



ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ ΓΕΩΠΟΝΩΝ

Κατεύθυνση: Φυτικής Παραγωγής

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ
ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΗΘΗΤΟΜΕΤΡΟ ΑΠΛΟΥ
ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ, ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ανδρέα Καλούμενου

Επιβλέπων Καθηγητής: Ηλίας Τελόγλου

Αναπληρωτής Καθηγητής

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2016



ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ ΓΕΩΠΟΝΩΝ

Κατεύθυνση: Φυτικής Παραγωγής

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ
ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΗΘΗΤΟΜΕΤΡΟ ΑΠΛΟΥ
ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ, ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ανδρέα Καλούμενου

Επιβλέπων Καθηγητής: Ηλίας Τελόγλου

Αναπληρωτής Καθηγητής

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως την οικογένειά μου, για την αμέριστη ηθική και οικονομική υποστήριξη που είχα σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Γεώργιο Οικονόμου, μέλος ΕΤΠ και τους φοιτητές Μαρία Σαρρή και Αποστόλη Περιστέρη για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων.

Ευχαριστώ θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή Δρ. Στέφανο Στεφάνου και την κ. Αγάπη Τσανακτσίδου, μέλος ΕΤΠ, για τις εδαφολογικές αναλύσεις των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές μετρήσεις.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό της εταιρείας Scientact ΑΕ και ιδιαίτερα τον κ. Σπύρο Πατρόπουλο, για την τεχνική υποστήριξη και την άψογη συνεργασία μας.

Τέλος, εκφράζονται ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ηλία Τελόγλου για την ανάθεση του θέματος της εργασίας και τις χρήσιμες συμβουλές και υποδείξεις του καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο όρος «Διήθηση» αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία το νερό της βροχής ή της άρδευσης εισχωρεί από την επιφάνεια του εδάφους προς τα βαθύτερα στρώματα του εδαφικού προφίλ. Η ποσοτικοποίηση της διήθησης είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάλυση και τον προσδιορισμό των συνιστωσών ενός υδρολογικού μοντέλου καθώς και στον σχεδιασμό των αρδεύσεων. Το φαινόμενο της διήθησης είναι αρκετά σύνθετο με μεγάλη χωρική και χρονική παραλλακτικότητα καθώς εξαρτάται από τη δομή του εδάφους, τη μηχανική σύσταση, τον βαθμό συμπίεσης, την αρχική περιεχόμενη υγρασία, την ύπαρξη επιφανειακής κρούστας και την ομοιογένεια της εδαφικής κατατομής.

Ειδικότερα στις αρδεύσεις, η ικανότητα διήθησης (infiltrability) είναι πολύ σημαντική παράμετρος διότι επηρεάζει την επιλογή του μεγέθους των αρδευτικών λεκανών, το μήκος των αρδευτικών λωρίδων ή αυλάκων και επίσης τον ρυθμό εφαρμογής του νερού. Λανθασμένη εκτίμηση της διηθητικότητας του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη διανομή του νερού στις καλλιέργειες, στην απώλεια νερού λόγω βαθιάς διήθησης ή επιφανειακής απορροής.

Η μέτρηση της διηθητικότητας γίνεται με συσκευές που ονομάζονται διηθητόμετρα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι διηθητομέτρων που χρησιμοποιούνται στην πρακτική των αρδεύσεων, ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του νερού στο έδαφος.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζεται η λειτουργικότητα ενός αυτοματοποιημένου διηθητομέτρου απλού κυλίνδρου σταθερού φορτίου (της Εταιρείας Scientact A.E.) που διαθέτει συσκευή αυτόματης καταγραφής της στάθμης του νερού, αυτοματισμούς ελέγχου της ροής συνεργαζόμενους με αντλία πλήρωσης του νερού στο διηθητόμετρο. Κατά τη διάρκεια των πειραματισμών παρατηρήθηκαν οι αστοχίες και έγιναν βελτιωτικές παρεμβάσεις στους αυτοματισμούς ελέγχου ώστε το διηθητόμετρο να λειτουργεί αξιόπιστα χωρίς την παρουσία παρατηρητή. Οι πειραματικές μετρήσεις διηθητικότητας πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Αρδεύσεων του ΑΤΕΙΘ και τα εδαφικά δείγματα ελήφθησαν από το Αγρόκτημα του Εκπαιδευτικού Ιδρύματος. Για τη διενέργεια των μετρήσεων κατασκευάστηκε μια ξύλινη ιδιοκατασκευή ως βάση υποδοχής των εδαφικών δειγμάτων και την τοποθέτηση του κυλινδρικού διηθητομέτρου. Ειδικότερα, κατά τις μετρήσεις διηθητικότητας εξετάστηκαν τα παρακάτω σενάρια. α) Μέτρηση διηθητικότητας σε ομοιογενές συμπιεσμένο και

ασυμπίεστο έδαφος β) Μέτρηση διηθητικότητας σε διαστρωμένο έδαφος γ) Μέτρηση διηθητικότητας με διαφορετικό χρονικό βήμα (1 s, 2 s και 4 s) καταγραφής των μετρήσεων.

Τέλος, παρουσιάζονται όλα τα διαδοχικά βήματα προετοιμασίας και βελτιώσεων της πειραματικής διάταξης και οι προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση της λειτουργικότητας του αυτοματοποιημένου διηθητομέτρου.

ABSTRACT

The term "infiltration" refers to the process by which rainwater or irrigation water penetrates the soil surface and moves towards the deeper layers of the soil profile. Quantification of infiltration is critical for analyzing and identifying the components of a hydrological model and for the design of irrigation systems. Infiltration is a quite complex process showing high spatial and temporal variability as it depends on the soil structure, the soil texture, the degree of compression, the initial soil moisture content, the existence of surface crust and the homogeneity of soil profile.

Especially in irrigation, infiltrability is a very important parameter as it influences the size of a flooding basin, the length of irrigation furrows and also the irrigation water application rate. Incorrect estimation of soil infiltration may result in uneven water distribution to the plants and can cause excessive losses of water due to deep infiltration or runoff.

The infiltration capacity of a soil can be determined by devices called Infiltrimeters. There are several types of Infiltrimeters each of which is appropriate for a particular irrigation method.

In this thesis, it is examined the functionality of a single cylindrical Infiltrimeter (Scientact SA), featuring automation control system and a Data logger device recording the falling water level in the cylindrical tank. During the experimentation, the apparatus failures were identified and were given appropriate suggestions for the improvement of automatic control mechanisms so that the infiltrimeter works reliably without requiring the presence of an observer. To carry out infiltration measurements, a wooden sandbox model was constructed in the Irrigation laboratory of ATEITH and the soil samples were taken from the Farm of Educational Institute and a field near Prosotsani Drama. Specifically, during the infiltration measurements the following scenarios are examined: a) Measurement of infiltration in homogeneous compressed and uncompressed soil b) infiltration measurements in a layered soil profile and c) infiltration measurements with various recording time steps (1 s, 2 s and 4 s) by the Data Logger.

Finally, it is presented all the successive steps of preparation and enhancements of the experimental setup and suggestions for further improvement of the instrument workability are given.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	IV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	VI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	VI
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΔΙΗΘΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	7
1.1. ΠΡΟΦΙΛ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΗΘΗΣΗ.....	7
1.2. ΡΥΘΜΟΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ (INFILTRATION RATE).....	8
1.3. ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ.....	11
1.3.1. Αριθμητικά μοντέλα.....	12
1.3.2. Προσεγγιστικές λύσεις εξισώσεων.....	13
1.3.3. Εμπειρικές εξισώσεις.....	15
2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΔΙΗΘΗΤΟΜΕΤΡΟΥ	18
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	23
3.1 ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΜΜΟΥ.....	23
3.2 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΗΘΗΤΟΜΕΤΡΟ	25
3.2.1 Αντλία νερού.....	26
3.2.1.1 Μετρήσεις παροχής αντλίας.....	26
3.2.2 Συσσωρευτής 12V.....	27
3.2.3 Ηλεκτρονικός διακόπτης (Πλωτήρας).....	28
3.2.4 Δεξαμενή νερού	29
3.2.5 Ηλεκτρικός διακόπτης ροής νερού- «Ηλεκτροβάνα» D266DBU	29
3.2.6 Αισθητήρας στάθμης νερού	30
3.2.6.1 Ευαισθησία του αισθητήρα ύψους στάθμης.....	31
3.2.7 Καταγραφικό (Data Logger).....	32
3.2.8 Ηλεκτρονικός Υπολογιστής (HY).....	33
3.2.9 Κύλινδροι διήθησης	34
4. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	36
5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	39
5.1. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ I.....	39
5.2. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ II	40
5.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ 2 ^{ΑΣ} ΜΑΡΤΙΟΥ 2016	42
5.4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ 17 ^{ΗΣ} ΜΑΪΟΥ 2016	43
5.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	44
5.5.1. Ομοιόμορφο έδαφος.....	44
5.5.2. Διαστρωμένο έδαφος.....	45
5.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΗ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	48
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	49
Κατασκευαστικές αστοχίες και τροποποιήσεις του πρότυπου διηθητομέτρου	50
Προτάσεις για τη βελτίωση της λειτουργικότητας του πρότυπου διηθητομέτρου	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

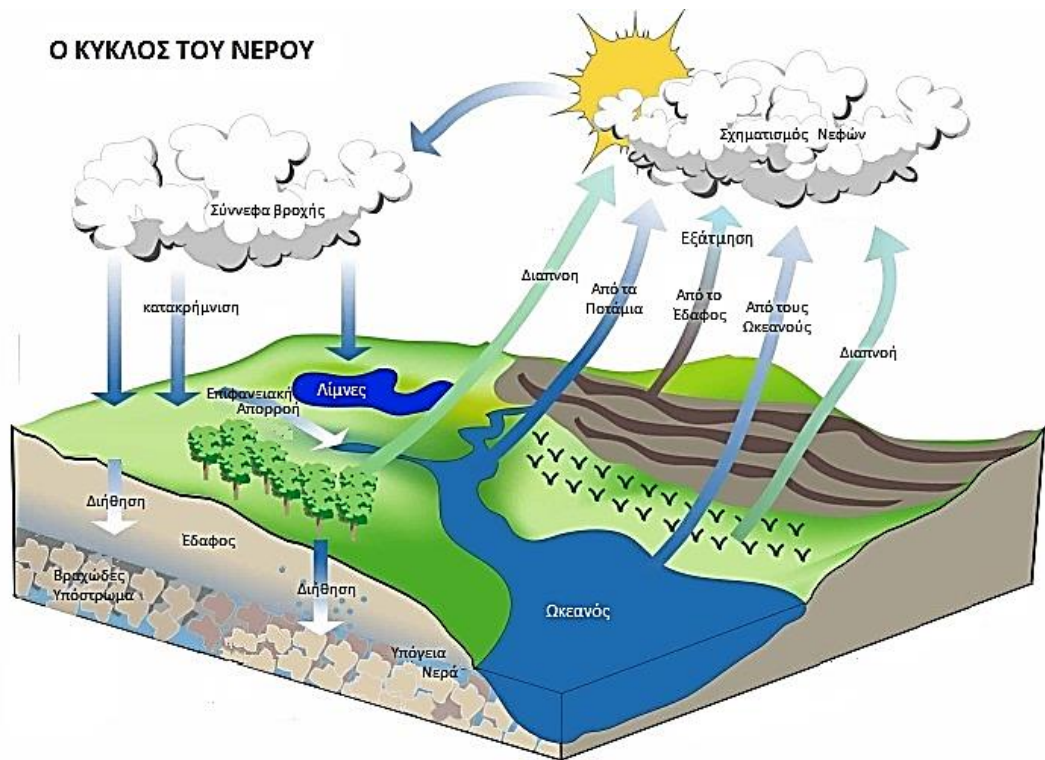
Σχήμα 1. Ο υδρολογικός κύκλος (Πηγή: http://plemenosem.wikispaces.com/Κύκλος+Νερού)..	1
Σχήμα 2. Τυπικό προφίλ διηθούμενου νερού	7
Σχήμα 3. Καμπύλες αθροιστικής και στιγμιαίας διηθητικότητας.....	8
Σχήμα 4. Καμπύλες αθροιστικής διήθησης σε ομοιογενή εδαφικά προφίλ	9
Σχήμα 5. Προφίλ διήθησης κατά τους Green and Ampt	13
Σχήμα 6. Ανάλυση ευαισθησίας της εξίσωσης Kostiaκον ως προς τον εκθέτη α'	17
Σχήμα 7. Μέτρηση της κατακόρυφης διήθησης με διηθητόμετρο διπλού κυλίνδρου	18
Σχήμα 8. Αθροιστική και στιγμιαία διηθητικότητα	21
Σχήμα 9. Καμπύλες διηθητικότητας (για διάφορες τιμές του εκθέτη).....	22
Σχήμα 10. Καμπύλες διηθητικότητας (για διάφορες τιμές του k)	22
Σχήμα 11. Σκαρίφημα του Προφίλ της ιδιοκατασκευής	25
Σχήμα 12. Σχηματική απεικόνιση αυτοματοποιημένου διηθητομέτρου	26
Σχήμα 13. Μετρήσεις του αισθητήρα στάθμης όταν το νερό βρίσκεται σε ηρεμία.....	31
Σχήμα 14. Αύξηση της στάθμης νερού στο διηθητόμετρο λόγω σιφωνισμού	40
Σχήμα 15. Ασυνέχεια μετρήσεων διηθητικότητας λόγω επιδιόρθωσης βλάβης.....	42
Σχήμα 16. Αθροιστική διήθηση (17 Μαΐου 2016).....	43
Σχήμα 17. Καμπύλη αθροιστικής διήθησης μετά το φιλτράρισμα των δεδομένων.....	44
Σχήμα 18. Προετοιμασία εδάφους για τη μέτρηση της διηθητικότητας	45
Σχήμα 19. Αθροιστική διήθηση με διαφορετικό βήμα ελέγχου στάθμης	45
Σχήμα 20. Διάταξη μέτρησης σε διαστρωμένο έδαφος.....	46
Σχήμα 21. Καμπύλες αθροιστικής διήθησης σε διαστρωμένο έδαφος	47
Σχήμα 22. Καμπύλη αθροιστικής διήθησης μετά το φιλτράρισμα των δεδομένων.....	47
Σχήμα 23. Προσαρμογή των δεδομένων στις εξισώσεις Green-Ampt και Philip.....	48
Σχήμα 24. Αθροιστική διήθηση για διαφορετικό βαθμό συμπίεσης εδάφους.....	49

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Διηθητόμετρο διπλού κυλίνδρου (Turf tech).....	18
Εικόνα 2. Τοποθέτηση πλαστικής μεμβράνης μέσα στο διηθητόμετρο.....	19
Εικόνα 3. Ιδιοκατασκευή για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.....	23
Εικόνα 4. Βάση στήριξης του μοντέλου άμμου.....	24
Εικόνα 5. Αποσπώμενη πλευρά του μοντέλου άμμου.....	24
Εικόνα 6. Εξωτερική μπαταρία 12Volt 7.2AH.....	28
Εικόνα 7. Ηλεκτρονικός διακόπτης «πλωτήρας».....	28
Εικόνα 8. (α) Κυλινδρική δεξαμενή νερού (β) Υποδοχή αισθητήρα στάθμης.....	29
Εικόνα 9. Ηλεκτρικός διακόπτης ροής D266DBU.....	30
Εικόνα 10. Αισθητήρας ύψους στάθμης νερού.....	31
Εικόνα 11. Καταγραφικό (Data Logger).....	33
Εικόνα 12. Ηλεκτρονικός υπολογιστής συνδεδεμένος με το καταγραφικό.....	34
Εικόνα 13. Διηθητόμετρο διπλού και μονού κυλίνδρου.....	35
Εικόνα 14. Οθόνη λογισμικού με τις δυνατότητες ρυθμίσεων.....	37
Εικόνα 15. Μετρήσεις διηθητικότητας (01-02-2016).....	39
Εικόνα 16. Διηθητόμετρο σε λειτουργία.....	40
Εικόνα 17. Κοσκίνισμα εδάφους και γέμισμα του μοντέλου άμμου.....	41
Εικόνα 18. Πειραματική διάταξη διήθησης (2 Μαρτίου 2016).....	42

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διήθηση αποτελεί μια βασική συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου. Το νερό που πέφτει υπό μορφή βροχής μπορεί είτε να ρέει πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και να καταλήγει στις λίμνες, τα ποτάμια και τους ωκεανούς ή να διηθείται από την επιφάνεια του εδάφους, προς τα βαθύτερα στρώματα (Σχήμα 1). Ένα μέρος του διηθούμενου νερού μπορεί να κινηθεί πλευρικά (ενδορροή) και να εκβάλλει σε κάποιο υδατόρρευμα ή να αναβλύζει ως πηγή και μια άλλη ποσότητα εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς. Η ποσότητα του νερού που ρέει πάνω στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να προκαλέσει διάβρωση και πλημμύρες. Αντίθετα, η διήθηση αποτελεί τη μοναδική πηγή νερού για τη διατήρηση και ανάπτυξη της βλάστησης και το νερό που διηθείται φιλτράρεται από το έδαφος το οποίο απομακρύνει διάφορες προσμείξεις μέσω φυσικών, χημικών και βιολογικών διαδικασιών και αναπληρώνει με φυσικό τρόπο τους υδροφορείς, τις πηγές και τα υδατορρέυματα (Rawls et al., 1993; Oram, 2005).



Σχήμα 1. Ο υδρολογικός κύκλος (Πηγή: <http://plemenosem.wikispaces.com/Κύκλος+Νερού>)

Στην διαχείριση του αρδευτικού νερού, η διήθηση παίζει σημαντικό ρόλο καθώς είναι ο ρυθμιστικός παράγοντας εφαρμογής του νερού στις καλλιέργειες. Η ικανότητα διήθησης (infiltrability) ενός εδάφους καθορίζει τον ρυθμό με τον οποίο πρέπει να

εφαρμόζεται το νερό κατά την άρδευση προκειμένου να αποφεύγεται η επιφανειακή απορροή ή η βαθειά διήθηση.

Ανάλογα με τη μέθοδο άρδευσης που εφαρμόζεται στον αγρό, το νερό μπορεί να διηθείται κατακόρυφα, οριζόντια ή και τα δύο μαζί (Τερζίδης και Παπαζαφειρίου 1997). Ένας από τους συνηθέστερους τρόπους μέτρησης της σημειακής ικανότητας διήθησης (ή διηθητικότητας) τους εδάφους για αρδευτικούς σκοπούς είναι η χρήση του κυλινδρικού διηθητομέτρου. Το διηθητόμετρο αποτελείται από έναν μεταλλικό κύλινδρο ο οποίος βυθίζεται μερικά εκατοστά στο έδαφος. Ο κύλινδρος γεμίζεται με νερό και μετράται ο ρυθμός με τον οποίο το νερό κινείται κατακόρυφα προς τα κάτω. Μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα για ένα συγκεκριμένο έδαφος, η επιφανειακή στρώση φθάνει σε κορεσμό και η διηθητικότητα καθίσταται σταθερή. Η διάμετρος του κυλίνδρου επηρεάζει σαφώς τα αποτελέσματα των μετρήσεων διηθητικότητας και έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για πολλούς ερευνητές (Swartzendruber and Olsen 1961; Ahuja 1976; Bouwer 1986; Youngs 1987; Gregory et al. 2005; Lai and Ren 2007; Lai et al. 2010).

Εξαιτίας των τριχοειδών δυνάμεων που αναπτύσσονται εντός του εδάφους και της ύπαρξης εδαφικών στρώσεων με διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα στην κατατομή ενός εδάφους, το νερό δεν κινείται μόνο κατακόρυφα αλλά και οριζόντια όταν το υγρό μέτωπο ξεπεράσει το βάθος του κάτω άκρου του κυλίνδρου. Αυτός είναι ο λόγος που τα διηθητόμετρα με έναν κύλινδρο πολλές φορές υπερεκτιμούν την κατακόρυφη διηθητικότητα. Επίσης, κατά την βύθιση του κυλίνδρου μέσα στο έδαφος αναπτύσσονται ρωγμές γύρω από το μεταλλικό τοίχωμα με αποτέλεσμα το νερό να διαρρέει μέσω αυτών προς τα κάτω και να υπερεκτιμάται ο ρυθμός διήθησης.

Η χρήση των ομόκεντρων κυλίνδρων βοηθά στο να ξεπεραστεί το πρόβλημα της διαρροής ή της οριζόντιας διήθησης. Η διαδικασία των μετρήσεων αναφέρεται διεξοδικά στην έκδοση ASTM D3385 του διεθνούς οργανισμού τυποποίησης γνωστού ως American Society for Testing and Material (ASTM, 2009).

Ο γρήγορος, εύκολος και συνάμα ακριβής τρόπος προσδιορισμού της διηθητικότητας ιδίως σε μεγάλες γεωργικές εκτάσεις είναι καθοριστικής σημασίας για την αποτύπωση της πραγματικής εικόνας στη δεδομένη χρονική στιγμή ώστε η αρδευτική δόση νερού να εφαρμόζεται με τον κατάλληλο ρυθμό. Μέχρι και σήμερα, η μέτρηση της διηθητικότητας με το κυλινδρικό διηθητόμετρο γίνεται χειρωνακτικά καθώς απαιτείται η παρουσία ενός τουλάχιστον παρατηρητή ο οποίος σε τακτά χρονικά διαστήματα λαμβάνει μετρήσεις της στάθμης του νερού και τις καταγράφει σε ειδικό

έντυπο. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η στάθμη του νερού μεταβάλλεται διαρκώς λόγω της διήθησης. Έτσι, ο παρατηρητής αναπληρώνει συχνά με νερό το διηθητόμετρο προκειμένου η στάθμη να παραμένει κατά το δυνατόν σ' ένα προκαθορισμένο ύψος. Ανάλογα με την μηχανική σύσταση (υφή) του εδάφους και την αρχικά περιεχόμενη υγρασία σ' αυτό, ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση μιας μέτρησης διηθητικότητας μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλος.

Για την αποφυγή της χρονοβόρας και κοπιαστικής διαδικασίας των μετρήσεων, ιδίως όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες στο παρελθόν ώστε να αυτοματοποιηθεί η όλη διαδικασία ελέγχου των μετρήσεων. Η πρώτη προσπάθεια έγινε από τους Constantz και Murphy (1987) οι οποίοι χρησιμοποίησαν έναν μετατροπέα πίεσης προκειμένου να κατασκευάσουν ένα αυτοματοποιημένο δοχείο Mariotte που επέτρεπε την αυτόματη καταγραφή της ροής του νερού διατηρώντας το φορτίο (στάθμη) σταθερό. Ωστόσο, στην διάταξη που χρησιμοποίησαν, απαιτείτο ο χειροκίνητος έλεγχος της στάθμης του νερού τόσο στον εσωτερικό όσο και στον εξωτερικό κύλινδρο. Η παραπάνω διάταξη τροποποιήθηκε αργότερα από τους Ankeny et al. (1988) για να χρησιμοποιηθεί ως διηθητόμετρο τάσης (Tension infiltrometer) με το οποίο μπορεί να μετρηθεί η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα.

Οι Matula και Dirksen (1989) ανέπτυξαν ένα σχεδόν αυτόματο σύστημα διηθητομέτρου διπλού κυλίνδρου, σταθερού φορτίου, στο οποίο η ποσότητα επαναπλήρωσης του νερού μπορούσε να ρυθμίζεται κατά ± 1 ml. Το σύστημα αποτελείτο από μια συσκευή ανίχνευσης της στάθμης του νερού, μια συσκευή τροφοδοσίας νερού και ένα ηλεκτρονικό χρονόμετρο. Η στάθμη του νερού στον εξωτερικό κύλινδρο ρυθμιζόταν με ένα μικρό πλωτήρα και η στάθμη του νερού στον εσωτερικό κύλινδρο ελεγχόταν μέσω διάταξης ενός πλωτήρα και ενός φωτοευαίσθητου ημιαγωγού LED.

Οι Prieksat et al. (1992) βασιζόμενοι στις εργασίες των Constantz και Murphy (1987) και Ankeny et al. (1988), παρουσίασαν μια δική τους διάταξη όπου χρησιμοποίησαν μετατροπείς πίεσης για τον προσδιορισμό της ροής του νερού από τη δεξαμενή Mariotte, μια συσκευή καταγραφής των δεδομένων και ένα σωλήνα εισαγωγής αέρα υπό μορφή φυσαλίδων για να ρυθμίζει το σταθερό ύψος νερού πάνω από την επιφάνεια του εδάφους με ακρίβεια ± 1 mm. Για να βελτιώσουν την ακρίβεια των μετρήσεων της διηθητικότητας, ελάμβαναν τη διαφορά πίεσης μεταξύ δύο μετατροπέων πίεσης που ήταν τοποθετημένοι στην κορυφή και στη βάση της δεξαμενής

Mariotte, αντίστοιχα.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας διευρύνει συνεχώς το πεδίο εφαρμογής της σε νέους κλάδους όπως και στον τομέα της Αγροτικής έρευνας. Μία παραλλαγή ως προς την τεχνική μέτρησης του ύψους της στάθμης του νερού υιοθετήθηκε από τους Milla and Kish (2006) οι οποίοι χρησιμοποίησαν έναν αισθητήρα υπέρυθρου φωτός. Η συσκευή τους επιτρέπει την μέτρηση της διηθητικότητας υπό συνθήκες σταθερού αλλά και μεταβαλλόμενου φορτίου. Αποτελείται από έναν αισθητήρα μέτρησης αποστάσεων με υπέρυθρο φως και έναν μικροελεγκτή ο οποίος προγραμματίζεται για τη συλλογή των δεδομένων ύψους στάθμης σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Τα δεδομένα χρόνου και στάθμης που μετρά ο αισθητήρας αποθηκεύονται σε μνήμη EEPROM και στη συνέχεια μεταφέρονται σ' έναν Η/Υ.

Στην ημιαυτόματη διάταξη απλού κυλίνδρου σταθερού φορτίου των Lazarovitch et al. (2007), καθώς το νερό διέρχεται με χαμηλή πίεση μέσα από ένα αμφίδρομη κατεύθυνσης πηνίο, η ροή μετράται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού ζυγού που διαθέτει καταγραφικό σύστημα. Τα δεδομένα της ροής απεικονίζονται στην οθόνη του Η/Υ και μέσω προγράμματος υπολογίζονται αυτόματα οι υδραυλικές ιδιότητες του εξεταζόμενου εδάφους.

Οι Arriaga et al. (2010) ανέπτυξαν ένα διηθητόμετρο διπλού κυλίνδρου για την αυτόματη συλλογή δεδομένων κάτω από συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου χρησιμοποιώντας ένα μικρό μετατροπέα πίεσης ο οποίος συνδέεται με το καταγραφικό δεδομένων μέσω πίνακα ακροδεκτών. Το σύστημα δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένο καθώς ο χειριστής/παρατηρητής θα πρέπει να ελέγχει και διατηρεί στο ίδιο ύψος τις στάθμες του εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου, αναπληρώνοντάς τους με νερό όποτε είναι απαραίτητο.

Οι Ong et al. (2012), αναβάθμισαν τη διάταξη του Maheshwari (1996), χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό μετατροπέων πίεσης, μικροελεγκτή και ηλεκτρονικά ανοιχτού κώδικα. Δημιούργησαν ένα σύστημα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της διηθητικότητας υπό σταθερό όσο και υπό μεταβαλλόμενο φορτίο. Επίσης, δεν χρησιμοποιούνται δοχεία Mariotte, το σύστημα τροφοδοσίας νερού και καταγραφής δεδομένων αυτοματοποιήθηκε και δίνεται η δυνατότητα στον χειριστή να επιλέξει το τρόπο τροφοδοσίας του διηθητομέτρου (από δίκτυο υπό πίεση, από αντλία, ή με διάταξη βαρύτητας).

Οι Fatehnia et al. (2016) σχεδίασαν ένα πλήρως αυτοματοποιημένο διηθητόμετρο

που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον έναν κύλινδρο υπό μεταβαλλόμενο φορτίο ή με διπλό κύλινδρο και σταθερό φορτίο. Για την κατασκευή του, χρησιμοποίησαν έναν μικροελεγκτή Arduino (Queloz et al., 2013; Ferdoush and Li, 2014), έναν αισθητήρα φαινομένου Hall, μια περισταλτική αντλία (Latham, 1966), έναν αισθητήρα στάθμης και μια βαλβίδα σταθεροποίησης στάθμης (πλωτήρα). Λόγω του τρόπου μέτρησης της ροής, η ακρίβεια των μετρήσεων είναι μεγάλη ακόμη και σε χαμηλούς ρυθμούς διήθησης. Το σύστημα διαθέτει κάρτα αποθήκευσης (micro-SD) των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο κι έτσι δεν απαιτείται η χρήση φορητού υπολογιστή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων διηθητικότητας στον αγρό. Όταν η διηθητικότητα σταθεροποιηθεί γίνεται αντιληπτό από το σύστημα και σταματά η διαδικασία των μετρήσεων.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η μελέτη σχεδιασμού μιας πρότυπης διάταξης αυτοματοποιημένου διηθητομέτρου που κατασκευάστηκε βήμα-βήμα σε συνεργασία με την εταιρεία Scientact A.E και η διερεύνηση της δυνατότητας βελτίωσης της λειτουργικότητάς του. Η όλη διάταξη στην τελική της μορφή αποτελείται από: α) ένα μεταλικό κυλινδρικό δοχείο νερού β) έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα της υδροστατικής πίεσης (pressure transducer), γ) την αντλία νερού δ) τον μεταλικό κύλινδρο διήθησης ε) τον ηλεκτρονικό αισθητήρα στάθμης (πλωτήρας) ώστε να διατηρείται το φορτίο διήθησης σταθερό στ) έναν ηλεκτρικό διακόπτη ροής (ηλεκτροβάννα) ζ) τη συσκευή συνεχούς καταγραφής (Data logger) των δεδομένων μέτρησης η) έναν συσσωρευτή 12V για την αυτόνομη λειτουργία του.

Η εργασία αποτελείται από την Εισαγωγή, πέντε Κεφάλαια (1-5), τα Συμπεράσματα και τη Βιβλιογραφία.

Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της διηθητικότητας, οι παράγοντες που την επηρεάζουν καθώς και οι διάφορες θεωρίες και προσεγγίσεις που ακολουθούνται για την προσομοίωση του φαινομένου.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία μέτρησης της διηθητικότητας με ένα μη αυτοματοποιημένο κυλινδρικό διηθητόμετρο και ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων της εξίσωσης Kostiaikov.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται διεξοδικά τα μέρη που απαρτίζουν το αυτοματοποιημένο διηθητόμετρο και η χρησιμότητα κάθε εξαρτήματος της πειραματικής διάταξης.

Στο 4^ο κεφάλαιο δίνεται το πρωτόκολλο πραγματοποίησης των μετρήσεων διηθητικότητας απαριθμώντας τα απαραίτητα βήματα που πρέπει να ακολουθούνται για

την συναρμολόγηση της μετρητικής διάταξης.

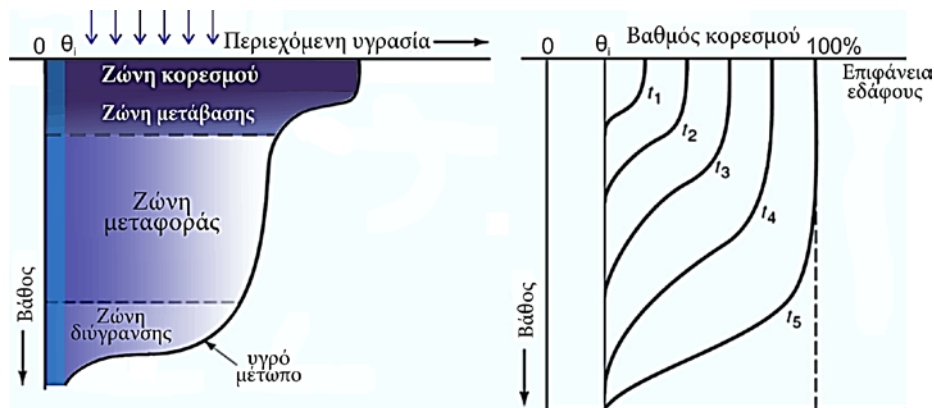
Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνθήκες διενέργειας των πειραματικών μετρήσεων, οι αστοχίες σχεδιασμού και οι κατασκευαστικές παρεμβάσεις για τη βελτίωση της λειτουργικότητας του αυτοματοποιημένου διηθητομέτρου.

1. ΔΙΗΘΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Στις επιστήμες της υδρολογίας και της μηχανικής των αρδεύσεων συχνά χρησιμοποιείται ο όρος ικανότητα διήθησης (infiltrability) και ορίζεται ως η μέγιστη ταχύτητα με την οποία το νερό μπορεί να διεισδύσει μέσα στο έδαφος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, και ως τέτοια, εκφράζει την απορροφητικότητα του εδάφους. Είναι η χαρακτηριστική ιδιότητα που καθορίζει, μετά από βροχόπτωση, το ποσοστό απορροής, την ποσότητα νερού που θα εισχωρήσει στο έδαφος και είτε θα διηθηθεί προς τα κάτω ή θα εξατμιστεί.

1.1. ΠΡΟΦΙΛ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΗΘΗΣΗ

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ένα ιδεατό προφίλ της εδαφικής υγρασίας κατά τη διήθηση του νερού σε βαθύ, ομοιόμορφο έδαφος που έχει αρχική περιεχόμενη υγρασία, θ_i . Καθώς το φαινόμενο της διήθησης (οριζόντια ή κατακόρυφη) εξελίσσεται σχηματίζονται τέσσερις διακριτές ζώνες. Στην επιφανειακή ζώνη, με πάχος λίγων εκατοστών, το έδαφος είναι σχεδόν κορεσμένο. Αμέσως κάτω από τη ζώνη κορεσμού, υπάρχει μια στενή περιοχή με μικρή αλλά απότομη μείωση της περιεκτικότητας σε νερό σε βάθος λίγων εκατοστών από την επιφάνεια. Η περιοχή αυτή ονομάζεται ζώνη μετάβασης και η εδαφική υγρασία παραμένει πολύ κοντά στον κορεσμό. Πλησίον και κάτω από την ζώνη μετάβασης σχηματίζεται η ζώνη μεταφοράς όπου το νερό μεταφέρεται προς το υγρό μέτωπο διαβροχής. Η ζώνη μεταφοράς αυξάνει σε μήκος όσο περνάει ο χρόνος, με ομοιόμορφη περιεκτικότητα σε νερό η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στον κορεσμό. Εντός της ζώνης διύγρυνσης, η περιεκτικότητα σε νερό μειώνεται μέχρι το υγρό μέτωπο διαβροχής, το οποίο σχηματίζει ένα απότομο όριο μεταξύ του υγρού και του αρχικά ξηρού εδάφους (Σχήμα 2). Τόσο η ζώνη διαβροχής όσο και το υγρό μέτωπο διαβροχής κινούνται συνεχώς κατά τη διάρκεια της διήθησης.

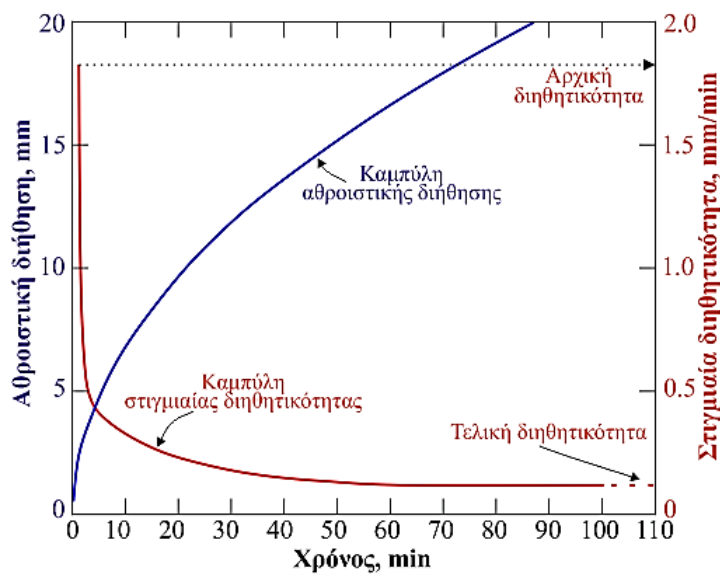


Σχήμα 2. Τυπικό προφίλ διηθούμενου νερού

1.2. ΡΥΘΜΟΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ (INFILTRATION RATE)

Ο ρυθμός διήθησης (Infiltration rate) χαρακτηρίζει την ταχύτητα με την οποία το νερό διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους και εισέρχεται στο εσωτερικό του (Rajeh Alhassoun, 2009.)

Κατά τα πρώτα στάδια του φαινομένου, η ταχύτητα διήθησης είναι σχετικά μεγάλη (ιδιαίτερα όταν το έδαφος είναι πολύ ξηρό) και ονομάζεται **αρχική διηθητικότητα** (Σχήμα 3). Στη συνέχεια η ταχύτητα διήθησης ελαττώνεται μονοτονικά και τείνει ασυμπτωτικά για μεγάλους χρόνους σε μια σταθερή τιμή (ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα) που ονομάζεται **βασική ή τελική διηθητικότητα**. Η τιμή της ταχύτητας διήθησης σε οποιοδήποτε χρονική στιγμή του φαινομένου ονομάζεται **στιγμιαία διηθητικότητα**.

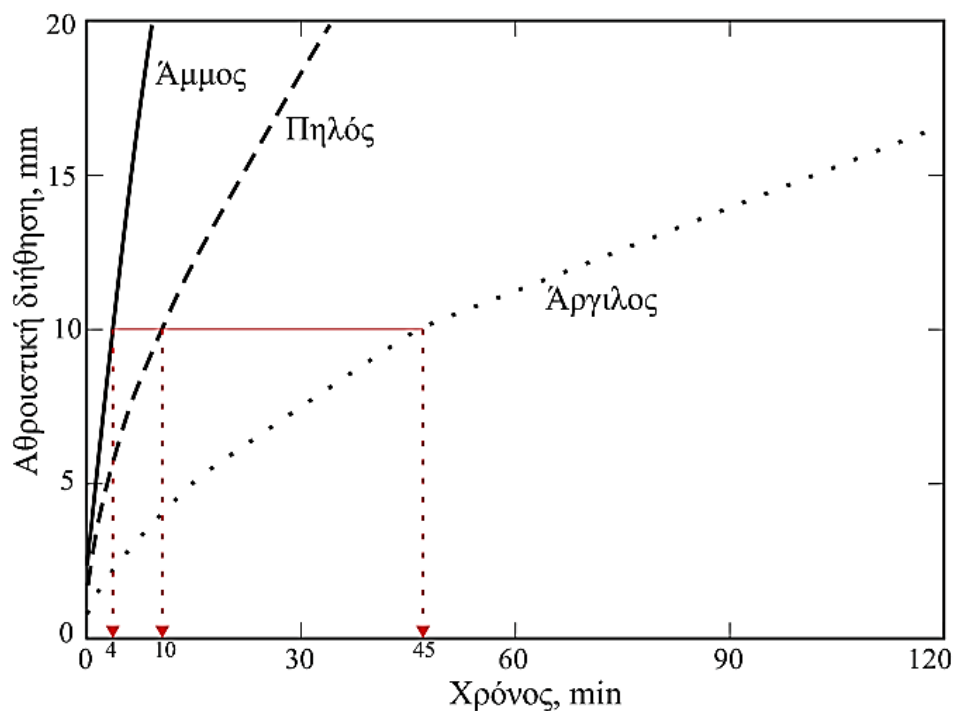


Σχήμα 3. Καμπύλες αθροιστικής και στιγμιαίας διηθητικότητας

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό διήθησης μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις γενικές κατηγορίες (Tindall et al., 1999), όπως: (1) εδαφικοί παράγοντες (2) φυσικοχημικές ιδιότητες του εδαφικού διαλύματος (3) ο τρόπος εφαρμογής του νερού στην επιφάνεια του εδάφους, και (4) η κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους.

- ♦ **Εδαφικοί παράγοντες:** Διακρίνονται στις χαρακτηριστικές ιδιότητες της επιφάνειας και στη μεταφορική ικανότητα του εδάφους οι οποίες διαμορφώνονται ανάλογα με την υφή, τη δομή, την οργανική ουσία, το βαθμό συμπίεσης, την υδραυλική αγωγιμότητα, την περιεχόμενη υγρασία, την κατανομή του μεγέθους των πόρων, την περιεκτικότητα σε άργιλο. Μείωση του ρυθμού διήθησης παρατηρείται σε εδάφη

που εμφανίζουν «σφράγισμα» των επιφανειακών πόρων. Το φράξιμο των εδαφικών πόρων μπορεί να προκληθεί από την επίδραση των σταγόνων της βροχής, τη δραστηριότητα ζώων ή από τη μετακίνηση βαρέων οχημάτων. Τα μικρότερου μεγέθους εδαφικά τεμαχίδια διεισδύουν και γεμίζουν τα κενά διαστήματα μεταξύ χονδρόκοκκων υλικών ή μακροπόρων σχηματίζοντας έτσι μια αδιαπέρατη στρώση. Η ικανότητα διήθησης οποιασδήποτε στρώσης εδάφους εξαρτάται από το πορώδες του, το πάχος και την περιεχόμενη ποσότητα νερού. Η μηχανική σύσταση του εδάφους, η δομή, η οργανική ουσία, η δραστηριότητα των ριζών καθορίζουν το μέγεθος του πορώδους ενός συγκεκριμένου εδάφους. Τόσο το συνολικό πορώδες όσο και η κατανομή του μεγέθους των πόρων καθορίζουν την ικανότητα συγκράτησης του νερού από το έδαφος. Η αρχική διηθητικότητα εξαρτάται από τον όγκο, το μέγεθος, τη συνέχεια και τη σχετική σταθερότητα των τριχοειδών και μη-τριχοειδών πόρων του εδάφους. Τα αμμώδη εδάφη έχουν σχετικά σταθερό μέγεθος πόρων. Αντιθέτως, τα καλώς διαβαθμισμένα ιλυώδη και αργιλώδη εδάφη δεν έχουν σταθερό μέγεθος πόρων λόγω της διόγκωσης και συρίκνωσης που εμφανίζουν κατά την διύγρανσή τους ή την ξήρανσή τους, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται καμπύλες αθροιστικής διήθησης τριών χαρακτηριστικών τύπων εδαφών, αμμώδες, πηλώδες και αργιλώδες. Στο αμμώδες έδαφος για να απορροφηθούν 10 mm νερού απαιτούνται περίπου 4 λεπτά, για το πηλώδες περίπου 10 λεπτά και για το αργιλώδες περίπου 45 λεπτά.



Σχήμα 4. Καμπύλες αθροιστικής διήθησης σε ομοιογενή εδαφικά προφίλ

- ♦ **Φυσικοχημικές ιδιότητες του εδαφικού διαλύματος:** Τα φυσικά χαρακτηριστικά του διηθούμενου νερού επηρεάζουν επίσης τον ρυθμό διήθησης. Όταν το νερό εισέρχεται σε ένα έδαφος, διαλυτοποιεί και εμπλουτίζεται από διάφορες ουσίες όπως η λεπτή άργιλος, η οργανική ουσία και τα άλατα. Αυτά τα αιωρούμενα και διαλυμένα στοιχεία μπορεί να σφραγίζουν τους εδαφικούς πόρους, αλλά επίσης μπορεί να επηρεάζουν το ιξώδες, την πυκνότητα και την επιφανειακή τάση του νερού. Μερικά από αυτά τα υλικά, όπως είναι τα άλατα, μπορεί να επηρεάζουν τη διόγκωση των ορυκτών της αργίλου, σχηματίζοντας σύμπλοκα με κολλοειδή υλικά. Η θερμοκρασία, το ιξώδες και η επιφανειακή τάση του νερού επηρεάζουν τον ρυθμό διείσδυσης και την ταχύτητα κίνησης μέσα στο έδαφος.
- ♦ **Τρόπος εφαρμογής του νερού στην επιφάνεια του εδάφους:** Αν η ικανότητα διήθησης (μέγιστος ρυθμός) υπερβαίνει το ρυθμό με τον οποίο εφαρμόζεται το νερό, τότε υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ ρυθμού διείσδυσης και του ρυθμού εφαρμογής. Ωστόσο, όταν ο ρυθμός εφαρμογής του νερού (ένταση βροχής) υπερβαίνει την ικανότητα διήθησης, τότε επιτυγχάνεται μια αντίστροφη σχέση μεταξύ του ρυθμού εφαρμογής και την ικανότητα διήθησης. Για παράδειγμα, μια αύξηση της έντασης βροχόπτωσης προκαλεί αύξηση της συμπίεσης, καθώς οι σταγόνες της βροχής πέφτουν στην επιφάνεια του εδάφους, μειώνοντας έτσι τον ρυθμό διήθησης. Οι Βροχοπτώσεις ή άλλα χαρακτηριστικά του νερού μπορεί επίσης να επηρεάζουν έμμεσα τη διηθητικότητα αυξάνοντας την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους, καθώς και τη δραστηριότητα των γαιοσκώληκων ή άλλων μικροοργανισμών.
- ♦ **Κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους:** Η κλίση, η τραχύτητα και η ύπαρξη βλάστησης στην επιφάνεια του εδάφους επηρεάζουν τον ρυθμό διήθησης (Ghildyal and Tripathi 1987). Απότομες ή ομαλές κεκλιμένες επιφάνειες με ελάχιστη φυτική κάλυψη, μειώνουν το διαθέσιμο χρόνο για διήθηση. Αντίθετα, επίπεδες ή τραχείς επιφάνειες με κλίση, αυξάνουν τον χρόνο παραμονής του νερού στο έδαφος και κατ' επέκταση τη διήθηση. Η βλάστηση είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας, διότι η φυτοκάλυψη επιβραδύνει την επιφανειακή απορροή, επιμηκύνοντας έτσι τον χρόνο διήθησης. Επιπλέον, η βλάστηση μειώνει την συμπίεση της επιφάνειας του εδάφους και τη δημιουργία κρούστας. Το ριζικό σύστημα των καλλιεργούμενων φυτών ή της φυσικής βλάστησης μπορεί να αυξάνει την υδραυλική αγωγιμότητα των

επιφανειακών στρώσεων του εδάφους κι επομένως να έχει σημαντική επίδραση στην διηθητικότητα. (Brakensiek and Rawls 1988; Branson et al. 1981).

1.3. ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ

Οι κυριότερες μεθοδολογίες που ακολουθούνται για την προσομοίωση της διήθησης διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: στα αριθμητικά μοντέλα που βασίζονται στους φυσικούς νόμους κίνησης των ρευστών σε πορώδη μέσα, στις προσεγγιστικές λύσεις και στα εμπειρικά μοντέλα.

1.3.1. Αριθμητικά μοντέλα

Τα μαθηματικά ομοιώματα που βασίζονται στους νόμους της φυσικής απαιτούν την επίλυση της μη γραμμικής διαφορικής εξίσωσης Richards (Richards, 1931; Šimůnek, et al., 1999,2005; Αντωνόπουλος, 1999; Radcliffe and Šimůnek, 2010), η οποία περιγράφει την κίνηση του νερού στο έδαφος. Για μονοδιάστατη κατακόρυφη ροή, η εξίσωση γράφεται:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \dots\dots\dots(1.1)$$

όπου: θ =η εδαφική υγρασία (κατ'όγκο) [-],

h =το ύψος πίεσης [L],

$K(\theta)$ =η υδραυλική αγωγιμότητα [$L T^{-1}$],

z =η κατακόρυφη διεύθυνση με φορά προς τα πάνω [L],

t =ο χρόνος [T].

Λόγω της μη γραμμικότητας της διαφορικής εξίσωσης (1.1), δεν έχει βρεθεί μέχρι σήμερα αναλυτική λύση που να ισχύει για γενικευμένες οριακές συνθήκες. Η επίλυση της εξίσωσης για ορισμένα προβλήματα είναι αρκετά δύσκολη και γι αυτό απαιτείται η χρήση αριθμητικών μεθόδων και η γνώση λεπτομερών δεδομένων εισόδου (Rawls et al, 1993).

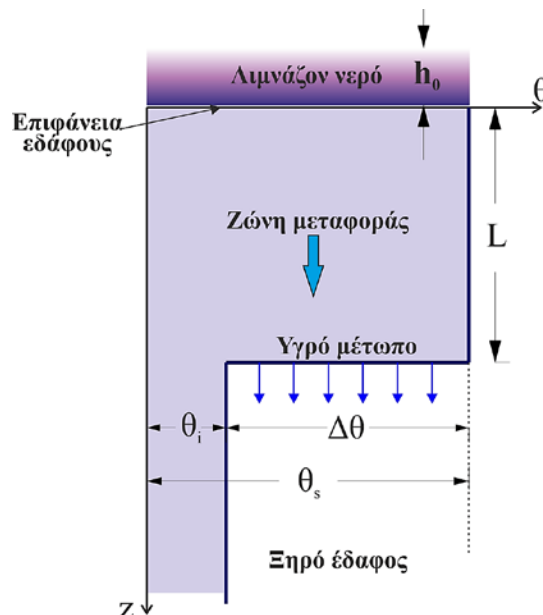
Σύμφωνα με τους Skaggs and Khaleel (1982), οι αριθμητικές μέθοδοι αν και επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση της κατακόρυφης διήθησης του νερού που είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της επαναπλήρωσης των υπόγειων υδάτων, στην ανάλυση της κίνησης των ρυπαντών μέσα στο έδαφος, ωστόσο είναι δαπανηρές, καθώς απαιτούν λεπτομερή δεδομένα εισόδου, σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, πολλές μετρήσεις πεδίου και για το λόγο αυτό σπάνια χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές. Από τότε μέχρι σήμερα υπήρξαν σημαντικές βελτιώσεις στην τεχνολογία

των υπολογιστών οι οποίες διευκολύνουν την περαιτέρω χρήση των αριθμητικών μεθόδων. Ωστόσο, η μεγάλη ποσότητα και η πολυπλοκότητα των μετρήσεων που απαιτούνται για να ληφθούν πολλές χαρακτηριστικές ιδιότητες του εδάφους και να χρησιμοποιηθούν στην αριθμητική επίλυση, συνιστούν έναν σοβαρό περιοριστικό παράγοντα που δεν έχει εξαλειφθεί με το χρόνο. Κατά συνέπεια, για πολλές πρακτικές εφαρμογές, οι εξισώσεις που απλοποιούν τις έννοιες που εμπλέκονται στη διαδικασία της διήθησης είναι περισσότερο πλεονεκτικές (Rawls et al., 1993).

1.3.2. Προσεγγιστικές λύσεις εξισώσεων

Μεταξύ των προσεγγιστικών μοντέλων συγκαταλέγονται οι εξισώσεις των Green and Ampt και του Philip (Αντωνόπουλος, 1999).

Οι Green and Ampt (1911), πρότειναν ένα προσεγγιστικό μοντέλο που βασίζεται στην εφαρμογή του νόμου του Darcy. Το μοντέλο των Green-Ampt βρέθηκε ότι μπορεί να περιγράψει την διήθηση καλύτερα σ'ένα βαθύ ομοιογενές, αρχικά ξηρό έδαφος με αδρόκκοκη υφή όπου σχηματίζεται ένα ευδιάκριτο υγρό μέτωπο (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Προφίλ διήθησης κατά τους Green and Ampt

Το είδος της ροής που περιγράφει το μοντέλο Green-Ampt ονομάζεται ροή εμβόλου. Ο ρυθμός διήθησης $f(t)$ ή στιγμιαία διηθητικότητα περιγράφεται από την εξίσωση:

$$f(t) = k \left[1 + \frac{\psi \Delta\theta}{F(t)} \right] \dots\dots\dots(1.2)$$

όπου: k = η υδραυλική αγωγιμότητα στην ζώνη μεταφοράς [L/T],

Ψ = η μύζηση πάνω στο υγρό μέτωπο [L],

$\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$ =η διαφορά μεταξύ υγρασίας κορεσμού και αρχικής υγρασίας [-],

t = ο χρόνος [T]

Η αθροιστική διήθηση $F(t)$, δίνεται από τη σχέση:

$$F(t) = k t + \Psi \Delta\theta \ln \left[1 + \frac{F(t)}{\Psi \Delta\theta} \right] \dots\dots\dots(1.3)$$

η οποία είναι πεπελεγμένης μορφής και για την επίλυσή της απαιτούνται δοκιμές κι επαναλήψεις.

Ο Philip (1957a), παρουσίασε μια ημιαναλυτική λύση της μη γραμμικής εξίσωσης Richards, σε μορφή άπειρης δυναμοσειράς, η οποία περιγράφει τόσο την οριζόντια όσο και την κατακόρυφη διήθηση σε ένα ομοιογενές έδαφος με ομοιόμορφη αρχική υγρασία και στην επιφάνεια του εδάφους λιμνάζει νερό σε σταθερό ύψος.

Η γενική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει την αθροιστική διήθηση δίνεται από τη σχέση:

$$F(t) = S t^{1/2} + A t + B t^{3/2} + \dots\dots\dots(1.4)$$

όπου: F =η αθροιστική διήθηση [L]

S = η απορροφητικότητα του εδάφους [L/T^{-1/2}] (εξαρτάται από την αρχική θ_i και τελική θ_n εδαφική υγρασία)

A, B =συντελεστές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες του εδάφους και τις θ_i, θ_n .

Σύμφωνα με τον Philip (1957b), η απορροφητικότητα ορίζεται ως ένα μετρήσιμο φυσικό μέγεθος που εκφράζει την ικανότητα ενός πορώδους μέσου να απορροφά τριχοειδώς ή να απελευθερώνει κάποιο ρευστό.

Ο ρυθμός διήθησης f (ή στιγμιαία διηθητικότητα) λαμβάνεται με παραγωγή της αθροιστικής διήθησης ως προς το χρόνο, δηλαδή

$$\frac{dF}{dt} \equiv f(t) = \frac{1}{2}S t^{-1/2} + A + \frac{3}{2}B t^{1/2} + \dots \dots \dots (1.5)$$

Ο Philip (1957b) πρότεινε την χρήση μόνο των δύο πρώτων όρων της εξίσωσης (1.5) για μικρούς χρόνους διήθησης όταν στην επιφάνεια του εδάφους υπάρχει λιμνάζον νερό με σταθερό φορτίο. Στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση γράφεται:

$$f(t) = \frac{1}{2}S t^{-1/2} + A \dots \dots \dots (1.6)$$

Για οριζόντια διήθηση, όλοι οι όροι μετά τον πρώτο μηδενίζονται

$$f(t) = \frac{1}{2}S t^{-1/2} \dots \dots \dots (1.7)$$

και η εξίσωση ισχύει για τιμές χρόνου μεγαλύτερες του μηδενός.

1.3.3. Εμπειρικές εξισώσεις

Μεταξύ των κυριότερων εμπειρικών εξισώσεων είναι αυτές των Horton και Kostiaκον που έχουν λιγότερους περιορισμούς, συγκριτικά με τα θεωρητικά μοντέλα που βασίζονται στους φυσικούς νόμους, ως προς τον τρόπο εφαρμογής του νερού επειδή δεν απαιτούνται οι παραδοχές που αφορούν στις οριακές συνθήκες ή τη γνώση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του εδάφους (Hillel, 1998). Οι παράμετροι των εμπειρικών εξισώσεων προσδιορίζονται με προσαρμογή σε πειραματικά δεδομένα διήθησης.

Το εμπειρικό μοντέλο του Horton (Horton, 1939,1940), χρησιμοποιείται ευρέως στην υδρολογία για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής. Ο Horton θεωρεί ότι η ικανότητα διήθησης f , μειώνεται με το χρόνο από μια αρχική τιμή f_0 μέχρι μια σταθερή τελική τιμή διηθητικότητας f_c και την μείωση αυτή την αποδίδει σε παράγοντες που διαμορφώνονται στην επιφάνεια του εδάφους παρά μέσα στη μάζα του (Xu, 2003). Η μεταβολή του ρυθμού διήθησης f κατά τον Horton, περιγράφεται από την διαφορική εξίσωση:

$$\frac{df}{dt} = -\beta(f - f_c) \dots\dots\dots(1.8)$$

Λύνοντας την εξίσωση (1.7) με αρχική συνθήκη $t=0, f=f_0$, προκύπτει :

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-\beta t} \dots\dots\dots(1.9)$$

όπου: β = συντελεστής απομείωσης του ρυθμού διήθησης [T^{-1}], που εξαρτάται από την αρχική περιεχόμενη υγρασία και τον ρυθμό εφαρμογής του νερού
 t = ο χρόνος μετά την έναρξη της διήθησης [T]

Η εξίσωση αθροιστικής διήθησης F , προκύπτει με ολοκλήρωση της (1.9) μεταξύ των ορίων $t=0$ και $t=t$ και δίνεται από τη σχέση:

$$F = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \dots\dots\dots(1.10)$$

Οι παράμετροι f_0, f_c και β , προσδιορίζονται από τις μετρημένες τιμές διηθητικότητας στο πεδίο.

Ο Kostiakov (1932) και ο Lewis (1938), ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον, πρότειναν μια εμπειρική εξίσωση η οποία βρήκε ευρεία εφαρμογή στην πρακτική των αρδεύσεων λόγω της απλότητάς της. Η εξίσωση αθροιστικής διήθησης έχει τη μορφή:

$$F = k t^\alpha \dots\dots\dots(1.11)$$

όπου: $0 < \alpha < 1$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση (1.11) προκύπτει η εξίσωση στιγμιαίας διηθητικότητας:

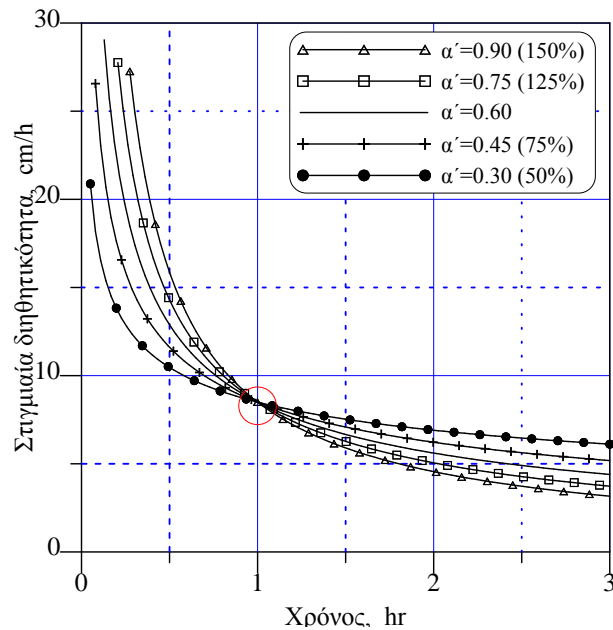
$$f = k \cdot \alpha \cdot t^{\alpha-1} = k' t^{\alpha'} \dots\dots\dots(1.12)$$

όπου: k [$L T^\alpha$] και α [-] εμπειρικοί συντελεστές

$$k' = k \cdot \alpha, \quad \alpha' = \alpha - 1$$

Η εξίσωση Kostiakov μπορεί να περιγράψει την διηθητικότητα για μικρούς σχετικά χρόνους καθώς για μεγάλους χρόνους η διηθητικότητα σύμφωνα με την εξίσωση (1.12) μηδενίζεται αντί της πραγματικής κατάστασης όπου παραμένει σταθερή γύρω από μια μικρή τιμή.

Στο Σχήμα 6, παρουσιάζεται η μεταβολή της διηθητικότητας με το χρόνο για διάφορες τιμές του εκθέτη α' . Η ευαισθησία της διηθητικότητας αρχικά μειώνεται με το χρόνο μέχρι να μηδενιστεί ($t=1$ hr) και στη συνέχεια αυξάνει ξανά.



Σχήμα 6. Ανάλυση ευαισθησίας της εξίσωσης Kostiakov ως προς τον εκθέτη α'

Στις επιφανειακές αρδεύσεις χρησιμοποιείται και η επεκταμένη μορφή της εξίσωσης Kostiakov που είναι γνωστή ως εξίσωση Lewis-Kostiakov. Οι αντίστοιχες εξισώσεις αθροιστικής και στιγμιαίας διηθητικότητας γράφονται:

$$F = k t^\alpha + f_0 t \dots\dots\dots(1.13)$$

$$f = k \cdot \alpha \cdot t^{\alpha-1} + f_0 = k' t^{\alpha'} + f_0 \dots\dots\dots(1.14)$$

όπου: $k [L T^\alpha]$ και $\alpha [-]$ εμπειρικοί συντελεστές

f_0 η τελική διηθητικότητα που είναι ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού

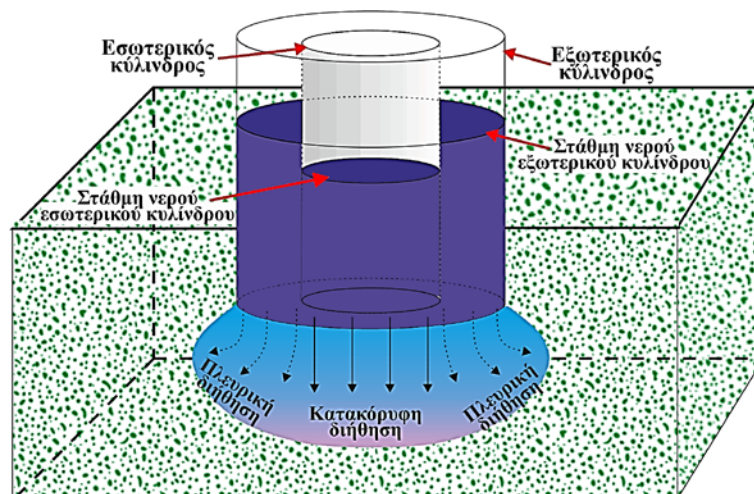
2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΔΙΗΘΗΤΟΜΕΤΡΟΥ

Η μέτρηση της κατακόρυφης διηθητικότητας στον αγρό μπορεί να γίνει είτε με τη συσκευή του μονού κυλίνδρου ή του διπλού κυλίνδρου (Double ring infiltrometer) (Εικόνα 1). Στην περίπτωση των δύο μεταλλικών κυλίνδρων, αυτοί τοποθετούνται ομοαξονικά και βυθίζονται μέσα στο έδαφος σε βάθος 10 με 15cm.



Εικόνα 1. Διηθητόμετρο διπλού κυλίνδρου (Turf tech)

Στη συνέχεια γεμίζονται ταυτόχρονα με νερό, έτσι ώστε η στάθμη του νερού και στους δύο κυλίνδρους να έχει ύψος περίπου 15 cm. Το νερό που βρίσκεται στον εξωτερικό κύλινδρο διασφαλίζει την κατακόρυφη διήθηση του νερού που βρίσκεται στον εσωτερικό κύλινδρο (Σχήμα 7).



Σχήμα 7. Μέτρηση της κατακόρυφης διήθησης με διηθητόμετρο διπλού κυλίνδρου

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, το νερό από τον εξωτερικό κύλινδρο δημιουργεί μέσα στο έδαφος ένα υδάτινο τείχος με αποτέλεσμα το νερό από τον εσωτερικό κύλινδρο να κινείται κατακόρυφα περιορίζοντας έτσι την πλευρική διαρροή του νερού.

Η μέτρηση της διηθητικότητας γίνεται ως εξής. Οι δύο κύλινδροι βυθίζονται στο έδαφος σε ομόκεντρη διάταξη σε βάθος 10 με 15cm. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο σφράγισμα των ρωγμών που δημιουργούνται στα σημεία επαφής των κυλίνδρων (περιμετρικά) με το έδαφος, ώστε να μην υπάρξει διαρροή του νερού κατά τα πρώτα λεπτά της διήθησης. Σε χρόνο $t=0$ και οι δύο κύλινδροι γεμίζονται με νερό ύψους 10 έως 15cm με τρόπο ώστε να μην διαταραχθεί η επιφανειακή κατάσταση του εδάφους. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, τοποθετείται πλαστική μεμβράνη μέσα στους κυλίνδρους και γεμίζεται με νερό στο επιθυμητό ύψος στάθμης. Με αυτό τον τρόπο, οι μετρήσεις ξεκινούν από ($t = 0$) τη στιγμή που αφαιρείται το πλαστικό μέσα από τους κυλίνδρους με γρήγορες κινήσεις, οπότε σχεδόν ακαριαία αρχίζουν οι μετρήσεις της πτώσης στάθμης. Αν δεν τηρηθεί η παραπάνω διαδικασία, είναι βέβαιο ότι οι αρχικές μετρήσεις θα αποκλίνουν σημαντικά από την πραγματικότητα.



Εικόνα 2. Τοποθέτηση πλαστικής μεμβράνης μέσα στο διηθητόμετρο

Από την στιγμή που αφαιρείται το πλαστικό αρχίζουν οι μετρήσεις. Στην αρχή ανά μικρά χρονικά διαστήματα και όσο περνάει ο χρόνος αυξάνουν τα χρονικά διαστήματα καταγραφής των μετρήσεων πτώσης στάθμης στον εσωτερικό κύλινδρο του διηθητομέτρου.

Τα δεδομένα σημειώνονται σε ειδικό έντυπο (Πίνακας 1) και στη συνέχεια με τη βοήθεια είτε ενός λογιστικού φύλλου εργασίας (Excel) ή πραγματοποιώντας τους

κατάλληλους υπολογισμούς με χρήση αριθμομηχανής μπορούν να προσδιοριστούν οι παράμετροι της εξίσωσης διήθησης.

Πίνακας 1. Έντυπο καταγραφής δεδομένων διήθησης

Χρόνος, min			Διήθηση, mm		
Ώρα (1)	Διαφορά (2)	Άθροισμα (3)	Στάθμη (4)	Διαφορά (5)	Άθροισμα (6)
10:34		0	21		0
	1			9	
10:35		1	30		9
	1			5	
10:36		2	35		14
	2			8	
10:38		4	43		22
	2			7	
10:40		6	50		29
	5			12	
10:45		11	62		41
	5			8	
10:50		16	70		49
	5			10	
10:55		21	80		59
	5			7	
11:00		26	87		66
	10			14	
11:10		36	101		80
	10			14	
11:20		46	115		94
	10			14	
11:30		56	129		108

Στον παρακάτω πίνακα 2, φαίνονται οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων k και a της εξίσωσης Kostiaκov.

Πίνακας 2. Υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων k και a της εξίσωσης Kostiaκov (Τελόγλου, 2012)

a/a	t_i (min) (α)	y_i (mm) (β)	$\log y_i$ (γ)	$\log t_i$ (δ)	$(\log t_i)^2$ (ϵ)	$\log t_i \log y_i$ ($\sigma\tau$)
1	1	9	0.9542	0.0000	0.0000	0.0000
2	2	14	1.1461	0.3010	0.0906	0.3450
3	4	22	1.3424	0.6021	0.3625	0.8082
4	6	29	1.4624	0.7782	0.6055	1.1380
5	11	41	1.6128	1.0414	1.0845	1.6795
6	16	49	1.6902	1.2041	1.4499	2.0352
7	21	59	1.7709	1.3222	1.7483	2.3415
8	26	66	1.8195	1.4150	2.0021	2.5746
9	36	80	1.9031	1.5563	2.4221	2.9618
10	46	94	1.9731	1.6628	2.7648	3.2808
11	56	108	2.0334	1.7482	3.0562	3.5548
		$\sum_{i=1}^{11}$	17.7082	11.6312	15.5864	20.7194

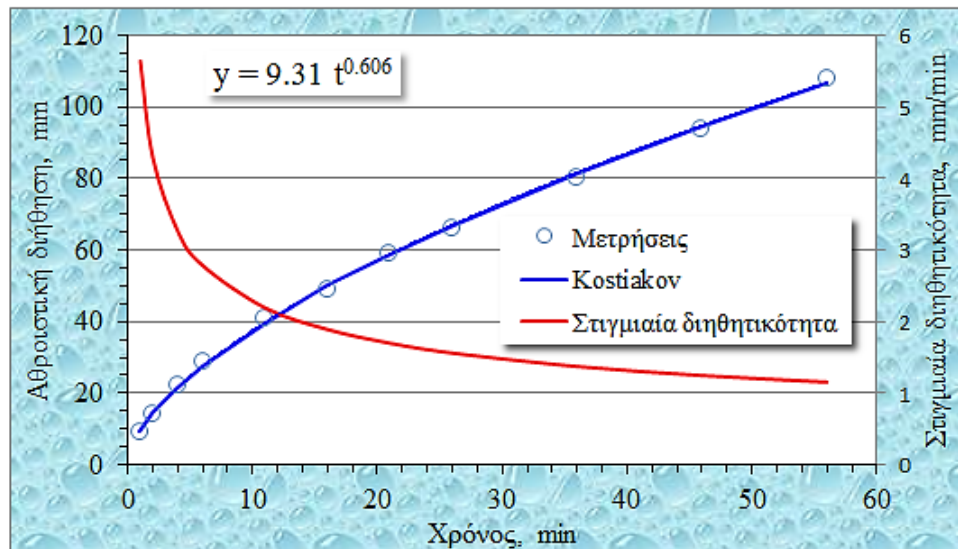
Στην στήλη (α) συμπληρώνεται ο χρόνος των μετρήσεων σε λεπτά (σε ποιο λεπτό μετρήθηκε η στάθμη), στη στήλη (β) τα πόσα mm κατέβηκε η στάθμη μέσα στο διηθητόμετρο. Στη στήλη (γ) και (δ) ο λογάριθμος της στήλης (α) και (β) αντίστοιχα, στη στήλη (ε) το τετράγωνο του λογαρίθμου του χρόνου $(\log t_i)^2$ και τέλος στη (στ) στήλη το γινόμενο του λογαρίθμου του χρόνου με το λογάριθμο της πτώσης της στάθμης. Τέλος, συμπληρώνονται τα σύνολα των στηλών (γ),(δ),(ε) και (στ).

Οι παράμετροι α και k της εξίσωσης Kostiakov υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις με αντικατάσταση των τιμών του πίνακα 2.

$$\alpha = \frac{n \sum_{i=1}^n \log y_i \log t_i - \sum_{i=1}^n \log y_i \sum_{i=1}^n \log t_i}{n \sum_{i=1}^n (\log t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \log t_i \right)^2} = \frac{(11 \times 20.7194) - (17.7081 \times 11.6313)}{(11 \times 15.5865) - (11.6313)^2} = 0.606$$

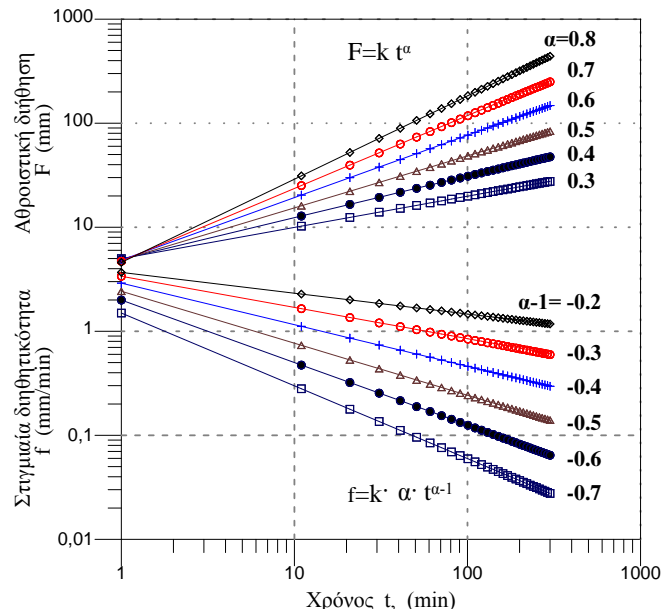
$$k = 10^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (\log y_i) - \alpha \sum_{i=1}^n (\log t_i)}{n} \right]} = 10^{[17.7081 - 0.606 \times 11.6313] / 11} = 10^{0.969} = 9.31$$

Λόγω του ότι η εξίσωση Kostiakov είναι εμπειρική, οι δύο παράμετροι k και α δεν υποδηλώνουν κάποια φυσικά μεγέθη αλλά αποτελούν σταθερές προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα διήθησης, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.



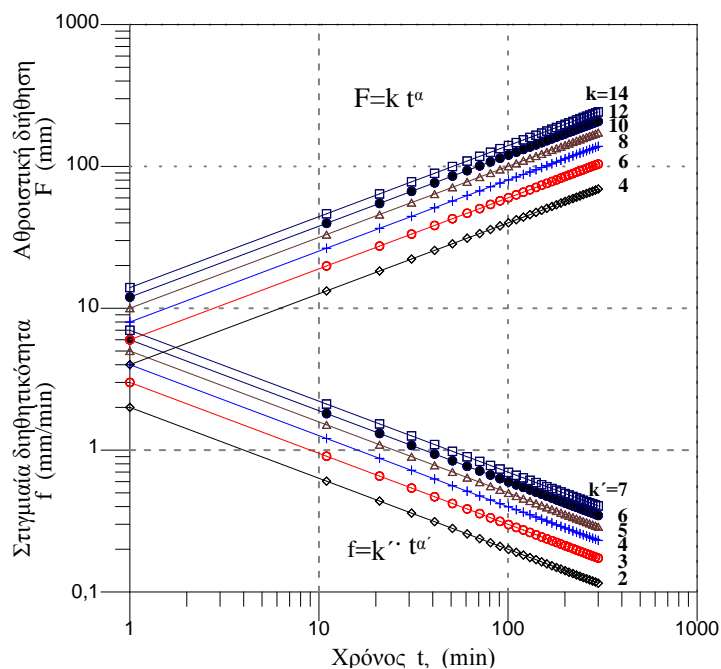
Σχήμα 8. Αθροιστική και στιγμιαία διηθητικότητα

Στο Σχήμα 9, παρουσιάζονται καμπύλες αθροιστικής διήθησης με διαφορετικό εκθέτη α ο οποίος εκφράζει τον ρυθμό διήθησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του εκθέτη τόσο πιο υδροπερατό είναι το έδαφος κι επομένως εμφανίζει μεγαλύτερο ρυθμό διήθησης.



Σχήμα 9. Καμπύλες διηθητικότητας (για διάφορες τιμές του εκθέτη)

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται οι καμπύλες διηθητικότητας για διάφορες τιμές του συντελεστή k που όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής τόσο μεγαλύτερη είναι η αρχική διηθητικότητα.



Σχήμα 10. Καμπύλες διηθητικότητας (για διάφορες τιμές του k)

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μια ιδιοκατασκευή μοντέλου άμμου για την τοποθέτηση του εδαφικού δείγματος και ένα αυτοματοποιημένο κυλινδρικό διηθητόμετρο.

3.1 ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΜΜΟΥ

Για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας του αυτοματοποιημένου διηθητομέτρου στο εργαστήριο, κατασκευάστηκε μια ξύλινη ιδιοκατασκευή μοντέλου άμμου (Εικόνα 3) στην οποία τοποθετήθηκε το έδαφος και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις διηθητικότητας. Η κατασκευή θα πρέπει να πληροί ορισμένες προδιαγραφές, όπως:

- Να μπορεί να συγκρατήσει σχετικά μεγάλο όγκο εδάφους
- Το έδαφος να αδειάζει και ν' αναπληρώνεται με σχετική ευκολία
- Να είναι μεταφερόμενη

Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η ξύλινη κατασκευή η οποία είναι τροχήλατη για να μπορεί να μεταφέρεται εύκολα μέσα στον εργαστηριακό χώρο.



Εικόνα 3. **Ιδιοκατασκευή για την πραγματοποίηση των μετρήσεων**

Οι εσωτερικές κατακόρυφες επιφάνειες επενδύθηκαν με πλαστικό (νάιλον) για να μην υπάρχει απώλεια εδάφους αλλά ούτε και διαρροή νερού. Στον πυθμένα της κατασκευής τοποθετήθηκε λεπτό συρματόπλεγμα. Για τις ανάγκες της στράγγισης τοποθετήθηκε ακριβώς πάνω από το συρματόπλεγμα μια στρώση από ελαφρόπετρα πάχους 5cm και πάνω από αυτήν επίσης συρματόπλεγμα ώστε η στρώση να παραμένει

σταθερή. Πάνω από το συρματόπλεγμα, προστέθηκε ένα υδροδιαπερατό γεώφασμα για την αποφυγή εισόδου λεπτόκοκκων υλικών στην υποκείμενη στρώση από ελαφρόπετρα.

Ένα σημαντικό κομμάτι της κατασκευής ήταν οι πλαϊνοί δοκοί στα πλαϊνά πλαίσια. Είναι αυτοί, οι οποίοι συγκρατούν τον χωμάτινο όγκο και δίνουν την δυνατότητα η μια πλευρά της κατασκευής να είναι αποσπώμενη αφού πρώτα αφαιρεθούν οι μεταλλικοί πύροι.



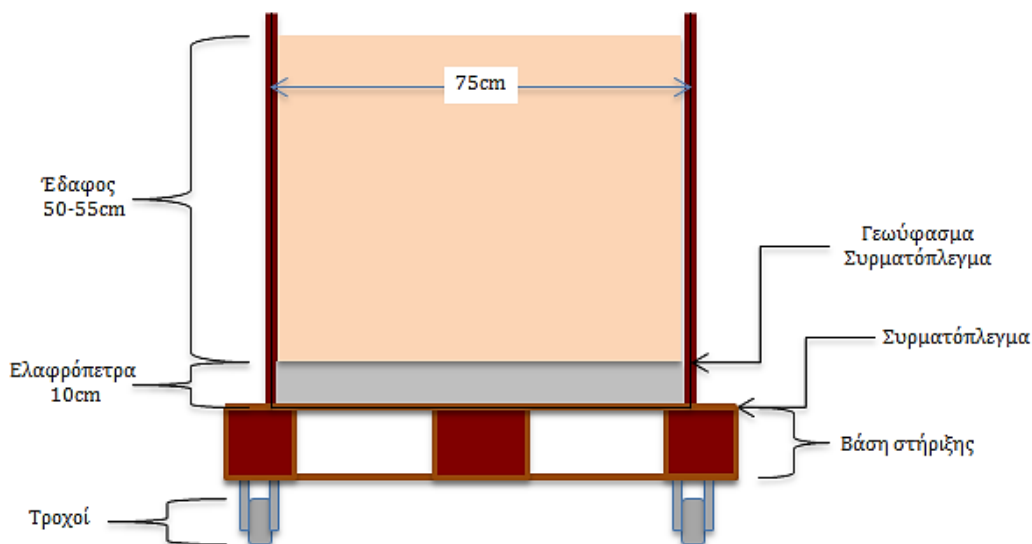
Εικόνα 4. Βάση στήριξης του μοντέλου άμμου



Εικόνα 5. Αποσπώμενη πλευρά του μοντέλου άμμου

Στην Εικόνα 4 φαίνονται η βάση στήριξης και οι τροχοί της κατασκευής. Στην Εικόνα 5 φαίνεται η επικάλυψη με πλαστική μεμβράνη, η στρώση ελαφρόπετρας με το συρματόπλεγμα και οι πλαϊνές δοκοί στήριξης από την αποσπώμενη πλευρά.

Στο Σχήμα 11 διακρίνεται το προφίλ της ξύλινης κατασκευής και τα υλικά που θα συναντήσει το νερό καθώς θα διηθείται από την κορυφή προς τα κατώτερα στρώματα/επίπεδα.



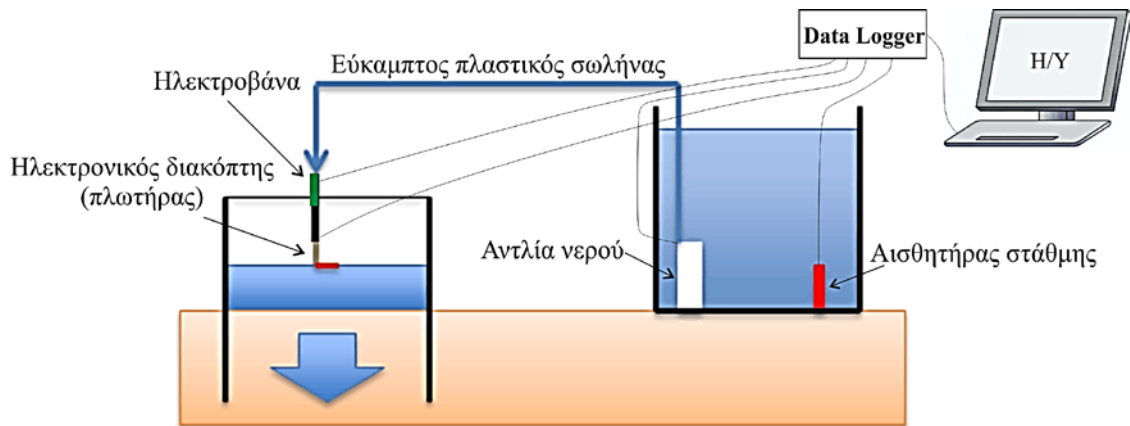
Σχήμα 11. Σκαρίφημα του Προφίλ της ιδιοκατασκευής

3.2 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΗΘΗΤΟΜΕΤΡΟ

Το αυτοματοποιημένο διηθητόμετρο αποτελείται από τα εξής λειτουργικά μέρη: α) ένα μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο (δεξαμενή) νερού β) έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα της υδροστατικής πίεσης (pressure transducer), γ) την αντλία νερού δ) τον μεταλλικό κύλινδρο διήθησης ε) τον ηλεκτρονικό αισθητήρα στάθμης (πλωτήρας) ώστε το φορτίο διήθησης να διατηρείται σταθερό στ) την ηλεκτροβάννα ζ) τη συσκευή συνεχούς καταγραφής (Data logger) των δεδομένων μέτρησης η) έναν συσσωρευτή 12V για την αυτόνομη λειτουργία του.

Ακολούθως, δίνεται η αρχή και ο τρόπος λειτουργίας του αυτοματοποιημένου διηθητομέτρου (Σχήμα 12). Μέσα στον μεταλλικό κύλινδρο διήθησης που είναι βυθισμένος στο έδαφος, τοποθετείται σε προκαθορισμένο ύψος ο ηλεκτρονικός αισθητήρας της στάθμης του νερού. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα που μπορούν να ρυθμίζονται από τον χειριστή (προτείνεται ανά 1sec), το ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχει αν η στάθμη του νερού μέσα στο δοχείο παραμένει σταθερή ή μεταβάλλεται και ταυτόχρονα το ύψος στάθμης καταχωρείται στη μνήμη του καταγραφικού. Όταν η στάθμη του νερού υποβιβαστεί κατά το ύψος ευαισθησίας του οργάνου που είναι 1.6mm, ο ηλεκτρονικός διακόπτης/πλωτήρας δίνει εντολή στην ηλεκτροβάννα να ανοίξει και στην αντλία η οποία βρίσκεται στον πυθμένα της κυλινδρικής δεξαμενής, να αποστέλλει νερό στον μεταλλικό κύλινδρο διήθησης μέχρι να αναπληρωθεί η διηθούμενη ποσότητα μέσα στο έδαφος. Μόλις η στάθμη του νερού φθάσει στο

προκαθορισμένο ύψος, κλείνει η ηλεκτροβάννα και σταματά να λειτουργεί η αντλία, κατόπιν εντολής που δέχονται από τον ηλεκτρονικό αισθητήρα στάθμης. Με αυτό τον μηχανισμό, η στάθμη (φορτίο) του νερού μέσα στο διηθητόμετρο διατηρείται σταθερή. Από τα καταγεγραμμένα ζεύγη τιμών χρόνου-στάθμης υπολογίζεται ανά πάσα στιγμή ο ρυθμός διήθησης το νερού στο έδαφος που έχει μονάδες ταχύτητας (μήκος/χρόνο).



Σχήμα 12. Σχηματική απεικόνιση αυτοματοποιημένου διηθητομέτρου

3.2.1 Αντλία νερού

Η αντλία νερού είναι τοποθετημένη στον πυθμένα του κυλινδρικού δοχείου μέσα σε σταθερή βάση προκειμένου να μην προκαλούνται αναταράξεις στο νερό κατά τη λειτουργία του και να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις στάθμης. Σκοπός της αντλίας είναι να στέλνει νερό στον κύλινδρο διήθησης κάθε φορά που δέχεται εντολή από το ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου στάθμης. Η ονομαστική παροχή της αντλίας είναι 100 US gal/h=378.5 lit/h.

3.2.1.1 Μετρήσεις παροχής αντλίας

Για την εξακρίβωση της αναγραφόμενης παροχής της αντλίας νερού, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις ογκομέτρησης.

Πρώτος τρόπος: Η αντλία ετέθη σε λειτουργία για δύο λεπτά και το νερό συλλέχθηκε μέσα σε πλαστικό δοχείο. Με τη βοήθεια γυάλινου ογκομετρικού σωλήνα

υπολογίστηκε ο όγκος του νερού. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν¹ σε 3 επαναλήψεις και υπολογίστηκε ο μέσος όρος.

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

1^η μέτρηση: 12,95 lit / 2min= 6,475 lit/min

2^η μέτρηση: 13,07 lit / 2min= 6,535 lit/min

3^η μέτρηση: 13,05 lit / 2min= 6,525 lit/min

Μέσος όρος: 6,511 lit / min = 390,66 lit/h

Δεύτερος τρόπος: Η αντλία ετέθη σε λειτουργία για δύο λεπτά. Από τη διαφορά της στάθμης του νερού πριν και μετά την άντληση και έχοντας γνωστές τις διαστάσεις του κυλινδρικού δοχείου υπολογίστηκε ο συνολικός όγκος νερού που αντλήθηκε. Η εσωτερική διάμετρος του κυλινδρικού δοχείου πλήρωσης είναι 38cm ή 0,38m. Οι μετρήσεις έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

1^η μέτρηση: Διαφορά στάθμης 11.3 cm. Η παροχή της αντλίας υπολογίζεται:

$$q = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot h}{1000 \cdot t} = \frac{3.1415 \cdot 19^2 \text{ cm}^2 \cdot 11.3 \text{ cm}}{1000 \text{ cm}^3/\text{lit} \cdot 2 \text{ min}} = 6.41 \text{ lit/min}$$

2^η μέτρηση: Διαφορά στάθμης 11.2 cm. Παροχή αντλίας q= 6,35 lit/min.

3^η μέτρηση: Διαφορά στάθμης 11.1 cm. Παροχή αντλίας q= 6,29 lit/min.

Μέσος όρος: 6,35 lit/min = 381 lit/h

3.2.2 Συσσωρευτής 12V

Ο συσσωρευτής ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτεί με ρεύμα την αντλία νερού και τον ηλεκτρικό διακόπτη νερού «ηλεκτροβάνα». Έχει τα εξής χαρακτηριστικά: 12Volt
7.2 Ampere/h

¹ Οι μετρήσεις της παροχής της αντλίας πραγματοποιήθηκαν στις 10 Μαρτίου 2016 στο εργαστήριο Αρδεύσεων του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης.



Εικόνα 6. Εξωτερική μπαταρία 12Volt 7.2AH

3.2.3 Ηλεκτρονικός διακόπτης (Πλωτήρας)

Ο ηλεκτρονικός διακόπτης «πλωτήρας» βρίσκεται μέσα στον κύλινδρο διήθησης. Η λειτουργία του αποσκοπεί στον έλεγχο του επιπέδου της στάθμης του νερού. Όταν διηθείται νερό από τον κύλινδρο και υποβιβάζεται η στάθμη, ο διακόπτης δίνει εντολή, μέσω του καταγραφικού, στην αντλία νερού να αποστείλει νερό μέχρι η στάθμη του φθάσει στο προκαθορισμένο ύψος. Οι χαρακτηριστικές θέσεις on και off του κινούμενου στοιχείου στον πλωτήρα απέχουν κατά ένα μήκος διαδρομής 1.6mm.

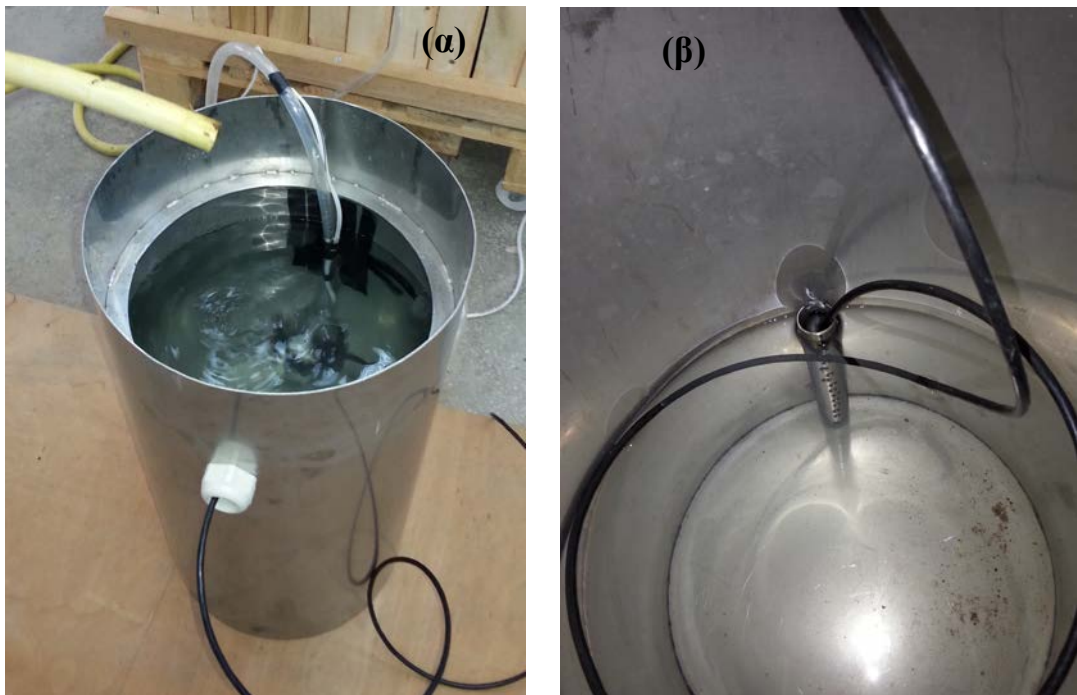


Εικόνα 7. Ηλεκτρονικός διακόπτης «πλωτήρας»

Με τον συνεχή έλεγχο της στάθμης επιτυγχάνεται η διατήρηση ενός σταθερού φορτίου νερού. Το ύψος της στάθμης νερού εξαρτάται από το πόσο θα βυθιστεί ο κύλινδρος διήθησης μέσα στο έδαφος. Για παράδειγμα, όταν ο κύλινδρος εισέρχεται σε βάθος 25cm το φορτίο του νερού είναι 5.5cm +/- 0.8mm. Σε βάθος 15cm το φορτίο του νερού μέσα στο διηθητόμετρο είναι 15.5cm +/- 0.8mm.

3.2.4 Δεξαμενή νερού

Ως δεξαμενή νερού χρησιμοποιείται ένα μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο μέσα στο οποίο βρίσκονται η αντλία και ο αισθητήρας στάθμης του νερού (Εικόνα 8α). Ο ρυθμός με τον οποίο υποβιβάζεται η στάθμη μέσα στην δεξαμενή αντιπροσωπεύει το ρυθμό διήθησης του νερού στο έδαφος.



Εικόνα 8. (α) Κυλινδρική δεξαμενή νερού (β) Υποδοχή αισθητήρα στάθμης

Το μεταλλικό δοχείο νερού έχει εσωτερική διάμετρο 30,8cm και ύψος 60cm. Η χωρητικότητά του περιορίζεται στο ύψος των 44cm λόγω μιας πλευρικής οπής από την οποία διέρχεται το εύκαμπτο καλώδιο του αισθητήρα στάθμης του νερού. Η μέγιστη ποσότητα του νερού που μπορεί ν' αποθηκευτεί μέσα στην δεξαμενή είναι:

$$\forall = \pi R^2 h = 3.14 * 15,4^2 \text{ cm}^2 * 44 \text{ cm} = 32782.6 \text{ cm}^3 = 32,78 \text{ lit}$$

Στον πυθμένα του δοχείου υπάρχει υποδοχή για την σταθερή τοποθέτηση του αισθητήρα μέσα στην δεξαμενή (Εικόνα 8β).

3.2.5 Ηλεκτρικός διακόπτης ροής νερού- «Ηλεκτροβάνα» D266DBU

Ο ηλεκτρικός διακόπτης νερού «Ηλεκτροβάνα» είναι συνδεδεμένος με το άκρο του εύκαμπτου σωλήνα μεταφοράς νερού προς τον κύλινδρο διήθησης. Η αποστολή του είναι να ανοίγει και να κλείνει ταυτόχρονα με την αντλία νερού με σκοπό να επιτρέπει το νερό να εισέρχεται από τη δεξαμενή πλήρωσης στο διηθητόμετρο (όταν είναι ανοιχτή) αλλά να μην επιτρέπει την κίνηση του νερού από και προς το διηθητόμετρο και την δεξαμενή πλήρωσης (όταν είναι κλειστή).



Εικόνα 9. Ηλεκτρικός διακόπτης ροής D266DBU

Η ηλεκτροβάνα έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Είναι κατασκευασμένη από την εταιρία m&m και το μοντέλο της είναι D266DBU. Λειτουργεί με συνεχή τάση DC σε πιέσεις νερού από 0.1 μέχρι 7 bar και σε εναλλασσόμενη τάση AC από 0.1 μέχρι 14 bar.

3.2.6 Αισθητήρας στάθμης νερού

Ο αισθητήρας στάθμης νερού βρίσκεται μέσα σε μια ειδικά διαμορφωμένη υποδοχή κοντά στον πυθμένα της δεξαμενής, ώστε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων να παραμένει σταθερός για να μην προκαλούνται αναταράξεις στο νερό και καταγράφονται λανθασμένες μετρήσεις. Η αποστολή του είναι να μετράει ανά τακτά χρονικά διαστήματα που καθορίζονται από τον χρήστη)² τη στάθμη του νερού μέσα

² Στις διάφορες πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας, ο αισθητήρας ρυθμίστηκε να καταγράφει το ύψος στάθμης ανά 1, 2 και 4 δευτερόλεπτα.

στη δεξαμενή πλήρωσης με ακρίβεια χιλιοστού (0,001m). Ο αισθητήρας μετρά την υδροστατική πίεση που ασκεί το νερό και τη μετατρέπει σε ύψος μέσα στην δεξαμενή.

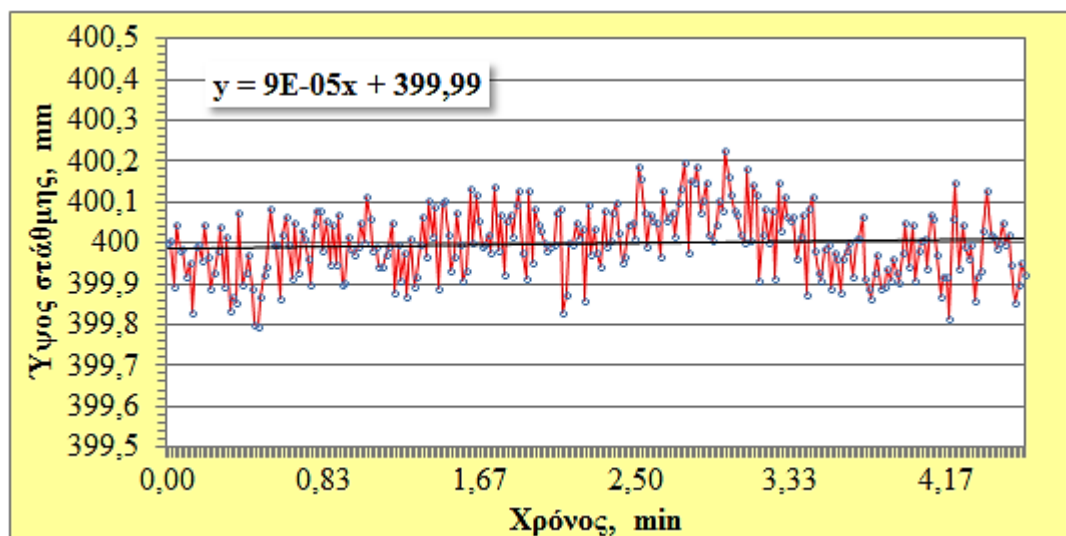


Εικόνα 10. Αισθητήρας ύψους στάθμης νερού

Έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Μπορεί να λειτουργήσει σε ύψος νερού από 0m έως 10m και τάση λειτουργίας από 3,2V μέχρι 32V.

3.2.6.1 Ευαισθησία του αισθητήρα ύψους στάθμης

Η ευαισθησία του οργάνου αξιολογήθηκε στις 10 Μαρτίου 2016. Το δοχείο νερού πληρώθηκε μέχρι το ύψος των 40cm. Έχοντας κλειστή την αντλία, και το νερό της δεξαμενής να βρίσκεται σε ηρεμία, τέθηκε σε λειτουργία το καταγραφικό για τη λήψη μετρήσεων ύψους στάθμης.



Σχήμα 13. Μετρήσεις του αισθητήρα στάθμης όταν το νερό βρίσκεται σε ηρεμία

<i>Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων</i>			
Mean	400	Skewness	0,0354
Standard Error	0,0049	Range	0,433
Median	399,9973	Minimum	399,7923
Mode	400,0433	Maximum	400,2253
Standard Deviation	0,0814	Count	276
Sample Variance	0,0066	Confidence Level (99,0%)	0,0127
Kurtosis	-0,2957		

Από το Σχήμα 13 γίνεται φανερό ότι η ακρίβεια του αισθητήρα είναι της τάξης 1mm και τα δεκαδικά ψηφία θα πρέπει να αγνοούνται. Ενώ η στάθμη του νερού παρέμενε σταθερή παρατηρήθηκε μια διακύμανση της τάξης του $\pm 0,2\text{mm}$.

3.2.7 Καταγραφικό (Data Logger)

Το καταγραφικό αποτελεί την καρδιά της μετρητικής διάταξης. Συνδέει και ελέγχει τα εξής όργανα:

- i. την αντλία νερού
- ii. τον ηλεκτρικό διακόπτη νερού
- iii. τον αισθητήρα στάθμης νερού
- iv. τον ηλεκτρονικό διακόπτη «πλωτήρα»
- v. τον ηλεκτρονικό υπολογιστή
- vi. τον συσσωρευτή 12V

Πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων διηθητικότητας, καθορίζεται μέσω του λογισμικού κάθε πόσα δευτερόλεπτα (συνιστάται 1s) ο αισθητήρας να καταγράφει τη στάθμη του νερού μέσα στην δεξαμενή πλήρωσης. Το καταγραφικό αποθηκεύει στην εσωτερική του μνήμη, ανά χρονική μονάδα που έχει προκαθοριστεί, α) την στάθμη του νερού στην δεξαμενή πλήρωσης, β) την τάση της εσωτερικής μπαταρίας³, και γ) την κατάσταση λειτουργίας (1 ON ή 0 OFF) της αντλίας νερού και της ηλεκτροβάνας.

Επίσης, το καταγραφικό ελέγχει/παρακολουθεί τον ηλεκτρονικό διακόπτη «πλωτήρα» και ανάλογα με τη θέση του, δίνει εντολή στην αντλία και την ηλεκτροβάνα να ανοίξουν ή να κλείσουν, ταυτόχρονα.

³ Η συσκευή Data Logger έχει ενσωματωμένες 6 μπαταρίες 1,5Volt τύπου AA σε σειρά

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται μια αδυναμία του προγραμματισμού ελέγχου του καταγραφικού. Ο έλεγχος της στάθμης του νερού μέσω του πλωτήρα επιβάλλεται να γίνεται στο συντομότερο χρονικό διάστημα (1s) ώστε να ανταποκρίνεται άμεσα η αντλία και να αποστέλλει νερό για τη διατήρηση σταθερού φορτίου στο διηθητόμετρο. Επειδή του καταγραφικό ελέγχει με την ίδια συχνότητα τα διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, προκύπτει ένας μεγάλος όγκος αποθηκευμένων δεδομένων δυσχεραίνοντας την επεξεργασία τους.

Αν ο χειριστής αυξήσει το χρονικό βήμα ελέγχου, αυτό θα έχει ως συνέπεια την μη επαρκή παρακολούθηση του ρυθμού διήθησης με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να μην είναι αξιόπιστες. Η παραπάνω αδυναμία μπορεί να αντιμετωπιστεί με κατάλληλο προγραμματισμό ώστε ο Data Logger να ελέγχει με διαφορετική συχνότητα το σύστημα πλωτήρας-ηλεκτροβόνα-αντλία σε σχέση με τον αισθητήρα πίεσης (ύψος στάθμης) οι τιμές του οποίου καταγράφονται στη μνήμη.

Ο Data Logger ρυθμίζεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή με τον οποίο συνδέεται με καλώδιο USB. Από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή δίνεται η εντολή λειτουργίας ή το σταμάτημα του Data Logger, ρυθμίζεται ο χρόνος καταγραφής και η ώρα. Ακόμα, μέσω του H/Y μεταφέρονται τα δεδομένα της μνήμης του Data Logger για επεξεργασία.

Τέλος, ο Data Logger συνδέεται με μία εξωτερική μπαταρία 12Volt η οποία όμως χρησιμοποιείται για να θέτει σε λειτουργία την αντλία νερού και την ηλεκτροβόνα. Η εσωτερική μπαταρία τροφοδοτεί με ενέργεια τον πλωτήρα, τον αισθητήρα στάθμης, δηλαδή, είναι κυρίως για την καταγραφή των δεδομένων στην μνήμη του Data logger.



Εικόνα 11. Καταγραφικό (Data Logger)

3.2.8 Ηλεκτρονικός Υπολογιστής (ΗΥ)

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής συνδέεται μέσω καλωδίου USB με το καταγραφικό. Τα δεδομένα των μετρήσεων μεταφέρονται από την μνήμη του καταγραφικού στον ΗΥ, όπου γίνεται και η επεξεργασία των δεδομένων στο πρόγραμμα Microsoft excel. Επίσης, μέσω του ειδικού λογισμικού ΗΥ γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις του καταγραφικού όπως έχει προαναφερθεί στην ενότητα 3.2.7.



Εικόνα 12. Ηλεκτρονικός υπολογιστής συνδεδεμένος με το καταγραφικό

3.2.9 Κύλινδροι διήθησης

Το διηθητόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον ένα ή και με τους δύο μεταλλικούς κυλίνδρους. Ο εσωτερικός κύλινδρος έχει διάμετρο 30.8cm, ο εξωτερικός 51.5cm και το ύψος τους είναι 45cm.



Εικόνα 13. Διηθητόμετρο διπλού και μονού κυλίνδρου

Επειδή, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε εδαφικά δείγματα μέσα στο εργαστήριο ήταν εύκολη η βύθιση του κυλίνδρου σε βάθος 25cm (είναι πιο δύσκολο, σε πραγματικές συνθήκες αγρού) και έτσι θεωρήθηκε επαρκής η χρήση του ενός μόνου κυλίνδρου. Οι κύλινδροι συνοδεύονται από ισχυρό μεταλλικό κάλυμα που χρησιμοποιείται ως επιφάνεια κρούσης για την υποβοήθηση της βύθισής τους στο έδαφος.

3. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Παρακάτω δίνονται τα βήματα συναρμολόγησης και οι διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται για τη διενέργεια των μετρήσεων διηθητικότητας.

Βήμα 1^ο: Το διηθητόμετρο βυθίζεται στο έδαφος⁴ στο κατάλληλο βάθος. (15cm με 25cm ανάλογα με το επιθυμητό ύψος υδραυλικού φορτίου)

Βήμα 2^ο: Γεμίζεται με νερό η κυλινδρική δεξαμενή

Βήμα 3^ο: Τοποθετούνται οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες και διακόπτες στις θέσεις τους⁵.

- i) ο ηλεκτρονικός αισθητήρας στάθμης «πλωτήρας» στο διηθητόμετρο
- ii) ο ηλεκτρικός διακόπτης νερού «ηλεκτροβάννα» στην θέση του πάνω από το διηθητόμετρο
- iii) ο αισθητήρας πίεσης ή στάθμης νερού μέσα στην ειδική υποδοχή της δεξαμενής νερού

Βήμα 4^ο: Πραγματοποιούνται όλες οι απαραίτητες συνδέσεις

- i) ο συσσωρευτής με το καταγραφικό
- ii) η αντλία νερού με το καταγραφικό
- iii) ο ηλεκτρονικός υπολογιστής με το καταγραφικό
- iv) η αντλία νερού διαμέσω του πλαστικού σωλήνα με τον κύλινδρο διήθησης ακριβώς πριν τον ηλεκτρικό διακόπτη νερού. Στο σημείο της σύνδεσης θα πρέπει οπωσδήποτε να τοποθετείται ελαστικό παρέμβυσμα (φλάντζα) για λόγους στεγανότητας.
- v) Τοποθετείται η πλαστική μεμβράνη (νάιλον) μέσα στο διηθητόμετρο

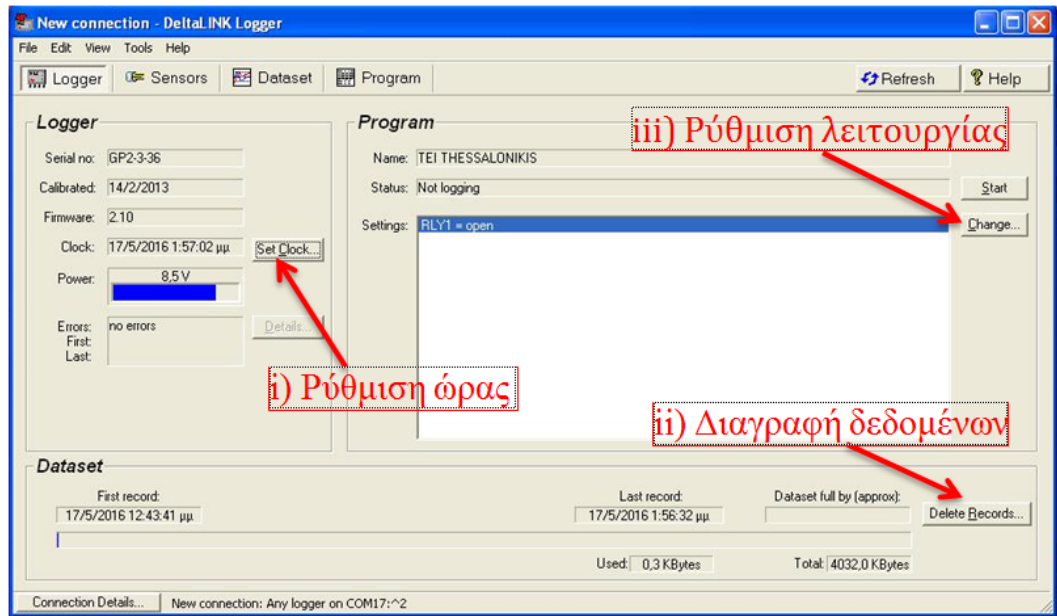
Βήμα 5^ο: Τίθεται σε λειτουργία το καταγραφικό: διακόπτης στη θέση ON (ο διακόπτης βρίσκεται στα πλάγια του καταγραφικού)

Βήμα 6^ο: Μέσα από το λογισμικό του καταγραφικού (Εικόνα 14) πραγματοποιούνται οι εξής ρυθμίσεις:

⁴ Σε αυτό το στάδιο τοποθετείται και ο εξωτερικός κύλινδρος εφόσον πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

⁵ Τα όργανα αυτά είναι ήδη συνδεδεμένα με το καταγραφικό.

- i) Ρυθμίζεται η ημερομηνία και ώρα (**Set Clock..**)
- ii) Διαγράφονται από τη μνήμη του καταγραφικού τα παλιά δεδομένα (**Delete Records..**)
- iii) Ρυθμίζεται το χρονικό βήμα (συνιστάται 1s) καταγραφής⁶ δεδομένων (**Change..**)



Εικόνα 14. Οθόνη λογισμικού με τις δυνατότητες ρυθμίσεων

Βήμα 7^ο: Πιέζοντας **Start** η μετρητική διάταξη τίθεται σε λειτουργία, η αντλία στέλνει νερό μέσα στο διηθητόμετρο (το πλαστικό δεν επιτρέπει τη διήθηση του νερού στο έδαφος). Το διηθητόμετρο γεμίζει με νερό έως ότου η στάθμη του φθάσει στο επίπεδο του πλωτήρα και αυτόματα θα δώσει εντολή να σταματήσει η αντλία νερού

Βήμα 8^ο: Οι επόμενες ενέργειες πρέπει να γίνουν με τη συγκεκριμένη σειρά αλλιώς θα υπάρχει αλλοίωση των αποτελεσμάτων.

- i) Ξαναγεμίζεται η δεξαμενή νερού μέχρι το ανώτατο όριο
- ii) Πιέζεται το **Stop** για να σταματήσει ο logger να καταγράφει δεδομένα
- iii) Διαγράφουμε τα δεδομένα από την μνήμη του logger
- iv) Πιέζουμε **Start** για να ξεκινήσει ο logger να καταγράφει μετρήσεις στάθμης

⁶ Για να είναι δυνατή η αλλαγή του βήματος καταγραφής δεν πρέπει να υπάρχουν δεδομένα στη μνήμη του logger. Επομένως, είναι απαραίτητο να προηγηθεί η διαγραφή της εσωτερικής μνήμης.

- v) Απομακρύνουμε την πλαστική μεμβράνη γρήγορα αλλά με τρόπο ώστε να μην δημιουργηθεί έντονη ταλάντωση στο νερό, για να αρχίσει η διήθηση στο έδαφος.
- vi) Στην εκροή του νερού μέσα στο διηθητόμετρο, τοποθετείται ένα συρματόπλεγμα ώστε να ελαττωθεί η διαταραχή της στάθμης και της λειτουργίας του πλωτήρα.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων η δεξαμενή νερού δεν πρέπει να μετακινείται διότι ο αισθητήρας στάθμης θα καταγράφει λανθασμένες μετρήσεις.

4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι τροποποιητικές παρεμβάσεις που έγιναν για τη βελτίωση της λειτουργικότητας του διηθητομέτρου, μέχρι να λάβει την τελική της μορφή.

5.1. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ I

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν την 1^η Φεβρουαρίου 2016 στο θερμοκήπιο αρωματικών φυτών του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης. Λόγω των καιρικών συνθηκών και της αυξημένης εδαφικής υγρασίας που υπήρχε στους εξωτερικούς χώρους του Αγροκτήματος, επιλέχθηκε η δοκιμή της μετρητικής διάταξης⁷ να γίνει στον εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου.

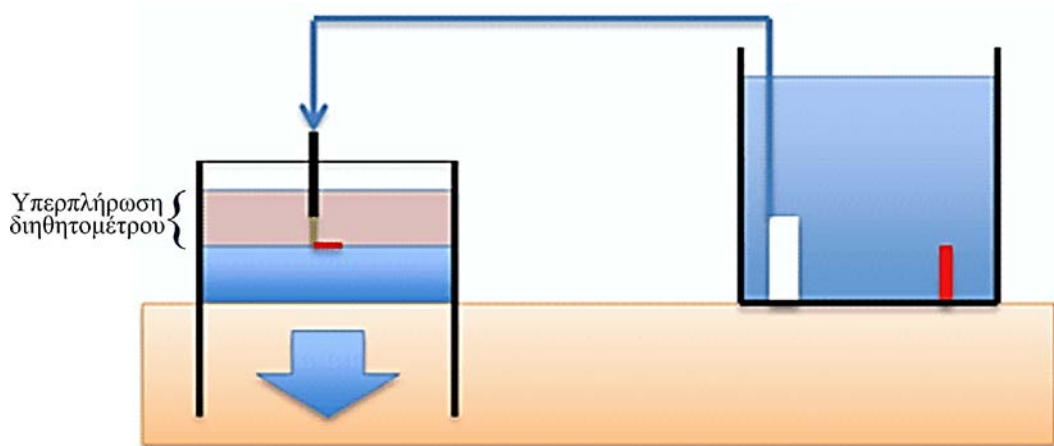


Εικόνα 15. Μετρήσεις διηθητικότητας (01-02-2016)

Κατά την πρώτη δοκιμή παρατηρήθηκε μια σημαντική αστοχία του συστήματος που οφειλόταν στην πρόκληση σιφονισμού εξαιτίας του ότι η στάθμη του νερού στην κυλινδρική δεξαμενή βρισκόταν σε μεγαλύτερο ύψος από το σημείο εκροής του νερού στο διηθητόμετρο. Έτσι, ενώ η αντλία ετίθετο εκτός λειτουργίας κατόπιν εντολής του ηλεκτρονικού διακόπτη, το νερό συνέχιζε να ρέει μέσα στον πλαστικό σωλήνα και να τροφοδοτεί τον κύλινδρο διήθησης. Αποτέλεσμα αυτής της δυσλειτουργίας ήταν, αφενός να μην διατηρείται σταθερό το φορτίο μέσα στο διηθητόμετρο (Σχήμα 14) και

⁷ Το κοσκίνισμα του εδάφους είναι κουραστική και χρονοβόρα διαδικασία. Στην περίπτωση αστοχίας των μετρήσεων, το έδαφος θα πρέπει να αφαιρεθεί από το χώρο μετρήσεων, να απλωθεί, να στεγνώσει και να κοσκινιστεί εκ νέου.

αφετέρου η καταγραφή του ύψους στάθμης στη δεξαμενή να μην αντιστοιχεί στο πραγματικά διηθούμενο ύψος νερού. Μετά την αποτυχημένη μέτρηση, η προσπάθειά μας εστιάστηκε στην εύρεση ενός μηχανισμού που να αποτρέπει τη δημιουργία σιφωνισμού.



Σχήμα 14. Αύξηση της στάθμης νερού στο διηθητόμετρο λόγω σιφωνισμού

5.2. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ II

Για την επίλυση του προβλήματος που προέκυψε στην πρώτη δοκιμαστική μέτρηση, εισάγαμε έναν ηλεκτρικό διακόπτη (ηλεκτροβάννα) στην έξοδο του νερού από τον πλαστικό σωλήνα και ο διακόπτης με τη σειρά του προσαρμόζεται σε μια μεταλλική βάση στήριξης του διηθητομέτρου (Εικόνα 16).



Εικόνα 16. Διηθητόμετρο σε λειτουργία

Η δοκιμή της συγκεκριμένης διάταξης πραγματοποιήθηκε στο θερμοκήπιο των αρωματικών φυτών στις 26-02-2016 όπου και διαπιστώθηκε η καλή λειτουργία του οργάνου.

Με τη διάταξη αυτή, κάθε φορά που ο ηλεκτρονικός αισθητήρας δίνει σήμα στο καταγραφικό να ενεργοποιήσει την αντλία νερού ή να αναστείλει τη λειτουργία της, δίνει ταυτόχρονα σήμα για το άνοιγμα ή το κλείσιμο της ηλεκτροβάνας, αντίστοιχα. Έτσι, η ροή του νερού σταματάει άμεσα και αποτρέπεται το φαινόμενο του σιφονίου.

Επειτα από την επιτυχημένη δοκιμή, αποφασίστηκε να γίνουν πειραματικές μετρήσεις διήθησης στον χώρο του εργαστηρίου σε έδαφος που ελήφθη από το θερμοκήπιο⁸. Μετά την αεροξήρανση του εδάφους ακολούθησε το κοσκίνισμα με μεταλική σίτα 2mm ώστε να απομακρυνθούν τα χονδρόκοκκα υλικά. Το έδαφος μεταφέρθηκε στον εργαστηριακό χώρο (Εικόνα 17) στις 27 Φεβρουαρίου 2016 και τοποθετήθηκε κατά στρώσεις μέσα στο ξύλινο κιβώτιο υποδοχής του διηθητομέτρου.



Εικόνα 17. Κοσκίνισμα εδάφους και γέμισμα του μοντέλου άμμου

Η υφή του εδάφους προσδιορίστηκε με μηχανική ανάλυση από την οποία προέκυψε η παρακάτω ποσοστιαία αναλογία των κλασμάτων:

Άμμος	Ιλύς	Άργιλος
67,5%	23,5%	9%

Σύμφωνα με το τριγωνικό σύστημα κατάταξης (USDA) το έδαφος ανήκει στην κατηγορία Αμμοπηλώδες (Sandy-Loam).

⁸ Χρησιμοποιήθηκε χώμα από το θερμοκήπιο γιατί ήταν πιο στεγνό.

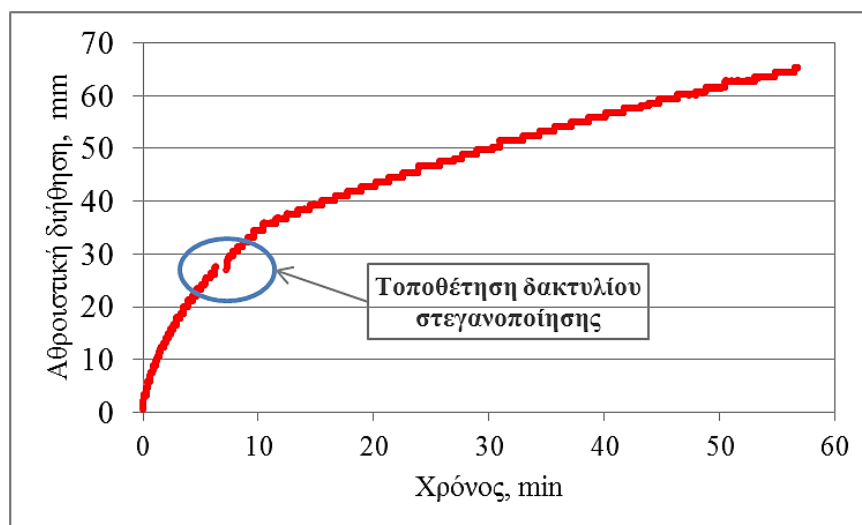
5.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ 2^{ΑΣ} ΜΑΡΤΙΟΥ 2016

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων στο εργαστήριο, διαπιστώθηκε μια ακόμη αστοχία της διάταξης.



Εικόνα 18. Πειραματική διάταξη διήθησης (2 Μαρτίου 2016)

Στο σημείο σύνδεσης του πλαστικού σωλήνα με την ηλεκτροβάνα, λόγω ελλιπούς στεγανοποίησης, παρατηρήθηκε επιστροφή του νερού από το σωλήνα προς την κυλινδρική δεξαμενή πλήρωσης όταν η αντλία έπαυε να λειτουργεί. Το πρόβλημα αυτό διορθώθηκε με την προσθήκη ενός πλαστικού δακτυλίου στεγανοποίησης στο σημείο ένωσης του σωλήνα με την ηλεκτροβάνα. Η χρονική στιγμή της προσθήκης φαίνεται στο Σχήμα 15.



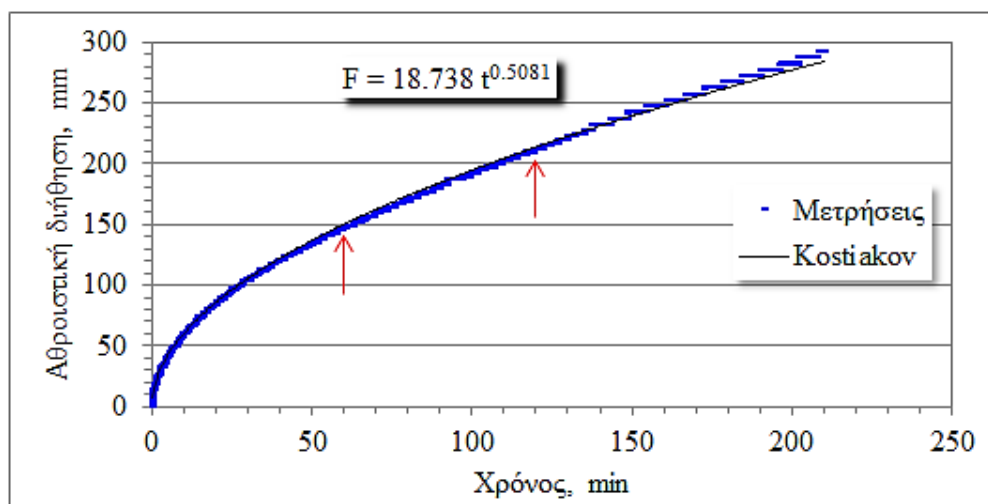
Σχήμα 15. Ασυνέχεια μετρήσεων διηθητικότητας λόγω επιδιόρθωσης βλάβης

5.4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ 17^{ΗΣ} ΜΑΪΟΥ 2016

Ο κύλινδρος του διηθητομέτρου βυθίστηκε στο εδαφικό δείγμα σε βάθος 25cm και το σταθερό υδραυλικό φορτίο (ύψος νερού πάνω από την επιφάνεια) διαμορφώθηκε στα 5.5cm. Οι πρώτες μετρήσεις της πτώσης στάθμης στο διηθητόμετρο καθορίζουν την αρχική διηθητικότητα του εδάφους και γι'αυτό απαιτείται ιδιαίτερος χειρισμός.

Κατά το γέμισμα του διηθητομέτρου, μέχρι η στάθμη του νερού να φθάσει στο επιθυμητό σταθερό ύψος, το νερό αρχίζει ήδη να διηθείται στο έδαφος. Επομένως, μέσα σ' αυτό το χρονικό διάστημα η διήθηση γίνεται με μεταβαλλόμενο φορτίο. Για τη διασφάλιση σταθερού φορτίου από την έναρξη του φαινομένου, τοποθετήθηκε μέσα στον κύλινδρο διήθησης μια πλαστική μεμβράνη. Στη συνέχεια, η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία και ο κύλινδρος πληρώθηκε με νερό μέχρι να φθάσει στο ύψος του ηλεκτρονικού αισθητήρα, οπότε αυτόματα σταμάτησε η λειτουργία της αντλίας. Η μεμβράνη αφαιρέθηκε από τον κύλινδρο σχεδόν ακαριαία ενώ το καταγραφικό βρισκόταν ήδη σε λειτουργία. Το βήμα ελέγχου της στάθμης και καταγραφής των μετρήσεων ήταν κλιμακωτό. Επειδή στην αρχή του φαινομένου ο ρυθμός διήθησης είναι μεγάλος, ο έλεγχος της στάθμης στο διηθητόμετρο πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη συχνότητα. Έτσι, στην πρώτη ώρα μετρήσεων ο έλεγχος και η καταγραφή της στάθμης του νερού γινόταν ανά 1 δευτερόλεπτο, την επόμενη ώρα ανά 2 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια μέχρι το πέρας των μετρήσεων ανά 4 δευτερόλεπτα.

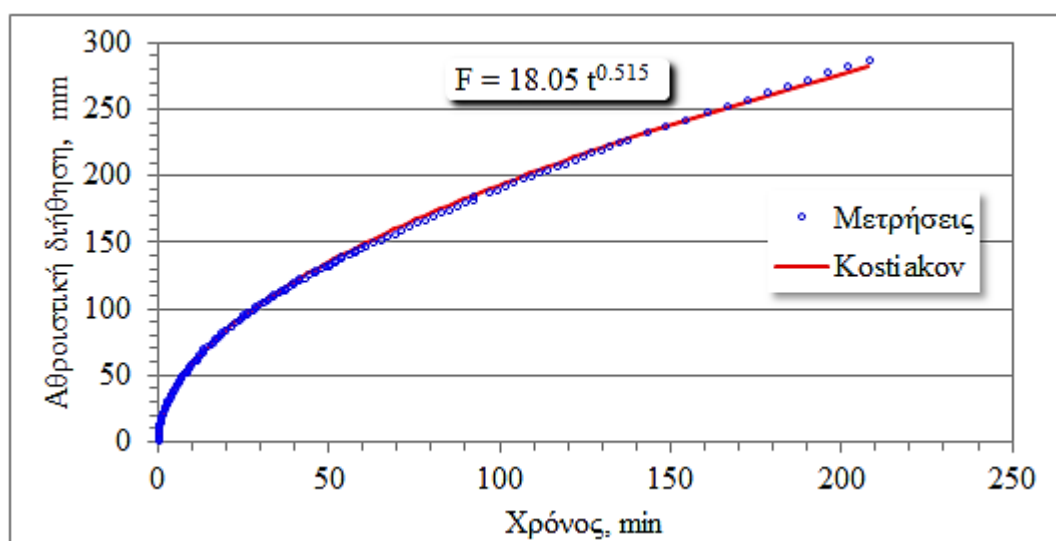
Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η καμπύλη της αθροιστικής διήθησης του νερού στο έδαφος η οποία έχει τη μορφή μιας συνεχούς τεθλασμένης γραμμής. Οι ταλαντώσεις της τεθλασμένης γίνονται πιο έντονες όσο αυξάνει το χρονικό βήμα ελέγχου της στάθμης.



Σχήμα 16. Αθροιστική διήθηση (17 Μαΐου 2016)

Επειδή στο αρχείο δεδομένων στάθμης, αποθηκεύονται τόσο οι χρόνοι κατά τους οποίους η αντλία στέλνει νερό στο διηθητόμετρο (ON «1») όσο και οι χρόνοι κατά τους οποίους η αντλία βρίσκεται εκτός λειτουργίας (OFF «0»), μπορεί να γίνει φιλτράρισμα των δεδομένων ώστε να παραμείνουν εκείνα τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε πραγματικά χρονικά διαστήματα διήθησης.

Στο Σχήμα 17, δίνεται η καμπύλη της αθροιστικής διήθησης μετά το φιλτράρισμα των μετρήσεων, δίχως ν' αλλάζουν σημαντικά οι συντελεστές της εξίσωσης Kostiakov.

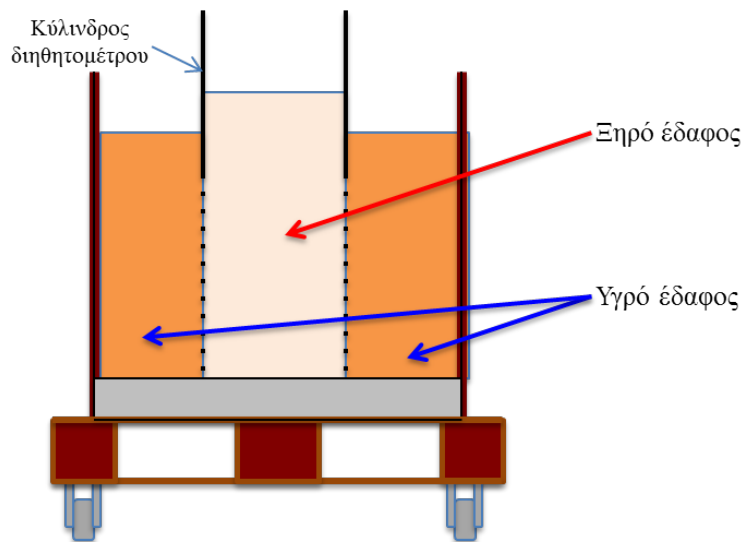


Σχήμα 17. Καμπύλη αθροιστικής διήθησης μετά το φιλτράρισμα των δεδομένων

5.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

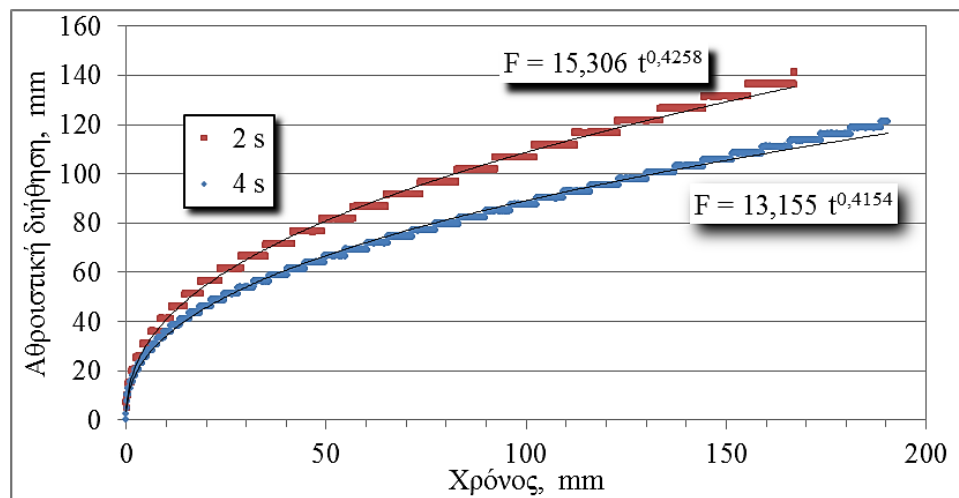
5.5.1. Ομοιόμορφο έδαφος

Μετά την ομοιόμορφη δýγγραση του εδάφους στην ξύλινη κατασκευή, στις 22 Μαρτίου 2016 αφαιρέθηκε έδαφος από τον πυρήνα του διηθητομέτρου μέχρι τον πυθμένα της κατασκευής (Σχήμα 18). Το έδαφος αεροξηράνθηκε και μετά από κοσκίνισμα επανατοποθετήθηκε με προσοχή μέσα στον κενό χώρο του διηθητομέτρου. Λόγω του περιμετρικά υγρού εδάφους, περιορίζεται η πλευρική διαρροή κι επομένως στο κεντρικό τμήμα του η διήθηση αναμένεται να εξελιχθεί κατακόρυφα.



Σχήμα 18. Προετοιμασία εδάφους για τη μέτρηση της διηθητικότητας

Οι μετρήσεις διηθητικότητας πραγματοποιήθηκαν στις 29 Μαρτίου 2016 με χρονικό βήμα ελέγχου στάθμης διηθητομέτρου 2 s και στις 05 Απριλίου 2016 με χρονικό βήμα 4 s. Οι καμπύλες αθροιστικής διήθησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 19.



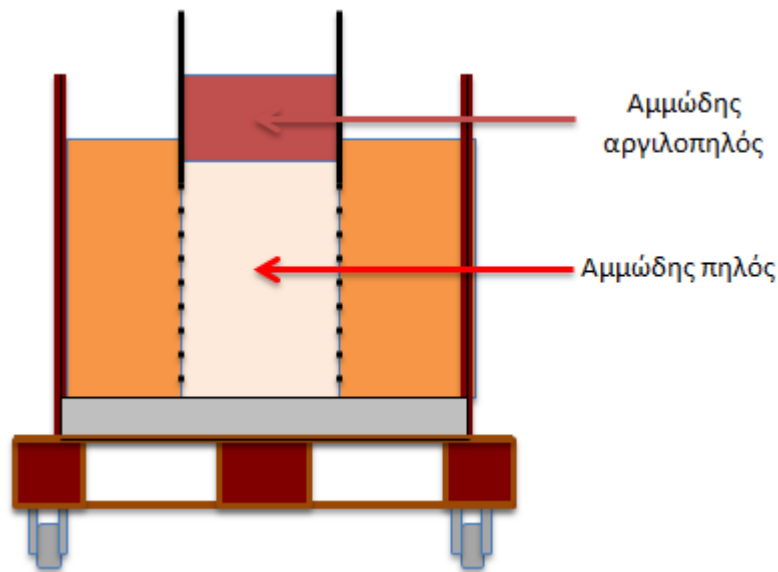
Σχήμα 19. Αθροιστική διήθηση με διαφορετικό βήμα ελέγχου στάθμης

Είναι φανερό, ότι η αύξηση του χρονικού βήματος ελέγχου της στάθμης οδηγεί σε λανθασμένη εκτίμηση των παραμέτρων της εξίσωσης διηθητικότητας. Όπως έχει εξηγηθεί στην ενότητα 3.2.7, με την μείωση της συχνότητας ελέγχου δεν παρακολουθείται επαρκώς ο ρυθμός διήθησης και συνακόλουθα καταγράφονται εσφαλμένες παρατηρήσεις στάθμης.

5.5.2. Διαστρωμένο έδαφος

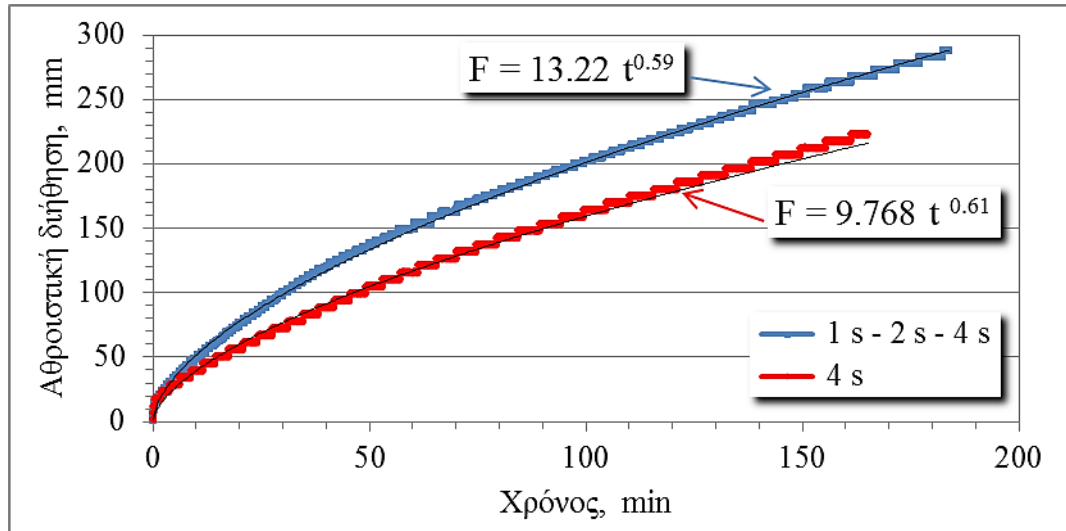
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία προετοιμασίας του εδαφικού υποστρώματος, τοποθετήθηκε στον πυθμένα του διηθητομέτρου το ξηρό έδαφος (Αμμώδης πηλός) και στην ανώτερη στρώση των 20cm (Σχήμα 20), τοποθετήθηκε έδαφος που ελήφθη από την Προσοτσάνη Δράμας και ανήκει στην κατηγορία του Αμμώδους αργιλοπηλός (50% άμμος, 23% ιλύς, 27% άργιλος).

Πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις διηθητικότητας (19 Απριλίου & 10 Μαΐου) με διαφορετικά χρονικά βήματα ελέγχου της στάθμης. Καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων της 19^{ης} Απριλίου η συχνότητα ελέγχου στάθμης ορίστηκε να είναι 4 δευτερόλεπτα. Στις μετρήσεις της 10^{ης} Μαΐου 2016 το χρονικό βήμα ελέγχου αυξανόταν κλιμακωτά από 1 δευτερόλεπτο για την πρώτη ώρα μετρήσεων σε 2 δευτερόλεπτα για την επόμενη ώρα και σε 4 δευτερόλεπτα για τον υπόλοιπο χρόνο των μετρήσεων.



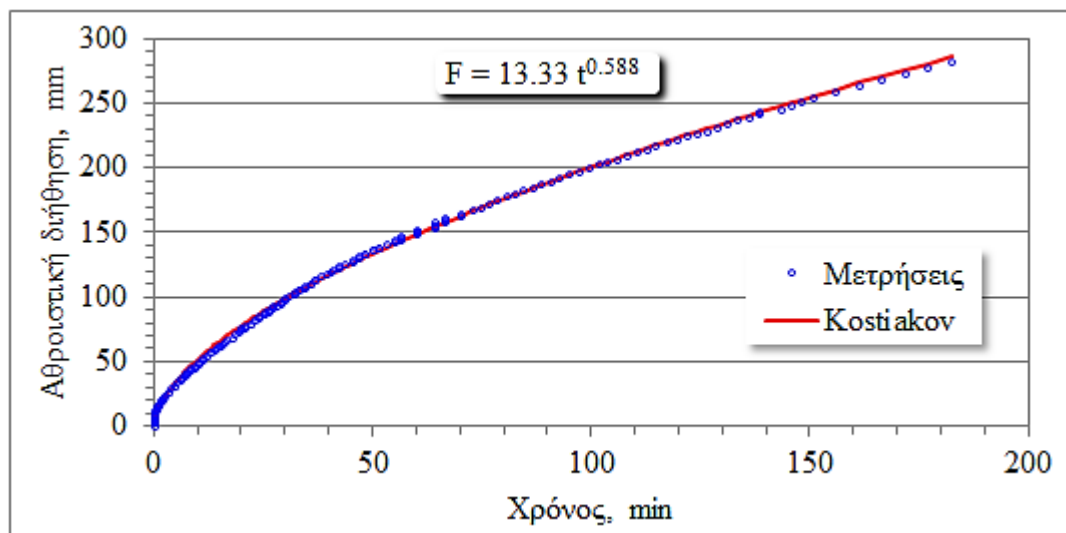
Σχήμα 20. Διάταξη μέτρησης σε διαστρωμένο έδαφος

Στο Σχήμα 21, παρατηρείται η εσφαλμένη εκτίμηση της διήθησης όταν το χρονικό βήμα ελέγχου στάθμης ορίστηκε στα 4s, λόγω της μη επαρκούς παρακολούθησης του φαινομένου.



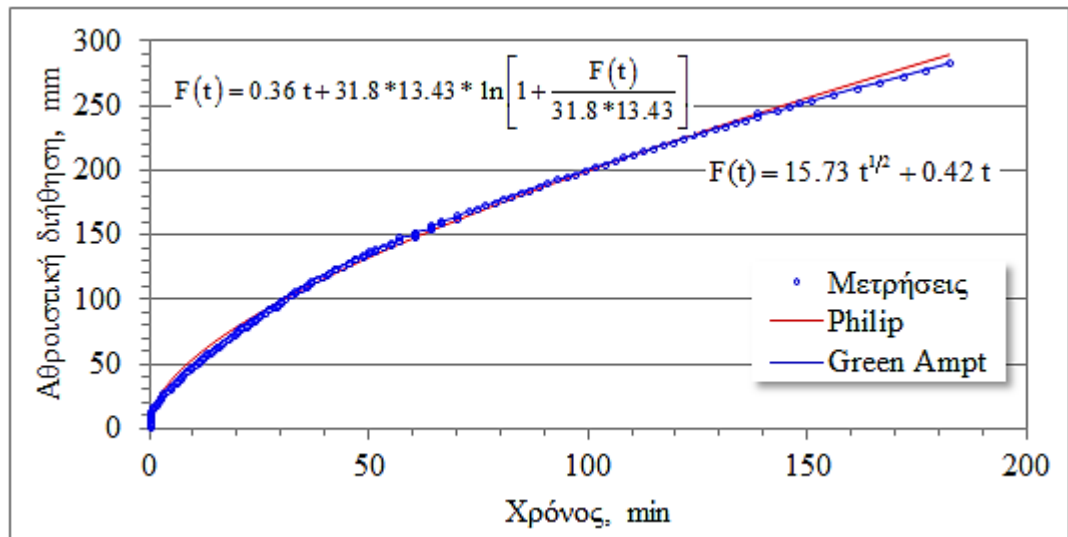
Σχήμα 21. Καμπύλες αθροιστικής διήθησης σε διαστρωμένο έδαφος

Επίσης, παρατηρούμε πως από τα ανεπεξέργαστα δεδομένα προκύπτουν καμπύλες διηθητικότητας με μορφή συνεχούς τεθλασμένης γραμμής. Μετά το κατάλληλο φιλτράρισμα, η αθροιστική διήθηση της μπλε καμπύλης εξομαλύνεται διατηρώντας την ακρίβεια των παραμέτρων της εξίσωσης Kostiaκον (Σχήμα 22).



Σχήμα 22. Καμπύλη αθροιστικής διήθησης μετά το φιλτράρισμα των δεδομένων

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζεται η προσαρμογή των εξισώσεων Green-Ampt και Philip στα επεξεργασμένα δεδομένα διηθητικότητας.

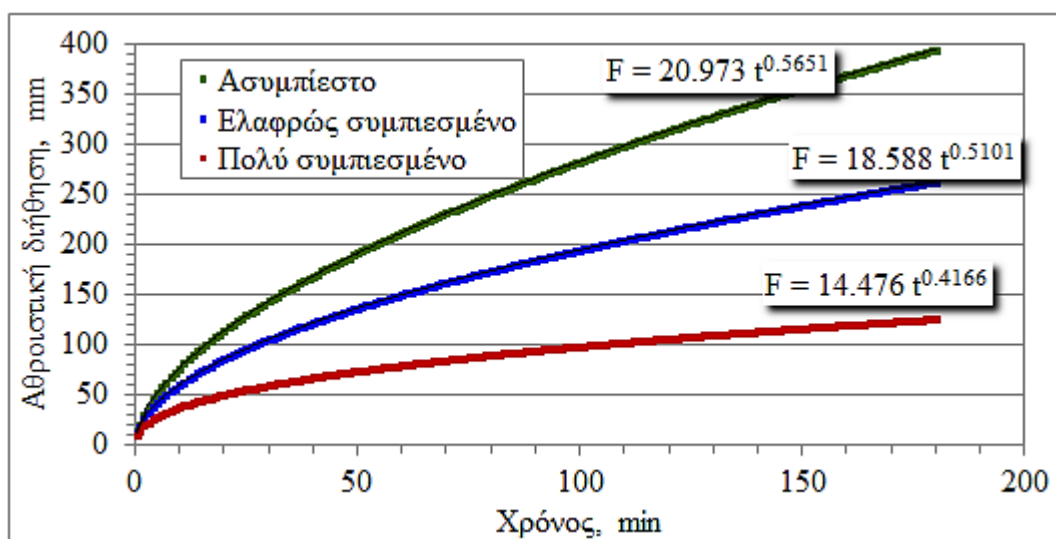


Σχήμα 23. Προσαρμογή των δεδομένων στις εξισώσεις Green-Ampt και Philip

5.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό διήθησης του νερού είναι ο βαθμός συμπίεσης του εδάφους. Η συμπίεση του εδάφους σε μια καλλιεργούμενη έκταση δεν παραμένει σταθερή καθώς εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας και την εντατικότητα χρήσης των καλλιεργητικών μηχανημάτων. Σ' ένα εδαφικό δείγμα στο οποίο εξασκήθηκαν κλιμακούμενης έντασης συμπίεσεις, πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες μετρήσεις διηθητικότητας.

Στο Σχήμα 24 φαίνεται μια σημαντική διαφοροποίηση στις καμπύλες αθροιστικής διήθησης ανάλογα με τον βαθμό συμπίεσης του εδάφους. Όσο μεγαλύτερη είναι η συμπίεση που έχει υποστεί το έδαφος τόσο μειώνεται το πορώδες του καθιστώντας την διήθηση βραδεία. Επίσης, οι συντελεστές της εξίσωσης Kostiakov μειώθηκαν με την αύξηση της συμπίεσης.



Σχήμα 24. Αθροιστική διήθηση για διαφορετικό βαθμό συμπίεσης εδάφους

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διηθητικότητα αποτελεί μια σημαντική ιδιότητα του εδάφους επηρεάζοντας τη διαχείριση του αρδευτικού νερού. Στις καλλιεργούμενες εκτάσεις, εμφανίζει μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα καθώς εξαρτάται από τις εδαφολογικές συνθήκες και τις εφαρμοζόμενες καλλιεργητικές εργασίες οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με την καλλιέργεια και την εποχή. Μια κοινή μέθοδος προσδιορισμού της διηθητικότητας είναι εκείνη του κυλινδρικού (μονού ή διπλού) διηθητομέτρου. Ο χειροκίνητος τρόπος μέτρησης της διηθητικότητας πολλές φορές είναι κουραστικός και χρονοβόρος και απαιτεί έμπειρο παρατηρητή για τη λήψη αξιόπιστων μετρήσεων.

Για την αυτοματοποιημένη διαδικασία των μετρήσεων, εξετάστηκε η λειτουργικότητα ενός αυτοματοποιημένου διηθητομέτρου απλού κυλίνδρου που αποτελείται από ηλεκτρονικούς αισθητήρες κι ένα σύστημα ελέγχου και καταγραφής δεδομένων.

Από τις πραγματοποιηθείσες δοκιμαστικές εργαστηριακές μετρήσεις, εντοπίστηκαν οι αστοχίες του αρχικού μοντέλου του διηθητομέτρου και έγιναν οι απαραίτητες κατασκευαστικές τροποποιήσεις. Επιπλέον, προτείνονται περαιτέρω προσθήκες και αλλαγές για τη βελτίωση της αυτόνομης λειτουργίας του οργάνου.

Κατασκευαστικές αστοχίες και τροποποιήσεις του πρότυπου διηθητομέτρου

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων διηθητικότητας διαπιστώθηκε ότι η μετρητική διάταξη παρουσίαζε σχεδιαστικά σφάλματα τα οποία δημιουργούσαν τα παρακάτω λειτουργικά προβλήματα:

- Λόγω έλλειψης μηχανισμού ελέγχου της ροής από την κυλινδρική δεξαμενή στο διηθητόμετρο παρατηρήθηκε το φαινόμενο του σιφωνισμού. Το πρόβλημα αποκαταστάθηκε με την προσθήκη ενός ηλεκτρικού διακόπτη (ηλεκτροβάννα) ο οποίος ανοιγοκλίνει ελεγχόμενα.
- Μετά την τοποθέτηση της ηλεκτροβάννας, παρουσιάστηκε πρόβλημα στεγανοποίησης στο σημείο σύνδεσης της με τον πλαστικό σωλήνα μεταφοράς νερού. Η αστοχία αυτή διορθώθηκε με την παρεμβολή ενός πλαστικού δακτυλίου.

- Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων, επινοήθηκε η αρχική τοποθέτηση μιας πλαστικής μεμβράνης στο διηθητόμετρο ώστε να επιτευχθεί το γέμισμα του κυλίνδρου με νερό χωρίς να προκαλείται ταυτόχρονη διήθηση. Με αυτόν τον τρόπο, όλες οι μετρήσεις διηθητικότητας λαμβάνονταν εξαρχής με σταθερό φορτίο.
- Για να επιτευχθούν ακριβείς μετρήσεις, ο έλεγχος της στάθμης του νερού στο διηθητόμετρο μέσω του ηλεκτρονικού πλωτήρα, απαιτείται να γίνεται με την μέγιστη συχνότητα η οποία ορίζεται στο 1 s. Επειδή στην παρούσα διαμόρφωση του συστήματος, η καταγραφή των δεδομένων στάθμης στη δεξαμενή νερού και ο έλεγχος της στάθμης του νερού στο διηθητόμετρο γίνονται με την ίδια συχνότητα, δημιουργείται πολύ μεγάλος όγκος δεδομένων δυσχεραίνοντας την επεξεργασία τους. Μια προσωρινή λύση είναι, η χειροκίνητα κλιμακούμενη αύξηση του χρονικού βήματος ελέγχου στάθμης και καταγραφής. Για να αλλάξει το βήμα θα πρέπει να σταματήσει η λειτουργία του διηθητομέτρου, να αποθηκευτούν τα δεδομένα στον ΗΥ και στη συνέχεια να διαγραφούν οι μετρήσεις από την μνήμη του καταγραφικού. Η παραπάνω διαδικασία είναι χρονοβόρα, οδηγεί σε απώλεια μετρήσεων και κυρίως απαιτεί την παρουσία ενός χειριστή.

Προτάσεις για τη βελτίωση της λειτουργικότητας του πρότυπου διηθητόμετρου

- Το καταγραφικό (datalogger) θα πρέπει να προγραμματιστεί κατά τρόπο ώστε η συχνότητα ελέγχου του συστήματος πλωτήρα-ηλεκτροβάννας-αντλίας να είναι η μέγιστη δυνατή (1s) και ανεξάρτητη από τη συχνότητα καταγραφής των δεδομένων η οποία να μπορεί να προγραμματίζεται εκ των προτέρων. Για παράδειγμα, ο χειριστής θα μπορούσε να εισάγει στο πρόγραμμα έναν πίνακα με τον οποίο θα δηλώνονται το χρονικό βήμα καταγραφής για κάθε αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Start time (Χρόνος εκκίνησης)	Stop time (Χρόνος τερματισμού)	Time Sequence (βήμα καταγραφής)
0 min	30 min	1 s
30 min	60 min	2 s
60 min	120 min	3 s
120 min	t_{end} min	4 s

Με τη ρύθμιση αυτή, λαμβάνονται ακριβείς μετρήσεις χωρίς την αποθήκευση υπερβολικά μεγάλου όγκου δεδομένων.

- Με τον κατάλληλο προγραμματισμό του καταγραφικού, θα μπορούσε να σταματά αυτόματα η διαδικασία των μετρήσεων όταν εντοπίζεται ότι ο ρυθμός της διήθησης έχει σταθεροποιηθεί.
- Ο πλωτήρας ελέγχου της στάθμης, στηρίζεται σε μια μεταλική ράβδο και έχει την δυνατότητα να ολισθαίνει κατακόρυφα προκειμένου να ρυθμίζεται στο επιθυμητό ύψος, διαμορφώνοντας ένα σταθερό φορτίο. Με το συγκεκριμένο μήκος της ράβδου, όταν το διηθητόμετρο βυθίζεται στο έδαφος κατά 25cm, το ελάχιστο φορτίο νερού που δημιουργείται είναι 5.5cm. Επειδή το μήκος της ράβδου είναι σχετικά μικρό, εάν το διηθητόμετρο βυθιστεί στο έδαφος κατά 15cm (μετρήσεις σε αγρό), το ελάχιστο φορτίο που μπορεί να σχηματιστεί στο διηθητόμετρο είναι 15.5cm. Γίνεται κατανοητό ότι το συγκεκριμένο φορτίο είναι αρκετά μεγάλο. Για την επίλυση του προβλήματος, θα πρέπει να αυξηθεί το μήκος της μεταλλικής ράβδου ώστε ο πλωτήρας να μπορεί να ρυθμίζεται σε χαμηλότερο ύψος.
- Στην περίπτωση που απαιτείται να χρησιμοποιηθεί και ο εξωτερικός κύλινδρος, θα πρέπει να προστεθεί ένας επιπλέον πλωτήρας ελέγχου στάθμης, ώστε ν' αναπληρώνεται η ακριβής ποσότητα νερού που διηθείται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ahuja, L.R., 1976. Measuring hydrologic properties of soil with a double ring infiltrometer and multiple depth tensiometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 494–499.
2. Alhassoun Rajeh, 2009. Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils. Doctoral Thesis, Julius Kühn-Institut, pp.156.
3. ASTM Standard D3385-09, 2009. Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-ring Infiltration West Conshohocken, PA, <http://dx.doi.org/10.1520/D3385-09> (www.astm.org).
4. Bouwer, H., 1986. Intake rate: Cylinder infiltrometer. in: A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9.* ASA. and SSSA. Madison, WI, 825-844.
5. Brakensiek, D. L., Rawls, W. J., 1988. Effects of agricultural rangeland management systems on infiltration. In *Modeling Agricultural, Forest, and Rangeland Hydrology*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers.
6. Branson, F. A., Gifford, G. F., Renard, K. G., Hadley, R. F., 1981. Rangeland hydrology. 47-72. Dubuque, IA: Kendall/Hunt.
7. Fatehnia, M., Paran, S., Kish, S., Tawfiq, K., 2016. Automating double ring infiltrometer with an Arduino microcontroller. *Geoderma* 262, 133–139.
8. Ferdoush, S., and Li, X., (2014): Wireless Sensor Network System Design using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications. The 9th International Conference on Future Networks and Communications (FNC-2014), *Procedia Computer Science* 34, 103-110.
9. Ghildyal, B. P., Tripathi, R. P., 1987. *Soil physics. Theory and Practice.* New York: Halsted Press.
10. Green, W.H., and Ampt, G.A., (1911): Studies on soil physics. *J. Agric. Sci.*, 4(1), 1-24.
11. Gregory, J.H., Dukes, M.D. Miller, G.L., and Jones, P.H., 2005. Analysis of double-ring infiltration techniques and development of a simple automatic water delivery system. *Appl. Turfgrass Sci.*, 2(1), 1-7.
12. Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics.* Academic Press. San Diego, CA., pp.771.

13. Horton, R. E., 1939. Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacity. Transactions of the American Geophysicists Union, Part IV, 693-694.
14. Horton, R. E., 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society of America, 5, 399-417.
15. Kostiakov, A.N., 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration, Trans. 6th Comm. Intern. Soc. Soil Sci., Russian Part A, 17-21.
16. Lai, J., and Ren, L., 2007. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation. Soil Sci. Soc. Am. J., 71(6), 1667-1675.
17. Lai, J., Luo, Y., and Ren, L., 2010. Buffer Index Effects on Hydraulic Conductivity Measurements Using Numerical Simulations of Double-Ring Infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J., 74(5), 1526-1536.
18. Latham, T.W., 1966. Fluid motion in a peristaltic pump. Master thesis, MIT, Cambridge, Massachusetts.
19. Maheshwari, B.L., 1996. Development of an automated double-ring infiltrometers. Australian Journal of Soil Research, 34, 709-714.
20. Matula, S., Dirksen, C., 1989. Automated regulating and recording system for cylinder infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J. 53, 299-302.
21. Milla, K., Kish, S., 2006. A low-cost microprocessor and infrared sensor system for automating water infiltration measurements. Comput. Electron. Agric. 53, 122-129.
22. Ong, J., Werkema, D., Lane, J.J.W., 2012. Revisiting the fully automated double ring infiltrometer using open-source electronics. AGU Fall Meeting Abstracts.
23. Oram, B. 2005. Hydrological Cycle. Watershed Assessment, Education, Training, Monitoring Resources in Northeastern Pennsylvania. Wilkes University. Environmental Engineering and Earth Sciences Department. Wilkes-Barre, PA <http://www.water-research.net/watershed/hydrologicalcycle.htm>. Accessed 8/29/06.
24. Philip, J. R., 1957a. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. Soil Sci. 83, 345-357.
25. Philip, J. R., 1957b. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Science 84, 257-264.

26. Prieksat, M.A., Ankeny, M.D., Kaspar, T.C., 1992. Design for an automated, self regulating, single-ring infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1409–1411.
27. Queloz, P., Besuchet, J., Rao, P.S.C., and Rinaldo, A., (2013): Development of a low-cost wireless controller for flexible sampling strategies based on real-time flow monitoring, EGU General Assembly Conference, Vienna, Austria, April 7-12.
28. Radcliffe, D., Simunek, J., 2010. *Soil physics with Hydrus. Modeling and Applications.* CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 369.
29. Rawls, W. J., Ahuja, L. R., Brakensiek, D. L., Shirmohammadi, A., 1993. Infiltration and soil water movement. In *Handbook of Hydrology.* McGraw-Hill, Inc.
30. Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M.Th., 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0.U.S. Salinity laboratory, Agricultural research service, U.S. department of agriculture, Riverside, California.
31. Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M.Th., 2005. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 3.0, HYDRUS Software Series 1, Department of Environmental Sciences, University of California-Riverside, Riverside, CA, 270.
32. Swartzendruber, D., and Olsen, T.C., 1961. Model study of the double ring infiltrometers as affected by depth of wetting and particle size. *J. Soil Sci.*, 92(4), 219–255.
33. Tindall, J. A., Kunkel, J. R., 1999. *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers,* Prentice Hall, pp. 624.
34. Turf tech, 2012. *ASTM 3385 Double Ring Infiltrometer,* Διαθέσιμο στο διαδικτυακό τόπο : <http://www.turf-tec.com/IN14Lit.html> (12-03-2016)
35. Xu, C. Y., 2003. Approximate infiltration models. Section 5.3 In *Hydrologic Models.* Uppsala University Department of Earth, Air and Water Sciences. Uppsala, Sweden.
36. Youngs, E.G., 1987. Estimating hydraulic conductivity values from ring infiltrometer measurements. *J. Soil Sci.*, 38(4), 623–632.

37. Αντωνόπουλος, Β., 1999. Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ, σελ. 264.
38. Ο κύκλος του νερού. Διαθέσιμο στο διαδικτυακό τόπο: <http://plemenosem.wikispaces.com/Κύκλος+Νερού> (14-09-2016)
39. Παπαμιχαήλ, Δ., Μπαμπατζιμόπουλος, Χ., 2014. Γεωργική Υδραυλική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 550.
40. Τελόγλου Η., 2012. Διδακτικές Σημειώσεις του μαθήματος «Αρδεύσεις - Στραγγίσεις», ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, σελ. 100.
41. Τερζίδης, Γ., Παπαζαφειρίου, Ζ., 1997. Γεωργική Υδραυλική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 501.