

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

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	Δημητριάδης Χ., Καθ. Εφαρμ./ Ε.Σ. Τμ. Γ. Μηχ & Αρδ Τ.Ε.Ι. Λάρισας dimchristos@hotmail.com
--	--	---	--	---

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: Εδαφική υγρασία, αισθητήρες, συστήματα αυτόματης άρδευσης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας μεγάλος αριθμός αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Όμως, οι πληροφορίες σχετικά με τις επιδόσεις τους είναι περιορισμένες, ενώ οι συγκριτικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί δεν είναι παρά ελάχιστες. Στην παρούσα εργασία γίνεται μία συγκριτική μελέτη ανάμεσα στους αισθητήρες Virrib, Gro-Point και Acclima, οι οποίοι επιλέχθηκαν μεταξύ δώδεκα άλλων διηλεκτρικών αισθητήρων, με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, το χαμηλό κόστος τους, την ικανοποιητική ακρίβεια των μετρήσεών τους και τη δυνατότητα εύκολης διασύνδεσης με ηλεκτρονικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου των αρδεύσεων. Από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας προκύπτει ότι οι τρεις αισθητήρες εδαφικής υγρασίας, σε σχέση με τη βαρυμετρική μέθοδο, δίνουν αξιόπιστες μετρήσεις και εντός των ορίων που περιγράφονται από τους κατασκευαστές. Ακόμη η σύγκριση των μετρήσεων της εδαφικής υγρασίας μεταξύ των τριών αισθητήρων, σε βάθος 20 cm του εδαφικού προφίλ, έδωσε παρόμοια αποτελέσματα.

A COMPARISON STUDY BETWEEN SOIL MOISTURE SENSORS

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	Dimitriadis C., Lecturer Dept of Farm Machinery & Irrig. T.E.I. of Larissa dimchristos@hotmail.com
---	---	---	--	---

KEY WORDS: Soil moisture, sensors, automatic irrigation systems.

ABSTRACT

A great number of soil moisture sensors have been developed the last decades. However, the information with regard to their performance is limited, while the comparative studies that have been realised are not despite minimal. In the present work becomes a comparative study between the soil moisture sensors Virrib, Gro-Point and Acclima, which were selected between twelve other dielectric sensors, with base their technical characteristics, their low cost, the satisfactory precision of their measurements and the possibility of easy interconnection with electronic systems of automatic control of irrigations. From the results of experimental process it was found that the three soil moisture sensors as compared to gravimetric method, give reliable measurements and inside the limits that are described by the constructors. The comparison of soil moisture measurements between the three sensors, in-depth 20 cm of the soil profile, it gave similar results.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέτρηση και παρακολούθηση της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας είναι θεμελιώδης παράγοντας κάθε ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αρδευτικού νερού, χάριν του οποίου διασφαλίζονται ο όγκος και η ποιότητα των παραγόμενων αγροτικών προϊόντων. Με τη βοήθεια αισθητήρων εδαφικής υγρασίας μπορούμε να σχεδιάσουμε συστήματα αρδεύσεων [1] [2], που να στοχεύουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την υπεράρδευση που είναι: η υψηλή κατανάλωση νερού και ενέργειας, η εξάντληση των επιφανειακών υδατικών πόρων και η διήθηση νιτρικών και φυτοφαρμάκων στο έδαφος με τελικούς αποδέκτες τους επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους. Επομένως η ανάγκη για αποδοτικότερη εφαρμογή του αρδευτικού νερού, οδήγησε σε αλματώδη ανάπτυξη των συσκευών μέτρησης και παρακολούθησης της περιεχόμενης υγρασίας στο έδαφος.

Η ενσωμάτωση αισθητήρων εδαφικής υγρασίας στο σχεδιασμό των συστημάτων άρδευσης προϋποθέτει τον προσδιορισμό ορισμένων σημαντικών δεικτών όπως είναι: ο κορεσμός, η υδατοϊκανότητα, το σημείο μόνιμης μάρανσης και η διαθέσιμη υγρασία. Οι μέθοδοι προσδιορισμού των δεικτών αυτών αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία [3] [4] [5]. Επίσης είναι γνωστόν, ότι επί του ποσοστού της περιεχόμενης υγρασίας επιδρούν διάφοροι εδαφικοί παράγοντες. Η υφή και η δομή του εδάφους επιδρούν επί της διήθησης, της κίνησης και της συγκράτησης του νερού [4]. Η ειδική θερμότητα όγκου του εδάφους και η θερμική αγωγιμότητα αποτελούν συναρτήσεις της περιεχόμενης υδατικής υγρασίας του εδάφους και μάλιστα αυξανόμενες με την αύξησή της [5]. Η υψηλή αλατότητα έχει σαν συνέπεια την αύξηση της δύναμης που πρέπει να ασκηθεί για την απομάκρυνση του νερού από το έδαφος, συντελεί στο να μειώνεται η διαθεσιμότητα του νερού στα φυτά, έστω και αν η υγρασία είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα και επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους.

Οι διαθέσιμοι αισθητήρες βασίζονται σε έμμεσες μεθόδους προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας, δηλαδή ενσωματώνουν τεχνολογίες μέτρησης άλλων ιδιοτήτων του εδάφους, που μεταβάλλονται σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία εντός αυτού. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται: α) οι μέθοδοι μέτρησης της τάσης του εδαφικού νερού (soil water potential) και β) οι ογκομετρικές (volumetric) μέθοδοι. Οι μέθοδοι μέτρησης της τάσης του εδαφικού νερού στηρίζονται στην εκτίμηση του μητρικού υδατικού δυναμικού (water matric potential), το οποίο ως γνωστόν οφείλεται στις δυνάμεις επιφανειακής τάσης που αναπτύσσονται στους ενδιάμεσους χώρους της δομής του εδάφους. Όλοι οι διαθέσιμοι αισθητήρες της κατηγορίας αυτής είναι κατασκευασμένοι από πορώδες υλικό (porous material), το οποίο έρχεται σε άμεση επαφή με το έδαφος. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται: α) το τενσιόμετρο (tensiometer) [4] [5], β) τα πλακίδια ηλεκτρικής αντίστασης (resistance blocks): τα γύψινα πλακίδια (gypsum blocks) [6], ο αισθητήρας κοκκώδους μήτρας (granular matrix sensor) [7] [8], γ) ο αισθητήρας διάχυσης θερμότητας (heat dissipation sensor) [9] [10], δ) το ψυχρόμετρο εδάφους (soil psychrometer) [11] [12] [13] και ε) το ισοτενσιόμετρο (equitensometer) [14]. Οι ογκομετρικές μέθοδοι είναι από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους εκτίμησης της υγρασιακής κατάστασης του εδάφους. Σ' αυτές περιλαμβάνονται η μέθοδος νετρονίων [15], της τομογραφίας ακτίνων x (x-ray tomography), του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (nuclear magnetic resonance, NMR) [16] και οι διηλεκτρικές μέθοδοι. Με την κατηγορία των μεθόδων, που βασίζονται σε διηλεκτρικές τεχνικές, εκτιμάται η περιεχόμενη εδαφική υγρασία, μετρώντας τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους. Ως γνωστόν το έδαφος αποτελείται από τρεις διαφορετικές συνιστώσες: τη στερεά, την υγρή και την αέρια, και επομένως η τιμή της διηλεκτρικότητάς του εξαρτάται από τη συμβολή της κάθε μίας απ' αυτές [17]. Οι διηλεκτρικοί μέθοδοι βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις βαθμονόμησης μεταξύ της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας και του σήματος εξόδου του αισθητήρα (χρόνος, συχνότητα, εμπέδηση, φάση). Οι μέθοδοι αυτές έτυχαν γρήγορα ευρείας αποδοχής επειδή παρουσιάζουν καλό χρόνο απόκρισης, δεν απαιτούν συντήρηση και δίνουν συνεχείς αναγνώσεις για τα συστήματα αυτοματισμών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται: η μέθοδος ανακλωμέτρησης χρόνου (time-domain reflectometry ή TDR) [18] [19] [20], η μέθοδος ανακλωμέτρησης συχνότητας (frequency-domain reflectometry ή FDR), η μέθοδος μέτρησης μετάδοσης χρόνου (time-domain transmissometry ή TDT), η μέθοδος μέτρησης μετατόπισης φάσης (phase transmissometry ή PT) και άλλες [21] [22].

Παρά το μεγάλο όγκο αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας που έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες, οι πληροφορίες σχετικά με τις επιδόσεις τους είναι περιορισμένες, ενώ οι συγκριτικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί δεν είναι παρά ελάχιστες. Οι σημαντικότερες μελέτες που δημοσιεύονται στη διεθνή βιβλιογραφία είναι αυτές των Charlesworth [21], Muñoz-Carpena [22], Robinson et al. [23], Robinson and Friedman [24], Evett et al. [25], Evett et al. [26] και Walker et al. [27]. Κοινή διαπίστωση όλων των προαναφερομένων ερευνητών είναι ότι οι αισθητήρες που βασίζονται στις τεχνολογίες TDR και FDR παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά ακρίβειας.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η συγκριτική αξιολόγηση τριών αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας (Virrib, Gro-Point και Acclima), με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά και την εργαστηριακή τους απόδοση σε

σχέση με την βαρυμετρική μέθοδο προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας. Οι αισθητήρες αυτοί θα ήταν δυνατόν να αποτελέσουν μία οικονομική και σχετικά αξιόπιστη λύση για συστήματα αυτόματης άρδευσης με σταγόνες.

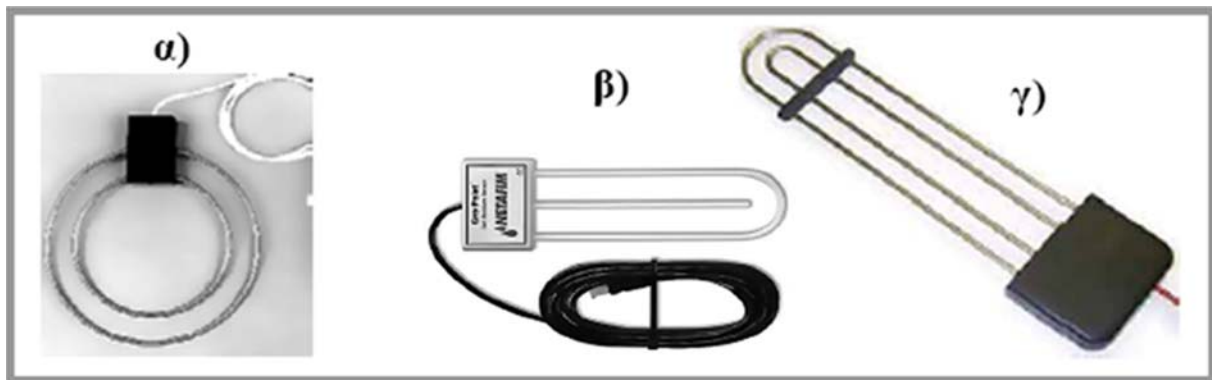
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες αυτής της συγκριτικής μελέτης, ήταν οι Virrib, Gro-Point και Acclima. Αρχικά, η επιλογή των τριών αυτών αισθητήρων έγινε μεταξύ δώδεκα άλλων διηλεκτρικών αισθητήρων (Πίνακας 1), με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, το χαμηλό κόστος τους, την ικανοποιητική ακρίβεια των μετρήσεών τους και τη δυνατότητα εύκολης διασύνδεσης με ηλεκτρονικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσεων.

CS 615-L	Aquaflex	TRIME-EZ	Gro-Point	Virrib	Acclima
Diviner 2000	EnviroSCAN	ECH ₂ O	HMS 9000	C-PROBE	ThetaProbe

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Διηλεκτρικοί αισθητήρες εδαφικής υγρασίας.

Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα VIRRIB βασίζεται στη μέθοδο μετατόπισης φάσης (Phase Transmission ή PT). Ως γνωστόν, κατά τη μετάδοση ημιτονοειδούς σήματος σε μία γραμμή μεταφοράς, η μετατόπιση της φάσης του (σε σχέση με την αρχική) εξαρτάται από το μήκος της γραμμής, τη συχνότητα και τη ταχύτητα διάδοσης. Όταν οι κυματοδηγοί του αισθητήρα βυθιστούν στο έδαφος, η ταχύτητα διάδοσης επηρεάζεται από την περιεχόμενη υγρασία σ' αυτό και επομένως, για σταθερή συχνότητα και μήκος διαδρομής, η κατ' όγκο περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό προσδιορίζεται από τη μετατόπιση της φάσης. Το σήμα στην έξοδο του είναι 5-50 mA, το οποίο αντιστοιχεί σε υγρασία εδάφους 5-50 % (% του όγκου), με ακρίβεια μέτρησης $\pm 1\%$. Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο μεταλλικούς αγωγούς ομόκεντρων κύκλων, οι οποίοι καταλήγουν σε ένα σώμα. Οι αισθητήρες Gro-Point και Acclima βασίζονται στην μέθοδο μέτρησης μετάδοσης του χρόνου (time-domain transmissometry ή TDT), η οποία είναι παρόμοια της μεθόδου ανακλωμέτρησης του χρόνου (TDR), δηλαδή βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού παλμού κατά μήκος μίας γραμμής μεταφοράς, με τη διαφορά ότι απαιτείται μονοκόμματη ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα στην αρχή και στο τέλος της γραμμής αυτής. Οι ανωτέρω αισθητήρες παρουσιάζονται στο σχήμα 1, ενώ περισσότερα στοιχεία για αυτούς δίνονται στους πίνακες 2 και 3 στο τέλος του άρθρου.



Σχήμα 1. Οι αισθητήρες εδαφικής υγρασίας α) Virrib, β) Gro-Point και γ) Acclima.

Η έρευνα έγινε στο εργαστήριο κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος. Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ορθογώνιο πλαστικό δοχείο διαστάσεων 1m x 0,5m x 0,5m που πληρώθηκε με έδαφος πηλώδες (loam) και μέσα του τοποθετούνταν οριζοντίως οι αισθητήρες μέτρησης της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 0,20 m. Το έδαφος του δοχείου υγραινόταν με εφαρμογή νερού από σταλακτήρα, μέχρι τον κορεσμό του και κατόπιν με τη βοήθεια μίας ψηφιακής ζυγαριάς, ζυγίζόταν περιοδικά ολόκληρο το δοχείο με σκοπό να προσδιοριστεί η κατ' όγκον εδαφική υγρασία (βαρυμετρική μέθοδος) και ταυτόχρονα γινόταν μετρήσεις της υγρασίας από τον κάθε αισθητήρα. Οι μετρήσεις διενεργούνταν σε επτά επίπεδα κατ' όγκον εδαφικής υγρασίας (5%-35%). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μεταξύ των αισθητήρων και της βαρυμετρικής μεθόδου αξιολογήθηκαν στατιστικά για να διαπιστωθεί η ακρίβεια μέτρησης του κάθε αισθητήρα.

Κατόπιν ακολούθησε σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων των τριών αισθητήρων σε χρονική δοκιμασία και για αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρία πλαστικά δοχεία κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου 0,70 m και ύψους 1 m, που πληρώθηκαν με έδαφος αμμοπηλώδες (sandy loam) και μέσα σε κάθε δοχείο τοποθετήθηκε οριζοντίως ένας αισθητήρας μέτρησης της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 0,20 m. Η εφαρμογή του νερού πραγματοποιούνταν

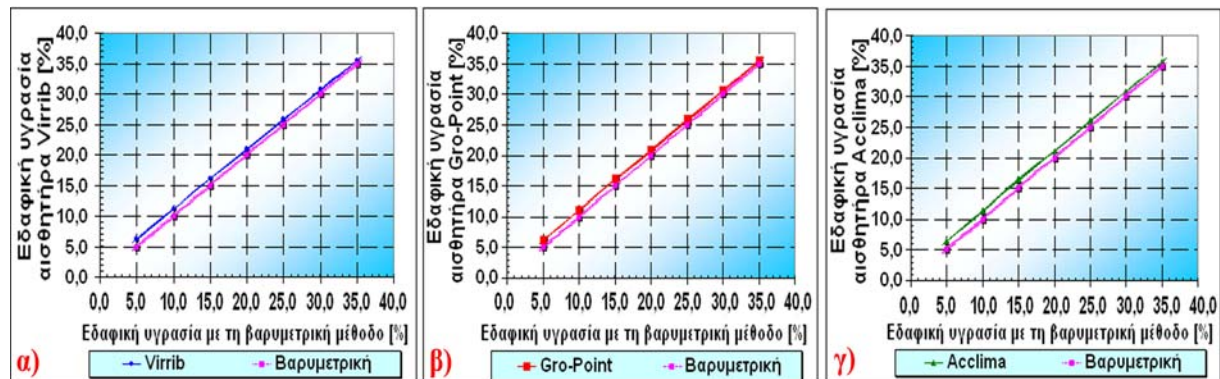
σύμφωνα με τις ενδείξεις του αισθητήρα Virrib (σημείο αναφοράς) και η ποσότητα του νερού εφαρμόζονταν με ένα σταλακτήρα σε κάθε δοχείο. Οι μετρήσεις υγρασίας με τους τρεις αισθητήρες διενεργούνταν καθημερινά σε διάστημα δέκα ημερών με συνολικό αριθμό μετρήσεων δέκα ανά ημέρα και ανά χρονικό διάστημα 90 min μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μεταξύ των τριών αισθητήρων, διερευνήθηκαν ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά τους όσον αφορά την απόκριση και την ακρίβεια μέτρησης του κάθε αισθητήρα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σε ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου των αρδεύσεων, η έξοδος από τους αισθητήρες εδαφικής υγρασίας (το σήμα ανάδρασης) θα πρέπει να συγκριθεί με τα σήματα που οριοθετούν την ωφέλιμη υγρασία για την ανάπτυξη των φυτών. Με αυτόν τον τρόπο η πληροφορία που σχετίζεται με την εδαφική υγρασία, μπορεί να ελέγχει τη ροή του νερού και να διατηρεί την υγρασία εντός του εδάφους σε επιθυμητά επίπεδα. Επομένως, η ορθή επιλογή αισθητήρων είναι κρίσιμος παράγοντας για την αποτελεσματική λειτουργία κάθε συστήματος ελέγχου των αρδεύσεων.

Εξετάστηκαν δώδεκα διηλεκτρικοί αισθητήρες (πίνακες 2 και 3 στο τέλος του άρθρου) και καταλήξαμε στην πειραματική χρήση τριών εξ αυτών (Virrib, Gro-Point και Acclima) με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, και την ικανοποιητική ακρίβεια των μετρήσεών τους. Οι αισθητήρες Gro-Point, Acclima και Virrib είναι ευαίσθητοι σε υψηλά επίπεδα αλατότητας, απαιτούν ειδική βαθμονόμηση για κάθε τύπο εδάφους και παρουσιάζουν μειωμένη ακρίβεια έναντι των αισθητήρων TDR (Tektronix 1502, TRASE, CS TDR 100, TRIME και CS 615-L) και FDR (Diviner 2000, EnviroSCAN και C-PROBE). Παρά ταύτα εμφανίζουν δύο σημαντικά πλεονεκτήματα: α) είναι χαμηλού κόστους και β) ανιχνεύουν την υγρασία σε σχετικά μεγάλο όγκο εδάφους. Επίσης, η δυνατότητά τους να διασυνδέονται εύκολα με άλλες ηλεκτρονικές συσκευές, τους καθιστά ως μία ικανοποιητική λύση για τα συστήματα αυτόματης άρδευσης με σταγόνες.

Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο μέρος του πειράματος (σύγκριση μετρήσεων βαρυμετρικής μεθόδου και αισθητήρων εδαφικής υγρασίας) είχε την ακόλουθη μηχανική σύσταση: Άμμος 44%, Ιλύς 40%, Αργίλος 16%, Φαινόμενο Ειδικό Βάρος 1,25g/cm³, Υδατοϊκανότητα 25% κ.ό., Σημείο Μόνιμης Μάρανσης 12% κ.ό., Αλατότητα < 2dS/m και pH=6,8. Στο σχήμα 2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τριών αισθητήρων σε σχέση με την βαρυμετρική μέθοδο. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι οι μετρήσεις των τριών αισθητήρων αποκλίνουν ελαφρώς από την καμπύλη που υπολογίζεται σύμφωνα με τη βαρυμετρική μέθοδο και κυρίως αποκλίνουν για χαμηλά ποσοστά εδαφικής υγρασίας μέχρι το 15%.



Σχήμα 2. Σύγκριση μετρήσεων της βαρυμετρικής μεθόδου και του αισθητήρα α) Virrib, β) Gro-Point, γ) Acclima.

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψαν τα ακόλουθα μοντέλα παλινδρόμησης και οι συντελεστές προσδιορισμού R^2 , που περιγράφουν τη σχέση της βαρυμετρικής μεθόδου με τον κάθε αισθητήρα μέτρησης της εδαφικής υγρασίας.

Για τον αισθητήρα Virrib η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο είναι η (1):

$$Y_{\text{VIRRIB}} = 0,975 X_{\text{ΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗ}} + 1,357 \quad (1)$$

με συντελεστή $R^2 = 1$.

Για τον αισθητήρα Gro-Point η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο είναι η (2):

$$Y_{\text{GRO-POINT}} = 0,974 X_{\text{ΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗ}} + 1,434 \quad (2)$$

με συντελεστή $R^2 = 1$.

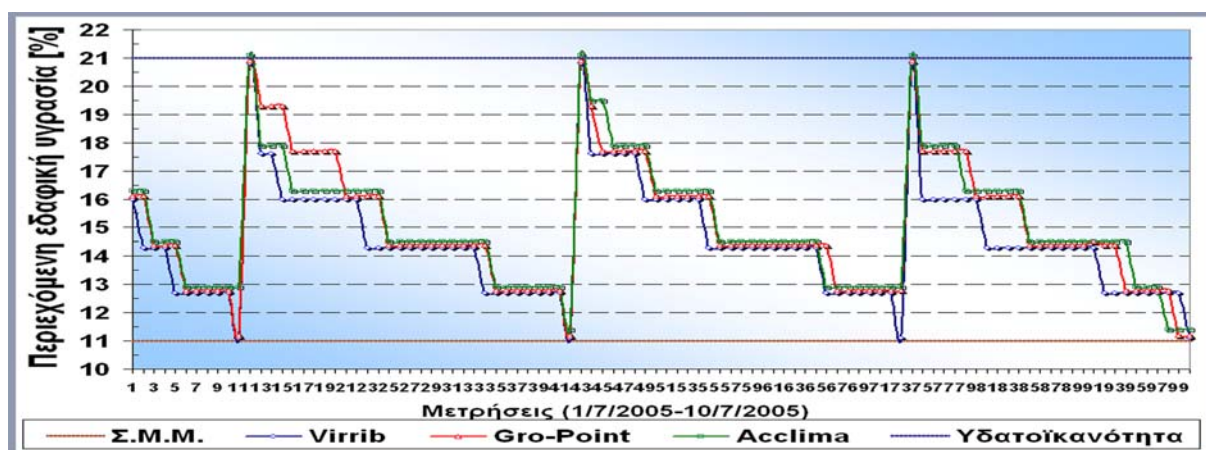
Για τον αισθητήρα Acclima η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο είναι η (3):

$$Y_{ACCLIMA} = 0,973 X_{ΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗ} + 1,677 \quad (3)$$

με συντελεστή $R^2 = 1$.

Αναλύοντας τα παραπάνω μοντέλα και τους συντελεστές προσδιορισμού, παρατηρούμε ότι αυτά αποδίδουν 100% τη σχέση μεταξύ των τιμών μέτρησης της εδαφικής υγρασίας με την βαρυμετρική μέθοδο και των τιμών της εδαφικής υγρασίας με βάση τον αντίστοιχο αισθητήρα. Αυτό σημαίνει ότι τα ανωτέρω μοντέλα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάλλιστα για να γίνει ακριβής βαθμονόμηση του κάθε αισθητήρα μέτρησης της εδαφικής υγρασίας βάσει της βαρυμετρικής μεθόδου και μπορούν να αποδώσουν με ακρίβεια τις τιμές της.

Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο μέρος του πειράματος (σύγκριση μετρήσεων μεταξύ των αισθητήρων) είχε την ακόλουθη μηχανική σύσταση: Άμμος 69%, Ιλύς 22%, Άργιλος 9%, Φαινόμενο Ειδικό Βάρος $1,50\text{g/cm}^3$, Υδατοϊκανότητα 21% κ.ό., Σημείο Μόνιμης Μάρανσης 7% κ.ό., Αλατότητα $< 2\text{dS/m}$ και $\text{pH}=6,7$. Από τη σύγκριση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν καθημερινά σε χρονικό διάστημα δέκα ημερών όπως προκύπτει από το σχήμα 3, δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές όσον αφορά τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τους αισθητήρες Virrib (M.O.=14,491), Gro-Point (M.O.= 15,064) και Acclima (M.O.= 15,078).



Σχήμα 3. Χρονική σύγκριση μετρήσεων εδαφικής υγρασίας των αισθητήρων Virrib, Gro-Point και Acclima.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά από την μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών των δώδεκα αισθητήρων και την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Οι αισθητήρες τεχνολογίας TDR και FDR παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης, εντούτοις οι αισθητήρες τεχνολογίας PT όπως ο Virrib και τεχνολογίας TDT όπως οι Gro-Point και Acclima θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως μία ικανοποιητική χαμηλού κόστους λύση για την παραγωγή του σήματος ανάδρασης σε συστήματα αυτόματης άρδευσης με σταγόνες.
2. Η συγκριτική διερεύνηση, των μετρήσεων μεταξύ βαρυμετρικής μεθόδου και αισθητήρων, δεν έδωσε σημαντικές αποκλίσεις. Από την στατιστική επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων αυτών προέκυψαν 3 διαφορετικά μοντέλα (ένα για κάθε αισθητήρα) και οι συντελεστές R^2 , με τη βοήθεια των οποίων προσδιορίζεται η σχέση της βαρυμετρικής μεθόδου με τους αισθητήρες μέτρησης της εδαφικής υγρασίας. Η ανάλυση των 3 μοντέλων και των συντελεστών R^2 έδειξε ότι είναι δυνατόν να αποδώσουν κατά 100% τη σχέση των τιμών μέτρησης της εδαφικής υγρασίας μεταξύ βαρυμετρικής μεθόδου και αισθητήρων. Επομένως, τα ανωτέρω μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάλλιστα για την ακριβή βαθμονόμηση του κάθε αισθητήρα με βάση τη βαρυμετρική μέθοδο και μπορούν να αποδώσουν με ακρίβεια τις τιμές της.
3. Από τη σύγκριση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των τριών αισθητήρων (Virrib, Gro-Point και Acclima) δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές. Επομένως, θα μπορούσαμε ανεπιφύλακτα να προτείνουμε τη χρήση των συγκεκριμένων αισθητήρων σε αυτόματα συστήματα αρδύσεων με σταγόνες, με την παρατήρηση ότι οι κυματοδηγοί του αισθητήρα Acclima, επειδή έχουν μεγάλο μήκος, παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας κατά την τοποθέτησή τους στο έδαφος.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	CS 615-L	TRIME-EZ	Aquaflex	Gro-Point	Virrib	Acclima
Μέθοδος μέτρησης	WCR	TDR	TDT	TDT	PD	TDT
Εύρος μέτρησης	0% ÷ 50%	0% ÷ 100%	0% ÷ 70%	5 % ÷ 50%	5% ÷ 50%	5% ÷ 50%
Ακρίβεια μέτρησης	± 2,5%	± 1 %	± 2 %	± 1 %	± 1 %	± 1 %
Κατανάλωση ισχύος	12 V DC	15 V DC	12 V DC	18 V DC	12 V DC	24 V AC
Διασύνδεση με άλλες συσκευές	NAI	NAI	NAI	NAI	NAI	NAI
Μέθοδος εγκατάστασης	Ενταφιαζόμενος	Ενταφιαζόμενος	Ενταφιαζόμενος	Ενταφιαζόμενος	Ενταφιαζόμενος	Ενταφιαζόμενος
Τύπος εδάφους	Δύσκολ. σε αργιλώδη	Όλα	Όλα	Δύσκολ. σε αργιλώδη	Όλα	Όλα
Ευαισθησία στην αλατότητα	>2 dS/m	>2 dS/m	Βαθμονόμ. ως προς Αγωγιμ./ θερμοκρ.	Σε υψηλά επίπεδα αλατότητας	>3 dS/m	>2,5 dS/m
Απαιτούμενη συντήρηση	OXI	OXI	OXI	OXI	OXI	OXI
Βαθμός επικινδυνότητας	OXI	OXI	OXI	OXI	OXI	OXI
Εφαρμογές	Έρευνα/ Άρδευση	Έρευνα/ Άρδευση	Έρευνα/ Άρδευση	Άρδευση	Άρδευση	Άρδευση
Διαστάσεις αισθητήρα	Οδηγ.30cm,Ø=3,2mm Κεφ. 11×6,3×2 cm	Οδηγ.16 cm Κεφ.23cm,Ø=6,3cm	Μήκ. οδηγ. 3 m	24×9,5×3,8 cm	Οδηγ. Ø=28 cm	36,8×7,6×2,5 cm
Κατασκευαστής / Χώρα προέλευσης	Campbell Scientific Η.Π.Α.	IMKO Γερμανία	Streat Instruments Νέα Ζηλανδία	Netafim Η.Π.Α.	Bilovice Τσεχία	Acclima Η.Π.Α.
Τιμή κόστους	6.250 €	1.700 €	583 €	295 €	200 €	290 €

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Κριτήρια αξιολόγησης διηλεκτρικών αισθητήρων εδαφικής υγρασίας.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	Diviner 2000	EnviroSCAN	ECH₂O	HMS 9000	C-PROBE	ThetaProbe
Μέθοδος μέτρησης	FDR	FDR	FD	FDR	FDR	ADR
Εύρος μέτρησης	0% ÷ 100%	0% ÷ 100%	0% ÷ 100%	0% ÷ 100%	0% ÷ 100%	0% ÷ 100%
Ακρίβεια μέτρησης	± 0,5 %	± 1 %	± 1 %	± 0,1%	± 1 %	± 1 %
Κατανάλωση ισχύος	12 V DC	15 V DC	2,5 V DC	8÷24 V DC	6 V DC	15 V DC
Διασύνδεση με άλλες συσκευές	OXI	NAI	NAI	NAI	NAI (Adcon Telemetry)	NAI
Μέθοδος εγκατάστασης	Ολισθαίνει σε πλαστ. σωλήνα	Ολισθαίνει σε πλαστ. σωλήνα	Ενταφιαζόμενος	Ειδικά ανοιγμένη οπή	Ολισθαίνει σε πλαστ. σωλήνα	Ενταφιαζόμενος/ πλαστ. σωλήνα
Τύπος εδάφους	Όλα	Όλα	Όλα	Όλα	Όλα	Όλα
Ευαισθησία στην αλατότητα	Ελάχιστη	Ελάχιστη	Ελάχιστη	>5 dS/m	Ελάχιστη	Ελάχιστη
Απαιτούμενη συντήρηση	NAI	NAI	OXI	OXI	NAI	OXI
Βαθμός επικινδυνότητας	OXI	OXI	OXI	OXI	OXI	OXI
Εφαρμογές	Έρευνα/ Άρδευση	Έρευνα/ Άρδευση	Άρδευση	Έρευνα/ Άρδευση	Έρευνα/ Άρδευση	Έρευνα/ Άρδευση
Διαστάσεις αισθητήρα	Βάθος =1 m	Βάθος =2 m	25,4×3,2 cm	Ø=2,2cm Μήκ.=32cm	Βάθος =1,5 m	Ø=4cm Μήκ.=20cm
Κατασκευαστής / Χώρα προέλευσης	Sentek Αυστραλία	Sentek Αυστραλία	DECAGON Η.Π.Α.	SDEC Γαλλία	Adcon/AgriLink Αυστρία/Αυστραλία	Delta-T Devices Αγγλία
Τιμή κόστους	1.800 €	3.500 €	125 €	585 €	916 €	412 €

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Κριτήρια αξιολόγησης διηλεκτρικών αισθητήρων εδαφικής υγρασίας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Singh B., J. Boivin, G. Kirkpatrick and B. Hum (1995) "Automatic irrigation scheduling system (AISSUM): Principles and applications", **J. Irrig. Drain. Eng.**, Vol. 121, pp. 43-57.
2. Evett S. R., T. A. Howell, A. D. Schneider, D. F. Wanjura and D. R. Upchurch (2002) "Automatic drip irrigation control regulates water use efficiency", **Int. Water and Irrigation**, Vol. 22, No. 2, pp. 32-37.
3. Israelsen O. W. and V. E. Hansen (1962) "**Irrigation principles and practices**", John Wiley & Sons.
4. Παπαζαφειρίου Ζ. Γ. (1984) "**Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων**", Εκδόσεις Ζήτη.
5. Μιχελιάκης Ν. (1988) "**Συστήματα Αυτόματης Άρδευσης: Άρδευση με σταγόνες**", Εκδοτική Αγροτεχνική.
6. Bouyoucos G. J. and A. H. Mick (1942) "An electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions", **Mich. State Coll. Agric. Exp. Tech. Bull.**, Vol. 172, pp. 1-14.
7. Goltz S. M., G. Benoit, and H. Schimmelpfenning (1981) "New circuitry for measuring soil water matric potential with moisture blocks", **Agric. Meteorol.**, Vol. 24, pp. 75-85.
8. Thompson S. J. and C. F. Armstrong (1987) "Calibration of the watermark model 200 soil moisture sensor", **Applied Engineering in Agriculture**, Vol. 3, No. 2, pp. 186-189.
9. Phene C. J., G. J. Hoffman and R. S. Austin (1973) "Controlling automated irrigation with soil matric potential sensor", **Transactions of the ASAE**, Vol. 42, pp. 774-76.
10. Phene C. J., P. A. Allee and J. Pierro (1987) "Measurement of soil matric potential and real time irrigation scheduling", Proc. Int. Conf. **Measurement Soil Plant Water Status II**, Logan, Utah, pp. 245-265.
11. Campbell G. S. and W. H. Gardner (1971) "Psychrometric measurement of soil water potential: temperature and bulk density effects", **Soil Science Society of American Journal**, Vol. 35, pp. 8-12.
12. Campbell E. C., G. S. Campbell and W. K. Barlow (1973) "A dewpoint hygrometer for water potential measurement", **Agric. Meteorol.**, Vol. 12, pp. 113-121.
13. Brown R. W. and J. M. Collins (1980) "A screen-caged thermocouple psychrometer and calibration chamber for measurements of plant and soil water potential", **Agron. J.**, Vol. 72, pp. 851-854.
14. Gaskin G. D. and J. D. Miller (1996) "Measurement of soil water content using simplified impedance measuring technique", **Journal of Agricultural Engineering Research**, Vol. 63, pp. 153-160.
15. Gardner W. and D. Kirkham (1952) "Determination of soil moisture by neutron scattering", **Soil Science Society of American Journal**, Vol. 73, pp. 391-401.
16. Anderson S. H. and C. J. Gantzer (1989) "Determination of soil water content by x-ray computed tomography and magnetic resonance imaging", **Irrigation Science**, Vol. 10, pp. 63-71.
17. Campbell J. E. (1990) "Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz", **Soil Science Society of American Journal**, Vol. 54, pp. 332-341.
18. Topp G. C. and J. L. Davis (1985) "Measurement of soil water content using Time-Domain Reflectometry (TDR): A field evaluation", **Soil Science Society of American Journal**, Vol. 49, pp. 19-30.
19. Malicki M. A. and W. M. Skierucha (1989) "A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300ps rise-time needle pulse", **Irrigation Science**, Vol. 10, pp. 153-163.
20. Baker J. M. and R. W. Allmaras (1990) "System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry", **Soil Science Society of American Journal**, Vol. 54, pp. 1-6.
21. Charlesworth P. (2000) "**Soil water monitoring**", CSIRO Land and Water.
22. Muñoz-Carpena R. (2004) "Field devices for monitoring soil water", **Bulletin 343**, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
23. Robinson D.A., C. M. K. Gardner and J. D. Cooper (1999) "Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and Thetaprobe: comparison, including the effect of bulk soil electrical conductivity", **Journal of Hydrology**, Vol. 223, pp. 138-211.
24. Robinson D. A. and S. P. Friedman (2000) "Parallel plates compared with conventional rods as TDR waveguides for sensing soil moisture", **Subsurface Sensing Technologies and Applications**, Vol. 1, No. 4, pp.137-151.
25. Evett S. R., B. B. Ruthardt, S. T. Kottkamp, T. A. Howell, A. D. Schneider and J. A. Tolk (2002) "Accuracy and precision of soil water measurements by neutron, capacitance, and TDR methods", **17th World Congress of Soil Science**, (pub. On CD-ROM), Bangkok, Thailand.
26. Evett S. R., J. P. Laurent, P. Cepuder and C. Hignett (2002) "Neutron scattering, capacitance, and TDR soil water content measurements compared on four continents", **17th World Congress of Soil Science**, (pub. On CD-ROM), Bangkok, Thailand.
27. Walker J. P., G. R. Willgoose and J. D. Kalma (2004) "In situ measurement of soil moisture: a comparison techniques. **Journal of Hydrology**, Vol. 293, pp. 85-99.