# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ. ΧΡΗΣΗ ΞΕΧΩΡΙΣΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΥΠΟΘΕΣΗ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΟΓΚΟΥ

**Μ. Μπαρδάνης[1] και Μ. Καββαδάς[2]**
**[1]Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ**
**[2]Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ**
**Τομέας Γεωτεχνικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ**
**e-mail: bardanis@mail.ntua.gr**

Συμβατική, εμπορικά διαθέσιμη, εργαστηριακή συσκευή προσδιορισμού χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα (θάλαμος μύζησης) χρησιμοποιήθηκε για τον πλήρη προσδιορισμό τέτοιων καμπυλών σε εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο. Αντίθετα από την παραδοχή σταθερού όγκου που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν έμμεσα ο λόγος κενών και ο βαθμός κορεσμού εκτός από το ποσοστό υγρασίας για κάθε τιμή της μύζησης που εφαρμόζεται στο ίδιο δοκίμιο, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά δοκίμια για κάθε τιμή της μύζησης με μέτρηση αυτών των μεγεθών. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιδεικνύουν τα προβλήματα από την παραδοχή σταθερού όγκου με χρήση ενός δοκιμίου. Προϋπόθεση ωστόσο για την εφαρμογή της μεθόδου χρήσης πολλών δοκιμίων αποτελεί η ικανότητα προαπαρασκευής όμοιων δοκιμίων (προκειμένου για αναζυμωμένα εδάφη) ή η ομοιογένεια του φυσικού υλικού εντός του δοκιμίου που έχει αποσπαστεί από το ύπαιθρο.

*Λέξεις-Κλειδιά: έδαφος, μη κορεσμένο, πίεση, μύζηση, χαρακτηριστική καμπύλη.*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει ενταθεί διεθνώς η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών, των εδαφικών υλικών δηλαδή που μέσα στα κενά τους συνυπάρχει αέρας και νερό (πλήρως κορεσμένα είναι τα εδαφικά υλικά που τα κενά τους είναι γεμάτα με νερό). Οι κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας μάλιστα καθιστούν για τους περισσότερους μήνες του χρόνου τα εδαφικά υλικά στην επιφάνεια του εδάφους μη κορεσμένα ακόμα και στις αναλογικά πιο υγρές και ψυχρές περιοχές της χώρας. Η ιδιαιτερότητα αυτή επιβάλλει τη μελέτη της συμπεριφοράς τους και στην Ελλάδα.

Οι μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών όταν είναι μη κορεσμένα μεταβάλλονται ανάλογα με το μέγεθος του βαθμού κορεσμού σε σχέση και με την αρνητική πίεση πόρων/μύζηση που αναπτύσσεται. Η διατμητική αντοχή όλων των εδαφικών υλικών αυξάνεται μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα (την αρνητική πίεση πόρων μέχρι την οποία το εδαφικό υλικό παραμένει πλήρως κορεσμένο). Για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες από αυτήν η διατμητική αντοχή τους μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, προκειμένου για αργιλικά εδαφικά υλικά, ή να μειωθεί, προκειμένου για κοκκώδη εδαφικά υλικά, ή τέλος να σταθεροποιηθεί, προκειμένου για εδαφικά υλικά ενδιάμεσης κοκκομετρικής διαβάθμισης –ανάλογα πάντοτε και με την ορυκτολογική σύσταση. Σε ό,τι αφορά τη συμπιεστότητα, ανάλογα με το επίπεδο τάσης υπό την οποία συμβαίνει η διαδρομή ξήρανσης-ύγρανσης τα εδαφικά υλικά σε διαδρομή ξήρανσης μπορούν να συρρικνώνονται ή να διογκώνονται κατά μέγεθος ανάλογο της αναπτυσσόμενης μύζησης και της φύσης τους. Κοκκώδη εδαφικά υλικά γενικά έχουν μικρές μεταβολές όγκου και ακόμα και υπό αρκετά μεγάλες πιέσεις, ξήρανση πρέπει να αναμένεται ότι προκαλεί μείωση του ολικού τους όγκου.

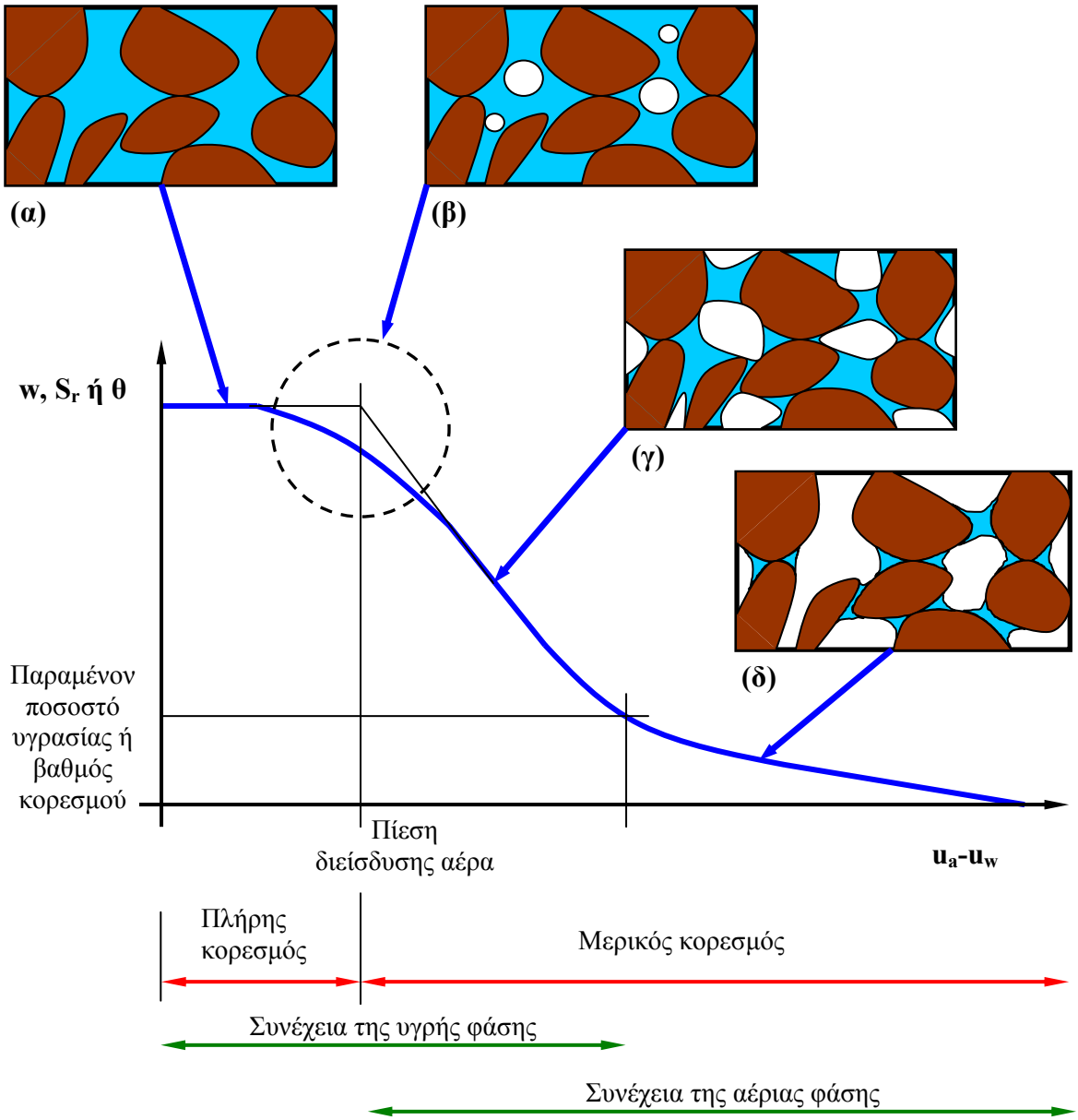
Αντίθετα, για αργιλικά εδαφικά υλικά ξήρανση υπό μικρές πιέσεις (ανάλογα με τη φύση του υλικού και την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισής του) οδηγεί σε συρρίκνωση, ενώ ξήρανση υπό μεγάλες πιέσεις μπορεί να οδηγήσει σε διόγκωση [1, 2]. Τα αντίθετα αποτελέσματα αναμένονται για διαδρομές ύγρανσης υπό το ίδιο καθεστώς τάσεων. Σε ό,τι αφορά το συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό η μείωση του βαθμού κορεσμού οδηγεί σε μείωσή του κατά αρκετές τάξεις μεγέθους σε ό,τι αφορά τη μικροδιαπερατότητα του εδαφικού υλικού, αλλά στη συνέχεια εάν το εδαφικό υλικό συρρικνώνεται τόσο ώστε να ρηγματώνεται λόγω της συρρίκνωσής του, οδηγεί σε ραγδαία αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό κατά αρκετές τάξεις μεγέθους.

Βασική ιδιότητα για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών είναι η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Αυτή είναι η καμπύλη που δείχνει τον τρόπο με τον οποίο χάνεται προοδευτικά νερό μέσα από τους πόρους του εδάφους συναρτήσει της αναπτυσσόμενης αρνητικής πίεσης στο νερό των πόρων και οριοθετεί τις χαρακτηριστικές περιοχές κατά την απώλεια ύδατος (Σχήμα 1). Για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιείται η μέθοδος μετατόπισης άξονα όπως εφαρμόζεται σε ειδική εργαστηριακή διάταξη. Η χρήση των διατάξεων αυτών όπως διατίθενται εμπορικώς επιτρέπει τον υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας στο ίδιο δοκίμιο για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης αλλά όχι και τον υπολογισμό του λόγου κενών. Ο υπολογισμός αυτός (με ρεαλιστικές παραδοχές) επιβάλει την καταστροφή του δοκιμίου για κάθε τιμή της αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης.

## 2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ

Αρχικά ο όρος «χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού» περιοριζόταν στην καμπύλη που συσχετίζει το ποσοστό υγρασίας σε όρους μάζας w ($=m_w/m_s$, όπου $m_w$ η μάζα του περιεχόμενου στο έδαφος νερό και $m_s$ η μάζα της στερεάς φάσης), με τη μύζηση, s (απαντάται και με το σύμβολο ψ ή και $u_a$-$u_w$). Για τις ανάγκες υπολογισμών ροής διά μέσω του εδάφους ωστόσο χρειαζόταν το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας θ ($= V_w/V$, όπου $V_w$ ο όγκος του νερού των πόρων και V ο ολικός όγκος), το οποίο προϋποθέτει την γνώση του ολικού όγκου του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής για κάθε τιμή της μύζησης. Προκειμένου για κοκκώδη και ιλυώδη εδάφη μπορεί να υποτεθεί χωρίς να υπεισέρχεται σημαντικό σφάλμα ότι ο συνολικός όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός κατά τις μεταβολές της μύζησης (τουλάχιστον εντός του εύρους τιμών που παρατηρούνται τα δύο σημεία καμπής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού). Κατά την χρήση λοιπόν εργαστηριακών συσκευών προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού γίνεται συχνά η «παραδοχή σταθερού όγκου», η παραδοχή δηλαδή ότι ο όγκος του δοκιμίου του εδάφους εντός της συσκευής παραμένει σταθερός παρά την αύξηση της μύζησης, οπότε αν μετρούμε το βάρος του νερού που εξέρχεται από το δοκίμιο κατά την αύξηση της μύζησης και υπολογίζουμε από αυτό τον όγκο του, μπορούμε να υπολογίσουμε το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας για κάθε τιμή της μύζησης όπως εφαρμόζεται σε ένα και μόνο δοκίμιο. Η παραδοχή αυτή έχει δυστυχώς επεκταθεί συχνά και σε αργιλικά εδαφικά υλικά, στα οποία ο ολικός όγκος του δοκιμίου με την αύξηση της μύζησης δεν παραμένει σταθερός. Προκειμένου για τέτοια εδαφικά υλικά πρέπει να μετρείται ο ολικός όγκος του εδαφικού υλικού για κάθε τιμή της μύζησης, το οποίο συχνά απαιτεί ιδιαίτερες εργαστηριακές διατάξεις αν αυτές οι μετρήσεις γίνονται στο ίδιο δοκίμιο. Εναλλακτικά, εάν μπορεί να εξασφαλιστεί η παρασκευή όμοιων δοκιμίων (προκειμένου για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά) ή η απότμηση δοκιμίων από ένα ομοιογενές δείγμα φυσικού υλικού, τότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μία

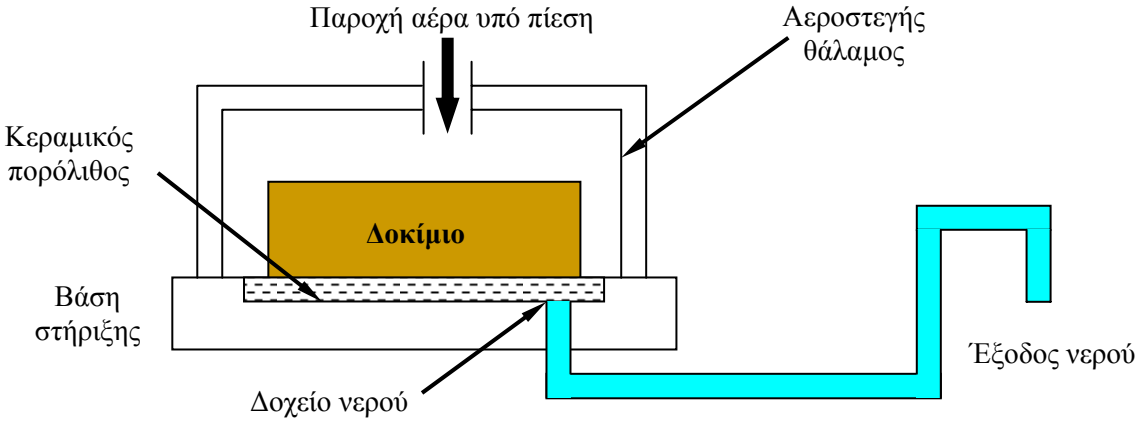
καταστροφική μέθοδος υπολογισμού του ολικού όγκου του δοκιμίου μετά από την εφαρμογή κάθε τιμής της μύζησης, με κάθε τιμή να εφαρμόζεται σε διαφορετικό δοκίμιο. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε και κατά την χρήση της εργαστηριακής διάταξης του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής Ε.Μ.Π.




Σχήμα 1. Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με τα ονομαστικά όρια πλήρους και μερικού κορεσμού, τα όρια της συνέχειας της κάθε ρευστής φάσης και την ποιοτική απεικόνιση της συνύπαρξης στερεάς, υγρής και αέριας φάσης: (α) πλήρης κορεσμός, (β) μερικός κορεσμός με την αέρια φάση σε μορφή φυσαλίδων, (γ) μερικός κορεσμός με την υγρή και την αέρια φάση να είναι ταυτόχρονα συνεχείς, και (δ) μερικός κορεσμός με την υγρή φάση να έχει απωλέσει τη συνέχειά της.

## 3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η εργαστηριακή διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού βασίζεται στην μέθοδο μετατόπισης άξονα. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει ότι πίεση αέρα που εφαρμόζεται στις ρευστές φάσεις ενός εδάφους προκαλεί την ίδια αύξηση και στην τιμή της πίεσης του αέρα των πόρων και στην τιμή της πίεσης του νερού των πόρων του εδάφους και επίσης ότι η ίδια διαφορά μεταξύ πίεσης αέρα και πίεσης του νερού των πόρων είναι αυτή που προκαλεί τα ίδια αποτελέσματα στη μηχανική συμπεριφορά και όχι οι απόλυτες τιμές των δύο μεγεθών. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται σε σκαρίφημα η αρχή της μεθόδου με την διάταξη όπως υλοποιήθηκε. Δοκίμιο του εδαφικού υλικού αφού παρασκευαστεί στις επιθυμητές αρχικές συνθήκες ή αποκοπεί από δείγμα φυσικού υλικού τοποθετείται πάνω σε κεραμικό πορόλιθο πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar που βρίσκεται εντός θαλάμου (θάλαμος μύζησης), που στη συνέχεια σφραγίζεται αεροστεγώς. Ο κεραμικός πορόλιθος επικοινωνεί με την εξωτερική πλευρά του θαλάμου και εφόσον η παρεχόμενη πίεση αέρα παραμένει μικρότερη από την πίεση διείσδυσης αέρα του πορολίθου, αυτός παραμένει πλήρως κορεσμένος, οπότε το νερό που εξέρχεται είναι μόνον νερό του δοκιμίου του εδαφικού υλικού. Εάν στο θάλαμο έχει τοποθετηθεί μόνο ένα δοκίμιο, τότε μπορεί να μετρείται η ποσότητα του νερού που εξέρχεται, οπότε ζυγίζοντας το δοκίμιο στην αρχή και στο τέλος της αλληλουχίας εφαρμοζόμενων τιμών μύζησης προσδιορίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του υλικού από μόνο ένα δοκίμιο σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης (w-s). Ακόμα και αν το μόνο μέγεθος που ενδιαφέρει η εξέλιξη του με τη μύζηση ωστόσο είναι το ποσοστό υγρασίας, η διαδικασία αυτή δεν προσφέρεται γιατί λόγω της μεγάλης διάρκειας των δοκιμών αυτών είναι προτιμότερο να τοποθετούνται δοκίμια από περισσότερα εδαφικά υλικά στην συσκευή οπότε τότε δεν μπορεί να γνωρίζει κάποιος πως κατανέμεται ανά δοκίμιο εντός του θαλάμου το εξερχόμενο νερό αφού ο σωλήνας μεταφέρει το νερό που περνάει μέσα από τον πορόλιθο από όλα τα δοκίμια που έχουν τοποθετηθεί πάνω σε αυτόν. Ακόμα και πάνω σε έναν μόνο πορόλιθο μπορούν να τοποθετηθούν έως επτά (7) δοκίμια αρκετά μεγάλων διαστάσεων όπως φαίνεται και στη φωτογραφία του Σχήματος 3. Στο διατιθέμενο θάλαμο μύζησης μπορούν να τοποθετηθούν ακόμα και τρεις πορόλιθοι επιτρέποντας την εισαγωγή 21 ή και παραπάνω δοκιμίων.




Σχήμα 2. Σκαρίφημα εργαστηριακής διάταξης προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους–νερού με εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης άξονα σε θάλαμο μύζησης.

(α) (β)

Σχήμα 3. Ο θάλαμος μύζησης του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής ΕΜΠ (κατασκευής SoilMoisture Inc.), α) ανοικτός με έναν πορόλιθο και το σωλήνα σύνδεσης με το εξωτερικό του θαλάμου συνδεδεμένο, και β) κλειστός και ασφαλισμένος με τον σωλήνα διοχέτευσης αέρα υπό πίεση να διακρίνεται στην μπροστινή πλευρά του.

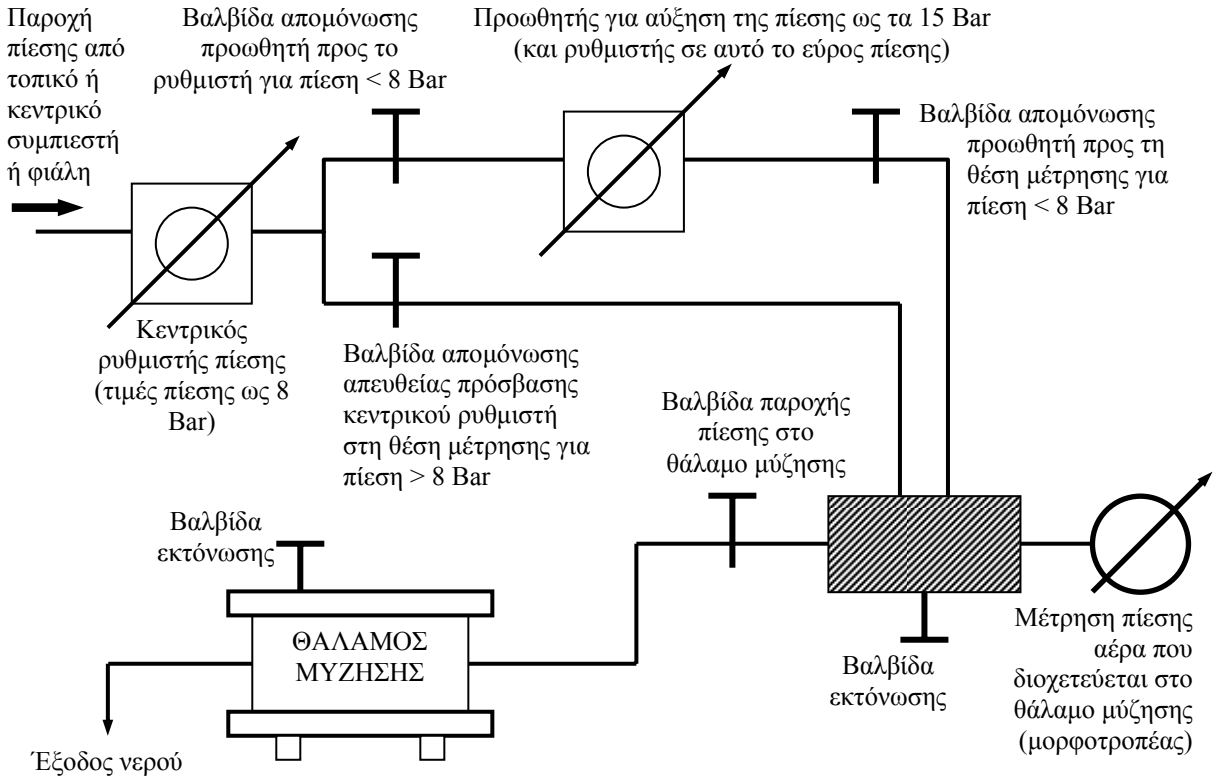
Στην περίπτωση λοιπόν που η συσκευή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού περισσότερων από ενός υλικών ταυτόχρονα ή απαιτείται ο υπολογισμός και άλλων μεγεθών εκτός από το ποσοστό υγρασίας σε ένα μόνο υλικό ή περισσότερα, τότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα δοκίμιο για εφαρμογή όλων των τιμών της μύζησης σε αυτό [3]. Αντίθετα η μέθοδος που ακολουθείται είναι να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά δοκίμια από το κάθε εδαφικό υλικό τα οποία έχουν αποκοπεί από ένα ομοιογενές δείγμα φυσικού υλικού ή έχουν παρασκευαστεί έτσι ώστε να προκύψουν με τα ίδια χαρακτηριστικά, προκειμένου για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά. Τοποθετούνται μέσα στη συσκευή τα δοκίμια από όλα τα εδαφικά υλικά ή τις διαφορετικές αρχικές συνθήκες για τις οποίες ζητείται ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, ο θάλαμος σφραγίζεται και εφαρμόζεται η πίεση που επιβάλει την επιθυμητή τιμή της μύζησης. Η πίεση αυτή αφήνεται για επαρκές χρονικό διάστημα μέχρι να αποκατασταθεί ομοιογένεια του τελικού ποσοστού υγρασίας εντός του κάθε δοκιμίου. Όταν παρέλθει αυτός ο χρόνος η πίεση ελαττώνεται απότομα στο 0, ο θάλαμος ανοίγεται και κάθε δοκίμιο κόβεται στα δύο. Το ένα τμήμα χρησιμοποιείται για μέτρηση του ποσοστού υγρασίας (ζύγιση πριν και μετά την τοποθέτηση σε φούρνο ξήρανσης και από την διαφορά υπολογισμός του ποσοστού υγρασίας) και το άλλο για μέτρηση του ολικού όγκου του (ζύγιση πριν, εμβάπτιση σε υγρή παραφίνη, ζύγιση του παραφινωμένου δοκιμίου υπό άνωση μετά τη στερεοποίηση της παραφίνης και υπολογισμός του ολικού όγκου από τη διαφορά των βαρών). Από το ποσοστό υγρασίας που είναι προφανώς το ίδιο και για το μισό τμήμα του δοκιμίου στο οποίο μετρήθηκε ο ολικός όγκος και τον ολικό όγκο υπολογίζονται όλα τα υπόλοιπα μεγέθη που ενδιαφέρουν (βαθμός κορεσμού $S_r$, λόγος κενών e και ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας θ).

Σε ό,τι αφορά την πίεση αέρα που εφαρμόζεται στο θάλαμο μύζησης χρησιμοποιήθηκε η διάταξη που φαίνεται σε σκαρίφημα στο Σχήμα 4. Αρχικά παρεμβάλλεται κεντρικός ρυθμιστής πίεσης με δυνατότητα ελέγχου τιμών της πίεσης ως τα 8 Bar. Η έξοδός του διακλαδίζεται προς το σημείο μέτρησης της πίεσης πριν την διοχέτευσή της στο θάλαμο μύζησης και προς τον προωθητή (booster) επαύξησης πίεσης ως τα 15 Bar που είναι η μέγιστη πίεση που μπορεί να εφαρμοστεί στο θάλαμο μύζησης

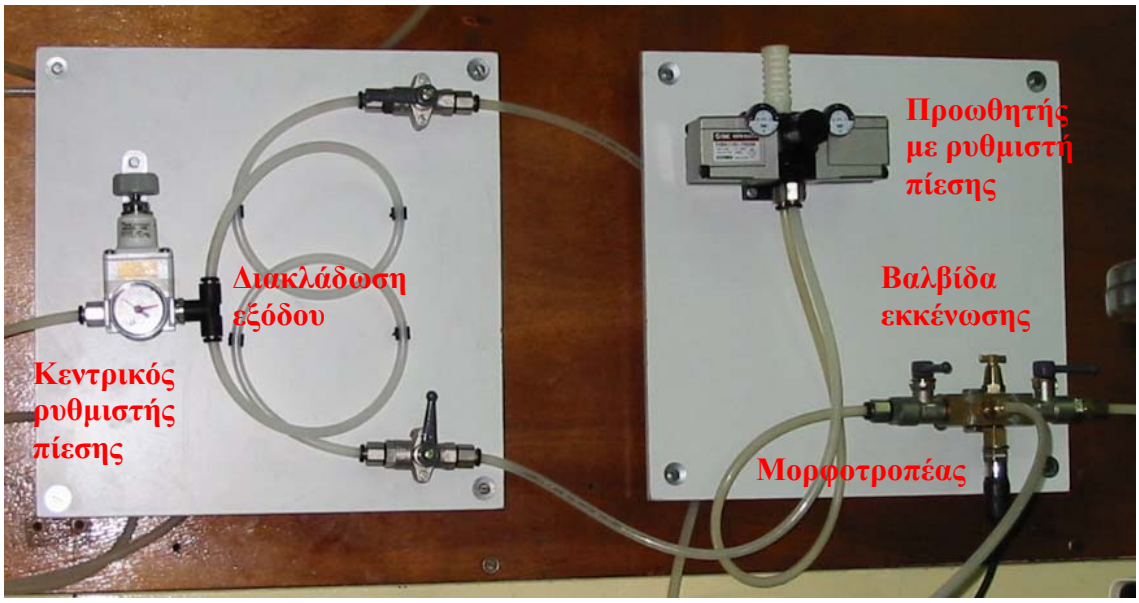
για τους διατιθέμενους κεραμικούς πορολίθους (η πίεση διείσδυσης αέρα των οποίων είναι 15 Bar). Ο προωθητής έχει και ενσωματωμένο ρυθμιστή της πίεσης για το εύρος αυτό. Η πίεση που έχει ρυθμιστεί είτε από τον κεντρικό ρυθμιστή είτε από τον προωθητή καταλήγει σε σημείο μέτρησής της μέσω μορφοτροπέα και καταγραφικού ακριβείας 0.5 kPa (0.005 Bar). Στο ίδιο σημείο υπάρχει και βαλβίδα εκτόνωσης της πίεσης του δικτύου μέχρι εκείνο το σημείο, ενώ παρεμβάλλονται και όλες οι απαιτούμενες βαλβίδες απομόνωσης των τμημάτων ανάλογα με το τμήμα της διάταξης που χρησιμοποιείται. Όταν έχει αναπτυχθεί η απαιτούμενη τιμή της πίεσης αέρα και έχει σταθεροποιηθεί στην επιθυμητή τιμή διοχετεύεται στο θάλαμο μύζησης ο οποίος διαθέτει ενσωματωμένη βαλβίδα εκτόνωσης από την οποία γίνεται η μείωση της πίεσης στο 0 όταν έχει ολοκληρωθεί η δοκιμή για την κάθε τιμή της μύζησης. Παρακολουθώντας την έξοδο του νερού μπορεί να διαπιστωθεί πότε έχει επέλθει υδραυλική ισορροπία (αφού έχει σταματήσει για επαρκές χρονικό διάστημα η έξοδος νερού). Στη φωτογραφία του Σχήματος 5 φαίνεται τμήμα της συνδεσμολογίας ρύθμισης και αύξησης της πίεσης στο θάλαμο μύζησης. Στο αριστερό πάνελ διακρίνεται ο κεντρικός ρυθμιστής της πίεσης με τη διακλάδωση του αέρα στην έξοδό του και στο δεξιό ο προωθητής για την αύξηση της πίεσης και η τελική θέση απελευθέρωσης πίεσης προς το θάλαμο μύζησης με την βαλβίδα εκκένωσης και τον μορφοτροπέα μέτρησης της διαμορφωθείσας πίεσης αέρα.

## 4. ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, κρίσιμη παράμετρος για την δυνατότητα εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι η διασφάλιση της ομοιότητας των χρησιμοποιούμενων ξεχωριστών δοκιμίων για κάθε τιμή της μύζησης. Προκειμένου για δοκίμια που αποκόπτονται από δείγμα φυσικού υλικού αρκεί η προσεκτική επιλογή ομοιογενών δειγμάτων. Προκειμένου για δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών ωστόσο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην παρασκευή των πολτών. Τα δοκίμια αναζυμωμένων εδαφών παρασκευάζονται στο εργαστήριο με την ανάμειξη εδαφών φυσικής ή τεχνητής κοκκομετρίας με νερό και τη μηχανική διάσπαση των συσσωματωμάτων των κόκκων και των πλακιδίων τους κατά τη διαδικασία της ανάμειξης. Αυτή η ανάμειξη καταλήγει στη δημιουργία ενός πολτού (slurry) υψηλού ποσοστού υγρασίας σε σχέση με το όριο υδαρότητας του υλικού (προκειμένου για αργιλικά εδάφη) στον οποίο έχουν διασπαστεί εντελώς τα συσσωματώματα των κόκκων και των πλακιδίων. Ο πολτός αυτός προσομοιάζει στο ίζημα από το οποίο προήλθαν φυσικά ιζηματογενή εδάφη και οι ιδιότητές του είναι αυτές που εξαρτώνται μόνο από τα εγγενή (intrinsic) χαρακτηριστικά των εδαφών, δηλ. την κοκκομετρία και την ορυκτολογική σύσταση, και όχι την κάθε είδους δομή που αυτά αποκτούν κατά την γεωλογική τους ιστορία από την δημιουργία του ιζήματος και μετά. Ιδανικά η περιεκτικότητα σε ξένες ουσίες του νερού με το οποίο γίνεται η ανάμειξη, πρέπει να είναι η ίδια με εκείνη του νερού των πόρων του υλικού στη φυσική του κατάσταση. Αυτό συνήθως είναι ιδιαίτερα δύσκολο οπότε για λόγους απλότητας χρησιμοποιείται απεσταγμένο ή απιονισμένο νερό για την παρασκευή των αναζυμωμένων εδαφών. Εκτός αυτού δεν αρκεί απλώς η μηχανική διάσπαση των συσσωματωμάτων των κόκκων και των πλακιδίων και η καλή ανάμειξή τους με νερό αλλά και η παρέλευση χρόνου (1 ως 10 ημέρες ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμιση και την ορυκτολογική σύσταση του υλικού) προκειμένου να αποκατασταθεί η ομοιογένεια του πολτού ως προς το ποσοστό υγρασίας του. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ύγρανση (hydration). Κατά τη διάρκειά της δε ο πολτός πρέπει να αναδεύεται τακτικά καθώς έχει παρατηρηθεί σε πολτούς εδαφικών υλικών με σημαντική ανομοιογένεια ως προς το μέγεθος των σωματιδί-




Σχήμα 4. Σκαρίφημα διάταξης ρύθμισης πίεσης αέρα στον θάλαμο μύζησης με ρυθμιστή πίεσης, προωθητή, μορφοτροπέα για τη μέτρηση της πίεσης και βαλβίδες απομόνωσης τμημάτων της διάταξης.




Σχήμα 5. Τμήμα της συνδεσμολογίας ρύθμισης και αύξησης της πίεσης στο θάλαμο μύζησης.

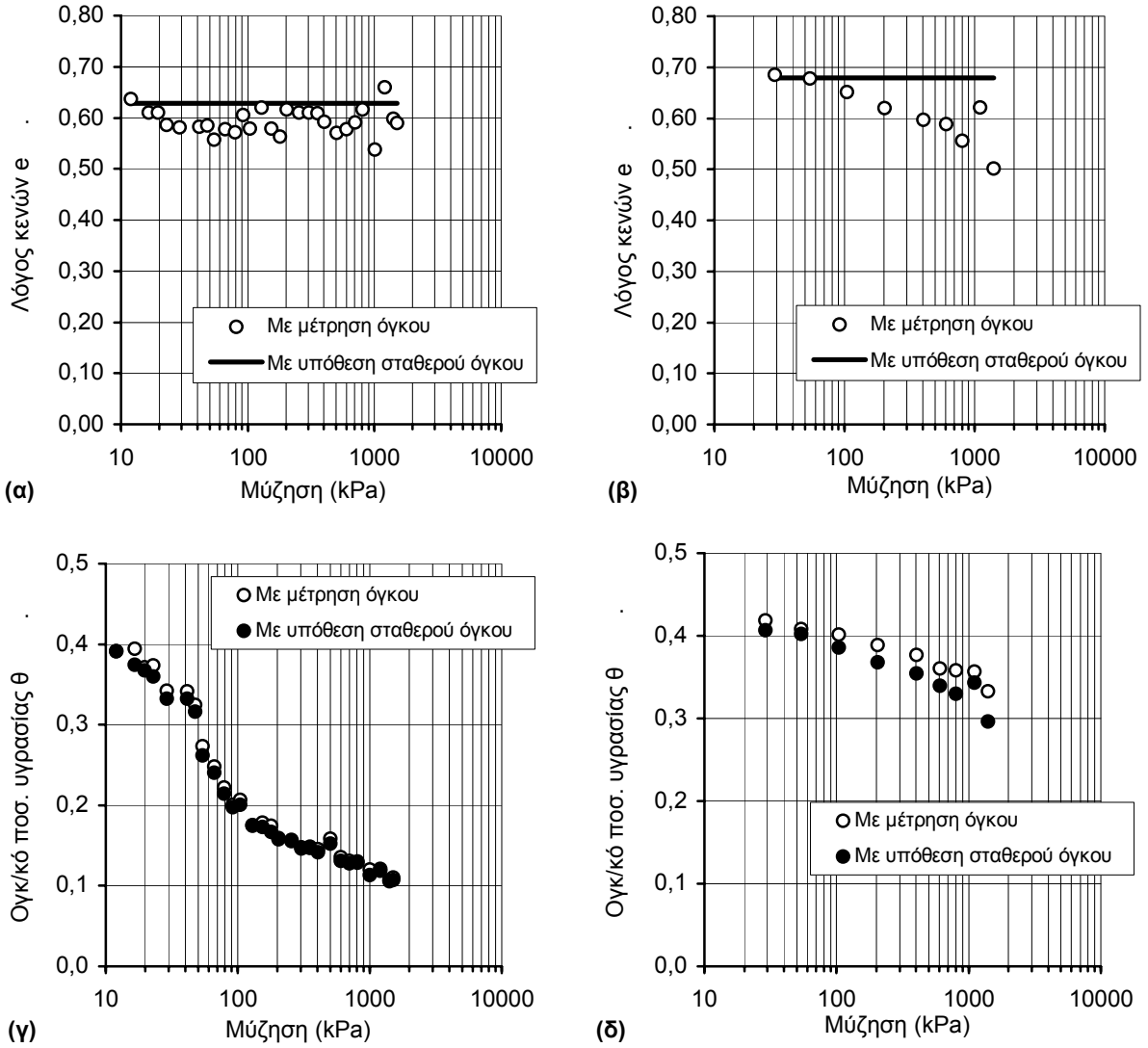
ων που τα αποτελούν, τα μεγαλύτερα να καθιζάνουν ταχύτερα προκαλώντας κατά το στάδιο της ύγρανσης ανομοιογένεια του πολτού ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση. Τέλος, διαρκούσης της ύγρανσης πρέπει να παρακολουθείται το ποσοστό υγρασίας ώστε να προστίθεται εν ανάγκη νερό για την αποκατάσταση της επιθυμητής τιμής του ποσοστού υγρασίας. Όταν δεν αναμένεται πλέον άλλη ανάδευση εφαρμόζεται μικρή πίεση κενού ώστε ο ρευστός πολτός να απαερωθεί.

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο θάλαμος μύζησης χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό συνολικά 6 χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού 5 διαφορετικών εδαφικών υλικών. Και στα 5 προσδιορίστηκε η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε αναζυμωμένα δείγματα επανασυμπιεσμένα στην τάση που είχαν τα εδαφικά υλικά επιτόπου. Στο ένα εδαφικό υλικό προσδιορίστηκε η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και του φυσικού υλικού εκτός από του αναζυμωμένου. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της αναζυμωμένης Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων επανασυμπιεσμένης σε κατακόρυφη τάση 100 kPa και της αναζυμωμένης Αργίλου Κηφισιάς επανασυμπιεσμένης σε τάση 600 kPa (παρουσιάζονται τα διαγράμματα λόγου κενών-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης για τα δύο υλικά). Η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων περιγράφεται κοκκομετρικά ως ιλυώδης λεπτή άμμος με λίγη άργιλο και αποτελούσε το πιο χονδρόκοκκο από τα εδαφικά υλικά στα οποία έγιναν δοκιμές, ενώ η Άργιλος Κηφισιάς περιγράφεται ως αργιλώδης ιλύς με ίχνη άμμου και αποτελούσε ένα εδαφικό υλικό ενδιάμεσης κοκκομετρίας από αυτά στα οποία έγιναν δοκιμές. Η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων είναι οριακά πλαστική με όριο υδαρότητας $w_L$ 24% και δείκτη πλαστικότητας $I_p$ μόλις 1%, ενώ η Άργιλος Κηφισιάς είναι υλικό μέσης πλαστικότητας με $w_L$ 40.5% και $I_p$ 20.5%.

Η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων παρουσιάζει μικρή συμπιεστότητα σε σχέση με την Άργιλο Κηφισιάς, κύρια λόγω της διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης αλλά και της διαφορετικής ορυκτολογίας των δύο υλικών. Προκειμένου για την πρώτη, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 6α και 6γ όπου παρατίθενται αντίστοιχα καμπύλες λόγου κενών-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης με και άνευ παραδοχής σταθερού όγκου, η διαφορά στην καμπύλη ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης που προσδιορίζεται από τις δύο μεθόδους είναι πολύ μικρή. Αντίθετα παρουσιάζεται ιδιαίτερα μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματα των μετρήσεων όγκου σε κάθε δοκίμιο (που μεταφράζεται στην παρατηρούμενη μεγάλη διασπορά των υπολογιζόμενων τιμών του λόγου κενών) με υποεκτίμηση μάλλον της αρχικής τιμής του λόγου κενών. Η διασπορά αυτή οφείλεται σε προβλήματα κατά την εμβάπτιση στην υγροποιημένη παραφίνη δοκιμίων εδαφικών υλικών που είναι πιο χονδρόκοκκα. Στην περίπτωση της Αργίλου Κηφισιάς αντίθετα, η διασπορά στις τιμές είναι μικρότερη (με εξαίρεση το σημείο στη μύζηση των 1100 kPa) επιδεικνύοντας σαφώς την τάση μείωσης του λόγου κενών με την μύζηση (Σχήμα 6β) οδηγώντας σε σημαντικές αποκλίσεις από την σταθερή τιμή του λόγου κενών που επιβάλει η παραδοχή σταθερού όγκου. Η απόκλιση αυτή μεταφράζεται και σε αντίστοιχη πολύ μεγάλη απομάκρυνση των καμπυλών ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης που προσδιορίζονται με και άνευ της παραδοχής σταθερού όγκου με την παραδοχή σταθερού όγκου να οδηγεί σε σημαντική υποεκτίμηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας για την ίδια τιμή της μύζησης. Το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας φαίνεται μάλιστα να υποεκτιμάται τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη γίνεται η μύζηση, πιθανόν λόγω της αρχικά μικρότερης συμπιεστότητας των δοκιμίων της Αργίλου Κηφισιάς (αφού είναι συμπιεσμένα στα 600 kPa). Η υποεκτίμηση αυτή παρατηρείται και στην Ιλύ Λίμνης

Ιωαννίνων, αλλά εκεί η διαφορά είναι πολύ μικρότερη λόγω της μικρής συμπιεστότητας του υλικού αυτού και άρα της μικρότερης απόκλισης από την πραγματικότητα της παραδοχής σταθερού όγκου. Για υλικά μεγαλύτερης συμπιεστότητας λοιπόν η παραδοχή σταθερού όγκου οδηγεί σε υποεκτίμηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας εκτός και από την προφανή υπερεκτίμηση του λόγου κενών.




Σχήμα 6. Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων και της Αργίλου Κηφισιάς. Καμπύλες λόγου κενών-μύζησης για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων (α) και την Άργιλο Κηφισιάς (β) και καμπύλες ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων (γ) και την Άργιλο Κηφισιάς (δ).

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Χρησιμοποιήθηκε συμβατική, εμπορικά διαθέσιμη, εργαστηριακή συσκευή προσδιορισμού χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα (θάλαμος μύζησης) για τον πλήρη προσδιορισμό τέτοιων καμπυλών σε εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο. Αντίθετα από την παραδοχή σταθερού όγκου που

χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν έμμεσα ο λόγος κενών και ο βαθμός κορεσμού εκτός από το ποσοστό υγρασίας για κάθε τιμή της μύζησης που εφαρμόζεται στο ίδιο δοκίμιο, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά δοκίμια για κάθε τιμή της μύζησης με μέτρηση αυτών των μεγεθών. Τα πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές σε δύο εδαφικά υλικά που παρουσιάστηκαν ενδεικτικά επιδεικνύουν τα προβλήματα από την παραδοχή σταθερού όγκου με χρήση ενός δοκιμίου. Για την ίδια τιμή της μύζησης ο λόγος κενών προφανώς υπερεκτιμάται και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας υποεκτιμάται, τόσο περισσότερο μάλιστα, όσο περισσότερο αυξάνεται η μύζηση. Προϋπόθεση ωστόσο για την εφαρμογή της μεθόδου χρήσης ξεχωριστών δοκιμίων αποτελεί η ικανότητα προαπαρασκευής όμοιων δοκιμίων (προκειμένου για αναζυμωμένα εδάφη) ή η ομοιογένεια του φυσικού υλικού εντός του δοκιμίου που έχει αποσπαστεί από το ύπαιθρο.

Σε ό,τι αφορά αυτή καθεαυτή την εργαστηριακή διάταξη είναι δυνατή η χρήση προωθητή για την αύξηση της πίεσης πριν την διοχέτευσή της στον θάλαμο μύζησης προκειμένου να γίνει εκμετάλλευση των πλήρων δυνατοτήτων συσκευών με πορολίθους ή μεμβράνες πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar. Με χρήση της κατάλληλης συνδεσμολογίας μπορεί να διοχετευθεί με ασφάλεια τέτοια τιμή της πίεσης στο θάλαμο μύζησης ακόμα και όταν έχουν αφαιρεθεί οι δύο από τις τρεις χρησιμοποιούμενες πλάκες οπότε ο όγκος του αέρα στη συσκευή είναι μεγαλύτερος και αυτή να διατηρηθεί για επαρκές χρονικό διάστημα.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Ο κ. Γ. Πυργιώτης, τεχνικός του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων, υλοποίησε τη συνδεσμολογία της εργαστηριακής διάταξης. Η έρευνα του κ. Μ. Μπαρδάνη χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Μ. Μπαρδάνης, Σ. Καβουνίδης, Σύγκριση δείκτη συμπιεστότητας από εμπειρικές συσχετίσεις και από δοκιμές σε αργιλικά εδάφη από τον ελλαδικό χώρο, Πρακτικά 4ου Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, σελ. 131-138, Αθήνα, 2001.

[2] M. E. Bardanis, M. J. Kavvadas, The concept of “apparent” compression index, in T., Schanz (Ed.), Unsaturated Soils: Experimental Studies, Proc. of the Int. Conf. “From Experimental Evidence towards Numerical Modelling of Unsaturated Soils”, Weimar, 17-18 September 2003, Springer, Berlin, Vol. I, pp. 421-432.

[3] D. G. Fredlund, H. Rahardjo, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993.