



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 πιο 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
Δημήτρου 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 Αρης, 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.	Κατκαρίδης 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 5^η ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΝ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	
Αντωνόπουλος, Α.Β., Ζ Β. Αντωνόπουλος, Α. Δ. Ντότα & Β Ζ. Αντωνόπουλος	366
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΤΖΙΜΟΠΟΥΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΔΙΗΘΗΣΗ ΣΕ ΠΗΛΩΔΗ ΑΜΜΟ	
Αγγελάκη Α., Σ. Κωνσταντάκος, Φ. Καψοσιδέρης, Ρ. Sihag, Ε. Γκόλια, & Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ.....	378
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΚΛΗΡΟΥ ΣΙΤΟΥ	
Καλφούντζος Δ., Μ. Κόκκορα, Κ. Ραχμανίδης & Π. Βύρλας	386
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΠΟΤΑΜΟΥ ΒΟΥΛΓΑΡΗ ΚΕΦΑΛΟΒΡΥΣΟΥ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥΣ	
Μπόλης Ι. & Γεωργίου Π.	395
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΛΙΜΝΩΝ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ	
Δουλγέρης Χ. & Γεωργίου Π.Ε.	404
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SALTMED ΓΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ	
Σιούρας Α., Π. Βύρλας, Μ. Κόκκορα & Δ. Καλφούντζος	415
ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	
Καργάς Γ., Ε. Ευθυμίου, Π. Λόντρα & Κ. Σούλης	426
ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΜΙΑ ΝΕΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	
Δεμερτζή Κ., Β. Ασχονίτης, Κ. Μπαμπάκος & Δ. Παπαμιχαήλ.....	433
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΝΕΟΤΕΡΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ	
Ζαχαρόπουλος Ι., Δ. Καραμούζης, Κ. Γεωργακάκης, Α. Παπαδόπουλος, Β. Ασχονίτης....	444
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΣΤΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗΜΕΤΡΟΥ ΚΛΑΣΗΣ Α ΣΕ ΗΜΙΞΗΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
Μπαμπάκος Κ., Β. Ασχονίτης, Β. Αντωνόπουλος & Δ. Παπαμιχαήλ.....	455

ΕΝΟΤΗΤΑ 5^η
ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ANN ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

**Αθανάσιος Β. Αντωνόπουλος, Ζήσης Β. Αντωνόπουλος, Ανθούλα Δ. Ντότα,
Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος**

Τμήμα Γεωπονίας, Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, Αριστοτέλειο
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη, vasanton@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πολλές εμπειρικές εξισώσεις και μέθοδοι για τον υπολογισμό της εξατμοσοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) από την επιφάνεια του εδάφους ή της εξάτμισης από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Η μέθοδος των Penman-Monteith θεωρείται η μέθοδος αναφοράς. Η μέθοδος αυτή απαιτεί δεδομένα θερμοκρασίας, ακτινοβολίας, υγρασίας και ταχύτητας ανέμου. Στους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς η ακτινοβολία δεν μετρείται. Στην εργασία αυτή, εμπειρικές εξισώσεις, όπως του Hargreaves, η μέθοδος των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural networks, ANN) και εξισώσεις που προκύπτουν από πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (multi-linear regression methods, MLR) χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ET_0 . Τα ημερησία δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Αμυνταίου χρησιμοποιούνται για την διερεύνηση και αξιολόγηση τόσο των εμπειρικών εξισώσεων, όσο και των μοντέλων ANN υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας και της ET_0 .

ESTIMATION OF PENMAN-MONTEITH REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION USING COMPUTED SOLAR RADIATION WITH EMPIRICAL AND ANN MODELS

**Thanasis V. Antonopoulos^{*}, Zissis V. Antonopoulos, Anthoula D. Ntota, Vassilis
Z. Antonopoulos**

School of Agriculture, Dept of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,
Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece, vasanton@agro.auth.gr

ABSTRACT

Many empirical equations and methods have been used and proposed in order to estimate the reference evapotranspiration (ET_0) from soil surface or the evaporation from the free water surface of lakes. The Penman-Monteith equation is considered as a standard method. It requires measurements of temperature, radiation, humidity and wind velocity, but in the most meteorological stations the radiation is not measured. In this work, empirical equations, as the Hargreaves method, as well as the Artificial Neural networks (ANN) technology and models based on multi-linear regression methods (MLR) are used to estimate the solar radiation, which then were used in ET_0 estimation. The daily meteorological measurements from the station of Amintaio in northern Greece were used to derive the solar radiation models and the ET_0 .

Keynotes: Solar radiation; Reference evapotranspiration; Penman-Monteith method; Empirical methods; ANNs model; daily datasets; Regression models.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι απαιτήσεις των καλλιεργειών σε νερό, που είναι απαραίτητες για τον σχεδιασμό των αρδευτικών δικτύων, τον προγραμματισμό των αρδεύσεων και για όλες τις υδρολογικές μελέτες βασίζονται στον ακριβή υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET₀).

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι ή εξισώσεις που έχουν αναπτυχθεί και προταθεί για τον υπολογισμό της ET₀. Αυτές οι μέθοδοι εξαρτώνται κυρίως από την διαθεσιμότητα των μετεωρολογικών στοιχείων. Οι πιο ακριβείς από αυτές βασίζονται στο ενεργειακό ισοζύγιο και στον συνδυασμό της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, όπως η μέθοδος των Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972; Aschonitis et al., 2013), η διορθωμένη μέθοδος FAO-24 του Penman (Allen and Pruitt, 1991), και η μέθοδος FAO-56 των Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Η καταλληλότητα των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού της ET₀ είναι ένα αντικείμενο που απασχολεί πολλούς υδρολόγους και γεωπόνους. Υπάρχουν πολλές εργασίες σύγκρισης των διαφορετικών μεθόδων με διαφορετικά δεδομένα από διαφορετικές περιοχές και κλιματικές συνθήκες για τον υπολογισμό της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής. Μερικές από αυτές είναι οι εργασίες των Xu and Singh (2002), Rosenberry et al. (2004), Lu et al. (2005), Gianniou and Antonopoulos (2007); Xystrakis and Matzarakis, (2011), Rácz, et al (2013), Djaman et al. (2015) and Antonopoulos and Antonopoulos (2017; 2018) στις οποίες χρησιμοποιούνται δεδομένα από την Switzerland, North Dakota, southeastern United States, Κρητη, Eastern Hungary, Senegal River Valley και Βόρεια Ελλάδα. Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial neural networks, ANN) στους υδατικούς πόρους και ιδιαίτερα στον υπολογισμό της εξάτμισης από ελεύθερη επιφάνεια νερού ή την εξατμισοδιαπνοή (Jain et al., 2008; Diamantopoulou et al., 2011; Laaboudi et al., 2012; Heddham, 2014; Antonopoulos et al., 2016). Ανάμεσα στους Έλληνες ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τις μεθόδους υπολογισμού της ET₀ και την σύγκριση μεταξύ αυτών είναι οι παρακάτω Tsakiris and Vangelis, 2005; Alexandris et al., 2006; Sakellariou-Makrantonaki and Vagenas, 2006; Valiantzas, 2006; Ampas et al., 2007; Aschonitis et al., 2012; Efthimiou et al., 2013; Paraskevas et al., 2013; Kitsara et al., 2015.

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους στα συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας και στη διαχείριση τους, αλλά και στον υπολογισμό της ET₀. Ο ακριβής υπολογισμός ή η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί πολύ σημαντικό αντικείμενο.

Οι πιο ακριβείς μέθοδοι υπολογισμού της ET₀ είναι οι μέθοδοι που βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία (Antonopoulos and Antonopoulos, 2017). Οι μελετητές και κατασκευαστές έργων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, αλλά και άλλοι επαγγελματίες, όπως οι αρχιτέκτονες, γεωπόνοι, οικολόγοι ενδιαφέρονται για μεθόδους ακριβέστερες εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια παράμετρος η οποία δεν καταγράφεται στους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς ή οι καταγραφές είναι μικρής ακρίβειας με πολλές ελλείψεις λόγω του κόστους, της συντήρησης και της ρύθμισης που απαιτούνται για τα όργανα αυτά (Despotovic et al., 2015). Στην Ελλάδα πολλοί μετεωρολογικοί σταθμοί έχουν εγκατασταθεί τα τελευταία χρόνια, στους περισσότερους όμως από αυτούς δεν καταγράφεται η ηλιακή ακτινοβολία. Μια εναλλακτική πρόταση/ μέθοδος είναι η εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας από εύκολα μετρήσιμες μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η ηλιοφάνεια, η εξωτερική θερμοκρασία κτλ. Υπάρχουν πολλά μοντέλα βασισμένα σε μαθηματικές προσεγγίσεις, όπως εμπειρικά μοντέλα, τεχνικές της τεχνητής νοημοσύνης (Zhang et al., 2017) και μέθοδοι τηλεπισκόπησης (satellite-based methods). Τα εμπειρικά μοντέλα διακρίνονται σε τρεις ομάδες (Zhang et al., 2017), τα μοντέλα διάρκειας της ηλιοφάνειας, τα τροποποιημένα μοντέλα ηλιοφάνειας και τα μοντέλα χωρίς την ηλιοφάνεια.

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση εμπειρικών εξισώσεων, όπως του Hargreaves, μοντέλων των ANN και εξισώσεων από πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR) για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα μοντέλα αυτά στην συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ET_o με τις μεθόδους Penman-Monteith και Hargreaves. Τα ημερησία δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Αμυνταίου χρησιμοποιούνται για την διερεύνηση και αξιολόγηση τόσο των εμπειρικών εξισώσεων, όσο και των μοντέλων ANN υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας και της ET_o .

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Ημερήσια εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς

Μέθοδος Penman-Monteith. Η επιτροπή εμπειρογνομών του FAO (Allen et al., 1994) μετά από ενδελεχή αξιολόγηση των μεθόδων εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με στοιχεία ερευνητικών εργασιών και πειραματικά δεδομένα, πρότειναν τη μέθοδο FAO Penman-Monteith (P-M), που έχει την παρακάτω μορφή (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

όπου ET_o η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm day^{-1}), Δ η κλίση της καμπύλης της σχέσεως μεταξύ της πίεσης κορεσμού υδρατμών και της θερμοκρασίας ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), R_n καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$), G η κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας προς το έδαφος ($\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$), γ η ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), T η μέση ημερήσια θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$), u_2 η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m (m s^{-1}), e_d η πίεση κορεσμού υδρατμών στη μέση θερμοκρασία (kPa), e_a η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa).

Μέθοδος Hargreaves. Η μέθοδος αυτή (Hargreaves and Samani, 1985) εκτιμά την ημερήσια ET_o , χρησιμοποιώντας μόνο την μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα σύμφωνα με την σχέση

$$ET_o = a_h (T_{\text{mean}} + b_h)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{c_h} R_a \quad (2)$$

όπου T_{max} , T_{min} και T_{mean} είναι η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$), αντίστοιχα, R_a είναι η εξωγήινη ακτινοβολία (mm day^{-1}) και $a_h=0.0023 \text{ }^\circ\text{C}^{-1.5}$, $b_h=17.8 \text{ }^\circ\text{C}$, και $c_h=0.5$ εμπειρικές σταθερές. Οι Hargreaves and Samani (1982) υπολογίζουν την ηλιακή ακτινοβολία (R_s) με την σχέση

$$R_s = 0.162(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} R_a \quad (3)$$

Οι μονάδες της σταθερά 0.162 της εξ (3) είναι σε $(^\circ\text{C})^{-0.5}$.

2.2. Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR)

Η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR) βασίζεται στο γεγονός ότι οι μετεωρολογικές παράμετροι συσχετίζονται σημαντικά με την R_s και ET_o , και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό σχέσεων μεταξύ της R_s ή της ET_o και των μετεωρολογικών παραμέτρων. Μια γενική μορφή της εξίσωσης είναι η εξής

$$ET_o = m_1 + m_2X_1 + m_3X_2 + m_4X_3 + m_5X_4 \quad (4)$$

όπου m_1 , m_2 , m_3 , m_4 και m_5 είναι συντελεστές της συσχέτισης και X_i μετεωρολογικές παράμετροι. Οι μεταβλητές X_i μπορεί να είναι απλά οι μετεωρολογικές παράμετροι ή συνδυασμός αυτών (Li et al., 2011; Besharat et al., 2013; Valiantzas, 2018; Antonopoulos et al, 2019). Σ' αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι μεταβλητές T_{ave} , T_{max} , T_{min} , RH_{av} , u_2 και ο συνδυασμός αυτών ($TD=T_{\text{max}}-T_{\text{min}}$) και $(TD)^{0.5}$.

2.3. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι μη γραμμικά μοντέλα τα οποία έχουν την ικανότητα να αναπαριστούν σύνθετες μη γραμμικές διαδικασίες που συνδέουν την είσοδο με την έξοδο κάθε συστήματος (Kisi, 2006, Antonopoulos and Antonopoulos, 2017). Η βασική μονάδα των ANN είναι ο νευρώνας (neuron). Οι νευρώνες συνδέονται μεταξύ τους δια μέσου των συνάψεων (synapses), συνδυαζόμενες με σταθμικούς παράγοντες (weight factor).

Η αρχιτεκτονική των ANN καθορίζεται από τον τρόπο που συνδέονται οι νευρώνες. Το δίκτυο τροφοδοτείται από μια ομάδα δεδομένων εισόδου-εξόδου. Η δομή ενός δικτύου ANN συμβολίζεται ως (i, j, k) , όπου i εκφράζει τον αριθμό των κόμβων στο επίπεδο εισόδου, j τους κόμβους στο κρυμμένο επίπεδο και k τους κόμβους στο επίπεδο εξόδου. Υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός αλγορίθμων για την εκπαίδευση ενός δικτύου ANN και την επιλογή των κατάλληλων σταθμιστικών βαρών. Σ' αυτό το άρθρο χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος πολλαπλών επιπέδων πρόσω τροφοδοσίας και μια τεχνική βελτιστοποίησης back-propagation. Ο κύριος σκοπός κατά την ανάπτυξη ενός μοντέλου ANN είναι να προσδιοριστούν οι μεταβλητές εισόδου και η καλύτερη δομή του δικτύου έτσι ώστε να παράγεται το καλύτερο αποτέλεσμα.

2.4. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα στατιστικά κριτήρια του συντελεστή συσχέτισης (r), του σφάλματος της τετραγωνικής ρίζας (RMSE) και του συντελεστή αποδοτικότητας (EF):

$$r = \left(\sum_{i=1}^N (O_i - O_m)(C_i - C_m) \right) / \left(\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (C_i - C_m)^2} \right) \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - O_i)^2} \quad (6)$$

$$\text{EF} = 1 - \left(\sum_{i=1}^N (C_i - O_i)^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^N (O_i - O_m)^2 \right) \quad (7)$$

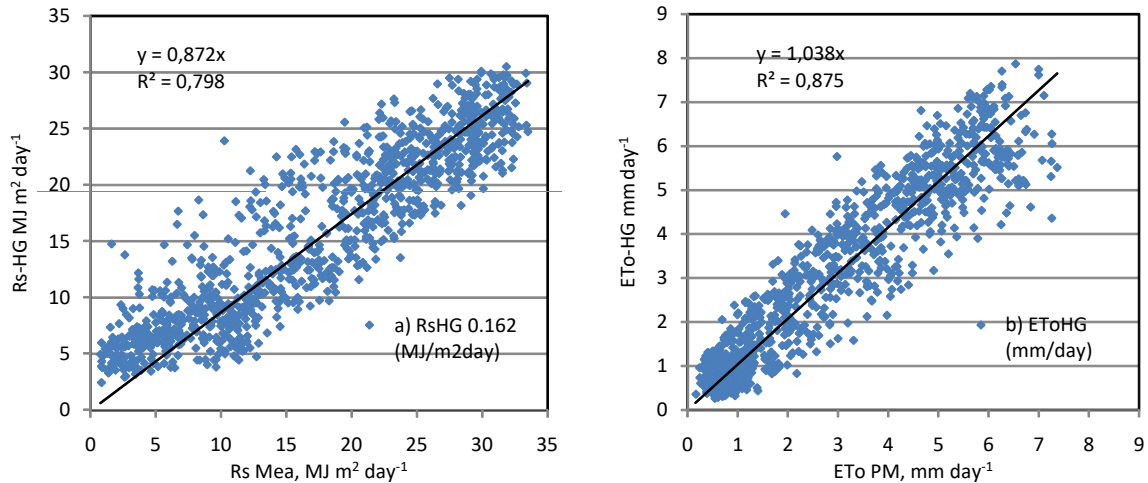
όπου O είναι οι μετρημένες τιμές (της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς), C είναι οι υπολογισμένες τιμές και O_m και C_m είναι οι μέσες μετρημένες και υπολογισμένες τιμές, αντίστοιχα.

2.5. Δεδομένα

Τα ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα θερμοκρασίας αέρα (μέγιστη, ελάχιστη και μέση), ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμου και σχετικής υγρασίας για μια περίοδο τριών ετών (2011 έως 2013) από το σταθμό του Αμυνταίου χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τις μεθόδους Penman-Monteith, και Hargreaves, εκπαίδευσης των ANN και προσδιορισμού των μοντέλων MLR. Τα ίδια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για τα προτεινόμενα μοντέλα R_s και την επίδραση τους στην εκτίμηση της ET_o . Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων της ET_o που προκύπτουν με τη χρήση διαφορετικών μοντέλων R_s γίνεται με την ET_o P-M στην οποία χρησιμοποιούνται οι μετρημένες τιμές R_s .

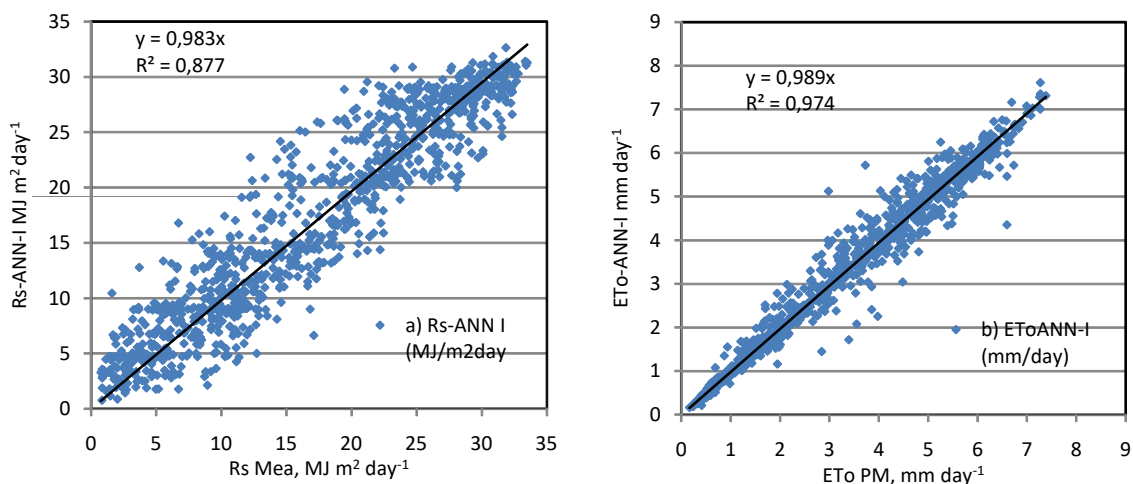
3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Σχήμα 1 δίνεται η σύγκριση μεταξύ των μετρημένων ημερήσιων τιμών του R_s και των υπολογισμένων με τη μέθοδο του Hargreaves (HG), όπως επίσης και η σύγκριση μεταξύ των υπολογισμένων τιμών ET_o με την μέθοδο P-M και των τιμών ET_o με τη μέθοδο Hargreaves στο σταθμό του Αμυνταίου.



Σχήμα 1. Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ α) της μετρημένης R_s και της υπολογισμένης R_s με τη μέθοδο Hargreaves (HG) και β) της ET_0 με τη μέθοδο Penman-Monteith και της ET_0 με τη μέθοδο Hargreaves στο σταθμό του Αμυνταίου.

Η αρχιτεκτονική του μοντέλου ANN προσδιορίστηκε με τη διαδικασία δοκιμής λάθους (Antonopoulos and Antonopoulos, 2017; 2018). Η τελική καλύτερη επιλογή για τα δεδομένα του Αμυνταίου ήταν η δομή 5-6-1 και η χρήση της σιγμοειδούς συνάρτησης μεταφοράς. Πριν από την εκπαίδευση και έλεγχο του μοντέλου τα δεδομένα εισόδου και εξόδου (R_s) αδιαστατοποιούνται και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για την διαδικασία εκπαίδευσης ελέγχου. Δυο συνδυασμοί μεταβλητών εισόδου χρησιμοποιήθηκαν. Στο 1ο μοντέλο (ANN-I) οι παράμετροι εισόδου ήταν R_a , $(T_{\max}-T_{\min})$, $(T_{\max}-T_{\min})^{0.5}$ και RH_{av} , ενώ στο 2ο μοντέλο (ANN-II) οι παράμετροι εισόδου ήταν R_a και $(T_{\max}-T_{\min})^{0.5}$. Στα Σχήματα 2 και 3 δίνονται τα διαγράμματα σύγκρισης των τιμών R_s μεταξύ των μετρημένων τιμών και των υπολογισμένων με τα δυο μοντέλα ANN. Επίσης δίνονται τα διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ των τιμών ET_0 που υπολογίζονται με τη μέθοδο P-M και αυτών που υπολογίζονται αν στην μέθοδο P-M χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα υπολογισμού του R_s των ANN.



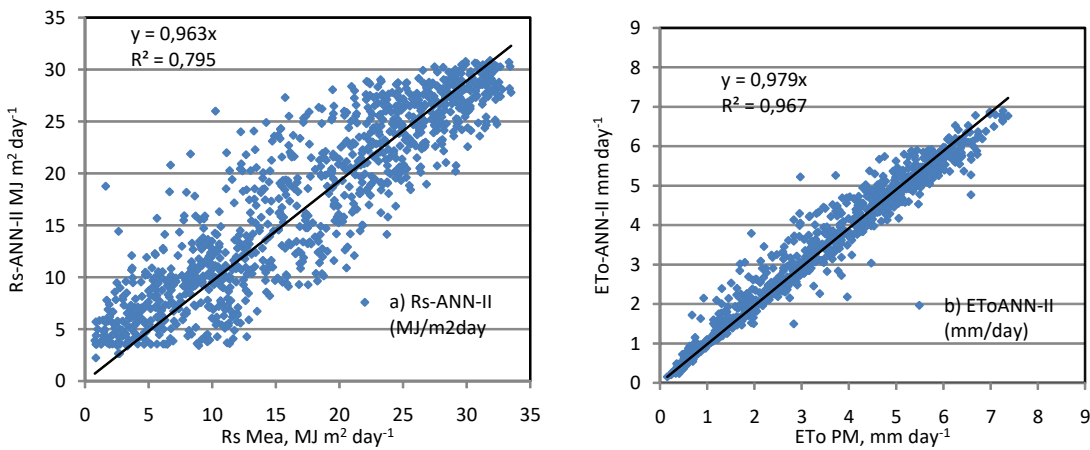
Σχήμα 2. Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ α) της μετρημένης R_s και της υπολογισμένης R_s με το μοντέλο ANN-I και β) της ET_0 με τη μέθοδο Penman-Monteith και της ET_0 όπου η R_s υπολογίζεται με το μοντέλο ANN-I.

Οι εξισώσεις με την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR), που προσαρμόζονται καλύτερα στα δεδομένα του σταθμού του Αμυνταίου είναι τα εξής

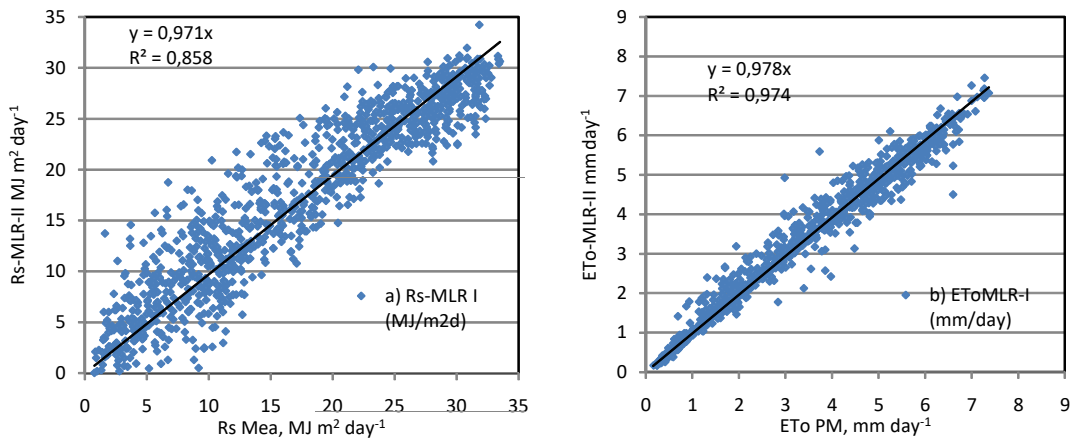
$$R_s = 5.6599 + 0.4869Ra - 0.03396(T_{\max} - T_{\min}) + 3.4621(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} - 0.1999RH_{av} \quad (9)$$

$$R_s = -15.7166 + 0.5758Ra + 5.0301(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (10)$$

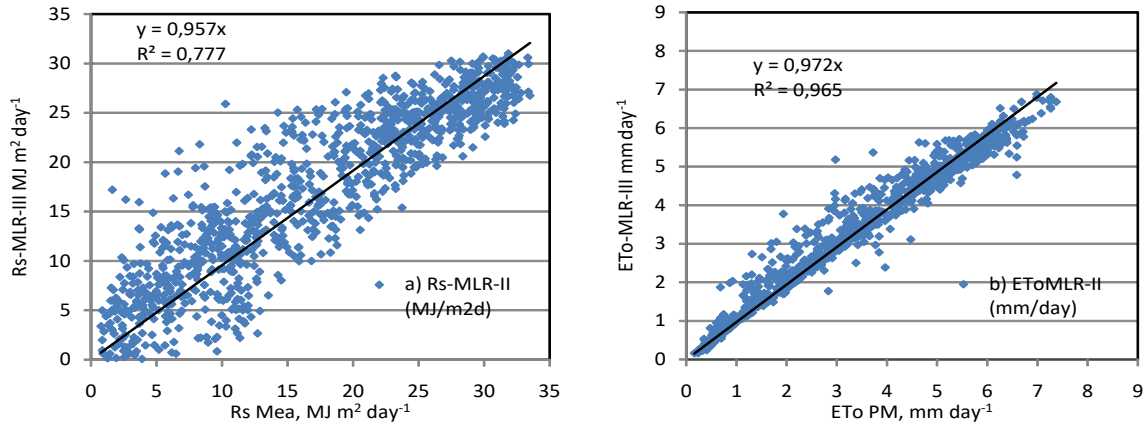
Το r^2 της γραμμικής προσέγγισης μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της R_s είναι αντίστοιχα 0.873 and 0.811. Στα Σχήματα 4 και 5 δίνονται τα διαγράμματα σύγκρισης των τιμών R_s μεταξύ των μετρημένων τιμών και των υπολογισμένων με τα δυο μοντέλα MLR. Επίσης δίνονται τα διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ των τιμών ET_o που υπολογίζονται με τη μέθοδο P-M και αυτών που υπολογίζονται αν στην μέθοδο P-M χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα υπολογισμού του R_s των MLR.



Σχήμα 3. Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ α) της μετρημένης R_s και της υπολογισμένης R_s με το μοντέλο ANN-II και β) της ET_o με τη μέθοδο Penman-Monteith και της ET_o όπου η R_s υπολογίζεται με το μοντέλο ANN-II.



Σχήμα 4. Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ α) της μετρημένης R_s και της υπολογισμένης R_s με το μοντέλο MLR-I και β) της ET_o με τη μέθοδο Penman-Monteith και της ET_o όπου η R_s υπολογίζεται με το μοντέλο MLR-I.



Σχήμα 5. Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ α) της μετρημένης R_s και της υπολογισμένης R_s με το μοντέλο MLR-II και β) της ET_o με τη μέθοδο Penman-Monteith και της ET_o όπου η R_s υπολογίζεται με το μοντέλο MLR-II.

Στον Πίνακα 1 δίνονται τα στατιστικά κριτήρια της σύγκρισης των αποτελεσμάτων υπολογισμού της R_s και της ET_o στο σταθμό του Αμυνταίου με τις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού της R_s . Ο συντελεστής συσχέτισης για τη μέθοδο Hargreaves υπολογισμού της R_s είναι 0.911, των μοντέλων ANN κυμαίνονται από 0.908 έως 0.940 και για τις εξισώσεις της MLR κυμαίνονται από 0.901 και 0.934. Το μοντέλο ANN-I δίνει την καλύτερη συσχέτιση με τις μετρημένες τιμές της R_s , που ακολουθείται από το μοντέλο MLR-I. Τα άλλα μοντέλα των ANN και MLR και της μεθόδου του Hargreaves δίνουν μικρότερης ακριβείας αποτελέσματα. Παρόμοια είναι η συμπεριφορά για τα κριτήρια του RMSE και EF για τα μοντέλα HG, ANN και MLR.

Πίνακας 1. Στατιστικά κριτήρια εκτίμησης των R_s και ET_o με τα μοντέλα HG, ANN και MLR εκτίμησης του R_s στο σταθμό του Αμυνταίου

	R_s					ET_o				
	AVE	STDEV	r	RMSE	EF	AVE	STDEV	r	RMSE	EF
HG	15.622	7.617	0.911	4.235	0.691	3.056	2.037	0.941	0.891	0.803
HG-RsAdj	17.165	8.369	0.911	3.842	0.829	3.358	2.238	0.941	0.930	0.990
HG-EToAdj						2.831	1.886	0.941	0.679	0.886
ANN-I	17.270	8.982	0.940	3.166	0.884	2.812	1.990	0.987	0.319	0.975
ANN-II	17.257	8.456	0.908	3.889	0.825	2.819	1.928	0.984	0.353	0.969
Refere	17.195	9.289				2.827	2.01			
MLR-I	17.199	8.676	0.934	3.314	0.828	2.807	1.936	0.987	0.319	0.974
MLR-II	17.194	8.366	0.901	4.0353	0.811	2.815	1.891	0.985	0.363	0.967

Note: ANN –I and MLR-I { R_a , (TD), (TD)^{0.5}, RH_{av} }, ANN –II and MLR-II { R_a , (TD)^{0.5} }

Το κριτήριο του RMSE για τη μέθοδο του Hargreaves για την R_s είναι $4.235 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, για τα μοντέλα των ANN κυμαίνονται από 3166 έως $3.889 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, ενώ για τα μοντέλα των MLR κυμαίνονται από 3.314 στο $4.035 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$.

Η επίδραση της χρήσης των διαφορετικών μοντέλων υπολογισμού της R_s για τον υπολογισμό της ET_o με τη μέθοδο των P-M φαίνεται επίσης από τα στατιστικά κριτήρια που δίνονται στον Πίνακα 1. Ο συντελεστής συσχέτισης για τον υπολογισμό της ET_o με τη μέθοδο του Hargreaves είναι 0.941, με τα μοντέλα ANN κυμαίνεται από 0.984 μέχρι 0.987 και τα μοντέλα MLR κυμαίνεται από 0.985 μέχρι 0.987. Το μοντέλο ANN-I δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ET_o , που υπολογίζεται με τις μετρημένες τιμές και ακολουθείται από το μοντέλο MLR-I. Γενικά ο υπολογισμός της ET_o όταν χρησιμοποιούνται τα μοντέλα των ANN και MLR και του Hargreaves στον υπολογισμό της R_s στον υπολογισμό της ET_o με την μέθοδο P-M είναι αρκετά υψηλής ακριβείας (το r κυμαίνεται από 0.941 έως 0.987). Παρόμοια συμπεριφορά δείχνουν και τα άλλα δυο κριτήρια είναι του RMSE και EF στο υπολογισμό της ET_o με τα προτεινόμενα μοντέλα υπολογισμού της R_s .

Η προσαρμογή του συντελεστή της εξίσωσης του Hargreaves (0.162) για τον υπολογισμό της R_s στα τοπικά δεδομένα του σταθμού (νέος συντελεστής 0.178) βελτιώνει τα κριτήρια του RMSE και EF, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Η χρήση της προσαρμοσμένης εξίσωσης της R_s στον υπολογισμό της ET_o βελτιώνει τον συντελεστή EF όχι όμως του RMSE. Η προσαρμογή του συντελεστή της ET_o στα δεδομένα του σταθμού βελτιώνει τόσο το RMSE, όσο και το EF σε σχέση με την αρχική εξίσωση.

Τα αποτελέσματα των μοντέλων Hargreaves, ANN και MLR για τον υπολογισμό της R_s δείχνουν ότι η χρήση της εξωγήινης ακτινοβολίας R_a βελτιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα υπολογισμού της. Ο συνδυασμός της R_a και της διαφοράς μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας δείχνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

Τα συμπεράσματα του Zhang κ. ά. (2017) για την χρησιμοποίηση των μοντέλων νευρωνικών δικτύων για την ηλιακή ακτινοβολία συνοψίζονται στα εξής: 1) Τα μοντέλα ANN μπορούν να εκτιμήσουν ικανοποιητικά τη μέση μηνιαία και ημερήσια ακτινοβολία, 2) πολλές παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου, και διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να εφαρμοστούν με σκοπό το φιλτράρισμα των δεδομένων εισόδου, 3) η βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων ANN σε σχέση με τα εμπειρικά μοντέλα δεν είναι αρκετά ξεκάθαρη και 4) τα κριτήρια του RMSE για τα μοντέλα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων κυμαίνονται αντίστοιχα από $0.32\text{--}2.05 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ και $1.24\text{--}4.2 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ για την μέση μηνιαία και ημερήσια ακτινοβολία.

Ο Despotovic κ. ά. (2015) παρουσίασαν μια σύγκριση διαφορετικών μοντέλων ηλιακής ακτινοβολίας για την επιλογή του καταλληλότερου και ακριβέστερου μοντέλου σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα ηλιοφάνειας. Εξετάστηκε ένα σύνολο 101 διαφορετικών μοντέλων ηλιακής ακτινοβολίας σε μεγάλης διάρκειας μετεωρολογικά δεδομένα σε όλη τη γη. Τα αποτελέσματα έδωσαν ένα μεγάλο εύρος των τιμών των στατιστικών κριτηρίων, από χαμηλής ακρίβειας μέχρι αρκετά ικανοποιητικά. Αυτό δείχνει την παρουσία μοντέλων που παρά την καλή αξιολόγηση τους με τα αρχικά δεδομένα για την ανάπτυξη του μοντέλου μπορεί να είναι αποδεκτά για γενικότερη χρήση. Οι Aladenola και Madramootoo (2014) εκτίμησαν την καταλληλότητα εννέα μοντέλων υπολογισμού της R_s και την επίδραση που είχαν στον υπολογισμό της ET_o με τη μέθοδο FAO-56 PM, χρησιμοποιώντας δεδομένα από οκτώ μετεωρολογικούς σταθμούς στον Καναδά. Η υπολογισμένη R_s σε σχέση με την μετρημένη R_s δεν είχαν σημαντικές διαφορές. Για το λόγο αυτό προτείνουν ότι σε περίπτωση απουσίας δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και ηλιοφάνειας στον Καναδά, τα μοντέλα

των Hargeaves -Samani είναι το καταλληλότερο για την εκτίμηση της R_s . Τα συμπεράσματα των Zhang et al. (2017), για τα εμπειρικά μοντέλα που δε συμπεριλαμβάνουν τη διάρκεια ηλιοφάνειας, και τα οποία χρησιμοποιούν τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής, τη σχετική υγρασία, τη νεφοκάλυψη, τα κατακρημνίσματα και την πίεση την υδρατμών καταλήγουν στο ότι οι τιμές του RMSE κυμαίνονται μεταξύ των 2.05 και 4.70 MJ m⁻² day⁻¹.

Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα της χρήσης μοντέλων ANN και από άλλους συγγραφείς όπως παρουσιάζονται στις δουλειές των Terzi και Keskin (2010), Diamantopoulou et al. (2011), Gocic et al. (2016), Shiri et al. (2014). Τα συγκριτικά αποτελέσματα των Antonopoulos και Antonopoulos (2016) για τα μοντέλα ANN και τις εμπειρικές εξισώσεις, χρησιμοποιώντας ημερήσια δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό του Αμυνταίου καθώς και μετρημένες τιμές R_s , δείχνουν ότι τα μοντέλα ANN μπορούν να εκτιμήσουν την ET_0 με καλή ακρίβεια που προκύπτει από τις τιμές RMSE που κυμαίνονται 0.574 έως 1.33 mm day⁻¹, και του r από 0.955 έως 0.986. Σε παρόμοια αποτελέσματα και συμπεράσματα έχουν οδηγηθεί και άλλοι ερευνητές οι οποίοι εξέτασαν εμπειρικές μεθόδους υπολογισμού της ET_0 (Xu and Singh, 2002; Lu et al., 2005; Xystrakis and Matzarakis, 2011; Rácz, et al., 2013; Efthimiou et al. 2013).

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των εμπειρικών μεθόδων, όπως η μέθοδος Hargreaves, τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και τα μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων, με τη χρήση μετρημένων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας έδειξαν ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε σταθμούς στους οποίους η ηλιακή ακτινοβολία δεν καταγράφεται.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εκτιμήθηκε η καταλληλότητα των μεθόδων Hargreaves, των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN) και της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και το πώς αυτή επηρεάζει τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με τη μέθοδο Penman-Monteith. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό του Αμυνταίου στη βόρεια Ελλάδα.

Τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών συγκρίθηκαν με τις μετρημένες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας R_s στον ίδιο σταθμό. Το εύρος του RMSE δείχνει ότι κυμαίνεται σε παρόμοια πλαίσια με αρκετά άλλα μοντέλα που περιγράφουν την R_s όπως φαίνεται από το άρθρο ανασκόπησης των Zang et al. (2017) για τα μοντέλα υπολογισμού R_s . Η χρήση της εξωγήινης ακτινοβολίας και της τετραγωνικής ρίζας της διαφοράς της ημερήσιας θερμοκρασίας στα μοντέλα ANN και MLR βελτιώνουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα των μοντέλων ANN σε σύγκριση με τα μοντέλα MLR, στα οποία χρησιμοποιήθηκαν ίδια δεδομένα εισόδου, έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα.

Η επιρροή της εκτιμημένης ηλιακής ακτινοβολίας στον υπολογισμό της ET_0 με τη μέθοδο P-M είναι αισθητά μικρή. Για τα δεδομένα από τον σταθμό του Αμυνταίου, οι τιμές του RMSE για την υπολογισμένη ET_0 κυμάνθηκαν από 0.211 έως 0.306 mm day⁻¹. Οι χαμηλότερες τιμές της ET_0 εντοπίστηκαν όταν η ηλιακή ακτινοβολία υπολογίστηκε με το μοντέλο MLR στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα εισόδου η εξωγήινη ακτινοβολία, η τετραγωνική ρίζα της διαφοράς της ημερήσιας θερμοκρασίας και η σχετική υγρασία. Το μοντέλο ANN με τα ίδια δεδομένα εισόδου ακλουθεί σε ακρίβεια.

Οι εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες κατά προέκταση χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, παραμένουν ένα χρήσιμο εργαλείο. Κύριος λόγος είναι το αυξημένο ενδιαφέρον για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς για υδρολογικές και αγρονομικές μελέτες, καθώς είναι ένα από τα βασικά στοιχεία του

υδατικού ισοζυγίου. Η ακρίβεια του υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη μέθοδο Penman-Monteith είναι σε αποδεκτά όρια όταν αυτές οι εμπειρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας, στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ακτινοβολίας. Τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) έχουν υψηλή ακρίβεια και σε παρόμοια επίπεδα και τα μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN). Τα τελευταία ενώ δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, απαιτούν ειδικές γνώσεις από τον χρήστη και ένα σημαντικό μέγεθος δεδομένων τα οποία είναι ίδια με αυτά για τον υπολογισμό της ET_0 .

Acknowledgements Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το Δήμο Αμυνταίου για την παραχώρηση των δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [Aladenola, O.O.](#), [Madramootoo, C. A.](#), 2014. Evaluation of solar radiation estimation methods for reference evapotranspiration estimation in Canada. Theoretical and Applied Climatology 118(3):377-385.
- Alexandris, S., Kerkides, P., Liakatas, A., 2006. Daily reference evapotranspiration estimates by the Copais approach. *Agric. Water Manage.* 82. 371-386.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *J. of Irrig. and Drain. Eng.*, ASCE, 117, 758-773.
- 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, Rome, Italy.
- Ampas, V., Baltas, E., Papamichail, D., 2007. Comparison of Different Methods for the Estimation of the Reference Crop Evapotranspiration in the Florina Region. *WSEAS Trans. Environ. Development*, 12(2), 1449-1454.
- Antonopoulos, V.Z., Antonopoulos, A.V., 2017. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables. *Comput. Electron. Agric.*, **132**, 86 - 96 .
- Antonopoulos, V.Z. and A.V. Antonopoulos, 2018. Evaluation of different methods to estimate monthly reference evapotranspiration in a Mediterranean area. *Water Utility Journal*, 18: 61-77,
- Antonopoulos, V.Z., Papamichail, D.M., Aschonitis, V.G., Antonopoulos, A.V., 2019. Solar radiation estimation methods using ANN and empirical models. *Comput. Electron. Agric.*, **160**, 160 - 167 .
- ANTONOPOULOS, V.Z., GIANNIOU, S.K., ANTONOPOULOS, A.V., 2016. ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND EMPIRICAL EQUATIONS TO ESTIMATE DAILY EVAPORATION: APPLICATION TO LAKE VEGORITIS, GREECE. *HYDROL. SCI. J.* 61. 2590-2599.
- Aschonitis, V.G., Antonopoulos, V.Z., Papamichail, D.M., 2012. Evaluation of pan coefficient equations in a semi-arid Mediterranean environment using the ASCE standardized Penman-Monteith method. *Agr. Sci.* 3(1). 58-65.
- Aschonitis, V.G., Demertzi, K., Papamichail, D.M., Colombani, N., Mastrociccio, M., 2015. Revisiting the Priestley-Taylor method for the assessment of reference crop evapotranspiration in Italy, *Italian J. Agrometeorology*. 20 (2). 5-18.

- Besharat, F., Dehghan, A. A. Faghieh, A.R., 2013. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 (2013) 798–821
- Bogawski, P., Bednorz, E., 2014. Comparison and validation of selected evapotranspiration models for conditions in Poland (Central Europe). *Water Resour. Manage.* 28. 5021 –5038. DOI 10.1007/s11269-014-0787-8
- Despotovic, M., Nedica, V., Despotovicb, D., Cvetanovicc, S., 2015. Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52: 1869–1880.
- Diamantopoulou, M.L., Georgiou, P.E., Papamichail, D.M., 2011. Performance evaluation of Artificial neural networks in estimation references evapotranspiration with minimal meteorological data. *Global Nest J.* 13. 18-27.
- Djaman, K., Baldea, A.B., Sow, A., Mullera, B., Irmak, S., N'Diaye, M.K., Manneha, B., Moukolumbia, Y. D., Futakuchic, K., Saitoc, K., 2015. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *J. Hydrol.: Regional Studies*,139–159
- Efthimiou, N., Alexandris, S., Karavitis, C., Mamassis, N., 2013. Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation between various methods and the FAO56 Penman - Monteith procedure, *European Water* ,42: 19-34.
- Gianniou, S. K., Antonopoulos, V.Z., 2007. Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece. *J. Hydrol.* 345. 212-223.
- Jain, S.K., Nayak, P.C., Sudheer, K.P., 2008. Models for estimating evapotranspiration using artificial neural networks. and their physical interpretation. *Hydrol. Process.* 22. 2225–2234.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Trans. ASAE* 1(2). 96-99.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.* ASCE 108 (3). 225–230.
- Heddam, S., 2014. Modelling hourly dissolved oxygen concentration (DO) using dynamic evolving neural- fuzzy inference system (DENFIS)-based approach: case study of Klamath River at Miller Island Boat Ramp. *OR. USA. Environ. Sci. Pollut. Res.* 21:9212–9227
- Heydari, M.M., Aghamajidi, R., Beygipoor, G., Heydari, M., Comparison and evaluation of 38 equations for estimating reference evapotranspiration in an arid region, *Fresenius Environ. Bulletin*, 23, 1985-1997.
- Kisi, O., Sanikhani, H., Zounemat-Kermani, M., Niazi,F., 2015. Long-term monthly evapotranspiration modeling by several data-driven methods without climatic data. *Comput. Electron. Agric.* 115. 66-77. ISSN 0168-1699.
- Kitsara, G., Papaioannou, G., Zygoura, E., Kerkides, P., 2015. Trends of Reference Evapotranspiration over Greece in a Future Climate. e-Proceedings of 9th World Congress of EWRA“Water Resources Management in a Changing World: Challenges and Opportunities”, Istanbul Turkey. I-1.Session 4.O-1-73
- Kumar, M., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., 2011. Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review, *Irrig. Sci.*, 29:11–25

- Laaboudi, A., Mouhouche, M., Draoui, B., 2012. Neural network approach to reference evapotranspiration modeling from limited climatic data in arid regions. *Int. J. Biometeorol.* 56. 831–841
- Li, H., Ma, W., Lian, Y., Wang, X., Zhao, L., 2011. Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China. *Renewable Energy* 36 (11), 3141-3145.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., Amatya, D.M., 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *J. Amer. Water Resour. Assoc. (JAWRA)*, 621-633.
- Paraskevas, C., Georgiou, P., Ilias, A., Panoras, A., Babajimopoulos, C., 2013. Evapotranspiration and simulation of soil water movement in small area vegetation, *Int. Agrophys.*, 27, 445-453
- Priestley, C., Taylor, R., 1972, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Rev.* 100 (2). 81-92.
- Rácz, C., Nagy, J. Dobos, A.C., 2013. Comparison of Several Methods for Calculation of Reference Evapotranspiration, *Acta Silv. Lign. Hung.* 9.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., Vagenas, I.N., 2006. Mapping crop evapotranspiration and total crop water requirements estimation in Central Greece. *European Water*, 13/14: 3-13.
- Shiri, J., Nazemi, A.H., Sadraddini, A.A., Landeras, G., Kisi, O., Fard, A.F., Marti, P., 2014. Comparison of heuristic and empirical approaches for estimating reference evapotranspiration from limited inputs in Iran. *Comput. Electron. Agric.* 108. 230-241.
- Terzi, O., Keskin, M.E., 2010. Comparison of artificial neural networks and empirical equations to estimate daily pan evaporation. *Irrig. Drain.* 59. 215–225.
- Tsakiris, G. Vangelis, H., 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water.* 9/10. 3–11.
- Xystrakis, F., Matzarakis, A., 2011. Evaluation of 13 Empirical Reference Potential Evapotranspiration Equations on the Island of Crete in Southern Greece. *J. Irrig. Drain Eng.*, 2011, 137(4): 211-222
- Xu, C.-Y. and Singh, V. P.: 2000, Evaluation and Generalization of Radiation-based Methods for Calculating Evaporation, *Hydrolog. Processes* 14, 339–349.
- Xu, C.-Y. , Singh, V.P., 2002. Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland. *Water Resour. Manage.*, 16: 197–219
- Valiantzas, J.D., 2018. Modification of the Hargreaves-Samani model for estimating solar radiation from temperature and humidity data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 144:06017014
- Valiantzas, J.D., 2006. Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data. *J. Hydrol.* 331(3-4). 690-702.
- Zhang, J., Zhao, L., Deng, S., Xu, W., Zhang, Y., 2017. A critical review of the models used to estimate solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 : 314–329.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΤΖΙΜΟΠΟΥΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΔΙΗΘΗΣΗ ΣΕ ΠΗΛΩΔΗ ΑΜΜΟ

Αγγελάκη Αναστασία¹, Κωνσταντάκος Σωτήριος, Καψοσιδέρης Φίλιππος, ParveenSihag², Γκόλια Ευαγγελία³, Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μαρία

¹Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Παν. Θεσσαλίας, Οδ Φυτόκου, Ν. Ιωνία, 38446, Βόλος, e-mail: anaggel@agr.uth.gr

²National Institute of Technology, Kurukshetra, India-136119

³Εργαστήριο Εδαφολογίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, Ν. Ιωνία, 38446, Βόλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εφαρμόστηκε η νέα ρητή εξίσωση Τζιμόπουλου για την κατακόρυφη αθροιστική διήθηση, σε πειραματικά δεδομένα διήθησης σε στήλη πηλώδους άμμου. Κατά την πειραματική διαδικασία μελετήθηκαν ογκομετρικά οι αθροιστικοί εισερχόμενοι όγκοι νερού στην εδαφική στήλη και ταυτόχρονα μετρήθηκε η υγρασία του εδάφους σε διάφορα βάθη, με τη μέθοδο TDR. Τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της αθροιστικής διήθησης μέσω του νέου μοντέλου Τζιμόπουλου και ταυτόχρονα έγινε σύγκριση με τις εξισώσεις των Green&Ampt και Parlange, αλλά και με τις τιμές που προέκυψαν από την ολοκλήρωση των προφίλ υγρασίας. Η νέα εξίσωση Τζιμόπουλου προσομοιάζει πολύ καλά τα πειραματικά σημεία και συγκλίνει με την εξίσωση των Green&Ampt.

Λέξεις κλειδιά: Αθροιστική διήθηση, ακόρεστη ροή, μοντέλα διήθησης

APPLYING THE NEW TZIMOPOULOS EQUATION FOR VERTICAL CUMULATIVE INFILTRATION AT LOAMY SAND

Angelaki Anastasia¹, Konstantakos Sotirios, Kapsosideris Filippos, Parveen Sihag², Golia Evangelia³, Sakellariou-Makrantonaki Maria

¹Laboratory of Agricultural Hydraulics, Depart.of Agriculture, Crop Production& Rural Environm., Univ. of Thessaly, Fytokou Str, N.Ionia, 38446, Volos, Greece, e-mail: anaggel@agr.uth.gr

²National Institute of Technology, Kurukshetra, India-136119

³Laboratory of Soil Science, Department of Agriculture, Crop Production & Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, N. Ionia, 38446, Volos, Greece

ABSTRACT

The new Tzimopoulos equation for vertical cumulative infiltration was applied to experimental data. The experimental procedure consisted of a soil column of loamy sand. The inserted cumulative volumes of water were measured, while at the same time, soil moisture at certain depths of the column was measured using the TDR method. The Tzimopoulos new infiltration model was used in order to simulate the vertical cumulative infiltration and to compare with Green & Ampt and Parlange equations. Also, Tzimopoulos equation was compared to integrated soil moisture profiles. Tzimopoulos new vertical cumulative infiltration equation approximates very well the experimental data and approaches the Green & Ampt equation.

Key words: Cumulative infiltration, unsaturated zone, infiltration models

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάρκεια της βροχής ή της άρδευσης το νερό κινείται μέσω της επιφάνειας του εδάφους προς βαθύτερα στρώματα, με κατεύθυνση προς το κέντρο της Γης. Η διαδικασία αυτή της εισροής του νερού στο έδαφος, ονομάζεται *διήθηση (infiltration)*. Η διήθηση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η δομή, η υφή, η μηχανική σύσταση, η ομοιογένεια των κόκκων και των πόρων του εδάφους, η αρχική υγρασία του εδάφους. Ο μηχανισμός διήθησης αποτελεί μία πολύ σημαντική διαδικασία κατά τη διάρκεια της βροχής ή της άρδευσης, γιατί από αυτήν εξαρτάται το ποσό του αρδευτικού νερού που θα εισέλθει στο έδαφος, αλλά και το υπόλοιπο ποσό νερού το οποίο απορρέει επιφανειακά. Η εμπειριστατωμένη γνώση του μηχανισμού διήθησης, είναι καθοριστική, καθώς από αυτήν εξαρτάται η εφαρμογή του αρδευτικού νερού, η διάρκεια της άρδευσης, αλλά και η συμπλήρωση του ελλείμματος εδαφικής υγρασίας και περεταίρω, ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών. Για το λόγο αυτό, πολλοί είναι οι ερευνητές που ασχολήθηκαν εκτενώς και εξέγαγαν διάφορες εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο (Green&Ampt 1911, Kostiakov 1932, Horton 1940, Talsma&Parlange 1972, Onstadetal 1973, Kunze1982, 1983, Parlange 1971, 1972, 1975, 1982, 1985, 1990, Philip 1957, 1958, 1969, 1973, 1983, Toumaetal 1984, Τζιμόπουλος 1991, Valiantzas 2010, Alietal 2016, Nieetal 2017, Τζιμόπουλος 2019 κ.α.). Η μεγάλη σημασία του φαινομένου της διήθησης στις αρδεύσεις, τη διαχείριση υδατικών πόρων, τη διαχείριση πλημμυρών, τη διατήρηση του υδρολογικού κύκλου και του υδατικού ισοζυγίου στο περιβάλλον, έχει οδηγήσει πολλούς ερευνητές στην ενασχόληση τόσο με το φαινόμενο της διήθησης, όσο και με τις υδραυλικές παραμέτρους που την επηρεάζουν (Kargasetal 2018, Angelakietal2004, 2013, Αγγελάκη κ.α. 2013, M. Sakellariou – Makrantonaki etal 2002, Kerkidesetal 1997, Poulouvassilisetal 1991), καθώς και με την ερμηνεία και πρόβλεψη του φαινομένου χρησιμοποιώντας τη θεωρία εντροπίας (VandA.S., 2018, SinghV.P. 2010, 2016), αλλά και μεθόδους machinelearningκαι τεχνητής νοημοσύνης (SihagP. etal2019, Angelakietal 2018).

Οι Green&Ampt, (G&A) παρουσίασαν την εξίσωσή τους το 1911 και αφορά την περίπτωση κατά την οποία το νερό λιμνάζει στην επιφάνεια ομογενούς εδάφους, με ομοιόμορφη αρχική υγρασία. Έκαναν την παραδοχή, ότι το νερό εφαρμόζεται απότομα στο έδαφος, ώστε να δημιουργείται ένα απότομο υγρό μέτωπο, το οποίο χωρίζει το έδαφος στην υγρή και την ξηρή ζώνη. Το προφίλ της υγρασίας που δημιουργείται λέγεται *τύπου εμβόλου (piston – type water content profile)*. Η διπαραμετρική εξίσωση G&A στη διαστατική της μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$K_s t = I - \frac{S^2}{2K_s} \ln \left(1 + \frac{2K_s}{S^2} I \right) \quad (1)$$

όπου I είναι η αθροιστική διήθηση, το χρόνο, K_s η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού του εδάφους, και S η απορροφητικότητα του εδάφους. Η εξίσωση των Green&Ampt, εκτός από την περίπτωση του ομοιόμορφου εδαφικού προφίλ, μπορεί να εφαρμοστεί με καλά αποτελέσματα σε προφίλ στα οποία η πυκνότητα μεταβάλλεται με το βάθος (Bouwer, 1976), αλλά ακόμη και για εδάφη στα οποία υπάρχει έμφραξη των πόρων στην επιφάνειά τους.

Το μοντέλο αθροιστικής διήθησης του Parlange (P), εξάγεται από την εξίσωση Richards (1931), η οποία με εξαρτημένη μεταβλητή τη θ και θεωρώντας άξονα θετικό προς τα κάτω, έχει τη μορφή:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (2)$$

όπου θ είναι η εδαφική υγρασία, K η υδραυλική αγωγιμότητα και D_0 συντελεστής διάχυσης.

Η διπαραμετρική εξίσωση Parlange στη διαστατική της μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$K_s t = I + \frac{S^2}{2K_s} \left[\exp \left(-\frac{2K_s I}{S^2} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

όπου I είναι η αθροιστική διήθηση, t ο χρόνος, K_s η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού του εδάφους, και S η απορροφητικότητα του εδάφους.

Το νέο μοντέλο Τζιμόπουλου (T) δίνεται από τη σχέση:

$$I = 0.5K_s t + S\sqrt{t} \left(a + b \frac{K_s^2 t}{S^2} \right)^c \quad (4)$$

όπου I είναι η αθροιστική διήθηση, t ο χρόνος, K_s η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού του εδάφους, S η απορροφητικότητα του εδάφους και a , b , c είναι συντελεστές που έχουν προκύψει με εφαρμογή της μεθόδου συζυγών διευθύνσεων, με ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς μεταξύ των τιμών της εξίσωσης G&A και της εξίσωσης (4). Συγκεκριμένα, οι συντελεστές αυτοί, οι οποίοι δεν έχουν κάποια φυσική σημασία, παίρνουν τιμές:

$$a = 1,293104$$

$$b = 0,379502$$

$$c = 0,449750$$

Η εξίσωση Τζιμόπουλου έχει εφαρμοστεί σε πειραματικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης των Αγγελάκη (2004) και Τσαούσης (2010) με πολύ καλά αποτελέσματα (Τζιμόπουλος κ.α. 2019).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Κατά την πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε μηχανική ανάλυση και το υπό εξέταση εδαφικό δείγμα χαρακτηρίστηκε πεπρωτός άμμος (Loamy Sand, LS). Στη συνέχεια υπολογίστηκε πειραματικά στο εργαστήριο η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού (K_s) του εδάφους LS και μελετήθηκε η αθροιστική διήθηση του νερού στην κατακόρυφη ομογενοποιημένη στήλη εδάφους LS διαμέτρου 6 cm, με εφαρμογή μικρού σταθερού φορτίου νερού στην επιφάνειά της.

Με τη βοήθεια ογκομετρικών δοχείων προσδιορίστηκαν οι εισερχόμενοι στην εδαφική στήλη, όγκοι νερού και ταυτόχρονα με τη μέθοδο TDR ελήφθησαν μετρήσεις εδαφικής υγρασίας σε διάφορα βάθη της εδαφικής στήλης (7,5 cm, 22,5 cm, 32,5 cm, 42,5 cm και 52,5 cm, από την επιφάνεια του εδάφους). Δυστυχώς, λόγω βλάβης, ο τελευταίος αισθητήρας (σε βάθος 52,5 cm) δεν κατέγραψε την εδαφική υγρασία στο λογισμικό της συσκευής.

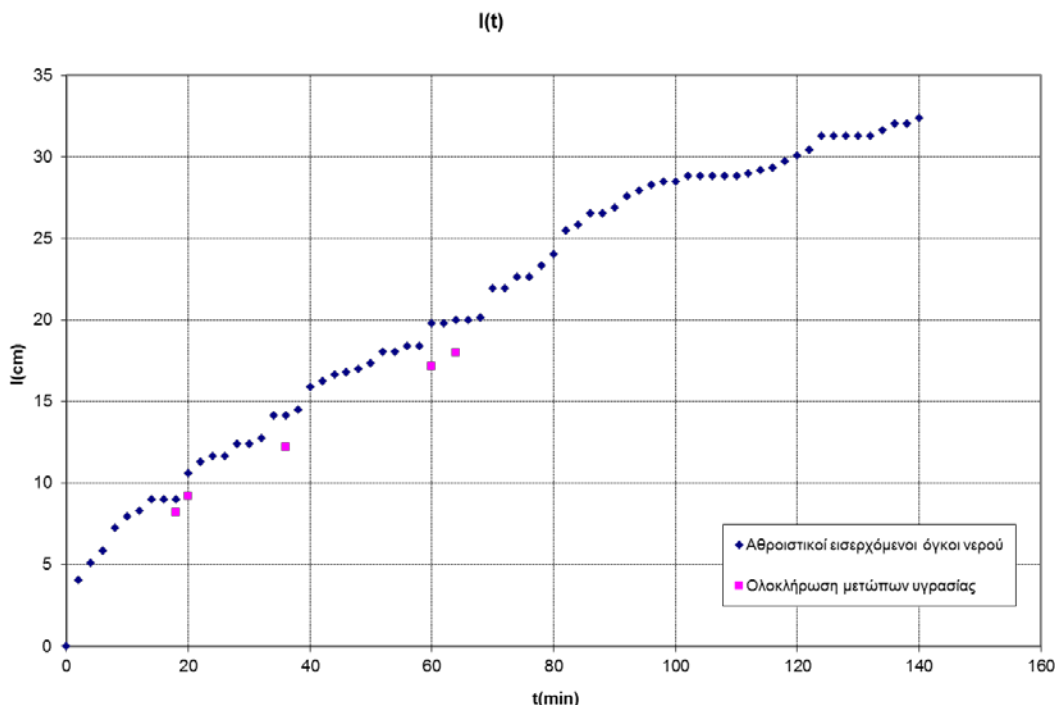
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού, που υπολογίστηκε από τα πειραματικά δεδομένα, είχε τιμή: $K_s = 0,21 \text{ cm/min}$. Για τους αρχικούς χρόνους διήθησης, δηλαδή στην αρχή του φαινομένου, όταν η διήθηση εξαρτάται από τις τριχοειδείς δυνάμεις, υπολογίστηκε η απορροφητικότητα του εδάφους από την κλίση της σχέσης $I = f(t^{1/2})$ και η τιμή της βρέθηκε: $S = 1,7141 \text{ cm/min}^{1/2}$.

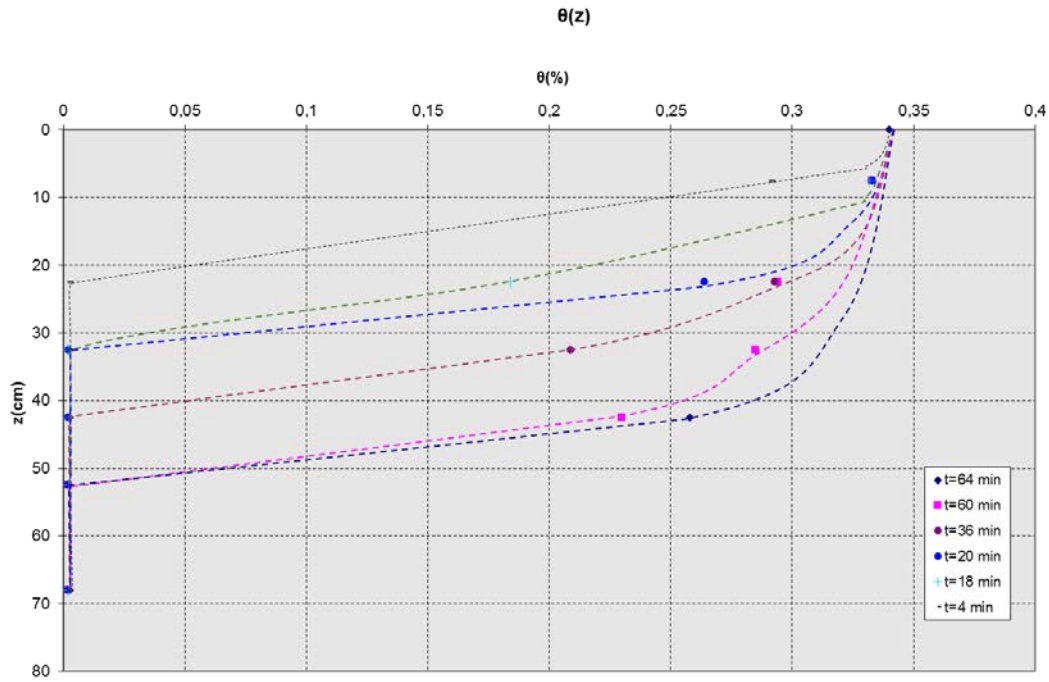
Οι παραπάνω, υπολογισμένες από πειραματικά δεδομένα τιμές, K_s και S χρησιμοποιήθηκαν στα διπαραμετρικά μοντέλα G&A, P και T, ώστε να γίνει συγκριτική αξιολόγηση και να διερευνηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου Τζιμόπουλου (T) στην πηλώδη άμμο (LS) (Σχήμα 3). Επιπλέον, από τα προφίλ υγρασίας (Σχήμα 2), υπολογίστηκαν με ολοκλήρωση οι εισερχόμενοι αθροιστικοί όγκοι νερού, οι οποίοι μετατράπηκαν σε μονάδες αθροιστικής διήθησης (Σχήμα 1, Σχήμα 3).

Από την πειραματική διαδικασία και επεξεργασία προέκυψε, ότι οι τιμές που υπολογίστηκαν από την ολοκλήρωση των προφίλ υγρασίας υποεκτιμούν τις πειραματικές τιμές αθροιστικής διήθησης που προέκυψαν ογκομετρικά.

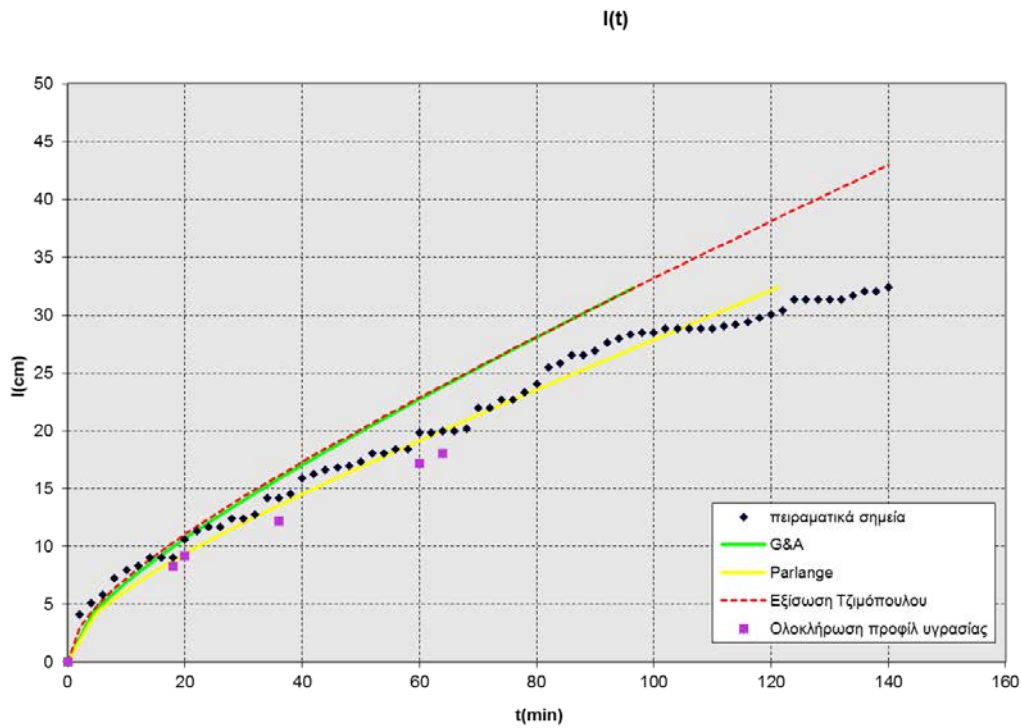
Επιπλέον, η παραπάνω διαδικασία έδειξε, ότι το μοντέλο Τζιμόπουλου ανταποκρίνεται εξαιρετικά στα πειραματικά σημεία και συγκλίνει στο μοντέλο των Green&Ampt τόσο στους μικρούς, όσο και στους μεγάλους χρόνους του φαινομένου της διήθησης. Αυτό σημαίνει, ότι προσεγγίζει πολύ καλά τα πειραματικά σημεία στους μικρούς χρόνους διήθησης. Στους μεγάλους χρόνους διήθησης το μοντέλο Τζιμόπουλου, όπως και το μοντέλο G&A, παρουσιάζει παράλληλη μετατόπιση και υπερεκτιμά τις τιμές αθροιστικής διήθησης. Αναμένεται η υπερεκτίμηση αυτή να είναι μικρότερη, όσο το έδαφος γίνεται ελαφρύτερο (Αγγελάκη 2004).



Σχήμα 1. Πειραματικά σημεία αθροιστικής διήθησης και σημεία από την ολοκλήρωση των μετώπων (προφίλ) εδαφικής υγρασίας.



Σχήμα 2. Μέτωπα (προφίλ) εδαφικής υγρασίας



Σχήμα 3. Πειραματικά σημεία αθροιστικής διήθησης και εφαρμογή τους στα μοντέλα Green&Ampt, Parlange και Τζιμόπουλου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της νέας ρητής εξίσωσης Τζιμόπουλου για την κατακόρυφη αθροιστική διήθηση, σε πειραματικά δεδομένα στήλης πηλώδους άμμου (LS), έδωσε ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, το νέο μοντέλο πρόβλεψης αθροιστικής διήθησης προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα και παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το μοντέλο των Green&Ampt, τόσο στους μικρούς, όσο και στους μεγάλους χρόνους διήθησης. Έτσι, στους μικρούς χρόνους διήθησης, όπου επιδρούν κυρίως οι δυνάμεις τριχοειδούς, το μοντέλο προσεγγίζει πολύ καλά τα πειραματικά σημεία. Στους μεγάλους χρόνους διήθησης, όπου επιδρούν οι δυνάμεις βαρύτητας το νέο μοντέλο παρουσιάζει υπερεκτίμηση της αθροιστικής διήθησης, όπως και το μοντέλο G&A. Ωστόσο, αναμένεται η συμπεριφορά αυτή να φθίνει, όσο το έδαφος τείνει να γίνει ελαφρύτερο. Η εφαρμογή της νέας εξίσωσης Τζιμόπουλου και η συμπεριφορά του μοντέλου σε μεγαλύτερο εύρος εδαφών αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ali, S., Islam, A., Mishra, P.K., Sikka, A.K. 2016. Green-Ampt approximations: A comprehensive analysis. *J Hydrol*, 535: 340–355.
- Anastasia Angelaki, Somvir Singh Nain, Varun Singh & Parveen Sihag, 2018. Estimation of models for cumulative infiltration of soil using machine learning methods, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, DOI: 10.1080/09715010.2018.1531274
- A. Angelaki, M. Sakellariou-Makrantonaki, C. Tzimopoulos, 2013. «Theoretical and experimental research of cumulative infiltration», *Transport In Porous Media*, 100: 247 – 257, DOI 10.1007/s11242-013-0214-2.
- A. Αγγελάκη, Σ. Κωνσταντάκος, Φ. Καψοσιδέρης, Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 2013. «Αθροιστική διήθηση με εφαρμογή μικρού σταθερού φορτίου στην επιφάνεια του εδάφους», 8ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, σελ. 219 – 223.
- A. Angelaki, M. Sakellariou – Makrantonaki, C. Tzimopoulos, 2004. «Laboratory experiments and estimation of cumulative infiltration and sorptivity», *Water, Air and Soil Pollution: Focus (WAFO) entitled: “Protection and Restoration of the Environment”*, Kluwer Academic Publishers, 4: 241 – 251
- A. Angelaki, M. Sakellariou – Makrantonaki, C. Tzimopoulos, 2004. «Estimation of sorptivity at a sandy soil sample», Mykonos, Greece, oral presentation at the 7th International Conference on the Protection and Restoration of the Environment, proceedings (CD-ROM).
- Αγγελάκη 2004. Διερεύνηση των υδροδυναμικών παραμέτρων σε ακόρεστη ροή με πειραματικές μεθόδους και μαθηματικά μοντέλα. Διδακτορική Διατριβή, Π.Θ. σελ. 239
- A. Angelaki, M. Sakellariou – Makrantonaki, C. Tzimopoulos, 2002. «Comparison of Green & Ampt and Parlange infiltration equations. Experimental procedure», Athens Greece, 5th International Conference of EWRA on water resources management in the era of transition, pp. 172 – 183.
- Bouwer H., 1976. Infiltration into increasingly permeable soils. *J. Irrigation and Drainage Div., ASCE*, 102: 127 – 136.
- Green W. H. & Ampt A. 1911. Studies on soil physics: The flow of air and water through soils. *J. Agr. Sci.* pp. 1 – 4.

- Horton R.E., 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 5: 399 – 417.
- George Kargas, Paraskevi Londra, Konstantinos Anastasiou and Petros Kerkides, 2018. A Note on One- and Three-Dimensional Infiltration Analysis from a Mini Disc Infiltrometer. *Water* 2018, 10(12), 1783; <https://doi.org/10.3390/w10121783>
- Kerkides, P., Poulouvasilis, A., Argyrokastritis, I., Elmaloglou, S., 1997. Comparative Evaluation of Analytic Solutions in Predicting Soil Moisture Profiles in Vertical One-Dimensional Infiltration under Pondered and Constant Flux Boundary Conditions. *Water Resources Management*, Volume 11, Issue 5, 1997, pp 323-33
- Kostiakov, A. N., 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. 6 Comm. Intern. Soil Sci. Soc. Russian, Part A*: 17 – 21.
- Kunze, R. J. and Nielsen, D. R., 1982. Finite – difference solutions of the infiltration equation. *Soil Sci.*, 134: 81 – 89.
- Kunze, R. J. and Nielsen, D. R., 1983. Comparison of soil water infiltration profiles. *Soil Sci.*, 135: 342 – 349.
- Kunze, R. J. and Hmida, M. K., 1983. Gravitational flow in infiltration. ‘Advances in infiltration’, Proceedings of the National Conference on advances in infiltration, December 12 – 13 Chicago, Illinois, pp. 14 – 23.
- Nie W.-B., Li, Y.-B., Fei L.-J., Ma, X.Y. 2017. Approximate Explicit Solution to the Green-Ampt Infiltration Model for Estimating Wetting Front Depth. *Water*, 9: 609.
- Onstad, C. A., Olson, T. C., Stong, L. R. 1973. An infiltration model tested with monolith moisture measurements. *Soil Sci.*, Vol. 116: 13 – 17.
- Palrlange J.Y., 1971. Theory of water movement in soils: 1. One – dimensional absorption. *Soil Sci.* Vol. 111 (2), pp. 134 – 137.
- Palrlange J.Y., 1971. Theory of water movement in soils: 2. One – dimensional infiltration. *Soil Sci.* Vol. 111 (3), pp. 170 – 174.
- Parlange J. – Y., 1972. Theory of water movement in soils. 6. Effect of water depth over soil. *Soil Sci.*, Vol. 133, pp. 308 – 312.
- Parlange J. – Y., 1972. Theory of water movement in soils. 8. One – dimensional infiltration with constant flux at the surface. *Soil. Sci.*, Vol. 114, pp. 1 – 4.
- Parlange J. – Y., 1975. A note of the Green & Ampt equation. *Soil Sci.* Vol 119, pp. 466 – 467.
- Parlange J. – Y., Lisle I., Braddock R. D. And Smith R. E., 1982. The three parameter infiltration equation. *Soil Sci.*, 133: 337 – 341.
- Parlange J. – Y., Haverkamp R. and Touma J., 1985. Infiltration under pondered conditions: 1. Optimal analytical solution and comparison with experimental observations. *Soil Sci.*, 139: 305 – 311.
- Parlange J. – Y., Starr J.-L., Haverkamp R., 1990. Numerical and Experimental Validation of a new Infiltration Equation. 4o National Congress EYE, Creta-GREECE, pp. 731-745.
- Philip J.R., 1957a. Theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil. Sci.*, 83: 435 – 448.

- Philip J.R., 1957b. Theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil. Sci.*, 84: 257 – 264.
- Philip J.R., 1957c. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration – dependent. II. *Austr. J. Physics*, 10: 29 – 42.
- Philip J.R., 1958. Theory of infiltration: 6. Effect of water depth over soil. *Soil. Sci.*, Vol. 85, 278-86.
- Philip J.R., 1969. Theory of infiltration. *Advances in Hydrosociences*, Academic Press, NY. 5: 215-96
- Philip J.R., 1973a. On solving the unsaturated flow equation: 1. The flux – concentration relation. *Soil Sci.*, 116: 328 – 335.
- Philip J.R., 1983. Theory of infiltration. ‘Advances in infiltration’, Proceedings of the National Conference on advances in infiltration, December 12 – 13 Chicago, Illinois, pp. 1 – 13.
- Poulovassilis, A., Kerkides, P., Elmaloglou, S., Argyrokastritis, I., 1991. An investigation of the relationship between ponded and constant flux rainfall infiltration. *Water Resources Research*, Volume 27, Issue 7, July 1991, pp 1403-1409
- Richards L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, Vol 1, 318-33
- M. Sakellariou – Makrantonaki, A. Angelaki, C. Tzimopoulos (2002) «Study of the cumulative infiltration of water in a soil sample», Skiathos Island, Greece, 6th International Conference on the Protection and Restoration of the Environment, pp. 521 – 527.
- Talsma, T., Parlange J – Y., 1972. One dimensional infiltration. *Austr. J. Soil Res.*, Vol. 10, 143-150.
- Sihag, P., Tiwari, N.K., Ranjan, S. 2019. Prediction of cumulative infiltration of sandy soil using random forest approach. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, Volume 7, Issue 2, 3 April 2019, Pages 118-142
- Singh V. P. 2016. Introduction to Tsallis Entropy Theory in Water Engineering, pp 427
- Singh V. P. 2010. Entropy theory for derivation of infiltration equations. *Water Resources Research* 46(3)DOI: 10.1029/2009WR008193
- Touma, J., Vachaud, G., and Parlange, J – Y. 1984. Air and water flow in sealed, ponded vertical soil column: Experiment and model. *Soil Sci.* 137: 181 – 187.
- Τζιμόπουλος Χρήστος, Παπαευαγγέλου Γεώργιος, Παπαδόπουλος Κυριάκος, Ευαγγελίδης Χρήστος 2019. Νέα εξίσωση για την κατακόρυφη διήθηση του νερού στο έδαφος. Εφαρμογή σε πειραματικά δεδομένα. 14^ο Πανελλήνιο συνέδριο ΕΥΕ, σελ. 37-46.
- Τζιμόπουλος Χ., 1991. Γενικευμένη εξίσωση για την περιγραφή του φαινομένου της διήθησης του νερού στο έδαφος. *Υδροτεχνικά*, Τόμος 1, Τεύχος 2 – 3, σελ. 3 – 19.
- Τσαούσης Α. 2010. Θεωρητική και πειραματική μελέτη της ακόρεστης ροής-περίπτωση ασφύς λογικής σε μοντέλα αθροιστικής διήθησης. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ., σελ. 241.
- Valiantzas, J.D. 2010. New linearized two-parameter infiltration equation for direct determination of conductivity and sorptivity. *J Hydrol*, 384: 1–13.
- Vand, A.S., Sihag, P., Singh, B, Zand, M., 2018. Comparative Evaluation of Infiltration Models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Volume 22, Issue 10, pp 4173-4184.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΚΛΗΡΟΥ ΣΙΤΟΥ

Δ. Καλφουντζος, Μ. Κόκκορα, Κ. Ραχμανίδης & Π. Βυρλας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Γενικό Τμήμα, Περιφερειακή οδός Λαρίσης-Τρικάλων, 41110, Λάρισα, e-mail: dkalf@teilar.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η επίδραση της μεθόδου άρδευσης και λίπανσης στην απόδοση και την ποιότητα του σκληρού σίτου. Για το σκοπό αυτό εγκαταστάθηκε πείραμα αγρού στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη Λάρισα, στο οποίο μελετήθηκαν οι εξής μεταχειρίσεις: 1) καταιονισμός και επιφανειακή λίπανση, 2) χωρίς άρδευση με επιφανειακή λίπανση, 3) στάγδην άρδευση και υδρολίπανση, 4) στάγδην άρδευση και επιφανειακή λίπανση, και 5) στάγδην άρδευση και δύο δόσεις υδρολίπανσης. Προσδιορίστηκε η απόδοση σε καρπό σκληρού σίτου, το ειδικό βάρος καρπού και η περιεκτικότητά του σε πρωτεΐνη. Η άρδευση της καλλιέργειας σκληρού σίτου, ανεξαρτήτως του αρδευτικού συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την παραγωγή σκληρού σίτου, καθώς και την περιεκτικότητά του σε πρωτεΐνη.

Λέξεις κλειδιά: υδρολίπανση, καταιονισμός και στάγδην άρδευση, απόδοση, περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη

EFFECT OF IRRIGATION AND FERTILIZATION METHOD ON YIELD AND QUALITY OF DURUM WHEAT

D. Kalfountzos, M. Kokkora, K. Rahmanidis & P. Vyrilas

University of Thessaly, General Department, Larissa-Trikala Ring Road, 41110, Larissa, Greece e-mail: dkalf@teilar.gr

ABSTRACT

In this study the effect of irrigation and fertilization method on yield and quality of durum wheat was investigated. A field experiment was established in the University of Thessaly farm in Larissa. Five treatments were considered: 1) sprinkler irrigation and surface fertilization, 2) no irrigation and surface fertilization, 3) drip irrigation using fertigation (1 dose), 4) drip irrigation and surface fertilization, and 5) drip irrigation using fertigation (2 doses). Durum wheat kernel yield, specific weight and protein content were determined. Irrigation of durum wheat crop, independently of irrigation method used, significantly increased yield, and also protein content of durum wheat.

Keywords: fertigation, sprinkler and drip irrigation, yield, protein content

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι υδατικοί πόροι δέχονται συνεχώς πιέσεις, ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης ζήτησης για επαρκές σε ποσότητα και ποιότητα νερό. Η συνεχιζόμενη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μαζί με τις επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος, αποτελούν περαιτέρω απειλή για τους περιορισμένους υδατικούς πόρους, ιδίως σε ξηρές και ημίξερους περιοχές.

Η εξάρτηση της γεωργικής παραγωγής από τη συχνότητα και την ποσότητα του νερού άρδευσης έχει διερευνηθεί από πάρα πολλούς ερευνητές (Doorenbos and Kassam, 1979, Κωτσόπουλος κ.α., 1999). Κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί σχετικές εξισώσεις οι οποίες άλλοτε είναι γενικές και άλλοτε αναφέρονται σε ορισμένες περιοχές και καλλιέργειες (Αλεξίου κ. α., 2000; Doorenbos and Pruit, 1977).

Υπάρχουν μεγάλες ανησυχίες για τα συστήματα καλλιέργειας στην περιοχή της Μεσογείου όπου το κλίμα χαρακτηρίζεται από θερμά και ξηρά καλοκαίρια και η έλλειψη νερού είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση των περισσότερων καλλιεργειών.

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η επίδραση της μεθόδου άρδευσης και της λίπανσης στην παραγωγή και ποιότητα του σκληρού σίτου. Το σχετικό πείραμα περιλαμβάνει τη σύγκριση μεθόδων άρδευσης και λίπανσης του σκληρού σίτου σε πέντε διαφορετικές μεταχειρίσεις με τέσσερις επαναλήψεις στην καθεμία: 1^η μεταχείριση με καταιονισμό και επιφανειακή λίπανση (ΚΕΛ), 2^η μεταχείριση χωρίς άρδευση με επιφανειακή λίπανση (ΜΕΛ), 3^η μεταχείριση με στάγδην άρδευση και υδρολίπανση (ΣΥΔ), 4^η μεταχείριση με στάγδην άρδευση και επιφανειακή λίπανση (ΣΕΛ) και 5^η μεταχείριση με στάγδην άρδευση και δύο (2) δόσεις υδρολίπανσης (Σ2ΥΔ). Προσδιορίστηκε η επίδραση των παραπάνω μεταχειρίσεων στην παραγωγή και την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη του σκληρού σίτου.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Πειραματικός αγρός

Στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη Λάρισα στις 15/12/2017 εγκαταστάθηκε πείραμα με καλλιέργεια σκληρού σίτου ποικιλίας Snevo με ποσότητα 25 kg/στρέμμα με τη χρήση σπαρτικής μηχανή σιτηρών. Η ποικιλία σκληρού σίτου Snevo είναι μια πρώιμη, ποιοτική και παραγωγική ποικιλία. Χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, ανθεκτικότητα σε σημαντικές ασθένειες όπως στο ωίδιο, στις σκωριάσεις, στη σεπτόρια και στις φουζαριώσεις, αλλά και στο πλάγιασμα και το ψύχος.

Το πείραμα περιλάμβανε πέντε μεταχειρίσεις, σε καθεμία εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκε διαφορετική μέθοδος άρδευσης και λίπανσης. Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν οι εξής: 1) μεταχείριση με καταιονισμό και επιφανειακή λίπανση (ΚΕΛ), 2) μεταχείριση χωρίς άρδευση με επιφανειακή λίπανση (ΜΕΛ), 3) μεταχείριση με στάγδην άρδευση και υδρολίπανση (ΣΥΔ), 4) μεταχείριση με στάγδην άρδευση και επιφανειακή λίπανση (ΣΕΛ), και 5) μεταχείριση με στάγδην άρδευση και δύο δόσεις υδρολίπανσης (Σ2ΥΔ). Η δεύτερη μεταχείριση (χωρίς άρδευση και με επιφανειακή λίπανση) αποτελεί τη βασική μέθοδο καλλιέργειας του σκληρού σίτου στην περιοχή.

Η κάθε μεταχείριση επαναλήφθηκε 4 φορές. Επομένως, χωρίστηκαν είκοσι πειραματικά τεμάχια με διαστάσεις 5 m μήκος και 3 m πλάτος (με πέντε λωρίδες σκληρού σίτου ανά πειραματικό τεμάχιο) και με μεταξύ τους απόσταση 2m. Η διάταξη του πειράματος φαίνεται στο Σχήμα 1. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1, τα πειραματικά τεμάχια δεν είναι πλήρως τυχαιοποιημένα για πρακτικούς λόγους που έχουν να κάνουν με τις μεθόδους άρδευσης και τη σχετική εγκατάσταση των σωλήνων άρδευσης.

Το έδαφος στον πειραματικό αγρό είναι μέσης σύστασης και συγκεκριμένα αμμοαργιλοπηλώδες. Περισσότερα ποιοτικά χαρακτηριστικά του εδάφους πριν την εγκατάσταση του πειράματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

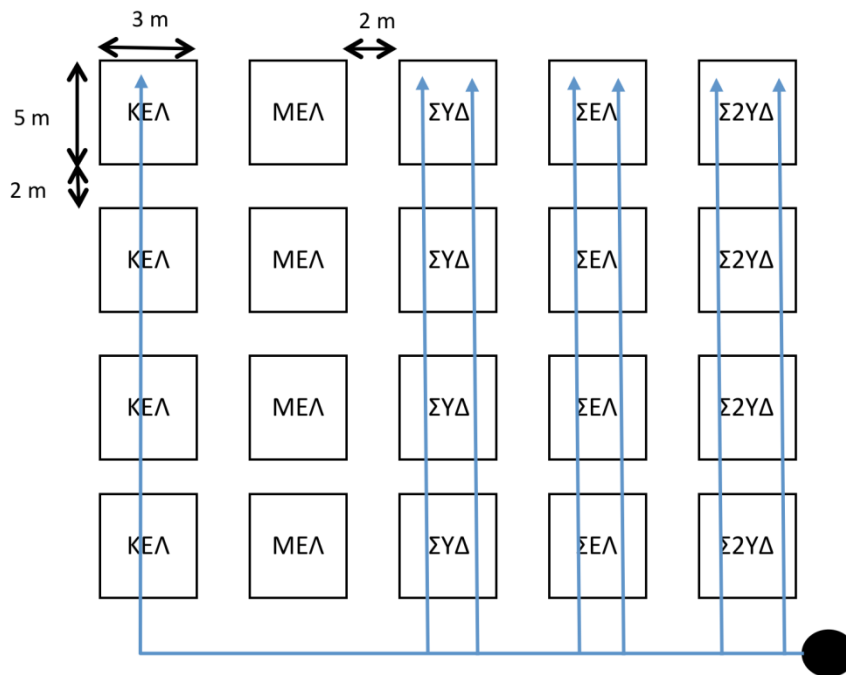
Πίνακας 1. Φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους (Φ.Ε.Β.: φαινόμενο ειδικό βάρος, FC: υδατοϊκανότητα, PWP: σημείο μόνιμης μάρανσης, EC: ηλεκτρική αγωγιμότητα, CEC: ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων).

Βάθος (cm)	Μηχανική σύσταση				Οργ. ουσία (%)	Φ.Ε.Β. (g cm ⁻³)	FC (% v/v)	PWP (% v/v)
	Άμμος (%)	Ιλύς (%)	Αργίλος (%)	Εδαφικός τύπος				
0-30	52,56	22,72	24,70	SCL	1,85	1,48	28,85	16,35
30-60	54,56	28,72	16,70	SCL	1,02	1,51	22,50	11,20
60-90	48,56	20,72	30,70	SCL	0,24	1,53	29,18	19,10

Βάθος (cm)	CaCO ₃ (%)	pH* ¹	EC* ² (dS/m)	N-Ανόργ. (mg/kg)	P-Olsen (mg/kg)	K-Εναλ. (meq/100g)	CEC	DTP A-Cu (ppm)	DTP A-Zn (ppm)	DTP A-Mn (ppm)
	0-30	1,30	7,6	0,49	93,31	20,83	1,10	35,87	0,98	0,73
30-60	0,16	7,7	0,15	121,32	6,55	0,78	37,07	1,21	0,50	15,02
60-90	0,90	8,1	0,23	107,18	8,85	0,78	36,49	1,14	0,61	13,36

*¹ σε αιώρημα εδάφους: H₂O 1:5

*² στους 25 °C



Σχήμα 1. Σχηματική διάταξη πειραματικών τεμαχίων.

Με βάση τον αρχικό σχεδιασμό για την εφαρμογή των αρδεύσεων λαμβάνονται υπόψη εδαφολογικά στοιχεία (FC, PWP, διηθητικότητα). Η εφαρμογή των αρδεύσεων ακολουθεί την εφαρμοζόμενη στην περιοχή πρακτική και διενεργείται όταν έχει εξαντληθεί από το βάθος του ριζοστρώματος ποσότητα νερού περίπου ίση με την ωφέλιμη υγρασία (Παπαζαφειρίου, 1984) στα πλέον αρδευόμενα πειραματικά τεμάχια.

Τα κλιματικά δεδομένα για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής λήφθηκαν από τον εγκαταστημένο αυτόματο τηλεμετρικό μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη Λάρισα, με αντικειμενικό σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση του αρδευτικού νερού.

2.2. Άρδευση και υδατοκατανάλωση της καλλιέργειας

Η άρδευση στις μεταχειρίσεις ΣΥΔ, ΣΕΛ και Σ2ΥΔ πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της στάγδην άρδευσης, ενώ στην ΚΕΛ με τη μέθοδο του καταιονισμού. Τοποθετήθηκαν δύο σταλακτηφόροι σωλήνες στις μεταχειρίσεις ΣΥΔ, ΣΕΛ και Σ2ΥΔ και ένας στην μεταχείριση ΚΕΛ (Σχήμα 1), οι οποίοι συνδέθηκαν με την παροχή νερού με τη βοήθεια συστήματος αποτελούμενο από βάνες, υδρολιπαντήρα, ροόμετρο και μανόμετρο. Τα χαρακτηριστικά των σταλακτηφόρων σωλήνων είναι τα εξής: Φ20της εταιρίας Eurodripμε ενσωματωμένους σταλάκτες. Οι σταλάκτες ήταν αυτόρρυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι, ισαποχής 1 m, παροχής 3,85 Lh⁻¹, σε πίεση λειτουργίας από 0,5 – 3,5 Atm, με διπλό μηχανισμό αυτοκαθαρισμού και δυο κανάλια εξόδου ώστε να αποφεύγεται η έμφραξη. Στη μεταχείριση ΜΕΛ δεν εφαρμόστηκε καθόλου άρδευση.

Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από τα μετεωρολογικά στοιχεία που λαμβάνονταν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που ήταν εγκατεστημένος εντός του πειραματικού αγρού. Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_o, έγινε με τη χρήση της αναθεωρημένης μεθόδου FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0.4084(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

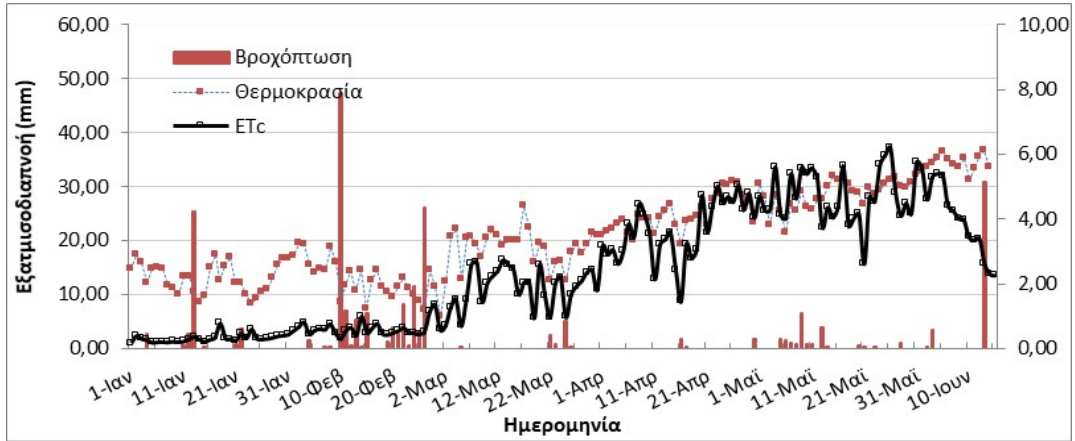
όπου ET_o είναι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (mm day⁻¹); R_n, η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (MJ m⁻² day⁻¹); G, η ροή θερμότητας στο έδαφος (MJ m⁻² day⁻¹); T, η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα σε ύψος 2 m (°C); Δ, η κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία T (kPa °C⁻¹); γ, ψυχρομετρική σταθερά, 66 Pa °C⁻¹; e_s, η πίεση των κορεσμένων υδρατμών (kPa); e_a, η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa); and U₂, η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m (m s⁻¹).

Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή, ET_c, υπολογίστηκε από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ET_o και τον απλό φυτικό συντελεστή (Allen et al., 1998) με τη σχέση:

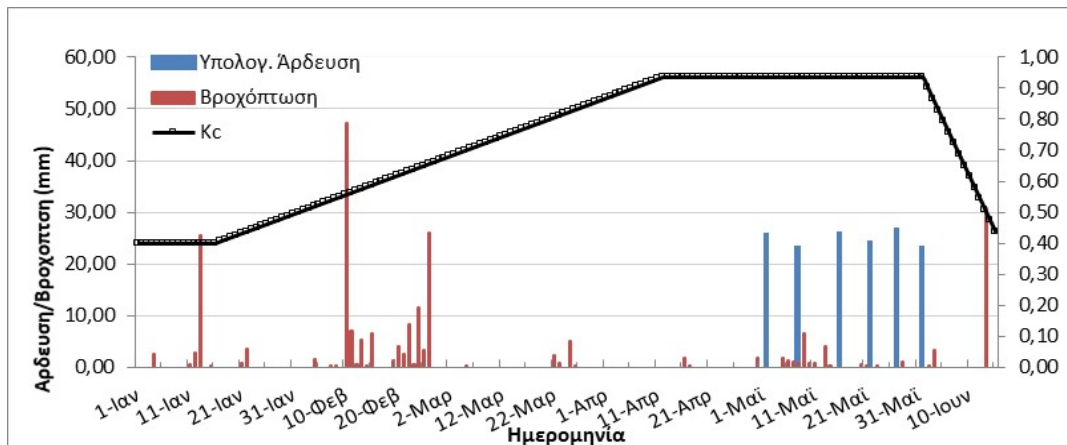
$$ET_c = K_c ET_o \quad (2)$$

όπου K_c, ο φυτικός συντελεστής ο οποίος για το στάδιο (1) διάρκειας 15 ημερών είχε την τιμή 0,3, στο στάδιο (2) διάρκειας 86 ημερών αυξάνονταν γραμμικά από 0,3 έως 0,95, στο στάδιο (3) διάρκειας 50 ημερών ήταν 0,95 και τέλος στο στάδιο (4) διάρκειας 16 ημερών μειώνονταν γραμμικά από 0,95 έως 0,4. Οι μετρήσεις αναφέρονται στην περίοδο Δεκέμβριος 2017 - Ιούνιος 2018.

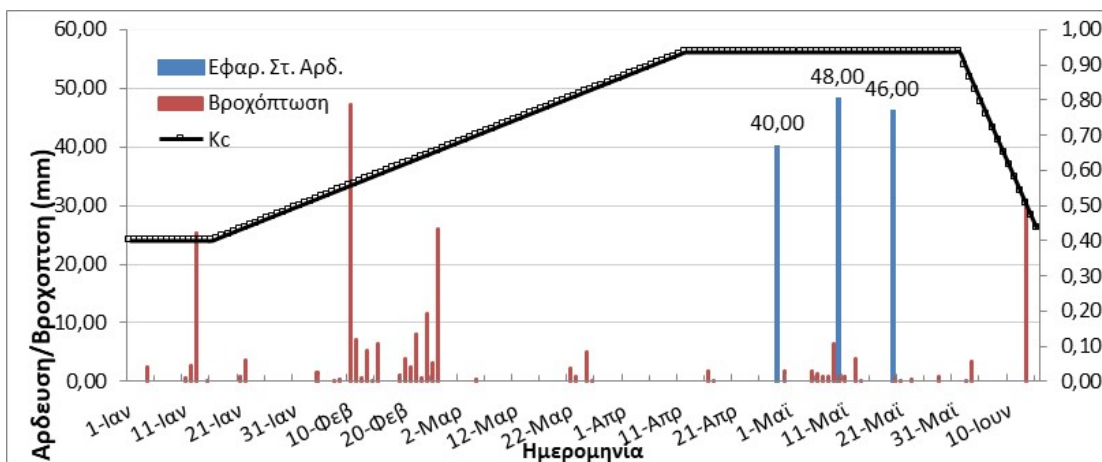
Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα μήκη των σταδίων καθώς και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά στάδιο ανάπτυξης. Στο Σχήμα 2 διακρίνεται η διακύμανση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας, της βροχόπτωσης και της μέγιστης θερμοκρασίας κατά την περίοδο του πειράματος, ενώ στα Σχήματα 3 ως 5 παρουσιάζονται αντίστοιχα η υπολογισμένη άρδευση από το πρόγραμμα FAO-56, καθώς και η εφαρμοσμένη άρδευση με τη μέθοδο στάγδην και καταιονισμού.



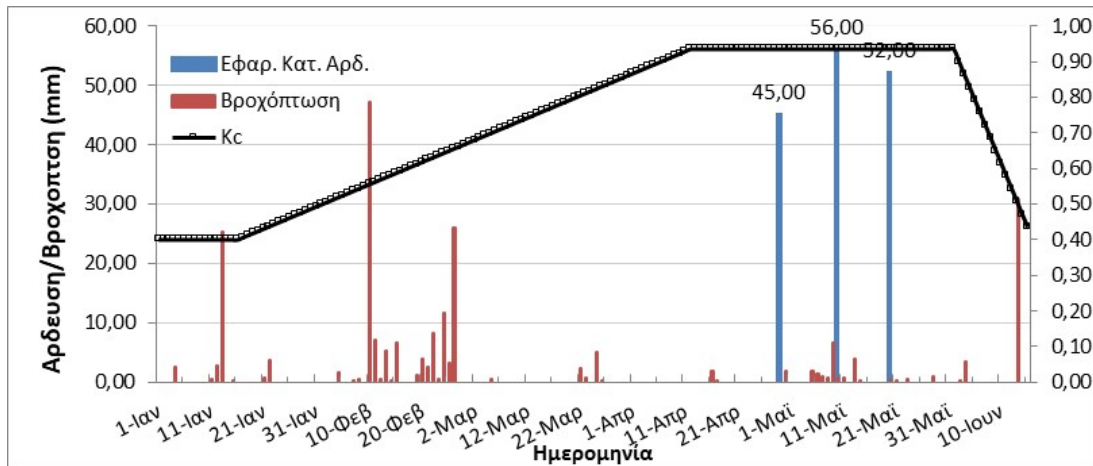
Σχήμα 2. Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, βροχόπτωση και μέγιστη θερμοκρασία.



Σχήμα 3. Υπολογισμένη άρδευση από το πρόγραμμα FAO-56.



Σχήμα 4. Εφαρμοσμένη στάγδην άρδευση.



Σχήμα 5. Εφαρμοσμένη άρδευση με καταιονισμό.

Πίνακας 2. Διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας και συνολική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά στάδιο.

Στάδιο	1	2	3	4	Σύνολο
Μήκος σταδίου (ημέρες)	15	86	50	15	166
ET _c (mm)	3,63	116,07	218,51	60,16	398,37

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω Σχήματα, εφαρμόστηκε ένα ποσοστό της ποσότητας της υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής. Συγκεκριμένα, η συνολική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ήταν 229,40 mm και εφαρμοστήκαν συνολικά 134 mm στα τρία τεμάχια με στάγδην άρδευση και 150 mm στο τεμάχιο με καταιονισμό.

2.3. Λίπανση της καλλιέργειας

Η λίπανση της καλλιέργειας περιελάμβανε την βασική εφαρμογή στις 13/12/2017, σύνθετου λιπάσματος με χαρακτηριστικά 15-13-0 (N-P₂O₅-K₂O), σε ποσότητα 40 kg/στρ., με τη χρήση λιπασματοδιανομέα. Δεν έγινε καλιούχος λίπανση διότι οι αναλύσεις εδάφους έδειξαν ότι υπάρχει επάρκεια καλίου στο έδαφος. Με τη βασική λίπανση συνολικά προστέθηκαν 6 kg N και 2,3 kg P το στρέμμα. Η βασική λίπανση ήταν κοινή για όλες τις μεταχειρίσεις.

Στις 10/03/2018 έγινε η πρώτη δόση επιφανειακής λίπανσης στις μεταχειρίσεις ΚΕΛ, ΜΕΛ και ΣΕΛ με τη χρήση του λιπάσματος νιτρικής αμμωνίας (34,4-0-0). Η ποσότητα εφαρμογής ήταν 6,91 kg N το στρέμμα. Ακολούθησε η δεύτερη δόση με τις ίδιες μονάδες στις 30/03/2018. Στις μεταχειρίσεις των υδρολιπάνσεων, στις 14-04-18 έγινε η πρώτη υδρολίπανση με το λίπασμα νιτρική αμμωνία (34,4-0-0) στις μεταχειρίσεις ΣΥΔ σε ποσότητα εφαρμογής 13,82 kg N το στρέμμα, καθώς και η πρώτη δόση στην Σ2ΥΔ με 6,91 kg N το στρέμμα. Στις 24/04/2018 έγινε η δεύτερη δόση στην Σ2ΥΔ με ποσότητα εφαρμογής 6,91 kg N το στρέμμα.

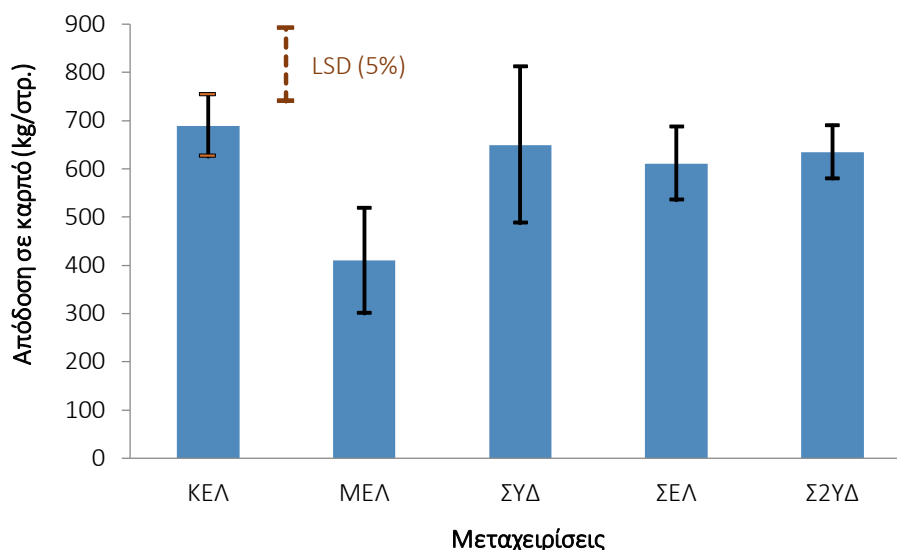
Από τα παραπάνω είναι φανερό πως σε όλες τις μεταχειρίσεις προστέθηκε η ίδια ποσότητα θρεπτικών Ν και Ρ (συνολικά 19,82 και 2,3 kg/στρ., αντίστοιχα), χρησιμοποιώντας τα ίδια λιπάσματα, με τη διαφορά όμως ως προς τον χρόνο και τη μέθοδο εφαρμογής των λιπασμάτων.

2.4. Μετρήσεις

Η συγκομιδή της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκε στις 15/06/2018 με τη θεριζοαλωνιστική μηχανή του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη Λάρισα. Προσδιορίστηκε η απόδοση της καλλιέργειας σκληρού σίτου σε καρπό, το ειδικό βάρος του καρπού, καθώς και η περιεκτικότητα του καρπού σε πρωτεΐνη και υγρασία. Η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη υπολογίστηκε έμμεσα μέσω της μέτρησης του ποσοστού του Ν με τη μέθοδο Kjeldahl.

3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα όσον αφορά στην απόδοση ήταν αρκετά ικανοποιητικά, καθώς όλες οι αρδευόμενες μεταχειρίσεις ξεπέρασαν κατά πολύ την αναμενόμενη παραγωγή που είχε τεθεί στα 500 kg/στρέμμα. Συγκεκριμένα, η μεταχείριση χωρίς άρδευση (ΜΕΛ) έδωσε παραγωγή 409 kg σπόρου το στρέμμα (στατιστικά σημαντικά μειωμένη παραγωγή σε σχέση με τις αρδευόμενες μεταχειρίσεις) (Σχήμα 6). Όλα τα τεμάχια που δέχθηκαν άρδευση έδωσαν αποδόσεις μεγαλύτερες από 600 kg/στρέμμα, μια ιδιαίτερα υψηλή απόδοση. Τη μέγιστη παραγωγή (689,5 κιλά/στρέμμα) έδωσε το τεμάχιο που αρδεύτηκε με καταιονισμό (τεχνητή βροχή) και διανομή του λιπάσματος στην επιφάνεια του χωραφιού, με το τεμάχιο με μια υδρολίπανση και στάγγην άρδευση να ακολουθεί. Η μεγαλύτερη παραγωγή στη μεταχείριση ΚΕΛ (άρδευση με καταιονισμό) πιθανώς οφείλεται στη μεγαλύτερη ποσότητα νερού άρδευσης που εφαρμόστηκε με τη μέθοδο του καταιονισμού, σε σχέση με τη στάγγην άρδευση (επιπλέον 16 mm νερού άρδευσης εφαρμόστηκαν στη μεταχείριση ΚΕΛ).



Σχήμα 6. Απόδοση σε βάρος καρπού σκληρού σίτου ποικιλίας Svenoσε kg/στρέμμα, ανά μεταχείριση (Μέσοι όροι τιμών με σχετική τυπική απόκλιση και LSD (5%)).

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σπόρου (Πίνακας 3) ήταν πολύ καλά καθώς όλα τα αρδευόμενα τεμάχια είχαν περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη μεγαλύτερη από 14%. Τη μεγαλύτερη τιμή έδωσε η υδρολίπανση στις αρχές Απριλίου, δηλαδή την εποχή που γνωρίζουμε ότι χρειάζεται το φυτό για να τροφοδοτήσει επαρκώς το σπόρο και να αποδώσει υψηλή πρωτεΐνη. Οι μεταχειρίσεις με υδρολίπανση (ΣΥΔ και ΣΥ2Δ) αύξησαν την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη σε σχέση με την μη αρδευόμενη καλλιέργεια σε ποσοστό 25 και 24%, αντίστοιχα, η μεταχείριση με τον καταιονισμό και την επιφανειακή λίπανση (ΚΕΛ) οδήγησε σε αύξηση σε ποσοστό 23%. Μικρότερη αύξηση της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη, της τάξης του 15% σε σχέση με τη μη αρδευόμενη καλλιέργεια, παρατηρήθηκε για τη μεταχείριση που συνδυάζει τη στάγδην άρδευση και την επιφανειακή λίπανση (ΣΕΛ).

Οι τιμές του ειδικού βάρους δεν ήταν απόλυτα ικανοποιητικές. Το γεγονός αυτό νεδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι έπρεπε η άρδευση να γίνει λίγο νωρίτερα για να αποφευχθεί κάποια ζημιά από την ξηρασία του Απριλίου 2018.

Πίνακας 3. Ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού σκληρού σίτου.

Μεταχείριση	Ειδικό Βάρος	Πρωτεΐνη (%)	Υγρασία (%)
ΚΕΛ	76,3	15,82	14,43
ΜΕΛ	78,4	12,89	14,77
ΣΥΔ	78,3	16,06	15,61
ΣΕΛ	77,6	14,78	14,41
Σ2ΥΔ	78,4	16,04	14,18

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας αναφέρονται σε μετρήσεις μιας καλλιεργητικής περιόδου, η εφαρμογή άρδευσης φαίνεται ότι επηρέασε θετικά την ποσότητα της παραγωγής σε σκληρό σίτο. Συγκεκριμένα έδωσε αυξημένη παραγωγή κατά 40% στην άρδευση με καταιονισμό σε σχέση με τη μη αρδευόμενη καλλιέργεια, ενώ στην στάγδην άρδευση η αύξηση της παραγωγής κυμάνθηκε από 32 έως 36%. Η εφαρμογή της επιφανειακής λίπανσης σε σχέση με την υδρολίπανση, επηρέασε ελάχιστα την αύξηση της παραγωγής.

Ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, η εφαρμογή άρδευσης αύξησε το ποσοτό. Η στάγδην άρδευση μας επιτρέπει να αρδεύσουμε και αργά στην περίοδο χωρίς να δημιουργούμε πρόβλημα στα φυτά ενώ η υδρολίπανση στις αρχές Απριλίου έδωσε τη υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη.

Η άρδευση της καλλιέργειας σκληρού σίτου, ανεξαρτήτως του αρδευτικού συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την παραγωγή σκληρού σίτου που μπορεί να φτάσει σε επίπεδα πάνω από τα 700 kg το στρέμμα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξίου Ι., Κωτσόπουλος Σ., Καλφούντζος Δ., και Βύρλας Π., 2000. *Εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής μέσω συναρτήσεων διαθεσιμότητας της εδαφικής υγρασίας*. Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Αθήνα, σελ 493-500.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, Rome.
- Doorenbos, J. and Pruitt W. O., 1977. *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24. 144 p.
- Doorenbos, J and Kassam, A H, 1979. *Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 33 193 p.
- Καλφούντζος Δ., Βύρλας Π., Παπαϊωάννου Χρ., Σιουρας Α., Φιλιντας Α., Ντιουδης Π., 2013. *Σχέση Άρδευσης Παραγωγής και Ποιοτικών Χαρακτηριστικών Βιομηχανικής Τομάτας στην Κεντρική Ελλάδα*. Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, σελ 130-134.
- Ντιούδης Π., Φιλίντας Α., Σακελλαρίου Μακραντωνάκη Μ., Καλφούντζος Δ., Παπαδόπουλος Α., 2013. *Διερεύνηση της Επίδρασης 4 Διατάξεων Στάγδην Άρδευσης στην Παραγωγικότητα Ζαχαροτεύτλων και Περιβαλλοντική-Οικονομική Ανάλυσή τους*. Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, σελ 235-240.
- Καλφούντζος Δ., Γκουγκουλιάς Ν., Παπαϊωάννου Χρ., Βύρλας Π., Ζέρβας Δ.,Κοκκορα Μ., Πατερας Δ., 2013. *Επίδραση της Λίπανσης στην Παραγωγής της Βιομηχανικής Τομάτας στην Κεντρική Ελλάδα*. Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, σελ 42-46.
- Καλφούντζος Δ., Βασιλάκογλου Ι., Γκουγκουλιάς Ν., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Λέλλης Θ., 2013. *Επίδραση της Άρδευσης και της Λίπανσης στην Απόδοση της Καλλιέργειας Στέβιας στην Κεντρική Ελλάδα*. Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος, σελ 241-245.
- Κόκκορα, Μ., Βύρλας, Π., Γκουγκουλιάς, Ν., Καλφούντζος Δ., 2015. *Άρδευση και λίπανση ενεργειακών καλλιεργειών στην κεντρική Ελλάδα*. Πρακτικά 3^{ου} Κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ – ΕΕΔΥΠ – ΕΥΣ, 10-12 Δεκεμβρίου 2015, Αθήνα, σελ 549-556
- Κωτσόπουλος Σ, Αλεξίου Ι, Καλφούντζος Δ. και Βύρλας Π. 1999. *Σχέσεις νερού και παραγωγής βαμβακιού σε περιοχές της Θεσσαλίας*. Πρακτικά 4^{ου} Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ Βόλος, Τεύχος Α', σελ 177-182.
- Παπαζαφειρίου Ζ. Γ. 1984. *Αρχές και Πρακτική των Άρδεύσεων*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΠΟΤΑΜΟΥ ΒΟΥΛΓΑΡΗ ΚΕΦΑΛΟΒΡΥΣΟΥ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥΣ

Ι. Μπολης & Π.Ε. Γεωργίου

Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής
Μηχανικής, 54124, Θεσσαλονίκη, e-mail: giannis.bo@outlook.com.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο συνεχώς αυξανόμενος ρυθμός του πληθυσμού της γης, οι απαιτήσεις για υδρευτικό και αρδευτικό νερό για την ικανοποίηση των βιοποριστικών αναγκών του πληθυσμού, καθώς και η αειφορία των φυσικών πόρων σε συνδυασμό με τη διατήρηση της ισορροπίας του περιβάλλοντος, καθιστούν την κάλυψη των υδατικών αναγκών μια περιοχής και την εύρεση ποιοτικότερου και καθαρότερου νερού πιο επιτακτική. Στην εργασία αυτή γίνεται διερεύνηση των υδατικών πόρων της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Βούλγαρη στο Κεφαλόβρυσο Ελασσόνας και προτείνονται έργα για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών της ευρύτερης περιοχής της επαρχίας Ελασσόνας, καθώς και την ικανοποίηση των υδρευτικών αναγκών της πόλης της Λάρισας.

Λέξεις κλειδιά: υδατικό ισοζύγιο, αρδευτικές ανάγκες, υδρευτικές ανάγκες

INVESTIGATION AND UTILIZATION OF WATER RESOURCES OF VOULGARIS RIVER IN KEFALOVRISO ELASSONA

I. Bolis, P.E. Georgiou

*School of Agriculture A.U.Th, Department of Hydraulics, Soil Science & Agricultural
Engineering, 54124, Thessaloniki, e-mail: giannis.bo@outlook.com.gr*

ABSTRACT

The relentlessly surging pace of the planet's habitants, the requisitions for water that covers urban requirements as well as requisitions for irrigational water that accommodates vital requirements of the habitants along with the sustainability of the natural resources conjointly with the preservation of natures balance make the placement of aqueous needs of a region and the digging up of water of a much better quality and clearance much more urgent. This paper investigates the water resources of Voulgari's river watershed and proposed works to satisfy the irrigation requirements of the vast region of Ellassona's province and the urban water requirements of Larissa city.

Key words: water balance, irrigation requirements, urban water requirements

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κάλυψη των υδατικών αναγκών μιας περιοχής και η εύρεση όσο το δυνατόν ποιοτικότερου και καθαρότερου νερού, αποτελεί εδώ και πολλά χρόνια αντικείμενο προβληματισμού, απασχόλησης και έρευνας κάθε χώρας. Η επιδίωξη για την κάλυψη αυτών των στόχων καθίσταται πιο επιτακτική λόγω του συνεχώς αυξανόμενου ρυθμού του πληθυσμού της γης, και συνεπώς των απαιτήσεων για υδρευτικό και αρδευτικό νερό και για την ικανοποίηση των βιοποριστικών τους αναγκών. Στο

παραπάνω προβληματισμό, τα τελευταία χρόνια, προστίθεται και η έννοια της αιφφορίας των φυσικών πόρων και της διατήρησης της ισορροπίας του περιβάλλοντος. Σημαντικό ρόλο στη λύση των παραπάνω προβλημάτων κατέχουν μια σειρά από ενέργειες και έργα που εντάσσονται στο ευρύτερο σύνολο των εγγειοβελτιωτικών έργων και των φορέων διαχείρισής τους.

Η αξιοποίηση των υδατικών πόρων στην Περιφέρεια Θεσσαλίας επιτυγχάνεται μέσα από μια μεγάλη σειρά έργων υποδομής που έχουν ολοκληρωθεί και έργων υποδομής που βρίσκονται υπό κατασκευή και εντοπίζονται μέσα στο υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας συμπεριλαμβανομένης και της λεκάνης απορροής του Αχελώου. Σημαντικό μέρος αυτών των έργων προορίζονται για την άρδευση της αγροτικής γης της Θεσσαλίας. Κύριος στόχος των έργων αυτών είναι η εκμετάλλευση των επιφανειακών υδάτων.

Σκοπός της εργασίας αποτελεί η μελέτη του υδατικού ισοζυγίου της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Βούλγαρη, που βρίσκεται ανάντη ενός υπό μελέτη φράγματος, στην περιοχή Κεφαλοβρύσου Ελασσόνας, για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών, της περιοχής κατάντη του μελετούμενου φράγματος και των υδρευτικών αναγκών της πόλης της Λάρισας. Για σκοπό αυτό εντοπίζεται κατά μήκος του κυρίως υδατορεύματος η πιθανή θέση που θα κατασκευαστεί το φράγμα για την ταμίευση νερού, χαράσσεται η υδρολογική λεκάνη μέχρι τη θέση αυτή, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης και του υδρογραφικού δικτύου, συλλέγονται και επεξεργάζονται τα μετεωρολογικά στοιχεία των σταθμών που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, εφαρμόζεται το μοντέλο των Thornthwaite and Mather (Thornthwaite and Mather, 1957; Dingman, 1994; Παπαμιχαήλ, 2004, McCabe and Markstrom, 2007), για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου, γίνεται εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών της ευρύτερης περιοχής μελέτης και των υδρευτικών αναγκών της πόλης της Λάρισας, ενώ πραγματοποιείται και ανάλυση λειτουργίας του μελετούμενου ταμιευτήρα, ώστε να εξαχθούν τα αντίστοιχα συμπεράσματα και να προταθούν τα ανάλογα έργα αξιοποίησης των υδατικών πόρων.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

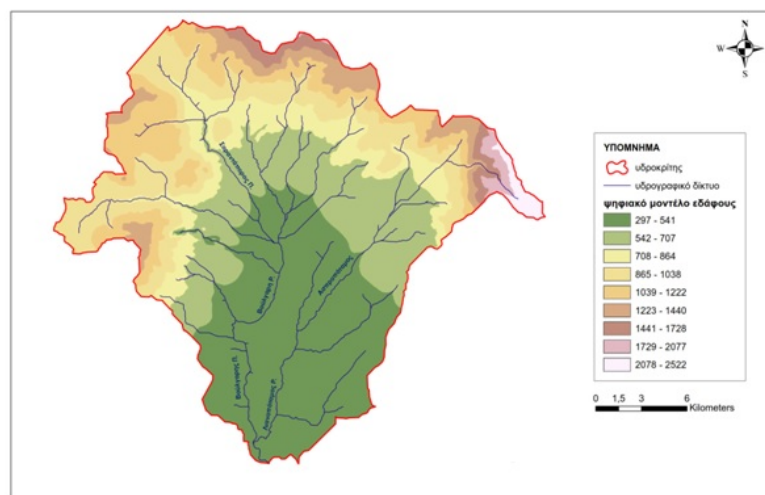
Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στην ευρύτερη περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Πηνειού στο υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας. Το μεγαλύτερο μέρος του υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας ανήκει στην Περιφέρεια Θεσσαλίας, ενώ περιλαμβάνει ένα μικρό μέρος της Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας και της Περιφέρειας Δυτικής και Κεντρικής Μακεδονίας. Η συνολική του έκταση είναι περίπου 13.140 km². Το διαμέρισμα παρουσιάζει απλή γεωμορφολογική εικόνα, με τα ορεινά τμήματά του περιμετρικά και τα πεδινά στις κεντρικές περιοχές. Το Θεσσαλικό Πεδίο που αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα του υδατικού διαμερίσματος, είναι τεκτονικό βύθισμα που περιβάλλεται από τις οροσειρές Ολύμπου-Καμβουνίων στα βόρεια, Πίνδου στα δυτικά, Όθρυος στα νότια και Πηλίου-Όσσας στα ανατολικά. Το κλίμα χαρακτηρίζεται μεσογειακό για την ανατολική παράκτια και ορεινή περιοχή, την κεντρική πεδινή με ηπειρωτικό και τη Δυτική ορεινή με ορεινό κλίμα (ΥΠΕΚΑ, 2014).

Οι σημαντικότερες υδρολογικές λεκάνες είναι του ποταμού Πηνειού και των ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου. Οι εκτάσεις ανέρχονται σε 11.062 km² και 2.079 km² αντίστοιχα.

Η παρούσα εργασία αφορά στη λεκάνη απορροής του ποταμού Βούλγαρη στην έξοδό του στην περιοχή του Κεφαλόβρυσου. Ο ποταμός Βούλγαρης αποτελεί κομμάτι του ποταμού Τιταρήσιου, ο οποίος τελικώς εκβάλλει στον Πηνειό ποταμό. Ο υδροκρίτης της υδρολογικής λεκάνης διέρχεται βορειοδυτικά από τα Καμβούνια Όρη, βόρεια από το Τίταρο Όρος και βορειοανατολικά από το όρος Όλυπος. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η υδρολογική λεκάνη με τον υδροκρίτη της, ενώ στο Σχήμα 2 φαίνεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και το υδρογραφικό δίκτυο της υδρολογικής λεκάνης, με τους κύριους ποταμούς και ρέματα.



Σχήμα 1. Υδροκρίτης της υδρολογικής λεκάνης ποταμού Βούλγαρη στην περιοχή Κεφαλόβρυσου



Σχήμα 2. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο λεκάνης απορροής ποταμού Βούλγαρη στην περιοχή Κεφαλόβρυσου

Η γεωλογία της περιοχής, και πιο συγκριμένα της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Βούλγαρη (λεκάνη έρευνας), χαρακτηρίζεται από τέσσερις (4) γεωλογικές ζώνες. Στο μεγαλύτερο τμήμα της από την Πελαγονική ζώνη, την αυτόχθονη σειρά Ολύμπου, την αυτόχθονη σειρά Κρανιάς και τους μεταλλικούς σχηματισμούς (Σούλιος, 2008). Από υδρογεωλογική άποψη η περιοχή μελέτης αποτελείται τόσο από υδατοπερατούς σχηματισμούς, εξαιτίας της καρστικότητας, όσο και από αδιαπέρατους σχηματισμούς. Χαρακτηριστικός υδατοπερατός σχηματισμός είναι αυτός στην ευρύτερη περιοχή του Πυθίου.

Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Βούλγαρη μέχρι το σημείο όπου ο υδροκρίτης τέμνει τον ποταμό στο υψόμετρο των 297 m, πλησίον του Κεφαλόβρυσου όπου είναι και η διερευνώμενη θέση κατασκευής του φράγματος, έχει έκταση 479,34 km², περίμετρο 118,8 km, μέση κλίση 15 %, ενώ το μέσο υψόμετρό της είναι 787,41 m, το μέγιστο υψόμετρο 2522 m, το ελάχιστο υψόμετρο 297 m, το μέγιστο μήκος διαδρομής μέχρι τη θέση του φράγματος είναι 40,4 km, το μήκος του μεγάλου άξονα της λεκάνης είναι 12,8 km και τέλος το μήκος του μικρού άξονα είναι 11,9 km. Η κλίση του κυρίως ρεύματος είναι 10,16 %.

Η θέση του υπό έρευνα φράγματος βρίσκεται σε ευθεία γραμμή περίπου 8 Km δυτικά από την Ελασσόνα και περίπου 3 Km βορειοανατολικά από το χωριό Κεφαλόβρυσο. Η λεκάνη αυτή είναι ορεινή με μεγάλα υψόμετρα και παρουσιάζει ένα κεντρικό, σχετικά μικρό τμήμα πεδινό-ημιλοφώδες. Καλύπτεται και από δενδρώδη-δασώδη βλάστηση και από θαμνώδη βλάστηση. Έχει μικρές γυμνές περιοχές και το 15% της έκτασης της καλλιεργείται με διάφορες καλλιέργειες (σιτηρά, αραβόσιτο, τριφύλλι, καπνό, οπωροφόρα δένδρα κ.α.) (Σούλιος, 2008).

3. ΥΔΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Μέση βροχόπτωση και μέση θερμοκρασία

Οι μετεωρολογικοί σταθμοί που βρίσκονται κοντά στην περιοχή μελέτης είναι οι εξής: Βερδικούσας (υψ. 863 m), Γιαννωτών (υψ. 578 m), Ελασσόνας (υψ. 312 m), Κρυόβρυσης (υψ. 1030 m), Κοζάνης (υψ. 621 m), Λιβαδίου (υψ. 1179 m), και Πυθίου (υψ. 750 m). Για την εκτίμηση της μέσης βροχόπτωσης και της μέσης θερμοκρασίας της υδρολογικής λεκάνης απαιτείται ο υπολογισμός της βροχοβαθμίδας και της θερμοβαθμίδας. Η γραμμική συσχέτιση υψόμετρου με το μέσο ετήσιο ύψος βροχής των παρατηρήσεων των κοινών υδρολογικών ετών (1954-55 μέχρι 2014-15) των σταθμών Βερδικούσας, Γιαννωτών, Ελασσόνας, Κρυόβρυσης, Λιβαδίου και Πυθίου, δίνουν τη σχέση:

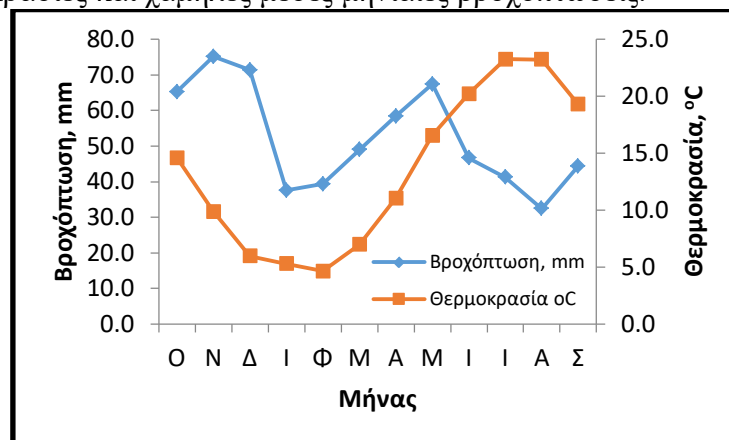
$$y = 0,261x + 465,77 \quad r = 0,899 \quad (1)$$

όπου, y το ετήσιο ύψος βροχής σε mm και x το υψόμετρο του σταθμού σε μέτρα.

Με βάση τα δεδομένα του σταθμού του Λιβαδίου (βρίσκεται εντός της υδρολογικής λεκάνης) των ετών 1950-51 μέχρι 2014-15 και τη βροχοβαθμίδα της σχέσης (1) υπολογίστηκε η μέση μηνιαία βροχόπτωση της υδρολογικής λεκάνης.

Επειδή οι μετεωρολογικοί σταθμοί της περιοχής καταγράφουν, κατά πλειοψηφία μόνο βροχόπτωση, εκτός από το σταθμό της Κοζάνης και του Λιβαδίου που επιπλέον καταγράφουν θερμοκρασία, δεν είναι δυνατόν να γίνει συσχέτιση για τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν μέσες μηνιαίες τιμές της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας ($^{\circ}\text{C}$ ανά 100 m) πάνω από τον Ελλαδικό χώρο έχουν δοθεί από το Φλόκα (1997). Με βάση τα δεδομένα του σταθμού του Λιβαδίου υπολογίστηκε η μέση μηνιαία θερμοκρασία της υδρολογικής λεκάνης.

Στο Σχήμα 3 δίνεται το ομβροθερμικό διάγραμμα που περιγράφει τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια του έτους στην υδρολογική λεκάνη της περιοχής έρευνας. Στο ομβροθερμικό διάγραμμα παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών υψηλές μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και χαμηλές μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις.



Σχήμα 3. Ομβροθερμικό διάγραμμα λεκάνης απορροής ποταμού Βούλγαρη στην περιοχή Κεφαλόβρυσου (1950-51 μέχρι 2014-15)

3.2 Υδρολογικό μοντέλο

Το μοντέλο των Thornthwaite & Mather (1957), όπως τροποποιήθηκε από τον Alley (Dingman, 1994) βασίζεται αρχικώς στην προσομοίωση της υδρολογικής λειτουργίας της λεκάνης απορροής με τη λειτουργία μιας απλής δεξαμενής. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει τρεις βασικές παραμέτρους: Τη μέγιστη εδαφική υγρασία S_0 και τους συντελεστές βαθιάς διήθησης b και υστέρησης a . Η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στο έδαφος εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις υδρολογικές συνθήκες και δεν μπορεί να υπερβεί κάποιο μέγιστο όριο που καθορίζεται από τη μέγιστη εδαφική υγρασία του εδάφους S_0 . Η ακριβής εκτίμηση της τιμής του S_0 επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφορετικών τιμών μέγιστης εδαφικής υγρασίας, η εκτίμηση των οποίων προϋποθέτει την ακριβή γνώση του τύπου του εδάφους κάθε περιοχής και των χρήσεων γης. Μια διαδικασία εκτίμησης της τιμής της μέγιστης εδαφικής υγρασίας είναι αυτή που χρησιμοποιεί τον απορροϊκό συντελεστή CN (Curve Number). Ο συντελεστής βαθιάς διήθησης b , εκτιμάται με βάση τη γεωλογική δομή της υδρολογικής λεκάνης και τους επιμέρους συντελεστές βαθιάς διήθησης του κάθε γεωλογικού σχηματισμού, όπως αυτοί δίνονται στη βιβλιογραφία. Τέλος, ο συντελεστής υστέρησης της απορροής a , εκτιμάται με βάση τη γεωλογική δομή, τις χρήσεις γης και την κλίση της λεκάνης.

Το χρονικό βήμα των υπολογισμών είναι μηνιαίο. Μία γενική περιγραφή της λειτουργίας του μοντέλου είναι η εξής: Υπολογίζονται οι όγκοι υδατικού πλεονάσματος F_p και υδατικού ελλείμματος D_p για την εύρεση της εδαφικής υγρασίας S για κάθε μήνα. Στη συνέχεια υπολογίζεται με βάση την εδαφική υγρασία και τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή ET_p , η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ET_c . Αφού αφαιρεθεί η ET_c , υπολογίζεται η βαθιά διήθηση G . Ο όγκος νερού που απομένει V , είναι υπεύθυνος για την άμεση απορροή, R_1 . Όμως, σε περίπτωση που η υγρασιακή κατάσταση του εδάφους ξεπεράσει τη μέγιστη εδαφική υγρασία S_0 , τότε προκύπτει έμμεση απορροή, R_2 . Η ολική απορροή, R , προκύπτει από το άθροισμα της άμεσης και έμμεσης απορροής.

3.3 Ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών

Οι ανάγκες σε αρδευτικό νερό αποτελούν τη βασική παράμετρο για τον προγραμματισμό και σχεδιασμό των αρδευτικών έργων και τη διαχείριση του αρδευτικού νερού (Γεωργίου, 2004; Γεωργίου και Παπαμιχαήλ, 2006; Georgiou and Paramichail, 2008).

Οι καθαρές σε νερό άρδευσης ανάγκες κάθε καλλιέργειας, θεωρώντας ότι η συμβολή του υπόγειου νερού και της εδαφικής υγρασίας είναι μηδενικές, υπολογίζονται από τη σχέση:

$$IR_n = ET_c - P_e \quad (2)$$

όπου ET_c = εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, P_e = ωφέλιμη βροχή.

Οι ολικές ανάγκες σε νερό άρδευσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$IR_t = IR_n / E \quad (3)$$

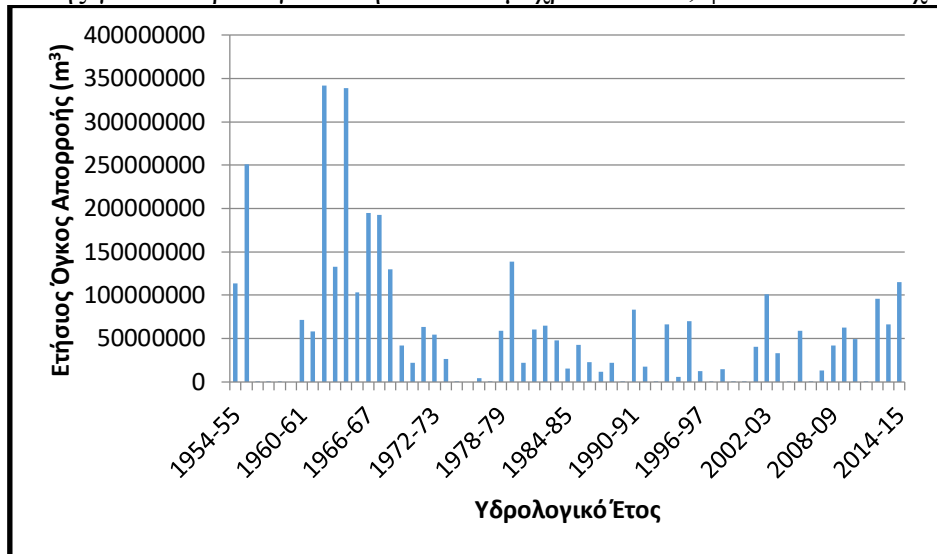
όπου E = αποδοτικότητα άρδευσης.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για την εφαρμογή του μοντέλου των Thornthwaite & Mather απαιτούνται δεδομένα βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής, ενώ απαιτείται και ο υπολογισμός των τριών παραμέτρων S_0 , b και a . Η μέση βροχόπτωση για την κύρια υδρολογική λεκάνη υπολογίστηκε με τη διαδικασία της βροχοβαθμίδας, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.1, ενώ η δυναμική εξατμισοδιαπνοή με τη μέθοδο του Thornthwaite με τη βοήθεια της μέσης θερμοκρασίας της λεκάνης.

Μετά από ανάλυση αρκετών δεδομένων στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και οι χρήσεις γης της λεκάνης απορροής βρέθηκε ότι η μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα S_{max} είναι ίση με 110 mm. Με τη χρήση των δεδομένων που αφορούν τους τύπους των γεωλογικών σχηματισμών, καθώς και με τη χρήση των συντελεστών βαθιάς διήθησης των γεωλογικών σχηματισμών και των αντίστοιχων εμβαδών τους, βρέθηκε ότι ο μέσος συντελεστής βαθιάς διήθησης b ισούται με 15%. Τέλος, ο συντελεστής υστέρησης πάρθηκε ίσος με 30%.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίστηκαν οι μηνιαίες απορροές για τα υδρολογικά έτη 1954-55 μέχρι 2014-15 για την υδρολογική λεκάνη του ποταμού Βούλγαρη. Επισημαίνεται ότι για τον υπολογισμό της απορροής δεν συμπεριλήφθηκε ο καρστικός σχηματισμός στην περιοχή Πυθίου, με συνολικό εμβαδόν περίπου 70 km² (Μανάκος, 2001). Οι ετήσιοι όγκοι απορροής της υπό έρευνα υδρολογικής λεκάνης για τα υδρολογικά έτη 1954-55 μέχρι 2014-15, φαίνονται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Ετήσιοι όγκοι απορροής της υδρολογικής λεκάνης ποταμού Βούλγαρη στην περιοχή Κεφαλόβρυσου για τα υδρολογικά έτη 1954-55 μέχρι 2014-15

Στον Πίνακα 1 δίνονται μέσες μηνιαίες και οι μέσες ετήσιες τιμές της βροχόπτωσης, της ολικής απορροής (υπολογισμένης από το μοντέλο), της βαθιάς διήθησης και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής της υδρολογικής λεκάνης ποταμού Βούλγαρη στην περιοχή Κεφαλόβρυσου για τα υδρολογικά έτη 1954-55 μέχρι 2014-15. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα ο μέσος ετήσιος συντελεστής απορροής είναι ίσος με 0.23.

Πίνακας 1. Μέσο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο των υδρολογικών ετών 1954-55 μέχρι 2014-15 της υδρολογικής λεκάνης ποταμού Βούλγαρη στην περιοχή Κεφαλόβρυσου

Μήνας	Βροχόπτωση (mm)	Μέση απορροή (mm)	Βαθεία διήθηση (mm)	Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή ΕΤc (mm)
Ο	65,2	2,2	1,2	41,4
Ν	75,2	8,2	2,8	26,3
Δ	71,4	17,5	5,1	13,3
Ι	37,5	22,5	3,3	11,0
Φ	39,4	20,5	3,7	9,5
Μ	49,0	21,3	4,0	19,9
Α	58,4	21,2	3,3	40,5
Μ	67,4	16,6	1,6	74,1
Ι	46,6	9,0	0,2	75,3
Ι	41,2	3,4	0,1	62,8
Α	32,4	1,1	0,0	43,6
Σ	44,4	0,4	0,0	40,6
Ετήσιο	628,1	144,0	25,4	458,2

Όπως ήδη αναφέρθηκε, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Βούλγαρη στην έξοδό του στη περιοχή Κεφαλόβρυσου Ελασσόνας, όπου μελετάται η κατασκευή φράγματος για την εξυπηρέτηση υδρευτικών ή/και αρδευτικών αναγκών. Για τον λόγο αυτό, υπολογίστηκαν οι μέσες μηνιαίες υδρευτικές ανάγκες της πόλης της Λάρισας (Πίνακας 2), από ετήσια δεδομένα που πάρθηκαν από την Δ.Ε.Υ.Α.Λ., της χρονικής περιόδου 2001-2016.

Πίνακας 2. Μέσες μηνιαίες υδρευτικές ανάγκες της Λάρισας (Δ.Ε.Υ.Α.Λ.)

Μήνας	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
Ανάγκες (*10 ⁶ m ³)	1,37	1,25	1,39	1,38	1,51	1,54	1,57	1,51	1,47	1,41	1,31	1,35

Σύμφωνα με την ετήσια δήλωση καλλιεργειών, για την ενίσχυση των αγροτών, του 2013 που πραγματοποιήθηκε από την Ένωση Αγροτικών Συνεταιρισμών Επαρχίας Ελασσόνας (ΕΑΣΕΕ, 2013), το σύνολο της γεωργικής γης που δηλώθηκε για την επαρχία Ελασσόνας ανέρχεται περίπου σε 463.000 στρέμματα. Από το σύνολο αυτό της γεωργικής γης αρδεύτηκαν οι καλλιεργείες του αραβόσιτου, του καπνού, των κηπευτικών και των ζωοτροφών (σανός μηδικής) σε ποσοστό 16,9 % (περίπου 78.098 στρ.) της συνολικής έκτασης. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής υπολογίζονται οι μέσες ανάγκες σε αρδευτικό νερό μικρότερης έκτασης από την παραπάνω αρδευθείσα έκταση, λαμβάνοντας υπόψη τις καλλιεργείες και αγροτεμάχια που βρίσκονται στην περιοχή που γεωγραφικά βρίσκεται κάτω από το υπό μελέτη φράγμα.

Το σύνολο των αρδευόμενων εκτάσεων των κοινοτήτων της επαρχίας Ελασσόνας (Αγιονέρι, Αετορράχη, Αμούρι, Βαλανίδα, Βερδικούσσα, Γαλανόβρυση, Δομένικο, Δρυμός, Ελασσόνα, Ευαγγελισμός, Καλύβια, Κεφαλόβρυσος, Μαγούλα, Παλαιόκαστρο, Πραιτώρι, Στεφανόβουνο, Συκέα, Τσαριτσάνη), που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των αναγκών σε νερό είναι περίπου 33.768 στρέμματα. Η κατανομή των εκτάσεων ανά καλλιέργεια δίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Κατανομή καλλιεργειών και έκταση προτεινόμενου σχεδίου άρδευσης της περιοχής

Καλλιέργει α	Αραβόσιτος	Καπνός	Κηπευτικά	Μηδική	ΣΥΝΟΛΟ
Έκταση (στρέμματα)	10.612	2.684	547	19.925	33.768

Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 3 και τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.3 υπολογίστηκαν οι ολικές ανάγκες σε αρδευτικό νερό (IR_i) στην περιοχή έρευνας και δίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Μέσες μηνιαίες και ετήσιες ανάγκες σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών της περιοχής μελέτης

	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Ετήσιο
IR _t , m ³	368.589	2.540.592	5.548.551	3.411.254	2.454.520	350.457	14.673.966

Για να ικανοποιηθούν οι υδρευτικές ανάγκες της Λάρισας και οι ανάγκες σε αρδευτικό νερό των αντίστοιχων εκτάσεων θα πρέπει να γίνουν έργα αποταμίευσης νερού (ταμιευτήρες – λιμνοδεξαμενές), στις οποίες θα αποθηκεύεται νερό και θα χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση των παραπάνω αναγκών. Στην παρούσα εργασία καταλληλότερη θέση για την κατασκευή του φράγματος θεωρήθηκε η κατώτερη θέση της κύριας υδρολογικής λεκάνης της περιοχής μελέτης όπου καταλήγει ο ποταμός Βούλγαρης, πλησίον της περιοχής Κεφαλόβρυσου Ελασσόνας. Το υψόμετρο σε αυτή την

θέση είναι 297 m. Για την εκτίμηση της θέσης αυτής πάρθηκαν πληροφορίες από την μελέτη της ερευνητικής ομάδας του Σούλιου, η οποία βασίστηκε σε επιτόπια έρευνα και σε γεωλογικά στοιχεία, πλησίον της περιοχής του χαμηλότερου σημείου της λεκάνης και της οποίας η πρόταση της θέσης του κυρίου άξονα του φράγματος δεν διαφέρει σημαντικά με την παραπάνω τιμή υψομέτρου (Σούλιος, 2008). Σύμφωνα με την ερευνητική ομάδα του Σούλιου και της Δ.Ε.Υ.Α.Λ. καταλληλότερη χωρητικότητα ταμιευτήρα για την συγκεκριμένη περιοχή θεωρήθηκαν τα 27.000.000 m³ και υψόμετρο μέχρι τη στέψη του φράγματος τα 325,25 m (Σούλιος, 2008).

Η ανάλυση λειτουργίας και η εκτίμηση της απόδοσης του ταμιευτήρα πραγματοποιήθηκε σε μηνιαίο χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας τη σχέση (Γεωργίου, 2004):

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + P_t - R_t - SP_t - L_t - E_t \quad (4)$$

όπου, S_{t+1} και S_t αποθήκευση του ταμιευτήρα στην αρχή του χρόνου t+1 και t αντίστοιχα, Q_t η εισροή στον ταμιευτήρα σε χρόνο t, P_t η απευθείας βροχόπτωση στον ταμιευτήρα σε χρόνο t, R_t η απελευθέρωση από τον ταμιευτήρα για την ικανοποίηση διαφόρων ζητήσεων κατά χρόνο t, SP_t η υπερχειλίση από τον ταμιευτήρα κατά τον χρόνο t, L_t οι υπόγειες διαφυγές από τον ταμιευτήρα κατά τον χρόνο t και E_t η εξάτμιση από τον ταμιευτήρα κατά τον χρόνο t.

Για την σωστή εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης στην παρούσα εργασία έγιναν οι παρακάτω παραδοχές και ενέργειες: Οι υπόγειες διαφυγές L_t θεωρήθηκαν αμελητέες, ο ταμιευτήρας στην αρχή του χρόνου λειτουργίας θεωρήθηκε γεμάτος και ίσος με την χωρητικότητα του ταμιευτήρα, υπολογίστηκε η βροχόπτωση και εξάτμιση στον ταμιευτήρα στη θέση του υπό έρευνα φράγματος (297 m) με τη χρήση των μηνιαίων βροχοπτώσεων και θερμοκρασιών του σταθμού Λιβαδίου των υδρολογικών ετών 1954-55 μέχρι 2014-15, η επιφάνεια του ταμιευτήρα θεωρήθηκε ίση με 1000 στρέμματα, η απόδοση του ταμιευτήρα εκτιμήθηκε θεωρώντας ότι για τα 60 χρόνια (1955-2014 - 720 μήνες) που υπάρχουν στοιχεία (βροχόπτωσης, εισροής, εξάτμισης και ζήτησης) θα επαναληφθούν κατά τον ίδιο τρόπο στη αντίστοιχη επόμενη χρονική περίοδο, ο σκοπός της λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι για την ικανοποίηση μέρους ή του συνόλου των αρδευτικών αναγκών (Πίνακας 4) και μέρους ή του συνόλου των υδρευτικών αναγκών της πόλης της Λάρισας (Πίνακας 2).

Πίνακας 5. Ανάλυση λειτουργίας του ταμιευτήρα

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ				
Μήνες χωρίς ανάγκες	Μήνες με ανάγκες	Μήνες με αστοχία	Μήνες με 0% ικανοποίηση	Μήνες που δεν ικανοποιήθηκε το 70%
377	343	117	110	114
ΥΔΡΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ				
Μήνες χωρίς ανάγκες	Μήνες με ανάγκες	Μήνες με αστοχία	Μήνες με 0% ικανοποίηση	Μήνες που δεν ικανοποιήθηκε το 70%
0	720	222	171	215

Στον Πίνακα 5 δίνονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση λειτουργίας του ταμιευτήρα για την περίοδο 1955-2014. Για τους 720 μήνες λειτουργίας, αρδευτικές ανάγκες υπήρχαν στους 343 μήνες λειτουργίας. Η ικανοποίηση της αρδευτικής ζήτησης εμφάνισε αστοχία, δηλαδή δεν ικανοποιούνταν το 100%, στους 117 μήνες λειτουργίας. Από το σύνολο των μηνών ύπαρξης αρδευτικής ζήτησης, πλήρης αστοχία (0% ικανοποίηση) εμφανίστηκε στους 110 μήνες λειτουργίας. Αντίστοιχα για τους 720 μήνες λειτουργίας, υδρευτικές ανάγκες υπήρχαν στους 720 μήνες λειτουργίας. Η ικανοποίηση

της υδρευτικής ζήτησης εμφάνισε αστοχία, δηλαδή δεν ικανοποιούνταν το 100%, στους 222 μήνες λειτουργίας. Από το σύνολο των μηνών ύπαρξης αρδευτικής ζήτησης, πλήρης αστοχία (0% ικανοποίηση) εμφανίστηκε στους 171 μήνες λειτουργίας.

Ο συγκεκριμένος αριθμός των μηνών για τους οποίους εμφανίστηκε πλήρης αστοχία ικανοποίησης τόσο των αρδευτικών, όσο και των υδρευτικών αναγκών, αιτιολογείται από τις μηδενικές απορροές που εμφανίστηκαν σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, που υπολογίστηκαν κατά την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου του ποταμού Βούλγαρη

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε προσδιορισμός της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Βούλγαρη και καθορίστηκε η έξοδος του ποταμού όπου μελετάται η κατασκευή φράγματος για αποθήκευση νερού, με σκοπό την ικανοποίηση υδρευτικών ή αρδευτικών αναγκών της ευρύτερης περιοχής. Στη συνέχεια, έγινε εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της υδρολογικής λεκάνης καθώς επίσης και των υδρευτικών αναγκών της πόλης τη Λάρισα με τη χρήση στοιχείων που δόθηκαν από την Δ.Ε.Υ.Α.Λ.. Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι μηνιαίες ανάγκες σε νερό των κύριων καλλιεργειών των αγροτεμαχίων της περιοχής που βρίσκονται κατάντη του μελετούμενου φράγματος, για τα υδρολογικά έτη 1954-55 μέχρι 2014-15. Ο λόγος που υπολογίστηκαν οι ανάγκες αυτές ήταν η διερεύνηση ικανοποίησής της από την ταμίευση νερού μέσω της έρευνας κατάλληλων εγγειοβελτιωτικών έργων (φράγμα, ταμιευτήρας κ.λπ.) αξιοποίησης του νερού της απορροής της κύριας υδρολογικής λεκάνης.

Στη συνέχεια, έγινε ανάλυση λειτουργίας ενός υπό μελέτη ταμιευτήρα με σκοπό την ικανοποίηση των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών. Κατά την ανάλυση λειτουργίας υπολογίστηκαν οι μήνες που ικανοποιείται η ζήτηση νερού καθώς επίσης και οι μήνες που υπάρχει αστοχία ικανοποίησης. Σε περίπτωση που μελλοντικά ,μετά την κατασκευή του φράγματος και του ταμιευτήρα, επαναληφθούν οι ίδιες απορροές και υπάρχουν οι ίδιες ανάγκες στη συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη, το ποσοστό ικανοποίησης της αρδευτικής ζήτησης ολικώς θα ανέρχεται σε 65,9% και μερικώς σε 67,9%. Αντίστοιχα το ποσοστό ικανοποίησης της υδρευτικής ζήτησης ολικώς θα ανέρχεται σε 69,2 και μερικώς σε 76,3%. Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν πως η λειτουργία του ταμιευτήρα είναι αρκετά καλή και πως με κατάλληλη διαχείριση του αποθηκευμένου νερού το τελικό αποτέλεσμα σε περίπτωση υλοποίησης του έργου θα είναι ικανοποιητικό.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γεωργίου, Π.Ε., 2004. Βελτιστοποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων για αρδευτικούς σκοπούς. Διδακτορική διατριβή, Γεωπονική Σχολή, ΑΠΘ.,
- Γεωργίου, Π.Ε. και Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2006. Βέλτιστη Διαχείριση Αρδευτικού Ταμιευτήρα για την Επιλογή των Καλλιεργειών και των Εκτάσεων τους σε Συνθήκες Πλήρους Άρδευσης. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ, «Διαχείριση Υδατικών Πόρων και Προστασία Περιβάλλοντος –Σύγχρονες Θεωρήσεις, Προβλήματα και Προοπτικές», Ξάνθη, σελ. 589-596.
- Georgiou, P.E. and Papamichail, D.M., 2008. Optimization Model of an Irrigation Reservoir for Water Allocation and Crop Planning under Various Weather Conditions. *Irrigation Science*, 26, 487-504.
- Dingman, S. L., 1994. *Physical Hydrology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Ένωση Αγροτικών Συνεταιρισμών Επαρχίας Ελασσόνας, 2013. Στοιχεία του Οργανωμένου Συστήματος Υποβολής Δηλώσεων (ΟΣΔΕ) για τον Δήμο Ελασσόνας, Ελασσόνα.

- Μανάκος Α., 2001. Υδρογεωλογική έρευνα των προσχωματικών πετρωμάτων λεκάνης απορροής Σαρανταπόρου Νομού Λάρισας, Θεσσαλονίκη.
- McCabe, G.J., and Markstrom, S.L., 2007, A monthly water-balance model driven by a graphical user interface: U.S. Geological Survey Open-File report 2007-1088, 6 p.
- Παπαμιχαήλ, Δ. Μ., 2004. “Τεχνική υδρολογία επιφανειακών υδάτων”. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη.
- Σούλιος, ΔΕΥΑΛ, 2008. Διερεύνηση κατασκευής Φράγματος στην περιοχή Κεφαλόβρυσου Ελασσόνας στον κύριο κλάδο του Τιταρήσιου, Θεσσαλονίκη.
- Thornthwaite C.W. & Mather J.R., 1957. “Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance”. Publication in Climatology, Vol.10, No.3, Centerton, N.J. Drexel Inst.
- ΥΠΕΚΑ, 2014. Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, Αθήνα.
- Φλόκας Α.Α., 1997, Μαθήματα μετεωρολογίας - κλιματολογίας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΛΙΜΝΩΝ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ

Χ. Δουλγέρης¹, Π.Ε. Γεωργίου²

¹Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός «ΔΗΜΗΤΡΑ», 574 00 Θεσσαλονίκη, e-mail: ch.doulgeris@swri.gr

²Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 541 24 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο καθορισμός της περιβαλλοντικά ελάχιστης στάθμης των λιμνών και ταμιευτήρων είναι ζωτικής σημασίας για την αειφόρο διαχείρισή τους. Η εκτίμηση της ελάχιστης στάθμης εξαρτάται από μια σειρά βιοτικών και αβιοτικών παραμέτρων του λιμναίου οικοσυστήματος, οι οποίες τις περισσότερες φορές δεν είναι γνωστές στο σύνολό τους. Παράλληλα, οι λίμνες/ταμιευτήρες αποτελούν μια σημαντική πηγή νερού για την κάλυψη των αναγκών σε νερό που προκύπτουν από τις οικονομικές δραστηριότητες. Στην εργασία αυτή, αναλύονται τα μορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά τεσσάρων λιμνών – Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη – για την εκτίμηση της ελάχιστης στάθμης τους. Η ανάλυση βασίζεται στις καμπύλες επιφάνειας - όγκου - στάθμης νερού της λίμνης καθώς και στην εισροή νερού στη λίμνη από την υδρολογική της λεκάνη.

Λέξεις κλειδιά: ελάχιστη στάθμη λιμνών, υδρο-μορφολογική ανάλυση, λεκάνη λ. Βεγορίτιδας

ASSESSMENT OF MINIMUM WATER LEVEL IN LAKES AND RESERVOIRS BASED ON THEIR MORPHOLOGICAL AND HYDROLOGICAL FEATURES

Ch. Doulgeris¹, P.E. Georgiou²

¹Soil & Water Resources Institute, Hellenic Agricultural Organisation “DEMETER”, 574 00 Thessaloniki, ✉ch.doulgeris@swri.gr

²Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24 Thessaloniki

ABSTRACT

The determination of environmentally minimum water level in lakes and reservoirs is essential for their sustainable management. The assessment of minimum water level depends on a number of biotic and abiotic factors of the lake ecosystem; however, in many cases these factors are not easy to collect and assess in their entirety. At the same time, the lakes/reservoirs in many cases consist an important water reserve to meet the requirements arising from economic activities. In this paper, the morphological and hydrological features in four lakes – Vegoritida, Petron, Cheimaditida and Zazari – of Northern Greece are analysed in order to assess their environmentally minimum water level. The analysis is based on the relationship of the lake surface area and volume with the water level as well as the water inflow from lake's hydrological catchment.

Keywords: minimum lake level, hydro-morphological analysis, Lake Vegoritida catchment

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υδρομορφολογικές πιέσεις στα υδάτινα οικοσυστήματα σχετίζονται συνήθως με την ανάγκη διαχείρισης της στάθμης του νερού στις λίμνες και τους ταμιευτήρες και της ροής του νερού στους ποταμούς για την κάλυψη των αναγκών των οικονομικών δραστηριοτήτων, όπως η βιομηχανία, ο υδροηλεκτρισμός, η γεωργία κ.λπ.. Επίσης, ο διαθέσιμος όγκος νερού μιας λίμνης, ο οποίος σχετίζεται άμεσα με τη στάθμη του νερού της λίμνης, είναι μια εύκολα διαθέσιμη πηγή νερού για την ικανοποίηση των αναγκών. Έτσι, ο καθορισμός της περιβαλλοντικά ελάχιστης στάθμης νερού στις λίμνες και τους ταμιευτήρες είναι μεγάλης σπουδαιότητας για την αειφόρο διαχείριση των οικοσυστημάτων τους, καθώς η ελάχιστη στάθμη είναι το κρίσιμο επίπεδο της στάθμης κάτω από το οποίο καμιά περαιτέρω απόληψη νερού δεν πρέπει να λαμβάνει χώρα, εξασφαλίζοντας την προστασία των λιμναίων οικοσυστημάτων.

Αρκετές μέθοδοι υπάρχουν στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση της περιβαλλοντικά ελάχιστης παροχής των ποταμών (Tharme, 2003; Jain, 2012), λίγες ωστόσο είναι οι μέθοδοι εκτίμησης της ελάχιστης στάθμης των λιμνών και ταμιευτήρων, πιθανά λόγω της μερικής κατανόησης των μηχανισμών μεταξύ της στάθμης των λιμνών και των οικοσυστημάτων τους. Επιπλέον, μέθοδοι για την εκτίμηση της ελάχιστης στάθμης λιμνών δεν έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί στη διαχείριση των λιμνών και ταμιευτήρων, λόγω του ότι λαμβάνουν υπόψη μέρος μόνο των παραμέτρων που επηρεάζουν το λιμναίο οικοσύστημα. Σε γενικές γραμμές, οι μέθοδοι εκτίμησης της ελάχιστης στάθμης λιμνών περιλαμβάνουν τις μεθόδους που βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα στάθμης λιμνών (historicallakelevelmethods) (Xu et al., 2004; Leeper and Ellison, 2015), τις μεθόδους ανάλυσης των μορφολογικών χαρακτηριστικών (lakemorphologyanalysismethods) (Liet al., 2007; Shang, 2013), τις μεθόδους ανάλυσης ενδιαιτημάτων (habitat analysis methods) και τα περιβαλλοντικά μοντέλα ειδών (species-environment models) (Cui et al., 2005; Abbaspour and Nazari Doust, 2007; Mjelde et al., 2013). Επιπρόσθετα, η διακύμανση της στάθμης των λιμνών, και κατ' επέκταση και ο καθορισμός της ελάχιστης στάθμης, είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που οφείλεται στις εισροές (άμεσες ή έμμεσες) νερού από την υδρολογική λεκάνη της, την εξάτμιση, την απευθείας βροχόπτωση και την ανταλλαγή νερού με τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Είναι με λίγα λόγια το αποτέλεσμα των κλιματικών μεταβολών που επηρεάζουν τις βροχοπτώσεις και την εξατμισοδιαπνοή στη λεκάνη απορροής και των χρήσεων στην περιοχή της λίμνης.

Στην εργασία αυτή, εφαρμόστηκε ανάλυση των μορφολογικών χαρακτηριστικών με βάση τη σχέση της επιφάνειας και του όγκου νερού με τη στάθμη νερού της λίμνης, καθώς και των υδρολογικών χαρακτηριστικών με βάση την εισροή νερού στη λίμνη από την υδρολογική της λεκάνη, για την εκτίμηση της περιβαλλοντικά ελάχιστης στάθμης των λιμνών Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη.

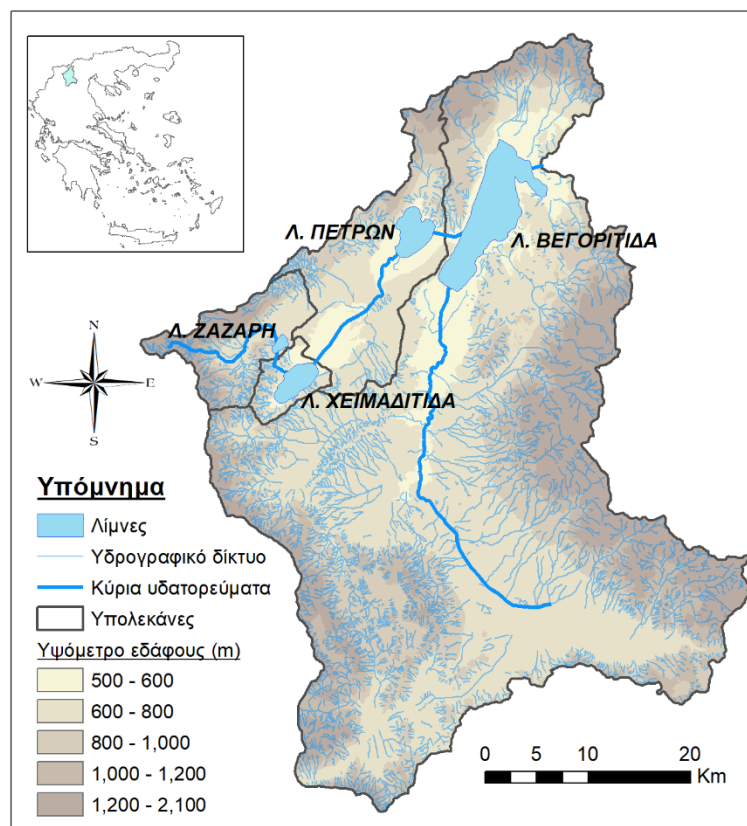
2. ΥΔΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιοχή μελέτης

Οι λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη εντοπίζονται στο Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Μακεδονίας και η υδρολογική λεκάνη απορροής τους καλύπτει μία έκταση 2.145 km² (Σχήμα 1). Αποτελούν ένα σύμπλεγμα λιμνών καθώς συνδέονται μεταξύ τους και περίσσεια των υδάτων τους μεταφέρεται από τη μία λίμνη στην άλλη. Η λίμνη Ζάζαρη βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο και συνδέεται με τη λίμνη Χειμαδίτιδα μέσω μιας τεχνητής τάφρου μήκους περίπου 2 km που κατασκευάστηκε το 1960. Ο υπερχειλιστής στη Ζάζαρη βρίσκεται σε υψόμετρο 599,7 m. Η

λίμνη Χειμαδίτιδα συνδέεται με τη σειρά της με τη λίμνη Πετρών καθώς τα νερά της εκρέουν μέσω μιας τάφρου στο ρέμα Αμύντα (ο υπερχειλιστής της Χειμαδίτιδα βρίσκεται σε υψόμετρο 592 m) και καταλήγουν στη λίμνη Πετρών. Από τη λίμνη Πετρών διοχετεύεται η περίσσεια των υδάτων προς τη λίμνη Βεγορίτιδα, μέσω μιας υπόγειας σήραγγας που κατασκευάστηκε την περίοδο 1962 - 1963 και λειτουργεί με θυρόφραγμα, το οποίο βρίσκεται σε υψόμετρο 573,1 m. Σημαντικός τροφοδότης της Βεγορίτιδας, η οποία είναι ο τελικός αποδέκτης των υδάτων στη λεκάνη απορροής, είναι το �έμα Πεντάβρυσο που ακολουθεί μια πορεία περίπου 25 km από νότο προς βορρά και συγκεντρώνει τα ύδατα των ορεινών όγκων του Ασκίου και του Βερμίου. Νερό από τη λίμνη Βεγορίτιδα στέλνονταν μέχρι το 1989 στη λίμνη του Άγρα, μέσω σήραγγας που κατασκευάστηκε το 1955, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του υδροηλεκτρικού σταθμού της ΔΕΗ. Αυτό οδήγησε σε σημαντική μείωση της στάθμης του νερού της λίμνης (Gianniou & Antonopoulos, 2007; Doulgeris et al., 2019). Η σήραγγα έκλεισε στα τέλη της δεκαετίας του 1980, αλλά τέθηκε ξανά σε λειτουργία για μια μικρή περίοδο το έτος 2015 μετά την άνοδο της στάθμης του νερού στη λίμνη Βεγορίτιδα. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων λιμνών (Doulgeris et al., 2017).

Οι οικονομικές δραστηριότητες που ασκούν πιέσεις στις τέσσερις λίμνες συνδέονται με τη βιομηχανία, τη γεωργία και τη χρήση νερού στις πόλεις. Η βιομηχανική δραστηριότητα της περιοχής περιλαμβάνει ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, που καταναλώνουν νερό και συμβάλλουν στην αύξηση των φορτίων ρύπανσης των λιμνών. Η γεωργική δραστηριότητα, με κύριες καλλιέργειες το σιτάρι, το καλαμπόκι, τα ζαχαρότευτλα, τις μηλιές και τα αμπέλια, καταναλώνει νερό για αρδεύσεις και συμβάλλει στην αύξηση των φορτίων μη-σημειακής ρύπανσης. Επίσης, πιέσεις ασκούν και οι αστικές περιοχές της Πτολεμαΐδας, του Αμυνταίου και μικρότερων οικισμών.



Σχήμα 1. Υδρολογική λεκάνη των λιμνών Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη

Πίνακας 1. Υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά των λιμνών στη λεκάνη της Βεγορίτιδας

	Βεγορίτιδα	Πετρών	Χειμαδίτιδα	Ζάζαρη
Απόλυτο υψόμετρο στάθμης (m)	518	573,1	592	599,7
Επιφάνεια λίμνης (km ²)	47,2	12,6	10,1	2,0
Όγκος νερού λίμνης (10 ⁶ m ³)	1.206,2	40,8	14,7	9,7
Μέσο βάθος (m)	26	3,5	1,5	5
Μέγιστο βάθος (m)	52,6	5,5	4,8	7,6

2.2. Μεθοδολογία

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός λιμναίου οικοσυστήματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον καθορισμό της περιβαλλοντικά ελάχιστης στάθμης του, δεδομένου ότι καθορίζουν το βάθος και την έκταση της παρόχθιας ζώνης, τα οποία αυξομειώνονται με την εποχιακή διακύμανση της στάθμης. Το υδατικό καθεστώς στην παρόχθια ζώνη συντελεί στη διαμόρφωση των επιθυμητών συνθηκών για τη διατήρηση και προστασία των βιολογικών ειδών, όπως η ιχθυοπανίδα και η υδρόβια βλάστηση, και εξαρτάται άμεσα από το μορφολογικό τύπο της λίμνης, που μπορεί να κυμαίνεται από μεγάλη και βαθιά λίμνη με απότομες όχθες μέχρι μικρή και ρηχή λίμνη με ήπιες κλίσεις πυθμένα.

Η μορφολογία του πυθμένα μιας λίμνης περιγράφεται επαρκώς στις περισσότερες περιπτώσεις από την υψογραφική καμπύλη της, δηλαδή τη σχέση της στάθμης-επιφάνειας νερού στη λίμνη, και την καμπύλη στάθμης-όγκου νερού στη λίμνη. Η επιφάνεια της λίμνης είναι ένας κατάλληλος δείκτης για την προστασία του λιμναίου οικοσυστήματος, δεδομένου ότι η βιοποικιλότητα στη λίμνη αυξάνει με την επιφάνεια της λίμνης (Browne, 1981). Από την άλλη πλευρά, ο αποθηκευμένος όγκος νερού στη λίμνη μπορεί να ληφθεί ως δείκτης του διαθέσιμου νερού για την ικανοποίηση των υδατικών αναγκών των οικονομικών δραστηριοτήτων.

Η επιφάνεια της λίμνης αυξάνει με τον όγκο της λίμνης, αλλά ο ρυθμός αύξησης, που εκφράζεται με την κλίση της καμπύλης επιφάνειας-όγκου της λίμνης, μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται με την μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού στη λίμνη, ανάλογα με τη μορφολογία του πυθμένα της λίμνης. Επομένως, υπάρχει μία «κρίσιμη τιμή» του αποθηκευμένου όγκου νερού στη λίμνη, όπου περαιτέρω αύξηση ή μείωση του όγκου δεν μεταβάλλει σημαντικά την επιφάνεια της λίμνης. Ο κρίσιμος όγκος αντιστοιχεί στο σημείο καμπής της καμπύλης επιφάνειας-όγκου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της ελάχιστης στάθμης της λίμνης, κατ' αναλογία με τη μέθοδο της περιβρεχόμενης περιμέτρου για τον καθορισμό της περιβαλλοντικά ελάχιστης παροχής στους ποταμούς (GippelandStewardson, 1998).

Με βάση τα παραπάνω, η μέθοδος επιφάνειας της λίμνης (lakesurfaceareamethod) (Shang, 2013) που ανήκει στις μεθόδους ανάλυσης των μορφολογικών χαρακτηριστικών, έχει προταθεί για τον καθορισμό της ελάχιστης στάθμης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την προστασία του λιμναίου οικοσυστήματος όσο και την ικανοποίηση των υδατικών αναγκών των οικονομικών δραστηριοτήτων. Η ελάχιστη στάθμη των λιμνών με τη μέθοδο αυτή μπορεί να υπολογιστεί είτε αναλυτικά, είτε αριθμητικά στην περίπτωση που η σχέση μεταξύ της επιφάνειας της λίμνης και του όγκου της δεν μπορεί να εκφραστεί με απλές συναρτήσεις και μία αριθμητική προσέγγιση της πρώτης παραγώγου είναι απαραίτητη (Shang, 2013). Στην περίπτωση αυτή, η ελάχιστη στάθμη της λίμνης μπορεί να υπολογισθεί με την επίλυση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης,

το οποίο λαμβάνει υπόψη δύο μη μηδενικούς συντελεστές βαρύτητας w_1 και w_2 . Ο συντελεστής βαρύτητας w_1 εκφράζει την ελαχιστοποίηση του αποθηκευμένου όγκου νερού στη λίμνη για την ικανοποίηση των υδατικών αναγκών και ο συντελεστής w_2 εκφράζει τη μεγιστοποίηση της επιφάνειας της λίμνης με σκοπό την προστασία των ενδιατημάτων του λιμναίου οικοσυστήματος. Εάν οι δύο συντελεστές έχουν την ίδια τιμή, δηλαδή $w_1=w_2=50\%$, τα δύο κριτήρια του προβλήματος βελτιστοποίησης εκφράζονται ισότιμα.

Η εφαρμογή της μεθόδου στις λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη (Doulgeriset al., 2017) έδειξε ότι ασφαλέστερη εκτίμηση της περιβαλλοντικά ελάχιστης στάθμης προκύπτει με την υιοθέτηση του «περιβαλλοντικού σεναρίου», δηλαδή $w_1=30\%$ και $w_2=70\%$, σύμφωνα με το οποίο η προστασία της βιοποικιλότητας ευνοείται έναντι της ικανοποίησης σε νερό των οικονομικών δραστηριοτήτων. Μειονέκτημα, ωστόσο, της μεθόδου είναι ότι βασίζεται μόνο στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των λιμνών και δεν λαμβάνει υπόψη το υδατικό ισοζύγιο τους και κυρίως την εισροή νερού στις λίμνες από την υδρολογική λεκάνη.

Για την εκτίμηση της εισροής νερού στις λίμνες από την υδρολογική λεκάνη αναπτύχθηκε το υδρολογικό ομοίωμα του συμπλέγματος των τεσσάρων λιμνών λαμβάνοντας υπόψη τις εισροές και εκροές νερού από τη λίμνη καθώς και τις απολήψεις νερού στη λεκάνη απορροής (Doulgeriset al., 2019). Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε το μοντέλο βροχής-απορροής NAM (Nielsen and Hansen, 1973) στις υπολεκάνες των τεσσάρων λιμνών με τη χρησιμοποίηση μετεωρολογικών δεδομένων σε μηνιαίο χρονικό βήμα για την περίοδο 1980-2015. Το μοντέλο βροχής-απορροής συνδυάστηκε με ένα μοντέλο υδατικού ισοζυγίου των λιμνών στο περιβάλλον του διαχειριστικού ομοιώματος MIKEBASIN (www.dhigroup.com) για την προσομοίωση της διακύμανσης της στάθμης νερού στην κάθε λίμνη. Το υδρολογικό ομοίωμα ρυθμίστηκε επιτυχώς, με βάση τις παρατηρούμενες τιμές της στάθμης στις λίμνες Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη για την περίοδο 2012-2015 και στη λίμνη Βεγορίτιδα για την περίοδο 1980-2015, με αποτέλεσμα την ασφαλή εκτίμηση της εισροής νερού στις λίμνες από την υδρολογική λεκάνη.

Ο μέσος ετήσιος όγκος νερού που εισρέει στην κάθε λίμνη από την υδρολογική λεκάνη της, καθώς και η αντίστοιχη εισροή νερού με πιθανότητα υπέρβασης 50% των υδρολογικών ετών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για τον έλεγχο της προτεινόμενης ελάχιστης στάθμης των λιμνών που εκτιμάται από τις διάφορες κατηγορίες μεθόδων (μορφολογικές, περιβαλλοντικές, κ.λπ.), δεδομένου ότι μια λίμνη πρέπει κάθε χρόνο να έχει την δυνατότητα να επανέρχεται από την προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη στη μέγιστη στάθμη υπερχειλίσεως για την επίτευξη ουσιαστικής ανανέωσης των υδάτων της, τουλάχιστον στην πλειονότητα των υδρολογικών ετών.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε η μέθοδος επιφάνειας της λίμνης (lakesurfaceareamethod) που ανήκει στις μεθόδους ανάλυσης των μορφολογικών χαρακτηριστικών και χάριν συντομίας θα αναφέρεται ως «μορφολογική μέθοδος» και η μεθοδολογία που βασίζεται στη μέση εισροή νερού από την υδρολογική λεκάνη και την εισροή με πιθανότητα υπέρβασης 50%, στις λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη για τον προσδιορισμό της ελάχιστης στάθμης τους.

Στον Πίνακα 2 δίνεται η μέγιστη στάθμη των λιμνών καθώς επίσης και η ελάχιστη στάθμη όπως υπολογίστηκε με τις παραπάνω μεθόδους. Στη μορφολογική μέθοδο θα πρέπει να αναφερθεί ότι εφαρμόστηκε η αριθμητική μέθοδος με τους συντελεστές βαρύτητας w_1 και w_2 να έχουν τιμές 30% και 70%, αντίστοιχα.

Από τον Πίνακα 2 για τη λίμνη Βεγορίτιδα, η προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη με την εφαρμογή της μορφολογικής μεθόδου είναι 516,2 m δηλαδή 1,8 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη των 518,0 m. Η στάθμη αυτή αντιστοιχεί σε μία απώλεια όγκου 82,36 εκ. m³ από τη μέγιστη στάθμη. Για την περίοδο των υδρολογικών ετών 1980-81 μέχρι 2014-15, η μέση ετήσια εισροή στη λίμνη είναι 30,1 εκ. m³. Με βάση την εισροή αυτή καθορίστηκε η ελάχιστη στάθμη πως πρέπει να είναι 517,4 m δηλαδή 0,60 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη. Τέλος, με βάση την εισροή που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 50% και είναι 14,6 εκ. m³, η αντίστοιχη ελάχιστη στάθμη που προτείνεται είναι 517,7m, δηλαδή 0,30 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη.

Για τη λίμνη Πετρών, η προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη με τη μορφολογική μέθοδο είναι 571,1 m δηλαδή 2,0 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη των 573,1 m. Η στάθμη αυτή αντιστοιχεί σε μία απώλεια όγκου 22,69 εκ. m³ από τη μέγιστη στάθμη. Για την περίοδο των υδρολογικών ετών 1980-81 μέχρι 2014-15, η μέση ετήσια εισροή στη λίμνη είναι 11,1 εκ. m³. Με βάση την εισροή αυτή καθορίστηκε η ελάχιστη στάθμη πως πρέπει να είναι 572,2m δηλαδή 0,90 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη. Με βάση την εισροή που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 50% και είναι 7,8 εκ. m³, η αντίστοιχη ελάχιστη στάθμη που προτείνεται είναι 572,4m, δηλαδή 0,70 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη.

Για τη λίμνη Χειμαδίτιδα, η προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη με τη μορφολογική μέθοδο είναι 591,3 m δηλαδή 0,7 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη των 592,0 m. Η στάθμη αυτή αντιστοιχεί σε μία απώλεια όγκου 6,75 εκ. m³ από τη μέγιστη στάθμη. Για την περίοδο των υδρολογικών ετών 1980-81 μέχρι 2014-15, η μέση ετήσια εισροή στη λίμνη είναι 6,7 εκ. m³. Με βάση την εισροή αυτή καθορίστηκε η ελάχιστη στάθμη πως πρέπει να είναι 591,3m δηλαδή ακριβώς ίδια με της προηγούμενης μεθόδου κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο από το γεγονός πως η μέση εισροή είναι παρόμοια με τη διαφορά όγκου νερού μεταξύ μέγιστης στάθμης και ελάχιστης στάθμης της μορφολογικής μεθόδου. Με βάση την εισροή που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 50% και είναι 4,77 εκ. m³, η αντίστοιχη ελάχιστη στάθμη που προτείνεται είναι 591,5m, δηλαδή 0,50 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη.

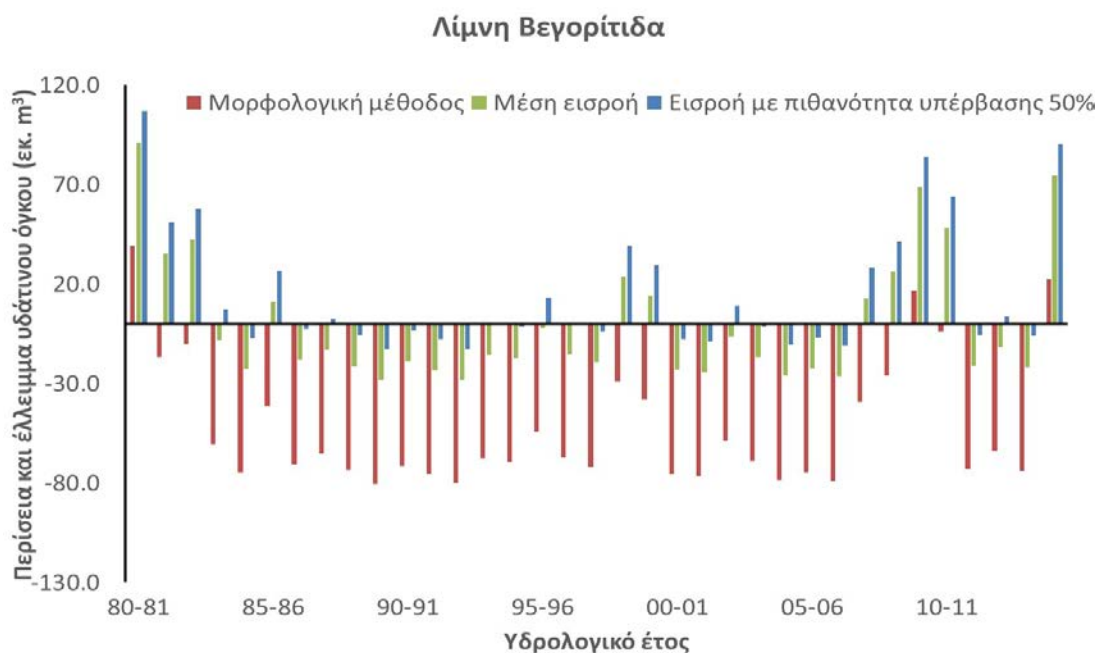
Πίνακας 2. Μέγιστη στάθμη νερού (m) και προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη (m) με βάση τη μορφολογική μέθοδο, τη μέση εισροή και την εισροή με πιθανότητα υπέρβασης 50% στις λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη

	Βεγορίτιδα	Πετρών	Χειμαδίτιδα	Ζάζαρη
Μέγιστη στάθμη (m)	518,0	573,1	592,0	599,7
Προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη (m)				
Μορφολογική μέθοδος (w ₁ =30%, w ₂ =70%)	516,2	571,1	591,3	596,0
Μέση εισροή	517,4	572,2	591,3	595,5
Εισροή με πιθανότητα υπέρβασης 50%	517,7	572,4	591,5	596,6

Τέλος, για τη λίμνη Ζάζαρη η προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη με τη μορφολογική μέθοδο είναι 596,0 m δηλαδή 3,7 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη των 599,7 m. Η στάθμη αυτή αντιστοιχεί σε μία απώλεια όγκου 6,4 εκ. m³ από τη μέγιστη στάθμη. Για την περίοδο των υδρολογικών ετών 1980-81 μέχρι 2014-15, η μέση ετήσια εισροή στη λίμνη είναι 7,2 εκ. m³. Με βάση την εισροή αυτή καθορίστηκε η ελάχιστη στάθμη πως πρέπει να είναι 595,5 m δηλαδή 4,2 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη. Με βάση την εισροή που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 50% και είναι 5,5 εκ. m³, η αντίστοιχη ελάχιστη στάθμη που προτείνεται είναι 596,6 m δηλαδή 3,1 m χαμηλότερα από τη μέγιστη στάθμη.

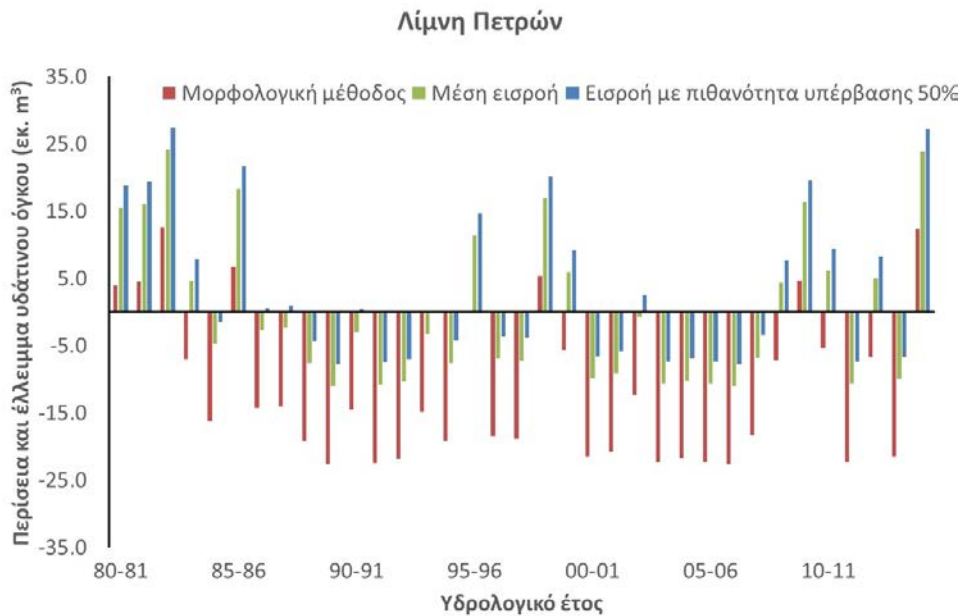
Με βάση την προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη όπως καθορίστηκε για τις τρεις περιπτώσεις (Πίνακας 2), έγινε προσομοίωση της λειτουργίας των λιμνών και έλεγχος της επαναφοράς από την ελάχιστη στάθμη στη μέγιστη στάθμη με βάση την ετήσια εισροή νερού στη λίμνη από την υδρολογική λεκάνη για τη χρονική περίοδο των υδρολογικών ετών 1980-81 έως 2014-15. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε η περίσσεια (υπερχειλίση) και το έλλειμμα (όγκος νερού που υπολείπεται μέχρι τη μέγιστη στάθμη) του υδάτινου όγκου, θεωρώντας πως η λίμνη στην αρχή κάθε υδρολογικού έτους βρίσκεται στην ελάχιστη προτεινόμενη στάθμη.

Στο Σχήμα 2 φαίνεται η προσομοίωση της λειτουργίας της λίμνης Βεγορίτιδας. Από το Σχήμα προκύπτει ότι με βάση τη μορφολογική μέθοδο, από τα 35 έτη λειτουργίας της λίμνης, στα 32 θα υπάρχει έλλειμμα και μόνο σε 3 έτη θα υπάρχει περίσσεια. Στην περίπτωση της μέσης εισροής, στα 24 έτη θα υπάρχει έλλειμμα ενώ σε 11 έτη θα υπάρχει περίσσεια. Τέλος, στην περίπτωση της εισροής με πιθανότητα υπέρβασης 50%, σε 17 έτη θα υπάρχει έλλειμμα και σε 18 έτη θα υπάρχει περίσσεια.

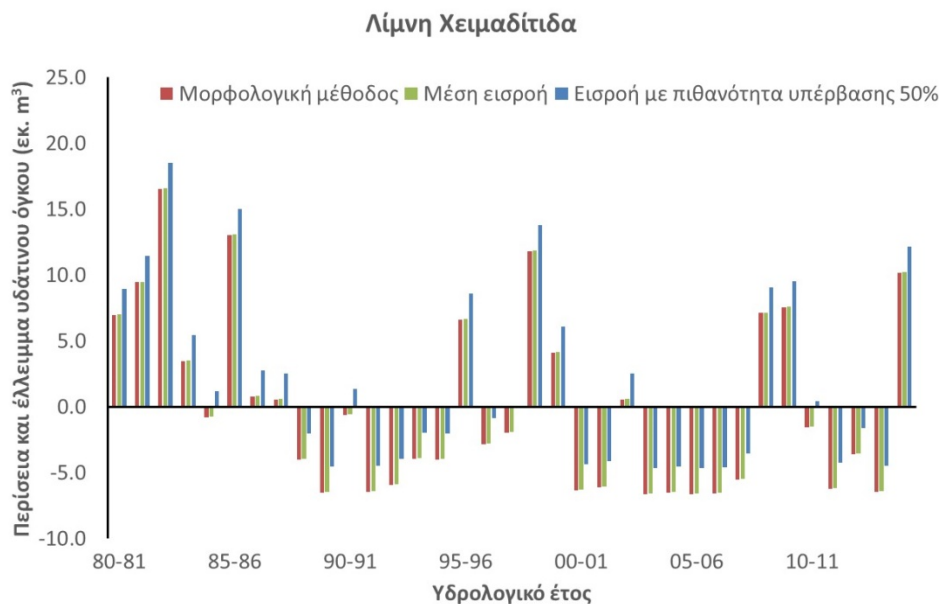


Σχήμα 2. Περίσσεια και έλλειμμα υδάτινου όγκου λίμνης Βεγορίτιδας κατά την επαναφορά στη μέγιστη στάθμη από ελάχιστη στάθμη που καθορίζεται με βάση (α) τη μορφολογική μέθοδο, (β) τη μέση εισροή και (γ) την εισροή με πιθανότητα υπέρβασης 50% στη διάρκεια των υδρολογικών ετών 1980-81 μέχρι 2014-15.

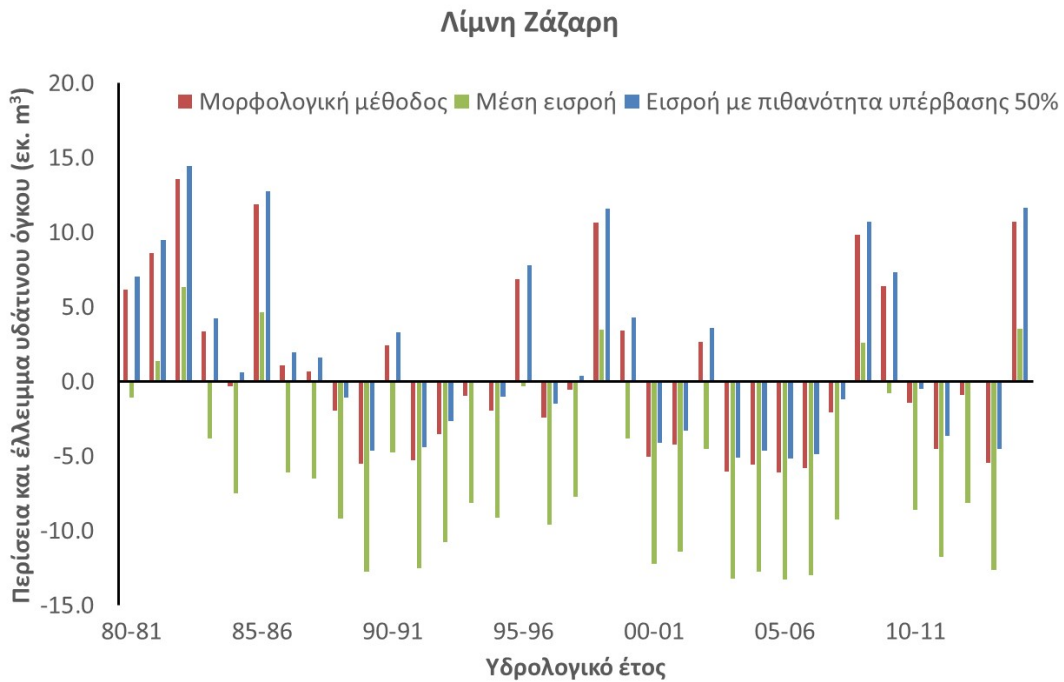
Στο Σχήμα 3 φαίνεται η προσομοίωση της λειτουργίας της λίμνης Πετρών. Από το Σχήμα προκύπτει ότι με βάση τη μορφολογική μέθοδο, στα 28 έτη θα υπάρχει έλλειμμα και μόνο σε 7 έτη θα υπάρχει περίσσεια. Στην περίπτωση της μέσης εισροής, στα 22 έτη θα υπάρχει έλλειμμα ενώ σε 13 έτη θα υπάρχει περίσσεια. Τέλος, στην περίπτωση της εισροής με πιθανότητα υπέρβασης 50%, σε 18 έτη θα υπάρχει έλλειμμα και σε 17 έτη θα υπάρχει περίσσεια.



Σχήμα 3. Περίσσεια και έλλειμμα υδάτινου όγκου λίμνης Πετρών κατά την επαναφορά στη μέγιστη στάθμη από ελάχιστη στάθμη που καθορίζεται με βάση (α) τη μορφολογική μέθοδο, (β) τη μέση εισροή και (γ) την εισροή με πιθανότητα υπέρβασης 50% στη διάρκεια των υδρολογικών ετών 1980-81 μέχρι 2014-15.



Σχήμα 4. Περίσσεια και έλλειμμα υδάτινου όγκου λίμνης Χειμαδίτιδας κατά την επαναφορά στη μέγιστη στάθμη από ελάχιστη στάθμη που καθορίζεται με βάση (α) τη μορφολογική μέθοδο, (β) τη μέση εισροή και (γ) την εισροή με πιθανότητα υπέρβασης 50% στη διάρκεια των υδρολογικών ετών 1980-81 μέχρι 2014-15.



Σχήμα 5. Περίσσεια και έλλειμμα υδάτινου όγκου λίμνης Ζάζαρης κατά την επαναφορά στη μέγιστη στάθμη από ελάχιστη στάθμη που καθορίζεται με βάση (α) τη μορφολογική μέθοδο, (β) τη μέση εισροή και (γ) την εισροή με πιθανότητα υπέρβασης 50% στη διάρκεια των υδρολογικών ετών 1980-81 μέχρι 2014-15.

Στο Σχήμα 4 φαίνεται η προσομοίωση της λειτουργίας της λίμνης Χειμαδίτιδας, από το οποίο προκύπτει ότι με βάση τη μορφολογική μέθοδο, στα 21 έτη θα υπάρχει έλλειμμα και σε 14 έτη θα υπάρχει περίσσεια. Στην περίπτωση της μέσης εισροής, ομοίως στα 21 έτη θα υπάρχει έλλειμμα ενώ σε 14 έτη θα υπάρχει περίσσεια. Τέλος, στην περίπτωση της εισροής με πιθανότητα υπέρβασης 50%, σε 18 έτη θα υπάρχει έλλειμμα και σε 17 έτη θα υπάρχει περίσσεια.

Τέλος, στο Σχήμα 5 φαίνεται η προσομοίωση της λειτουργίας της λίμνης Ζάζαρης, από το οποίο προκύπτει ότι με βάση τη μορφολογική μέθοδο, στα 20 έτη θα υπάρχει έλλειμμα και σε 15 έτη θα υπάρχει περίσσεια. Στην περίπτωση της μέσης εισροής στα 28 έτη θα υπάρχει έλλειμμα ενώ μόνο σε 7 έτη θα υπάρχει περίσσεια. Τέλος, στην περίπτωση της εισροής με πιθανότητα υπέρβασης 50%, σε 18 έτη θα υπάρχει έλλειμμα και σε 17 έτη θα υπάρχει περίσσεια.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση των μορφολογικών χαρακτηριστικών των λιμνών, που βασίστηκε στις καμπύλες επιφάνειας - όγκου - στάθμης νερού, αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για μισοχρονικά ασφαλή και γρήγορη εκτίμηση της περιβαλλοντικά ελάχιστης στάθμης των λιμνών Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη. Ωστόσο, η μέθοδος μειονεκτεί στο ότι βασίζεται μόνο στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των λιμνών και δεν λαμβάνει υπόψη το υδατικό ισοζύγιο τους και κυρίως την εισροή νερού στις λίμνες από την υδρολογική λεκάνη, με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις η ελάχιστη στάθμη να εκτιμάται σε αρκετά χαμηλό επίπεδο (π.χ. Ζάζαρη, Πετρών), χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα επαναφοράς από την ελάχιστη στάθμη στη μέγιστη στάθμη υπερχειλίσεως, τουλάχιστον για την πλειονότητα των υδρολογικών ετών.

Με βάση όμως την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου των λιμνών που προτείνεται στην παρούσα εργασία, και συγκεκριμένα τον μέσο ετήσιο όγκο νερού που εισρέει στη λίμνη από την υδρολογική λεκάνη με πιθανότητα υπέρβασης 50% των υδρολογικών ετών, η εκτίμηση της ελάχιστης στάθμης των λιμνών γίνεται με μεγαλύτερη ασφάλεια. Παράλληλα, εξασφαλίζεται η επαναφορά από την ελάχιστη στάθμη στη μέγιστη στάθμη υπερχειλίσης για τα περισσότερα υδρολογικά έτη, με ταυτόχρονη αύξηση της περισσειας του υδάτινου όγκου που μεταφέρεται από τη μία λίμνη στην άλλη, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για το σύμπλεγμα των λιμνών στην υδρολογική λεκάνη της Βεγορίτιδας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbaspour, M., Nazaridou, A., 2007. Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: an ecological approach. *International Journal of Environmental Studies*, 64(2): 161–169.
- Browne, R. A., 1981. Lakes as islands: biogeographic distribution, turnover rates, and species composition in the lakes of central New York. *Journal of Biogeography*, 8(1): 75–83.
- Cui, B. S., Zhao, X., Yang, Z. F., 2005. Eco-hydrology-based calculation of the minimum ecological water requirement for lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 25(7): 1788–1795.
- Doulgeris Ch., Georgiou P., Apostolakis A., Papadimos D., Zervas D., Petriki O., Bobori D., Papamichail D., Antonopoulos V., Farcas C. and Stålnacke P., 2017. Assessment of the environmentally minimum lake level based on hydromorphological features. *European Water* 58: 197-202
- Doulgeris, Ch., Pisinaras, V., Tziritis, E., Hatzigiannakis, E. and Panagopoulos, A., 2019. Climate change impact assessment on the establishment of maximum water level in Lake Vegoritida, Greece. 2nd International Conference Adapt to Climate, 24-25 June, Heraclion, Greece.
- Gianniou K.S. and Antonopoulos, Z.V., 2007. Evaporation and energy budget in Lake Vegoritida, Greece. *Journal of Hydrology*. 345(3): 212-223.
- Gippel, C. J., Stewardson, M. J., 1998. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regulated Rivers: Research & Management*; 14(1): 53–67.
- Jain, S. K., 2012. Assessment of environmental flow requirements. *Hydrological Processes*, 26(22): 3472–3476.
- Leeper, D. A., and Ellison, D.L., 2015. Proposed Minimum and Guidance Levels for Lake Hancock in Polk County, Florida. Southwest Florida Water Management District. Brooksville, Florida.
- Li, X. H., Song, Y. D., Li, Y. T., et al. 2007. Calculation methods of lowest ecological water level of lake. *Arid Land Geography*, 30(4): 526–530.
- Mjelde, M., Hellsten, S., Ecke, F., 2013. A water level drawdown index for aquatic macrophytes in Nordic lakes. *Hydrobiologia*; 704:141–151
- Nielsen, S.A., Hansen, E., 1973. Numerical simulation of the rainfall runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology*, 4, 171- 190. <https://doi.org/10.2166/nh.1973.0013>
- Shang, S. H., 2013. Lake surface area method to define minimum ecological lake level from level–area–storage curves. *J Arid Land*; 5(2): 133–142.
- Tharme, R. E., 2003. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5–6): 397–441.
- Xu, Z. X., Chen, M. J., Dong, Z. C., 2004. Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake. *Acta Ecologica Sinica*, 24(10): 2324–2328.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SALTMED ΓΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

A. Σιούρας, Π. Βύρλας, Μ. Κόκκορα & Δ. Καλφούντζος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Γενικό Τμήμα, Περιφερειακή οδός Λαρίσης-Τρικάλων, 41110, Λάρισα, e-mail: dkalf@teilar.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα περισσότερα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για ειδικά συστήματα άρδευσης, για εξειδικευμένες διαδικασίες όπως η κίνηση του νερού και των διαλυμένων ουσιών, η διήθηση, η έκπλυση του νερού, η πρόσληψή του από τις ρίζες των φυτών ή και συνδυασμούς αυτών. Το μοντέλο SALTMED έχει αναπτυχθεί έτσι ώστε να έχει γενική εφαρμογή σε όλα τα παραπάνω. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται η βαθμονόμηση του μοντέλου σε καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην Λάρισα, όπου εφαρμόστηκε καθαρό νερό σε διαφορετικά επίπεδα ύψους άρδευσης με το σύστημα της στάγδην άρδευσης. Το μοντέλο περιγράφει επιτυχώς την επίδραση του συστήματος άρδευσης, στην κατανομή της εδαφικής υγρασίας και στην παραγωγή της καλλιέργειας.

Λέξεις κλειδιά: μοντέλο saltmed, στάγδην άρδευση, προφίλ υγρασίας, παραγωγή καλλιέργειας.

CALIBRATION OF SALTMED MODEL FOR INDUSTRIAL TOMATO CROP USING A DRIP IRRIGATION SYSTEM

A. Siouras, P. Vyrlas, M. Kokkora and D. Kalfountzos

University of Thessaly, General Department, Larissa-Trikala Ring Road, 41110, Larissa, Greece, e-mail: dkalf@teilar.gr

ABSTRACT

Most existing models are designed for a specific irrigation system, specific process such as water and solute movement, infiltration, leaching or water uptake by plant roots or a combination of them. SALTMED model has been developed for such generic applications. The SALTMED was calibrated using data of an industrial tomatocultivated field of Larissa region, irrigated by fresh water at different water levels, by a trickle irrigation system. The model successfully illustrated the effect of the irrigation system on soil moisture distribution and crop yield.

Key words: Saltmed model, trickle irrigation, soil moisture profile, crop yield.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κύριος χρήστης νερού είναι η γεωργία σε παγκόσμιο επίπεδο, ξεκινώντας από ένα επίπεδο 70% αυξάνεται στο 80% στις χώρες της Μεσογείου και στη χώρα μας είναι στο 78,5%. Συνεπώς κάθε ενέργεια που στοχεύει στην ορθολογική χρήση του με στόχο την εξοικονόμηση νερού έχει ιδιαίτερη βαρύτητα. Επίσης παγκόσμιο φαινόμενο αποτελεί η μείωση των υδατικών αποθεμάτων που συχνά συνδυάζεται με την υποβάθμιση των υδατικών πόρων. Η αύξηση των απολήψεων νερού, η μείωση των εισροών και οι επεμβάσεις στη φυσική ροή προκαλούν άμεσα μείωση υδατικών αποθεμάτων. Παράλληλα όμως, μειώνεται η ικανότητα συγκράτησης του νερού, καθώς και η διηθητική ικανότητα του εδάφους, ενώ ρυπαίνονται με τοξικές ουσίες τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα και παρατηρείται εισροή θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Σε περιοχές άνυδρες και περιοχές που πλήττονται από την ξηρασία το νερό είναι σπάνιο, αλλά ακόμα και σε περιοχές όπου οι βροχοπτώσεις είναι άφθονες αλλά οι ποσότητες που μπορούν να εκμεταλλευτούν είναι μικρές ή η ποιότητα του νερού είναι υποβαθμισμένη, υπάρχει έλλειψη νερού και δεν μπορούν να ικανοποιηθούν αυστηρές απαιτήσεις. Όλα αυτά οδηγούν σε δύο συμπεράσματα. Το πρώτο είναι η αναγκαιότητα πρόληψης και το δεύτερο η αναγκαιότητα επιστράτευσης νέων τεχνολογιών για ελαχιστοποίηση της ρύπανσης, για ανάπτυξη νέων μεθόδων χαμηλών εισροών και χρήσης υποβαθμισμένων ποιοτικά υδάτων μέσω διαφόρων μοντέλων πρόβλεψης.

Τα περισσότερα υπάρχοντα μοντέλα είναι προσανατολισμένα σε μια εξειδικευμένη διαδικασία όπως: α) μοντέλα για τη διήθηση (Bresler, 1975; Vogel and Hopmans, 1992; β) μοντέλα για την πρόσληψη νερού απ' τις ρίζες (Cardon and Letey, 1992a; Coelho and Dani, 1996) γ) μοντέλα για έκπλυση ή μεταφορά του νερού και των διαλυμένων ουσιών (Cardon and Letey, 1992b; Babajimopoulos et al., 1995; Vanclooster et al., 1996; Antonopoulos, 1997) ή δ) μοντέλα για συγκεκριμένες εφαρμογές, π.χ. κύριο αρδευτικό σύστημα, εδάφος ή καλλιέργεια (Noborio et al., 1996; Minhas and Gupta, 1993). Συνεπώς υπάρχει ανάγκη για μοντέλα σύνθετα τα οποία θα έχουν εφαρμογή για διαφορετικές καλλιέργειες, πρακτικές διαχείρισης του νερού και του αγρού. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να βαθμονομήσει ένα γενικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε από τον Ragab (2000) και εφαρμόστηκε σε καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας στην περιοχή της Λάρισας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή του πειράματος

Το αρδευτικό δίκτυο αποτελούνταν από τον κύριο αγωγό μεταφοράς από PE Φ90/6 Atm και από δευτερεύοντες αγωγούς PE Φ32/6 Atm. Οι σταλακτηφόροι σωλήνες άρδευσης είχαν ισαποχή 1,95 m, μήκος 30 m και ήταν τύπου PC2/Φ16 της εταιρείας Eurodrip με ενσωματωμένους σταλάκτες. Οι σταλάκτες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι ισαποχής 1 m, παροχής 3,8 L/h σε πίεση λειτουργίας από 0,5 έως 4,5 Atm, με διπλό μηχανισμό αυτοκαθαρισμού.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε πειραματικό αγρό του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη Λάρισα κατά το έτος 2011. Ο πειραματικός αγρός είχε έκταση 2400 m² (80 x 30) όπου έγινε σπορά βιομηχανικής τομάτας ποικιλίας Sandra (*Gossypium hirsutum*). Εφαρμόστηκαν τρία επίπεδα άρδευσης ίσα με το 100% (Α), το 75% (Β), και το 55% (Γ) της υδατοκατανάλωσης, σε τέσσερις επαναλήψεις. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε πλάτος 3 m (κάθετα στις γραμμές σποράς) και μήκος 5 m (παράλληλα στις γραμμές σποράς).

Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από κλιματικά δεδομένα του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού που υπήρχε στη θέση του πειράματος με τη μέθοδο Penman-Moethieth FAO 56. Καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου η εδαφική υγρασία καταγράφονταν με ένα πλήρες σύστημα μέτρησης και καταγραφής (DataLogger) της υγρασίας του εδαφικού προφίλ. Το σύστημα λειτουργούσε με αισθητήρα TDR (Decagon) και ηλεκτρονική μονάδα, PR2 και HH2 αντίστοιχα. Η καταγραφή της εδαφικής υγρασίας ξεκίνησε από τις 02/06/2011 οπότε εγκαταστάθηκαν οι αισθητήρες και πραγματοποιούνταν σε ημερήσια βάση με τη βοήθεια του οργάνου PR2 σε κάθε τεμάχιο μεταχείρισης. Ο αισθητήρας ήταν εγκατεστημένος στην τρίτη σειρά κάθε τεμαχίου, ανάμεσα σε δύο φυτά βιομηχανικής τομάτας ώστε να λαμβάνονται αντιπροσωπευτικές μετρήσεις της υγρασίας του εδαφικού προφίλ στη συνολική έκταση του τεμαχίου. Η ώρα μέτρησης ήταν πρωινή για τη διασφάλιση της ομοιογένειας των αποτελεσμάτων.

Από τις αναλύσεις του εδάφους και την ταξινόμηση που έγινε από το Ινστιτούτο χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας (IXTEΛ), φαίνεται ότι είναι αργιλώδες σε όλη την κατατομή του και ανήκει στην υποομάδα των Calcic Chromoxerert των Vertisol. Στο Πίνακα 1 δίδονται οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους.

Πίνακας 1. Φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους (Φ.Ε.Β.: φαινόμενο ειδικό βάρος, FC: υδατοϊκανότητα, PWP: σημείο μόνιμης μάρανσης, CEC: ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων).

Βάθος (cm)	Μηχανική σύσταση				Φ.Ε.Β. (g cm ⁻³)	FC (% v/v)	PWP (% v/v)
	Άμμος (%)	Ίλύς (%)	Άργιλος (%)	Εδαφικός τύπος			
0-30	32	22	46	C	1,24	40,01	27,35
30-60	33	19	48	C	1,30	41,03	28,52
60-90	33	18	49	C	1,43	41,58	29,10

Βάθος (cm)	CaCO ₃ (%)	pH (H ₂ O 1:1)	P-Olsen (ppm)	K-Εναλ. (meq 100g ⁻¹)	CEC (meq 100g ⁻¹)
0-30	0,73	7,9	27,8	0,99	41,87
30-60	0,24	7,2	11,3	0,78	47,07
60-90	0,57	7,5	8,8	0,78	46,49

Από κάθε επανάληψη του πειράματος συλλέχθηκε και ζυγίστηκε χωριστά για κάθε γραμμή η παραγωγή 10 φυτών. Η πυκνότητα φύτευσης ήταν 0,45 m x 1 m, όπου 0,45 m η απόσταση μεταξύ των γραμμών και 1 m η απόσταση μεταξύ των φυτών της ίδιας γραμμής σποράς.

Μετά τη σπορά της βιομηχανικής τομάτας έγινε άρδευση για το φύτερωμα της καλλιέργειας, με αυτοπροωθούμενο εκτοξευτήρα και δόση άρδευσης 20 mm. Στον Πίνακα 2, δίνονται ύψη άρδευσης καθώς και το συνολικό νερό (άρδευση+βροχή+άρδευση φυτρώματος) καθώς και η συγκομιζόμενη παραγωγή.

Πίνακας 2. Συνολικά ύψη άρδευσης και συνολικού νερού με την παραγωγή για κάθε μεταχείριση.

Επίπεδο άρδευσης	Άρδευση (mm)	Σύνολο νερού (mm)	Παραγωγή (tn/στρ.)
A	518,89	612,69	9,5
B	399,88	493,68	5,8
Γ	284,22	378,02	2,61

2.2. Περιγραφή του μοντέλου SALTMED

Το μοντέλο SALTMED περιλαμβάνει τις ακόλουθες διαδικασίες: υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής, πρόσληψη νερού, μεταφορά νερού και διαλυμένων ουσιών κάτω από διαφορετικά αρδευτικά συστήματα, στράγγιση και τη σχέση μεταξύ παραγωγής καλλιέργειας και χρήσης νερού.

Η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται με την εξίσωση Penman-Monteith σύμφωνα με την τροποποιημένη έκδοση του FAO-56, (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{(T + 273.1)} \right) \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

Όπου:

ET_0 είναι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε (mmd-1),

R_n είναι η καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια εδάφους σε (MJ m⁻² day⁻¹),

U_2 η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2m (m s⁻¹),

T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε ύψος 2m (οC),

G είναι η πυκνότητα ροής θερμότητας στο επιφανειακό έδαφος η οποία εκφράζεται σε (MJ m⁻² d⁻¹),

e_s η ημερήσια ή ωριαία πίεση κορεσμού υδρατμών σε (kPa), ενώ

e_a η μέση ημερήσια ή ωριαία πίεση υδρατμών ατμόσφαιρας σε (kPa),

Δ είναι η κλίση της καμπύλης της σχέσης πίεσης κορεσμού υδρατμών και θερμοκρασίας σε (kPa °C⁻¹),

γ είναι η ψυχομετρική σταθερά (kPa °C⁻¹).

Όταν υπάρχει έλλειψη μετεωρολογικών δεδομένων (θερμοκρασία, ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου κ.λπ.) η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς υπολογίζεται από τις μετρήσεις εξατμισομέτρου τύπου A. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c υπολογίζεται ως εξής:

$$ET_c = ET_r (K_{cb} + K_e) \quad (2)$$

Όπου: ET_r η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς, K_{cb} ο συντελεστής διαπνοής της καλλιέργειας και K_e ο συντελεστής εξάτμισης του εδάφους.

Η πρόσληψη νερού από τις ρίζες των φυτών στο μοντέλο SALTMED υπολογίζεται με τη σχέση των Cardon and Letey (1992a), η οποία προσδιορίζει τον ρυθμό πρόσληψης S (d⁻¹) ως εξής:

$$S(z,t) = \left[\frac{S_{\max}(t)}{1 + \left(\frac{a(t)h + \pi}{\pi_{50}(t)} \right)^3} \right] \lambda(z,t) \quad (3)$$

όπου:

$$\lambda(z) = 5/3L \text{ για } z < 0,2L \quad (4)$$

$$\lambda(z) = 25/12L \times (1-z/L) \text{ για } 0,2L < z < L \quad (4a)$$

$$\lambda(z) = 0,0 \text{ για } z > L \quad (4b)$$

όπου $S_{\max}(t)$ είναι η μέγιστη δυνατή πρόσληψη νερού απ' τις ρίζες σε χρόνο t , z είναι το κατακόρυφο βάθος (θετικό προς τα κάτω), $\lambda(z,t)$ είναι το κλάσμα της ολικής ριζικής μάζας που εξαρτάται από το βάθος και το χρόνο, L είναι το μέγιστο βάθος του ριζικού συστήματος, h είναι το φορτίο πίεσης του εδαφικού νερού, π είναι η οσμωτική πίεση, $\pi_{50}(t)$ είναι η τιμή της οσμωτικής πίεσης που εξαρτάται απ' το χρόνο όταν $S_{\max}(t)$ μειώνεται κατά 50% και $a(t)$ είναι ένας συντελεστής βαρύτητας ο οποίος εκφράζει την απόκριση της καλλιέργειας στην υδατική και οσμωτική καταπόνηση. Ο συντελεστής $a(t)$ ισούται με $\pi_{50}(t)/h_{50}(t)$ όπου $h_{50}(t)$ είναι το ύψος πίεσης όταν το $S_{\max}(t)$ μειώνεται κατά 50%.

Η μέγιστη πρόσληψη νερού $S_{\max}(t)$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{\max}(t) = ET_r(t) \times K_{cb}(t) \quad (5)$$

Το βάθος του ριζοστρώματος περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{Ριζικό βάθος}(t) = [\text{ριζικό βάθος}_{\min} + (\text{ριζικό βάθος}_{\max} - \text{ριζικό βάθος}_{\min})] \times K_c(t) / K_{c\max} \quad (6)$$

Το μέγιστο ριζικό βάθος είναι διαθέσιμο είτε από μετρήσεις είτε απ' τη βιβλιογραφία.

Η πραγματική παραγωγή ΑΥ δίνεται απλά από την εξίσωση:

$$AY = RY \times Y_{\max} \quad (7)$$

όπου Y_{\max} , η μέγιστη παραγωγή η οποία αναμένεται σε μια περιοχή υπό βέλτιστες συνθήκες και

$$RY = \frac{\sum S(x, z, t)}{\sum S_{\max}(x, z, t)} \quad (8)$$

2.2.1. Κίνηση νερού και διαλυτών ουσιών

Κυλινδρική ροή λαμβάνει χώρα κατά την άρδευση με σταγόνα (ροή από σταλακτήρα). Για σταθερά ισότροπα και ομογενή πορώδη μέσα, η δισδιάστατη ροή του νερού στο έδαφος περιγράφεται σύμφωνα με τον Bresler (1975) από την εξίσωση:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial (\psi + z)}{\partial z} \right] \quad (9)$$

όπου: x η οριζόντια συντεταγμένη, z είναι η κατακόρυφη συντεταγμένη (θετικό προς τα κάτω), $K(\theta)$ η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα, θ η εδαφική υγρασία, t ο χρόνος, ψ το ύψος πίεσης του εδαφικού νερού.

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων απαιτούνται δυο σχέσεις του εδαφικού νερού δηλαδή, η δυναμική σχέση εδαφικής υγρασίας-πίεσης εδαφικού νερού και η δυναμική σχέση πίεσης εδαφικού νερού-υδραυλικής αγωγιμότητας. Αυτές περιγράφονται από τις σχέσεις του Van Genuchten (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a|h|)^n]^m} \quad (10)$$

Όπου:

θ είναι η κατ' όγκο εδαφική υγρασία ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

h είναι το ύψος πίεσης (cm),

θ_s είναι η εδαφική υγρασία στον κορεσμό ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$),

θ_r είναι η υπολειμματική υγρασία ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $a(\text{cm}^{-1})$,

n και m (αδιάστατες) είναι εμπειρικές παράμετροι προσαρμογής που καθορίζουν τη μορφή της καμπύλης.

Για να αποφευχθεί μείωση της παραγωγής, όταν η συγκέντρωση των αλάτων ξεπεράσει τα όρια αντοχής, τα πλεονάζοντα άλατα πρέπει να εκπλυθούν κάτω απ' τη ριζική ζώνη με ελεύθερη στράγγιση. Το μοντέλο υπολογίζει τις απαιτήσεις έκπλυσης (LR).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με τη χρήση 100% καθαρού νερού σε καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας σε αγρό του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη Λάρισα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα πάρθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό που υπήρχε στη θέση του πειράματος. Το μοντέλο δέχεται τα αρχεία εισαγωγής δεδομένων σε μορφή (Excel), όπως το αρχείο των κλιματικών δεδομένων και το αρχείο άρδευσης το οποίο περιέχει μετρήσεις αγρού, όπως δόση άρδευσης και διάρκεια άρδευσης για κάθε μεταχείριση.

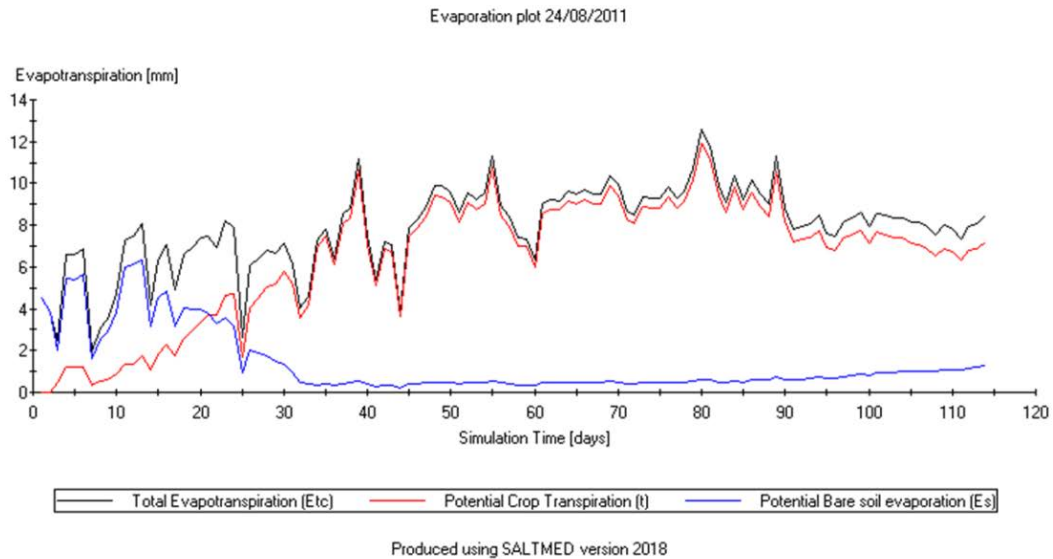
Οι φυτικοί συντελεστές K_c και K_{cb} αντίστοιχα, για το στάδιο (1), διάρκειας 35 ημερών είχαν την τιμή 0,6 και 0,18, κατά το στάδιο (2) διάρκειας 45 ημερών αυξανόνταν γραμμικά από 0,6 έως 1,15 και από 0,18 έως 1,1, κατά το στάδιο (3) διάρκειας 70 ημερών ήταν 1,15 και 1,1 και τέλος κατά το στάδιο (4) διάρκειας 30 ημερών μειώνονταν γραμμικά από 1,15 έως 0,8 και από 1,1 έως 0,7.

Οι παράμετροι της καλλιέργειας όπως το μέγιστο ύψος φυτού ήταν 0,7m, το ελάχιστο και μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος ήταν 0,5 και 1,0 m αντίστοιχα. Τα δεδομένα αυτά βρίσκονται στην δυναμική ηλεκτρονική βάση του μοντέλου και για την εφαρμογή τους γίνεται μόνο επιλογή της καλλιέργειας.

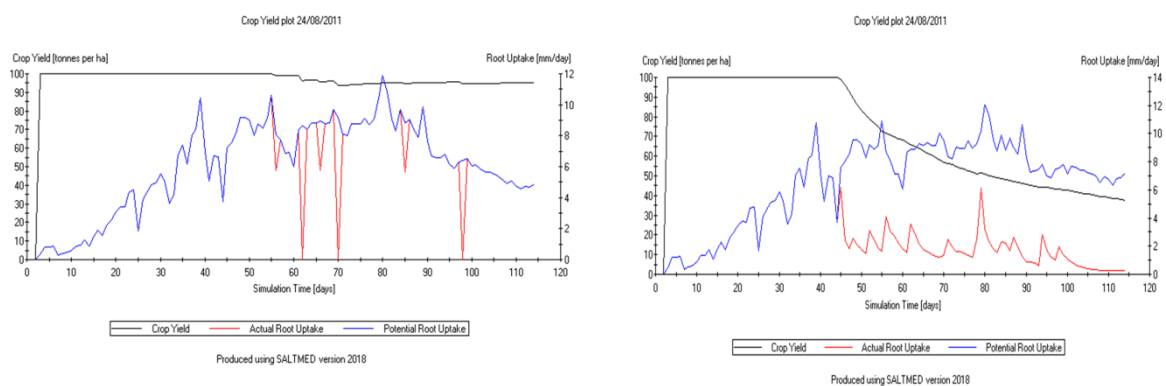
Ο προσδιορισμός της μηχανικής σύστασης έγινε με τη μέθοδο Βουγιούκου, της αρχικής περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας με τη σταθμική μέθοδο στο εργαστήριο, και οι υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους, όπως η χαρακτηριστική καμπύλη με τη συσκευή πίεσεως στο εργαστήριο και η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα μετρήθηκε με τη χρήση του οργάνου (Guelph Permeameter) στον αγρό. Από αυτή με τη βοήθεια του προγράμματος RETC (Van Genuchten 1991) προσδιορίστηκαν οι παράμετροι όπως η υπολειμματική υγρασία θ_r και η υγρασία στο κορεσμό θ_s . Η τιμή του bubbling pressure χρησιμοποιήθηκε από τη βάση δεδομένων του προγράμματος για αργιλώδες έδαφος και ήταν 37,3 cm. Οι μετρήσεις της κατ' όγκο υγρασίας έγιναν με αισθητήρες Decagon οι οποίοι λειτουργούν με τη μέθοδο TDR.

Στο Σχήμα 1, φαίνεται η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, η διαπνοή και εξάτμιση από γυμνό έδαφος καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο κατά το έτος 2011. Στο διάγραμμα του Σχήματος 2, φαίνεται η υπολογισμένη από το μοντέλο παραγωγή βιομηχανικής τομάτας κατά την μεταχείριση του 100% και 75% εφαρμοζόμενου νερού καθώς και η πραγματική και η δυναμική πρόσληψη νερού από τις ρίζες των φυτών αντίστοιχα. Η υδατική καταπόνηση που δείχνει το Σχήμα 2 μετά την 60^η ημέρα, οφείλεται στην έλλειψη νερού τη συγκεκριμένη ημέρα.

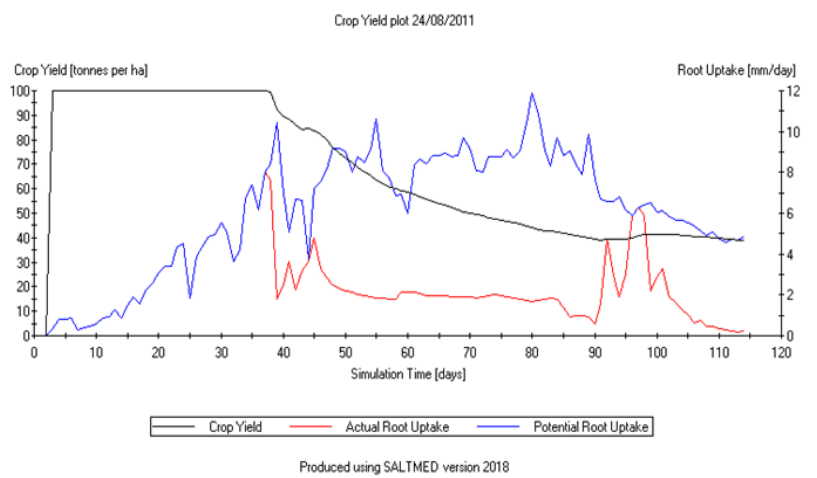
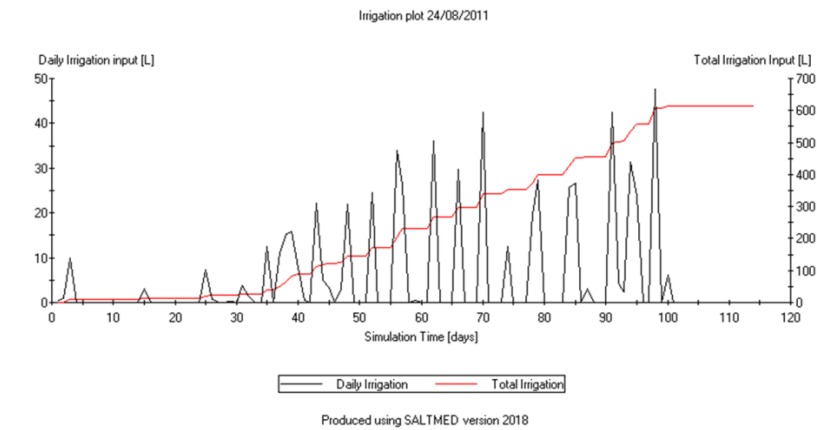
Οι αρδεύσεις γινόταν με τη χρήση του προγραμματιστή άρδευσης μετά την εξάντληση της οφέλιμης υγρασίας όπως δείχνει το Σχήμα 3.



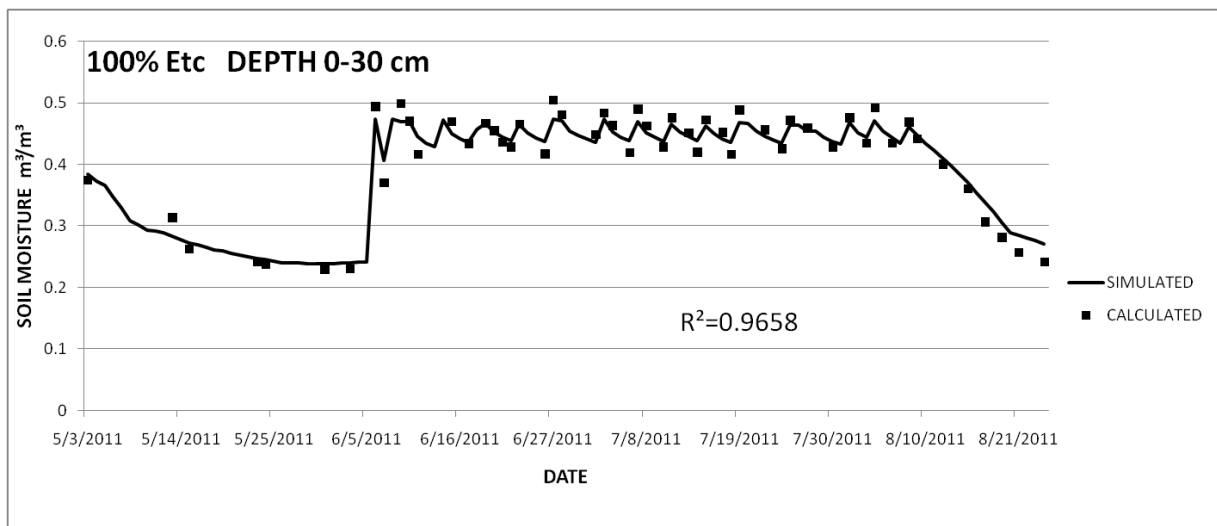
Σχήμα 1. Εξατμισοδιαπνοή, διαπνοή της καλλιέργειας και εξάτμιση από γυμνό έδαφος.



Σχήμα 2. Υπολογισμένη παραγωγή βιομηχανικής τομάτας κατά το έτος 2011 για τις μεταχειρίσεις του 100% και 75% της ETc αντίστοιχα.



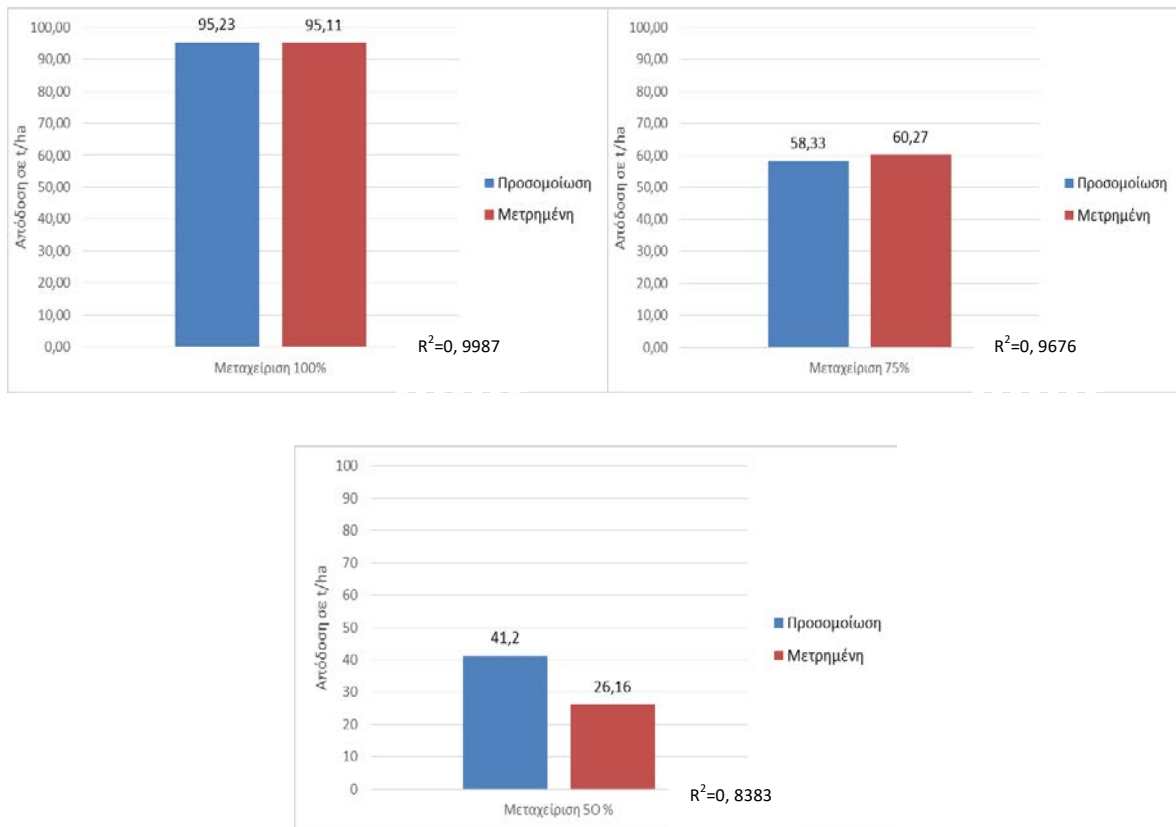
Σχήμα 3. Συνολικός όγκος νερού κατά το έτος 2011 για την μεταχείριση του 100% της ETc.



Σχήμα 4. Γραφική αναπαράσταση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών εδαφικής υγρασίας.

Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα κατά την διάρκεια της εφαρμογής του να απεικονίζει γραφικά τα προφίλ της εδαφικής υγρασίας σε διαφορετικές αποστάσεις από τον σταλάκτη σε ημερήσιο βήμα. Στο Σχήμα 4, φαίνεται η γραφική αναπαράσταση της εδαφικής υγρασίας στη θέση του σταλάκτη σε βάθος 0 cm έως 30 cm με τις μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της εδαφικής υγρασίας πριν και μετά την άρδευση με πολύ ικανοποιητική προσέγγιση.

Οι υπολογισμένες τιμές παραγωγής βιομηχανικής τομάτας από το μοντέλο δεν αποκλίνουν από τις μετρημένες σε όλα τα επίπεδα άρδευσης όπως δείχνει η σύγκριση του Σχήματος 5.



Σχήμα 5. Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών παραγωγής σε t/ha (πάνω αριστερά για τη μεταχείριση (Α) με 100% της υδατοκατανάλωσης, πάνω δεξιά για τη μεταχείριση (Β) με 75% της υδατοκατανάλωσης και κάτω για τη μεταχείριση (Γ) με 50% της υδατοκατανάλωσης).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε πρώτη φάση το μοντέλο SALTMED βαθμονομήθηκε με τη χρήση δεδομένων από πειραματικό αγρό καλλιέργειας βιομηχανικής τομάτας σε αργιλώδες έδαφος του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη Λάρισα για το έτος 2011, εφαρμόζοντας διαφορετικά επίπεδα καθαρού νερού σε σύστημα στάγδην άρδευσης.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έδειξε καλή εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας και της παραγωγής βιομηχανικής τομάτας σε σύστημα στάγδην άρδευσης.

Το μαθηματικό μοντέλο SALTMED περιγράφει ικανοποιητικά την επίδραση του συστήματος άρδευσης στο υδατικό ισοζύγιο του εδάφους, γεγονός που το κάνει ένα αποτελεσματικό εργαλείο στην πρακτική διαχείρισης του αρδευτικού νερού.

Μια επόμενη εργασία θα εμφανίσει τα αποτελέσματα λειτουργίας του μοντέλου χρησιμοποιώντας δεδομένα από καλλιέργειες αρδευόμενες με αλατούχο νερό και διαφορετικά συστήματα άρδευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, Rome.
- Αλεξίου Ι., Καλφούντζος Δ., Κωτσόπουλος Σ., Βύρλας Π., Καμπέλης Σ. 2003. Σύγκριση της υποεπιφανειακής και της επιφανειακής στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια βαμβακιού. 9ο Πανελλήνιο Συνέδριο, Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης Θεσσαλονίκη, Πρακτικά τεύχος Α σελ. 199-206.
- Antonopoulos V. Z., 1997. *Simulation of soil moisture dynamics on irrigated cotton in semi-arid climates*. Agr. Water. Manag. 34, 233-246.
- Babatjimosoylos, C., Budina, A., Kalfountzos, D., 1995. SWBACROS: A model for the estimation of the water balance of cropped soil. Environ.. Soft. 10(3), 211-220.
- Bresler, E., 1975. *Two –dimensional transport of solute during non-steady infiltration for trickle source*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39, 604-613.
- Cardon, E.G., Letey, J., 1992a. *Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models*. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1876-1880.
- Cardon, E.G., Letey, J., 1992b. *Soil-based irrigation and salinity management models: II, water and solute movement calculations*. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1887-1892.
- Coelho, F. E., Dani, Oe., 1996. *A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation*. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 1039-1049.
- Dioudis, P., Filintas, Ag.Th., Papadopoulos, A.H., 2008. *Corn yield in response to irrigation interval and the resultant savings in water and other overheads*, Irrigation and Drainage J., DOI: 10.1002/ird.395, pp.9.
- Minhas, P.S., Gupta, R.K., 1993. *Conjunctive use of saline and non saline waters, II. Validation and application of a transient model for wheat*. Agric. Water Manag. 23 149-160
- Noborio, K., McInnes, K.J. Heilman, J.L., 1996. *Two dimensional model for water, heat, and solute transport in furrow-irrigated soil: I Theory*. SoilSci. Soc. Am. J. 60, 1001-1009.

- Κωτσόπουλος Σ., Αλεξίου Ι., Καλφούντζος Δ., και Βύρλας Π. 2001. *Σχέσεις νερού και παραγωγής βαμβακιού σε περιοχές της Θεσσαλίας*. 4ο Εθνικό Συνέδριο ΕΕΔΥΠ Βόλος, Πρακτικά Τεύχος Α' σελ. 177-182.
- Ragab, R., 2002. *A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model*. Environ. Mod. &Soft. 17 345-361.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Τέντας Ι., Κολιού Α., Καλφούντζος Δ., Παπανίκος Ν. 2003. *Άρδευση πρασίνου με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα*. 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, Πρακτικά τεύχος Α' σελ. 265-272.
- Vanclooster M., Viaene P., Christiaens and Ducheyne S., 1996. *A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment (WAVE)*. Reference and user's manual.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., (44):892-898.
- Van Genuchten, M.Th., Leij F. J. and Yates S. R., 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. U.S. Environmental Protection Agency, Oklahoma.
- Vogel, T., Hopmans, J.W., 1992. *Two-dimensional analysis of furrow infiltration*. J. Irrigation Drainage Eng. 118, 791-806.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Γ. Κάργας, Ε. Ευθυμίου, Π. Λόντρα & Κ. Σούλης

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι κατατομές υγρασίας που αναπτύχθηκαν σε ένα πηλώδες έδαφος στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις στην ανώτερη εδαφική του στρώση. Στην πρώτη μεταχείριση, στο έδαφος έγινε χημική καταπολέμηση της φυσικής βλάστησης και παρέμεινε γυμνό (NT), στη δεύτερη μεταχείριση η φυσική βλάστηση αναπτύχθηκε ελεύθερα (NV), ενώ στην τρίτη μεταχείριση τα ζιζάνια κόβονταν μέχρι το ύψος των 5-10 cm και το κομμένο τμήμα παρέμενε στο έδαφος (KM). Η εξέταση των κατατομών υγρασίας μέχρι το βάθος των 60 cm έδειξε ότι κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου μελέτης (11/10/2017 έως 13/3/2018) περισσότερο νερό αποθηκεύτηκε στο έδαφος που δέχτηκε τις μεταχειρίσεις KM και NT (67.4 και 70.99 mm, αντίστοιχα), και λιγότερο στη NV μεταχείριση (39.9 mm). Την ίδια περίοδο καταγράφηκε ύψος βροχόπτωσης 274.2 mm. Κατά συνέπεια, στην εδαφική κατατομή αποθηκεύθηκε το 24.5%, 25.8% και 14.5% της βροχόπτωσης για τις KM, NT και NV μεταχειρίσεις, αντίστοιχα.

Λέξεις κλειδιά: καλλιεργητικές μεταχειρίσεις, διήθηση, εξατμισοδιαπνοή

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE UPPER SOIL LAYER WATER BALANCE

G. Kargas, E. Efthimiou, P. Londra & K.Soulis

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

ABSTRACT

In the present study, soil moisture profiles developed on the upper soil layer of a loam soil, under three different cultivation treatments, were examined. In the first treatment, weeds were chemically controlled and the soil remained bare (NT), in the second treatment weeds grew freely (NV), and in the third treatment weeds were cut to a height of 5-10 cm and cuttings remained on the soil surface (KM). The examination of soil moisture profiles to a depth of 60 cm, showed that during the wet period examined (11/10/2017 to 13/3/2018) more water was stored in the KM and NT soil treatments (67.4 and 70.99 mm, respectively) and less in the NV treatment (39.9 mm). During the same period a rainfall height of 274.2 mm was recorded. Consequently, 24.5%, 25.8% and 14.5% of the rainfall for the KM, NT and NV treatments were stored in the soil profile, respectively.

Keywords: cultivation treatments, infiltration, evapotranspiration

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διάφορες καλλιεργητικές επεμβάσεις στην επιφανειακή εδαφική στρώση μπορεί να μεταβάλλουν σημαντικά τις υδραυλικές ιδιότητές της. Η μεταβολή των υδραυλικών ιδιοτήτων της ανώτερης εδαφικής στρώσης επηρεάζει την ανάπτυξη των κατατομών υγρασίας λόγω της άρδευσης ή βροχόπτωσης, την επιφανειακή απορροή και τελικά την ανάπτυξη των φυτών.

Η μελέτη των υδραυλικών ιδιοτήτων του επιφανειακού εδαφικού στρώματος είναι σημαντική, δεδομένου ότι αυτές ρυθμίζουν την είσοδο του αρδευτικού ή του νερού της βροχής στο έδαφος, αλλά και την απορροή του όταν η ένταση βροχόπτωσης υπερβαίνει τις δυνατότητες διήθησης του εδάφους. Οποιαδήποτε διαταραχή αυτού του στρώματος μπορεί να επηρεάσει τις υδραυλικές ιδιότητές του, αλλά και τη συμπεριφορά του σε μεταγενέστερα στάδια.

Ειδικά στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές, στις οποίες το νερό είναι πολύ περιορισμένος φυσικός πόρος, οι μεταβολές των υδραυλικών ιδιοτήτων της επιφανειακής στρώσης, λόγω των φθινοπωρινών καλλιεργητικών επεμβάσεων, μπορεί να επηρεάσουν τον όγκο του νερού των χειμερινών βροχοπτώσεων ο οποίος διηθείται και ανακατανέμεται στο έδαφος. Σε αυτές τις περιοχές, η αύξηση του αποθηκευμένου νερού στην εδαφική κατατομή μπορεί να βοηθήσει την ικανοποιητική ανάπτυξη των φθινοπωρινών καλλιεργειών ή να μειώσει τις απαιτήσεις σε άρδευση στις ανοιξιάτικες αρδευόμενες καλλιέργειες.

Οι Moret et al. (2006) μελέτησαν την επίδραση τριών διαφορετικών καλλιεργητικών μεταχειρίσεων στην αποθήκευση του νερού της βροχής στο έδαφος σε μια ημίξηρη περιοχή της Ισπανίας κατά την περίοδο της αγρανάπαυσης, που διήρκεσε 16-18 μήνες. Αποδείχθηκε ότι, ανεξάρτητα από το είδος της μεταχείρισης δεν υπάρχει κέρδος στο αποθηκευμένο νερό και στην αποτελεσματικότητα της βροχόπτωσης για όλη την περίοδο της αγρανάπαυσης. Η αποτελεσματικότητα της βροχόπτωσης ήταν 11% σε όλη την περίοδο. Όμως, στις διάφορες υποπεριόδους της αγρανάπαυσης μπορεί να εμφανιστεί διαφορετική συμπεριφορά. Επίσης, παρατήρησαν ότι η αποθήκευση αυξάνεται όταν η ένταση της βροχής είναι μεγαλύτερη από 10 mm/ημέρα.

Οι Ziyou et al. (2007) διερεύνησαν την επίδραση τεσσάρων διαφορετικών καλλιεργητικών μεταχειρίσεων στην αποθήκευση νερού μέχρι το βάθος των 200 cm κατά την περίοδο της καλοκαιρινής αγρανάπαυσης μετά την καλλιέργεια σιτηρών. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η μεταχείριση, η οποία περιλαμβάνει απόθεση φυτικών υπολειμμάτων χωρίς όργωμα, επιφέρει μεγαλύτερη αύξηση της ποσότητας του αποθηκευμένου νερού συγκριτικά με τις άλλες μεταχειρίσεις. Επίσης, η ποσότητα του αποθηκευμένου νερού κατά τη διάρκεια της αγρανάπαυσης μεταβάλλεται από έτος σε έτος εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης, καθώς και τις καλλιεργητικές μεταχειρίσεις.

Οι Kargas et al. (2016) παρακολούθησαν τις χρονικές μεταβολές των υδραυλικών ιδιοτήτων του επιφανειακού στρώματος ενός εδάφους υπό τρεις διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις: α) το έδαφος οργώθηκε και διατηρήθηκε γυμνό (RT), το έδαφος δεν οργώθηκε και διατηρήθηκε γυμνό (NT) και το έδαφος δεν οργώθηκε, αλλά καλυπτόταν από ζιζάνια (NV). Αξιοσημείωτες μεταβολές της K_s με την πάροδο του χρόνου εντοπίστηκαν για τις μεταχειρίσεις RT και NT, με τις ελάχιστες τιμές να επικρατούν κατά τη διάρκεια των βροχών και τις μέγιστες κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων. Αντίθετα, η K_s στη μεταχείριση NV μεταβλήθηκε ελάχιστα μεταξύ των δύο περιόδων (ξηρή και υγρή), αν και οι μικρότερες τιμές μετρήθηκαν πάλι κατά τη διάρκεια της περιόδου των βροχών, η οποία ωστόσο ήταν περίπου δύο φορές μεγαλύτερη από εκείνες των μεταχειρίσεις για RT και NT. Οι κατανομές του μεγέθους των πόρων, που προέκυψαν από την ΧΚΥ του εδάφους, παρουσίασαν αξιόλογη μεταβολή, ιδίως στην περίπτωση των πόρων που αντιστοιχούν σε εύρος πίεσης από τον κορεσμό μέχρι τα -60 cm στήλης νερού. Η μεταβολή των τιμών της K_s που μετρήθηκαν θα μπορούσε να σχετιζόταν με τις αλλαγές κατανομής του μεγέθους των πόρων που παρατηρήθηκαν. Επίσης, σημαντικές διαφορές του αποθηκευμένου νερού της βροχής

καταγράφηκαν, όπου στις μεταχειρίσεις NV το ποσό του νερού που αποθηκεύτηκε ήταν σχεδόν διπλάσιο από τις μεταχειρίσεις RT και NT.

Σκοπός της εργασίας είναι να παρακολουθήσουμε τη μεταβολή στα προφίλ της εδαφικής υγρασίας κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων του χειμώνα. Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν οι κατατομές υγρασίας μέχρι το βάθος των 60 cm σε ένα πηλώδες έδαφος στο οποίο έχουν πραγματοποιηθεί τρεις τύποι πειραματικών επεμβάσεων. Το πείραμα διήρκησε από τις 11/10/2017 έως τις 13/3/2018.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Πειραματικά τεμάχια

Στην παρούσα ερευνητική εργασία εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις σε οκτώ πειραματικά τεμάχια διαστάσεων 5x5 m². Κατά την περίοδο 2017-2018, στα πειραματικά τεμάχια A και B αφέθηκε να αναπτυχθεί ελεύθερα η φυσική βλάστηση (NV), στα τεμάχια C και D έγινε χημική καταπολέμηση των ζιζανίων και παρέμειναν γυμνά καθ' όλη την πειραματική περίοδο (NT), ενώ στα τεμάχια E, F, G, H τα ζιζάνια κόβονταν μέχρι το ύψος των 5-10 cm και το κομμένο τμήμα παρέμενε στο έδαφος (KM). Στο κέντρο κάθε τεμαχίου τοποθετήθηκε πλαστικός σωλήνας μήκους 1 m για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας σε όλο το βάθος της κατατομής με τη βοήθεια της διηλεκτρικής συσκευής PR2. Για τη μέτρηση της επιφανειακής υγρασίας χρησιμοποιήθηκε η διηλεκτρική συσκευή ML2. Από όλα τα πειραματικά αγροτεμάχια λαμβάνονταν μετρήσεις της κατ' όγκον υγρασίας κάθε εβδομάδα και έκτακτα όταν υπήρχαν φαινόμενα βροχοπτώσεων. Τα ύψη βροχόπτωσης καταγράφηκαν από βροχογράφο που είναι εγκατεστημένος στον πειραματικό αγρό. Οι μετρήσεις αφορούν στο διάστημα από 11/10/2017 ως 13/3/2018.

2.2 Συσκευή μέτρησης της εδαφικής υγρασίας PR2

Η συσκευή PR2 (Delta –T Device Ltd, User manual for the Profile probe, 2008) μετρά την εδαφική υγρασία (θ) σε καθορισμένα βάθη του εδάφους. Για τη μέτρηση της θ η συσκευή εισάγεται σε σωλήνα ο οποίος έχει τοποθετηθεί μόνιμα στο έδαφος στο κέντρο κάθε πειραματικού τεμαχίου. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν με τη βοήθεια της φορητής συσκευής HH2.

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

$$\sqrt{\epsilon} = 1.125 - 5.536V + 67.17V^2 - 234.42V^3 + 413.56V^4 - 356.68V^5 + 121.53V^6 \quad (1)$$

υπολογίζεται η διηλεκτρική σταθερά.

Η θ προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$\theta = \frac{\sqrt{\epsilon} - \alpha_0}{\alpha_1} \quad (2)$$

Στην περίπτωση της εργοστασιακής βαθμονόμησης, οι τιμές των α_0 και α_1 δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων α_0 και α_1 .

Τύπος εδάφους	α_0	α_1
Ανόργανα εδάφη	1.6	8.4
Οργανικά εδάφη	1.3	7.7

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι προτεινόμενες τιμές, το σφάλμα υπολογισμού της θ μπορεί να είναι $\pm 0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Εάν απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της θ τότε χρειάζεται να γίνει ειδική βαθμονόμηση της συσκευής στο συγκεκριμένο έδαφος. Η ειδική βαθμονόμηση είναι αναγκαία στα βαριά αργιλώδη εδάφη, στα πολύ οργανικά ή σε ειδικές κατηγορίες π.χ εδάφη που παρουσιάζουν έντονες μαγνητικές ιδιότητες (Kargas and Kerkides, 2008).

2.3 Συσκευή μέτρησης της εδαφικής υγρασίας ML2

Η συσκευή ML2 (ThetaProbe Soil moisture sensor Type ML2 user manual, 1999) μετρά την κατ' όγκον υγρασία του εδάφους και χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της επιφανειακής υγρασίας.

Η σχέση της διηλεκτρικής σταθεράς με τα Volts που δίνει η συσκευή εκφράζεται από την εξίσωση

$$\sqrt{\epsilon} = 1.07 + 6.4V - 6.4V^2 + 4.7V^3 \quad (R^2 = 0.998) \quad (3)$$

Εκτός ορισμένων περιπτώσεων που απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια, η συσκευή δε χρειάζεται βαθμονόμηση, καθώς, το πειραματικό σφάλμα είναι της τάξεως των $\pm 0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Οι συντελεστές εργοστασιακής βαθμονόμησης της συσκευής για τον υπολογισμό της θ από την εξίσωση (2) για τα ανόργανα εδάφη δίνονται στον Πίνακα 1.

2.4 Υπολογισμός του ύψους νερού της εδαφικής κατατομής

Για τον υπολογισμό του ύψους νερού της εδαφικής κατατομής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του τραπεζίου

$$\int_a^b \theta dz = \frac{b-a}{2v} [\theta(\alpha) + 2\theta(n_1) + 2\theta(n_2) + \dots + 2\theta(n_{n-1}) + \theta(b)] \quad (4)$$

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

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Χαρακτηριστικά βροχοπτώσεων

Οι συνολικές βροχοπτώσεις κατά την πειραματική περίοδο (11/10/2017 -13/3/2018) ήταν 274.2mm.

Πίνακας 2. Ύψη βροχόπτωσης κατά την περίοδο μελέτης 11/10/2017 -13/3/2018.

Μήνας	Ύψος νερού (mm)
Οκτώβριος	5.0
Νοέμβριος	118.6
Δεκέμβριος	26.6
Ιανουάριος	52.8
Φεβρουάριος	69.8
Μάρτιος	1.4
Σύνολο	274.2

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου παρατηρήθηκαν συνολικά 57 ημέρες βροχοπτώσεων. Από το σύνολο των βροχερών ημερών, μόνο 10 ημέρες παρουσίασαν τιμές αποτελεσματικής βροχόπτωσης με πάνω από 10 mm/ημέρα (Moret and Arrue, 2007). Το συνολικό ύψος βροχόπτωσης που αντιστοιχεί σε αυτές τις ημέρες ήταν 195.2 mm. Τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Φεβρουάριο καταγράφηκαν οι περισσότερες ημέρες βροχόπτωσης (14, 13 και 14 ημέρες, αντίστοιχα). Αυτούς τους μήνες τα ύψη βροχόπτωσης ήταν 118.6 mm, 26.6 mm και 69.8

mm, αντίστοιχα. Όσον αφορά στην κατανομή της βροχόπτωσης, τα ύψη βροχής για τον μήνα Νοέμβριο έπεσαν κυρίως σε 4 ημέρες (13,16,17 και 19/11) με συνολικό ύψος 104.2 mm, για τον μήνα Δεκέμβριο σε 2 ημέρες (22 και 29/12) με συνολικό ύψος βροχόπτωσης 19.4 mm και τον Φεβρουάριο σε 4 ημέρες (10,15,24 και 26/2), με συνολικό ύψος βροχόπτωσης 53.6 mm. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρ' όλο που τον μήνα Ιανουάριο καταγράφηκαν 11 ημέρες βροχόπτωσης και τον μήνα Δεκέμβριο 13 ημέρες, το ύψος βροχόπτωσης ήταν σχεδόν διπλάσιο τον Ιανουάριο (52.8 mm) σε σχέση με τον Δεκέμβριο (26.6 mm). Οι μεγαλύτερες εντάσεις βροχόπτωσης παρατηρήθηκαν στις 16/11/2017 και 17/11/2017 με τιμές 46.8 και 52.82 mm/h, αντίστοιχα. Από δεδομένα προηγούμενων εργασιών, όπου μετρήθηκε η K_s στον ίδιο πειραματικό αγρό στις μεταχειρίσεις NT και NV, φαίνεται ότι η ένταση της βροχόπτωσης δεν υπερβαίνει την τιμή της K_s παρά μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις στην NT μεταχείριση (Kargas et al., 2016). Η τιμή της K_s στην NT μεταχείριση κυμάνθηκε από 36 έως 138 mm/h, ενώ στην NV η μέση K_s ήταν 150 mm/h. Συνεπώς, μπορούμε να υποθέσουμε αξιόπιστα ότι η επιφανειακή απορροή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

3.2. Ύψος αποθηκευμένου νερού

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται το ύψος του αποθηκευμένου νερού στην εδαφική κατατομή κατά την έναρξη και στο τέλος της υγρής περιόδου, καθώς και στις 23/1/2018 (περίπου στο μέσο της περιόδου). Παρουσιάζονται, επίσης, τα ύψη βροχόπτωσης που καταγράφηκαν στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα (11/10/2017 έως 23/1/2018) και (23/1/2018 έως 13/3/2018).

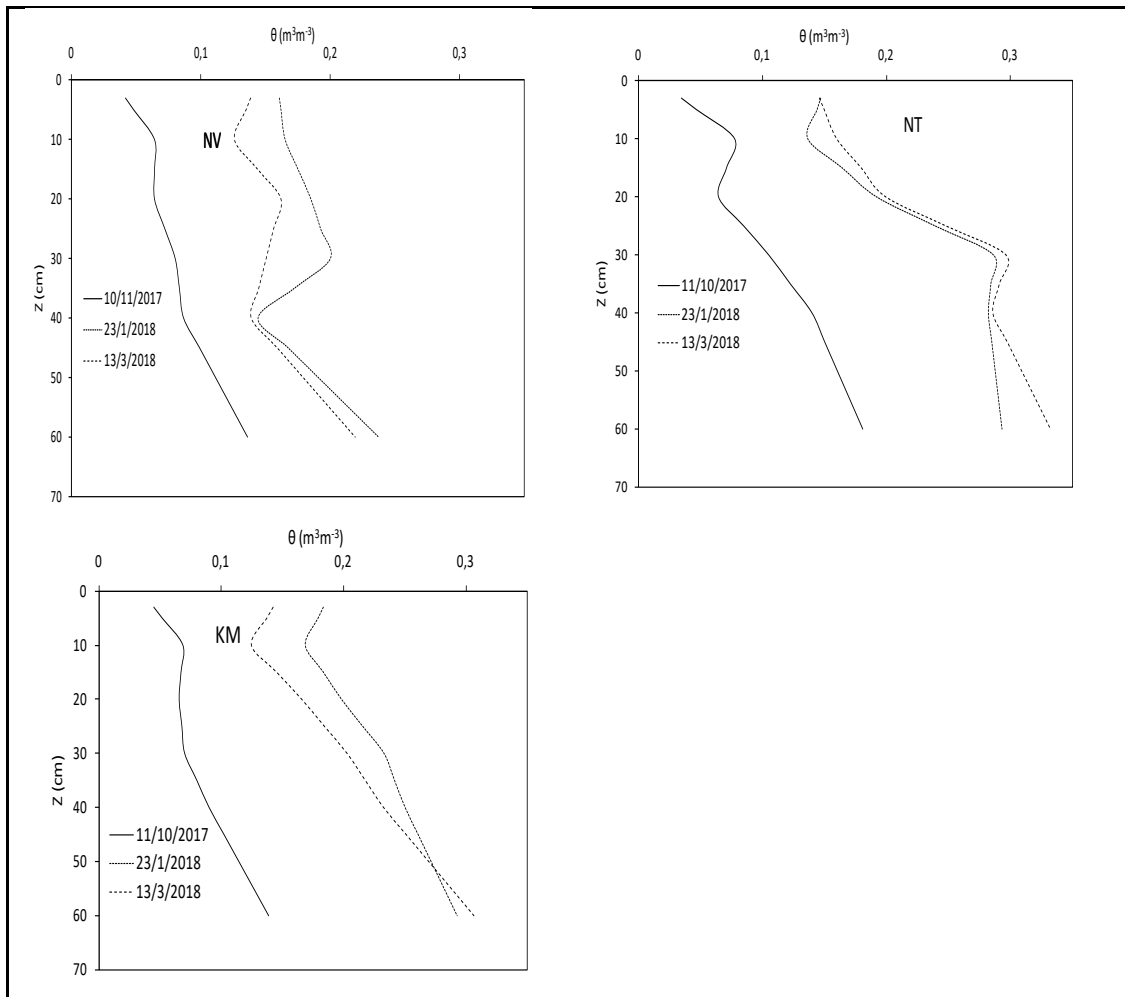
Πίνακας 3. Ύψος νερού σε mm στην εδαφική κατατομή στις 11/10/2017, 23/1/2018 και 13/3/2018 σε κάθε πειραματικό τεμάχιο, καθώς και οι μέσοι όροι κάθε μεταχείρισης.

Πειραματικό τεμάχιο	11/10/2017	23/1/2018	13/3/2018	Διαφορές 11/10/17-13/3/18
A	42.09	89.83	81.53	
B	51.86	119.20	92.22	
Μέσος όρος	46.97	104.51	86.87	39.90
C	74.10	132.90	142.30	
D	51.97	141.72	140.70	
Μέσος όρος	65.65	133.37	136.64	70.99
E	50.03	133.91	121.19	
F	48.84	126.45	111.69	
G	43.46	125.75	114.85	
H	48.40	121.64	112.84	
Μέσος όρος	47.68	126.93	115.14	67.46
Ύψος βροχόπτωσης (mm)		200.40	73.80	

Από τα αποτελέσματα (Πίνακας 3) φαίνεται ότι κατά μέσο όρο στα πειραματικά τεμάχια της NV μεταχείρισης (A,B) αποθηκεύτηκαν κατά την υγρή περίοδο 39.9 mm νερού ή 14.5% της συνολικής βροχόπτωσης της περιόδου. Την ίδια χρονική περίοδο κατά μέσο όρο στα τεμάχια NT (C,D) αποθηκεύτηκαν 70.99 mm νερού, δηλαδή ποσοστό 25.8% της συνολικής βροχόπτωσης της αντίστοιχης περιόδου. Στα πειραματικά τεμάχια της KM μεταχείρισης (E,F,G,H) αποθηκεύτηκαν κατά την υγρή περίοδο 67.46 mm νερού, ποσοστό 24.6% της συνολικής βροχόπτωσης της περιόδου. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι στις μεταχειρίσεις NT και KM αποθηκεύτηκε το μεγαλύτερο ύψος νερού της βροχής, περίπου 25%, ενώ στη μεταχείριση NV αποθηκεύτηκε περίπου 15%. Πρέπει να σημειωθεί ότι μετά από τις 23/1/2018 και έως 13/3/2018, παρότι καταγράφηκε ύψος βροχόπτωσης

73.8 mm, στις μεταχειρίσεις NV και KM παρατηρήθηκε μείωση στην αποθήκευση νερού στην εδαφική κατατομή, ενώ στη μεταχείριση NT η αποθήκευση νερού ήταν σχεδόν ίδια. Ειδικότερα, οι απώλειες στην NV ήταν μεγαλύτερες από την KM. Πιθανότατα, οι μεγαλύτερες απώλειες να σχετίζονται με τη μεγαλύτερη εξατμισοδιαπνοή λόγω της ύπαρξης ζιζανίων.

Στο Σχήμα 1 δίνονται οι κατατομές υγρασίας στην αρχή και στο τέλος της υγρής περιόδου, καθώς και στις 23/1/2018.



Σχήμα 1. Οι μέσοι όροι των κατατομών υγρασίας για τις τρεις μεταχειρίσεις σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Από το Σχήμα 1 φαίνεται ότι στις 11/10/2017 όλες οι μεταχειρίσεις έχουν κατατομές υγρασίας με τιμές θ μικρότερες από $0.16 \text{ m}^3/\text{m}^3$, ενώ στις 13/3/2018 οι μεταχειρίσεις NT και KM έχουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές θ συγκριτικά με τη NV για βάθος μεταξύ 20 και 60 cm.

Για καλύτερη διερεύνηση του όλου φαινομένου εξετάστηκαν οι κατατομές υγρασίας όλων των μεταχειρίσεων στις 7/11 και 18/11, δηλαδή για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Στο διάστημα μεταξύ των δύο αυτών ημερομηνιών, το ύψος βροχόπτωσης ήταν 95.4 mm, το οποίο αποτελεί το 35% της συνολικής βροχόπτωσης από 11/11/2017 έως 13/3/2018. Ειδικότερα, στο διάστημα αυτό παρατηρήθηκαν και οι μεγαλύτερες εντάσεις βροχόπτωσης που προαναφέρθηκαν. Από την εξέταση αυτή προέκυψε ότι η αποθήκευση νερού στις τρεις μεταχειρίσεις ήταν: $KM=88.3 \text{ mm}$, $NV=73.3 \text{ mm}$ και $NT=82.1 \text{ mm}$. Από τα δεδομένα αυτά φαίνεται ότι το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης αποθηκεύτηκε στην KM μεταχείριση και το μικρότερο στην NV. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι αυτό συμβαίνει διότι στην KM μεταχείριση το στρώμα των φυτικών υπολειμμάτων διευκολύνει από

τη μια την είσοδο του νερού στο έδαφος, αφού συμβάλει στη διαμόρφωση καλύτερης δομής του εδάφους και άρα μεγαλύτερης K_s και από την άλλη αποτρέπει την εξάτμιση. Αντίθετα, στη NV μεταχείριση η μικρότερη αποθήκευση του νερού μπορεί να οφείλεται στη μεγαλύτερη εξατμισοδιαπνοή, αλλά και στη μεγαλύτερη αποστράγγιση της κατατομής λόγω του πορώδους που διαμορφώνεται κατά βάθος με τη συμβολή του ριζικού συστήματος. Από το Σχήμα 1 φαίνεται ότι οι απώλειες κατά το διάστημα από 23/1/2018 έως 13/3/2018 στην NV μεταχείριση είναι περίπου ίδιες κατά βάθος μέχρι τα 40 cm, ενώ στην KM μεταχείριση μειώνονται με το βάθος.

Αν εξετάσουμε το αποθηκευμένο νερό σε κάθε μεταχείριση σε μεγαλύτερο εύρος χρόνου π.χ ένα έτος, φαίνεται να μην υπάρχει ουσιαστική μεταβολή και στις τρεις μεταχειρίσεις παρότι σε μικρότερες περιόδους μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Πιο συγκεκριμένα, από τη μέτρηση των κατατομών υγρασίας στις 25/9/2018, διαπιστώθηκε ότι το ύψος του αποθηκευμένου νερού στην NT ήταν 45.3 mm, στην NV 73.4 mm και στην KM 49.2 mm. Οι τιμές αυτές είναι σχεδόν ίδιες με τις τιμές των κατατομών στις 11/10/2017 (Πίνακας 3). Το αποτέλεσμα αυτό συμπίπτει με αυτό των Moret et. al. (2006) για ημίξηρη περιοχή και περίοδο αγρανάπαυσης 16-18 μήνες καθώς και των Κάργας κ.α (2012). Δηλαδή ότι ανεξάρτητα από το είδος της μεταχείρισης δεν υπάρχει κέρδος στο αποθηκευμένο νερό και στην αποτελεσματικότητα της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια μιας σχετικά μεγάλης περιόδου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στις ξηρές και τις ημίξηρες περιοχές, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της χώρας μας, φαίνεται, από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, ότι οι διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις οδηγούν σε διαφορετικές ποσότητες αποθηκευμένου νερού στην εδαφική κατατομή μέχρι το βάθος των 60 cm κατά την διάρκεια της υγρής περιόδου. Όμως οι διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές, στην περίπτωση της μη αρδευόμενης γεωργίας, μπορούν να επηρεάσουν την ποσότητα του αποθηκευμένου νερού μόνο σε σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα. Για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα στις τρεις μεταχειρίσεις δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στο αποθηκευμένο νερό.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Kargas G., Kerkides P., Sotirakoglou K, and Poulouvassilis A., 2016. *Temporal variability of surface soil hydraulic properties under various tillage systems*. Soil and Tillage Research, 158: 22–31.
- Kargas G., Kerkides P., and Poulouvassilis A., 2012. *Infiltration of rain water in semi-arid areas under three land surface treatments*. Soil and Tillage Research, 120: 15-24.
- Kargas G., and Kerkides P., 2008. *Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theta probe*. Irrigation and Drainage, 57: 435-449.
- Κάργας Γ., Λαμπροπούλου Α., Π. Κερκίδης, 2012. *Ανάπτυξη κατατομών εδαφικής υγρασίας κάτω από τρεις διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις στην ανώτερη εδαφική στρώση*. 2^ο Κοινό Συνέδριο ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ, σελ. 847-857, Πάτρα 11-13/10/2012.
- Moret D, Arrue J.L., Lopez M.V, and Gracia R., 2006. *Influence of fallowing practices on soil water and precipitation storage efficiency in semiarid Aragon (NE Spain)*. Agricultural water management, 82: 161-176.
- Moret D., and Arrue J.L., 2007. *Dynamics of soil hydraulic properties during fallow by tillage*. Soil and Tillage Research, 96: 103-113.
- User Manual for the Profile Probe, 2008. Delta Device Ltd Cambridge, UK.
- User manual for ML2 THETA PROBE, 1999. Delta-T Device Ltd Cambridge, UK.
- Ziyou S., Zhang J., Wu W., Cai D., Lv J., Jiang G., Huang J., Gao J., Hartmann R., and Gabriels D., 2007. *Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China*. Agricultural water management, 87: 307-314.

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΜΙΑ ΝΕΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Κ. Δεμερτζή¹, Β. Ασχονίτης^{2✉}, Κ. Μπαμπάκος¹ & Δ. Παπαμιχαήλ¹

¹Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσ/νίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και
Γεωργικής Μηχανικής, 54124, Θεσ/νίκη

²Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων ΕΛΓΟ - ΔΗΜΗΤΡΑ, 57001, Θέρμη-Θεσσαλονίκης

✉v.aschonitis@swri.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση μίας νέας μεθόδου εκτίμησης της ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (LOSW-ET), η οποία λαμβάνει υπόψη και εδαφολογικά και τοπογραφικά δεδομένα. Η μέθοδος αποτελεί επέκταση μίας δημοσιευμένης εμπειρικής μεθόδου (της LOSW) κατά την οποία εκτιμώνται οι μέσες ετήσιες συνιστώσες της κατείσδυσης και της επιφανειακής απορροής από μία επιφάνεια αναφοράς. Στην παρούσα εργασία, η συγκεκριμένη μέθοδος εκτιμήθηκε σε εθνικό επίπεδο και συγκρίθηκε με αντίστοιχες μεθόδους πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (ΟΙ'Dekop, Coutagne, Turk), οι οποίες λαμβάνουν υπόψη μόνο κλιματικά δεδομένα. Από την ανάλυση προέκυψε ότι τα αποτελέσματα της LOSW-ET είναι σε συμφωνία μόνο με τη μέθοδο του Turk, με τις μεταξύ τους διαφορές να περιορίζονται στις επικλινείς μεγάλου υψομέτρου περιοχές.

Λέξεις κλειδιά: πραγματική εξατμισοδιαπνοή, τοπογραφία, επιδράσεις εδάφους

INCORPORATING SOIL AND TOPOGRAPHY TO A NEW SIMPLIFIED METHOD FOR ESTIMATING ANNUAL REAL EVAPOTRANSPIRATION

K. Demertzi¹, V. Aschonitis^{2✉}, K. Babakos¹ & D. Papamichail¹

¹Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Department of Hydraulics, Soil
Science and Agricultural Engineering, 54124, Thessaloniki

²Soil and Water Resources Institute, Hellenic Agricultural Organization - Demeter, 57001,
Thermi-Thessaloniki

✉v.aschonitis@swri.gr

ABSTRACT

The aim of this study is to present a new method for estimating annual real evapotranspiration (LOSW-ET), which considers soil and topography. The method is an expansion of a published empirical method (LOSW) that assesses mean annual percolation and runoff from a reference surface. The new method was performed at national scale and was compared with respective methods of real evapotranspiration (ΟΙ'Dekop, Coutagne, Turk) that consider only climate data. From the analysis, it was observed that the results of the LOSW-ET method agree very well only with the results of Turk method, while their differences were restricted to the sloppy and high-altitude areas.

Keywords: real evapotranspiration, topography, soil effects

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή αποτελεί βασική συνιστώσα είτε σε επίπεδο αγρού για την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών είτε σε επίπεδο λεκάνης απορροής για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου. Η εκτίμησή της μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων τα οποία απαιτούν πληθώρα δεδομένων (κλιματικά, τοπογραφικά, εδαφολογικά) (KniselandDavis, 2000) είτε μέσω απλών σχέσεων όπως των OI'Dekor (1911), Coutagne (1954) και Turk (1961), οι οποίες όμως λαμβάνουν υπόψη μόνο κλιματικά δεδομένα χωρίς την επίδραση του εδάφους και της τοπογραφίας.

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η παρουσίαση μίας νέας μεθόδου εκτίμησης της ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής με μία απλή σχέση η οποία εκτός από τα κλιματικά δεδομένα λαμβάνει επιπλέον υπόψη τοπογραφικά και εδαφολογικά δεδομένα.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ASCEstandardizedPenman-Monteith

Η μέθοδοςASCE-standardizedPenman-Monteith αποτελεί την πλέον βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου FAO-56 (Allenetal., 1998) και σύμφωνα με την ASCE-EWRITaskCommittee είναι η πιο ακριβής μέθοδος υπολογισμού της ET_o (Allenetal., 2005). Οι βελτιώσεις που εισήχθησαν στη μέθοδο ASCE αφορούν: α) την εισαγωγή νέων συντελεστών αεροδυναμικής αντίστασης και τραχύτητας για δεύτερο τύπο ψηλότερης καλλιέργειας αναφοράς (άλφα-άλφα ύψους 50 cm) πέραν του γρασιδιού με ύψος 12 cm και β) τη βελτίωση των συντελεστών αεροδυναμικής αντίστασης και τραχύτητας της καλλιέργειας αναφοράς για υπολογισμούς σε ωριαίο χρονικό βήμα. Ο υπολογισμός της μεθόδου σε ημερήσιο χρονικό βήμα γίνεται και για δύο τύπους καλλιέργειας αναφοράς (χαμηλή και υψηλή καλλιέργεια αναφοράς) από τη σχέση (Allenetal., 2005):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma u_2(e_s - e_a)C_n}{(T_{mean} + 273.16)}}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (1)$$

όπου ET_o : η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (mm d^{-1}), R_n : η καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), u_2 : η ταχύτητα ανέμου στα 2 m από την επιφάνεια του εδάφους (m s^{-1}), T_{mean} : η μέση ημερήσια θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), G : η κατακόρυφη ροή ενέργειας από το έδαφος που μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμική ενέργεια ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), e_s : η πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa), e_a : η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa), Δ : η κλίση της καμπύλης στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών και θερμοκρασίας ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : η ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), C_n : ο συντελεστής του τύπου της καλλιέργειας αναφοράς και C_d : ο συνδυαστικός συντελεστής επίδρασης αεροδυναμικής αντίστασης λόγω πυκνότητας και ύψους της φυτοκάλυψης της καλλιέργειας αναφοράς. Η χαμηλή καλλιέργεια αναφοράς αντιστοιχεί σε γρασίδι ύψους 12 cm και αεροδυναμικής αντίστασης 70 sm^{-1} , όπου οι συντελεστές C_n και C_d παίρνουν τιμές 900 και 0.34, αντίστοιχα. Για την περίπτωση αυτή, η Εξ.(1) όταν υπολογίζεται σε ημερήσιο χρονικό βήμα, είναι όμοια με τη δοθείσα εξίσωση κατά FAO-56 (Allenetal., 1998). Η υψηλή καλλιέργεια αναφοράς αντιστοιχεί σε γρασίδι ύψους 50 cm και αεροδυναμικής αντίστασης 45 sm^{-1} , όπου οι συντελεστές C_n και C_d παίρνουν τιμές 1600 και 0.38, αντίστοιχα (Allenetal., 2005). Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση μόνο της περίπτωσης της ET_o χαμηλής καλλιέργειας αναφοράς.

2.2 Κλασικές υδροκλιματικές μέθοδοι ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής

Οι πιο κλασικές μέθοδοι εκτίμησης της ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε απλές εφαρμογές της διεθνούς βιβλιογραφίας χωρίς απαιτήσεις χρήσης πολύπλοκων υδρολογικών μοντέλων είναι των OI'Dekor (1911), Coutagne (1954) και Turk (1961). Οι συγκεκριμένες μέθοδοι απαιτούν μόνο κλιματικά δεδομένα και για το λόγο αυτό καλούνται στην παρούσα εργασία ως “μέθοδοι πραγματικής εξατμισοδιαπνοής υδροκλιματικού τύπου”. Ένα βασικό μειονέκτημα των παραπάνω μεθόδων είναι ότι ως εισροή νερού θεωρείται μόνο η βροχή.

Η εξίσωση της ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής σύμφωνα με τη μέθοδο του OI'Dekor είναι η εξής:

$$ET_D = P[1 - \exp(-ET_o/P)] \quad (2)$$

όπου ET_D : η ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή OI'Dekor (mmyear^{-1}), P : το μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mmyear^{-1}) και ET_o : η ετήσιαδυνητική εξατμισοδιαπνοή ή εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mmyear^{-1}).

Η εξίσωση της ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής σύμφωνα με τη μέθοδο του Coutagne είναι η εξής:

$$ET_C = P \text{ για } P < L_C/8$$

$$ET_C = P(1 - P/L) \text{ για } L_C/8 \leq P \leq L_C/2 \quad (3)$$

$$ET_C = 200 + 35T \text{ για } P > L_C/2$$

$$\text{με } L_C = 800 + 140T$$

όπου ET_C : η ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή Coutagne (mmyear^{-1}), P : το μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mmyear^{-1}), T : η μέση ετήσια θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) και L_C : η συνάρτηση θερμοκρασίας του Coutagne.

Η εξίσωση της ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής σύμφωνα με τη μέθοδο του Turk, είναι η εξής:

$$ET_T = P \text{ για } P/L_T \leq 0.316$$

$$ET_T = P/[0.9 + (P/L_T)^2]^{0.5} \text{ για } P/L_T > 0.316 \quad (4)$$

$$\text{με } L_T = 300 + 25T + 0.05T^2$$

όπου ET_T : η ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή Turk (mmyear^{-1}), P : το μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mmyear^{-1}), T : η μέση ετήσια θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) και L_T : η συνάρτηση θερμοκρασίας του Turk.

2.3 Ανάπτυξη νέας εδαφο-υδροκλιματικής μεθόδου ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής μέσω επέκτασης της μεθόδου LOSW (Aschonitis et al., 2012)

Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε από τους Aschonitis et al. (2012) με στόχο τη δημιουργία απλοποιημένων σχέσεων εκτίμησης της ετήσιας επιφανειακής απορροής και κατείδυσης από μία επιφάνεια με πλήρη κάλυψη γρασιδιού (καλλιέργεια αναφοράς). Οι σχέσεις αυτές ρυθμίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη ένα μεγάλο αριθμό θεωρητικών προσομοιώσεων του μονοδιάστατου ντετερμινιστικού μοντέλου GLEAMS (Knisel and Davis 2000) με πλήρη κάλυψη γρασιδιού σε ημερήσιο βήμα υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες μεσογειακών και εύκρατων κλιμάτων, συνθήκες διαφορετικής υδρολογικής κλάσης εδάφους (A, B, C, D) (NRCS-USDA, 2007), διαφορετικές κλίσεις επιφάνειας εδάφους καθώς και δύο περιπτώσεις άρδευσης (χωρίς άρδευση ή αυτόματη άρδευση). Η κλίση εδάφους σχετίζεται με τη μέθοδο του απορροϊκού συντελεστή *curvenumber* μέσω της σχέσης των Getter et al. (2007) για επιφάνειες γρασιδιού. Η άρδευση εφαρμόστηκε αυτόματα από το μοντέλο GLEAMS ώστε να διατηρείται η εδαφική υγρασία μεταξύ

20% και 100% της διαθέσιμης περιεχόμενης υγρασίας στο εδαφικό προφίλ. Το εύρος αυτό επιλέχθηκε ώστε να δοθούν όσο το δυνατόν περισσότερο ρεαλιστικές εφαρμογές άρδευσης. Από τις προσομοιώσεις του μοντέλου GLEAMS, εξήχθησαν τα αποτελέσματα των ετήσιων απωλειών νερού με κατείσδυση κάτω από το ριζόστρωμα των 30 cm και των απωλειών νερού με επιφανειακή απορροή. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν ως εξαρτημένες μεταβλητές για την ανάπτυξη και ρύθμιση των δεικτών LOSW-P και LOSW-R, οι οποίοι περιγράφουν τις ετήσιες απώλειες νερού με κατείσδυση και επιφανειακή απορροή, αντίστοιχα. Η γενική μορφή των δύο δεικτών αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και η τελική μορφή των δύο μοντέλων είναι η εξής:

$$LOSW - P = \left\{ \begin{array}{l} 0.0941\sqrt{K_s} - 0.761\sqrt{SL} + 0.4185\sqrt{P} \\ - 0.0487\sqrt{ET_o} + 0.0903\sqrt{IR} \end{array} \right\}^2 \quad (5)$$

$$LOSW - R = \left\{ \begin{array}{l} -0.0856\sqrt{K_s} + 1.8573\sqrt{SL} + 0.9966\sqrt{P} \\ -0.5612\sqrt{ET_o} + 0.2384\sqrt{IR} \end{array} \right\}^2 \quad (6)$$

όπου LOSW-P: οι απώλειες νερού με κατείσδυση κάτω από τα 30 cm (mmyear⁻¹), LOSW-R: οι απώλειες νερού με επιφανειακή απορροή (mmyear⁻¹), K_s: η υδραυλική αγωγιμότητα (mmday⁻¹), SL: η κλίση της επιφάνειας του εδάφους (%), P: η ετήσια βροχόπτωση (mmyear⁻¹), ET_o: η ετήσια εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mmyear⁻¹), και IR: η ετήσια άρδευση για την κάλυψη των αναγκών της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (mmyear⁻¹). Στην περίπτωση που το εσωτερικό των αγκυλών στις παραπάνω εξισώσεις οδηγεί σε αρνητικές τιμές, η τιμή των LOSW-P και LOSW-R λαμβάνεται 0.

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε θεωρώντας IR=0 είτε IR≠0 όταν αυτό εκφράζει την ετήσια άρδευση για την κάλυψη των αναγκών τις εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, η οποία κατά προσέγγιση υπολογίζεται από την εξής σχέση (Aschonitis et al., 2013a):

$$IR = \sum_{i=1}^{12} IR_i \quad (7)$$

όπου $IR_i = ET_{oi} - P_i$ αν $ET_{oi} > P_i$ αλλιώς $IR_i = 0$

όπου IR: η ετήσια άρδευση για την κάλυψη των αναγκών τις ετήσιας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (mm year⁻¹), IR_i: η μηνιαία άρδευση (mmmonth⁻¹) για την κάλυψη των αναγκών της μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_{oi} (mmmonth⁻¹) και P_i: η μηνιαία βροχόπτωση (mmmonth⁻¹). Χρήση τυχαίων τιμών IR για την ανάλυση υπεράρδευσης ή ελλειμματικής άρδευσης δεν ενδείκνυται. Η διαφοροποίηση των δεικτών LOSW σε σχέση με τη χρήση του όρου της άρδευσης καλλιέργειας αναφοράς IR, καθορίζεται από το σκοπό χρήσης των δεικτών (π.χ. για αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις IR≠0 και για μη αρδευόμενες εκτάσεις και φυσικά χερσαία οικοσυστήματα IR=0).

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1 Μέθοδοι

Λαμβάνοντας υπόψη το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου LOSW, θεωρήθηκε ότι αν χρησιμοποιηθεί η παραδοχή ετήσιων σταθερών συνθηκών (steadystate conditions) (δηλαδή μηδενική ετήσια μεταβολή της εδαφικής υγρασίας) τότε από την επίλυση της εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου για την επιφάνεια αναφοράς προκύπτει ότι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή μπορεί να υπολογιστεί με ή χωρίς άρδευση σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$LOSW-ET = P+IR - (LOSW-P) - (LOSW-R) \quad (8)$$

Η περίπτωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής αρδευόμενης καλλιέργειας αναφοράς που υπολογίζει η Εξ.8 δεν αντιστοιχεί στην ET_0 , αλλά σε μια μικρότερη τιμή λόγω του γεγονότος ότι οι προσομοιώσεις του μοντέλου GLEAMS για τη ρύθμιση των δεικτών έγινε χρησιμοποιώντας συνθήκες εδαφικής υγρασίας ρεαλιστικών αρδεύσεων και όχι θεωρητικές υγρασιακές συνθήκες μηδενικού υδατικού στρες. Η Εξ.8 επίσης διαφοροποιείται από παλαιότερες μεθόδους πραγματικής εξατμισοδιαπνοής καθώς λαμβάνει υπόψη εκτός από τα κλιματικά, και τα τοπογραφικά-εδαφολογικά χαρακτηριστικά μιας υπό εξέταση περιοχής. Η συγκεκριμένη μέθοδος θα εφαρμοστεί σε εθνικό επίπεδο και τα αποτελέσματά της για $IR \neq 0$ θα συγκριθούν με την ET_0 και για $IR=0$ με τις μεθόδους πραγματικής εξατμισοδιαπνοής των Ol'Dekop (1911), Coutagne (1954) και Turk (1961).

3.2 Δεδομένα

Οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι οι εξής:

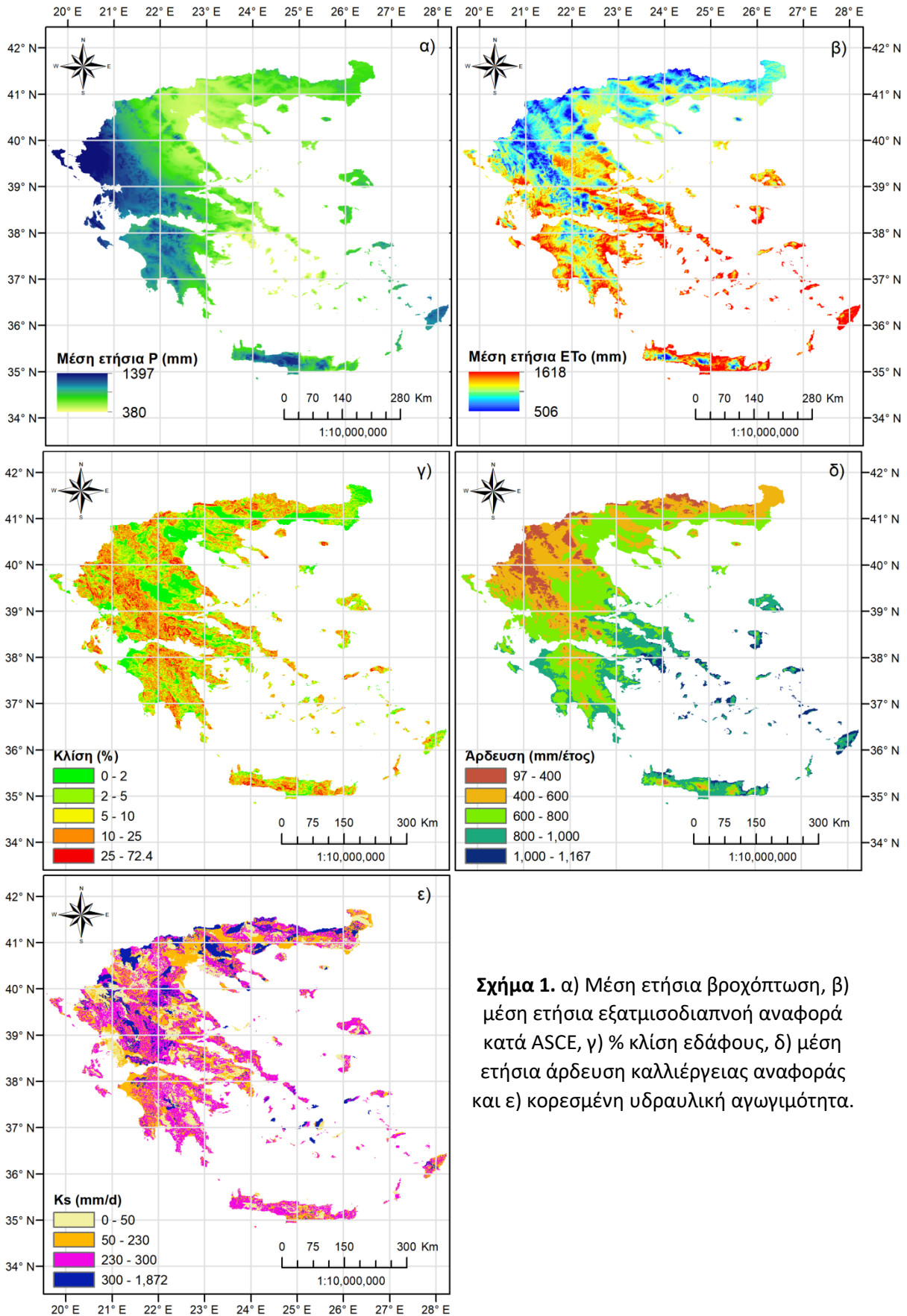
α) Κλιματικά δεδομένα: Από τη βάση δεδομένων WorldClim version 1 (Hijmans et al., 2005) λήφθηκαν οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις στον Ελλαδικό χώρο για την περίοδο 1950-2000 υπό μορφή κανάβου (raster) χωρικής ανάλυσης (30 arc-sec, $\sim 1 \times 1$ km) (Σχήμα 1α). Από την βάση δεδομένων των Aschonitis et al. (2017) (<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.868808>) λήφθηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές της ET_0 κατά ASCE για χαμηλή καλλιέργεια αναφοράς για την περίοδο 1950-2000 υπό μορφή κανάβου (raster) χωρικής ανάλυσης (30 arc-sec, $\sim 1 \times 1$ km) (Σχήμα 1β). Τα παραπάνω υπόβαθρα είναι στο παγκόσμιο ελλειψοειδές γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων WGS84. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίστηκε και η άρδευση με χρήση της εξ.7 (Σχήμα 1δ).

β) Τοπογραφικά δεδομένα: Η κλίση του εδάφους (Σχήμα 1γ) υπολογίστηκε με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους GTOPO30 (με ανάλυση 1×1 km) όπως αυτό δίνεται από την European Environmental Agency σε σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων ETRS89/LAEA (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/digital-elevation-model-of-europe#tab-gis-data>). Το γεωγραφικό υπόβαθρο της κλίσης στη συνέχεια μετασχηματίστηκε σε σύστημα WGS84 (30 arc-sec χωρική ανάλυση).

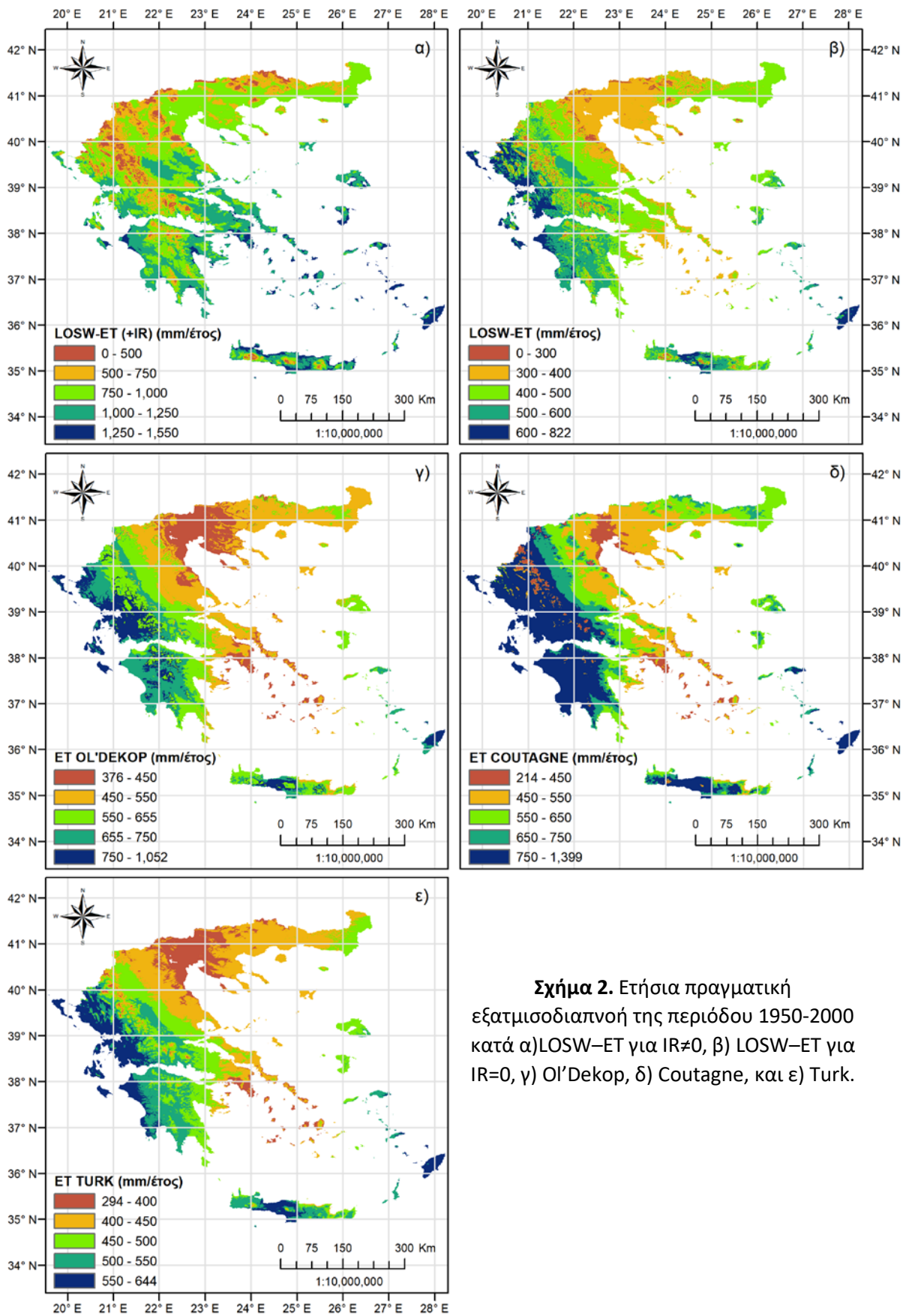
γ) Εδαφολογικά δεδομένα: Από την Ευρωπαϊκή Βάση Εδαφολογικών Δεδομένων (European Soil Database - ESDB) της ECJRC (European Commission Joint Research Centre) (Hiederer, 2013a,b) ελήφθησαν δεδομένα όπως % άμμος, % ιλύς, % άργιλος, % χαλίκι/πέτρες, % οργανικός άνθρακας, βάθος ριζοστρώματος για την επιφανειακή στρώση των 0-30 cm. Οι παράμετροι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την εκτίμηση της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας εδάφους (Σχήμα 1ε) με τις πεδοσυναρτήσεις των Saxton and Rawls (2006), οι οποίες λαμβάνουν υπόψη και την επίδραση του χαλικιού. Επειδή, η χρήση των συγκεκριμένων πεδοσυναρτήσεων περιορίζεται για εδάφη με οργανική ουσία $< 8\%$, στην περίπτωση των οργανικών εδαφών χρησιμοποιήθηκαν οι πεδοσυναρτήσεις των Wösten et al. (1999).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τα υπόβαθρα των μέσων ετήσιων παραμέτρων P , ET_0 , IR για την περίοδο 1950-2000, καθώς και των υποβάθρων K_s και SL (Σχήματα 1α έως 1ε), εκτιμήθηκαν οι μέσες ετήσιες τιμές πραγματικής εξατμισοδιαπνοής σύμφωνα με τις μεθόδους $LOSW-ET$ για $IR \neq 0$ και για $IR=0$ (Εξ.8), και με τις μεθόδους των Ol'Dekop (1911) (Εξ.2), Coutagne (1954) (Εξ.3) και Turk (1961) (Εξ.4), οι οποίες δίνονται αντίστοιχα στα Σχήματα 2α έως 2ε.



Σχήμα 1. α) Μέση ετήσια βροχόπτωση, β) μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή αναφορά κατά ASCE, γ) % κλίση εδάφους, δ) μέση ετήσια άρδευση καλλιέργειας αναφοράς και ε) κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα.

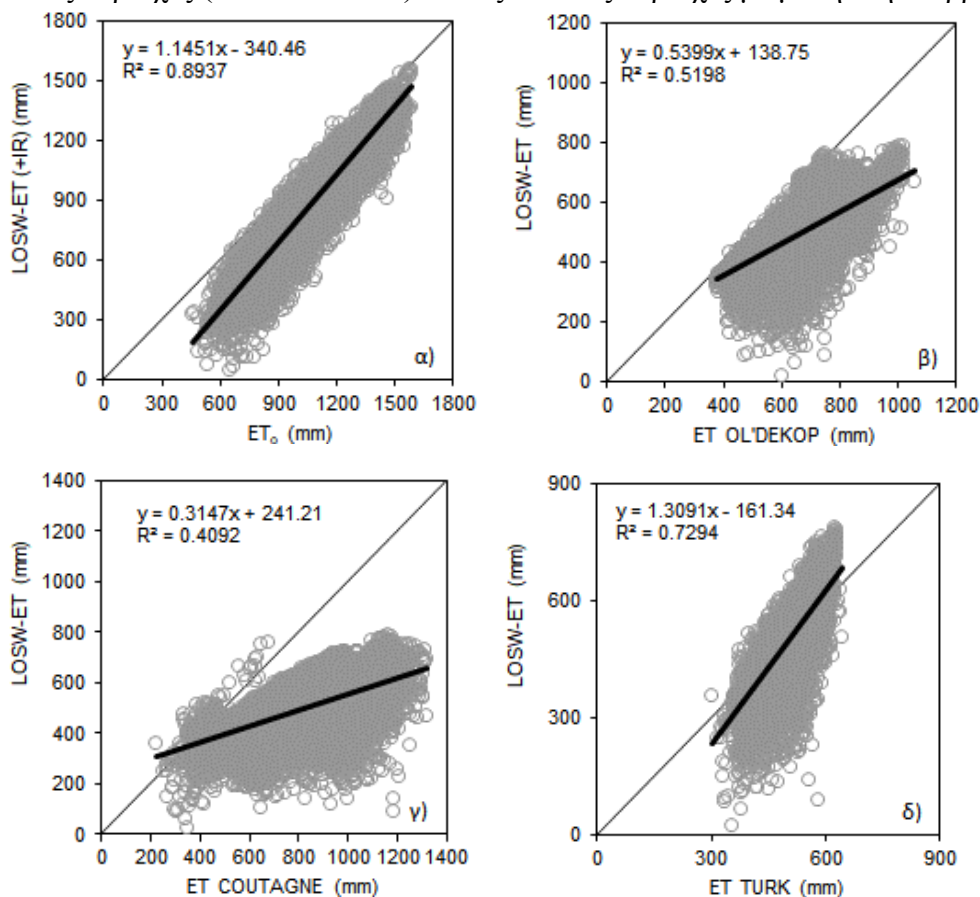


Σχήμα 2. Ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή της περιόδου 1950-2000 κατά α) LOSW-ET για IR≠0, β) LOSW-ET για IR=0, γ) OI'Dekop, δ) Coutagne, και ε) Turk.

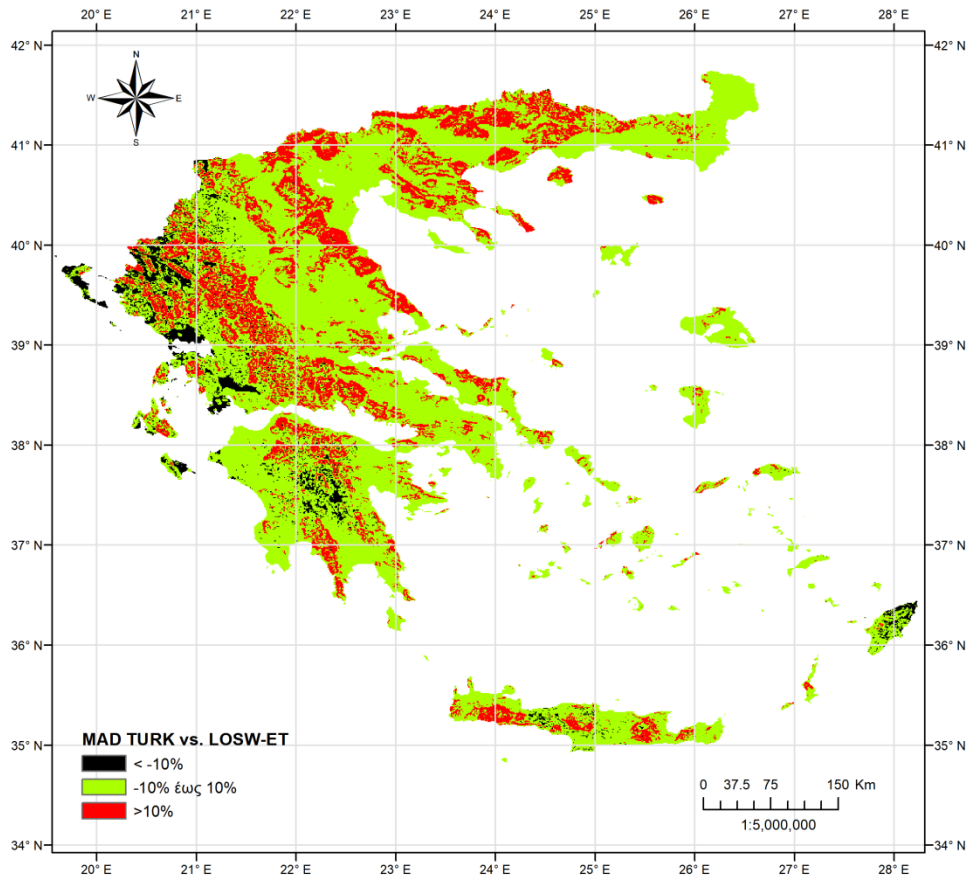
Το αποτέλεσμα της συσχέτισης μεταξύ της LOSW-ET για $IR \neq 0$ με την ET_o (περιπτώσεις μεθόδων που λαμβάνουν υπόψη την άρδευση) δίνεται στο Σχήμα 3α. Από το Σχήμα 3α προκύπτει υψηλή συσχέτιση μεταξύ τους. Χρησιμοποιώντας τη σχέση της γραμμής τάσης, οι τιμές της LOSW-ET είναι μικρότερες της ET_o , γεγονός το οποίο δικαιολογείται απόλυτα καθώς στην ET_o η υγρασία είναι μονίμως στην υδατοϊκανότητα ενώ στην LOSW-ET η υγρασία πέφτει μεταξύ διαδοχικών αρδεύσεων.

Τα αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ της LOSW-ET για $IR=0$ με τις μεθόδους πραγματικής εξατμισοδιαπνοής των OI'Dekor (1911), Coutagne (1954) και Turk (1961) (μέθοδοι που δεν λαμβάνουν υπόψη την άρδευση) δίνονται στα Σχήματα 3β,γ,δ, αντίστοιχα. Από την ανάλυση προέκυψαν χαμηλές συσχετίσεις μεταξύ της LOSW-ET και των μεθόδων OI'Dekor και Coutagne με τις δεύτερες να υπερεκτιμούν αρκετά την πραγματική εξατμισοδιαπνοή (Σχήμα 3β,γ).

Αντιθέτως, παρουσιάστηκε υψηλή συσχέτιση μεταξύ της LOSW-ET για $IR=0$ με τη μέθοδο Turk (Σχήμα 3δ). Η συμπόρευση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων σε τοπικό επίπεδο, υπολογίστηκε μέσω της επί της % μέσης ετήσιας διαφοροποίησης (Mean Annual Difference – MAD) της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής της μεθόδου Turk ET_T σε σχέση με την LOSW-ET για $IR=0$. Η MAD υπολογίζεται ως $100 \cdot [(ET_T) - (LOSW-ET)] / (LOSW-ET)$ υπό μορφή κανάβου (Σχήμα 4). Από τον χάρτη της MAD παρατηρείται ότι οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορές μικρότερες του $\pm 10\%$ για το 73% της συνολικής κάλυψης του Ελλαδικού χώρου, ενώ δεν συμπορεύονται στις ορεινές - επικλινείς περιοχές (κλίσεων $> 10\%$) καθώς και στις περιοχές με μέση ετήσια βροχόπτωση > 900 mm.



Σχήμα 3. Συσχετίσεις α) της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς LOSW-ET για $IR \neq 0$ με την ET_o κατά ASCE, β) LOSW-ET για $IR=0$ με OI'Dekor, γ) LOSW-ET για $IR=0$ με Coutagne και δ) LOSW-ET για $IR=0$ με Turk.



Σχήμα 4. Μέση ετήσια διαφοροποίηση (Mean Annual Difference – MAD) της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής του Turk σε σχέση με την LOSW-ET για $IR=0$.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εισαγωγή της μεθόδου LOSW-ET αποτελεί μία νέου τύπου υβριδική εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, η οποία:

- επεκτείνει την έννοια της κλασικής εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς ET_0 , η οποία δεν λαμβάνει υπόψη εδαφολογικά και τοπογραφικά δεδομένα κατά τον υπολογισμό της. Η χρήση της Εξ.8 για $IR \neq 0$ δίνει μία πιο ρεαλιστική εκτίμηση της μέγιστης εξατμισοδιαπνοής που θα επιτύγχανε η καλλιέργεια αναφοράς λαμβάνοντας υπόψη τα εδαφολογικά-τοπογραφικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής αλλά και την επίδραση της διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας μεταξύ ρεαλιστικών αρδεύσεων.
- επεκτείνει την έννοια της μέγιστης πραγματικής εξατμισοδιαπνοής μη αρδευόμενων και φυσικών οικοσυστημάτων, μέσω της χρήσης της Εξ.8 για $IR=0$, καθώς οι κλασικές απλοποιημένες μέθοδοι (π.χ. OI'Dekor, Coutagne, Turk) δεν λαμβάνουν υπόψη τις επιδράσεις των εδαφολογικών-τοπογραφικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής.

Η καλή συσχέτιση μεταξύ της μεθόδου του Turk και της εξίσωσης Εξ.8 για $IR=0$ (Σχήμα 3δ) και κυρίως ο χάρτης MAD των δύο μεθόδων (Σχήμα 4) έδειξαν ότι:

- τα αποτελέσματα της προτεινόμενης Εξ.8 για $IR=0$ ταυτίζονται πολύ ικανοποιητικά με μία τουλάχιστον μέθοδο πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, την Turk, η οποία είναι και η νεότερη και η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μεταξύ των άλλων δύο (Ol'Dekor και Coutagne).
- οι περιοχές στις οποίες αποκλίνουν τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων είναι κυρίως περιοχές υψηλών τοπογραφικών κλίσεων γεγονός το οποίο αφήνει τη δυνατότητα εξαγωγής συμπεράσματος ότι η προτεινόμενη μέθοδος υπερσχύει της Turk καθώς η δεύτερη δεν λαμβάνει υπόψη τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 300.
- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D. and Jensen, M., 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Final Report (ASCE-EWRI). Pr. In: Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D., Jensen, M. (Eds.), Environmental and Water Resources Institute, 2005. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration of the Environmental and Water Resources Institute.
- Aschonitis, V.G., Mastrocicco, M., Colombani, N., Salemi, E., Kazakis, N., Voudouris, K. and Castaldelli, G., 2012a. Assessment of the intrinsic vulnerability of agricultural land to water and nitrogen losses via deterministic approach and regression analysis. *Water Air and Soil Pollution*, 223(4), 1605-1614.
- Aschonitis, V.G., Salemi, E., Colombani, N., Castaldelli, G. and Mastrocicco, M., 2013a. Formulation of indices to describe intrinsic nitrogen transformation rates for the implementation of best management practices in agricultural lands. *Water Air and Soil Pollution*, 224, art. no. 1489.
- Coutagne, A., 1954. Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. *La Houille Blanche*, 360-374.
- Getter, K.L., Rowe, D.B. and Andresen, J.A., 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31(4), 225-231.
- Hiederer, R. 2013a. Mapping Soil Properties for Europe - Spatial Representation of Soil Database Attributes. Luxembourg: Publications Office of the European Union – 2013 – 47pp. – EUR26082EN Scientific and Technical Research series, ISSN 1831-9424.
- Hiederer, R. 2013b. Mapping Soil Typologies - Spatial Decision Support Applied to European Soil Database. Luxembourg: Publications Office of the European Union – 2013 – 147pp. – EUR25932EN Scientific and Technical Research series, ISSN 1831-9424.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. and Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Knisel, W.G. and Davis, F.M., 2000. GLEAMS, Groundwater loading effects from agricultural management systems V3.0. Publ. No. SEWRL-WGK/FMD-050199, U.S.D.A., Tifton, Georgia.

- NRCS-USDA, 2007. Chapter 7 Hydrologic Soil Groups. Part 630 Hydrology, National Engineering Handbook, (210–VI–NEH).
- Ol'Dekop, E.M., 1911. On evaporation from the surface of river basins. Univ. of Tartu, Tartu, Estonia, p. 209.
- Saxton K.E. and Rawls W.J., 2006. Soil water estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Science Society of America Journal, 70, 1569-1578.
- Turk, L., 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. Annals of Agronomy, 131, 13-49.
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. and Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma, 90(3-4), 169-185.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΝΕΟΤΕΡΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

**I. Ζαχαρόπουλος¹, Δ. Καραμούζης², Κ. Γεωργακάκης², Α. Παπαδόπουλος¹,
Β. Ασχονίτης¹**

¹Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, ΕΛΓΟ - ΔΗΜΗΤΡΑ, 57001, Θέρμη-Θεσσαλονίκης

²Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσ/νίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και
Γεωργικής Μηχανικής, 54124, Θεσ/νίκη

✉v.aschonitis@swri.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της ακρίβειας νεότερων αναλυτικών λύσεων της εξίσωσης του Boussinesq, καθώς και η αξιολόγηση της πιο δύσκολα μετρήσιμης παραμέτρου, της ειδικής σε νερό απόδοσης του εδάφους, όταν η τιμή της λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία. Για την πειραματική διερεύνηση του προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε μοντέλο άμμου. Στη παρούσα εργασία εξετάζονται δυο προβλήματα στραγγίσεων, παρουσιάζονται οι αναλυτικές λύσεις τους και η πειραματική επιβεβαίωση τους για βιβλιογραφικές τιμές της ειδικής σε νερό απόδοσης του εδάφους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για τιμές εντός του εύρους της διεθνούς βιβλιογραφίας, οι νέες εξισώσεις προσομοιώνουν, κατά τους πρώτους χρόνους, με μεγάλη ακρίβεια περιπτώσεις πτώσεις της υπόγειας στάθμης με μέγιστο σφάλμα περί το 5.70%, ενώ σε περιπτώσεις ανόδου της υπόγειας στάθμης το μέγιστο σφάλμα ανέρχεται περί το 16.17%. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι με τη πάροδο του χρόνου το σφάλμα εξαλείφεται και στις δυο περιπτώσεις.

Λέξεις κλειδιά: ασταθής στραγγίση, ειδική σε νερό απόδοση, εξίσωση Boussinesq

EXPERIMENTAL RESEARCH OF NEWER ANALYTICAL SOLUTIONS OF UNSTEADY DRAINAGE

**I. Zacharopoulos¹, D. Karamouzis², K. Georgakakis², A. Papadopoulos¹,
V. Aschonitis¹**

¹Soil and Water Resources Institute, Hellenic Agricultural Organization - Demeter, 57001,
Thermi-Thessaloniki, ✉v.aschonitis@swri.gr

²Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Department of Hydraulics, Soil
Science and Agricultural Engineering, 54124, Thessaloniki

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the accuracy of newer analytical solutions of Boussinesq equation, as well as the evaluation of bibliographic values of the hardest measured parameter, the specific yield. For the experimental investigation, a sand model was used. In the present study two drainage problems are being assessed, the analytical solutions are being presented as well as their experimental validation for various values of the specific yield. The results showed that during the first stages of the unsteady phenomenon, the newer equations simulate with great accuracy cases where drawdown is taking place, with the maximum error being around 5.70%, while in cases where the groundwater level rises, the maximum error is around 16.17%. Moreover, it was observed that the errors are eliminated completely at greater times in both cases.

Keywords: unsteady drainage, specific yield, Boussinesq equation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κύριο αντικείμενο της επιστήμης των στραγγίσεων είναι η απομάκρυνση του πλεονάζοντος επιφανειακού και υπόγειου εδαφικού νερού καθώς και η διατήρηση της υπόγειας στάθμης σε ένα επιθυμητό βάθος. Τα στραγγιστικά δίκτυα παίζουν καθοριστικό ρόλο προς τον σκοπό αυτό διασφαλίζοντας ένα ευνοϊκό περιβάλλον τόσο για την ανάπτυξη των φυτών όσο και για την προστασία υποδομών από πλημμυρικά φαινόμενα. Τα προβλήματα των στραγγίσεων χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες, αυτά της σταθερής και αυτά της ασταθούς στράγγισης. Κατά την σταθερή στράγγιση το φαινόμενο της στράγγισης είναι σταθερό στο χρόνο και η μαθηματική περιγραφή του είναι απλή. Κατά την ασταθή στράγγιση, το φαινόμενο της στράγγισης μεταβάλλεται στο χρόνο.

Η πρώτη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου της ασταθούς στράγγισης έγινε από τον Boussinesq (1904) μέσω μιας μη γραμμικής μερικής διαφορικής εξίσωσης. Η δυσκολία επίλυσης αυτής της εξίσωσης έγκειται στη μη γραμμικότητά της, και κατά τα επόμενα χρόνια διάφοροι ερευνητές δημοσίευσαν λύσεις της με διάφορες μεθόδους γραμμικοποίησής της. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των μεθόδων τους βασίζεται ανάμεσα στα άλλα και στις παραδοχές που γίνονται κατά την διαδικασία της γραμμικοποίησης, καθώς και στη μέτρηση ορισμένων παραμέτρων που συμμετέχουν στις εξισώσεις τους. Διάφοροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με το αντικείμενο τόσο της σταθερής αλλά κυρίως της ασταθούς στράγγισης, όπως οι Τερζίδης (1969, 1983, 1986), Τζιμόπουλος (1975, 1976), Καραμούζης (1976, 1980, 1984, 1988, 1991, 1993, 2012), Ζησης (1980, 1995), Rossi (2008).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της ακρίβειας νεότερων λύσεων της εξίσωσης του Boussinesq, καθώς και η ακρίβεια της ειδικής σε νερό απόδοσης του εδάφους, όταν αυτή η τιμή λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Ειδική απόδοση σε νερό του εδάφους

Ο λόγος του αποθηκευμένου όγκου νερού V_w προς τον όγκο των συνολικών πόρων V_0 του εδάφους, λέγεται βαθμός κορεσμού και συμβολίζεται με S_w . Αν έχουμε ένα έδαφος κορεσμένο με νερό και το αφήσουμε να στραγγίσει με την επίδραση της βαρύτητας, τότε θα απομακρυνθεί μόνο ένα μέρος του και το υπόλοιπο θα κατακρατηθεί λόγω των δυνάμεων συνοχής, συνάφειας και τριχοειδών.

Αν V_{wr} είναι ο όγκος του νερού που κατακρατήθηκε και V_{wy} ο όγκος του νερού που απομακρύνθηκε με στράγγιση λόγω της βαρύτητας, τότε ορίζονται η ειδική κατακράτηση (specific retention) S_r και η ειδική απόδοση (specific yield) S_y σε νερό του εδάφους με τις παρακάτω σχέσεις, αντίστοιχα:

$$S_r = \frac{V_{wr}}{V_0} \quad (1)$$

και

$$S_y = \frac{V_{wy}}{V_0} \quad (2)$$

όπου V_0 είναι ο συνολικός όγκος του δείγματος ενός εδάφους ή ενός πορώδους μέσου.

Η ειδική απόδοση σε νερό του εδάφους λέγεται και αποτελεσματικό πορώδες (effective porosity) n_e . Το αποτελεσματικό πορώδες χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κύρια ροή του υπόγειου νερού. Στα ιλυώδη εδάφη, και πολύ περισσότερο βέβαια στα αργιλώδη, το αποτελεσματικό πορώδες καταλαμβάνει μικρό ποσοστό του ολικού πορώδους, ενώ στα αμμώδη και χαλικιώδη εδάφη, οι δύο αυτές ποσότητες είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται για διάφορα είδη πορωδών μέσων τα εύρος και ο αριθμητικός μέσος όρος της ειδικής απόδοσης σε νερό όπως μετρήθηκαν από τους Morris και Johnson (1967).

Πίνακας 1. Ειδική απόδοση διαφόρων τύπων πορωδών μέσων (Morris & Johnson, 1967).

Υλικό υδροφορέα	Αριθμός Αναλύσεων	Ειδική απόδοση σε νερό	
		Πεδίο τιμών	Μέσος όρος
Ιζηματογενή			
Αμμόλιθοι (λεπτοί)	47	0.02 - 0.40	0.21
Αμμόλιθοι (μέσοι)	10	0.12 - 0.41	0.27
Ιλυώδης αμμόλιθος	13	0.01 - 0.33	0.12
Άμμος (λεπτή)	287	0.01 - 0.46	0.33
Άμμος (μέση)*	297	0.16 - 0.46	0.32
Άμμος (αδρή)	143	0.18 - 0.43	0.30
Χαλίκια (λεπτά)	33	0.13 - 0.40	0.28
Χαλίκια (μέσα)	13	0.17 - 0.44	0.24
Χαλίκια (αδρά)	9	0.13 - 0.25	0.21
Ιλύς	299	0.01 - 0.39	0.20
Αργίλος	27	0.01 - 0.18	0.06
Ασβεστόλιθοι	32	0 - 0.36	0.14
Ανεμογενή			
Loess	5	0.14 - 0.22	0.18
Αιολική άμμος	14	0.32 - 0.47	0.38
Τόφφοι	90	0.02 - 0.47	0.21
Μεταμορφωσιγενή			
Σχιστόλιθοι	11	0.22 - 0.33	0.26

*Περίπτωση υπό αξιολόγηση στην παρούσα εργασία.

2.2 Εξίσωση Boussinesq

Η εξίσωση του Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{S}{K} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{I_{\tau} + q_0}{K} \quad (3)$$

από μαθηματική άποψη είναι μια δεύτερης τάξης μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση παραβολικού τύπου και μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 = \frac{S}{Kh} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{I_{\tau} + q_0}{K} \quad (4)$$

Η μη γραμμικότητα της διαφορικής εξίσωσης (4) οφείλεται στο έξω από τις παραγώγους h των παρονομαστών και στη δεύτερη δύναμη του δεύτερου όρου.

2.3 Καμπύλη αρχική υπόγεια στάθμη χωρίς επαναπλήρωση και διαρροή (Πρόβλημα των Glover-Dumm)

Οι πρώτες λύσεις που επιτεύχθηκαν από διάφορους ερευνητές της Υπηρεσίας Εγγείων Βελτιώσεων των Η.Π.Α., με προεξάρχοντα τον Glover, βασίστηκαν στην παραδοχή ότι η υπόγεια στάθμη είναι αρχικά οριζόντια και παράλληλη προς το αδιαπέρατο υπόστρωμα καθώς και προς το επίπεδο στο οποίο βρίσκονται οι στραγγιστικοί αγωγοί. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και άλλα σχήματα γνωστών καμπυλών για την αρχική μορφή της υπόγειας στάθμης. Η λύση της γραμμικοποιημένης μερικής διαφορικής εξίσωσης (4), που χρησιμοποιείται σήμερα από την Υ.Ε.Β. των Η.Π.Α., βασίζεται στην παραδοχή ότι η υπόγεια στάθμη αρχικά έχει σχήμα, που μπορεί να περιγραφεί από παραβολή τετάρτου βαθμού. Συγκεκριμένα δέχονται ότι κατά την αρχική στιγμή ($t=0$) της ασταθούς στράγγισης ισχύει η εξίσωση (Τερζίδης και Καραμούζης, 1986):

$$y(x, 0) = 8y_0 \left[\frac{x}{L} - 3 \left(\frac{x}{L} \right)^2 + 4 \left(\frac{x}{L} \right)^3 - 2 \left(\frac{x}{L} \right)^4 \right] \quad (5)$$

Εφαρμόζοντας την πρώτη μέθοδο γραμμικοποίησης (Τερζίδης και Καραμούζης, 1986) η λύση του παραπάνω προβλήματος είναι η ακόλουθη (Dumm, 1968):

$$y(x, t) = \frac{192y_0}{\pi^5} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left(\frac{n^2\pi^2 - 8}{n^5} \right) \sin \left(\frac{n\pi x}{L} \right) e^{-n^2\pi^2 \frac{at}{L^2}} \quad (6)$$

Η εξίσωση (6) είναι η γενική λύση του προβλήματος με καμπύλη αρχική υπόγεια στάθμη, η οποία περιγράφεται σύμφωνα με την Υ.Ε.Β. των Η.Π.Α., από την παραβολή τετάρτου βαθμού της εξίσωσης (5), χωρίς οποιαδήποτε επαναπλήρωση και διαρροή και περιγράφει την τιμή της υπόγειας στάθμης $y(x,t)$ από το επίπεδο των στραγγιστικών αγωγών σε οποιαδήποτε απόσταση x και για οποιοδήποτε χρόνο t .

2.4 Ανύψωση υπόγειας στάθμης εξαιτίας επαναπλήρωσης από βροχόπτωση ή διαρροή (Πρόβλημα των Van de Leur και Maasland)

Ο Kraijenhoff van de Leur το έτος 1958 και ο Maasland το έτος 1959 παρουσίασαν διαφορετική μέθοδο επίλυσης των προβλημάτων της μη μόνιμης στράγγισης με επαναπλήρωση από νερά της βροχής ή της άρδευσης. Οι παραπάνω ερευνητές παραδέχθηκαν ότι στην αρχική στιγμή $t=0$ η υπόγεια στάθμη του νερού είναι οριζόντια και βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τους στραγγιστικούς σωλήνες. Για $t>0$ η υπόγεια στάθμη αρχίζει να ανεβαίνει εξαιτίας μιας σταθερής παροχής διήθησης επαναπλήρωσης, ανά μονάδα επιφάνειας, η οποία είναι το αποτέλεσμα των νερών της βροχής ή της άρδευσης. Το πρόβλημα αυτό περιγράφεται μαθηματικά από τη μη γραμμική – μη ομογενή διαφορική εξίσωση του παραβολικού τύπου του Boussinesq (Τερζίδης και Καραμούζης, 1986):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - I_r, \quad h = h(x, t), \quad 0 < x < L \quad (7)$$

καθώς και με την αρχική και τις οριακές συνθήκες:

$$h(x, 0) = D \quad t = 0, \quad 0 < x < L \quad \text{και} \quad h(0, t) = h(L, t) = D \quad t > 0$$

Εφαρμόζοντας την πρώτη γραμμικοποίηση (Τερζίδης και Καραμούζης, 1986) η διαφορική εξίσωση (7) μπορεί να γραφεί:

$$\alpha \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{I_r}{S} \quad (8)$$

Λύση της οποίας είναι η:

$$y(x, t) = \frac{I_r}{2\alpha S} (Lx - x^2) - \frac{4RL^2}{\alpha S \pi^3} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) e^{-n^2 \pi^2 \frac{\alpha t}{L^2}} \quad (9)$$

Η εξίσωση (9) δίνει το βάθος $y(x,t)$ σε οποιαδήποτε θέση και οποιοδήποτε χρόνο t από την έναρξή της επαναπλήρωσης R .

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

Όπως είναι γνωστό, ένα οποιοδήποτε φυσικά ασταθές ή μόνιμο πρόβλημα ορίζεται από τη διαφορική εξίσωση που περιγράφει το φυσικό φαινόμενο, την αρχική και τις οριακές συνθήκες. Ας θεωρήσουμε ένα έδαφος, στο οποίο έχει εγκατασταθεί και λειτουργεί ένα στραγγιστικό δίκτυο. Το ύψος της υπόγειας στάθμης, για οποιοδήποτε πρόβλημα στράγγισης, βρίσκεται στο κέντρο των στραγγιστικών αγωγών, ορίζοντας έτσι τις οριακές συνθήκες αυτών των προβλημάτων. Έτσι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα ασταθούς ή μη μόνιμης στράγγισης καθορίζεται με βάση τη μερική διαφορική εξίσωση και την αρχική συνθήκη που το περιγράφουν.

Εισάγοντας στη διαφορική εξίσωση (3), στις αρχικές και στις οριακές συνθήκες τις νέες ανεξάρτητες μεταβλητές:

$$\xi = \frac{x}{L} \quad \text{και} \quad \tau = \frac{at}{L^2} \quad (10)$$

και την νέα εξαρτημένη μεταβλητή:

$$\omega(\xi, \tau) = \frac{h^2(x,t) - D^2}{L^2} \quad (11)$$

η μη γραμμική διαφορική εξίσωση (3) μετατρέπεται στη γραμμική μορφή:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial \xi^2} = \frac{\partial \omega}{\partial \tau} - 2 \frac{q_0 + I_\tau}{K} \quad (12)$$

η οποία περιγράφει με ικανοποιητική προσέγγιση όλα τα προβλήματα της ασταθούς στράγγισης. Επίσης οι οριακές συνθήκες γίνονται:

$$\omega(0, \tau) = \omega(1, \tau) = 0 \quad (13)$$

Η αδιάστατη γραμμική διαφορική εξίσωση (12), με τις οριακές συνθήκες (13) δύναται να καθορίζουν ένα κοινό καλά τοποθετημένο πρόβλημα των στραγγίσεων, για το οποίο τα I_0 (επιφανειακή εισροή), q_0 (υπόγεια εισροή) και I_τ παίρνουν σε κάθε περίπτωση τιμές ίσες ή μεγαλύτερες από μηδέν.

3.2 Καμπύλη αρχική υπόγεια στάθμη χωρίς επαναπλήρωση και διαρροή (Πρόβλημα των Glover-Dumm)

Το πρώτο πρόβλημα καθορίζεται από τις τιμές $I_0 \neq 0$ (επιφανειακή εισροή), $q_0 = 0$ (υπόγεια εισροή) και $I_\tau = 0$. Αυτό σημαίνει ότι το έδαφος εδράζεται σε ένα αδιαπέρατο υπόστρωμα και η υπόγεια στάθμη κατά τη σταθερή στράγγιση έχει ανέλθει στη θέση $h_0 = h_j$, εξαιτίας της επιφανειακής εισροής I_0 . Η ασταθής στράγγιση αρχίζει τη στιγμή που η τιμή της I_0 μηδενίζεται. Αυτή η στιγμή λαμβάνεται και ως η αρχή του χρόνου ($t=0$), κατά τον οποίο αρχίζει η ασταθής στράγγιση. Σε κάποιο χρόνο $t > 0$ η τιμή της υπόγειας στάθμης γίνεται $h_i = h_j$. Αυτό σημαίνει ότι στο πρόβλημα αυτό λαμβάνει χώρα μια πτώση της υπόγειας στάθμης από τη θέση $h_j = h_0$ στη θέση $h_i = h_j$.

Έχοντας σαν βάση την αδιάστατη εξίσωση (12) και εκτελώντας υπολογισμούς βάσει των αρχικών και οριακών συνθηκών του προβλήματος έχουμε για $h_0 \neq 0$:

$$\frac{h^2(x,t) - D^2}{h_0^2 - D^2} = \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin\left(n\pi \frac{x}{L}\right) e^{-n^2 \pi^2 \frac{at}{L^2}} \quad (14)$$

Η εξίσωση (14) υπολογίζει για οποιοσδήποτε τιμές των x και t , το ύψος της στάθμης του υπόγειου νερού από το αδιαπέρατο υπόστρωμα, όταν δεν υπάρχει επαναπλήρωση από βροχόπτωση ή άρδευση και διαρροή κατά την περίοδο ασταθούς στράγγισης.

3.3 Ανύψωση υπόγειας στάθμης εξαιτίας επαναπλήρωσης από βροχόπτωση ή διαρροή (Πρόβλημα των Van de Leur και Maasland)

Στο δεύτερο πρόβλημα θεωρούμε ότι για $t \leq 0$ είναι $I_0 = 0$, $q_0 = 0$, ενώ για $t > 0$ η επιφανειακή εισροή $I_\tau \neq 0$. Από τα δεδομένα αυτά προκύπτει ότι για $t \leq 0$ δε λαμβάνει χώρα καμία εισροή νερού στο προς στράγγιση έδαφος, οπότε η στάθμη του υπόγειου νερού αυτή τη χρονική περίοδο θα είναι οριζόντια στο επίπεδο των στραγγιστικών αγωγών, δηλαδή θα είναι $h_0 = D$. Για $t > 0$ αρχίζει να εισέρχεται στο έδαφος μια ένταση παροχής I_τ , η οποία οφείλεται σε άρδευση ή βροχόπτωση. Έτσι γι' αυτούς τους χρόνους θα λαμβάνει χώρα ανύψωση της υπόγειας στάθμης η οποία στο μεσοδιάστημα των στραγγιστικών αγωγών θα ανέρχεται από τη θέση $h_0 = D$ στη θέση $h_i = h_j$ για $t = t_i$ ή στη θέση $h_i = h_j$ για

$t=t_j$, όπου $t_j > t_i$. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε από τους Van de Leur και Maasland, οι οποίοι όμως γραμμικοποίησαν τη μερική διαφορική εξίσωση με τον πρώτο τρόπο γραμμικοποίησης όπως προαναφέρεται, ο οποίος θεωρείται ο λιγότερο ακριβής.

Έχοντας σαν βάση την αδιάστατη εξίσωση (12) και εκτελώντας υπολογισμούς βάσει των αρχικών και οριακών συνθηκών του προβλήματος έχουμε ότι:

$$h^2(x, t) = D^2 + \frac{I_\tau L^2}{K} \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] - \frac{I_\tau L^2}{4K} \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin \left(n\pi \frac{x}{L} \right) e^{-n^2 \pi^2 \frac{at}{L^2}} \quad (15)$$

Η εξίσωση αυτή δίνει, για οποιοσδήποτε τιμές των x και t , το ύψος της στάθμης του υπόγειου νερού από το αδιαπέρατο υπόστρωμα, όταν υπάρχει μια επαναπλήρωση από βροχόπτωση ή άρδευση, χωρίς όμως διαρροή.

3.4 Πειραματική διαδικασία

Για την πειραματική διερεύνηση του προβλήματος της ασταθούς κίνησης υπόγειου νερού προς στραγγιστικούς αγωγούς, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο άμμου με δεξαμενή σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου. Το μοντέλο άμμου με την δεξαμενή, αποτέλεσε μια αναπαράσταση (σε σμίκρυνση) ενός εδάφους που οριοθετείται από δύο παράλληλες τάφρους. Κατά μήκος της βάσης της κεντρικής δεξαμενής υπήρχαν 25 οπές, με μεταξύ τους απόσταση 10 cm, με τη πρώτη και τελευταία να απέχουν 25 cm από τις χαλύβδινες μικρές έδρες, και 5 cm από τα διαφράγματα. Αυτές οι οπές ήταν συνδεδεμένες με τριχοειδείς σωλήνες οι οποίοι ξεκινούν από την βάση της δεξαμενής και καταλήγουν σε βαθμονομημένο πίνακα. Ο προσδιορισμός της μηχανικής σύστασης έγινε με την μέθοδο Βουγιούκου. Το έδαφος αποτελείται από 88.8% άμμο, 1.6% ιλύ και 9.6% άργιλο και ανήκει στην κατηγορία Loamy Sand. Τέλος, η κοκκομετρική σύσταση παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Σύμφωνα με τους Morris & Johnson (1967), το ανωτέρω έδαφος ανήκει στην κατηγορία της μέσης άμμου.

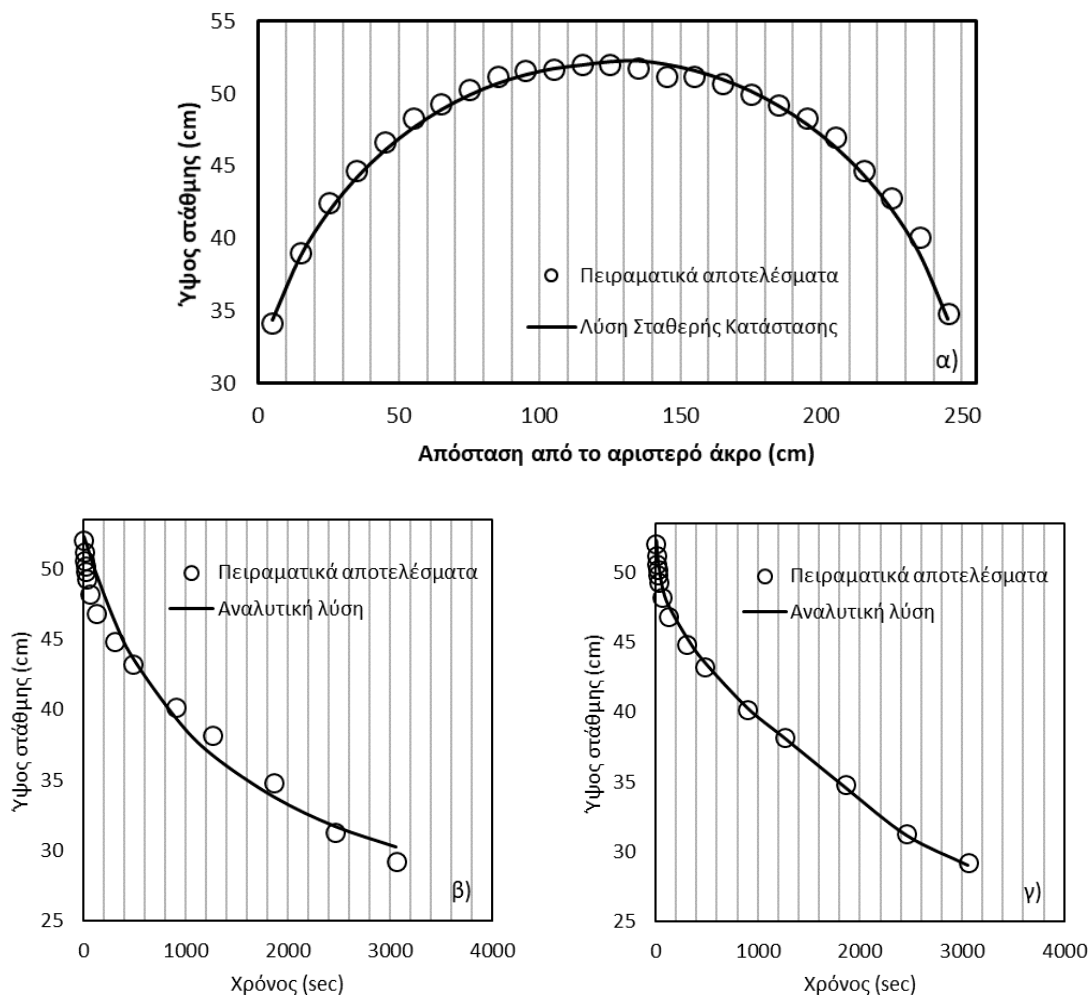
Πίνακας 2. Κατανομή μεγέθους κόκκων άμμου.

Τάξη μεγέθους (μm)	Καθαρό βάρος (gr)
$x > 500$	22.46
$500 > x > 250$	66.89
$250 > x > 125$	9.58
$125 > x > 105$	0.59
$105 > x > 53$	0.35
$53 > x$	0.13

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Καμπύλη αρχική υπόγεια στάθμη χωρίς επαναπλήρωση και διαρροή (Πρόβλημα των Glover-Dumm)

Στο Σχήμα (1α) που ακολουθεί φαίνεται η αρχική κατάσταση ($t=0$) και στο Σχήμα (1β) η μεταβολή του ύψους στάθμης σε συνάρτηση με τον χρόνο για ειδική απόδοση σε νερό ίση με 0.32. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα (1β) η αναλυτική λύση για ειδική απόδοση σε νερό 0.32 προσεγγίζει το πρόβλημα ικανοποιητικά. Η μέγιστη διαφορά παρατηρείται κατά τους αρχικούς χρόνους και ανέρχεται σε 5.70%.



Σχήμα 1. (α) Καμπύλη αρχική υπόγεια στάθμη χωρίς επαναπλήρωση και διαρροή, αρχική κατάσταση για $t=0$, **(β)** Μεταβολή ύψους στάθμης σε συνάρτηση με τον χρόνο για ειδική απόδοση σε νερό ίση με 0.32 (από Πίνακα 1), στο σημείο ισαποχής ($L/2$), **(γ)** Μεταβολή ύψους στάθμης σε συνάρτηση με τον χρόνο για μεταβαλλόμενη με το χρόνο ειδική απόδοση σε νερό, στο σημείο ισαποχής ($L/2$).

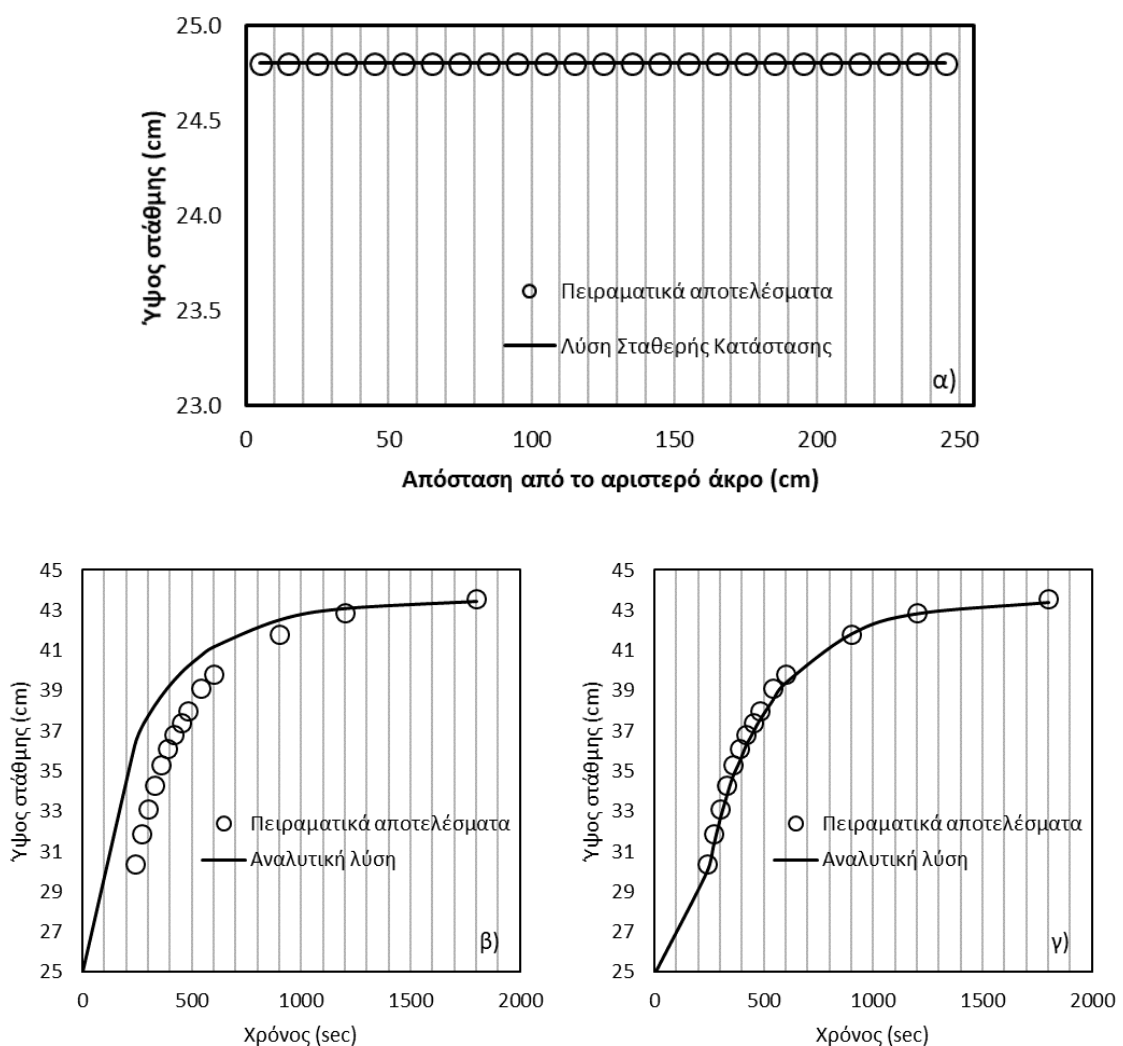
Όμως, όπως προαναφέρεται, η ειδική απόδοση σε νερό δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με τον χρόνο. Στο Σχήμα (1γ) παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους στάθμης για μεταβλητή ειδική απόδοση σε νερό για κάθε χρονικό βήμα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα (1γ) η αναλυτική λύση προσεγγίζει εξαιρετικά το πρόβλημα. Η μέγιστη διαφορά παρατηρείται κατά τους αρχικούς χρόνους

και ανέρχεται σε 1.90%. Με εξαίρεση τους χρόνους από 5 sec έως 120 sec, όπου η μέση τιμή της ειδικής σε νερό απόδοσης είναι περί το 0.15, για χρόνους από 5 min έως και 50 min η μέση τιμή της ειδικής σε νερό απόδοσης είναι περί το 0.32, τιμή που επιβεβαιώνει τις μετρήσεις των Morris και Johnson.

4.2 Ανύψωση υπόγειας στάθμης εξαιτίας επαναπλήρωσης από βροχόπτωση ή διαρροή (Πρόβλημα των Van de Leur και Maasland)

Στο Σχήμα (2^α) που ακολουθεί φαίνεται η αρχική κατάσταση ($t=0$) και στο Σχήμα (2β) η μεταβολή του ύψους στάθμης σε συνάρτηση με τον χρόνο για ειδική απόδοση σε νερό ίση με 0.32.

Της φαίνεται και στο Σχήμα (2β) η αναλυτική λύση για ειδική απόδοση σε νερό 0.32 προσεγγίζει το πρόβλημα ικανοποιητικά για χρόνους μεγαλύτερους από 15 min. Η μέγιστη διαφορά παρατηρείται κατά της αρχικούς χρόνους και ανέρχεται σε 16.17%.



Σχήμα 2. (α) Ανύψωση υπόγειας στάθμης εξαιτίας επαναπλήρωσης από βροχόπτωση ή διαρροή, αρχική κατάσταση για $t=0$, (β) Μεταβολή ύψους στάθμης σε συνάρτηση με τον χρόνο για ειδική απόδοση σε νερό ίση με 0.32 (από Πίνακα 1), στο σημείο ισαποχής ($L/2$), (γ) Μεταβολή ύψους στάθμης σε συνάρτηση με τον χρόνο για μεταβαλλόμενη με το χρόνο ειδική απόδοση σε νερό, στο σημείο ισαποχής ($L/2$).

Στο Σχήμα (2γ) παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους στάθμης για μεταβλητή ειδική απόδοση σε νερό για κάθε χρονικό βήμα. Της φαίνεται και στο Σχήμα (2γ) η αναλυτική λύση προσεγγίζει το πρόβλημα εξαιρετικά. Η μέγιστη διαφορά παρατηρείται κατά της αρχικούς χρόνους και ανέρχεται σε 2.31%. Με εξαίρεση της χρόνους από 5sec έως 6min, όπου η μέση τιμή της ειδικής σε νερό απόδοσης είναι περί το 0.99, για χρόνους από 6,5min έως και 50min η μέση τιμή της ειδικής σε νερό απόδοσης είναι περί το 0.49.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ορθότητα των νεότερων αναλυτικών λύσεων. Καταδεικνύουν όμως το μεγάλο πρόβλημα του προσδιορισμού της ειδικής σε νερό απόδοσης, που απαιτείται για την εφαρμογή τους. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα, η χρήση του μοναδικού πίνακα με τιμές για την ειδική σε νερό απόδοση (Πίνακας 1), δύναται να χρησιμοποιηθεί για εδάφη στα οποία λαμβάνει χώρα πτώση της στάθμης, όμως σε περιπτώσεις κατά τις οποίες λαμβάνει χώρα άνοδος της στάθμης, και η πρότερη υγρασιακή κατάσταση του εδάφους είναι ξηρή, τα αποτελέσματα θα πρέπει να λαμβάνονται με επιφύλαξη ως προς την ορθότητα κατά τους πρώτους χρόνους.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ζήσης Θ.Σ., 1980. Αριθμητική επίλυση της εξίσωσης του Boussinesq με μεταβαλλόμενη την ειδική σε νερό απόδοση. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εργ. Γεν. και Γεωργ. Υδραυλικής και Βελτιώσεων, Θεσσαλονίκη.
- Ζήσης, Θ., Καλαϊτζίδου – Πάικου, Ν. και Καραμούζης, Δ., 1995. *Ασταθής στράγγιση πάνω από ημίκλειστο υδροφορέα σε περιοδικά πλημμυρισμένο στραγγιστικό δίκτυο*. Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 473-481.
- Καραμούζης Δ.Ν., 2012. *Στραγγίσεις εδαφών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Καραμούζης Δ.Ν., 1976. Επίλυσις της Εξίσωσης του Boussinesq δια της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εργ. Γεν. και Γεωργ. Υδραυλικής και Βελτιώσεων, Θεσσαλονίκη.
- Καραμούζης, Δ.Ν. και Τερζίδης Γ.Α., 1980. *Μη Γραμμική Ασταθής Διδιάστατη Ροή με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*. Πρακτ. II Πανελ. Σεμ. Υδρολογίας, τομ. II, 393-425.
- Τερζίδης, Γ.Α., 1969. *Ασταθής Στράγγισις Γεωργικών Εδαφών*. Τεχνικά Χρονικά, τευχ. 4, 254-257.
- Τερζίδης, Γ.Α, 1983. *Γραμμικοποιήσεις και Λύσεις Ομοιότητας της Εξίσωσης του Boussinesq*. Υδροτεχνικά, τομ. 1, τευχ. 1, 151-162, Θεσσαλονίκη.
- Τερζίδης, Γ.Α. και Καραμούζης Δ.Ν., 1986. *Στραγγίσεις γεωργικών εδαφών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Τερζίδης, Γ.Α. και Ζήσης Θ.Σ., 1983. *Ασταθής Στράγγιση με Μεταβαλλόμενη την Ειδική σε Νερό Απόδοση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*. Δελτ. Ε.Ε.Α.Α., τευχ. 1-2, 21-28.

- Τζιμόπουλος Χ., 1975. *Εφαρμογή της Εξισώσεως Boussinesq εις Προβλήματα της Υπογείου Υδραυλικής*. Τεχνικά Χρονικά, τευχ. 2, 103-112.
- Boussinesq, J., 1903. *Sur le débit, en temps de sècheresse, d'une source alimentée par une nappe d'eaux d'infiltration*. Comptes rendus Sciences Académie des Sciences 136: 1511-1517.
- Boussinesq, J., 1904. *Recherches Théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources*. Journal Mathématiques pures et Appliquées, (5 séries), Tome X-Fasc. 1, 5-58.
- Dumm, L.D., 1964. *Transient – Flow Concept in Subsurface Drainage: It's Validity and Use*. Trans of the ASAE, volume 7, No 2, 142-146, 151.
- Dumm, L.D. 1968 *Subsurface Drainage by Transient – Flow Theory*. Journal of Irrigation and Drain, Div., PASCE, volume 94, IR4, 505-519.
- Glover, R.E., 1964 *Ground-Water Movement*. Engineering Monograph No. 31, Office of Chief Engineer, Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, Denver, Colorado.
- Karamouzis, D., and Terzidis, G., 1984. *Computation of the unsteady two – dimensional free surface of groundwater by the finite – element method*. Journal of Hydrology, 74: 53-65.
- Karamouzis, D., Zissis, T., and Terzidis, G.. 1988. *Nondimensional Diagrams for Unsteady Drainage Problems With or Without Recharge*. J. of Agricultural Water Management, 13: 145-156.
- Karamouzis, D.N., 1991. *Unsteady drainage problems for soils laying on semi-confined aquifers*. Advances in Water Resources Technology, by G. Tsalikis (ed.), Balkema, pp. 225-234.
- Karamouzis, D.N. and Teloglou, I.S., 1993. *Analytical solutions of unsteady drainage problems for soils subjected to variable recharge from a semi-confined aquifer*. Water Resources Management 7: 153-168.
- Maasland, M., 1957. *Soil anisotropy and land drainage*. In J.N. Luthin (ed.) Drainage of agricultural lands. Agronomy 7: 216-285. American Society of Agronomy, Madison Wisconsin.
- Morris, D.A. and Johnson A.J., 1967. *Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Material, as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey 1948-60*. Geological Survey Water-Supply Paper 1839-D.
- Rossi, M., Ippisch, O., Flühler, H., 2008. *Solute dilution under imbibition and drainage conditions in a heterogeneous structure: Modeling of a sand tank experiment*. Advances in Water Resources, Vol 31.
- Tzimopoulos, C., 1976. *Solution de l'équation de Boussinesq par une méthode des éléments finis*. Journal of Hydrology, 30 : 1-18.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΣΤΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗΜΕΤΡΟΥ ΚΛΑΣΗΣ Α ΣΕ ΗΜΙΞΗΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Κ. Μπαμπάκος¹, Β. Ασχονίτης^{2✉}, Β. Αντωνόπουλος¹ & Δ. Παπαμιχαήλ¹

1Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσ/νίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, 54124, Θεσ/νίκη

2Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων ΕΛΓΟ - ΔΗΜΗΤΡΑ, 57001, Θέρμη-Θεσσαλονίκης

✉v.aschonitis@swri.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η ευρωστία πέντε μοντέλων υπολογισμού του όρου k_p για την έμμεση εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς ET_0 με χρήση μετρήσεων εξατμισομέτρου. Οι συντελεστές των παραμέτρων των μοντέλων αναβαθμονομήθηκαν με δεδομένα από την περιοχή του αεροδρομίου Θεσσαλονίκης με χρήση απλής και bootstrap μη γραμμικής παλινδρόμησης για την εξαγωγή του βαθμού στατιστικής σημαντικότητας (p-value) και την ανάλυση του 95% εύρους των τιμών των συντελεστών μέσω της κατανομής μέγιστης οπίσθιας πυκνότητας. Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης των πέντε μοντέλων ενώ ήταν ικανοποιητικά, η στατιστική σημαντικότητα των συντελεστών τους που συνδέονται με την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική υγρασία ήταν μη αποδεκτή. Μία απλή γραμμική σχέση υπολογισμού της ET_0 με χρήση δεδομένων E_{pan} επέδειξε ισοδύναμη εμφάνιση παλινδρόμησης με στατιστικά σημαντικούς συντελεστές.

Λέξεις κλειδιά: εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, εξάτμιση, παλινδρόμηση, μέθοδος bootstrap

EVALUATING MODELS OF CLASS A PAN COEFFICIENT UNDER SEMI-ARID CONDITIONS

K. Babakos¹, V. Aschonitis^{2✉}, V. Antonopoulos¹ & D. Papamichail¹

1Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, 54124, Thessaloniki

2Soil and Water Resources Institute, Hellenic Agricultural Organization - Demeter, 57001, Themi-Thessaloniki

✉v.aschonitis@swri.gr

ABSTRACT

In the present study, the robustness of five k_p models were evaluated for indirect estimations of reference crop evapotranspiration ET_0 using pan evaporation measurements. The coefficients of models' parameters were recalibrated with data from the airport area of Thessaloniki by performing simple and bootstrap non-linear regression analysis in order to evaluate the statistical significance of the coefficients (p-value) and the 95% interval of high posterior density distribution of their values. Despite the good fitting performance of the five models, the statistical significance of the coefficients related to wind speed and relative humidity parameters was not acceptable. A simple linear model between ET_0 and E_{pan} showed equivalent fitting performance and statistically significant coefficients.

Keywords: reference evapotranspiration, evaporation, regression analysis, bootstrap

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τη διατήρηση της καλής ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης των υδατικών πόρων μίας λεκάνης απορροής, στην οποία απαντώνται αρδευόμενες εκτάσεις, απαιτείται, μεταξύ άλλων, η ορθολογική διαχείριση του αρδευτικού νερού. Ο υπολογισμός των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών και επακόλουθα ο προγραμματισμός των αρδύσεων είναι μία μακρά διαδικασία και η βασική παράμετρος που απαιτείται είναι η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ως συνάρτηση του φυτικού συντελεστή και της καλλιέργειας αναφοράς ET_0 . Για τον υπολογισμό της ET_0 έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι που διαφέρουν ως προς την ακρίβεια και τα απαιτούμενα δεδομένα.

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι υπολογισμού της ET_0 είναι κυρίως τροποποιήσεις της μαθηματικής έκφρασης του ισοζυγίου ενέργειας και η χρησιμοποίησή τους απαιτεί τη λεπτομερή καταγραφή παρατηρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων. Οι σημαντικότερες μέθοδοι εκτίμησης της ET_0 είναι η μέθοδος Penman (1948; 1956; 1963), η Blaney-Criddle (1950), η τροποποιημένη Blaney-Criddle κατά FAO-24 (Doorembos and Pruitt, 1977), η Priestley-Taylor (1972), η τροποποιημένη FAO-24 (Allen and Pruitt, 1991), η Kimberly Penman (Wright, 1982), η CIMIS Penman (Snyder and Pruitt, 1985), η Shuttleworth and Wallace (1985), η Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1982; 1985), η FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998) και η ASCE-standardized Penman-Monteith (Allen et al., 2005).

Από τις παραπάνω μεθόδους, η FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998) είναι η πιο διαδεδομένη και για τον υπολογισμό της απαιτούνται παρατηρήσεις όλων των μετεωρολογικών παραμέτρων, δηλαδή της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες δεν είναι πάντα διαθέσιμες. Η τελευταία βελτίωσή της που καλείται ASCE-standardized Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005) έχει χαρακτηριστεί ως η πλέον ακριβής μέθοδος εκτίμησης της ET_0 και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται και ως βάση για τη ρύθμιση άλλων μεθόδων μειωμένων παραμέτρων.

Η ανεπάρκεια μετεωρολογικών δεδομένων οδήγησε πολλούς ερευνητές στη διερεύνηση μεθόδων λιγότερο απαιτητικών σε δεδομένα εισόδου. Χαρακτηριστική είναι η μέθοδος του εξατμισιμέτρου κατά την οποία υπολογίζεται η ET_0 με τη χρήση μετρήσεων εξατμίσου από εξατμισόμετρο, E_{pan} , και του ειδικού συντελεστή εξατμισιμέτρου, k_p , ο οποίος εξαρτάται και από τη φύση του περιβάλλοντος χώρου στο οποίο είναι τοποθετημένο (Allen et al., 1998; Παπαζαφειρίου, 1999). Για την περίπτωση του εξατμισιμέτρου κλάσης A (class A pan) έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα παλινδρόμησης του συντελεστή k_p ως συνάρτηση της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας ανέμου και της απόστασης του εξατμισιμέτρου από το όριο της φυτοκάλυψης γρασιδιού μέσα στην οποία εδράζεται (Cuenca, 1989; Allen and Pruitt, 1991; Snyder, 1992; Pereira et al., 1995; Orang, 1998; Raghuwanshi and Wallender, 1998). Η συνήθης διαδικασία ρύθμισης των μοντέλων k_p γίνεται με βάση την ET_0 ως εξαρτημένη μεταβλητή, η οποία υπολογίζεται από μία μέθοδο που απαιτεί πλήρη μετεωρολογικά δεδομένα (π.χ. ASCE) και όχι από πραγματικές μετρήσεις ET_0 (π.χ. ζυγιστικού λυσιμέτρου με κάλυψη γρασιδιού). Η παραπάνω διαδικασία ρύθμισης ενώ ακολουθείται κατά κόρον, παραβιάζει έναν βασικό στατιστικό κανόνα σύμφωνα με τον οποίο παράμετροι που εμπλέκονται στην εξαρτημένη μεταβλητή δεν πρέπει να συμμετέχουν ανεξάρτητες μεταβλητές (π.χ. η ταχύτητα του ανέμου και η σχετική υγρασία συμμετέχουν και στην ET_0 και στο k_p). Να σημειωθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται πραγματικές μετρήσεις της ET_0 δεν παραβιάζεται ο παραπάνω στατιστικός κανόνας.

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση της ευρωστίας (robustness) υφιστάμενων μοντέλων υπολογισμού του συντελεστή εξατμισιμέτρου k_p , τα οποία χρησιμοποιούν ως μεταβλητές κλιματικά

δεδομένα. Η αξιολόγηση των εν λόγω μοντέλων θα επιτευχθεί μέσω του υπολογισμού του εύρους διακύμανσης και της στατιστικής σημαντικότητας των συντελεστών τους. Για τη διερεύνηση θα χρησιμοποιηθούν ημερήσια κλιματικά δεδομένα και δεδομένα εξάτμισης από εξατμισήμετρο κλάσης A από την περιοχή του αεροδρομίου Θεσσαλονίκης των καλλιεργητικών περιόδων (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) των ετών 2008 και 2009.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς

Η εξίσωση των Penman-Monteith κατά ASCE, η οποία προτάθηκε από την ASCE-EWRI Task Committee, αποτελεί βελτίωση της εξίσωσης κατά FAO-56 (Allen et al., 1998) και υπολογίζεται είτε σε ημερήσιο είτε σε ωριαίο χρονικό βήμα για δύο τύπους καλλιέργειας αναφοράς (χαμηλή και υψηλή καλλιέργεια αναφοράς) και δίνεται από τη σχέση (Allen et al., 2005):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{c_n}{(T+273.16)} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (1)$$

όπου ET_0 : η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (mm day^{-1} για ημερήσιο χρονικό βήμα), R_n : η καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ για ημερήσιο χρονικό βήμα), u_2 : η ταχύτητα ανέμου στα 2 m από την επιφάνεια του εδάφους (m sec^{-1}), T : η μέση θερμοκρασία αέρα ανάλογα ($^{\circ}\text{C}$), G : η κατακόρυφη ροή ενέργειας από το έδαφος που μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμική ενέργεια ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ για ημερήσιο χρονικό βήμα), e_s : η πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa), e_a : η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa), Δ : η κλίση της καμπύλης στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών και θερμοκρασίας ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : η ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), C_n : ο συντελεστής του τύπου της καλλιέργειας αναφοράς και C_d : ο συνδυαστικός συντελεστής επίδρασης αεροδυναμικής αντίστασης λόγω πυκνότητας και ύψους της φυτοκάλυψης της καλλιέργειας αναφοράς.

Αναφορικά με το χρονικό βήμα υπολογισμού και τον τύπο καλλιέργειας αναφοράς (υψηλή ή χαμηλή) οι παράμετροι C_n , C_d και G διαφοροποιούν τη σχέση (1). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου το χρονικό βήμα υπολογισμού είναι το ημερήσιο και για χαμηλή καλλιέργεια αναφοράς, η μέθοδος Penman-Monteith κατά ASCE ταυτίζεται με τη FAO-56 Penman-Monteith. Επομένως, οι παράμετροι C_n , C_d και G παίρνουν τις τιμές 900, 0.34 και 0, αντίστοιχα.

2.2 Μέθοδος του εξατμισημέτρου

Η μέθοδος του εξατμισημέτρου είναι μία διαδεδομένη μέθοδος υπολογισμού της ET_0 που απαιτεί μετρήσεις εξάτμισης από ελεύθερη επιφάνεια νερού, E_{pan} , και τον υπολογισμό του k_p , ο οποίος εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες και από τη φύση του περιβάλλοντος χώρου στο οποίο είναι τοποθετημένο (πράσινη επιφάνεια ή γυμνό έδαφος) (Allen et al., 1998; Παπαζαφειρίου, 1999). Οι Doorenbos and Pruitt (1975; 1977) πρότειναν τη χρήση του εξατμισημέτρου τύπου λεκάνης, το εξατμισήμετρο κλάσης A. Το εξατμισήμετρο κλάσης A, της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ, είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο εργαλείο μέτρησης της εξάτμισης από ελεύθερη επιφάνεια νερού. Επιπλέον, οι Doorenbos and Pruitt (1977) δίνουν προτεινόμενες τιμές του k_p , οι οποίες προέκυψαν από μετρήσεις ET_0 και E_{pan} , για διάφορες συνθήκες. Η γενική εξίσωση της μεθόδου του εξατμισημέτρου είναι η εξής:

$$ET_0 = k_p E_{pan} \quad (2)$$

όπου E_{pan} : η καταγεγραμμένη εξάτμιση από το εξατμισήμετρο (mmday^{-1}) και k_p : ο συντελεστής του εξατμισήμετρου.

Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία το εύρος των τιμών του k_p είναι περίπου από 0.3 έως 1.1 (Snyder, 1992; Allenetal., 1998; Gundekaretal., 2008; Rahimikhoob, 2009; Sabziparvaretal., 2010; Aschonitisetal., 2012). Προσπάθειες έχουν γίνει για τον έμμεσο υπολογισμό του k_p απευθείας από τα μετεωρολογικά δεδομένα και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος χώρου με τις σημαντικότερες από αυτές των Cuenca (1989), Allen and Pruitt (1991), Snyder (1992), Pereiraetal. (1995), Orang (1998) και Raghuwanshi and Wallender (1998), οι οποίες αφορούν τη χαμηλή καλλιέργεια αναφοράς και δίνονται αντίστοιχα από τις παρακάτω σχέσεις:

$$k_p = 0.475 - 2.4 \times 10^{-4}u_2 + 5.16 \times 10^{-3}RH + 1.18 \times 10^{-3}F - 1.6 \times 10^{-5}RH^2 - 1.01 \times 10^{-6}F^2 - 8 \times 10^{-9}RH^2u_2 - 1 \times 10^{-8}RH^2F \quad (3)$$

$$k_p = 0.108 - 0.000331u_2 + 0.0422\ln(F) + 0.1434\ln(RH) - 0.000631[\ln(F)]^2\ln(RH) \quad (4)$$

$$k_p = 0.482 - 0.000376u_2 + 0.024\ln(F) + 0.0045RH \quad (5)$$

$$k_p = \frac{0.85(\Delta + \gamma)}{[\Delta + \gamma(1 + 0.33u_2)]} \quad (6)$$

$$k_p = 0.51206 - 0.000321u_2 + 0.031886\ln(F) + 0.002889RH \quad (7)$$

$$k_p = 0.5944 + 0.0242X_1 - 0.0583X_2 - 0.1333X_3 - 0.2083X_4 + 0.0812X_5 + 0.1344X_6 \quad (8)$$

όπου RH: η μέση ημερήσια σχετική υγρασία (%), u_2 : η μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου στα 2m από το έδαφος (kmd^{-1}) για τις σχέσεις (3, 4, 5, 7) και σε (msec^{-1}) για τη σχέση (6) και F: η απόσταση από αναπτυσσόμενη καλλιέργεια στην προσάνεμη πλευρά τις μέσης διεύθυνσης του ανέμου (m). Για τη σχέση (8) οι παράγοντες έχουν ως εξής $X_1=\ln(F)$, X_2 , X_3 και X_4 : οι κλάσεις εύρους τις ταχύτητας του ανέμου 175-425, 425-700 και $>700 \text{ kmd}^{-1}$, αντίστοιχα, οι οποίες ορίζονται με 0 ή 1 ανάλογα με την παρουσία τους (για ταχύτητες $<175 \text{ kmd}^{-1}$ όλα είναι μηδέν), X_5 και X_6 : οι κλάσεις εύρους τις σχετικής υγρασίας 40-70% και $>70\%$, αντίστοιχα, οι οποίες ορίζονται με 0 ή 1 ανάλογα με την παρουσία τους (για σχετική υγρασία $\leq 40\%$ όλα είναι μηδέν).

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Δεδομένα

Για τις αναλύσεις στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από μετεωρολογικό σταθμό του αγροκτήματος του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης ($40^\circ 32' 08'' \text{N}$, $22^\circ 59' 18'' \text{E}$) και κάλυπταν τους μήνες Απριλίου-Οκτωβρίου των ετών 2008 και 2009. Οι καταγεγραμμένες παρατηρήσεις αφορούσαν ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας, της ταχύτητας του ανέμου, της βροχής και της εξάτμισης από εγκατεστημένο εξατμισήμετρο κλάσης A.

3.2 Μέθοδοι ανάλυσης

Στις πειραματικές προσπάθειες των Doorenbos and Pruitt, (1977) οι οποίοι πρότειναν πινακοποιημένες τιμές του k_p , τα εξατμισήμετρα τοποθετήθηκαν σε σημεία τέτοια που το Φείχε τις τιμές 1, 10, 100 και 1000m. Στην παρούσα διερεύνηση το Φ ήταν ίσο με ~1m, και ως εκ τούτου η αξιολόγηση των σχέσεων (3) έως (7) αφορά αυτές τις συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου. Εξαιρείται από τη διερεύνηση το γενικευμένο γραμμικό μοντέλο των Raghuvanshi and Wallender (1998) (σχέση 8) διότι οι διαθέσιμες μετρήσεις εξατμίσης δεν επαρκούσαν για την παλινδρόμηση δεδομένων των κλάσεων των συντελεστών της. Θέτοντας $F=1$ στις εξισώσεις του k_p , και αντικαθιστώντας τα νούμερα των τελικών συντελεστών με γενικούς όρους, προκύπτουν οι εξής τροποποιημένες σχέσεις, οι οποίες αντιστοιχούν με τη σειρά στις σχέσεις (3) έως (7):

$$k_p = a + b \cdot u_2 + c \cdot RH + d \cdot RH^2 + e \cdot RH^2 \cdot u_2 \quad (9)$$

$$k_p = a + b \cdot u_2 + c \cdot \ln(RH) \quad (10)$$

$$k_p = a + b \cdot u_2 + c \cdot RH \quad (11)$$

$$k_p = \frac{a(\Delta + \gamma)}{[\Delta + \gamma(b + c \cdot u_2)]} \quad (12)$$

$$k_p = a + b \cdot u_2 + c \cdot RH \quad (13)$$

Επισημαίνεται ότι η σχέση (7) (Orang), για $F=1$ μαποκτά την ίδια μορφή με τη σχέση (5) (Snyder) (νέες εξισώσεις 11 και 13).

Αξιοποιώντας τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα υπολογίστηκαν οι τιμές της ET_o με τη μέθοδο ASCE (σχέση 1). Για την ανάλυση ευρωστίας των πέντε μοντέλων k_p (σχέσεις 9-13) με βάση την ET_o και την E_{pan} (σχέση 2), πραγματοποιήθηκε απλή και bootstrap ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη “nlsl” της γλώσσας R (Ritz and Streibig, 2008) στην οποία είναι ενσωματωμένος ο αλγόριθμος μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων “nl2sol” (Dennis et al., 1981). Η απλή μη γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιήθηκε με στόχο την εξαγωγή της στατιστικής σημαντικότητας (p-value) των συντελεστών των μοντέλων k_p ενώ η bootstrap μη γραμμική παλινδρόμηση για την ανάλυση του εύρους των εκτιμώμενων τιμών τους. Η μέθοδος bootstrap μη γραμμικής παλινδρόμησης δίνει τη δυνατότητα σύνθεσης μεγάλου σετ νέων δεδομένων, αφαιρώντας, σε κάθε επανάληψη, έναν αριθμό δεδομένων (ζεύγη) και αντικαθιστώντας τα τυχαία με κάποια από τα ήδη υπάρχοντα (Efron and Tibshirani, 1994). Ο αριθμός των επαναλήψεων που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη μέθοδο ήταν 1000. Η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρείται από τις πιο δημοφιλείς για την εκτίμηση της διακύμανσης των συντελεστών παλινδρόμησης.

Η ανάλυση του εύρους διακύμανσης των συντελεστών των μοντέλων k_p έγινε υπολογίζοντας το 95% μεσοδιάστημα της κατανομής πυκνότητας πιθανότητας, το οποίο καλείται και μεσοδιάστημα εμπιστοσύνης κατά Bayes. Η συγκεκριμένη διαδικασία έγινε χρησιμοποιώντας την κατανομή μέγιστης οπίσθιας πυκνότητας (High Posterior Density Distribution - HPD) για την περιγραφή της κατανομής πιθανότητας των 1000 εκτιμήσεων κάθε συντελεστή. Η συγκεκριμένη διαδικασία

περατώθηκε χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη “p.interval{LaplacesDemon}” της γλώσσας R (Bernardo 2005), η οποία έχει τη δυνατότητα περιγραφής κατανομών πυκνότητας πιθανότητας μίας ή περισσότερων κορυφών.

Εκτός από την αξιολόγηση της στατιστικής σημαντικότητας των παραμέτρων που υπεισέρχονται στις υπό διερεύνηση σχέσεις, διερευνήθηκε και η σχέση μεταξύ της ET_0 και της E_{pan} χωρίς τη συμμετοχή μετεωρολογικών παραμέτρων. Η διερεύνηση του τύπου συσχέτισης μεταξύ των δύο παραμέτρων έγινε με τη χρήση του στατιστικού πακέτου Statgraphic στο οποίο δίνει τη δυνατότητα διερεύνησης και επιλογής της βέλτιστης γραμμικής συσχέτισης με διάφορους τύπους μετασχηματισμένων μεταβλητών. Από τη διερεύνηση προέκυψε ότι η γραμμική σχέση μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας της ET_0 και της λογαριθμημένης E_{pan} αποτελεί τη βέλτιστη μορφή συσχέτισης των δύο μεταβλητών (σχέση 14). Στη συνέχεια η στατιστική σημαντικότητα και το εύρος των συντελεστών της σχέσης (14) αναλύθηκε με την ίδια μεθοδολογία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

$$\sqrt{ET_0} = a + b \cdot \ln(E_{pan}) \rightarrow ET_0 = \{a + b \cdot \ln(E_{pan})\}^2 \quad (14)$$

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση της απλής μη γραμμικής παλινδρόμησης εκτιμήθηκαν οι τιμές p-value της στατιστικής σημαντικότητας των συντελεστών των σχέσεων (9) έως (14), οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 1. Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 1 προκύπτει ότι εννιά στους δέκα συντελεστές των μοντέλων που σχετίζονται με τις παραμέτρους της ταχύτητας του ανέμου και της σχετικής υγρασίας δεν είναι στατιστικώς σημαντικοί για επίπεδο εμπιστοσύνης $p < 0.05$ (η μόνη εξαίρεση είναι ο συντελεστής της εξίσωσης 12, η οποία είναι οριακά στατιστικώς σημαντική).

Πίνακας 1. Η τιμή p-value των συντελεστών των υπό αξιολόγηση σχέσεων μέσω απλής μη γραμμικής παλινδρόμησης.

Συντελεστής	a	b	c	d	e
Cuenca (1989) (σχέση 9)	0.002	0.820*	0.951*	0.832*	0.783*
Allen and Pruitt (1991) (σχέση 10)	0.001	0.315*	0.129*	-	-
Snyder (1992), Orang (1998) (σχέση 11 και 13)	<0.001	0.281*	0.114*	-	-
Pereira et al. (1995) (σχέση 12)	<0.001	0.148*	0.038*	-	-
Νέα σχέση (14)	<0.001	<0.001	-	-	-

*Συντελεστές που σχετίζονται με τις παραμέτρους της ταχύτητας του ανέμου και της σχετικής υγρασίας.

Πίνακας 2. Στατιστικά χαρακτηριστικά των συντελεστών των παραμέτρων της σχέσης α) Cuenca, β) Allen and Pruitt, γ) Snyder/Orang, δ) Pereira et al. και ε) νέας σχέσης 14, μέσω της μεθόδου της μη γραμμικής παλινδρόμησης bootstrap για 1.000 επαναλήψεις.

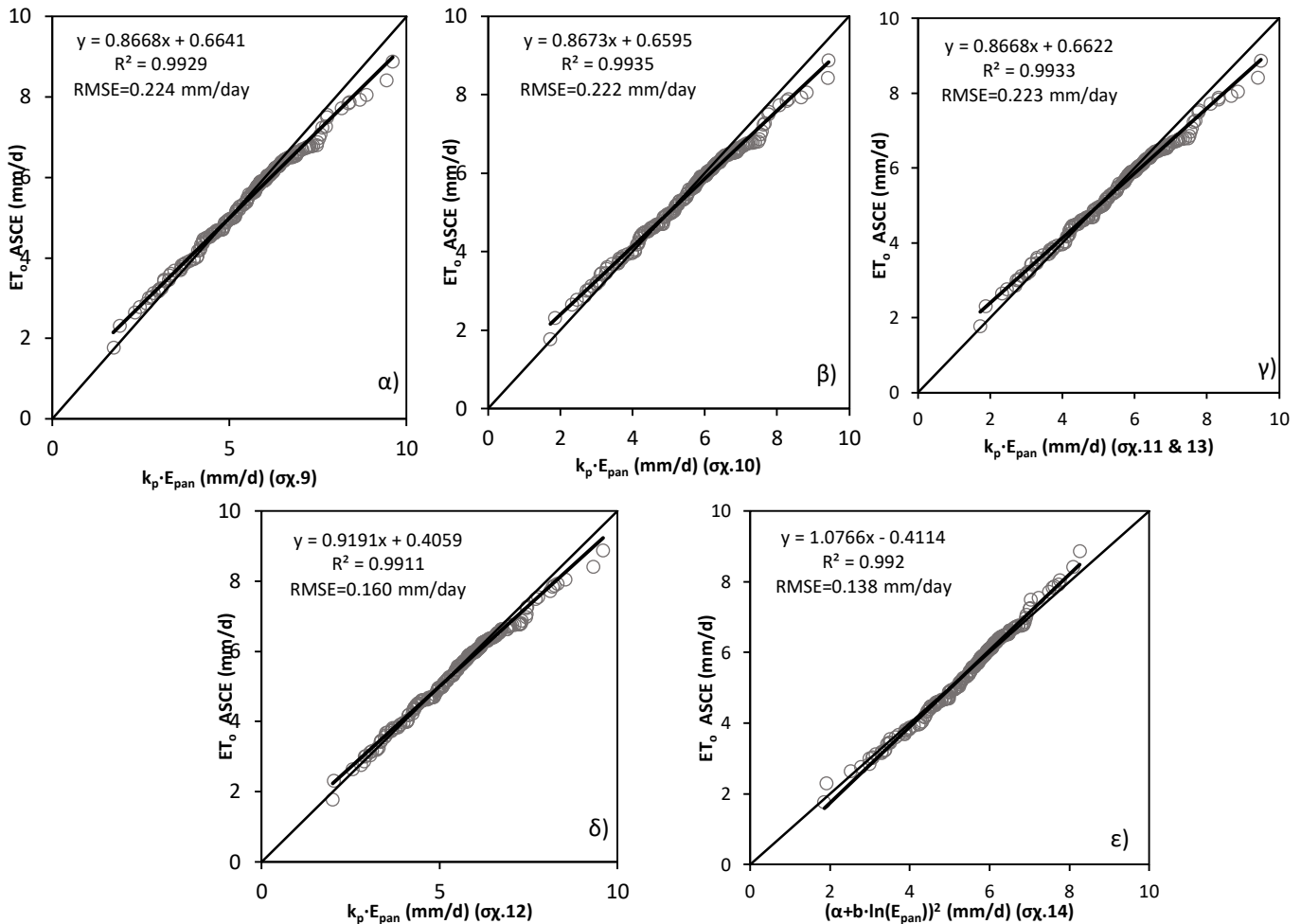
α) (Σχέση 9) Συντελεστής	a	b	c	d	e
Μέση τιμή	6.443E-01	-5.527E-03	8.438E-04	7.457E-06	-4.749E-06
Ελάχιστο	1.599E-03	-1.011E-01	-1.593E-02	-1.389E-04	-5.170E-05
Μέγιστο	1.220E+00	1.035E-01	1.992E-02	1.330E-04	3.708E-05
2.5% όριο HPD	2.304E-01	-5.971E-02	-9.931E-03	-7.530E-05	-2.820E-05
97.5% όριο HPD	9.994E-01	5.775E-02	1.257E-02	8.260E-05	2.070E-05

β) (Σχέση 10) Συντελεστής	a	b	c
Μέση τιμή	5.060E-01	-1.489E-02	5.043E-02
Ελάχιστο	8.588E-02	-5.300E-02	-7.698E-02
Μέγιστο	1.068E+00	3.146E-02	1.462E-01
2.5% όριο HPD	2.220E-01	-4.129E-02	-1.895E-02
97.5% όριο HPD	7.961E-01	8.149E-03	1.108E-01

γ) (Σχέση 11/13) Συντελεστής	a	b	c
Μέση τιμή	6.536E-01	-1.461E-02	9.689E-04
Ελάχιστο	4.969E-01	-5.716E-02	-1.686E-03
Μέγιστο	8.704E-01	2.770E-02	3.042E-03
2.5% όριο HPD	2.220E-01	-4.129E-02	-1.895E-02
97.5% όριο HPD	7.961E-01	8.149E-03	1.108E-01

δ) (Σχέση 12) Συντελεστής	a	b	c
Μέση τιμή	5.042E-01	-1.506E-01	9.712E-02
Ελάχιστο	4.077E-01	-6.926E-01	-3.793E-02
Μέγιστο	6.350E-01	5.992E-01	2.745E-01
2.5% όριο HPD	4.400E-01	-5.087E-01	1.139E-02
97.5% όριο HPD	5.697E-01	2.294E-01	1.710E-01

ε) (Σχέση 14) Συντελεστής	a	b
Μέση τιμή	5.688E-01	8.544E-01
Ελάχιστο	4.225E-01	7.609E-01
Μέγιστο	7.622E-01	9.222E-01
2.5% όριο HPD	4.561E-01	7.969E-01
97.5% όριο HPD	6.771E-01	9.009E-01



Σχήμα 1. Σύγκριση 1:1 μεταξύ της ET_o (ASCE) και της $k_p E_{pan}$ με τη σχέση α) Cuenca, β) Allen and Pruitt, γ) Snyder/Orang, δ) Pereira et al. και ε) νέα σχέση 14, με βάση τους μέσους όρους των 1000 bootstrapτιμών των συντελεστών.

Αντιστοίχως, τα αποτελέσματα της bootstrapμη γραμμικής παλινδρόμησης για την ανάλυση του εύρους διακύμανσης των συντελεστών των παραπάνω μοντέλων με βάση το 95% μεσοδιάστημα της κατανομής μέγιστης οπίσθιας πυκνότητας (HPD) δίνονται στους Πίνακες 2α έως 2ε. Τα γραφήματα 1:1 σύγκρισης $k_p E_{pan}$ vs. ET_o των παραπάνω μοντέλων δίνονται στα Σχήματα 1α έως 1ε. Από τους Πίνακες 2α έως 2ε προκύπτει ότι πέραν της μη στατιστικής σημαντικότητάς τους οι συντελεστές που

σχετίζονται με τις παραμέτρους της ταχύτητας του ανέμου και της σχετικής υγρασίας δεν μπορούν να διατηρήσουν ούτε σταθερό πρόσημο εντός του 95% εύρους διακύμανσης. Το συγκεκριμένο εύρημα αναδεικνύει ότι η ρύθμιση των μοντέλων k_p που χρησιμοποιούν τις παραμέτρους της ταχύτητας του ανέμου και της σχετικής υγρασίας είναι επισφαλής ακόμα και στην περίπτωση ρύθμισής τους για χρήση σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Αντιθέτως, στη σχέση (14) στην οποία δεν συμμετέχουν κλιματικές παράμετροι, το 95% εύρος HPDτων συντελεστών είναι περιορισμένο και χωρίς μεταβολές πρόσημο. Επιπλέον, η ικανότητα προσαρμογής της σχέσης (14) στις τιμές της ET_o κατά ASCEδεν υστερεί έναντι των άλλων μοντέλωνκαι παρουσιάζει καλύτερο RMSE, παρόλο που περιγράφεται από λιγότερους βαθμούς ελευθερίας προσαρμογής (Σχήματα 1α έως 1ε).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διερευνήθηκε η ευρωστία πέντε υφιστάμενων μοντέλων υπολογισμού του όρου k_p , ο οποίος χρησιμοποιείται στη σχέση της μεθόδου του εξατμισημέτρου για τον έμμεσο υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς ET_o από μετρήσεις εξατμισημέτρου. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση των μοντέλων για τις συνθήκες της περιοχής του αεροδρομίου Θεσσαλονίκης με τη χρήση απλής και bootstrap μη γραμμικής παλινδρόμησης για την εκτίμηση της στατιστικής σημαντικότητας των συντελεστών και του εύρους του 95% της κατανομής μέγιστης οπίσθιας πυκνότητας. Η απόδοση των αναβαθμισμένων μοντέλων ήταν ικανοποιητική, ωστόσο οι συντελεστές των εν λόγω μοντέλων που συνδέονται με την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική υγρασία δεν ήταν στατιστικώς σημαντικοί για επίπεδο εμπιστοσύνης $p < 0.05$. Επιπλέον, το γεγονός ότι το 95% της κατανομής μέγιστης οπίσθιας πυκνότητας των περισσότερων συντελεστών εκτεινόταν σε θετικές και αρνητικές τιμές, υποδεικνύει τη μη καταλληλότητα των μοντέλων. Μία απλή σχέση υπολογισμού της ET_o με χρήση δεδομένων E_{pan} χωρίς την εμπλοκή άλλων παραμέτρων επέδειξε ίδιας τάξης απόδοση με τα αναβαθμισμένα υπό αξιολόγηση μοντέλα και στατιστική σημαντικότητα των συντελεστών της για επίπεδο εμπιστοσύνης $p < 0.05$.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R.G. and Pruitt, W.O., 1991. *FAO-24 reference evapotranspiration factors*. J. Irrig. and Drain. Engng., ASCE 117(IR5): 758-773.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 300.
- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D. and Jensen, M., 2005. *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Final Report (ASCE-EWRI)*. Pr. In: Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D., Jensen, M. (Eds.), Environmental and Water Resources Institute, 2005. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration of the Environmental and Water Resources Institute.
- Aschonitis, V., Antonopoulos V.Z. and Papamichail, D., 2012. *Evaluation of pan coefficient equations in a semi-arid Mediterranean environment using the ASCE-standardized Penman-Monteith method*. Agricultural sciences, 3(1): 58-65.

- Blaney, H.F. and Criddle, W.D., 1950. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. USDA/SCS, SCS-TP 96., 44pp.
- Cuenca, R.H., 1989. *Irrigation system design. An engineering approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 133pp.
- Dennis J.J.E., Gay, D.M. and Welsh, R.E., 1981. *An adaptive nonlinear least squares algorithm*. ACM Trans Math Softw., 7:348-368.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1975. *Guidelines for predicting crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 24)*. Food and Agric. Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24, (1st and 2nd Edition)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp.179 and 156.
- Efron, B. and Tibshirani, R.J., 1994. *An introduction to the bootstrap*. - Chapman & Hall/CRC, New York.
- Frevert, D.K., Hill, R.W. and Braaten, B.C., 1983. *Estimation of FAO evapotranspiration coefficients*. J. Irrig. Drain. Eng., 109(2), 265-270.
- Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Dunson, D.B., Vehtari, A. and Rubin, D.B., 2014. *Bayesian data analysis*, 3rd edn. Taylor and Francis Group: Chapman & Hall/CRC Press, 675 pp.
- Gundekar, H.G., Khodke, U.M., Sarkar, S., Rai, R.K., 2008. *Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region*. Irrigation Science, 26: 169-175.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1982. *Estimating potential evapotranspiration*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 108: 223-230.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1985. *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Transaction of ASAE, 1(2): 96-99.
- Lanzoni, M., Aschonitis, V., Milardi, M., Fano, E.A. and Castaldelli, G., 2019. *A bimodal weight-length relationship in bleak (Alburnus alburnus)*. Ann. Zool Fennici, 56:25-32.
- Orang, M., 1998. *Potential accuracy of the popular non-linear regression equations for estimating pan coefficient values in the original and FAO-24 tables*. Unpublished Rep., Calif. Dept. of Water Resources, Sacramento, Calif.
- Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 347 σελ.
- Penman, H.L., 1948. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proceedings of the Royal Society London, A193, pp. 120-145.
- Penman, H.L. 1956. *Estimating evaporation*. Transactions of American Geophysical Union, 37: 43-50.
- Penman, H.L. 1963. *Vegetation and hydrology*. Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England, pp 125.

- Pereira, A.R., Villanova, N., Pereira, A.S. and Baebieri, V.A., 1995. *A model for the class-A pan coefficient*. Agricultural Water Management, 76: 75-82.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*. Monthly Weather Review, 100: 81-92.
- Raghuwanshi, N.S. and Wallender, W.W., 1998. *Converting from pan evaporation to evapotranspiration*. J Irrig. Drain Eng., 118(6):977-980.
- Rahimikhoob, A., 2009. *An evaluation of common pan coefficient equations to estimate reference evapotranspiration in a subtropical climate (north of Iran)*. Irrigation Science, 27: 289-296.
- Ritz, C. and Streibig, J.C., 2008. *Nonlinear regression with R*. Springer, New York.
- Sabziparvar, A.-A., Tabari, H., Aeni, A., Ghafouri, M., 2010. *Evaluation of Class-A pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration in cold semi-arid and warm arid climates*. Water Resources Management, 24: 909-920.
- Shuttleworth, W.J. and Wallace, J.S., 1985. *Evaporation from sparse crops – an energy combination theory*. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 111: 839-855.
- Snyder, R.L., 1992. *Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion*. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 118: 977-980.
- Snyder, R.L. and Pruitt, W.O., 1985. *Estimating reference evapotranspiration with hourly data. VII-1-VII-3*. R. Snyder, D. W. Henderson, W. O., Pruitt, and A. Dong (Eds.), California Irrigation Management Systems, Final Report, University of California, Davis.
- Wright, J.L., 1982. *New evapotranspiration crop coefficients*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 108: 57-74.

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ

11^ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΒΟΛΟΣ, 2019

