

ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ/ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

**Ι. Γράβαλος¹, Α. Ατζέμης, Μ. Σαββουλίδης, Χ. Χαδίνη,
Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Ζ. Τσιρόπουλος, Α. Δαλακούρας**

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας,
Τμήμα Γεωργικών Μηχανών & Αρδεύσεων
¹gravalos@in.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται το σχέδιο και η πειραματική διερεύνηση ενός αυτόνομου συστήματος μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας. Το πρωτότυπο αυτό σύστημα περιλαμβάνει έξι αισθητήρες ηλεκτρικής αντίστασης, που συνδέονται με την κεντρική ηλεκτρονική μονάδα. Η ηλεκτρονική μονάδα βασίζεται σε έξι ολοκληρωμένα κυκλώματα LM 3915, καθένα από τα οποία περιέχει δέκα συγκριτές τάσης. Κατά την πειραματική διερεύνηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τύποι αισθητήρων και διαφορετικοί τύποι εδαφών. Το όλο σύστημα είναι ενεργειακά αυτόνομο καθώς τροφοδοτείται μέσω φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών, η συμπεριφορά του ηλεκτρονικού συστήματος κρίνεται ικανοποιητική.

AN AUTONOMOUS SOIL WATER MONITORING SYSTEM

**I. Gravalos, A. Atzemis, M. Savoulides, Ch. Chadini,
D. Kateris, P. Xyradakis, Z. Tsiropoulos, A. Dalakouras**

Technological Educational Institute of Larissa, Faculty of Agricultural
Technology, Department of Agricultural Machinery & Irrigation
¹gravalos@in.gr

ABSTRACT

In this work, the drawing and the experimental evaluation of an autonomous soil water monitoring system are presented. This original system includes six sensors of electric resistance that are connected with the electronic monitoring unit. The monitoring unit is based on six integrated circuits LM 3915 each one consisting from 10 voltage comparators. At the experimental evaluation of this system there were used different types of sensors and different types of soil. The system is energy autonomous, because it is supplied directly via photovoltaic frames. According to the test results the behaviour of this electronic soil water monitoring system is judged satisfactory.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέτρηση/καταγραφή της εδαφικής υγρασίας είναι θεμελιώδης παράγοντας κάθε ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης του αρδευτικού νερού. Για το λόγο αυτό, πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να αναπτύξουν συστήματα αυτόματης άρδευσης, βασιζόμενοι στη μέτρηση/καταγραφή της εδαφικής υγρασίας. Χρησιμοποίησαν διάφορες μεθόδους και συσκευές, όπως της ηλεκτρικής αντίστασης, των τασιμέτρων, της χρονικής ανακλωμέτρησης (TDR) και άλλες. Εκτεταμένη παρουσίαση πλήθους διαφορετικών συσκευών μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας γίνεται στην εργασία του Charlesworth (2000).

Η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στην αρχή ότι κάθε μεταβολή της εδαφικής υγρασίας προκαλεί αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, τα οποία βυθίζονται στο έδαφος σε επιθυμητό βάθος. Παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία στη μεγάλη συγκέντρωση αλάτων, ενώ απαιτούν συνεχή βαθμονόμηση. Για τους αισθητήρες, των οποίων τα ηλεκτρόδια βυθίζονται στο έδαφος γυμνά, το πρωτεύων πρόβλημα προέρχεται από την ηλεκτρική πόλωση (electrical polarization). Η πόλωση οφείλεται σε αντίδραση του αισθητήρα στη δίοδο του ρεύματος με τη δημιουργία αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, η οποία έχει σαν σκοπό να αντισταθμίσει κάθε εξωτερική τάση, που εφαρμόζεται σε αυτόν (Malicki & Hanks, 1989). Για τον περιορισμό της πόλωσης προτείνεται η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος αντί του συνεχούς και όσο η συχνότητά του είναι μεγαλύτερη, τόσο μειώνεται ο κίνδυνος εμφάνισής της. Οι αισθητήρες αυτοί είναι σχετικά απλοί στην κατασκευή τους, είναι χαμηλού κόστους και γι' αυτό χρησιμοποιούνται σε πολλά συστήματα αυτόματης άρδευσης, παρά τα μειονεκτήματα που εμφανίζουν.

Σύμφωνα με τους Skinner et al. (1997) τα γύψινα πλακίδια δεν είναι από τους ιδανικότερους αισθητήρες μέτρησης/καταγραφής της υγρασίας εδάφους, όμως είναι πρακτικά και αξιόπιστα. Ένα από τα μειονεκτήματά τους είναι η με μηχανικό τρόπο ανάγνωση των μετρήσεων και ο περιορισμένος αριθμός των αναγνώσεων, μία ή δύο φορές την εβδομάδα. Ο Werner (2002) υποστηρίζει ότι τα γύψινα πλακίδια είναι αποδεκτά εργαλεία στον προγραμματισμό των αρδεύσεων και παρουσιάζει τρόπους ορθής εγκατάστασης των πλακιδίων στον αγρό. Οι Hanson et al. (2000) μελέτησαν τη συμπεριφορά των τασιμέτρων και αισθητήρων ηλεκτρικής αντίστασης σε διαφορετικές συνθήκες υγρασίας του εδάφους. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις τους, τα γύψινα πλακίδια δεν παρουσιάζουν άμεση απόκριση. Τα τασιμετρα και οι αισθητήρες Watermark έχουν παρόμοια απόκριση, όμως διαπιστώθηκε ότι οι αισθητήρες Watermark συμπεριφέρονται καλύτερα σε ξηρότερα εδάφη. Οι McCann et al. (1992) μελέτησαν τα στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά της απόκρισης του αισθητήρα Watermark 200. Η γραφική παράσταση της αντίστασης του εδάφους ως προς τη μεταβολή του δυναμικού του εδαφικού νερού ήταν σχεδόν γραμμική. Ειδικότερα, στην κατάσταση κορεσμού του εδάφους, η ηλεκτρική αντίσταση μετρήθηκε στο 1 kΩ, ενώ στα -103 kPa η ηλεκτρική αντίσταση μετρήθηκε στα 23 kΩ. Η δυναμική απόκριση του αισθητήρα ήταν ικανοποιητική όταν η υγρασία του εδάφους μεταβλήθηκε, από το όριο της υδατοϊκανότητας μέχρι το σημείο μόνιμης μαράνσεως και αντιστρόφως, με ομαλό τρόπο. Αντιθέτως, η απόκρισή του δεν ικανοποίησε όταν η υγρασία του εδάφους ελαττώθηκε απότομα και η ύγρανση του εδάφους έγινε μερικώς. Σύμφωνα με την έρευνα των Spaans και Baker (1992), η απόκριση του αισθητήρα Watermark, στις μεταβολές της θερμοκρασίας εδάφους, μπορεί να εκφραστεί με μια ενιαία εξίσωση, έγκυρη για κάθε αισθητήρα, αλλά σε σύγκριση με το δυναμικό του εδαφικού νερού διαπιστώθηκε ότι κάθε αισθητήρας είχε τη δική του απόκριση. Επίσης, η απόκριση του αισθητήρα Watermark ήταν διαφορετική σε διαφορετικά εδάφη και για δεδομένο

έδαφος δεν παρήγαγε απαραίτητως το ίδιο αποτέλεσμα σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Σύμφωνα με τους Xin et al. (2007), οι αισθητήρες ηλεκτρικής αντίστασης είναι κατάλληλα και χαμηλού κόστους εργαλεία μέτρησης του δυναμικού του εδαφικού νερού. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι ότι οι μετρήσεις τους συχνά δεν είναι ακριβείς σε ένα μεγάλο εύρος τιμών της υγρασίας εδάφους. Για το λόγο αυτό ανέπτυξαν ένα νέο αισθητήρα ηλεκτρικής αντίστασης, ο οποίος μπορεί να δώσει μετρήσεις μεγαλύτερης ακρίβειας σε ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών της υγρασίας εδάφους. Ο αισθητήρας αυτός αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετήθηκαν εντός μίας μήτρας από γύψο και άμμο, η οποία σταθεροποιήθηκε με πολυακρυλαμίδιο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, ο αισθητήρας μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια το δυναμικό του εδαφικού νερού από -7,5 kPa έως -10 MPa.

Από τα προηγούμενως αναφερθέντα προκύπτει ότι η έρευνα γύρω από την ανάπτυξη συστημάτων αυτόματης άρδευσης με βάση τους αισθητήρες ηλεκτρικής αντίστασης συνεχίζεται με αμείωτο ενδιαφέρον, παρά τα μειονεκτήματα που εμφανίζουν. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος μέτρησης/καταγραφής της υγρασίας εδάφους, το οποίο μπορεί να βοηθήσει στον προγραμματισμό των αρδεύσεων. Αυτό το πρωτότυπο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικούς τύπους αισθητήρων ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ είναι ενεργειακά αυτόνομο καθώς τροφοδοτείται μέσω φωτοβολταϊκών πλαισίων.

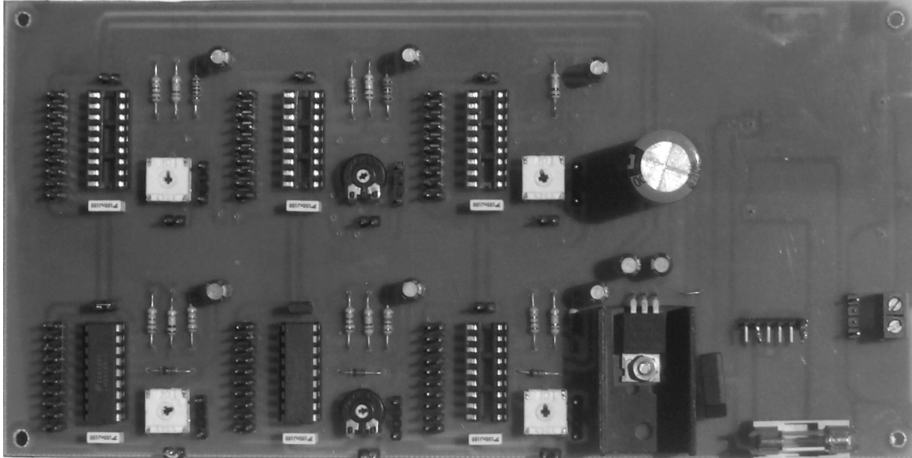
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το προτεινόμενο αυτόνομο σύστημα μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και διερευνήθηκε πειραματικά από το Τμήμα Γεωργικών Μηχανών & Αρδεύσεων του Τ.Ε.Ι. Λάρισας. Το πρωτότυπο αυτό σύστημα αποτελείται από δύο επιμέρους συστήματα: α) το σύστημα μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας και β) το φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδοσίας.

2.1. ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ/ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Το σύστημα μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας περιλαμβάνει: α) την ηλεκτρονική μονάδα και β) έξι αισθητήρες ηλεκτρικής αντίστασης. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το κύκλωμα του συστήματος μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας. Η κεντρική πλακέτα βασίζεται σε έξι (6) ολοκληρωμένα κυκλώματα LM 3915. Κάθε ολοκληρωμένο περιέχει δέκα συγκριτές τάσης, ενώ είναι συνδεδεμένο σε μία τάση αναφοράς, την οποία καθορίζει ένας διατρέτης τάσης. Η ευαισθησία του σήματος εξόδου κάθε αισθητήρα ρυθμίζεται με τη βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου. Το εναλλασσόμενο ρεύμα από τον αισθητήρα ανορθώνεται από μία διόδο 1N4148 και ένα στοιχείο RC. Οι αυτόφωτες διόδοι, που είναι τοποθετημένες επί μίας μπάρας, οδηγούνται απευθείας από τις εξόδους των συγκριτών του κάθε ολοκληρωμένου. Το ανωτέρω σύστημα δίνει, μέσω των αυτόφωτων διόδων (λυχνιών) τριών διαφορετικών χρωματισμών, οπτική απεικόνιση, όταν το μέτωπο της υγρασίας απλώνεται εντός του εδάφους σε ένα επιθυμητό επίπεδο και αντιστρόφως. Επιπλέον, οι τιμές μέτρησης της εδαφικής υγρασίας από κάθε αισθητήρα απεικονίζονται με τη βοήθεια έξι ψηφιακών οθονών. Κάθε οθόνη αποτελείται από τρεις μονάδες HD11310 των επτά (7) τομέων LED. Το κύκλωμα τροφοδοσίας της κεντρικής πλακέτας και των αισθητήρων είναι απλό και περιλαμβάνει ένα μετασχηματιστή, μία γέφυρα ανόρθωσης, πυκνωτή εξομάλυνσης και ένα σταθεροποιητή τάσης των 5V. Η τροφοδοσία των αισθητήρων γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα που λαμβάνεται πριν την ανόρθωση αυτού. Για την αποφυγή υπερθέρμανσης των κυκλωμάτων της κεντρικής ηλεκτρονικής μονάδας,

υλοποιήθηκε ένα βοηθητικό κύκλωμα ελέγχου της θερμοκρασίας. Το κύκλωμα αυτό προειδοποιεί, με τη βοήθεια βομβητή, σε κάθε περίπτωση υπέρβασης των επιτρεπόμενων ορίων θερμοκρασίας, ενώ ταυτόχρονα θέτει σε λειτουργία ένα μικρό ανεμιστήρα. Η οδήγηση τόσο του βομβητή όσο και του ανεμιστήρα βασίζεται στα ολοκληρωμένα LM555CM.

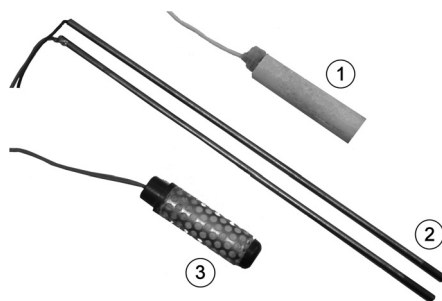


Σχήμα 1. Κύκλωμα του συστήματος μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας

Κατά την πειραματική διερεύνηση του συστήματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν τρεις (3) διαφορετικοί τύποι αισθητήρων ηλεκτρικής αντίστασης. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται ο αισθητήρας δύο ηλεκτροδίων, το γύψινο πλακίδιο και ο αισθητήρας Watermark Model 200 SS της Irgometer Co. Πρόκειται για τρεις τύπους αισθητήρων χαμηλού κόστους, που τοποθετούνται στο έδαφος σχετικά εύκολα, αλλά απαιτούν συχνή βαθμονόμηση. Τα ηλεκτρόδια του πρώτου αισθητήρα είναι κατασκευασμένα από λεπτόκοκκο άνθρακα και έχουν επικαλυφθεί με στρώμα χαλκού. Στα πλακίδια από γύψο, τοποθετήθηκαν ανοξειδωτά ηλεκτρόδια σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Τέλος, ο Watermark είναι ένας αισθητήρας κοκκώδους μήτρας (granular matrix sensor). Αποτελείται από δύο ομοκεντρικά ηλεκτρόδια ενσωματωμένα εντός του κοκκώδους αυτού υλικού, το οποίο προστατεύεται από μία συνθετική μεμβράνη. Επίσης, ένα πλέγμα από ανοξειδωτό χάλυβα σε συνδυασμό με ένα ελαστικό εξωτερικό κάλυμμα καθιστούν τον αισθητήρα ανθεκτικότερο από ένα κοινό γύψινο πλακίδιο.

2.2.ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

Το φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδοσίας (Σχήμα 3) αποτελείται από τα εξής κύρια τμήματα: α) το σύστημα δύο φωτοβολταϊκών πλαισίων, β) τον ελεγκτή φόρτισης, γ) το συσσωρευτή και δ) τον μετατροπέα DC-AC.

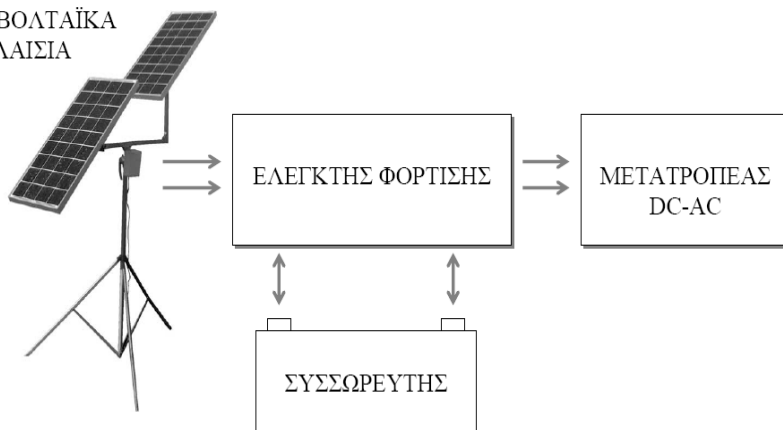


Σχήμα 2. Αισθητήρες ηλεκτρικής αντίστασης

1) Γύψινο πλακίδιο, 2) Αισθητήρας δυο ηλεκτροδίων και 3) Αισθητήρας Watermark

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο της NAPS KYOCERA Co (JAPAN). Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε ΦΒ πλαισίου είναι: τυπική ισχύς αιχμής $P_p=51W$, ηλεκτρική τάση στο σημείο ισχύος αιχμής $V_{m,STC}=16,9 V$, ηλεκτρικό ρεύμα στο σημείο ισχύος αιχμής $I_{m,STC}=3,02 A$ και οι διαστάσεις $985 \times 445 \times 36 mm$ (μήκος x πλάτος x πάχος). Η ισχύς αιχμής των ΦΒ πλαισίων υπολογίστηκε με σκοπό να καλύψει τις ανάγκες ισχυροδότησης ενεργοποιητών (ηλεκτροβαλβίδων) του συστήματος, μετά από μελλοντική εξέλιξη αυτού σε σύστημα αυτόματης άρδευσης. Ο ελεγκτής φόρτισης της Specialty Concepts Inc. (USA) εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνεται ο συσσωρευτής, αφενός από τα ΦΒ πλαίσια στην περίπτωση της υπερφόρτισης και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Είναι τοποθετημένος εντός προστατευτικού περιβλήματος αλουμινίου κατάλληλο για εξωτερική χρήση. Για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ένας συσσωρευτής Μολύβδου – Θεικού οξέος (Pb/H_2SO_4). Η χρησιμοποίηση μετατροπέα DC-AC ήταν επιβεβλημένη, επειδή η τροφοδοσία των αισθητήρων έπρεπε να γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα (όπως αναφέρθηκε ανωτέρω), για τον περιορισμό της ηλεκτρικής πόλωσης.

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ
ΠΛΑΙΣΙΑ



Σχήμα 3. Φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδοσίας

2.3. ΥΛΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πειραματική διάταξη αξιολόγησης των αισθητήρων ηλεκτρικής, περιελάμβανε ένα πλαστικό δοχείο, ύψους 45 cm και διαμέτρου 18 cm. Ένα τασίμετρο model RSU (Iggometer Co.) για τη βαθμονόμηση των αισθητήρων. Ένα ογκομετρικό δοχείο νερού, στον πυθμένα του οποίου είχε προσαρμοστεί ένας ρυθμιζόμενος σταλακτήρας. Έναν ορθοστάτη για τη στερέωση του δοχείου. Ένα ψηφιακό ωμόμετρο για την καταγραφή των μεταβολών της ηλεκτρικής αντίστασης. Κατά την πειραματική διερεύνηση του συστήματος αυτού στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι εδαφών. Τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά εδαφών

Έδαφος	Μηχανική Σύσταση Εδάφους			Χαρακτηρισμός Εδάφους	Ηλεκτρική αγωγιμότητα [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	pH
	Άμμος [%]	Ίλύς [%]	Άργιλος [%]			
Έδαφος Νο1	65	26	9	Αμμώδης Πηλός	660	7,2
Έδαφος Νο2	57	30	13	Αμμώδης Πηλός	430	5,6
Έδαφος Νο3	23	30	47	Άργιλος	858	7,9

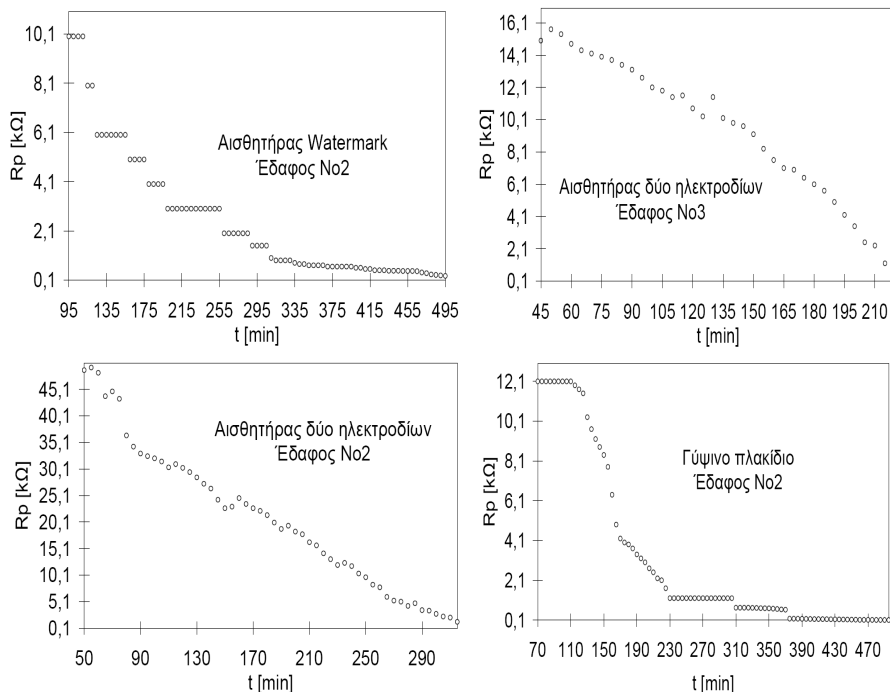
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Συχνά, η μέτρηση της μεταβλητής ή των μεταβλητών μίας διαδικασίας, συνεπάγεται χρονική καθυστέρηση που μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα αποτελέσματα σε ένα σύστημα. Επομένως, είναι σημαντικό να μελετηθεί η χρονική απόκριση των αισθητήρων εδαφικής υγρασίας σε συγκεκριμένη διέγερση, που μπορεί να υποβληθεί πειραματικά. Στο ακόλουθο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η χρονική απόκριση των τριών αισθητήρων σε διαφορετικούς τύπους εδαφών, όταν η διαβροχή γίνεται με σταθερή ποσότητα νερού και η μέτρηση λαμβανόταν ανά 5 min. Από την πειραματική αυτή διερεύνηση προέκυψε ότι η ηλεκτρική αντίσταση, στην έξοδο όλων των αισθητήρων, μεταβάλλεται ευκρινώς. Ειδικότερα, ο αισθητήρας Watermark δίνει την ομαλότερη αλλά και την πιο βαθμιαία μεταβολή της αντίστασης. Όμως, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη νεκρή ζώνη (δίνει σήμα στην έξοδο, 95 min μετά τη διέγερσή του). Ο αισθητήρας δύο ηλεκτροδίων παρουσιάζει τη μικρότερη νεκρή ζώνη, αλλά δείχνει να επηρεάζεται σημαντικά όταν λειτουργεί σε εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε άμμο και αυξημένη συγκέντρωση αλάτων. Τέλος, το γύψινο πλακίδιο παρουσιάζει απότομες μεταβολές της αντίστασης που μπορούν να προκαλέσουν εσφαλμένη εκτίμηση των μεταβολών της εδαφικής υγρασίας και δείχνει να επηρεάζεται σημαντικά από την αυξημένη συγκέντρωση αλάτων στο έδαφος.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στο δυναμικό του εδαφικού νερού και την έξοδο των αισθητήρων ηλεκτρικής αντίστασης για το έδαφος Νο 2. Είναι προφανές ότι η έξοδος του αισθητήρα Watermark παρουσιάζει καλύτερη γραμμικότητα σε σχέση με το γύψινο πλακίδιο.

Στο γράφημα του Σχήματος 6 δίνεται ένα παράδειγμα από την πειραματική επαλήθευση των ενδείξεων (φωτεινών λυχνιών) του συστήματος μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας για το έδαφος Νο 2, όταν με αυτό χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας Watermark. Συγκεκριμένα, οι λυχνίες σημειώνονται πάνω στο γράφημα ως εξής: με τον κύκλο (○) η πράσινη λυχνία, με το τρίγωνο (Δ) η κίτρινη λυχνία και με το τετράγωνο (□) η κόκκινη λυχνία. Η ρύθμιση της ευαισθησίας, στην έξοδο κάθε αισθητήρα, θα πρέπει να γίνεται με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου και θα πρέπει να προσδιορίζεται πειραματικά ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και το είδος των καλλιεργούμενων φυτών. Στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνονται ικανοποιητικά

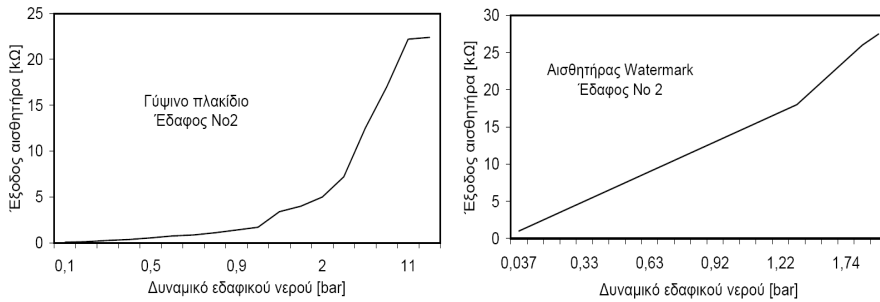
αποτελέσματα όταν η ρύθμιση γίνεται στο μέσον της διαδρομής του ποτενσιόμετρου. Σύμφωνα με το Σχήμα 6, για το έδαφος Νο 2 η πράσινη λυχνία φωτοβόλουσε όταν το υδατικό δυναμικό του εδάφους ήταν κοντά στα 4 cbars, η κόκκινη λυχνία όταν το υδατικό δυναμικό έπεφτε περίπου στα 68 cbars και η κίτρινη λυχνία όταν το υδατικό δυναμικό προσέγγιζε τα 40 cbars, προειδοποιώντας για κατάσταση οριακής ξηρότητας του εδάφους. Σύμφωνα με το γράφημα, η συμπεριφορά του συστήματος μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας κρίνεται ικανοποιητική.



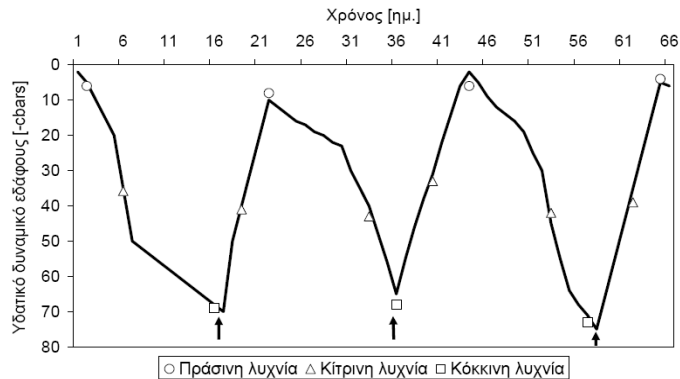
Σχήμα 4. Χρονική απόκριση των τριών αισθητήρων σε διαφορετικούς τύπους εδαφών

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα σύστημα μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικούς τύπους αισθητήρων ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ είναι ενεργειακά αυτόνομο. Από την πειραματική διαδικασία προέκυψε ότι η έξοδος όλων των αισθητήρων, μεταβάλλεται ευκρινώς. Ειδικότερα, ο αισθητήρας Watermark δίνει την ομαλότερη και πιο βαθμιαία χρονική απόκριση. Επίσης δίνει την έξοδο με την καλύτερη γραμμικότητα. Κατά την πειραματική επαλήθευση, η συμπεριφορά του συστήματος, όταν με αυτό χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας Watermark, κρίθηκε ικανοποιητική. Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνουν και άλλες δοκιμές με σκοπό να προσδιορίσουμε την επίδραση και άλλων παραγόντων, όπως του φαινομένου της υστέρησης, των μεταβολών της θερμοκρασίας, κ.ά.



Σχήμα 5. Η σχέση ανάμεσα στο δυναμικό εδαφικού νερού και την έξοδο των αισθητήρων



Σχήμα 6. Πειραματική επαλήθευση των ενδείξεων του συστήματος μέτρησης/καταγραφής της εδαφικής υγρασίας για το έδαφος Νο 2

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Charlesworth, P., 2000. *Soil water monitoring*. Land & Water, Australia, 96 pp.
- Hanson, B., Peters, D., Orloff, S., 2000. *Effectiveness of tensiometers and electrical resistance sensors varies with soil conditions*. California Agriculture, 54 (3): 47-50.
- Malicki, M.A., Hanks, R.J., 1989. *Interfacial contribution to two-electrode soil moisture sensor readings*. Irrig. Sc., 10: 41-54.
- McCann, I.R., Kincaid, D.C., Wang, D., 1992. *Operational characteristics of the Watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management*. Applied Engineering in Agriculture, 8 (5): 603-609.
- Skinner, A., Hignett, C., Dearden, J., 1997. *Resurrecting the gypsum block for soil moisture measurement*. Australian Viticulture, 14: 1-9.
- Spaans, E.J.A., Baker, J.M., 1992. *Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature*. Plant and Soil, 143: 213-217.
- Werner, H., 2002. *Irrigation management using electrical resistance blocks to measure soil moisture*. CES. <http://agbiopubs.sdstate.edu/articles/FS899.pdf>
- Xin, X.L., Xu, F.A., Zhang, J.B., Xu, M.X., 2007. *A new resistance sensor for monitoring soil matric potential*. Soil Sci. Soc. Am. J., 71 (3): 866-871.