



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ – ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΑΓΡΟΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Σταυρούλα Κατσουλάκου

**Αξιολόγηση διηλεκτρικών αισθητήρων
υγρασίας εδάφους στο πλαίσιο
αποτελεσματικής διαχείρισης άρδευσης
καλλιεργειών**

Αξιολόγηση διηλεκτρικών αισθητήρων υγρασίας εδάφους στο πλαίσιο αποτελεσματικής διαχείρισης άρδευσης καλλιεργειών

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Σταυρούλα Κατσουλάκου

2018

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή

1. ΤΣΙΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ τμ. ΤΓ, ΤΕΙ ΗΠΕΙΡΟΥ
2. ΜΑΝΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ τμ. ΤΓ, ΤΕΙ ΗΠΕΙΡΟΥ
3. ΠΑΤΑΚΙΟΥΤΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ τμ. ΤΓ, ΤΕΙ ΗΠΕΙΡΟΥ

Ευχαριστήρια

Ευχαριστώ όλους όσους μου συμπαραστάθηκαν σε αυτό το δύσκολο έργο. Τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γιάννη Τσιρογιάννη για το σύνολο της υποστήριξης καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, τον Χρήστο Κολιοπάνο για τις πολύτιμες εξηγήσεις σχετικά με την αρχή λειτουργίας των αισθητήρων, την Κωνσταντίνα Φωτιά, την Πηνελόπη Μπαλτζώη, την Ελένη Λαμπράκη και τον Μάριο Δανιηλίδη για την υποστήριξη στις αναλύσεις των εδαφών και την διαδικασία της βαθμονόμησης των αισθητήρων.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην μητέρα μου, η οποία υπήρξε ανεκτίμητο στήριγμα για μένα, σε κάθε στάδιο της ζωής μου, και στην οποία οφείλω όλη τη διαδρομή των σπουδών μου μέχρι σήμερα. Η πίστη της στις δυνατότητές μου, η στήριξη όλων των επιλογών μου, αλλά και η αμέριστη συμπαραστάσή της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας συνέβαλαν σε μεγάλο βαθμό στην επιτυχή διεκπεραίωσή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κωνσταντίνο Θεοχάρη για την υπομονή του, καθώς επίσης και τους φίλους και τις φίλες μου για τη στήριξη και την παρουσία τους όλα αυτά τα χρόνια, η οποία ομορφαίνει τη ζωή μου.

Περίληψη

Στο πλαίσιο της εφαρμογής προγραμμάτων άρδευσης, η αρχή του «πώς να ελέγξεις κάτι που δεν μετράς», απαιτεί χρήση συστημάτων μέτρησης των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου ή/και της υδατικής κατάστασης των καλλιεργειών.

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 βαθμονόμηση για τους διάφορους τύπους εδάφους και τα διάφορα επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού άρδευσης ώστε να έχουν αυξημένη ακρίβεια μέτρησης.

Στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας:

1. γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο και την αρχή λειτουργίας των ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων μέτρησης υγρασίας εδάφους.
2. παρουσιάζεται, η τυπική μέθοδος βαθμονόμησης που προτείνεται από τον κατασκευαστή και μία μέθοδος που προσομοιάζει την κατάσταση στον αγρό για δύο κοινά χρησιμοποιούμενους σχετικούς αισθητήρες (EC5 και 10HC της DecagonDevices, USA),
3. εφαρμόζονται και αξιολογούνται για τους δύο αισθητήρες και για βασικούς τύπους εδαφών που συναντώνται στην πεδιάδα της Άρτας τόσο η τυπική όσο και η μέθοδος που προσομοιάζει την κατάσταση στον αγρό και
4. εξετάζεται η συμπεριφορά των αισθητήρων στην περίπτωση άρδευσης με νερό με χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα όσο και νερό με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα από συγκεκριμένη πηγή νερού (διώρυγα του συλλογικού αρδευτικού δικτύου της πεδιάδας της Άρτας που τροφοδοτείται από την τάφρο Βόσσα).

Τα γενικά συμπεράσματα είναι ότι απαιτείται μεγάλη προσοχή στην τοποθέτηση των αισθητήρων ώστε να λαμβάνονται αξιόπιστα δεδομένα, ότι απαιτείται βαθμονόμηση για να προσεγγιστούν οι πραγματικές τιμές της υγρασίας του εδάφους, ότι το πολυωνυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού δίνει γενικά καλύτερα αποτελέσματα ως εξίσωση βαθμονόμησης και ότι η μέθοδος quasiinsitu δίνει τιμές που γενικά έχουν αποκλείσεις από την πραγματική υγρασία εντός των ορίων που αναφέρει ο κατασκευαστής.

Summary

Evaluation of dielectric soil moisture sensors in the framework of efficient irrigation of crops.

In our days the use of soil moisture sensors for more efficient use of irrigation water in the context of sustainable farming practices is becoming ever more intense.

These sensors often require calibration for the different soil types and the different levels of irrigation water conductivity to provide increased measurement accuracy.

In the framework of this postgraduate thesis:

1. Reference is made to the theoretical background and principle of operation of electromagnetic soil moisture measurement sensors.
2. The typical calibration method proposed by the manufacturer and a field-simulation method (quasi In-situ) for two commonly used dielectric capacitance sensors (EC5 and 10HS by Decagon Devices, USA) are presented.
3. Both sensors are calibrated using the typical and the land-based methods for basic types of soils that can be found in the plain of Arta.
4. The behavior of the sensors in the case of irrigation using water with high electrical conductivity from a specific source of water (a canal of the participatory irrigation system of the plain of Arta fed by the Vosha ditch) is examined.

The overall conclusion is that a lot of attention is needed on the location of the sensors so that reliable data are obtained, that calibration is required to reach the actual values of soil moisture, that the 3rd degree polynomial model generally provides better results as a calibration equation and that the quasi in-situ approach provides values that their deviation from the actual soil moisture is generally within the limits stated by the manufacturer.

Stavroula Katsoulakou

MScStudent

Ευρετήρια

Πίνακας περιεχομένων

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή	2
Ευχαριστήρια	2
Περίληψη	4
Summary	5
Ευρετήρια	6
Πίνακας περιεχομένων	6
Κατάλογος πινάκων	7
Κατάλογος διαγραμμάτων / εικόνων	9
Κατάλογος εξισώσεων	12
Κατάλογος προβληματισμών όσο αφορά την ακρίβεια της βαθμονόμησης διηλεκτρικών αισθητήρων για τα διάφορα εδάφη	13
Εισαγωγή	15
Θεωρητικό υπόβαθρο	16
Έδαφος και νερό	16
Το κλάσμα της αργίλου και η επίδρασή του στη δημιουργία συσσωματωμάτων και στη συρρίκνωση – διόγκωση του εδάφους	19
Υγρασία εδάφους και διαθεσιμότητά του εδαφικού νερού για τα φυτά	21
Υστέρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας	29
Χρήση ηλεκτρικών αισθητήρων για τη μέτρηση εδαφικής υγρασίας	30
Διηλεκτρικοί πυκνωτικοί αισθητήρες μέτρησης εδαφικής υγρασίας	32
Αισθητήρες που αφορά η αξιολόγηση	42
Βασικά χαρακτηριστικά του EC5	42
Βασικά χαρακτηριστικά του 10HS	44
Αισθητήρες στο πεδίο και μετρήσεις	47
Απεγκατάσταση	51
Το καταγραφικό em50 της Decagon και το λογισμικό ECH20 Utility	52
Κανονικοποίηση	53
Ανάγκη για βαθμονόμηση	54
Γενική εξίσωση μετατροπής σήματος του EC5 σε υγρασία	58
Γενική εξίσωση μετατροπής σήματος του 10HS σε υγρασία	59
Μετρήσεις σε rawcounts και σε mV	61
Η τυπική διαδικασία βαθμονόμησης που προτείνει η Decagon	62

Εξοπλισμός που απαιτείται.....	62
Διαδικασία βαθμονόμησης.....	65
Η quasiin-situ διαδικασία βαθμονόμησης	73
Εξοπλισμός που απαιτείται.....	73
Διαδικασία βαθμονόμησης.....	75
Οι μελέτες περίπτωσης	78
Εύρεση μοντέλων και ανάλυσή τους.....	78
Έδαφος Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή]	80
Μέθοδος quasiin-situ.....	80
Τυπική μέθοδος	83
Σύγκριση αποτελεσμάτων	87
Έδαφος Β [ΜΤ – Κολομόδια]	91
Μέθοδος quasiin-situ.....	91
Τυπική μέθοδος	94
Σύγκριση αποτελεσμάτων	96
Έδαφος Γ [ΕΞ – Νεοχώρι]	101
Μέθοδος quasiin-situ.....	101
Τυπική μέθοδος	104
Σύγκριση αποτελεσμάτων	106
Έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα]	110
Μέθοδος quasiin-situ.....	110
Τυπική μέθοδος	112
Σύγκριση αποτελεσμάτων	114
Συμπεριφορά των αισθητήρων στην περίπτωση άρδευσης με νερό διαφορετικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας	118
Συμπεράσματα.....	121
Βιβλιογραφία	124
Παράρτημα Ι – Κλάσεις εδάφους.....	130
Παράρτημα ΙΙ – Το κόστος του εξοπλισμού	132

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Εξισώσεις βαθμονόμησης για μετατροπή σήματος EC5 σε υγρασία, μετρήσεις μεταξύ της υδατοικανότητας και μικρότερες τιμές θ για εύρος υγρασίας που προτάθηκε από τον κατασκευαστή (IrrigationAssociation, 2008)	55
--	----

Πίνακας 2 Συγκεντρωτικά στοιχεία σχετικά με την ακρίβεια των αισθητήρων EC5 και 10HS σύμφωνα με πηγές της DecagonInc.....	57
Πίνακας 3 Πίνακας βαθμονόμησης με παράδειγμα από 10HS σε πηλοαμμώδες (loamysand) έδαφος.....	72
Πίνακας 4 Φύλλο καταγραφής δεδομένων δείγματος και μετρήσεων	76
Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά εδάφους και καλλιέργειας περίπτωσης Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή]	80
Πίνακας 6 Δείγματα μεθόδου quasiin-situ για την περίπτωση Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή]	80
Πίνακας 7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρων για έδαφος Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] για καταγραφικά της DecagonDevices.....	87
Πίνακας 8 Σύγκριση μοντέλων για το έδαφος Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] για καταγραφικά της Decagon Devices	90
Πίνακας 9 Χαρακτηριστικά εδάφους και καλλιέργειας περίπτωσης Β [ΜΤ - Κολομόδια]	91
Πίνακας 10 Δείγματα μεθόδου quasiin-situ για την περίπτωση Β [ΜΤ - Κολομόδια] ..	91
Πίνακας 11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρων για έδαφος Β [ΜΤ - Κολομόδια] για καταγραφικά της DecagonDevices	97
Πίνακας 12 Σύγκριση μοντέλων για το έδαφος Β [ΜΤ - Κολομόδια] για καταγραφικά της Decagon Devices	100
Πίνακας 13 Χαρακτηριστικά εδάφους και καλλιέργειας περίπτωσης Γ [ΕΞ – Νεοχώρι]	101
Πίνακας 14 Δείγματα μεθόδου quasiin-situ για την περίπτωση Γ [ΕΞ – Νεοχώρι]...	101
Πίνακας 15 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρων για έδαφος Γ [ΕΞ – Νεοχώρι] για καταγραφικά της DecagonDevices	106
Πίνακας 16 Σύγκριση μοντέλων για το έδαφος Γ [ΕΞ – Νεοχώρι] για καταγραφικά της Decagon Devices	109
Πίνακας 17 Χαρακτηριστικά εδάφους και καλλιέργειας περίπτωσης Δ [ΧΚ – Ρόκα] ..	110
Πίνακας 18 Δείγματα μεθόδου quasiin-situ για την περίπτωση Δ [ΧΚ – Ρόκα].....	110
Πίνακας 19 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρων για έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα] για καταγραφικά της DecagonDevices.....	115
Πίνακας 20 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα] για καταγραφικά της Decagon Devices	117

Κατάλογος διαγραμμάτων / εικόνων

Εικόνα 1 Το έδαφος ως σύστημα τριών φάσεων (στερεά, νερό και αέρας).....	16
Εικόνα 2 Σχέση φαινόμενης πυκνότητας με την κατ'όγκο υγρασία ανάλογα με τον τύπο του εδάφους	20
Εικόνα 3 Αργιλώδες έδαφος που έχει συρρικνωθεί λόγω ξηρασίας με αποτέλεσμα την εμφάνιση χαρακτηριστικών ρωγμών	20
Εικόνα 4 Χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας και βασικά επίπεδα υγρασίας (πηγή: απόδοση στα Ελληνικά από Lajos, 2008: http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0032_talajtan/ch07s05.html). Μία πολύ αναλυτική παρουσίαση του διαγράμματος αυτού είναι διαθέσιμη στο: https://www.youtube.com/watch?v=70x98CdErbE)	24
Εικόνα 5 Γενικές σχέσεις υγρασίας και μηχανικής κλάσης εδάφους (πηγή: Dukes κ.α., 2010)	25
Εικόνα 6 Χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας διαφόρων τύπων εδαφών. Επάνω: μορφή με απλούς άξονες (πηγή: Hydrogold, http://hydrogold.com/education.soil_moisture_concepts.html), κάτω εκφρασμένη σε τιμές pF (πηγή: Lajos, 2008, http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0032_talajtan/ch07s05.html)	28
Εικόνα 7 Υστέρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (αριστερά απλοποιημένη παρουσίαση πηγή: http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_3/chapt_4/main.htm , δεξιά αναλυτική παρουσίαση (Likos κ.α., 2013)).....	29
Εικόνα 8 Αισθητήρες υγρασίας εδάφους με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα και η πρώτη σελίδα μίας σχετικής εργασίας του J. Bouyoukos (1951)	30
Εικόνα 9 Πυκνωτές και ορισμένες διαμορφώσεις αυτών (πυκνωτής παράλληλων οπλισμών - parallelplatecapacitor και πυκνωτής συνεπίπεδων οπλισμών - coplanarplatecapacitor).....	33
Εικόνα 10 Διηλεκτρική σταθερά των διαφόρων συστατικών του εδάφους	34
Εικόνα 11 Σχέση μετρούμενης εξόδου αισθητήρα capacitance/FD με την κατ'όγκο υγρασία διαφόρων εδαφών (Campbell, 2014).....	39
Εικόνα 12 DecagonEC5 και όγκος ευαισθησίας του αισθητήρα (CobosD.R., 2008)	43
Εικόνα 13 Συνδέσεις αισθητήρα στο καταγραφικό	44
Εικόνα 14 Decagon 10HS και όγκος ευαισθησίας του αισθητήρα (Cobos, 2008α)	45

Εικόνα 15 Προτεινόμενος προσανατολισμός επιπέδου αισθητήρα ως προς επίπεδο εδάφους ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις από την προς τα κάτω κίνηση του νερού (Decagon, 2012).....	47
Εικόνα 16 Προτεινόμενοι τρόποι εγκατάστασης (Campbell, 2017β)	49
Εικόνα 17 Τυπικό παράθυρο του λογισμικού ECH20 Utility.....	53
Εικόνα 18 Σχέση εξόδου αισθητήρα με κατ'όγκο υγρασία για αισθητήρες ECH2O της Decagon (Campbell, 2001)	55
Εικόνα 19 Ογκομετρικός δειγματολήπτης εδάφους που διατίθεται στο εμπόριο (παρουσιάζεται στο video που δείχνει την διαδικασία βαθμονόμησης (Decagon, 2017β))	63
Εικόνα 20 Δοχεία εδαφικών δειγμάτων	64
Εικόνα 21 Δειγματολήπτης αδιατάρακτου δείγματος εδάφους.....	64
Εικόνα 22 Στιγμιότυπο από την τυπική διαδικασία βαθμονόμησης, διακρίνεται το δοχείο ανάμειξης - ομογενοποίησης εδάφους, ο αισθητήρας (10HS) και το καταγραφικό (Bissey, 2012)	68
Εικόνα 23 Δοχείο / καλούπι PVC κατά τη διάρκεια δειγματοληψίας.....	74
Εικόνα 24 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situ για EC5 για την περίπτωση Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή]. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.....	82
Εικόνα 25 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης EC5 quasiin-situ για υγρασίες μεταξύ FC και FC-MADx(FC-PWP) για την περίπτωση [ΛΜ – Αγ. Παρασκευή]. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	83
Εικόνα 26 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	84
Εικόνα 27 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο – περιορισμός στην περιοχή του RAW. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.....	85
Εικόνα 28 Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις	

παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	86
Εικόνα 29 Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο – περιορισμός στην περιοχή του RAW. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	87
Εικόνα 30 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situ για EC5, για την περίπτωση Β [ΜΤ - Κολομόδια] . Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.....	92
Εικόνα 31 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situ για 10HS, για την περίπτωση Β [ΜΤ - Κολομόδια] . Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.....	93
Εικόνα 32 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης 10HS quasi in-situ για υγρασίες μεταξύ FC και FC-MADx(FC-PWP) για την περίπτωση [ΜΤ – Κολομόδια]. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	94
Εικόνα 33 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος Β [ΜΤ - Κολομόδια] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	95
Εικόνα 34 Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος Β [ΜΤ - Κολομόδια] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	96
Εικόνα 35 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situ για 10HS, για την περίπτωση Γ [ΕΞ – Νεοχώρι] . Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.....	102
Εικόνα 36 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situ για 10HS, για υγρασίες μεταξύ FC και FC-MADx(FC-PWP) για την περίπτωση Γ [ΕΞ – Νεοχώρι] . Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	103

Εικόνα 37 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος Γ [ΕΞ – Νεοχώρι] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	104
Εικόνα 38 Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος Γ [ΕΞ – Νεοχώρι] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	105
Εικόνα 39 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situ για 10HS, για την περίπτωση Δ [ΧΚ – Ρόκα] . Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	111
Εικόνα 40 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	113
Εικόνα 41 Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.	114
Εικόνα 42 Η τάφος της Βόσσας στην πεδιάδα της Άρτας (πηγή: ΕΟΧ Ανοξική Ζώνη, http://eeagrants.amvrakikos.upatras.gr/)	118
Εικόνα 43 Μοντέλα συσχέτισης σήματος αισθητήρα με εδαφική υγρασία για EC5 και άρδευση με νερό υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας	119
Εικόνα 44 Μοντέλα συσχέτισης σήματος αισθητήρα με εδαφική υγρασία για 10HS και άρδευση με νερό υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας	120

Κατάλογος εξισώσεων

Εξίσωση 1 Φαινόμενη πυκνότητα εδάφους	17
Εξίσωση 2 Περιεκτικότητα κατ' όγκο σε υγρασία	22
Εξίσωση 3 Περιεκτικότητα κατά μάζα σε υγρασία και σχέση με την περιεκτικότητα κατ' όγκο	23
Εξίσωση 4 Συνολική διηλεκτρική σταθερά εδάφους	35
Εξίσωση 5 Κατ' όγκο υγρασία ως συνάρτηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους	35

Εξίσωση 6 Εξίσωση του Torp.....	35
Εξίσωση 7 Υπολογισμός διηλεκτρικής σταθεράς πυκνωτή –εδάφους στην περίπτωση που μελετάται-	37
Εξίσωση 8 Υπολογισμός τάσης εξόδου ολοκληρωτή (RCintegrator) και σχέση της με την διηλεκτρική σταθερά του πυκνωτή – εδάφους και επομένως με την περιεχόμενη σε αυτό υγρασία.	38
Εξίσωση 9 Εξισώσεις υπολογισμού της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους με βάση το τεχνικό φυλλάδιο του 10HS (Decagon, 2009)	44
Εξίσωση 10 Εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε ηλεκτρική επιδεκτικότητα για τον EC5 με βάση την εξίσωση Torp (Decagon, 2012)	59
Εξίσωση 11 Γενική εμπειρική εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε κατ'όγκο υγρασία για τον EC5 (Decagon, 2012).....	59
Εξίσωση 12 Γενική εμπειρική εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε διηλεκτρική επιδεκτικότητα για τον 10HS (Decagon, 2009).....	60
Εξίσωση 13 Γενική εμπειρική εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε κατ'όγκο υγρασία για τον 10HS	60
Εξίσωση 14 Σειρά υπολογισμών κατά την τυπική διαδικασία βαθμονόμησης (Cobos και Chambers, 2010, Decagon, 2017β).....	70

Κατάλογος προβληματισμών όσο αφορά την ακρίβεια της βαθμονόμησης διηλεκτρικών αισθητήρων για τα διάφορα εδάφη

Προβληματισμός 1 Σχετικά με τη μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας του εδάφους και την επίδραση της ξήρανσης του εδαφικού δείγματος.....	17
Προβληματισμός 2 Σχετικά με τις αλλαγές όγκου του εδαφικού δείγματος.....	20
Προβληματισμός 3 Σχετικά με την μετατροπή από κατά βάρος σε κατ'όγκο υγρασία και την επίδραση της πυκνότητας του νερού στους υπολογισμούς.....	23
Προβληματισμός 4 Επίδραση της υστέρησης της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας.....	30
Προβληματισμός 5 Επίδραση χαρακτηριστικών του εδάφους στην σχέση διηλεκτρικής σταθεράς και περιεχόμενης κατ'όγκο υγρασίας στο έδαφος.....	35
Προβληματισμός 6 Σχετικά με τη θέση τοποθέτησης τόσο ως προς την έκταση του αγρού όσο και ως προς το βάθος εντός του εδάφους.....	51

Προβληματισμός 7 Σχετικά με το δοχείο βαθμονόμησης, τα κόσκινα, την ποσότητα εδάφους που θα ληφθεί από τον αγρό και τον δειγματολήπτη εδάφους στη διάρκεια της βαθμονόμησης.....	64
Προβληματισμός 8 Βαθμονόμηση αρχίζοντας με ξηρό ή με υγρό έδαφος;	68
Προβληματισμός 9 Σχετικά με τον τρόπο που προτείνεται για την ομογενοποίηση και τοποθέτηση στο δοχείο μετρήσεων	69
Προβληματισμός 10 Εκτίμηση ποσότητας νερού που προστίθεται κάθε φορά ώστε να προκύψουν τελικά 4-6 σημεία βαθμονόμησης.....	69
Προβληματισμός 11 Σχετικά με το καταγραφικό που χρησιμοποιείται	69
Προβληματισμός 12 Σχετικά με τον όγκο και την πυκνότητα δείγματος κατά την τυπική διαδικασία βαθμονόμησης	70
Προβληματισμός 13 Η διαφορά εργαστηρίου και αγρού.....	73
Προβληματισμός 14 Σχετικά με τα δοχεία της quasiin-situ διαδικασίας.....	74
Προβληματισμός 15 Συρίκνωση εδάφους.....	76
Προβληματισμός 16 Σχετικά με την πυκνότητα του νερού και της τάσης των μπαταριών	78

Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της εφαρμογής προγραμμάτων άρδευσης, η αρχή του «πώς να ελέγξεις κάτι που δεν μετράς», απαιτεί χρήση συστημάτων μέτρησης των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου ή/και της υδατικής κατάστασης των καλλιεργειών.

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.

Στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας:

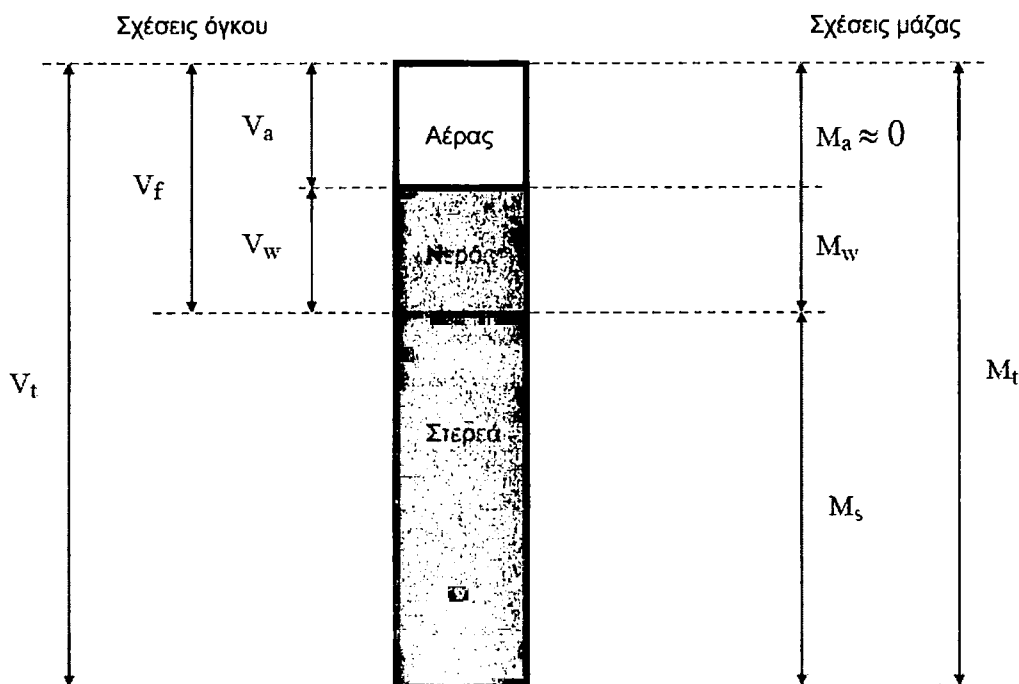
1. γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο και την αρχή λειτουργίας των ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων μέτρησης υγρασίας εδάφους.
2. παρουσιάζεται, η τυπική μέθοδος βαθμονόμησης που προτείνεται από τον κατασκευαστή και μία μέθοδος που προσομοιάζει την κατάσταση στον αγρό για δύο κοινά χρησιμοποιούμενους σχετικούς αισθητήρες (EC5 και 10HC της DecagonDevices, USA),
3. εφαρμόζονται και αξιολογούνται για τους δύο αισθητήρες και για βασικούς τύπους εδαφών που συναντώνται στην πεδιάδα της Άρτας τόσο η τυπική όσο και η μέθοδος που προσομοιάζει την κατάσταση στον αγρό και
4. εξετάζεται η συμπεριφορά των αισθητήρων στην περίπτωση άρδευσης με νερό με χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα όσο και νερό με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα από συγκεκριμένη πηγή νερού (διώρυγα του συλλογικού αρδευτικού δικτύου της πεδιάδας της Άρτας που τροφοδοτείται από την τάφρο Βόσσα).

Θεωρητικού υπόβαθρο

Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιλεγμένα θέματα που σχετίζονται άμεσα με την αξιολόγηση διηλεκτρικών αισθητήρων υγρασίας εδάφους στο πλαίσιο αποτελεσματικής διαχείρισης άρδευσης καλλιιεργειών. Η εξηγήσεις που ακολουθούν βασίζονται στο τεχνικό σημείωμα των Τσιρογιάννης και Κολιοπάνου (2017).

Έδαφος και νερό

Ένα τυπικό ανόργανο έδαφος (mineral soil) περιέχει 45% κατ'όγκο ανόργανη ύλη, 5% κατ'όγκο οργανική ύλη ενώ το υπόλοιπο 50% του όγκου του καταλαμβάνεται από την υγρή (εδαφικό διάλυμα) και την αέρια φάση.



Εικόνα 1 Το έδαφος ως σύστημα τριών φάσεων (στερεά, νερό και αέρας)

Η κλασσική φυσική του εδάφους, βασίζεται στην απλοποίηση ότι το έδαφος ως υλικό έχει συμπαγή συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι η σχέση μεταξύ του όγκου της στερεάς φάσης και των πόρων παραμένει σχετικά σταθερή. Ο χώρος των πόρων καταλαμβάνεται από το νερό και τον αέρα με σχέση αντιστρόφως ανάλογη. Αυτό μπορεί να προσεγγιστεί αρκετά στον πραγματικό κόσμο από εδάφη στα οποία επικρατούν τα χονδρόκοκκα υλικά (π.χ. στα αμμώδη εδάφη).

Η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους (soil bulk density) εξαρτάται από τη μηχανική σύσταση του εδάφους αλλά αποτελείται δείκτη της συμπίεσής του¹. Υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 1, μετριέται σε g/cm³ και η τιμή της είναι μεταξύ 1,0 g/cm³ για πηλώδη εδάφη και 1,8 g/cm³ για αμμώδη ή συμπιεσμένα εδάφη (Miller και Donahue, 1990).

$$\rho_b = m_d / V_s$$

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 (cm³)

Εξίσωση 1 Φαινόμενη πυκνότητα εδάφους

Προβληματισμός 1 Σχετικά με τη μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας του εδάφους και την επίδραση της ξήρανσης του εδαφικού δείγματος

Η μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας απαιτεί την πολύ καλή δειγματοληψία όσο αφορά το/α αδιατάρακτο/α δείγματα (undistributed soil sample/s), διαδικασία που είναι πολύ δύσκολη.

Όσο αφορά την μέτρηση της μάζας του ξηρού εδάφους. Η ξήρανση ενός εδάφους στους 105°C για 24 ώρες θεωρείται ότι απομακρύνει τις χημικά ελεύθερες μορφές του νερού από ένα έδαφος. Η μέθοδος αυτή θεωρείται καταστροφική μια και τόσο οι φυσικές όσο και οι χημικές ιδιότητες ενός εδάφους μπορεί να μεταβληθούν σημαντικά και έτσι γενικά δεν συστήνεται ένα έδαφος που έχει περάσει υπό αυτή τη διαδικασία ξήρανσης να χρησιμοποιείται στη συνέχεια για άλλες μετρήσεις (Pansu και Gautheyrou, 2006).

Για το λόγο αυτό στο πλαίσιο της προτεινόμενης διαδικασίας βαθμονόμησης αισθητήρων από την Decagon (Cobos και Chambers, 2010; Decagon Devices Inc., 2017β) στην αρχή το εδαφικό δείγμα, δεν ξηραίνεται σε φούρνο αλλά αφήνεται να ξεραθεί όσο περισσότερο γίνεται, ενώ στη συνέχεια τοποθετείται σε δοχείο έτσι ώστε να προσεγγίζει την φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους. Και οι δύο αυτές συστάσεις περιέχουν ασάφειες μια και τόσο ο βαθμός ξήρανσης που θα επιτευχθεί είναι άγνωστος (όμως δεν θα μπορούσε να γίνει σύσταση για ξήρανση στο φούρνο λόγω του ότι αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μεταβολές των φυσικών και χημικών

¹ Η φαινόμενη πυκνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του ειδικού όγκου (v , specific volume) του εδάφους

ιδιοτήτων του εδάφους), αλλά και ο βαθμός προσέγγισης της φαινόμενης πυκνότητας είναι άγνωστο (αυτό όμως που επιτυγχάνεται με την προσπάθεια αυτή είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη επαφή αισθητήρα και εδάφους σε συνθήκες χαμηλής περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό).

Όσο αφορά την ανόργανη ύλη, σε ένα έδαφος είναι δυνατόν να υπάρχουν από πέτρες και χαλίκια, μέχρι σωματίδια μη-ορατά με γυμνό μάτι. Τα τελευταία, συνήθως ενώνονται πολλά μαζί με μεγαλύτερα και σχηματίζουν τα συσσωματώματα. Για πρακτικούς λόγους προέκυψε η ανάγκη της ταξινόμησης αυτών των σωματιδίων του εδάφους με βάση το μέγεθός τους σε ομάδες, που ονομάζονται κλάσματα κοκκομετρικής (μηχανικής) σύστασης. Τα κλάσματα κοκκομετρικής σύστασης είναι τρία:

- Η άμμος (sand, μέγεθος σωματιδίων: 0,02-2 mm). Η άμμος των εδαφών αποτελείται από στρογγυλωμένους ή γωνιώδεις κόκκους, οι οποίοι εξαιτίας της μικρής τους ειδικής επιφάνειας, στερούνται της ικανότητας να συγκρατούν νερό και ακόμα δεν εμφανίζουν πλαστικότητα και συνοχή.
- Η ιλύς(silt, μέγεθος σωματιδίων: 0,02-0,002 mm). Η ιλύς αποτελείται από κόκκους με ακανόνιστο σχήμα, οι οποίοι παρουσιάζουν μικρή πλαστικότητα και συνοχή.
- Η άργιλος (clay, μέγεθος σωματιδίων: <0,002 mm). Η άργιλος αποτελείται από κόκκους πεπλατυσμένους με πολύ μικρό μέγεθος. Εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους εμφανίζουν μεγάλη ειδική επιφάνεια, πράγμα που επιτρέπει στην άργιλο να συγκρατεί πολύ νερό και να εκδηλώνει μεγάλη πλαστικότητα και συνοχή.

Η εργαστηριακή τεχνική, με τη βοήθεια της οποίας γίνεται ο ποσοτικός προσδιορισμός της εκατοστιαίας περιεκτικότητας του εδάφους στα τρία κλάσματα, δηλαδή της κοκκομετρικής σύστασης(soil texture), ονομάζεται κοκκομετρική ή αλλιώς μηχανική ανάλυση. Μετά από τον ποσοτικό προσδιορισμό των τριών κλασμάτων η κατηγορία στην οποία ανήκει το έδαφος από άποψη μηχανικής σύστασης βρίσκεται με χρήση του τριγωνικού διαγράμματος κοκκομετρικής σύστασης εδαφών (στο Παράρτημα Ι γίνεται αναφορά στις βασικές ονομασίες των διαφόρων κλάσεων κοκκομετρικής σύστασης).

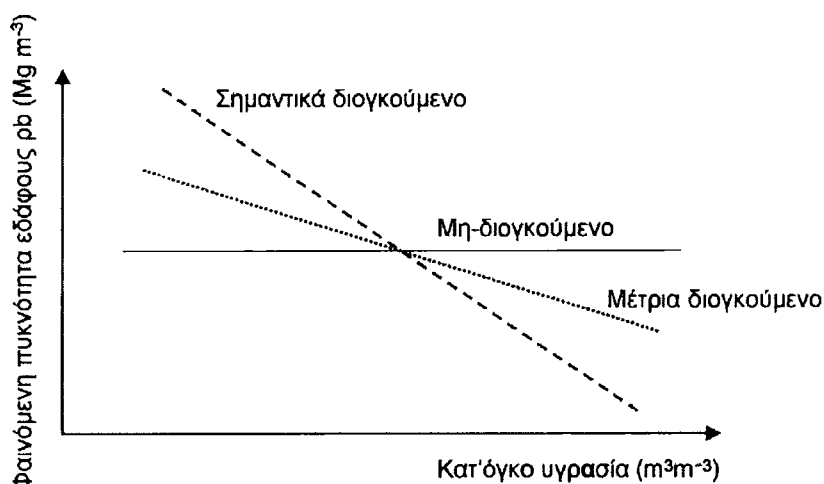
Όσο αφορά την οργανική ύλη (organicmatter), αξίζει να τονιστεί ότι ο χούμος έχει υδρόφιλο χαρακτήρα και μπορεί να συγκρατήσει νερό που αναλογεί έως και 15 φορές το βάρος του, πολύ περισσότερο δηλαδή από ότι μπορεί να συγκρατήσει η

άργιλος. Όμως μέρος από το νερό αυτό συγκρατείται ισχυρά και δεν είναι διαθέσιμο στα φυτά (Παπαδόπουλος, 1998).

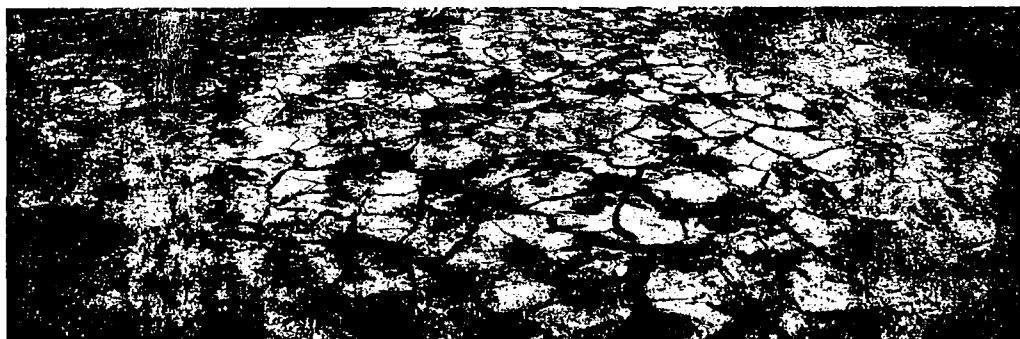
Το κλάσμα της αργίλου και η επίδρασή του στη δημιουργία συσσωματωμάτων και στη συρρίκνωση – διόγκωση του εδάφους

Τα εδαφικά σωματίδια (particles) πολύ σπάνια βρίσκονται διασπαρμένα στο έδαφος. Τα μεγαλύτερα σε μέγεθος από αυτά περιβάλλονται από ένα είδος «κόλλας» και σχηματίζουν συσσωματώματα. Το συγκολλητικό υλικό είναι η άργιλος και ο χούμος. Σε ένα υδατικό αιώρημα αργίλου τα ομώνυμα (αρνητικά) φορτία των σωματιδίων απωθούνται μεταξύ τους και διασπείρονται σε όλη τη μάζα του υγρού. Η άργιλος βρίσκεται έτσι σε κατάσταση διασποράς. Εάν υπάρχουν στο διάλυμα ηλεκτροθετικά ιόντα (όπως π.χ. τα κατιόντα που υπάρχουν στο έδαφος: Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ κ.ο.κ) τα αρνητικά φορτία των σωματιδίων της αργίλου εξουδετερώνονται, παύουν να απωθούνται μεταξύ τους και η άργιλος βρίσκεται σε κατάσταση θρόμβωσης. Για τη δημιουργία σταθερών συσσωματωμάτων στο έδαφος απαραίτητη προϋπόθεση είναι η άργιλος να βρίσκεται σε κατάσταση θρόμβωσης, επομένως η θρόμβωση της αργίλου αποτελεί βασικό παράγοντα για τη δημιουργία δομής (structure) στο έδαφος (Παπαδόπουλος, 1998; Shanstrom, 2014).

Ένα άλλο γνώρισμα που χαρακτηρίζει την άργιλο των εδαφών και επηρεάζει τη δημιουργία, αλλά και τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων είναι η διόγκωση και η συρρίκνωση που υφίσταται με την πρόσληψη ή την απώλεια νερού αντίστοιχα. Η διόγκωση της αργίλου είναι έντονη όταν περιέχει διογκούμενους τύπους αργίλου και κυρίως μοντμοριλλονίτη, ο οποίος δέχεται πολύ εύκολα την είσοδο μορίων νερού μεταξύ των στοιβάδων του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα τέτοιο έδαφος όταν έχει υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία να αυξάνει τον όγκο του και όταν η υγρασία αυτή απομακρύνεται να δημιουργούνται ρωγμές. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2, τα συμπαγή, η μη-διογκούμενα εδάφη (π.χ. εδάφη με μεγάλα σωματίδια π.χ. αμμώδη, χωρίς πολλή οργανική ουσία) δεν παρουσιάζουν αλλαγή στον όγκο τους και έτσι η σχετική πυκνότητά τους μένει σταθερή παρόλο που αλλάζει το περιεχόμενό τους σε υγρασία. Σε ένα σημαντικά διογκούμενο έδαφος (π.χ. αργιλώδες έδαφος που μεγάλο ποσοστό μοντμοριλλονίτη) όταν αυξάνεται το περιεχόμενο σε υγρασία αναμένεται αύξηση του όγκου του και επομένως μείωση της φαινόμενης πυκνότητας, ενώ σε περίπτωση ξήρανσης συμβαίνει το αντίστροφο (Εικόνα 3). Γενικά τα περισσότερα καλλιεργούμενα εδάφη αναπτύσσουν μέτριες αλλαγές στον όγκο τους όταν διαβρέχονται ή ξηραίνονται και αυτό συμβαίνει όταν περιέχουν λιγότερο από 8% διογκούμενη άργιλο (Dexter 1988).



Εικόνα 2 Σχέση φαινόμενης πυκνότητας με την κατ'όγκο υγρασία ανάλογα με τον τύπο του εδάφους



Εικόνα 3 Αργιλώδες έδαφος που έχει συρρικνωθεί λόγω ξηρασίας με αποτέλεσμα την εμφάνιση χαρακτηριστικών ρωγμών

Προβληματισμός 2 Σχετικά με τις αλλαγές όγκου του εδαφικού δείγματος

Σε ένα έδαφος που έχει ελάχιστο ελεύθερο νερό, η άργιλος σε μεγάλο βαθμό σε κατάσταση θρόμβωσης και η δομή του εδάφους είναι μπορεί να είναι έως και ασύνδετη (ασύνδετη δομή έχουν συνήθως τα εδάφη με μεγάλο ποσοστό χονδροειδών σωματιδίων π.χ. άμμου αλλά και ένα έδαφος που περιέχει άργιλο αν δεν περιέχει νερό δεν μπορεί να αποκτήσει συσσωματώματα). Το έδαφος αυτό, στο πλαίσιο της προτεινόμενης διαδικασίας βαθμονόμησης αισθητήρων από την Decagon (Cobos και Chambers, 2010; Decagon, 2017β), μπορεί ανάλογα με την συμπίεση που θα υποστεί να καταλάβει τον όγκο που προκύπτει αν το ξηρό του βάρος διαιρεθεί με την φαινόμενη πυκνότητα και έτσι να αποκτήσει τεχνητά μία πυκνότητα ίση με την φαινόμενη πυκνότητα. Με την προσθήκη νερού και το

ανακάτεμα - πλάσιμο του εδάφους ώστε η ύγρανση να είναι ομοιόμορφη θα δημιουργηθούν συσσωματώματα και το έδαφος θα περάσει σχεδόν σίγουρα σε μια κατάσταση συσσωματώδους δομής (εκτός και αν δεν το επιτρέπει ο τύπος του). Αποτέλεσμα αυτού είναι μεγάλο μέρος από τους ελεύθερους χώρους που υπήρχαν στην ασύνδετη κατάσταση να απαληφθεί και επομένως να μην υπάρχει πια δυνατότητα το έδαφος να καταλάβει τον όγκο που αντιστοιχεί στην φαινόμενη πυκνότητα. Προφανώς σε εδάφη με μεγάλο ποσοστό διογκούμενης αργίλου, θα εξελίσσεται παράλληλα και η διαδικασία αύξησης του όγκου όταν αυξάνει η περιεκτικότητα σε νερό. Το φαινόμενο αυτό είναι ανταγωνιστικό ως προς την μεταβολή του όγκου με τη δημιουργία δομής που αναφέρθηκε. Προφανώς όταν η δημιουργία δομής επικρατεί το τελικό αποτέλεσμα της προσθήκης νερού είναι να μειώνεται ο όγκος του δείγματος.

Τι όγκο όμως θα πρέπει να καταλάβει το έδαφος στο δοχείο λήψης δεδομένων από τον αισθητήρα μετά από ένα βήμα ύγρανση κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης (Cobos και Chambers, 2010; Deoagon, 2017β); Αυτό δεν έχει μεγάλο ενδιαφέρον σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία μια και αφού υπάρχει αρκετή υγρασία θα επιτευχθεί καλή επαφή αισθητήρα και εδάφους, πράγμα που είναι και το ζητούμενο. Ο προσδιορισμός δε της κατ'όγκο υγρασίας θα γίνει με βάση τον όγκο και την υγρασία του/των δείγματος/των που θα ληφθεί/ουν από το δοχείο λήψης δεδομένων από τον αισθητήρα σε κάθε βήμα ύγρανσης.

Δεν μπορεί όμως να μην αναφερθεί ότι σε συνθήκες πεδίου η δημιουργία ρωγμών σε εδάφη με μεγάλο κλάσμα αργίλου είναι σίγουρο ότι θα προκαλέσει (για λόγους που θα αναφερθούν στη συνέχεια) ζητήματα σχετικά με την ακρίβεια των μετρήσεων.

Υγρασία εδάφους και διαθεσιμότητά του εδαφικού νερού για τα φυτά

Το νερό στο έδαφος ή γενικότερα στα υποστρώματα καλλιέργειας, εκτός από την επίδραση της βαρύτητας δέχεται και την τάση (suction / μύζηση – αρνητική πίεση) συγκράτησής του από τα εδαφικά σωματίδια. Η υγρασία που περιέχεται στο έδαφος συνδέεται με την τάση αυτή. Τα φυτά πρέπει να ασκήσουν τουλάχιστον πίεση τουλάχιστον όσο και η τάση συγκράτησης του νερού από το έδαφος ώστε να το απορροφήσουν. Ακόμη το νερό στο έδαφος περιέχει διαλυμένες ουσίες (και για αυτό ονομάζεται και εδαφικό διάλυμα) που μπορεί να είναι χρήσιμες ή όχι για τη θρέψη των φυτών ενώ η συγκέντρωσή τους μπορεί να διευκολύνει ή όχι την πρόσληψη του εδαφικού διαλύματος από αυτά.

Τα υποστρώματα ως πορώδη σώματα, συγκρατούν υγρασία λόγω ελκτικών δυνάμεων μεταξύ της επιφάνειας της στερεάς ουσίας τους και του νερού (δυνάμεις συνάφειας). Τα μόρια του νερού που υπάρχουν στο έδαφος ασκούν και μεταξύ τους ελκτικές δυνάμεις (δυνάμεις συνοχής). Κάθε έδαφος έχει μία χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας (X.K.Y., moisture characteristic curve ή pF -curve²), που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ περιεχομένης υγρασίας και της μύζησης με την οποία το νερό συγκρατείται από την στερεά φάση (Εικόνα 4, Εικόνα 6). Η μύζηση υποστρώματος (ψ_m , soil matric potential) ισούται με το μέτρο των δυνάμεων συνάφειας ανά μονάδα επιφάνειας των στερεών τεμαχιδίων (εκφράζεται συνήθως σε kPa, bar, cm, pF^3 , κοκ). Σε κάθε επίπεδο μύζησης αντιστοιχεί και ένα επίπεδο υγρασίας (η ακριβής ποσότητα μπορεί να έχει διαφορά λόγω του φαινομένου της υστέρησης που θα αναφερθεί στη συνέχεια) που μπορεί να συγκρατηθεί από το υπόστρωμα και το αντίστροφο. Η περιεκτικότητα κατά όγκο σε υγρασία (θ , volumetric water content) ορίζεται ως η εκατοστιαία αναλογία μεταξύ του όγκου του νερού που περιέχεται σε ένα υπόστρωμα (V_w) και του συνολικού όγκου του υποστρώματος (V_s) και εκφράζεται ως % v/v (Εξίσωση 2).

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} 100\%$$

όπου:

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

V_w , ο όγκος του νερού που περιέχεται σε ένα υπόστρωμα / έδαφος

V_s , ο συνολικός όγκος του υποστρώματος / εδάφους (ίδιος με τον όγκο που αναφέρθηκε στην Εξίσωση 1)

Εξίσωση 2 Περιεκτικότητα κατ'όγκο σε υγρασία

Αν είναι γνωστή η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους (ρ_b , Εξίσωση 1) μπορεί να γίνει μετατροπή από την κατ'όγκο υγρασία (Εξίσωση 2) στην κατά βάρος υγρασία (gravimetric water content, Εξίσωση 3) και το αντίστροφο (Θεοχάρης 1998; Campbell, 2014).

² Η τιμή pF δίνεται από τη σχέση $pF = \log|\Psi_m|$ όπου Ψ_m η μύζηση υποστρώματος σε cm

³ $1 \text{ kPa} = 0.01 \text{ bar} = 10 \text{ cm}$ στήλη νερού, $pF = \log^{10}(-P)$ με P σε cm

$$W = \frac{m_w}{m_d} 100\%$$

όπου:

m_w , το βάρος του νερού που περιέχεται σε ένα υπόστρωμα / έδαφος

m_d , το βάρος του ξηρού (dry) υποστρώματος / εδάφους

όμως επειδή για το νερό ισχύει πρακτικά $m_w = V_w$, αν αντικατασταθεί το m_d από την Εξίσωση 1 και ληφθεί υπόψη η Εξίσωση 2, καταλήγουμε στο:

$$W = \frac{1}{\rho_b} \theta \text{ ή αντίστροφα στο } \theta = W \rho_b$$

αν λαμβάνονταν υπόψη και η πυκνότητα του νερού (ρ_w) τότε θα ήταν:

$$W = \frac{\rho_w}{\rho_b} \theta \text{ ή αντίστροφα στο } \theta = W \rho_b / \rho_w$$

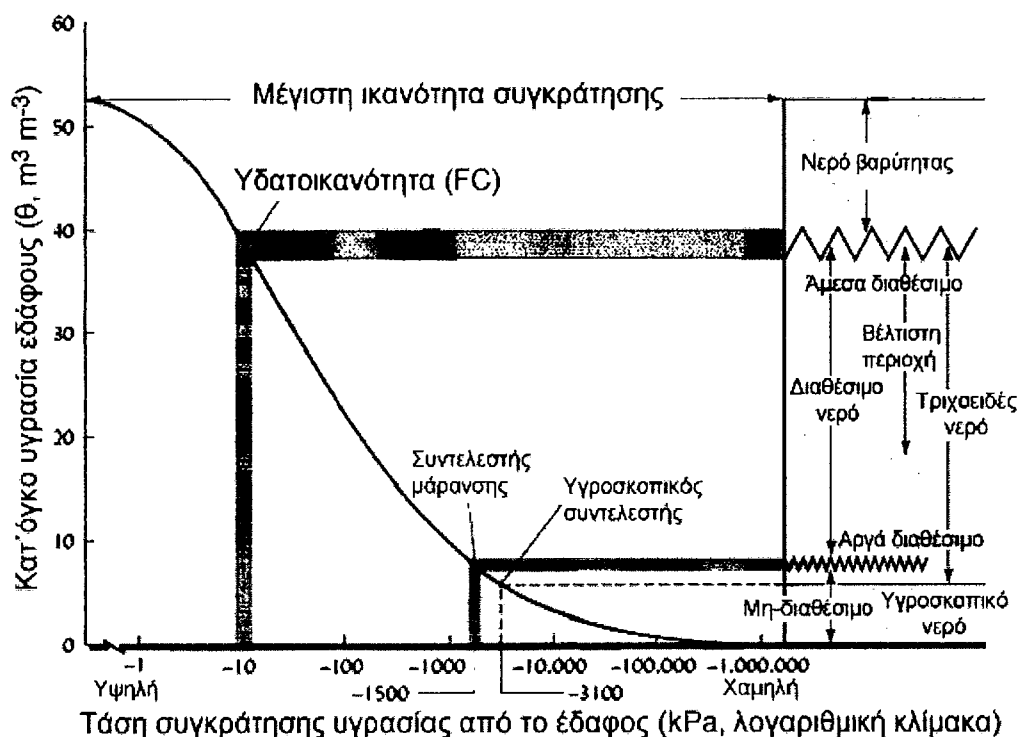
Εξίσωση 3 Περιεκτικότητα κατά μάζα σε υγρασία και σχέση με την περιεκτικότητα κατ'όγκο

Προβληματισμός 3 Σχετικά με την μετατροπή από κατά βάρος σε κατ'όγκο υγρασία και την επίδραση της πυκνότητας του νερού στους υπολογισμούς

Η πολύ απλή εικόνα μετατροπής που παρουσιάζει η Εξίσωση 3, θα επέτρεπε με βάση την φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους να μην υπάρχει ανάγκη γνώσης του όγκου του δείγματος εδάφους που λαμβάνεται σε κάθε βήμα της διαδικασίας βαθμονόμησης αισθητήρων που προτείνεται από την Decagon (Cobos και Chambers, 2010; Decagon, 2017β). Η ζύγιση του ξηρού (105°C 24h) δείγματος θα αρκούσε μια και ο πολλαπλασιασμός του με τη φαινόμενη πυκνότητα (Προβληματισμός 1) θα είχε ως αποτέλεσμα τον όγκο που αντιστοιχεί στο αδιατάρακτο δείγμα (Εξίσωση 1). Είναι προφανές όμως ότι από τη στιγμή που το έδαφος το οποίο χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση έχει διαταραχθεί (κοσκίνισμα κλπ.) και έχει γίνει προσπάθεια προσέγγισης της φαινόμενης πυκνότητας κατά το πρώτο βήμα της βαθμονόμησης, ενώ στα υπόλοιπα δεν υπάρχει καμία σιγουριά –ούτε ενδιαφέρον- προσέγγισής της (Προβληματισμός 2) η μετατροπή αυτή δεν μπορεί να γίνει. Μόνο σε πολύ χονδρόκοκκα εδάφη θα μπορούσε να είναι κοντά στην πραγματικότητα.

Στο πλαίσιο της προτεινόμενης διαδικασίας βαθμονόμησης αισθητήρων από την Decagon (Cobos και Chambers, 2010; Decagon, 2017β) η πυκνότητα του νερού λαμβάνεται ίση με 1. Όμως αυτό δεν είναι παρά μία προσέγγιση καθώς η πυκνότητα του νερού αλλάζει με τη θερμοκρασία. Βέβαια σε θερμοκρασίες μεταξύ 15 και 30°C η αλλαγές είναι μικρές⁴.

⁴Οι Starr και Pallineanu (2002), αναφέρουν ότι για θερμοκρασίες μεταξύ 10 – 30°C δεν φαίνεται να δημιουργούνται μεγάλα σφάλματα.



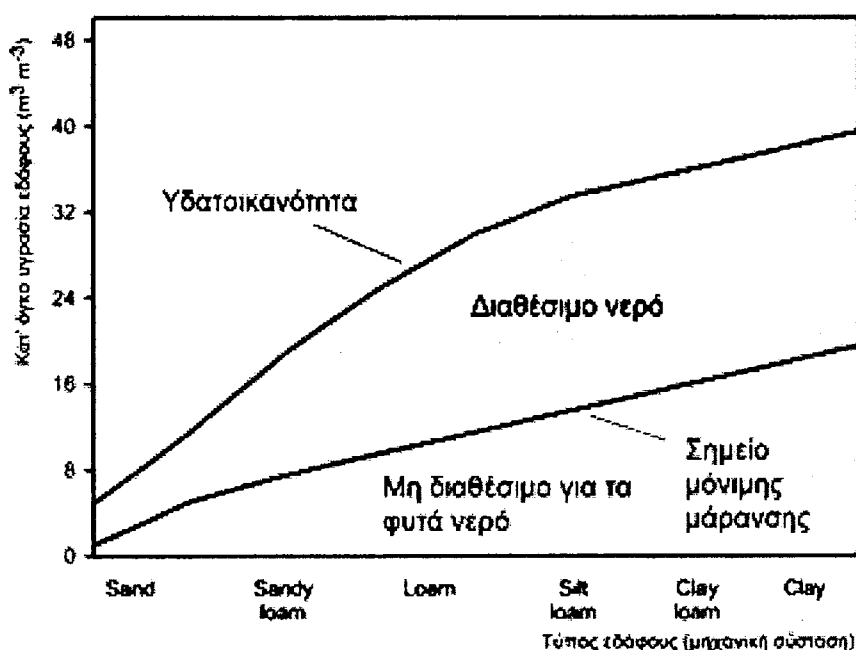
Εικόνα 4 Χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας και βασικά επίπεδα υγρασίας (πηγή: απόδοση στα Ελληνικά από Lajos, 2008: http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0032_talajtan/ch07s05.html). Μία πολύ αναλυτική παρουσίαση του διαγράμματος αυτού είναι διαθέσιμη στο: <https://www.youtube.com/watch?v=70x98CdErbE>).

Τα φυτά πρέπει να υπερνικήσουν τη μύζηση υποστρώματος ώστε να μπορέσουν να αποσπάσουν νερό από αυτό και να το χρησιμοποιήσουν για τις φυσιολογικές τους λειτουργίες. Υπάρχουν κάποια επίπεδα υγρασίας του υποστρώματος που έχουν ιδιαίτερη σημασία για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων. Στα εδάφη ορίζονται τα ακόλουθα (Εικόνα 4, Εικόνα 5):

- Υγρασία κορεσμού (Θ_s , Saturation), όταν όλοι οι πόροι του εδάφους είναι γεμάτοι με νερό. Η ποσότητα νερού μεταξύ κορεσμού και υδατοικανότητας (βλέπε αμέσως παρακάτω) ονομάζεται νερό βαρύτητας μια και δεν συγκρατείται ισχυρά από το έδαφος και η κίνησή του καθορίζεται από τη βαρύτητα. Στα περισσότερα εδάφη το νερό αυτό έχει απομακρυνθεί σε 1-2 ημέρες.
- Υδατοικανότητα (FC, FieldCapacity ή και FullPoint), όταν μόνο οι μικροί – τριχοειδείς- πόροι του εδάφους είναι γεμάτοι με νερό. Αντιστοιχεί στο επίπεδο

μύζησης των 10 30 kPa (0,1 – 0,33 bar). Το νερό αυτό (ονομάζεται και τριχοειδές νερό) συγκρατείται από το έδαφος και μάλιστα η ποσότητα που αντιστοιχεί πρακτικά μεταξύ υδατοικανότητας και σημείου μόνιμης μάρανσης (βλέπε αμέσως παρακάτω) είναι τυπικά διαθέσιμη στα φυτά.

- Σημείο μόνιμης μάρανσης (PWP, Permanent Wilting Point), όταν η υγρασία που έχει απομείνει στο έδαφος αντιστοιχεί στο νερό που είναι ισχυρά προσκολλημένο στα εδαφικά σωματίδια. Αντιστοιχεί στο επίπεδο μύζησης των 1500 kPa (15 bar). Το νερό αυτό (ονομάζεται και υγροσκοπικό νερό) δεν είναι διαθέσιμο στα φυτά και εάν η υγρασία στο έδαφος μείνει στο επίπεδο αυτό αργά ή γρήγορα τα φυτά θα ξεραθούν.



Αμμώδες (Sand), Αμμοπηλώδες (Sandyloam), Πηλώδες (Loam), Ιλυοπηλώδες (Siltloam), Αργιλοπηλώδες (Siltclayloam), Αργιλώδες (Clay)

Εικόνα 5 Γενικές σχέσεις υγρασίας και μηχανικής κλάσης εδάφους (πηγή: Dukes κ.α., 2010)

Τυπικά θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι όσο η υγρασία του εδάφους μένει εντός των ορίων του διαθέσιμου νερού (AW, Available Water ή PAW, Plant Available Water) τα φυτά δεν θα υπόκεινται σε υδατική καταπόνηση. Όμως όπως φαίνεται και από την χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας, όσο μειώνεται η διαθέσιμη υγρασία τόσο μεγαλύτερη τάση πρέπει να αναπτύξουν τα φυτά ώστε να υπερνικήσουν την αντίστοιχη μύζηση του εδάφους και να απορροφήσουν το νερό. Στο πλαίσιο αυτό και

ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε φυτού τίθεται ένα όριο (MAD, Maximum Allowable Depletion) μέγιστης κατανάλωσης της διαθέσιμης υγρασίας ώστε να μην συμβαίνει υδατική καταπόνηση. Με βάση το MAD ορίζεται ένα ακόμη ενδιαφέρον στην πρακτική των αρδεύσεων επίπεδο υγρασίας:

- Σημείο επαναπλήρωσης με νερό (RF, Refilling Point), η υγρασία που αντιστοιχεί στο $FC - MAD$ (FC-PWP) και σηματοδοτεί την ανάγκη για άρδευση.

Γενικά το ζητούμενο είναι η υγρασία στο έδαφος να παραμένει σε μία περιοχή που ονομάζουμε Εύκολα Διαθέσιμο Νερό (EAW – Easily Available Water ή RAE – Readily Available Water). Πρακτικοί περιορισμοί σε αυτή την προσέγγιση αποτελούν τα ακόλουθα:

- Ορίζεσθαι κατανέμονται ομοιόμορφα στο νεδαφικό όγκο που εξετάζεται
- Η υγρασία δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στο νεδαφικό όγκο που εξετάζεται
- Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους (hydraulic conductivity)⁵ μπορεί να επιφέρει καθυστερήσεις όσο αφορά την αναπλήρωση της υγρασίας στην περιοχή των ριζών και συνεπώς την πραγματική επάρκεια νερού στην περιοχή αυτή (Raviv κ.α., 2002)
- Υπάρχουν διαφορές όσο αφορά το σημείο μόνιμης μάρανσης για τα διάφορα φυτά, άρα η ιδιότητα αυτή δεν εξαρτάται μόνο από το έδαφος.

Ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (μηχανική σύσταση) μπορούμε να εκτιμήσουμε μέσω της βιβλιογραφίας τα επίπεδα κορεσμού, υδατοικανότητας και μόνιμης μάρανσης για τα κοινά ανόργανα εδάφη. Πολλές σχετικές αναφορές είναι διαθέσιμες (π.χ. Soil type (USA Soil Texture Classification) από το FAO paper 56 (Allen κ.α., 1998) και Twarakavi, κ.α., 2009.).

⁵ Δεν πρέπει να συγχέεται με την ηλεκτρική αγωγιμότητα που θα αναφερθεί παρακάτω για τους αισθητήρες μέτρησης υγρασίας

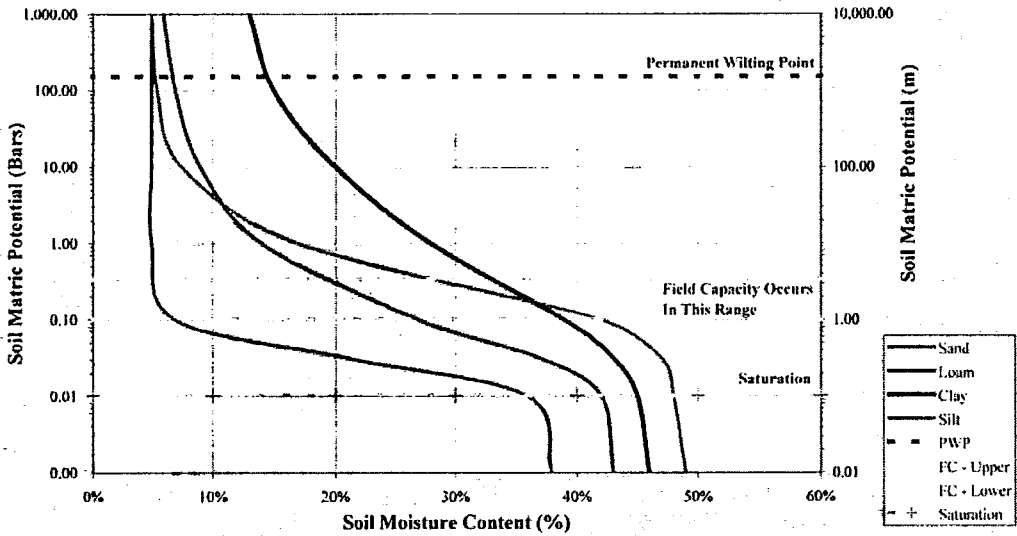
Στα υποστρώματα υδροπονίας, έχουν οριστεί κάποια αντίστοιχα επίπεδα αναφοράς(Savvas, 2009).

- Υδατοϊκανότητα φυτοδοχείου (θ_{cc} , containercapacity), η οποία ισούται με την μέγιστη περιεκτικότητα (%) ενός υποστρώματος σε υγρασία σε συνθήκες ανεμπόδιστης στράγγισης. Συμβατικά η θ_{cc} λαμβάνεται ίση με την περιεκτικότητα του υποστρώματος σε υγρασία (με βάση την Χ.Κ.Υ.) σε μύζηση 10 cm στήλης νερού (1 kPa).
- Εύκολα διαθέσιμο νερό (ΕΔΝ, EasilyAvailableWater- EAW) καλείται η διαφορά μεταξύ της περιεκτικότητας ενός υποστρώματος σε υγρασία στα 10 και 50 cm στήλης νερού (1 και 5 kPa, αντίστοιχα). Το νερό αυτό μπορεί να αντληθεί από τα φυτά χωρίς να καταναλωθούν σημαντικά ποσά ενέργειας.
- Ρυθμιστική περιεκτικότητα νερού (ΡΠΝ, WaterBufferingCapacity - WBC). Η διαφορά μεταξύ της περιεκτικότητας ενός υποστρώματος σε υγρασία σε 50 και σε 100 cm στήλης νερού (5 και 10 kPa, αντίστοιχα).
- Για μεγαλύτερες τιμές μύζησης, το νερό είναι από δύσκολα έως καθόλου διαθέσιμο για τα φυτά (στα 15.000 cm ή 1500 kPa αντιστοιχεί το σημείο μόνιμης μάρανσης, πέρα από το οποίο τα φυτά έχουν μηδενική δυνατότητα απορρόφησης νερού).

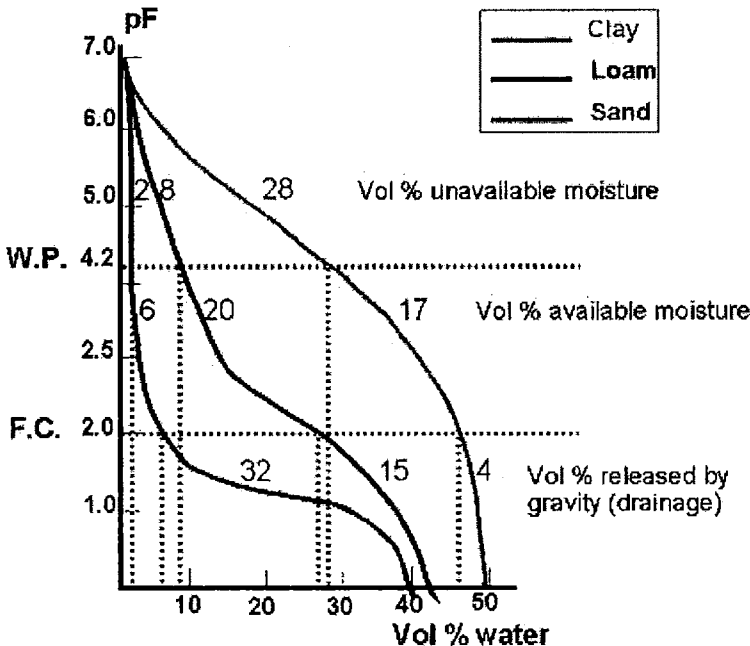
Κάθε χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας μπορεί να προέλθει από πειραματικές μετρήσεις και να μοντελοποιηθεί (σχέση μεταξύ h (cm, kPa κοκ) και θ (% , v/v). Ένα γενικά αποδεκτό μοντέλο στο οποίο προσαρμόζονται τέτοια δεδομένα είναι το μοντέλο van Genuchten (1980).

Η παρούσα εργασία εστιάζει σε κοινά εδάφη και όχι σε ειδικά υποστρώματα.

Water Retention/Release Curves (Soil Moisture Characteristic)



Sand: άμμος, Loam: Αργιλλώδες, Clay: Πηλώδες, Silt: Ιλυώδες, Saturation: Κορεσμός, Field Capacity: υδατοικανότητα, Permanent Wilting Point: σημείο μόνιμης μάρανσης, Soil Matric Potential: τάση συγκράτησης νερού από το έδαφος και SoilMoistureContent: εδαφική υγρασία

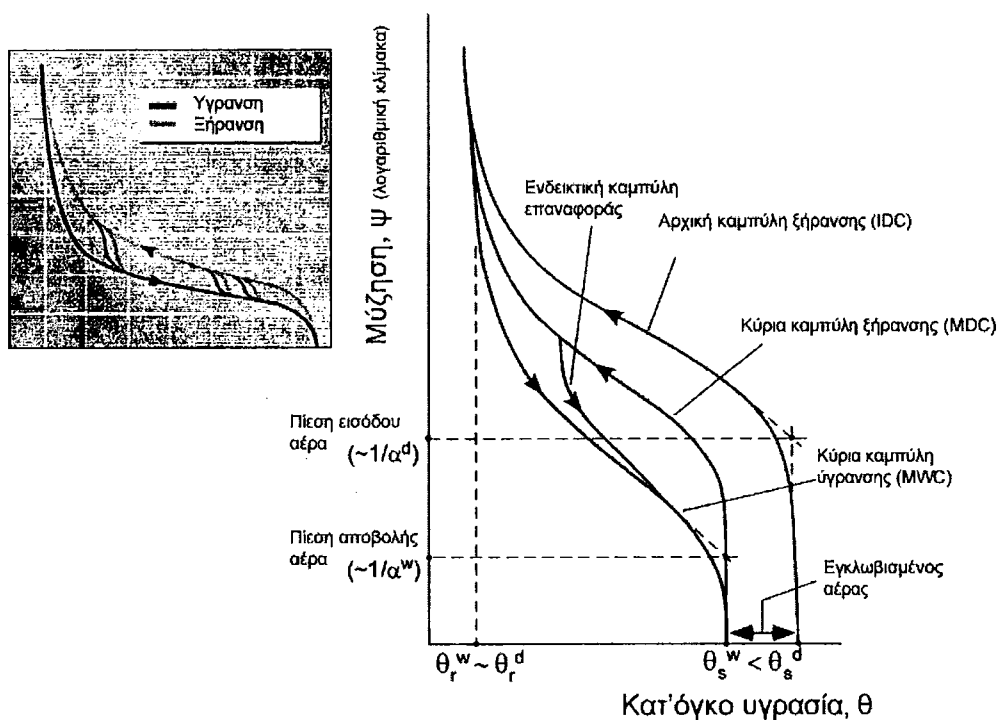


Εικόνα 6 Χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας διαφόρων τύπων εδαφών.Επάνω: μορφή με απλούς άξονες (πηγή: Hydrogold, [http://hydrogold.com/education.soil moisture concepts.html](http://hydrogold.com/education.soil%20moisture%20concepts.html)), κάτω εκφρασμένη σε τιμές pF (πηγή: Lajos, 2008, [http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0032 talajtan/ch07s05.html](http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0032_talajtan/ch07s05.html))

Υστέρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας

Η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας δεν είναι ίδια κατά την διαδικασία ύγρυνσης και ξήρανσης του εδάφους και το φαινόμενο ονομάζεται υστέρηση (hysteresis). Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με την κατάσταση (ύγρυνση – ξήρανση) στην ίδια τιμή εδαφικής υγρασίας θα αντιστοιχούν διαφορετικές τιμές τάσης συγκράτησης του νερού από το έδαφος (Εικόνα 7). Η υστέρηση οφείλεται σε μία σειρά από αιτίες και διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (Likos κ.α., 2013), λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, η υστέρηση συχνά παραλείπεται από την μελέτη της πρακτικής συμπεριφοράς του εδάφους και σε πρακτικό επίπεδο στο πλαίσιο της γεωπονικής επιστήμης, ως χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας χρησιμοποιείται η καμπύλη ξήρανσης.

Αναφέρεται (Witkowska-Walczak, 2006) ότι η μέγιστη διαφορά όσο αφορά το περιεχόμενο σε νερό μεταξύ της διαδικασίας ξήρανσης και διαβροχής για την ίδια μύζηση εδάφους μπορεί να φτάσει και το 15% (κατ'όγκο υγρασία του εδάφους).



Εικόνα 7 Υστέρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (αριστερά απλοποιημένη παρουσίαση πηγή: http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_3/chapt_4/main.htm, δεξιά αναλυτική παρουσίαση (Likos κ.α., 2013))

Προβληματισμός 4 Επίδραση της υστέρησης της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας

Το ενδιαφέρον στην περίπτωση της υγρασίας που περιέχει το έδαφος και της διαθεσιμότητας αυτού για τα φυτά είναι μεγαλύτερο όσο αφορά τη φάση ξήρανσης. Η άρδευση (φάση διαβροχής) θα κρατήσεις λίγα λεπτά έως κάποιες ώρες και μετά πιθανότατα για κάποιες ημέρες τα φυτά θα πρέπει να απορροφούν νερό από ένα έδαφος που βρίσκεται σε φάση ξήρανσης. Αφού αυτό που ενδιαφέρει είναι η τάση που πρέπει να ασκήσουν τα φυτά για να πάρουν το νερό από το έδαφος. Από την Εικόνα 7 είναι φανερό ότι οι μετρήσεις στο πλαίσιο βαθμονόμησης ενός αισθητήρα υγρασίας θα ήταν καλύτερα να γίνονται στη φάση ξήρανσης.

Χρήση ηλεκτρικών αισθητήρων για τη μέτρηση εδαφικής υγρασίας

Η χρήση αισθητήρων που αξιοποιούν τον ηλεκτρισμό, για μέτρηση υγρασίας σε εδάφη και γενικότερα σε υποστρώματα καλλιέργειας (soil / substratewatercontent) 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.

Published October, 1951

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

GEORGE JOHN BOUYOUKOS¹

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 plaster on the moisture scale goes beyond the 100% mark. This means that the electrical resistance of the soil may be as low as 500 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 500 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 10-16-16 fertilizer in powdered form, at the rates of 9, 50, 100, and 200 pounds per acre, and mixing thoroughly. The bottom of a metal pan 3½ by 2½ by 1 inch was covered with the soil to a depth of ½ inch. On top of this layer was placed a plaster of paris block and the pan filled with soil. Distilled water was added to wet 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 plaster water had evaporated



Εικόνα 8 Αισθητήρες υγρασίας εδάφους με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα και η πρώτη σελίδα μίας σχετικής εργασίας του J. Bouyoukos (1951)

Η πιο απλή εκδοχή τέτοιων οργάνων είναι αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας (electrical conductance sensors, Εικόνα 8). 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:

1. Εκτός από τα επίπεδα υγρασίας το πόσο ρεύμα θα περάσει από το έδαφος εξαρτάται και από την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του νερού.
2. Η αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του εδάφους.
3. 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 (neutronprobe). 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):

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

- Ανάκλασης στο χώρο⁶:
 - ο του χρόνου (Time Domain Reflectometry - TDR)
 - ο της συχνότητας (Frequency Domain Reflectometry - FDR)
 - ο του πλάτους (Amplitude Domain Reflectometry - ADR).
- Χωρητικότητας (capacitance domain)

Στη συνέχεια θα γίνει ειδικότερη αναφορά στους διηλεκτρικούς πυκνωτικούς αισθητήρες (dielectric capacitance sensors) και εντός της κατηγορίας αυτής στους αισθητήρες χωρητικότητας (capacitance) μια και τέτοιοι είναι οι αισθητήρες (EC5 και 10H της Decagon Devices) που θα αξιολογηθούν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής⁷.

⁶Η λέξη domain επιλέχθηκε για λόγους κυριολεξίας στο πλαίσιο της φυσικής, να αποδοθεί με τον όρο χώρος (σε άλλες αναφορές χρησιμοποιείται ο όρος πεδίο)

⁷Στην παρουσίαση (webinar) της Decagon σχετικά με τους αισθητήρες αυτούς (Campbell, 2014) αναφέρονται κάποιες φορές ως capacitance/frequency domain και κάποιες ως Frequency Domain Reflectometry – FDR. Στα φυλλάδια της Decagon (2009, 2010, 2012) για

Διηλεκτρικοί πυκνωτικοί αισθητήρες μέτρησης εδαφικής υγρασίας

Η μέθοδος αυτή συσχετίζει την εδαφική υγρασία με την χωρητικότητα του εδάφους ως ηλεκτρικού πυκνωτή και αποτελεί μια πολύ καλή τομή μεταξύ κόστους, ακρίβειας και αξιοπιστίας σε σχέση με τις προηγούμενες. Για αυτό το λόγο έχει επικρατήσει και θα την περιγράψουμε περισσότερο αναλυτικά. Ένα μικρό παράρτημα που συνοδεύει αυτή την αναφορά εξηγεί την ψηφιοποίηση και μέτρηση της πληροφορίας από τα σύγχρονα ηλεκτρονικά και βοηθά στο να σχηματιστεί μια ξεκάθαρη εικόνα του ζητήματος της μέτρησης της εδαφικής υγρασίας με τη μέθοδο αυτή. 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 150MHz βρήκαν ευρύτερη εφαρμογή από τη δεκαετία του 1990. Η εξηγήσεις που ακολουθούν βασίζονται στο τεχνικό σημείωμα των Τσιρογιάννη και Κολιοπάνου (2017).

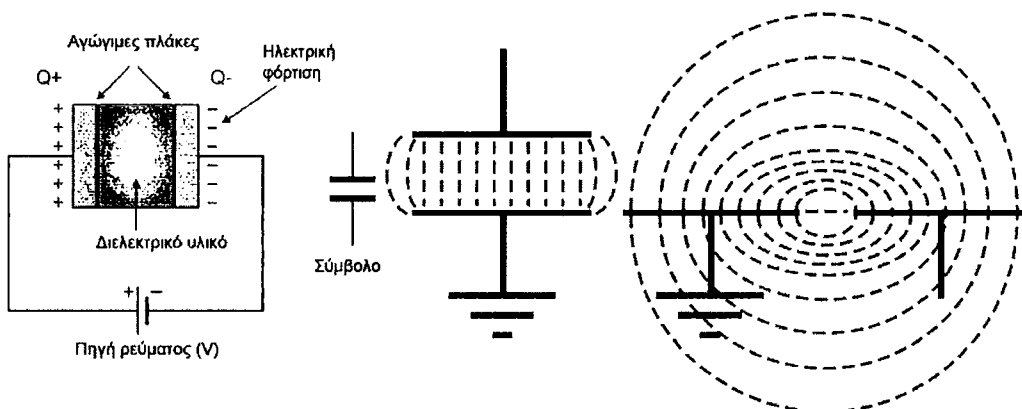
Αρχή λειτουργίας

Η χωρητικότητα συμβολίζεται με C (capacitance) και είναι ένα φυσικό μέγεθος με μονάδα μέτρησης στο SI το F (Farad). Χαρακτηρίζει τους πυκνωτές, δηλαδή τις διατάξεις όπου δύο μεταλλικές πλάκες τοποθετούνται η μία απέναντι από την άλλη, αλλά μεταξύ τους πρέπει να υπάρχει αναγκαστικά μη αγώγιμο υλικό (δηλαδή ένας μονωτής π.χ. αέρας, πλαστικό κ.α.) που ονομάζουμε "διηλεκτρικό". Οι μεταλλικές αυτές πλάκες ονομάζονται οπλισμοί του πυκνωτή και όταν συνδεθούν με μια πηγή τάσης τότε φορτίζονται.

Η χωρητικότητα C ενός πυκνωτή εκφράζεται ως 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. Ανάμεσα στους οπλισμούς δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο που εξαρτάται αποκλειστικά από το διηλεκτρικό, όταν η γεωμετρία του πυκνωτή παραμένει αμετάβλητη. Η ένταση του ηλεκτρικού αυτού πεδίου εκφράζει ουσιαστικά την χωρητικότητα του πυκνωτή. Μετά την διακοπή της τάσης οι οπλισμοί του πυκνωτή παραμένουν φορτισμένοι έχοντας αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια που μπορούν να την αποδώσουν (σαν να ήταν μπαταρίες) σε άλλα κυκλώματα.

Πως μετράμε την εδαφική υγρασία;

Ο συσχετισμός με την εδαφική υγρασία είναι απλός. Ο πυκνωτής ως κατασκευή παραμένει σταθερός, κάθε φορά που αλλάζει η ποσότητα του νερού στο έδαφος, αλλάζει και η ποιότητα του διηλεκτρικού στην περιοχή του πεδίου άρα αλλάζει και η χωρητικότητά του.



Εικόνα9 Πυκνωτές και ορισμένες διαμορφώσεις αυτών (πυκνωτής παράλληλων οπλισμών - parallel plate capacitor και πυκνωτής συνεπίπεδων οπλισμών - coplanar plate capacitor)

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι για πρακτικούς λόγους δεν μετράμε άμεσα την χωρητικότητα του αισθητήρα (με ένα χωρητικόμετρο). Αντιθέτως είναι πιο αποδοτικό να εξάγουμε το μέγεθος της χωρητικότητας έμμεσα από το χρόνο φόρτισης ή εκφόρτισης του πυκνωτή ο οποίος μπορεί με τη σειρά της να εκφραστεί από την τάση φόρτισης που μπορεί να λάβει σε συγκεκριμένο χρόνο. 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.

Ακούγεται σχετικά απλό αλλά αν εξεταστεί με μεγαλύτερη προσοχή θα κάνουν την εμφάνισή τους τα δύσκολα σημεία της μεθόδου που θα πρέπει να γνωρίζει κάποιος ώστε να αξιοποιεί αποτελεσματικά τους αισθητήρες της κατηγορίας αυτής.

Βασικές παραδοχές λειτουργίας των πυκνωτικών αισθητήρων

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

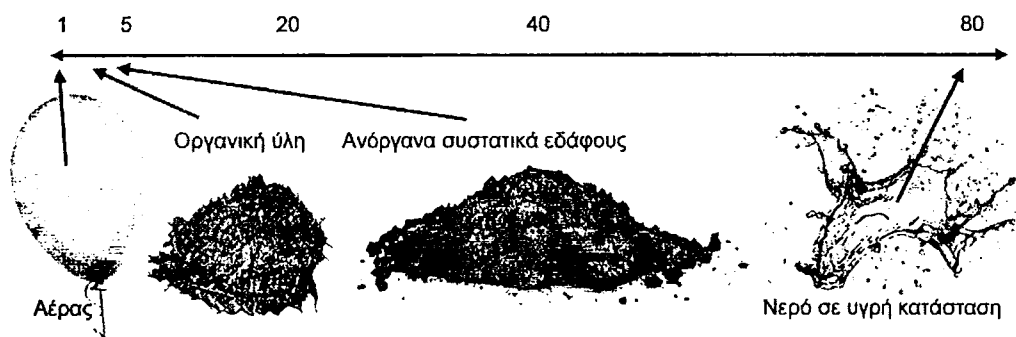
1. Παραδοχή: το έδαφος περιοχής την οποία αντιπροσωπεύει η μέτρηση θεωρείται ομοιογενές.
2. Παραδοχή: το έδαφος (στερεά, υγρή και αέρα φάση) είναι ένα τουλάχιστον καλό διηλεκτρικό υλικό, με άλλα λόγια ένας καλός μονωτής.

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: μετρίεται 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 πιθανότατα θα πρέπει να ρυθμιστούν - βαθμονομηθούν με βάση το έδαφός μας, εκτός και εάν είμαστε σίγουροι ότι έχουμε έδαφος ίδιο με την εργοστασιακή ρύθμιση του αισθητήρα.

Μεθοδολογία μέτρησης

Η διηλεκτρική σταθερά ξηρού ανόργανου εδάφους είναι μεταξύ 3 και 5 (σε εδάφη με υψηλή ECη τιμή αυτή αναμένεται να είναι αυξημένη (Czarnomski κ.α., 2005.)), του αέρα περίπου 1 και του νερού περίπου 80 (Εικόνα 9). Επομένως οι αλλαγές όσο αφορά το περιεχόμενο στο έδαφος νερό αντικατοπτρίζονται άμεσα στην διηλεκτρική του σταθερά.



Εικόνα 9 Διηλεκτρική σταθερά των διαφόρων συστατικών του εδάφους

Στη συνολική διηλεκτρική σταθερά ενός εδάφους (apparent dielectric permittivity (συμβολίζεται με κή ϵ_a ή ϵ_b)) συνεισφέρουν τα διάφορα συστατικά του (Εξίσωση 4, 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 4 Συνολική διηλεκτρική σταθερά εδάφους

Θεωρώντας $b = 0,5$ (βλέπε Σφάλμα! Άγνωστη παράμετρος αλλαγής.)

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

Εξίσωση 5 Κατ'όγκο υγρασία ως συνάρτηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους

Η Εξίσωση 4 μπορεί να επιλυθεί ως προς την κατ'όγκο υγρασία (Εξίσωση 5) 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 Τορρτο 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 6).

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

Εξίσωση 6 Εξίσωση του Τορρ

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

Προβληματισμός 5 Επίδραση χαρακτηριστικών του εδάφους στην σχέση διηλεκτρικής σταθεράς και περιεχόμενης κατ'όγκο υγρασίας στο έδαφος

Σύμφωνα με το τον Campbell (2014), μπορεί η προσέγγιση του Torrona είναι απλή, όμως οι εξισώσεις που προκύπτουν μπορεί να έχουν μεγάλες διαφορές από έδαφος σε έδαφος ανάλογα με τις υδραυλικές του ιδιότητες (Campbell, 2001), την ηλεκτρική αγωγιμότητα (πρόβλημα όταν είναι υψηλή) (Campbell, 2001, Visconti, 2014), το ποσοστό της άμμου (πρόβλημα όταν είναι υψηλό) (Campbell, 2001), το ποσοστό αργίλου (πρόβλημα όταν είναι υψηλό) (Campbell, 2001, Visconti, 2014), την θερμοκρασία (επηρεάζει την επιδεκτικότητα του νερού να πολώνεται υπό την επίδραση του πεδίου αφού π.χ. από του 5 έως του 35°C η διηλεκτρική σταθερά του νερού μειώνεται κατά 0,7%°C⁻¹ (Campbell 2001 από Czarnomski κ.α., 2005)) και την φαινόμενη πυκνότητα (πρόβλημα εάν είναι χαμηλή). Άλλοι προσθέτουν στις πηγές προβλημάτων την υψηλή οργανική ουσία.

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 7. Από αυτή, το πρόβλημα μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς μετατρέπεται σε πρόβλημα μέτρησης της διηλεκτρικής χωρητικότητας ή απλά χωρητικότητάς του (C, dielectric capacitance).

$$C = \epsilon x F$$

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 ϵ_1 μια και αναφερόμαστε στη συνολική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους στη συγκεκριμένη περίπτωση

- Εξίσωση 5 και Εξίσωση 6) ισχύει $\kappa_i = \epsilon / \epsilon_0$, όπου ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, η σχέση γίνεται

$$C = \kappa_i \epsilon_0 x F$$

Εξίσωση 7 Υπολογισμός διηλεκτρικής σταθεράς πυκνωτή –εδάφους στην περίπτωση που μελετάται-

Μέτρηση χωρητικότητας C σε κύκλωμα RC

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 5τ και καλείται χρονική σταθερά. Επομένως η μέτρηση του χρόνου φόρτισης ή εκφόρτισης σε συνδυασμό με γνωστό R δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του C. Αυτό μπορεί να γίνει αν με το που κλείνει το κύκλωμα, μία ηλεκτρονική διάταξη παρακολουθεί την πορεία της καμπύλης και όταν αυτή σταθεροποιηθεί θεωρηθεί ότι έχει μετρηθεί ο χρόνος t . Δύο βασικά προβλήματα έχουν προκύψει έως το σημείο αυτό:

- αφού η επιδεκτικότητα του διηλεκτρικού υλικό επηρεάζεται από την συχνότητα του ρεύματος που δημιουργεί το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή του πυκνωτή, σε ποια συχνότητα πρέπει να γίνονται οι μετρήσεις ώστε η επίδραση να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη;

KQ1

- πως θα μετρηθεί με ακρίβεια ο χρόνος φόρτισης / εκφόρτισης του πυκνωτή;

Οι αισθητήρες που εξετάζονται στο πλαίσιο της αναφοράς αυτής (EC5 και 10HS της Decagon Devices) λειτουργούν στα 70MHz. Αυτό είναι επιλογή της κατασκευάστριας εταιρείας ως ένα είδος «χρυσής τομής» που επέλεξε συγκεκριμένος κατασκευαστής ώστε να παρέχει αξιόπιστες μετρήσεις με χαμηλό κόστος ηλεκτρονικών⁸.

Όσο αφορά την μέτρηση του χρόνου, το θέμα αντιμετωπίζεται ως εξής: τορεύμα εισόδου εφαρμόζεται με παλμούς υψηλής συχνότητας (square-wave) που μεταβάλλει τη τάση μεταξύ δύο ακραίων τιμών

⁸ Σττισχετικὰ κείμενα της Decagon αναφέρεται: «The sensor uses a 70 MHz frequency, which minimises salinity and textural effects, making it an ideal sensor in agricultural and standard scientific projects».

ακολουθώντας μία επιλεγμένη συχνότητα (Starr και Paltineanu, 2002). Ανηπερίοδος της κυματομορφής εισόδου είναι μικρότερη της χρονικής σταθεράς του συστήματος τότε θα προκύψει μεγαλύτερη συχνότητα, ο πυκνωτής δεν θα προλάβει να φορτιστεί πλήρως και η μορφή αυτή της εξόδου θα προσομοιάζει με τρίγωνο. Όταν το διηλεκτρικό υλικό του πυκνωτή είναι καλύτερο (καλύτερος μονωτής), αυξάνει η χωρητικότητα (C) (Εξίσωση 7). Αυτό συμβαίνει στο έδαφος συμβαίνει όταν η υγρασία είναι χαμηλή. Τότε στην έξοδο θα μετριέται μία τάση Νουτμικρότερη αυτής που θα μετριάταν όταν στο έδαφος υπήρχε υψηλή υγρασία. Στην Εξίσωση 8 παρουσιάζεται η θεωρητική σχέση υπολογισμού της τάσης εξόδου και φαίνεται ότι η μέτρησης της τάσης εξόδου μπορεί τελικά να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρησης της διηλεκτρικής 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

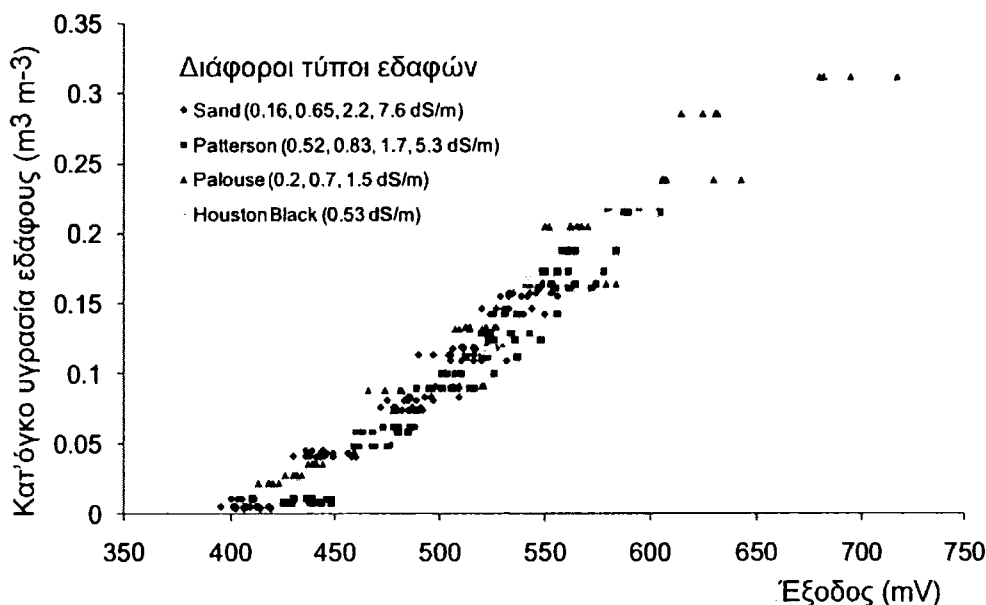
$$V_{out} = V_{in} \times (1 - e^{-t/RC})$$

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

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 $C = k \times \epsilon_0 \times F$ (βλέπε Εξίσωση 7)

ενώ με τη σειρά της η κτ συνδέεται με την κατ'όγκο υγρασία του εδάφους θ (βλέπε Εξίσωση 5)

Εξίσωση 8 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 10 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 DecagonDevices) εκτιμούν μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς του του πυκνωτή - εδαφουςτην περιεχόμενη σε αυτό υγρασία. Το κύκλωμα είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε η κυματομορφή εισόδου και η κυματομορφή εξόδου να έχουν συνότητα 70MHz 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 10). Για κάθε αισθητήρα η εταιρεία παρέχει εμπειρικές εξισώσεις για διάφορους τύπους εδαφών.

Γενικά πρακτικά ζητήματα

Οι αισθητήρες διηλεκτρικής χωρητικότητας είναι γενικά περισσότερο πολύπλοκοι όσο αφορά τα ηλεκτρονικά σε σχέση με τους απλούς αισθητήρες αγωγιμότητας. Για το λόγο αυτό κοστίζουν αρκετά περισσότερο. Βέβαια η τάση είναι να γίνονται όλο και πιο απλοί και φθηνοί και έτσι βρίσκουν όλο και περισσότερο εφαρμογή σε παραγωγικές εγκαταστάσεις. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν μεγάλη επαναληψιμότητα αλλά η ακρίβειά τους δεν είναι πολύ υψηλή (κυρίως λόγω σφαλμάτων βαθμονόμησης και επίδρασης ετερογένειας του υποστρώματος) (Pardossi κ.α., 2009). Στα

πλεονεκτήματά τους μπορούν να συμπεριληφθούν ότι είναι συμπαγείς κατασκευές, έχουν καλούς χρόνους απόκρισης, έχουν ακρίβεια όταν υπάρχει καλή επαφή με το έδαφος, είναι εύκολοι στη χρήση και ασφαλείς, μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε συστήματα συνεχούς καταγραφής και να απέχουν από το καταγραφικό και την πηγή ρεύματος έως και 500m (Starr και Pallineanu, 2002).

Σύμφωνα με τους Starr και Pallineanu (2002), οι εμπορικοί πυκνωτικοί αισθητήρες λειτουργούν σε συχνότητες από 38 έως 150 MHz σε εμπορικά συστήματα ενώ κάποιοι έχουν και αυτόματη διόρθωση για ηλεκτρική αγωγιμότητα και θερμοκρασία. Πολλά εμπορικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια με σκοπό την αυτοματοποίηση της άρδευσης με χρήση αισθητήρων διηλεκτρικής χωρητικότητας. Αισθητήρες όπως ο ML2 Theta Probe της Delta T (τεχνολογία ADR) και οι 10HS ή EC-5 (τεχνολογία capacitance domain) της Decagon παραδίδονται από τους κατασκευαστές τους βαθμονομημένοι για ανόργανα εδάφη αλλά και για άλλες ειδικές περιπτώσεις ενώ έχουν την δυνατότητα μετά από σχετική βαθμονόμηση να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο άρδευσης ακόμη και σε υδροπονικά συστήματα (Nemali κ.α., 2007; Miralles κ.α., 2010, Kim κ.α., 2014).

Ο Muñoz-Carpena (2009) προτείνει μία μέθοδο επιλογής, βάση της οποίας υπολογίζει ένα τελικό δείκτη χαρακτηρισμού του αισθητήρα μέσω των απαντήσεων σε μία σειρά ερωτήσεων που αφορούν: το εύρος μετρήσεων, την ακρίβεια, την επαναληψιμότητα, τον τρόπο μεταφοράς των δεδομένων, τις απαιτήσεις συντήρησης και προφανώς το κόστος αγοράς.

Όμως σχετικά πειράματα (Thompson κ.α., 2007) έχουν καταλήξει ότι η χρήση τέτοιων αισθητήρων δεν έχει πάντα ικανοποιητική ακρίβεια εξαιτίας θεμάτων που σχετίζονται με το βάθος ριζοστρώματος, την εκτίμηση της υδατοικανότητας και των ορίων του εύκολα διαθέσιμου νερού, την βαθμονόμηση των αισθητήρων αλλά και την ακρίβειά τους στο εύρος τιμών που ενδιαφέρει.

Όπως αναφέρθηκε, το νερό έχει σημαντικά μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε σχέση με τον αέρα. Επομένως αν ο αισθητήρας βρίσκεται εντός του χώρου ευαισθησίας του περισσότερο αέρα από αυτόν που αντιστοιχεί γενικά στο έδαφος, οι μετρήσεις μπορεί να έχουν σοβαρά σφάλματα (και αυτό μπορεί να γίνει αν κατά την τοποθέτησης δεν επιτευχθεί καλή επαφή με το έδαφος ή αν δημιουργηθούν οποιαδήποτε άλλη στιγμή κενά λόγω απομάκρυνσης νερού, αναδιάταξης του εδάφους από ρίζες, οργανισμούς στο έδαφος κ.ο.κ.).

Ακόμη, η ύπαρξη νερού στην περιοχή ευαισθησίας του αισθητήρα το οποίο όμως δεν είναι εδαφικό νερό (π.χ. υγρασία της ρίζας ή των οργανισμών που ζουν στο περιβάλλον της ρίζας) προκαλεί επίσης προβλήματα στις μετρήσεις. Αν σε αυτά προσθέσουμε την αναμενόμενη ανομοιομορφία της υγρασίας στον εδαφικό όγκο του

αγρού που μας ενδιαφέρει τότε όσο και αν προσέξει κάποιος την τοποθέτηση όσο αφορά την επαφή με το χώμα αλλά και την επιλογή «αντιπροσωπευτικών» σημείων (μια και δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθεί πολύ μεγάλος αριθμός αισθητήρων σε επιχειρησιακές εφαρμογές), η πιθανότητα να έχει ακρίβεια ως προς την μέτρηση της υγρασίας φαντάζει πολύ δύσκολη.

Σε κάθε περίπτωση το θέμα της ανάπτυξης καλύτερων αισθητήρων για τον έλεγχο της άρδευσης με βάση την υγρασία (ή και άλλες παραμέτρους) του υποστρώματος παραμένει ανοικτό. Σε αυτό το πλαίσιο δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ποτέ ότι όσο πιο πολύπλοκη και απαιτητική σε συντήρηση και γνώσεις είναι μία προσέγγιση τόσο πιο δύσκολο είναι να εφαρμοστεί σε ευρεία κλίμακα στην πράξη.

Αισθητήρες που αφορά η αξιολόγηση

Η αξιολόγηση που ακολουθεί αφορά δύο πολύ δημοφιλείς αισθητήρες της Decagon Devices Inc. WA, USA, τον EC5 και τον 10HS (και οι δύο περιλαμβάνονται στην σειρά αισθητήρων ECH₂O της εταιρείας). Και οι δύο αισθητήρες είναι πυκνωτικοί (capacitance), τύπου συνεπίπεδου πυκνωτή (Εικόνα 9) και μετρούν την κατόγκο υγρασία έμμεσα μέσω μετρήσεων της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους στο πεδίο των συχνοτήτων (frequency domain) (Decagon, 2009, 2010 και 2012). Ο 10HS έχει προέλθει από εξέλιξη του EC5 (Viscontik.α., 2014).

Γενικά η Decagon προσφέρει ευρεία σχετική πληροφόρηση και υλικό σε λήδα της στο διαδίκτυο (Decagon, 2014).

Βασικά χαρακτηριστικά του EC5

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-Kizitok.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.

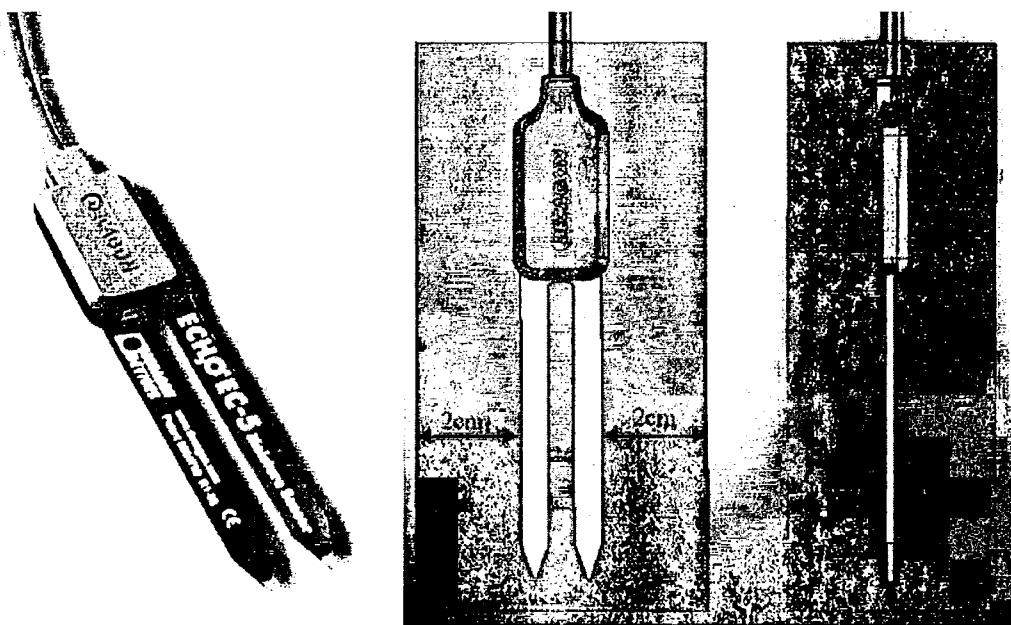
Τα χαρακτηριστικά του EC5 (Εικόνα 11) συνοψίζονται στα ακόλουθα σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο της εταιρείας για τον αισθητήρα (Decagon, 2012):

- διαστάσεις αισθητήρα: 8.9cm x 1.8cm x 0.7cm
- μήκος λαμών: 5 cm
- μήκος καλωδίου: 5m τυπικό (ειδικά μήκη αλλά και επεκτάσεις καλωδίου είναι διαθέσιμες)
- τύπος σύνδεσης: βύσμα 3.5 mm (stereo plug) ή γυμνά καλώδια (Εικόνα 12)
- συμβατότητα 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)
- θερμοκρασία λειτουργίας: -40 έως +60 °C
- εύρος μέτρησης κατόγκο υγρασία (θ ή VWC): 0-100 m³m⁻³ (0 -100% VWC, μετρά έως τον κορεσμό)
- ακρίβεια, VWC: $\pm 3\%$ VWC (± 0.03 m³m⁻³) χωρίς βαθμονόμηση – χρησιμοποιώντας τη γενική εξίσωση μετατροπής σήματος σε υγρασία, για

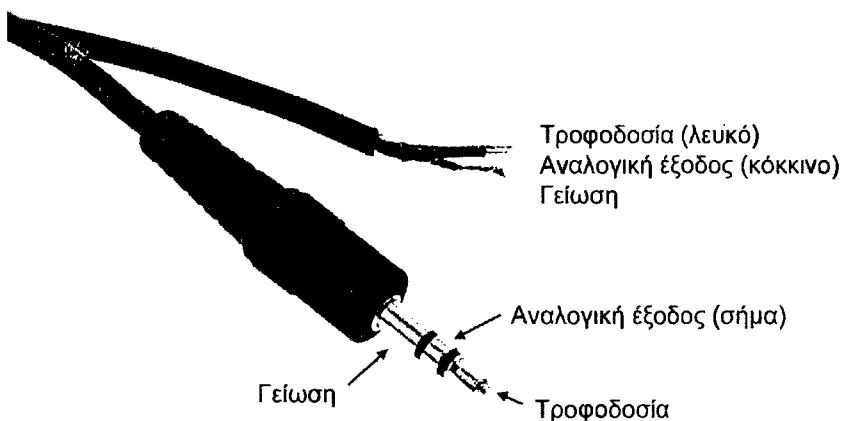
τυπικά ανόργανα εδάφη καιγιαηλεκτρικήαγωγιμότητα (EC) $<10\text{ dSm}^{-1}$ και $\pm 1\text{--}2\%$ VWC (± 0.01 έως $0.02\text{ m}^3\text{m}^{-3}$) μετά από ειδική βαθμονόμηση για το κάθε υπόστρωμα / χώμα

- απαιτήσεις για τροφοδοσία(excitation): 2.5VDC έως 3.6VDC στα 10mA
- σήμαεξόδου: $10\text{--}40\%$ της τάσης τροφοδοσίας ($250\text{--}1000\text{mV}$ για τροφοδοσία 2500mV)

Ο όγκος ευαισθησίας είναι ένα ελλειψοειδές στερεό με όγκο 181cm^3 (Cobos, 2010β). Για να αυξήσει την ανάλυση του σήματος εξόδου, η Decagon χρησιμοποιεί για την καταχώρηση των μετρήσεων όλα τα νούμερα του μπορούν να αποθηκευτούν στα 12-bit (4096 συνδυασμοί) (Decagon, 2012).



Εικόνα 11DecagonEC5 και όγκος ευαισθησίας του αισθητήρα (CobosD.R., 2008)



Βασικά χαρακτηριστικά του 10HS

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 9). 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 Viscontik.α. (2014).

$$t = RxC \ln [(V-V_f)/(V_i-V_f)]$$

και αν αντικατασταθεί το C από την **Σφάλμα! Άγνωστη παράμετρος αλλαγής.**, προκύπτει

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

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

ο συνδυασμός των δύο αυτών σχέσεων δίνει σχέση παρόμοια με την γενική θεωρητική προσέγγιση που παρουσιάζεται στην Εξίσωση 8, συνδέοντας τη διηλεκτρική επιδεκτικότητα (διηλεκτρική σταθερά) με την τάση εξόδου – μετρούμενο σήμα του αισθητήρα

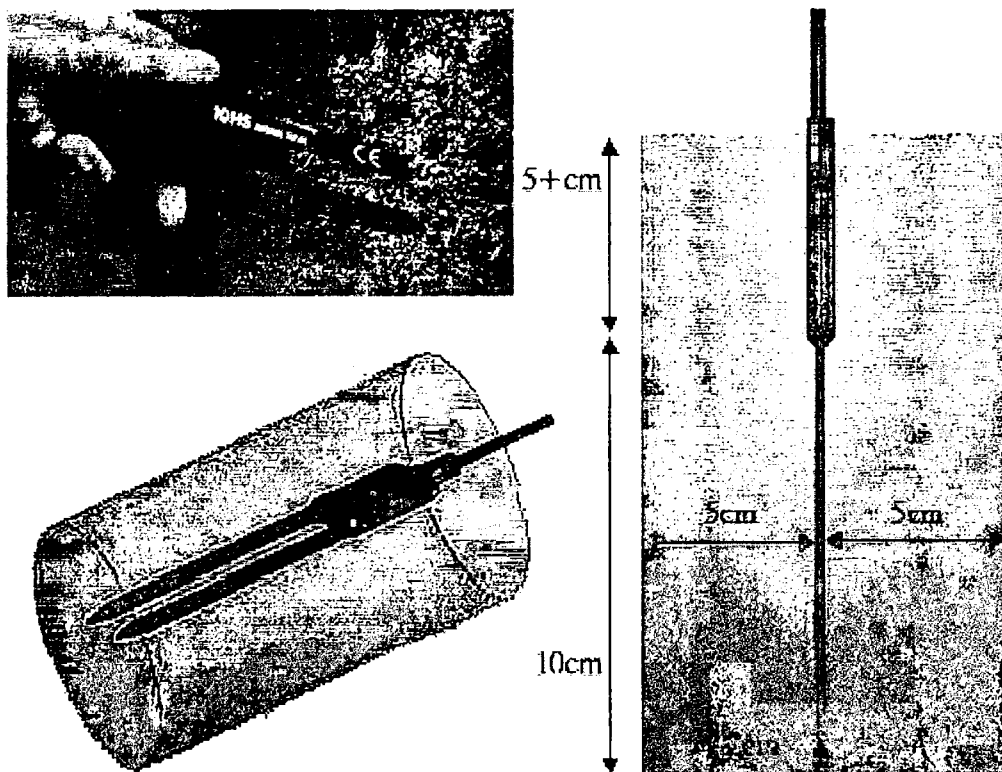
Εξίσωση 9 Εξισώσεις υπολογισμού της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους με βάση το τεχνικό φυλλάδιο του 10HS (Decagon, 2009)

Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του αισθητήρα (Decagon, 2009), ο10HS:

- 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
- χρησιμοποιεί την βελτιστοποιημένη συχνότητα λειτουργίας που η εταιρεία εφάρμοσε για πρώτη φορά το 2005 στον EC5
- έχει ενσωματωμένο ρυθμιστή τάσης εισόδου που επιτρέπει την τροφοδοσία του αισθητήρα με συνεχή τάση από 3 έως 15 V χωρίς ανάγκη για ειδική βαθμονόμηση (αυτό το χαρακτηριστικό δεν είναι διαθέσιμο στον EC5)
- 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 13 Decagon 10HS και όγκος ευαισθησίας του αισθητήρα (Cobos, 2008α)

Τα χαρακτηριστικά του 10HS (Εικόνα 13) συνοψίζονται στα ακόλουθα (Decagon, 2009 και 2010, Cobos, 2008 α και β):

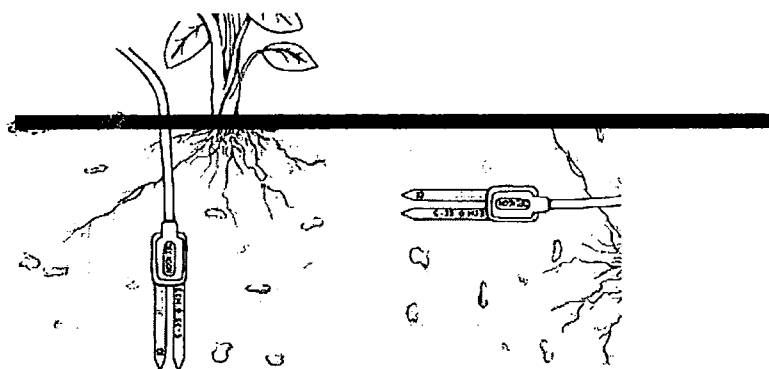
- μήκος λαμών: 10 cm
- μήκος καλωδίου: 5m τυπικό (ειδικά μήκη αλλά και επεκτάσεις καλωδίου είναι διαθέσιμες)
- τύπος σύνδεσης: βύσμα 3.5 mm (stereoplug) ή γυμνά καλώδια (Εικόνα 12)
- συμβατότητα με καταγραφικά: Decagon: Em50, Em50R, Em5b, ProCheck handheld reader, Campbell Scientific: CR10X, 21X, 23X, CR850, 1000, 3000 (χωρίς να αποκλείονται και άλλα που πληρούν τις απαιτήσεις τροφοδοσίας και λήψεις σήματος του αισθητήρα)
- θερμοκρασία λειτουργίας: λειτουργία: 0 – 50 °C, επιβίωση: -40 to 50 °C
- εύρος μέτρησης:
 - ο φαινόμενη διηλεκτρική περατότητα (ϵ_a , apparent dielectric permittivity): 1 (αέρας) έως 50
 - ο κατόγκο υγρασία (θ ή VWC): 0 – 0.57 m³/m³ (0 -57% VWC)
- ακρίβεια:
 - ο ϵ_a (φαινόμενη διηλεκτρική επιδεκτικότητα): ± 0.5 για ϵ_a από 2 έως 10, ± 2.5 για ϵ_a από 10 έως 50
 - ο VWC: $\pm 3\%$ VWC (± 0.03 m³/m³) 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/m³) μετά από ειδική βαθμονόμηση για το κάθε υπόστρωμα / χώμα
- ανάλυση:
 - ο ϵ_a : 0.1 για ϵ_a από 1 έως 30, 0.2 για ϵ_a από 30 έως 50
 - ο VWC: 0.0008 m³/m³ (0.08% VWC) σε ανόργανα εδάφη από 0 έως 0.50 m³/m³ (0-50% VWC)
- χρόνος μέτρησης: 10 ms (milliseconds)
- απαιτήσεις για τροφοδοσία (excitation): από 3VDC στα 12mA έως 15 VDC στα 15 mA
- σήμα εξόδου: 300 – 1250 mV, ανεξάρτητα από την τάση εισόδου (αρκεί να είναι εντός των ορίων που αναφέρθηκαν παραπάνω)

Αισθητήρες στο πεδίο και μετρήσεις

Σύμφωνα με τον Campbell

(2013)

χρειάζονται περισσότεροι από δύο αισθητήρες για την αξιόπιστη μέτρηση του υδατικού ύψους υγιεινός 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 14 Προτεινόμενος προσανατολισμός επιπέδου αισθητήρα ως προς επίπεδο εδάφους ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις από την προς τα κάτω κίνηση του νερού (Decagon, 2012)

Σύμφωνα με την Decagon (2012), όσα 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 και αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τον αισθητήρα. 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 και αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τις μετρήσεις. H Bissley (2012), στο πλαίσιο μίας παρουσίασης της Decagon συνοψίζει όσα πρέπει να ληφθούν υπόψη σχετικά με τη θέση εγκατάστασης:

- Καθορίστε το στόχο αξιοποίησης των δεδομένων:

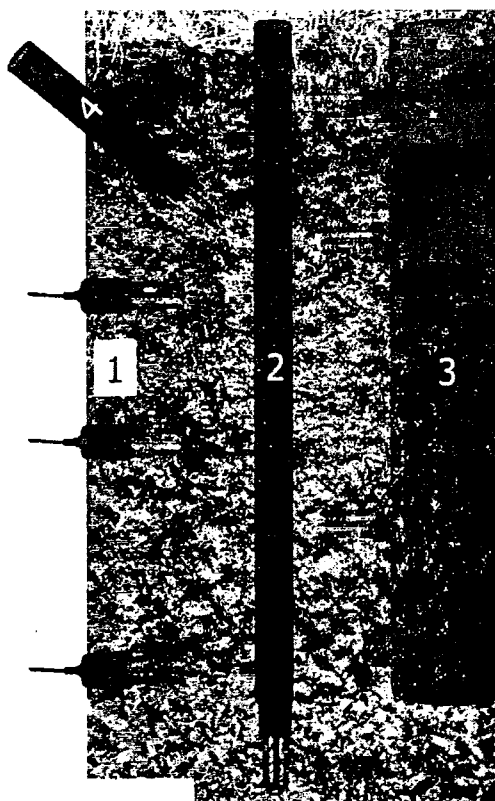
- ο Διαχείριση άρδευσης ή απλά συλλογή δεδομένων για παρακολούθηση της υγρασίας εδάφους
- Σκεφτείτε τι μπορεί να προκαλεί χωρική διαφοροποίηση στην υγρασία εδάφους:
 - ο Διαφοροποιήσεις από μεταχείριση σε μεταχείριση ή από στάση σε στάση του αρδευτικού συστήματος;
 - ο Μορφή ανάγλυφου (πχ. κλίσεις, ύπαρξη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

Η Decagon (2012) αναφέρει την ακόλουθη διαδικασία εγκατάστασης:

1. Αφού σκάψετε μίαν τρύπα έως το επιθυμητό βάθος, σπρώξτε τον αισθητήρα στο αδιάτακτο 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 ολόσος 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 10 cm 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 15 Προτεινόμενοι τρόποι εγκατάστασης (Campbell, 2017β)

3. Και στις δύο περιπτώσεις:

- a. Αν δεν μπορεί να μπει εύκολα (παρά το ότι οι λάμες έχουν σχήμα που βοηθά σε αυτό) θα πρέπει να διαβρέξετε το χώμα ή να δημιουργήσετε μία σχισμή-οδηγό με τη λάμα τοποθέτησης ή άλλο κατάλληλο εργαλείο (Decagon 2009 και 2017γ).
- b. Σιγουρευτείτε ότι ο λόγος αισθητήρας μαζί με την κεφαλή του όπου βρίσκεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι εντός του εδάφους.
- c. Χρειάζεται προσοχή να μην λυγίσει το σημείο που ενώνει τον αισθητήρα με το καλώδιο.
- d. 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.

Σύμφωνα με τον Campbell (2017β), οι EC5 και 10HS, μπορούν να τοποθετηθούν και υπό γωνία 45°. 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. Η λογική αυτή βασίζεται στο ότι η ροή του νερού προς τα βαθύτερα στρώματα είναι εντονότερη ροή σε τμήματα του εδάφους όπου υπάρχουν ρωγμές ή οπές από ρίζες, γεωσκώληκες κ.ο.κ. Το φαινόμενο ονομάζεται επιλεκτική ροή (preferential flow).

Ακόμη συστήνεται να υπάρχει προστασία των καλωδίων των αισθητήρων από το καταγραφικό έως και περίπου 5cm εντός του εδάφους. Η εμπειρία (Τσιρογιάννης, 2017) έχει δείξει ότι επειδή υπάρχουν περιπτώσεις που πρέπει να γίνει αντικατάσταση αισθητήρα, η χρήση σωλήνα ΡΕ ή σπирάλ για το σκοπό αυτό δεν είναι τόσο πρακτική και συστήνεται η χρήση ηλεκτρολογικών καναλιών με καπάκι. 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).

Η Decagon διαθέτει και ένα videoσχετικά με την εγκατάσταση των αισθητήρων (Decagon, 2017γ).

Προβληματισμός 6 Σχετικά με τη θέση τοποθέτησης τόσο ως προς την έκταση του αγρού όσο και ως προς το βάθος εντός του εδάφους

Προφανώς υπάρχει ένα μεγάλο θέμα τόσο ως προς το πώς θα επιλεγεί μία αντιπροσωπευτική θέση σε ένα αγρό, πόσοι αισθητήρες χρειάζονται π.χ. ανά στρέμμα ή εκτάριο ώστε να λαμβάνεται αντιπροσωπευτική μέτρηση αλλά και σε ποιο βάθος πρέπει αυτοί να τοποθετούνται ανάλογα με την καλλιέργεια (Pardossi κ.α., 2009). Σε ετήσιες δε καλλιέργειες το βάθος του ριζοστρώματος εξελίσσεται κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου, ενός στις πολυετείς με τα έτη έως την ωριμότητα της φυτείας.

Μία πολύ ενδιαφέρουσα διάσταση του ζητήματος αυτού δίνεται από τον Campbell (2014) σε ένα σεμινάριο που δεν είναι πια διαθέσιμο στο διαδικτυακό τόπο της Decagon. Σύμφωνα με την αναφορά αυτή η απάντηση θα μπορούσε να δοθεί από την στατιστική, και εξαρτάται από ζητούμενη ακρίβεια. Ισχύει $S_m = S/n^{1/2}$ ή $n = (2S/\epsilon)^2$ (όπου n ο αριθμός των δειγμάτων, S_m μέση τιμή και S τυπική απόκλιση, ε η ακρίβεια = $\pm 2S$). Η αναφορά παρουσιάζει και ένα παράδειγμα: πόσα δείγματα χρειάζονται για να πετύχουμε ακρίβεια 1% εάν η τυπική απόκλιση είναι 3%; Η απάντηση είναι $n = (2 \times 3 / 1)^2 = 36$ ή σε πρακτικούς όρους: περισσότερα από όσα μπορείς να πληρώσεις.

Απεγκατάσταση

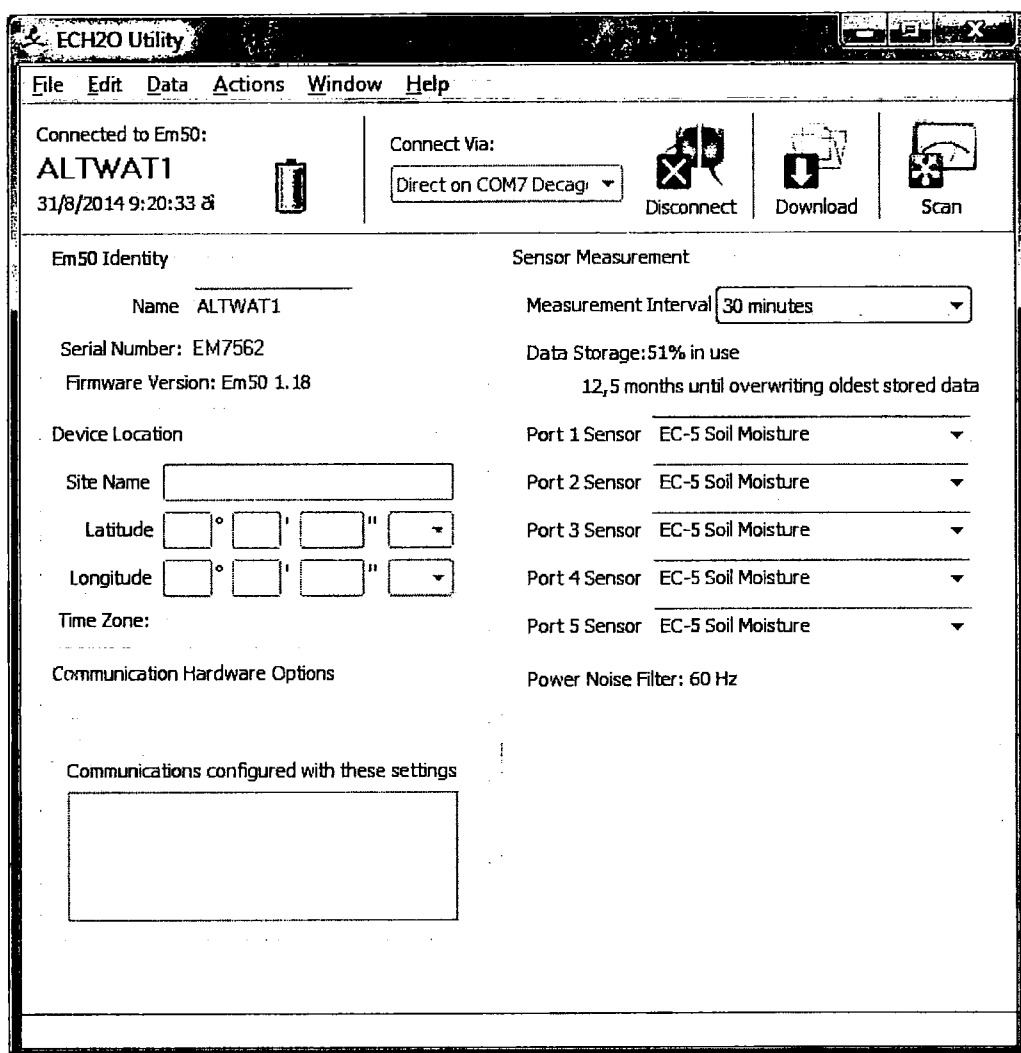
Κατά την αφαίρεση του αισθητήρα από το έδαφος δεν θα πρέπει να τραβιέται από το καλώδιο (Decagon 2009 και 2012). Σε κάθε περίπτωση, η εμπειρία έχει δείξει ότι η απεγκατάσταση είναι μία απαιτητική εργασία που χρειάζεται υπομονή και προσεκτικούς χειρισμούς έως ότου απελευθερωθεί από το έδαφος ο αισθητήρας.

Το καταγραφικό em50 της Decagon και το λογισμικό ECH20 Utility

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

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 (cable usb στο υπολογιστή και stereoplug 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.



Εικόνα 16Τυπικόπαράθυροτου λογισμικού ECH2O Utility

Κανονικοποίηση

Η κανονικοποίησης (normalization) έχει ως σκοπό την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που προέρχονται από τον ίδιο τον αισθητήρα ως κατασκευή. Έχει ως αποτέλεσμα μία εξίσωση μετατροπής σήματος να καλύπτει όλους τους αισθητήρες ενός μοντέλου, με άλλα λόγια σημαίνει ότι αν έχω μία εξίσωση μετατροπής σήματος (μετά από βαθμονόμηση, βλέπε στη συνέχεια) του 10HS σε κατ'όγκο υγρασία, η εξίσωση αυτή θα ισχύει για όλους τους 10HS. Οι Starr και Paltineanu (1997) (από Starr και Paltineanu (2002)) περιγράφουν την διαδικασία κανονικοποίησης με μετρήσεις σε νερό και αέρα, η οποία καταλήγει στην εύρεση μίας εξίσωσης για την παράμετρο SF (scaled frequency) βάση της οποίας κανονικοποιούνται οι μετρήσεις των αισθητήρων.

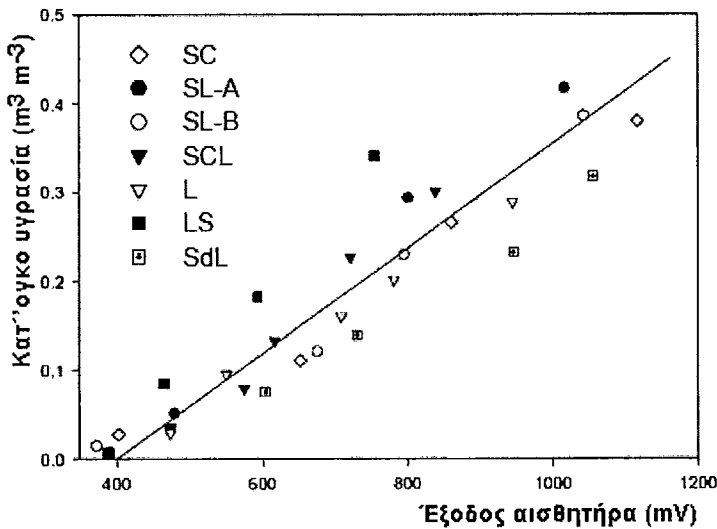
Η Decagon (Landry, 2012) παρέχει μετρήσεις για αισθητήρες της, μεταξύ των οποίων και οι EC5 και 10HS για νερό βρύσης και αέρα. Σύμφωνα με τους Cobos και Chambers (2010): "η ακρίβεια, η ανάλυση, η επαναληψιμότητα και η συμφωνία μεταξύ των αισθητήρων της σειράς ECH2O είναι άριστη και επομένως αν εφαρμοστεί η βαθμονόμηση για ένα έδαφος για έναν θα ισχύει και για τους υπόλοιπους". Σύμφωνα με την Decagon (Campbell, 2001, Campbell, 2014), οι διηλεκτρικοί αισθητήρες της εταιρείας, έχουν ελεγχθεί κατά τη φάση κατασκευής έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η εξίσωση μετατροπής σήματος (μετά από βαθμονόμηση, βλέπε στη συνέχεια) που προκύπτει για έναν αισθητήρα να ισχύει για όλους τους άλλους του ίδιου μοντέλου.

Ανάγκη για βαθμονόμηση

Σύμφωνα με τους Starr και Paltineanu (2002) εάν η βασική ανάγκη που καλύπτει η χρήση των διηλεκτρικών αισθητήρων, είναι η εύρεση σχετικών διαφορών της περιεχόμενης στο έδαφος υγρασίας, τότε οι γενικές εξισώσεις μετατροπής σήματος που παρέχονται από τον κατασκευαστή ή παρέχονται για μία γενική κατηγορία εδάφους από τη βιβλιογραφία μπορεί να δίνουν αποδεκτά αποτελέσματα.

Σχετικά με την ακρίβεια των αισθητήρων EC5 και 10HS έγινε αναφορά στα χαρακτηριστικά των αισθητήρων. Οι γενικές εξισώσεις βαθμονόμησης για οργανικά εδάφη αλλά και κάποιες εξισώσεις για ιδιαίτερες κατηγορίες παρουσιάζονται στα τεχνικά φυλλάδια των αισθητήρων αλλά και σε τεχνικές αναφορές του κατασκευαστή (Decagon, 2009, 2010, 2011 και 2012) και αναφέρονται παρακάτω. Ο Campbell (2001) σε σημείωμα εφαρμογής της Decagon παραθέτει πληροφορία σχετικά με την επίδραση των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους, του περιεχόμενου σε αυτό νερού και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος στις μετρήσεις των πυκνωτικών διηλεκτρικών αισθητήρων της σειράς ECH2O. Στο πλαίσιο της σχετικής αξιολόγησης (δεν αφορά τους EC5, 10HS) μελετήθηκε μία σειρά από εδάφη (σύμβολο, % άμμος, ιλύς, πηλός και EC dS m⁻¹): Πηλοαμμώδες (LS, 87, 3, 10, 0,04), Αμμοπηλώδες (SdL, 79, 9, 12, 0,34), Πηλός (L, 47, 29, 24, 0,09), Ιλυοπηλώδες (SL-A, άγνωστες αναλογίες, 0,20), Ιλυοπηλώδες (SL-B, 3, 71, 26, 0,20), Ιλυοαργιλοπηλώδες (SCL, 3, 68, 29, 0,09) και Ιλυοαργιλώδες (SC, 17, 41, 42, 1,48), τα οποία όμως προέκυψαν από τεχνητή ανάμιξη. Χρησιμοποιήθηκε δοχείο διαστάσεων 30x15x15cm, όπου το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε γύρω από τον αισθητήρα προσπαθώντας να προσεγγίσουν την επιθυμητή κάθε φορά πυκνότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν μία πρακτικά γραμμική σχέση εξόδου (mV) και υγρασίας εδάφους για όλα τα εδάφη που δοκιμάστηκαν (Εικόνα 17), όμως όταν αυξάνει η

αγωγιμότητα και για μεγάλα ποσοστά άμμου ή αργίλου τότε παρουσιάζονται ζητήματα.



Εικόνα 17 Σχέση εξόδου αισθητήρα με κατ'όγκο υγρασία για αισθητήρες ECH2O της Decagon (Campbell, 2001)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η αξιολόγηση του EC5 (δυστυχώς δεν έχει γίνει έως τώρα αντίστοιχη δουλειά για τον 10HS) από την Irrigation Association (2008) στο πλαίσιο των δράσεων SWAT (Smart Water Application Technologies) Calibration Reports (Πίνακας1).

Πίνακας1 Εξισώσεις βαθμονόμησης για μετατροπή σήματος EC5 σε υγρασία, μετρήσεις μεταξύ της υδατοικανότητας και μικρότερες τιμές θγια εύρος υγρασίας που προτάθηκε από τον κατασκευαστή (Irrigation Association, 2008)

Τύπος εδάφους	Εξίσωση μετατροπής σήματος ($Y=\theta$ και $X=\text{εξόδος σε mV}$)
Λεπτόκοκκα εδάφη	$Y = 0,7499X + 0,1538$
Μέσης μηχανικής σύστασης εδάφη	$Y = 0,9367X + 0,0665$
Χονδρόκοκκα εδάφη	$Y = 0,9622X + 0,0469$
Έδαφος στους 20°C	$Y = 0,8238X + 0,0646$
Έδαφος στους 30°C	$Y = 0,9824X + 0,0441$
Παγωμένο έδαφος	$Y = 0,721X + 0,0793$
Λεπτόκοκκο έδαφος που αρδεύεται με νερό που έχει $EC=1,5 \text{ dSm}^{-1}$	$Y = 0,8343X + 0,1498$

Τύπος εδάφους	Εξίσωση μετατροπής σήματος ($Y \equiv \theta$ και $X = \text{έξοδος σε mV}$)
Μέσης μηχανικής σύστασης έδαφος που αρδεύεται με νερό που έχει $EC=1,5 \text{ dSm}^{-1}$	$Y = 0,7243X + 0,0400$
Μέσης μηχανικής σύστασης έδαφος που αρδεύεται με νερό που έχει $EC=3 \text{ dSm}^{-1}$	$Y = 0,6452X + 0,0676$
Χονδρόκοκκο έδαφος που αρδεύεται με νερό που έχει $EC=1,5 \text{ dSm}^{-1}$	$Y = 1,047X + 0,0103$

Οι Cobos και Chambers (2010) παρουσιάζουν αναλυτικά μία μέθοδο βαθμονόμησης, μέθοδος η οποία παρουσιάζεται από την εταιρεία και σε video Decagon (2017β). Η Decagon αναλαμβάνει και η ίδια την βαθμονόμηση ως ειδική υπηρεσία. Μάλιστα στο πλαίσιο υποστήριξης ερευνητικής δραστηριότητας αποστέλλει δωρεάν σχετικές εξισώσεις (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** Landry, 2012).

Μελέτες που έχουν γίνει από ανεξάρτητους ερευνητές (Czarnomskik.α., 2005 από Cobos and Chambers, 2010) καταλήγουν ότι η βαθμονόμηση των αισθητήρων EC_{H_2O} έχει ως αποτέλεσμα να έχουν ακρίβεια συγκρινόμενη με αυτή των αισθητήρων TDR, λαμβάνοντας βέβαια υπόψη και τη σχέση κόστους των αισθητήρων. Άλλοι ερευνητές (Kodešová, 2011 για EC_5) δημοσίευσαν συντελεστές βαθμονόμησης που είναι με τη σειρά τους συναρτήσεις παραμέτρων του εδάφους (π.χ. ποσοστού σε άμμο και αλατότητα). Σύμφωνα με τους Kargaski και Soulis (2012), που δοκίμασαν πειραματικά στο εργαστήριο τον 10HS σε διάφορα υλικά με γνωστές διηλεκτρικές ιδιότητες, υπάρχει ευαισθησία στον τύπο του εδάφους, γεγονός που δημιουργεί ανάγκη για ξεχωριστή βαθμονόμηση για κάθε έδαφος.

Οι Visconti κ.α. (2014) μελέτησαν τον 10HS στο πεδίο για 20 διαφορετικά εδάφη των τύπων αργιλοπηλώδες, αμμοαργιλοπηλώδες και ιλυοαργιλώδες με διάφορες αναλογίες άμμου, ιλύος και αργίλου και διάφορες τιμές EC . Ανέπτυξαν εξισώσεις βαθμονόμησης που συνδέουν την διηλεκτρική σταθερά του εδάφους (κ_i) με την κατ'όγκο υγρασία και βρήκαν ότι ακόμη και με χρήση της εξίσωσης βαθμονόμησης ο 10HS έδινε περισσότερη υγρασία κατά $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ κατά μέσο όρο για αργιλώδη εδάφη με EC έως $1,7 \text{ dSm}^{-1}$. Καταλήγουν όμως ότι ο 10HS είναι καλύτερα να βαθμονομείται για το έδαφος για το οποίο θα χρησιμοποιηθεί.

Σε κάθε περίπτωση η βαθμονόμηση δεν επιλύει συστηματικά (χρονικά ή χωρικά) ή τυχαία (φυσική τυχαιότητα, κακές μετρήσεις (προβλήματα στους αισθητήρες, την

τοποθέτησή τους, την ερμηνεία των αποτελεσμάτων κοκ) σφάλματα που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσει (Campbell, 2014).

Οι πίνακας που ακολουθεί (Πίνακας 1) συγκεντρώνει τη σχετική πληροφορία που προέρχεται από υλικό που διανέμει η Decagon. Σε αυτό φαίνεται ότι γενικά η ακρίβεια των αισθητήρων είναι από $\pm 3\%$ VWC, αλλά μπορεί να βελτιωθεί στο $\pm 1\%$ VWC μετά από βαθμονόμηση.

Πίνακας 1 Συγκεντρωτικά στοιχεία σχετικά με την ακρίβεια των αισθητήρων EC5 και 10HS σύμφωνα με πηγές της Decagon Inc.

Σχετικά με την ακρίβεια του EC5	Σχετικά με την ακρίβεια του 10HS	Πηγή
ακρίβεια, VWC: $\pm 3\%$ VWC ($\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) χωρίς βαθμονόμηση – χρησιμοποιώντας τη γενική εξίσωση μετατροπής σήματος σε υγρασία, για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) $< 8 \text{ dS m}^{-1}$ και $\pm 1\%$ VWC ($\pm 0,01$ έως $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) μετά από ειδική βαθμονόμηση για το κάθε υπόστρωμα / χώμα στο κεφάλαιο της ίδιας αναφοράς όπου παρατίθεται η γενική εξίσωση αναφέρει ότι ισχύει για όλα τα ανόργανα εδάφη με EC από $0,1 \text{ dS/m}$ έως 10 dS/m .		Decagon, 2012
	ea: ± 0.5 για ea από 2 έως 10, ± 2.5 για ea από 10 έως 50 VWC: $\pm 3\%$ VWC ($\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) χωρίς βαθμονόμηση – χρησιμοποιώντας τη γενική εξίσωση μετατροπής σήματος σε υγρασία, για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) $< 10 \text{ dS m}^{-1}$ και $\pm 2\%$ VWC ($\pm 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) μετά από ειδική βαθμονόμηση για το κάθε υπόστρωμα / χώμα	Decagon, 2009
	λόγω του ότι έχει μεγαλύτερο ευαισθησίας από αυτόν του EC5) χρειάζεται ειδική βαθμονόμηση όταν χρησιμοποιείται με άλλα συστήματα.	Decagon, 2009
	λόγω της πολυπλοκότητας των εδαφών η ακρίβεια στη μέτρηση της VWC μπορεί να είναι χαμηλή παρά την ακριβή μέτρηση της διηλεκτρικής επιδεκτικότητας. Αυτό μπορεί να συμβεί εύκολα σε πολύ συμπιεσμένα εδάφη, σε εδάφη με πολύ μικρή φαινόμενη πυκνότητα, οργανικά εδάφη και εδάφη που περιέχουν ανόργανα	Decagon, 2009

Σχετικά με την ακρίβεια του EC5	Σχετικά με την ακρίβεια του 10HS	Πηγή
	συστατικά με υψηλή διηλεκτρική επιδεκτικότητα (π.χ. άμμοι TiO ₂). Επιπλέον η ακρίβεια του 10HS μπορεί να έχει πρόβλημα για εδάφη με μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα (>10 dS/m solution EC). Για αυτά τα εδάφη συστήνεται να γίνεται ειδική βαθμονόμηση η οποία μπορεί να φθάσει την ακρίβεια στο 1-2%.	
Λόγω διαφοροποιήσεων στην φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους, στα συστατικά του εδάφους, στην δομή του και στην αλατότητά του, η γενική εξίσωση που χρησιμοποιούν οι αισθητήρες ECH ₂ O (μεταξύ των οποίων και οι EC5 και 10HS), έχει ακρίβεια περίπου ±3-4% (±0,03 - ±0,04 m ³ m ⁻³) για τα περισσότερα ανόργανα εδάφη και περίπου ± 5% (±0,05 m ³) για τα υποστρώματα υδροπονίας, το έδαφος γλαστρικών κοκ. Η βαθμονόμηση μπορεί να επιτύχει ακρίβεια ± 1-2% (±0,01 με ±0,02 m ³ m ⁻³) για όλα τα εδάφη και τα υποστρώματα και έτσι συστήνεται από την Decagon.		Cobos και Chambers, 2010
Δεν έχουν όλα τα εδάφη τις ίδιες διηλεκτρικές ιδιότητες. Λόγω διαφοροποιήσεων στην δομή και στην αλατότητα, η γενική εξίσωση για ανόργανα εδάφη δίνει ακρίβεια της τάξης του ± 3-4% για τα περισσότερα υποστρώματα έως και λεπτόκοκκης δομής ανόργανα εδάφη, ενώ η ακρίβεια για εδάφη χονδρόκοκκης δομής ή εδάφη με υψηλή αγωγιμότητα μπορεί να διαφέρει έως και ± 10%. Σε κάθε περίπτωση η ακρίβεια φθάνει στο ±1-2% για όλα τα εδάφη εάν γίνει βαθμονόμηση για αυτά.		Decagon, 2017β (στη σελίδα της Decagonπου φιλοξενεί το video)
Η γενική εξίσωση μετατροπής σήματος σε υγρασία με την οποία έρχονται από το εργοστάσιο οι αισθητήρες είναι μια χαρά για μεγάλο εύρος ανόργανων εδαφών. Η αναμενόμενη ακρίβεια είναι +/-3%. Αν θέλουμε μεγαλύτερη ακρίβεια ή αν χρησιμοποιούμε κάποιο ειδικό υπόστρωμα (όπως π.χ. στην υδροπονία) τότε πρέπει να κάνουμε βαθμονόμηση. Τα αναμενόμενα οφέλη σε ακρίβεια στα ανόργανα εδάφη είναι μικρά, γενικά συνιστά να μην κάνουμε βαθμονόμηση για κοινά εδάφη.		Galloway, 2014

Γενική εξίσωσημετατροπής σήματος τουEC5 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 Torrr (Εξίσωση 6) από την Εξίσωση 10.

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

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

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

Εξίσωση 10 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 κατόγκο υγρασία ισχύει για όλα τα ανόργανα εδάφη με ECαπό 0.1 dSm⁻¹ έως 10 dSm⁻¹ και παρέχει -εάν ο αισθητήρας τοποθετηθεί σωστά- ακρίβεια ±3% VWC (0,03 m³m⁻³) ή και καλύτερη (Εξίσωση 11).

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

ή

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

όπου:

θ η κατόγκο υγρασία του εδάφους

RAW είναι το σήμα εξόδου ενός καταγραφικού της Decagon που παρέχει τάση εισόδου στο αισθητήρα 3V (π.χ. am50) και

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

Εξίσωση 11 Γενική εμπειρική εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε κατόγκο υγρασία για τον EC5 (Decagon, 2012)

Η Εξίσωση 11 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 3^{ου} βαθμού (Decagon, 2012).

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 12).

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 ($0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$) 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 rawouuntsσε 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 (Viscontik.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.

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

ή

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

όπου:

ε_a 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 12 Γενική εμπειρική εξίσωση μετατροπής σήματος εξόδου σε διηλεκτρική επιδεκτικότητα για τον 10HS (Decagon, 2009)

$$\theta = 1.17 \times 10^{-9} \times \text{RAW}^3 - 3.95 \times 10^{-6} \times \text{RAW}^2 + 4.90 \times 10^{-3} \times \text{RAW} - 1.92 \text{ (για καταγραφικά της Decagon)}$$

ή

$$\theta = 2.97 \times 10^{-9} \times \text{mV}^3 - 7.37 \times 10^{-6} \times \text{mV}^2 + 6.69 \times 10^{-3} \times \text{mV} - 1.92 \text{ (για άλλα συμβατά με τον αισθητήρα καταγραφικά)}$$

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

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 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.

Η τυπική διαδικασία βαθμονόμησης που προτείνει η Decagon

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

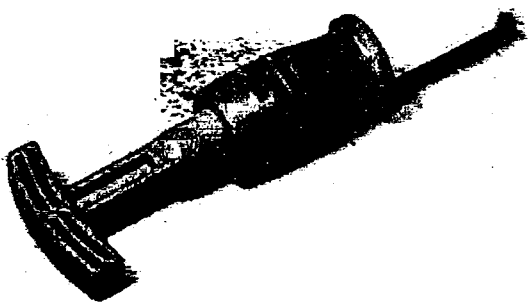
Εξοπλισμός που απαιτείται

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:
 - να επιτρέπει να επιτρέψει την τοποθέτηση του εδάφους έτσι ώστε να προσεγγίζει την φαινόμενη πυκνότητα που είχε το έδαφος στον αγρό.
 - 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. Κόσκινοχώματος (1x): 2-5mm (CobosκαιChambers, 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 23) 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 19 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 σχετικώς σταθερή θερμοκρασία στα επίπεδα των 105 – 110 °C.
10. Λάμα τοποθέτησης για αισθητήρες. Σύμφωνα με την Decagon (2017β) αντί για το ειδικό εργαλείο (λάμα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένα μεγάλο μαχαίρι.



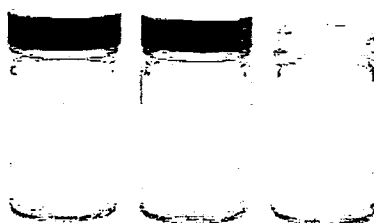
Δειγματολήπτης ESS Core N' One 25g της Environmental Sampling Supply⁹

Εικόνα 18 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:

⁹Ο δειγματολήπτης που παρουσιάζει το video της Decagon(2007β) βρέθηκε στα: <http://www.ttenvirc.com/store/lock-nload-handle> και <http://www.ttenviro.com/store/lock-nload-syringe> ενώ σχετικές με το προϊόν πληροφορίες βρέθηκαν και στα <http://www.ttenviro.com/store/powerstop-handle> και <https://www.mgscientific.com/products/en-core-soil-sampling-tools/>

11. Δοχεία λήψης δειγμάτων αδιατάρακτου εδάφους (1-3x) για κάθε τύπο εδάφους. Ωστε να μπορεί να εκτιμηθεί η φαινόμενη ειδική πυκνότητα (fieldbulkdensity).
12. 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.
13. Μυστρί και πλαστικά γάντια για ανακάτεμα του εδάφους κατά τα βήματα ύγρανσης



Εικόνα 19 Δοχεία εδαφικών δειγμάτων



Εικόνα 20 Δειγματολήπτης αδιατάρακτου δείγματος εδάφους

Προβληματισμός 7Σχετικά με το δοχείο βαθμονόμησης, τα κόσκινα, την ποσότητα εδάφους που θα ληφθεί από τον αγρό και τον δειγματολήπτη εδάφους στη διάρκεια της βαθμονόμησης

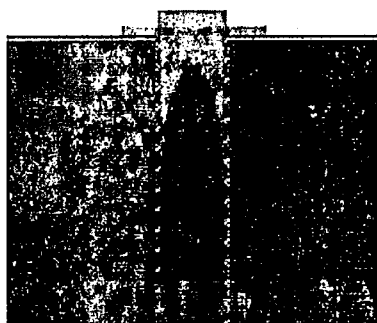
Στο πλαίσιο της διαδικασίας ομογενοποίησης του δείγματος η αναφορά που παρέχεται από την Decagon (SSSA / Starr και Paltineanu (2002)) δεν δίνει αρκετή σχετική πληροφορία. Στο οδηγό των Schumaohar κ.α. (1990) παρέχονται πολύ περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη διαδικασία αυτή.

Προφανώς είναι καλό να έχουμε και λίγο περισσότερο χώμα από τα 4Lμια και όπως θα φανεί στην προτεινόμενη διαδικασία βαθμονόμησης μπορεί να μας χρειαστεί σε κάποια σημεία επιπλέον χώμα.

Το δοχείο βαθμονόμησης είναι καλύτερα να έχουν κυλινδρικό σχήμα ώστε να είναι εύκολοι οι υπολογισμοί που απαιτούνται.

Τα κόσκινα 2-5mmή 5mmδεν μπορεί να δώσουν το ίδιο αποτέλεσμα.

Αντί εμπορικών δειγματοληπτών, προτείνεται η εναλλακτική λύση της χρήσης πλαστικών ή μεταλλικών σωλήνων. Σωλήνες από σχετικά τραχύ πλαστικό (π.χ. ακόμη και μία κατασκευή από σύριγγα στην οποία έχει αφαιρεθεί η άκρη) ασκούν αρκετή τριβή στο έδαφος και το παρασέρνουν.



Σε σωλήνες από λείο μέταλλο π.χ. χαλκοσωλήνες η επίδραση αυτή είναι πολύ μικρότερη. Σε κάθε περίπτωση η εμπειρία έδειξε ότι είναι καλύτερα να χρησιμοποιούνται λείοι μεταλλικοί σωλήνες διαμέτρου τουλάχιστον 1" με σαφή ένδειξη μέχρι που να μπαίνουν στο έδαφος και όταν μπαίνουν έως την ένδειξη να θεωρείται ότι έχει ληφθεί ο όγκος που αντιστοιχεί έως την ένδειξη άσχετα εάν η

επιφάνεια του εδάφους μέσα τους έχει υποχωρήσει.

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 (Εξίσωση 1).
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 1, με γνωστά τα ρβ και τη διατομή του δοχείου λύνουμε ως προς η 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.
 - 4.1. Στην περίπτωση του EC-5, μπορούμε να βάλουμε όλο το χώμα στο δοχείο πριν το τοποθετήσουμε τον αισθητήρα.
 - 4.2. 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
 - 5.1. Για τον EC5:
 - 5.1.1. OEC5 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.
 - 5.1.2. 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.
 - 5.1.3. Ο αισθητήρας πρέπει σε κάθε περίπτωση να περιβάλλεται από συνεχές έδαφος για μία ακτίνα τουλάχιστον 5 cm γύρω από τις λάμες του.
 - 5.2. Για τον 10HS:
 - 5.2.1. 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.

5.2.2. Εάν η κεφαλή δεν χωρά ολόκληρη μπορεί να γίνει αυτό που συστήνεται για την αντίστοιχη περίπτωση για τον EC5 (λοφάκι).

5.2.3. Ο αισθητήρας πρέπει σε κάθε περίπτωση να περιβάλλεται από συνεχές έδαφος για μία ακτίνα τουλάχιστον 10cm 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 ECH2OUtility – σε αυτή την περίπτωση η μέτρηση σε RAW counts διαβάζεται από το σχετικό παράθυρο (Terminal)). Η μέτρηση καταγράφεται στο σχετικό πίνακα (Πίνακας 2, στήλη 2). 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. Χωρίζουμε τα κινήσουμε 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 εξέρχεται 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 ξήρανσης. Προσθέτουμε αργά νερό¹⁰ 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 καταμεληθεί 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 105°C.

¹⁰Ορισμένοι (Czarnomski κ.α., 2005) αναφέρουν τη χρήση αποιονισμένου νερού αλλά αυτό δεν αναφέρεται σε κανένα σχετικό κείμενο της Decagon.

Για εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε οργανική ουσία προτείνεται η ξήρανση να γίνεται στους 60-70°C για τουλάχιστον 48 ώρες και στους 105°C μπορεί να χάνουν 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 21 Στιγμιότυπο από την τυπική διαδικασία βαθμονόμησης, διακρίνεται το δοχείο ανάμειξης - ομογενοποίησης εδάφους, ο αισθητήρας (10HS) και το καταγραφικό (Bissey, 2012)

Προβληματισμός 8 Βαθμονόμηση αρχίζοντας με ξηρό ή με υγρό έδαφος;

Στο σημείο της τοποθέτησης του εδάφους στο δοχείο βαθμονόμησης έτσι ώστε να καταλαμβάνει όγκο που να αντιστοιχεί περίπου στη φαινόμενη πυκνότητά του, οι Cobos and Chambers (2010) αναφέρουν ότι «αν ξεκινάμε με σχετικά ξηρό έδαφος». Αυτό υπονοεί ότι θα μπορούσαμε να ξεκινήσουμε από υγρό έδαφος και να λαμβάνουμε μετρήσεις με βηματικά μειούμενη υγρασία. Αυτή η διαδικασία όμως θα απαιτούσε να έχουμε από την αρχή αδιατάρακτο το σύνολο της ποσότητας του εδάφους που βαθμονομούμε και η ξήρανση θα διαρκούσε πολύ χρόνο. Επομένως θα υπήρχε μία διαδικασία επίπονη, η οποία μπορεί και να γίνει αλλά δεν είναι πρακτική.

Προβληματισμός 9 Σχετικά με τον τρόπο που προτείνεται για την ομογενοποίηση και τοποθέτηση στο δοχείο μετρήσεων

Στο video της Decagon (2017β) αναφέρεται στην αρχή ότι χρησιμοποιείται η μέθοδος ομογενοποιημένου εδάφους (homogenised soil method) της SSSA (Soil Science Society of America). Οι Cobos και Chambers (2010) αναφέρουν στις αναφορές του τεχνικού τους σημειώματος για την βαθμονόμηση, τους Starr και Paltineanu (2002). Σε επικοινωνία με την Decagon (Smith, 2017) μας ενημέρωσαν ότι το κείμενο των Cobos και Chambers (2010) ακολουθεί την μέθοδο της SSSA. Το άρθρο των Starr και Paltineanu (2002) δημοσιεύεται σε τόμο της SSSA και δίνει τη γενική οδηγία για βαθμονόμηση των διηλεκτρικών πυκνωτικών αισθητήρων. Έχουν δημοσιευτεί μετρήσεις για διαφορές υγρασίας της τάξης του 0-3% μεταξύ εδάφους στη φυσική του κατάσταση (αδιατάρακτο) και σε δείγμα που έχει τοποθετηθεί σε δοχείο μέτρησης στο πλαίσιο βαθμονόμησης αισθητήρων της σειράς ECH2O της Decagon (Czarnomski κ.α., 2005).

Προβληματισμός 9 Εκτίμηση ποσότητας νερού που προστίθεται κάθε φορά ώστε να προκύψουν τελικά 4-6 σημεία βαθμονόμησης

Η περιοχή βαθμονόμησης που μας ενδιαφέρει μπορεί να εκτιμηθεί αν έχει προηγηθεί μηχανική ανάλυση και έχουν εκτιμηθεί ο κορεσμός, η υδατοικανότητα και το σημείο μόνιμης μάρανσης (Twarakani κ.α., 2009). Αυτό θα μας επιτρέψει να εκτιμήσουμε και τα βήματα που θα κάνουμε ώστε να λάβουμε 4-6 σημεία βαθμονόμησης.

Προβληματισμός 10 Σχετικά με το καταγραφικό που χρησιμοποιείται

Στο video για calibration (Campbell, 2014) αναφέρει ότι η βαθμονόμηση πρέπει να γίνεται με το καταγραφικό που θα χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας στο πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι αν πρόκειται να εγκατασταθεί em50 η βαθμονόμηση είναι καλύτερα να γίνει με em50.

Η κατόγκου υγρασία υπολογίζεται όπως έχει αναφερθεί ως ο όγκος του νερού προς τον όγκο του εδάφους (εδαφικό δείγμα στην περίπτωση της βαθμονόμησης) (Εξίσωση 2). Η σχετική μέτρηση υπολογίζεται με βάση τις μετρήσεις για κάθε δείγμα (Πίνακας 2, στήλες 7 έως 10). Η Εξίσωση 14 συνοψίζει τους υπολογισμούς που περιλαμβάνει τυπική διαδικασία βαθμονόμησης (Cobos και Chambers, 2010, Decagon, 2017β)

$$mw = mwet - mdry$$

$$V_w = m_w / \rho_w$$

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

$$\theta = V_w / V_s$$

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 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$

Εξίσωση 14 Σειρά υπολογισμών κατά την τυπική διαδικασία βαθμονόμησης (Cobos και Chambers, 2010, Decagon, 2017β)

Προβληματισμός 11 Σχετικά με τον όγκο και την πυκνότητα δείγματος κατά την τυπική διαδικασία βαθμονόμησης

Στοσημείο που ετοιμάζουμε το έδαφος για καθεύση μείο βαθμονόμησης

υγραίνοντάς το, οι Cobos και Chambers (2010) αναφέρουν:

«σημειώστε ότι μπορεί να διατηρηθεί η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους καθ'όλη την διαδικασία βαθμονόμησης με το να συμπιέζετε την ίδια ποσότητα εδάφους στο ίδιο ύψος εντός του δοχείου βαθμονόμησης, για κάθε υγρασία εδάφους». Αυτό στην πράξη παρουσιάζει μεγάλα προβλήματα και πιθανότατα είναι ιδιαιτερότητα σε χονδρόκοκκα εδάφη.

Οι Cobos και Chambers (2010) παραθέτουν πίνακα με ενδεικτικά αποτελέσματα όπου στη στήλη I, θεωρούν ότι υπολογίζουν τη φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους ρ_b . Αυτό δημιουργεί σύγχυση μια και αυτό που υπολογίζουν είναι η πυκνότητα του εδαφικού δείγματος που λήφθηκε για κάθε σημείο βαθμονόμησης και προφανώς μόνο από τύχη θα ήταν σταθερή. Αυτό φαίνεται και στα αποτελέσματα που καταγράφουν στη στήλη I.

Ακόμη αναφέρουν ότι οι αισθητήρες ECH_2O δεν είναι πολύ ευαίσθητοι σε μικρές διαφοροποιήσεις της πυκνότητας του εδάφους (έδαφος και πόροι). Στη συνέχεια όμως σημειώνουν ότι αν η πυκνότητα του εδάφους (έδαφος και πόροι) είναι πολύ διαφορετική από αυτή που είχε στον αγρό τότε θα υπάρξουν σφάλματα.

Παρατηρούν δε στη διαδικασία συλλογής δείγματος εδάφους στον αγρό που περιγράφουν στο ίδιο κείμενο για την εύρεση της φαινόμενης πυκνότητας. Τονίζουν ότι αν η διαφορά της πυκνότητας του δείγματος στο δοχείο βαθμονόμησης είναι μεγαλύτερη από 20% αυτής που αντιστοιχεί στην φαινόμενη πυκνότητα στον αγρό τότε θα υπάρχει πρόβλημα.

Πίνακας 2 Πίνακας βαθμονόμησης μετράδειγματος από 10HS σε πηλοαμμώδες (loamysand) έδαφος

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 cm ³) Όγκος δείγματος (ml ή cm ³)	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 cm ³) Βάρος, όγκος νερού (g, ml ή cm ³)	mdry [equation: cell6 – cell3] Dry soil mass (g) Βάρος ξηρού εδάφους (καθαρό) (g)	ρ[equation: mdry / Vs or cell8/cell4] Soil density (g/cm ³) Πυκνότητα εδάφους ρ (gr/cm ³)	θ or VWC [equation: mw/Vs or cell7/cell4] Volumetric water content (cm ³ /cm ³ or %) Κατ' όγκο περιεκτικότητα σε νερό (cm ³ /cm ³ or %)	VWC according Decagon's 10HS generic mineral scils (%) 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

Hquasiin-situ διαδικασία βαθμονόμησης

Αρκετή συζήτηση έχει γίνει σχετικά με το εάν έχει νόημα να μπαίνουμε στη διαδικασία να κάνουμε βαθμονόμηση των αισθητήρων για κάθε ξεχωριστό έδαφος (Czarnomskik.a., 2005). Η ίδια η Decagon δεν δίνει σαφή απάντηση σχετικά με το αν τελικά πρέπει να γίνεται η όχι αυτή η βαθμονόμηση. Η λογική λέει ότι από τη στιγμή που ο εξοπλισμός –που δεν είναι φθηνός- αγοράζεται για χρήση για κάποια έτη και ότι σε περίπτωση μεγάλων αποκλίσεων το ζήτημα είναι σοβαρό, θα πρέπει να γίνεται η βαθμονόμηση ώστε να υπάρχουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Προβληματισμός 12Η διαφορά εργαστηρίου και αγρού

Στο σημείο αυτό τίθεται ένα μεγάλο ερώτημα: στον αγρό δεν υπάρχουν οι ελεγχόμενες συνθήκες του εργαστηρίου και το καλά προετοιμασμένο δείγμα που χρησιμοποιείται στη βαθμονόμηση, πως λοιπόν να πούμε ότι η εξίσωση βαθμονόμησης αντιπροσωπεύει την κατάσταση στον αγρό όπου το έδαφος περιέχει πετραδάκια, ρίζες, σκουλήκια κκ;

Έτσι αποφασίστηκε εκτός από τις εξισώσεις βαθμονόμησης που θα λαμβάνονταν ακολουθώντας την τυπική διαδικασία που αναφέρει η Decagon να έχουμε ενδείξεις για το τι γίνεται σε αδιατάρακτο έδαφος σε φυσική «όσο το δυνατόν» κατάσταση. Στο πλαίσιο αυτό έγινε μία προσπάθεια βαθμονόμησης σε δείγματα που πρακτικά έμειναν στην κατάσταση που ήταν στον αγρό καθ'όλη τη διαδικασία βαθμονόμησης και πέρασαν από κύκλους ύγρανσης και αφύγρανσης. Η διαδικασία αυτή (quasiin-situ) προηγήθηκε της τυπικής διαδικασίας βαθμονόμησης και έτσι η τυπική διαδικασία εφαρμόστηκε ακριβώς στο ίδιο χώμα που είχε δοκιμαστεί αυτή η εναλλακτική προσέγγιση. Η όλη διαδικασία περιγράφεται στο τεχνικό σημείωμα των Τσιρογιάννη και Κολιοπάνου (2017).

Εξοπλισμός που απαιτείται

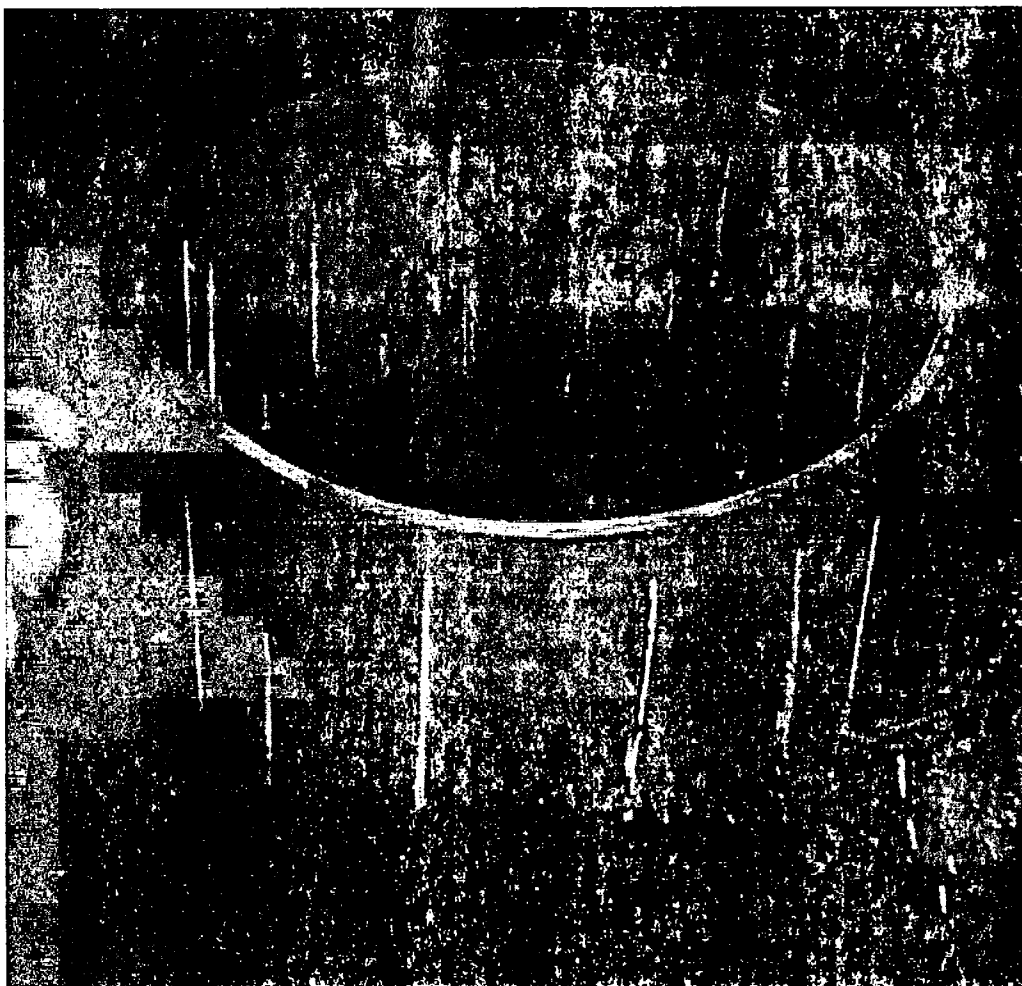
1. Ψεκαστήρας
2. Δοχεία / καλούπια για δειγματοληψία (Εικόνα 22). Κατασκευάστηκαν από σωλήνα PVC Ø140 (λεπτού τοιχώματος). Διαστάσεις: Ø εσωτ. 13,5 και ύψος 18,5 (2648 cm³ (ή ml) – όγκος που αντιστοιχεί στον όγκο ευαισθησίας του 10HS). Έγιναν κοψίματα στο πλάι με τροχό (κατά το μεγάλο άξονα). Έχουν σημάδια (τρυπίτσες ώστε να αναγνωρίζονται και να βρίσκουμε τις ακριβείς διαστάσεις και βάρος που έχει καταγραφεί για το καθένα). Κυκλικό πλαστικό (μη διαβρεχόμενο) τάπωμα με οπές κάτω (έγιναν από μυγοσκοτώστρες) και

μικρά «ποδαράκια» π.χ. από μη απορροφητικά αυτοκόλλητα για προστασία επίπλων ώστε να φεύγει εύκολα το νερό.

3. Πλαστικό σφυρί / ματσόλα
4. Μαχαίρι ή σπάτουλα για αφαίρεση περίσσειας εδάφους
5. Δοχεία μεταφοράς: αλουμινένια ταιψάκια

Προβληματισμός 13 Σχετικά με τα δοχεία της quasiin-situ διαδικασίας

Παρά το ότι είχαν προβλεφθεί χαρακιές ώστε να φεύγει υγρασία σε πολλές περιπτώσεις αυτό γινόταν πολύ αργά και έτσι υπήρξε η ανάγκη να γίνουν μικρές οπές με σύρμα στο έδαφος (μακριά από τον αισθητήρα). Πιθανότατα έπρεπε μέρος των τοιχωμάτων του σωλήνα να μπορούσε να αφαιρεθεί τελείως (παράθυρα) και να αντικατασταθεί με δίκτυ μετά την λήψη του αδιατάρακτου ώστε να μπορεί να απομακρύνεται πιο εύκολα η υγρασία από το έδαφος.



Εικόνα 22 Δοχείο / καλούπι PVC κατά τη διάρκεια δειγματοληψίας

Διαδικασία βαθμονόμησης

1. Δειγματοληψία. Ελήφθησαν 3 δείγματα από κάθε αγρό με χρήση του δοχείου / καλουπιού δειγματοληψίας, σημειώνονται στο σχετικό φύλλο (Πίνακας 3) η προέλευση, το βάθος δείγματος, το δοχείο PVC. Η δειγματοληψία έγινε σε βρεγμένο χώμα για ευκολία εισόδου του κυλίνδρου στο χώμα. Προσοχή: Ο ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΓΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΟ ΕΔΑΦΟΣ και στο εργαστήριο φθάνει με την περίσσεια χώματος μια και μπορεί να χρειαστεί.
2. Προετοιμασία.
 - 2.1. Ζυγίζεται ο αισθητήρας με το καλώδιό του
 - 2.2. Ζυγίζεται το διαβρεχόμενο τάπωμα
 - 2.3. Ζυγίζεται η βάση μεταφοράς
 - 2.4. Σε κάθε δοχείο μπαίνει –με τη βοήθεια της λάμας τοποθέτησης ο αισθητήρας. Προσοχή: να τοποθετηθεί σωστά - κατακόρυφα στο κέντρο του κυλίνδρου.
 - 2.5. Γίνεται διαβροχή με τον ψεκαστήρα ώστε το δείγμα να φθάσει στον κορεσμό (σιγά σιγά θα ρίξουμε πολύ νερό και το αφήνουμε λίγο να πάει ομοιόμορφα παντού) και θα περιμένουμε και μερικές ώρες ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Αν φύγει νερό κάτω πρέπει να σηκωθεί το δοχείο PVC και να γίνει ζύγιση πριν απομακρυνθεί και καταγραφή. Για αυτό αν γίνεται διαβροχή δεν πρέπει αμέσως μετά στέγνωμα, να το παρακολουθήσουμε σε σκιερό και δροσερό χώρο για λίγες ώρες.
3. Ανάλυση – Μετρήσεις
 - 3.1. Γίνεται μέτρηση υγρασίας (raw counts και % v/v) με σύνδεση στο καταγραφικό.
 - 3.2. Ζυγίζονται μαζί το μέσο μεταφοράς, βάση, δοχείο PVC, χώμα και αισθητήρας με καλώδιο
 - 3.3. Μεταφέρονται στο θερμοκήπιο ή σε ειδικό χώρο με αερόθερμα ώστε να γίνει αφύγρανση
 - 3.4. Μετά από 1-2 π.χ. ημέρες κάνουμε νέα μέτρηση και επαναλαμβάνουμε έως ότου η υγρασία σταθεροποιηθεί σε χαμηλό επίπεδο.
 - 3.5. Μετά υγραίνουμε σταδιακά με τον ψεκαστήρα και επαναλαμβάνουμε την σειρά μετρήσεων.
 - 3.6. Γίνονται 2-3 κύκλοι διαβροχής – στεγνώματος. Για τις χαμηλές περιεκτικότητες σε νερό, επειδή είναι δύσκολο να έχουμε ομοιομορφία ίσως χρειαστούν περισσότερες επαναλήψεις

4. Ξήρανση – Ζύγιση για εύρεση πυκνότητας

4.1. Στο τέλος της διαδικασίας, αφαιρέθηκε το χώμα το κυλίνδρου, ζυγίστηκε, ξηράνθηκε στους 102°C για 24h και ζυγίστηκε ξανά. Εναλλακτικά αν ο όγκος δείγματος αποδειχθεί προβληματικός μπορούν να ληφθούν 2-3 δείγματα γνωστού όγκου τα οποία αφού γίνει ξηρανσή τους σε φούρνο ζυγίζονται και αναλογικά βρίσκεται η τιμή για το σύνολο. Έτσι υπολογίζεται το φαινόμενο ειδικό βάρος χώματος αλλά και μπορεί να εκτιμηθεί η υγρασία του κατά τη διάρκεια των δοκιμών μέσα από τις μετρήσεις του ζυγού.

Προβληματισμός 14 Συρίκνωση εδάφους

Με τον καιρό, όσο στεγνώνει το έδαφος μπορεί να «ξεκολλήσει» το χώμα προς το εσωτερικό του PVC (να μαζέψει) και να δημιουργηθούν ρωγμές. Αυτό αναμένεται όπως έχει ήδη αναφερθεί σε αργιλώδη διογκούμενα εδάφη. Προφανώς η δημιουργία ρωγμών θα έχει μεγάλη επίδραση στις μετρήσεις, αλλά αυτό θα συνέβαινε στον αγρό.

Πίνακας 3Φύλλο καταγραφής δεδομένων δείγματος και μετρήσεων

Α/Α		
Προέλευση χώματος: Βάθος δείγματος:		
ΔΟΧΕΙΟ Αριθμός δοχείου PVC (έχει μικρές τρύπες που το δείχνουν):		
Βάρος: Διαστάσεις: Ø.....h..... Εσωτερικός όγκος:		
Βάρος με διαβρεχόμενου ταπώματος με σπές:		
ΒΑΣΗ & ΔΟΧΕΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ Βάση, Βάρος:, Δοχείο μεταφοράς, Βάρος:		
Τύπος αισθητήρα:		
Βάρος αισθητήρα (με καλώδιο, δεματικό κλπ):		

Ημερομηνία & Ώρα		
Μέτρηση υγρασίας (% v/v)		
Μέτρηση υγρασίας (raw counts)		
Βάρος (μέσο μεταφοράς, βάση, δοχείο PVC, χώμα και αισθητήρας με καλώδιο)		
Καταγραφέας (ονοματεπώνυμο)		
Παρατηρήσεις		

Οι μελέτες περίπτωσης

Οι αισθητήρες EC5 και 10HS της σειράς ECH2O της Decagon Devices Inc. βαθμονομήθηκαν για εδάφη που υπάρχουν σε 4 οπωρώνες με ακτινίδια στην πεδιάδα της Άρτας. Από κάθε οπωρώνα λήφθηκαν 3 αδιατάρακτα δείγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για βαθμονόμησης με βάση τη μέθοδο quasi in-situ ενώ στη συνέχεια το έδαφος από κάθε δείγμα χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση με βάση την τυπική μέθοδο βαθμονόμησης που προτείνει η εταιρεία.

Για τη λήψη των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το καταγραφικό em50 της Decagon Devices Inc. με το οποίο γινόταν καταγραφή του σήματος σε RAW counts (μπορούν να μετατραπούν σε mV).

Το έδαφος κάθε οπωρώνα αποτελεί μία μελέτη περίπτωσης. Οι μελέτες περίπτωσης έχουν ένα κωδικό που αποτελείται από τα γράμματα Α έως Δ, δύο ακόμη γράμματα και την περιοχή του αγρού ώστε να ξεχωρίζουν.

Εκτός από την βαθμονόμηση έγινε προσπάθεια να γίνει σύνδεση με την καλλιέργεια. Για παράδειγμα για μία καλλιέργεια μας ενδιαφέρει να διατηρούμε την υγρασία στο έδαφος μεταξύ FC και FC-MADxAW = FC-MADx(FC-PWP) όμως από αυτά, σίγουρα το MAD (35% για το ακτινίδιο) και ακόμη και το PWP εξαρτάται από την καλλιέργεια. Επομένως στο πλαίσιο της βαθμονόμησης μας ενδιαφέρει να έχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στην περιοχή αυτή της υγρασίας και όχι σε όλο το εύρος μέτρησης του αισθητήρα π.χ. 0-57% VWC για τον 10HS.

Προβληματισμός 15 Σχετικά με την πυκνότητα του νερού και της τάσης των μπαταριών

Στο πλαίσιο της βαθμονόμησης, παρατηρήθηκε ότι η τάση των μπαταριών δεν ήταν συνεχώς η ίδια και έτσι γίνονταν μετρήσεις της τάσης των μπαταριών του em50 ενώ έγινε και μέτρηση της πυκνότητας του νερού με το οποίο γινόταν η διαβροχή.

Εύρεση μοντέλων και ανάλυσή τους

Πρέπει να αναφερθεί ότι οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής στις εικόνες που ακολουθούν είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς. Για υπολογισμούς πρέπει να χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις

παρεμβολής που παρουσιάζονται στους συγκριτικούς πίνακες που συνοδεύουν κάθε μελέτη περίπτωσης¹¹.

Για τη σύγκριση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής Ideal Point Error, τριών διαστάσεων (IPE3) (Domínguezetal. 2011 από Malamos και Koutsoyiannis, 2016). Ο συντελεστής κανονικοποιείται ως προς το μέσο σφάλμα τετραγώνου RMSE (root mean square error), το μέσο σφάλμα MBE (mean bias error) και το συντελεστή R^2 , και έτσι ο συντελεστής IPE3 για κάθε μοντέλο λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 (όσο πιο κοντά στο 0, τόσο καλύτερο το μοντέλο).

¹¹ How to display more digits in trendline equation coefficients in Excel (<https://support.microsoft.com/en-us/help/282135/how-to-display-more-digits-in-trendline-equation-coefficients-in-excel>)

Έδαφος Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή]

Ο Πίνακας 4, περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της καλλιέργειας που ενδιαφέρουν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.

Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά εδάφους και καλλιέργειας περίπτωσης Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή]

Καλλιέργεια	Ακτινίδιο, Hayward, 7 ετών
MAD(Allenetal., 1998)	0,35
Τύπος εδάφους (Κατσουλάκου, 2017)	Siltloam – Ιλυοπηλώδες
Θs, FC, PWP (με βάση τον τύπο του εδάφους από Twarakavietal., 2009)	Θs (m ³ m ⁻³): 43% FC (m ³ m ⁻³): 28% PWR (m ³ m ⁻³): 14%
Ks (Μαλάμος, 2016 / Normalized Ks at 10°C)	17,5 cm d ⁻¹
ρ _b (Μαλάμος, 2016)	1,47 g cm ⁻³

Μέθοδος quasiin-situ

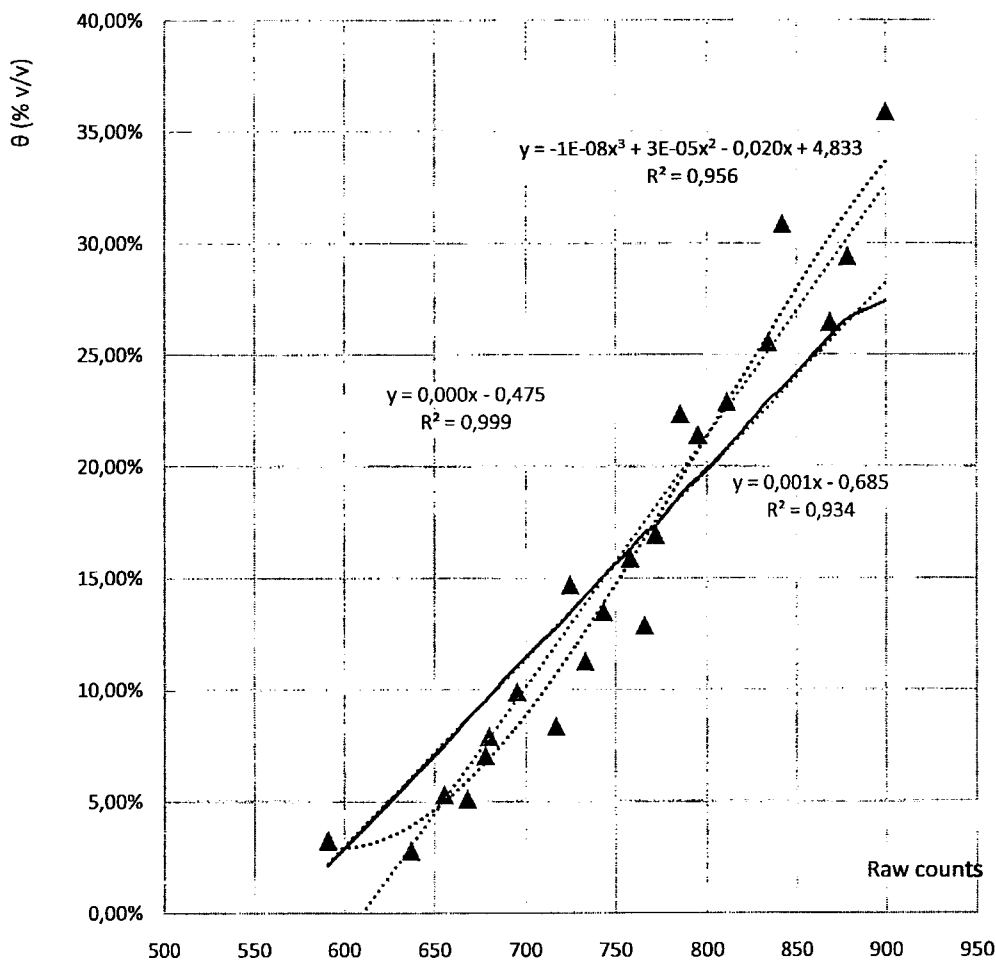
Χρησιμοποιήθηκαν 3 αδιατάρακτα δείγματα (κύλινδροι PVC με τα χαρακτηριστικά που έχουν αναφερθεί). Ο Πίνακας 5 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων.

Πίνακας 5 Δείγματα μεθόδου quasiin-situ για την περίπτωση Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή]

Αναγνωριστικό δείγματος	5	4	3	
Βάθος δείγματος (0 επιφάνεια εδάφους)	0-18,5	0-18,5	0-18,5	cm
Βάρος δοχείου αδιατάρακτου	291	287	283	gr
Διαστάσεις δοχείου αδιατάρακτου: Διάμετρος Ø	13,5	13,5	13,5	cm
Διαστάσεις δοχείου αδιατάρακτου: h	18,6	18,4	18,5	cm
Εσωτερικός όγκος δοχείου αδιατάρακτου	2.662,38	2.633,75	2.648,07	cm ³ ή ml
Βάση συγκρ. χώματος - βάρος	24	21	23	gr
Δοχείο μεταφοράς, βάρος	17	16	15	gr
Τύπος αισθητήρα	EC5	EC5	EC5	
Βάρος αισθητήρα (με καλώδιο 5m και βύσμα σύνδεσης και	133	133	133	gr

Αναγνωριστικό δείγματος	5	4	3	
δεματικότακτοποίησης καλωδίου)				
Ξηρό βάρος χώματος	2.987	3.566	3.291	gr
Δοχείο ζύγισης –ξήρανσης στο φούρνο, βάρος	22	25	24	gr
Όγκος εδάφους στο δοχείο αδιατάρακτου	2.590,8	2.562,2	2.576,5	cm ³
Φαινόμενη πυκνότητα εδάφους (ρ_b)	1,14	1,38	1,27	gr cm ⁻³

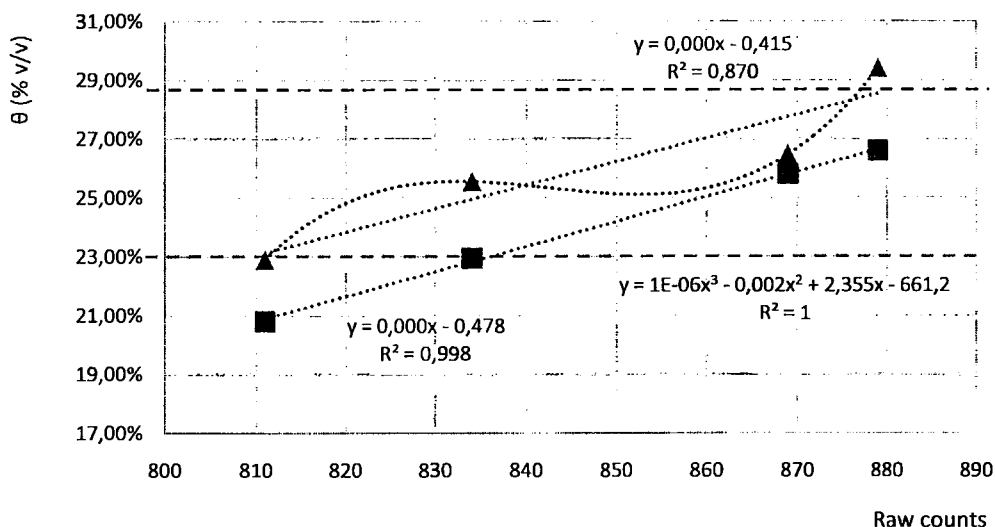
Εφαρμόστηκε η μέθοδος βαθμονόμησης quasiin-situ και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στην Εικόνα 23. Τα δεδομένα έχουν ομαδοποιηθεί (databinning/bucketing) ανά δεκάδα rawcounts (π.χ. από όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις μεταξύ 790 και 799 rawcounts χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή τους κοκ). Οι μετρήσεις της κατόγκο υγρασίας του εδάφους σε ν/νακολουθούν τα όσα προβλέπονται από την γενική του εξίσωση για τα ανόργανα εδάφη. Η πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ου} βαθμού παρέχει λίγο καλύτερο συντελεστή R^2 από την γραμμική παρεμβολή (0,96 αντί 0,93). Η ανάλυση έδειξε (τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται) ότι και παρεμβολές 1^{ου} και 2^{ου} βαθμού έχουν καλή προσαρμογή.



— ECS Decagon κατ'όγκο υγρασία με βάση τη γενική εξίσωση για ανόργανα εδάφη (% v/v)

▲ Quasi in-situ Υγρασία μέσω ζυγού (% v/v)

Εικόνα 23 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situγια EC5 για την περίπτωση Α[ΛΚ – Αγ. Παρασκευή]. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.



- EC5 Decagon κατ'όγκο υγρασία με βάση τη γενική εξίσωση για ανόργανα εδάφη (% v/v)
 ▲ Quasi in-situ Υγρασία μέσω ζυγού (% v/v)

Εικόνα 24 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης EC5 quasi in-situ για υγρασίες μεταξύ FC και FC-MADx (FC-PWP) για την περίπτωση [ΛΜ – Αγ. Παρασκευή]. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

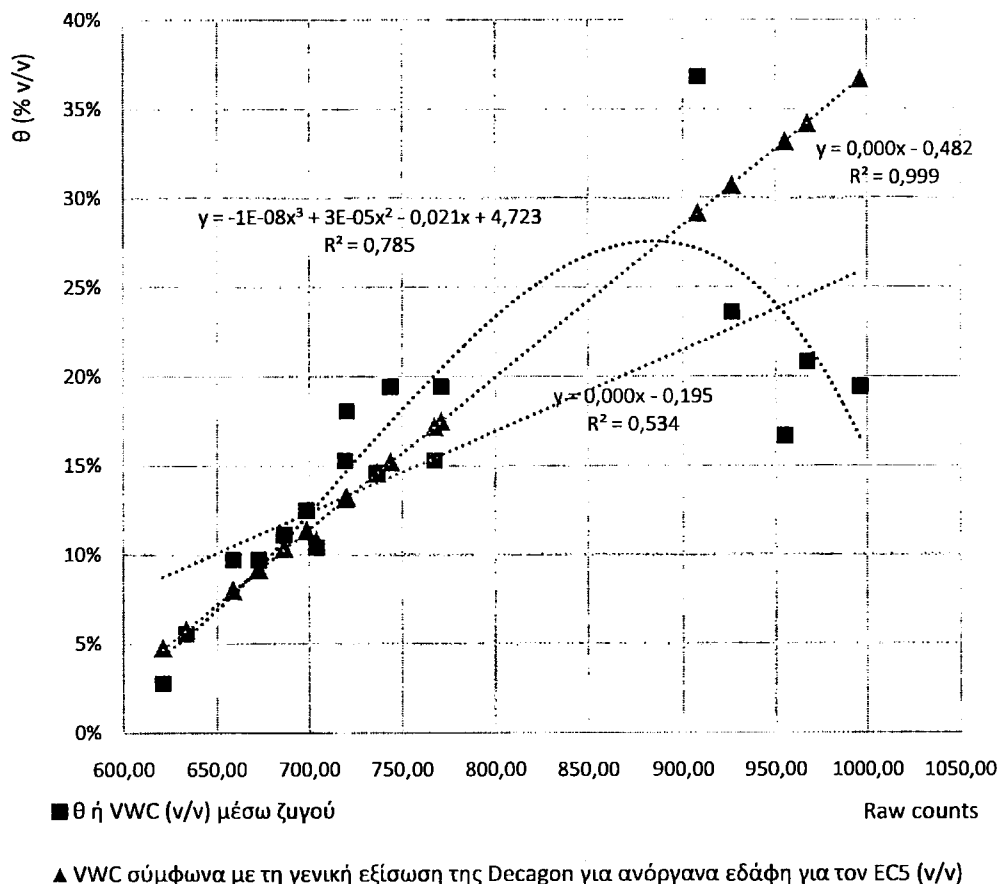
Όπως είναι γνωστό γενικά στο πλαίσιο των αρδεύσεων, ενδιαφέρει η υγρασία στο έδαφος να παραμένει μεταξύ FC και FC-MADxAW = FC-MADx (FC-PWP) (περιοχή RAW: readily available water). Με βάση τα δεδομένα που υπάρχουν για τη συγκεκριμένη περίπτωση (Πίνακας 4) θα ήταν ενδιαφέρον εξεταστεί η βαθμονόμηση όχι στο συνολικό εύρος μετρήσεων αλλά για την περιοχή μεταξύ 23,1 (αντιστοιχεί στο MADx (FC-PWP)) και 28% (FC) (όπως μετρήθηκαν από το ζυγό). Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 24 από όπου φαίνεται ότι η γραμμική παρεμβολή δεν είναι βελτιωμένη σε σχέση με αυτή που βρέθηκε για το συνολικό εύρος, ενώ από την άλλη η πολυωνυμική 3^{ου} βαθμού έχει άριστη προσαρμογή.

Τυπική μέθοδος

Πρέπει να αναφερθεί όσο αφορά την φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους (ρ_b), ότι αυτή βρέθηκε διαφορετική σε μία ανεξάρτητη μέτρηση που είχε γίνει το 2016 (Μαλάμος) και στα 3 δείγματα της quasi in-situ μεθόδου που αναφέρθηκε παραπάνω: 1,47 (Πίνακας 4), 1,14, 1,38 και 1,27 (Πίνακας 5) gcm⁻³ αντίστοιχα. Από αυτά προκύπτει μία μέση τιμή 1,32 gcm⁻³ ($\pm 0,062$ τυπικό σφάλμα).

Ακολουθώντας την τυπική μέθοδο βαθμονόμησης, για κάθε ένα από τα 3 δείγματα και ομαδοποιώντας τα αποτελέσματα ανά δεκάδα rawcount έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα αποτελεσμάτων (Εικόνα 25, Εικόνα 26 για EC5 και Εικόνα 27, Εικόνα 28 για 10HS).

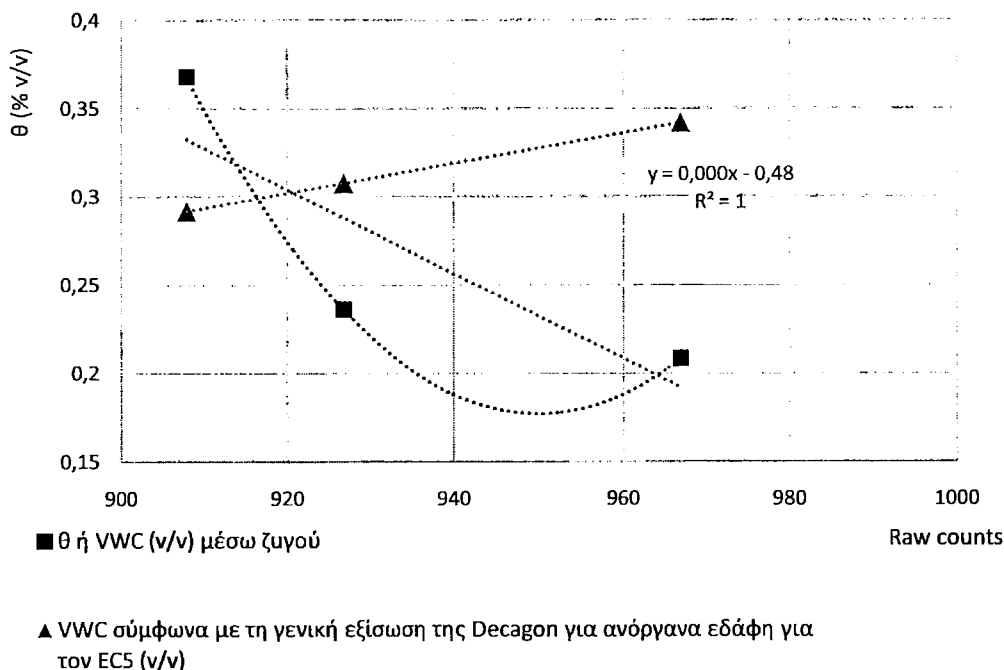
Από την Εικόνα 25 φαίνεται ότι η γραμμική παρεμβολή δίνει πολύ μέτρια αποτελέσματα ενώ η πολυωνυμική παρεμβολή (3^{ου} βαθμού) έχει καλύτερη προσαρμογή.



Εικόνα 25 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος A [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

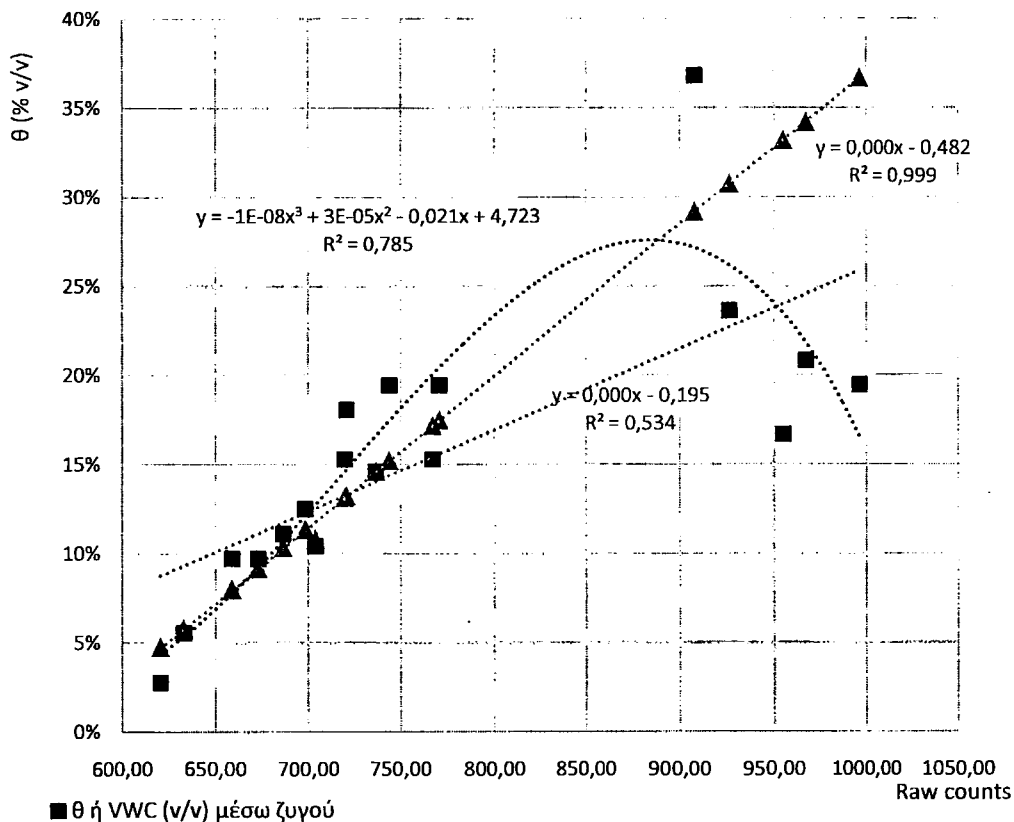
Στην προσπάθεια περιορισμού των αποτελεσμάτων στην περιοχή που έχει άμεσο ενδιαφέρον για το ακτινίδιο (RAW), εμφανίστηκε το πρόβλημα ότι δεν υπήρχε παρά μόνο μία μέτρηση. Για να αντιμετωπιστεί αυτό συμπεριλήφθηκαν και οι δύο κοντινότερες (προς τα πάνω και προς τα κάτω, μετρήσεις υγρασίας μέσω ζυγού) και έτσι (Εικόνα 26). Τα αποτελέσματα αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά

χρησιμοποιήσιμα λόγω του μικρού αριθμού μετρήσεων (για το λόγο αυτό δεν δίνονται και οι εξισώσεις των παρεμβολών)

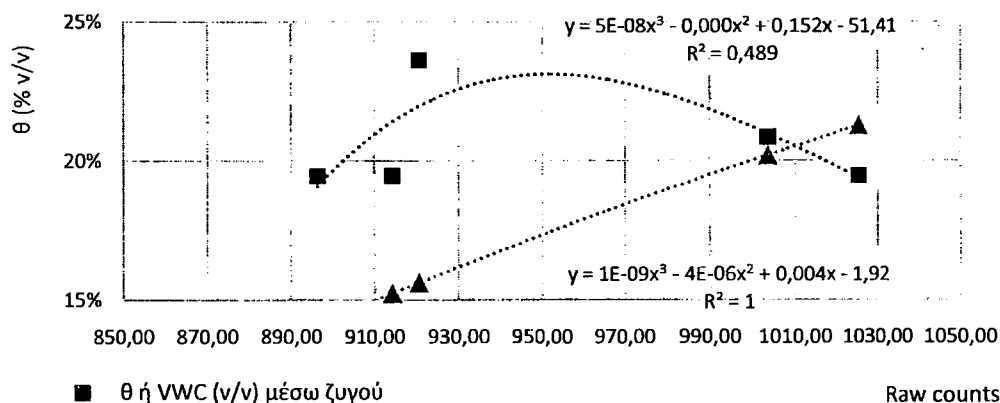


Εικόνα 26 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος A [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο – περιορισμός στην περιοχή του RAW. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Όσο αφορά τον αισθητήρα 10HS, τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 27 και στην Εικόνα 28. Στην περίπτωση του 10HS, με βάση την πρόταση παρεμβολής της κατασκευάστριας εταιρείας, χρησιμοποιήθηκε πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ου} βαθμού. Η ανάλυση έδειξε (τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται) ότι παρεμβολές 1^{ου} και 2^{ου} βαθμού έχουν καλή προσαρμογή. Και στην περίπτωση του 10HS, η βαθμονόμηση στην περιοχή του RAW παρουσίασε προβλήματα, καταρχήν λόγω μη ύπαρξης αρκετών δεδομένων, με αποτέλεσμα η εξίσωση που προκύπτει να μην έχει πρακτική χρησιμότητα.



Εικόνα 27 Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος A [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.



Εικόνα 28Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος A [ΛΡ – Αγ. Παρασκευή] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο – περιορισμός στην περιοχή του RAW.Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν τη συγκεκριμένη περίπτωση. Ο

Πίνακας 7 παρουσιάζει τη σύγκριση των μοντέλων από όπου φαίνεται ότι (με βάση τον συντελεστή IPE3) για τον EC5 το πολυώνυμο 3ου βαθμού μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση τόσο στην τυπική όσο και στη quasi in situ βαθμονόμηση, το πολυωνυμικό μοντέλο 3ου βαθμού έχει και το μικρότερο τυπικό σφάλμα και στις δύο περιπτώσεις. Για τον 10HS (η βαθμονόμηση αφορά μόνο την τυπική μέθοδο), καλύτερο μοντέλο είναι η γενική εξίσωση της Decagon Devices για ανόργανα εδάφη (η οποία είναι πολυώνυμο 3ου βαθμού) με μικρή διαφορά από το πολυωνυμικό όσο αφορά τον IPE3 αλλά μεγαλύτερο τυπικό σφάλμα. Ακόμη είναι φανερό ότι το εύρος των διαφορών από την πραγματική τιμή της υγρασίας όπως μετρήθηκε με το ζυγό είναι σε κάθε περίπτωση πολύ μεγαλύτερο από αυτό που θεωρεί αναμενόμενο ο κατασκευαστής.

Πίνακας 6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρων για έδαφος A [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] για καταγραφικά της DecagonDevices

Έδαφος	Silt loam - Ιλυσπηλώδες
Αισθητήρας / Καταγραφικό	Decagon EC5 / Decagon em50
Προτεινόμενη εξίσωση από κατασκευαστή (generic mineral)	$\theta = 8,5 \times 10^{-4} \times RAW - 0,48$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0 - \approx 0,60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (0 -60% VWC) ακρίβεια: VWC: $\pm 3\%$ ή $\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (χωρίς βαθμονόμηση), για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα $0,1 < EC < 10 \text{ dS m}^{-1}$ και αν επιτευχθεί άψογη τοποθέτηση του αισθητήρα Αν χρειάζονται μετρήσεις στην κλίμακα 0-100% πρέπει να γίνει βαθμονόμηση με πολυώνυμο 3 ^{ου} βαθμού (Decagon, 2012).
Αναμενόμενη σύμφωνα με τον κατασκευαστή ακρίβεια μετά από βαθμονόμηση	$\pm 1-2\% \text{ VWC}$ ($\pm 0,01$ έως $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)
Quasi in situ εξίσωση	$\theta = 0,00112355851882995 \times RAW - 0,685425037972744$ ($R^2 = 0,94$) και $\theta = -0,0000000112589450231738 \times RAW^3 + 0,0000269218387595589 \times RAW^2 - 0,0201063986804668 \times RAW + 4,83321413283519$

	$(R^2 = 0,96)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,03 - 0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (3 -34% VWC)
Quasi in situ (περιοχή RAW) εξίσωση	$\theta = 0,000797856312459791 \times \text{RAW} - 0,415912671860681$ $(R^2 = 0,8705)$ και $\theta = 0,00000110596649320941 \times \text{RAW}^3 - 0,00279584332720617 \times \text{RAW}^2 + 2,35559244342716 \times \text{RAW} - 661,207111239415$ $(R^2 = 1)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,23 - 0,29 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (22 -29% VWC)
Τυπική μέθοδος εξίσωση	$\theta = 0,000455679570226723 \times \text{RAW} - 0,195315226940475$ $(R^2 = 0,54)$ και $\theta = -0,0000000145471014815841 \times \text{RAW}^3 + 0,0000314164872034794 \times \text{RAW}^2 - 0,021435355974034 \times \text{RAW} + 4,72314308672129$ $(R^2 = 0,76)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,03 - 0,37 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (3 -37% VWC)
Τυπική μέθοδος (περιοχή RAW) εξίσωση	-
	
Προτεινόμενη εξίσωση από κατασκευαστή (generic mineral)	$\theta = 1,17 \times 10^{-9} \times \text{RAW}^3 - 3,95 \times 10^{-6} \times \text{RAW}^2 + 4,90 \times 10^{-3} \times \text{RAW} - 1,92$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0 - 0,57 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (0 -57% VWC) ακρίβεια: VWC: $\pm 3\%$ ή $\pm 0,03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα $\text{EC} < 10 \text{ dS m}^{-1}$ και αν επιτευχθεί άψογη τοποθέτηση του αισθητήρα
Αναμενόμενη σύμφωνα με τον κατασκευαστή ακρίβεια μετά από βαθμονόμηση	$\pm 2\% \text{ VWC}$ ($\pm 0.02 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$)
Quasi in situ εξίσωση	-
Quasi in situ (περιοχή RAW) εξίσωση	-

Τυπική εξίσωση	μέθοδος	$\theta = 0,0000000175681289054622x \text{ RAW}^3 -$ $0,0000554354883164219 \times \text{RAW}^2 +$ $0,0578288563125128x \text{ RAW} - 19,7665527830258$ $(R^2 = 0,84)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,05 - 0,24 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (5 -24% VWC)
Τυπική (περιοχή εξίσωση	μέθοδος RAW)	-

Πίνακας 7 Σύγκριση μοντέλων για το έδαφος Α [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή] για καταγραφικά της Decagon Devices

Αισθητήρας / Καταγραφικό	Decagon EC5 / Decagon em50			
	Τυπική μέθοδος		Quasi in situ μέθοδος	
Μοντέλο	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα
Πολυωνυμικό 3 ^{ου} βαθμού	0,63	-10% έως 7% 0,83%	0,69	-4 έως 4% 0,43%
Γραμμικό	0,99	-15% έως 7% 1,22%	0,82	-5 έως 5% 0,53%
Γενικό της Decagon (generic)	0,77	-8% έως 17% 1,67%	0,81	-9 έως 4% 0,74%
Μοντέλο	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα
Πολυωνυμικό 3 ^{ου} βαθμού	0,88	-4% έως 4% 0,52%	-	-
Γενικό της Decagon (generic)	0,81	-8% έως 4% 0,86%	-	-

Έδαφος Β [ΜΤ – Κολομόδια]

Ο Πίνακας 9, περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της καλλιέργειας που ενδιαφέρουν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά εδάφους και καλλιέργειας περίπτωσης Β [ΜΤ - Κολομόδια]

Καλλιέργεια	Ακτινίδιο, Hayward, 16 ετών
MAD(Allenetal., 1998)	0,35
Τύπος εδάφους (Κατσουλάκου, 2017)	Siltclay – Ιλυσαργιλώδες
Θs, FC, PWP (με βάση τον τύπο του εδάφους από Twarakavietal., 2009)	Θs ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$): 45% FC ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$): 34% PWR ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$): 10%
Ks (Μαλάμος, 2016 / Normalized Ks at 10°C)	160,7 cm d^{-1}
ρ_b (Μαλάμος, 2016)	1,18 g cm^{-3}

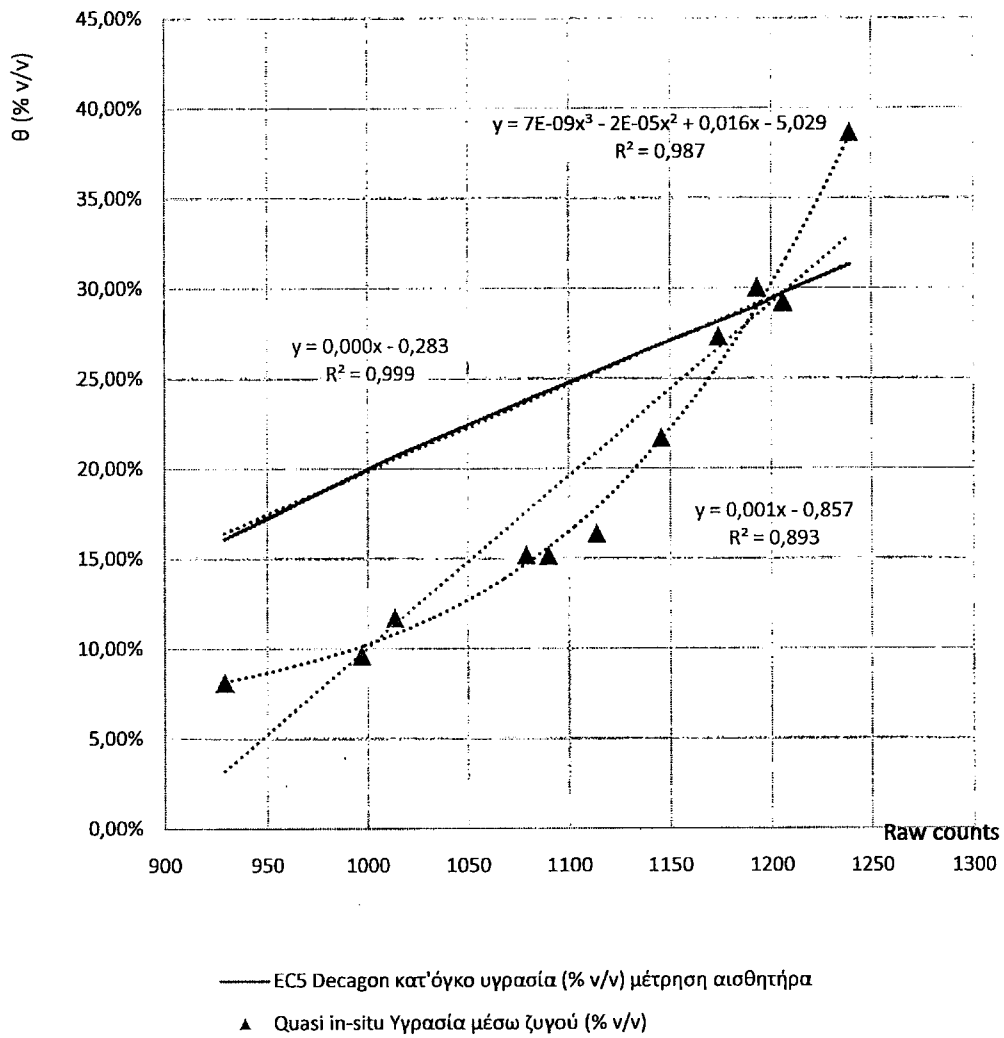
Μέθοδος quasiin-situ

Χρησιμοποιήθηκαν 3 αδιατάρακτα δείγματα (κύλινδροι PVC με τα χαρακτηριστικά που έχουν αναφερθεί). Ο Πίνακας 18 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων.

Πίνακας 9 Δείγματα μεθόδου quasiin-situ για την περίπτωση Β [ΜΤ - Κολομόδια]

Αναγνωριστικό δείγματος	1	2	6	
Βάθος δείγματος (0 επιφάνεια εδάφους)	0-18,5	0-18,5	0-18,5	cm
Βάρος δοχείου αδιατάρακτου	291	337	290	gr
Διαστάσεις δοχείου αδιατάρακτου: Διάμετρος Ø	13,5	13,5	13,5	cm
Διαστάσεις δοχείου αδιατάρακτου: h	18,6	18,6	19,2	cm
Εσωτερικός όγκος δοχείου αδιατάρακτου	2662,38	2662,38	2748,27	cm^3 ή ml
Βάση συγκρ. χώματος - βάρος	24	22	25	gr
Δοχείο μεταφοράς, βάρος	17	17	16	gr
Τύπος αισθητήρα	EC5			
Βάρος αισθητήρα (με καλώδιο 5m και βύσμα σύνδεσης και δεματικό τακτοποίησης καλωδίου)	133	150	150	gr
Ξηρό βάρος χώματος	2987	2844	2705	gr
Δοχείο ζύγισης – ξήρανσης στο	22	26	23	gr

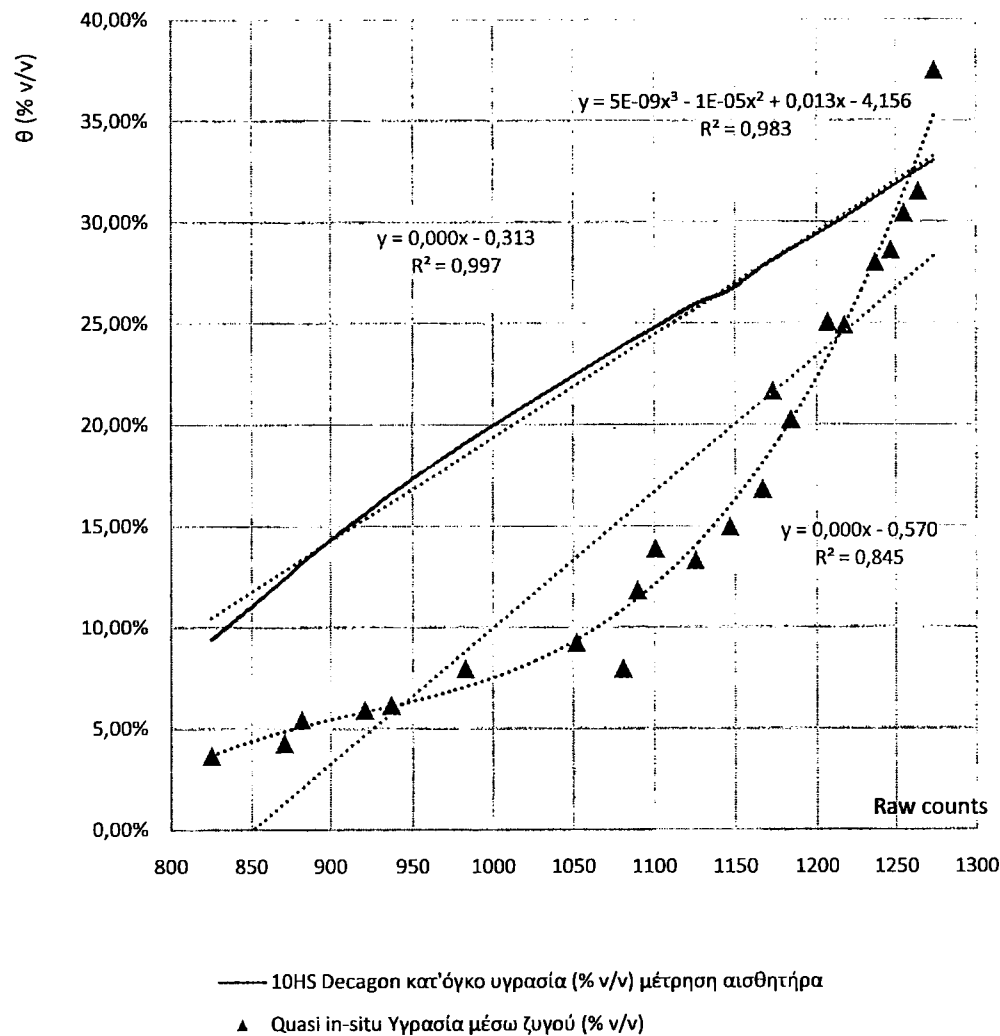
Αναγνωριστικό δείγματος	1	2	6	
φούρνο, βάρος				
Όγκος εδάφους στο δοχείο αδιατάρακτου	2576,5	2576,5	2633,8	cm ³
Φαινόμενη πυκνότητα εδάφους (ρ _b)	1,15	1,09	1,02	gr cm ⁻³



Εικόνα 29 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situγιαEC5, για την περίπτωση Β [MT - Κολομόδια].Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Εφαρμόστηκε η μέθοδος βαθμονόμησης quasiin-situ.Τα αποτελέσματα για το EC5 συνοψίζονται στηνΕικόνα 38. Τα δεδομένα έχουν ομαδοποιηθεί (databinning/bucketing) ανά δεκάδα rawcounts (π.χ. από όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις μεταξύ 790 και 799 rawcountsχρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή τους κοκ). Οι

μετρήσεις της κατόγκο υγρασίας του εδάφους σε ν/νακολουθούν τα όσα προβλέπονται από την γενική του εξίσωση για τα ανόργανα εδάφη. Η πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ου} βαθμού παρέχει καλύτερο συντελεστή R² από την γραμμική παρεμβολή (0,99 αντί 0,89).

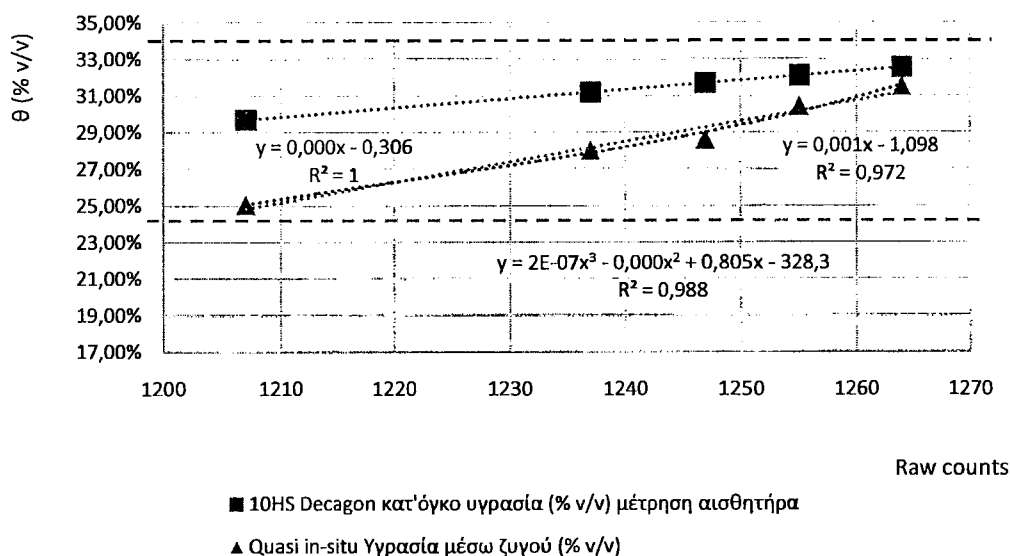


Εικόνα 30 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasi in-situ για 10HS, για την περίπτωση Β [MT - Κολομόδια]. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Όπως είναι γνωστό γενικά στο πλαίσιο των αρδεύσεων, ενδιαφέρει η υγρασία στο έδαφος να παραμένει μεταξύ FC και $FC - MAD \times AW = FC - MAD \times (FC - PWP)$ (περιοχή RAW: readily available water). Με βάση τα δεδομένα που υπάρχουν για τη συγκεκριμένη περίπτωση (Πίνακας 8) θα ήταν ενδιαφέρον εξεταστεί η βαθμονόμηση όχι στο συνολικό εύρος μετρήσεων αλλά για την περιοχή μεταξύ 25 (αντιστοιχεί στο

MADx(FC-PWP)) και 34% (FC) (όπως μετρήθηκαν από το ζυγό). Όμως δεν υπάρχουν παρά μόνο 3 μετρήσεις στην περιοχή αυτή και έτσι τα σχετικά αποτελέσματα δεν έχουν πρακτική αξία και δεν παρουσιάζονται.

Στην Εικόνα 30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για τον 10HS με χρήση της quasi-in-situ προσέγγισης. Τόσο η παρεμβολή 1^{ου} βαθμού, όσο και η παρεμβολή 3^{ου} βαθμού δίνουν πολύ καλές τιμές R^2 , 0,86 και 0,98 αντίστοιχα. Για την περίπτωση του 10HS υπήρχαν 5 διαθέσιμες μετρήσεις και επομένως παρουσιάζονται οι καμπύλες για την περιοχή μεταξύ FC και FC-MADxAW = FC-MADx(FC-PWP) (περιοχή RAW: readily available water), 25 και 34% αντίστοιχα για την συγκεκριμένη περίπτωση).



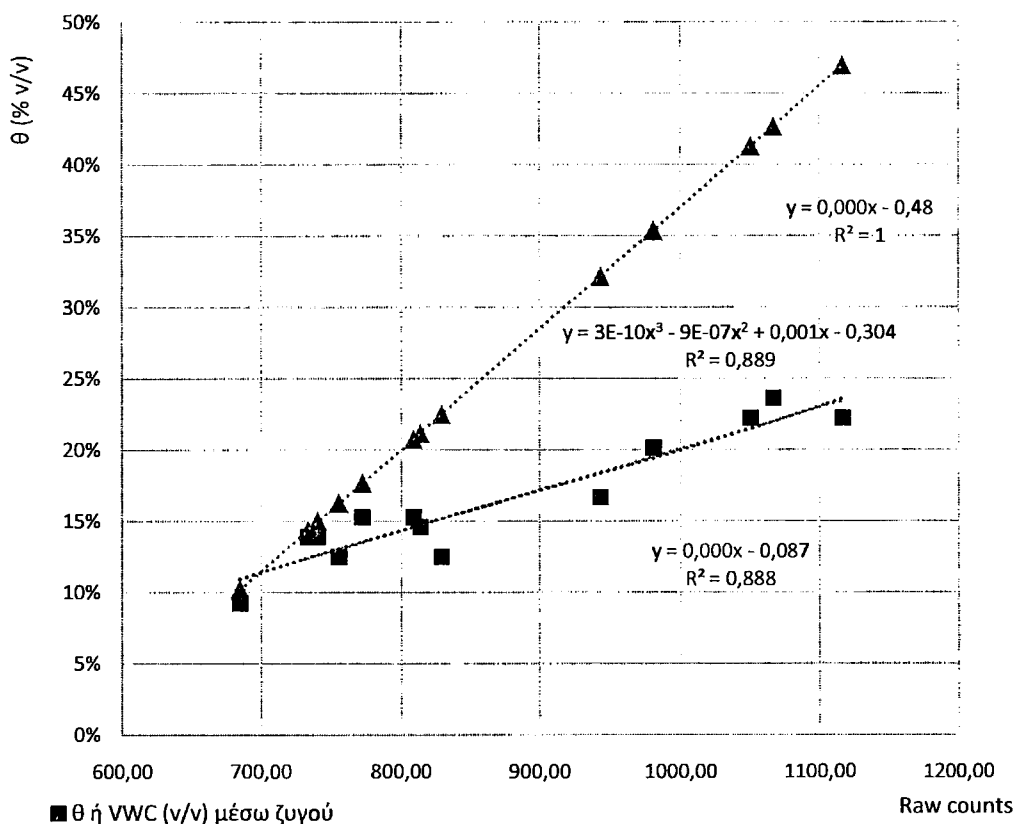
Εικόνα 31 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης 10HS quasi in-situ για υγρασίες μεταξύ FC και FC-MADx(FC-PWP) για την περίπτωση [MT – Κολομόδια]. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Τυπική μέθοδος

Πρέπει να αναφερθεί όσο αφορά την φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους (ρ_b), ότι αυτή βρέθηκε διαφορετική σε μία ανεξάρτητη μέτρηση που είχε γίνει το 2016 (Μαλάμος) και στα 3 δείγματα της quasi-in-situ μεθόδου που αναφέρθηκε παραπάνω: 1,18 (Πίνακας 4 Πίνακας 8), 1,15, 1,09 και 1,02 (Πίνακας 9) gcm^{-3} αντίστοιχα. Από αυτά προκύπτει μία μέση τιμή $1,11 \text{gcm}^{-3} (\pm 0,03 \text{ τυπικό σφάλμα})$.

Ακολουθώντας την τυπική μέθοδο βαθμονόμησης, για κάθε ένα από τα 3 δείγματα και ομαδοποιώντας τα αποτελέσματα ανά δεκάδα rawcount έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα αποτελεσμάτων (Εικόνα 32για EC5 και Εικόνα 33για 10HS).

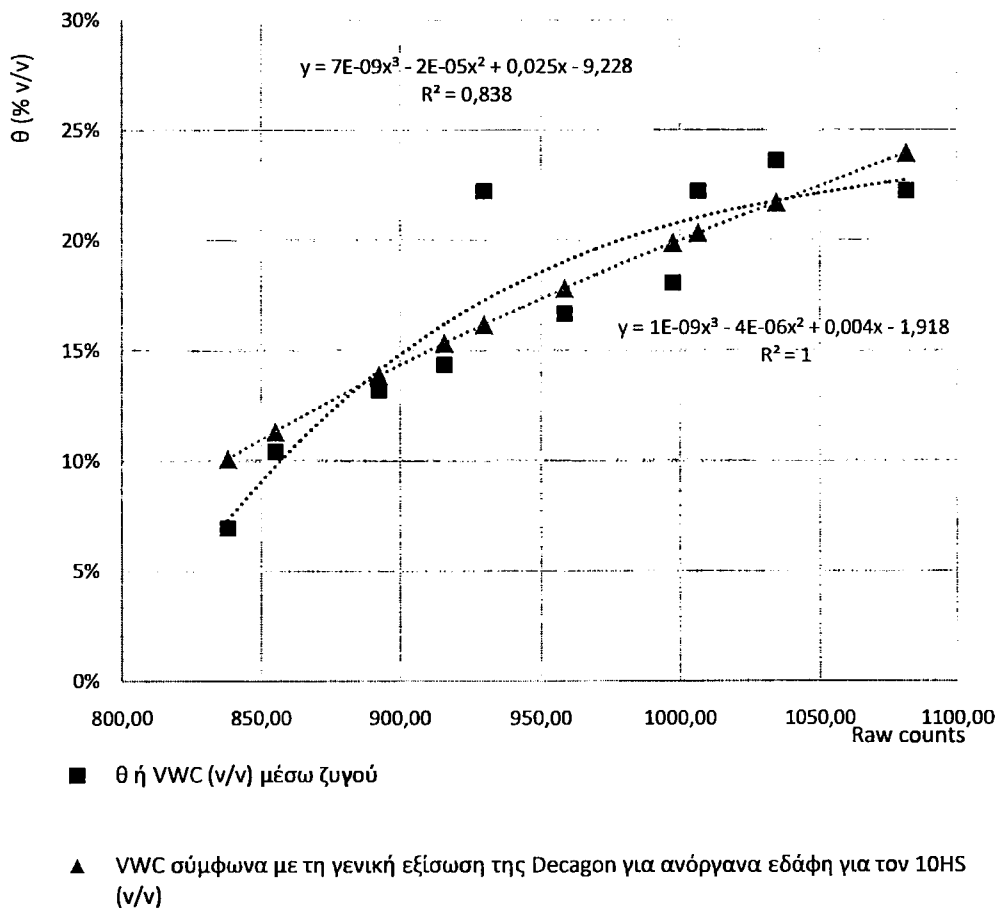
Από την Εικόνα 32 φαίνεται ότι η γραμμική παρεμβολή καλά αποτελέσματα ενώ η παρεμβολή πολυωνυμική (3^{ου} βαθμού) δεν υπερτερεί. Δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις ώστε να εξαχθεί εξίσωση για την περιοχή που έχει άμεσο ενδιαφέρον για το ακτινίδιο (RAW).



Εικόνα 32 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος Β [MT - Κολομόδια] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Όσο αφορά τον αισθητήρα 10HS, τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 33. Στην περίπτωση του 10HS, με βάση την πρόταση παρεμβολής της κατασκευάστριας εταιρείας, χρησιμοποιήθηκε πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ου} βαθμού,

η οποία έδειξε καλή προσαρμογή. Δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις ώστε να εξαχθεί εξίσωση για την περιοχή που έχει άμεσο ενδιαφέρον για το ακτινίδιο (RAW).



Εικόνα 33 Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος Β [MT - Κολομόδια] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Ο Πίνακας 10 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν τη συγκεκριμένη περίπτωση. Ο

Πίνακας 11 παρουσιάζει τη σύγκριση των μοντέλων από όπου φαίνεται ότι (με βάση τον συντελεστή IPE3) για τον EC5 το πολυώνυμο 3ου βαθμού και η γενική εξίσωση της Decagon μοντελοποιούν καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση ενώ το πολυώνυμο 3ου βαθμού έχει την καλύτερη συμπεριφορά στην quasi in situ βαθμονόμηση. Το πολυωνυμικό μοντέλο 3ου βαθμού έχει και το μικρότερο τυπικό σφάλμα και στις δύο περιπτώσεις.

Για τον 10HS τη γενική εξίσωση της Decagon μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση ενώ το πολυώνυμο 3ου βαθμού έχει την καλύτερη συμπεριφορά στην quasi in situ βαθμονόμηση. Το πολυωνυμικό μοντέλο 3ου βαθμού έχει το μικρότερο τυπικό σφάλμα και στις δύο περιπτώσεις. Το εύρος των διαφορών από την πραγματική τιμή της υγρασίας όπως μετρήθηκε με το ζυγό είναι για το πολυώνυμο 3ου βαθμού και κυρίως για την quasi in situ μέθοδο εντός των ορίων που προβλέπει ο κατασκευαστής.

Πίνακας 10 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρων για έδαφος B [MT - Κολομόδια] για καταγραφικά της Decagon Devices

Έδαφος	Silty Clay - Ιλυσαργιλώδες
Αισθητήρας / Καταγραφικό	Decagon, EC5 / Decagon em50
Προτεινόμενη εξίσωση από κατασκευαστή (generic mineral)	$\theta = 8,5 \times 10^{-4} \times \text{RAW} - 0,48$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0 - \approx 0,60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (0 -60% VWC) ακρίβεια: VWC: $\pm 3\%$ ή $\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (χωρίς βαθμονόμηση), για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα $0,1 < \text{EC} < 10 \text{ dS m}^{-1}$ και αν επιτευχθεί άψογη τοποθέτηση του αισθητήρα Αν χρειάζονται μετρήσεις στην κλίμακα 0-100% πρέπει να γίνει βαθμονόμηση με πολυώνυμο 3 ^{ου} βαθμού (Decagon, 2012).
Αναμενόμενη σύμφωνα με τον κατασκευαστή ακρίβεια μετά από βαθμονόμηση	$\pm 1\text{-}2\% \text{ VWC}$ ($\pm 0,01$ έως $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)
Quasi in situ εξίσωση	$\theta = 0,000957741730464802 \times \text{RAW} - 0,857556949610379$ ($R^2 = 0,89$) και $\theta = 0,00000000650984105767307 \times \text{RAW}^3 -$

	$0,0000177668270071308x RAW^2 +$ $0,0163890790022663x RAW - 5,0296737336285$ $(R^2 = 0,99)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,08 - 0,38 m^3 m^{-3}$ (8 -38% VWC)
Quasi in situ (περιοχή RAW) εξίσωση	-
Τυπική μέθοδος εξίσωση	$\theta = 0,000288062615146619x RAW -$ $0,0872739340401247$ $(R^2 = 0,89)$ και $\theta = 0,000000000330074176233947 x RAW^3 -$ $0,000000873132003852207 x RAW^2 +$ $0,00104731125686628 x RAW - 0,304502914943433$ $(R^2 = 0,89)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,09 - 0,24 m^3 m^{-3}$ (9 -24% VWC)
Τυπική μέθοδος (περιοχή RAW) εξίσωση	-
Προτεινόμενη εξίσωση από κατασκευαστή (generic mineral)	$\theta = 1,17 x 10^{-9} x RAW^3 - 3,95 x 10^{-6} x RAW^2 + 4,90 x 10^{-3}$ $x RAW - 1,92$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0 - 0,57 m^3 m^{-3}$ (0 -57% VWC) ακρίβεια: VWC: $\pm 3\%$ ή $\pm 0,03 m^3 m^{-3}$, για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα $EC < 10 dS m^{-1}$ και αν επιτευχθεί άφογη τοποθέτηση του αισθητήρα
Αναμενόμενη σύμφωνα με τον κατασκευαστή ακρίβεια μετά από βαθμονόμηση	$\pm 2\% VWC (\pm 0.02 m^3 m^{-3})$
Quasi in situ εξίσωση	$\theta = 0,000670138405588632x RAW - 0,570424726526977$ $(R^2 = 0,85)$ και $\theta = 0,00000000520568492256398x RAW^3 -$ $0,0000143634631892059x RAW^2 + 0,01338947127456x$ $RAW - 4,15662241580242$

	$(R^2 = 0,98)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,03 - 0,38 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (3 -38% VWC)
Quasi in situ (περιοχή RAW) εξίσωση	$\theta = 0,00111597576340432 \times \text{RAW} - 1,09870132395256$ $(R^2 = 0,97)$ και $\theta = 0,000000179671288865098 \times \text{RAW}^3 - 0,00065843439836983 \times \text{RAW}^2 + 0,805210840004644 \times \text{RAW} - 328,336335798395$ $(R^2 = 0,99)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,25 - 0,31 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (25 -31% VWC)
Τυπική μέθοδος εξίσωση	$\theta = 0,00000000722247816041885 \times \text{RAW}^3 - 0,0000235412706419221 \times \text{RAW}^2 + 0,0257551823983846 \times \text{RAW} - 9,22833143589439$ $(R^2 = 0,84)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,07 - 0,24 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (7 -24% VWC)
Τυπική μέθοδος (περιοχή RAW) εξίσωση	-

Πίνακας 11 Σύγκριση μοντέλων για το έδαφος Β [ΜΤ - Κολομόδια] για καταγραφικά της Decagon Devices

Αισθητήρας / Καταγραφικό	Decagon EC5 / Decagon em50			
	Τυπική μέθοδος		Quasi in situ μέθοδος	
Μοντέλο	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα
Πολυωνυμικό 3 ^{ου} βαθμού	0,81	-2 έως 3% 0,41%	0,58	-2 έως 2% 0,33%
Γραμμικό	0,82	-23 έως 1% 2,25%	0,82	-6 έως 4% 0,97%
Γενικό της Decagon (generic)	0,81	1 έως 25% 2,29%	0,81	-7 έως 10% 1,71%
Μοντέλο	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα
Πολυωνυμικό 3 ^{ου} βαθμού	0,95	-5 έως 3% 0,72%	0,66	-3 έως 3% 0,29%
Γενικό της Decagon (generic)	0,81	-6 έως 3% 0,84%	0,81	-4 έως 16% 1,04%

ΈδαφοςΓ [ΕΞ – Νεοχώρι]

ΟΠίνακας 12, περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της καλλιέργειας που ενδιαφέρουν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.

Πίνακας 12 Χαρακτηριστικά εδάφους και καλλιέργειας περίπτωσης Γ [ΕΞ – Νεοχώρι]

Καλλιέργεια	Ακτινίδιο, Hayward, 8 ετών
MAD(Allenetal., 1998)	0,35
Τύπος εδάφους (Κατσουλάκου, 2017)	SiltyClayLoam έωςClayLoam - Ιλυοαργιλοπηλώδες έως αργιλοπηλώδες
Θs, FC, PWP (με βάση τον τύπο του εδάφους από Twarakavietal., 2009)	Θs ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$): 43% FC ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$): 38% PWR ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$): 22%
Ks	-
ρ_b	-

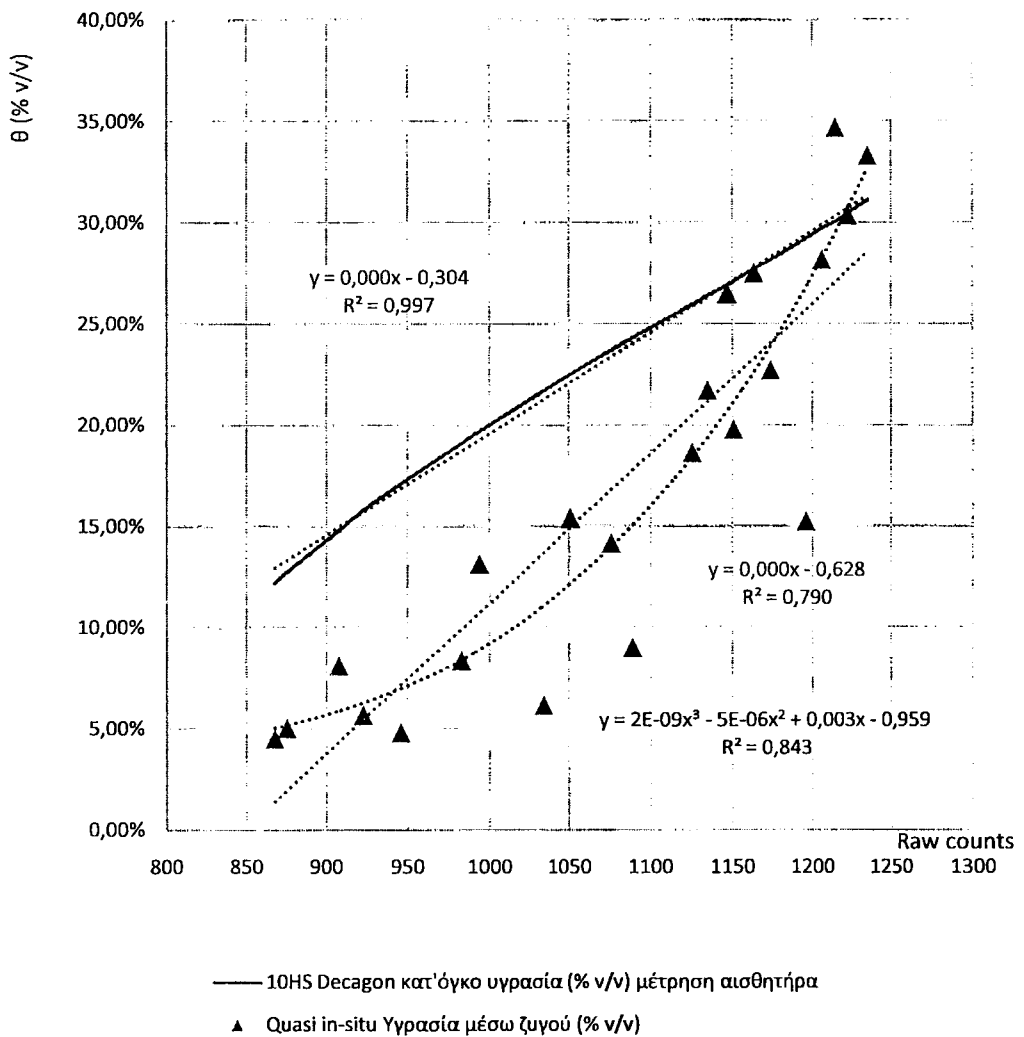
Μέθοδος quasiin-situ

Χρησιμοποιήθηκαν 3 αδιατάρακτα δείγματα (κύλινδροι PVCμε τα χαρακτηριστικά που έχουν αναφερθεί). Ο Πίνακας 13περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων.

Πίνακας 13 Δείγματα μεθόδου quasiin-situ για την περίπτωση Γ [ΕΞ – Νεοχώρι]

Αναγνωριστικό δείγματος	9	8	7	
Βάθος δείγματος (0 επιφάνεια εδάφους)	0-18,5	0-18,5	0-18,5	cm
Βάροςδοχείου αδιατάρακτου	300	284	284	gr
Διαστάσεις δοχείου αδιατάρακτου: Διάμετρος Ø	13,5	13,5	13,5	cm
Διαστάσεις δοχείου αδιατάρακτου: h	18,6	18,7	18,5	cm
Εσωτερικός όγκος δοχείου αδιατάρακτου	2662,38	2676,70	2648,07	cm^3 ή ml
Βάση συγκρ. χώματος - βάρος	25	24	24	gr
Δοχείο μεταφοράς, βάρος	27	18	28	gr
Τύπος αισθητήρα				
Βάρος αισθητήρα (με καλώδιο 5m και βύσμα σύνδεσης και δεματικό	150	150	150	gr

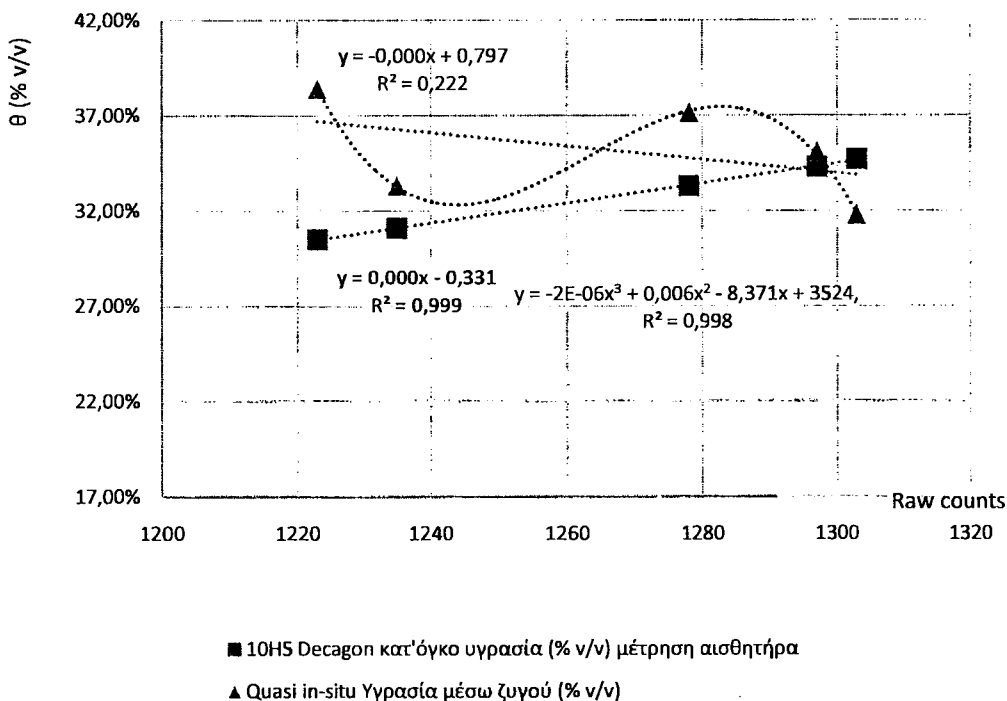
Αναγνωριστικό δείγματος	9	8	7	
τακτοποίησης καλωδίου)				
Ξηρό βάρος χώματος	3335	3287	3248	gr
Δοχείο ζύγισης – ξήρανσης στο φούρνο, βάρος	30	28	30	gr
Όγκος εδάφους στο δοχείο αδιατάρακτου	2590,8	2605,1	2576,5	cm ³
Φαινόμενη πυκνότητα εδάφους (ρ_b)	1,28	1,25	1,25	gr cm ⁻³



Εικόνα 34 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situγια 10HS, για την περίπτωση Γ [Ξ – Νεοχώρι].Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Εφαρμόστηκε η μέθοδος βαθμονόμησης quasiin-situ και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στην Εικόνα 34. Τα δεδομένα έχουν ομαδοποιηθεί (databinning/bucketing) ανά δεκάδα rawcounts (π.χ. από όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις μεταξύ 790 και 799 rawcounts χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή τους κοκ). Οι μετρήσεις της κατόγκο υγρασίας του εδάφους σε ν/νακολουθούν τα όσα προβλέπονται από την γενική του εξίσωση για τα ανόργανα εδάφη. Η πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ου} βαθμού παρέχει λίγο καλύτερο συντελεστή R^2 από την γραμμική παρεμβολή (0,84 αντί 0,79).

Όπως είναι γνωστό γενικά στο πλαίσιο των αρδεύσεων, ενδιαφέρει η υγρασία στο έδαφος να παραμένει μεταξύ FC και $FC - MAD \times AW = FC - MAD \times (FC - PWP)$ (περιοχή RAW: readily available water). Με βάση τα δεδομένα που υπάρχουν για τη συγκεκριμένη περίπτωση (Πίνακας 12) θα ήταν ενδιαφέρον εξεταστεί η βαθμονόμηση όχι στο συνολικό εύρος μετρήσεων αλλά για την περιοχή μεταξύ 32 (αντιστοιχεί στο $MAD \times (FC - PWP)$) και 38% (FC) (όπως μετρήθηκαν από το ζυγό). Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 35 από όπου φαίνεται ότι η γραμμική παρεμβολή έχει κακή προσαρμογή, ενώ από την άλλη η πολυωνυμική 3^{ου} βαθμού έχει άριστη προσαρμογή.



Εικόνα 35 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situ για 10HS, για υγρασίες μεταξύ FC και $FC - MAD \times (FC - PWP)$ για την περίπτωση Γ [Ξ – Νεοχώρι]. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι

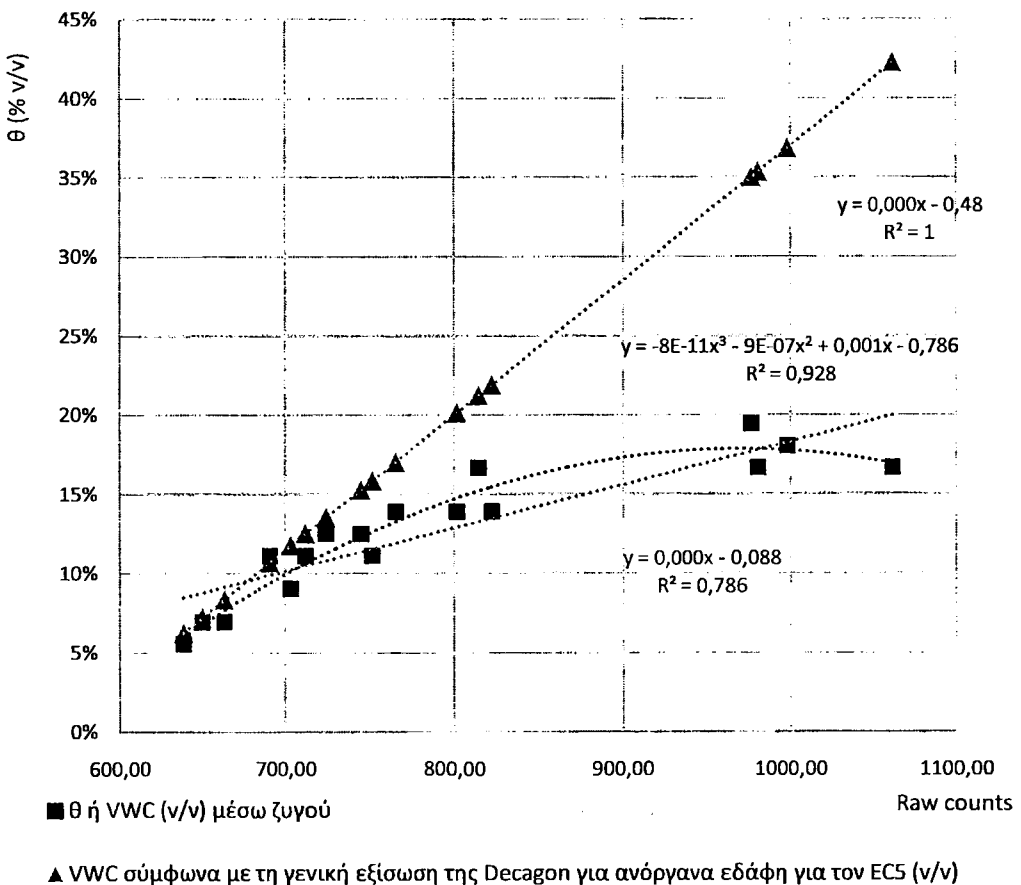
στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Τυπικήμέθοδος

Πρέπει να αναφερθεί όσο αφορά την φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους (ρ_b), ότι αυτή βρέθηκε παρόμοια στα 3 δείγματα της quasiin-situ μεθόδου: 1,28, 1,25 και 1,25 gcm⁻³ αντίστοιχα (Πίνακας 12). Από αυτά προκύπτει μία μέση τιμή 1,26 gcm⁻³ ($\pm 0,01$ τυπικό σφάλμα).

Ακολουθώντας την τυπική μέθοδο βαθμονόμησης, για κάθε ένα από τα 3 δείγματα και ομαδοποιώντας τα αποτελέσματα ανά δεκάδα rawcount έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα αποτελεσμάτων (Εικόνα 36 για EC5 και Εικόνα 37 για 10HS).

Από την Εικόνα 36 φαίνεται ότι η γραμμική παρεμβολή δίνει πολύ μέτρια αποτελέσματα ενώ η πολυωνυμική παρεμβολή (3^{ου} βαθμού) έχει καλύτερη προσαρμογή.

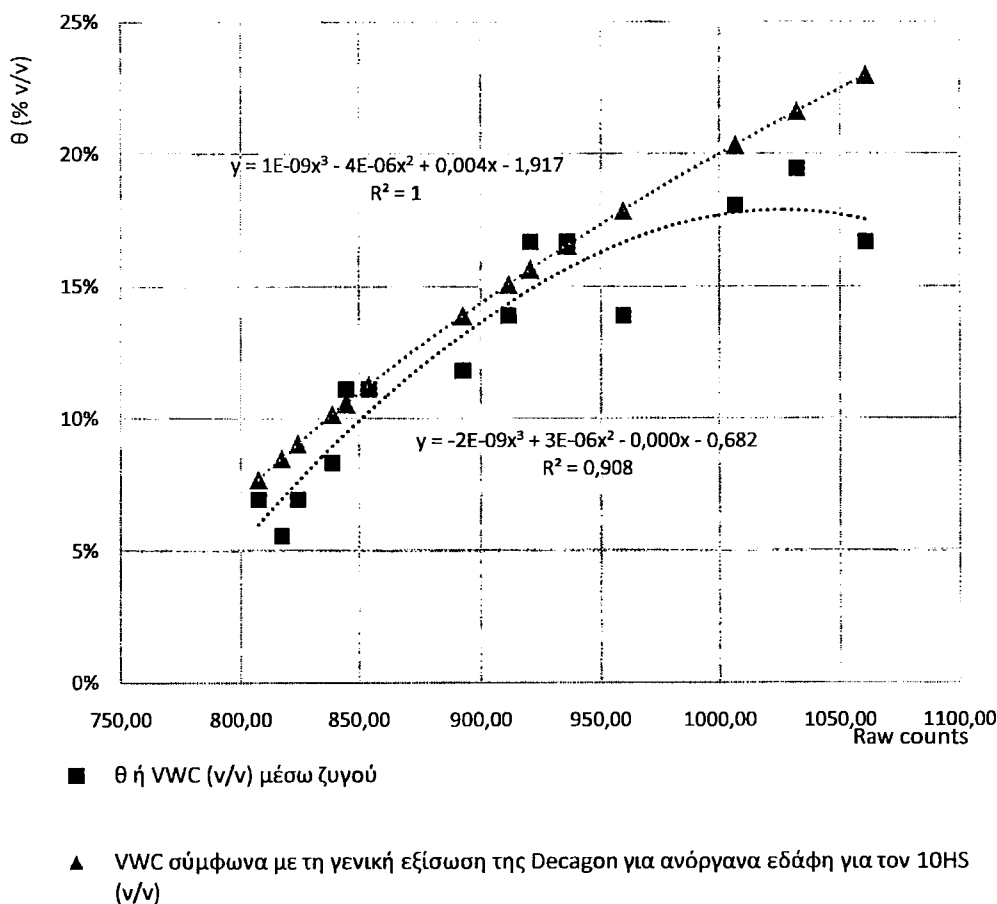


Εικόνα 36 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος Γ [ΕΞ – Νεοχώρι] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής

είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Στην προσπάθεια περιορισμού των αποτελεσμάτων στην περιοχή που έχει άμεσο ενδιαφέρον για το ακτινίδιο (RAW), εμφανίστηκε το πρόβλημα ότι δεν υπήρχαν δεδομένα ώστε να γίνει η ανάλυση.

Όσο αφορά τον αισθητήρα 10HS, τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 37. Στην περίπτωση του 10HS, με βάση την πρόταση παρεμβολής της κατασκευάστριας εταιρείας, χρησιμοποιήθηκε πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ου} βαθμού. Και στην περίπτωση του 10HS, η βαθμονόμηση στην περιοχή του RAW δεν έγινε λόγω μη ύπαρξης δεδομένων.



Εικόνα 37 Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος Γ [ΕΞ – Νεοχώρι] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Ο Πίνακας 14 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν τη συγκεκριμένη περίπτωση. Ο

Πίνακας 15 παρουσιάζει τη σύγκριση των μοντέλων από όπου φαίνεται ότι (με βάση τον συντελεστή IPE3) για τον EC5 το πολυώνυμο 3ου βαθμού μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση (δεν υπάρχουν δεδομένα για την quasi in situ βαθμονόμηση). Το πολυωνυμικό μοντέλο 3ου βαθμού έχει και το μικρότερο τυπικό σφάλμα. Για τον 10HS, η γενική εξίσωση της Decagon μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση ενώ το πολυώνυμο 3ου βαθμού έχει την καλύτερη συμπεριφορά στην quasi in situ βαθμονόμηση. Το πολυωνυμικό μοντέλο 3ου βαθμού έχει το μικρότερο τυπικό σφάλμα και στις δύο περιπτώσεις. Το εύρος των διαφορών από την πραγματική τιμή της υγρασίας όπως μετρήθηκε με το ζυγό είναι για το πολυώνυμο 3ου βαθμού για την τυπική μέθοδο εντός των ορίων που προβλέπει ο κατασκευαστής.

Πίνακας 14 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρων για έδαφος Γ [EΞ – Νεοχώρι]για καταγραφικά της Decagon Devices

Έδαφος	Silty Clay Loam έως Clay Loam - Ιλυοαργιλοπηλώδες έως αργιλοπηλώδες
Αισθητήρας Καταγραφικό	Decagon EC5 / Decagon em50
Προτεινόμενη εξίσωση από κατασκευαστή (generic mineral)	$\theta = 8,5 \times 10^{-4} \times \text{RAW} - 0,48$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0 - \approx 0,60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (0 -60% VWC) ακρίβεια: VWC: $\pm 3\%$ ή $\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (χωρίς βαθμονόμηση), για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα $0,1 < \text{EC} < 10 \text{ dS m}^{-1}$ και αν επιτευχθεί άψογη τοποθέτηση του αισθητήρα Αν χρειάζονται μετρήσεις στην κλίμακα 0-100% πρέπει να γίνει βαθμονόμηση με πολυώνυμο 3 ^{ου} βαθμού (Decagon, 2012).
Αναμενόμενη σύμφωνα με τον κατασκευαστή ακρίβεια μετά από βαθμονόμηση	$\pm 1\text{-}2\% \text{ VWC}$ ($\pm 0,01$ έως $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)
Quasi in situ εξίσωση	-
Quasi in situ (περιοχή RAW) εξίσωση	-
Τυπική μέθοδος εξίσωση	$\theta = 0,000271785437942534 \times \text{RAW} - 0,0887498249400068$

	$(R^2 = 0,79)$ και $\theta = -0,0000000000823995051606081 \times RAW^3 -$ $0,000000865034204200587 \times RAW^2 +$ $0,00191182128362143 \times RAW - 00,78666166794132$ $(R^2 = 0,93)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,06 - 0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (6 -16% VWC)
Τυπική μέθοδος (περιοχή RAW) εξίσωση	-
Προτεινόμενη εξίσωση από κατασκευαστή (generic mineral)	$\theta = 1,17 \times 10^{-9} \times RAW^3 - 3,95 \times 10^{-6} \times RAW^2 + 4,90 \times 10^{-3}$ $\times RAW - 1,92$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0 - 0,57 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (0 -57% VWC) ακρίβεια: VWC: $\pm 3\%$ ή $\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα $EC < 10 \text{ dS m}^{-1}$ και αν επιτευχθεί άψογη τοποθέτηση του αισθητήρα
Αναμενόμενη σύμφωνα με τον κατασκευαστή ακρίβεια μετά από βαθμονόμηση	$\pm 2\% \text{ VWC } (\pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$
Quasi in situ εξίσωση	$\theta = 0,000740353942236607 \times RAW - 0,628612336310376$ $(R^2 = 0,79)$ και $\theta = 0,00000000220010734723462 \times RAW^3 -$ $0,00000495933185696269 \times RAW^2 +$ $0,00381062172363202 \times RAW - 0,959378582419237$ $(R^2 = 0,84)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,04 - 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (4 -35% VWC)
Quasi in situ (περιοχή RAW) εξίσωση	-
Τυπική μέθοδος εξίσωση	$\theta = -0,00000000206182073324206 \times RAW^3 +$ $0,00000341411204235075 \times RAW^2 -$ $0,000493102366114427 \times RAW - 0,682323968372464$ $(R^2 = 0,91)$

		για μετρήσεις θ (ή VWC): $0,06 - 0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (6 -16% VWC)
Τυπική (περιοχή εξίσωση	μέθοδος RAW)	-

Πίνακας 15 Σύγκριση μοντέλων για το έδαφος Γ [ΕΞ – Νεοχώρι] για καταγραφικά της Decagon Devices

Αισθητήρας / Καταγραφικό	Decagon EC5 / Decagon em50			
	Τυπική μέθοδος		Quasi in situ μέθοδος	
Μοντέλο	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα
Πολυωνυμικό 3 ^{ου} βαθμού	0,61	-2 έως 2% 0,26%	-	-
Γραμμικό	0,82	-22 έως 2% 1,86%	-	-
Γενικό της Decagon (generic)	0,81	0 έως 26% 1,91%	-	-
Μοντέλο	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα
Πολυωνυμικό 3 ^{ου} βαθμού	0,87	-2 έως 3% 0,37%	0,74	-8 έως 10% 0,88%
Γενικό της Decagon (generic)	0,81	-1 έως 6% 0,51%	0,81	-5 έως 16% 1,04%

ΈδαφοςΔ [ΧΚ – Ρόκα]

ΟΠίνακας 16, περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της καλλιέργειας που ενδιαφέρουν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.

Πίνακας 16 Χαρακτηριστικά εδάφους και καλλιέργειας περίπτωσης Δ [ΧΚ – Ρόκα]

Καλλιέργεια	Ακτινίδιο, Τσεχελίδης, 7 ετών
MAD(Allenetal., 1998)	0,35
Τύπος εδάφους (Κατσουλάκου, 2017)	Siltclay – Ιλυοαργιλώδες
Θs, FC, PWP (με βάση τον τύπο του εδάφους από Twarakavietal., 2009)	Θs ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$): 45% FC ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$): 39% PWR ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$): 22%
Ks (Μαλάμος, 2016 / Normalized Ks at 10°C)	34 cm d^{-1}
ρ_b (Μαλάμος, 2016)	1,68g cm^{-3}

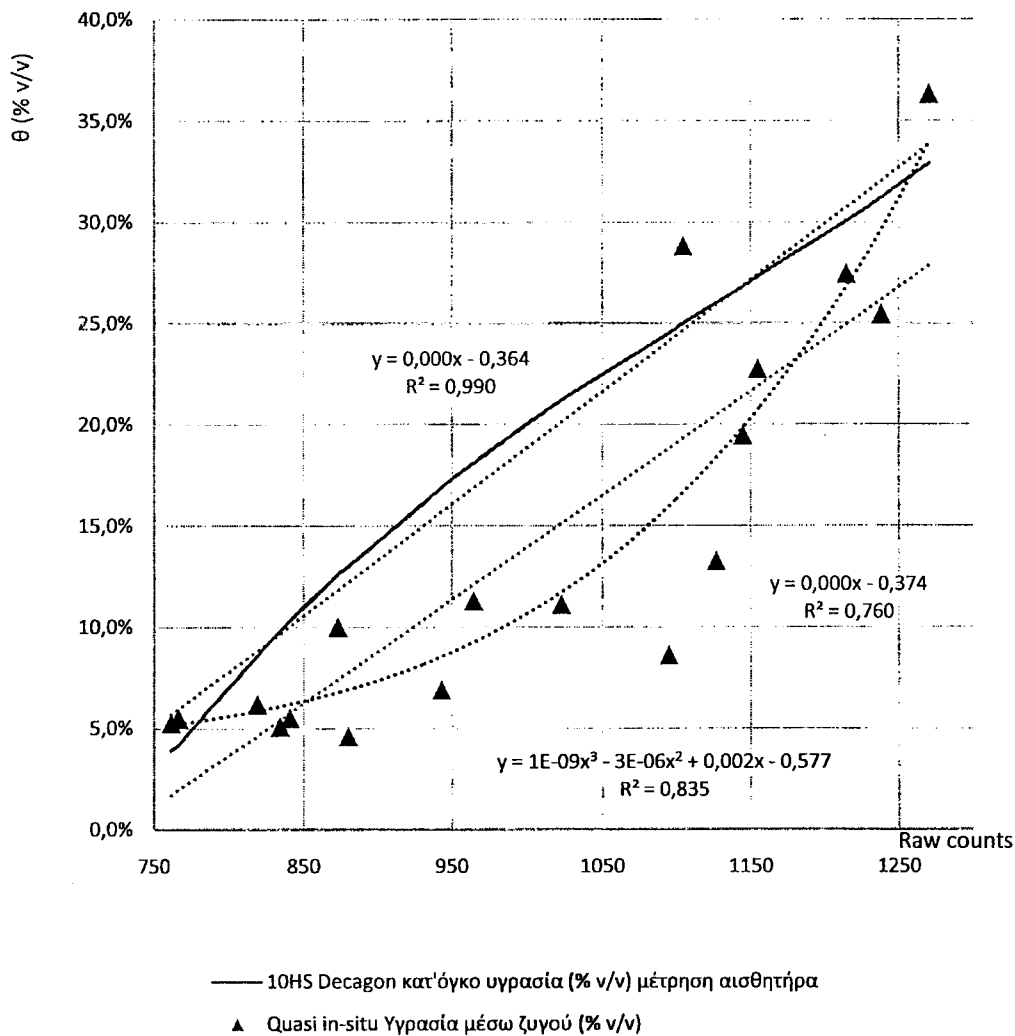
Μέθοδος quasiin-situ

Χρησιμοποιήθηκαν 3 αδιατάρακτα δείγματα (κύλινδροι PVCμε τα χαρακτηριστικά που έχουν αναφερθεί). Ο Πίνακας 17 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων.

Πίνακας 17 Δείγματα μεθόδου quasiin-situ για την περίπτωση Δ [ΧΚ – Ρόκα]

Αναγνωριστικό δείγματος	10	11	12	
Βάθος δείγματος (0 επιφάνεια εδάφους)	0-18,5	0-18,5	0-18,5	cm
Βάροςδοχείου αδιατάρακτου	282	277	281	gr
Διαστάσεις δοχείου αδιατάρακτου: Διάμετρος Ø	13,5	13,5	13,5	cm
Διαστάσεις δοχείου αδιατάρακτου: h	18,5	18,4	18,7	cm
Εσωτερικός όγκος δοχείου αδιατάρακτου	2648,07	2633,75	2676,70	cm^3 ή ml
Βάση συγκρ. χώματος - βάρος	25	13	16	gr
Δοχείο μεταφοράς, βάρος	21	22	20	gr
Τύπος αισθητήρα				
Βάρος αισθητήρα (με καλώδιο 5m και βύσμα σύνδεσης και δεματικό τακτοποίησης καλωδίου)	150	150	150	gr
Ξηρό βάρος χώματος	2592	2733	2357	gr

Αναγνωριστικό δείγματος	10	11	12	
Δοχείο ζύγισης – ξήρανσης στο φούρνο, βάρος	28	19	27	gr
Όγκος εδάφους στο δοχείο αδιατάρακτου	2576,5	2562,2	2605,1	cm ³
Φαινόμενη πυκνότητα εδάφους (ρ_b)	1	1,06	0,89	gr cm ⁻³



Εικόνα 38 Αποτελέσματα μεθόδου βαθμονόμησης quasiin-situgια 10HS, για την περίπτωση Δ [ΧΚ – Ρόκα].Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Εφαρμόστηκε η μέθοδος βαθμονόμησης quasiin-situkaι τα αποτελέσματα συνοψίζονται στηνΕικόνα 38. Τα δεδομένα έχουν ομαδοποιηθεί (databinning/bucketing) ανά δεκάδα rawcounts (π.χ. από όλες τις διαθέσιμες

μετρήσεις μεταξύ 790 και 799 rawcounts χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή τους κοκ). Οι μετρήσεις της κατόγκο υγρασίας του εδάφους σε ν/νακολουθούν τα όσα προβλέπονται από την γενική του εξίσωση για τα ανόργανα εδάφη. Η πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ου} βαθμού παρέχει λίγο καλύτερο συντελεστή R² από την γραμμική παρεμβολή (0,84 αντί 0,76).

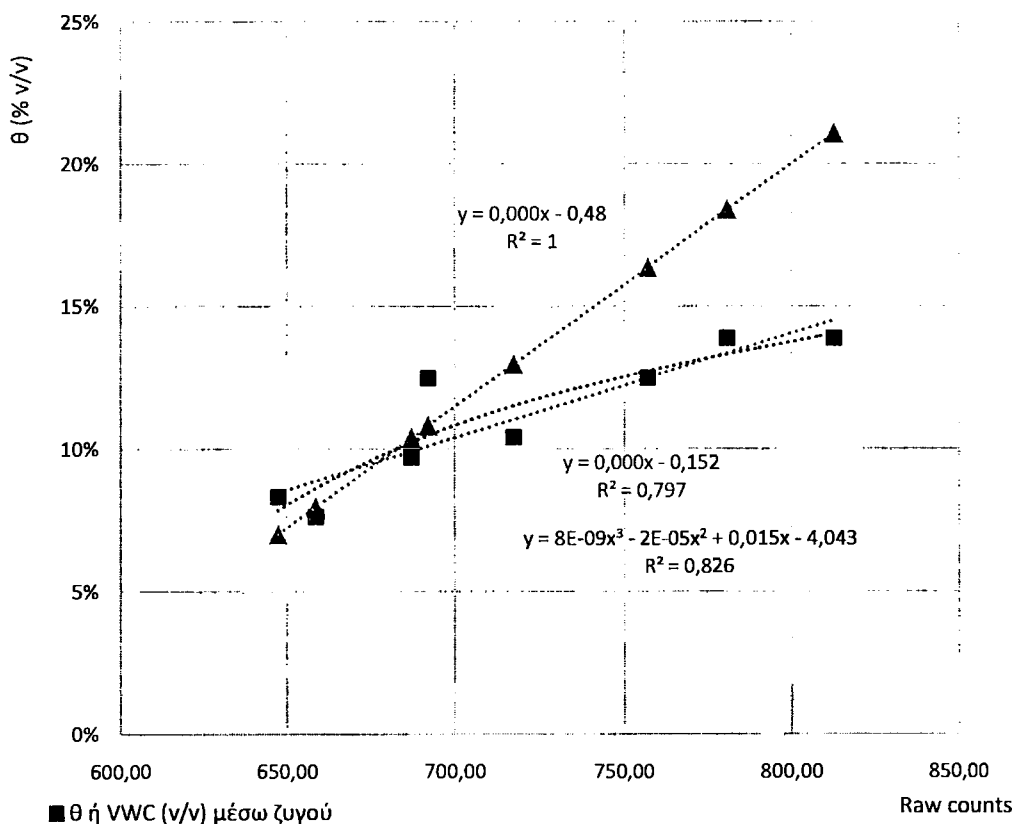
Όπως είναι γνωστό γενικά στο πλαίσιο των αρδεύσεων, ενδιαφέρει η υγρασία στο έδαφος να παραμένει μεταξύ FC και $FC - MAD \times AW = FC - MAD \times (FC - PWP)$ (περιοχή RAW: readily available water). Με βάση τα δεδομένα που υπάρχουν για τη συγκεκριμένη περίπτωση (Πίνακας 16) θα ήταν ενδιαφέρον εξεταστεί η βαθμονόμηση όχι στο συνολικό εύρος μετρήσεων αλλά για την περιοχή μεταξύ 33 (αντιστοιχεί στο $MAD \times (FC - PWP)$) και 39% (FC) (όπως μετρήθηκαν από το ζυγό). Δεν υπήρχαν όμως διαθέσιμα δεδομένα για την ανάλυση αυτή.

Τυπική μέθοδος

Πρέπει να αναφερθεί όσο αφορά την φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους (ρ_b), ότι αυτή βρέθηκε διαφορετική σε μία ανεξάρτητη μέτρηση που είχε γίνει το 2016 (Μαλάμος) και στα 3 δείγματα της quasi in-situ μεθόδου που αναφέρθηκε παραπάνω: 1,68 (Πίνακας 16), 1, 1,06 και 0,89 gcm⁻³ αντίστοιχα (Πίνακας 17). Από αυτά προκύπτει μία μέση τιμή 1,11 gcm⁻³ ($\pm 0,12$ τυπικό σφάλμα).

Ακολουθώντας την τυπική μέθοδο βαθμονόμησης, για κάθε ένα από τα 3 δείγματα και ομαδοποιώντας τα αποτελέσματα ανά δεκάδα rawcount έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα αποτελεσμάτων (Εικόνα 39 για EC5 και Εικόνα 40 για 10HS).

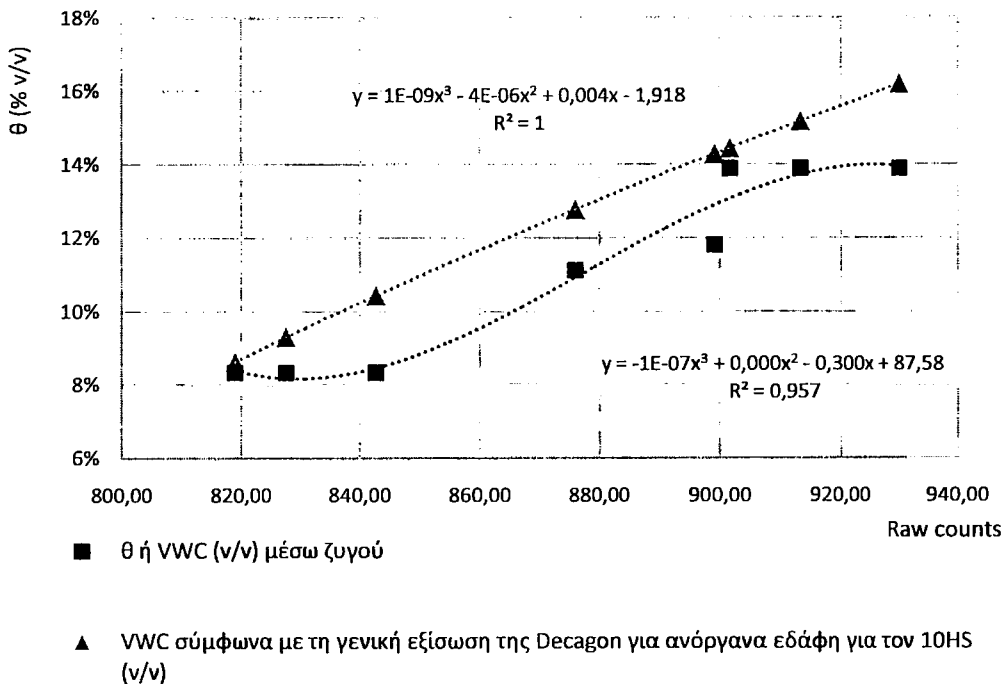
Από την Εικόνα 39 φαίνεται ότι η γραμμική παρεμβολή δίνει πολύ μέτρια αποτελέσματα ενώ η πολυωνυμική παρεμβολή (3^{ου} βαθμού) έχει λίγο καλύτερη προσαρμογή.



Εικόνα 39 Βαθμονόμηση EC5 για έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Για την περιοχή που έχει άμεσο ενδιαφέρον για το ακτινίδιο (RAW), δεν έγινε ανάλυση λόγω του ότι δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα.

Όσο αφορά τον αισθητήρα 10HS, τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 40. Στην περίπτωση του 10HS, με βάση την πρόταση παρεμβολής της κατασκευάστριας εταιρείας, χρησιμοποιήθηκε πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ου} βαθμού. Και στην περίπτωση του 10HS, η βαθμονόμηση στην περιοχή του RAW παρουσίασε δεν έγινε, λόγω μη ύπαρξης δεδομένων.



Εικόνα 40 Βαθμονόμηση 10HS για έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα] σύμφωνα με την τυπική μέθοδο. Προσοχή οι συντελεστές που παρουσιάζονται στις εξισώσεις παρεμβολής είναι στρογγυλοποιημένοι και εάν χρησιμοποιηθούν έτσι ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς.

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Ο Πίνακας 18 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν τη συγκεκριμένη περίπτωση. Ο

Πίνακας 19 παρουσιάζει τη σύγκριση των μοντέλων από όπου φαίνεται ότι (με βάση τον συντελεστή IPE3) για τον EC5 το πολυώνυμο 3ου βαθμού μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση τόσο στην τυπική όσο και στην quasi in situ βαθμονόμηση έχοντας και το μικρότερο τυπικό σφάλμα.

Για τον 10HS η γενική εξίσωση της Decagon μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση (δεν υπάρχουν δεδομένα για την quasi in situ). Το πολυωνυμικό μοντέλο 3ου βαθμού έχει το μικρότερο τυπικό σφάλμα.

Το εύρος των διαφορών από την πραγματική τιμή της υγρασίας όπως μετρήθηκε με το ζυγό είναι για το πολυώνυμο 3ου βαθμού για την τυπική μέθοδο και την quasi in situ μέθοδο εντός των ορίων που προβλέπει ο κατασκευαστής. Το γενικό μοντέλο της Decagon το επιτυγχάνει αυτό μόνο για το 10HS στην τυπική μέθοδο.

Πίνακας 18 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρων για έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα] για καταγραφικά της Decagon Devices

Έδαφος	Silt loam - Ιλυστηλώδες
Αισθητήρας / Καταγραφικό	Decagon EC5 / Decagon em50
Προτεινόμενη εξίσωση από κατασκευαστή (generic mineral)	$\theta = 8,5 \times 10^{-4} \times \text{RAW} - 0,48$ για μετρήσεις θ (ή VWC): $0 - \approx 0,60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (0 -60% VWC) ακρίβεια: VWC: $\pm 3\%$ ή $\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (χωρίς βαθμονόμηση), για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα $0,1 < \text{EC} < 10 \text{ dS m}^{-1}$ και αν επιτευχθεί άποψη τοποθέτηση του αισθητήρα Αν χρειάζονται μετρήσεις στην κλίμακα 0-100% πρέπει να γίνει βαθμονόμηση με πολυώνυμο 3 ^{ου} βαθμού (Decagon, 2012).
Αναμενόμενη σύμφωνα με τον κατασκευαστή ακρίβεια μετά από βαθμονόμηση	$\pm 1\text{-}2\% \text{ VWC}$ ($\pm 0,01$ έως $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)
Quasi in situ εξίσωση	-
Quasi in situ (περιοχή RAW) εξίσωση	-
Τυπική μέθοδος εξίσωση	$\theta = 0,000366277878937558 \times \text{RAW} - 0,152318991736438$ ($R^2 = 0,80$) και

	$\theta = 0,00000000811035710109101 \times RAW^3 - 0,0000192154665544324 \times RAW^2 + 0,0154085504785472 \times RAW - 4,04382306242726$ $(R^2 = 0,83)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): 0,08 – 0,14 m ³ m ⁻³ (8 -14% VWC)
Τυπική μέθοδος (περιοχή RAW) εξίσωση	-
Προτεινόμενη εξίσωση από κατασκευαστή (generic mineral)	$\theta = 1,17 \times 10^{-9} \times RAW^3 - 3,95 \times 10^{-6} \times RAW^2 + 4,90 \times 10^{-3} \times RAW - 1,92$ για μετρήσεις θ (ή VWC): 0 – 0,57 m ³ m ⁻³ (0 -57% VWC) ακρίβεια: VWC: $\pm 3\%$ ή $\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, για τυπικά ανόργανα εδάφη και για ηλεκτρική αγωγιμότητα EC <10 dS m ⁻¹ και αν επιτευχθεί άψογη τοποθέτηση του αισθητήρα
Αναμενόμενη σύμφωνα με τον κατασκευαστή ακρίβεια μετά από βαθμονόμηση	$\pm 2\% \text{ VWC } (\pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$
Quasi in situ εξίσωση	$\theta = 0,000513929895887348 \times RAW - 0,374647072422628$ $(R^2 = 0,76)$ και $\theta = 0,00000000143780913568529 \times RAW^3 - 0,00000312764591005099 \times RAW^2 + 0,00237406533192283 \times RAW - 0,577672673999874$ $(R^2 = 0,84)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): 0,05 – 0,36 m ³ m ⁻³ (5 -36% VWC)
Quasi in situ (περιοχή RAW) εξίσωση	-
Τυπική μέθοδος εξίσωση	$\theta = -0,000000130490927728266 \times RAW^3 + 0,000343645189085362 \times RAW^2 - 0,300754310478423 \times RAW + 87,5836513330364$ $(R^2 = 0,96)$ για μετρήσεις θ (ή VWC): 0,08 – 0,14 m ³ m ⁻³ (8 -14% VWC)

Τυπική (περιοχή εξίσωση	μέθοδος RAW)	-
-------------------------------	-----------------	---

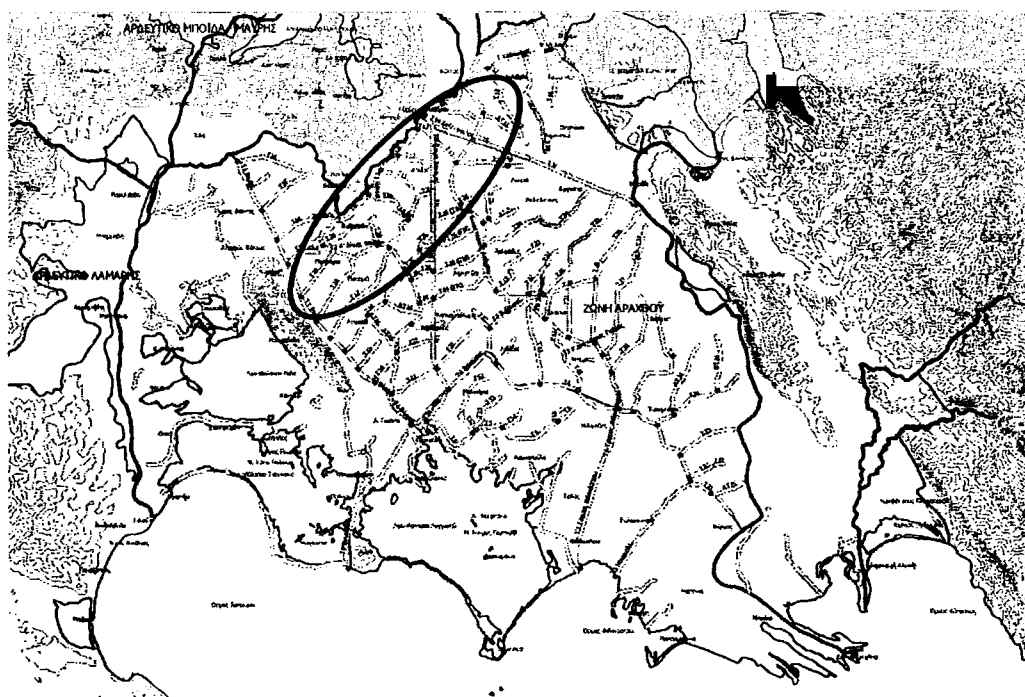
Πίνακας 19 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα] για καταγραφικά της Decagon Devices

Αισθητήρας / Καταγραφικό	Decagon EC5 / Decagon em50			
	Τυπική μέθοδος		Quasi in situ μέθοδος	
Μοντέλο	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα
Πολυωνυμικό 3 ^{ου} βαθμού	0,77	-2 έως 1% 0,36%	0,71	-12 έως 7% 0,96%
Γραμμικό	0,83	-7 έως 1% 1,02%	0,83	-10 έως 10% 1,15%
Γενικό της Decagon (generic)	0,81	-2 έως 7% 1,09%	0,81	-4 έως 16% 1,27%
Μοντέλο	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα	IPE3	Διαφορά από πραγματική τιμή Τυπικό σφάλμα
Πολυωνυμικό 3 ^{ου} βαθμού	0,83	-1 έως 1% 0,19%	-	-
Γενικό της Decagon (generic)	0,81	0 έως 2% 0,29%	-	-

Συμπεριφορά των αισθητήρων στην περίπτωση άρδευσης με νερό διαφορετικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Η σύγκριση αφορά έδαφος από τη μελέτη περίπτωσης Δ [ΧΚ – Ρόκα] για αισθητήρες 10HS και EC5 της Decagon, συνδεδεμένους σε καταγραφικό em50 του ίδιου κατασκευαστή.

Το νερό προήλθε από την τάφρο της Βόσσας η οποία χρησιμοποιείται τόσο για στράγγιση όσο και για άρδευση (Εικόνα 41). Η μέση ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) στα δείγματα που συλλέχθηκαν κατά την αρδευτική περίοδο 2017 ήταν: $1998 \mu\text{S cm}^{-1}$. Η βαθμονόμηση έγινε με την τυπική μέθοδο.

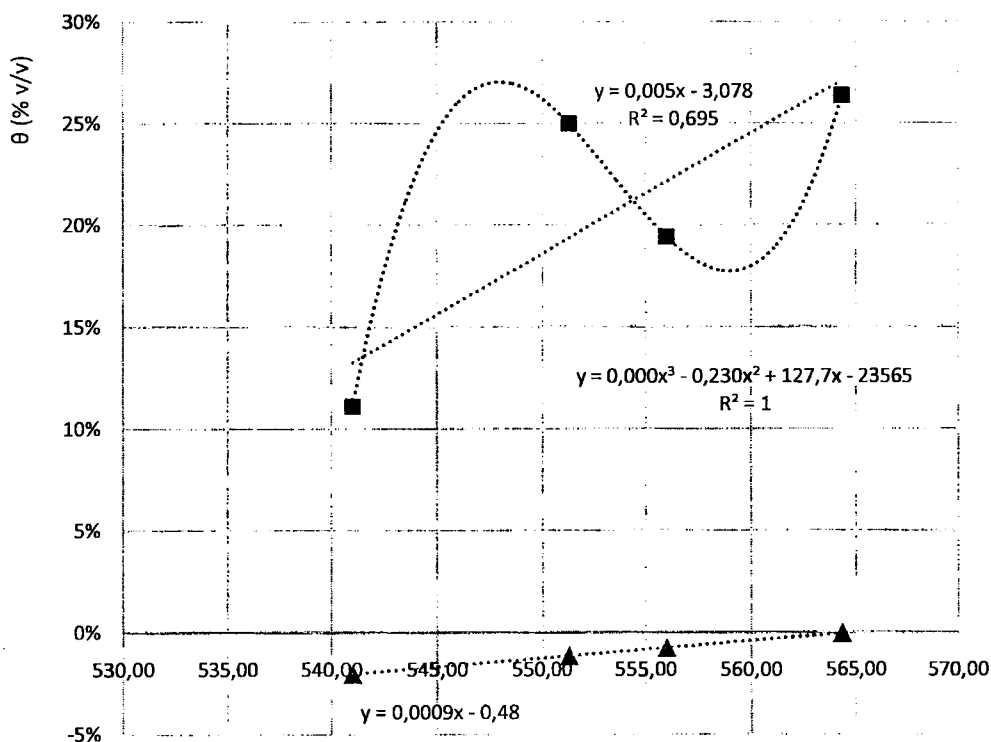


Εικόνα 41 Η τάφρος της Βόσσας στην πεδιάδα της Άρτας (πηγή: ΕΟΧ Ανοξική Ζώνη, <http://eeagrants.amvrakikos.upatras.gr/>)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 42, η γενική (generic) εξίσωση της Decagon για τον EC5 (υπενθυμίζεται ότι είναι 1^{ου} βαθμού) δίνει πολύ μεγάλα σφάλματα, ενώ το μοντέλο βαθμονόμησης 1^{ου} βαθμού έχει μέτριο R^2 (0,69), απόδοση που βελτιώνεται αρκετά εάν χρησιμοποιηθεί πολυωνυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού.

Οι αποκλίσεις ήταν από -26,40 έως -13,12% για την γενική (generic) εξίσωση της Decagon (τυπικό σφάλμα 3,13%), από -5,60 έως 2,72% για την γραμμική εξίσωση βαθμονόμησης (τυπικό σφάλμα 2,72 %), και 0 για την πολυωνυμική εξίσωση

βαθμονόμησης. Βέβαια αν υπήρχαν περισσότερα σημεία ίσως η άριστη αυτή απόδοση της πολυωνυμικής να μειωνόταν.



■ θ ή VWC (v/v) μέσω ζυγού

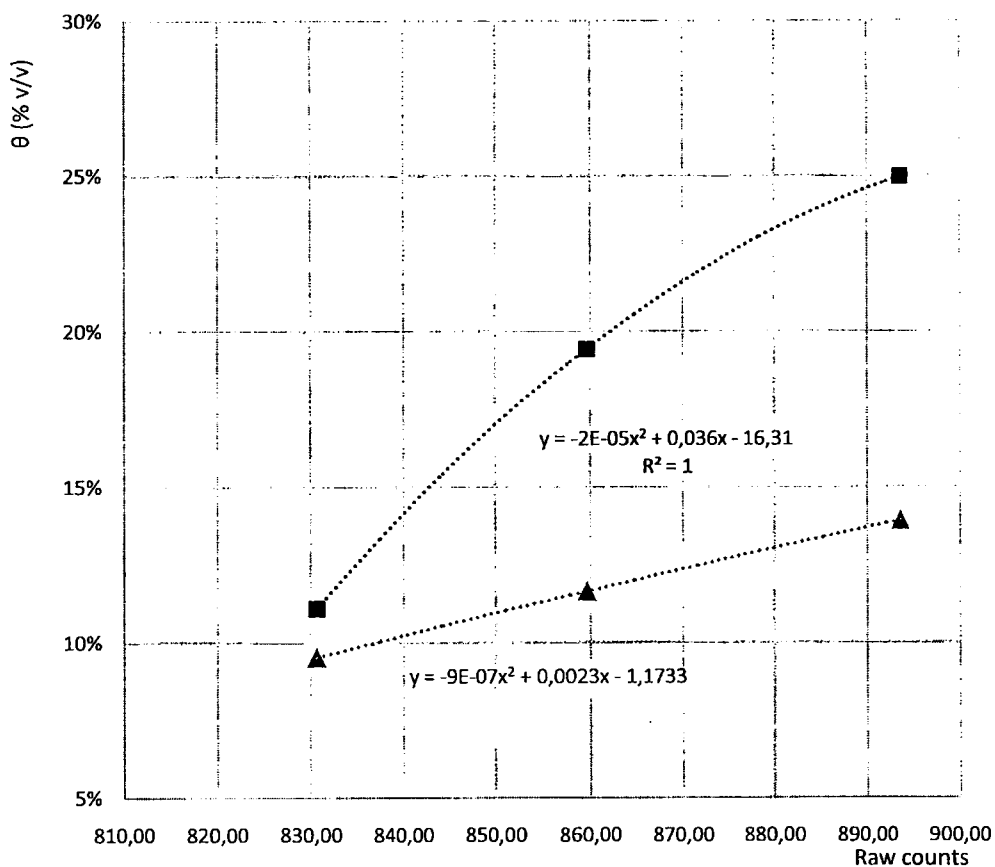
Raw counts

▲ VWC σύμφωνα με τη γενική εξίσωση της Decagon για ανόργανα εδάφη για τον EC5 (v/v)

Εικόνα 42 Μοντέλα συσχέτισης σήματος αισθητήρα με εδαφική υγρασία για EC5 και άρδευση με νερό υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 43, η γενική (generic) εξίσωση της Decagon για τον 10HS(υπενθυμίζεται ότι είναι 3^{ου} βαθμού)δίνει πολύ μεγάλα σφάλματα, ενώ το μοντέλο βαθμονόμησης 3^{ου} βαθμού έχει άριστο R^2 (1). Σημειώνεται ότι η μεταβλητή στον 3^ο βαθμό δεν φαίνεται γιατί η τιμή του αντίστοιχου συντελεστή είναι 0.

Οι αποκλίσεις ήταν από -11,04 έως -1,57% για την γενική (generic) εξίσωση της Decagon (τυπικό σφάλμα 2,78%) και 0 για την πολυωνυμική εξίσωση βαθμονόμησης. Βέβαια αν υπήρχαν περισσότερα σημεία ίσως η άριστη αυτή απόδοση της πολυωνυμικής να μειωνόταν



■ θ ή VWC (v/v) μέσω ζυγού

▲ VWC σύμφωνα με τη γενική εξίσωση της Decagon για ανόργανα εδάφη για τον 10HS (v/v)

Εικόνα 43 Μοντέλα συσχέτισης σήματος αισθητήρα με εδαφική υγρασία για 10HS και άρδευση με νερό υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της εφαρμογής προγραμμάτων άρδευσης, η αρχή του «πώς να ελέγξεις κάτι που δεν μετράς», απαιτεί χρήση συστημάτων μέτρησης των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου ή/και της υδατικής κατάστασης των καλλιεργειών.

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 βαθμονόμηση για τους διάφορους τύπους εδάφους και τα διάφορα επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού άρδευσης ώστε να έχουν αυξημένη ακρίβεια μέτρησης.

Στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας:

1. γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο και την αρχή λειτουργίας των ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων μέτρησης υγρασίας εδάφους.
2. παρουσιάζεται, η τυπική μέθοδος βαθμονόμησης που προτείνεται από τον κατασκευαστή και μία μέθοδος που προσομοιάζει την κατάσταση στον αγρό για δύο κοινά χρησιμοποιούμενους σχετικούς αισθητήρες (EC5 και 10HC της DecagonDevices, USA),
3. εφαρμόζονται και αξιολογούνται για τους δύο αισθητήρες και για βασικούς τύπους εδαφών που συναντώνται στην πεδιάδα της Άρτας τόσο η τυπική όσο και η μέθοδος που προσομοιάζει την κατάσταση στον αγρό και
4. εξετάζεται η συμπεριφορά των αισθητήρων στην περίπτωση άρδευσης με νερό με χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα όσο και νερό με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα από συγκεκριμένη πηγή νερού (διώρυγα του συλλογικού αρδευτικού δικτύου της πεδιάδας της Άρτας που τροφοδοτείται από την τάφρο Βόσσα).

Για το έδαφος A [ΛΚ – Αγ. Παρασκευή], το οποίο ήταν μέσο, τύπου Siltloam – Ιλυοπηλώδες η σύγκριση των μοντέλων έδειξε ότι (με βάση τον συντελεστή IPE3) για τον EC5 το πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση τόσο στην τυπική όσο και στη quasiinsitu βαθμονόμηση ενώ έχει και το μικρότερο τυπικό σφάλμα και στις δύο περιπτώσεις. Για τον 10HS (η βαθμονόμηση αφορούσε μόνο την τυπική μέθοδο), καλύτερο μοντέλο ήταν η γενική εξίσωση της DecagonDevices για ανόργανα εδάφη (η οποία είναι πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού) με μικρή διαφορά από το πολυωνυμικό όσο αφορά τον IPE3 αλλά μεγαλύτερο τυπικό σφάλμα. Ακόμη είναι φανερό ότι το εύρος των διαφορών από την πραγματική τιμή της υγρασίας όπως μετρήθηκε με το ζυγό είναι σε κάθε περίπτωση πολύ μεγαλύτερο από αυτό που θεωρεί αναμενόμενο ο κατασκευαστής.

Για το έδαφος Β [ΜΤ - Κολομόδια], το οποίο ήταν μέσο αλλά στο όριο με βαρύ, τύπου Siltclay – Ιλυοαργιλώδες η σύγκριση των μοντέλων (με βάση τον συντελεστή ΙΡΕ3) για τον EC5, έδειξε ότι το πολuwώνυμο 3^{ου} βαθμού και η γενική εξίσωση της Decagon μοντελοποιούν καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση ενώ το πολuwώνυμο 3ου βαθμού έχει την καλύτερη συμπεριφορά στην quasiinsitu βαθμονόμηση. Το πολuwονυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού είχε και το μικρότερο τυπικό σφάλμα και στις δύο περιπτώσεις. Για τον 10HS τη γενική εξίσωση της Decagon μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση ενώ το πολuwώνυμο 3^{ου} βαθμού έχει την καλύτερη συμπεριφορά στην quasiinsitu βαθμονόμηση. Το πολuwονυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού έχει το μικρότερο τυπικό σφάλμα και στις δύο περιπτώσεις. Το εύρος των διαφορών από την πραγματική τιμή της υγρασίας όπως μετρήθηκε με το ζυγό είναι για το πολuwώνυμο 3^{ου} βαθμού και κυρίως για την quasiinsitu μέθοδο εντός των ορίων που προβλέπει ο κατασκευαστής.

Για το έδαφος Γ [ΕΞ – Νεοχώρι], SiltyClayLoam έως ClayLoam - Ιλυοαργιλοπηλώδες έως αργιλοπηλώδες (στα όρια μεταξύ μέσου και βαρύ), η σύγκριση των μοντέλων (με βάση τον συντελεστή ΙΡΕ3) για τον EC5, έδειξε ότι το πολuwώνυμο 3^{ου} βαθμού μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση (δεν υπάρχουν δεδομένα για την quasiinsitu βαθμονόμηση). Το πολuwονυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού έχει και το μικρότερο τυπικό σφάλμα. Για τον 10HS τη γενική εξίσωση της Decagon μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση ενώ το πολuwώνυμο 3^{ου} βαθμού έχει την καλύτερη συμπεριφορά στην quasiinsitu βαθμονόμηση. Το πολuwονυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού έχει το μικρότερο τυπικό σφάλμα και στις δύο περιπτώσεις. Το εύρος των διαφορών από την πραγματική τιμή της υγρασίας όπως μετρήθηκε με το ζυγό είναι για το πολuwώνυμο 3^{ου} βαθμού για την τυπική μέθοδο εντός των ορίων που προβλέπει ο κατασκευαστής.

Για το έδαφος Δ [ΧΚ – Ρόκα] τύπου SiltyClayLoam - Ιλυοαργιλοπηλώδες (βαρύ στα όρια με μέσο) η σύγκριση των μοντέλων (με βάση τον συντελεστή ΙΡΕ3) έδειξε για τον EC5 το πολuwώνυμο 3^{ου} βαθμού μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση τόσο στην τυπική όσο και στην quasiinsitu βαθμονόμηση έχοντας και το μικρότερο τυπικό σφάλμα. Για τον 10HS η γενική εξίσωση της Decagon μοντελοποιεί καλύτερα την κατάσταση στην τυπική βαθμονόμηση (δεν υπάρχουν δεδομένα για την quasiinsitu). Το πολuwονυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού έχει το μικρότερο τυπικό σφάλμα. Το εύρος των διαφορών από την πραγματική τιμή της υγρασίας όπως μετρήθηκε με το ζυγό είναι για το πολuwώνυμο 3^{ου} βαθμού για την τυπική μέθοδο και την quasiinsitu μέθοδο εντός των ορίων που προβλέπει ο κατασκευαστής. Το γενικό μοντέλο της Decagon το επιτυγχάνει αυτό μόνο για το 10HS στην τυπική μέθοδο.

Η χρήση νερού με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα έδειξε ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι αισθητήρες με βάση τις γενικές εξισώσεις που δίνει ο κατασκευαστής και θέλουν οπωσδήποτε βαθμονόμηση. Και στην περίπτωση αυτή την καλύτερη προσαρμογή έδωσε το μοντέλο 3^{ου} βαθμού.

Τα γενικά συμπεράσματα είναι ότι απαιτείται μεγάλη προσοχή στην τοποθέτηση των αισθητήρων ώστε να λαμβάνονται αξιόπιστα δεδομένα, ότι απαιτείται βαθμονόμηση για να προσεγγιστούν οι πραγματικές τιμές της υγρασίας του εδάφους, ότι το πολυωνυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού δίνει γενικά καλύτερα αποτελέσματα ως εξίσωση βαθμονόμησης και ότι η μέθοδος *quasiinsitu* δίνει τιμές που γενικά έχουν αποκλείσεις από την πραγματική υγρασία εντός των ορίων που αναφέρει ο κατασκευαστής.

Βιβλιογραφία

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome. Διαθέσιμο στο: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>, προσπελάστηκε: 10/4/2017
- 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
- BougoulS., BoulardT., 2006. Water dynamics in two rockwool slab growing substrates of contrasting densities. Scientia Horticulturae 107: 399–404.
- Campbell C.S., 2001. Response of the ECH2O Soil Moisture Probe to variation in water content, soil type, and solution electrical conductivity. Decagon Application Note ANEC0112.
- 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-meal/>, προσπελάστηκε: 10/4/2017
- 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
- Campbell G.S., 2014. Three questions to answer before you publish your soil moisture data (Decagon Devices Inc. Webinar 4/9/2014)
- CobosD.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
- Cobos D.R., 2008β. EC-5 Volume of Sensitivity. DecagonDevices. Διαθέσιμο στο: <http://www.onsetcomp.com/files/15926-B%20EC-5%20Volume%20of%20Sensitivity.pdf>, προσπελάστηκε: 10/4/2017
- 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

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 forest soils of the Pacific Northwest. Canadian Journal of Forest Research, 35(8): 1867-1876, <https://doi.org/10.1139/x05-121>

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

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

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/>)

Decagon Devices Inc., 2011. Calibration Equations for the ECH2O EC-5, ECH2O-TE and 5TE Sensors. ApplicationNote 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

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 webpage: <http://www.decagon.com/en/soils/volumetric-water-content-sensors/ec-5-lowest-cost-vwc/>)

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

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

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
- Decagon Devices Inc., 2017α. ECH2O Utility software. Διαθέσιμο στο: <https://www.decagon.com/en/data-loggers-main/software/ech2o-utility/>, προσπελάστηκε 15/7/2017
- 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
- 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/>, προσπελάστηκε: 10/4/2017
- Dexter A.R., 1988. Advances in characterization of soil structure. SoilandTillageResearch, 199-238.
- Dukes M.D., Zotarelli L., Morgan K.T., 2010. Use of Irrigation Technologies for Vegetable Crops in Florida. HortTechnology February 20(1): 133-142
- Fernando Visconti F., de Paza J.M., Martínez D., Molina J., 2014. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils. Agricultural Water Management 132:111–119
- Galloway M. 2014. Προσωπική επικοινωνία με ταξύ Matt Galloway – Decagon Soil Moisture Sensors Team Manager και Λ. Τσιρογιάννη σχετικά με τη δυνατότητα βαθμονόμησης των αισθητήρων 10HS και EC5.
- ICT International, 2006. Irrigation Scheduling. Διαθέσιμο στο: <http://www.ictinternational.com/casestudies/Irrigation-scheduling/>, προσπελάστηκε: 10/10/2017
- 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
- Kargas, G., Soulis, K.X., 2012. Performance analysis and calibration of a new low-cost capacitance soil moisture sensor. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE 138, 632–641
- Kim J., Lea-Cox J.D., Chappell M., van Iersel M.W., 2014. Wireless sensors networks for optimization of irrigation, production, and profit in ornamental production. Acta Hortic. 1037, 643-649

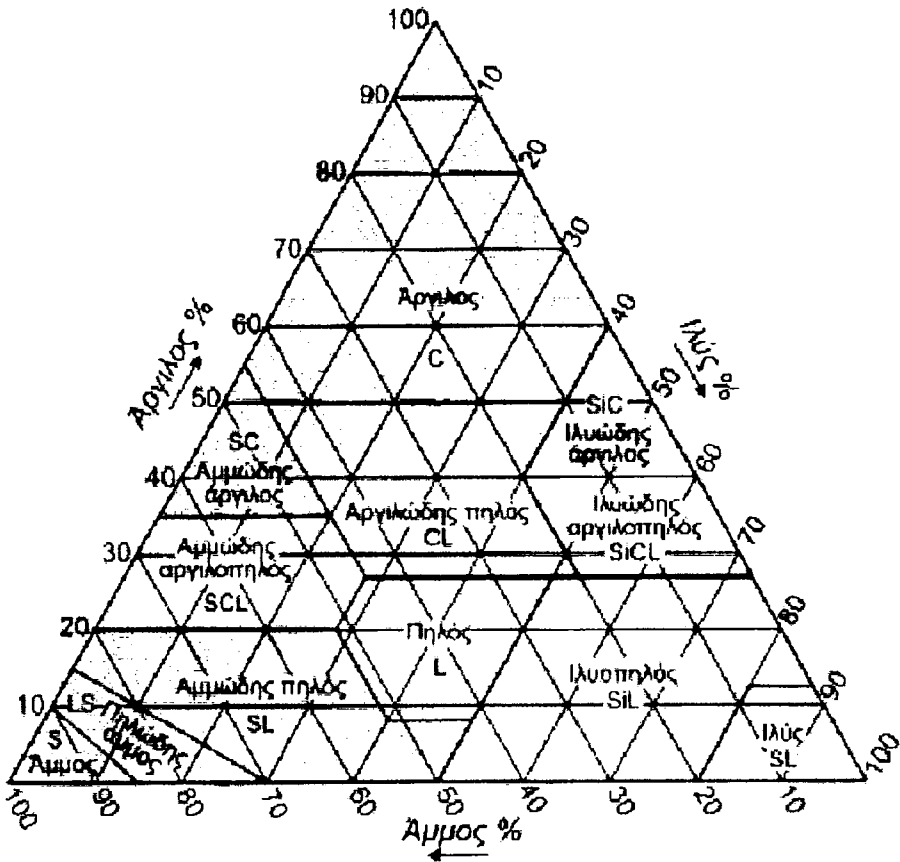
- Kodešová R., Kodeš V., Mráz A., 2011. Comparison of Two Sensors ECH2O EC-5 and SM200 for Measuring Soil Water Content. *Soil & Water Res.*, 6, (2): 102–110
- Landry L., 2012. Προσωπική επικοινωνία μεταξύ Lauren Landry – Decagon Support και Λ. Α. Τσιρογιάννη σχετικά με τη διαθεσιμότητα εξισώσεων βαθμονόμησης αισθητήρων 10HS και EC5 (στο πλαίσιο της επικοινωνίας στάλθηκε από την Decagon σχετική λίστα: Decagon ECH2O System Calibration Master List)
- Likos W.J., Ning Lu M., Godt J.W., 2014. Hysteresis and Uncertainty in Soil Water-Retention Curve Parameters. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 140(4). Διαθέσιμο στο: <https://www.pc-progress.com/Images/Personal/NLu/Publications/NLJ76201306.pdf>, προσπελάστηκε: 14/9/2017
- Malamos N., Koutsoyiannis D., 2015. Bilinear surfaces smoothing for spatial interpolation with optional incorporation of an explanatory variable. Part 2: Application to synthesized and rainfall data. *Hydrological Sciences Journal*, 61(3): 527-540
- Miller R.W. and Donahue R.L., Soils, An Introduction to Soils and Plant Growth. Σελ. 60. Sixth Edition 1990. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Pansu M., Gautheyrou J., 2006. Handbook of Soil Analysis - Mineralogical, Organic and Inorganic Methods (κεφάλαιο Water Content and Loss on Ignition). Διαθέσιμο στο: http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloadaddocument/9783540312109-c1.pdf?SGWID=0-0-45-174599-p115687972, προσπελάστηκε: 13/9/2017
- Pardossi A., Incrocci L., Incrocci G., Malorgio F., Battista P., Bacci L., Rapi., Marzalletti P., Hemming J. and Balendonck J., 2009. Review - Root Zone Sensors for Irrigation Management in Intensive Agriculture. *Sensors* 9, 2809-2835
- Raviv M., Wallach R., Silber A., Bar-Tal A., 2002. Substrates and their analysis (Chapter 2 in: D. Savvas and H. Passam (Eds), *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals* p.p. 25-101). Embryo Publications, Athens, Greece
- Schumacher B.A., Shines K.C., Burton J.V., Papp M.L., 1990. A comparison of soil sample homogenization techniques. Lockheed Engineering and Sciences Company, Inc. for U.S. Environmental Protection Agency Environmental

- Sentek Pty LTD, 2016. Solutions for soil moisture and salinity management. Presentation. Διαδικτυακός τόπος εταιρείας: <http://www.sentek.com.au/>
- Shanstrom N., 2014. What is Soil Structure and Why is it Important? Διαθέσιμο στο: <http://www.deepproot.com/blog/blog-entries/what-is-soil-structure-and-why-is-it-important>, προσπελάστηκε 16/9/2017
- Smith E., 2017. Προσωπική επικοινωνία μεταξύ Elisabeth Smith–Decagon Support και Ι.Α. Τσιρογιάννη σχετικά με τη βάση της μεθοδολογίας βαθμονόμησης των αισθητήρων EC5 και 10HS.
- 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)
- Twarakavi, N.K.C., Sakai, M., and Šimůnek, J., 2009. An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. Water Resources Research, 45 (10): 1-9. Διαθέσιμο στο: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009WR007944/full>, προσπελάστηκε: 1/8/2017.
- van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal. Διαθέσιμο στο: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/37751343/VanGenuchten-A closed form equation for predicting hydraulic conductivity-1980.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1505323131&Signature=XBgcDYM%2FoV%2BFLjPvJb1VQBPJITU%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DA closed form equation for predicting th.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/37751343/VanGenuchten-A%20closedform%20equation%20for%20predicting%20hydraulic%20conductivity-1980.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1505323131&Signature=XBgcDYM%2FoV%2BFLjPvJb1VQBPJITU%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DA%20closed%20form%20equation%20for%20predicting%20th.pdf), προσπελάστηκε 1/8/2017.
- Witkowska-Walczak B., 2006. Hysteresis between wetting and drying processes as affected by soil aggregate size. Int. Agrophysics, 2006, 20, 359-365. Διαθέσιμο στο: http://www.old.international-agrophysics.org/artykuly/international_agrophysics/IntAgr_2006_20_4_359.pdf, προσπελάστηκε: 14/9/2017
- Θεοχάρης Μ., 1998 Αρδεύσεις Στραγγίσεις. ΤΕΙ Ηπείρου, Άρτα
- Κολιοπάνος Χ., 2015. Παρουσίαση σχετικά με τις βασικές αρχές λειτουργίας των ηλεκτρικών αισθητήρων υγρασίας εδάφους. ΤΕΙ Ηπείρου, Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανικής και Διαχείρισης Φυσικών Πόρων.

- Μαλάμος Ν., 2016. Αναλύσεις αδιατάρακτων δειγμάτων εδάφους που αφορά η παρούσα εργασία με σκοπό την εύρεση της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κορεσμένη κατάσταση (Ks). ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Τμ. Τεχνολόγων Γεωπόνων.
- Παπαδόπουλος Γ. Δ., 1998. Εδαφολογία. ΤΕΙ Ηπείρου
- 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>)
- Τσιρογιάννης Ι.Λ., Κολιοπάνος Χ., 2017. Χρήση διηλεκτρικών πυκνωτικών αισθητήρων υγρασίας εδάφους. Τεχνική Αναφορά AN01_2017 ΤΕΙ Ηπείρου, Τμ. Τεχν. Γεωπόνων, Εργ. Γεωργικής Μηχανικής και Διαχείρισης Φυσικών Πόρων. Διαθέσιμο στο: <http://www.irrigation-management.eu/tools/repository/category/49-studies-reports?download=658:an012017>, προσπελάστηκε: 1/11/2017.

Παράρτημα Ι – Κλάσεις εδάφους

Όσο αφορά τη στερεή φάση, η μηχανική κλάση ή σύσταση του εδάφους προσδιορίζεται από το μέγεθος των τεμαχιδίων ή κόκκων του εδάφους. Αν απομακρυνθούν τα λεγόμενα σκελετικά υλικά (διάμετρος κόκκων> 2 mm), υπάρχουν 3 βασικές κατηγορίες τεμαχιδίων (ως προς το μέγεθος): α) άμμος (sand), β) ιλύ (silt) και άργιλο (clay). Για τις διαστάσεις των κόκκων έγινε αναφορά στο κυρίως κείμενο, στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το τρίγωνο μηχανικής κατάταξης, ενώ στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες.



Textural class	Τύπος εδάφους (κατηγορία κοκκομετρικής σύστασης)
Sand	Άμμος
Coarse Sand	Χονδρόκοκκη άμμος
Medium Sand	Άμμος με μέσους κόκκους
Fine Sand	Λεπτόκοκκη άμμωσ
Loamy Sand	Πηλοαμμώδες
Sandy Loam	Αμμοπηλώδες
Fine Sandy Loam	Λεπτόκοκκο αμμοπηλώδες
V. Fine Sandy Loam	Πολύ λεπτόκοκκο αμμοπηλώδες
Loam	Πηλός
Silt	Ιλύς
Silt Loam	Ιλοσπηλώδες
Sandy Clay Loam	Αμμοαργιλοπηλώδες
Clay Loam	Αργιλοπηλώδες
Silty Clay Loam	Ιλοαργιλοπηλώδες
Sandy Clay	Αμμοαργιλώδες
Silty Clay	Ιλοαργιλώδες
Clay	Αργιλώδες

Παράρτημα II– Το κόστος του εξοπλισμού

Στο τέλος του 2017, το κόστος απόκτησης των αισθητήρων και των καταγραφικών που αξιολογούνται στο πλαίσιο της έρευνας αυτής είναι το ακόλουθο (ενδεικτικό κόστος ανά τεμάχιο, χωρίς ΦΠΑ):

- ECH2O EC-5 αισθητήρας υγρασίας της DECAGON/METER με 5mκαλώδιο και βύσμα 3.5 mm (stereo plug): 100€
- ECH2O 10HS αισθητήρας υγρασίας της DECAGON/METER με 5mκαλώδιο και βύσμα 3.5 mm (stereo plug): 110€
- Em50 καταγραφικό με 5 θέσεις για αισθητήρες 3.5 mm (stereo plug) τηςDECAGON/METER: 690€