

# ΕΠΙΒΟΛΗ ΟΛΙΚΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΣΕ ΕΛΑΦΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕΣΩ ΑΕΡΑ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΜΕ ΥΔΑΤΙΚΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΑΛΑΤΩΝ

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα  
ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.  
Εργαστήριο Εδαφομηχανικής-Βραχομηχανικής-Σκυροδέματος-Αδρανών  
[lab@edafos.gr](mailto:lab@edafos.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Οι δύο κύριες μέθοδοι ελέγχου της μύζησης (suction) στην εδαφομηχανική μη κορεσμένων εδαφών είναι η μέθοδος μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού και η μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας με υδατικά διαλύματα για τον έλεγχο της ολικής μύζησης. Ενώ η πρώτη μέθοδος ωστόσο είναι διαδεδομένη διεθνώς αλλά και στην Ελλάδα πλέον, η δεύτερη παραμένει σε μεγάλο βαθμό άγνωστη, ειδικά στην Ελλάδα. Στο άρθρο που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της μεθόδου, η μεθοδολογία παρασκευής των διαλυμάτων αλάτων και τα βασικά σημεία της εμπειρίας από την μέχρι σήμερα εφαρμογή της μεθόδου, αυτούσια για τον έλεγχο της μύζησης με σκοπό τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, συνδυαζόμενη με υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου για την επαλήθευση της τιμής της υλοποιούμενης μύζησης, αλλά και όταν χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ολικής μύζησης σε άλλα δοκίμια που υποβάλλονται σε δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων.

## ABSTRACT:

The two primary methods for suction control in unsaturated soil mechanics is the axis translation technique for matrix suction and the water solutions method for total suction control by means of controlling the relative humidity in an enclosed space. While the former method is well established both worldwide and in Greece, the latter remains relatively unknown especially in Greece, although it is the only method available to achieve very high values of suction. The basic principles of the method are presented in the paper, the methodology of preparing salt solutions and the basic points of the experience gained so far from the application of the method, either by itself as part of the determination of the soil-water characteristic curve, or for the same purpose but combined with the use of the chilled-mirror hygrometer for verification of the total suction attained, or finally when the method is used for the control of total suction on samples subjected to mechanical properties testing.

*Λέξεις-Κλειδιά: Μη κορεσμένα εδάφη, ολική μύζηση, σχετική υγρασία, υδατικά διαλύματα*

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.  
Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

## 1. Εισαγωγή

Στην εδαφομηχανική μη κορεσμένων εδαφών, δηλ. των εδαφών που έχουν στους πόρους τους και αέρα και νερό (αντί μόνο νερό οπότε ονομάζονται πλήρως κορεσμένα), χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι υλοποίησης της μύζησης (suction) που αναπτύσσεται στα εδαφικά αυτά υλικά. Η πιο συνηθισμένη από αυτές για την ανάπτυξη της ολικής μύζησης (total suction) είναι η μέθοδος των υδατικών διαλυμάτων. Διαλύματα αλάτων (ή σπανιότερα οξέων) σε απεσταγμένο νερό τοποθετούνται στον πυθμένα αεροστεγώς κλεισμένων δοχείων και αφήνονται μέχρι την αποκατάσταση της υδροδυναμικής ισορροπίας με τον υπερκείμενο της ελεύθερης επιφάνειας των διαλυμάτων αέρα. Λόγω της παρουσίας των αλάτων εντός του απεσταγμένου νερού, στον αέρα που υπέρκειται του διαλύματος εντός του θαλάμου αναπτύσσεται σχετική υγρασία μικρότερη του 100%. Εάν στο περιβάλλον αυτού του αέρα τοποθετηθεί δοκίμιο πλήρως κορεσμένου εδάφους, τότε θα αρχίσει να εξατμίζεται μέρος του περιεχόμενου στο δοκίμιο νερού μέχρι να αποκατασταθεί ισορροπία με την τιμή της σχετικής υγρασίας στον περιβάλλοντα το δοκίμιο αέρα κατά τις προβλέψεις του νόμου του Kelvin. Διαλύματα αλάτων λοιπόν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία μίας συγκεκριμένης τιμής της σχετικής υγρασίας στον αέρα εντός θαλάμου και στη συνέχεια ο αέρας αυτός μέσα στον ίδιο θάλαμο να χρησιμοποιηθεί για την επιβολή μίας συγκεκριμένης τιμής της ολικής μύζησης σε ένα δοκίμιο εδαφικού υλικού και άρα ενός αντίστοιχου βαθμού κορεσμού σε αυτό.

Για την εφαρμογή της μεθόδου υλοποιήθηκε διάταξη πέντε διαλυμάτων αλάτων. Τα διαλύματα τοποθετήθηκαν εντός υγραντήρων με τάπες κενού, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την μόνιμη εισαγωγή θερμομέτρων στον αέρα εντός των υγραντήρων. Η κατάσκευή αυτή επέτρεψε την διαρκή μέτρηση της θερμοκρασίας ώστε να μπορούν να γίνουν διορθώσεις εφόσον απαιτηθεί. Στη συνέχεια τοποθετούντο μέσα στους υγραντήρες τα εδαφικά δοκίμια, αφήνονταν εύλογο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια εξάγονταν για ζύγισή τους. Στη συνέχεια επανατοποθετούνταν στους υγραντήρες και ακολουθείτο η ίδια διαδικασία μέχρι σταθεροποίησης του βάρους των εδαφικών δοκιμίων. Τότε τα δοκίμια εξάγονταν και μετρείτο η ολική τους μύζηση σε υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου. Η διάταξη αυτή επέτρεψε τον προσδιορισμό του χρόνου επίτευξης ισορροπίας ανάμεσα στα εδαφικά δοκίμια και τον αέρα στους υγραντήρες.

Στο άρθρο παρουσιάζονται αναλυτικά οι αναπτυχθείσες διαδικασίες, η ανάγκη διακριβώσεων των χρησιμοποιούμενων οργάνων μετρήσεων, και ορισμένα από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων και κυρίως οι χρόνοι επίτευξης της ζητούμενης ολικής μύζησης στα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα δοκιμών.

## 2. Έλεγχος της ολικής μύζησης μέσω της σχετικής υγρασίας. Ο νόμος τους Kelvin

Ο Kelvin (1871)<sup>1</sup> διατύπωσε την ομώνυμη εξίσωση, η οποία συσχετίζει την μεταβολή της πίεσης κάθετα σε μία καμπυλωμένη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης με την πίεση των ατμών στην αέρια φάση. Στην πιο διαδεδομένη μορφή της η εξίσωση του Kelvin παίρνει

---

<sup>1</sup> Πρόκειται για τον Λόρδο Kelvin, το πραγματικό όνομα του οποίου ήταν William Thomson. Στη βιβλιογραφία εμφανίζεται με το πραγματικό του όνομα.

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων

την μορφή της Εξίσωσης 1, όπου  $\psi$  η ολική μύζηση εδαφικού υλικού σε ισορροπία με αέρα σχετικής υγρασίας RH, R η παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων, T η απόλυτη θερμοκρασία, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και m το μοριακό βάρος του νερού.

$$\psi = (RT/gm) \ln RH \quad (1)$$

Η Εξίσωση του Kelvin έχει πολύ μεγάλη θεωρητική και πρακτική σημασία στην εδαφομηχανική μη κορεσμένων εδαφών. Παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για την εξήγηση της συσχέτισης ανάμεσα στα φαινόμενα που επικρατούν στην ατμόσφαιρα και το νερό των πόρων στα μη κορεσμένα εδάφη (εξηγώντας ουσιαστικά δύο από τις βασικές παρατηρήσεις της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών: την ξήρανσή τους αν αφεθούν εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα όταν σε αυτήν επικρατούν οι συνήθειες –τουλάχιστον στην Ελλάδα– συνθήκες και την διατήρησή τους πλήρως κορεσμένα –εφόσον ήταν αρχικά– όταν τοποθετηθούν σε θαλάμους με απεσταγμένο νερό εντός των οποίων δημιουργείται ένα περιβάλλον με αέρα σχετικής υγρασίας πρακτικά 100%<sup>2</sup>). Επιτρέπει δε πρακτικές εφαρμογές όπως την μέτρηση της μύζησης μέσω της μέτρησης της σχετικής υγρασίας, ή τον έλεγχο της μέσω του ελέγχου της σχετικής υγρασίας.

Ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας υλοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος και πιο συνηθισμένος αφορά στον έλεγχο της σχετικής υγρασίας μέσω της χρήσης υδατικών διαλυμάτων αλάτων ή οξέων και ο δεύτερος και πιο σπάνιος στον ενεργό έλεγχο των επιμέρους πιέσεων που καθορίζουν την τιμή της σχετικής υγρασίας. Η πρώτη μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας περιγράφεται στην αγγλική βιβλιογραφία από τον όρο *isopiestic humidity control method* και η δεύτερη από τον όρο *two-pressure humidity control method* (Lu and Likos 2004). Η πρώτη από τις δύο μεθόδους η οποία αποδίδεται στα ελληνικά με τον όρο *μέθοδος υδατικών διαλυμάτων* είναι αρκετά συνηθισμένη διεθνώς για τον έλεγχο της ολικής μύζησης προκειμένου αυτή να εφαρμοστεί σε δοκίμια εδαφικού υλικού. Αντίθετα, η δεύτερη μέθοδος, ενώ είναι διαδεδομένη για τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας με πολύ υψηλή ακρίβεια σε εργαστήρια διακριβώσεων, διεθνώς δεν αναφέρεται παρά μόνο μία προσπάθεια χρήσης της για τον έλεγχο της ολικής μύζησης σε δοκίμια εδαφικών υλικών (Lu and Likos 2004). Στο άρθρο περιγράφονται οι εμπειρίες από την εφαρμογή της μεθόδου των υδατικών διαλυμάτων μέχρι σήμερα και κυρίως οι ανάγκες για σωστή προετοιμασία των διαλυμάτων, για έλεγχο ή παρακολούθηση της θερμοκρασίας και για τον συνδυασμό της μεθόδου με τη χρήση του υγρομέτρου ψυχρού κατόπτρου (*chilled-mirror hygrometer*) για επιβεβαίωση της επιτυγχανόμενης τιμής της ολικής μύζησης.

### 3. Η χρήση υδατικών διαλυμάτων για τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας/ολικής μύζησης

Κατά την εφαρμογή της χρήσης της μεθόδου των υδατικών διαλυμάτων υπάρχουν τρεις κύριες επιλογές που μπορούν να γίνουν σε ό,τι αφορά τα διαλύματα. Η πρώτη από αυτές

---

<sup>2</sup> Είναι δύσκολο να μη γίνει η παρατήρηση ότι αυτή η πολύ απλή εμπειρική συσχέτιση του τι συμβαίνει στα εδαφικά υλικά και κυρίως η θεωρητική εξήγησή της μέσω του νόμου του Kelvin απουσιάζει παντελώς από το εκπαιδευτικό υλικό των μαθημάτων Εδαφομηχανικής στην Ελλάδα αλλά και σε άλλες χώρες.

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων

είναι εάν το διάλυμα θα είναι κορεσμένο ή όχι. Η δεύτερη αφορά στο είδος της διαλυμένης ουσίας και η τρίτη αφορά στο πως θα χρησιμοποιηθεί ένα υδατικό διάλυμα για τον έλεγχο της ολικής μύζησης, δηλαδή εάν επιδιώκεται διά της μεταβολής της συγκέντρωσης του διαλύματος ο έλεγχος περισσότερων τιμών της σχετικής υγρασίας και άρα της ολικής μύζησης διά ενός διαλύματος μόνο, ή η επίτευξη κάθε ξεχωριστής τιμής με ένα μόνο διάλυμα. Όπως θα επιδειχθεί στη συνέχεια, αυτό είναι συνάρτηση της εφαρμογής στην οποία επιδιώκεται ο έλεγχος της ολικής μύζησης.

Μη κορεσμένα διαλύματα μπορούν να επιβάλλουν πολύ υψηλές τιμές της ολικής μύζησης ανάλογα με το είδος της ουσίας που χρησιμοποιείται. Από την άλλη πλευρά, ειδικά μάλιστα για μεγάλου μεγέθους εδαφικά δοκίμια, η προσθήκη ή απώλεια υγρασίας από το υδατικό διάλυμα λόγω της ξήρανσης ή της ύγρανσης του εδαφικού δοκιμίου αντίστοιχα θα μεταβάλλει την συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος, άρα την σχετική υγρασία που αυτό μπορεί να δημιουργήσει σε ένα κλειστό περιβάλλον και άρα την ολική μύζηση που θα επιβληθεί στο εδαφικό δοκίμιο. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο πρέπει να χρησιμοποιούνται μικρού μεγέθους εδαφικά δοκίμια (κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό, ειδικά μάλιστα όταν ζητείται η προετοιμασία ολόκληρων δοκιμίων για την εκτέλεση δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών) και μεγάλες ποσότητες υδατικών διαλυμάτων (το οποίο είναι οικονομικό ζήτημα λόγω της ανάγκης προμήθειας μεγαλύτερων ποσοτήτων διαλυμένων ουσιών, είτε αλάτων, είτε οξέων). Έτσι προτιμάται γενικώς, όπου είναι εφικτό, να χρησιμοποιούνται κορεσμένα διαλύματα (με σημαντική μάλιστα περίσσεια διαλυμένης ουσίας), αφού μετά από τον κορεσμό ενός υδατικού διαλύματος σταθεροποιείται η τιμή της σχετικής υγρασίας την οποία μπορεί να δημιουργήσει. Έτσι, ειδικά όταν έχει προστεθεί επιπλέον διαλυμένη ουσία (οπότε το διάλυμα είναι υπέρκορο), η προσθήκη ή απώλεια υγρασίας από το υδατικό διάλυμα λόγω της ξήρανσης ή της ύγρανσης του εδαφικού δοκιμίου αντίστοιχα<sup>3</sup>, δεν μπορούν να μεταβάλλουν το γεγονός ότι αυτό παραμένει κορεσμένο και άρα δεν μεταβάλλεται η τιμή της σχετικής υγρασίας που μπορεί να δημιουργήσει και κατά συνέπεια η τιμή της ολικής μύζησης που έχει την δυνατότητα να επιβάλλει σε ένα δοκίμιο εδαφικού υλικού. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών σταδιακής προσθήκης άλατος σε απεσταγμένο νερό για την δημιουργία κορεσμένων διαλυμάτων πέντε διαφορετικών αλάτων. Αναφέρεται η συγκέντρωση επίτευξης κορεσμού του διαλύματος, η τιμή της μύζησης που αναφέρεται στην βιβλιογραφία για κορεσμένα διαλύματα αυτών των αλάτων και η τιμή που μετρήθηκε στο εργαστήριο με υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου για τα συγκεκριμένα διαλύματα που παρασκευάστηκαν. Η μοριακότητα κατά βάρος διαλύτη στην οποία επιτεύχθηκε κορεσμός διαπιστώθηκε με σταδιακή αύξηση της τιμής της, ανάδευση του διαλύματος και άφεσή του για 24 ώρες. Στην πρώτη τιμή της στην οποία το ίζημα που εμφανίστηκε αρχικά, παρέμενε και μετά από 24 ώρες, αποδόθηκε η τιμή της μοριακότητας επίτευξης κορεσμού του διαλύματος και είναι αυτή που αναφέρεται στον Πίνακα 1. Τονίζεται ότι σε όλα τα διαλύματα, υπήρξαν τιμές της μοριακότητας μικρότερης από την αναγραφόμενη στις οποίες εμφανίστηκε αρχικά ίζημα αλλά διαλύθηκε μετά από 24 ώρες. Για όλα τα άλατα υπήρχε πιστοποιητικό του προμηθευτή για καθαρότητα μεγαλύτερη από 99.0%.

---

<sup>3</sup> Μάλιστα για τον υπολογισμό του πόσο υπέρκορο πρέπει να είναι ένα διάλυμα γίνεται ο σχετικός υπολογισμός από το πλήθος, το βάρος και το αρχικό ποσοστό υγρασίας των δοκιμίων που θα τοποθετηθούν στο θάλαμο αυτού του διαλύματος.

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.  
Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά διαλυμάτων αλάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ολικής μύζησης.

Άλας	Σχετική υγρασία από την βιβλιογραφία (Lu and Likos 2004)	Ολική μύζηση από την βιβλιογραφία (Lu and Likos 2004)	Ολική μύζηση που μετρήθηκε	Μοριακότητα κατά βάρος διαλύτη στην οποία επιτεύχθηκε κορεσμός του (εμφάνιση ιζήματος στον πυθμένα)
	(%)	(MPa)	(MPa)	(m)
BaCl <sub>2</sub>	90.3	14.0	14.1	2
KCl	84.2	23.6	23.6	5
NaCl	75.1	39.3	39.0	6
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52.8	87.7	85.5	9
MgCl <sub>2</sub>	32.7	153.5	151.7	15

Όταν η μέθοδος των υδατικών διαλυμάτων χρησιμοποιείται προκειμένου να ελεγχθεί η ολική μύζηση για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού<sup>4</sup> προσφέρεται γενικά η χρήση υπέρκορων υδατικών διαλυμάτων αλάτων. Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα άλατα είναι ασφαλείς ουσίες, δεδομένου ότι η εξισορρόπηση αργεί αρκετά προσφέρονται για μακροχρόνια παραμονή στους χρησιμοποιούμενους θαλάμους, και τέλος το κόστος αγοράς των αλάτων είναι αρκετά μικρό για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις απαιτούμενες ποσότητες. Στην Φωτογραφία 1 απεικονίζεται θάλαμος υπέρκορου υδατικού διαλύματος με δοκίμια που έχουν τοποθετηθεί για ξήρανση στην ατμόσφαιρα του θαλάμου. Προκειμένου για αυτήν την εφαρμογή λοιπόν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία και χαμηλό κόστος υπέρκορα διαλύματα αλάτων.

Η μέθοδος όμως χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο της μύζησης σε συσκευές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών. Στην Φωτογραφία 2 απεικονίζεται παράδειγμα συσκευής μονοδιάστατης συμπίεσης με κυψέλη ελεγχόμενης μύζησης (Μπαρδάνης 2011). Στην περίπτωση αυτή, πρέπει είτε να υλοποιηθεί μία διάταξη που να επιτρέπει την διακοπή της παροχής αέρα ελεγχόμενης σχετικής υγρασίας από συγκεκριμένο διάλυμα, όταν έχει επιτευχθεί ισορροπία, για να προστεθεί ένα άλλο δοχείο που περιέχει διάλυμα άλλου άλατος για την επίτευξη άλλης τιμής της ολικής μύζησης, είτε πρέπει να υπάρχει ένα δοχείο μέσα στο οποίο να χρησιμοποιείται ένα ακόρεστο διάλυμα εντός του οποίου μεταβάλλεται η συγκέντρωσή του και άρα η ικανότητα επίτευξης συγκεκριμένης τιμής της μύζησης στο δοκίμιο. Η πρώτη λύση προσφέρεται όταν υπάρχουν υδατικά διαλύματα διαθέσιμα μέσω των οποίων μπορούν να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές της μύζησης. Αν ζητούνται αυστηρά καθορισμένες τιμές της ολικής μύζησης οι οποίες δεν είναι εύκολο να υλοποιηθούν άμεσα, τότε προτιμάται η δεύτερη περίπτωση στην οποία μάλιστα είθισται να χρησιμοποιούνται διαλύματα οξέων αντί για διαλύματα αλάτων. Η διάταξη τότε σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να παρέχει και την δυνατότητα ελέγχου της ποσότητας του διαλύτη, χρησιμοποιώντας πάντοτε παράλληλα έναν ζυγό για την παρακολούθηση της συνολικής ποσότητας του διαλύματος (απεικονίζεται και στην Φωτογραφία 2α, στην αντίστοι-

<sup>4</sup> 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 (βλ. Μπαρδάνης και Καββαδάς 2005, Μπαρδάνης 2011 για την σημασία της καμπύλης αυτής στην μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών).

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων

χη διάταξη του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. αλλά για υπέρκορο διάλυμα). Όταν επιδιώκεται η επίτευξη στενής αλληλουχίας τιμών της μύζησης και το δοκίμιο είναι αρκετά μικρό ώστε οι ανταλλάσσόμενες ποσότητες ύδατος να είναι πραγματικά μικρές αυτή η λύση είναι εφικτή και με τον κατάλληλο έλεγχο μπορεί να δώσει πολύ ακριβή αποτελέσματα.



Φωτογραφία 1. α) Θάλαμοι υπέρκορων υδατικών διαλυμάτων αλάτων του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε., και β) θάλαμος υπέρκορου διαλύματος KCl με δείγματα αναζυμωμένων υλικών (τριπλοί μικρού μεγέθους δειγματολήπτες εντός μεγαλύτερου δειγματολήπτη) και δοκίμιο αναζυμωμένου υλικού για την παρασκευή τελικά δοκιμίου θλίψης κατά γενέτειρα. Διακρίνονται τα θερμομέτρα παρακολούθησης της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα των θαλάμων.



Φωτογραφία 2. α) Συμπιεσόμετρο με κυψέλη ελεγχόμενης μύζησης διά υπέρκορου υδατικού διαλύματος του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. (διακρίνεται το δοχείο διατήρησης του διαλύματος, ο ζυγός παρακολούθησης του συνολικού βάρους του, η περισταλτική αντλία εξασφάλισης της κυκλοφορίας του αέρα ελεγχόμενης μύζησης και η συνδεσμολογία κυψέλης-δοχείου), και β) η τροποποιημένη κυψέλη (Μπαρδάνης 2011).

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

#### 4. Πρακτικές δυσκολίες εφαρμογής της μεθόδου. Η ανάγκη συνδυασμού με το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου

Όπως προκύπτει από την εξίσωση Kelvin η θερμοκρασία παίζει καθοριστικό ρόλο στην ικανότητα ρύθμισης συγκεκριμένης τιμής της σχετικής υγρασίας από το υδατικό διάλυμα. Ιδανικά λοιπόν, προκειμένου να εφαρμοστεί με ακρίβεια η μέθοδος, στο σκεύος εντός του οποίου βρίσκεται το διάλυμα και το εδαφικό δοκίμιο πρέπει να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία. Αυτό επιτρέπει όταν σταθεροποιηθεί το ολικό βάρος του δοκιμίου που έχει τοποθετηθεί στο θάλαμο με το συγκεκριμένο διάλυμα να υποθεθεί εύλογα ότι έχει σταθεροποιηθεί το ποσοστό υγρασίας και άρα μετά από την σταθεροποίηση αυτή να μετρηθεί και το ποσοστό υγρασίας και ο ολικός όγκος του δοκιμίου διά παραφινώσεως και ζύγισης υπό άνωση, οπότε σε συνδυασμό με το ειδικό βάρος της στερεάς φάσης και το ποσοστό υγρασίας να υπολογιστεί ο λόγος κενών και ο βαθμός κορεσμού, και να θεωρηθεί ότι αυτά τα μεγέθη αντιστοιχούν στην μύζηση που έχει μετρηθεί για αυτό το διάλυμα για την συγκεκριμένη θερμοκρασία.

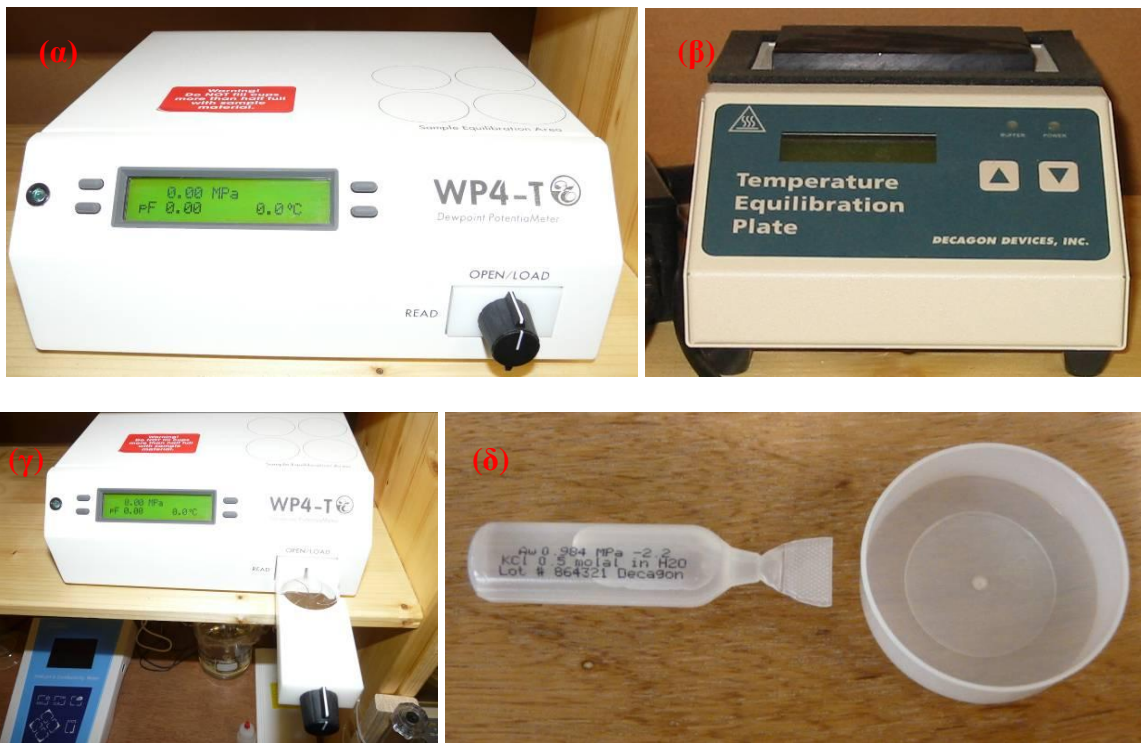
Στην πράξη, ενώ η θερμοκρασία θα ήταν δυνατόν να διατηρείται σταθερή (π.χ. μέσω της χρήσης υδατόλουτρων), υπάρχουν και άλλοι παράγοντες οι οποίοι δυσκολεύουν την τελική εξισορρόπηση σε συγκεκριμένη τιμή της ολικής μύζησης των εδαφικών δοκιμίων ταυτόσημης με την ολική μύζηση που αντιστοιχεί στην σχετική υγρασία που δημιουργεί το υδατικό διάλυμα και προβλέπεται από τον νόμο του Kelvin. Καταρχάς η εξισορρόπηση διαρκεί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Κατά συνέπεια πολύ συχνά κατά την διάρκεια ενός μεγάλου εργαστηριακού προγράμματος στο οποίο παρασκευάζονται διάφορα δοκίμια σε συγκεκριμένους χρόνους, ή απαιτείται η παρασκευή δοκιμίων μέσα σε συγκεκριμένα και αυστηρά καθορισμένα χρονικά πλαίσια που εξαρτώνται από την διαθεσιμότητα συσκευών προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών, μπορεί εντός συγκεκριμένου θαλάμου να τοποθετηθούν νέα δοκίμια πριν την εξισορρόπηση της ολικής μύζησης στα προηγούμενα. Αυτό διαταράσσει την ισορροπία στον αέρα των θαλάμων και ειδικά όταν αυξάνεται ο αριθμός των δοκιμίων ενδέχεται τελικά να υπάρξει εξισορρόπηση σε τιμές του ποσοστού υγρασίας που αντιστοιχούν σε χαμηλότερες τιμές της μύζησης. Αυτό μοιάζει καταρχήν αρνητικό, δεν είναι όμως αν εξεταστεί ο σκοπός για τον οποίο ζητείται η υλοποίηση τέτοιων τιμών κατά τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Στον Πίνακα 1 αναφέρονται οι τιμές της ολικής μύζησης που επιτυγχάνονται με τα πέντε υδατικά διαλύματα αλάτων που αναφέρονται: 14, 24, 40, 88 και 154 MPa. Ειδικά οι τέσσερις μεγαλύτερες τιμές αντιστοιχούν στην Περιοχή ΙΙΙ της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού όπου η υγρή φάση των πόρων των εδαφικών υλικών έχει χάσει τη συνέχειά της και ο λόγος κενών έχει σταθεροποιηθεί (στην παραμένουσα τιμή του). Κατά συνέπεια, αν οι τιμές της ολικής μύζησης δεν έχουν τις προηγούμενες τιμές αλλά κάποιες μικρότερες, δεν αλλοιώνεται η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (ο προσδιορισμός της οποίας είναι και το ζητούμενο), αρκεί μόνο να είναι γνωστές οι ακριβείς τιμές της ολικής μύζησης στις οποίες έχει γίνει η εξισορρόπηση των δοκιμίων. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου (chilled-mirror hygrometer). Το όργανο αυτό αποτελεί είδος ψυχομέτρου με ικανότητα μέτρησης της σχετικής υγρασίας και απευθείας απόδοσής της σε τιμή της ολικής μύζησης του εδαφικού δοκιμίου από 0 έως 300 MPa με ακρίβεια  $\pm 0.1$  MPa από 0 έως 10 MPa και  $\pm 1\%$  από 10 έως 300 MPa. Στην Φωτογραφία 3 απεικονίζεται το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων



Decagon Devices. Ο κατασκευαστής του οργάνου παρέχει πρότυπα υδατικά διαλύματα αλάτων μέσω των οποίων ο χρήστης μπορεί να ελέγχει σε τακτά χρονικά διαστήματα την ακρίβεια μέτρησης του οργάνου. Με την χρήση του λοιπόν απλοποιείται συνολικά η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου των υδατικών διαλυμάτων, όπως επιδεικνύεται και στα παραδείγματα της επόμενης παραγράφου (για την χρήση του βλ. και ASTM D 6836).



Φωτογραφία 3. α) Το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε., β) η εστία εξισορρόπησης θερμοκρασίας των δοκιμών πριν την μέτρηση, γ) η συσκευή με τον θάλαμο μέτρησης ανοικτό, και δ) φιαλίδιο προτύπου διαλύματος με τον δειγματολήπτη της συσκευής.

## 5. Καμπύλες ξήρανσης με τον χρόνο – Μετρήσεις επιτευχθεισών τιμών ολικής μύζησης

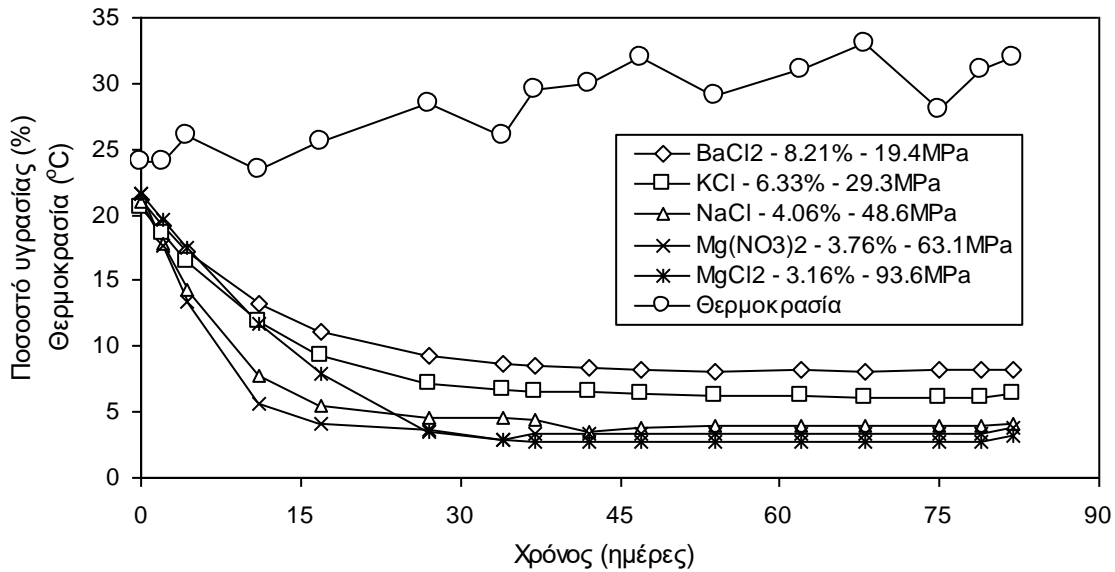
Ως αυτό το σημείο περιγράφηκαν γενικά τα χαρακτηριστικά της μεθόδου ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω υδατικών διαλυμάτων καθώς και τα πλεονεκτήματα του συνδυασμού της με το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα από πραγματικές δοκιμές.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται οι καμπύλες παρακολούθησης του ποσοστού υγρασίας εδαφικών δοκιμών και οι τελικές τιμές της ολικής μύζησης στις οποίες αυτές ισορρόπησαν. Πρόκειται για δοκίμια Αργίλου Αμαρουσίου συμπυκνωμένα με την μέθοδο Proctor πρότυπης ενέργειας συμπύκνωσης (ASTM D 698-07e1) σε υγρασία 3% μεγαλύτερη της βέλτιστης (όπως αυτή υπολογίστηκε με βάση το ίδιο πρότυπο). Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του υλικού αυτού σε όρους λόγου κενών-μύζησης. Η πρώτη ομάδα πειραματικών σημείων έχει προκύψει από εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης άξονα σε θάλαμο μύζησης με πορολίθους πίεσης διείσδυσης αέρα 1500 kPa (Μπαρδάνης και Καββαδάς 2005), ενώ η δεύτερη ομάδα πειραματικών σημείων

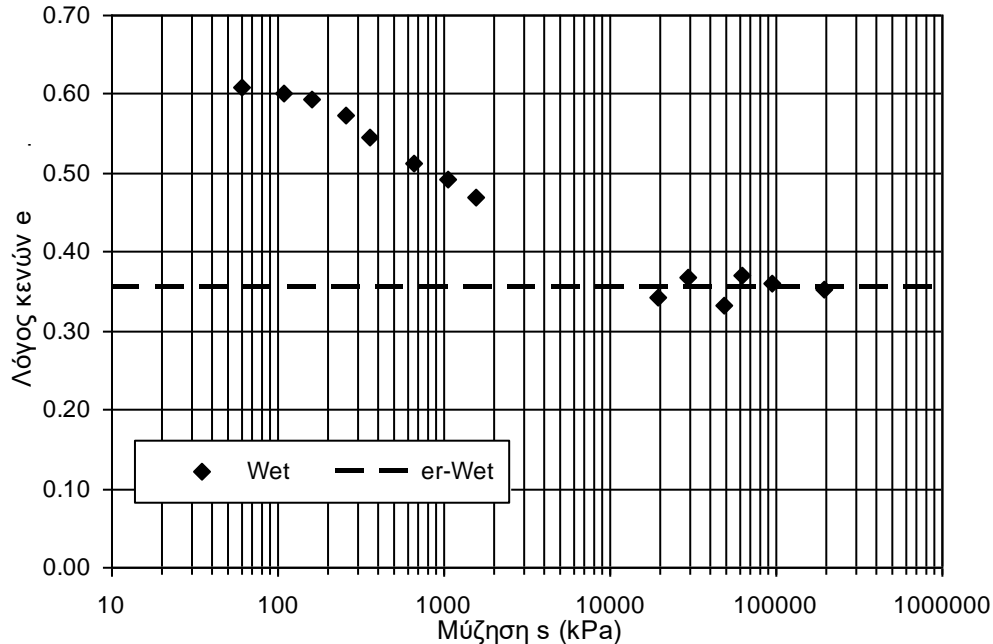
Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων





Σχήμα 1. Παρακολούθηση ποσοστού υγρασίας με τον χρόνο σε δοκίμια συμπυκνωμένης Αργίλου Αμαρουσίου (μέθοδος Proctor πρότυπης ενέργειας συμπύκνωσης κατά ASTM D-698 07e1) συμπυκνωμένα σε υγρασία 3% μεγαλύτερη της βέλτιστης και τοποθετημένων εντός των θαλάμων 5 διαφορετικών υπέρκορων υδατικών διαλυμάτων αλάτων. Παρουσιάζεται και η εξέλιξη της θερμοκρασίας του αέρα ελεγχόμενης σχετικής υγρασίας εντός των θαλάμων συντήρησης των υδατικών διαλυμάτων. Αναφέρεται η διαλυμένη ουσία κάθε άλατος, το ποσοστό υγρασίας στο οποίο ισορρόπησε κάθε δοκίμιο και τη ολική μύζηση που μετρήθηκε σε αυτό με το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου.



Σχήμα 2. Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού συμπυκνωμένης Αργίλου Αμαρουσίου (μέθοδος Proctor πρότυπης ενέργειας συμπύκνωσης κατά ASTM D-698-07e1) από δοκίμια συμπυκνωμένα σε υγρασία 3% μεγαλύτερη της βέλτιστης.

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

από εφαρμογή της μεθόδου ελέγχου της ολικής μύζησης με υδατικά διαλύματα αλάτων (εξαιρουμένου του τελευταίου σημείου το οποίο αντιστοιχεί σε δοκίμιο που αφέθηκε να αποξηρανθεί στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου και στη συνέχεια μετρήθηκε η ολική του μύζηση στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2 ο λόγος κενών έχει σταθεροποιηθεί (με την διακύμανση να αντικατοπτρίζει την ακρίβεια της μέτρησης του ολικού όγκου με την μέθοδο παραφίνωσης) επιδεικνύοντας το επιχείρημα της προηγούμενης παραγράφου.

## 6. Συμπεράσματα

Στο άρθρο παρουσιάστηκε η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης εδαφικών δοκιμίων μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης μέσω υδατικών διαλυμάτων. Παρουσιάστηκαν οι διάφοροι τρόποι εφαρμογής της μέσω της χρήσης ακόρεστων ή υπέρκορων υδατικών διαλυμάτων, αλάτων ή οξέων και υλοποίησής τους μέσω λουτρών σταθερής θερμοκρασίας ή συνδυασμό με την χρήση υγρομέτρου ψυχρού κατόπτρου. Προκειμένου για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού η προτιμητέα παραλλαγή της εφαρμογής της μεθόδου είναι με χρήση υπέρκορων διαλυμάτων αλάτων, παρακολούθηση αλλά όχι κατ' ανάγκη έλεγχο της θερμοκρασίας και τελική επιβεβαίωση της τιμής της ολικής μύζησης με την χρήση υγρομέτρου ψυχρού κατόπτρου. Αντίθετα, προκειμένου για έλεγχο της ολικής μύζησης σε δοκίμια δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών είναι προτιμητέος ο συνδυασμός ελέγχου της θερμοκρασίας και ακόρεστων διαλυμάτων οξέων, ή εάν επιλεχθούν υπέρκορα διαλύματα αλάτων, να παρεμβάλλεται η συνδεσμολογία που να επιτρέπει την αλλαγή σκεύους διαλύματος χωρίς την έκθεση του αέρα σε επαφή με το δοκίμιο στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου.

## 7. Βιβλιογραφία

Μπαρδάνης Μ., ‘Μή Κορεσμένα Εδάφη’, Διάλεξη μετά από πρόσκληση της Ελλ. Επιστ. Εταιρείας Εδαφομηχανικής & Γεωτεχνικής Μηχανικής (ΕΕΕΕΓΜ), 30 Μαΐου 2011, Αθήνα.

Μπαρδάνης Μ. και Καββαδάς Μ., ‘Εργαστηριακή διάταξη προσδιορισμού χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού. Χρήση ξεχωριστού δοκιμίου χωρίς υπόθεση σταθερού όγκου’. 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μετρολογίας, 11-12 Νοεμβρίου 2005, Αθήνα.

ASTM International, D 698-07<sup>e1</sup>, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08, Soil and Rock (I), 2006, West Conshohocken, PA.

ASTM International, D 6836-02, *Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge*, Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.09, Soil and Rock (II), 2006, West Conshohocken, PA.

Lu N., Likos W.J., “Unsaturated soil mechanics”, 2004, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Thomson W., *Philosophical Magazine*, **42**, pp. 448, 1871.

Μ. Μπαρδάνης, Σ. Γρίφιζα, ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012