



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

ΠΕΛΙΟΥ



Της φοιτήτριας :

Αντιγόνη Πλατή

gf6451

Επιβλέπων καθηγητής: Ιωάννης Ν. Δαλιακόπουλος

Ηράκλειο, Οκτώβριος , 2021

ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΥΤΟ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ ΓΕΩΠΟΝΩΝ, ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΤΟΥ ΤΕΙ.

ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ ΤΡΙΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

ΚΑΘ: Τζανακάκης Βασίλειος

ΚΑΘ...: Δαλιακόπουλος Ιωάννης

ΚΑΘ...: Κόκκινου Ελένη

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ιωάννη Ν. Δαλιακόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου ένα ενδιαφέρον και σημαντικό θέμα διπλωματικής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ν. Μαρκάκη υπεύθυνος του εργαστηρίου διαχείριση αποβλήτων για την καθοδήγησή του στα πλαίσια του πειράματος μου.

Περίληψη

Η επάρκεια εδαφικής υγρασίας είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των φυτών καθώς το νερό έχει το ρόλο του διαλύτη και του μεταφορέα των θρεπτικών στοιχείων προς ρίζες και στους φυτικούς ιστούς μέσω της διαδικασίας της διαπνοής. Όμως, εδάφη και ύδατα με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα είναι προβληματικά, καθώς δυσχεραίνουν την απορρόφηση του εδαφικού νερού και θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά, έστω και αν η εδαφική υγρασία βρίσκεται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Συνεπώς, ο ακριβής προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος, που αποτελεί δείκτη της περιεκτικότητας του νερού σε άλατα, έχουν μεγάλη σημασία για τον ορθό προσδιορισμό των εκάστοτε αρδευτικών αναγκών.

Πέρα από τις εργαστηριακές μεθόδους, για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας και αγωγιμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες πεδίου, δηλαδή συσκευές που ανιχνεύουν ή μετρούν τις φυσικές αυτές ιδιότητες και να τις καταγράφουν ή τις μεταδίδουν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες πεδίου. Με τη βοήθεια αισθητήρων εδαφικής υγρασίας μπορούμε να σχεδιάσουμε ή να βελτιώσουμε συστήματα άρδευσης, με αποτέλεσμα τη μείωση της σπατάλης νερού και αλλά και την εξασφάλιση της βέλτιστης ποσότητας άρδευσης. Σήμερα, η ανάγκη για αποδοτικότερη εφαρμογή του αρδευτικού νερού σε συνδυασμό με την τεχνολογική πρόοδο, έχει οδηγήσει σε αλματώδη ανάπτυξη των συσκευών μέτρησης και παρακολούθησης της υγρασίας του εδάφους. Παρόλη τη χρησιμότητά τους, οι αισθητήρες παρουσιάζουν διάφορα σφάλματα τα οποία θα πρέπει αν είναι γνωστά για την ορθολογική χρήση τους.

Στην παρούσα μελέτη γίνονται συγκρίσεις μεταξύ των αισθητήρων GS3 και 5TM του οίκου METER Group, MEC10 του οίκου Dalian Endeavour Technology και μιας υλοποίησης του αισθητήρα Chirp που αποτελεί ανοιχτό υλισμικό. Οι δύο πρώτοι αισθητήρες είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι στη βιβλιογραφία, ενώ οι δύο άλλοι παρουσιάζουν ενδιαφέρον καθώς αποτελούν οικονομικές εναλλακτικές λύσεις. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η συγκριτική αξιολόγηση τεσσάρων αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας (5TM, GS3, MEC10, και Chirp), με βάση την εργαστηριακή τους απόδοση σε σχέση με την μέθοδο προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας και της αγωγιμότητας.

Κατά την υλοποίηση της μελέτης, γίνονται δύο διακριτά πειράματα. Το πρώτο αφορά την αξιολόγηση της μέτρησης ηλεκτρικής διαπερατότητας, δηλαδή της ιδιότητας εκείνης του εδάφους που αξιοποιείται από τους αισθητήρες για τον υπολογισμό της εδαφικής υγρασίας. Το πείραμα αυτό γίνεται σε νερό και άλλα υγρά με γνωστές τιμές διαπερατότητας, χρησιμοποιώντας μόνο τους

αισθητήρες GS3 και 5TM που παρέχουν αυτή την μέτρηση ως πρωτογενές δεδομένο. Το δεύτερο μέρος αφορά την αξιολόγηση της μέτρησης εδαφικής υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Το πείραμα αυτό έγινε σε τρία διαφορετικά είδη εδάφους (χαλαζιακή άμμος 0,1–0,4 mm, αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος και υδροπονικό υπόστρωμα από μίγμα κόκκου-περλίτη σε αναλογία 1:1) με σταδιακή προσθήκη διαλυμάτων NaCl με αγωγιμότητες από 0,46 mS/cm έως 32,6 mS/cm σε συγκέντρωση στο έδαφος από 2,5% V/V ως 40% (V/V) κατ' όγκο.

Για την καταγραφή των μετρήσεων των αισθητήρων GS3 και 5TM χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο καταγραφικό (DataLogger EM50 του οίκου METER) ενώ για τους αισθητήρες MEC10 και Chirp δημιουργήθηκε κατάλληλη ρουτίνα σε περιβάλλον MATLAB. Οι μετρήσεις των αισθητήρων συγκρίνονται με τις γνωστές συγκεντρώσεις υγρασίας και αλατότητας και τα αποτελέσματα αναλύονται στατιστικά.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναμένεται να υποδείξουν τους αισθητήρες με τη μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας και αγωγιμότητας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με παρόμοιες βιβλιογραφικές μελέτες και ώστε να αξιολογηθεί η εγκυρότητα της παρούσας εργασίας.

Λέξεις κλειδιά: αισθητήρες, υγρασία, αγωγιμότητα, βαθμονόμηση.

Laboratory Comparison Evaluation Of Commercial Field Soil Moisture Sensors

Abstract

In the present study, comparisons are made between the GS3 and 5TM sensors of METER Group, MEC 10 of Dalian Endeavour Technology and an implementation of the Chirp sensors, which is an open hardware. The first two sensors are particularly widespread in the literature, while the other two are of interest as they are economical alternatives. The purpose of this work is the comparative evaluation of four sensors for the measurement of soil moisture (5TM, GS3, MEC 10, and Chirp!), based on their laboratory performance in relation to the method of determining soil moisture and conductivity. During the implementation of the study, two distinct experiments are performed. The first concerns the evaluation of the measurement of electrical permeability, the property of the soil used by the sensors to calculate soil moisture. This experiment is performed in water and other liquids with known permeability values, using only the GS3 and 5TM sensors that provide this measurement as a primary data. The second part concerns the assessment of the measurement of soil moisture and electrical conductivity. This experiment was carried out on three different soil types (quartz sand 0.1-0.4 mm, sandy clay loam soil and hydroponic substrate from grain-perlite mixture in a ratio of 1:1) with gradual addition of NaCl solutions with conductivity from 0.4mS/cm to 32.6mS/cm at a soil concentration of 2.5 % V/V to 40%V/V. For the recording of the measurements of the GS3 and 5TM sensors was used suitable logger (DataLogger EM50 of METER), while for the MEC 10 and Chirp! sensors was created suitable routine MATLAB environment. The measurements of the sensors are compared with the known concentrations of moisture and salinity and the result are analyzed statically. The results of the experiments are expected to indicate the sensors with the greatest accuracy and reliability in the measurement of soil moisture and conductivity. The results are compared with similar bibliographic studies to evaluate the validity of this paper.

Keywords: sensors, humidity, conductivity, calibration

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract.....	vi
1 Εισαγωγή.....	12
1.1 Εδαφική υγρασία.....	12
1.2 Ηλεκτρικά αγωγιμότητα.....	13
1.3 Αισθητήρες εδαφικής υγρασίας.....	14
1.3.1 Αισθητήρας υγρασίας εδάφους Stevens HydraProbe.....	14
1.3.2 Sentek Drill & Drop Soil Moisture Probe.....	15
1.3.3 GroPoint™ Profile.....	15
1.3.4 TRUEBNER SMT100 RS485 – MODBUS. Αισθητήρας υγρασίας εδάφους και θερμοκρασίας.....	16
1.3.5 CS650.....	17
1.3.6 Αισθητήρας Υγρασία εδάφους, θερμοκρασία & EC MODBUS-RTU RS485.....	17
1.3.7 6450WD Αισθητήρας υγρασίας εδάφους υδατογραφήματος.....	18
1.3.8 SM- 100 αισθητήρας υγρασίας εδάφους WaterScout.....	18
1.3.9 VH400 Economic Soil Moisture Sensor.....	19
1.3.10 Αισθητήρας εδάφους AO-520-01 για ταυτόχρονη μέτρησης υγρασίας και θερμοκρασίας.....	19
1.3.11 Αισθητήρας Ao-520-02 με ταυτόχρονη μέτρηση υγρασίας εδάφους, θερμοκρασίας και αγωγιμότητας.....	20
1.3.12 GroPoint Classic.....	21
1.3.13 RK520-01.....	21
1.3.14 DR αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους.....	22
1.3.15 Αισθητήρας εδάφους RS485 FDR 7 σε 1.....	22
1.3.16 Αισθητήρας SEM2253.....	23

1.3.17	Αισθητήρας υγρασίας εδάφους CS655 του οίκου Campbell	24
1.3.18	Συνοπτικά	24
1.4	Ο σκοπός του πειράματος	28
2	Υλικά και Μέθοδοι	29
2.1	Λογισμικό καταγραφής	29
2.1.1	Λογισμικό ECH2O	29
2.1.2	Πρότυπο λογισμικό σε MATLAB	30
2.2	Αισθητήρες υγρασίας	31
2.2.1	Αισθητήρας GS3	31
2.2.2	Ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό	31
2.2.3	Ηλεκτρική αγωγιμότητα [EC]	32
2.2.4	Βαθμονόμηση αισθητήρα GS3	32
	Διηλεκτρική σταθερά	32
	Βαθμονόμηση για πορώδη μέσα εκτός εδάφους	32
2.2.5	Εγκατάσταση αισθητήρων	33
2.2.6	Αισθητήρας 5TM	33
2.2.7	Ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό	34
2.2.8	Θερμοκρασία	34
2.2.9	Βαθμονόμηση αισθητήρα 5TM	34
2.2.10	Αισθητήρας MEC 10	36
2.2.11	Αισθητήρας Chirp!	37
2.3	Χρήση των αισθητήρων στη βιβλιογραφία	37
2.4	Πειραματικό μέρος	38
2.4.1	Διαλύματα με αγωγιμότητες	38
2.4.2	Βαθμονόμηση σε χαλαζιακή άμμο	40
2.4.3	Βαθμονόμηση και προσδιορισμός της υγρασίας των αισθητήρων σε υδροπονικό υπόστρωμα από μίγμα κόκκου-περλίτη σε αναλογία 1:1)	42

2.4.4	Βαθμονόμηση αισθητήρων σε έδαφος	43
2.4.5	Εκτέλεση προσδιορισμού	44
2.5	Συντελεστής συσχέτισης και Σφάλμα μέσης τετραγωνικής ρίζας	46
3	Αποτελέσματα	47
3.1	Αναζήτηση των αισθητήρων σε βιβλιογραφικές αναφορές	47
3.2	Αισθητήρας GS3	48
3.2.1	Υδατικά διαλύματα	48
3.2.2	Χαλαζιακή άμμος	49
3.2.3	Υδροπονικό υπόστρωμα	51
3.2.4	Αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος	52
3.3	Αισθητήρας 5TM	54
3.3.1	Χαλαζιακή άμμος	54
3.3.2	Υδροπονικό υπόστρωμα	54
3.3.3	Αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος	55
3.4	Αισθητήρας MEC 10	56
3.4.1	Υδατικό διάλυμα NaCl	56
3.4.2	Χαλαζιακή άμμος	58
3.4.3	Υδροπονικό υπόστρωμα	59
3.4.4	Αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος	61
3.5	Αισθητήρας Chirp!	62
3.5.1	Χαλαζιακή άμμος	62
3.5.2	Υδροπονικό υπόστρωμα	63
3.5.3	Αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος	64
3.6	Συνοπτικά	64
4	Συζήτηση	66
5	Συμπέρασμα	68
7	Βιβλιογραφία	69

1 Εισαγωγή

1.1 Εδαφική υγρασία

Η εδαφική υγρασία είναι σημαντική λόγω του ότι λειτουργεί σαν διαλύτης καθώς και για τη μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων προς τις ρίζες αλλά και μέσα στους φυτικούς ιστούς. Στα φυτικά κύτταρα, το νερό είναι απαραίτητο για την διατήρησή τους σε σπαργή, επίσης αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να παραμείνουν ζωντανά. Το νερό συμμετέχει στη φωτοσύνθεση και αποτελεί το μέσο για να πραγματοποιηθούν όλες οι βιοχημικές αντιδράσεις. Στα φύλλα γίνεται η διαπνοή, δηλαδή η εξάτμιση του νερού υπό μορφή υδρατμών, για να διατηρείται η θερμοκρασία των φυτικών ιστών σε φυσιολογικά επίπεδα στις καλοκαιρινές ημέρες του χρόνου. Εξαιτίας της διαπνοής τα φυτά καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες νερού. Έχει υπολογιστεί ότι για την παραγωγή 1 kg ξηράς φυτικής μάζας απαιτούνται 200 – 1.000 kg νερού, ανάλογα με το είδος του φυτού. Τα φυτά λοιπόν, θα πρέπει να εξασφαλίζουν το απαραίτητο νερό από το έδαφος για να αναπτύσσονται κανονικά και να ικανοποιεί της ανάγκες του. Τα συνήθη γεωργικά εδάφη συγκρατούν νερό κατά μέσο όρο σε ποσότητα ίσο με το 20 με 30% της μάζας τους. Το νερό που συγκρατείται γύρω από τα τεμαχίδια της αργίλου χαρακτηρίζεται σαν προσροφημένο νερό. Όσο αφορά την ποσότητα του νερού που συγκρατεί ένα έδαφος εξαρτάται από την σύσταση του εδάφους (Θεριός Ι., 1996).

Τα αμμώδη ή ελαφριά εδάφη (αμμώδες, πηλοαμμώδες) στα οποία επικρατεί η άμμος, αερίζονται καλά και θερμαίνονται εύκολα. Δεν μπορούν να συγκρατήσουν πολύ νερό και θρεπτικά στοιχεία και για αυτό χαρακτηρίζονται ως πτωχά εδάφη. Τα αργιλώδη ή βαριά εδάφη (αμμοαργιλώδες, ιλυοαργιλώδες, αργιλώδες) στα οποία επικρατεί η άργιλος συγκρατούν πολύ νερό και θρεπτικά στοιχεία. Και τα μέσης σύστασης εδάφη εκδηλώνουν ενδιάμεσες ιδιότητες των προηγούμενων κατηγοριών και θεωρούνται τα πιο κατάλληλα για γεωργική εκμετάλλευση. Η διαμόρφωση των φυσικών ιδιοτήτων των εδαφών όπως η συνεκτικότητά τους επηρεάζεται από την ποσότητα του νερού στο έδαφος και από την φύση της αργίλου. Τα αμμώδη εδάφη, όταν είναι ξηρά είναι πολύ χαλαρά ενώ όταν είναι υγρά αυξάνει η συνοχή τους. Αντίθετα, τα αργιλώδη εδάφη όταν είναι ξηρά καλλιεργούνται δύσκολα, ενώ όταν είναι υγρά καλλιεργούνται ευκολότερα λόγω της μικρότερης συνεκτικότητάς τους (Σινάνης, 2015). Στον Πίνακα 1 μπορούν να βρεθούν τα πορώδη των εδαφών σε σχέση με τη μηχανική τους σύσταση.

Πίνακας 1: Πορώδες σε σχέση με την μηχανική σύσταση ενός εδάφους

Μηχανική σύσταση	Πορώδες %
Αμμώδες	42

Πηλοαμμώδεις	48
Πηλός	55
Πλοσηλώδεις	56
Αργιλοπηλώδεις	59
Αργιλώδεις	60

Η υγρασία μετρείται με διάφορους μεθόδους μερικές από αυτές είναι η μέθοδος του τενσιόμετρου, η χρήση των αισθητήρων και η μέθοδος με χρήση αναλυτή υγρασίας.

1.2 Ηλεκτρικά αγωγιμότητα

Η συσσώρευση αλάτων στο έδαφος δημιουργεί προβλήματα στον άνθρωπο λόγω των δυσμενών δράσεων τους στα καλλιεργούμενα φυτά. Εάν το νερό άρδευσης είναι κακής ποιότητα οδηγεί στην συγκέντρωση αλάτων στο έδαφος. Τα άλατα προέρχονται κυρίως από τα πετρώματα και ορυκτά και είναι ένας δείκτης της περιεκτικότητας του νερού ή του χώματος σε άλατα και μετράτε σε mS/cm, dS/cm ή mmho/cm.

Όταν η βροχόπτωση είναι αρκετή τα άλατα εκπλύνονται και απομακρύνονται με τα επιφανειακά νερά ή διηθούνται σε βαθύτερα στρώματα και δεν δημιουργούν προβλήματα στην γεωργία. Αντίθετα, σε περιοχές με μικρή βροχόπτωση τα άλατα συγκεντρώνονται στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους. Η κακή αποστράγγισή είναι ένας παράγοντας που συντελεί στην αλάτωση των εδαφών και την μικρή διαπερατότητα του εδάφους. Η μικρή διαπερατότητα που εδάφους μπορεί να οφείλετε στην κακή δομή του εδάφους ή την ύπαρξη αδιαπέρατων στρώσεων. Σχετικά με την υφή του, όσο περισσότερη περιεκτικότητα έχει ένα έδαφος σε άργιλο, τόσο καλύτερος αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος είναι. Η θερμοκρασία του εδάφους, όσο αυξάνει, επιδρά και στην αύξηση της αγωγιμότητας του εδάφους. Τέλος, όσο μεγαλύτερο πορώδες έχει ένα έδαφος, τόσο αυξάνει η ηλεκτρική του αγωγιμότητα .

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους αυξάνετε όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άλατα στο έδαφος. Σε εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα δημιουργούν προβλήματα καθώς δυσκολεύουν την απορρόφηση του νερού και θρεπτικών στοιχείων από το φυτό. Αντίθετα η χαμηλή αγωγιμότητα είναι επιθυμητή, καθώς ωφελεί την αφομοιωσιμότητα του νερού και των θρεπτικών στοιχείων (Σινάννης Κ., 2022).

Τα εδάφη, ανάλογα την ένδειξη σε ηλεκτρική αγωγιμότητα, κατατάσσονται σε έντονης αλατότητας, σε μέτριας, σε ελαφρώς, σε ελάχιστης και σε καθόλου σύμφωνα με τον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Καταγραφή των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας καθορίζουν το επίπεδο αλατότητας

Επίπεδο αλατότητας	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (mmho/cm)
Καθόλου	0 έως < 2
Ελάχιστα	2 έως < 4
Ελαφρώς	4 έως < 8
Μέτρια	8 έως < 16
Έντονης	> 16

Η μέτρηση της αγωγιμότητας γίνεται είτε με ψηφιακούς αισθητήρες είτε με ειδικά όργανα τα αγωγιμόμετρα, οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν στο έδαφος ή σε κάποιο θρεπτικό διάλυμα.

1.3 Αισθητήρες εδαφικής υγρασίας

Ένας μεγάλος αριθμός αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Σε αυτό το σημείο θα αναφέρουμε και θα περιγράψουμε μερικούς από αυτούς.

1.3.1 Αισθητήρας υγρασίας εδάφους *Stevens HydraProbe*

Ο αισθητήρας *HydraProbe* μετράει την υγρασία του εδάφους, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την θερμοκρασία. Ο σχεδιασμός του είναι μοναδικός σε σύγκριση με άλλους αισθητήρες υγρασίας εδάφους, λόγω του ότι η ηλεκτρική απόκριση των εδαφών μπορεί να καθοριστεί από δύο παραμέτρους: την διηλεκτρική σταθερά και την αγωγιμότητα. Η διηλεκτρική σταθερά είναι ακριβέστερη για την περιεκτικότητα σε νερό, ενώ η αγωγιμότητα εξαρτάται από την αλατότητα του εδάφους. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.1. Το κόστος για αυτόν τον αισθητήρα είναι 695 \$ (*Stevens HydraProbe Soil Moisture Sensors*, 2022).



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση του αισθητήρα HydraProbe της κατασκευαστικής Stevens Waters.

1.3.2 Sentek Drill & Drop Soil Moisture Probe

Ο αισθητήρας Sentek Drill & Drop Soil Moisture Probe εγκαθίσταται εύκολα στο έδαφος και προσφέρεται σε πέντε μήκη, 10 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm και 120 cm. Παρέχει μετρήσεις υγρασίας εδάφους, θερμοκρασίας και αγωγιμότητας. Το περιβάλλον του εδάφους δεν διαταράσσεται με την εγκατάσταση του αισθητήρα, πράγμα που επιτρέπει στον χρήστη να πάρει μετρήσεις αμέσως μετά την εγκατάσταση. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.2. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 1.300 € (*Sentek Drill & Drop Soil Moisture Probe, 120 cm, 2022*)



Εικόνα 1.2: Απεικόνιση του αισθητήρα Drill & Drop Soil Moisture Probe της κατασκευαστικής Sentek.

1.3.3 GroPoint™ Profile

Ο αισθητήρας GroPoint™ Profile μετρά την ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό και την θερμοκρασία του εδάφους σε πολλαπλά βάθη. Μετρά συνεχώς την υγρασία του εδάφους σε όλο το μήκος του αισθητήρα, , έτσι παρέχει συνεχές μετρήσεις της κίνησης του νερού σε όλο το έδαφος, και όχι σε διακριτές θέσεις του αισθητήρα και έχει σχεδιαστεί για κάθετη εγκατάσταση. .Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.3. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 912,07 € (*GroPoint Profiling – Stevens Water, 2022*).



Εικόνα 1.3: Απεικόνιση του αισθητήρα Profile της κατασκευαστικής GroPoint.

1.3.4 TRUEBNER SMT100 RS485 – MODBUS. Αισθητήρας υγρασίας εδάφους και θερμοκρασίας

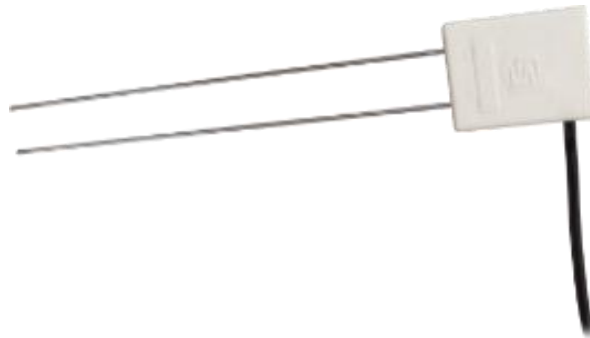
Ο αισθητήρας SMT100 υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους συνδυάζει το χαμηλό κόστος της τεχνολογίας FDR με την ακρίβεια της TDR. Διαθέτει 10 μ καλώδιο. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.4. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 163,95 € (*Truebner SMT100 RS485 - ASCII. Soil humidity and temperature sensor, 2022*).



Εικόνα 1.4: Απεικόνιση του αισθητήρα SMT100 του οίκου TRUEBNER.

1.3.5 CS650

Ο αισθητήρας CS650 αποτελείται από δύο ράβδους μήκους 30 cm που συνδέονται με μία πλακέτα. Επιτρέπει ακριβείς μετρήσεις της περιεκτικότητας σε νερό στο εδάφη με $EC \leq 3 \text{ dS m}^{-1}$ χωρίς να απαιτείται εκτέλεση ειδικής βαθμονόμησης σύμφωνα με τον τύπο του εδάφους. Η οριζόντια εγκατάσταση του αισθητήρα παρέχει ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους στο ίδιο βάθος με την περιεκτικότητα σε νερό. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.5. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 397€ (*PRICE LIST 2022 PRODUCTS AND SERVICES CATALOG*, 2022).



Εικόνα 1.5: Απεικόνιση του αισθητήρα CS650.

1.3.6 Αισθητήρας Υγρασία εδάφους, θερμοκρασία & EC MODBUS-RTU RS485

Ο αισθητήρας «Υγρασίας, θερμοκρασίας & EC εδάφους MODBUS-RTU RS485» υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους MODBUS-RTU RS485 διαθέτει υψηλή ακρίβεια, αξιοπιστία, σταθερότητα, και ανθεκτικότητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε επαγγελματικά σενάρια εφαρμογής όσο και σε επιστημονικά. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.6. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 99€ (*Soil Moisture & Temperature & EC Sensor MODBUS-RTU RS485*, 2022).



Εικόνα 1.6: Απεικόνιση του αισθητήρα RS485

1.3.7 6450WD Αισθητήρας υγρασίας εδάφους υδατογραφήματος

Ο αισθητήρας 6450WD είναι ένας καθιερωμένος αισθητήρας παρακολούθησης υγρασίας του εδάφους σε καλλιέργειες, αμπελώνες ή άλλες περιοχές όπου το επίπεδο υγρασίας πρέπει να παρακολουθείται. Τοποθετείται στα ανώτερα και κατώτερα όρια της ριζικής ζώνης. Διαβάζει υγρασία από 0 (κορεσμένα) έως 200 (ξηρά) εκατοστά. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.7. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 89 € (6450 Watermark Soil Moisture Sensors - Maranata-Madrid SL - NIF B-85746204, 2022).



Εικόνα 1.7: Απεικόνιση του αισθητήρα 6450WD

1.3.8 SM-100 αισθητήρας υγρασίας εδάφους WaterScout

Ο αισθητήρας SM-100 αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια. Η διηλεκτρική σταθερά του νερού είναι πολύ μεγαλύτερη από τον αέρα, τα ορυκτά του εδάφους και την οργανική ύλη. Έτσι, οι αλλαγές στην περιεκτικότητα σε νερό μπορούν να ανιχνευθούν από τον αισθητήρα και να συσχετιστούν με την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.8. Το κόστος

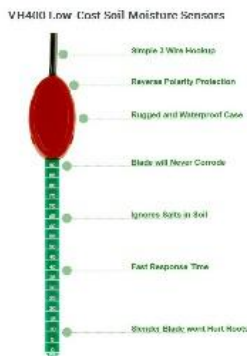
αυτού του αισθητήρα είναι 105 € (*SM-100 WaterScout Soil Moisture Sensor with 1,8m cable - Maranata-Madrid SL - NIF B-85746204, 2022*).



Εικόνα 1.8: Απεικόνιση του αισθητήρα SM-100

1.3.9 VH400 Economic Soil Moisture Sensor

Ο αισθητήρας VH400 μετρά την περιεκτικότητα υγρασίας στο έδαφος, έχει σχεδιαστεί για να αντέχει στο χρόνο ενώ η λεπτή λεπίδα του μειώνει την πιθανότητα ζημίας στο ριζικό σύστημα. Ο αισθητήρας φαίνεται Εικόνα 1.9. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 60€ (*Sensor de Humidade do Solo Econômico, 2022*).



Εικόνα 1.9: Απεικόνιση του αισθητήρα VH400

1.3.10 Αισθητήρας εδάφους AO-520-01 για ταυτόχρονη μέτρησης υγρασίας και θερμοκρασίας

Ο αισθητήρας AO-520-01 παρέχει μετρήσεις της υγρασίας εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία Frequency Domain Reflectometry (FDR), όπου μετρώντας τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, υπολογίζεται η περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους ενώ η θερμοκρασία βασίζεται στην αντίσταση στοιχείου πλατίνας. Ο αισθητήρας μπορεί να εγκατασταθεί μόνιμα υπογείως και να συνδεθεί με ένα

καταγραφικό δεδομένων για απεριόριστες δοκιμές. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.10. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 140 € (*Buy AO-520-01 Soil Moisture and Temperature Measurement Sensors*, 2022).



Εικόνα 1.10: Απεικόνιση του αισθητήρα AO-520-01 Soil Sensor της κατασκευαστικής AO-Electronics

1.3.11 Αισθητήρας Ao-520-02 με ταυτόχρονη μέτρηση υγρασίας εδάφους, θερμοκρασίας και αγωγιμότητας

Το AO-520-02 είναι ένας ενσωματωμένος αισθητήρας υγρασίας εδάφους, θερμοκρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Το προϊόν έχει αντιστάθμιση θερμοκρασίας για να εξασφαλίσει την ακρίβεια των μετρήσεων. Ο αισθητήρας μπορεί να ενσωματωθεί μόνιμα υπογείως και να συνδεθεί με ένα καταγραφικό δεδομένων για απεριόριστες μετρήσεις. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.11. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 183 € (*Purchase Soil moisture, temperature and EC sensor, AO-520-02*, 2022) (alphaomega-electronics. 2022).



Εικόνα 1.11: Απεικόνιση του αισθητήρα O-520-02 Integrated Soil Moisture, Temperature & EC Sensor της κατασκευαστικής AO- Electronics.

1.3.12 GroPoint Classic

Το στοιχείο ανίχνευσης κατασκευάζεται από μια συμπαγή ράβδο ανοξείδωτου χάλυβα διατομής 7 mm. Παρέχει καλώδιο 5 m που μπορεί να επεκταθεί σε έως και 150 m. Μπορεί να βαθμονομηθεί ειδικά για αμμώδη εδάφη, εδάφη υψηλής αγωγιμότητας, εδάφη αργίλου ή ένα ευρύ φάσμα εδαφών. Ανταποκρίνεται άμεσα και με ακρίβεια στις αλλαγές στην υγρασία του εδάφους, εγκαθίστατε εύκολα και δεν απαιτεί σχεδόν καμία συντήρηση, παρέχοντας χρόνια αξιόπιστης λειτουργίας. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.12. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 350,99 € (*GroPoint Classic*, 2022).



Εικόνα 1.12: Απεικόνιση του αισθητήρα GroPoint Classic της κατασκευαστικής GroPoint.

1.3.13 RK520-01

Ο αισθητήρας RK520-01 εδάφους, εγκαθίσταται για τη μέτρηση υγρασίας και θερμοκρασίας. Ο αισθητήρας μπορεί να ενσωματωθεί μόνιμα υπόγεια και να συνδεθεί με ένα καταγραφικό δεδομένων για απεριόριστες μετρήσεις. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.13. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 39\$ (*Rk520-01 Rs485 4-20ma 0-5v Output Agriculture Soil Temperature Moisture Sensor 4-20ma Transmitter Probe Manufacture - Buy Soil Moisture 4-20ma, Agriculture Soil Sensor, Rs485 Soil Moisture Sensor Product on Alibaba.com*, 2022).



Εικόνα 1.13: Απεικόνιση του αισθητήρα RK520-01 της κατασκευαστικής Rika.

1.3.14 FDR αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους

Ο αισθητήρας εδάφους FDR μετράει την υγρασία και τη θερμοκρασία εδάφους. Μετρώντας τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, μπορεί να δείχνει την πραγματική περιεκτικότητα σε υγρασία. Ο αισθητήρας είναι κατάλληλος για επαγγελματική ή επιστημονική χρήση, σε εφαρμογές γεωργικού κλάδου, επεξεργασία λυμάτων, αποθήκευση τροφίμων κ.λπ. ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.14. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 60\$ (*Fdr Mec10 Soil Temperature And Moisture Sensor With Rs485 Output - Buy Soil Moisture Sensor,Mce10,Soil Moisture And Temperature Product on Alibaba.com, 2022*).



Εικόνα 1.14: Απεικόνιση του αισθητήρα FDR θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους

1.3.15 Αισθητήρας εδάφους RS485 FDR 7 σε 1

Ο αισθητήρας εδάφους 7 σε 1 είναι κατάλληλος για την ανίχνευση του αζώτου, του φωσφόρου, του καλίου, του pH, της EC, της θερμοκρασίας και της υγρασίας του εδάφους, και

χρησιμοποιείται ευρέως στους τομείς της γεωργίας. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.15. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 50\$ (*Soil Npk Ec Conductivity Temperature Moisture Ph Sensor 7 In 1 Digital Soil Ph Probe Meter Tester - Buy Soil Ph Meter, Soil Ph Tester, Soil Ph Sensor Product on Alibaba.com, 2022*).



Εικόνα 1.15: Απεικόνιση του αισθητήρα *Agricultural RS485 FDR7 in 1 Wireless soil Temperature Moisture NRK EC Salinity Humidity Sensor* της κατασκευαστικής *JXCT*

1.3.16 Αισθητήρας SEM2253

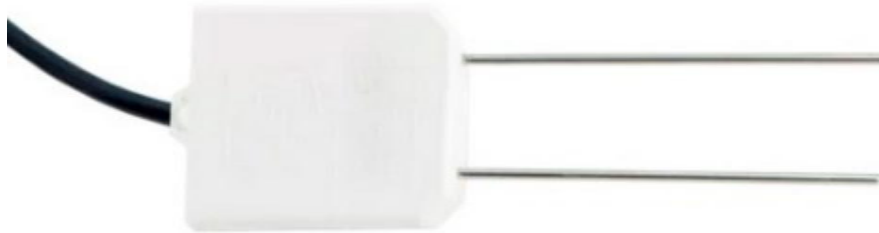
Ο αισθητήρας εδάφους SEM225 είναι ένας αισθητήρας υψηλής ακρίβειας για τη μέτρηση της υγρασίας και της θερμοκρασίας του εδάφους. Σε σύγκριση με παλαιότερους αισθητήρες υψηλής ακρίβειας και βαθμονομημένο με την μέθοδο ξήρανσης και ζύγισης του εδάφους, έχει υψηλή ακρίβεια, γρήγορη απόκριση και σταθερή απόδοση. Χρησιμοποιούνται ευρέως στα θερμοκήπια, την καλλιέργεια λουλουδιών, τα λιβάδια βοσκοτόπων και άλλες εφαρμογές. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.16. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 58\$ (*Sem2253 Soil Temperature Moisture Sensor 4-20ma Rs485 Output 3 Way Soil Conductivity Ec Salinity Sensor Probe Rod - Buy Temperature Instruments And Humidity Sensor, Soil Temperature Moisture Sensor, Soil Salinity Sensor Probe Product on Alibaba.com, 2022*).



Εικόνα 1.16: Απεικόνιση του αισθητήρα SEM225 της κατασκευαστικής SENTEC.

1.3.17 Αισθητήρας υγρασίας εδάφους CS655 του οίκου Campbell

Ο αισθητήρας CS655 αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια ράβδων μήκους 12 cm που συνδέονται με έναν ηλεκτρονικό πίνακα. Οι αισθητήρες CS655 έχουν σχεδιαστεί για εδάφη με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ο CS655 μετρά την περιεκτικότητα σε νερό και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους. Επιτρέπει την ακριβή μέτρηση της περιεκτικότητας σε νερό σε εδάφη με $EC \leq 8 \text{ dS m}^{-1}$ χωρίς να εκτελείται συγκεκριμένη βαθμονόμηση για το κάθε έδαφος. Ο αισθητήρας μετράει επίσης τη θερμοκρασία του εδάφους. Ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 1.17. Το κόστος αυτού του αισθητήρα είναι 373 € (*PRICE LIST 2022 PRODUCTS AND SERVICES CATALOG, 2022*).



Εικόνα 1.17: Απεικόνιση του αισθητήρα CS655

1.3.18 Συνοπτικά

Στον Πίνακα 1.33 μπορούν να βρεθούν τα βασικά στοιχεία και τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων που αναφέρονται παραπάνω.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο εύρος από αισθητήρες με διαφορετικά χαρακτηριστικά, λειτουργίες και εύρη μετρήσεων οπότε αξίζει τον κόπο να δούμε ποιοι αισθητήρες

έχουν καλύτερη απόδοση. Το εύρος θερμοκρασίας που έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν οι αισθητήρες κυμαίνεται από -40 έως 80°C, για το εύρος μετρήσεων της υγρασίας είναι 0-100. Επίσης κάθε αισθητήρας έχει δική του μέθοδο μετρήσεις όπως FDR, TDR, TDT5, RDP και ADP.

Πίνακας 1.33: Απεικόνιση προδιαγραφών των αισθητήρων όπου καταγράφονται τα ονόματα των αισθητήρων, την κατασκευαστική εταιρία, τους μεθόδους μέτρησης, την απαίτηση ισχύος, εύρος θερμοκρασίας, εύρος μετρήσεων, μετρήσεις ακριβείας και τέλος το πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Όνομα αισθητήρων	Κατασκευαστής	Μέθοδοι μέτρησης	Απαίτησης ισχύος	Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	Εύρος μετρήσεων		Μετρήσεις ακριβείας		Πρωτόκολλο επικοινωνίας
					Υγρασία	Θερμοκρασία	Υγρασία	Θερμοκρασία	
HydraProbe	StevensWaters	Διηλεκτρική αντίσταση	9-20 VDC	-10°C έως +60°C	0-100%	-10 έως +60°C	± 0.5% or ± 0.2 dielectric units	± 0.3°C	RS-485 ή SDI-12
Drill & Drop soil moisture Probe	Sentek	Διηλεκτρική αντίσταση	2.7V 15Vdc, Nominal 12V	-20°C έως +60°C	0 έως 100%	-20°C έως +60°C	±0.03% vol	±2°C έως 25°C	SDI-12
Profile	GroPoint™	Διηλεκτρική αντίσταση (FDR)	6 έως 14 VDC max. 18 VDC	-20°C έως +70°C	0% έως 100% VMC	-20°C έως +70°C	±2.0%	±0.5°C	SDI-12 V1.3 (RS485 and Modbus optional)
SMT 100	TRUEBNER	TDR	4-24 VDC, έως 40 mA	-40°C έως +80°C	0 έως 60%	-40°C έως +80°C	± 3%	± 0.8°C	RS485 SDI-12
VH400	Vegetronix	Διηλεκτρική αντίσταση (FDR)	3.3V έως 20VDC	-40°C έως 85°C	0-100%				
AO-520-01 Soil Sensor	AO-Electronics	TDT5	4-20mA	-30°C ~ 70°C	0-100%	-30oC έως +70oC	± 3%	± 0.2°C	Analog ή RS485
AO-520-02	AO-Electronics	TDT5	5 VDC, 12-24VDC	-40°C έως 80°C	0-100%	-30°C έως +70°C	±2%(0-50%) ±3% (51-100%)	±0.5°C	RS485 SDI-12
GroPoint Classic	GroPoint	Διηλεκτρική αντίσταση (FDR)	6-14VDC	-20°C έως 70°C	0-100%	-30oC έως +70oC	±2.0%		analog
RK520-01	Rika	Διηλεκτρική αντίσταση	12-24V	-30°C έως 70°C	0-100%	-30~70°C	±3%	±0.2°C	RS485 ή SDI-12

		(FDR)							
BND-MS10	Shenzhen Bonad	Διηλεκτρικ ή αντίσταση (FDR)	5-30V/DC	-40 έως 85°C	0-100%	-40°C έως +80°C	0-53% ±3% 53- 100% ±5%	±0.5°C	RS485
JXBS-3001	JXCT	Διηλεκτρικ ή αντίσταση (FDR)	12-24V DC	-45°C έως 115°C	0-100%	-40°C έως +80°C	0-53% ± 3% 53- 100% ± 5%	±0.5°C	RS485
SEM225	SENTEC	Διηλεκτρικ ή αντίσταση (FDR)	5~24VDC	-40°C έως +80°C	0-100%	-40 έως +80°C	±3%	±5%°C	RS485 ή SDI- 12
CS655	CAMPBELL SCIENTIFIC	Διηλεκτρικ ή αντίσταση (FDR)	6-18VDC	-50° έως +70°C	0-100%	-50°C έως +70°C	±1%	±0.1%°C [0-40° C] ±0.5%°C	SDI-12 ή RS232
GS3	METER	Διηλεκτρικ ή αντίσταση (FDR)	3.6-15 VDC	-40 έως +60	0-100%	-40 έως +60 °C	±3%	±1 °C	SDI-12
5TM	METER	Διηλεκτρικ ή αντίσταση (FDR)	3.6-15 VDC	-40 έως +50	0-100%	-40 έως +50	±3%	±1 °C	RS232 ή SDI- 12
MEC 10	INFWIN	Διηλεκτρικ ή αντίσταση (FDR)	3.6- 30V/DC	-40 έως 80°C	0-100%	-40 έως 80°C	0-50% ±3% 50- 100% ±5%	±0.5 °C	RS485 ή analog
Chirp!	WEMAKETHI NGS	Ηλεκτρική αντίσταση							I2C

1.4 Ο σκοπός του πειράματος

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η συγκριτική αξιολόγηση τεσσάρων αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας σε εργαστηριακές συνθήκες. Οι αισθητήρες που επελέγησαν με βάση την άμεση διαθεσιμότητά τους ήταν οι 5TM, GS3, MEC10, και Chirp. Η αξιολόγηση έγινε με βάση την εργαστηριακή τους απόδοση σε σχέση με τη μέθοδο προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας και της αγωγιμότητας με την βαθμονόμηση και την εγκατάσταση των αισθητήρων (α) σε υδατικό διάλυμα NaCl, και σε (β) χαλαζιακή άμμο 0,1–0,4 mm, αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος και υδροπονικό υπόστρωμα από μίγμα κόκκου-περλίτη σε αναλογία 1:1. Για την αξιολόγηση των τεσσάρων αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας, οι πειραματικές διαδικασίες χωρίστηκαν σε 2 μέρη. Το πρώτο αφορά την αξιολόγηση της μέτρησης διηλεκτρικής σταθεράς, δηλαδή της ιδιότητας εκείνης του εδάφους που αξιοποιείται από τους αισθητήρες για τον υπολογισμό της εδαφικής υγρασίας. Το πείραμα αυτό γίνεται σε νερό και άλλα υγρά με γνωστές τιμές διαπερατότητας, χρησιμοποιώντας μόνο τους αισθητήρες GS3 και 5TM που παρέχουν αυτή την μέτρηση ως πρωτογενές δεδομένο. Το δεύτερο μέρος αφορά την αξιολόγηση της μέτρησης εδαφικής υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Το πείραμα αυτό έγινε σε τρία διαφορετικά είδη εδάφους (χαλαζιακή άμμος 0,1–0,4 mm, αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος και υδροπονικό υπόστρωμα από μίγμα κόκκου-περλίτη σε αναλογία 1:1) με σταδιακή προσθήκη διαλυμάτων NaCl με αγωγιμότητες από 0,46 mS/cm έως 32,6 mS/cm σε συγκέντρωση στο έδαφος από 2,5% V/V ως 40% (V/V) κατ' όγκο. Τα αποτελέσματα από αυτήν την εργασίας θα μπορέσουν να αξιοποιηθούν για την καλύτερη επιλογή αισθητήρων κατά τον σχεδιασμό πειραμάτων πεδίου ή εφαρμογών έξυπνης άρδευσης με τη χρήση αισθητήρων υγρασίας.

2 Υλικά και Μέθοδοι

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αισθητήρες εδαφικής υγρασίας που θα αναλύσουμε σε αυτό το κεφάλαιο. Για την καταγραφή των μετρήσεων των αισθητήρων GS3 και 5TM χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο καταγραφικό (DataLogger EM50 του οίκου METER) ενώ για τους αισθητήρες MEC10 και Chirp δημιουργήθηκε κατάλληλη ρουτίνα σε περιβάλλον MATLAB.

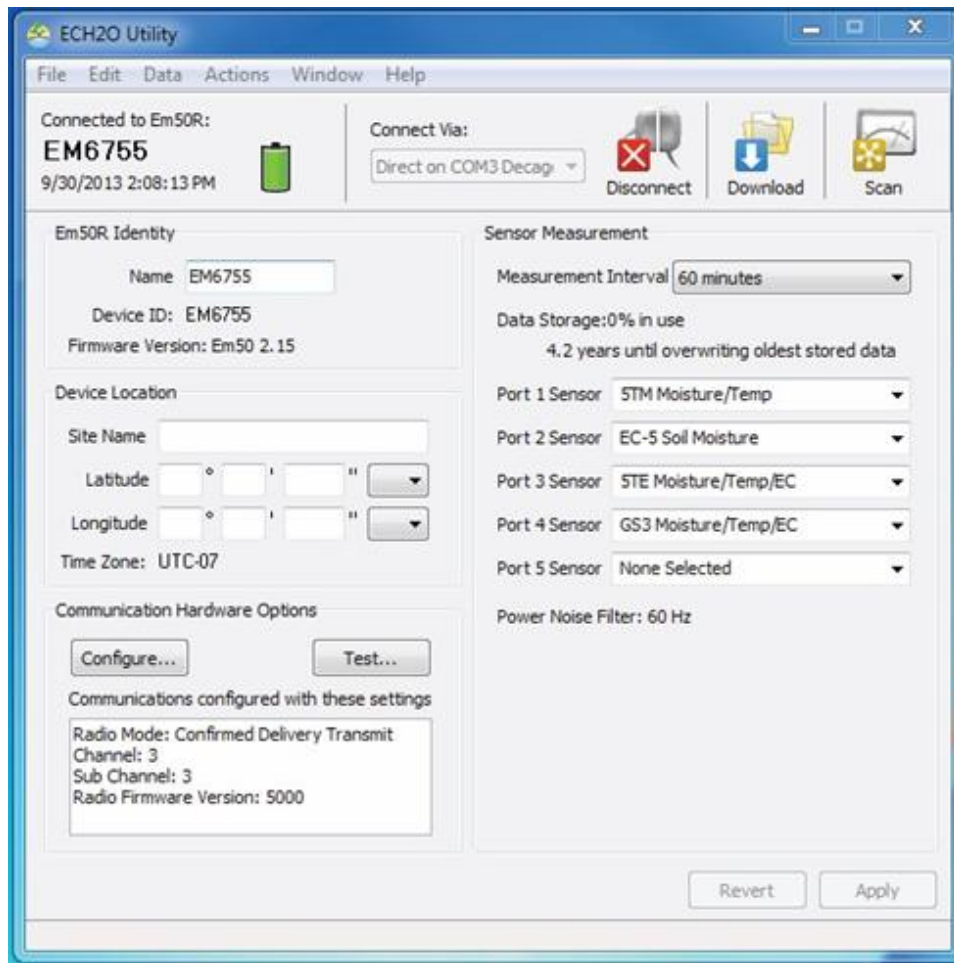
2.1 Λογισμικό καταγραφής

2.1.1 Λογισμικό ECH2O

Το ECH2O Utility είναι μια εφαρμογή για την ευκολότερη λήψη δεδομένων από το πρόγραμμα Em50. Οι αισθητήρας GS3 και 5TM λειτουργούν πιο αποτελεσματικά με τα Em50, Em 50R, Em50G. Πρέπει να εγκατασταθεί στον υπολογιστή η εφαρμογή ECH2O Utility, εφόσον γίνει η εγκατάσταση συνδέετε το Data logger στον υπολογιστή και στην συνέχεια κατεβάζετε τα δεδομένα. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται με καταγραφές Decagon διαθέτουν σύνδεσμο στερεοφωνικού βύσματος, όπου επιτρέπει την σύνδεση με τους καταγραφές δεδομένων Em50 της Decagon και με τους φορητούς αισθητήρες. Αυτήν η εφαρμογή μας επιτρέπει καθορίσουμε την ημερομηνία, την ώρα και τα διαστήματα μετρήσεων των αισθητήρων. Επίσης μας δίνει την δυνατότητα να αποθηκεύουμε τις μετρήσεις ανάλογα τα διαστήματα που προτιμάμε. Στην Εικόνα 2.1 φαίνεται η απεικόνιση καταγραφικού Em50/Em50R Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται η απεικόνιση του λογισμικού ECH2O Utility.



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση καταγραφικού Em50/Em50R

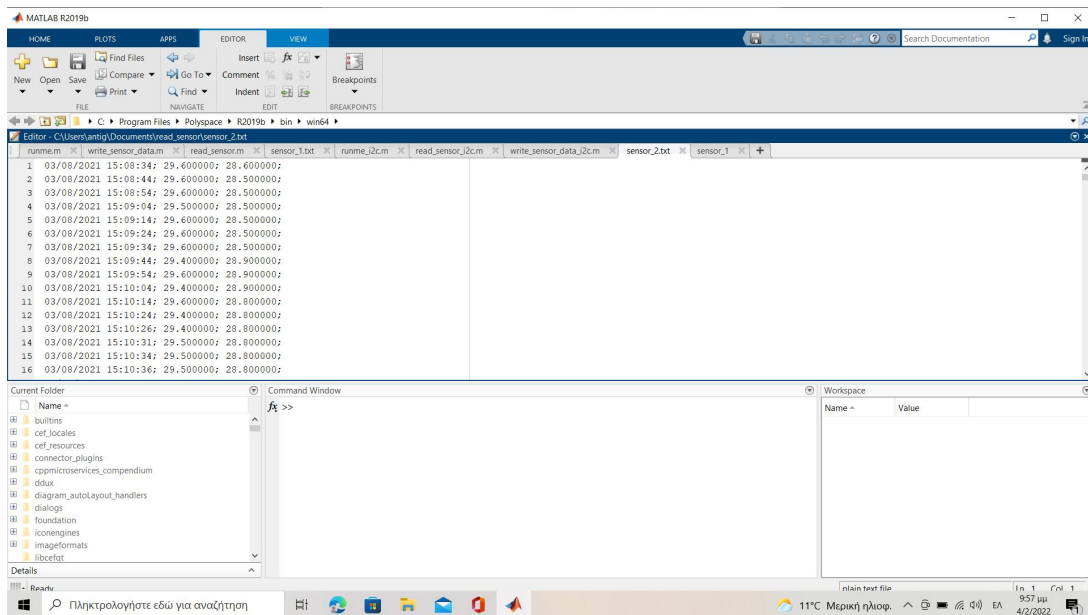


Εικόνα 2.2: Απεικόνιση του λογισμικού ECH2O Utility.

2.1.2 Πρότυπο λογισμικό σε MATLAB

Το λογισμικό MATLAB είναι ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό πακέτο. Είναι ένα διαδραστικό πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς και για κατασκευή γραφημάτων, επίσης είναι χρήσιμο εργαλείο για όσους ασχολούνται με τις θετικές επιστήμες διότι έχει την δυνατότητα προγραμματισμού.

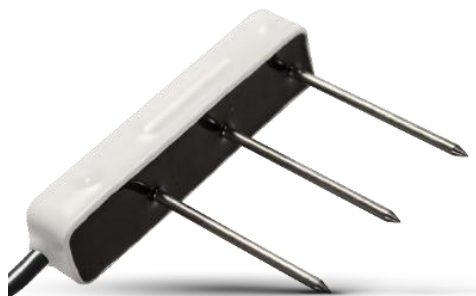
Στην παρούσα πτυχιακή, το MATLAB χρησιμοποιήθηκε ως βοηθητικό πρόγραμμα για τη σύνδεση των αισθητήρες MEC 10 και Chirp! στον υπολογιστή, έτσι ώστε να γίνετε ευκολότερη η καταγραφή των αποτελεσμάτων μας. Εισάγουμε όλες τις εντολές ανάλογα με τα διαστήματα των μετρήσεων που θέλουμε να πάρουμε και τα αποτελέσματα καταγράφονται στον υπολογιστή μας. Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται η απεικόνιση του προγράμματος MATLAB στον υπολογιστή.



Εικόνα 2.3: Απεικόνιση του προγράμματος MATLAB στον υπολογιστή

2.2 Αισθητήρες υγρασίας

2.2.1 Αισθητήρας GS3



Εικόνα 2.4: Απεικόνιση του αισθητήρα GS3

Ο GS3 είναι αισθητήρας υγρασίας για ορυκτά εδάφη και υποστρώματα, όπως ο πετροβάμβακας (Rookwool) που χρησιμοποιούνται στην υδροπονία, τύρφη και περλίτης. Ο GS3 μετρά την ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό, τη θερμοκρασία και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα ηλεκτρόδια τους αισθητήρα είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και έχουν εκτεταμένη επιφάνεια για την βελτιστοποίηση των μετρήσεων EC. Μπορούν να συνδεθούν σε καταγραφικό δεδομένων Decagon ή να ενσωματωθούν σε άλλα συστήματα.

2.2.2 Ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό

Ο αισθητήρας GS3 χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για τη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθερά του περιβάλλοντος μέσου. Ο αισθητήρας τροφοδοτεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα 70 MHz στα ηλεκτρόδια του αισθητήρα που φορτίζει σύμφωνα με το διηλεκτρικό του υλικού. Ο GS3 μετρά

το φορτίο και εξάγει μια τιμή διηλεκτρικής σταθερά από τον αισθητήρα. Η διηλεκτρική τιμή μετατρέπεται στη συνέχεια σε ογκομετρική περιεκτικότητα υγρασίας με την εξίσωση βαθμονόμησης.

2.2.3 Ηλεκτρική αγωγιμότητα [EC]

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα [EC] είναι η ικανότητα μια ουσίας να μεταφέρει ηλεκτρικό πεδίο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η ποσότητα των φορτισμένων μορίων που βρίσκονται σε διάλυμα. Η EC μετρείται με την εφαρμογή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος σε δύο ηλεκτρόδια μεταξύ τους. Οι μετρήσεις του GS3 αισθητήρα βαθμονομεί τη μέτρηση για να είναι ακριβής εντός $\pm 10\%$ από 0 έως 10 dS/m. Ωστόσο, σε ορισμένες εφαρμογές με υποστρώματα υψηλής αλατότητας οι μετρήσεις μπορούν να υπερβούν το καθορισμένο εύρος, το GS3 θα μετρά έως και 23 dS/m EC.

2.2.4 Βαθμονόμηση αισθητήρα GS3

Διηλεκτρική σταθερά

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις ο αισθητήρας έχει την ικανότητα να μετράει διηλεκτρική σταθερά (permittivity) όπου είναι χρήσιμη για την βαθμονόμηση.

Βαθμονόμηση για πορώδη μέσα εκτός εδάφους

Με τον αισθητήρα GS3 έχουν πραγματοποιηθεί βαθμονομήσεις σε περλίτη, τύρφη και φυτόχωμα. Ο στόχος αυτών των βαθμονομήσεων ήταν να δημιουργηθεί μιας εξίσωση που θα χρησιμοποιείται σε όλους τους τύπους υποστρώματος, με ακρίβεια $\pm 5\%$ ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό (VWC).

Το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης για διάφορα φυτοχώματα, περλίτη και τύρφη σε αλατότητες που κυμαίνονται από 0 έως > 4 dS/m δίνεται από την εξίσωση:

$$VWC\left(\frac{m^3}{m^3}\right) = 0.118\sqrt{\epsilon_a} - 0.117$$

Αντίστοιχα, το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης για ορυκτό έδαφος, η αγωγιμότητα του οποίου κυμαίνεται από 0 έως > 5 dS/m δίνεται από την εξίσωση:

$$VWC\left(\frac{m^3}{m^3}\right) = 5.89 \times 10^{-6}\epsilon^3 - 7.62 \times 10^{-4}\epsilon^2 + 3.67 \times 10^{-2}\epsilon - 7.53 \times 10^{-2} \quad (6)$$

2.2.5 Εγκατάσταση αισθητήρων

Ο προσανατολισμός του αισθητήρα επηρεάζει την ακρίβεια του αισθητήρα, η υψηλή χωρική μεταβλητότητα στα υποστρώματα θα επηρεάσει τις ενδείξεις των αισθητήρων από την μία θέση στην άλλη.

Το GS3 μπορεί να εγκατασταθεί σε πολλούς διαφορετικούς προσανατολισμούς, ανάλογα με τις ανάγκες σας. Οι αισθητήρες μπορούν να εισαχθούν στην κορυφή του δοχείου φυτών είτε στην πλευρά της ριζόσφαιρας. Η εισαγωγή στην πλευρά της ριζόσφαιρας είναι η καλύτερη επιλογή, καθώς θα δώσει την ακριβή ένδειξη του νερού που διαθέτει το φυτό.



Εικόνα 2.5: Απεικόνιση τοποθέτησης του αισθητήρα GS3 στο έδαφος

2.2.6 Αισθητήρας 5TM



Εικόνα 2.6: Απεικονίσει του αισθητήρα 5TM

Ο 5TM μετράει την περιεκτικότητα σε νερό, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την θερμοκρασία του εδάφους. Το 5TM περιέχει ταλαντωτή που λειτουργεί στα 70 MHz για την μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε νερό. Ένας θερμίστορ σε θερμική επαφή με τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα παρέχει τη θερμοκρασία του εδάφους.

2.2.7 Ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό

Ο αισθητήρας 5TM χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για τη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς στο περιβάλλον πορώδες μέσο. Ο αισθητήρας τροφοδοτεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα 70 MHz στα ηλεκτρόδια του αισθητήρα που φορτίζει σύμφωνα με το διηλεκτρικό του υλικού. Το αποθηκευμένο φορτίο είναι ανάλογο με την περιεκτικότητα σε διηλεκτρικό έδαφος και ογκομετρικό νερό εδάφους. Ο μικροεπεξεργαστής 5TM μετρά τη φόρτιση και εξάγει μια τιμή διηλεκτρικής σταθεράς από τον αισθητήρα.

2.2.8 Θερμοκρασία

Ο 5TM χρησιμοποιεί έναν επιφανειακά τοποθετημένο θερμίστορ για να λαμβάνει μετρήσεις θερμοκρασίας. Το θερμίστορ βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του αισθητήρα, δίπλα σε ένα από τα ηλεκτρόδια, και διαβάζει τη θερμοκρασία της επιφάνειας. Η θερμοκρασία μετριέται σε °C, εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά στο αρχείο προτιμήσεων του DataTrac 3 ή του βοηθητικού προγράμματος ECH2O.

2.2.9 Βαθμονόμηση αισθητήρα 5TM

Διηλεκτρική σταθερά

Κάθε αισθητήρας 5TM βαθμονομείται από το εργοστάσιο Decagon για την μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς, όπου 1 ο αέρας έως 80 το νερό.

Βαθμονόμηση ορυκτού εδάφους

Έχουν γίνει μελέτες μεταξύ της διηλεκτρικής σταθερά και της ογκομετρικής περιεκτικότητας σε νερό (VWC) στο έδαφος. Με αποτέλεσμα, να υπάρχουν πολυάριθμες εξισώσεις μεταφοράς που προβλέπουν την υγρασία από τη μετρούμενη διηλεκτρική σταθερά.

$$VWC = 4.3 * 10^{-6} \epsilon^3 - 5.5 * 10^{-4} \epsilon^2 + 2.92 * 10^{-2} \epsilon - 5.3 * 10^{-2}$$

Σε ένα εγκατεστημένο αισθητήρα 5TM με ηλεκτρική αγωγιμότητα < 10 dS/m, οδηγεί σε μετρήσεις εντός ±3% VWC του πραγματικού εδάφους VWC.

✓ Έδαφος γλάστρας

$$VWC = 2.25 * 10^{-5} \varepsilon^3 - 2.06 * 10^{-3} \varepsilon^2 + 7.24 * 10^{-2} \varepsilon - 0.247$$

✓ Πετροβάμβακας (rockwool)

$$VWC = -1.68 * 10^{-3} \varepsilon^2 + 6.56 * 10^{-2} \varepsilon + 0.0266$$

✓ Περλίτης

$$VWC = -1.07 * 10^{-3} \varepsilon^2 + 5.25 * 10^{-2} \varepsilon - 0.0685$$

Εγκατάσταση αισθητήρα 5TM

Είναι σημαντικό να αποφύγετε συμπαγές έδαφος ή κενά αέρα γύρω από τον αισθητήρα, το οποίο μπορεί να επηρεάσει τις ενδείξεις. Ο αισθητήρας εισάγετε απευθείας στο έδαφος και πρέπει να καλύπτεται πλήρως από το έδαφος.



Εικόνα 2.7: Απεικονίζει τοποθέτηση του αισθητήρα 5TM στην άμμο

2.2.10 Αισθητήρας MEC 10



Εικόνα 2.8: Απεικόνιση του αισθητήρα MEC 10

Ο αισθητήρας MEC 10 παρέχεται με υψηλή ακρίβεια και υψηλή ευαισθησίας. Αυτός ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει τον όγκο της υγρασίας του εδάφους την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την θερμοκρασία. Εγκαθίσταται στο έδαφος για επιστημονικά πειράματα, άρδευση εξοικονόμηση νερού, λαχανικά θερμοκηπίου, λουλούδια, γρασίδι, έδαφος, καλλιέργεια φυτών, μετρημένη ταχύτητα λυμάτων, αποθήκευση σιτηρών και έλεγχος θερμοκηπίου.

Εγκατάσταση και σύνδεση

Ο αισθητήρας εγκαθιστάτε κάθετα στο έδαφος και να εξασφαλίζετε η στενή επαφή με το έδαφος. Μπορεί να μείνει στο έδαφος για μέρες, μήνες ή ακόμα περισσότερο για να μετρήσει και να καταγράψει. Ο αισθητήρας συνδέεται γρήγορα με το βοηθητικό πρόγραμμα MATLAB όπως αναφέραμε παραπάνω.

2.2.11 Αισθητήρας Chirp!

Ο Chirp! χρησιμοποιεί χωρητική ανίχνευση υγρασία, δηλαδή δεν κάνει ηλεκτρική επαφή με το έδαφος, αποφεύγοντας τη διάβρωση των ηλεκτροδίων και του εδάφους με αποτέλεσμα καλύτερη ακρίβεια και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Το Chirp! είναι ένας συναγερμός ποτίσματος φυτών. Τον τοποθετεί στο έδαφος κοντά στο φυτό και όταν το έδαφος είναι ξηρό, ειδοποιεί να ποτίσετε το φυτό. Ο συναγερμός μπορεί να ρυθμιστεί για κάθε φυτό ξεχωριστά, αφού το φυτό απορροφά νερό ο Chirp! θα ανίχνευση το χαμηλό επίπεδο υγρασίας και θα αρχίσει να εκπέμπει σήμα. Το Chirp! είναι υλικό ανοιχτού κώδικα με άδεια υλικού CERN v.1.1. λειτουργεί με μπαταρία 3V CR2032 διάρκειας έως και ένα έτος.



Εικόνα 2.9: Απεικόνιση του αισθητήρα Chirp!.

Για να χρησιμοποιηθεί πρέπει πρώτα να ποτιστεί το φυτό σας, τοποθετήστε την μπαταρία στην συνέχεια εγκαθιστάτε την συσκευή στο έδαφος. Το έδαφος με τον αισθητήρα θα πρέπει να εφάπτονται και να μην υπάρχουν κενά μεταξύ τους. Κατόπιν τον ενεργοποιείται ώστε να μετρήσει το επίπεδο υγρασίας.

2.3 Χρήση των αισθητήρων στη βιβλιογραφία

Η συστηματική έρευνα της βιβλιογραφίας βασίστηκε στη μέθοδο PRISMA (Page *et al.*, 2021) . Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό “Publish or perish” (Harzing and Wal, 2008) για την

αναζήτηση βιβλιογραφικών δεδομένων στη βάση “Google scholar”. Για κάθε αναζήτηση χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμοί λέξεων κλειδιών με τη μορφή sensor + keyword, όπου sensor ο τύπος και η εταιρεία παραγωγής του αισθητήρα και keyword ένας από τους όρους “soil” “water” “moisture”. Τα αποτελέσματα της αναζήτησης ελέγχθηκαν διαδοχικά (α) ως προς το είδος του εγγράφου οπότε και διατηρήθηκαν μόνο όσο αποτελούσαν δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά, (β) ως προς τη μοναδικότητά τους και τελικά (γ) ως προς την συνάφειά τους με το αντικείμενο.

2.4 Πειραματικό μέρος

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στα διαλύματα διαφορετικές αγωγιμότητες, και στα εδάφη (χαλαζιακή άμμος 0,1-0,4mm, αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος και υδροπονικό υπόστρωμα από μίγμα κόκκου-περλίτη σε αναλογία 1:1).

2.4.1 Διαλύματα με αγωγιμότητες

Υλικά:

Για τον προσδιορισμό της αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε το Αγωγιμόμετρο Multi 3510 IDS.



Εικόνα 2.10: Απεικόνιση του αγωγιμόμετρου Multi 3510 IDS

Μέθοδος

Φτιαχτήκαν 12 διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων NaCl. Χρησιμοποιήθηκαν 12 μπουκαλάκια γυάλινα, το κάθε μπουκαλάκι γεμίζεται με απιονισμένο νερό και προστίθεται κάθε φορά διαφορετική ποσότητα αλατιού, στην συνέχεια αναδεύεται για να διαλυθεί το αλάτι. Κατόπιν, το διάλυμα μεταφέρεται σε πλαστικό ποτήρι ζέσεως όπου μετριέται η αγωγιμότητα (mS/cm) με το αγωγιμόμετρο. Αφού γίνει γνωστή η αγωγιμότητα του διαλύματος, προσθέτουμε τους αισθητήρες για την καταγραφή των μετρήσεων μας.

Εικόνα 2.11: Διαδικασία παρασκευής διαλυμάτων και προσδιορισμού τις αγωγιμότητες με του αισθητήρες GS3, 5TM, MEC 10.



Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται όλα τα διαλύματα που παρασκευάστηκαν με διαφορετικούς βαθμούς αγωγιμότητας για την αξιολόγηση των μετρήσεων των αισθητήρων.

Πίνακας 2.1: Καταγραφή των 12 διαλυμάτων με τις διαφορετικές αγωγιμότητες τους

Διαλύματα	Αγωγιμότητα EC [mS/cm]
Καθαρό νερό	0,46
Δ1	1,092
Δ2	2,5
Δ3	3,43
Δ4	5,5
Δ5	6,75
Δ6	7,1
Δ7	8,35
Δ8	10,3
Δ9	21,1
Δ10	25,5
Δ11	32,6

2.4.2 Βαθμονόμηση σε χαλαζιακή άμμο

Μέθοδος

Αρχικά παρασκευάστηκαν 6 δείγματα άμμου όγκου 1L, σε ένα ποτήρι ζέσεως προστίθεται με μια σπάτουλα 1L άμμος, στην συνέχεια μεταφέρεται η άμμος μεταφέρεται σε μία λεκάνη όπου προστίθεται το νερό αφού πρώτα έχει μετρηθεί ο όγκος του με έναν ογκομετρικό κύλινδρο. Η άμμος με το νερό ανακατεύεται με ένα κουτάλι ώστε να ομογενοποιηθούν τα υλικά. Αφού γίνει η ομογενοποίηση τοποθετείτε η άμμος σε ποτήρι ζέσεως, κάθε φορά προστίθεται μια μικρή ποσότητα άμμου και πιέζετε με το χέρι για να ενσωματωθεί στο δοχείο, ταυτόχρονα τοποθετείτε ο αισθητήρας κάθετα χωρίς να ακουμπάει στο δοχείο αφού εγκατασταθεί ο αισθητήρας σωστά και θαφτεί μέχρι πάνω τον αφήνουμε για κάποιο χρονικό διάστημα για την καταγραφή των μετρήσεων.

Εικόνα 2.12: Βαθμονόμηση και προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας σε διαφορετικές συγκεντρώσεις νερού με του αισθητήρες 5TM, GS3, MEC 10, Chirp!



Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται όλες οι ποσότητες άμμου με την αντίστοιχη προστιθέμενη ποσότητα σε υγρασία.

Πίνακας 2.2: Καταγραφή της προστιθέμενης υγρασίας σε 1L άμμος.

Ποσότητα άμμος (L)	Υγρασία VWC
A _{1.1}	25 ml
A _{1.2}	50 ml
A _{1.3}	100 ml
A _{1.4}	150 ml
A _{1.5}	200 ml
A _{1.6}	250 ml

Φτιαχτήκαν τέσσερα δείγματα άμμου με διαφορετικές υγρασίες και αγωγιμότητες ως εξής: 200 ml με αγωγιμότητα 5 mS/cm και 15 mS/cm και 300 ml με αγωγιμότητα 5 mS/cm και 15 mS/cm. Τοποθετήθηκε 1 L άμμο σε μια λεκάνη φτιάχνουμε τα διαλύματα αγωγιμότητας, δηλαδή σε ένα γυάλινο μπουκαλάκι βάζουμε 200 ml απιονισμένο νερό προστίθεται συγκεκριμένη ποσότητα αλατιού. Έτσι ώστε όταν μετρηθεί με το αγωγιμόμετρο το γυάλινο μπουκαλάκι να έχει 5 mS/cm . Αφού φτιάχτηκε το διάλυμα μεταφέρεται η άμμος στην λεκάνη και αναμιγνύεται με το διάλυμα, ανακατεύεται καλά μέχρι να ομογενοποιηθεί. Κατόπιν τοποθετείται η άμμος σε ποτήρι ζέσεως σε στρώσεις αφού έχει γίνει η τοποθέτησή του αισθητήρα κάθετα αλλά χωρίς να ακουμπάει το δοχείο, λόγω ότι μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις. Αφού εγκαταστάθηκε ο αισθητήρα σωστά αφήνεται για ένα χρονικό διάστημα να καταγράψει τις μετρήσεις. Ομοίως ακολουθείτε αυτή η διαδικασία και στα 3 άλλα δείγματα . Για την καταγραφή των μετρήσεων των αισθητήρων GS3 και 5TM χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο καταγραφικό (DataLogger EM50 του οίκου METER) ενώ για τους αισθητήρες MEC10 και Chirp δημιουργήθηκε κατάλληλη ρουτίνα σε περιβάλλον MATLAB.



Εικόνα 2.13: Βαθμονόμηση και προσδιορισμό τις υγρασίας και τις αγωγιμότητας με τους αισθητήρες GS3, 5TM, MEC 10, Chirp!

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται όλες οι ποσότητες υγρασίας και αγωγιμότητας, ανά λίτρου άμμο, που εξετάστηκαν.

Πίνακας 2.3: Καταγραφή της προστιθέμενης υγρασίας και τις αγωγιμότητας σε 1L άμμου.

Ποσότητα άμμος (L)	Υγρασία	Αγωγιμότητα mS/cm
A _{2.1}	200 ml	5
A _{2.2}	200 ml	15
A _{2.3}	300 ml	5
A _{2.4}	300 ml	15

2.4.3 Βαθμονόμηση και προσδιορισμός της υγρασίας των αισθητήρων σε υδροπονικό υπόστρωμα από μίγμα κόκκου-περλίτη σε αναλογία 1:1)

Μέθοδος

Φτιαχτήκαν 7 διαφορετικές υγρασίες σε 1L οργανική ουσία. Σε ποτήρι ζέσεως προστίθεται με μια σπάτουλα 1L οργανική ουσία, στην συνέχεια μεταφέρεται η οργανική ουσία σε μία λεκάνη όπου προστίθεται το νερό αφού πρώτα έχει μετρηθεί ο όγκος του με έναν ογκομετρικό κύλινδρο. Ομογενοποιείται με ένα κουτάλι η οργανική ουσία με το νερό και τοποθετείτε η οργανική ουσία σε ποτήρι ζέσεως, κάθε φορά προσθέτετε μια μικρή ποσότητα οργανικής ουσίας και πιέζετε με το χέρι για να ενσωματωθεί στο δοχείο, ταυτόχρονα τοποθετείτε ο αισθητήρας κάθετα χωρίς να ακουμπάει στο δοχείο αφού εγκατασταθεί ο αισθητήρας θα πρέπει να έχει τέλεια επαφή με την οργανική ουσία για να μη επηρεαστούν η μετρήσεις και αφήνεται για κάποιο χρονικό διάστημα για την καταγραφή των μετρήσεων.



Εικόνα 2.14: Βαθμονόμηση και προσδιορισμό τις υγρασίας με τους αισθητήρες GS3, 5TM, MEC 10, Chirp!

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται όλες οι ποσότητες σε προστιθέμενη υγρασία που εξετάστηκαν ανά λίτρο οργανικής ουσίας.

Πίνακας 2.4: Καταγραφή της προστιθέμενης υγρασίας σε 1L οργανική ουσία.

Ποσότητα οργανικής ουσίας (L)	Υγρασία
O _{1.1}	50 ml
O _{1.2}	100 ml
O _{1.3}	150 ml
O _{1.4}	200 ml
O _{1.5}	250 ml
O _{1.6}	300 ml
O _{1.7}	400 ml

Φτιαχτήκαν τέσσερα δείγματα οργανικής ουσίας με διαφορετικές υγρασίες και αγωγιμότητες ως εξής: 200 ml με αγωγιμότητα 5 mS/cm και 15 mS/cm και 300 ml με αγωγιμότητα 5 mS/cm και 15 mS/cm. Τοποθετήθηκε 1L οργανική ουσία σε μια λεκάνη παρασκευάστηκε το διάλυμα αγωγιμότητας, δηλαδή σε ένα γυάλινο μπουκαλάκι προστίθεται 200 ml απιονισμένο νερό και συγκεκριμένη ποσότητα αλατιού. Έτσι ώστε όταν το μετρήσουμε με το αγωγιμόμετρο το γυάλινο μπουκαλάκι να έχει 5 mS/cm. Αφού φτιαχτεί το διάλυμα μεταφέρεται η οργανική ουσία στην λεκάνη και αναμιγνύεται με το διάλυμα ανακατεύουμε καλά μέχρι να ομογενοποιηθούν. Κατόπιν τοποθετείται η οργανική ουσία σε ποτήρι ζέσεως σε στρώσεις αφού έχει γίνει η τοποθέτηση του αισθητήρα κάθετα αλλά χωρίς να ακουμπάει το δοχείο, λόγω ότι μπορεί να επηρεάσει της μετρήσεις. Αφού εγκατασταθεί ο αισθητήρα σωστά αφήνεται για ένα χρονικό διάστημα να καταγράψει τις μετρήσεις. Ομοίως ακολουθείτε αυτή η διαδικασία και στα 3 άλλα δείγματα. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται όλες οι ποσότητες προστιθέμενης ποσότητας υγρασίας και βαθμού αγωγιμότητας

Πίνακας 2.5: Καταγραφή της προστιθέμενης υγρασίας και αγωγιμότητας σε 1L οργανική ουσία

Ποσότητα οργανικής ουσίας (L)	Υγρασία	Αγωγιμότητα mS/cm
O _{2.1}	200 ml	5
O _{2.2}	200ml	15
O _{2.3}	300 ml	5
O _{2.4}	300 ml	15

2.4.4 Βαθμονόμηση αισθητήρων σε έδαφος

Πριν την βαθμονόμηση του αισθητήρα χρειάστηκε να γίνει προσδιορισμός της μηχανικής σύστασης του εδάφους που χρησιμοποιήθηκε. Για τον προσδιορισμό της μηχανικής σύστασης του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω εργαστηριακά όργανα: το πυκνόμετρο, οι Κύλινδροι μηχανικής

ανάλυσης 1L, ο αναδευτήρας κοκκομετρικής ανάλυσης (μίξερ ηλεκτρικό), Υδραργυρικό θερμόμετρο, Αναδευτήρας για την ανάδευση των αιωρημάτων στον κύλινδρο και το Χρονόμετρο.

2.4.5 Εκτέλεση προσδιορισμού

50 g έδαφος τοποθετείται σε πλαστικό ποτήρι των 600 ml και προστίθενται 100 ml διαμεριστικού $\text{Na}(\text{PO}_3)_6$ (Sodium hexametaphosphate). Η διάλυση του αντιδραστηρίου γίνεται σε περίπου 900 ml αποσταγμένου νερού, επίσης προστίθενται σε μικρές ποσότητες Na_2CO_3 μέχρι το pH να φτάσει 8,3 με 8,5. Το διάλυμα αφήνεται για 15 με 20 ώρες. Μετέπειτα το αιώρημα μεταφέρεται με περίπου 200 ml αποσταγμένου νερού στο δοχείο του μίξερ, το δοχείο προσαρμόζεται στη συσκευή και γίνεται ανάδευση επί 2-3 λεπτά. Στην συνέχεια το αιώρημα μεταφέρεται σε κύλινδρο κοκκομετρικής ανάλυσης και συμπληρώνετε μέχρι ο όγκος του να φτάσει 1 L με αποσταγμένο νερό. Παρασκευάζετε επίσης ένα τυφλό δείγμα χωρίς έδαφος με προσθήκη 100 ml διαμεριστικού σε κύλινδρο κοκκομετρικής αναλύσεως και συμπλήρωση μέχρι όγκου 1 L με απεσταγμένο νερό. Στην συνέχεια αναδεύονται καλά οι κύλινδροι με το τυφλό και το αιώρημα για να ομοιογενοποιηθούν. Κατόπιν αφήνονται για μισή με μία ώρα, μετά λαμβάνεται η πρώτη ένδειξη του πυκνόμετρου με εισαγωγή στο τυφλό δείγμα. Το αιώρημα με το έδαφος αναδεύεται ξανά πολύ καλά, ανακινείται (πάνω- κάτω) 10 φορές. Αφήνουμε τον κύλινδρο σε ηρεμία μετά από 40 sec με την λειτουργία ενός χρονόμετρου προστίθενται 5 με 6 σταγόνες ακετόνης (αντιαφριστικό) και εισάγετε το πυκνόμετρο στο αιώρημα και σημειώνετε η ένδειξη. Στην συνέχεια αφαιρείτε το πυκνόμετρο, πλένεται με νερό και στεγνώνεται. Εισάγεται ξανά το πυκνόμετρο στο αιώρημα μετά από 2 ώρες ηρεμίας και σημειώνεται η ένδειξη. Η ένδειξη του τυφλού δείγματος αφαιρείται από την ένδειξη του πυκνόμετρου του αιωρήματος.

Η ένδειξη του πυκνόμετρου στα 40 sec δείχνει το ποσοστό ιλύς και αργίλου στο έδαφος, ενώ η ένδειξη του πυκνόμετρου στις 2 ώρες δείχνει το ποσοστό αργίλου. Το ποσοστό της άμμους υπολογίζεται από την μαθηματική διαφορά.

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν 2 επαναλήψεις, από αυτές τις επαναλήψεις βγήκε ο μέσος όρος και αφαιρέθηκε με το 3 (τυφλό δείγμα). Από αυτήν τη μέθοδο βρέθηκαν τα εξής αποτελέσματα: η ένδειξη του τυφλού δείγματος ήταν 3. Όσο αφορά το έδαφος η ένδειξη ποσοστού τις ιλύς και αργίλου ήταν 42 και 45 για τις δύο επαναλήψεις. Για την άργιλο ήταν 23 και για τις δύο επαναλήψεις. Συνεπώς τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

- ιλύς και αργίλου είναι 40,5%
- άργιλο ήταν 20%
- άμμο 59,5%

Αφού βρέθηκαν τα ποσοστά σε άμμο, αργίλου και ιλύς- αργίλου θα γίνει προσδιορισμός του εδάφους σε ποια κατηγορία ανήκει με την βοήθεια τις παρακάτω εικόνας.

Άρα το έδαφος που χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο ανήκει στην κατηγορία αμμόαργιλοπηλώδες. (Σινάννης, 2015).

Μέθοδος

Φτιαχτήκαν 6 διαφορετικές υγρασίες σε 1 L έδαφος. Πρώτα χτυπάμε το έδαφος στο γουδί και στην συνέχεια το περνάμε από το κόσκινο για την απομάκρυνση μεγάλων σωματιδίων και ξένων υλών. Στην συνέχεια σε ένα ποτήρι ζέσεως προστίθεται με σπάτουλα 1L έδαφος και το μεταφέρουμε σε μια λεκάνη, σε ένα ογκομετρικό κύλινδρο μετριέται ο όγκος του νερού και στην συνέχεια προστίθεται στο έδαφος. Αναμιγνύεται και στην κατόπιν τοποθετείτε το έδαφος σε ποτήρι ζέσεως, κάθε φορά προστίθεται μια μικρή ποσότητα και πιέζετε με το χέρι για να ενσωματωθεί ομοιόμορφα στο δοχείο, ταυτόχρονα τοποθετείτε ο αισθητήρας κάθετα και στο κέντρο χωρίς να ακουμπάει στο δοχείο, έτσι ώστε να έχουν τέλεια επαφή ώστε να μην επηρεάσουν τις μετρήσεις τυχόν κενό αναμεσά τους. Τέλος αφήνετε ο αισθητήρας για κάποιο χρονικό διάστημα για την καταγραφή των μετρήσεων. Επίσης προστέθηκαν συγκεντρώσεις αλατιού για την δημιουργία 5 mS/cm και 15 mS/cm σε 200 ml και 300 ml νερό για την μέτρηση τις αγωγιμότητας και προστίθεται στο έδαφος με την ίδια ακριβώς μέθοδο όπως στην άμμο και στην οργανική ουσία .

Πίνακας 2.6: Καταγραφή της προστιθέμενης υγρασίας σε 1L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

Ποσότητα εδάφους (L)	Υγρασία
E _{1,1}	100 ml
E _{1,2}	150 ml
E _{1,3}	200 ml
E _{1,4}	250 ml
E _{1,5}	300 ml
E _{1,6}	400 ml



Εικόνα 2.15: Προετοιμασίας εδάφους και βαθμονόμηση για τον προσδιορισμό της υγρασίας και τις αγωγιμότητας

Στον Πίνακα 2.7 απεικονίζονται όλες οι ποσότητες σε υγρασία και αγωγιμότητας σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

Πίνακας 2.7: Καταγραφή της προστιθέμενης υγρασίας και τις αγωγιμότητες σε 1L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος

Ποσότητα εδάφους (L)	Υγρασία	Αγωγιμότητα mS/cm
E _{2.1}	200 ml	5
E _{2.2}	200ml	15
E _{2.3}	300 ml	5
E _{2.4}	300 ml	15

2.5 Συντελεστής συσχέτισης και Σφάλμα μέσης τετραγωνικής ρίζας

Για τις ερευνητικές μελέτες με έγκυρα αποτελέσματα είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή τους ερευνητικά εργαλεία στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιούνται η αισθητήρες, τα οποία έχουν ελεγχθεί για την αξιοπιστία τους. Η αναζήτηση της αξιοπιστίας των αισθητήρων μέτρησης είναι δύο βασικά κριτήρια για την εξασφάλιση έγκυρων αποτελεσμάτων, στις έρευνες που πραγματοποιούνται. Η αξιοπιστία αφαιρετέ στην σταθερότητα που εμφανίζει σε διαδοχικές μετρήσεις, σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε ίδιο δείγμα και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, εμφανίζει σταθερά τι ίδιο αποτέλεσμα. Η αξιοπιστία εκτιμάται με το συντελεστή συσχέτισης R όπου κυμαίνεται από την τιμή 0 (δεν είναι αξιόπιστο), μέχρι την τιμή 1 (R=1,0) τόσο μεγαλύτερη αξιοπιστία θεωρείται ότι διαθέτει ο αισθητήρας. Ως αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας θεωρείται ο συντελεστής συσχέτισης $R > 0,70$, ο συντελεστής προσδιορισμού μετρά το ποσοστό της διακύμανσης του Y που εξηγείται από το X και υπολογίζετε με τον εξής τύπο:

$$R^2 = \left(\frac{N \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{N \sum y^2 - (\sum y)^2}} \right)^2$$

Το σφάλμα μέσης τετραγωνικής ρίζας (root mean square error – RMSE) μετράει τη διαφορά μεταξύ της εκτιμώμενης τιμής που έχει προβλεφθεί από την πραγματική τιμή. Το RMSE μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως το άπειρο, όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του αποτελέσματος τόσο μικρότερο σφάλμα έχουμε. Το RMSE έχει τον εξής τύπο:

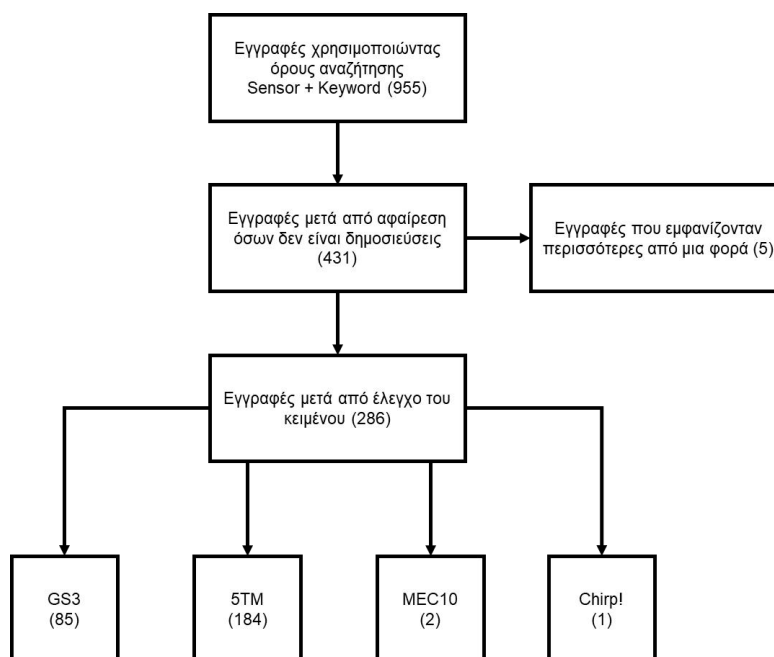
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

3 Αποτελέσματα

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των αισθητήρων GS3, 5TM, MEC 10 και Chirp! που πραγματοποιήθηκαν σε διαλύματα με αγωγιμότητα και στα εξής εδάφη: χαλαζιακή άμμος 0,1–0,4 mm, αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος και υδροπονικό υπόστρωμα από μίγμα κόκκου-περλίτη σε αναλογία 1:1.

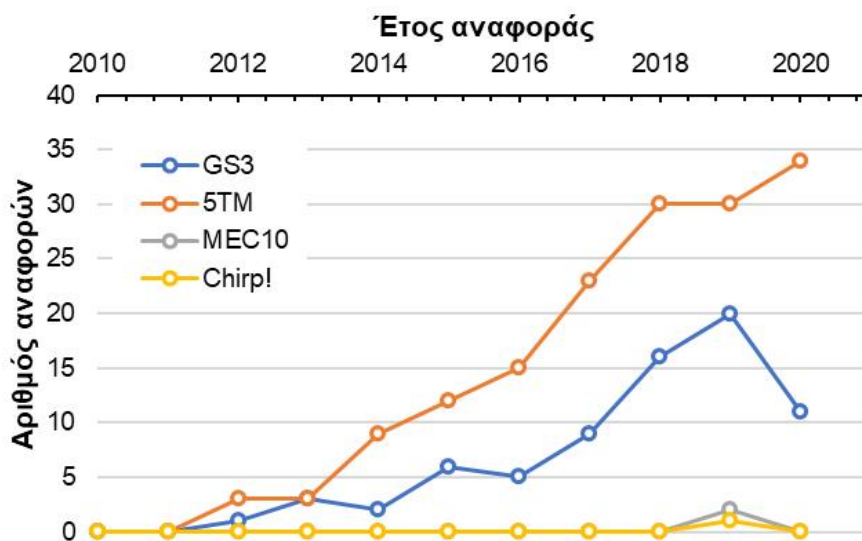
3.1 Αναζήτηση των αισθητήρων σε βιβλιογραφικές αναφορές

Έγινε αναζήτηση για τους αισθητήρες GS3 και 5TM του οίκου METEER, MEC10 του οίκου Dalian Endeavour Technology και μιας υλοποίησης του αισθητήρα Chirp! που αποτελεί ανοιχτό υλισμικό. Ακολουθώντας τη μέθοδο PRISMA, από τα αποτελέσματα των αναζητήσεων (955) επιλέχθηκαν όσα αφορούσαν δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά (431), και στη συνέχεια βρέθηκαν οι διπλές εγγραφές (5). Μετά από έλεγχο τουλάχιστον των περιλήψεων διατηρήθηκαν μόνο οι συναφείς δημοσιεύσεις (286), από τις οποίες 85 αφορούσα τον αισθητήρα GS3, 184 τον 5TM, 2 τον MEC10 και μία Chirp! Στην εικόνα 3.1 βλέπουμε ότι ο αισθητήρας 5TM είναι πολύ διαδεδομένος τον έχουν χρησιμοποιήσει σε πάρα πολλές μελέτες σε σύγκριση με τον αισθητήρα Chirp!.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα της μεθόδου PRISMA για την αναζήτηση των αισθητήρων αισθητήρες GS3, 5TM, MEC10 και Chirp! στη βιβλιογραφία.

Η Εικόνα 3.2 δείχνει τον αριθμός βιβλιογραφικών αναφορών των αισθητήρων GS3, 5TM, MEC10 και Chirp! στη βιβλιογραφία σε σχέση με το έτος εμφάνισης, από το έτος πρώτης εμφάνισης ως το 2020. Η αναζήτηση έδειξε ότι μεταξύ των αισθητήρων που εξετάζονται οι 5TM είναι σημαντικά πιο διαδεδομένοι. Αντίθετα, οι MEC10 και Chirp! εμφανίζονται σπάνια.



Εικόνα 3.2: Αριθμός αναφορών των αισθητήρων GS3, 5TM, MEC10 και Chirp! στη βιβλιογραφία σε σχέση με το έτος εμφάνισης.

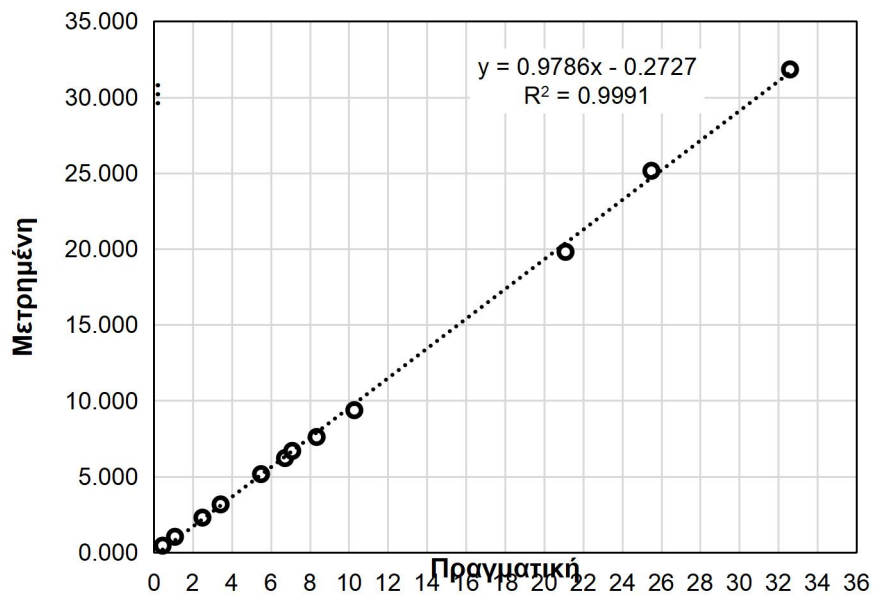
Μεταξύ των αισθητήρων του οίκου METER είναι εμφανές ότι οι 5TM έχουν πολύ μεγαλύτερη απήχηση στο επιστημονικό κοινό απ' ότι οι GS3. Ένας πιθανός λόγος είναι η χαμηλότερη τιμή τους και το γεγονός ότι οι περισσότερες έρευνες διαρκούν για μικρά χρονικά διαστήματα ή λαμβάνουν χώρα σε εργαστηριακές συνθήκες και όχι τόσο σε συνθήκες πεδίου ώστε να απαιτείται η χρήση αισθητήρων μεγάλης αντοχής. Η ένδειξη αυτή ίσως μπορεί να επιβεβαιωθεί ερευνώντας τη βιβλιογραφία σε μεγαλύτερο βάθος. Φαίνεται επίσης ότι παρά τα καλά χαρακτηριστικά του MEC10, αυτός δεν χρησιμοποιείται ερευνητικά. Θα είχε ενδιαφέρον η αντιπαράθεση των στοιχείων αυτών με στοιχεία έρευνας αγοράς ή γκρίζας βιβλιογραφίας σχετικά με την διάδοση των αισθητήρων αυτών σε εφαρμογές πεδίου.

3.2 Αισθητήρας GS3

3.2.1 Υδατικά διαλύματα NaCl

Αγωγιμότητα

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.3) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την αγωγιμότητα (EC) σε σχέση με την πραγματική αγωγιμότητα. ο αισθητήρας GS3 σε όλες τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας που παρασκευάστηκαν είναι εξαιρετικά αξιόπιστη. Λόγω της ακρίβεια των μετρήσεων που έχει καταγράψει. Ο συντελεστής συσχετίσεις είναι $R^2=0,9991$.



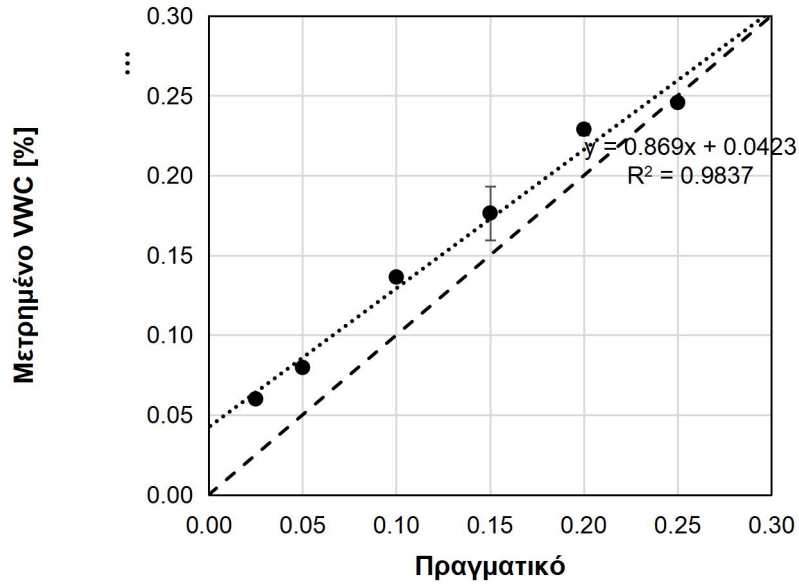
...

Εικόνα 3.3: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα GS3 για όλες τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας.

3.2.2 Χαλαζιακή άμμος

Υγρασία (VWC)

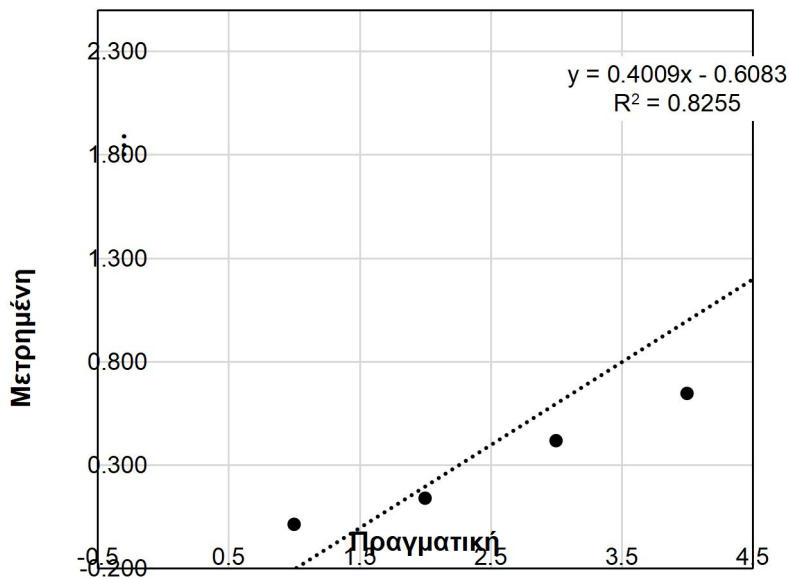
Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.4) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσον αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L άμμος με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. Ο αισθητήρας καταγράφει υψηλότερη υγρασία αλλά η διαφορά είναι ελάχιστη. Ο συντελεστής συσχέτισης με τον οποίο θα κρίνουμε την αξιοπιστία του αισθητήρα είναι $R^2 = 0,9837$.



Εικόνα 3.4: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα GS3 για όλες τις ποσότητες υγρασίας που προστέθηκαν σε 1 Λάμμος

Αγωγιμότητα

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.5) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την αγωγιμότητα (EC). Ο αισθητήρας GS3 σε όλες τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας που παρασκευάστηκαν είναι εξαιρετικά αξιόπιστος λόγω της ακρίβεια των μετρήσεων που έχει καταγράψει. Ο συντελεστής συσχετίσεις είναι $R^2=0,8255$.

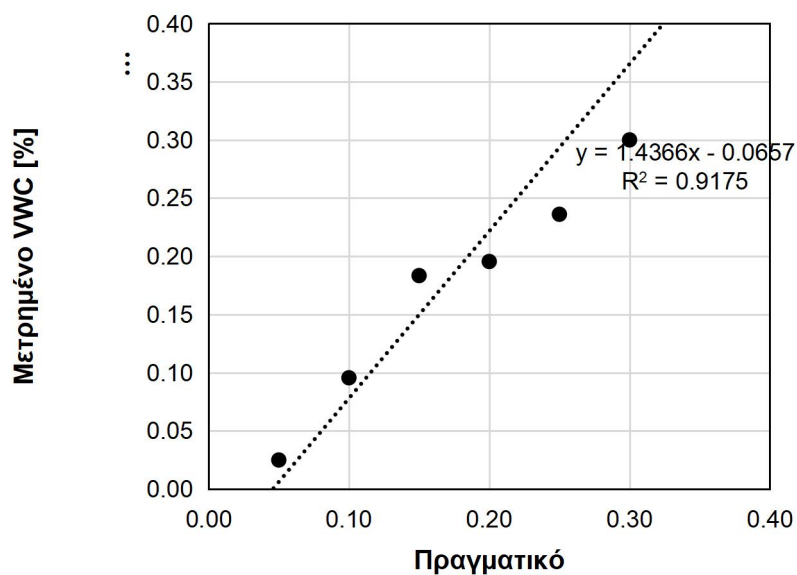


Εικόνα 3.5: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα GS3 για τις αγωγιμότητες που προστέθηκαν σε 1L άμμο.

3.2.3 Υδροπονικό υπόστρωμα

Υγρασία

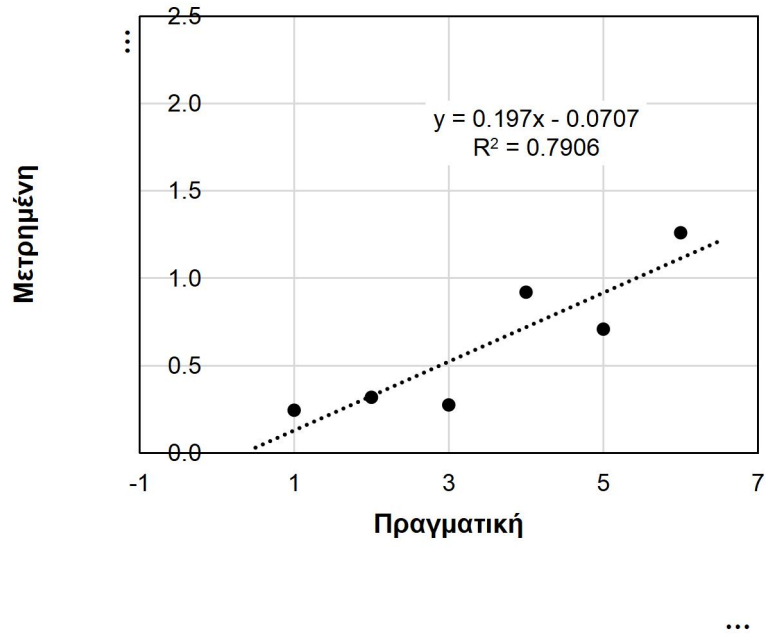
Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.6) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα GS3 όσον αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L υδροπονικό υπόστρωμα με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. Παρατηρούμε πως υπάρχει μία μικρή διαφορά από την πραγματική και την μετρούμενη VWC. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,9175$



Εικόνα 3.6: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα GS3 για όλες τις ποσότητες υγρασίας που προστέθηκαν σε 1 L υδροπονικό υπόστρωμα .

Αγωγιμότητα

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.7) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την αγωγιμότητα (EC). Ο αισθητήρας GS3 σε όλες τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας που παρασκευάστηκαν είναι αξιόπιστη λόγω της ακρίβεια των μετρήσεων που έχει καταγράψει. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,7906$.

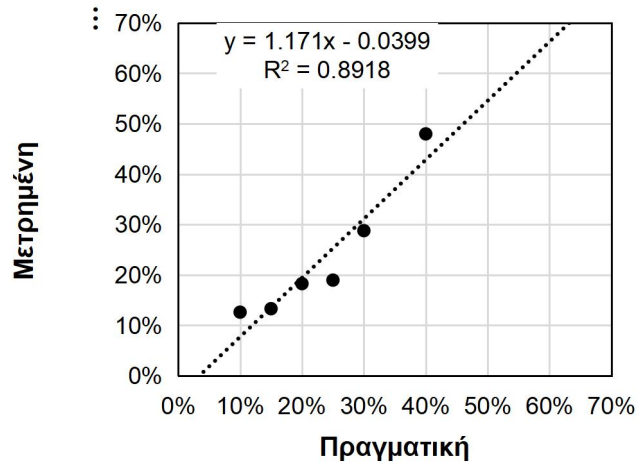


Εικόνα 3.7: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα GS3 για τις αγωγιμότητες που προστέθηκαν σε 1 L υδροπονικό υπόστρωμα.

3.2.4 Αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος

Υγρασία

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.8) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της μετρούμενης VWC αλλά είναι αρκετά αξιόπιστος. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,8918$.

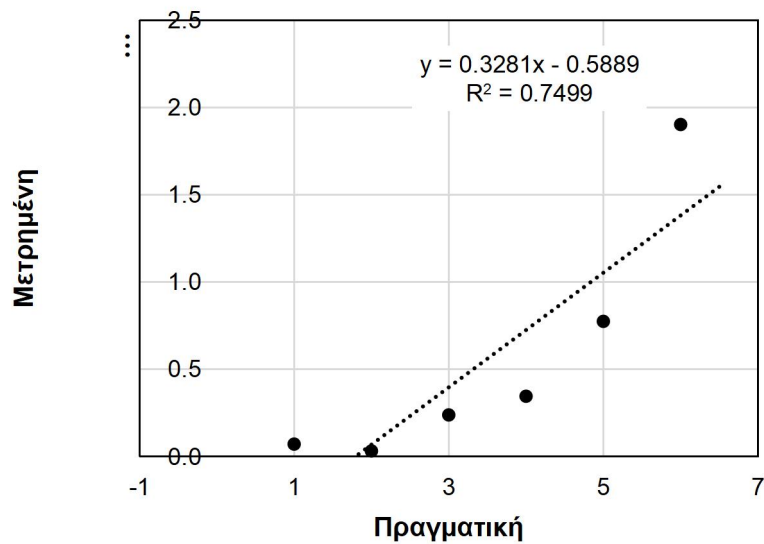


...

Εικόνα 3.8: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα GS3 για όλες τις ποσότητες υγρασίας που προστέθηκαν σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

Αγωγιμότητα

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.9) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την αγωγιμότητα (EC). Ο αισθητήρας GS3 σε όλες τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας που παρασκευάστηκαν είναι αξιόπιστος. Λόγω της ακρίβεια των μετρήσεων που έχει καταγράψει. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,7499$



...

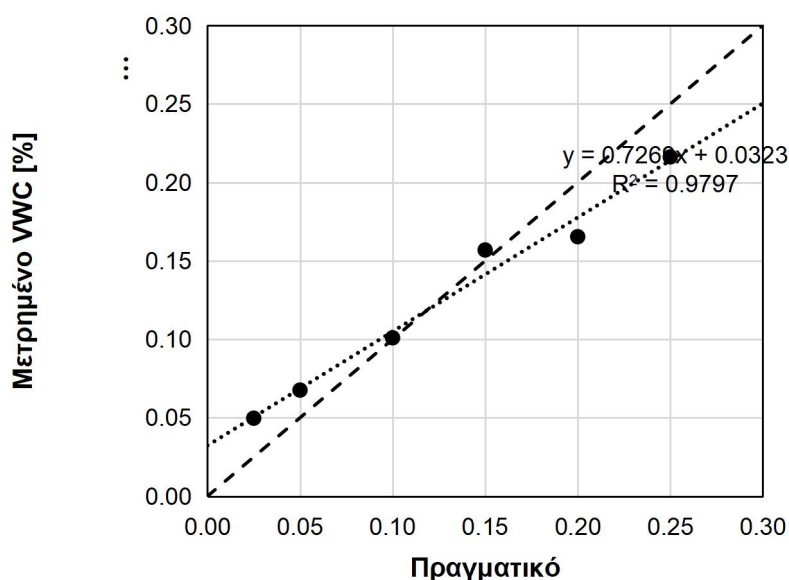
Εικόνα 3.9: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα GS3 για τις αγωγιμότητες που προστέθηκαν σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

3.3 Αισθητήρας 5TM

3.3.1 Χαλαζιακή άμμος

Υγρασία

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.10) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L άμμος με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα του αισθητήρα διαφέρει ελάχιστα από την πραγματική υγρασία (VWC). Ο συντελεστής συσχέτισης με τον οποίο θα κρίνουμε την αξιοπιστία του αισθητήρα είναι $R^2 = 0,9797$.



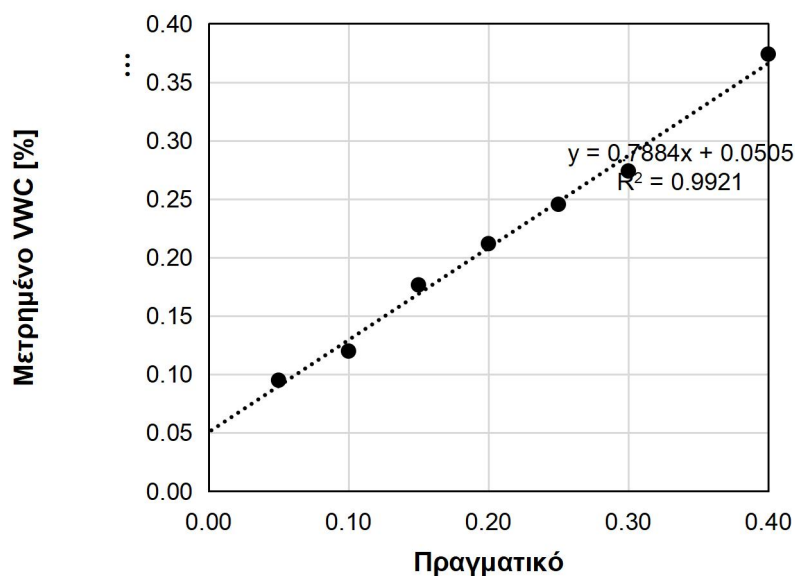
Εικόνα 3.10: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα 5TM για τις υγρασίες που προστέθηκαν σε 1 L άμμο

3.3.2 Υδροπονικό υπόστρωμα

Υγρασία

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.11) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L υδροπονικό υπόστρωμα με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. παρατηρούμε πως υπάρχει μία

μικρή διαφορά από την πραγματική και την μετρούμενη VWC. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,9921$.

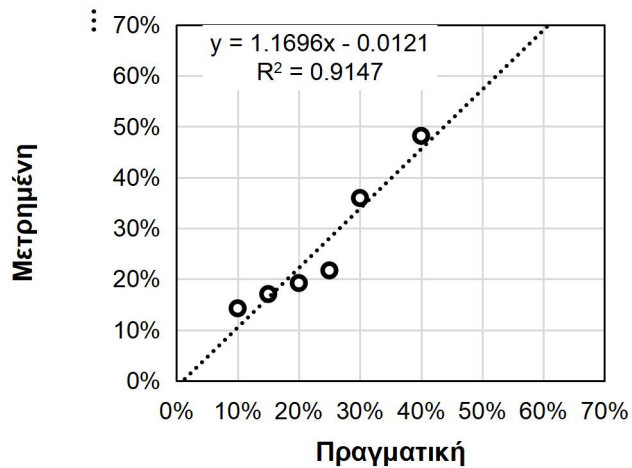


Εικόνα 3.11: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα 5TM για όλες τις ποσότητες υγρασίας που προστέθηκαν σε 1 L υδροπονικό υπόστρωμα. .

3.3.3 Αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

Υγρασία

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.12) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της μετρούμενης VWC. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,9147$.



...

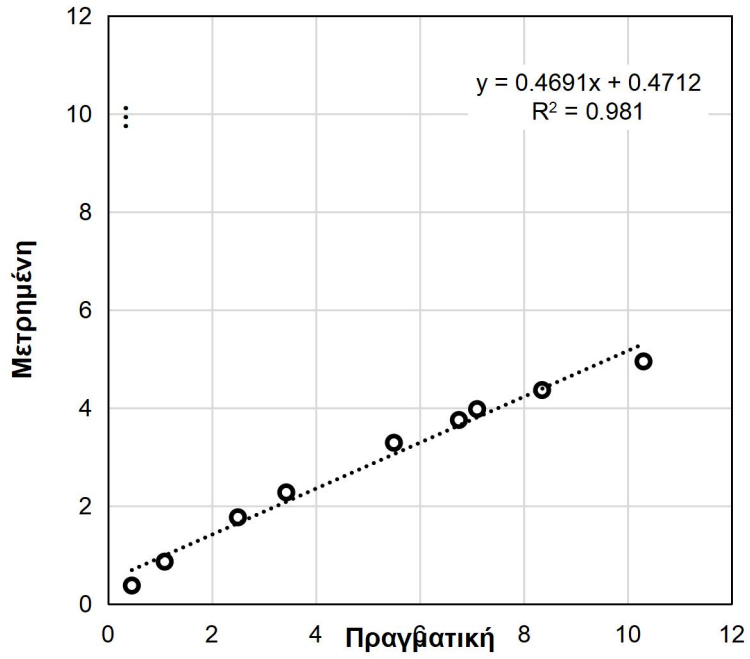
Εικόνα 3.12: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα 5TM για όλες τις ποσότητες υγρασίας που προστέθηκαν σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

3.4 Αισθητήρας MEC 10

3.4.1 Υδατικό διάλυμα NaCl

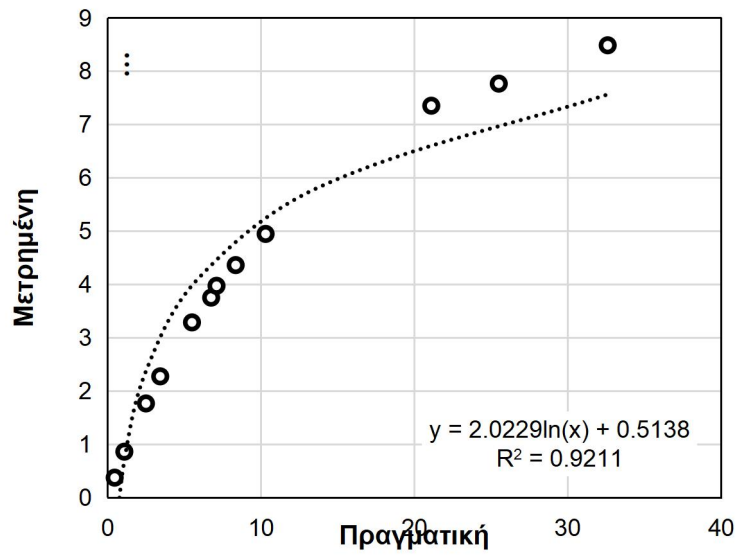
Αγωγιμότητα

Στο διάγραμμα (Εικόνα 3.13) έχουμε την συνολική απόδοση του αισθητήρα για τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητα < 10 mS/cm και βλέπουμε πως ο αισθητήρας MEC 10 σε όλες τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας που παρασκευάστηκαν είναι εξαιρετικά αξιόπιστη. Λόγω της ακρίβεια των μετρήσεων που έχει καταγράψει. Ο συντελεστής συσχετίσεων είναι $R^2=0,981$. Ενώ στην (Εικόνα 3.14) έχουμε την συνολική απόδοση του αισθητήρα για τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας > 10 mS/cm παρατηρούμε πως ο αισθητήρας σε αγωγιμότητα μεγαλύτερη από 10 mS/cm δεν είναι τόσο αξιόπιστος.



...

Εικόνα 3.13: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα MEC 10 για τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας < 10 mS/cm.



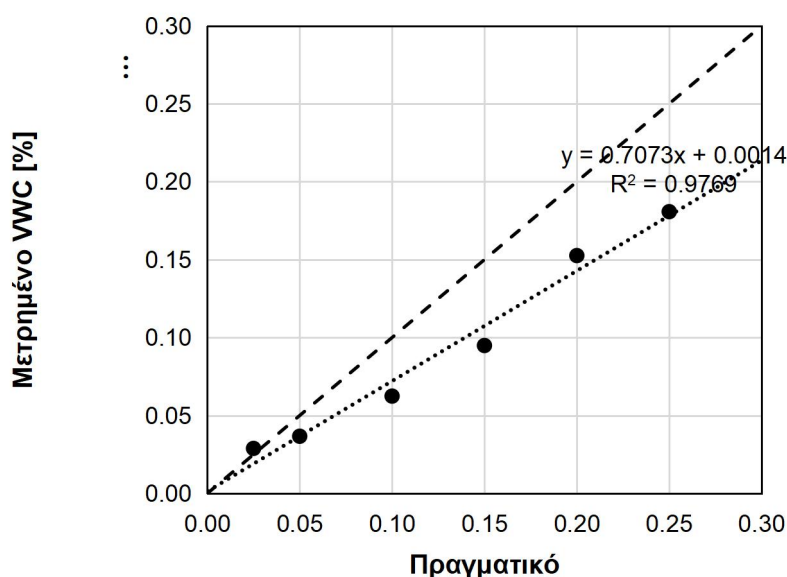
...

Εικόνα 3.14: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα MEC 10 για τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας > 10 mS/cm.

3.4.2 Χαλαζιακή άμμος

Υγρασία

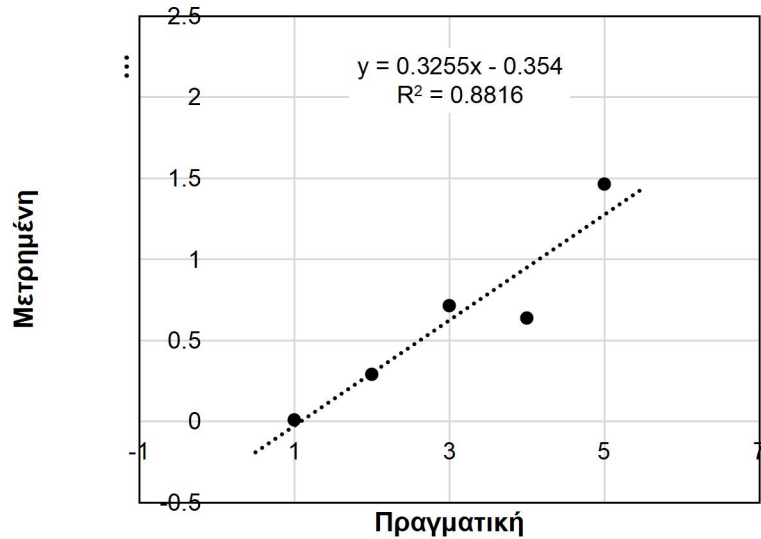
Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.15) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L άμμος με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα του αισθητήρα διαφέρει ελάχιστη από την πραγματική υγρασία (VWC). Ο συντελεστής συσχέτισης με τον οποίο θα κρίνουμε την αξιοπιστία του αισθητήρα είναι $R^2= 0,9769$.



Εικόνα 3.15: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα MEC 10 για τις υγρασίες που προστέθηκαν σε 1L άμμο

Αγωγιμότητα

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.16) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την αγωγιμότητα (EC). ο αισθητήρας MEC 10 σε όλες τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας που παρασκευάστηκαν είναι εξαιρετικά αξιόπιστος λόγω της ακρίβεια των μετρήσεων που έχει καταγράψει. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,8816$

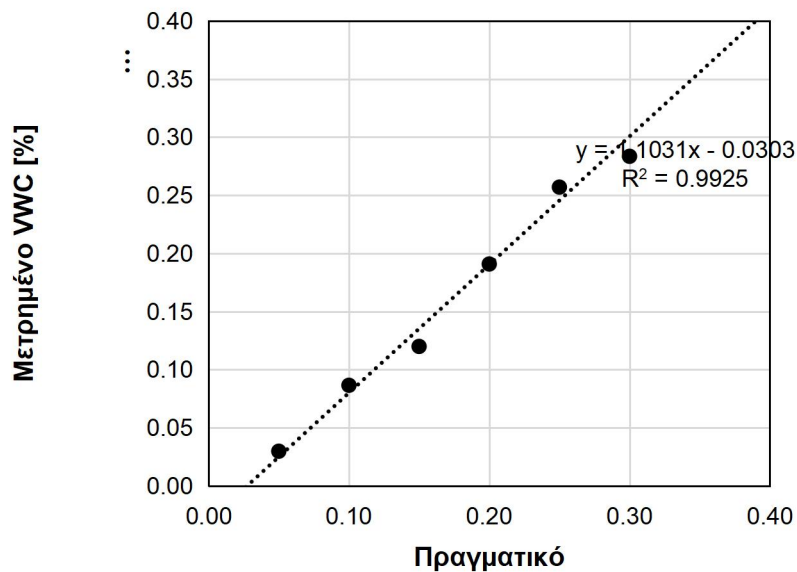


Εικόνα 3.16: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα MEC 10 για τις αγωγιμότητες που προστέθηκαν σε 1L άμμος.

3.4.3 Υδροπονικό υπόστρωμα

Υγρασία

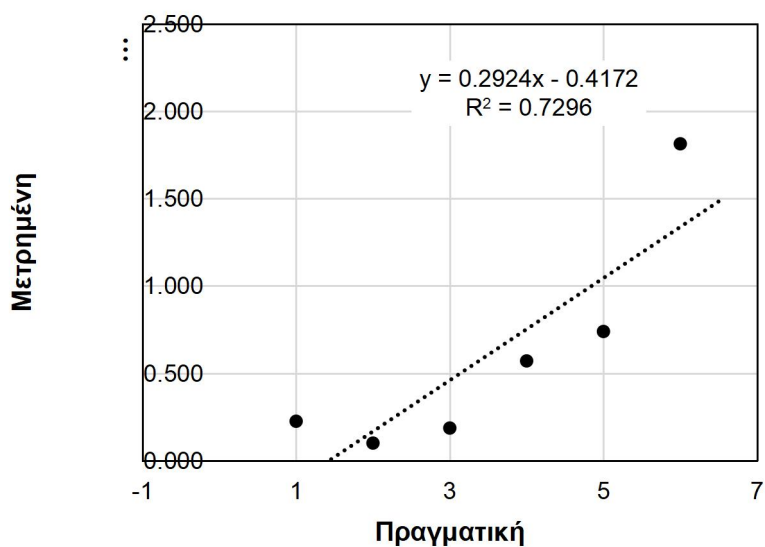
Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.17) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L υδροπονικό υπόστρωμα με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. παρατηρούμε πως ο αισθητήρας καταγράφει τα αποτελέσματα με μία μικρή διαφορά από την πραγματική και την μετρούμενη VWC. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,9925$.



Εικόνα 3.17: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα MEC 10 για όλες τις ποσότητες υγρασίας που προστέθηκαν σε 1 L υδροπονικό υπόστρωμα .

Αγωγιμότητα

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.18) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την αγωγιμότητα (EC). Ο αισθητήρας MEC 10 σε όλες τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας που παρασκευάστηκαν είναι εξαιρετικά αξιόπιστος λόγω της ακρίβεια των μετρήσεων που έχει καταγράψει. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,7296$

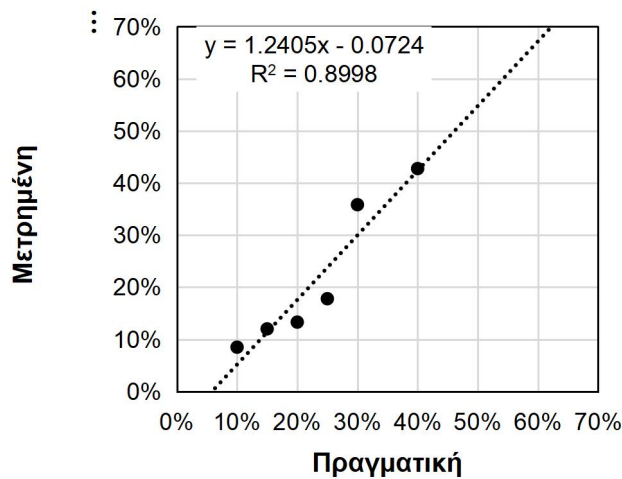


Εικόνα 3.18: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα MEC 10 για τις αγωγιμότητες που προστέθηκαν σε 1 L υδροπονικό υπόστρωμα.

3.4.4 Αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

Υγρασία

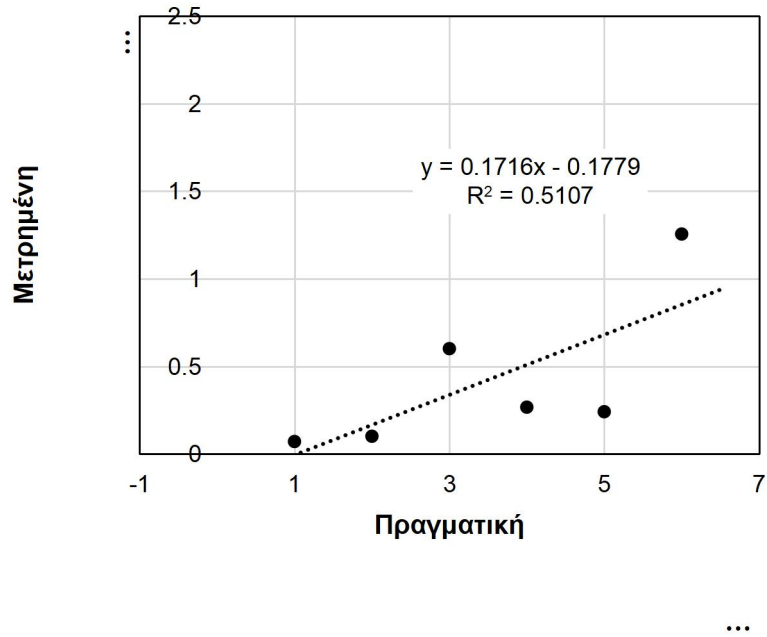
Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.19) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της μετρούμενης VWC. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,8998$.



Εικόνα 3.19: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα MEC 10 για όλες τις ποσότητες υγρασίας που προστέθηκαν σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

Αγωγιμότητα

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.20) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την αγωγιμότητα (EC). Βλέπουμε πως ο αισθητήρας MEC 10 σε όλες τις συγκεντρώσεις αγωγιμότητας που παρασκευάστηκαν δεν είναι αξιόπιστος. Λόγω ότι ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,5107$.



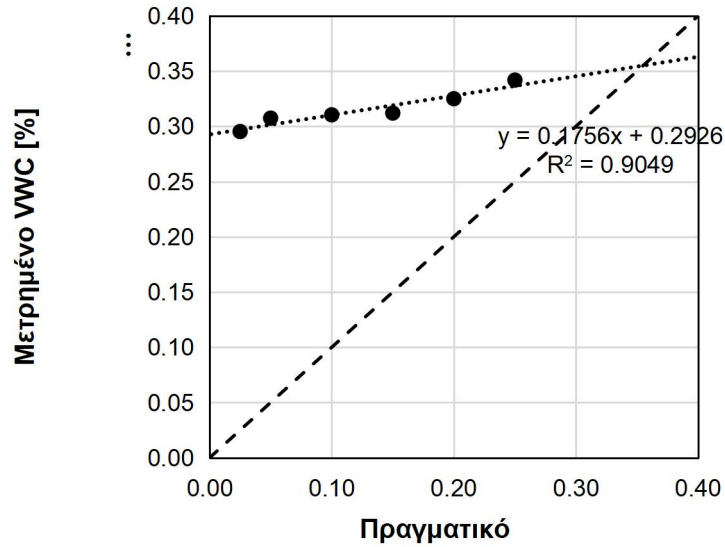
Εικόνα 3.20: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα MEC 10 για τις αγωγιμότητες που προστέθηκαν σε 1L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

3.5 Αισθητήρας Chirp!

3.5.1 Χαλαζιακή άμμος

Υγρασία

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.21) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L άμμος με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. παρατηρούμε ότι είναι αρκετά αξιόπιστος. Ο συντελεστής συσχέτισης με τον οποίο θα κρίνουμε την αξιοπιστία του αισθητήρα είναι $R^2 = 0,9049$.

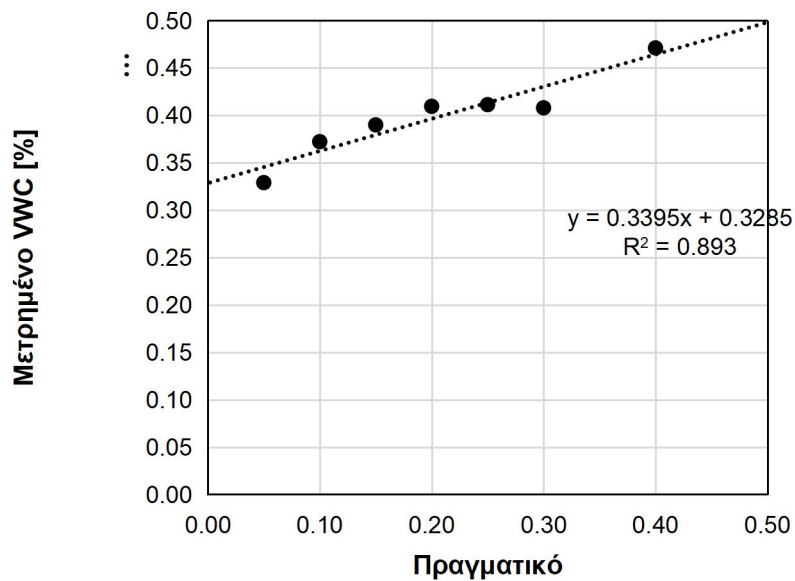


Εικόνα 3.21: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα Chirp! για τις υγρασίες που προστέθηκαν σε 1 L άμμο.

3.5.2 Υδροπονικό υπόστρωμα

Υγρασία

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.22) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L οργανική ουσία με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. βλέπουμε πώς ο αισθητήρας Chirp! έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,893$.

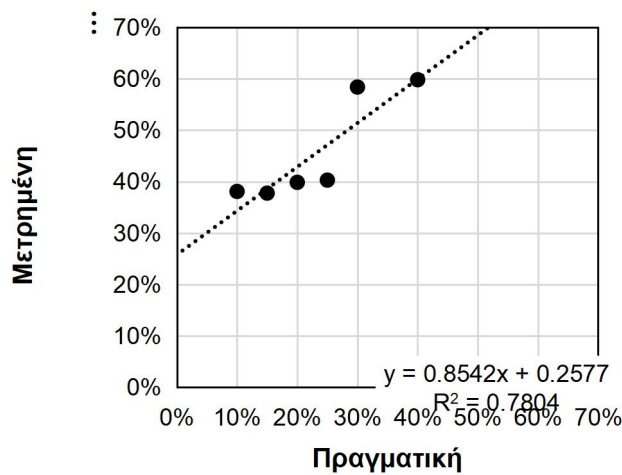


Εικόνα 3.22: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα Chirp! για όλες τις ποσότητες υγρασίας που προστέθηκαν σε 1 L υδροπονικό υπόστρωμα .

3.5.3 Αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

Υγρασία

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.23) παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του αισθητήρα όσο αφορά την υγρασία (VWC) σε σχέση με την πραγματική ποσότητα υγρασίας που προστέθηκε σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος με τα αποτελέσματα του αισθητήρα. Παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα του αισθητήρα Chirp! έχουν ελάχιστες διαφορές από τις πραγματικές τιμές. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,7804$.



Εικόνα 3.23: Η συνολική απόδοση του αισθητήρα Chirp! για όλες τις ποσότητες υγρασίας που προστέθηκαν σε 1 L αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος.

3.6 Συνοπτικά

Στον παρακάτω πίνακα 3.1 αναγράφονται όλες οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης (R^2) και της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) στα διαλύματα NaCl, στην άμμο, στο έδαφος και στο υδροπονικό υπόστρωμα σε σχέση με την υγρασία (VWC) και στην αγωγιμότητα (EC).

Πίνακας 3.1: Απεικονίζονται όλες οι τιμές του συντελεστής συσχέτιση (R^2) και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) για τους αισθητήρες GS3, 5TM, MEC 10 και Chirp! σε διάλυμα NaCl, άμμος, έδαφος και υδροπονικό υπόστρωμα.

Αισθητήρες		Διάλυμα NaCl	Άμμος		Έδαφος		Υπόστρωμα	
		EC	VWC	EC	VWC	EC	VWC	EC
GS3	R^2	0,9991	0,9837	0,8255	0,8918	0,7499	0,9175	0,7906
	RMSE	0,64 mS/cm	2,8%	9,28 mS/cm	4,3%	9,67mS/cm	7,4%	9,6 mS/cm
5TM	R^2	-	0,9797	-	0,9147	-	0,9921	-
	RMSE	-	2,3%	-	4,7%	-	2,7%	-
MEC 10	R^2	0,981* 0,9211**	0,9769	0,8816	0,8998	0,5107	0,9925	0,7290
	RMSE	2.96 mS/cm*	4,4%	9,26 mS/cm	4,9%	9,71 mS/cm	2,1%	9,66 mS/cm
Chirp!	R^2	-	0,9049	-	0,7804	-	0,839	-
	RMSE	-	19,7%	-	22,8%	-	20,5%	-

* EC μεταξύ 0 και 10 mS/cm

** λογαριθμική παλινδρόμηση για EC μεταξύ 0 και 32.6 mS/cm.

4 Συζήτηση

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αξιολόγηση και η ακρίβεια των αισθητήρων έγινε με την σύγκριση του συντελεστή συσχέτισης (R^2) και της ρίζας μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) για τους αισθητήρες GS3, 5TM, MEC 10, Chirp! που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του πειράματος. Η αξιοπιστία εκτιμάται με το συντελεστή συσχέτισης R^2 που κυμαίνεται από την τιμή 0 (δεν είναι αξιόπιστο), μέχρι την τιμή 1 ($R^2=1,0$) τόσο μεγαλύτερη αξιοπιστία θεωρείται ότι διαθέτει ο αισθητήρας. Ως αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας θεωρείται ο συντελεστής συσχέτισης $R^2>0,70$.

Από τον Πίνακα 4.1 βλέπουμε πως ο αισθητήρας GS3 στο διάλυμα NaCl όσον αφορά την αγωγιμότητα (EC) έχει συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,9991$. Αντίθετα, ο αισθητήρας MEC 10 έχει συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,9771$ όταν η αγωγιμότητα κυμαίνεται από 0 έως 10 mS/cm όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.13 η εξίσωση είναι γραμμική, ενώ σε αγωγιμότητα μεταξύ 0 έως 32,6 mS/cm ο συντελεστής συσχέτισης είναι 0,9211. Συνεπώς, ο αισθητήρας MEC 10 αλλάζει συμπεριφορά όταν η EC είναι μεγαλύτερη από 10 mS/cm. Σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.14, η συσχέτιση μεταξύ μετρημένης και παρατηρούμενης αγωγιμότητας είναι λογαριθμική. Επίσης, ο αισθητήρας GS3 στο διάλυμα NaCl έχει ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος $RMSE = 0,64$ mS/cm, ενώ ο αισθητήρας MEC 10 έχει $RMSE = 0,96$ mS/cm. Επόμενος, ο αισθητήρας GS3 είναι περισσότερο ακριβής από τον αισθητήρα MEC 10.

Στην άμμο, οι μετρήσεις υγρασίας του αισθητήρα GS3 έχει υψηλότερο R^2 (0,9837) σε σχέση με αυτά των υπόλοιπων αισθητήρων. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε ότι οι διαφορές μεταξύ των συντελεστών συσχέτισης είναι πολύ μικρές. Πιο συγκεκριμένα, ο αισθητήρας 5TM έχει $R^2= 0,9797$, ο αισθητήρας MEC 10 έχει $R^2= 0,9769$ και ο αισθητήρας Chirp! έχει $R^2 = 0,9049$. Επίσης, στην άμμο το RMSE του αισθητήρα GS3 για μέτρηση υγρασίας είναι 2,8%, ενώ ο αισθητήρα 5TM έχει μικρότερη τιμή RMSE (2,3%), ο αισθητήρας MEC 10 4,4% και τέλος ο αισθητήρας Chirp! παρουσιάζει το υψηλότερο RMSE (19,7%). Συνεπώς, ο αισθητήρας 5TM υπερισχύει όσον αφορά το κριτήριο RMSE, ενώ ο αισθητήρας GS3 υπερισχύει όσον αφορά το κριτήριο R^2 . Σύμφωνα με σχετική έρευνα η οποία υλοποιήθηκε από τους (Ferrarezi, Nogueira and Zepeda, 2020a) , ο αισθητήρας GS3 δεν είναι αποτελεσματικός στον προσδιορισμό VWC. Πιο συγκεκριμένα, το R^2 που υπολόγισαν ήταν 0,72, τιμή που είναι χαμηλότερη από τους υπόλοιπους αισθητήρες και το RMSE είναι 4,9% το οποίο ήταν υψηλότερο σε σχέση με τους υπόλοιπους 11 αισθητήρες που χρησιμοποιήσαν, οι οποίοι είναι η εξής: 10HS, GS1, 5TE, GS650, GS655, CS616, TDR315L, TDR315, TDR310S, TDT-ACC-SEN-SDI, και Hydra Probe. Αυτό το πείραμα υλοποιήθηκε σε

αμμώδη εδάφη. Σε σύγκριση με την υλοποίηση του παρόντος πειράματος, οι Ferrarezi, Nogueira and Zepeda, (2020b) αναφέρουν αντικρουόμενα αποτελέσματα. Όπως αναφέρθηκε προηγούμενος ο GS3 στην άμμο είχε μεγαλύτερο R^2 .

Ο αισθητήρας GS3 όσο αφορά την αγωγιμότητα στην άμμο έχει $R^2 = 0,8255$, ενώ ο αισθητήρας MEC 10 έχει υψηλότερο R^2 (0,8816). Επίσης το RMSE στο αισθητήρα GS3 είναι 9,28 mS/cm ενώ στο αισθητήρα MEC 10 είναι 9,26 mS/cm. Παρατηρούμε πως οι διαφορές μεταξύ των τιμών του R^2 και του RMSE είναι πολύ μικρή. Επομένως ο αισθητήρας MEC 10 μας έχει δώσει καλύτερα αποτελέσματα.

Όσον αφορά τις μετρήσεις υγρασίας στο έδαφος, ο αισθητήρας 5TM έχει υψηλότερο R^2 0,9147 σε σύγκριση με τους υπόλοιπους αισθητήρες. Πιο συγκεκριμένα, ο αισθητήρας GS3 έχει $R^2 = 0,8918$, ο MEC 10 έχει $R^2 = 0,8998$, και ο αισθητήρας Chirp! έχει τη μικρότερη τιμή με $R^2 = 0,7804$. Ο αισθητήρας 5TM υπερισχύει σε σχέση με τους άλλους αισθητήρες στο κριτήριο R^2 . Όσο αφορά το RMSE για τη μέτρηση υγρασία, ο αισθητήρας GS3 έχει χαμηλότερη μέση τιμή σφάλματος όπου είναι 4,3% σε σύγκριση με τους υπόλοιπους αισθητήρες. Πιο συγκεκριμένα, ο αισθητήρας 5TM έχει RMSE =4,7%, ο MEC 10 έχει 4,9% και ο Chirp! έχει RMSE =22,8% όπου έχει και την υψηλότερη μέση τιμή σφάλματος. Επόμενος, ο αισθητήρας GS3 υπερισχύει σε σύγκριση με τους άλλους αισθητήρες.

Για την αγωγιμότητα στο έδαφος ο αισθητήρας GS3 έχει υψηλότερο R^2 (0,7499) από τον αισθητήρα MEC 10 όπου έχει πολύ χαμηλό R^2 (0,5107). Όσο αφορά το RMSE είναι 9,67 mS/cm για τον αισθητήρα GS3 ενώ ο αισθητήρας MEC 10 έχει RMSE = 9,71 mS/cm. Επομένως, ο αισθητήρας 5TM μας έχει δώσει καλύτερα αποτελέσματα για την υγρασία, και για την αγωγιμότητα ο αισθητήρας GS3.

Τέλος στο υδροπονικό υπόστρωμα για την υγρασία παρατηρούμε πως ο MEC 10 έχει μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης 0,9925 από τους υπολοίπους αισθητήρες και έχει πολύ μικρή διαφορά από το αισθητήρα 5TM που έχει 0,9921, ενώ ο GS3 έχει 0,9175 και ο Chirp! έχει το χαμηλότερο R^2 (0,839). Επίσης, ο αισθητήρας MEC 10 έχει το υψηλότερο RMSE που είναι 2,1%, ενώ ο GS3 έχει 7,4%, ο 5TM έχει 2,7% και ο Chirp! έχει την υψηλότερη μέση τιμή σφάλματος που είναι 20,5%. Συνεπώς, και για το R^2 και για το RMSE υπερισχύει ο αισθητήρας MEC 10.

Όσο αφορά την αγωγιμότητα στο υδροπονικό υπόστρωμα η τιμή του R^2 είναι μεγαλύτερη στον αισθητήρα GS3 που είναι 0,7906 ενώ ο MEC 10 έχει $R^2 = 0,7290$. Τέλος το RMSE και για τον αισθητήρα GS3 και τον MEC 10 είναι το ίδιο 9,6 mS/cm. Συνεπώς για την αγωγιμότητα στο υδροπονικό υπόστρωμα υπερισχύει ο αισθητήρας GS3. Σύμφωνα με παρόμοια μελέτη που

πραγματοποίησαν οι Rhie and Kim, (2017) , ο αισθητήρας GS3 έδειξε ικανοποιητικό αποτελέσματα με $R^2 > 0,93$ για όλα τα μείγματα υποστρωμάτων εκτός 100% περλίτη. Σε σύγκριση με το παρόν πείραμα, οι Rhie and Kim, (2017) έδειξαν λοιπόν ότι ο αισθητήρας GS3 μπορεί να είναι ακόμα πιο αξιόπιστος.

Επιπλέον, στη βιβλιογραφία ο αισθητήρας GS3 χρησιμοποιήθηκε και για άλλα τύπου εδάφη όπως η αργιλώδης ιλύς. Στην σχετική έρευνα που πραγματοποίησε ο Son, Shin and Cho, (2017) έδειξαν πως ο αισθητήρας GS3 σε αργιλώδη ιλύ ο συντελεστής συσχέτισης ήταν R^2 0,96 και το RMSE ήταν 0.31%. Αυτό σημαίνει πως ο αισθητήρας είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα

Όσο αφορά την αγωγιμότητα βρέθηκε σχετική έρευνα που πραγματοποίησε ο Bañón et al., (2021) χρησιμοποίησαν τον αισθητήρα GS3 για την εκτίμηση της αλατότητας του υποστρώματος και βρέθηκαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι 0,992. Σε σύγκρισή με το παρόν πείραμα ο αισθητήρας ήταν αρκετά ακριβής στο διάλυμα NaCl και στην άμμο.

5 Συμπέρασμα

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι θα ήταν αποτελεσματικό να γίνεται βαθμονόμηση σε οποιοδήποτε αισθητήρα χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα με το πόσο διαδομένος και αξιόπιστος είναι. Όλοι οι αισθητήρες έχουν μία διαφορά στην τυπική απόκλιση και στο τυπικό σφάλμα όσο ακριβείς και αν είναι στις μετρήσεις τους. Παρατηρήθηκε πως οι αισθητήρες έχουν διαφορετική τιμή σφάλματος, κάτι που επηρεάζεται από τον τύπο του υποστρώματος που θα χρησιμοποιηθεί για να πραγματοποιηθεί το πείραμα. Στα 3 διαφορετικά δείγματα υποστρωμάτων παρατηρήθηκε διαφορετική τιμή σφάλματος και διαφορετική συμπεριφορά και από τους τέσσερις αισθητήρες, όσο αφορά την υγρασία και την αγωγιμότητα. Οι βαθμονόμηση του αισθητήρα GS3 έχει καταγράψει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην άμμο άλλο όχι και στα υπόλοιπα είδη εδαφών. Επομένως οι αξιοπιστία των αισθητήρων διαφέρει από έδαφος σε έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, ο αισθητήρας GS3 όσον αφορά το διάλυμα NaCl για της μετρήσεις της αγωγιμότητα έχει δώσει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον αισθητήρα MEC 10. Για την άμμο στην υγρασία ο GS3 υπερéχει από της υπόλοιπους αισθητήρες διότι έχει υψηλότερο R^2 . Για την αγωγιμότητα στην άμμο ο αισθητήρας MEC 10 είναι περισσότερο αξιόπιστος. Για της μετρήσεις της υγρασίας συνιστάτε ο αισθητήρας 5TM και της αγωγιμότητας στο έδαφος συνιστάτε ο αισθητήρας GS3. Τέλος, για το υδροπονικό υπόστρωμα στην υγρασία υπερéχει ο αισθητήρας MEC 10 ενώ για την αγωγιμότητα ο αισθητήρας GS3. Ανάλογα με το κόστος, την αξιοπιστία και την χρήση του αισθητήρα θα πρέπει επιλέγονται οι κατάλληλη αισθητήρες Τα κόστη για τους τέσσερις αισθητήρες που χρησιμοποιήση

στο παρόν πείραμα είναι ως εξής: για τον αισθητήρα GS3 είναι 700 ευρώ και η μέθοδος μέτρησης είναι FDR, για τον αισθητήρα 5TM είναι 200 ευρώ και η μέθοδος μέτρησης είναι FDR ενώ για τον MEC 10 είναι 100 ευρώ με μέθοδο μέτρησης FDR και για τον αισθητήρα Chirp! είναι 14 δολάρια και η μέθοδος μέτρησης είναι capacitive. Επομένως για την πραγματοποιήσει κάποιας έρευνας σε εργαστηριακό χώρο για την καταγραφή της αγωγιμότητας και της υγρασίας θα ήταν περισσότερο αποδοτικό να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρες εξαιρετικής ακρίβειας που ανέφερα παραπάνω, όμως εάν γίνετε χρησιμοποιήσει του αισθητήρα μόνο για παρακολούθηση της υγρασία ή της αγωγιμότητας σε κάποια καλλιέργεια ώστε να γίνεται σωστή διαχείριση αρδευτικού νερού για την μείωση της υπερβολικής αρδεύσεις και κατανάλωση ενέργειας θα ήταν ποιο αποδοτικό εάν χρησιμοποιηθεί αισθητήρας με χαμηλό κόστος και ικανοποιητική ακρίβεια όπως είναι ο αισθητήρας MEC 10.

6 Βιβλιογραφία

6450 Watermark Soil Moisture Sensors - Maranata-Madrid SL - NIF B-85746204 (2022). Available at: https://www.alphaomega-electronics.com/en/sensors-probes/2418-6450-watermark-soil-moisture-sensors.html?search_query=6450WD&results=2 (Accessed: 14 November 2022).

Bañón, S. *et al.* (2021) ‘Assessment of soil salinity indexes using electrical conductivity sensors’, *Scientia Horticulturae*, 285, p. 110171. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110171>.

Buy AO-520-01 Soil Moisture and Temperature Measurement Sensors (2022). Available at: https://www.alphaomega-electronics.com/en/sensors-for-weather-stations/3619-ao-520-01-soil-sensor-to-integrate-humidity-and-temperature-measurement.html?search_query=AO-520-01+&results=1 (Accessed: 14 November 2022).

Fdr Mec10 Soil Temperature And Moisture Sensor With Rs485 Output - Buy Soil Moisture Sensor,Mce10,Soil Moisture And Temperature Product on Alibaba.com (2022). Available at: https://www.alibaba.com/product-detail/Soil-Moisture-Sensor-Rs485%20Sensor%20Soil_62043955900.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.5c80347ePvhZcb&s=p (Accessed: 14 November 2022).

Ferrarezi, R.S., Nogueira, T.A.R. and Zepeda, S.G.C. (2020a) ‘Performance of Soil Moisture Sensors in Florida Sandy Soils’, *Water*, 12(2), p. 358. Available at: <https://doi.org/10.3390/w12020358>.

Ferrarezi, R.S., Nogueira, T.A.R. and Zepeda, S.G.C. (2020b) ‘Performance of Soil Moisture Sensors in Florida Sandy Soils’, *Water*, 12(2), p. 358. Available at: <https://doi.org/10.3390/w12020358>.

GroPoint Classic (2022). Available at: <https://environment.pileus.si/GroPoint-Classic?search=GroPoint%20Classic> (Accessed: 14 November 2022).

GroPoint Profiling – Stevens Water (2022). Available at: <https://stevenswater.com/products/gropoint-profiling/> (Accessed: 14 November 2022).

Harzing, A.-W.K. and Wal, R. van der (2008) ‘Google Scholar as a new source for citation analysis’, *Ethics in Science and Environmental Politics*, 8(1), pp. 61–73. Available at: <https://doi.org/10.3354/ESEP00076>.

Page, M.J. *et al.* (2021) ‘The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews’, *BMJ*, 372. Available at: <https://doi.org/10.1136/BMJ.N71>.

PRICE LIST 2022 PRODUCTS AND SERVICES CATALOG (2022). Available at: https://www.fiedler.company/sites/default/files/dokumenty/cenik_2022e_v104b.pdf (Accessed: 14 November 2022).

Purchase Soil moisture, temperature and EC sensor, AO-520-02 (2022). Available at: https://www.alphaomega-electronics.com/en/conductivity-in-soil/5671-ao-520-02-integrated-soil-moisture-temperature-ec-sensor-0-2vdc-or-rs485-or-sdi-12-output.html?search_query=AO-520-02&results=1 (Accessed: 14 November 2022).

Rhie, Y.H. and Kim, J. (2017) ‘Changes in physical properties of various coir dust and perlite mixes and their capacitance sensor volumetric water content calibrations’, *HortScience*, 52(1), pp. 162–166. Available at: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11362-16>.

Rk520-01 Rs485 4-20ma 0-5v Output Agriculture Soil Temperature Moisture Sensor 4-20ma Transmitter Probe Manufacture - Buy Soil Moisture 4-20ma,Agriculture Soil Sensor,Rs485 Soil Moisture Sensor Product on Alibaba.com (2022). Available at: https://www.alibaba.com/product-detail/Rs485-Soil-Moisture-Sensor-RK520-01_60790215466.html?spm=a2700.7724857.topad_classic.d_image.5c80347ePvhZcb (Accessed: 14 November 2022).

Sem2253 Soil Temperature Moisture Sensor 4-20ma Rs485 Output 3 Way Soil Conductivity Ec Salinity Sensor Probe Rod - Buy Temperature Instruments And Humidity Sensor,Soil Temperature

Moisture Sensor, Soil Salinity Sensor Probe Product on Alibaba.com (2022). Available at: https://www.alibaba.com/product-detail/SEM2253-Soil-temperature-moisture-sensor-4_1600233370690.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.5c80347ePvhZcb (Accessed: 14 November 2022).

Sensor de Humidade do Solo Econômico (2022). Available at: https://www.alphaomega-electronics.com/en/sensors-probes/839-economic-soil-moisture-sensor.html?search_query=VH400+&results=9 (Accessed: 14 November 2022).

Sentek Drill & Drop Soil Moisture Probe, 120 cm (2022). Available at: <https://www.meteoshop.gr/product/501/eksoplismos-davis-aisthitires-sentek-drill-soil-moisture-probe,-120-cm/> (Accessed: 7 November 2022).

SM-100 WaterScout Soil Moisture Sensor with 1,8m cable - Maranata-Madrid SL - NIF B-85746204 (2022). Available at: https://www.alphaomega-electronics.com/en/sensors-probes/2554-sm-100-waterscout-soil-moisture-sensor-with-18m-cable.html?search_query=sm-100&results=1 (Accessed: 14 November 2022).

Soil Moisture & Temperature & EC Sensor MODBUS-RTU RS485 (2022). Available at: <https://www.antratek.com/soil-moisture-temperature-ec-sensor-modbus-rtu-rs485> (Accessed: 14 November 2022).

Soil Npk Ec Conductivity Temperature Moisture Ph Sensor 7 In 1 Digital Soil Ph Probe Meter Tester - Buy Soil Ph Meter, Soil Ph Tester, Soil Ph Sensor Product on Alibaba.com (2022). Available at: https://www.alibaba.com/product-detail/Probe-Temperature-Soil-Soil-NPK-EC_1600106508448.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.4d314b5cMyxS5y&s=p (Accessed: 14 November 2022).

Son, J.-K., Shin, W.-T. and Cho, J.-Y. (2017) 'Laboratory and Field Assessment of the Decagon 5TE and GS3 Sensors for Estimating Soil Water Content in Saline-Alkali Reclaimed Soils', *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(19), pp. 2268–2279. Available at: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1411501>.

Stevens HydraProbe Soil Moisture Sensors (2022). Available at: <https://www.fondriest.com/stevens-hydraprobe-soil-moisture-sensors.htm> (Accessed: 8 November 2022).

Truebner SMT100 RS485 - ASCII. Soil humidity and temperature sensor, (2022). Available at: <https://dvs-beregnung.de/truebner-smt100-rs485-ascii-soil-moisture-and-temperature->

sensor?gclid=CjwKCAiA68ebBhB-EiwALVC-No8r-
bYBACzbUHsKL4xKeMY9i3xe7s25HW6e127n4bVAD7WMFLmRGhoCWVEQAvD_BwE
(Accessed: 14 November 2022).

Ιωάννης Ν Θεριός (1996) *Ανόργανη θρέψη και λιπάσματα*. Α. Θεσσαλονίκη: Γαρταγάνη.

Σινάννης, Κ. (2015) *ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ*. Edited by Σ. Λουκέρη. Αθήνα: ΣΕΑΒ. Available at: www.kallipos.gr.

Σινάννης, Κ. (2022) *Εδαφολογία. [Προπτυχιακό Εγχειρίδιο]*. Available at: <https://doi.org/10.57713/kallipos-14>.