

**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΗΣ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑΣ - ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΣ ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΥ

ΑΜ: 11610

ΘΕΜΑ:

**“Μέθοδος προσδιορισμού της υδραυλικής
αγωγιμότητας κορεσμού του εδάφους με τη μέθοδο του
διαπερατόμετρου KSAT”**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΡ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΛΑΜΟΣ

ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΜΑΛΙΑΔΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Αρδεύσεων και Στραγγίσεων του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Πατρών, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Νικολάου Μαλάμου.

Αρχικά, κρίνω σκόπιμο να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου για την ανάθεση και για την επίβλεψη της πτυχιακής μου εργασίας, καθώς και την επιστημονική καθοδήγηση του.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γιώργο Ζερβουδάκη που η ευγενής και πρόθυμη παραχώρηση του εργαστηρίου του κατά την ανάλυση των δειγμάτων, βοήθησε στην διεκπεραίωση της μελέτης μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Διάθρωση.....	1
2	ΝΟΜΟΣ DARCY - ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	3
2.1	Γενικά	3
2.2	Η ανάλυση του Wooding.....	5
2.3	Μεθοδολογία μεταβλητού φορτίου (falling head).....	7
2.4	Μεθοδολογία σταθερού φορτίου (constant head)	8
2.5	Υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού στο εργαστήριο με τη μέθοδο διαπερατόμετρου σταθερού φορτίου πίεσης	10
2.5.1	Γενικά	10
2.5.2	Διάταξη.....	11
2.5.3	Πειραματική διαδικασία.....	12
2.5.4	Παρατηρήσεις και υπολογισμοί.....	13
3	ΤΟ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΜΕΤΡΟ KSAT	14
3.1	Γενικά	14
3.2	Αρχές μέτρησης.....	15
3.3	Δειγματοληψία και κορεσμός δείγματος.....	16
3.3.1	Ταξινόμηση των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας	18
3.3.2	Υγρό διήθησης	19
3.4	Λειτουργία του KSAT	21
3.4.1	Αρχικοποίηση (Σημείο μηδέν).....	21
3.4.2	Κορεσμός δείγματος.....	23

3.4.3	Προετοιμασία μέτρησης.....	24
3.5	Μέτρηση με τη μέθοδο μεταβλητού φορτίου.....	26
3.5.1	Πραγματοποίηση της μέτρησης.....	28
3.6	Μέτρηση με την μέθοδο σταθερού φορτίου	29
3.6.1	Πραγματοποίηση της μέτρησης.....	30
3.7	Εξαγωγή δεδομένων.....	31
3.8	Παράγοντες που επηρεάζουν τη αξιοπιστία της μέτρησης.....	31
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	33
4.1	Λογισμικό KSAT VIEW	33
4.2	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	43
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	46
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	49

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας αυτής είναι αρχικά η κατανόηση της έννοιας της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού του εδάφους, να εξεταστούν οι παράμετροι από τους οποίους εξαρτάται και οι τεχνικές που εφαρμόζονται για την εκτίμηση στο εργαστήριο με τη μέθοδο του διαπερατόμετρου KSAT.

Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της μεθοδολογίας διαπερατόμετρου σταθερού αλλά και μεταβλητού φορτίου πίεσης για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού του εδάφους σε δείγματα που λήφθηκαν από διάφορες περιοχές.

Ο **συντελεστής** υδραυλικής αγωγιμότητας είναι μια σταθερά αναλογίας στον νόμο του Darcy. Αν η ροή είναι κορεσμένη ο συντελεστής αυτός έχει σταθερή τιμή όπου εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου και ονομάζεται υδραυλική αγωγιμότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού (K_s). Ο συντελεστής αγωγιμότητας ενός πορώδους μέσου, είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος γιατί χαρακτηρίζει την ικανότητα του εδάφους να μεταφέρει νερό.

Η ετερογένεια του εδάφους ακόμα και σε αποστάσεις λίγων μέτρων είναι έντονη με συνέπεια αντίστοιχες μεταβολές στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού (K_s).

1.2 Διάθρωση της εργασίας

Αρχικά παρουσιάζεται μια ανάλυση του νόμου του Darcy και του μοντέλου υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας πάνω στο οποίο έχουν βασιστεί όλα τα μετέπειτα μοντέλα υπολογισμού. Στην συνέχεια αναφέρονται μερικές από τις βασικές δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό αυτής.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα δείγματα, τα χαρακτηριστικά τους και της προέλευσης τους, ενώ στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου που εκτελέστηκαν τα πειράματα, των εργαλείων που χρειάστηκαν και όλων των χειρισμών που απαιτούνται για να πάρουμε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας με τη μορφή διαγραμμάτων που περιέχουν τα δεδομένα που εξάχθηκαν από τις μετρήσεις δειγμάτων στο εργαστήριο.

2 ΝΟΜΟΣ DARCY - ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

2.1 Γενικά

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μια σταθερά αναλογίας σύμφωνα με το νόμο του Darcy (1856) (Εξίσωση 1) η οποία αποδίδει τη σχέση της παροχής και της κλίσης του υδραυλικού φορτίου που επιβάλλεται στα άκρα του δοκιμίου:

$$q = -K \times i \times A = -K \times \frac{\Delta H}{L} \times A \quad (1)$$

Όπου :

q ο ρυθμός ροής, m^3/s

K η υδραυλική αγωγιμότητα, m/s

$\Delta H/L$ i η κλίση του υδραυλικού φορτίου

ΔH η απώλεια φορτίου κατά μήκος του δοκιμίου, m

L μήκος δοκιμίου, m

A εμβαδόν διατομής δοκιμίου, m^2

Η υδραυλική αγωγιμότητα (K) έχει μονάδες μήκους ανά μονάδα χρόνου . Στις ΗΠΑ η μονάδα του K είναι ft/sec ενώ στο SI m/s , ενώ η ροή θεωρείται αρνητική προς τα κάτω.

Η υδραυλική αγωγιμότητα (K) στο νόμο του Darcy δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του πορώδους μέσου αλλά και από τις ιδιότητες ρέοντος υγρού (Olson and Daniel 1981). Η άμμος για παράδειγμα θα είχε μικρότερη υδραυλική αγωγιμότητα εάν το ρέον υγρό ήταν λάδι αντί νερό ,διότι το λάδι έχει μεγαλύτερο ιξώδες .

Μια πιο γενική μορφή του νόμου του Darcy είναι η εξής :

$$q = -K \times \frac{\gamma}{\mu} \times \frac{\Delta H}{L} \times A \quad (2)$$

Όπου :

K απόλυτη (ειδική) υδραυλική αγωγιμότητα , m/s

γ ειδικό βάρος του ρέοντος υγρού , $\text{kg/m}^2\text{s}^2$

μ δυναμικό ιξώδες του ρέοντος υγρού , $\text{kg/m}\cdot\text{s}$

Η απόλυτη (ειδική) υδραυλική αγωγιμότητα είναι συνάρτηση μόνο των ιδιοτήτων του πορώδους μέσου και όχι των ιδιοτήτων του ρέοντος υγρού.

Πολύ συχνά χρησιμοποιείται η υδραυλική αγωγιμότητα (K) αντί του όπου απόλυτη (ειδική) υδραυλική αγωγιμότητα επειδή αναφέρεται στο νερό του οποίου η πυκνότητα και το ιξώδες παραμένουν σχετικά σταθερές (η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται περίπου 3% για κάθε μεταβολή 1°C στη θερμοκρασία). Παραδοσιακά η σταθερά (K) της εξίσωσης (1) καλείται συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ή απλά υδραυλική αγωγιμότητα.

Επίσης η χρήση του όρου υδραυλική αγωγιμότητα για την σταθερά (k) της εξίσωσης (1) μπορεί να δημιουργήσει σύγχυση με την απόλυτη (ειδική) υδραυλική αγωγιμότητα η οποία είναι σταθερά της εξίσωσης (2). Η χρήση του όρου υδραυλική αγωγιμότητα εξαλείφει κάθε σύγχυση με την απόλυτη ή ειδική υδραυλική αγωγιμότητα .Στην εργασία αυτή η υδραυλική αγωγιμότητα υποδηλώνει τη σταθερά (K) της εξίσωσης (1).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχει αποδειχτεί πειραματικά ότι η εξίσωση του Darcy (1) ισχύει για ένα μεγάλο εύρος τύπων εδαφών και υδραυλικών φορτίων όταν υπάρχει στρωτή (laminar) ροή μέσω των κόκκων (Olson and Daniel 1981).

Το κριτήριο έρευνας του εύρους εφαρμογής του νόμου του Darcy είναι ο αριθμός Reynolds (Rn). Για ροή σε πορώδη μέσα ο αριθμός Reynolds (Rn) δίνεται από την σχέση:

$$Rn = \frac{v \times D \times \rho}{\mu} \quad (3)$$

Όπου :

v , είναι η ταχύτητα εκροής ,cm/s

D , είναι η μέση διάμετρος κόκκων, cm

ρ , είναι η πυκνότητα του ρευστού, kg/cm³

μ , είναι το δυναμικό ιξώδες, kg/cm·s

Εντούτοις, ο νόμος του Darcy δεν ισχύει για πολύ μεγάλα υδραυλικά φορτία σε χονδρόκοκκα εδάφη όπου η ροή από στρωτή γίνεται τυρβώδης (turbulent)

Ο νόμος του Darcy δεν ισχύει επίσης όταν εφαρμόζονται πάρα πολύ μικρά υδραυλικά φορτία σε αργιλικά κυρίως υλικά. Όπως αποδείχθηκε από τον Hansbo (1960), σε αργιλικά εδαφικά δείγματα για πολύ μικρά υδραυλικά φορτία υπάρχει μια μη γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας εκροής και του υδραυλικού φορτίου, ενώ για μεγάλα υδραυλικά φορτία η σχέση αυτή γίνεται γραμμική. Επίσης, όταν η ροή του ρευστού μέσω του υπό μελέτη δείγματος είναι με φορά από κάτω προς τα επάνω, φαινόμενα τριβής τείνουν να ανυψώσουν τους εδαφικούς κόκκους και να εξαναγκάσουν τον αποχωρισμό τους.

Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από μηχανικούς ή φυσικοχημικούς παράγοντες. Οι μηχανικοί παράγοντες κύριου ενδιαφέροντος που επηρεάζουν την μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι το μέγεθος του δοκιμίου, η υγρασία κορεσμού του εδάφους (για συστελλόμενα εδάφη), η μέθοδος και ο χρόνος κορεσμού του δοκιμίου, η θερμοκρασία του ρευστού και του περιβάλλοντος χώρου και το χρησιμοποιούμενο ρευστό. Οι φυσικοχημικοί παράγοντες όπως η ορυκτολογική σύσταση και το ποσοστό των αργιλικών ορυκτών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας επειδή ελέγχουν την τάση των αργιλικών ορυκτών να διογκώνονται και να δημιουργούν συσσωματώματα (Mesri et al., 1971).

2.2 Η ανάλυση του Wooding

Η προσεγγιστική λύση σταθερής κατάστασης του Wooding (1968) αποτελεί τη βάση για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας σε μη κορεσμένο έδαφος με βάση τα αποτελέσματα μετρήσεων με το διηθητόμετρο δίσκου εφαρμογής αρνητικής πίεσης. Η κλασική ανάλυση του Wooding αφορά τον προσδιορισμό δύο αγνώστων παραμέτρων, της υδραυλικής αγωγιμότητας K_s (LT⁻¹) στο

κορεσμένο έδαφος και του συντελεστή διήθησης a (L^{-1}) στο εκθετικό μοντέλο του Gardner (1958) της υδραυλικής αγωγιμότητας στο ακόρεστο έδαφος:

$$K(h)=K_s \times \exp(a \times h) \quad (4)$$

Οι παράμετροι K_s και a μπορούν να εκτιμηθούν με βάση την εξίσωση του Wooding (1968), για διήθηση σταθερής κατάστασης κάτω από πηγή νερού προερχόμενη από δίσκο:

$$Q(h_0)=\pi \times r_0^2 \times 2K(h_0) + 4r_0 \times \varphi(h_0) \quad (5)$$

Όπου:

Q , είναι ο ρυθμός διήθησης σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, (L^3T^{-1})

r_0 , είναι η ακτίνα του δίσκου, (L)

h_0 , είναι το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους

$K(h_0)$, είναι η υδραυλική αγωγιμότητα που αντιστοιχεί στο φορτίο πίεσης h_0 , (LT^{-1})

$\varphi(h_0)$, είναι το αρχικό δυναμικό (L)

Ο πρώτος όρος αναφέρεται στην επίδραση της βαρύτητας και ο δεύτερος όρος αναφέρεται στην επίδραση των δυνάμεων λόγω του τριχοειδούς φαινομένου.

Με βάση το μετασχηματισμό του Kirchhoff (Gardner 1958) ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$\varphi(h_0, h_i)=\int_{h_i}^{h_0} K(h)dh \quad (6)$$

Όπου h_i το αρχικό φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους (L).

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η αρχική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων διηθητομέτρου δίσκου εφαρμογής αρνητικής πίεσης έγινε με βάση την ανάλυση του Wooding (1968) η οποία προϋποθέτει την

προσέγγιση του ρυθμού διήθησης, σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, σε διάφορα διαθέσιμα αρχικά φορτία πίεσης. Προηγούμενες μελέτες έχουν αποδείξει ότι η προσεγγιστική λύση του Wooding υπερεκτιμά την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, εφόσον η σταθερή κατάσταση δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί. Παρόλα αυτά ο ρυθμός διήθησης που επιτυγχάνεται εντός μιας ώρας θεωρείται ότι αφορά στις συνθήκες ροής σταθερής κατάστασης στην πλειοψηφία των ερευνών που χρησιμοποιούν τη μέθοδο του Wooding. Το τυπικό σφάλμα συνήθως αγνοείται, λόγω της βαρύτητας που δίδεται στην παραλλακτικότητα του εδάφους (Simunek et al. 1999a).

2.3 Μεθοδολογία μεταβλητού φορτίου (falling head)

Στη μεθοδολογία μεταβλητού φορτίου το επίπεδο στάθμης του νερού στην είσοδο του δοκιμίου μεταβάλλεται.

Το κύριο πλεονέκτημα των δοκιμών μεταβλητού φορτίου είναι ότι ο εξοπλισμός του είναι πιο απλός σε σχέση με τον εξοπλισμό που απαιτείται στις δοκιμές σταθερού φορτίου. Ένα μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι οι εξισώσεις για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι πιο περίπλοκες.

Εντούτοις υπάρχουν τρεις δυνητικοί περιορισμοί στις δοκιμές μεταβλητού φορτίου οι οποίοι είναι (Olson and Daniel 1981):

1. Καθώς το υδραυλικό φορτίο μειώνεται, η πίεση μειώνεται και κάθε πιθανή φυσαλίδα στο δοκίμιο διογκώνεται.
2. Καθώς η πίεση μειώνεται, το ποσοστό του αδιάλυτου αέρα στο ρευστό μειώνεται, γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει την έκλυση αδιάλυτου αέρα από το ρευστό και τη δημιουργία φυσαλίδων (εφόσον το ρευστό ήταν κορεσμένο με αδιάλυτο αέρα στην αρχική μέγιστη πίεση).
3. Στα κυψέλες (cells) εύκαμπτου τύπου στα οποία η ολική τάση διατηρείται σταθερή, η μείωση της πίεσης των πόρων προκαλεί μια αύξηση στην ενεργή τάση η οποία με τη σειρά της προκαλεί φαινόμενα στερεοποίησης και μείωση του λόγου κενών.

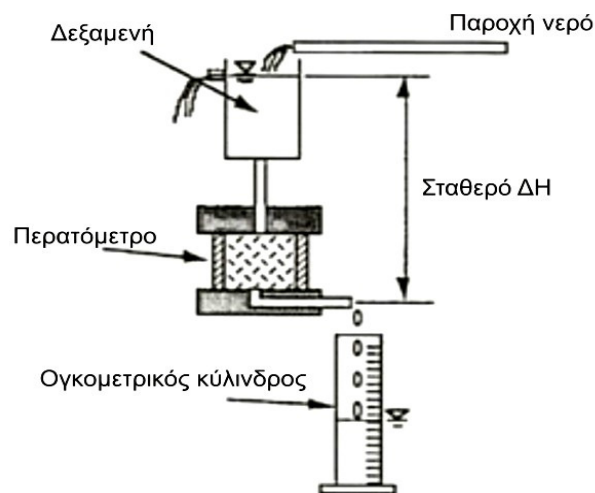
Η δοκιμή του μεταβλητού φορτίου χρησιμοποιείται για εδάφη μικρής έως μέσης υδραυλικής αγωγιμότητας, δηλαδή για εδάφη με υδραυλική αγωγιμότητα $<10^{-5}$ m/s, όπως τα αργιλικά.

Το πρόβλημα της στερεοποίησης μπορεί να είναι σημαντικό για υλικά υψηλής συμπίεστος. Το πρόβλημα της ανάπτυξης των φυσαλίδων με τη μείωση της πίεσης, περιορίζεται εάν το δοκίμιο κορεστεί με την τεχνική αντιπίεσης πόρων και το πρόβλημα της δημιουργίας φυσαλίδων από το ρευστό περιορίζεται με τη χρήση απαερωμένου ρευστού σε υψηλές πιέσεις. Επίσης εάν υπάρχουν μικρές γνωστές απώλειες φορτίου στους σωλήνες ή στις βαλβίδες, αυτές πρέπει να ληφθούν υπόψη στις δοκιμές σταθερού φορτίου, ενώ στις δοκιμές μεταβλητού φορτίου όχι, μιας και οι απώλειες φορτίου διαφοροποιούνται με το φορτίο (Olson and Daniel, 1981).

2.4 Μεθοδολογία σταθερού φορτίου (constant head)

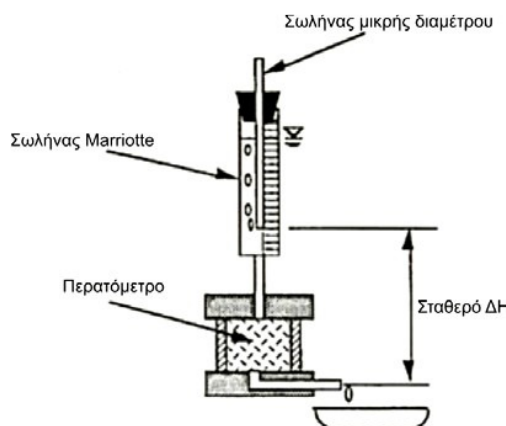
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να διατηρηθεί το φορτίο σταθερό .

Στο **Σχήμα 1** διατηρείται σταθερή η στάθμη στη δεξαμενή νερού σε συνεχή ροή, παρέχοντας επαρκή ποσότητα νερού στο διαπερατόμετρο.



Σχήμα 1 Το σταθερό φορτίο διατηρείται με συνεχή παροχή νερού στη δεξαμενή (Olson and Daniel, 1981)

Μια άλλη μέθοδος για τη διατήρηση σταθερού φορτίου είναι ο σωλήνας τύπου Mariotte (Σχήμα 2).



Σχήμα 2 Το σταθερό φορτίο διατηρείται χρησιμοποιώντας τη συσκευή Mariotte (Olson and Daniel, 1981)

Ένας μικρής διαμέτρου σωλήνας τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή και ο δακτύλιος ταπώνεται με ένα λαστιχένιο πώμα. Καθώς το νερό αρχίζει να ρέει έξω από τη δεξαμενή, ο αέρας μεταφέρεται στο σωλήνα μικρής διαμέτρου. Όταν ο σωλήνας μικρής διαμέτρου αδειάσει από νερό, ο αέρας ξεκινάει να σχηματίζει φυσαλίδες στη δεξαμενή. Το φορτίο στο σωλήνα μικρής διαμέτρου πρέπει να είναι ίσο με την εφαρμοζόμενη πίεση αέρα. Καθώς ο αέρας σχηματίζει φυσαλίδες στη δεξαμενή, η συσκευή Mariotte διατηρεί το φορτίο σταθερό. Εντούτοις υπάρχει μια μικρή διακύμανση λίγων χιλιοστών στο φορτίο κατά την διάρκεια της δημιουργίας των φυσαλίδων αέρα. Αυτή η μικρή διακύμανση στο φορτίο σπάνια είναι σημαντική σε εργαστηριακές δοκιμές μέτρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας αλλά μπορεί να είναι σημαντική σε άλλου είδους εφαρμογές π.χ. δοκιμές διήθησης στο πεδίο.

Η δοκιμή είναι κατάλληλη και ενδείκνυται για εδάφη με υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ 10^{-2} και 10^{-5} m/s, που συναντάται σε καθαρές άμμους και δείγματα αμμοχάλικων με λεπτόκοκκα (ίλος ή άργιλος) λιγότερα από 10% (Burnes, 2005)

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας σταθερού φορτίου είναι:

1. Ευκολία στον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας.
2. Διατήρηση μιας σταθερής πίεσης στο φορτίο.

2.5 Υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού στο εργαστήριο με τη μέθοδο διαπερατόμετρου σταθερού φορτίου πίεσης

2.5.1 Γενικά

Η μεθοδολογία υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού με τη μέθοδο διαπερατόμετρου σταθερού φορτίου για πολύ πορώδη εδάφη.(Sarkar and Halдар,2005) παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω:

Εάν ένα σταθερό επίπεδο νερού διατηρηθεί στη κορυφή κορεσμένης στήλης εδάφους με μήκος L , ο όγκος νερού με Q που θα την διαπεράσει από άκρο σε άκρο ανά επιφάνεια διατομής A της στήλης εδάφους σε μονάδα χρόνου t θα είναι ευθέως ανάλογη της κλίσης του υδραυλικού φορτίου κατά μήκος της στήλης εδάφους.

Άρα:

$$\frac{Q}{A \times t} = -K \times \frac{\Delta H}{L} \quad (7)$$

Σύμφωνα με το νόμο του Darcy η σταθερά αναλογικότητας K στην παραπάνω εξίσωση είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους.

Το σύμβολο $\Delta H = H_i - H_0$ αναπαριστά τη διαφορά ανάμεσα στο συνολικό φορτίο πίεσης μεταξύ των άκρων εισροής και εκροής της στήλης.

Άρα :

$$H_i = Hs_i + Hg_i \quad (8)$$

$$H_0 = Hs_0 + Hg_0 \quad (9)$$

Όπου τα Hs και τα Hg αναπαριστούν το φορτίο πίεσης και το φορτίο θέσης αντίστοιχα.

Η προς τα επάνω κατεύθυνση θεωρείται θετική, το νερό κυλά ελεύθερα από τη βάση της στήλης εδάφους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες $H_0 = 0$, καθώς το Hs_0 και Hg_0 είναι ίσα με το 0.

Άρα:

$$\Delta H = Hs_i + Hg_i \quad (10)$$

Αλλά:

$$Hg_i = L \quad (11)$$

Οπότε:

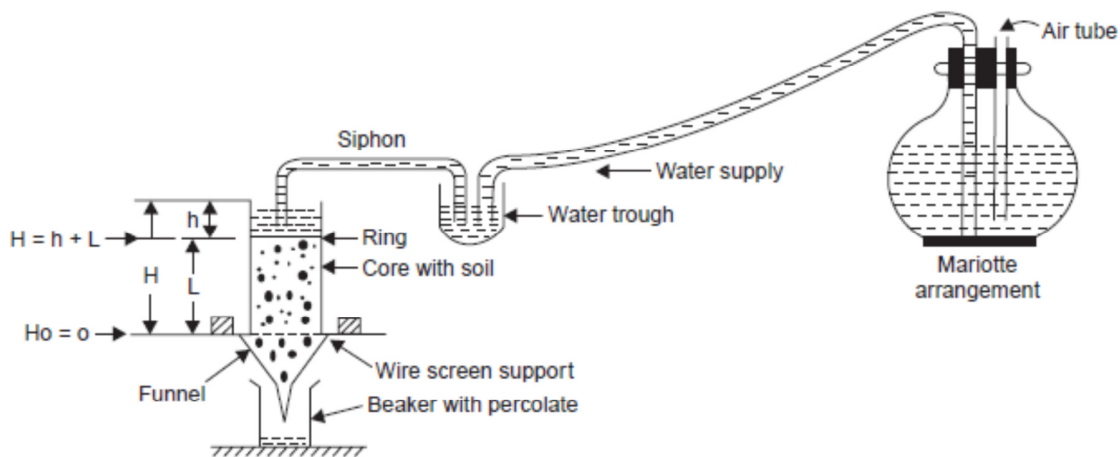
$$\Delta H = Hs_i + L \quad (12)$$

Άρα όντως:

$$\frac{Q}{A \times t} = -K \times \left(\frac{Hs_i + L}{L} \right) \quad (13)$$

2.5.2 Διάταξη

1. Μπρούτζινος κύλινδρος (διαπερατόμετρο) εσωτερικής διαμέτρου περίπου 7 cm και μήκους 10 cm με διάτρητη βάση.
2. Μια ξύλινη ή μεταλλική βάση για την υποστήριξη του διαπερατόμετρου.
3. Γυάλινοι ράβδοι
4. Ένα χρονόμετρο
5. Μια δεξαμενή νερού με διάταξη φιάλης Mariotte η οποία διατηρεί σταθερό επίπεδο του νερού στην κορυφή της επιφάνειας του εδάφους.



Σχήμα 3 Γενική διάταξη διαπερατόμετρου σταθερού φορτίου

2.5.3 Πειραματική διαδικασία

1. Τοποθετούμε ένα φίλτρο χαρτιού στο κάτω μέρος του διαπερατόμετρου.
2. Λαμβάνονται 200 gr ξηρού εδάφους περασμένο από κόσκινο 2 mm και τοποθετείτε όλο το δείγμα μέσα στο διαπερατόμετρο.
3. Ανακατεύουμε και συμπιέζουμε το δείγμα χτυπώντας το διαπερατόμετρο 15-20 φορές σε ένα κομμάτι ξύλο από ύψος 2.5 cm.
4. Τοποθετούμε ένα φίλτρο χαρτιού στην επιφάνεια του εδάφους για να προστατευθεί, το δείγμα κατά την αρχική εισαγωγή του νερού.
5. Αφήνουμε το δείγμα να κορεστεί τοποθετώντας το δείγμα σε ένα δοχείο με αρκετό νερό ώστε το επίπεδο αυτού να είναι ελαφρώς πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.
6. Αφήνουμε έτσι για μια ημέρα μέχρι να κορεστεί μέχρι την επιφάνεια του εδάφους σε νερό. Το σημείο κορεσμού καταδεικνύεται σε μια συνεχόμενη γραμμή νερού στην επιφάνεια του εδάφους.
7. Τοποθετούμε το διαπερατόμετρο στη βάση και ανοίγεται το σιφόνι για να διασφαλιστεί μια σταθερή στάθμη νερού 2 - 3 cm στην επιφάνεια του εδάφους με χρήση της διάταξης της φιάλης Mariotte.

8. Εκτελούμε τουλάχιστον 4 επαναλήψεις για να υπάρχει μια γενική ιδέα της μεταβλητότητας.
9. Καταγράφεται ο χρόνος από τη στιγμή που το νερό στη κορυφή του δείγματος σταθεροποιηθεί και υπάρχει μια σταθερή ροή στην εκροή.
10. Όταν επιτευχθεί μια σταθερή ροή ξεκινά η συγκέντρωση του νερού που εκρέεται σε ένα ογκομετρικό κύλινδρο.
11. Μετράται ο όγκος του συγκεντρωμένου νερού σε συγκεκριμένο χρόνο.
12. Καταγράφονται μερικές διαδοχικές μετρήσεις μέχρι να σταθεροποιηθεί η ροή.
13. Μετράται το ακριβές επίπεδο νερού στην επιφάνεια του εδάφους με τη χρήση ενός χάρακα και έπειτα αποσυνθέεται το πείραμα.
14. Μετράται το ύψος της στήλης εδάφους πιέζοντας με μια γυάλινη ράβδο κάθετα και καταγράφεται το μήκος της ράβδου που είναι καλυμμένο με χώμα.
15. Καταγράφεται η θερμοκρασία του νερού που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.

2.5.4 Παρατηρήσεις και υπολογισμοί

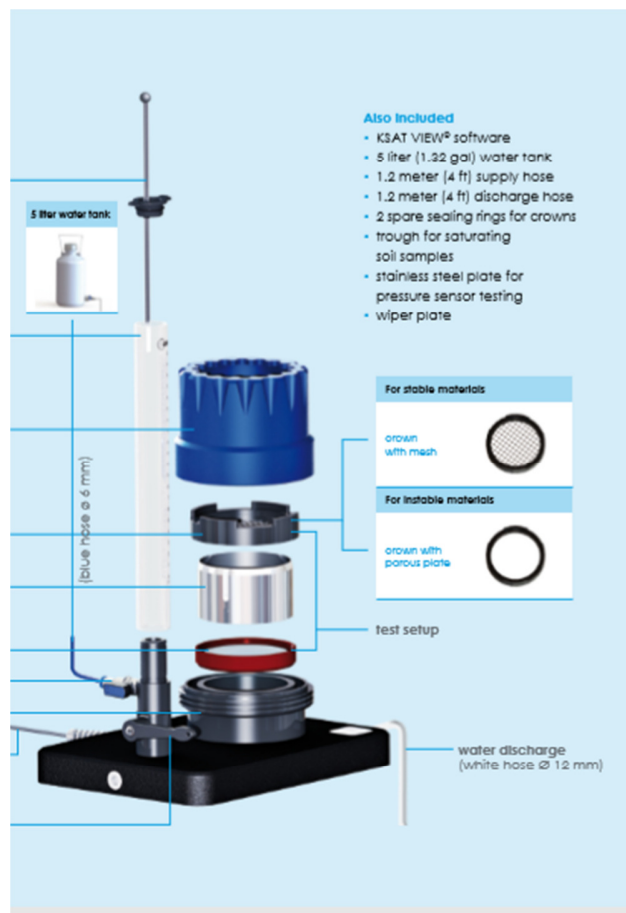
- Διάμετρος του διαπερατόμετρου= d (cm)
- Επιφάνεια διατομής του διαπερατόμετρου.....= A (cm²)
- Βάθος του νερού πάνω από το έδαφος....= H (cm)
- Μήκος της στήλης εδάφους....= L (cm)
- Χρόνος που συγκεντρώσαμε το εκρεόμενο νερό....= t (min)
- Όγκος του νερού που συλλέχθηκε= Q (cm³)
- Υδραυλική αγωγιμότητα K_s (cm min⁻¹):

$$K_s = \left(\frac{Q}{A \times t} \times \frac{L}{L + H} \right) \quad (14)$$

3 ΤΟ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΜΕΤΡΟ KSAT

3.1 Γενικά

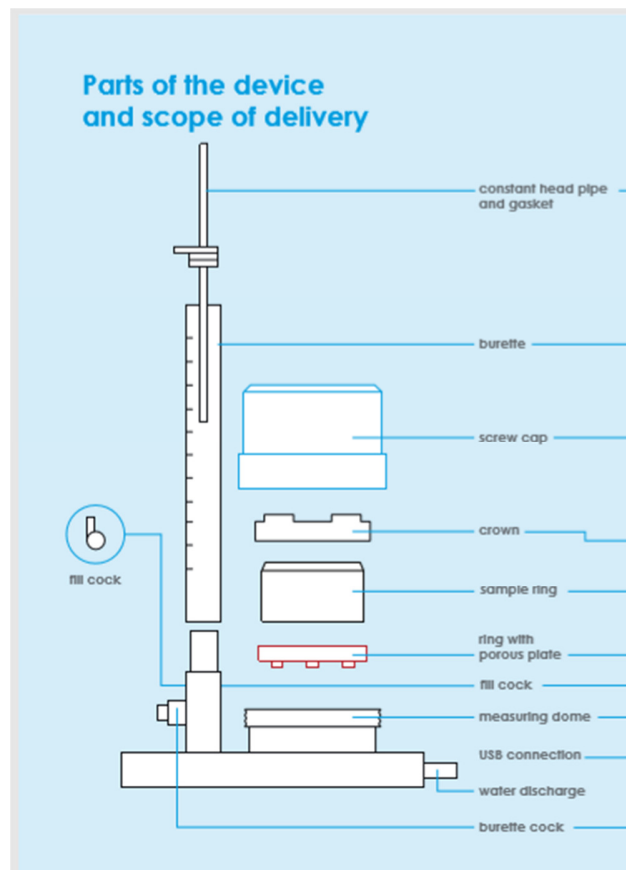
Η αποθήκευση νερού και η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ζωτικής σημασίας για μια ποικιλία διαδικασιών των οικοσυστημάτων. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία των αρδευτικών συστημάτων αλλά και των συστημάτων στράγγισης εξαρτάται σε ένα μεγάλο βαθμό από την υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού του εδάφους. Επιπρόσθετα, η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού του εδάφους έχει σημαντικό ρόλο στη διακίνηση των θρεπτικών ουσιών και των ρύπων στο έδαφος.



Σχήμα 4 Το διαπερατόμετρο KSAT

3.2 Αρχές μέτρησης

Ένα πλήρως κορεσμένο δείγμα εδάφους διαπερνάται κάθετα στην διατομή του με απαερωμένο νερό σε θερμοκρασία δωματίου. Μετρούνται η παροχή και η υδραυλική κλίση.



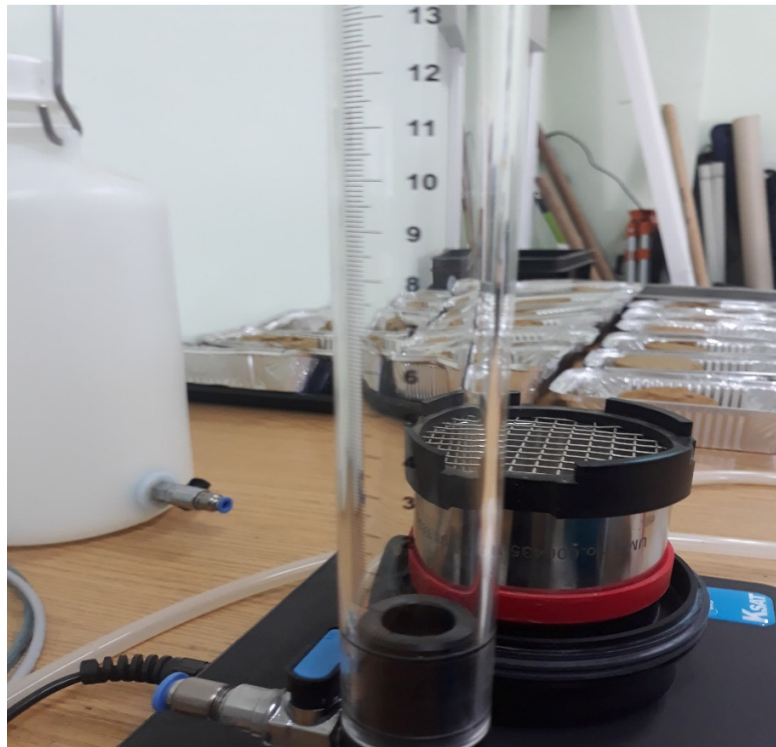
Σχήμα 5 Τα μέρη του διαπερατόμετρου KSAT

Σύμφωνα με τον Darcy (1856), η ειδική παροχή $q = Q / A$ στην περίπτωση στρωτής ροής, θεωρείται ανάλογη προς την υδραυλική κλίση. Η υδραυλική αγωγιμότητα (K_s) υπολογίζεται με βάση τον όγκο της ροής του νερού, V , διαιρούμενο με την διατομή του δείγματος, A και το χρόνο t , το μήκος του

δοκιμίου του εδάφους, L , και την κλίση του υδραυλικού φορτίου κατά μήκος της διεύθυνσης ροής (βλ. Εξίσωση 13).

3.3 Δειγματοληψία και κορεσμός δείγματος

Σύμφωνα, με το DIN-ISO 19683-9 οι μετρήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας μπορούν να πραγματοποιηθούν σε διαταραγμένα ή αδιατάρακτα δείγματα εδάφους που λήφθηκαν με μεταλλικούς κυλίνδρους. Τα διαταραγμένα δείγματα δεν επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την υδραυλική αγωγιμότητα *in situ*, η οποία καθορίζεται από τη δομή του εδάφους.



Εικόνα 1 Όργανο KSAT στο Εργαστήριο Αρδεύσεων και Στραγγίσεων

Οι ακόλουθες οδηγίες περιγράφουν πως να ληφθεί αδιατάρακτο δείγμα εδάφους:

- Τοποθετείται ο μεταλλικός κύλινδρος στο επιθυμητό βάθος με τη μυτερή άκρη στο εκτεθειμένο έδαφος.
- Χρησιμοποιείται ένα μεσαίου μεγέθους αντικραδασμικό σφυρί (ματσόλα) και ο δειγματολήπτης UMS SZA 250, ώστε να εισέρχεται στο έδαφος ο μεταλλικός κύλινδρος κάθετα και χωρίς καθόλου κλίση (κατακόρυφα ή οριζόντια).
- Προσεκτικά αφαιρείται ο μεταλλικός κύλινδρος με ένα μαχαίρι ή με μια σπάτουλα, προσέχοντας το έδαφος παραμένει άθικτο μέσα στο μεταλλικό κύλινδρο, π.χ. το αδιατάρακτο έδαφος πρέπει να προεξέχει ελαφρώς πάνω από τις δυο πλευρές των άκρων του κυλίνδρου.
- Αφαιρείται η περίσσεια του εδάφους πέραν του χείλους του κυλίνδρου με ένα κοφτερό μαχαίρι ή μεταλλική λεπίδα πριονιού, διασφαλίζοντας ότι θα επιφάνειες (βάση και κορυφή) είναι επίπεδες και ότι οι πόροι του εδαφικού δείγματος δεν έχουν διαταραχθεί. Αν υπάρχουν εμφανείς ρίζες είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν με ψαλίδι.
- Τέλος τα δείγματα καλύπτονται με τα προστατευτικά καλύμματα για την μεταφορά στο εργαστήριο.

Όταν καθοριστεί η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού είναι κρίσιμο ότι δεν υπάρχει καθόλου κενό, σχισμές ή ρωγμές στο δείγμα κατά μήκος της κατεύθυνσης της διήθησης. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι τα κενά στην άκρη. Δείγματα εδάφους που γέρνουν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας είναι πιθανόν να έχουν τέτοια κενά στην άκρη και πρέπει να απορρίπτονται.

Σύμφωνα με τον Dirksen(1999) η ακρίβεια της μέτρησης δεν είναι το κύριο πρόβλημα, αλλά η ποιότητα και η αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων εδάφους στον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού. Για τα αδιατάρακτα δείγματα το λιγότερο 5 με 10 δείγματα πρέπει να ληφθούν για να λάβουμε αντιπροσωπευτικές τιμές.



Εικόνα 2 Κύλινδρος δειγματοληψίας

3.3.1 Ταξινόμηση των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας

Εκτός και αν δηλωθεί διαφορετικά K_f και αναλόγως K_s τιμές στη βιβλιογραφία συνήθως αναφέρονται στο νερό. Εάν η περατότητα του νερού είναι γνωστή, τότε η περατότητα άλλων υγρών μπορεί να εκτιμηθεί.

Κατάταξη υδραυλικής αγωγιμότητας εδαφών, σύμφωνα με DIN 18130

- Πολύ υψηλά υδατοπερατό $>10^{-2}$ m/s
- Υψηλά υδατοπερατό 10^{-2} με 10^{-4} m/s
- Υδατοπερατό 10^{-4} με 10^{-6} m/s
- Ελαφρώς υδατοπερατό 10^{-6} με 10^{-8} m/s

- Ελάχιστα υδατοπερατό $< 10^{-8}$ m/s

Αγωγιμότητες για μη περιορισμένους υπόγειους υδροφορείς:

- Χαλίκι 10^{-1} με 10^{-2} m/s
- Χονδρή άμμος 10^{-3} m/s
- Μεσαίου μεγέθους κόκκος άμμου 10^{-3} με 10^{-4} m/s
- Λεπτός κόκκος άμμου 10^{-4} με 10^{-5} m/s
- Ιλώδης 10^{-5} με 10^{-7} m/s
- Ιλώδης άργιλος 10^{-6} με 10^{-9} m/s
- Αργιλώδες $< 10^{-9}$ m/s

Η μετάβαση από ένα υδατοπερατό σε ένα μη υδατοπερατό έδαφος είναι κατά προσέγγιση 10^{-6} m/s . Εδάφη με k_f τιμή $< 10^{-9}$ m/s είναι σχεδόν αδιαπέραστα.

3.3.2 Υγρό διήθησης

Σύμφωνα με τα DIN19693-9, 1998 και DIN18130-1, 1998 μπορεί να χρησιμοποιηθεί απαερωμένο νερό χαμηλής ιονικής δύναμης σε θερμοκρασία δωματίου. Συνήθως απαερωμένο νερό βρύσης επαρκεί. Σε αργιλώδη εδάφη, επαρκεί η προσθήκη ενός ασθενούς διαλύματος δισθενούς κατιόντος (π.χ. 0.01M CaCl_2 διάλυμα, βλ. McKenzie *et al.*, 2002). Η απαέρωση μπορεί να επιτευχθεί βράζοντας ή κρατώντας το νερό για λίγο διάστημα σε κενό αέρος ενώ συνεχώς αναδεύεται.



Εικόνα 3 Μοχλός επιλογής της μεθόδου (σταθερό ή μεταβλητό φορτίο)

Η ιοντική ισχύς του διαλύματος εδάφους επηρεάζει σημαντικά το πλάτος του ηλεκτρικής διπλής στοιβάδας του εδάφους και ως εκ τούτου επηρεάζει την υδραυλική αγωγιμότητα ιδίως για αργιλικά εδάφη. Στην ιδανική περίπτωση το υγρό διήθησης εμπλουτίζεται με ηλεκτρολύτη παρόμοιο με το εδαφικό διάλυμα. Στα αργιλικά εδάφη η χρήση μονοσθενών κατιόντων θα οδηγήσει σε διασπορά των σωματιδίων της αργίλου και η κίνηση αυτών των σωματιδίων ενδεχομένως να φράξουν το σύστημα των πόρων του εδάφους.

Το υγρό διήθησης αποθηκεύεται σε ένα δοχείο, το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω από τη συσκευή και συνδέεται μέσω ενός σωλήνα στη βάση της προχοΐδας. Το γέμισμα της προχοΐδας γίνεται εύκολα με το άνοιγμα της βαλβίδας γεμίματος στο δοχείο αποθήκευσης. Σε κανονική λειτουργία, μόνο περίπου 5 cm νερού χρησιμοποιούνται σε μια τρέχουσα μέτρηση. Η στρωτή ροή του νερού από το δοχείο αποθήκευσης μέσα στη προχοΐδα ελαχιστοποιεί την επαφή του υγρού διήθησης με την ατμόσφαιρα και την πιθανή εξάτμιση κάποιας ποσότητας. Επίσης το νερό αποθήκευσης πρέπει να βρίσκεται πάντα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

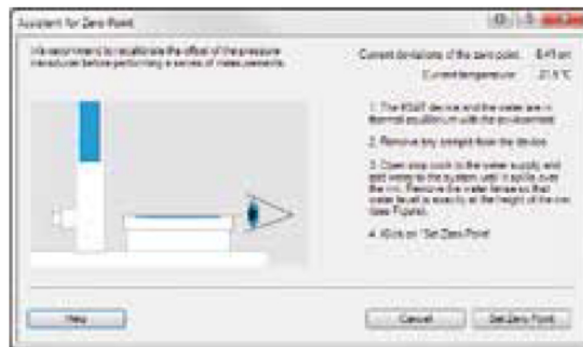
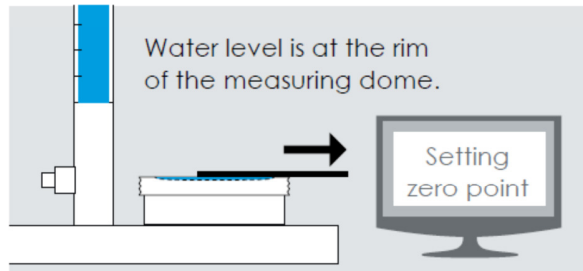
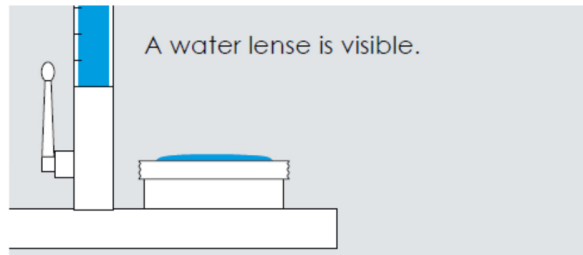
3.4 Λειτουργία του KSAT

Αφού συνδέσουμε τη συσκευή στη θύρα USB του υπολογιστή, εκκινούμε το λογισμικό KSAT VIEW. Στη συνέχεια συνδέουμε τη παροχή του νερού διήθησης και τον σωλήνα αποχέτευσης.

3.4.1 Αρχικοποίηση (Σημείο μηδέν)

Γεμίζουμε την προχοΐδα ανοίγοντας τη βαλβίδα, την οποία στη συνέχεια κλείνουμε. Γεμίζουμε την κεφαλή μέτρησης ανοίγοντας τη βαλβίδα της προχοΐδας, μέχρι να είναι ορατός ο μηνίσκος του νερού.

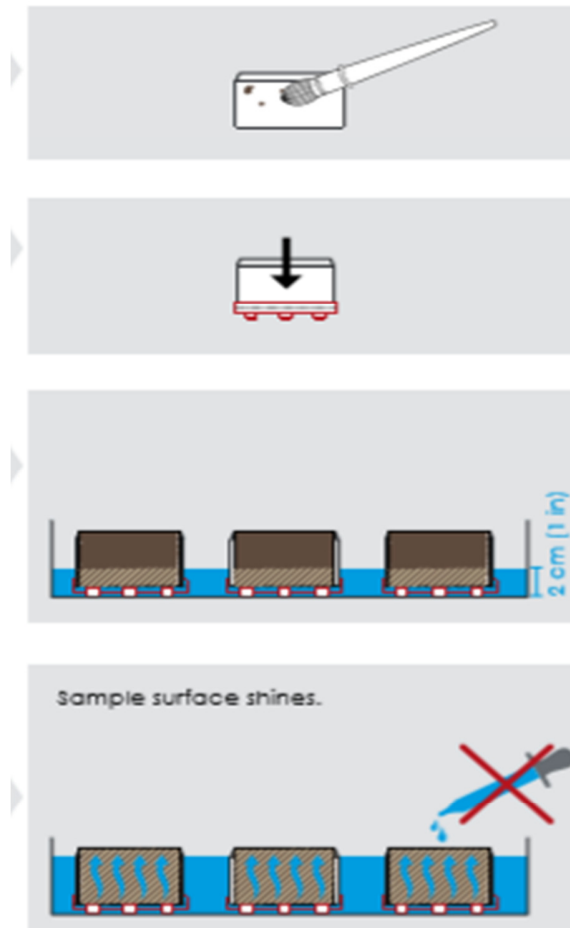
Αφού απομακρύνουμε το πλεονάζον νερό από την κεφαλή μέτρησης, χρησιμοποιώντας την πλάκα καθαρισμού και το επίπεδο του νερού βρίσκεται στο χείλος της κεφαλής μέτρησης επιλέγουμε: “Setting zero point” στο λογισμικό.



Εικόνα 4 Αρχικοποίηση οργάνου

Αφού ορίσουμε το σημείο μηδέν, στο πεδίο “Measuring” πρέπει να εμφανίζεται η τιμή: -6.9cm ύψος στήλης νερού γιατί αυτή είναι η πραγματική υψομετρική διαφορά.

3.4.2 Κορεσμός δείγματος



Εικόνα 5 Διαδικασία προετοιμασίας δείγματος

Γεμίζουμε ένα δοχείο με 2 cm απαερωμένο νερό παρόμοιας ιοντικής σύνθεσης με το δείγμα εδάφους.

Τοποθετούμε τον κύλινδρο δειγματοληψίας στο δακτύλιο με την πορώδη πλάκα και τοποθετούμε και τους δύο στο δοχείο με το νερό.

Αυξάνουμε το επίπεδο το νερού μέχρι το ύψος του δείγματος, προσέχοντας να μην ρίξουμε νερό στο πάνω μέρος για να μην παγιδευτεί αέρας στο δείγμα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η εκτίμηση για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να κορεστούν τα δείγματα, ανάλογα με τον τύπο τους.

Πίνακας 1 Τυπικοί χρόνοι κορεσμού εδαφών

Υλικά	Συμπλήρωμα με νερό μετά από	Κορεσμένο μετά
Χονδρή άμμος	9 min	10min
Λεπτή άμμος	45min	1hrs
Ίλος	6hrs	24hrs
Άργιλος	-	Πάνω από 2 εβδομάδες

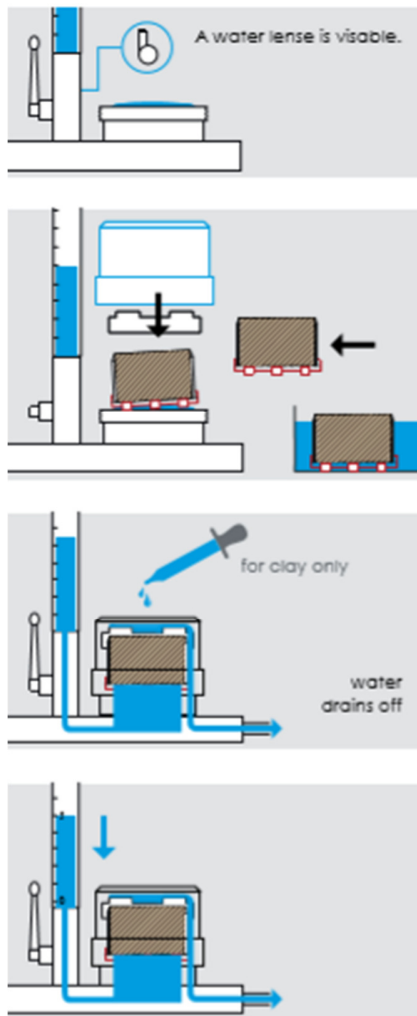
Οι πορώδεις πλάκες θα πρέπει να κορεστούν πριν τοποθετήσουμε το δείγμα εδάφους σε αυτές. Αυτό συμβαίνει όταν η πορώδης πλάκα αντί να επιπλέει, βυθίζεται στο νερό.

3.4.3 Προετοιμασία μέτρησης

Ανοίγουμε τη βαλβίδα πλήρωσης και γεμίζουμε τη προχοΐδα. Στη συνέχεια, αφού κλείσουμε τη βαλβίδα, ανοίγουμε τη βαλβίδα της προχοΐδας γεμίζουμε την κεφαλή μέτρησης και ξανακλείνουμε τη βαλβίδα της προχοΐδας.

Παίρνουμε το δείγμα εδάφους από το δοχείο και το τοποθετούμε οριζόντια στη συσκευή κρατώντας το με ελαφρά κλίση ως προς την κεφαλή μέτρησης ώστε να μπορεί να διαφύγει ο αέρας που τυχόν βρίσκεται μεταξύ του δείγματος και της κεφαλής μέτρησης.

Τοποθετούμε το κάλυμμα στον κύλινδρο του δείγματος, σφίγγουμε το βιδωτό καπάκι και ξαναγεμίζουμε τη προχοΐδα.



Εικόνα 6 Τοποθέτηση δείγματος στο KSAT

Η διαδικασία της μέτρησης αρχίζει ανοίγοντας τη βαλβίδα της προχοΐδας και αφού αρχίσει να εξέρχεται νερό από το σωλήνα αποχέτευσης. Στην περίπτωση δειγμάτων αργίλου, μπορούμε να εφαρμόσουμε μια μικρή ποσότητα νερού στην επιφάνεια του δείγματος ώστε να μειωθεί η διάρκεια της μέτρησης.

Ο ρυθμός ροής μπορεί να κυμαίνεται από λιγότερο από 1 mm s^{-1} , για αργιλώδη εδάφη, ως και αρκετά cm s^{-1} στην περίπτωση ελαφρών εδαφών.

Στην περίπτωση δειγμάτων με ρυθμό διήθησης μικρότερο από την εξάτμιση στο εργαστήριο (τυπικά 0.2 μέχρι 0.5 cm d⁻¹) θα πρέπει να καλύπτουμε το βιδωτό καπάκι με κάποιο πλαστικό φιλμ, ώστε να μην ξηραθεί

3.5 Μέτρηση με τη μέθοδο μεταβλητού φορτίου

Η μέθοδος μέτρησης μεταβλητού φορτίου θεωρείται σαν πρότυπη (standard) μέθοδος. Μετά την εκκίνηση, η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη χωρίς να απαιτείται κάποια ανάγνωση ή παρέμβαση από το χρήστη.

Αυτή η μέθοδος κυρίως χρησιμοποιείται για δείγματα με χαμηλή περατότητα και χρησιμοποιεί μεγάλα φορτία πίεσης νερού. Χρησιμοποιώντας το KSAT δεν είναι απαραίτητη η χρήση μεγάλων φορτίων πίεσης νερού καθώς η ηλεκτρονική μέτρηση είναι εξαιρετικά ακριβής. Για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή συνίσταται για όλα τα δείγματα ανεξαρτήτως τι περατότητα έχουν.

Η μεθοδολογία που υλοποιείται μέσω της συσκευής χρησιμοποιεί τα παρακάτω δεδομένα για τον υπολογισμό της Ks:

- Q (cm³ s⁻¹) παροχή νερού
- L (cm) μήκος δείγματος
- A_{SAMPLE} (cm²) εμβαδό διατομής δείγματος
- A_{BUR} (cm²) εμβαδό προχοϊδας
- $H(t)$ (cm²) Μεταβολή του υδραυλικού φορτίου στο σύστημα δείγματος - πλάκας

Οι υπολογισμοί έχουν ως εξής:

$$q = \frac{Q}{A_{SAMPLE}} = \frac{A_{BUR}}{A_{SAMPLE}} \frac{dH}{dt} \quad (15)$$

Άρα αντικαθιστώντας στον νόμο του Darcy (Εξίσωση 1), την παροχή, q , παίρνουμε:

$$\frac{1}{dt}dH = -K_s \frac{A_{BUR}}{A_{SAMPLE}} \frac{1}{L} dt \quad (16)$$

Στη συνέχεια ολοκληρώνοντας από το αρχικό στάδιο όπου $H = H_0$ σε χρόνο $t = 0$ μέχρι τον χρόνο t παίρνουμε:

$$\ln H(t) - \ln H_0 = -K_s \frac{A_{BUR}}{A_{SAMPLE}} \frac{1}{L} t \quad (17)$$

Και άρα:

$$H(t) = H_0 \exp\left(-K_s \frac{A_{BUR}}{A_{SAMPLE}} \frac{1}{L} t\right) = \alpha \exp(-b t) \quad (18)$$

Η εκτίμηση της παραμέτρου b , γίνεται με προσαρμογή εκθετικής συνάρτησης στην χρονοσειρά των μετρήσεων $H(t)$. Τότε η υδραυλική αγωγομότητα κορεσμού δίνεται από:

$$K_s = \frac{A_{BUR}}{A_{SAMPLE}} L b \quad (19)$$

Η αγωγιμότητα του συνολικού συστήματος καθορίζεται από την αντίσταση του εδάφους, την αντίσταση της πορώδους πλάκας, τις απώλειες πίεσης σε αντικείμενα όπως σωλήνες και βαλβίδες και πιθανόν την αντίσταση στο σημείο επαφής της πορώδους πλάκας και του εδάφους αν και αυτό δεν απαντάται κάτω σε συνθήκες πλήρους κορεσμού. Αν επιλεγθεί μια πορώδης πλάκα με μεγάλους πόρους, έτσι ώστε η αγωγιμότητά της να είναι πολύ υψηλή σε σχέση με την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, τότε η αντίσταση της συσκευής θεωρείται αμελητέα.

3.5.1 Πραγματοποίηση της μέτρησης

Η μέτρηση ξεκινά πατώντας “Start” και ανοίγοντας τη βαλβίδα της προχοϊδας. Αυτόματα το KSAT VIEW αντιλαμβάνεται το ξεκίνημα βασιζόμενο στην απότομη άνοδο της πίεσης. Χειροκίνητα οποιαδήποτε στιγμή μπορεί να πραγματοποιηθεί επανεκκίνηση πατώντας το κουμπί “Restart”.

Πατώντας το κουμπί “Restart” μπορούν να ακυρωθούν δεδομένα τα οποία είχαν αρχικά αποθηκευτεί και στη συνέχεια να προχωρήσει το πείραμα (χωρίς να σταματήσει η ροή του νερού). Η διαδικασία αυτή έχει νόημα, στην περίπτωση που τα αρχικά δεδομένα υποδηλώνουν αποτυχία του πειράματος ή αν η αρχική αύξηση της πίεσης δεν έχει ανιχνευθεί από το λογισμικό ως σήμα έναρξης.

Τα δεδομένα που καταγράφονται, εμφανίζονται και η Ks υπολογίζεται μόλις 2 έγκυρα μετρήσεις είναι διαθέσιμες. Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος μεταβλητού φορτίου δεν είναι αναγκαίο η μέτρηση να βρίσκεται υπό παρακολούθηση. Η διαδικασία ολοκληρώνεται αυτόματα όταν τα κριτήρια διακοπής της έχουν επιτευχθεί.

Η διαδικασία μέτρησης μπορεί να ολοκληρωθεί ανά πάσα στιγμή πατώντας το κουμπί “Stop measuring” και στη συνέχεια επανεκκίνηση ξανά πατώντας το κουμπί “Restart”.

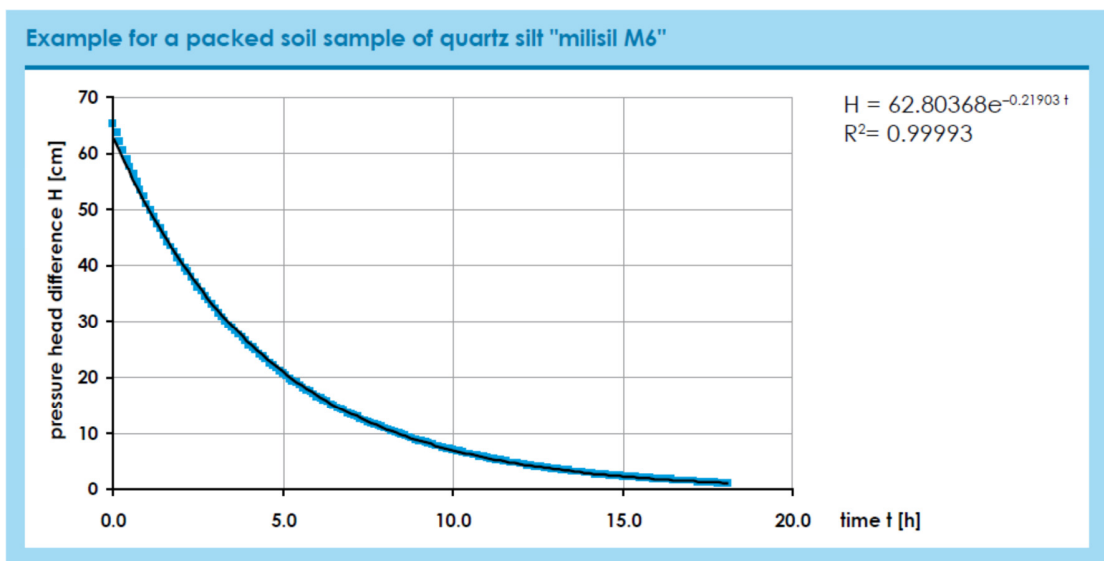
Αν ξεκινήσει νέα μέτρηση, μια νέα καρτέλα προστίθεται στην οθόνη. Τα προηγούμενα δεδομένα είναι αποθηκευμένα και μπορούν να ελεγχθούν παρόλο ότι η νέα μέτρηση πραγματοποιείται ταυτόχρονα.

Δεν είναι συνήθως απαραίτητο να καταγράφονται τα δεδομένα για παρατεταμένη χρονική περίοδο ή μέχρι η στάθμη εντός της προχοϊδας να φτάσει σε χαμηλό επίπεδο. Αν η υδραυλική αγωγιμότητα είναι σταθερή, η εκτίμησή της θα πραγματοποιηθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα, ακόμα και αν το επίπεδο του νερού πέσει μόνο κατά 1 cm, στην περίπτωση δειγμάτων με χαμηλή περατότητα.

Η μείωση του φορτίου πίεσης πρέπει να είναι εκθετικής μορφής σε σχέση με το χρόνο, ώστε η μέτρηση να είναι αξιόπιστη. Προσαρμογή καμπύλης που έχει ως αποτέλεσμα τιμή του συντελεστή προσδιορισμού $R^2 > 0.999$ δείχνει ότι η μέτρηση

είναι αξιόπιστη. Αν η προσαρμογή της καμπύλης παρουσιάζει συστηματική απόκλιση και ένα πολύ μικρότερο R^2 τότε υπάρχουν δυο πιθανοί λόγοι:

- 1) Αλλαγή της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης ή
- 2) Πρόβλημα με τη τοποθέτηση του δείγματος στη συσκευή.



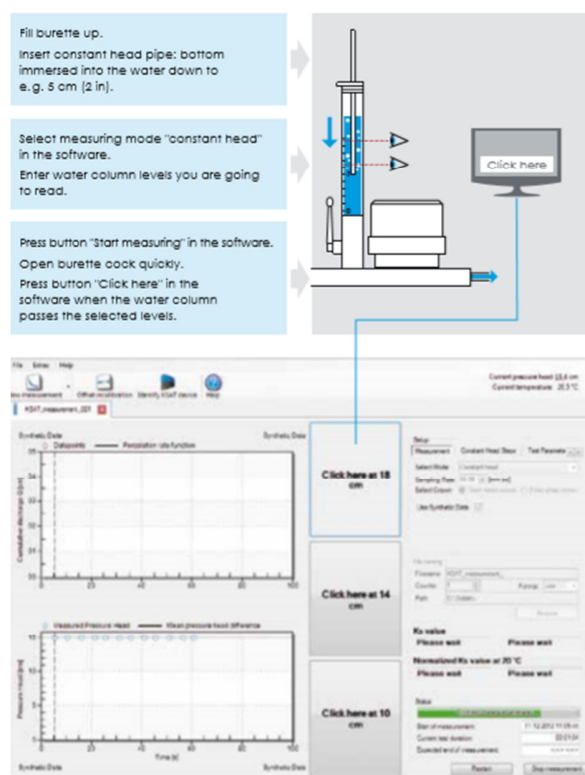
Εικόνα 7 Εκθετική μείωση του φορτίου πίεσης με το χρόνο

3.6 Μέτρηση με την μέθοδο σταθερού φορτίου

Η χρήση της συσκευής είναι παρόμοια με την αντίστοιχη της μεθόδου μεταβλητού φορτίου. Η διαφορά στην εφαρμογή της μεθόδου σταθερού φορτίου έγκειται στο ότι τοποθετείται ένας σωλήνας και με στεγανό καπάκι πάνω στην προχοΐδα έτσι ώστε η συσκευή να λειτουργεί σαν φιάλη Mariotte. Η στάθμη του νερού μεταβάλλεται στη φιάλη Mariotte επιτρέποντας τη μέτρηση του αθροιστικού όγκου ροής. Οι μετρήσεις θα πρέπει να καταγράφονται από το χρήστη, καθιστώντας τη λειτουργία μέτρησης με την μέθοδο σταθερού φορτίου ημιαυτόματη.

3.6.1 Πραγματοποίηση της μέτρησης

Η διαδικασία της μέτρησης ξεκινά αφού ανοιχθεί η βαλβίδα της προχοΐδας. Το όργανο παρακολουθεί τη πίεση νερού η οποία εξαρτάται από το βάθος που είναι βυθισμένος ο σωλήνας που καθορίζει το φορτίο πίεσης το οποίο παραμένει σταθερό με το χρόνο. Εξαιτίας όμως των τριχοειδών φαινομένων η εμφανιζόμενη πίεση δεν είναι ίδια με το βάθος βύθισης του σωλήνα.



Εικόνα 8 Διαδικασία μέτρησης με τη μέθοδο σταθερού φορτίου (constant head)

Κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η στάθμη του νερού στη προχοΐδα μειώνεται γραμμικά. Ο χρήστης με διαδοχικά κλικ επισημαίνει το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει η στάθμη του νερού μέσα στην προχοΐδα, σε δύο προκαθορισμένα

σημεία. Η μέτρηση ολοκληρώνεται όταν έχει επισημανθεί και ο χρόνος της κατώτατης στάθμης.

Οι προκαθορισμένες τιμές μπορούν να μεταβληθούν από το μενού “test parameters”. Επίσης η μέτρηση μπορεί να τερματιστεί χειροκίνητα εφόσον παρατηρηθεί ότι η μέτρηση έχει υπολογιστεί είναι ακριβής και αξιόπιστη. Εδαφικά δείγματα με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα είναι δυνατόν να το επιτύχουν αυτό μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα.

Η υδραυλική αγωγιμότητα K_s (cm/d) σε σταθερό φορτίο υπολογίζεται από

$$K_s = \frac{Q}{A_{sample}} \times \frac{L}{H} \quad (20)$$

όπου:

Q (cm³ d⁻¹) είναι η ροή σταθερής κατάστασης από τη φιάλη Mariotte

A_{sample} (cm²) είναι το εμβαδόν διατομής εδαφικού δείγματος

L (cm) είναι το μήκος του εδαφικού δείγματος

H (cm) είναι το υδραυλικό φορτίο ανάμεσα στα επίπεδα εισόδου και εξόδου.

3.7 Εξαγωγή δεδομένων

Οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε μορφή cvs, οι οποίες μπορούν να εισαχθούν σε λογισμικά υπολογιστικών φύλλων. Τα διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν σαν εικόνα σε μορφή jpg.

3.8 Παράγοντες που επηρεάζουν τη αξιοπιστία της μέτρησης

1. Διαρροές νερού από τη συσκευή.

Στην περίπτωση αυτή πρέπει να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητοι έλεγχοι για σωστή στεγανοποίηση αφαιρώντας και καθαρίζοντας το βιδωτό καπάκι και τους στεγανοποιητικούς δακτυλίους στα εξής σημεία:

- a) Ανάμεσα στον κύλινδρο δειγματοληψίας και στο δακτύλιο της πορώδους πλάκας
- b) Ανάμεσα στον κύλινδρο δειγματοληψίας και το βιδωτό καπάκι.

2. Η αγωγιμότητα αυξάνεται κατά τη διάρκεια μέτρησης.

Στην περίπτωση αυτή πιθανά να ισχύουν τα εξής:

- a) Η μέτρηση προκαλεί διάβρωση στο δείγμα
- b) Δημιουργούνται φυσαλίδες αέρα οι οποίες διαλύονται στη επιφάνεια επαφής του δείγματος με την πορώδη πλάκα ή μέσα στο δείγμα
- c) Αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού, προκαλώντας μείωση του ιξώδους
- d) Λαμβάνει χώρα τυρβώδης ροή, πιθανά μέσω ενός μακροπόρου, οπότε ο ρυθμός ροής δεν είναι ανάλογος με τη κλίση του υδραυλικού φορτίου

3. Η αγωγιμότητα μειώνεται κατά τη διάρκεια μέτρησης.

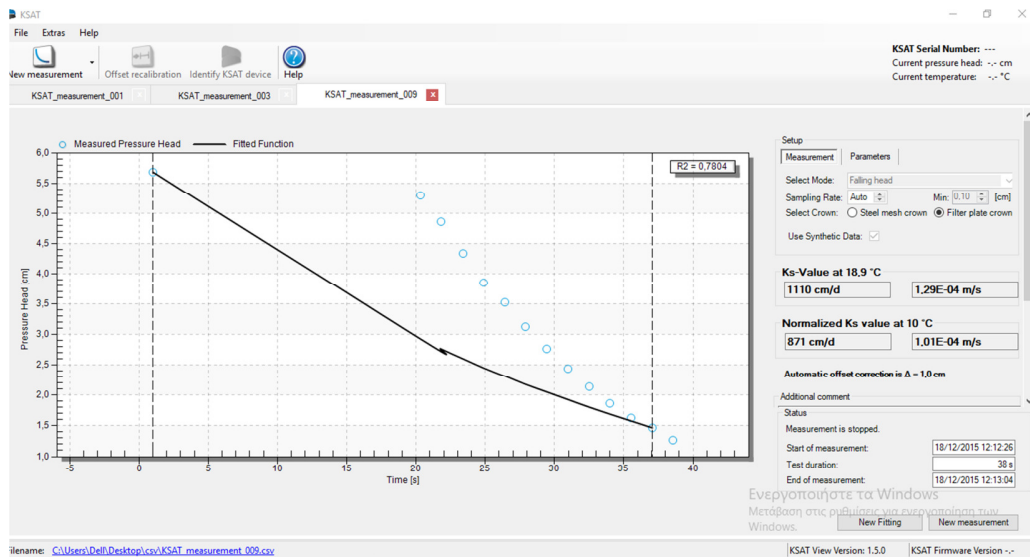
Στην περίπτωση αυτή πιθανά να ισχύουν τα εξής:

- a) Μείωση της ιοντικής ισχύς του νερού του δείγματος όταν δεν έχει εξισορροπηθεί η ιοντική ισχύς του χρησιμοποιούμενου νερού
- b) Σχηματισμός φυσαλίδων αέρα είτε από κακώς απαερωμένο νερό είτε από μικροοργανισμούς
- c) Μειώνεται η θερμοκρασία του νερού οπότε αυξάνεται το ιξώδες του.
- d) Δημιουργείται φιλμ αέρα στην επιφάνεια επαφής του δείγματος με την πορώδη πλάκα, από φυσαλίδες που προέρχονται από κακώς απαερωμένο νερό

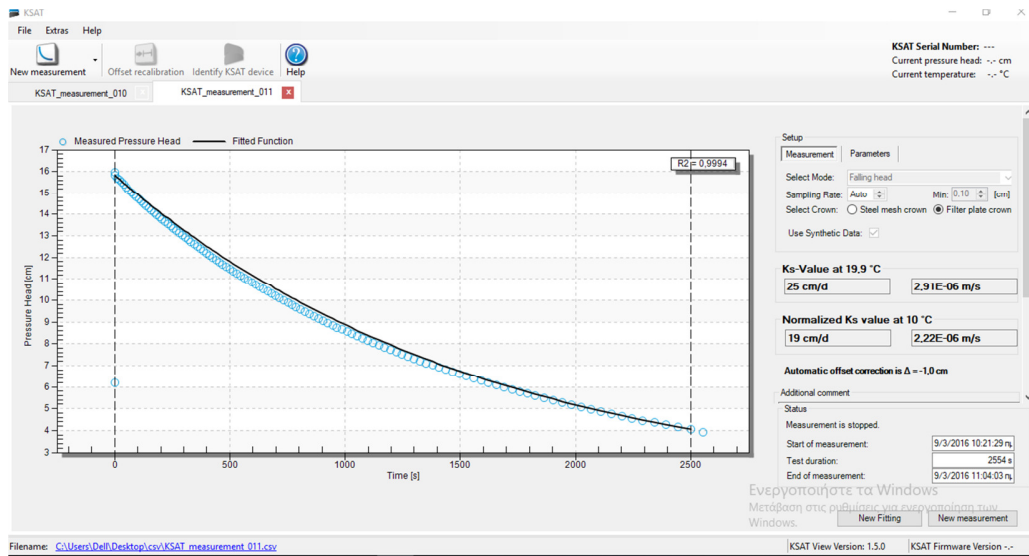
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Λογισμικό KSAT VIEW

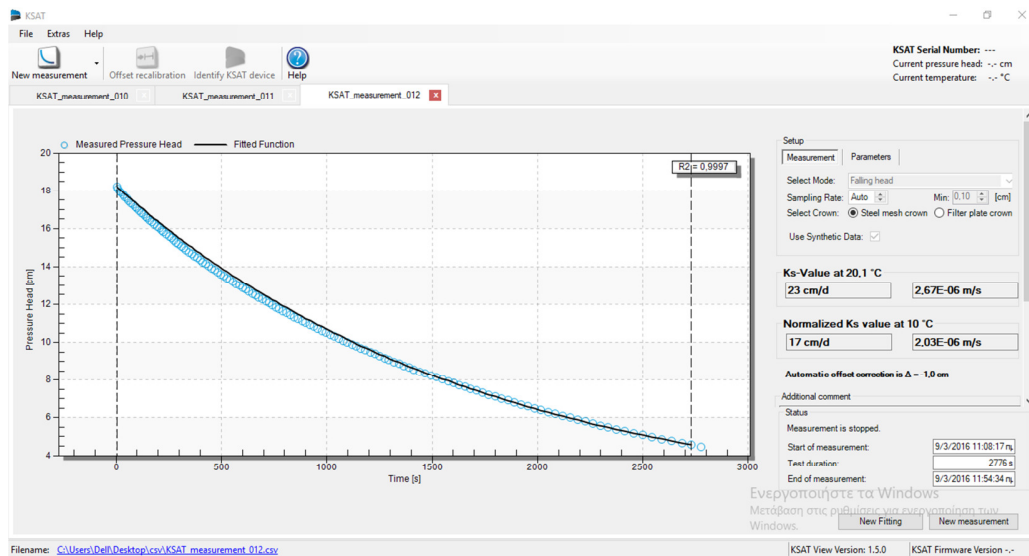
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται αποτελέσματα από διάφορες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της πτυχιακής:



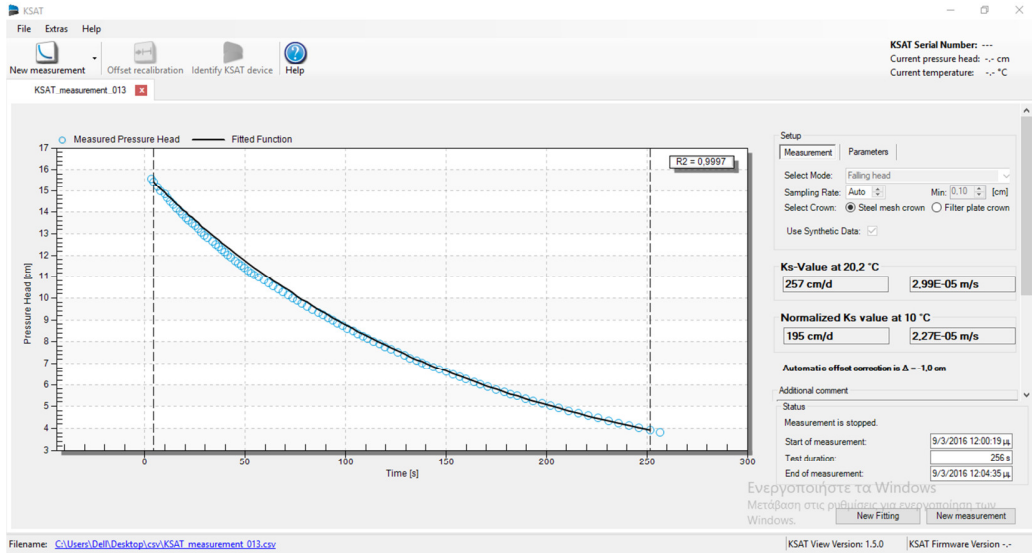
Εικόνα 9 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 871 \text{ cm/d}$



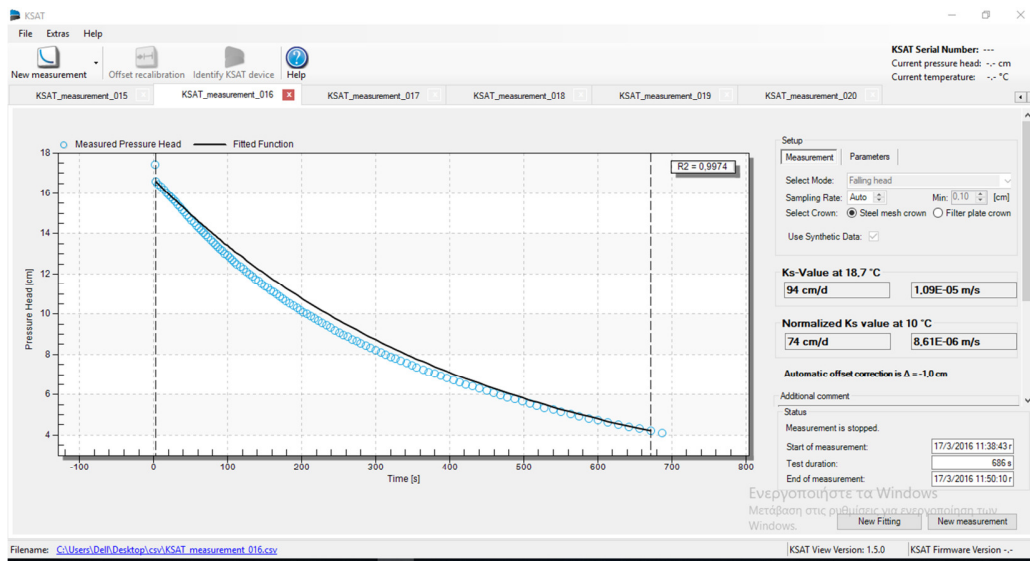
Εικόνα 10 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 19 \text{ cm/d}$



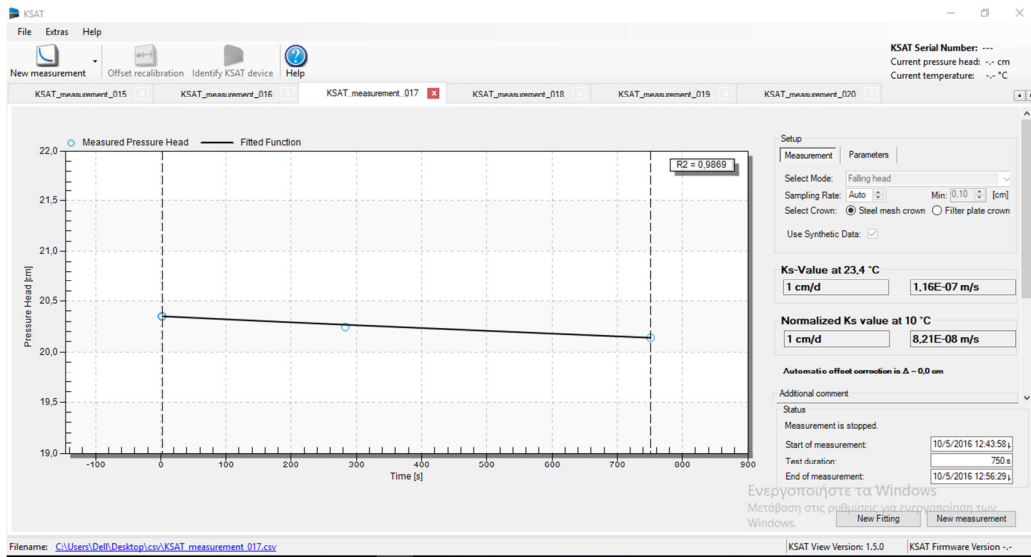
Εικόνα 11 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 17 \text{ cm/d}$



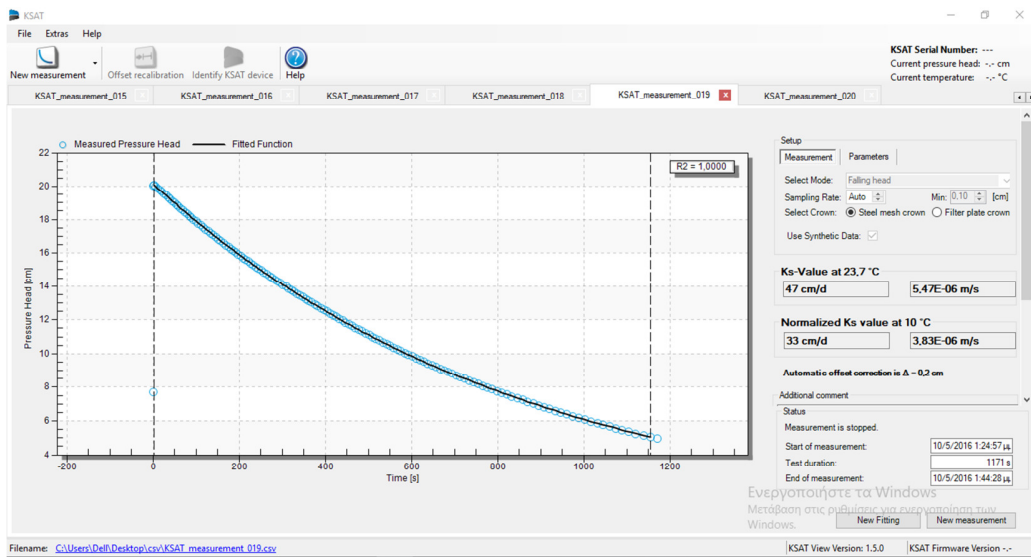
Εικόνα 12 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 195$ cm/d



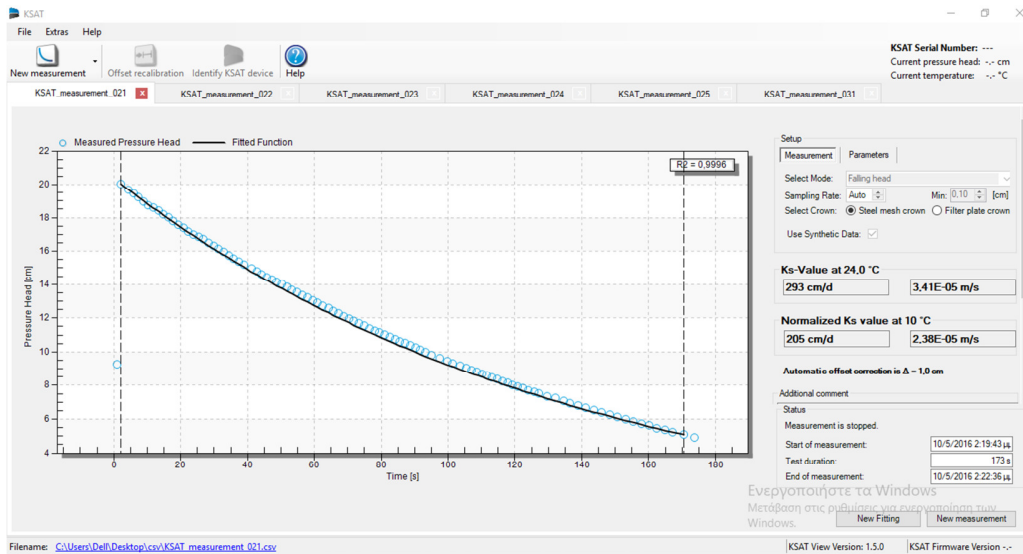
Εικόνα 13 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 74$ cm/d



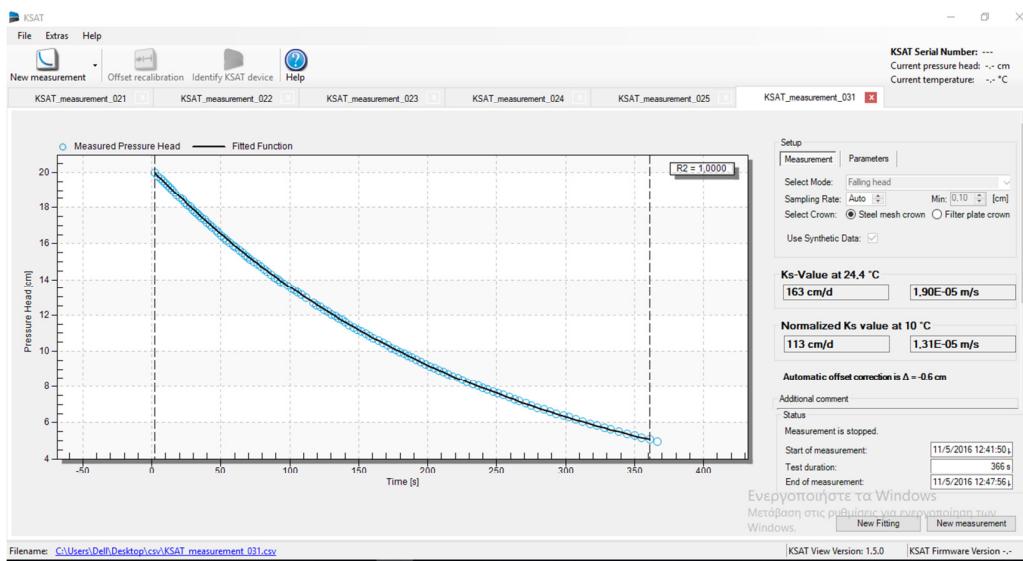
Εικόνα 14 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 1$ cm/d



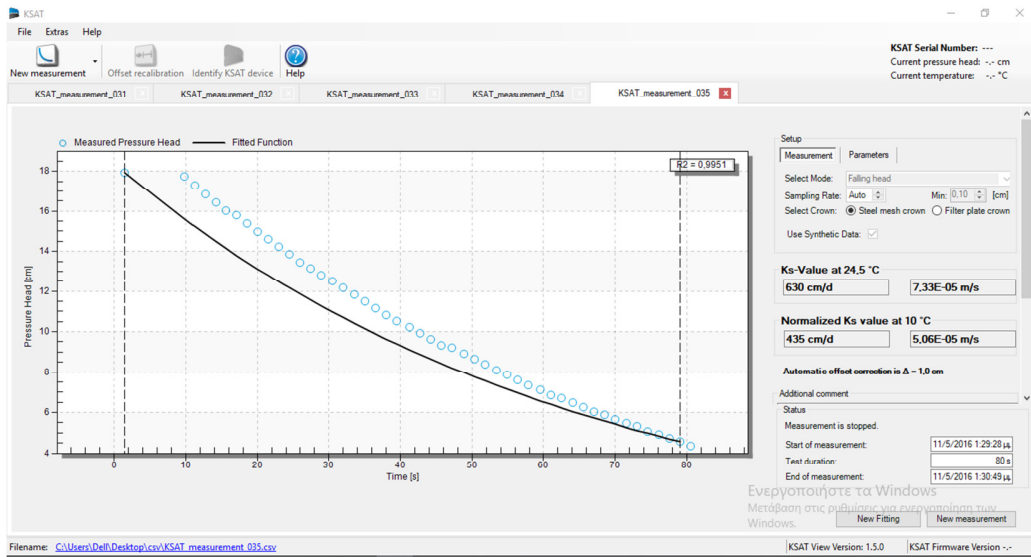
Εικόνα 15 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 33$ cm/d



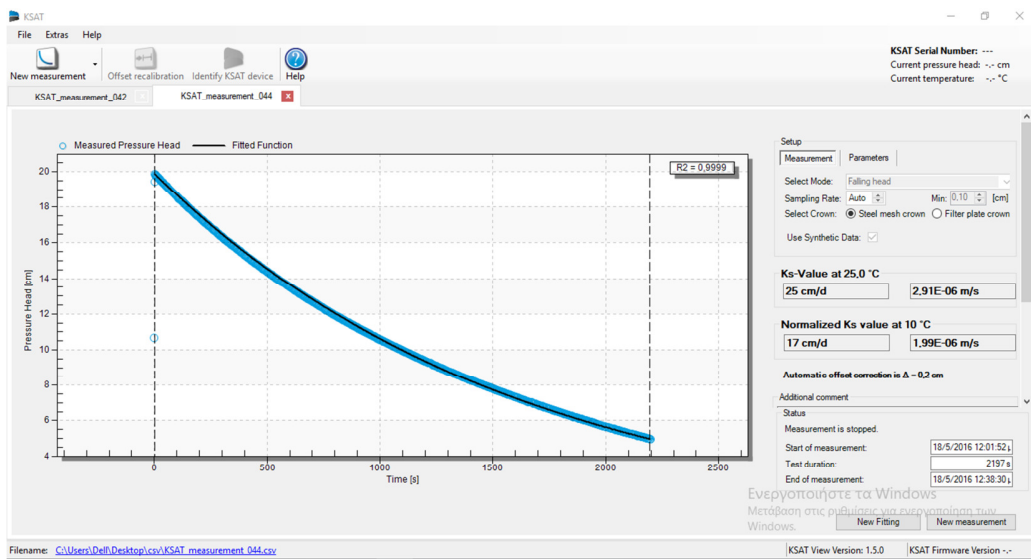
Εικόνα 16 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 205 \text{ cm/d}$



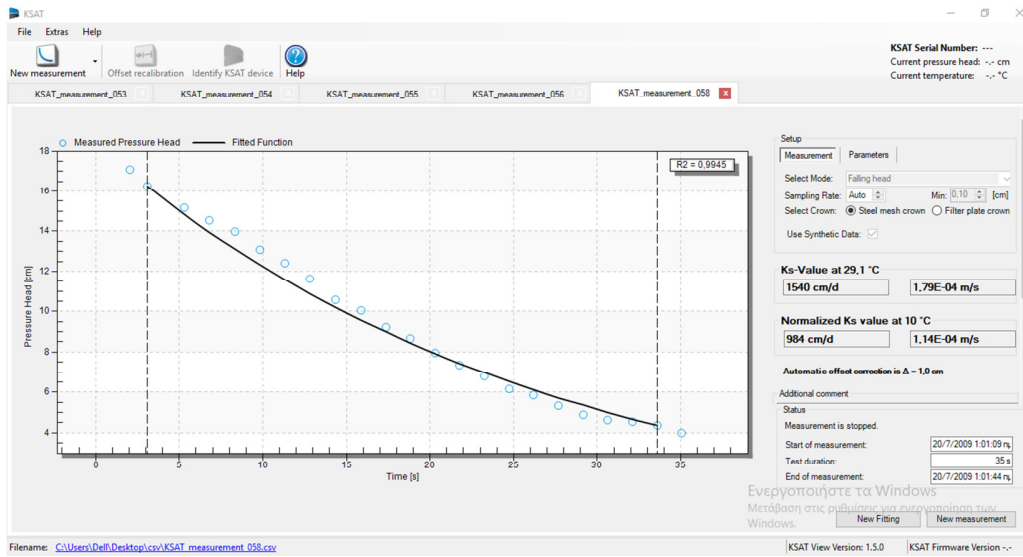
Εικόνα 17 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 113 \text{ cm/d}$



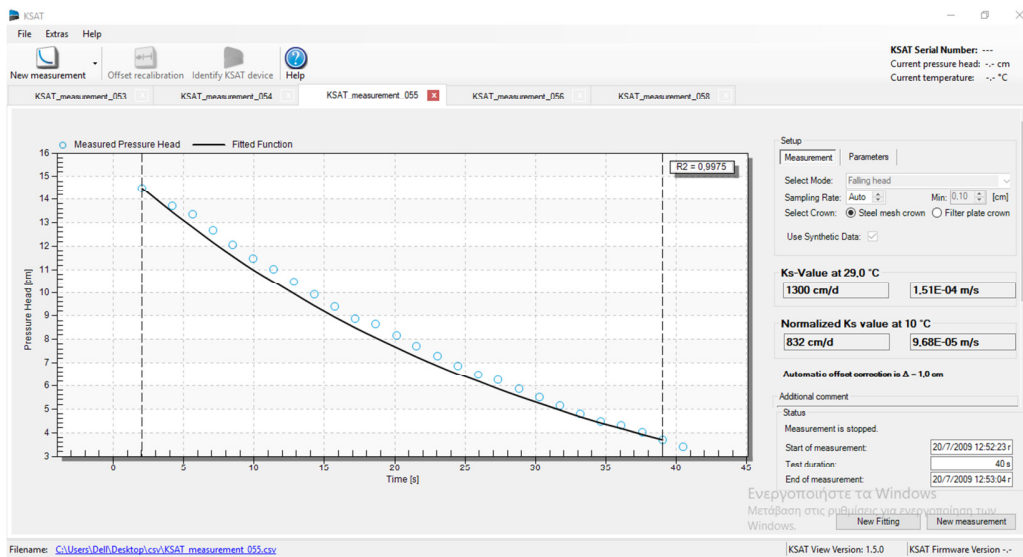
Εικόνα 18 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 435$ cm/d



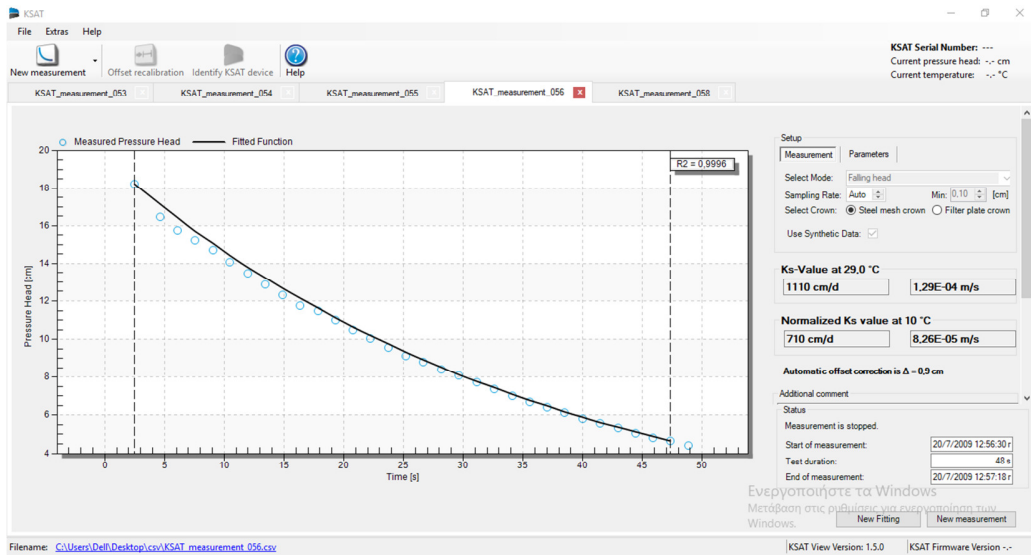
Εικόνα 19 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 17$ cm/d



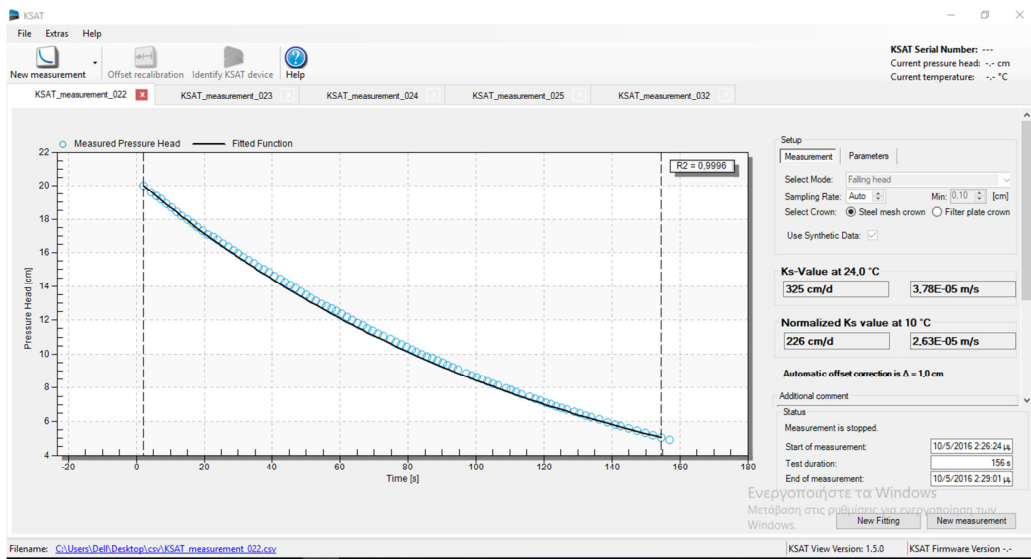
Εικόνα 20 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 984 \text{ cm/d}$



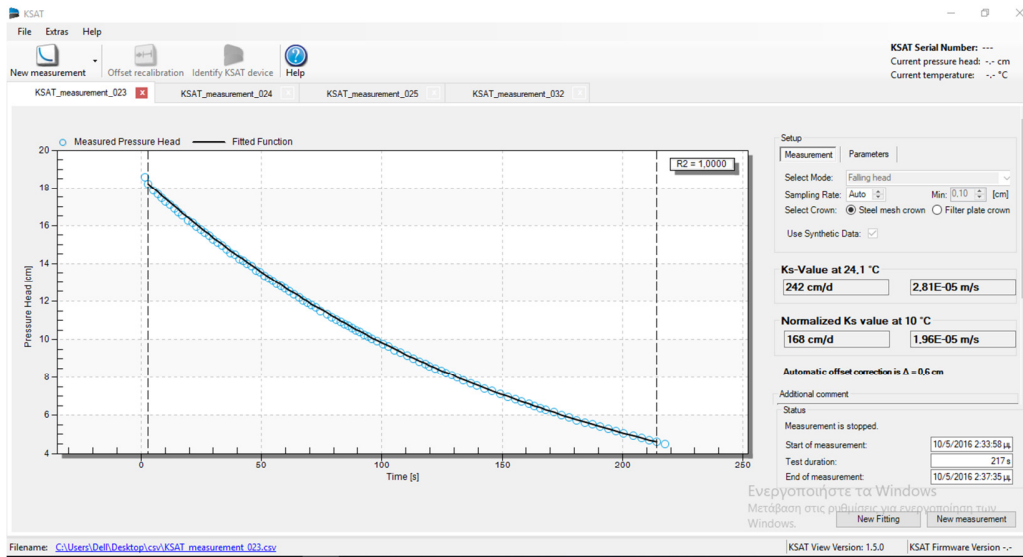
Εικόνα 21 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 832 \text{ cm/d}$



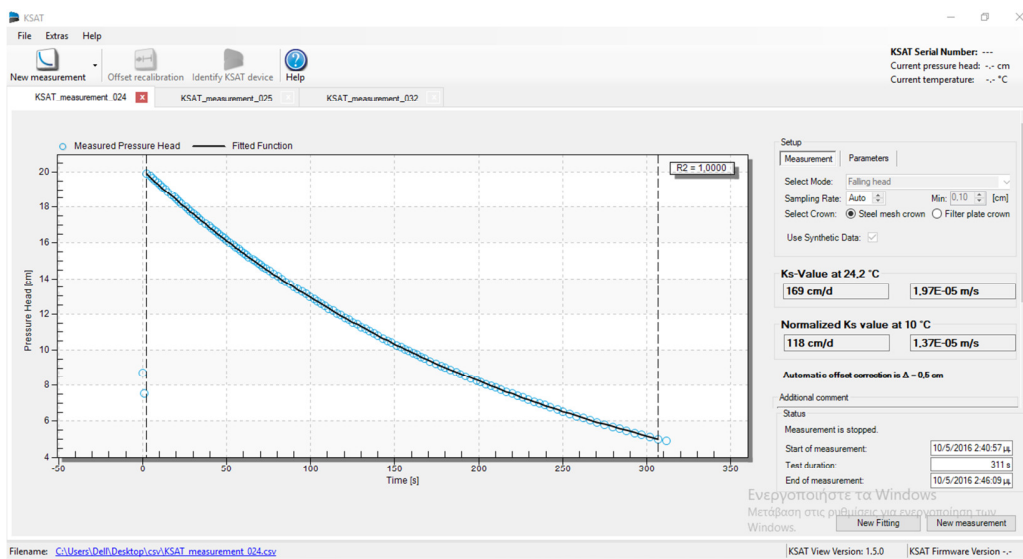
Εικόνα 22 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 710$ cm/d



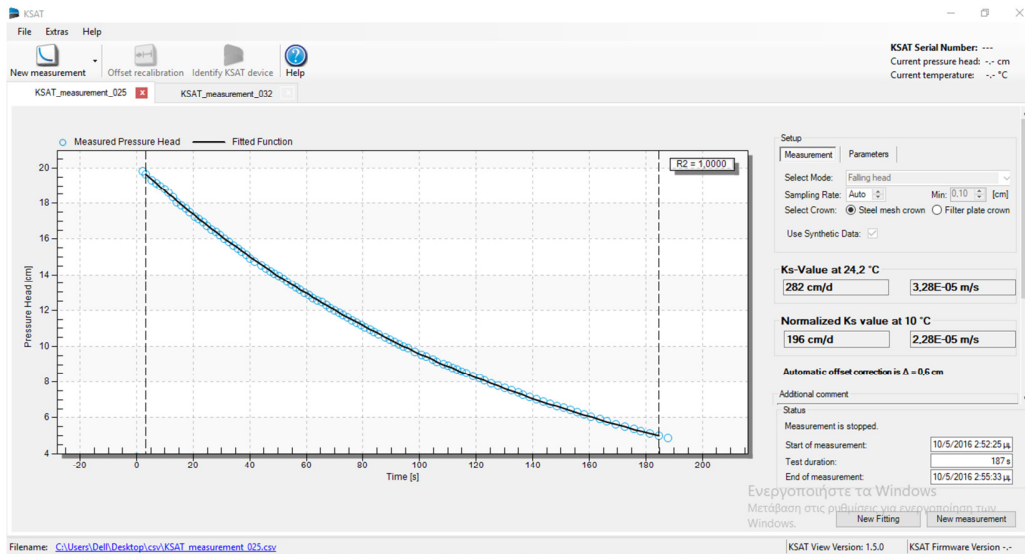
Εικόνα 23 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 226$ cm/d



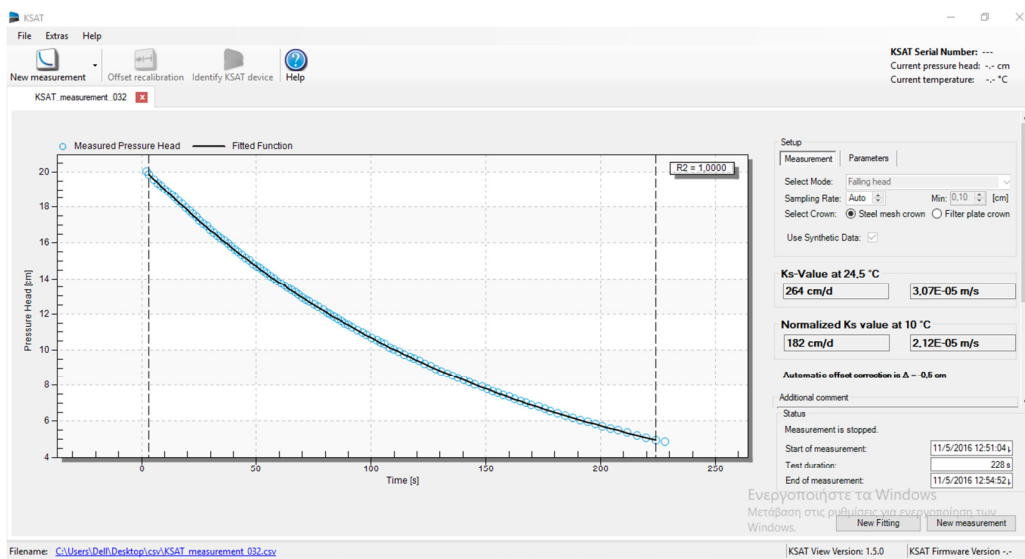
Εικόνα 24 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 168 \text{ cm/d}$



Εικόνα 25 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 118 \text{ cm/d}$



Εικόνα 26 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 196$ cm/d



Εικόνα 27 Μέτρηση με την μέθοδο falling head - $K_s = 182$ cm/d

4.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από δείγματα εδάφους που εξετάστηκαν στο εργαστήριο, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας. Επιπρόσθετα εκτός από τη λεπτομερή καταγραφή των αποτελεσμάτων για το κάθε δείγμα υπήρξε και μια μικρή παρουσίαση του προφίλ του καθενός (περιοχή δειγματοληψίας, βάθος δειγματοληψίας, καλλιεργημένο ή ακαλλιέργητο, όνομα ιδιοκτήτη, συντεταγμένες).

Πίνακας 2: Αποτελέσματα μετρήσεων Ks

A/A	Τοποθεσία	Περιοχή	Τύπος εδάφους	Δειγματοληψία	Ks (cm/day)	Ks (m/s)	Θ	Normalized Ks at 10C (cm/d)	Normalized at 10C Ks (m/s)
1	Λευκάδα	Περιβόλια	Ακαλλιέργητο	Επιφανειακά	25	2,92E-06	19,9	19	2,23E-06
2	Λευκάδα	Περιβόλια	Ακαλλιέργητο	Επιφανειακά	23	2,66E-06	20,3	17	2,02E-06
3	Λευκάδα	Περιβόλια	Ακαλλιέργητο	Επιφανειακά	257	2,99E-05	20,2	195	2,27E-05
4	Αμαλιάδα	προς Κουρούτα	Καλλιεργημένο	Επιφανειακά	147	1,70E-05	18,6	116	1,35E-05
5	Αμαλιάδα	προς Κουρούτα	Καλλιεργημένο	Επιφανειακά	185	2,15E-05	18,7	146	1,70E-05
6	Αμαλιάδα	προς Κουρούτα	Καλλιεργημένο	Επιφανειακά	94	1,09E-05	18,7	74	8,59E-06
7	Άρτα	Κολιός ζώνη Β	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	0,2	2,33E-08	24,4	0,1	1,61E-08
8	Άρτα	Κολιός Χρήστος Α	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	237	2,76E-05	23,8	166	1,93E-05
	Άρτα	Κολιός Χρήστος Α	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	293	3,41E-05	23,8	205	2,38E-05
	Άρτα	Κολιός Χρήστος Α	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	325	3,78E-05	23,8	226	2,63E-05
9	Άρτα	Κολιός Χρήστος παλιά	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	49	5,70E-06	23,5	35	4,01E-06
	Άρτα	Κολιός Χρήστος παλιά	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	47	5,42E-06	23,5	33	3,80E-06
10	Άρτα	Μιχάλης Α	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	242	2,81E-05	24,1	168	1,96E-05
	Άρτα	Μιχάλης Α	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	169	1,97E-05	24,1	118	1,37E-05
	Άρτα	Μιχάλης Α	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	282	3,28E-05	24,1	196	2,28E-05
11	Άρτα	Βίτσιος	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	163	1,89E-05	24,4	113	1,31E-05
	Άρτα	Βίτσιος	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	264	3,07E-05	24,4	183	2,12E-05
	Άρτα	Βίτσιος	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	273	3,17E-05	24,4	188	2,19E-05

12	Άρτα	Κολιός Ζώνη Α	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	0,5	4,15E-08	23,4	0,4	4,15E-08
	Άρτα	Κολιός Ζώνη Α	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	39	3,10E-06	23,4	27	3,10E-06
13	Άρτα	Κολιός Ζώνη Γ	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	2,3	2,66E-07	25	1,6	1,82E-07
14	Άρτα	Λάμπρος Κώστας	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	25	2,85E-06	25	17	1,95E-06
	Άρτα	Λάμπρος Κώστας	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	26	3,05E-06	25	18	2,08E-06
15	Άρτα	Ξυλογιάννη Βασιλική	Καλλιεργημένο	30cm βάθος	326	3,79E-05	29,2	208	2,42E-05

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο ακριβής προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού του εδάφους είναι δύσκολη διαδικασία λόγω έλλειψης αυτοματοποιημένου εξοπλισμού υψηλής ακρίβειας. Το όργανο KSAT πραγματοποιεί αυτοματοποιημένες μετρήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού υψηλής ακρίβειας στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό.

Για τον προσδιορισμό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο μέθοδοι της βιβλιογραφίας, δηλαδή η μέθοδος μεταβλητού φορτίου (falling head), η οποία πραγματοποιείται με πλήρως αυτόματο τρόπο και η μέθοδος σταθερού φορτίου (constant head), η οποία πραγματοποιείται με ημιαυτόματο τρόπο. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την κατάλληλη μέθοδο ανάλογα με τον τύπο του εδαφικού δείγματος και τις ανάγκες της έρευνας.

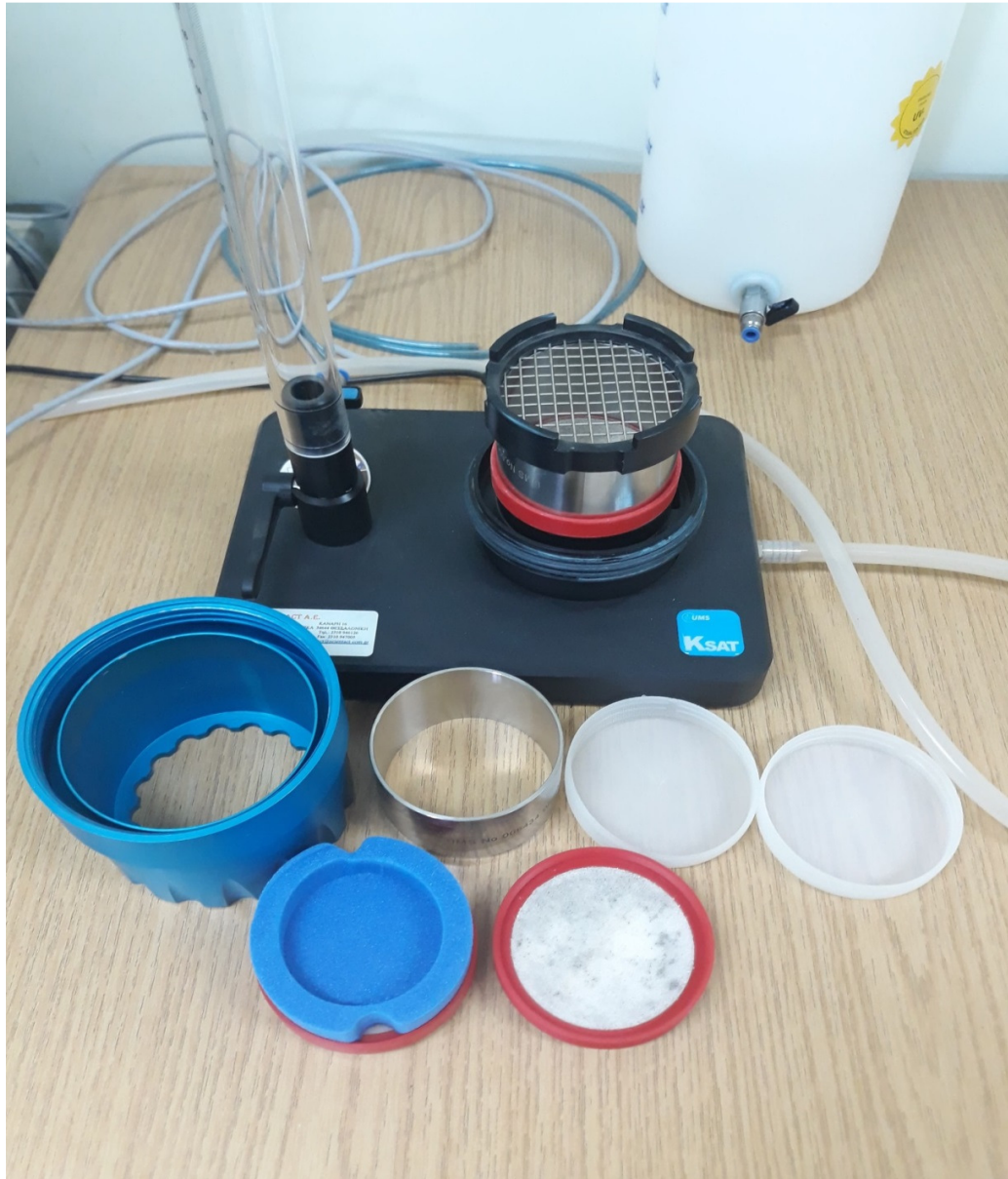
Το παρεχόμενο λογισμικό εκτελεί όλους τους υπολογισμούς, συμπεριλαμβανομένων και των διορθώσεων στο ιξώδες του νερού με βάση τις μεταβολές στη θερμοκρασία. Επιπλέον συμβάλλει σημαντικά στην εξοικονόμηση χρόνου στο εργαστήριο, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο μέτρησης κατά πολύ, απαλείφοντας τις διάφορες ζυγίσεις και τη λήψη αποφάσεων οι οποίες οδηγούν σε καθυστερήσεις και σφάλματα.

Το KSAT καλύπτει εύρος μέτρησης υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού από 5000 μέχρι και 0.1 cm/d. Επιπλέον καταγράφει και αποθηκεύει δεδομένα αυτόματα στον υπολογιστή του χρήστη μέσω σύνδεσης USB, μειώνοντας τα πιθανά ανθρώπινα λάθη, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο την ποιότητα των δεδομένων των μετρήσεων και άρα αξιόπιστα τελικά αποτελέσματα.



Εικόνα 28 Κάτοψη του οργάνου KSAT

Καταλήγοντας, ο προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού του εδάφους με τις διαδικασίες και το λογισμικό του οργάνου KSAT είναι πολύ πιο αποτελεσματικός και πιο αξιόπιστος σε σύγκριση με τη χρήση απλών διαπερατόμετρων είτε σταθερού είτε μεταβλητού φορτίου, στο εργαστήριο.



Εικόνα 29 Το όργανο KSAT με τα εξαρτήματά του

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Darcy, H., 1856. Les fontaines publiques de la ville Dijon. Paris.
- Ekhmaj, A.I., Amin, M.S.M., Almdny, A.H., Abdulaziz, A.M., Aimrun, W., 2006. Simulation of Soil Water Movement in Sandy Soil under a Prairie Field with Hydrus _ 2D Model. In: The 2nd International Conf. on Water Resources & Arid Environment. pp. 1–16
- Gardner, W.R. 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85: 228-232.
- Hansbo, S, 1960. Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains. *Swedish Geotech Inst Proc No 18*, Stockholm 18:41–159
- Olson . R.E and Daniel D.E., 1981. Measurement of the Hydraulic Conductivity of Fine-Grained Soils, Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM STP, 746 (1981), pp. 18–64
- Sarkar, D. and Haldar, A., 2005. *Physical and Chemical Methods in Soil Analysis*. New Delhi: New Age International Pvt Ltd Publishers.
- Šimůnek, J., Kodešová, R., Gribb, M.M., and van Genuchten, M.T., 1999. Estimating hysteresis in the soil water retention function from cone permeameter experiments. *Water Resources Research*, 35 (5), 1329–1345.
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.* 4:1259–1273.
- Dane J.H. und Topp G.C. (2002). *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Soil Science Society of America Book Series No. 5, ISBN 0-89118-810-X, Soil Science Society of America: Madison, p. 1692.

DIN 19683-9 (1998). Physical laboratory investigation, determination of the permeability (hydraulic conductivity) in saturated soil sample rings, Beuth Verlag GmbH.

DIN 18130 (1998). Foundation ground: investigation of soil samples; determination of the hydraulic conductivity – part 1, Beuth Verlag GmbH.

DIN 19672-1 and E DIN ISO 10381-4. Soil quality – Sampling – Part 4: Guidance on the procedure for investigation of natural, near-natural and cultivated sites, Beuth Verlag GmbH

Dirksen C. (1999). Soil Physics Measurements. Catena Verlag, Reiskirchen.

Hartge K.-H. und R. Horn (2009). Die physikalische Untersuchung von Böden. 4. Auflage (Physical analysis of soils, 4th edition). E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

McKenzie N.J., T.W. Green und D.W. Jacquier (2002). Laboratory measurement of hydraulic conductivity. In: McKenzie et al.: Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation. CSIRO Publ., Collingwood, Australia.

Εγχειρίδιο λειτουργίας KSAT, 2019, METER GROUP, https://metergroup-83d0.kxcdn.com/app/uploads/2018/12/KSAT_Manual.042019.pdf