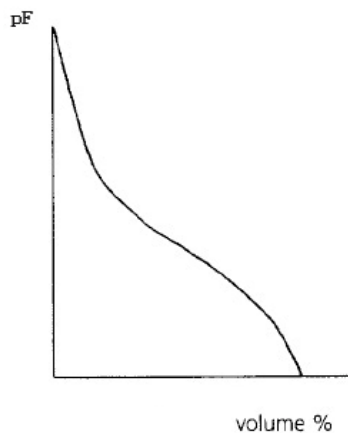




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Διπλωματική Εργασία

***Προσδιορισμός καμπυλών μύζησης - εδαφικής υγρασίας σε
εργαστηριακές συσκευές Sandbox***



Επιβλέπων: Σ.Γιακουμάκης, Επ. Καθηγητής

Εκπόνηση: Γεώργιος Ν .Στεφανής

Αθήνα 2008

Περιεχόμενα

Πρόλογος	5
Περίληψη.....	6
Abstract.....	7
Κεφάλαιο 1 ^ο : Θεωρητικό Μέρος.....	8
1.1 Βασικές έννοιες	8
1.1.1 Τριχοειδής πίεση	8
1.1.2 Χαρακτηριστικές συναρτήσεις εδάφους.....	12
1.1.3 Το Φαινόμενο υστέρησης	16
1.2 Συνθήκες Ροής στη Ακόρεστη Ζώνη	18
1.2.1 Νόμος του Darcy	18
1.2.2 Επέκταση του Νομου Darcy	19
1.2.3 Γενική Διαφορική Εξίσωση	20
1.2.4 Ειδικές Μορφές της Εξίσωσης.....	21
Κεφάλαιο 2 ^ο : Πειραματικό Μέρος	24
2.1 Περιγραφή Συσκευών.....	24
2.1.1 1 ^η Συσκευή SANDBOX.....	24
2.1.2 2 ^η Συσκευή SANDBOX.....	29
2.2 Εδαφικά Δείγματα.....	35
2.3 Καταγραφή πειραμάτων	27
2.3.1 Πειράματα με την 1 ^η συσκευή.....	37
2.3.2 Πειράματα με την 2 ^η συσκευή.....	39

Κεφάλαιο 3 ^ο - Αποτελέσματα & Συμπεράσματα	41
3.1 Αποτελέσματα	41
3.2 Συμπεράσματα	43
Βιβλιογραφία	45
Παράρτημα.....	47

Κατάλογος Περιεχόμενων Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1	ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΝΕΡΟΥ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΕΩΣ.....	9
ΣΧΗΜΑ 2	ΕΔΑΦΙΚΗ ΤΟΜΗ ΑΚΟΡΕΣΤΗΣ –ΚΟΡΕΣΜΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ.....	17
ΣΧΗΜΑ 3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	24
ΣΧΗΜΑ 4	ΓΩΝΙΕΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ.....	34
ΣΧΗΜΑ 5	ΓΩΝΙΕΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ.....	34
ΣΧΗΜΑ 6	ΣΥΣΚΕΥΗ DARCY.....	17
ΣΧΗΜΑ 7	ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ 1.....	17
ΣΧΗΜΑ 8	ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ 2.....	24
ΣΧΗΜΑ 9	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΜΜΟΥ.....	34

Κατάλογος Περιεχόμενων Εικόνων

ΦΩΤΟ 1	ΓΕΝΙΚΗ ΑΠΟΨΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.....	14
ΦΩΤΟ 2	ΔΙΑΤΡΗΤΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ.....	15
ΦΩΤΟ 3	ΔΙΑΠΟΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΑΜΜΟΥ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ.....	20
ΦΩΤΟ 4	ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΑΜΜΟΥ ΜΕ ΧΑΡΑΚΑ.....	21
ΦΩΤΟ 5	ΓΕΝΙΚΗ ΑΠΟΨΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.....	22
ΦΩΤΟ 6	ΚΑΛΥΨΗ ΤΟΥ ΔΙΑΤΡΗΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΜΕ ΥΦΑΣΜΑΤΙΝΟ ΦΙΛΤΡΟ.....	26
ΦΩΤΟ 7	ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ 2.....	28
ΦΩΤΟ 8	ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΑΜΜΩΔΗ ΕΔΑΦΙΚΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	35
ΦΩΤΟ 9	ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΡΓΙΛΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	37

Κατάλογος Περιεχόμενων Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΑΜΜΟΥ ΣΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ 1 ΚΑΙ ΣΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ 2.....	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΑΡΓΙΛΟΥ ΣΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ 2.....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 3	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΥΖΗΣΗΣ – ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΑΜΜΩΔΗ ΚΑΙ ΤΑ ΑΡΓΙΛΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	40

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αφορά την εξαγωγή καμπυλών μύζησης–εδαφικής υγρασίας σε εργαστηριακές συσκευές Sandbox, σε καθεστώς στράγγισης. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ε.Ε &Δ.Υ.Π της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Το Εργαστήριο προσέφερε πολύτιμες γνώσεις στον συντάξαντα κατά την φοίτησή του στη Σχολή και ως εκ τούτου, το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. κ. Σπύρο Γιακουμάκη, ο οποίος αποτέλεσε και τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας. Η βοήθεια που μου παρείχε, τόσο κατά την πειραματική διαδικασία, αλλά και στο υπόλοιπο διάστημα, έως και την παρουσίασή της, ήταν εξαιρετικά πολύτιμη. Ακόμη, ευχαριστώ ιδιαίτερα τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής, τον Διευθυντή του Εργαστηρίου Ε.Ε &Δ.Υ.Π Καθηγητή κ. Γιώργο Τσακίρη, καθώς και τον Διευθυντή του Τομέα Καθηγητή κ. Μ. Σακελλαρίου για το ενδιαφέρον που επέδειξαν, καθώς και για τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Αθήνα , Απρίλιος 2008

Περίληψη

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία γίνεται αρχικά μία εκτενής αναφορά στη θεωρητική περιγραφή του αντικειμένου της ακόρεστης ροής, που περιλαμβάνει και τα περί καμπυλών μύζησης-εδαφικής υγρασίας $\theta(h)$, που χρησιμοποιούνται στη μαθηματική προσομοίωση της ροής σε ακόρεστο έδαφος. Στη συνέχεια ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των εργαστηριακών συσκευών Sandbox (κιβώτια άμμου) που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των καμπυλών αυτών, καθώς και η περιγραφή των εδαφικών δειγμάτων που επελέγησαν.

Στην πρώτη συσκευή Sandbox (συσκευή 1) εξετάστηκαν εδαφικά δείγματα άμμου σε κοκκώδη μορφή για μύζησης έως 100 cm στήλης νερού. Στη δεύτερη συσκευή εξετάστηκαν επίσης τα ίδια εδαφικά δείγματα άμμου, για μεγαλύτερες όμως τιμές της μύζησης. Επιπλέον, στη συσκευή 2 εξετάστηκαν ακόμη και δύο αδιατάρακτα αργιλικά εδαφικά δείγματα, για τη συλλογή των οποίων από το ύπαιθρο, χρησιμοποιήθηκε συσκευή Auger (Παράρτημα).

Από τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής προκύπτει ότι οι εν λόγω συσκευές αποτελούν μία αξιόπιστη εναλλακτική λύση στις «κλασσικές» μεθόδους γ -ακτινοβολίας και νετρονίων για τον πειραματικό προσδιορισμό των καμπυλών $\theta(h)$, χωρίς να εμπεριέχουν τους κινδύνους έκθεσης σε επικίνδυνες ακτινοβολίες των τελευταίων.

Abstract

The determination of the moisture characteristics is essential when researching the quantity of water available in the soil for plants and trees. One of the main characteristics of the soils is the suction – moisture curves.

In this essay, an experimental process for the determination of these curves in the laboratory, is presented. The curves were produced by using the following devices: The Sandbox and the Sand/Kaolin. It is remarkable that these devices were used for the first time in Greece for conducting such experiments.

Two undisturbed soil specimens of clay and two of coarse sand were used. The latter was in grain form. The experiments were conducted in the Land Reclamation Works Laboratory of Survey Engineer School of NTUA. The specimens of clay were obtained from the field by using an Auger soil collector. The soils were then transferred to the lab in steel soil sample rings and set into the sandboxes.

In the present essay the theoretical part of the object, involving the general matter of moisture movement in the unsaturated zone, is included. In Chapter 1 the main references of the bibliography are firmly presented.

In Chapter 2 the experimental process is extensively described. The preparation of the soils and the sand boxes, the experiments, and finally the results are presented, with a significant number of photos and figures attached in the text.

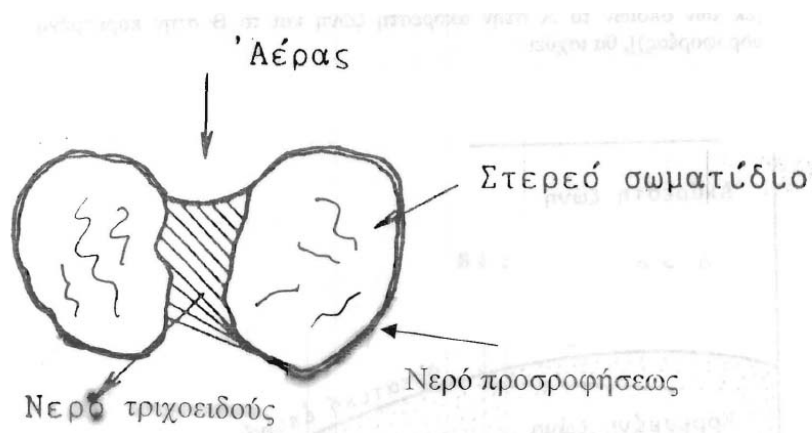
Finally in Chapter 3 all the significant conclusions are explained and some remarks are stated involving the experimental use of the sandbox devices.

Κεφάλαιο 1^ο: Θεωρητικό Μέρος

1.1 Βασικές έννοιες

1.1.1 Τριχοειδής πίεση

Η ροή του νερού που λαμβάνει χώρα στην εδαφική ζώνη που εκτείνεται μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και της φρεατικής επιφάνειας ενός υδροφορέα καλείται ακόρεστη. Και τούτο επειδή οι πόροι μεταξύ των κόκκων του εδαφικού μητρώου είναι μερικώς γεμάτοι με νερό στη ζώνη αυτή. Το νερό συγκρατείται κυρίως με τις δυνάμεις του τριχοειδούς. Συγκεκριμένα, στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους θεωρείται ότι η πίεση της αέριας φάσης ισούται με την ατμοσφαιρική και προκύπτει ότι η πίεση του εδαφικού νερού είναι αρνητική ως προς αυτή, δηλαδή οι σχηματιζόμενοι υδάτινοι μηνίσκοι μεταξύ των κόκκων του εδάφους έχουν τα κοίλα προς την πλευρά της υγρής φάσης. Οι μηνίσκοι αυτοί συνδέονται με τα λεπτά υδάτινα υμένα που περιβάλλουν τους κόκκους (νερό προσροφήσεως), (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Ισορροπία μεταξύ νερού τριχοειδούς και προσροφήσεως.

Για τα τριχοειδή φαινόμενα ισχύει η εξίσωση του Laplace (Hillel, 1980):

$$h = \frac{-pc}{D_w \cdot g} = \frac{-2 \cdot \sigma}{D_w \cdot g \cdot R} \quad (1)$$

όπου:

h: το ύψος πίεσεως του εδαφικού νερού, (L).

p_c: η τριχοειδής πίεση, (M L⁻¹T⁻²)

D_w: η πυκνότητα του νερού, (M L⁻³)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας, (9.81 m/s²)

σ: η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια νερού-αέρα που είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του νερού, (M T⁻²)

R: η ακτίνα καμπυλότητας του μηνίσκου, (L).

Στην ακόρεστη ροή, ως αρχή των πιέσεων λαμβάνεται η ατμοσφαιρική,

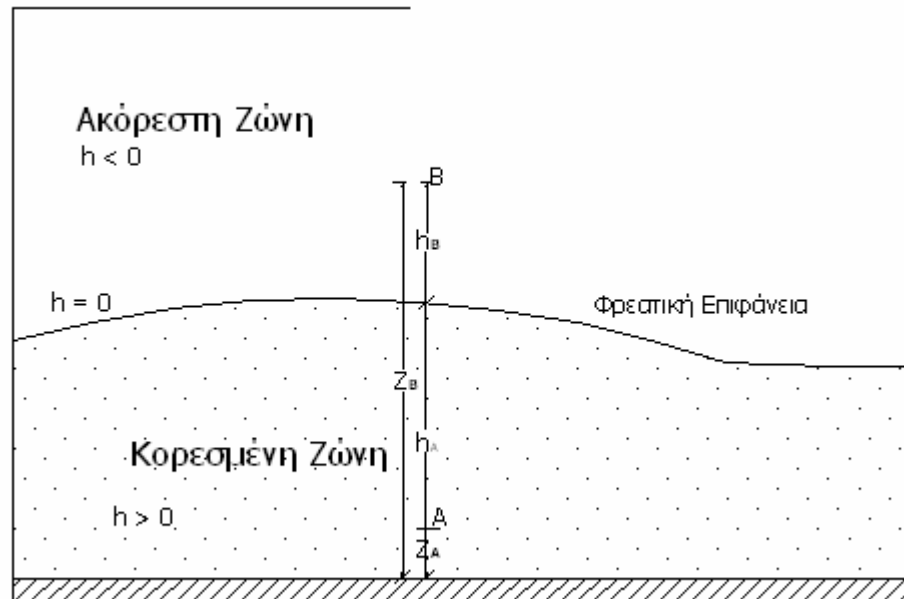
$p_c = p_a - p_w > 0 \Rightarrow p_c = -p_w \Rightarrow p_w = -p_c < 0$
($p_a = 0$). Τότε η τριχοειδής πίεση p_c (εξ. (1)), δίνεται από τη σχέση, (Σχήμα 1):

Επομένως, η πίεση του νερού στην ακόρεστη ζώνη p_w είναι η τριχοειδής πίεση με πρόσημο μείον, (αρνητική πίεση).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται σε σκαρίφημα μία τομή του εδάφους μεταξύ ακόρεστης και κορεσμένης περιοχής, που χωρίζονται από τη φρεατική επιφάνεια. Αν οι πιέσεις του νερού εκφραστούν σε ύψος στήλης νερού, τότε $h=0$, η ατμοσφαιρική πίεση στην φρεατική επιφάνεια. Το υδραυλικό φορτίο λαμβάνεται ως προς ένα επίπεδο αναφοράς που μπορεί να είναι ένα αδιαπέραστο στρώμα, (Σχήμα 2). Αν το σύστημα θεωρηθεί σε ισορροπία, για τα υδραυλικά φορτία στα σημεία A και B επί μίας κατακορύφου, [εκ των οποίων το A στην ακόρεστη ζώνη και το B στην κορεσμένη (υπόγειος υδροφορέας)], θα ισχύει:

$$\Phi_A = \Phi_B$$

(2)



Σχήμα 2: Εδαφική τομή ακόρεστης – κορεσμένης ζώνης.

Η πίεση στο A θα είναι η υδροστατική $h_A > 0$, ενώ στο B, με βάση την εξίσωση (2) θα είναι:

$$h_A + z_A = h_B + z_B \Rightarrow h_B = [h_A + z_A] - z_B$$

Από το Σχήμα 2 και την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η πίεση του νερού στο σημείο B, εκφρασμένη σε ύψος στήλης νερού, είναι αρνητική, (τριχοειδής πίεση).

Ορισμοί Εδαφικής Υγρασίας

Η εδαφική υγρασία σε ακόρεστο έδαφος ορίζεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

(i). *Περιεκτικότητα κατά βάρος* (θ_m)

Είναι ο λόγος της μάζας του νερού m_w προς τη μάζα του ξηρού εδάφους εδαφικού δείγματος m_s .

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_s}, (\text{gr/gr}) \quad (2)$$

(ii). *Περιεκτικότητα κατ' όγκο (θ_v)*

Είναι ο λόγος του όγκου του νερού V_w προς τον συνολικό όγκο του εδαφικού δείγματος (έδαφος και πόροι) V_t .

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} = \frac{D_b}{D_w} \cdot \theta_m \text{ (cm}^3/\text{cm}^3) \quad (3)$$

όπου D_b η φαινόμενη ξηρή πυκνότητα (gr /cm^3).

(iii). *Ισοδύναμο ύψος εδαφικού νερού (θ_h)*

Το ισοδύναμο ύψος νερού ορίζεται από την εξίσωση:

$$\theta(h) = 10 \cdot \theta_m \cdot \frac{D_b}{D_w} \cdot h, (\text{mm}) \quad (4)$$

Όπου h το βάθος της θεωρούμενης εδαφικής ζώνης (cm).

Από τις παραπάνω εκφράσεις της εδαφικής υγρασίας, στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθούν οι δύο πρώτες.

Η μέγιστη τιμή της εδαφικής κατ' όγκο υγρασίας ισούται με το πορώδες του εδάφους, εφ όσον όλοι οι πόροι του είναι γεμάτοι με νερό και δεν υπάρχει εγκλωβισμένος αέρας μέσα σε αυτούς. Το πορώδες p ισούται με:

$$p = 1 - \frac{D_b}{D_s} \quad (5)$$

όπου:

D_s η πραγματική πυκνότητα του εδάφους (gr/cm^3). Συνήθως $D_s = 2,65 \text{ gr}/\text{cm}^3$ εάν το έδαφος δεν περιέχει οργανική ουσία. 1.2 Χαρακτηριστικές συναρτήσεις εδάφους.

1.1.2 Χαρακτηριστικές συναρτήσεις εδάφους

Για την αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων της ακόρεστης ροής, απαραίτητη προϋπόθεση είναι κατ' αρχήν ο προσδιορισμός των δύο βασικών συναρτησιακών σχέσεων, χαρακτηριστικών ενός δεδομένου τύπου εδάφους:

- Της συνάρτησης $\theta(h)$ μύζησης (απόλυτης τιμής της αρνητικής πίεσης του νερού στους πόρους) - εδαφικής υγρασίας.

- Της συνάρτησης $K(\theta)$ υδραυλικής αγωγιμότητας- εδαφικής υγρασίας.

Οι δύο προαναφερθείσες συναρτήσεις προσδιορίζονται με πειραματικές μετρήσεις και προσαρμογή διαφόρων τύπων παραμετρικών εξισώσεων στα ζεύγη των πειραματικών τιμών ($\theta - h$ ή $K - \theta$), εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Μια από τις πιο γνωστές μορφές τέτοιων παραμετρικών εξισώσεων για τη συνάρτηση $\theta(h)$ είναι

A. (Van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (a|h|)^n]^m} + \theta_r \quad (6)$$

όπου :

θ_s, θ_r (cm^3/cm^3): Η εδαφική υγρασία κορεσμού εκφρασμένη κατ' όγκο και η υπολειπόμενη υγρασία αντίστοιχα. Η τιμή της θ_s συνήθως ταυτίζεται με το πορώδες του εδάφους.

α (cm^{-1}), n , m : παράμετροι προσαρμογής που εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους με $m=1-(1/n)$, $0 < \alpha < 1$, $n > 1$.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σε ζεύγη πειραματικών σημείων (θ, h) προκύπτουν οι παράμετροι θ_r, α και n . Σημειωτέον, ότι η υπολειπόμενη υγρασία θ_r μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραπάνω εξίσωση και ως μία γνωστή παράμετρος, όπως η υγρασία στον κορεσμό θ_s . Συγκεκριμένα, αυτή αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της μετρηθείσας υγρασίας κατά την πειραματική διαδικασία. Στην περίπτωση αυτή, από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζονται οι α και n .

B. Συνάρτηση υδραυλικής αγωγιμότητας (εξισώσεις Gardner)

Στην περίπτωση κατά την οποία επιλεγεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή η αρνητική πίεση του νερού στους πόρους h , τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία από τις παρακάτω μορφές εξισώσεων (Gardner, 1958, Giakoumakis and Tsakiris, 1999):

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h)$$

$$K(h) = \frac{a}{|h|^m + b}$$

όπου:

α, b, m παράμετροι προσαρμογής και K_s η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού του εδάφους (L T^{-1}).

Μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί και η μορφή:

$$K(h) = K_s \frac{b_1}{|h|^{b_2} + b_1}$$

όπου b_1 και $b_2 > 0$.

Στην περίπτωση κατά την οποία επιλεγεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή η εδαφική κατ' όγκο υγρασία θ , τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (Brooks and Corey, 1964):

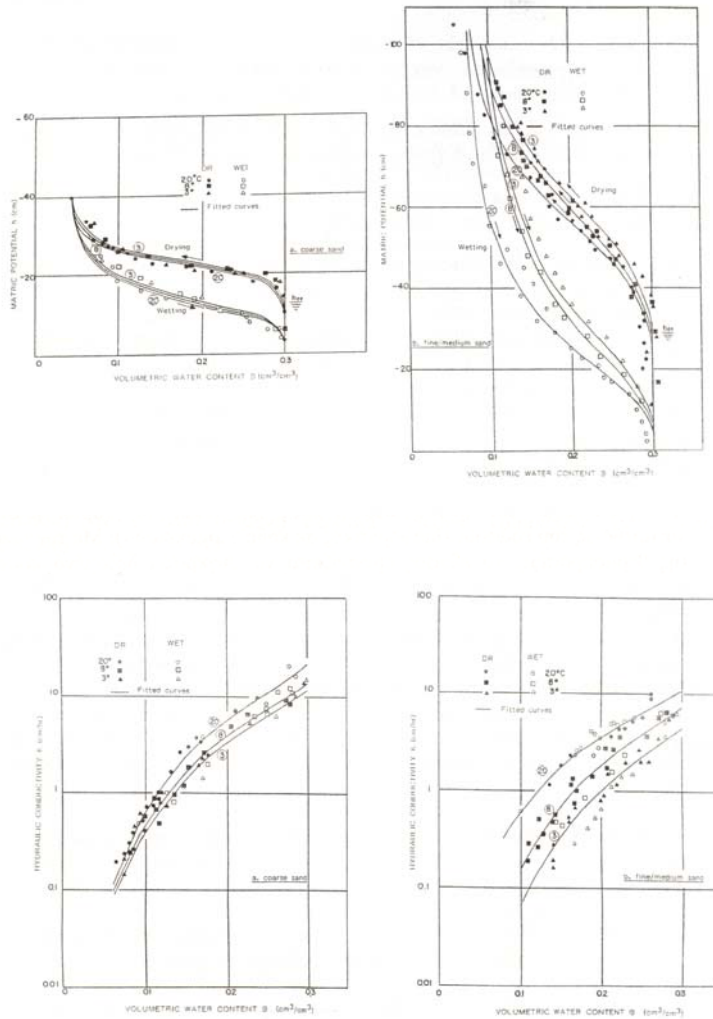
$$K(\theta) = \left[\frac{\theta}{\theta_s} \right]^b$$

όπου $b > 0$ και θ_s ($L^3 L^{-3}$) η εδαφική κατ' όγκο υγρασία κορεσμού του εδάφους.

Στο Σχήμα 3 (α,β) φαίνονται οι χαρακτηριστικές συναρτήσεις $\theta(h)$ και $K(\theta)$ αντίστοιχα, σε ισόθερμες συνθήκες διεξαγωγής των σχετικών πειραμάτων στους 20, 8 και 3 °C, για την περίπτωση μίας χονδρόκοκκης (coarse sand 0.1 έως 1.0 mm) και μίας λεπτής άμμου (fine/medium sand 0.05 έως 0.5 mm), (Giakoumakis and Tsakiris, 1991). Στην πρώτη περίπτωση, η βέλτιστη προσαρμογή στα πειραματικά σημεία έγινε με την εξίσωση του Van Genuchten και στη δεύτερη, με την εξίσωση των Brooks και Corey. Μπορεί να παρατηρηθούν τα εξής:

1. Η θερμοκρασία του νερού στο έδαφος επηρεάζει τις χαρακτηριστικές συναρτήσεις του εδάφους (διαφορετικές σε κάθε θερμοκρασία). Με την μείωση της θερμοκρασίας, το έδαφος εμφανίζεται να συγκρατεί δεδομένο ποσοστό υγρασίας σε μεγαλύτερη κατ' απόλυτο τιμή πίεση h , ενώ εμφανίζεται ταυτόχρονα λιγότερο αγωγή. Αυτό μπορεί εν μέρει να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι τόσο η επιφανειακή τάση σ (εξίσωση 1), όσο και το ιξώδες του νερού ν , είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας (η επιφανειακή τάση και το ιξώδες αυξάνονται με την μείωση της θερμοκρασίας). Πράγματι, για αρκετούς τύπους εδαφών αποδεικνύεται ότι οι ανηγμένες συναρτήσεις $\theta(h,T)/\sigma(T)$ και $K(\theta,T) \times \nu(T)$ δεν εξαρτώνται από τη θερμοκρασία κατά την θεωρία επιφανειακής τάσης - ιξώδους ροής (S.T.V.F.: surface tension viscous flow approach).

2. Η συνάρτηση $\theta(h)$, σε αντίθεση με τη συνάρτηση $K(\theta)$, επηρεάζεται από φαινόμενα υστέρησης μεταξύ των φάσεων στράγγισης (drying) και διύγρυνσης (wetting).

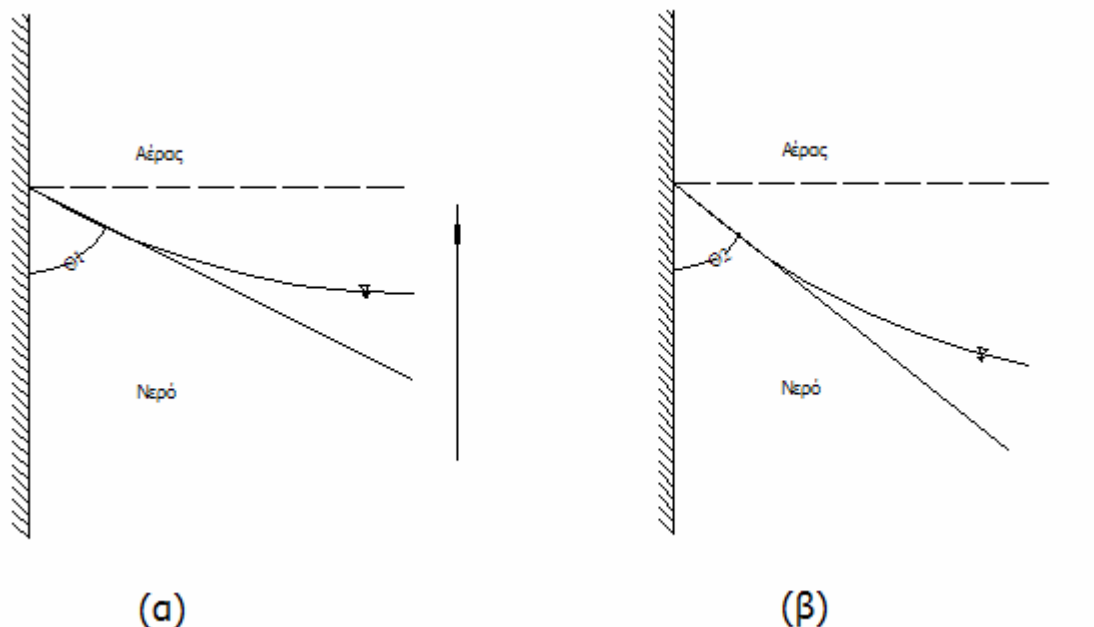


Σχήμα 3(α,β): Συναρτήσεις εδαφικής υγρασίας και υδραυλικής αγωγιμότητας για τα δύο εδάφη (Giakoumakis and Tsakiris, 1991).

1.1.3 Φαινόμενο υστέρησης

Το φαινόμενο της υστέρησης επηρεάζει τις χαρακτηριστικές συναρτήσεις του εδάφους $\theta(h)$ και $K(h)$ σε αντίθεση με την συνάρτηση $K(\theta)$ που δεν επηρεάζεται. Αυτό αποδεικνύεται πειραματικά. Επομένως, η πρώτη παρατήρηση έγκειται στο ό,τι η μεταβλητή h (ύψος τριχοειδούς πίεσης) είναι εκείνη που «ευθύνεται» για το φαινόμενο αυτό. Πράγματι, έχοντας κατά νου την εξίσωση του Laplace (εξίσωση 1), μπορούν να αναφερθούν οι εξής λόγοι που προκαλούν την υστέρηση:

1. Η ανομοιόμορφη κατανομή των πόρων του πορώδους μέσου (εδάφους).
2. Η διαφορετική γωνία επαφής του νερού στους κόκκους του εδαφικού μητρώου κατά τη στράγγιση και τη διύγρανση, (Σχήμα 4).

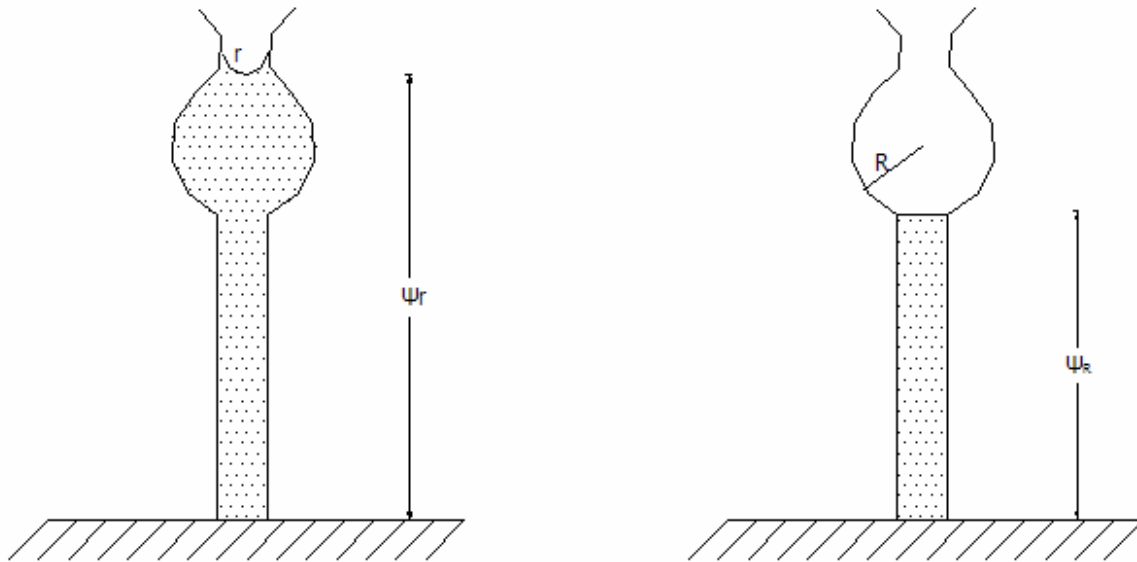


Σχήμα 4: (α). Γωνία διαβροχής θ_1 κατά τη διύγρανση (β). Γωνία απόσυρσης κατά τη στράγγιση θ_2 .

Ισχύει $\theta_1 > \theta_2$ με αποτέλεσμα οι ακτίνες καμπυλότητας των μηνίσκων να είναι: $R_1 > R_2$ και τα αντίστοιχα ύψη πίεσης με βάση την εξίσωση του Laplace: $|h_1| < |h_2|$. Αυτό σημαίνει ότι για δεδομένη τιμή της εδαφικής υγρασίας, το ύψος

της τριχοειδούς πίεσης θα είναι κατ' απόλυτο τιμή μεγαλύτερο κατά τη διάρκεια της στράγγισης απ' ό,τι κατά τη διύγρυνση του εδάφους, όπως άλλωστε φαίνεται και στις πειραματικές καμπύλες του Σχήματος 3α.

3. Το αποτέλεσμα της φιάλης με μελάνι (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Αποτέλεσμα της φιάλης με μελάνι (ink bottle effect).

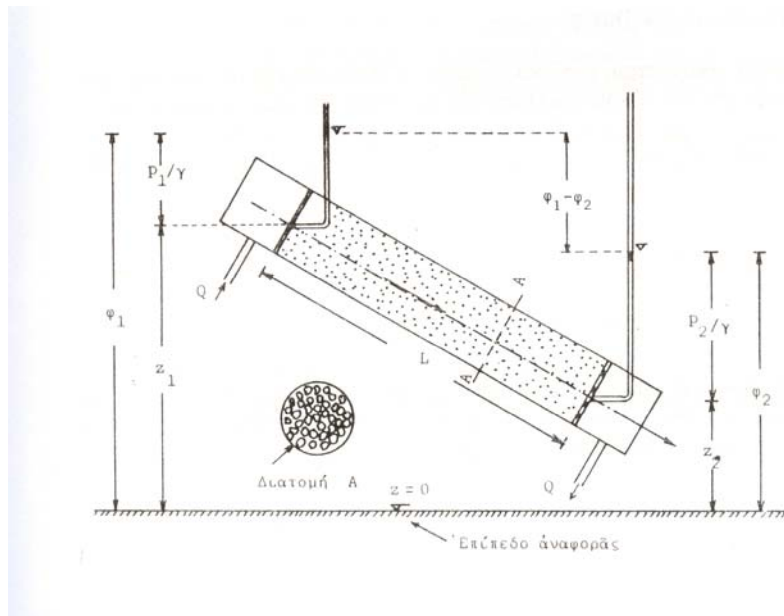
Το αποτέλεσμα της φιάλης με μελάνι δίνεται παραστατικά στο Σχήμα 5. Στο Σχήμα αυτό φαίνεται ένας υποθετικός πόρος κατά τα στάδια διύγρυνσης και στράγγισης. Ο πόρος αυτός αποτελείται από ένα τριχοειδή σωλήνα ακτίνας καμπυλότητας r που παρουσιάζει στο επάνω μέρος μία σφαιρική διόγκωση ακτίνας R . Για μία ορισμένη τιμή της μύζησης ψ_r (απόλυτη τιμή του ύψους της τριχοειδούς πίεσης h , εν γένει $\psi = -h$), το νερό ισορροπεί στο επάνω μέρος της διόγκωσης, όπου η καμπυλότητα της διεπιφάνειας αέρα-νερού είναι $r < R$. Όταν η μύζηση γίνει λίγο μεγαλύτερη από ψ_r τότε η σφαιρική διόγκωση αδειάζει εντελώς. Για να ξαναγεμίσει, χρειάζεται μία μύζηση λίγο μεγαλύτερη από την ψ_R , (Σχήμα 5) και επειδή $R > r$ από την εξίσωση του Laplace προκύπτει ότι $\psi_R < \psi_r$. Επομένως, για το γέμισμα του πόρου απαιτείται

μικρότερη μύζηση από αυτήν που απαιτείται για το άδειασμά του.

1.2 Συνθήκες Ροής στη Ακόρεστη Ζώνη

1.2.1 Νόμος του Darcy

Στο Σχήμα 3 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε ο Darcy. Διατηρώντας μία σταθερή διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων 1 και 2 μίας στήλης με κορεσμένη άμμο, αποδεικνύεται ότι η διερχόμενη παροχή Q ($L^3 T^{-1}$) είναι ανάλογη της διατομής της στήλης A (L^2) και της διαφοράς δυναμικού $(\Phi_1 - \Phi_2)$, (L), καθώς και μίας σταθεράς αναλογίας K_s ($L T^{-1}$). Επίσης, είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της στήλης L (L).



Σχήμα 6: Πειραματική συσκευή του Darcy.

Η μαθηματική διατύπωση των παραπάνω έχει ως εξής:

$$Q = K_s A (\Phi_1 - \Phi_2) / L = -K_s A (\Phi_2 - \Phi_1) / L \quad (3)$$

όπου:

$$\Phi_i = p_i/\gamma + z_i = p_i/(D_w g) + z_i \quad (4)$$

το ολικό δυναμικό ή υδραυλικό φορτίο στη θέση i ως προς το επίπεδο αναφοράς, (Σχήμα 3). Όπως φαίνεται από την εξίσωση (4), το υδραυλικό φορτίο Φ είναι το άθροισμα του δυναμικού πίεσης p και του δυναμικού βαρύτητας z .

p_i η πίεση του νερού στη θέση i , γ ($M L^{-2} T^{-2}$) το ειδικό βάρος και D_w ($M L^{-3}$) η πυκνότητα του νερού, g ($L T^{-2}$) η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ισχύει $\Phi_1 > \Phi_2$ αλλά $p_1/\gamma < p_2/\gamma$.

Η σχέση (3) γράφεται ακόμη:

$$q = Q/A = -K_s i \quad (5)$$

όπου:

q : η ειδική παροχή ή ταχύτητα Darcy, ($L T^{-1}$) και i η κλίση του υδραυλικού φορτίου ως προς την κατεύθυνση της ροής.

1.2.2. Επέκταση του νόμου του Darcy

Για την περίπτωση ακόρεστου πορώδους μέσου, ο Richards (1931) πρότεινε την παρακάτω τροποποίηση του νόμου του Darcy για μονοδιάστατη

$$q = -K(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -K(\theta) \left\{ \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right\} \quad (6)$$

(κατακόρυφη) ροή:

ή

$$q = -K(h) \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -K(h) \left\{ \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right\} \quad (7)$$

όπου:

K είναι η συνάρτηση υδραυλικής αγωγιμότητας του πορώδους μέσου ($L T^{-1}$) με ανεξάρτητη μεταβλητή την εδαφική υγρασία (θ) ή την τριχοειδή πίεση h (L), (πορώδες μέσο ομογενές, ισότροπο και ισόθερμο).

1.2.3 Γενική διαφορική εξίσωση της ακόρεστης ροής στο χώρο των τριών διαστάσεων

Η επέκταση του νόμου του Darcy στο χώρο των τριών διαστάσεων (καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων) έχει ως εξής:

$$\vec{q} = -K(\theta) \nabla \Phi = -K(\theta) \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \vec{k} \right\} \quad (8)$$

Η εξίσωση (8) μπορεί να προκύψει και απ' ευθείας από τις εξισώσεις των Navier-Stokes ύστερα από κάποια μαθηματική επεξεργασία και μετά από απλουστευτικές παραδοχές που στηρίζονται στον αρχικό νόμο του Darcy (εξίσωση 5).

Αν θεωρηθεί ένας στοιχειώδης όγκος αναφοράς U στο πορώδες μέσο (control volume) που περικλείει μάζα νερού M , τότε η μάζα αυτή ισούται:

$$M = \iiint_U (D_w \theta) dU \quad (9)$$

όπου:

D_w ($M L^{-3}$) η πυκνότητα του νερού και θ , η εδαφική κατ' όγκο υγρασία (L^3/L^3).

Θεωρώντας ότι η μάζα του νερού που εισέρχεται στο στοιχειώδη όγκο ισούται με εκείνη που εξέρχεται απ' αυτόν, (αρχή διατήρησης της μάζας), προκύπτει ότι:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_U (D_w \theta) dU = 0 \quad (10)$$

Με βάση το θεώρημα μεταφοράς του Reynolds προκύπτει ακόμη:

$$\iiint_U \left\{ \frac{\partial(D_w \theta)}{\partial t} + \text{div}(D_w \theta \vec{V}) \right\} dU = 0 \quad (11)$$

Επειδή ο στοιχειώδης όγκος U είναι αυθαίρετος, η εξίσωση (11) γίνεται:

$$\frac{\partial(D_w \theta)}{\partial t} + \text{div}(D_w \theta \vec{V}) = 0 \quad (12)$$

όπου:

$$\vec{V} = \frac{\vec{q}}{\theta}$$

η μέση ταχύτητα ροής δια μέσου των πόρων ($L T^{-1}$).

Για ασυμπύεστο ρευστό ($D_w = ct$), η εξίσωση (12) γράφεται:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div} \vec{q} = -\left\{ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right\} \quad (13)$$

όπου q_x, q_y, q_z οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy κατά x, y και z αντίστοιχα.

Η εξίσωση (13) αποτελεί τη γενική διαφορική εξίσωση της ακόρεστης ροής στο χώρο των τριών διαστάσεων.

1.2.4 Ειδικές μορφές της γενικής διαφορικής εξίσωσης της ακόρεστης ροής

α). Περίπτωση οριζόντιας ροής (εξίσωση Fokker-Plank)

Αν θεωρηθεί η περίπτωση μονοδιάστατης οριζόντιας ροής, τότε η εξίσωση (13) γράφεται (Philip, 1969):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x}$$

Αναπτύσσοντας το δεξιό μέλος, προκύπτει:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] \quad (14)$$

Ορίζοντας την συνάρτηση $D(\theta) = K(\theta) \cdot dh/d\theta$ ως συντελεστή διάχυσης της εδαφικής υγρασίας ($L^2 T^{-1}$), η εξίσωση (14) εντέλει γράφεται:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (15)$$

β). Περίπτωση κατακόρυφης ροής (εξίσωση Richards)

Αν θεωρηθεί η περίπτωση μονοδιάστατης κατακόρυφης ροής, τότε η εξίσωση (13) γράφεται:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q_z}{\partial z}$$

$$q_z = -K(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad \Phi = h + z$$

με κατακόρυφο άξονα z θετικά προσανατολισμένο προς τα πάνω.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left\{ \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right\} \right] \quad (16)$$

Ορίζοντας την συνάρτηση:

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh}$$

ως ειδική υδραυλική χωρητικότητα του πορώδους μέσου (L^{-1}), η εξίσωση (16) γράφεται τελικά (μεταβλητή η πίεση του νερού στους πόρους h):

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left\{ \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right\} \right] \quad (17)$$

Οι εξισώσεις (15) και (17) είναι διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους, παραβολικού τύπου, έντονα μη γραμμικές και αποτελούν τις πλέον χρησιμοποιούμενες εξειδικευμένες μορφές της εξίσωσης (13) για μονοδιάστατη ροή, οριζόντια και κατακόρυφη, αντίστοιχα.

Η αδυναμία ανάπτυξης αναλυτικών λύσεων, εξαιτίας του έντονα μη γραμμικού χαρακτήρα των παραπάνω εξισώσεων, οδήγησε στην δημιουργία αριθμητικών μοντέλων για την επίλυσή τους, όπου ο χώρος ολοκλήρωσης προσδιορίζεται από δεδομένες αρχική και οριακές συνθήκες.

Ειδικά για την εξίσωση (15) υπάρχουν υπολογιστικές δυσχέρειες στην περιοχή του κορεσμού ($\theta = \theta_s$), όπου $D \rightarrow \infty$ επειδή $C \rightarrow 0$ με βάση την εξίσωση $D(\theta) = K(\theta) dh/d\theta = K(\theta)/C(h)$.

Κεφάλαιο 2^ο: Πειραματικό Μέρος

2.1 Περιγραφή Συσκευών

2.1.1 1^η Συσκευή SANDBOX



Φώτο 1 Γενική άποψη της συσκευής 1

Αυτή η συσκευή χρησιμοποιείται για την εφαρμογή ενός εύρους μυζήσεων στα εδαφικά δείγματα από 0 cm στήλης H_2O έως 100 cm στήλης H_2O . Στην εν λόγω συσκευή, τα εξεταζόμενα εδαφικά δείγματα εδράζονται σε κορεσμένο στρώμα συνθετικής άμμου, πάχους 10 cm, ομοιόμορφης διαμέτρου 73 μm . Η άμμος αυτή καλύπτει διάτρητο σωλήνα αποστράγγισης από PVC (Φώτο 2).



Φώτο 2 Διάτρητος σωλήνας αποστράγγισης

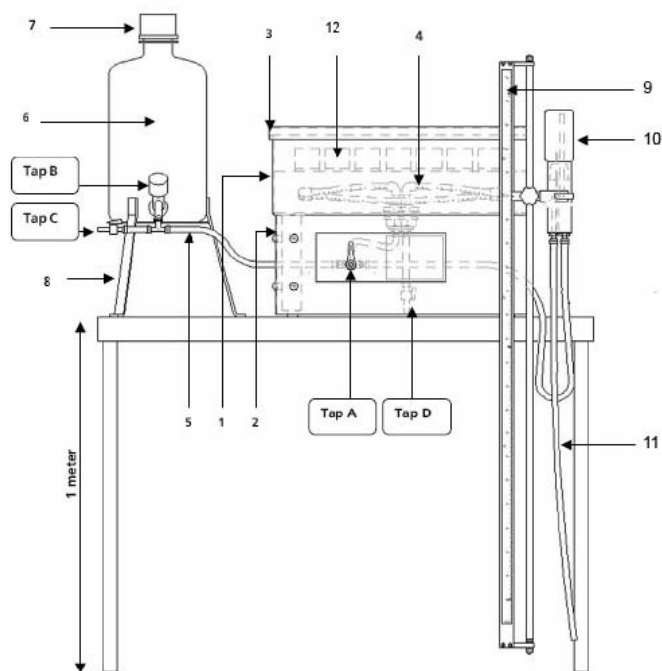
(Βλ. και τεύχος Οδηγιών Χρήσης/Operating Instructions, Eijkelkamp, 2005).

Το στρώμα της συνθετικής άμμου καλύπτεται στη συνέχεια με υφασμάτινο φίλτρο. Η άριστη επαφή του φίλτρου με το στρώμα της συνθετικής άμμου είναι απαραίτητη πριν από τη χρήση της συσκευής. Τα δείγματα εδάφους (σε ειδικούς μεταλλικούς δακτυλίους), τοποθετούνται πάνω στο υφασμάτινο φίλτρο προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις.

Πριν από την έναρξη των μετρήσεων (μύζηση 0 cm στήλης H₂O), η στάθμη 0 του δοχείου Mariotte της συσκευής βρίσκεται στο μέσο περίπου των δακτυλίων που συγκρατούν τα εδαφικά δείγματα (εσωτερική διάμετρος 5,4 cm, ύψος 3 cm). Σημειωτέον ακόμη ότι πάνω από το υφασμάτινο φίλτρο δημιουργείται στρώμα νερού ύψους 1 cm και ότι κατά την έναρξη των μετρήσεων το υδραυλικό κύκλωμα της συσκευής είναι πλήρως κορεσμένο (απομάκρυνση φυσαλλίδων αέρα μέσω ειδικών βανών).

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η πρώτη τιμή της μύζησης στα δείγματα με κατέβασμα του δοχείου Mariotte στην επιθυμητή θέση. Η υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης 0 του δοχείου Mariotte και του μέσου περίπου των δειγμάτων εδάφους καθορίζει το ύψος της επιβαλλόμενης μύζησης h (εύρος 0 ~100 cm). Τα δείγματα ζυγίζονται κατόπιν σε ζυγό ακριβείας, αφού έχει επέλθει κατάσταση ισορροπίας στη δεδομένη τιμή της μύζησης (παύση εκροής από το σωλήνα εξαγωγής).

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται μια γενική διάταξη της συσκευής (Σχήμα 7).



1.Κιβώτιο	8. Βάση φιάλης
2.Βάση κιβωτίου	9. Κανόνας μέτρησης της πίεσης
3.Καπάκι Κιβωτίου	10. Δοχείο Mariotte
4.Σωλήνας αποστράγγισης	11. Σωλήνας εξαγωγής
5.Σωλήνας τροφοδοσίας	12. Εδαφικά δείγματα
6.Φιάλη παροχής	
7.Καπάκι φιάλης	

Σχήμα 7 Γενική διάταξη της συσκευής 1

- **Λεπτομέρειες προετοιμασίας συσκευής 1**

Ο πλαστικός σωλήνας αποστράγγισης μέσα στο κιβώτιο της συσκευής πρέπει να καλυφθεί επίσης με υφασμάτινο φίλτρο πριν δημιουργηθεί σε αυτήν το στρώμα της συνθετικής άμμου, όπως αναφέρθηκε. Διαποτίζεται πρώτα το υφασμάτινο φίλτρο σε αποσταγμένο νερό. Τυλίγεται στη συνέχεια γύρω από τον σωλήνα αποστράγγισης, ώστε κάθε διαδοχικό τύλιγμα να καλύπτει τα 2/3

περίπου του πλάτους του προηγούμενου. Αυτό εξασφαλίζει ότι ο σωλήνας θα καλυφθεί σε όλο του το μήκος από 3 στρώσεις υφασμάτινου φίλτρου.

Η συσκευή 1 τοποθετήθηκε πάνω στον πάγκο του Εργαστηρίου (επίπεδη επιφάνεια, ανεπηρέαστη από κραδασμούς).

Προετοιμάζονται 8 λίτρα απεσταγμένου νερού με βρασμό και πληρώνεται η φιάλη παροχής με αυτό όταν κρυώσει. Προστίθεται θειούχος χαλκός για να μειωθεί η βακτηριακή δραστηριότητα.

Τοποθετείται η φιάλη παροχής στο στήριγμά της αριστερά του κιβωτίου της συσκευής. Το στήριγμα ανεβάζει τη βάση της φιάλης στο ίδιο ύψος με τη βάση του κιβωτίου. Συνδέεται η φιάλη παροχής στη βάνα Α του κιβωτίου με ειδικό πλαστικό σωλήνα στο πίσω μέρος αυτού. Αφήνεται αρχικά η βάνα κλειστή. Η στάθμη του νερού στη φιάλη παροχής δεν πρέπει να βρίσκεται πολύ υψηλότερα από το άνω επίπεδο του κιβωτίου, επειδή μπορεί να προκληθεί απότομη ροή του νερού μέσα στο κιβώτιο. Ανοίγει στη συνέχεια η βάνα Β της φιάλης παροχής καθώς και η βάνα Α στο εμπρός μέρος του κιβωτίου (θέση: supply/τροφοδοσία). Αφήνεται το νερό να τρέξει από τη φιάλη παροχής στο κιβώτιο έως ότου το κιβώτιο πληρωθεί κατά το ήμισυ περίπου με νερό. Η στάθμη του νερού στη φιάλη παροχής δεν πρέπει ποτέ να πέσει κάτω από το επίπεδο του σωλήνα αποστράγγισης μέσα στο κιβώτιο (πρακτικά κάτω από τη στάθμη 4500 ml). Ανοίγει στη συνέχεια η βάνα D στο πίσω μέρος του κιβωτίου και αφήνεται για λίγο το νερό να τρέξει σε ένα γυάλινο δοχείο ώστε να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες του αέρα. Η στάθμη του νερού στο κιβώτιο δεν πρέπει να πέσει ποτέ κάτω από το επίπεδο του σωλήνα αποστράγγισης.

Διαποτίζεται μια ποσότητα συνθετικής άμμου με απιονισμένο νερό και αναδεύεται σταθερά σε ειδική λεκάνη. Στη συνέχεια χύνεται αργά η κορεσμένη με νερό άμμος μέσα στο νερό του κιβωτίου της συσκευής, ενώ ταυτόχρονα το μείγμα αναδεύεται σταθερά ώστε να απομακρυνθεί ο τυχόν παγιδευμένος αέρας. Η άμμος πρέπει τώρα να πιεστεί προς τα τοιχώματα του κιβωτίου και

στις γωνίες, ώστε να καταστεί βέβαιο ότι αυτή δεν περιέχει θύλακες παγιδευμένου αέρα.

Τελειώνει η πλήρωση του κιβωτίου με κορεσμένη άμμο όταν το στρώμα της άμμου βρίσκεται 5 cm πάνω από το υψηλότερο σημείο του πλαστικού σωλήνα αποστράγγισης ή 6,5 cm κάτω από το άνω χείλος του κιβωτίου της συσκευής. Εξομαλύνεται η επιφάνεια της άμμου με ένα χάρακα και αφήνεται να κατακαθίσει. Πάνω από το στρώμα της άμμου τοποθετείται υφασμάτινο φίλτρο και δημιουργείται 1 cm ύψος νερού.



Φότο 4 Εξομάλυνση της επιφάνειας της συνθετικής άμμου με χάρακα

Το μέσο περίπου των δειγμάτων εδάφους χρησιμοποιείται ως το επίπεδο αναφοράς για «μηδενική πίεση». Χρησιμοποιείται μάλιστα ειδικό εξάρτημα της συσκευής για να ρυθμιστεί με ακρίβεια το σημείο 0 στο δοχείο Mariotte.

Στη συνέχεια το κιβώτιο της συσκευής σκεπάζεται για να αποφευχθεί εξάτμιση του περιεχόμενου νερού και αυτή είναι έτοιμη προς χρήση.

2.1.2 2^η Συσκευή SANDBOX



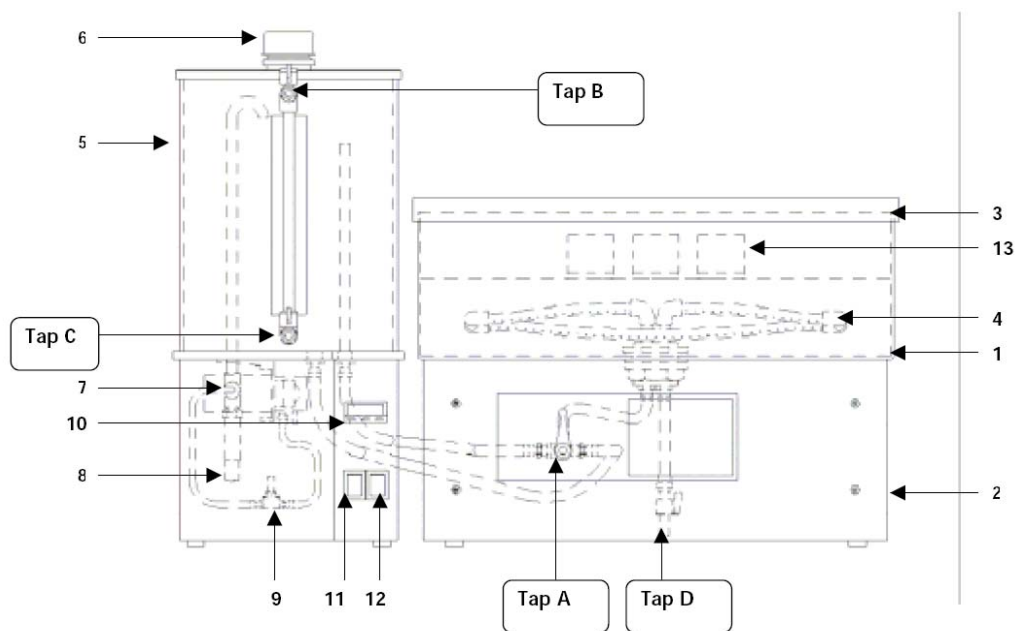
Φώτο 5 Γενική άποψη της συσκευής 2

Αυτή η συσκευή (Φώτο 5) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή ενός εύρους μυζήσεων στα εδαφικά δείγματα από 0 έως 500 cm H₂O. Στην εν λόγω συσκευή τα εξεταζόμενα εδαφικά δείγματα εδράζονται σε στρωματοποιημένο συνθετικό έδαφος δύο στρώσεων: 1. κάτω κορεσμένο στρώμα συνθετικής άμμου (πάχους 8 cm, ομοιόμορφης διαμέτρου 73 μm) 2. πάνω στρώμα καολινίτη (πάχους 1,5 cm). Η στρώση της συνθετικής άμμου καλύπτει και εδώ διάτρητο σωλήνα αποστράγγισης από PVC.

Η συσκευή 2 φαίνεται στο Σχήμα 8. (Βλ. και τεύχος Οδηγιών Χρήσης/Operating Instructions, Eijkelkamp, 2005).

Το στρωματοποιημένο συνθετικό έδαφος των δύο στρώσεων που προαναφέρθηκαν, καλύπτεται και εδώ από υφασμάτινο φίλτρο. Η άριστη επαφή του με το στρώμα του καολινίτη καθίσταται απαραίτητη πριν από την αρχική χρήση της συσκευής. Σημειωτέον ακόμη ότι πάνω από το υφασμάτινο φίλτρο έχει δημιουργηθεί στρώμα νερού ύψους 1 cm. Αρχικά τα δείγματα εδάφους σε ειδικούς μεταλλικούς δακτυλίους (εσωτερική διάμετρος 5,4 cm και ύψος 3 cm),

τοποθετούνται πάνω στο υφασμάτινο φίλτρο προκειμένου να κορεστούν και στη συνέχεια να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Σε αυτή τη συσκευή, αντί του δοχείου Mariotte και του κανόνα μέτρησης της πρώτης συσκευής για την επιβολή των μυζήσεων στα εδαφικά δείγματα, υπάρχει μία ηλεκτρική αντλία.



Σχήμα 8 Γενική διάταξη της συσκευής 2

13. Εδαφικά δείγματα		
1. Κιβώτιο	2. Στήριγμα Κιβωτίου	3. Καπάκι
4. Σωλήνας αποστράγγισης	5. Δοχείο κενού αέρα	6. Καπάκι δοχείου κενού αέρα
7. Αντλία	8. Αισθητήρας Πίεσης	9. Ρυθμιστική βαλβίδα
10. Οθόνη	11. Διακόπτης λειτουργίας συσκευής	12. Διακόπτης αντλίας

- **Λεπτομέρειες προετοιμασίας συσκευής 2**

Αρχικά τοποθετείται η συσκευή πάνω στον εργαστηριακό πάγκο, με τη βάνα A στραμμένη σε ορατή κατεύθυνση. Στη συνέχεια, το δοχείο κενού αέρα που περιλαμβάνει την αντλία, εδράζεται εξ αριστερών του κιβώτιου και η αντλία τροφοδοτείται από πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που δίνει τάση 220-230 Volts. Δίνεται προσοχή προκειμένου όλες οι βάνες της συσκευής (A, B, C, D) να είναι αρχικά κλειστές.

Πριν συναρμολογηθεί η συσκευή, ο σωλήνας αποστράγγισης μέσα στο κιβώτιο πρέπει να καλυφθεί με υφασμάτινο φίλτρο. Για την εφαρμογή του υφάσματος στο σωλήνα γίνονται τα εξής: Αρχικά κόβεται ένα τμήμα υφάσματος μήκους 3,5 μέτρων από το χορηγούμενο ρολό. Στη συνέχεια κόβεται η μια πλευρά του παραπάνω υφάσματος ώστε να δημιουργηθεί ενιαίο κομμάτι πλάτους 12 cm. Για να περιτυλιχθεί ο σωλήνας κόβεται ένα τμήμα μήκους 10 cm σε κάθε άκρη του ρολού ώστε να σχηματιστούν δύο σύνδεσμοι. Διαποτίζεται το υφασμάτινο φίλτρο σε νερό απαλλαγμένο από άλατα (απιονισμένο). Δένεται το υφασμάτινο φίλτρο στο ένα άκρο του σωλήνα αποστράγγισης που εισέρχεται στο εσωτερικό του κιβωτίου της συσκευής. Τυλίγεται το υφασμάτινο φίλτρο γύρω από τον σωλήνα αποστράγγισης ώστε κάθε διαδοχικό τύλιγμα να καλύπτει τα 2/3 περίπου του πλάτους του προηγούμενου. Αυτό εξασφαλίζει ότι ο σωλήνας θα καλυφθεί σε όλο του το μήκος από 3 στρώσεις υφασμάτινου φίλτρου (Φώτο 6).



Φώτο 6 Κάλυψη του διάτρητου σωλήνα αποστράγγισης με υφασμάτινο φίλτρο

Έπειτα γίνεται απόσταξη με βρασμό 10 λίτρων νερού τα οποία στη συνέχεια ψύχονται με αργό ρυθμό έως ότου η θερμοκρασία τους να φτάσει κοντά σε αυτή του εργαστηριακού περιβάλλοντος. Ανοίγεται εν συνεχεία το καπάκι του δοχείου κενού αέρα και πληρώνεται το δοχείο με νερό έως τη μέγιστη ένδειξη. Προστίθεται θειούχος χαλκός ο οποίος αποτρέπει την όποια ανάπτυξη βακτηριδίων στο νερό του δοχείου.

Ακολούθως η βάνα A στρέφεται στη θέση “Supply” προκειμένου να αρχίσει η ροή του νερού από το δοχείο κενού αέρα στο κιβώτιο της συσκευής, έως ότου ο σωλήνας αποστράγγισης καλυφθεί πλήρως με νερό και η στάθμη του νερού στο κιβώτιο της συσκευής φτάσει στο ήμισυ περίπου του συνολικού του ύψους. Η βάνα D στο πίσω μέρος της συσκευής ανοίγεται προκειμένου να τρέξει λίγη ποσότητα νερού. Όταν πλέον δεν υπάρχουν καθόλου φυσαλλίδες μεταξύ του σωλήνα αποστράγγισης και της βάνας D, αυτή κλείνει, καθώς και το καπάκι του δοχείου κενού αέρα.

Σε ό,τι έχει να κάνει με την αντλία, αρχικά ελέγχεται εάν εκείνη βρίσκεται εκτός λειτουργίας, καθώς και εάν οι βάνες A, B, C και D είναι κλειστές και έπειτα, τίθεται σε θέση λειτουργίας ο διακόπτης της αντλίας. Η κόκκινη ενδεικτική λυχνία αρχίζει να αναβοσβήνει και έτσι η συσκευή βρίσκεται στην κατάσταση του αρχικού μενού. Πατώντας τρεις φορές το κουμπί Scroll εμφανίζεται η “AL” παράμετρος η οποία και πρέπει να ρυθμιστεί στα 100 cm στήλης H₂O χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα κουμπιά. Αυτή είναι η στιγμή που η αντλία τίθεται σε λειτουργία και μια μικρή ποσότητα νερού από το κιβώτιο αναρροφάται στο δοχείο κενού αέρα. Όταν πλέον εξαφανιστούν οι όποιες φυσαλλίδες αέρα μεταξύ του κιβωτίου της συσκευής και του δοχείου κενού αέρα, η αντλία πρέπει να κλείσει. Έτσι το υδραυλικό κύκλωμα της συσκευής έρχεται σε κατάσταση κορεσμού.



Φότο 7 Διακόπτες λειτουργίας της συσκευής 2

Σε αυτό το στάδιο προετοιμάζεται μια ποσότητα συνθετικής άμμου και εμποτίζεται με απιονισμένο νερό υπό σταθερή ανάδευση. Πρέπει η αναλογία του νερού εντός της συνθετικής άμμου να είναι σχετικά υψηλή προκειμένου να μπορεί κατόπιν με ευκολία να απλωθεί το μείγμα σε όλη την επιφάνεια του κιβωτίου της συσκευής. Στη συνέχεια προστίθεται η -εμποτισμένη με νερό- συνθετική άμμος στο κιβώτιο της συσκευής, ενώ παράλληλα γίνεται ανάδευση προκειμένου να απομακρυνθεί ο περιεχόμενος αέρας.

Η συνθετική άμμος πιέζεται προς τα πλευρικά τοιχώματα του κιβωτίου και τις γωνίες του, έτσι ώστε να επιτευχθεί η πλήρης απομάκρυνση του αέρα, καθώς και η καλή επαφή μεταξύ της άμμου και του κιβωτίου. Μετά, η βάνα A στρέφεται στη θέση «Supply» και ανοίγεται η βάνα B ώστε η πίεση πάνω από την επιφάνεια του νερού στο δοχείο κενού να επανέλθει στα 0 cm (ατμοσφαιρική πίεση). Έτσι ρέει νερό από το δοχείο κενού διαμέσου της συνθετικής άμμου και συμπαρασύρει τις όποιες εναπομείνουσες φυσαλλίδες αέρα. Τέλος, το πλεονάζον νερό αποχετεύεται ανοίγοντας τη βάνα D. Τα παραπάνω βήματα εκτελέστηκαν με ιδιαίτερη προσοχή, αφού οι όποιες παγιδευμένες ποσότητες αέρα δεν θα μπορούσαν να αφαιρεθούν έπειτα από την τοποθέτηση της στρώσης του καολινίτη.

Αφού η επιφάνεια της άμμου έχει λειανθεί με ένα καθαρό χάρακα και έχει αφεθεί να «ηρεμήσει» για περίπου μία ώρα, προστίθεται η στρώση του

καολινίτη. Σημειωτέον ότι, όπως και στην συσκευή 1, το στρώμα της συνθετικής άμμου έχει καλύψει πλήρως τον σωλήνα αποστράγγισης του κιβωτίου.

Η διαδικασία προετοιμασίας της στρώσης του καολινίτη αρχίζει μισογεμίζοντας μια λεκάνη με αποιονισμένο νερό. Με αργό ρυθμό προστίθεται η σκόνη του καολινίτη, ενώ παράλληλα γίνεται διαρκής ανάδευση. Όταν το μείγμα έχει εμποτιστεί πλήρως και έχει γίνει ομογενές, απλώνεται πάνω από την επιφάνεια της άμμου του κιβωτίου της συσκευής, χρησιμοποιώντας ένα χάρακα. Το τελικό πάχος της στρώσης του καολινίτη είναι περίπου 1,5 εκατοστό. Κατόπιν πιέστηκε η στρώση του καολινίτη προς τα τοιχώματα του δοχείου και ιδίως προς τις ακμές του, προκειμένου να εξασφαλιστεί απόλυτη επαφή. Η επιφάνεια της στρώσης του καολινίτη λειάνθηκε χρησιμοποιώντας ένα καθαρό χάρακα. Πάνω από τη στρώση του καολινίτη τοποθετήθηκε υφασμάτινο φίλτρο και δημιουργήθηκε στρώμα νερού με πάχος 1 εκατοστού.

Αφού διαπιστωθεί ότι η αντλία και οι βάνες A, B, C, και D είναι κλειστές, ότι το καπάκι του δοχείου κενού είναι καλά σφιγμένο και ότι ο παροχέας ρεύματος είναι συνδεδεμένος σε ηλεκτρική πηγή, ενεργοποιείται ο διακόπτης λειτουργίας της συσκευής. Η κόκκινη ενδεικτική λυχνία αναβοσβήνει προκειμένου να ειδοποιηθεί ο χρήστης ότι βρίσκεται στο κεντρικό μενού.

Στη συνέχεια το κιβώτιο της συσκευής σκεπάζεται για να αποφευχθεί εξάτμιση του περιεχόμενου νερού και αυτή είναι έτοιμη προς χρήση.

2.2 Εδαφικά Δείγματα

Εξετάσθηκαν δύο διαφορετικά εδαφικά δείγματα:

(1) Άμμος Θαλάσσης.

Το παραπάνω έδαφος έμεινε σε κοκκώδη μορφή στο φούρνο ξήρανσης του Εργαστηρίου για 24 ώρες και σε θερμοκρασία 105 βαθμών Κελσίου, ώστε να φύγει η φυσική υγρασία και να αρχίσει η διαδικασία του κοσκινίσματος. Με τα κόσκινα του Εργαστηρίου κατέστη δυνατός ο σχηματισμός της κοκκομετρικής καμπύλης του, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4. Για τα πειράματα στις συσκευές Sanbox χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταλλικοί δακτύλιοι στους οποίους τοποθετήθηκαν αντίστοιχα εδαφικά δείγματα άμμου, που αφέθηκαν αρχικά να κορεστούν.

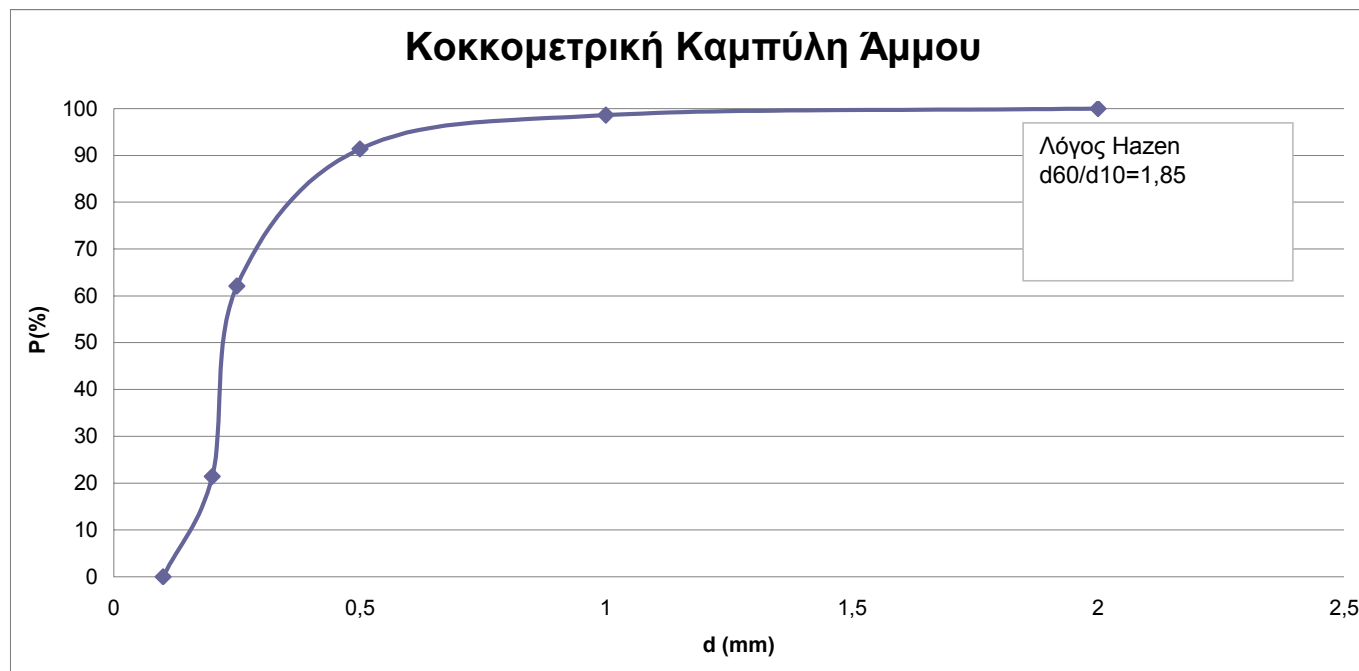
(2) Αργιλικό έδαφος.

Ο χαρακτηρισμός του σαν αργιλικό έδαφος δεν προέκυψε από ανάλυση, αλλά από το χρώμα του και το βαθμό συνοχής του. Το έδαφος αυτό έχει ανοιχτό κοκκινωπό χρώμα και πολύ υψηλό βαθμό συμπίεσης (αδιατάρακτο δείγμα, συλλεγόν μέσω συσκευής Auger).

Για τα πειράματα στις συσκευές Sanbox χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταλλικοί δακτύλιοι της συσκευής Auger, στους οποίους είχαν συλλεγεί αντίστοιχα εδαφικά δείγματα της αργίλου, που αρχικά ξηράθηκαν στον κλίβανο και στη συνέχεια αφέθηκαν να κορεστούν.

Κοκκομετρική Καμπύλη Άμμου				
		Διερχόμενο Ποσοστό	Παραμένον βάρος	Διερχόμενο βάρος
2,00	mm	100,00%	0,00	747,70
1,00	mm	98,60%	10,50	737,20
500,00	μm	91,40%	53,80	683,40
250,00	μm	62,10%	219,20	464,20
200,00	μm	21,40%	304,10	160,10
100,00	μm	0,00%	159,90	0,20
50,00	μm	0,00%	0,20	0,00
20,00	μm	0,00%	0,00	0,00
			747,70	

$$D_b = \frac{747,7}{500} = 1,5 \text{ g/cm}^3$$



p=0,43 (πορώδες)
(εξ. 5)

2.3 Καταγραφή πειραμάτων

2.3.1 Πειράματα με την 1^η συσκευή



Φότο 8 Μέτρηση της μύζησης για τα αμμώδη εδαφικά δείγματα

Έγιναν μετρήσεις για τυποποιημένες (προτεινόμενες από τον κατασκευαστή) τιμές της μύζησης 2.5 cm, 10 cm, 31.6 cm, 63.1 cm, και 88.1 cm στήλης H₂O για τα δύο αμμώδη εδαφικά δείγματα, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί.

Στην πρώτη και δεύτερη στήλη του Πίνακα αυτού καταγράφεται ο αύξων αριθμός του μεταλλικού δακτυλίου (διάμετρος 5,4 cm και ύψος 3 cm) που περιέχει το εδαφικό δείγμα, στην τρίτη στήλη η τιμή της εφαρμοζόμενης μύζησης σε cm, στην 4η το ζυγισμένο συνολικό βάρος του δακτυλίου με το δείγμα σε κατάσταση ισορροπίας (παύση εκροής νερού), στην 5^η το συνολικό ξηρό βάρος του δακτυλίου με το δείγμα, στην 6^η το απόβαρο του δακτυλίου, στην 7^η το προκύπτον με αφαίρεση των τιμών των στηλών 4 και 5 βάρος του περιεχόμενου εδαφικού νερού, στην 8^η το προκύπτον ξηρό βάρος εδάφους με αφαίρεση των τιμών των στηλών 5 και 6, στην 9^η στήλη η περιεχόμενη κατά βάρος εδ. υγρασία με διαίρεση των τιμών των στηλών 7 και 8, στην 10^η στήλη αναγράφεται η φαινόμενη ξηρή πυκνότητα του κάθε εδαφικού δείγματος και τέλος στην 11^η στήλη προκύπτει η κατ' όγκο περιεχόμενη εδαφική υγρασία με πολλαπλασιασμό των τιμών των στηλών 9 και 10.

Πίνακας 1.

Άμμος										
Αριθμός δείγματος	Αριθμός Δακτυλίου	σπιστήλης νερού	Βάρος (g)					V=Όγκος δείγματος=62,7 cm ³		
			Υγρό Βάρος (δείγμα, δακτύλιος, ύφασμα, λάστιχο) A	Ξηρό Βάρος (δείγμα, δακτύλιος, ύφασμα, λάστιχο) B	Βάρος δακτυλίου, υφάσματος, ελαστικού Γ	Βάρος νερού εδάφους Δ=A-B	Βάρος ξηρού εδάφους Ε=B-Γ	$\theta_m = \Delta/E$	D_b (g/cm ³)	$\theta_v = \theta_m \cdot \rho_b$
1	1	1,0	188,25	161,25	67,20	27,00	94,05	0,287	1,50	0,430
2	2		187,80	160,80	66,75	27,00	94,05	0,287	1,50	0,430
1	1	2,5	188,25	161,25	67,20	27,00	94,05	0,287	1,50	0,430
2	2		187,80	160,80	66,75	27,00	94,05	0,287	1,50	0,430
1	1	10,0	188,25	161,25	67,20	27,00	94,05	0,287	1,50	0,430
2	2		187,80	160,80	66,75	27,00	94,05	0,287	1,50	0,430
1	1	31,6	185,25	161,25	67,20	24,00	94,05	0,260	1,50	0,390
2	2		184,80	160,80	66,75	24,00	94,05	0,260	1,50	0,390
1	1	63,1	177,23	161,25	67,20	15,98	94,05	0,170	1,50	0,255
2	2		175,59	160,80	66,75	14,79	94,05	0,157	1,50	0,236
1	1	88,1	175,69	161,25	67,20	14,44	94,05	0,154	1,50	0,230
2	2		173,93	160,80	66,75	13,13	94,05	0,140	1,50	0,209
1	1	100,0	168,20	161,25	67,20	6,95	94,05	0,074	1,50	0,111 *
2	2		166,80	160,80	66,75	6,00	94,05	0,064	1,50	0,096 *
1	1	200,0	166,23	161,25	67,20	4,98	94,05	0,053	1,50	0,080 *
2	2		165,10	160,80	66,75	4,30	94,05	0,046	1,50	0,070 *
(*) : από συσκευή 2										

2.3.2 Πειράματα με την 2^η συσκευή



Φώτο 9 Μέτρηση της μύζησης για αργιλικά εδαφικά δείγματα

Έγιναν μετρήσεις για τιμές της μύζησης 100 cm και 200 cm στήλης H₂O, στα δείγματα της άμμου που μεταφέρθηκαν από την 1^η συσκευή (Πίνακας 1). Επίσης έγιναν μετρήσεις για τιμές της μύζησης 1 cm, 2.5 cm, 10 cm, 31.6 cm, 63.1 cm, 88.1 cm, 100 cm, 200 cm στήλης H₂O για τα δύο αργιλικά εδαφικά δείγματα, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 2 που ακολουθεί.

Στην πρώτη και δεύτερη στήλη του Πίνακα αυτού καταγράφεται ο αύξων αριθμός του μεταλλικού δακτυλίου (διάμετρος 5,4 cm και ύψος 3 cm) που περιέχει το εδαφικό δείγμα, στην τρίτη στήλη η τιμή της εφαρμοζόμενης μύζησης σε cm, στην 4^η το ζυγισμένο συνολικό βάρος του δακτυλίου με το δείγμα σε κατάσταση ισορροπίας (παύση εκροής νερού), στην 5^η το συνολικό ξηρό βάρος του δακτυλίου με το δείγμα, στην 6^η το απόβαρο του δακτυλίου, στην 7^η το προκύπτουν με αφαίρεση των τιμών των στηλών 4 και 5 βάρος του περιεχόμενου εδαφικού νερού, στην 8^η το προκύπτουν ξηρό βάρος εδάφους με αφαίρεση των τιμών των στηλών 5 και 6, στην 9^η στήλη η περιεχόμενη κατά βάρος εδ. υγρασία με διαίρεση των τιμών των στηλών 7 και 8, στην 10^η στήλη αναγράφεται η φαινόμενη ξηρή πυκνότητα του κάθε εδαφικού δείγματος και τέλος στην 11^η στήλη προκύπτει η κατ' όγκο περιεχόμενη εδαφική υγρασία με πολλαπλασιασμό των τιμών των στηλών 9 και 10.

Πίνακας 2

Αργιλος										
Αριθμός δείγματος	Αριθμός Δακτυλίου	σπ στήλης νερού	Βάρος (g)					V=Όγκος δείγματος=62,7 cm ³		
			Υγρό Βάρος (δείγμα, δακτύλιος, ύφασμα, λάστιχο) A	Ξηρό Βάρος (δείγμα, δακτύλιος, ύφασμα, λάστιχο) B	Βάρος δακτυλίου, υφάσματος, ελαστικού Γ	Βάρος νερού εδάφους Δ=A-B	Βάρος ξηρού εδάφους Ε=B-Γ	$\theta_m = \Delta/E$	D _b (g/cm ³)	$\theta_v = \theta_m \cdot \rho_b$
1	1	1,0	207,72	176,60	67,20	31,12	109,40	0,284	1,74	0,495
2	2		204,62	174,00	66,75	30,62	107,25	0,286	1,74	0,497
1	1	2,5	207,10	176,60	67,20	30,50	109,40	0,279	1,74	0,485
2	2		204,57	174,00	66,75	30,57	107,25	0,285	1,74	0,496
1	1	10,0	206,85	176,60	67,20	30,25	109,40	0,277	1,74	0,481
2	2		203,95	174,00	66,75	29,95	107,25	0,279	1,74	0,486
1	1	31,6	206,55	176,60	67,20	29,95	109,40	0,274	1,74	0,476
2	2		199,52	174,00	66,75	25,52	107,25	0,238	1,74	0,414
1	1	63,1	205,18	176,60	67,20	28,58	109,40	0,261	1,74	0,455
2	2		196,80	174,00	66,75	22,80	107,25	0,213	1,74	0,370
1	1	88,1	204,50	176,60	67,20	27,90	109,40	0,255	1,74	0,444
2	2		196,50	174,00	66,75	22,50	107,25	0,210	1,74	0,365
1	1	100,0	204,31	176,60	67,20	27,71	109,40	0,253	1,74	0,441
2	2		196,36	174,00	66,75	22,36	107,25	0,208	1,74	0,363
1	1	200,0	200,00	176,60	67,20	23,40	109,40	0,214	1,74	0,372
2	2		190,00	174,00	66,75	16,00	107,25	0,149	1,74	0,260

Κεφάλαιο 3^ο: Αποτελέσματα & Συμπεράσματα

3.1 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας φαίνονται στο Σχήμα 5 σε καθεστώς στράγγισης. Σημειωτέον ότι με τις εν λόγω συσκευές προσδιορίζεται από τις καμπύλες $\theta(h)$, κυρίως αυτή της στράγγισης και όχι της διήθησης. Το φαινόμενο της υστέρησης που επηρεάζει τη συνάρτηση $\theta(h)$ (κεφάλαιο 1) μπορεί να διερευνηθεί από τη συσκευή 2 που είναι κλειστού υδραυλικού κυκλώματος σε αντίθεση με την συσκευή 1, αν καταστεί δυνατό να αντιμετωπιστεί επιτυχώς το πρόβλημα της παγίδευσης φουσαλίδων αέρα στο στρωματοποιημένο έδαφος του κιβωτίου, καθώς και στο υδραυλικό κύκλωμα.

Τα πειραματικά ζεύγη τιμών ($\theta-h$) εμφανίζονται με διαφορετικά σύμβολα για κάθε δείγμα εδάφους (δηλαδή μεταλλικοί δακτύλιοι με άμμο 1,2 και μεταλλικοί δακτύλιοι με άργιλο 1,2). Σε κάθε περίπτωση εμφανίζεται και η καμπύλη προσαρμογής (εξ. VG) με τις παραμέτρους προσαρμογής στον συνημμένο πίνακα. Σημειωτέον ότι για την εξαγωγή των παραμέτρων αυτών (μη γραμμική παλινδρόμηση) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή από τη διδακτορική διατριβή του επιβλέποντος (Giakoumakis, 1987).

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα πειραματικά ζεύγη ($\theta-h$) για την άμμο περιγράφουν μία και μοναδική καμπύλη εν αντιθέσει με αυτά της αργίλου. Η διαφοροποίηση αυτή μπορεί να οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

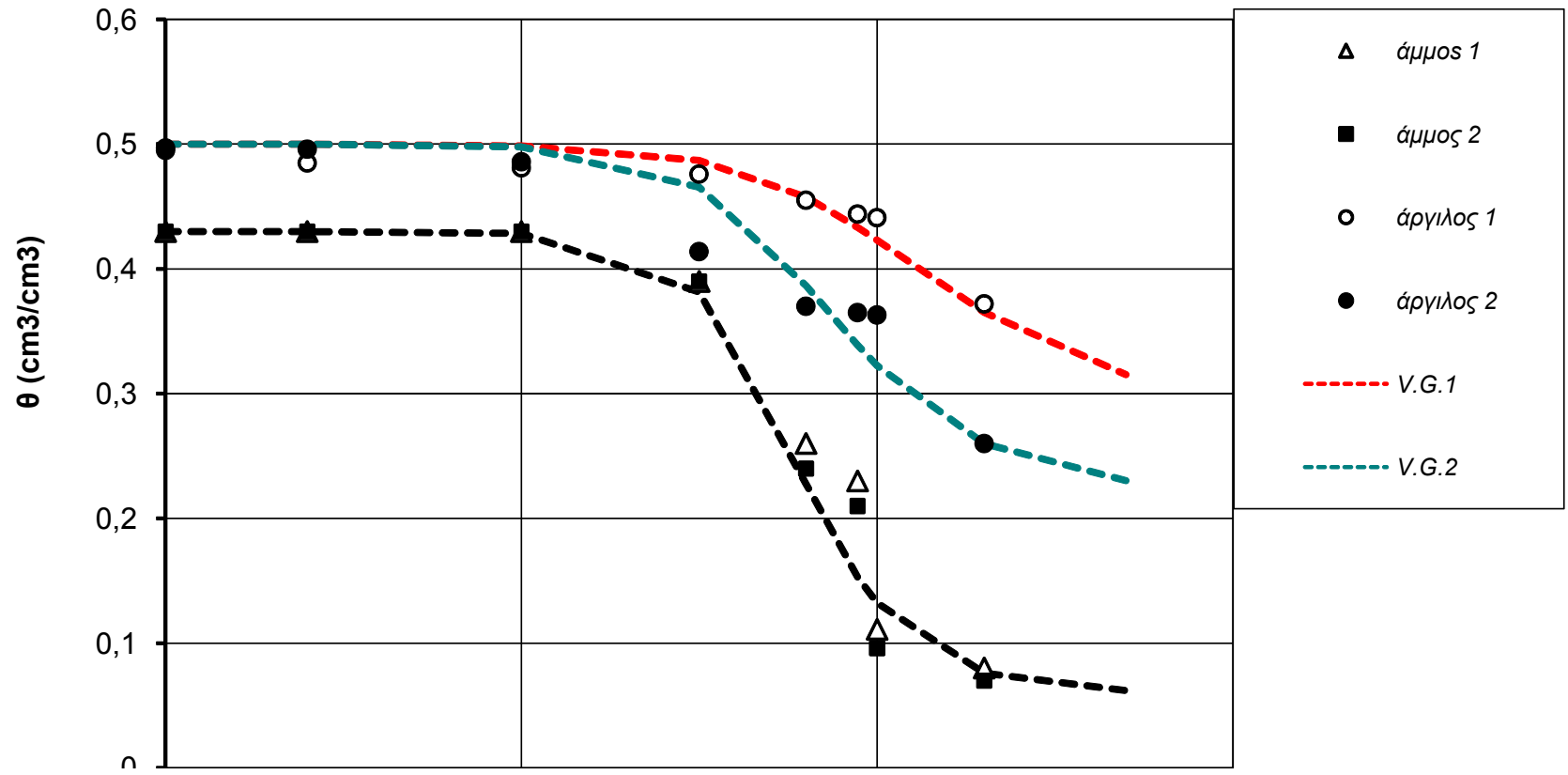
1. στην ομοιόμορφη κατανομή των πόρων της άμμου εν αντιθέσει με την ανομοιόμορφη αυτών της αργίλου (αδιατάρακτα δείγματα).
2. υψηλό βαθμό συμπύκνωσης των δειγμάτων της αργίλου σε αντίθεση με αυτών της άμμου.

3. στον διαφορετικό τρόπο παρασκευής των εδαφικών δειγμάτων (κοκκώδης άμμος, συμπαγής αδιατάρακτη άργιλος).

Αξίζει ακόμη να υπενθυμίσουμε ότι -σε ό,τι αφορά στα ζεύγη των πειραματικών τιμών (θ-h)- πρόκειται για αποτελέσματα «συνθηκών ισορροπίας» και στις δύο συσκευές. Δηλαδή για κάθε τιμή της επιβαλλόμενης μύζησης, η υγρασία στο κάθε εδαφικό δείγμα μετριόταν με ζύγισμα όταν η εκροή του νερού από το δείγμα σταματούσε.

Καμπύλες μύζησης - εδαφικής υγρασίας

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a|h|)^n]^m} + \theta_r$$



3.2 Συμπεράσματα

Οι χρησιμοποιηθείσες πειραματικές συσκευές SANDBOX για την εξαγωγή πειραματικών καμπυλών μύζησης- εδαφικής υγρασίας σε εδαφικά δείγματα σε καθεστώς στράγγισης, αν και περίπλοκες από πλευράς προετοιμασίας των συνθετικών στρώσεων και του υδραυλικού κορεσμού αυτών, αποτελούν μία αξιόπιστη εναλλακτική λύση στις ηλεκτρονικά περίπλοκες και επικίνδυνες συσκευές γ- ακτινοβολίας και νετρονίων.

Σημειωτέον ότι οι συσκευές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην Ελλάδα. Τα πλέον αξιοσημείωτα συμπεράσματα της εργασίας αυτής είναι:

1. Η υδραυλική μετάδοση της μύζησης δεν εξαρτάται από το είδος των συνθετικών στρώσεων στις δύο συσκευές αλλά από τον πλήρη κορεσμό ή μη αυτών, καθώς και του υδραυλικού κυκλώματος μετάδοσης της πίεσης.

2. Τα δύο δείγματα άμμου στους αντίστοιχους δακτυλίους – υποδοχείς συγκράτησης αυτών στις συσκευές Sandbox, περιέχουν κατ' ουσία ομοιόμορφο έδαφος (μία και μοναδική καμπύλη $\theta(h)$).

3. Σχετικά με το αργιλικό έδαφος, αυτό εξετάστηκε μονάχα στην δεύτερη συσκευή Sandbox λόγω της δυνατότητας επιβολής σε αυτήν μεγαλύτερης τιμής της μύζησης (έως 500cm έναντι μόλις έως 100cm στην πρώτη συσκευή). Λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής των πόρων του εδάφους αυτού, καθώς και του βαθμού συμπίεσής του λόγω της τεχνητής λήψης του στο ύπαιθρο, προέκυψαν δύο διαφορετικές καμπύλες $\theta(h)$ που αντιστοιχούν στα δείγματα των δακτυλίων 1 και 2 αντίστοιχα.

Δεν κατέστη δυνατή η πλήρης εξαγωγή της καμπύλης $\theta-h$ σε όλη τη γκάμα των τιμών της μύζησης (δηλαδή έως 500 cm H₂O), λόγω εμφάνισης φυσαλλίδων αέρα στο υδραυλικό κύκλωμα και μη δυνατότητας σταθεροποίησης της επιβαλλόμενης μύζησης για τιμές άνω των 200 cm H₂O. Αυτό δείχνει ότι – τουλάχιστον για αδιατάρακτο αργιλικό έδαφος, όπως και για τη διερεύνηση του

φαινομένου της υστέρησης της συνάρτησης $\theta(h)$ – η συσκευή Sandbox παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς.

Βιβλιογραφία

- 1) Brooks R.M. and A.T. Corey, 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper 3, Colorado State Univ., Fort Collins.
- 2) Hillel, D., 1980. Fundamentals of soil physics. Acad. Press, New York.
- 3) Gardner W.R., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4): 228-232.
- 4) Giakoumakis S., 1987. Effets de la température sur les caractéristiques hydrodynamiques de deux sols non-saturés, indéformables. Contribution à l'étude de la propagation du gel. PhD Thesis, I.N.P.Grenoble.
- 5) Giakoumakis S. and G. Tsakiris, 1991. Eliminating the effect of temperature from unsaturated soil hydraulic functions. *Journal of Hydrology*, 129, pp.109-125.
- 6) Giakoumakis S. and G. Tsakiris, 1999. Quick estimation of hydraulic conductivity in unsaturated sandy loam soil. *Irrigation and Drainage Systems*, 13, pp.349-359.
- 7) Philip J.R., 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosc.*, No 5, Academic Press, New York, pp. 215-296.
- 8) Richards L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, No 1, pp. 318-333.
- 9). Van Genuchten M.T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society, Am. Journal, vol. 44, 1980, pp. 892-897.
- 10). Eijkelkamp Agrisearch Equipment, 2005. Operating Instructions Sanbox and Sand/Kaolin Box, The Netherlands.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Συσκευή Συλλογής Εδαφικών Δειγμάτων- Soil Core Sampler (Auger)



