr, athananagno@auth.gr

²Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, 35100, Λαμία,

³Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Τεχνολογίας, 41100 Λάρισα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανθράκωση είναι μια μυκητιακή νόσος που βλάπτει έντονα τη φυτοκόμη των δέντρων. Σκοπός της μελέτης είναι η σύγκριση των πιο γνωστών αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (MM) για ταξινόμηση, με σκοπό να ερευνηθεί το κατά πόσο είναι αποτελεσματικός ένας ταξινομητής βασισμένος σε εικόνες. Διάφοροι αλγόριθμοι MM αξιολογήθηκαν. Η σύγκριση διεξάγεται με βάση διάφορους μετρητές απόδοσης και τελικώς συζητείται το αν μπορούν να εφαρμοστούν σε αληθινές εφαρμογές.

Λέξεις κλειδιά: μηχανή μάθησης, ταξινόμηση εικόνων, ανθράκωση, δέντρα καρυδιάς

COMPARISON OF IMAGE CLASSIFICATION MACHINE LEARNING ALGORITHMS ON ANTHRACNOSE INFECTED WALNUT TREE LEAVES

**A. Anagnostis^{1,2}, G. Asiminari¹, G. Dolias¹, C. Arvanitis¹, E. Papageorgiou^{1,3}, Ch.
Myresiotis¹ & D. Bochtis¹**

¹Institute for Bio-economy and Agri-technology, Center for Research and Technology Hellas, 6th Km
Charilaou-Thermi RD, Thessaloniki, e-mail: a.anagnostis@certh.gr, athananagno@auth.gr

²University of Thessaly, Department of Computer Science, 35100, Lamia,

³University of Thessaly, Faculty of Technology, 41100 Larisa,

ABSTRACT

Anthracnose is a fungal disease that damages intensively the canopy of trees. Purpose of this study is to compare the most famous ML algorithms for classification, in order to investigate the effectiveness of an image-based classifier. Various machine learning algorithms were evaluated. The comparison is conducted based on several performance metrics and finally, the applicability is discussed for real-life applications.

Keywords: machine learning, image classification, anthracnose, walnut tree

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μυκητιακές νόσοι αποτελούν ένα βασικό πρόβλημα στην αγροτική παραγωγή και κυρίως στις καλλιέργειες υψηλής αξίας, όπως οι δενδροειδείς. Όταν το δέντρο προσβάλλεται από μολύνσεις, η παραγωγή των καρπών μειώνεται σημαντικά και ο οικονομικός αντίκτυπος μπορεί να είναι

καταστροφικός. Ως κομμάτι του κλάδου της γεωργίας ακριβείας, η αυτόματη ανίχνευση και η ταξινόμηση της ασθένειας του φυτού μπορεί να επιλύσει αυτό το πρόβλημα με συστήματα έγκαιρης ανίχνευσης χωρίς επιτήρηση, τα οποία μπορούν να ταυτοποιήσουν την παρουσία της ασθένειας στα φύλλα των δέντρων και να την ταξινομήσουν κατάλληλα. Η εξέλιξη της μηχανικής εκμάθησης τα περασμένα χρόνια έχει ενισχύσει σημαντικά την πρόοδο στο ερευνητικό αυτό κομμάτι (Bharate & Shirdhonkar 2018; Liakos et al. 2018).

Διάφορες μελέτες μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία που αφορούν προσεγγίσεις της μηχανικής μάθησης για τυποποίηση ασθενειών των φύλλων βασισμένη σε εικόνες. Η ανίχνευση ασθενειών των φύλλων για διαφορετικά είδη φύλλων και ασθενειών έχει ερευνηθεί από κλασικούς αλγόριθμους μηχανικής μάθησης όπως μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (support vector machines, SVM) και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα οπίσθιας διάδοσης (back-propagation artificial neural networks, ANN) επιτυγχάνοντας ακρίβεια της τάξης του 88%-92% (Ramya & Lydia 2016), νευρωνικά δίκτυα πρόσω-τροφοδότησης (feed forward neural network, FFNN), κβαντισμένα διανύσματα μάθησης (learning vector quantization, LVQ) και δίκτυα ακτινικής συνάρτησης βάσης (radial basis function networks, RBF) με ακρίβεια 56.7%-90,7% (Muthukannan et al. 2015), προηγμένα βαθιά υπολειπόμενα νευρωνικά δίκτυα (advanced deep residual neural networks) με ακρίβεια έως και 96% (Picon et al. 2018), καθώς και βαθιά μάθησης μέθοδοι (deep learning methods, DL) όπως συνελκτικάνευρωνικά δίκτυα (convolutional neural networks CNN) τα οποία κατάφεραν να επιτύχουν 96.3% ακρίβεια (Mg et al. 2017).

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η τυποποίηση του χαρακτηρισμού της ασθένειας της ανθράκωσης σε φύλλα δέντρων καρυδιάς, με εικόνες που συλλέχθηκαν σε πραγματικές συνθήκες. Παρουσιάζεται μια διερευνητική ανάλυση δοκιμάζοντας και αξιολογώντας τους πιο γνωστούς αλγόριθμους μηχανικής μάθησης για ταξινόμηση. Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας θα οδηγήσει σε καλύτερη κατανόηση των ικανοτήτων της κάθε μεθόδου για το συγκεκριμένο πρόβλημα και θα μας δείξει τη σωστή κατεύθυνση για περαιτέρω διερεύνηση πιο σύνθετων προσεγγίσεων.

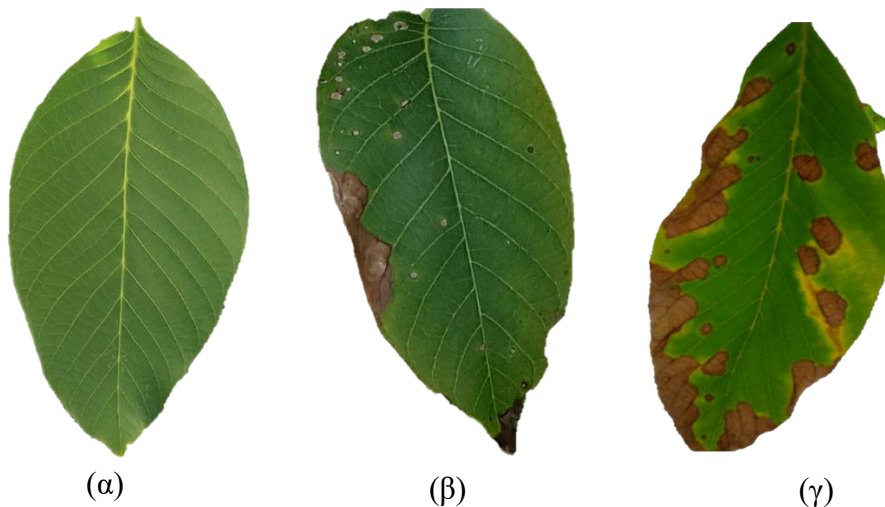
Η δομή αυτής της παρουσίασης είναι η εξής: στην Παράγραφο 2 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την απόκτηση και την προετοιμασία των δεδομένων, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης που δοκιμάστηκαν και οι μετρητές απόδοσης που χρησιμοποιήθηκαν για αξιολόγηση, στην Παράγραφο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ερευνητικής μελέτης και τέλος, στην παράγραφο 4 γίνεται μια σύζητηση καθώς και παρουσίαση των συμπερασμάτων της μελέτης αυτής.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η ανθράκωση εμφανίζεται στη μορφή των καφέ ή καφέ-κίτρινων στιγμάτων στα φύλλα της καρυδιάς. Τα στίγματα συνήθως εμφανίζονται ως κηλίδες στην επιφάνεια ή καλύπτουν την περίμετρο του φύλλου. Για το ανθρώπινο μάτι, τα συμπτώματα της ανθράκωσης (ή παρόμοιων ασθενειών) είναι εύκολο να ανιχνευτούν. Ο σκοπός είναι να βρεθεί μια μεθοδολογία μηχανικής εκμάθησης που να μπορεί να αποδίδει εξίσου καλά με την ανθρώπινη αντίληψη, ώστε η διαδικασία αναγνώρισης να μπορεί να αυτοματοποιηθεί με απώτερο στόχο την αυτόματη χαρτογράφηση ολόκληρου οπωρώνα. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

2.1 Απόκτηση δεδομένων

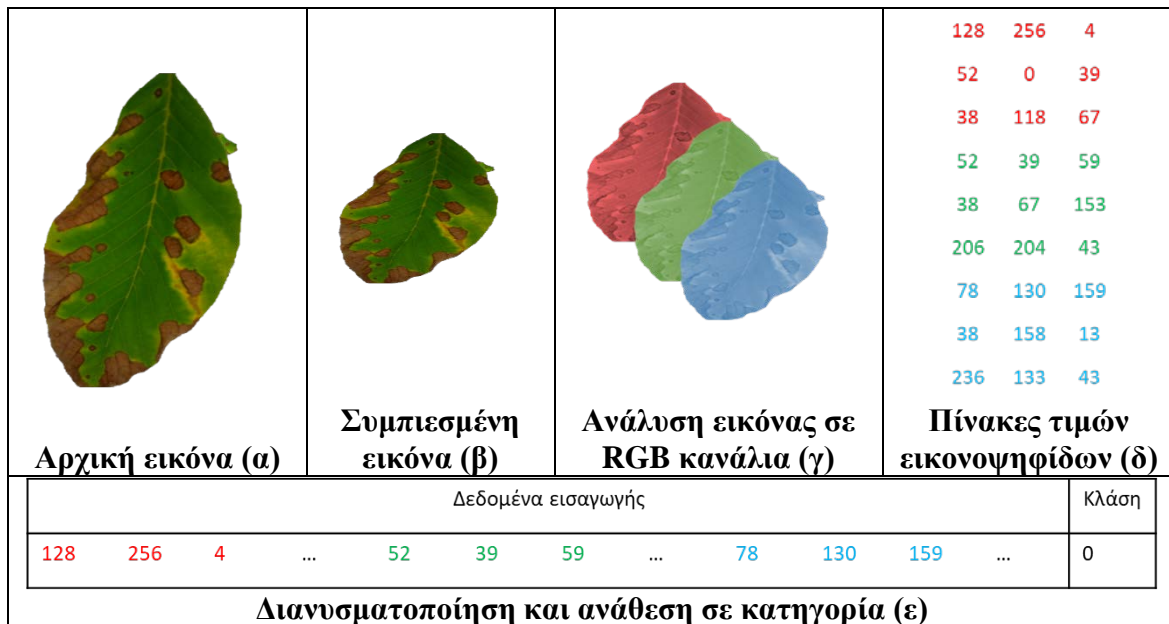
Η ταξινόμηση με βάση τις εικόνες απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό δεδομένων με διακριτά χαρακτηριστικά έτσι ώστε να εκπαιδευτεί σωστά το μοντέλο και να μπορεί να περιγράψει μια κλάση. Συνολικά 4.000 φωτογραφίες συλλέχθηκαν από ένα οπωρώνα με δέντρα καρυδιάς που βρίσκεται στον Ριζόμυλο Βόλου, Ελλάδα. Τα δεδομένα διαχωρίστηκαν σε ίσο αριθμό εικόνων έτσι ώστε μισές εικόνες να περιέχουν φύλλα τα οποία έχουν μολυνθεί από ανθράκωση και οι άλλες μισές υγιή φύλλα. Αξίζει να τονιστεί ότι ορισμένες φωτογραφίες από μολυσμένα φύλλα αντιστοιχούν σε ελαφρά προσβεβλημένα φύλλα. Στο Σχήμα 1(α) παρατηρούμε μια εικόνα από ένα υγιές φύλλο, στο Σχήμα 1(β) ένα ελαφρά προσβεβλημένο από ανθράκωση φύλλο και στο σχήμα 1(γ) ένα φύλλο με υψηλή προσβολή από ανθράκωση.



Σχήμα 1. Φύλλα καρυδιάς χωρίς ανθράκωση (α) , με ελαφρά προσβολή (β) και με υψηλή προσβολή από ανθράκωση (γ).

2.2 Προετοιμασία δεδομένων

Αρχικά το μέγεθος κάθε εικόνας μετασχηματίστηκε σε ανάλυση εικονοψηφίδων 128x128. Αυτή η ανάλυση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να παραμείνουν όλα τα χαρακτηριστικά του φύλλου και αρκετά μικρή ώστε να εκπαιδευτεί το μοντέλο στον επιθυμητό χρόνο. Η πληροφορία του χρώματος είναι σημαντική για την ταυτοποίηση της ανθράκωσης, συνεπώς όλες οι εικόνες χρησιμοποιούνται στους αλγόριθμους σε μορφή RGB, δηλαδή 3 κανάλια (κόκκινο, πράσινο, μπλε) από 128x128 εικονοψηφίδες το κάθε ένα. Κάθε εικόνα στη συνέχεια μετασχηματίζεται έτσι ώστε το σχήμα της από 128x128x3 να γίνει ένα διάνυσμα 1x49.152. Αυτό διεξήχθη για κάθε εικόνα σχηματίζοντας τελικά έναν πίνακα 2.000x49.152 που περιέχει όλα τα χαρακτηριστικά των εικονοψηφίδων. Μια τελευταία στήλη προστέθηκε στον πίνακα η οποία περιείχε την ετικέτα της κάθε εικόνας (π.χ 'με ανθράκωση' ή 'υγιές') επομένως ο πίνακας αποκτά διαστάσεις 2.000x49.153. Η στήλη που δηλώνει την ετικέτα της κάθε εικόνας η οποία είναι κατηγοριοποιημένη, μετατρέπεται σε δυαδική μορφή, '0' για ανθράκωση και '1' για υγιή φύλλα. Τελικώς, οι γραμμές από τα δεδομένα ανακατεύονται δύο φορές με δύο διαφορετικές μεθόδους γεννητριών τυχαιότητας με σκοπό να αποφευχθεί ένα μεροληπτικό δείγμα που θα οδηγούσε σε ακατάλληλα μοντέλα εκπαίδευσης. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα βήματα της προεπεξεργασίας μιας εικόνας ενός φύλλου με ανθράκωση. Η αρχική εικόνα (α) μετατρέπεται σε εικόνα με κλίμακα 128x128(β). Στη συνέχεια διαιρείται σε RGB κανάλια (γ) ώστε να δημιουργηθούν οι πίνακες με τις τιμές των εικονοψηφίδων (δ), και τέλος διανυσματοποιούνται ώστε να μπορεί να προστεθεί η αντίστοιχη κλάση και να είναι σε τελική μορφή για τους αλγόριθμους (ε).



Σχήμα 2. Προεπεξεργασία εικόνων από την αρχική μορφή (α), σε κλίμακα (β), σε RGB κανάλια (γ), σε ανάθεση τιμών σε πίνακες (δ) και τέλος σε διανυσματοποίηση και ανάθεση κλάσης (ε).

2.3 Διαχωρισμός δεδομένων

Πριν την οποιαδήποτε εφαρμογή των μοντέλων, τα δεδομένα χωρίστηκαν σε τρία τμήματα. Αρχικά, τα δεδομένα χωρίστηκαν σε αυτά που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του μοντέλου και σε αυτά που θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του μοντέλου με ποσοστό 80/20 αντίστοιχα. Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του μοντέλου είναι τελείως κρυφά από την διαδικασία εκπαίδευσης του, έτσι ώστε να ληφθούν προβλέψεις οι οποίες είναι άγνωστες στον εκπαιδευμένο ταξινομητή. Το δεύτερο χόρισμα αφορά τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση από τα οποία το 20% χρησιμοποιείται για επαλήθευση. Ως αποτέλεσμα, θα αποφευχθεί η υπερφόρτωση του αλγόριθμου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης ώστε να διατηρηθεί η καλή γενίκευση του μοντέλου. Αφού το μοντέλο εκπαιδευτεί, τα δεδομένα που κρατήθηκαν για τον έλεγχό του θα χρησιμοποιηθούν για να γίνουν προβλέψεις βάσει των οποίων θα προσδιοριστεί η ακρίβειά του.

2.4 Μέθοδοι μηχανικής μάθησης

Για τη μελέτη μας, επιλέχθηκαν 11 από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους μηχανικής μάθησης με σκοπό να αναδειχθεί πόσο καλά κάθε μια από τις διαφορετικές μεθοδολογίες μπορεί να επιτύχει εξαρτώμενες αποδόσεις. Ονομαστικά αλγόριθμοι:

1. Gaussian Naïve Bayes (GNB) (Russell & Norvig 2002),
2. Linear Discriminant Analysis (LDA) (Büyükoztürk & Çokluk-Bökeoğlu 2008),
3. k-Nearest Neighbours (kNN) (Altman 1992),
4. Decision Tree (DT) (Breiman 1984),
5. Random Forest (RF) (Breiman 2001),
6. Adaboost, (Ada-b) (Freund & Schapire 1996),
7. Gradient-Bosting (Grad-B) (Mason et al. 1999),
8. Δύο παραλλαγές των Support vector machines (SVM & nu-SVM) (Vapnik 1999),
9. Δυο είδη της κατηγορίας Artificial Neural Networks (ANN) (McCulloch & Pitts 1943),
10. Ένας multi-layer perceptron (MLP) με ένα κρυμμένο στρώμα 100 διακλαδώσεων και
11. Βαθύ νευρωνικό δίκτυο (deep neural network DNN) με αρχιτεκτονική 5 στρωμάτων διάταξης 8,16,16,16,16 και με 50% ποσοστό εγκατάλειψης ανάκρυμμένο στρώμα.

2.5 Μετρητές απόδοσης

Οι μετρητές απόδοσης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη περιγράφονται σε αυτήν την παράγραφο. Αφού εκπαιδευτεί ο ταξινομητής, προβλέπει την κλάση μιας νέας εισόδου από τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για έλεγχο. Με βάση την πρόβλεψη και την πραγματική κλάση στην οποία ανήκει, η πρόβλεψη μπορεί να είναι αληθινά θετική (truepositive, TP) ή αληθινά αρνητική (truenegative, TN) αν ταξινομήθηκε σωστά ή ψευδώς θετική (falsepositive, FP) ή ψευδώς αρνητική (falsenegative, FN) αν δεν ταξινομήθηκε σωστά.

Η ορθότητα (accuracy) είναι ο πιο εύληπτος μετρητής, όσον αφορά τα συμμετρικά δεδομένα, προσδιορίζεται ως ο λόγος των σωστά προβλεπόμενων παρατηρήσεων προς τις συνολικές παρατηρήσεις και ορίζεται ως:

$$\text{accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Η ακρίβεια (precision) είναι ο λόγος των σωστά προβλεπόμενων θετικών παρατηρήσεων προς τις συνολικές προβλεπόμενες θετικές παρατηρήσεις και ορίζεται ως:

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

Η ανάκληση (recall) είναι ο λόγος των σωστά προβλεπόμενων θετικών παρατηρήσεων προς όλες τις παρατηρήσεις στην συγκεκριμένη κλάση και ορίζεται ως:

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

Το F1score, το οποίο προτιμάται όταν η διανομή στις κλάσεις είναι μη ισορροπημένη, είναι ο σταθμικός μέσος της ακρίβειας (precision) και της ανάκλησης (recall) και ορίζεται ως:

$$F1 = 2 \frac{\text{Recall} \cdot \text{Precision}}{\text{Recall} + \text{Precision}}$$

Τέλος η λογαριθμική απώλεια (logarithmicloss) μετράει την απόδοση του μοντέλου ταξινόμησης. Σε τέτοιου είδους μοντέλα, η πρόβλεψη δίνεται σαν μια πιθανότητα με τιμή από 0 έως 1. Η λογαριθμική απώλεια αυξάνεται καθώς η προβλεφθείσα πιθανότητα αποκλίνει από την πραγματική τιμή με ιδανικό στόχο να ελαχιστοποιείται στο 0. Μαθηματικά η λογαριθμική απώλεια για δυαδική ταξινόμηση για μια συγκεκριμένη παρατήρηση προσδιορίζεται σαν:

$$-(y \log(p) + (1 - y) \log(1 - p))$$

Όπου γείναι ένας δυαδικός δείκτης (0 ή 1) που δείχνει σε ποια από τις δυο κλάσεις ανήκει η δεδομένη παρατήρηση και ρείναι η πιθανότητα που προβλέφθηκε από το μοντέλο για το αν η δοσμένη πιθανότητα ανήκει στη συγκεκριμένη κλάση.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

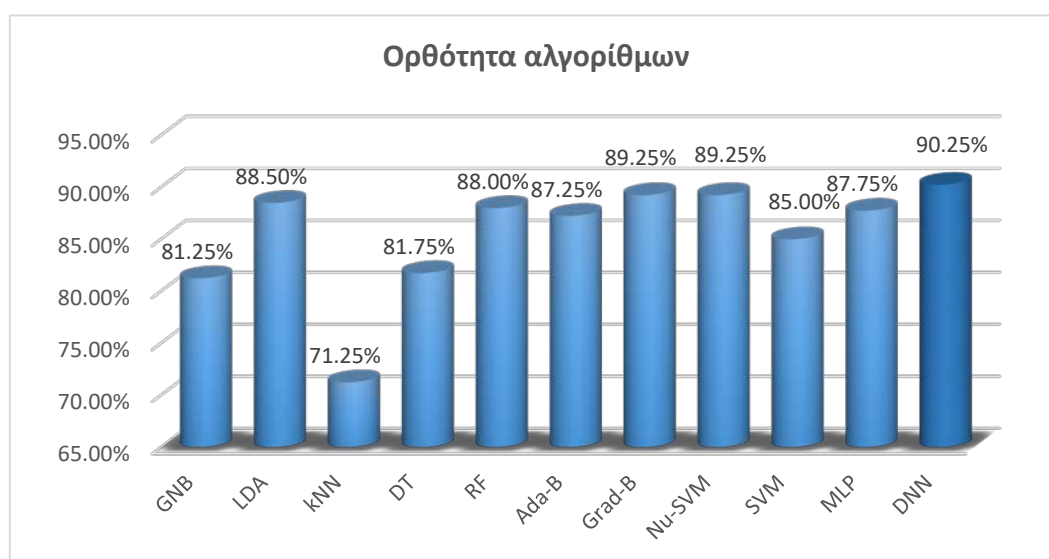
Τα αποτελέσματα των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης παρουσιάζονται σε αυτή την παράγραφο. Όλοι οι αλγόριθμοι εκπαιδεύτηκαν σε Nvidia Titan 1080 Ti και προγραμματίστηκαν σε Python με τις βιβλιοθήκες Sci-Kit Learn, Keras (με Tensorflow), Pandas και Numpy. Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των αλγορίθμων.

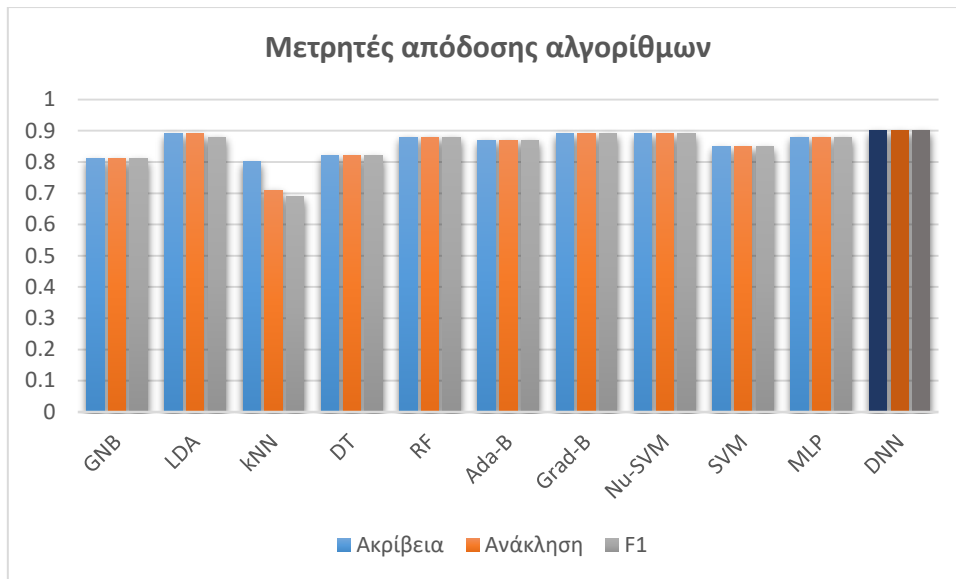
Πίνακας 1.Μετρητές απόδοσης για τη σύγκριση των αλγορίθμων των μηχανών μάθησης.

Αλγόριθμοι	Ορθότητα	Ακρίβεια	Ανάκλιση	F1	Λογαριθμική απώλεια
<i>GNB</i>	81.25%	0.81	0.81	0.81	6.479
<i>LDA</i>	88.50%	0.89	0.89	0.88	0.532
<i>kNN</i>	71.25%	0.8	0.71	0.69	4.503
<i>DT</i>	81.75%	0.82	0.82	0.82	6.303
<i>RF</i>	88.00%	0.88	0.88	0.88	0.369
<i>Ada-B</i>	87.25%	0.87	0.87	0.87	0.631
<i>Grad-B</i>	89.25%	0.89	0.89	0.89	0.247
<i>Nu-SVM</i>	89.25%	0.89	0.89	0.89	0.263
<i>SVM</i>	85.00%	0.85	0.85	0.85	0.338
<i>MLP</i>	87.75%	0.88	0.88	0.88	3.256
<i>DNN</i>	90.25%	0.9	0.9	0.9	0.295

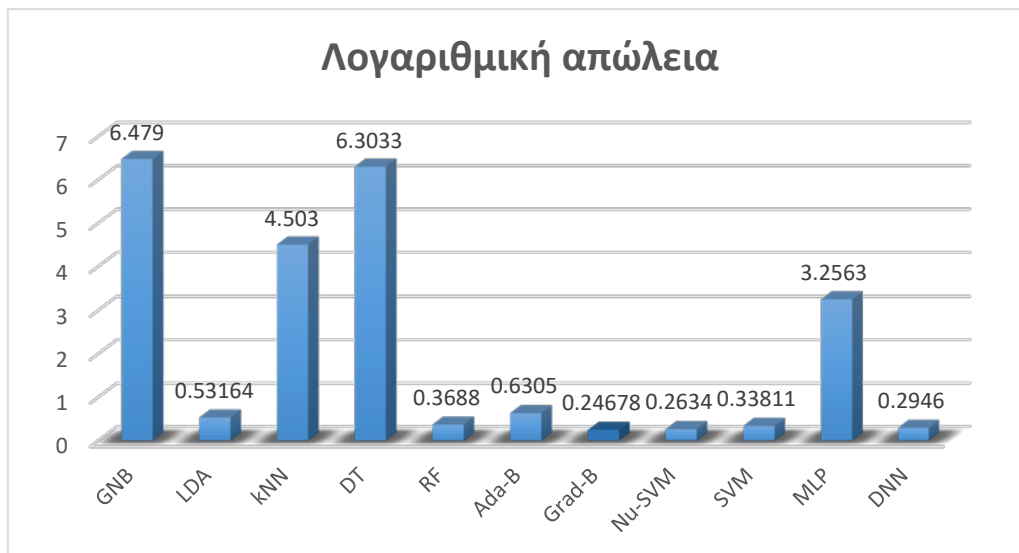
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται μια σύγκριση των μετρητών απόδοσης των αλγορίθμων που έχουν επιτύχει οι αλγόριθμοι. Εν συνεχεία, στο σχήμα 4 απεικονίζεται η ορθότητα εκάστου αλγόριθμου επίδοσης, καθώς επίσης στο σχήμα 5 η λογαριθμική απώλεια των προαναφερθέντων αλγορίθμων. Με βάση τα σχήματα 4 και 5, την πιο αποδοτική αρχιτεκτονική την έχει το βαθύ νευρωνικό δίκτυο, το οποίο εμφανίζει την μέγιστη ορθότητα και την ελάχιστη λογαριθμική απώλεια σε σύγκριση με τους υπόλοιπους αλγόριθμους.

Το βαθύ νευρωνικό δίκτυο(DNN), οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (SVM) και η μέθοδος βελτίωσης κλίσης (gradient boosting) πέτυχαν την καλύτερη απόδοση. Αυτοί οι τρεις αλγόριθμοι μπόρεσαν να πετύχουν μια χαμηλή λογαριθμική απώλεια, παρόλα αυτά ο χρόνος εκπαίδευσης του βαθύως νευρωνικού δικτύου ήταν πολύ πιο μικρός σε σύγκριση με τους άλλους και συγκεκριμένα 74s. Το βαθύ νευρωνικό δίκτυο φαίνεται ότι είναι ο καλύτερος αλγόριθμος για αυτή την εφαρμογή.

**Σχήμα 3.** Σύγκριση ορθότητας των αλγορίθμων των μηχανών μάθησης.



Σχήμα 4. Σύγκριση μετρητών απόδοσης των αλγορίθμων των μηχανών μάθησης.



Σχήμα 5. Σύγκριση λογαριθμικής απώλειας των αλγορίθμων των μηχανών μάθησης.

4. Συζήτηση και συμπεράσματα

Μια συγκριτική ανάλυση διεξήχθη όσον αφορά την εφαρμοσιμότητα και την απόδοση των αλγορίθμων των μηχανών εκμάθησης για την ταξινόμηση των φύλλων των δέντρων καρυδιάς σε αυτά που έχουν ανθράκωση και σε αυτά που είναι υγιή. Ένας επαρκής αριθμός 2000 φωτογραφιών πάρθηκε με ισοδύναμο αριθμό υγιών και μολυσμένων με ανθράκωση φύλλων. Συνολικά 11 αλγόριθμοι δοκιμάστηκαν και αξιολογήθηκαν με βάση την απόδοση και την ακρίβεια που πέτυχαν στα συγκεκριμένα δεδομένα. Οι ακρίβειες των αλγορίθμων κυμαίνονται από 71.25% έως 90.25%, με τους περισσότερους να φτάνουν πάνω από 85%. Ο αλγόριθμος με την καλύτερη απόδοση ήταν το βαθύ νευρωνικό δίκτυο ο οποίος πέτυχε και χαμηλή λογαριθμική απώλεια (0.295) και έναν μέσο χρόνο εκπαίδευσης 74s. Με βάση την απόδοση της αρχιτεκτονικής του βαθύς νευρωνικού δικτύου, η ανίχνευση της ανθράκωσης των φύλλων από τα δέντρα καρυδιάς είναι μια εφικτή εφαρμογή.

Αυτή η ερευνητική ανάλυση δείχνει τον δρόμο προς μια πιο εκ βαθέως μελέτη των αλγορίθμων που βασίζονται στις βαθιές νευρωνικές δομές, όπως τα συνελκτικάνευρωνικά δίκτυα (convolutionalneuralnetworks, CNN) και τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα

(recurrentneuralnetworks, RNN). Μελλοντικά σχέδια περιλαμβάνουν την έρευνα πιο σύνθετων παραγώγων, όπως και μετα-αρχιτεκτονικές του CNN που μπορούν να διεξάγουν εντοπισμό αντικειμένων όπως και τμηματοποίηση εικόνων. Επιπρόσθετα, μέθοδοι επεξεργασίας εικόνων όπως οι μετασχηματισμοί Fourier και αποσύνθεση των wavelets πρέπει να μελετηθούν.

Ως προς τη γνώση των συγγραφέων, άλλες μελέτες άγγιξαν παρόμοιες αποδόσεις στο συγκεκριμένο πρόβλημα των δέντρων καρδιάς/ανθράκωσης (Gamal et al. 2017). Σκοπός αυτής της μελέτης και της συνέχισής της είναι να χτιστεί ένας ταξινομητής μεγάλης ακρίβειας (>99%), βασισμένος σε δεδομένα πραγματικών συνθηκών από δέντρα καρδιάς. Με αυτό τον τρόπο ισχυρά αυτόνομα συστήματα θα μπορούν να ανιχνεύσουν ασθένειες σε φύλλα με μεγάλη ακρίβεια, χωρίς την επίβλεψη ανθρώπου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το έργο “Ερευνητική Συνέργεια για την Αντιμετώπιση των Μεγάλων Προκλήσεων του Πλέγματος (NEXUS): Ενέργεια-Περιβάλλον-Αγροτική Παραγωγή (Τροφή, Νερό, Υλικά) (NEXUS)”, Χρηματοδοτήθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ)-Κωδικός έργου MIS 5002496.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Altman, N.S., 1992. An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *American Statistician*.
- Bharate, A.A. & Shirdhonkar, M.S., 2018. A review on plant disease detection using image processing. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Sustainable Systems, ICISS 2017*. pp. 103–109.
- Breiman, L., 1984. Classification and regression trees Regression trees. *Encyclopedia of Ecology*.
- Breiman, L., 2001. Random Forrest. *Machine Learning*.
- Büyükoztürk, Ş. & Çokluk-Bökeoğlu, Ö., 2008. Discriminant function analysis: Concept and application. *Eğitim Arastırmaları - Eurasian Journal of Educational Research*, (33), pp.73–92.
- Freund, Y. & Schapire, R.R.E., 1996. Experiments with a New Boosting Algorithm. *International Conference on Machine Learning*, pp.148–156.
- Gamal, A. et al., 2017. A New Proposed Model for Plant Diseases Monitoring Based on Data Mining Techniques. In K. R. Hakeem et al., eds. *Plant Bioinformatics: Decoding the Phyta*. Cham: Springer International Publishing, pp. 179–195.
- Liakos, K. et al., 2018. Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors*, 18(8), p.2674. Available at: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2674> [Accessed December 6, 2018].
- Mason, L. et al., 1999. Boosting algorithms as gradient descent in Function space. *Nips*.
- McCulloch, W.S. & Pitts, W., 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), pp.115–133.
- Mg, A. et al., 2017. Plant Leaf Disease Detection using Deep Learning and Convolutional Neural Network. *International Journal of Engineering Science and Computing*.
- Muthukannan, K. et al., 2015. Classification of diseased plant leaves using neural network algorithms. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Picon, A. et al., 2018. Deep convolutional neural networks for mobile capture device-based crop disease classification in the wild. *Computers and Electronics in Agriculture*.
- Ramya, V. & Lydia, M.A., 2016. Leaf Disease Detection and Classification using Neural Networks. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(11), pp.207–210.
- Russell, S. & Norvig, P., 2002. *Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd Edition)*,
- Vapnik, V.N., 1999. An overview of statistical learning theory. *IEEE Transactions on N. Networks*.

APPLICATIONS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN PRECISION CROP FARMING

T. Bartzanas

¹Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855, Athens, e-mail: t.bartzanas@aua.gr

ABSTRACT

Computational fluid dynamics (CFD), numerical analysis and simulation tools of fluid flow processes have emerged from the development stage and become nowadays a robust design tool. It is widely used to study various transport phenomena which involve fluid flow, heat and mass transfer, providing detailed information for spatial and temporal distributions of flow speed and direction, pressure, temperature and species concentration. The CFD tools provide a cost-effective way of carrying out equipment and process design and optimisation, and can reduce risk in equipment modification and process scale-up. In recent years, CFD modelling has been gaining attraction from the agri-food industry. The present paper provides a state-of-the-art review on various CFD applications for precision crop production such as, soil tillage, sprayers, harvesting, machinery, and greenhouses. The challenges faced by modellers using CFD in precision crop production are discussed and possibilities for incorporating the CFD models in decision support tools for precision farming are highlighted.

Keywords: Tillage, harvesting machines, sprayers, greenhouse, decision support tools

1. INTRODUCTION

Historically agriculture has covered the even increasing human population by increasing its productivity. In the last century most of this increased productivity was the result of genetic improvement of crops and the use of chemicals and machinery. In the next years agriculture is expected to produce not only food and raw material but also to maintain the landscape and contribute to the reduction of Greenhouse Gases (GHG) in the atmosphere. It is anticipated that the new increase in productivity in the next fifty years can also be the result of Information and Communication Technology (ICT) use in agriculture.

The introduction of advanced ICT technologies into agriculture has enabled farmers to acquire huge amounts of site-specific data for their farms, with the ultimate aim to improve their decision-making process (Blackmore, 2000). Precision Agriculture, Site-Specific Management, Precision Farming are all synonymous of innovative agricultural techniques to improve production and reduce environmental pollution. Precision Agriculture (PA) can be defined as "the application of technologies and principles to manage spatial (in-field) and temporal (over time) variability associated with all aspects of agricultural production for the purpose of improving crop performance and environmental quality" (Blackmore et al., 2003). The first applications of PA around the world started in the early nineties but the initial adoption started at the end of the nineties.

The PA is intrinsically information intensive, and farmers face many difficulties in efficiently managing the enormous amount of data they collect. They may lack sufficient time or are reluctant to invest the time needed to analyze the data and interpret the information. The challenge lies to identify the usefulness, importance and relevance of the gathered data for optimising farm efficiency. It became clear that it is not a lack of available data that will impede progress in PA. Farmers have to

think systematically about their information needs, the costs of information, alternative sources and the value of the information, identifying what is the necessary data to collect before making decisions (Fountas et al, 2006). There is no “cook-book” available on how to systematically analyze the gathered data to help them make farm management decisions. This has become a drawback on the wide adoption of PA worldwide. It becomes more evident that the analysis and interpretation of PA data will be a new role for agronomists, as separate service or as complimentary to agrochemical and fertilizer suppliers.

PA is effectively a suite of methods, approaches and instrumentation that farmers should examine in detail to decide which is the most suitable for their business. In a report by Knight et al. (2009) the cost/benefit of many of the components of this “suite” were discussed, suggesting what is needed for each case. The growth in the adoption of PA in countries such as the UK has shown that between 2009 and 2012 the proportion of farms using PA increased. The increase for GNSS was greatest, from 14% to 22%, for soil mapping from 14% to 20%, for variable rate application from 13% to 16% and for yield mapping from 7% to 11%. The two most common reasons for adopting precision farming techniques were to improve accuracy in farming operations (76% of farms in 2012) and to reduce input costs (63% of farms in 2012).

In most cases data gathering is related to management of quantitative inputs in several production related processes. Several proposals for data treatment can be found in the literature such of Godwin et al. (1999) for data-gathering techniques, Oliver (1999) for interpolation techniques (geostatistics) and Blackmore (2000) on interpretation of trends from year to year. Simulation models have also been used, since they provide insights on the relationships between variables and their influence on systems behaviour. In addition, using the gathered data several authors have validate and propose models for optimal decision making at farm level (Shaffer et al., 2000).

Apart of the above mentioned data treatment and modelling methods, numerical modelling techniques such as CFD can offer an effective way of accurately quantifying the influence of machinery design, environment parameters and weather conditions within a virtual environment. Thus, the amount of physical experimentation can be reduced considerably, although, as of yet, not eliminated. CFD is a simulation method that can efficiently estimate both spatial and temporal field fluid pressure as well as other chemical and environmental scalars, and the method has proven its effectiveness in system design and optimization within the chemical, aerospace, and hydrodynamic industries (Zhang et al., 2006). The ubiquitous nature of fluids and their influence on system performance has caused a widespread take-up of CFD by many other disciplines. As a developing modelling technique, CFD has received extensive attention throughout the international community. As a result, CFD became an integral part of the engineering design and analysis environment of many companies because of its ability to predict the performance of new designs or processes prior to manufacturing or implementation (Schaldach et al., 2000).

The application of CFD in precision farming is concentrated mainly in greenhouse systems and in the optimisation of sprayers. Few works have been done to optimise the design and functioning of harvesting machines and some to analyze soil characteristics during tillage.

The present work reviews the main issues in the context of the current status and capabilities of CFD in precision crop farming and identifies its potential for contributing in the design of more efficient decision support systems for precision agriculture applications.

2. APPLICATIONS OF CFD IN PRECISION CROP FARMING

2.1. Tillage

Study in tillage tool modelling mainly focus on energy requirement to operate the tool at different soil, tool and system conditions. Though tillage is a dynamic process, most of the previous studies are based on quasi-static analysis following the passive earth pressure theories. During tillage, soil particles move ahead and around the tool as they fail in shear. As the tool engages soil during tillage, undisturbed stiff soil sustains the exerted tool thrust up to its elastic limit before failing in shear. Soil shear failure can be visualised and analysed as a flow pattern in front and around the cutting tool. Soil failure front, the maximum longitudinal distance of the disturbed soil from the tool face, is associated with slip surfaces generated by yielding and plastic deformation. The advancement of the soil failure front depends on the operating speed, tool shape and size, tool orientation, and the soil conditions.

Soil pressure exerted on the tool surface was also simulated using CFD (Karmakar, 2005). Mathematical modelling was based on Navier stokes relationships for incompressible, single phase soil flow in a free-surface flow channel with specific boundary conditions. Using CFD the soil was treated as a visco-plastic fluid using the Bingham-plastic material model. Dynamic analysis of soil-tool interaction with CFD helped understand visco-plastic soil flow phenomena and formation of furrow and soil build-up around the tool (Fig. 1). Free-surface simulation improved the prediction and description of the dynamics of soil-tool interaction and enabled visualization of soil surface deformation representing furrow formation at the back of the tool and ridge formation in front of the tool (Karmakar and Kushwaha, 2005).

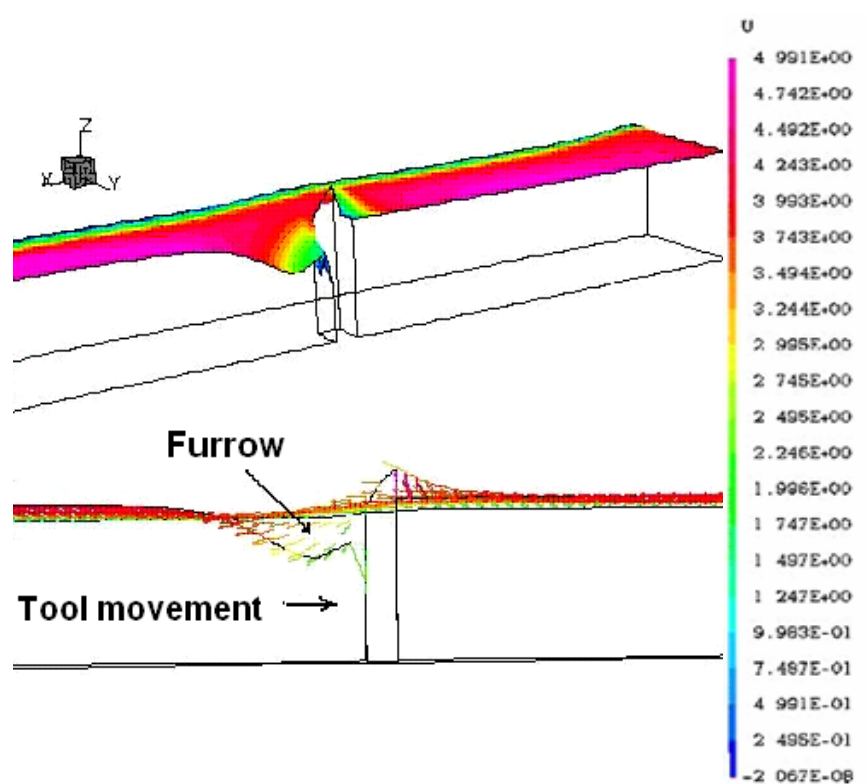


Fig. 1. Velocity profile showing furrow formation behind the tool and soil build-up in front of tillage tool (Karmakar, 2005).

Pressure bulbs in front and around the tool, depicting the soil stress due to the tool motion is shown in Figure 2. The contour lines describe the range of pressure on the horizontal plane at halfway below the soil surface i.e., at 50 mm depth. The normal stress on the soil in front of the tool at 50 mm depth and 1 m s⁻¹ operating speed decreased from 177 to 20 kPa along the direction of motion forming a set of pressure bulbs. A negative pressure zone existed behind the tool due to flow suction and pressure drop.

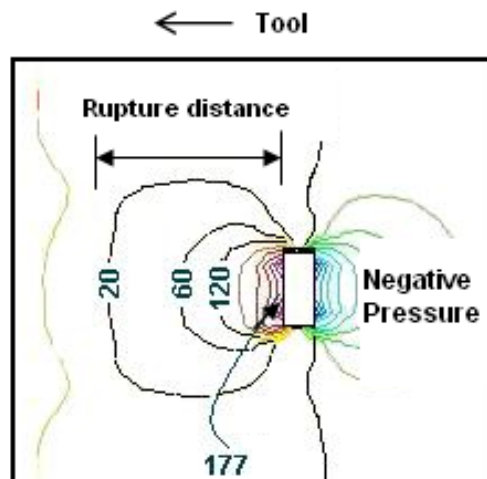


Fig. 2. Velocity profile showing furrow formation behind the tool and soil build-up in front of tillage tool (Karmakar, 2005).

2.2 Sprayers

Most computer simulations for pesticide spray applications focus on droplet movement and air flow after they are discharged from sprayers and spray droplet displacement under simplified field conditions. Lagrangian trajectory approach is used to calculate droplet movement in laminar or turbulence air flow fields. CFD accuracy to determine the relative effects of droplet size, wind speed, turbulent intensity, initial droplet velocity, droplet discharge height, temperature and relative humidity on droplet displacement (Zhu et al., 1996) was validated in a wind tunnel (Reichard et al., 1992) and was used. Spray drift potentials from ground sprayers were also simulated (Nuyttens et al., 2011), to improve sprayer performance (Molari et al., 2005), assist design of a pneumatic shielded spraying system for increasing spray deposition and reduce spray drift (Tsay et al., 2002), simulate jet flow in sprayer tanks to increase tank mixture uniformity (Ucar et al., 2001), and simulate air flow and droplet movements inside canopies for an air-assisted orchard sprayer to increase spray deposition on leaves (Delele et al., 2005). Tsay et al. (2002) used CFD simulation to evaluate different designs of mechanical shields attached on boom sprayers and demonstrated that the addition of a double-foil shield on a sprayer could reduce potential spray drift up to 50% while adding an inclined plate ahead of the shield would worsen the shield performance. With CFD simulations Endalew et al. (2010) were able to determine droplet trajectories inside pear canopies for choosing optimal nozzles for air-assisted tower sprayers to maximize droplet deposition on leaves and minimize off-target loss (Fig. 3).

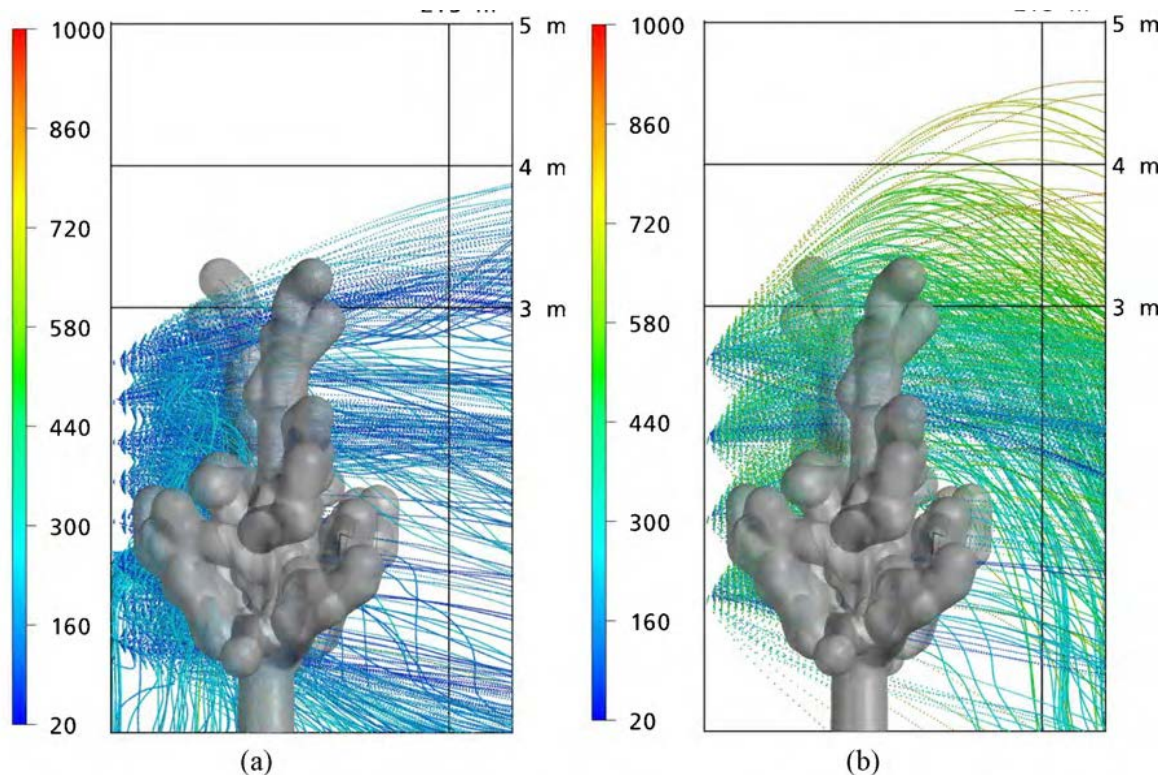


Fig. 3. CFD simulated droplet trajectories passing through a pear tree for the air assisted tower sprayer equipped with (a) hollow cone nozzles and (b) flat fan nozzles (Endalew et al., 2010)

2.3. Harvesting and machinery design

In modern harvesting machines, one of the critical factors to fulfil the current demand of capacity and output under a wide range of field and crop conditions is the capacity of the cleaning fan. With the increasing power and output demands of the modern grain combine, the cleaning section capacity has become a limiting factor. In order to obtain an effective cleaning action, the fan has to generate a forceful and even air flow over and through the complete width of sieves.

Gebrehiwot et al. (2010) investigates the effect of an additional inlet opening on the performance of the cleaning fan using CFD. They combined simulations with experimental measurements by hotwire anemometers, to study the influence of a cross-flow opening on the performance and flow distribution of a forward curved wide centrifugal fan with two parallel outlets. Three forward curved fans of the same dimension were considered (Fig. 4). Fan-I is an ordinary forward curved centrifugal fan with two axial inlets, while fan-II and fan-III have a cross-flow inlet in addition to the axial inlet opening in fan-I.

To assess the effect of the cross-flow opening on the performance of the centrifugal fan, CFD simulations were performed. The transient, three-dimensional, viscous, incompressible URANS equations were solved and the Re-Normalization Group (RNG) $k-\epsilon$ was used as a turbulence model.

The calculation is performed unsteady, because of the highly transient flow in the blade channels. There is a relatively large amount of air coming out of the frontal middle area across the width. In the other parts of the opening, air is entering the fan through this opening at a relatively smaller velocity. Thus, even when running at no load this opening is not completely an inlet. Close monitoring of the flow in this opening shows that a small net amount of air enters the fan. Using the CFD simulation results, Gebrehiwot et al. (2010) observed that availability of the cross-flow opening increases the flow rate created by the fan at low loads. At higher loads however, all fans generate similar flow rates. Comparison between measurements and simulations showed that the three-dimensional URANS CFD simulations could predict the performance of the cleaning fan with an error of less than 10%.

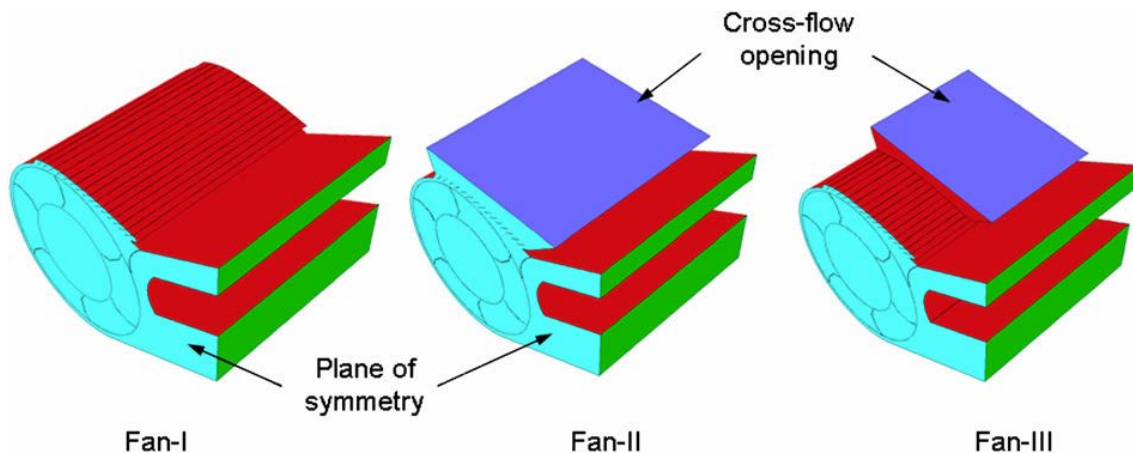


Fig. 4. Geometrical configuration of the fans under consideration (Gebrehiwot et al., 2010).

CFD modelling allows the prototypes of the harvesters to be developed and tested to obtain essential parameters for engineering design without building a physical prototype, which requires more time and is relatively expensive. Consequently, the CFD modeling allows the harvester designs to be more easily optimized, creating greater control over the physical process of gas-particle separation. In this research, the three dimensional design of nut harvester geometry was computationally generated based on an initial prototype of commercial almond-harvester developed by a commercial manufacturer (Flory Industries, Salida, CA).

Ponpesh and Giles (2008) applied CFD modelling to improve the design a nut harvester in order to reduce particulate matter emissions while maintaining product quality and harvesting speed. Fluent® was used for the simulations and the Realizable $k-\epsilon$ and Stochastic Lagrangian Discrete Phase Models were used to study the gas-particle flow in the harvester. Model validation was performed using experimental measurements of static and dynamic pressures of the flow fields, particle flow pattern and collection efficiency. As indicated by Ponpesh and Giles (2008), this may benefit the collection efficiency of the particles by minimizing particle movement and the re-entrainment of the particles into the gas stream which proceeds toward the outlet. The velocity is increased during the semicircular section and is decreased toward the outlet. Larger (heavier) particles moving at a lower speed are exerted by greater centrifugal force become detached from the flow and driven toward the wall of the separating chamber. In addition, the simulated vectors of velocity predict some recirculation near the upper wall of the outlet section, slightly down stream from the semicircular section.

3. DISCUSSION

The complexity and importance of agricultural operations management has increased as agriculture has adapted capital-intensive production systems, thereby stimulating the development of more formal planning techniques. Also, during recent years the general trend towards sustainable farming practices has shifted the very nature of farm planning. From mainly dealing with the traditional way of planning what to do - which crops to grow and which machines to use - the focus has been moved towards problems of how to schedule and carry out different operations. CFD can be combined with other models and experimental devices and it can be effectively be a part of decision support tools in precision crop farming.

Bochtis et al (2011), presents a diagnostic tool which involves a combination of a sensors network for the acquisition of real-time data in order to provide the actual conditions within the biomass storage facility and a real-time computational fluid dynamics (CFD) modelling approach fitted with selected updated weather data in order to provide the predicted conditions within the storage facility assuming ideal conditions with no interfering events. The two conditions (actual and predicted) are depicted graphically in a user interface allowing the user to evaluate the deviation between the two conditions and decide if preventive actions are required. The principal components of the diagnostic system (Fig. 5) include, a sensor network functioning as a data acquisition unit, a wireless communication unit for the transmission of sensor data to an on-site data storage unit, a data storage unit, a central server running the CFD model and a user interface for visualization purposes. In the near future it is anticipated the CFD models will be used more often in such systems enabling a more precision crop production.

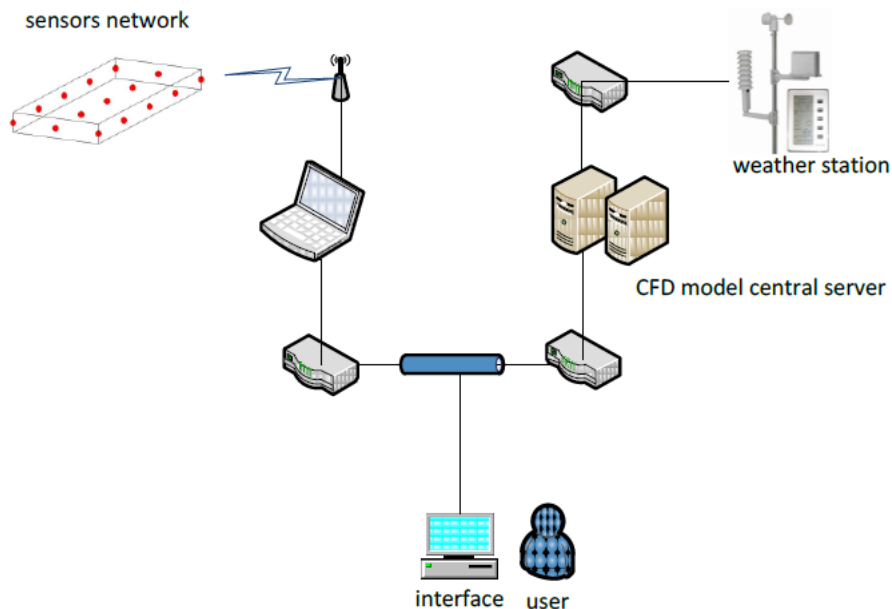


Fig. 5. The basic physical components of the diagnostic system (Bochtis, et al. 2011)

The perspectives of this diagnostic system, and maybe similar systems using CFD models, is to be integrated on farm management information systems where the visualization and alerting can involve multi-delivery mechanisms such instant messaging through e-mail, or wireless devices (e.g., cellular phones). This continuously updated information will provide the manager a solid basis for necessary preventive measures in precision crop farming.

4. CONCLUSIONS

CFD modelling has been successfully used for precision crop farming. Application of CFD to tillage has been proved to be an important tool in addressing many unresolved issues related to dynamic soil-tool interaction. Modeling of energy requirement and predicting of soil failure patterns in large soil deformation during tillage have been successfully analyzed by CFD modeling. CFD simulations advanced also the improvement of pesticide sprayer efficiency for crops comprising of many varieties and species. Future CFD models should accommodate uncontrollable canopy characteristics and weather conditions with the sprayer design and operation to present real-time droplet trajectories. Concerning the comparison with experimental data, although in general there was a good agreement between measured and simulated (CFD) results, there was some deviation between the pressure from the experiments and the simulations at the location before the flow entering the separating chamber and in the outlet region. It is possible that this difference arises from the effects on the flow field of the pitot tubes due to their relatively large dimension and shape of the probe tips. Other factors such as the uncertainty of turbulent flow measurement, outlet boundary condition and the steady state assumption are also pointed out by the authors

5. REFERENCES

- Blackmore, S., 2000. *The interpretation of trends from multiple yield maps*. Comput. Elect. Agric. 26, 37-51.
- Blackmore, S., Godwin, R., Fountas, S., 2003. *The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years*. Biosyst. Engng. 84, 455-466
- Godwin, R.J., Wheeler, P.N., O'Dogherty, M.J., Watt, C.D., Richards, T., 1999. *Cumulative mass determination for yield maps of non-grain crops*. In: Godwin, R.J. (Ed.), Special issue: spatial yield recording of non-grain crops. Comput. Elect. Agric. 23, 85-101.
- Delele, M. A., De Moor, A., Sonck, B., Ramon, H., Nicolai, B. M., Verboven, P. 2005. *Modelling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed*. Biosyst. Engng. 92, 165-174
- Endalew, A.M., Debaer, C., Ruttan, N., Vercaemmen, J., Delele, M.A., Ramon, H., Nicolai, B.M., Verboven, P., 2010. *Modelling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: A new integrated CFD approach*. Agr. For. Meteor. 150, 1383-1392.
- Fountas, S., Wulfsohn, D., Blackmore, B.S., Jacobsen, H.L., Pedersen, S.M., 2006. *A model of decision-making and information flows for information-intensive agriculture*. Agric. Syst. 87 (2), 192-210.

- Gebrehiwot, M.G., De Baerdemaeker, J., Baelmans, M., 2010. *Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester: computational and experimental study*. Biosyst. Eng. 105 (2), 247–256.
- Karmakar, S., 2005. *Numerical modeling of soil flow and pressure distribution on a simple tillage tool using computational fluid dynamics*. PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada pp. 220.
- Karmakar, S., Kushwaha, R.L., 2005. *Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics*. Trans. ASAE. 48, 923–932.
- Knight, S., Miller, P., Orson, J., 2009. *An up-to-date cost/benefit analysis of precision farming techniques to guide growers of cereals and oilseeds*. HGCA Research Review 2009 No. 71, pp. 115
- Molari, G., Benini, L., Ade, G., 2005. *Design of a recycling tunnel sprayer using CFD simulations*. Trans. ASAE. 48, 463-468
- 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, 403-408.
- Oliver, M.A., 1999. *Exploring soil spatial variation geostatistically*. In: Stafford, J.V. (Ed.), Precision Agriculture'99. Sheffield Academic Press, UK, pp. 3-17.
- Ponpesh, P.O., Ken Giles, D., 2008. *Modeling Turbulent Flow for Design of Almond Harvesters with Low Power Demand and Reduced Emission of Particulate Material*, ASABE Paper Number: 084016, ASABE Annual Int. Meeting, Rhode Island Convention Center, Providence, Rhode Island (June 29–July 2).
- Reichard, D.L., Zhu, H., Fox, R.D., Brazee, R.D., 1992. *Wind tunnel evaluation of a computer program to model spray drift*. Trans. ASAE. 35, 755-758.
- Schaldach, G., Berger, L., Razilov, I., Berndt, H. 2000. *Computer simulation for fundamental studies and optimisation of ICP spray chambers*. ISAS (Institute of Spectrochemistry and Applied Spectroscopy) Current Research Reports, Berlin, Germany.
- Shaffer, M.J., Bartling, P.N.S., Ascough, J.C., 2000. *Object-oriented simulation of integrated whole farms: GPFARM framework*. Comput. Electron. Agric. 28, 29-49.
- Tsay, J., Ozkan, H.E., Brazee, R.D., Fox, R.D. 2002. *CFD simulation of moving spray shields*. Trans. ASAE. 45 (1): 21-26.
- Ucar, T., Fox, R.D., Ozkan, H.E., Brazee, R.D., 2001. *Simulation of jet agitation in sprayer tanks: Comparison of predicted and measured water velocities*. Trans. ASAE. 44, 223-230.

PRECISION LIVESTOCK FARMING (PLF) TECHNIQUES IN PIG HUSBANDRY

**Christos Tzanidakis^a, Panagiotis Simitzis^b, Konstantinos Arvanitis^c and
Panagiotis Panagakis^a**

^aAUA, Dpmnt of Natural Resources Management & Agric. Engineering, Lab. of Farm Structures

^bAUA, Dpmnt of Animal Science and Aquaculture, Laboratory of Animal Husbandry

^cAUA, Dpmnt of Natural Resources Management & Agric. Engineering, Lab. of Farm Machinery

ABSTRACT

The transition from extensive to intensive housing has induced in great changes in pigs' husbandry. The social issue that arose from this transition, is the lack of space for pigs to express their natural behaviours such as exploration and foraging. Changes as such, resulted in aggression heightening, the appearance of undesired and abnormal social behaviours (e.g. belly-nosing, tail and ear biting, etc.) and unstable dominance hierarchies posing risks to health, welfare, deteriorating the quality of the end product and thus, reducing the economical income of the units. Precision Livestock Farming (PLF) is the fully automated continuous monitoring of animals, emphasizing on the individuality, by using technological advancements as part of the management process. Pig husbandry is one of the most technologically advanced forms of farming and the use of PLF is considered a given in the production process. The data may be collected by cameras (CCTV, infra-red, thermal, etc.) and real-time analyses systems, by microphones and sound analyses systems, or by any other sensor within the production unit or on the animal such as accelerometers, flow meters, etc. In this paper, various PLF research and PLF applications on the pig production are presented.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ(PLF) ΣΤΗΝ ΧΟΙΡΟΤΡΟΦΙΑ

**Χρήστος Τζανιδάκης^a, Παναγιώτης Σιμητζής^b, Κωνσταντίνος Αρβανίτης^c και
Παναγιώτης Παναγάκης^a**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την μετάβαση από την εκτατική στην εντατική εκτροφή μεταβλήθηκαν σημαντικά οι συνθήκες διαβίωσης των χοιριδίων. Το πρόβλημα που εμφανίστηκε εξαιτίας αυτής της μετάβασης, είναι η ανεπάρκεια χώρου για την έκφραση των φυσικών συμπεριφορών, όπως η εξερεύνηση και η αναζήτηση τροφής. Επιπλέον, αυτές οι αλλαγές είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιθετικότητας, την εμφάνιση ανεπιθύμητων συμπεριφορών (π.χ. belly-nosing, tail και earbiting κλπ.) και τη διαταραχή των κοινωνικών σχέσεων με αρνητικές επιπτώσεις για την υγεία, την ευζωία, την ποιότητα και συνεπώς, για την οικονομική αποτελεσματικότητα των μονάδων. Οι Τεχνολογίες Ακριβείας στην Κτηνοτροφία (PLF) είναι η συνεχής παρακολούθηση των αγροτικών ζώων, με έμφαση στην ατομικότητα, ενσωματώνοντας τις σύγχρονες τεχνολογίες στην παραγωγική διαδικασία. Η χοιροτροφία είναι από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογικά, μορφές εκτροφής των αγροτικών ζώων και χρήση των PLF θεωρείται δεδομένη στην παραγωγική διαδικασία. Η συλλογή των δεδομένων μπορεί να γίνει με το συνδυασμό συστημάτων ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο και συστημάτων καταγραφής εικόνας (CCTV, infra-red, θερμικές κάμερες κλπ.), ή ήχου, είτε με τη χρήση οποιουδήποτε άλλου αισθητήρα εγκατεστημένου εντός της μονάδα παραγωγής ή στα χοιρίδια υποδερμικά, όπως αξελερόμετρα, μετρητές ροής κλπ. Στο κείμενο θα παρουσιαστούν ορισμένες μελέτες και εφαρμογές των συστημάτων αυτών.

1. Introduction

The demand for meat and dairy products from the growing global population is continuously increasing (Ahrendt et al., 2011; FAO, 2011; Berckmans, 2017). Today, 60 billion animals are slaughtered each year for food production and it is expected that in the next 15 years this number will increase up to 40% (Berckmans, 2014a) and 70% by 2050 (Berckmans, 2017) due to the rising economies in Asia, India, South America and China. In particular, 770 million pigs are housed globally each year, producing approximately of 110 million tons of meat (USDA, 2017). This demand incentivizes producers to further expand their farms resulting in higher energy demands and in less time spend by the farmer for each individual animal (FAO, 2011).

Up to the 1960s pig production was typically based on extensive rearing systems (PCIFAP, 2008) with approximately 4,000 m² of pasture access per 20 pigs (HIS, 2014). During the last half of the 20th century changes in animal farming modified the applied practices and management and the production was converted from extensive to intensive commercialized facilities (PCIFAP, 2008). By the 1990s, the dominant production type was “megafarms” (i.e. more than 10,000 breeding sows in a single location) covering more than half of the pig production globally (HIS, 2014). Due to this great change pig production units have grown a lot bigger, negatively affecting the health and welfare status of animals (TFEHP, 2014). According to HIS (2014), the largest pig production company in the USA and globally (Smithfield Foods) keeps nearly 1.1 million breeding sows and the next top 9 companies keep more than 100,000 sows each. In addition, TFEHP (2014) reported that in the UK the average herd size for fattening pigs was 1,000 or greater compared with that in 1994, when the average herd size was less than 600, implying that the animal number per worker has been greatly increased over the past two decades.

The transition from extensive to intensive housing has induced in great changes in pigs’ husbandry. For example, the piglets are naturally weaned at approximately 17 weeks of age (Jensen and Recén, 1989) while, under intensive housing conditions, they are commonly weaned prematurely at approximately 4 - 5 weeks of age (D’Eath and Turner, 2009). In addition, sows housed extensively will breed twice a year while, when housed intensively this number is significantly higher by at least 15 - 20 % (FAO, 2011). This indicates that the pigs grow in size and reach puberty and adulthood much faster than their free-ranging or extensively reared counterparts. The social issue that arose from this transition, is the lack of space for pigs to express their natural behaviours such as exploration and foraging. In particular, in observations on the foraging behaviour of domestic pigs housed extensively, each group member kept a distance of 3.8 m on average from their nearest neighbor and different herds kept a distance of 50 m or more (HIS, 2014). In contrast, each pig housed under intensive commercial conditions has only 0.25 - 2.25 m² at its disposal (FAO, 2011), depending on its characteristics (e.g. age, gender, group size, etc.). Changes as such, resulted in aggression heightening, the appearance of undesired and abnormal social behaviours (e.g. belly-nosing, tail and ear biting, etc.) and unstable dominance hierarchies (D’Eath and Turner, 2009) posing risks to health and welfare (Hintze et al., 2013).

As the pig herds grow bigger and at the same time the number of farmers is decreasing worldwide, it is almost impossible for the farmers to assess every animal and assure their wellbeing individually (Berckmans, 2017). Precision Livestock Farming (PLF) could provide solutions for this problem. PLF is the fully automated continuous monitoring of animals, emphasizing on the individuality, by using technological advancements as part of the management process (Banhazi et al., 2012; Berckmans, 2014a; Berckmans, 2017). When a problem within the production unit is detected, a warning signal is triggered so that immediate action can be taken, leading to an early problem solution (Berckmans, 2017). It can potentially improve animal welfare, reduce livestock

emissions, improve the performance and the marketing and minimize the annual costs of the production unit (Banhazi et al., 2012; Nilsson et al., 2015).

1. Precision Livestock Farming - data collection and analysis in pig barns

Every living organism is a Complex, Individually Different, Time-Varying and Dynamic (CITD) system (Quanten et al., 2006). In biological research the majority of statistical analyses and comparisons are between groups of living organisms by comparing the differences between the averages of the groups (Berckmans, 2014b). However, no living organism lives or responds according to this average bioresponses. In addition, the time varying characteristics of each individual means that an individual will express different response to an environmental change or a stressor each time it occurs (Quanten et al., 2006; Berckmans, 2014b).

According to Berckmans (2004) PLF:

- (a) is a support tool and does not intend on replacing the farmer,
- (b) is an animal-centric tool – the animal is the main part of the process and
- (c) needs ideal conditions for the monitoring and control processes.

The process of developing an early warning system for the farm is based on the hypothesis that when a pig experiences dis-comfort conditions, it will exhibit a bioresponse in terms of behavioural changes (Nilsson et al., 2015; Berckmans, 2017). The first signs of a behavioural change should be detected by the PLF system – either image processing, sound analysis or implanted sensors. Therefore, the first step of creating a system that automatically monitors pigs' behaviour and manages a problem based on their bioresponses, is to observe and label video recordings that are captured over a suitable time period. With the resulting video analysis it is possible to build an automatic classifier that classifies patterns leading to behavioural differences due to unsuitable conditions (Berckmans, 2008; Statham et al., 2009). The second step is to develop dynamic mathematical models based on the posture/movement parameters, to define specific indicators for these behaviours (Berckmans, 2014a). This particular protocol unified with a computer-vision system that can track and monitor pigs continuously, can produce a tool for real time problem solution that will improve the housing conditions and minimize the annual costs of the pig unit (Berckmans, 2014). These systems can help the producers in identifying a pig or groups of pigs that need special attention (Dominiak et al., 2018). It should be noted that the CITD nature of the living organisms is greatly affecting the algorithms used to measure individual bioresponses and it is necessary to be constantly adapted (Berckmans, 2017).

The data may be collected by cameras (CCTV, infra-red, thermal, etc.) and real-time analyses systems, by microphones and sound analyses systems, or by any other sensor within the production unit or on the animal such as accelerometers, flow meters, etc. In the following paragraphs, various PLF research and PLF applications on the pig production are presented.

1.1. Camera-based monitoring

McGlone (1986) stated that camera monitoring is generally used for detailed observations of individual behaviours concerning their characteristics such as frequency of appearance, duration, speed, acceleration, etc. He reported that only full time periods can be used in behavioural analysis. In particular, he found that behavioural data sampling will result in great standard errors that will negatively affect the results of the study and lead to inaccuracies. The recorded behaviour can be analysed in (a) slow motion (Stygar et al., 2014) or frame-by-frame (Oczak et al., 2013) for analysing individual fights and behavioural patterns or behavioural interactions such as bites (average duration 0.5s) (McGlone, 1986), or (b) a faster speed for general activity analysis such as

that of classifying the standing and lying behaviour of the animals (Nir et al., 2018). By performing the above analyses, researchers can save valuable time and effort without compromising the accuracy of the results (McGlone, 1986). It should be noted that a single camera above the pig pen is efficient enough for any data collection needed and at the same time the total installation costs of the systems are minimised (Berckmans, 2014a). Table 1 provides the definitions of the basic instrument parameters to be used when evaluating a PLF system.

Over the past three decades, computer vision approaches in PLF have been used in multiple livestock behaviour analysis and classification related applications. Their core purpose is to determine even the slightest detail affecting the production (Halachmi et al., 2018). Nilsson et al. (2015) developed an algorithm for thermal dis-comfort detection and automatic micro-climate control management at pen level using a simple camera installed above the pen, based on pigs' lying positions within the pen. In addition, they reported that the system could potentially be used to detect health issues and diseases with some modifications. Kashiha et al. (2013), successfully monitored and identified the resting behaviour of 10 individual pigs, with a success rate of 88.7 %. It should be noted that a PLF system can potentially trigger bioresponses in order to prevent certain behaviours of the animals (Berckmans, 2014a). For example, real-time monitoring systems have been successfully applied for investigating and controlling the feeding behaviour and weight estimation of the pigs (Kashiha et al., 2014; Stygar et al., 2017; Nir et al., 2018) and possible prevention of aggressive interactions by distracting the pigs with candies (Ismayilova et al., 2013).

Table 1. PLF system evaluation parameters

Parameter	Definition
Accuracy	The maximum difference between the value that the sensor reads and a known benchmark (Prichard, 2001; MC, 2008; NI, 2019)
Sensitivity/recall	The minimum input of physical parameter for a detectable output change by the sensor (MC, 2018)
Specificity	The discrimination between the parameter of interest and everything else in the matrix (Prichard, 2001)
Precision	The degree of reproducibility of a measurement or in mathematical terms, "the random component of the measurement error of the method", (Prichard, 2001)

Another camera-based application is Thermal cameras. Thermal camera equipment has been used in various areas of pig production including disease detection based on body temperature analysis (Islam et al., 2015), the feasibility of thermal cameras and infrared thermometers as core body temperature measurement tools instead of the common rectal thermometer (Schmidt et al., 2013) and inflammation and lesions detection (Ruminski et al., 2007). In addition, Soerensen and Pedersen (2015) reported that Infrared Temperature Equipment (IRTME) is a useful tool for efficient automatic detection of pigs' movement and evaluation of their health status. It should be noted that usually there is inadequate equipment in field research and limited knowledge on its functions

(Soerensen and Pedersen, 2015). However, these studies showed very promising results suggesting that in the near future IRTME technology will be in the centre of PLF research and commercial on-farm applications.

These studies have shown a great potential in solving health and welfare related problems in the area of livestock farming and at the same time reducing the time spent with the pigs by the farmer (Oczak et al., 2013; Oczak et al., 2014; Berckmans, 2014a).

The most common problem in today's camera-based systems is "blob merging" (Viazzi et al., 2014). This may be caused due to illumination or environmental changes such as humidity condensation or dust concentration on the lens of the camera during the day, interfering with and increasing the noise of the recordings (Lee et al., 2016). In the studies of McFarlane and Schofield (1995) and Viazzi et al. (2014), when the pigs got too close to each other, especially when they slept in piles (i.e. one on top of the other), the tracking software merged the individual blobs misinterpreting two individuals as one and eventually, it could not identify which pig is which (Figure 1.I.). In addition, Viazzi et al. (2014) software lacked in complete detection of aggressive behaviour as it showed a value of 89% for accuracy, 88.7% for sensitivity and 89.3% for specificity. McFarlane and Schofield (1995) recommended an increase of the image-capture rate of the camera to 1 image/50ms (= 50 frames per second) with the intention to minimise this problem. Lee et al. (2016) developed a tool based on the Kinect depth sensor and used it to track and classify aggressive behaviours within the pig pen but they also faced the same problems as Viazzi et al. (2014) (Figure 1.II.). The average classification accuracy was 90.2% and the average precision and recall were 90.2% and 90.1%, respectively. Even though the software developed by Lee et al. (2016) showed improved precision, accuracy and recall, the problem of real-time monitoring and complete automatic aggression detection is yet to overcome.

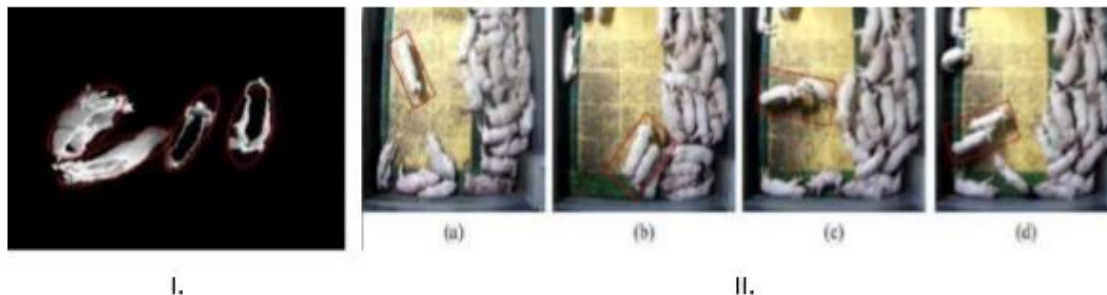


Figure 1. Blob merging in today's camera-based systems. (I. Adapted from: Viazzi *et al.*, 2014, II. Adapted from: Lee *et al.*, 2016).

Sound surveillance

Vocalisations and screams are behavioural expressions among pigs that convey information about their current state of health and welfare (Hillmann et al., 2004; Vandermeulen et al., 2015). This information can be of extreme help for the farmer in detecting problems early or preventing outbreaks. In particular, high frequency barks are linked to high cortisol levels in the blood and increased stress (Manteuffel et al., 2004; Vandermeulen et al., 2015).

It is known that pigs have a strong tendency for coordination and synchronization of behaviour in space and time and even one bark alarm by a single pig may make the whole group or even all the

groups in the chamber to freeze and attend towards the sound source (Špinka, 2009). Therefore, the technology used for monitoring pigs, should not interfere with their lives as even a slight sound such as a ‘pling’ could be the reason of inaccuracies in the experimental results. This was evident in Aerts et al. (2005) where the pigs got used of the labelling sound of the system and started coughing voluntarily to hear this particular sound, leading to experimental errors.

To develop an automatic scream classifier a reference set of data is necessary (Vandermeulen et al., 2015; Hemeryck and Berckmans, 2015). This reference data set can be built with audio labelling captured data by a single observer (Guarino et al., 2008; Chung et al., 2013), the same method as in camera-based systems. Schön et al. (2004) developed an Artificial Neural Network tool, the STREMODO, for automatic stress detection based only on vocalisation analysis. During the development process of the tool they found that the duration and intensity of screams are better stress indicators than the actual number of screams. STREMODO was tested under commercial conditions and the results were compared against six human experts’ audio observations and against the cortisol levels in pigs’ blood, achieving more than 99% of accuracy and more than 95% precision. Vandermeulen et al. (2015) developed an automatic classifier for pig screams definition and subtraction from other production process sounds. An event was labelled as a scream if its duration was longer than 0.4s. The thresholds that determined a scream’s characteristics (i.e. duration, low or high sound power, frequency, specific formant structure and variation between screams) were combined into a simple voting system, where each feature had one vote to determine if a certain sound was a scream or not. Thus, this classifier was based on votes making it adaptive. The developed tool achieved a 71.83% sensitivity, 91.43% specificity and an 83.61% precision. The classifier was then compared with STREMODO in terms of specificity, sensitivity and precision. It was found that STREMODO demonstrated improved results in sensitivity and specificity while for calculating the correlation between the two systems and a labeler for ten minutes both systems achieved comparable results comprising, a correlation of 0.80 ($P<0.001$) for the Vandermeulen et al. (2015) method and a 0.84 ($P<0.001$) for STREMODO.

Ferrari et al. (2008), developed an automatic tool that detects and classifies cough and screams related with pulmonary diseases. They reported that there was a significant difference between the Root Mean Square of healthy pigs (0.215) and the infected with disease (0.124) ($P=0$). Moreover, significant differences between the average peak frequency and length of coughs found ($P<0.001$); non-infectious coughs had an average peak frequency of 1600 Hz and average length of 0.43s compared with the infectious coughs that were recorded at 600Hz and 0.67s. Chung et al. (2013) achieved a 94% accuracy and a 91% sensitivity with their automatic cough and screams detection tool. It was noted that even a cheap microphone can be used to collect the data further reducing the system costs. Cordeiro et al. (2018) classified the screams of 40 pigs (i.e. 20 male and 20 female) for a full production cycle. It was found that the intensity differed significantly between males and females (i.e. 194 Hz and 218.2 Hz, respectively) and among the stages of the production cycle. They developed a tool that automatically classifies the age, sex and stressful events with precision of 81% based on voice recognition exclusively. Von Borell et al. (2009) developed a tool based on the classification of three different classes of piglet vocalisations (i.e. grunting, squealing and screaming). They found that vocalization analysis in pigs can help identify both pain and behavioural changes indicating that a system that combines both camera-based and audio analysis system could potentially improve contemporary PLF systems. The aforementioned studies provide evidence that utilization of certain pigs’ behaviour elements through sound analysis is feasible and it will be an essential part of future PLF systems.

2.3. Other Communication Information Technology (CIT) sensors

Various sensors could be used to monitor any parameter of interest within the pig barn such as radio-frequency identification (RFID) chips (Adrion et al., 2017) and depth sensors (Kim et al., 2017) along with more complex systems including electronic feeders and drinkers (Berckmans, 2015).

Adrion et al. (2018) tested an ultra-high frequency (UHF) RFID system for its efficiency in tracking pigs' trough visits using cameras. This system showed a 49.7% sensitivity, 99.0% specificity and a 97.9% accuracy. They reported that this technology needs further research and development. In addition, Maselyne et al. (2015) placed a high frequency RFID system around the nipple drinkers and 55 RFID tags were put on equal number of pigs to monitor pigs' individual drinking behaviour. The system was validated by live observations and flow-meters installed before each nipple drinker. It successfully registered 97% of the total drinking bouts, hence the 99.2% of the total drinking duration. However, they reported that the number and duration of the drinking bouts was overestimated by 10 and 19% respectively, implementing that further research is needed for a PLF early problem detection, signal warning application.

Cornou et al. (2008) proposed an oestrus, lameness and health disorders detection method using data collected from electronic sow feeders. This model showed specificity higher than 93% for all three tested parameters ($P < 0.003$). Sensitivity was not higher than 75% and was reported as satisfying compared with other commercial methods. However, these methods result in high number of false alarms and further research is needed for more concrete results.

Scheel et al. (2015), proposed a method to automatically detect lameness in sows at early stages using acceleration data collected from ear tags. In particular, they measured general activity such as daily variance, average variation and average squared variation, of 14 sows, 7 of which were diagnosed as lame at the end of the experimental period which lasted 14 days. They assumed that this data followed a normal distribution. A feature was classified as abnormal if the probability of observation was lower than 0.08. "Features per sow in state on" (i.e. mean, med, min, max) were significantly higher (i.e. 14.6, 11, 1, 41 on day 13 and 18.4, 15, 6, 50 on day 14), than in healthy sows (i.e. 5.4, 3, 0, 12 and 8.3, 8, 1, 20, respectively). They reported that they are working towards the development of an on-farm application with an early warning system based on the proposed method.

Wallenbeck and Keeling (2013) developed a model that predicts future tail biting outbreaks (TBO) 9 weeks before the first visual tail injuries based on data collected from electronic feeders, comprising daily frequency of feeder visits (DFV) and daily feed consumption (DFC). More specifically, 6-9 weeks before a TBO took place, the pigs demonstrated 23-51% less DFV than the pigs in pens with no development of TBO. Moreover, during the 5th week before a TBO, the future tail bite victims showed a 33-47% greater DFV compared with their pen mates that would not become victims and a 24-29% greater DFV compared with pigs in pens where no TBO was set in course.

Manteuffel (2009) developed a system for active feeding control in pigs. Groups of 8 pigs at the age of 7 weeks old were trained to individual jingles that were produced from Call Feeding Stations (CFS) in stall in their pens. The CFS produced a jingle sound and if the appropriate animal entered the feeder, feed was provided. The experiment lasted for 13 weeks and was repeated with 6 more groups. In the first day of the experiment all pigs positively reacted to the jingle sound on average of $49.1 \pm 3.2\%$. By the 4th day they reached correct response rate of $82 \pm 7\%$ while, the frequency of

appearance of abnormal behaviours such as belly nosing was lower and healing of skin lesions was improved compared with the control groups. In addition, the experimental groups showed better meat quality (comprising, 0.2% less intramuscular fat, 1.1% less drip loss and 7% more oxidative muscle fibres) and growth performance was not affected. It was reported that CFS minimised the competitive fighting, improved health and welfare and in general reduced stress levels.

The above studies suggest that although there has been a lot of work the previous 30 years and PLF area has improved greatly, more research is needed in order to reach the next level – on farm applications development and installation.

2.4. Modelling - methodology

Research and developments in the area of modelling of animal behaviour has been in the centre of focus the past decade providing very promising results such as preventing environmental degradation and health issues (Exadaktylos et al., 2008) and aggressive behaviour precognition (Oczak et al., 2013; 2014) in pigs.

The final step in developing an automatic dynamic control tool is to develop a model that links behaviour responses such as resting, feeding, drinking, panting, huddling, floor occupation area, aggressive interaction and activity to the parameter of interest e.g. temperature, relative humidity, airborne particle concentration, etc. Controlling the parameter via aspects of behaviour requires knowledge of how the animals respond to different conditions and variations of the parameter of interest. The responses are likely to involve both steady-state and dynamic components, therefore both traditional statistical analysis and dynamic modelling can be used to describe them (Smouse et al., 2010). As a result the model should be able to first describe a relationship between the parameter of interest and the behaviour and secondly predict the animal behaviour from past information. As a third step the comparison between predicted and real measured behaviour reveals if the animal status has changed (i.e. from comfort to discomfort). The change in status can be either determined by the prediction error, namely the error between predicted and real measured value, or the change in the model parameters that are defined by the model structure. The information to what extent the animal state has changed can then be used as input for the model-based controller defining what adjustments in the parameter settings must be done to bring the animal back to its normal state e.g. comfort behaviour. The monitoring and control algorithm would be trained by the experimental data and first validated on an extra data set that would have been gathered throughout experimentation but not used for the development of the algorithms. These algorithms should have a sensitivity of at least 85% and a specificity of at least 89% in order for the system to be commercially adoptable (Petrie and Watson, 2006; Oczak et al., 2013; Oczak et al., 2014; Viazzi et al., 2014; Berckmans 2014a). Thus, the pigs would unconsciously control the parameter of interest themselves.

3. The future of PLF

Pigs tend to destroy any system they have access to thus, the future of PLF in this area is geared towards under-the-skin sensors, Information and Communications Technology (ICT), cameras and microphones (Berckmans, 2014a). Although, PLF technology has been mainly developed under laboratory conditions, it has been proven that it is feasible to develop systems for commercial pig barns (Berckmans, 2017). This technology is just a daily management decision making tool that assists farmers improve their units and minimise the reliance on human labor (Kamphuis et al., 2015). However, PLF technology in farm adaptation has been rather slow the past years. This phenomenon could be mostly attributed to the cost-benefit ratio and the lack of perceived economic value (Russel and Bewley, 2013) mostly. For example the automatic weight monitoring and

estimation of pigs, although it seems very interesting, it has almost no value at all for the farmer as the collected data and the weight deviation alarms cannot be translated in to actions. Therefore, research in this area should be more focused on applications development rather than technology investigation. In addition, there should be an economic analysis that would demonstrate the economic benefits of PLF technology on on-farm applications (i.e. value for money). This may be one of the most important research concepts in today's PLF development centres.

The impact of PLF in pig barns could be of great benefit for the farmers. More specifically, aggression in a pig barn may cost the farmer either due to deaths or, medical treatments and delayed growth for the injured pigs. A PLF system that is able to reduce the costs due to aggression even by 2%, it is estimated that it will greatly benefit the farmer compared with its installation costs (Tzanidakis, 2018). In addition, a system as such could potentially be used in other animals with some alternations.

Under-the-skin sensors will be installed in the near future as Europe and the US are already working towards the definition of acceptable laws in terms of animal welfare and well-being. Imec R&D nano electronics and digital technologies companies have already developed a sensor that can detect and treat an infection at the first cell of a pig's body by measuring the pro-inflammatory cytokine, acute phase proteins, effector molecules and several other blood and body fluid variables. This sensor is attached on pig's body and the blood is being pumped through the sensor. Today, researchers are working towards the development of an algorithm that identifies which concentration of infected cells is infective for each person individually. In particular, this algorithm will be able to measure variations in the individual (Barckmans, 2014a).

Another debate is the installation costs of a PLF system. PLF technology can potentially be fairly cheap. Berckmans (2014a) reported that in 1989 M3-BIORes group started an experiment to measure heart rate, temperature and body movement using an implanted sensor for chickens and pigs and the cost for each sensor was 12,300 euros. In 2014 the same sensor costs 400 euros each and the manufacturer stated that could sell it for 0.12 euros if they produce 100,000,000 sensors per year. Therefore, it is evident that if a certain technology find useful applications within the pig barns then the installation cost could almost be eliminated.

It is evident that technological power has risen the past decades and it will continue rising this century in even faster pace. Researchers in the PLF area have a huge variety of sensors and systems to test for possible in pig barns in almost every aspect of the production process. It is known that today the developed sensors can measure almost everything needed to be measured (Berckmans, 2014a). These technological advancements are a challenge towards developing systems that will be economically viable, easy to use and efficient targeting a more environmental friendly pig production in terms of welfare, quantity and quality.

References

- Adrion, F., Kapun, A., Eckert, F., Holland, E.-M., Staiger, M., Götz, S. and Gallmann, E. 2018. Monitoring trough visits of growing-finishing pigs with UHF-RFID. *Computers and Electronics in Agriculture*. 144(1): 144-153.
- Adrion, F., Kapun, A., Holland, E.-M., Staiger, M., Löb, P. and Gallmann, E. Novel approach to determine the influence of pig and cattle ears on the performance of passive UHF-RFID ear tags. *Computers and Electronics in Agriculture*. 140(1): 168-179.

- Aerts, J.-M., Jans, P., Halloy, D., Gustin, P. and Berckmans, D. 2005. Labeling of cough data from pigs for on-line disease monitoring by sound analysis. Models and analysis of vocal emissions for biomedical applications. 4th international workshop. October 29-31, 2005 – Firenze, Italy.
- Ahrendt, P. Gregersen, T. and Henrik, K. 2011. Development of a real-time computer vision system for tracking loose-housed pigs. *Computers and Electronics in Agriculture*. 76 (2), pp. 169-174.
- Banhazi, T.M., Lehr, H., Black, J.L., Crabtree, H., Schofield, P., Tschärke, M. and Berckmans, D. 2012. Precision Livestock Farming: an international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 5(3): 1-9.
- Berckmans, D. 2004. Automatic on-line monitoring of animals by precision livestock farming. in F. Madec, G. Clement (ed.), *Animal Production in Europe: The way forward in an changing world, in between congress of the ISAH*, pp. 27-30.
- Berckmans, D. 2014. My vision of Precision Pig Farming in 2020. BPEX Innovation Conference 2014.24 June 2014, Warwickshire, UK. [Online]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=jEUQytFAHwo>
- Berckmans, D. 2014. Smart Farming for Europe: Value Creation through Precision Livestock Farming. 65th Annual Meeting of the EAAP. 25 August 2014, Copenhagen, Denmark. [Online]. Available from: http://old.eaap.org/Previous_Annual_Meetings/2014Copenhagen/Papers/Published/S05_01.pdf
- Berckmans, D. 2017. General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers*. 7(1): 6-11.
- Chung, Y., Oh, S., Lee, J. και Park, D. 2013. Automatic detection and recognition of pig wasting diseases using sound data in audio surveillance systems. *Sensors*. 13(10): 12929-12942.
- Cordeiro, A.F.S., Nääs, I.A., Leitão, F.S., de Almeida, A.C.M. και de Moura, D.J. 2018. Use of vocalization to identify sex, age, and distress in pig production. *Biosystems Engineering*. 173(1): 57-63.
- Cornou, C., Vinther, J. and Kristensen, A.R. 2008. Automatic detection of oestrus and health disorders using data from electronic sow feeders. *Livestock Science*. 118(3): 262-271.
- D'Eath, R.B. and Turner, S.P. 2009. The natural behaviour of the pig. In: Marchant-Forde, J.N. ed. *The welfare of pigs*. Indiana: Springer. pp. 13-46.
- Dominiak, K.N., Pedersen, L.J. και Kristensen, A.R. 2018. Spatial modeling of pigs' drinking patterns, as an alarm reducing method I. Developing a multivariate dynamic linear model. *Computers and Electronics in Agriculture*. [In Press]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917310980>
- Exadaktylos, V., Silva, M., Aerts, J.-M., Taylor, C.J. and Berckmans, D. 2008. Real-time recognition of sick pig cough sounds. *Computers and Electronics in Agriculture*. 63(2): 207-214.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011. Pigs for prosperity. Diversification booklet number 15. Rome: Rural Infrastructure and Agro-Industries Division (RIAD). [Online]. Available from: <http://www.fao.org/docrep/015/i2471e/i2471e00.pdf>
- Ferrari, S., Silva, M., Guarino, M., Aerts, J.-M. και Berckmans, D. 2008. Cough sound analysis to identify respiratory infection in pigs. *Computer and Electronics in Agriculture*. 64(2): 318-325.
- Guarino, M., Jans, P., Costa, A., Aerts, J.-M. and Berckmans, D. 2008. Field test of algorithm for automatic cough detection in pig houses. *Computers and electronics in Agriculture*. 62(1): 2228.
- Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J. και Pastell, M. 2018. Smart Animal Agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production. *Annual Review of Animal Biosciences*. 7: 403-425.

- Hemeryck, M. and Berckmans, D. 2015. Pig cough monitoring in the EU-PLF project: first results. In: Halachmi, I. ed. Precision livestock farming applications. Making sense of sensors to support farm management. Wageningen Academic Publishers. Wageningen, Netherlands. pp. 197-209.
- Hillmann, E., Mayer, C., Scön, P.C., Puppe, B. and Schrader, L. 2004. Vocalisation of domestic pigs (*Sus scrofa domestica*) as an indicator for their adaptation towards ambient temperatures. *Applied Animal Behaviour Science*. 89(3-4): 195-206.
- Hintze, S., Scott, D., Turner, S., Meddle, S.L. and D'Eath, R. B. 2013. Mounting behaviour in finishing pigs: Stable individual differences are not due to dominance or stage of sexual development. *Applied Animal Behaviour Science*. 147 (1-2), pp. 69-80.
- Human International Society (HIS). 2014. An HIS report: The welfare of animals in the pig industry. [Online article]. Available from: http://www.hsi.org/assets/pdfs/hsi-fa-whitepapers/welfare_of_animals_in_the_pig.pdf
- Islam, M.M., Ahmed, S.T., Mun, H.S., Bostami, A.B.M.R., Kim, Y.J. and Yang, C.J. 2015. Use of thermal imaging for early detection of signs of disease in pigs challenged orally with *Salmonella typhimurium* and *Escherichia coli*. *African Journal of Microbiology Research*. 9(26): 1667-1674.
- Jensen, P. and Recén, B. 1989. When to wean – Observations from free-ranging domestic pigs. *Applied Animal Behaviour Science*. 23 (1-2), pp. 49-60.
- Kamphuis, C., Steeneveld, W. and Hogeveen, H. 2015. Economic modelling to evaluate the benefits of precision livestock farming technologies. In: Halachmi, I. ed. Precision livestock farming applications. Making sense of sensors to support farm management. Wageningen Academic Publishers. Wageningen, Netherlands. pp. 86-94
- Kashiha, M., Bahr, C., Ott, S., Moons, C.P.H., Niewold, T.A., Ödberg, F.O. and Berckmans, D. 2013. Automatic identification of marked pigs in a pen using image pattern recognition. *Computers and Electronics in Agriculture*. 93 (1), pp. 111-120. Kashiha, M., Bahr, C., Ott, S., Moons, C.P.H.,
- Niewold, T.A., Ödberg, F.O. and Berckmans, D. 2014. Automatic weight estimation of individual pigs using image analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 107 (1), pp. 38-44.
- Kim, J., Chung, Y., Choi, Y., Sa, J., Kim, H., Chung, Y., Park, D. and Kim, H. 2017. Depth-based detection of standing pigs in moving noise environments. *Sensors*. 17(12): 2757. [On-line]. Available from: file:///C:/Users/y50/Downloads/Depth-Based_Detection_of_StandingPigs_in_Moving_N.pdf
- Lee, J., Jin, L., Park, D. and Chung, Y. 2016. Automatic recognition of aggressive behaviour in pigs using a depth sensor. *Sensors*. 16 (5), pp. 631-642.
- Manteuffel, G. 2009. Active feeding control and environmental enrichment with call-feedingstations. In: Lokhorst, C. and Koerkamp, P. W. G. G. eds. Precision livestock farming '09. Papers presented at the 4th European Conference on Precision Livestock Farming. 6-8 July, 2009. Wageningen Academic Publishers. Wageningen, Netherlands. pp. 283-288.
- Mantueffel, G., Puppe, B. and Schön, P. 2004. Vocalisation of farm animals as a measure of welfare *Applied Animal Behaviour Science*. 88(1-2): 163-182.
- Maselyne, J., Adriaens, I., Huybrechts, T., de Ketelaere, B., Millet, S., Vangeyte, J. van Nuffel, A. and Saeys, W. 2015 Assessing the drinking behaviour of individual pigs using RFID registrations. In: Halachmi, I. ed. Precision livestock farming applications. Making sense of sensors to support farm management. Wageningen Academic Publishers. Wageningen, Netherlands. pp. 209-215.
- McFarlane, N.J.B. and Schofield, C.P. 1995. Segmentation and tracking of piglets in images. *Machine Vision and Applications*. 8(3): 187-193.

- Measurement Computing (MC). 2018. Measurement computing data acquisition knowledgebase. Accuracy, precision, resolution & sensitivity. [Online]. Available from: <https://kb.mccdaq.com/KnowledgebaseArticle50043.aspx>
- McGlone, J.J. 1986. Agonistic behaviour in food animals: review of research and techniques. *Journal of Animal Science*. 62 (4), pp. 1130-1139.
- National Instruments (NI). 2019. Sensor Terminology. [Online]. Available from: <http://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/13/sensor-terminology.html>
- Nilsson, M., Herlin, A.H., Guzhva, O., Åström, K., Ardö, H. and Bergsten, C. 2015. Continuous surveillance of pigs in a pen using learning-based segmentation in computer vision. In: Halachmi, I. ed. *Precision livestock farming applications. Making sense of sensors to support farm management*. Wageningen Academic Publishers. Wageningen, Netherlands. pp. 217-223.
- Nir, O., Parmet, Y., Werner, D., Adin, G. και Halachmi, I. 2018. 3D Computer-vision system for automatically estimating heifer height and body mass. *Biosystems Engineering*. 173(1): 4-10.
- Oczak, M., Ismayilova, G., Costa, A., Viazzi, S., Sonoda, L.T., Fels, M., Bahr, C., Hartung, J., Guarino, M., Berckmans, D. and Vraken, E. 2013. Analysis of aggressive behaviours of pigs by automatic video recordings. *Computers and Electronics in Agriculture*. 99 (1), pp. 209-217.
- Oczak, M., Viazzi, S., Ismayilova, G., Sonoda, L.T., Roulston, N., Fels, M., Bahr, C., Hartung, J., Guarino, M., Berckmans, D. and Vraken, E. 2014. Classification of aggressive behaviour in pigs by activity index and multilayer feed forward neural network. *Biosystems Engineering*. 119 (1), pp. 89-97.
- Pew Commission on Industrial Farm Animal Production (PCIFAP). 2008. Putting meat on the table: Industrial Farm Animal Production in America. [Online]. Available from: http://www.pewtrusts.org/~media/assets/2008/pcifap_exec-summary.pdf
- Prichard, E. 2001. Analytical Measurement Terminology. *Handbook of terms used in quality assurance of analytical measurement*. LGC, Teddington, UK. Chapter 2: The analytical method. p. 17.
- Scheel, C., Traulsen, I. and Krieter, J. 2015. Detecting lameness in sows using acceleration data from ear tags. In: Halachmi, I. ed. *Precision livestock farming applications. Making sense of sensors to support farm management*. Wageningen Academic Publishers. Wageningen, Netherlands. pp. 39-44.
- Quanten, S., de Valck, E., Cluydts, R., Aerts, J.-M. and Berckmans, D. 2006. Individualized and timevariant model for the functional link between thermoregulation and sleep onset. *Journal of Sleep Research*. 15(2): 183-198.
- Ruminski, J., Kaczmarek, M., Renkielska, A. and Nowakowski, A. 2007. Thermal parametric imaging in the evaluation of skin burn depth. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Professional Technical Group of Bio-Medical Engineering (IEEE) Transactions on Biomedical Engineering*. 54(2): 303-312.
- Schmidt, M., Lahrmann, K.H., Ammon, C., Berg, W., Schön, P.C. and Hoffmann, G. 2013. Assessment of body temperature in sows by two infrared thermography methods at various body locations. *Journal of Swine Health and Production*. 21(4): 203-209.
- Schön, P.C., Puppe, B. and Manteuffel, G. 2004. Automated recording of stress vocalisations as a tool to document impaired welfare in pigs. *Animal Welfare*. 13(2): 105-110.
- Smouse, E.P., Focardi, S., Moorcroft, R.P., Kie, G.J., Forester, D.J. and Morales, M.J. 2010. Stochastic modelling of animal movement. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*. 365(1550): 2201-2211.

- Soerensen, D.D. and Pedersen, L.J. 2015. Infrared skin temperature measurements for monitoring health in pigs: a review. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 57(1): 5.
- Špinko, M. 2009. Behaviour of pigs. In Jensen, P. ed. *The ethology of domestic animals: An introductory text (Second edition)*. Oxon: CABI Publishing. pp. 177-191.
- Stygar, A.H., Dolechck, K.A. και Kristensen, A.R. 2017. Analyses of body weight patters in growing pigs: a new view on body weight in pigs for frequent monitoring. *Animal*. 12(2): 295-302.
- The Food Ethics Council and Heather Pickett (TFECHP). 2014. Farm animal welfare – Past, present and future. A review of farm animal welfare in the UK. Commissioned by the RSPCA’s freedom scheme to mark its 20th anniversary. September 2014. [Online]. Available from: <http://www.foodethicscouncil.org/uploads/publications/2014%20FarmAnimalWelfare.pdf>
- Tzanidakis, C. 2018. The economic impact of aggressive behaviours in a pig barn. MSc Thesis, Agricultural University of Athens, p. 50.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2017. Swine reports. [Online]. Available from: <https://www.ams.usda.gov/market-news/swine-reports>
- Vandermeulen J., Bahr, C., Tullo, E., Fontana, I., Ott, S., Kashiha, M., Guarino, M., Moons, C.P.H., Tuytens, F.A.M., Niewold, T.A. and Berckmans, D. 2015. Discerning pig screams in production environments. *Public Library of Science*. 10(4). [Online]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4414550/>
- Viazzi, S., Ismayilova, Oczak, M., Sonoda, L.T., Fels, M. Guarino, M., Vranken, E., Hartung, J., Bahr, C. and Berckmans, D. 2014. Image feature extraction for classification of aggressive interactions among pigs. *Computers and Electronics in Agriculture*. 104 (1): 57-62.
- von Borell, E., Bünger, B., Schmidt, T. and Horn, T. 2009. Vocal-type classification as a tool to identify stress in piglets under on-farm conditions. *Animal Welfare*. 18(4): 407-416.
- Wellenbeck, A. and Keeling, L.J. 2013. Using data from electronic feeders on visit frequency and feed consumption to indicate tail biting outbreaks in commercial pig production. *Journal of Animal Science*. 91(6): 2879-2884.

ΡΟΜΠΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

I. Μενεξές, Β. Κολορίζος, Χ. Αρβανίτης, Γ. Μπανιάς, Δ. Κατέρης & Δ. Μπόχτης

¹Ινστιτούτο Βιο-οικονομίας και Αγρό-τεχνολογίας (iBO), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Δημάρχου Γεωργιάδου 118, 38333, Βόλος, e-mail: i.menexes@certh.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αντιφατική συνύπαρξη της παραδοσιακής γεωργίας και του σύγχρονου κόσμου της ψηφιοποιημένης πληροφορίας, θα έπρεπε να αποτελεί παράγοντα επιτάχυνσης του εκσυγχρονισμού του εν λόγω πρωτογενούς τομέα και των μη-βελτιστοποιημένων μεθόδων που τον διέπουν. Εφαρμοσμένες πρακτικές βασιζόμενες σε εμπειρικές παρατηρήσεις που οδηγούν σε σπατάλη πόρων και αποφέρουν ανεπιθύμητα αποτελέσματα, οικονομικών και περιβαλλοντικών αρνητικών επιπτώσεων, μπορούν να αντικατασταθούν από σύγχρονες εναλλακτικές. Τα παραπάνω αποτελούν προβλήματα που θα μπορούσαν να εξαλειφθούν με την αξιοποίηση των τελευταίων τεχνολογικών εξελίξεων που στοχεύουν στη χρήση αυτόνομων οχημάτων και πληροφοριακών συστημάτων. Το πληροφοριακό σύστημα που παρουσιάζεται, αποτελεί το πλαίσιο που ενσωματώνει όλα τα επιμέρους αυτόνομης λειτουργίας υποσυστήματα και εξασφαλίζει την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ τους.

Λέξεις κλειδιά: ρομποτική, γεωργία, αισθητήρες, μη επανδρωμένο εναέριο όχημα, μη επανδρωμένο επίγειο όχημα

ROBOTICS APPLICATIONS IN AGRICULTURE WITH THE USE OF AN INTEGRATED INFORMATION SYSTEM

I. Menexes, V. Kolorizos, C. Arvanitis, G. Baniias, D. Kateris & D. Bochtis

¹Institute for Bio-economy and Agri-technology (iBO), Center for Research and Technology Hellas (CERTH), Dimarchou Georgiadou 118, 38333, Bolos, e-mail: i.menexes@certh.gr

ABSTRACT

The contradictory coexistence of Agriculture and the modern world of digitized information, should act as a factor in accelerating the modernization process of this primary sector and of its non-optimized methods that it is governed by. Applied practices that are based on empirical observations, leading to inefficient resource use and yield undesired results of negative environmental as well as economic impact, might as well be replaced by modern alternatives. Such matters are considered problems that could be eliminated by using the latest technological advancements, the aim of which is focused on the utilization of autonomous vehicles and information systems. The presented information system is the framework within which the integration of numerous autonomously operating subsystems is viable with an ensured bidirectional communication among the information system's entities.

Keywords: robotics, agriculture, sensors, UGV, UAV

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κόσμος όπως είθισται να το γνωρίζουμε έχει αλλάξει. Έχει εξελιχθεί πλέον σε ένα περιβάλλον ψηφιακής πληροφορίας και δεδομένων, δομημένο εντός του πλαισίου που έχει δημιουργήσει το σύγχρονο διαδίκτυο. Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η δυναμική φύση του, παράγοντας που καθιστά την ανάγκη για αναβάθμιση των στοιχείων του επιτακτική από ποτέ. Ωστόσο, παρόλο που αυτή η διαδικασία βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη καιρό τώρα, είναι εμφανές πως δεν έχουν λάβει όλοι οι τομείς τη δέουσα προσοχή ούτως ώστε ο αναλογικός, άλλοτε, κόσμος μας να μεταβεί ομαλά στην εποχή της πληροφορίας. Δυστυχώς, η γεωργία ανήκει σε αυτή τη λίστα κλάδων που έχουν παραβλεφθεί και, κατά συνέπεια, δεν έχουν καταφέρει να παρακολουθήσουν τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις. Ως αποτέλεσμα της σημαντικής αυτής ασυνέπειας, πλήθος μεθόδων της επιστήμης της γεωργίας παραμένουν δέσμιες ξεπερασμένων πρακτικών που βασίζονται σε παρατηρήσεις και σε εμπειρικά συμπεράσματα που υστερούν αποτελεσματικότητας και χρίζουν άμεσης βελτιστοποίησης. Γι' αυτό το λόγο, έχει τεράστια σημασία η στόχευση προς αυτήν την κατεύθυνση καθώς υπάρχουν τρομερές δυνατότητες βελτίωσης των άνωθεν πασχουσών μεθόδων, εφόσον αξιοποιηθούν υπεύθυνα και μεθοδικά οι δυνατότητες των τελευταίων τεχνολογικών εξελίξεων.

Τέτοιες εξελίξεις καθιστούν εφικτή την ενσωμάτωση τεχνολογιών, συνδεδεμένων με τις έννοιες των φορητών και ασύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων και του υπολογιστικού νέφους, στη βασισμένη στη γνώση Γεωργία (Morgan and Murdoch, 2000), και ικανή να αυτοματοποιήσει εργασίες που απαιτούν ανθρώπινο δυναμικό, μειώνοντας σημαντικά το κόστος τέτοιων εργασιών. Ως άμεσο επακόλουθο αυτού, εξασφαλίζεται η μείωση κατανάλωσης πόρων τη στιγμή που αυξάνεται η παραγωγή, επιτυγχάνοντας το στόχο μιας επιθυμητής ισορροπίας παραδόξων. Ο στόχος αυτός, καθορισμένος με κριτήριο τη βιωσιμότητα, που σημαδεύει σε ζήτηση υψηλότερης παραγωγής, εκπληρώνεται και αντικατοπτρίζεται στις θετικές επιπτώσεις που έχει επάνω στις, μεταξύ άλλων, περιβαλλοντικές και οικονομικές πτυχές της βιομηχανία της βιο-οικονομίας (Von Wirén-Lehr, 2001). Παράλληλα όμως, με τον ολοένα αυξανόμενο ανθρώπινο πληθυσμό να ασκεί πιέσεις για μεγαλύτερη παραγωγή, σε συνδυασμό με τους ανασταλτικούς παράγοντες της συμπίεσης του εδαφικού δυναμικού (Hamza and Anderson, 2005) και της κλιματικής αστάθειας (Mueller et al., 2012), προσθέτουν ακόμα μεγαλύτερο βάρος στη ζήτηση. Επιπροσθέτως, κατά τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών, μία ανάλυση σε βάθος είκοσι ετών δείχνει αύξηση της τάξεως του 0,49% ετησίως, σε θερμοδικές απαιτήσεις κατά κεφαλή. Η αύξηση αυτή, που μεταφράζεται σε ένα αξιοσημείωτο 10.25% για δύο δεκαετίες, αποκτά ιδιαίτερο βάρος ως μεταβλητή στην εξίσωση που επισημαίνει την αναγκαιότητα για περαιτέρω αύξηση της προσφοράς προκειμένου να αντισταθμιστεί η ζήτηση.

Η Τεχνολογία της Πληροφορίας παρέχει την υποδομή για τη δημιουργία του πολύ αναγκαίου περιβάλλοντος για τη Γεωργία που είναι βασισμένη στην πληροφορία. Πληροφοριακά συστήματα που συγκεντρώνουν και επεξεργάζονται πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη γεωργία, εξυπηρετούν σκοπούς που θα βελτιώσουν το επίπεδο της ευφυούς διαχείρισης και απόφασης της γεωργικής παραγωγής (Sørensen et al., 2010; Yan-E, 2011). Τα δεδομένα εισόδου στο πληροφοριακό σύστημα που αφορούν στην ποιότητα του εδάφους, στην κατάσταση του χωραφιού και της καλλιέργειας, στην υγεία των φυτών καθώς επίσης και σε πολλές άλλες κρίσιμες μετρήσεις, μπορούν να λαμβάνονται αξιόπιστα και αποτελεσματικά με τη χρήση αυτοματοποιημένων ρομποτικών υποσυστημάτων (Sørensen et al., 2010), σε συνδυασμό με εξελιγμένο εξοπλισμό (αισθητήρες, κάμερες κλπ.) (Adamchuk et al., 2004). Επίγεια (UGV) και εναέρια (UAV) μη επανδρωμένα οχήματα τελευταίας τεχνολογίας, εξοπλισμένα με εξίσου ανεπτυγμένο και εξελιγμένο εξοπλισμό, μπορούν να εισαχθούν στη Γεωργία της Πληροφορίας μέσω ολοκληρωμένων πληροφοριακών συστημάτων (Sørensen et al., 2011).

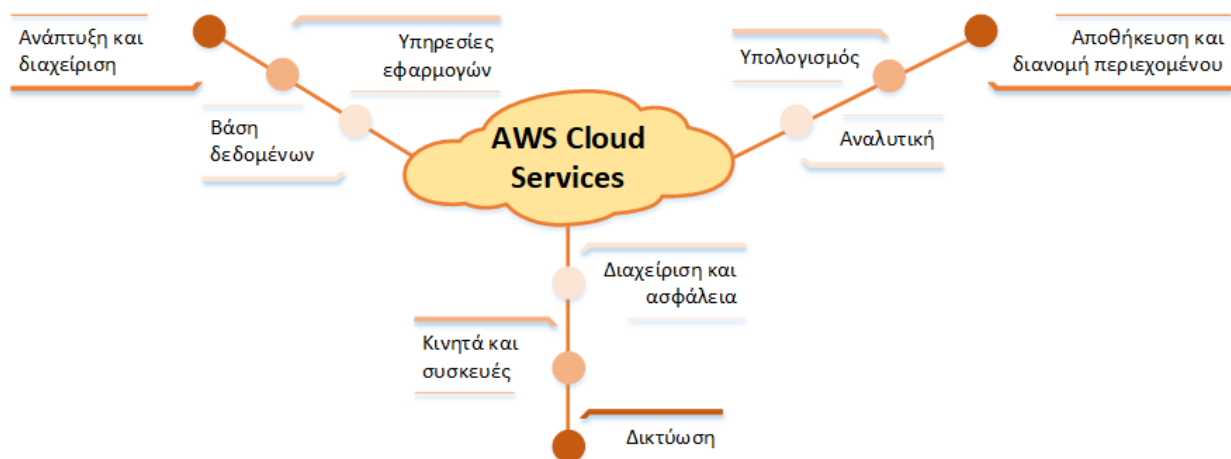
Ωστόσο, δικαιολογημένα προκύπτει η απορία για την απουσία ενός τέτοιου περιβάλλοντος, του οποίου η ύπαρξη θα ανέβαζε τον πήχη δυνατοτήτων της γεωργίας και θα την αναβάθμιζε σε επίπεδο

αντάξιο των υπολοίπων κλάδων της βιομηχανίας, καθώς, εν έτι 2019 και με την ραγδαία άνθιση της τεχνολογίας, μια τέτοια απουσία τίποτε άλλο παρά έντονο προβληματισμό θα μπορούσε να προκαλεί. Η αιτία της, έως τώρα, αδυναμίας ανάπτυξης παρόμοιων ολοκληρωμένων πληροφοριακών συστημάτων για την υποστήριξη του εγχειρήματος ενσωμάτωσης αυτόνομων ρομποτικών υποσυστημάτων στη Γεωργία της Πληροφορίας, εντοπίζεται σε λειτουργικές και δομικές δυσκολίες. Ο διαφορετικός φύσεως τύπος των επιμέρους υποσυστημάτων εμποδίζει την διασύνδεση αυτών και αναστέλλει τη ροή των δεδομένων μεταξύ τους, καθιστώντας τις προσπάθειες για συνεργασία τους μη-λειτουργικές. Επιπλέον, η μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων, που συλλέγονται από τα ρομποτικά οχήματα, ώστε να μετατραπούν σε εφαρμόσιμη πληροφορία απαιτεί τη χρήση προγραμμάτων, ανεπτυγμένα στο πλαίσιο κλειστού κώδικα, που επί της ουσίας αποτελούν «μαύρα κουτιά» στα οποία ο χρήστης δεν έχει κανέναν έλεγχο ως προς τον τρόπο επεξεργασίας της πληροφορίας εισόδου και, κατ' επέκταση, καμία βεβαιότητα ως προς την εγκυρότητα της παραγόμενης εξόδου. Έπειτα, ακόμη και στην περίπτωση που τα άνωθεν αντιμετωπίζονται επιτυχώς, το πρόβλημα που θέτει φραγμό στην αξιοποίηση των αποτελεσμάτων είναι ο κατακερματισμός της παραγόμενης πληροφορίας. Πολυάριθμες μονάδες επεξεργασίας δεδομένων συνεχούς παραγωγής πληροφοριών, συνεπάγονται εξίσου πολυάριθμων πηγών παραγόμενης πληροφορίας. Η συλλογή αυτών και η συγκεντρωτική διαχείρισή τους, μέσα από μια υποδομή που προσφέρει δυνατότητες φιλτραρίσματος των παραπάνω πληροφοριών για την καλύτερη και αποτελεσματικότερη αξιοποίησή τους, είναι το πρόβλημα και η πρόκληση στα οποία επικεντρώνεται το ενδιαφέρον.

Σε αυτή την εργασία, προτείνεται ένα ολοκληρωμένο πληροφοριακό σύστημα που συλλέγει δεδομένα μέσω μη επανδρωμένων επίγειων και εναέριων οχημάτων. Το σύστημα αυτό στοχεύει στον εκσυγχρονισμό και την αυτοματοποίηση ορισμένων από τους προαναφερθέντες κλάδους της γεωργίας και αναμένεται να θεραπεύσει προβλήματα τα οποία πηγάζουν τόσο από μεθόδους στηριζόμενες σε παραδοσιακές πρακτικές όσο και από την έλλειψη κεντρικά συγκεντρωμένων δεδομένων.

2. ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1 Λειτουργικότητα πληροφοριακού συστήματος



Εικόνα 4. AWS Υποδομή υπηρεσιών νέφους.

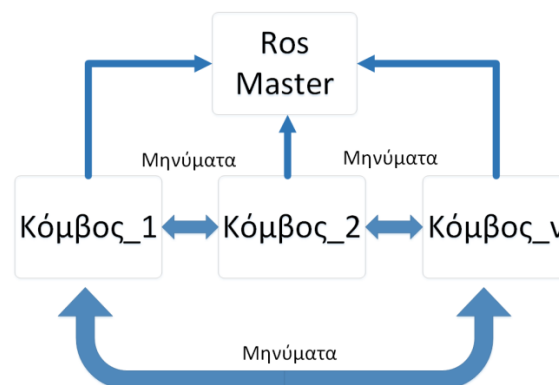
Το πλαίσιο στο οποίο ενσωματώνονται τα υποσυστήματα των UGV και UAV είναι το πληροφοριακό σύστημα που παρουσιάζεται. Η υποδομή πάνω στην οποία βασίζεται ο εξυπηρετητής του πληροφοριακού συστήματος (back-end), ο ρόλος του οποίου είναι να λαμβάνει, να αποθηκεύει, να επεξεργάζεται και να παρέχει τόσο στο χρήστη την τελική πληροφορία όσο και την αναγκαία πληροφορία μεταξύ των υποσυστημάτων, υποστηρίζεται από τις υποδομές που προσφέρει η Amazon

μέσω των υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους (Amazon, 2016) που ανήκουν στο ευρύτερο σύνολο των υπηρεσιών ιστού της Amazon (AWS) (Εικόνα 11). Η υψηλή αξιοπιστία και οι δυνατότητες για εύκολη προσαρμογή της κλίμακας του συστήματος ώστε να ανταποκρίνεται στις λειτουργικές απαιτήσεις όπως αυτές διαμορφώνονται, καθώς επίσης και η λειτουργία “serverless application” ήταν οι τρεις λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του υπολογιστικού νέφους AWS ως την πλατφόρμα φιλοξενίας του πληροφοριακού συστήματος που αναπτύχθηκε. Το μοντέλο “serverless application” αποδεσμεύει ανθρώπινους πόρους από εργασίες που αφορούν στη συντήρηση του εξυπηρετητή, και αντί αυτού το ανθρώπινο αυτό δυναμικό μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη της εφαρμογής εστιάζοντας το ενδιαφέρον στο κομμάτι του πληροφοριακού συστήματος με το οποίο αλληλεπιδρά ο χρήστης (front-end).

Για την ανάπτυξη του front-end, ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα σύνολο διαφορετικών εργαλείων λογισμικού. Οι γλώσσες ReactStrap (Hernandez, Burrell and Sharp, 2018), Bootstrap (Otto et al., 2019), HTML και CSS υιοθετήθηκαν για τη δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να αλληλεπιδρά με το πληροφοριακό σύστημα και να έχει πρόσβαση σε αυτό. Η επικοινωνία μεταξύ του back-end και του front-end του συστήματος για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο, πραγματοποιείται με τη βοήθεια της γλώσσας React (Facebook Open Source, 2017). Η React είναι μια βιβλιοθήκη βασισμένη στη JavaScript γλώσσα που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην ανάπτυξη ιστοσελίδων και ιστο-εφαρμογών, και είναι κατάλληλη για τη δημιουργία γραφικών διεπαφών μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ο χειρισμός της εκάστοτε ανεπτυγμένης εφαρμογής από τους αντίστοιχους χρήστες. Η Bootstrap είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη μορφοποίηση της εμφάνισης των ιστοσελίδων, που καθιστά πολύ εύκολη την πολύ-συμβατότητα των ιστοσελίδων με πολυάριθμες διαφορετικές συσκευές όπως κινητά, φορητοί - και μη - υπολογιστές κλπ., χωρίς να αλλοιώνεται ο τρόπος εμφάνισης της ιστοσελίδας σε διαφορετικού μεγέθους οθόνες. Η χρήση της Bootstrap σε συνδυασμό με τη React γλώσσα που καθίσταται απαραίτητη για την ανάπτυξη του πληροφοριακού συστήματος, πραγματοποιείται μέσω της γλώσσας ReactStrap που αποτελεί ένα μέσω εισαγωγής των στοιχείων που προσφέρει η Bootstrap στη γλώσσα React.

2.2. Λειτουργικότητα ρομποτικού συστήματος

Το “Robot Operating System” (ROS) (Quigley et al., 2009) είναι ένα πλαίσιο βασισμένο στο λειτουργικό σύστημα Linux, που προσφέρεται για την ανάπτυξη λογισμικού για ρομπότ. Αποτελείται από την κεντρική μονάδα που ονομάζεται “Rosmaster” και από ένα δίκτυο κόμβων. Το δίκτυο αυτό διαχειρίζεται ο Rosmaster, και δεν έχει περιορισμό ως προς το πλήθος κόμβων που μπορεί να φιλοξενήσει. Όλοι οι κόμβοι αυτοί είναι ανεξάρτητοι από τους υπόλοιπους, με τον καθένα να εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς εκτελώντας διαφορετικής φύσεως εργασίες, δημιουργώντας έτσι ένα πολύπλοκο, ωστόσο απλό στη βάση του, δίκτυο επεξεργαστικών μονάδων που λειτουργούν παράλληλα μέσα στο ίδιο οικοσύστημα (Σφάλμα! Αγνώστη παράμετρος αλλαγής.).



Εικόνα 5. Δομή του δικτύου ROS.

Οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν ο ένας με τον άλλο ανταλλάσσοντας δεδομένα μέσω διαφορετικών τύπων, για κάθε περίπτωση, μηνυμάτων και όλοι τους συντονίζονται από το Rosmaster.

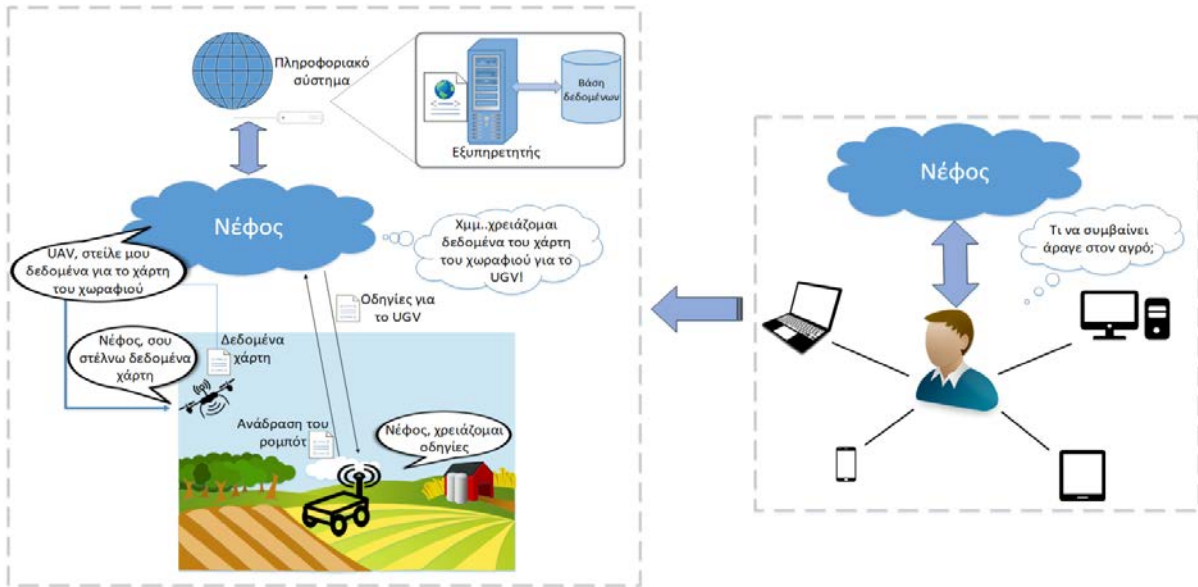
Το λογισμικό ROS χρησιμοποιείται σε σημαντικό βαθμό στη βιομηχανία όταν εμπλέκονται ρομπότ, ή ακόμα και στόλοι από ρομπότ, και είναι δημοφιλές χάρη στην Ανοικτού Λογισμικού φύση του, όπως επίσης και λόγω της πλούσιας συλλογής από βιβλιοθήκες λογισμικού που προσφέρει οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν σε διαφορετικές εφαρμογές. Επιπροσθέτως, το ROS παρέχει μια μεγάλη ποικιλία οδηγών λογισμικού (software drivers), διευκολύνοντας έτσι, εντυπωσιακά, τη διαδικασία σύνδεσης βιομηχανικού, τελευταίας τεχνολογίας, εξοπλισμού στα ρομπότ. Τέτοιος εξοπλισμός μπορεί να αφορά αισθητήρια και συσκευές, όπως για παράδειγμα δέκτες δομένων πλοήγησης που προέρχονται από το Δορυφορικό Σύστημα Παγκόσμιας Πλοήγησης (GNSS), αισθητήρες σάρωσης λέιζερ, κάμερες βάθους/RGB, Μονάδες Μέτρησης Αδράνειας (IMU) κλπ., με τη χρήση του οποίου τα ρομπότ είναι ικανά να αντιλαμβάνονται τον πραγματικό κόσμο και να κινούνται εντός αυτού αποφεύγοντας εμπόδια που ανιχνεύουν στο χώρο γύρω τους (Thrun, 2008).

2.3. Λειτουργικότητα συνδεδεμένου συστήματος

Τα UGV που είναι εξοπλισμένα με τέτοιου είδους εξοπλισμό, επιχειρούν αυτόνομα εντός του πλαισίου που παρέχει το πληροφοριακό σύστημα (Sørensen and Bochtis, 2010), το οποίο μπορεί να αναθέσει εργασίες στα ρομπότ οι οποίες θα εκτελεστούν σύμφωνα με το πρόγραμμα εργασιών όπως αυτό διαμορφώνεται από το χρήστη του συστήματος. Το πληροφοριακό σύστημα παρακολουθεί και καταγράφει διαρκώς την κατάσταση των ρομπότ που διαχειρίζεται, παρέχοντας πληροφορίες για τη συνολική εποπτεία αυτών. Σημαντική χρησιμότητα έχει η ζωντανή ενημέρωση δεδομένων σχετικών με την τοποθεσία, την ταχύτητα, τα επίπεδα και αρτιότητα της μπαταρίας, την πρόοδο της ανατεθείσας εργασίας και τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του εκάστοτε ρομπότ, καθότι κρατά το χρήστη του συστήματος ενήμερο για την κατάσταση αυτού. Το διασυνδεδεμένο σύστημα κάνει δυνατή την υποβοήθηση της αυτόνομης πλοήγησης του/των UGV(s) από UAV(s) τα οποία επιχειρούν ταυτόχρονα στον εναέριο χώρο του αγρού, τροφοδοτώντας, σε πραγματικό χρόνο, το πληροφοριακό σύστημα με δεδομένα του επιχειρησιακού χώρου (π.χ. 3-D mapping) τα οποία μεταφέρονται στο πληροφοριακό σύστημα και αναλύονται ώστε να μεταφέρουν στα UGV πληροφορίες υποστήριξης στην επίγνωση περιβάλλοντος (Ravankar et al., 2018). Συγκεκριμένα, τα UAVs συλλέγουν φωτογραφικό υλικό του οποίου η ανάλυση παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τον εντοπισμό επίγειων εμποδίων. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο πληροφοριακό σύστημα από όπου ο χρήστης έχει πρόσβαση στο συλλεγμένο εναέριο υλικό και μπορεί να δει ζωντανά την εικόνα που βλέπει το εναέριο όχημα, για το αντίστοιχο χωράφι. Ακόμη, από την ανάλυση των παραπάνω δεδομένων είναι εφικτό να συνταχθούν πλάνα πορείας με τα οποία ενημερώνονται τα επίγεια ρομπότ. Στο πλαίσιο της υποβοηθούμενης πλοήγησης, τα UAV στέλνουν ειδοποιήσεις στα UGV, που σηματοδοτούν την ύπαρξη εμποδίων σε συγκεκριμένα σημεία εντός του χωραφιού. Έπειτα, τα UGV χρησιμοποιούν αυτήν την πληροφορία και σε συνδυασμό με τα δεδομένα που λαμβάνουν μέσω του εξοπλισμού τους, επαληθεύουν την εγκυρότητα αυτών των ειδοποιήσεων και ανανεώνουν το πλάνο διαδρομής που θα ακολουθήσουν προκειμένου να αποφύγουν περιοχές εντός του αγρού από όπου δεν μπορούν να διέλθουν.

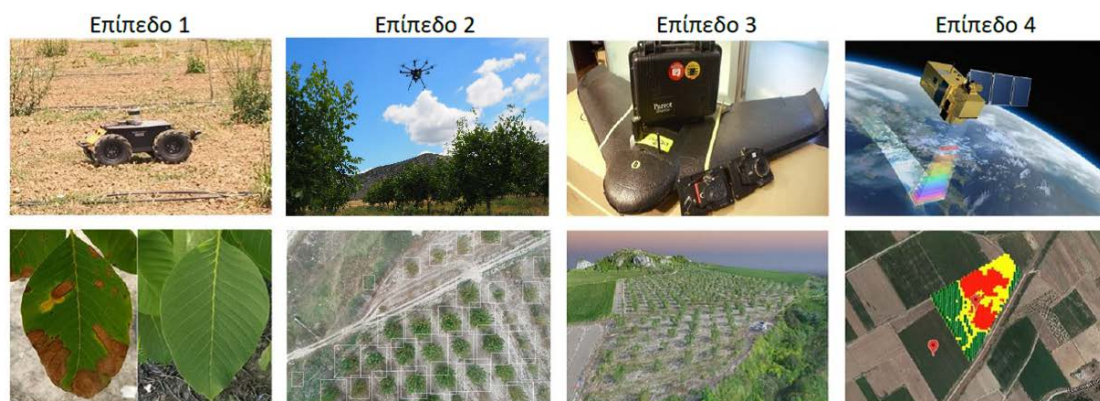
3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ο σημαντικός όγκος δεδομένων που συγκεντρώνεται στο πληροφοριακό σύστημα, για να αποθηκευτεί στο νέφος και να συνταχθεί σε εφαρμόσιμη πληροφορία για μελλοντική χρήση. Το φωτογραφικό υλικό που συλλέγεται μέσω των UGV κατά τη λειτουργία τους εντός του αγρού, έχει ιδιαίτερη αξία σε πολυάριθμες εφαρμογές (Εικόνα 13 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**).



Εικόνα 6. Αλληλεπίδραση των οντοτήτων του πληροφοριακού συστήματος, με το χρήστη.

Η παρακολούθηση της υγείας των φυτών μετατρέπεται σε εργασία που δεν απαιτεί πλέον σημαντικό ανθρώπινο δυναμικό (Liakos et al., 2018) ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται εντυπωσιακά η ακρίβεια των δεδομένων που αντλούνται κατά την διεκπεραίωσή της (Khirade and Patil, 2015). Ως άμεση συνέπεια αυτού, προκύπτει καλύτερη και μεγαλύτερου βαθμού αξιοπιστίας πρόβλεψη παραγωγής, που με τη σειρά της οδηγεί σε υψηλότερης ακρίβειας οικονομικές εκτιμήσεις για τους χρήστες του πληροφοριακού συστήματος. Επίσης, ο ψεκασμός για την αντιμετώπιση των ζιζανίων μπορεί να προγραμματιστεί και να δρομολογηθεί για συγκεκριμένες περιοχές εντός των αγρών, όπου το πρόβλημα συγκέντρωσης ζιζανίων εντοπίζεται να είναι εντονότερο, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση σπατάλης πόρων και, κατ' επέκταση, στην αύξηση της αποτελεσματικότητας και μείωση πιθανών αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (C. Nithya et al., 2011) (Εικόνα 14).



Εικόνα 7. Σύστημα παρακολούθησης αγροτικής παραγωγής τεσσάρων επιπέδων.

Στην εικόνα 4 παρουσιάζονται τέσσερα παραδείγματα διασυνδεδεμένης πληροφορίας προερχόμενης από τέσσερις διαφορετικές πηγές (τέσσερα επίπεδα παρακολούθησης). Στο πρώτο επίπεδο ανήκουν οι διαδικασίες συλλογής δεδομένων με τη χρήση UGV σχετικά με την αναγνώριση ανθράκωσης σε φύλλα καρυδιάς. Η διάγνωση της ασθένειας υλοποιείται από τη μετέπειτα επεξεργασία της συλλεχθείσας πληροφορίας, με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης. Στο επόμενο επίπεδο, χρησιμοποιώντας UAV, πραγματοποιείται αναγνώριση δένδρων του καρυδεώνα με τα δεδομένα που συλλέγονται να αποστέλλονται στο πληροφοριακό σύστημα και, κατόπιν επεξεργασίας, να

μεταφέρονται στο UGV για την υποστήριξη της πλοήγησής του. Ακόμη, στο επίπεδο 3, διαφορετικού τύπου UAV συλλέγει φωτογραφικό υλικό από το οποίο γίνεται εξαγωγή, αρχικά, μωσαϊκών προς επαλήθευση της εγκυρότητας δορυφορικών εικόνων για την αντίστοιχη έκταση, όπως επίσης και ποικίλων δεικτών ιδιαίτερης κρισιμότητας, για τους χρήστες του συστήματος, στους οποίους εντάσσονται οι δείκτες NDVI, EVI, MDPI, NDWI καθώς και πλήθος άλλων. Τέλος, το πληροφοριακό σύστημα μπορεί να υποστηρίξει πληροφορία, σχετική με τους παραπάνω δείκτες, που προέρχεται από δορυφορικά δεδομένα, να συνδεθεί και να αποθηκευτεί στην υποδομή ώστε αργότερα να οπτικοποιηθεί στα πλαίσια είτε σύγκρισης με τα δεδομένα που παράγονται από τη χρήση UAV είτε ενίσχυσης αυτών ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία λήψης σχετικών αποφάσεων από το χρήστη του συστήματος

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εν κατακλείδι, το πληροφοριακό σύστημα που παρουσιάζεται, ενσωματώνει μη-επανδρωμένα επίγεια και εναέρια οχήματα που υποστηρίζουν τις λειτουργίες ενός στόλου ανεξάρτητων συλλεκτών δεδομένων, το οποίο διαθέτει περεταίρω δυνατότητες δημιουργίας-ανάθεσης και μετάδοσης εργασιών προς εκτέλεση. Η αυτοματοποιημένη αλληλεπίδραση των UGV και UAV με το πληροφοριακό σύστημα στοχεύει στη δημιουργία ενός βιώσιμου δικτύου συνεχούς ροής δεδομένων ανάμεσα στις οντότητες που φιλοξενούνται και επιχειρούν εντός του οικοσυστήματός του. Η πρόβλεψη παραγωγής, για παράδειγμα, θα μπορεί να υποστηρίζεται πλέον από αποτελέσματα ανάλυσης μεγάλων όγκων φωτογραφικού υλικού, προκειμένου να μην υπόκειται σε αβέβαιες εκτιμήσεις. Η μηχανισμοί που θα πλαισιώνουν την παρακολούθηση της υγείας των φυτών, σχεδιάζονται ούτως ώστε να ενημερώνουν το χρήστη του πληροφοριακού συστήματος για πιθανούς κινδύνους σχετικούς με παθήσεις φυτών, εντός του αγρού, και να ελαχιστοποιήσουν το περιθώριο λάθους στη διάγνωση συνηθισμένων εξ αυτών. Τέλος, η μεθοδική παρακολούθηση των αγρών για τον εντοπισμό ανάπτυξης ζιζανίων αναμένεται να παρέχει καθοδήγηση για ψεκασμό ακριβείας, αξιοποιώντας χάρτες έντασης οι οποίοι φέρουν πληροφορίες που υποδεικνύουν ποιες περιοχές αντιμετωπίζουν το μεγαλύτερο πρόβλημα. Στηνπαρούσαεργασίαπαρουσιάστηκεμασύντομη περιγραφή του πληροφοριακού συστήματος. Το σύστημα βρίσκεται υπό διαρκή ανάπτυξη και μέρη αυτού έχουν ήδη υλοποιηθεί. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την έως τώρα χρήση του πληροφοριακού συστήματος ενθαρρύνουν την περεταίρω συνέχιση προς αυτήν την κατεύθυνση.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου "Ερευνητική Συνέργεια για την Αντιμετώπιση των Μεγάλων Προκλήσεων του Πλέγματος (NEXUS): Ενέργεια-Περιβάλλον-Αγροτική Παραγωγή (Τροφή, Νερό, Υλικά) (NEXUS)", με χρηματοδότηση της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) - Κωδικός Έργου: MIS 5002496.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Morgan, K. and Murdoch, J., 2000. *Organic vs. conventional agriculture: Knowledge, power and innovation in the food chain*, *Geoforum*, 31, 159 -173.
- Von Wirén-Lehr, S., 2001. *Sustainability in agriculture - An evaluation of principal goal-oriented concepts to close the gap between theory and practice*, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 84, 115-129.
- Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T. and Upadhyaya, S. K., 2004. *On-the-go soil sensors for precision agriculture*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 44, 71-91.
- Hamza, M.A. and Anderson, W.K., 2005. *Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions*, *Soil and Tillage Research*, 82, 121-145.

- Thrun, S., 2008. *Simultaneous localization and mapping*, Springer Tracts in Advanced Robotics, 13-41.
- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Berger, E., Wheeler, R. and Mg, A., 2009. *ROS: an open-source Robot Operating System*, Proceedings of 26th International Conference on Robotics and Automation, Workshop on Open Source Software, Kobe, Japan. doi: <http://www.willowgarage.com/papers/ros-open-source-robot-operating-system>.
- Sorensen, C.G., Pesonen, L., Fountas, S., Suomi, P., Bochtis, D., Bildsøe, P. and Pedersen, S.M., 2010. *A user-centric approach for information modelling in arable farming*, Computers and Electronics in Agriculture. Elsevier, 73, 44–55.
- Sørensen, C.G., Fountas, S., Nash, E., Pesonen, L., Bochtis, D., Pedersen, S.M., Basso, B. and Blackmore, S.B., 2010. *Conceptual model of a future farm management information system*, Computers and Electronics in Agriculture. Elsevier, 72, 37–47.
- Sørensen, C.G. and Bochtis, D.D., 2010. *Conceptual model of fleet management in agriculture*, Biosystems Engineering. Academic Press, 105,41–50.
- Sørensen, C.G., Pesonen, L., Bochtis, D. D., Vougioukas, S. G. and Suomi, P., 2011. *Functional requirements for a future farm management information system*, Computers and Electronics in Agriculture. Elsevier, 76(2011), 266–276. doi: 10.1016/J.COMPAG.2011.02.005.
- Nithya, C., Chinnusamy, C. and Muthukrishnan, P., 2011. *Evaluation of grass herbicide - metamifop on weed control and productivity of direct seeded rice in Tamil Nadu*, 23rd Asian-Pacific Weed Science Society Conference, The Sebel Cairns, Cairns, Australia. Available at: <https://apwss.org/documents/23rd%20APWSS%20Conference%20Proceedings%20Vol%202.pdf#page=108>.
- Yan-E, D., 2011. *Design of intelligent agriculture management information system based on IoT*, in Proceedings of 4th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2011. Shenzhen, China, 1045–1049.
- Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N. and Foley, J.A., 2012. *Closing yield gaps through nutrient and water management*, Nature, 490, 254-257.
- Khirade, S.D. and Patil, A.B., 2015. *Plant Disease Detection Using Image Processing*, Proceedings of 2nd International Conference on Computing Communication Control and Automation, Pune, India, 768–771.
- Amazon, 2016. *Amazon Web Services (AWS)- Cloud Computing Services*, Amazon Web Services, Inc. Available at: <https://aws.amazon.com/>.
- Facebook Open Source, 2017. *JavaScript library for building user interfaces*, Facebook Inc. Available at: <https://reactjs.org/>.
- Hernandez, E., Burrell, C. and Sharp, E., 2018. *ReactStrap - React Bootstrap 4 components*. Available at: <https://reactstrap.github.io/>.
- Liakos, K., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., Bochtis, D., Liakos, K.G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S. and Bochtis, D., 2018. *Machine Learning in Agriculture: A Review*, Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 18, 2674.
- Ravankar, Ankit, Ravankar, Abhijeet, Kobayashi, Y. and Emaru, T., 2018. *Autonomous Mapping and Exploration with Unmanned Aerial Vehicles Using Low Cost Sensors*, Proceedings of 5th International Electronic Conference on Sensors and Applications, 44.
- Otto, M., Thornton, J., Rebert, C., Lauke, P., Mazovetskiy, G., Galante, A. and Cuppens, M., 2019. *Bootstrap - The most popular HTML, CSS, and JS library in the world*. Available at: <https://getbootstrap.com/>.

ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΚΕΦΑΛΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΚΟΡΥΦΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΦΥΛΛΙΖΙΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΠΝΟ

Ν. Ζιάκας, Δ. Κολοβός, Δ. Σταμούλης, Τ. Βαρλάγκας, Θ. Γιαλαμάς, Ι. Γράβαλος
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, 41110 Λάρισα e-mail: gravalos@teilar.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στον καπνό, η αφαίρεση των κορυφών (κορυφολόγημα) και στη συνέχεια ο έλεγχος των μασχαλιαίων βλαστών (έλεγχος φυλλιζίων) είναι απαραίτητες εργασίες, που επηρεάζουν θετικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ξηρού καπνού. Σκοπός της εργασίας αυτής, είναι η ανάπτυξη μίας ρομποτικής κεφαλής που κόβει αυτόματα την ταξιανθία και ταυτόχρονα διαβρέχει στοχευμένα με αντιφυλλιζιακό διάλυμα τα κομμένα φυτά. Η ρομποτική κεφαλή περιλαμβάνει έναν διχαλωτό μεταλλικό οδηγό, τον μηχανισμό κοπής και τον μηχανισμό ψεκασμού. Η κεφαλή προσαρμόστηκε κατάλληλα πάνω σε μία τρίτροχη πλατφόρμα, με κάθετη ρύθμιση ανάλογα με το επιθυμητό ύψος κοπής της ταξιανθίας. Δοκιμάστηκε τόσο σε εργαστηριακές, όσο και σε συνθήκες πεδίου. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τον καινοτόμο σχεδιασμό της ρομποτικής κεφαλής.

Λέξεις κλειδιά: καλλιέργεια καπνού, κορυφολόγημα, έλεγχος φυλλιζίων, αγροτικά ρομπότ

A ROBOTIC HEAD FOR AUTOMATED TOPPING AND SUCKERING OF TOBACCO PLANTS

N. Ziakas, D. Kolovos, D. Stamoulis, T. Varlagas, Th. Gialamas, I. Gravalos
School of Agricultural Sciences, University of Thessaly, 41110 Larissa, Greece, e-mail:
gravalos@teilar.gr

ABSTRACT

In agricultural crops, such as tobacco, the budding part of the plant (topping) is removed and subsequently the growth of axillary shoots (called suckers) is controlled with chemicals in order to produce good quality heavy-bodied darker tobacco leaves. In this study, the design and development of a novel robotic head is presented, whereby the topping and suckering treatments can be performed in an automatic fashion. The head includes a topper unit, a high-precision sprayer and a bifurcated metal guide, designed to keep the plants in an upright position and guide them to the circular saw blade. The robotic head and auxiliary equipment were mounted on a three-wheeled mobile platform. It was tested in both laboratory and field conditions. The results obtained confirm the benefits achieved by the use of our innovative design.

Keywords: tobacco plant, topping, suckercide treatments, agricultural robotics

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη χώρα μας καλλιεργούνται τρεις διαφορετικοί τύποι καπνού: α) τα ανατολικά, β) τα Virginia και γ) τα Burley. Για κάθε τύπο καπνού υπάρχουν πολλές ποικιλίες οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα μορφολογικά γνωρίσματα, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και τις εδαφοκλιματικές συνθήκες. Οποιοσδήποτε τύπος καπνού και αν καλλιεργηθεί, χρειάζεται όλες εκείνες τις καλλιεργητικές φροντίδες, για να δώσει υψηλή στρεμματική απόδοση αλλά κυρίως υψηλή ποιότητα ξηρού καπνού (δηλαδή γεύση-άρωμα κατά το κάπνισμα) (Steinberg & Tso, 1958).

Ο καπνός είναι ένα φυτό με ένα στέλεχος το οποίο καταλήγει σε μία ταξιανθία με σχήμα βότρυος. Η ωρίμανση της ταξιανθίας εμποδίζει την ανάπτυξη των πλάγιων βλαστών (φυλλιζίων) στις μασχάλες των φύλλων. Σε κάθε μασχάλη μπορεί να εμφανιστούν έως τρεις πλάγιοι βλαστοί (συνήθως δύο βλαστοί). Η ταξιανθία χρησιμεύει στην αναπαραγωγή του καπνού και για το λόγο αυτό το φυτό διοχετεύει νερό και θρεπτικά στοιχεία σε αυτήν, με αποτέλεσμα τα υπόλοιπα μέρη του φυτού και κυρίως τα φύλλα να χάνουν σε βάρος και ποιότητα μετά την αποξήρανση (Hannam, 1968). Έτσι, το κορυφολόγημα (topping) είναι μία καλλιεργητική πρακτική για τα καπνά Virginia και Burley, η οποία συνοδεύεται από έλεγχο των φυλλιζίων (chemicalsuckercontrol).

Με το κορυφολόγημα τα φύλλα που μένουν στο φυτό μεγαλώνουν και γίνονται πλουσιότερα σε βάρος. Επίσης, το ριζικό σύστημα του φυτού αυξάνεται με αποτέλεσμα: να αυξάνεται η αντοχή του φυτού στην ξηρασία και τους ανέμους, να βελτιώνεται η ικανότητά του στην πρόσληψη του νερού και των θρεπτικών στοιχείων και επομένως να έχουμε σύνθεση περισσότερης νικοτίνης (Elliot, 1976). Το κορυφολόγημα θα πρέπει να πραγματοποιείται όταν τα μισά φυτά της καλλιέργειας έχουν αρχίσει να ανθίζουν (δηλαδή σε κάθε φυτό παρατηρούνται 2-3 άνθη ανοιγμένα). Το κορυφολόγημα των φυτών ολοκληρώνεται μετά από μερικές ημέρες, όταν και τα υπόλοιπα φυτά ανθίσουν. Τα αποτελέσματα μακροχρόνιων ερευνών έδειξαν ότι στην περίπτωση που τα φυτά του καπνού δεν κορυφολογηθούν εγκαίρως, η απόδοση μειώνεται κατά 2-3 kg ανά στρέμμα και ανά ημέρα. Επίσης, πειραματικά έχει προσδιοριστεί το ύψος του κορυφολογήματος. Τα καπνά Virginia θα πρέπει να κορυφολογούνται στο ύψος των 18-20 χρήσιμων φύλλων, ενώ τα καπνά Burley στο ύψος των 20-22 χρήσιμων φύλλων (Yazdani, 2013). Το κορυφολόγημα για να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα, πρέπει να συνδυάζεται από έλεγχο των φυλλιζίων. Η παρουσία φυλλιζίων δεν επιτρέπει στα φύλλα του καπνού να αναπτυχθούν και να βαρύνουν ικανοποιητικά. Ο έλεγχος των φυλλιζίων πραγματοποιείται με βλαστολόγημα ή αντιφυλλιζιακά σκευάσματα (χημικός έλεγχος). Το βλαστολόγημα γίνεται με το χέρι μία φορά την εβδομάδα. Τρία με τέσσερα βλαστολογήματα είναι αρκετά για απαλλαγούν τα φυτά από τα φυλλίδια. Επίσης, με το βλαστολόγημα παρατηρείται μείωση στην απόδοση που οφείλεται σε σπάσιμο των φύλλων από άστοχες κινήσεις των εποχιακών εργατών γης ανάμεσα στις σειρές των φυτών του καπνού. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το βλαστολόγημα δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικό με την εφαρμογή αντιφυλλιζιακών σκευασμάτων (Sadri & Dehghan Zade, 2014).

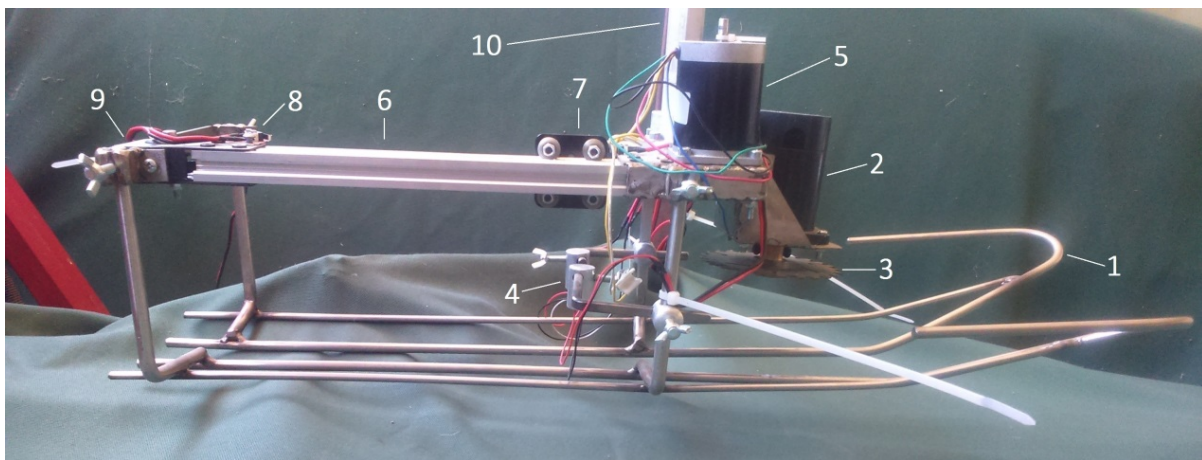
Τα αντιφυλλιζιακά σκευάσματα διακρίνονται σε: α) αντιφυλλιζιακά επαφής και β) διασυστηματικά αντιφυλλιζιακά. Τα αντιφυλλιζιακά σκευάσματα επαφής νεκρώνουν τα φυλλίδια πολύ γρήγορα αμέσως μετά την εφαρμογή τους (συνεπώς δεν επηρεάζεται το αποτέλεσμα από ενδεχόμενη βροχόπτωση που μπορεί να ακολουθήσει). Τα διασυστηματικά αντιφυλλιζιακά εισέρχονται εντός του φυτού και διακόπτουν την ανάπτυξη των φυλλιζίων. Ο απαιτούμενος χρόνος για την είσοδο του σκευάσματος στο φυτό είναι περίπου 6 ώρες. Στο διάστημα αυτό δεν πρέπει να βρέξει ή να πραγματοποιηθεί άρδευση των φυτών. Για τον λόγο αυτό προτιμούνται τα αντιφυλλιζιακά σκευάσματα επαφής. Η δόση του αντιφυλλιζιακού διαλύματος που συνιστάται είναι 15-25 cm³ ανά φυτό. Η χρήση του αντιφυλλιζιακού σκευάσματος πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή, ώστε το διάλυμα να εφαρμόζεται ακριβώς πάνω στο κομμένο στέλεχος του φυτού, στη συνέχεια να αφηθεί να "τρέξει" προς τα κάτω και κατά μήκος του στελέχους μέχρι τη βάση του, για να διαβρέξει όλες τις μασχάλες των φύλλων (Taylor, et al., 2007/2008; Λόλας, 2014).

Το κορυφολόγημα γίνεται με αυτοκινούμενο toppeer που κόβει την ταξιανθία, ενώ το αντιφυλλιζιακό σκεύασμα επαφής εφαρμόζεται με ψεκαστήρα πλάτης ή αυτοκινούμενο ψεκαστικό μηχάνημα (Swetnam & Walton, 1998). Η ορθότερη εφαρμογή του αντιφυλλιζιακού γίνεται με ένα μικρό πλαστικό δοχείο του οποίου το στόμιο εκροής είναι διαμέτρου 5 mm. Με τις πρακτικές αυτές έχουμε μειωμένη επιτυχία στον έλεγχο των φυλλιζίων, καθώς και σπατάλη αντιφυλλιζιακού διαλύματος στα φύλλα του καπνού και στο έδαφος. Επίσης, η εφαρμογή του αντιφυλλιζιακού διαλύματος με μικρό πλαστικό δοχείο είναι μία χρονοβόρα διαδικασία (ένα άτομο διαβρέχει 3-4 στρ/ημέρα).

Σκοπός τηςεργασίας είναι η παρουσίαση μίας ρομποτικής κεφαλής που κόβει την ταξιανθία των φυτών του καπνού και ταυτόχρονα διαβρέχει με στοχευόμενη ρίψη αντιφυλλιζιακούδιαλύματος το κομμένο στέλεχος κάθε φυτού, διασφαλίζοντας τη σωστή ποσότητα χωρίς περαιτέρω επιβάρυνση των φύλλων και του εδάφους με αντιφυλλιζιακό διάλυμα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η ρομποτική κεφαλή αυτόματου κορυφολογήματος και ελέγχου των φυλλιζίων αποτελείται από τρεις κύριες μονάδες: α) τον διχαλωτό μεταλλικό οδηγό με τη βάση του, β) τον μηχανισμό κοπής της ταξιανθίας και γ) το σύστημα ψεκασμού υψηλής ακρίβειας. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται το πρωτότυπο της ρομποτικής κεφαλής, η οποία με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού γραμμικού ενεργοποιητήπροσαρμόζεται σε μια τρίτροχη πλατφόρμα.



Εικόνα 1. Το πρωτότυπο της ρομποτικής κεφαλής: 1) διχαλωτός μεταλλικός οδηγός, 2) κινητήραςDCμόνιμου μαγνήτη, 3) οδοντωτός δίσκος κοπής, 4) αισθητήρας δέσμης υπερύθρων, 5) βηματικός κινητήρας, 6) γραμμικός οδηγός, 7) φορείο ακροφυσίου, 8) τερματικός διακόπτης, 9) γωνιακός σύνδεσμος, 10) ηλεκτρικός γραμμικός ενεργοποιητής.

Ο διχαλωτός μεταλλικός οδηγός αποτελείται από δύο παράλληλα μέλη συνδεδεμένα μεταξύ τους με ένανγωνιακό σύνδεσμο. Τα φυτά του καπνού εγκλωβίζονται από τον διχαλωτό οδηγό, καθώς η τροχοφόρος πλατφόρμα κινείται κατά μήκος της σειράς των φυτών, με τρόπο που να διατηρούνται σε όρθια θέση και να οδηγούνται στονμηχανισμό κοπής της κορυφής (κορυφολόγημα).

Ομηχανισμόςκοπής τηςκορυφήςπεριλαμβάνει έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (PMDC) και ένανπεριστρεφόμενοοδοντωτό δίσκο,συνδέονται δε με τη βοήθειαμιας μεταλλικής βάσης, στο εμπρόσθιο τμήμα της ρομποτικής κεφαλής. Καθώς τα φυτά οδηγούνται προς τον μηχανισμό κοπής,ο περιστρεφόμενοςδίσκος αφαιρεί την κορυφή. Ο έλεγχος του κινητήρα επιτυγχάνεται με έναν διακόπτη δύο θέσεων.

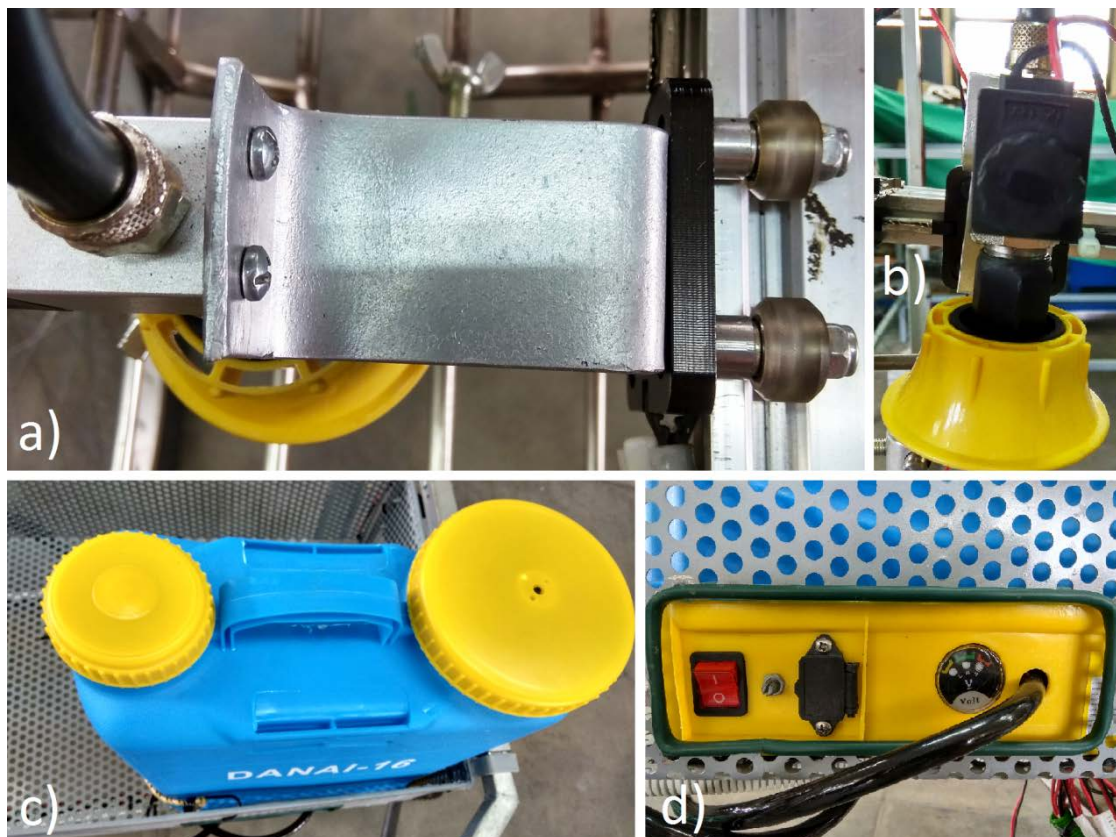
Το σύστημα ψεκασμούεντοπίζει αυτόματα την ακριβή θέση του κομμένου στελέχους κάθε φυτού και εφαρμόζει το αντιφυλλιζιακό σκεύασμαεπαφής κατευθείαν στοσημείο κοπής. Πρόκειται για μια λειτουργία εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας,που νεκρώνει τα φυλλίζιασχετικά γρήγορα, περίπου μια ώρα μετά την εφαρμογή. Το σύστημα ψεκασμού υψηλής ακρίβειας αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη: α) τον μηχανισμό κίνησης με ιμάντα, β) τη μονάδα ψεκασμού και γ) το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου.

Ο μηχανισμός κίνησης με ιμάντα περιλαμβάνει ένανβηματικό κινητήρα, δύο τροχαλίεςαλουμινίου, έναν οδοντωτό ιμάντα, έναν γραμμικό οδηγό αλουμινίου V-σχισμής (20x40 mm). Το συνολικό μήκος της ιμαντοκίνησης είναι 420 mm. Ο βηματικός κινητήρας που κινεί μία

από τις τροχαλίες είναι ένας Soyo SY57ST76-0686B με ανάλυση 1,8 μοίρες / βήμα. Ο κινητήρας έχει μέγιστη ακτινική δύναμη 75 N και μέγιστη αξονική δύναμη 10 N. Η κίνηση του ιμάντα μετατρέπει την περιστροφική κίνηση του βηματικού κινητήρα σε γραμμική κίνηση του ολισθαίνοντος φορείου ακροφυσίου.

Η μονάδα ψεκασμού αποτελείται από μία σωληνοειδή βαλβίδα 12 V dc, ένα ακροφύσιο και έναν φορητό ηλεκτρικό ψεκαστήρα (Εικόνα 2). Το ακροφύσιο, παρόλο που είναι πολλαπλών οπών, παρέχει πυκνές δομές ψεκασμού πλήρους κώνου. Η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα και το ακροφύσιο ψεκασμού είναι τοποθετημένα σε μία μεταλλική βάση, η οποία εδράζεται πάνω στον μηχανισμό του ολισθαίνοντος φορείου. Ο φορητός ψεκαστήρας περιλαμβάνει μία ηλεκτρική αντλία διαφράγματος, μία δεξαμενή PP (πολυπροπυλενίου) των 16 λίτρων και έναν ενισχυμένο εύκαμπτο σωλήνα ψεκασμού PVC για μεγάλη διάρκεια ζωής. Τροφοδοτείται από μια ανεξάρτητη μπαταρία 12V / 8Ah, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνεχώς για 4 ώρες μετά από πλήρη φόρτιση.

Τα δύο άκρα του ιμάντα είναι συνδεδεμένα με το ολισθαίνον φορείο με εξαρτήματα σύσφιξης. Ο ιμάντας κινεί το φορείο μαζί με το ακροφύσιο ψεκασμού σε μία καθορισμένη απόσταση. Η κίνηση του ακροφυσίου ψεκασμού είναι ευθύγραμμη με κατεύθυνση είτε προς τα εμπρός, είτε προς τα πίσω. Οπίσθια θεωρείται η κίνηση από τον τερματικό διακόπτη επανεκκίνησης (αρχική θέση) προς τον διακόπτη τέρματος διαδρομής (τελική θέση). Αυτή η κίνηση είναι αντίθετη προς τη φορά κίνησης της τρίτροχης πλατφόρμας. Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης, το ακροφύσιο ψεκασμού κινείται με μη ομοιόμορφη ταχύτητα που συγχρονίζεται με την ταχύτητα κίνησης της τρίτροχης πλατφόρμας. Με τον τρόπο αυτό, ακολουθεί το κομμένο στέλεχος του φυτού και εφαρμόζει με ακρίβεια το αντιφυλλοζιακό σκεύασμα επαφής. Εμπρόσθια θεωρείται η κίνηση του ακροφυσίου ψεκασμού, όταν αυτό επιστρέφει στην αρχική του θέση. Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης, το ακροφύσιο κινείται γρήγορα και με σταθερή ταχύτητα.

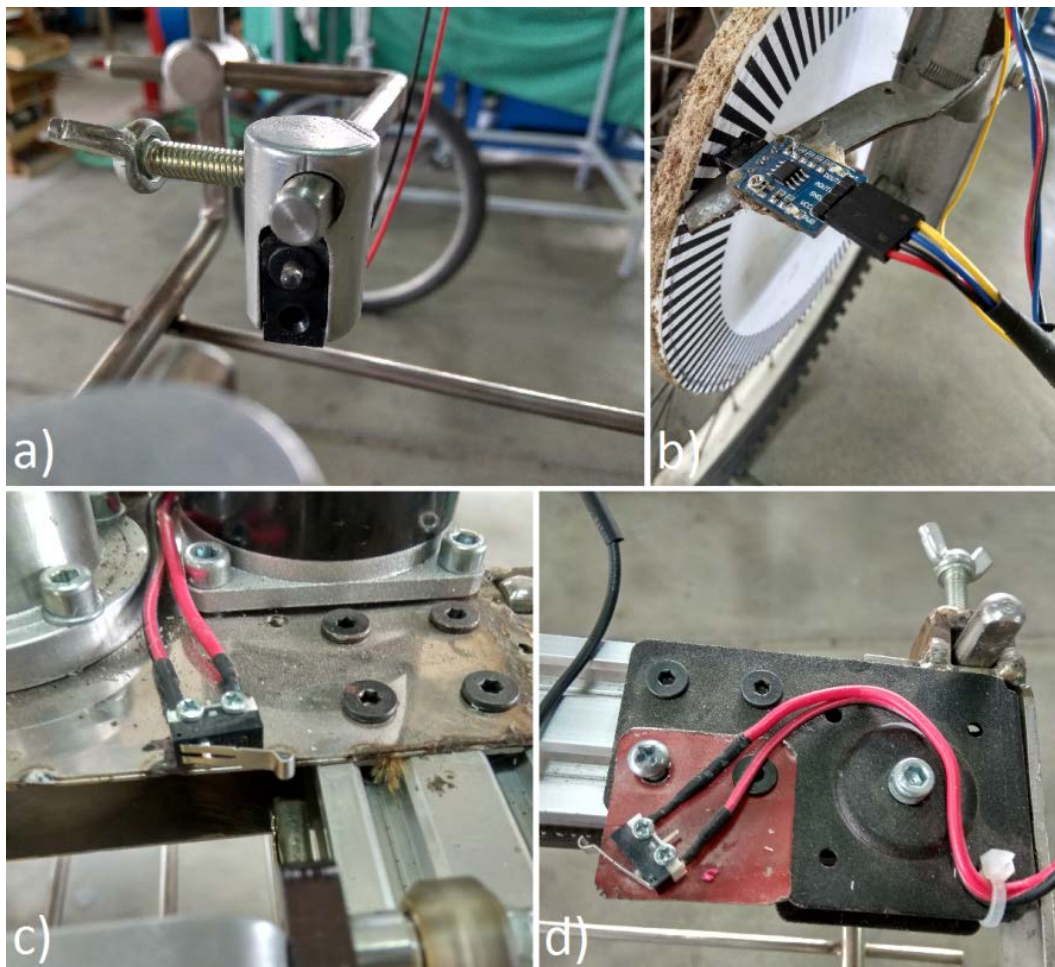


Εικόνα 2. Σύστημα ψεκασμού: a) ολισθαίνον φορείο ακροφυσίου, b) σωληνοειδής βαλβίδα με ακροφύσιο ψεκασμού, c) φορητός ψεκαστήρας, d) πίνακας ελέγχου ψεκαστήρα.

Ο έλεγχος κίνησης του ακροφυσίου ψεκασμού γίνεται με τη βοήθεια του μικροελεγκτή Arduino Uno, του οδηγού A4988 του βηματικού κινητήρα, έναν αισθητήρα υπέρυθρων ακτίνων (IR), δύο τερματικούς διακόπτες και έναν αυξητικό οπτικό κωδικοποιητή (Εικόνα 3).

Ο αυξητικός οπτικός κωδικοποιητής είναι συνδεδεμένος στον άξονα του εμπρόσθιου δεξιού τροχού της τρίτροχης πλατφόρμας. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας της πλατφόρμας. Ο μικροελεγκτής Arduino Uno διαβάζει τις μεταβολές της γωνιακής ταχύτητας του δεξιού τροχού και όταν το κομμένο στέλεχος του φυτού διακόπτεται η δέσμη των υπέρυθρων ακτίνων, ο μικροελεγκτής μέσω του οδηγού A4988 περιστρέφει τον βηματικό κινητήρα με την ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται και ο δεξιός τροχός της πλατφόρμας. Την ίδια στιγμή, ο μικροελεγκτής ενεργοποιεί τη σωληνοειδή βαλβίδα του συστήματος ψεκασμού με ένα τρανζίστορ.

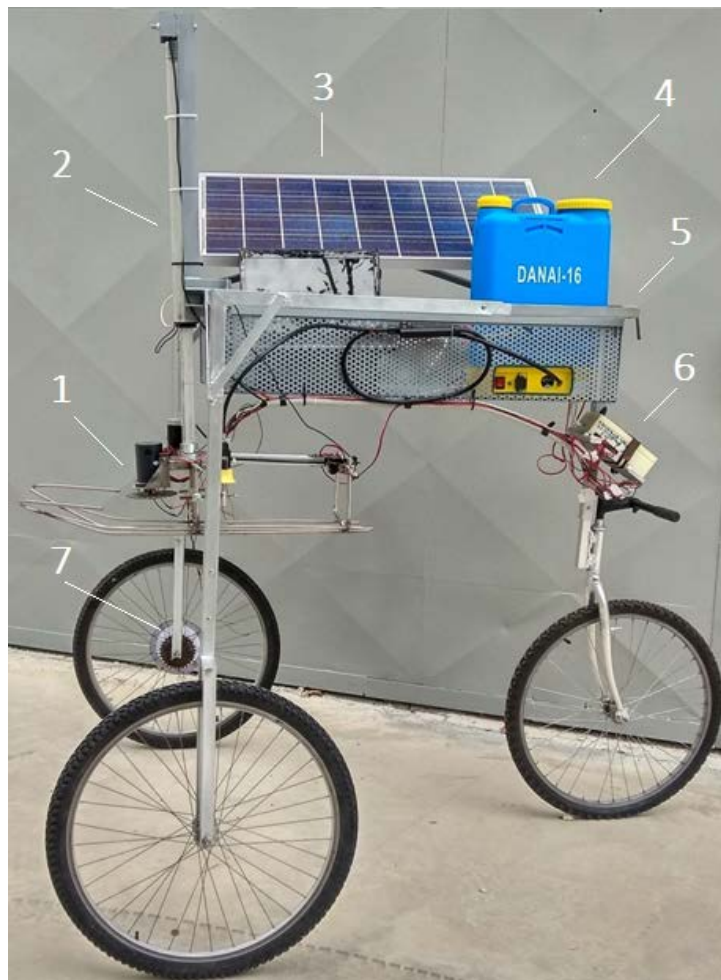
Η ρομποτική κεφαλή περιλαμβάνει ηλεκτρικούς κινητήρες, αισθητήρες, ενεργοποιητές και έναν ελεγκτή, που όλα χρειάζονται ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αναπτύχθηκε για να παράγει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό (PV) πλαίσιο (μοντέλο LA361K51, KYOCERA CORPORATION), έναν ελεγκτή φόρτισης (10A, 12V / 24V, PWM), και έναν συσσωρευτή μολύβδου οξέος (SLA) (GPC12-13) της εταιρείας OSAKA των 12V και 13 Ah. Η ισχύς του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να φτάσει τα 51 W. Ο ελεγκτής φόρτισης προστατεύει τον συσσωρευτή από υπερβολική φόρτιση. Επίσης, το φωτοβολταϊκό σύστημα περιλαμβάνει έναν διακόπτη δύο θέσεων για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.



Εικόνα 3. Σουίτα αισθητήρων: a) αισθητήρας δέσμης υπέρυθρων, b) αυξητικός οπτικός κωδικοποιητής, c) διακόπτης επανεκκίνησης, d) διακόπτης τέρματος διαδρομής.

Η τρίτροχη πλατφόρμα σχεδιάστηκε με βάση τις ιδιαιτερότητες των συνθηκών εργασίας που επικρατούν στην καλλιέργεια του καπνού. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται το πρωτότυπο της πλατφόρμας αυτής. Το σχέδιό του μοιάζει με εκείνο ενός αντεστραμμένου παιδικού τρίκυκλου ποδήλατου. Η σχεδίαση αυτή επιτρέπει στους δύο εμπρόσθιους τροχούς να διαμορφώνουν μεγάλο ελεύθερο ύψος για την πλατφόρμα, ενώ ο οπίσθιος τροχός είναι διεθυντήριο, διευκολύνοντας την κίνηση της πλατφόρμας ανάμεσα στα φυτά του καπνού. Οι διαστάσεις της πλατφόρμας είναι 1820x1630x2000 mm (LxWxH), το άνοιγμα των εμπρόσθιων τροχών είναι 1465 mm, ενώ το μεταξόνιο είναι 1160 mm.

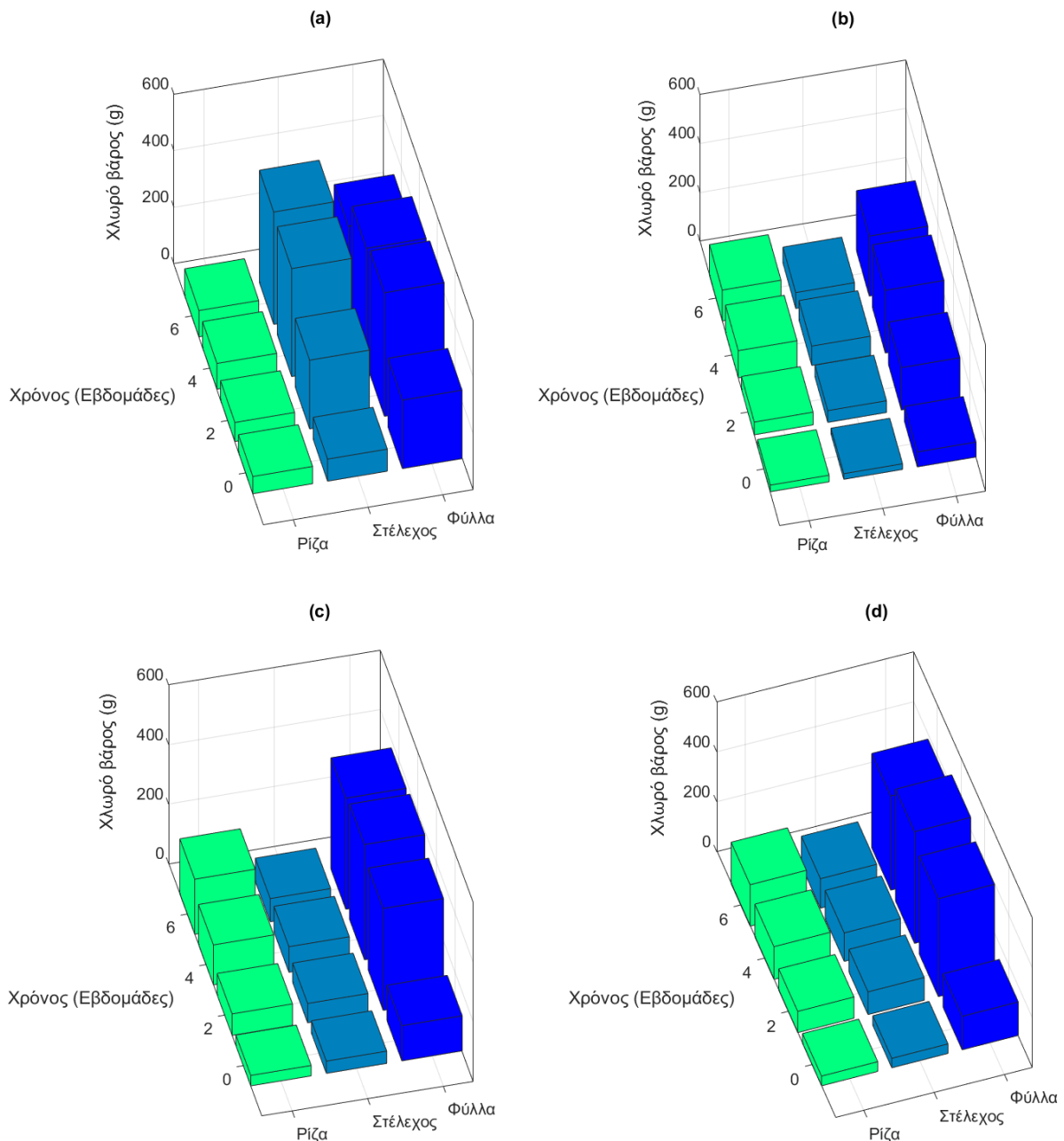
Το πλαίσιο της πλατφόρμας είναι κατασκευασμένο από χαλύβδινους κοιλοδοκούς μικρής διατομής, συγκολλημένους μεταξύ τους. Για να χρησιμοποιηθεί στην καλλιέργεια διαφορετικών τύπων καπνού, το πλαίσιο είναι ρυθμιζόμενο ως προς το ύψος και πλάτος. Επιπλέον, περιλαμβάνει ένα ράφι από διάτρητη λαμαρίνα για την εγκατάσταση του πρόσθετου εξοπλισμού. Το πλαίσιο έχει ένα ζευγάρι παράλληλων ποδιών στο εμπρόσθιο τμήμα, το καθένα από τα οποία στηρίζεται με έναν τροχό, ενώ το τρίτο πόδι στο οπίσθιο τμήμα φέρει έναν μηχανισμό διεύθυνσης. Ο μηχανισμός διεύθυνσης, που εκτείνεται προς τα πίσω, περιλαμβάνει ένα τιμόνι, ένα πιρούνι και έναν τρίτο τροχό ιδίων διαστάσεων με τους δύο εμπρόσθιους.



Εικόνα 4. Τρίτροχη πλατφόρμα φέρουσα τη ρομποτική κεφαλή και τον πρόσθετο εξοπλισμό: 1) ρομποτική κεφαλή, 2) ηλεκτρικός γραμμικός ενεργοποιητής, 3) φωτοβολταϊκό σύστημα παροχής ενέργειας, 4) μονάδα ψεκασμού, 5) τρίτροχη πλατφόρμα, 6) ηλεκτρονικό σύστημα και πίνακας ελέγχου, 7) αυξητικός οπτικός κωδικοποιητής.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μετά από δύο περίπου χρόνια ανάπτυξης της ρομποτικής κεφαλής και του φορέα της, δηλαδή της τρίτροχης πλατφόρμας, υιοθετήθηκε μια σειρά δοκιμών τόσο στο εργαστήριο όσο και στον αγρό για να ελεγχθούν η αξιοπιστία και η ασφαλής λειτουργία του συνολικού εξοπλισμού. Οι δοκιμές αφορούσαν κυρίως τον έλεγχο της συμπεριφοράς του μηχανισμού κοπής των φυτών του καπνού και του συστήματος ψεκασμού υψηλής ακριβείας των αντιφυλλιζιακών σκευασμάτων, καθώς επίσης της πρόωρης φθοράς μηχανικών εξαρτημάτων, αύξησης της θερμοκρασίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και της συνολικής απόδοσης του ηλεκτρικού συστήματος. Τα τεχνικά προβλήματα που προέκυψαν αντιμετωπίστηκαν αποτελεσματικά και η συμπεριφορά των επιμέρους μηχανισμών ήταν πολύ ικανοποιητική.



Εικόνα 5. Η σημασία του κορυφολογήματος και ελέγχου των φυλλιζίων στο χλωρό βάρος των φύλλων, του στελέχους και της ρίζας των φυτών καπνού της ποικιλίας Virginia: a) ακορυφολόγητα, b) κορυφολόγημα 2 φύλλων, c) κορυφολόγημα 4 φύλλων, d) κορυφολόγημα 6 φύλλων.

Με τη βοήθεια της ρομποτικής κεφαλής, η οποία προσαρμόστηκε κατάλληλα στην τρίτροχη πλατφόρμα, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα του όλου συστήματος στοκορυφολόγημα και τον έλεγχο των φυλλιζίων στο χλωρό βάρος των φύλλων, του στελέχους και της ρίζας φυτών σε μία πειραματική καλλιέργεια καπνού Virginia. Η δειγματοληψία άρχισε αμέσως μετά τοκορυφολόγημα και τον έλεγχο των φυλλιζίων και συνεχίστηκε κατά τη διάρκεια της δεύτερης, τέταρτης και έκτης εβδομάδας. Τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο, όπου τα όργανα κάθε φυτού διαχωρίστηκαν (π.χ., τα φύλλα διαχωρίστηκαν από τα στελέχη και τις ρίζες) και ζυγίστηκαν. Η Εικόνα 5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα τουκορυφολογήματος και ελέγχου των φυλλιζίων επί του χλωρού βάρους των φύλλων, του στελέχους και της ρίζας των φυτών καπνού σύμφωνα με τις ακόλουθες μεταχειρίσεις: α) ακορυφολόγητα, β) κορυφολόγημα 2 φύλλων, γ) κορυφολόγημα 4 φύλλων, δ) κορυφολόγημα 6 φύλλων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ρίζα των κορυφολογημένων φυτών ήταν μεγαλύτερη και ισχυρότερη σε σχέση με τα ακορυφολόγητα φυτά, ενώ το χλωρό βάρος των φύλλων παρέμεινε περίπου σταθερό τόσο για τα ακορυφολόγητα όσο και για ταφυτά με το κορυφολόγημα των 4 και 6 φύλλων.

Η εργασία αυτή παρουσιάζει μια πλατφόρμα με τρεις τροχούς, η οποία φέρει το πρωτότυπο ρομποτικής κεφαλής για αυτόματο κορυφολόγημα και έλεγχο των φυλλιζίων φυτών του καπνού. Μετά τοκορυφολόγημα, η ρομποτική κεφαλή εφαρμόζει τοαντιφυλλιζιακόεπαφή. Η εφαρμογή του αντιφυλλιζιακού πρέπει να γίνεται με ακρίβεια ώστε να ελαχιστοποιούνται τα υπολείμματα στα φυτά. Ο Beau (2011) αξιολόγησε διαφορετικούς τύπους και θέσεις εγκατάστασης των ακροφυσίων για να βελτιώσει την εφαρμογή των αντιφυλλιζιακών στα καπνάburley. Τα αποτελέσματα και άλλων ερευνητών, όπως οι Elliot (1976), Tayloreταλ. (2007/2008), επιβεβαιώνουν ότι η τοποθέτηση του ακροφυσίου ακριβώς πάνω από ταφυτά είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος για τον αποτελεσματικό έλεγχο τωνφυλλιζίων. Επομένως, τα αντιφυλλιζιακά σκευάσματα πρέπει να εφαρμόζονται απευθείας στην κομμένη επιφάνεια του στελέχους των φυτών του καπνού. Αυτό είναι εφικτό, με το σύστημα που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της θέσης του ακροφυσίου ψεκασμού με μίαντα της ρομποτικής κεφαλής, το οποίο επιτρέπει την αυτόματη και με υψηλή ακρίβεια παρακολούθηση του κομμένου στελέχους κάθε φυτού καπνού. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση πολύπλοκων συστημάτων μηχανικής όρασης (όπως: κάμερα, λογισμικό όρασης κ.λπ.) για την αναγνώριση των κομμένων στελεχών των φυτών, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος της ρομποτικής κεφαλής. Το ακροφύσιο ψεκασμού με μίαντα της ρομποτικής κεφαλής παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτή που συνήθως επιτυγχάνεται με αυτοκινούμενα ψεκαστικά μηχανήματα ή φερόμενα από γεωργικό έλκυστήρα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο καπνός είναι φυτό με ένα στέλεχος που καταλήγει σε μία ταξιανθία. Το φυτό, μόλις εμφανιστεί η ταξιανθία, αρχίζει να διοχετεύει προς αυτή νερό και θρεπτικά συστατικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα φύλλα να χάνουν σε βάρος και ποιοτικά χαρακτηριστικά. Επομένως, τοκορυφολόγημα είναι μία από τις σημαντικές εργασίες που πρέπει να εκτελούνται κατά την καλλιέργεια όλων των τύπων καπνού. Το κορυφολόγημα για να είναι αποτελεσματικό πρέπει να γίνει στον κατάλληλο χρόνο, σε συγκεκριμένο ύψος και να συνδυάζεται με έλεγχο των φυλλιζίων. Η χειρονακτική αφαίρεση των φυλλιζίων έχει αποδειχθεί ότι είναι εξαιρετικά αποτελεσματική για τη θανάτωση των πλάγιων βλαστών (φυλλιζίων), αλλά αυτή η πρακτική είναι έντασης εργασίας. Για τον λόγο αυτό ο έλεγχος των φυλλιζίων με χημικά σκευάσματα είναι επίσης ένας αποτελεσματικός αλλά και οικονομικός τρόπος για να βελτιωθεί η ποιότητα τουξηρού καπνού.

Η πλατφόρμα με τους τρεις τροχούς και τη ρομποτική κεφαλή που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή αποδείχτηκε ότι είναι ένα ιδιαίτερα κατάλληλο σύστημα για την καλλιέργεια καπνού σε μικρές εκτάσεις (όπως συμβαίνει στην Ελλάδα). Επί του παρόντος, το κύριο μειονέκτημα της όλης διάταξης είναι ότι η πλατφόρμα είναι χειροκίνητη. Στο μέλλον, η πλατφόρμα των τριών τροχών προβλέπεται να εξοπλιστεί με διάφορα συστήματα, όπως της ηλεκτροκίνησης και της αυτόματης πλοήγησης.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Beau, N.R., 2001. *Nozzle type and arrangement alternatives for improved application of suckercides in burley tobacco (NicotianatabacumL.)*. Master's Theses University of Kentucky. http://uknowledge.uky.edu/gradschool_theses/159
- Elliot, J.M., 1976. *Effects of height of topping and plant spacing of flue-cured tobacco on certain properties of flue-cured leaves and smoke characteristics of cigarettes*. Canadian Journal of Plant Science, 56, 161-167.
- Hannam, R.V., 1968. *Leaf growth and development in the young tobacco plant*. Australian Journal of Biological Sciences, 21, 855-870.
- Λόλας, Π., 2014. *Τοκορυφολόγημα στον καπνό και ο έλεγχος των φυλλιζίων*. Γεωργία – Κτηνοτροφία, 5, 40-44.
- Sadri, S., Dehghan Zade, H., 2014. *Effects of topping and suckercide on leaf quality of tobacco (Nicotiana Tabacum)*. International Journal of Advanced Biological Biomedical Research, 2, 723-731.
- Steinberg, R.A., Tso, T.C., 1958. *Physiology of the tobacco plant*. Annual Review of Plant Physiology, 9, 151-174.
- Swetnam, L.D., Walton, L.R., 1998. *Mechanically topping Burley tobacco*. Tobacco Science, 42, 16-17.
- Taylor, Z.G., Fisher, L.R., Jordan, D.L., Smith, W.D., Wilcut, J.W., 2007/2008. *Management of axillary shoot growth and maleic hydrazine residues with diflufenzopyr in flue-cured tobacco (Nicotiana Tabacum)*. Tobacco Science, 47, 13-21.
- Yazdani, M., 2013. *Influence of remove leaf number and topping timing on quality in air-cured tobacco by priming and stalk cut*. Global Journal of Plant Ecophysiology, 3, 52-55.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΟΠΩΡΩΝΩΝ

Γ. Βασιλειάδης^{1,2}, Δ. Κατικαρίδης¹, Β. Μουσιάδης¹, Δ. Κατέρης¹ & Δ. Μπόχτης¹

¹Ινστιτούτο Βιο-οικονομίας και Αγρο-τεχνολογίας (iBO), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Δημάρχου Γεωργιάδου 118, 38333, Βόλος, e-mail: g.vasileiadis@certh.gr

²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστημιούπολη, 541 24, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εποχή της άνθισης της Γεωργίας 4.0, η εγκατάσταση οπωρώνων παραμένει μία χειρωνακτική και βασισμένη σε εμπειρική γνώση εργασία και επηρεάζει την απόδοση του καθ' όλη την διάρκεια ζωής του. Η εργασία που παρουσιάζεται στοχεύει να επιδράσει θετικά στο σύστημα με την εισαγωγή σύγχρονων τεχνολογιών. Κεντρικό πυλώνα ανάπτυξης θα αποτελεί το ρομποτικό λειτουργικό σύστημα που εξασφαλίζει συμβατότητα και επεκτασιμότητα του λογισμικού, των περιφερειακών, όπως π.χ. τους αισθητήρες ελέγχου του συστήματος, και την επίτευξη της αυτόνομης εργασίας. Ο μηχανολογικός σχεδιασμός θα εξασφαλίσει συμβατότητα με αυτόνομα επίγεια οχήματα αλλά και συμβατικά γεωργικά μηχανήματα. Τέλος, η αρθρωτή αρχιτεκτονική καθιστά το σύστημα προσαρμόσιμο στις διαφοροποιημένες ανάγκες των χωρικά διασκορπισμένων σημείων εφαρμογής. Θετικά αποτελέσματα αναμένονται τόσο στην λειτουργική απόδοση, στην δυνατότητα προετοιμασίας επερχόμενων εργασιών αλλά και στην μεγάλης ακρίβειας δεδομένων γεωδαισίας κατά την φύτευση.

Λέξεις κλειδιά: εγκατάσταση οπωρώνων, ρομποτική φύτευση, μη επανδρωμένο επίγειο όχημα

DRAFTING A ROBOTIC SYSTEM FOR ORCHARD ESTABLISHMENT

G. Vasileiadis, D. Katikaridis, V. Moysiadis, D. Kateris & D. Bochtis

¹Institute for Bio-economy and Agri-technology (iBO), Centre for Research and Technology Hellas (CERTH), Dimarchou Georgiadou 118, 38333, Volos, e-mail: g.vasileiadis@certh.gr

²Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, AUTH Campus, 54124, Thessaloniki

ABSTRACT

Orchard establishment is a cornerstone work for a multiyear cultivation that can benefit greatly from the technological advancements Agriculture 4.0 has to offer. Standard practices consist of intensive manual labour based on empirical knowledge. In this light, the system proposed uses a robotic platform and creates a framework of subsystems to support establishment. Based on Robotic Operating System, compatibility and future development both in software and hardware is guaranteed. Mechanical design ensures integration on a selection of Unmanned Ground Vehicles as well as conventional agricultural machinery. The modular architecture allows partial or full adoption of the system depending on the mix of spatial and fiscal conditions. Positive impact is expected to enhance operational performance and enrich future operations with data, e.g. documented georeferenced maps.

Keywords: orchard establishment, robot planting, UGV

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Γεωργία έχει στηρίξει την οικονομική ανάπτυξη παγκοσμίως καθ' όλη την ιστορία της. Για να το επιτύχει αυτό καλλιεργητικές τεχνικές, φυτά και εργαλεία εξελίχθηκαν και έδωσαν ώθηση για περαιτέρω πρόοδο του αγροτικού τομέα επηρεάζοντας σημαντικά όλους τους άλλους τομείς. Ενώ η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού αναμένεται να έχει ακόμα υψηλότερους ρυθμούς ασκώντας σημαντικές πιέσεις στην αγροδιατροφική παραγωγή, οι επιπτώσεις της περιβαλλοντικής αλλαγής έχουν αρνητικό αντίκτυπο στις αποδόσεις των αγρών αλλά και στην διαθεσιμότητα γης με αποτέλεσμα η αειφορία με συμβατικές πρακτικές να μην είναι εφικτή (Gerland et al., 2014). Η Γεωργία Ακριβείας έχει εισάγει ένα πλαίσιο διαχείρισης πόρων που υπόσχεται την ορθολογική και βελτιστοποιημένη χρήση τους (McBratney et al., 2005). Αυτό επιτρέπει την καλλιέργεια με αυξημένη αποτελεσματικότητα εισροών και διατήρηση φυσικών πόρων όπως π.χ. το νερό άρδευσης, ενώ ταυτόχρονα δρα θετικά στην απόδοση του αγρού και τη ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων (Blackmore, Godwin and Fountas, 2003). Για την εφαρμογή της Γεωργίας Ακριβείας η χρήση τεχνολογιών πληροφορίας και επικοινωνίας, αυτοματοποίηση και τα αυτόνομα οχήματα μπορούν να συνδυασθούν για να επιτύχουν την αυξημένη ακρίβεια που απαιτεί η γεωργία ακριβείας (Sørensen et al., 2010).

Η Ρομποτική, οι τεχνολογίες πληροφορίας και επικοινωνίας (ΤΠΕ) καθώς και η αυτοματοποίηση επέκτειναν το πεδίο της εφαρμογής τους με ταχείς ρυθμούς στην γεωργία. Παράδειγμα αποτελούν οι μετασκευές και αναβαθμίσεις συμβατικών μηχανημάτων με συστήματα αυτόματης πλοήγησης και με Real Time Kinematic (RTK) συστήματα παγκόσμιου δορυφορικού εντοπισμού (GNSS) αλλά και οι διασπαστικά καινοτόμες ρομποτικές πλατφόρμες ικανές να εκτελέσουν αυτόνομα εργασίες στο πεδίο. Οι Blackmore et al. (2009) πρότειναν ένα σύστημα κατηγοριοποίησης των ρομποτικών συστημάτων που έχουν ως στόχο την εκτέλεση εργασιών στο πεδίο της γραμμικής καλλιέργειας. Διάφορα ρομποτικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια (Bergerman et al., 2013; Ball et al., 2015), ορισμένα από τα οποία στοχεύουν ειδικά στην καλλιέργεια οπωρώνων. Ιδιαίτερα για εργασίες επίβλεψης που μπορούν να εκτελεστούν τόσο από τα UGVs όσο και από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs) με τη χρήση σχετικά φτηνών αισθητήρων (Pravakar et al., 2015). Ακόμα έχουν προταθεί συστήματα για καλλιεργητικές φροντίδες, που αποτελούν ιδιαίτερα ενεργό τομέα ανάπτυξης και έρευνας. Η ανάγκη για πλήρως αυτοματοποιημένες, προγραμματισμένες, ελεγχόμενες, μετρήσιμες και τεκμηριωμένες επιχειρήσεις είναι επιτακτική, παρόλο που οι γεωργοί τείνουν να τις αντιλαμβάνονται ως περιττό φόρτο εργασίας παρά ως χρήσιμο εργαλείο. Για να μειωθεί αυτή η αντίληψη, τα συστήματα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργούν αυτόνομα και με κατανοητή ροή εργασίας από τους αγρότες.

Η εγκατάσταση αποτελεί μια σημαντική εργασία για την πολυετή καλλιέργεια οπωρώνων και μπορεί να ωφεληθεί σημαντικά από την εισαγωγή των ΤΠΕ και την αυτοματοποίηση. Επιπλέον, η ικανότητα ανακούφισης των συνεπειών των σφαλμάτων σε αυτό το στάδιο είναι σημαντικά περιορισμένη, αν όχι αδύνατη, υπογραμμίζοντας την ανάγκη τεκμηριωμένων και ελεγχόμενων ενεργειών.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην επέκταση της ενσωμάτωσης των αυτόνομων επίγειων οχημάτων (UGV) στην καλλιέργεια οπωρώνων μέσω του προτεινόμενου ρομποτικού συστήματος που πρόκειται να αναπτυχθεί για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της εγκατάστασης οπωρώνων.

2. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η εγκατάσταση ενός οπωρώνα αποτελεί μια υψηλής έντασης χειρωνακτική εργασία που συνήθως απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό εργαζομένων. Ο διαχειριστής του οπωρώνα καθορίζει την διάταξη φύτευσης και τις παραμέτρους που σχετίζονται με την καλλιεργούμενη ποικιλία αλλά και την τοποθεσία. Μετά από αυτό το προπαρασκευαστικό στάδιο ακολουθούν συνήθως οι εργασίες σήμανσης των θέσεων φύτευσης, διάνοιξης των οπών και φύτευσης του νεαρού φυτού.

Προκειμένου το προτεινόμενο σύστημα να λειτουργεί αποτελεσματικά σε αυτό το περιβάλλον, το όχημα θα πρέπει να έχει την ικανότητα μεταφοράς εξοπλισμού και υλικών. Μία επίσης σημαντική παράμετρος αποτελεί η συμβατότητα με ICT εργαλεία. Αυτή η προδιαγραφή αποτελεί την βάση για την πλήρως αυτοματοποιημένη και απομακρυσμένα ελεγχόμενη λειτουργία τόσο του οχήματος όσο και του προτεινόμενου εργαλείου διάνοιξης των οπών στα σημεία φύτευσης. Επιπλέον το όχημα πρέπει να είναι αρκετά στιβαρό ώστε να φέρει τον εξοπλισμό και να εκτελεί αποτελεσματικά την εργασία.

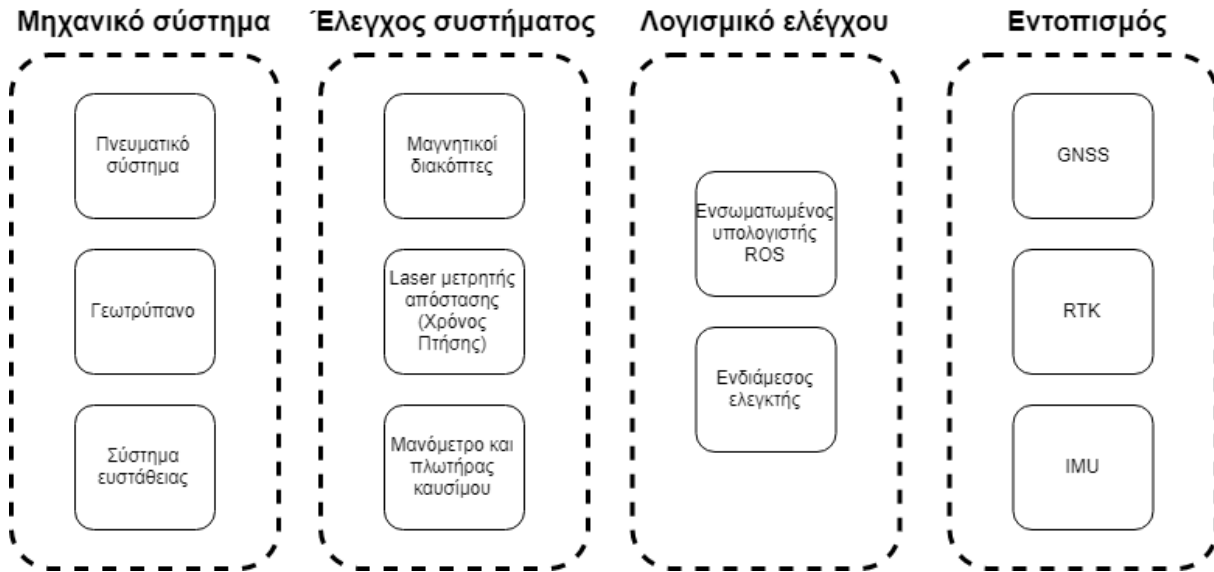
Τα συστήματα GNSS αποτελούν βασικό εξοπλισμό πλέον σε πολλά οχήματα αλλά ο τρόπος με τον οποίο τα δεδομένα αυτά είναι προσβάσιμα αποτελεί προδιαγραφή για το προτεινόμενο σύστημα. Τα δεδομένα θα πρέπει να παρέχονται σε διαδομένα ανοιχτά πρωτόκολλα επικοινωνίας ώστε να είναι εφαρμόσιμα τόσο στους αλγόριθμους κίνησης και εντοπισμού αλλά και στον αλγόριθμο εκτέλεσης της εργασίας. Επιπλέον το επίπεδο ακρίβειας εντοπισμού θα πρέπει να είναι της τάξης των 1-3 εκατοστών ώστε να εξασφαλιστεί υψηλότερο επίπεδο λειτουργίας σε σχέση με άλλα υπάρχοντα συστήματα.

Η αυτονομία είναι μία από τις σημαντικές προδιαγραφές για το σύστημα που έχει συμπεριληφθεί από τα πρώτα βήματα του σχεδιασμού του. Η αυτονομία συμβάλει τόσο στην ενεργειακή όσο και στην επιχειρησιακή απόδοση του συστήματος. Τα ρομποτικά συστήματα πρέπει να επιτύχουν υψηλά επίπεδα αυτόνομης λειτουργίας ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμες εναλλακτικές έναντι των συμβατικών μηχανημάτων. Περαιτέρω οφέλη της υψηλής αυτονομίας είναι η πλήρης εκμετάλλευση του συχνά περιορισμένου χρονικού ορίζοντα για την εκτέλεση της εργασίας.

Τέλος, το βάθος διάτρησης αποτελεί λειτουργία που επηρεάζει τον σχεδιασμό του συστήματος σημαντικά. Πέρα από τις διαστάσεις του γεωτρύπανου, η ενέργεια που απαιτεί η εργασία σχετίζεται και με τον τύπο του εδάφους στο οποίο θα εγκατασταθεί η καλλιέργεια. Συνεπώς μία πλειάδα εδαφικών παραμέτρων θα μελετηθούν προκειμένου να καθοριστούν με ακρίβεια τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους. Το σύστημα που προκύπτει αποτελείται από στοιχεία που στοχεύουν στην απλοποίηση της κατασκευής αλλά και την χρήση τεχνολογίας που είναι σε τέτοιο επίπεδο ετοιμότητας ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί άμεσα. Η αρχιτεκτονική παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 6. Αρχιτεκτονική του συστήματος.

3.1 Αρχιτεκτονική του συστήματος

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίζεται στο αυτόνομο επίγειο όχημα Thorvald (Σχήμα 2). Αυτή η πλατφόρμα διαθέτει τις κατάλληλες μηχανικές και σχεδιαστικές ιδιότητες που απλοποιούν τον σχεδιασμό και ενσωμάτωση υποσυστημάτων σημαντικά. Ειδικότερα το περιμετρικό πλαίσιο με τον διαθέσιμο εσωτερικά χώρο και το μεταβλητό πλάτος αποτελούν σημαντικά προτερήματα. Το πρώτο επιτρέπει τον σχεδιασμό εργαλείων που δεν μεταβάλλουν το συνολικό αποτύπωμα του συστήματος και την ευστάθεια λόγω κέντρου βάρους αυξάνοντας τη συνολική στιβαρότητα. Επιπλέον, το μικρότερο αποτύπωμα λειτουργεί ευεργετικά στις στροφές ενώ αυξάνει την ευελιξία του οχήματος και την εύκολη μεταφορά του από και προς τον αγρό. Το μεταβλητό πλάτος είναι σημαντικό γιατί επιτρέπει την αυξομείωση του πλάτους εργασίας και την επιχειρησιακή χωρητικότητα. Τέλος, η μεταβλητότητα του πλάτους καθιστά το πλάτος μη-κρίσιμη μεταβλητή για τον σχεδιασμό του συστήματος.



Σχήμα 7. Αυτόνομο όχημα Thorvald

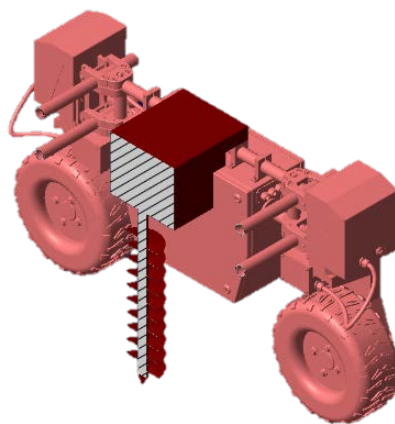
Όπως έχει προαναφερθεί, το σύστημα απαιτεί πλοήγηση και εντοπισμό στους αγρούς με μεγάλη ακρίβεια. Μία τεχνολογική λύση συμβατή με αυτές τις απαιτήσεις είναι η χρήση μίας μονάδας GNSS με διορθώσεις RTK ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια. Επικουρικά λειτουργεί επίσης η Μονάδα Αδρανειακής Μέτρησης (IMU) που καταγράφει την κατεύθυνση κίνησης.

Η κύρια εργασία θα εκτελείτε χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο βενζινοκίνητο γεωτρώπανο. Η χρήση βενζινοκίνητου συστήματος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε επίπεδο αυτονομίας. Η μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) παρέχει την απαραίτητη ισχύ για την εργασία διάτρησης και εξασφαλίζει την μη ενεργειακή επιβάρυνση των ηλεκτρικών συσσωρευτών του UGV κάτι που είναι απαραίτητο για την μετακίνηση στα σημεία ενδιαφέροντος. Η δεύτερη πηγή ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα που τροφοδοτεί το πνευματικό σύστημα ύψους του γεωτρώπανου. Η αποδοτικότητα του συστήματος θα αυξηθεί δεδομένου ότι η ΜΕΚ θα τροφοδοτεί είτε το γεωτρώπανο είτε το κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα.

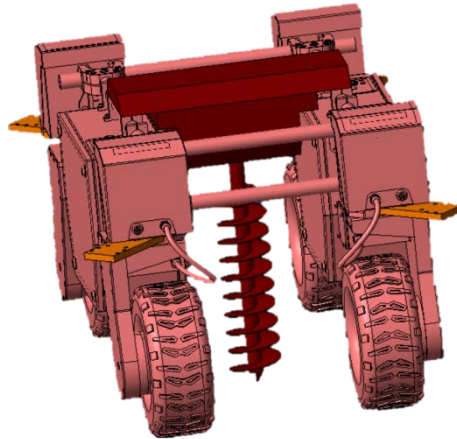
Για να επιτευχθεί η απαραίτητη ευστάθεια του συστήματος, η κινηματική του οχήματος μπορεί να συνεισφέρει κατά την εργασία διάτρησης στρέφοντας τους τροχούς κατά 45° προς το εσωτερικό ακινητοποιώντας το όχημα αντισταθμίζοντας μερικώς και τις ροπές που δημιουργούνται κατά την διάτρηση. Για την περαιτέρω εξασφάλιση σταθερότητας έχει σχεδιαστεί ένα κινητό σύστημα που ακινητοποιεί το ρομπότ κατά τη διάρκεια της διάτρησης ενώ αποσυνδέεται όταν δεν είναι απαραίτητο.

Τα υποσυστήματα χρειάζονται παρακολούθηση και συντονισμό. Το πλαίσιο διασύνδεσης εξυπηρετείται από το Ρομποτικό Λειτουργικό Σύστημα (ROS) που ελέγχει το UGV και το GNSS ενώ επικοινωνεί με τον ενδιάμεσο ελεγκτή ο οποίος συνδέει τους αισθητήρες και παρακολουθεί το εργαλείο. Ο ενδιάμεσος ελεγκτής μπορεί να είναι ένας υπολογιστής μίας πλακέτας ή ένας προγραμματιζόμενος μικροελεγκτής που μπορεί να διαβάσει τα εισερχόμενα σήματα, να τα επεξεργαστεί σε βασικό επίπεδο και να τα μεταδώσει σειριακά για την ενημέρωση της κατάστασης του συστήματος.

3.2 Μηχανικό σύστημα



Σχήμα 8. Προβολή τομής του γεωτρώπανου σε UGV.



Σχήμα 9. Ενσωμάτωση γεωτρύπανου στο UGV.

Αναλυτικότερα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του γεωτρύπανου θα καθοριστούν μετά από την αξιολόγηση μιας σειράς πειραματικών δεδομένων που πρόκειται να ληφθούν, προσδιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις βέλτιστες παραμέτρους σχεδιασμού κατά τις συνθήκες λειτουργίας. Η γωνία ελίκωσης, η γωνία της μύτης, ο αριθμός των αυλακώσεων και άλλες παράμετροι θα πρέπει να προσδιοριστούν ανάλογα με τη δύναμη και τη ροπή που θα ασκήσουν στη δομή. Μια προκαταρκτική εκδοχή του προτεινόμενου συστήματος παρουσιάζεται στα σχήματα που ακολουθούν. (Σχήμα 3 και Σχήμα 4).

Η προαναφερθείσα διαδικασία πρόκειται να καθορίσει τον αριθμό των σημείων αγκύρωσης που χρειάζεται το σύστημα για την επίτευξη σταθερότητας κατά τη λειτουργία. Το σύστημα αγκύρωσης θα είναι κινητό και θα χρησιμοποιεί ένα υποπλαίσιο με προέκταση που βοηθά στην αγκύρωση μεταξύ του συστήματος και του εδάφους.

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται σε μέρη που αποσύρονται και εμπλέκονται ανάλογα με τις ανάγκες. Το πνευματικό σύστημα που παρέχει αυτή τη λειτουργία πρόκειται να χρησιμοποιήσει έμβολα πεπιεσμένου αέρα με γραμμική κίνηση. Το σύστημα θα χρησιμοποιεί την ενέργεια που παράγεται από τον κινητήρα MEK που τροφοδοτεί το τρυπάνι. Αυτό συμβάλλει στην αυτονομία του συστήματος, κυρίως επειδή ο πεπιεσμένος αέρας είναι μία από τις πιο ενεργοβόρες λειτουργίες.

3.3 Έλεγχος του συστήματος

Τα κινούμενα υποσυστήματα θα πρέπει να ελέγχονται και να παρακολουθούνται από το ενδιάμεσο λογισμικό. Η ανθεκτικότητα του προτεινόμενου συστήματος σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας είναι ένας βασικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς το περιβάλλον λειτουργίας είναι δυσμενές. Επιπλέον, τα δομικά στοιχεία θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερα και διαθέσιμα ώστε να είναι λειτουργικά και αντικαταστάσιμα. Υπό αυτό το πρίσμα, επιλέχθηκαν μαγνητικοί διακόπτες για την επίτευξη του ελέγχου των τερματικών διαδρομής. Καθώς η αρχή λειτουργίας δεν βασίζεται στην φυσική επαφή, υπάρχει ανοχή στην ευθυγράμμιση και στους ρύπους από το περιβάλλον.

Για να μετρηθεί με ακρίβεια η θέση οδήγησης του τρυπανιού, θα επιλεγθεί ένας οπτικός αισθητήρας που βασίζεται σε μετρήσεις χρόνου πτήσης μιας διόδου λέιζερ. Δεδομένου ότι αυτός είναι επίσης ένας αισθητήρας χωρίς επαφή και χωρίς κινητά μέρη, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ανθεκτικός για λειτουργία στο πεδίο.

Τόσο η πίεση της δεξαμενής πεπιεσμένου αέρα όσο και η στάθμη του καυσίμου της ΜΕΚ θα παρακολουθούνται συνέχεια με τη χρήση ενός μανομέτρου και ενός απλού διακόπτη-πλωτήρα, αντίστοιχα.

3.4 Λογισμικό ελέγχου

Οι αισθητήρες ελέγχου που περιγράφονται στην ενότητα 3.3 θα πρέπει να συνδεθούν με έναν προγραμματιζόμενο μικροελεγκτή, ο οποίος θα ενσωματωθεί στο εργαλείο διάνοιξης των οπών. Αυτό το πρωτεύον επίπεδο ελέγχου θα βοηθήσει στην αναφορά της λειτουργικής κατάστασης και θα παρακολουθεί την πρόοδο των εργασιών του συστήματος. Η ανάγκη ύπαρξης ελεγκτή μεσαίου λογισμικού υπαγορεύεται επίσης από την απαίτηση του συστήματος να είναι φορητό και εύκολα προσαρμόσιμο σε άλλα οχήματα. Επιπλέον, ο έλεγχος χαμηλότερου επιπέδου μπορεί να αντιμετωπιστεί εσωτερικά, τυποποιώντας τα χαρακτηριστικά και τις διαδικασίες του εξοπλισμού και επιτρέποντας την ενσωμάτωση ή την ανάπτυξη νέου λογισμικού τρίτου.

Ο βασικός υπολογιστικός πόρος σε ανώτερο επίπεδο είναι ο ενσωματωμένος υπολογιστής του UGV που χειρίζεται κυρίως όλες τις λειτουργίες του οχήματος. Δεδομένου ότι το UGV εκτελεί ROS, ο προγραμματισμός της διαδρομής του έργου μπορεί να γίνει από τους αντίστοιχους αλγόριθμους του ROS και η επικοινωνία με το ενδιάμεσο λογισμικό μπορεί να επιτευχθεί σειριακά. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη για ανάπτυξη λογισμικού που μεταφέρει εντολές στο εργαλείο και αντίστροφα, ενώ ερμηνεύει και τα δεδομένα που μεταδίδονται από το ενδιάμεσο λογισμικό.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το προτεινόμενο σύστημα έχει σχεδιαστεί ώστε να αυτοματοποιήσει μια διαδικασία υψηλής έντασης εργασίας. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται διάφορα υποσυστήματα για τη σύνθεση ενός νέου εργαλείου που μπορεί να ενσωματωθεί σε αυτόνομα ρομποτικά οχήματα. Το σύστημα βασίζεται σε δύο πηγές τροφοδοσίας, τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές του UGV και τη δεξαμενή βενζίνης της ΜΕΚ που χρησιμοποιείται για το τρυπάνι και τον συμπιεστή αέρα. Οι μελλοντικές εκδοχές σχεδιασμού πρέπει να επικεντρωθούν σε μια πλήρως ηλεκτρική έκδοση. Συγκεκριμένα, η πειραματική διαδικασία καθορισμού των βέλτιστων γεωμετρικών παραμέτρων του κοχλία θα παράσχει επίσης πολύτιμα δεδομένα όπως τις πραγματικές απαιτήσεις εργασίας και ισχύος. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό ενός ικανού επιπέδου αυτονομίας που πληροί τις επιχειρησιακές απαιτήσεις της εγκατάστασης οπωρώνων. Τέλος, παρόλο που το σύστημα σχεδιάζεται εξειδικευμένα για συγκεκριμένες εργασίες, μικρές τροποποιήσεις μπορούν να βελτιώσουν τη λειτουργικότητά του σε παρόμοια εργασία πεδίου. π.χ. η δειγματοληψία του εδάφους θα μπορούσε επίσης να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο σύστημα, αυτοματοποιώντας μια κουραστική και δαπανηρή διαδικασία, επιτρέποντας στους αγρότες να συμπεριλάβουν χρήσιμα δεδομένα ανάλυσης εδάφους στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ball, D., Ross, P., English, A., Patten, T., Upcroft, B., Fitch, R., Sukkarieh, S., Wyeth, G. and Corke, P., 2015. *Robotics for Sustainable Broad-Acre Agriculture*. Springer, Cham, 439–453.
- Bergerman, M., Billingsley, J., Reid, J. F. and Deere, J., 2013. *IEEE Robotics and Automation Society Technical Committee on Agricultural Robotics and Automation [TC Spotlight]*.
- Blackmore, B.S., Fountas, S., Gemtos, T.A. and Griepentrog, H.W., 2009. *A specification for an autonomous crop production mechanization system*. *Acta Horticulturae*, 201–216.
- Blackmore, S., Godwin, R.J. and Fountas, S., 2003. *The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years*. *Biosystems Engineering*, 84(4), 455–466.
- Gerland, P., Raftery, A.E., Ševčíková, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T., Alkema, L., Fosdick, B.K., Chunn, J., Lalic, N., Bay, G., Buettner, T., Heilig, G.K. and Wilmoth, J., 2014. *World population stabilization unlikely this century*. *American Association for the Advancement of Science*, 346(6206), 234–237.
- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T. and Bouma, J., 2005. *Future Directions of Precision Agriculture*. *Precision Agriculture*, 6(1), 7–23.
- Pravakar, R., Stefan, N., Peng, C., Bayram, H., Tokekar, P. and Isler, V., 2015. *Robotic Surveying of Apple Orchards*.
- Sørensen, C.G., Fountas, S., Nash, E., Pesonen, L., Bochtis, D., Pedersen, S.M., Basso, B. and Blackmore, S.B., 2010. *Conceptual model of a future farm management information system*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(1), 37–47.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ CCCI ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟ ΣΤΑΦΥΛΙ

Οικονομίδης Α., Αναστασίου Ε., Τσούλιας Ν., Ξανθόπουλος Γ. & Φουντάς Σ.

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, e-mail:
alexandoikon@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αμπελώνα ποικιλίας *Vitis vinifera* L. cv. Thompson seedless μελετήθηκε η χωρική και χρονική παραλλακτικότητα του δείκτη περιεκτικότητας χλωροφύλλης της κόμης (CCCI), κατά τα κρίσιμα στάδια ανάπτυξης και η επίδραση του στην απόδοση και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, συνδυαστικά με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Τα δεδομένα περιγράφηκαν στατιστικά και συγκρίθηκαν μεταξύ τους, ώστε να εκτιμηθεί το καλύτερο δυνατό μοντέλο συσχέτισης. Μοντέλο βασισμένο σε τρίτου βαθμού πολυώνυμο παρουσίασε την καλύτερη συσχέτιση, ενώ ο CCCI σημείωσε χαμηλή συσχέτιση με την μέση θερμοκρασία του αέρα, την εξατμισοδιαπνοή και την μέση υγρασία του αέρα ($R^2=0.49$ και στις τρεις περιπτώσεις). Τέλος, παρατηρήθηκε υψηλή συσχέτιση του δείκτη με τα ολικά διαλυτά στερεά στοιχεία, την απόδοση αλλά και τον αριθμό βοτρύων πρέμνου ($R^2>0.75$).

Λέξεις κλειδιά: Αμπελουργία ακριβείας, NDVI, CCCI, Απόδοση

MODELLING CCCI VEGETATION INDEX FOR THE ASSESSMENT OF QUALITY AND YIELD IN TABLE GRAPE

Oikonomidis A., Anastasiou E., Tsoulis N., Xanthopoulos G., Fountas S.

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, e-mail: alexandoikon@gmail.com

ABSTRACT

The study took place in a commercial vineyard cultivated with *Vitis vinifera* L. cv. Thompson seedless, concerning the spatial and temporal variability of the canopy chlorophyll content index (CCCI) at the critical stages of growth, and its effect on the yield and quality characteristics of the crop, combined with the prevailing meteorological conditions of the area. The data were described statistically and compared to each other in order to assess the best possible model of correlation. The model based on the 3rd degree polynomial depicted the optimum correlation, while the CCCI revealed a low degree of correlation with the average of air temperature, the evapotranspiration and the average air humidity ($R^2=0.49$, in all cases). An important correlation was also observed with the total soluble solids, the yield and the number of branches ($R^2>0.75$).

Keywords: Precision viticulture, NDVI, CCCI, Yield

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια ενός συνεχώς αυξανόμενου ανταγωνισμού στις διεθνείς αγορές, γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη για την επίτευξη υψηλότερων ποιοτικών προδιαγραφών στα γεωργικά προϊόντα. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται νέες τεχνολογίες και τεχνικές στις γεωργικές καλλιέργειες, όπως είναι τα συστήματα Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ), που για την καλλιέργεια του αμπελιού αναφέρονται ως Αμπελουργία Ακριβείας (ΑΑ). Η ΓΑ είναι ένα σύστημα διαχείρισης αγροκτημάτων το οποίο χρησιμοποιώντας την πληροφορική και τα ηλεκτρονικά εφαρμοσμένα στη γεωργία, βοηθά τον γεωργό στη λήψη αποφάσεων για την καλύτερη διαχείριση του αγροκτήματος (Gemtosetal., 2002). Ο όρος καλύτερη διαχείριση μπορεί να σημαίνει βελτίωση της οικονομικής απόδοσης του αγροκτήματος, είτε με αύξηση της παραγωγής, είτε με μείωση των εισροών, είτε με συνδυασμό και των δύο. Επιπλέον, μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση των τυχόν αρνητικών επιπτώσεων της γεωργίας στο περιβάλλον, εφόσον εφαρμόζεται η αναγκαία ποσότητα εισροών σε κάθε σημείο του αγρού (Fountas&Gemtos, 2015). Μάλιστα, η μεταβολή των μετεωρολογικών συνθηκών παίζει καθοριστικό ρόλο όχι μόνο στην εμφάνιση ασθενειών και στη διατήρηση της απαιτούμενης βλάστησης στο φυτό, αλλά και για στην επίτευξη των επιθυμητών ποιοτικών χαρακτηριστικών (Ali, 2012; Fragaetal., 2012) που καθιστούν τον καρπό ή το προϊόν του καρπού κατάλληλο για κατανάλωση. Για παράδειγμα στο αμπέλι, η βροχή επηρεάζει τον δείκτη βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI) (Hashemi, 2011), ενώ η συγκέντρωση των ολικών διαλυτών στερεών συστατικών της ράγας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία (VanLeeuwen&Darriet, 2016). Επομένως, οι δείκτες βλάστησης μπορούν να επηρεαστούν από τη μεταβολή των μετεωρολογικών συνθηκών. Προηγούμενες μελέτες σε αμπελώνες έδειξαν ότι οι μεταβολές των δεικτών βλάστησης συνδέονται με ποιοτικά χαρακτηριστικά αλλά και την απόδοση της καλλιέργειας (Gonzalez-Floretal. (2014); Anastasiouetal. (2018)). Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι να εξεταστεί η δυνατότητα εκτίμησης της τελικής παραγωγής και ποιότητας επιτραπέζιων σταφυλιών, βάσει του συνδυασμού μετεωρολογικών δεδομένων και δεικτών βλάστησης από μετρήσεις της κόμης της καλλιέργειας, με την εφαρμογή μεθόδων ΑΑ. Η μελέτη της σχέσης των αποτελεσμάτων έχει ως απώτερο σκοπό την αρτιότερη εφαρμογή των εισροών και των καλλιεργητικών εργασιών προς όφελος όχι μόνο του παραγωγού και του καταναλωτή, αλλά και του περιβάλλοντος.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην παρούσα μελέτη συλλέχθηκαν δεδομένα με συστήματα ΓΑ σε αμπελώνα καλλιέργειας επιτραπέζιου σταφυλιού της ποικιλίας *Vitisvinifera* L. cv. *Thompsonseedless* στην περιοχή της Νέας Φυτείας (37°54'29.36" N, 22°44'43.47" E, Κόρινθος, Ελλάδα), που αφορούσαν τις μετεωρολογικές συνθήκες, τα επίπεδα βλάστησης και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά στην καλλιέργεια. Ο αμπελώνας έκτασης 15 στρεμμάτων, και διαμόρφωσης τύπου "V" στα φυτά, είχε αποστάσεις 2.6 m μεταξύ των γραμμών, και 1.8 m μεταξύ των φυτών επί των γραμμών φύτευσης. Τέλος, ο αμπελώνας χωρίστηκε σε 8 κελιά (blocks) για την δειγματοληψία των παραμέτρων της παραγωγής σύμφωνα με τις μεθοδολογίες της ΓΑ.

2.1 Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα συλλέχθηκαν μέσω του αυτόματου συστήματος ΓΑ SynField (Synelixis Solutions S.A., Greece). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν συλλέγονταν ημερησίως με συχνότητα περίπου είκοσι λεπτών από την 24^η Μαΐου 2018 (έναρξη του σταδίου της άνθησης) έως την 4^η Αυγούστου 2018 (έναρξη της συγκομιδής), και αφορούσαν την μέση θερμοκρασία του αέρα (ΘΑ) (°C), την μέση σχετική υγρασία του αέρα (ΥΑ) (%)

και την εξατμισοδιαπνοή (ΕΞΔ) (mm). Για κάθε παράμετρο υπολογίστηκε ο μέσος όρος του χρονικού διαστήματος περίπου δεκαπέντε ημερών πριν την κάθε μέτρηση έως την ημερομηνία της κάθε μέτρησης. Δηλαδή, υπολογίστηκαν οι παράμετροι για τα διαστήματα 24/05/18 – 09/06/18 (Στάδιο καρπόδεσης), 10/06/18 – 30/06/18 (Στάδιο πρασινίσματος της ράγας), 01/07/2018 – 09/07/2018 (Στάδιο ανάσχεσης της αύξησης των καρπών), 10/07/2018 – 23/07/2018 (Στάδιο περκασμού), 24/07/18 – 04/07/18 (Στάδιο συγκομιδής).

2.2 Δείκτες βλάστησης

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν πέντε δειγματοληψίες για τον υπολογισμό και την ανάλυση των δεικτών NDRE, NDVI και CCCI στον αμπελώνα. Η κάθε δειγματοληψία αποτελείται από ένα σύνολο μετρήσεων για κάθε κελί του αγρού. Η κάθε δειγματοληψία αντιστοιχεί σε ένα στάδιο ανάπτυξης: την καρπόδεση (09/06/2018), τοπρασίνισμα της ράγας (30/06/2018), την ανάσχεση της αύξησης των καρπών (09/07/2018), τον περκασμό (23/07/2018), και τη συγκομιδή (04/08/2018). Τα δεδομένα λήφθηκαν με τη συσκευή RapidSCANCS-45 (HollandScientific, USA) σε κάθε κελί του αμπελώνα, παίρνοντας μετρήσεις ανά τρεις γραμμές φύτευσης και ανά τρεις στύλους στήριξης κατά μήκος των γραμμών, που αντιστοιχούσε σε περίπου 7.8 m και 5.4m, αντίστοιχα. Σε κάθε κελί αντιστοιχούν περίπου 40 μετρήσεις. Οι μετρήσεις λήφθηκαν με σκόπευση από τα πλάγια με 0.5 μαπόσταση από την κόμη και χωρίς γωνία σκόπευσης.

Ο αισθητήρας μετράει ταυτόχρονα την ανάκλαση των καλλιεργειών/εδάφους στα 670 nm, 730 nm και 780 nm. Επίσης, είναι ικανός να συλλέγει δεδομένα από τη βλάστηση σε απόστασεις μεταξύ αισθητήρα και κόμης, που κυμαίνονται από 0.3 έως 3 μέτρα. Αυτή η ικανότητα του αισθητήρα εξηγεί την επιρροή των πιθανών κενών ανάμεσα στην κόμη της αμπέλου, καθώς μετράει την ανάκλαση από την επόμενη σειρά φύτευσης.

Όσο περισσότερο ενεργό είναι το φυτό, τόσο υψηλότερη θα είναι η ανάκλαση, δηλαδή θα είναι δυνατός ο εντοπισμός ζωνών υψηλής και χαμηλής δυναμικότητας μέσα στον αμπελώνα (Halletal., 2002). Οι πιο διαδεδομένοι δείκτες στην ΑΑ είναι ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) (σχέση 1) και ο δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς κόκκινου άκρου (Normalized Difference Red Edge index, NDRE) (σχέση 2). ONDVI κυμαίνεται μεταξύ -1 και +1 (Hallet al., 2002) και βασίζεται στη διαφορά μεταξύ της αντανάκλασης της ακτινοβολίας στην εγγύς υπέρυθρη φασματική ζώνη και της αντανάκλασης στην ερυθρή φασματική ζώνη. Σύμφωνα με τους Caietal. (2010) η σκιά δεν επηρεάζει τις τιμές που λαμβάνονται. Οι δείκτες που περιλαμβάνουν πράσινα και κόκκινα κανάλια (κοντά στα 700 nm, παρόμοια με τον NDRE) αυξάνουν την ευαισθησία του NDVI στην περιεκτικότητα χλωροφύλλης στη βλάστηση (Gitelson & Merzlyak 1997; Bonfil 2017). Οι δείκτες NDRE και NDVI υπολογίζονται από τις εξισώσεις (Halletal., 2002):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (\text{σχέση 1})$$

$$\text{NDRE} = (\text{NIR} - \text{Red-Edge}) / (\text{NIR} + \text{Red-Edge}) \quad (\text{σχέση 2})$$

Όπου, NIR (Near-InfraRed) οι τιμές ανακλώμενου φάσματος κοντά στην υπέρυθρη περιοχή (760–850 nm), RED η αντανάκλαση στο κόκκινο φάσμα (630–685 nm) και Red-Edge η αντανάκλαση στο άκρο του ερυθρού φάσματος (690–730 nm) (Rouseetal., 1974). Επίσης, από τον συνδυασμό των δεικτών NDRE και NDVI προκύπτει ο δείκτης περιεκτικότητας της κόμης σε χλωροφύλλη (Canopy Chlorophyll Content Index, CCCI) (σχέση 3). Ο δείκτης CCCI υπολογίζεται από την εξίσωση (Eiteletal., 2010):

$$\text{CCCI} = \text{NDRE} / \text{NDVI} \quad (\text{σχέση 3})$$

Ο δείκτης CCCI παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του φυλλώματος και πιο συγκεκριμένα για την περιεκτικότητά του σε χλωροφύλλη (Eiteletal., 2010). Ακόμα, ο δείκτης CCCI προτείνεται ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την ανίχνευση του επιπέδου του αζώτου (N) της κόμης, επειδή εξηγεί τις μεταβολές στη συγκέντρωση του N της κόμης κατά τη διάρκεια της εποχής (Devadasetal., 2011; Bassoetal., 2016; Ruddetal., 2017).

2.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά και απόδοση

Η συλλογή των ποιοτικών δεδομένων της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκε κατά το στάδιο της συγκομιδής, όπου μετρήθηκαν τα ολικά διαλυτά στερεά συστατικά της ράγας (ΟΔΣΣ) ($^{\circ}$ Brix), η διάμετρος της ράγας (Δ PB) (mm), ο αριθμός των βοτρυών του πρέμνου (ΑΒΠ)(αδιάστατο μέγεθος) και η απόδοση σε κιλά βοτρυών ανά πρέμνο (ΑΠ) (Kg). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη λήψη των δεδομένων (N=8) ήταν, αρχικά, η επιλογή ενός πρέμνου-μάρτυρα σε κάθε κελί (block), η μέτρηση των συντεταγμένων της θέσης του με τη χρήση GPS και στη συνέχεια η καταγραφή του ΑΒΠ. Ακολούθησε αποκοπή των βοτρυών και τοποθέτηση τους σε καφάσι γνωστού βάρους, για ζύγιση με τη χρήση ψηφιακής ζυγαριάς χειρός με ακρίβεια μετρήσεων ± 0.03 Kg. Έτσι, υπολογίστηκε η ΑΠ. Από την μέτρηση των μεγεθών ΑΒΠ και ΑΠ προέκυψε ένα ειδικό μέγεθος που αποτέλεσε έναν δείκτη απόδοσης της καλλιέργειας. Η σχέση που χαρακτηρίζει αυτό τον δείκτη είναι ο αριθμός των βοτρυών του πρέμνου προς την απόδοσή του (ΑΒΠ/ΑΠ) (Βότρες/Kg). Με αυτό τον τρόπο υπολογίστηκε ο αριθμός των βοτρυών ανά κιλό της απόδοσης. Τέλος, μετρήθηκε με τη χρήση ψηφιακού παχύμετρου η Δ PB (N=10), καθώς και οι βαθμοί brix των ΟΔΣΣ (N=5) με τη χρήση ενός διαθλασίμετρου χειρός, από διαφορετικούς βότρες του ίδιου πρέμνου που αντιπροσώπευε το κάθε κελί του αμπελώνα. Το διαθλασίμετρο έχει ακρίβεια μέτρησης $\pm 1\%$, ενώ το ψηφιακό παχύμετρο ± 0.02 mm.

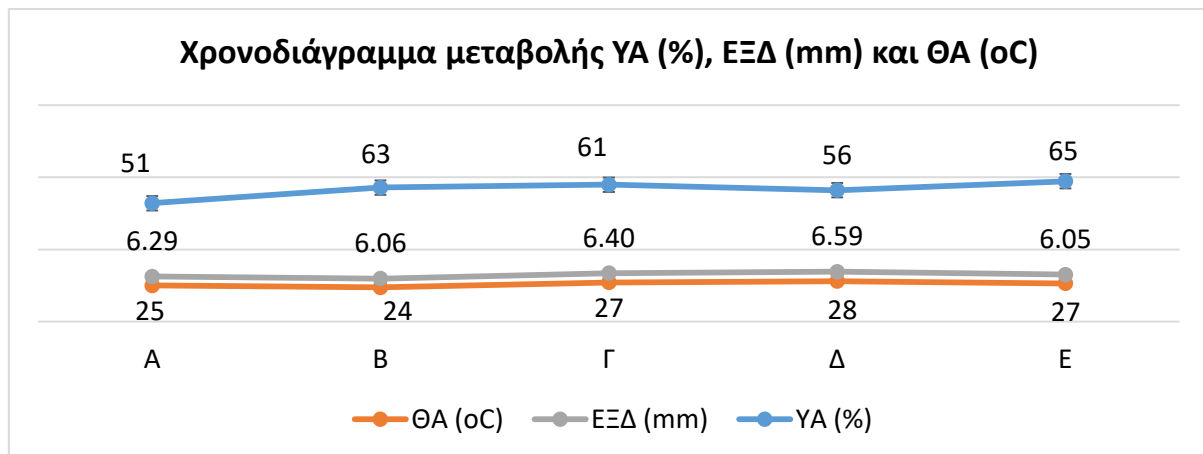
2.4 Επεξεργασία δεδομένων

Τα δεδομένα που λήφθηκαν από τις μετρήσεις οργανώθηκαν σε υπολογιστικά φύλλα με τη χρήση του προγράμματος Microsoft Office Excel (version Professional Plus 2013, Microsoft Corporation, USA), με το οποίο δημιουργήθηκαν στη συνέχεια διαγράμματα για τη χρονική μεταβολή των μεταβλητών. Για τις στατιστικές αναλύσεις των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο λογισμικού International Business Machines Corporation Statistical Package for Social Sciences, IBM SPSS (version 23, SPSS Inc., IL., USA). Στο λογισμικό αυτό εξετάστηκε η στατιστική περιγραφή, η συσχέτιση κατά Pearson, τα μοντέλα παλινδρόμησης και η ανάλυση παραλλακτικότητας όλων των δεδομένων της παρούσας μελέτης. Στη συνέχεια, όλα τα δεδομένα επεξεργάστηκαν για ψηφιοποίηση και δημιουργία θεματικών χαρτών στα προγράμματα ArcGIS (version 10.4, ESRI Inc., USA) και Global Mapper (version 20, Blue Marble Geographics Inc., USA). Η χωρική παρεμβολή πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο χωρικής ανάλυσης Inverse Distance Weight (IDW). Η επιλογή αυτού του μοντέλου έγινε λόγω της καλύτερης λειτουργίας του σε μελέτες με περιορισμένο αριθμό δειγμάτων. Επίσης, με το IDW δεν λαμβάνεται υπόψη ο προσδιορισμός της χωρικής αυτοσυσχέτισης, δηλαδή το πώς καθορίζονται οι συσχετισμένες μεταβλητές σε διαφορετικές αποστάσεις. Ακόμα, στο IDW δεν χρησιμοποιούνται στατιστικά μοντέλα, όπως συμβαίνει στην μέθοδο Kriging, και γίνεται χρήση μόνο γνωστών τιμών z και απόστασης για τον προσδιορισμό άγνωστων περιοχών (A. Setiantoetal., 2013). Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Curve Expert (version 1.4, Hyams Development, USA) με το οποίο εξετάστηκαν τα βέλτιστα πιθανά μοντέλα συσχέτισης των δεδομένων της παρούσας μελέτης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Μετεωρολογικά δεδομένα

Από την χρονική μεταβολή των μετεωρολογικών συνθηκών παρατηρήθηκε ότι κατά τη διάρκεια του σταδίου πρασινίσματος της ράγας μέχρι το στάδιο του περκασμού, δηλαδή την περίοδο των έντονων κλιματικών αλλαγών για τον μήνα Ιούλιο, παρουσιάστηκε μια έντονη μεταβολή στην ΥΑ, την ΕΞΔ και την ΘΑ που πιθανώς επηρέασε σημαντικά την βλάστηση, άρα τον δείκτη CCCI, αλλά και την ποιότητα και την τελική απόδοση της καλλιέργειας (Σχήμα 1). Η ΥΑ (%) μειώθηκε από το 63% στο 56%, ενώ οι ΘΑ (°C) και ΕΞΔ (mm) αυξήθηκαν από τους 24 στους 28 °C και από τα 6.06 στα 6.59 mm, αντίστοιχα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι παρά τις έντονες κλιματικές αλλαγές την περίοδο αυτή, η αθροιστική συσσώρευση της βροχής στην συγκεκριμένη περιοχή για όλη την υπό μελέτη περίοδο, σύμφωνα με τον μετεωρολογικό σταθμό, έφτασε τα 1.33 mm. Μεμονωμένα κατά το στάδιο της καρπόδεσης, του πρασινίσματος της ράγας, της ανάσχεσης της αύξεσης των καρπών, του περκασμού και της συγκομιδής σημειώθηκαν κατά μέσο όρο 0, 0.03, 0.05, 0 και 0.03 mm, αντίστοιχα.



Σχήμα 1. Χρονική μεταβολή των μετεωρολογικών δεδομένων της ΥΑ: Υγρασίας Αέρα(%), της ΘΑ: Θερμοκρασίας Αέρα (°C) και της ΕΞΔ: Εξατμισοδιαπνοής (mm), κατά την περίοδο 09/06/2018 – 04/08/2018, όπου A: Στάδιο καρπόδεσης (24/05/2018 – 09/06/2018), B: Στάδιο πρασινίσματος ράγας (10/06/2018 – 30/06/2018), Γ: Στάδιο ανάσχεσης αύξεσης των καρπών (01/07/2018 – 09/07/2018), Δ: Στάδιο περκασμού (10/07/2018 – 23/07/2018), E: Στάδιο συγκομιδής (24/07/2018 – 04/08/2018).

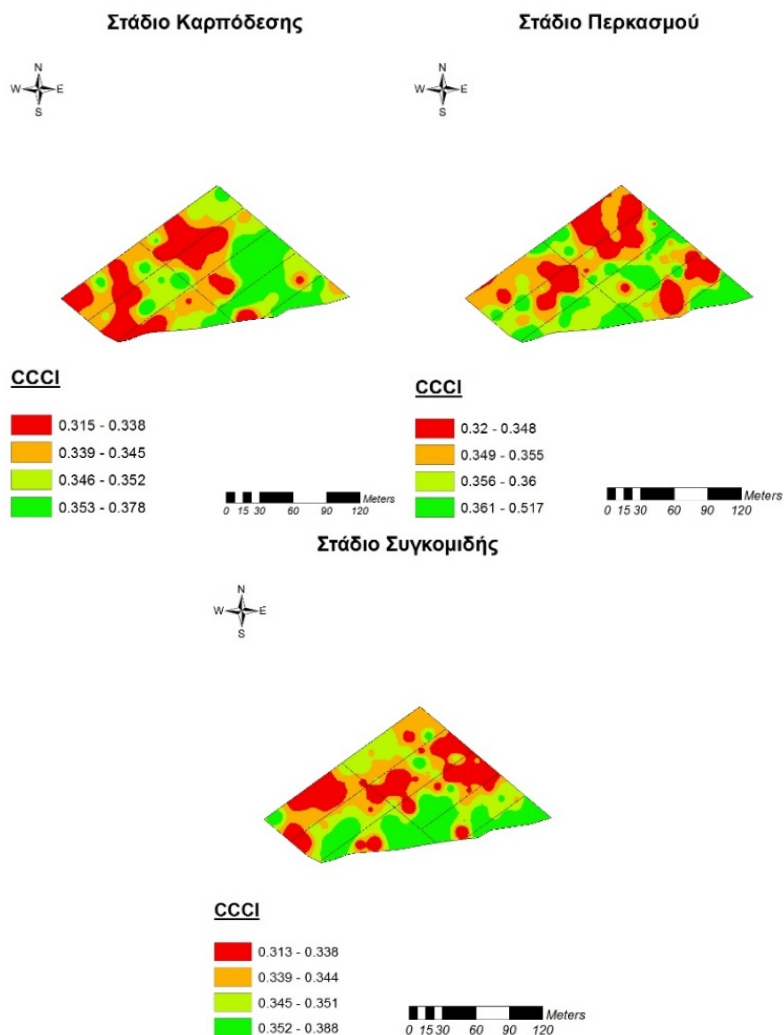
3.2 Δείκτης βλάστησης CCCI

Όσον αφορά τα δεδομένα του δείκτη CCCI, κατά το στάδιο της καρπόδεσης οι υψηλότερες τιμές παρατηρήθηκαν στην ανατολική πλευρά του αμπελώνα (μέγιστη μέση τιμή: 0.38), ενώ οι χαμηλότερες στην δυτική πλευρά (ελάχιστη μέση τιμή: 0.32) (Σχήμα 2). Επίσης, στο στάδιο αυτό σημειώθηκε τυπική απόκλιση (0.02) και συντελεστής διακύμανσης (7%). Κατά το στάδιο του περκασμού παρουσιάστηκε αύξηση των τιμών του δείκτη στο κεντρικό τμήμα στον αμπελώνα, ενώ μείωση παρουσιάστηκε στο βόρειο, δυτικό και ανατολικό κομμάτι του (ελάχιστη μέση τιμή: 0.32). Αξίζει να αναφερθεί πως σε αυτό το στάδιο καταγράφηκε η υψηλότερη μέση τιμή του CCCI καθόλη τη καλλιεργητική περίοδο (0.52), αλλά και τυπική απόκλιση (0.03) και συντελεστής διακύμανσης (8%) (Πίνακας 1). Τέλος, κατά το στάδιο της συγκομιδής σημειώθηκε αύξηση των τιμών του CCCI στη νότια και ανατολική πλευρά με μέγιστη τιμή (0.39), ενώ παρατηρήθηκε μείωση σε διάφορα σημεία μέσα στον αμπελώνα (ελάχιστη μέση τιμή ίση με 0.31). Σε αυτό το στάδιο παρατηρήθηκε χαμηλή τιμή τυπικής

απόκλισης και συντελεστή διακύμανσης του CCCI (0.02 και 5%, αντίστοιχα). Κατά το στάδιο του περκασμού παρατηρείται μικρή αύξηση του CCCI η οποία συνοδεύεται από ελαφρώς αυξημένη ΘΑ και ΕΞΔ και αρκετά μειωμένη ΥΑ (Πίνακας 1). Οι χάρτες με την χωρική παραλλακτικότητα του δείκτη CCCI στα διαφορετικά φαινολογικά στάδια παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 1. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία του δείκτη βλάστησης CCCI κατά το στάδιο της καρπόδεσης (09/06/18), του περκασμού (23/07/18) και της συγκομιδής (04/08/18).

Στάδιο	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διακύμανσης
Καρπόδεση	0.32	0.38	0.35	0.02	7%
Περκασμός	0.32	0.52	0.36	0.03	8%
Συγκομιδή	0.31	0.39	0.35	0.02	5%



Σχήμα 2. Η χωρική παραλλακτικότητα του δείκτη CCCI κατά τα στάδια της καρπόδεσης (09/06/2018), του περκασμού (23/07/2018) και της συγκομιδής (04/08/2018).

Παρατηρήθηκε υψηλος συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των δεικτών βλάστησης NDRE και NDVI ($r=0.8$ για $p<0.01$). Το πολυωνυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού ($y=a+bx+cx^2+dx^3$) περιέγραψε την υψηλότερη συσχέτιση ανάμεσα στον δείκτη βλάστησης CCCI και τις μετεωρολογικές συνθήκες, όπου ως εξαρτημένη μεταβλητή (y) χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης βλάστησης CCCI και ως ανεξάρτητη μεταβλητή (x) οι μετεωρολογικοί παράμετροι. Ο δείκτης CCCI παρουσίασε χαμηλές συσχετίσεις με την ΘΑ (SEE=0.02, $R^2=0.49$), την ΥΑ (SEE=0.02, $R^2=0.49$) και την ΕΞΔ (SEE=0.02, $R^2=0.49$) (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Συσχέτιση των μετεωρολογικών (N=322) δεδομένων με τον δείκτη βλάστησης CCCI, με τη χρήση του πολυωνυμικού μοντέλου 3^{ου} βαθμού ($y=a+bx+cx^2+dx^3$), όπου SEE: το τυπικό σφάλμα, R^2 : ο συντελεστής προσδιορισμού.

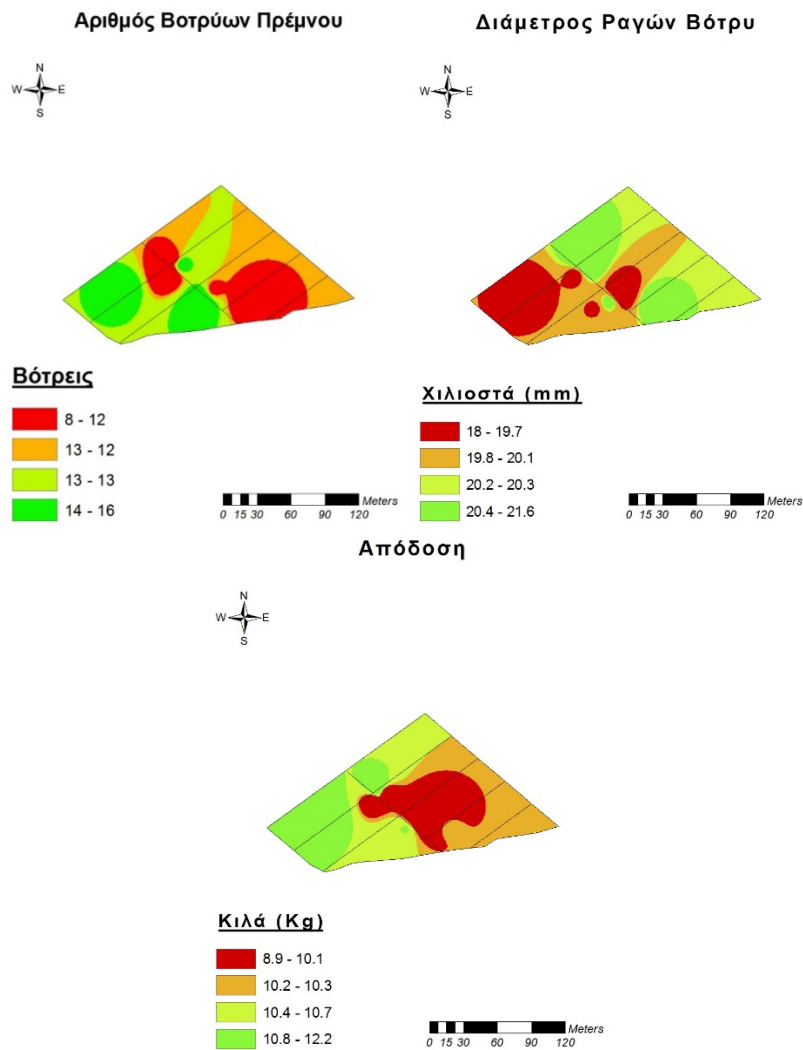
X	a	b	c	d	SEE	R^2
ΘΑ	3.56E-06	1.14E-01	-7.20E-03	1.28E-04	0.02	0.49
ΥΑ	-1.15E-04	6.52E-03	9.50E-05	-1.76E-06	0.02	0.49
ΕΞΔ	-5.37E-06	2.78E-01	-6.46E-02	4.65E-03	0.02	0.49

3.3 Ποιοτικά δεδομένα και απόδοση

Οι υψηλότερες τιμές των μεταβλητών ποιότητας και απόδοσης εμφανίστηκαν κυρίως στο δυτικό και νότιο κομμάτι του αμπελώνα, ενώ οι χαμηλότερες τιμές τους κυρίως στο κεντρικό, ανατολικό και δυτικό κομμάτι του αμπελώνα (Σχήμα 3). Προηγουμένως, αναφέρθηκε πως τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και η απόδοση συσχετίζονται με τους δείκτες βλάστησης και επηρεάζονται από τη μεταβολή των μετεωρολογικών συνθηκών (Gonzalez-Floretal., 2014). Επομένως, μπορεί η μεταβολή αυτή των μετεωρολογικών συνθηκών να έχει πιθανή επιρροή στα ποιοτικά χαρακτηριστικά και την απόδοση της καλλιέργειας του αμπελώνα (Orduna, 2010). Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερη τιμή του CCCI (0.37) καταγράφηκε στη χαμηλότερη τιμή των ΟΔΣΣ (=13.5 °Brix) (Πίνακας 2). Η περιεκτικότητα σε σάκχαρα σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με τη δυναμικότητα των πρέμων και την παραγωγή, καθώς όπως αναφέρουν οι Nuzzo & Matthews (2005) η μείωση της καλλιέργειας αυξάνει γενικά την τιμή του ρυθμού αύξησης της συγκέντρωσης σακχάρων. Επίσης, στην περιοχή που σημειώθηκε μια από τις χαμηλότερες τιμές του δείκτη CCCI (=0.34), καταγράφηκε υψηλή τιμή ΑΒΠ (=14 Βότρες), ΑΠ (=11.8 Kg) και ΔΡΒ (=20.6 mm) (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των δεδομένων ποιότητας και απόδοσης της καλλιέργειας κατά το στάδιο της συγκομιδής (04/08/18), όπου ΟΔΣΣ: Ολικά Διαλυτά Στερεά Στοιχεία, ΔΡΒ: Διάμετρος Ραγών Βότρυ, ΑΒΠ: Αριθμός Βοτρώων Πρέμνου, ΑΠ: Απόδοση Πρέμνου, ΑΒΠ/ΑΠ: ειδικό μέγεθος Αριθμού Βοτρώων Πρέμνου προς Απόδοση Πρέμνου.

	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης
ΟΔΣΣ (°Brix)	13.5	18.9	16.1	1.5	10%
ΔΡΒ (mm)	18.0	21.6	20.0	1.2	10%
ΑΒΠ (Βότρες)	8	16	12	3	20%
ΑΠ (Kg)	8.9	12.3	10.4	1.1	10%
ΑΒΠ/ΑΠ (Αδιάστατο)	0.8	1.5	1.1	0.2	0.2



Σχήμα 3. Η χωρική παραλλακτικότητα του ΑΒΠ (Βότρες), της ΔΡΒ (mm) και της ΑΠ (Kg) στο στάδιο της συγκομιδής.

Σύμφωνα με τον πίνακα 4 δεν παρουσιάστηκαν στατιστικές σημαντικές συσχετίσεις κατά Pearson με το εύρος των τιμών των συσχετίσεων να κυμαίνεται μεταξύ -0.35 έως 0.40. (ΟΔΣΣ-ΔΡΒ: $r=-0.23$, ΟΔΣΣ-ΑΒΠ: $r=-0.22$, ΟΔΣΣ-ΑΠ: $r=-0.35$, ΔΡΒ-ΑΒΠ: $r=0.18$, ΔΡΒ-ΑΠ: $r=0.40$, ΑΒΠ-ΑΠ: $r=0.27$). Οι Peacock & Simpson (1995) βρήκαν ότι η διάμετρος των ραγών στην ποικιλία Thompson Seedless επηρεάζει το βάρος τους και κατά συνέπεια την απόδοση, καθώς όσο αυξάνεται η διάμετρος των ραγών στην ποικιλία Thompson Seedless, τόσο αυξάνεται η απόδοση της (Πίνακας 4).

Πίνακας 4. Συσχέτιση κατά Pearson μεταξύ των ποιοτικών χαρακτηριστικών και της απόδοσης του αμπελώνα.

	ΟΔΣΣ	ΔΡΒ	ΑΒΠ	ΑΠ
ΟΔΣΣ	-	-0.23	-0.22	-0.35
ΔΡΒ	-0.23	-	0.18	0.40
ΑΒΠ	-0.22	0.18	-	0.27
ΑΠ	-0.35	0.40	0.27	-

Το πολυωνυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού ($y=a+bx+cx^2+dx^3$) περιέγραψε την υψηλότερη συσχέτιση ανάμεσα στα ποιοτικά δεδομένα και τον δείκτη βλάστησης CCCI, όπου ως εξαρτημένη μεταβλητή (y) χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ποιότητας και απόδοσης και ως ανεξάρτητη μεταβλητή (x) ο δείκτης βλάστησης CCCI (Πίνακας 5).

Η μεταβολή του δείκτη CCCI παρουσίασε σημαντικό βαθμό συσχέτισης με την μεταβολή των ποιοτικών μεταβλητών και της απόδοσης (Πίνακας 5). Πιο συγκεκριμένα, με τα ΟΔΣΣ σημείωσε βαθμό συσχέτισης $R^2=0.97$ (SEE=1.22). Σε προηγούμενες μελέτες παρατηρήθηκε σημαντική συσχέτιση μεταξύ ΟΔΣΣ και NDVI ($r=-0.714$, $p<0.01$) (Anastasiouetal., 2017). Με την ΔΡΒ σημειώθηκε βαθμός συσχέτισης $R^2=0.97$ (SEE=1.38). Οι Anastasiouetal. (2018) συγκρίνοντας διαφορετικούς τρόπους λήψης του δείκτη NDVI και συσχετίζοντας τους με διάφορα ποιοτικά χαρακτηριστικά, βρήκαν ότι κατά το στάδιο της ωρίμανσης και της συγκομιδής, η συσχέτιση του NDVI με την ΔΡΒ παρουσίασε στατιστικώς σημαντική χαμηλή συσχέτιση με $r=0.47$, $p<0.01$ και $r=0.42$, $p<0.01$, αντίστοιχα. Ο ΑΒΠ και η ΑΠ παρουσίασαν θετική συσχέτιση με τον δείκτη CCCI (SEE=2.90, $R^2=0.76$ & SEE=1.28, $R^2=0.92$, αντίστοιχα), δείχνοντας ότι οι περιοχές με υψηλό CCCI εμφανίζουν υψηλότερη παραγωγή βοτρώων ανα πρέμνο. Το ειδικό μέγεθος ΑΒΠ/ΑΠ παρουσίασε σημαντική συσχέτιση με τον δείκτη CCCI με μικρό τυπικό σφάλμα ($R^2=0.85$ SEE=0.13). Αυτό δείχνει ότι το ειδικό μέγεθος ΑΒΠ/ΑΠ αποτελεί μια ασφαλέστερη έκφραση της απόδοσης στις περιπτώσεις που η ΑΒΠ και η ΑΠ δεν συσχετίζονται στον ίδιο βαθμό με τον δείκτη CCCI.

Πίνακας 5. Συσχέτιση των ποιοτικών (N=8) δεδομένων με τον δείκτη βλάστησης CCCI με τη χρήση του πολυωνυμικού μοντέλου 3^{ου} βαθμού ($y=a+bx+cx^2+dx^3$), όπου SEE: το τυπικό σφάλμα, R^2 : ο συντελεστής προσδιορισμού.

Y	a	b	c	d	SEE	R^2
ΟΔΣΣ	-7.85E-05	-3.01E+03	1.76E+04	-2.52E+04	1.22	0.97
ΔΡΒ	1.65E-05	-7.49E+02	4.71E+03	-6.88E+03	1.43	0.97
ΑΒΠ	2.73E-04	-5.73E+02	3.34E+03	-4.57E+03	2.90	0.76
ΑΠ	3.31E-06	1.42E+03	-7.71E+03	1.07E+04	1.28	0.92
ΑΒΠ/ΑΠ	9.44E+03	-8.07E+04	2.30E+05	-2.18E+05	0.13	0.85

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αμπελώνα αξιολογήθηκε ο βαθμός συσχέτισης του δείκτη CCCI με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και την τελική παραγωγή του σταφυλιού. Μέσω της χαρτογράφησης της χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας, καθώς και της στατιστικής ανάλυσης του δείκτη CCCI παρατηρήθηκε ότι είχε συνολικά χαμηλό βαθμό συσχέτισης με τις μετεωρολογικές συνθήκες. Ωστόσο, ο δείκτης σημείωσε υψηλή συσχέτιση με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σταφυλιού και την ΑΠ του αμπελώνα σε σύγκριση με τους δείκτες βλάστησης NDR και NDVI μεμονωμένα. Επίσης, μπορεί να βοηθήσει στη πρόβλεψη του ΑΒΠ του αμπελώνα. Επομένως, ο δείκτης ενδεχομένως να αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο για τον τελικό χρήστη, καθώς είναι αποτελέσματα δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων δεικτών βλάστησης για την εκτίμηση της ποιότητας και της απόδοσης της παραγωγής. Παρόλα αυτά, απαιτούνται περαιτέρω έρευνες μεγαλύτερης δειγματοληψίας για την εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών κατά τα κρίσιμα στάδια ανάπτυξης του αμπελιού με τον δείκτη CCCI, καθώς και την εύρεση ειδικών μεγεθών που συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με τον δείκτη για εγγυρότερες εκτιμήσεις της ποιότητας και απόδοσης της καλλιέργειας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anastasiou E., Kounani K., Tzouvaras S., Balafoutis A., Templalexis C., Lentzou D., Tsiropoulos Z., Xanthopoulos G., Fountas S., 2017. *Validation of 5 spectral vegetation indices in estimating yield and quality parameters on table grapes using aside canopy sensor*. 2nd Conference on Geographical Information Systems and Spatial Analysis in Agriculture and the Environment, Athens, 25 & 26 May 2017.
- Anastasiou E., Zaharioudaki E., Manolaki S., Vasileiou P., Tzouvaras S., Kounani K., Balafoutis A., Fountas S., 2017. *Evaluation of NDVI and NDRE in estimation of quantity and quality parameters of two different winegrape varieties*. 2nd Conference on Geographical Information Systems and Spatial Analysis in Agriculture and the Environment, Athens, 25 & 26 May 2017.
- Anastasiou E., Balafoutis A., Darra N., Psiroukis V., Biniari A., Xanthopoulos G. and Fountas S., 2018. *Satellite and Proximal Sensing to Estimate the Yield and Quality of Table Grapes*. *Agriculture*, 8(7), p.94.
- Ali M., 2012. *Climate change impacts on plant biomass growth*. Springer Science & Business Media.
- Basso B., Fiorentino, C., Cammarano, D., & Schulthess, U. (2016). *Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing*. *Precision agriculture*, 17(2), 168-182.
- Bonfil, D. J. (2017). *Wheat phenomics in the field by RapidScan: NDVI vs. NDRE*. *Israel Journal of Plant Sciences*, 64(3-4), 41-54.
- Cai D., Li M., Bao Z., Chen Z., Wei W. and Zhang H., 2010. *Study on shadow detection method on high resolution remote sensing image based on HIS space transformation and NDVI index*. In *Geoinformatics, 2010 18th International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- De Orduna R.M., 2010. *Climate change associated effects on grape and wine quality and production*. *Food Research International*, 43(7), pp.1844-1855.
- Devadas R., Jones S., Fitzgerald G., McCauley I., Matthews B., Perry E. & Kouzani A., 2011. *Development of a wireless sensor network for in-situ image validation for water and nitrogen management*. *Asian Journal of Geoinformatics*, 11(2), 1-11.
- Eitel J.U., Keefe R.F., Long D.S., Davis A.S. and Vierling L.A., 2010. *Active ground optical remote sensing for improved monitoring of seedling stress in nurseries*. *Sensors*, 10(4), pp.2843-2850.
- Fraga H., Malheiro A.C., Moutinho-Pereira J. and Santos J.A., 2012. *An overview of climate change impacts on European viticulture*. *Food and Energy Security*, 1(2), pp.94-110.
- Gemtos T.A., Fountas S., Blackmore, S. and Greipentrog, H.W., 2002. *Precision farming experience in Europe and the Greek potential*. HAICTA Conference, Athens, June 2002.
- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1997). *Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves*. *International Journal of Remote Sensing*, 18(12), 2691-2697.
- González-Flor C., Serrano L., Gorchs G. and Pons J.M., 2014. *Assessment of grape yield and composition using reflectance-based indices in rainfed vineyards*. *Agronomy Journal*, 106(4), pp.1309-1316.
- Hall A., Lamb D.W., Holzapfel B. and Louis J., 2002. *Optical remote sensing applications in viticulture-a review*. *Australian journal of grape and wine research*, 8(1), pp.36-47.
- Hashemi S.A., 2011. *Investigation of relationship between rainfall and vegetation index by using NOAA/AVHRR satellite images*. *World Applied Sciences Journal*, 14(11), pp.1678-82.

- Nuzzo, V., & Matthews, M. A. (2005, September). Berry size and yield paradigms on grapes and wines quality. In *International Workshop on Advances in Grapevine and Wine Research 754* (pp. 423-436).
- Peacock B. and Simpson T., 1995. *The relationship between berry weight, length, and width for five table grape varieties*. University of California Cooperative Extension (UCCE)-Tulare County., Publ. TB1-95.
- Rouse Jr J.W., Haas R.H., Deering D.W., Schell J.A. and Harlan J.C. 1974. *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation*. NASA/GSFC Type III Final Report.
- Rouse Jr J.W., Haas R.H., Schell J.A. and Deering, D.W., 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*.
- Rudd J.D., Roberson G.T., & Classen J.J., 2017. *Application of satellite, unmanned aircraft system, and ground-based sensor data for precision agriculture: a review*. In 2017 ASABE Annual International Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Setianto A. and Triandini T., 2013. *Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis*. Journal of Applied Geology, 5(1).
- Van Leeuwen C. and Darriet P., 2016. *The impact of climate change on viticulture and wine quality*. Journal of Wine Economics, 11(1), pp.150-167.

IMPACT OF DROUGHT ON CROP WATER REQUIREMENTS USING REMOTE SENSING AND GIS

R.M. Stefanidis & S. Giakoumakis

Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management, School of rural and Surveying Engineering, National Technical University of Athens, Iroon Polytechniou 9, 157 80, Athens, Greece, e-mail: marios_stefanidis@hotmail.gr

ABSTRACT

The present work suggests that the achievement of integrated water resources management, requires geospatial data concerning crops. These data were extracted using remote sensing techniques and GIS. Moreover, rainfall and temperature data were used in order to calculate reference evapotranspiration and then, the reconnaissance drought index (RDI). Thematic maps based on this index, indicating drought's spatial distribution, were derived. Potential evapotranspiration of crops was estimated through the appropriate crop coefficients. Also, effective rainfall was taken into account for the irrigation period. Based on the total area that the crops cover, the annual volume of water that the crops need was estimated and then was compared to the effective volume of water of the reservoirs of two interconnected dams that are to be constructed in the area. Crop requirements were derived for the driest year.

Keywords: Drought, GIS, remote sensing, water requirements.

ΧΡΗΣΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ GIS ΓΙΑ ΑΙΧΝΕΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Ρ.Μ. Στεφανίδης & Σ. Γιακουμάκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Γεωχωρικά δεδομένα που αφορούν καλλιέργειες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως. Τα δεδομένα αυτά εξήχθησαν χρησιμοποιώντας τηλεπισκοπικές τεχνικές και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας με σκοπό να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και εν συνεχεία ο δείκτης αναγνώρισης ξηρασίας (RDI). Με βάση αυτόν τον δείκτη, δημιουργήθηκαν θεματικοί χάρτες χωρικής κατανομής της ξηρασίας. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών εκτιμήθηκε μέσω των κατάλληλων φυτικών συντελεστών. Επίσης, λήφθηκε υπόψιν η ενεργός βροχόπτωση για την αρδευτική περίοδο. Ο ετήσιος όγκος νερού, ο οποίος απαιτείται για την κάλυψη των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών, υπολογίστηκε με βάση τη συνολική έκταση που αυτές καλύπτουν και εν συνεχεία συγκρίθηκε με τον ωφέλιμο όγκο νερού των ταμιευτήρων των δύο διασυνδεδεμένων φραγμάτων τα οποία πρόκειται να κατασκευαστούν στην περιοχή. Οι υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών υπολογίστηκαν για το ξηρότερο έτος, επιτυγχάνοντας έτσι την ολοκληρωμένη διαχείριση υδάτινων πόρων.

Λέξεις κλειδιά: Ξηρασία, ΓΣΠ, τηλεπισκόπηση, υδατικές ανάγκες.

1. INTRODUCTION

Understanding future changes in crop water requirements and irrigation demand in the context of climate change is essential for long-term water resources management and agricultural planning (Acharjee et al., 2017). More specifically, Tavronitis's river basin in Crete (Greece) was used as case study. Tree crops such as olive trees, avocados and orange trees are widely cultivated in the region. More specifically, each plant species was recognized by applying several techniques to emphasize the role of remote sensing in detecting crops (Assatse et al., 2016). Google Satellite has played a key role in crop detection. Like every other Google Earth Engine, Google Satellite aims at providing planetary-scale geospatial data which are useful in a variety of high-impact societal issues associated with land reclamation works such as drought, water management, climate monitoring, environmental protection, crop yield estimation, flood mapping and land use change (Gorelick et al., 2017). Inside the river basin two interconnected dams (Sempreniotis dam and Papadianon dam) are planned to be constructed so that the effective volume of their reservoirs will be used to cover the water demand of the tree crops during the irrigation period between March and October (Giakoumakis, 2017). In order to check the effectiveness of the design of the interconnected dams in the river basin, the annual water requirements of the driest year, indicated as the year with the highest water requirements for the irrigation period of March-October, were compared to the secured demand at almost 100%, from the reservoirs of the proposed dams (Hydro-System Consultants Engineers, 1992). Drought is considered to be one of the most important extreme natural phenomena within the climatic variations (Nalbantis and Tsakiris, 2008). In general, drought may have different expressions depending on the examination parameters and the climate of the area (Rossi et al., 1992). Besides, drought has serious consequences on the water supplies, economy and environment, due to the fact that is inarguably one of the most challenging and complex natural disasters from management perspective (Mera, 2018). Remote sensing and water demand estimation, especially during dry periods, over the cultivated area are used to manage irrigation and minimize losses during the crop growing cycle (Vanino et al., 2018) underlining the purpose of the present study, which is to propose a methodology for investigating the impact of drought on the water requirements of crops in river basins of the Mediterranean region.

2. METHODOLOGY

2.1 Remote sensing and GIS

Geospatial data, concerning the area of the tree crops inside the river basin, were estimated in order to have a complete hydrological view over the river basin. Remote sensing techniques and geographic information systems (GIS) software were used. These techniques mainly concerned the so-called photo interpretation characteristics, which are: shape, size, pattern, hue, texture, shade, spatial location and spatial arrangement (Argialas, 1999). The recognition and digitization that followed was performed in Quantum GIS using online – free – imagery that this software provides, called Google Satellite. The recognized crops were olive trees, avocados and orange trees. The projection system used was *GGRS87 / Greek Grid*. The featured orchards were digitized with maximum precision, so that the risk of failure of intergraded water resources management gets minimized (Hooper, 2003; World Meteorological Organization, 2009).

2.2 Drought characterization

In this study *meteorological drought*, meaning the period of time without enough rainfall (Tsakiris, 2013), was investigated. As a matter of fact, meteorological drought is directly related to the examined area, because the atmospheric conditions, which differ from area to area, play a key

role to its formation. Greece, as a typical Mediterranean country (mild rainy winters and hot dry summers with high evaporation), due to its geographical position and climate, is fairly prone to drought outbreaks. Insufficient rainfall is one of the main factors that causes drought, while the phenomenon can be represented by its intensity, duration and spatial distribution (Vangelis, 2012; Hassan et al., 2019). So, knowing that rainfall is very low during summer, drought is more likely to appear on the second semester of a hydrological year (April-September). This six-month period is also considered as the core of the irrigation period under Greek, and general Mediterranean, climatic conditions.

The method used here adopts an index that can detect the existence of drought in an area, at a specific time period. This index is called RDI (Reconnaissance Drought Index) and expresses meteorological drought through the balance between input and output. RDI is based on rainfall (P) as input and potential evapotranspiration (PET) as output (Tigkas et al., 2013). Recently, several studies have shown that temperature methods for estimating PET can be fairly sufficient for the calculation of RDI in various regions with different climatic characteristics, thus providing a realistic representation of drought conditions while concurrently limiting the required data to rainfall and temperature (Thomas et al., 2016; Tigkas et al., 2016). RDI involves three different forms: the initial value (a_k), the normalized form (RDI_n) and the standardized one (RDI_{st}). The initial value a_k is calculated for the i -th year during a time of k months:

$$a_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}}, \quad i=1(1)N \text{ and } j=1(1)k \tag{1}$$

with P_{ij} being the rainfall and PET_{ij} the potential evapotranspiration of the j -th month of the i -th year, while N is the total number of hydrological years of the available time series.

The following expression is the normalized RDI or RDI_n :

$$RDI_n^{(i)} = \frac{a_k^{(i)}}{\overline{a_k^{(i)}}} - 1 \tag{2}$$

where $\overline{a_k^{(i)}}$ is the arithmetic mean of $a_k^{(i)}$.

The standardized value of RDI, RDI_{st} , is calculated as follows:

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y_i^{(i)} - \bar{y}}{\sigma_y} \tag{3}$$

in which y_i is the $\ln(a_k^{(i)})$, \bar{y} its arithmetic mean and σ_y its standard deviation.

The values of RDI_{st} can be classified in 7 classes (Table 1) and can be calculated for a 3, 6 or 12 month-period (Vangelis, 2012).

Table 1. Classification of drought conditions according to RDI_{st} .

RDI_{st} values	Drought classification
>2.0	Extremely Wet
1.50 to 1.99	Very Wet
1.00 to 1.49	Moderately Wet
-0.99 to 0.99	Normal Conditions
-1.00 to -1.49	Moderately Dry
-1.50 to -1.99	Very Dry
<-2.00	Extremely Dry

3.CASE STUDY

For the river basin studied, that spans 131 km², rainfall and temperature data from three different meteorological stations were available. The stations chosen for the present study were: Tavronitis (+15m) with 660.8 mm of average annual rainfall, Zympragou (+235m) with 1171.5 mm of average annual rainfall and Palaia Roumata (+316m) with 1251 mm of average annual rainfall.

Discretization was performed, involving 167 squares of 1 km² each (1 km side), to cover the whole basin's area. Every square was represented by its center. Hydrological information was transferred to each square from the nearest stations, using the *inverse distance* algorithm (Vangelis, 2012; Tsanakas et al., 2013). After both monthly rainfall and temperature data were transferred to the centers of all squares, Thornthwaite method (Thornthwaite and Holzman, 1942; Thornthwaite, 1948) was applied in order to determine the reference evapotranspiration (PET). This method is one of the most commonly used method of PET calculation, because it provides the best results on regional level using only temperature data as input (Cadro et al., 2017). In this paper PET was calculated as:

$$PET_{Thornthwaite} = 16 \left(\frac{T_{mean}}{I} \right)^a \quad (4)$$

$$I = \sum_{a=1}^{12} (0.2 T_a)^{1.514} \quad (5)$$

$$a = 6.75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1.7912 \cdot 10^{-2} I + 0.49239 \quad (6)$$

where T_{mean} is the mean air temperature (°C), I a thermal index imposed by the local normal climatic temperature regime, and the exponent α is a function of I.

Then, RDI_{st} (eq 3), for a 35-year period (1971-2006) available here, was calculated using Drought Indices Calculator (DrinC) software (Tigkas et al., 2015). RDI_{st} values for every square unit were calculated for the six months period (April to September) of each hydrological year. According to these values, thematic maps of drought were created using AutoCAD and ArcMAP software. As an example, for some years, drought appeared to be significant (Figures 1, 2). In other cases, there were relatively wet years (Figure 3).

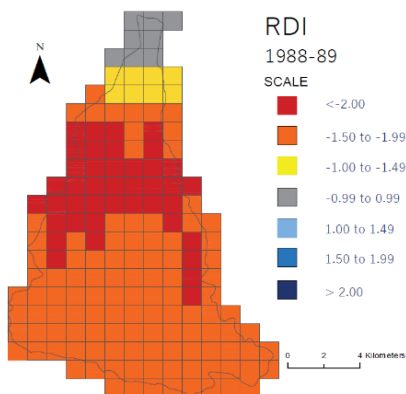


Figure 1. Spatial illustration of drought for the dry year 1988-89 according to RDI_{st} six month period values.

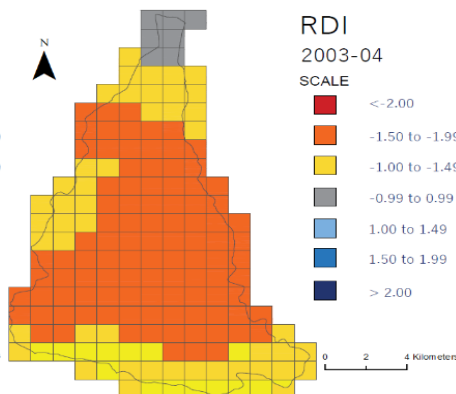


Figure 2. Spatial illustration of drought for the dry year 2003-04 according to RDI_{st} six month period values.

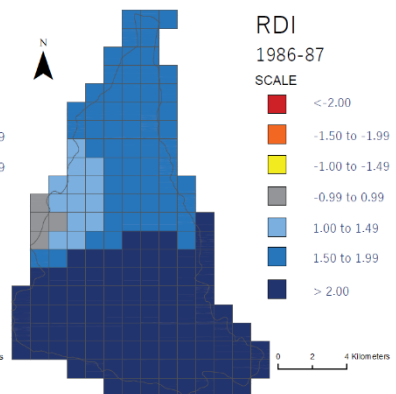


Figure 3. Spatial illustration of drought for the wet year 1986-87 according to RDI_{st} six month period values.

In Figures (4) and (5) are presented the most vulnerable areas of the river basin examined in detail under dry and humid conditions respectively. In addition, the main hydrographic network of the river basin as well as the areas covered by tree crops, as extracted during the remote sensing process (i.e. olive trees, avocados and orange trees) are included. Hydrometeorological stations and the location of the interconnected proposed dams, are also depicted.

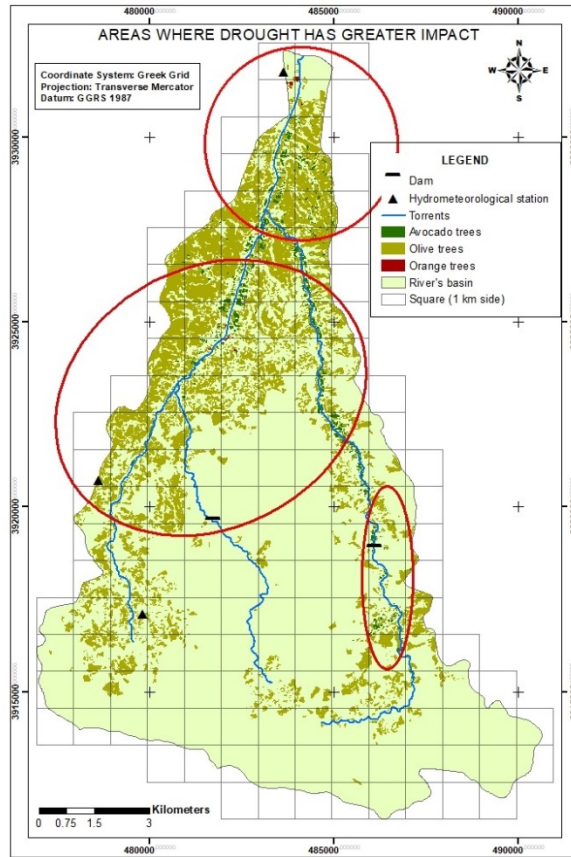


Figure 4. Areas most vulnerable to drought.

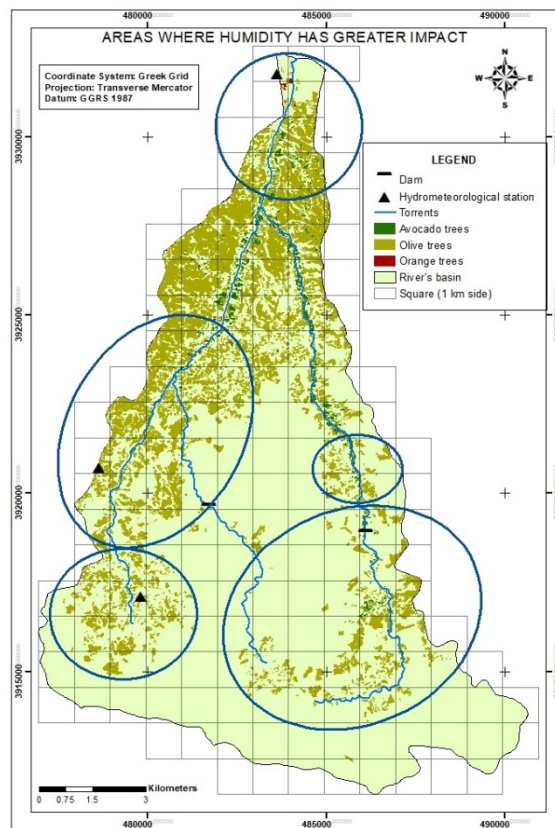


Figure 5. Areas most vulnerable to humidity.

The estimation of the water requirements of these crops was carried out using the Penman-Monteith method (Allen et al., 1998; World Meteorological Organization, 2008; Zotarelli et al., 2010; Spiliotopoulos, 2014). Reference evapotranspiration PET (ET_o) was first calculated. The relevant data were taken from Souda meteorological station, which was the nearest to the river basin with complete records (Giakoumakis, 2017). Using, then, the appropriate crop coefficients K_c for each of the three types of tree crops in the area, potential evapotranspiration PET_c (ET_c), which represents the crop water needs under certain climatic conditions (Zhang et al., 2010), was computed for the irrigation period (March to October) as:

$$PET_c = PET \cdot K_c \quad (7)$$

where, PET_c is the actual or potential evapotranspiration of the crop (mm/day), PET is the reference evapotranspiration (mm/day) and K_c the crop coefficient at a specific growth stage. K_c depends on crop properties (e.g., height of crop, resistance of canopy, albedo), soil and climatic parameters, such as soil surface, evaporation, wind speed and direction. Albedo is the fraction of solar radiation reflected by the surface of crop and soil, where, as the canopy means the leaves and branches of crops at the top (Chowdhury et al., 2016). So, resistance of canopy is the resistance of the crop against vapor transfer (Allen et al., 1998). As a result, K_c varies not only on the type of crop, but also on the growing stage of the crop (initial stage, mid-season and late season), which practically reflects the canopy development due to agronomic practices over the course of the growing season. At the same time, PET plays an important role in global energy exchange and water cycle, whereas it depends on climatic data like air temperature, wind velocity, sunshine hours and air humidity (Du and Sun, 2012). It follows the FAO approved Penman-Monteith equation as:

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (8)$$

where, PET is the reference evapotranspiration (mm/day), R_n is the net radiation at the crop surface ($MJ/m^2/day$), G is the soil heat flux density ($MJ/m^2/day$), T is the mean air temperature at 2 m height ($^{\circ}C$), u_2 is the wind speed at 2 m height (m/s), e_s is the saturation vapor pressure (kPa), e_a is the actual vapor pressure (kPa), $e_s - e_a$ is the saturation vapor pressure deficit (kPa), Δ is the slope of vapor pressure curve ($kPa/^{\circ}C$) and γ is the psychrometric constant ($kPa/^{\circ}C$) (Farg et al., 2012; Zheng et al., 2012).

For the water balance, effective rainfall P_e (mm) was also taken into account (Allen et al., 1998). Therefore, P_e was considered as the part of total rainfall that could be used for crop development, directly or indirectly. The percentage of total P that was considered as P_e depends on several factors, practically related to infiltration, runoff and evapotranspiration. The equations used to represent P_e are the following (Tigkas et al., 2016):

$$P < 250mm, P_e = \{P \cdot (125 - 0.2 \cdot P)\} / 125 \quad (9)$$

$$P > 250mm, P_e = 125 + 0.1 \cdot P \quad (10)$$

with P (mm) being the monthly rainfall.

Results are illustrated in Table (2). In this table, IR_n (mm) represents net water requirements (i.e. $IR_n = PET_c - P_e$).

Considering the whole cultivated area of each crop, the average annual water requirements were calculated (Table 3).

Table 2. Average values of crop evapotranspiration (mm) for the irrigation period (Mar-Oct).

Mon.	PET (mm)	Pe (mm)	Kc Ol.	Kc Av.	Kc Or.	PETc Ol.	PETc Av.	PETc Or.	IRn Ol.	IRn Av.	IRn Or.
MAR	91.1	114.4	0.65	0.6	0.7	59.2	54.7	63.8	0.0	0.0	0.0
APR	117.9	56.6	0.7	0.85	0.7	82.5	100.2	82.5	26.0	43.6	26.0
MAY	157.9	21.3	0.7	0.85	0.65	110.5	134.2	102.6	89.2	112.9	81.3
JUN	182.7	8.0	0.7	0.85	0.65	127.9	155.3	118.8	119.9	147.3	110.8
JUL	195	1.3	0.7	0.85	0.65	136.5	165.8	126.8	135.2	164.5	125.5
AUG	172.7	3.4	0.7	0.85	0.65	120.9	146.8	112.3	117.5	143.4	108.9
SEP	129.4	29.3	0.7	0.85	0.65	90.6	110.0	84.1	61.3	80.7	54.8
OCT	95.2	76.5	0.7	0.75	0.65	66.6	71.4	61.9	0.0	0.0	0.0
SUM	1141.9	310.7				794.8	938.3	752.7	549.1	692.4	507.2

Table 3. Average annual water requirements of crops.

	Annual water requirements m ³ /(ha/10)	Area (km ²)	Area (ha/10)	Annual water requirements of the total area 10 ⁶ ·m ³
Olives	549.1	28.51	28510	15.65
Avocados	692.4	1.58	1580	1.09
Oranges	507.2	0.06	60	0.03
		30.15	30150	16.78

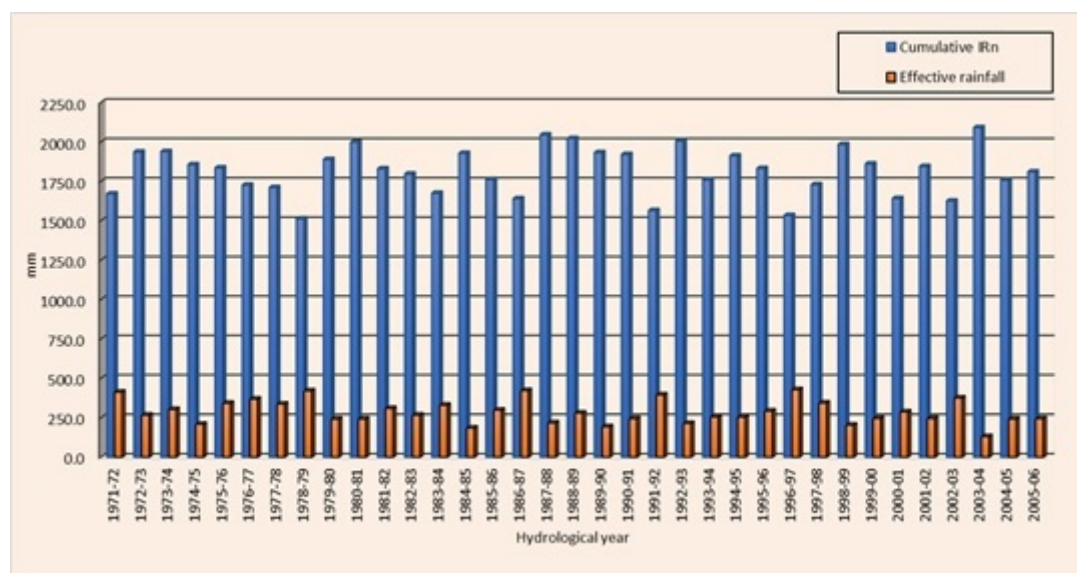


Figure 6. Comparison between cumulative IR_n and effective rainfall.

According to the preceding drought analysis, for the driest hydrological year the water requirements were estimated as equal as $20.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (minimum effective rainfall). The driest hydrological year was considered as the year where the deficit between potential evapotranspiration and effective rainfall was maximum. In this case, the deficit presents its highest value during the year 2003-04 (Figure 6). This was compared to the secure annual demand at almost 100% from the

reservoirs of the dams that are going to be constructed in the area, which was determined as equal as $22.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Hydro-System Consultants Engineers, 1992).

Finally, according to the present study, the water requirements of the crops, even for the driest year, can be satisfied by the dams. The areas that are more likely to suffer from an impending drought outbreak are located, mostly, below the proposed dams where the altitude is lower. At low altitude temperature (and PET as a result) is higher and rainfall is lower than at higher altitude. These factors combined escalate the crops water demand, making them more vulnerable during a dry year. On the other hand, a wet irrigating period seem to benefit most of the cultivated area, due to the fact that all crops lose less water due to evapotranspiration.

4. CONCLUSIONS

Extended satellite imagery interpretation, along with GIS mapping, can give high quality crop data (crop classification and delineation), which can be used as background information for further hydrological investigation.

The calculation of RDI and the creation of thematic maps of drought, for a number of consecutive hydrological years, can give a good estimation about the regions where drought is likely to have more severe effects on crops.

The volume of water that is required to cover the water demands of the crops is equal to the volume of water that these crops need during the driest year. According to the present study, the water requirements of the tree crops, even for the driest year, can be satisfied by the two dams.

5. REFERENCES

- Acharjee, T.K., Ludwig, F., Van Halsema, G., Hellegers, P., Supit, I., 2017. *Future changes in water requirements of Boro rise in the face of climate change in North-West Bangladesh*. Agricultural Water Management, 194: 172-183.
- Alem, Getachew, 2018. *Drought and its impacts in Ethiopia*. Weather and Climate Extremes, 22: 24-35.
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Argialas, D., 1999. *Photo Interpretation-Remote Sensing 1. Fundamental concepts of Remote Sensing 2. Basic elements of photographic systems*. Publication of National Technical University of Athens, Athens (in Greek).
- Assatse, W.T., Nouck, P.N., Tabod, C.T., Akame, J.M., Biringanine, G.N., 2016. *Hydrogeological activity of lineaments in Yaounde Cameroon region using remote sensing and GIS techniques*. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 19: 49-60.
- Cadro, Sabrija, Uzunovic, Mirza, Zurovec, Jasminca, Zurovec, Ognjen, 2017. *Validation and calibration of various reference evapotranspiration alternative methods under the climate conditions of Bosnia and Herzegovina*. International Soil and Water Conservation Research, 5: 309-324.
- Chowdhury, Shakhawat, Al-Zahrani, Muhammad, Abbas, Abdullah, 2016. *Implications of climate change on crop water requirements in arid region: An example of Al-Jouf, Saudi Arabia*. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 28: 21-31.
- Du, J.P., Sun, R., 2012. *Estimation of evapotranspiration for ungauged areas using MODIS measurements and GLDAS data*. Procedia Environmental Sciences, 13: 1718-1727.
- Farg, E., Arafat, S.M., Abd El-Wahed, M.S., El-Gindy, A.M., 2012. *Estimation of Evapotranspiration ETc and Crop Coefficient Kc of Wheat, in south Nile Delta of Egypt using integrated FAO-56 approach and remote sensing data*. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 15: 83-89.

- Giakoumakis, S., 2017. *Research project for the updating of Tavronitis river basin potential utilization plan*. Issue 1 Preliminary Analysis of Data and Studies in the Area, Chapter 10 Agricultural Development Plan, NTUA - School of Rural and Surveying Engineering, Athens (in Greek).
- Gorelick, Noel, Hancher, Matt, Dixon, Mike, Ilyushchenko, Thau, David, Moore, Rebecca, 2017. *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*. Remote Sensing of Environment, 202: 18-27.
- Hassan, A.G., Fullen, M.A., Oloke, D., 2019. *Problems of drought and its management in Yobe State, Nigeria*. Weather and Climate Extremes, 23.
- Hooper, B.P., 2003. *Integrated Water Resources Management and River Basin Governance*. Universities Council on water resources, water resources update, 126: 12-20.
- Hydro-System Consultants Engineers, 1992. *Final study of dams of Tavronitis river basin. Papadiana-Sempreniotis dams & connection of the reservoirs, Hydrological & Hydraulic calculations*. Ministry of Agriculture, Athens (in Greek).
- Nalbantis, I., Tsakiris, G., 2008. *Assessment of Hydrological Drought Revisited*. Springer Science + Business Media B.V. 2008, School of Rural and Surveying Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece.
- Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G., Giakoumakis, S., 1992. *On Regional Drought Estimation and Analysis*. Water Resources Management, 6: 249-277.
- Spiliotopoulos, M., 2014. *Water Resources Management in Agricultural Watersheds using Remote Sensing*. Ph.D. University of Thessaly, School of Engineering, Department of Civil Engineering.
- Thomas, T., Jaiswal, R.K., Galkate, R.V., Nayak, T.R., 2016. *Reconnaissance drought index based evaluation of meteorological drought characteristics in Bundelkhand*. Procedia Technology, 24: 23-30.
- Thorntwaite, C.W., 1948. *An Approach toward a Rational Classification of Climate*. American Geographical Society, Geographical Review, 38, No. 1.: 55-94.
- Thorntwaite, C.W., Holzman, B., 1942. *Measurement of Evaporation from Land and Water Surfaces*. United States Department of Agriculture, Washington D.C, USA.
- Tigkas, D., Vangelis, H., Tsakiris, G., 2013. *The RDI as a composite climatic index*. European Water, 41: 17-23.
- Tigkas, D., Vangelis, H., Tsakiris, G., 2015. *DrinC: a software for drought analysis based on drought indices*. Earth Science Informatics, 8(3): 697-709.
- Tigkas, D., Vangelis, H., Tsakiris, G., 2016. *Introducing a modified Reconnaissance Drought Index (RDIE) incorporating effective precipitation*. Procedia Engineering, 162: 332-339.
- Tsakiris, G. (Issuing officer), 2013. *Water Resources: I. Technical Hydrology and Introduction to Water Resources Management*. Symmetry Publications, Athens (in Greek).
- Tsanakas, I., Giakoumakis, S., Vangelis, H., 2013. *Spatial Distribution of Meteorological Drought in Louros River Basin. Proceedings of 8th EWRA International Conference, Porto, Portugal*, pp. 1271-1278.
- Vangelis, H., 2012. *Estimation and Preventive Drought Management Planning*. Ph.D. National Technical University of Athens, School of Rural and Surveying Engineering, Athens (in Greek).
- Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Bolognesi, S.F., D'Urso, G., Di Bene, C., Pennelli, B., Vuolo, F., Farina, R., Pulighe, G., Napoli, R., 2018. *Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy*. Remote Sensing of Environment, 215: 452-470.

- World Meteorological Organization, 2008. *Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information*. Chairperson, Publications Board World Meteorological Organization (WMO No-168), Switzerland.
- World Meteorological Organization, 2009. *Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices*. Chairperson, Publications Board World Meteorological Organization (WMO No-168), Switzerland.
- Zhang, Yu, Yang, Shengtian, Ouyang, Wei, Zeng, Hongjuan, Cai, Mingyong, 2010. *Applying Multi-source Remote Sensing Data on Estimating Ecological Water Requirement of Grassland in Ungauged Region*. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 953-963.
- Zheng, He-xiang, Li, He-ping, Guo, Ke-zhen, 2012. *Calculating Methods of Forage Crop Water Requirements in Pasture*. *Procedia Engineering*, 28: 469-475.
- Zotarelli, L., Dukes, M.D., Romero, C., Migliaccio, K.W., Morgan, K.T., 2010. *Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56)*. UF IFAS Extension University of Florida, USA.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΚΛΗΡΟΥ ΣΙΤΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΟΡΥΦΟΡΟ SENTINEL-2

Χ. Καβαλάρης, Κ. Ανατολίτης & Α. Κυπαρίσσης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 384 46 Νέα Ιωνία, Μαγνησία, e-mail: chkaval@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η αξιολόγηση τριών δεικτών βλάστησης (NDVI, NDRE, EVI), προερχόμενων από δεδομένα Sentinel-2 για την εκτίμηση της απόδοσης σκληρού σίτου. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή χρονοσειρών δεικτών βλάστησης (ΔΒ) κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2017-2018 σε 9 αγρούς σίτου στη Θεσσαλία. Υπολογιστήκαν τα ολοκληρώματα των χρονοσειρών των ΔΒ για διαφορετικά χρονικά διαστήματα της καλλιεργητικής περιόδου και εξετάστηκαν οι συσχετίσεις με την απόδοση που μετρήθηκε με θεριζοαλωνιστική μηχανή. Για όλους τους ΔΒ, οι συντελεστές συσχέτισης αυξάνονται σταδιακά από χαμηλές τιμές, για τα ολοκληρώματα της συνολικής περιόδου, σε υψηλές τιμές, για ολοκληρώματα μετά την περίοδο ανθοφορίας. Οι NDVI και NDRE παρουσιάζουν παρόμοιες επιδόσεις με μια μικρή υπεροχή του NDRE, ενώ οι μέγιστες συσχετίσεις εμφανίζονται για τον EVI. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ΔΒ από δεδομένα Sentinel-2 που αντιστοιχούν στην περίοδο μετά την ανθοφορία, φαίνονται ιδιαίτερα κατάλληλοι για την εκτίμηση της απόδοσης σκληρού σίτου υψηλής ακρίβειας

Λέξεις κλειδιά: σκληρός σίτος, απόδοση, Sentinel-2, τηλεπισκόπηση, NDVI, NDRE, EVI

YIELD ESTIMATION OF DURUM WHEAT WITH USE OF SENTINEL-2 SATELLITE VEGETATION INDICES

C. Cavalaris, K. Anatolitis & A. Kyparissis

University of Thessaly, Department of Agricultural Crop Production and Rural Environment, Fytokou Str. 384 46 Volos, Greece, e-mail: chkaval@uth.gr

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate three common vegetation indices (NDVI, NDRE, EVI), derived from Sentinel-2 data for durum wheat yield estimation. The data were used for the construction of vegetation indices (VI) time-series throughout the 2017-2018 growing period over 9 wheat fields at Thessaly, Greece. The VIs time-series integrals were estimated for several intervals of the growing period and their correlations against yield measured by the yield monitor of a combine harvester were examined. For all VIs, the correlation coefficients were gradually increased from low values for the whole growing period integrals to maximum values for integrals after the flowering period. In all cases, NDVI and NDRE showed similar performance with a slight superiority of NDRE, while the best correlations appeared for EVI. The results of this study indicate that VIs derived from Sentinel-2 data, corresponding to the post flowering period are particularly suitable for high accuracy durum wheat yield estimation..

Keywords: durum wheat, yield, Sentinel-2, remote sensing, NDVI, NDRE, EVI

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκληρός σίτος (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) αποτελεί βασική καλλιέργεια για την παρασκευή ζυμαρικών. Σχεδόν το 60% της παγκόσμιας καλλιέργειας σκληρού σίτου, περίπου 7,8 εκατομμύρια εκτάρια, πραγματοποιείται στη λεκάνη της Μεσογείου (Royo et al., 2017). Ωστόσο, η κατανάλωση ζυμαρικών στις Μεσογειακές χώρες είναι υψηλότερη από την τοπική παραγωγή, οπότε οι βιομηχανίες τροφίμων εξαρτώνται από τις εισαγωγές από άλλες περιοχές, κυρίως τη Βόρεια Αμερική. Η τελική παραγωγή εξαρτάται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες, ιδιαίτερα κατά το στάδιο της ωρίμανσης των σπόρων (Diacono et al., 2012). Το μεταβλητό Μεσογειακό κλίμα, σε συνδυασμό με την τρέχουσα κλιματική αλλαγή, προκαλεί μεγάλες διακυμάνσεις των αποδόσεων του σκληρού σίτου από έτος σε έτος, δημιουργώντας κινδύνους και αβεβαιότητες στη βιομηχανία, στο εμπόριο, στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής αλλά και στους ίδιους τους παραγωγούς. Η πρόβλεψη της απόδοσης του σκληρού σίτου είναι ζωτικής σημασίας για ολόκληρη την αλυσίδα παραγωγής τροφίμων. Οι αγρότες μπορούν να προσαρμόσουν τις γεωργικές εισροές (λιπάσματα, άρδευση) για να ικανοποιήσουν τις ειδικές ανάγκες της καλλιέργειας, εφαρμόζοντας τεχνικές ευφυούς γεωργίας ή γεωργίας ακριβείας, ενώ ο τομέας της συγκομιδής μπορεί να προγραμματίσει τη διαχείριση των θεριζοαλωνιστικών μηχανών και τις διαδικασίες μεταφοράς και αποθήκευσης του σπόρου.

Παρόλο που η χωρική παραλλακτικότητα στην απόδοση των καλλιεργειών συνδέεται στενά με τις ιδιότητες του εδάφους και τη διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών (Diacono et al., 2012; Johnen et al., 2014), η τηλεπισκόπηση της βλάστησης της καλλιέργειας θεωρείται μια αποτελεσματική μέθοδος για την εκτίμηση της απόδοσης, καθώς η βλάστηση είναι αυτή που τελικά αποτυπώνει τις επιδράσεις όλων των παραπάνω παραγόντων (Satir and Berberoglu, 2016). Μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των αποδόσεων, οι εμπειρικές μέθοδοι που βασίζονται στην απλή εφαρμογή μιας στατιστικής παλινδρόμησης μεταξύ ΔΒ και απόδοσης είναι οι πιο συνηθισμένες, λόγω της απλότητας και των περιορισμένων απαιτήσεων σε δεδομένα (Ren et al., 2009; Bolton et al., 2013; Lopresti et al., 2015; Nagy et al., 2018). Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι οι σχέσεις ΔΒ - απόδοσης συχνά περιορίζονται στις περιοχές για τις οποίες πραγματοποιήθηκε η αρχική βαθμονόμηση και δεν έχουν ικανοποιητική εφαρμογή σε άλλες περιοχές (Moriondo et al., 2007; Lopresti et al., 2015). Οι Bhattacharya et al. (2011) απέδωσαν την περιορισμένη εφαρμογή μοντέλων εκτίμησης της απόδοσης στον κορεσμό ορισμένων ΔΒ (π.χ. NDVI) σε υψηλά επίπεδα LAI και την μη ευαισθησία των ΔΒ στην διακύμανση της υγρασίας του εδάφους, ειδικά σε συνθήκες μέτριας έως πλήρους εδαφοκάλυψης. Παρ' όλα αυτά, οι Becker-reshef et al. (2010) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για το χειμερινό σιτάρι, όπου η απόδοση συσχετίστηκε γραμμικά με το εποχιακό μέγιστο NDVI από δεδομένα MODIS. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε και εφαρμόστηκε για την πολιτεία του Κάνσας (ΗΠΑ) και αποδείχθηκε άμεσα μεταβιβάσιμο και εφαρμόσιμο για την Ουκρανία.

Οι πολυφασματικοί αισθητήρες διαφόρων δορυφόρων (π.χ. LANDSAT, MODIS, SPOT) παρέχουν δεδομένα που χρησιμοποιούνται εκτενώς για την παρακολούθηση της βλάστησης (Hatfield, 1983; Labus et al., 2002; Salazar et al., 2007; Becker-reshef et al., 2010; Nagy et al., 2018). Ωστόσο, η χρησιμότητά τους συχνά περιορίζεται από τη χαμηλή χωρική (MODIS) ή χρονική (LANDSAT) ανάλυση ή την ελεύθερη πρόσβαση στα δεδομένα (SPOT). Πρόσφατα, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA) έθεσε σε λειτουργία ένα ζευγάρι δορυφόρων (Sentinel-2 A και B), εξοπλισμένων με ένα πολυφασματικό αισθητήρα (MultiSpectral Instrument, MSI), που παρέχει ελεύθερα δεδομένα κάθε πέντε ημέρες, σε 13 φασματικά κανάλια (443 – 2190 nm), με χωρική ανάλυση 10, 20 και 60 m (Sentinel User Guide). Αυτά τα δεδομένα φαίνονται ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές γεωργίας ακριβείας και εκτίμηση αποδόσεων, ιδιαίτερα σε χωράφια μικρού μεγέθους.

Ωστόσο, λόγω της μικρής περιόδου λειτουργίας των Sentinel-2, οι ερευνητικές πληροφορίες για συγκεκριμένες καλλιέργειες και παραμέτρους βλάστησης είναι ακόμη αρκετά περιορισμένες. Οι Xie et al. (2019) χρησιμοποίησαν δεδομένα Sentinel-2 για να εκτιμήσουν τον LAI και την περιεχόμενη χλωροφύλλη σε χειμερινό σίτο, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με *in situ* μετρήσεις και αποδεικνύοντας την καταλληλότητα του αισθητήρα MSI για την εκτίμηση βιοφυσικών παραμέτρων των καλλιεργειών. Σε μια συγκριτική μελέτη, οι Prey and Schmidhalter (2019) κατέδειξαν ότι ο αισθητήρας MSI σαφώς υπερέβη τους αισθητήρες των Landsat-8, Worldview-2 και RapidEye στην εκτίμηση ΔB που συσχετίζονται με την απόδοση καλλιέργειας σίτου, καθώς και με την πρόσληψη και τη συγκέντρωση αζώτου. Τα πλεονεκτήματα αποδόθηκαν στο κανάλι red edge και την καλύτερη κάλυψη της περιοχής μεταξύ 800 και 1000 nm από τον Sentinel-2.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης δεδομένων Sentinel-2 για την εκτίμηση των αποδόσεων σκληρού σίτου, που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης απόδοσης, κατάλληλων για τα μικρού μεγέθους χωράφια της Μεσογείου. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται τρεις ΔB, που χρησιμοποιούνται συνήθως σε μοντέλα παραγωγικότητας (NDVI, NDRE, EVI), έναντι δεδομένων απόδοσης που μετρήθηκαν με θεριζοαλωνιστική εξοπλισμένη με σύστημα χαρτογράφησης της παραγωγής.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιοχές μελέτης

Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 9 χωράφια στην περιοχή της Θεσσαλίας (Σχήμα 1), που καλλιεργήθηκαν με σκληρό σιτάρι κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2017-2018. Η έκταση των αγρών ήταν από 2,3 έως 8,4 ha (μέσο μέγεθος 5,9 ha) και η συνολική έκταση 52,9 ha (Πίνακας 1). Για την επιλογή των αγρών εξετάστηκαν δύο κριτήρια: τα χωράφια θα έπρεπε να έχουν συγκομιστεί με μηχανή συγκομιδής εξοπλισμένη με συσκευή μέτρησης της απόδοσης και το μέγεθός τους θα έπρεπε να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να είναι κατάλληλο για δορυφορική παρακολούθηση. Τα χωράφια σπάρθηκαν κατά τη διάρκεια του Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου 2017 και συγκομίστηκαν τον Ιούνιο του 2018 (Πίνακας 1).



Σχήμα 1. Χάρτης της Ελλάδας με τα υπό μελέτη χωράφια (με κόκκινο χρώμα) στο ένθετο.

Πίνακας 1. Τα 9 υπό μελέτη χωράφια και βασικά τους χαρακτηριστικά.

Όνομα	Εμβαδό, ha	Αρ. 10m pixels	Ημ/νία σποράς	Ημ/νία συγκομιδής	Πουικιλία	Ποσότη. σπ. kg ha ⁻¹
1	4.9	275	28/11/17	31/5/18	Svevo	240
2	6.7	480	26/11/17	7/6/18	Givraltar	230
3	5.3	327	28/11/17	4/6/18	Iridae	230
4	6.7	429	12/11/17	2/6/18	Iridae	240
5	2.7	126	16/11/17	31/5/18	Svevo	250
6	2.3	147	14/11/17	31/5/18	Svevo	250
7	8.4	611	12/11/17	3/6/18	Iridae	240
8	8.0	452	8/12/17	6/6/18	Svevo	230
9	7.9	537	24/11/17	7/6/18	Normano	230

2.2 Μέτρηση απόδοσης

Στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, όλα τα χωράφια συγκομίστηκαν με μηχανή John Deere S660i εξοπλισμένη με σύστημα χαρτογράφησης της παραγωγής και παρήχθησαν χάρτες αποδόσεων χωρικής ανάλυσης 1.5x1 m από το σχετικό λογισμικό MyJD (Σχήμα 2a). Οι αρχικοί χάρτες υποβλήθηκαν σε περαιτέρω επεξεργασία με το λογισμικό ανοικτού κώδικα Yield Editor (έκδοση 2.0.7) (Sudduth et al., 2012) για την απομάκρυνση των ακραίων τιμών. Τέλος, οι χάρτες απόδοσης (vector) μετατράπηκαν σε εικόνες (raster) με μέγεθος εικονοστοιχείου 10x10 m (Σχήμα 2b), αντίστοιχου με τα εικονοστοιχεία των εικόνων Sentinel-2 (Σχήμα 2c), χρησιμοποιώντας το λογισμικό QGIS. Η μετατροπή από vector σε raster πραγματοποιήθηκε με την εξαγωγή του μέσου όρου όλων των τιμών που περιέχονταν εντός των ορίων κάθε εικονοστοιχείου Sentinel 10x10 m.

2.3 Δορυφορικά δεδομένα

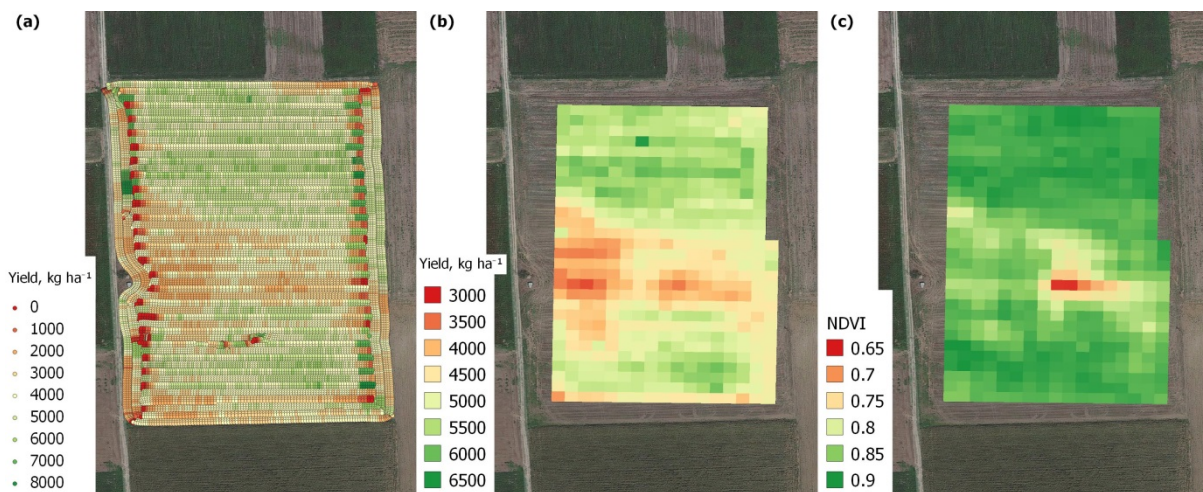
Συνολικά 32 εικόνες Sentinel-2 (A και B) ληφθείσες από τον Οκτώβριο του 2017 έως τον Ιούνιο του 2018 ανακτήθηκαν από το Copernicus Open Access Hub της ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν προϊόντα ανακλαστικότητας Level2A (ραδιομετρικά και ατμοσφαιρικά διορθωμένα). Όλες οι εικόνες με μέγεθος εικονοστοιχείων μεγαλύτερου των 10 m, υποβλήθηκαν σε επαναδειγματοληψία σε μέγεθος εικονοστοιχείου 10 m χρησιμοποιώντας το ελεύθερο λογισμικό ανοικτού κώδικα SNAP (ESA Sentinels Application Platform v6.0.4, <http://step.esa.int>). Μετά την εξαγωγή δεδομένων για τα εικονοστοιχεία των υπό μελέτη χωραφιών (συνολικά 3384 εικονοστοιχεία), κατασκευάστηκαν χρονοσειρές για τους ακόλουθους δείκτες βλάστησης:

$$\text{Normalized Difference Vegetation Index, } NDVI = \frac{R_{842} - R_{665}}{R_{842} + R_{665}}$$

$$\text{Enhanced Vegetation Index, } EVI = 2.5 \frac{R_{842} - R_{665}}{R_{842} + 6R_{665} - 7.5R_{490} + 1}$$

$$\text{Normalized Difference Red Edge Index, } NDRE = \frac{R_{842} - R_{705}}{R_{842} + R_{705}}$$

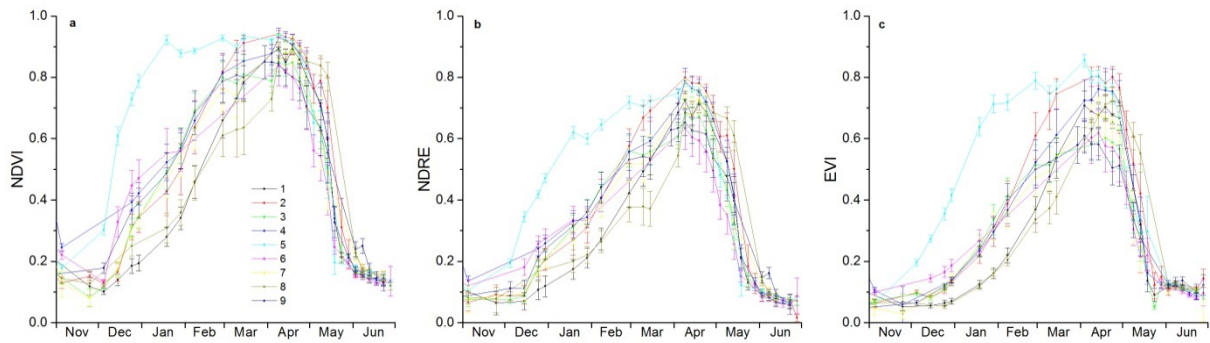
όπου R_x , η ανακλαστικότητα σε μήκος κύματος x , με το x να δείχνει το κεντρικό μήκος κύματος του σχετικού καναλιού του Sentinel-2. Ακολούθως, οι πενήμερες χρονοσειρές των 3384 εικονοστοιχείων για τους 3 ΔΒ υποβλήθηκαν σε απλή γραμμική παρεμβολή, παράγοντας καθημερινά δεδομένα για κάθε εικονοστοιχείο και για ολόκληρη την περίοδο ανάπτυξης (Οκτώβριος 2017 - Ιούνιος 2018). Η απλή γραμμική παρεμβολή και η απουσία οποιασδήποτε διαδικασίας εξομάλυνσης των χρονοσειρών επιλέχθηκαν προκειμένου να διατηρηθεί η διαδικασία όσο το δυνατόν απλούστερη, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε διαδικασίες μοντελοποίησης πραγματικού χρόνου. Οι χρονοσειρές ημερήσιων τιμών χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για τον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων για κάθε ΔΒ, για ποικίλα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.



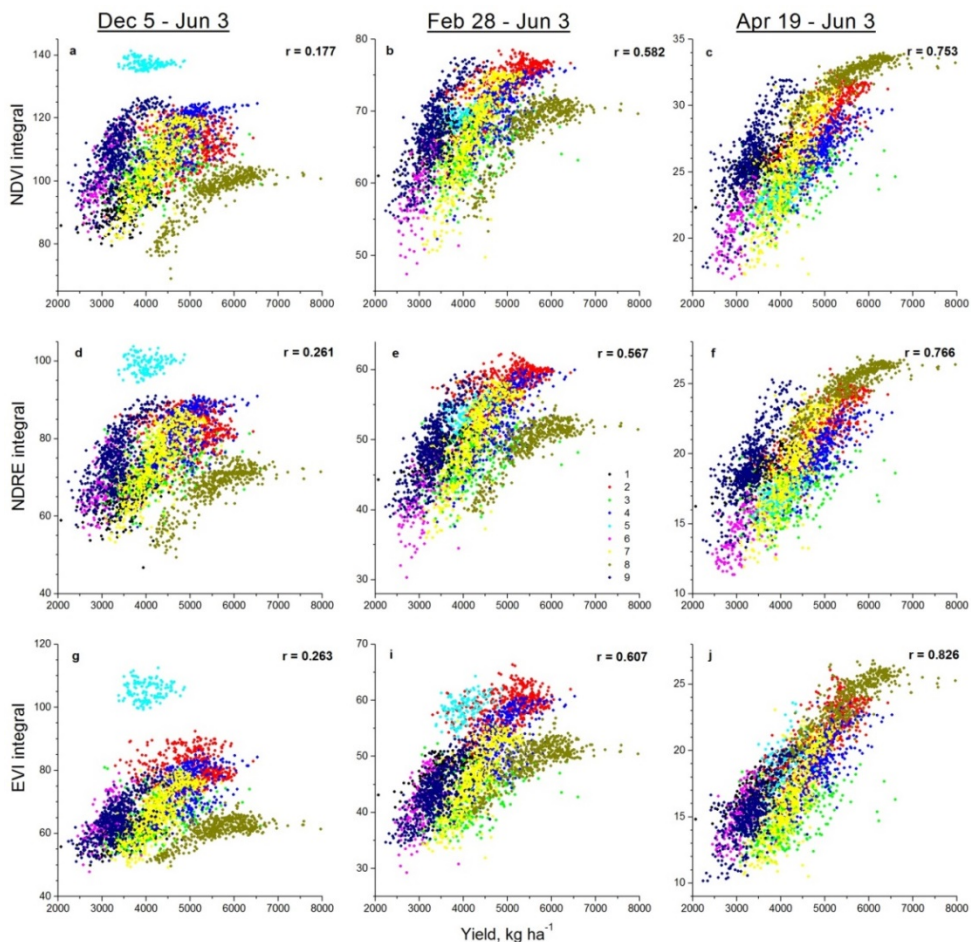
Σχήμα 2. Αρχικά δεδομένα παραγωγής (a), χάρτης παραγωγής μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών και μετατροπή σε raster με διάσταση εικονοστοιχείου 10 m (b) εικόνα Sentinel-2 NDVI για τις 29 Απριλίου 2018 (c) για ένα από τα υπό μελέτη χωράφια.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, το εποχιακό πρότυπο χειμερινής καλλιέργειας αποδίδεται καλά από τη διακύμανση των ΔΒ, με χαμηλές τιμές κατά τη διάρκεια της περιόδου σποράς (Νοέμβριος), σταδιακή αύξηση μέχρι την περίοδο ανθοφορίας του Απριλίου και σχετικά απότομη μείωση κατά την περίοδο ωρίμανσης των σπόρων (Μάιος). Ωστόσο, παρότι και οι τρεις ΔΒ αποδίδουν το εποχιακό πρότυπο, υπάρχουν διαφορές μεταξύ αυτών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, ο NDVI αυξάνεται ταχύτερα από τους άλλους δύο δείκτες και φτάνει σε κορεσμό αρκετά νωρίς, περίπου στα μέσα Μαρτίου, ενώ ο NDRE ένα μήνα αργότερα, στα μέσα Απριλίου και ο EVI στα τέλη Απριλίου. Η επίδραση κορεσμού στον NDVI έχει αναγνωριστεί ως κύριο μειονέκτημα για την παρακολούθηση της βιομάζας, καθώς η γραμμική σχέση μεταξύ του δείκτη και της βιομάζας χάνεται για τιμές LAI πάνω από 3 (Prabhakara et al., 2015; Gaso et al., 2019). Η άνθηση του σιταριού στην περιοχή της Θεσσαλίας συμβαίνει συνήθως στα μέσα Απριλίου, με τη μέγιστη επιφάνεια φύλλων να επιτυγχάνεται 10-15 ημέρες πριν από αυτήν (Lopresti et al., 2015).



Σχήμα 3. Χρονοσειρές NDVI, NDRE and EVI για τα 9 υπό μελέτη χωράφια. Για κάθε χωράφι έχει υπολογιστεί η μέση τιμή όλων των εικονοστοιχείων για κάθε ημερομηνία. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν $\pm SD$.



Σχήμα 4. Συσχετίσεις μεταξύ ολοκληρωμάτων ΔΒ (NDVI, NDRE, EVI) για 3 χρονικά διαστήματα και αποδόσεων. Ο κάθε αγρός υποδεικνύεται με διαφορετικό χρώμα. Οι συντελεστές συσχέτισης φαίνονται στο επάνω δεξί μέρος του κάθε διαγράμματος.

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι ΔΒ για την εκτίμηση της απόδοσης των καλλιεργειών, υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα για διαφορετικές χρονικές περιόδους και συσχετίστηκαν με δεδομένα απόδοσης που μετρήθηκαν με τη μηχανή συγκομιδής. Η αρχική μας υπόθεση ήταν ότι τα ολοκληρώματα για ολόκληρη την αναπτυξιακή περίοδο θα παρουσίαζαν χαμηλότερη συσχέτιση με τα δεδομένα απόδοσης, συγκριτικά με τα ολοκληρώματα για την περίοδο από την άνθηση έως τη συγκομιδή. Η υπόθεση αυτή διαμορφώθηκε με βάση το γεγονός ότι σε πολλά αγρωστώδη τα περισσότερα από τα προϊόντα της φωτοσύνθεσης μετά την άνθηση κατευθύνονται στην ανάπτυξη των σπερμάτων (Gonzalez-Navarro et al., 2016). Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, για όλους τους ΔΒ ουσιαστικά δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του ολοκληρώματος για ολόκληρη την περίοδο και της απόδοσης, ενώ η συσχέτιση γίνεται μεγαλύτερη καθώς η περίοδος γίνεται συντομότερη και πλησιέστερη στην περίοδο ανθοφορίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα διαγράμματα για το σύνολο της περιόδου και για όλους τους ΔΒ (Σχήμα 4a, d, g) τα χωράφια 5 και 8 διαχωρίζονται σαφώς από τα υπόλοιπα, με το 5 να εμφανίζει τις υψηλότερες και το 8 τις χαμηλότερες τιμές, σε συμφωνία με τους πρώτους μήνες της ανάπτυξης (Σχήμα 3). Για το τελευταίο χρονικό διάστημα της αναπτυξιακής περιόδου, όπου όλοι οι ΔΒ δείχνουν τη μέγιστη συσχέτιση με την απόδοση (Σχήμα 4c, f, j), οι NDVI και NDRE δείχνουν παρόμοια ακρίβεια πρόβλεψης, με μικρή υπεροχή του NDRE, ενώ ο EVI εμφανίζει την υψηλότερη συσχέτιση μεταξύ των τριών.

Τα χωράφια της παρούσας μελέτης παρουσίασαν σημαντική διακύμανση στη μεταξύ τους απόδοση αλλά και ενδογενώς, με τιμές που κυμάνθηκαν από 2 έως 8 Mg ha⁻¹. Αυτή η παραλλακτικότητα αποδόθηκε σαφώς και από τους ΔΒ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, με το χωράφι 5 να είναι το πιο πρώιμο και το 8 το πιο όψιμο, ενώ η ενδογενής παραλλακτικότητα υποδεικνύεται από τις γραμμές σφάλματος. Αντίστοιχα μεγάλο ήταν και το εύρος τιμών των ΔΒ για το σύνολο των 3384 εικονοστοιχείων: π.χ. κατά την περίοδο του Μαρτίου οι τιμές κυμαίνονται από 0,45 έως 0,90 για τον NDVI και 0,30 έως 0,70 για τους NDRE και EVI. Η υψηλή χωρική ανάλυση του Sentinel-2, που παρείχε τη δυνατότητα αναλυτικής εξέτασης των αγρών σε διάσταση 10x10 m, σε συνδυασμό με την μεγάλη διακύμανση στην απόδοση και τους ΔΒ, πιθανώς εξηγεί τους σχετικά υψηλούς συντελεστές συσχέτισης που βρέθηκαν στην παρούσα μελέτη. Η σημασία της ταυτοποίησης της ενδογενούς (εντός του αγρού) παραλλακτικότητας της απόδοσης μέσω τηλεπισκόπησης έχει αναφερθεί από αρκετούς συγγραφείς που προσπάθησαν να την ποσοτικοποιήσουν στο χώρο και στο χρόνο (Dang et al., 2011; Lai et al., 2018). Συγκριτικά με προηγούμενες προσεγγίσεις με δεδομένα Landsat χωρικής ανάλυσης 30x30 m (Rudorff et al., 1991; Gaso et al., 2019; Lyle et al., 2013), ο Sentinel-2 φαίνεται να παρουσιάζει σαφή υπεροχή.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υψηλή χωρική ανάλυση των δεδομένων Sentinel-2 επέτρεψε την εκτίμηση των αποδόσεων σκληρού σίτου με ικανοποιητική ακρίβεια, περίπου 80%. Η εκτίμηση βασίστηκε στους ΔΒ NDVI, NDRE ή EVI και εξετάστηκε μέσω γραμμικών συσχετίσεων με την απόδοση. Οι NDVI και NDRE παρουσίασαν παρόμοιες επιδόσεις με μια μικρή υπεροχή του NDRE, ενώ ο EVI υπερίσχυσε των άλλων δύο. Το βέλτιστο χρονικό διάστημα για την εκτίμηση της απόδοσης ήταν από την περίοδο της ανθοφορίας (μέσα - τέλη Απριλίου) έως το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Αν και η εκτίμηση της παραγωγής μετά την ανθοφορία δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για διορθωτικές ενέργειες διαχείρισης της καλλιέργειας, αποτελεί όμως μια πολύ σημαντική πληροφορία για τη διαχείριση και οργάνωση της εφοδιαστικής αλυσίδας (οργάνωση της συγκομιδής, μεταφορά, αποθήκευση κτλ.)

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bhattacharya, B.K., Mallick, K., Nigam, R., Dakore, K., Shekh, A.M., 2011. Efficiency based wheat yield prediction in a semi-arid climate using surface energy budgeting with satellite observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 1394–1408.
- Becker-reshef, I., Vermote, E., Lindeman, M., Justice, C., 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 114, 1312–1323.
- Bolton, D.K., Friedl, M.A., 2013. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology* 173, 74–84.
- Dang, Y., Pringle, M., Schmidt, M., Dalal, R., Apan, A., 2011. Identifying the spatial variability of soil constraints using multi-year remote sensing. *Field Crops Research* 123, 248–258.
- Diacono, M., Castrignanò, A., Troccoli, A., Benedetto, D. De, Basso, B., Rubino, P., 2012. Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. *Field Crops Research* 131, 49–62.
- Gaso, D.V., Berger, A.G., and Ciganda, V.S., 2019. Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images. *Computers and Electronics in Agriculture* 159, 75–83.
- Gonzalez-Navarro, O., Griffiths, S., Molero, G., Reynolds, M.P., Slafer, G., 2016. Variation in developmental patterns among elite wheat lines and relationship with spike fertility. *Field Crops Research* 196, 294–304.
- Hatfield, J.L. 1983. Remote sensing estimators of potential and actual crop yield. *Remote Sensing of Environment* 13, 301–311.
- Johnen, T., Boettcher, U., Kage, H., 2014. An analysis of factors determining spatial variable grain yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy* 52, 297–306.
- Labus, M.P., Nielsen, G.A., Lawrence, R.L., Engel, R., Long, D.S. 2002. Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. *Intern. J. of Remote Sensing* 23, 4169–4180.
- Lai, Y.R., Pringle, M.J., Kopittke, P.M., Menzies, N.W., Orton, T.G., Dang, Y.P., 2018. An empirical model for prediction of wheat yield, using time-integrated Landsat NDVI. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 72, 99-108.
- Lopresti, M.F., Di Bella, C.M., Degioanni, A.J., 2015. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. *Information Processing in Agriculture* 2, 73–84.
- Lyle, G., Lewis, M., Ostendorf, B., 2013. Testing the temporal ability of Landsat imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical estimates of wheat yield at the farm scale. *Remote Sensing* 5(4), 1549–1567.
- Moriondo, M., Maselli, F., Bindi, M., 2007. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy* 26, 266–274.
- Nagy, A., Fehér, J., Tamás, J., 2018. Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics. *Computers and Electronics in*

Agriculture 151, 41–49.

- Prabhakara, K., Dean Hively, W., McCarty, G.W., 2015. Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 39, 88–102.
- Prey, L., Schmidhalter, U., 2019. Simulation of satellite reflectance data using high-frequency ground based hyperspectral canopy measurements for in-season estimation of grain yield and grain nitrogen status in winter wheat. *J. Photogram. & Rem. Sens.* 149, 176–187
- Ren, J., Chen, Z., Zhou, Q., Tang, H., 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10(4), 403–413.
- Royo C., Soriano J.M., Alvaro F., 2017. Wheat: A Crop in the Bottom of the Mediterranean Diet Pyramid, *Mediterranean Identities, Env. Soc. Culture* Edr. B. Fuerst-Bjelis, IntechOpen
- Rudorff, B.F.T. and Batista, G.T., 1991. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. *Intern. Journal of Remote Sensing* 12, 2477–2484.
- Salazar, L., Kogan, F., Roytman, L., 2007. Use of remote sensing data for estimation of winter wheat yield in the United States. *International Journal of Remote Sensing* 28, 3795–3811.
- Satir, O., Berberoglu, S., 2016. Crop yield prediction under soil salinity using satellite derived vegetation indices. *Field Crops Research* 192, 134–143.
- Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Myers, D.B., 2012. Yield Editor 2.0: Software for Automated Removal of Yield Map Errors. ASABE Meeting Presentation: 121338243, 1-14.
- Xie, Q., Dash, J., Huete, A., Jiang, A., Yin, G., Ding, Y., Peng, D., Hall, C.C., Brown, L., Shi, Y., Ye, H., Dong, Y., Huang, W., 2019. Retrieval of crop biophysical parameters from Sentinel-2 remote sensing imagery. *Int. J. Applied Earth Observation & Geoinformation* 80, 187-195.

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ

11^ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΒΟΛΟΣ, 2019

