

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Γράβαλος Ι.,
Επ. Καθηγητής
Τμ. Γ. Μηχ & Αρδ
Τ.Ε.Ι. Λάρισας
gravalos@in.gr

Ντιούδης Π.,
Αναπ. Καθηγητής
Τμ. Γ. Μηχ & Αρδ
Τ.Ε.Ι. Λάρισας
dioudis@teilar.gr

Φιλίντας Αγ.,
Καθ. Εφαρμ./ Ε.Σ.
Τμ. Γ. Μηχ & Αρδ
Τ.Ε.Ι. Λάρισας
filintas@teilar.gr

Κατέρης Δ.,
Μετ. Φοιτητής
Γεωπονική Α.Π.Θ.
54124 Θεσσαλονίκη
dkateris@agro.auth.gr

Μόλλα Α.
Μετ. Φοιτήτρια
Γ.Π.Α.
11855 Αθήνα
Katrinmol@yahoo.gr

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ : Σταγόδην άρδευση, υγρός θύλακας, αισθητήρες εδαφικής υγρασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε ένα σύστημα άρδευσης με σταγόνες, για να αυτοματοποιήσουμε την όλη διαδικασία με τη βοήθεια ηλεκτρονικών διατάξεων, θα πρέπει να τοποθετήσουμε τους αισθητήρες μέτρησης της εδαφικής υγρασίας εντός της ζώνης του διαβρεχόμενου υποεπιφανειακού εδαφικού όγκου με μία μέση περιεχόμενη υγρασία. Στην πρακτική όμως των αρδεύσεων, το σχήμα και το εμβαδό του υγρού θύλακα καθώς και η κατανομή της εδαφικής υγρασίας διαφοροποιούνται ανάλογα με τις εξής παραμέτρους: τη μηχανική σύσταση του εδάφους, την παροχή του σταλακτήρα και τη διάρκεια της άρδευσης. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να μελετήσει σε σύστημα στάγδην άρδευσης, τις διαστάσεις του υγρού θύλακα και την κατανομή της εδαφικής υγρασίας βάσει των ανωτέρω παραμέτρων, ώστε να προσδιοριστεί η καταλληλότερη θέση εγκατάστασης των αισθητήρων εδαφικής υγρασίας και να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του συστήματος ελέγχου.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SOIL MOISTURE SENSORS POSITION IN DRIP IRRIGATION SYSTEMS

Gravalos I.,
Assistant Professor
Dept of Farm
Machinery & Irrig.
T.E.I. of Larissa
gravalos@in.gr

Dioudis P.,
Assoc. Professor
Dept of Farm
Machinery & Irrig.
T.E.I. of Larissa
dioudis@teilar.gr

Filintas Ag.,
Lecturer
Dept of Farm
Machinery & Irrig.
T.E.I. of Larissa
filintas@teilar.gr

Kateris D.,
Postgraduate Student
School of Agriculture
A.U.TH.
54124 Thessaloniki
dkateris@agro.auth.gr

Molla A.
Postgraduate Student
Agricultural Un. of
Athens.
11855 Athens
Katrinmol@yahoo.gr

KEY WORDS: Drip irrigation, wet pocket, soil moisture sensor.

ABSTRACT

In a drip irrigation system in order to have an automatic procedure aided by an electronic setting, we have to place the soil moisture sensors within the zone of soil block beneath ground surface saturated by an average moisture content. However in irrigation practice, shape, surface area of wet pocket, as well as distribution of soil moisture are differentiated according to the following parameters: mechanical soil composition, dripper supply and irrigation duration. The objective of this survey related to drip irrigation systems is to study the dimensions of wet pocket and soil moisture distribution on the basis of the above parameters, aiming to the determination of best position of moisture sensors and securing the best performance of a control system.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η στάγδην άρδευση είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές σύγχρονες μεθόδους άρδευσης των γεωργικών καλλιεργειών, η οποία έτυχε ταχείας διάδοσης σε παγκόσμια κλίμακα. Ανήκει στις μεθόδους τοπικών αρδεύσεων και χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι χορηγεί το νερό κατευθείαν στη ζώνη ριζικής δραστηριότητας των φυτών σε μικρές και συχνές ποσότητες [1]. Με τη στάγδην άρδευση επιτυγχάνονται ευνοϊκότερες συνθήκες για την ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών. Η υδατοπεριεκτικότητα του εδάφους διατηρείται συνεχώς σε υψηλά επίπεδα, ενώ η χαμηλή τάση εδαφικής υγρασίας διευκολύνει την πρόσληψη του νερού και των θρεπτικών στοιχείων από το ριζόστρωμα [2] [3]. Επίσης, η στάγδην άρδευση συντελεί στην επίλυση του προβλήματος εξοικονόμησης νερού και της μείωσης των εργατικών χεριών. Αυτό διασφαλίζεται με τη μεταφορά και διανομή του νερού στα φυτά με ένα μόνιμο δίκτυο αγωγών και σταλακτήρων [4]. Μια μεγάλη ποικιλία από διαθέσιμα όργανα μέτρησης και παρακολούθησης της εδαφικής υγρασίας, ηλεκτρονικών προγραμματιστών και ηλεκτροϋδραυλικών στοιχείων δίνουν τη δυνατότητα να αυτοματοποιηθούν όλοι οι χειρισμοί, που απαιτούνται κατά τη διαδικασία της στάγδην άρδευσης [5] [6] [7] [8].

Στα συστήματα στάγδην άρδευσης, η κίνηση του νερού γίνεται κατά τις τρεις διευθύνσεις με αποτέλεσμα να σχηματίζεται κάτω από κάθε σταλακτήρα ένας υγρός θύλακας. Μετά την άρδευση, υψηλή υγρασία (στο επίπεδο και πάνω της υδατοϊκανότητας) υπάρχει μόνο σε μία μικρή κεντρική ζώνη του θύλακα, η οποία περιβάλλεται από άλλες διαδοχικές ζώνες με συνεχώς μικρότερη υγρασία [9] [10] [11]. Για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών έχει ιδιαίτερη σημασία το ποσοστό του διαβρεχόμενου υποεπιφανειακού εδαφικού όγκου. Πειράματα μελέτης της κατανομής των ριζών σε συνθήκες στάγδην άρδευσης έδειξαν ότι η υψηλή υδατοπεριεκτικότητα και ο ελλιπής αερισμός κάτω από τους σταλακτήρες εμποδίζουν την ανάπτυξη μεγάλης συγκέντρωσης ριζών. Αντιθέτως, διαπιστώθηκε ότι στα γύρω εδαφικά στρώματα με μέση περιεχόμενη υγρασία διαμορφώνονται ιδανικές συνθήκες τάσης εδαφικής υγρασίας και αερισμού για την ανάπτυξή τους [1] [12] [13] [14].

Για να μετρήσουμε την περιεχόμενη υγρασία σε έδαφος με εφαρμοζόμενη επιφανειακή στάγδην άρδευση, ώστε να αυτοματοποιήσουμε την όλη διαδικασία, θα πρέπει να τοποθετήσουμε τους αισθητήρες εδαφικής υγρασίας εντός της ζώνης του διαβρεχόμενου υποεπιφανειακού εδαφικού όγκου με μία μέση περιεχόμενη υγρασία. Στην πρακτική όμως των αρδεύσεων, το σχήμα και το εμβαδόν του υγρού απιοειδούς θύλακα καθώς και η κατανομή της εδαφικής υγρασίας διαφοροποιούνται ανάλογα με τις κάτωθι παραμέτρους: τη μηχανική σύσταση του εδάφους, την παροχή του σταλακτήρα και τη διάρκεια της άρδευσης. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να μελετήσει σε σύστημα στάγδην άρδευσης, τις διαστάσεις του υγρού θύλακα και την κατανομή της εδαφικής υγρασίας βάσει των ανωτέρω παραμέτρων, ώστε να προσδιοριστεί η καταλληλότερη θέση εγκατάστασης των αισθητήρων εδαφικής υγρασίας και να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του συστήματος ελέγχου.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ενός συστήματος στάγδην άρδευσης, το οποίο περιελάμβανε μία πλαστική δεξαμενή 200l, ένα δίκτυο σωληνώσεων και ρυθμιζόμενους σταλακτήρες. Η δεξαμενή ήταν τοποθετημένη πάνω σε ένα μεταλλικό πλαίσιο και σε ύψος 1,5 m. Η παροχή των σταλακτήρων με δεδομένη πίεση μπορούσε να μεταβληθεί με ειδικό χειρισμό. Για τον προσδιορισμό της παροχής των σταλακτήρων χρησιμοποιήθηκε ένα ογκομετρικό δοχείο και ένα ηλεκτρονικό χρονόμετρο. Μετά την αρχική διακρίβωση της παροχής του κάθε σταλακτήρα και την ολοκλήρωση της άρδευσης, γινόταν εκ νέου μέτρηση της παροχής αυτού.

Η πειραματική διερεύνηση έγινε στην ύπαιθρο σε επιλεγμένες τοποθεσίες. Επειδή η οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση του νερού έπρεπε να μελετηθεί σε ακόρεστο ή μερικώς κορεσμένο έδαφος, γι' αυτό το λόγο οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερινές περιόδους. Η περιεχόμενη υγρασία εντός του εδαφικού προφίλ μετρήθηκε πριν και αμέσως μετά την άρδευση, οριζόντια και κατακόρυφα από τη θέση του σταλακτήρα, σε ίσες αποστάσεις των 10 cm και σε βάθος έως 100 cm. Για τις ανάγκες της δειγματοληψίας χρησιμοποιήθηκε ένας χειροκίνητος σωληνωτός εδαφολήπτης τύπου Oakfield. Ο προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας έγινε αρχικά με τη μέθοδο του πυριαντηρίου και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των μετρήσεων επιβεβαιώθηκαν με τη βοήθεια του φορητού οργάνου Diviner 2000 της εταιρείας Sentek Sensor Technologies. Πρόκειται για ένα φορητό όργανο, που βασίζεται στην τεχνολογία FDR (Frequency Domain Reflectometry), ο αισθητήρας του οποίου ολισθαίνει μέσα σε σωλήνα και καθώς μετακινείται μετρά και καταγράφει την εδαφική υγρασία.

Μελετήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι εδαφών, στους οποίους προηγήθηκε ανάλυση των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τους.

- Τύπος Εδάφους I: πρόκειται για ένα έδαφος μέσης συστάσεως, με μέτρια υδατοπερατότητα (συντελεστής υδατοπερατότητας $k=2,9$ cm/h).

- Τύπος Εδάφους II: πρόκειται για ένα έδαφος μέσης συστάσεως, με μικρή υδατοπερατότητα (συντελεστής υδατοπερατότητας $k=0,5 \text{ cm/h}$).

Στο έδαφος I πραγματοποιήθηκαν συνολικά 6 μεταχειρίσεις με διαφορετική παροχή σταλακτήρα και χρόνο εφαρμογής αρδευτικού νερού. Τα δεδομένα που αφορούν την παροχή του σταλακτήρα q [l/h], το χρόνο διάρκειας της άρδευσης t [h] και τη συνολική αρδευόμενη ποσότητα Q [l] δίνονται στον πίνακα 1. Τέλος στον πίνακα 2 δίνονται τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν το έδαφος II.

Μεταχείριση	Παροχή σταλακτήρα q [l/h]	Χρόνος άρδευσης t [h]	Αρδευόμενη ποσότητα Q [l]
1	2	6	12
2	4	6	24
3	6	6	36
4	1	2	2
5	1	6	6
6	1	12	12

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Πειραματικά δεδομένα εδάφους I

Μεταχείριση	Παροχή σταλακτήρα q [l/h]	Χρόνος άρδευσης t [h]	Αρδευόμενη ποσότητα Q [l]
7	2	4	8
8	4	4	16
9	6	4	24
10	2	2	4
11	2	6	12
12	2	12	24

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Πειραματικά δεδομένα εδάφους II

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

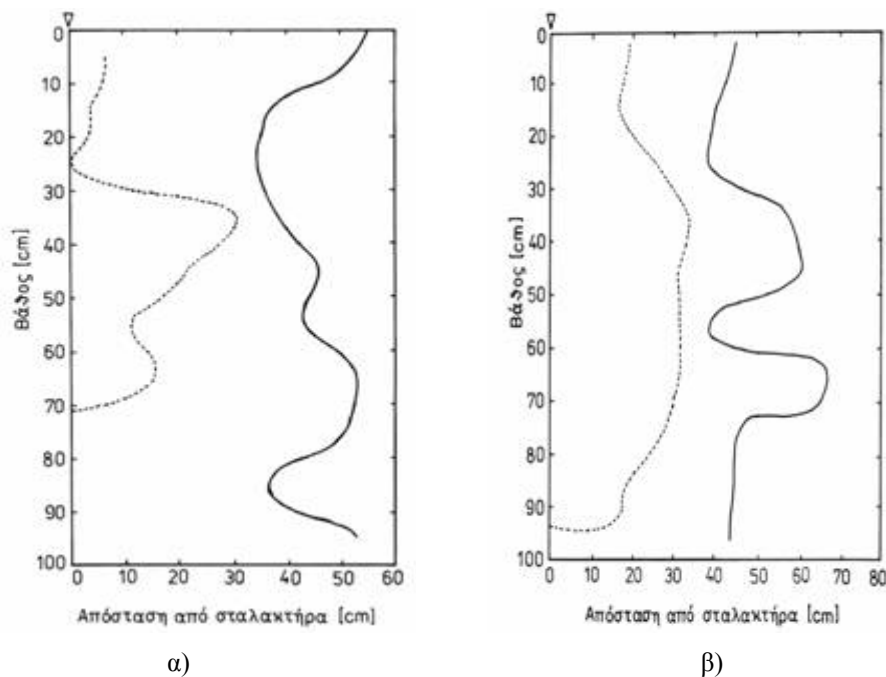
Η "Άρδευση Πραγματικού Χρόνου" (Real Time Irrigation) είναι ένας όρος που αναφέρεται στον έλεγχο της εδαφικής υγρασίας κοντά στη ζώνη ριζοστρώματος των φυτών, βασίζεται στις μετρήσεις που λαμβάνονται καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και δύναται να υλοποιηθεί με τα υπάρχοντα συστήματα αυτομάτου ελέγχου των αρδύσεων. Συνήθως, ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από την κεντρική μονάδα ελέγχου, η οποία με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού διαβάζει, καταγράφει και αναλύει τα δεδομένα από τους αισθητήρες εδαφικής υγρασίας και στη συνέχεια ελέγχει τα ενεργοποιούμενα στοιχεία (αντλία, ηλεκτροβαλβίδες, κλπ.). Κρίσιμος παράγοντας για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος θεωρείται ο ακριβής προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας. Ο έλεγχος της εδαφικής υγρασίας είναι πολύ πιο σύνθετη διαδικασία και η τοποθέτηση ενός αισθητήρα εντός της ζώνης ριζοστρώματος των φυτών δεν επαρκεί στις περισσότερες των περιπτώσεων για να εξασφαλίσει τον ικανοποιητικό έλεγχο αυτής. Από αρκετούς ερευνητές [5] [6] [15], για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο, προτείνεται η λύση της χρήσης δύο ή περισσότερων αισθητήρων. Στα συστήματα τοπικών αρδύσεων και ειδικότερα της στάγδην άρδευσης το πρόβλημα ελέγχου της εδαφικής υγρασίας είναι ακόμη πιο πολύπλοκο καθώς η κίνηση του νερού γίνεται κατά τις τρεις διευθύνσεις με αποτέλεσμα να σχηματίζεται κάτω από κάθε σταλακτήρα ένας υγρός θύλακας, του οποίου το σχήμα, το εμβαδόν και η κατανομή της εδαφικής υγρασίας διαφοροποιούνται ανάλογα με την παροχή του σταλακτήρα, τη συχνότητα άρδευσης, την ολική ποσότητα του εφαρμοζόμενου νερού και τη μηχανική σύσταση του εδάφους.

Αρχικά, για τον προσδιορισμό του υγρού θύλακα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό WetUp [16]. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα υπολογίζει, σε ομοιογενή εδάφη, την ακτινωτή και κατακόρυφη διάδοση του υγρού μετάπου από το σταλακτήρα. Όμως η θεωρητική απεικόνιση των καμπυλών, με τη βοήθεια του συγκεκριμένου υπολογιστικού εργαλείου, δεν ανταποκρινόταν στα πειραματικά δεδομένα και συνεπώς η προσπάθεια αυτή εγκαταλείφθηκε. Για το λόγο αυτό, το μέγεθος του διαβρεχόμενου υποεπιφανειακού εδαφικού όγκου καθώς και οι καμπύλες που αντιστοιχούν στο εξωτερικό όριο του υγρού θύλακα και στο όριο της υψηλής περιεχόμενης υγρασίας (στο επίπεδο και πάνω της υδατοϊκανότητας), υπολογίστηκαν και σχεδιάστηκαν με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τον Kuklik [17] και η οποία βασίζεται σε προγενέστερες εργασίες των Bresler et al. [18], Roth

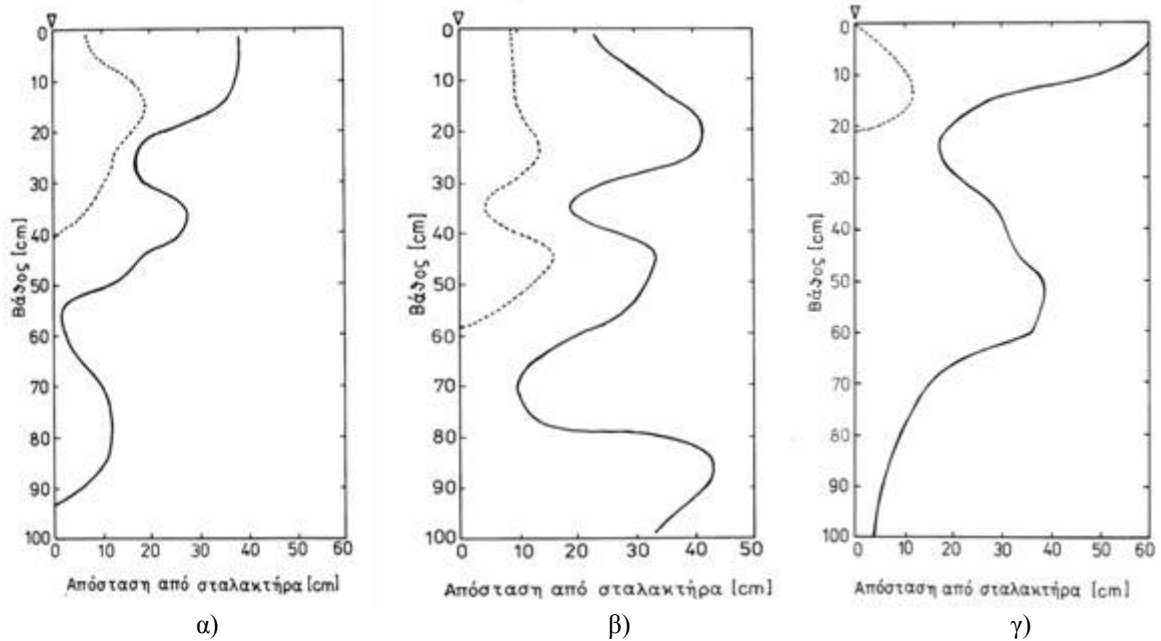
[19] και Sumakov et al. [20]. Στα διαγράμματα κατανομής της εδαφικής υγρασίας, αμέσως μετά την άρδευση και σε βάθος ενός μέτρου, απεικονίζονται με τη συνεχή γραμμή το εξωτερικό όριο του υγρού θύλακα και με τη διακεκομμένη γραμμή το όριο, το οποίο ανταποκρίνεται στην υψηλή υγρασία (στο επίπεδο και πάνω της υδατοϊκανότητας). Η θέση του σταλακτήρα σημειώνεται με το σύμβολο (\blacktriangledown). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να διαπιστωθούν εύκολα οι διαστάσεις του διαβρεχόμενου όγκου και κατά συνέπεια να προσδιοριστεί η καταλληλότερη θέση για την εγκατάσταση των αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας. Από τη λεπτομερειακή μελέτη των διαγραμμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα:

1. Στο έδαφος I, με τη μέτρια υδατοπερατότητα, ο υγρός θύλακας σχηματιζόταν με απόλυτη ευκρίνεια. Στο κέντρο του είχαμε υψηλή συγκέντρωση υγρασίας στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας, ενώ περιβαλλόταν από στρώσεις με μικρότερη υγρασία.
2. Στο έδαφος I, όταν ο χρόνος άρδευσης ήταν σταθερός $t=6$ h και μεταβαλλόταν μόνο η παροχή του σταλακτήρα $q_1=2$ l/h, $q_2=4$ l/h και $q_3=6$ l/h, διαπιστώθηκε μία σταδιακή κατακόρυφη και οριζόντια διεύρυνση του απιοειδούς θύλακα (Σχήμα 1). Ο πυρήνας του υγρού θύλακα με την υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας) κυμάνθηκε στην οριζόντια κατεύθυνση από τα $0=30$ cm και το εξωτερικό όριο του θύλακα από τα $30=50$ cm. Στην κατακόρυφη διεύθυνση ο θύλακας (εξωτερικό όριο) μετά από 6 ώρες συνεχόμενης άρδευσης ξεπέρασε τα 100 cm.
3. Στο έδαφος I, όταν η παροχή του σταλακτήρα ήταν σταθερή $q=1$ l/h και σταδιακά μεταβαλλόταν ο χρόνος άρδευσης $t_1=2$ h, $t_2=6$ h και $t_3=12$ h, διαπιστώθηκε ότι ο πυρήνας του υγρού θύλακα μετακινήθηκε αρχικά κατακόρυφα στα 40 cm (Σχήμα 2α). Στη συνέχεια σε χρόνο $t_2=6$ h ο θύλακας επεκτάθηκε από τα 40 cm στα 60 cm (Σχήμα 2β) και μετά από $t_3=12$ h ο πυρήνας του θύλακα εκ νέου συρρικνώθηκε στα 20 cm (Σχήμα 2γ). Το εξωτερικό όριο κατανομής του θύλακα μετακινήθηκε επιφανειακά από τα 40 cm στα 60 cm.
4. Στο έδαφος I, όταν η συνολική αρδευόμενη ποσότητα ήταν ίδια $Q=12$ l αλλά είχε πραγματοποιηθεί με διαφορετική παροχή του σταλακτήρα και σε διαφορετικό χρόνο, για παράδειγμα $q_1=2$ l/h, $t_1=6$ h ή $q_2=1$ l/h, $t_2=12$ h, διαπιστώθηκε ότι ο θύλακας παρουσιάζοταν διευρυμένος όταν η παροχή του σταλακτήρα ήταν μεγαλύτερη και η αρδευόμενη ποσότητα εφαρμοζόταν σε μικρό χρόνο (Σχήμα 1α). Αντιθέτως, ο θύλακας ήταν αρκετά μικρότερος όταν η ίδια ποσότητα νερού εφαρμοζόταν με μικρότερη παροχή του σταλακτήρα και σε περισσότερο χρόνο (Σχήμα 2γ), λόγω βαθιάς διείδυσης και εξάτμισης του νερού.
5. Στο έδαφος II, με την μικρή υδατοπερατότητα, δεν σχηματιζόταν ευκρινώς ο απιοειδής υγρός θύλακας. Η κατανομή της υγρασίας γινόταν με ανομοιόμορφο τρόπο, εμφανίζονταν σημεία με υψηλή περιεχόμενη υγρασία στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας και σημεία με μικρότερη περιεχόμενη υγρασία (Σχήμα 3).

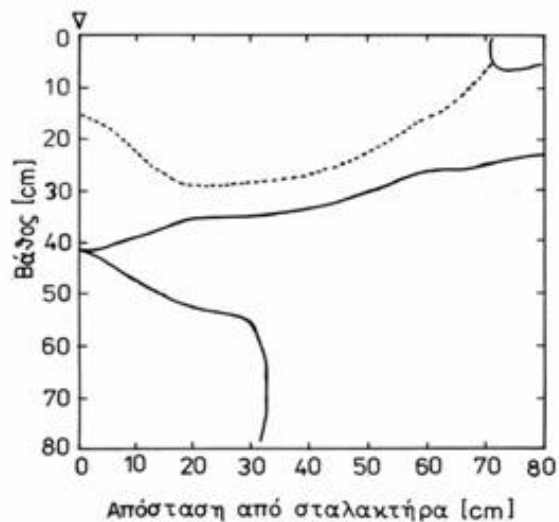
Διευκρινίζεται ότι η περιεχόμενη υγρασία εντός του εδαφικού προφίλ μετρήθηκε αμέσως μετά την άρδευση και για τους δύο τύπους εδαφών.



Σχήμα 1. Κατανομή της υγρασίας στο τύπο εδάφους I: α) όταν η συνολική ποσότητα νερού των 12 l εφαρμόστηκε με σταλακτήρα παροχής 2 l/h και σε χρόνο 6 h (Μεταχείριση 1) και β) όταν η συνολική ποσότητα νερού των 24 l εφαρμόστηκε με σταλακτήρα παροχής 4 l/h και σε χρόνο 6 h (Μεταχείριση 2).



Σχήμα 2. Κατανομή της υγρασίας στο τύπο εδάφους I: α) όταν η συνολική ποσότητα νερού των 2 l εφαρμόστηκε με σταλακτήρα παροχής ενός l/h και σε χρόνο 2 h (Μεταχείριση 4), β) όταν η συνολική ποσότητα νερού των έξι l εφαρμόστηκε με σταλακτήρα παροχής ενός l/h και σε χρόνο 6 h (Μεταχείριση 5) και γ) όταν η συνολική ποσότητα νερού των δώδεκα l εφαρμόστηκε με σταλακτήρα παροχής ενός l/h και σε χρόνο 12 h (Μεταχείριση 6).

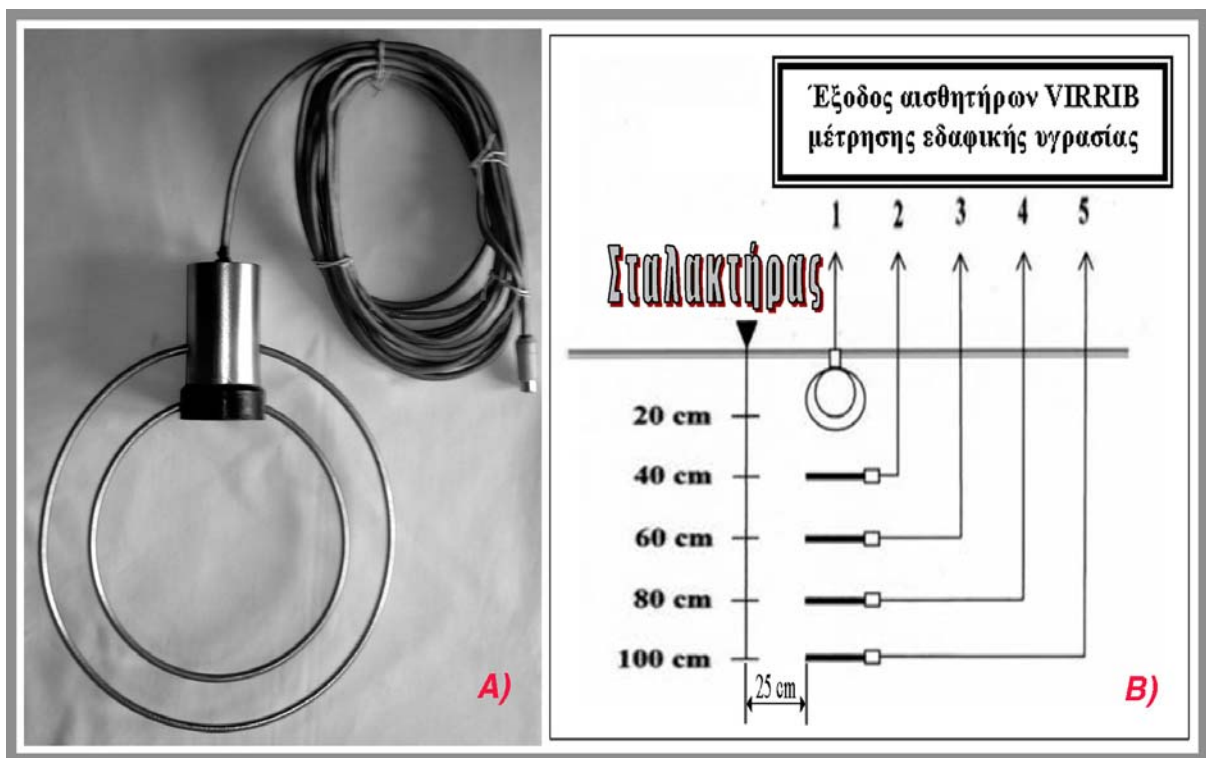


Σχήμα 3. Κατανομή της υγρασίας στο τύπο εδάφους II: όταν η συνολική ποσότητα νερού των 24 l εφαρμόστηκε με σταλακτήρα παροχής 6 l/h και σε χρόνο 4 h (Μεταχείριση 9).

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η εγκατάσταση του αισθητήρα εδαφικής υγρασίας θα πρέπει να γίνεται σε ορισμένη απόσταση από το σταλακτήρα, εντός της ζώνης του διαβρεχόμενου υποεπιφανειακού εδαφικού όγκου με μία μέση περιεχόμενη υγρασία, όπου διαμορφώνονται ιδανικές συνθήκες τάσης εδαφικής υγρασίας και αερισμού για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και επομένως ο αισθητήρας θα συμπεριφέρεται ως ενεργό τμήμα της ζώνης ριζοστρώματος (root zone water management). Η παραδοχή αυτή διατυπώνεται και από τον Μιχαλάκη [20], ο οποίος προτείνει τα τασίμετρα να τοποθετούνται σε αποστάσεις από το σταλακτήρα περίπου 20 cm στα αμμώδη, 30 cm στα μέσα και 40 cm στα αργιλώδη εδάφη. Παρόμοιες απόψεις εκφράζονται και από άλλους ερευνητές και κατασκευαστές αισθητήρων εδαφικής υγρασίας [6] [7] [22] [23] [24].

Όλοι οι αισθητήρες εδαφικής υγρασίας, που είναι σήμερα διαθέσιμοι, απεικονίζουν την υγρασιακή κατάσταση σε ένα συγκεκριμένο σημείο του εδαφικού προφίλ. Επομένως, γεννάται το εύλογο ερώτημα σχετικά με τον αριθμό των αισθητήρων, που θα πρέπει να τοποθετηθούν εντός του εδάφους, ώστε να εξασφαλιστεί ο

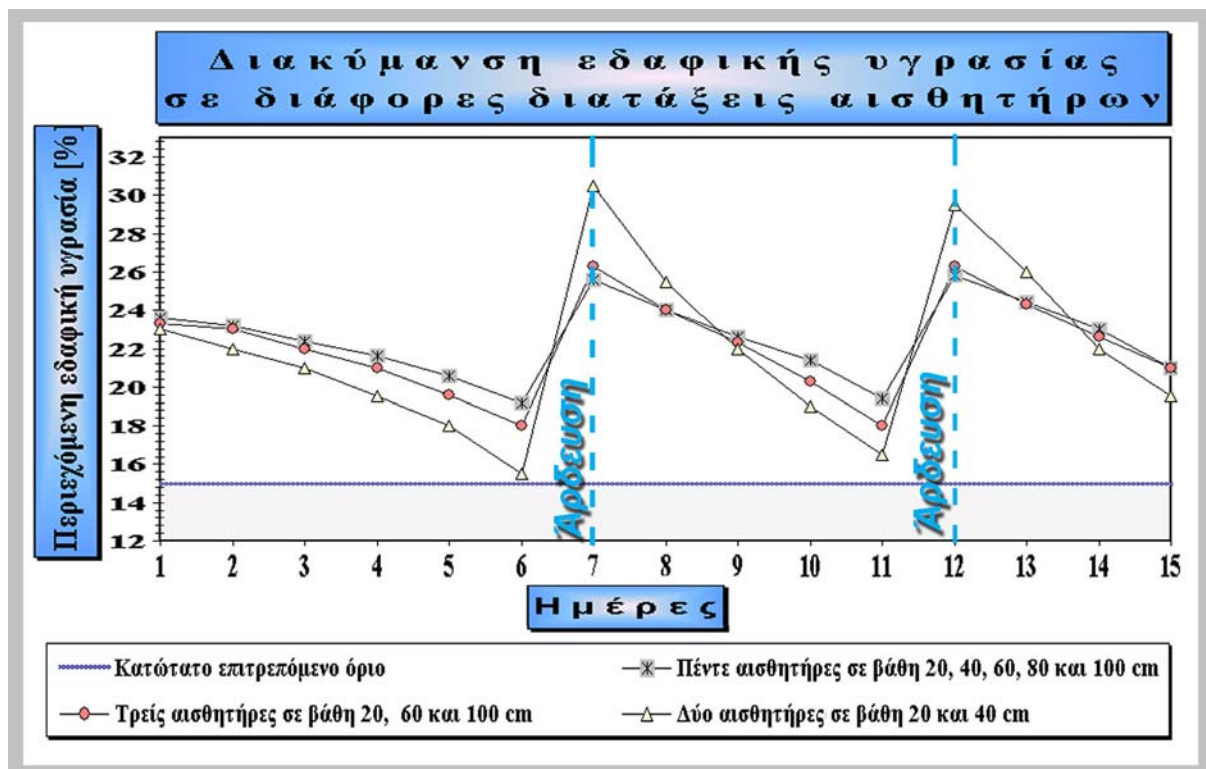
αποτελεσματικός σχεδιασμός των συστημάτων αυτόματης άρδευσης με σταγόνες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν συνολικά πέντε αισθητήρες μέτρησης της εδαφικής υγρασίας, με την εμπορική ονομασία VIRRIB (σχήμα 4.α). Πρόκειται για αισθητήρες που ανήκουν στη ευρύτερη κατηγορία των διηλεκτρικών αισθητήρων και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μέτρηση της μετατόπισης φάσης (phase transmission) ενός αρχικού ημιτονοειδούς σήματος, καθώς η ταχύτητα διάδοσής του επηρεάζεται από την περιεχόμενη εδαφική υγρασία. Ο κάθε αισθητήρας αποτελείται από δύο μεταλλικούς κυματοδηγούς ομόκεντρων κύκλων με εξωτερική διάμετρο 270 mm, που καταλήγουν σε ένα σώμα εντός του οποίου φυλάσσονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η εγκατάσταση των αισθητήρων έγινε στο τύπο εδάφους Ι και σύμφωνα με το σχήμα 4.β. Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι η τοποθέτηση των αισθητήρων (στο οριζόντιο επίπεδο) σε μία απόσταση 20 έως 50 cm από το σταλακτήρα, θεωρείται ικανοποιητική για τον έλεγχο της εδαφικής υγρασίας διότι η περιεκτικότητα της εδαφικής υγρασίας κυμαίνεται περίπου σε μέσες τιμές. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε βάθος ανά 20 cm και σε απόσταση 25 cm από τον νοητό άξονα που περνά κατακόρυφα από το σταλακτήρα. Ο επιφανειακός αισθητήρας τοποθετήθηκε κάθετα, ενώ οι υπόλοιποι τέσσερις τοποθετήθηκαν οριζόντια. Η έξοδος των αισθητήρων παρέχεται σε [mA], τα οποία με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης μετατρέπονται σε [%] της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας.



Σχήμα 4. α) Αισθητήρας VIRRIB. β) Κατακόρυφη διάταξη των αισθητήρων εδαφικής υγρασίας (VIRRIB).

Με σκοπό να εκτιμηθεί καλύτερα η σε βάθος μετρούμενη εδαφική υγρασία, συγκρίθηκε η μέση τιμή της περιεχόμενης υγρασίας από τους πέντε αισθητήρες με τη μέση τιμή: α) των τριών από αυτούς, που ήταν εγκαταστημένοι σε βάθος 20 cm, 60 cm και 100 cm και β) των δύο πρώτων, που ήταν εγκαταστημένοι σε βάθος 20 cm και 40 cm. Η άρδευση γινόταν όταν η περιεχόμενη υγρασία προσέγγιζε ένα κατώτατο επιτρεπόμενο όριο και η συνολική ποσότητα νερού των 24 l εφαρμόστηκε με σταλακτήρα παροχής 4l/h και σε χρόνο 6 h. Η καταγραφή των μετρήσεων γινόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα συνολικής διάρκειας δεκαπέντε ημερών. Σύμφωνα με το σχήμα 4, η παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας σε διαφορετικά βάθη, με τη βοήθεια πέντε, τριών και δύο αισθητήρων μας οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Για φυτά, των οποίων οι ρίζες είναι συγκεντρωμένες στο πάνω μέρος της ζώνης ριζοστρώματος και αντλούν το μεγαλύτερο ποσοστό της υγρασίας από τα επιφανειακά στρώματα, η χρήση περισσότερων των δύο αισθητήρων θα οδηγούσε σε λανθασμένη εκτίμηση της μέσης περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας για βάθος μέχρι 40 cm, με αποτέλεσμα την καθυστερημένη έναρξη της άρδευσης και την έκθεση των φυτών σε υδατικό στρες.
2. Για φυτά, τα οποία έχουν βαθύ ριζικό σύστημα, η χρήση περισσότερων αισθητήρων, για παράδειγμα τριών ή πέντε, δίνει μία πληρέστερη εικόνα της συνολικής υδατοϊκανότητας του ριζοστρώματος για βάθος μέχρι 100 cm, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η συχνότητα επανάληψης των αρδεύσεων και να εξοικονομούνται ποσότητες αρδευτικού νερού.



Σχήμα 5. Η παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας σε διαφορετικά βάθη, με διαφορετικές διατάξεις: πέντε, τριών και δύο αισθητήρων

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα είναι:

1. Σε συνθήκες στάγδην άρδευσης, οι παράμετροι όπως: η μηχανική σύσταση του εδάφους, η παροχή του σταλακτήρα και η διάρκεια άρδευσης, επηρεάζουν τις διαστάσεις του υγρού θύλακα και την κατανομή της εδαφικής υγρασίας.
2. Σε εδάφη με μέτρια έως πολύ μεγάλη υδατοπερατότητα, ο υγρός αποειδής θύλακας σχηματίζεται με απόλυτη ευκρίνεια, δηλαδή στο κέντρο του έχουμε υψηλή συγκέντρωση υγρασίας στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας, ενώ περιβάλλεται από στρώσεις με μικρότερη υγρασία. Η τοποθέτηση των αισθητήρων σε μία απόσταση 20÷50 cm από το σταλακτήρα, αφού προηγουμένως ληφθούν υπόψη οι ανωτέρω παράμετροι, θα μπορούσε να μας δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τον έλεγχο της εδαφικής υγρασίας.
3. Σε εδάφη με ανομοιόμορφα υδραυλικά χαρακτηριστικά, ο υγρός θύλακας δε σχηματίζεται ευκρινώς και εμφανίζονται σημεία με υψηλή περιεχόμενη υγρασία στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας και σημεία με μικρότερη περιεχόμενη υγρασία. Στις περιπτώσεις αυτές, η θέση των αισθητήρων θα πρέπει να προσδιορίζεται πειραματικά.
4. Ο αριθμός των αισθητήρων που θα πρέπει να τοποθετούνται εντός του εδαφικού προφίλ εξαρτάται από το βάθος του ριζοστρώματος των φυτών. Για φυτά με επιφανειακό ριζικό σύστημα προτείνεται η χρήση ενός ή δύο αισθητήρων, ενώ για φυτά με βαθύ ριζικό σύστημα η χρήση περισσότερων αισθητήρων βοηθά στην ασφαλέστερη εκτίμηση της περιεχόμενης υγρασίας και στην εξοικονόμηση αρδευτικού νερού.
5. Δια της ορθής εγκατάστασης των αισθητήρων επιτυγχάνεται ο ακριβής έλεγχος της εδαφικής υγρασίας και κατά συνέπεια διασφαλίζεται η βέλτιστη απόδοση του κάθε συστήματος αυτόματης άρδευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μιχαλάκης Ν. (1988) “Συστήματα Αυτόματης Άρδευσης: Άρδευση με σταγόνες”, Εκδοτική Αγροτεχνική.

2. Keller J. and D. Karmeli (1974) "Trickle irrigation design for optimal soil wetting", Proc. 2nd Int. **Drip Irrigation Conference**, San Diego, California, pp. 240-251.
3. Nakayama F. S. and D. A. Bucks (1986) "**Trickle irrigation for crop production: Design, operation and management**", Elsevier.
4. Παπαζαφειρίου Ζ. Γ. (1984) "**Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων**", Εκδόσεις Ζήτη.
5. Campbell G. S. and M. D. Campbell (1982) "Irrigation scheduling using soil moisture measurements: Theory and practice", **Adv. Irrig.**, Vol. 1, pp. 25-42.
6. Charlesworth P. (2000) "**Soil Water Monitoring**", CSIRO Land and Water.
7. Φιλίντας Θ. Αγ. (2005) «**Συστήματα χρήσης γης με έμφαση στα γεωργικά μηχανήματα στις αρδεύσεις και στην νιτρορύπανση, με χρήση Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και Μοντέλων, σε επίπεδο λεκάνης απορροής στην Κεντρική Ελλάδα**», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Περιβάλλοντος, Σχολή Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου
8. Muñoz-Carpena R., H. H. Bryan, W. Klassen, and M. D. Dukes (2003) "Automatic Soil Moisture-Based Drip Irrigation for Improving Tomato Production", Proc. of the **Florida State Horticulture Society**, Florida, USA.
9. Rubin J. (1968) "Theoretical analysis of two-dimensional transient flow of water in unsaturated and partly unsaturated soils", **Soil Science Society of American Proc.**, Vol. 32, pp. 607-615.
10. Gardner W. R., D. Hiller, and Y. Benjamini (1970) "Post-irrigation movement of soil water", **Water Resources Research**, Vol. 6, pp. 851-861.
11. Parlange J. Y. (1972) "Theory of water movement in soils: Two and three-dimensional steady infiltration", **Soil Science Society of American Proc.**, Vol. 113, pp. 96-101.
12. Goldberg D., B. Gornat and Y. Bar (1971) "The distribution of roots, water and minerals as a result of trickle irrigation", **J. Americ. Soc. Hort. Sci.**, Vol. 96, No. 5, pp. 645-648.
13. Ντιούδης, Π., Φιλίντας Αγ., Λέλλης Θ., Κόκκορας Ι. (2003) «**Επίδραση της συχνότητας άρδευσης με σταγόνες στην απόδοση της καλλιέργειας του αραβοσίτου (Zea Mays L.)**», Πρακτ. 9^ο Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, εκδ.ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη, 2003.
14. Atkinson D. (1980) "The effect of trickle irrigation on the distribution of root growth and activity in fruit trees", Proc. of the **Symposium on Drip Irrigation in Horticulture with Foreign Experts Participating**, Skierniewice, Poland.
15. Cary J. W. and H. D. Fisher (1983) "Irrigation decision simplified with electronics and soil water sensors", **Soil Science Society of American Journal**, Vol. 47, pp. 1219-1223.
16. Cook F. J., P. J. Thorburn, P. Fitch and K. L. Bristow (2003) "WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers", **Irrigation Science**, Vol. 22, pp.129-134.
17. Kuklik V. (1988) "Zvlastnosti vlahoveho rezimu pri kapkove zavlake v nestejnorodne pude", **Sbornik VSZ v Praze**, Fakulta Agronomicka, Rada c. 2, s. 185-201.
18. Bresler E., J. Heller, N. Diner, I. Ben-Asher, A. Brandt and D. Goldberg (1971) "Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions", **Soil Science Society of American Proc.**, Vol. 35, pp. 683-689.
19. Roth R. L. (1974) "Soil moisture distribution and wetting patterns from a point source", Proc. II Int. **Drip Irrigation Congress**, San Diego, California, USA.
20. Sumakov B. B., A. A. Aleksasenko, N. I. Vdovin (1978) "Teoreticeskie i experimentalnye issledovania kapelnogo orosenia", **Vestnik selskochoziaistvennoi nauki**, No. 7, s. 82-92.
21. Μιχελάκης Ν. (1990) "Εφαρμογή της άρδευσης: Με βάση την εξάτμιση και τα τασίμετρα", **Γεωργική Τεχνολογία**, τεύχος 8/9, σελ. 38-45.
22. Lukangu G., M. J. Savage and M. A. Johnston (1999) "Use of sub-hourly soil water content measured with a frequency-domain reflectometer to schedule irrigation of cabbages", **Irrigation Science**, Vol. 19, pp. 7-13.
23. Jones S. B., J. M. Wraith and O. Dani (2002) "Time domain reflectometry measurement principles and applications", **Hydrological Processes**, Vol. 16, pp. 141-153.
24. Campbell Scientific Inc (2002), "Model 257 and 257-L (Watermark 200) soil moisture sensor", **Instruction Manual**, Revision: 3/05.