

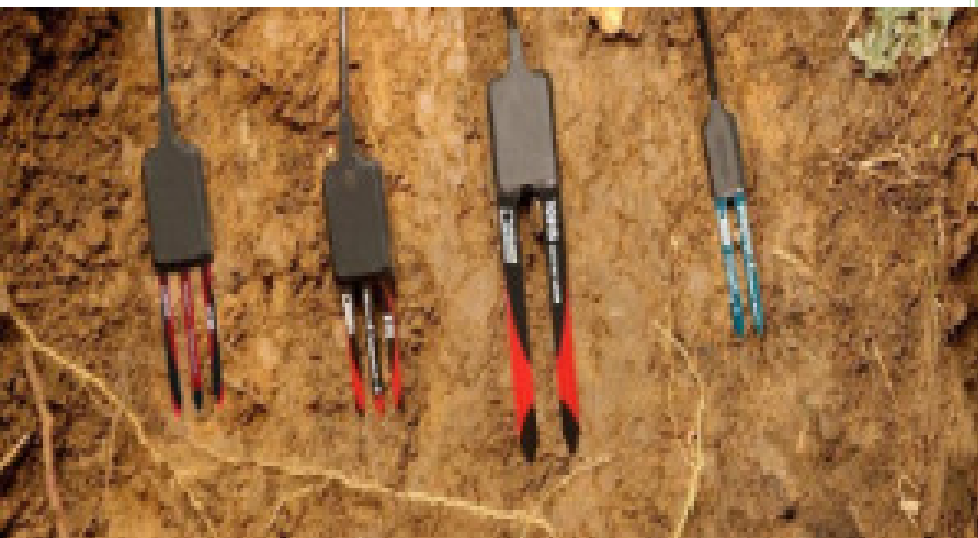


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική αξιολόγηση μεθόδων βαθμονόμησης αισθητήρων εδαφικής υγρασίας



ΝΙΚΟΛΑΟΣ Φ. ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ
Α.Μ.: 12038

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΛΑΜΟΣ
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΜΑΛΙΑΔΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που με βοήθησαν στην υλοποίηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας. Ιδιαίτερα:

1. Τον Δρ. Μαλάμο Νικόλαο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Πατρών, υπεύθυνο του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής και επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να εκπονίσω τη συγκεκριμένη εργασία υπό την επίβλεψή του, καθώς και για την καθοδήγησή του σε καίρια σημεία της πειραματικής διαδικασίας, της συγγραφής αλλά και της παρουσίασης της πτυχιακής μου εργασίας.
2. Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Πατρών, Ζερβουδάκη Γεώργιο, υπεύθυνο του εργαστηρίου Φυσιολογίας, Βιοχημείας και Ανατομίας Φυτών, για την διευκόλυνση που προσέφερε ώστε να χρησιμοποιήσω το ξηραντήριο του εργαστηρίου του για την υλοποίηση των πειραμάτων.
3. Τον κύριο Χατζέλα Χρήστο, πτυχιούχο του προαναφερθέντος τμήματος, που ως μέντορας μου στο εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής όλα αυτά τα χρόνια μου δίδαξε όλες τις βασικές τεχνικές πάνω στην Γεωργική Υδραυλική και παραμένει ακόμα και σήμερα αδελφικός μου φίλος.
4. Την κυρία Ηλιοπούλου Κωνσταντίνα, πτυχιούχο του προαναφερθέντος τμήματος, που με την καθοδήγησή της και τις γνώσεις της, με βοήθησε στην εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας. Την ευχαριστώ που με τιμά με την φιλία της.
5. Τον κύριο Καλομοίρη Νικόλαο και τον κύριο Πασχαλίδη Σάββα, φοιτητές του τμήματος, αγαπημένους μου φίλους, οι οποίοι με βοήθησαν στις εργασίες συγκέντρωσης του εδάφους και την μεταφορά του στο εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής. Τους ευχαριστώ για το κουράγιο τους.
6. Την κυρία Δημακοπούλου Βασιλική, πτυχιούχο του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών για την βοήθεια της στην δημιουργία των διαγραμάτων.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	5
1.2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ	5
1.3. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	8
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	8
2.2 ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	8
2.3 ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	11
2.4 ΔΙΗΘΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	12
2.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑ	13
2.6 ΕΔΑΦΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ.....	15
2.7 ΥΓΡΑΣΙΑ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΚΑΙ ΥΔΑΤΟΪΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	17
2.8 ΣΗΜΕΙΟ ΜΟΝΙΜΗΣ ΜΑΡΑΝΣΕΩΣ	18
2.9 ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΚΑΙ ΩΦΕΛΙΜΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	21
3.1 ΑΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	21
3.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΠΥΡΙΑΝΤΗΡΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 105 °C.....	21
3.2 ΕΜΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	23
3.2.1 ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....	69
4.1. Η ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΕΙ Η ΜΕΤΕΡ GROUP (ΠΡΩΗΝ DECAGON).....	69
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	75
4.2.1 ΠΕΙΡΑΜΑ 1	75
4.2.2 ΠΕΙΡΑΜΑ 2	78
4.2.3. ΠΕΙΡΑΜΑ 3 (ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 2)	81
4.2.4 ΠΕΙΡΑΜΑ 4.....	84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	86
ΠΕΙΡΑΜΑ #1	86
ΠΕΙΡΑΜΑ #2	88
ΠΕΙΡΑΜΑ #3 (ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 2)	91
ΠΕΙΡΑΜΑ #4	93
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	110
ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	110
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η ζωή και ο πολιτισμός γεννήθηκαν και εξελίχθηκαν εκεί που υπήρχε νερό. Δεν υπάρχει ανθρώπινη δραστηριότητα που να μην εξαρτάται άμεσα ή έμμεσα από το νερό. Με τον σχηματισμό των πρώτων κοινωνιών αυξήθηκε η ανάγκη του ανθρώπου για τροφή χωρίς να χρειάζεται να μεταναστεύει. Έτσι άρχισε να καλλιεργεί την γη και ανέπτυξε την γεωργία αφήνοντας τη ζωή του τροφосуλλέκτη. Η καλλιέργεια και η ανάπτυξη των φυτών είναι αδύνατη χωρίς την απαραίτητη για τις ανάγκες εδαφική υγρασία, η οποία προέρχεται είτε από το νερό της βροχής είτε από την προσθήκη νερού στο έδαφος (άρδευση). Η προσθήκη νερού αυξάνει την ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών, αλλά συγχρόνως δίνει την δυνατότητα να ευδοκιμούν φυτά που οι ανάγκες σε νερό υπερβαίνουν αυτές που μπορούν να ικανοποιηθούν με την βροχή.

Η άρδευση συνεπώς είναι μια από τις παρεμβάσεις του ανθρώπου στο φυσικό οικοσύστημα, που επιδρά καθοριστικά στην οικονομική δράση και κοινωνική ανάπτυξη, και στη πολιτισμική εξέλιξη του ανθρώπου. Οι πρώτες κοινωνίες ανέπτυξαν την τεχνολογία της άρδευσης στις τέσσερις μεγάλες ποτάμιες κοιλάδες: του Νείλου στην Αίγυπτο, του Τίγρη και του Ευφράτη στην Μεσοποταμία, του Κίτρινου ποταμού στην Κίνα και του Ινδού στην Ινδία. Σε αυτές τις περιπτώσεις γινόταν πλημμυρίζοντας με νερό περιοχές, οι οποίες περιβάλλονταν με χωμάτινα φράγματα. Η εξέλιξη των μεθόδων της άρδευσης ακολουθεί την εξέλιξη των καλλιεργητικών τεχνικών που διαχρονικά υποστηρίζουν τις ανάγκες της γεωργικής παραγωγής και των φιλοτεχνικών δραστηριοτήτων γενικότερα. Τα σύγχρονα συστήματα άρδευσης όπως εφαρμόζονται ειδικά στην κηποτεχνία, είναι δίκτυα που έχουν στόχο την ομοιόμορφη και ορθολογική κατανομή του νερού, ώστε να εξασφαλίζονται στα φυτά οι καλύτερες δυνατές συνθήκες ανάπτυξης τους, για την θετική βιοκλιματική και αισθητική παρέμβαση τους τόσο στο ανθρωπογενές όσο και στο φυσικό περιβάλλον.

1.2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ

Ο βασικός σκοπός κάθε επιστημονικής και τεχνολογικής εφαρμογής είναι η γενικότερη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος και φυσικά, της ποιότητας ζωής. Η πρόοδος στην άρδευση στην διάρκεια της ανθρώπινης εξέλιξης στην γεωργία έχει βελτιώσει την ποιότητα ζωής του καλλιεργητή, με αποτέλεσμα να εξοικονομηθούν υδάτινοι πόροι, ανθρώπινο δυναμικό και ώρες εργασίας. Ένα πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η μέτρηση της εδαφικής υγρασίας η οποία είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του όγκου του νερού που θα εφαρμόσουμε στο χωράφι μας έτσι ώστε ο όγκος αυτός να είναι αρκετός για την άρδευση του

χωραφιού μας αλλά και να μην σπαταλήσει νερό από τον υδροφόρο ορίζοντα, βλάπτοντας το περιβάλλον. Στην εποχή μας η χρήση αισθητήρων υγρασίας εδάφους για την αποτελεσματικότερη χρήση του νερού άρδευσης στο πλαίσιο των αειφόρων γεωργικών πρακτικών γίνεται συνεχώς και πιο έντονη. Οι αισθητήρες αυτοί συχνά απαιτούν βαθμονόμησης για τους διάφορους τύπους εδάφους και τα διάφορα επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού άρδευσης ώστε να έχουν αυξημένη ακρίβεια μέτρησης.

Στην ακόλουθη εργασία θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τρία (3) πειράματα τα οποία βαθμονομούν συγκεκριμένους ηλεκτρομαγνητικούς αισθητήρες εδαφικής υγρασίας, οι οποίοι θα παρουσιαστούν παρακάτω, με την μέθοδο εύρεσης εδαφικής υγρασίας του πυριαντηρίου. Συγκεκριμένα θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία δείχνουν τις διαφορές και τις ομοιότητες των ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων μεταξύ τους αλλά και των δύο μεθόδων αντίστοιχα.

1.3. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελείται από πέντε (5) κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο, που είναι εισαγωγικό δίνεται ο σκοπός και η δομή της εργασίας.

Στο 2^ο κεφάλαιο δίνεται αναλυτική περιγραφή για τις αρχές, τις έννοιες και τους νόμους που οδηγούν στη σωστή εφαρμογή των αρδεύσεων. Σημαντική έκταση δίνεται στο έδαφος σαν μέσο διακινήσεως και αποθηκεύσεως του νερού, στην κατανάλωση νερού από τις καλλιέργειες και στην εξατμισοδιαπνοή.

Στο 3^ο κεφάλαιο θα γίνει η αναλυτική περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων εδαφικής υγρασίας, θα περιγραφούν οι μέθοδοι εύρεσης εδαφικής υγρασίας όπως η μέθοδος του πυριαντηρίου αλλά και η μέθοδος εύρεσης εδαφικής υγρασίας μέσω διηλεκτρικών αισθητήρων.

Στο 4^ο και 5^ο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα πειράματα που διεξάχθηκαν, τα αποτελέσματα των εν λόγω πειραμάτων, οι δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε και διάφοροι προβληματισμοί που δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια εξαγωγής των πειραμάτων.

Στο 6^ο, και τελευταίο, κεφάλαιο, θα παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό από την διεξαγωγή των πειραμάτων.



Εικόνα 1 Απεικόνιση ριζικού συστήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Το νερό αποτελεί βασικό στοιχείο του κύκλου της ζωής. Σε δυναμικά αναπτυσσόμενες καλλιέργειες, το νερό είναι τέσσερις με οχτώ φορές παραπάνω από το βάρος των στερεών συστατικών των φυτών. Ακόμη, για την παραγωγή μιας μονάδας ξερής φυτικής ουσίας χρειάζεται να περάσουν μέσα από τα φυτά πολλές εκατοντάδες μονάδες νερού που χάνονται στην ατμόσφαιρα με την διαδικασία της διαπνοής.

Τα φυτά παίρνουν το νερό από το έδαφος. Με την έννοια αυτή, το έδαφος μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μια αποθήκη που δέχεται νερό με τη μορφή βροχής ή αρδεύσεως το οποίο στη συνέχεια διαθέτει στα φυτά. Για να είναι το εδαφικό νερό χρήσιμο στις καλλιέργειες πρέπει να κρατιέται ανάμεσα σε ορισμένα όρια. Αν υπάρχει υπέρβαση των ορίων αυτών, το νερό γίνεται επιζήμιο και πρέπει να απομακρύνεται με στράγγιση. Αντίθετα, αν το εδαφικό νερό πέσει κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια, οι καλλιέργειες δεν μπορούν να αναπτυχθούν κανονικά οπότε το νερό πρέπει να προστεθεί με άρδευση. Για την σωστή άρδευση και στράγγιση είναι απαραίτητη η σε βάθος γνώση των νόμων που διέπουν την κίνηση, ανακατανομή και συγκράτηση του νερού στο έδαφος. Το νερό χάνεται από τα χωράφια με τις διαδικασίες της διαπνοής και της εξατμίσεως. Εξατμηση και διαπνοή είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων που έχουν σχέση με τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών, τη διαθεσιμότητα ενέργειας και την κατάσταση που επικρατεί στην ατμόσφαιρα στην περιοχή του φυλλώματος των καλλιεργειών. Πηγή ενέργειας για τα φυτά είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Η κατάσταση που επικρατεί στην ατμόσφαιρα διαμορφώνεται κατά κύριο λόγο από την ταχύτητα του ανέμου, τη σχετική υγρασία και την θερμοκρασία.

2.2 ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Το έδαφος, με τη γεωγραφική του έννοια, μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σύνθετο σύστημα που ταυτόχρονα είναι μια αποθήκη θρεπτικών στοιχείων, ένα περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται και δρα πλήθος μικροοργανισμών, ένα μέσο στερεώσεως των φυτών, ένα μέσο διακινήσεως του νερού προς όλες τις κατευθύνσεις και μια αποθήκη νερού από την οποία τα φυτά αντλούν την απαραίτητη για την ανάπτυξη τους υγρασία. Μητρικό υλικό των ορυκτών εδαφών αποτελούν τα χαλαρά συγκρατούμενα τεμαχίδια αποσαθρωμένων πετρωμάτων ή ίζηματογενή υλικά διαφόρων ειδών και προελεύσεων. Η φυσική και χημική διάβρωση που δρα χωρίς διακοπή πάνω στα υλικά αυτά, έχει σαν αποτέλεσμα την κατά βάθος διάσθρωση των εδαφών.

Ο τρόπος εναλλαγής των στρώσεων και το είδος των υλικών από τα οποία αποτελούνται επηρεάζουν σε βάθος και πυκνότητα ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών όπως και την κίνηση, ανακατανομή και αποθήκευση του νερού. Βασικά φυσικά χαρακτηριστικά ενός εδάφους είναι η υφή και η δομή. Εδαφική υφή είναι η ποσοστιαία αναλογία των διαφόρου μεγέθους ορυκτών σωματιδίων που απαρτίζουν το έδαφος. Εδαφική δομή είναι ο τρόπος διατάξεως των σωματιδίων αυτών για τον σχηματισμό ομάδων ή συσσωματωμάτων. Εδαφική υφή και δομή σε συνδυασμό, ρυθμίζουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο εφοδιασμού και διακίνησης του νερού στο έδαφος. Η ταξινόμηση των εδαφικών σωματιδίων γίνεται με μηχανική ανάλυση. Οι τρόποι που γίνεται η ανάλυση αυτή είναι παγκόσμια τυποποιημένοι. Τα εδάφη διακρίνονται ανάλογα με τη περιεκτικότητά τους σε άμμο, ιλύ και άργιλο σε 12 τύπους υφής που δίνονται στον πίνακα 1.

Ταξινόμηση των εδαφικών σωματιδίων (κόκκων) κατά το USDA

Χαρακτηρισμός σωματιδίων	Διάμετρος κόκκων, mm	Αριθμός κόκκων ανά gr	Επιφάνεια κόκκων, cm ² /gr
(1)	(2)	(3)	(4)
Άμμος	2,00 – 0,05		
Πολύ χονδρή	2,00 – 1,00	90	11
Χονδρή	1,00 – 0,50	720	23
Ενδιάμεση	0,50 – 0,25	5700	45
Λεπτή	0,25 – 0,10	46000	91
Πολύ λεπτή	0,10 – 0,05	722000	227
Ιλύς	0,05 – 0,002	5776000	454
Άργιλλος	< 0,002	90261000	8000000

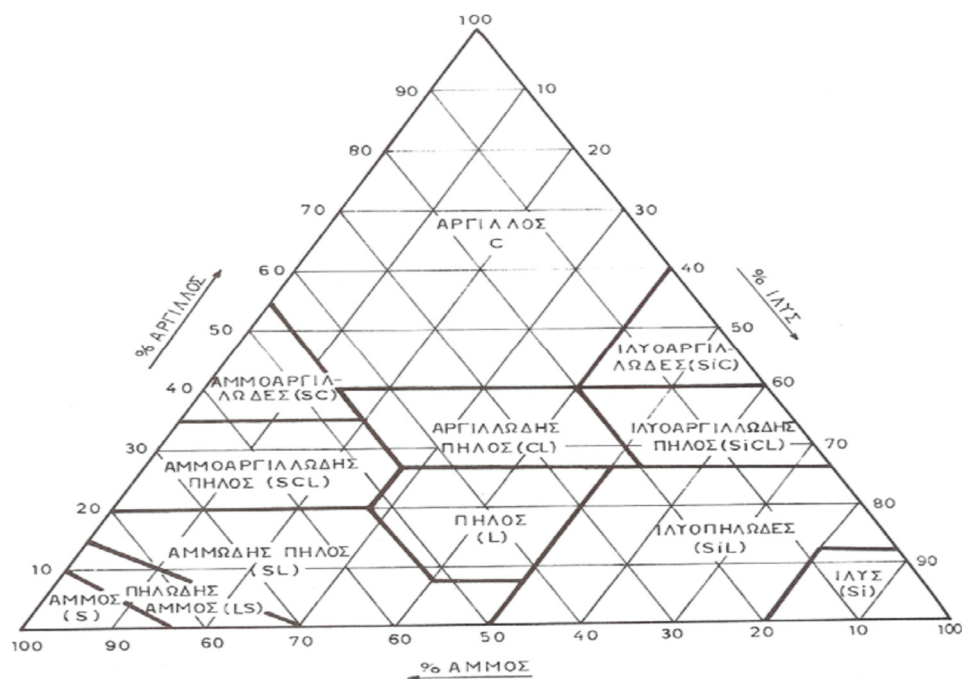
Πίνακας 1 Ταξινόμηση των εδαφικών σωματιδίων

Η δομή ενός εδάφους μπορεί να είναι ομοιόμορφη σε όλο το βάθος του ή να διαφέρει από ορίζοντα σε ορίζοντα, με συννηθέστερη την δεύτερη περίπτωση.

Τα εδάφη ταξινομούνται σε έξι (6) βασικούς τύπους που είναι:

1. Τα ελαφρά μονόκοκκα
2. Τα βαρέα μονόκοκκα
3. Κυβικής μορφής
4. Πλακώδη
5. Πρισματικά
6. Κοκκώδη

- ✚ Τα ελαφρά μονόκοκκα εδάφη απαρτίζονται από σωματίδια με ομοιόμορφους κόκκους τις τάξεως της άμμου, στερούνται δομή και επιτρέπουν την εύκολη διείσδυση και διακίνηση του νερού.
- ✚ Τα βαρέα μονόκοκκα απαρτίζονται από κόκκους της τάξεως της αργίλου. Δεν έχουν δομή και μοιάζουν με συμπαγή άμορφη μάζα, με αποτέλεσμα το νερό να κινείται μέσα σε αυτά τα εδάφη πολύ δύσκολα.
- ✚ Στα κυβικής μορφής εδάφη οι κόκκοι σχηματίζουν συσσωματώματα που έχουν μορφή κύβων και επιτρέπουν καλή διακίνηση του νερού.
- ✚ Τα πλακώδη αποτελούνται από πλατιά και λεπτά συσσωματώματα στα οποία η πλευρική κίνηση του νερού γίνεται εύκολα σε αντίθεση με την κατακόρυφη που γίνεται με δυσκολία.
- ✚ Στα πρισματικά εδάφη τα συσσωματώματα έχουν την μορφή πρισμάτων με μακρύ τον κατακόρυφο άξονα τους και παρουσιάζουν εύκολη διείσδυση και κατακόρυφη κίνηση του νερού.
- ✚ Τα κοκκώδη απαρτίζονται από σφαιρικά συσσωματώματα και εκτελούν καλή κίνηση του νερού προς όλες τις κατευθύνσεις.



Σχήμα 1 Κατάταξη εδαφών σε τύπους υφής ανάλογα με την ποσοστιαία αναλογία σε άμμο, ιλύ και άργιλο σύμφωνα με το USDA.

2.3 ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Ο θεμελιώδης νόμος για την κίνηση του νερού σε πορώδη μέσα διατυπώθηκε από τον Darcy το 1856 και είναι ο ακόλουθος: Η ροή του νερού σε ένα πορώδες μέσο είναι ανάλογη προς την υδραυλική κλίση και ενός παράγοντα, γνωστού σαν συντελεστή υδροπερατότητας, που είναι χαρακτηριστικός του πορώδους μέσου. Η βασική σχέση που εκφράζει τον νόμο αυτό είναι:

$$Q = -K \frac{dH}{dL} A$$

Εξίσωση 1 Νόμος Darcy

Όπου Q είναι η παροχή, A είναι η διατομή της ροής, dH/dL είναι η υδραυλική κλίση και K είναι ο συντελεστής υδατοπερατότητας.

Ο νόμος του Darcy ισχύει για κορεσμένη και ακόρεστη ροή, με την προϋπόθεση ότι η ροή αυτή είναι στρωτή. Αν η ροή είναι κορεσμένη, ο συντελεστής υδατοπερατότητας έχει σταθερή τιμή που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου. Στη περίπτωση αυτή το K λέγεται υδραυλική αγωγιμότητα. Αν η ροή είναι ακόρεστη ο συντελεστής υδατοπερατότητας παίρνει διάφορες τιμές που είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών του πορώδους μέσου και τις περιεχόμενης σε αυτό υγρασίας. Το K στη περίπτωση αυτή λέγεται τριχοειδής αγωγιμότητα.

Σε ένα κορεσμένο έδαφος η κίνηση του νερού μπορεί να είναι οριζόντια, κατακόρυφη ή προς οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση (Elmaloglou and Malamos (2007)). Η ανάλυση της ροής για καθεμία από τις περιπτώσεις αυτές γίνεται χωριστά με τη βοήθεια εδαφικών στηλών. Σε εδάφη που αποτελούνται από δυο ή περισσότερες εδαφικές στρώσεις για να είναι δυνατή η εφαρμογή του νόμου του Darcy πρέπει η ροή του νερού σε κάθε στρώση χωριστά να είναι στρωτή.

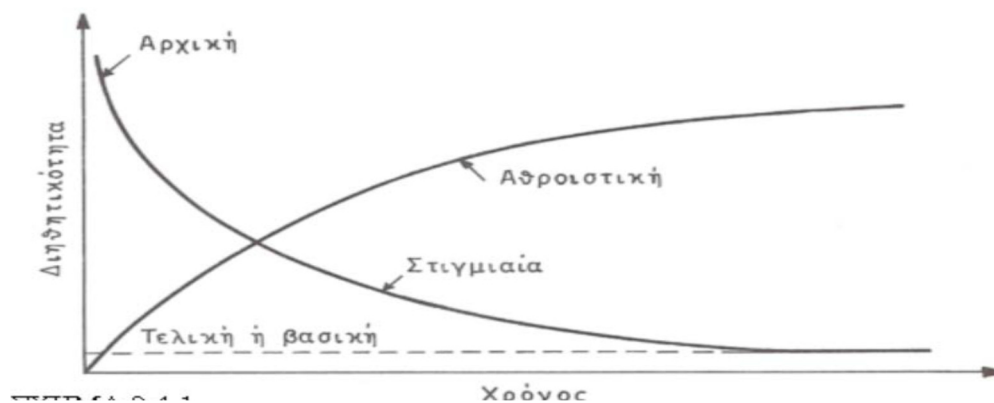
Στο επιφανειακό έδαφος αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα των φυτών που είναι κατά κανόνα ακόρεστο. Εκεί βρίσκονται οι πόροι του εδάφους (νερό και αέρας). Έτσι η εδαφική υγρασία βρίσκεται κάτω από αρνητική πίεση που μπορεί να θεωρηθεί σαν ίση και αντίθετη με τη δύναμη που χρειάζεται για την απομάκρυνση του νερού από τους εδαφικούς πόρους. Αν ένα έδαφος αρχικά κορεσμένο με νερό αφηθεί να στραγγίσει, πρώτα αδειάζουν από το νερό οι πόροι με τη μεγαλύτερη διάμετρο και ακολουθούν αυτοί με τη μικρότερη. Όσο λιγότερο νερό μένει στο έδαφος τόσο πιο ισχυρά συγκρατιέται. Αυτή η ικανότητα (δύναμη) συγκρατήσεως κατά κύριο λόγο εξαρτάται:

1. Από το μέγεθος, το σχήμα και τη κατανομή των εδαφικών πόρων

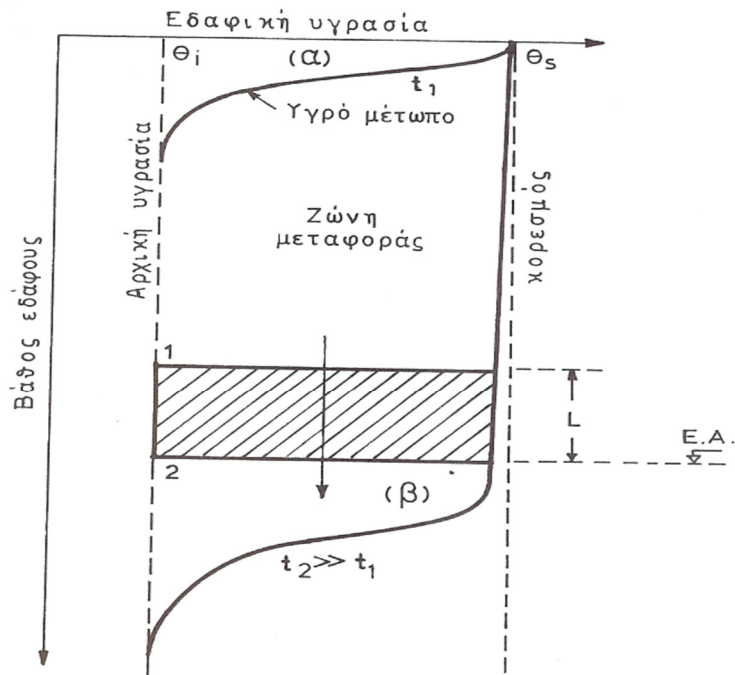
2. Τη γωνία επαφής του νερού με τα εδαφομόρια που περιβάλλουν τους πόρους
3. Την επιφανειακή τάση.

2.4 ΔΙΗΘΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Στη διάρκεια μιας βροχής ή άρδευσης το νερό κινείται, δια της επιφάνειας του εδάφους, προς βαθύτερα στρώματα. Η διήθηση αυτή του νερού στο έδαφος, που εξαρτάται από την κατάσταση της επιφάνειας, τη δομή και την υφή, τη σε βάθος ομοιογένεια και στα αρχικά στάδια, από την εδαφική υγρασία, αποτελεί το φαινόμενο της διηθήσεως. Όταν ένα έδαφος είναι αρχικά ξερό και δέχεται στην επιφάνεια του νερό, διαμορφώνεται μια αρκετά σαφής διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο έδαφος που έχει ήδη υγρανθεί από το κατερχόμενο νερό και στο έδαφος που ακόμη είναι ξερό. Η διαχωριστική αυτή επιφάνεια λέγεται υγρό μέτωπο ή μέτωπο προσπελάσεως. Η υγρή περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στη επιφάνεια του εδάφους και το μέτωπο προσπελάσεως λέγεται ζώνη μεταφοράς. Η ζώνη αυτή επιμηκύνεται συνέχεια όσο κρατάει η εφαρμογή του νερού, έχει σχεδόν σταθερή περιεκτικότητα σε νερό με βαθμό κορεσμού 80% - 95% και σχεδόν σταθερό, ελαφρά αρνητικό, ύψος πίεσεως που κυμαίνεται από -5cm μέχρι -25cm. Η ταχύτητα με την οποία το νερό διηθείται στο έδαφος δεν είναι σταθερή με το χρόνο. Αρχικά η ταχύτητα αυτή είναι πολύ μεγάλη αλλά, με τη πάροδο του χρόνου, ελαττώνεται σημαντικά μέχρι κάποιο όριο που από εκεί και περά παραμένει σταθερή. Η ταχύτητα διηθήσεως στην αρχή του φαινομένου λέγεται αρχική διηθητικότητα και η σταθερή τιμή που παίρνει μετά την παρέλευση αρκετού χρόνου λέγεται τελική ή βασική διηθητικότητα. Η ταχύτητα διηθήσεως σε οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια του φαινομένου λέγεται στιγμιαία διηθητικότητα. Η ποσότητα του νερού που διηθείται στο έδαφος από την αρχή του φαινομένου μέχρι κάποιο χρόνο λέγεται αθροιστική διηθητικότητα. Σε ένα διάγραμμα του νερού οι καμπύλες τις στιγμιαίας και αθροιστικής διηθητικότητας έχουν πρωταρχική σημασία στην εφαρμογή των αρδεύσεων γιατί, με βάση αυτές, καθορίζεται ο ρυθμός εφαρμογής του νερού και η διάρκεια της αρδεύσεως.



Σχήμα 2 Τυπικές καμπύλες στιγμιαίας και αθροιστικής διηθητικότητας ομογενών εδαφών



Σχήμα 3 Κίνηση του νερού στο έδαφος κατά τη διάρκεια της διηθήσεως.

Στο σχήμα 3 δίνεται η θέση του υγρού μετώπου σε δυο διαφορετικούς χρόνους. Η καμπύλη (α) δείχνει τη θέση του υγρού μετώπου αμέσως μετά την έναρξη της διηθήσεως. Εδώ η ζώνη μεταφοράς είναι ακόμη ασχημάτιστη και το ύψος θέσεως δεν έχει σχεδόν καμία επίδραση στην κίνηση προς τα κάτω του νερού. Αντίθετα το ύψος πίεσεως παίζει καθοριστικό ρόλο γιατί αμέσως πάνω από το μέτωπο προσπελάσεως το ύψος αυτό είναι μικρό (από -5cm έως -25cm) ενώ, αμέσως κάτω από αυτό, το ύψος πίεσεως παίρνει μεγάλες αρνητικές τιμές ανάλογα με την αρχικά περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία. Η καμπύλη (β) δείχνει τη θέση του υγρού μετώπου μετά την παρέλευση αρκετού χρόνου από την έναρξη της διηθήσεως. Εδώ η ζώνη μεταφοράς είναι καλά σχηματισμένη.

2.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η διήθηση του νερού στο έδαφος εξαρτάται από την κατάσταση της επιφάνειας και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του. Εδάφη με μεγάλους πόρους και ανοιχτή δομή παρουσιάζουν μεγάλη διηθητικότητα. Το αντίθετο συμβαίνει με τα συνθετικά εδάφη που, αν και έχουν μεγάλο πορώδες, το μέγεθος των πόρων τους είναι μικρό και η δομή τους σφιχτή. Άλλα εδάφη διαστέλλονται όταν διαβρέχονται με αποτέλεσμα να κλείνουν οι πόροι τους και να γίνονται

αδιαπέραστα στο νερό. Τα ίδια εδάφη, κατά κανόνα, όταν ξεραίνονται σχηματίζουν ρωγμές από τις οποίες το νερό μπορεί να διεισδύσει ταχύτατα με αποτέλεσμα να έχουν πολύ μεγάλη αρχική διηθητικότητα. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διηθητικότητα στα χωράφια είναι:

- 1) Η στεγανοποίηση της επιφάνειας του εδάφους. Μερικές φορές στη επιφάνεια του χωραφιού σχηματίζεται μια λεπτή συμπαγής κρούστα που περιορίζει δραστικά τη διήθηση. Η κρούστα αυτή είναι αποτέλεσμα της καταστροφής της δομής του επιφανειακού εδάφους, (1) από την πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής ή του καταιονισμού, (2) από μεταφορά λεπτόκοκκου υλικού με το νερό που εφαρμόζεται στο χωράφι με επιφανειακή άρδευση.
- 2) Η δημιουργία υπεδάφιας αδιαπέρατης στρώσης. Όταν το έδαφος είναι σχετικά συνεκτικό και υγρό, τα εδαφοκαλλιεργητικά μηχανήματα το συμπιέζουν, αμέσως κάτω από το βάθος στο οποίο φτάνουν (10-15cm), με αποτέλεσμα να δημιουργείται στη θέση αυτή μια συμπαγής στρώση που δρα ανασχετικά στην προς τα κάτω κίνηση του νερού. Η στρώση αυτή μπορεί να καταστραφεί με βαθιά άροση ή χρήση υπεδαφοκαλλιεργητών. Με τον τρόπο αυτό στη θέση της συμπαγούς στρώσεως δημιουργούνται ευρείς πόροι που επιτρέπουν την άνετη κίνηση του νερού.
- 3) Η προσθήκη οργανικών υλικών. Αν εάν έδαφος περιέχει οργανικά υλικά, το πορώδες του παραμένει σχετικά υψηλό και έχει καλή διήθηση που εξαρτάται από το βαθμό αποσυνθέσεως των υλικών αυτών. Εμπλουτισμός του εδάφους σε οργανικά υλικά μπορεί να γίνει με εναλλαγή καλλιεργειών.
- 4) Η εδαφοκαλλιεργητικές εργασίες. Πέρα από το σχηματισμό της συμπαγούς υπεδάφιας στρώσεως που μερικές από τις εργασίες αυτές δημιουργούν στο έδαφος και τη καταστροφή της επιφανειακής κρούστας, η διηθητικότητα του εδάφους στη ζώνη που φτάνουν τα διάφορα μηχανήματα μπορεί να βελτιωθεί κάνοντας το έδαφος περισσότερο χαλαρό, ή να χειροτερέψει με τη διακοπή της συνέχειας των φυσικών αγωγών της επιφανειακής στρώσεως προς το υποκείμενο έδαφος.
- 5) Τα φερτά υλικά του αρδευτικού νερού. Το αρδευτικό νερό κατά κανόνα μεταφέρει άργιλο και λεπτή ιλύ που τις αποθέτει στο χωράφι. Αν αυτό είναι ωφέλιμο ή όχι εξαρτάται από την ποσότητα των φερτών υλικών, τη χρονική διάρκεια των αποθέσεων και την υφή και δομή του εδάφους στο οποίο αποθέτονται.
- 6) Η διάβρωση του εδάφους. Η διάβρωση του εδάφους μπορεί να οφείλεται σε φυσικά αίτια ή σε μη σωστή εφαρμογή του νερού με επιφανειακές μεθόδους άρδευσης.

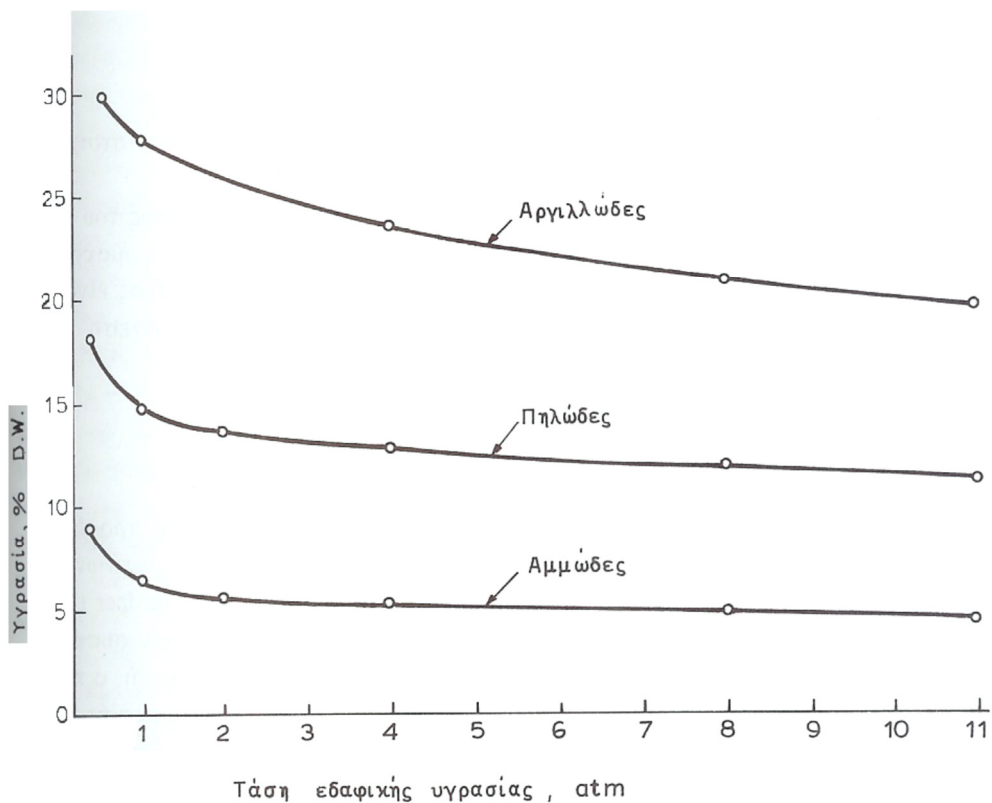
- 7) Η ισοπέδωση του εδάφους. Η επίδραση της ισοπεδώσεως στη αισθητικότητα του χωραφιού είναι ανάλογη με αυτή της διαβρώσεως.
- 8) Η περιεκτικότητα του αρδευτικού νερού σε άλατα. Τα άλατα που περιέχει το αρδευτικό νερό συγκεντρώνεται σταδιακά στο έδαφος και με τη πάροδο του χρόνου μπορεί να μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά του σε σχέση με τη διηθητικότητα. Στα υγρά κλήματα τα άλατα αποπλένονται με το νερό της βροχής και η σοβαρότητα του προβλήματος περιορίζεται σημαντικά. Αντιμετώπιση του προβλήματος στα ξερά κλήματα επιτυγχάνεται με εφαρμογή κατά διαστήματα υπεράρδρευσης. Νερό που μεταφέρει άλατα ασβεστίου και μαγνησίου μπορεί να έχει ευνοϊκή επίδραση στο έδαφος, σε αντίθεση με το νερό που περιέχει σημαντική συγκέντρωση σε χλωριούχο, θειικό, όξινο ανθρακικό νάτριο που έχει καταστρεπτικά αποτελέσματα στη δομή του εδάφους.
- 9) Η θερμοκρασία του νερού. Η θερμοκρασία έχει σημαντική επίδραση στη διηθητικότητα γιατί επηρεάζει δραστικά το ιξώδες του νερού. Νερό με χαμηλή θερμοκρασία έχει μεγαλύτερο ιξώδες και μικρότερη διηθητικότητα από ότι νερό με υψηλή θερμοκρασία.

2.6 ΕΔΑΦΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Οι εδαφικοί πόροι σχηματίζουν ένα πολύπλοκο δίκτυο από διασυνδεδεμένους αγωγούς κάθε σχήματος, διαμέτρου και μεγέθους. Όταν σε ένα ξερό έδαφος προστεθεί νερό, αυτό αρχικά σχηματίζει λεπτές στρώσεις σε επαφή με τα τοιχώματα των πόρων και μετατοπίζει τον αέρα από τους πόρους. Αν όλοι οι πόροι του εδάφους γεμίσουν με νερό το έδαφος έφτασε στον κορεσμό. Ο κορεσμός αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα έδαφος. Αν ένα κορεσμένο με νερό έδαφος αφηθεί να στραγγίσει, μια ποσότητα νερού που βρίσκεται στους μεγάλους πόρους κινείται υπό την επίδραση της βαρύτητας προς τα κάτω. Το νερό αυτό λέγεται νερό της βαρύτητας ή ελεύθερο νερό, μετά δε την απομάκρυνση του τη θέση του ξαναπαίρνει ο αέρας. Το νερό που παραμένει στο έδαφος μετά την απομάκρυνση του ελεύθερου λέγεται τριχοειδές νερό. Αυτό κινείται προς κάθε κατεύθυνση ανάλογα με τις υφιστάμενες υδραυλικές κλίσεις αλλά με μικρότερη ταχύτητα από ότι το ελεύθερο νερό.

Οι δυνάμεις που συγκρατούν το νερό στο έδαφος εκφράζονται γενικά με τους ισοδύναμους όρους, αρνητική πίεση ή τάση ή μύζηση. Οι δυνάμεις συνάφειας αντιπροσωπεύουν κατά κάποιο τρόπο την έλξη που ασκούν τα εδαφομόρια με την επιφάνεια τους πάνω στο νερό. Οι δυνάμεις συνοχής αντιπροσωπεύουν την έλξη που ασκούν τα μόρια του νερού το ένα στο άλλο. Καθώς το πάχος των στρώσεων μεγαλώνει, τα μόρια του νερού συγκρατούνται λιγότερο και μπορούν να μετακινηθούν υπό την επίδραση της βαρύτητας που ασκούν άλλες γειτονικές με μικρότερο πάχος στρώσεις. Έτσι πολύ μικρό έργο χρειάζεται να καταβληθεί για την απομάκρυνση του νερού από ένα έδαφος που η υγρασία του βρίσκεται

κοντά στο κορεσμό. Η αρνητική πίεση ή τάση της εδαφικής υγρασίας είναι το μέτρο που δείχνει πόσο ισχυρά συγκρατείται το νερό στο έδαφος. Για να γίνει δυνατή η εκτίμηση της ποσότητας του νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένα έδαφος κάτω από διάφορες τάσεις, πρέπει να κατασκευαστούν οι καμπύλες υγρασίας-τάσεως.



Σχήμα 4 Χαρακτηριστικές καμπύλες εδαφικής υγρασίας των τριών βασικών εδαφικών τύπων υφής.

Η ύπαρξη αλάτων στο εδαφικό νερό έχει σαν συνέπεια την αύξηση της δύναμης που πρέπει να ασκηθεί για την απομάκρυνση του. Αυτό οφείλεται στην όσμωση. Αν δυο διαλύματα με διαφορετική συγκέντρωση αλάτων χωριστούν με μια μεμβράνη διαπερατή στο νερό αλλά αδιαπέραστη στα άλατα που περιέχει, το νερό θα κινηθεί από το διάλυμα με την μικρότερη προς το διάλυμα, με την μεγαλύτερη συγκέντρωση. Η δύναμη που προκαλεί την κίνηση του νερού μέσα από την μεμβράνη λέγεται οσμωτική πίεση. Αν το εδαφικό νερό περιέχει σημαντική ποσότητα αλάτων, η δύναμη που πρέπει να ασκηθεί για την απομάκρυνση του από το έδαφος πρέπει να είναι ίση με το άθροισμα της τάσεως και της οσμωτικής πίεσεως.

2.7 ΥΓΡΑΣΙΑ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΚΑΙ ΥΔΑΤΟΪΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Όταν όλοι οι πόροι ενός εδάφους είναι γεμάτοι με νερό, τότε λέμε ότι το έδαφος αυτό από πλευράς υγρασίας βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού (υγρασία κορεσμού). Στη πρακτική των αρδεύσεων είναι ουσιώδες να γνωρίζουμε το ποσό του νερού που υπάρχει στο έδαφος, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις καλλιέργειες για την κανονική ανάπτυξη και απόδοση τους. Το έδαφος είναι σαν μια δεξαμενή που χωράει μια ορισμένη ποσότητα χρήσιμης υγρασίας. Η υδατοϊκανότητα μπορεί να οριστεί ως η υγρασία που συγκρατεί ένα βαθύ, ομοιόμορφο και καλά στραγγισμένο έδαφος μετά την απομάκρυνση του ελεύθερου νερού. Η υγρασία του εδάφους φτάνει στην υδατοϊκανότητα τρεις με πέντε μέρες μετά από βροχή ή άρδευση ανάλογα με την υφή και την δομή του εδάφους. Στη φύση, τα βαθιά και ομοιόμορφα εδάφη δεν αποτελούν τον κανόνα αλλά μάλλον την εξαίρεση. Πέρα από το γεγονός ότι τα περισσότερα εδάφη είναι διαστρωμένα, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου, σε πεδινές περιοχές, η στάθμη του υπόγειου νερού είναι αρκετά υψηλή, με συνέπεια κακή στράγγιση. Υπάρχουν λοιπόν πολλές περιπτώσεις εκτίμησης της υδατοϊκανότητας του εδάφους που μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες εκτιμήσεις προσδιορισμού της υγρασίας του χωραφιού 3-5 μέρες μετά την επιφανειακή εφαρμογή του νερού. Αντικειμενικός προσδιορισμός μπορεί να γίνει μόνο με μέτρηση της στάσεως της εδαφικής υγρασίας που αντιστοιχεί στην υδατοϊκανότητα, της τάσεως, δηλαδή εκείνης στην οποία αντίστοιχη τιμή τριχοειδούς αγωγιμότητας τόσο μικρή που πρακτικά να θεωρείται μηδενική. Η τάση είναι φυσικό να διαφέρει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Τα συμπεράσματα τους δίνονται στο SCS National Engineering Handbook (1964) όπως λέει ο Παπαζαφειρίου (1998) και δείχνουν τις ακόλουθες αντιστοιχίες μεταξύ ικανότητας και τάσεως (ΣΧΗΜΑ 5):

Τύπος εδάφους	Τάση στην υδατοϊκανότητα, cm
αμμώδες (χονδρόκοκκο)	60
αμμοπηλώδες	100
ιλοπηλώδες	300
αργιλλώδες	600

Σχήμα 5 Τύποι εδάφους και τάση υδατοϊκανότητας

2.8 ΣΗΜΕΙΟ ΜΟΝΙΜΗΣ ΜΑΡΑΝΣΕΩΣ

Ενώ η υδατοϊκανότητα αποτελεί το πάνω όριο της χρήσιμης για τα φυτά υγρασίας, το αντίστοιχο κάτω όριο της είναι το σημείο μόνιμης μαράνσεως. Όταν η εδαφική υγρασία φτάσει στο σημείο αυτό τα φυτά δεν μπορούν να πάρουν από το έδαφος όλο το νερό που χρειάζονται για την κάλυψη των αναγκών τους και για το λόγο αυτό αρχίζουν να μαραίνονται. Το σημείο μόνιμης μαράνσεως δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από την υφή και την δομή του εδάφους, το είδος και την κατάσταση που βρίσκονται τα φυτά, τη συγκέντρωση αλάτων στο έδαφος και της κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Για τους λόγους αυτούς, η τάση της εδαφικής υγρασίας που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό κυμαίνεται από 7 atm μέχρι 32 atm. Η διαφορά αυτή σε τάση δεν σημαίνει ανάλογη διαφορά και σε περιεχόμενη υγρασία. Είναι παρατηρημένο ότι στα χαμηλά αυτά επίπεδα, μεγάλες μεταβολές της τάσεως συνεπάγονται ελάχιστες μεταβολές της υγρασίας. Σήμερα, σαν αντιπροσωπευτική του σημείου μόνιμης μαράνσεως όλων των εδαφών, έχει γίνει δεκτή η τάση των 15atm.

Όταν η υγρασία του εδάφους φτάσει στο σημείο μόνιμης μαράνσεως η ανάπτυξη των φυτών σταματά. Τα φυτά εξακολουθούν να παίρνουν σε μικρές ποσότητες νερό από το έδαφος και κάτω από το σημείο αυτό, αυτές όμως είναι μόλις αρκετές να τα κρατούν στη ζωή. Αν η υγρασία ελαττωθεί ακόμη περισσότερο θα προκληθεί μάρανση και θάνατος των φυτών. Το όριο αυτό της εδαφικής υγρασίας στο οποίο τα φυτά νεκρώνονται λέγεται έσχατο σημείο μαράνσεως. Η τάση που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό μπορεί να φτάσει τις 60atm.

2.9 ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΚΑΙ ΩΦΕΛΙΜΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Το νερό που μπορεί να κρατήσει ένα έδαφος ανάμεσα στο σημείο μόνιμης μαράνσεως και την ιδατοϊκανότητα επικράτησε να λέγεται διαθέσιμη υγρασία. Γενικά η εδαφική υγρασία εκφρασμένη στο επί τοις εκατό ξερού βάρους μπορεί να βρεθεί με τη σχέση:

$$SM(\%D.W.) = 100 \frac{W_w}{W_s}$$

Εξίσωση 2 επί τοις εκατό κατά βάρος εδαφική υγρασία

Όπου SM(%D.W.) είναι η εδαφική υγρασία % ξερού βάρους. W_w είναι το βάρος του νερού που περιέχει το έδαφος και W_s είναι το βάρος του ξερού εδάφους.

Η ίδια υγρασία εκφρασμένη σαν ποσοστό στο επί τοις εκατό όγκου βρίσκεται με την σχέση:

$$SM(\%V) = 100 \frac{V_w}{V_s}$$

Εξίσωση 3 επί τοις εκατό κατ'όγκο εδαφική υγρασία

Όπου $SM(\%V)$ είναι η υγρασία % όγκου. V_w είναι ο όγκος του εδαφικού νερού και V_s είναι ο όγκος του εδάφους μαζί με τους πόρους του.

Τέλος ο όγκος ενός οποιουδήποτε σώματος μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$V = \frac{W}{D}$$

Εξίσωση 4 Όπου W είναι το βάρος του σώματος και D είναι η πυκνότητα του

.

Αν συνδυάσουμε τις εξισώσεις 3 και 4 βρίσκουμε ότι:

$$SM(\%V) = 100 \frac{V_w}{V_s} = 100 \left[\frac{W_w}{D_w} / \frac{W_s}{D_s} \right] = 100 \left[\frac{W_w}{W_s} \frac{D_s}{D_w} \right]$$

Εξίσωση 5 Όπου D_s είναι η πυκνότητα του εδάφους με τους πόρους του, D_w είναι η πυκνότητα του νερού και οι άλλοι όροι είναι όπως έχουν ήδη οριστεί.

Στην άρδευση δεν μας ενδιαφέρει οποιαδήποτε εδαφική υγρασία και βάθος εδάφους, αλλά συγκεκριμένα η υγρασία ανάμεσα στην ιδατοϊκανότητα και το σημείο μόνιμης μαράνσεως και το βάθος του λιθοστρώματος. Έχουμε :

$$ASM = \frac{FC - PWP}{100} * ASW * RD$$

Εξίσωση 6 η υγρασία ανάμεσα στην ιδατοϊκανότητα και το σημείο μόνιμης μαράνσεως και το βάθος του λιθοστρώματος.

Όπου ASM είναι η διαθέσιμη υγρασία σε mm πάχους υδάτινου στρώματος. FC και PWP είναι αντίστοιχα η ιδατοϊκανότητα και το σημείο μόνιμης μάρανσης εκφρασμένα % ξερού βάρους. ASW είναι το φαινόμενο ειδικό βάρος που παίρνεται αδιάστατο και RD είναι το βάθος του ριζοστρώματος σε mm.

Τα κεφάλαια 2.6 και 2.9 είναι ζωτικής σημασίας για τα πειράματά μας και θα γίνει αναλυτικότερη περιγραφή τους στο 3ο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Για τη διαπίστωση του χρόνου άρδευσης, αλλά και της δόσης άρδευσης, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η υγρασία του εδάφους. Το θέμα αυτό είναι από τα πιο βασικά θέματα των αρδεύσεων, προκειμένου να αυξήσουμε, αλλά και να βελτιώσουμε τη γεωργική παραγωγή. Για τον προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας αναπτύχθηκαν από διάφορους ερευνητές, μέθοδοι οι οποίες διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες.

3.1 ΑΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΠΥΡΙΑΝΤΗΡΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 105 °C

Η μέθοδος αυτή είναι κλασσική. Παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα ότι από τη στιγμή που παίρνεται το δείγμα από το έδαφος, μέχρι το αποτέλεσμα περνάει χρόνος από 24 έως 48 ώρες. Η λήψη εδαφικών δειγμάτων από διάφορες θέσεις και βάθη του χωραφιού είναι η πιο απλή, η πιο χρησιμοποιούμενη και πιθανόν η καλύτερη μέθοδος μέτρησης της υγρασίας. Το εδαφικό δείγμα τοποθετείται σε αεροστεγές δοχείο π.χ. ένα αλουμινένιο κουτί ή ένα γυάλινο δοχείο που σφραγίζεται αμέσως για να εμποδιστεί η απώλεια υγρασίας στο δρόμο προς το εργαστήριο. Οι σχηματιζόμενοι υδρατμοί μέσα στο δοχείο πρέπει να ζυγιστούν και να περιληφθούν στον προσδιορισμό της υγρασίας επειδή ήταν μέρος της υγρασίας του εδάφους όταν πάρθηκε το δείγμα. Τα υγρά δείγματα ζυγίζονται, ξηραίνονται σε θερμοκρασία 105 °C και ξαναζυγίζονται. Η διαφορά σε βάρος οφείλεται στην απώλεια νερού και διατηρείται με το βάρος ξηρού εδάφους για να δώσει το ποσοστό εδαφικής υγρασίας, εκφρασμένο στα % ξηρού βάρους εδάφους.

Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή, παίρνονται συνήθως δείγματα από αρκετές θέσεις του χωραφιού και αναμειγνύονται, για να δώσουν ένα μέσο όρο. Τα δείγματα παίρνονται με τη χρήση εδαφοληπτών που δίνουν πυρήνες περίπου ίσου όγκου, ή ειδικά τρυπάνια που επιτρέπουν τη δειγματοληψία σε διάφορα εδάφη. Αν επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα πρέπει να πάρουμε αρκετές προφυλάξεις και να χρησιμοποιηθεί ένα φτυάρι. Η μέθοδος αυτή είναι κουραστική και χρονοβόρα εκτός από τα επιφανειακά δείγματα. Στην περίπτωση ανάμειξης των δειγμάτων πρέπει να χρησιμοποιούνται ίσοι περίπου όγκοι εδάφους από τα επιμέρους δείγματα.



Εικόνα 2 Εδαφολήπτες

3.2 ΕΜΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.2.1 ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Η χρήση αισθητήρων που αξιοποιούν τον ηλεκτρισμό, για μέτρηση υγρασίας σε εδάφη και γενικότερα σε υποστρώματα καλλιέργειας (soil / substrate water content) στο πλαίσιο διαχείρισης καλλιεργειών έχει αρχίσει ξεκινήσει εδώ και χρόνια. Ο Muñoz-Carpena (2009) αλλά και οι Pardossi κ.α. (2009) παραθέτουν όλες τις τελευταίες εξελίξεις σχετικά με την χρήση αισθητήρων υγρασίας για εδάφη και υποστρώματα.



Εικόνα 3 Αισθητήρες Υγρασίας Εδάφους

Published October, 1951

The Effect of Fertilizers on the Plaster of Paris Electrical Resistance Method for Measuring Soil Moisture in the Field¹

GEORGE JOHN BOUYOUKOS²

IN THE present paper an attempt is made to answer the question: To what extent does the application of fertilizers affect the accuracy of the plaster of paris electrical resistance method for measuring soil moisture content under field conditions? This question has been brought to a sharp focus lately by the irrigation moisture meter (1) (Fig. 1) which has been developed to

ohms base was selected because it applies to a great number of soils in the humid region. However, for soils high in fertility, and for soils to which rather large amounts of fertilizers are added, the pointer on the moisture scale goes beyond the 100% mark. This means that the electrical resistance of the soil may be as low as 300 ohms as compared to the standard base of 600 ohms. The question is, how much of an error is there in the moisture content when the initial or field capacity electrical resistance is 300 ohms and the soil has to dry out some before its electrical resistance rises to the standard 600 ohms base? Furthermore, is this error confined only to the higher level of soil moisture content, or does it extend throughout the entire range of the moisture scale? Finally, how accurate and reliable is the irrigation moisture meter in relation to the above conditions? It is the purpose of this paper to present studies for the answer to these questions.

Procedure

The procedure consisted of adding to half-pound samples of soil 10-10 fertilizer in powdered form, at the rates of 0, 500, 1000, and 2000 pounds per acre, and mixing thoroughly. The bottom of a metal pan 3 $\frac{3}{4}$ by 2 $\frac{1}{4}$ by 1 inches was covered with the soil to a depth of $\frac{7}{16}$ inch. On top of this layer was placed a plaster of paris block and the pan filled with soil. Distilled water was added to soak the soil. More soil was added until it formed a mound 1 inch high above the rim of the pan. After the entire soil mass was saturated with distilled water, it was allowed to dry at room temperature. When the excess water had evaporated



Εικόνα 4 Πρώτη σελίδα μίας σχετικής εργασίας του J. Βουγιουκος (1951)

Η πιο απλή εκδοχή τέτοιων οργάνων είναι αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας (electrical conductance sensors, Εικόνα 3). Περιλαμβάνουν δύο αγώγιμα (όχι μονωμένα) ηλεκτρόδια τα οποία μπορεί να είναι ελεύθερα ή ενσωματωμένα σε ένα πορώδες υλικό (π.χ. γύψο) με σκοπό την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους. Το ρεύμα που θα περάσει από το κύκλωμα θα είναι ανάλογο της υγρασίας στο έδαφος, όταν υπάρχει πολύ νερό θα περνά πολύ ρεύμα, όταν υπάρχει λίγο νερό θα περνά λίγο ρεύμα.

Τα ζητήματα που αντιμετωπίζουν οι αισθητήρες αυτοί σχετίζονται με τα ακόλουθα:

Εκτός από τα επίπεδα υγρασίας το πόσο ρεύμα θα περάσει από το έδαφος εξαρτάται και από την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του νερού.

Η αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του εδάφους.

Τα ηλεκτρόδια οξειδώνονται λόγω του φαινομένου της γαλβανισμού και επομένως αλλάζουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους.

Στο άλλο άκρο, απαιτητική στη χρήση μορφή αισθητήρα που παρέχει όμως μεγάλη ακρίβεια, είναι ο αισθητήρας νετρονίων (neutron probe). Δεν βρίσκει όμως εφαρμογή στην πράξη πέρα από την έρευνα λόγω μίας σειράς ζητημάτων με κυριότερο το ότι χρησιμοποιεί ραδιενέργεια (Campbell, 2014).

Μία πολύ δημοφιλής τεχνολογία είναι οι διηλεκτρικοί αισθητήρες μέτρησης εδαφικής υγρασίας. Αυτοί εκτιμούν την εδαφική υγρασία μετρώντας την διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, μία ηλεκτρική ιδιότητα που σχετίζεται με την ποσότητα νερού που περιέχεται σε αυτό.

Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες των αισθητήρων αυτών είναι οι ακόλουθες (Pardossi κ.α., 2009; Muñoz-Carpena, 2009):

- Ανάκλαση στο χώρο του χρόνου (Time domain reflectometry - TDR)
- Χώρος συχνοτήτων (Frequency domain - FD) με δύο βασικές τεχνικές:
- Χωρητικότητα στο πεδίο των συχνοτήτων (capacitance/frequency domain) και
- Ανάκλαση στο πεδίο των συχνοτήτων (Frequency Domain Reflectometry - FDR)
- Εύρος στο χώρο των συχνοτήτων (Amplitude Domain Reflectometry - ADR).

Στην κατηγορία ADR ανήκει και ο ThetaProbe της ΔΤ, ο οποίος χρησιμοποιείται από το εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Πατρών, ως όργανο αναφοράς.

Στη συνέχεια θα γίνει ειδικότερη αναφορά στους διηλεκτρικούς πυκνωτικούς αισθητήρες (dielectric capacitance sensors) και εντός της κατηγορίας αυτής στους αισθητήρες μέτρησης χωρητικότητας στο χώρο των συχνοτήτων (capacitance /frequency domain) μια και τέτοιοι είναι οι αισθητήρες (EC5 και 10HS της Decagon Devices) που θα αξιολογηθούν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.

3.2.1.1. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΠΥΚΝΩΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Η χωρητικότητα ως ηλεκτρομαγνητική μέθοδος για μέτρηση υγρασίας εδάφους άρχισε να εφαρμόζεται από τη δεκαετία του 1930 (Starr και Paltineanu, 2002). Σύμφωνα με την ίδια εργασία σχετικά αισθητήρια που λειτουργούσαν στα 150 MHz βρήκαν ευρύτερη εφαρμογή από τη δεκαετία του 1990.

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι διηλεκτρικοί πυκνωτικοί αισθητήρες είναι κατασκευασμένοι με βάση την λογική του πυκνωτή, δηλαδή δύο μεταλλικών πλακών που απέχουν μεταξύ τους σταθερή απόσταση. Οι πλάκες του αισθητήρα (πυκνωτή) είναι εμβαπτισμένες σε μονωτικό υλικό (πλαστικό περίβλημα), ενώ το έδαφος (κυρίως ανάμεσά τους αλλά και σε κάποια απόσταση γύρω από αυτούς) είναι το διηλεκτρικό υλικό του πυκνωτή. Η χωρητικότητα C του πυκνωτή εκφράζεται σαν το πηλίκο Q/V , όπου Q το φορτίο στον κάθε οπλισμό του όταν εφαρμόσουμε στα άκρα του τάση V . Η χωρητικότητα του πυκνωτή εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του (μέγεθος οπλισμών, απόστασή τους και γεωμετρία τους) καθώς και από το διηλεκτρικό υλικό. Η χωρητικότητα εκφράζεται με μονάδα μέτρησης το Farad (F). Στην περίπτωση των πυκνωτικών αισθητήρων ο πυκνωτής σαν κατασκευή παραμένει σταθερός. Κάθε μεταβολή της χωρητικότητας οφείλεται στην αλλαγή των ιδιοτήτων του διηλεκτρικού (εδάφους) λόγω της αύξησης ή μείωσης του νερού που περιέχεται σε αυτό. Τέλος η μέτρηση της χωρητικότητας του πυκνωτή δεν είναι αυτή που προσδιορίζει την αλλαγή στην συγκέντρωση του νερού. Δεν μετράμε άμεσα την χωρητικότητα του αισθητήρα (με ένα χωρητικόμετρο) για πρακτικούς λόγους. Αντιθέτως είναι ποιο αποδοτικό να εξάγουμε το μέγεθος της χωρητικότητας έμμεσα από το χρόνο φόρτισης ή εκφόρτισης του πυκνωτή η οποία μπορεί με τη σειρά της να εκφραστεί από την τάση φόρτισης που μπορεί να λάβει σε συγκεκριμένο χρόνο. Αυτή η διαδικασία θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια. Η τελική έξοδος ενός διηλεκτρικού πυκνωτικού αισθητήρα είναι μια τιμή τάσης (σε mV) που αντιστοιχεί σε μια επί τοις εκατό κατ'όγκο περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΠΥΚΝΩΤΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Για να αξιοποιηθούν σε πρακτικό επίπεδο οι αισθητήρες αυτοί γίνονται οι παραδοχές που αναφέρονται στη συνέχεια και ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1. Παραδοχή: το έδαφος περιοχής την οποία αντιπροσωπεύει η μέτρηση θεωρείται ομοιογενές.
2. Παραδοχή: το έδαφος (στερεά, υγρή και αέρα φάση) είναι ένα τουλάχιστον καλό διηλεκτρικό υλικό, με άλλα λόγια ένας καλός μονωτής.

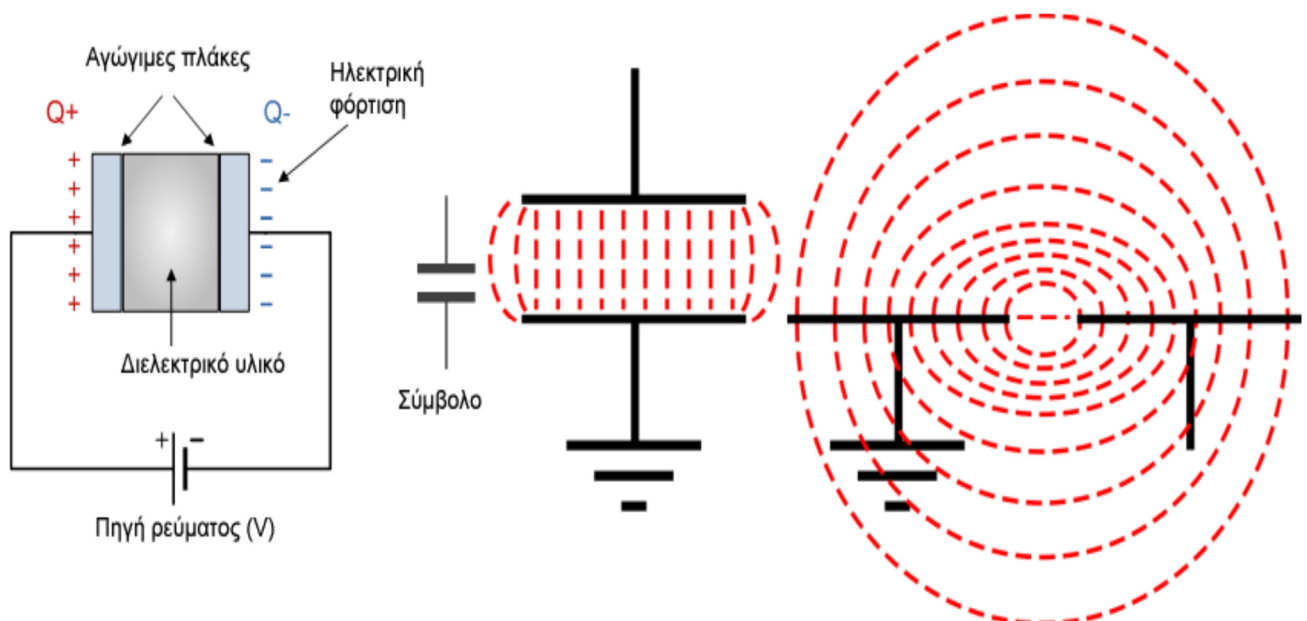
3. Παραδοχή: λαμβάνεται υπόψη ως δίπολο μόνο το νερό που περιέχεται στο έδαφος και μόνο αυτό επηρεάζει τις αλλαγές στη χωρητικότητα του εδάφους (διηλεκτρικού)
4. Πρακτική: η μέτρηση γίνεται με χρήση εισόδου τάσης με σταθερή συχνότητα, και κυματομορφής που δεν αλλάζει.
5. Πρακτική: μετριέται η κορυφή της εξόδου και αυτή συσχετίζεται με την χωρητικότητα του εδάφους (διηλεκτρικού) που με τη σειρά της συσχετίζεται με την περιεκτικότητά του σε νερό.

Για τους παραπάνω λόγους εύκολα μπορεί να γίνει αντιληπτό γιατί πριν από την χρήση τους αυτοί οι αισθητήρες θα πρέπει να ρυθμιστούν με βάση το έδαφος μας, εκτός και εάν είμαστε σίγουροι ότι έχουμε έδαφος ίδιο με την εργοστασιακή ρύθμιση του αισθητήρα.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΥΚΝΩΤΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Γεωμετρία οπλισμών

Ένας πυκνωτής αποτελείται από δύο αγώγιμα ηλεκτρόδια / πλάκες / οπλισμούς (που στην τυπική διαμόρφωση είναι ίδιοι και ο ένας απέναντι από τον άλλο) που φορτίζονται με αντίθετο φορτίο (+ και -). Οι οπλισμοί δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο και το διηλεκτρικό υλικό που υπάρχει στην περιοχή του πεδίου πολώνεται -η πόλωση επικεντρώνεται ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή.



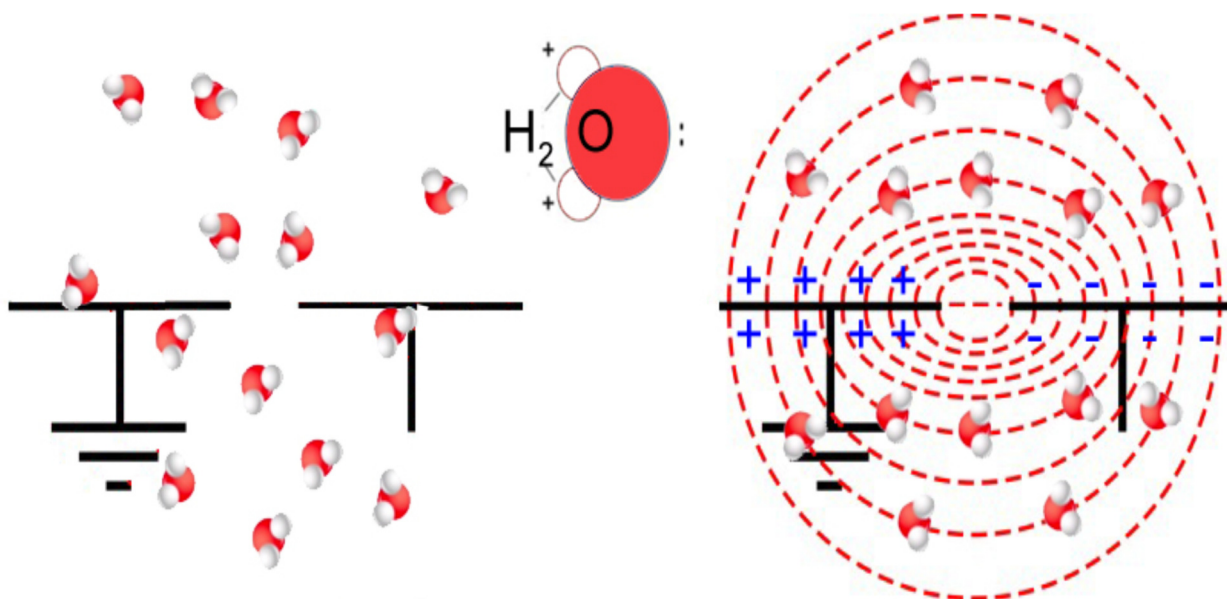
Εικόνα 5 Πυκνωτές και ορισμένες διαμορφώσεις αυτών (πυκνωτής παράλληλων οπλισμών - parallel plate capacitor και πυκνωτής συνεπίπεδων οπλισμών - coplanar plate capacitor)

Όταν οι οπλισμοί του πυκνωτή είναι απέναντι όλες σχεδόν οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές περιορίζονται ανάμεσα στο διηλεκτρικό. Κατά την απομάκρυνση των πυκνωτών οι

δυναμικές γραμμές απλώνουν όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Η διάταξη αυτή των οπλισμών δεν επηρεάζει το φαινόμενο και είναι πιο αποτελεσματική λόγω του εδάφους που περικλείει καλύτερα τον ανιχνευτή.

Πόλωση μορίων νερού

Όπως αναφέρθηκε, το διηλεκτρικό υλικό στην περίπτωση που εξετάζεται είναι το έδαφος με το νερό και τον αέρα που περιέχει. Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα μόνιμα δίπολα του νερού πολώνονται. Το ίδιο φαινόμενο ισχύει όχι μόνο στην περίπτωση εφαρμογής σταθερής τάσης (διαφοράς δυναμικού) αλλά και όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενη ή περιοδική τάση. Σε κάθε περίπτωση τα μόρια του νερού (δίπολα) προσπαθούν να ακολουθήσουν τις μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου και έτσι η συμπεριφορά των διπόλων του νερού (άρα και της χωρητικότητας του πυκνωτή) είναι συνάρτηση της συχνότητας της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται (Εικόνα 6). Το πόσο εύκολα περνά ρεύμα μέσα από το υλικό ορίζει την περατότητά του (permeability), π.χ. αν αφήνει λίγο είναι μονωτής, αν αφήνει πολύ είναι αγωγός, ενώ το πόσο εύκολα μεταβάλλεται ο προσανατολισμός των μορίων του, το πόσο αντιστέκεται δηλαδή στη διαμόρφωση ενός ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή του (έχει άμεση και ανάλογη συνέπεια στη δυνατότητά του να αποθηκεύει ενέργεια) ορίζει την επιδεκτικότητα του (permittivity). Τα δύο αυτά μεγέθη σχετίζονται.



Εικόνα 6 Όταν περνά ρεύμα από τους οπλισμούς του πυκνωτή – έδαφος τότε τα δίπολα του νερού προσανατολίζονται με βάση το πεδίο που δημιουργείται και αποθηκεύουν μέρος του φορτίου

Η σχετική επιδεκτικότητα ή απλά επιδεκτικότητα (ϵ_r , dielectric permittivity ή electrical permittivity) ή αλλιώς διηλεκτρική σταθερά (κ , dielectric constant) -όπως θα αναφέρεται στην συνέχεια- ενός διηλεκτρικού υλικού ορίζεται ως ο λόγος της απόλυτης επιδεκτικότητας (ϵ) του ως προς την επιδεκτικότητα του κενού ϵ_0 (το κενό έχει την μικρότερη δυνατή απόλυτη επιδεκτικότητα ($\approx 8.85 \times 10^{-12}$ F/m)). Η διηλεκτρική σταθερά είναι αδιάστατο μέγεθος και

εξ'ορισμού για το απόλυτο κενό θα είναι ίση με 1, τιμή που δεν διαφέρει πρακτικά από αυτή του αέρα του οποίου η σχετική επιδεκτικότητα είναι 1,0006. Η διηλεκτρική σταθερά ξηρού ανόργανου εδάφους είναι μεταξύ 3 και 5 (σε εδάφη με υψηλή EC η τιμή αυτή αναμένεται να είναι αυξημένη (Czarnomski κ.α., 2005), του αέρα περίπου 1 και του νερού περίπου 80 (Εικόνα 7). Επομένως οι αλλαγές όσο αφορά το περιεχόμενο στο έδαφος νερό αντικατοπτρίζονται άμεσα στην διηλεκτρική του σταθερά.



Εικόνα 7 Διηλεκτρική σταθερά των διαφόρων συστατικών του εδάφους

Στη συνολική διηλεκτρική σταθερά ενός εδάφους (apparent dielectric permittivity (συμβολίζεται με κ_t ή ε_a ή ε_b)) συνεισφέρουν τα διάφορα συστατικά του (Εξίσωση 7, Campbell, 2014). Σύμφωνα με την ίδια πηγή, για τυπικά εδάφη αναμένονται τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς μεταξύ 5 και 40.

$$\kappa_t^b = \kappa_m^b V_m + \kappa_a^b V_a + \kappa_w^b \theta + \kappa_{om}^b V_{om} + \kappa_i^b V_i$$

όπου:

κ η διηλεκτρική σταθερά

θ η υγρασία του εδάφους (κατ'όγκο) – αναφέρεται και ως VWC (volumetric water content)

b μία σταθερά με τιμή πρακτικά ίση με 0,5

V είναι οι μερικοί όγκοι (όλα τα V και το θ, έχουν άθροισμα ίσο με 1)

t,m,a,om,i,w εκφράζουν το συνολικό έδαφος (total), το ανόργανο τμήμα του εδάφους (mineral soil), τον αέρα (air), την οργανική ουσία (organic matter), τον πάγο (ice) και το νερό (water)

Εξίσωση 7 Συνολική διηλεκτρική σταθερά εδάφους

Θεωρώντας $b=0,5$ βλέπε εξίσωση 37

$$\theta = \frac{1}{\sqrt{\kappa_w}} \sqrt{\kappa_t} - \frac{(\sqrt{\kappa_m} V_m + \sqrt{\kappa_a} V_a + \sqrt{\kappa_{om}} V_{om} + \sqrt{\kappa_i} V_i)}{\sqrt{\kappa_w}}$$

Εξίσωση 8 Κατ'όγκο υγρασία ως συνάρτηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους

Η Εξίσωση 7 μπορεί να επιλυθεί ως προς την κατ'όγκο υγρασία (Εξίσωση 8) από όπου προκύπτει ότι η σχέση της κατ'όγκο υγρασίας του εδάφους με τη διηλεκτρική του σταθερά μπορεί να προσεγγιστεί από μία σχετικά απλή μαθητική έκφραση και επομένως οι μετρήσεις των αισθητήρες που μετρούν την διηλεκτρική σταθερά μπορούν να μοντελοποιηθούν (π.χ. μέσω πολυωνυμικής παρεμβολής) ώστε να παρέχουν την κατ'όγκο υγρασία (Campbell, 2014).

Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον Torpp το 1980 (Campbell, 2014) ο οποίος κατέληξε σε μία σχέση η οποία από πολλούς καλείται γενική (universal) μεταξύ κατ'όγκο υγρασίας του εδάφους και διηλεκτρικής του σταθεράς (Εξίσωση 9).

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \kappa_t - 5.5 \times 10^{-4} \kappa_t^2 + 4.3 \times 10^{-6} \kappa_t^3$$

Εξίσωση 9 Εξίσωση του Torpp

Παρά το γεγονός ότι είναι εμπειρική και ότι έχει αρχικά αναπτυχθεί για μέτρησης υγρασίας σε ανόργανα εδάφη με χρήση τεχνολογίας TDR, η εξίσωση του Torpp έχει μεγάλη αξία μια και έδειξε ότι το περιεχόμενο του εδάφους σε υγρασία εξαρτάται μόνο από την διηλεκτρική σταθερά αυτού (Visconti, 2014).

Η διηλεκτρική σταθερά των υλικών εξαρτάται από μία σειρά ιδιοτήτων τους αλλά και από τη συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που τα διαπερνά ενώ είναι ανεξάρτητη του εάν ο φορτιστής υπόκειται σε φόρτιση ή εκφόρτιση. Όπως αναφέρθηκε, στην περίπτωση που εξετάζεται, το διηλεκτρικό υλικό είναι το έδαφος με την υγρασία που αυτό περιέχει και για το λόγο αυτό πολλές φορές η διηλεκτρική σταθερά που αποτελεί το στόχο της μέτρησης αναφέρεται ως (soil bulk permittivity). Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς μπορεί να συσχετιστεί με την περιεκτικότητά του εδάφους σε νερό.

Εάν είναι γνωστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυκνωτή, η διηλεκτρική σταθερά μπορεί να υπολογιστεί με βάση την Εξίσωση 10. Από αυτή, το πρόβλημα μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς μετατρέπεται σε πρόβλημα μέτρησης της διηλεκτρικής χωρητικότητας ή απλά χωρητικότητάς του (C, dielectric capacitance).

$$C = \epsilon \times F$$

όπου:

C η διηλεκτρική χωρητικότητα ή απλά χωρητικότητά

ϵ η απόλυτη επιδεκτικότητα του διηλεκτρικού υλικού που επηρεάζεται από το ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή

F παράμετρος που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυκνωτή π.χ. στην περίπτωση που οι οπλισμοί είναι ο ένας απέναντι από τον άλλο και παράλληλα μεταξύ τους $F=A/d$ όπου A το εμβαδόν του ενός ηλεκτροδίου και d η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων (δηλαδή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυκνωτή)

και λαμβάνοντας υπόψη ότι η διηλεκτρική σταθερά του υλικού (χρησιμοποιούμε την κ_i μια και αναφερόμαστε στη συνολική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους στη συγκεκριμένη περίπτωση - Εξίσωση 38 και 39) ισχύει $\kappa_i = \epsilon / \epsilon_0$, όπου ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, η σχέση γίνεται

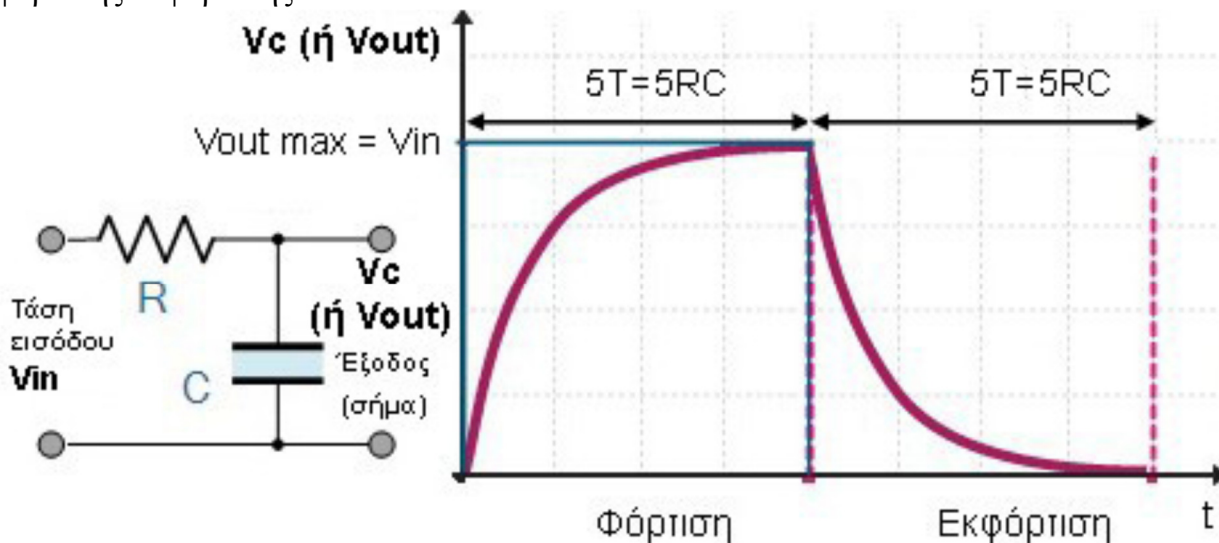
$$C = \kappa_i \times \epsilon_0 \times F$$

Εξίσωση 10 Υπολογισμός διηλεκτρικής σταθεράς πυκνωτή –εδάφους στην περίπτωση που μελετάται

Μεθοδολογία μέτρησης

Εάν σε ένα πυκνωτή συνδεθεί μία πηγή συνεχούς ρεύματος (DC), αυτός θα αποκτήσει ακαριαία την τάση της πηγής (V_{in}) στους οπλισμούς του (δηλαδή θα φορτιστεί). Το ίδιο γρήγορα θα εκφορτιστεί όταν οι δύο πλάκες βραχυκυκλωθούν. Σε περίπτωση που παρεμβληθεί στο κύκλωμα μία αντίσταση σε σειρά, τότε ο χρόνος φόρτισης θα εξαρτάται από το μέγεθος της αντίστασης (R) και τη χωρητικότητα του πυκνωτή (C) και μάλιστα θα είναι περίπου 5 φορές το $R \times C$. Με πιο απλά λόγια, μετά από χρόνο $5RC$ ο πυκνωτής αναμένεται να έχει φορτιστεί ή εκφορτιστεί πλήρως. Ο χρόνος αυτός (ίδιος για φόρτιση και εκφόρτιση) συμβολίζεται συχνά ως 5T και καλείται χρονική σταθερά. Επομένως η μέτρηση του χρόνου φόρτισης ή εκφόρτισης σε συνδυασμό με γνωστό R δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του C (Εικόνα 8). Αυτό μπορεί να γίνει αν με το που κλείνει το κύκλωμα, μία ηλεκτρονική διάταξη παρακολουθεί την πορεία της καμπύλης (Εικόνα 8) και όταν αυτή σταθεροποιηθεί θεωρηθεί ότι έχει μετρηθεί ο χρόνος t.

τάση πηγής: V_{in} , τάση πυκνωτή: V_c , μετρούμενο σήμα: V_{out} , χρόνος φόρτισης/εκφόρτισης: $5T=5RC$

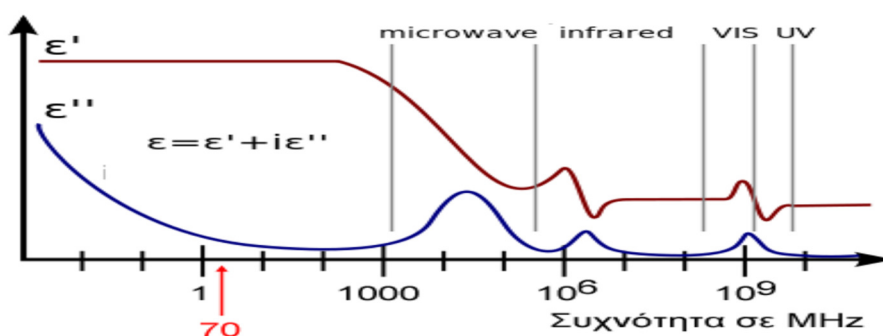


Εικόνα 8 Φόρτιση και εκφόρτιση σε κύκλωμα πυκνωτή – αντίστασης σε σειρά με εφαρμογή συνεχούς ρεύματος

Το θέμα της επιλογής συχνότητας ρεύματος

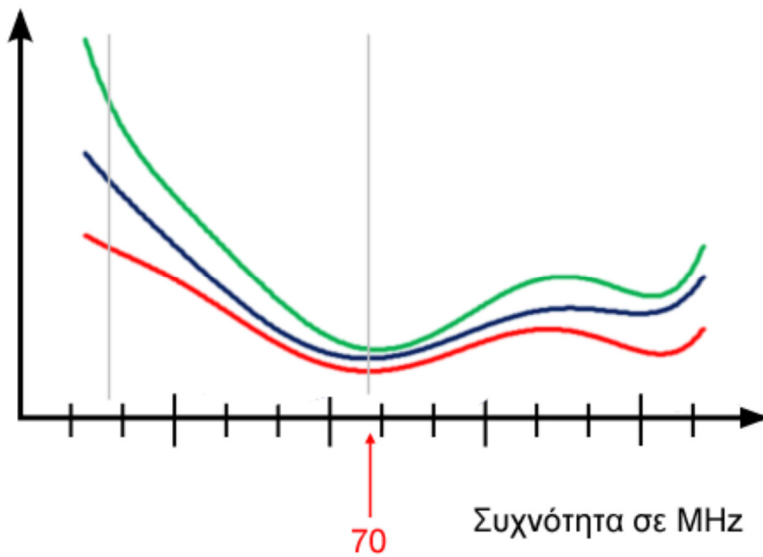
Η επιδεκτικότητα είναι ένα μιγαδικό μέγεθος του οποίου το μέγεθος δεν είναι ίδιο για όλες τις συχνότητες (Εικόνα 9). Αυτό ισχύει για όλα τα υλικά και όχι μόνο για το έδαφος.

Οι αισθητήρες που εξετάζονται στο πλαίσιο της εργασίας αυτής (EC5 και 10HS της Decagon Devices) λειτουργούν στα 70MHz. Αυτό είναι επιλογή της κατασκευάστριας εταιρείας επειδή στα 70MHz τόσο το φανταστικό όσο και το πραγματικό μέρος της επιδεκτικότητας είναι σταθερά και μάλιστα το φανταστικό βρίσκεται στο ελάχιστο σημείο για το έδαφος (Εικόνα 9). Ακόμη στη συχνότητα αυτή οι επιδεκτικότητες των διαφόρων υλικών του εδάφους (π.χ. άμμος, ιλύς, άργιλος, νερό, άλατα / θρεπτικά συστατικά κοκ) έχουν πολύ κοντινές τιμές με αποτέλεσμα τόσο η σύσταση όσο και η δομή του εδάφους να έχουν πολύ μικρή επιρροή στην μέτρηση (Εικόνα 10).



Εικόνα 9 Γενικές καμπύλες για την ηλεκτρική επιδεκτικότητα σε σχέση με τη συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος (τα ϵ' και ϵ'' υποδηλώνουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της ηλεκτρικής επιδεκτικότητας).

Για το έδαφος στα 70 MHz το φανταστικό μέρος έχει τη μικρότερη τιμή.



Εικόνα 10 Επιδεκτικότητα διαφόρων υλικών του εδάφους σε σχέση με τη συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος (προσέγγιση)

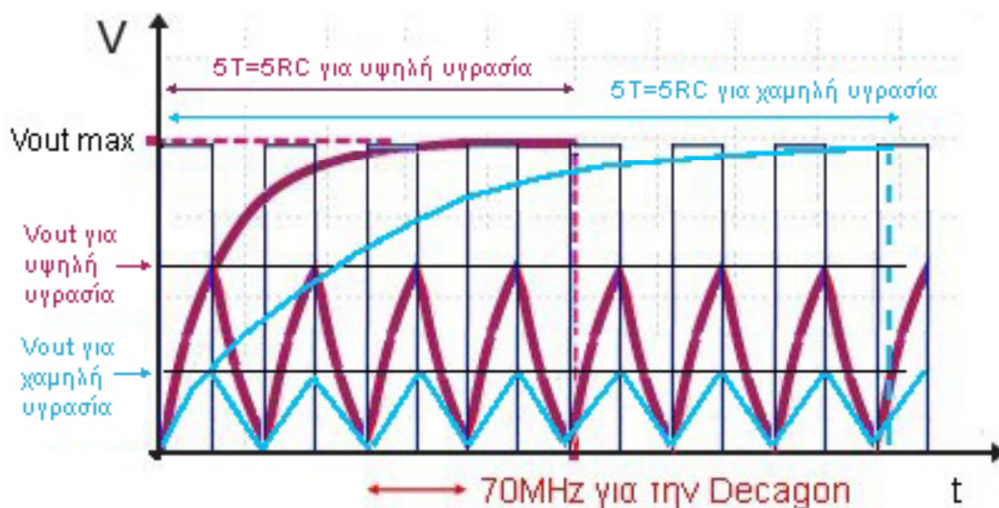
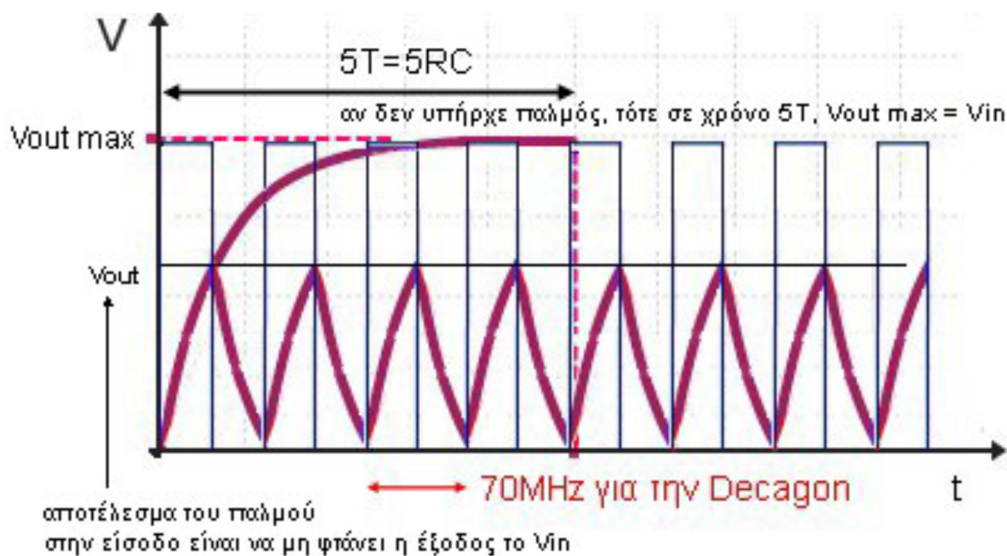
Σε μεγαλύτερες συχνότητες π.χ. 100MHz υπάρχει καλύτερη συμπεριφορά αλλά η μέτρηση αυτή αυξάνει σημαντικά το κόστος των ηλεκτρονικών (Κολιοπάνος, 2015). Επομένως τα 70MHz είναι ένα είδος «χρυσής τομής» που επέλεξε ο συγκεκριμένος κατασκευαστής.

Το θέμα της αποφυγής της ανάγκης μέτρησης του χρόνου

Η Εικόνα 8 παρουσιάζει το τι θα συμβεί αν εφαρμοστεί μία σταθερή πηγή συνεχούς ρεύματος. Αν όμως το ρεύμα εφαρμοστεί με παλμούς ή αλλιώς υπό μία παραλληλόγραμμη κυματομορφή (pulsed or square-wave waveform) που μεταβάλλει την τάση μεταξύ δύο ακραίων τιμών ακολουθώντας μία επιλεγμένη συχνότητα, η κατάσταση αλλάζει. Κάτι τέτοιο μπορεί να προκαλέσει η προσθήκη στο κύκλωμα ενός πηνίου (L) σε σειρά, οπότε δημιουργείται ένας ηλεκτρικός ταλαντωτής (ηλεκτρικός ταλαντωτής (oscillator) (Starr και Paltineanu, 2002). Στη συνέχεια, επειδή ξεφεύγει από το επίπεδο της παρουσίας αυτής, δεν παρουσιάζεται ο τρόπος παραγωγής της κυματομορφής.

Αν οι παλμοί εναλλάσσονται με χρόνο ίσο με 10T τότε θα προκύπτουν πλήρεις φορτίσεις και εκφορτίσεις καθώς στην αρχή και για χρόνο 5T θα επιτευχθεί πλήρης φόρτιση και στην συνέχεια στα επόμενα 5T πλήρης εκφόρτιση. Αν η περίοδος της κυματομορφής εισόδου είναι μικρότερη της χρονικής σταθεράς του συστήματος τότε θα προκύψει μεγαλύτερη συχνότητα ($f > 1/10RC$) και ο πυκνωτής δεν θα προλάβει να φορτιστεί πλήρως (Εικόνα 11). Η μορφή αυτή της εξόδου (που προσομοιάζει με τρίγωνα) είναι το αποτέλεσμα της λειτουργίας του κυκλώματος ως ολοκληρωτή (RC integrator). Ο ολοκληρωτής είναι ένα είδος φίλτρου μια και

ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος και την συχνότητα του ρεύματος εισόδου, η έξοδος δεν θα ξεπερνά κάποιο όριο που έχει τεθεί ως στόχος.



Εικόνα 11 Παλμική είσοδος ρεύματος σε κύκλωμα πυκνωτή – αντίστασης σε σειρά και αντίστοιχη έξοδος που μετριέται (σήμα).

Όταν το διηλεκτρικό υλικό του πυκνωτή είναι καλύτερο (καλύτερος μονωτής), αυξάνει η χωρητικότητα (C) (Εξίσωση 10). Αυτό συμβαίνει στο έδαφος συμβαίνει όταν η υγρασία είναι χαμηλή. Τότε στην έξοδο θα μετριέται μία τάση V_{out} μικρότερη αυτής που θα μετριόταν όταν στο έδαφος υπήρχε υψηλή υγρασία (Εικόνα 11).

Στην Εξίσωση 11 παρουσιάζεται η θεωρητική σχέση υπολογισμού της τάση εξόδου και φαίνεται ότι η μέτρησης της τάσης εξόδου μπορεί τελικά να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρησης της διηλεκτρική σταθεράς και κατά συνέπεια της υγρασίας του εδάφους.

$$V_{out} = \frac{1}{RC} \int_0^t V_{in} dt$$

από την οποία προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις

$$V_{out} = V_{in} \times (1 - e^{-t/RC})$$

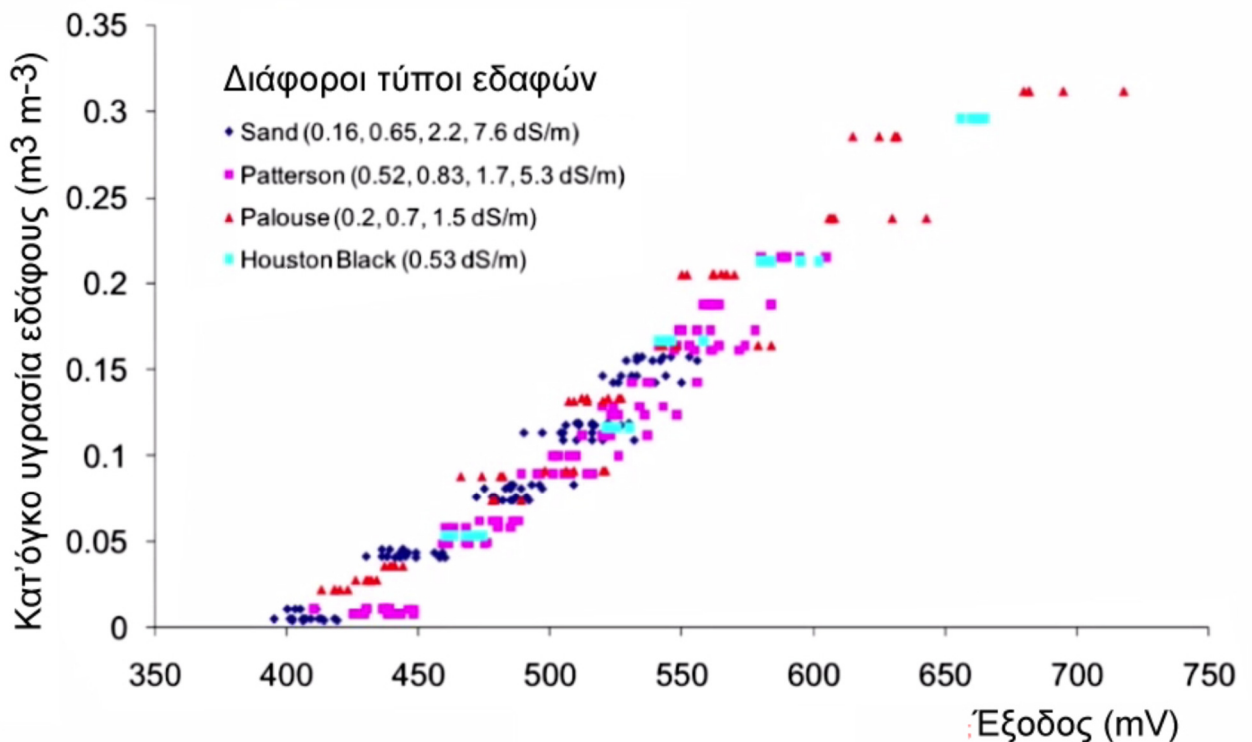
$$V_{out} = V_{in} \times e^{-t/RC}$$

που ισχύουν για την φάση της φόρτισης και την φάση της εκφόρτισης αντίστοιχα, και στις δύο περιπτώσεις η χωρητικότητα C μπορεί να αντικατασταθεί από τη σχέση

$$C = \kappa_t \times \epsilon_0 \times F$$

ενώ με τη σειρά της η κ_t συνδέεται με την κατ'όγκο υγρασία του εδάφους θ

Εξίσωση 11 Υπολογισμός τάσης εξόδου ολοκληρωτή (RC integrator) και σχέση της με την διηλεκτρική σταθερά του πυκνωτή – εδάφους και επομένως με την περιεχόμενη σε αυτό υγρασία



Εικόνα 12 Σχέση μετρούμενης εξόδου αισθητήρα capacitance/FD με την κατ'όγκο υγρασία διαφόρων εδαφών (Campbell, 2014)

Σε αυτή ακριβώς τη λογική, οι αισθητήρες που εξετάζονται στο πλαίσιο της εργασίας αυτής (EC5 και 10HS της Decagon Devices) εκτιμούν μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς του πυκνωτή - εδαφους την περιεχόμενη σε αυτό υγρασία. Το κύκλωμα είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε η κυματομορφή εισόδου και η κυματομορφή εξόδου να έχουν συχνότητα 70MHz (επιλογή της εταιρείας σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω) ενώ αντί της μέτρησης χρόνου αρκεί η μέτρηση τάσης εξόδου έχοντας ως δεδομένη την τάση εισόδου (3-15 V DC για τους αισθητήρες που εξετάζονται). Στη συνέχεια η τάση εξόδου που μετράται συσχετίζεται

μέσω εμπειρικών εξισώσεων με την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (Εικόνα 12). Για κάθε αισθητήρα η εταιρεία παρέχει εμπειρικές εξισώσεις για διάφορους τύπους εδαφών.

3.2.1.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ EC-5 by METER GROUP (πρώην DECAGON)

Η Decagon προτείνει τον EC5 για εφαρμογές όπου ο όγκος του υποστρώματος / εδάφους είναι μικρός όπως π.χ. για υποστρώματα υδροπονίας ή γλαστρικά φυτά ή σε ειδικές περιπτώσεις όπως μετρήσεις κοντά στην σε εξωτερικές επιφάνειες, σε στήλες υποστρώματος / εδάφους στο εργαστήριο κοκ (Decagon, 2009).

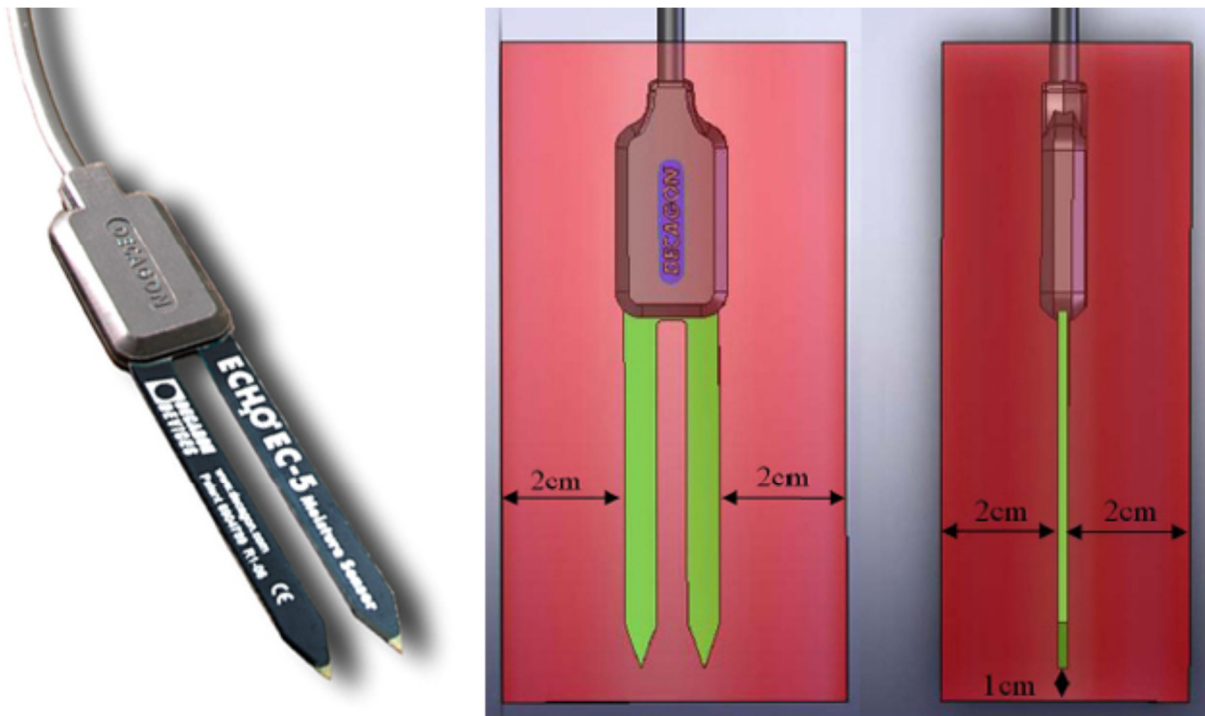
Το 2005, η εταιρεία βελτιστοποίησε την συχνότητα λειτουργίας του αισθητήρα (70 MHz -Kizito κ.α., 2008, Bogena κ.α., 2007 από (Decagon, 2009)) επιτυγχάνοντας πολύ υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις (Decagon, 2009). Στη συνέχεια η ίδια συχνότητα εφαρμόστηκε και στον 10HS.

Τα χαρακτηριστικά του EC5 (Εικόνα 13) συνοψίζονται στα ακόλουθα σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο της εταιρείας για τον αισθητήρα (Decagon, 2012):

1. διαστάσεις αισθητήρα: 8.9cm x 1.8cm x 0.7cm
2. μήκος λαμών: 5 cm
3. μήκος καλωδίου: 5m τυπικό (ειδικά μήκη αλλά και επεκτάσεις καλωδίου είναι διαθέσιμες)
4. τύπος σύνδεσης: βύσμα 3.5 mm (stereo plug) ή γυμνά καλώδια (Εικόνα 13)
5. Συμβατότητα με καταγραφικά: Decagon: Em5b, Em50, Campbell Scientific: CR10X, 21X, 23X, CR1000, CR3000 (χωρίς να αποκλείονται και άλλα που πληρούν τις απαιτήσεις τροφοδοσίας και λήψεις σήματος του αισθητήρα)
6. θερμοκρασία λειτουργίας: -40 έως +60 °C
7. εύρος μέτρησης κατ'όγκο υγρασία (θ ή VWC): 0-100 m³ m⁻³ (0 -100% VWC, μετρά έως τον κορεσμό)
8. ακρίβεια, VWC: ±3% VWC (± 0.03 m³ m⁻³) χωρίς βαθμονόμηση – χρησιμοποιώντας τη γενική εξίσωση μετατροπής σήματος σε υγρασία, για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)<10 dS m⁻¹ και ±1-2% VWC (± 0.01 έως 0.02 m³ m⁻³) μετά από ειδική βαθμονόμηση για το κάθε υπόστρωμα / χώμα
9. απαιτήσεις για τροφοδοσία (excitation): 2.5VDC έως 3.6VDC στα 10mA
10. Σήμα εξόδου: 10-40% της τάσης τροφοδοσίας (250-1000mV για τροφοδοσία 2500mV)

Ο όγκος ευαισθησίας είναι ένα ελλειψοειδές στερεό με όγκο 181 cm³ (Cobos, 2010β).

Για να αυξήσει την ανάλυση του σήματος εξόδου, η Decagon χρησιμοποιεί για την καταχώρηση των μετρήσεων όλα τα νούμερα που μπορούν να αποθηκευτούν στα 12-bit (4096 συνδυασμοί) (Decagon, 2012).



Εικόνα 13 Decagon EC5 και όγκος ευαισθησίας του αισθητήρα (Cobos D.R., 2008)



Εικόνα 14 Συνδέσεις αισθητήρα στο καταγραφικό

Γενική εξίσωση μετατροπής σήματος του EC5 σε υγρασία

Στο τεχνικό φυλλάδιο του αισθητήρα (Decagon, 2012) παρέχονται εκτός από την γενική εξίσωση για ανόργανα εδάφη, εξισώσεις για χώμα γλαστρικών, πετροβάμβακα και περλίτη (οι σχέσεις που παρέχονται ισχύουν μόνο εάν τη τάση τροφοδοσίας του αισθητήρα είναι ίση με 2500mV). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμες και άλλες εξισώσεις βαθμονόμησης για διάφορα εδάφη π.χ. Irrigation Association (2008), Kodešová (2011).

Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του αισθητήρα (Decagon, 2012), η ηλεκτρική επιδεκτικότητα δίνεται με βάση της εξίσωση Torpp (Εξίσωση 9) από την Εξίσωση 12.

$$\epsilon = 1 / (-1,10570 \times 10^{-9} \times RAW^3 + 3,57500 \times 10^{-6} \times RAW^2 - 3,95570 \times 10^{-3} \times RAW + 1,53153)$$

όταν χρησιμοποιούνται οι ενδείξεις σε raw counts από καταγραφικά της Decagon με τάση εισόδου 3mV, ενώ για καταγραφικά άλλων κατασκευαστών, ισχύει:

$$\epsilon = 1 / (-3,33260 \times 10^{-9} \times mV^3 + 7,02180 \times 10^{-6} \times mV^2 - 5,11647 \times 10^{-3} \times mV + 1,30746)$$

Εξίσωση 12 Εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε ηλεκτρική επιδεκτικότητα για τον EC5 με βάση την εξίσωση Torpp (Decagon, 2012)

Σύμφωνα με την ίδια αναφορά (Decagon, 2012), η γενική εξίσωση σύνδεσης σήματος εξόδου με κατ'όγκο υγρασία ισχύει για όλα τα ανόργανα εδάφη με EC από 0.1 dS m⁻¹ έως 10 dS m⁻¹ και παρέχει -εάν ο αισθητήρας τοποθετηθεί σωστά- ακρίβεια ±3% VWC (0,03 m³ m⁻³) ή και καλύτερη (Εξίσωση 13).

$$\theta = 8.5 \times 10^{-4} \times RAW - 0.48 \text{ (για καταγραφικά της Decagon)}$$

ή

$$\theta = 11.9 \times 10^{-4} \times mV - 0.401 \text{ (για άλλα συμβατά με τον αισθητήρα καταγραφικά)}$$

όπου:

θ η κατ'όγκο υγρασία του εδάφους

RAW είναι το σήμα εξόδου ενός καταγραφικού της Decagon που παρέχει τάση εισόδου στο αισθητήρα 3V (π.χ. em50) και

mV είναι το σήμα εξόδου του αισθητήρα όταν δέχεται τάση εισόδου 2500 mV

Εξίσωση 13 Γενική εμπειρική εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε κατ'όγκο υγρασία για τον EC5 (Decagon, 2012)

Η Εξίσωση 13 δίνει ένα μέγιστο περίπου 60% VWC σε καθαρό νερό. Αυτό είναι αρκετό για τα περισσότερα ανόργανα εδάφη όπου ο κορεσμός επέρχεται συνήθως στο 40-50%. Αν χρειάζονται μετρήσεις στην κλίμακα 0-100% πρέπει να γίνει βαθμονόμηση με πολυώνυμο 3ου βαθμού (Decagon, 2012).

3.2.1.3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ 10HS by METER GROUP (πρώην DECAGON)

Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του αισθητήρα (Decagon, 2009) ο 10HS συστήνεται για μετρήσεις υγρασίας σε ανόργανα εδάφη. Επίσης σύμφωνα με τον κατασκευαστή ο αισθητήρας έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε υποστρώματα όπου η ομοιογένεια αποτελεί πρόβλημα. Σύμφωνα με την ίδια πηγή, η αρχή υπολογισμού βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται για την φόρτιση (ή εκφόρτιση) του πυκνωτή (έδαφος) υπό την επίδραση κυματοειδούς εισόδου και την σχέση αυτής με την διηλεκτρική σταθερά του εδάφους η οποία θα αλλάζει ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε νερό (Εξίσωση 14). Η σχέση αυτή είναι σε συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω και δείχνει ότι ο χρόνος που θα απαιτηθεί για τη φόρτιση του πυκνωτή θα είναι ανάλογος της διηλεκτρικής σταθεράς και της χωρητικότητας αυτού. Μία συνοπτική αλλά ολοκληρωμένη παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου που διέπει την αρχή λειτουργίας των αισθητήρων αυτών παρέχεται Visconti κ.α. (2014).

$$t = R \times C \times \ln [(V-V_f)/(V_i-V_f)]$$

και αν αντικατασταθεί το C από την Εξίσωση 40, προκύπτει

$$k_t = t / \{ (\epsilon_0 F) \times R \times \ln [(V-V_f)/(V_i-V_f)] \}$$

όπου:

t χρόνος φόρτισης (ή εκφόρτισης) του πυκνωτή (έδαφος) υπό την επίδραση κυματοειδούς εισόδου (ουσιαστικά μέτρο της συχνότητας του ρεύματος εισόδου)

R η αντίσταση του κυκλώματος μέτρησης C η

χωρητικότητα του πυκνωτή –εδάφους-

F η γεωμετρική σταθερά του πυκνωτή –εδάφους-

k_t η διηλεκτρική επιδεκτικότητα (διηλεκτρική σταθερά) του μέσου μεταξύ των ηλεκτροδίων του αισθητήρα

ϵ_0 η διηλεκτρική επιδεκτικότητα του κενού

V η τάση κατά τον χρόνο t (ουσιαστικά η τάση εξόδου - σήμα που θα μετρηθεί) V_i είναι η αρχική τάση

V_f είναι η τάση εισόδου

Εξίσωση 14 Εξισώσεις υπολογισμού της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους με βάση το τεχνικό φυλλάδιο του 10HS (Decagon, 2009)

Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του αισθητήρα (Decagon, 2009), ο 10HS:

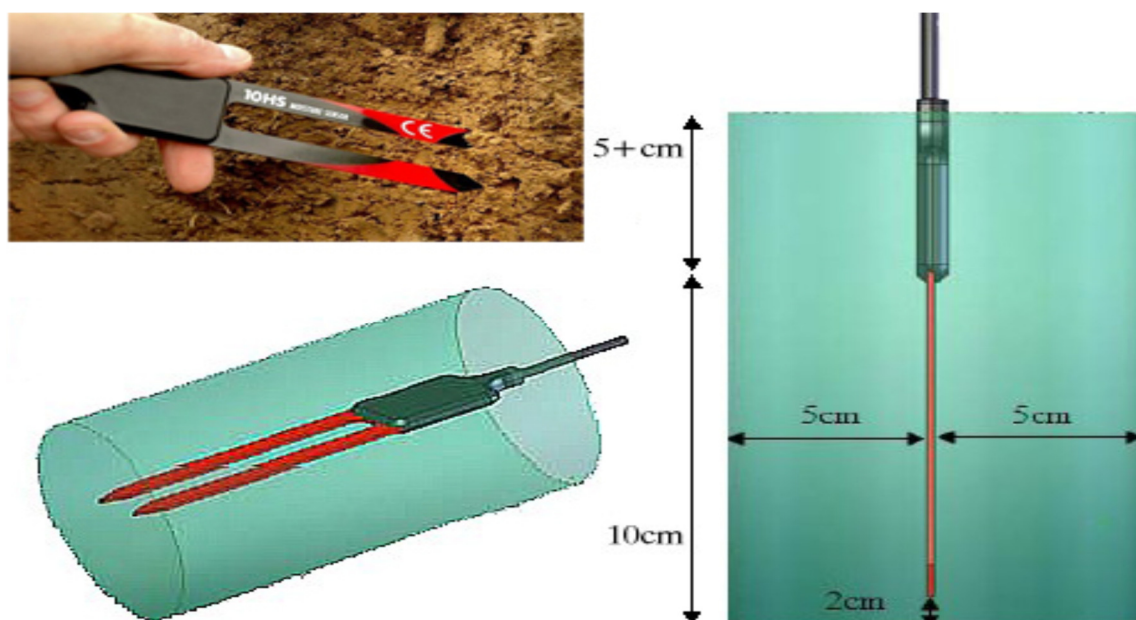
1. έχει μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια και πολύ υψηλή ανάλυση (resolution) χαρακτηριστικά που δίνουν τη δυνατότητα να γίνονται μετρήσεις που να διακρίνουν

αλλαγές στην υγρασία με μεγάλη συχνότητα (π.χ. ανά ώρα ή και λιγότερο) για μεγάλη χρονική περίοδο

2. χρησιμοποιεί την βελτιστοποιημένη συχνότητα λειτουργίας που η εταιρεία εφάρμοσε για πρώτη φορά το 2005 στον EC5
3. έχει ενσωματωμένο ρυθμιστή τάσης εισόδου που επιτρέπει την τροφοδοσία του αισθητήρα με συνεχή τάση από 3 έως 15 V χωρίς ανάγκη για ειδική βαθμονόμηση
4. έχει μεγάλο όγκο ευαισθησίας που επιτρέπει πιο αντιπροσωπευτικές μετρήσεις της υγρασίας του εδάφους.

Ο όγκος ευαισθησίας είναι ένα ελλειψοειδές στερεό με όγκο $\approx 1160 \text{ cm}^3$ (Cobos, 2010α).

Εξαιτίας ακριβώς του μεγάλου όγκου της περιοχής δείγματος ο κατασκευαστής δεν προτείνει τον αισθητήρα αυτό για υποστρώματα υδροπονίας ή μικρά δοχεία ή γενικά όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμοι μεγάλοι όγκοι υποστρώματος (Decagon Devices, 2009).



Εικόνα 15 Decagon 10HS και όγκος ευαισθησίας του αισθητήρα (Cobos, 2008α)

Τα χαρακτηριστικά του 10HS (Εικόνα 15) συνοψίζονται στα ακόλουθα (Decagon, 2009 και 2010, Cobos, 2008 α και β):

1. μήκος λαμών: 10 cm

2. μήκος καλωδίου: 5m τυπικό (ειδικά μήκη αλλά και επεκτάσεις καλωδίου είναι διαθέσιμες)
3. τύπος σύνδεσης: βύσμα 3.5 mm (stereo plug) ή γυμνά καλώδια (Εικόνα 21)
4. συμβατότητα με καταγραφικά: Decagon: Em50, Em50R, Em5b, ProCheck handheld reader, Campbell Scientific: CR10X, 21X, 23X, CR850, 1000, 3000 (χωρίς να αποκλείονται και άλλα που πληρούν τις απαιτήσεις τροφοδοσίας και λήψεις σήματος του αισθητήρα)
5. θερμοκρασία λειτουργίας: λειτουργία: 0 – 50 °C, επιβίωση: -40 to 50 °C
6. εύρος μέτρησης:
 - a. φαινόμενη διηλεκτρική περατότητα (ea, apparent dielectric permittivity): 1 (αέρας) έως 50
 - b. κατ'όγκο υγρασία (θ ή VWC): 0 – 0.57 m³/m³ (0 -57% VWC)
7. ακρίβεια
 - a. (φαινόμενη διηλεκτρική επιδεκτικότητα): ± 0.5 για ea από 2 έως 10, ± 2.5 για ea από 10 έως 50
 - b. VWC: $\pm 3\%$ VWC (± 0.03 m³ m⁻³) χωρίς βαθμονόμηση – χρησιμοποιώντας τη γενική εξίσωση μετατροπής σήματος σε υγρασία, για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)<10 dS m⁻¹ και $\pm 2\%$ VWC (± 0.02 m³ m⁻³) μετά από ειδική βαθμονόμηση για το κάθε υπόστρωμα / χώμα
8. ανάλυση:
 - a. για ea από 1 έως 30, 0.2 για ea από 30 έως 50
 - b. VWC: 0.0008 m³ m⁻³ (0.08% VWC) σε ανόργανα εδάφη από 0 έως 0.50 m³ m⁻³ (0-50% VWC)
9. χρόνος μέτρησης: 10 ms (milliseconds)
10. απαιτήσεις για τροφοδοσία (excitation): από 3VDC στα 12mA έως 15 VDC στα 15 mA
11. σήμα εξόδου: 300 – 1250 mV, ανεξάρτητα από την τάση εισόδου (αρκεί να είναι εντός των ορίων που αναφέρθηκαν παραπάνω)

Γενική εξίσωση μετατροπής σήματος του 10HS σε υγρασία

Ο αισθητήρας 10HS είναι βαθμονομημένος από τον κατασκευαστή ώστε να μετρά την διηλεκτρική επιδεκτικότητα του εδάφους με την ακρίβεια που έχει ήδη αναφερθεί (Decagon, 2009). Οι εξίσωση που συνδέει την μέτρηση (σήμα) με την διηλεκτρική επιδεκτικότητα του εδάφους δίνεται στη συνέχεια (Εξίσωση 15).

Η Decagon (2009) ανέπτυξε μία τυπική εξίσωση βαθμονόμησης για την περίπτωση που ο 10HS χρησιμοποιείται σε ανόργανα εδάφη (Εξίσωση 13). Η εταιρεία αναφέρει ότι με βάση την εξίσωση αυτή και προσεκτική εγκατάσταση του αισθητήρα η ακρίβεια μπορεί να φτάσει τα επίπεδα του $\pm 3\%$ VWC (0.03 m³/m³) ή και ακόμη καλύτερα και έτσι προτείνει να μη γίνεται βαθμονόμηση του αισθητήρα για τα διάφορα ανόργανα εδάφη. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι συντελεστές που παρέχονταν στο εγχειρίδιο του αισθητήρα το 2008 για τη μετατροπή

από raw counts σε θ , δεν ήταν οι ίδιοι (0 αντί του 1.17×10^{-9} , 3.13×10^{-7} αντί του -3.95×10^{-6} , -1.47×10^{-4} αντί του 4.9×10^{-3} και -5.82×10^{-2} αντί του -1.92 (Visconti κ.α., 2014).

Το σημείο κλειδί είναι και εδώ το «προσεκτική εγκατάσταση» μια και η πιθανότητα προβλήματος κατά την εγκατάσταση π.χ. δημιουργία θυλάκων αέρα γύρω από τον αισθητήρα ή μετά από κάποιο καιρό π.χ. ανάπτυξη ριζών στην περιοχή του αισθητήρα είναι υψηλή.

$$\epsilon_s = 7.449 \times 10^{-11} \times \text{RAW}^4 - 1.969 \times 10^{-7} \times \text{RAW}^3 + 1.890 \times 10^{-4} \times \text{RAW}^2 - 6.691 \times 10^{-2} \times \text{RAW} + 7.457 \text{ (για καταγραφικά της Decagon)}$$

ή

$$\epsilon_s = 2.589 \times 10^{-10} \text{ mV}^4 - 5.010 \times 10^{-7} \text{ mV}^3 + 3.523 \times 10^{-4} \text{ mV}^2 - 9.135 \times 10^{-2} \text{ mV} + 7.457 \text{ (για άλλα συμβατά με τον αισθητήρα καταγραφικά)}$$

όπου:

ϵ_s η φαινόμενη διηλεκτρική επιδεκτικότητα (apparent dielectric permittivity)

RAW είναι το σήμα εξόδου ενός καταγραφικού της Decagon και

mV είναι το σήμα εξόδου του αισθητήρα όταν δέχεται το καταγραφικό παρέχει τάση μεταξύ 3-15 VDC

Εξίσωση 15 Γενική εμπειρική εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε διηλεκτρική επιδεκτικότητα για τον 10HS (Decagon, 2009)

$$\theta = 1.17 \times 10^{-3} \times \text{RAW}^3 - 3.95 \times 10^{-5} \times \text{RAW}^2 + 4.90 \times 10^{-3} \times \text{RAW} - 1.92 \text{ (για καταγραφικά της Decagon)}$$

ή

$$\theta = 2.97 \times 10^{-3} \text{ mV}^3 - 7.37 \times 10^{-6} \text{ mV}^2 + 6.69 \times 10^{-3} \text{ mV} - 1.92 \text{ (για άλλα συμβατά με τον αισθητήρα καταγραφικά)}$$

όπου:

θ η κατ'όγκο υγρασία του εδάφους

RAW είναι το σήμα εξόδου ενός καταγραφικού της Decagon που παρέχει τάση εισόδου στο αισθητήρα 3V (π.χ. em50) και

mV είναι το σήμα εξόδου του αισθητήρα όταν δέχεται το καταγραφικό παρέχει τάση μεταξύ 3-15 VDC

Εξίσωση 16 Γενική εμπειρική εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε κατ'όγκο υγρασία για τον 10HS

Μετρήσεις σε raw counts και σε mV

Όπως αναφέρθηκε πριν τα καταγραφικά της Decagon παρέχουν μετρήσεις σε raw counts οι οποίες μετατρέπονται σε κατ'όγκο υγρασία. Η έξοδος του αισθητήρα είναι σε mV, ο λόγος που η εταιρεία χρησιμοποιεί τα raw counts είναι για να αυξήσει την ανάλυση (resolution) της εξόδου του αισθητήρα αξιοποιώντας όλους τους διαθέσιμους συνδυασμούς των 12-bit (4096 συνδυασμοί). Σύμφωνα με την Decagon (2012), για τον EC5 ισχύει η εξίσωση μετατροπής $mV = 0,61 \text{ RAW}$. Στο αντίστοιχο εγχειρίδιο του 10HS δεν υπάρχει σχετική πληροφορία. Η μετατροπή αυτή αν συνδυαστεί με τις εξισώσεις που δίνει η Decagon (2012) για μετατροπή του σήματος από raw ή mV σε θ δίνει μικρές διαφοροποιήσεις όσο αφορά το θ . Αντίστοιχες εξισώσεις μετατροπής παρέχονται από τον Τσιρογιάννη (2011):

- για τον EC5 η σχέση μετατροπής mV σε raw counts βρέθηκε να είναι: Σήμα σε raw counts (RU) = $1,5398 \text{ Σήμα σε mV} + 49,042$ ($R^2 = 0,98$). Η σχέση αυτή ισχύει μόνο εάν η διέγερση του αισθητήρα γίνει με τάση 3V. Αν συγκριθεί με τη σχέση της Decagon (2012) η σχέση αυτή δίνει γενικά τιμές θ πιο κοντά σε αυτές που λαμβάνονται με μετατροπή από τα raw counts (μέση διαφορά -2,64% αντί -2,96% και τυπική απόκλιση 1,17% αντί 1,88%).

- για τον 10HS η σχέση μετατροπής mV σε raw counts βρέθηκε να είναι: Σήμα σε raw counts = $1,3686 \text{ Σήμα σε mV} - 0,2379$ ($R^2 = 1$). Η σχέση αυτή ισχύει μόνο εάν η διέγερση του αισθητήρα γίνει με τάση 3-15V.

Αισθητήρες στο πεδίο και μετρήσεις

Σύμφωνα με τον Campbell (2013) χρειάζονται περισσότεροι από δύο αισθητήρες για την αξιόπιστη μέτρηση του υδατικού ισοζυγίου ενός αγρού: αυτός που θα είναι κοντά στην επιφάνεια θα δίνει πληροφορία σχετικά με την υγρασία στην περιοχή των ριζών ενώ ο βαθύτερος θα δίνει πληροφορία σχετικά με απώλειες νερού που στραγγίζει προς βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Σε άλλη αναφορά, η Decagon (2015) προτείνει τη χρήση 3 αισθητήρων κατά βάθος όταν το ζητούμενο είναι ο εντοπισμός της υδατοϊκανότητας.



Εικόνα 16 Προτεινόμενος προσανατολισμός επιπέδου αισθητήρα ως προς επίπεδο εδάφους ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις από την προς τα κάτω κίνηση του νερού (Decagon, 2012)



Εικόνα 17 Δύο μεγάλες τρύπες στο έδαφος (κόκκινοι κύκλοι) πιθανότατα από κάποιο ζώο πολύ κοντά στη θέση τοποθέτησης των αισθητήρων (μπλε κύκλος) δείχνουν πόσο μεγάλος είναι ο κίνδυνος για δημιουργία προβλημάτων από τυχαίες αιτίες στις μετρήσεις στον αγρό με αποτέ

Σύμφωνα με την Decagon (2012), όσο αφορά τον EC5 όταν πρέπει να επιλεγεί η θέση εγκατάστασης, είναι σημαντικό να έχουμε κατά νου ότι το έδαφος που θα είναι στην περιοχή ευαισθησίας του αισθητήρα θα είναι και αυτό που θα επηρεάσει την μέτρηση και για το λόγο αυτό ότι συμβαίνει εντός του όγκου ευαισθησίας πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό της περιοχής για την οποία μετράμε. Έτσι κενά αέρα, μεγάλη συμπίεση, εγγύτητα σε πηγές νερού, εγγύτητα σε μεγάλες πέτρες κοκ αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τον αισθητήρα (Εικόνα 16). Ακόμη οι αισθητήρες δεν πρέπει να κοντά σε μεταλλικά αντικείμενα που θα επηρεάσουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του αισθητήρα. Επειδή ο EC5 (όπως και ο 10HS) έχει

κενά μεταξύ των λαμών του η παρουσία στην περιοχή αυτή ξύλων, ριζών κοκ αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τις μετρήσεις. Η Bissey (2012), στο πλαίσιο μίας παρουσίας της Decagon συνοψίζει όσα πρέπει να ληφθούν υπόψη σχετικά με τη θέση εγκατάστασης:

1. Καθορίστε το στόχο αξιοποίησης των δεδομένων:
 - a. Διαχείριση άρδευσης ή απλά συλλογή δεδομένων για παρακολούθηση της υγρασίας εδάφους
2. Σκεφτείτε τι μπορεί να προκαλεί χωρική διαφοροποίηση στην υγρασία εδάφους:
 - a. Διαφοροποιήσεις από μεταχείριση σε μεταχείριση ή από στάση σε στάση του αρδευτικού συστήματος;
 - b. Μορφή ανάγλυφου (πχ. κλίσεις, ύπαρξη στραγγιστικών τάφρων κοκ)
 - c. Μεταβολές υγρασίας με το βάθος (κίνηση νερού με το βάθος, αλλαγές σε τύπος και πυκνότητα εδάφους με το βάθος, βάθος ριζοστρώματος)
 - d. Μεταβολές του τύπου και της πυκνότητας του εδάφους (π.χ. συμπίεση)
 - e. Εγγύτητα σε περιοχές με ρίζες σε αντιδιαστολή με ανοικτούς χώρους
 - f. Επιδράσεις από την κόμη της καλλιέργειας που αφορούν την εξάτμιση και την ενεργό βροχόπτωση)
 - g. Τυχαίες επιδράσεις
3. Σκεφτείτε τη διαδικασία λήψης δεδομένων:
 - a. Ποιος μπορεί να κατεβάζει τα δεδομένα και τι πρόσβαση σε σχετικό εξοπλισμό μπορεί να έχει (δεν αναφέρεται στο Bissey, 2012);
 - b. Πόσο δύσκολο είναι να επισκέπτεται κάποιος το χώρο για να κατεβάζει δεδομένα.
 - c. Αν χρησιμοποιηθούν ασύρματα καταγραφικά μπορεί να χρειάζεται σχετική κάλυψη δικτύου

Η Decagon (2012) αναφέρει την ακόλουθη διαδικασία εγκατάστασης:

1. Αφού σκάψετε μία τρύπα έως το επιθυμητό βάθος, σπρώξτε τον αισθητήρα στο αδιατάρακτο έδαφος στο βάθος της τρύπας ή στα τοιχώματά της. Αν το έδαφος είναι σχετικά σκληρό μπορείτε να το διαβρέξετε πριν την εισαγωγή του αισθητήρα. Σε συμπαγή εδάφη μπορεί η προσπάθεια για εισαγωγή του αισθητήρα να προκαλέσει σπάσιμό του, άρα συστήνεται να δημιουργηθεί αρχικά μία σχισμή με ένα κατάλληλο εργαλείο.
2. Η τρύπα πρέπει να γεμίσει με χώμα έτσι ώστε να αποκατασταθεί όσο είναι δυνατό η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους. Σιγουρευτείτε ότι όλος ο αισθητήρας μαζί με την κεφαλή του όπου βρίσκεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι εντός του εδάφους. Χρειάζεται προσοχή να μην λυγίσει το σημείο που ενώνει τον αισθητήρα με το καλώδιο.

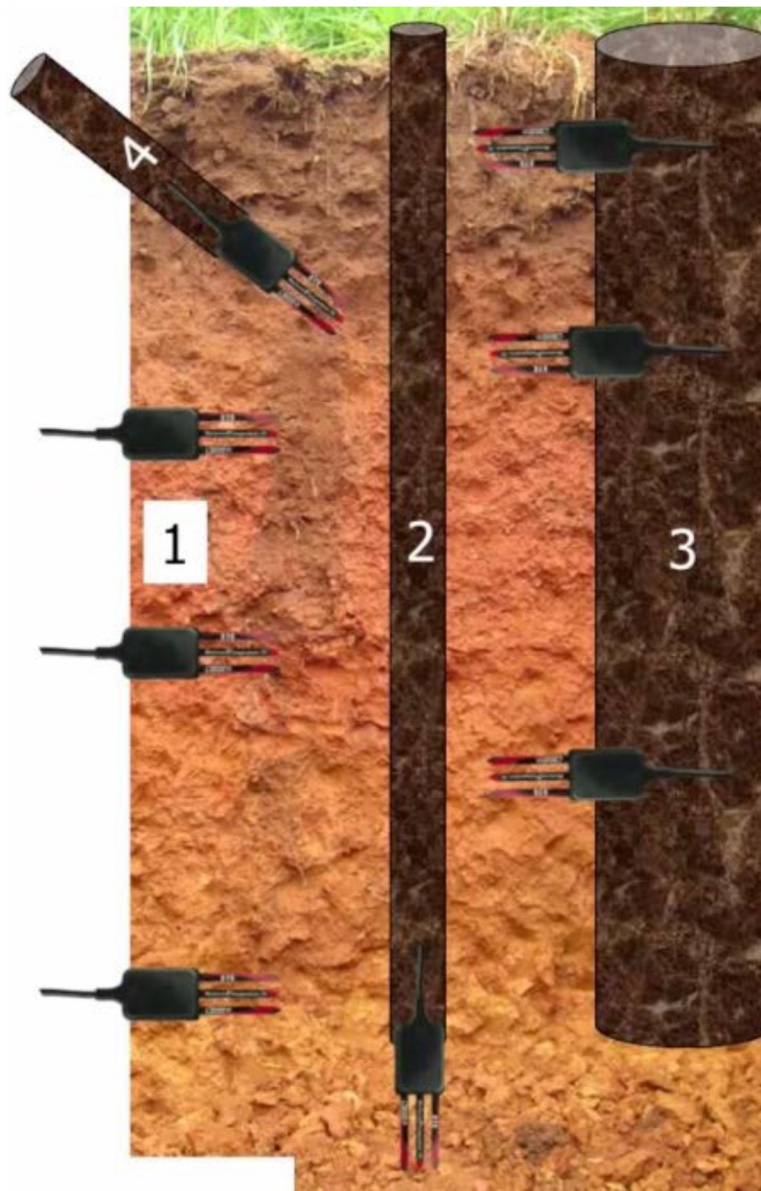
Σύμφωνα με την Decagon (2009), όσο αφορά τον 10HS ισχύουν όσα αναφέρθηκαν για τον EC5 (Decagon, 2012), λαμβάνοντας όμως υπόψη τη μεγαλύτερη πιθανότητα να υπάρξει πρόβλημα λόγω του μήκους των λαμών του αν προσπαθήσουμε να τον σπρώξουμε στη θέση

τοποθέτησης. Επιπλέον ο 10HS δεν πρέπει να εγκαθίσταται σε απόσταση μικρότερη από 5 cm από την επιφάνεια του εδάφους μια και τότε μέρος του ηλεκτρομαγνητικού του πεδίου θα μετρά και τον αέρα που βρίσκεται έξω από το έδαφος. Η Decagon (2009) προτείνει δύο τρόπους εγκατάστασης:

1. οριζόντια τοποθέτηση: σκάβετε μία τρύπα λίγα εκατοστά βαθύτερη από το βάθος όπου θα εγκατασταθεί ο αισθητήρας. Στόχος είναι να τοποθετήσετε τον αισθητήρα σε αδιατάρακτο έδαφος.
2. κατακόρυφη τοποθέτηση: σκάβετε μία τρύπα διαμέτρου 10cm στο βάθος που επιθυμείτε να τοποθετήσετε τον αισθητήρα. Αυτό μπορεί να γίνει και με ένα κατάλληλο εργαλείο λήψης εδαφικού δείγματος. Εισάγετε τον αισθητήρα στο αδιατάρακτο έδαφος στο βάθος της τρύπας είτε με το χέρι είτε με κάποιο βοηθητικό εργαλείο (συνήθως ένα σωλήνα PVC κατάλληλα διαμορφωμένο, το καλώδιο μπαίνει ειδική εγκοπή κάθετη στο επίπεδο των εγκοπών που στηρίζουν – βοηθούν στην τοποθέτηση του αισθητήρα, Εικόνα 19).



Εικόνα 18 Σωλήνας PVC ειδικά διαμορφωμένος ως εργαλείο τοποθέτησης αισθητήρα (πηγή: Onset – Installing Soil Moisture Sensors)



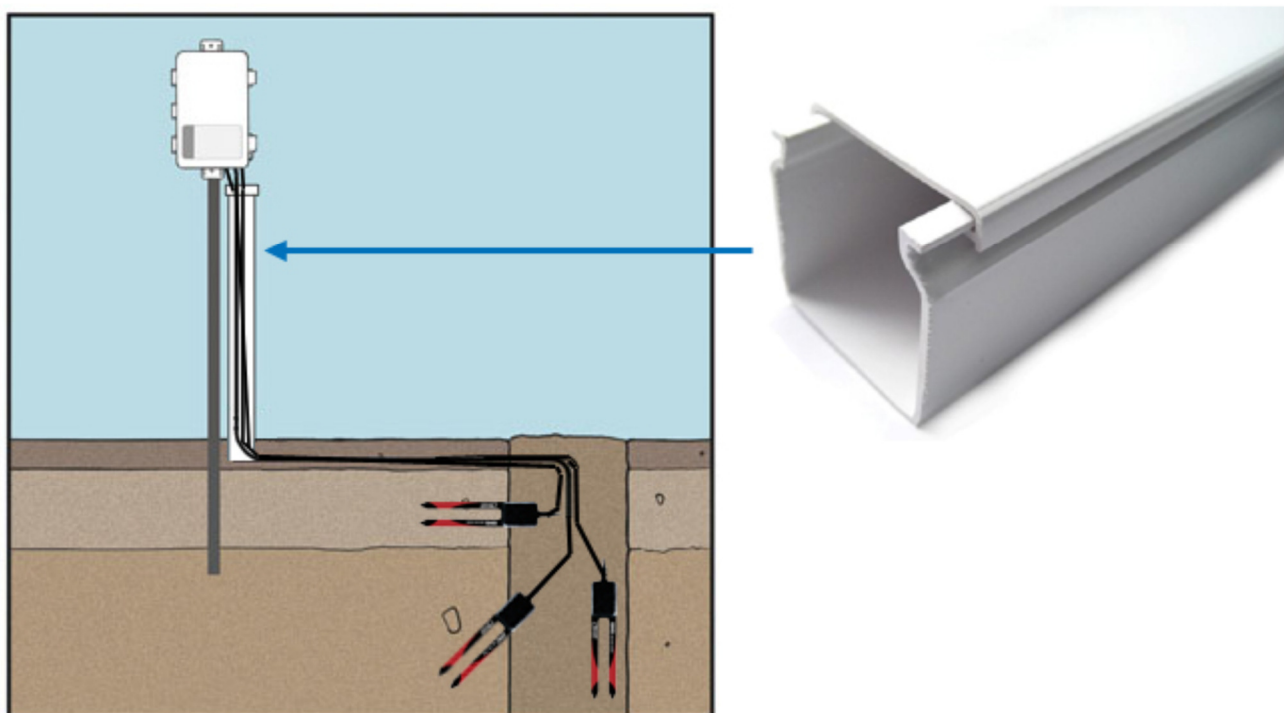
Εικόνα 19 Προτεινόμενοι τρόποι εγκατάστασης (Campbell, 2017β)

3. Και στις δύο περιπτώσεις:

- Αν δεν μπορεί να μπει εύκολα (παρά το ότι οι λάμες έχουν σχήμα που βοηθά σε αυτό) θα πρέπει ή να διαβρέξετε το χώμα ή να δημιουργήσετε μία σχισμή-οδηγό με τη λάμα τοποθέτησης ή άλλο κατάλληλο εργαλείο (Decagon 2009 και 2017γ).
- Σιγουρευτείτε ότι όλος ο αισθητήρας μαζί με την κεφαλή του όπου βρίσκεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι εντός του εδάφους.
- Χρειάζεται προσοχή να μην λυγίσει το σημείο που ενώνει τον αισθητήρα με το καλώδιο.
- Η τρύπα πρέπει να γεμίσει με χώμα έτσι ώστε να αποκατασταθεί όσο είναι δυνατό η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους.

Όσο αφορά τον προσανατολισμό (Decagon 2009 και 2012), ο αισθητήρας μπορεί να τοποθετηθεί με οποιοδήποτε προσανατολισμό. Σε κάθε περίπτωση συστήνεται το επίπεδο του να τοποθετείται κάθετα στο επίπεδο της επιφάνειας της επιφάνειας του εδάφους ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις από την προς τα κάτω κίνηση του νερού (Εικόνα 16).

Σύμφωνα με τον Campbell (2017β), οι EC5 και 10HS, μπορούν να τοποθετηθούν και υπό γωνία 45° (Εικόνα 19). Αυτός ο τρόπος σύμφωνα με τον Campbell (2017β) παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι αφού το καλώδιο δεν είναι κατακόρυφα πάνω από την περιοχή του αισθητήρα δεν οδηγεί νερό –ή τέλος πάντων το κάνει σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τις άλλες τοποθετήσεις- από την επιφάνεια στην περιοχή του αισθητήρα.



Εικόνα 20 Σωλήνας προστασίας καλωδίων κατά την εγκατάσταση (επεξεργασμένο σχέδιο με βάση γραφική απεικόνιση του N. Kroese (<http://www.illustrationnk.com/>))

Ακόμη συστήνεται να υπάρχει προστασία των καλωδίων των αισθητήρων από το καταγραφικό έως και περίπου 5cm εντός του εδάφους. Η εμπειρία έχει δείξει ότι επειδή υπάρχουν περιπτώσεις που πρέπει να γίνει αντικατάσταση αισθητήρα, η χρήση σωλήνα PE ή σπιράλ για το σκοπό αυτό δεν είναι τόσο πρακτική και συστήνεται η χρήση ηλεκτρολογικών καναλιών με καπάκι (Εικόνα 20). Η πιθανή περίσσεια καλωδίου μαζεύεται πάνω από το σωλήνα προστασίας και κάτω από το καταγραφικό.

Τέλος συστήνεται η σήμανση τόσο των καλωδίων των αισθητήρων (σε απόσταση ώστε οι ετικέτες να είναι εκτός του καταγραφικού) με αναφορά στο βάθος και θέση εγκατάστασης όσο και η επικόλληση φωσφορίζουσας ταινίας στο καλώδιο σύνδεσης του καταγραφικού με τον υπολογιστή που χρησιμοποιείται (αν χρησιμοποιείται) για τη διαχείριση του

καταγραφικού μια και αν πέσει στον αγρό είναι πολύ δύσκολο (λόγω του μικρού του μεγέθους και του μαύρου χρώματός του να εντοπιστεί).



Εικόνα 21 Σήμανση καλωδίου αισθητήρα (Bissey, 2012) και σήμανση καλωδίου σύνδεσης καταγραφικού με Η/Υ (Τσιρογιάννης, 2017)

Απεγκατάσταση

Κατά την αφαίρεση του αισθητήρα από το έδαφος δεν θα πρέπει να τραβιέται από το καλώδιο (Decagon 2009 και 2012). Σε κάθε περίπτωση, η εμπειρία έχει δείξει ότι η απεγκατάσταση είναι μία απαιτητική εργασία που χρειάζεται υπομονή και προσεκτικούς χειρισμούς έως ότου απελευθερωθεί από το έδαφος ο αισθητήρας.

3.2.1.4 ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΟ EM50 by METER GROUP (πρώην DECAGON), ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ECH20 Utility

Οι καταγραφές μπορούν να γίνουν με μία σειρά καταγραφικά (data loggers). Σχετικά με τη συμβατότητα έγινε αναφορά στα χαρακτηριστικά των αισθητήρων. Ο em50 της Decagon είναι από τους πιο κοινά χρησιμοποιούμενους (Εικόνα 22, Decagon, 2016). Μπορεί να δεχθεί από έναν έως πέντε αισθητήρες με βύσμα stereo plug. Λειτουργεί με 5 μπαταρίες AA.



Εικόνα 22 Το καταγραφικό Decagon em50 στον αγρό. Στο περιβάλλον του αγρού δεν είναι σπάνιο να βρίσκονται έντομα και κατασκευές τους μέσα στο κουτί του καταγραφικού.

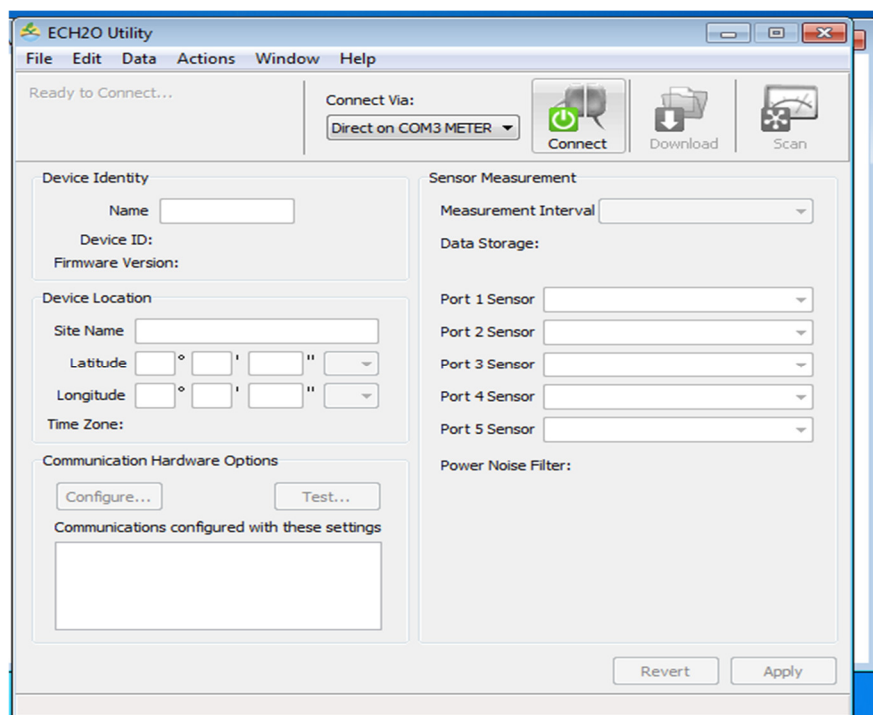
Ο χειρισμός του μπορεί να γίνει μέσω του Utility software (Decagon, 2017α). Με αυτό μπορούμε να ορίσουμε εάν και ποιος αισθητήρας αντιστοιχεί σε κάθε σημείο σύνδεσης (port) καθώς και τη συχνότητα καταγραφής (ή αν δεν καταγράφει). Για να συνδεθεί ένας υπολογιστής στο em50 απαιτείται ειδικό καλώδιο (com ή usb στο υπολογιστή και stereo plug στο em50). Στη συνέχεια πατώντας Connect γίνεται η σύνδεση. Όταν ολοκληρωθεί η όποια

εργασία, και θέλουμε να αποσυνδέσουμε το em50 από τον υπολογιστή πρέπει πρώτα να πατηθεί το Disconnect.

Εάν θέλουμε να γίνει μία μέτρηση άμεσα επιλέγουμε Scan. Στο πλαίσιο της βαθμονόμησης μας ενδιαφέρει να διαβάζουμε τα RAW counts κάθε τέτοιας άμεσης μέτρησης. Αυτό γίνεται από το μενού Window, επιλογή Show Terminal. Εάν το επιλέξουμε σε ένα νέο παράθυρο θα δούμε τα RAW counts που αντιστοιχούν στα 5 σημεία σύνδεσης στο καταγραφικό. Προφανώς μας ενδιαφέρει η καταγραφή για το σημείο σύνδεσης όπου έχει συνδεθεί ο αισθητήρας που βαθμονομείται. Παρακάτω θα γίνει λεπτομερής περιγραφή του λογισμικού ECH20 Utility.

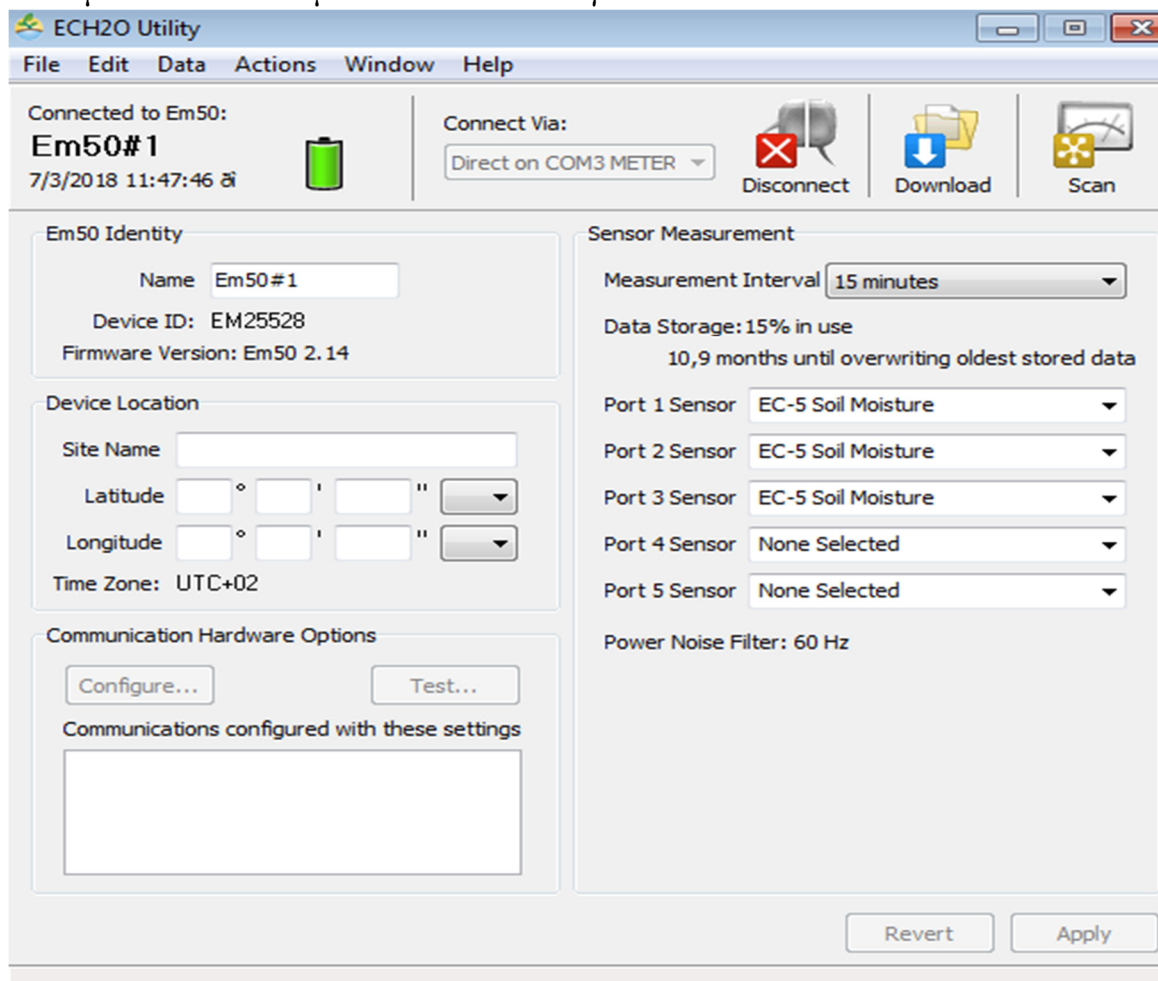
ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ DATA LOGGER EM50 ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ECH20 UTILITY

1. Χρήση H/Y με Λογισμικό Windows (XP και νεότερες εκδόσεις)
2. Τοποθετούμε τις 5 μπαταρίες κατηγορίας AA.
3. Συνδέουμε το ακροφύσιο 3.5mm jack στην θέση COMM/PORT στον Data Logger (τελευταίο δεξιά ακροφύσιο) και το USB στον H/Y.
4. Κατεβάζουμε και εγκαθιστούμε το πρόγραμμα ECH20 Utility από την σελίδα της METER (πρώην DECAGON) και ακολουθούμε τις οδηγίες. https://software.metergroup.com/ECH20_Utility_1.84_Installer.exe
5. Ανοίγουμε την εφαρμογή από το εικονίδιο που δημιουργήθηκε στην επιφάνεια εργασίας μας



Εικόνα 23 Interface εφαρμογής

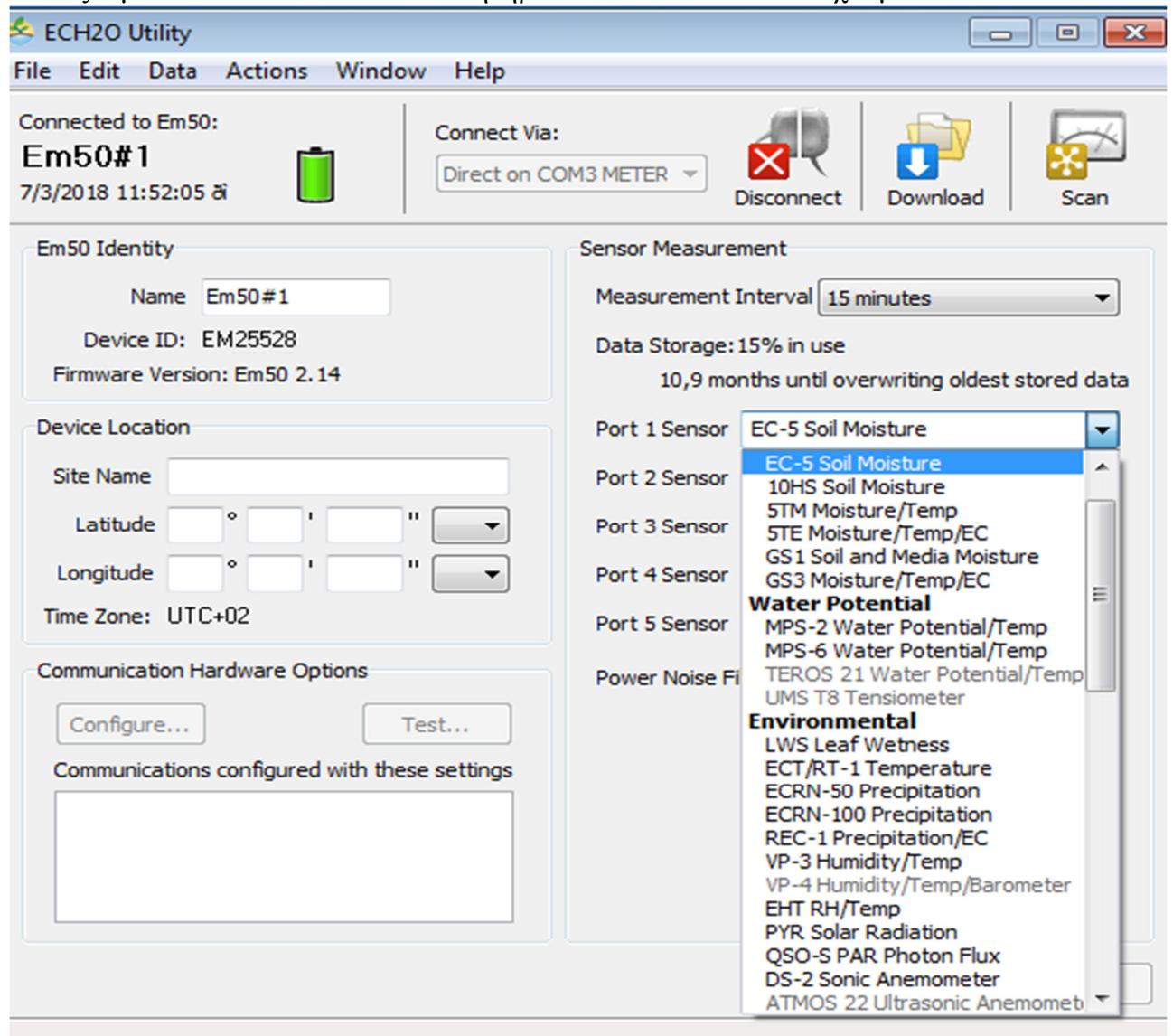
6. Πατάμε το κουμπί Connect για να συνδεθεί ο Data Logger.



Εικόνα 24 Interface εφαρμογής με συνδεδεμένο τον data logger

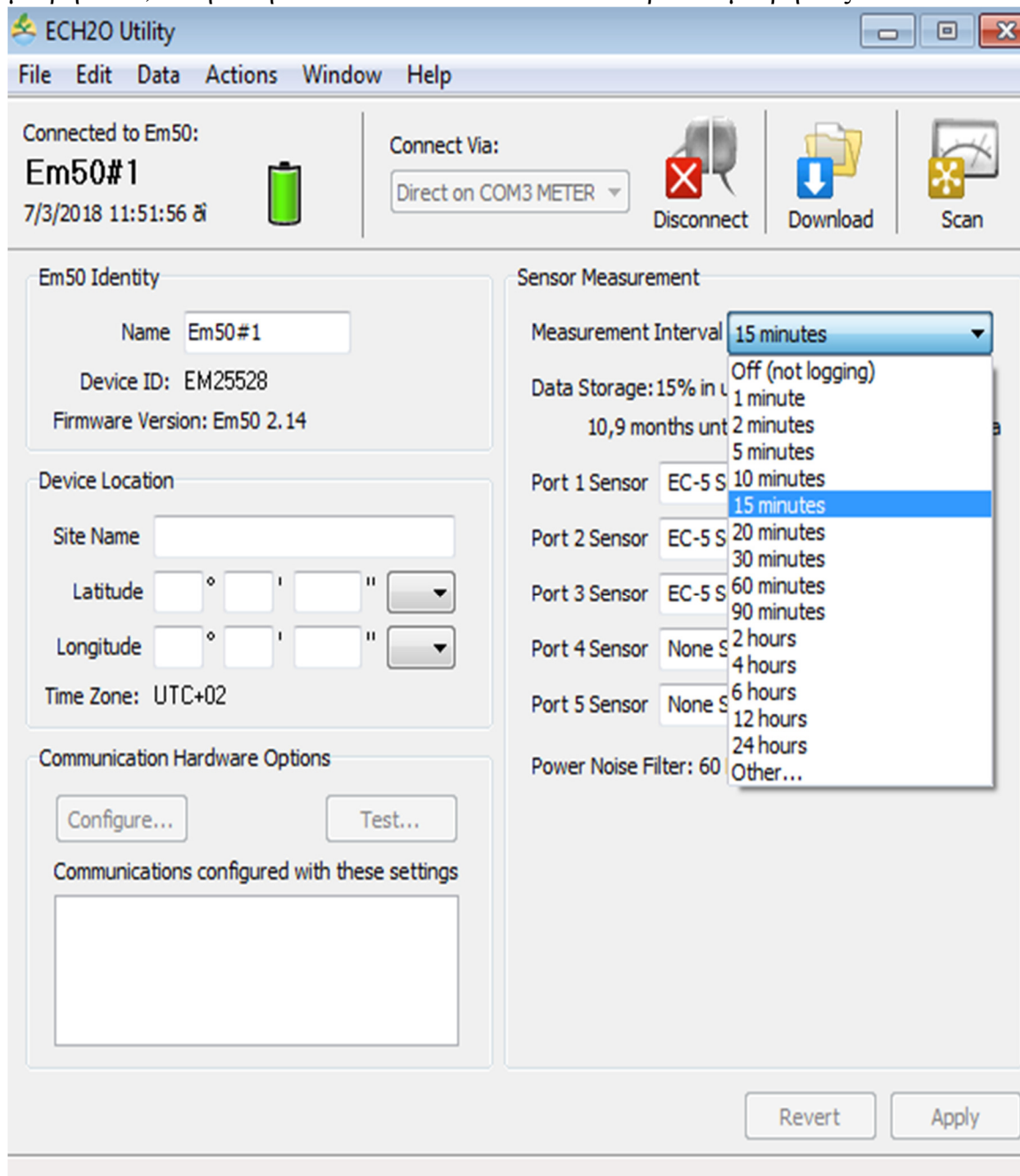
7. Αυτή είναι η αρχική οθόνη του προγράμματος. Μπορούμε να δούμε και να ρυθμίσουμε το όνομα του Data Logger, την ώρα και την ημερομηνία, το ID του Data Logger, την έκδοση Firmware που έχει εγκατεστημένη και να τοποθετήσουμε Συντεταγμένες της περιοχής που είμαστε και μετράμε.
8. Ύστερα συνδέουμε τους αισθητήρες που θέλουμε σε κάθε μία από τις 5 θύρες του Data Logger και στην συνέχεια πατάμε στην οθόνη τις επιλογές Port Sensor 1-5 για να

επιλέξουμε τον αισθητήρα που έχουμε συνδέσει.



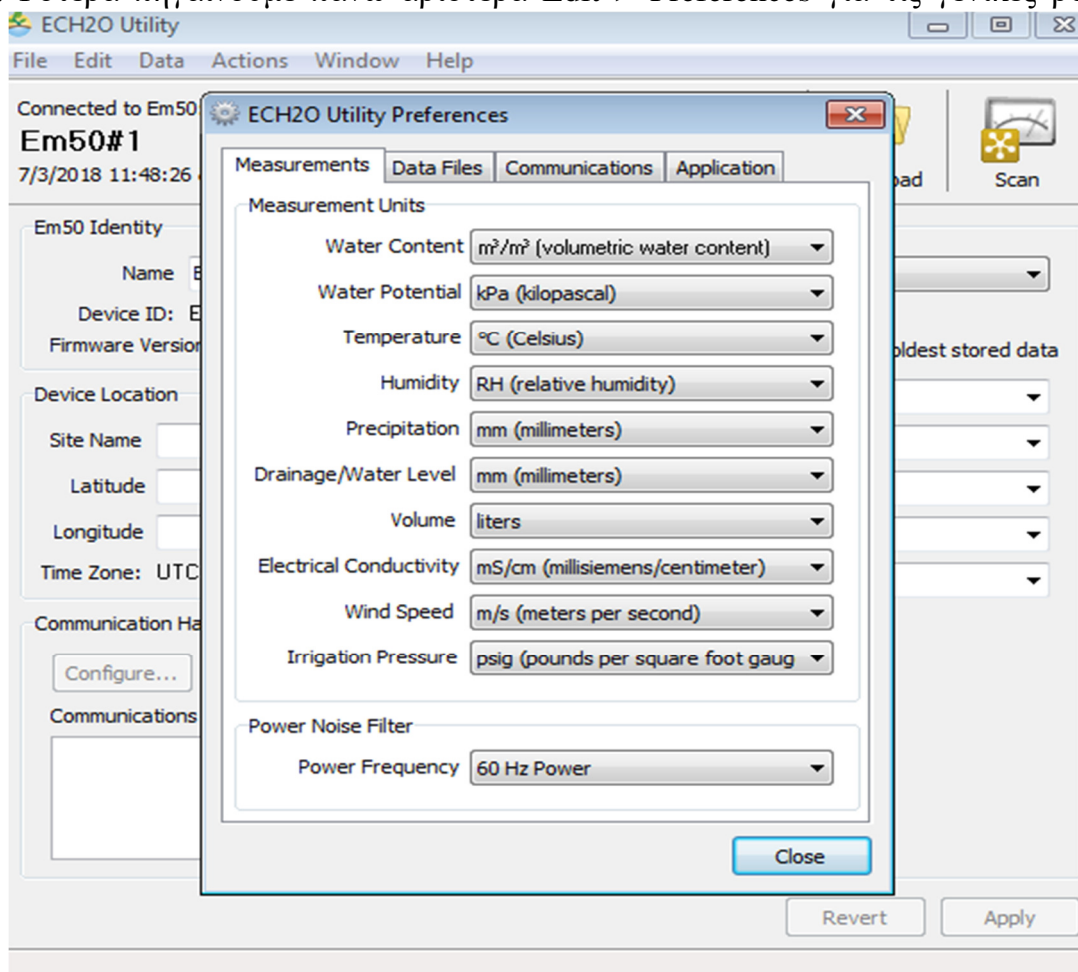
Εικόνα 25 Επιλογή αισθητήρα.

9. Έπειτα πηγαίνουμε στο measurement interval για να ρυθμίσουμε την διάρκεια των μετρήσεων, δηλαδή το κάθε πότε θα παίρνει μετρήσεις ο Data Logger.



Εικόνα 26 Διάστημα συλλογής δεδομένων

10. Ύστερα πηγαίνουμε πάνω αριστερά Edit > Preferences για τις γενικές ρυθμίσεις μας.



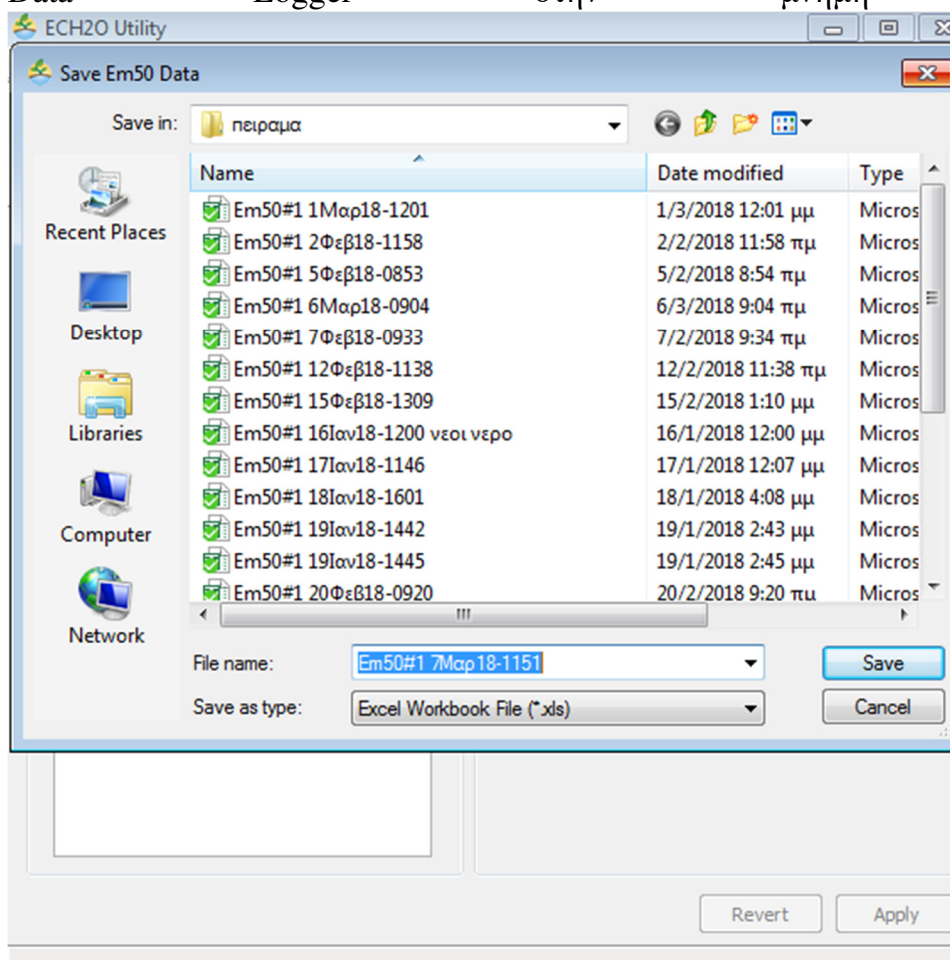
Εικόνα 27 Επιλογή μονάδων μέτρησης

11. Εδώ ρυθμίζουμε τις μονάδες μέτρησης όπως την περιεκτικότητα σε νερό, την δυναμική του νερού, την θερμοκρασία, την υγρασία, την κατακρήμνιση, την στράγγιση του νερού, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την ταχύτητα του ανέμου, την πίεση άρδευσης και την συχνότητα που θα δουλεύει ο data logger.

Αφού, λοιπόν, έχουμε συνδέσει τους αισθητήρες μας στις θύρες και τοποθετήσει τους αισθητήρες στο έδαφος, πηγαίνουμε να πάρουμε τις μετρήσεις. Πηγαίνοντας στην επιλογή Data πάνω αριστερά, έχουμε τρεις επιλογές:

- Πατώντας το Download All Data, κατεβάζουμε σε ένα αρχείο .xls (MS Office Excel), όλες τις μετρήσεις που έχει ο Data Logger στην μνήμη του, μέχρι αυτή τη στιγμή (καλό θα ήταν πριν ξεκινήσουμε κάποιο πείραμα. Να κάνουμε reset στον data logger γιατί μπορεί να περιέχει μετρήσεις από προηγούμενα πειράματα.

- Με την επιλογή Download New Data, κατεβάζουμε ένα αρχείο .xls (MS Office Excel) με τις νέες μετρήσεις από την τελευταία φορά που κατεβάσαμε μετρήσεις.
- Με την επιλογή Report Stored Data, κάνουμε αναφορά στις μετρήσεις που έχει ο Data Logger για τυχόν λάθη.
- Με την επιλογή Erase Stored Data, διαγράφουμε όλες τις μετρήσεις που έχει ο Data Logger στην μνήμη του.



Εικόνα 28 Η εικόνα μας δείχνει πώς αποθηκεύονται τα αρχεία .xls

12. Πατώντας το κουμπί Download πάνω δεξιά, κατεβάζουμε τα νέα Data, όπως είπαμε παραπάνω.
13. Πατώντας το κουμπί Scan, βλέπουμε τις μετρήσεις που παίρνει ο Data Logger εκείνη την στιγμή. Μπορούμε να τις δούμε σε μορφή που είχαμε επιλέξει απο τις ρυθμίσεις (preferences), σε unprocessed data (raw), τα οποία raw είναι αριθμοί που τους χρησιμοποιεί ο Data Logger, για να μετατρέψει το ηλεκτρικό σήμα στην μονάδα μέτρησης που θέλουμε εμείς και σε millivolts.

14. Επίσης, ο Data Logger, έχει συγκεκριμένη μνήμη αποθήκευσης. Βρίσκεται η χωρητικότητα του κάτω από την επιλογή measurement interval. Λέγεται Data Storage.
15. Τέλος, για να αποσυνδεθούμε πατάμε ΠΑΝΤΑ το κουμπί Disconnect αλλιώς υπάρχει κίνδυνος απώλειας δεδομένων.

3.2.1.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ML2 THETAPROBE ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΟ HH2 MOISTURE METER by DELTA-T DEVICES

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ HH2 MOISTURE METER

Ο μετρητής υγρασίας διαβάζει και αποθηκεύει μετρήσεις που έχουν ληφθεί με τους ακόλουθους αισθητήρες υγρασίας εδάφους Delta-T:

- Αισθητήρες εδαφικής υγρασίας ThetaProbe ML1, ML2 και ML3
- SM σειρά αισθητήρων εδαφικής υγρασίας SM150, SM150T, SM200 και SM300
- Τύποι PR1, PR2 και PR2 SDI-12
- Ισοστασιόμετρο, τύπου EQ2
- Αισθητήρες Νερού

Ο μετρητής μπορεί να εμφανίσει και να αποθηκεύσει, όπου απαιτείται, τις τιμές που παίρνει από τις μετρήσεις:

- Raw data και milliVolt (mV)
- Εδαφική Υγρασία
- Έλλειμα νερού στο έδαφος
- Αγωγιμότητα
- Μαζική διαπερατότητα
- Θερμοκρασία

Τα ισοστασιόμετρα μετριοούνται μόνο σε Mv.

Οι αναγνώσεις περιλαμβάνουν την ώρα και την ημερομηνία για μεταγενέστερη συλλογή από έναν υπολογιστή.

Οι μετρήσεις μπορεί να είναι κατά μέσο όρο. Σημείωση: οι μέσοι όροι δεν μπορούν να αποθηκευτούν για μεταγενέστερη συλλογή από έναν υπολογιστή.

Ο μετρητής είναι εύκολο στη μεταφορά και λειτουργία με το ένα χέρι.

ΜΕΡΗ ΜΕΤΡΗΤΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ HH2



Οθόνη LCD με 2 σειρές 16 χαρακτήρων - χρησιμοποιείται για την εμφάνιση μενού και αναγνώσεων

ΠΛΗΚΤΡΑ

Read Παίρνουμε μετρήσεις

Store Αποθήκευση μετρήσεων

Set Επιλογή μενού ή ρυθμίσεων

Esc Ενεργοποίηση συσκευής ή απόρριψη επιλογής ή πίσω

▲ ▼ Μετακίνηση

Μέσος Όρος

Αδιάβροχη Θήκη

25-pin D υποδοχή για σύνδεση αισθητήρων ή υπολογιστή

Εικόνα 29



Χώρος μπαταρίας - παίρνει μία μπαταρία PP3

Εικόνα 30

ΠΩΣ ΠΑΙΡΝΕΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ Ο ΗΗ2

- Αναλογικοί Αισθητήρες (SM150, SM150T, SM200, SM300, ML1, ML2, ML3, EQ2, PR1 and PR2)

Ο μετρητής υγρασίας εφαρμόζει ισχύ στον αισθητήρα και μετρά την τάση σήματος εξόδου που επιστρέφεται. Εμφανίζει στην οθόνη απευθείας, σε mV ή / και μετατρέπει σε άλλες μονάδες, ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα και τις διαθέσιμες πληροφορίες. (Τα αποτελέσματα ισοστασιόμετρου μπορούν να εμφανιστούν μόνο σε mV.) Ο μετρητής μετατρέπει την ένδειξη mV σε μονάδες εδαφικής υγρασίας χρησιμοποιώντας έναν πίνακα γραμμικοποίησης και συγκεκριμένες παραμέτρους εδάφους. Οι πίνακες γραμμικοποίησης είναι προεγκατεστημένοι για αισθητήρες, μαζί με παραμέτρους εδάφους για τα ακόλουθα εδάφη: οργανικά, ορυκτά, μίγματα τύρφης, κοκοφοίνικα, ορυκτό μαλλί και περλίτη. Για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορείτε να εισαγάγετε τις δικές σας παραμέτρους τύπου εδάφους - αλλά αυτές πρέπει να καθοριστούν πειραματικά. Αυτό δεν εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής αυτού του εγχειριδίου. Για έλλειμμα mm θα πρέπει να παρέχετε χωρητικότητα πεδίου και βάθος ρίζας για κάθε τύπο εδάφους και καλλιέργεια. Η ημερομηνία και η ώρα αποθηκεύονται με κάθε ένδειξη. Πριν αποθηκεύσετε αναγνώσεις, μπορείτε να εισαγάγετε μια μοναδική ετικέτα Plot, Sample ή Device ID (ID).

- Ψηφιακός αισθητήρας (WET)

Ο μετρητής υγρασίας εφαρμόζει ισχύ στον αισθητήρα, λαμβάνει αναγνώσεις ως σειριακά δεδομένα, τις επεξεργάζεται (όπως περιγράφεται στη σημείωση εφαρμογής αισθητήρα WET που διατίθεται από το Delta-T) και υπολογίζει την αγωγιμότητα, τη μαζική διαπερατότητα και τη θερμοκρασία όπως απαιτείται. Χρησιμοποιώντας εγκατεστημένες βαθμονομήσεις εδάφους, ο HH2 υπολογίζει την περιεκτικότητα σε νερό. Δεδομένου του βάθους της ρίζας και της χωρητικότητας πεδίου, μπορεί επίσης να υπολογίσει mm Deficit

➤ Ψηφιακός αισθητήρας PR2 SDI-12

Ο μετρητής υγρασίας εφαρμόζει ισχύ στον ανιχνευτή Profile Probe SDI-12 και λαμβάνει μια ένδειξη ή τη διαπερατότητα σε κάθε βάθος, μετατρέποντάς το σε μονάδες υγρασίας εδάφους χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό πίνακα βαθμονόμησης και ειδικές παραμέτρους εδάφους για τα ακόλουθα εδάφη: οργανικά, ορυκτά, μίγματα τύρφης, κοκοφοίνικα, ορυκτοβάμβακα και περλίτη. Οι μετρήσεις δεν είναι διαθέσιμες σε mV.

“Ύπνος” και αφύπνιση του μετρητή

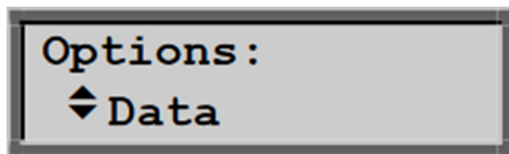
- Για εξοικονόμηση μπαταρίας, ο μετρητής θα "πάει για ύπνο" όταν δεν χρησιμοποιείται για 1 λεπτό. Η οθόνη θα παραμείνει κενή και ο μετρητής θα απενεργοποιηθεί για να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας. Για να "κοιμηθεί" ο HH2, πατήστε Esc για να επιστρέψετε στο λογότυπο "Delta-T Devices Moisture Meter" και, στη συνέχεια, πατήστε Esc περισσότερο χρόνο για να τον κάνετε να κοιμηθεί. Θα "ξυπνήσει" όταν πατηθεί το Esc ή όταν λαμβάνονται μηνύματα RS232 από τον υπολογιστή ή όταν επανασυνδεθεί η μπαταρία.





Μέσος Όρος

- Πατήστε # για να εμφανιστεί ο προηγούμενος μέσος όρος και πατήστε # δύο φορές για να τον ενημερώσετε με την τρέχουσα ένδειξη. Οι μέσοι όροι δεν αποθηκεύονται. Γράψτε το εάν το χρειάζεστε.

Επιλογές πλοήγησης και αναγνώσεις

- Πατήστε Esc για να ξυπνήσετε το HH2 και να εξετάσετε το χάρτη πλοήγησης πάνω από το φύλλο. Υπάρχουν δύο κύριες διαδρομές - γύρω από τον κύκλο ανάγνωσης και κάτω (και πάνω) τα μενού επιλογών. Οι μεμονωμένες επιλογές ή τιμές ορίζονται στο κάτω επίπεδο κάθε διαδρομής μενού. Δείτε επίσης την Περίληψη Επιλογών στο πίσω μέρος κάθε κεφαλαίου αισθητήρα.
- Δεν είναι διαθέσιμες όλες οι επιλογές με όλες τις συσκευές. Σε κάθε κεφάλαιο αισθητήρα εμφανίζονται ένας πίνακας επιτρεπόμενων επιλογών, περιοχών και προεπιλεγμένων τιμών. Για να εμφανίσετε το κύριο μενού επιλογών, πατήστε το πλήκτρο Set όταν οι αναγνώσεις είναι ορατές στην οθόνη ή κατά την έναρξη- η οθόνη είναι ορατή.




- Πατήστε Set για να επιλέξετε μια επιλογή - αυτό μπορεί να είναι ένα άλλο, κάτω μενού.
- Πατήστε Esc για να απορρίψετε μια επιλογή και να επιστρέψετε στο προηγούμενο μενού.
- Όταν εμφανίζονται τα σύμβολα  και , πατήστε τα πλήκτρα πάνω  και κάτω  για κύλιση σε όλες τις επιλογές του μενού.

Για να αποθηκεύσετε τις μετρήσεις πατήστε Store.

Για να αποθηκεύσετε τις επιλογές πατήστε Set.

Πατήστε Read και Store για να αποθηκεύσετε τις αναγνώσεις.

MENΟΥ ΕΠΙΛΟΓΩΝ

Το σύμβολο  υποδηλώνει ότι είναι διαθέσιμες και άλλες επιλογές.

Data: Προσθήκη ετικέτας για Plot ID, Δείγμα, Device ID, Ριζικό Βάθος, Βάθος Αισθητήρα ή διαγραφή όλων των δεδομένων.

Device: Επιλέξτε τον αισθητήρα π.χ. PR1 για Profile Probe.

Τύπος εδάφους: Επιλέξτε έναν για κάθε αισθητήρα εάν θέλετε αποτελέσματα σε μηχανικές μονάδες. Η προεπιλογή είναι Mineral.

Soil Set-Up: Ορίστε τις παραμέτρους που σχετίζονται με κάθε τύπο εδάφους.

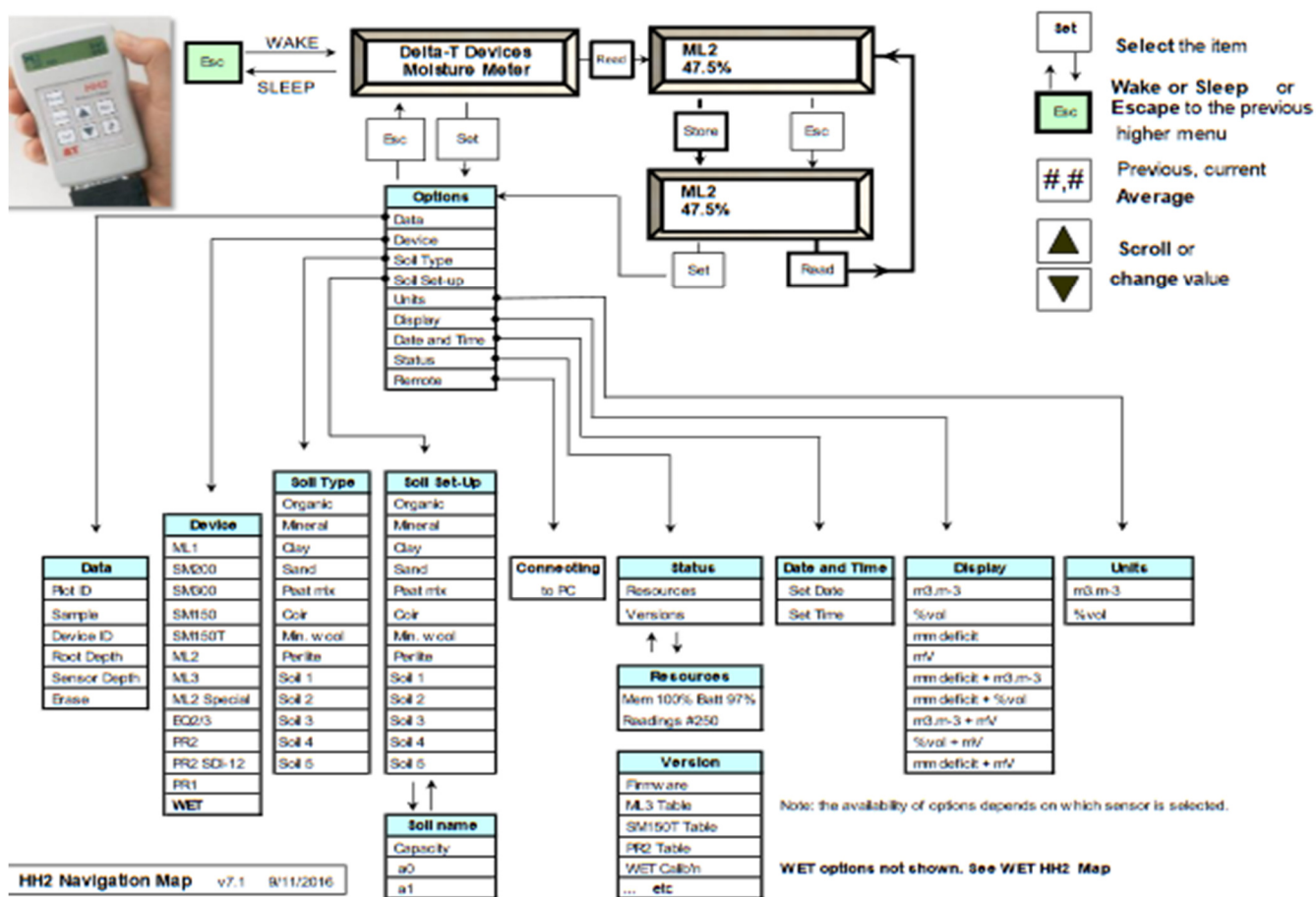
Units: Επιλέξτε ποιες μηχανικές μονάδες χρησιμοποιούνται - π.χ. % vol ή m3 ή m-3.

Display: Επιλέξτε τις αναγνώσεις που θα ληφθούν και θα εμφανιστούν - π.χ. mV και % Vol.

Date and Time: Το ρολόι μπορεί να ρυθμιστεί μέσω του πληκτρολογίου ή από το PC

Status: Εμφανίζει % μνήμη που χρησιμοποιείται, % διάρκεια ζωής μπαταρίας και αριθμός αναγνώσεων στη μνήμη. Επίσης, αριθμοί έκδοσης υλικολογισμικού και τυχόν εγκατεστημένων πινάκων.

Remote: Επιλέξτε αυτό κατά τη σύνδεση σε υπολογιστή.



Εικόνα 31 Χρήση του μενού επιλογών

Επιλέξτε πρώτα την επιλογή Device. Οι άλλες επιλογές εξαρτώνται από τη συσκευή που έχει επιλεγεί.

(Σημείωση: για να επιλέξετε έναν αισθητήρα WET, πρέπει να εγκαταστήσετε το αρχείο βαθμονόμησης WET χρησιμοποιώντας το HH2Read.)

Μπορείτε να καθορίσετε οποιοδήποτε αναγνωριστικό γραφικής παράστασης (A -Z), αναγνωριστικό συσκευής (0 -255) και αναγνωριστικό δείγματος (1 -2000) για οποιαδήποτε ανάγνωση. Αυτές οι ετικέτες είναι μόνο ετικέτες. Μπορείτε να επιλέξετε ποια μονάδα μηχανικής θα εμφανιστεί το αποτέλεσμα. Για την εδαφική υγρασία πρέπει να επιλέξετε έναν τύπο εδάφους, εκτός εάν θέλετε μόνο μετρήσεις mV. (Οι μετρήσεις ισοστασιομέτρων διατίθενται μόνο σε mV.) Ο προεπιλεγμένος τύπος εδάφους είναι ορυκτός. Οι προηγμένοι χρήστες, που μπορούν να βαθμονομήσουν τα δικά τους εδάφη, μπορούν να εγκαταστήσουν τους δικούς τους συντελεστές βαθμονόμησης για το έδαφος που ονομάζονται a0 & a1 κάτω από το Soil Set-Up. (b0 & b1 για αισθητήρες WET). Άλλοι χρήστες θα πρέπει να χρησιμοποιούν τα ορυκτά και οργανικά εδάφη που έχουν ήδη καθοριστεί στο Μετρητή Υγρασίας. Οι χρήστες WET έχουν τη δυνατότητα επιλογής τυπικών τύπων εδάφους και, εάν αγοράζονται υπάρχουν προεγκατεστημένοι στο HH2 προσαρμοσμένες βαθμονομήσεις για

συγκεκριμένα εμπορικά τεχνητά εδάφη όπως πέτρινο μαλλί. Αν θέλετε mm deficit πρέπει να ορίσετε την χωρητικότητα πεδίου και το βάθος ρίζας για κάθε τύπο εδάφους. Παρέχουμε έναν πίνακα στο πίσω μέρος αυτού του εγχειριδίου για τα ορυκτά εδάφη. Τα οργανικά εδάφη είναι τόσο μεταβλητά που πρέπει να καθορίσετε πειραματικά την χωρητικότητα του πεδίου, προτού να έχει νόημα να λάβετε μετρήσεις mm Deficit. Η προεπιλογή για χωρητικότητα πεδίου είναι προκαθορισμένη στο 38% που αντιστοιχεί σε αργίλιο αργίλου. Το προεπιλεγμένο βάθος ρίζας, ρυθμισμένο στο μηδέν, αναγκάζει την υπολογιζόμενη προεπιλεγμένη τιμή για τα mm Deficit να είναι μηδέν. Ορισμένοι σύμβουλοι καλλιέργειας συνιστούν 700 mm ως το προεπιλεγμένο βάθος ρίζας. Για ευκολία στη γραφική παράσταση των δεδομένων, καλό είναι να μετράτε πάντα τους αισθητήρες σας με την ίδια σειρά σε κάθε επίσκεψη. Μερικοί ειδικοί προτείνουν να έχετε τρεις αισθητήρες ή σωλήνες πρόσβασης, σε κάθε τοποθεσία και λαμβάνοντας τρεις αναγνώσεις από κάθε μία, για να υπολογιστούν τα τυχαία σφάλματα δειγματοληψίας αργότερα στον υπολογιστή. Οι χρήστες PR2 πρέπει να λαμβάνουν τρεις αναγνώσεις σε κάθε τοποθεσία περιστρέφοντας τον αισθητήρα κατά 120 μοίρες.



Εικόνα 32 Αισθητήρας ML2 THETAPROBE και Data Logger HH2

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ML2 THETAPROBE

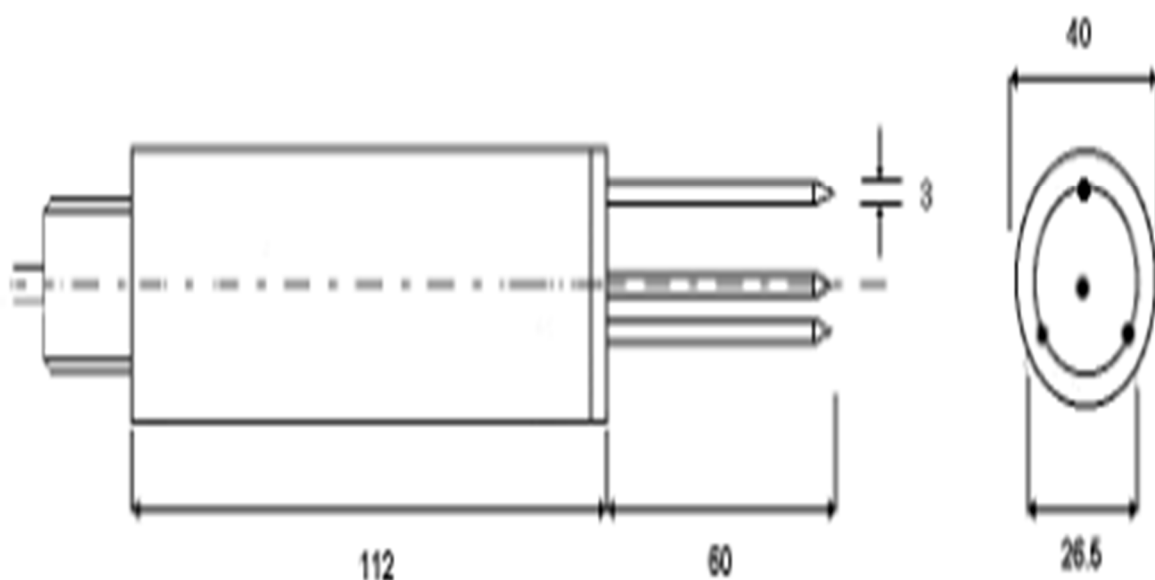


Εικόνα 33 Αισθητήρας ML2

ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το ThetaProbe αποτελείται από ένα αδιάβροχο περίβλημα που περιέχει τα ηλεκτρονικά και, προσαρτημένο σε αυτό στο ένα άκρο, τέσσερις ακονισμένες ράβδους από ανοξείδωτο χάλυβα που εισάγονται στο έδαφος. Ο ανιχνευτής δημιουργεί ένα ημιτονοειδές σήμα 100 MHz το οποίο εφαρμόζεται σε μια ειδικά σχεδιασμένη εσωτερική γραμμή μετάδοσης που εκτείνεται στο χώμα μέσω της σειράς των ράβδων εξωφύλλου. Η σύνθετη αντίσταση αυτής της συστοιχίας ποικίλλει ανάλογα με την αντίσταση του εδάφους, τα οποία έχουν δύο συστατικά - την φαινομενική διηλεκτρική σταθερά και την ιοντική αγωγιμότητα. Η συχνότητα σήματος των 100 MHz έχει επιλεγεί για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της ιοντικής αγωγιμότητας, έτσι ώστε οι αλλαγές στην αντίσταση της γραμμής μετάδοσης να εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την φαινομενική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους. Επειδή το διηλεκτρικό νερό (~ 81) είναι πολύ υψηλότερο από το έδαφος (συνήθως 3 έως 5) και τον αέρα (1), η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους καθορίζεται κυρίως από την περιεκτικότητα σε νερό. Η σύνθετη αντίσταση της συστοιχίας ράβδου επηρεάζει την αντανάκλαση των 100 MHz και αυτές οι αντανάκλασεις συνδυάζονται με το εφαρμοζόμενο σήμα για να σχηματίσουν ένα κύμα όρθιας τάσης κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης. Η έξοδος του ThetaProbe είναι μια αναλογική τάση ανάλογη με τη διαφορά πλάτους αυτού του μόνιμου κύματος σε δύο σημεία και αυτό διαμορφώνει την ευαίσθητη και ακριβή μέτρηση της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό. Η εργασία που δημοσιεύθηκε εδώ και πολλά χρόνια από τους Whalley, White, Knight Zegelin και Topp and others, δείχνει σχεδόν γραμμική συσχέτιση μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας του διηλεκτρικού σταθερού, ($\sqrt{\epsilon}$) και της περιεκτικότητας σε ογκομετρική υγρασία, (θ_v), και αυτό έχει τεκμηριωθεί από πολλούς τύπους εδάφους. Κάθε ThetaProbe προσαρμόζεται

κατά την κατασκευή για να παρέχει μια συνεπή έξοδο κατά τη μέτρηση γνωστών μέσω διηλεκτρικής σταθεράς, καθιστώντας τα εύκολα, εναλλάξιμα χωρίς επαναβαθμολόγηση του συστήματος. Το σήμα εξόδου είναι 0 έως 1V DC για ένα εύρος διηλεκτρικής σταθεράς εδάφους, ϵ , μεταξύ 1 και 32, το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 0,5 m³-m⁻³ ογκομετρικής περιεκτικότητας σε εδαφική υγρασία σε τυπικά εδάφη.



Εικόνα 34 Μέγεθος αισθητήρα

- $\pm 1\%$ ακρίβεια
- Εύκολη σύνδεση καταγραφικού δεδομένων (έξοδος DC σε DC)
- Εξαιρετική σταθερότητα θερμοκρασίας και αλατότητας
- Διπλός σκοπός: είτε χειρός για αναγνώσεις στην στιγμή είτε σε πείραμα για καταγραφή δεδομένων

Ο παρακάτω πίνακας αναλύει τα χαρακτηριστικά του ML2x ThetaProbe:

Technical Specifications	
Type No.	ML2x
Measurement parameter	Volumetric soil moisture content, θ_v ($m^3 \cdot m^{-3}$ or %vol.).
Range	Accuracy figures apply from 0.05 to 0.6 $m^3 \cdot m^{-3}$, Full range is from 0.0 to 1.0 $m^3 \cdot m^{-3}$
Accuracy	$\pm 0.01 m^3 \cdot m^{-3}$, 0 to 40°C, $\pm 0.02 m^3 \cdot m^{-3}$, 40 to 70°C, after calibration to a specific soil type
subject to soil salinity errors, see below	$\pm 0.05 m^3 \cdot m^{-3}$, 0 to 70°C using the supplied soil calibration, in all 'normal' soils,
Soil salinity errors	0.0 to 250 $mS \cdot m^{-1}$, < -0.0001 $m^3 \cdot m^{-3}$ change per $mS \cdot m^{-1}$, 250 to 2000 $mS \cdot m^{-1}$, no significant change.
Soil sampling volume	>95% influence within cylinder of 4.0cm diam., 6cm long, (approx 75 cm^3), surrounding central rod.
Environment	Will withstand burial in wide ranging soil types or water for long periods without malfunction or corrosion (IP68 to 5m)
Stabilization time	1 to 5 sec. from power-up, depending on accuracy required.
Response time	Less than 0.5 sec. to 99% of change.
Duty cycle	100 % (Continuous operation possible).
Interface	Input requirements: 5-15V DC unregulated. Current consumption: 19mA typical, 23mA max. Output signal: approx. 0-1V DC for 0-0.5 $m^3 \cdot m^{-3}$
Case material	PVC
Rod material	Stainless steel
Cable length	Standard: 5m. Maximum length: 100m
Weight	350 gm approx. with 5m cable.

Εικόνα 35 Χαρακτηριστικά αισθητήρα

3.2.1.6 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ PARROT FLOWER POWER

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ



1) Ένταση του φωτός

2) Θερμοκρασία περιβάλλοντος

3) Επίπεδο λίπανσης του εδάφους

4) Επίπεδο υγρασίας του εδάφους

Εικόνα 36

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ PARROT FLOWER POWER



Εικόνα 37

ΟΔΗΓΙΕΣ

Προετοιμασία

1. Για την εγκατάσταση και τη λήψη δεδομένων χρειάζεται smartphone (κινητό τηλέφωνο, tablet κοκ) με Android ή IOS και Bluetooth 4.0
2. Πρέπει να υπάρχουν εγκατεστημένες στο κινητό οι εφαρμογές:
 - a. Parrot Flower Power app

(<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.parrot.flowerpower.android>) και να έχει δημιουργηθεί λογαριασμός σε αυτή

- b. GROW app (<https://play.google.com/store/apps/details?id=at.ac.iiasa.grow>) και να έχει δημιουργηθεί λογαριασμός σε αυτή (μπορεί και με τα ίδια στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για το Parrot Flower Power app)

- c. Google Maps
(<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.apps.maps>)
ή και GGRS87 – ΕΓΣΑ 87 app
(<https://play.google.com/store/apps/details?id=gr.stasta.egsa>) μπορεί να φανούν
χρήσιμες για μέτρηση αποστάσεων και εύρεση συντεταγμένων
- d. Στο website του έργου, <https://growobservatory.org/> κάνουμε Register και αφού
έχουμε μπει στο λογαριασμό μας πάμε στο My Connected Apps και κάνουμε
σύνδεση με το Parrot Flower Power δίνοντας τον κωδικό με τον οποίο
εγγραφήκαμε εκεί. Από την επιλογή Data, 2-3 ημέρες μετά την εγκατάσταση θα
μπορούμε να δούμε τα δεδομένα που έχουν ανέβει στο cloud έως και την
τελευταία επίσκεψη στον αισθητήρα.

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΟ ΧΩΡΑΦΙ

- a. Το χωράφι πρέπει να είναι σε περιοχή με σήμα κινητού ώστε να μπορεί να έχει μέσω σύνδεσης κινητού και internet.
- b. Δεν πιάνουμε με γυμνό χέρι τον αισθητήρα φωτός (λευκός μικρός θόλος) γιατί μένει λίπος
- c. Ομοιόμορφη περιοχή – όχι άκρα χωραφιού όπου υπάρχουν αλλαγές – σε απόσταση 30 μέτρα γύρω από τον αισθητήρα
- d. Στο χωράφι, στην θέση εγκατάστασης:
- e. Σημείωση με ταινία στα δένδρα ή αλλού της θέσης του αισθητήρα γιατί μπορεί στο μέλλον να δυσκολευτούμε να τον βρούμε.
- f. Τοποθετούμε την μπαταρία στον αισθητήρα όπως περιγράψαμε παραπάνω.
- g. Ελέγχουμε με το εργαλείο που έχουμε μαζί μας ότι το χώμα δεν έχει πέτρες και είναι σχετικά μαλακό ώστε να μπαίνει εύκολα ο αισθητήρας.
- h. Αν το έδαφος είναι πολύ ξηρό μπορεί να χρειαστεί να το βρέξουμε.
- i. Βάζουμε τον αισθητήρα στο χώμα (να μπει όλο το μαύρο τμήμα με τις λεπίδες)
- j. Ανοίγουμε την εφαρμογή Parrot Flower Power και κάνουμε SIGN IN.
- k. Εάν είμαστε πολύ κοντά στον αισθητήρα θα τον δει και θα δούμε τον κωδικό του – αυτόν που είναι γραμμένος και με μαρκαδόρο πάνω του.
- l. Τον επιλέγουμε και μετά από λίγα δευτερόλεπτα θα μπορούμε να δούμε ενδείξεις
- m. Αλλάζουμε το όνομα του δίνοντας ως όνομα τον κωδικό του (αυτόν που είναι γραμμένος και πάνω του), προσοχή μόνο λατινικούς χαρακτήρες (όχι ελληνικά)
- n. Αν σκιάσουμε τον αισθητήρα φωτός θα δούμε να μηδενίζεται η ένδειξη.
- o. Σε 15 λεπτά θα αποθηκεύσει για πρώτη φορά δεδομένα.
- p. Ανοίγουμε την εφαρμογή Google Maps ή GGRS 87 – ΕΓΣΑ 87, βλέπουμε συντεταγμένες και τις σημειώνουμε στη φόρμα εγκατάστασης.
- q. Συμπληρώνουμε και όλα τα άλλα στοιχεία στη φόρμα εγκατάστασης

- r. Ανοίγουμε την εφαρμογή GROW και κάνουμε SIGN IN.
- s. Πατάμε το εικονίδιο με τα 6 τετραγωνάκια και τον δορυφόρο επάνω (αριστερά από το πρόσωπο), επιλέγουμε Ελληνικά και προχωράμε μέχρι να επιλέξουμε <<ΕΡΕΥΝΑ ΓΗΣ>>. Δίνουμε το όνομα του αισθητήρα (τον κωδικό του που γράψαμε και στην εφαρμογή Parrot Flower Power (αυτόν που είναι γραμμένος και πάνω του), προσοχή μόνο λατινικούς χαρακτήρες (όχι ελληνικά)) και απαντάμε στις ερωτήσεις, βγάζουμε φωτογραφία και ολοκληρώνουμε τη φόρμα ΕΡΕΥΝΑ ΓΗΣ. Δεν χρειαζόμαστε κάτι άλλο την εφαρμογή GROW.
- t. Εάν έχουν περάσει 15 λεπτά από την εγκατάσταση, τότε αν δούμε ξανά τον αισθητήρα με την εφαρμογή Parrot Flower Power σε κάθε μέτρηση κάτω δεξιά θα έχει εμφανιστεί και ένα εικονίδιο με διπλή καμπύλη. Αυτό σημαίνει ότι έχει ήδη αποθηκεύσει μία φορά δεδομένα.
- u. Αυτό ήταν με την εγκατάσταση.
- v. Μετά από διάστημα το πολύ 1 μήνα πηγαίνουμε στον αισθητήρα, συνδεόμαστε και συγχρονίζει ξανά (στέλνει δεδομένα στο cloud).
- w. Επαναλαμβάνουμε τις επισκέψεις για συγχρονισμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

4.1. Η ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΕΙ Η METER GROUP (ΠΡΩΗΝ DECAGON)

Σύμφωνα με το σχετικό τεχνικό σημείωμα της Decagon (Cobos και Chambers, 2010), η ειδική βαθμονόμηση των EC5 και 10HS για ένα έδαφος ακολουθεί την γενική διαδικασία βαθμονόμησης πυκνωτικών διηλεκτρικών αισθητήρων υγρασίας εδάφους που προτείνεται από τους Starr και Paltineanu (2002). Η όλη διαδικασία παρουσιάζεται από την Decagon και σε σχετικό video (Decagon, 2017β).

Εξοπλισμός που απαιτείται

Ο εξοπλισμός που απαιτείται παρουσιάζεται στην συνέχεια (#x ποσότητα, Cobos και Chambers, 2010, Decagon, 2017β):

1. Φτυάρι (1x) και δοχείο για και λήψη δείγματος εδάφους για τη λήψη εδάφους από τον αγρό. (1x για κάθε τύπο εδάφους). Προτείνεται η λήψη δείγματος όγκου περίπου 4L (Decagon, 2017β)
2. Δοχείο βαθμονόμησης (1x). Το δοχείο αυτό πρέπει να είναι σταθερό (όχι εύκαμπτο) και να έχει διαστάσεις τέτοιες ώστε:
 - a. να επιτρέπει να επιτρέπει την τοποθέτηση του εδάφους έτσι ώστε να προσεγγίζει την φαινόμενη πυκνότητα που είχε το έδαφος στον αγρό.
 - b. να χωρά όλο τον αισθητήρα (ακίδες και πλαστική κεφαλή που φιλοξενεί τα ηλεκτρονικά) και να επιτρέπει τα περιθώρια που προβλέπονται από τον όγκο ευαισθησίας του.
3. Κόσκινο χόματος (1x): 2-5mm (Cobos και Chambers, 2010), 5mm (Decagon, 2017β).
4. Αισθητήρες ECH2O που θα βαθμονομηθούν (π.χ. EC5 και 10HS) Αναφέρεται (Decagon, 2017b) ότι η έξοδος των αισθητήρων της σειράς ECH2O είναι πρακτικά η ίδια και επομένως η βαθμονόμηση για έναν αισθητήρα ισχύει γενικά για όλους του ίδιου τύπου.
5. Καταγραφικό (1x). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα καταγραφικά που είναι συμβατά με τους αισθητήρες. Η Decagon (2017β) αναφέρει ότι πρέπει η βαθμονόμηση να γίνει με τον τύπο καταγραφικού που θα χρησιμοποιηθεί και στις μετρήσεις που θα γίνουν στη συνέχεια στην πράξη.
6. Ογκομετρικός δειγματολήπτης εδάφους (1x), ώστε να λαμβάνονται δείγματα εδάφους γνωστού όγκου σε κάθε βήμα ύγρανσης. (καταγράφεται: Πίνακας 2, στήλη 4). Μπορεί να είναι ένας από αυτούς που κυκλοφορούν στο εμπόριο (Εικόνα 39) ή να κατασκευαστεί. Για την κατασκευή οι Cobos και Chambers (2010) αναφέρουν: να είναι από ένα μεταλλικό (ή λεπτό πλαστικό) κύλινδρο μήκους 3 - 5 cm διαμέτρου (1.5 - 2.5 cm), το άκρο που θα

μπαίνει στο έδαφος συστήνεται να έχει γίνει κοφτερό και ο εσωτερικός όγκος του να έχει μετρηθεί με ακρίβεια.

7. Δοχεία ξήρανσης δειγμάτων εδάφους με κάπακι που να αντέχουν στους 105 – 110° C (5-7x για κάθε τύπο εδάφους για τον οποίο γίνεται η βαθμονόμηση) - Εικόνα 40 Το βάρος τους (χωρίς το καπάκι) πρέπει να μετρηθεί μια και θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς ((Πίνακας 2, στήλη 3). Συνίσταται να αριθμηθούν ώστε να μην υπάρχει περίπτωση μπερδέματος για το ποιο είναι ποιο.
8. Ζυγός ακριβείας με ανάλυσή τουλάχιστον 0.01 g (1x).
9. Φούρνος ξήρανσης (1x) που να μπορεί να διατηρήσει σχετικά σταθερή θερμοκρασία στα επίπεδα των 105 – 110 οC.
10. Λάμα τοποθέτησης για αισθητήρες. Σύμφωνα με την Decagon (2017β) αντί για το ειδικό εργαλείο (λάμα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένα μεγάλο μαχαίρι



Εικόνα 38 Δειγματολήπτης ESS Core N' One 25g της Environmental Sampling Supply9. Ογκομετρικός δειγματολήπτης εδάφους που διατίθεται στο εμπόριο (παρουσιάζεται στο video που δείχνει την διαδικασία βαθμονόμησης (Decagon, 2017β))

Επιπλέον εξοπλισμός που μέσω της εμπειρίας θεωρούμε ότι απαιτείται για την εφαρμογή της τυπικής διαδικασίας βαθμονόμησης:

1. Δοχεία λήψης δειγμάτων αδιατάρακτου εδάφους (1-3x) για κάθε τύπο εδάφους (Εικόνα 30). Ωστε να μπορεί να εκτιμηθεί η φαινόμενη ειδική πυκνότητα (field bulk density).
2. Μετρητές EC (1x) και pH (1x) Δεν αναφέρεται άμεσα (Cobos και Chambers, 2010, Decagon, 2017β), αλλά χρειάζονται για να βλέπουμε αν είμαστε σε προβληματικές καταστάσεις.
3. Μυστρί και πλαστικά γάντια για ανακάτεμα του εδάφους κατά τα βήματα ύγρανσης





Εικόνα 40 Δειγματολήπτης αδιατάρακτου δείγματος εδάφους

Διαδικασία βαθμονόμησης

Η διαδικασία που ακολουθείται παρουσιάζεται στην συνέχεια (Cobos και Chambers, 2010, Decagon, 2017β):

1. Λήψη δειγμάτων στον αγρό. Λαμβάνουμε δείγματα αδιατάρακτου εδάφους και δείγματα όγκου 4L περίπου για κάθε τύπου εδάφους για τον οποίο θέλουμε να κάνουμε βαθμονόμηση από τον αγρό. Τα δείγματα να είναι από το βάθος – ορίζοντα εδάφους όπου πρόκειται να τοποθετηθούν οι αισθητήρες.
2. Προετοιμασία εδάφους. Αφήνουμε το έδαφος που θα χρησιμοποιηθεί στη βαθμονόμηση να χάσει την υγρασία του (όχι στο φούρνο αλλά στον αέρα). Για να γίνει αυτό γρηγορότερα το απλώνουμε σε μία λεπτή στρώση. Απομακρύνουμε τα μεγάλα τεμαχίδια από το έδαφος (πέτρες, χαλίκια κλπ.) και σπάμε τα μεγάλα συσσωματώματα κοσκινίζοντας το έδαφος με ένα κόσκινο 2-5mm. Σε κάποια εδάφη (π.χ. κομπόστ, υποστρώματα υδροπονίας κοκ), η απομάκρυνση των μεγάλων σωματιδίων θα άλλαζε τη φύση του υλικού και επομένως δεν μπορεί να γίνει.
3. Βρίσκουμε την φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους από τα ειδικά για αυτό το σκοπό δείγματα που πήραμε από τον αγρό.

$$\rho_b = m_d / V_s$$

όπου:

m_d = η μάζα του ξηρού εδάφους (grams)

V_s = ο όγκος αδιατάρακτου δείγματος εδάφους, συνολικός όγκος εδάφους, στερεά φάση μαζί με τους πόρους (cm^3)

Εξίσωση 17 Φαινόμενη πυκνότητα εδάφους

4. Τοποθετούμε το έδαφος εντός του δοχείου βαθμονόμησης προσπαθώντας να προσεγγίσουμε την φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους. Για να γίνει αυτό ζυγίζουμε το έδαφος και χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 17, με γνωστά τα ρ_b και τη διατομή του δοχείου λύνουμε ως προς h που είναι το ύψος του δοχείου όπου πρέπει να φτάσει το χώμα. Στο σχετικά στεγνό αρχικό δείγμα αυτό θα γίνει εύκολα και συνίσταται να γίνει σταδιακά κατά στρώσεις π.χ. αν το έδαφος έχει βάρος 2kg και πρέπει να φτάσει σε ύψος 20cm μέσα στο δοχείο καλύτερα να τοποθετηθεί σε 4 στρώσεις των 0,5kg για κάθε μία από τις οποίες θα προσπαθήσουμε να έχει ύψος 5cm.
 - a. Στην περίπτωση του EC-5 ,μπορούμε να βάλουμε όλο το χώμα στο δοχείο πριν το τοποθετήσουμε τον αισθητήρα.
 - b. Για το 10HS, προτείνεται να βάλουμε μόνο το μισό χώμα, μετά να βάλουμε το αισθητήρα και μετά το υπόλοιπο γύρω του (Cobos και Chambers, 2010). Η Decagon (2017β) στο σχετικό video, λέει ότι αν έχουμε όλο το χώμα στο δοχείο να κάνουμε πρώτα ένα άνοιγμα με τη λάμα τοποθέτησης
5. Εισάγουμε τον αισθητήρα ECH2O
 - a. Για τον EC5:
 - i. Ο EC5 μπορεί να εισαχθεί κατακόρυφα, κατευθείαν στον πλήρη όγκο του εδάφους στο δοχείο βαθμονόμησης. Όμως χρειάζεται προσοχή ώστε να μπει ακολουθώντας μία ίσια γραμμή ώστε να μην δημιουργηθούν κενά με αέρα στην περιοχή επαφής των λαμών του αισθητήρα και του εδάφους.
 - ii. Ο αισθητήρας πρέπει να μπει όλος μέσα στο έδαφος, μαζί με την πλαστική κεφαλή που περιέχει τα ηλεκτρονικά του. Εάν για κάποιο λόγο δεν είναι δυνατό να μπει και η κεφαλή, η κεφαλή και λίγα cm καλωδίου πρέπει να καλυφθούν με επιπρόσθετο χώμα δημιουργώντας ένα λοφάκι.
 - iii. Ο αισθητήρας πρέπει σε κάθε περίπτωση να περιβάλλεται από συνεχές έδαφος για μία ακτίνα τουλάχιστον 5 cm γύρω από τις λάμες του.
 - b. Για τον 10HS:
 - i. Ο αισθητήρας πρέπει να μπει όσο γίνεται μέσα στο έδαφος. Για κάποιους τύπους εδάφους ή/και για κάποια επίπεδα υγρασίας αυτό είναι εύκολο. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως είναι πρακτικά αδύνατο. Σε αυτές συστήνεται να δημιουργηθεί ένα άνοιγμα με την λεπίδα εισαγωγής ή άλλο παρόμοιο

εργαλείο. Μετά μπαίνει ο αισθητήρας. Και εδώ όπως στον EC5 χρειάζεται προσοχή να μην δημιουργηθούν κενά με αέρα στην περιοχή επαφής των λαμών του αισθητήρα και του εδάφους.

- ii. Εάν η κεφαλή δεν χωρά ολόκληρη μπορεί να γίνει αυτό που συστήνεται για την αντίστοιχη περίπτωση για τον EC5 (λοφάκι).
 - iii. Ο αισθητήρας πρέπει σε κάθε περίπτωση να περιβάλλεται από συνεχές έδαφος για μία ακτίνα τουλάχιστον 10 cm γύρω από τις λάμες του.
6. Λαμβάνουμε μία μέτρηση με τον αισθητήρα. Η μέτρηση μπορεί να φανεί π.χ. στον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με το καταγραφικό (π.χ. το em50) και τρέχει κατάλληλο λογισμικό (π.χ. το ECH2O Utility – σε αυτή την περίπτωση η μέτρηση σε RAW counts διαβάζεται από το σχετικό παράθυρο (Terminal)). Προτείνεται να επαναληφθεί η διαδικασία λήψης μέτρησης τουλάχιστον δύο με τρεις φορές. Ίσως παρατηρηθούν μικροδιαφορές στη μέτρηση. Θα καταγραφεί ο μέσος όρος των μετρήσεων.
 7. Χωρίς να μετακινήσουμε τον αισθητήρα, λαμβάνουμε τουλάχιστον δύο (2) δείγματα του εδάφους (ο δειγματολήπτης μπαίνει όλος μέσα ώστε να ληφθεί ο όγκος που χωρά). Αφαιρούμε το χώμα που εξέχει κάτω από το δειγματολήπτη και το τοποθετούμε σε ένα από τα αριθμημένα δοχεία ξήρανσης.
 8. Ζυγίζουμε το δείγμα του εδάφους (όπως είναι υγρό) με το δοχείο ξήρανσης (χωρίς το καπάκι) και καταγράφουμε το αποτέλεσμα (Πίνακας 2, στήλη 5). Κλείνουμε το καπάκι ώστε να αποφευχθούν σφάλματα από απώλεια νερού π.χ. λόγω εξάτμισης και αφήνουμε το δείγμα να περιμένει.
 9. Ετοιμαζόμαστε για το επόμενο βήμα ύγρανσης. Προσθέτουμε αργά νερό 10 στο έδαφος (περίπου 1 mL για κάθε 10 mL εδάφους (αναμένεται να αυξήσει την VWC κατά 10%) και ανακατεύουμε πολύ καλά (με μυστρί ή και με τα χέρια) ώστε η υγρασία να κατανεμηθεί ομοιόμορφα.
 10. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα της βαθμονόμησης έως ότου το έδαφος να φτάσει κοντά στον κορεσμό. Χρειάζεται προσοχή στην προσπάθεια να καταλάβει το έδαφος στο δοχείο βαθμονόμησης όγκο που αντιστοιχεί στην φαινόμενη πυκνότητα μια και η διαφορά που ίσως προκύψει δεν πρέπει να ξεπερνά το 20%. Ο στόχος είναι να παραχθούν 4-6 σημεία βαθμονόμησης.
 11. Αφού έχουν συγκεντρωθεί όλα τα δείγματα στα δοχεία, τα τοποθετούμε (χωρίς το καπάκι) στο φούρνο ξήρανσης όπου παραμένουν για 24 ώρες στους 105oC. Για εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε οργανική ουσία προτείνεται η ξήρανση να γίνεται στους 60-70 oC για τουλάχιστον 48 ώρες μια και στους 105oC μπορεί να χάσουν σημαντικό μέρος της οργανικής ύλης που εξαερώνεται εύκολα.
 12. Βγάζουμε τα δοχεία από το φούρνο, βάζουμε τα καπάκια και τα αφήνουμε να κρυώσουν.
 13. Ζυγίζουμε τα δείγματα: το ξηρό έδαφος με το δοχείο ξήρανσης (χωρίς το καπάκι) και καταγράφουμε το αποτέλεσμα (Πίνακας 2, στήλη 6).



Εικόνα 41 Στιγμιότυπο από την τυπική διαδικασία βαθμονόμησης, διακρίνεται το δοχείο ανάμειξης - ομογενοποίησης εδάφους, ο αισθητήρας (10HS) και το καταγραφικό (Bisse, 2012)

Η κατ'όγκο υγρασία υπολογίζεται όπως έχει αναφερθεί ως ο όγκος του νερού προς τον όγκο του εδάφους (εδαφικό δείγμα στην περίπτωση της βαθμονόμησης). Η σχετική μέτρηση υπολογίζεται με βάση τις μετρήσεις για κάθε δείγμα (Πίνακας 2, στήλες 7 έως 10). Η Εξίσωση 18 συνοψίζει τους υπολογισμούς που περιλαμβάνει τυπική διαδικασία βαθμονόμησης (Cobos και Chambers, 2010, Decagon, 2017β)

$$mw = m_{wet} - m_{dry}$$

$$V_w = mw / \rho_w$$

$$\rho = m_{dry} / V_s$$

$$\theta = V_w / V_s$$

όπου:

θ η κατ'όγκο υγρασία σε νερό (v/v)

m_w η μάζα του νερού στο δείγμα εδάφους (g)

m_{dry} η μάζα του δείγματος εδάφους (g) όπως προκύπτει μετά την ξήρανση του δείγματος στο φούρνο

V_w ο όγκος του νερού στο δείγμα (cm^3)

V_s ο όγκος του δείγματος εδάφους (cm^3), αυτό είναι ίσο σε κάθε βήμα με τον όγκο που συλλέγει ο δειγματολήπτης

ρ η πυκνότητα του δείγματος εδάφους (g/cm^3)

ρ_w η πυκνότητα του νερού, που σύμφωνα με τις οδηγίες της Decagon μπορεί να ληφθεί ίση με $1 g/cm^3$

Εξίσωση 18 Σειρά υπολογισμών κατά την τυπική διαδικασία βαθμονόμησης (Cobos και Chambers, 2010, Decagon, 2017β)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Καταγραφές / μετρήσεις					Υπολογισμοί				Επιπλέον υπολογισμός
Sample number αριθμός δείγματος	Avg. Sensor reading (raw counts or mV) Μέση ένδειξη αισθητήρα (raw counts ή mV)	Drying container tare mass (g) Βάρος περιέκτη δείγματος (g)	Vs Sample volume (ml or cm3) Όγκος δείγματος (ml ή cm3)	Mass of container + wet soil (g) Βάρος περιέκτη + υγρού εδάφους (g)	Mass of container + dry soil (g) Βάρος περιέκτη + ξηρού εδάφους (g)	mw, Vw [equation: cell5- cell6] Mass, volume of water (g, ml or cm3) Βάρος, όγκος νερού (g, ml ή cm3)	mdry [equation: cell6 – cell3] Dry soil mass (g) Βάρος ξηρού εδάφους (καθαρό) (g)	ρ [equation: mdry / Vs or cell8/cell4] Soil density (g/cm3) Πυκνότητα εδάφους ρ (gr/cm3)	θ or VWC [equation: mw/Vs or cell7/cell4] Volumetric water content (cm3/cm3 or %) Κατ' όγκο περιεκτικότητα σε νερό (cm3/cm3 or %)	VWC according Decagon's 10HS generic mineral soils (%) VWC σύμφωνα με τη γενική εξίσωση της Decagon για 10HS για ανόργανα εδάφη (%)
1	742,00	2,20	73,08	92,73	91,48	1,25	89,28	1,22	0,02	0,02
2	774,33	2,28	73,08	105,50	98,17	7,33	95,89	1,31	0,10	0,05
3	878,00	2,22	73,08	112,95	98,47	14,48	96,25	1,32	0,20	0,13
4	1283,67	2,26	73,08	136,66	110,93	25,73	108,67	1,49	0,35	0,34
5	1399,67	2,25	73,08	150,24	114,40	35,84	112,15	1,53	0,49	0,41
6	1424,33	2,25	73,08	139,45	103,53	35,92	101,28	1,39	0,49	0,43

Πίνακας 2 Πίνακας βαθμονόμησης με παράδειγμα από 10HS σε πηλοαμμώδες (loamy sand) έδαφος

4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η τυπική διαδικασία βαθμονόμησης της METER GROUP (πρώην DECAGON), ουσιαστικά πρόσθετε νερό στα δείγματα σταδιακά ώστε να φτάσει στο σημείο κορεσμού για να βαθμονομηθούν οι αισθητήρες. Τα πειράματα που θα αναλυθούν παρακάτω έγιναν με την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή, τα δείγματα φτιάχτηκαν με την υγρασία στον κορεσμό και σιγά σιγά, “έχαναν” νερό ώστε να φτάσουν στο σημείο που δεν θα έχουν καθόλου νερό μέσα τους. Η διαδικασία είναι περισσότερο χρονοβόρα, διαρκεί περισσότερες μέρες αλλά είναι αναλυτικότερη.

4.2.1 ΠΕΙΡΑΜΑ 1

Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν:

1. Κύλινδροι αδιατάρακτων δειγμάτων με καπάκια και όγκο $V = 250 \text{ cm}^3$
2. Δειγματολήπτης αδιατάρακτων δειγμάτων
3. Ζυγός ακριβείας
4. Κλίβανος ξήρανσης (πυριαντήριο)

5. Κόσκινο 2mm
6. Τσουβάλια
7. Αλουμινένια ταψάκια
8. Πλαστική λεκάνι
9. Σφυρί (Ματσόλα)
10. Ειδικό εργαλείο τοποθέτησης αισθητήρων
11. Γάντια μίας χρήσης
12. Διαφανής μεμβράνη
13. Φτυαράκι
14. Τρία δοχεία με νερό
15. Γλαστράκια χωρητικότητας 1000 ml
16. Ειδική λάμα (πριόνι)
17. Τρεις αισθητήρες EC-5 by DECAGON
18. Καταγραφικό Em50 by DECAGON
19. Φορητός υπολογιστής με λειτουργικό Windows με εγκατεστημένο το πρόγραμμα ECH20 Utility

- A. Τοποθετήσαμε τους τρεις αισθητήρες στα τρία δοχεία με το νερό (προσοχή: όλος ο αισθητήρας να είναι μέσα και να έχει λίγο και από το καλώδιο.) ώστε να δούμε τι μετρήσεις παίρνουμε.
- B. Τοποθετήσαμε τους τρεις αισθητήρες σε 3 γλαστράκια με χώμα ώστε να δούμε τι μετρήσεις παίρνουμε.
- C. Πήραμε χώμα από το έδαφος της σχολής για το πείραμα (2 τσουβάλια).
- D. Απλώσαμε στο εργαστήριο για αεροξήρανση για τρεις ημέρες
- E. Μετά από τρεις μέρες που το χώμα είχε ξηρανθεί, μαζέψαμε και ύστερα κοσκινίσαμε σε κόσκινο 2 mm.
- F. Τοποθετήσαμε σε κύλινδρο αδιατάρακτου δείγματος με όγκο 250 cm^3 , έδαφος για να βρούμε την υγρασία που είχε εκείνη την στιγμή το έδαφος αλλά και το φαινόμενο ειδικό βάρος.
- G. Τοποθετήσαμε έδαφος και το πιέσαμε έτσι ώστε να μην έχει κενά και να εκμεταλλευτούμε όλο τον όγκο των 250 cm^3 .
- H. Το τοποθετήσαμε σε αλουμινένιο ταψάκι (αφού πήραμε το απόβαρο βάρους του) και το ζυγίσαμε. Η μάζα υγρή (Wwet) ζύγιζε 359,5 g.
- I. Το τοποθετήσαμε σε κλίβανο ξήρανσης για 24 ώρες στους 105°C
- J. Το ζυγίσαμε μετά από τις 24 ώρες σε ζυγό ακριβείας και η μάζα ξηρή (Wdry) ζύγιζε 352 g.

- K. Οπότε βάσει του τύπου $\Theta v = (W_{wet} - W_{dry}) / 250$, όπου 250 είναι ο όγκος του κυλίνδρου, η υγρασία κατ'όγκο ήταν $\Theta v = (359,5 - 352) / 250 = 0,03$ κατ'όγκο υγρασία και εκφρασμένη σε ποσοστό 3% κατ'όγκο υγρασία.
- L. Από τις γλάστρες δεν χρησιμοποιήσαμε όλη την χωρητικότητα (1000 ml), παρά μετρήσαμε μέχρι την χαραγή της γλάστρας (750 ml) για να αποφύγουμε την υπερχείληση.
- M. Το φαινόμενο ειδικό βάρος (ρ_b) δίνεται από την σχέση $\rho_b = W_{dry} / V$, οπότε $\rho_b = 352 / 250 = 1,4 \text{ g/cm}^3$
- N. Χρησιμοποιήσαμε 750ml όγκο από τη γλάστρα. Για να δούμε πόσο χώμα θα συμπληρώσουμε λέμε, $750 * 1,4 = 1050 \text{ g}$. Δηλαδή κάθε γλαστράκι με το χώμα μόνο θα ζυγίζει 1050 g.
- O. Ύστερα φτιάξαμε 20 γλαστράκια με χώμα 1050 g.
- P. Για να βρούμε τον κορεσμό του εδάφους βάλουμε σε έναν κύλινδρο 250 cm^3 , χώμα, το πιέσαμε για να μην έχει κενά.
- Q. Το ζυγίσαμε σε ζυγό ακριβείας $W(\text{αρχ})$, αφού βγάλαμε το απόβαρο του κυλίνδρου, και τοποθετήσαμε στο κάτω μέρος του κυλίνδρου ένα καπάκι με πόρους.
- R. Το τοποθετήσαμε σε ένα ειδικό βυτίο 5 λίτρων και συμπληρώσαμε νερό γλυρω από το δείγμα μέχρι την χαραγή του κυλίνδρου έτσι ώστε το νερό να μπαίνει από τους πόρους του καπακιού και να βρούμε τον κορεσμό του. Το αφήσαμε για 24 ώρες.
- S. Το ζυγίσαμε μετά από 24 ώρες $W(\text{τελ})$ και το αποτέλεσμα ήταν: $W(\text{κορεσμός}) = (W(\text{τελ}) - W(\text{αρχ})) / V$. Το αποτέλεσμα ήταν 40% κατ'όγκο υγρασία. $W(\text{κορεσμός}) = 40\%$
- T. Η Υγρασία ήταν στο 3% και εμείς θέλαμε την φτάσουμε στο 40%. Οπότε $0,4 (40\% \text{ κορεσμός}) - 0,03 (3\% \text{ υγρασία}) = 0,37 * 750 \text{ ml} = 277,5 \text{ ml}$.
- U. Άρα στα 750 ml που έχει χωρητικότητα το γλαστράκι, θα συμπληρώσουμε 277,5 ml νερό για να φτάσουμε την υγρασία από το 3% στο 40% (κορεσμός).
- V. Στην συνέχεια πήρα την λεκάνη, τοποθέτησα 277,5 ml νερού και τα 1050 g χώματος κάθε γλάστρας για να φτιάξω το μείγμα.
- W. Αφού ανακατέψαμε καλά, τοποθετήσαμε το μείγμα στο γλαστράκι και το καλύψαμε με διαφανή μεμβράνη για να μην εξατμιστεί το νερό όσο φτιάχναμε τις υπόλοιπες 19 γλάστρες.
- X. Μόλις τελειώσαμε, βγάλαμε τις μεμβράνες από τα γλαστράκια και πήραμε 3 τυχαίες γλάστρες για να τοποθετήσουμε τους αισθητήρες.
- Y. Παίρνωντας το ειδικό εργαλείο τοποθέτησης αισθητήρων, κάναμε μια τομή στην μέση της γλάστρας και τοποθετήσαμε τον αισθητήρα (προσοχή, να καλυφθεί όλος και λιγο από το καλώδιο)
- Z. Συνδέσαμε με το καταγραφικό EM50, κάναμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις (μέτρηση ανά τέταρτο, αναγνώριση αισθητήρων στο πρόγραμμα, ρύθμιση μονάδων μέτρησης) και το πείραμα ξεκίνησε στις 18/1/2018.

ΠΑΙΡΝΟΝΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

- A. Πήραμε ένα από τα γλαστράκια, τοποθετήσαμε στο κέντρο τον κύλινδρο και πάνω του τον δειγματολήπτη αδιατάρακτων δειγμάτων.

- B. Τον πιάσαμε σιγα σιγά ώστε ο κύλινδρος να μπει μέσα στο γλαστράκι αλλά η χαραγή του να είναι έξω, ίσα που να φαίνεται.
- C. Κλείσαμε με το καπάκι το δείγμα από το πάνω μέρος και σιγα σιγα με το φτυαράκι, βγάλαμε το γύρω χώμα ώστε να πάρουμε το δείγμα μου.
- D. Κλείσαμε και το κάτω μέρος με το καπάκι και το τοποθετήσαμε στον πάγκο εργασίας ώστε να το επεξεργαστούμε με την λάμα και να βγάλουμε το περίσσιο χώμα.
- E. Τοποθετήσαμε με προσοχή το δείγμα μέσα στο ταψάκι, και αφού βγάλαμε το απόβαρο από το ταψάκι, ζυγίσαμε το δείγμα W(wet) και το τοποθετήσαμε στον κλίβανο ξήρανσης (πυριαντήριο) για 24 ώρες στους 105 °C. Παράλληλα πήραμε και τις μετρήσεις που είχαν οι αισθητήρες εκείνη την συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- F. Μετά από 24 ώρες ζυγίσαμε το δείγμα μας W(dry) για να δούμε πόσο ποσοστό υγρασίας έχασε και να συγκρίνουμε με τις μετρήσεις των αισθητήρων.
- G. Η ίδια διαδικασία για τα επόμενα 19 δείγματα (20 σύνολο).
- H. Λήξη πειράματος 20/3/2018.

4.2.2 ΠΕΙΡΑΜΑ 2

Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν:

1. Κύλινδροι αδιατάρακτων δειγμάτων με καπάκια και όγκο $V = 250 \text{ cm}^3$
2. Δειγματολήπτης αδιατάρακτων δειγμάτων
3. Ζυγός ακριβείας
4. Κλίβανος ξήρανσης (πυριαντήριο)
5. Κόσκινο 2mm
6. Τσουβάλια
7. Αλουμινένια ταψάκια
8. Πλαστική λεκάνι
9. Σφυρί (Ματσόλα)
10. Ειδικό εργαλείο τοποθέτησης αισθητήρων
11. Γάντια μίας χρήσης
12. Διαφανής μεμβράνη
13. Φτυαράκι
14. Τρία δοχεία με νερό
15. Γλαστράκια χωρητικότητας 4600 ml
16. Ειδική λάμα (πριόνι)
17. Δύο αισθητήρες EC-5 by DECAGON
18. Ένας αισθητήρας ML2X ThetaProbe by DELTA-T DEVICES
19. Ένα καταγραφικό HH2 Moisture Meter by DELTA-D DEVICES
20. Καταγραφικό Em50 by DECAGON

21. Φορητός υπολογιστής με λειτουργικό Windows με εγκατεστημένο το πρόγραμμα ECH20 Utility

- A. Τοποθετήσαμε τους τρεις αισθητήρες στα τρία δοχεία με το νερό (προσοχή: όλος ο αισθητήρας να είναι μέσα και να έχει λίγο και από το καλώδιο.) ώστε να δούμε τι μετρήσεις παίρνουμε.
- B. Τοποθετήσαμε τους τρεις αισθητήρες σε 3 γλαστράκια με χώμα ώστε να δούμε τι μετρήσεις παίρνουμε.
- C. Πήραμε χώμα από το έδαφος της σχολής για το πείραμα (5 τσουβάλια).
- D. Απλώσαμε το χώμα στο εργαστήριο για αεροξήρανση για τρεις ημέρες
- E. Μετά από τρεις μέρες που το χώμα είχε ξηρανθεί, το μαζέψαμε και ύστερα το κοσκινήσαμε σε κόσκινο 2mm.
- F. Τοποθετήσαμε σε κύλινδρο αδιατάρακτου δείγματος με όγκο 250 cm^3 , έδαφος για να βρούμε την υγρασία που είχε εκείνη την στιγμή το έδαφος αλλά και το φαινόμενο ειδικό βάρος.
- G. Τοποθετούσαμε έδαφος και το πιέζαμε έτσι ώστε να μην έχει κενά και να εκμεταλλευτούμε όλο τον όγκο των 250 cm^3 .
- H. Το τοποθετήσαμε σε αλουμινένιο ταψάκι (αφού πάρουμε το απόβαρο βάρους του) ζυγίσαμε και η μάζα υγρή (Wwet) ζύγιζε 350 g.
- I. Το τοποθετήσαμε σε κλίβανο ξήρανσης για 24 ώρες στους $105 \text{ }^\circ\text{C}$
- J. Το ζυγίσαμε μετά από τις 24 ώρες σε ζυγό ακριβείας και η μάζα ξηρή (Wdry) ζύγιζε 347 g.
- K. Οπότε βάσει του τύπου $\Theta_v = (W_{wet} - W_{dry}) / 250$, όπου 250 είναι ο όγκος του κυλίνδρου, η υγρασία κατ'όγκο ήταν $\Theta_v = (350 - 347) / 250 = 0,012$ κατ'όγκο υγρασία και εκφρασμένη σε ποσοστό 1,2% κατ'όγκο υγρασία.
- L. Από τις γλάστρες δεν χρησιμοποιήσαμε όλη την χωρητικότητα (4600 ml), παρά μετρήσαμε μέχρι την χαραγή της γλάστρας (3500 ml) για να αποφύγουμε την υπερχείληση.
- M. Το φαινόμενο ειδικό βάρος (ρ_b) δίνεται από την σχέση $\rho_b = W_{dry} / V$, οπότε $\rho_b = 347 / 250 = 1,39 \text{ g/cm}^3$ και με στρογγυλοποίηση $1,4 \text{ g/cm}^3$
- N. Χρησιμοποιήσαμε 3500ml όγκο από τη γλάστρα. Για να δούμε πόσο χώμα θα συμπληρώσουμε λέμε, $3500 * 1,4 = 4900 \text{ g}$. Δηλαδή κάθε γλαστράκι θα έχει μέσα χώμα και θα ζυγίζει 4900 g.
- O. Ύστερα φτιάξαμε 25 γλαστράκια με χώμα 4900 g.
- P. Για να βρούμε τον κορεσμό του εδάφους βάλαμε σε έναν κύλινδρο 250 cm^3 , χώμα, το πιέζαμε για να μην έχει κενά.
- Q. Το ζυγίσαμε σε ζυγό ακριβείας $W(\text{αρχ})$, αφού βγάλαμε το απόβαρο του κυλίνδρου, και τοποθετήσαμε στο κάτω μέρος του κυλίνδρου ένα καπάκι με πόρους.
- R. Το τοποθετήσαμε σε ένα ειδικό βυτίο 5 λίτρων και συμπληρώσαμε νερό γλυρω από το δείγμα μέχρι την χαραγή του κυλίνδρου έτσι ώστε το νερό να μπαίνει από τους πόρους του καπακιού και να βρούμε τον κορεσμό του. Το αφήσαμε για 24 ώρες.

- S. Το ζυγίσαμε μετά από 24 ώρες W(τελ) και το αποτέλεσμα ήταν: $W(\text{κορεσμός}) = (W(\text{τελ}) - W(\text{αρχ}))/V$. Το αποτέλεσμα ήταν 40% κατ'όγκο υγρασία. $W(\text{κορεσμός}) = 40\%$
- T. Η Υγρασία ήταν στο 1,2% και εμείς θέλαμε την φτάσουμε στο 40%. Οπότε $0,4 (40\% \text{ κορεσμός}) - 0,012 (1,2\% \text{ υγρασία}) = 0,388 * 3500\text{ml} = 1358 \text{ ml}$.
- U. Άρα στα 3500 ml που έχει χωρητικότητα το γλαστράκι, θα συμπληρώσουμε 1358 ml νερό για να φτάσουμε την υγρασία από το 1,2% στο 40% (κορεσμός).
- V. Στην συνέχεια πήραμε την λεκάνη, τοποθετήσαμε 1358 ml νερού και τα 4900 g χώματος κάθε γλάστρας για να φτιάξουμε το μείγμα.
- W. Αφού ανακατέψαμε καλά, τοποθετήσαμε το μείγμα στο γλαστράκι και το καλύψαμε με διαφανή μεμβράνη για να μην εξατμιστεί το νερό όσο φτιάχναμε τις υπόλοιπες γλάστρες.
- X. Μόλις τελειώσαμε, βγάλαμε τις μεμβράνες από τα 25 γλαστράκια και πήραμε 3 τυχαίες γλάστρες για να τοποθετήσουμε τους αισθητήρες.
- Y. Παίρνοντας το ειδικό εργαλείο τοποθέτησης αισθητήρων, κάναμε μια τομή στην μέση της γλάστρας και τοποθετήσαμε τον αισθητήρα (προσοχή, να καλυφθεί όλος και λίγο από το καλώδιο)
- Z. Το ίδιο και για τον αισθητήρα ML2X ο οποίος τοποθετήθηκε στο κέντρο.
- AA. Συνδέθηκαν με το καταγραφικό EM50, κάναμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις (μέτρηση ανά τέταρτο, αναγνώριση αισθητήρων στο πρόγραμμα, ρύθμιση μονάδων μέτρησης) και το πείραμα ξεκίνησε στις 23/10/2018.

ΠΑΙΡΝΩΝΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

- A. Πήραμε ένα από τα γλαστράκια, τοποθετήσαμε στο κέντρο τον κύλινδρο και πάνω του τον δειγματολήπτη αδιατάρακτων δειγμάτων.
- B. Τον πιάσαμε σιγα σιγά ώστε ο κύλινδρος να μπει μέσα στο γλαστράκι αλλά η χαραγή του να είναι έξω, ίσα που να φαίνεται.
- C. Κλείσαμε με το καπάκι το δείγμα από το πάνω μέρος και σιγα σιγα με το φτυαράκι, βγάλαμε το γύρω χώμα ώστε να πάρω το δείγμα μας.
- D. Κλείσαμε και το κάτω μέρος με το καπάκι και το τοποθετήσαμε στον πάγκο εργασίας ώστε να το επεξεργαστούμε με την λάμα και να βγάλουμε το περίσσιο χώμα.
- E. Τοποθετήσαμε με προσοχή το δείγμα μέσα στο ταψάκι, και αφού έχουμε βγάλαμε το απόβαρο από το ταψάκι, ζυγίσαμε το δείγμα W(wet) και το τοποθετήσαμε στον κλίβανο ξήρανσης (πυριαντήριο) για 24 ώρες στους 105 °C. Παράλληλα πήραμε και τις μετρήσεις που είχαν οι αισθητήρες εκείνη την συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- F. Μετά από 24 ώρες ζυγίσαμε το δείγμα μου W(dry) για να δούμε πόσο ποσοστό υγρασίας έχασε και να συγκρίνουμε με τις μετρήσεις των αισθητήρων.
- G. Η ίδια διαδικασία για τα επόμενα 21 δείγματα (22 σύνολο).

Λήξη πειράματος 7/2/2019.

4.2.3. ΠΕΙΡΑΜΑ 3 (ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 2)

Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν:

- 1) Κύλινδροι αδιατάρακτων δειγμάτων με καπάκια και όγκο $V = 250 \text{ cm}^3$
- 2) Δειγματολήπτης αδιατάρακτων δειγμάτων
- 3) Ζυγός ακριβείας
- 4) Κλίβανος ξήρανσης (πυριαντήριο)
- 5) Κόσκινο 2mm
- 6) Τσουβάλια
- 7) Αλουμινένια ταψάκια
- 8) Πλαστική λεκάνι
- 9) Σφυρί (Ματσόλα)
- 10) Ειδικό εργαλείο τοποθέτησης αισθητήρων
- 11) Γάντια μίας χρήσης
- 12) Διαφανής μεμβράνη
- 13) Φτυαράκι
- 14) Πέντε δοχεία με νερό
- 15) Γλαστράκια χωρητικότητας 4600 ml
- 16) Ειδική λάμα (πριόνι)
- 17) Τρεις αισθητήρες EC-5 by DECAGON
- 18) Ένας αισθητήρας ML2X ThetaProbe by DELTA-T DEVICES
- 19) Ένα καταγραφικό HH2 Moisture Meter by DELTA-D DEVICES
- 20) Ένας αισθητήρας Parrot Flower Power
- 21) Καταγραφικό Em50 by DECAGON
- 22) Φορητός υπολογιστής με λειτουργικό Windows με εγκατεστημένο το πρόγραμμα ECH20 Utility

- A. Τοποθετήσαμε τους πέντε αισθητήρες στα πέντε δοχεία με το νερό (προσοχή: όλος ο αισθητήρας να είναι μέσα και να έχει λίγο και από το καλώδιο.) ώστε να δούμε τι μετρήσεις παίρνουμε.
- B. Τοποθετήσαμε τους πέντε αισθητήρες σε 5 γλαστράκια με χώμα ώστε να δούμε τι μετρήσεις παίρνουμε.
- C. Πήραμε χώμα από το έδαφος της σχολής για το πείραμα (5 τσουβάλια).
- D. Απλώσαμε στο εργαστήριο για αεροξήρανση για τρεις ημέρες
- E. Μετά από τρεις μέρες που το χώμα είχε ξηρανθεί, μαζέψαμε και ύστερα κοσκινίσαμε σε κόσκινο 2mm.

- F. Τοποθετήσαμε σε κύλινδρο αδιατάρακτου δείγματος με όγκο 250 cm³, έδαφος για να βρούμε την υγρασία που είχε εκείνη την στιγμή το έδαφος αλλά και το φαινόμενο ειδικό βάρος.
- G. Τοποθετήσαμε έδαφος και το πιάσαμε έτσι ώστε να μην έχει κενά και να εκμεταλλευτούμε όλο τον όγκο των 250 cm³.
- H. Το τοποθετήσαμε σε αλουμινένιο ταψάκι (αφού πάρουμε το απόβαρο βάρους του) ζυγίσαμε και η μάζα υγρή (W_{wet}) ζύγιζε 360,09 g.
- I. Το τοποθετήσαμε σε κλίβανο ξήρανσης για 24 ώρες στους 105°C
- J. Το ζυγίσαμε μετά από τις 24 ώρες σε ζυγό ακριβείας και η μάζα ξηρή (W_{dry}) ζύγιζε 355,16 g.
- K. Οπότε βάσει του τύπου $\Theta_v = (W_{wet} - W_{dry}) / 250$, όπου 250 είναι ο όγκος του κυλίνδρου, η υγρασία κατ'όγκο ήταν $\Theta_v = (360,09 - 355,16) / 250 = 0,0197$ κατ'όγκο υγρασία και εκφρασμένη σε ποσοστό 1,97% κατ'όγκο υγρασία.
- L. Από τις γλάστρες δεν χρησιμοποιήσαμε όλη την χωρητικότητα (4600 ml), παρά μετρήσαμε μέχρι την χαραγή της γλάστρας (3500 ml) για να αποφύγουμε την υπερχειλίση
- M. Το φαινόμενο ειδικό βάρος (ρ_b) δίνεται από την σχέση $\rho_b = W_{dry} / V$, οπότε $\rho_b = 355,16 / 250 = 1,42 \text{ g/cm}^3$ αλλά το συμψηφήσαμε με το προηγούμενο πείραμα και το ρ_b έγινε 1,41 g/cm³
- N. Χρησιμοποιήσαμε 3500ml όγκο από τη γλάστρα. Για να δούμε πόσο χώμα θα συμπληρώσουμε λέμε, $3500 * 1,41 = 4935 \text{ g}$. Δηλαδή κάθε γλαστράκι θα έχει μέσα χώμα και θα ζυγίζει 4935 g.
- O. Ύστερα φτιάξαμε 26 γλαστράκια με χώμα 4935 g.
- P. Για να βρούμε τον κορεσμό του εδάφους βάλαμε σε έναν κύλινδρο 250 cm³, χώμα, το πιάσαμε για να μην έχει κενά.
- Q. Το ζυγίσαμε σε ζυγό ακριβείας W(αρχ), αφού βγάλαμε το απόβαρο του κυλίνδρου, και τοποθετήσαμε στο κάτω μέρος του κυλίνδρου ένα καπάκι με πόρους.
- R. Το τοποθετήσαμε σε ένα ειδικό βυτίο 5 λίτρων και συμπληρώσαμε νερό γλυρω από το δείγμα μέχρι την χαραγή του κυλίνδρου έτσι ώστε το νερό να μπαίνει από τους πόρους του καπακιού και να βρούμε τον κορεσμό του. Το αφήσαμε για 24 ώρες.
- S. Το ζυγίσαμε μετά από 24 ώρες W(τελ) και το αποτέλεσμα ήταν: $W(\text{κορεσμός}) = (W(\text{τελ}) - W(\text{αρχ})) / V$. Το αποτέλεσμα ήταν 40,56% κατ'όγκο υγρασία. $W(\text{κορεσμός}) = 40,56\%$
- T. Η Υγρασία ήταν στο 1,97% και εμείς θέλαμε την φτάσουμε στο 40,56%. Οπότε $0,4056 (40,56\% \text{ κορεσμός}) - 0,0197 (1,97\% \text{ υγρασία}) = 0,3859 * 3500 \text{ ml} = 1350,65 \text{ ml}$.
- U. Άρα στα 3500 ml που έχει χωρητικότητα το γλαστράκι, θα συμπληρώσουμε 1350,65 ml νερό για να φτάσουμε την υγρασία από το 1,97% στο 40,56% (κορεσμός).
- V. Στην συνέχεια πήραμε την λεκάνη, τοποθετήσαμε 1350,65 ml νερού και τα 4935 g χώματος κάθε γλάστρας για να φτιάξουμε το μείγμα.
- W. Αφού ανακατέψαμε καλά, τοποθετήσαμε το μείγμα στο γλαστράκι και το καλύψαμε με διαφανή μεμβράνη για να μην εξατμιστεί το νερό όσο φτιάχνουμε τις υπόλοιπες γλάστρες.
- X. Μόλις τελειώσαμε, βγάλαμε τις μεμβράνες από τα 26 γλαστράκια και πήραμε 5 τυχαίες γλάστρες για να τοποθετήσουμε τους αισθητήρες.

- Υ. Παίρνοντας το ειδικό εργαλείο τοποθέτησης αισθητήρων, κάναμε μια τομή στην μέση της γλάστρας και τοποθετήσαμε τον αισθητήρα (προσοχή, να καλυφθεί όλος και λίγο από το καλώδιο)
- Z. Το ίδιο και για τον αισθητήρα ML2X και τον Parrot οι οποίοι τοποθετήθηκαν στο κέντρο.
- ΑΑ. Συνδέθηκαν με το καταγραφικό EM50, έκανα τις απαραίτητες ρυθμίσεις (μέτρηση ανά τέταρτο, αναγνώριση αισθητήρων στο πρόγραμμα, ρύθμιση μονάδων μέτρησης) και το πείραμα ξεκίνησε στις 17/10/2019.

ΠΑΙΡΝΩΝΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

- A. Πήραμε ένα από τα γλαστράκια, τοποθετήσαμε στο κέντρο τον κύλινδρο και πάνω του τον δειγματολήπτη αδιατάρακτων δειγμάτων.
- B. Τον πιέσαμε σιγα σιγά ώστε ο κύλινδρος να μπει μέσα στο γλαστράκι αλλά η χαραγή του να είναι έξω, ίσα που να φαίνεται.
- C. Κλείσαμε με το καπάκι το δείγμα από το πάνω μέρος και σιγα σιγα με το φτυαράκι, βγάζουμε το γύρω χώμα ώστε να πάρουμε το δείγμα μας.
- D. Κλείσαμε και το κάτω μέρος με το καπάκι και το τοποθετήσαμε στον πάγκο εργασίας ώστε να το επεξεργαστούμε με την λάμα και να βγάλουμε το περίσσιο χώμα.
- E. Τοποθετήσαμε με προσοχή το δείγμα μέσα στο ταψάκι και αφού βγάλαμε το απόβαρο από το ταψάκι, ζυγίσαμε το δείγμα W(wet) και το τοποθετήσαμε στον κλίβανο ξήρανσης (πυριαντήριο) για 24 ώρες στους 105 °C. Παράλληλα πήραμε και τις μετρήσεις που είχαν οι αισθητήρες εκείνη την συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- F. Μετά από 24 ώρες ζυγίσαμε το δείγμα μου W(dry) για να δούμε πόσο ποσοστό υγρασίας έχασε και να συγκρίνουμε με τις μετρήσεις των αισθητήρων.
- G. Η ίδια διαδικασία για τα επόμενα 20 δείγματα (21 σύνολο).
- H. Στο συγκεκριμένο πείραμα δοκιμάσαμε να δούμε πόση υγρασία έχουν τα γλαστράκια με τους αισθητήρες. Απαιτεί μεγάλη προσοχή στην αφαίρεση των αισθητήρων για να παρθούν τα δείγματα.

Λήξη πειράματος 30/12/2019.

4.2.4 ΠΕΙΡΑΜΑ 4

Το πείραμα αυτό είναι η κανονική διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων EC-5 το οποίο έχει περιγραφεί παραπάνω.

Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν:

- 1) Κύλινδροι αδιατάρακτων δειγμάτων με καπάκια και όγκο $V = 250 \text{ cm}^3$
- 2) Δειγματολήπτης αδιατάρακτων δειγμάτων
- 3) Ζυγός ακριβείας
- 4) Κλίβανος ξήρανσης (πυριαντήριο)
- 5) Κόσκινο 2mm
- 6) Τσουβάλια
- 7) Αλουμινένια ταψάκια
- 8) Πλαστική λεκάνι
- 9) Σφυρί (Ματσόλα)
- 10) Ειδικό εργαλείο τοποθέτησης αισθητήρων
- 11) Γάντια μίας χρήσης
- 12) Διαφανής μεμβράνη
- 13) Φτυαράκι
- 14) Τρία δοχεία με νερό
- 15) Γλαστράκια χωρητικότητας 4600 ml
- 16) Ειδική λάμα (πριόνι)
- 17) Τρεις αισθητήρες EC-5 by DECAGON
- 18) Καταγραφικό Em50 by DECAGON
- 19) Φορητός υπολογιστής με λειτουργικό Windows με εγκατεστημένο το πρόγραμμα ECH20 Utility

- A. Για να βρούμε τον κορεσμό του εδάφους βάλουμε σε έναν κύλινδρο 250 cm³, χώμα, το πιέσαμε για να μην έχει κενά.
- B. Το ζυγίσαμε σε ζυγό ακριβείας $W(\text{αρχ})$, αφού βγάλαμε το απόβαρο του κυλίνδρου, και τοποθετήσαμε στο κάτω μέρος του κυλίνδρου ένα καπάκι με πόρους.
- C. Το τοποθετήσαμε σε ένα ειδικό βυτίο 5 λίτρων και συμπληρώσαμε νερό γλυρω από το δείγμα μέχρι την χαραγή του κυλίνδρου έτσι ώστε το νερό να μπαίνει από τους πόρους του καπακιού και να βρούμε τον κορεσμό του. Το αφήσαμε για 24 ώρες.
- D. Το ζυγίσαμε μετά από 24 ώρες $W(\text{τελ})$ και το αποτέλεσμα ήταν: $W(\text{κορεσμός}) = (W(\text{τελ}) - W(\text{αρχ}))/V$. Το αποτέλεσμα ήταν 40% κατ'όγκο υγρασία. $W(\text{κορεσμός}) = 40\%$
- E. Η αρχική μας υγρασία από το προηγούμενο πείραμα ήταν 1,97%/V.
- F. Από τις γλάστρες δεν χρησιμοποιήσαμε όλη την χωρητικότητα (4600 ml), παρά μετρήσαμε μέχρι την χαραγή της γλάστρας (3500 ml) για να αποφύγουμε την υπερχειλίση

- G. Χρησιμοποιήσαμε 3500ml όγκο από τη γλάστρα
- H. Υπολογίσαμε ότι από το 1,97% μέχρι το 40% είναι 38,03% δηλαδή για να φτάσει η υγρασία από το 1,97% στο 40% πρέπει να συμπληρώσουμε 1331,05ml νερού ($3500\text{ml} \cdot 0,3803 = 1331,05\text{ml}$ νερό) στρογγυλοποίηση στα 1331ml
- I. Φτιάξαμε 6 γλαστράκια με 4935 g χώμα.
- J. Τα 6 γλαστράκια θα είναι τα 6 σημεία μας που θα παίρνουμε δείγματα.
- K. Τα 6 σημεία χωρίζονται στα συγκεκριμένα ml: 0ml, 250ml, 520ml, 790ml, 1060ml και 1331ml. Δηλαδή: 1ο σημείο 0ml, 2ο σημείο 250ml, 3ο σημείο 520ml, 4ο σημείο 790ml, 5ο σημείο 1060ml και 6ο σημείο 1331ml
- L. Πήραμε το πρώτο γλαστράκι με τα 4935ml χώματος το οποίο δεν θα έχει νερό μέσα λόγω του πρώτου σημείου που είναι 0ml.
- M. Τοποθετήσαμε τον πρώτο EC-5 και τον ρυθμίζουμε να παίρνει μετρήσεις ανά 1 λεπτό. Στα 10 λεπτά τον βγάζουμε και βάζουμε τον δεύτερο EC-5. Μετά από 10 λεπτά βγάζουμε τον δεύτερο EC-5 και τοποθετούμε τον τρίτο EC-5. Μετά από 10 λεπτά βγάζουμε και τον τρίτο αισθητήρα, παίρνουμε αδιατάραχτο δείγμα (όπως στα προηγούμενα πειράματα) και παράλληλα έχουμε ήδη φτιάξει την δεύτερη γλάστρα μας με το επόμενο σημείο (250ml), (η διαδικασία ανάμειξης χώματος και νερού ίδια όπως στα προηγούμενα πειράματα) και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία.
- N. Ύστερα αφού πήραμε τα αποτελέσματα από το πυριαντήριο συγκρίναμε με τους αισθητήρες.

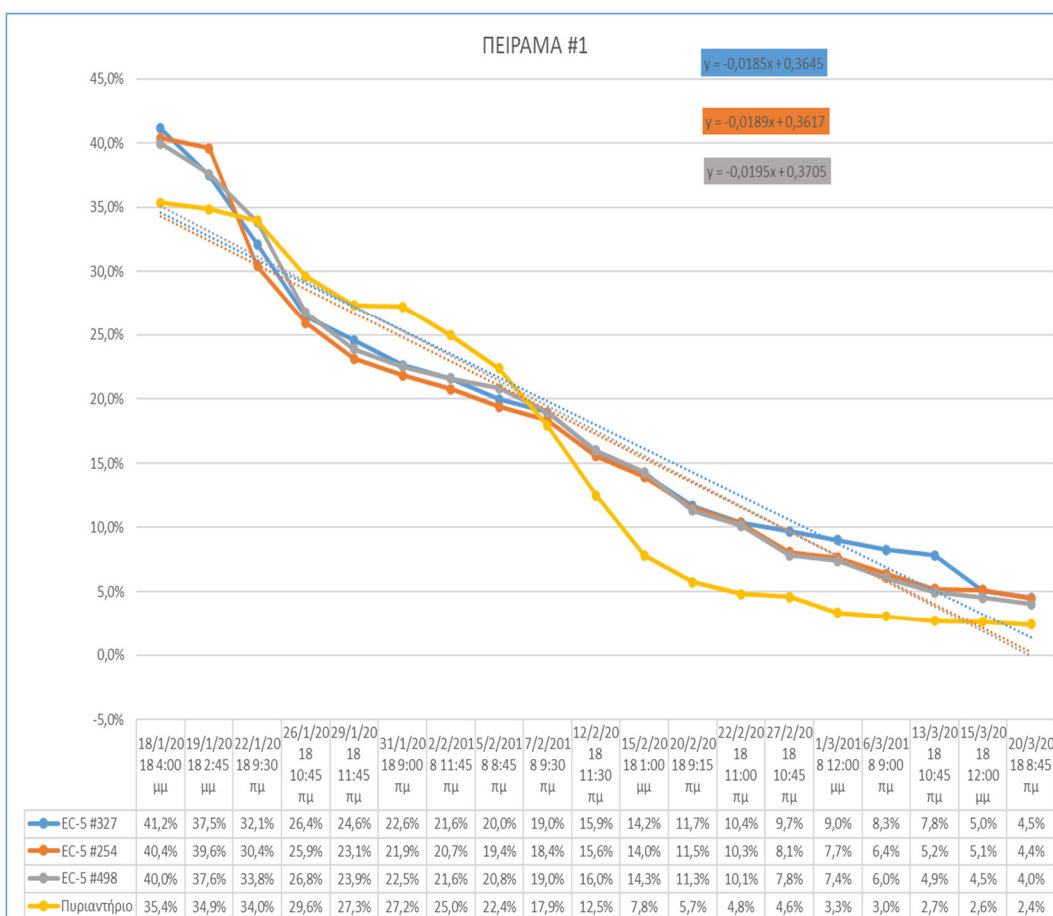
Έναρξη και λήξη πειράματος 25/2/2020

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, διαγράμματα και πίνακες τα οποία εκφράζουν την απώλεια υγρασίας που είχαν οι αισθητήρες μέσα στα γλαστράκια αλλά και τα δείγματα μας από το πυριαντήριο. Τα δεδομένα τα οποία λαμβάνουμε από τον data logger, είναι εκφρασμένα σε ποσοστά επι τις εκατό κατ'όγκου υγρασίας. Οπότε, η βαθμονόμηση, η σύγκριση δηλαδή, των δεδομένων, γίνεται με τα ήδη υπάρχοντα ποσοστά επι τοις εκατό κατ'όγκου υγρασίας που έχουμε λάβει από το πυριαντήριο.

ΠΕΙΡΑΜΑ #1

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

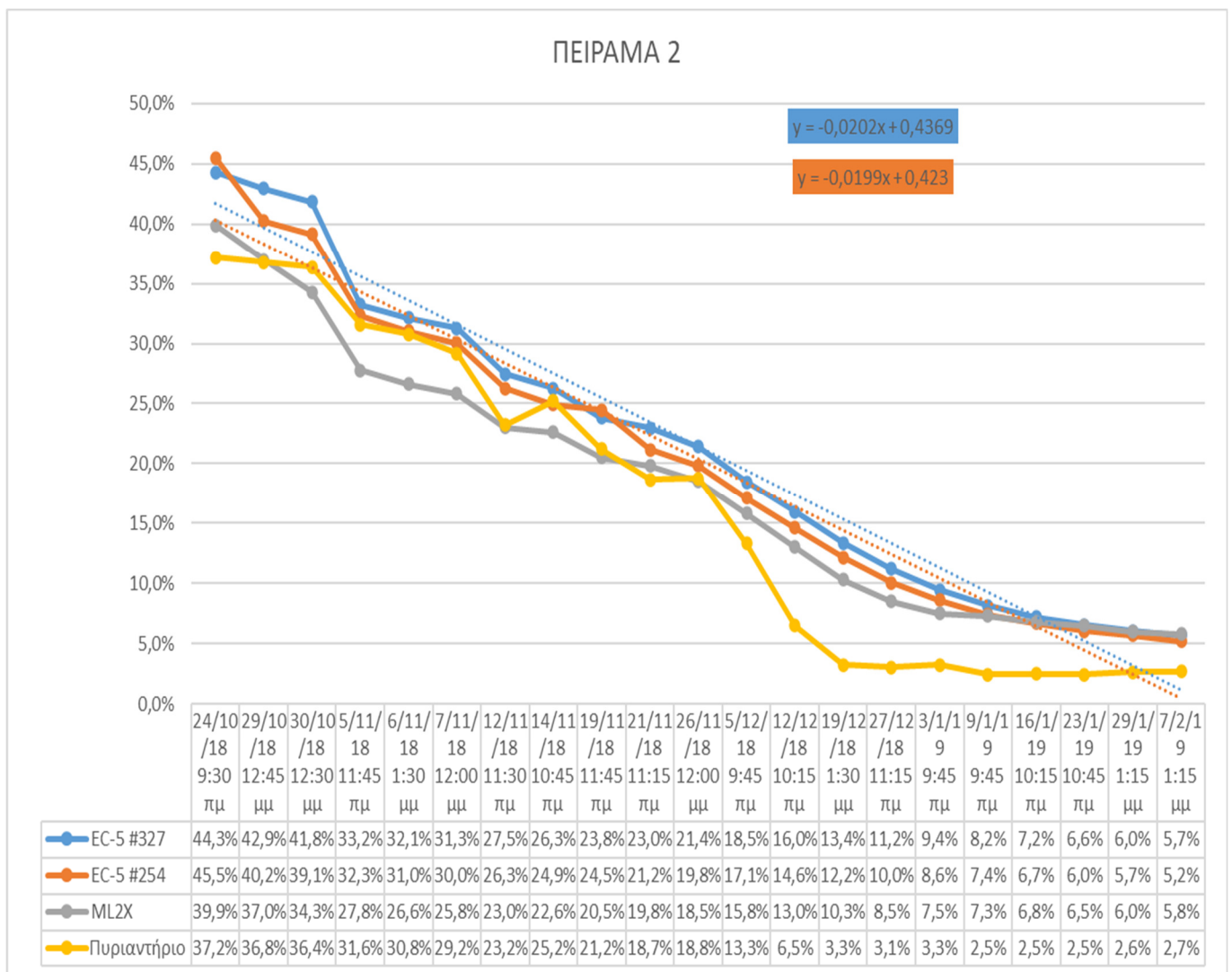
ΠΕΙΡΑΜΑ #1

Measurement Time	EC-5 #327 m ³ /m ³	EC-5 #327 raw	EC-5 #254 m ³ /m ³	EC-5 #254 raw	EC-5 #498 m ³ /m ³	EC-5 #498 raw	Μάζα υγρή g	Μάζα ξηρή g	%ΥΓΡΑΣΙΑ /w Πυριαντήριο	%ΥΓΡΑΣΙΑ /v Πυριαντήριο
18/1/2018 4:00 PM	41,2%	1050	40,4%	1041	40,0%	1036	453,12	364,670	24,3%	35,4%
19/1/2018 2:45 PM	37,5%	1007	39,6%	1032	37,6%	1008	456,750	369,600	23,6%	34,9%
22/1/2018 9:30 AM	32,1%	944	30,4%	924	33,8%	964	460,350	375,400	22,6%	34,0%
26/1/2018 10:45 AM	26,4%	877	25,9%	871	26,8%	881	436,860	362,820	20,4%	29,6%
29/1/2018 11:45 AM	24,6%	855	23,1%	838	23,9%	847	438,820	370,460	18,5%	27,3%
31/1/2018 9:00 AM	22,6%	832	21,9%	823	22,5%	831	452,740	384,680	17,7%	27,2%
2/2/2018 11:45 AM	21,6%	820	20,7%	810	21,6%	820	436,100	373,630	16,7%	25,0%
5/2/2018 8:45 AM	20,0%	801	19,4%	794	20,8%	811	420,020	364,070	15,4%	22,4%
7/2/2018 9:30 AM	19,0%	789	18,4%	782	19,0%	789	389,190	344,340	13,0%	17,9%
12/2/2018 11:30 AM	15,9%	753	15,6%	749	16,0%	754	394,470	363,250	8,6%	12,5%
15/2/2018 1:00 PM	14,2%	733	14,0%	730	14,3%	734	377,580	358,060	5,5%	7,8%
20/2/2018 9:15 AM	11,7%	703	11,5%	701	11,3%	699	390,580	376,250	3,8%	5,7%
22/2/2018 11:00 AM	10,4%	688	10,3%	687	10,1%	685	380,510	368,510	3,3%	4,8%
27/2/2018 10:45 AM	9,7%	680	8,1%	661	7,8%	658	383,220	371,760	3,1%	4,6%
1/3/2018 12:00 PM	9,0%	672	7,7%	656	7,4%	653	366,310	358,010	2,3%	3,3%
6/3/2018 9:00 AM	8,3%	663	6,4%	641	6,0%	637	381,220	373,620	2,0%	3,0%
13/3/2018 10:45 AM	7,8%	658	5,2%	627	4,9%	624	378,400	371,690	1,8%	2,7%
15/3/2018 12:00 PM	5,0%	625	5,1%	626	4,5%	619	369,500	363,000	1,8%	2,6%
20/3/2018 8:45 AM	4,5%	619	4,4%	618	4,0%	613	387,430	381,440	1,6%	2,4%

- Στην πρώτη στήλη βλέπουμε την ημερομηνία και την ώρα που πήραμε τις μετρήσεις μας.
- Στην δεύτερη, τέταρτη και έκτη στήλη, βλέπουμε τις στιγμιαίες μετρήσεις που πήραμε από τον data logger.
- Στην Τρίτη, Πέμπτη και έβδομη στήλη βλέπουμε τα raw data τα οποία χρησιμοποιούνται από τον EM-50 data logger για να μετατρέψουν το ρεύμα σε ποσοστό υγρασίας.
- Στην όγδοη στήλη είναι τα δείγματά μας πριν την ξήρανση και στην ένατη στήλη είναι τα δείγματα μας μετά την ξήρανση.
- Στην δέκατη στήλη είναι το ποσοστό υγρασίας εκφρασμένο κατά βάρος και στην εντέκατη στήλη είναι το ποσοστό υγρασίας εκφρασμένο κατ'όγκο.

ΠΕΙΡΑΜΑ #2

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



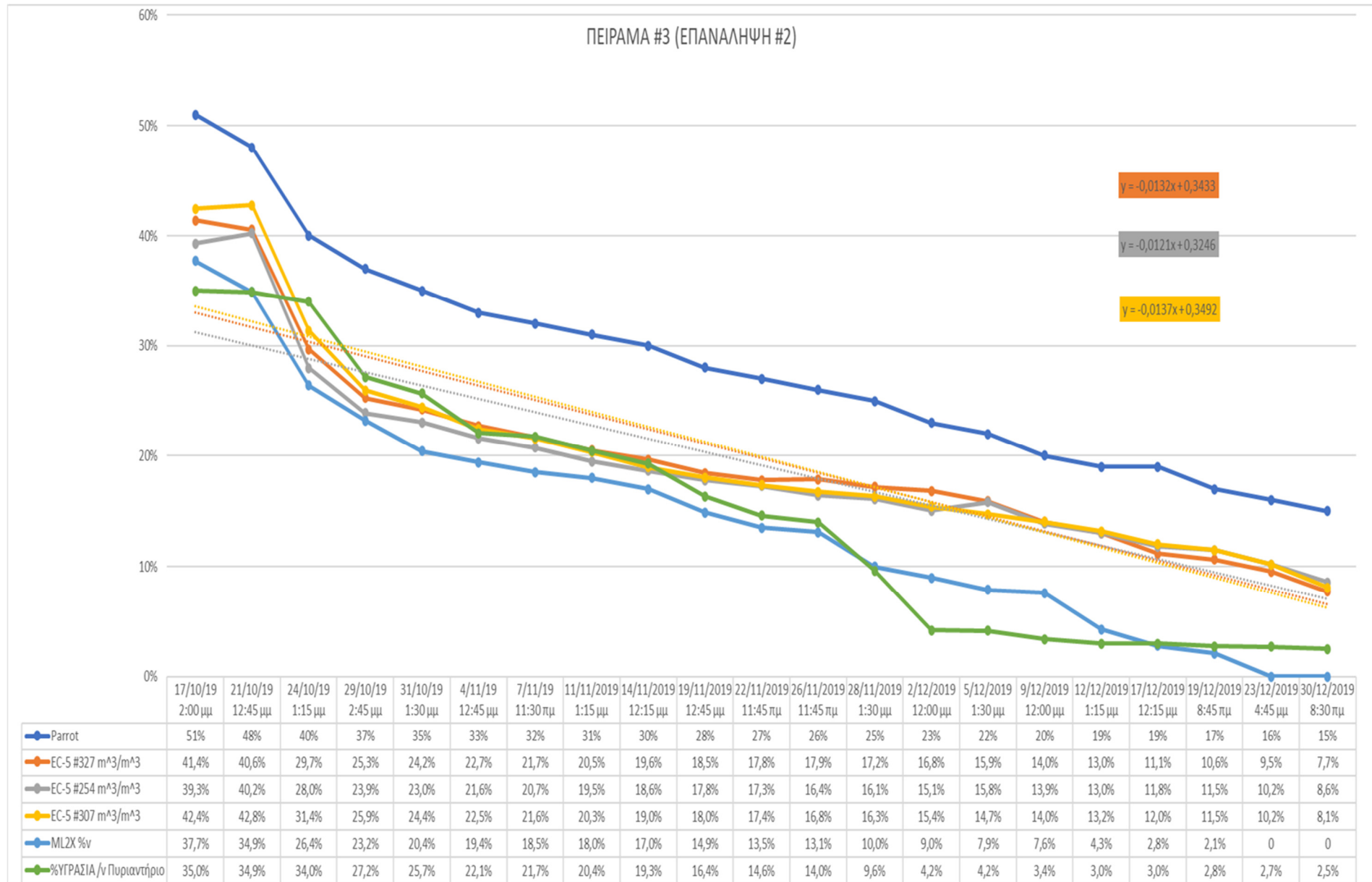
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑ #2

Measurement Time	EC-5 #327 m ³ /m ³	EC-5 #327 raw	EC-5 #254 m ³ /m ³	EC-5 #254 raw	ML2X %v	ML2X Mv	Μάζα υγρή g	Μάζα ξηρή g	%ΥΓΡΑΣΙΑ /w Πυριαντήριο	%ΥΓΡΑΣΙΑ /v Πυριαντήριο
24/10/2018 9:30 AM	44,3%	1087	45,5%	1101	39,9%	881	469	376	24,7%	37,2%
29/10/18 12:45 μμ	42,9%	1071	40,2%	1039	37,0%	835	455	363	25,3%	36,8%
30/10/18 12:30 μμ	41,8%	1058	39,1%	1026	34,3%	793	462	371	24,5%	36,4%
5/11/2018 11:45 AM	33,2%	957	32,3%	946	27,8%	678	445	366	21,6%	31,6%
6/11/2018 1:30 PM	32,1%	944	31,0%	931	26,6%	651	450	373	20,6%	30,8%
7/11/2018 12:00 PM	31,3%	934	30,0%	919	25,8%	635	442	369	19,8%	29,2%
12/11/18 11:30	27,5%	889	26,3%	875	23,0%	576	416	358	16,2%	23,2%
14/11/2018 10:45 AM	26,3%	875	24,9%	859	22,6%	568	430	367	17,2%	25,2%
19/11/2018 11:45 AM	23,8%	846	24,5%	854	20,5%	521	420	367	14,4%	21,2%
21/11/2018 11:15 AM	23,0%	836	21,2%	815	19,8%	504	420,4	373,7	12,5%	18,7%
26/11/2018 12:00 PM	21,4%	818	19,8%	799	18,5%	475	408,5	361,6	13,0%	18,8%
5/12/2018 9:45 AM	18,5%	783	17,1%	767	15,8%	406	390,5	357,2	9,3%	13,3%
12/12/2018 10:15 AM	16,0%	754	14,6%	738	13,0%	341	368,8	352,6	4,6%	6,5%
19/12/2018 1:30 PM	13,4%	723	12,2%	709	10,3%	284	361,1	352,9	2,3%	3,3%
27/12/2018 11:15 AM	11,2%	698	10,0%	684	8,5%	246	349,6	341,9	2,2%	3,1%
3/1/2019 9:45 AM	9,4%	677	8,6%	667	7,5%	226	350,6	342,4	2,4%	3,3%
9/1/2019 9:45 AM	8,2%	662	7,4%	653	7,3%	221	354,3	348,2	1,8%	2,5%
16/1/2019 10:15 AM	7,2%	651	6,7%	645	6,8%	211	341,7	335,4	1,9%	2,5%
23/1/2019 10:45 AM	6,6%	643	6,0%	637	6,5%	207	359,9	353,8	1,7%	2,5%
29/1/2019 1:15 PM	6,0%	637	5,7%	633	6,0%	197	357,5	350,9	1,9%	2,6%
7/2/2019 1:15 PM	5,7%	633	5,2%	627	5,8%	194	364,2	357,5	1,9%	2,7%

- Στην πρώτη στήλη βλέπουμε την ημερομηνία και την ώρα που πήραμε τις μετρήσεις μας.
- Στην δεύτερη, τέταρτη και έκτη στήλη, βλέπουμε τις στιγμιαίες μετρήσεις που πήραμε από τον EM-50 data logger και τον ML2X.
- Στην Τρίτη, Πέμπτη και έβδομη στήλη βλέπουμε τα raw data τα οποία χρησιμοποιούνται από τον data logger για να μετατρέψουν το ρεύμα σε ποσοστό υγρασίας.
- Στην όγδοη στήλη είναι τα δείγματά μας πριν την ξήρανση και στην ένατη στήλη είναι τα δείγματα μας μετά την ξήρανση.
- Στην δέκατη στήλη είναι το ποσοστό υγρασίας εκφρασμένο κατά βάρος και στην εντέκατη στήλη είναι το ποσοστό υγρασίας εκφρασμένο κατ'όγκο.

ΠΕΙΡΑΜΑ #3 (ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 2)



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

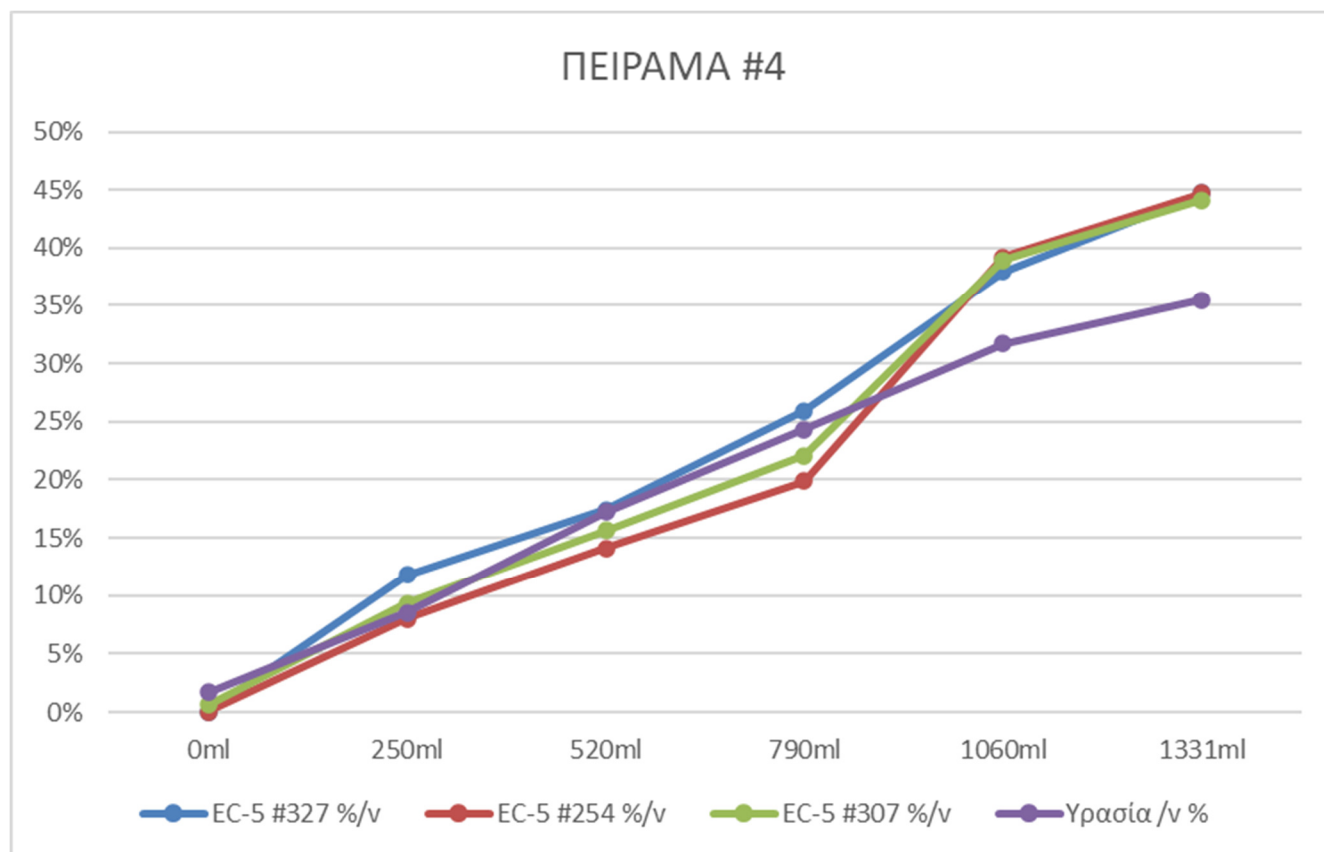
ΠΕΙΡΑΜΑ #3 (ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ #2)

Measurement Time	Parrot	EC-5 #327 m ³ /m ³	EC-5 #327 raw	EC-5 #254 m ³ /m ³	EC-5 #254 raw	EC-5 #307 m ³ /m ³	EC-5 #307 raw	ML2X %v	ML2X Mv	Μάζα υγρή g	Μάζα ξηρή g	%ΥΓΡΑΣΙΑ /w Πυριαντήριο	%ΥΓΡΑΣΙΑ /v Πυριαντήριο
17/10/19 2:00 μμ	51%	41,4%	1053	39,3%	1028	42,4%	1065	37,7%	847	454,69	367,18	23,8%	35,0%
21/10/19 12:45 μμ	48%	40,6%	1043	40,2%	1039	42,8%	1069	34,9%	802	453,00	365,74	23,9%	34,9%
24/10/19 1:15 μμ	40%	29,7%	915	28,0%	895	31,4%	935	26,4%	647	450,28	365,25	23,3%	34,0%
29/10/19 2:45 μμ	37%	25,3%	863	23,9%	847	25,9%	871	23,2%	581	419	351,12	19,3%	27,2%
31/10/19 1:30 μμ	35%	24,2%	851	23,0%	837	24,4%	853	20,4%	518	416,45	352,23	18,2%	25,7%
4/11/19 12:45 μμ	33%	22,7%	833	21,6%	820	22,5%	830	19,4%	496	407,76	352,58	15,7%	22,1%
7/11/19 11:30 πμ	32%	21,7%	821	20,7%	810	21,6%	820	18,5%	475	410,73	356,38	15,3%	21,7%
11/11/2019 1:15 PM	31%	20,5%	807	19,5%	795	20,3%	805	18,0%	464	404,78	353,68	14,4%	20,4%
14/11/2019 12:15 PM	30%	19,6%	797	18,6%	785	19,0%	789	17,0%	438	404,80	356,59	13,5%	19,3%
19/11/2019 12:45 PM	28%	18,5%	783	17,8%	775	18,0%	778	14,9%	385	394,20	353,32	11,6%	16,4%
22/11/2019 11:45 AM	27%	17,8%	775	17,3%	769	17,4%	770	13,5%	350	389,12	352,65	10,3%	14,6%
26/11/2019 11:45 AM	26%	17,9%	776	16,4%	759	16,8%	763	13,1%	343	393,59	358,63	9,7%	14,0%
28/11/2019 1:30 PM	25%	17,2%	768	16,1%	755	16,3%	758	10,0%	277	376,57	352,48	6,8%	9,6%
2/12/2019 12:00 PM	23%	16,8%	764	15,1%	743	15,4%	747	9,0%	256	360,00	349,46	3,0%	4,2%
5/12/2019 1:30 PM	22%	15,9%	753	15,8%	752	14,7%	739	7,9%	233	371,86	361,46	2,9%	4,2%
9/12/2019 12:00 PM	20%	14,0%	731	13,9%	729	14,0%	731	7,6%	228	366,50	358,01	2,4%	3,4%
12/12/2019 1:15 PM	19%	13,0%	719	13,0%	719	13,2%	721	4,3%	168	359,67	352,20	2,1%	3,0%
17/12/2019 12:15 PM	19%	11,1%	697	11,8%	705	12,0%	707	2,8%	142	364,22	356,77	2,1%	3,0%
19/12/2019 8:45 AM	17%	10,6%	691	11,5%	701	11,5%	701	2,1%	129	358,39	351,49	2,0%	2,8%
23/12/2019 4:45 PM	16%	9,5%	678	10,2%	686	10,2%	686	Under/rng	82	359,02	352,23	1,9%	2,7%
30/12/2019 8:30 AM	15%	7,7%	657	8,6%	667	8,1%	661	Under/rng	-44	359,39	353,12	1,8%	2,5%

- Στην πρώτη στήλη βλέπουμε την ημερομηνία και την ώρα που πήραμε τις μετρήσεις μας.
- Στην δεύτερη, τρίτη και πέμπτη, έβδομη και ένατη στήλη, βλέπουμε τις στιγμιαίες μετρήσεις που πήραμε από τον αισθητήρα PARROT (μέσω κινητού), τον EM-50 data logger και τον ML2X.
- Στην τέταρτη, έκτη, όγδοη και δέκατη στήλη βλέπουμε τα raw data τα οποία χρησιμοποιούνται από τον EM-50 data logger και τον ML2X για να μετατρέψουν το ρεύμα σε ποσοστό υγρασίας.
- Στην ενδέκατη στήλη είναι τα δείγματά μας πριν την ξήρανση και στην δωδέκατη στήλη είναι τα δείγματα μας μετά την ξήρανση.
- Στην δέκατη τρίτη στήλη είναι το ποσοστό υγρασίας εκφρασμένο κατά βάρος και στην δέκατη τέταρτη στήλη είναι το ποσοστό υγρασίας εκφρασμένο κατ'όγκο.

ΠΕΙΡΑΜΑ #4

Το πείραμα #4, όπως αναφέραμε και πριν, είναι το πείραμα βαθμονόμησης που προτείνει η ίδια η METER GROUP (πρώην DECAGON). Το πείραμα βασίζεται στην προσθήκη νερού στα γλαστράκια ανα συγκεκριμένα ml (0ml, 250ml, 520ml, 790ml, 1060ml) και φυσικά ο στόχος μας που είναι ο κορεσμός του εδάφους (40% κατ'όγκο υγρασία) 1331ml. Ο πίνακας και το διάγραμμα περιέχουν τον μέσο όρο των δεκαλέπτων που είχαμε τον κάθε αισθητήρα μέσα στα γλαστράκια στα συγκεκριμένα ml. Κάθε μέσος όρος, δηλαδή, είναι ένα δεκάλεπτο.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ ΟΡΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑ #4

ML	EC-5 #327 %/v	EC-5 #327 raw	EC-5 #254 %/v	EC-5 #254 raw	EC-5 #307 %/v	EC-5 #307 raw	Μάζα υγρή g	Μάζα ξηρή g	Υγρασία /w %	Υγρασία /v %
0ml	0%	556	0%	576	0,60%	573	345,98	341,82	1,22%	1,66%
250ml	11,76%	704	7,97%	660	9,34%	676	354,08	332,67	6,44%	8,56%
520ml	17,46%	771	14,09%	732	15,61%	750	385,36	342,31	12,58%	17,22%
790ml	25,95%	871	19,90%	800	22,09%	826	405,99	345,06	17,66%	24,37%
1060ml	37,97%	1013	39,21%	1027	38,93%	1024	420,84	341,64	23,18%	31,68%
1331ml	44,76%	1093	44,74%	1092	44,16%	1085	451,85	363,13	24,43%	35,49%

- Στην πρώτη στήλη είναι τα σημεία μας, δηλαδή πόσα ml νερού περιείχε το κάθε γλαστράκι εκείνη την στιγμή.
- Στην δεύτερη, τέταρτη και έκτη στήλη είναι οι μέσοι όροι των υγρασιών ανα δεκάλεπτο σε κάθε σημείο (ml)
- Στην τρίτη, πέμπτη και έβδομη στήλη βλέπουμε τα raw data τα οποία χρησιμοποιούνται από τον EM-50 data logger για να μετατρέψουν το ρεύμα σε ποσοστό υγρασίας.
- Στην όγδοη στήλη είναι τα δείγματά μας πριν την ξήρανση και στην ένατη στήλη είναι τα δείγματα μας μετά την ξήρανση.
- Στην δέκατη τρίτη στήλη είναι το ποσοστό υγρασίας εκφρασμένο κατά βάρος και στην δέκατη τέταρτη στήλη είναι το ποσοστό υγρασίας εκφρασμένο κατ'όγκο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα πειράματα μας είχαν σκοπό να δείξουν πως οι αισθητήρες μέτρησης εδαφικής υγρασίας, μπορούν να ευκολύνουν τον κάθε εναν από εμας στην σωστή εύρεση του συγκεκριμένου ποσοστού υγρασίας του εδάφους. Οι παραγωγοί θα μπορούσαν απλά με την τοποθέτηση ενός αισθητήρα στο χωράφι τους να έχουν εικόνα της υγρασίας εκείνη την στιγμή.

Αυτό που αποδείχθηκε όμως από όλα τα πειράματα είναι ότι οι αισθητήρες και η μέθοδος του πυριαντηρίου (η οποία είναι η απόλυτη μέθοδος εύρεσης της εδαφικής υγρασίας) έχουν διαφορές.

Παρατηρούμε ότι οι αισθητήρες EC-5 έχουν αρκετές διαφορές με το πυριαντήριο, ωστόσο όμως, ο αισθητήρας ML2X βρίσκεται πιο κοντά στις μετρήσεις του πυριαντηρίου. Όλοι οι αισθητήρες έχουν διαφορές μεταξύ τους, είδαμε όμως ότι για να μπορέσουμε να τους χρησιμοποιήσουμε σωστά, πρέπει να τους βαθμονομήσουμε σύμφωνα με το πυριαντήριο.

Η ταξινόμηση σε αύξουσα σειρά ποιότητας αποτελεσμάτων είναι: ο PARROT, ο EC-5 και τέλος ο ML2X.

Για ποιο ακριβή αποτελέσματα όμως, οδηγούμαστε πάντα στην μέθοδο του πυριαντηρίου. Το τελευταίο που προσέξαμε είναι ότι οι εξισώσεις της γραμμικής τάσης των αισθητήρων EC-5 των πειραμάτων μας, ταιριάζει με την εξίσωση που δίνει η ίδια η εταιρεία (βλέπε εξίσωση 13).

Τα πειράματα μας έγιναν με ακρίβεια στις οδηγίες. Η διαδικασία ήταν πολύ δύσκολη αλλά με αυτόν τον τρόπο βγάλαμε πιο λεπτομερή συμπεράσματα απ'ότι το πείραμα #4.

Η δυσκολία ξεκίνησε όταν έπρεπε να συμπληρώσουμε με ακρίβεια τα ml νερού αλλά και τα ml εδάφους σύμφωνα με το ποσοστό κορεσμού που είχε το συγκεκριμένο έδαφος. Στην αρχή των πειραμάτων όλα πήγαιναν καλά έως ότου τα δείγματα μας, άρχιζαν να σκληραίνουν με αποτέλεσμα ο κύλινδρος λήψης αδιατάραχτου δείγματος, εισερχόταν στο έδαφος αρκετά πιο δύσκολα. Με υπομονετικές κινήσεις όμως, καταφέραμε να βγάλουμε άρτια τα δείγματά μας και να επετύχουν τα πειράματα.

Μεγάλη προσοχή δώσαμε όταν παίρναμε τα δεδομένα μας από τον data logger. Έπρεπε να προσέξουμε που αποθηκεύουμε τα δεδομένα λόγω της πληθώρας τους διότι έπρεπε να ταξινομηθούν χρονολογικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ



Εικόνα 42 Αεροζήρανση εδάφους



Εικόνα 43 Αεροζήρανση εδάφους



Εικόνα 44 Συλλογή αεροξηραμένου εδάφους



Εικόνα 45 Γλαστράκια με έδαφος πριν την ανάμειξη με το νερό



Εικόνα 46 Δοκιμή αισθητήρων EC-5 στο νερό



Εικόνα 47 Κόσκινο 2mm <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.analytika.gr%2Fproduct-categories-46075%2Fkoskina-sieves-46049%2Fkoskina-stainless-steel-200-mm-x-65-mm-46292%2Fp2%2F&psig=AOvVaw1u8tqE2ArwWw3IVFsQDOsP&ust=1623592585833000&source=images&>



Εικόνα 48 Ανάμειξη εδάφους και νερού



Εικόνα 49 Δείγματα με ανάμειξη εδάφους και νερού στον κορεσμό



Εικόνα 50 Κύλινδρος αδιατάρακτου δείγματος και τα καπάκια του



Εικόνα 51 Πορώδες καπάκι που χρησιμοποιήθηκε στον κύλινδρο αδιατάρακτου δείγματος για την εύρεση του κορεσμού



Εικόνα 52 Καλιμπράρισμα αισθητήρων και αρχή πειράματος



Εικόνα 53 Τοποθέτηση κυλίνδρου για τη συλλογή αδιατάρακτου δείγματος.



Εικόνα 54 Προσεκτική τοποθέτηση κυλίνδρου στο δείγμα



Εικόνα 55 Κλείσιμο δείγματος με το καπάκι



Εικόνα 56 Κλείσιμο δείγματος και με το δεύτερο καπάκι



Εικόνα 57 Καθαρισμός επιπέδων εδάφους



Εικόνα 58 Κλείσιμο δείγματος



Εικόνα 59 Τοποθέτηση δείγματος σε ταψάκι



Εικόνα 60 Ζύγιση υγρής μάζας



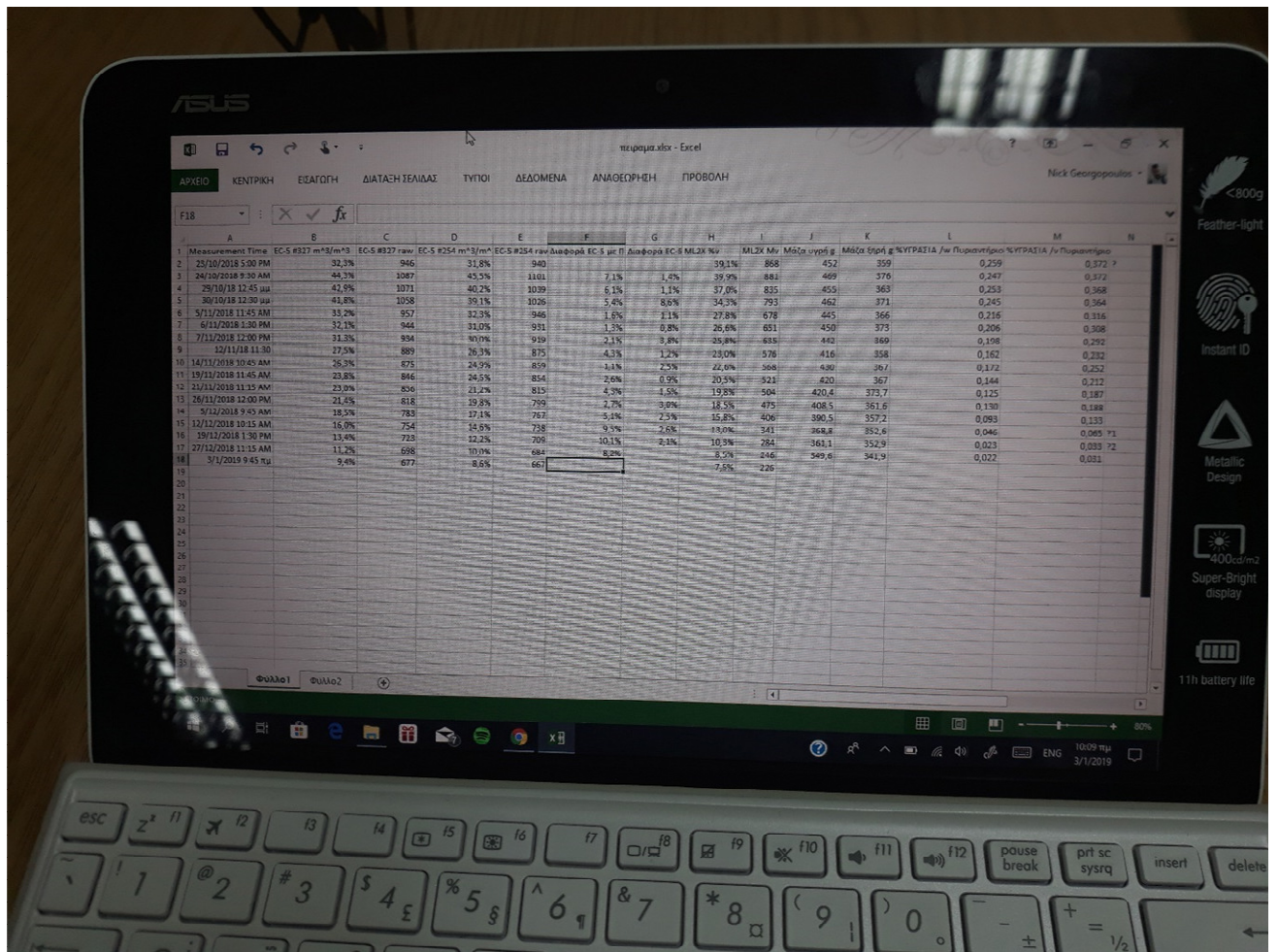
Εικόνα 61 Τοποθέτηση δείγματος στο πυριαντήριο



Εικόνα 62 Ρύθμιση πυριαντηρίου



Εικόνα 63 Ζύγιση μάζας ξηρής



Εικόνα 64 Τοποθέτηση δεδομένων





ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Πτυχιακή εργασία Χατζέλα Χρήστου με θέμα «Χαρακτηριστικά και συγκριτική αξιολόγηση έξυπνων προγραμματιστών άρδευσης», Τμήμα Γεωπονίας Πανεπιστημίου Πατρών, Ιούνιος 2020
2. Εργασία με θέμα «χρήση διηλεκτρικών πυκνωτικών αισθητήρων υγρασίας εδάφους» Γιαννης λ. Τσιρογιάννης, Γεωπόνος – Γεωργικός Μηχανικός msc phd αναπληρωτής καθηγητής ΤΕΙ ηπείρου, Χρηστος Κολιοπάνος, Φυσικός msc, συνεργάτης εργαστήριου γμ & δφπ, σχολή τεχνολογίας γεωπονίας, τεχνολογίας τροφίμων και διατροφής τμήμα τεχνολόγων γεωπόνων εργαστήριο γεωργικής μηχανικής & διαχείρισης φυσικών πόρων
3. Παπαζαφειρίου, Ζ. (1998). «Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων», Εκδόσεις Ζήτη
4. «Αρδεύσεις», Μενέλαος ε. Θεοχάρης, πολιτικός μηχανικός Ε.Μ.Π., m.sc. Γεωπονίας παν. Θεσσαλίας, διδάκτορας α.π.θ., καθηγητής ΤΕΙ ηπείρου, τμήμα φυτικής παραγωγής https://theoxar2.weebly.com/uploads/1/7/9/7/17970951/0_%CE%94%CE%99%CE%91%CE%9B%CE%95%CE%9E%CE%97_%CE%91%CE%A1%CE%94%CE%95%CE%A5%CE%A3%CE%95%CE%A9%CE%9D_2017.pdf
5. «ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΔΑΦΩΝ» ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ Γ. ΚΑΡΑΚΑΤΣΟΥΛΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ, ΑΝΩΤΑΤΗΣ ΓΕΩΠΟΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΑΘΗΝΩΝ. http://www.eef.edu.gr/media/2396/e_h00050.pdf
6. ΡΗC: Το έδαφος είναι ένας ζωντανός οργανισμός, ΒΙΝΤΕΟ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ YOUTUBE. <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=hSy3DNxMQDs>
7. «ΕΔΑΦΟΣ» <http://www.elliflowers.gr/%CE%91%CE%A1%CE%98%CE%A1%CE%91/%CE%88%CE%B4%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%82-%CE%BA%CE%AE%CF%80%CE%BF%CF%85-%CE%BA%CE%B1%CF%84%CE%B7%CE%B3%CE%BF%CF%81%CE%AF%CE%B5%CF%82-%CF%87%CF%8E%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82/>
8. Κολιοπάνος Χ., 2015. Παρουσίαση σχετικά με τις βασικές αρχές λειτουργίας των ηλεκτρικών αισθητήρων υγρασίας εδάφους. ΤΕΙ Ηπείρου, Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανικής και Διαχείρισης Φυσικών Πόρων.
9. Τσιρογιάννης Ι.Λ., 2011. Προσδιορισμός δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για τη διαχείριση του μικροκλίματος και της άρδευσης στο θερμοκήπιο - Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών: <http://phdtheses.ekt.gr/eadd/handle/10442/28569>)
10. ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ PARROT FLOWER POWER ΑΠΟ ΤΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗ ΓΙΑΝΝΗΣ Λ. ΤΣΙΡΟΓΙΑΝΝΗΣ, ΓΕΩΠΟΝΟΣ – ΓΕΩΡΓΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ MSC PHD ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΕΙ ΗΠΕΙΡΟΥ.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Elmaloglou, S., & Malamos, N. (2007). Estimation of Width and Depth of the Wetted Soil Volume Under a Surface Emitter, Considering Root Water-Uptake and Evaporation. *Water Resources Management*, 21(8), 1325–1340. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9084-5>
2. Pardossi A., Incrocci L., Incrocci G., Malorgio F., Battista P, Bacci L., Rapi ., Marzioletti P., Hemming J. and Balendonck J., 2009. Review - Root Zone Sensors for Irrigation Management in Intensive Agriculture. *Sensors* 9, 2809-2835
3. Campbell G.S., 2014. Soil Moisture 201: Water content measurement theory and application. Decagon Devices Inc. Webinar. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=jzYCuspFhwo>, προσπελάστηκε: 3/7/2017
4. Campbell G.S., 2014. Three questions to answer before you publish your soil moisture data (Decagon Devices Inc. Webinar 4/9/2014)
5. ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ SCIENTACT <http://www.scientact.gr/el/E207E62C>
6. ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ DELTA-T DEVICES <https://delta-t.co.uk/product/hh2/>
7. USER MANUAL FOR THE MOISTURE METER TYPE HH2 www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2016/10/HH2-UM-4.2.pdf
8. OPERATING INSTRUCTIONS 14.26.06 THETAPROBE, TYPE ML2X, USER MANUAL <https://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/EN/m1-142606thetaprobe.pdf>
9. ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ SCIENTACT ΜΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ML2X http://www.d17837-17612.hosting.ote.gr/scientact.com.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=969:ml2-thete-probe-delta-t-&catid=95:2010-02-28-18-03-07&Itemid=65&lang=en
10. PARROT FLOWER POWER USER MANUAL www.parrot.com/files/s3fs-public/firmware/flower-power_user-guide_uk.pdf
11. Starr J.L., Paltineanu I.C., 2002. Methods for measurement of soil water content: capacitance devices. *Methods of Soil Analysis* (διαθέσιμο στο: Book: *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, SSSA Book Series 5.4, 2002 σελ. 463-474)
12. Czarnomski M.N., Moore G.W., Pypker T.G., Licata J., Bond B.J., 2005. Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two 85forest soils of the Pacific Northwest. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(8): 1867-1876, <https://doi.org/10.1139/x05-121>
13. Czarnomski N.M., Moore G.W., Pypker T.G., Licata J., Bond B.J., 2005. Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest *Can. J. For. Res.* 35: 1867–1876
14. Fernando Visconti F., de Paza J.M., Martínez D., Molina J., 2014. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils. *Agricultural Water Management* 132:111– 119

15. Decagon Devices Inc, 2010. EC-20, EC-10, EC-5 Soil Moisture Sensors. User's Manual, Version 10. Pullman WA 99163. Διαθέσιμο στο: <http://www.labcell.com/media/13457/ec-20-ec-10-ec-5-soil-moisture-sensor-user-manual.pdf>, προσπελάστηκε: 11/4/2017
16. Decagon Devices Inc., 2009. 10HS Soil Moisture Sensor Operator's Manual. Pullman WA 99163. Διαθέσιμο στο: http://manuals.decagon.com/Manuals/13508_10HS_Web.pdf, προσπελάστηκε: 11/4/2017 (10HS product web page: <http://www.decagon.com/en/soils/volumetric-water-content-sensors/10hs-large-volume-vwc/>)
17. Decagon Devices Inc., 2011. Calibration Equations for the ECH2O EC-5, ECH2O-TE and 5TE Sensors. Application Note 13392-03. Διαθέσιμο στο: http://manuals.decagon.com/Application%20Notes/13392_Calibration%20Equations%20for%20EC-5%20TE%20and%205TE_Print.pdf, προσπελάστηκε: 12/4/2017
18. Decagon Devices Inc., 2012. EC-5 manual (13876, version 2). Διαθέσιμο στο: http://manuals.decagon.com/Manuals/13876_EC-5_Web.pdf, προσπελάστηκε: 12/4/2017 (EC5 product web page: <http://www.decagon.com/en/soils/volumetric-water-content-sensors/ec-5-lowest-cost-vwc/>)
19. Decagon Devices Inc., 2014. Soil moisture sensors information (web page). Διαθέσιμο στο: <http://www.decagon.com/products/soils/volumetric-water-content-sensors/>, προσπελάστηκε: 10/4/2017
20. Decagon Devices Inc., 2015. Plant available water: how do I determine Field Capacity and Permanent Wilting Point? Διαθέσιμο στο: <https://www.decagon.com/en/support/how-do-i-determine-field-capacity/>, προσπελάστηκε: 10/9/2017
21. Decagon Devices Inc., 2016. Em50/Em50R/Em50G - Em50 Series Data Collection System - Operator's Manual. Διαθέσιμο στο: http://manuals.decagon.com/Manuals/13453_Em50_Web.pdf, προσπελάστηκε: 18/6/2017
22. Decagon Devices Inc., 2017α. ECH2O Utility software. Διαθέσιμο στο: <https://www.decagon.com/en/data-loggers-main/software/ech2o-utility/>, προσπελάστηκε 15/7/2017
23. Decagon Devices Inc., 2017β. Custom Soil Calibration for Volumetric Water Content Sensors (video). Διαθέσιμο στο: <https://www.decagon.com/en/support/videos/soil-calibration-video/>, προσπελάστηκε: 10/4/2017
24. Decagon Devices Inc., 2017γ. Soil Moisture Sensor Installation. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=Zh7SSzc10O4> και στο <https://www.decagon.com/en/support/videos/ech2o-sensor-installation/>,
25. Starr J.L., Paltineanu I.C., 2002. Methods for measurement of soil water content: capacitance devices. Methods of Soil Analysis (διαθέσιμο στο: Book: Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods, SSSA Book Series 5.4, 2002 σελ. 463-474)
26. Kodešová R., Kodeš V., Mráz A., 2011. Comparison of Two Sensors ECH2O EC-5 and SM200 for Measuring Soil Water Content. Soil & Water Res., 6, (2): 102–110
27. Cobos D.R., Chambers C., 2010. Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensors. Decagon Devices, Application Note, Revised 11/17/10. Διαθέσιμο στο:

- http://manuals.decagon.com/Application%20Notes/13393_Calibrating%20ECH2O%20Probes_Print.pdf, προσπελάστηκε: 10/4/2017
28. Cobos D.R., 2008α. 10HS Volume of Sensitivity Decagon Devices, Application Note. Διαθέσιμο στο: <http://www.onsetcomp.com/files/15925-B%2010HS%20Volume%20of%20Sensitivity.pdf>, προσπελάστηκε: 10/4/2017
 29. Cobos D.R., 2008β. EC-5 Volume of Sensitivity. Decagon Devices. Διαθέσιμο στο: <http://www.onsetcomp.com/files/15926-B%20EC-5%20Volume%20of%20Sensitivity.pdf>, προσπελάστηκε: 10/4/2017
 30. Campbell C.S., 2013. Improved Irrigation Scheduling Using Soil Moisture and other Measures, Decagon Devices, Inc. (webinar). Διαθέσιμο στο: <https://www.decagon.com/en/education/virtual-seminars-copy/improved-irrigation-scheduling-using-soil-moisture-and-other-meas/>, προσπελάστηκε: 10/4/2017
 31. Bissey L., 2012. Best practices - Soil moisture field measurements (Decagon Devices Inc.). Διαθέσιμο στο: <http://manuals.decagon.com/Retired%20and%20Discontinued/Slicks%20and%20content/Presentations/SoilMoisture101.pdf>, προσπελάστηκε: 10/10/2017
 32. <https://www.interregir2ma.eu/forum/irrigation-system-gr/66-%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%BF-%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%BF>
 33. Empirical two-point A-mixing model for calibrating the ECH2O EC-5 soil moisture sensor in sands Kizito (2008), Bogena (2007) https://www.researchgate.net/publication/228736787_Empirical_two-point_a-mixing_model_for_calibrating_the_ECH2O_EC-5_soil_moisture_sensor_in_sands/link/543b7e140cf24a6ddb977461/download
 34. Irrigation Association, 2008. Smart Water Application Technologies/SWAT Calibration Report for Decagon ECH2O EC-5 Soil Moisture Sensor. Διαθέσιμο στο: <http://www.irrigation.org/IA/FileUploads/SWAT/Decagon-ECH2O-Testing-Report-11-3-2008.pdf>, προσπελάστηκε: 12/09/2017
 35. Campbell C.S., 2017β, <https://www.ecologyandsociety.org/vol22/iss4/art8/>
 36. Theta and Profiler Soil Moisture Probes Accurate Impedance Measurement Devices – New applications by Whalley, White, Knight Zegelin και Topp and others https://dynamax.com/images/uploads/papers/95_Theta_and_profiler_soil_moisture_probe_s.pdf
 37. Tensiometers for Measuring the Capillary Tension of Soil Water, L. A. Richards, Willard Gardner <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1936.00021962002800050002x>

