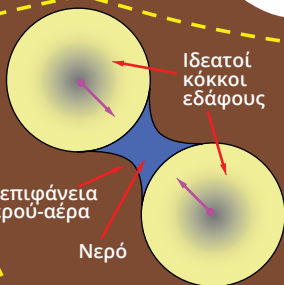
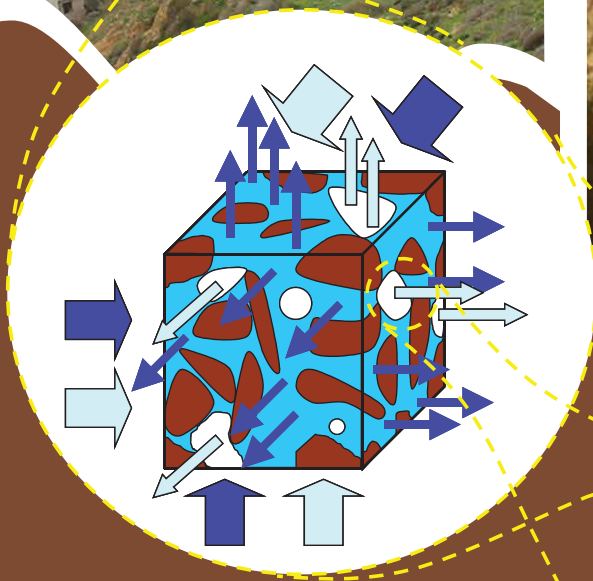
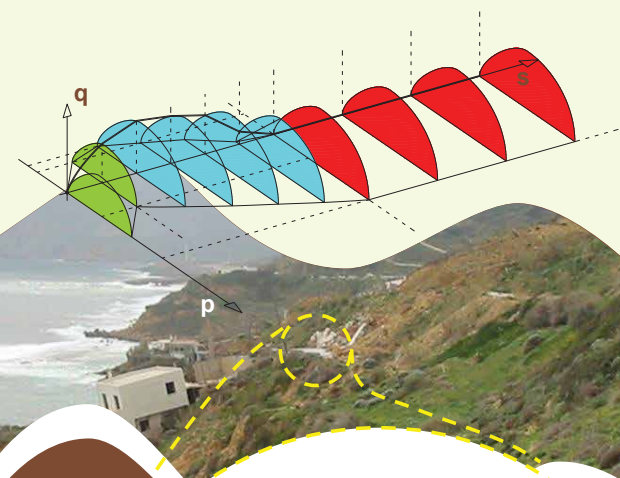


ΕΣΠΕΡΙΔΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

1η Ιουλίου 2019
Αίθουσα Εκδηλώσεων
Τεχνικού Επιμελητηρίου της Ελλάδας
Αθήνα





ΕΛΛΗΝΙΚΗ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ
ΕΤΑΙΡΕΙΑ
ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
& ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

HELLENIC
SOCIETY FOR
SOIL
MECHANICS
& GEOTECHNICAL
ENGINEERING



Milos 2022



UNSAT2022 The 8th International Conference on
Unsaturated Soils, Milos Island, Greece

Σχεδιάζοντας για την ανάπτυξη



NAMA
ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗΤΕΣ ΑΕ



NAMALAB
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ Α.Ε.

Γεωτεχνικές και γεωλογικές μελέτες
Υπηρεσίες συμβούλου
Γεωτεχνικές έρευνες
Εργαστηριακές
δοκιμές

Ειδικές δοκιμές & μετρήσεις
για μη κορεσμένα εδάφη



Κεντρικά: Υπερείδου 9, Πλάκα, Αθήνα, 10558, Τηλ. 210 3222050
Εργαστήριο: Θεραπειών 2, Κολωνός, Αθήνα, 10558, Τηλ. 210 5149020
e-mail: admin@edafos.gr / lab@edafos.gr - www.edafos.gr



ATHENS-METRO-LINE3 - GREECE



CENTRALE A GAZ, HASSI R' MEL - ALGERIA



TUNNEL PK9 - ALGERIA

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ
ΕΡΕΥΝΕΣ

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ
ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

ΕΙΔΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ
ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΕΡΓΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ
ΔΟΚΙΜΕΣ



BARRAGE BOUKHROUFA - ALGERIA



WIND FARM, TRIPOLI - GREECE



E65 CENTRAL GREECE MOTORWAY



Εδαφομηχανική Α.Τ.Ε.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ
ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΡΑΚΤΙΚΑ
ΕΣΠΕΡΙΔΑΣ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Αίθουσα Εκδηλώσεων του
Τεχνικού Επιμελητηρίου της Ελλάδας
Νίκης 4, Σύνταγμα, Αθήνα

1^η Ιουλίου 2019

Έκδοση της Ελληνικής Επιστημονικής Εταιρείας Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής (ΕΕΕΕΓΜ), 2019.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, έντυπη, ηλεκτρονική ή άλλης μορφής, μέρους ή ολόκληρης της παρούσας έκδοσης χωρίς προηγούμενη έγγραφη άδεια της Ελληνικής Επιστημονικής Εταιρείας Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής.

Οι απόψεις που εκφράζονται στα άρθρα των πρακτικών αυτών εκφράζουν τους συγγραφείς των άρθρων και όχι υποχρεωτικά την Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής.

Η Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής και οι συγγραφείς των άρθρων των πρακτικών αυτών δεν φέρουν καμμία ευθύνη από τη χρήση των αναφερόμενων στοιχείων σε αυτά τα πρακτικά κατά τη μελέτη, κατασκευή ή άλλη εργασία σχετική με τεχνικά έργα. Η ευθύνη από αυτή τη χρήση βαρύνει τους χρήστες αυτών των στοιχείων.

**ΣΗΜΕΙΩΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΕΔΡΟΥ ΤΗΣ
ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ TC106 ΤΗΣ
ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΕΝΩΣΗΣ
ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

Αποτελεί ιδιαίτερη ευχαρίστησή μου να προλογίσω αυτά τα Πρακτικά της Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών της Ελληνικής Επιστημονικής Εταιρείας Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής (ΕΕΕΕΓΜ). Η κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών είναι κρίσιμη για τη γεωτεχνική μηχανική. Τα περισσότερα συμπυκνωμένα εδάφη είναι μη κορεσμένα και πολλά φυσικά εδάφη βρίσκονται σε κατάσταση μερικού κορεσμού, ειδικά στις πιο ξηρές περιοχές της Ελλάδας και της λεκάνης της Μεσογείου γενικότερα. Όμως ακόμα στην καθημερινή μας πρακτική επιχειρούμε να αναλύσουμε τη συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών με προσεγγίσεις από τα πλήρως κορεσμένα εδάφη. Σε μερικές περιπτώσεις η προσέγγιση αυτή μπορεί να είναι συντηρητική (με το να αγνοούμε τη μύζηση του εδάφους κάνουμε θεώρηση του δυσμενέστερου δυνατού σεναρίου). Σε κάποιες περιπτώσεις όμως, η υπόθεση πλήρους κορεσμού μπορεί να αποτύχει πλήρως να προβλέψει τη συμπεριφορά του εδάφους με πολύ δυσμενείς συνέπειες (όπως οι παραμορφώσεις λόγω κατάρρευσης από διαβροχή). Συγχαίρω την ΕΕΕΕΓΜ για τη διοργάνωση αυτής της εκδήλωσης για την ανάδειξη του σημαντικού αυτού αντικείμενου στην Ελλάδα. Ελπίζω ότι αυτή η Εσπερίδα θα ανοίξει την όρεξή σας για το αντικείμενο και θα σας ενθαρρύνει να παρακολουθήσετε το 8^ο Διεθνές Συνέδριο Μη Κορεσμένων Εδαφών που θα διοργανωθεί από την ΕΕΕΕΓΜ το 2022.

Καθηγητής David Toll

Πρόεδρος της Τεχνικής Επιτροπής TC106 για
Μη Κορεσμένα Εδάφη της ISSMGE

**NOTE FROM THE CHAIRMAN OF
TECHNICAL COMMITTEE TC106 OF
THE INTERNATIONAL SOCIETY OF
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING**

It gives me great pleasure to introduce these Proceedings of the Hellenic Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering's (HSSMGE) Workshop on Unsaturated Soils. Understanding the engineering behaviour of unsaturated soils is a key aspect of geotechnical engineering; most compacted soils are unsaturated and many natural soils will exist in an unsaturated state, particularly in the more arid regions of Greece and the Mediterranean region. Yet we still, as a profession, try to analyse their behaviour using saturated soil approaches. In some circumstances the use of saturated approaches can be conservative (by neglecting soil suctions we may be considering a worst case scenario). However, in other cases, a saturated soil model can completely mispredict behaviour and we may miss important aspects with severe consequences (such as collapse on wetting). I congratulate HSSMGE for organising this event to raise the profile of this important topic in Greece. I do hope that this Workshop "wets" your appetite for the topic and you will be encouraged to attend the 8th International Conference on Unsaturated Soils to be organised by HSSMGE in 2022.

Professor David Toll

Chair of ISSMGE's Technical Committee
TC106 on Unsaturated Soils

Μεγάλο μέρος του πλανήτη επηρεάζεται από κλιματολογικές συνθήκες που επιβάλλουν την παρουσία μη κορεσμένων γεωυλικών στην επιφάνεια του φλοιού της γης ακόμα και μέχρι σημαντικό βάθος. Η ιδιαιτερότητα των υλικών αυτών είναι ότι οι πόροι τους δεν είναι πλήρως γεμάτοι με νερό, οπότε θα ήταν πλήρως κορεσμένα, ούτε εντελώς άδεια από νερό, οπότε θα ήταν απολύτως ξηρά. Στους πόρους τους συνυπάρχουν νερό και αέρας κατά την αναλογία που περιγράφει ο βαθμός κορεσμού, δηλαδή ο λόγος του όγκου των πόρων των γεωυλικών που είναι γεμάτος με νερό προς το σύνολο του όγκου των πόρων. Πολλές από τις φυσικές καταστροφές που συμβαίνουν ολοένα και συχνότερα λόγω της κλιματικής αλλαγής σχετίζονται ακριβώς με τη μεταβολή του βαθμού κορεσμού των γεωυλικών αυτών υπό την επιρροή έντονων καιρικών φαινομένων. Άλλες από αυτές είναι ραγδαίες, όπως κατολισθήσεις μετά από ραγδαίες ή παρατεταμένες βροχοπτώσεις, και άλλες αργές και προοδευτικές, όπως οι παραμορφώσεις σε κατασκευές λόγω της συρρίκνωσης του εδάφους που προκαλεί η παρατεταμένη ξηρασία, και της διόγκωσης του εδάφους που φέρνει η κατοπινή βροχερή περίοδος. Καθώς τα φαινόμενα αυτά γίνονται πιο έντονα σε περιοχές με πιο υγρό και ψυχρό κλίμα, στις οποίες μέχρι πρότινος η εμφάνιση μη κορεσμένων εδαφών ήταν σπάνια, και καθώς αναπτύσσονται διαρκώς περιοχές με ξηρότερο και θερμότερο κλίμα, στις οποίες τα γεωυλικά αυτά εμφανίζονται πολύ συχνά, αυξάνεται και η ανάγκη για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και της ενσωμάτωσής της στην καθημερινή γεωτεχνική πρακτική.

Στο πλαίσιο αυτό, οργανώθηκε η Εσπερίδα Μη Κορεσμένων Εδαφών από την Ελληνική Επισημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής (ΕΕΕΕΓΜ). Σκοπός της διεξαγωγής της ήταν η ενημέρωση των μελών της ΕΕΕΕΓΜ, της ευρύτερης κοινότητας των μηχανικών και του κοινού για το αντικείμενο αυτό και τη σημασία του στη γεωτεχνική πρακτική. Ευχή και επιδίωξη ήταν και η παρότρυνση της ελληνικής γεωτεχνικής κοινότητας για μεγαλύτερη ενασχόληση με το αντικείμενο, εν όψει και της διοργάνωσης του 8^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου Μη Κορεσμένων Εδαφών από την ΕΕΕΕΓΜ το 2022. Εκ μέρους της ΕΕΕΕΓΜ, εύχομαι τα πρακτικά αυτά να αποτελέσουν έναν χρήσιμο

A large part of the planet is affected by climate conditions imposing the presence of unsaturated geomaterials close to the surface of the earth's crust, even up to considerable depth. What makes these materials unique is that their pores are not filled with water, in which case they would be fully saturated, or completely void of water, in which case they would be completely dry. Air and water coexist in the soil pores in proportions described by the degree of saturation, i.e. the ratio of the volume of the pores filled with water over the total volume of the pores. Many of the natural disasters that are becoming progressively more frequent due to climate change are associated with the variation of the degree of saturation of these geomaterials under the influence of severe weather phenomena. Some of these disasters are rapid, as for instance catastrophic landslides after high intensity or prolonged rainfall; others are slow and progressive, as for instance strains on structures due to soil shrinkage caused by prolonged drought, and swelling imposed by the subsequent rainy season. As these phenomena are becoming more severe in regions with more humid and colder climate, where until recently the occurrence of unsaturated soils was scarce, and as regions with drier and hotter climate, in which these geomaterials appear more frequently, continue to grow economically, the need for studying the mechanical behaviour of unsaturated soils and incorporating its results in everyday geotechnical practice increases.

In this context, the Hellenic Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (HSSMGE) organised the Evening Workshop on Unsaturated Soils. The scope was to brief the members of HSSMGE, the wider engineering community and the general public on this particular subject and its importance in geotechnical practice, wishing and aiming at the same time to encourage the Hellenic geotechnical community to get further involved in the subject, especially in view of the organisation of the 8th International Conference on Unsaturated Soils by HSSMGE in 2022. On behalf of the HSSMGE, I wish these proceedings make a useful reference for the Hellenic geotechnical community.

This evening workshop would have been impossible without the contribution of many

τόμο αναφοράς για την ελληνική γεωτεχνική κοινότητα.

Η εσπερίδα αυτή θα ήταν αδύνατη χωρίς τη συνεισφορά πολλών συναδέλφων. Πρώτα και κύρια των μελών της Εκτελεστικής Επιτροπής της ΕΕΕΕΓΜ και ειδικά του Προέδρου, καθηγητή κ. Γκαζέτα χάρη στις επαφές του οποίου η εκδήλωση έτυχε μεγαλύτερης δημοσιότητας αλλά και εμπλουτίστηκε με την ομιλία του καθηγητή Eduardo Alonso από το πανεπιστήμιο UPC της Βαρκελώνης, ο οποίος απεδέχθη ευγενικά την πρόσκληση να δώσει μία ομιλία στο πλαίσιο της εσπερίδας. Φυσικά αντίστοιχες ευχαριστίες πρέπει να αποδοθούν στους ομιλητές που αποδέχθηκαν την πρόσκληση να παρουσιάσουν τις ομιλίες τους αλλά και να συγγράψουν τα αντίστοιχα άρθρα για τα πρακτικά αυτά. Εκτός από συγγραφείς, οι ίδιοι συμμετέχοντες είχαν και τον ρόλο των κριτών των υπόλοιπων εργασιών πλην της δικής τους προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ποιότητα κειμένου αλλά και η αλληλοαναφορά στα άρθρα για τη δημιουργία ενός εύχρηστου τόμου αναφοράς-«εργαλείου» για τους αναγνώστες.

Μ. Ε. Μπαρδάνης

Γενικός Γραμματέας ΕΕΕΕΓΜ

colleagues. First and foremost the members of the Executive Committee of HSSMGE, especially the President, Professor G. Gazetas, thanks to whose contacts, the event gained greater publicity and was enriched with the presentation of Professor Eduardo Alonso from the University of Catalunya (UPC), a leading authority on the subject of unsaturated soils and 57th Rankine Lecturer, who kindly accepted to make a presentation in the evening workshop. The contributions of the speakers must be acknowledged, not only for accepting the invitation to present during the event and authoring their articles for this volume of proceedings, but also for acting as peer-reviewers for each other in order to achieve the maximum text quality possible and cross-referencing between papers of the proceedings, so as to make them a useful reference for readers.

M. E. Bardanis

Secretary General HSSMGE

ΕΣΠΕΡΙΔΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Περιεχόμενα

ΦΥΣΗ, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Μ. Ε. Μπαρδάνης.....σελ. 1

Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ

Αικ. Τσιαμπούση.....σελ. 43

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ν. Θ. Χατζηγώγος.....σελ. 67

ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Δ. Λουκίδης.....σελ. 83

ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Ν. Θ. Χατζηγώγος & Μ. Ε. Μπαρδάνης.....σελ. 101

ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Π. Χ. Σιταρένιος.....σελ. 127

ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

Μ. Ε. Μπαρδάνης & Δ. Λουκίδης.....σελ. 155

ΑΓΓΛΟ-ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Μ. Ε. Μπαρδάνης.....σελ. 187

ΦΥΣΗ, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

NATURE, MECHANICAL BEHAVIOUR AND OCCURENCE OF UNSATURATED SOILS

Μ. Ε. Μπαρδάνης¹

Δρ Πολιτικός Μηχανικός

Γενικός Γραμματέας ΕΕΕΕΓΜ

Διευθυντής Εργαστηρίου, ΕΔΑΦΟΣ
Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Μεγάλο μέρος του πλανήτη επηρεάζεται από κλιματολογικές συνθήκες που επιβάλλουν την παρουσία μη κορεσμένων εδαφών στην επιφάνεια του φλοιού της γης ακόμα και μέχρι σημαντικό βάθος. Η φύση τους καθορίζεται από την αναλογία του όγκου των πόρων του εδάφους που καταλαμβάνεται από νερό με τον συνολικό όγκο των πόρων, η οποία ονομάζεται βαθμός κορεσμού. Η αλληλεπίδραση της αέριας με την υγρή φάση που συνυπάρχουν στους πόρους του εδάφους οδηγούν στην ανάπτυξη του μεγέθους που ονομάζεται μύζηση. Οι μεταβολές του μεγέθους αυτού μαζί με αυτές του βαθμού κορεσμού καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών αυτών είναι κρίσιμη για την επεξήγηση φαινομένων όπως η μεγαλύτερη αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών, η διόγκωση ή η κατάρρευση τους λόγω διαβροχής και η μείωση της μικροδιαπερατότητάς τους. Το άρθρο παρουσιάζει τις ιδιαιτερότητες των μη κορεσμένων εδαφών καταλήγοντας στη σημασία της κατανόησης της μηχανικής τους συμπεριφοράς για τα τεχνικά έργα.

ABSTRACT: A large part of the planet is affected by climatic conditions that impose the occurrence of unsaturated soils on the surface of the earth's crust even up to considerable depth. Their nature is dictated by the proportion of the pore volume that is filled with

water over the whole of the pore volume, which is termed degree of saturation. The interaction between the air phase and the water phase that coexist in the soil pores allow the development of the variable termed suction. Changes of this variable and the degree of saturation dictate the mechanical behavior of unsaturated soils. Knowledge of the mechanical behavior of these materials is critical for the explanation of phenomena such as the greater strength of unsaturated soils, their swelling or collapse upon inundation and the decrease of their microporosity and the increase of their macroporosity. The article presents the special characteristics of unsaturated soils summing up to the importance of understanding their mechanical behavior for engineering works.

1. Εισαγωγή

Μή κορεσμένο ονομάζεται το έδαφος εκείνο του οποίου ο βαθμός κορεσμού, δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών του που πληρούνται με νερό προς τον συνολικό όγκο των κενών του, είναι μικρότερος της μονάδας και μεγαλύτερος του μηδενός. Εδαφικά υλικά με βαθμό κορεσμού ίσο με τη μονάδα ονομάζονται πλήρως κορεσμένα και εδαφικά υλικά με μηδενικό βαθμό κορεσμού απολύτως ξηρά. Η εμφάνιση των μη κορεσμένων εδαφών στον ελλαδικό χώρο είναι ιδιαίτερα συχνή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους στις θερμότερες και ξηρότερες περιοχές, και κατά τους θερινούς μήνες, ακόμα και στις λιγότερο θερμές ή ξηρές περιοχές της χώρας. Γι' αυτόν τον λόγο έχει ιδιαίτερη σημασία η μελέτη της φύσης και της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών σε μια χώρα όπως η Ελλάδα. Τα περισσότερα εγχειρίδια Εδαφομηχανικής και προπτυχιακές ή ακόμα και μεταπτυχιακές σειρές μαθημάτων Εδαφομηχανικής όμως βασίζονται στην υπόθεση ότι όλα τα εδαφικά υλικά είναι πλήρως κορεσμένα με νερό ή απολύτως ξηρά. Οι λόγοι για αυτό είναι τρεις: α) η εδαφομηχανική αναπτύχθηκε στη Βόρεια Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική όπου το κλίμα είναι τόσο ψυχρό και υγρό, ώστε η ανώτερη, μη κορεσμένη, ζώνη του εδάφους είναι συνήθως σχετικά ρηχή ή και ανύπαρκτη σε φυσικά εδάφη με αποτέλεσμα τα περισσότερα γεωτεχνικά έργα να κατασκευάζονται μέσα σε πλήρως κορεσμένο έδαφος και επομένως η παραδοχή ότι το έδαφος είναι πλήρως

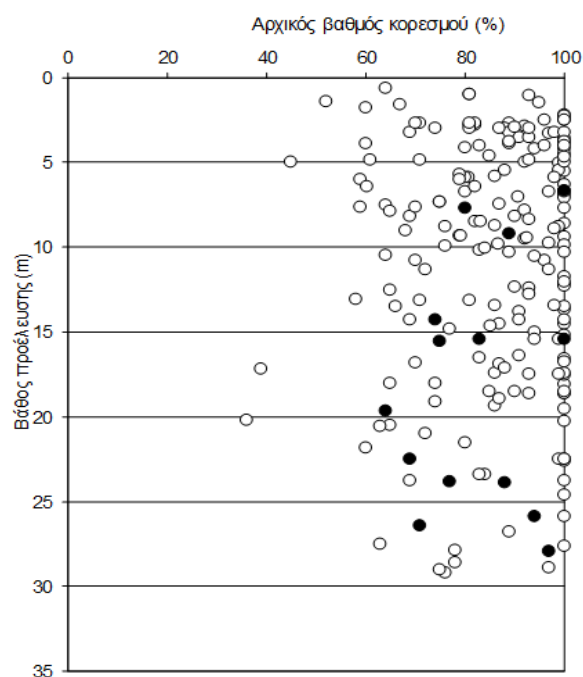
¹ Ηλεκτρονική διεύθυνση επικοινωνίας:
mbardanis@edafos.gr

κορεσμένο είναι συνήθως ορθή, β) η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών αποδείχθηκε πολύ πιο δύσκολη στην κατανόησή της σε σχέση με αυτή των πλήρως κορεσμένων εδαφών δικαιολογώντας τη χρονική υστέρηση στην κατανόηση και αξιοποίησή της σε σχέση με την αντίστοιχη των πλήρως κορεσμένων εδαφών, και γ) η βασική παραδοχή επίσης πίσω από τη μελέτη των εδαφικών υλικών όταν οι πόροι τους είναι πλήρως γεμάτοι με νερό είναι ότι η κατάσταση αυτή βρίσκεται προς την πλευρά της ασφάλειας. Για παράδειγμα σε ό,τι αφορά τη διατμητική αντοχή, αυτή είναι μεγαλύτερη για ένα μη κορεσμένο έδαφος σε σχέση με το ίδιο έδαφος όταν είναι πλήρως κορεσμένο.

Δεδομένου όμως ότι μη κορεσμένα μπορεί να είναι φυσικά εδάφη σε περιοχές του κόσμου που οι κλιματολογικές συνθήκες το επιτρέπουν (όπως η Ελλάδα) αλλά και όλες οι συμπυκνωμένες επιχώσεις (αρχικά, πριν την εφαρμογή φορτίου, και ανεξαρτήτως κλιματολογικών συνθηκών), η παραδοχή πλήρους κορεσμού δεν επιτρέπει την ορθή μελέτη της φύσης και της μηχανικής συμπεριφοράς φυσικών εδαφών χωρών με θερμό και ξηρό κλίμα αλλά και των επιχώσεων. Η οικονομική ανάπτυξη χωρών με θερμότερο και ξηρότερο κλίμα ωστόσο, με τη συνεπαγόμενη αύξηση των αναγκών των χωρών αυτών σε έργα υποδομής, οδήγησε στην ενασχόληση με τα μη κορεσμένα εδάφη, αφού γεωτεχνικά έργα στις χώρες αυτές κατασκευάζονται μέσα σε μη κορεσμένα εδάφη ή επί αυτών. Επίσης η ανάγκη για δημιουργία υπόγειων χώρων ταφής πυρηνικών αποβλήτων στις πιο προηγμένες βιομηχανικά χώρες έχει ως προαπαιτούμενο τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και της επιρροής της θερμοκρασίας στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών γενικώς, αφού η θερμότητα που εκπέμπουν τα πυρηνικά απόβλητα μειώνει το βαθμό κορεσμού των συμπυκνωμένων υλικών που τα περιβάλλουν στους υπόγειους χώρους ταφής τους διατηρώντας τα μη κορεσμένα. Η συντηρητικότητα της θεώρησης των εδαφικών υλικών ως πλήρως κορεσμένων ακόμα και όταν δεν είναι, βρίσκεται σε ευθεία αντίθεση με την επιθυμία επίτευξης οικονομίας που πάντοτε ενδιαφέρει στα τεχνικά έργα. Συχνά άλλωστε οι λόγοι για τους οποίους η παραδοχή πλήρους κορεσμού θεωρείται ότι βρίσκεται στην πλευρά της ασφάλειας οδηγεί στο αντίθετο αποτέλεσμα όταν εξετάζονται αντίστροφα προβλήματα (π.χ. αντίστροφες αναλύσεις κατολισθήσεων). Εκτός αυτού, σχετικά πρόσφατα έχει παρατηρηθεί και σε χώρες με μέχρι πρότινος πιο ψυχρό και υγρό κλίμα, κλιματική

μεταβολή η οποία κατά τους θερινούς μήνες επιφέρει μεγαλύτερη ταπείνωση του υπόγειου ορίζοντα, μικρότερη υγρασία του εδάφους κοντά στην επιφάνεια και αποψίλωση χλωρίδας που επιτείνει ακόμα περισσότερο την επιφανειακή αποξήρανση.

Εκτός από αυτούς τους λόγους, η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών έχει συχνά μεγάλη σημασία για αντίστροφες αναλύσεις αστοχιών αλλά και προσπάθεια ερμηνείας δοκιμών πεδίου και κυρίως εργαστηρίου. Στο Σχ. 1 παρουσιάζεται ο αρχικός βαθμός κορεσμού εδαφικών δοκιμών που υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης (Μπαρδάνης & Καβουνίδης, 2001). Όπως φαίνεται από το Σχ. 1, βαθμός κορεσμού μικρότερος του 100% μπορεί να βρεθεί και σε σημαντικά βάθη αν υποτεθεί ότι οι τιμές αυτές του βαθμού κορεσμού δεν είχαν επηρεαστεί από ξήρανση των εδαφικών δειγμάτων.



Σχ. 1. Αρχικός βαθμός κορεσμού εδαφικών δοκιμών από δείγματα από γεωτρήσεις στην ξηρά (άδειοι κύκλοι) και στη θάλασσα (μαύρο γέμισμα) που υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με το βάθος κάτω από την επιφάνεια της ξηράς και της θάλασσας αντίστοιχα.

Fig. 1. Initial degree of saturation of soil specimens from samples from boreholes on dry land (empty circles) and at sea (full circles) subjected to one-dimensional compression with the depth of the samples below the surface and bottom of the sea respectively.

των των γεωτρήσεων από δειγματοληψίας μέχρι εκτελέσεως της δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης. Εκείνο που εντυπωσιάζει όμως είναι ότι ακόμα και σε εδαφικά δοκίμια που μορφώθηκαν από δείγματα που προήλθαν από θαλάσσιες γεωτρήσεις, ο αρχικός βαθμός κορεσμού των εδαφικών δοκιμών κατά τον χρόνο έναρξης της δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης βρέθηκε για κάποια σημαντικά μικρότερος του 100%. Προφανώς η τιμή αυτή του βαθμού κορεσμού δεν είναι πραγματική, αλλά αποτέλεσμα της ξήρανσης των συγκεκριμένων εδαφικών δειγμάτων μέχρι να έρθει η σειρά τους στο εργαστήριο για να εκτελεστούν οι δοκιμές. Αυτό που επισημαίνει το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι τη σημασία της γνώσης της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών ακόμα και σε γεωλογικά και κλιματολογικά περιβάλλοντα που δεν οδηγούν στη δημιουργία μη κορεσμένων εδαφών στη φύση, αλλά αυτά τελικώς προκύπτουν ως αποτέλεσμα της στάθμης της γεωερευνητικής και εργαστηριακής πρακτικής στον συγκεκριμένο γεωγραφικό χώρο.

2. Τί καθιστά τα μη κορεσμένα εδάφη ιδιαίτερα; Η φύση των υλικών αυτών. Η μύζηση

Η ιδιαιτερότητα των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών είναι ότι στους πόρους τους συνυπάρχει η υγρή με την αέρια φάση και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αν είναι u_a η πίεση στην αέρια φάση και u_w η πίεση στην υγρή φάση, η διαφορά των δύο φάσεων $u_a - u_w$, ονομάζεται μύζηση (suction) και συμβολίζεται $u_a - u_w$, s , ή ψ . Φυσικά εκφράζει την αντίσταση ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω αφαίρεση νερού από τους πόρους του και γι' αυτό διακρίνεται σε τρία είδη: α) την μύζηση εδαφικού σκελετού (matrix ή matric suction) που εκφράζει την αντίσταση ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω αφαίρεση νερού από τους πόρους του λόγω τριχοειδών φαινομένων εντός αυτών, β) την ωσμωτική μύζηση (osmotic suction) που εκφράζει την αντίσταση ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω αφαίρεση νερού από τους πόρους του λόγω ώσμωσης του νερού των πόρων εξαιτίας της διάλυσης ιόντων σε αυτό, και γ) την ολική μύζηση (total suction) που εκφράζει το σύνολο της αντίστασης ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω αφαίρεση νερού από τους πόρους του και λόγω τριχοειδών φαινομένων και λόγω ώσμωσης.

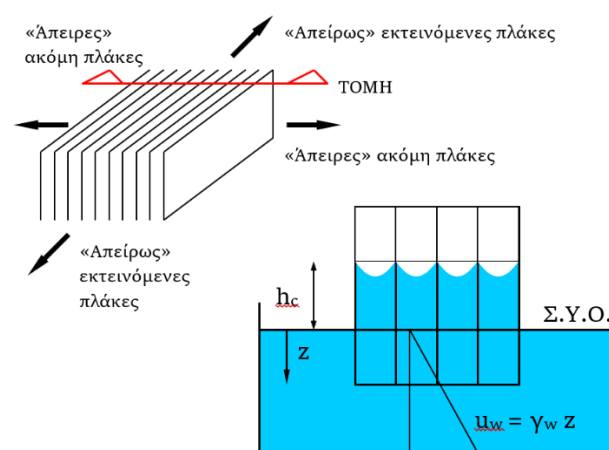
Για να γίνουν τα προαναφερθέντα καλύτερα κατανοητά θα εξεταστεί ένα θεωρητικό προσομοίωμα των εδαφικών υλικών. Έστω ότι τα εδαφικά υλικά αποτελούνταν από παράλληλα διατεταγμένες συμπαγείς πλάκες, απείρως εκτεινόμενες, σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους, κατά τον τρόπο που φαίνεται στο Σχ. 2. Αν η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρισκόταν αρχικά στο ύψος h_c πάνω από τη στάθμη που φαίνεται στο Σχ. 2 και προοδευτικά άρχιζε να χαμηλώνει, τότε η πίεση στην υγρή φάση θα γινόταν μικρότερη από την πίεση στην αέρια (έστω η ατμοσφαιρική) και η ισορροπία μεταξύ δύο πλακών θα είχε όπως προκύπτει στην Εξ. 1 (βλ. Σχ. 3 για ορισμό των σχετικών μεγεθών, T_s η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης), ενώ η διαφορά πίεσης μεταξύ υγρής και αέριας φάσης θα εκφραζόταν από την Εξ. 2. Στην τελική κατάσταση λοιπόν, μετά την ταπείνωση στάθμης του υπόγειου ορίζοντα στην τελική θέση και για ισορροπία δυνάμεων στο νερό που έχει απομείνει μεταξύ πλακών πάνω από τη νέα στάθμη του υπόγειου ορίζοντα θα πρέπει να ισχύει η Εξ. 3.

$$2 T_s \sin \beta = \Delta u (2 R_s \sin \beta) \quad \text{ή}$$

$$2 T_s \cos \alpha = \Delta u (2 R_s \cos \alpha) \quad (1)$$

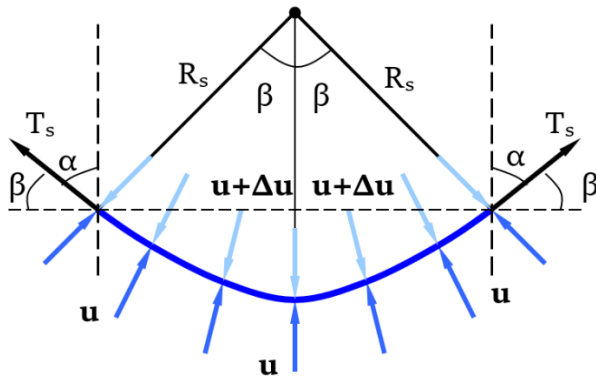
$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2)$$

$$\Delta u = \gamma_w h_c \quad (3)$$



Σχ. 2. Στάθμη υπόγειου ορίζοντα και ύψος τριχοειδούς ανύψωσης σε προσομοίωμα των πόρων του εδάφους από πλάκες σε ίση απόσταση.

Fig. 2. Water table and capillary height in a model of the soil pores as plates at equal distances.

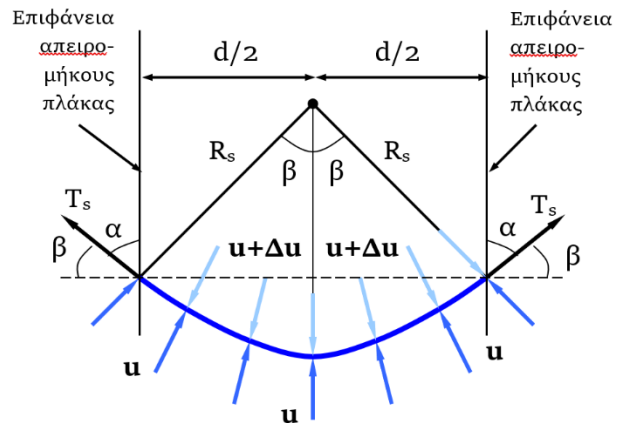


Σχ. 3. Καμπυλωμένη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης σε δύο διαστάσεις με τις ασκούμενες δυνάμεις και πιέσεις και τα γεωμετρικά μεγέθη της Εξ. 1.

Fig. 3. Curved interface of liquid-air phase in two dimensions with forces and pressures applied and the geometrical characteristics involved in Eq. 1.

Με συνδυασμό των Εξ. 2 & 3 προκύπτει η Εξ. 4 στην οποία το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης συσχετίζεται με την ακτίνα καμπυλότητας της διεπιφάνειας υγρής αέριας φάσης. Αν στο προσομοίωμα των πλακών σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους, είναι d η σταθερή απόσταση μεταξύ των πλακών, τότε όπως προκύπτει από το Σχ. 4, η ακτίνα καμπυλότητας R_s μπορεί να εκφραστεί εύκολα ως συνάρτηση της απόστασης των πλακών και της γωνίας καμπύλωσης της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης α (Εξ. 5). Αντικαθιστώντας την ακτίνα καμπυλότητας R_s από την Εξ. 5 στην Εξ. 4 προκύπτει η Εξ. 6.

Η Εξ. 6 εκφράζει για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών το ύψος μέχρι το οποίο οι «πόροι» του «εδάφους» παραμένουν εντελώς γεμάτοι με νερό ως αποτέλεσμα της διαφοράς πίεσης στην υγρή και την αέρια φάση, με την πίεση στην υγρή φάση να είναι μικρότερη από την πίεση στην αέρια. Δηλώνει επίσης ότι το ύψος αυτό πάνω από τη στάθμη του υπογείου ορίζοντα είναι συνάρτηση της φύσης της υγρής φάσης, όπως εκφράζεται από το ειδικό βάρος του νερού γ_w και την επιφανειακή του τάση T_s , της απόστασης των πλακών d και της αλληλεπίδρασης της στερεάς φάσης με την υγρή, όπως εκφράζεται από τη γωνία α . Η γωνία επαφής α συνιστά εγγενή ιδιότητα ενός συστήματος αποτελούμενου από στερεά, υγρή και αέρια φάση (Lu & Likos, 2004). Προκειμένου για ένα μη κορεσμένο εδαφικό υλικό η γωνία α ορίζεται ως η γωνία



Σχ. 4. Καμπυλωμένη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης σε δύο διαστάσεις με τις ασκούμενες δυνάμεις και πιέσεις και τα γεωμετρικά μεγέθη της Εξ. 1.

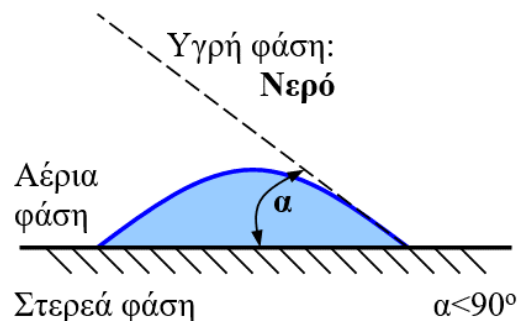
Fig. 4. Curved interface of liquid-air phase in two dimensions with forces and pressures applied and the geometrical characteristics involved in Eq. 1.

μεταξύ της εφαπτομένης στη διεπιφάνεια αέριας-υγρής φάσης και της διεπιφάνειας υγρής-στερεάς φάσης, στο σημείο επαφής των δύο διεπιφανειών.

$$h_c = \frac{T_s}{\gamma_w R_s} \quad (4)$$

$$R_s = (d/2) / \cos \alpha \quad (5)$$

$$h_c = \frac{2T_s \cos \alpha}{\gamma_w d} \quad (6)$$



Σχ. 5. Αλληλεπίδραση στερεάς-υγρής-αέριας φάσης σε μη κορεσμένο εδαφικό υλικό.

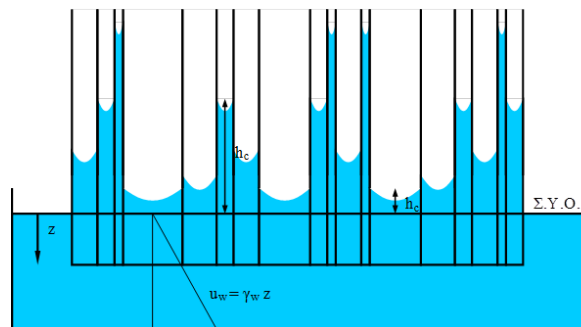
Fig. 5. Solid-liquid-air phase in an unsaturated soil.

Το σημαντικό σημείο που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση όπως κατέληξε στην Εξ. 6 είναι ότι για το προσομοίωμα του εδάφους με απειρομήκειες πλάκες από το ίδιο υλικό σε σταθερή μεταξύ τους απόσταση είναι ότι το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης εξαρτάται μόνο από την απόσταση των πλακών και άρα θα είναι σταθερό, οπουδήποτε μέσα στο ιδεατό αυτό έδαφος αφού είναι σταθερή η απόσταση των πλακών (για δεδομένο υγρό των πόρων, υλικό κατασκευής των πλακών και συνθήκες πίεσης, υγρασίας και θερμοκρασίας στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα). Στην ιδεατή αυτή περίπτωση λοιπόν θα είχαμε τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα σε μία θέση, νερό έως το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης και από εκεί και πάνω μόνο αέρα (Σχ. 2).

Αντίθετα, αν στο προσομοίωμα της προηγούμενης περίπτωσης οι πλάκες δεν απείχαν σταθερή απόσταση μεταξύ τους αλλά μεταβλητή, κυμαινόμενη από πολύ μικρή έως πολύ μεγάλη, τότε εξαιτίας της ύπαρξης διαφορετικών αποστάσεων μεταξύ των πλακών, θα ήταν διαφορετικό και το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης από διάκενο σε διάκενο μεταξύ πλακών, ποικίλλοντας από πολύ μικρό, ίσως και μηδενικό εκεί που η απόσταση των πλακών θα ήταν πολύ μεγάλη (μεγάλοι πόροι του εδάφους), έως πολύ μεγάλο εκεί που η απόσταση των πλακών θα ήταν πολύ μικρή (μικροί πόροι του εδάφους) όπως φαίνεται στο Σχ. 6.

Το παράδειγμα αυτό επιτρέπει να φανταστούμε τι συμβαίνει στο εσωτερικό της ιδιαίτερα πιο πολύπλοκης διάταξης των σωματιδίων των πραγματικών εδαφών (κόκκων και πλακιδίων), καταρχάς σε ό,τι αφορά την ποικιλία ως προς το μέγεθος των πόρων που δημιουργούνται. Αν η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους είναι τέτοια που να εξασφαλίζει πρακτικά ομοιογενές μέγεθος πόρων, τότε πράγματι καθώς απομακρυνόμαστε προς τα πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, μέχρι ένα ύψος το εδαφικό υλικό θα είναι πλήρως κορεσμένο (το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης για το κυρίαρχο μέγεθος πόρων) και από αυτό το ύψος και πάνω προοδευτικά θα αρχίσει να εξέρχεται το νερό των πόρων αρκετά ραγδαία (θεωρητικά αμέσως) λόγω της έλλειψης ποικιλίας μεγεθών πόρων.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση εδαφικών υλικών με κοκκομετρική διαβάθμιση τέτοια που να οδηγεί σε πόρους διαφορετικού μεγέθους εντός του εδάφους, αρχικά το έδαφος παραμένει πλήρως κορεσμένο μέχρι το ύψος από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μέγεθος πόρων. Στη συνέχεια, όσο το ύψος



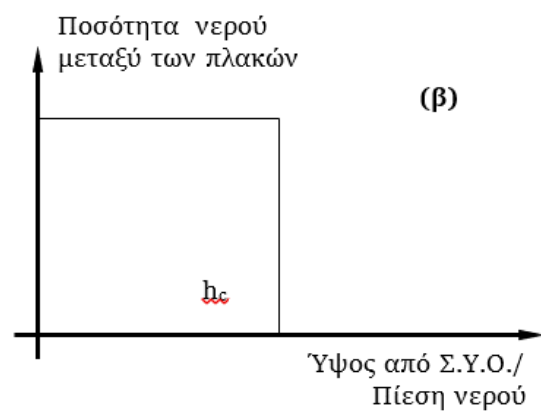
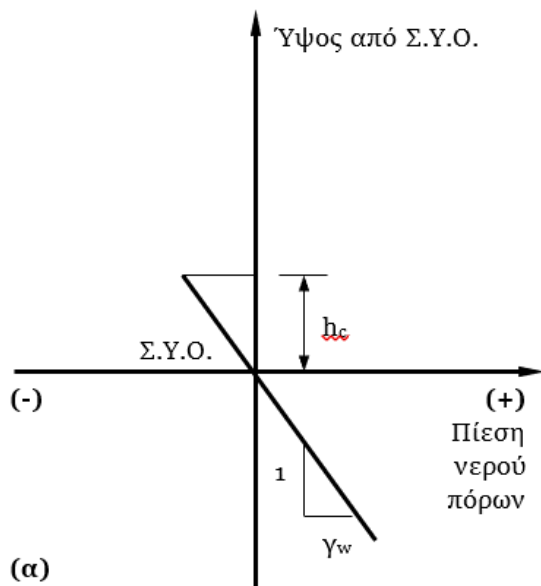
Σχ. 6. Προσομοίωση της διαφορετικής ικανότητας συγκράτησης νερού των πόρων των εδαφικών υλικών μέσω του διαφορετικού ύψους τριχοειδούς ανύψωσης σε ιδεατό προσομοίωμα από απειρομήκειες πλάκες σε διαφορετική απόσταση μεταξύ τους.

Fig. 6. Simulation of the varying ability of the soil pores to retain water due to different capillary height in idealized model of infinite length plates at different distances between them.

από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα μεγαλώνει, στραγγίζουν προοδευτικά και οι μικρότεροι πόροι και οι εσοχές των μεγαλύτερων πόρων, οδηγώντας σε αργή και όχι ραγδαία απώλεια ύδατος από τους πόρους με την περαιτέρω αύξηση του ύψους από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Και αυτή η περίπτωση προσομοιώνεται από το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους.

Οι περιορισμοί των θεωρητικών αυτών προσομοιωμάτων της επίδρασης των τριχοειδών φαινομένων αφορούν στη γεωμετρική προσομοίωση του σχήματος των πόρων του εδαφικού υλικού, αφού το νερό μπορεί να εξέλθει από τους πόρους αλλά όχι από τις παρυφές τους, όπου οι αποστάσεις μεταξύ των κόκκων και των πλακιδίων είναι μικρότερες και ως εκ τούτου σε εκείνα τα σημεία των πόρων είναι διαφορετικές οι αποστάσεις που υπεισέρχονται. Θα πρέπει να απομακρυνθούμε δυσανάλογα πολύ σε σχέση με πριν από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα για να εξέλθει το νερό και από εκεί.

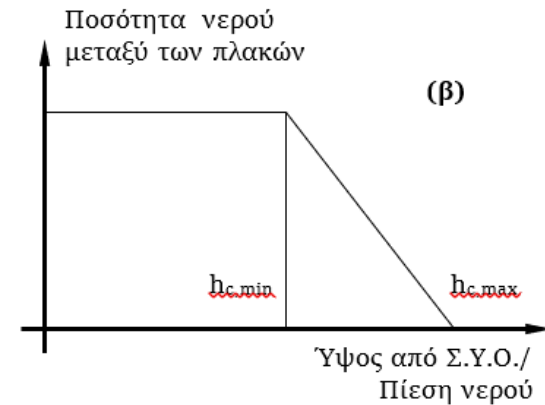
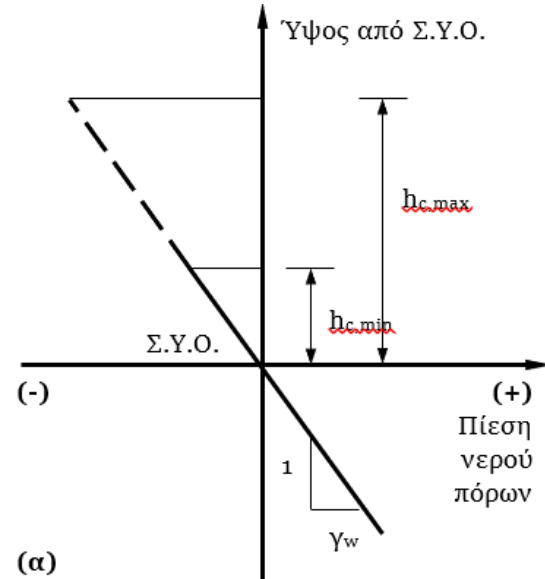
Επεκτείνοντας το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών στη συσχέτιση παρουσίας νερού και πίεσης προκύπτουν τα Σχ. 7 & 8. Στο Σχ. 7α παρουσιάζεται η κατανομή της πίεσης στο νερό μεταξύ των πλακών στο προσομοίωμα με τις πλάκες σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και κάτω η πίεση του νερού είναι θετική και από εκεί και πάνω η πίεση είναι αρνητική μέχρι την τιμή που



Σχ. 7. Κατανομές πίεσης του νερού με την απόσταση από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα (α) και του περιεχόμενου νερού με το ύψος από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα (β) για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε σταθερή απόσταση.

Fig. 7. Water pressure profile with the distance from the water table (a) and the water retained with the height from the water table (b) in the equal distance infinite length plates model.

αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης h_c . Συσχετίζοντας την ποσότητα νερού που περιέχεται μεταξύ των πλακών πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα με το ύψος από τη στάθμη αυτή (ή αντίστοιχα την πίεση στην οποία αντιστοιχεί αυτό το ύψος) προκύπτει το Σχ. 7β για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Αντίστοιχα για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους, στο Σχ. 8α παρουσιάζεται η κατανομή της πίεσης στο νερό



Σχ. 8. Κατανομές πίεσης του νερού με την απόσταση από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα (α) και του περιεχόμενου νερού με το ύψος από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα (β) για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους.

Fig. 8. Water pressure profile with the distance from the water table (a) and the water retained with the height from the water table (b) in the different distances infinite length plates model.

μεταξύ των πλακών. Η διαφορά με την προηγούμενη περίπτωση είναι ότι από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και πάνω η πίεση είναι αρνητική με νερό να υπάρχει σε όλα τα κενά μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στο ελάχιστο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης $h_{c, min}$ και στα κενά μικρότερης απόστασης πλακών μέχρι το μέγιστο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης $h_{c, max}$ που αντιστοιχεί στην ελάχιστη απόσταση μεταξύ των πλακών. Κατά συνέπεια από το ύψος $h_{c, min}$ (ή την πίεση που αντιστοιχεί σε αυτό) και πάνω, η μέση

ποσότητα νερού που περιέχεται μεταξύ των πλακών δεν μηδενίζεται όπως στο Σχ. 7β αλλά μειώνεται προοδευτικά μέχρι το ύψος $h_{c,max}$ όπως φαίνεται στο Σχ. 8β (η μείωση αυτή απεικονίζεται ενδεικτικά γραμμική –προφανώς θα είναι μη γραμμική με τα κοίλα στραμμένα προς τα πάνω ή προς τα κάτω αν κυριαρχούν οι μικρότερες αποστάσεις πλακών ή οι μεγαλύτερες αποστάσεις αντίστοιχα).

Η γραφική απεικόνιση της μέσης ποσότητας του νερού με το ύψος από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα/πίεση του νερού αποτελεί την εισαγωγή στη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού που αποτελεί τη βασική έννοια για την περιγραφή της φύσης και της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών (Τσιαμπούση, 2019).

Μία βασική παραδοχή που έγινε επίσης για τη χάραξη των Σχ. 7 & 8, είναι ότι κατά την απώλεια ύδατος δεν συμβαίνει οποιαδήποτε μείωση του συνολικού όγκου (συρρίκνωση -shrinkage). Μια τέτοια μεταβολή θα επέβαλε επιπλέον μείωση της ποσότητας νερού που δείχνεται στα Σχ. 7β και 8β, ακόμα και κατά το στάδιο πριν το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης.

Παρόμοια θεωρητικά προσομοιώματα της απώλειας ύδατος με την απομάκρυνση από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα με το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε σταθερή ή διαφορετική απόσταση μεταξύ τους έχουν διατυπωθεί και με τριχοειδείς σωλήνες της ίδιας ή διαφορετικής διαμέτρου αλλά και με σφαίρες σταθερής ή διαφορετικής διαμέτρου σε διατάξεις μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας (ενδεικτικά: Fredlund & Rahardjo, 1993, Lu & Likos, 2004). Για τα προσομοιώματα αυτά έχουν προσδιοριστεί θεωρητικές συσχετίσεις της διαφοράς της πίεσης στην αέρια και την υγρή φάση και το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης, παρόμοιες με την Εξ. 6.

Στα πλαίσια του προσομοιώματος των απειρομήκων πλακών δεν έχουν υπεισέλθει καθόλου μέχρι αυτό το σημείο οι ιδιαιτερότητες των ορυκτών που αποτελούν τους κόκκους και τα πλακίδια των εδαφικών υλικών. Οι απειρομήκεις πλάκες δηλαδή θεωρήθηκε ότι αποτελούνται από υλικό τέτοιο που δεν υπάρχει κάποια ιδιαιτερότητα κατά την επαφή των μορίων της επιφάνειάς τους με τα μόρια του νερού πλην της διαβροχής ή μή της στερεάς φάσης από την υγρή. Αυτό είναι επαρκές για να προσομοιώσει τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν οι κόκκοι των χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών με το νερό των πόρων τους και είναι γνωστό ως τριχοειδές προσομοίωμα (capillary model).

Στα εδαφικά υλικά όμως αναπτύσσονται ηλεκτρικές δυνάμεις και δυνάμεις van der Waals. Τα πεδία των δυνάμεων αυτών είναι ισχυρά σε πολύ μικρή απόσταση από τη διεπιφάνεια στερεάς και υγρής φάσης και έχουν μεγαλύτερη σημασία για λεπτόκοκκα εδάφη, όπου η αναλογία των διαστάσεων των πλακιδίων πλέον –και όχι κόκκων– ευνοεί την ανάπτυξη ισχυρότερων τέτοιων δυνάμεων.

Οι ηλεκτρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται οφείλονται στα ηλεκτρικά πεδία που προκαλούνται από την αρνητική φόρτιση στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων. Η επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών που αποτελούν τα πλακίδια των αργιλικών εδαφών είναι ηλεκτρικά φορτισμένη με θετικά φορτία να αναπτύσσονται κατά μήκος της περιμέτρου των πλακιδίων και αρνητικά φορτία να αναπτύσσονται επί της επιφάνειάς τους. Το αποτέλεσμα είναι τα ηλεκτρικά φορτισμένα δίπολα των μορίων του νερού να έλκονται από την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και να προσκολλώνται σε αυτήν σχηματίζοντας τη διπλή στρώση του προσροφημένου νερού (adsorbed water) εκατέρωθεν των αργιλικών πλακιδίων (Terzaghi, 1928, Grim, 1968), η οποία με τη σειρά της περιβάλλεται από το απορροφημένο νερό (absorbed water) που συνδέεται με το νερό στην προσροφημένη στρώση (επίσης συγκρατούμενο με ηλεκτροστατικής φύσης δυνάμεις στο προσροφημένο νερό και όχι τα αργιλικά πλακίδια). Γύρω από αυτό υπάρχει το ελεύθερο νερό (free water). Ο Bolt (1956) χρησιμοποίησε τη θεωρία αυτή για να εξηγήσει τους λόγους της παρουσίας νερού πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα σε αργιλικά εδάφη καθώς και της συρρίκνωσης των αργίλων κατά την ξήρανση. Το νερό που μπορεί να απομακρυνθεί από τα αργιλικά εδάφη κατά τον Bolt (1956) είναι το ελεύθερο νερό.

Οι δυνάμεις van der Waals οφείλονται στην αλληλεπίδραση δυνάμεων που αναπτύσσονται σε ατομική κλίμακα μεταξύ των μορίων που απαρτίζουν την επιφάνεια της στερεάς φάσης και των μορίων που απαρτίζουν την υγρή φάση και εμφανίζονται σε όλα τα είδη των εδαφικών υλικών.

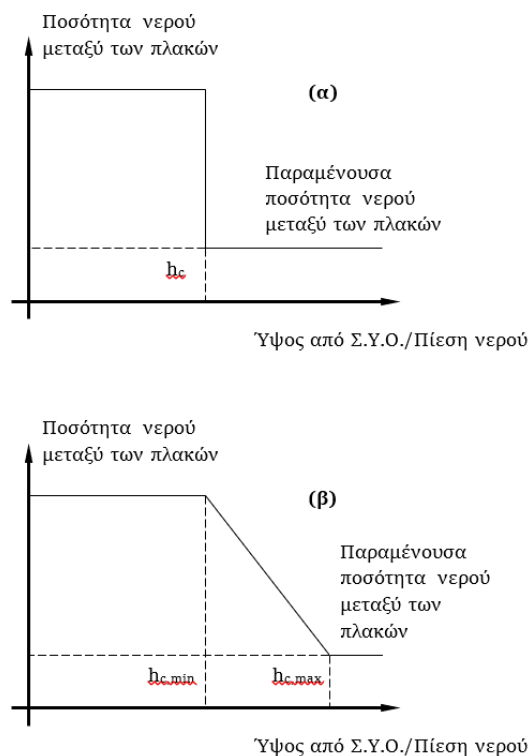
Η επιρροή και των δύο αυτών ειδών δυνάμεων είναι εμφανέστερη στην υγρή φάση που έχει προσροφηθεί στην επιφάνεια αργιλικών πλακιδίων, τα οποία έχουν και σημαντικά ηλεκτρικά φορτία και μεγάλη επίπεδη επιφάνεια σε σχέση με το μέγεθός τους. Η επιρροή και των ηλεκτρικών δυνάμεων και των δυνάμεων van der Waals μειώνεται ραγδαία με την αύξηση της

απόστασης από την επιφάνεια των στερεών σωματιδίων (κόκκοι και πλακίδια).

Αν αναλογιστούμε λοιπόν την επιρροή των δυνάμεων αυτών στα εδαφικά υλικά, είναι λογικό να είναι εντονότερη η επίδρασή τους εκεί που οι πόροι των εδαφικών υλικών είναι μικρότεροι, αφού αυτοί εμφανίζονται εκεί που είναι πιο λεπτόκοκκα τα εδάφη, ή στις παρυφές και εσοχές πόρων, όπου αναμένεται πάλι να είναι μεγαλύτερη η επίδραση αυτών των δυνάμεων. Γι' αυτό λοιπόν το λόγο, τα φαινόμενα προσρόφησης έχουν μεγαλύτερη σημασία εκεί που το ποσοστό υγρασίας και ο βαθμός κορεσμού έχουν μικρές τιμές, οπότε η υγρή φάση των πόρων περιορίζεται σε λεπτές στρώσεις που περιβάλλουν τη στερεά φάση. Οι λεπτές αυτές στρώσεις είτε δεν μπορούν να απομακρυνθούν από την επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων, είτε για να απομακρυνθούν, η μύζηση πρέπει να γίνει δυσανάλογα μεγάλη για την απομάκρυνση της ίδιας ποσότητας νερού σε σχέση με εκείνη που απαιτείται για την απομάκρυνση της ίδιας ποσότητας νερού εκεί που κυριαρχούν τα τριχοειδή φαινόμενα (μεγαλύτεροι πόροι).

Εισάγοντας τη λεπτή αυτή στρώση στο προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών (είτε σε σταθερή, είτε σε διαφορετική απόσταση), πάνω από το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης υπάρχει μία μικρή ποσότητα νερού που αντιστοιχεί σε μία λεπτή στρώση νερού κατά μήκος των πλακών, η παρουσία της οποίας δεν καθορίζεται από τα τριχοειδή φαινόμενα, αλλά από την ύπαρξη των ηλεκτρικών δυνάμεων και των δυνάμεων van der Waals κατά μήκος των πλακών. Τότε, τα Σχ. 7β και 8β τροποποιούνται όπως φαίνεται στα Σχ. 9α και 9β αντίστοιχα. Ακόμα δηλαδή και αν η απώλεια ύδατος είναι ραγδαία (θεωρητικά άμεση) μετά το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης h_c , όπως στο προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους, ή βαθμιαία όπως στο προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε διαφορετική απόσταση, η ποσότητα του νερού στους πόρους του ιδεατού εδάφους δεν μηδενίζεται αλλά σταθεροποιείται σε μία πολύ μικρή τιμή που αντιστοιχεί στις λεπτές προσροφημένες στρώσεις της υγρής φάσης κατά μήκος των πλακών ανεξαρτήτως ύψους από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Υπάρχει λοιπόν μία ποσότητα νερού, η οποία όσο κι αν απομακρυνθούμε από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα ή όσο κι αν αφήσουμε το εδαφικό υλικό να ξεραθεί υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν θα απομακρυνθεί. Το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί σε αυτήν την ποσότητα νερού ονομάζεται παραμένον ποσοστό υγρασίας (residual

water content), με τα φυσικά μεγέθη που αντιστοιχούν στην κατάσταση αυτή να φέρουν την αντίστοιχη ονομασία (παραμένον βαθμός κορεσμού, παραμένον λόγος κενών κλπ).



Σχ. 9. Κατανομές του περιεχόμενου νερού με το ύψος από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε σταθερή απόσταση (α) και σε διαφορετική απόσταση (β) όταν μία λεπτή στρώση νερού είναι προσκολλημένη στις πλάκες.

Fig. 9. Water retained with the height from the water table in the equal distance infinite length plates model (a) and in the different distances infinite length plates model (b) when a finite layer of water is attached to the plates.

Κάθε κλιματολογικός παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την ισορροπία δυνάμεων στο νερό του εδάφους αποτελεί και παράγοντα που επηρεάζει την παρουσία του νερού στην ζώνη του εδάφους πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Έτσι εκτός από την προφανή επιρροή της ταπείνωσης ή ανύψωσης του υπόγειου ορίζοντα λόγω απώλειας ή παροχής ύδατος σε αυτόν μέσω υπόγειας κίνησης του νερού, η μεταβολή της θερμοκρασίας ή της πίεσης ή της σχετικής υγρασίας στον ατμοσφαιρικό αέρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους είναι

επίσης λόγος που μπορεί να προκαλέσει μεταβολή της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα και άρα της παρουσίας του νερού στους πόρους του εδάφους πάνω από αυτήν (και της εντατικής κατάστασης στο νερό των πόρων).

Ο Kelvin (1871) διατύπωσε την ομώνυμη εξίσωση, η οποία συσχετίζει τη μεταβολή της πίεσης κάθετα σε μία καμπυλωμένη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης με την πίεση των ατμών στην αέρια φάση. Προκειμένου για έναν τριχοειδή σωλήνα, την υγρή φάση να αποτελείται από νερό και την αέρια από τον ατμοσφαιρικό αέρα, η εξίσωση του Kelvin διατυπώνεται ως εξής (Εξ 7):

$$\mu_1 - \mu_0 = -R T \ln \frac{u_{ul}}{u_{u0}} = \frac{2T_s v_w \cos \alpha}{r} \quad (7)$$

όπου $\mu_1 - \mu_0$ είναι η μεταβολή στο χημικό δυναμικό των υδρατμών στον τριχοειδή σωλήνα λόγω της καμπύλωσης της διεπιφάνειας νερού-αέρα (μ_0 είναι το χημικό δυναμικό του ελεύθερου νερού ως σημείο αναφοράς και μ_1 είναι το χημικό δυναμικό στην επικρατούσα κατάσταση), R είναι η παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων, T η θερμοκρασία εκφρασμένη σε βαθμούς Kelvin, u_{u0} είναι η κορεσμένη πίεση υδρατμών σε ισορροπία με το ελεύθερο νερό σε θερμοκρασία T , u_{ul} είναι η επικρατούσα πίεση υδρατμών στον τριχοειδή σωλήνα, T_s είναι η επιφανειακή τάση του νερού, και v_w ο μερικός μοριακός όγκος των υδρατμών. Όταν η αέρια φάση είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας και υγρή

φάση το νερό όπως εδώ, ο λόγος $\frac{u_{ul}}{u_{u0}}$ είναι η

σχετική υγρασία RH. Σε αντιστοιχία με την Εξ. 2, η διαφορά πίεσης της αέριας και της υγρής φάσης σε τριχοειδείς σωλήνες ακτίνας r εκφράζεται από την Εξ. 8.

$$u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (8)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. 7 και 8 προκύπτει η Εξ. 9 η οποία εκφράζει τη διαφορά της πίεσης στον αέρα και στο νερό μέσα σε ένα τριχοειδή σωλήνα (και άρα κατ' επέκταση το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης εντός αυτού) ως συνάρτηση των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας που επικρα-

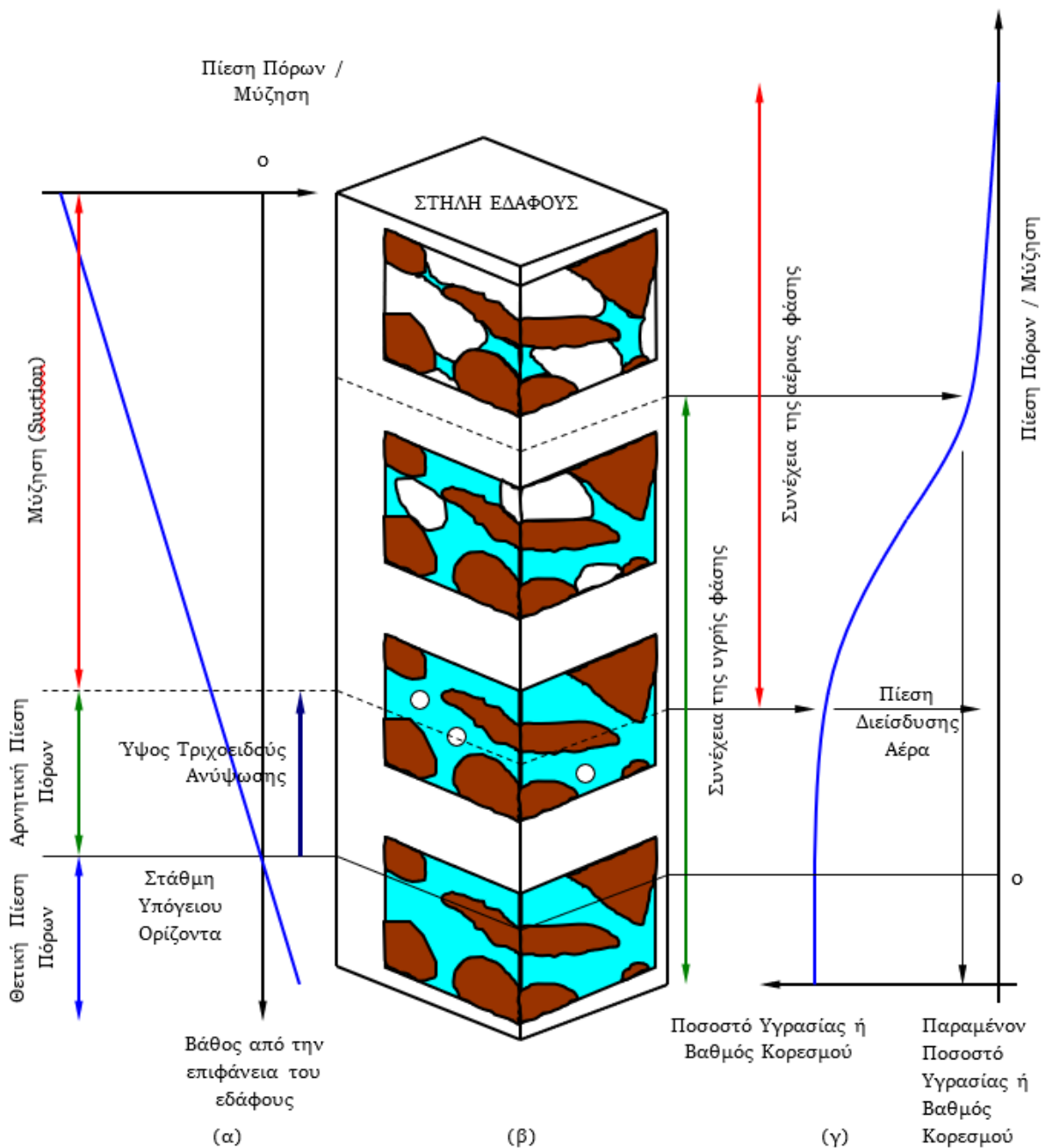
τούν στον αέρα (της μεν θερμοκρασίας άμεσα και έμμεσα μέσω της επιρροής της στα άλλα μεγέθη, της δε πίεσης έμμεσα μόνο μέσω της επιρροής της στη σχετική υγρασία και στο μερικό μοριακό όγκο των ατμών της υγρής φάσης).

$$u_a - u_w = -\frac{RT}{v_w} \ln \frac{u_{ul}}{u_{u0}} = -\frac{RT}{v_w} \ln (RH) = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (9)$$

Η Εξίσωση του Kelvin έχει πολύ μεγάλη θεωρητική και πρακτική σημασία. 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. Επιτρέπει δε πρακτικές εφαρμογές όπως τη μέτρηση της μύζησης μέσω της μέτρησης της σχετικής υγρασίας, ή τον έλεγχο της μέσω του ελέγχου της σχετικής υγρασίας (Μπαρδάνης, 2016, Μπαρδάνης & Λουκίδης, 2019).

Μετά από την αναφορά στα διάφορα προσομοιώματα που περιγράφουν τους λόγους εμφάνισης ύδατος πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα εξετάζεται μία πραγματική στήλη εδαφικού υλικού όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχ. 10β. Στη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο με τη διάταξη των κόκκων και πλακιδίων που απεικονίζεται στη θέση αυτή της στήλης του εδαφικού υλικού, η οποία στη συνέχεια θα υποτεθεί σταθερή κατά μήκος της στήλης. Η πίεση του νερού των πόρων στη θέση αυτή είναι ο όπως φαίνεται στο Σχ. 10α που απεικονίζει την εξέλιξη της πίεσης των πόρων με την απόσταση από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα σε κατάσταση ισορροπίας. Αντιστοίχως ο βαθμός κορεσμού είναι 100% και το ποσοστό υγρασίας έχει μία αρχική τιμή που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο εδαφικό υλικό όπως φαίνεται στο Σχ. 10γ που απεικονίζει την εξέλιξη των μεγεθών αυτών με την απόσταση από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.

Τα εδαφικά υλικά έχουν μέσα στη μάζα τους κόκκους και πλακίδια ποικιλίας μεγεθών που σχηματίζουν «απειρία» διαφορετικών μεγεθών των κενών μεταξύ τους (μέσα σε κάποιο εύρος τιμών για το κάθε εδαφικό υλικό) και άρα, με βάση όσα προαναφέρθηκαν για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών, «απειρία» τιμών



Σχ. 10. Στήλη εδάφους με την εξέλιξη της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης (β), την κατανομή της πίεσης πόρων (α) και την εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού (γ) με την απόσταση από τη στάθμη του υπόγειου οριζοντα.

Fig. 10. A column of soil with the evolution of the coexistence of the liquid and the air phase (b), the distribution of water pressure (a) and the evolution of water content or degree of saturation (c) with the distance above the water table.

ύψους τριχοειδούς ανύψωσης. Η απειρία αυτών των μεγεθών των κενών τους ωστόσο, θα έχει μία μέγιστη τιμή στην οποία θα αντιστοιχεί μία ελάχιστη τιμή του ύψους τριχοειδούς ανύψωσης. Η τιμή αυτή του ύψους τριχοειδούς ανύψωσης θα είναι εκείνη που αντιστοιχεί στον εδαφικό

σχηματισμό στο σύνολό του. Μέχρι αυτήν την τιμή του ύψους τριχοειδούς ανύψωσης, το εδαφικό υλικό θα είναι πλήρως κορεσμένο, αφού όλα του τα κενά θα είναι γεμάτα με νερό, με το νερό των πόρων του να βρίσκεται υπό αρνητική πίεση και αυτή να ακολουθεί την υδροστατική

κατανομή, εφόσον δεν έχουμε σημαντική συνιστώσα της πίεσης λόγω ροής. Από το ύψος αυτό πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και πάνω, το εδαφικό υλικό αρχίζει προοδευτικά να στραγγίζει με τους μεγαλύτερους πόρους του να στραγγίζουν πρώτοι και τους επόμενους μετά. Ένα εδαφικό υλικό λοιπόν θα διατηρεί νερό μέσα στη μάζα του μέχρι και το ύψος εκείνο πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα που αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης των πόρων με το ελάχιστο μέγεθος μέσα στο εδαφικό υλικό. Σε συμφωνία άλλωστε με τα προαναφερθέντα, ακόμα και αν ένα μέγεθος πόρων έχει στραγγίσει, νερό παραμένει στις παρυφές του πόρου όπου οι αποστάσεις μεταξύ των πλακιδίων και των κόκκων είναι μικρότερες και είναι σαν να έχουμε τους πόρους μικρότερου μεγέθους. Όπως όμως προαναφέρθηκε οι πόροι ενός εδαφικού υλικού μπορούν να στραγγίσουν μόνο μέχρι ένα ορισμένο μέγεθος πόρων καθώς από αυτό και κάτω κυριαρχούν περισσότερο ηλεκτρικής φύσης δυνάμεις και δυνάμεις Van der Waals.

Όπως προαναφέρθηκε, το ποσοστό υγρασίας ενός δοκιμίου εδαφικού υλικού από το ύψος εκείνο πάνω από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα που αντιστοιχεί στο ύψος πάνω από το οποίο δεν μπορεί να στραγγίσει το νερό τριχοειδώς από τους πόρους ελάχιστου μεγέθους ονομάζεται παραμένον ποσοστό υγρασίας (residual water content). Η τιμή αυτή του ποσοστού υγρασίας αντιστοιχεί στην ελάχιστη εκείνη ποσότητα νερού που θα παραμείνει σε ένα εδαφικό υλικό εάν το αφήσουμε να στραγγίσει σε -συνήθεις- ατμοσφαιρικές συνθήκες και η οποία για να εξαχθεί θα πρέπει το δοκίμιο, είτε να θερμανθεί, είτε γενικά να εξασκηθεί πολύ μεγάλη δύναμη στα μόρια του νερού των πόρων του για να το βγάλουμε από αυτούς.

Εάν προσπαθήσουμε να αποτυπώσουμε όλα τα παραπάνω σε ένα σχήμα, τότε προκύπτει το Σχ. 10γ. Σε αυτό παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού με το ύψος πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και βρίσκεται σε ακριβή αντιστοιχία με το Σχ. 9β. Αν στο Σχ. 10γ μετατρέψουμε το ύψος από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα και το βάθος από αυτήν σε αρνητική και θετική πίεση στήλης νερού αντίστοιχα, τότε προκύπτει το Σχ. 11, στο οποίο συσχετίζεται το ύψος αυτό της στήλης νερού με το ποσοστό φυσικής υγρασίας ή τον βαθμό κορεσμού ή το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας. Το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας θ ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του νερού των πόρων V_w προς τον συνολικό όγκο του εδάφους $V_{ολ}$ (Εξ. 10).

$$\theta = V_w / V_{ολ} \quad (10)$$

Στο τμήμα της καμπύλης που η πίεση είναι θετική (στήλη νερού που αντιστοιχεί σε βάθος από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και κάτω) δεν υπάρχει μεταβολή του ποσοστού υγρασίας w ή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας θ και προφανώς του βαθμού κορεσμού S_r , ο οποίος είναι σταθερός 100% κάτω από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα. Στο τμήμα της που η πίεση είναι αρνητική (στήλη νερού που αντιστοιχεί σε ύψος πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και συνηθίζεται να απεικονίζεται δεξιά του άξονα των w , θ ή S_r) απεικονίζονται τα δύο χαρακτηριστικά σημεία καμπής που περιγράφει προηγουμένως και οριοθετούν στην περιοχή των εδαφικών υλικών πάνω από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα τρεις περιοχές:

α) Το πρώτο χαρακτηριστικό σημείο της καμπύλης αυτής είναι το πρώτο σημείο καμπής που αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης του εδαφικού σχηματισμού. Πριν από αυτό το σημείο ο καμπής εκτείνεται η Περιοχή I.

β) Το δεύτερο χαρακτηριστικό σημείο της καμπύλης αυτής είναι το δεύτερο σημείο καμπής που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας. Μεταξύ του πρώτου σημείου καμπής και του δεύτερου σημείου καμπής εκτείνεται η Περιοχή II και από το δεύτερο σημείο καμπής και μετά εκτείνεται η Περιοχή III.

Σε όρους πίεσης, το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα (air-entry pressure) την αρνητική εκείνη πίεση δηλαδή μέχρι την οποία εντός του εδαφικού υλικού δεν υπάρχει αέρας αλλά μόνο νερό.

Στην Περιοχή I μεταξύ μηδενικής πίεσης και ύψους τριχοειδούς ανύψωσης (δηλ. πίεσης διείσδυσης αέρα) το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο, αλλά η πίεση των πόρων είναι αρνητική. Η αρχή των ενεργών τάσεων ισχύει με την πίεση των πόρων να έχει αρνητικές τιμές (τιμές δηλαδή μικρότερες της ατμοσφαιρικής πίεσης). Η ενεργός τάση λοιπόν είναι μεγαλύτερη της ολικής κατά το μέγεθος της αρνητικής πίεσης πόρων. Αυτό σημαίνει ότι μείωση της πίεσης των πόρων υπό σταθερή ολική τάση οδηγεί σε αύξηση της διατμητικής αντοχής και σε ογκομετρικές παραμορφώσεις όμοιες με εκείνες που θα προκαλούντο από την αντίστοιχη αύξηση της ενεργού τάσης αν το εδαφικό υλικό ήταν πλήρως κορεσμένο. Στην Περιοχή I η υγρή φάση είναι συνεχής και είναι η μοναδική παρούσα ρευστή

φάση. Προφανώς η κίνηση του νερού των πόρων γίνεται με αυτό να βρίσκεται σε υγρή φάση.

Στην Περιοχή II μεταξύ της πίεσης διείσδυσης αέρα και της πίεσης που αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης των πόρων ελαχίστου μεγέθους, το εδαφικό υλικό έχει στο εσωτερικό του και αέρα και νερό και μάλιστα και η υγρή και η αέρια φάση των εδαφών είναι συνεχής. Στην περιοχή αυτή όπως εξηγείται στη συνέχεια δεν ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Η κίνηση του νερού των πόρων γίνεται και σε αυτήν την περιοχή με αυτό να βρίσκεται σε υγρή φάση, αλλά μόνο μέσα από τον χώρο που καταλαμβάνει η υγρή φάση. Η παρατήρηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για τη διαπερατότητα των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Στην περιοχή αυτή κυριαρχούν τα τριχοειδή φαινόμενα στον καθορισμό της παρουσίας του νερού στους πόρους του εδάφους.

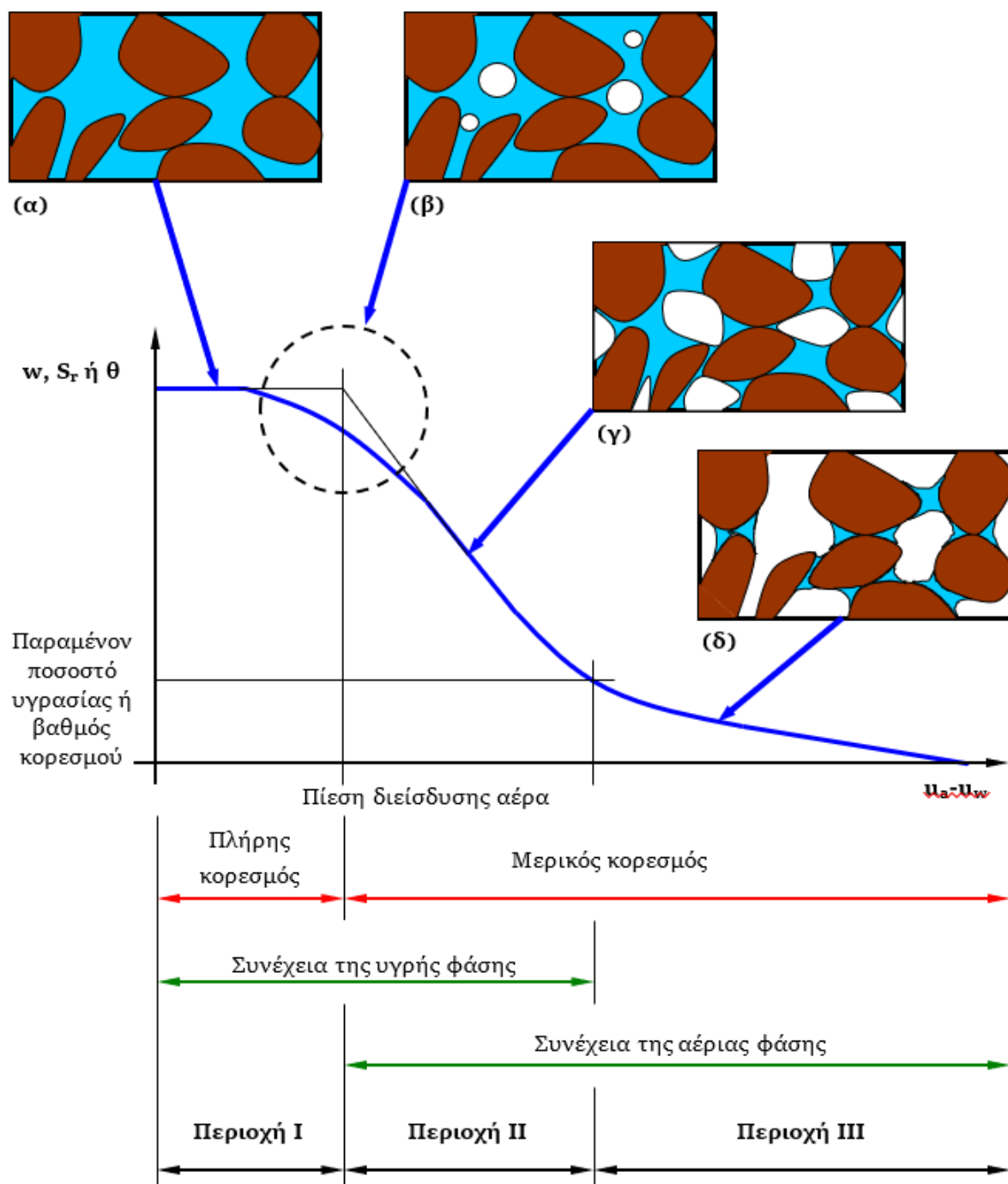
Στο όριο μεταξύ Περιοχής I και Περιοχής II υπάρχει μία ιδιαίτερη υποπεριοχή στην οποία το εδαφικό υλικό είναι μη κορεσμένο αλλά με την αέρια φάση να είναι μη συνεχής, ευρισκόμενη σε μορφή διακριτών μεταξύ τους φυσαλίδων. Ο περιεχόμενος αέρας σε αυτήν την περίπτωση ονομάζεται στην αγγλική βιβλιογραφία *occluded air*. Προφανώς στην ιδιαίτερη αυτή μεταβατική περιοχή η κίνηση του νερού των πόρων γίνεται με αυτό να βρίσκεται σε υγρή φάση, χωρίς να έχουμε κίνηση του αέρα των πόρων –ως συνεχούς μέσου.

Στην Περιοχή III, δηλαδή μεταξύ της πίεσης που αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης των πόρων ελαχίστου μεγέθους (παραμένον ποσοστό υγρασίας) και το θεωρητικό σημείο μηδενισμού του ποσοστού υγρασίας, το εδαφικό υλικό έχει στο εσωτερικό του και αέρα και νερό, αλλά μόνο η αέρια φάση του εδαφικού υλικού είναι συνεχής, ενώ η υγρή φάση είναι μη συνεχής, αφού το νερό των πόρων περιορίζεται σε απομονωμένους θύλακες στους μικρότερους πόρους ή στις μικρότερου μεγέθους κοιλότητες στα άκρα μεγαλύτερων πόρων. Ούτε στην περιοχή αυτή ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Στην περιοχή αυτή πια η μετακίνηση του νερού των πόρων δεν γίνεται με το νερό σε υγρή φάση (αφού η υγρή φάση δεν είναι πλέον συνεχής) αλλά με το νερό σε μορφή υδρατμών. Αποτέλεσμα αυτού είναι η διαπερατότητα του εδάφους ως προς την υγρή φάση στην κατάσταση αυτή να περιορίζεται πάρα πολύ. Αντίστροφα η διαπερατότητα του εδάφους ως προς την αέρια φάση είναι μέγιστη.

Η καμπύλη του βαθμού κορεσμού με την αρνητική πίεση πόρων ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και εξετάζεται διεξοδικά από την Τσιαμπούση (2019). Στο Σχ. 11 συνοψίζονται οι ποιοτικές απεικονίσεις της κατάστασης μεταξύ στερεάς, υγρής και αέριας φάσης ενός εδαφικού υλικού και παρουσιάζεται ταυτόχρονα η περιοχή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην οποία αντιστοιχούν. Η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έγκειται στο ότι επιτρέπει οι διάφορες τιμές του βαθμού κορεσμού από το 0 έως το 100% να συσχετιστούν με συγκεκριμένες φυσικές καταστάσεις συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης εντός των εδαφικών υλικών, οπότε να αναζητηθεί η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά για την περιγραφή των μη κορεσμένων εδαφών όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια του πρώτου μέρους.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αποτελεί τη βασική έννοια για την ποιοτική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών και της κατάταξής τους ως προς τον βαθμό κορεσμού. Απαντά δηλαδή στο ερώτημα που συχνά διατυπώνεται «πώς κατατάσσεται ένα έδαφος ως προς ένα μέγεθος (μη κορεσμένο), όταν το μέγεθος που χρησιμοποιείται για την κατάταξη καταλαμβάνει τόσο εκτεταμένο εύρος τιμών;». Μη κορεσμένο δηλαδή είναι και το έδαφος εκείνο με βαθμό κορεσμού 99.99% και εκείνο με βαθμό κορεσμού 50% και εκείνο με βαθμό κορεσμού 0.001%. Μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λοιπόν γίνεται αντιληπτή η κατάσταση συνύπαρξης της στερεάς, της υγρής και της αέριας φάσης στην οποία αντιστοιχεί κάθε μία από αυτές τις τιμές, και άρα η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά, με διαφορετικό τρόπο μάλιστα για κάθε εδαφικό υλικό ανάλογα με τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, η οποία συνιστά χαρακτηριστική ιδιότητα του κάθε εδαφικού υλικού και καθορίζεται από τις φυσικές του ιδιότητες και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.

Για παράδειγμα σε ένα εδαφικό υλικό ο παραμένον βαθμός κορεσμού μπορεί να είναι 30%, άρα όταν έχει βαθμό κορεσμού 50% βρίσκεται στην Περιοχή II της -δικής του- χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Αντίθετα σε ένα άλλο εδαφικό υλικό ο παραμένον βαθμός κορεσμού μπορεί να είναι 60%, άρα όταν έχει βαθμό κορεσμού 50% βρίσκεται στην Περιοχή III της -δικής του- χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Ακόμα περισσότερο, αν ένα εδαφικό υλικό έχει



Σχ. 11. Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με τα 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 (Περιοχή I), (β) μερικός κορεσμός με την αέρια φάση σε μορφή φυσαλίδων (οριακή περιοχή μεταξύ Περιοχής I και II), (γ) μερικός κορεσμός με την υγρή και την αέρια φάση να είναι ταυτόχρονα συνεχείς (Περιοχή II) και (δ) μερικός κορεσμός με την υγρή φάση να μην είναι πια συνεχής (Περιοχή III).

Fig. 11. Soil-water characteristic curve with the limits between full and partial saturation, the limits of continuity for each phase and the qualitative representation of the coexistence of solid, liquid and air phase: a) full saturation (Area I), b) partial saturation with the air phase in the form of occluded bubbles (boundary between Areas I and II), c) partial saturation with the liquid and air phases being simultaneously continuous (Area II), and d) partial saturation with the liquid phase being discontinuous (Area III).

π.χ. παραμένοντα βαθμό κορεσμού 30% χωρίς προηγούμενη ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης, ο παραμένων βαθμός κορεσμού του μπορεί να μεταβληθεί εάν προηγηθεί κάποια ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης. Η ίδια τιμή του βαθμού κορεσμού λοιπόν μπορεί να αντιστοιχεί όχι απλώς σε διαφορετικό σημείο επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, στην ίδια περιοχή, αλλά ακόμα και σε διαφορετική περιοχή επί αυτής, άρα και σε εντελώς διαφορετικό καθεστώς μηχανικής συμπεριφοράς, και μάλιστα με την κατάσταση αυτή να μεταβάλλεται ανάλογα με την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης του εδαφικού υλικού. Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού παρουσιάζεται αναλυτικά από την Τσιαμπουσέ (2019).

Προηγουμένως επεξηγήθηκε η θετική και η αρνητική πίεση του νερού των πόρων και εισήχθη ως έννοια η μύζηση. Προκειμένου για γενικό και ενιαίο υπόγειο ορίζοντα χωρίς σημαντική υπόγεια ροή, κάτω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα η πίεση του νερού είναι θετική, δηλ. το νερό έχει την τάση να διαφύγει από το εδαφικό υλικό παρουσία της πίεσης αυτής. Το αντίθετο εκφράζει η αρνητική πίεση του νερού των πόρων πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και μέχρι το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης που υπάρχει μόνο μία ρευστή φάση, η υγρή. Το νερό δηλαδή έχει την τάση όχι να διαφύγει από τους πόρους αλλά να προσελκύσει κι άλλο (δηλ. το έδαφος να προσροφήσει κι άλλο νερό). Πάνω από το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης όπου αρχίζει η συνύπαρξη υγρής και αέριας φάσης, η διαφορά της πίεσης στο νερό των πόρων από την πίεση στον αέρα των πόρων ονομάζεται μύζηση (suction) και συμβολίζεται διεθνώς $u_a - u_w$ ή ψ ή s . Δεδομένου ότι η πίεση του νερού των πόρων u_w πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα είναι μικρότερη του 0 (δηλ. μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης) η μύζηση είναι θετική αφού στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η πίεση του αέρα των πόρων u_a είναι 0 (ατμοσφαιρική). Η παρουσία μύζησης επίσης δε σημαίνει κατ' ανάγκη ότι η πίεση της υγρής φάσης των πόρων είναι πραγματικά αρνητική, δηλαδή μικρότερη του πραγματικού 0 και όχι απλώς μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης. Προκειμένου η πίεση της υγρής φάσης να είναι πραγματικά αρνητική, η τιμή της μύζησης πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 100 kPa και η τιμή της πίεσης της αέριας φάσης να είναι ίση με την ατμοσφαιρική (και τα δύο αυτά ισχύουν για την αέρια φάση να αποτελείται από τον ατμοσφαιρικό αέρα). Σε αυτόν ακριβώς το λόγο οφείλεται και η διαδεδομένη άποψη ότι το νερό δεν μπορεί να

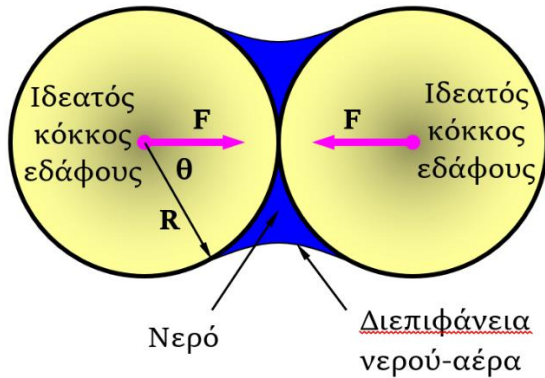
βρεθεί υπό αρνητική πίεση μεγαλύτερη από 100 kPa, κατ' απόλυτο τιμή, ακριβώς γιατί δεν μπορεί να παραλάβει πραγματικά αρνητική (εφελκυστική) πίεση.

Στην περίπτωση που οι κόκκοι ή τα πλακίδια των εδαφικών υλικών περιβάλλονται εξ ολοκλήρου από νερό οπότε η πίεση του νερού των πόρων ασκείται ολόπλευρα σε αυτούς έχει ήδη εξηγηθεί η επιρροή της πίεσης αυτής, θετικής ή αρνητικής. Στην περίπτωση λοιπόν αυτή (Περιοχή I επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού) η μύζηση ταυτίζεται με την αρνητική πίεση πόρων και γι' αυτό ισχύει και η αρχή των ενεργών τάσεων. Εάν ωστόσο θεωρήσουμε καταστάσεις συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης των πόρων όπως αυτές που αντιστοιχούν στις Περιοχές II και III επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, τότε η πίεση της υγρής φάσης δεν ασκείται ολόπλευρα επί των κόκκων και των πλακιδίων των εδαφικών υλικών.

Στο Σχ. 12 παρουσιάζεται ιδεατή απεικόνιση κόκκων εδαφικού υλικού της ίδιας ακτίνας σε επαφή μεταξύ τους, στην εγγύτερη περιοχή των οποίων υπάρχει νερό που σχηματίζει τον μηνίσκο (meniscus) του νερού που απεικονίζεται. Η δύναμη έλξης μεταξύ των εφαιπτόμενων κόκκων που προκαλεί η παρουσία του μηνίσκου υπολογίζεται από την Εξ. 10 (Haines, 1927) όπου F , η δύναμη που ασκείται σε κάθε κόκκο, T_s η επιφανειακή τάση του νερού, R η ακτίνα των κόκκων και θ η γωνία που σχηματίζει η ευθεία που ενώνει τα κέντρα των δύο κόκκων με την ακτίνα κάθε κόκκου όταν αγγίζει την περιφέρεια του μηνίσκου. Η δύναμη αυτή τείνει να φέρει τους δύο κόκκους πιο κοντά και άρα η επίδρασή της θα είναι να «σταθεροποιεί» τους κόκκους αυτούς στη θέση τους, να έχει δηλαδή την τάση να κάνει πιο «ανθεκτική» μια ομάδα κόκκων που συνδέονται κατ' αυτόν τον τρόπο σε κάθε αίτιο που θα τείνει να τους διαχωρίσει.

$$F = \frac{2\pi R T_s}{1 - \tan \frac{\theta}{2}} \quad (10)$$

Θεωρώντας ότι αντίστοιχες δυνάμεις με αυτές που δημιουργούν οι μηνίσκοι του νερού μεταξύ των ιδεατών σφαιρικών κόκκων ασκούνται και μεταξύ των κόκκων των πραγματικών εδαφών κατά την κατάσταση συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης όπως στις Περιοχές II και III επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, τότε γίνεται προφανές ότι οι δυνάμεις

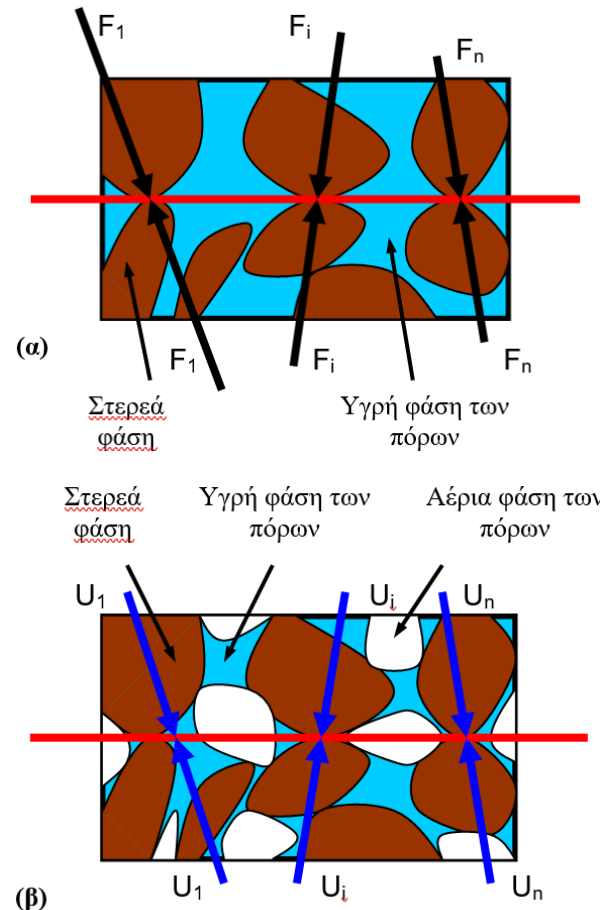


Σχ. 12. Ιδεατή απεικόνιση εδαφικών κόκκων μεταξύ των οποίων υπάρχει «μηνίσκος» νερού και της δύναμης έλξης που ασκεί ο «μηνίσκος» σε αυτούς.

Fig. 12. Ideal representation of soil grains with a water meniscus between them and the attraction force this meniscus creates between them.

αυτές τείνουν να σταθεροποιήσουν τους κόκκους αυτούς. Το ίδιο σύνολο κόκκων λοιπόν θα παρουσιάζεται με μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με την περίπτωση που οι μηνίσκοι δεν υπήρχαν, όπως αν ήταν πλήρως κορεσμένο (Περιοχή I). Η διαπίστωση αυτή επιτρέπει τη διατύπωση ενός θεωρητικού ορισμού της μύζησης. Όπως η τάση σε ένα εδαφικό υλικό είναι το όριο των δυνάμεων που ασκούνται στις επαφές μεταξύ των κόκκων σε δεδομένη επιφάνεια προς την επιφάνεια αυτή τείνουσα στο 0 (Σχ. 13α), έτσι και η μύζηση είναι το όριο των δυνάμεων που δημιουργούν οι μηνίσκοι του νερού εκεί που η αέρια φάση έχει αποκτήσει τη συνέχειά της (Περιοχές II και III) και ασκούνται σε δεδομένη επιφάνεια προς την επιφάνεια αυτή τείνουσα στο 0 (Σχ. 13β). Δεδομένου μάλιστα ότι η συνύπαρξη της υγρής με την αέρια φάση είναι συνάρτηση μόνο της απόστασης από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τότε και η τιμή της μύζησης εξαρτάται μόνο από αυτούς τους παράγοντες και είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσης της θεωρούμενης επιφάνειας (σε αντίθεση με την τάση), και άρα είναι μέγεθος ιστροπικό, όπως και η πίεση του νερού των πόρων στα πλήρως κορεσμένα εδάφη.

Μία γενική αναφορά σε μη κορεσμένα εδάφη δεν μπορεί να αποφεύγει το ζήτημα της ισχύος ή όχι της αρχής των ενεργών τάσεων. Αναγκαία και ικανή συνθήκη για να αποτελεί ένα μέγεθος ενεργό τάση είναι οι μεταβολές του να προκαλούν κάθε παρατηρούμενη μεταβολή στη μηχανική



Σχ. 13. Δυνάμεις α) στις επαφές των στερεών κόκκων F_i σε πλήρως κορεσμένο έδαφος και β) στους στερεούς κόκκους U_i λόγω μερικού κορεσμού.

Fig. 13. Forces a) at the contacts of solid grains F_i in fully saturated soils, and b) between solid grains U_i due to partial saturation.

νική συμπεριφορά του εδαφικού υλικού και κάθε μεταβολή στη μηχανική συμπεριφορά του υλικού να αντιστοιχεί σε μία μεταβολή της τιμής του μεγέθους αυτού (λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του χρόνου), ανεξάρτητα από τις επιμέρους μεταβολές στα εντατικά μεγέθη που δρουν στις φάσεις του υλικού και προκαλούν την ίδια μεταβολή στο μέγεθος που συνιστά την ενεργό τάση. Δηλαδή, στα πλήρως κορεσμένα εδάφη για παράδειγμα, οι παρατηρούμενες μεταβολές οφείλονται αποκλειστικά στη μεταβολή της ενεργού τάσης, ανεξάρτητα από το εάν αυτή οφείλεται σε μεταβολή της ολικής τάσης υπό σταθερή πίεση πόρων ή σε μεταβολή της πίεσης πόρων υπό σταθερή ολική τάση. Έχοντας επιβεβαιώσει πειραματικά αυτήν ακριβώς την αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία, ο Terzaghi (1936) κατέληξε: «Οι τάσεις σε οποιοδήποτε σημείο σε

μία διατομή ενός εδαφικού υλικού μπορούν να υπολογιστούν από τις ολικές κύριες τάσεις σ_1 , σ_2 και σ_3 που δρουν σε αυτό το σημείο. Αν τα κενά του εδαφικού υλικού είναι γεμάτα με νερό ευρισκόμενο υπό πίεση u , οι ολικές κύριες τάσεις διακρίνονται σε δύο μέρη. Το ένα μέρος u δρα επί του νερού και του εδάφους με την ίδια ένταση και ονομάζεται ουδέτερη τάση ή πίεση του νερού των πόρων. Η διαφορά $\sigma_1' = \sigma_1 - u$, $\sigma_2' = \sigma_2 - u$, $\sigma_3' = \sigma_3 - u$ αποτελεί μία περίσσεια επί της πίεσης του νερού των πόρων u και δρα αποκλειστικά επί της στερεάς φάσης του εδαφικού υλικού. Το τμήμα αυτό της ολικής κύριας τάσης ονομάζεται ενεργός κύρια τάση». Είναι προφανής ο περιορισμός της ισχύος της αρχής των ενεργών τάσεων για πλήρως κορεσμένα εδαφικά υλικά και η συνέπεια της πρότασης αυτής: «Όλα τα παρατηρούμενα φαινόμενα που προκαλεί η μεταβολή της τάσης (π.χ. παραμόρφωση ή μεταβολή της διατμητικής αντοχής) οφείλονται αποκλειστικά σε μεταβολές στην μέση ενεργό τάση (λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του χρόνου)».

Οι σπουδαιότερες διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδάφη μπορούν να βρεθούν στον Μπαρδάνη (2016). Η λεπτομερής αναφορά τους εδώ ξεφεύγει του σκοπού του παρόντος άρθρου. Σε όλες τις διατυπώσεις χρησιμοποιείται η ολική τάση σ και η πίεση στην υγρή φάση u_w ή κάποιο μέγεθος που σχετίζεται με αυτήν. Σε μερικές από τις διατυπώσεις χρησιμοποιείται και η πίεση στην αέρια φάση u_a . Πέραν αυτών, στις περισσότερες διατυπώσεις υπάρχει τουλάχιστον μία παράμετρος η οποία συνδέει τα εντατικά μεγέθη που δρουν στις επιμέρους φάσεις.

Στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, αφενός δεν υπάρχει όρος που να συνδέει την ολική τάση και την πίεση στην υγρή φάση και αφετέρου, κάθε παρατηρούμενη μεταβολή στα εδαφικά υλικά οφείλεται στη μεταβολή του μεγέθους αυτού και αντίστροφα (λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του χρόνου) ανεξαρτήτως των μεταβολών στα επιμέρους μεγέθη από τα οποία προκύπτει η ενεργός τάση. Το δεύτερο από αυτά τα χαρακτηριστικά συνιστά προϋπόθεση για να θεωρηθεί κάποιο από τα προταθέντα μεγέθη ενεργός τάση. Το ενδεχόμενο ύπαρξης όρου που να συνδέει την ολική τάση και την πίεση στην υγρή φάση δεν προβληματίζει, υπό την προϋπόθεση όμως ότι αυτός ο όρος είναι ανεξάρτητος της κατάστασης (state) στην οποία βρίσκεται το εδαφικό υλικό.

Όπως έχει αποδειχτεί πλέον σήμερα, οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι στις διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδάφη δεν πληρούν αυτήν την απαίτηση αλλά εξαρτώνται από την κατάσταση του υλικού με αποτέλεσμα οι διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων να καθίστανται μάλλον καταστατικές εξισώσεις παρά διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων.

Πρώτοι οι Jennings & Burland (1962) αμφισβήτησαν την ισχύ της πρότασης του Bishop (1959) για την ενεργό τάση, Εξ. 11, και τις παρόμοιες διατυπώσεις, επιδεικνύοντας ότι η τιμή της παραμέτρου χ προέκυπτε διαφορετική όταν προέκυπτε από τη διατμητική αντοχή και όταν προέκυπτε από τις μεταβολές στο λόγο κενών αποτελώντας συνάρτηση της τασικής διαδρομής, αλλά και των επιμέρους μεταβολών στα εντατικά μεγέθη της κάθε ρευστής φάσης, που προκαλούσαν την ίδια μεταβολή της «ενεργού τάσης». Παρατήρησαν μάλιστα ότι οι αποκλίσεις αυτές γίνονται μέγιστες από μία κρίσιμη τιμή του βαθμού κορεσμού και κάτω, την οποία προσδιόρισαν περί το 20% για τις ιλείς και τις άμμους και μεταξύ 85 και 90% για τις αργίλους. Οι παρατηρήσεις αυτές για τον βαθμό κορεσμού επιδεικνύουν την επιρροή και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του εδαφικού υλικού στην παράμετρο χ .

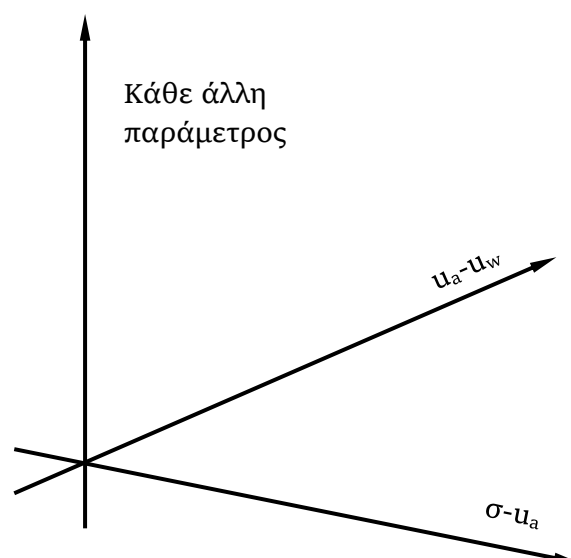
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (11)$$

Οι Bishop & Blight (1963) περιόρισαν την ισχύ της πρότασης του Bishop (1959) στη συσχέτιση μεταξύ διατμητικής αντοχής και ενεργού τάσης παρατηρώντας και εκείνοι ότι δεν επαρκεί για την πρόβλεψη των ογκομετρικών παραμορφώσεων, αφού η ίδια μεταβολή της ενεργού τάσης προερχόμενη από μεταβολή του όρου $\sigma - u_a$ και από μεταβολή του όρου $u_a - u_w$ οδηγούσε σε διαφορετική ογκομετρική παραμόρφωση. Προχωρώντας μάλιστα ένα βήμα πιο πέρα πρότειναν την διαχείριση προβλημάτων ογκομετρικών παραμορφώσεων μέσω διαφορετικών παραμέτρων τάσης, και όχι μίας μοναδικής παραμέτρου τάσης. Η πρόταση αυτή τονίστηκε ακόμα περισσότερο από τον Burland (1964, 1965), τους Matyas & Radhakrishna (1968) και τους Barden et al. (1969) μέχρι την πρόταση συγκεκριμένων παραμέτρων τάσης για μη κορεσμένα εδάφη από τους Fredlund & Morgenstern (1977). Περαιτέρω πειραματικά αποτελέσματα που απέδειξαν ότι τα μη κορεσμένα εδάφη δεν

υπακούουν στην αρχή των ενεργών τάσεων παρουσιάστηκαν από τους Wheeler & Sivakumar (1995).

Συνοψίζοντας τα πειραματικά αποτελέσματα που προαναφέρθηκαν, είναι μάλλον αδύνατο να αποδοθεί μία μοναδική τιμή της «ενεργού τάσης» σε ένα μη κορεσμένο εδαφικό υλικό και αυτή να επαρκεί για την περιγραφή όλων των μεταβολών που παρατηρούνται σε αυτό. Διατυπώσεις όπως αυτή του Bishop (1959) περιγράφουν ίσως επαρκώς τις μεταβολές της διατμητικής αντοχής αλλά όχι και των ογκομετρικών μεταβολών. Η επάρκεια στην πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής δικαιολογεί τη διάδοσή τους, ιδίως για διατύπωση καταστατικών προσομοιωμάτων και ενσωμάτωση σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων, οι δημιουργοί των οποίων ισχυρίζονται κατ' αυτόν τον τρόπο ότι καλύπτουν και τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Και πάλι ωστόσο η περιοχή της ισχύος τους περιορίζεται από τη φύση των υλικών και το εύρος του βαθμού κορεσμού. Ακόμα σημαντικότερα, όπως παρατηρεί ο Wheeler (2006), για την πρόβλεψη των ογκομετρικών μεταβολών πρέπει πρακτικά σε όλες τις διατυπώσεις να εισαχθεί μία καταστατική παράμετρος που να συνδέει τα επιμέρους εντατικά μεγέθη στην κάθε φάση και η οποία να διορθώνει την αδυναμία πρόβλεψης των παρατηρούμενων μεταβολών ανεξάρτητα από τις επιμέρους μεταβολές στα εντατικά αυτά μεγέθη. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, οι διατυπώσεις αυτές καθίστανται καταστατικές εξισώσεις που συνδέουν τις ανεξάρτητες παραμέτρους τάσης με τις παρατηρούμενες μεταβολές, παρά διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων. Οι τάσεις αυτές δε, καλό είναι να αναφέρονται – όπως έχει επικρατήσει πια πρακτικά – ως τάσεις Bishop και όχι ενεργές τάσεις.

Οι Fredlund & Morgenstern (1977) κατέληξαν στην εγγενή αδυναμία διατύπωσης της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά και προχώρησαν στον ορισμό δύο παραμέτρων τάσης για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών, οι οποίες πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη συσχέτιση με κάθε άλλη παράμετρο (Σχ. 14). Οι δύο παράμετροι τάσης λοιπόν τις οποίες πρότειναν είναι οι συνδυασμοί των σ , u_w και u_a , $\sigma - u_a$ και $u_a - u_w$. Κάθε άλλος συνδυασμός των σ , u_w και u_a μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών αλλά οι παραπάνω συγγραφείς πρότειναν τις δύο αυτές παραμέ-



Σχ. 14. Συσχέτιση κάθε παραμέτρου με τις δύο παραμέτρους τάσης για μη κορεσμένα εδάφη.

Fig. 14. Relation of every other parameter with two stress parameters for unsaturated soils.

τρους τάσης ως εκείνες με το σαφέστερο φυσικό νόημα και την ικανότητα απευθείας μέτρησης ή υπολογισμού. Η παράμετρος $\sigma - u_a$ λοιπόν εκφράζει την περίσσεια της τάσης επί της πίεσης της αέριας φάσης, η οποία εφόσον είναι συνεχής βρίσκεται υπό την ατμοσφαιρική πίεση. Η παράμετρος $u_a - u_w$ εκφράζει τη διαφορά της πίεσης της υγρής φάσης ως προς την πίεση της αέριας φάσης, η οποία εφόσον είναι συνεχής βρίσκεται υπό την ατμοσφαιρική πίεση και άρα την «τάση» της υγρής φάσης να προσροφήσει νερό εφόσον αυτό παρασχεθεί σε περίσσεια. Η παράμετρος αυτή λοιπόν είναι η μύζηση και αντιδιαστέλλεται ως προς την αρνητική πίεση πόρων όπως θεωρείται κάθε πίεση μικρότερη του μηδενός. Η πίεση της υγρής φάσης γίνεται πραγματικά αρνητική (εφελκυστική) όταν η μύζηση ξεπεράσει την τιμή των 100 kPa.

Αυτό μοιάζει αντιφατικό με την κοινή εμπειρία της εμφάνισης φυσαλίδων στο νερό όταν η πίεση του γίνεται μικρότερη της ατμοσφαιρικής και προσεγγίζει το -100 kPa, οπότε πιστεύεται ότι γίνεται σπηλαιώση στο νερό. Μία πιο προσεκτική εξέταση του ορισμού της σπηλαιώσης αλλά και της φύσης του ίδιου του νερού στις συνθήκες καταστάσεις στις οποίες απαντάται διαφοροποιεί αυτή την εικόνα. Καταρχάς, σπηλαιώση (cavitation) είναι το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο μόρια ενός υγρού μεταπίπτουν από την υγρή φάση στην αέρια λόγω πτώσης της πίεσης του υγρού υπό σταθερή θερμοκρασία, όπως

ακριβώς θα συνέβαινε αν αυξανόταν η θερμοκρασία του υγρού και έφτανε στο σημείο ζέσεώς του υπό σταθερή πίεση. Για αυτό το λόγο το φαινόμενο αυτό λέγεται και «βρασμός εν ψυχρώ».

Τα περισσότερα υγρά ωστόσο περιέχουν αέρια σε διάλυση. Καθώς μειώνεται η πίεση στο υγρό των πόρων τα αέρια αυτά περνούν σε αέρια φάση μέσα στο υγρό των πόρων σχηματίζοντας διακριτές μεταξύ τους φυσαλίδες όπως ακριβώς θα συνέβαινε αν πράγματι επιτυχανόταν πραγματική σπηλαιώση του εν λόγω υγρού. Η πρόταση αυτή έγινε από τους Harvey et al (1944) και γνώρισε σημαντική αποδοχή έκτοτε. Ο Tabor (1979) επέδειξε ότι η εφελκυστική αντοχή του νερού (η μέγιστη δηλαδή κατ' απόλυτο τιμή αρνητική πίεση που μπορούσε να του επιβάλλει πριν συμβεί βρασμός εν ψυχρώ) είναι περίπου 500 kPa, ενώ οι Temperley & Chambers (1946) αναφέρουν ότι προσεκτικά απαερωμένα υγρά εντός δοχείων με λεία τοιχώματα έχουν σημαντικά υψηλότερη εφελκυστική αντοχή από εκείνη που έχουν στην περίπτωση που δεν πληρούνται αυτές οι συνθήκες. Η σημασία των παρατηρήσεων των Temperley & Chambers (1946) έγκειται στην επιβεβαίωση της υπόθεσης των Harvey et al (1944) για τη σημασία της διαφοράς της ύπαρξης φυσαλίδων εντός του νερού και στις παρυφές αυτού με το στερεό με το οποίο βρίσκεται σε επαφή. Μία ελεύθερη φυσαλίδα εντός ενός υγρού είναι ασταθής και συνήθως τα αέρια που τη σχηματίζουν περνούν σε διάλυση εντός του υγρού. Αντίθετα μία φυσαλίδα σε μία κοιλότητα του δοχείου εντός του οποίου βρίσκεται το υγρό που την περιβάλλει μπορεί να παραμείνει αδιάλυτη ακόμα και μετά την επιβολή πολύ υψηλών τιμών της πίεσης στο νερό. Όταν η πίεση λαμβάνει αρνητικές τιμές, οι φυσαλίδες αυτές μεγαλώνουν σε μέγεθος και τελικά προκαλούν το φαινόμενο που εκδηλώνεται ως σπηλαιώση. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από τη διήθηση των αερίων (gas diffusion) διά μέσω της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης και την μετακίνηση του ορίου αέριας-υγρής-στερεάς φάσης συναρτήσει του καθεστώτος των τάσεων σε κάθε φάση.

Η εφελκυστική αντοχή του νερού μετρείται με σωλήνες Berthelot. Οι σωλήνες αυτοί (κλειστοί στα δύο άκρα τους) είναι αρχικά σχεδόν γεμάτοι με νερό ενώ το κενό εντός αυτών καταλαμβάνεται από αέρα και υδρατμούς. Ο σωλήνας τότε θερμαίνεται ώστε το υγρό που περιέχει να διογκωθεί και να προκαλέσει τη διάλυση όλων των αερίων σε αυτό. Κατά την

πτώση της θερμοκρασίας που ακολουθεί, το υγρό παραμένει προσκολλημένο στα τοιχώματα του σωλήνα υποβαλλόμενο προοδευτικά σε ολοένα και μεγαλύτερο εφελκυσμό (αρνητική πίεση) έως ότου καταρρέει με την εμφάνιση της αέριας φάσης εντός του σωλήνα. Μερικοί κύκλοι θέρμανσης-ψύξης αρκούν για την ανάπτυξη εφελκυστικής αντοχής (Chapman et al., 1975), ενώ αυτή αυξάνει με την αύξηση των κύκλων θέρμανσης-ψύξης (Jones et al, 1981) και την επιβολή προηγούμενης υψηλής θετικής πίεσης στο υγρό (Tarantino & Mongioni, 2001).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, ο μηχανισμός υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του νερού έχει ως εξής:

- Η εμφάνιση φυσαλίδων σε υγρό χωρίς προηγούμενη επεξεργασία κατά τη μείωση της πίεσης σε αυτό δεν συνιστά σπηλαιώση με βάση τον ορισμό του φαινομένου, δηλ. τη μετάπτωση μορίων του υγρού από την υγρή στην αέρια φάση λόγω μείωσης της πίεσης στο υγρό.
- Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε μικροφυσαλίδες αερίων που παραμένουν εγκλωβισμένες μέσα στα υγρά ή στις μικροκοιλότητες κατά μήκος της επαφής του υγρού με το στερεό εντός του οποίου βρίσκεται χωρίς να διαλυθούν, ακόμα και μετά την επιβολή πολύ υψηλών πιέσεων στο νερό, και την παρουσία αερίων διαλυμένων εντός του υγρού τα οποία περνούν εύκολα από τη διάλυση εντός του υγρού στην αέρια φάση προκαλώντας την αύξηση του μεγέθους των παριστάμενων φυσαλίδων μέχρι την τελική ραγδαία ένωσή τους προς αποκατάσταση της συνέχειας της αέριας φάσης.
- Υγρό καθαρό, χωρίς προσμείξεις ή διαλυμένες ουσίες εντός αυτού, απαερωμένο, που έχει υποβληθεί σε προηγούμενη πολύ υψηλή πίεση ώστε οι μικροφυσαλίδες να συντρίβουν και τα αέρια που τις σχηματίζουν να περάσουν σε διάλυση εντός του υγρού και το οποίο βρίσκεται σε δοχείο μικρού όγκου (για περιορισμό της ποσότητας του υγρού) με πολύ λεία τοιχώματα ώστε να μην μπορούν να παραμείνουν φυσαλίδες αερίων κατά μήκος της διεπιφάνειας υγρής-στερεάς φάσης επιδεικνύει πολύ υψηλή εφελκυστική αντοχή, η οποία αντιστοιχεί σε πίεση πολύ χαμηλότερη των -100 kPa.

Τέλος, περισσότερα για τις μεθόδους μέτρησης της μύξης και τους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες μπορούν να βρεθούν στον Μπαρδάνης (2016), Bardanis (2016a) και στους Μπαρδάνη & Λουκίδη (2019).

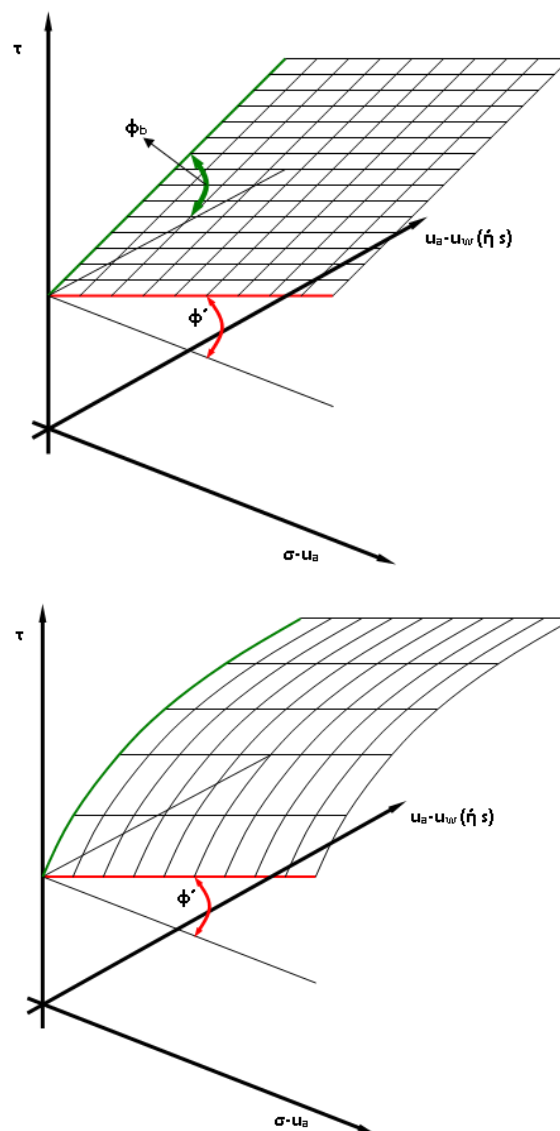
3. Μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών

3.1 Διατμητική αντοχή

Η περιγραφή της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών με τη μύζηση μπορεί να βρεθεί στον Χατζηγώγο (2019). Γενικά όσο αυξάνεται η μύζηση των μη κορεσμένων εδαφών αυξάνεται και η διατμητική τους αντοχή κατά τις προβλέψεις του γενικευμένου (για μη κορεσμένα εδάφη) γραμμικού κριτηρίου διατμητικής αντοχής των Fredlund, et al. (1978) -Εξ. 12. Πολλά πειραματικά αποτελέσματα έχουν επιδείξει (π.χ. Escario & Sáez, 1986, Krahn, et al., 1989), ότι η αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση δεν είναι γραμμική αλλά ο ρυθμός αύξησης προοδευτικά μειώνεται (γενικευμένο, μη γραμμικό κριτήριο διατμητικής αντοχής, Σχ. 15).

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (12)$$

Ακόμα ωστόσο και το μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας, παρά τον μειούμενο ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της μύζησης, περιγράφει την εξέλιξη της περισσότερο των αργιλικών και των ιλυοαργιλωδών υλικών παρά πιο χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών. Προς επίδειξη παρουσιάζεται η Φωτ. 1 (Μπαρδάνης, 2016) στην οποία απεικονίζεται η εξέλιξη της ισορροπίας μίας πολύ λεπτόκοκκης άμμου. Το υλικό αυτό -όπως όλες οι άμμοι- ισορροπεί πρακτικά στην ίδια γωνία και όταν είναι εντελώς ξηρή και όταν είναι πλήρως κορεσμένη, αλλά στέκεται σε μορφή δοκιμίου κατακόρυφα όταν αναπτυχθεί μικρή τιμή της μύζησης μετά την ξήρανσή της για μικρό χρονικό διάστημα. Καθώς αυξάνεται η μύζηση με την περαιτέρω έκθεση του δοκιμίου στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, το δοκίμιο διαλύεται φτάνοντας και πάλι σε μια μορφή κοντά σε εκείνη του εντελώς ξηρού και του πλήρως κορεσμένου υλικού, παρά τη διατήρηση συσσωματωμάτων του πιο λεπτού υλικού όπου ενδεχομένως υπάρχουν και ίχνη ιλύος. Κατά συνέπεια πιο χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά από αργίλους αναμένεται να μπορούν να έχουν πρακτικά οποιαδήποτε εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 16. Κοινό χαρακτηριστικό για όλα τα εδαφικά υλικά είναι η αύξηση της διατμητικής αντοχής μέχρι την πίεση διεύθυνσης αέρα του κάθε ενός κατά την γωνία διατμητικής αντοχής του αντίστοιχου υλικού πλήρως κορεσμένου (κατά



Σχ. 15. Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών κατά το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb (πάνω) και το μη γραμμικό κριτήριο (κάτω).

Fig. 15. Schematic representation of the failure envelope of unsaturated soils according to generalized linear Mohr-Coulomb criterion (top) and the non-linear criterion (bottom).

τις προβλέψεις της αρχής των ενεργών τάσεων όπως αυτή ισχύει για αρνητικές πιέσεις πόρων μέχρι την πίεση διεύθυνσης αέρα). Από εκεί και πέρα για αμιγώς χονδρόκοκκα εδάφη πρέπει να αναμένεται η μείωση της αντοχής μέχρι το 0 (Έδαφος E στο Σχ. 16), για χονδρόκοκκα με κάποιο ποσοστό ιλύος, μείωση μέχρι τη σταθεροποίηση σε μια μηδενική τιμή (Έδαφος Δ), για πιο ιλυώδη εδάφη η σταθεροποίηση της αντοχής στην αποκτηθείσα μέχρι την πίεση

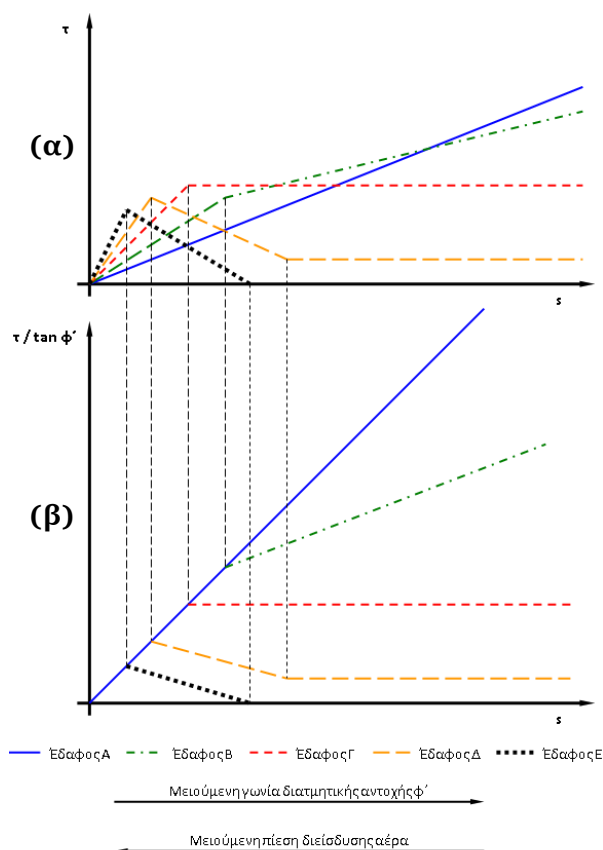


Φωτ. 1. Πολύ λεπτή Άμμος Λίμνης Ιωαννίνων: α) εντελώς ξηρή, β) πλήρως κορεσμένη, γ) υπό μερικό κορεσμό μετά από μόρφωση σε τύπο όντας πλήρως κορεσμένη και την άφεση της στην ατμόσφαιρα για ξήρανση για μικρό χρονικό διάστημα, και δ) στο παραμένον ποσοστό υγρασίας μετά από ξήρανσή της στην ατμόσφαιρα.

Phot. 1. Very fine Ioannina Lake Sand: a) completely dry, b) fully saturated, c) unsaturated after moulding in fully saturated state & letting it dry in atmospheric conditions for a short time, and d) at residual water content state after drying in atmospheric conditions.

διείσδυσης αέρα τιμή (Έδαφος Γ), για αργιλιώδη εδάφη η αύξηση με μικρότερο ρυθμό (Έδαφος Β) και τέλος για αμιγώς αργιλικά εδάφη και ειδικά υψηλής πλαστικότητας η μονοτονική αύξηση ακόμα και με τον ίδιο ρυθμό με αυτόν που καθορίζει η γωνία διατμητικής αντοχής του ίδιου υλικού πλήρως κορεσμένου (Έδαφος Α) -στο Σχ. 16 υποτέθηκε χάριν απλοποίησης ότι η συνοχή είναι ο).

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στο αντικείμενο των μη κορεσμένων εδαφών είναι ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών για τον υπολογισμό παραμέτρων. Ενδεικτικά παρατίθεται ο Πιν. 1 όπου συγκεντρώνονται ρυθμοί επιβολής φόρτισης σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό ελεγχόμενη μύζηση. Όπως φαίνεται από τους ρυθμούς στον Πιν. 1, ακόμα και αν υποτεθούν δοκίμια ύψους 70mm και μέγιστη αξονική παραμόρφωση 15%, ο ελάχιστος χρόνος μόνο για το στάδιο της θραύσης είναι 1.5 έως 7.5 ημέρες. Αν συνυπολογιστούν τα στάδια στερεοποίησης και ξήρανσης



Σχ. 16. Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών για μηδενικές τιμές της τάσης και διάφορα είδη εδαφών: α) διατμητική αντοχή τ με την μύζηση, και β) διατμητική αντοχή διαιρεμένη με την εφαπτομένη της γωνίας διατμητικής αντοχής ϕ' κάθε υλικού με την μύζηση.

Fig. 16. Schematic representation of the failure envelope of unsaturated soils for zero total stress: a) shear strength τ vs suction, and b) shear strength normalized by the tangent of the angle of shearing resistance ϕ' of each material vs suction.

στη ζητούμενη τιμή μύζησης, γίνεται αντιληπτό ότι οι χρόνοι για τον εργαστηριακό προσδιορισμό της αντοχής ενός μη κορεσμένου εδάφους υπό έναν συνδυασμό πλευρικής τάσης και μύζησης μετρείται σε μήνες. Για δοκιμές άμεσης διάτμησης υπό ελεγχόμενη μύζηση οι χρόνοι μειώνονται κάπως αλλά όχι σημαντικά.

Μία προσπάθεια ταχύτερου τρόπου υπολογισμού της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση είναι ο συνδυασμός αποτελεσμάτων δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα (Μπαρδάνης, 2016, Bardanis & Grifi-za, 2016). Αν και η μέθοδος περιορίζεται σε

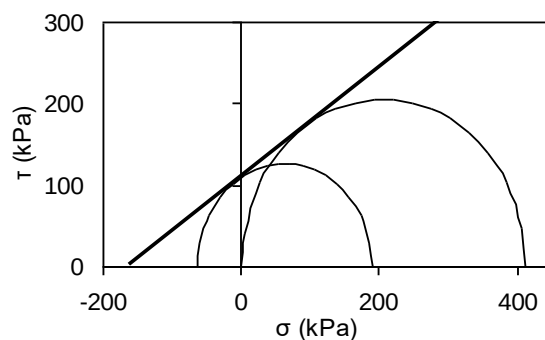
Πιν. 1. Συνόψιση ρυθμών μετατόπισης κατά την επιβολή τριαξονικής θλίψης με έλεγχο της μύζησης (από τον Delage, 2004).

Tab. 1. Summary of displacement rates during triaxial compression under suction control (after Delage, 2004).

Αναφορά	Μέθοδος ελέγχου μύζησης	Εδαφικό υλικό	Ρυθμός μετ/σης (μm/min)
Bishop & Donald (1961)	Μέσω στήλης υδραργύρου	Ιλύς	2.13
Gulhati & Satija (1981)	MMA	Άργιλος, $I_p = 24$	6
Ho & Fredlund (1982)	MMA	Ιλυοαμώδες υλικό	1.43
Delage, et al. (1987)	Ωσμωτική μέθοδος	Ιλύς, $I_p = 19$	1
Romero, et al. (1997)	MMA	Ιλύς, $I_p = 16$	1
Barrera, et al. (2002)	MMA	Ιλύς, $I_p = 16$	1
Wheeler & Sivakumar (1995)	MMA	Καολίνης $I_p = 33$	1.4
Maâtouk, et al. (1995)	MMA	Ιλύς, $I_p = 7$	1.2
Rampino, et al. (1999) – Τριαξονική συσκευή	MMA	Ιλυώδης άμμος, $I_p = 13$	1.26
Laloui, et al. (1997)	MMA	Αμμώδης ιλύς, $I_p = 8$	1.5

MMA: Μέθοδος Μετατόπισης Άξονα.

αρχικά αναζυμωμένα δοκίμια εδαφικών υλικών τα οποία υποβάλλονται σε διάφορες τιμές της μύζησης, παρέχει μία εικόνα της αναμενόμενης εξέλιξης της αντοχής με την αύξηση της μύζησης μέσω της εξέλιξης της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση. Οι κύκλοι Mohr από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα εκτελεσθείσες στο ίδιο υλικό μετά από επιβολή της ίδιας μύζησης, μπορούν να συνδυαστούν για την εκτίμηση της φαινόμενης συνοχής του υλικού αυτού υπό την τιμή της μύζησης στην οποία υπο-

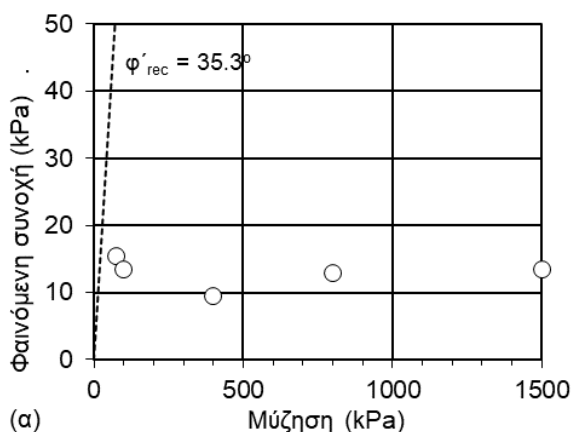


Σχ. 17. Παράδειγμα συνδυασμού των κύκλων Mohr από τη δοκιμή θλίψης κατά γενέτειρα (κύκλος στα αριστερά) και τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης (κύκλος στα δεξιά) με την εφαπτομένη των δύο κύκλων.

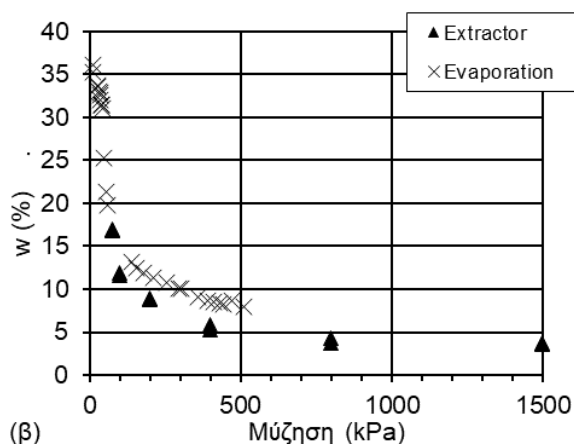
Fig. 17. An example of the combination of Mohr's circles for splitting tensile test (circle on the left) and unconfined compression test (circle on the right) with the tangent to the two circles.

βλήθηκε (Σχ. 17). Υποβάλλοντας διάφορα δοκίμια σε διαφορετικές τιμές της μύζησης μπορεί να εκτιμηθεί η εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση (Σχ. 18 & 19). Η μέθοδος περιορίζεται σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά σε μορφή πολτού αλλά παρέχει τη δυνατότητα μέσα σε 20-30 ημέρες να προσδιοριστεί μία εκτίμηση για την εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση. Ο χρόνος αυτός, αν και παραμένει μεγάλος, είναι σημαντικά μειωμένος σε σχέση με τον χρόνο που απαιτείται για δοκιμές τριαξονικής φόρτισης και άμεσης διάτμησης υπό ελεγχόμενη μύζηση. Στο Σχ. 18 παρουσιάζεται η εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής για ένα μη πλαστικό υλικό (αντιστοιχεί σε ιλύ με ίχνη άμμου και αργίλου από πλευράς κοκκομετρικής διαβάθμισης) στο οποίο η αντοχή αυξήθηκε λίγο μετά την πίεση διεύθυνσης αέρα και στη συνέχεια μειώθηκε σε μία σταθερή πρακτικά τιμή ανεξαρτήτως μύζησης. Στο Σχ. 19 παρουσιάζεται η εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής για ένα υλικό με πλαστικότητα στο οποίο η αντοχή μετά την πίεση διεύθυνσης αέρα αυξάνεται με σταθερό ρυθμό που αντιστοιχεί σε γωνία $\phi'^b = 4.8^\circ$.

Η μεγαλύτερη αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών αποτελεί την αιτία για την οποία θεωρείται παραδοχή υπέρ της ασφαλείας να μην λαμβάνεται υπόψη ο μερικός κορεσμός. Πράγματι, αφού ο μερικός κορεσμός οδηγεί σε μεγαλύτερη αντοχή, σε μία ευθεία ανάλυση ενός προβλήματος αντοχής, το να αγνοηθεί αυτή η πρόσθετη



(α)



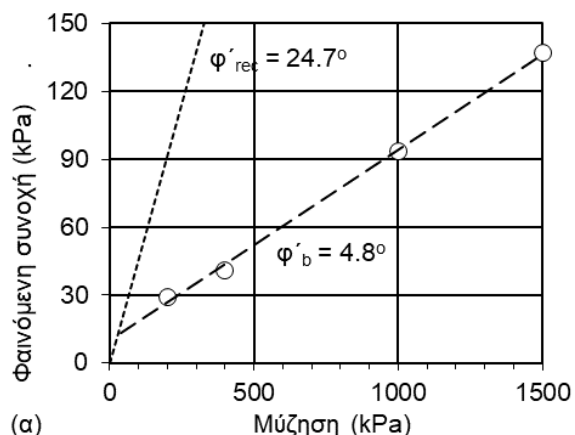
(β)

Σχ. 18. α) Φαινόμενη συνοχή με τη μύζηση και με τη γραμμή που αντιστοιχεί στη γωνία διατμητικής αντοχής του αναζυμωμένου εδάφους όπως μετρήθηκε σε άμεση διάτμηση για σύγκριση, και β) ποσοστό υγρασίας με τη μύζηση για αποσπασμένο Φυλλίτη Σκύρου.

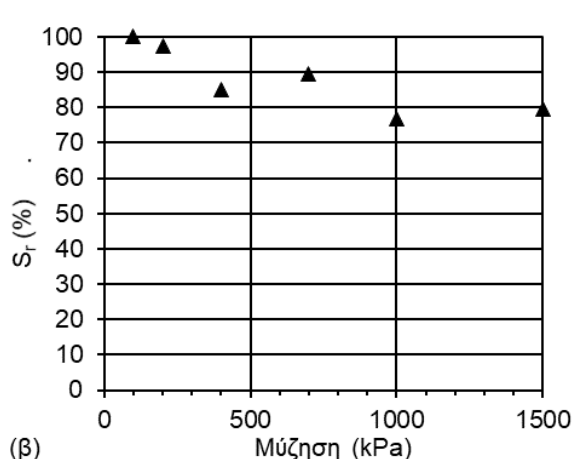
Fig. 18. a) Apparent cohesion vs suction with the line corresponding to ϕ' from direct shear on slurry for comparison, and b) water content vs suction, for Skiros weathered Phyllite.

αντοχή είναι παραδοχή υπέρ τη ασφαλείας. Το ερώτημα όμως είναι: το να αγνοείται η πρόσθετη αυτή αντοχή σε ένα πρόβλημα *αντίστροφης ανάλυσης* είναι υπέρ της ασφαλείας;

Χάριν πληρότητας υπενθυμίζεται η έννοια της παραμένουσας διατμητικής αντοχής ενός αργιλικού εδάφους με συνοχή (Skempton, 1964). Προκειμένου για επιβολή διατμητικών παραμορφώσεων μέχρι τη θραύση των δοκιμών ένα πλήρως κορεσμένο αργιλικό έδαφος έχει γενικά συνοχή και γωνία διατμητικής αντοχής σε όρους ενεργών τάσεων, c' και ϕ' αντίστοιχα. Με την αύξηση της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης η διατμητική αντοχή μειώνεται σε τιμές τέτοιες



(α)



(β)

Σχ. 19. α) Φαινόμενη συνοχή με τη μύζηση και με τη γραμμή που αντιστοιχεί στη γωνία διατμητικής αντοχής του αναζυμωμένου εδάφους όπως μετρήθηκε σε άμεση διάτμηση για σύγκριση, και β) ποσοστό υγρασίας με τη μύζηση για αποσπασμένο Φυλλίτη Σκύρου.

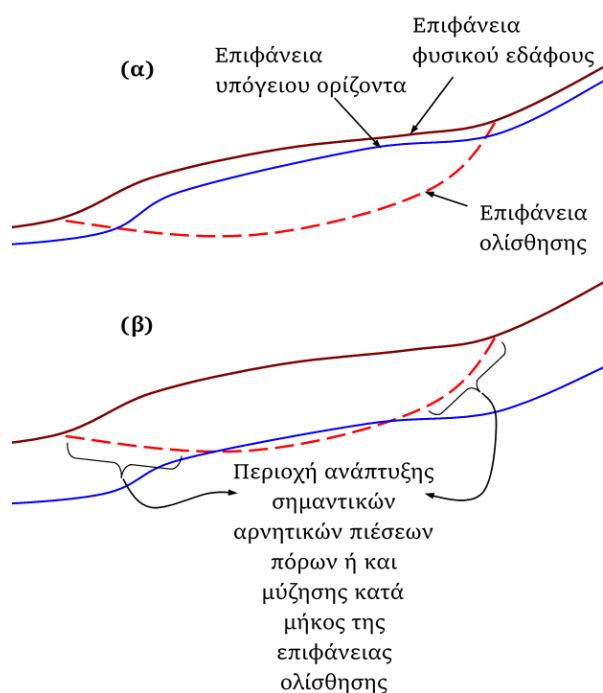
Fig. 19. a) Apparent cohesion vs suction with the line corresponding to ϕ' from direct shear on slurry for comparison, and b) water content vs suction, for Skiros weathered Phyllite.

που τα αργιλικά εδάφη χάνουν τη συνοχή τους και η γωνία διατμητικής αντοχής τους παραμένει όση και αυτή στην αστοχία. Εάν τέλος η επιβαλλόμενη παραμόρφωση αυξηθεί ακόμα περισσότερο, τότε και η γωνία διατμητικής αντοχής μειώνεται μέχρι την τελική τιμή της που είναι η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής, ϕ'_{res} (residual angle of friction). Η τόσο χαμηλή τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής οφείλεται στην προοδευτική ευθυγράμμιση των αργιλικών πλακιδίων παράλληλα με το επίπεδο αστοχίας, γεγονός το οποίο μειώνει στο ελάχιστο την αναπτυσσόμενη αντίσταση στην περαιτέρω ολίσθηση μεταξύ τους. Η

γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής εξαρτάται από το εύρος τιμών της κατακόρυφης τάσης στο οποίο μετρείται (Bishop, 1971, Skempton, 1985, Maksimović, 1989, Stark & Eid, 1994), την κοκκομετρική διαβάθμιση (Skempton, 1964, Kenney, 1967, Lupini, et al., 1981, Skempton, 1985, Kalteziotis, 1993), την πλαστικότητα (Kalteziotis, 1993, Wesley, 2003) και την ορυκτολογική σύσταση των εδαφικών υλικών (Mitchell, 1976, Brandl, 1987, Kalteziotis, 1993), τον ρυθμό επιβολής της διατμητικής παραμόρφωσης (Tika, et al., 1996), και τη χημική σύσταση του νερού των πόρων των εδαφικών υλικών (Di Maio, 1996a & 1996b).

Η γνώση της παραμέτρου αυτής είναι πολύ σημαντική στα πλαίσια της μελέτης αποκατάστασης κατολισθήσεων. Στις κατολισθήσεις, και ειδικά στις παλαιοκατολισθήσεις (palaeo-landslides), δηλαδή εκείνες που έχουν συμβεί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα πριν από σήμερα και άρα έχουν συμβεί πολύ μεγάλες παραμορφώσεις επί των επιφανειών ολίσθησής τους, οι οποίες είναι σαφώς καθοριζόμενες, κινηματικά δυνατές, και κατά μήκος τους –ή τουλάχιστον σε μεγάλο τμήμα του μήκους τους– η διατμητική αντοχή έχει περιέλθει στην κατάσταση παραμένουσας αντοχής. Στις περιπτώσεις αυτές βέβαια η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής προσδιορίζεται από αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας (στις οποίες τίθεται $c' = 0$) αντί για εργαστηριακές δοκιμές, προκύπτοντας πάντα λίγο μεγαλύτερη από την τιμή που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές προκειμένου για κατολίσθηση η επιφάνεια ολίσθησης της οποίας διέρχεται από ομογενή αργιλικά εδάφη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η ίδια παραμόρφωση που έχει συμβεί κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης δεν έχει απαραίτητα το ίδιο αποτέλεσμα στο εδαφικό υλικό από το οποίο διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης σε κάθε σημείο της, απομειώνοντας με τον ίδιο τρόπο τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής. Το ίδιο αποτέλεσμα έχει επίσης και η ανομοιογένεια των υλικών από τα οποία διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης. Η εγγύτητα της τιμής της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας (στις οποίες έχει τεθεί $c' = 0$) και της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από εργαστηριακές δοκιμές συνιστά μέτρο εκτίμησης του μεγέθους των παραμορφώσεων που έχουν συμβεί στη συγκεκριμένη κατολίσθηση και της επιρροής τους επί των παραμέτρων αντοχής των απαντώντων από την επιφάνεια ολίσθησης υλικών.

Το ερώτημα όμως που προκύπτει ανεξάρτητα από τον τρόπο που προέκυψε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής είναι πως –και αν– μεταβάλλεται η παράμετρος αυτή με τον βαθμό κορεσμού και τη μύζηση. Οι λόγοι για τους οποίους ένα τέτοιο ερώτημα καθίσταται σημαντικό είναι ο τρόπος με τον οποίο θα αποφασιστούν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής επί μίας επιφάνειας ολίσθησης, κατά μήκος της οποίας έχει αναπτυχθεί αρνητική πίεση πόρων ή και μύζηση, ώστε με τις παραμέτρους αυτές να σχεδιαστούν τα μέτρα σταθεροποίησης της κατολίσθησης. Στο Σχ. 20 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις κατολισθήσεων. Στη μία περίπτωση η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι ψηλά (Σχ. 20α) και στην άλλη χαμηλά (Σχ. 20β). Εάν ισχύουν οι συνθήκες του Σχ. 20α, δηλ. η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι τόσο «ψηλά» που μικρό μόνο μέρος της επιφάνειας ολίσθησης βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, τότε μπορεί να υπολογιστεί η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής θέτοντας τον συντελεστή ασφαλείας ίσο με τη μονάδα σε αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας. Από τις αναλύσεις αυτές θα υπολογιστεί πράγματι η «μέση» τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης θέτοντας $c' = 0$. Χρησιμοποιώντας αυτήν την παράμετρο αντοχής για το σχεδιασμό των μέτρων σταθεροποίησης, τότε στις ευθείες αναλύσεις προκύπτει ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας για τα μέτρα σταθεροποίησης που εισήχθησαν. Εάν ωστόσο ισχύουν οι συνθήκες του Σχ. 20β, τότε σε σημαντικά τμήματα της επιφάνειας ολίσθησης έχουν αναπτυχθεί αρνητικές πιέσεις πόρων ή και μύζηση (ανάλογα με την τιμή της πίεσης διεύθυνσης αέρα των υλικών που απαντώνται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, τη μεταβολή στη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και το μέγεθος της κατείδυσης από την επιφάνεια του εδάφους και διά της επιφάνειας ολίσθησης, η οποία συχνά συνιστά και η ίδια επιλεκτική δίοδο για τα κατεισδύοντα ύδατα). Υπό αυτές τις συνθήκες, αν αγνοηθούν οι αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα κατά την εκτέλεση της αντίστροφης ανάλυσης, υπερεκτιμάται η τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής για $c' = 0$, συχνά ακόμα και σε εξωπραγματικά μεγάλες τιμές για τη φύση των απαντώντων υλικών. Αν αντίθετα οι τιμές της αρνητικής πίεσης πόρων ληφθούν υπόψη, υπολογίζεται μία μικρότερη τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Εάν οι τιμές της αντοχής από την αντίστροφη ανάλυση



Σχ. 20. Ενδεικτική απεικόνιση συνθηκών υπόγειου ορίζοντα σε εκδηλωθείσες κατολισθήσεις: α) με τον υπόγειο ορίζοντα «ψηλά», δηλαδή με ελάχιστο τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης να υπόκειται σε αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση, και β) με τον υπόγειο ορίζοντα «χαμηλά», δηλαδή με σημαντικό τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης να υπόκειται σε αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση.

Fig. 20. Indicative representation of water table conditions in landslides: a) with the water table “high”, i.e. with a minimum part of the sliding surface affected by negative pore water/suction, and b) with the water table “low”, i.e. with a considerable part of the sliding surface affected by negative pore water/suction.

χωρίς να ληφθούν υπόψη οι αρνητικές πιέσεις πόρων ($c' = 0$, $\phi' > \phi'_{res}$) εισαχθούν στις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας για τη διαστασιολόγηση των απαιτούμενων μέτρων σταθεροποίησης, τότε υπάρχει ο κίνδυνος σοβαρού υποσχεδιασμού των μέτρων αυτών. Και αυτό γιατί οι παράμετροι αντοχής που πρόέκυψαν από την αντίστροφη ανάλυση ευσταθείας εμπεριέχουν την επιρροή της αρνητικής πίεσης πόρων ή της μύζησης στην ευστάθεια μέσω του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb, αλλά και την επιρροή της μύζησης επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυτής κάθεαυτής. Δεδομένου όμως ότι αυτή η επιρροή μπορεί να χαθεί ως συνέπεια της απώλειας της παροδι-

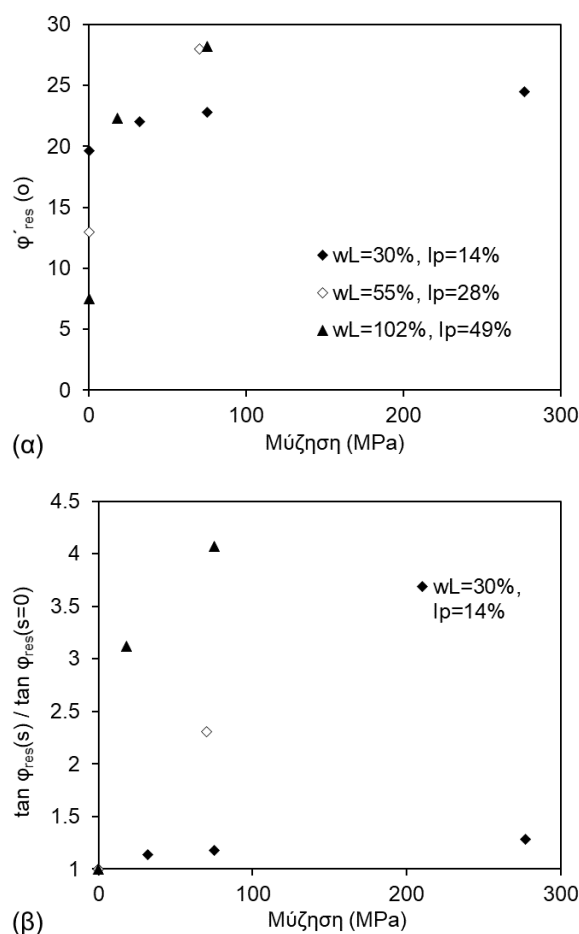
κής παρουσίας της μύζησης, ο συντελεστής ασφαλείας με τα μέτρα σταθεροποίησης θα είναι αυτός που προκύπτει μόνο για τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής από αντίστροφη ανάλυση της κατάστασης όπως περιγράφεται στις συνθήκες του Σχ. 20β λαμβάνοντας υπόψη και τις αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση. Ο Χατζηγώγος (2019) αναφέρεται ειδικά στο θέμα της δυνατότητας ταχείας απώλειας της επιρροής του μερικού κορεσμού στην αντοχή σε υπολειμματικά εδάφη, λόγω επιλεκτικής κίνησης των υδάτων επί ασυνεχειών. Η λύση για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων κατά τη μελέτη σταθεροποίησης κατολισθήσεων βρίσκεται στην ορθή αναγνώριση των συνθηκών που περιγράφονται από το Σχ. 20β για κάθε κατολίσθηση και την υιοθέτησή τους στο προσομοίωμα κατά την εκτέλεση της αντίστροφης ανάλυσης ευσταθείας με εισαγωγή της αρνητικής πίεσης πόρων ή της μύζησης όπως έχει αναπτυχθεί κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Κάτι τέτοιο απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία από πλευράς μελετητή, αλλά αν δεν υπάρχουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία μπορεί να οδηγήσει σε συντηρητικές εκτιμήσεις (όταν δεν υπάρχει μεγάλη εμπειρία) ή κατηγορίες εκ μέρους του κυρίου του έργου για συντηρητικό σχεδιασμό. Από την άλλη πλευρά, η ορθή εισαγωγή της αρνητικής πίεσης πόρων ή της μύζησης απαιτεί ένα πρόγραμμα γεωτεχνικής έρευνας πεδίου και εργαστηρίου που ξεφεύγει από την καθεστηκυία γεωερευνητική πρακτική στην Ελλάδα και άλλες χώρες (παρά την καθολική αναγνώριση πλέον της επιρροής της ξήρανσης στην ευστάθεια πρανών και την αυξημένη αντοχή γενικότερα, η απώλεια της οποίας κατά τις βροχερές περιόδους με πιο πρόσφατο παράδειγμα την χειμερινή περίοδο 2018-19 στην Ελλάδα και στην Κύπρο). Το θέμα αυτό εξεζητείται περαιτέρω στη συνέχεια μέσα από παραδείγματα αντιστρόφων και ευθειών αναλύσεων ευσταθείας, οι οποίες εκτελέστηκαν με την εισαγωγή της επιρροής της μύζησης και χωρίς αυτήν.

Η άμεση επιρροή της αρνητικής πίεσης πόρων και της μύζησης στην αντίσταση στην ολίσθηση κατά μήκος επιφανειών αστοχίας στις οποίες η διατμητική αντοχή καθορίζεται μόνο από τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής γίνεται αντιληπτή μέσω του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb. Η μείωση του βαθμού κορεσμού και η συνεπαγόμενη αύξηση της μύζησης ωστόσο έχουν συνέπειες και επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυτής κάθεαυτής. Ο Brandl (1996) μέτρησε σε συσκευή επαναλαμβανόμενης άμεσης διάτμησης με έλεγχο του βαθμού

κορεσμού τη μεταβολή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής με το βαθμό κορεσμού. Με βάση τα ευρήματά του, η γωνία ϕ'_{res} αυξάνεται ραγδαία με τη μείωση του βαθμού κορεσμού και μάλιστα τόσο πιο ραγδαία, όσο πιο μεγάλη είναι η εφαρμοζόμενη κατακόρυφη τάση. Για πολύ μικρές τιμές του βαθμού κορεσμού (20% στην ιλυώδη άργιλο των δοκιμών του Brandl, 1996) παρατηρείται ότι η επιρροή της κατακόρυφης τάσης πρακτικά εξαλείφεται.

Οι Vaunat, et al. (2006) πραγματοποίησαν δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης σε μια ιλυώδη άργιλο χαμηλής πλαστικότητας ($w_L=30\%$, $I_p=14\%$, $G_s=2.71$) χρησιμοποιώντας μία συσκευή Bromhead (Bromhead, 1979) στην οποία είχαν ενσωματώσει σύστημα ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω ελεγχόμενης σχετικής υγρασίας. Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής του υλικού αυξήθηκε από 19.6° για το πλήρως κορεσμένο εδαφικό υλικό, σε 22.0° για μύζηση 32 MPa, 22.8° για μύζηση 75 MPa, και 24.5° για μύζηση 277 MPa. Η πίεση διεύθυνσης αέρα του υλικού ήταν περί το 1 MPa και η μύζηση επίτευξης παραμένουστος ποσοστού υγρασίας περί τα 70 MPa. Δεδομένου ότι η κατακόρυφη τάση που εφαρμόστηκε περιορίστηκε μέχρι τα 300 kPa, δεν παρατηρήθηκαν μεταβολές της γωνίας ϕ'_{res} με την κατακόρυφη τάση. Χρησιμοποιώντας την ίδια συσκευή οι Vaunat, et al. (2007) μέτρησαν γωνία ϕ'_{res} 28° στην άργιλο Boom από το Βέλγιο ($w_L=55\%$, $I_p=28\%$) για μύζηση 70 MPa, όταν η γωνία ϕ'_{res} του ίδιου υλικού πλήρως κορεσμένου είναι μόνο 13° , και οι Merchán, et al. (2008) μέτρησαν γωνία ϕ'_{res} 28.2° σε μπεντονίτη FEBEX ($w_L=102\%$, $I_p=49\%$, $G_s=2.70$) για μύζηση 75 MPa και 22.3° για μύζηση 18 MPa, όταν η γωνία ϕ'_{res} του ίδιου υλικού πλήρως κορεσμένου είναι μόνο 7.5° . Τα αποτελέσματα αυτά συγκεντρώνονται στο Σχ. 20. Στο Σχ. 21α συσχετίζεται η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής με τη μύζηση, και στο Σχ. 21β τα αποτελέσματα κανονικοποιούνται ως προς τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής κάθε εδαφικού υλικού όταν είναι πλήρως κορεσμένο, $\phi_{res}(s=0)$, συσχετίζοντας τον λόγο $\tan \phi_{res}(s) / \tan \phi_{res}(s=0)$ με τη μύζηση, όπου $\phi_{res}(s)$ η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής υπό μύζηση s . Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυξάνεται με τη μύζηση και μάλιστα τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη είναι η πλαστικότητα των εδαφικών υλικών, με την αύξηση αυτή να επιδεικνύεται για τιμές της μύζησης μέχρι τη μύζηση επίτευξης του

παραμένουστος ποσοστού υγρασίας, από την οποία και πάνω η γωνία ϕ'_{res} πρακτικά σταθεροποιείται. Η μεταβολή αυτή της γωνίας ϕ_{res} αποδίδεται στον σχηματισμό πολύ ισχυρά συνδεδεμένων συσσωματωμάτων των αργιλικών πλακιδίων λόγω της ξήρανσης που προκαλεί η αύξηση της μύζησης και τα οποία δεν μπορούν να διασπαστούν από την επιβαλλόμενη διατμητική παραμόρφωση. Η εξήγηση αυτή τεκμηριώθηκε από τους Merchán, et al. (2008) μέσω της φωτογράφισης των δοκιμών τους σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



Σχ. 21. Επιρροή της μύζησης επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα: α) γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής με την μύζηση, και β) ο λόγος $\tan \phi_{res}(s) / \tan \phi_{res}(s=0)$ με την μύζηση.

Fig. 21. Effect of suction on the angle of residual shearing resistance from published experimental results: a) angle of residual shearing resistance with suction, and b) ratio $\tan \phi_{res}(s) / \tan \phi_{res}(s=0)$ with suction.

Προκειμένου να επιδειχθεί καλύτερα αυτή η επιρροή, ειδικά στις αντίστροφες αναλύσεις σχεδιάστηκε το ακόλουθο παράδειγμα. Έστω ότι έχουμε επιφάνεια ολίσθησης μίας παλαιοκατολίσθησης, όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχ. 22. Το πρανές προσομοιώθηκε αριθμητικά με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για επίλυση προβλημάτων υπόγειας ροής που υπάρχει ενσωματωμένος στο πρόγραμμα ανάλυσης ευστάθειας πρανών με την μέθοδο οριακής ισορροπίας (MOI) SLIDE ver. 5.036. Οι οριακές συνθήκες καταστρώθηκαν όπως φαίνεται στο Σχ. 22: συνθήκες μηδενικής ροής κάθετα στο κάτω όριο του αριθμητικού προσομοιώματος, ορισμός ολικού υδραυλικού ύψους H (total head) στα πλευρικά όρια ($H=38\text{m}$ στο δεξιό όριο και $H=28\text{m}$ στο αριστερό) και ελεύθερες στην επιφάνεια. Ο συντελεστής διαπερατότητας ετέθη ίσος με 10^{-9} m/sec και επιλύθηκε το πρόβλημα μόνιμης ροής. Η επίλυση του αριθμητικού προσομοιώματος προβλέπει βάθος υπόγειου ορίζοντα στην στέψη του πρανούς περί τα 8m . Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αντίστροφη ανάλυση ευσταθείας της συγκεκριμένης επιφάνειας ολίσθησης με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας χρησιμοποιώντας τις πιέσεις πόρων που προβλέφθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), αλλά χωρίς να χρησιμοποιηθούν οι αρνητικές πιέσεις πόρων πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα. Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής προέκυψε 18.4° . Όταν εισήχθη η επιρροή των αρνητικών πιέσεων πόρων, η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής προέκυψε 17.0° . Για σύγκριση χρησιμοποιήθηκε για απλοποίηση των υπολογισμών η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα που προβλέφθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σαν απλή στάθμη υπόγειου ορίζοντα (φρεάτιος ορίζοντας) χωρίς το υπόλοιπο πεδίο πιέσεων πόρων. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε επί της ίδιας επιφάνειας επιβεβαίωσε καταρχάς ότι προέκυψε η ίδια γωνία τριβής όπως και για την ανάλυση χωρίς να ληφθεί υπόψη η αρνητική πίεση πόρων πάνω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα με πολύ μικρή διαφορά μόνο: 18.5° .

Μετά από την αντίστροφη αυτή ανάλυση επιχειρήθηκε να εισαχθούν διάφορα μέτρα σταθεροποίησης της κατολίσθησης που προσομοιώθηκε μέσω των αντίστοιχων ευθειών αναλύσεων ευσταθείας. Στην πρώτη περίπτωση εισήχθη εκσκαφή περί την οφρύ της κατολίσθησης, μέσω της οποίας αφαιρέθηκε και τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης. Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής ϕ_{res} από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία δεν ελήφθη

υπόψη η μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα προέκυψε συντελεστής ασφαλείας (Σ.Α.) 1.470 (Σχ. 23α), ενώ από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής ϕ_{res} από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία ελήφθη υπόψη η μύζηση προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.345 , δηλαδή σημαντικά μικρότερος από πριν (Σχ. 23β).

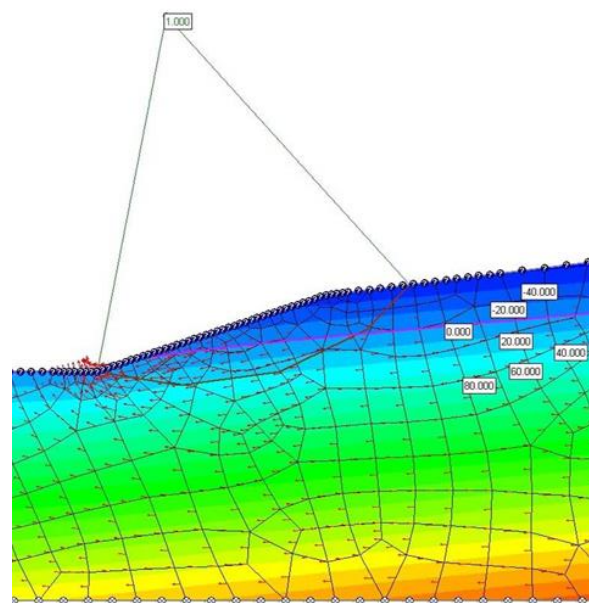
Εκτός από την περίπτωση σταθεροποίησης της κατολίσθησης μέσω εκσκαφής περί την οφρύ, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευσταθείας και για την περίπτωση σταθεροποίησης μέσω σταθεροποιητικού επιχώματος στον πόδα. Το επίχωμα θεωρήθηκε ότι είχε ύψος 3m και το υλικό κατασκευής του ότι είχε φαινόμενο βάρος 20 kN/m^3 , $c'=10 \text{ kPa}$ και $\phi'=26^\circ$. Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής ϕ_{res} από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία δεν ελήφθη υπόψη η μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.466 (Σχ. 23γ), ενώ από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής ϕ_{res} από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία ελήφθη υπόψη η μύζηση προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.363 , δηλαδή και πάλι σημαντικά μικρότερος (Σχ. 23δ).

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευσταθείας και για την περίπτωση σταθεροποίησης μέσω σειρών μονίμων προεντεταμένων αγκυρώσεων. Εισήχθησαν δύο σειρές αγκυρώσεων με αγκύρια 350 kN ανά 2 m . Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής ϕ_{res} από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία δεν ελήφθη υπόψη η μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.444 (Σχ. 23ε), ενώ από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής ϕ_{res} από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία ελήφθη υπόψη η μύζηση προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.322 , δηλαδή και πάλι σημαντικά μικρότερος (Σχ. 23στ). Λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας δεν πραγματοποιήθηκε το αντίστοιχο ζευγάρι ευθειών αναλύσεων ευσταθείας και για την λύση σταθεροποίησης με πασσάλους, παρόλο που είναι βέβαιο ότι και σε αυτή την περίπτωση θα προέκυπτε το ίδιο αποτέλεσμα.

Συνοψίζοντας λοιπόν προκύπτει ότι, όταν η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής κατολισθήσεων με τον υπόγειο ορίζοντα χαμηλά προκύπτει χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψη οι αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση πάνω από αυτόν, η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής υπερτιμάται, με αποτέλεσμα τα μέτρα σταθερο-

ποίησης που σχεδιάζονται στις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας που ακολουθούν με την τιμή αυτή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής να είναι υποδιαστασιολογημένα και ο πραγματικός συντελεστής ασφαλείας να είναι μικρότερος αυτού που υπολογίζεται, αφού η μύζηση αυτή πάνω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα δεν μπορεί να υποτεθεί ότι θα υπάρχει πάντα. Ο μόνος τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, είναι κατά τον υπολογισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής από αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας να προσομοιωθεί πρώτα το καθεστώς των πιέσεων πόρων μέχρι να προβλεφθεί η στάθμη υπόγειου ορίζοντα που έχει μετρηθεί, ενώ γενικά σε άλλα προγράμματα που δεν υφίσταται η δυνατότητα προσομοίωσης του καθεστώτος των πιέσεων πόρων να εισάγεται μία μικρή τιμή της συνοχής, η οποία έχει ελεγχθεί ότι αντιστοιχεί σε μια λογική μέση τιμή της μύζησης πολλαπλασιασμένη με την εφαπτομένη της υπολογιζόμενης γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής, και η οποία κατά τις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας θα αγνοείται. Η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού απαιτεί σημαντική κρίση προκειμένου να υποτεθεί μία λογική μέση τιμή της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα, και υπολογιστικά έναν αριθμό επαναλήψεων, αφού αρχικά η αντίστροφη ανάλυση εκτελείται χωρίς συνοχή και υπολογίζεται μία τιμή ϕ_{res}' , από αυτήν υπολογίζεται μία τιμή συνοχής η οποία εισάγεται και από την οποία προκύπτει νέα τιμή ϕ_{res}' κ.ο.κ. έως ότου υπολογιστεί η ορθή τιμή ϕ_{res}' .

Υπενθυμίζεται και πάλι ότι η παρατήρηση αυτή ισχύει για κατολισθήσεις στις οποίες η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρίσκεται τόσο χαμηλά που σημαντικό τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης βρίσκεται πάνω από αυτήν την στάθμη. Σε αυτή την ιδιαίτερη περίπτωση η αγνόηση της μύζησης κατά τις αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας, οδηγεί τελικά σε αποτελέσματα τα οποία βρίσκονται σε βάρος της ασφάλειας, ακριβώς αντίθετα από τις περιπτώσεις ευθειών αναλύσεων ευσταθείας πρανών με μύζηση, όπου η αγνόηση της μύζησης οδηγεί σε αποτελέσματα υπέρ της ασφάλειας. Και αυτό γιατί η μύζηση που επιδρά σε μια διαμορφωμένη κατάσταση (οδηγώντας στην αυξημένη τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής, όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα) δεν μπορεί να υποτεθεί ότι θα υπάρχει πάντα, με το ίδιο σκεπτικό που κατά τις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας πρανών με μύζηση θεωρείται λογικό να μη βασιστεί η δια-

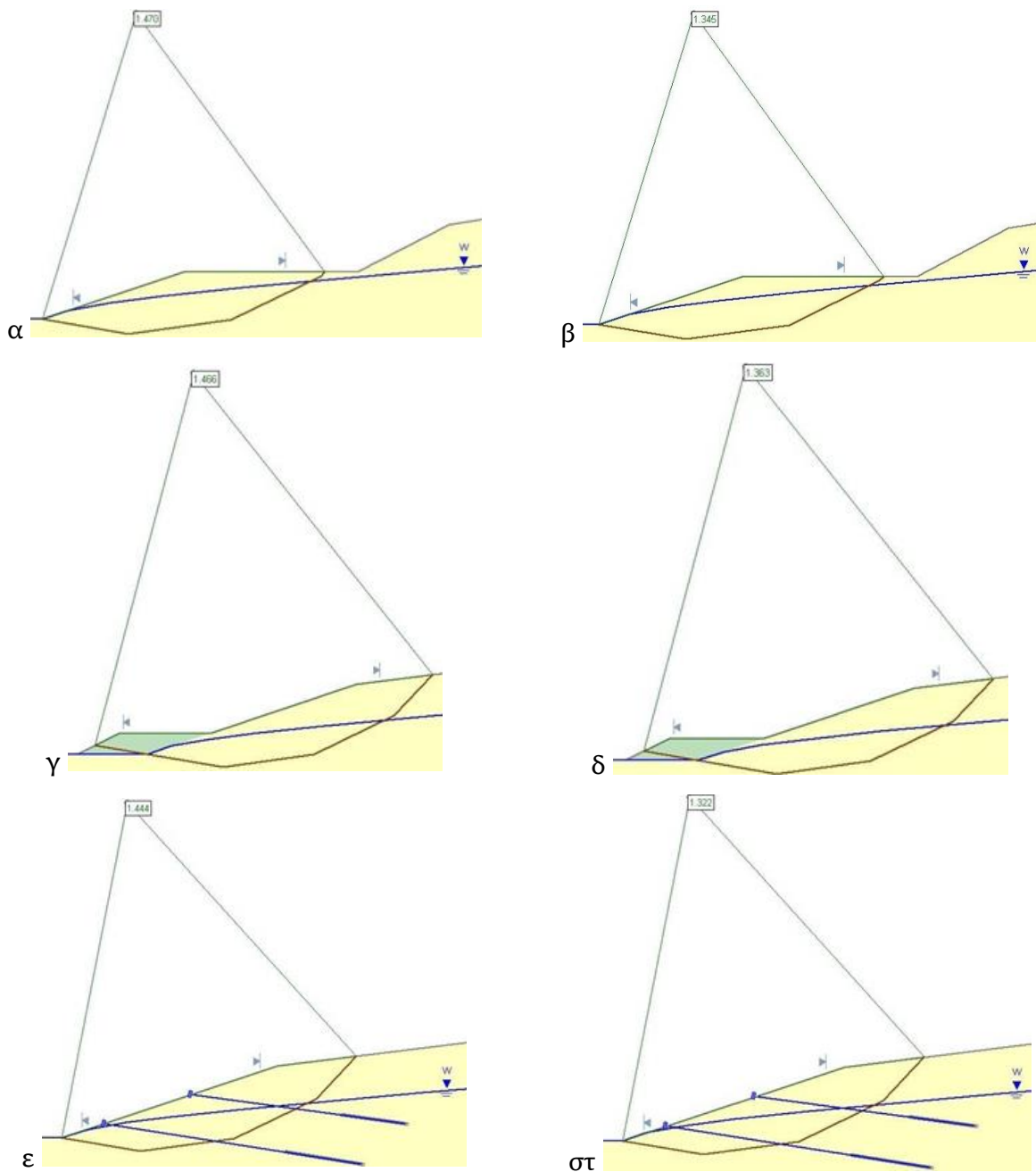


Σχ. 22. Αριθμητικό προσομοίωμα πρανούς με προδιαγεγραμμένη επιφάνεια ολίσθησης, όπως καταστρώθηκε για την επίλυση του καθεστώτος των πιέσεων πόρων υπό συνθήκες μόνιμης ροής με την ΜΠΣ.

Fig. 22. Numerical model of slope with predefined sliding surface, as set up for solving the pore pressure regime problem for steady state seepage conditions using FEM.

στασιολόγησή τους στην παρουσία αυτής της μύζησης. Πέρα από το πρακτικό του ενδιαφέρον, το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί –σε όρους ευσταθείας πρανών- τη μοναδική ίσως περίπτωση που δεν ισχύει η γνωστή αρχή για αναλύσεις ευσταθείας κατολισθήσεων: ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίζεται μετά τα μέτρα είναι ο σωστός, αρκεί οι συνθήκες των ευθειών αναλύσεων ευσταθείας με τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής να είναι ίδιες με τις συνθήκες της αντίστροφης ανάλυσης από την οποία προέκυψε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής.

Συνοψίζοντας την αναφορά στο ζήτημα της επιρροής του βαθμού κορεσμού στη διατμητική αντοχή, επισημαίνεται και πάλι η ανάγκη για την ανάπτυξη ταχύτερων μεθόδων μέτρησης ή έστω εκτίμησης της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής των εδαφών με τη μύζηση και η σημασία της αναγνώρισης της επιρροή αυτής της εξέλιξης της αντοχής με τη μύζηση σε αντίστροφα προβλήματα, καθώς η αγνόησή της μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι σε βάρος της ασφάλειας όπως επιδείχθηκε για αναλύσεις ευσταθείας σε περιπτώσεις με προδιαγεγραμμένη επιφάνεια ολίσθησης.



Σχ. 23. Αποτελέσματα αναλύσεων ευσταθείας επί της επιφάνειας ολίσθησης του Σχ. 22 μετά από εκσκαφή ελάφρυνσης στην οφρύ μέσω της οποίας αφαιρέθηκε τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης: α) με ϕ_{res}' από την αντίστροφη ανάλυση (ΑΑ) στην οποία αγνοήθηκε η μύζηση, και β) με ϕ_{res}' από την ΑΑ στην οποία ελήφθη υπόψη, μετά από εισαγωγή σταθεροποιητικού αντιβάρου στον πόδα: γ) με ϕ_{res}' από την ΑΑ στην οποία αγνοήθηκε η μύζηση, και δ) με ϕ_{res}' από την ΑΑ στην οποία ελήφθη υπόψη, και τέλος μετά από εισαγωγή προεντεταμένων αγκυρίων: ε) με ϕ_{res}' από την ΑΑ στην οποία αγνοήθηκε η μύζηση, και β) με ϕ_{res}' από την ΑΑ στην οποία ελήφθη υπόψη.

Fig. 23. Slope stability analysis results for the sliding surface in Fig. 22 after excavation at the scarp which removed part of the sliding surface: a) with ϕ_{res}' from the back analysis (BA) in which suction was neglected, and b) with ϕ_{res}' from the BA in which suction was taken into account, after introduction of stabilizing berm at the toe: c) with ϕ_{res}' from the BA in which suction was neglected, and d) with ϕ_{res}' from the BA in which suction was taken into account, and after the introduction of prestressed anchors: e) with ϕ_{res}' from the BA in which suction was neglected, and f) with ϕ_{res}' from the BA in which suction was taken into account.

3.2 Μεταβολές όγκου

Οι μεταβολές όγκου των μη κορεσμένων εδαφών αποτελούν φαινόμενα που σχετίζονται με μεγάλα τεχνικά προβλήματα αλλά και επιστημονικά αντικείμενα που έχουν αποτελέσει σημαντικό πεδίο έρευνας και για την εργαστηριακή και επιτόπου διερεύνηση του αλλά και την αναλυτική και αριθμητική προσομοίωσή του.

Το σπουδαιότερο φαινόμενο που σχετίζεται με μεταβολές όγκου είναι η διόγκωση των πλαστικών αργιλικών εδαφών. Ως φαινόμενο ευθύνεται για τις ζημιές με τη μεγαλύτερη οικονομική αξία παγκοσμίως (Λουκίδης, 2019) και αν και συνήθως οδηγεί σε ζημιές λειτουργικού χαρακτήρα, δεν είναι τόσο σπάνιες και οι ζημιές μέχρι και στον φέροντα οργανισμό κτιρίων. Στην Φωτ. 2 παρουσιάζεται γωνιακό υποστύλωμα μονοόροφης μονοκατοικίας στη συνοικία Λυκαβητός της Λευκωσίας στην Κύπρο. Το κτίριο εδράζεται επί της Μάργας Λευκωσίας, ενός σχηματισμού πολύ υψηλής διογκωσιμότητας που καλύπτει μεγάλο μέρος της επιφάνειας της Κύπρου και σε ορισμένες περιοχές είναι εξαιρετικά υψηλής πλαστικότητας και διογκωσιμότητας. Στο συγκεκριμένο κτίριο δεν εκπονήθηκε γεωτεχνική έρευνα, αλλά στην ευρύτερη περιοχή του κτιρίου αυτού η Μάργα Λευκωσίας εμφανίζεται με όριο υδαρότητας που φτάνει το 100% και δείκτη πλαστικότητας που φτάνει το 70%. Στο υποστύλωμα αυτό λοιπόν είχε προκληθεί τόση ζημιά που προκλήθηκε θραύση στο κάτω μέρος του για την αντιμετώπιση της οποίας τοποθετήθηκε εξωτερικός μανδύας με επανασκυροδέτηση για διεύρυνση της διατομής. Παρά την ρωγμή και μετά από αυτήν την επέμβαση, είναι εμφανής η συνέχιση της διόγκωσης του κτιρίου όπως μαρτυρά η ανύψωση της στρώσης σκυροδέματος που τοποθετήθηκε στη βάση του κτιρίου με το περιμετρικό πεζοδρόμιο για την αντιμετώπιση της κατείσδυσης υδάτων. Ο Λουκίδης (2019) παρουσιάζει επίσης αναλύσεις με βάση τις οποίες προκύπτει η επιπλέον φόρτιση γενικών κοιτοστρώσεων λόγω εποχιακών μεταβολών όγκου σε διογκούμενα εδάφη, αλλά και τα προβλήματα που δημιουργεί η αποκόλληση αυτών των εδαφών κατά τις εποχιακές μεταβολές όγκου τους από πασσάλους στις περιπτώσεις θεμελιώσεων με κοιτοστρώσεις επί πασσάλων, οδηγώντας σε συνθήκες «κοντού υποστυλώματος» το ανώτερο τμήμα των πασσάλων. Και τα δύο αυτά φαινόμενα, δυνητικά οδηγούν σε καταστάσεις σε βάρος της ασφάλειας σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας.



Φωτ. 2. Γωνιακό υποστύλωμα μονοόροφης μονοκατοικίας θεμελιωμένης επί Μάργας Λευκωσίας σε συνοικία της Λευκωσίας μετά από την επισκευή της βλάβης που του προκάλεσε η διόγκωση, η οποία συνεχίστηκε και μετά την επισκευή.

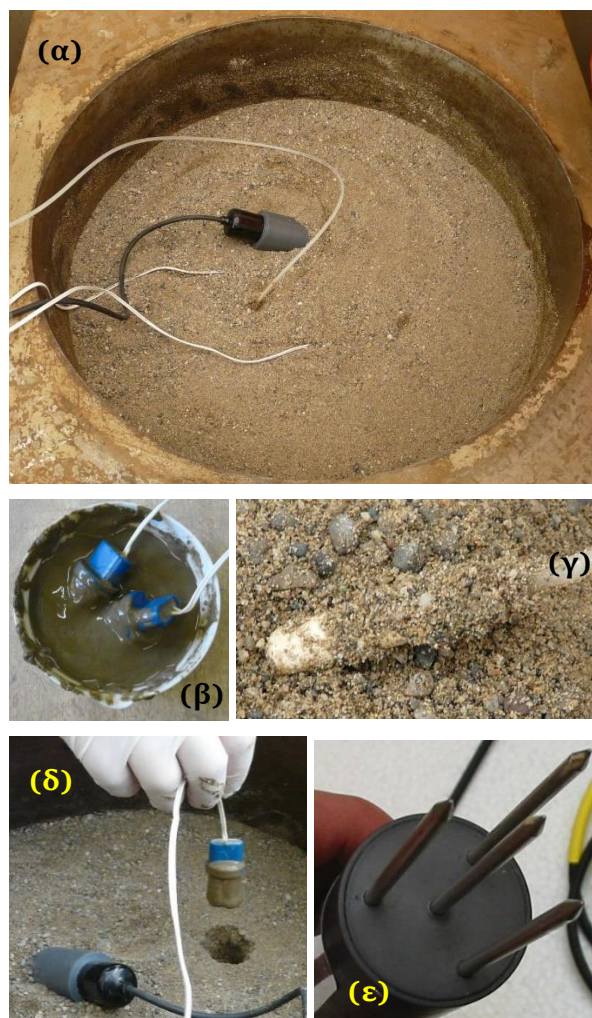
Phot. 2. An example of the combination of Mohr's circles for splitting tensile test (circle on the left) and unconfined compression test (circle on the right) with the tangent to the two circles.

Αντίστοιχα σημαντικά με τα προβλήματα διόγκωσης είναι τα προβλήματα κατάρρευσης λόγω υδρεμποτισμού (collapse) -Χατζηγώγος & Μπαρδάνης, 2019. Το φαινόμενο της κατάρρευσης των εδαφών λόγω υδρεμποτισμού είναι ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των μή κορεσμένων εδαφών. Μάλιστα (όπως άλλωστε και το φαινόμενο της διόγκωσης) είναι ένα από τα χαρακτηριστικά εκείνα που όταν αγνοείται ο μερικός κορεσμός κατά τους υπολογισμούς δεν μπορεί να προβλεφθεί. Κατά συνέπεια αποτελεί παράδειγμα περίπτωσης στην οποία το να αγνοηθεί ο μερικός κορεσμός κατά τους υπολογισμούς είναι σε βάρος της ασφάλειας. Υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες οι παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού είναι ραγδαίες, οπότε είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται ο όρος κατάρρευση του εδάφους, αλλά και περιπτώσεις στις οποίες οι παραμορφώσεις αυτές εκδηλώνονται προο-

δευτικά, οπότε το φαινόμενο της προοδευτικής αυτής κατάρρευσης ονομάζεται υδρостερεοποίηση (hydroconsolidation). Όπως και στην περίπτωση του αντίστροφου φαινομένου, της διόγκωσης (Λουκίδης, 2019), το μέγεθος των παραμορφώσεων λόγω υδρεμποτισμού εξαρτάται έντονα από την πυκνότητα του υλικού υπό την οποία συμβαίνει ο υδρεμποτισμός. Οι παραμορφώσεις είναι τόσο μεγαλύτερες όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα κατά τον υδρεμποτισμό του μη κορεσμένου εδάφους. Έτσι, ανθρωπογενείς αποθέσεις οι οποίες είναι χαλαρές, όπως συνήθως οι ιστορικές αποθέσεις, αποτελούν υλικά στα οποία μπορεί να συμβούν είτε ραγδαίες παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού είτε πιο προοδευτικές. Ομοίως, σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά, είτε κοκκώδη, είτε αργιλικά, που δεν υπήρξε αυστηρός έλεγχος της πυκνότητας και της υγρασίας τους κατά την κατασκευή μπορεί να εκδηλωθούν παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού. Τέλος, για την προσομοίωση του φαινομένου της κατάρρευσης των μη κορεσμένων εδαφών έχει καταβληθεί ιδιαίτερη ερευνητική προσπάθεια στον τομέα της καταστατικής προσομοίωσης των μη κορεσμένων εδαφών, προκειμένου να μπορούν να γίνουν επιτυχείς προβλέψεις των παραμορφώσεων των μη κορεσμένων εδαφών κατά τον υδρεμποτισμό τους (Σιταρένιος, 2019).

Προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η συσχέτιση μεταξύ μερικού κορεσμού και διόγκωσης ή κατάρρευσης λόγω υδρεμποτισμού παρατίθενται δύο παραδείγματα εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια μεγάλου μεγέθους όπου φαίνεται η ευθεία συσχέτιση του μακροσκοπικά παρατηρούμενου φαινομένου που είναι μεταβολή όγκου με την μεταβολή της μύζησης και του βαθμού κορεσμού εντός των δοκιμίων.

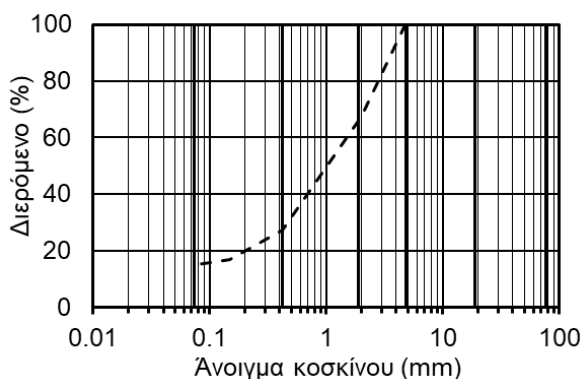
Ο Bardanis (2014) παρουσίασε το παράδειγμα ενός εδαφικού δοκιμίου μεγάλων διαστάσεων από χονδρόκοκκη άμμο το οποίο συμπυκνώθηκε σε πολύ μικρή αρχική πυκνότητα και ποσοστό υγρασίας, συμπίεστηκε υπό μικρή τάση και υποβλήθηκε σε υδρεμποτισμό, παρουσία οργάνων μέτρησης της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας εγκατεστημένων μέσα στο δοκίμιο. Το δοκίμιο το ίδιο κατά τη φάση της παρασκευής του και της εγκατάστασης των οργάνων παρουσιάζεται στην Φωτ. 3. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν χονδρόκοκκη άμμος Ποταμού Αλιάκμονα από το Φράγμα Ιλαρίωνα (Σχ. 24). Προκειμένου να μην επηρεαστεί η απόδοση των αισθητήρων μέτρησης που εγκαταστάθηκαν, η κατακόρυφη τάση διατηρήθηκε μικρή, μόλις 50 kPa. Το δοκίμιο παρασκευάστηκε με



Φωτ. 3. α) Δοκίμιο μεγάλων διαστάσεων χονδρόκοκκης άμμου με εγκατεστημένα όργανα παρακολούθησης στη στρώση που τοποθετήθηκαν, β) τεμάχια γύψου εντός πολτού ιλυώδους εδάφους, γ) κεφαλή τενσιομέτρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα μετά την εξαγωγή του από το δοκίμιο, δ) το ένα από τα τεμάχια γύψου κατά την τοποθέτησή του σε οπή στο δοκίμιο, και ε) ο αισθητήρας μέτρησης ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας ThetaProbe.

Phot. 3. a) Large-size sample of coarse-grained sand with monitoring sensors installed at the installation layer of the sample, b) gypsum blocks in silt slurry, c) low air-entry pressure tensiometer tip after its removal from the sample, d) one of the gypsum blocks during installation in a hole in the installation layer of the sample, and e) the ThetaProbe volumetric water content sensor.

αρχικό ξηρό φαινόμενο βάρος 15 kN/m^3 και ποσοστό υγρασίας 5%. Στο μέσο του ύψους του δοκιμίου όπως φαίνεται στην Φωτ. 3α τοποθετήθηκαν ένα τενσιόμετρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα (Φωτ. 3γ), δύο τεμάχια γύψου (Φωτ. 3β & 3δ) και ένας αισθητήρας μέτρησης ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (ο ML-2 της

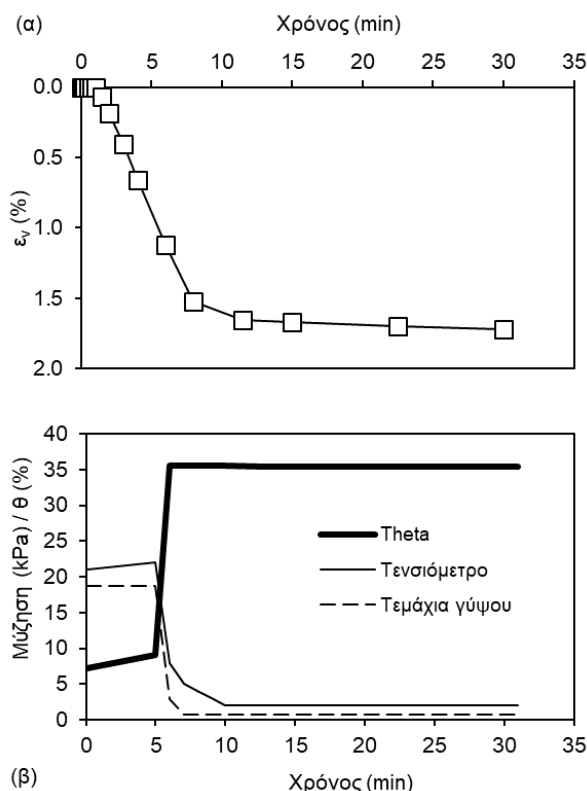


Σχ. 24. Καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης χονδρό-κοκκης άμμου Αλιάκμονα.

Fig. 24. Grain-size distribution curve of coarse-grained Aliakmon river sand.

Delta-T Devices γνωστός και ως ThetaProbe). Περισσότερα για τις συσκευές μέτρησης της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας μπορούν να βρεθούν στους Μπαρδάνη, 2016, Bardanis, 2016b, & Μπαρδάνη & Λουκίδη, 2019.

Μετά την παρασκευή του δοκιμίου με εγκατεστημένους τους αισθητήρες, το δοκίμιο αφέθηκε καλυμμένο με μεμβράνη στα όρια της κυψέλης της συσκευής ώστε να μην μπορεί να γίνει εξάτμιση από το εσωτερικό του, μέχρι να σταθεροποιηθούν οι ενδείξεις των αισθητήρων. Η μύζηση ήταν μικρή, 22-23 kPa στο тенσιόμετρο και 19-20 kPa στα τεμάχια γύψου και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας 7.0-7.5%. Οι τιμές αυτές μεταβλήθηκαν ελάχιστα κατά την εφαρμογή της κατακόρυφης τάσης των 50 kPa. Μετά την σταθεροποίηση των ενδείξεων των αισθητήρων άρχισε ο υδρεμπότισμός του δοκιμίου εντός της κυψέλης της συσκευής. Στο Σχ. 25α παρουσιάζεται η εξέλιξη της κατακόρυφης παραμόρφωσης του δοκιμίου όπως υπολογίστηκε από τις μετρήσεις μετατόπισης από δύο μηχανοσκόπια στο εξωτερικό του δοκιμίου και το αρχικό ύψος του δοκιμίου πριν την έναρξη του υδρεμπότισμού με τον χρόνο από την έναρξη παροχής ύδατος. Στο Σχ. 25β παρουσιάζονται η εξέλιξη της μύζησης που κατέγραψαν οι αισθητήρες κατά τον ίδιο χρόνο. Όπως προκύπτει από τα Σχ. 25α & 25β η εκδήλωση της παραμόρφωσης λόγω υδρεμπότισμού βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με την μείωση της μύζησης στο 0 και την αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε τιμή που αντιστοιχεί σε πλήρη κορεσμό. Για την ακρίβεια το χρονικό πλαίσιο στο οποίο γίνεται η ραγδαία μείωση της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας στους αισθητήρες είναι πιο



Σχ. 25. α) Κατακόρυφη παραμόρφωση λόγω υδρεμπότισμού με το χρόνο από την έναρξη παροχής ύδατος σε χονδρόκοκκη άμμο υπό σταθερή κατακόρυφη τάση 50 kPa, και β) μύζηση από тенσιόμετρο και τεμάχια γύψου και ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας με τον χρόνο από την έναρξη παροχής ύδατος.

Fig. 25. a) Vertical strain due to inundation with time after start of wetting for coarse-grained sand under 50 kPa constant vertical stress, and b) suction measured from tensiometer and gypsum block and volumetric water content with time after start of wetting.

στενό από το χρονικό πλαίσιο στο οποίο η παραμόρφωση αυξήθηκε από το 0 στο 1.65%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα εξωτερικά τοποθετημένα μηχανοσκόπια καταγράφουν την παραμόρφωση του δοκιμίου από την αρχή του υδρεμπότισμού οπότε και τμήματα του δοκιμίου μακριά σχετικά από τους αισθητήρες αρχίζουν να καταρρέουν, ενώ οι ίδιοι οι αισθητήρες καταγράφουν μεταβολή όταν πια το υγρό μέτωπο φτάσει στο σημείο του δοκιμίου που αυτοί είναι εγκατεστημένοι. Κατά συνέπεια, η μακροσκοπική παρατήρηση της παραμόρφωσης λόγω υδρεμπότισμού είναι σε πλήρη συμφωνία με την απώλεια 20 kPa μύζησης και αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας από 7.5% σε 35.5% που αντιστοιχεί σε πλήρη κορεσμό. Με αντίστροφους υπολογισμούς προκύπτει ότι ο αρχικός βαθμός κορεσμού ήταν περί το 25% και

άρα αυτή η μεταβολή που καταγράφηκε στο συγκεκριμένο υλικό αντιστοιχούσε σε μεταβολή του βαθμού κορεσμού από 25% σε 100% και της μύζησης από 20 kPa σε 0. Ο Bardanis (2014) παραθέτει λεπτομέρειες για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών και τη χρήση των εσωτερικά εγκατεστημένων αισθητήρων για τέτοιους υπολογισμούς.

Αντίστοιχα με την προηγούμενη δοκιμή για την παρακολούθηση της κατάρρευσης ενός χονδρόκοκκου εδαφικού υλικού λόγω υδρεμποτισμού παρατίθεται και μια αντίστοιχη δοκιμή παρακολούθησης της διόγκωσης ενός μεγάλου δοκιμίου από συμπυκνωμένη άργιλο. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν Άργιλος Κέρκυρας ($w_L=35-45\%$, $I_p=15-23$, $G_s=2.70$, λεπτόκοκκα 80-90%) η οποία συμπυκνώθηκε περί το 95% του μέγιστου ξηρού φαινομένου βάρους της από τη δοκιμή συμπύκνωσης κατά Proctor με την πρότυπη ενέργεια συμπύκνωσης (αρχικό ξηρό φαινόμενο βάρους περί τα 15.2 kN/m³). Το δοκίμιο συμπυκνώθηκε σε 5 στρώσεις και στην 3^η εξ αυτών τοποθετήθηκαν όπως φαίνεται στην Φωτ. 4) τρία τεμάχια γύψου και ένας αισθητήρας μέτρησης ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (ο ML-2 της Delta-T Devices γνωστός και ως ThetaProbe). Περισσότερα για τις συσκευές μέτρησης της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας μπορούν να βρεθούν στους Μπαρδάνη, 2016, Bardanis, 2015, 2016a & 2016b και στους Μπαρδάνη & Λουκίδη, 2019.

Μετά την παρασκευή του δοκιμίου με εγκατεστημένους τους αισθητήρες, το δοκίμιο αφέθηκε καλυμμένο με μεμβράνη στα όρια της κυψέλης της συσκευής ώστε να μην μπορεί να γίνει εξάτμιση από το εσωτερικό του, μέχρι να σταθεροποιηθούν οι ενδείξεις των αισθητήρων. Η μύζηση ήταν 250-400 kPa στα τεμάχια γύψου και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας 39.6%. Μετά την σταθεροποίηση των ενδείξεων των αισθητήρων άρχισε ο υδρεμποτισμός του δοκιμίου εντός της κυψέλης της συσκευής με ελάχιστο φορτίο από πάνω αντιστοιχώντας πρακτικά σε συνθήκες ελεύθερης διόγκωσης. Στο Σχ. 26α παρουσιάζεται η εξέλιξη της κατακόρυφης παραμόρφωσης του δοκιμίου όπως υπολογίστηκε από τις μετρήσεις μετατόπισης από δύο μηχανοστάμια στο εξωτερικό του δοκιμίου και το αρχικό ύψος του δοκιμίου πριν την έναρξη του υδρεμποτισμού με τον χρόνο από την έναρξη παροχής ύδατος. Στο Σχ. 26β παρουσιάζεται η αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας από 39.6% σε 41.9% και στο Σχ. 26γ η μείωση της μύζησης που κατέγραψαν τα τεμάχια γύψου κατά τον ίδιο χρόνο. Όπως προκύπτει από το Σχ. 26 η εκδή-

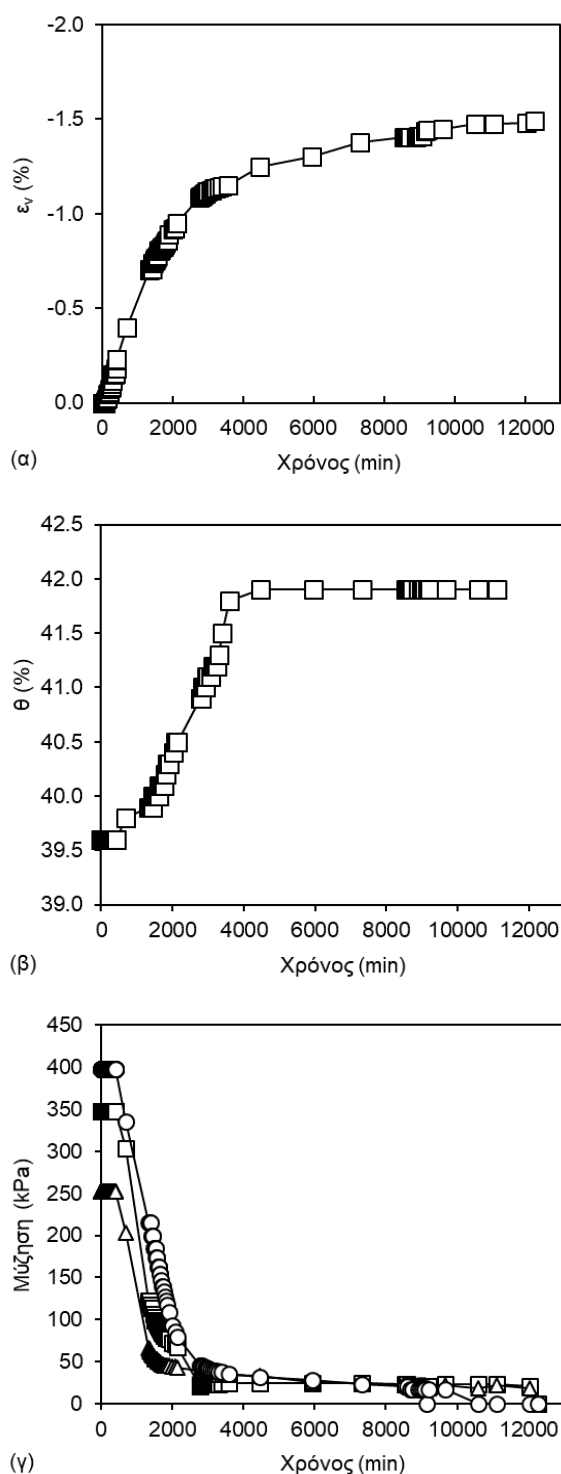


Φωτ. 4. Δοκίμιο μεγάλων διαστάσεων Αργίλου Κέρκυρας με εγκατεστημένα όργανα παρακολούθησης στη στρώση που τοποθετήθηκαν.

Phot. 4. Large-size sample of Corfu Clay with monitoring sensors installed at the installation layer of the sample.

λωση της διόγκωσης λόγω υδρεμποτισμού βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τη μείωση της μύζησης στο 0 και την αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε τιμή που αντιστοιχεί σε πλήρη κορεσμό. Για την ακρίβεια το χρονικό πλαίσιο στο οποίο γίνεται η μείωση της μύζησης και η αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας στους αισθητήρες είναι πιο στενό από το χρονικό πλαίσιο στο οποίο το δοκίμιο διογκώθηκε κατά -1.49%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα εξωτερικά τοποθετημένα μηχανοστάμια καταγράφουν την παραμόρφωση του δοκιμίου από την αρχή του υδρεμποτισμού οπότε και τμήματα του δοκιμίου μακριά σχετικά από τους αισθητήρες αρχίζουν να διογκώνονται, ενώ οι ίδιοι οι αισθητήρες καταγράφουν μεταβολή όταν πια το υγρό μέτωπο φτάσει στο σημείο του δοκιμίου που αυτοί είναι εγκατεστημένοι. Κατά συνέπεια, η μακροσκοπική παρατήρηση της διόγκωσης είναι σε πλήρη συμφωνία με την απώλεια της μύζησης και την αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας. Με αντίστροφους υπολογισμούς προκύπτει ότι ο αρχικός βαθμός κορεσμού ήταν περί το 96% και άρα αυτή η μεταβολή που καταγράφηκε στο συγκεκριμένο υλικό αντιστοιχούσε σε μεταβολή του βαθμού κορεσμού από 96% σε 100% και της μύζησης από περίπου 300 kPa σε 0.

Οι δοκιμές αυτές δεν προσφέρονται για εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων. Η σημασία τους



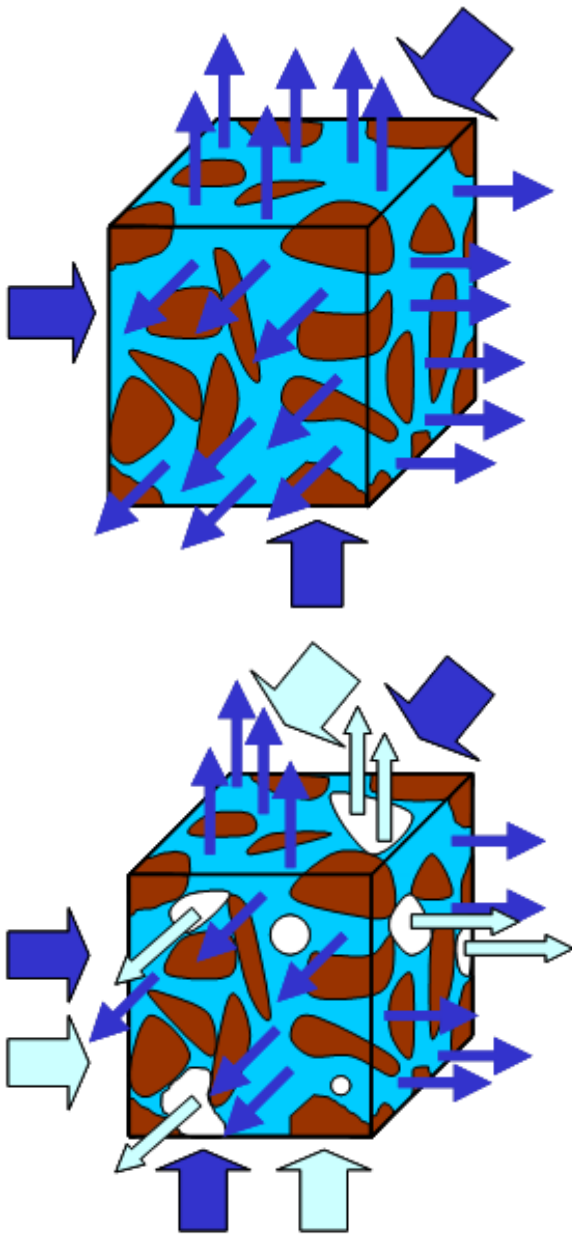
Σχ. 26. α) Κατακόρυφη παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού σε Άργιλο Κέρκυρας σε συνθήκες ελεύθερης διόγκωσης, β) ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας με τον χρόνο, και γ) μύζηση από τεμάχια γύψου με το χρόνο από την έναρξη παροχής ύδατος.

Fig. 26. a) Vertical strain due to inundation for Corfu Clay under free swell conditions, b) volumetric water content, and c) suction from gypsum blocks with time after start of wetting.

έγκειται όμως στην πλήρη αντιστοίχιση μεταξύ του μακροσκοπικά παρατηρούμενου φαινομένου που είναι η καθίζηση ή η διόγκωση λόγω κατάρρευσης από υδρεμποτισμό και της απόλυτης συμφωνίας της απώλειας μύζησης και της αύξησης του βαθμού κορεσμού στο 100% στο ίδιο ακριβώς χρονικό πλαίσιο.

3.3 Διαπερατότητα ως προς την υγρή φάση των μη κορεσμένων εδαφών

Η ροή νερού διαμέσου ενός πλήρως κορεσμένου εδάφους περιγράφεται από τον νόμο του Darcy (1856). Με βάση αυτόν η ταχύτητα ροής είναι ανάλογη της υδραυλικής διαφοράς δυναμικού κατά μήκος συγκεκριμένης απόστασης προς την απόσταση αυτή (ή υδραυλικής κλίσης), όπως φαίνεται στην Εξ. 12, όπου v_w είναι η φαινόμενη ταχύτητα ροής του νερού των πόρων (και εκφράζει την ευθύγραμμη απόσταση που διανύεται από την ροή), k_w ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό, και $\partial h_w / \partial y$ η διαφορά υδραυλικού δυναμικού κατά μήκος της διεύθυνσης y ή αλλιώς η υδραυλική κλίση στην διεύθυνση y , i_{wy} . Ο συντελεστής αναλογίας στην ταχύτητα ροής και την υδραυλική κλίση ονομάζεται συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό k_w . Η υδραυλική κλίση αποτελεί την κλίση (gradient) της πιεζομετρικής συνάρτησης, η οποία ορίζεται από την Εξ. 13. Η Εξ. 12 μπορεί να διατυπωθεί και για τις διευθύνσεις των αξόνων x και z λοιπόν, ή στην γενική ταυυστική της μορφή (Εξ. 14), όπου μάλιστα και ο συντελεστής διαπερατότητας παρουσιάζεται στη γενική του μορφή ως ανισότροπο (ταυυστικό) μέγεθος. Το αρνητικό πρόσημο στο δεξιό μέρος της Εξ. 12 δηλώνει ότι η ροή γίνεται στην κατεύθυνση που μειώνεται η υδραυλική κλίση. Κατά τη μελέτη της ροής διά μέσω πλήρως κορεσμένου εδάφους, εφόσον ο όγκος του παραμένει σταθερός, αλλά και κάθε φορά που έχουμε συνθήκες μόνιμης ροής, η συνολική μάζα του νερού που εισέρχεται σε ένα στοιχείο πλήρως κορεσμένου εδάφους πρέπει να ισούται με τη μάζα του νερού που εξέρχεται από αυτό (ποιοτική απεικόνιση Σχ. 27α). Κατά συνέπεια ισχύει η εξίσωση συνέχειας, η οποία διατυπωμένη σε τρεις διαστάσεις εκφράζεται από την Εξ. 15. Εάν η Εξ. 15 συνδυαστεί με τις Εξ. 13 και 14, τότε προκύπτει η γενική μορφή της εξίσωσης Laplace (για ανισότροπο συντελεστή διαπερατότητας) η οποία εκφράζεται από την Εξ. 16. Αντίθετα, κατά τη μελέτη της ροής διαμέσου μή κορεσμένου εδάφους ακόμα και αν ο όγκος του εδάφους παραμένει σταθερός, μαζί με τη



Σχ. 27. Ποιοτική απεικόνιση α) της ροής ύδατος διαμέσου στοιχείου πλήρως κορεσμένου εδάφους, και β) αέρα και ύδατος διαμέσου στοιχείου μη κορεσμένου εδάφους.

Fig. 27. Qualitative representation a) of water flow through fully saturated soil, and b) of water and air through unsaturated soil.

συνολική μάζα του νερού που εισέρχεται σε ένα στοιχείο μη κορεσμένου εδάφους εισέρχεται (ή εξέρχεται) και ποσότητα αέρα (ποιοτική απεικόνιση Σχ. 27β) καθιστώντας άγνωστη τη σχέση μεταξύ των δύο αυτών ποσοτήτων κατά την έξοδο από το εδαφικό στοιχείο. Κατά συνέπεια πρέπει να είναι γνωστή μία επιπλέον πληροφορία δηλ. η σχέση μεταξύ του όγκου που καταλαμβάνει

η αέρια και η υγρή φάση των πόρων εντός του εδαφικού στοιχείου. Η εξίσωση Laplace τότε εκφράζεται από την Εξ. 17, όπου θ το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας του μη κορεσμένου εδάφους. Από τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού όμως, το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας θ συσχετίζεται με την μύζηση όπως φαίνεται στην Εξ. 18, όπου m_w η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Επειδή το απόλυτο υψόμετρο y είναι σταθερό με το χρόνο οπότε $\partial y / \partial t = 0$, αντικαθιστώντας στην Εξ. 18 και εισάγοντας στην Εξ. 17 προκύπτει η Εξ. 19.

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \quad (12)$$

$$\vec{i} \equiv \vec{\nabla} h(x, y, z) \quad (13)$$

$$\vec{v}_w = -k_w(x, y, z) \cdot \vec{i} \quad (14)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (17)$$

$$\partial \theta = m_w \partial (u_a - u_w) = m_w \gamma_w \partial (h_w - y) \quad (18)$$

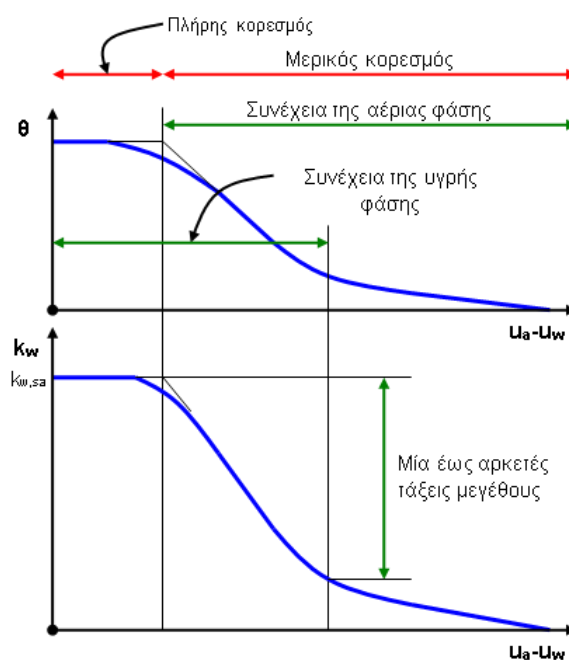
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (19)$$

Η Εξ. 19 αποτελεί την γενικευμένη μορφή της εξίσωσης Laplace για μη κορεσμένα εδάφη και συνιστά την διαφορική εξίσωση που διέπει την κίνηση της υγρής φάσης διαμέσου μη κορεσμένων εδαφών. Συνδέει την κλίση της πιεζομετρικής συνάρτησης μέσω του νόμου του Darcy με την χρονική μεταβολή της πιεζομετρικής συνάρτησης και την χαρακτηριστική καμπύλη εδά-

φους-νερού. Η επίλυση της εξίσωσης αυτής γίνεται συνήθως αριθμητικά με τις διάφορες μεθόδους που έχουν εισαχθεί σε διαθέσιμους κώδικες πεπερασμένων στοιχείων.

Καθώς ο όγκος των κενών που καταλαμβάνεται από νερό στα μη κορεσμένα εδάφη μειώνεται με την αύξηση της μύζησης, η μικροδιαπερατότητα του εδάφους ως προς την υγρή φάση μειώνεται και η μακροδιαπερατότητα αυξάνεται λόγω της εμφάνισης ρωγμών (Μπαρδάνης, 2016). Ο συντελεστής διαπερατότητας (εάν επηρεάζεται μόνο η μικροδιαπερατότητα του εδάφους) συσχετίζεται με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού όπως φαίνεται στο Σχ. 28, καθώς το νερό κινείται μόνο μέσα από τους πόρους του εδάφους που υπάρχει ήδη νερό, και μετά τον αποκορεσμό του περιορίζεται σε ολοένα και μικρότερο τμήμα των πόρων. Για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι στο εργαστήριο (Μπαρδάνης, 2016). Λίγες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό και επιτόπου (Μπαρδάνης, 2016, Μπαρδάνης & Λουκίδης, 2019).

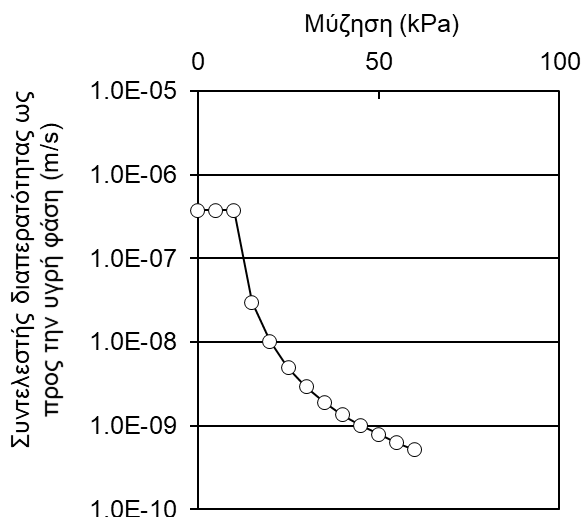
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εξέλιξης της μεταβολής της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα με το χρόνο, εάν ληφθεί υπόψη η μείωση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό και αν αγνοηθεί. Ως αφετηρία για την περιγραφή της απλοποιημένης περίπτωσης κατά την οποία αγνοείται η επιρροή του βαθμού κορεσμού και της μύζησης επί του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε το παράδειγμα που παρατίθεται στον Καββαδά (1998). Στο παράδειγμα αυτό χώρος απόθεσης υγρών αποβλήτων πλημμυρίζει σε ύψος μέχρι 3m. Στον εδαφικό σχηματισμό κάτω από τον χώρο αυτόν η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρίσκεται στα 6m βάθος και υπάρχει αποκατεστημένη κατανομή αρνητικών πιέσεων πόρων κατά την προέκταση της υδροστατικής κατανομής της θετικής πίεσης πόρων. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση που παραθέτει ο Καββαδάς (1998) για τον εδαφικό σχηματισμό ($3.75 \cdot 10^{-7}$ m/s) και επιλύθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών το πρόβλημα της εξέλιξης των κατανομών πίεσης πόρων με το βάθος για διάφορες χρονικές στιγμές μέχρι την επίτευξη της νέας κατάστασης συνθηκών μόνιμης ροής, και για την περίπτωση που ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση θεωρείται σταθερός με την μύζηση, και για την περίπτωση που μειώνεται με αυτήν.



Σχ. 28. Ποιοτική απεικόνιση της συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό k_w με τη μύζηση και αντιστοίχισή της με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού.

Fig. 28. Qualitative representation of the relation between water coefficient of permeability k_w and suction and its correlation to the soil-water characteristic curve.

Η επίλυση του προβλήματος καταστρώθηκε αρχικά σε φύλλο υπολογισμών και η επίλυση έγινε με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Η διακριτοποίηση σε ό,τι αφορά τον χρόνο ήταν με βήματα της 1h μέχρι τις πρώτες 24h και των 3h από εκεί και μετά. Σε ό,τι αφορά το ύψος, η διακριτοποίηση ήταν ανά 0.5m. Για την περίπτωση της μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας με την αρνητική πίεση πόρων/μύζηση χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη που παρουσιάζεται στο Σχ. 29. Υποτέθηκε πίεση διείσδυσης αέρα 10 kPa, δεν θεωρήθηκαν σημαντικές μεταβολές του συντελεστή διαπερατότητας μέχρι αυτήν την τιμή της μύζησης, ενώ από την πίεση διείσδυσης αέρα και μετά μέχρι την μύζηση των 60 kPa θεωρήθηκε ότι έχει επέλθει μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση κατά τρεις τάξεις μεγέθους. Η έλλειψη σημαντικών μεταβολών του συντελεστή διαπερατότητας που εισήχθη μέχρι τα 10 kPa, τεκμηριώνεται λόγω της ούτως ή άλλως μικρής τιμής της πίεσης διείσδυσης αέρα (άρα μικρό το βήμα από 0 έως 10 kPa για να θεωρηθεί ότι συμβαίνουν σημαντικές ογκομετρικές

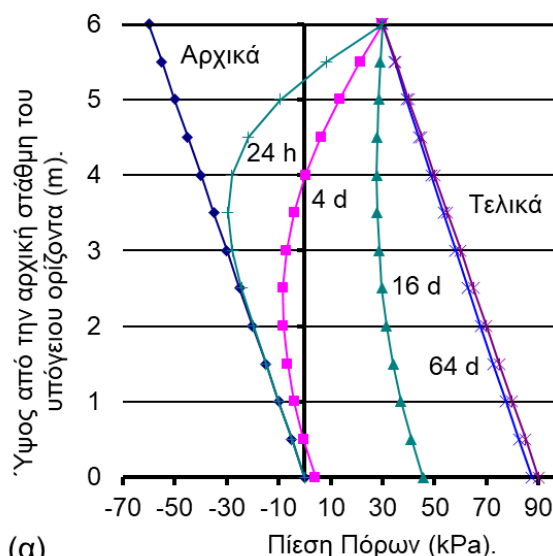


Σχ. 29. Εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων με την αρνητική πίεση πόρων/μύζηση για τον εδαφικό σχηματισμό στο παράδειγμα που παρατίθεται.

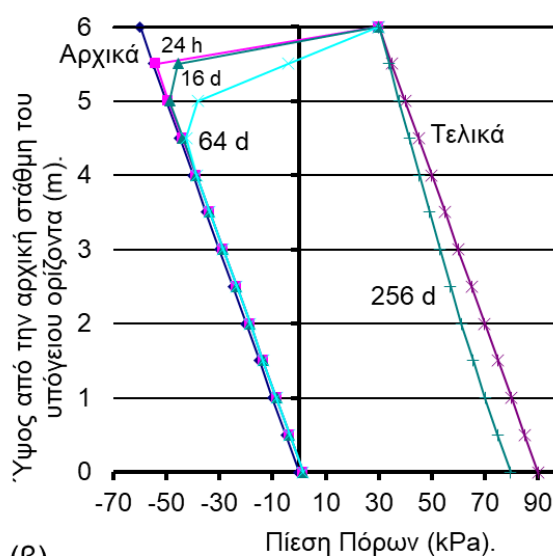
Fig. 29. Evolution of coefficient of permeability relative to the liquid phase of the soil pores with negative pore water pressure/suction for the soil formation in the example presented.

μεταβολές που θα προκαλούσαν μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας παρόλο που το έδαφος παραμένει πλήρως κορεσμένο), ενώ ο συντελεστής διαπερατότητας του πλήρως κορεσμένου εδάφους είναι αρκετά μεγάλος και αντιστοιχεί σε μάλλον σχετικά ασυμπίεστο έδαφος για να αναμένονται μεταβολές του συντελεστή διαπερατότητας λόγω ογκομετρικών μεταβολών γενικά.

Στο Σχ. 30α παρουσιάζεται η κατανομή της εξέλιξης της αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης με το βάθος αγνοώντας την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων με την μύζηση, και στο Σχ. 30β η κατανομή της εξέλιξης της αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης με το βάθος λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων με την μύζηση. Η εφαρμογή της οριακής συνθήκης στην επιφάνεια θεωρήθηκε χρονικά ακαριαία. Όπως προκύπτει από την σύγκριση των κατανομών για διάφορα χρονικά διαστήματα στα Σχ. 30α και 30β, εάν αγνοηθεί η εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση η επίτευξη των συνθηκών μόνιμης ροής που αντιστοιχούν στην νέα οριακή συνθήκη στην επιφάνεια του εδάφους γίνεται πρακτικά μέσα σε 64 ημέρες, ενώ εάν ληφθεί



(α)



(β)

Σχ. 30. Κατανομή της εξέλιξης της αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης με το βάθος α) αγνοώντας την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων με την μύζηση, και β) λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων με την μύζηση.

Fig. 30. Negative pore water pressure/suction with depth a) neglecting coefficient of permeability relative to the water phase decrease with suction and b) taking into account.

υπόψη η εξέλιξη αυτή τότε ο απαιτούμενος χρόνος αυξάνεται 4 φορές, στις 256 ημέρες. Όταν λαμβάνεται υπόψη η εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση, σε 64 ημέρες πρακτικά δεν έχει επέλθει καμιά αλλαγή κάτω

από το 1.5m βάθος εντός τους εδαφικού σχηματισμού, ενώ αντίθετα όταν αγνοείται η εξέλιξη αυτή, μέσα σε χρονικό διάστημα 5-6 ημερών ουσιαστικά έχουν εξαλειφθεί οι αρνητικές πιέσεις πόρων/μυζήσεις. Κατά συνέπεια, εάν αγνοηθεί η επιρροή της μύζησης επί του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό, υποτιμάται σημαντικότερα ο χρόνος ολοκλήρωσης των φαινομένων που σχετίζονται με μεταβολές στο καθεστώς των πιέσεων πόρων, ενώ υπερτιμώνται και οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της εμφάνισης μία οριακής συνθήκης πλημμύρας όπως στο παράδειγμα, ή διαβροχής.

Πολύ συχνά στην καθημερινή γεωτεχνική πράξη απαντώνται προβλήματα που σχετίζονται με επικρεμάμενους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Το παράδειγμα που παρουσιάστηκε στην παράγραφο αυτή επιδεικνύει πως ουσιαστικά ένας τέτοιος υπόγειος ορίζοντας μπορεί να προκύψει πρόσκαιρα ή και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα απλώς και μόνο λόγω της παρουσίας μη κορεσμένης ζώνης μέχρι σημαντικό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Προκειμένου ένα τέτοιο φαινόμενο να προσομοιωθεί, απαιτείται η γνώση της εξέλιξης του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση, αλλά και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Ειδικά το δεύτερο τονίζεται ιδιαίτερα αφού κυκλοφορούν κώδικες πεπερασμένων στοιχείων οι δημιουργοί των οποίων διατείνονται ότι κάνουν αναλύσεις υπόγειας ροής και στην μη κορεσμένη του εδάφους χωρίς να ζητούν ως δεδομένο εισαγωγής την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Οι χρήστες τέτοιων κωδίκων οφείλουν να είναι ιδιαίτερα επιφυλακτικοί, καθώς είτε έχει εισαχθεί κάποια χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, η οποία είναι κοινή για κάθε ανάλυση και δεν είναι γνωστή στους χρήστες του κώδικα, είτε ακόμα χειρότερα, ο μη μηδενικός όρος στην εξίσωση Laplace για την ροή στην μη κορεσμένη ζώνη έχει αγνοηθεί εντελώς και το μόνο που κάνουν οι συγκεκριμένοι κώδικες είναι να χρησιμοποιούν την εξίσωση Laplace για την ροή σε πλήρως κορεσμένο έδαφος απλώς εισάγοντας την μειωμένη τιμή του συντελεστή διαπερατότητας. Στις περιπτώσεις τέτοιων κωδίκων, οι χρήστες καλό θα είναι είτε να αποφεύγουν συνολικά την χρήση τους, είτε να περιορίζουν την χρήση τους μόνο για αναλύσεις μόνιμης ροής (αποφεύγοντας παντελώς τα αποτελέσματα μη μόνιμης ροής από αυτούς τους κώδικες και τις προβλέψεις τους για το χρονικό διάστημα επίτευξης συνθηκών μόνι-

μης ροής μετά από μία αλλαγή στις οριακές συνθήκες), και σε κάθε περίπτωση να αποφεύγουν οπωσδήποτε την χρήση αυτών των αποτελεσμάτων για τον συνδυασμό με αναλύσεις τάσεων-παραμορφώσεων, ειδικά σε έντονα παραμορφώσιμα κατά τις μεταβολές της μύζησης εδαφικά υλικά, αφού δεν είναι δυνατή η πρόβλεψη των μεταβολών στην μακροδιαπερατότητα των υλικών (λόγω αδυναμίας πρόβλεψης της επιρροής της συρρίκνωσης).

4. Καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών

Η καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών παρουσιάζεται αναλυτικά από τον Σιταρένιο (2019). Τα πρώτα κατάστατικά προσομοιώματα βασίστηκαν στην επέκταση διαδεδομένων προσομοιωμάτων για πλήρως κορεσμένα εδάφη με την προσθήκη μίας επιπλέον διάστασης, αυτής της μύζησης. Το πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα ήταν αυτό των Alonso, et al (1990), το οποίο απέτελεσε επέκταση του προσομοιώματος Modified Cam-Clay (Roscoe & Burland, 1968) καταφέρνοντας ταυτόχρονα να προσομοιώσει βασικά χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών όπως την εμφάνιση πλαστικής διαρροής για αύξηση της τιμής της μύζησης από μία τιμή και πάνω, την αύξηση της τάσης διαρροής κατά την φόρτιση υπό σταθερή μύζηση με την αύξηση της μύζησης και τις μεγάλες παραμορφώσεις λόγω κατάρρευσης εξαιτίας μείωσης της μύζησης υπό τάση μεγαλύτερη της τάσης διαρροής. Αντίθετα, άλλα χαρακτηριστικά όπως η πρόβλεψη της παύσης της μείωσης του λόγου κενών για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες εκείνης που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών (Bardanis & Kavvas, 2008a), πρόβλεψη διαφορετικής εξέλιξης αντοχής ανάλογα με τη φύση του εδάφους (Bardanis & Kavvas, 2008b), ακριβέστερη προσομοίωση των πιο διογκώσιμων εδαφών και συμπερίληψη πιο περίπλοκων προσομοιωμάτων για πλήρως κορεσμένα εδάφη προσομοιώθηκαν αργότερα και συνεχίζονται οι απόπειρες προσομοίωσής τους. Τέλος, από τα αρχικά προσομοιώματα διατυπωμένα σε όρους ολικής τάσης-μύζησης, η καταστατική προσομοίωση έχει περάσει πλέον στη συνδυασμένη θεώρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και την υιοθέτηση παραμέτρου τάσης που συνδυάζει και τη μύζηση (παρά την ταυτόχρονη ανεξάρτητη θεώρηση της μύζησης). Διεξοδική αναφορά

στην καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών και τη σχετική ερευνητική εξέλιξη παρατίθεται από τον Σιταρένιο (2019).

5. Γιατί τα μη κορεσμένα εδάφη έχουν σημασία στη γεωτεχνική μηχανική;

Αντί συμπερασμάτων κρίθηκε σκόπιμη η συνόψιση των λόγων που καθιστούν σημαντικά τα μη κορεσμένα εδάφη στη γεωτεχνική μηχανική καθώς και των βασικών τους χαρακτηριστικών:

- Απαντούν συχνά λόγω των κλιματολογικών συνθηκών σε πιο θερμές και ξηρές περιοχές όπως η Ελλάδα και η Κύπρος. Αναμένεται ότι θα απαντούν ολοένα και πιο συχνά λόγω της κλιματικής αλλαγής.
- Μη κορεσμένα είναι όλα τα συμπυκνωμένα εδάφη μέχρι την επιβολή σημαντικού φορτίου επί αυτών ή τον υδρεμποτισμό τους.
- Ακόμα και εκεί που δεν υπάρχουν μη κορεσμένα εδάφη στη φύση, υπάρχει το ενδεχόμενο να απαιτείται η γνώση της μηχανικής τους συμπεριφοράς ως αποτέλεσμα της καθεστηκυίας γεωερευνητικής πρακτικής (υπενθυμίζεται το Σχ. 1).
- Η συνύπαρξη της υγρής και της αέριας φάσης στους πόρους των εδαφικών υλικών οδηγεί στην ανάπτυξη του μεγέθους που ονομάζεται μύζηση. Αυτό το μέγεθος καθορίζει μαζί με τον βαθμό κορεσμού τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Συσχετίζεται με περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η πίεση της ατμόσφαιρας μέσω του νόμου του Kelvin, ο οποίος εξηγεί την επιρροή των κλιματολογικών συνθηκών στην εμφάνιση των μη κορεσμένων εδαφών κοντά στην επιφάνεια της γης.
- Ο βαθμός κορεσμού συσχετίζεται με τη μύζηση μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (ή αλλιώς καμπύλης συγκράτησης ύδατος). Η καμπύλη αυτή είναι μοναδική για κάθε εδαφικό υλικό και καθορίζει τη συμπεριφορά του ανάλογα με τη μύζηση στην οποία θα βρεθεί. Η καμπύλη αυτή επιτρέπει την ομαδοποίηση των μη κορεσμένων εδαφών, παρά το τόσο μεγάλο εύρος του κυρίαρχου μεγέθους που τα περιγράφει, του βαθμού κορεσμού.
- Γενικά ο μερικός κορεσμός επιφέρει αύξηση της διατμητικής αντοχής, με εξέλιξη ωστόσο που καθορίζεται ανάλογα με τη φύση του εδάφους (υπενθυμίζεται το Σχ. 16). Η αγνόηση της πρόσθετης αυτής αντοχής είναι υπέρ της

ασφαλείας σε προβλήματα ευθειών αναλύσεων, αλλά ενδέχεται να είναι σε βάρος της σε προβλήματα αντίστροφων αναλύσεων (επιδείχθηκε σχετικό παράδειγμα αντιστρόφων αναλύσεων ευσταθείας).

- Λεπτόκοκκα πλαστικά εδάφη υπό χαμηλές τάσεις εκδηλώνουν διόγκωση κατά τον υδρεμποτισμό τους και κατάρρευση υπό υψηλές τάσεις. Χονδρόκοκκα εδάφη χαμηλής σχετικής πυκνότητας εκδηλώνουν κατάρρευση κατά τον υδρεμποτισμό τους, ανεξαρτήτως επιπέδου τάσης. Και τα δύο φαινόμενα δεν μπορούν να προβλεφθούν με παραδοχές πλήρους κορεσμού και άρα συνιστούν προβλήματα μηχανικού που η παραδοχή πλήρους κορεσμού δεν είναι υπέρ της ασφαλείας. Και τα δύο δε, δεν επηρεάζουν μόνο τη λειτουργικότητα αλλά υπό προϋποθέσεις και την ασφάλεια των κατασκευών (βλ. Λουκίδης, 2019, Χατζηγώγος & Μπαρδάνης, 2019).
- Η μείωση του βαθμού κορεσμού επιφέρει μείωση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό. Κατά την ροή σε μη κορεσμένα εδάφη πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η γενικευμένη μορφή της εξίσωσης Laplace η οποία συνιστά την διαφορική εξίσωση που διέπει την κίνηση της υγρής φάσης διαμέσου των μη κορεσμένων εδαφών. Για την επίλυσή της απαιτείται η εισαγωγή και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και της καμπύλης εξέλιξης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό με τη μύζηση. Εφιστάται η προσοχή σε λογισμικά που επιχειρούν την επίλυση προβλημάτων μη μόνιμης ροής χωρίς να ζητούν ως παραμέτρους εισαγωγής τις δύο αυτές καμπύλες.

Για τη βελτίωση της κατανόησης της μηχανικής συμπεριφοράς και της διάδοσής τους στην καθημερινή γεωτεχνική πρακτική θα απαιτηθεί η διάδοση της διδασκαλίας τους σε προπτυχιακό και μεταπτυχιακό επίπεδο σπουδών, η ανάπτυξη μεθόδων μέτρησης ή εκτίμησης παραμέτρων σε μικρότερα χρονικά διαστήματα από αυτά που είναι σήμερα δυνατά με τον υφιστάμενο εξοπλισμό και η επιμονή στην μακροχρόνια παρακολούθηση της μύζησης επιτόπου. Το τελευταίο θα επιτρέψει να γίνει καλύτερα αντιληπτό το αναμενόμενο εύρος τιμών της μύζησης στο πεδίο, η αναμενόμενη εποχιακή εξέλιξη της μύζησης και η συσχέτισή της με τις κλιματολογικές παραμέτρους, κυρίως δε η δυνατότητα διατήρησης της μύζησης ή απώλειάς της λόγω επεισοδίων βροχόπτωσης, ει δυνατόν ακόμα και σε επίπεδο εμπιστοσύνης που να επιτρέπει την πρόβλεψη για χρήση πλέον στη γεωτεχνική πρακτική.

Ευχαριστίες

Για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών που παρουσιάστηκαν βοήθησαν η Σοφία Γρίφιζα και Μαρία Σαρίδου, Γεωλόγοι, και οι Χάρης Βαγενάς, Μάριος Τσουκαλαδάκης και Δημήτρης Σακκής, Τεχνικοί του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Βιβλιογραφία

- Καββαδάς, Μ. Ι., 1998, Στοιχεία περιβαλλοντικής γεωτεχνικής, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- Λουκίδης, Δ., 2019, Διόγκωση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 83-100.
- Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2016, Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ 2016, σελ. 1300.
- Μπαρδάνης, Μ., Γρίφιζα, Σ., 2012, Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων, Πρακτικά 4ου Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας, Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012.
- Μπαρδάνης, Μ., Καβουνίδης Σ., 2001, Σύγκριση δείκτη συμπίεσης από εμπειρικές συσχετίσεις και από δοκιμές σε αργιλικά εδάφη από τον ελληνικό χώρο, Πρακτ. 4ου Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα, 30 Μαΐου – 1 Ιουνίου 2001, Τόμ. 1, σελ. 131-138.
- Μπαρδάνης, Μ. Ε., Λουκίδης, Δ., 2019, Μακροχρόνιες μετρήσεις μύζησης στην Ελλάδα και στην Κύπρο, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 155-186.
- Χατζηγώγος, Ν. Θ., Μπαρδάνης, Μ., 2019, Κατάρρευση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 101-126.
- Σιταρένιος, Π., 2019, Καταστατική συμπεριφορά της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 127-154.
- Τσιαμπούση, Αικ., 2019, Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και η σημασία της, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 43-66.
- Χατζηγώγος, Ν. Θ., 2019, Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 67-82.
- Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A., 1990, A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique*, 40, 3, pp. 405-430.
- Bardanis, M., 2014, Collapse of coarse-grained materials due to inundation under one-dimensional compression conditions, *Proc. 6th Int. Conf. on Unsaturated Soils*, 2-4 July 2014, Sydney, Australia, Vol. 2, pp. 1659-1665.
- Bardanis, M., 2015, Field suction and volumetric water content measurements in semi-urban area near Athens, Greece, *proc. Int. Symp. Shrink-Swell Processes in Soils, Climate & Construction*, 18-19 June 2015, Marne-la-Vallée, France, pp. 463-472.
- Bardanis, M., 2016a, Time response of two types of porous blocks for suction measurement, *Proc. 3rd Eur. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, France, 12-14 September, 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160910005.
- Bardanis, M., 2016b, Volumetric water content measurement probes in earth-dam construction, *Proc. 3rd Eur. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, France, 12-14 September, 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160916004.
- Bardanis, M., Grifiza, S., 2016, Swelling and collapse of compacted soils to be used as earth dam cores, *Proc. 3rd Eur. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, France, 12-14 September, 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160919003.
- Bardanis, M., Grifiza, S., 2016, Low-cost alternatives to estimate unsaturated soil shear strength parameters, *Proc. 3rd Eur. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, France, 12-14 September, 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160909007.
- Bardanis, M., Kavvasdas, M., 2008a, Prediction of the residual void ratio of clayey soils after drying, from their initial state, physical properties and structure, *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*, Toll et al. (eds), *Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils*, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 381-387.
- Bardanis, M., Kavvasdas, M., 2008b, Modifying the Barcelona Basic Model to account for residual void ratio and subsequent decrease of

- shear strength relative to suction*, Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering, Toll et al. (eds), Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 589-595.
- Barden, L., Madedor, A. O., Sides, G. R., 1969, *Volume change characteristics of unsaturated clay*, ASCE J. Soil Mech. Found. Div., 95, SM1, pp. 33-52.
- Barrera, M., Romero, E., Lloret, A., Vaunat, J., 2002, *Hydro-mechanical behaviour of a clayey silt during controlled-suction shearing*, Juca et al. (eds), proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 2, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 485-490.
- Bishop, A. W., 1959, *The principle of effective stress*, Teknisk Ukeblad, 106: No. 39, pp. 859-863.
- Bishop, A. W., 1971, *Shear strength parameters for undisturbed and remoulded soil specimens*, proc. of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge, Foulis.
- Bishop, A. W., Blight, G. E., 1963, *Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils*, Géotechnique, 13, 3, pp. 177-197.
- Bishop, A. W., Donald, I. B., 1961, *The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus*, Proc. 5th ICSMFE, Vol. 1, pp. 13-21.
- Bolt, G.H., 1956, *Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays*, Géotechnique 6, pp. 86-93.
- Burland, J. B., 1964, *Effective stresses in partly saturated soils*, Discussion of 'Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils' by G. E. Blight & A. W. Bishop, Géotechnique, 14, pp. 65-68.
- Burland, J. B., 1965, *Some aspects of the mechanical behaviour of partly saturated soils*, in Aitchison, G. D. (ed.) "Moisture Equilibria and Moisture Changes in the Soils beneath Covered Areas", Butterworths, Australia, pp. 270-278.
- Brandl, H., 1996, *Stabilization of multiple progressive slope failures*, proc. 7th Int. Symp. On Landslides, Trondheim, Norway, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 1661-1666.
- Bromhead, E. N., 1979, *A simple ring shear apparatus*, Ground Eng., 12, pp. 40-44.
- Chapman, P. J., Richards, B. E., Trevena, D. H., 1975, *Monitoring the growth of tension in a liquid in a Berthelot tube*, J. of Physics, E: Scientific Instruments, 8, pp. 731-735.
- Darcy, H., 1856, *Histoire Des Fontaines Publiques de Dijon*, Paris, Dalmont, pp. 590-594.
- Delage, P., 2004, *Experimental unsaturated soil mechanics*, in Juca et al. (eds), proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, Swets & Zeitlinger, Lisse, Vol. 3, pp. 973-996.
- Delage, P., Suraj de Silva, G. P. R., de Laure, E., 1987, *Un nouvel appareil triaxial pour le sols non saturés*, proc. 9th Eur. Conf. Soil Mech. & Foundations Engng, Dublin, Vol. 1, pp. 26-28.
- Di Maio, C., 1996a, *The influence of pore fluid composition on the residual shear strength of some natural clayey soils*, in K. Seneset (ed.), proc. 7th Int. Conf. on Landslides, 2, pp. 1189-1194, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Di Maio, C., 1996b, *Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effect*, Géotechnique, 46, 4, pp. 695-707.
- Escario, V., Sáez, J., 1986, *The shear strength of partly saturated soils*, Géotechnique, Vol: 36, Pages: 453-456.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., 1977, *Stress state variables for unsaturated soils*, J. Geot. Eng. Div. ASCE, 103, pp. 447-466.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1993, *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, New York, N.Y., 517 pp.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., Widger, R. A., 1978, *The shear strength of unsaturated soils*, Can. Geot. J., Vol. 15, pp. 313-321.
- Gulhati, S. K., Satija, D. J., 1981, *Shear strength of partially saturated soils*, proc. 10th ICSMFE, Stockholm, pp. 609-612.
- Grim, R. E., 1968, *Clay mineralogy*, McGraw-Hill, Inc., 2nd Edition.
- Haines, W. B., 1927, *A further contribution to the theory of capillary phenomena in soils*, J. Agric. Sci., 17, pp. 264-290.
- Harvey, E. N., Barnes, D. K., McElroy, W. D., Whiteley, A. H., Pease, D. C., Cooper, K. W., 1944, *Bubble formations in animal, 1-Physical Factor*, J. Cellular and Comparative Physiology, 24 (1), pp. 1-22.

- Ho, D. Y. F., Fredlund, D. G., 1982, Increase in strength due to suction for two Hong Kong soils, Proc. of the Conf. on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils, ASCE, Honolulu, Hawaii.
- Jennings, J. E. B., Burland, J. B., 1962, *Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils*, Géotechnique, 12, 2, pp. 125-144.
- Jones, W. M., Overton, G. D. N., Trevena, D. H., 1981, *Tensile strength experiments with water using a new type of Berthelot tube*, J. of Physics, D: Applied Physics, 14, pp. 1283-1291.
- Kalteziotis, N., 1993, *The residual shear strength of some Hellenic clayey soils*, Geotechnical and Geological Engineering, 11, pp. 125-145.
- Kenney, T. C., 1967, *The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils*, proc. Geotech. Conf. on the Shear Strength properties of natural soils and rocks, 1, pp. 123-129.
- Krahn, J., Fredlund, D. G., Klassen, M. J., 1989, *Effect of soil suction on slope stability at Notch Hill*, Can. Geot. J., Vol: 26, Pages: 269-278.
- Laloui, L., Geiser, F., Vulliet, L., Li, X. L., Bolle, A., Charlier, R., 1997, *Characterization of the mechanical behaviour of an unsaturated sandy silt*, proc. XIV ICSMGE, Hamburg, 6-12 September 1997, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 347-350.
- Lu, N., Likos, W. J., 2004, *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 556 p.
- Lupini, J. F., Skinner, A. E., Vaughan, P. R., 1981, *The drained residual strength of cohesive soils*, Géotechnique, 31, 2, pp. 181-213.
- Maâtouk, A., Leroueil, S., La Rochelle, P., 1995, *Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil*, Géotechnique, 45, 3, pp. 465-477.
- Maksimović, M., 1989, *On the residual shearing strength of clays*, Géotechnique, 39, 2, pp. 347-351.
- Matyas, E. L., Radhakrishna, 1968, *Volume change behaviour of partially saturated soils*, Géotechnique, 18, 4, pp. 432-448.
- Merchán, V., Vaunat, J., Romero, E., Meca, T., 2008, *Experimental study of the influence of suction on the residual friction angle of clays*, Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering, Toll et al. (eds), Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 423-428.
- Mitchell, J., 1976, *Fundamentals of Soils Behavior*, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Rampino, C., Mancuso, C., Vinale, F., 1999, *Laboratory testing of an unsaturated soil: equipment, procedures and first experimental results*, Can. Geotech. J., 36, pp. 1-12.
- Romero, E., Facio, J. A., Lloret, A., Gens, A., Alonso, E. E., 1997, *A new suction and temperature controlled triaxial apparatus*, proc. 14th ICSMFE, Hamburg, Vol. 1, pp. 185-188, A. A. Balkema.
- Roscoe, K. H., Burland, J. B., 1968, *On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay*, in Engineering Plasticity (eds J. Heyman & F. A. Leckie), pp. 535-609, Cambridge University Press.
- Skempton, A. W., 1964, *The 4th Rankine Lecture: Long-term stability of clay slopes*, Géotechnique, 14, 1, pp. 77-102.
- Skempton, A. W., 1985, *Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory*, Géotechnique, 35, 1, pp. 3-18.
- Stark, T. D., Eid, H. T., 1994, *Drained residual strength of cohesive soils*, J. of Geotech. Engng, ASCE, 120, 5, pp. 856-871.
- Tabor, D., 1979, *Gases, liquids and solids*, 2nd Ed., Cambridge University Press.
- Tarantino, A., Mongiovi, L., 2001, *Experimental procedures and cavitation mechanisms in tensiometer measurements*, Geotechnical and Geological Engineering, 19, 3, pp. 189-210.
- Temperley, R. N. V., Chambers, L. G., 1946, *The behaviour of water under hydrostatic tension*, Proc. Physics Society, 58, pp. 420-436.
- Terzaghi, K., 1928, *The physical properties of clays*, M.I.T., Tech. Eng. News, 9: 10, 11, 36.
- Terzaghi, K., 1936, *The shearing resistance of saturated soils*, Proc. 1st Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engng, Cambridge, MA, Vol. 1, pp. 54-56.
- Thomson, W. (Lord Kelvin), 1871, *Philosophical Magazine*, 42, pp. 448.

- Tika, T. E., Vaughan, P., Lemos, L. J., 1996, *Fast shearing of pre-existing shear zones in soil*, Géotechnique, 46, 2, pp. 197-233.
- Vaunat, J., Amador, C., Romero, E., Djeran-Maigre, I., 2006, *Residual strength of a low plasticity clay at high suctions*, 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 1, pp. 1279-1289.
- Vaunat, J., Merchán, V., Romero, E., Pineda, J., 2007, *Residual strength of clays at high suctions*, in T., Schanz (Ed.), Theoretical and Numerical Unsaturated Soil Mechanics, Proc. of the Int. Conf. "Mechanics of Unsaturated Soils", Weimar, 7-9 March 2007, Springer, Berlin, Vol. II, pp. 151-163.
- Wesley, L. D., 2003, *Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits*, Géotechnique, 53, 7, pp. 669-672.
- Wheeler, S. J., 2006, *Constitutive modeling of unsaturated soils*, Keynote lecture delivered at the 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, 2-6 April 2006, Carefree, Arizona, USA.
- Wheeler, S. J., Sivakumar, V., 1995, *An elastoplastic critical state framework for unsaturated soils*, Géotechnique, 45, 1, pp. 35-53.

Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ

SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE AND ITS IMPORTANCE

Αικ. Τσιαμπούση

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Senior Lecturer in Geotechnics

Department of Civil & Environmental
Engineering

Imperial College London, UK

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (ή καμπύλη συγκράτησης ύδατος) είναι από τις βασικότερες ιδιότητες των μη κορεσμένων εδαφών, καθώς αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ μύζησης και βαθμού κορεσμού (ή ποσοστού υγρασίας), υποδηλώνοντας την ποσότητα του νερού των πόρων που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη μύζηση. Επηρεάζει σημαντικά τόσο τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των μη κορεσμένων εδαφών (τη διαπερατότητα και την υδραυλική ροή), όσο και τις μηχανικές τους ιδιότητες (αντοχή και συμπίεστότητα) καθορίζοντας και την αλληλεπίδραση υδραυλικών και μηχανικών εδαφικών διεργασιών (υδρομηχανική σύζευξη). Η αντιστοιχία μύζησης-βαθμού κορεσμού δεν είναι μοναδική και διαφορετικός βαθμός κορεσμού μπορεί να αντιστοιχεί στην ίδια μύζηση ανάλογα με την ιστορία ξήρανσης και διαβροχής του εδάφους και με τον λόγο κενών. Για το λόγο αυτό η εργαστηριακή μέτρηση και η αριθμητική προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι περίπλοκες αλλά και συνάμα απαραίτητες διαδικασίες στην επίλυση προβλημάτων συνωριακών συνθηκών.

ABSTRACT: The soil-water characteristic (or retention) curve is one of the main features of unsaturated soils, representing the relationship between suction and degree of saturation (or water content) and indicating the amount of water in the soil pores corresponding to a certain value of suction. Thus, it affects greatly the hydraulic characteristics of unsaturated

soils (water permeability and flow), as well as their mechanical properties (strength and compressibility) and the hydro-mechanical coupling. The relationship between suction and degree of saturation is not unique, with a different degree of saturation corresponding to the same value of suction depending on the drying and wetting history of the soil and its void ratio. Consequently, the experimental measurement and numerical modelling of the characteristic curve is complicated, but necessary in the numerical simulation of boundary value problems.

1. Εισαγωγή

Παρότι η σημασία της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους Νερού (Χ.Κ.Ε.Ν), η οποία για λόγους απλοποίησης θα αναφέρεται από εδώ και πέρα απλά ως χαρακτηριστική καμπύλη, αναγνωρίστηκε από νωρίς στον κλάδο της γεωργικής μηχανικής (Buckingham, 1907), η εισαγωγή της στην Εδαφομηχανική και τη Γεωτεχνική Μηχανική καθυστέρησε για πολλές δεκαετίες. Αν και η πλέον χρησιμοποιούμενη, καθότι απλή, εξίσωση χαρακτηριστικής καμπύλης προτάθηκε από τον van Genuchten το 1980 (van Genuchten, 1980), δηλαδή μία δεκαετία πριν το πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα για τη μηχανική συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών από τους Alonso et al. (1990), η χρησιμότητά της παρέμεινε ουσιαστικά αφανής και δυσνόητη μέχρι την δεκαετία του 2000, όταν εμφανίσθηκαν τα πρώτα ολοκληρωμένα καταστατικά προσομοιώματα που επιχείρησαν να προσομοιώσουν την υδρομηχανική συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών (π.χ. Wheeler et al., 2003; Gallipoli et al., 2003a). Έκτοτε, καταβάλλεται συνεχής προσπάθεια για τη βελτίωση των προσομοιωμάτων της χαρακτηριστικής καμπύλης (π.χ. Gallipoli et al., 2003b, Li, 2005, Tarantino, 2009, Pedroso & Williams 2010, Tsiamprousi et al., 2013, Gallipoli et al., 2015), ενώ η ενσωματωσή της σε καταστατικούς νόμους περιγραφής της υδρομηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών είναι όλο και πιο συχνή (Σιταρένιος, 2019).

Επιπλέον, παρότι η σύνδεση χαρακτηριστικής καμπύλης και διαπερατότητας σε νερό και αέρα έχει αναγνωριστεί από καιρό (Muallem, 1976), τα προσομοιώματα για τη διαπερατότητα παραμένουν ως επί το πλείστον εμπειρικά

(Leong & Rahardjo, 1997), πιθανόν λόγω της δυσκολίας εργαστηριακής μέτρησης της διαπερατότητας σε συνθήκες μερικού κορεσμού. Τέλος, η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης, σε ό,τι αφορά στη ροή του νερού στους πόρους των ακόρεστων εδαφών, αναγνωρίστηκε σε όλες τις προσπάθειες προσομοίωσης της συζευγμένης στερεοποίησης ακόρεστων εδαφών (Daksanamurthy et al., 1984, Wong et al., 1998, Gatmiri et al., 1998, Sheng et al., 2003, Khalili et al., 2008, Tsiamprousi et al., 2017a and 2017b).

Το παρόν άρθρο αποσκοπεί στο να αποδώσει περιληπτικά τις σημαντικότερες ιδιότητες της χαρακτηριστικής καμπύλης και να συνοψίσει επιγραμματικά τους τρόπους με τους οποίους επηρεάζει την εδαφική συμπεριφορά, τονίζοντας έτσι την πολυδιάστατη σημασία της. Η εργαστηριακή μέτρηση και η αριθμητική προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης, οι οποίες επίσης παρουσιάζονται περιληπτικά, οφείλουν να αναγνωστούν σε συνδυασμό με το άρθρο των Μπαρδάνη & Λουκίδη (2019) του παρόντος τόμου. Τέλος, η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης τονίζεται μέσα από ένα παράδειγμα προβλήματος συνοριακών συνθηκών από την Tsiamprousi (2011).

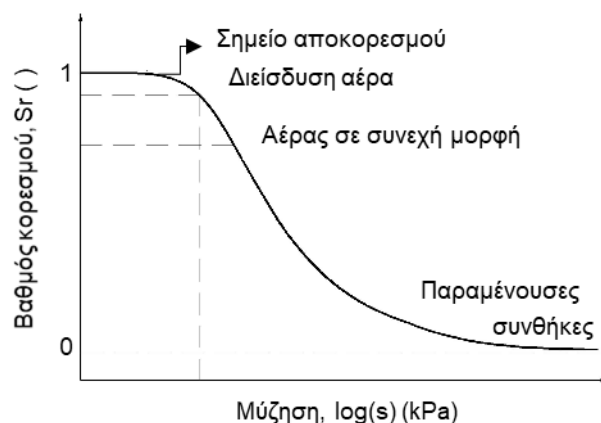
2. Σχήμα χαρακτηριστικής καμπύλης και ζώνες εδαφικής συμπεριφοράς

Κατά την σταδιακή ξήρανση ενός αρχικά πλήρως κορεσμένου εδάφους με βαθμό κορεσμού, S_r , ίσο με τη μονάδα, το νερό υποχωρεί σε όλο και μικρότερους πόρους, με αποτέλεσμα η καμπυλότητα της διεπιφάνειας νερού-αέρα, και επομένως η μύζηση, να αυξάνεται βαθμιαία καθώς ο βαθμός κορεσμού μειώνεται. Η σχέση βαθμού κορεσμού-μύζησης (ή ποσοστού υγρασίας-μύζησης) είναι μη γραμμική και συνήθως λαμβάνει την χαρακτηριστική μορφή ανάστροφης σιγμοειδούς καμπύλης όπως στο Σχ. 1) με τη μύζηση στον οριζόντιο άξονα σε λογαριθμική κλίμακα και το βαθμό κορεσμού (ή το ποσοστό υγρασίας, w) στον κατακόρυφο σε γραμμική.

Κατά τη ξήρανσή τους τα περισσότερα εδάφη διατηρούν αρχικά το βαθμό κορεσμού τους αμείωτο εωσότου αέρας υπό τη μορφή φυσαλίδων εμφανιστεί στους μεγαλύτερους πόρους, όταν η μύζηση γίνει ίση με τη μύζηση αποκορεσμού. Με την περαιτέρω ξήρανση και αύξηση της μύζησης, αέρας σε συνεχή μορφή

διεισδύει στους μεγαλύτερους πόρους οδηγώντας ταυτόχρονα σε μείωση του βαθμού κορεσμού. Η μύζηση που απαιτείται για να επιτευχθεί διείσδυση αέρα σε συνεχή μορφή αναφέρεται ως πίεση διείσδυσης αέρα.

Περαιτέρω αύξηση της μύζησης συνοδεύεται από σταδιακή διείσδυση αέρα σε όλο και μικρότερους πόρους, απομάκρυνση νερού και μείωση του βαθμού κορεσμού, μέχρι την τελική απομάκρυνση της μάζας του νερού από τους πόρους. Σε αυτό το σημείο, όλο το παραμένον νερό βρίσκεται σε μορφή μηνίσκων στις επαφές μεταξύ σωματιδίων και ο αντίστοιχος βαθμός κορεσμού αποκαλείται παραμένον βαθμός κορεσμού. Περαιτέρω αύξηση της μύζησης αντιστοιχεί σε αύξηση της καμπυλότητας των μηνίσκων με πολύ μικρή επιπλέον επίδραση στον βαθμό κορεσμού.

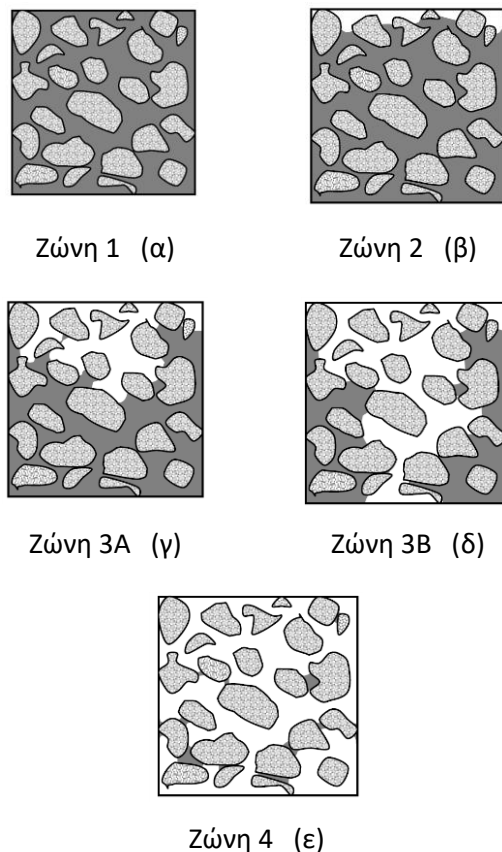


Σχ. 1. Τυπικό σχήμα χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

Fig. 1. Example of typical form of soil-water characteristic curve.

Με βάση τα παραπάνω οι Tsiamprousi et al. (2017a) καθορίζουν τέσσερις ζώνες συμπεριφοράς. Στη Ζώνη 1 το έδαφος παραμένει πλήρως κορεσμένο (Σχ. 2α) και η υδρομηχανική του συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί πλήρως από τις καταστατικές σχέσεις για πλήρως κορεσμένα εδάφη. Στη Ζώνη 2 (Σχ. 2β), αέρας έχει αρχίσει να διεισδύει στους εξωτερικούς πόρους και ο βαθμός κορεσμού έχει αρχίσει να μειώνεται. Για μεγέθη μύζησης μικρότερα από την πίεση διείσδυσης αέρα, η εδαφική συμπεριφορά παρουσιάζει λίγες αποκλίσεις από την τυπική συμπεριφορά των κορεσμένων εδαφών. Αισθητή αλλαγή στη συμπεριφορά παρατηρείται για μυζήσεις μεγαλύτερες της πίεσης διείσδυσης αέρα, στις Ζώνες 3 και 4.

Η Ζώνη 3 μπορεί να διαχωριστεί σε δύο υποζώνες, 3Α και 3Β, βάσει της συνέχειας ή μη της αέριας φάσης συνολικά στην εδαφική μάζα. Στη ζώνη 3Α (Σχ. 3γ) ο αέρας έχει συνεχή μορφή και βρίσκεται σε επικοινωνία με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ωστόσο δεν είναι συνεχής σε όλη την εδαφική μάζα, με αποτέλεσμα την περιορισμένη ροή του. Αντιθέτως, στη Ζώνη 3Β (Σχ. 2δ) τόσο το νερό όσο και ο αέρας είναι συνεχή σε όλη την εδαφική μάζα και ενώ η ροή του νερού περιορίζεται από την εδαφική διαπερατότητα, ο αέρας μπορεί να ρέει χωρίς περιορισμούς (στο σχήμα παρουσιάζεται η δισδιάστατη τομή του τρισδιάστατου χώρου και η συνέχεια του νερού δεν γίνεται εμφανής).



Σχ. 2. Ζώνες συμπεριφοράς κατά Tsiampousi et al. (2017a).

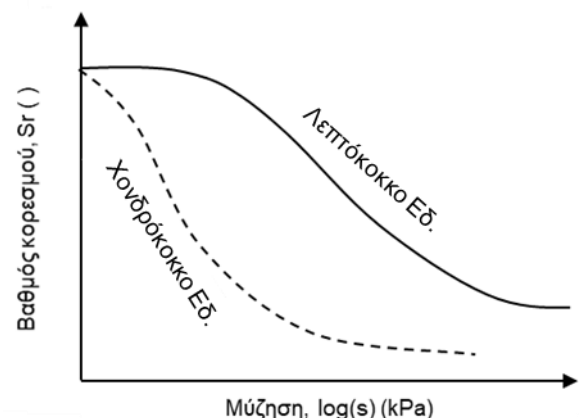
Fig. 2. Conceptual zones of behaviour according to Tsiampousi et al. (2017a).

Στη Ζώνη 4 η υγρή φάση έχει χάσει πλήρως τη συνέχειά της (Σχ. 2ε) και η ροή της είναι δυνατή μόνο μέσω της ροής υδρατμών. Ο βαθμός κορεσμού φτάνει την παραμένουσα τιμή του.

Γίνεται αντιληπτό ότι το νερό σε ένα απλοποιημένο θεωρητικό πλαίσιο (=conceptual model) μπορεί να υπάρξει στους πόρους σε μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μορφές: ελεύθερο (bulk water), σε μορφή μηνίσκων (meniscus water) και σε μορφή υδρατμών μέσα στην αέρια φάση (water vapour). Ομοίως, ο αέρας δύναται να είναι παρών σε μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μορφές: ελεύθερος (bulk air), σε μορφή φυσαλίδων αποκλεισμένου αέρα (occluded air bubbles) και διαλυμένος στην υγρή φάση (dissolved air). Η αναλογία νερού-αέρα αλλά και η μορφή νερού και αέρα στους πόρους έχουν σημαντική επίδραση στην εδαφική συμπεριφορά. Ο βαθμός κορεσμού, παρότι δεν είναι παρά ενδεικτικός της μορφής, αποδίδει την αναλογία νερού-αέρα με ακρίβεια και ως εκ τούτου η γνώση του από τη χαρακτηριστική καμπύλη είναι απαραίτητη.

2.1 Επίδραση κοκκομετρίας

Η κοκκομετρία του εδάφους επηρεάζει σημαντικά τη χαρακτηριστική καμπύλη, τόσο ως προς τη θέση της όσο και ως προς την καμπυλότητά της. Όσο πιο μικροί είναι οι εδαφικοί πόροι, τόσο πιο μικρή είναι η ακτίνα καμπυλότητας των σχηματιζόμενων μηνίσκων και τόσο πιο μεγάλη η μύζηση που απαιτείται για να επιτευχθεί συγκεκριμένος βαθμός κορεσμού, όπως δηλώνουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του Σχ. 3. Για τον ίδιο λόγο, η πίεση διεύθυνσης αέρα είναι πολύ μεγαλύτερη σε λεπτόκοκκα απ' ότι σε χονδρόκοκκα εδάφη, γεγονός που επίσης επηρεάζει τη χαρακτηριστική καμπύλη.



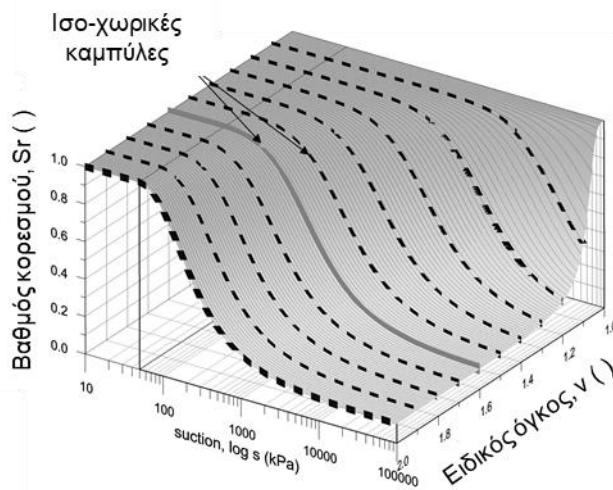
Σχ. 3. Παράδειγμα χαρακτηριστικών καμπυλών λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων εδαφών.

Fig. 3. Example of soil-water characteristic curves for fine- and coarse-grained soils.

2.2 Επίδραση λόγου κενών

Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων και του επιβαλλόμενου τασικού πεδίου είναι δυνατόν να προκαλέσουν μεταβολές του λόγου κενών και ως εκ τούτου του βαθμού κορεσμού, καθώς αυτός ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του νερού στους εδαφικούς πόρους προς τον συνολικό όγκο των πόρων. Επομένως, ο βαθμός κορεσμού δύναται να μεταβληθεί υπό σταθερή μύζηση λόγω της μεταβολής του επιβαλλόμενου τασικού πεδίου.

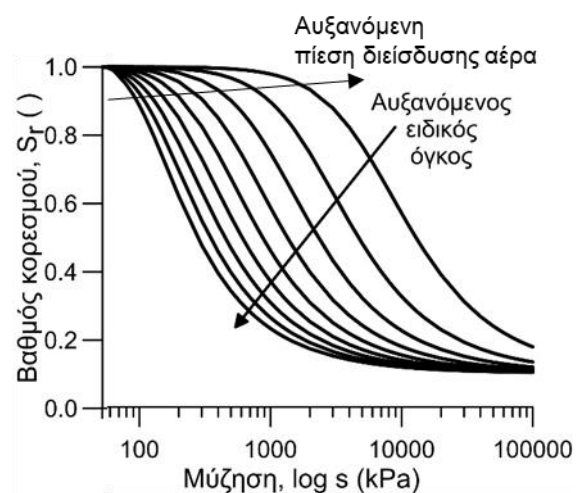
Συνεπώς η χαρακτηριστική καμπύλη ενός εδάφους είναι στην ουσία τρισδιάστατη καμπύλη στο χώρο $S_r - \log s - v$, όπου S_r είναι ο βαθμός κορεσμού, s η μύζηση και v ο ειδικός όγκος ($v = 1 + e$, όπου e ο λόγος κενών). Η επιφάνεια του Σχ. 4 αποτελείται από υποθετικές χαρακτηριστικές καμπύλες που αντιστοιχούν σε σταθερό (αμετάβλητο) λόγο κενών και ονομάζονται ισο-χωρικές (Gallipoli et al., 2015) ή ισόογκες (iso-volumetric, Tsiamprousi et al., 2013). Η επιφάνεια του Σχ. 4 παρήχθη αριθμητικά με χρήση του προσομοιώματος χαρακτηριστικής καμπύλης των Gallipoli et al. (2003), το οποίο συζητείται λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα. Από την προβολή των ισο-χωρικών καμπυλών στο επίπεδο $S_r - s$ στο Σχ. 5 γίνεται αντιληπτό ότι όσο μικρότερος είναι ο ειδικός όγκος τόσο ψηλότερα βρίσκεται η χαρακτηριστική καμπύλη στο επίπεδο, με υψηλότερο βαθμό κορεσμού να αντιστοιχεί στην ίδια τιμή μύζησης, και τόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση διείσδυσης αέρα.



Σχ. 4. Ισο-χωρικές (ισόογκες) χαρακτηριστικές καμπύλες στο χώρο $S_r - \log s - v$.

Fig. 4. Isochoric (iso-volumetric) soil-water characteristic curves in the $S_r - \log s - v$ space.

Ωστόσο, τα ακόρεστα εδάφη διατηρούν αμετάβλητο τον όγκο τους κατά την επιβολή υδραυλικής φόρτισης (μεταβολή μύζησης) μόνο σε χαμηλό βαθμό κορεσμού, όταν ο λόγος κενών φτάνει την παραμένουσα τιμή του. Σε κάθε άλλη περίπτωση, υδραυλική φόρτιση συνήθως προκαλεί μεταβολή του ειδικού όγκου η οποία με τη σειρά της προκαλεί αλλαγή της χαρακτηριστικής σχέσης εδάφους-νερού από μία ισο-χωρική καμπύλη στην επόμενη, διαγράφοντας μία χαρακτηριστική καμπύλη στο χώρο $S_r - \log s - v$.

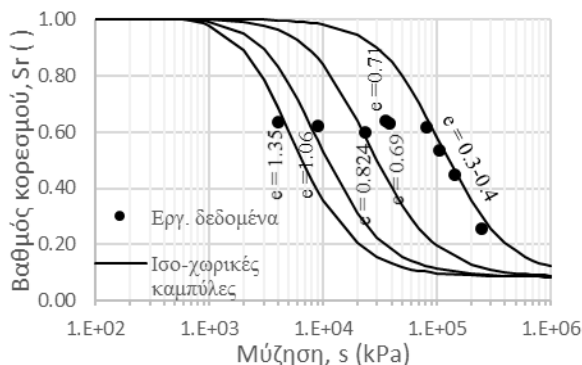


Σχ. 5. Προβολή ισο-χωρικών καμπυλών στο επίπεδο $S_r - s$.

Fig. 5. Projection of isochoric curves on the $S_r - s$ plane.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι ο λόγος κενών (και επομένως ο ειδικός όγκος) μεταβάλλεται κατά την επιβολή υδραυλικής φόρτισης εωσότου φτάσει την παραμένουσα τιμή του, δεν είναι δυνατή η άμεση εργαστηριακή μέτρηση ισο-χωρικών καμπυλών. Η ύπαρξή τους επιβεβαιώνεται θεωρητικά από την ερμηνεία εργαστηριακών μετρήσεων, όπως στο παράδειγμα του Σχ. 6, όπου απεικονίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη πελλέτας μπεντονίτη MX80 (Molinero Guerra et al., 2015). Η υδραυλική συμπεριφορά συμπυκνωμένου μπεντονίτη MX80 έχει μελετηθεί διεξοδικά στα πλαίσια της γεωλογικής εναπόθεσης πυρηνικών αποβλήτων, όπου, λόγω του υψηλού δυναμικού διόγκωσης, προτείνεται η χρήση του σε μορφή προσυμπυκνωμένων τεμαχίων και πελλετών για την «σφράγιση» του χώρου μεταξύ των

κανίστρων που περιέχουν τα υαλοποιημένα απόβλητα και του περιβάλλοντος γεωλογικού σχηματισμού στον οποίο εναποτίθενται. Το ασυνήθιστο σχήμα της εργαστηριακής χαρακτηριστικής καμπύλης του Σχ. 6 οφείλεται στις μεγάλες μεταβολές του λόγου κενών κατά την εργαστηριακή διαβροχή του σφαιριδίου από την αρχική του συμπυκνωμένη κατάσταση. Στο σχήμα έχει αναγραφεί ο λόγος κενών που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή μύζησης καθώς και οι αντίστοιχες ισο-χωρικές καμπύλες που υπολογίζονται θεωρητικά με το προσομοίωμα των Gallipoli et al. (2003b).

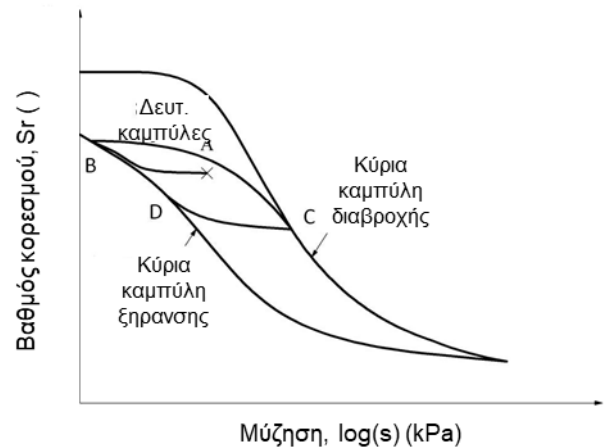


Σχ. 6. Παράδειγμα επίδρασης λόγου κενών στην χαρακτηριστική καμπύλη σφαιριδίου μπεντονίτη.

Fig. 6. Example of the effect of void ratio on the soil-water characteristic curve of bentonite pellets.

2.3 Υδραυλική υστέρηση

Μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι η υδραυλική υστέρηση, δηλαδή η ύπαρξη διαφορετικής καμπύλης κατά τη ξήρανση και τη διαβροχή εδαφικών δοκιμίων, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 7. Κατά την ξήρανση από συνθήκες πλήρους κορεσμού, αναζυμωμένο δοκίμιο ακολουθεί τη λεγόμενη κύρια καμπύλη ξήρανσης (primary drying curve). Εάν η ξήρανση συνεχιστεί μέχρι να επιτευχθούν παραμένουσες συνθήκες κορεσμού και στη συνέχεια το δοκίμιο υποβληθεί σε διαβροχή, ακολουθεί την κύρια καμπύλη διαβροχής (primary wetting curve), η οποία στα περισσότερα εδάφη είναι διακριτή από την κύρια καμπύλη ξήρανσης, καθώς απαιτείται μικρότερη μύζηση για να επιτευχθεί ο ίδιος βαθμός κορεσμού κατά την κύρια διαβροχή σε σύγκριση με την κύρια ξήρανση του ίδιου δοκιμίου.



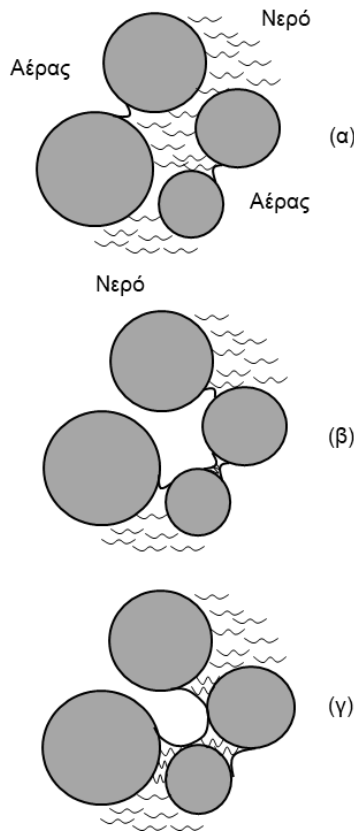
Σχ. 7. Υδραυλική υστέρηση χαρακτηριστικής καμπύλης.

Fig. 7. Hydraulic hysteresis of the soil-water characteristic curve

Ο λόγος για τον οποίο παρατηρείται η υδραυλική υστέρηση σχετίζεται με τη διαφορετική ακτίνα καμπυλότητας των μηνίσκων όταν τα κενά μεταξύ των εδαφικών κόκκων γεμίζουν και αδειάζουν από νερό, όπως εξηγείται σχηματικά στο Σχ. 8. Όταν το κενό μεταξύ των κόκκων στο Σχ. 8α αδειάζει από νερό κατά την ξήρανση του εδάφους, οι μηνίσκοι σχηματίζονται με μικρή ακτίνα καμπυλότητας στις στενές εισόδους του κενού και επομένως η αντίστοιχη μύζηση είναι σχετικά μεγάλη. Με την περαιτέρω ξήρανση το κενό αδειάζει τελείως από νερό (Σχ. 8β), η ακτίνα καμπυλότητας των μηνίσκων μικραίνει και η μύζηση αυξάνεται. Κατά τη διαβροχή, η ακτίνα καμπυλότητας των μηνίσκων, η οποία έχει αναστραφεί, είναι μεγαλύτερη, όπως φαίνεται στο Σχ. 8γ, και η αντίστοιχη μύζηση είναι μικρότερη.

Εάν η διαβροχή του δοκιμίου συνεχιστεί μέχρι να επιτευχθούν συνθήκες πλήρους κορεσμού, σε ενδεχόμενη ξήρανσή του θα ακολουθήσει ξανά την κύρια καμπύλη ξήρανσης. Ωστόσο στην πράξη η διαβροχή δε συνεχίζεται πάντα μέχρι τον πλήρη κορεσμό του εδάφους και η ξήρανση σπανίως συνεχίζεται μέχρι συνθήκες παραμένουστος βαθμού κορεσμού. Εάν η διαβροχή ή η ξήρανση διακοπούν πριν επιτευχθούν συνθήκες πλήρως ή παραμένουστος κορεσμού, κατά την επακόλουθη ξήρανση ή διαβροχή το έδαφος ακολουθεί δευτερεύουσες καμπύλες ξήρανσης και διαβροχής, αντίστοιχα (scanning drying and wetting paths). Συμπυκνωμένα εδάφη έχουν συνήθως βαθμό κορεσμού ο οποίος δεν αντιστοιχεί σε καμία από

τις κύριες καμπύλες και επομένως με υδραυλική φόρτιση ακολουθούν κάποια δευτερεύουσα καμπύλη.

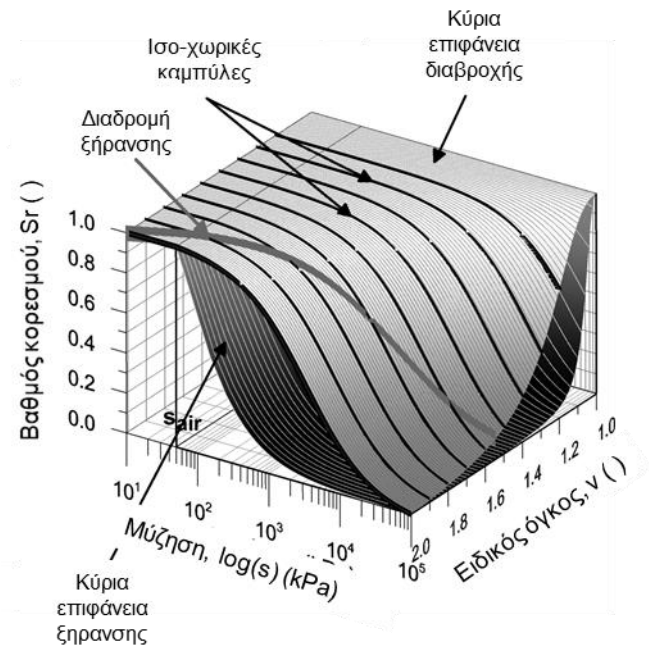


Σχ. 8. Σχηματική εξήγηση υδραυλικής υστέρησης χαρακτηριστικής καμπύλης (Standing, 2005).

Fig. 8. Schematic explanation of hydraulic hysteresis (adapted from Standing, 2005).

Παρότι οι κύριες καμπύλες ορίζονται θεωρητικά μοναδικά από αναζυμωμένα δοκίμια, οι δευτερεύουσες είναι άπειρες στον αριθμό καθώς εξαρτώνται από το σημείο αλλαγής της υδραυλικής φόρτισης από ξήρανση σε διαβροχή και αντίστροφα (reversal hydraulic point) ή από τις συνθήκες συμπύκνωσης, καθώς αυτές καθορίζουν τον αρχικό βαθμό κορεσμού.

Εάν ληφθεί υπόψη η επίδραση του λόγου κενών, η χαρακτηριστική καμπύλη παρουσιάζει υστέρηση στον τρισδιάστατο χώρο $S_r - \log s - v$, ακολουθώντας κατά την κύρια υδραυλική φόρτιση κύριες επιφάνειες ξήρανσης και διαβροχής (Σχ. 9).



Σχ. 9. Κύριες επιφάνειες ξήρανσης και διαβροχής (Tsiamprousi et al., 2013).

Fig. 9. Primary drying and wetting surfaces (Tsiamprousi et al., 2013).

3. Εργαστηριακή μέτρηση

Η εργαστηριακή μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης γίνεται σε αφόρτιστα δοκίμια διαφόρων μεγεθών, ανάλογα με τη μέθοδο που ακολουθείται για την εφαρμογή και τον έλεγχο της μύζησης και τις δυνατότητες του εργαστηρίου. Συμπυκνωμένα, αναζυμωμένα ή αδιατάρακτα δοκίμια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις της μελέτης. Η μόνη βασική διαφορά στην ακολουθούμενη μεθοδολογία σε δοκίμια διαφορετικού τύπου προέρχεται από το γεγονός πως ο αρχικός βαθμός κορεσμού, και επομένως οι δυνατές διαδρομές ξήρανσης και διαβροχής, διαφέρουν. Έτσι, αναζυμωμένα δοκίμια, τα οποία είναι εκ φύσεως πλήρως κορεσμένα, μπορούν να υποβληθούν αρχικά μόνο σε ξήρανση. Η αρχική υδραυλική φόρτιση συμπυκνωμένων δοκιμίων, τα οποία είναι εκ φύσεως μερικώς κορεσμένα, μπορεί να προέρχεται είτε από διαβροχή είτε από ξήρανση.

Παίρνοντας ως παράδειγμα την περίπτωση ενός αναζυμωμένου δοκιμίου, για τον προσδιορισμό των κύριων καμπυλών απαιτείται η σταδιακή ξήρανσή του σε παραμένουσες συνθήκες και εν συνεχεία η σταδιακή διαβροχή του μέχρι συνθηκών πλήρους κορεσμού. Συχνά δεν είναι

δυνατόν να επιτευχθούν παραμένουσες συνθήκες, καθώς αυτές μπορεί να αντιστοιχούν σε τιμή μύζησης πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που είναι εργαστηριακά επιτεύξιμη, είτε λόγω έλλειψης κατάλληλων εργαστηριακών μεθόδων επιβολής της μύζησης, είτε λόγω ιδιαιτερότητας του εξεταζόμενου εδάφους, είτε λόγω χρονικών περιορισμών. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι σε αυτήν την περίπτωση, με ακόλουθη διαβροχή, το δοκίμιο θα ακολουθήσει δευτερεύουσα και όχι την κύρια καμπύλη διαβροχής. Επίσης, συχνά, δεν είναι δυνατός ο πλήρης κορεσμός κατά τη διαβροχή, καθώς είναι πολύ δύσκολη η διάλυση των αποκλεισμένων φυσαλίδων αέρα υπό αφόρτιστες συνθήκες, και είναι πιθανό ο βαθμός κορεσμού να είναι μικρότερος της μονάδας κατά το τέλος της διαβροχής κι ενώ η μύζηση έχει μηδενιστεί. Η εκ νέου διαβροχή ενός τέτοιου δοκιμίου θα οδηγήσει σε δευτερεύουσα καμπύλη ξήρανσης και όχι στην κύρια.

Σε κάθε περίπτωση, η εργαστηριακή μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης απαιτεί τη σταδιακή μεταβολή της μύζησης (αύξηση ή μείωση) και μέτρηση του ποσοστού υγρασίας και του όγκου του δοκιμίου όταν έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ της επιβαλλόμενης μύζησης στα όρια του δοκιμίου και της μύζησης σε όλους τους πόρους του δοκιμίου (συνήθως μετά από 7 ημέρες αν και αναλόγως του τύπου του εδάφους, της μεθόδου ελέγχου της μύζησης και του μέγεθος του δοκιμίου μπορεί να χρειαστεί περισσότερος χρόνος). Αναλόγως την τεχνική, μπορεί να απαιτείται απομάκρυνση του δοκιμίου από την εργαστηριακή συσκευή προκειμένου να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε ενδιάμεσα στάδια της δοκιμής. Η μεγαλύτερη δυσκολία έγκειται στην εφαρμογή και στον έλεγχο της μύζησης με ακρίβεια και για μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς η μέτρηση μιας ολοκληρωμένης χαρακτηριστικής καμπύλης μπορεί να διαρκέσει αρκετούς μήνες.

Για τις μεθόδους εφαρμογής, ελέγχου και μέτρησης της μύζησης μπορεί ο αναγνώστης να ανατρέξει στον Μπαρδάνη (2019). Για περισσότερες πληροφορίες, λεπτομέρειες, συγκρίσεις και σε βάθος αποτίμηση των μεθόδων, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις δημοσιεύσεις των Delage (2002) και Delage et al. (2008). Ενδεικτικά, συζητούνται περιληπτικά δύο εκ των πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενων μεθόδων μέτρησης χαρακτηριστικών καμπυλών. Η μέθοδος χαρτιού φίλτρου και η μέθοδος ισορροπίας υδρατμών.

3.1 Μέθοδος χαρτιού φίλτρου

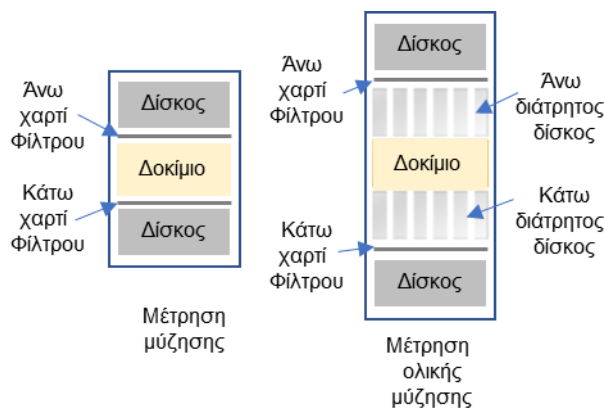
Το χαρτί φίλτρου χρησιμοποιείται για την μέτρηση της μύζησης στην περιοχή της γεωργικής μηχανικής από τη δεκαετία του 1930 (Gardner, 1937) και υιοθετήθηκε αρκετά αργότερα από τη γεωτεχνική κοινότητα (Chandler & Gutierrez, 1986; Ridley et al., 2003). Η χρήση του είναι πλέον ευρεία (ASTM D 5298-94), καθώς είναι φτηνή και εύκολη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση τόσο της μύζησης εδαφικού σκελετού (matrix suction) όσο και της ολικής μύζησης (total suction), οπότε γίνεται δυνατός ο υπολογισμός της ωσμωτικής μύζησης (osmotic suction). Με το κοινώς χρησιμοποιούμενο χαρτί φίλτρου Whatman No. 42, οι μετρήσιμες τιμές μύζησης έχουν εύρος από 0 έως 30 MPa (Marinho, 1994, Al Haj & Standing, 2016), καλύπτουν δηλαδή τις ανάγκες των περισσότερων γεωτεχνικών έργων, με, ίσως μοναδική, εξαίρεση τη γεωλογική εναπόθεση πυρηνικών αποβλήτων για την οποία απαιτούνται τιμές μύζησης που φτάνουν τις εκατοντάδες MPa.

Σε πρόσφατη δημοσίευση, οι Al Haj & Standing (2016) εξηγούν λεπτομερώς τη σύγχρονη τεχνική για μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης. Πριν τη μέτρηση καμπυλών ξήρανσης, το εδαφικό δοκίμιο αφήνεται ανοικτό στο περιβάλλον του εργαστηρίου για ένα χρονικό διάστημα κάποιων ωρών αναλόγως με την επιθυμητή τιμή μύζησης. Παρομοίως, πριν τη μέτρηση καμπυλών διαβροχής, το δοκίμιο ψεκάζεται ομοιόμορφα με απεσταγμένο νερό. Πρέπει να σημειωθεί ότι με την τεχνική του χαρτιού φίλτρου, δεν είναι δυνατός ο έλεγχος, παρά μόνο η μέτρηση της μύζησης.

Στεγνά χαρτιά φίλτρου τοποθετούνται εκατέρωθεν του κυλινδρικού δοκιμίου (Σχ. 10), σε επαφή με το δοκίμιο στην περίπτωση μέτρησης μύζησης. Για τη μέτρηση ολικής μύζησης διάτρητοι δίσκοι πολυμεθακρυλικού μεθυλίου, πάχους λίγων χιλιοστών, τοποθετούνται μεταξύ του δοκιμίου και των χαρτιών φίλτρου, οι οποίοι επιτρέπουν την κυκλοφορία αποκλειστικά υδρατμών μεταξύ δοκιμίου και χαρτιών. Τέλος συμπαγείς δίσκοι πολυμεθακρυλικού μεθυλίου τοποθετούνται εξωτερικά των χαρτιών φίλτρου, και το δοκίμιο με τους δίσκους και τα χαρτιά μονώνεται και αποθηκεύεται σε συνθήκες σταθερής υγρασίας και θερμοκρασίας για μία εβδομάδα, στην περίπτωση μέτρησης μύζησης εδαφικού σκελετού, ή για δύο εβδομάδες, όταν μετρείται η ολική μύζηση. Ο χρόνος αυτός αρκεί

προκειμένου να επέλθει ισορροπία μεταξύ της μύζησης του δοκιμίου και του χαρτιού. Τέλος, τα χαρτιά φίλτρου απομακρύνονται και ζυγίζονται ώστε να υπολογιστεί το ποσοστό υγρασίας που απορρόφησαν. Η αντίστοιχη μύζηση υπολογίζεται από καμπύλες βαθμονόμησης για τον συγκεκριμένο τύπο χαρτιού που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Τονίζεται η ανάγκη χρήσης ζυγού ακρίβειας μέτρησης 0.1mg.

Για να αποφευχθεί η μεταφορά υγρασίας μεταξύ χρήστη και χαρτιού, καθώς και μεταξύ αέρα και χαρτιού, είναι σημαντικό ο χειρισμός του χαρτιού φίλτρου να γίνεται με τσιμπιδάκι και να τοποθετείται μέσα σε σφραγιζόμενο πλαστικό σακουλάκι αμέσως μετά την αφαίρεσή του και πριν τη μέτρηση του βάρους του (Μοντρού, 2006). Το βάρος και οι διαστάσεις του δοκιμίου χρειάζεται να μετρηθούν για τον υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού του εδάφους. Η μύζηση του χαρτιού (ίση με τη μύζηση του δοκιμίου σε συνθήκες ισορροπίας) και ο βαθμός κορεσμού του δοκιμίου αντιστοιχούν σε ένα σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ληφθεί ολόκληρη η καμπύλη με αρμόζουσα ακρίβεια σχήματος και για τις αρμόζουσες τιμές μύζησης.



Σχ. 10. Διάταξη δοκιμίου, χαρτιών φίλτρου και δίσκων πολυμεθακρυλικού μεθυλίου (Perspex disk) στη μέθοδο χαρτιού φίλτρου (Kirkham, 2015).

Fig. 10. Sample, filter paper and polymethyl methacrylate disk (Perspex disk) arrangement in filter paper method (adapted from Kirkham, 2015).

3.2 Μέθοδος ισορροπίας υδρατμών

Η μέθοδος ισορροπίας υδρατμών χρησιμοποιείται για την έμμεση εφαρμογή ολικής μύζησης σε τιμές που υπερβαίνουν τα 10

MPa και φτάνουν τις εκατοντάδες MPa, εύρος τιμών που κυρίως απαντάται στη γεωλογική εναπόθεση πυρηνικών αποβλήτων αλλά και συχνά απαραίτητο για τον προσδιορισμό του κλάδου της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού κοντά ή και μετά το παραμένον ποσοστό υγρασίας/παραμένοντα βαθμό κορεσμού σε αργλικής φύσης υλικά (σε αμμοίλυ η μέθοδος μετατόπισης άξονα συνήθως αρκεί για να επιτευχθούν παραμένουσες συνθήκες). Η μέθοδος βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος αέρα και του δοκιμίου μέσα σε σφραγισμένο και μονωμένο χώρο. Όταν το εδαφικό δοκίμιο εκτεθεί σε αέρα σχετικής υγρασίας διαφορετικής από τη σχετική υγρασία του αέρα που περιέχει στους πόρους του, γίνεται ανταλλαγή υδρατμών με τον αέρα και επέρχεται ξήρανση ή διαβροχή του δοκιμίου. Ο νόμος του Kelvin επιτρέπει τη μετάφραση της σχετικής υγρασίας σε τιμή μύζησης. Παράλληλα, μέτρηση του βάρους και των διαστάσεων του δοκιμίου επιτρέπει τον υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού, που σε συνδυασμό με την τιμή της μύζησης, αντιστοιχούν σε ένα σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ρύθμισης της σχετικής υγρασίας του χώρου. Ο απλούστερος είναι μέσω υδατικών διαλυμάτων, τα οποία μπορούν να είναι κορεσμένα ή ακόρεστα, αλάτων ή οξέων. Η μερική πίεση υδρατμών σε ισορροπία με κορεσμένο διάλυμα άλατος σε συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι σταθερή, δημιουργώντας συνθήκες σταθερής σχετικής υγρασίας στον περιβάλλοντα αέρα, ακόμη κι όταν η συγκέντρωση του διαλύματος αλλάξει (O'Brien, 1948, Young, 1967). Παρά τη διαδεδομένη τους χρήση (Delage et al., 1998, Villar, 1999, Romero et al., 2001, Tang & Cui, 2005, Blatz et al., 2008, Salager et al., 2011, Tarantino et al., 2011), το κύριο μειονέκτημά είναι ότι το χημικό δυναμικό, και επομένως η σχετική υγρασία που δημιουργούν, είναι ευαίσθητα σε μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας. Επίσης, το κάθε κορεσμένο διάλυμα άλατος αντιστοιχεί σε δεδομένη τιμή σχετικής υγρασίας υπό ισοθερμικές συνθήκες και επομένως, απαιτείται η χρήση πολλών διαφορετικών διαλυμάτων για τη μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης. Εναλλακτικά, με τη χρήση του ίδιου ακόρεστου διαλύματος οξέος επιτυγχάνεται ένα εύρος σχετικής υγρασίας, ωστόσο η συγκέντρωση του διαλύματος, και ως εκ τούτου και η σχετική υγρασία, είναι

ευαίσθητα στην ανταλλαγή υδρατμών με τον περιβάλλοντα αέρα, η σχετική υγρασία του οποίου επηρεάζεται από το ποσοστό υγρασίας του εδαφικού δοκιμίου, καθιστώντας τη ρύθμιση της μύζησης πολύ δύσκολη (Blatz et al., 2008).

Μία εναλλακτική μέθοδος ρύθμισης της μύζησης μέσω ρύθμισης της σχετικής υγρασίας δοχείου προτάθηκε πρόσφατα από τον Mantikos (2019). Η μέθοδος βασίζεται σε μίξη κατάλληλων ποσοστών κορεσμένου και ξηρού αέρα με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος λαμβάνει συνεχείς μετρήσεις σχετικής υγρασίας από υγρόμετρα και προσαρμόζει το μίγμα ανάλογα. Παρέχεται έτσι οποιαδήποτε τιμή σχετικής υγρασίας από 10% (300 MPa μύζησης) έως 90% (30 MPa μύζησης), και διατηρείται σταθερή για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται παρά τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Τα εδαφικά δοκίμια ζυγίζονται τακτικά και όταν η μάζα τους σταθεροποιηθεί, θεωρείται πως έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ της σχετικής υγρασίας του αέρα του δοχείου και του δοκιμίου. Η μέθοδος είναι τόσο ακριβής όσο είναι η ακρίβεια των υγρομέτρων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας.

4. Προσομοίωση

Το πλέον γνωστό προσομοίωμα χαρακτηριστικής καμπύλης προτάθηκε από τον van Genuchten (1980). Παρότι δε λαμβάνει υπόψη την επίδραση του λόγου κενών και την υδραυλική υστέρηση, είναι απλό και εύχρηστο. Στην αρχική του μορφή, το προσομοίωμα είχε διατυπωθεί για τον καθορισμό του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας από τη μύζηση και δεν περιελάμβανε τον παραμένοντα βαθμό κορεσμού, ωστόσο η παρακάτω εξίσωση (ή κάποια παρόμοια) έχει επικρατήσει στην πράξη:

$$S_r = \left\{ \frac{1}{1 + [as]^n} \right\}^m (1 - S_{r,0}) + S_{r,0} \quad (1)$$

όπου $S_{r,0}$ είναι ο παραμένων βαθμός κορεσμού και a , m και n παράμετροι που ελέγχουν το σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης.

Αργότερα οι Gallipoli et al. (2003b) εισήγαγαν την επίδραση του λόγου κενών στο προσομοίωμα της χαρακτηριστικής καμπύλης του van Genuchten (1980), καθώς και την έννοια κατ' ουσίαν των ισοχωρικών καμπυλών, παρότι δεν τις κατονόμασαν. Η παράμετρος ψ στην Εξ. 2 καθορίζει την επίδραση του λόγου κενών:

$$S_r = \left\{ \frac{1}{1 + [a(v-1)\psi_s]^n} \right\}^m \quad (2)$$

Για $\psi = 0$ ο λόγος κενών δεν επηρεάζει τη χαρακτηριστική καμπύλη, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο πιο εμφανής είναι η επιρροή του λόγου κενών και τόσο μεγαλύτερη απόσταση έχουν οι ισοχωρικές καμπύλες στο επίπεδο $\log s - v$. Δεν νοούνται αρνητικές τιμές ψ .

Το προσομοίωμα της χαρακτηριστικής καμπύλης του Tarantino (2009) για παραμορφώσιμα εδάφη, εκτός από την επίδραση του λόγου κενών, συμπεριλαμβάνει και υδραυλική υστέρηση. Ωστόσο, το προσομοίωμα δεν αναφέρεται σε δευτερεύουσες καμπύλες και οι εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν μόνον σε σχέση με τις κύριες καμπύλες. Ως εκ τούτου, παρότι είναι ένα αδιαμφισβήτητο πολύ χρήσιμο θεωρητικό εργαλείο, το προσομοίωμα αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει σε συνδυασμό με αριθμητικές ή άλλες υπολογιστικές μεθόδους στην πράξη.

Τα προσομοιώματα των Li (2005), Pedroso & Williams (2010), Tsiamposi et al. (2013b) και Gallipoli et al. (2015) συμπεριλαμβάνουν λεπτομερώς την προσομοίωση της υδραυλικής υστέρησης, με (Tsiamposi et al. 2013b, και Gallipoli et al., 2015) ή χωρίς (Li, 2005 και Pedroso & Williams, 2010) την επίδραση του λόγου κενών. Η υδραυλική υστέρηση αυξάνει κατά πολύ την περιπλοκότητα των προσομοιωμάτων καθώς και το υπολογιστικό κόστος των αναλύσεων, ωστόσο, όπως εξηγείται στο παράδειγμα της επόμενης ενότητας, είναι πολύ σημαντική σε περιπτώσεις συχνής εναλλαγής διαβροχής και ξήρανσης, όπως στην περίπτωση ατμοσφαιρικών επιδράσεων σε γεωτεχνικές κατασκευές σε μη κορεσμένα εδάφη.

5. Σημασία χαρακτηριστικής καμπύλης

5.1 Μεταβολές όγκου

Η επίδραση του βαθμού κορεσμού στις μεταβολές όγκου, και συγκεκριμένα στην διόγκωση και κατάρρευση μη κορεσμένων εδαφών, παρουσιάζεται εκτενώς και λεπτομερώς σε άλλες δημοσιεύσεις του παρόντος τόμου (Λουκίδης, 2019, και Χατζηγώγος & Μπαρδάνης, 2019).

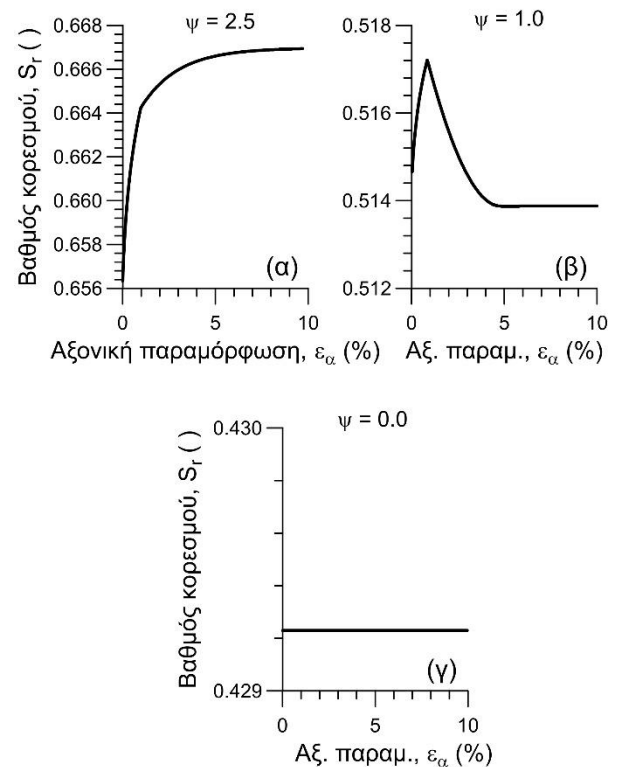
5.2 Αντοχή

Η διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών παρουσιάζεται εκτενώς στη δημοσίευση του Χατζηγώγου (2019) στον παρόντα τόμο. Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στη σύνδεση των καταστατικών προσομοιωμάτων με τη χαρακτηριστική καμπύλη, η οποία είναι απαραίτητη προκειμένου να περιγραφεί ορθά η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των εδαφών με τον μερικό κορεσμό. Καταστατικά προσομοιώματα για τη συμπεριφορά μη κορεσμένων εδαφών παρουσιάζονται στη δημοσίευση του Σιταρένιου (2019), επίσης στον παρόντα τόμο.

Η αλληλεπίδραση καταστατικού προσομοιώματος και χαρακτηριστικής καμπύλης πρέπει να μελετάται διεξοδικά προκειμένου να επιτραπεί η σωστή ερμηνεία των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Ως παράδειγμα εξετάζεται ο συνδυασμός του καταστατικού προσομοιώματος των Georgiadis et al. (2005) με τη χαρακτηριστική καμπύλη των Gallipoli et al. (2003). Το καταστατικό προσομοίωμα συνδέει την αύξηση της φαινόμενης συνοχής με το γινόμενο $S_r * s_{eq}$, όπου $s_{eq} = s - s_{air}$ και s και s_{air} είναι η μύζηση και η πίεση διείσδυσης αέρα. Η χαρακτηριστική καμπύλη προσομοιώνει την επίδραση του λόγου κενών μέσω της παραμέτρου ψ (βλ. Ενότητα 5 για λεπτομέρειες). Η επίδραση της χαρακτηριστικής καμπύλης στις προβλέψεις του καταστατικού προσομοιώματος μελετήθηκε για τρεις τιμές της παραμέτρου ψ , 2,5, 1 και 0. Σε κάθε περίπτωση προσομοιώθηκε τριαξονική θλίψη υπό σταθερής μύζησης, από ίδιες αρχικές συνθήκες με $s_{eq} = 300$ kPa και OCR = 11 (βαθμός υπερστερεοποίησης σε όρους μέσης τάσης, δηλαδή $OCR = p/p_0$ όπου p είναι η αρχική μέση τάση και p_0 η τάση προστερεοποίησης που αντιστοιχεί στην αρχική τιμή μύζησης).

Στο Σχ. 11 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού κορεσμού για τις τρεις αναλύσεις, η οποία είναι δηλωτική της επίδρασης του καταστατικού προσομοιώματος στη χαρακτηριστική καμπύλη. Υπό συνθήκες σταθερής μύζησης, η μικρή μεταβολή του βαθμού κορεσμού για $\psi = 2,5$ και 1 οφείλεται σε μεταβολές του λόγου κενών. Στην περίπτωση όπου $\psi = 0$, ο λόγος κενών δεν έχει καμία επίδραση στην χαρακτηριστική καμπύλη και ο βαθμός κορεσμού παραμένει αμετάβλητος.

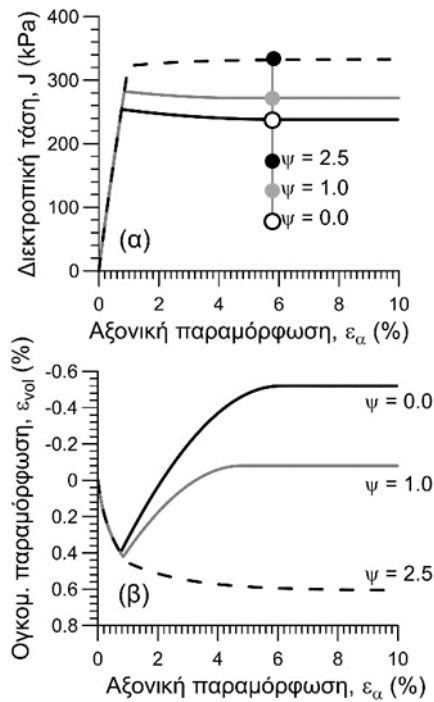
Η επίδραση της χαρακτηριστικής καμπύλης στα αριθμητικά αποτελέσματα του καταστατικού



Σχ. 11. Μεταβολή του βαθμού κορεσμού λόγω μεταβολών του ειδικού όγκου σε αναλύσεις υπό συνθήκες σταθερής μύζησης για (α) $\psi = 2.5$; (β) $\psi = 1.0$ and (γ) $\psi = 0.0$.

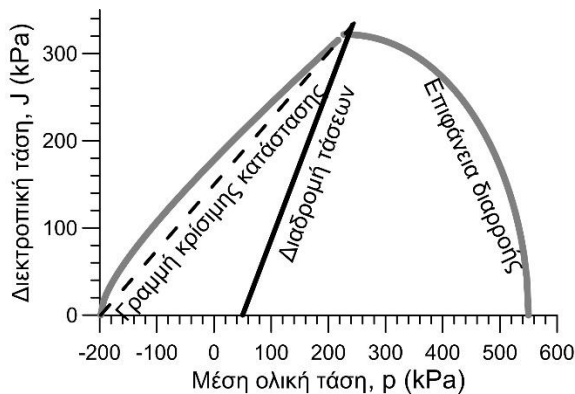
Fig. 11. Variation of the degree of saturation, S_r , due to changes in specific volume occurring during drained analyses, for (a) $\psi = 2.5$; (b) $\psi = 1.0$ and (c) $\psi = 0.0$.

προσομοιώματος επιδεικνύεται στο Σχ. 13, όπου παρουσιάζεται η σχέση διεκτροπικής τάσης-αξονικής παραμόρφωσης και η σχέση ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης για τις τρεις αναλύσεις. Η ανάλυση με $\psi = 0$ παρουσίασε τη μικρότερη διεκτροπική τάση και τη μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση στην κρίσιμη κατάσταση. Όταν η επίδραση του λόγου κενών ελήφθη υπόψη, η μεν διεκτροπική τάση αυξήθηκε, η δε ογκομετρική παραμόρφωση μειώθηκε για $\psi = 1$, ενώ για $\psi = 2.5$ αντί ογκομετρικής διαστολικότητας παρατηρήθηκε συστολικότητα, παρά την μεγάλη τιμή OCR. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η φαινόμενη συνοχή αυξήθηκε τόσο, λόγω της αύξησης του βαθμού κορεσμού, όσο ήταν απαραίτητο ώστε η διαδρομή των τάσεων να περάσει στην υποκρίσιμη (subcritical) ή «υγρή» (wet) περιοχή (Σχ. 13), δεξιά δηλαδή της γραμμής κρίσιμης κατάστασης, όπου οι υπολογιζόμενες πλαστικές παραμορφώσεις είναι συστολικές.



Σχ. 12. Διάγραμμα (α) διεκτροπικής τάσης, J , και (β) ογκομετρικής παραμόρφωσης, ε_{vol} , με αξονική παραμόρφωση, ε_a , για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ψ .

Fig. 12. Plots of (a) deviatoric stress, J , and (b) volumetric strains, ε_{vol} , versus axial strain, ε_a , for different values of the parameter ψ .



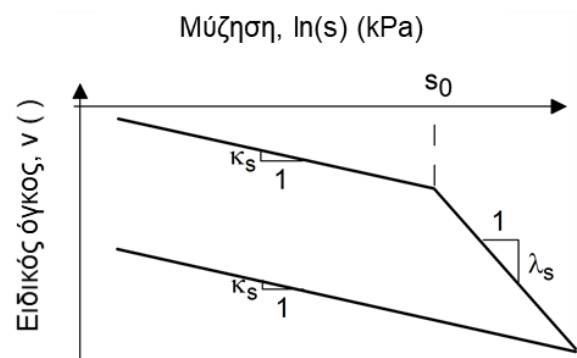
Σχ. 13. Επιφάνεια διαρροής και γραμμή κρίσιμης κατάστασης για $\psi = 2.5$ και η ακολουθούμενη διαδρομή τάσεων για OCR = 11.0.

Fig. 13. The yield surface and critical state line generated for $\psi = 2.5$ and the stress path followed for OCR = 11.0.

5.3 Συμπίεστικότητα

Η επιρροή της μύζησης στη συμπίεστικότητα ήταν από τα πρώτα χαρακτηριστικά των ακόρεστων

εδαφών που μελετήθηκαν εργαστηριακά και συμπεριελήφθησαν στα πρώτα θεωρητικά πλαίσια και ολοκληρωμένα καταστατικά προσομοιώματα. Οι Alonso et al. (1990) έκαναν την παραδοχή πως η συμπίεστικότητα παραμένει αρχικά σταθερή (δείκτης ελαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω μύζησης κ_s) εφόσον η τρέχουσα τιμή της μύζησης δεν ξεπερνά τη μέγιστη τιμή την οποία έχει λάβει στο παρελθόν. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί, η συμπίεστικότητα αυξάνει (δείκτης πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω μύζησης $\lambda_s > \kappa_s$) και οι ογκομετρικές παραμορφώσεις λόγω υδραυλικής φόρτισης γίνονται πλαστικές (Σχ. 14).

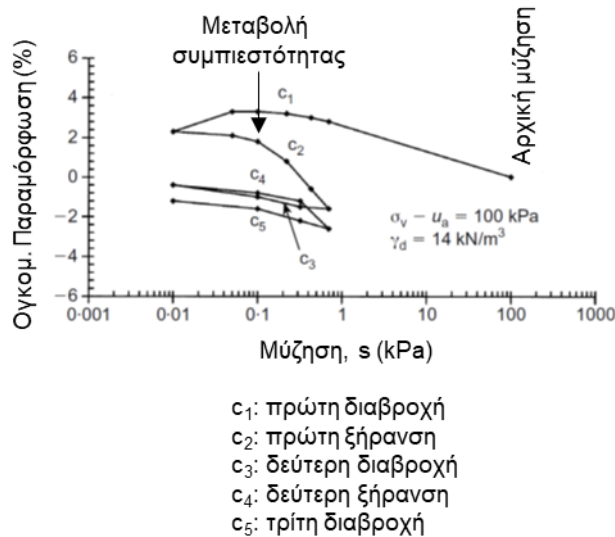


Σχ. 14. Γραμμή συμπίεσης λόγω μύζησης κατά Alonso et al. (1990) με ελαστικό και πλαστικό δείκτη συμπίεσης κ_s και λ_s , αντίστοιχα.

Fig. 14. Suction induced compression line in Alonso et al. (1990); elastic and plastic coefficients of compressibility with suction, κ_s and λ_s , respectively.

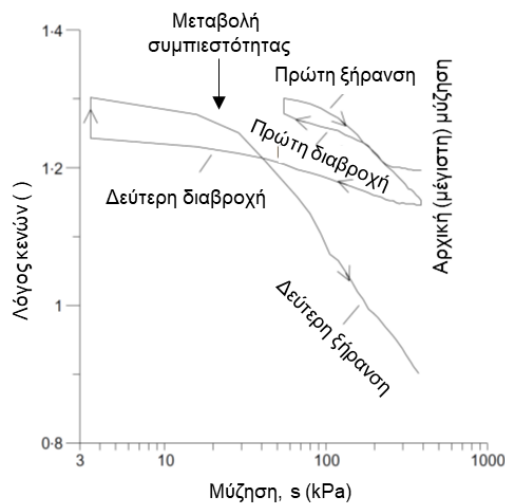
Εκ πρώτης όψεως, η παραδοχή αυτή φαίνεται εύλογη. Για παράδειγμα, οι καμπύλες του Σχ. 15 και 16 δείχνουν το πώς μεταβάλλεται ο όγκος συμπυκνωμένης αργίλου Boom και συμπυκνωμένου μίγματος μπεντονίτη-καολίνη, αντίστοιχα, με την κυκλική μεταβολή της μύζησης. Παρατηρούμε ότι η αλλαγή της συμπίεστικότητας φαίνεται να πραγματοποιείται σε τιμές μύζησης μικρότερες από τη μέγιστη στην οποία έχουν υποβληθεί τα δοκίμια. Στην περίπτωση της αργίλου Boom, η μύζηση μειώθηκε από την αρχική της τιμή περί τα 100 MPa στο μηδέν (διαδρομή C1) και εν συνεχεία αυξήθηκε μέχρι τα 1000 kPa (διαδρομή C2), ωστόσο η συμπίεστικότητα του δοκιμίου φαίνεται να αυξάνεται μετά τα 100 kPa, γεγονός που δε συμφωνεί με τη θεωρητική προσέγγιση των

Alonso et al. (1990). Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγει η μελέτη των εργαστηριακών δεδομένων για το μίγμα μπεντονίτη-καολίνη στο Σχ. 16 καθώς και για πλήθος άλλων ακόρεστων εδαφών.



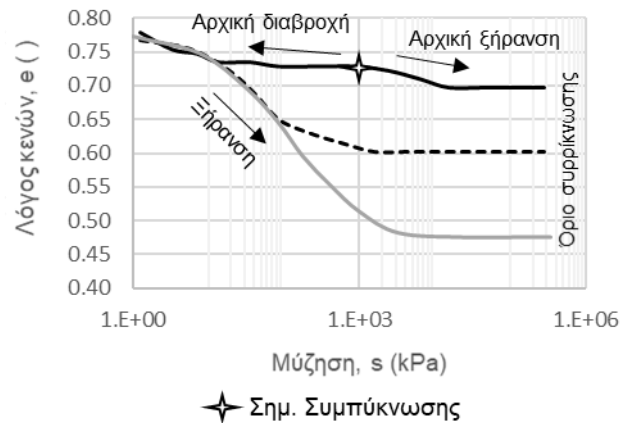
Σχ. 15. Κυκλική διαβροχή και ξήρανση αργίλου Boom (εργαστηριακά δεδομένα από τους Alonso et al., 1995).

Fig. 15. Wetting-drying cycles on Boom clay (experimental data after Alonso et al., 1995).



Σχ. 16. Κυκλική διαβροχή και ξήρανση συμπυκνωμένου μίγματος μπεντονίτη-καολίνη (εργαστηριακά δεδομένα από τον Sharma, 1998).

Fig. 16. Wetting-drying cycle on compacted bentonite-kaolin (experimental data after Sharma, 1998).



Σχ. 17. Μεταβολή του λόγου κενών κατά την ανεμπόδιστη ξήρανση και διαβροχή συμπυκνωμένου Εδάφους Α (Jotisankasa, 2005).

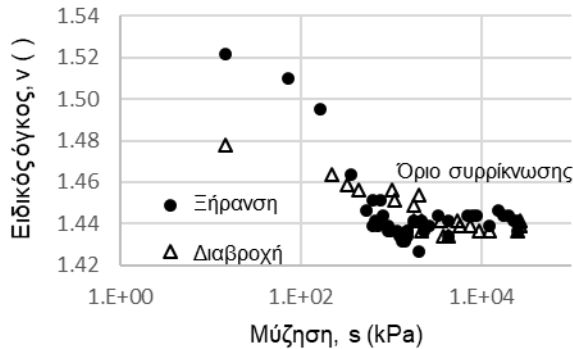
Fig. 17. Changes in void ratio measured during unconfined drying and wetting of compacted Soil A (after Jotisankasa, 2005).

Επιπλέον, εργαστηριακές μετρήσεις της μεταβολής του όγκου (ή αντίστοιχα του λόγου κενών ή του ειδικού όγκου) λόγω μεταβολής της μύζησης υπό μηδενική μηχανική φόρτιση (ανεμπόδιστη ξήρανση και διαβροχή αφόρτιστων δοκιμίων) δείχνουν διαφορετική εικόνα σε σχέση με την υπόθεση των Alonso et al. (1990). Για παράδειγμα, ο λόγος κενών και ο ειδικός όγκος του εδάφους των Σχ. 17 και 18, φαίνεται να λαμβάνει μια οριακή τιμή ανεξάρτητα από το εάν πρόκειται για δοκίμιο συμπυκνωμένου ή αναζυμωμένου εδάφους. Επομένως, η γραμμή συμπίεσης λόγω μύζησης είναι μη-γραμμική στο επίπεδο $\log s - v$, και ο ειδικός όγκος τείνει προς μία οριακή τιμή καθώς ο βαθμός κορεσμού πλησιάζει την παραμένουσα τιμή του.

Εάν η χαρακτηριστική καμπύλη του Σχ. 19, ορισμένη στο χώρο $S_r - \log s - v$, προβληθεί στο επίπεδο $\log s - v$, γίνεται φανερό πως, πρώτον, η γραμμή συμπίεσης δεν μπορεί να είναι γραμμική, διαφορετικά δεν νοείται συμβατότητα με τη χαρακτηριστική καμπύλη και, δεύτερον, πως συνδέεται με το βαθμό κορεσμού. Οι Tsiamprousi et al. (2013b) πρότειναν την παρακάτω σχέση μεταξύ του βαθμού κορεσμού, S_r , και του δείκτη συμπίεστικότητας λόγω μύζησης:

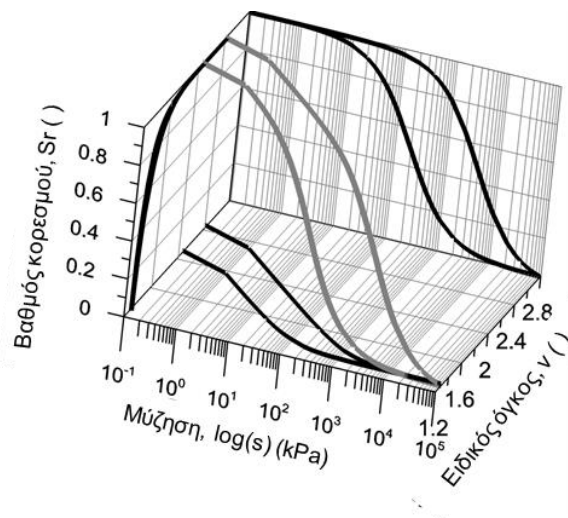
$$\kappa_s = \chi \cdot (S_r)^\omega \quad (3)$$

όπου χ και ω είναι παράμετροι που ελέγχουν τον ρυθμό μεταβολής του δείκτη συμπιεστότητας ($\omega \geq 0$). Όταν $\omega = 0$, ο δείκτης συμπιεστότητας είναι ανεξάρτητος του βαθμού κορεσμού και ίσος με χ .



Σχ. 18. Μεταβολή του ειδικού όγκου κατά την ανεμπόδιστη ξήρανση και διαβροχή αναζυμωμένου Εδάφους Α (Cunningham, 2000)

Fig. 18. Changes in specific volume measured during unconfined drying and wetting of reconstituted Soil A (after Cunningham, 2000)



Σχ. 19. Χαρακτηριστική καμπύλη στο χώρο $S_r - S_r - \log s - v$ και προβολή στο επίπεδο $\log s - v$.

Fig. 19. SWRC in the $S_r - S_r - \log s - v$ and projection on the $\log s - v$ plane.

5.4 Διαπερατότητα

Με τον αποκορεσμό, η διαπερατότητα των ακόρεστων εδαφών ως προς το νερό μειώνεται σημαντικά σε σχέση με την τιμή που λαμβάνει σε συνθήκες πλήρους κορεσμού. Η μείωση αυτή

οφείλεται στη μείωση της ποσότητας του νερού στους πόρους αλλά και στην αύξηση του μήκους των διαδρομών που μπορεί να ακολουθήσει το νερό κατά τη ροή του ή και την ολική τους εξάλειψη, καθώς η ροή του νερού περιορίζεται μόνο στους πόρους εκείνους που είναι γεμάτοι με νερό και είναι αδύνατη μέσω πόρων γεμάτων με αέρα.

Οι Fredlund & Raharjo (1993) παρατήρησαν πως η μεταβολή της διαπερατότητας σε νερό με τον αποκορεσμό των εδαφών μπορεί να εκφραστεί είτε ως συνάρτηση της μύζησης είτε ως συνάρτηση του βαθμού κορεσμού. Ωστόσο, η σχέση διαπερατότητας-μύζησης παρουσιάζει υστέρηση, ενώ η σχέση διαπερατότητας-βαθμού κορεσμού ορίζεται μονοσήμαντα.

Η πλέον διαδεδομένη εξίσωση υπολογισμού της διαπερατότητας από το βαθμό κορεσμού προέρχεται από την δημοσίευση του van Genuchten (1980), η οποία με τη σειρά της βασίστηκε στις προτάσεις του Mualem (1976), και έχει ως εξής:

$$k = k_{sat} \cdot \theta^{1/2} \cdot \left[1 - (1 - \theta^{1/m})^m \right]^2 \quad (4)$$

όπου k_{sat} είναι η διαπερατότητα του πλήρως κορεσμένου εδάφους, m είναι παράμετρος του προσομοιώματος και:

$$\theta = \frac{S_r - S_{r0}}{1 - S_{r0}} \quad (5)$$

όπου S_{r0} ο παραμένων βαθμός κορεσμού.

5.5 Υδραυλική ροή και υδρομηχανική σύζευξη

Η θεωρία του Biot (1941) μπορεί να επεκταθεί στα μη κορεσμένα εδάφη. Οι Tsiamprousi et al. (2017a) πρότειναν τις εξής εξισώσεις για την καταστατική σχέση του εδαφικού σκελετού:

$$\varepsilon_x = \frac{(\sigma_x - u_a)}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_y + \sigma_z - 2u_a) + \left(\frac{u_a - u_w}{H} \right),$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (6)$$

και αντίστοιχα για τις παραμορφώσεις $\varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ (όπου $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}$ είναι οι γνωστές τάσεις, u_w η πίεση του νερού και u_a η πίεση του αέρα και E, G και μ το μέτρο ελαστικότητας του Young, το μέτρο διάτμησης και ο λόγος του Poisson), και της φάσης του νερού:

$$\theta_w = \Omega \varepsilon_{vol} + \omega(u_a - u_w) \quad (7)$$

όπου θ_w είναι το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας και ε_{vol} η ογκομετρική παραμόρφωση. Οι

παράμετροι H , Ω και ω στις παραπάνω εξισώσεις συναντώνται μόνο στα μη κορεσμένα εδάφη και δείχνουν αντίστοιχα, την επίδραση της μύζησης στην εδαφική παραμόρφωση, της ογκομετρικής παραμόρφωσης στο ποσοστό υγρασίας και της μύζησης στο ποσοστό υγρασίας.

Οι Tsiamprousi et al. (2017a) απέδειξαν πως οι παράμετροι H , Ω και ω συνδέονται με το εκάστοτε καταστατικό προσομοίωμα και προσομοίωμα χαρακτηριστικής καμπύλης μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$\begin{aligned} H &= -\frac{3}{\frac{1}{v_0} \frac{\partial v}{\partial s}} \\ \Omega &= -S_r - e \frac{\partial S_r}{\partial v} \\ \omega &= n \cdot \frac{\partial S_r}{\partial s} \end{aligned} \quad (8)$$

όπου v είναι ο ειδικός όγκος, e ο λόγος κενών, n το πορώδες και v_0 ο αρχικός ειδικός όγκος (πριν την επιβολή της αλλαγής της τιμής της μύζησης).

Η υδρομηχανική σύζευξη των Εξ. 6 και 7 απαιτεί την επίλυσή τους με αριθμητικές μεθόδους, όπως π.χ. η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, όπου οι εξισώσεις λαμβάνουν την εξής, απλοποιημένη, μορφή:

$$\begin{bmatrix} K & X_1 \\ \Omega X_2 & Y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R \\ F \end{Bmatrix} \quad (9)$$

όπου D και P είναι τα ολικά διανύσματα μεταβολής των κομβικών μετατοπίσεων και πιέσεων νερού των πόρων, αντίστοιχα, και K είναι το Συνολικό Μητρώο Στιβαρότητας. Ο πίνακας Y περιέχει την εδαφική διαπερατότητα καθώς και την παράμετρο ω . Οι πίνακες X_1 και X_2 είναι οι πίνακες σύζευξης και συνδέουν τις πιέσεις του νερού των πόρων P με το διάνυσμα των κομβικών αντιδράσεων R και τις μετατοπίσεις D με το διάνυσμα της ροής F . Η χαρακτηριστική καμπύλη επηρεάζει τους όρους X_1 , Ω και Y της Εξ. 9.

Ο όρος X_1 περιλαμβάνει την παράμετρο H και επομένως εξαρτάται από την χαρακτηριστική καμπύλη στο βαθμό που η εδαφική συμπιεστότητα εξαρτάται από το βαθμό κορεσμού. Η επιβολή ενός εξωτερικού φορτίου σε ορισμένο χρόνο Δt επηρεάζει τον όρο R και, μέσω της πρώτης Εξ. 9, μοιράζεται μεταξύ των μετατοπίσεων D και των πιέσεων του νερού των πόρων P . Η εξάρτηση του όρου X_1 από τον βαθμό κορεσμού σημαίνει πως η διανομή του φορτίου μεταξύ του εδαφικού σκελετού, μέσω των μετατοπίσεων, και του νερού των πόρων επηρεάζεται από την παρουσία αέρα σε

συνθήκες μερικού κορεσμού. Η συνεισφορά του νερού στην ανάληψη φορτίου μειώνεται συνεχώς με τον αποκορεσμό και γίνεται εν τέλει πρακτικά μηδενική, οπότε και το φορτίο μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στον εδαφικό σκελετό.

Επιπλέον, ο όρος X_1 συνδέει μεταβολές της μύζησης με μετατοπίσεις μέσω της πρώτης Εξ. 9, καθώς σε περίπτωση μεταβολής της μύζησης προκαλούνται κομβικές αντιδράσεις και μετατοπίσεις. Η εξάρτηση του όρου από τον βαθμό κορεσμού δηλώνει πως η εδαφική ακαμψία αυξάνεται σταδιακά με τον αποκορεσμό, και όταν το νερό δεν υπάρχει πλέον σε ελεύθερη μορφή στους πόρους, μεταβολή της μύζησης των μηνίσκων δεν προκαλεί επιπλέον εδαφικές παραμορφώσεις.

Μεταβολή της μύζησης προκαλεί ροή του νερού που υπάρχει σε ελεύθερη μορφή στους πόρους, μέσω της δεύτερης Εξ. 9 και του όρου Y . Καθώς η εδαφική διαπερατότητα και η παράμετρος ω , που περιέχονται στον όρο Y , εξαρτώνται από το βαθμό κορεσμού, έτσι και η ροή εξαρτάται από τη χαρακτηριστική καμπύλη. Ενώ σε συνθήκες πλήρους κορεσμού το νερό μπορεί να ρέει στο ρυθμό που του επιτρέπει η διαπερατότητα του κορεσμένου εδάφους, η ροή του μειώνεται με τον αποκορεσμό και εν τέλει σταματά όταν το νερό δεν υπάρχει πλέον σε ελεύθερη μορφή στους πόρους.

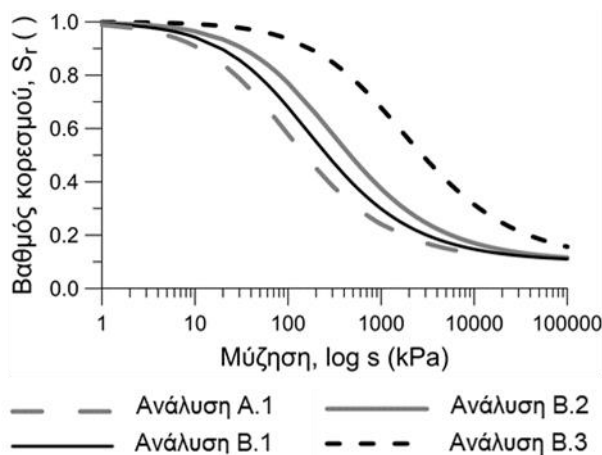
Ροή νερού μπορεί επίσης να προκληθεί λόγω υδρομηχανικής σύζευξης, όταν το έδαφος παραμορφώνεται και περιγράφεται μέσω του όρου ΩX_2 και της δεύτερης Εξ. 9. Η ποσότητα του νερού που δύναται να ρεύσει εξαρτάται από τη χαρακτηριστική καμπύλη εφόσον η παράμετρος Ω είναι συνάρτηση του βαθμού κορεσμού, και είναι ίση με την ογκομετρική παραμόρφωση σε συνθήκες πλήρους κορεσμού και μηδενική όταν το νερό δεν υπάρχει πλέον σε ελεύθερη μορφή στους πόρους.

6. Παράδειγμα επίδρασης σε πρόβλημα συνοριακών συνθηκών

Η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης και του προσομοιώματος που χρησιμοποιείται για την προσομοίωσή της παρουσιάζεται παρακάτω με τη βοήθεια παραδείγματος πρανούς σε μη κορεσμένη αργιλική ιλύ. Συγκεκριμένα, οι μετατοπίσεις του πρανούς με το χρόνο, υπό συνθήκες εποχιακής μεταβολής της μύζησης λόγω βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής,

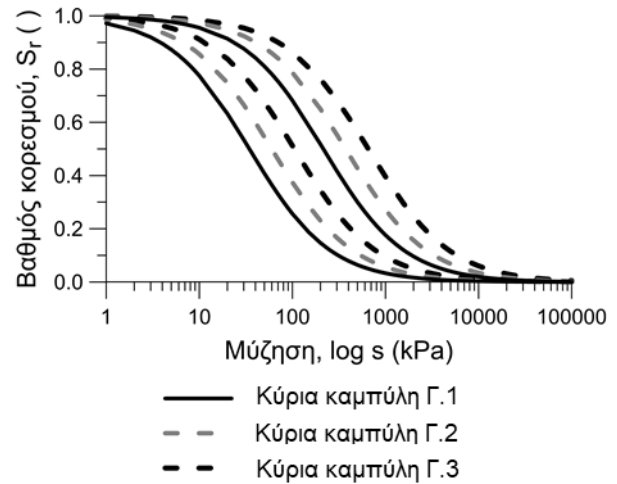
εξετάζονται σε οκτώ αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το ICFEP (Imperial College Finite Element Program, Potts & Zdravkovic, 1999) και διαφοροποιούνται μόνο προς την χαρακτηριστική καμπύλη. Το πρόβλημα παρουσιάζει ενδιαφέρον διότι η εποχιακή εναλλαγή βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής έχει συνδυαστεί με εναλλαγή διόγκωσης και συρρίκνωσης των πρανών (O'Brien et al., 2004) και προβλήματα λειτουργικότητας (O'Brien, 2013; Tsiamprousi et al., 2016) και προοδευτικής αστοχίας τους (Konavecic et al., 2001).

Η πρώτη ανάλυση (Ανάλυση Α.1) εκτελέστηκε με χρήση του προσομοιώματος του van Genuchten (1980). Οι παράμετροι της Εξ. 1 έλαβαν τις τιμές του Πιν. 1. Η αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη παρουσιάζεται στο Σχ. 20. Οι υπόλοιπες καμπύλες του σχήματος αντιστοιχούν στις Αναλύσεις Β.1, Β.2 και Β.3 οι οποίες εκτελέστηκαν με το προσομοίωμα των Gallipoli et al. (2003), για $\psi = 1, 2$ και 5 , αντίστοιχα. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του Σχ. 21 υιοθετήθηκαν στις Αναλύσεις Γ.1, Γ.2 και Γ.3 και παρήχθησαν με το προσομοίωμα των Tsiamprousi et al. (2013b) για $\psi = 1, 2$ και 3 . Η ανάλυση Α.2 πραγματοποιήθηκε με $\psi = 0$ για σύγκριση. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων του προσομοιώματος συνοψίζονται επίσης στον Πιν. 1.



Σχ. 20. Χαρακτηριστικές καμπύλες Αναλύσεων Α.1, Β.1, Β.2 και Β.3

Fig. 20. Characteristic curves in Analyses A.1, B.1, B.2 and B.3



Σχ. 21. Χαρακτηριστικές καμπύλες Αναλύσεων Α.2, Γ.1, Γ.2 και Γ.3

Fig. 21. Characteristic curves in Analyses A.2, Γ.1, Γ.2 and Γ.3

Πιν. 1. Τιμές παραμέτρων χαρακτηριστικών καμπυλών που υιοθετήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις.

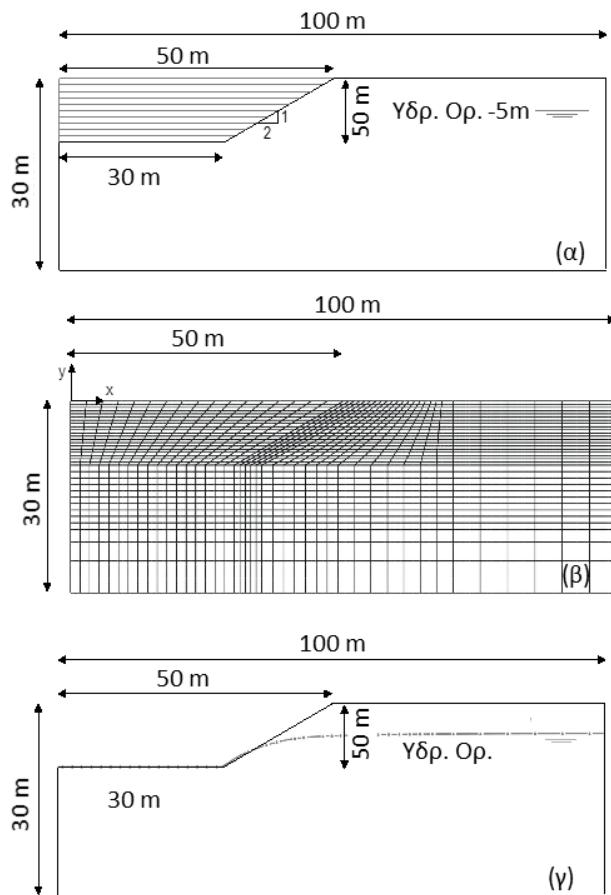
Tab. 1. Values of parameters for SWRC models employed in the numerical analyses.

Ανά- λυση	α (1/kPa)	n (-)	m (-)	$S_{r,0}$ (%)	ψ (-)
A.1	0.015	0.95	0.7	10	-
B.1	0.015	0.95	0.7	10	1
B.2	0.015	0.95	0.7	10	2
B.3	0.015	0.95	0.7	10	5
	α_d (-)	α_w (-)	s_{air} (kPa)	s_0 (kPa)	ψ (-)
A.2	0.008	0.05	0	100000	0
Γ.1	0.008	0.05	0	100000	1
Γ.2	0.008	0.05	0	100000	2
Γ.3	0.008	0.05	0	100000	3

Η γεωμετρία του πρανούς, το οποίο προέρχεται από εκσκαφή, παρουσιάζεται στο Σχ. 22α και στο Σχ. 22β παρουσιάζεται ο κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις.

Η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώθηκε με το καταστατικό προσομοίωμα των Georgiadis et al. (2005), με τις βελτιώσεις και τις τιμές των παραμέτρων που προτάθηκαν για τη συγκεκριμένη αργιλική ιλύ από τους Tsiamprousi et al. (2013a). Η τιμή της διαπερατότητας σε πλήρως κορεσμένες συνθήκες ήταν 10^{-8} m/s. Οι αρχικές τάσεις του εδάφους αντιστοιχούν σε ειδικό βάρος 19.1 kN/m³ και συντελεστή ωθήσεων γαιών ηρεμίας,

$K_0 = 1$. Πριν από την εκσκαφή, οι πιέσεις του νερού των πόρων ήταν υδροστατικές και ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρισκόταν σε βάθος 5 m. Η θέση του μετά το πέρας της εκσκαφής παρουσιάζεται στο Σχ. 22γ.



Σχ. 22. (α) Γεωμετρία εκσκαφής, (β) κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων, (γ) θέση υδροφόρου ορίζοντα στο τέλος της εκσκαφής.

Fig. 22. (a) Excavation geometry; (b) finite element mesh; (c) position of the groundwater table at the end of the excavation.

Κατά την εκσκαφή, η συνοριακή συνθήκη σταθερής πίεσης επιβλήθηκε στο δεξί κατακόρυφο όριο του καννάβου και τα υπόλοιπα όρια θεωρήθηκαν αδιαπέρατα, με εξαίρεση το μέτωπο και τον πυθμένα της εκσκαφής όπου επιβλήθηκε η διπλή συνοριακή συνθήκη των Smith et al. (2008), η οποία επιτρέπει την αυτόματη εναλλαγή μεταξύ μηδενικών πιέσεων του νερού των πόρων και μηδενικής ροής, όπως εξηγείται παρακάτω. Μετά το τέλος της εκσκαφής, οι συνοριακές συνθήκες εξατμισοδιαπνοής των Nyambayo & Potts

(2010) και βροχόπτωσης των Smith et al. (2008) επιβλήθηκαν στο άνω όριο του καννάβου και στο πρηνές, σε μηνιαία βάση και με συνολική διάρκεια πέντε ετών, με τους μηνιαίους ρυθμούς δυναμικής εξατμισοδιαπνοής και βροχόπτωσης που παρουσιάστηκαν από τους Nyambayo & Potts (2010).

Η συνοριακή συνθήκη εξατμισοδιαπνοής των Nyambayo & Potts (2010) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε τύπο βλάστησης, αρκεί να ορισθούν το βάθος του ριζικού συστήματος, ο ρυθμός δυναμικής εξατμισοδιαπνοής και οι τιμές της μύζησης που αντιστοιχούν σε αναερόβιες συνθήκες και συνθήκες υπό τις οποίες η πραγματική εξατμισοδιαπνοή γίνεται μέγιστη κατά τη θεώρηση των Feddes et al. (1978). Ο αλγόριθμος μετατρέπει πρώτα τις τιμές δυναμικής εξατμισοδιαπνοής σε πραγματική εξατμισοδιαπνοή, και στη συνέχεια υπολογίζει τον ρυθμό υδραυλικής ροής για κάθε κόμβο του καννάβου όπου επιβάλλεται η συνθήκη και βρίσκεται εντός του βάθους των ριζών.

Η συνοριακή συνθήκη βροχόπτωσης των Smith et al. (2008) είναι κατ' ουσίαν μία διπλή συνοριακή συνθήκη, η οποία επιτρέπει την εναλλαγή μεταξύ των ακόλουθων συνοριακών συνθηκών: σταθερής πίεσης του νερού των πόρων, p_{fb} , και ορισμένου ρυθμού ροής, q_{nb} . Στην αρχή κάθε υπολογιστικού βήματος, ο αλγόριθμος συγκρίνει την πίεση του νερού των πόρων σε κάθε κόμβο όπου επιβάλλεται η συνθήκη με την ορισμένη τιμή p_{fb} . Εάν η τρέχουσα πίεση είναι μικρότερη από p_{fb} , επιβάλλεται η συνοριακή συνθήκη ορισμένου ρυθμού ροής, ενώ εάν είναι μεγαλύτερη από p_{fb} , επιβάλλεται η συνθήκη σταθερής πίεσης και μόνο τμήμα της ορισμένης βροχόπτωσης διηθείται στον κάνναβο, αποφεύγοντας έτσι τον υπολογισμό μη ρεαλιστικών τιμών διήθησης και πιέσεων των πόρων. Πέραν της προσομοίωσης βροχόπτωσης, η συνοριακή συνθήκη με $p_{fb} = 0$ και $q_{nb} = 0$ είναι χρήσιμη για την προσομοίωση των υδραυλικών συνθηκών κατά την εκσκαφή σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας. Εάν η εκσκαφή πραγματοποιείται σε αστράγγιστες συνθήκες αλλά πραγματοποιείται ανάλυση συζευγμένης στερεοποίησης, αρχικά το όριο της εκσκαφής πρέπει να προσομοιωθεί ως αδιαπέρατο. Εάν επιβληθεί μηδενική πίεση νερού, το προσομοίωμα λανθασμένα υπολογίζει ροή νερού από το όριο της εκσκαφής προς το έδαφος, όπου λόγω της εκσκαφής οι πιέσεις νερού μπορεί να έχουν πάρει αρνητικές τιμές.

Ωστόσο, οι πιέσεις νερού αυξάνονται με το χρόνο και εάν η συνοριακή συνθήκη δεν αλλάξει σε μηδενική πίεση νερού, το προσομοίωμα λανθασμένα υπολογίζει μεγάλες θετικές τιμές πίεσης νερού. Η αλλαγή από τη μία συνθήκη στην άλλη απαιτείται να γίνει σε διαφορετικά στάδια της ανάλυσης για κάθε κόμβο και, επομένως, η αυτόματη αλλαγή που προσφέρει η συνοριακή συνθήκη των Smith et al. (2008) είναι πολύ χρήσιμη.

Στο Σχ. 23 συγκρίνονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις της κορυφής του πρανούς για τις Αναλύσεις Α.1 και Β.1, 2 και 3. Θετικές οριζόντιες και αρνητικές κατακόρυφες μετατοπίσεις αντιστοιχούν σε εδαφική συρρίκνωση. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις των Αναλύσεων Α.1, Β.1 και 2 αυξήθηκαν σχεδόν μονοτονικά με το χρόνο, γεγονός που σημαίνει πως η συρρίκνωση του εδάφους κατά τους θερινούς, ξηρούς μήνες δεν ακολουθήθηκε, όπως είναι αναμενόμενο, από διόγκωση κατά τους χειμερινούς μήνες. Η εναλλαγή από συρρίκνωση σε διόγκωση παρατηρήθηκε στις οριζόντιες μετατοπίσεις της κορυφής μόνο στην Ανάλυση Β.3, ωστόσο η θερινή συρρίκνωση ήταν μεγαλύτερη από τη χειμερινή διόγκωση με αποτέλεσμα τη συσσώρευση θετικών μετατοπίσεων (συρρίκνωση), που έφτασαν τα 5 cm στο τέλος των πέντε χρόνων της ανάλυσης.

Η εναλλαγή συρρίκνωσης και διόγκωσης ήταν εμφανής στις κατακόρυφες μετατοπίσεις της κορυφής, σε όλες τις αναλύσεις, με τη θερινή συρρίκνωση να είναι κάθε χρόνο μεγαλύτερη από τη χειμερινή διόγκωση, ώστε στην περίπτωση της Ανάλυσης Β.3 ($\psi=5.0$) να συσσωρευθούν περί τα 12 cm συρρίκνωσης στο τέλος της ανάλυσης.

Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν για τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις στη μέση του πρανούς (Σχ. 24). Οι οριζόντιες μετατοπίσεις του Σχ. 24 είναι όμοιες σε μέγεθος με αυτές του Σχ. 23α, ωστόσο οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στη μέση του πρανούς ήταν μικρότερες απ' ό,τι στην κορυφή σε όλες τις αναλύσεις.

Οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρατηρήθηκαν συστηματικά στην περίπτωση της Ανάλυσης Β.3, όπου υιοθετήθηκε η μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου ψ . Για αυξανόμενες τιμές της παραμέτρου ψ , η ταπείνωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα υπό τη δράση των επιβαλλόμενων συνοριακών συνθηκών ήταν μεγαλύτερη, όπως φαίνεται στο Σχ. 25 που αντιστοιχεί στο τέλος Αυγούστου του τελευταίου

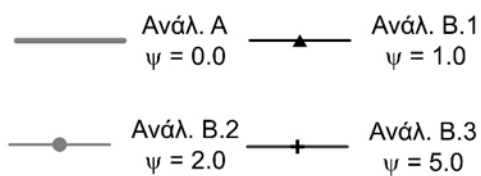
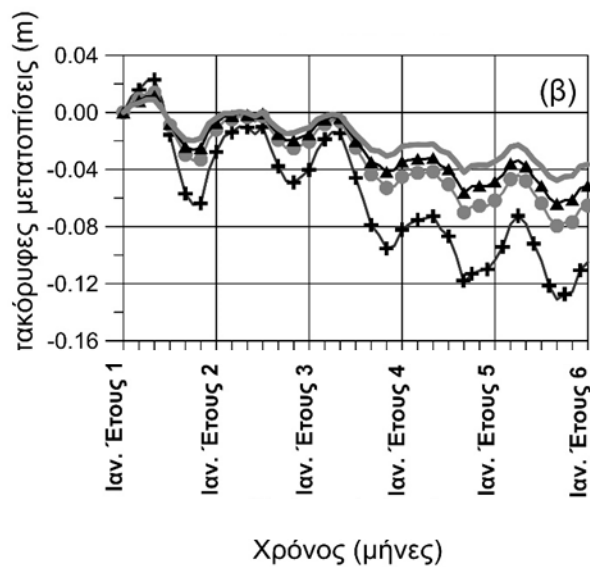
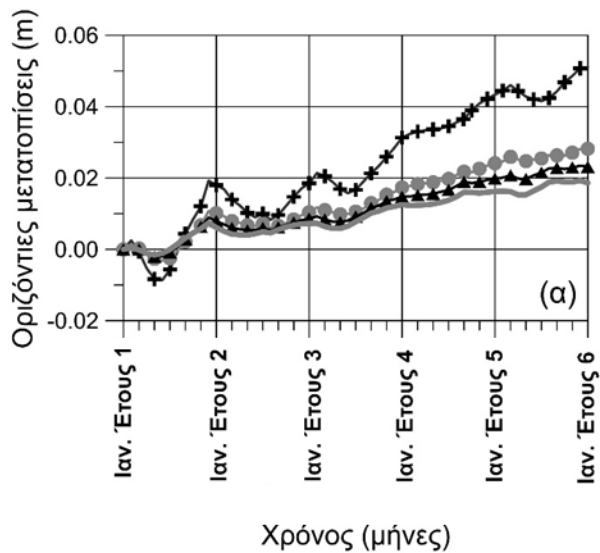
έτους της ανάλυσης, δικαιολογώντας τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Η θέση του υπόγειου ορίζοντα σχετίζεται με την παράμετρο ψ λόγω του σχήματος της χαρακτηριστικής καμπύλης (Σχ. 20). Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ψ , τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κορεσμού που αντιστοιχεί σε δεδομένη τιμή μύζησης. Επομένως, και η ροή του νερού (εισροή και εκροή) είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα να είναι μεγαλύτερες και οι εδαφικές παραμορφώσεις από την υδρομηχανική σύζευξη.

Τα Σχ. 26 και 27 παρουσιάζουν τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις στην κορυφή και στη μέση του πρανούς, αντίστοιχα, για τις Αναλύσεις Α.2 και Γ.1, 2 και 3.

Η επιρροή της παραμέτρου ψ στην περίπτωση των Αναλύσεων Γ.1, 2 και 3 (με υδραυλική υστέρηση) ήταν παρόμοια με την περίπτωση των Αναλύσεων Β.1, 2 και 3 (χωρίς υδραυλική υστέρηση). Παρότι οι μετατοπίσεις ήταν μικρότερες σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν με τα προσομοιώματα των van Genuchten (1980) και Gallipoli et al. (2003), η εναλλαγή συρρίκνωσης και διόγκωσης ήταν περισσότερο εμφανής όταν η υδραυλική υστέρηση ελήφθη υπόψη, ακόμη και εν απουσία της επίδρασης του λόγου κενών ($\psi=0$).

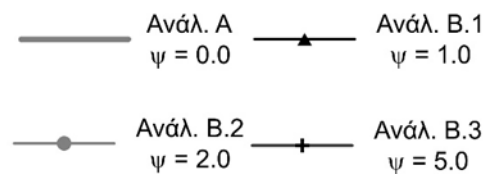
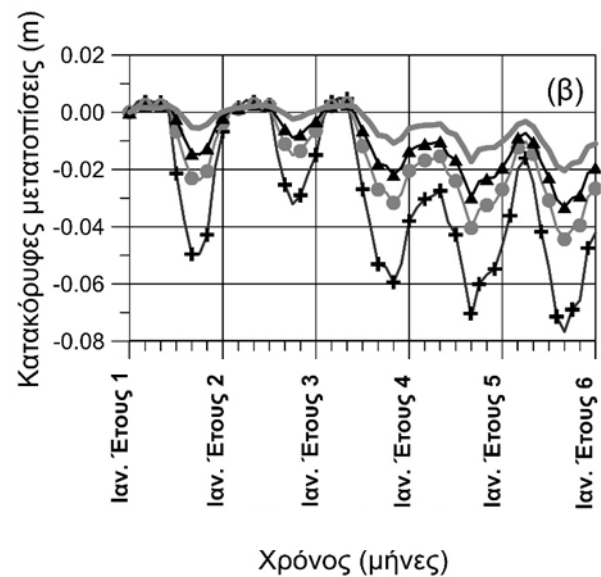
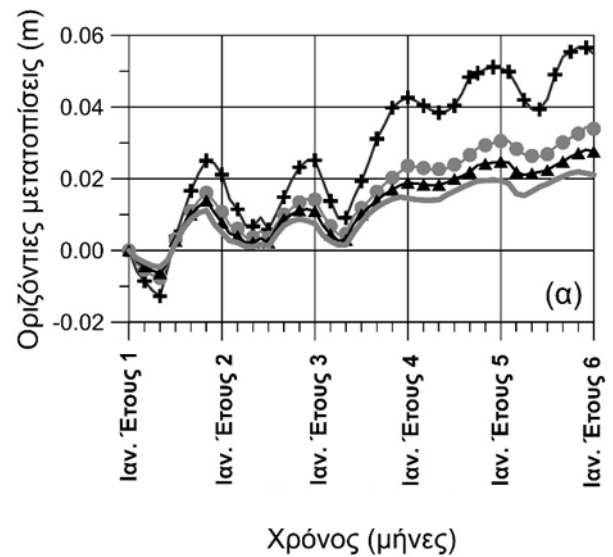
Αν και οι μετατοπίσεις στις Αναλύσεις Γ.1, 2 και 3 είναι μικρές στα πέντε χρόνια που εξετάστηκαν, η συσσώρευσή τους με το χρόνο μπορεί να είναι υπολογίσιμη. Για να εξεταστεί αυτό το ενδεχόμενο, η Ανάλυση Γ.1 συνεχίστηκε για 15 χρόνια. Η συσσώρευση των μετατοπίσεων στο Σχ. 28 με το χρόνο είναι εμφανής. Αξίζει να σημειωθεί πως η Ανάλυση Γ.1 αντιστοιχεί σε μικρή τιμή της παραμέτρου ψ . Επιπλέον, η ιλύς του παραδείγματος δεν έχει ιδιαίτερα μεγάλη παραμορφωσιμότητα κατά τη διαβροχή και ξήρανση. Η συσσώρευση μετατοπίσεων δύναται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε εδάφη με μεγάλη παραμορφωσιμότητα.

Συμπερασματικά, η επιλογή του προσομοιώματος της χαρακτηριστικής καμπύλης επηρέασε σημαντικά τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης. Έτσι, όταν το προσομοίωμα δεν έλαβε υπόψη την υδραυλική υστέρηση, η εποχιακή εναλλαγή διόγκωσης και συρρίκνωσης δεν προσομοιώθηκε επιτυχώς. Επίσης, όταν το προσομοίωμα δεν έλαβε υπόψη την επίδραση του λόγου κενών, οι μετατοπίσεις ήταν αρκετά μικρότερες.



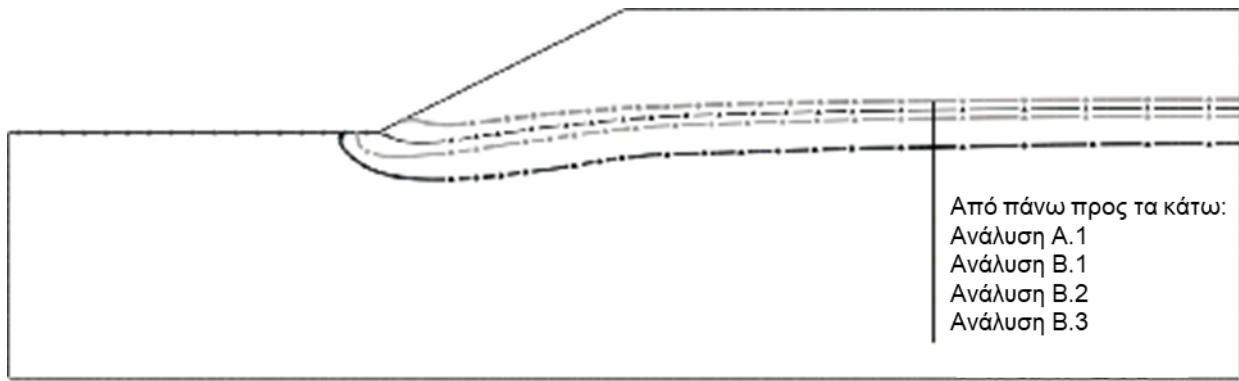
Σχ. 23. (α) Οριζόντιες και (β) κατακόρυφες μετατοπίσεις της κορυφής της εκσκαφής με το χρόνο για τις Αναλύσεις A.1, B.1, B.2 και B.3.

Fig. 23. (a) Horizontal and (b) vertical displacements with time at the crest of the excavation for Analyses A.1, B.1, B.2 and B.3.



Σχ. 24. (α) Οριζόντιες και (β) κατακόρυφες μετατοπίσεις στη μέση της εκσκαφής με το χρόνο για τις Αναλύσεις A.1, B.1, B.2 και B.3.

Fig. 24. (a) Horizontal and (b) vertical displacements with time at mid-slope for Analyses A.1, B.1, B.2 and B.3.



Σχ. 25. Θέση υδροφόρου ορίζοντα στο τέλος Αυγούστου του τελευταίου χρόνου των Αναλύσεων Α.1, Β.1, Β.2 και Β.3.

Fig. 25. Position of the groundwater table at the end of August for the final year of Analyses Α.1, Β.1, Β.2 and Β.3.

7. Συμπεράσματα

Δεδομένης της περιπλοκότητας της υδρομηχανικής συμπεριφοράς και της υδραυλικής ροής σε ακόρεστα εδάφη, η χρήση αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με τον μερικό κορεσμό είναι σε μεγάλο βαθμό αναπόφευκτη, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι συνοριακές συνθήκες είναι επίσης περίπλοκες. Σε αντίθεση με τα καταστατικά προσομοιώματα της μηχανικής συμπεριφοράς μη κορεσμένων εδαφών, η χρησιμότητα των οποίων είναι ευνόητη, η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης έγινε καλύτερα αντιληπτή σχετικά πρόσφατα.

Το παράδειγμα του προβλήματος συνοριακών συνθηκών που παρουσιάστηκε καταδεικνύει πως τα αριθμητικά αποτελέσματα επηρεάζονται εμφανώς από τη χαρακτηριστική καμπύλη και από το εάν η επίδραση του λόγου κενών και η υδραυλική υστέρηση λαμβάνονται υπόψη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η χαρακτηριστική καμπύλη επηρεάζει σχεδόν κάθε έκφανση της μηχανικής και υδραυλικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών συμπεριλαμβανομένης της αντοχής, της συμπίεστότητας, της διαπερατότητας, της υδραυλικής ροής και της υδρομηχανικής σύζευξης.

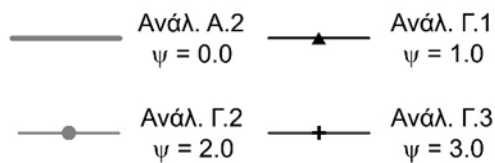
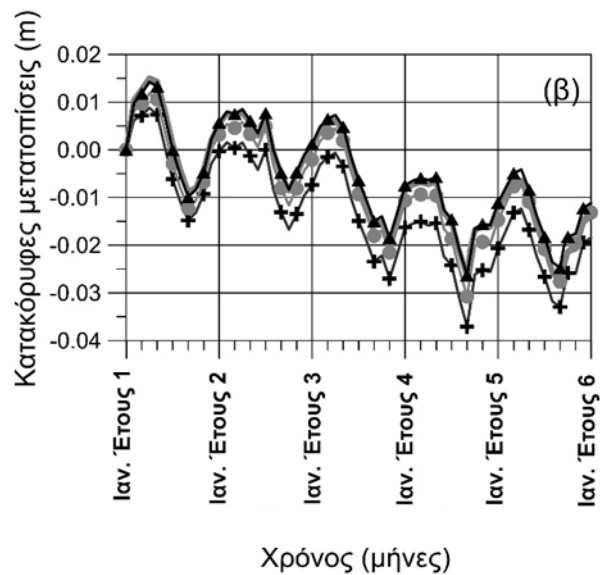
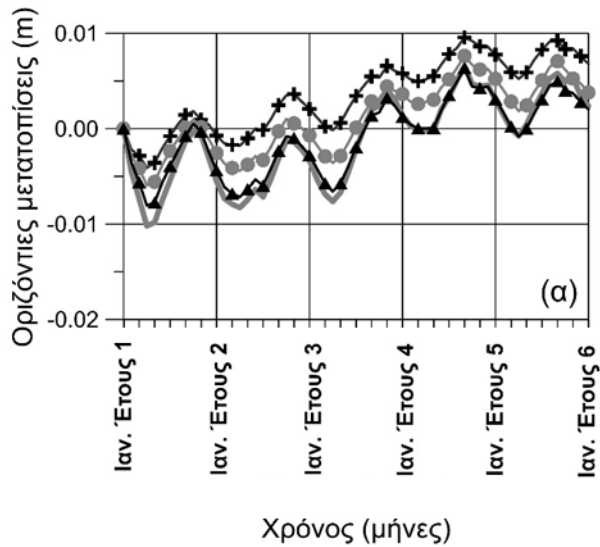
Η εργαστηριακή μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης δεν είναι ιδιαιτέρως περίπλοκη και απαιτητική, ούτε και πολυδάπανη ως προς τις εργαστηριακές εγκαταστάσεις και δυνατότητες που απαιτούνται. Ωστόσο, η ακρίβεια με την οποία καθορίζεται εξαρτάται σημαντικά από την ακρίβεια με την οποία μπορεί να επιβληθεί και

να μετρηθεί η επιθυμητή μύζηση και μάλιστα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης, η ερμηνεία και κατανόηση των εργαστηριακών μετρήσεων δεν είναι πάντα εύκολη, καθώς, πρώτον, η επίδραση του λόγου κενών δεν είναι εύκολα μετρήσιμη και, δεύτερον, η διάκριση μεταξύ κύριων και δευτερευουσών καμπυλών πρέπει να γίνεται με προσοχή.

Τέλος, τα μαθηματικά προσομοιώματα της χαρακτηριστικής καμπύλης διαφέρουν ως προς τις δυνατότητες και την περιπλοκότητά τους. Ειδικά, η προσομοίωση της υδραυλικής υστέρησης αυξάνει σημαντικά τόσο την περιπλοκότητα του προσομοιώματος όσο και το υπολογιστικό κόστος της ανάλυσης στην οποία χρησιμοποιείται. Ωστόσο, δεδομένης της σημασίας της χαρακτηριστικής καμπύλης, η κατά το δυνατόν ακριβής προσομοίωσή της είναι εξαιρετικά χρήσιμη έως και κρίσιμη για ορισμένες κατηγορίες προβλημάτων.

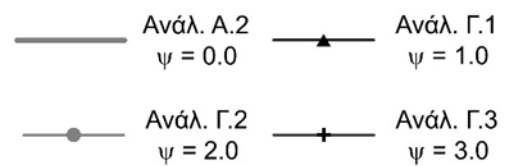
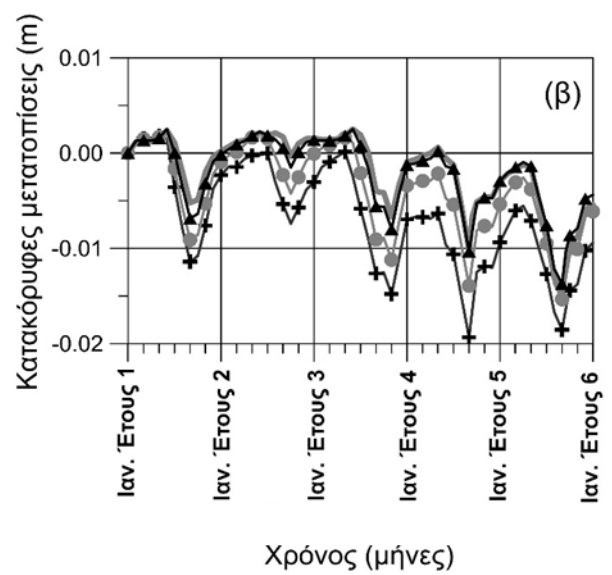
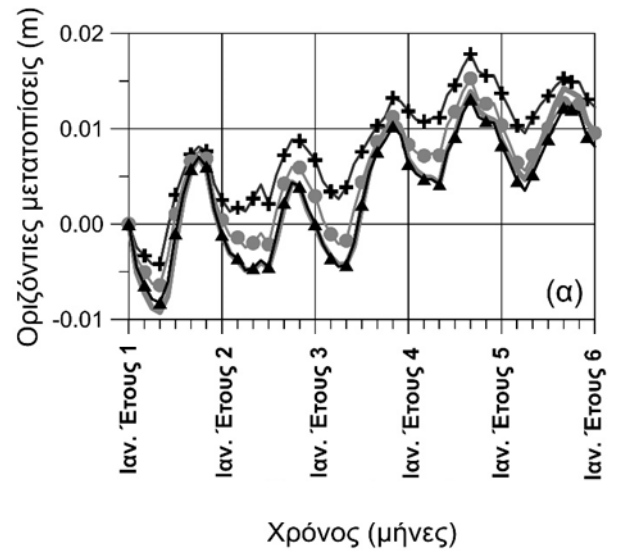
Βιβλιογραφία

- Λουκίδης, Δ., 2019, *Διόγκωση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 83-100.
- Μπαρδάνης, Μ. Ε., Λουκίδης, Δ., 2019, *Μακροχρόνιες μετρήσεις μύζησης στην Ελλάδα και στην Κύπρο*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 155-186.
- Σιταρένιος, Π., 2019, *Καταστατική προσομοίωση μη κορεσμένων εδαφών*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 127-154.



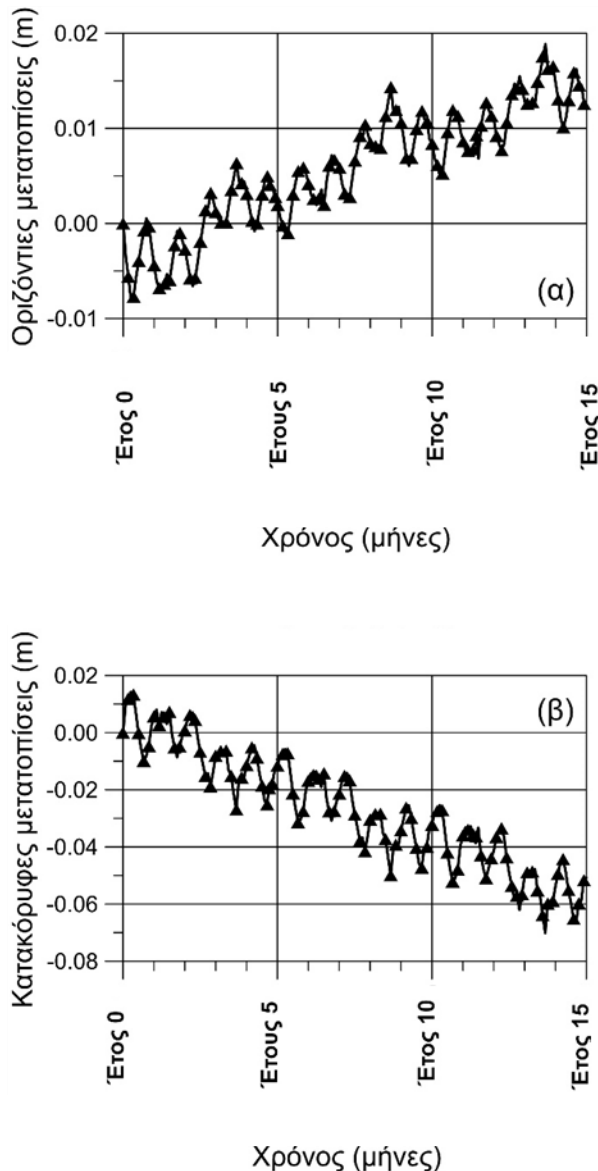
Σχ. 26. (α) Οριζόντιες και (β) κατακόρυφες μετατοπίσεις της κορυφής της εκσκαφής με το χρόνο για τις Αναλύσεις Α.2, Γ.1, Γ.2 και Γ.3.

Fig. 26. (a) Horizontal and (b) vertical displacements with time at the crest of the excavation for Analyses A.2, Γ.1, Γ.2 and Γ.3.



Σχ. 27. (α) Οριζόντιες και (β) κατακόρυφες μετατοπίσεις στη μέση της εκσκαφής με το χρόνο για τις Αναλύσεις Α.2, Γ.1, Γ.2 και Γ.3.

Fig. 27. (a) Horizontal and (b) vertical displacements with time at mid-slope for Analyses A.2, Γ.1, Γ.2 and Γ.3.



Σχ. 28. (α) Οριζόντιες και (β) κατακόρυφες μετατοπίσεις της κορυφής της εκσκαφής με το χρόνο για 15 χρόνια για την Ανάλυση Γ.3.

Fig. 28. (a) Horizontal and (b) vertical displacements with time for 15 years at the crest of the excavation for Analysis Γ.3.

Χατζηγώγος, Ν., 2019, *Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφών*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 67-82.

Χατζηγώγος, Ν., Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2019, *Κατάρρευση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 101-126.

Al Haj, K. M. A., Standing, J. R. (2016). *Soil water retention curves representing two*

tropical clay soils from Sudan.

Geotechnique, Vol: 66(1), Pages: 71-84.

Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A., 1990. *A constitutive model for partially saturated soils.* Géotechnique, Vol: 40(3), Pages: 405-430.

ASTM, 1997, ASTM D 5298-94: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. In Annual book of ASTM standards, vol. 04.09, Soil & Rock (II), D4943-Latest, pp. 157-162. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

Biot, M. A., 1941, *General theory of three dimensional consolidation*, Journal of applied physics, Vol: 12 (2), Pages: 155-164.

Blatz, J. A., Cui, Y.-J., Oldecop, L., 2008, *Vapour Equilibrium and Osmotic Technique for Suction Control*, Geotechnical and Geological Engineering, Vol: 26(6), Pages: 661-673.

Buckingham, E., 1907, Studies on the movement of soil moisture, Bureau of Soils, Bulletin, 38, Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture.

Chandler, R. J., Gutierrez, C. I., 1986, *Filter-paper method of suction measurement*, Géotechnique, Vol: 36(2), Pages: 265-268.

Cunningham, M. R., 2000, *The mechanical behaviour of compacted silty clay*, PhD thesis, Imperial College, University of London, UK.

Darkshanamurthy, V., Fredlund, D., Rahardjo, H., 1984, *Coupled three-dimensional consolidation theory of unsaturated porous media*, Proceedings of the Fifth International Conference on Expansive Soils: Preprints of Papers. Institution of Engineers, Australia.

Delage, P., 2002, *Experimental unsaturated soil mechanics: State-of-art-report*, 3rd International conference on unsaturated soils, Vol: 3, Recife, Brazil.

Delage, P., Howat, M. D., Cui, Y. J., 1998, *The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay.* Engineering Geology, Vol: 50(1-2), Pages: 31-48.

Delage, P., Romero, E., Tarantino, A., 2008, *Recent developments in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils (Keynote Lecture).* 1st Eur.

- Conf. on Unsaturated Soils, Durham, UK, Pages: 33-52.
- Feddes, R. A., Kowalk, P. J., Zaradny, H., 1978, Simulation of field water use and crop yield. New York, John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1993, Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, New York, N.Y., 517 pp.
- Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R., Vaunat, J., 2003a, *An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour*, Géotechnique, Vol: 53 (1), Pages: 123-135.
- Gallipoli, D., Wheeler, S. J., Karstunen, M., 2003b, *Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil*, Géotechnique, Vol: 53 (1), Pages: 105-112.
- Gallipoli, D., Bruno, A. W., D'Onza, F., Mancuso, C., 2015, *A bounding surface hysteretic water retention model for deformable soils*, Géotechnique, Vol: 65(10): Pages: 793-804.
- Gardner, R., 1937, *A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range*. Soil Sci. Vol: 43 (4), Pages: 277-283.
- Gatmiri, B., Delage, P., Cerrolaza, M., 1998, *Udam: A powerful finite element software for the analysis of unsaturated porous media*, Advances in Engineering Software, Vol: 29 (1), Pages: 29-43.
- Georgiadis, K., Potts, D. M. & Zdravkovic, L., 2005, *Three-dimensional constitutive model for partially and fully saturated soils*, International Journal of Geomechanics, Vol: 5 (3), Pages: 244-255.
- Jotisankasa, A., 2005, *Collapse behaviour of compacted silty clay*, PhD Thesis, Imperial College, University of London, UK.
- Kirkham, A., 2015, *Novel experimental technique for the measurement of hydraulic properties of geomaterials*, MEng dissertation, Imperial College London, UK.
- Kovacevic, N., Potts, D.M., Vaughan, P., 2001, *Progressive failure in clay embankments due to seasonal climate changes*, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering AA BALKEMA PUBLISHERS, Vol: 3, Pages: 2127-2130.
- Khalili, N., Habte, M., Zargarbashi, S., 2008, *A fully coupled flow deformation model for cyclic analysis of unsaturated soils including hydraulic and mechanical hysteresis*, Computers and Geotechnics, Vol: 35 (6), Pages: 872-889.
- Leong, E.C., Rahardjo, H., 1997, *Permeability functions for unsaturated soils*, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol: 123(12), Pages: 1118-1126.
- Li, X. S., 2005, *Modelling of hysteresis response for arbitrary wetting/drying paths*, Computers and Geotechnics, Vol: 32, Pages: 133-137.
- Mantikos, V., 2019, Development of novel apparatus for establishing swelling and water retention characteristics of bentonite, PhD Thesis, Imperial College London, UK.
- Marinho, F. A. M., 1994, *Shrinkage behaviour of some plastic soils*, PhD thesis, Imperial College, University of London, UK.
- Monroy, R., 2006, *The influence of load and suction changes on the volumetric behaviour of compacted London clay*, PhD Thesis, Imperial College, University of London, UK.
- Molinero Guerra A., Mokni N., Cui Y.J., Tang A.M., Delage P., Aïmedieu P., Bernier F., Bornert M., 2018, *Experimental characterisations of the hydro-mechanical behaviour of a pellet/powder bentonite mixture*. 7th Int. Conf. Unsat. Soils, HK.
- Mualem, Y., 1976, *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*, Water Resources Research, Vol: 12(3), Pages: 513-522.
- Nyambayo, V. P., Potts, D. M., 2010, *Numerical simulation of evapotranspiration using a root water uptake model*, Computers and Geotechnics, Vol: 37, Pages: 175-186.
- O'Brien, F. E. M., 1948, *The Control of Humidity by Saturated Salt Solutions*, Journal of Scientific Instruments, Vol: 25(3), Pages: 73-76.
- O'Brien, A. S., Ellis, E. A., Russell, D., 2004, *Old railway embankment clay fill: Laboratory experiments, numerical modelling and field behaviour*, Proceedings of the Advances in Geotechnical Engineering, The Skempton Conference, Thomas Telford, London, Pages: 911-921.

- Pedroso, D. M. & Williams, D. J., 2010, *A novel approach for modelling soil water characteristic curves with hysteresis*, Computers and Geotechnics, Vol: 37 (3), Pages: 374-380.
- Potts, D. M., Zdravkovic, L., 1999, *Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory*. London, Thomas Telford.
- Ridley, A. M., Dineen, K., Burland, J. B., Vaughan, P. R., 2003, *Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering*, Géotechnique, Vol: 53(2), Pages: 241-253.
- Romero, E., Della Vecchia, G., Jommi, C., 2011, *An insight into the water retention properties of compacted clayey soils*, Geotechnique, Vol: 61(4), Pages: 313-328.
- Salager, S., Rizzi, M., Laloui, L., 2011, *An innovative device for determining the soil water retention curve under high suction at different temperatures*, Acta Geotechnica, Vol: 6(3), Pages: 135-142.
- Sheng, D., Sloan, S. W., Gens, A., Smith, D. W., 2003, *Finite element formulation and algorithms for unsaturated soils. Part I: Theory*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol: 27 (9), Pages: 745-765.
- Smith, P. G. C., Potts, D. M., Addenbrook, T. I., 2008, *A precipitation boundary condition for finite element analysis*, In: Toll, D. G., Augarde, C. E., Gallipoli, D., Wheeler, S. J. (eds.) 1st European Conference on Unsaturated Soils, Durham, UK. Taylor and Francis Group, London, UK, Pages: 773-778.
- Standing, J.R., 2005, *Partly saturated soils*, MSc in Soil Mechanics Notes, Imperial College London, UK.
- Tang, A.-M., Cui, Y.J., 2005, *Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay*, Canadian Geotechnical Journal, Vol: 42(1), Pages: 287-296.
- Tarantino, A., 2009, *A water retention model for deformable soils*, Géotechnique, Vol: 59 (9), Pages: 751-762.
- Tarantino, A., Gallipoli, D., Augarde, C. E., De Gennaro, C. E., Gomez-Espina, R., Laloui, L., Mancuso, C., El Mountassir, G., Munoz, J. J., Pereira, J. M., Peron, H., Pisoni, G., Romero, E., Raveendraraj, A., Rojas, J. C., Toll, D. G., Tombolato, S., Wheeler, S. J., 2011, *Benchmark of experimental techniques for measuring and controlling suction*, Géotechnique, Vol: 61(4), Pages: 303-312.
- Tsiampousi, A., 2011, *Numerical analyses of slopes in unsaturated soils*, PhD thesis, Imperial College London, UK.
- Tsiampousi, A., Zdravkovic L., Potts, D.M., 2013a, *A new Hvorslev surface for critical state type unsaturated and saturated constitutive models*. Computers and Geotechnics, Vol: 48, Pages: 156-166.
- Tsiampousi, A., Zdravkovic, L., Potts, D.M., 2013b, *A three-dimensional hysteretic soil-water retention curve*, Géotechnique, Vol: 63(2), Pages: 155-164.
- Tsiampousi, A., Zdravkovic, L., Potts, D.M., 2016, *Numerical study of the effect of soil-atmosphere interaction on the stability and serviceability of cut slopes in London clay*, Canadian Geotechnical Journal, Vol: 54(3), Pages: 405-418.
- Tsiampousi, A., Smith, P.G., Potts, D.M., 2017, *Coupled consolidation in unsaturated soils: An alternative approach to deriving the governing equations*, Computers and Geotechnics, Vol: 84, Pages: 238-255.
- Tsiampousi, A., Smith, P.G., Potts, D.M., 2017, *Coupled consolidation in unsaturated soils: From a conceptual model to applications in boundary value problems*, Computers and Geotechnics, Vol: 84, Pages: 256-277.
- van Genuchten, M. T., 1980, *Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, Soil Science Society of America Journal, Vol: 44(5), Pages: 892-899.
- Villar, M. V., 1999, *Investigation of the behaviour of bentonite by means of suction-controlled oedometer tests*, Engineering Geology, Vol: 54(1-2), Pages: 67-73.
- Wheeler, S.J., Sharma, R.S., Buisson, M.S.R., 2003, *Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils*, Géotechnique, Vol: 53(1), Pages: 41-54.
- Wong, T. T., Fredlund, D. G., Krahn, J., 1998, *A numerical study of coupled consolidation in unsaturated soils*, Canadian Geotechnical Journal, Vol: 35 (6), Pages: 926-937.

Young, J. F., 1967, *Humidity control in the laboratory using salt solutions—a review*, Journal of Applied Chemistry, Vol: 17(9), Pages: 241-245.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΕΩΛΙΚΩΝ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

INVESTIGATION OF THE SHEAR STRENGTH OF GEOMATERIALS IN UNSATURATED CONDITIONS

N. Θ. Χατζηγώγος¹

Δρ. Τεχνικός Γεωλόγος, MSc-DIC
Engineering Geology

Μέλος του Εργαστηρίου Τεχνικής
Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Τμ.
Γεωλογίας Α.Π.Θ

Διευθύνων σύμβουλος της εταιρίας
Γεωλογικών-Γεωτεχνικών μελετών Triger

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Για τον προσδιορισμό της γεωτεχνικής συμπεριφοράς ενός γεωυλικού σε ακόρεστες συνθήκες είναι αρχικά απαραίτητος ο προσδιορισμός της παραμέτρου ϕ^b και της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους-Νερού. Ο εργαστηριακός προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής και της συμπεριφοράς μεταβολής όγκου σε ακόρεστες συνθήκες απαιτεί τον έλεγχο του βαθμού κορεσμού και την ερμηνεία των μεταβολών του ως μεταβολές της εντατικής κατάστασης, μέσω της μέτρησης της μύζησης. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η εργαστηριακή διερεύνηση της διατμητικής αντοχής ενός υπολειμματικού αργιλικού εδάφους, η παρουσία του οποίου έχει συνδεθεί με σειρά αστοχιών τεχνητών πρανών μετά τη διάνοιξή τους και ενός αδρόκοκκου εδάφους σε ακόρεστες συνθήκες. Για το σκοπό αυτό εκτελέστηκε ένα πρόγραμμα τριαξονικών δοκιμών και ένα πρόγραμμα δοκιμών άμεσης διάτμησης CD με έλεγχο της πίεσης του αέρα (u_a) και του νερού των πόρων στο δοκίμιο (u_w), έτσι ώστε να προσομοιώνεται η τιμή της αναπτυσσόμενης μύζησης ($u_a - u_w$). Τελικός στόχος της πειραματικής διερεύνησης είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής c' , ϕ' και ϕ^b των εξεταζόμενων γεωυλικών και της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους-Νερού.

ABSTRACT: In order to estimate the geotechnical behavior of a soil in unsaturated conditions, the determination of the parameter ϕ^b and the Soil-Water characteristic curve (SWCC) is primarily needed. The laboratory determination of the soil shear strength and volume change behavior in unsaturated conditions requires the control of the degree of saturation and the interpretation of its changes as changes in stress state via the measurement of matric suction. In this paper a laboratory investigation of the shear strength behavior of a cohesive residual soil connected with failures in cut slopes and of a non-cohesive soil in unsaturated conditions. For this purpose there was a laboratory program including triaxial and direct shear tests CD using advanced, fully automated equipment with control of suction. The final goal of the laboratory investigation is the determination of the shear strength parameters c' , ϕ' and ϕ^b of the geomaterials tested and the determination of their Soil - Water Characteristic Curve.

1. Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής των ακόρεστων εδαφών είναι ένα δύσκολο πρόβλημα με το οποίο έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές, στην προσπάθεια να βρεθεί μία ικανοποιητική της έκφραση σε σχέση με την ενεργό τάση ή καλύτερα σε σχέση με τις προτεινόμενες μεταβλητές της εντατικής κατάστασης. Μία από τις πρώτες προσεγγίσεις είναι αυτή των Bishop et al (1960):

$$\tau = c' + [\sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi', \quad (1)$$

όπου τ = διατμητική αντοχή (kPa), c' = ενεργός συνοχή (kPa), ϕ' = ενεργός γωνία τριβής ($^\circ$), σ = ολική ορθή τάση στην επιφάνεια αστοχίας (kPa), u_a = πίεση αέρα των πόρων (kPa), u_w = πίεση νερού των πόρων (kPa), χ = εδαφική παράμετρος με εύρος τιμών 0-1, που εξαρτάται από το βαθμό κορεσμού, το είδος του εδάφους, την εντατική κατάσταση και την υστερητική κατάσταση υγρασίας.

Για ένα τελείως ξηρό έδαφος $\chi=0$ και για συνθήκες κορεσμού $\chi=1$, οπότε η Εξ. 1 συμφωνεί

¹ Ηλεκτρονική διεύθυνση επικοινωνίας: chatzi12@gmail.com

με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για κορεσμένα εδάφη:

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (2)$$

Μία πιο πρόσφατη διατύπωση της διατμητικής αντοχής είναι αυτή των Fredlund, Morgenstern και Widger (1978):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b, \quad (3)$$

όπου ϕ^b είναι η κλίση της επιφάνειας αστοχίας στο επίπεδο διατμητικής τάσης-μύζησης (τ - s επίπεδο) και αποτελεί χαρακτηριστικό παράμετρο του εδάφους (Σχ. 1). Αρχικά θεωρήθηκε ότι οι ϕ' και ϕ^b είναι ανεξάρτητες της μύζησης. Επομένως η επίδραση της μύζησης στη διατμητική αντοχή είναι ισοδύναμη με μία αύξηση της ενεργού συνοχής:

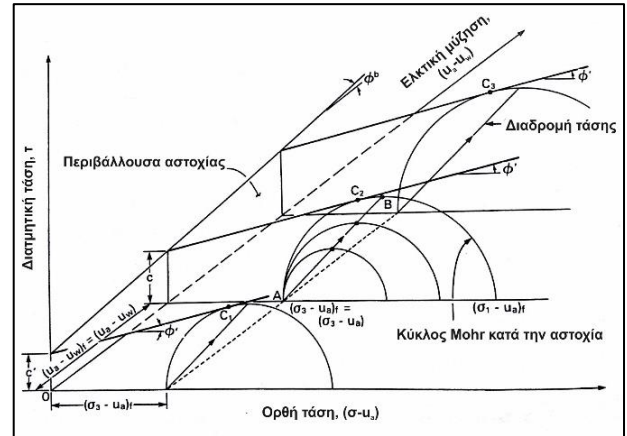
$$C = c' + (u_a - u_w) \epsilon \phi^b, \quad (4)$$

όπου C είναι η ολική συνοχή. Η Εξ. 4 μεταβάλλεται σε διατύπωση περιγραφής της κορεσμένης κατάστασης όταν $u_a = u_w = 0$.

Οι Escario και Saez (1986) παρουσίασαν αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης που έδειξαν πως η υπόθεση ότι η τιμή της ϕ^b είναι σταθερή δεν είναι ρεαλιστική. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από άλλους ερευνητές (Fredlund, Rahardjo, & Gan, 1987), που πρότειναν ότι η τιμή της ϕ^b είναι ίση με αυτήν της ϕ' σε μικρές τιμές μύζησης και στη συνέχεια μειώνεται σημαντικά σε μία σταθερή, μικρή τιμή για μεγάλες τιμές μύζησης (Σχ. 2).

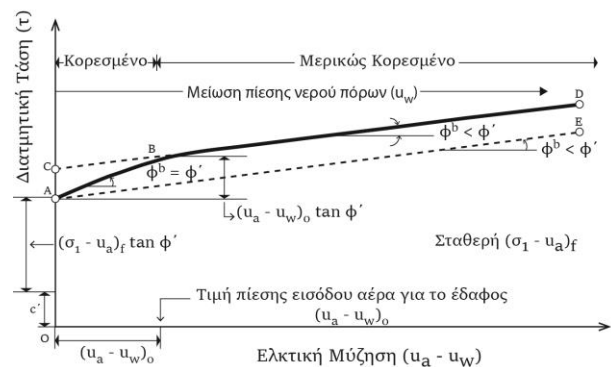
Οι Escario et al. (1989) πρότειναν ότι σε υψηλές τιμές μύζησης η τιμή ϕ^b γίνεται αρνητική, αναφέροντας ότι σε τέτοιες τιμές μύζησης η φαινόμενη συνοχή λόγω της μύζησης τείνει προς το μηδέν, καθώς το έδαφος ξηραίνεται εντελώς. Συγκρίνοντας τις Εξ. 1 και Εξ. 3 και υποθέτοντας πως οι τιμές της διατμητικής αντοχής για τις δύο σχέσεις είναι ίσες, μπορούμε να καταλήξουμε στη σχέση:

$$\chi = \tan \phi^b / \tan \phi' \quad (5)$$



Σχ. 1. Επέκταση της περιβάλλουσας αστοχίας κατά Mohr-Coulomb για ακόρεστα εδάφη (Fredlund, Morgenstern, & Widger, 1978)

Fig. 1. Extended Mohr-Coulomb failure envelope for unsaturated soils (Fredlund, Morgenstern, & Widger, 1978).



Σχ. 2. Μη γραμμικότητα της περιβάλλουσας αστοχίας στο τ - s επίπεδο (Escario & Saez, 1986).

Fig. 2. Nonlinearity failure envelope on the shear stress versus matric suction plane (Escario & Saez, 1986).

Με βάση τα παραπάνω, ο υπολογισμός της διατμητικής αντοχής ενός ακόρεστου εδάφους είναι δυνατόν να γίνει με τον προσδιορισμό των παραγόντων ϕ^b και $(u_a - u_w)$. Ο όρος ϕ^b θεωρείται πως έχει χαρακτηριστική τιμή για κάθε εδαφικό σχηματισμό, η οποία είναι σταθερή μόνο για ένα εύρος τιμών της μύζησης, που καλύπτει όμως τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα. Μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά όπως δείχνει το Σχ. 1. Η τιμή της μύζησης μπορεί να υπολογιστεί επίσης πειραματικά ή και έμμεσα με τη χρήση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους-Νερού.

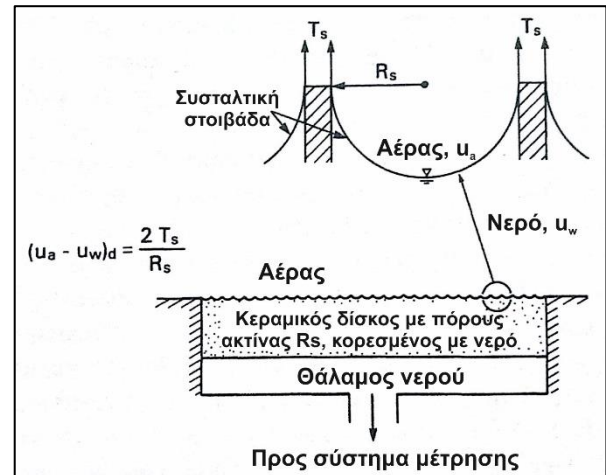
2. Μεθοδολογία εργαστηριακής διερεύνησης

Η διερεύνηση της διατμητικής αντοχής σε ακόρεστες συνθήκες έγινε με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα (axis-translation technique). Με βάση αυτήν τη μέθοδο, οι πιέσεις αέρα και νερού των πόρων μεταφράζονται σε θετικό εύρος τιμών για την αποφυγή μετρήσεων αρνητικών πιέσεων πόρων αναφερόμενων στην ατμοσφαιρική πίεση. Συντελείται τεχνητή αύξηση της πίεσης του αέρα των πόρων, κάτω από την οποία διεξάγεται η εκάστοτε εργαστηριακή δοκιμή, με αποτέλεσμα την αύξηση των αρνητικών πιέσεων νερού των πόρων σε ισόποση θετική τιμή. Με την παραπάνω τεχνική, η ελκτική μύζηση ($u_a - u_w$) παραμένει σταθερή στο εδαφικό δοκίμιο ανεξάρτητα από την τιμή της επιβαλλόμενης πίεσης αέρα στους πόρους και είναι δυνατός ο έλεγχος της ελκτικής μύζησης στο εξεταζόμενο δοκίμιο με τη χρήση ενός λεπτού πορώδους κεραμικού δίσκου με τιμή πίεσης εισόδου αέρα μεγαλύτερη από την τιμή μύζησης που εφαρμόζεται στη δοκιμή (Bishop, Alpan, Blight, & Donald, 1960).

Ο πορώδης δίσκος υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα (High Air Entry Porous Disk) έχει μικρούς και σχετικά ομοιόμορφους πόρους και συμπεριφέρεται σαν μεμβράνη ανάμεσα στον αέρα και το νερό. Οι δίσκοι που χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές δοκιμές είναι κεραμικοί και φτιάχνονται από πορώδη καολίνη. Όταν ο δίσκος είναι κορεσμένος με νερό, τότε δεν μπορεί να περάσει αέρας μέσα στο δίσκο εξαιτίας της ικανότητας της συσταλτικής στοιβάδας (contractile skin), δηλαδή της διεπιφανείας νερού-αέρα να αντιστέκεται στη ροή του αέρα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της επιφανειακής τάσης T_s που αναπτύσσει η συσταλτική στοιβάδα, ενώνοντας τους μικρούς πόρους του δίσκου ακτίνας R_s στην επιφάνεια αυτού. Η διαφορά της πίεσης του αέρα επάνω από τη συσταλτική στοιβάδα και της πίεσης του νερού κάτω από αυτήν αντιπροσωπεύει την τιμή μύζησης στο εδαφικό δοκίμιο (Σχ. 3). Η μέγιστη τιμή μύζησης που μπορεί να διατηρηθεί στην επιφάνεια του κεραμικού δίσκου ονομάζεται τιμή πίεσης εισόδου ή διείσδυσης αέρα του δίσκου και περιγράφεται από την Εξίσωση του Kelvin:

$$(u_a - u_w)_d = (2T_s)/R_s \quad (6)$$

όπου $(u_a - u_w)_d$ = τιμή πίεσης εισόδου αέρα στον κεραμικό δίσκο.



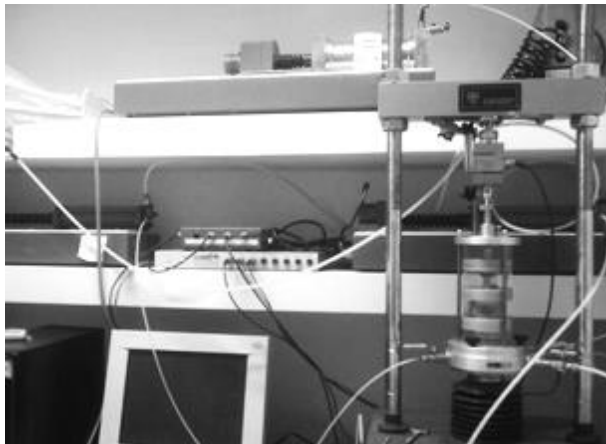
Σχ. 3. Αρχή λειτουργίας του δίσκου υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Fig. 3. Operating principal of High Air Entry Porous Disk (Fredlund & Rahardjo, 1993).

2.1 Πειραματική διάταξη τριαξονικής δοκιμής

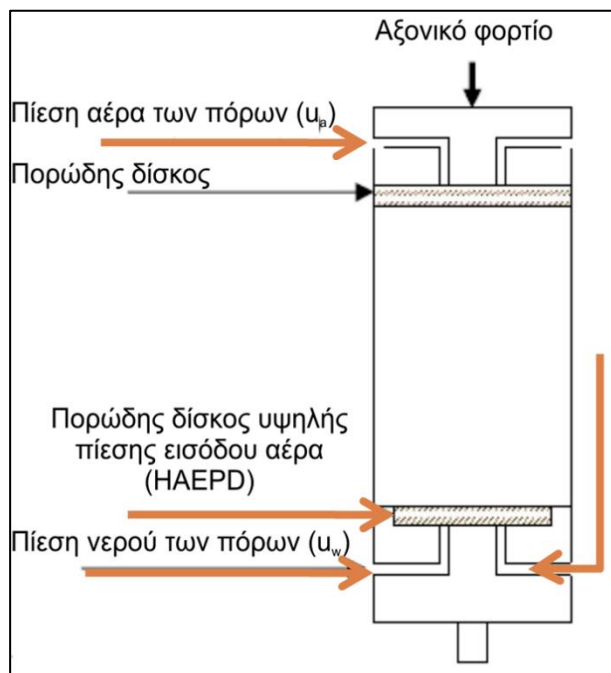
Οι τριαξονικές δοκιμές εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ. σε συσκευή τριαξονικής δοκιμής GDS με δυνατότητα ελέγχου και μέτρησης πιέσεων του αέρα και του νερού καθώς και της μεταβολής όγκου στο εσωτερικό του δοκιμίου. Η διάταξη περιλαμβάνει έναν ελεγκτή (controller) πίεσης - όγκου για τον έλεγχο της πίεσης και της μεταβολής του όγκου του αέρα στο δοκίμιο. Δύο επιπλέον ελεγκτές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της αντιπίεσης νερού των πόρων (back pressure) και τη μεταβολή του όγκου του νερού στο δοκίμιο καθώς και για τον έλεγχο της πλευρικής πίεσης στο θάλαμο του δοκιμίου.

Το άθροισμα της μεταβολής του όγκου στους ελεγκτές νερού και αέρα δίνει τη συνολική μεταβολή όγκου του δοκιμίου. Επιπλέον ο θάλαμος εισαγωγής του δοκιμίου περιλαμβάνει βάση με πορώδη δίσκο υψηλής πίεσης εισόδου αέρα 15 bar (high air entry porous disk), έτσι ώστε να διασφαλίζεται η εφαρμογή της επιλεγόμενης τιμής μύζησης στο δοκίμιο (Σχ. 4).



Φωτ 1. Η πειραματική διάταξη της τριαξονικής συσκευής.

Phot 1. The arrangement of the triaxial testing apparatus.



Σχ. 4. Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του δοκιμίου.

Fig. 4. Schematic of specimen connections.

Με αυτήν τη διάταξη επιτυγχάνεται η εφαρμογή της επιθυμητής τιμής μύζησης στο δοκίμιο και η άμεση μέτρηση των μεταβολών όγκου του δοκιμίου $\Delta V = \Delta V_{\text{air}} + \Delta V_{\text{water}}$.

Η πειραματική διάταξη εγκαταστάθηκε σε απομονωμένο θάλαμο με έλεγχο της εσωτερικής του θερμοκρασίας με ακρίβεια $\pm 0.5^\circ\text{C}$ για να ελαχιστοποιείται η επίδραση των μεταβολών της εξωτερικής θερμοκρασίας στις μετρήσεις μεταβολών του όγκου αέρα από τον αντίστοιχο

ελεγκτή. Η ακρίβεια των μετρήσεων των μεταβολών όγκου από τον ελεγκτή πίεσης-όγκου αέρα της GDS έχει μελετηθεί (Adams, Wulfsohn, & Fredlund, 1996) και είναι πολύ ικανοποιητική αν ληφθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις, όπως η διατήρηση ισοθερμικών συνθηκών, η αποφυγή διαρροών από τα σημεία συναρμογής της διάταξης και η εισαγωγή πεπιεσμένου αέρα στον ελεγκτή. Η χρονική απόκριση του ελεγκτή στις μεταβολές όγκου είναι αποδεκτή για δοκιμές αργού ρυθμού παραμόρφωσης ($\leq 0,01\text{mm/min}$).

2.2 Πειραματική διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης

Οι δοκιμές άμεσης διάτμησης εκτελέστηκαν επίσης στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ. και χρησιμοποιήθηκε η αυτοματοποιημένη συσκευή δοκιμών άμεσης διάτμησης κλειστού τύπου με δυνατότητα ελέγχου των πιέσεων των πόρων της GDS (μοντέλο: Saturated/Unsaturated Back Pressured Shearbox "GDSBPS"). Η διάταξη της συσκευής δίνεται στο Σχ. 5 σε τομή όπου παρατηρούνται βασικά χαρακτηριστικά όπως ο κλειστός θάλαμος ελέγχου της πίεσης του αέρα, η θέση του δείγματος που βρίσκεται σε επαφή με τον πωρόλιθο υψηλής πίεσης εισόδου αέρα (HAEPD) 500 kPa (5 bar), η είσοδος του νερού μέσω του HAEPD στο δείγμα, η θέση εφαρμογής του αξονικού φορτίου και ο μετρητής της αξονικής μετατόπισης-πίεσης και η θέση εφαρμογή του διατμητικού φορτίου και ο μετρητής της οριζόντιας μετατόπισης-/πίεσης.

Η εφαρμογή της πίεσης του αέρα στο δείγμα u_a γίνεται από γεννήτρια συμπίεσης αέρα μέγιστης πίεσης 800 kPa (8 bar), ο οποίος στη συνέχεια αποθηκεύεται σε θάλαμο τριακοσίων (300) λίτρων. Η εισαγωγή του αέρα στον θάλαμο ρυθμίζεται από τον πνευματικό ελεγκτή (Φωτ. 2) με μέγιστη πίεση στην εξαγωγή 2000 kPa (20 bar) και ακρίβεια μέτρησης $\pm 0,1\text{ kPa}$. Η εφαρμογή της πίεσης του νερού των πόρων u_w γίνεται μέσω δυναμικού εμβολοφόρου ελεγκτή με χωρητικότητα 200cc, εύρος 2000 kPa (20 bar) και ακρίβεια μέτρησης $\leq 0,25\%$ ή $\pm 30\text{mm}^3$.

Η συνολική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (Φωτ. 3) βρίσκεται σε ξεχωριστό κλειστό θάλαμο με έλεγχο της θερμοκρασίας του χώρου κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Η καταγραφή των δεδομένων, από κάθε ελεγκτή και μετατροπέα, έγινε σε κονσόλα οχτώ (8) καναλιών που μεταφέρει τα δεδομένα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η αποτύπωση των δεδομένων και ο



Φωτ 2. Πνευματικός ελεγκτής υψηλής ακρίβειας αέρα.

Phot 2. Pneumatic Pressure Controller (GDSPPC).



Φωτ 3. Συνολική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και αποτελείται από: (α)Συσκευή διάτμησης, (β)Ελεγκτή πιέσεων νερού, (γ)Ελεγκτή πιέσεων αέρα, (δ)Κονσόλα δεδομένων οχτώ (8) καναλιών, (ε)Γεννήτρια συμπίεσης αέρα και (στ)Ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Phot 3. Chamber layout: **a** GDS unsaturated back-pressure shear box, **b** water pressure controller, **c** air pressure controller, **d** 8-channel data console, **e** air pressure generator, **f** computer(GDSLAB software).

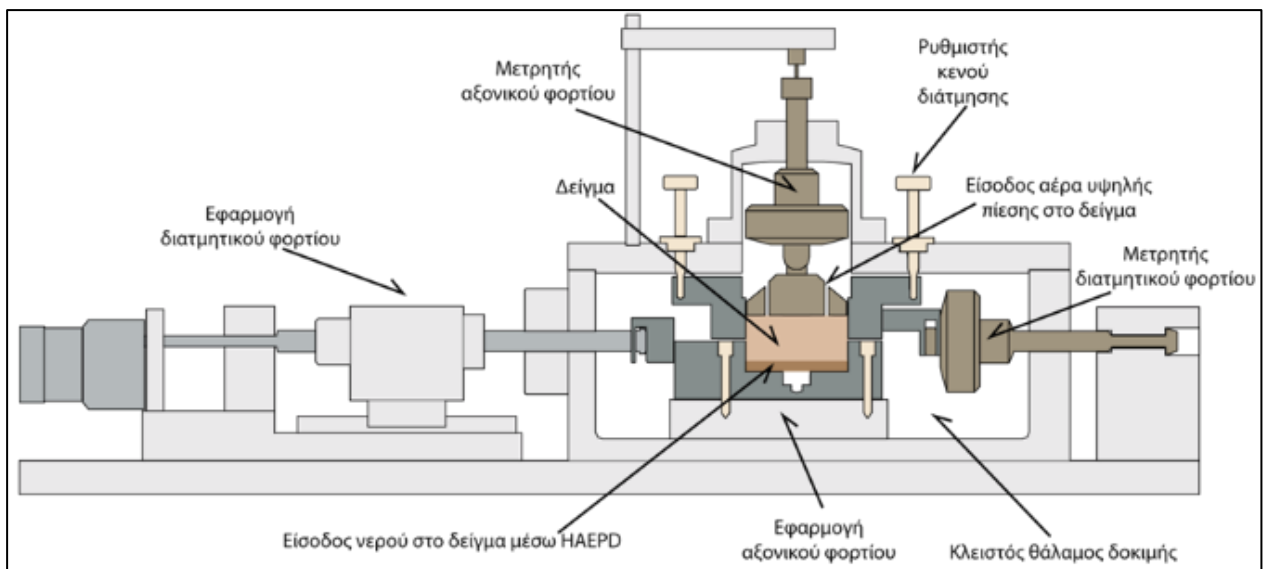
χειρισμός της πειραματικής διάταξης γίνεται μέσω του προγράμματος GDSLAB.

3. Διατμητική αντοχή αργιλικού υπολειμματικού εδάφους σε ακόρεστες συνθήκες

Διερευνήθηκε η διατμητική αντοχή υπολειμματικού γεωυλικού, η παρουσία του οποίου έχει συσχετιστεί με διαπιστωμένες αστοχίες τεχνητών πρανών κατά μήκος της Εγνατίας οδού στην περιοχή της Ασπροβάλτας (Chatzigogos et al., 2007, 2008). Οι αστοχίες αυτές εκδηλώθηκαν σε συνθήκες διατάραξης της περιεχόμενης υγρασίας των υπολειμματικών υλικών (δηλαδή μεταβλητών τιμών μύζησης) και για το λόγο αυτό η διερεύνηση του μηχανισμού τους πραγματοποιήθηκε με εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών CD, οι οποίες επιτρέπουν την καταγραφή της πίεσης του νερού και του αέρα των πόρων στο δείγμα (Χατζηγώγος και λοιποί, 2010). Στόχος ήταν η διερεύνηση της μεταβολής των μηχανικών παραμέτρων αντοχής του εξεταζόμενου υλικού για διαφορετικές τιμές μύζησης (matric suction).

3.1 Εργαστηριακή περιγραφή γεωυλικού

Το εξεταζόμενο υλικό είναι προϊόν της αποσάθρωσης γνευσιακών πετρωμάτων της Σερβομακεδονικής μάζας και η ορυκτολογική του σύσταση όπως προέκυψε από δοκιμές XRD δίνεται στον Πίν. 1.



Σχ. 5. Διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης κλειστού τύπου με δυνατότητα ελέγχου των πιέσεων των πόρων(τροποποιημένη από GDS Specification Datasheet, 2009 ως προς τα χρώματα και το υπόμνημα).

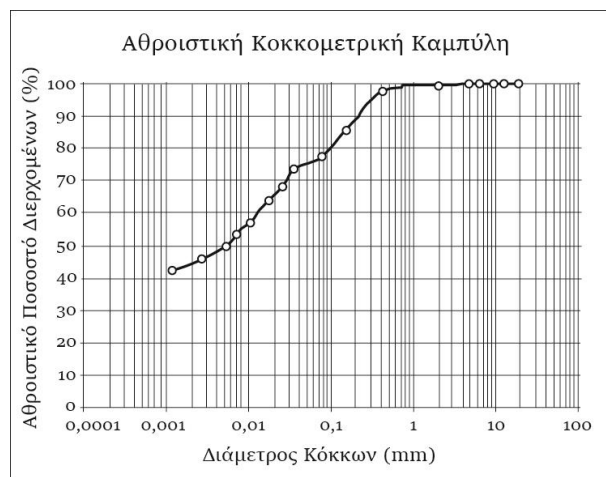
Fig. 5. GDS unsaturated back-pressure shear box scheme.

Πίν. 1. Ορυκτολογική σύσταση εξεταζόμενου υλικού.

Tab. 1. Mineralogical composition of tested material.

Ορυκτό	%
Χαλαζίας	21
Πλαγιόκλαστο	2
Ασβεστίτης	11
Αργιλικά ορυκτά διογκούμενα (σμεκτίτες)	21
Αργιλικά ορυκτά μη διογκούμενα	45

Από τον Πίν. 1 προκύπτει ότι το υλικό έχει σημαντική περιεκτικότητα σε διογκούμενα αργιλικά ορυκτά (>20%). Η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού επί τόπου δίνεται στο Σχ. 6 και οι φυσικές του ιδιότητες συνοψίζονται στον Πίν. 2.



Σχ. 6. Κοκκομετρική καμπύλη εξεταζόμενου υλικού.

Fig. 6. Gradation curve of tested material.

Πίν. 2. Φυσικές ιδιότητες υλικού επί τόπου.

Tab. 2. Index properties of the in situ material.

LL	PI	γ_s	γ_d (kg/cm ³)	e	USCS
75	50	2,47	1,36	0,81	CH

3.2 Πρόγραμμα και εκτέλεση δοκιμών

Για την εργαστηριακή διερεύνηση του προβλήματος σχεδιάστηκε πρόγραμμα δοκιμών τριαξονικής αντοχής CD δηλαδή βραδείας δοκιμής σε στερεοποιημένα δοκίμια με αποστράγγιση. Διαμορφώθηκαν 10 κυλινδρικά δοκίμια από αναζυμωμένο υλικό το οποίο είχε προηγουμένως συμπυκνωθεί στην επί τόπου

υπολογισμένη ξηρή πυκνότητα ($\gamma_d = 1,37$ gr/cm³). Το ένα δείγμα χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους Νερού (Soil Water Characteristic Curve). Στα υπόλοιπα 9 εκτελέστηκαν ισάριθμες δοκιμές CD για τρεις διαφορετικές τιμές πλευρικής τάσης σ_3 , σε τρεις διαφορετικές τιμές μύζησης, όπως δείχνει ο Πίν. 3.

Πίν. 3. Πρόγραμμα δοκιμών CD

Tab. 3. CD test schedule.

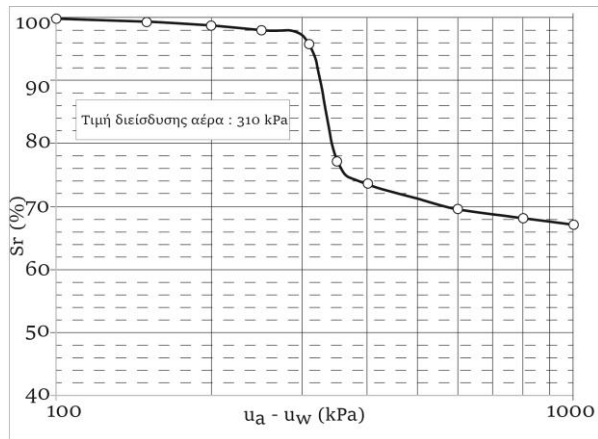
$u_a - u_w$ (kPa)	$(\sigma_3 - u_a)$ kPa		
200	50	100	150
400	50	100	150
800	50	100	150

Κατά την εκτέλεση των δοκιμών το δοκίμιο στερεοποιείται σε μια τάση αντιπροσωπευτική της επί τόπου εντατικής κατάστασης. Στις συγκεκριμένες δοκιμές η τάση στερεοποίησης ήταν $\sigma_3 - u_a = 70$ kPa. Το έδαφος στερεοποιείται σε ιστροπική τάση $\sigma_3 - u_a$ ενώ παράλληλα η πίεση του νερού και του αέρα των πόρων διατηρούνται σε θετικές τιμές u_a και u_w αντίστοιχα, τέτοιες ώστε να επιτευχθεί εργαστηριακά μια τιμή μύζησης μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση (101,3 kPa).

3.3 Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους Νερού

Η Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους Νερού προέκυψε με αρχική εφαρμογή πίεσης αέρα $u_a = 1010$ kPa, νερού $u_w = 1000$ kPa και σταδιακή μείωση της τιμής της u_w , όπως φαίνεται στο Σχ. 7. Στην καμπύλη αυτή είναι σημειωμένη η τιμή μύζησης για την οποία επέρχεται διείσδυση αέρα στο δοκίμιο (air entry value) και κατά συνέπεια αρχίζει η μεταβολή του βαθμού κορεσμού S_r . Για το συγκεκριμένο υλικό η τιμή αυτή είναι 310 kPa. Η τιμή αυτή αποδίδεται στην υπολειμματική προέλευση του υλικού, το οποίο αν και είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκο όπως ήδη περιγράφηκε, έχει κληρονομημένη «ανοιχτή» δομή με υψηλό λόγο κενών e.

Με βάση τα στοιχεία της καμπύλης καθώς και τις τιμές υγρασίας του υλικού επί τόπου, επιλέχθηκαν οι τρεις τιμές μύζησης που φαίνονται στον Πίν. 3. Έτσι κατά την εκτέλεση των δοκιμών θράυσης η τιμή μύζησης $u_a - u_w = 200$



Σχ. 7. Χαρακτηριστική καμπύλη νερού εδάφους του υλικού.

Fig. 7. Soil water characteristic curve of material.

kPa αντιστοιχεί πρακτικά σε συνθήκες κορεσμού (τιμή μικρότερη από 310 kPa), η τιμή μύζησης $u_a - u_w = 400$ kPa βρίσκεται κοντά στην τιμή πίεσης εισόδου αέρα και αντιστοιχεί στον επί τόπου βαθμό κορεσμού που υπολογίστηκε κατά τη φάση εκδήλωσης των αστοχιών, ενώ τέλος η τιμή μύζησης $u_a - u_w = 800$ kPa εισάγεται για να εκτιμηθεί η μεταβολή της διατμητικής αντοχής σε ψηλές τιμές μύζησης.

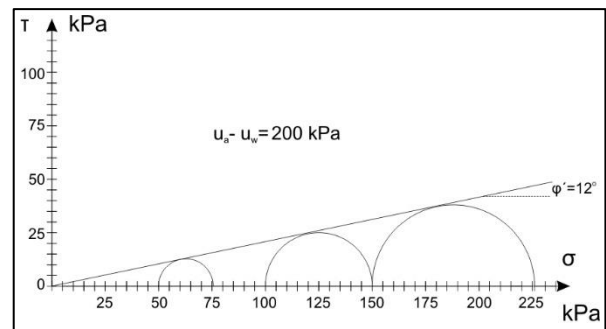
3.4 Αποτελέσματα δοκιμών CD

Τα αποτελέσματα των δοκιμών CD που εκτελέστηκαν με βάση το πρόγραμμα δίνονται με τη μορφή διαγραμμάτων Mohr στα Σχ. 8, 9 και 10 και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των χαρακτηριστικών αντοχής στον Πίν. 4.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι οι εργαστηριακές τιμές γωνίας τριβής ϕ' που προέκυψαν μπορεί να θεωρηθούν μικρές και παρατηρείται μικρή αύξησή τους με την αύξηση της μύζησης. Οι τιμές γωνίας τριβής ϕ'_r που αντιστοιχούν στην παραμένουσα αντοχή του υλικού είναι σταθερές και παρουσιάζουν μικρή απόκλιση από τις τιμές ϕ' σε σχέση με τη θεωρητικά αναμενόμενη. Για τιμή μύζησης $u_a - u_w = 200$ kPa η τιμή της ϕ'_r δεν διαφοροποιείται από την τιμή της ϕ' .

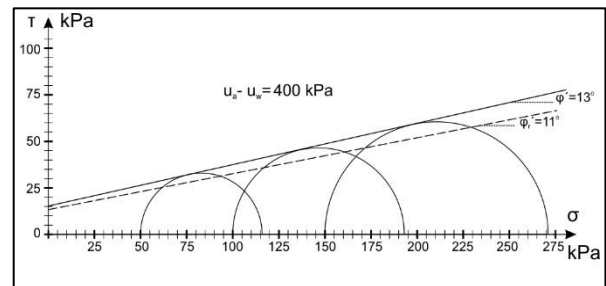
Οι τιμές φαινόμενης συνοχής c που υπολογίστηκαν, όπως φαίνεται στον Πίν. 4, παρουσιάζουν μια γραμμική αύξηση σε σχέση με την τιμή της μύζησης, όπως προβλέπει η Εξ. 4.

Η μεταβολή της αξονικής παραμόρφωσης ε % με τη μεταβολή της διεκτροπικής τάσης $\sigma_1 - \sigma_3$ δίνεται στο Σχ.11 για τις διαφορετικές τιμές μύζησης.



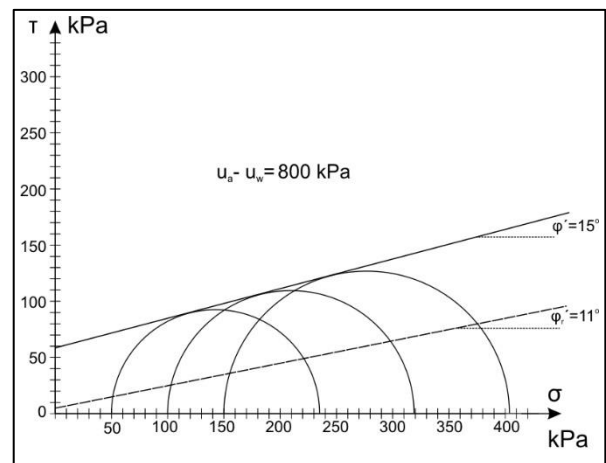
Σχ. 8. Δοκιμές CD για $u_a - u_w = 200$ kPa

Fig. 8. CD tests for $u_a - u_w = 200$ kPa.



Σχ. 9. Δοκιμές CD για $u_a - u_w = 400$ kPa

Fig. 9. CD tests for $u_a - u_w = 400$ kPa



Σχ. 10. Δοκιμές CD για $u_a - u_w = 800$ kPa

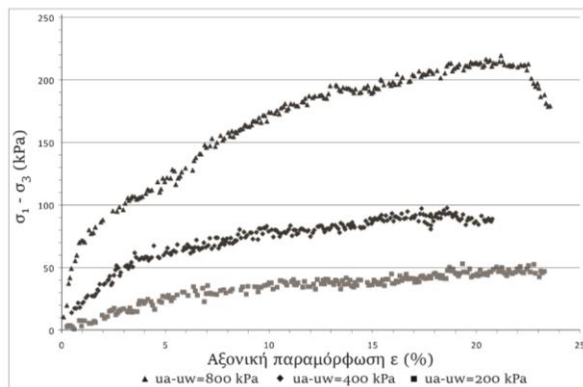
Fig. 10. CD tests for $u_a - u_w = 800$ kPa

Σύμφωνα με τους Rahardjo et al., (2004) η αύξηση της μύζησης συνεισφέρει στην αύξηση της στιφρότητας και ψαθυρότητας του υλικού, ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές πλευρικής τάσης.

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 11 που αναφέρεται σε τιμή $\sigma_3 - u_a = 100$ kPa, παρατηρείται πράγματι μια αύξηση της στιφρότητας των δοκιμών, η οποία είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η τιμή της μύζησης και φαίνεται από τη μεταβολή της κλίσης

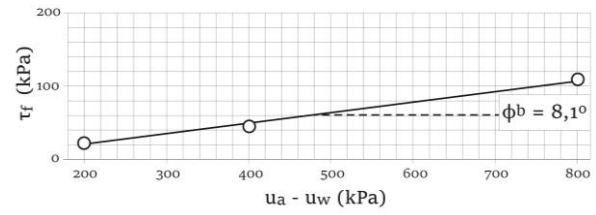
Πίν. 4. Αποτελέσματα δοκιμών CD**Tab. 4.** CD test results.

$u_a - u_w$ (kPa)	200	400	800
	76	116	235
$\sigma_1 - u_a$ (kPa)	150	193	319
	223	271	404
	50	50	50
$\sigma_3 - u_a$ (kPa)	100	100	100
	150	150	150
c' (kPa)	0	15,28	58,5
c'_r (kPa)	0	13,31	4,81
ϕ'	12°	13°	15°
ϕ'_{pp}	12°	11°	11°
ϕ'^b	8,1°		

**Σχ. 11.** Διάγραμμα διεκτροπικής τάσης ($\sigma_1 - \sigma_3$) - αξονικής παραμόρφωσης (ϵ) για $\sigma_3 - u_a = 100$ kPa και διαφορετικές τιμές μύζησης.**Fig. 11.** Deviatoric stress - strain diagram for $\sigma_3 - u_a = 100$ kPa and different matric suction values.

των σχετικών καμπυλών. Επίσης από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ότι οι τιμές αξονικής παραμόρφωσης για τις οποίες επέρχεται θραύση των δοκιμίων είναι γενικά αυξημένες ($\epsilon > 20\%$) ενώ η αύξηση της μύζησης επιφέρει και εντονότερη θραυσίγενή συμπεριφορά.

Η μεταβολή της διατμητικής αντοχής του υλικού με τη μεταβολή της μύζησης, φαίνεται στο διάγραμμα του Σχ. 1, στο οποίο διακρίνεται η επέκταση της προβλεπόμενης από το κριτήριο Mohr-Coulomb περιβάλλουσας αστοχίας για την περίπτωση των ακόρεστων εδαφών (Fredlund & Rahardjo, 1993). Η κλίση της γραμμής τομής που

**Σχ.12.** Πειραματική ευθεία τομής της περιβάλλουσας αστοχίας με το επίπεδο $\tau - (u_a - u_w)$.**Fig. 12.** Experimental intersection line between the failure envelope and the $\tau - (u_a - u_w)$ plane.

προκύπτει από την τομή του επιπέδου αστοχίας πάνω στο επίπεδο $\tau - (u_a - u_w)$, αντιπροσωπεύει τη γωνία ϕ'^b .

Η γωνία αυτή είναι αντιπροσωπευτική του κάθε υλικού και πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι, για μικρές τιμές μύζησης (κορεσμένες συνθήκες) ισούται με την ϕ' ενώ για μεγάλες τιμές μύζησης (πάνω από την τιμή πίεσης διείσδυσης αέρα) παρουσιάζεται σταθερή και πάντα μικρότερη ή ίση με την ϕ' (Gan, 1986). Για το εξεταζόμενο υλικό υπολογίστηκε σε $\phi'^b = 8,1^\circ$ όπως φαίνεται στο Σχ.12.

4. Διατμητική αντοχή εδαφών αμμώδους σύστασης σε ακόρεστες συνθήκες

Μέχρι πρόσφατα η παραγωγή αξιόπιστων εργαστηριακών δεδομένων για τη μηχανική συμπεριφορά σε ακόρεστες συνθήκες ενός αδρόκοκκου εδάφους με χρήση της μεθόδου μετατόπισης άξονα ήταν δύσκολη και προβληματική, εξαιτίας της έλλειψης εξειδικευμένου εργαστηριακού εξοπλισμού για μη συνεκτικά εδάφη. Αυτό γιατί οι περισσότερες πειραματικές διατάξεις με έλεγχο της μύζησης αναπτύχθηκαν σε τριαξονικές συσκευές που απαιτούν συνεκτικά δείγματα.

Η ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια συσκευών άμεσης διάτμησης με δυνατότητα ελέγχου της μύζησης δίνει προοπτικές αποτελεσμάτων εργαστηριακών ερευνών σε μη συνεκτικά εδάφη, αναφορικά για τη σχέση της διατμητικής αντοχής με την εδαφική μύζηση, της συμπεριφοράς μεταβολής όγκου και Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους Νερού (SWCC).

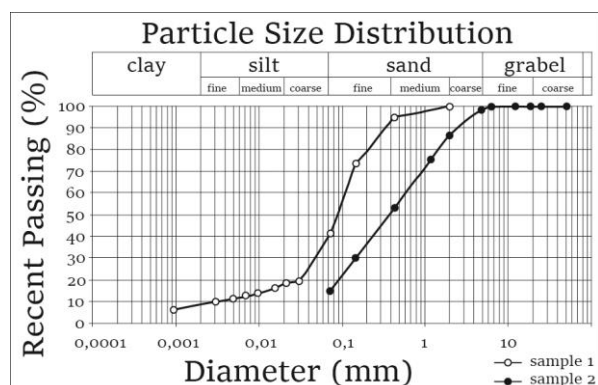
4.1 Εργαστηριακή περιγραφή εδαφικών υλικών

Τα εδαφικά δείγματα που εξετάστηκαν είναι κυρίως άμμοι από δύο διαφορετικές περιοχές της Β. Ελλάδος. Το πρώτο ταξινομείται ως SM-SW (USCS) και προέρχεται από Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά ηλικίας Παλαιοκαίνου. Το δεύτερο δείγμα ταξινομείται ως SP (USCS) και προέρχεται από αποθέσεις προϊόντων αποσάθρωσης Τραβερτίνη ηλικίας Τεταρτογενούς. Τα δείγματα είναι μη πλαστικά και οι ιδιότητές τους παρουσιάζονται στον Πίν. 5. Στο Σχ. 13 παρουσιάζεται η κοκκομετρική τους διαβάθμιση (Βλάχος, 2015).

Πίν. 5. Φυσικές ιδιότητες και ταξινόμηση δειγμάτων

Tab. 5. Physical and index properties of samples

Δείγμα	m (%)	e	γ_d (gr/cm ³)	Fines (%)	USCS
S1	21.17	0.76	1.54	45	SM
S2	17.7	0.83	1.44	13.9	SP



Σχ. 13. Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης εξεταζόμενων δειγμάτων.

Fig. 13. Grain size distribution curves of tested samples.

4.2 Πρόγραμμα και εκτέλεση δοκιμών

Οι εργαστηριακές δοκιμές εκτελέστηκαν στη συσκευή άμεσης διάτμησης που περιγράφεται στην παράγραφο 2.2 και περιλάμβαναν ένα πλήρη κύκλο ξήρανσης-ύγρανσης για τον προσδιορισμό της Χαρακτηριστική Καμπύλης Εδάφους Νερού για το δείγμα S1 και δύο σειρές δοκιμών άμεσης διάτμησης CD για κάθε δείγμα, η πρώτη σε συνθήκες κορεσμού και η δεύτερη σε τιμές μύζησης αντίστοιχες με τη φυσική υγρασία των δειγμάτων. Η διάτμηση σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκε με σταθερή ταχύτητα

Πίν. 6. Πρόγραμμα δοκιμών εξεταζόμενων δειγμάτων

Tab. 6. Experimental program for the tested materials

Δείγμα	Δοκιμή	σ_n (kPa)	Matric suction $u_a - u_w$ (kPa)
S1	SWCC	10	0-455
	CD	106-212-300	0
	CD	106-212-300	400
S2	CD	22.5-50-100	0
	CD	22.5-50-100	120

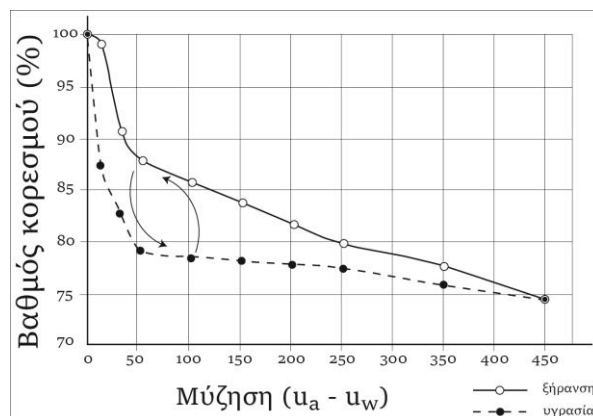
διάτμησης στα 0,002 mm/sec (0,12 mm/min). Το πρόγραμμα των εκτελεσθεισών δοκιμών παρουσιάζεται στον Πίν. 6.

4.3 Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους Νερού

Κατασκευάστηκε η Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους Νερού για το δείγμα S1 και πιο συγκεκριμένα η σχέση μύζησης-βαθμού κορεσμού του δείγματος για έναν πλήρη κύκλο ξήρανσης-ύγρανσης (Σχ. 14). Από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν βρέθηκε ότι η μέγιστη υγρασία του υλικού για τιμή μύζησης 0 kPa είναι 28,14% και η ελάχιστη για τιμή μύζησης 455 kPa είναι 20,53%. Ο βαθμός κορεσμού για τη μέγιστη τιμή μύζησης (455 kPa) μειώθηκε στο 74,5%. Στο Σχ. 14 παρατηρείται υστέρηση στην αύξηση του βαθμού κορεσμού κατά την ύγρανση του δείγματος με μέγιστη διαφορά για μύζηση 55 kPa περίπου στα 9%.

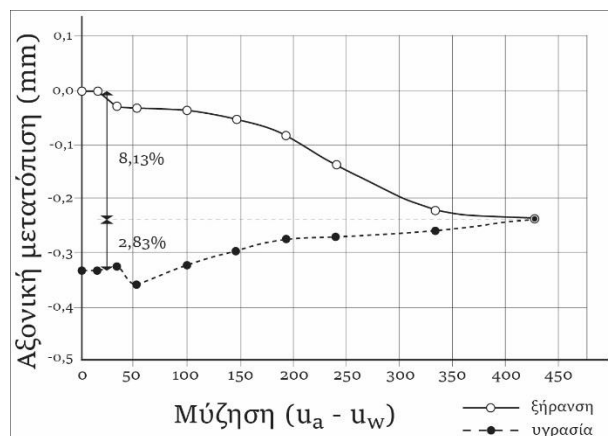
Παράλληλα με την υστέρηση παρατηρήθηκε μείωση του λόγου κενών με την αύξηση της μύζησης (από το 0,76 στα 0,73), δηλαδή συρρίκνωση, ενώ κατά τη μείωση της μύζησης παρέμεινε σχεδόν σταθερός επιδεικνύοντας έτσι αντίστοιχη υστέρηση στις μεταβολές του ολικού όγκου κατά μήκος κύκλων ξήρανσης-ύγρανσης.

Η συγκεκριμένη μείωση σχετίζεται με συρρίκνωση του όγκου του δείγματος κατά την ξήρανσή της τάξης του 8,13%. Η συρρίκνωση αναμενόταν, κατά την μείωση της μύζησης (ύγρανση), να σταματήσει και να αντιστραφεί (διόγκωση), όμως παρατηρήθηκε συνέχιση της συρρίκνωσης της τάξης του 2,83%. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά του υλικού αποτυπώνονται στο Σχ. 15 όπου παρουσιάζεται η συρρίκνωση του δείγματος κατά τη φάση ενός κύκλου ξήρανσης ύγρανσης.



Σχ. 14. Χαρακτηριστική καμπύλη νερού εδάφους του δείγματος S1.

Fig. 14. Soil water characteristic curve of specimen S1.

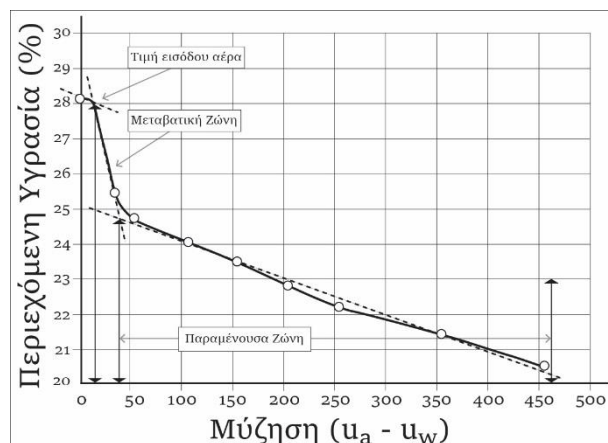


Σχ. 15. Αξονική παραμόρφωση κατά τη διαδικασία κατασκευής της ΧΚΕΝ του δείγματος S1.

Fig. 15. Matric suction vs axial displacement during the production of SWCC for sample S1.

Η Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους Νερού χωρίζεται σε τρία (3) τμήματα τα οποία ως προς τις τιμές μύζησης συμβαδίζουν (για αυτό παρουσιάζονται μόνο στην ξήρανση) αλλά υπάρχει η υστέρηση που προαναφέρθηκε. Τα τμήματα δίνονται σχηματικά στο Σχ. 16.

Αρχικά ορίζεται η πίεση διείσδυσης αέρα (Air Entry Value), το σημείο όπου πλέον το δείγμα δεν θεωρείται κορεσμένο, στα 15 kPa μύζηση, στη συνέχεια ορίζεται η μεταβατική ζώνη (Transition Zone), όπου το δείγμα μεταβαίνει στην ακόρεστη κατάσταση, από τα 15 έως τα 40 kPa και τέλος η παραμένουσα ζώνη (Residual Zone), όπου το δείγμα θεωρείται ακόρεστο και η συμπεριφορά του παραμένει σταθερή, από τα 40 kPa έως τη μέγιστη τιμή μύζησης (455 kPa).



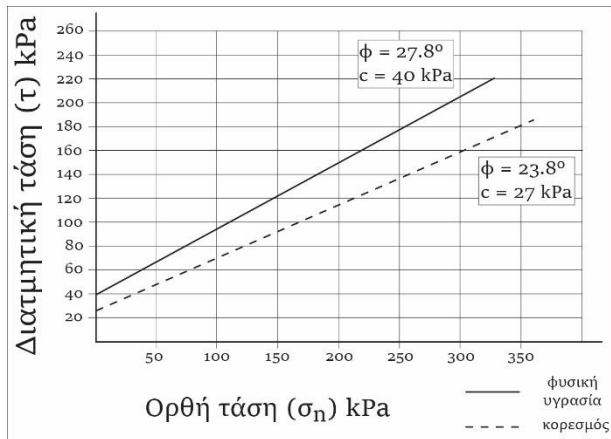
Σχ. 16. Ανάλυση της ΧΚΕΝ ως προς την πίεση διείσδυσης αέρα, τη μεταβατική ζώνη και την παραμένουσα ζώνη (Βλάχος 2015).

Fig. 16. Matric suction vs axial displacement during the production of SWCC for sample S1 (Vlachos 2015).

4.4 Αποτελέσματα δοκιμών CD

Στο Σχ. 17 παρουσιάζεται ένα συνδυαστικό διάγραμμα των παραμέτρων αντοχής για τις περιπτώσεις κορεσμού και φυσικής υγρασίας στα δείγματα του σχηματισμού S1. Οι υπολογιζόμενες τιμές αντοχής παρατίθενται συνοπτικά στον Πιν. 7. Οι παράμετροι αντοχής υπολογίστηκαν σε συνθήκες κορεσμού $c=27,0$ kPa και $\phi=23,8^\circ$. Η υπολογιζόμενη σημαντική τιμή της συνοχής οφείλεται πιθανώς στο βαθμό συγκόλλησης του εν λόγω σχηματισμού. Σε τέτοιες περιπτώσεις παρατηρείται συχνά το φαινόμενο η υπολογιζόμενη απομένουσα (post peak) γωνία τριβής ϕ_{cr} να είναι μεγαλύτερη της αρχικής τιμής ϕ , εξαιτίας της καταστροφής των δεσμών συγκόλλησης σε δοκιμές διάτμησης με υψηλές τιμές κάθετης τάσης (Vargas, 1974). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στη συγκεκριμένη περίπτωση, με υπολογιζόμενη τιμή $\phi_{cr}=35,0^\circ$, η οποία προσεγγίζει αριθμητικά την υπολογιζόμενη τιμή γωνίας τριβής μέσω εμπειρικής σχέσης από την επί τόπου δοκιμή N_{SPT} ($\phi=42,0^\circ$).

Σε συνθήκες φυσικής υγρασίας, που αντιστοιχούν σε τιμή μύζησης $s=400$ kPa, όπως προκύπτει από τη Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους Νερού, οι παράμετροι αντοχής υπολογίστηκαν $c=40,0$ kPa και $\phi=27,8^\circ$. Παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση μία σημαντική αύξηση της τιμής της ολικής συνοχής με παράλληλη επίσης μικρή αύξηση της τιμής της γωνίας τριβής.



Σχ. 17. Συνδυαστικό διάγραμμα μηχανικών παραμέτρων για τις περιπτώσεις κορεσμού και φυσικής υγρασίας στα δείγματα του σχηματισμού S1.

Fig. 17. Shear strength parameters for both saturated and unsaturated conditions at the natural moisture content of soil formation S1.

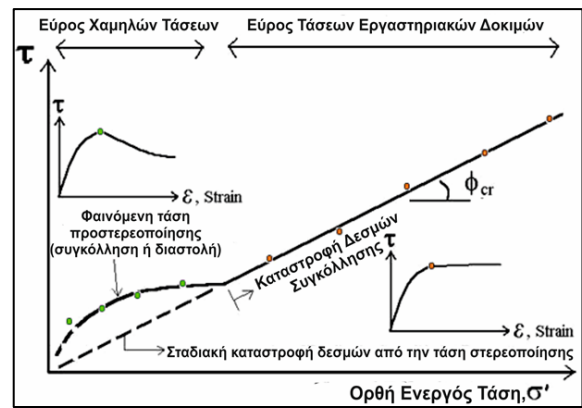
Πιν. 7. Υπολογισμός παραμέτρων διατμητικής αντοχής για το σχηματισμό S1 (Βλάχος, 2015).

Tab. 7. Experimental shear strength parameters for formation S1 (Vlachos, 2015).

Μηχανικές Παράμετροι	
Κορεσμένες συνθήκες	c : 27.0 (kPa)
	φ : 23.8 (°)
Ακόρεστες συνθήκες	c : 40.0 (kPa)
	φ : 27.8 (°)
Nspt	c : 0.0 (kPa)
	φ : 42.0 (°)
Υψηλές εργαστηριακές τάσεις (Vargas, 1974)	c : 0.0 (kPa)
	φ _{cr} : 35.0 (°)

Από την δοκιμή διάτμησης στη φυσική υγρασία με κάθετη τάση 106 kPa και από την αντίστοιχη της σε κορεσμένες συνθήκες, προκύπτει η σύγκριση ως προς τη μέγιστη και την απομένουσα (post peak) διατμητική αντοχή. Στο Σχ. 19 παρουσιάζεται το διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τις δύο δοκιμές.

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι δύο καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή με τη μέγιστη διατμητική αντοχή για τον κορεσμό να δίνεται στα 80 kPa και να αντιστοιχεί σε 13% παραμόρφωση, ενώ η διάτμηση στη φυσική υγρασία με αντίστοιχη τιμή μύζησης s=400 kPa έδωσε μέγιστη διατμητική

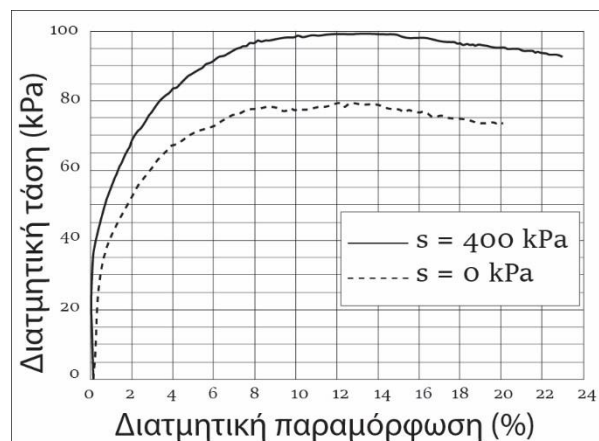


Σχ. 18. Επίδραση της ύπαρξης δεσμών στον υπολογισμό της συνοχής από μία περιβάλλουσα αστοχίας σε συνθήκες αποστράγγισης (Vargas, 1974).

Fig. 18. Influence of bonds in the estimation of cohesion from a failure envelope in drained conditions (Vargas, 1974)

αντοχή στα 99 kPa για το ίδιο ποσοστό παραμόρφωσης.

Η απομένουσα διατμητική αντοχή σε κατάσταση κορεσμού παρατηρείται στα 74 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 18%, ενώ η αντίστοιχη για τη φυσική υγρασία στα 90 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 25%. Από το διάγραμμα μπορεί να υπολογισθεί και παρουσιάζεται στον Πιν. 8 η γωνία ϕ^b του σχηματισμού S1 για το εύρος τάσεων που εκτελέστηκαν οι παραπάνω δοκιμές. Υπολογίστηκε τελικώς $\phi^b=3^\circ$.



Σχ. 19. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για δείγματα με διαφορετική τιμή μύζησης και ίδια τιμή κάθετης τάσης.

Fig. 19. Shear stress-strain diagrams for saturated and unsaturated conditions and for the same value of normal stress.

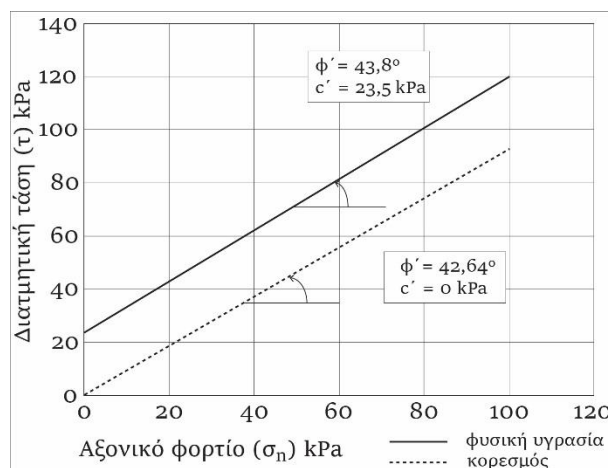
Πιν. 8. Υπολογισμός γωνίας τριβής ϕ^b με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές για το σχηματισμό S1.

Tab. 8. Calculation of parameter ϕ^b based on experimental data for formation S1.

A/A	$(u_a - u_w)$ (kPa)	τ (kPa)	
1	0	80	
2	400	99	$\phi^b : 3^\circ$

Στο Σχ. 20 παρουσιάζεται ένα συνδυαστικό διάγραμμα των παραμέτρων αντοχής για τις περιπτώσεις κορεσμού και φυσικής υγρασίας στα δείγματα του σχηματισμού S2. Οι υπολογιζόμενες τιμές αντοχής παρατίθενται συνοπτικά στον Πιν. 9. Οι παράμετροι αντοχής υπολογίστηκαν σε συνθήκες κορεσμού $c=0,0$ kPa και $\phi=42,6^\circ$.

Σε συνθήκες φυσικής υγρασίας, που αντιστοιχούν σε τιμή μύζησης $s=120$ kPa, όπως προκύπτει από τη χαρακτηριστική καμπύλη μύζησης, οι παράμετροι αντοχής υπολογίστηκαν $c=23,5$ kPa και $\phi=43,8^\circ$. Παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση μία σημαντική αύξηση της τιμής της ολικής συνοχής με τη διαφορά όμως σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις πως η τιμή της γωνίας τριβής παραμένει σχεδόν σταθερή. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε πλήρη εναρμόνιση με την θεωρητική εξίσωση της διατμητικής αντοχής (Εξ. 3) σε ακόρεστες συνθήκες.



Σχ. 20. Συνδυαστικό διάγραμμα μηχανικών παραμέτρων για τις περιπτώσεις κορεσμού και φυσικής υγρασίας στα δείγματα του σχηματισμού S2.

Fig. 20. Shear strength parameters for both saturated and unsaturated conditions at the natural moisture content of soil formation S2.

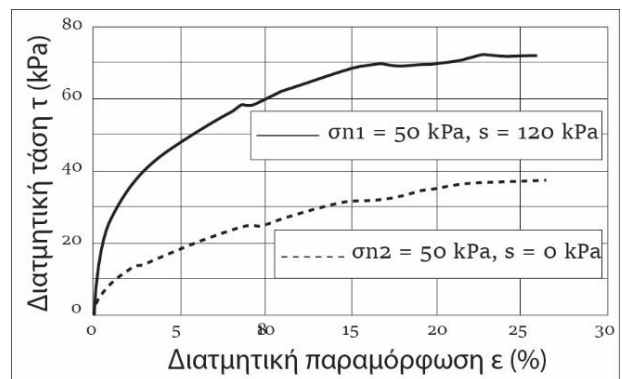
Πιν. 9. Υπολογισμός παραμέτρων διατμητικής αντοχής για το σχηματισμό S2 (Παπατσικουράκης, 2019).

Tab. 9. Experimental shear strength parameters for formation S2 (Papatsikourakis, 2019).

Μηχανικές Παράμετροι Αντοχής	
Κορεσμένες συνθήκες	$c : 0,0$ (kPa) $\phi : 42,6^\circ$
Ακόρεστες συνθήκες	$c : 23,5$ (kPa) $\phi : 43,8^\circ$

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης για συνθήκες κορεσμού και τιμή μύζησης $s=120$ kPa (Σχ. 21), παρατηρείται αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μείωση του βαθμού κορεσμού και αύξηση του ποσοστού μεταβολής της διατμητικής αντοχής με μείωση της αξονικής φόρτισης ($\sigma_n=22,5$ kPa αύξηση=120%, $\sigma_n=50$ kPa αύξηση=100% και $\sigma_n=100$ kPa αύξηση=20%).

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνοχή εξαιτίας της αύξησης της μύζησης σε τιμή $s=120$ kPa υπολογίστηκε εργαστηριακά της τάξης των $c=23,5$ kPa προκύπτει ότι η γωνία ϕ^b αντιστοιχεί σε τιμή $11,0^\circ$.



Σχ. 21. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για δείγματα με διαφορετική τιμή μύζησης και ίδια τιμή κάθετης τάσης.

Fig. 21. Shear stress-strain diagrams for saturated and unsaturated conditions and for the same value of normal stress.

5. Συζήτηση-Συμπεράσματα

Ακόμα και σήμερα, το πεδίο της έρευνας των ακόρεστων εδαφών είναι πολύ ανοιχτό και υπάρχει σημαντικό έλλειμμα πληροφοριών σχετικά με τις δυσκολίες προβλημάτων σε

ακόρεστα εδάφη. Οι κυριότερες ανάγκες έρευνας είναι οι ακόλουθες:

1. Η μέτρηση της μύζησης. Πρέπει να αναπτυχθούν εργαστηριακές και επί τόπου διατάξεις μέτρησης της εδαφικής μύζησης. Ήδη οι περισσότερες εταιρίες εργαστηριακού εξοπλισμού κατασκευάζουν διατάξεις με δυνατότητα άμεσης ή έμμεσης μέτρησης της μύζησης.
2. Απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους Νερού. Εκτός από τη δημοσίευση ΧΚΕΝ για όσο το δυνατόν περισσότερα είδη γεωυλικών, πρέπει να αναπτυχθεί περισσότερο και το κομμάτι των πληροφοριών που μπορεί κανείς να αντλήσει από αυτές. Με άλλα λόγια, να προσανατολισθεί η έρευνα στη συσχέτιση των ΧΚΕΝ με τις παραμέτρους της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών. Τα τελευταία χρόνια, αρκετά προγράμματα γεωτεχνικών υπολογισμών συνοδεύονται από βάσεις δεδομένων εδαφικών παραμέτρων, οι οποίες περιλαμβάνουν και Χαρακτηριστικές Καμπύλες Εδάφους Νερού.
3. Υπάρχει ανάγκη απλοποίησης των μαθηματικών διατυπώσεων για τα διάφορα προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής που αφορούν και ακόρεστα εδάφη.
4. Η έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες πρέπει να επεκταθεί και σε ειδικές κατηγορίες εδαφών. Τέτοια είναι τα υπολειμματικά εδάφη, μια κατηγορία εδαφών που διέπεται συνήθως από τις αρχές της ακόρεστης μηχανικής συμπεριφοράς.
5. Ολοκληρωμένες περιπτώσεις έρευνας. Υπάρχει ανάγκη για ολοκληρωμένη καταγραφή πληροφοριών τάσεων, εδαφικών παραμέτρων και συμπεριφοράς σε περιπτώσεις που σχετίζονται με προβλήματα διαρροής, μεταβολής όγκου και διατμητικής αντοχής σε ακόρεστα εδάφη.

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη σύνοψη μιας πολυετούς πειραματικής έρευνας σχετικά με τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής γεωυλικών και των μεταβολών της με αντίστοιχες μεταβολές του βαθμού κορεσμού. Περιλαμβάνει την πειραματική προσέγγιση του κρίσιμου προβλήματος της μηχανικής συμπεριφοράς υπολειμματικών εδαφών του ελλαδικού χώρου σε ακόρεστες συνθήκες καθώς και τη διερεύνηση της επιρροής της μύζησης σε αδρόκοκκους

σηματισμούς, για τους οποίους υπάρχουν διεθνώς ελάχιστα πειραματικά δεδομένα, καθώς υπάρχουν ελάχιστες συσκευές διάτμησης με έλεγχο της μύζησης για μη συνεκτικά γεωυλικά.

Η προσέγγιση αυτή έγινε με τη χρήση πειραματικών διατάξεων ελέγχου της μύζησης κατά τη διάρκεια δοκιμών βραδείας θλίψης (CD) με στόχο τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής σε ακόρεστες συνθήκες c' , ϕ' και ϕ'^b . Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών σε συνδυασμό με τη γνώση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους Νερού είναι απαραίτητος για την ερμηνεία της διατμητικής αντοχής σε ακόρεστες συνθήκες.

Το συνεκτικό γεωυλικό που εξετάστηκε και παρουσιάζεται στην Ενότητα 3 αποτελεί ένα σχεδόν πλήρως αργιλοποιημένο προϊόν αποσάθρωσης μεταμορφωμένων πετρωμάτων, για το οποίο ή για παρόμοιας προέλευσης γεωυλικά τα πειραματικά δεδομένα στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ελάχιστα. Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας το συγκεκριμένο γεωυλικό παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλή τιμή γωνίας τριβής ϕ' ($\approx 13^\circ$) και τιμή της απομένουσας γωνίας ϕ'_{pp} ($\approx 11^\circ$) η οποία είναι υψηλή σε σχέση με τη ϕ' . Η χαμηλή τιμή της ϕ' μπορεί να αποδοθεί στην ορυκτολογική σύσταση του γεωυλικού και πιο συγκεκριμένα στην παρουσία διογκούμενων αργιλικών ορυκτών που μπορεί να εμφανίζουν μεγάλο πλακοειδές (σμεκτίτες). Σύμφωνα με τους Mesri & Cepeda-Diaz, (1986) η παρουσία τέτοιων ορυκτών δικαιολογεί πολύ μικρές τιμές ϕ' και ϕ'_{pp} οι οποίες μάλιστα παρουσιάζουν μικρή απόκλιση μεταξύ τους.

Επιπρόσθετα παρατηρείται αύξηση της ϕ' με αύξηση της μύζησης. Το φαινόμενο συναντάται στη βιβλιογραφία ως παραμένουσα αντοχή των εδαφών μετά την αστοχία λόγω συσσωμάτωσης των αργιλικών ορυκτών (aggregation stiffening), δηλαδή σε δομικού τύπου αστοχίες. Φαίνεται λοιπόν πως οι εκτιμώμενες τιμές αντοχής αποτελούν την δομικού χαρακτήρα αντοχή του εξεταζόμενου υπολειμματικού εδάφους. Σημειώνεται πως η επέκταση της εξίσωσης της διατμητικής αντοχής σε ακόρεστες συνθήκες κατά το επεκτεταμένο γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb (Εξ. 3) θεωρεί πως η τιμή της γωνίας ϕ' δεν επηρεάζεται από μεταβολές της μύζησης.

Οι τιμές c' και ϕ' για $u_a - u_w = 400$ kPa που υπολογίστηκαν συμφωνούν απόλυτα με τα αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων που έγιναν για τις αστοχίες των τεχνητών πρανών στην περιοχή της Ασπροβάλας, στις οποίες

συμμετείχαν τα γεωυλικά που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία (Χατζηγώγος & Μακεδών, 2008).

Η τιμή της $\phi^b=8,1^\circ$ που υπολογίστηκε είναι χαρακτηριστική του γεωυλικού που εξετάστηκε και καθορίζει την αύξηση της διατμητικής αντοχής του με την αύξηση της τιμής της μύζησης. Γενικά η συμπεριφορά του υλικού προσομοιάζει με αυτήν ενός υπερστερεοποιημένου υλικού για υψηλές τιμές μύζησης και ενός κανονικά στερεοποιημένου για χαμηλές τιμές μύζησης.

Σε ότι αφορά τα αδρόκοκκα εδαφικά υλικά S1 και S2 στα οποία εκτελέστηκαν δοκιμές άμεσης διάτμησης με έλεγχο της μύζησης, είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός της παραμέτρου ϕ^b . Από τα αποτελέσματα φαίνεται πως η επιρροή της μύζησης στην ολική συνοχή για το σχηματισμό S1 που έχει αρχική υψηλή τιμή συνοχής σε κορεσμένες συνθήκες λόγω συγκόλλησης των κόκκων είναι μικρή ($\phi^b=3,0^\circ$), σε σχέση με την επιρροή της μύζησης στο σχηματισμό S2 ο οποίος έχει μηδενική συνοχή ($\phi^b=11,1^\circ$).

Αντίστοιχα παρατηρείται σημαντική αύξηση της γωνίας τριβής ϕ με αύξηση της μύζησης στο σχηματισμό S1, ο οποίος έχει σχετικά μικρή τιμή σε κορεσμένες συνθήκες ($\phi=23,8^\circ$), ενώ η τιμή της για το σχηματισμό S2, που είναι υψηλή ($\phi=42,6^\circ$) δεν επηρεάζεται πρακτικά από μεταβολές της μύζησης. Γενικότερα όμως, το φαινόμενο της αύξησης της τιμής της ϕ με αύξηση της μύζησης δημιουργεί προβληματισμό για την εναρμόνιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με την θεωρητική εξίσωση της διατμητικής αντοχής (Εξ. 3) σε ακόρεστες συνθήκες, όπου και θεωρείται πως δε μεταβάλλεται η τιμή της.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαίτερα το συνεργάτη μου Δρ. Θωμά Μακεδών και τους κυρίους καθηγητές Βασίλειο Χρηστάρα και Βασίλειο Μαρίνο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μεταπτυχιακούς φοιτητές Β. Βλάχο και Δ. Παπατσικουράκη, που συμμετείχαν στην παρούσα έρευνα μέσω των διπλωματικών τους εργασιών.

Τέλος τους ομότιμους καθηγητές γεωτεχνικής μηχανικής, Στέφανο Τσότσο και Θεόδωρο

Χατζηγώγο για την επιστημονική υποστήριξη τους.

Βιβλιογραφία

Βλάχος, Χ., 2015, *Εργαστηριακή προσομοίωση των συνθήκων διάτμησης εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες*, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης Α.Π.Θ 2015, σελ. 106.

Παπατσικουράκης, Δ., 2018, *Διερεύνηση των συνθήκων θεμελίωσης στο Γενί τζαμί της Έδεσσας*, Διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ 2018, σελ. 99.

Χατζηγώγος, Ν., Μακεδών, Θ., 2008, *Η επίδραση της παρουσίας υπολειμματικών υλικών στην ευστάθεια πρανών σε μεταμορφωμένα πετρώματα με έντονη αποσάθρωση και καταπόνηση*, Άρθρο 1907. Συμμετοχή στο 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα, 5-7 Νοεμβρίου 2008.

Χατζηγώγος, Ν., Μακεδών, Θ., γ. Δημόπουλος, Γ., Τσότσος, Σ., Χρηστάρας, Β., 2010, *Εργαστηριακή διερεύνηση της διατμητικής αντοχής υπολειμματικών υλικών σε ακόρεστες συνθήκες*, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Βόλος 29-1/10 2010.

Χατζηγώγος, Ν. Θ., 2015, *Συμβολή στη διερεύνηση των μηχανισμών αστοχίας υπολειμματικών εδαφών*, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ 2015, σελ. 365.

Chatzigogos, N. P., Makedon, T. K. and Tsotsos S., 2007, *The mechanical behaviour of gneissous rocks and selection of strength parameters for stability analysis of excavated slopes*, Proceedings 1st Sri Lankan Geotechnical Society (SLGS) International Conference on Soil and Rock Engineering, Colombo, paper no 2560

Escario, V., & Saez, J., 1986, *The Shear Strength of Partly Saturated Soils*, Geotechnique, 36 (3), (σσ. 453-456).

Escario, V., Juca, J. F., & Coppe, M. S., 1989, *Strength and Deformation of Partly Saturated Soils*, Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech & Found. Eng., (σσ. 43-46). Rio de Janeiro, Brazil.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A., 1978, *The shear strength of unsaturated soils*, Can. Geotech. J., Vol. 15, No 3, pp. 313-321.

- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H., 1985, *Theoretical context for understanding unsaturated residual soils behaviour*, *Proc. 1st Intern. Conf. Geomechanics in tropical laterite and saprolitic soils*, Sao Paolo, Brazil, pp. 295-306.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H., 1993, *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons Inc., USA, p. 517.
- Gan, J. K. M., 1986, *Direct shear strength testing of unsaturated soils*, MSc-thesis, University of Saskatchewan, Canada.
- GDS Specification Datasheet: (a)*Saturated Unsaturated Back Pressured Shearbox (GDSBPS)*, (b)*Pneumatic Pressure Controller (GDSPPC)*, (c)*Standard Pressure Volume Controller (STDDPC)* v2.
- Mesri, G., and Cepeda-Diaz, A. F., 1986, *Residual shear strength of clays and shales*, *Geotechnique*, Vol. 36, No 2, pp. 269-274.
- Rahardjo, H., Heng, O. B., and Choon, L. E., 2004, *Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests*, *Can. Geotech. J.*, Vol. 41, pp. 421-436.
- Vargas, M., 1974, *Engineering properties of residual soils from south-central region of Brazil*, In *Proceedings of the Second International Conference of the International Association of Engineering Geology*, Sao Paulo, Brazil (Vol. 1, σσ 5,1-5,26).

ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

SOIL EXPANSION DUE TO CHANGES IN THE DEGREE OF SATURATION AND ITS IMPACT ON STRUCTURES

Δ. Λουκίδης¹

Δρ Πολιτικός Μηχανικός

Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου
Κύπρου

Πρόεδρος ΚΕΕΕΓΜ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας και η συνεπαγόμενη μείωση της μύζησης οδηγεί στην αύξηση του όγκου του εδάφους. Η αύξηση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στα αργιλικά εδάφη με σημαντική περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη. Η διόγκωση των αργίλων αποτελεί την αιτία για σημαντικά προβλήματα σε κατασκευές που θεμελιώνονται σε αυτές, με συνολικό παγκόσμιο ετήσιο κόστος ζημιών της τάξεως των δεκάδων δισεκατομμυρίων δολαρίων. Το παρόν άρθρο παρουσιάζει τους παράγοντες που καθορίζουν τη διογκωσιμότητα των εδαφών, τις επιπτώσεις που αυτή έχει στις κατασκευές του πολιτικού μηχανικού, καθώς και τρόπους για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων που έχουν προταθεί και εφαρμοστεί διεθνώς έως σήμερα.

ABSTRACT: The increase of moisture content and the resulting suction reduction leads to soil volume expansion. This volume increase is particularly intense in clayey soils containing substantial amounts of montmorillonite. The swelling of clays causes significant problems to structures founded on them, with the total worldwide annual cost amounting to tens of billions of dollars. The present article presents the factors that control the expansiveness of soils, its impact on civil engineering works, and methods that have been proposed and

applied so far throughout the world for mitigating the consequences of soil swelling.

1. Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι ο όγκος των εδαφών δύναται να μεταβληθεί λόγω αυξομείωσης της περιεχόμενης υγρασίας. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της συρρίκνωσης εδάφους λόγω ξήρανσης (μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας), εύκολα παρατηρούμενη στη φύση σε περιόδους ξηρασίας λόγω των συνεπαγόμενων ρηγματώσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Η αντίστροφη διαδικασία, δηλ. η αύξηση του ποσοστού υγρασίας οδηγεί σε αύξηση του εδαφικού όγκου.

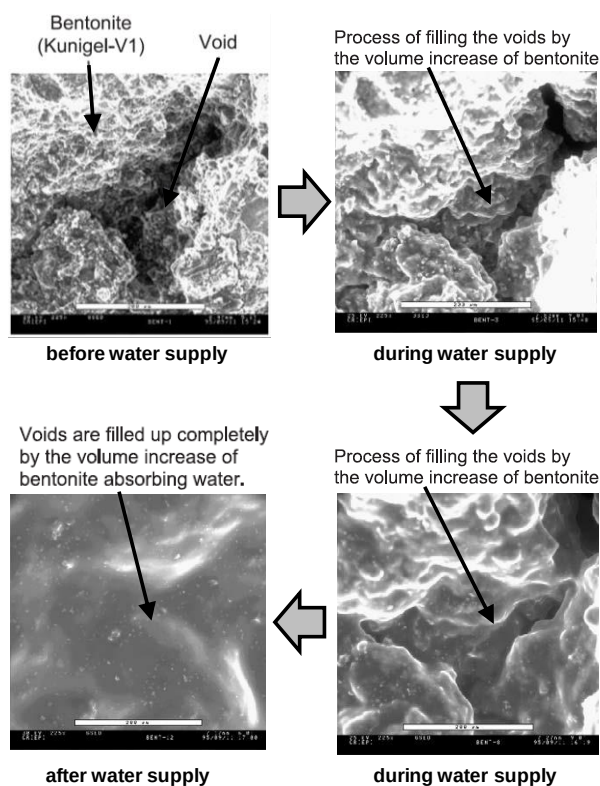
Στα μη πλαστικά εδάφη (π.χ. άμμοι, μη πλαστικές ιλύες), ο μηχανισμός ανάπτυξης αυτών των παραμορφώσεων έχει να κάνει με τις μεταβολές της μύζησης (suction) που προκαλεί η προσθήκη ή αφαίρεση νερού από τους πόρους του εδάφους, όπως περιγράφεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (soil-water characteristic curve: SWCC, Τσιαμπούση, 2019). Για παράδειγμα, η αύξηση του βαθμού κορεσμού ενός εδάφους (μεγαλύτερο μέρος των πόρων καταλαμβάνεται από νερό), προκαλεί μείωση της μύζησης, η οποία με τη σειρά της οδηγεί στην ελάττωση των ενεργών εδαφικών κόκκων. Θεώρηση ακόμη και ενός απλού ελαστικού νόμου καταδεικνύει ότι η μείωση των ενεργών τάσεων (ανακούφιση του εδαφικού σκελετού από τις έλξεις της μύζησης) θα προξενήσει αύξηση του όγκου του. Στα μη πλαστικά εδάφη, αυτές οι ογκομετρικές παραμορφώσεις είναι συχνά μικρές ώστε να θεωρούνται αμελητέες στην πράξη, αφού δεν μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στις ανθρώπινες κατασκευές.

Στην περίπτωση των λεπτόκοκκων εδαφών που εμφανίζουν πλαστικότητα, προστίθεται ένας ακόμη μηχανισμός γένεσης ογκομετρικών παραμορφώσεων, ο οποίος σχετίζεται με τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις και τις δυνάμεις van der Waals που κυριαρχούν στη μικροκλίμακα των αργιλικών πλακιδίων και των κατιόντων που περιέχονται στο νερό. Η ύγρανση μιας μερικώς κορεσμένης αργίλου δίνει τη δυνατότητα στα πλακιδιά της να δεσμεύσουν επιπλέον νερό, αυξάνοντας τον όγκο του διπλού στρώματος και κατά συνέπεια οδηγώντας σε περαιτέρω αύξηση του συνολικού όγκου του εδάφους. Το αντίθετο φαινόμενο (σμίκρυνση

¹ Ηλεκτρονική διεύθυνση επικοινωνίας:
loukidis@ucy.ac.cy

του διπλού στρώματος) συμβαίνει όταν η άργιλος υπόκειται σε ξήρανση.

Στο Σχ. 1 δίνονται διαδοχικές εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου όπου φαίνεται η πορεία αύξησης του όγκου των συμπλεγμάτων πλακιδίων και διπλών στρωμάτων κατά τη διαβροχή μιας μπεντονιτικής άργιλου με υψηλή περιεκτικότητα στο αργιλικό ορυκτό μοντμοριλλονίτης (Komine, 2004). Η δέσμευση νερού από τα πλακίδια μοντμοριλλονίτη είναι τόσο έντονη που στο τέλος της διαδικασίας το δεσμευμένο νερό καταλαμβάνει σχεδόν πλήρως τον χώρο που καταλάμβαναν τα κενά του αρχικώς μερικώς κορεσμένου υλικού.



Σχ. 1. Προσρόφιση νερού από πλακίδια μπεντονιτικής άργιλου όπως φαίνεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (από Engineering Geology, vol. 71, Komine H, *Simplified Evaluation for Swelling Characteristics of Bentonites*, pp. 265-279, Copyright (2004), με άδεια του Elsevier).

Fig. 1. Water absorption from bentonitic clay particles as seen in electron scanning microscope (adapted from Engineering Geology, vol. 71, Komine H, *Simplified Evaluation for Swelling Characteristics of Bentonites*, pp. 265-279, Copyright (2004), with permission from Elsevier).

Η διόγκωση και η συρρίκνωση είναι δυο όψεις του ίδιου νομίσματος και στη συνέχεια του

κειμένου ως διογκώσιμα (expansive) εδάφη αναφέρονται αυτά που εμφανίζουν σημαντικές, από πρακτικής απόψεως, ογκομετρικές παραμορφώσεις εξαιτίας μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας, είτε πρόκειται για διόγκωση (λόγω ύγρυνσης) είτε για συρρίκνωση (λόγω ξήρανσης). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο παρόν άρθρο ως θετικές παραμορφώσεις θεωρούνται οι εκτατικές, ενώ ως αρνητικές οι συρρικνώσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράγοντες που καθορίζουν την ανάπτυξη των εν λόγω παραμορφώσεων και το πώς αυτές μπορούν να εκτιμηθούν, με στόχο την κατανόηση της επίδρασης του φαινομένου στις κατασκευές του πολιτικού μηχανικού και των πρακτικών τρόπων αντιμετώπισης του.

2. Ορυκτολογία και γεωλογική προέλευση

Ο μηχανισμός της ανάπτυξης παραμορφώσεων που οφείλονται στην αυξομείωση του διπλού στρώματος γίνεται εντονότερος όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια και, κατά συνέπεια, η ενεργότητα (activity) και η πλαστικότητα της άργιλου. Το αργιλικό ορυκτό με πλακίδια με τη μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια είναι ο μοντμοριλλονίτης (καθώς και άλλοι σμεκτίτες), ενώ με τη μικρότερη είναι ο καολινίτης. Ο ιλλίτης, που είναι το αργιλικό ορυκτό που βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στη φύση, είναι ενδιάμεσα του καολινίτη και του μοντμοριλλονίτη. Συνεπώς, τα λεπτόκοκκα εδάφη που έχουν σημαντική περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη αναμένεται να είναι και τα πιο διογκώσιμα. Ακραία περίπτωση τέτοιων εδαφών είναι αυτή των επονομαζόμενων μπεντονιτικών αργίλων, όπου η περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη είναι της τάξεως του 40% με 80%. Όταν η περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη είναι στο ανώτερο τμήμα αυτού του εύρους, ή ακόμη και μεγαλύτερη, όπως π.χ. στη νήσο Μήλο, τότε είθισται να μιλούμε για μπεντονίτη, ο οποίος εξορύσσεται και έχει ποικίλες εφαρμογές σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους, σε καταναλωτικά προϊόντα και στην τεχνολογία των γεωτρήσεων.

Ο μοντμοριλλονίτης είναι κατά κύριο λόγο προϊόν υποθαλάσσιας εξαλλοίωσης ηφαιστειακών πετρωμάτων από υδροθερμικούς πίδακες. Ο μοντμοριλλονίτης, που δημιουργείται από τα αναδυόμενα θερμά διαλύματα που διατρέχουν τα πετρώματα,

εκλύεται από τους πίδακες και διαχέεται στα κατώτερα στρώματα του θαλάσσιου σώματος μαζί με άλλες χημικές ενώσεις. Με το χρόνο καθιζάνει λόγω βαρύτητας ως ιζημα στο θαλάσσιο πυθμένα μαζί με άλλα ιζήματα, δίνοντας έτσι μπεντονιτικές αργίλους.

Όταν αυτά τα ιζήματα ή ιζηματογενή πετρώματα γίνουν μέρος του αναγλύφου της στεριάς χάρη σε τεκτονικές δράσεις και ορογένεση, υπόκεινται στους διαβρωτικούς παράγοντες της ατμόσφαιρας. Έτσι παράγονται εκ νέου ιζήματα με σημαντικό ποσοστό μοντμοριλλονίτη, τα οποία μπορούν να γίνουν μέρος νέων, αλλά πιο εκτεταμένων, εδαφικών σχηματισμών κατάντη, δίνοντας δευτερογενώς εδάφη με χαμηλή έως και πολύ μεγάλη διογκωσιμότητα.

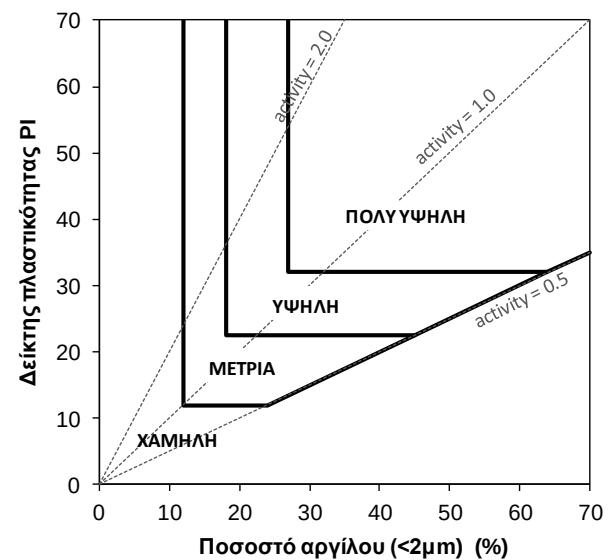
Για παράδειγμα, στην Κύπρο οι μπεντονιτικές αργίλοι που σχηματίστηκαν πριν από 70 με 80 εκατομμύρια χρόνια στον πυθμένα της θάλασσας της Τηθύος (προγόνου της Μεσογείου θάλασσας) καταλαμβάνουν σήμερα ένα σχετικά μικρό μέρος της επιφανειακής γεωλογίας της νήσου. Εντούτοις, όγκοι αυτών των γεωλογικών σχηματισμών που εκτέθηκαν εν τω μεταξύ στην ατμόσφαιρα έδωσαν υλικά διάβρωσης με υψηλό ποσοστό μοντμοριλλονίτη, τα οποία κατάληξαν να συμμετέχουν στον σχηματισμό νεώτερων ιζηματογενών πετρωμάτων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τις μέτρια ως πολύ ισχυρά διογκώσιμες χακί μάργες του Σχηματισμού Λευκωσίας, ηλικίας Πλειοκαίνου (δηλ. 2.5 με 5.5 εκ. χρόνια πριν). Η περιεκτικότητα της χακί μάργας σε μοντμοριλλονίτη κυμαίνεται από 10% έως 20%, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει τα 25%, καθιστώντας τη μάργα υλικό πολύ υψηλής διογκωσιμότητας (Constantinou et al. 2002). Διογκώσιμα εδάφη απαντώνται σε πολλά μέρη της υψηλίου, αποτελώντας έτσι πρόκληση για τον μηχανικό που θα κληθεί να σχεδιάσει και να κατασκευάσει σε αυτά. Διογκώσιμα εδάφη καταλαμβάνουν ιδιαίτερα σημαντικές εκτάσεις στις νότιες και κεντρικές Ηνωμένες Πολιτείες, Νότιο Αφρική, Ισπανία, Αυστραλία, Κίνα, Ινδία και Μέση Ανατολή.

3. Εμπειρικό διάγραμμα Van der Merwe

Η διογκωσιμότητα των αργιλικών εδαφών μπορεί να μετρηθεί ποσοτικά στο εργαστήριο, αλλά και να εκτιμηθεί για πρακτικούς σκοπούς χρησιμοποιώντας εμπειρικές συσχετίσεις με

βάση φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως τα όρια Atterberg και η κοκκομετρία, που αντικατοπτρίζουν έμμεσα την ορυκτολογική του σύνθεση και που απαντώνται σχεδόν πάντα στις γεωτεχνικές εκθέσεις έρευνας πεδίου.

Ο Van der Merwe (1975) πρότεινε ένα διάγραμμα (Σχ. 2) για τον χαρακτηρισμό της διογκωσιμότητας των εδαφών, υπό την έννοια του πόσο πολύ μπορεί διογκωθεί δυνητικά ένα έδαφος αν οι επί τόπου συνθήκες είναι τέτοιες που να ευνοούν τη διόγκωση (μικρό ποσοστό υγρασίας, μεγάλη πυκνότητα, μικρή κατακόρυφη τάση). Το διάγραμμα Van der Merwe (1975) αναφέρεται συχνά και ως «Νοτιοαφρικανικό» διάγραμμα λόγω της προέλευσης της έρευνας και εμπειρίας που χρησιμοποιήθηκαν στην κατάστρωση του. Σύμφωνα με το διάγραμμα, το εδαφικό υλικό χαρακτηρίζεται ως χαμηλής, μέσης, υψηλής ή πολύ υψηλής διογκωσιμότητας ανάλογα με το δείκτη πλαστικότητας PI και το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος ορισμένο ως ισοδύναμη διάμετρος κόκκου μικρότερη από 2μm. Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης πλαστικότητας και όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε αργίλο, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση για διογκωση/συρρίκνωση του εδάφους.



Σχ. 2. Εμπειρικό διάγραμμα χαρακτηρισμού διογκωσιμότητας εδαφών του Van der Merwe (1975).

Fig. 2. Empirical chart for the characterization of soil expansiveness by Van der Merwe (1975).

Επιπλέον, ο Van der Merwe (1975) πρότεινε μια αντιστοίχιση των τεσσάρων περιοχών του διαγράμματος (Σχ. 2) με ενδεικτικές τιμές της

τάξης μεγέθους τη δυνητικής διόγκωσης του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο. Συγκεκριμένα, η δυνητική διογκωσιμότητα (potential expansiveness) PE δίνεται σε όρους inches per foot (in/ft) ανά κατηγορία στον Πίν. 1. Στον Πιν. 1 φαίνονται επίσης οι αντίστοιχες τιμές κατακόρυφης παραμόρφωσης ε_s .

Πίν. 1. Τιμές δυνητικής διογκωσιμότητας κατά Van der Merwe (1975).

Tab. 1. Values of potential expansiveness according to Van der Merwe (1975).

Κατηγορία διογκωσιμότητας	PE (in/ft)	ε_s (%)
Πολύ Υψηλή	1	8.3
Υψηλή	0.5	4.2
Μέτρια	0.25	2.1
Χαμηλή	0	0.0

Οι τιμές του Πιν. 1 αναφέρονται σε ελεύθερη διόγκωση, δηλαδή υπό καθεστώς πολύ μικρής κατακόρυφης τάσης. Για εδαφικά στοιχεία που βρίσκονται σε βάθος εντός του εδαφικού προφίλ, γίνεται αναγωγή πολλαπλασιάζοντας το PE με ένα μειωτικό συντελεστή F που δίνεται από την εξής σχέση:

$$F = 10^{-D/20} \quad (1)$$

όπου D το βάθος σε ft.

Τα παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση μιας αδρής, μάλλον υπερσυντηρητικής, εκτίμησης της δυνητικής ανύψωσης ΔH της επιφάνειας του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο, διαιρώντας το στρώμα της διογκώσιμης αργίλου σε n υποστρώματα πάχους d_i και χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{s,i} \times F_i \times d_i \quad (2)$$

όπου i υποδηλώνει τον αριθμό του εκάστοτε υποστρώματος.

Η Εξ. 1 προβλέπει ότι η τάση για διόγκωση πρακτικώς εξαφανίζεται σε βάθος περίπου 70ft ή 20m. Εντούτοις, όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα, το εύρος βάθους στο οποίο αναμένεται να συμβούν εποχιακές μεταβολές του βαθμού κορεσμού είναι σαφώς μικρότερο. Επομένως, ακόμη και αν το εδαφικό στρώμα που έχει χαρακτηριστεί ως διογκώσιμο εκτείνεται σε μεγάλο βάθος, το τμήμα του που θα διαιρεθεί

σε n υποστρώματα για τον υπολογισμό βάσει της Εξ. 2 δεν χρειάζεται να ξεπερνά το βάθος κάτω από το οποίο δεν αναμένονται μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας.

Η μέθοδος Van der Merwe (1975) είναι ιδιαίτερα δημοφιλής, αλλά σε καμία περίπτωση δεν είναι η μοναδική. Υπάρχει πληθώρα παλαιότερων αλλά και νεώτερων εμπειρικών σχέσεων στη διεθνή βιβλιογραφία. Συγκεντρωτική παρουσίαση των διαθέσιμων εμπειρικών μεθόδων μπορεί να αναζητηθεί στις αναφορές US Department of the Army (1983), Dhowian (1990) και Nelson et al. (2015).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι πλείστες εμπειρικές συσχετίσεις δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της αρχικής πυκνότητας του εδάφους. Όπως παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα, εργαστηριακές μετρήσεις καταδεικνύουν ότι η διόγκωση εξαρτάται ισχυρά από την πυκνότητα του εδαφικού υλικού.

4. Εργαστηριακός προσδιορισμός

Το πόσο θα διογκωθεί ένα εδαφικό στοιχείο στην πραγματικότητα εξαρτάται από φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό κορεσμού και τη μεταβολή αυτού, την κατακόρυφη τάση, αλλά και την αρχική του πυκνότητα.

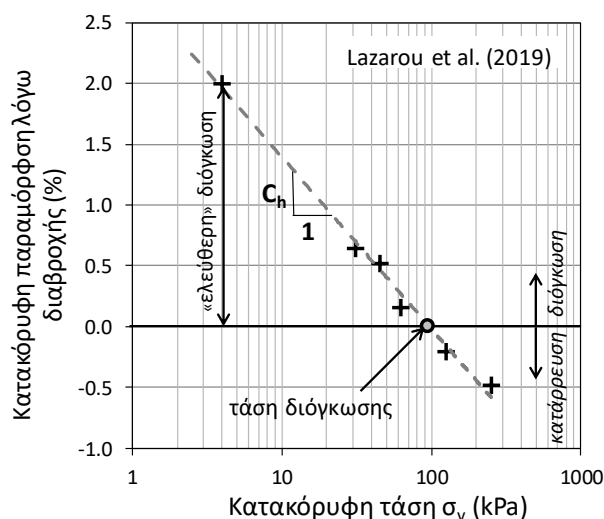
4.1 Μέτρηση διόγκωσης λόγω διαβροχής στο οιδήμετρο

Η διόγκωση των λεπτόκοκκων εδαφών μπορεί να μετρηθεί σχετικά εύκολα στο εργαστήριο με χρήση κοινών συσκευών στερεοποίησης. Επίσης, μπορεί να μελετηθεί με λεπτομέρεια μέσω δοκιμών μηχανικής μη κορεσμένων εδαφών χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο εξοπλισμό με μέτρηση/ελεγχο της μύζησης.

Μια απλή αλλά πρακτικά πολύ χρήσιμη πειραματική διαδικασία συνίσταται στην τοποθέτηση μη κορεσμένου δοκιμίου εδάφους σε κλασικό κελί οιδήμετρου/στερεοποίησης. Το δοκίμιο μπορεί να είναι στο φυσικό ποσοστό υγρασίας ή σε οποιοδήποτε άλλο ποσοστό υγρασίας επιλεγεί και επιτευχθεί με τεχνικές στοχευόμενης ξήρανσης ή ύγρανσης (Tang & Cui 2005, Bardanis & Grifiza 2012). Μετά την τοποθέτηση στο κελί οιδήμετρου, επιβάλλεται πρώτα επί του μη κορεσμένου δοκιμίου σταθερή κατακόρυφη τάση σ_v , μικρού ή

μεγάλου μεγέθους, και αφήνεται όσο παραμένει μη κορεσμένο να αναπτύξει οποιεσδήποτε παραμορφώσεις για ένα εύλογο χρονικό διάστημα (συνήθως 24hr, μεγαλύτερος χρόνος μπορεί να απαιτηθεί για πολύ πλαστικά εδάφη), κατά το οποίο λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή απώλειας υγρασίας (μόνωση του κελιού με πλαστική μεμβράνη). Μετά την παρέλευση αυτής της περιόδου, ο χώρος του κελιού γεμίζει με απιονισμένο νερό (εμβάπτιση δοκιμίου) και μετρώνται οι κατακόρυφες παραμορφώσεις οι οποίες αναπτύσσονται με το χρόνο λόγω της προοδευτικής αύξησης του βαθμού κορεσμού από την αρχική του τιμή σε 100% (διαδικασία που ολοκληρώνεται συνήθως σε ένα έως τρία εικοσιτετράωρα).

Στο Σχ. 3 φαίνονται τα αποτελέσματα τέτοιων δοκιμών εμβάπτισης σε αδιατάρακτα δείγματα μέτρια διογκώσιμης μάργας Λευκωσίας, με σ_v από 4kPa έως 250kPa (Lazarou et al., 2019). Τα πειράματα έγιναν στο φυσικό ποσοστό υγρασίας που είχε το έδαφος κατά τη δειγματοληψία (μήνας Ιούλιος), το οποίο αντιστοιχούσε σε βαθμό κορεσμού S_{r0} περί το 52%. Για σ_v ίσο με 4kPa (πρακτικά αμελητέα επιφόρτιση), η προκύπτουσα παραμόρφωση, που μπορεί να χαρακτηριστεί ως «ελεύθερη» διόγκωση, είναι 2%. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιβληθείσα σ_v , παρατηρούμε ότι τόσο μειώνεται (καταστέλλεται) η διόγκωση που προκαλεί ο πλήρης κορεσμός του δοκιμίου.



Σχ. 3. Κατακόρυφη παραμόρφωση λόγω διαβροχής σκληρής μάργας Λευκωσίας συναρτήσει της επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης.

Fig. 3. Vertical strain due to inundation of hard Nicosia marl as a function of applied vertical stress.

Μάλιστα, για $\sigma_v > 100\text{kPa}$, η διαβροχή αντί για διόγκωση παράγει κατάρρευση (collapse) του εδαφικού ιστού. Αυτό οφείλεται στο ότι η αρχικά μεγάλη μύζηση μεγεθύνει την επιφάνεια διαρροής (αυξάνει την αντοχή και δυσκαμψία του εδάφους) και συγκρατεί τον εδαφικό ιστό σε σχετικά μεγαλύτερο πορώδες παρά την επιβολή μεγάλης τάσης, η οποία θα οδηγούσε σε σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις αν η φόρτιση γινόταν σε πλήρως κορεσμένο δοκίμιο, όπως στην κλασική δοκιμή στερεοποίησης. Με τη διαβροχή του δοκιμίου, η αρχική μύζηση χάνεται, με αποτέλεσμα την απώλεια της συγκράτησης του εδαφικού ιστού και την ανάπτυξη καθίζησης. Για πιο αναλυτική ερμηνεία του μηχανισμού αυτού και της επεξήγησής του στο πλαίσιο της καταστατικής προσομοίωσης των μη κορεσμένων εδαφών βλέπε Σιταρένιος (2019).

Το σημείο όπου ο γεωμετρικός τόπος των σημείων δεδομένων τέμνει τον οριζόντιο άξονα και που οριοθετεί το σύνορο αλλαγής συμπεριφοράς από διόγκωση σε κατάρρευση αντιστοιχεί στην επονομαζόμενη τάση διόγκωσης (Σχ. 3). Η τάση διόγκωσης είναι η κατακόρυφη τάση που απαιτείται για να προκύψει μηδενική παραμόρφωση κατά τον κορεσμό του δοκιμίου. Η τάση διόγκωσης χρησιμοποιείται εναλλακτικά της ελεύθερης διόγκωσης για σκοπούς ποσοτικοποίησης της διογκωσιμότητας των αργιλικών εδαφών, παρόλο που ενίοτε μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα (Μπαρδάνης, 2019).

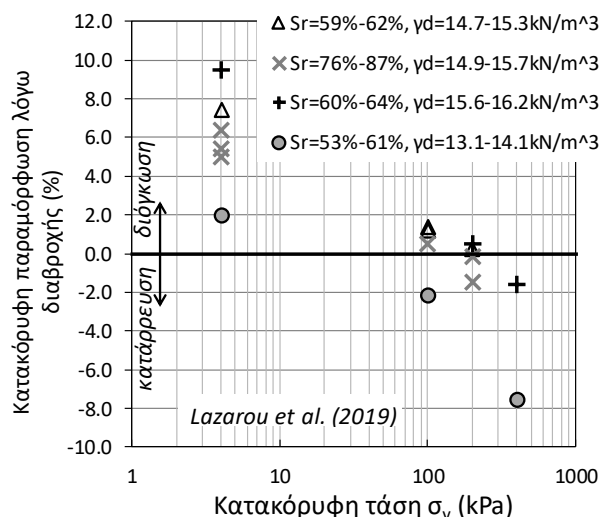
Ο γεωμετρικός τόπος των πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών εμβάπτισης σε οιδήμετρο, σε λογαριθμικό διάγραμμα, μπορεί να προσεγγιστεί τις περισσότερες φορές με μια ευθεία γραμμή, όπως στο Σχ. 3, η οποία αποδίδεται μαθηματικά από την εξής έκφραση (Nelson et al. 2015):

$$\varepsilon_v = C_h \log \left(\frac{p_s}{\sigma_v} \right) \quad (3)$$

όπου ε_v η παραγόμενη κατακόρυφη παραμόρφωση, p_s η τάση διόγκωσης και C_h η κλίση της ευθείας. Συσχετίσεις αυτής της μορφής έχουν περιορισμένο εύρος ισχύος. Σε τιμές της κατακόρυφης τάσης σημαντικά μεγαλύτερες της τάσης διόγκωσης, η παραμόρφωση λόγω κατάρρευσης συνήθως παρουσιάζει μέγιστο και πέραν αυτού παρατηρείται ακόμα και μείωσή της (Lawton, et al. 1989, Bardanis & Grifiza 2016).

Οι παραμορφώσεις λόγω διαβροχής ενός δεδομένου εδάφους δεν εξαρτώνται μόνο από το σ_v , αλλά και από το πόσο μη κορεσμένο και πόσο πυκνό είναι το έδαφος πριν τη διαβροχή. Στο Σχ. 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σειράς δοκιμών διαβροχής στο οιδήμετρο σε αναζυμωμένη μάργα Λευκωσίας υψηλής διογκωσιμότητας (πιο πλαστική από αυτή του Σχ. 3) (Lazarou et al., 2019). Είναι εμφανές ότι η «ελεύθερη» διόγκωση, καθώς και η τάση διόγκωσης, μειώνονται όσο μικρότερο είναι το αρχικό ξηρό ειδικό βάρος γ_{do} και όσο μεγαλύτερος είναι ο αρχικός βαθμός κορεσμού S_{ro} . Εντούτοις, φαίνεται ότι η κλίση των συμπλεγμάτων των πειραματικών σημείων (δηλ. το C_h) είναι σχετικά ανεξάρτητη του αρχικού βαθμού κορεσμού και του αρχικού ξηρού ειδικού βάρους για το εύρος των τάσεων που εξετάστηκε.

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από το Σχ. 5, το οποίο δείχνει πειραματικά δεδομένα από σειρές δοκιμών μέτρησης διόγκωσης λόγω διαβροχής (Komine, 2004) σε μπεντονιτική άργιλο με σχεδόν 70% περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη και αρχικό βαθμό κορεσμού 54%.



Σχ. 4. Επίδραση αρχικού βαθμού κορεσμού και αρχικής πυκνότητας στη διόγκωση/κατάρρευση αναζυμωμένης μάργας Λευκωσίας λόγω διαβροχής.

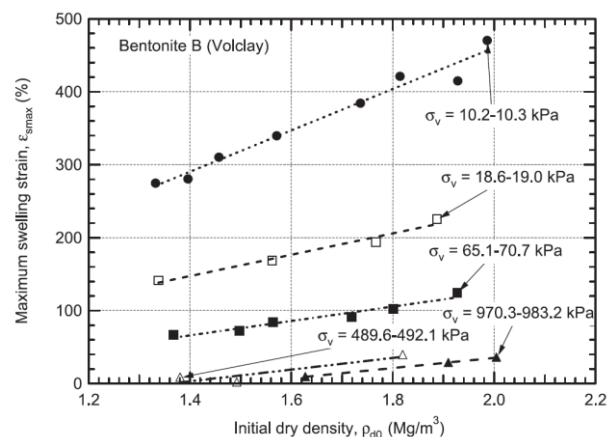
Fig. 4. Effect of initial degree of saturation and initial density on the swelling/collapse of remoulded Nicosia marl due to inundation.

Λόγω του γεγονότος ότι ο συγκεκριμένος μοντμοριλλονίτης είναι νατριούχος (N-montmorillonite), καθιστώντας το υλικό

εξαιρετικά πλαστικό ($PI > 500$), η «ελεύθερη» διόγκωση ($\sigma_v \approx 10 \text{ kPa}$) είναι μια με δυο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από ότι θα αναμέναμε σε πιο συνηθισμένες αργίλους υψηλής διογκωσιμότητας. Σύμφωνα με το Σχ. 5, φαίνεται να υπάρχει γραμμική εξάρτηση μεταξύ της παραμόρφωσης διόγκωσης και της αρχικής ξηράς πυκνότητας ρ_{do} .

Ενδιαφέρουσα παρατήρηση σχετικά με το Σχ. 4 είναι ότι τα δεδομένα της μάργας Λευκωσίας υποδηλώνουν ότι η διογκωσιμότητα εξαρτάται σε εντονότερο βαθμό από το γ_{do} από ότι το S_{ro} . Για παράδειγμα, τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με ξηρό ειδικό βάρος $13.1-14.1 \text{ kN/m}^3$ (κυκλικά σύμβολα στο διάγραμμα) εμφανίζουν πολύ μικρότερη διόγκωση, από ότι δοκίμια με $14.9-15.7 \text{ kN/m}^3$ (σύμβολα σταυροί στο διάγραμμα), παρόλο που τα δεύτερα είναι σαφώς πιο κορεσμένα ($S_{ro} = 76\%-87\%$), έχοντας σχεδόν τη μισή «απόσταση» από τον πλήρη κορεσμό από ότι τα πρώτα ($S_{ro} = 53\%-61\%$).

Στα πειράματα των Σχ. 3-5, η διαβροχή οδηγεί σε πλήρη κορεσμό του εδαφικού δοκιμίου, κάτι που ενδέχεται στην πραγματικότητα να συμβεί μόνο σε μικρά βάθη και σε ακραίες συνθήκες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο βαθμός



Σχ. 5. Παραμόρφωση διόγκωσης μπεντονίτη συναρτήσει κατακόρυφης τάσης και αρχικής ξηράς πυκνότητας (από Engineering Geology, vol. 71, Komine H, *Simplified Evaluation for Swelling Characteristics of Bentonites*, pp. 265-279, Copyright (2004), με άδεια του Elsevier).

Fig. 5. Swelling strain of bentonite as a function of vertical stress and initial density (reprinted from Engineering Geology, vol. 71, Komine H, *Simplified Evaluation for Swelling Characteristics of Bentonites*, pp. 265-279, Copyright (2004), with permission from Elsevier).

κορεσμού θα παραμένει κάτω του 100%, με αποτέλεσμα οι διόγκωση που θα αναπτυχθεί να είναι ένα μέρος αυτής που μετράται στη συσκευή οιδιμέτρου. Ο Chen (1988) προτείνει την προσεγγιστική εκτίμηση της μειωμένης διόγκωσης με χρήση ενός συντελεστή α που εξαρτάται γραμμικά από τη μεταβολή του βαθμού κορεσμού ως εξής:

$$\alpha = \frac{\Delta S_r}{1 - S_{r0}} \quad (4)$$

όπου ΔS_r η αναμενόμενη αύξηση του βαθμού κορεσμού.

Στον Πίνακα 2 γίνεται συνόψιση της επίδρασης που έχει κάθε μια από φυσικές και μηχανικές παραμέτρους στις παραμορφώσεις διόγκωσης του εδάφους.

Πίν. 2. Επίδραση παραγόντων στην αναμενόμενη παραμόρφωση διόγκωσης.

Tab. 2. Influence of various factors on the expected swelling strain.

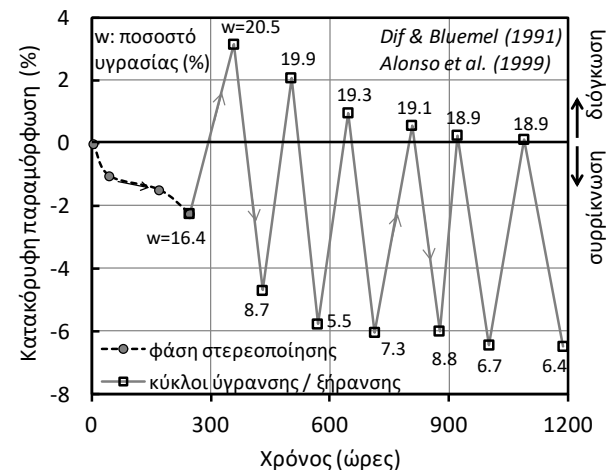
Παράγοντας	Διόγκωση
δείκτης πλαστικότητας $\uparrow$	$\uparrow$
ποσοστό αργίλου $\uparrow$	$\uparrow$
ποσοστό μοντμοριλλονίτη $\uparrow$	$\uparrow$
αρχικός βαθμός κορεσμού S_{r0} $\uparrow \Rightarrow$	$\downarrow$
μεταβολή βαθμού κορεσμού ΔS_r $\uparrow$	$\uparrow$
αρχική ξηρά πυκνότητα ρ_{d0} $\uparrow$	$\uparrow$
αρχικός δείκτης πόρων e_0 $\uparrow$	$\downarrow$
κατακόρυφη τάση σ_v $\uparrow$	$\downarrow$
$\uparrow$: αύξηση	
$\downarrow$: μείωση	

4.2 Παραμορφώσεις συρρίκνωσης λόγω ξήρανσης

Η αφαίρεση υγρασίας από το έδαφος έχει αντίθετα αποτελέσματα από αυτά που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο, οι παραμορφώσεις συρρίκνωσης δεν είναι πάντα η απόλυτη αντιστροφή του τι έγινε κατά τη διαβροχή. Δηλαδή αν μετά τη διαβροχή

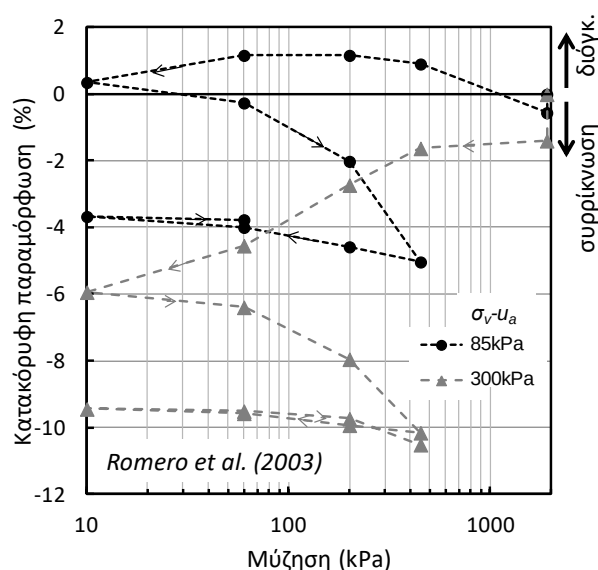
μειώσουμε το βαθμό κορεσμού με ξήρανση πίσω στην αρχική του τιμή, το έδαφος δεν θα επανέλθει απαραίτητα στην αρχική του κατάσταση (σε όρους όγκου και δείκτη πόρων). Για παράδειγμα, στο Σχ. 6 δίνεται η εξέλιξη της κατακόρυφης παραμόρφωσης ε_v σε άργιλο Hoheneggelsen (Dif & Bluemel, 1991) καθώς αυτή υποβάλλεται σε κύκλους διαβροχής μέχρι πλήρους κορεσμού ακολουθούμενη από ξήρανση με έκθεση στον αέρα στις συνθήκες του εργαστηρίου, υπό κατακόρυφη τάση ίση με 200kPa. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, με κάθε κύκλο διαβροχής / ξήρανσης, το μέσο των κύκλων μετακινείται προς τα κάτω στο διάγραμμα, δηλ. συσσωρεύεται σταδιακά συρρίκνωση. Εντούτοις, αυτή η συσσώρευση βαίνει μειούμενη όσο αυξάνεται ο αριθμός των κύκλων.

Παρόμοια διαπίστωση μπορεί να γίνει βάσει των αποτελεσμάτων των πειραμάτων σε αναζυμωμένα δοκίμια αργίλου Boom των Romero et al. (2003) που φαίνονται στο Σχ. 7. Οι συγκεκριμένες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ειδικό κελί ελεγχόμενης μύζησης με τη μέθοδο της μετατόπισης άξονα (axis translation). Κάθε κύκλος κορεσμού / αποκορεσμού συνίσταται σε μείωση της μύζησης εδαφικού σκελετού (matric suction) σε 10kPa ακολουθούμενη από αύξηση.



Σχ. 6. Εξέλιξη κατακόρυφης παραμόρφωσης στο οιδιμέτρο με την επιβολή αλληπάληλων κύκλων ύγρυνσης και ξήρανσης σε άργιλο Hoheneggelsen υπό κατακόρυφη τάση 200kPa (Dif & Bluemel 1991, Alonso et al. 1999).

Fig. 6. Evolution of vertical strain at the oedometer due to successive wetting and drying cycles in Hoheneggelsen clay under 200kPa vertical stress (Dif & Bluemel 1991, Alonso et al. 1999).



Σχ. 7. Εξέλιξη κατακόρυφης παραμόρφωσης σε άργιλο Boom υποβαλλόμενη σε κύκλους επιβαλλόμενης μύζησης (Romero et al. 2003).

Fig. 7. Evolution of vertical strain in Boom clay subjected to cycles of applied suction (Romero et al. 2003).

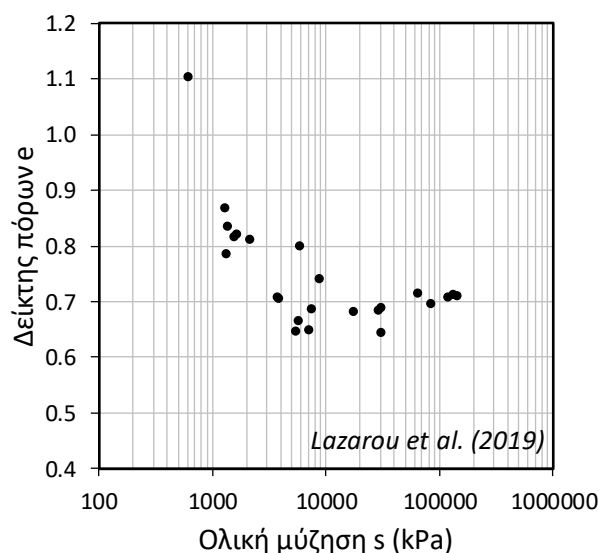
Βλέπουμε ότι στον πρώτο κύκλο υπάρχει συσσώρευση συρρίκνωσης, η οποία πρακτικά παύει να συμβαίνει στον δεύτερο κύκλο.

Οι αλληπάλληλοι κύκλοι ύγρυνσης και ξήρανσης δεν οδηγούν πάντα στη συσσώρευση απώλειας όγκου. Αντίθετα, μπορεί να έχουμε παραμένονσα διόγκωση, ειδικά στην περίπτωση χαμηλών σ_v (Alonso et al. 1999, Tripathy et al. 2002). Το συμπέρασμα πρακτικής σημασίας όμως είναι ότι, σε κάθε περίπτωση, μετά την παρέλευση ορισμένου αριθμού κύκλων, επέρχεται σταθεροποίηση, δηλαδή οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται από αυτό το σημείο και πέρα είναι σχεδόν πλήρως αντιστρέψιμες. Επομένως, σε ένα φυσικό έδαφος, το οποίο έχει υποβληθεί σε πάρα πολλούς κύκλους ύγρυνσης/ξήρανσης στο παρελθόν, αναμένεται ότι την ξηρά περίοδο του υδρολογικού έτους θα ανακτάται η διόγκωση της βροχερής περιόδου (αν υποθέσουμε βέβαια ότι το ετήσιο εύρος μεταβολής της μύζησης λόγω κλιματικών παραγόντων παραμένει το ίδιο και ότι η ανθρώπινη δραστηριότητα δεν μεταβάλλει σημαντικά το καθεστώς των τάσεων). Αυτό καθιστά τη συμπεριφορά του εδάφους σχετικά πιο προβλέψιμη σε προβλήματα που εμπλέκουν φυσικό έδαφος (π.χ. θεμελίωση κτιρίου). Αντίθετα, προσοχή

θα απαιτηθεί σε έργα που έχουν να κάνουν με συμπυκνωμένα υλικά και επιχώσεις από πλαστικά λεπτόκοκκα εδάφη, όπου η ανακυκλική συσσώρευση παραμορφώσεων μπορεί να είναι μη αμελητέα.

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι υπάρχει ένα κατώτερο όριο τιμής του δείκτη πόρων το οποίο δεν μπορεί να ξεπεραστεί με περαιτέρω ξήρανση του υλικού. Το Σχ. 8 δίνει ένα παράδειγμα από τη μάργα Λευκωσίας (Lazarou et al., 2019), σε κάποια αδιατάρακτα δοκίμια της οποίας προστέθηκε νερό ενώ σε άλλα αφαιρέθηκε με έκθεση στην ατμόσφαιρα ή σε περιβάλλον ελεγχόμενης σχετικής υγρασίας από διαλύματα αλάτων (Bardanis & Grifiza, 2012), και τα οποία αφέθηκαν να αναπτύξουν παραμορφώσεις στον πάγκο του εργαστηρίου (απουσία επιβαλλόμενων τάσεων).

Για ξήρανση που αντιστοιχεί σε τιμές μύζησης (ολικής) άνω των 7-8MPa, ο δείκτης πόρων φαίνεται να σταθεροποιείται περίξ της τιμής 0.7. Αυτή η τιμή διατηρείται ακόμη και αν η ξήρανση είναι τόσο έντονη και παρατεταμένη που η μύζηση ξεπεράσει τα 100MPa. Πρέπει μάλιστα να σημειωθεί ότι το σημείο όπου παύει να υπάρχει περαιτέρω συρρίκνωση της μάργας αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού περίπου 50%, μια τιμή που απαντάται συχνά στο πεδίο τους καλοκαιρινούς μήνες.



Σχ. 8. Μεταβολή δείκτη πόρων συναρτήσει της μύζησης σε σκληρή μάργα Λευκωσίας απουσία επιβαλλόμενων τάσεων (Lazarou et al., 2019).

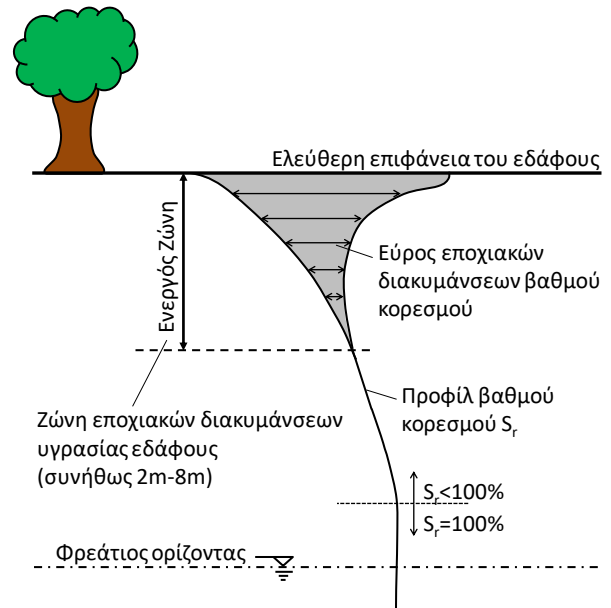
Fig. 8. Void ratio variation with suction in hard Nicosia marl in the absence of applied stresses (Lazarou et al., 2019).

5. Επιπτώσεις διόγκωσης/ συρρίκνωσης εδάφους στις κατασκευές

Ογκομετρικές παραμορφώσεις της τάξης των 5%-10% που παρατηρήσαμε στα προηγούμενα σχήματα μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ολικές αλλά και διαφορικές ανυψώσεις/καθιζήσεις στο πεδίο, προκαλώντας έτσι βλάβες στις κατασκευές. Το παγκόσμιο ετήσιο κόστος ζημιών που οφείλονται στις δράσεις των διογκώσιμων εδαφών εκτιμάται ότι είναι της τάξης των πολλών δεκάδων δισεκατομμυρίων δολαρίων. Οι Jones & Jones (1987) εκτίμησαν το ετήσιο κόστος ζημιών στις Ηνωμένες Πολιτείες στα 9 δισεκατομμύρια δολάρια. Σύμφωνα με τον Chen (1988), το ανηγγμένο ετήσιο κόστος ζημιών εξαιτίας διογκώσιμων εδαφών ξεπερνάει το αντίστοιχο άλλων φυσικών καταστροφών, συμπεριλαμβανομένων των σεισμών και των πλημμυρών.

5.1 Μηχανισμός γένεσης βλαβών σε κτίρια με επιφανειακή θεμελίωση

Με δεδομένο ότι οι παραμορφώσεις ενός διογκώσιμου εδάφους οφείλονται στις αλλαγές του βαθμού κορεσμού, οι κατασκευές που απειλούνται είναι αυτές που έχουν τα στοιχεία θεμελίωσής τους εντός της ζώνης του εδαφικού προφίλ όπου αναμένεται να συμβούν μεταβολές του ποσοστού υγρασίας κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Οι μεταβολές αυτές συνήθως οφείλονται σε κλιματολογικούς παράγοντες και εμφανίζουν περιοδικότητα στη διάρκεια του έτους. Για παράδειγμα, στον γεωγραφικό χώρο της Μεσογείου, οι φθινοπωρινοί και χειμερινοί μήνες αποτελούν την περίοδο βροχοπτώσεων, ενώ οι θερινοί είναι περίοδος ξηρασίας. Αυτό σημαίνει ότι τη χειμερινή περίοδο έχουμε αύξηση του ποσοστού υγρασίας του εδάφους, ενώ τους θερινούς μήνες έχουμε μείωση. Οι εποχιακές μεταβολές είναι έντονες κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια όπου το έδαφος είναι άμεσα εκτεθειμένο στους κλιματολογικούς παράγοντες. Όμως, όπως δείχνει το Σχ.9, όσο προχωρούμε σε μεγαλύτερα βάθη, το πλάτος της εποχιακής διακύμανσης του βαθμού κορεσμού S_r και κατ' επέκταση της εδαφικής μύζησης γίνεται όλο και μικρότερο. Από ένα βάθος και κάτω, τα έδαφος παύει να αντιλαμβάνεται τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες και το ποσοστό υγρασίας



Σχ. 9. Σχηματική αναπαράσταση τυπικού προφίλ βαθμού κορεσμού και της ενεργού ζώνης.

Fig. 9. Schematic of representation of typical profile of degree of saturation and active zone.

παραμένει εποχιακά σταθερό. Το τμήμα του εδαφικού προφίλ που βρίσκεται μεταξύ αυτού του βάθους και της ελεύθερης επιφάνειας το έδαφος ονομάζεται ενεργός ζώνη (Σχ. 9). Κάτω από την ενεργό ζώνη, ο βαθμός κορεσμού αναμένεται να αυξάνεται σταδιακά με το βάθος μέχρι τη ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης (capillary fringe) όπου το έδαφος είναι πλέον πρακτικά πλήρως κορεσμένο λόγω της εγγύτητας με τον φρεάτιο (υδροφόρο) ορίζοντα.

Έστω ότι έχουμε ένα κτίριο θεμελιωμένο με αβαθή θεμελίωση (π.χ. γενική κοιτόστρωση), με τη στάθμη θεμελίωσης να είναι εντός της ενεργού ζώνης. Τους χειμερινούς μήνες, η βροχή αυξάνει την υγρασία του εδάφους λόγω διήθησης του νερού και μειώνει τη μύζηση όπου το έδαφος δεν καλύπτεται από το κτίριο («ελεύθερο» πεδίο). Λόγω των χωρικών διαφορών στη μύζηση που προκύπτουν, δηλαδή μειωμένη μύζηση στο ελεύθερο πεδίο ενώ κάτω από το κτίριο διατηρείται αυξημένη, δημιουργείται υδραυλική κλίση που κάνει την υγρασία να διεισδύσει πλευρικά κάτω από την κάτοψη του κτιρίου (Σχ. 10α). Λόγω της εγγενούς μικρής διαπερατότητας των λεπτόκοκκων εδαφών (η οποία είναι περαιτέρω μειωμένη εξαιτίας του μερικού κορεσμού, Μπαρδάνης 2019) και της παροδικότητας των βροχοπτώσεων, η διείσδυση είναι σχετικά μικρή, συγκεκριμένα της τάξεως των λίγων

μέτρων (0.5m - 3m) από την περίμετρο του κτιρίου (El-Gahry & Wray, 2004).

Η διόγκωση του εδάφους στην περιμετρική περιοχή της κάτοψης και η μη διόγκωσή του στην κεντρική περιοχή συντελεί στην ανάπτυξη διαφορικών ανυψώσεων που τείνουν να δημιουργήσουν κάμψη στην πλάκα θεμελίωσης με τα κοίλα προς τα πάνω (Σχ. 10α). Αν η πλάκα δεν είναι αρκετά δύσκαμπτη ή επαρκώς οπλισμένη ώστε να διατηρήσει την ελαστική της δυσκαμψία, οι διαφορικές ανυψώσεις θα είναι τέτοιου μεγέθους που θα δημιουργήσουν βλάβες στην ανωδομή. Αυτή η περίπτωση αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως κατάσταση edge lift ή edge heave.

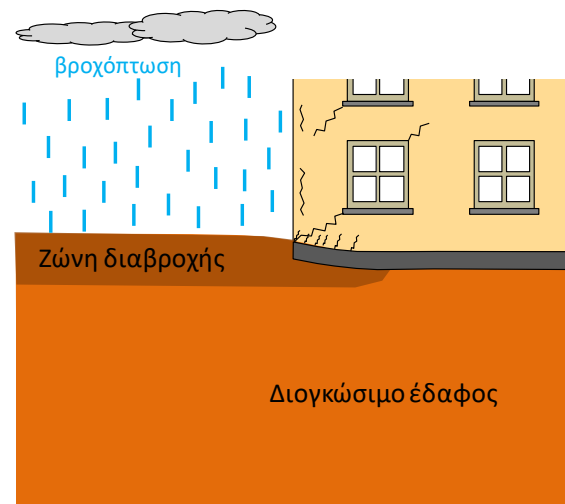
Οι αντίθετες μορφές παραμορφώσεων δημιουργούνται από την ξήρανση κατά τους θερινούς μήνες (Σχ. 10β). Υγρασία απομακρύνεται από το έδαφος λόγω εξατμισοδιαπνοής, η οποία αυξάνει τη μύζηση στο ελεύθερο πεδίο. Η υδραυλική κλίση που δημιουργείται μεταξύ ελεύθερου χώρου και του εδάφους κάτω από τη θεμελίωση, το οποίο διατηρεί χαμηλότερη τιμή μύζησης, συντελεί στην απώλεια υγρασίας από την περιμετρική περιοχή της κάτοψης του κτιρίου, ανάπτυξη διαφορικών καθιζήσεων και κάμψη της πλάκας θεμελίωσης με τα κοίλα προς τα κάτω. Αυτή η περίπτωση αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως κατάσταση center lift ή center heave.

5.2 Μορφές βλαβών σε κτίρια

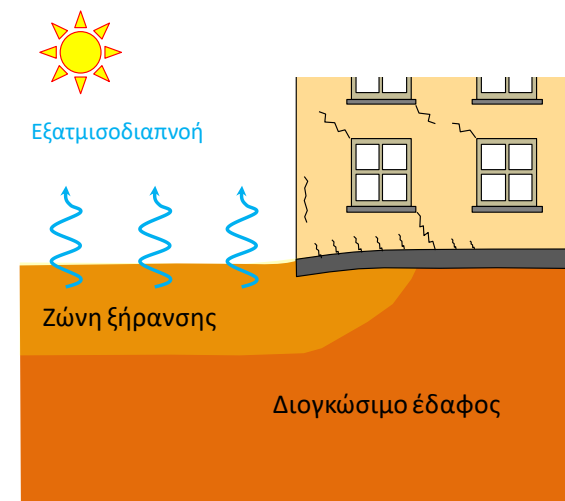
Οι El-Gahry & Wray (2004) παρουσιάζουν συγκεντρωτικά τις μετρημένες τιμές μέγιστης ανύψωσης y_s στο ελεύθερο πεδίο από διάφορες τοποθεσίες με ενόργανη παρακολούθηση σε αργιλικά εδάφη υψηλής έως πολύ υψηλής διογκωσιμότητας στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Αυστραλία, με τις τιμές να βρίσκονται στο εύρος από 2cm έως 8cm. Οι Fityus et al. (2004) παρατήρησαν σε τοποθεσία με ενόργανες παρακολουθήσεις σε άργιλο υψηλής διογκωσιμότητας ανύψωση στο ελεύθερο πεδίο 3.5-5cm.

Η τιμή του y_s μπορεί να εκτιμηθεί με βάση πειραματικά δεδομένα δοκιμών διαβροχής σε οιδήμετρο, αξιοποιώντας τις Εξ. 3 & 4 και διαιρώντας την ενεργό ζώνη σε n υποστρώματα πάχους d_i , ως ακολούθως:

$$y_s = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{v,i} \times a_i \times d_i \quad (5)$$



(α)



(β)

Σχ. 10. Μηχανισμός ανάπτυξης βλαβών σε κτίρια με αβαθή θεμελίωση εντός διογκώσιμης αργίλου λόγω α) διόγκωσης τους χειμερινούς μήνες, β) συρρίκνωσης τους θερινούς μήνες.

Fig. 10. Mechanism of damage development in buildings with shallow foundation in expansive clay due to a) swelling during winter months, b) shrinkage during summer months.

όπου i υποδηλώνει τον αριθμό του εκάστοτε υποστρώματος. Για την εφαρμογή της Εξ. (5), χρειάζεται να γίνει μια εκτίμηση ή υπόθεση σχετικά με το βάθος της ενεργού ζώνης, καθώς και του εύρους της σκιασμένης ζώνης του Σχ. 9, δηλ. του πλάτους μεταβολής του βαθμού κορεσμού συναρτήσει του βάθους, ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός του a_i .

Οι αντίστοιχες διαφορικές ανυψώσεις y_m στον χώρο που καταλαμβάνει η θεμελίωση είναι

μικρότερες, αλλά της ίδιας τάξης μεγέθους. Σύμφωνα με τον Holland (1981), το y_m είναι προσεγγιστικά 50% και 70% του y_s στην περίπτωση edge lift και center lift, αντίστοιχα. Οι διαφορικές μετατοπίσεις αυτού του μεγέθους καθιστούν απαγορευτική τη χρήση μεμονωμένων πεδίων για τη θεμελίωση κτιρίων σε διογκώσιμα εδάφη (Bowles 1996, Abduljauwad et al. 1998, Coduto 2001), διότι μια τέτοια θεμελίωση στερείται της συνέχειας που απαιτείται για να αναδιανεμηθούν αποτελεσματικά οι διαφορικές μετατοπίσεις και πιέσεις. Κατά συνέπεια, οι διεθνώς συνιστώμενοι τύποι θεμελίωσης σε διογκώσιμα εδάφη είναι είτε δύσκαμπτες επιφανειακές θεμελιώσεις (π.χ. γενικές κοιτοστρώσεις) ή πασσαλοθεμελιώσεις.

Οι Abduljauwad et al. (1998) κατασκεύασαν μοντέλο μικρού κτιρίου σε άργιλο υψηλής διογκωσιμότητας για τη μελέτη του φαινομένου. Το κτίριο ήταν θεμελιωμένο σε μεμονωμένα πέδιλα. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πειράματος έδειξαν ότι ολικές ανυψώσεις λόγω διαβροχής 3.5cm-5cm στο ελεύθερο πεδίο γύρω από το κτίριο και διαφορικές κατακόρυφες μετατοπίσεις της τάξης των 1.5cm κατά μήκος του κτιρίου προκάλεσαν σοβαρές βλάβες στην τοιχοποιία, με ρωγμές να εμφανίζονται ακόμη και σε κάποιες από τις δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος.

Οι περιπτώσεις στην πραγματικότητα όπου παρατηρούνται ζημιές στον φέροντα οργανισμό (υπέρβαση της οριακής κατάστασης αστοχίας - ULS) είναι υπαρκτές αλλά σπάνιες, αφού αφορούν εξαιρετικά διογκώσιμα εδάφη, ενώ συχνά εμπλέκονται σε αυτές και άλλοι παράγοντες που δυσχεραίνουν το πρόβλημα (π.χ. κλίση εδάφους, ενδεχόμενες κακοτεχνίες, κ.α.). Τις περισσότερες φορές, οι βλάβες που προκαλούνται από τη διόγκωση/συρρίκνωση του εδάφους θεμελίωσης έχουν τη μορφή ρωγμών στους τοίχους πληρώσεως (υπέρβαση της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας - SLS). Κάτι τέτοιο έχει κυρίως αισθητικό αντίκτυπο και συντελεί στη μείωση του αισθήματος ασφάλειας των χρηστών, τα οποία όμως έχουν άμεση αρνητική επίπτωση στην αξία του ακινήτου. Οι ρωγμές με την πάροδο του χρόνου αποκτούν σημαντικό άνοιγμα ώστε να επιτρέπουν τη διείσδυση υγρασίας, προκαλώντας επιπλέον φθορά στις επικαλύψεις και απαιτώντας σχεδόν συνεχείς επισκευές. Επίσης, θα πρέπει να αναλογιστούμε πόση μπορεί να είναι η μείωση της σεισμικής

επάρκειας ενός κτιρίου του οποίου ο φέρων οργανισμός βρίσκεται σε σχεδόν μόνιμο καθεστώς υπέρβασης SLS και μόνιμων πρόσθετων εντάσεων λόγω των στρεβλώσεων που προκαλούνται από τις διαφορικές ανυψώσεις/καθιζήσεις.

Το Σχ. 10 δείχνει τις τυπικές μορφές ρηγματώσεων σε τοίχους που προξενούνται από τις διαφορικές ανυψώσεις / καθιζήσεις κατά περίπτωση. Κυριαρχούν οι διαγώνιες ρωγμές, οι οποίες έχουν κάθε φορά διεύθυνση που «σημαδεύει» την πλευρά της θεμελίωσης που ανασηκώνεται σε σχέση με την άλλη. Η υπέρβαση της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας έχει και άλλες εκφάνσεις πέρα από τις ρηγματώσεις των τοίχων. Για παράδειγμα, οι στρεβλώσεις της ανωδομής συχνά οδηγούν στη δυσλειτουργία (σφήνωμα) θυρών και παραθύρων. Επίσης, εντάσεις στις σωληνώσεις των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης μπορεί να προκαλέσουν διαρροές από τις ενώσεις. Αυτές οι διαρροές, οι οποίες θα οδηγήσουν σε τοπική αύξηση του βαθμού κορεσμού του εδάφους θεμελίωσης και σε περαιτέρω διογκώσεις, μπορεί είτε απλά να επιτείνουν τα υπάρχοντα προβλήματα ή να κλιμακώσουν δραματικά τις μετακινήσεις θέτοντας το πρόβλημα σε άλλο επίπεδο.

Η βροχόπτωση και εξατμισοδιαπνοή (παράγοντες που έχουν εποχιακή περιοδικότητα) δεν είναι οι μόνες αιτίες αλλαγής του βαθμού κορεσμού του εδάφους. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν μονοτονικές και μακροπρόθεσμες μεταβολές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η προαναφερθείσα διαρροή ή ακόμη και θραύση αγωγών αποχέτευσης ή ύδρευσης κάτω από τη θεμελίωση, γεγονός που θα οδηγήσει σε σημαντική (και δύσκολα εντοπίσιμη στην περίπτωση απλής διαρροής) αύξηση του ποσοστού υγρασίας και μακροχρόνια διόγκωση στο τμήμα της κάτοψης που επηρεάζεται. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση δενδροφύτευσης κοντά στην περίμετρο του κτιρίου. Οι ανάγκες των δένδρων σε υγρασία έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν σημαντικά την εδαφική μύζηση μέσω του ριζικού τους συστήματος, προξενώντας μακροπρόθεσμα συρρίκνωση του εδάφους.

Σταδιακή μακροπρόθεσμη αύξηση του βαθμού κορεσμού στο κεντρικό τμήμα της κάτοψης μπορεί να συμβεί επίσης όταν ο φρεάτιος ορίζοντας είναι σε σχετικά μικρό βάθος. Σε αυτή την περίπτωση, η κατασκευή της

θεμελίωσης δημιουργεί ένα αδιαπέρατο σύνορο που φράζει τη φυσική δίοδο εξόδου προς την ατμόσφαιρα λόγω εξάτμισης που υπήρχε για το νερό του ρηχού υδροφορέα. Ως αποτέλεσμα, προοδευτικά συσσωρεύεται υγρασία στο κεντρικό τμήμα της θεμελίωσης, ενώ κοντά στην περίμετρό της, όπου διατηρείται η δυνατότητα διαφυγής προς την ατμόσφαιρα, η αύξηση της υγρασίας είναι λιγότερο έντονη, δημιουργώντας έτσι συνθήκες μακροπρόθεσμης διαφορικής ανύψωσης τύπου center lift.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος της στάθμης θεμελίωσης, τόσο μικρότερα αναμένεται να είναι τα προβλήματα. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση της διαρροής αγωγών αποχέτευσης ή ύδρευσης, η οποία μπορεί να προκαλέσει σημαντικές μεταβολές στον βαθμό κορεσμού του εδάφους ακόμη και εκτός της ενεργού ζώνης. Πάντως, αν η στάθμη θεμελίωσης βρίσκεται πολύ κοντά ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, το έδαφος θεμελίωσης θα είναι πάντα πλήρως κορεσμένο και οι διογκώσεις / συρρικνώσεις μηδενικές.

Τέλος, δεδομένου ότι η διογκωσιμότητα φθίνει έντονα αυξανόμενης της κατακόρυφης τάσης (βλέπε Σχ. 3-5) και ότι κάθε όροφος τυπικού κτιρίου προσθέτει χονδρικά 12kPa στη στάθμη έδρασης, θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα ψηλά κτίρια γενικά δεν επηρεάζονται από την παρουσία διογκώσιμων εδαφών.

5.3 Προβλήματα σε πασσαλοθεμελιώσεις

Οι θεμελιώσεις με πασσάλους θεωρούνται συχνά από τους μηχανικούς ως η ύστατη (λόγω υψηλού κόστους) αλλά οριστική λύση στο πρόβλημα της διογκωσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης. Εντούτοις, η λύση της βαθιάς θεμελίωσης δεν είναι απαλλαγμένη από προβλήματα και πολυπλοκότητες. Το έδαφος στη ζώνη διαβροχής διογκώνεται και πιέζει πλευρικά τον πάσσαλο με ορθές (οριζόντιες) τάσεις που είναι κοντά στην τάση διόγκωσης p_s (Σχ. 11α). Τέτοιες τάσεις είναι συχνά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που θα ασκούντο στα σχετικά μικρά βάθη της ενεργού ζώνης απουσία διόγκωσης.

Ταυτόχρονα, το έδαφος αυξάνοντας τον όγκο του τείνει να ανυψωθεί ασκώντας πρόσθετες πλευρικές τριβές προς τα πάνω (Σχ. 11α). Αυτές οι τριβές είναι πολύ μεγαλύτερες από τις

συνήθεις εξαιτίας της αύξησης της οριζόντιας τάσης που ασκείται στον κορμό του πασσάλου. Επιπλέον, ασκούνται κατακόρυφες πιέσεις προς τα άνω στον κεφαλόδεσμο. Αυτοί οι παράγοντες συντελούν στην ανάπτυξη εφελκυστικής αξονικής δύναμης στους πασσάλους. Γι' αυτό και συχνά φρεατοπάσσαλοι που κατασκευάζονται σε διογκώσιμα εδάφη οπλίζονται ισχυρά σε όλο το μήκος τους, ακόμη και σε περιοχές χαμηλής σεισμικότητας.

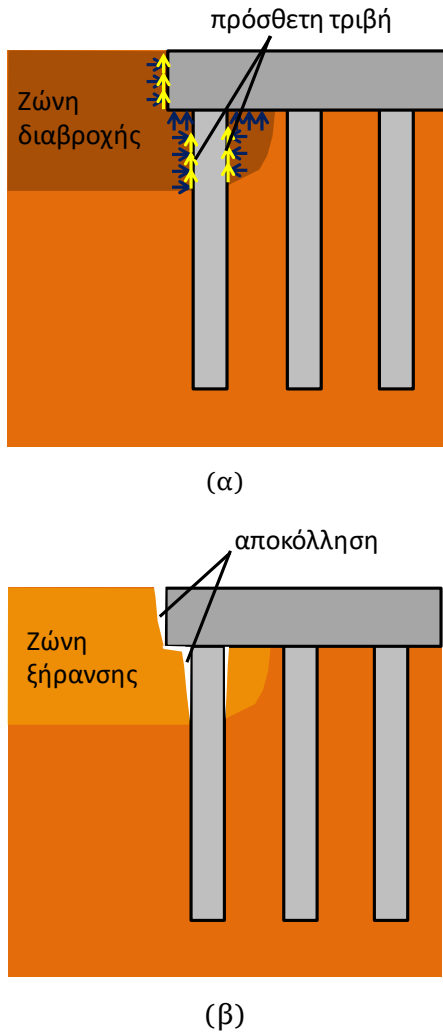
Επίσης, οι πάσσαλοι θα πρέπει να φτάνουν σε τέτοιο βάθος ώστε να μπορεί το κατώτερο τμήμα τους να αναπτύξει τις αρνητικές πλευρικές τριβές αντίστασης που απαιτούνται για να εξισορροπηθούν οι δράσεις που ασκούνται στο ανώτερο τμήμα (εντός της ενεργού ζώνης) λόγω της διόγκωσης, αλλιώς ενδέχεται να δημιουργηθούν ανυψώσεις και διαφορικές μετατοπίσεις όπως στην περίπτωση των επιφανειακών θεμελιώσεων.

Ένα άλλο πρόβλημα, το οποίο συχνά παραβλέπεται, είναι η πιθανή ανάπτυξη διακένου μεταξύ φρεατοπασσάλου (πασσάλου δι' εκσκαφής) και εδάφους στα ανώτερα τμήματα του εδαφικού προφίλ κατά τους θερινούς μήνες ή σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας (Σχ. 11β).

Αυτό το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο στην περίπτωση που οι πάσσαλοι κατασκευαστούν κατά την υγρή περίοδο, δηλ. όταν το έδαφος είναι διογκωμένο. Παρόλο που το φαινόμενο της αποκόλλησης δεν ασκεί πρόσθετες τάσεις στους πασσάλους, στις περιοχές μεγάλης σεισμικότητας προκύπτει το πρόβλημα ότι οι πάσσαλοι δεν θα έχουν (ή θα έχουν μειωμένη) πλευρική αντίδραση-στήριξη από το έδαφος στα μικρά βάθη, δημιουργώντας έτσι συνθήκες παρόμοιες με αυτές κοντού υποστυλώματος, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στον αντισεισμικό σχεδιασμό της θεμελίωσης.

6. Στατική ανάλυση θεμελιώσεων σε διογκώσιμα εδάφη

Οι γενικές κοιτοστρώσεις αποτελούν τον δημοφιλέστερο τύπο θεμελίωσης σε διογκώσιμα εδάφη διότι χαρακτηρίζονται από μεγάλη δυσκαμψία και έχουν μικρότερο κόστος από τις βαθιές θεμελιώσεις. Έτσι, εδώ και δεκαετίες αναπτύχθηκε ένας αριθμός μεθόδων (Lytton 1970, Fraser & Wardle 1975, PTI 1978, Walsh 1974, Mitchell 1980, Wray 1980, 1989, Poulos 1984) για τη στατική ανάλυση των γενικών



Σχ. 11. Επίδραση μεταβολών όγκου εδάφους στις πασσαλοθεμελίωσεις: α) ανύψωση και πρόσθετες πλευρικές τριβές λόγω διόγκωσης, β) απώλεια επαφής λόγω συρρίκνωσης.

Fig. 11. Impact of soil volume changes on pile foundations: a) uplift and additional side friction due to swelling, b) loss of contact due to shrinkage.

κοιτοστρώσεων, με προέλευση τις χώρες όπου αντιμετωπίζουν έντονα προβλήματα από διογκώσιμες αργίλους, όπου και έχουν βρει πρακτική εφαρμογή, συγκεκριμένα τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Αυστραλία.

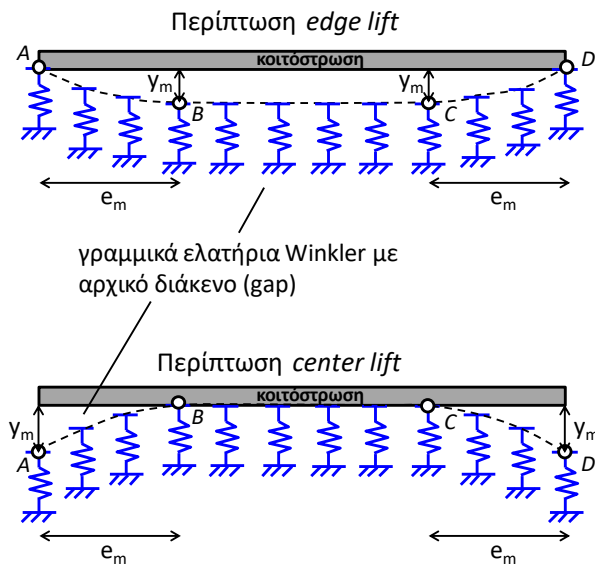
Όλες οι παραπάνω μέθοδοι βασίζονται στην ίδια υπολογιστική λογική, η οποία έχει ως εξής. Λόγω των διαφορικών ανυψώσεων/καθιζήσεων (Σχ. 10), η επιφάνεια έδρασης έχει καμπύλο (κοίλο ή κυρτό) σχήμα, το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί προσεγγιστικά με βάση εμπειρικές συσχετίσεις (οι οποίες διαφέρουν μεταξύ των μεθόδων). Για τον στατικό υπολογισμό της, η πλάκα θεμελίωσης τοποθετείται αρχικά αφόρτιστη πάνω στην

καμπύλη επιφάνεια έδρασης. Κατά συνέπεια, κάποια τμήματα της κοιτόστρωσης σε αυτή την αρχική φάση θα βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, ενώ σε κάποια άλλα θα υπάρχει διάκενο (gap) μεταξύ κοιτόστρωσης και εδάφους. Το διάκενο, το οποίο έχει μεταβαλλόμενο μέγεθος κατά μήκος της κοιτόστρωσης, εντοπίζεται στην κεντρική περιοχή της θεμελίωσης στην περίπτωση edge lift και στην περιμετρική περιοχή στην περίπτωση center lift (Σχ. 12).

Στη συνέχεια, επιβάλλονται τα φορτία στην πλάκα (φορτία ανωδομής και το ίδιο βάρος της), η οποία πλέον αλληλεπιδρά με το έδαφος, κάμπτεται και αναπτύσσει τα ζητούμενα εντατικά μεγέθη (ροπές και τέμνουσες). Η ύπαρξη διακένων στην αρχή της φόρτισης παράγει μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη από ότι αν η πλάκα πίεζε εξ αρχής μια εντελώς επίπεδη επιφάνεια εδάφους σε όλη την έκτασή της. Αυτά τα προσαυξημένα εντατικά μεγέθη αντικατοπτρίζουν τις δράσεις που ασκούνται στη θεμελίωση λόγω της διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους.

Όλες οι μέθοδοι θεωρούν ότι το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά. Οι μέθοδοι των Lytton (1970) (μόνο για την περίπτωση center lift) και Mitchell (1980) κάνουν θεώρηση απλών (μη συζευγμένων) ελατηρίων Winkler για τη στατική ανάλυση αλληλεπίδρασης κοιτόστρωσης-εδάφους, κάτι που επιτρέπει την άμεση και εύκολη εφαρμογή αυτών των μεθόδων σε εμπορικά προγράμματα στατικής ανάλυσης κατασκευών, όπως το SAP2000. Οι υπόλοιπες μέθοδοι βασίζονται στη χρήση ακριβέστερων ανώτερων θεωριών για την αναπαράσταση του εδάφους, όπως συζευγμένα ελατήρια Winkler, θεωρία συνεχούς ελαστικού ημίχωρου και τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, για την εφαρμογή των οποίων οι ερευνητές που πρότειναν τις παραπάνω μεθόδους έγραψαν εξειδικευμένα προγράμματα. Ωστόσο, απουσία αυτών των προγραμμάτων, η θεώρηση απλών ελατηρίων Winkler είναι σίγουρα προτιμότερη από το να αγνοηθεί η επίδραση της διόγκωσης / συρρίκνωσης του εδάφους στην ανάλυση της κοιτόστρωσης.

Το Σχ. 12 παρουσιάζει την κατανομή αρχικού διακένου που θεωρούν οι μέθοδοι των Fraser & Wardle (1975), PTI (1978), Wray (1980). Οι κατανομές εμφανίζουν τρία τμήματα, το κεντρικό BC και τα περιμετρικά AB και CD.

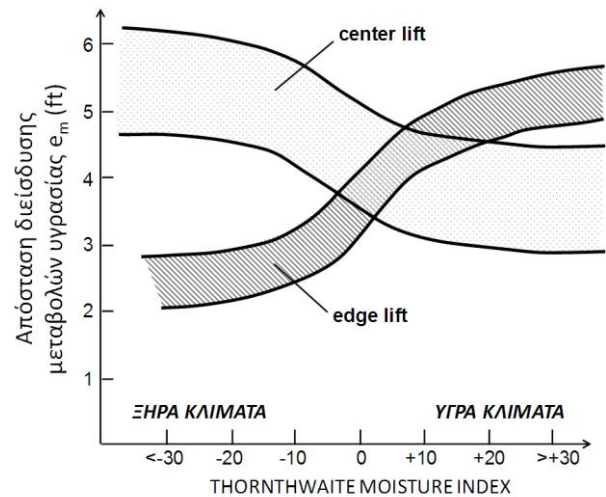


Σχ. 12. Στατικό ανάλογο για την ανάλυση γενικών κοιτοστρώσεων σε διογκώσιμα εδάφη.

Fig. 12. Static analog for the analysis of mat foundations on expansive soils.

Στο τμήμα BC η κατανομή του διακένου είναι σταθερή ή μηδενική, ενώ στα AB και CD η κατανομή είναι παραβολική (πολυωνυμική 2^{ου} βαθμού). Το εύρος e_m των ζωνών AB και CD, το οποίο αντικατοπτρίζει το μήκος διείσδυσης των μεταβολών υγρασίας κάτω από τη θεμελίωση, προσδιορίζεται από εμπειρικές συσχετίσεις ή εξειδικευμένο software. Για παράδειγμα, ο Wray (1989) δίνει νομογράφημα (Σχ. 13) για την εκτίμηση του e_m συναρτήσει του κλιματικού δείκτη Thornthwaite (Thornthwaite Moisture Index) και του τύπου της ανάλυσης (edge lift vs. center lift). Η μέγιστη τιμή διακένου y_m μπορεί να εκτιμηθεί επίσης από εμπειρικές συσχετίσεις ή εξειδικευμένο λογισμικό που συνοδεύει τις εν λόγω μεθόδους ανάλυσης, ή χρησιμοποιώντας την Εξ. (5) και θεωρώντας y_m ως ένα ποσοστό 50% ή 70% του y_s κατά Holland (1981).

Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου ανάλυσης θεμελίωσης με ελατήρια με διάκενο παρουσιάζεται στο Σχ. 14. Συγκεκριμένα, πλάκα θεμελίωσης κυλινδρικής δεξαμενής υδατοπρομήθειας θεωρείται ότι εδράζεται σε στρώμα διογκώσιμης αργίλου πάχους 8m. Το πάχος της πλάκας σκυροδέματος είναι 0.5m και η διάμετρός της 10m. Ο δείκτης εδάφους τέθηκε ίσος 19.6MPa/m, ενώ υποτέθηκε ότι το μέγιστο διάκενο y_m είναι 3.5cm και η απόσταση διείσδυσης e_m 1.6m (5.2ft). Οι συγκεκριμένες παράμετροι αντιστοιχούν σε περίπτωση



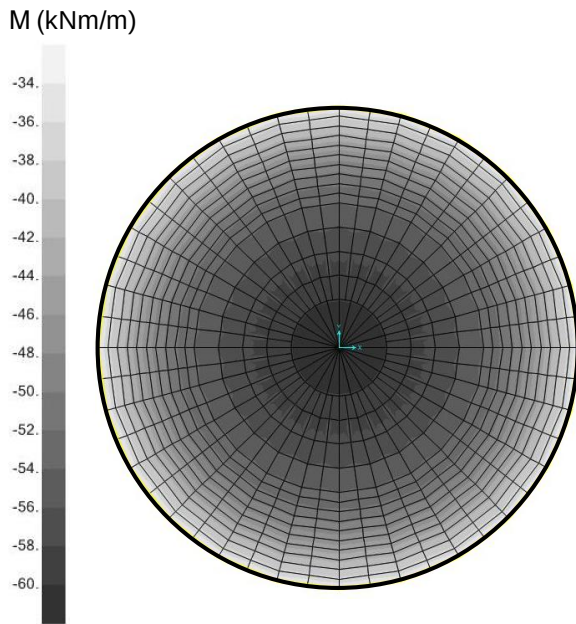
Σχ. 13. Διάγραμμα Wray (1989) εκτίμησης απόστασης διείσδυσης εποχιακών μεταβολών εδαφικής υγρασίας κάτω από γενική κοιτόστρωση.

Fig. 13. Wray (1989) chart for the estimation of the distance of penetration of seasonal fluctuations of soil moisture under a mat foundation.

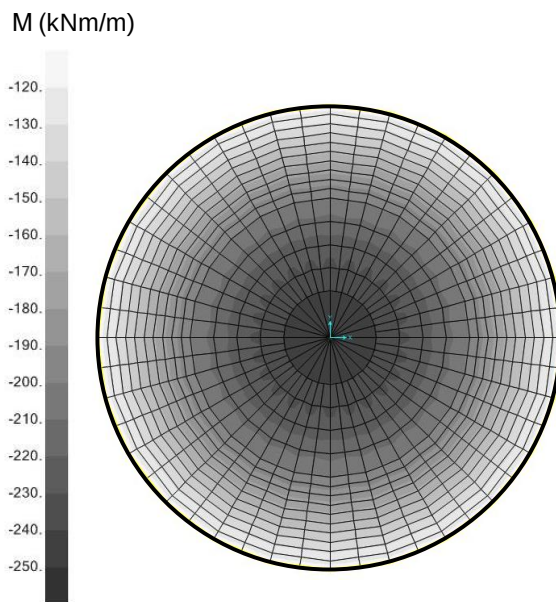
αργιλικού προφίλ πολύ υψηλής διογκωσιμότητας σε περιοχή με ξηρό κλίμα.

Η πλάκα φορτίζεται με πίεση 40kPa σε όλη την έκτασή της και με κατανεμημένο γραμμικό φορτίο 35kN/m κατά μήκος της περιμέτρου της. Η κατανομή του διακένου ήταν αυτή του Σχ. 12 για την περίπτωση center lift. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με το δημοφιλές πρόγραμμα H/Y ανάλυσης κατασκευών SAP2000.

Στο Σχ. 14α φαίνονται τα αποτελέσματα σε όρους καμπτικών ροπών στην περίπτωση που αγνοήσουμε τη διόγκωση/συρρίκνωση της αργίλου, δηλ. χρησιμοποιώντας ελατήρια Winkler χωρίς διάκενο. Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη (κατ' απόλυτο τιμή) καμπτική ροπή εφελκυσμού άνω ίνας προκύπτει 60.2kNm/m. Αντίθετα, λαμβάνοντας υπόψη τη διογκωσιμότητα της αργίλου, δηλ. χρησιμοποιώντας ελατήρια Winkler με διάκενο, η αντίστοιχη ροπή προκύπτει 250.2kNm/m (Σχ. 14β), δηλαδή αυξημένη πάνω από 4 φορές. Αντίστοιχη είναι και η αύξηση στις διαφορικές μετατοπίσεις. Το να μην ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό της θεμελίωσης αυτά τα σημαντικώς προσauxημένα μεγέθη είναι εύλογο ότι μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση προβλημάτων στην κατασκευή.



(α)



(β)

Σχ. 14. Κατανομή καμπτικών ροπών σε κυκλική θεμελίωση δεξαμενής υδατοπρομήθειας υπό συνθήκες center lift από ανάλυση με ελατήρια: α) χωρίς διάκενο, β) με διάκενο.

Fig. 14. Bending moment distribution in circular foundation of water supply tank under center lift conditions from analysis with springs: a) without gap, b) with gap.

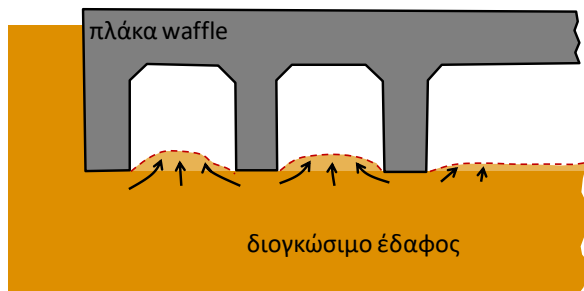
Στην περίπτωση των θεμελιώσεων με πασσάλους, οι υπάρχουσες μέθοδοι για να ληφθεί υπόψη η διογκωσιμότητα των αργίλων στον σχεδιασμό είναι ακόμη λιγότερες (O'Neill

& Roormoayed 1980, Reese & O' Neill 1988, Chen 1988) και ο στόχος τους περιορίζεται στο να προβλέψουν την τριβή που αναμένεται να αναπτυχθεί στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου και της εφελκυστικής δύναμης που ενδέχεται να προκληθεί εντός του πασσάλου. Ο υπολογισμός της πλευρικής τριβής χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του διαγράμματος αξονικών δυνάμεων που χρειάζεται για τον σχεδιασμό του διαμήκους οπλισμού των πασσάλων. Οι εν λόγω προσεγγίσεις βασίζονται στην κλασική μέθοδο του συντελεστού β (Bowles 1996, Coduto 2001), με τη διαφορά ότι η οριακή πλευρική τριβή που αναπτύσσεται θεωρείται ότι είναι ανάλογη της τάση διόγκωσης p_s (αντί της κατακόρυφης τάσης) μέσω ενός εμπειρικού πολλαπλασιαστή.

7. Κατασκευαστικοί τρόποι μείωσης των επιπτώσεων των διογκώσιμων εδαφών

Δεδομένης της μεγάλης αύξησης των εντατικών μεγεθών και διαφορικών μετατοπίσεων που προξενούν στις κοιτοστρώσεις οι ογκομετρικές παραμορφώσεις των διογκώσιμων εδαφών, έχουν επινοηθεί μια σειρά από κατασκευαστικές λύσεις για την αντιμετώπιση των προβλημάτων στο επίπεδο της θεμελίωσης. Κάποιες από αυτές στοχεύουν στην αύξηση της μηχανικής αντίστασης (αντοχής και δυσκαμψίας) της θεμελίωσης ώστε αυτή να μπορεί να αναλάβει αποτελεσματικά τις δράσεις που ασκεί το διογκώσιμο έδαφος, ενώ άλλες μέθοδοι προσπαθούν να μειώσουν τις δράσεις που θα ασκηθούν στη θεμελίωση κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι ιδιαίτερα δημοφιλής η κατασκευή προεντεταμένων πλακών θεμελίωσης, η οποία αυξάνει σημαντικά την ικανότητα της θεμελίωσης να αναλάβει τις πρόσθετες εντάσεις που προέρχονται από τη διόγκωση/συρρίκνωση του εδάφους. Μια εναλλακτική διαμόρφωση γενικής κοιτόστρωσης είναι αυτή της δοκιδωτής πλάκας, με τις δοκίδες να εξέχουν προς τα κάτω και να βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος (waffle slab). Πέρα από την μεγάλη καμπτική δυσκαμψία που προσφέρουν οι δοκίδες, ο κενός χώρος μεταξύ τους επιτρέπει στο έδαφος θεμελίωσης να εκτονώσει τις τάσεις του για διόγκωση (Σχ. 15). Για τη δημιουργία των



Σχ. 15. Εκτόνωση διόγκωσης εδάφους εντός των κενών χώρων κοιτόστρωσης τύπου waffle.

Fig. 15. Relief of soil swelling in the voids of a waffle-type mat foundation.

κενών χρησιμοποιούνται καλούπια από χαρτόνι ή πολυστερίνη, ή πλαστικά καλούπια.

Στα μέτρα μείωσης των δράσεων εντάσσονται η χρήση στεγανωτικών μεμβρανών, η αντικατάσταση εδάφους και η βελτίωση του διογκώσιμου εδάφους με σταθεροποιητικούς παράγοντες (π.χ. άσβεστος/υδράσβεστος, τσιμέντο, κ.α.). Η επένδυση του χώρου θεμελίωσης, αλλά και του περιβάλλοντος χώρου με στεγανωτική γεωμεμβράνη, ώστε να επιτευχθεί μόνωση του προβληματικού εδάφους από τις εποχιακές μεταβολές υγρασίας, είναι ένα προληπτικό μέτρο που έχει παρατηρηθεί ότι βοηθάει στην ελάττωση της έντασης των προβλημάτων ή την καθυστέρηση εμφάνισής τους. Η προσέγγιση αυτή συνδυάζεται με τη διαμόρφωση του περιβάλλοντος χώρου με τέτοια κλίση της ελεύθερης επιφάνειας ώστε να απομακρύνεται εύκολα το νερό της βροχής, καθώς και την τοποθέτηση στραγγιστικών καναλιών και σωλήνων.

Η αντικατάσταση εδάφους στην περίπτωση διογκώσιμων εδαφών έχει συνήθως τη μορφή μιας εκσκαφής 1m-1.5m η οποία γεμίζει με χονδρόκοκκο υλικό, κατά προτίμηση θραυστό αμμοχάλικο ή χαλίκι. Η αντικατάσταση εδάφους έχει ως στόχο τη μείωση των δράσεων του διογκώσιμου εδάφους προς τη θεμελίωση χάρη στη διάχυσή τους εντός της μάζας της χονδρόκοκκης επίχωσης, με αποτέλεσμα αυτές να φτάνουν στη βάση της πλάκας θεμελίωσης με μειωμένη ένταση. Πριν την επιχωμάτωση, οι παρειές και ο πυθμένας της εκσκαφής επενδύονται με μονωτική μεμβράνη ώστε να αποφευχθεί να διαβραχεί το φυσικό έδαφος από νερό της βροχής που τυχόν να βρει δίοδο εισόδου στη σχετικά μεγάλης διαπερατότητας επιχωμάτωση.

Από τις σχετικά σύγχρονες μεθόδους βελτίωσης διογκώσιμων εδαφών είναι η εισαγωγή στο έδαφος ουσιών που μειώνουν τη διογκωσιμότητα των αργίλων, όπως 1) η άσβεστος/υδράσβεστος (Petry and Little, 2002), 2) ο συνδυασμός ιπτάμενης τέφρας, τέφρας πυθμένα και συνθετικών ινών (Rupalla et al., 2006), 3) η διογκούμενη πολυουρεθάνη (Buzzi et al., 2010), και 4) ο συνδυασμός ασβέστου και τσιμέντου (Madhyannapu et al., 2009). Τα υλικά αυτά είτε εισπιέζονται στο υπέδαφος, εκμεταλλεύοντας τις ρωγμές συρρίκνωσης που σχηματίζονται την ξηρά περίοδο στα ανώτερα στρώματα του εδαφικού προφίλ, ή γίνεται μίξη του εδάφους με τους σταθεροποιητικούς παράγοντες με ειδικά μηχανήματα σε βάθος (deep soil mixing). Πλεονέκτημα της βελτίωσης με σταθεροποιητικούς παράγοντες είναι το γεγονός ότι δύναται να εφαρμοστεί σε υπάρχουσες θεμελιώσεις. Ωστόσο, οι εν λόγω μέθοδοι θεωρούνται ότι είναι ακόμη σε πειραματικό στάδιο σε ό,τι αφορά τον έλεγχο διογκώσης.

8. Τελικά σχόλια - παρατηρήσεις

Τα διογκώσιμα εδάφη εξακολουθούν να είναι πηγή σημαντικών προβλημάτων στα έργα του πολιτικού μηχανικού, παρά τις προσπάθειες που έχουν γίνει στη μελέτη και ανάπτυξη μέτρων για την αντιμετώπισή τους εδώ και πολλές δεκαετίες (πειραματικά και υπολογιστικά αλλά και στην κατασκευαστική πρακτική). Αυτό οφείλεται στην εγγενή πολυπλοκότητα των φαινομένων που εμπλέκουν μηχανική μη κορεσμένων εδαφών και ροή, κορεσμένα και μη, εντός του υπεδάφους. Πρόβλεψη των διαφορικών μετατοπίσεων και εντατικών μεγεθών που είναι αποτέλεσμα μεταβολών του όγκου του εδάφους λόγω αλλαγής της περιεχόμενης υγρασίας απαιτεί τον χειρισμό εννοιών πέραν των απλών νόμων ελαστικότητας που είθισται να χρησιμοποιούνται για τους κλασικούς ελέγχους καθιζήσεων λόγω φορτίων της ανωδομής. Ως αποτέλεσμα, η πρακτική στον τομέα των θεμελιώσεων σε ό,τι αφορά τα διογκώσιμα εδάφη χαρακτηρίζεται έντονα από εμπειρισμό και τις αβεβαιότητες που αυτός ενέχει.

Η ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια σύγχρονων πειραματικών μεθόδων, οργάνων, αισθητήρων, αλλά και προχωρημένων καταστατικών προσομοιωμάτων και αριθμητικών

μεθοδολογιών μεγαλύτερης αξιοπιστίας, αναμένεται να οδηγήσει σταδιακά σε βελτιωμένες μεθόδους ανάλυσης, σχεδιασμού και κατασκευής θεμελιώσεων σε διογκώσιμα εδάφη. Εν τω μεταξύ, ο μηχανικός οφείλει να λαμβάνει υπόψη στον σχεδιασμό των θεμελιώσεων τις δυσμενείς επιδράσεις της διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους, εφαρμόζοντας τις υπάρχουσες μεθοδολογίες και πρακτικές, παρά την αδρότητα και τις αβεβαιότητες που τις χαρακτηρίζουν. Αυτό άλλωστε επιβάλλει και ο Ευρωκώδικας 7 (EN 1997-1:2004) με αναφορές σε διάφορα σημεία του σε διογκώσιμα εδάφη, για επιφανειακές και βαθιές θεμελιώσεις, αλλά και τοίχους αντιστήριξης.

Βιβλιογραφία

- Μπαρδάνης, Μ.Ε., 2019, Φύση, μηχανική συμπεριφορά και εμφάνιση μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 1-42.
- Τσιαμπούση, Αικ., 2019, Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και η σημασία της, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 43-66.
- Σιταρένιος, Π., 2019, Καταστατική συμπεριφορά της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 127-154.
- Alonso, E.E., Vaunat, J., Gens, A., 1999, *Modelling the mechanical behaviour of expansive clays*. Engineering Geology, 54(1), pp. 173-183.
- Bardanis, M., Grifiza, S., 2012, *Soil-Water Characteristic Curves and Evolution of the Tensile and Unconfined Compression Strength of Drying Slurried Soils*. Unsaturated Soils: Research and Applications, Springer, pp. 249-256.
- Bardanis, M., Grifiza, S., 2016, Swelling and collapse of compacted soils to be used as earth dam cores, Proc. 3rd Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, France, 12-14 September, 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160919003.
- Bowles, J.E. (1996), Foundation Engineering, Mc Graw-Hill.
- Buzzi, O., Fityus, S., Sloan, S.W., 2010, *Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations*. Canadian Geotechnical Journal, 47(6), pp. 623-634.
- Chen, F. H., 1988, Foundations on expansive soils. Elsevier.
- Coduto, D.P., 2015. Foundation design: principles and practices, Prentice Hall.
- Constantinou, G., Petrides, G., Kyrou, K., Chrysostomou, C., 2002, Swelling Clays: A Continuous Threat to the Built Environment of Cyprus. UNOPS Project Final Report, Technical Chamber of Cyprus, Nicosia, Cyprus.
- Dhowian, A.W., 1990, *Heave prediction techniques and design consideration on expansive soils*. Journal of King Saud University - Engineering Science, 2, pp. 355-377.
- Dif, A.E., Bluemel, W.F., 1991, *Expansive soils under cyclic drying and wetting*. Geotechnical Testing Journal, 14(1), pp. 96-102.
- El-Garhy, B.M., Wray, W.K., 2004, *Method for calculating the edge moisture variation distance*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(9), pp. 945-955.
- EN 1997-1:2004, Eurocode 7 - Part 1: General rules, European Committee of Standardization.
- Fraser, R.A., Wardle, J.L., 1975, *The Analysis of Stiffened Raft Foundation on Expansive Soils*, Proceedings of the Symposium on Recent Developments in the Analysis of Soil Behaviour and their Application to Geotechnical Structures, Sydney, Australia, pp. 89-98.
- Holland, J.E., 1981, The Design, Performance and Repair of Housing Foundations, Swinburne College Press, Melbourne.
- Jones, D.E., Jones, K.A., 1987, *Treating expansive soils*. Civil Engineering—ASCE, 57(8), pp. 62-65.
- Komine H., 2004, *Simplified Evaluation for Swelling Characteristics of Bentonites*. Engineering Geology, 71(3), pp. 265-279.
- Lazarou, G., Loukidis, D. Bardanis, M., 2019, *Moisture migration under mat foundations in Nicosia marl*. Geotechnical and Geological Engineering, 37, pp. 1585-1608.

- Lawton, E.C., Frigaszy, R.J., Hardcastle, J.H., 1989, *Collapse of compacted clayey soils*. J. Geotech. Engng, ASCE, 115, pp. 1252-1267.
- Lytton, R.L., 1970, *Analysis for Design of Foundation on Expansive Clay*, Proceeding of the Symposium on Soils and Earth Structures in Arid Climates, Adelaide, Australia.
- Madhyannapu, R.S., Puppala, A.J., Nazarian, S., Yuan, D., 2009, *Quality assessment and quality control of deep soil mixing construction for stabilizing expansive subsoils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, 136(1), pp. 119-128.
- Van der Merwe, D.H., 1975., *Plasticity index and percentage clay fraction of soils*. Proceedings of the 4th Regional Conference in Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 166-167.
- Nelson, J.D., Chao, K.C., Overton, D.D., Nelson, E.J., 2015, *Foundation engineering for expansive soils*, Wiley, New York, 416 pp.
- O'Neill, M. W., Poormoayed, M., 1980, *Methodology for foundations on expansive clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 106(GT12), pp. 1345-1367.
- Petry, T.M., Little, D.N., 2002, *Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures - history, practice, and future*. Journal of Materials in Civil Engineering, 14(6), pp. 447-460.
- Poulos, H.G. 1984, *Parametric Solutions for Strip Footings on Swelling and Shrinking Soils*. Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, Australia, pp. 149-153.
- PTI, 1978, *Design and Construction of Post-Tensioned Slabs-on-Ground*, Post-Tensioning Institute, Arizona, USA.
- Reese, L. C., O'Neill, M.W., 1988. *Drilled shafts: construction procedures and design methods*, Federal Highway Administration, Office of Implementation.
- Romero, E., Gens, A., Lloret, A., 2003, *Suction effects on a compacted clay under non-isothermal conditions*. Géotechnique, 53(1), pp. 65-81.
- SAP2000 v.18, 2016, *CSI analysis reference manual*. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA
- Tang AM, Cui YJ, 2005, *Controlling suction by vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay*. Canadian Geotechnical Journal, 42, pp. 287-296.
- Tripathy, S., Rao, K.S., Fredlund, D.G., 2002, *Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils*. Canadian Geotechnical Journal, 39(4), pp. 938-959.
- US Department of the Army, 1983, *Technical Manual TM 5-818-7, Foundations in Expansive Soils*, Washington, DC.
- Walsh, P.F., 1974, *The design of residential slab-on-ground*, Technical Paper No. 5, CSIRO, Division of Building Research, Melbourne, Australia.
- Wray, W. K, 1980, *Analysis of Stiffened Slabs-on-Ground over Expansive Soil*. Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, USA, pp. 558-581.
- Wray, W.K., 1989, *Field measurement of edge moisture variation distance*. Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 663-666.

ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

SOIL COLLAPSE DUE TO VARIATION OF THE DEGREE OF SATURATION

N. Θ. Χατζηγώγος¹

Δρ. Τεχνικός Γεωλόγος, MSc-DIC
Engineering Geology

Μέλος του Εργαστηρίου Τεχνικής
Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Τμ.
Γεωλογίας Α.Π.Θ

Διευθύνων σύμβουλος της εταιρίας
Γεωλογικών-Γεωτεχνικών μελετών Triger

M. E. Μπαρδάνης²

Δρ Πολιτικός Μηχανικός
Γενικός Γραμματέας ΕΕΕΕΓΜ

Διευθυντής Εργαστηρίου, ΕΔΑΦΟΣ
Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Μία από τις ιδιαιτερότητες της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών είναι και η εκδήλωση μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων με τον υδρεμποτισμό τους που προκαλεί πλήρη κορεσμό. Το φαινόμενο είναι γνωστό ως κατάρρευση εδαφών (soil collapse) και εμφανίζεται σε κοκκώδη εδάφη όταν ο υδρεμποτισμός συμβαίνει είτε υπό μικρές είτε υπό μεγάλες τάσεις και σε αργιλικά εδάφη όταν συμβαίνει υπό μεγάλες τάσεις. Μια ιδιαίτερη υποκατηγορία εδαφών στις οποίες εμφανίζεται το φαινόμενο είναι οι ιστορικές αποθέσεις. Στο άρθρο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του φαινομένου αυτού γενικά και παραδείγματα και πειραματικά αποτελέσματα και από ιστορικές αποθέσεις και από συμπυκνωμένα εδάφη.

ABSTRACT: One of the particular aspects of the mechanical behavior of unsaturated soils that differentiate them from fully saturated soils is the large compressive strains that take place when inundation causes them to become fully

saturated. This phenomenon is known as soil collapse and it appears in granular soils when inundation takes place under both low and high stress values and in clayey soils when inundation takes place under high stress values. A special case of soils where soil collapse takes place is historic fills. Case studies where the phenomenon of soil collapse appeared are presented in the article along with experimental results both from historic fills and soils used as engineering fills.

1. Εισαγωγή

Το φαινόμενο της κατάρρευσης των εδαφών λόγω υδρεμποτισμού είναι ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των μη κορεσμένων εδαφών. Μάλιστα είναι ένα από τα χαρακτηριστικά εκείνα που όταν αγνοείται ο μερικός κορεσμός κατά τους υπολογισμούς δεν μπορεί να προβλεφθεί. Κατά συνέπεια αποτελεί παράδειγμα περίπτωσης στην οποία το να αγνοηθεί ο μερικός κορεσμός κατά τους υπολογισμούς είναι σε βάρος της ασφάλειας. Υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες οι παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού είναι ραγδαίες, οπότε είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται ο όρος κατάρρευση του εδάφους, αλλά και περιπτώσεις στις οποίες οι παραμορφώσεις αυτές εκδηλώνονται προοδευτικά, οπότε το φαινόμενο της προοδευτικής αυτής κατάρρευσης ονομάζεται υδροστερεοποίηση (hydroconsolidation). Όπως και στην περίπτωση του αντίστροφου φαινομένου, της διόγκωσης (Λουκίδης, 2019), το μέγεθος των παραμορφώσεων λόγω υδρεμποτισμού εξαρτάται έντονα από την πυκνότητα του υλικού υπό την οποία συμβαίνει ο υδρεμποτισμός. Οι παραμορφώσεις είναι τόσο μεγαλύτερες όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα κατά τον υδρεμποτισμό του μη κορεσμένου εδάφους. Έτσι, ανθρωπογενείς αποθέσεις οι οποίες είναι χαλαρές, όπως συνήθως οι ιστορικές αποθέσεις, αποτελούν υλικά στα οποία μπορεί να συμβούν είτε ραγδαίες παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού είτε πιο προοδευτικές. Ομοίως, σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά, είτε κοκκώδη, είτε αργιλικά, που δεν υπήρξε αυστηρός έλεγχος της πυκνότητας και της υγρασίας τους κατά την κατασκευή μπορεί να εκδηλωθούν παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού. Τέλος, για την προσομοίωση του φαινομένου της κατάρρευσης των

¹ Ηλεκτρονική διεύθυνση επικοινωνίας: chatzi12@gmail.com

² Ηλεκτρονική διεύθυνση επικοινωνίας: mbardanis@edafos.gr

μη κορεσμένων εδαφών έχει καταβληθεί ιδιαίτερη ερευνητική προσπάθεια στον τομέα της καταστατικής προσομοίωσης των μη κορεσμένων εδαφών, προκειμένου να μπορούν να γίνουν επιτυχείς προβλέψεις των παραμορφώσεων των μη κορεσμένων εδαφών κατά τον υδρεμπτισμό τους (Σιταρένιος, 2019).

2. Κατάρρευση εδαφών και εξέλιξη της μύζησης

Η κατάρρευση εδαφών είναι ένα από τα φαινόμενα που προσφέρονται για την καλύτερη περιγραφή της σύνδεσης των μακροσκοπικά παρατηρούμενων φαινομένων (όπως είναι η εκδήλωση της καθίζησης στην οποία οδηγεί ο υδρεμπτισμός) και της εξέλιξης των μεγεθών που καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών, δηλαδή του βαθμού κορεσμού και της μύζησης.

Ο Bardanis (2014) παρουσίασε το παράδειγμα ενός εδαφικού δοκιμίου μεγάλων διαστάσεων από χονδρόκοκκη άμμο το οποίο συμπυκνώθηκε σε πολύ μικρή αρχική πυκνότητα και ποσοστό υγρασίας, συμπιέστηκε υπό μικρή τάση και υποβλήθηκε σε υδρεμπτισμό, παρουσία οργάνων μέτρησης της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας εγκατεστημένων μέσα στο δοκίμιο. Το δοκίμιο το ίδιο κατά τη φάση της παρασκευής του και της εγκατάστασης των οργάνων παρουσιάζεται στην Φωτ. 1. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν χονδρόκοκκη άμμος Ποταμού Αλιάκμονα από το Φράγμα Ιλαρίωνα (Σχ. 1). Προκειμένου να μην επηρεαστεί η απόδοση των αισθητήρων μέτρησης που εγκαταστάθηκαν, η κατακόρυφη τάση διατηρήθηκε μικρή, μόλις 50 kPa. Το δοκίμιο παρασκευάστηκε με αρχικό ξηρό φαινόμενο βάρος 15 kN/m^3 και ποσοστό υγρασίας 5%. Στο μέσο του ύψους του δοκιμίου όπως φαίνεται στην Φωτ. 1α τοποθετήθηκαν ένα τενσιόμετρο χαμηλής πίεσης διεύθυνσης αέρα (Φωτ. 1γ), δύο τεμάχια γύψου (Φωτ. 1β & 1δ) και ένας αισθητήρας μέτρησης ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (ο ML-2 της Delta-T Devices γνωστός και ως ThetaProbe). Περισσότερα για τις συσκευές μέτρησης της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας μπορούν να βρεθούν στον Μπαρδάνη, 2016 & 2019, και στους Μπαρδάνη & Λουκίδη, 2019.

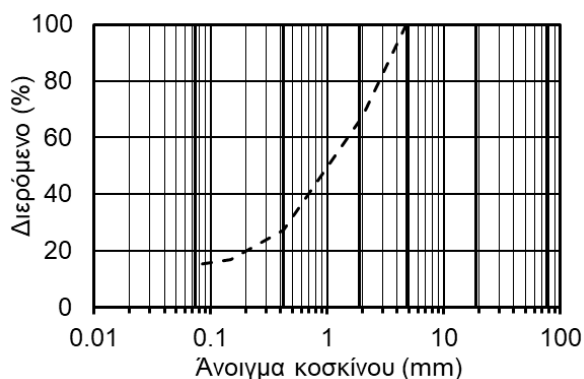
Μετά την παρασκευή του δοκιμίου με εγκατεστημένους τους αισθητήρες, το δοκίμιο αφέθηκε καλυμμένο με μεμβράνη στα όρια της κυψέλης της συσκευής ώστε να μην μπορεί να γίνει εξάτμιση από το εσωτερικό του, μέχρι να σταθερο-



Φωτ. 1. α) Δοκίμιο μεγάλων διαστάσεων χονδρόκοκκης άμμου με εγκατεστημένα όργανα παρακολούθησης στη στρώση που τοποθετήθηκαν, β) τεμάχια γύψου εντός πολλού ιλυώδους εδάφους, γ) κεφαλή τενσιόμετρου χαμηλής πίεσης διεύθυνσης αέρα μετά την εξαγωγή του από το δοκίμιο, δ) το ένα από τα τεμάχια γύψου κατά την τοποθέτησή του σε οπή στο δοκίμιο, και ε) ο αισθητήρας μέτρησης ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας ThetaProbe.

Phot. 1. a) Large-size sample of coarse-grained sand with monitoring sensors installed at the installation layer of the sample, b) gypsum blocks in silt slurry, c) low air-entry pressure tensiometer tip after its removal from the sample, d) one of the gypsum blocks during installation in a hole in the installation layer of the sample, and e) the ThetaProbe volumetric water content sensor.

ποιηθούν οι ενδείξεις των αισθητήρων. Η μύζηση ήταν μικρή, 22-23 kPa στο τενσιόμετρο και 19-20 kPa στα τεμάχια γύψου και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας 7.0-7.5%. Οι τιμές αυτές μεταβλήθηκαν ελάχιστα κατά την εφαρμογή της κατακόρυφης τάσης των 50 kPa. Μετά την σταθεροποίηση των ενδείξεων των αισθητήρων



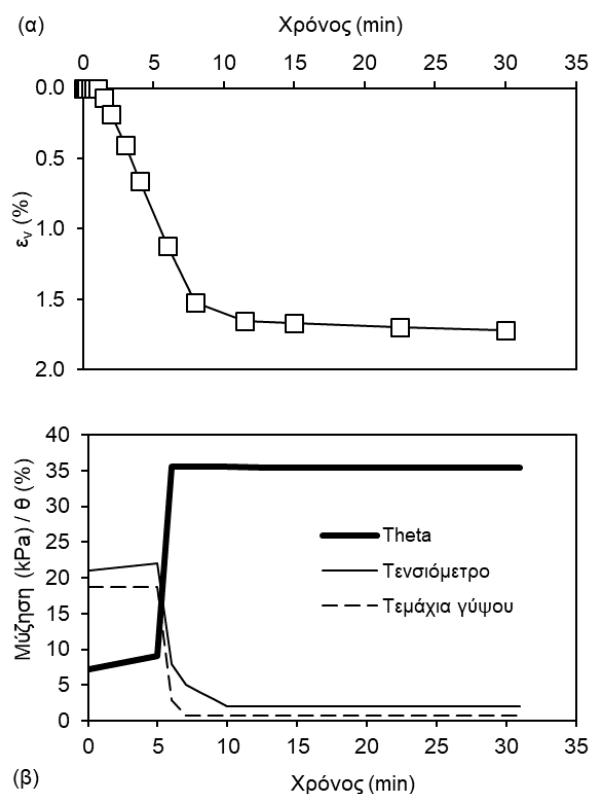
Σχ. 1. Καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης χονδρό-κοκκης άμμου Αλιάκμονα.

Fig. 1. Grain-size distribution curve of coarse-grained Aliakmon river sand.

άρχισε ο υδρεμπτισμός του δοκιμίου εντός της κυψέλης της συσκευής. Στο Σχ. 2α παρουσιάζεται η εξέλιξη της κατακόρυφης παραμόρφωσης του δοκιμίου όπως υπολογίστηκε από τις μετρήσεις μετατόπισης από δύο μηχανοσκόπετρα στο εξωτερικό του δοκιμίου και το αρχικό ύψος του δοκιμίου πριν την έναρξη του υδρεμπτισμού με τον χρόνο από την έναρξη παροχής ύδατος. Στο Σχ. 2β παρουσιάζονται η εξέλιξη της μύζησης που κατέγραψαν οι αισθητήρες κατά τον ίδιο χρόνο. Όπως προκύπτει από τα Σχ. 2α & 2β η εκδήλωση της παραμόρφωσης λόγω υδρεμπτισμού βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με την μείωση της μύζησης στο 0 και την αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε τιμή που αντιστοιχεί σε πλήρη κορεσμό. Για την ακρίβεια το χρονικό πλαίσιο στο οποίο γίνεται η ραγδαία μείωση της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας στους αισθητήρες είναι πιο στενό από το χρονικό πλαίσιο στο οποίο η παραμόρφωση αυξήθηκε από το 0 στο 1.65%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα εξωτερικά τοποθετημένα μηχανοσκόπετρα καταγράφουν την παραμόρφωση του δοκιμίου από την αρχή του υδρεμπτισμού οπότε και τμήματα του δοκιμίου μακριά σχετικά από τους αισθητήρες αρχίζουν να καταρρέουν, ενώ οι ίδιοι οι αισθητήρες καταγράφουν μεταβολή όταν πια το υγρό μέτωπο φτάσει στο σημείο του δοκιμίου που αυτοί είναι εγκατεστημένοι. Κατά συνέπεια, η μακροσκοπική παρατήρηση της παραμόρφωσης λόγω υδρεμπτισμού είναι σε πλήρη συμφωνία με την απώλεια 20 kPa μύζησης και αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας από 7.5% σε 35.5% που αντιστοιχεί σε πλήρη κορεσμό. Με αντίστροφους υπολογισμούς προκύπτει ότι ο αρχικός βαθμός κορεσμού ήταν περί το 25% και

άρα αυτή η μεταβολή που καταγράφηκε στο συγκεκριμένο υλικό αντιστοιχούσε σε μεταβολή του βαθμού κορεσμού από 25% σε 100% και της μύζησης από 20 kPa σε 0. Ο Bardanis (2014) παραθέτει λεπτομέρειες για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών και τη χρήση των εσωτερικά εγκατεστημένων αισθητήρων για τέτοιους υπολογισμούς.

Η δοκιμή αυτή δεν προσφέρεται για εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων. Η σημασία της έγκειται όμως στην πλήρη αντιστοίχιση μεταξύ του μακροσκοπικά παρατηρούμενου φαινομένου που είναι η καθίζηση λόγω κατάρρευσης από υδρεμπτισμό και της απόλυτης συμφωνίας της απώλειας μύζησης και της αύξησης του βαθμού κορεσμού στο 100% στο ίδιο ακριβώς χρονικό πλαίσιο.



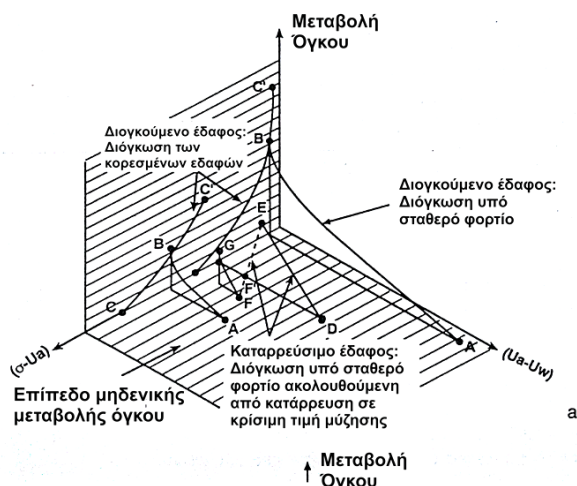
Σχ. 2. α) Κατακόρυφη παραμόρφωση λόγω υδρεμπτισμού με το χρόνο από την έναρξη παροχής ύδατος σε χονδρόκοκκη άμμο υπό σταθερή κατακόρυφη τάση 50 kPa, και β) μύζηση από тензиόμετρο και τεμάχια γύψου και ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας με τον χρόνο από την έναρξη παροχής ύδατος.

Fig. 2. a) Vertical strain due to inundation with time after start of wetting for coarse-grained sand under 50 kPa constant vertical stress, and b) suction measured from tensiometer and gypsum block and volumetric water content with time after start of wetting.

3. Ιστορικές αποθέσεις

3.1 Γενικά

Στα ακόρεστα εδάφη η διαδικασία της διόγκωσης και της κατάρρευσης περιγράφεται ως μεταβολή όγκου σε σχέση με τις μεταβλητές της ακόρεστης ενεργού τάσης ($\sigma - u_a$) και της μύζησης ($u_a - u_w$) (Blight G. E., 1965). Η σχέση αυτών των μεταβλητών κατά τη διαδικασία μεταβολής όγκου ενός ακόρεστου εδάφους παρουσιάζεται στο Σχ. 3. Αν η ($\sigma - u_a$) διατηρείται σταθερή, και θεωρηθεί ως το ισοδύναμο μιας σταθερής ολικής τάσης στο πεδίο, τότε μείωση της μύζησης ($u_a - u_w$), εξαιτίας αύξησης της περιεχόμενης υγρασίας θα προκαλέσει διόγκωση του εδάφους κατά την πορεία της καμπύλης AB (Σχ. 3). Αν το έδαφος έχει σταθερή κοκκώδη δομή τότε η διόγκωσή του θα συνεχιστεί μέχρι η τιμή της μύζησης να μηδενιστεί, δηλαδή μέχρι να επέλθει κορεσμός του εδάφους (σημείο B). Στη συνέχεια, αν η σ μειωθεί περαιτέρω, η διόγκωση θα συνεχιστεί κατά μήκος της γραμμής BC'. Παρόλα αυτά, αν το εξεταζόμενο έδαφος έχει ασταθή δομή, είναι πιθανό να επέλθει κατάρρευση αυτής μόλις η τιμή της μύζησης ($u_a - u_w$) πέσει κάτω από μία κρίσιμη τιμή σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τιμή ($\sigma - u_a$) (τμήμα DEF). Μόλις η δομή των εδαφικών κόκκων σταθεροποιηθεί τότε θα συνεχιστεί η διόγκωση του εδάφους κατά μήκος του τμήματος FG, και αν η τιμή της μύζησης συνεχίσει να μειώνεται, τότε το εξεταζόμενο έδαφος θα συμπεριφερθεί κανονικά.



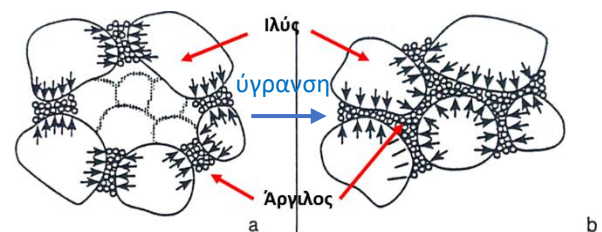
Σχ. 3. Τρισδιάστατο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τη διόγκωση μη κορεσμένου εδάφους κάτω από συνεχές ισотροπικό φορτίο (Blight G. E., 1965).

Fig.3. Three dimensional stress-strain diagram for the swelling of a partially saturated soil under constant isotropic load (Blight G. E., 1965).

Το φαινόμενο της κατάρρευσης συναντάται κυρίως σε χαλαρές ανθρωπογενείς τεχνητές ή ιστορικές επιχωματώσεις (historical, urban non-engineered fills) και σε κάποιους τύπους υπολειμματικών εδαφών, χωρίς να λείπουν και οι περιπτώσεις σε συμπυκνωμένα εδάφη χωρίς επιμελή έλεγχο της πυκνότητας και της υγρασίας κατά την συμπύκνωση (βλ. Παράγραφο 4). Ένα επιδεκτικό σε κατάρρευση έδαφος μπορεί να έχει υψηλή αντοχή και να είναι σχετικά ασυμπίεστο για μικρές τιμές υγρασίας (δηλαδή υψηλές τιμές μύζησης) και να χάνει την αντοχή του και να γίνεται συμπίεστο αν μειωθεί η μύζηση λόγω αύξησης της υγρασίας (Knight, 1961).

Το φαινόμενο της κατάρρευσης μπορεί να εξελιχθεί προοδευτικά και να μην εκδηλωθεί ως μία απότομη καθίζηση, ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία του εδάφους και το εύρος της μεταβολής της. Το φαινόμενο της προοδευτικής αυτής κατάρρευσης ονομάζεται υδροστερεοποίηση (hydroconsolidation). Συμβαίνει μόνο μία φορά, κατά την ύγρανση του εδάφους, με κατάρρευση της δομής και δημιουργία νέας πιο σταθερής (Σχ. 4). Στο Σχ. 5 φαίνεται πως αν το έδαφος φορτιστεί σε υψηλή τιμή περιεχόμενης υγρασίας τότε θα στερεοποιηθεί χωρίς να υποστεί κατάρρευση. Αν όμως κατά τη φόρτιση έχει μικρή τιμή περιεχόμενης υγρασίας και στη συνέχεια υγρανθεί, τότε θα διογκωθεί εάν η τάση είναι μικρότερη από 100 kPa ή θα καταρρεύσει εάν η τάση είναι μεγαλύτερη από 200 kPa (στο συγκεκριμένο παράδειγμα).

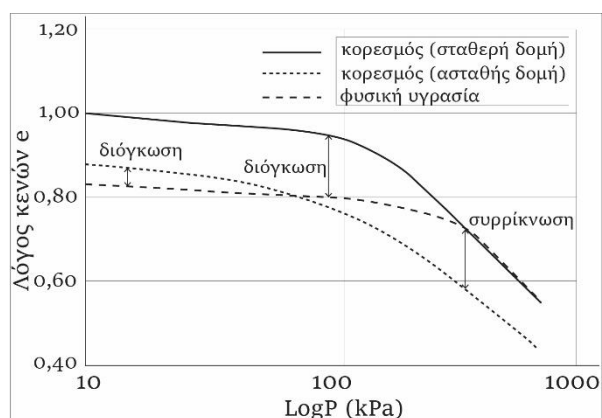
Το μέγεθος των καθιζήσεων λόγω κατάρρευσης της δομής εξαρτάται από τον λόγο κενών του εδάφους καθώς επίσης και από την εφαρμοζόμενη πίεση. Για μικρά φορτία θεμελιώσεων από 100 kPa έως 300 kPa παρατηρούνται συνήθως



Σχ. 4. Μηχανισμός κατάρρευσης αμώδους εδαφικού υλικού α) Φορτισμένη εδαφική δομή πριν την ύγρανση β) Φορτισμένη εδαφική δομή μετά την ύγρανση (Knight, 1961).

Fig.4. Collapse mechanism of a sandy soil a) Loaded soil structure before wetting b) Loaded soil structure after wetting (Knight, 1961).

μεταβολές όγκου της τάξης του 10% του πάχους του επίμαχου στρώματος, ενώ έχουν παρατηρηθεί και καθιζήσεις μέχρι το 15% αυτού. Εργαστηριακά, ο υπολογισμός της υδροστερεοποίησης προσεγγίζεται με τη δοκιμή του οιδημέτρου (Jennings & Knight, 1975), όπου επιχειρείται η προσομοίωση της διαδικασίας φόρτισης ακολουθούμενης από ύγρανση. Λύσεις θεμελίωσης για την αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων έχουν προταθεί με βάση την υπόθεση ότι τα φαινόμενα κατάρρευσης θα εκδηλωθούν με τη μορφή ενός "μαλακού σημείου" διαμέτρου μέχρι και 2m σε οποιοδήποτε σημείο κάτω από τη θεμελίωση (Tromp, 1985), (Schwartz & Yates, 1980).



Σχ. 5. Μεταβολές όγκου μετά από φόρτιση σε κατάσταση φυσικής υγρασίας και κορεσμού μιας υπολειμματικής αργιλώδους ιλύος ασταθούς δομής προερχόμενης από αποσάθρωση χαλαζίτη (Knight, 1961).

Fig. 5. Volume changes after loading in natural moisture content and in saturation of a residual clayey silt with meta-stable structure, derived from weathering of quartzite (Knight, 1961).

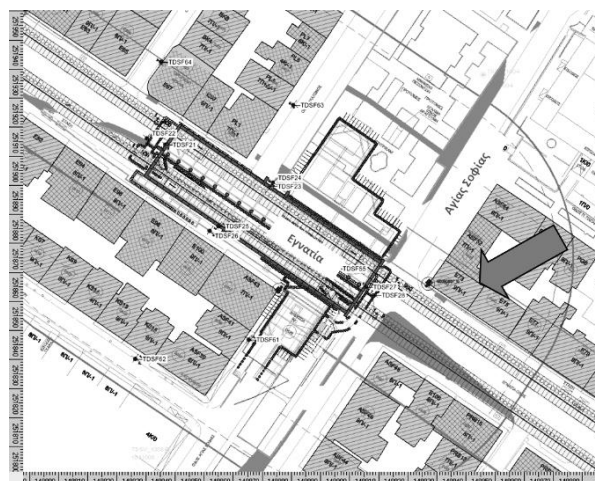
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σχηματισμού που έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα υδροστερεοποίησης αποτελούν οι ιστορικές επιχωματώσεις της Θεσσαλονίκης. Συγκεκριμένα, κατά την κατασκευή διαφραγματικών τοίχων σε σταθμό του Μετρό, προκλήθηκε ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα μέσα στο στρώμα των ιστορικών αποθέσεων. Στο συγκεκριμένο στρώμα ο υδροφόρος ορίζοντας είναι αποκλεισμένος από μεταβολές λόγω της επιφανειακής οικιστικής ανάπτυξης που αποτρέπει την κατείσδυση. Το αποτέλεσμα της ανύψωσης του υδροφόρου ορίζοντα ήταν να

προκληθούν καθιζήσεις σε σημεία του ιστορικού κέντρου της πόλης (Chatzigogos et al., 2006).

3.2 Περιγραφή του προβλήματος

Κατά τη φάση κατασκευής των διαφραγματικών τοίχων του Σταθμού Αγίας Σοφίας του Μετρό Θεσσαλονίκης παρατηρήθηκαν μετακινήσεις σε παρακείμενη οικοδομή στη συμβολή των οδών Αγίας Σοφίας και Εγνατία με αποτέλεσμα την απόκλιση του κτιρίου προς τα ΝΔ. Για την παρακολούθηση του φαινομένου έγιναν συστηματικές μετρήσεις των μετακινήσεων επί του εδάφους θεμελίωσης και του κτιρίου καθώς και της μεταβολής της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα σε γεωτρήσεις της περιοχής του έργου (Σχ. 6).

Η γενική στρωματογραφία της περιοχής περιλαμβάνει το σχηματισμό των ερυθρών αργίλων της Θεσσαλονίκης πάνω στις οποίες τοποθετούνται οι πρόσφατες Τεταρτογενείς αποθέσεις και το στρώμα των ιστορικών επιχωματώσεων, στο οποίο θεμελιώνονται κατά κύριο λόγο τα κτίρια του ιστορικού κέντρου της πόλης. Το στρώμα αυτό είναι εξαιρετικά ετερογενής σχηματισμός ικανού πάχους, που έχει σχηματισθεί από ανθρωπογενείς διαδικασίες και αποτελείται γενικά από εδαφικά και οικοδομικά υλικά καθώς και υλικά επιχωματώσεων. Το πάχος του κυμαίνει-



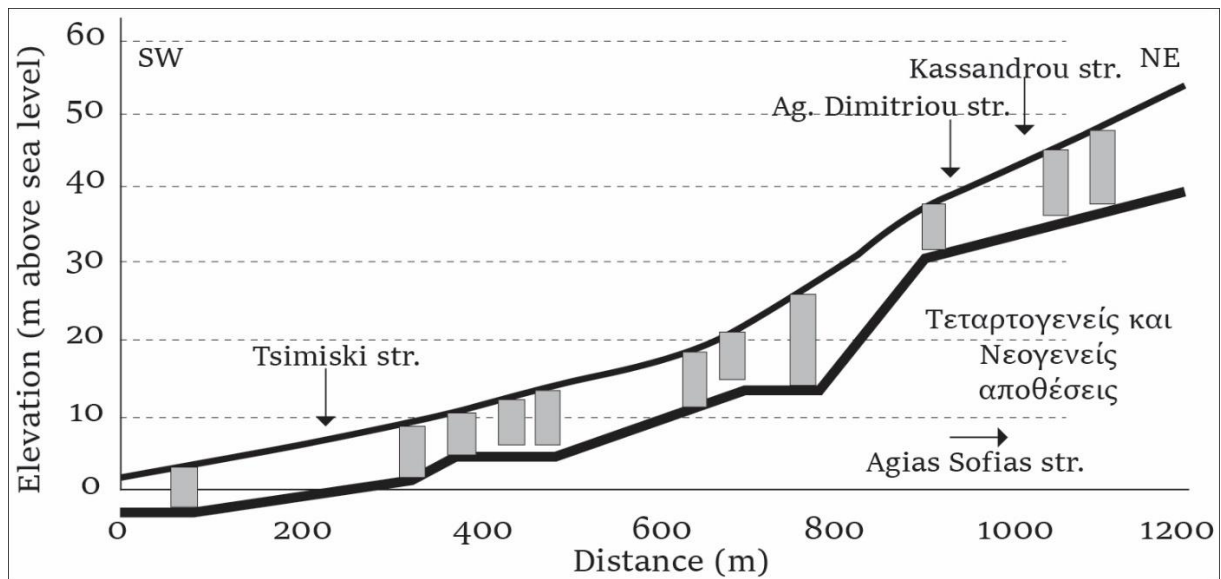
Σχ. 6. Κάτοψη έργων και γεωτρήσεων του σταθμού Αγίας Σοφίας, μαζί με το κτίριο E73.

Fig. 6. Planar view of the construction works and boreholes in Agia Sofia Metro Station, along with building E73.

ται από 2-13m και μεταβάλλεται τοπικά χωρίς να ακολουθεί συγκεκριμένο στρωματογραφικό κανόνα. Το στοιχείο αυτό σε συνδυασμό με την ανομοιογένεια των υλικών που το αποτελούν καθιστά εξαιρετικά δυσχερή τον προσδιορισμό των μηχανικών του παραμέτρων σε επίπεδο σχεδιασμού έργου. Ο σχηματισμός των ερυθρών αργίλων του Νεογενούς είναι ο κυρίαρχος σχηματισμός του υπεδάφους, ο οποίος υπέρκειται του βραχώδους γεωλογικού υποβάθρου. Ακολουθεί

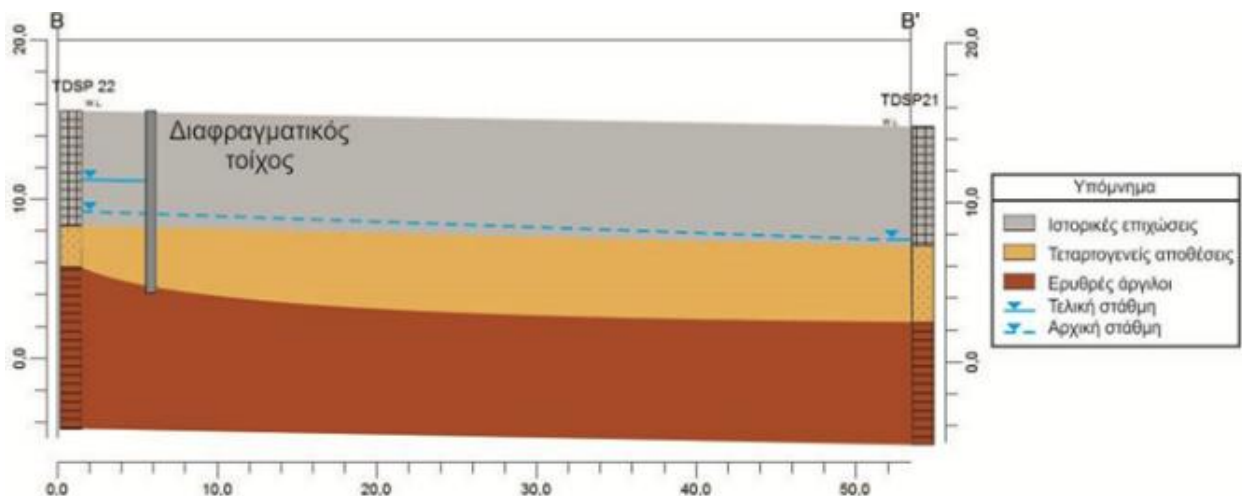
βαθμιδωτή δομή παράλληλα με τη διεύθυνση της φυσικής ακτογραμμής της πόλης, η οποία έχει προκύψει εξαιτίας της τεκτονικής των ΒΔ-ΝΑ κανονικών ρηγμάτων (Chatzigogos et al, 2006) -Σχ. 7.

Στην ανάλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν για τις ανάγκες του Μετρό της Θεσσαλονίκης στην περιοχή μελέτης.



Σχ. 7. Χαρακτηριστική τομή κατά μήκος της οδού Αγίας Σοφίας όπου φαίνεται η βαθμιδωτή μορφολογία του υποβάθρου των ιστορικών επιχωματώσεων (Chatzigogos et al, 2006).

Fig. 7. Cross section along Agias Sofias street indicating the terraced pattern of the soil strata underneath the historical fill (Chatzigogos et al, 2006).



Σχ. 8. Γεωλογική τομή διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ κατά μήκος των γεωτρήσεων TDSP22-TDSP21

Fig. 8. Geological cross section of NE-SW direction along boreholes TDSP22-TDSP21

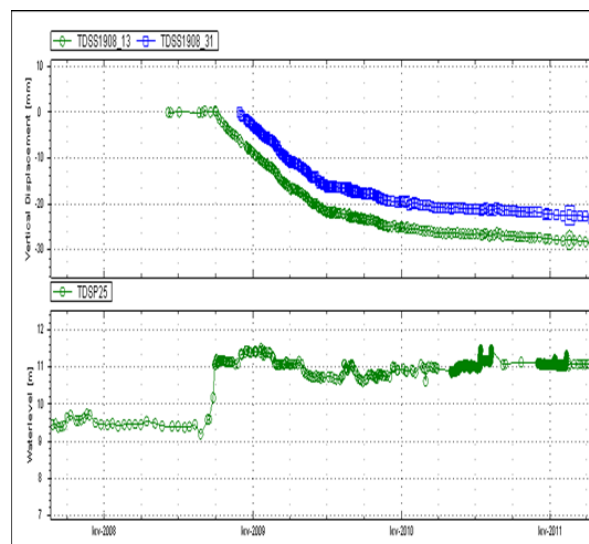
Με βάση τα στοιχεία αυτά στην περιοχή έρευνας το στρώμα των ιστορικών επιχωματώσεων παρουσιάζεται με πάχος 9-10m και οι τεταρτογενείς αποθέσεις με πάχος 3m περίπου μόνο στο δυτικό τμήμα και πάνω από τις ερυθρές αργίλους. Παρατηρείται υδροφόρος ορίζοντας που ακολουθεί γενικά τη μορφολογία του στρώματος των ερυθρών αργίλων με σταθερή στάθμη που δεν παρουσιάζει σημαντική εποχιακή μεταβολή μιας και ο αστικός ιστός εμποδίζει την επιφανειακή κατείσδυση (Σχ. 8). Λόγω αυτής της αδυναμίας, η ακόρεστη ζώνη που δημιουργείται πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι ικανού πάχους και γι' αυτό τα υλικά εντός αυτής φαίνεται ότι δεν έχουν υποστεί ύγρανση κατά το παρελθόν.

Η κατασκευή του Σταθμού ξεκίνησε με διαφραγματικούς τοίχους στη βόρεια πλευρά. Από τα πρώτα κιόλας στάδια παρατηρήθηκε σημαντική ανύψωση της στάθμης στα πιεζόμετρα παρακολούθησης (πιεζόμετρο TDSP 25 και TDSP 22) όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 9.

Η ανύψωση αυτή έφτασε τελικά το 1,5m, όμως δεν παρατηρήθηκε στα υπόλοιπα πιεζόμετρα (TDSP 21 και TDSP24). Έτσι τέθηκε το θέμα της ερμηνείας μιας τέτοιας τοπικά εντοπισμένης ανόδου της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Ταυτόχρονα με την άνοδο της στάθμης παρατηρήθηκαν καθιζήσεις – μετακινήσεις στην εν λόγω οικοδομή (κτίριο E73) που βρίσκεται στη συμβολή των οδών Εγνατία και Αγ. Σοφίας. Οι μετακινήσεις αυτές έδειξαν καθίζηση αλλά και κλίση του κτιρίου με κατεύθυνση προς την οδό Εγνατία (προς την ελεύθερη πλευρά του κτιρίου) που έφτασε σε απόλυτο μέγεθος τα 30mm (Σχ. 9). Το γεγονός ότι αυτές δεν καταγράφηκαν για το σύνολο της επιφάνειας της οικοδομής αλλά μόνο για τη νοτιοδυτική της πλευρά, καθώς και το ότι παρατηρήθηκαν σε φάση ανύψωσης και όχι ταπείνωσης της υπόγειας στάθμης χρήζουν επίσης ερμηνείας.

3.3 Μεθοδολογία

Οι μετακινήσεις που καταγράφηκαν μετά την άνοδο της υπόγειας στάθμης στο στρώμα των ιστορικών επιχωματώσεων οφείλονται σε υδροστερεοποίησή του, αφού εκδηλώθηκαν χωρίς καμία μεταβολή των συνθηκών φόρτισης. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε ένα πρόγραμμα εργα-



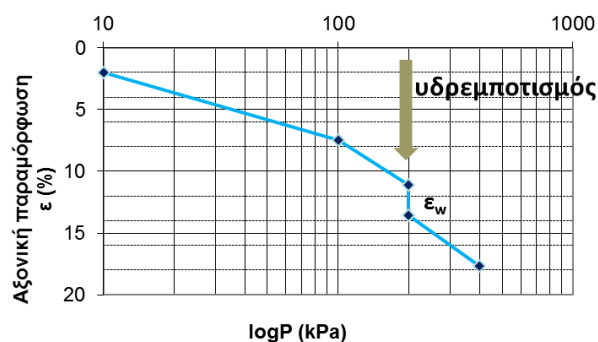
Σχ. 9. Καθιζήσεις στο κτίριο E73 αμέσως μετά την άνοδο στάθμης (γεώτρηση TDSP25).

Fig. 9. Settlement in building E73 following the rise of the water table (borehole TDSP25)

στηριακής προσομοίωσης της επιδεκτικότητας σε υδροστερεοποίηση των ιστορικών επιχωματώσεων σε χαρακτηριστικά δείγματα από παρακείμενες γεωτρήσεις.

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός της συμπεριφοράς μεταβολής του όγκου με ύγρανση υπό σταθερό φορτίο έγινε με την εκτέλεση σειράς δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης κατά τις οποίες εφαρμόστηκε ένα συγκεκριμένο φορτίο στο δείγμα με τη φυσική του υγρασία και στη συνέχεια επιβλήθηκε υδρεμποτισμός του μέχρι κορεσμού (Brandon et al, 1990). Προσδιορίζεται έτσι η μεταβολή του λόγου κενών αποκλειστικά εξαιτίας της ύγρανσης e_w (Σχ. 10). Από μία σειρά τέτοιων δοκιμών προκύπτει η καμπύλη μεταβολής της αξονικής παραμόρφωσης e_w σε διαφορετικά επίπεδα φόρτισης σ_v , η οποία εκφράζει την επιδεκτικότητα του υπό εξέταση υλικού σε υδροστερεοποίηση (Σχ. 11).

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι αναμενόμενες λόγω υδροστερεοποίησης καθιζήσεις στην υπό μελέτη περιοχή με τη χρήση του λογισμικού Settle3D, με βάση τα δεδομένα των χαρακτηριστικών υδροστερεοποίησης των εργαστηριακών δοκιμών και το γεωλογικό προσομοίωμα αυτής. Τέλος γίνεται σύγκριση των υπολογιζόμενων



Σχ. 10. Μεταβολή λόγου κενών λόγω ύγρυνσης υπό σταθερό φορτίο 200kPa.

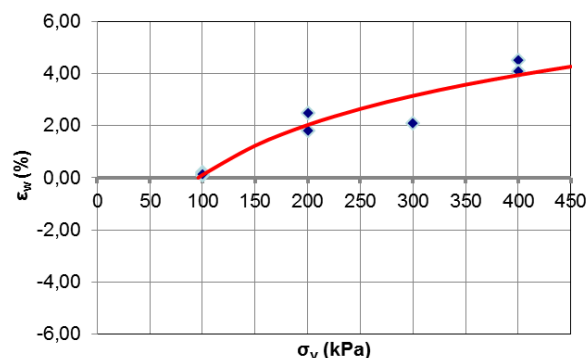
Fig. 10. Void ratio change due to wetting under constant load of 200kPa.

τιμών καθιζήσεων με τις επί τόπου μετρήσεις αυτών.

3.4 Αποτελέσματα

Το πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών εκτελέστηκε σε δοκίμια του στρώματος των ιστορικών επιχωματώσεων που ελήφθησαν από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις της περιοχής έρευνας. Στον Πίν. 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών ϵ_w που προέκυψαν από τον υδρεμποτισμό των δοκιμών υπό σταθερό φορτίο.

Στο Σχ. 10 φαίνεται η μεταβολή του λόγου κενών λόγω υδροστερεοποίησης του δοκιμίου 4 για



Σχ. 11. Αξονική παραμόρφωση λόγω ύγρυνσης σε διαφορετικές τιμές τάσης των ιστορικών επιχωματώσεων της Θεσσαλονίκης.

Fig. 11. Axial strain due to wetting of Thessaloniki's historical fill at different stresses.

σταθερό φορτίο 200kPa κατά την ύγρυνση. Με βάση τα στοιχεία του Πίν. 1 προέκυψε η χαρακτηριστική καμπύλη υδροστερεοποίησης του υπό μελέτη στρώματος που φαίνεται στο Σχ. 11 και περιγράφει τη συμπεριφορά μεταβολής του όγκου του σε συνθήκες ύγρυνσης υπό σταθερό φορτίο. Προκύπτει διόγκωση του στρώματος για τάση μικρότερη από 95kPa και μείωση όγκου για τάση μεγαλύτερη από 95kPa. Χαρακτηριστικά για ύγρυνση υπό σταθερή τάση της τάξης των 400kPa η μεταβολή του όγκου υπολογίστηκε εργαστηριακά σε $\epsilon_w=4,1\%$.

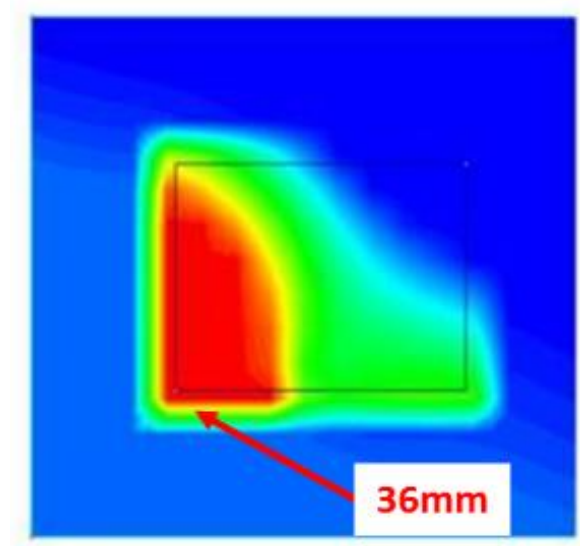
Πίν. 1. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών υδροστερεοποίησης

Tab. 1. Laboratory tests results of hydroconsolidation properties

Δείγμα	Γεώτρηση	Βάθος (m)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	m (%)	e	S (%)	Πίεση κατά την ύγρυνση	ϵ_w (%)
1	TCSP34	2,5	16,7	13,4	24,60	1,01	65,76	100	0,10
2	TDSF64	4,3	15,8	12,6	24,98	1,14	59,16	100	0,15
3	TDSF62	6,4	19,0	15,3	24,10	0,76	85,62	100	0,20
4	TCSP34	2,6	16,3	12,9	26,10	1,09	70,47	200	2,49
5	TDSF62	6,7	19,0	16,1	18,01	0,67	72,58	200	1,81
6	TCSP34	2,2	18,3	15,4	18,80	0,75	67,68	300	2,14
7	TCSP34	2,9	17,7	14,2	24,06	0,89	72,99	400	4,11
8	TDSF62	6,2	17,0	13,6	24,72	0,98	68,11	400	4,48

Οι ενόργανες παρατηρήσεις των καθιζήσεων αντιστοιχούν σε μέγιστη παραμόρφωση λόγω υδροστερεοποίησης 2% για ανύψωση στάθμης 1.5m. Με βάση τα παραπάνω, έγινε υπολογισμός των αναμενόμενων καθιζήσεων λόγω υδροστερεοποίησης στη θέση έρευνας με τη χρήση του λογισμικού Settle 3D, στην οποία εισήχθησαν οι παράμετροι της στρωματογραφίας, όπως αυτή προέκυψε από τη γεωλογική ερμηνεία, η ανύψωση της υπόγειας στάθμης και τα χαρακτηριστικά υδροστερεοποίησης του στρώματος. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στο Σχ. 12. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή των καθιζήσεων με αυξημένες τιμές στη πλευρά του κτιρίου κατά μήκος της οδού Αγίας Σοφίας και μέγιστη τιμή 3cm στη ΝΔ γωνία του. Στην πλευρά κατά μήκος της Εγνατίας οδού εμφανίζεται μείωση των υπολογιζόμενων μετακινήσεων προς Α. Οι υπολογισμοί συμφωνούν με τις επί τόπου παρατηρήσεις, όπου φαίνεται να υπάρχει σταδιακή μείωση των μετακινήσεων του κτιρίου από ΝΔ προς ΒΑ.

Η υπολογιζόμενη ανομοιόμορφη κατανομή των καθιζήσεων οφείλεται στο γεγονός ότι το πάχος του στρώματος των επιχωματώσεων που υδροστερεοποιείται και έχει ως μέγιστη τιμή την τιμή ανύψωσης της στάθμης 1.5m, δεν είναι ίδιο στο σύνολο της κάτοψης του κτιρίου εξαιτίας της κλίσης του προς ΝΔ. Με βάση τα παραπάνω, το



Σχ. 12. Υπολογισμός καθίζησης λόγω υδροστερεοποίησης στο κτίριο E79.

Fig. 12. 2D and 3D analysis of hydroconsolidation settlement in building E79.

στρώμα των επιχωματώσεων βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο προς τα ΒΑ σε σχέση με το υψόμετρο της στάθμης και επομένως το πάχος που υδροστερεοποιείται μειώνεται προς αυτή τη κατεύθυνση.

3.5 Συζήτηση-Συμπεράσματα

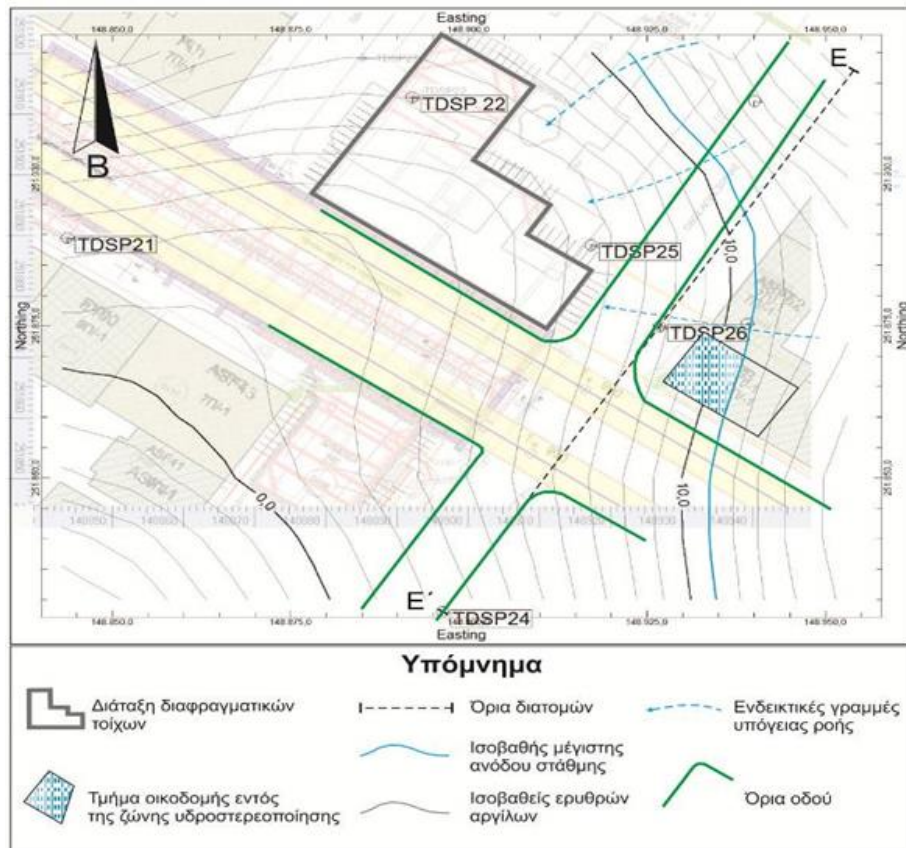
Το παράδειγμα των ιστορικών αποθέσεων της Θεσσαλονίκης αναδεικνύει το σημαντικό πρόβλημα των καθιζήσεων μετά από ύγρανση λόγω μιας τεχνικής παρέμβασης κυρίως σε μη ιζηματογενή εδάφη, δηλαδή σε σχηματισμούς που δεν έχουν αποτεθεί σε υγρό περιβάλλον. Το στρώμα των ιστορικών αποθέσεων της Θεσσαλονίκης είναι επιδεκτικό στο φαινόμενο της υδροστερεοποίησης και αυτό οφείλεται τόσο στον τρόπο σχηματισμού και την προέλευση των υλικών του όσο και στην απουσία σημαντικών μεταβολών στο περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας του κατά το παρελθόν. Το μέγεθος των καθιζήσεων λόγω υδροστερεοποίησης εξαρτάται από το πάχος του στρώματος που προσβάλλεται από ανυψώσεις της στάθμης και από το υφιστάμενο εντατικό πεδίο. Οι τεχνικές παρεμβάσεις στα πλαίσια των έργων του Μετρό της Θεσσαλονίκης οδήγησαν σε ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και συνακόλουθες παραμορφώσεις στο έδαφος θεμελίωσης παρακείμενου κτιρίου εξαιτίας του εν λόγω φαινομένου.

Το μέγεθος των παρατηρούμενων παραμορφώσεων που προσδιορίστηκε επί τόπου για εκτιμώμενο φορτίο 230kPa έφτασε σε ποσοστό 2%. Η εργαστηριακή τιμή για αντίστοιχο φορτίο υπολογίστηκε σε ποσοστό περίπου 2.5%. Η ελάχιστη αυτή απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στο μονοδιάστατο χαρακτήρα της εργαστηριακής δοκιμής. Το στοιχείο αυτό περιορίζει την εκδήλωση της στερεοποίησης σε μία διάσταση, γεγονός που υπερτιμά το συνολικό ποσοστό της παραμόρφωσης η οποία επί τόπου εκδηλώνεται σε τρεις διαστάσεις. Σημειώνεται ότι οι παρατηρούμενες επί τόπου καθιζήσεις συνοδεύτηκαν και από αντίστοιχες πλευρικές παραμορφώσεις. Ένα πρόσθετο στοιχείο που εξηγεί την παρατηρούμενη απόκλιση είναι και η επίδραση κλίμακας, μιας και το στρώμα των ιστορικών επιχωματώσεων περιλαμβάνει επί τόπου συμπαγή, ογκώδη υλικά που εκ των πραγμάτων δεν μπορούν να

συμπεριληφθούν στα εργαστηριακά δοκίμια (λίθοι, μπάζα, κεραμικά κλπ).

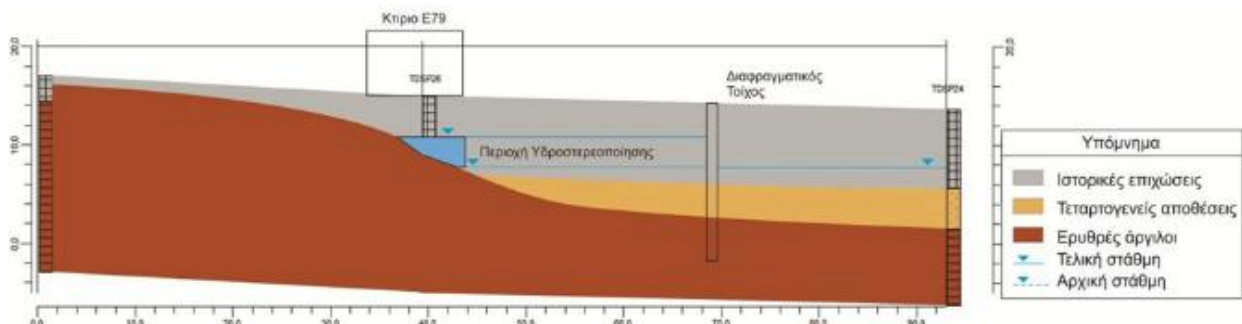
Η παρατηρούμενη εκδήλωση διαφορικών καθιζήσεων και όχι ενιαίας παραμόρφωσης στο εν λόγω στρώμα οφείλεται κατά κύριο λόγο στην γεωμετρία του (κλίση προς τα ΝΔ) λόγω της οποίας το πάχος του επηρεαζόμενου από την υδροστερεοποίηση τμήματος είναι μεταβλητό και

μεινώνεται προς τα ΒΑ. Στο Σχ. 13 παρουσιάζεται χάρτης των ισοβαθών του στρώματος των ερυθρών αργίλων που οριοθετούν τη γεωμετρία των υπερκείμενων επιχωματώσεων και στο Σχ. 14 χαρακτηριστική τομή διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ με επισημάνση στην περιοχή υδροστερεοποίησης κάτω από το κτίριο.



Σχ. 13. Χάρτης της περιοχής έρευνας με τις ισοβαθείς των ερυθρών αργίλων.

Fig. 13. Map of the investigation area with the isodepths of the red clays.



Σχ. 14. Γεωλογική τομή ΕΕ' όπου επισημαίνεται η περιοχή υδροστερεοποίησης.

Fig. 14. Geological section EE' pointing out the hydroconsolidation region.

4. Συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά

4.1 Γενικά

Μέχρι αυτό το σημείο παρουσιάστηκε το γενικό πρόβλημα της κατάρρευσης των μη κορεσμένων εδαφών λόγω υδρεμποτισμού και επιδείχθηκε και μία εφαρμογή υδροστερεοποίησης στρώσης ιστορικών επιχωματώσεων, στην οποία μάλιστα δεν επήλθε πλήρης υδρεμποτισμός ολόκληρης της στρώσης αλλά μικρή μόνο άνοδος του υπόγειου ορίζοντα και μάλιστα λόγω της κατασκευής τεχνικού έργου (σταθμός μετρό). Η εφαρμογή αυτή αναδεικνύει τη σημασία της διερεύνησης των ιστορικών επιχωματώσεων, ειδικά μάλιστα σε χώρες με μακραίωνη ιστορία όπως η Ελλάδα και η Κύπρος.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το πρόβλημα της κατάρρευσης λόγω υδρεμποτισμού των συμπυκνωμένων εδαφικών υλικών, δηλαδή, υλικών που έχουν συμπυκνωθεί με σκοπό να αποτελέσουν χωμάτινες κατασκευές μηχανικού (engineered fills). Για την κατασκευή επιχωμάτων οδοποιίας και ακόμα περισσότερο αναχωμάτων χωμάτινων και λιθόρριπτων φραγμάτων υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές οι οποίες καθορίζουν την επιτρεπόμενη κοκκομετρική διαβάθμιση, τη ζητούμενη πυκνότητα και την επιτρεπόμενη υγρασία κατά τη συμπύκνωση. Για κοινές (μη φέρουσες) επιχώσεις είτε δεν υπάρχουν προδιαγραφές, είτε και αν υπάρχουν δεν τηρούνται με την ίδια αυστηρότητα όπως για επιχώματα οδοποιίας και αναχώματα φραγμάτων. Επίσης στις επανεπιχώσεις ιδιωτικών οικοδομών, στις οποίες ο ποιοτικός έλεγχος των επανεπιχώσεων σπανίζει, κυρίως λόγω πολύ μικρού όγκου των χωματισμών αλλά και της υφιστάμενης οικοδομικής πρακτικής και νοοτροπίας περί αυτήν, δεν είναι λίγα τα παραδείγματα ανεξέλεγκτων καθιζήσεων, οι οποίες μπορεί μεν να μην φτάνουν να επηρεάσουν την ασφάλεια, επηρεάζουν όμως έντονα την λειτουργικότητα συμβάλλοντας έτσι στο κόστος των ζημιών που προκαλεί η έλλειψη συστηματικής ενασχόλησης στην πράξη με τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Ειδικά για αυτά τα προβλήματα έχουν αναπτυχθεί πρακτικές ανύψωσης δαπέδων επί επιχώσεων που έχουν υποστεί κατάρρευση λόγω υδρεμποτισμού με εισπίεση διογκούμενης πολυουρεθάνης υψηλής αντοχής κάτω από τα δάπεδα που έχουν υποστεί ζημιές. Στην Φωτ. 2 παρουσιάζεται παράδειγμα επίχωσης σε επαφή με τοίχο αντιστήριξης η οποία έχει εμφανώς υποστεί καθίζηση λόγω διαβροχής εξαιτίας της έκθεσής της στα καιρικά φαινόμε-



Φωτ. 2. Επίχωση που έχει υποστεί κατάρρευση λόγω διαβροχής δίπλα από τοίχο αντιστήριξης στην Κύπρο.

Phot. 2. Fill with collapse due to inundation next to retaining wall in Cyprus.

να. Το πάχος της εν λόγω επίχωσης είναι περί τα 2.0-2.5m και όπως φαίνεται στην Φωτ. 2 από το άβαφο τμήμα του τοίχου που έχει αποκαλυφθεί (περί τα 15-20cm) έχει υποστεί παραμόρφωση περί το 7-8%. Τα παραδείγματα δεν εξαντλούνται σε επιχώσεις που δεν έχουν συμπυκνωθεί επαρκώς. Οι Bardanis et al. (2019) παρουσίασαν τις συστηματικές καθιζήσεις ενός ασφαλτικού οδοστρώματος διαδρόμου αποπροσγείωσης διεθνούς αεροδρομίου στο οποίο μεταξύ άλλων παραγόντων, οι καθιζήσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος οφείλονταν και στον εποχιακό υδρεμποτισμό στρώσεων υποκείμενων του ασφαλτικού οδοστρώματος λόγω υπόγειας ροής από τη μία πλευρά του διαδρόμου προς την άλλη. Οι Anastasopoulos et al. (2009) παρουσίασαν τις καθιζήσεις σε πέντε ελληνικά φράγματα. Άλλες από αυτές ήταν μικρές και μάλιστα μικρότερες από τις αναφερόμενες στη βιβλιογραφία για παρόμοιου ύψους φράγματα κατασκευασμένα με παρόμοια υλικά, αλλά άλλες είχαν οδηγήσει ακόμα και στην εμφάνιση κατά μήκος ρωγμών στη στέψη του φράγματος (Φράγμα Γρατινής). Οι ρωγμές αυτές συνδέονται από τους Anastasopoulos et al. (2009) με τις παραμορφώσεις λόγω κατάρρευσης τμήματος των σωμάτων στήριξης που κατασκευάστηκε από μαλακούς βράχους που περιείχαν σημαντική περιεκτικότητα σε αργιολίθους. Οι Alonso et al. (2005) παρουσίασαν αποτελέσματα από το φράγμα Beliche στην Πορτογαλία που έχουν συμβεί παραμορφώσεις της τάξης του 3.0-3.5%

(φράγμα ύψους 54m) μέχρι τον χρόνο της δημοσίευσής τους. Τέλος οι Wieland & Malla (2009) αναφέρουν κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη του 170m ύψους φράγματος Ataturk στην Τουρκία της τάξης των 7m, 10 χρόνια μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Οι μετακινήσεις αυτές αντιστοιχούν σε 4.1% παραμόρφωση. Τα αναφερόμενα παραδείγματα είναι μόνο ενδεικτικά για να επισημάνουν την ύπαρξη του προβλήματος και να εστιάσουν το ενδιαφέρον του αναγνώστη. Μία αναλυτική παρουσίαση της σχετικής βιβλιογραφίας ξεφεύγει από τον σκοπό του παρόντος άρθρου.

Στη συνέχεια της ενότητας αυτής παρουσιάζονται αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού της κατάρρευσης λόγω υδρεμοτισμού και σε λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά και σε χονδρόκοκκα, με μία σύντομη αναφορά και σε εδαφικά υλικά που αποτελούν μαλακούς βράχους.

4.2 Λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά

Στο άρθρο παρουσιάζονται οι δοκιμές υδρεμοτισμού υπό μονοδιάστατη συμπίεση έξι (6) εδαφικών υλικών μετά από συμπύκνωσή τους υπό διάφορα ποσοστά υγρασίας. Οι φυσικές ιδιότητες τους παρουσιάζονται στον Πιν. 2, τα χαρακτηριστικά συμπύκνωσής τους στον Πιν. 3 και αυτές καθεαυτές οι καμπύλες συμπύκνωσής τους στο Σχ. 15. Όπως φαίνεται από τον Πιν. 2, κάποια από αυτά τα υλικά είναι αμμοϊλυώδη χωρίς πλαστικότητα μάλιστα, ενώ άλλα, όπως π.χ. η Άργιλος Αμαρουσίου, έχουν τα φυσικά χαρακτηριστικά για να καταταχθούν ως διογκώσιμα και μάλιστα έχουν καταγραφεί για αυτά σημαντικές τιμές πίεσης διόγκωσης αλλά και μεγάλες παραμορφώσεις ελεύθερης διόγκωσης.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν παρασκευάστηκαν είτε με συμπύκνωση μίγματος ζυγισμένων ποσοτήτων ξηρού υλικού και νερού μέχρι επίτευξης της επιθυμητής πυκνότητας εντός των κυψελών των συμπιεσομέτρων, είτε με συμπύκνωση σε αυτόματο κόπανο της δοκιμής Proctor υπό τη ζητούμενη υγρασία εντός μητρών της δοκιμής αυτής, εξόλκευση εκ των μητρών και αποκοπή με τα οξύαιχμα κοπτικά άκρα των κυψελών των συμπιεσομέτρων. Περισσότερα για τις μεθόδους παρασκευής των δοκιμών μπορούν να βρεθούν στους Bardanis & Grifiza, 2010, και Bardanis & Grifiza, 2016. Το σπουδαιότερο πλεονέκτημα της παρασκευής μεγάλων δοκιμών και της κοπής των δοκιμών της δοκι-

μής υδρεμοτισμού από αυτά είναι η δυνατότητα μέτρησης της μύζησης πριν την κοπή των δοκιμών. Στους Πιν. 4 και 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων μύζησης με τενσιόμετρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα και υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου σε συμπυκνωμένα δοκίμια Αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου και Άργιλου Αμαρουσίου αντίστοιχα. Το μικρό εύρος μύζησης που μπορεί να μετρήσει το τενσιόμετρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα δεν επέτρεψε τον ακριβή προσδιορισμό στον Αποσαθρωμένο Σερπεντινίτη Σκύρου για υγρασία ξηρά από τη βέλτιστη και καθόλου στην περίπτωση της Άργιλου Αμαρουσίου για ίδιες συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση, αποκτάται μία αίσθηση των τιμών των συνιστωσών της μύζησης που μπορούν να αναμένονται μετά τη συμπύκνωση των εδαφών και άρα αντίστοιχα των σημείων έναρξης των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού των συμπυκνωμένων υλικών από κάθε

Πιν. 2. Φυσικές ιδιότητες λεπτόκοκκων εδαφών.

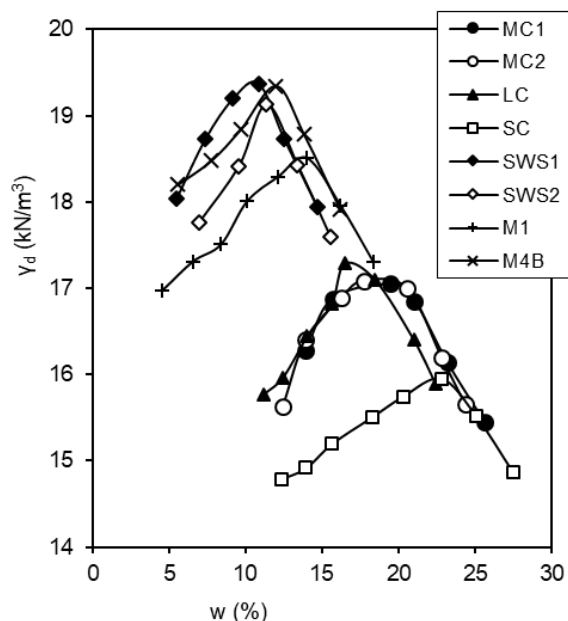
Tab. 2. Index properties of fine-grained soils.

Έδαφος	Αργ. (%)	Ιλύς (%)	w _L (%)	I _p	G _s
Άργιλος Αμαρουσίου (MC)	40.1	41.9	47	28	2.66
Άργιλος Λιβαδερού Δράμας (LC)	22.0	45.8	37	20	2.70
Άργιλος Σκύρου (SC)	35.3	52.4	44	21	2.67
Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου (SWS)	2.1	48.5	27	8	2.61
Αμμώδης Ιλύς Πλατύ Ποταμού (M1)	5.4	51.2	N.P.		2.75
Ιλυώδης Άμμος Πλατύ Ποταμού (M4B)	4.5	35.6	N.P.		2.68

Πιν. 3. Χαρακτηριστικά συμπύκνωσης λεπτόκοκκων εδαφών.

Tab. 3. Compaction characteristics of fine-grained soils.

Έδαφος	Y _{d,max} (kN/m ³)	W _{opt} (%)	W _{dry} (%)	W _{wet} (%)
MC	17.1	18.5	15.0	21.5
LC	17.4	17	15	19
SC	16.0	23	16	26
SWS	19.3	11	8.5	13.5
M1	18.6	14	11	17
M4B	19.3	12	10	14



Σχ. 15. Καμπύλες ξηρού φαινόμενου βάρους-ποσο-
στου υγρασίας από δοκιμές συμπύκνωσης Proctor με
την πρότυπη ενέργεια συμπύκνωσης για τα λεπτόκοκ-
κα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν (δύο δοκι-
μές για την Άργιλο Αμαρουσίου και τον Αποσαθρω-
μένο Σερπεντινίτη Σκύρου, μέσοι όροι αυτών στον
Πιν. 2).

Fig. 15. Dry unit weight-moisture content curves
from standard compaction energy Proctor tests for
the fine-grained soils tested (two tests for Maroussi
clay and Skiros weathered Serpentinite, average va-
lues from these in Tab. 2).

αρχική υγρασία (Σχ. 16, από Μπαρδάνη & Γρίφι-
ζα, 2010 & 2012, και Σχ. 17, από Μπαρδάνη,
2016). Τα τμήματα των καμπυλών στα Σχ. 16 και
17 με γεμάτους δείκτες αφορούν σε σημεία που
προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο μετατόπισης
άξονα και αυτά με άδειους δείκτες σε σημεία
που προσδιορίστηκαν είτε με άφεση των δοκιμί-
ων στην ατμόσφαιρα για ξήρανση και μέτρηση
της μύζης τους στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπ-
τρου, ή τοποθέτησή τους σε περιβάλλον ελεγχό-
μενης σχετικής υγρασίας καθοριζόμενης από
κορεσμένα διαλύματα αλάτων (Πιν. 6 από
Μπαρδάνη & Γρίφιζα, 2010 & 2012, και Μπαρ-
δάνη, 2016).

Τονίζεται ότι ο Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης
Σκύρου αποτελεί αποσαθρωμένο έως εξαλλοιω-
μενο βράχο (σκληρό έδαφος / μαλακός βράχος),
το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή
των σωμάτων στήριξης του Φράγματος Φερεκά-
μπου Σκύρου. Στο ίδιο φράγμα χρησιμοποιή-
θηκε η Άργιλος Σκύρου για την κατασκευή του
πυρήνα. Όταν μάλιστα εξαντλήθηκε η πηγή

Πίν. 4. Μύζηση αμέσως μετά την συμπύκνωση Απο-
σαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου.

Tab. 4. Suction immediately after compaction of
Weathered Skiros Serpentinite.

Υγρασία συμπύκνωσης	Μύζηση εδαφικού σκελετού (kPa)	Ολική μύζηση (kPa)	Ωσμωτική συνιστώσα μύζησης (kPa)
Ξηρά από τη βέλτιστη	69±2	384±46	314±47
Στη βέλτιστη	30±5	234±27	205±25
Υγρά από τη βέλτιστη	12±2	239±30	227±31

Πίν. 5. Μύζηση αμέσως μετά την συμπύκνωση Αργί-
λου Αμαρουσίου.

Tab. 5. Suction immediately after compaction of Ma-
roussi Clay.

Υγρασία συμπύκνωσης	Μύζηση εδαφικού σκελετού (kPa)	Ολική μύζηση (kPa)	Ωσμωτική συνιστώσα μύζησης (kPa)
Ξηρά από την βέλτιστη	60	130	70
Στην βέλτιστη	80	330	250
Υγρά από την βέλτιστη	-	2500	-

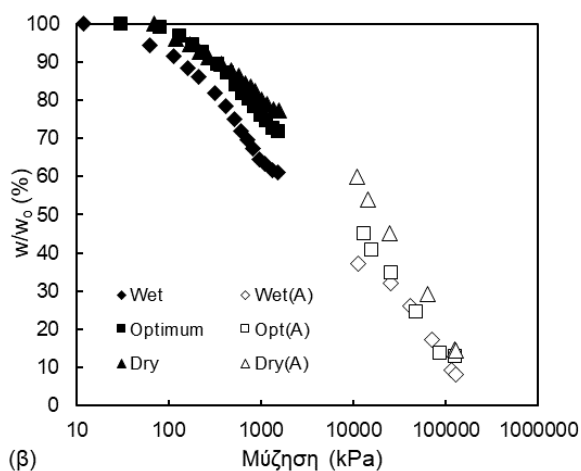
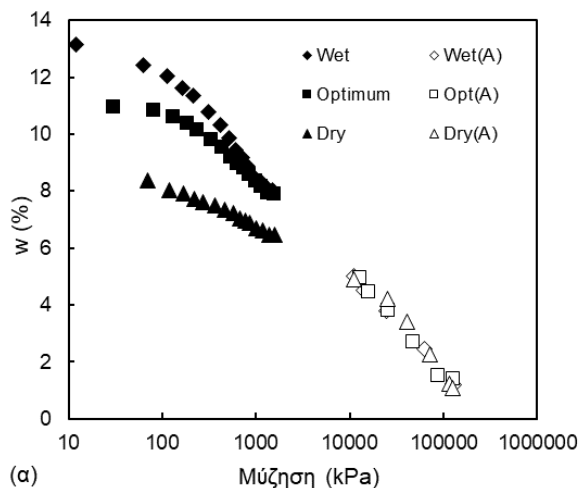
Πίν. 6. Χαρακτηριστικά χρησιμοποιηθέντων υδατι-
κών διαλυμάτων αλάτων.

Tab. 6. Characteristics of salt solutions used.

Διάλυμα	Σχετική υγρασία (25° C)	Μύζηση όπως μετρήθηκε	Συγκ/ση επίτευξης κορεσμού διαλύμα- τος
	(%)	(MPa)	(M)
BaCl ₂ ·2H ₂ O	90.3	14.1	2
KCl	84.2	23.6	5
NaCl	75.1	39.0	6
Mg(NO ₃) ₂	52.8	85.5	9
MgCl ₂ ·6H ₂ O	32.7	151.7	15

λήψης της χρησιμοποιήθηκε ο Αποσαθρωμένος
Σερπεντινίτης Σκύρου από πηγή στην οποία βρέ-
θηκε πιο πλαστικός για την ολοκλήρωση της κα-
τασκευής του πυρήνα του φράγματος.

Οι καμπύλες εξέλιξης της παραμόρφωσης λόγω
υδρεμποτισμού με την κατακόρυφη τάση για τα
λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά στα οποία έγιναν

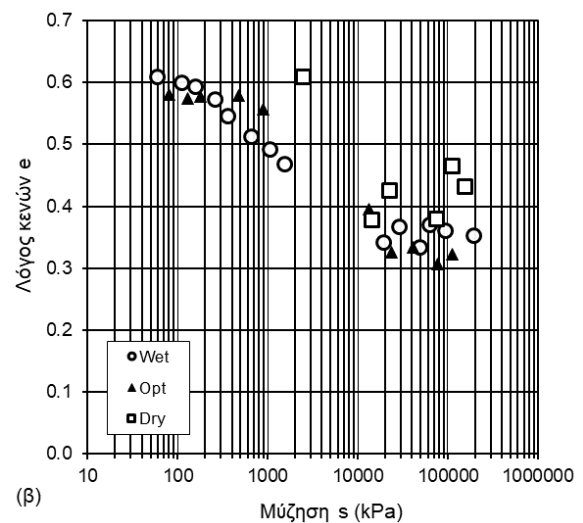
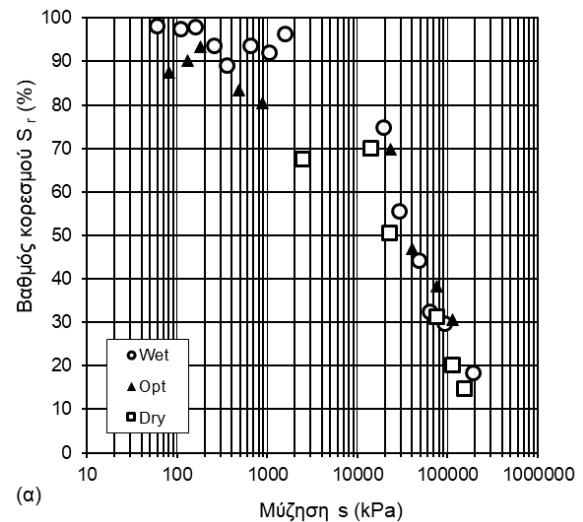


Σχ. 16. Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού συμπυκνωμένου σερπεντινίτη για τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης σε όρους α) ποσοστού υγρασίας-μύζησης, και β) κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας-μύζησης.

Fig. 16. Soil-water characteristic curves of compacted serpentinite for the three compaction moisture contents in terms of a) moisture content-suction, and b) normalized moisture content-suction.

δοκιμές παρουσιάζονται στα Σχ. 18 έως 23. Στα σχήματα που σημαίνονται ως (α) η κατακόρυφη τάση είναι σε γραμμική κλίμακα και στα σχήματα που σημαίνονται ως (β) είναι σε λογαριθμική. Σε κάθε σχήμα παρουσιάζονται οι καμπύλες και για τις 3 υγρασίες, «ξηρά», στη βέλτιστη και «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία.

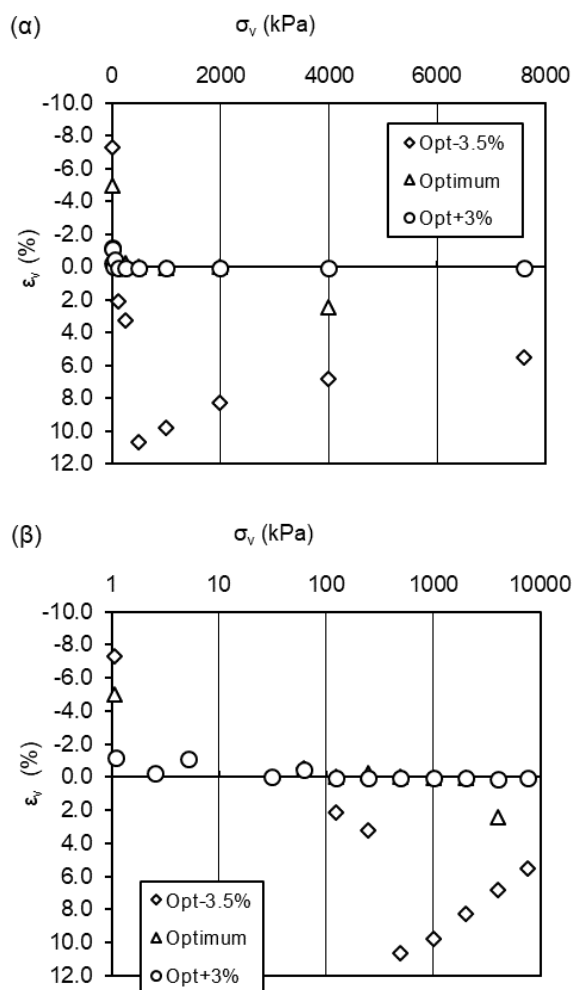
Στο Σχ. 18 παρουσιάζονται οι καμπύλες για την Άργιλο Αμαρουσίου. Οι παραμορφώσεις του υλικού αυτού είναι πραγματικά εντυπωσιακού μεγέθους για υγρασία συμπύκνωσης ξηρά από τη βέλτιστη φτάνοντας το 7.3% διόγκωση πρακτικά υπό συνθήκες ελεύθερης διόγκωσης και το 10.7% κατάρρευση για κατακόρυφη τάση 500



Σχ. 17. Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού συμπυκνωμένης Άργιλου Αμαρουσίου για τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης σε όρους α) βαθμού κορεσμού-μύζησης, και β) λόγου κενών-μύζησης.

Fig. 17. Soil-water characteristic curves of compacted Maroussi Clay for the three compaction moisture contents in terms of a) degree of saturation-suction, and b) void ratio-suction.

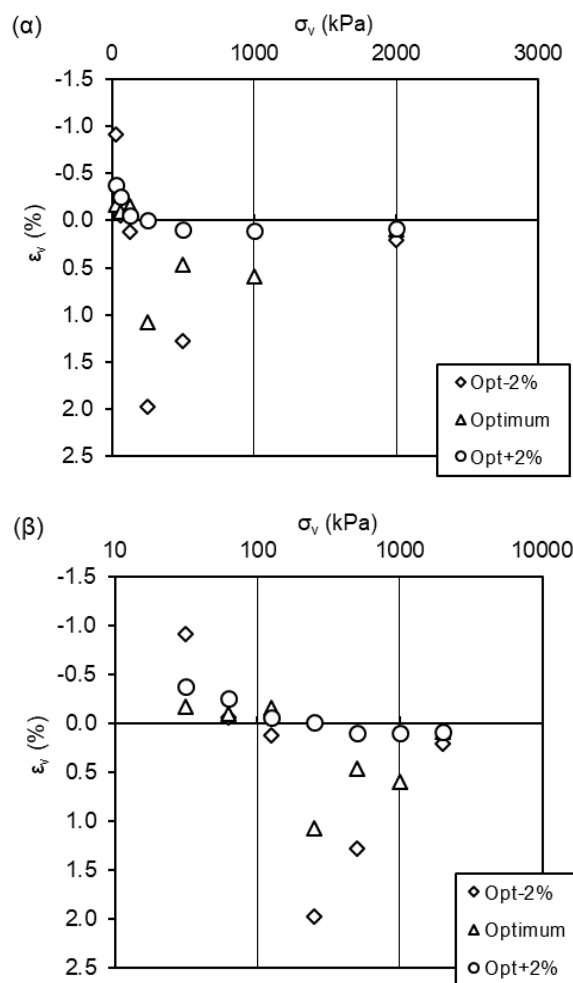
kPa, όπου και επιδεικνύεται μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης κατάρρευσης, με τις παραμορφώσεις να μειώνονται γραμμικά με τον λογάριθμο της τάσης μετά από αυτήν την τιμή. Το ακόμα πιο σημαντικό, είναι ότι αυτές οι τόσο μεγάλες τιμές παραμορφώσεων, αντιστοιχούν σε μια τιμή της πίεσης διόγκωσης (η τάση από την οποία μεταβαίνουμε από παραμορφώσεις κατάρρευσης κατά τον υδρεμποτισμό σε διογκώσεις, βλ. Λουκίδης, 2019) μόλις 75-80 kPa. Μία τέτοια τιμή της πίεσης διόγκωσης σπάνια θα προκαλούσε ανησυχία στην καθημερινή γεωτεχνική πρακτική αν και όπως φαίνεται από τις σχετικές



Σχ. 18. Παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού για την Άργιλο Αμαρουσίου με την κατακόρυφη τάση σε α) γραμμική κλίμακα, και β) σε λογαριθμική κλίμακα.

Fig. 18. Strain due to inundation for Maroussi clay versus vertical stress in a) linear scale, and b) logarithmic scale.

δοκιμές αντιστοιχεί σε εξαιρετικά ανησυχητικές τιμές παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού. Επιτείνοντας ακόμα περισσότερο τη σημασία του να δίνεται προσοχή στις παραμορφώσεις αντί τις τιμές της πίεσης διόγκωσης, για υγρασία συμπύκνωσης στη βέλτιστη υγρασία, η πίεση διόγκωσης είναι 700 kPa, μία πολύ μεγάλη τιμή, ενώ οι παραμορφώσεις για τάσεις από 60 kPa έως 2000 kPa κυμαίνονται μόλις μεταξύ -0.5% και +0.02%. Σε πολύ μικρές και πολύ μεγάλες μόνο τάσεις παίρνουν μεγάλες τιμές, -5% (1 kPa) και +4% (7.6 MPa) αντίστοιχα. Για υγρασία συμπύκνωσης υγρά από τη βέλτιστη οι παραμορφώσεις σε μεγάλες τάσεις είναι πολύ μικρές, αν και για μικρές τάσεις καταγράφεται διόγκωση μέχρι και 1.2%. Η συμπεριφορά αυτού του υλικού επέβαλε τη διερεύνηση της ορυκτολογικής του σύστασης

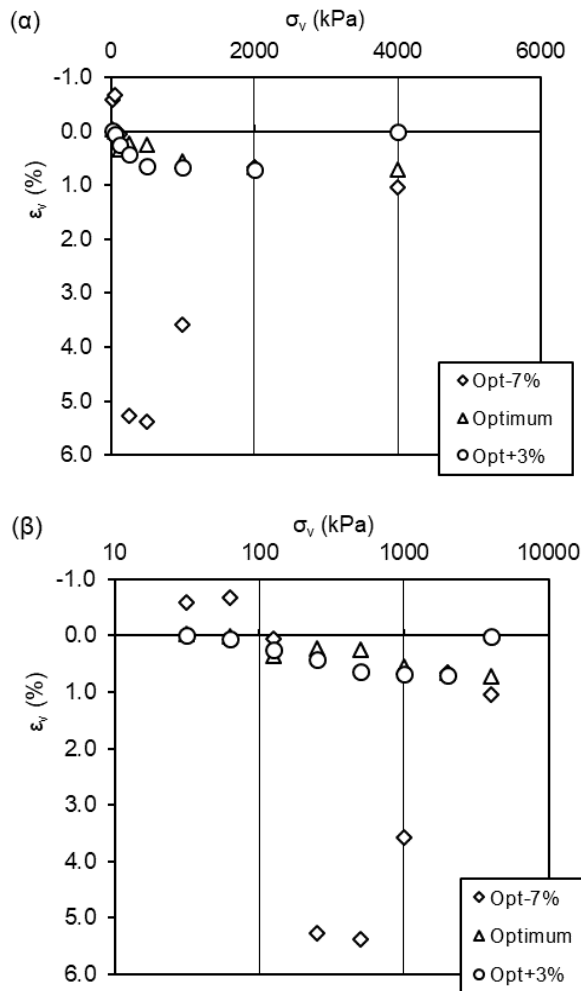


Σχ. 19. Παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού για την Άργιλο Λιβαδερού Δράμας με την κατακόρυφη τάση σε α) γραμμική κλίμακα, και β) σε λογαριθμική κλίμακα.

Fig. 19. Strain due to inundation for Livadero clay versus vertical stress in a) linear scale, and b) logarithmic scale.

μέσω XRD από την οποία προέκυψε ότι το υλικό περιέχει 65% αργιλικά ορυκτά με τα υπόλοιπα 35% να κατανέμονται εξίσου σε ανθρακικά και πυριτικά ορυκτά. Στα αργιλικά ορυκτά περιλαμβάνονται 15% ιλλίτης, 11% μοντμοριλονίτης, 10% καολινίτης, 10% μοσχοβίτης, 8% αλοϋσίτης, 5% χλωρίτης και 4% σερπεντινίτης. Τέτοια ορυκτολογική σύσταση είναι ενδεχομένως σπάνια, όμως η συμπεριφορά αυτού του υλικού επιδεικνύει τη σημασία της παρατήρησης των μεταβολών όγκου λόγω υδρεμποτισμού και όχι των τιμών της πίεσης διόγκωσης.

Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για την Άργιλο Λιβαδερού Δράμας όπως φαίνεται από τις σχετικές καμπύλες στο Σχ. 19 αν και όχι με τόσο έντονες τιμές όπως για την Άργιλο

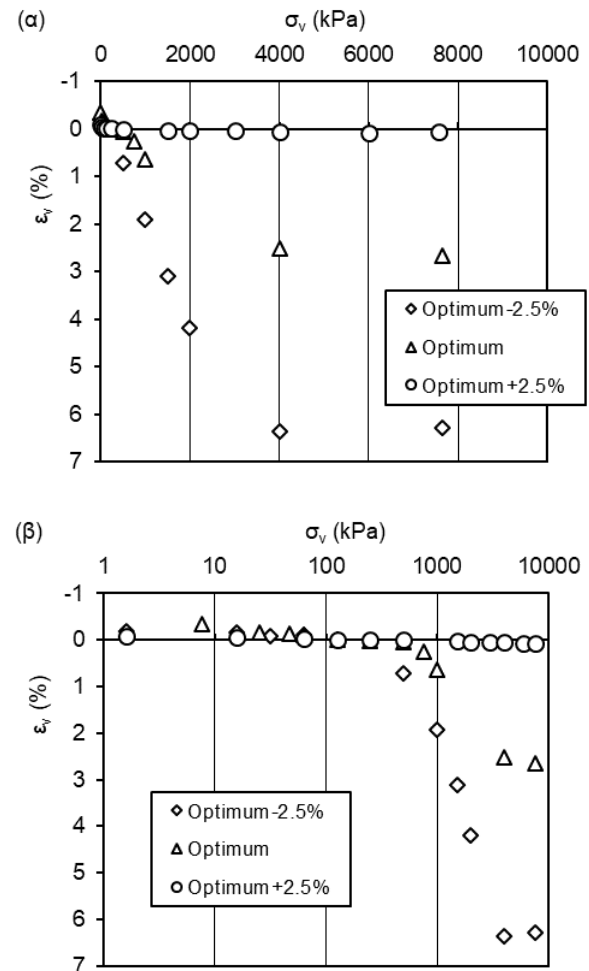


Σχ. 20. Παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού για την Αργίλο Σκύρου με την κατακόρυφη τάση σε α) γραμμική κλίμακα, και β) σε λογαριθμική κλίμακα.

Fig. 20. Strain due to inundation for Skiros clay versus vertical stress in a) linear scale, and b) logarithmic scale.

Αμαρουσίου. Και για αυτό το υλικό η παραμόρφωση λόγω κατάρρευσης επέδειξε μέγιστη τιμή για συγκεκριμένη τάση (250 kPa) πριν αρχίσει να μειώνεται για μεγαλύτερες τάσεις. Αυτό, στην περίπτωση της Αργίλου Σκύρου (Σχ. 20) εμφανίστηκε μόνο για την υγρασία συμπίκνωσης ξηρά από τη βέλτιστη.

Ο Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου ήταν το μόνο υλικό που δεν επέδειξε μέγιστη τιμή παραμόρφωσης κατάρρευσης για καμμία από τις υγρασίες συμπίκνωσης (Σχ. 21). Για υγρασία συμπίκνωσης ξηρά από τη βέλτιστη οι παραμορφώσεις άρχισαν να αυξάνονται ραγδαία από τάση 250 kPa και μετά μέχρι τα 4000 kPa, όπου παρατηρήθηκε τάση σταθεροποίησης των παραμορφώσεων με την περαιτέρω αύξηση της

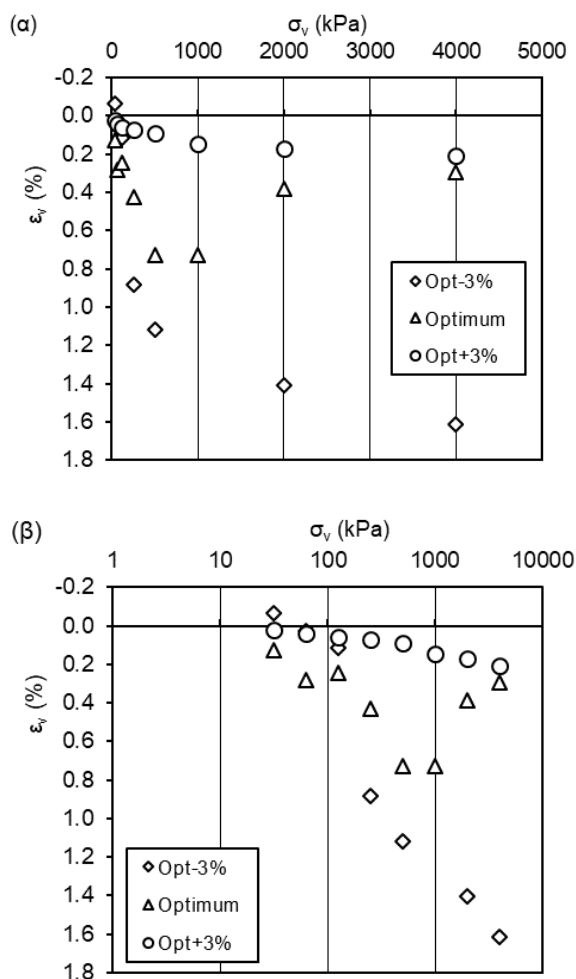


Σχ. 21. Παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού για τον Αποσαθρωμένο Σερπεντινίτη Σκύρου με την κατακόρυφη τάση σε α) γραμμική κλίμακα, και β) σε λογαριθμική κλίμακα.

Fig. 21. Strain due to inundation for Skiros Weathered Serpentinite versus vertical stress in a) linear scale, and b) logarithmic scale.

τάσης. Η μέγιστη παραμόρφωση λόγω κατάρρευσης ήταν 6.4%. Η μέγιστη διόγκωση που κατεγράφη για το υλικό ήταν -0.2%. Η συμπεριφορά ήταν αντίστοιχη για υγρασία συμπίκνωσης στη βέλτιστη υγρασία με τη μέγιστη παραμόρφωση κατάρρευσης να φτάνει το 2.7%. Τέλος, για υγρασία υγρά από τη βέλτιστη οι παραμορφώσεις ήταν ελάχιστες (0.07%) σε τιμές για τις οποίες μπορεί κανείς βάσιμα να θεωρήσει ότι δεν πρόκειται για παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού αλλά ουσιαστικά συνέχιση των παραμορφώσεων υπό την τάση στην οποία έγινε ο υδρεμποτισμός λόγω ερπυσμού (ειδικά μάλιστα για τις μεγαλύτερες τιμές της τάσης).

Τέλος, τα πιο ιλυσιασμένα υλικά του Ποταμού Πλατύ (Σχ. 22 & 23) επέδειξαν και εκείνα

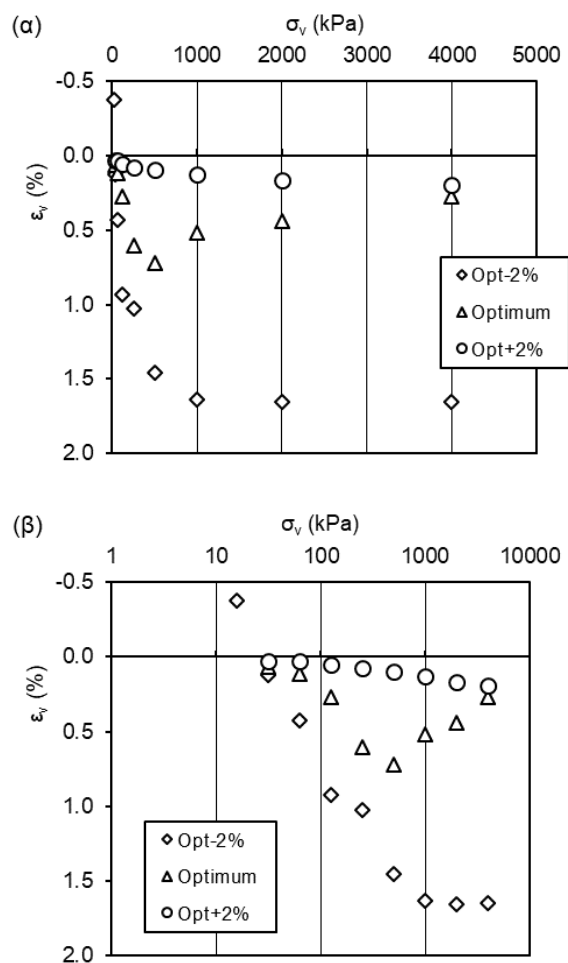


Σχ. 22. Παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού για την Αμμώδη Ιλύ Πλατύ Ποταμού με την κατακόρυφη τάση σε α) γραμμική κλίμακα, και β) σε λογαριθμική κλίμακα.

Fig. 22. Strain due to inundation for Platy River silty sand versus vertical stress in a) linear scale, and b) logarithmic scale.

παραμορφώσεις διόγκωσης υπό πολύ μικρές τάσεις και υγρασίες συμπύκνωσης ξηρά από την μέγιστη με αντίστοιχη τιμή πίεσης διόγκωσης, αλλά επέδειξαν κυρίως (όπως αναμενόταν)

παραμορφώσεις λόγω κατάρρευσης με τον υδρεμποτισμό τους. Ειδικά μάλιστα η Αμμώδης Ιλύς (Σχ. 22) επέδειξε συνεχή αύξηση της παραμόρφωσης αυτής με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης ακόμα και για πολύ μεγάλες τιμές της (4000 kPa). Η ιλυώδης άμμος επέδειξε τάσεις σταθεροποίησης της παραμόρφωσης με την αύξηση της τάσης μετά τα 1000 kPa για υγρασία συμπύκνωσης ξηρά από τη βέλτιστη (Σχ. 23). Και τα δύο υλικά επέδειξαν κατακόρυφη τάση εμφάνισης μέγιστης παραμόρφωσης περί τα 500 kPa για υγρασία

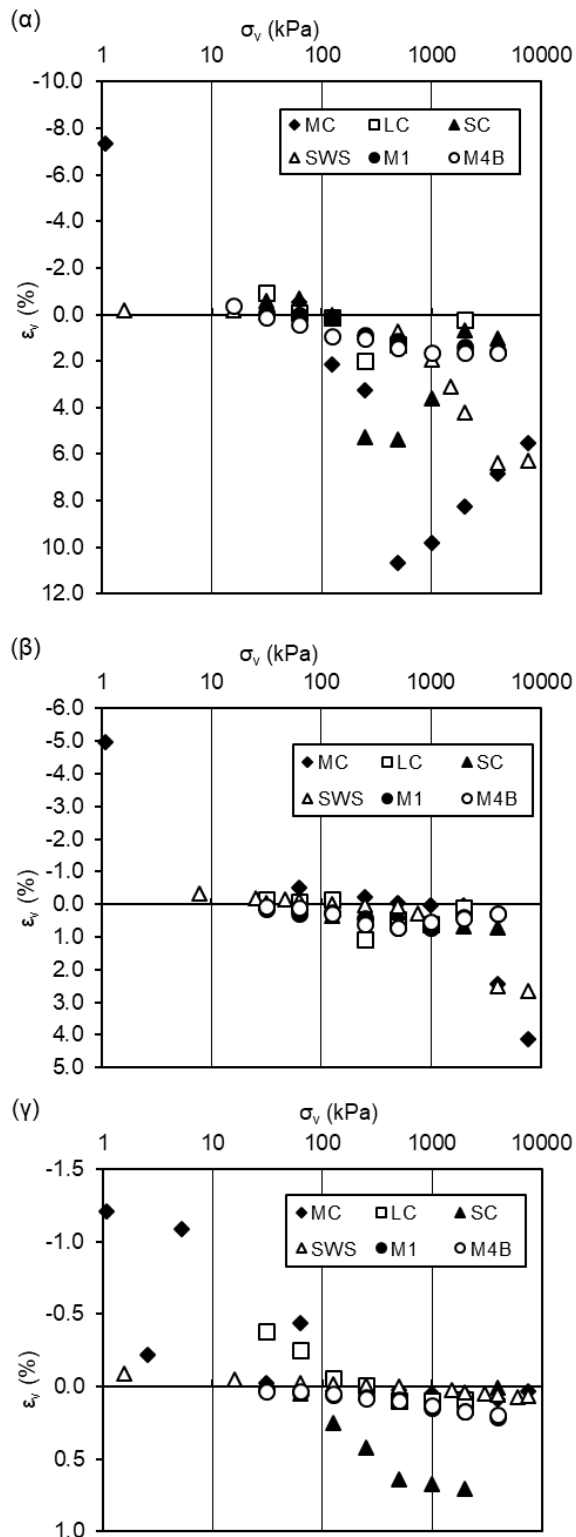


Σχ. 23. Παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού για την Ιλυώδη Άμμο Πλατύ Ποταμού με την κατακόρυφη τάση σε α) γραμμική κλίμακα, και β) σε λογαριθμική κλίμακα.

Fig. 23. Strain due to inundation for Platy River silty sand versus vertical stress in a) linear scale, and b) logarithmic scale.

συμπύκνωσης στη βέλτιστη υγρασία. Τέλος για υγρασία συμπύκνωσης υγρά από τη βέλτιστη υγρασία και στα δύο υλικά κατεγράφησαν μικρότερες μεν, αλλά όχι μηδαμινές παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού υπό μεγάλες τιμές της κατακόρυφης τάσης (μέχρι 0.2%).

Τέλος, στο Σχ. 24 παρουσιάζονται όλες οι καμπύλες εξέλιξης της παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού για όλα τα λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά στα οποία έγιναν δοκιμές, ομαδοποιημένες κατά υγρασία συμπύκνωσης. Είναι εμφανής ο περιορισμός του εύρους των παραμορφώσεων λόγω υδρεμποτισμού που μετρήθηκαν καθώς μεταβαίνουμε από την υγρασία συμπύκνωσης ξηρά από τη βέλτιστη σε υγρασία συμπύκνωσης υγρά από τη βέλτιστη. Στα πιο πολλά υλικά, και



Σχ. 24. Παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού με την κατακόρυφη τάση για όλα τα εδαφικά υλικά με υγρασία, α) «ξηρά» της βέλτιστης, β) στην βέλτιστη, και γ) «υγρά» από τη βέλτιστη.

Fig. 24. Strain due to wetting versus vertical stress for all soils tested at a) dry of optimum, b) optimum, and c) wet of optimum moisture content.

ξηρά από τη βέλτιστη και στη βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης πρέπει να αναμένεται εμφάνιση κατακόρυφης τάσης μέγιστης παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού. Όπως φαίνεται από το Σχ. 24β, είναι σημαντική η εγγύτητα της υγρασίας συμπύκνωσης στη βέλτιστη υγρασία από τις δοκιμές συμπύκνωσης ή και σε μεγαλύτερη από αυτήν. Στο εύρος τάσεων από 50 έως 2000 kPa, οι παραμορφώσεις για όλα τα εδαφικά υλικά παρουσιάζονται να εμπίπτουν στο ίδιο μικρό εύρος (μέχρι 1%). Αντίστοιχα, από το Σχ. 24γ προκύπτει (με εξαίρεση την Άργιλο Αμαρουσίου ότι για κατακόρυφη τάση από 100 kPa και πάνω οι παραμορφώσεις για όλα τα εδαφικά υλικά παρουσιάζονται να εμπίπτουν στο ίδιο μικρό εύρος (μέχρι 0.25%).

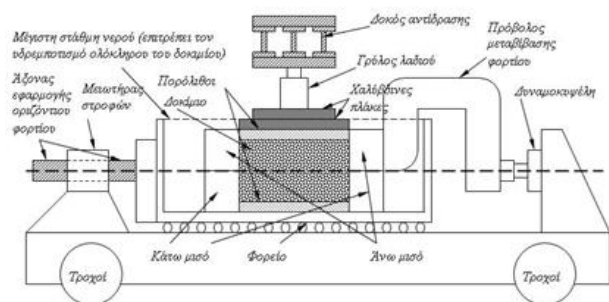
4.3 Χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά

Αντίθετα από τα λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά που μπορεί να επιδείξουν είτε διόγκωση για χαμηλή κατακόρυφη τάση, είτε κατάρρευση για υψηλή, στα χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά εμφανίζεται μόνο κατάρρευση με μέγεθος καθοριζόμενο από την τιμή της κατακόρυφης τάσης, το ξηρό φαινόμενο βάρος και το ποσοστό υγρασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα για τρεις ομάδες χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών, ένα ποτάμιο αμμοχάλικο ποικίλης πετρογραφίας από τον Ποταμό Αλιάκμονα, ποτάμια αμμοχάλικα πρακτικά εξ ολοκλήρου ασβεστολιθικά από την κοιλάδα του Ποταμού Πλατύ στην Κρήτη, και ένα μίγμα θραυστού και ποτάμιου αμμοχαλικώδους υλικού κυρίως γρανιτικού, ως προς την πετρογραφία του.

Η μηχανική συμπεριφορά των χονδρόκοκκων υλικών και των υλικών λιθορριπής ειδικά έχει μελετηθεί από μεγάλο αριθμό ερευνητών (ενδεικτικά: Marsal, 1973, Charles & Watts, 1980, Barton & Kjaernsli 1981, Oldecop & Alonso 2001, 2003 & 2004). Η σχετική έρευνα έχει εστιάσει στην υψηλή αντοχή αυτών των υλικών και την κυρτότητα της περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής τους (Charles & Watts, 1980, Thiers & Donovan, 1981, Barton & Kjaernsli 1981, Indraratna et al. 1998, Μπαρδάνης και λοιποί, 2013, 2014) επιτρέποντας την υιοθέτηση πιο απότομων κλίσεων για πρανή λιθορριπής. Αντίστοιχα έχουν μελετηθεί οι μεταβολές όγκου των υλικών αυτών, και λόγω φόρτισης αλλά και λόγω υδρεμποτισμού (Sowers et al., 1965, Oldecop & Alonso 2001, 2003 & 2004, Bardanis, 2014).

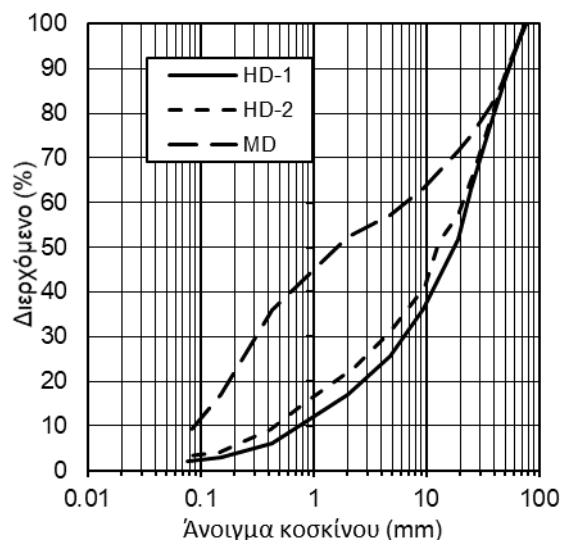
Σε μια προσπάθεια μελέτης της μηχανικής συμπεριφοράς τέτοιων χονδρόκοκκων υλικών αναπτύχθηκε η μεγάλων διαστάσεων συσκευή άμεσης διάτμησης του Εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. (Μπαρδάνης και λοιποί, 2013). Η συσκευή υιοθετεί κυκλική διατομή διαμέτρου 45cm επιτρέποντας έτσι τη μελέτη και της αντοχής των υλικών αυτών, αλλά και των μεταβολών όγκου τους υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης. Η κατακόρυφη τάση επιβάλλεται μέσω υδραυλικού γρύλου παρουσία οριζόντιας δοκού αντίδρασης (Σχ. 25) επιτρέποντας την ανάπτυξη μέγιστης κατακόρυφης τάσης με πλήρη ηλεκτρονικό έλεγχο μέχρι 1500 kPa και μέσω χειροκίνητης αντλίας πίεσεως μέχρι 3500 kPa. Η παρουσία φορείου ύψους μεγαλύτερου των τεμαχίων της κυψέλης άμεσης διάτμησης εξασφαλίζει τη δυνατότητα πλήρους υδρεμποτισμού των δοκιμίων, επιτρέποντας έτσι τη διερεύνηση των μεταβολών όγκου και λόγω υδρεμποτισμού υπό μονοδιάστατες συνθήκες φόρτισης. Περισσότερα για τη συσκευή αυτή μπορούν να βρεθούν στους Μπαρδάνη και λοιπούς, 2013 & 2014.

Το πρώτο υλικό στο οποίο εκτελέστηκε δοκιμή υδρεμποτισμού υπό σταθερή κατακόρυφη τάση, ήταν η χονδρόκοκκη άμμος Ποταμού Ιλαρίωνα που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 2. Αμμοχάλικο από τον Ποταμό Ιλαρίωνα υποβλήθηκε επίσης σε δοκιμές μέχρι μέγιστη κατακόρυφη τάση 1200 kPa. Οι σχετικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δύο υλικά, διαφορετικών καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης (Σχ. 26), ένα πολύ καλής διαβάθμισης (καμπύλες HD-1 & HD-2 στο Σχ. 26, κατάταξη GW κατά USCS) στο οποίο μπορούσε να αναπτυχθεί πάρα πολύ μεγάλο ξηρό φαινόμενο βάρος κατά τη συμπύκνωση (24-25 kN/m³), και ένα μέτριας έως κακής διαβάθμισης (καμπύλη MD στο Σχ. 26, κατάταξη GP-GM κατά USCS) στο οποίο μπορούσε να ανα-



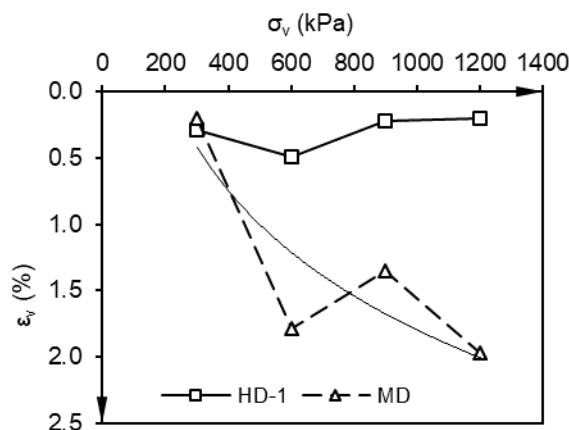
Σχ. 25. Γενική διάταξη της μεγάλης συσκευής άμεσης διάτμησης.

Fig. 25. General layout of the large-size direct shear apparatus.



Σχ. 26. Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης δειγμάτων υλικού λιθορριπής Φράγματος Ιλαρίωνα.

Fig. 26. Grain-size distribution curves of samples of the material used for rockfill for the Ilarion Dam.



Σχ. 27. Εξέλιξη κατακόρυφης παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού με την κατακόρυφη τάση για μέσης και υψηλής πυκνότητας δείγματα υλικού λιθορριπής Φράγματος Ιλαρίωνα.

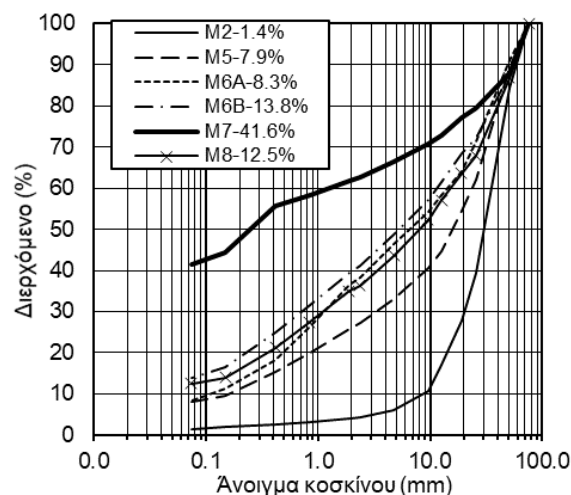
Fig. 27. Evolution of vertical strain due to inundation with vertical stress for medium density and high density samples of rock-fill used for the construction of the Ilarion Dam.

πτυχθεί μόνο μικρότερο ξηρό φαινόμενο βάρος (22.0-22.5 kN/m³). Πετρογραφικά το υλικό ήταν μίγμα διαφόρων υλικών, κύρια γνευσίων, φυλλιτών, κερατολίθου, χαλαζίτη, ψαμμίτη, ασβεστολίθου, μαρμάρου και οφιλίθων, πρακτικά σε ίσα μέρη. Στο Σχ. 27 παρουσιάζονται οι καμπύλες παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού με την κατακόρυφη τάση υπό την οποία συνέβησαν. Και στα δύο υλικά το αρχικό ποσοστό υγρασίας με το

οποίο έγινε η συμπύκνωσή τους μέσα στη συσκευή ήταν 2%. Στο υλικό καλής διαβάθμισης και υψηλού αρχικού ξηρού φαινομένου βάρους καταγράφηκε παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού μέχρι 0.5%, ενώ στο υλικό κακής διαβάθμισης και χαμηλότερου ξηρού φαινομένου βάρους μέχρι 2.0% (ενδεικτικά χρησιμοποιήθηκε στο Σχ. 27 μία καμπύλη 2^{ου} βαθμού για την προσομοίωση της εξέλιξης των σχετικών παραμορφώσεων). Ενδεικτικά μετρήθηκε με υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου η ολική μύζηση στο διερχόμενο των υλικών αυτών από το κόσκινο No 4 (4.75mm) με την υγρασία προ υδρεμποτισμού και βρέθηκε 250-300 kPa.

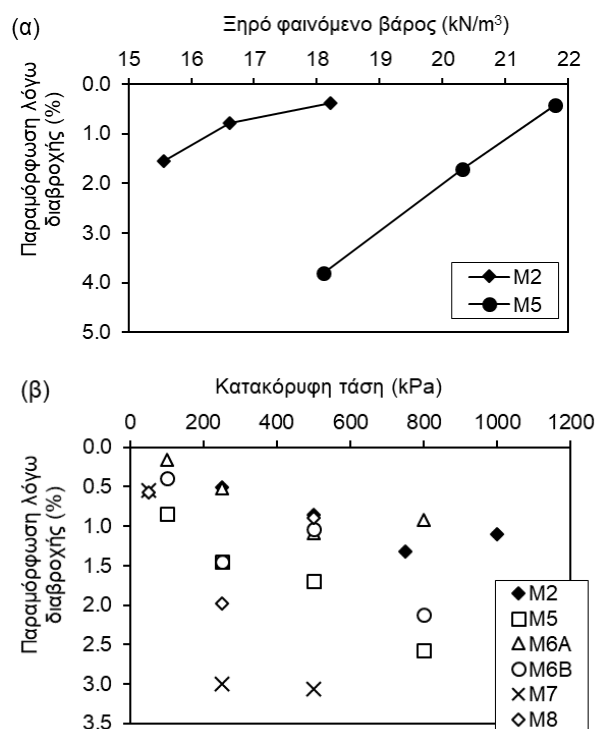
Η επόμενη ομάδα υλικών στην οποία εκτελέστηκαν δοκιμές ήταν αμμοχάλικα από τον Πλατύ Ποταμό στο Νομό Ρεθύμνου Κρήτης. Και αυτά τα υλικά ήταν ποτάμιας προέλευσης, αλλά σε αντίθεση με τα αμμοχάλικα Ποταμού Ιλαρίωνα, πρακτικά εξ ολοκλήρου ασβεστολιθικής προέλευσης. Στο Σχ. 28 παρουσιάζονται οι καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και ποικίλλουν από χάλικες με λίγη άμμο (μίγμα M2) μέχρι χαλικώδη αμμοίλυ χωρίς πλαστικότητα (μίγμα M7). Άλλα υλικά όπως αυτό του μίγματος M2 είναι κακής διαβάθμισης και μπορούν να αναπτύξουν μικρές τιμές ξηρού φαινομένου βάρους κατά τη συμπύκνωσή τους, και άλλα υλικά, όπως αυτό του μίγματος M5, καλής διαβάθμισης και μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες τιμές ξηρού φαινομένου βάρους κατά τη συμπύκνωσή τους. Στα υλικά αυτά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές υδρεμποτισμού για διάφορες τιμές κατακόρυφης τάσης και σχετική πυκνότητα των υλικών περί το 50-60%. Ειδικά για τα μίγματα M2 και M5 επιλέχθηκε υπό κατακόρυφη τάση 500 kPa να εκτελεστούν δοκιμές υδρεμποτισμού μετά από συμπύκνωσή τους σε διάφορες πυκνότητες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών υδρεμποτισμού παρουσιάζονται στο Σχ. 29. Στο Σχ. 29α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα μίγματα M2 και M5 υπό κατακόρυφη τάση 500 kPa για διάφορες πυκνότητες, και στο Σχ. 29β τα αποτελέσματα από όλα τα μίγματα για διάφορες κατακόρυφες τάσεις υπό την ίδια σχετική πυκνότητα μετά τη συμπύκνωση (50-60%).

Όπως προκύπτει από το Σχ. 29α, αύξηση του ξηρού φαινομένου βάρους κατά 1.0-1.5 kN/m³ προκαλεί μείωση των παραμορφώσεων λόγω υδρεμποτισμού κατά περίπου 1.0-1.5%. Πιο σημαντικά ακόμα, το υλικό κακής διαβάθμισης στο οποίο μπορεί να αναπτυχθεί μικρότερο ξηρό φαινόμενο βάρος κατά τη συμπύκνωσή του επιδεικνύει μικρότερη μέγιστη παραμόρφωση λόγω



Σχ. 28. Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης από υλικών που εξετάστηκαν ως υλικό λιθορριπής από τον Πλατύ Ποταμό (τα ποσοστά δίπλα από κωδικούς μιγμάτων δηλώνουν τα ποσοστά λεπτοκόκκων).

Fig. 28. Grain-size distribution curves of samples of the material used for rockfill for the Platy dam in Crete, Greece (percentages next to mixture names denote the percentage of fines).



Σχ. 29. Εξέλιξη της παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού α) με το ξηρό φαινόμενο βάρος των μιγμάτων M2 και M5 υπό τάση 500 kPa, και β) με την τάση για όλα τα μίγματα σε σχετική πυκνότητα 50-60%.

Fig. 29. Evolution of strains due to inundation a) with dry unit weight of mixtures M2 and M5 under 500 kPa stress, and b) with stress for all the mixtures of materials tested at a relative density of 50-60%.

υδρεμπτισμού σε σχέση με το υλικό καλής διαβάθμισης όταν θα βρεθεί υπό αντίστοιχα μικρή σχετική πυκνότητα.

Στο Σχ. 29β, λόγω της υιοθέτησης μετριασμένων τιμών του αρχικού ξηρού φαινομένου βάρους για συντηρητικότερη εκτίμηση της διατμητικής αντοχής, οι τιμές της παραμόρφωσης λόγω υδρεμπτισμού που προκύπτουν είναι αρκετά μεγάλες (φτάνοντας το 3% για το δείγμα M7 που έχει πολύ περισσότερα λεπτόκοκκα, και τιμές όπως 1.5% για τα υπόλοιπα μίγματα).

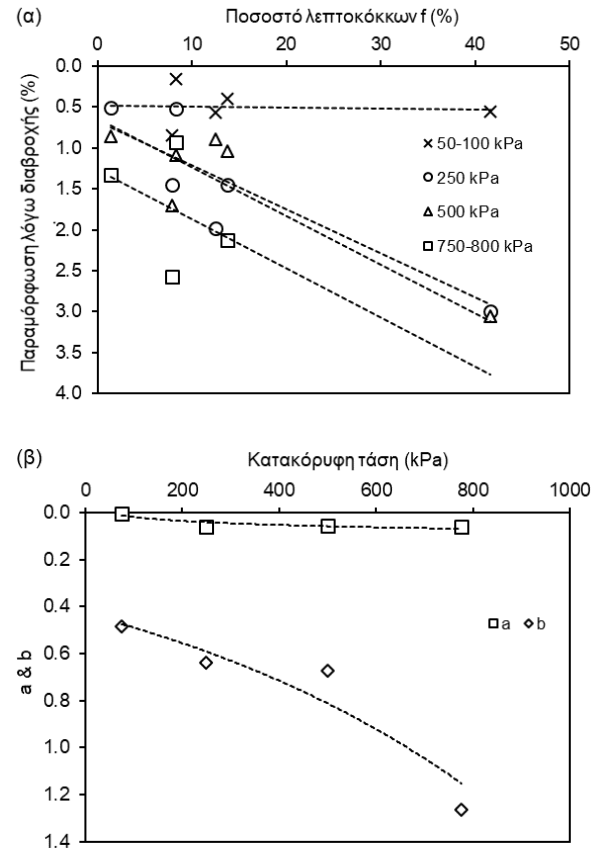
Οι παραμορφώσεις του Σχ. 29β ομαδοποιήθηκαν ανά εύρος τάσεων και συσχετίστηκαν με το ποσοστό λεπτοκόκκων των μιγμάτων στο Σχ. 30α. Στο σχήμα αυτό μπορεί να αναγνωριστεί γραμμική εξέλιξη της παραμόρφωσης με το ποσοστό λεπτοκόκκων των χονδρόκοκκων αυτών υλικών η οποία περιγράφεται γενικά από την Εξ. 1, όπου ε_{vi} η παραμόρφωση λόγω υδρεμπτισμού, f το ποσοστό λεπτοκόκκων, και a & b εμπειρικές παράμετροι, περιγραφόμενες από τις Εξ. 2 και 3 ως συναρτήσεις της κατακόρυφης τάσης από τις βέλτιστες προσεγγίσεις του Σχ. 30β βάσει των γραμμικών συσχετίσεων για κάθε επίπεδο τάσης από το Σχ. 30α.

$$\varepsilon_{vi} = a \cdot f + b \quad (1)$$

$$a = 0.025 \cdot \ln(\sigma_v) - 0.1 \quad (2)$$

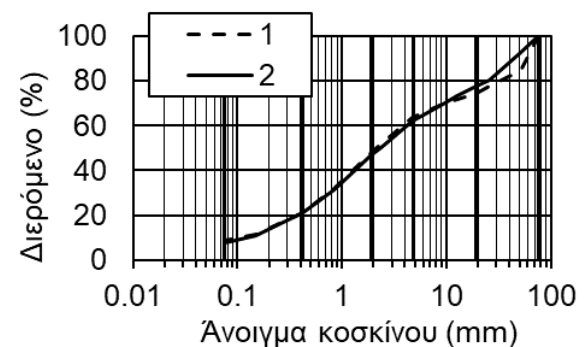
$$b = 0.43 \cdot e^{0.0013 \cdot \sigma_v} \quad (3)$$

Τέλος στο Σχ. 31 παρουσιάζονται οι καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος ποτάμιου και θραυστού αμμοχαλικού γρανιτικής προέλευσης από τη Βουλγαρία στο οποίο εκτελέστηκαν δοκιμές άμεσης διάτμησης και υδρεμπτισμού υπό σταθερή κατακόρυφη τάση. Το υλικό κατατάσσεται ως SW-SM κατά USCS. Το υλικό συμπεκνώθηκε σε σχετική πυκνότητα μεγαλύτερη από 85% και στο Σχ. 32α παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις λόγω υδρεμπτισμού υπό σταθερή κατακόρυφη τάση με την τάση αυτή. Προφανώς η μεγάλη σχετική πυκνότητα του υλικού αυτού πριν τον υδρεμπτισμό του εξασφάλισε το πολύ μικρό μέγεθος των παραμορφώσεων αυτών. Όπως φαίνεται στο Σχ. 32β, για μικρότερες πυκνότητες που εκτελέστηκαν δοκιμές υδρεμπτισμού υπό κατακόρυφη τάση 400 kPa, οι παραμορφώσεις μπορούν να αυξηθούν, ακόμα και ραγδαία για μικρές μεταβολές της πυκνότητας.



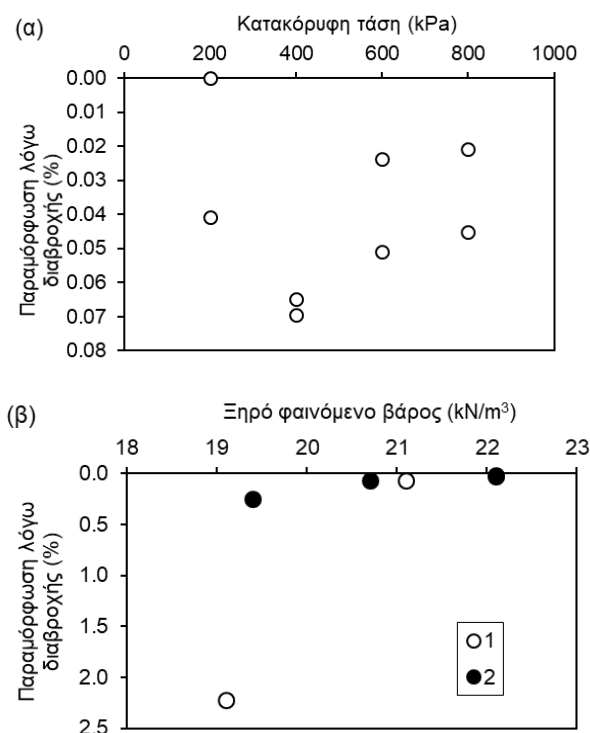
Σχ. 30. α) Εξέλιξη παραμόρφωσης λόγω υδρεμπτισμού υπό σταθερή τάση με το ποσοστό των λεπτοκόκκων για διάφορα εύρη τάσεων (με τις βέλτιστες γραμμικές προσεγγίσεις για κάθε εύρος τάσεων), και β) εξέλιξη των παραγόντων a και b της Εξ. 1 με την τάση (με τις βέλτιστες προσεγγίσεις τους, όπως περιγράφονται από τις Εξ. 2 και 3 αντίστοιχα).

Fig. 30. a) Evolution of strain due to inundation under constant vertical stress with percentage of fines for various stress ranges (with linear best fits for each stress level), and b) evolution of factors a & b of Eq. 1 against vertical stress (with their best fits, represented by Eq. 2 & 3 respectively).



Σχ. 31. Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης γρανιτικού υλικού.

Fig. 31. Grain-size distribution curves of coarse-grained granitic material.



Σχ. 32. Εξέλιξη της παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού α) με την τάση για όλα τα μίγματα σε σχετική πυκνότητα $>85\%$, και β) με το ξηρό φαινόμενο βάρος των μιγμάτων υπό τάση 400 kPa.

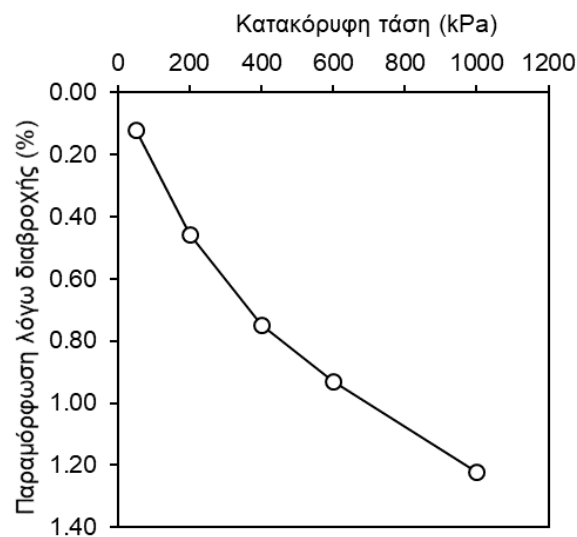
Fig. 32. Evolution of strains due to inundation a) with stress for all the mixtures of materials tested at a relative density $>85\%$, and b) with dry unit weight of mixtures under 400 kPa stress.

4.4 Μαλακοί βράχοι

Μια ιδιαίτερη κατηγορία υλικών, και για τις παραμορφώσεις λόγω κατάρρευσης, όπως και για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της μηχανικής τους συμπεριφοράς, είναι οι μαλακοί βράχοι/σκληρά εδάφη (weak rocks/hard soils). Στην Παράγραφο 4.1 έγινε ήδη αναφορά στη χρήση μαλακών βράχων στην κατασκευή των σωμάτων στήριξης του Φράγματος Γρατινής, στην οποία απέδωσαν οι Anastasopoulos, et al. (2012) την εκδήλωση ρωγμών στη στέψη του φράγματος. Στην Παράγραφο 4.2 επίσης παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών υδρεμποτισμού σε μικρού μεγέθους δοκίμια του συμπυκνωμένου Αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των σωμάτων στήριξης του Φράγματος Φερεκάμπου Σκύρου. Γενικά, η χρήση μαλακών βράχων είναι αρκετά συνηθισμένη για την κατασκευή φραγμάτων και στην Ελλάδα, είτε σωμάτων στήριξης, είτε αδιαπέρατου πυρήνα (ενδεικτικά Dounias, et al.,

2002, για τον αδιαπέρατο πυρήνα του Φράγματος Ευήνου από ιλυολιθικό φλύσχη). Οι μαλακοί βράχοι, μπορεί να είναι χαμηλής αντοχής από τη φύση τους χωρίς σημαντική προηγούμενη αποσάθρωση (π.χ. κρητίδες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι), ή λόγω της αποσάθρωσης ή ακόμα και της εξαλλοίωσής τους από ισχυρότερη κατάσταση στην οποία έχουν βρεθεί (π.χ. ο Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου). Προς επισήμανση της ιδιαιτερότητας των υλικών αυτών παρουσιάζονται ενδεικτικά μόνο αποτελέσματα για δύο μαλακούς βράχους από την Ελλάδα και την Κύπρο.

Στο Σχ. 33 παρουσιάζεται η εξέλιξη των παραμορφώσεων λόγω υδρεμποτισμού με την κατακόρυφη τάση για έναν αποσαθρωμένο γνεύσιο από τη Χαλκιδική (λεπτόκοκκα 20-30%, w_L 32-35%, I_p 9-12). Το υλικό συμπυκνώθηκε σε αρχικό ξηρό φαινόμενο βάρος περί το 95% της δοκιμής συμπίκνωσης Proctor με την τροποποιημένη ενέργεια συμπίκνωσης (περί το 19.5-20.0 kN/m³) με υγρασία περί τη βέλτιστη (περί το 9%), φορτίστηκε υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι εξισορρόπησης κατακόρυφων παραμορφώσεων και στη συνέχεια υποβλήθηκε σε υδρεμποτισμό. Οι παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού αυξάνονται ομαλά και μονοτονικά με την κατακόρυφη τάση φτάνοντας μέγιστη τιμή 1.22% χωρίς ενδείξεις τάσης σταθεροποίησής τους μέχρι την τάση των 1000 kPa.

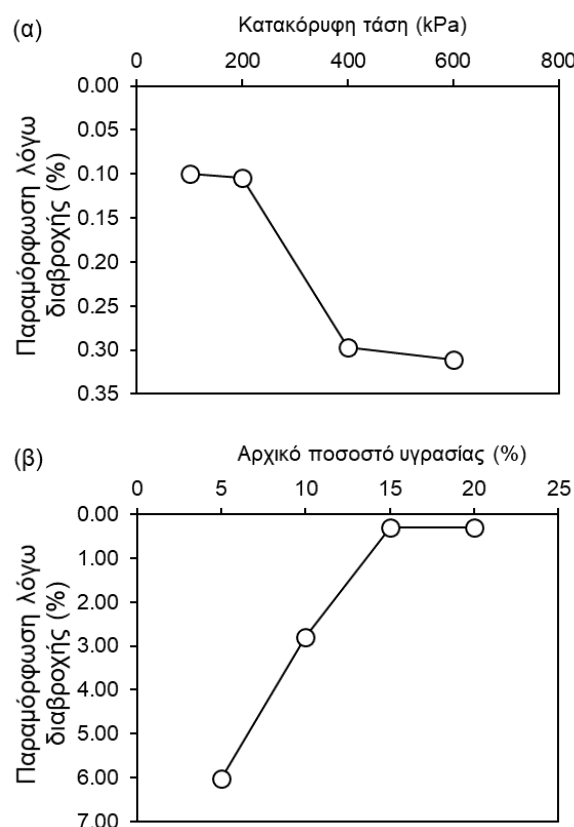


Σχ. 33. Εξέλιξη της παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού με την τάση για αποσαθρωμένο γνεύσιο Χαλκιδικής.

Fig. 33. Evolution of strains due to inundation with stress for Chalkidiki weathered gneiss.

Στο Σχ. 34 παρουσιάζεται η εξέλιξη των παραμορφώσεων λόγω υδρεμποτισμού με την κατακόρυφη τάση για κρητίδες Τερσεφάνου Κύπρου (λεπτόκοκκα 25-50%, w_L 36-40%, I_p 14-17). Το υλικό συμπυκνώθηκε σε αρχικό ξηρό φαινόμενο βάρος περί το 95% της δοκιμής συμπύκνωσης Proctor με την τροποποιημένη ενέργεια συμπύκνωσης (περί το 16 kN/m³) με υγρασία περί τη βέλτιστη (περί το 15%), φορτίστηκε υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι εξισορρόπησης κατακόρυφων παραμορφώσεων και στη συνέχεια υποβλήθηκε σε υδρεμποτισμό. Όπως φαίνεται στο Σχ. 34α οι παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού αυξάνονται ομαλά και μονοτονικά με την κατακόρυφη τάση φτάνοντας μέγιστη τιμή 0.31% χωρίς ενδείξεις τάσης σταθεροποίησής τους μέχρι την τάση των 600 kPa. Λόγω της ιδιαιτερότητας της γεωλογικής προέλευσης του υλικού αυτού και της αρκετά μεγάλης βέλτιστης υγρασίας συμπύκνωσης, προετοιμάστηκαν δοκίμια με διαφορετικές αρχικές υγρασίες τα οποία φορτίστηκαν με κατακόρυφη τάση 400 kPa και υποβλήθηκαν σε υδρεμποτισμό. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Σχ. 34β. Ενώ για ποσοστό υγρασίας κοντά και λίγο πάνω από τη βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης του υλικού, οι παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού είναι πρακτικά σταθερές, καθώς το αρχικό ποσοστό υγρασίας μειώνεται αισθητά κάτω από την τιμή της βέλτιστης υγρασίας συμπύκνωσης, οι παραμορφώσεις αυξάνονται και μάλιστα σε πολύ μεγάλες τιμές. Τα αποτελέσματα για αυτές τις κρητίδες δεν μπορούν φυσικά να γενικευθούν. Επισημαίνουν όμως την επιδεκτικότητα παρόμοιων σχηματισμών για εκδήλωση μεγάλων παραμορφώσεων λόγω υδρεμποτισμού εάν δεν ελεγχθεί αποτελεσματικά η υγρασία και η πυκνότητά τους.

Κλείνοντας, επισημαίνεται για τους μαλακούς βράχους και τα σκληρά εδάφη που είναι προϊόντα αποσάθρωσης βραχωδών υλικών (υπολειμματικά εδάφη) ότι διατηρούν στους κόκκους τους μέρος της δομής των μητρικών υλικών. Είναι πολύ πιθανό, ότι τέτοια υλικά όταν χρησιμοποιούνται μετά από συμπύκνωση για την κατασκευή επιχωμάτων και αναχωμάτων φραγμάτων ότι θα εκδηλώσουν μακροπρόθεσμα παραμορφώσεις οφειλόμενες στην προοδευτική καταστροφή της «δομής» του μητρικού εδάφους που έχει απομείνει στους κόκκους τους (θα συνεχίζεται δηλαδή η αποσάθρωση/εξαλλοίωση των κόκκων των εδαφών αυτών). Η βιβλιογραφία για αυτό το φαινόμενο είναι ελάχιστη όμως ενδέχεται να οδηγεί ακόμα και στην επανεμφάνιση παραμορφώσεων λόγω κατάρρευσης εξ



Σχ. 34. Εξέλιξη της παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού α) με την τάση, και β) με το ποσοστό υγρασίας υπό τάση 400 kPa.

Fig. 34. Evolution of strains due to inundation a) with stress, and b) with initial water content under 400 kPa stress.

υδρεμποτισμού ακόμα και περισσότερες από μία φορές, πέραν της αρχικής κατά την ύγρανση για πρώτη φορά. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποτελεί αντικείμενο αιχμής για την τεκμηρίωση της αξίας ή επικινδυνότητας των μαλακών βράχων/σκληρών εδαφών ως υλικών κατασκευής επιχώσεων μηχανικού (engineered fills).

5. Συμπεράσματα

Στο άρθρο παρουσιάστηκαν πειραματικά αποτελέσματα κατάρρευσης μη κορεσμένων εδαφών λόγω υδρεμποτισμού. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε κοκκώδη εδάφη όταν ο υδρεμποτισμός συμβαίνει είτε υπό μικρές είτε υπό μεγάλες τάσεις και σε αργιλικά εδάφη όταν συμβαίνει υπό μεγάλες τάσεις. Μια ιδιαίτερη υποκατηγορία εδαφών στις οποίες εμφανίζεται το φαινόμενο είναι οι ιστορικές αποθέσεις. Αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικά εκείνα που όταν αγνοείται ο μερικός κορεσμός κατά τους υπολογισμούς

δεν μπορεί να προβλεφθεί. Κατά συνέπεια αποτελεί παράδειγμα περίπτωσης στην οποία το να αγνοηθεί ο μερικός κορεσμός κατά τους υπολογισμούς είναι σε βάρος της ασφάλειας. Υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες οι παραμορφώσεις λόγω υδρεμποτισμού είναι ραγδαίες, οπότε είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται ο όρος κατάρρευση του εδάφους, αλλά και περιπτώσεις στις οποίες οι παραμορφώσεις αυτές εκδηλώνονται προοδευτικά, οπότε το φαινόμενο της προοδευτικής αυτής κατάρρευσης ονομάζεται υδροστερεοποίηση (hydroconsolidation).

Για τις ιστορικές αποθέσεις παρουσιάστηκε το παράδειγμα των ιστορικών αποθέσεων της Θεσσαλονίκης. Το παράδειγμα αυτό αναδεικνύει το σημαντικό πρόβλημα των καθιζήσεων μετά από ύγρανση λόγω μιας τεχνικής παρέμβασης κυρίως σε μη ιζηματογενή εδάφη, δηλαδή σε σχηματισμούς που δεν έχουν αποτεθεί σε υγρό περιβάλλον. Το στρώμα των ιστορικών αποθέσεων της Θεσσαλονίκης είναι επιδεκτικό στο φαινόμενο της υδροστερεοποίησης και αυτό οφείλεται τόσο στον τρόπο σχηματισμού και την προέλευση των υλικών του όσο και στην απουσία σημαντικών μεταβολών στο περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας του κατά το παρελθόν. Το μέγεθος των καθιζήσεων λόγω υδροστερεοποίησης εξαρτάται από το πάχος του στρώματος που προσβάλλεται από ανυψώσεις της στάθμης και από το υφιστάμενο εντατικό πεδίο. Οι τεχνικές παρεμβάσεις στα πλαίσια των έργων του Μετρό της Θεσσαλονίκης οδήγησαν σε ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και συνακόλουθες παραμορφώσεις στο έδαφος θεμελίωσης παρακείμενου κτιρίου εξαιτίας του εν λόγω φαινομένου. Η εφαρμογή αυτή αναδεικνύει τη σημασία της διερεύνησης των ιστορικών επιχωματώσεων, ειδικά μάλιστα σε χώρες με μακραίωνη ιστορία όπως η Ελλάδα και η Κύπρος.

Παρουσιάστηκαν επίσης πειραματικά αποτελέσματα των παραμορφώσεων λόγω υδρεμποτισμού και δειγμάτων ιστορικών αποθέσεων (στρώσεις ιστορικών αποθέσεων Θεσσαλονίκης), και συμπυκνωμένων υλικών για χρήση σε συμπυκνωμένες επιχώσεις μηχανικού (engineered fills). Τα αποτελέσματα και για λεπτόκοκκα αργιλικά εδάφη, και για χονδρόκοκκα υλικά αλλά και σε μαλακούς βράχους/σκληρά εδάφη, επέδειξαν τη σκοπιμότητα αυστηρού ελέγχου της υγρασίας συμπύκνωσης και της επιτυγχανόμενης πυκνότητας μετά τη συμπύκνωση προς αποφυγή μεγάλου μεγέθους παραμορφώσεων λόγω υδρεμποτισμού. Οι δοκιμές δε σε λεπτόκοκκα εδάφη υπό διάφορες τιμές κατακόρυφης τάσης και υγρασίες συμπύκνωσης επέδειξαν τη

σκοπιμότητα αποφυγής χρήσης της πίεσης διόγκωσης, ως κριτήριο αξιολόγησης της διογκωσιμότητας αργλικών εδαφών. Τα ίδια δε εδάφη που προκύπτουν εξαιρετικά διογκώσιμα σε χαμηλές τάσεις, επιδείχθηκε ότι είναι επιδεκτικά μεγάλων παραμορφώσεων κατάρρευσης εξ υδρεμποτισμού σε μεγάλες τάσεις. Για χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά μπορούν να αναμένονται γενικά μικρότερες παραμορφώσεις κατάρρευσης εξ υδρεμποτισμού σε σχέση με τα συμπυκνωμένα λεπτόκοκκα εδάφη, οι οποίες υπό προϋποθέσεις και σε σχετικά απλά γεωλογικά περιβάλλοντα μπορούν να αποτελούν σχετικά εύκολα εργαστηριακά προσδιοριζόμενες συναρτήσεις του ποσοστού λεπτοκόκκων και της κατακόρυφης τάσης. Τέλος και σε αυτό το αντικείμενο της μηχανικής συμπεριφοράς, ιδιαίτερη κατηγορία εδαφών αποτελούν οι μαλακοί βράχοι/σκληρά εδάφη, αφενός γιατί ενδέχεται να επιδεικνύουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις κατάρρευσης εξ υδρεμποτισμού σε σχέση με κοκκώδη εδάφη ακόμα και της ίδια κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ μοιάζει να έχει εξαιρετικά μεγάλη επιρροή η υγρασία συμπύκνωσής της. Είναι δε χαρακτηριστικές οι βιβλιογραφικές αναφορές για τα αποτελέσματα της χρήσης τους σε πραγματικές κατασκευές.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την εταιρεία Αττικό Μετρό Α.Ε. για την διάθεση στοιχείων των γεωερευνητικών εργασιών στην περιοχή έρευνας, καθώς και τον Αν. Καθ. Α.Π.Θ. Β. Μαρίνο και τον γεωλόγο Β. Πέππα για τη συνδρομή τους στην αξιοποίηση των στοιχείων αυτών. Για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών των Παραγράφων 2 και 4 που παρουσιάστηκαν βοήθησαν η Σοφία Γρίφιζα, Γεωλόγος, και οι Χάρης Βαγενάς, Μάριος Τσουκαλαδάκης και Δημήτρης Σακκής, Τεχνικοί του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Βιβλιογραφία

Λουκίδης, Δ., 2019, *Διόγκωση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού και επιπτώσεις στις κατασκευές*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, 1^η Ιουλίου 2019, σελ. 83-100.

- Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2016, *Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών*, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ 2016, σελ. 1300.
- Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2019, *Φύση, μηχανική συμπεριφορά και εμφάνιση μη κορεσμένων εδαφών*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, 1^η Ιουλίου 2019, σελ. 1-42.
- Μπαρδάνης, Μ., Γρίφιζα, Σ., 2010, *Μηχανική συμπεριφορά ενός συμπτυκνωμένου αποσπασμένου σερπεντινίτη από την Σκύρο*, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Βόλος, 2010, 29/9-1/10, Τομ. 1, σελ. 151-158.
- Μπαρδάνης, Μ., Γρίφιζα, Σ., 2012, *Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων*, Πρακτικά 4ου Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας, Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012.
- Μπαρδάνης, Μ. Ε., Λουκίδης, Δ., 2019, *Μακροχρόνιες μετρήσεις μύζησης στην Ελλάδα και στην Κύπρο*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, 1^η Ιουλίου 2019, σελ. 155-186.
- Μπαρδάνης, Μ., Γρίφιζα, Σ., Κόκκαλη, Π., 2014, *Διατμητική αντοχή πολύ χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών και μετρήσεις του συντελεστή ωθήσεων γαιών ηρεμίας τους*, 7ο Παν. Συν. Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, 5-7 Νοεμβρίου 2014.
- Μπαρδάνης, Μ., Καβουνίδης, Σ., Ντουνιάς, Γ., 2013, *Μια νέα συσκευή άμεσης διάτμησης για χονδρόκοκκα εδάφη και εδάφη με μεγάλα συσσωματώματα. Μετρήσεις διατμητικής αντοχής και μεταβολών όγκου*, Πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Φραγμάτων και Ταμιευτήρων, Αθήνα, 7-8 Νοεμβρίου 2013.
- Σιταρένιος, Π., 2019, *Καταστατική συμπεριφορά της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, 1^η Ιουλίου 2019, σελ. 127-154.
- Alonso, E.E., Olivella, S., Pinyol, N.M., 2005, *A review of Beliche Dam*, Géotechnique 55: 267-285.
- Anastasopoulos, K., Dounias, G., Oikonomidis, C., Papachatzaki, Z.R., Siachou, S., 2009, *Post construction deformations of modern Greek rockfill dams*, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Long Term Behaviour of Dams, Graz, Austria, pp. 326-331.
- Bardanis, M., 2014, *Collapse of coarse-grained materials due to inundation under one-dimensional compression conditions*, Proc. 6th Int. Conf. on Unsaturated Soils, 2-4 July 2014, Sydney, Australia, Vol. 2, pp. 1659-1665.
- Bardanis, M. E., Grifiza, S., 2010, *Collapse potential of a compacted weathered serpentinite from Skiros island, Greece*, proc. of the 5th Int. Conf. on Unsaturated Soils, UNSAT 2010, Barcelona, Spain, 6-8 September 2010.
- Bardanis, M., Grifiza, S., 2016, *Swelling and collapse of compacted soils to be used as earth dam cores*, Proc. 3rd Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, France, 12-14 September, 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160919003.
- Barton, N., Kjaernsli, B., 1981, *Shear strength of rockfill*, J. Geotech. Eng. Div. 107: 873-891.
- Blight, G.E., 1965, *A study of effective stresses for volume change*, Proc. symposium in print Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Aitchinson, G.D. ed, Butterworths, Australia, pp. 259-269.
- Brandon, T.L., Duncan, J.M., Gardner, W.S., 1990, *Hydrocompression settlement of deep fills*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, pp. 1536-1548.
- Charles, J.A., Watts, K.S., 1980, *The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rock fill*, Géotechnique 30 (4): 353-367.
- Chatzigogos, N. T., Makedon, T., Tsotsos, S., & Christaras, B., 2006, *Implementation of a ground investigation strategy on urban fills*, 10th IAEG Congress. Nottingham, UK.
- Dounias, G., Vaughan, P., Cavounidis, S., 2002, *Making an impermeable clay core from a flysch mudrock*, Geotechnical and Geological Engineering Journal, 20: 17-40.
- Indraratna, B., Ionescu, D., Christie, H.D., 1998, *Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests*, J. Geotech. Eng. Div. 124: 439-449.
- Jennings, J. E. and Knight, K., 1975, *A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain*

- structure*, Proc. 6th Reg. Conf. For Africa on Soil Mech. and Found. Eng., 1, pp. 99-105.
- Knight, K., 1961, *The collapse of structure of sandy sub-soils on wetting*, PhD Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Marsal, R.J., 1973, *Mechanical properties of rockfill. Embankment Dam Engineering*, Casagrande Volume. New York: John Wiley and Sons.
- Oldecop, L.A., Alonso, E.E., 2001, *A model for rockfill compressibility*, Géotechnique 51: 127-139.
- Oldecop, L.A., Alonso, E.E., 2003, *Suction effects on rockfill compressibility*, Géotechnique 53: 289-292.
- Oldecop, L.A., Alonso, E.E., 2004, *Testing rockfill under relative humidity control*, Geotech. Testing J. 27 (3): 269-278.
- Schwartz, K., Yates, J. R. C., 1980, *Engineering properties of aeolian Kalahari Sands*, Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Accra, Ghana.
- Sowers, G.F. Williams, R.C., Wallace, T.S., 1965, *Compressibility of broken rock and settlement of rockfill*, Proc. 6th ICSMFE Vol. 2: 561-565.
- Thiers, G.R., Donovan, T.D., 1981, *Field density, gradation, and triaxial testing of large-size rockfill for Little Blue Run Dam*, in Yong/Townsend (eds) Laboratory shear strength of soil, ASTM STP 740.
- Tromp, B. E., 1985, *Design of stiffened raft foundations for houses on collapsing sands*, Johannesburg: Schwarz, Tromp and Associates.
- Wieland, M., Malla, S., 2009, *Assessment of Long-Term Behaviour of Ataturk Dam Based on Elasto-Plastic Analysis: Comparison of Effective and Total Stress Approaches for Clay Core*, Long term behavior of dams, pp. 899-904.

ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

CONSTITUTIVE MODELLING OF UNSATURATED SOILS

Παναγιώτης. Χ. Σιταρένιος¹

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Lecturer in Civil Engineering Geotechnics

School of Energy, Construction and
Environment

Coventry University, UK

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Το παρόν άρθρο συνοψίζει τις κυριότερες συνεισφορές στην καταστατική προσομοίωση των συνήθων (μη διογκώσιμων) μη κορεσμένων εδαφών τα τελευταία 30 χρόνια. Ξεκινάει με την εισαγωγή του Βασικού Καταστατικού Προσομοιώματος της Βαρκελώνης (Barcelona Basic Model) και παρουσιάζει το πως αυτό επηρέασε την μετέπειτα εξέλιξη της καταστατικής προσομοίωσης των μη κορεσμένων εδαφών, περιλαμβάνοντας έως και τα πλέον σύγχρονα καταστατικά προσομοιώματα τα οποία χρησιμοποιούν την τάση του εδαφικού σκελετού του Bishop, ενσωματώνουν την επιρροή του βαθμού κορεσμού και περιλαμβάνουν επιπρόσθετα χαρακτηριστικά όπως η περιγραφή της ανισοτροπίας. Στο παρόν άρθρο τα μελετώμενα καταστατικά προσομοιώματα διαχωρίζονται και κατηγοριοποιούνται στην βάση των καταστατικών μεταβλητών που χρησιμοποιούν.

ABSTRACT: The present paper summarizes the most important contributions in constitutive modelling of non-expansive, unsaturated soils, proposed in the international literature over the last 30 years. Starting with the presentation of the pioneering Barcelona Basic Model, it discusses how the latter was seminal for the evolution of constitutive modelling over the following years. The discussion extends up to more recent contributions which suggest the utilization of Bishop's average skeleton stress,

the incorporation of degree of saturation in the compressibility framework and even incorporate additional characteristics such as the effects of soil anisotropy. The present paper categorizes the various contributions based on their utilized constitutive variables.

1. Εισαγωγή

Από το 1990, όταν οι Alonso et al. (1990) παρουσίασαν το πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδάφη, στην διεθνή βιβλιογραφία έχει δημοσιευτεί πληθώρα καταστατικών νόμων που αποσκοπούν στην περιγραφή της μηχανικής και ενίοτε της υδρομηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Η συντριπτική πλειονότητα αυτών βασίζεται στην κλασσική θεωρία της πλαστικότητας για εδαφικά υλικά, ενώ δεν λείπουν και συνεισφορές που ακολουθούν άλλες παραδοχές όπως για παράδειγμα η εργασία των Mašín & Khalili (2008) που βασίζεται στην υποπλαστικότητα (hypoplasticity).

Επιπρόσθετα, η συντριπτική πλειονότητα των διαθέσιμων εργασιών αφορά στην μηχανική συμπεριφορά εδαφών τα οποία συνήθως επιδεικνύουν κατάρρευση (μείωση του όγκου) κατά την διαβροχή υπό τάση. Αργιλικά εδάφη τα οποία περιλαμβάνουν ιδιαίτερα ενεργά ορυκτά (active minerals) όπως για παράδειγμα ο Μοντμοριλλονίτης (Mitchell & Soga 2005), παρουσιάζουν έντονη τάση για διόγκωση με την διαβροχή. Τα εδάφη αυτά ονομάζονται διογκώσιμα και αποτελούν ειδική κατηγορία μη κορεσμένων εδαφών (Λουκίδης, 2019). Η περιγραφή της μηχανικής τους συμπεριφοράς απαιτεί ιδιαίτερα πλαίσια συμπεριφοράς και εξειδικευμένα καταστατικά προσομοιώματα τα οποία να λαμβάνουν ξεχωριστά υπόψη την υδρομηχανική συμπεριφορά του υλικού σε επίπεδο μικροπορώδους (εντός συσσωματωμάτων) και μακροπορώδους (μεταξύ συσσωματωμάτων). Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα καταστατικού προσομοιώματος για διογκώσιμα αργιλικά εδάφη αποτελεί το BExM των Alonso et al. (1999).

Στην συνέχεια, το παρόν άρθρο θα επικεντρωθεί στην παρουσίαση και σχολιασμό των σημαντικότερων δημοσιευμένων προτάσεων καταστατικής προσομοίωσης συνήθων, μη

¹ Ηλεκτρονική διεύθυνση επικοινωνίας:
panagiotis.sitarenios@coventry.ac.uk

διογκώσιμων, μη κορεσμένων εδαφών, δίνοντας έμφαση επιπρόσθετα σε προσομοιώματα διατυπωμένα με βάση τις αρχές της κλασσικής θεωρίας της πλαστικότητας για εδαφικά υλικά. Για την διάρθρωση του άρθρου επιλέχθηκε ο διαχωρισμός των προσομοιωμάτων στη βάση των καταστατικών παραμέτρων που αυτά χρησιμοποιούν, πρόταση η οποία πρώτα διατυπώθηκε από τους Gens et al. (2006) και επίσης ακολουθήθηκε από τον Gens (2010).

Στην επόμενη ενότητα εισάγονται επιγραμματικά βασικές αρχές της θεωρίας της πλαστικότητας για εδαφικά υλικά και συζητούνται οι απαιτούμενες τροποποιήσεις που επιβάλει η αναγκαιότητα χρήσης επιπλέον της μίας καταστατικής παραμέτρου για την περιγραφή της μηχανικής τους συμπεριφοράς. (Matyas & Radhakrishna 1968, Fredlund & Morgenstern 1977). Στην ενότητα 3 παρουσιάζονται καταστατικά προσομοιώματα τα οποία χρησιμοποιούν την ανηγμένη τάση ως πρώτη τους καταστατική παράμετρο, ενώ στην ενότητα 4 συνεισφορές που βασίζονται στην τάση του εδαφικού σκελετού του Bishop (1959).

2. Πλαίσιο πλαστικότητας για μη κορεσμένα εδάφη

2.1 Βασικές έννοιες πλαστικότητας

Το καταστατικό προσομοίωμα αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα οποιασδήποτε ανάλυσης συννοριακών συνθηκών (είτε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είτε με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών). Περιγράφει την μηχανική συμπεριφορά του υλικού (π.χ. έδαφος) και βασίζεται στην έννοια της **κατάστασης του υλικού** (material state).

Η κατάσταση ενός υλικού περιγράφεται από δύο ειδών μεταβλητές. Τις **εξωτερικές μεταβλητές** κατάστασης (external variables) οι οποίες περιγράφουν την **φόρτιση** (loading) ενός υλικού, και τις **εσωτερικές μεταβλητές** κατάστασης οι οποίες περιγράφουν την μνήμη του υλικού. Η κατάσταση ενός υλικού αλλάζει μόνο εφόσον αλλάξει κάποια από τις μεταβλητές κατάστασης. Οι πιθανές καταστάσεις ενός υλικού διακρίνονται σε **ελαστικές καταστάσεις**, κατά τις οποίες οποιαδήποτε απειροστή φόρτιση (infinitesimal loading) προκαλεί μόνο αναστρέψιμες μεταβολές των εξωτερικών μεταβλητών κατάστασης, και σε **πλαστικές καταστάσεις**, όταν κάθε απειροστή φόρτιση

προκαλεί μη αναστρέψιμες μεταβολές των εξωτερικών μεταβλητών κατάστασης.

Αναλόγως της κατάστασης ενός υλικού ορίζονται ως **ελαστική φόρτιση**, οποιαδήποτε απειροστή φόρτιση είτε από μία ελαστική κατάσταση είτε από μία πλαστική κατάσταση, η οποία συνδέεται με μεταβολή αποκλειστικά των εξωτερικών μεταβλητών κατάστασης. Σε κάθε άλλη περίπτωση συμβαίνει **πλαστική φόρτιση**, με τις εσωτερικές μεταβλητές κατάστασης να αλλάζουν μόνο εφόσον συμβαίνει πλαστική φόρτιση.

Η διάκριση μεταξύ ελαστικών και πλαστικών καταστάσεων επιτυγχάνεται μέσω της **επιφάνειας διαρροής**, η οποία μαθηματικά αντιπροσωπεύεται από την **συνάρτηση διαρροής**. Θεωρώντας απλουστευτικά ότι η συνάρτηση διαρροής εξαρτάται μόνο από τον τανυστή της τάσης λαμβάνει την μορφή $f(\sigma)$.

Καταστάσεις επί της επιφάνειας διαρροής ($f(\sigma) = 0$) θεωρούνται **πλαστικές**, ενώ καταστάσεις εντός της επιφάνειας διαρροής ($f(\sigma) < 0$) θεωρούνται **ελαστικές**. Καταστάσεις εκτός της επιφάνειας διαρροής θεωρούνται μη προσβάσιμες και για το λόγο αυτό κατά τη διάρκεια πλαστικής φόρτισης η επιφάνεια διαρροής συνήθως μεταβάλλει είτε το σχήμα της είτε το μέγεθός της είτε την θέση της, ώστε κάθε νέα πλαστική κατάσταση να βρίσκεται επί της επιφάνειας διαρροής. Εξαιρέση αποτελούν καταστατικά προσομοιώματα που δεν περιλαμβάνουν κάποια μορφή κράτυνσης και προβλέπουν απολύτως πλαστική συμπεριφορά.

Η μεταβολή του σχήματος, μεγέθους ή/και θέσης της επιφάνειας διαρροής ονομάζεται **κράτυνση** και συνδέεται με την μεταβολή των μεταβλητών κράτυνσης. Οι **μεταβλητές κράτυνσης** (h) αποτελούν μεταβλητές της συνάρτησης διαρροής οι οποίες μεταβάλλονται μόνο κατά την διάρκεια πλαστικής φόρτισης και ως εκ τούτου αποτελούν εσωτερικές μεταβλητές κατάστασης. Η συνάρτηση διαρροής περιλαμβάνει και τις παραμέτρους κράτυνσης, οπότε μία πληρέστερη μορφή της εξίσωσης της επιφάνειας διαρροής θα είχε την μορφή ($f(\sigma, h) = 0$).

Η μηχανική συμπεριφορά του υλικού κατά τη διάρκεια ελαστικών φορτίσεων περιγράφεται από τον ελαστικό νόμο συμπεριφοράς ή **ελαστικότητα**, με την γραμμική ισότροπη ελαστικότητα να αποτελεί την απλούστερη μορφή τέτοιου νόμου. Κατά τη διάρκεια πλαστικών φορτίσεων ο **νόμος ροής** περιγράφει

την συσσώρευση πλαστικών (μη αναστρέψιμων) παραμορφώσεων. Ένας νόμος ροής μπορεί να είναι είτε **συσχετισμένος** είτε **μη-συσχετισμένος**. Σε έναν συσχετισμένο νόμο ροής, η κατεύθυνση των πλαστικών παραμορφώσεων θεωρείται κάθετη στην επιφάνεια διαρροής στον εξαεδρικό χώρο των τάσεων, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση οι πλαστικές παραμορφώσεις ακολουθούν μη-συσχετισμένο νόμο ροής. Τέλος η μεταβολή των παραμέτρων κράτυνσης (h) κατά την διάρκεια πλαστικών φορτίσεων περιγράφεται από τον νόμο κράτυνσης.

2.2 Πλαστικότητα και μη κορεσμένα εδάφη

Σε συνήθη προσομοιώματα για κορεσμένα εδαφικά υλικά, όπως για παράδειγμα το Modified Cam Clay (MCC) (Roscoe & Burland, 1968), ο τανυστής της ενεργού τάσης (σ') αποτελεί την μοναδική εξωτερική μεταβλητή, ενώ οι όποιες παράμετροι κράτυνσης αποτελούν τις εσωτερικές μεταβλητές του προσομοιώματος.

Μία από τις βασικές αρχές της σύγχρονης μηχανικής των μη κορεσμένων εδαφών, είναι η απαίτηση περισσότερων της μίας παραμέτρων για την ακριβή περιγραφή της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Η ιδιαιτερότητα αυτή αντικατοπτρίζεται και στην καταστατική τους προσομοίωση καθώς αυξάνει τον αναγκαίο αριθμό των εξωτερικών μεταβλητών για την περιγραφή της κατάστασης.

Οι **καταστατικές μεταβλητές** (constitutive variables) ενός προσομοιώματος όπως ορίστηκαν από τους Gens et al. (2006) και Gens (2010) αποτελούν αυτομάτως και εξωτερικές μεταβλητές. Έτσι, για παράδειγμα ένα καταστατικό προσομοίωμα το οποίο βασίζεται στην τάση του Bishop (σ) και στην μύζηση (s) έχει δύο εξωτερικές μεταβλητές. Εάν επιπρόσθετα το πλαίσιο συμπεριστασίας που χρησιμοποιείται βασίζεται και στον βαθμό κορεσμού (S_r) οι εξωτερικές μεταβλητές αυξάνονται σε τρεις. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρότι ο βαθμός κορεσμού αποτελεί εξωτερική μεταβλητή για το μηχανικό καταστατικό προσομοίωμα, δεν είναι ανεξάρτητη μεταβλητή καθώς προκύπτει από την μύζηση και την καμπύλη συγκράτησης ύδατος (Τσιαμπούση 2019). Επισημαίνεται ότι σε υδρομηχανικά καταστατικά προσομοιώματα, ο βαθμός κορεσμού μπορεί να αποτελεί εσωτερική μεταβλητή.

Η ύπαρξη επιπρόσθετων εξωτερικών μεταβλητών αυξάνει την πολυπλοκότητα των καταστατικών εξισώσεων. Για παράδειγμα κάνει πιο σύνθετη την διάκριση μεταξύ πλαστικών, ελαστικών και ουδετέρων φορτίσεων και μεταβάλλει τον ορισμό του βαθμωτού μεγέθους λ που περιγράφει την επαύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων και των παραμέτρων κράτυνσης. Επιπρόσθετα, πλέον του κλασσικού ελαστοπλαστικού τανυστή στιβαρότητας (Jacobian), εισάγει πρόσθετους πλαστικούς τανυστές στιβαρότητας οι οποίοι συνδέουν την μεταβολή της τάσης με την μεταβολή της μύζησης ή/και τον βαθμό κορεσμού. Η παράθεση της ακριβούς μορφής των διαφόρων εξισώσεων αφενός ξεφεύγει σε πολυπλοκότητα από το σκοπό του παρόντος άρθρου, αφετέρου εξαρτάται σημαντικά από τις καταστατικές παραμέτρους του κάθε προσομοιώματος και έτσι δεν παρουσιάζεται σε λεπτομέρεια στο παρόν άρθρο. Για εμβάθυνση μπορεί κανείς να απευθυνθεί στο Sitarenios (2016).

3. Καταστατικά προσομοιώματα βασισμένα στην ανηγμένη ολική τάση (net stress)

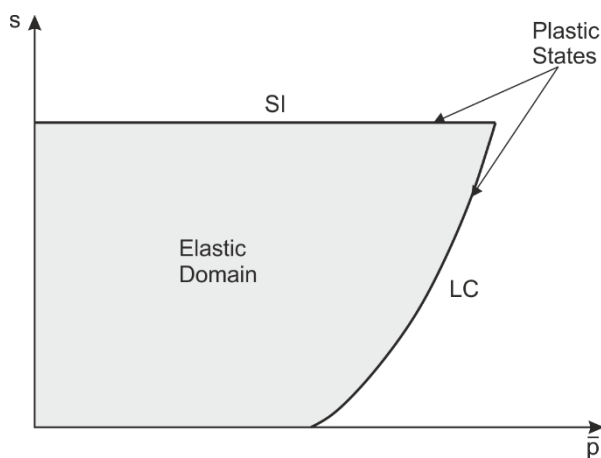
Η παρούσα ενότητα συνοψίζει τα κύρια χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων τα οποία χρησιμοποιούν την **ανηγμένη ολική τάση (net stress)** ως την πρώτη καταστατική μεταβλητή. Για συντομία, στις επόμενες παραγράφους ο όρος ανηγμένη τάση θα χρησιμοποιείται απλουστευτικά. Η **ανηγμένη τάση** ($\bar{\sigma}$) αντιστοιχεί στην περίσσεια της ολικής τάσης (σ) ως προς την πίεση της αέριας φάσης (u_a):

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_a \quad (1)$$

3.1 Το Βασικό Καταστατικό Προσομοίωμα της Βαρκελώνης (Barcelona Basic Model)

Οι Alonso et al. (1987) πρότειναν ένα πλαίσιο συμπεριφοράς για μη κορεσμένα εδάφη το οποίο αργότερα μετεξελίχθηκε από τους Alonso et al. (1990) στο πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδάφη, το **Barcelona Basic Model (BBM)**. Το BBM βασίζεται στις αρχές της Εδαφομηχανικής της Κρίσιμης Κατάστασης (Critical State Soil Mechanics) και επεκτείνει το MCC για καταστάσεις μερικού κορεσμού.

Χρησιμοποιεί την ανηγμένη τάση και την μύζηση ως την πρώτη και την δεύτερη καταστατική μεταβλητή αντίστοιχα. Το BBM εισάγει δύο νέες καταστατικές επιφάνειες στο επίπεδο της μέσης ανηγμένης τάσης ($\bar{p}$) και της μύζησης (s) οι οποίες ορίζουν την ελαστική περιοχή. Πρόκειται για την επιφάνεια αύξησης της μύζησης (Suction Increase, SI) και την επιφάνεια φόρτισης – κατάρρευσης (Loading–Collapse, LC), όπως φαίνονται στο Σχ. 1. Η εισαγωγή της επιφάνειας φόρτισης – κατάρρευσης αποτελεί την πιο καθοριστική συνεισφορά του BBM στην προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών.



Σχ. 1. Η ελαστική περιοχή του BBM στο επίπεδο ανηγμένης ολικής τάσης ($\bar{p}$) – μύζησης (s).

Fig. 1. BBM elastic region on the net stress ($\bar{p}$) – suction (s) plane.

Και οι δύο ανωτέρω καταστατικές επιφάνειες βασίζονται στο πλαίσιο συμπεριστατότητας το οποίο προτείνει το BBM για την περιγραφή της ογκομετρικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών (βλέπε Σχ. 2). Η τιμή της μύζησης διαρροής (s_0) αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή της μύζησης που έχει ασκηθεί στην ιστορία φόρτισης του εξεταζόμενου εδάφους. Ξήρανση σε τιμές μεγαλύτερες της s_0 προκαλεί πλαστικές παραμορφώσεις με την ογκομετρική συμπεριφορά να ακολουθεί την καμπύλη παρθενικής συμπίεσης για μεταβολές της μύζησης με κλίση λ_s . Για τιμές της μύζησης μικρότερες της s_0 η συμπεριφορά είναι ελαστική και περιγράφεται από την ευθεία με κλίση κ_s . Έτσι οι ογκομετρικές παραμορφώσεις για μεταβολές της μύζησης σύμφωνα με το BBM περιγράφονται ως:

$$\text{ελαστική φόρτιση: } \dot{v} = -\kappa_s \frac{\dot{s}}{s - p_{atm}} \quad (2\alpha)$$

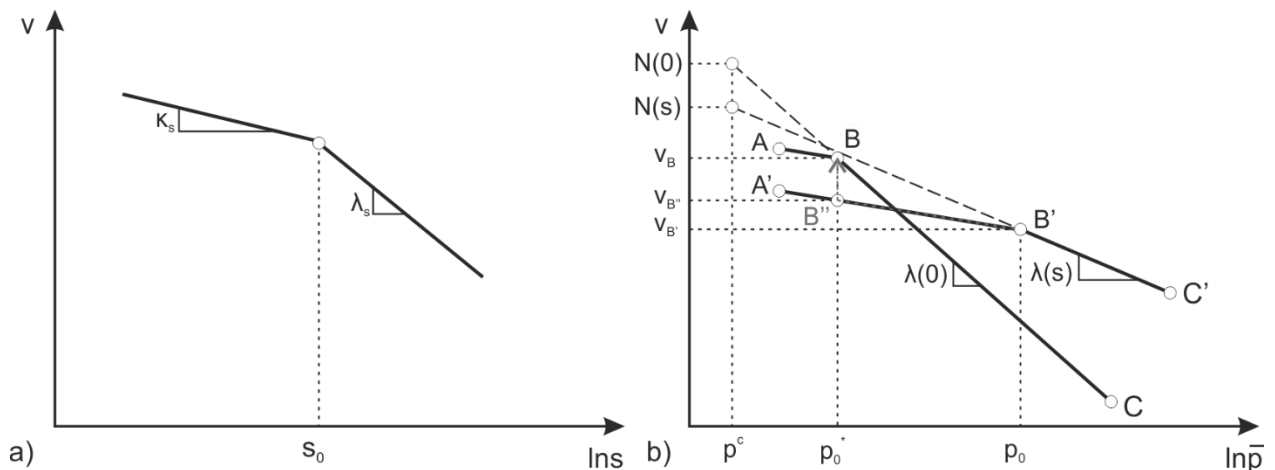
$$\text{πλαστική φόρτιση: } \dot{v} = -\lambda_s \frac{\dot{s}}{s - p_{atm}} \quad (2\beta)$$

Το Σχ. 2b παρουσιάζει το πλαίσιο συμπεριστατότητας του BBM για την περιγραφή της ογκομετρικής συμπεριφοράς στο επίπεδο της μέσης ανηγμένης τάσης. Παρατηρούμε ότι η συμπεριστατότητα του κορεσμένου εδάφους περιγράφεται από έναν κλασσικό διγραμμικό νόμο συμπεριφοράς όμοιο του MCC. Η διαρροή ελέγχεται από την τάση προστερεοποίησης p_0^* , η καμπύλη παρθενικής συμπίεσης έχει κλίση $\lambda(0)$ και οι καμπύλες αποφόρτισης – επαναφόρτισης κλίση κ . Η θέση της γραμμής παρθενικής συμπίεσης ελέγχεται από την τιμή του ειδικού όγκου $N(0)$ υπό μέση τάση p^c .

Με την βοήθεια του Σχ. 2, παρατηρούμε ότι ένα αρχικώς κορεσμένο εδαφικό στοιχείο (Σημείο Α) το οποίο υποβάλλεται σε ξήρανση (αύξηση της μύζησης) υπό σταθερή τάση, θα συρρικνωθεί (μείωση ειδικού όγκου) και θα μετακινηθεί στην θέση Α'. Φόρτιση (αύξηση της μέσης τάσης) υπό σταθερή μύζηση θα προκαλέσει περαιτέρω μείωση του όγκου (λόγω συμπίεσης) με την συμπεριφορά κινούμενη επί μιας νέας καμπύλης αποφόρτισης – επαναφόρτισης έως ότου η επιβαλλόμενη τάση φτάσει το επίπεδο της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης p_0 . Η τάση φαινόμενης προστερεοποίησης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την τάση προστερεοποίησης του κορεσμένου υλικού και αντιπροσωπεύει την ευεργετική συνεισφορά των δυνάμεων μύζησης (πχ. υδατικοί μηνίσκοι, δυνάμεις προσρόφησης) επί της αντοχής και συμπεριστατότητας του υλικού. Περαιτέρω φόρτιση θα οδηγήσει σε πλαστικές παραμορφώσεις επί της καμπύλης παρθενικής συμπίεσης με κλίση $\lambda(s)$, αντιστοιχούσα στο επίπεδο της επιβαλλόμενης μύζησης. Η μείωση της συμπεριστατότητας με την αύξηση της μύζησης περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1 - r)e^{-\beta s} + r] \quad (2)$$

Η Εξ. 2 περιγράφει μια συνεχή και ασυμπτωτική μείωση της συμπεριστατότητας με την αύξηση της μύζησης. Η παράμετρος β , ελέγχει το ρυθμό μείωσης, ενώ η παράμετρος r , την οριακή τιμή της συμπεριστατότητας. Τέλος, η παράμετρος $N(s)$ ελέγχει την θέση των καμπυλών παρθενικής συμπίεσης για διαφορετικά επίπεδα μύζησης μέσω της τάσης αναφοράς p^c .



Σχ. 2. Το πλαίσιο συμπιεστότητας του BBM (Alonso et al. 1990) στα επίπεδα: a) $v - \ln s$ και b) $v - \ln \bar{p}$.

Fig. 2. The BBM (Alonso et al. 1990) compressibility framework in: a) $v - \ln s$ and b) $v - \ln \bar{p}$ plane.

Ακολουθώντας το προτεινόμενο πλαίσιο συμπιεστότητας και με απλούς υπολογισμούς κατά μήκος της τασικής διαδρομής $B' \rightarrow B'' \rightarrow B$ μπορεί να συσχετιστεί η τάση φαινόμενης προστερεοποίησης με την τάση προστερεοποίησης υπό μηδενική μύζηση (κορεσμένο έδαφος):

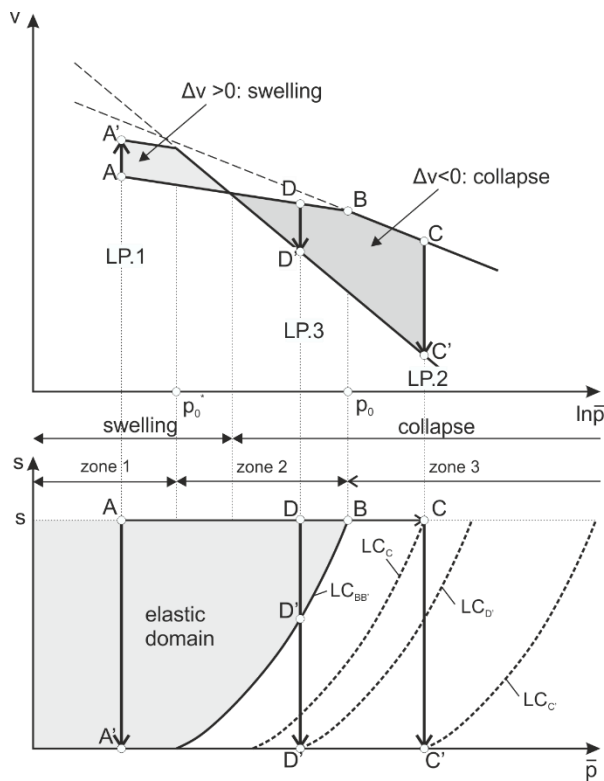
$$\frac{p_0}{p^c} = \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \quad (3)$$

Η Εξ. 3 περιγράφει την αύξηση της τάσης προστερεοποίησης με την μύζηση και επί της ουσίας καθορίζει την μορφή της καμπύλης φόρτισης - κατάρρευσης (βλέπε Σχ. 1). Η καμπύλη φόρτισης - κατάρρευσης και η εισαγωγή της ως φυσική απόρροια του πλαισίου συμπιεστότητας αποτελεί με διαφορά την πιο σημαντική συνεισφορά του BBM στην καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών. Για να γίνει περαιτέρω αντιληπτή η σπουδαιότητα της, ας εξετάσουμε τρεις διαφορετικές τασικές διαδρομές, με την βοήθεια το Σχ. 3.

Τασική διαδρομή 1 (LP.1): Από μία αρχικώς μη κορεσμένη εδαφική κατάσταση, σημείο A, ένα εδαφικό στοιχείο υποβάλλεται σε ύγρανση (μείωση της μύζησης) υπό σταθερή, σχετικά μικρή μέση τάση. Μια τέτοια τασική διαδρομή είναι κατακόρυφη στο επίπεδο $v - \ln \bar{p}$ και η κατάσταση του υλικού κινείται προς το σημείο A', επί της καμπύλης συμπιεστότητας του κορεσμένου υλικού (μηδενική μύζηση). Παρατηρούμε ότι η διαδρομή αυτή είναι ελαστική και συνοδεύεται από αύξηση του όγκου (διόγκωση).

Τασική διαδρομή 2 (LP.2): Εκκινώντας από το ίδιο αρχικό σημείο (Σημείο A) αυτή τη φορά το εδαφικό στοιχείο υποβάλλεται αρχικά σε φόρτιση (αύξηση της μέσης τάσης) υπό σταθερή μύζηση. Αρχικά και μέχρι την τάση φαινόμενης προστερεοποίησης που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο επίπεδο μύζησης, η φόρτιση είναι ελαστική. Περαιτέρω φόρτιση, πέρα της τάσης προστερεοποίησης, τείνει να οδηγήσει την κατάσταση του υλικού εκτός της επιφάνειας φόρτισης - κατάρρευσης και επομένως είναι πλαστική, οδηγώντας αφενός στην συσσώρευση ελαστοπλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων με βάση την αντιστοιχούσα στο επιβαλλόμενο επίπεδο μύζησης συμπιεστότητα $\lambda(s)$, και αφετέρου σε κράτυνση της επιφάνειας φόρτισης - κατάρρευσης καθώς αυτή αποτελεί μέρος της επιφάνειας διαρροής του προσομοιώματος. Ας υποθέσουμε ότι η φόρτιση σταματάει σε ένα δεδομένο επίπεδο μέσης τάσης περιγραφόμενο από την πλαστική κατάσταση του σημείου C και με αναφορά το σημείο αυτό, το εξεταζόμενο εδαφικό στοιχείο υποβάλλεται εκ νέου σε διαβροχή (μείωση της μύζησης). Αντίθετα με την LP1 διαδρομή, παρατηρούμε ότι σε αυτή την περίπτωση η διαβροχή τείνει να οδηγήσει την κατάσταση του υλικού εκτός της επιφάνειας διαρροής φόρτισης - κατάρρευσης και έτσι οδηγεί σε πλαστική φόρτιση. Η πλαστική φόρτιση αυτή οδηγεί σε κράτυνση της επιφάνειας φόρτισης - κατάρρευσης και αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης όπως ακριβώς και η πλαστική φόρτιση υπό σταθερή μύζηση. Και οι δύο φορτίσεις οδηγούν σε μείωση του όγκου και

εξηγούν το πως το BBM δύναται να περιγράψει παραμορφώσεις κατάρρευσης λόγω διαβροχής μέσω της καμπύλης φόρτισης - κατάρρευσης.



Σχ. 3. Το πλαίσιο συμπίεστικότητας του BBM στο επίπεδο $v - \ln \bar{p}$ και η αντιστοιχία με την επιφάνεια φόρτισης - κατάρρευσης στο επίπεδο $\bar{p} - s$.

Fig. 3. The BBM compressibility framework in the $v - \ln \bar{p}$ plane and its correspondence with the LC curve in the $\bar{p} - s$ plane.

Τασιική διαδρομή 3 (LP.3): Γίνεται εύκολα τώρα αντιληπτό ότι εάν εξετάσουμε την περίπτωση της διαβροχής χρησιμοποιώντας ως αρχική κατάσταση ένα σημείο D υπό μία ενδιάμεση μέση τάση όπου η κατάσταση του υλικού είναι ελαστική, η μείωση της μύζησης προκαλεί αρχικά διόγκωση ως απόρροια ελαστικής φόρτισης (μέχρι σημείου D'). Περαιτέρω μείωση της μύζησης όμως προκαλεί κράτυνση της επιφάνειας φόρτισης - κατάρρευσης και αντιστροφή της ογκομετρικής παραμόρφωσης.

Μέσω των προηγούμενων παραδειγμάτων γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα του πλαισίου συμπίεστικότητας του BBM και η σημασία της επιφάνειας διαρροής φόρτισης - κατάρρευσης

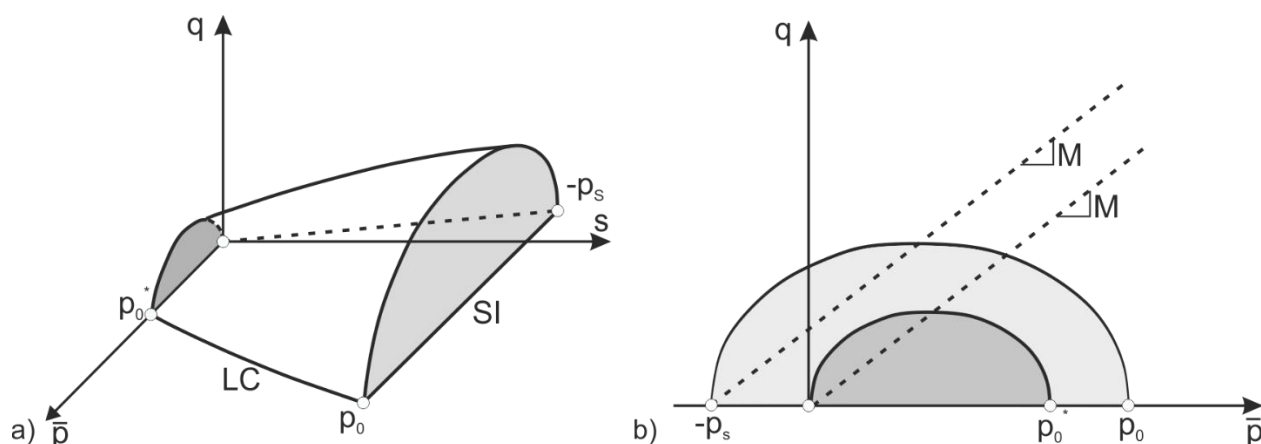
στην ομογενοποιημένη και συστηματική περιγραφή της: α) αύξησης της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης με την μύζηση, β) μείωσης της συμπίεστικότητας με την μύζηση και γ) στην εξάρτηση της ογκομετρικής συμπεριφοράς κατά την διαβροχή από το επίπεδο τάσης κάτω από το οποίο αυτή συμβαίνει.

Για την επέκταση του πλαισίου μηχανικής συμπεριφοράς του BBM στον διεκτροπικό χώρο, οι Alonso et al. (1990) χρησιμοποίησαν την ελλειψοειδή επιφάνεια διαρροής του MCC. Η τελική μορφή της επιφάνειας διαρροής του BBM στον χώρο μέσης ανηγμένης τάσης ($\bar{p}$) - διεκτροπικής τάσης (q) - μύζησης (s) παρουσιάζεται στο Σχ. 4. Παρατηρούμε ότι η δεξιά ακμή της έλλειψης ακολουθεί την διακύμανση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης ευρισκόμενη επί της επιφάνειας φόρτισης - κατάρρευσης.

Για να λάβουν περαιτέρω υπόψη την αύξηση της αντοχής των εδαφών με την αύξηση της μύζησης, παρατηρούμε ότι η αριστερή ακμή της επιφάνειας διαρροής μετατοπίζεται προς τα αρνητικά του άξονα της μέσης ανηγμένης τάσης σηματοδοτώντας την δυνατότητα ενός μη κορεσμένου εδάφους να παραλάβει εφελκυσμό. Για την μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής (p_s) με την μύζηση, το BBM πρότεινε ένα απλό γραμμικό νόμο της μορφής $p_s = k \cdot s$ όπου k παράμετρος του υλικού. Υπολογίζεται εύκολα μαθηματικά ότι ακολουθώντας αυτή την παραδοχή η κρίσιμη κατάσταση του BBM περιγράφεται από μία εξίσωση της μορφής:

$$q = M(\bar{p} + ks) \quad (4)$$

Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι το BBM περιλαμβάνει και μία μορφή υδρομηχανικής σύζευξης καθώς η κίνηση της επιφάνειας αύξησης της μύζησης (SI) συνδέθηκε με την κράτυνση της επιφάνειας φόρτισης - κατάρρευσης. Το προσομοίωμα συνοδευόταν από έναν τροποποιημένο σε σχέση με το MCC, μη συσχετισμένο νόμο ροής για την καλύτερη πρόβλεψη τιμών του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 σε μονοδιάστατη συμπίεση. Τέλος, ελαστικές φορτίσεις (λόγω αύξησης της τάσης) περιγράφονται από την ποροελαστικότητα όπως και στο MCC, ενώ και ο νόμος κράτυνσης είναι ίδιος με του MCC καθώς χρησιμοποιεί την τάση προστερεοποίησης του κορεσμένου εδαφικού υλικού ως παράμετρο κράτυνσης.



Σχ. 4. Η επιφάνεια διαρροής του BBM στο χώρο $\bar{p} - q - s$ και b) προβολές τις επιφάνειας διαρροής για κορεσμένες και μη κορεσμένες εδαφικές καταστάσεις στο επίπεδο $\bar{p} - q$.

Fig. 4. The BBM yield envelope in the $\bar{p} - q - s$ space and; b) projections of the yield envelope for unsaturated and saturated material states on the $\bar{p} - q$ plane.

Η μεγάλη επιτυχία του BBM βασίζεται, πέρα από την ενοποιημένη περιγραφή της ογκομετρικής περιγραφής των μη κορεσμένων εδαφών μέσω του πρωτοποριακού πλαισίου συμπεστότητάς του, και στο γεγονός ότι βασίστηκε στο εδραιωμένο πλαίσιο της εδαφομηχανικής της κρίσιμης κατάστασης επεκτείνοντας το MCC για καταστάσεις μερικού κορεσμού. Με τον τρόπο αυτό εδραίωσε ακόμη περαιτέρω την άποψη ότι τα μη κορεσμένα εδάφη αποτελούν απλά μία «κατάσταση» στην οποία μπορεί να βρεθεί οποιοδήποτε εδαφικό στοιχείο αν συντρέχουν οι κατάλληλες υδραυλικές - περιβαλλοντικές συνθήκες και όχι ιδιαίτερα ή προβληματικά εδάφη.

Όντας το πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδάφη, το BBM επηρέασε συντριπτικά την μετέπειτα έρευνα. Οποιοδήποτε καταστατικό προσομοίωμα της «μεταBBM» εποχής μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά τροποποίηση ή επέκταση του BBM. Οι περισσότεροι ερευνητές επικεντρώθηκαν στην άρση των βασικών αδυναμιών του BBM που είναι η πρόβλεψη: α) συνεχούς και γραμμικής αύξησης της αντοχής με την μύζηση, β) συνεχούς μείωσης του όγκου με την ξήρανση και γ) συνεχούς αύξησης των παραμορφώσεων κατάρρευσης λόγω διαβροχής με την αύξηση της μέσης τάσης. Στην συνέχεια σταχυολογούνται οι σημαντικότερες προτάσεις καταστατικών προσομοιωμάτων που τροποποιούν ή επεκτείνουν το BBM, χρησιμοποιώντας την ανηγμένη ολική τάση ως την πρώτη τους καταστατική παράμετρο.

3.2 Το προσομοίωμα των Josa et al. (1992)

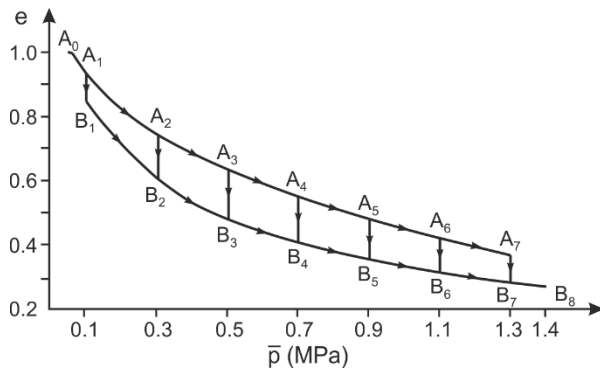
Οι Josa et al. (1992) βελτίωσαν τις προβλέψεις κατάρρευσης λόγω διαβροχής του BBM. Αναγνώρισαν ότι εργαστηριακά δεδομένα συνιστούν ένα μέγιστο στις παραμορφώσεις κατάρρευσης λόγω διαβροχής για ενδιάμεσες τιμές ανηγμένης τάσης. Πρότειναν μία τροποποιημένη εξίσωση για την περιγραφή της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης με την μύζηση η οποία επιπλέον λαμβάνει υπόψη το επίπεδο μέσης τάσης:

$$p_0 = (p_0 - p^c) + p^c [e^{(1-m)-as} + m] \quad (5)$$

όπου η παράμετρος a ελέγχει το σχήμα της καμπύλης φόρτισης - κατάρρευσης και η παράμετρος m το επίπεδο τάσης για το οποίο το μέγιστο κατάρρευσης συμβαίνει. Η παράμετρος m υπολογίζεται με βάση την εξίσωση:

$$m = +1 \frac{\zeta_x - 1}{\zeta_x} (p_0^* - p^c) e^{\frac{\zeta_x - p_0^*}{\zeta_x - p^c}} \quad (6)$$

όπου ζ_x , ζ_y σχετίζονται με τη μέγιστη παραμόρφωση κατά τη διαβροχή. Η προκύπτουσα καμπύλη φόρτισης - κατάρρευσης παραμένει κυρτή και περιγράφει συνεχόμενη αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης προς μία ασυμπτωτική τιμή. Το Σχ. 5 παρουσιάζει προβλέψεις του προσομοιώματος των Josa et.al. (1992) σε κατάρρευση λόγω διαβροχής όπου παρατηρούμε μέγιστο παραμορφώσεων (A3-B3) για ενδιάμεσο επίπεδο μέσης τάσης.



Σχ.5. Προβλέψεις ογκομετρικής παραμόρφωσης με τη διαβροχή σύμφωνα με το καταστατικό προσομοίωμα των Josa et al. (1992).

Fig. 5. Wetting induced volumetric predictions according to the Josa et al. (1992) constitutive model.

3.3 Τα προσομοιώματα των Wheeler & Sivakumar (1995) και Wheeler (1996)

Οι Wheeler & Sivakumar (1995) βασιζόμενοι σε εργαστηριακά αποτελέσματα επί δοκιμών συμπυκνωμένου Καολίνη αμφισβήτησαν την ισχύ της Εξ. 2 του BBM. Υποστήριξαν ότι η αύξηση της μύζησης δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένο πως μειώνει την συμπίεστικότητα των μη κορεσμένων εδαφών. Για το λόγο αυτό πρότειναν ότι η κλίση των γραμμών παρθενικής συμπίεσης $\lambda(s)$ θα πρέπει να μπορεί να επιλεγεί ελεύθερα, ανάλογα με τα εκάστοτε εξεταζόμενα εργαστηριακά αποτελέσματα. Ταυτόχρονα, πρότειναν κατάλληλες τροποποιήσεις στο πλαίσιο συμπίεστικότητας του BBM ώστε να εξακολουθεί να προβλέπει αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης με την μύζηση. Η πρότασή τους επιτρέπει την προσομοίωση μιας συνεχούς μείωσης των παραμορφώσεων κατάρρευσης λόγω υδρεμποτισμού με την αύξηση της τάσης.

Επιπρόσθετα, ακολουθώντας τις προτάσεις των Toll (1990) και Wheeler (1991), υποστήριξαν ότι τόσο η κλίση όσο και θέση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στα επίπεδα $\bar{p} - q$ και $v - \ln \bar{p}$ θα πρέπει να εξαρτώνται από την μύζηση προτείνοντας:

$$q = M(s) \cdot p + \mu(s) \quad (7\alpha)$$

$$v = \Gamma(s) - \psi(s) \ln \frac{p}{p_{atm}} \quad (7\beta)$$

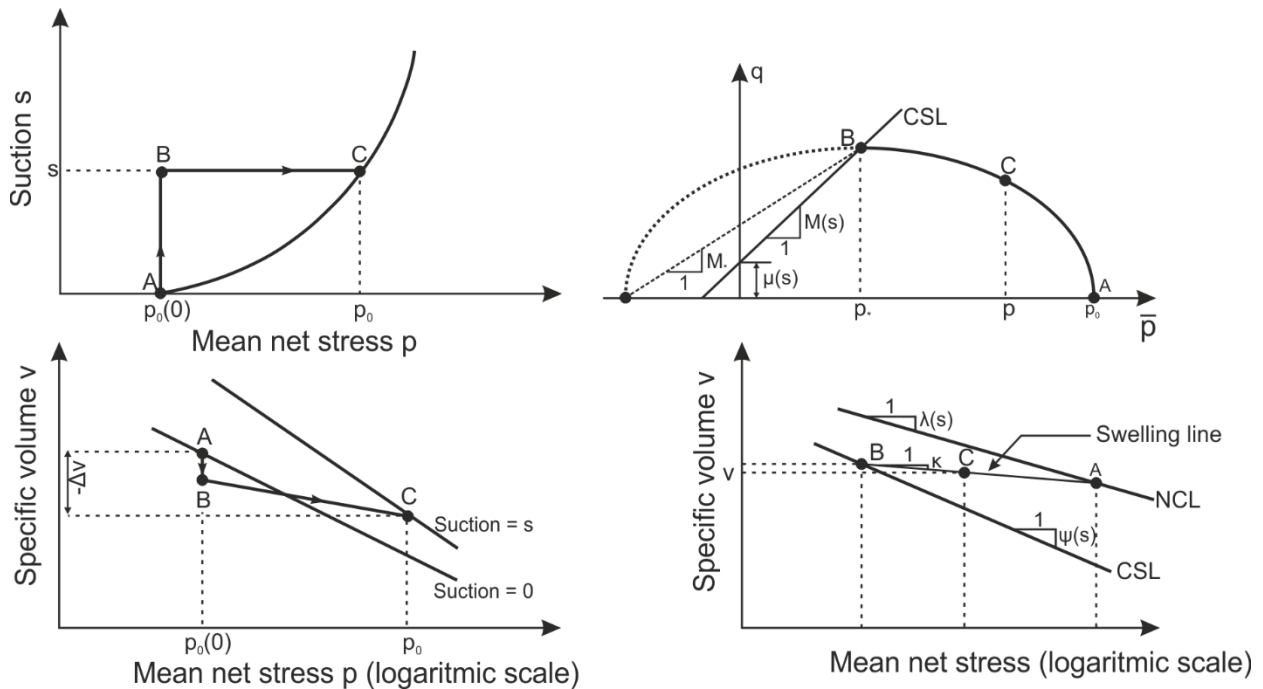
Το Σχ. 6 συνοψίζει τις βασικές τροποποιήσεις που πρότειναν οι Wheeler & Sivakumar (1995) στο πλαίσιο του BBM.

Ο Wheeler (1996) εξέλιξε περαιτέρω το προσομοίωμα των Wheeler & Sivakumar (1995) ενσωματώνοντας υδρομηχανικά χαρακτηριστικά. Χρησιμοποίησε τον ειδικό όγκο νερού $v_w = 1 + S_r \cdot e$ για να περιγράψει την μεταβολή του νερού εντός των πόρων ενός εδαφικού στοιχείου κατά τη διάρκεια φόρτισης και αναγνώρισε την σημασία και την επιρροή στην μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών της δομής και ιδιαίτερα του μικροπορώδους και μακροπορώδους που αναπτύσσουν συμπυκνωμένα εδάφη.

Επιπρόσθετα, οι Sivakumar & Doran (2000) ενοποίησαν τις καμπύλες φόρτισης - κατάρρευσης και αύξησης της μύζησης (SI) στο επίπεδο $\bar{p} - s$ χρησιμοποιώντας μία συνεχή και συνεχώς παραγωγίσιμη καμπύλη.

3.4 Τα υδρομηχανικά προσομοιώματα των Vaunat et al. (2000) και Buisson & Wheeler (2000)

Οι Vaunat et.al. (2000) παρουσίασαν το πρώτο ολοκληρωμένο υδρομηχανικό καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδάφη. Τα υδρομηχανικά προσομοιώματα μεταχειρίζονται την καμπύλη συγκράτησης ύδατος ως εσωτερικό καταστατικό νόμο, περιγράφοντας ενιαία την συμπεριφορά στον χώρο τάσης - μύζησης - βαθμού κορεσμού (ή άλλης κατάλληλης ποσότητας σχετιζόμενης με την περιεκτικότητα των πόρων του εδάφους σε νερό). Σύζευξαν το πλαίσιο μηχανικής συμπεριφοράς του BBM με ένα υστερητικό και εξαρτώμενο από τον λόγο κενών προσομοίωμα συγκράτησης ύδατος με σκοπό να προσομοιώσουν πλαστικές παραμορφώσεις εντός κύκλων ξήρανσης-ύγρανσης. Για το σκοπό αυτό οι κύριοι κλάδοι ξήρανσης και ύγρανσης της καμπύλης συγκράτησης ύδατος θεωρούνται επιφάνειες διαρροής ενώ οι καμπύλες επανύγρανσης - επαναξήρανσης αντιπροσωπεύουν την συμπεριφορά εντός της ελαστικής περιοχής. Το προσομοίωμα συγκράτησης ύδατος που πρότειναν λαμβάνει υπόψιν την επιρροή του βαθμού κορεσμού του μικροπορώδους και μακροπορώδους. Επιπρόσθετα ήταν μεταξύ των πρώτων που επισήμαναν ότι η μηχανική συμπεριφορά συνήθων μη διογκώσιμων εδαφικών υλικών θα πρέπει να σχετίζεται με τον βαθμό κορεσμού του μακροπορώδους και όχι με τον συνολικό βαθμό κορεσμού, καθώς οι συνήθεις φορτίσεις επηρεάζουν μόνο το μακροπορώδες.



Σχ. 6. Η επιφάνεια διαρροής (πάνω) και το πλαίσιο συμπιεστότητας (κάτω) του καταστατικού προσομοιώματος των Wheeler & Sivakumar (1995).

Fig. 6. The Yield envelope (above) and the compressibility framework (below) of the Wheeler & Sivakumar (1995) constitutive model.

Ταυτόχρονα, οι Buisson και Wheeler (2000) πρότειναν ένα γενικότερο πλαίσιο υδρομηχανικής σύζευξης το οποίο μπορεί να ενσωματωθεί σε οποιοδήποτε μηχανικό προσομοίωμα χρησιμοποιεί την μέση ανηγμένη τάση ($\bar{p}$) και την μύζηση (s) ως την πρώτη και την δεύτερη καταστατική μεταβλητή, αντίστοιχα. Το προτεινόμενο πλαίσιο είναι παρόμοιο με αυτό των Vaunat et.al. (2000) και μπορεί να προβλέψει μη αναστρέψιμες (πλαστικές) παραμορφώσεις εντός κύκλων ξήρανσης - ύγρυνσης.

Η προταθείσα ισοδύναμη παράμετρος τάσης εκτός της ενοποιημένης περιγραφής της επιρροής της τάσης και της μύζησης στον χώρο $\bar{p} - q - s$, επιπρόσθετα ενοποιεί και τις επιφάνειες αύξησης της μύζησης και φόρτισης - κατάρρευσης σε μία συνεχή και συνεχώς παραγωγίσιμη υπερεπιφάνεια. Η προτεινόμενη ποσότητα τάσης είναι μία από τις πιο πετυχημένες απόπειρες εξαγωγής μίας ενεργού παραμέτρου τάσης για μη κορεσμένα εδάφη. Παρόλα αυτά έχει το μειονέκτημα ότι δεν επαληθεύει την ενεργό τάση του Terzaghi σε καταστάσεις πλήρους κορεσμού.

3.5 Το προσομοίωμα των Tang & Graham (2002)

Οι Tang και Graham (2002) παρουσίασαν μία από τις πιο ολοκληρωμένες απόπειρες ενοποίησης της συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών σε μία παράμετρο τάσης, προτείνοντας την ακόλουθη ισοδύναμη ποσότητα τάσης:

$$p_{eq} = \sqrt{\bar{p}^2 + s^2} \quad (8)$$

3.6 Το προσομοίωμα των Rampino et al. (2000)

Οι Rampino et al. (2000) διερεύνησαν εργαστηριακά την μηχανική συμπεριφορά μιας πλαστικής ιλύδους άμμου. Υποστήριξαν ότι το πλαίσιο συμπιεστότητας του BBM μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά και την συμπεριφορά αμμωδών εδαφών. Επειδή το υλικό τους παρουσίαζε χαρακτηριστικά συμπεριφοράς που τυπικά απαντώνται σε άμμους (πχ. εξάρτηση της συμπεριφοράς από την σχετική πυκνότητα)

χρησιμοποίησαν το προσομοίωμα Nor-Sand (Jefferies, 1993) ως προσομοίωμα βάσης, το επέκτειναν για καταστάσεις μερικού κορεσμού χρησιμοποιώντας το πλαίσιο συμπίεστικότητας του BBM και επιπρόσθετα ενσωμάτωσαν την πρόταση των Wheeler & Sivakumar (1995) για την περιγραφή της γραμμής κρίσιμης κατάστασης.

3.7 Το προσομοίωμα των Bardanis και Kanvadas (2008)

Οι Bardanis & Kanvadas (2008) τροποποίησαν το προσομοίωμα BBM με σκοπό την βελτιωμένη πρόβλεψη της αύξησης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση και την πρόβλεψη σταθεροποίησης του λόγου κενών με την ξήρανση. Σε ότι αφορά την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής, πρότειναν την αντικατάσταση της σταθεράς k με μία μεταβλητή με βάση την εξίσωση:

$$k = \zeta_k \cdot S_r^{n_k} \quad (9)$$

Παρατηρούμε ότι η προτεινόμενη εξίσωση ενσωματώνει τον βαθμό κορεσμού για να περιγράψει μη γραμμική αύξηση της διατμητικής αντοχής με τον μερικό κορεσμό, καθώς και δύο σταθερές (ζ_k , n_k) που ελέγχουν την μέγιστη διατμητική αντοχή και τον ρυθμό μεταβολής της με τον μερικό κορεσμό.

Για την πρόβλεψη σταθεροποίησης του λόγου κενών με την ξήρανση τροποποίησαν το πλαίσιο συμπίεστικότητας του BBM στο επίπεδο $v - \ln s$ εισάγοντας έναν τρίτο κλάδο που προβλέπει σταθεροποίηση του λόγου κενών περί παραμένουσας τιμής e_r , ενώ βασιζόμενοι σε εργαστηριακά δεδομένα πρότειναν εμπειρικές συσχετίσεις του παραμένουστος λόγου κενού e_r με τα φυσικά χαρακτηριστικά τυπικών εδαφών (Bardanis & Kanvadas 2008, Μπαρδάνης 2016). Επιπρόσθετα, ο Μπαρδάνης (2016) βασιζόμενος σε εργαστηριακές μετρήσεις της αντοχής μη κορεσμένων εδαφών βαθμονόμησε την Εξ. 9, προτείνοντας χαρακτηριστικά εύρη τιμών για τις παραμέτρους ζ_k , n_k .

3.8 Το προσομοίωμα SFG των Sheng et al. (2008)

Οι Sheng et al. (2008) παρουσίασαν μία από τις πλέον ολοκληρωμένες προτάσεις καταστατικής προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών χρησιμοποιώντας την ανηγμένη τάση και την μύζηση ως

καταστατικές παραμέτρους. Ξεκίνησαν από την μελέτη της συμπεριφορά ενός αναζυμωμένου σε πολύ εδάφους το οποίο υποβάλλεται σε σταδιακή ξήρανση. Παρατήρησαν και επισήμαναν ότι μέχρι την επίτευξη της μύζησης αποκορεσμού (s_0), το έδαφος παραμένει κορεσμένο και έτσι η ογκομετρική του παραμόρφωση του θα πρέπει να ελέγχεται από την ενεργό τάση του Terzaghi, όμοια με οποιοδήποτε άλλο κορεσμένο έδαφος. Πρότειναν ότι μία οποιαδήποτε μεταβολή της ανηγμένης τάσης ($\bar{p}$) ή της μύζησης ($\dot{s}$) από αρχική κατάσταση ($\bar{p}, s$) προκαλεί ογκομετρική παραμόρφωση που μπορεί να υπολογιστεί ως:

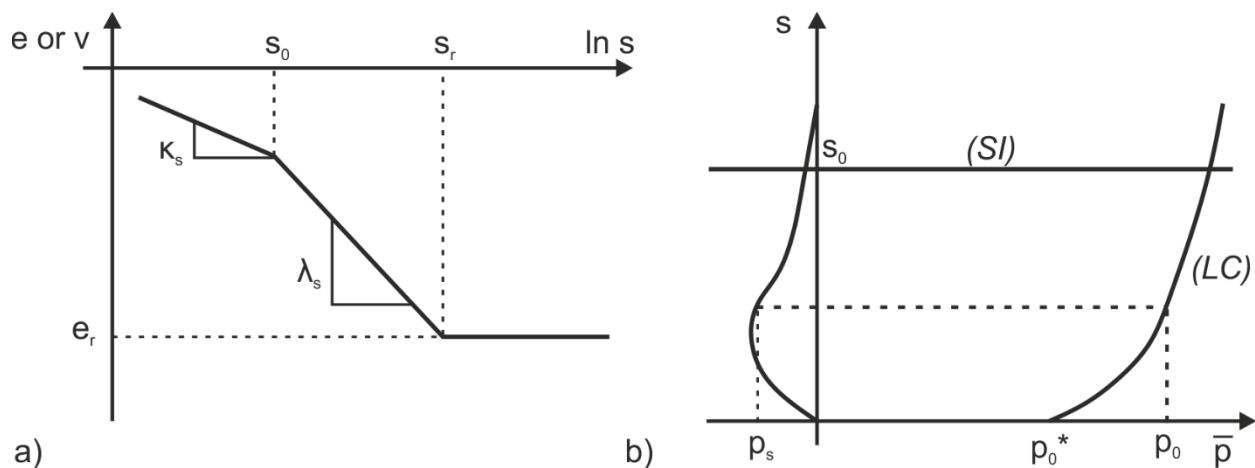
$$\dot{\epsilon}_v = \lambda_{vp} \frac{\dot{p}}{p+s} + \lambda_{vs} \frac{\dot{s}}{p+s} \quad (10\alpha)$$

ενώ η παράμετρος συμπίεστικότητας λ_{vp} υπολογίζεται ως:

$$\lambda_{vp} = \begin{cases} \lambda_{vp} & \text{for } s \leq s_0 \\ \lambda_{vp} \frac{s_0+1}{s+1} & \text{for } s > s_0 \end{cases} \quad (10\beta)$$

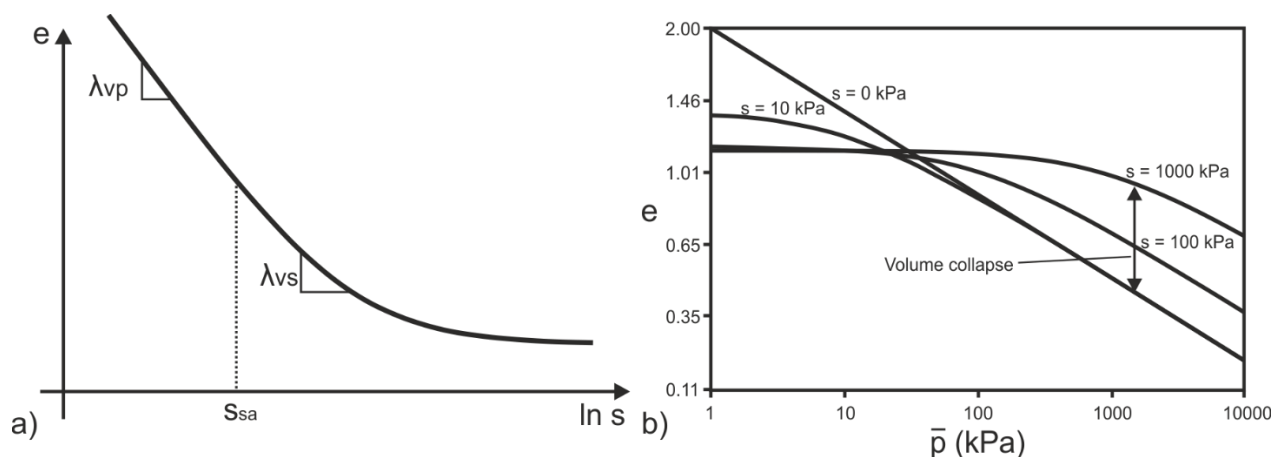
Οι σχέσεις (10α) και (10β) εξασφαλίζουν μία ομαλή μετάβαση από συνθήκες πλήρους σε συνθήκες μερικού κορεσμού και επιπρόσθετα περιγράφουν σταδιακή μείωση της παραμορφωσιμότητας με την αύξηση της μύζησης. Δύναται έτσι να περιγράψει σταθεροποίηση του λόγου κενών με την μύζηση. Σε ότι αφορά την παραμορφωσιμότητα με την αύξηση της τάσης, η Εξ. 10β εξασφαλίζει ότι για μύζηση μικρότερη της μύζησης αποκορεσμού (s_0), η συμπίεστικότητα του εδάφους είναι αυτή του κορεσμένου υλικού, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της μύζησης η συμπίεστικότητα μειώνεται με την αύξηση της μύζησης και αυξάνεται με την αύξηση της ανηγμένης τάσης. Το Σχ. 8 παρουσιάζει την εξέλιξη της παραμέτρου συμπίεστικότητας λ_{vp} καθώς και ενδεικτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων με το προσομοίωμα SFG.

Το προσομοίωμα SFG περιλαμβάνει και υδρομηχανική σύζευξη μέσω ενός υστερητικού προσομοιώματος συγκράτησης ύδατος παρόμοιου με αυτό των Wheeler et al. (2003). Οι Sheng & Zhou (2011) βελτίωσαν το υδραυλικό κομμάτι του προσομοιώματος SFG προτείνοντας ένα βελτιωμένο προσομοίωμα συγκράτησης ύδατος, το οποίο λαμβάνει υπόψη ότι οι συνήθως μετρούμενες καμπύλες συγκράτησης ύδατος στο εργαστήριο αντιστοιχούν σε συνθήκες σταθερής τάσης και όχι σταθερού λόγω κενών όπως πολύ συχνά θεωρούνται για απλουστευτικούς λόγους.



Σχ. 7. a) Το τροποποιημένο πλαίσιο συμπεριστατότητας στο επίπεδο $v - \ln s$ (a) και b) η τροποποιημένη επιφάνεια διαρροής στο επίπεδο $\bar{p} - s$. Πρόταση των Bardanis & Kavvas (2008).

Fig. 7. a) The Bardanis & Kavvas (2008) proposed modified volumetric framework on the $v - \ln s$ plane and; b) their modified yield envelope in the $\bar{p} - s$ plane.



Σχ. 8. Προβλέψεις του προσομοιώματος SFG (Sheng et al. 2008) στα επίπεδα a) $e - \ln s$ και b) $e - \ln p$.

Fig. 8. Characteristic predictions of the SFG (Sheng et al. 2008) model; in a) $e - \ln s$ and b) $e - \ln p$.

3.9 Τα προσομοιώματα των Georgiadis et al. (2003) και Tsiamprousi et al. (2013b)

Οι Georgiadis et al. (2003) παρουσίασαν την πλέον ολοκληρωμένη απόπειρα τροποποίησης και άρσης των αδυναμιών του καταστατικού προσομοιώματος BBM. Το καταστατικό προσομοίωμα των Georgiadis et al. (2003) ενσωματώθηκε στο ICFEP (Imperial College Finite Element Program) εισάγοντας και χρησιμοποιώντας μία ποσότητα ισοδύναμης μύζησης (s_{eq}) ως δεύτερη καταστατική παράμετρο. Η ισοδύναμη μύζηση ορίζεται ως η

μύζηση πλέον της μύζησης αποκορεσμού (s_0) και υπολογίζεται ως:

$$s_{eq} = \begin{cases} 0 & \text{for } s \leq s_0 \\ s - s_0 & \text{for } s > s_0 \end{cases} \quad (11)$$

Η ισοδύναμη μύζηση χρησιμοποιείται συστηματικά στις εξισώσεις του προτεινόμενου προσομοιώματος και εξασφαλίζει ότι για $s \leq s_0$ η περιγραφόμενη συμπεριφορά δεν αποκλίνει από αυτή ενός κορεσμένου εδάφους.

Για την πρόβλεψη ενός μέγιστου στις παραμορφώσεις κατάρρευσης κατά την διαβροχή προτάθηκαν δύο διαφορετικές τροποποιήσεις του πλαισίου συμπεριστατότητας του BBM. Η πρώτη εναλλακτική αφορά στη

τροποποίηση της εξίσωσης της επιφάνειας διαρροής φόρτισης – κατάρρευσης με βάση την εξίσωση:

$$P_0 = P_0^* \cdot a_c \frac{\lambda(0) - \lambda(s_{eq})}{\lambda(s_{eq}) - k} \quad (12)$$

Η δεύτερη εναλλακτική πρόταση βασίζεται στην τροποποίηση των καμπυλών παρθενικής συμπίεσης για καταστάσεις μερικού κορεσμού με βάση την σχέση:

$$v = N(s_{eq}) - \lambda(0) - \lambda_m \left(\frac{p_0}{p^c} \right)^{-b} (1 - b \cdot \ln \frac{p_0}{p^c}) \quad (13)$$

Παρόμοια με την πρόταση των Josa et al. (1992), τόσο η παράμετρος a_c όσο και η παράμετρος b ελέγχουν την εξέλιξη των παραμορφώσεων κατάρρευσης λόγω διαβροχής και μπορούν να βαθμονομηθούν κατάλληλα ώστε να προβλέπουν μέγιστο κατάρρευσης για δεδομένο επίπεδο τάσης.

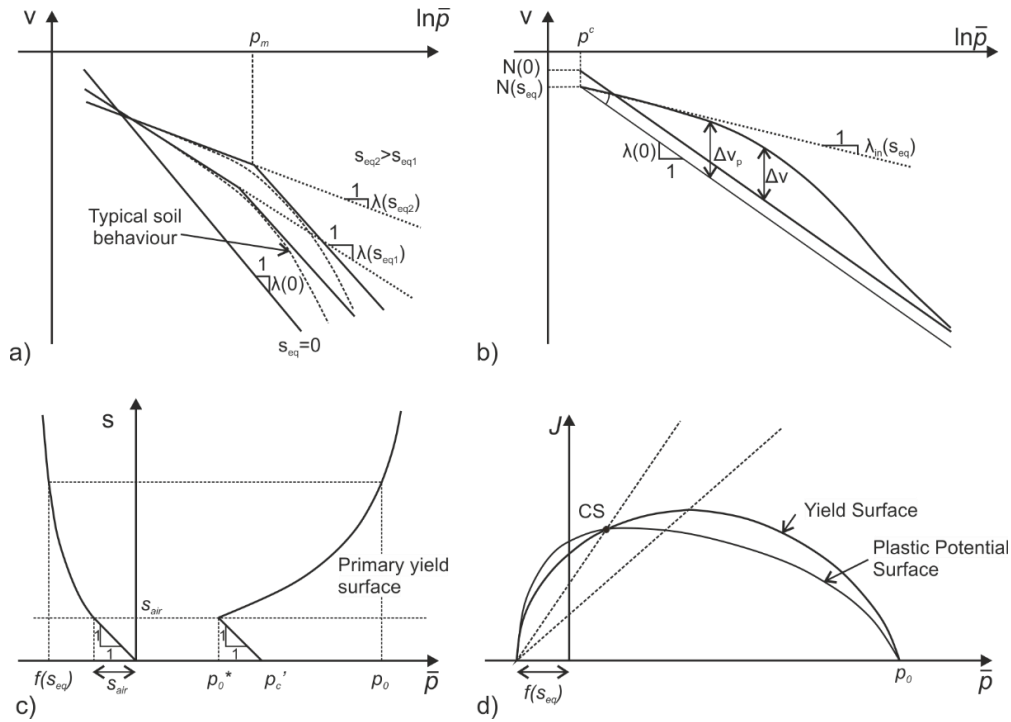
Για την συμπεριφορά στο διεκτροπικό επίπεδο χρησιμοποίησαν την επιφάνεια διαρροής των Lagioia et al. (1996). Η επέκταση για καταστάσεις μερικού κορεσμού γίνεται μέσω της ισοδύναμης μύζησης (s_{eq}), η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης θεωρείται ανεξάρτητη της μύζησης, ενώ για την περιγραφή της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της

μύζησης προτάθηκε μία μη γραμμική σχέση (Εξ. 14) η οποία περιλαμβάνει τον βαθμό κορεσμού και έτσι απαιτείται σύζευξη της συμπεριφοράς με κατάλληλο προσομοίωμα συγκράτησης ύδατος.

$$f(s_{eq}) = S_r \cdot s_{eq} + s_0 \quad (14)$$

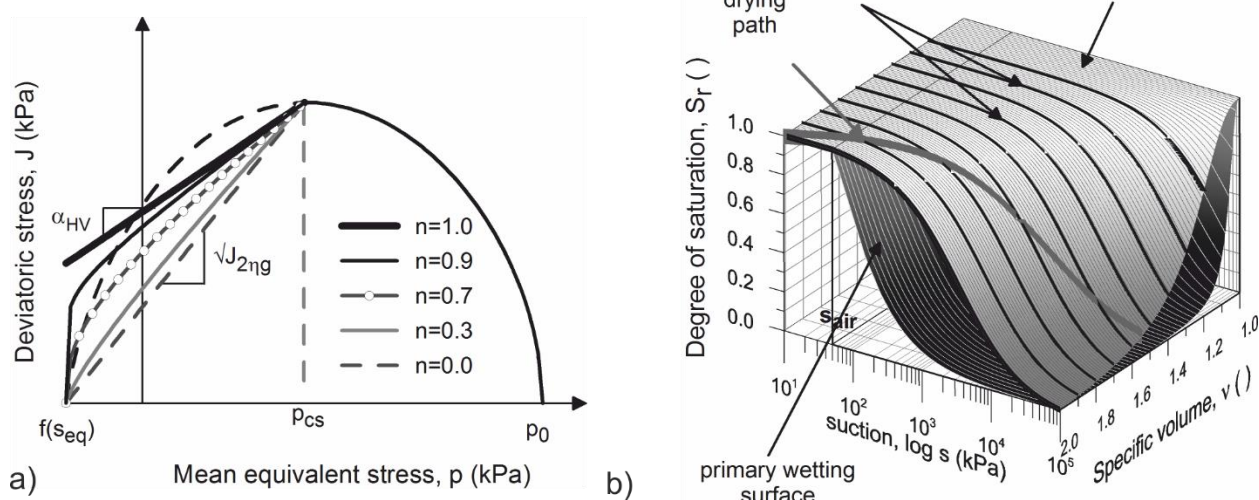
Το Σχ. 9 παρουσιάζει χαρακτηριστικές επιφάνειες του προσομοιώματος των Georgiadis et al. (2003)

Οι Tsiamprousi et al. (2013a) επέκτειναν και βελτίωσαν το καταστατικό των Georgiadis et al. (2003) δίνοντας έμφαση στις προβλέψεις της μηχανικής συμπεριφοράς για καταστάσεις έντονης υπερστερεοποίησης αριστερά ή «ξηρά» της κρίσιμης κατάστασης. Ενσωμάτωσαν μία νέας μορφής καμπύλη επιφάνεια Hvorslev όπως φαίνεται στο Σχ. 10. Επιπρόσθετα οι Tsiamprousi et al. (2013b) πρότειναν και ενσωμάτωσαν στο ICFEP ένα προηγμένο, υστερητικό και εξαρτώμενο από τον λόγο κενών προσομοίωμα περιγραφής της καμπύλης συγκράτησης ύδατος (βλέπε Σχ. 10), με σκοπό την βελτίωση των υδρομηχανικών προβλέψεων του καταστατικού προσομοιώματος.



Σχ. 9. Το πλαίσιο συμπίεστικότητας (πάνω) και η επιφάνεια διαρροής (κάτω) του καταστατικού προσομοιώματος των Georgiadis et al. (2003).

Fig. 9. The compressibility framework (above) and the yield envelope (below) of the Georgiadis et al. (2003) model.



Σχ. 10 a) Η κυρτή επιφάνεια αντοχής (τύπου Hvorslev) των Tsiamprousi et al. (2013a) και b) το υστερητικό και εξαρτώμενο από τον λόγο κενών προσομοίωμα των Tsiamprousi et al. (2013b).

Fig. 10. a) The Tsiamprousi et al. (2013a) curved Hvorslev state surface and; b) the Tsiamprousi et al. (2013b) hysteretic, void ratio dependant water retention model. (courtesy of Dr. Tsiamprousi).

3.10 Προσομοιώματα εδαφικής ανισοτροπίας με χρήση της ανηγμένης τάσης

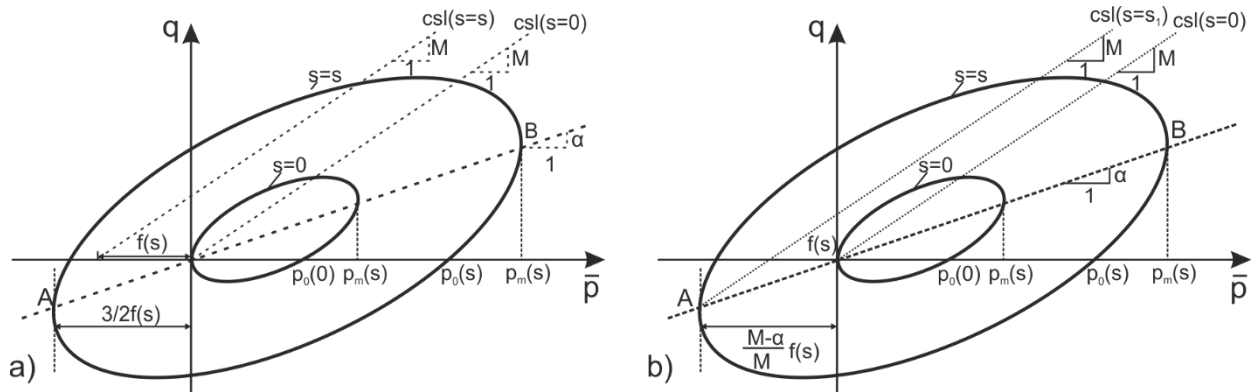
Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες υποενότητες είναι ότι χρησιμοποιούν ως προσομοιώματα βάσης, ιστροπικά (συμμετρική επιφάνεια διαρροής ως προς τον άξονα της μέσης ανηγμένης τάσης) καταστατικά προσομοιώματα όπως το MCC. Οι Cui & Delage (1996) παρουσίασαν μία αναλυτική εργαστηριακή διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς της Ιλύος του Josigny (Josigny Silt) υπό συνθήκες μερικού κορεσμού η οποία περιελάμβανε δοκιμές τόσο σε ισότροπα όσο και σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια.

Παρατήρησαν ότι το πλαίσιο συμπίεστικότητας του BBM μπορεί να περιγράψει επιτυχώς την παρατηρούμενη εξέλιξη της συμπίεστικότητας με την μύζηση. Ταυτόχρονα όμως επισήμαναν ότι σε ό,τι αφορά το διεκτροπικό επίπεδο η παρατηρούμενη κοινή περιβάλλουσα των σημείων διαρροής συνιστά μη ισότροπη επιφάνεια διαρροής. Πρότειναν λοιπόν την ενσωμάτωση ενός στραμμένου ελλειψοειδούς με τον κύριο άξονά του προσανατολισμένο κατά μήκος της γραμμής K_0 στερεοποίησης. Επιπρόσθετα επισήμαναν ότι η κατεύθυνση των πλαστικών παραμορφώσεων δεν προκύπτει

κάθετη προς την προτεινόμενη επιφάνεια διαρροής συστήνοντας την χρήση μη συσχετισμένων νόμων ροής.

Ακολουθώντας τις παρατηρήσεις των Cui & Delage (1996), οι Stropheit et al. (2008) επέκτειναν το καταστατικό προσομοίωμα εδαφικής ανισοτροπίας S-CLAY1 (Wheeler et al. 2003) για καταστάσεις μερικού κορεσμού χρησιμοποιώντας το πλαίσιο μηχανικής συμπεριφοράς του BBM. Το προσομοίωμα ονομάστηκε ABBM (Anisotropic BBM). Οι D'Onza et al. (2010), βασίστηκαν στα εργαστηριακά αποτελέσματα του Barrera (2002) και τροποποίησαν ελαφρά το ABBM με σκοπό την ακριβέστερη περιγραφή της συμπεριφοράς σε τασικές οδεύσεις που οδηγούν στην αστοχία. Πρόσφατα, Οι Al-Sharrad και Gallipoli (2016) βελτίωσαν περαιτέρω το καταστατικό ABBM με σκοπό την βελτιωμένη πρόβλεψη της διαρροής σε ανισότροπες τασικές οδεύσεις και της περιγραφόμενης πλαστικής διαστολικότητας.

Στο Σχ. 11a & 11b παρουσιάζονται τομές της επιφάνειας διαρροής στο διεκτροπικό επίπεδο και υπό σταθερή μύζηση των προσομοιωμάτων εδαφικής ανισοτροπίας ABBM (Stropheit et al. 2008) και ABBM1 (D'Onza et al. 2010), αντίστοιχα.



Σχ. 11. Χαρακτηριστικές επιφάνειες των μοντέλων: a) ABBM (Stropeit et al. 2008) και b) ABBM1 (D'Onza et al. 2010).

Fig. 11. Characteristic surfaces of the: a) ABBM (Stropeit et al. 2008) and; b) ABBM1 (D'Onza et al. 2011) constitutive models.

4. Καταστατικά προσομοιώματα βασισμένα στην τάση του εδαφικού σκελετού του Bishop

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης της ανηγμένης ολικής τάσης και ειδικά σε συνδυασμό με την μύζηση είναι η ευκολία και η σαφήνεια με την οποία επιτρέπει την περιγραφή συνήθων τασικών διαδρομών. Όπως για παράδειγμα επιδείχθηκε κατά την παρουσίαση του BBM στην ενότητα 3.1 με την βοήθεια των σχημάτων 2 και 3, στο επίπεδο $\bar{p} - s$, φόρτιση υπό σταθερή μύζηση ή ξήρανση, ύγρανση υπό σταθερή τάση αντιπροσωπεύονται από απλές ευθείες γραμμές παράλληλες στον άξονα που αντιπροσωπεύει την υπό μεταβολή ποσότητα. Από την άλλη όμως, ένα βασικό μειονέκτημα της ανηγμένης τάσης είναι ότι δεν επιτρέπει την ενιαία περιγραφή καταστάσεων πλήρους και μερικού κορεσμού, καθώς δεν μεταπίπτει στην ενεργό τάση κατά τον πλήρη κορεσμό.

Η αδυναμία ενιαίας περιγραφής της κορεσμένης και ακόρεστης κατάστασης ενός εδαφικού υλικού αποτελεί ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα στην καταστατική προσομοίωση καθώς απαιτεί ειδικούς αριθμητικούς κώδικες που να λαμβάνουν κατάλληλα υπόψη την απαιτούμενη αλλαγή των καταστατικών μεταβλητών με τον κορεσμό ή τον αποκορεσμό. Αυτή ήταν και η βασική αρχική ώθηση ερευνητών να επανεξετάσουν την χρήση της τάσης του εδαφικού σκελετού του Bishop ως εναλλακτική καταστατική παράμετρο.

Η τάση του εδαφικού σκελετού του Bishop ορίζεται ως:

$$p = \bar{p} + \chi \cdot s \quad (15)$$

όπου χ παράμετρος η οποία ελέγχει την επιρροή της μύζησης στην τάση του εδαφικού σκελετού. Σήμερα οι περισσότερες μελέτες συνηγορούν στο ότι η παράμετρος χ συμπίπτει με τον βαθμό κορεσμού ή με παράγωγα του βαθμού κορεσμού μεγέθη. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει σαφές από την αρχή ότι η τάση του εδαφικού σκελετού του Bishop, παρότι συμβατή με την τάση του Terzaghi, δεν αποτελεί ενεργό παράμετρο τάσης καθώς δεν μπορεί να περιγράψει μοναδικά όλες τις πτυχές της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών με κυριότερη την κατάρρευση κατά την διαβροχή.

Στις επόμενες υποενότητες σταχυολογούνται μερικές από τις σημαντικότερες συνεισφορές στην καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών οι οποίες κάνουν χρήση της τάσης του Bishop ως την πρώτη τους καταστατική παράμετρο. Σημειώνεται ότι στην συνέχεια του άρθρου για την τάση του Bishop αποφεύγεται η χρήση του συμβόλου p' για την αποφυγή παρανόησης πως αυτή αποτελεί ενεργό παράμετρο τάσης.

4.1 Αρχικές απόπειρες χρήσης της τάσης του Bishop

Οι Kogho et al. (1993) ήταν εκ των πρώτων που πρότειναν την χρήση της τάσης του Bishop στην καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών με σκοπό να εξασφαλίσουν ενιαία περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς κορεσμένων και μη κορεσμένων εδαφικών καταστάσεων. Για την παράμετρο χ πρότειναν

μία ασυνεχή μαθηματική διατύπωση με βάση την μύζηση αποκορεσμού (s_0):

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{for } s \leq s_0 \\ \frac{s_c - s_0}{(s^* + a^e)^2} & \text{for } s > s_0 \end{cases} \quad (16)$$

όπου s_c και a παράμετροι του υλικού ενώ ως s^* ορίζεται η ποσότητα $s^* = s - s_0$. Από την συνεισφορά των Kogho et al. (1993) παρατηρούμε ότι εφόσον η παράμετρος χ ληφθεί ως συνάρτηση της μύζησης απαιτείται και πάλι ασυνεχής περιγραφή της εξέλιξής της για την μετάβαση μεταξύ καταστάσεων μερικού και πλήρους κορεσμού.

Οι Kogho et al. (1993) πρότειναν επιπρόσθετα καμπύλες παρθενικής συμπίεσης οι οποίες εξαρτώνται από την μύζηση μέσω μίας υπερβολικής συνάρτησης η οποία αποσκοπεί στην πρόβλεψη συμπεριφοράς παρόμοιας με το BBM, ενώ επιπρόσθετα χρησιμοποίησαν την επιφάνεια διαρροής του MCC για να φράξουν την ελαστική περιοχή στο διεκτροπικό επίπεδο. Η σημαντικότερη συνεισφορά των Kogho et al. (1993) ήταν ότι, όντας μεταξύ των πρώτων που χρησιμοποίησαν την τάση του Bishop στην καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών, αναγνώρισαν ότι αυτή δεν αποτελεί ενεργό παράμετρο και έτσι απαιτείται και δεύτερη καταστατική μεταβλητή για την ολοκληρωμένη περιγραφή της μηχανικής τους συμπεριφοράς.

Οι Bolzon et al. (1996) χρησιμοποίησαν την τάση του Bishop και την μύζηση για να επεκτείνουν το καταστατικό προσομοίωμα των Pastor et al. (1990) για καταστάσεις μερικού κορεσμού. Ως παράμετρο χ χρησιμοποίησαν τον βαθμό κορεσμού επιτυγχάνοντας έτσι την ομαλή και φυσική περιγραφή της μετάβασης μεταξύ καταστάσεων μερικού και πλήρους κορεσμού. Όμοια με τους Kogho et al. (1993) επισήμαναν την ανάγκη χρησιμοποίησης επιπλέον καταστατικής μεταβλητής. Επέλεξαν την μύζηση και την ενσωμάτωσαν κατάλληλα στην διατύπωση του πλαστικού μέτρου κράτυνσης μαζί με την μέση τάση με σκοπό την περιγραφή ογκομετρικής συμπεριφοράς παρόμοιας με του BBM αλλά στο επίπεδο της τάσης του Bishop.

4.2 Η μελέτη της Jommi (2000)

Αναμφισβήτητα μία από τις πιο σημαντικές συνεισφορές στην καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών με χρήση της τάσης του Bishop, είναι αυτή της Jommi (2000) καθώς έθεσε τις βάσεις για την ευρεία χρησιμοποίηση

της τάσης του Bishop στην καταστατική προσομοίωση. Η Jommi (2000) ξεκινώντας από το MCC αντικατέστησε την ενεργό τάση με την τάση του Bishop και μελέτησε συστηματικά την προκύπτουσα συμπεριφορά στο επίπεδο της ανηγμένης τάσης σε αντιπαραβολή με το BBM.

Ξεκινώντας από τη επιφάνεια διαρροής του MCC:

$$f(p, q, p_0) = q^2 - Mp(p_0 - p) = 0 \quad (17)$$

όπου p_0 η τάση προστερεοποίησης και αντικαθιστώντας την μέση ενεργό τάση με την τάση του Bishop προκύπτει:

$$f(p, q, p_0) = q^2 - M(\bar{p} + \chi \cdot s)(p_0^* - \bar{p} - \chi \cdot s) \quad (18a)$$

ενώ για $\chi = S_r$ προκύπτει επιπλέον:

$$f(p, q, p_0) = q^2 - M(\bar{p} + S_r s)(p_0^* - \bar{p} - S_r s) \quad (18b)$$

όπου p_0^* η τάση προστερεοποίησης του κορεσμένου εδαφικού υλικού, $\bar{p}$ η μέση ανηγμένη τάση, s η μύζηση και S_r ο βαθμός κορεσμού.

Χρησιμοποιώντας την Εξ. 18b μπορούμε να απεικονίσουμε την προκύπτουσα επιφάνεια διαρροής στα επίπεδα $\bar{p} - q$ και $\bar{p} - s$ για καταστάσεις πλήρους ($s = 0$ και $S_r = 1.0$) και μερικού κορεσμού ($s > 0$ και $S_r < 1.0$), αντιπαραβάλλοντάς την ταυτόχρονα με το BBM (Σχ. 12) Παρατηρούμε ότι η προκύπτουσα επιφάνεια διαρροής μετατοπίζεται στα αριστερά της επιφάνειας του MCC χωρίς να μεταβάλλεται το μέγεθός της. Συγκρίνοντάς την επιπλέον με το BBM προκύπτει ότι:

α) Η μετατόπιση της αριστερής «ακμής» της επιφάνειας διαρροής προς τα αριστερά, στα αρνητικά του άξονα της μέσης ανηγμένης τάσης, είναι συμβατή με τις προβλέψεις του BBM. Αντιπροσωπεύει την αύξηση της αντοχής με την μύζηση και επιπρόσθετα η περιγραφόμενη αύξηση προκύπτει μη γραμμική και εξαρτώμενη από τον βαθμό κορεσμού και την μύζηση. Σε αντιστοίχιση με τις παραμέτρους του BBM παρατηρούμε ότι η αύξηση της αντοχής με το μερικό κορεσμό περιγράφεται ως:

$$p_s = s \cdot S_r \quad (19)$$

Προκύπτει λοιπόν ότι η χρήση της τάσης του Bishop επιτρέπει την φυσική προσομοίωση μιας μη γραμμικής αύξησης της αντοχής με την μύζηση, εξαρτώμενης από την καμπύλη συγκράτησης ύδατος του υλικού σε συμφωνία με πληθώρα σχετικών εργαστηριακών παρατηρήσεων αλλά και σε συμφωνία με προτάσεις άλλων ερευνητών οι οποίοι

προσπάθησαν να βελτιώσουν τις προβλέψεις του BBM τροποποιώντας την παράμετρο k (π.χ. Georgiadis 2003, Bardanis & Kanvadas 2008).

β) Από την άλλη, αν επικεντρωθούμε στο δεξιό άκρο της επιφάνειας διαρροής παρατηρούμε ότι η μετατόπιση του επίσης προς τα αριστερά υπονοεί ότι η τάση φαινόμενης προστερεοποίησης μειώνεται με τον μερικό κορεσμό κάτι το οποίο είναι αντίθετο με το BBM αλλά και με τις συνήθειες εργαστηριακές παρατηρήσεις.

Σε ό,τι αφορά το πλαίσιο συμπίεσότητας, παρόμοια με την επιφάνεια διαρροής μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τάση του Bishop για να αντικαταστήσουμε την ενεργό τάση στις εξισώσεις που διέπουν την συμπεριφορά του MCC σε πλαστική φόρτιση. Προκύπτει:

$$v = N(0) - \lambda(0) \ln \frac{p}{p^c} = N(0) - \lambda(0) \ln \frac{\bar{p} + s \cdot S_r}{p^c} \quad (20)$$

όπου $N(0)$ ο ειδικός όγκος για τιμή της τάσης ίσης με p^c και $\lambda(0)$ η κλίση της γραμμής παρθενικής συμπίεσης του κορεσμένου εδαφικού υλικού. Αντίστοιχα, εντός της ελαστικής περιοχής προκύπτει ότι καταστάσεις αποφόρτισης - επαναφόρτισης μπορούν να περιγραφούν ως:

$$v = -\kappa(0) \ln \frac{p}{p^c} = -\kappa(0) \ln \frac{\bar{p} + s \cdot S_r}{p^c} \quad (21)$$

όπου $\kappa(0)$ η κλίση της γραμμής αποφόρτισης επαναφόρτισης του κορεσμένου εδαφικού υλικού στο επίπεδο $v - \ln p$.

Με διαφορισμό των παραπάνω εξισώσεων μπορεί να αποδειχτεί ότι αν εξεταστεί η συμπεριφορά στο επίπεδο της ανηγμένης ολικής τάσης προκύπτει ότι η κλίση των γραμμών παρθενικής συμπίεσης ισούται με:

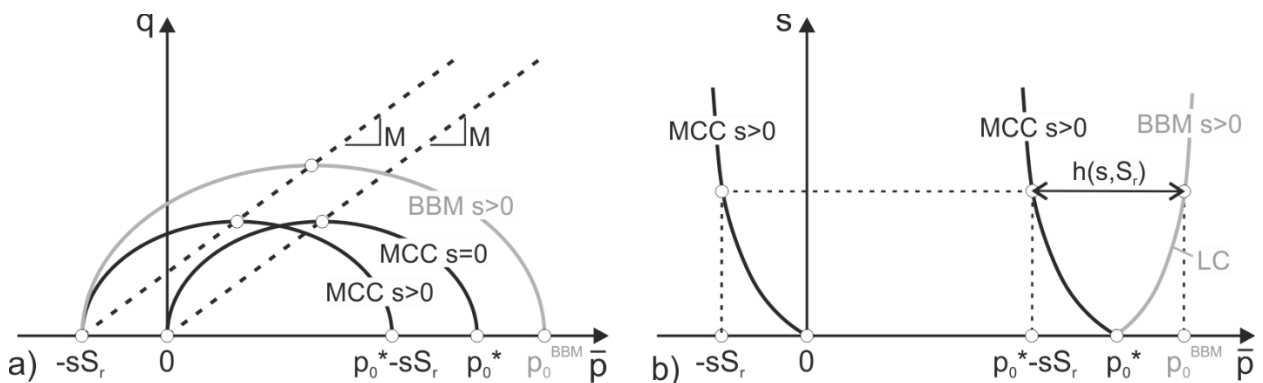
$$\lambda(s) = \lambda(0) \frac{\bar{p}}{\bar{p} + s \cdot S_r} \quad (22)$$

και η κλίση των γραμμών αποφόρτισης - επαναφόρτισης ισούται με:

$$\kappa(s) = \kappa(0) \frac{\bar{p}}{\bar{p} + s \cdot S_r} \quad (23)$$

Από τις Εξισώσεις 22 και 23 προκύπτει ότι η χρήση της τάσης του Bishop στο πλαίσιο συμπίεσότητας του MCC προβλέπει φυσική μείωση της συμπίεσότητας με αυξανόμενη μύζηση και αύξουσα συμπίεσότητα με αύξηση του τασικού πεδίου, συμπεριφορά που είναι συμβατή με συνήθειες εργαστηριακές διερευνήσεις της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών.

Η διερεύνηση της Jommi (2000) αποδεικνύει ότι η χρήση της τάσης του εδαφικού σκελετού του Bishop σε καταστατικά προσομοιώματα έχει πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς μπορεί να προσομοιώσει φυσικά σημαντικές πτυχές της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Ταυτόχρονα όμως επισημαίνει το γεγονός ότι δεν είναι ικανή από μόνη της για να περιγράψει την αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης με τον μερικό κορεσμό, επιπλέον απόδειξη του γεγονότος ότι δεν είναι και δεν μπορεί να θεωρηθεί ενεργός παράμετρος τάσης.



Σχ. 12. Σύγκριση μεταξύ της επιφάνειας διαρροής του MCC με χρήση της τάσης του εδαφικού σκελετού του Bishop και της επιφάνειας διαρροής του BBM στο επίπεδο α) $\bar{p} - q$ και β) $\bar{p} - q$.

Fig. 12. Comparison between the MCC yield surface using Bishop's stress and comparison with the BBM Yield Surface; a) the $q - \bar{p}$ space and; b) the $p - \bar{p}$ plane.

Είναι απαραίτητη λοιπόν η υιοθέτηση επιπρόσθετων καταστατικών παραμέτρων, αποδεικνύοντας επιπλέον ότι για να περιγραφεί συμπεριφορά παρόμοια με του BBM όταν γίνεται χρήση του MCC και της τάσης του εδαφικού σκελετού του Bishop πρέπει η εξίσωση που περιγράφει την αύξηση της τάσης φαινόμενης προστεροποίησης με την μύζηση να έχει την μορφή:

$$p_0 = p^c \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} + s \cdot S_r \quad (24)$$

Μέσω της Εξ. 24 η Jommi (2000) ήταν εκ των πρώτων ερευνητών που επέδειξαν ότι για την περιγραφή της καμπύλης φόρτισης - κατάρρευσης ενδέχεται να απαιτείται και η χρήση του βαθμού κορεσμού ως επιπλέον καταστατική μεταβλητή πέραν της μύζησης και της τάσης.

4.3 Η μύζηση ως δεύτερη καταστατική παράμετρος

Πλήθος ερευνητών πρότειναν καταστατικά προσομοιώματα που κάνουν χρήση της τάσης του Bishop και της μύζησης ως πρώτης και δεύτερης καταστατικής παραμέτρου αντίστοιχα. Οι Karube & Kawai (2001) πρότειναν ένα σχετικά απλό καταστατικό προσομοίωμα με την βασική του ιδιαιτερότητα να έγκειται στην επιλογή της παραμέτρου χ για την διατύπωση της τάσης του Bishop. Υποστήριξαν ότι η απλή αντιστοίχισή της με τον βαθμό κορεσμού είναι πολύ απλουστευτική προσέγγιση. Την θεώρηση αυτή την απέδωσαν στους διαφορετικούς «τύπους νερού» οι οποίοι συνυπάρχουν μέσα σε ένα μη κορεσμένο έδαφος και πιο συγκεκριμένα στο α) «ελεύθερο νερό», β) στο νερό των μηνίσκων και γ) στο προσροφημένο νερό. Υποστήριξαν ότι διαφορετικοί «τύποι νερού» οδηγούν σε διαφορετική ανάπτυξη των δυνάμεων λόγω μύζησης μεταξύ των κόκκων και προσπάθησαν να λάβουν υπόψη τις διαφορές αυτές μέσω μια ποσότητας ονομαζόμενης «τάση μύζησης». Η διατύπωσή της είναι αρκετά πολύπλοκη και η παράθεσή της ξεφεύγει από το σκοπό του παρόντος άρθρου.

Οι Loret & Khalili (2000) χρησιμοποίησαν την μύζηση τόσο ως δεύτερη καταστατική παράμετρο όσο και ως παράμετρο χ . Η θεώρησή τους αυτή έγινε με σκοπό την εξάλειψη της αναγκαιότητας χρήσης ενός προσομοιώματος συγκράτησης ύδατος για τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού. Αναγκαστικά όμως, όμοια με

τους Kogho et al. (1993), οδηγήθηκαν στην αναγκαιότητα μιας ασυνεχούς συνάρτησης για την παράμετρο χ ώστε η προτεινόμενη μορφή της τάσης του Bishop να μην οδηγήσει σε απόκλιση από την ενεργό τάση για επίπεδα μύζησης μικρότερα της μύζησης αποκορεσμού.

Οι Wheeler et al. (2003) πρότειναν ένα υδρομηχανικό προσομοίωμα με βάση την πρόταση των Buisson & Wheeler (2000) και με χρήση της τάσης του Bishop. Η βασική ιδιαιτερότητα της πρότασής τους έγκειται στην ενσωμάτωση μίας τροποποιημένης ποσότητας μύζησης ως δεύτερης καταστατικής παραμέτρου, ακολουθώντας τις προτάσεις του Houlsby (1997) σχετικά με την χρήση θερμοδυναμικά συμβατών παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, ο Houlsby (1997) υποστήριξε ότι η διατύπωση οποιουδήποτε καταστατικού προσομοιώματος θα πρέπει να κάνει χρήση κατάλληλων, θερμοδυναμικά συμβατών (work conjugate) παραμέτρων «τάσης» και «τροπών», οι οποίες να εξασφαλίζουν ότι ο ρυθμός μεταβολής του παραγόμενου έργου ανά μονάδα μάζας ενός υλικού το οποίο υπόκειται σε φόρτιση είναι ίσος με το ταυυστικό άθροισμα των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων τάσης και τροπών. Για μη κορεσμένα εδάφη προχώρησε στις προτάσεις του Πίνακα 1.

Πιν. 1. Θερμοδυναμικά συμβατές παράμετροι κατά Houlsby (1997).

Tab. 1. Work Conjugate parameters according to Houlsby (1997).

Formulation	Μεταβλητή «τάσης»	Μεταβλητή «τροπής»
Ανηγγμένη τάση	$\bar{\sigma}$	$\bar{\varepsilon}$
	s	$-n \cdot \dot{S}_r + S_r \cdot \dot{\varepsilon}^*$
Bishop τάση	$\sigma = \bar{\sigma} + s \cdot S_r$	$\dot{\varepsilon}$
	$n \cdot s^*$	$-\dot{S}_r$

*n πορώδες

Οι Wheeler et al. (2003) χρησιμοποίησαν την τροποποιημένη ποσότητα μύζησης $n \cdot s$ ως δεύτερη καταστατική μεταβλητή. Το προσομοίωμα τους δύναται να περιγράψει υστερική και συζευγμένη υδρομηχανική συμπεριφορά ενσωματώνοντας κατάλληλες επιφάνειες διαρροής για την περιγραφή

πλαστικών παραμορφώσεων με την αύξηση ή την μείωση της μύζησης. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι μία σημαντική καινοτομία του προσομοιώματός τους έγκειται στο ότι η χρήση της τροποποιημένης μύζησης επιτρέπει την περιγραφή της μεταβολής του βαθμού κορεσμού κατά την διάρκεια μηχανικών φορτίσεων χωρίς να απαιτείται η χρήση προσομοιώματος συγκράτησης ύδατος με εξάρτηση από το δείκτη πόρων.

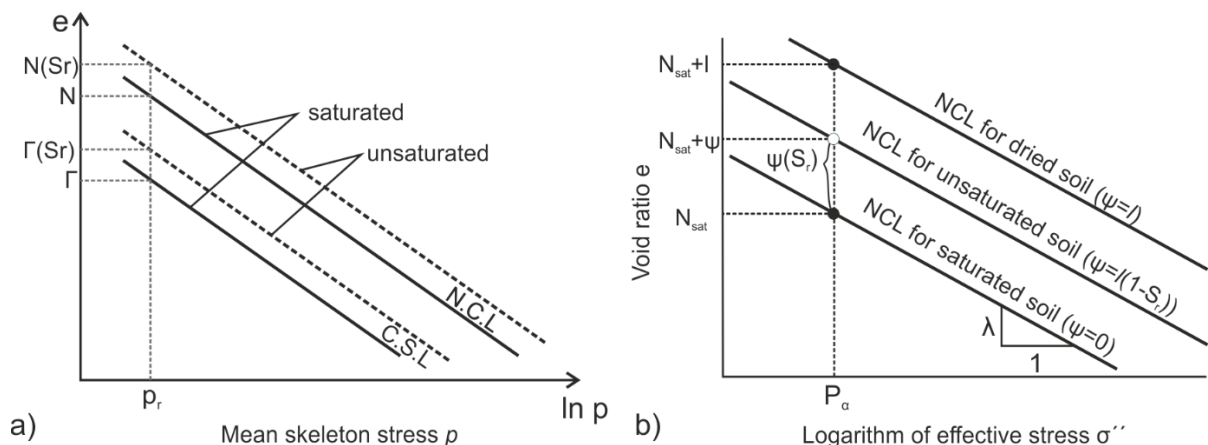
Οι Sheng et al. (2004) διατύπωσαν ένα παρόμοιο με τους Wheeler et al. (2003) υδρομηχανικό προσομοίωμα. Παρότι και αυτοί αναγνώρισαν την σημασία μιας θερμοδυναμικά σωστής διατύπωσης εξέφρασαν σοβαρές επιφυλάξεις για το φυσικό νόημα μίας παραμέτρου όπως η «τροποποιημένη μύζηση», επιλέγοντας την μύζηση ως δεύτερη καταστατική παράμετρο. Επιπρόσθετα χρησιμοποίησαν το πλαίσιο συμπίεστότητας του BBM ακολουθώντας τις προτάσεις της Jommi (2000) σχετικά με την ενσωμάτωσή του στο χώρο της τάσης του Bishop. Μία από τις καινοτομίες των Sheng et al. (2004) είναι η χρήση της υπερελαστικότητας για την περιγραφή συντηρητικής ελαστικής συμπεριφοράς με περιγραφή των ογκομετρικών παραμορφώσεων στο χώρο $\ln v - \ln p$. Παρόμοια πρόταση διατυπώθηκε αργότερα και από τους Sun et al. (2007).

4.4 Ο βαθμός κορεσμού ως δεύτερη καταστατική παράμετρος

Τα τελευταία χρόνια αρκετοί ερευνητές μελέτησαν και συνέστησαν την χρήση του βαθμού κορεσμού ως δεύτερης καταστατικής παραμέτρου σε συνδυασμό με την τάση του

εδαφικού σκελετού του Bishop. Μεταξύ των πρώτων υπήρξαν οι Zhang & Ikariya (2011) και οι Kikumoto et al. (2011), οι οποίοι περιέγραψαν καμπύλες παρθενικής συμπίεσης εξαρτώμενες από τον βαθμό κορεσμού. Προτείνουν ότι τόσο οι καμπύλες παρθενικής συμπίεσης όσο και η γραμμή κρίσιμης κατάστασης θα πρέπει με τον μερικό κορεσμό να μετατοπίζονται στα αριστερά των αντίστοιχων καμπυλών για το κορεσμένο έδαφος, χωρίς να αλλάζει η κλίση τους (βλέπε Σχ. 13). Με το τρόπο αυτό περιγράφεται αύξηση της πίεσης προστερεοποίησης (τάση φαινόμενης προστερεοποίησης), ενώ η όποια μη γραμμικότητα στην συμπίεστότητα προκύπτει αποκλειστικά από την εφαρμογή της τάσης του Bishop όπως συζητήθηκε με αφορμή την εργασία της Jommi (2000). Επιπρόσθετα, οι Kikumoto et al. (2011) υποστήριξαν ότι εάν τα εργαστηριακά αποτελέσματα των Cui & Delage (1996) επανεξεταστούν σε όρους τάσης Bishop και βαθμού κορεσμού επιβεβαιώνουν το πλαίσιο συμπίεστότητάς τους.

Οι Zhou et al. (2012a, 2012b) παρουσιάζουν μία πολύ εμπειριστατωμένη μελέτη και ανάλυση των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η χρήση της τάσης του εδαφικού σκελετού του Bishop σε συνδυασμό με τον βαθμό κορεσμού συγκρινόμενη με την κλασσική προσέγγιση χρήσης της ανηγμένης τάσης και της μύζησης. Επισήμαναν κυρίως το γεγονός ότι η εξάρτηση των καμπυλών παρθενικής συμπίεσης από τον βαθμό κορεσμού εξασφαλίζει ότι όσο ο βαθμός κορεσμού παραμένει 100%, ακόμα και για θετικές τιμές της μύζησης, η συμπεριφορά δεν αποκλίνει από το πλαίσιο συμπεριφοράς των κορεσμένων εδαφών, στοιχείο απαραίτητο όταν η τάση του εδαφικού σκελετού του Bishop χρησιμοποιείται ως πρώτη καταστατική παράμετρος.



Σχ. 13. Το πλαίσιο συμπίεστότητας των: a) Zhang & Ikariya (2011) και b) Kikumoto et al. (2011).

Fig. 13. The compressibility framework of: a) Zhang & Ikariya (2011) and; b) Kikumoto et al. (2011).

Επιπρόσθετα, επισήμαναν ότι κατά την φόρτιση (αύξηση τάσης) ακόμα και υπό σταθερή μύζηση η μεταβολή του βαθμού κορεσμού οδηγεί σε συνεχή αύξηση της συμπίεστότητας με την αύξηση της τάσης, συμπεριφορά που επιβεβαιώνει εργαστηριακές παρατηρήσεις και εξηγεί επίσης την εργαστηριακά παρατηρούμενη εξέλιξη των παραμορφώσεων λόγω διαβροχής με την μύζηση. Επιπρόσθετα, υιοθέτησαν την πρόταση των Alonso et al. (2010) σχετικά με την χρήση του βαθμού κορεσμού του μακροπορώδους («ενεργός» βαθμού κορεσμού, $S_{r,e}$) ως παραμέτρου χ στην διατύπωση της τάσης του Bishop. Για το πλαίσιο συμπίεστότητάς τους πρότειναν καμπύλες παρθενικής συμπίεσης οι οποίες εκκινούν από κοινό σημείο αναφοράς και η κλίση τους εξαρτάται από τον ενεργό βαθμό κορεσμού με βάση την εξίσωση:

$$\lambda(S_{r,e}) = \lambda_0 - (1 - S_{r,e})^{\alpha_1} (\lambda_0 - \lambda_d) \quad (25)$$

όπου λ_0 η συμπίεστότητα του κορεσμένου υλικού, α_1 παράμετρος του υλικού και λ_d η συμπίεστότητα του ίδιου υλικού όταν αυτό είναι τελείως ξηρό. Για να μειώσουν τον αριθμό των παραμέτρων, επιπρόσθετα πρότειναν ότι η παράμετρος λ_d μπορεί να λαμβάνεται ίση με την κλίση σε αποφόρτιση – επαναφόρτιση κ .

Στο Σχ. 14a συνοψίζεται το πλαίσιο συμπίεστότητας των Zhou et al. (2012a, 2012b) μαζί με μία τυπική τασική διαδρομή που περιλαμβάνει ξήρανση (ABC) και φόρτιση (CD), ενώ το Σχ. 14b παρουσιάζεται την επιφάνεια διαρροής του προσομοιώματος στο χώρο $p - q - s$. Το προσομοίωμά τους ολοκληρώνεται με την

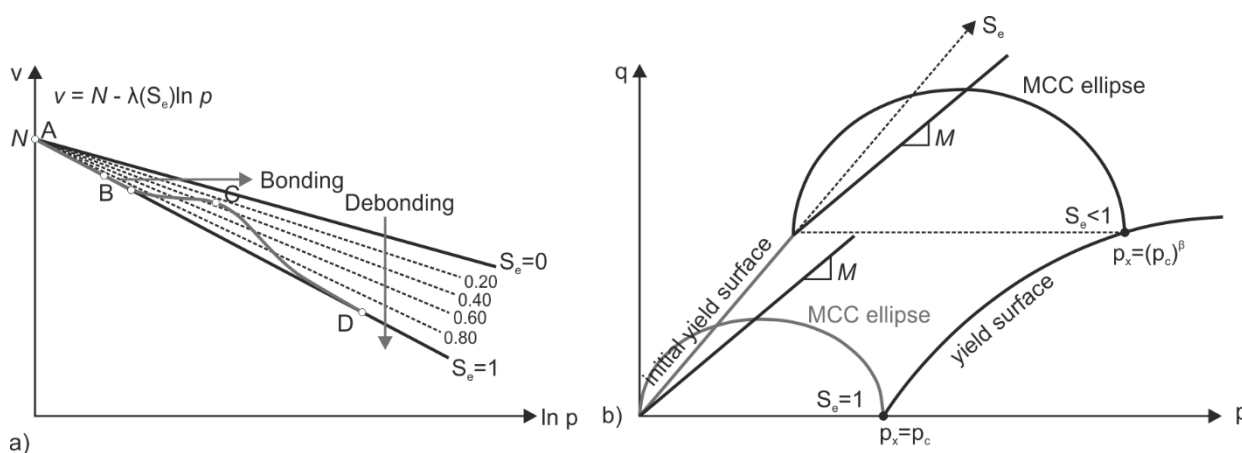
χρήση του MCC ως προσομοιώματος βάσης για πλήρως κορεσμένα εδαφικά υλικά και ενσωματώνει ένα υστερητικό και εξαρτώμενο από το λόγο κενών προσομοίωμα συγκράτησης ύδατος.

Πρόσφατα, οι Zhou & Sheng (2015) εξέλιξαν περαιτέρω το προσομοίωμα με σκοπό την καλύτερη περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς συμπυκνωμένων εδαφών κατά τη διαβροχή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν αρχές της πλαστικότητας οριακών επιφανειών.

Η Casini (2012) παρουσίασε ένα πλαίσιο συμπίεστότητας για μη κορεσμένα εδάφη το οποίο αργότερα επεκτάθηκε στον γενικευμένο χώρο των τάσεων με χρήση των αρχών του MCC. Παρόμοια με τις εργασίες των Zhang & Ikariya (2011) και Kikumoto et al. (2001), η Casini (2012) πρότεινε παράλληλη μετάθεση των καμπυλών παρθενικής συμπίεσης με τον μερικό κορεσμό χωρίς αλλαγή στην κλίση τους (βλέπε Σχ. 15). Η μετάθεση των καμπυλών πρακτικά επιτυγχάνεται μέσω ενός εκθετικού νόμου που ελέγχει την τάση φαινόμενης προστεροποίησης και παίρνει την μορφή:

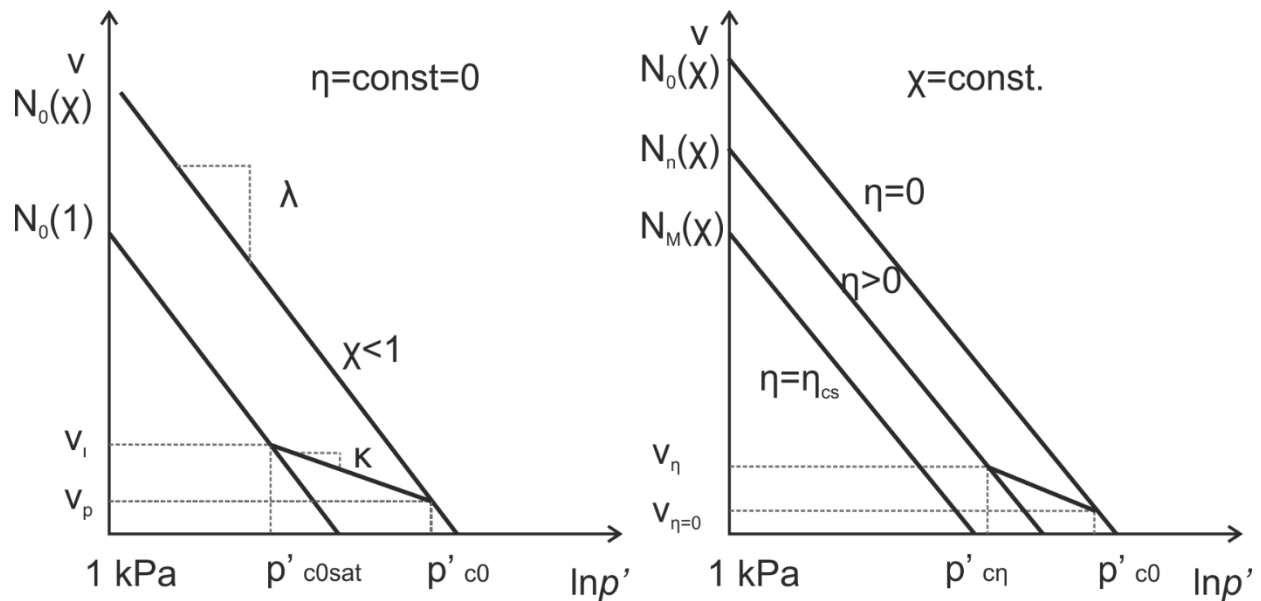
$$p(\chi) = p_0 \cdot a \cdot \exp(1 - \chi) \quad (26)$$

όπου a παράμετρος του υλικού και χ η ίδια παράμετρος που υπεισέρχεται στην τάση του Bishop. Προτείνεται η χρήση του βαθμού κορεσμού του μακροπορώδους ακολουθώντας την πρόταση των Alonso et al. (1990), ενώ για την περιγραφή του βαθμού κορεσμού χρησιμοποιείται το εξαρτώμενο από το λόγο κενών προσομοίωμα συγκράτησης ύδατος των Casini et al. (2012).



Σχ. 14. Το προσομοίωμα των Zhou et al. (2012a, 2012b). a) Το πλαίσιο συμπίεστότητας και b) η επιφάνεια διαρροής στον χώρο $p - q - s$.

Fig. 14. The Zhou et al. (2012a, 2012b) constitutive model; a) the compressibility framework and; b) the yield surface in the $p - q - s$.



Σχ. 15. Το πλαίσιο συμπίεστικότητας της Casini (2012).

Fig. 15. The volumetric compressibility framework of Casini (2012).

4.5 Ποσότητες που συνδυάζουν την μύζηση και τον βαθμό κορεσμού ως δεύτερη καταστατική παράμετρο

Οι Gallipoli et al. (2003a) παρουσίασαν μία από τις σημαντικότερες συνεισφορές στην καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών με χρήση της τάσης του εδαφικού σκελετού του Bishop ως πρώτης καταστατικής παραμέτρου και του βαθμού κορεσμού ως παραμέτρου χ . Η βασική τους συνεισφορά έγκειται στην επισήμανση ότι η δεύτερη καταστατική παράμετρος θα πρέπει ουσιαστικά να αντιπροσωπεύει τις δυνάμεις δεσμών (bonding forces) που αναπτύσσονται στον εδαφικό σκελετό λόγω μερικού κορεσμού. Παρόμοια ιδέα είχε διατυπωθεί και από τον Kanvadas (2000) ο οποίος πρότεινε ότι ο μερικός κορεσμός δρα παρόμοια με άλλους παράγοντες δομής όπως η σιμέντωση και η θιξοτροπία στην μηχανική συμπεριφορά των εδαφών. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι παρότι η ιδέα του Kanvadas (2000) είναι στην βάση της ορθής, όπως επισημάνθηκε από τον Gens (2010), σε αντίθεση με άλλους παράγοντες δομής, η προκαλούμενη από τον μερικό κορεσμό δομή είναι αναστρέψιμη και εξαρτώμενη από τις επιβαλλόμενες υδραυλικές συνθήκες.

Για την περιγραφή των δυνάμεων «δομής» λόγω μερικού κορεσμού, οι Gallipoli et al. (2003a) εξέτασαν την απλούστερη περίπτωση «δομής» λόγω μερικού κορεσμού επικεντρώνοντας στον

εδαφικό σκελετό ενός αδρόκοκκου εδάφους όπου κυρίαρχα είναι τα τριχοειδή φαινόμενα. Επισήμαναν ότι οι δυνάμεις μεταξύ των κόκκων (interparticle forces) που οφείλονται στους μηνίσκους νερού θα είναι τόσο πιο ισχυρές όσο: α) μεγαλύτερη είναι η μύζηση, καθώς αυξάνεται η ένταση των επιμέρους δυνάμεων μηνίσκων αλλά και β) όσο αυξάνεται ο αριθμός των μηνίσκων που συνυπάρχουν ανά μονάδα όγκου εδάφους, παράμετρος που συσχετίζεται με τον βαθμό κορεσμού και την καμπύλη συγκράτησης ύδατος. Διατύπωσαν λοιπόν την ιδέα ότι η δεύτερη καταστατική παράμετρος θα πρέπει να περιλαμβάνει την επιρροή τόσο της μύζησης όσο και του βαθμού κορεσμού και την υλοποίησαν προτείνοντας μία συνδυαστική ποσότητα, τον παράγοντα δομής (bonding factor):

$$\xi = (1 - S_r) \cdot f(s) \quad (27)$$

όπου ως $f(s)$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε κατάλληλη μαθηματική εξίσωση η οποία δύναται να περιγράψει την επιρροή της μύζησης στις δυνάμεις μεταξύ των κόκκων. Για την περιγραφή του βαθμού κορεσμού χρησιμοποίησαν το εξαρτώμενο από το βαθμό κορεσμού προσομοίωμα των Gallipoli et al. (2003b).

Οι Alonso et al. (2013) παρουσίασαν ένα καταστατικό προσομοίωμα με έμφαση στην συμπεριφορά συμπυκνωμένων εδαφών χρησιμοποιώντας ως δεύτερη καταστατική παράμετρο το γινόμενο της μύζησης με τον

ενεργό βαθμό κορεσμού (μακροπορώδες), ονομάζοντας την νέα ποσότητα ενεργό μύζηση:

$$\bar{s} = s \cdot S_r^e \quad (28)$$

Ο ενεργός βαθμός κορεσμού υπολογίζεται με βάση την πρόταση των Alonso et al. (2010) και χρησιμοποιείται και ως παράμετρος χ στη διατύπωση της τάσης του Bishop. Η ενεργός μύζηση υπεισέρχεται στην διατύπωση του πλαισίου συμπιεστότητας το οποίο ακολουθεί τις βασικές αρχές του BBM στον χώρο της τάσης του Bishop με την κλίση των γραμμών παρθενικής συμπίεσης να εξαρτάται από τη σχέση:

$$\lambda(\bar{s}) = \bar{r} + (1 - \bar{r}) \left[1 + \left(\frac{\bar{s}}{\bar{s}_\lambda} \right)^{\frac{1}{1-\beta}} \right]^\lambda - \bar{\beta} \quad (29)$$

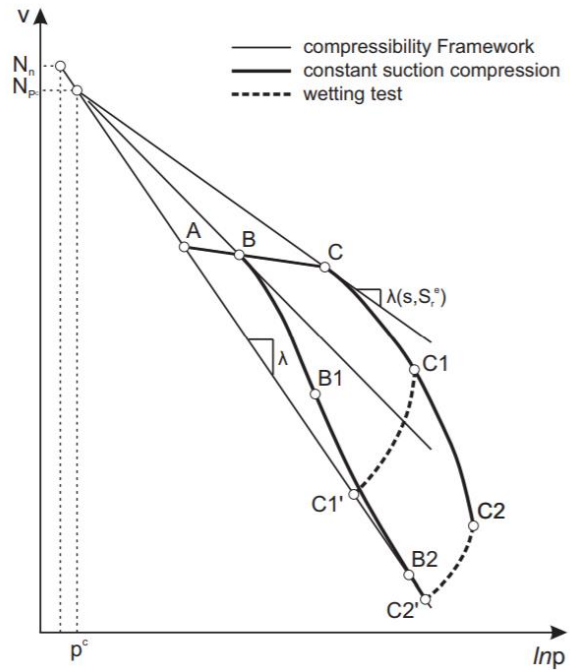
όπου $\bar{\rho}, \bar{\beta}$ και $\bar{s}_\lambda$ παράμετροι του υλικού. Η Εξ. 29 χρησιμοποιείται στην Εξ. 3 για να περιγράψει την εξέλιξη της συμπιεστότητας, οδηγώντας σε καμπύλη φόρτισης - κατάρρευση με διπλή εξάρτηση από την μύζηση και τον βαθμό κορεσμού.

4.6 Προσομοίωση εδαφικής ανισοτροπίας με χρήση της τάσης του Bishop

Ένα από τα αντικείμενα που έχει συγκεντρώσει αρκετή ερευνητική δραστηριότητα τα τελευταία χρόνια είναι η χρήση της τάσης του Bishop για την μελέτη της συμπεριφοράς και την διατύπωση καταστατικών πλαισίων συμπεριφοράς ή και προσομοιωμάτων που περιγράφουν την συνδυασμένη συμπεριφορά μη κορεσμένων εδαφών υπό συνθήκες φόρτισης οι οποίες προκαλούν εδαφική ανισοτροπία. Ήδη από την πρόταση της Casini (2002), η συγγραφέας επισήμανε την ανάγκη το οποιοδήποτε πλαίσιο συμπιεστότητας για μη κορεσμένα εδάφη να λαμβάνει υπόψη και την εξάρτηση των καμπυλών παρθενικής συμπίεσης από την ανισοτροπία του τασικού πεδίου.

Παρόμοια πρόταση διατύπωσαν και οι Sitarenios & Kavvas (2014), οι οποίοι επέκτειναν το πλαίσιο συμπιεστότητας των Belokas & Kavvas (2011) για καταστάσεις μερικού κορεσμού. Για την περιγραφή της εξέλιξης της συμπιεστότητας των εδαφών σε καταστάσεις μερικού κορεσμού χρησιμοποίησαν την τάση του εδαφικού σκελετού του Bishop, ενώ πρότειναν διπλή εξάρτηση της κλίσης των καμπυλών παρθενικής συμπίεσης τόσο από την μύζηση όσο και από τον βαθμό κορεσμού (βλέπε Σχ. 16). Τόσο ως παράμετρο χ αλλά και για την

περιγραφή της συμπιεστότητας υιοθέτησαν και ενσωμάτωσαν την πρόταση των Alonso et al. (2000) σχετικά με την χρήση του βαθμού κορεσμού του μακροπορώδους.



Σχ. 16. Το πλαίσιο συμπιεστότητας των Sitarenios & Kavvas (2014).

Fig. 16. The volumetric compressibility framework of Sitarenios & Kavvas (2014).

Το πλαίσιο συμπιεστότητας των Sitarenios & Kavvas (2014), επεκτάθηκε περαιτέρω από τον Sitarenios (2016) με την συμπιεστότητα των καμπυλών παρθενικής συμπίεσης να περιγράφεται τελικά από την εξίσωση:

$$\lambda(s, S_r^e) = \lambda [1 - (1 - r)(1 - S_r^e)^\gamma (1 - e^{-\beta s})] \quad (30)$$

όπου λ η συμπιεστότητα του κορεσμένου υλικού, β, r παράμετροι που ελέγχουν την εξέλιξη της συμπιεστότητας με την μύζηση (s) και διατηρούν παρόμοια φυσική σημασία με το BBM, ενώ η παράμετρος γ ελέγχει την επιρροή του βαθμού κορεσμού του μακροπορώδους («ενεργός» βαθμός κορεσμού, S_r^e) επί της συμπιεστότητας. Η καινοτομία της Εξ. 30, έγκειται στο ότι λαμβάνει υπόψη τόσο την επιρροή της μύζησης όσο και του βαθμού κορεσμού στην συμπιεστότητα του υλικού αλλά χωρίς να συνδυάζει τις δύο ποσότητες σε κάποιου είδους παράγωγο μέγεθος, όπως προτάσεις που παρουσιάστηκαν στην ενότητα

4.5. Η Εξ. 30 ουσιαστικά υποκρύπτει μία μαθηματική διατύπωση της μορφής:

$$\lambda(s, S_r^e) = \lambda - (\lambda - \lambda(s))(1 - S_r^e)^{\gamma} \quad (31)$$

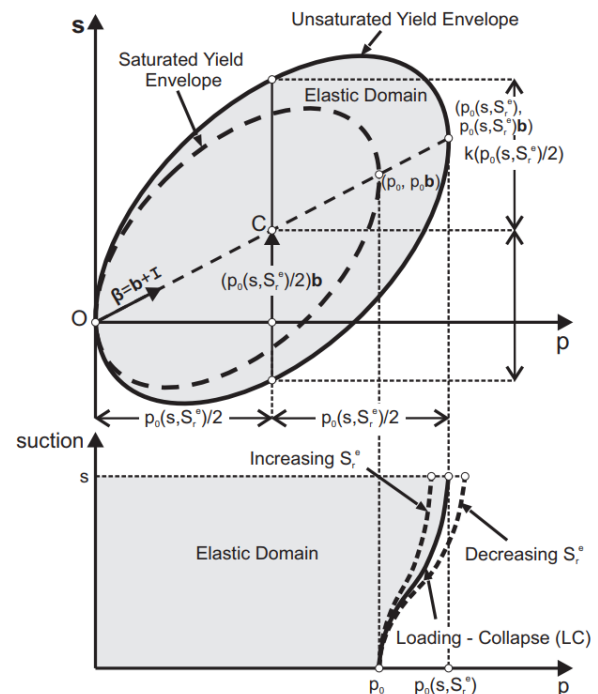
Η Εξ. 31 προβλέπει ότι για $S_r^e = 1.0$ η συμπίεστικότητα παραμένει ίση με την συμπίεστικότητα του κορεσμένου εδαφικού υλικού, στοιχείο απαραίτητο σε προσομοιώματα που κάνουν χρήση της τάσης του Bishop, ενώ μείωση του βαθμού κορεσμού προκαλεί προοδευτική αύξηση της συμπίεστικότητας από θεωρητικά μέγιστη τιμή $\lambda(s)$ προς την συμπίεστικότητα του κορεσμένου εδαφικού υλικού. Στην θεώρηση αυτή, ο βαθμός κορεσμού θεωρείται ως η βασική παράμετρος δημιουργίας «δομής» ενώ η αύξησή του λαμβάνεται ως παράγοντας καταστροφής «δομής» (πχ., λόγω μείωσης των μηνίσκων νερού σε εδάφη που κυριαρχούν τα τριχοειδή φαινόμενα). Για την περιγραφή της εξάρτησης της συμπίεστικότητας από την μύζηση $\lambda(s)$, στην Εξ. 31 οι Sitarenios & Kavvas (2014) χρησιμοποίησαν την πρόταση του BBM (Εξ. 2) για να καταλήξουν στην Εξ. 30, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω.

Για την περιγραφή της εδαφικής ανισοτροπίας, ο Sitarenios (2016) συνδύασε το παραπάνω πλαίσιο συμπίεστικότητας με το στρεβλό ελλειψοειδές του Kavvas (1982). Αναθεώρησε και επέκτεινε τους νόμους ροής και κράτυνσης του προσομοιώματος του Kavvas (1982), διατυπώνοντας ένα νέο καταστατικό προσομοίωμα για ανισότροπα και μη κορεσμένα εδάφη (CMUA) (Sitarenios & Kavvas 2019). Το Σχ. 17 παρουσιάζει χαρακτηριστικές επιφάνειες του προσομοιώματος CMUA.

Το προσομοίωμα δύναται να περιγράψει με ακρίβεια την εξάρτηση των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης από τον βαθμό της επιβαλλόμενης τασικής ανισοτροπίας καθώς και ρεαλιστικές πλαστικές παραμορφώσεις τόσο σε δοκιμές ακτινικής συμπίεσης όσο και σε στραγγισμένες δοκιμές τριαξονικής φόρτισης. Ο νόμος κράτυνσης που ενσωματώνει προβλέπει προοδευτική «απώλεια μνήμης» της ανισοτροπίας με τη συσσώρευση διεκτροπικών πλαστικών παραμορφώσεων για να περιγράψει τόσο την τασική χαλάρωση που επιδεικνύουν ανισότροπα στερεοποιημένα εδαφικά υλικά όσο και μία ενιαία κρίσιμη κατάσταση.

Σε ό,τι αφορά καταστάσεις μερικού κορεσμού, η εφαρμογή της τάσης του εδαφικού σκελετού του Bishop περιγράφει με επιτυχία την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση (βλέπε Σχ. 18b), ενώ το προτεινόμενο πλαίσιο

συμπίεστικότητας για καταστάσεις μερικού κορεσμού, προσομοιώνει επιτυχώς την εξέλιξη της συμπίεστικότητας με τη μύζηση και τον βαθμό κορεσμού και δύναται να προβλέπει: α) καμπύλες συμπίεσης ανεξάρτητες της μύζησης για καταστάσεις πλήρους κορεσμού, β) συνεχή μεταβολή της συμπίεστικότητας για καταστάσεις φόρτισης υπό σταθερή μύζηση καθώς και γ) ένα μέγιστο στις ογκομετρικές παραμορφώσεις λόγω διαβροχής (κατάρρευση) (βλέπε Σχ. 18a). Προϋπόθεση για τα παραπάνω αποτελεί η σύζευξη του προσομοιώματος με προσομοίωμα συγκράτησης ύδατος το οποίο να περιλαμβάνει εξάρτηση από το δείκτη πόρων, με το CMUA να κάνει χρήση του μοντέλου συγκράτησης ύδατος των Gallipoli et al. (2003b).



Σχ.17. Χαρακτηριστικές καταστατικές επιφάνειες του προσομοιώματος CMUA (Sitarenios & Kavvas 2019).

Fig. 17. Characteristic Constitutive surfaces of the CMUA model (Sitarenios & Kavvas 2019).

Οι Al-Sharad et al. (2017) παρουσίασαν μία από τις πλέον ολοκληρωμένες και σύγχρονες εργαστηριακές διερευνήσεις της μηχανικής συμπεριφοράς ανισότροπα στερεοποιημένων και μη κορεσμένων εδαφών. Χρησιμοποίησαν δείγματα συμπυκνωμένου καολίνη Speswhite και επιβεβαίωσαν ότι όμοια με τις παρατηρήσεις των Cui & Delage (1996), τα εργαστηριακά τους δεδομένα συνιστούν μη συμμετρική επιφάνεια

διαρροής περί τον άξονα της ισότροπης τάσης τόσο στον χώρο της ανηγμένης τάσης όσο και στον χώρο της τάσης του Bishop, επιπρόσθετα προτείνοντας την χρήση του στρεβλού ελλειψοειδούς του Kanvadas (1982) για την περιγραφή της επιφάνειας διαρροής των εργαστηριακών τους δεδομένων. Οι Al-Sharad & Gallipoli (2018) χρησιμοποίησαν τα εργαστηριακά δεδομένα των Al-Sharad et al. (2017) για να διατυπώσουν ένα καταστατικό προσομοίωμα για ανισότροπα και μη κορεσμένα εδάφη, στο χώρο της μέσης τάσης του Bishop, με την τροποποιημένη μύζηση των Wheeler et al. (2003) (βλέπε ενότητα 4.3) να αποτελεί την δεύτερη καταστατική παράμετρο. Το προσομοίωμα τους προσομοιώνει με επιτυχία αποτελέσματα τριαξονικής θλίψης τόσο σε ισότροπα όσο και σε ανισότροπα αρχικώς στερεοποιημένα εδαφικά δοκίμια αλλά παρότι κάνει χρήση της τάσης του Bishop, οι προβλέψεις του για καταστάσεις πλήρους κορεσμού υστερούν αυτών υπό ακόρεστες συνθήκες. Επίσης υποστήριξαν ότι είναι δυνατή ή χρήση συσχετισμένου νόμου ροής ακόμα και σε προσομοιώματα με στρεβλό ελλειψοειδές αρκεί να ενσωματωθούν κατάλληλοι νόμοι κράτυνσης για την περιγραφή της εξέλιξης της ανισοτροπίας.

Τέλος, οι Sitarenios & Casini (2018) παρουσίασαν νέα δεδομένα υπέρ της υιοθέτησης στρεβλών ελλειψοειδών ως περιβάλλουσα διαρροής μη κορεσμένων εδαφών, βασιζόμενοι σε εργαστηριακά αποτελέσματα των Casini et al. (2003).

5. Σύνοψη

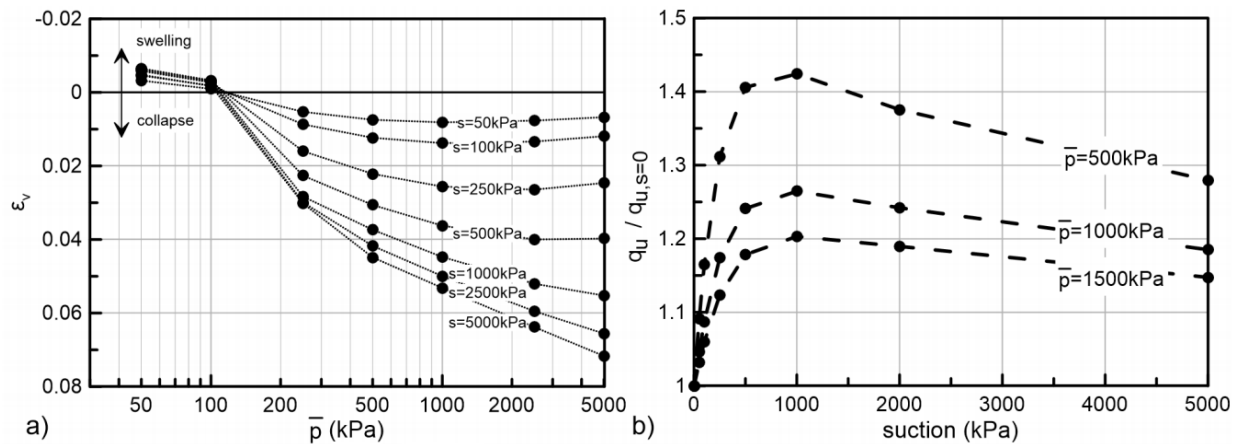
Στο παρόν άρθρο συγκεντρώθηκαν και παρουσιάστηκαν οι σημαντικότερες προτάσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς συνήθων μη διογκωσιμων, μη κορεσμένων εδαφών. Καταδείχθηκε η σημασία της πρωτοποριακής πρότασης των Alonso et al. (1990) στην κατανόηση της συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών αλλά και το πως αυτή ουσιαστικά καθόρισε και διαμόρφωσε την εξέλιξη της καταστατικής προσομοίωσης των μη κορεσμένων εδαφών για τα επόμενα σχεδόν τριάντα χρόνια.

Επιδείχθηκε ότι πρακτικώς οποιοδήποτε καταστατικό προσομοίωμα για κορεσμένα εδάφη μπορεί να επεκταθεί για καταστάσεις

μερικού κορεσμού με την χρήση ενός κατάλληλου πλαισίου συμπίεστότητας. Το πλαίσιο συμπίεστότητας περιγράφει την επιρροή του μερικού κορεσμού στην ογκομετρική συμπεριφορά των εδαφών και χρησιμοποιείται στην περιγραφή της εξέλιξης της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης με τον μερικό κορεσμό. Η εξέλιξη της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης με τον μερικό κορεσμό περιγράφει την καμπύλη φόρτισης - κατάρρευσης η οποία σε επίπεδο καταστατικής προσομοίωσης αποτελεί επιπρόσθετη επιφάνεια διαρροής διακρίνοντας εφικτές από μη εφικτές καταστάσεις στο χώρο «τάσης - μερικού κορεσμού».

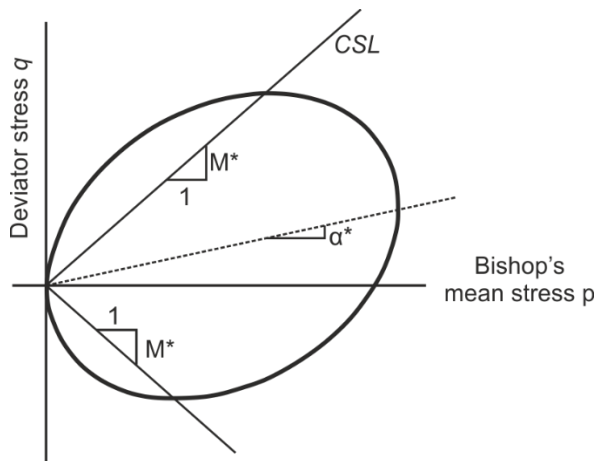
Η επιφάνεια φόρτισης - κατάρρευσης περιγράφει με ενοποιημένο τρόπο την πλαστική διαρροή λόγω φόρτισης (αύξησης τάσης) υπό σταθερές συνθήκες μερικού κορεσμού και την κατάρρευση λόγω διαβροχής. Ανεξαρτήτως του εάν η διατύπωση ενός προσομοιώματος γίνεται σε όρους ανηγμένης ολικής τάσης ή με χρήση της τάσης του εδαφικού σκελετού του Bishop, η περιγραφή της επιφάνειας φόρτισης - κατάρρευσης απαιτεί επιπρόσθετες καταστατικές μεταβλητές για την περιγραφή της κατάστασης αλλά και της φόρτισης του υλικού.

Τα τελευταία χρόνια στην καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών κερδίζει έδαφος συστηματικά η χρήση της τάσης του εδαφικού σκελετού του Bishop ως πρώτης καταστατικής μεταβλητής. Σε αυτό συντελεί η ικανότητα της τάσης του Bishop να περιγράφει φυσικά την μετάβαση μεταξύ καταστάσεων πλήρους και μερικού κορεσμού διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό και την ενσωμάτωση προσομοιωμάτων σε κώδικες αριθμητικών αναλύσεων. Επιπρόσθετα είναι σήμερα κοινώς αποδεκτό ότι η τάση του εδαφικού σκελετού του Bishop δύναται να περιγράψει επιτυχώς την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με τον μερικό κορεσμό αλλά και την ελαστική συμπεριφορά των εδαφών. Προϋπόθεση ορθής εφαρμογής της τάσης του Bishop είναι η χρησιμοποίηση του βαθμού κορεσμού (ή κάποιας συνάρτησης του βαθμού κορεσμού) ως παραμέτρου χ για τον έλεγχο της επιρροής της μύζησης επί της ποσότητας τάσης. Η χρήση του βαθμού κορεσμού στην τάση του Bishop εξασφαλίζει περαιτέρω την σύνδεση της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού με την καμπύλη συγκράτησης ύδατος του εκάστοτε εδάφους.



Σχ.18. α) Εξέλιξη των παραμορφώσεων κατάρρευσης λόγω διαβροχής και β) εξέλιξη της αντοχής με την μύζηση. Χαρακτηριστικές προβλέψεις του προσομοιώματος CMUA (Sitarenios & Kavvas 2019).

Fig. 18. a) Evolution of volumetric collapse and; b) evolution of shear strength with suction. Characteristic predictions of the CMUA model (Sitarenios & Kavvas 2019).



Σχ.19. Η επιφάνεια διαρροής των Al-Sharad & Gallipoli (2018) στο διεκτροπικό επίπεδο και υπό δεδομένο επίπεδο «τροποποιημένης μύζησης».

Fig. 19. A section of the Al-Sharad & Gallipoli (2018) yield surface on the deviatoric plane under a given level of modified suction.

Σε ό,τι αφορά τις απαιτούμενες επιπρόσθετες καταστατικές παραμέτρους, η μύζηση, ο βαθμός κορεσμού αλλά και ποσότητες οι οποίες αποτελούν τροποποιήσεις ή συνδυασμούς των ανωτέρω μπορούν να βρεθούν στην διεθνή βιβλιογραφία. Οι πλέον πρόσφατες συνεισφορές συνιστούν ότι η χρήση του βαθμού κορεσμού ως δεύτερης ή έως επιπλέον (πλέον της μύζησης) καταστατικής μεταβλητής παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η ενσωμάτωση του βαθμού κορεσμού στο πλαίσιο συμπεστότητας

μπορεί να περιγράψει με φυσικό τρόπο την συνεχή μεταβολή της συμπεστότητας ακόμα και σε συμπίεση υπό σταθερή μύζηση (απαιτείται προσομοίωμα συγκράτησης ύδατος με εξάρτηση από το δείκτη πόρων), ενώ η συνεχής αυτή μεταβολή της συμπεστότητας δύναται να περιγράψει με φυσικό τρόπο την εμφάνιση μεγίστου στις παραμορφώσεις κατάρρευσης λόγω διαβροχής. Επισημαίνεται ότι ειδικά σε περιπτώσεις που γίνεται χρήση της τάσης του Bishop ως πρώτης καταστατικής μεταβλητής, η κατάλληλη χρήση του βαθμού κορεσμού και στο πλαίσιο συμπεστότητας εξασφαλίζει την συμβατότητα και την ομαλή μετάβαση της ογκομετρικής συμπεριφοράς μεταξύ καταστάσεων πλήρους και μερικού κορεσμού.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι έχει καταβληθεί προσπάθεια το παρόν άρθρο να αποτελέσει μία κατά το δυνατόν πιο αντικειμενική παρουσίαση των σημαντικότερων συνεισφορών στην καταστατική προσομοίωση των μη διογκώσιμων, μη κορεσμένων εδαφών. Αναπόφευκτα όμως δεν παύει σε σημαντικό βαθμό να αντικατοπτρίζει τις προσωπικές απόψεις του συγγραφέα, και για αυτό οι παρουσιαζόμενες πληροφορίες δεν θα πρέπει να ληφθούν ούτε ως πρόταση αλλά και ούτε ως αποτροπή χρήσης συγκεκριμένων καταστατικών προσομοιωμάτων έναντι άλλων. Σκοπός του παρόντος άρθρου είναι να αποτελέσει ένα κείμενο αναφοράς για την αναζήτηση αρχικών πληροφοριών, ενώ σε κάθε περίπτωση ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης θα πρέπει να μελετήσει σε βάθος τις αντίστοιχες

προτεινόμενες βιβλιογραφικές αναφορές πριν την χρησιμοποίηση οποιουδήποτε από τα παρουσιαζόμενα καταστατικά προσομοιώματα. Επιπρόσθετα στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει σημαντικός αριθμός αντίστοιχων συνεισφορών που συνοψίζουν πληροφορίες σχετικά με την καταστατική προσομοίωση μη κορεσμένων εδαφών και στις οποίες ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει (Wheeler & Karube 1996, Gens 2000, Leong et al. 2003, Gens et al. 2006, Sheng & Fredlund 2008, Sheng 2011, Arai et al. 2014).

Βιβλιογραφία

- Λουκίδης, Δ., 2019, Διόγκωση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 83-100.
- Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2016, *Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών*, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ 2016, σελ. 1300.
- Τσιαμπούση, Α., 2019, Η Χαρακτηριστική Καμπύλη εδάφους νερού και η σημασία της, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 43-66.
- Alonso, E.E., Gens, A. and Hight, D.W., 1987, August. General report. Special problem soils. In *Proceedings of the 9th European Conference on soil mechanics and foundation engineering, Dublin* (Vol. 3, pp. 1087-1146).
- Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), pp.405-430.
- Alonso, E.E., Pereira, J.M., Vaunat, J. and Olivella, S., 2010. A microstructurally-based effective stress for unsaturated soils. *Géotechnique*, 60(12), pp.913-925.
- Alonso, E.E., Pinyol, N.M. and Gens, A., 2013. Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling. *Géotechnique*, 63(6), p.463.
- Al-Sharrad, M.A. and Gallipoli, D., 2016. Incorporating anisotropy in the Barcelona basic model. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 9, p. 17003). EDP Sciences.
- Al-Sharrad, M.A. and Gallipoli, D., 2018. Modelling anisotropy of unsaturated soils using Bishop's stress. In *Proc. of the 7th International Conference on Unsaturated Soils, Hong Kong, 3-5 August 2018*.
- Al-Sharrad, M.A., Gallipoli, D. and Wheeler, S.J., 2017. Experimental investigation of evolving anisotropy in unsaturated soils. *Géotechnique*, 67(12), pp.1033-1049.
- Arai, W., Prunier, F., Djeran-Maigre, I. and Millard, A., 2014. On the use of effective stress in three-dimensional hydro-mechanical coupled model. *Computers and Geotechnics*, 58, pp.56-68.
- Bardanis, M.E. and Kavvas, M.J., 2006, Prediction of the limiting void ratio of clayey soils after drying, In *Proceedings of the 4th International Conf. on Unsaturated Soils*, Carefree, Arizona, USA, April 2-5, 2006, Vol. 1, pp. 1085-1096.
- Bardanis, M.E. and Kavvas, M.J., 2008. Modifying the Barcelona Basic Model to account for the residual void ratio and subsequent decrease of shear strength relative to suction. In *Proceedings of the 1st Europe Conference, E-UNSAT, Durham, UK, 2008* (pp. 589-595).
- Barrera Bucio, M., 2002. *Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables*. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2002.
- Belokas, G. and Kavvas, M., 2011. An intrinsic compressibility framework for clayey soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), pp.855-871.
- Bishop, A. W., 1959. *The principle of effective stress*. Teknick Ukeblad, 39, pp. 859-863.
- Bolzon, G., Schrefler, B.A. and Zienkiewicz, O.C., 1996. Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states. *Géotechnique*, 46(2), pp.279-289.
- Buisson MSR & Wheeler SJ, 2000. Inclusion of hydraulic hysteresis in a new elasto-plastic framework for unsaturated soils, In *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils* (pp. 109-119). Tarantino, A. and Mancuso, C. eds., CRC Press.
- Casini, F., 2012. Deformation induced by wetting: a simple model. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(8), pp.954-960.
- Casini, F., Serri, V. and Springman, S.M., 2012. Hydromechanical behaviour of a silty sand

- from a steep slope triggered by artificial rainfall: from unsaturated to saturated conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1), pp.28-40.
- Casini, F., Vaunat, J., Romero, E. and Desideri, A., 2012. Consequences on water retention properties of double-porosity features in a compacted silt. *Acta Geotechnica*, 7(2), pp.139-150.
- Cui, Y.J. and Delage, P., 1996. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46(2), pp.291-311.
- D'Onza, F., Gallipoli, D. and Wheeler, S., 2010. Effect of anisotropy on the prediction of unsaturated soil response under triaxial and oedometric conditions. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, 6-8 September 2010*, pp. 787-794
- Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R., 1977, Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(5), pp.447-466.
- Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R. and Vaunat, J., 2003a. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour. *Géotechnique*, 53(1), pp.123-136.
- Gallipoli, D., Wheeler, S.J. and Karstunen, M., 2003b. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. *Géotechnique*, 53(1), pp.105-112.
- Gens, A., 2010. Soil-environment interactions in geotechnical engineering. *Géotechnique*, 60(1), p.3.
- Gens, A., Sánchez, M. and Sheng, D., 2006. On constitutive modelling of unsaturated soils. *Acta Geotechnica*, 1(3), p.137.
- Georgiadis, K., 2003. *Development, implementation and application of partially saturated soil models in finite element analysis* PhD Thesis, Imperial College, London, UK, 2003.
- Houlsby, G.T., 1997. The work input to an unsaturated granular material. *Géotechnique*, 47(1), pp.193-196.
- Jefferies, M.G., 1993. Nor-Sand: a simple critical state model for sand. *Géotechnique*, 43(1), pp.91-103.
- Jommi, C., 2014. Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils. In *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils* (pp. 147-162). CRC Press.
- Josa, A., Balmaceda, A., Gens, A. and Alonso, E.E., 1992, April. An elastoplastic model for partially saturated soils exhibiting a maximum of collapse. In *3rd international conference on computational plasticity, Barcelona* (Vol. 1, pp. 815-826).
- Karube, D. and Kawai, K., 2001. The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils. *Geotechnical & Geological Engineering*, 19(3-4), pp.211-241.
- Kavvasdas, M.J., 2000. General report: Modelling the soil behaviour-Selection of soil parameters. In *Proc. 2nd Int. Conf. Geotech. Hard Soils-Soft Rocks* (Vol. 2, pp. 1441-1481).
- Kikumoto, M., Kyokawa, H., Nakai, T. and Shahin, H.M., 2011. A simple elasto-plastic model for unsaturated soils and interpretations of collapse and compaction behaviors. *Unsaturated Soils*, (EE Alonso and A. Gens, eds.), Barcelona, Spain, 2010: pp. 849-855.
- Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T., 1993. Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils. *Soils and foundations*, 33(4), pp.49-63.
- Lagioia, R., Puzrin, A.M. and Potts, D.M., 1996. A new versatile expression for yield and plastic potential surfaces. *Computers and Geotechnics*, 19(3), pp.171-191.
- Leong, E.C., Rahardjo, H. and Fredlund, D.G., 2003, June. A comparative study of constitutive models for unsaturated soils. In *Proc., 2nd Asian Conf. on Unsaturated Soils*, Osaka, Japan 2003 (pp. 41-46).
- Loret, B. and Khalili, N., 2000. A three-phase model for unsaturated soils. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 24(11), pp.893-927.
- Mašin, D. and Khalili, N., 2008. A hypoplastic model for mechanical response of unsaturated soils. *International Journal for*

- Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(15), pp.1903-1926.
- Matyas, E.L. and Radhakrishna, H.S., 1968. Volume change characteristics of partially saturated soils. *Géotechnique*, 18(4), pp.432-448.
- Mitchell, J.K. and Soga, K., 2005. Fundamentals of soil behavior. *Fundamentals of soil behavior*, (Ed. 3).
- Pastor, M., Zienkiewicz, O.C. and Chan, A.H.C., 1990. Generalized plasticity and the modelling of soil behaviour. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 14(3), pp.151-190.
- Rampino, C., Mancuso, C. and Vinale, F., 2000. Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), pp.748-763.
- Roscoe, K. and Burland, J.B., 1968. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay.
- Sheng, D. & Fredlund, D. G. (2008). Elastoplastic modelling of unsaturated soils: an overview. *Proc. 12th Int. Conf. of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, 2084-2105 (CD-ROM).
- Sheng, D. and Zhou, A.N., 2011. Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(5), pp.826-840.
- Sheng, D., 2011. Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour. *Computers and Geotechnics*, 38(6), pp.757-776.
- Sheng, D., Fredlund, D.G. and Gens, A., 2008. A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(4), pp.511-534.
- Sheng, D., Sloan, S.W. and Gens, A., 2004. A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects. *Computational Mechanics*, 33(6), pp.453-465.
- Sitarenios, P., 2016, *Constitutive Modelling of the mechanical behaviour of Unsaturated Soils*, PhD Thesis, School of Civil Engineering, NTUA 2016.
- Sitarenios, P. and Casini, F., 2018, August. Evaluating different yield surface assumptions in representing constant axial load tests which follow anisotropic consolidation. In *Proc. of the 7th International Conference on Unsaturated Soils, Hong Kong, 3-5 August 2018*
- Sitarenios, P. and Kavvadas, M., 2014. A compressibility framework to describe the volume change behaviour of unsaturated clayey soils. In *Unsaturated Soils: Research & Applications* (pp. 473-480). CRC Press.
- Sitarenios, P. and Kavvadas, M., 2019, A plasticity Constitutive Model for Unsaturated, Anisotropic, non-expansive soils (CMUA). Submitted for Publication.
- Sivakumar, V. and Doran, I.G., 2000. Yielding characteristics of unsaturated compacted soils. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures*, 5(4), pp.291-303.
- Stropeit, K., Wheeler, S. and Cui, Y.J., 2008. An anisotropic elasto-plastic model for unsaturated soils. In *Proceedings of the 1st Europe Conference, E-UNSAT, Durham, UK, 2008* (pp. 625-631).
- Sun, D.A., Sheng, D. and Sloan, S.W., 2007. Elastoplastic modelling of hydraulic and stress-strain behaviour of unsaturated soils. *Mechanics of Materials*, 39(3), pp.212-221.
- Tang, G.X. and Graham, J., 2002. A possible elastic plastic framework for unsaturated soils with high-plasticity. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4), pp.894-907.
- Toll, D.G., 1990. A framework for unsaturated soil behaviour. *Géotechnique*, 40(1), p.31.
- Tsiampousi, A., Zdravković, L. and Potts, D.M., 2013a. A new Hvorslev surface for critical state type unsaturated and saturated constitutive models. *Computers and Geotechnics*, 48, pp.156-166.
- Tsiampousi, A., Zdravkovic, L. and Potts, D.M., 2013b. A three-dimensional hysteretic soil-water retention curve. *Geotechnique*, 63(2), p.155.
- Vaunat, J., Romero, E. and Jommi, C., 2000. An elastoplastic hydromechanical model for unsaturated soils. *Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils*.

- Wheeler, S.J. and Karube, D., 1996. Constitutive modelling. In *Proc. 1st International Conf. on Unsaturated Soils, (UNSAT 95)*, Paris, France, 6-8 Sept. 1995. (3), pp.1323-56.
- Wheeler, S.J. and Sivakumar, V., 1995. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Géotechnique*, 45(1), pp.35-53.
- Wheeler, S.J., 1991. An alternative framework for unsaturated soil behaviour. *Geotechnique*, 41(2).
- Wheeler, S.J., 1996. Inclusion of specific water volume within an elasto-plastic model for unsaturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1), pp.42-57.
- Wheeler, S.J., Näätänen, A., Karstunen, M. and Lojander, M., 2003. An anisotropic elastoplastic model for soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), pp.403-418.
- Wheeler, S.J., Sharma, R.S. and Buisson, M.S.R., 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, 53(1), pp.41-54.
- Wheeler, S.J., Sharma, R.S. and Buisson, M.S.R., 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, 53(1), pp.41-54.
- Zhang, F. and Ikariya, T., 2011. A new model for unsaturated soil using skeleton stress and degree of saturation as state variables. *Soils and Foundations*, 51(1), pp.67-81.
- Zhou, A. and Sheng, D., 2015. An advanced hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils with different initial densities. *Computers and Geotechnics*, 63, pp.46-66.
- Zhou, A.N., Sheng, D., Sloan, S.W. and Gens, A., 2012a. Interpretation of unsaturated soil behaviour in the stress-saturation space, I: volume change and water retention behaviour. *Computers and Geotechnics*, 43, pp.178-187.
- Zhou, A.N., Sheng, D., Sloan, S.W. and Gens, A., 2012b. Interpretation of unsaturated soil behaviour in the stress-saturation space: II: constitutive relationships and validations. *Computers and Geotechnics*, 43, pp.111-123.

ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

LONG-TERM MEASUREMENTS OF SUCTION IN GREECE AND CYPRUS

Μ. Ε. Μπαρδάνης¹

Δρ Πολιτικός Μηχανικός

Γενικός Γραμματέας ΕΕΕΕΓΜ

Διευθυντής Εργαστηρίου, ΕΔΑΦΟΣ
Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

Δ. Λουκίδης²

Δρ Πολιτικός Μηχανικός

Πρόεδρος ΚΕΕΕΓΜ

Επικουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου
Κύπρου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εμφάνιση των μη κορεσμένων εδαφών στη φύση είναι διαπιστωμένη και τεκμηριωμένη μέσα από μετρήσεις του βαθμού κορεσμού σε δείγματα εδάφους που έχουν ληφθεί στο πλαίσιο γεωτεχνικών ερευνών. Αντίθετα, η τιμή της μύζησης των μη κορεσμένων εδαφών στο πεδίο, και μάλιστα στο πλαίσιο μακροχρόνιας παρακολούθησης είναι κάτι σπάνιο και οι αναφορές στη βιβλιογραφία πολύ λίγες και για πολύ λίγες τοποθεσίες. Η έλλειψη τέτοιων μετρήσεων στερεί την εμπειρία της αντίληψης του μεγέθους της μύζησης που μπορεί να αναπτυχθεί σε χώρες με τις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας και της Κύπρου, καθώς και την αντίληψη της δυνατότητας συντήρησης ή απώλειας αυτής της μύζησης ως συνέπεια των κλιματολογικών συνθηκών και ειδικά της βροχόπτωσης. Στο άρθρο παρουσιάζονται μετρήσεις από σταθμούς, προσωρινούς και μόνιμους, που έχουν εγκατασταθεί μέχρι σήμερα στην Ελλάδα και στην Κύπρο. Από τις -λιγοστές αυτές- μετρήσεις μέχρι σήμερα τεκμηριώνεται το μεγάλο μέγεθος της μύζησης που μπορεί να αναπτυχθεί και κατά τους θερινούς αλλά ακόμα και κατά

τους χειμερινούς μήνες, η δυνατότητα διατήρησης της μύζησης για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα, και συμπεράσματα με τη μορφή προτάσεων καλής πρακτικής κατά την υλοποίηση σταθμών μέτρησης της μύζησης επιτόπου.

ABSTRACT: The occurrence of unsaturated soils in the field has been well documented by measurements of the degree of saturation on samples taken during geotechnical investigation. On the other hand, the suction of unsaturated soils in the field, especially as part of long-term measurements, is documented very rarely and references on the subject are very few and for very few places around the world. Lack of this kind of measurements denies perception of suction magnitude and its possible loss or retention as a result of climatic conditions, especially precipitation. Suction measurements from temporary and permanent stations in Greece and Cyprus are presented in the paper. From these -admittedly few- measurements until today, the large magnitude of suction that may be found both during summer and winter is shown, along with the possibility of long periods of these suctions being maintained. Finally, suggestions of good practice for suction measurements station installations are summarized.

1. Εισαγωγή

Η πρόοδος στο αντικείμενο της εδαφομηχανικής μη κορεσμένων εδαφών τις τελευταίες δεκαετίες υπήρξε πολύ εντυπωσιακή. Αναπτύχθηκαν απλοί και πιο σύνθετοι καταστατικοί νόμοι, οι οποίοι φτάνουν μέχρι και στην περιγραφή της πλήρους θέρμο-ύδρο-μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους. Πλήρη καταστατικά προσομοιώματα και της μηχανικής συμπεριφοράς και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έχουν ενσωματωθεί σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων επιτρέποντας αναλύσεις απλών και σύνθετων προβλημάτων σε μη κορεσμένα εδάφη (Σιταρένιος, 2019). Αντίστοιχα στο εργαστήριο έχουν αναπτυχθεί συσκευές που επιτρέπουν πρακτικά την επιβολή κάθε γνωστής από τα πλήρως κορεσμένα εδάφη μηχανικής καταπόνησης του εδάφους και στα μη κορεσμένα εδάφη μέσω της τροποποίησης των αντίστοιχων συσκευών ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί μία μέ-

¹ Ηλεκτρονική διεύθυνση επικοινωνίας:
mbardanis@edafos.gr

² Ηλεκτρονική διεύθυνση επικοινωνίας:
loukidis@ucy.ac.cy

θοδος ελέγχου της μύζησης. Το τίμημα και εδώ όπως και στην περιοχή της καταστατικής προσομοίωσης είναι ο πολύ μεγαλύτερος χρόνος εκτέλεσης των δοκιμών και το πολύ μεγαλύτερο κόστος των συσκευών.

Αντίθετα όμως από το αντικείμενο της καταστατικής προσομοίωσης και της εργαστηριακής διερεύνησης, στον τομέα των μετρήσεων πεδίου και της αξιολόγησής τους, η πρόοδος στο αντικείμενο είναι πολύ πιο μικρή. Παρά τις πολυάριθμες μετρήσεις ποσοστού υγρασίας στο πλαίσιο πρακτικά κάθε γεωτεχνικής έρευνας, το ποσοστό υγρασίας μόνο του δεν επαρκεί για να περιγράψει τα μή κορεσμένα εδάφη. Η παρακολούθηση εποχιακών μεταβολών του ποσοστού υγρασίας αδυνατεί επίσης να περιγράψει την εξέλιξη στη συμπεριφορά των μή κορεσμένων εδαφών. Το μέγεθος που πρέπει να μετρείται και να παρακολουθείται, ειδικά στο πεδίο και για μεγάλα χρονικά διαστήματα, είναι η μύζηση. Από αυτό το μέγεθος θα κριθεί η εξέλιξη της αντοχής, της συμπιεστότητας και της διαπερατότητας των μή κορεσμένων εδαφών ώστε να γίνουν υπολογισμοί και να εκτιμηθεί η εξέλιξη της συμπεριφοράς τους.

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η έλλειψη αυτή θα επιχειρηθεί σε αυτό το σημείο ένας παραλληλισμός. Ας θεωρήσουμε προς στιγμήν το αντικείμενο της εδαφοδυναμικής. Ένα αντικείμενο εξίσου δύσκολο με το αντικείμενο των μή κορεσμένων εδαφών, στο οποίο έχουν γίνει επίσης σημαντικές εξελίξεις και στην καταστατική προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των εδαφών και στις εργαστηριακές μεθόδους μέτρησης των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφών. Στο αντικείμενο της εδαφοδυναμικής όμως υπάρχουν και πάρα πολλές, συστηματικές και σε βάθος χρόνου μετρήσεις. Μετρήσεις που έχουν καταγραφεί κατά τη διάρκεια αστοχιών και έχει αναλυθεί διεξοδικά η συσχέτιση των μετρηθεισών τιμών της εδαφικής επιτάχυνσης με τις αστοχίες που έχουν γίνει ή και που δεν έχουν γίνει. Ως αποτέλεσμα αυτού, υπάρχει συσσωρευμένη εμπειρία για τις αναμενόμενες εδαφικές επιταχύνσεις και τα σχετικά φάσματα προκειμένου να μπορεί να υπάρξει κατάληξη σε σεισμό σχεδιασμού, φτάνοντας μάλιστα μέχρι και τη διατύπωση κανονισμών σχεδιασμού για συνήθεις κατασκευές. Παρόλο που το αντικείμενο της εδαφοδυναμικής μοιάζει ξένο ή μακρινό σε σχέση με το αντικείμενο των μή κορεσμένων εδαφών, η εξέλιξή του δείχνει τον δρόμο που πρέπει να ακολουθηθεί και στο αντικείμενο αυτό προκειμένου να γίνει ένα άμεσα, πρακτικά εφαρμόσιμο στην καθημερινή γεωτεχνική πρακτική αντικεί-

μενο, και αυτός περνάει μέσα από τις μακροπρόθεσμες μετρήσεις της μύζησης στο πεδίο.

Χρονικά σημειακές μετρήσεις της μύζησης έχουν καταγραφεί, κυρίως για την περιγραφή αστοχιών (π.χ. από τους Krahn et al., 1989, για ένα επίχωμα που αστόχησε, ή τους Blatz, et al., 2004, για ένα όρυγμα που αστόχησε). Συστηματικές μετρήσεις μύζησης για μεγάλα ή έστω μικρότερα χρονικά διαστήματα έχουν καταγραφεί σπανιότερα (π.χ. από τους Tsaparas et al., 2003, Rahardjo et al., 2005 & 2013, Sorbino & Nicotera, 2013, Ng et al., 2003, Zhan et al., 2007, Springman et al., 2003). Μετρήσεις έχουν καταγραφεί επίσης σε πολύ διαφορετικά υλικά (όπως π.χ. την Άργιλο Λονδίνου) και σε τόσο διαφορετικό κλίμα σε σχέση με την Ελλάδα και την Κύπρο (κοντά στο Λονδίνο) από τους Smethurst et al. (2006). Το πολύ ενδιαφέρον σημείο με αυτή την αναφορά είναι ότι ακόμα και σε μία περιοχή με τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής του Λονδίνου και σε ένα εδαφικό υλικό τόσο χαμηλής διαπερατότητας όσο η Άργιλος Λονδίνου, καταγράφονται τιμές της μύζησης μέχρι και 440 kPa κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Σε άλλες πηγές έχει επίσης καταγραφεί η επιρροή της βλάστησης και της διαπνοής στην εξέλιξη και το μέγεθος της μύζησης (Biddle, 1983, Bozozuk & Burn, 1960, Fredlund & Hung, 2001). Σήμερα, η μελέτη της αλληλεπίδρασης εδάφους-ατμόσφαιρας προχωράει (π.χ. Cui, et al., 2005, 2010, 2013, Blight, 1997 & 1999) επιδεικνύοντας και πώς να χρησιμοποιούνται καταγραφόμενες τιμές της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας αλλά και πώς να συσχετίζονται με τα κλιματολογικά δεδομένα. Η πλήρης καταγραφή της βιβλιογραφίας για το θέμα υπερβαίνει το σκοπό του άρθρου, παρόλο που οι αναφερθείσες πηγές αναφέρονται σε μεγάλο εύρος κλιματολογικών συνθηκών, εφαρμογών, εύρους μετρηθείσας μύζησης, εδαφικά υλικά που έγιναν οι μετρήσεις και χρησιμοποιηθείσες μεθόδους και αισθητήρες μέτρησης.

2. Η μέτρηση της μύζησης

Μέχρι σήμερα έχουν εφευρεθεί διάφορες μέθοδοι και όργανα μέτρησης της μύζησης. Οι μέθοδοι αυτές διακρίνονται στις μεθόδους άμεσης και στις μεθόδους έμμεσης μέτρησης της μύζησης. Μέθοδοι άμεσης μέτρησης της μύζησης είναι εκείνες κατά τις οποίες η μύζηση μετρείται απευθείας, κατά τρόπο αντίστοιχο με την άμεση μέτρηση της θετικής πίεσης του νερού των πόρων ενός κορεσμένου εδαφικού υλικού. Αντίθε-

τα στις μεθόδους έμμεσης μέτρησης μετρείται ένα άλλο φυσικό μέγεθος το οποίο συσχετίζεται με τη μύζηση και από αυτό υπολογίζεται η τιμή της μύζησης του εδαφικού υλικού. Οι μέθοδοι έμμεσης μέτρησης διακρίνονται στις μεθόδους έμμεσης μέτρησης και στις μεθόδους έμμεσου προσδιορισμού (Μπαρδάνης, 2016).

Οι υπάρχουσες μέθοδοι μέτρησης της μύζησης συνοψίζονται στον Πίν. 1. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν. Στην αγγλική βιβλιογραφία οι μέθοδοι των Ομάδων Α και Β απαντώνται με τον όρο indirect methods (μέθοδοι έμμεσης μέτρησης) και οι μέθοδοι της Ομάδας Γ με τον όρο direct methods (μέθοδοι άμεσης μέτρησης). Η σκοπιμότητα της διάκρισης της μεθόδου μετατόπισης άξονα από τις υπόλοιπες βασίζεται στη διαφωνία που υπάρχει διεθνώς σχετικά με το πώς ακριβώς κατατάσσεται η μέθοδος αυτή.

Βασικά κριτήρια κατάταξης των διαφόρων μεθόδων ήταν το είδος της μύζησης που μετρούν (ολική, εδαφικού σκελετού ή ωσμωτική), ο χώρος διεξαγωγής της μέτρησης (στο εργαστήριο ή επιτόπου), το εύρος των τιμών της μύζησης που μπορούν να μετρήσουν και ο χρόνος επίτευξης της μέτρησης. Τα ίδια αυτά κριτήρια κατάταξης αποτελούν και τους παράγοντες για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για τη μέτρηση της μύζησης για κάθε εφαρμογή. Το κόστος εφαρμογής της κάθε μεθόδου, η διαθεσιμότητα των χρησιμοποιούμενων οργάνων και η αξιοπιστία από-

τελούν επίσης παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Στους Πίν. 2 και 3 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων μέτρησης της ολικής μύζησης και της μύζησης εδαφικού σκελετού αντίστοιχα.

Η μέθοδος μεμβράνης ή πορολίθου και η εξέλιξη αυτής στη μέθοδο μετατόπισης άξονα απέτελεσαν την πρώτη μέθοδο μέτρησης της μύζησης που αναπτύχθηκε και επί δεκαετίες τη μόνη διαθέσιμη μέθοδο μέτρησης της μύζησης στο κρίσιμο για προβλήματα πολιτικού μηχανικού εύρος 0 - 1500 kPa . Η μέθοδος δεν επιτρέπει τη μέτρηση της μύζησης επιτόπου αλλά μόνο στο εργαστήριο απαιτώντας μέτριο ύψους οικονομικές επενδύσεις σε εργαστηριακό εξοπλισμό και χαμηλού ύψους λειτουργικά έξοδα. Μετρήσεις της μύζησης επιτόπου μπορούν να γίνουν με τα τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα που αποτελούν κατ' ουσίαν παραλλαγή της μεθόδου πορολίθου αλλά μόνο για το εύρος τιμών της μύζησης 0 - 100 kPa (στην πράξη 0 - 90 kPa). Η μετρούμενη μύζηση είναι η μύζηση εδαφικού σκελετού. Ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας είναι της τάξης των ωρών στο εργαστήριο προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και τη μέθοδο μεμβράνης ή πορολίθου και της τάξης λεπτών της ώρας για το απλό τενσιόμετρο (εξαίρεση αποτελεί το τενσιόμετρο τύπου Quickdraw το οποίο επιτρέπει την επίτευξη μέτρησης εντός 1-2 λεπτών). Η ακρίβεια μέτρησης είναι συνήθως

Πιν. 1. Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης και οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται.

Tab. 1. Suction measurement methods and their categories.

Κατηγορία μεθόδων μέτρησης της μύζησης	Μέθοδος μέτρησης της μύζησης	Εφαρμογή
A. Μέθοδοι έμμεσης μέτρησης της μύζησης.	Μέθοδος μετατόπισης άξονα με χρήση θαλάμου μύζησης με μεμβράνη ή πορόλιθο	Εργαστήριο
	Μέθοδος χαρτιού φίλτρου	Και εργαστήριο και πεδίο (δύσκολα)
B. Μέθοδοι έμμεσου προσδιορισμού της μύζησης.	Μέθοδοι τεμαχίων πορώδους υλικού	Πεδίο
	Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης μέσω μέτρησης της σχετικής υγρασίας	Εργαστήριο. Πολύ δύσκολα στο πεδίο.
Γ. Μέθοδοι άμεσης μέτρησης της μύζησης.	Μέθοδος τενσιόμετρου με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	Και εργαστήριο και πεδίο.
	Μέθοδος τενσιόμετρου με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	Και εργαστήριο και πεδίο.
	Μέθοδος ωσμωτικού τενσιόμετρου	Και εργαστήριο και πεδίο.

Πιν. 2. Συνοψιση χαρακτηριστικών των μεθόδων μέτρησης της ολικής μύζησης.**Tab. 2.** Summary of total suction methods' characteristics.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Χαρτιών φίλτρου σε απόσταση από το εδαφικό δείγμα	NAI	NAI (;)	1000 έως 500000 kPa (ακριβέστερα 1000 έως 30000 kPa)	Τουλάχιστον 7-14 ημέρες
Ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης	NAI	OXI	100 – 70000 kPa	Λεπτά έως μία ώρα
Ψυχρόμετρα θερμικού ζεύγους	NAI	NAI	100 – 8000 kPa	Λεπτά έως μία ώρα
Υγρόμετρα σημείου δρόσου	NAI	NAI	100 – 8000 kPa	Λεπτά έως μία ώρα
Υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου	NAI	OXI	100 – 450000 kPa	Λεπτά
Αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών	NAI	NAI	1000 – 1000000 kPa	Δευτερόλεπτα
Αισθητήρες οργανικών μέσων	NAI	NAI	1000 – 1000000 kPa	Λεπτά

πολύ υψηλή (από 0.5 kPa έως 1 kPa). Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται η έλλειψη διερεύνησης της επιρροής της αύξησης της πίεσης της αέριας φάσης προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και το μικρό εύρος μέτρησης μύζησης για τη μέθοδο μεμβράνης ή πορολίθου και τα τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα. Η μέθοδος μετατόπισης άξονα έχει ωστόσο περισσότερο ενδιαφέρον ως μέθοδος ελέγχου της μύζησης, ενώ με την επένδυση στη μέθοδο αυτή εξασφαλίζονται ταυτόχρονα και μία μέθοδος μέτρησης της μύζησης και μία μέθοδος ελέγχου της μύζησης (σε σημαντικό μάλιστα εύρος τιμών της μύζησης που να επιτρέπει τη βαθμονόμηση άλλων έμμεσων μεθόδων μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού στο ίδιο εύρος τιμών, οι οποίες καλύπτουν το κενό του απλού τενσιομέτρου για τη μέτρηση της μύζησης σε αυτό το εύρος τιμών στο ύπαιθρο).

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με χαρτί φίλτρου επιτρέπει τη μέτρηση είτε της μύζησης εδαφικού σκελετού είτε της ολικής μύζησης, απαιτεί ελάχιστες πρόσθετες οικονομικές επενδύσεις σε ένα εργαστήριο εδαφομηχανικής (με εξαίρεση έναν αναλυτικό ζυγό ακριβείας 0.0001

g), έχει ελάχιστα λειτουργικά έξοδα και μεγάλο εύρος τιμών μέτρησης της μύζησης. Αυτό είναι ο – 500000 kPa (ακριβέστερα 30 – 3000 kPa) προκειμένου για τη μύζηση εδαφικού σκελετού, και 1000 – 500000 kPa (ακριβέστερα 1000 – 30000 kPa) προκειμένου για την ολική μύζηση. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται η πολύ μεγάλη διακύμανση στα αποτελέσματα των μετρήσεων της μύζησης (η οποία για να μειωθεί πρέπει να γίνονται συχνές βαθμονομήσεις οι οποίες απαιτούν αφενός επένδυση σε κάποια μέθοδο ελέγχου της μύζησης – συνήθως την μέθοδο μετατόπισης άξονα – και αφετέρου υψηλά λειτουργικά έξοδα), η απαίτηση λεπτών χειρισμών για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου, ο μεγάλος χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας και ο περιορισμός ουσιαστικά της χρήσης της μεθόδου σε μετρήσεις εργαστηρίου (χρήση της μεθόδου επιτόπου έχει αναφερθεί μεν, με αμφίβολα αποτελέσματα δε).

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με τεμάχια γύψου απετέλεσε επί δεκαετίες τη μόνη διαθέσιμη μέθοδο μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού επιτόπου στο κρίσιμο εύρος τιμών της μύζησης 30 – 3000 kPa με δυνατότητα μακροχρόνιας παρακολούθησης και ταυτόχρονη χρήση

Πιν. 3. Συνοψιση χαρακτηριστικών των μεθόδων μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού.

Tab. 3. Summary of matrix suction methods' characteristics.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Μεμβράνης ή πορολίθου	NAI	OXI	Έως 100 kPa	Ώρες
Μετατόπισης άξονα	NAI	OXI	Όση η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορολίθου. Συνήθως 1500 kPa	Ώρες έως 24ώρα
Χαρτιών φίλτρου σε επαφή με το εδαφικό δείγμα	NAI	NAI (;)	0 έως 500000 kPa (ακριβέστερα 30 έως 3000 kPa)*	Τουλάχιστον 7 ημέρες
Τεμαχίων γύψου	NAI	NAI	5 – 3000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τεμαχίων κοκκώδους σκελετού	NAI	NAI	0 – 200 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τεμαχίων πορωδών υλικών FDR	NAI	NAI	10 – 100000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας	NAI	NAI	5 – 1500 kPa	5-25 ημέρες (υπάρχουν ενδείξεις για επίτευξη μέσα σε ώρες για πολύ καλή επαφή αισθητήρα-εδάφους)
Ηλεκτρομαγνητική	NAI (;)	NAI	0 – 1000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	NAI	NAI	0 - 90 kPa	Λεπτά (1 - 30')
Τενσιόμετρα τύπου Quickdraw	NAI	NAI	0 - 90 kPa	Λεπτά (2 - 10')
Τενσιόμετρα πορώδους άκρου υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	NAI	NAI	0 - 2000 kPa	Λεπτά έως ώρες
Ωσμωτικά τενσιόμετρα	NAI	OXI	0 - 1500 kPa	Ώρες

*Εάν η μύζηση είναι τόσο υψηλή για το εδαφικό υλικό που να έχει προσεγγιστεί το παραμένον ποσοστό υγρασίας του, τότε και σε αυτή την μέθοδο μετρείται η ολική μύζηση.

της μεθόδου για μέτρηση της μύζησης και στο εργαστήριο. Συνιστά μέθοδο χαμηλού κόστους, το οποίο αυξάνεται μόνο από την απαίτηση βαθμονομήσεων και άρα επενδύσεων σε μία μέθοδο

ελέγχου της μύζησης. Η ακρίβειά της είναι σχετικά υψηλή (μετά από βαθμονόμηση) και ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας μάλλον μικρός (όπως προέκυψε κατά την χρήση των οργά-

νων από τον Μπαρδάνη, 2016). Στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνεται και η φθορά των τεμαχίων γύψου μετά από μέσης διάρκειας παραμονή στη θέση μέτρησης (η οποία επιταχύνεται εντυπωσιακά σε περιβάλλον με νερό υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα). Η παρεμφερής μέθοδος των τεμαχίων κοκκώδους υλικού επιτρέπει την πιο αξιόπιστη μέτρηση της μύζησης σε κοκκώδη εδάφη, με αντοχή στο χρόνο μάλιστα περίπου διπλάσια εκείνης των τεμαχίων γύψου, με τίμημα όμως το μικρότερο εύρος μέτρησης της μύζησης (κατά την βιβλιογραφία).

Οι αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας επιτρέπουν τη μέτρηση της μύζησης επιτόπου και στο εργαστήριο σε μεγάλο εύρος τιμών (5 – 1500 kPa) με τον ίδιο πρακτικά χρόνο απόκρισης των τεμαχίων γύψου, με το σημαντικό πλεονέκτημα έναντι αυτών ότι οι μετρήσεις τους δεν επηρεάζονται από την παρουσία διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων. Και αυτή η μέθοδος είναι χαμηλού κόστους, το οποίο αυξάνεται μόνο από την απαίτηση βαθμονομήσεων και άρα επενδύσεων σε μία μέθοδο ελέγχου της μύζησης. Η ακρίβειά της μεθόδου είναι παραπλήσια των τεμαχίων γύψου και η υστέρηση των καμπυλών βαθμονόμησης και η επιρροή της θερμοκρασίας, αν και μπορούν να διορθωθούν, ουσιαστικά αυξάνουν το λειτουργικό κόστος λόγω της ανάγκης επιμελούς βαθμονόμησης των αισθητήρων υπό τις αντίστοιχες συνθήκες. Και αυτή η μέθοδος είναι ακατάλληλη για μέτρηση της μύζησης σε περιβάλλον ραγδαίων και μη μονοτονικών μεταβολών της μύζησης.

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με κάποιον από τους αναπτυχθέντες τύπους ψυχομέτρου επιτρέπει τη μέτρηση της ολικής μύζησης επιτόπου και στο ύπαιθρο με μεγάλη ακρίβεια και με πολύ μικρό χρόνο απόκρισης. Επειδή ωστόσο μετρείται η ολική μύζηση, αντί για τη μύζηση εδαφικού σκελετού, θα πρέπει πάντοτε να επιδιώκεται η ταυτόχρονη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού, ή τουλάχιστον να γίνεται μία εκτίμηση της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης στο επίπεδο μύζησης που αντιστοιχεί στη μετρούμενη τιμή της ολικής μύζησης, και σε κάθε περίπτωση κατά την αξιολόγηση τέτοιων μετρήσεων να υπάρχει επίγνωση ότι πρόκειται για τιμές της ολικής μύζησης. Από την άλλη πλευρά, στο εύρος τιμών της μύζησης για το οποίο υπάρχουν και όργανα ή μέθοδοι που μπορούν να μετρούν τη μύζηση εδαφικού σκελετού, τα ψυχρόμετρα προσφέρουν έναν εναλλακτικό τρόπο μέτρησης της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης, από τη διαφορά ολικής μύζησης και μύζησης εδαφικού σκελετού. Επειδή τα ψυχρό-

μετρα βασίζονται στη μέτρηση της σχετικής υγρασίας για τον προσδιορισμό της μύζησης των εδαφικών υλικών, είναι πολύ ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Γι' αυτό συνιστάται ο έλεγχος της θερμοκρασίας στο χώρο πραγματοποίησης της μέτρησης. Εναλλακτικά, όταν δεν είναι δυνατός ο έλεγχος της θερμοκρασίας (π.χ. σε επιτόπου μετρήσεις) θα πρέπει να μετρείται και να καταγράφεται και η θερμοκρασία κατά το χρόνο μέτρησης, ώστε, μέσω της κατάλληλης βαθμονόμησης του οργάνου για διάφορες θερμοκρασίες, να μπορεί να γίνει διόρθωση των μετρήσεων ως προς τη θερμοκρασία. Αν και τα ψυχρόμετρα καθεαυτά δεν είναι ιδιαίτερα ακριβά, είναι ακριβοί οι μετρητές που χρησιμοποιούνται για τη διέγερσή τους και την ανάγνωση των μετρήσεων, ενώ το κόστος αυξάνεται ραγδαία και από τις απαιτήσεις ελέγχου της θερμοκρασίας, ή εναλλακτικά της βαθμονόμησης για διάφορες τιμές της, και της ανάγκης τακτικής βαθμονόμησης των οργάνων λόγω συστηματικής μεταβολής των καμπυλών βαθμονόμησης τους με το χρόνο.

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με τενσιόμετρο με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα αποτελεί την πιο πρόσφατη μέθοδο μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού και τη μοναδική μέχρι σήμερα μέθοδο άμεσης μέτρησης της μύζησης στο εύρος τιμών της μύζησης 0-2 MPa. Επιτρέπει τη μέτρηση της μύζησης στο εργαστήριο και επιτόπου ακόμα και σε περιβάλλον ραγδαίων μη μονοτονικών μεταβολών της μύζησης και με αναλογικά μικρό χρόνο επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας (λεπτά ως ώρες). Προσφέρεται επίσης και για μακροχρόνια παρακολούθηση, ενώ ταυτόχρονα το τενσιόμετρο αυτό αποτελεί το μόνο όργανο που μπορεί να ενσωματωθεί με σχετική ευκολία σε άλλες εργαστηριακές συσκευές για τη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού στα δοκίμια εντός αυτών και μάλιστα για το εύρος τιμών της μύζησης 0 – 2 MPa. Στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνονται οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό προετοιμασίας των τενσιόμετρων (ικανότητα εφαρμογής πολύ υψηλής θετικής πίεσης και πίεσης κενού), αλλά και το υψηλό κόστος των ίδιων των τενσιόμετρων, η αδυναμία κορεσμού του τενσιόμετρου όταν ο πορόλιθος του αποκορεστεί διαρκούς της μέτρησης, και η απαίτηση για λεπτούς και προσεκτικούς χειρισμούς κατά την εφαρμογή της μεθόδου (και κατά την προετοιμασία του οργάνου για μέτρηση και κατά τη μέτρηση αυτή καθεαυτή).

Προκειμένου λοιπόν για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μέτρησης της μύζησης απο-

φασιστικοί παράγοντες που πρέπει να αποσαφηνιστούν πρώτα είναι το είδος των συνθηκών μέτρησης:

α) εύρος τιμών μύζησης (μικρές ή μεγάλες τιμές ή ταυτοχρόνως και μικρές και μεγάλες τιμές),

β) ταχύτητα, μέγεθος και φορά μεταβολών της μύζησης (υπάρχουν σημαντικές μεταβολές ή όχι, αν υπάρχουν, είναι ραγδαίες ή αργές, και τέλος είναι μονοτονικές ή ανακυκλικές)

γ) περιβάλλον μέτρησης της μύζησης (υπάρχουν παράγοντες στο νερό των πόρων που μπορούν να προσβάλλουν το όργανο μέτρησης ή όχι).

Μόλις αποσαφηνιστούν οι παράγοντες αυτοί, πρέπει να καθοριστούν λειτουργικού χαρακτήρα παράγοντες όπως:

α) το κόστος απόκτησης της δυνατότητας εφαρμογής της κάθε μεθόδου,

β) το λειτουργικό της κόστος,

γ) η διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού για την εφαρμογή της, προκειμένου για μέθοδο που απαιτεί λεπτεπίλεπτους χειρισμούς, και

δ) οι απαιτήσεις σε συμπληρωματικό εξοπλισμό που χρειάζεται για την πλήρη εκμετάλλευσή της.

Οι απαιτήσεις σε συμπληρωματικό εξοπλισμό μάλιστα συχνά παραγνωρίζονται αλλά αυτός μπορεί να είναι ιδιαίτερα ακριβός (εξοπλισμός κορεσμού πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα, ικανότητα εφαρμογής υψηλής πίεσης αέρα προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα, αναλυτικοί ζυγοί ακριβείας 0.0001 g προκειμένου για τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου, ύπαρξη κάποιας μεθόδου ελέγχου της μύζησης προκειμένου για μεθόδους που απαιτούν τακτική βαθμονόμηση κλπ.).

3. Η μέτρηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας

3.1 Γενικά

Το ποσοστό υγρασίας, w , αποτελεί μία από τις βασικότερες φυσικές ιδιότητες των εδαφών. Συνήθως εκφράζεται σε όρους βάρους (gravimetric water content), και ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του περιεχόμενου νερού σε ένα δείγμα εδάφους προς το βάρος της στερεάς φάσης στο ίδιο δείγμα. Η μέτρηση του ποσοστού υγρασίας σε αυτούς του όρους είναι αρκετά απλή και προϋποθέτει τη ζύγιση ενός υγρού δοκιμίου, την ξήρανσή του σε φούρνο θερμοκρασίας 110 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του και στη

συνέχεια τη ζύγιση του ίδιου δοκιμίου ξηρού πλέον, με το βάρος του ξηρού δοκιμίου να χρησιμοποιείται ως το βάρος της στερεάς φάσης στον προηγούμενο ορισμό και τη διαφορά των δύο βαρών να χρησιμοποιείται ως το βάρος του περιεχόμενου νερού στον ίδιο ορισμό. Αυτή είναι πιθανόν η απλούστερη εργαστηριακή δοκιμή εδαφομηχανικής (αποτυπώνεται λεπτομερώς σε διάφορα πρότυπα, ενδεικτικά αναφέρεται το ASTM D 2216) με μειονέκτημά της ωστόσο ότι απαιτεί την παρουσία ενός φούρνου σε συνεχή λειτουργία (προφανώς με την αντίστοιχη παρουσία παροχής ηλεκτρικού ρεύματος), ζυγό ακριβείας και απαιτεί και τουλάχιστον 12-16 ώρες μέχρι την εξαγωγή αποτελέσματος.

Εναλλακτικά αυτού του μεγέθους έχει χρησιμοποιηθεί το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, θ (volumetric water content), το οποίο είναι ο λόγος του όγκου του νερού, V_w , που περιέχεται σε δείγμα εδάφους όγκου, V , προς τον όγκο αυτό (Εξ. 1). Όπως προκύπτει εύκολα από τον ορισμό του ως φυσικό μέγεθος, το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας συσχετίζεται με το πορώδες, n , και τον βαθμό κορεσμού, S_r , μέσω της Εξ. 2, ή τον λόγο κενών, e , και τον βαθμό κορεσμού μέσω της Εξ. 3, ή τέλος με το ποσοστό υγρασίας σε όρους βάρους, τον λόγο κενών και το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεάς φάσης, G_s , μέσω της Εξ. 4.

$$\theta = V_w / V \quad (1)$$

$$\theta = n \cdot S_r \quad (2)$$

$$\theta = e \cdot S_r / (1 + e) \quad (3)$$

$$\theta = w \cdot G_s / (1 + e) \quad (4)$$

Για να μετρηθεί αυτή η παράμετρος πρέπει να συνδυαστεί η μέτρηση του ποσοστού υγρασίας σε όρους βάρους και με μετρήσεις του ολικού όγκου του δοκιμίου του εδαφικού υλικού στο οποίο γίνεται η μέτρηση αυτής της παραμέτρου. Κατά την άμεση μέτρηση αυτού του μεγέθους λοιπόν απαιτείται και πάλι η παρουσία ενός φούρνου σε συνεχή λειτουργία (προφανώς με την αντίστοιχη παρουσία παροχής ηλεκτρικού ρεύματος), ζυγού ακριβείας και χρόνου 12-16 ωρών μέχρι την εξαγωγή αποτελέσματος. Η διαφορά ωστόσο στην περίπτωση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας είναι ότι έχουν αναπτυχθεί διάφορες έμμεσες μέθοδοι μέτρησής του, ενώ αντίθετα για το ποσοστό υγρασίας σε όρους βάρους μόνο μία και μάλιστα σπάνια χρησιμοποιούμενη (η μέθοδος του καρβιδίου του ασβεστίου

–ASTM D 4944). Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να διακριθούν σε δύο ευρείες ομάδες:

- τις μεθόδους που βασίζονται σε ραδιενεργές μετρήσεις, και
- τις μεθόδους που βασίζονται σε ηλεκτρικές μετρήσεις.

Στην πρώτη ομάδα μεθόδων μπορούν να γίνουν μετρήσεις της πυκνότητας και του ποσοστού υγρασίας μέσω της παρακολούθησης της –εξασθενημένης– ταχύτητας κίνησης νετρονίων που εκπέμπονται από μία ραδιενεργή πηγή στη συσκευή. Η μέθοδος επιτρέπει μετρήσεις κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (γνωστή ως Troxler, καταγεγραμμένη στο πρότυπο ASTM D 6938, το οποίο αντικατέστησε τα παλαιότερα πρότυπα ASTM D 2922 και ASTM D 3017 με τα οποία διαχωριζόταν η μέτρηση της πυκνότητας από τη μέτρηση της υγρασίας) αλλά και σε βάθος μέσω ράβδου η οποία τοποθετείται στο έδαφος εντός ανοικτής οπής (πρότυπα ASTM D 5195 και ASTM D 5220 για μετρήσεις της πυκνότητας και της υγρασίας αντίστοιχα). Οι μέθοδοι αυτές είναι διαδεδομένες και αξιόπιστες με προβλήματα όμως που σχετίζονται με το υψηλό κόστος απόκτησης των συσκευών, τη φύλαξή τους και την εκπαίδευση του προσωπικού στη διαχείριση ραδιενεργών υλικών, όπως άλλωστε και τις γραφειοκρατικές διατυπώσεις που σχετίζονται με την αδειοδότηση για χρήση και φύλαξη ραδιενεργών υλικών. Εκτός αυτού, ιδιαίτερη μέριμνα προβλέπεται και για τις διαδικασίες βαθμονόμησης των μεθόδων αυτών (ASTM D 7759) αλλά και αυτή καθεαυτή τη δημιουργία των σχετικών υποδομών για την εκτέλεση τέτοιων διαδικασιών (ASTM D 7013).

Στη δεύτερη ομάδα μεθόδων εντάσσονται πολλές επιμέρους μέθοδοι. Επιχειρώντας την ομαδοποίησή τους, άλλες από αυτές τις μεθόδους απαιτούν την εισαγωγή ακίδων στο έδαφος για τη διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτό (με περαιτέρω ομαδοποίηση να μπορεί να γίνει ανάλογα με τον αριθμό των ακίδων και τον τρόπο που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις όπως και το είδος των μετρήσεων), και άλλες απλώς την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την επιφάνεια του εδάφους χωρίς διείσδυση ακίδων (ASTM D 7830, Fraden, 2010). Στις μεθόδους εκείνες οι οποίες βασίζονται στη διείσδυση ακίδων στο έδαφος, η βασική αρχή διέπεται από την εισαγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος διά των ακίδων αυτών στο έδαφος και την καταγραφή διαφόρων ηλεκτρικών παραμέτρων του ηλεκτρικού «κυκλώματος» που περιλαμβάνει πλέον και το εδαφικό υλικό μεταξύ των

ακίδων, ως αποτέλεσμα της ηλεκτρικής αυτής διέγερσης. Η βασική διάκριση που προαναφέρθηκε με βάση τον αριθμό των ακίδων, είναι εάν οι μετρήσεις των αποτελεσμάτων γίνονται διά των ίδιων ακίδων που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική διέγερση (δύο ακίδες), ή εάν άλλο ζεύγος ακίδων χρησιμοποιείται για την ηλεκτρική διέγερση και άλλο για την καταγραφή των διαφόρων ηλεκτρικών παραμέτρων του ηλεκτρικού «κυκλώματος» που περιλαμβάνει πλέον και το εδαφικό υλικό μεταξύ των τεσσάρων ακίδων. Από την επιλογή αυτή και μετά οι διάφορες μέθοδοι διακρίνονται ανάλογα με το είδος της ηλεκτρικής διέγερσης και το είδος των ηλεκτρικών παραμέτρων που μετρούνται και τον τρόπο της ανάλυσής τους. Βασική παράμετρος που ζητείται να μετρηθεί και να συσχετιστεί με το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας είναι η σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα (relative dielectric permittivity), η οποία ορίζεται ως η ηλεκτρική διαπερατότητα ενός μέσου προς την ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού. Η ηλεκτρική διαπερατότητα ως μέγεθος εκφράζει την αντίσταση ενός μέσου στη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου εντός αυτού. Η ηλεκτρική διαπερατότητα εξαρτάται από χαρακτηριστικά του μέσου στο οποίο μετρείται όπως η φάση του (αέριο, υγρό, στερεό ή μίγμα αυτών όπως το έδαφος), την πολικότητα των μορίων ενός υγρού (όπως το νερό στο έδαφος και σε ελεύθερη μορφή αλλά και σε μορφή συνδεδεμένη με πλακίδια αργίλου) και τη συγκέντρωσή του υγρού σε ιόντα. Οι μετρήσεις ωστόσο εξαρτώνται έντονα και από το δίκτυο μετάδοσης της ηλεκτρικής διέγερσης (αναφέρθηκε ήδη το παράδειγμα του αριθμού των ακίδων και του τρόπου χρήσης τους). Στο δεύτερο αυτό ζήτημα χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι ανάλυσης των εκπεμπόμενων και καταγεγραμμένων σημάτων, οι οποίες διακρίνουν σε επιπλέον κατηγορίες τις ηλεκτρικές μεθόδους μέτρησης του ποσοστού υγρασίας (IAEA, 2008, Tarantino et al., 2009). Η ανάλυση των μετρήσεων μπορεί να βασίζεται στον χρόνο που διανύει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα τις ακίδες (time-domain reflectometry, TDR), στο εύρος του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος μετά τη διάνυση των ακίδων (amplitude-domain reflectometry, ADR), στη συχνότητα του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος μετά τη διάνυση των ακίδων (frequency-domain reflectometry, FDR) κλπ. Σε κάθε επιμέρους μέθοδο το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας ή και η ίδια η πυκνότητα (ή το φαινόμενο βάρος) συσχετίζονται απευθείας με κάποιο από αυτά τα μεγέθη (χρόνο διαδρομής, εύρος ή συχνότητα ανακλώ-

μενων κυμάτων), είτε με την ηλεκτρική διαπερατότητα, η οποία όμως και πάλι έχει προκύψει από τα προαναφερθέντα μεγέθη. Η λεπτομερής περιγραφή αυτών των μεθόδων ξεφεύγει από τη σκοπιμότητα του παρόντος άρθρου και ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται είτε σε πρότυπα εφαρμογής αυτών των μεθόδων (ASTM D6565, D6780, D7698, D7830), είτε σε πολύ αναλυτικές βιβλιογραφικές παραπομπές (IAEA, 2008, Tarantino et al., 2009, Fraden, 2010).

Στη συνέχεια του άρθρου συνοψίζονται εμπειρίες από τη χρήση αισθητήρων μέτρησης ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας βασισμένων σε ηλεκτρικές μετρήσεις και συστάσεις καλής πρακτικής (Μπαρδάνης, 2013, Bardanis, 2016).

3.2 Διεισδυσιμότητα ακίδων

Ο πρώτος παράγοντας που καθορίζει τη δυνατότητα χρήσης μιας τέτοιας μεθόδου βασισμένης σε ακίδες είναι η δυνατότητα να διεισδύσουν οι ακίδες στο έδαφος. Συνήθως η ικανότητα αυτή καθορίζεται από το μέγεθος των κόκκων (όχι μόνο το μέσο αλλά κυρίως αυτό που αφορά ένα ποσοστό διερχομένων της τάξης του 90%) το οποίο πρέπει να είναι ένα ποσοστό της απόστασης μεταξύ των ακίδων. Προφανώς αυξημένη παρουσία κόκκων μεγέθους μεγαλύτερου της απόστασης των ακίδων δεν επιτρέπει τη διείσδυση των οργάνων, αφήνοντας ανοικτό το ενδεχόμενο ακόμα και πιθανής θραύσης ή κάμψης των ακίδων. Το δεύτερο, αν και δεν οδηγεί σε αχρηστία μία συσκευή υποχρεωτικά, ενδέχεται να οδηγήσει σε συστηματικά λάθη μετρήσεων, αφού η ακρίβεια τους βασίζεται στη γνωστή (για τον κατασκευαστή) και υποτιθέμενη σταθερή κατά τη χρήση του οργάνου απόσταση των ακίδων.

Όμοια προς το μέγεθος των κόκκων, η πυκνότητα του εδαφικού υλικού πρέπει να είναι τέτοια που να επιτρέπει τη διείσδυση των ακίδων του αισθητήρα. Παρόλο που έχουν καταγραφεί μέθοδοι εφαρμογής προδιάτρησης του εδάφους (Topp et al., 1982, Rothe et al., 1997) για τη διείσδυση των ακίδων, και μάλιστα για συμπιεστά (αργιλικά) εδάφη υπάρχουν αναφορές ότι γίνεται και πιο ακριβής η μέτρηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας με αυτή τη μέθοδο διείσδυσης (Rothe et al., 1997), το σκεπτικό της χρήσης αυτών των μεθόδων είναι η ταχύτητα εφαρμογής. Εάν πρέπει να γίνει προδιάτρηση για τη διείσδυση των ακίδων, τότε αναιρείται ο βασικός λόγος χρήσης των μεθόδων (εκτός και αν στη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν αποτελεί τόσο σημαντικό κριτήριο). Προς καλύτερη αντίληψη των

φαινομένων αυτών παρουσιάζεται η Φωτ. 1. Σε αυτήν απεικονίζεται ο αισθητήρας ML-2x της Delata-T Devices (Φωτ. 1α) σε απόπειρα χρήσης για τη μέτρηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε δοκίμια Αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου συμπυκνωμένα στη βέλτιστη υγρασία (Φωτ. 1β) και ξηρά από τη βέλτιστη (Φωτ. 1γ). Στη βέλτιστη υγρασία, ο αισθητήρας διείσδυσε μεν, ρωγματώνοντας διαμπερώς το δοκίμιο δε, οπότε λόγω διείσδυσης αέρα η μέτρηση αλλοιώνεται αισθητά. Ξηρά από τη βέλτιστη υγρασία, κατέστη αδύνατον να διεισδύσει ο αισθητήρας σε όλο το μήκος των ακίδων, οπότε είναι αδύνατη η μέτρηση. Η εμπειρία από αυτές τις δοκιμές και τη χρήση τέτοιων αισθητήρων στον ποιοτικό έλεγχο κατασκευής χωμάτων φραγμάτων υποδεικνύει την ανάγκη για τέτοιους αισθητήρες με δυνατότητα τοποθέτησής τους μέσω κρούσης ή στατικής εφαρμογής μεγάλης δύναμης.



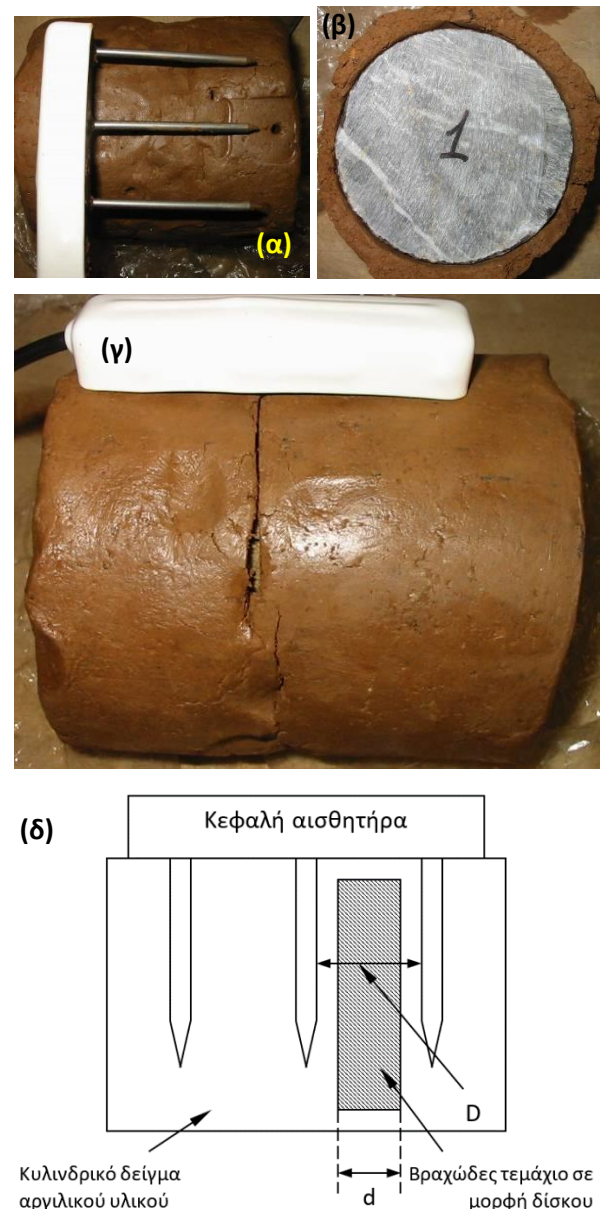
Φωτ. 1. α) Ο αισθητήρας ML-2x, β) διείσδυση σε δείγμα με τη βέλτιστη υγρασία, και γ) σε υγρασία ξηρά από τη βέλτιστη.

Phot. 1. a) ML-2x sensor, b) penetration in sample at optimum water content, and c) at water content dry of optimum.

3.3 Επιρροή χονδρόκοκκου κλάσματος

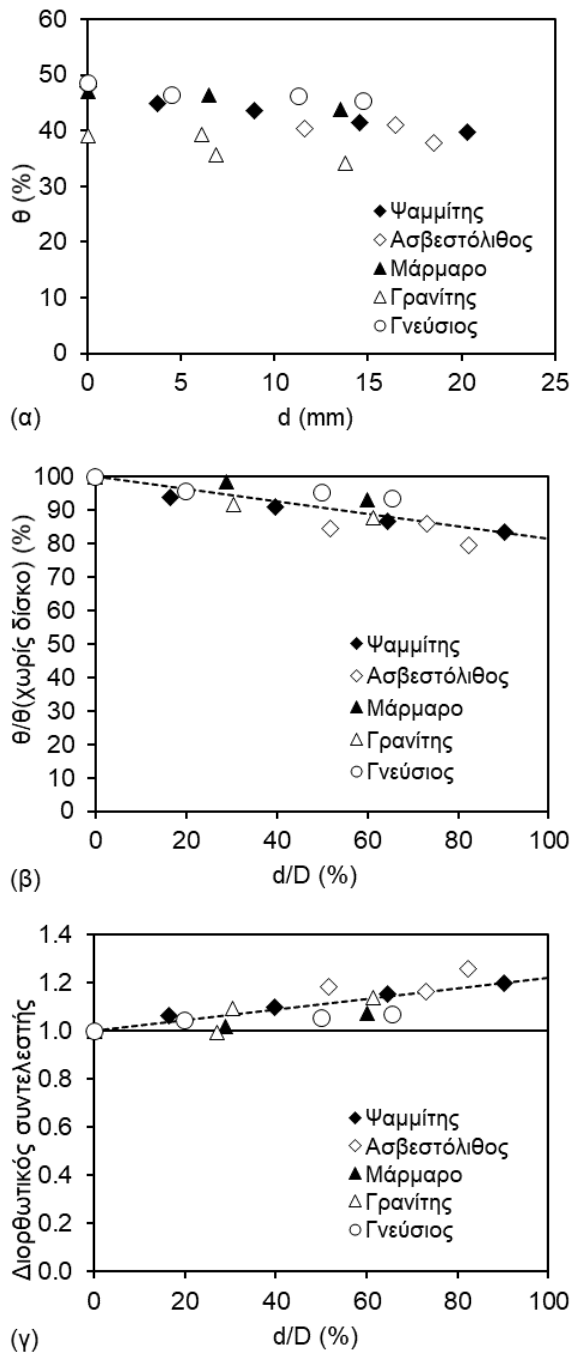
Εκτός από την προφανή άμεση επιρροή της παρουσίας ευμεγέθων κόκκων που εμποδίζουν τη διείσδυση των ακίδων τέτοιων οργάνων, η παρουσία χονδρών κόκκων μεταξύ των ακίδων των αισθητήρων, μία περίπτωση δηλαδή κατά την οποία είναι δυνατή η διείσδυση των ακίδων μεν αλλά υπάρχουν χονδρόκοκκα τεμάχια εντός του κυρίως λεπτόκοκκου δείγματος, αλλοιώνει αισθητά τη μετρούμενη τιμή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (Μπαρδάνης, 2013, Bardanis, 2016).

Δείγματα 5 διαφορετικών βράχων από γεωτρήσεις κόπηκαν σε πολύ λεπτό πάχος και αφού αφέθηκαν να κορεστούν με περίσσεια νερού, εισήχθησαν σε δείγματα συμπακνωμένης Αργίλου Σκύρου κάθετα στον άξονα των κυλινδρικών δοκιμίων έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί αισθητήρας GS3 της Decagon Devices (Frequency Domain Reflectometry, FDR), κατά τρόπο που να βρίσκονται τα δισκοειδή δοκίμια βράχου ανάμεσα στις ακίδες του αισθητήρα (Σχ. 1). Η Αργίλος Σκύρου είναι αργιλώδης ιλύς με άμμο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του πυρήνα του φράγματος Φερεκάμπου Σκύρου ($w_L=44\%$, $I_p=21$, $G_s=2.67$, $w_{opt}=23\%$, $\gamma_{d,max}=16 \text{ kN/m}^3$). Για τις δοκιμές αυτές παρασκευάστηκαν συμπακνωμένα δοκίμια πολύ υγρά από τη βέλτιστη υγρασία ($w=30\%$) και για τη μέτρηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας τους χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας GS3. Μετρήσεις του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας έγιναν σε δοκίμια χωρίς τα δισκοειδή τεμάχια και βρέθηκαν πολύ συστηματικές με πολύ μικρή διασπορά των τιμών. Έτσι στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν τα δισκοειδή τεμάχια και άρχισαν οι μετρήσεις των νέων τιμών του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχ. 2α. Κανονικοποιώντας τις μετρήσεις, οι τιμές του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας παρουσία των δισκοειδών τεμαχίων βράχου διαιρέθηκαν με το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας πριν την τοποθέτηση των δισκοειδών τεμαχίων βράχου και το πάχος των δισκοειδών τεμαχίων βράχου με την απόσταση των ακίδων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 2β υποδεικνύοντας ότι παρουσία των δισκοειδών τεμαχίων, το ποσοστό υγρασίας που μετρείται μειώνεται σε σχέση με αυτό του κυρίαρχου λεπτόκοκκου υλικού. Στο Σχ. 2γ παρουσιάζεται ο διορθωτικός συντελεστής του μετρούμενου ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας παρουσία δισκοειδών βραχιδών τεμαχίων για να υπολογιστεί το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας του λεπτόκοκκου υλικού.



Σχ. 1. α) Ο αισθητήρας GS3 πριν τη διείσδυση σε δείγμα Αργίλου Σκύρου, β) τοποθέτηση δισκοειδούς τεμαχίου ασβεστολίθου σε συμπακνωμένο δείγμα Αργίλου Σκύρου, γ) τοποθέτηση του αισθητήρα GS3 σε συμπακνωμένο δείγμα Αργίλου Σκύρου μετά την τοποθέτηση δισκοειδούς βραχιδούς τεμαχίου, και δ) σχηματική απεικόνιση της διάταξης μέτρησης με επεξήγηση αποστάσεων και των συμβόλων τους.

Fig. 1. a) GS3 sensor before insertion in Skiros Clay sample, b) disk-shaped rock sample inserted in the compacted Skiros Clay sample, c) insertion of the GS3 sensor in the compacted Skiros Clay sample with the disk-shaped rock sample in place, and d) schematic representation of the measurement array with distances definitions and symbols.



Σχ. 2. α) θ με το πάχος των δισκοειδών τεμαχίων, d , θ προς θ δείγματος χωρίς τεμάχια, και γ) διορθωτικός συντελεστής μετρούμενου θ παρουσία δισκοειδών τεμαχίων με τον λόγο του πάχους των δισκοειδών τεμαχίων, d , προς την απόσταση των ακίδων, D .

Fig. 2. a) θ vs rock disks' thickness, d , b) θ over θ of the initial sample, and c) correction coefficient of volumetric water content of sample in the presence of rock disks for 5 types of rock vs the ratio of rock disks' thickness over rods' distance, D .

Τα δεδομένα από το Σχ. 2 συνοψίζονται στις Εξ. 5 έως 7 για τον αισθητήρα GS3 και αργιλοϊλυώδη υλικά παρόμοια με την Άργιλο Σκύρου.

$$\theta/\theta_i = 100 - 0.187 \cdot d/D \quad (5)$$

$$a_\theta = 1 + 0.0022 \cdot d/D \quad (6)$$

$$\theta_{\text{corrected}} = a_\theta \cdot \theta_{\text{measured}} \quad (7)$$

3.4 Επιρροή μεταβολών όγκου κατά τη διείδυση

Η διείδυση των ακίδων αισθητήρων μέτρησης ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας προκαλεί πέριξ των ακίδων που διεισδύουν μεταβολές όγκου ανάλογες της πυκνότητας των εδαφικών υλικών στα οποία γίνεται η διείδυση. Εδαφικά υλικά μεγάλης πυκνότητας επιδεικνύουν διαστολικότητα πέριξ των ακίδων, ενώ μικρής πυκνότητας συστολικότητα. Αυτό μεταφράζεται αντίστοιχα σε αύξηση και μείωση του ολικού όγκου του εδαφικού υλικού πέριξ των ακίδων του αισθητήρα, προκαλώντας την αντίστοιχη μεταβολή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας, ενώ ο όγκος του νερού των πόρων πρακτικά μένει σταθερός. Η λεπτομερής περιγραφή του φαινομένου και των αποτελεσμάτων της σχετικής πειραματικής διερεύνησης εκφεύγει του σκοπού αυτού του άρθρου και ο αναγνώστης παραπέμπεται σε λεπτομερείς αναφορές για το θέμα (Μπαρδάνης, 2013, Bardanis, 2016). Εκείνο που επισημαίνεται εδώ είναι ότι κατά τη διακρίβωση τέτοιων αισθητήρων, είναι σκόπιμο να παρακολουθείται το μετρούμενο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας με τον χρόνο και η εξέλιξή του να συγκρίνεται και να ερμηνεύεται με βάση την πυκνότητα και την κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού και την αναμενόμενη συστολικότητα ή διαστολικότητά του κατά την διάτμηση. Η κατάληξη αυτής της ερμηνείας των δοκιμών διακρίβωσης θα επιτρέψει την αντίληψη της «ορθής» μέτρησης που πρέπει να λαμβάνεται από τον κάθε αισθητήρα κατά τη χρήση του στο πεδίο, και στο πλαίσιο μόνιμων σταθμών παρακολούθησης του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας, αλλά, ακόμα σπουδαιότερα, κατά τη χρήση αυτών των αισθητήρων σε χρονικά σημειακές μετρήσεις, όπως π.χ. σε εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου της κατάσκευής επιχώσεων για τον προσδιορισμό της υγρασίας και της πυκνότητας. Στο ίδιο πλαίσιο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη του υλικό κατάσκευής των τύπων εντός των οποίων γίνονται οι σχετικές δοκιμές (Μπαρδάνης, 2013, Bardanis, 2016).

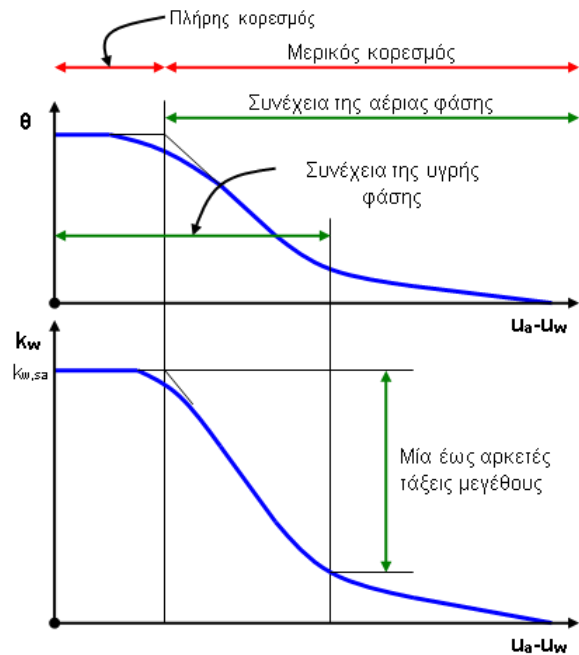
4. Η μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας επιτόπου

Καθώς ο όγκος των κενών που καταλαμβάνεται από νερό στα μη κορεσμένα εδάφη μειώνεται με την αύξηση της μύζησης, η μικροδιαπερατότητα του εδάφους ως προς την υγρή φάση μειώνεται και η μακροδιαπερατότητα αυξάνεται λόγω της εμφάνισης ρωγμών (Μπαρδάνης, 2016, 2019). Ο συντελεστής διαπερατότητας (εάν επηρεάζεται μόνο η μικροδιαπερατότητα του εδάφους) συσχετίζεται με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού όπως φαίνεται στο Σχ. 3, καθώς το νερό κινείται μόνο μέσα από τους πόρους του εδάφους που υπάρχει ήδη νερό, και μετά τον αποκορεσμό του περιορίζεται σε ολοένα και μικρότερο τμήμα των πόρων.

Για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι στο εργαστήριο (Μπαρδάνης, 2016, 2019). Μία από τις λίγες μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό επιτόπου βασίζεται στις μετρήσεις αισθητήρων μέτρησης μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε σταθμούς μέτρησης των μεγεθών αυτών στο πεδίο μετά από δοκιμές διαβροχής. Η μέθοδος είναι γνωστή ως μέθοδος χρονικά σημειακής κατανομής (instantaneous profile method) και βασίζεται στην απευθείας εφαρμογή του νόμου του Darcy για τη ροή σε μη κορεσμένα εδάφη (Εξ. 1):

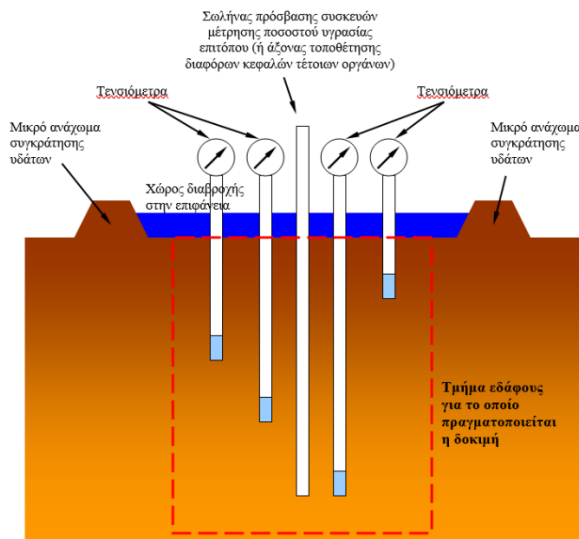
$$k = -q / (A \cdot i) \quad (1)$$

όπου k ο συντελεστής διαπερατότητας, A η επιφάνεια διά της οποίας γίνεται η ροή και i η υδραυλική κλίση. Εάν λοιπόν σε έναν σταθμό επιτόπου μετρήσεων υπάρχουν αισθητήρες μέτρησης της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε διάφορα βάθη z_i και μετά από μία δοκιμή πλήρους διαβροχής (οπότε το έδαφος κορέστηκε, και αρχίζει ο αποκορεσμός του από κατάσταση πλήρους κορεσμού) παρακολουθούνται οι ενδείξεις των αισθητήρων σε χρόνους t_i , τότε με απευθείας εφαρμογή της Εξ. 1, μπορεί να εκτιμηθεί ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση. Στο Σχ. 4 παρουσιάζεται ενδεικτική διάταξη μέτρησης της μύζησης επιτόπου με тенσιόμετρα. Στην Παράγραφο 5, παρουσιάζονται μετρήσεις από σταθμούς με διαφορετικά είδη αισθητήρων. Αν λοιπόν έχει προηγηθεί η πλήρης διαβροχή από την



Σχ. 3. Ποιοτική απεικόνιση της συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό k_w με τη μύζηση και αντιστοίχισή της με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού.

Fig. 3. Qualitative representation of the relation between water coefficient of permeability k_w and suction and its correlation to the soil-water characteristic curve.



Σχ. 4. Ενδεικτική απεικόνιση της μεθόδου χρονικά σημειακής κατανομής για τη μέτρηση του συντελεστή διαπ/τας ως προς το νερό επιτόπου.

Fig. 4. Qualitative representation of the field instantaneous profile method of measurement of the water coefficient of permeability k_w .

επιφάνεια και το έδαφος σε όλα τα βάθη εγκατάστασης αισθητήρων έχει κορεστεί πλήρως, τότε σε κάθε βάθος και χρόνο, η παροχή βρίσκεται από την Εξ. 2 και αν το ολικό υδραυλικό ύψος h_t , δίνεται ως $h_t = h_m + z$, όπου h_m το υδραυλικό ύψος λόγω μύζησης, και z το ύψος λόγω στάθμης, η υδραυλική κλίση δίνεται από την Εξ. 3.

$$q(z_i, t_i) = -dz \left(\frac{d\theta}{dt} \right)_{z_i, t_i} \quad (2)$$

$$i(z_i, t_i) = \frac{dh_t}{dz} \Big|_{z_i, t_i} \quad (3)$$

Με συνδυασμό των Εξ. 1, 2 και 3 και εύλογες υποθέσεις για την επιφάνεια διαμέσω αισθητήρων σε διαφορετικά βάθη εκτιμάται ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση επιτόπου και η εξέλιξή του με τη μύζηση. Περισσότερα για τη μέθοδο αυτή μπορούν να βρεθούν στους Lu & Likos (2004).

5. Μακροχρόνιες μετρήσεις

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων από 4 περιοχές, 3 εξ αυτών στην Ελλάδα και 1 στην Κύπρο. Οι περιοχές στην Ελλάδα είναι η Αρτέμιδα Αττικής, τα Μαριτσά Ρόδου και η θέση Μπάσαλες Σκύρου, και στην Κύπρο η Πανεπιστημιούπολη Κύπρου στην Αγλαντζιά Λευκωσίας.

5.1 Αρτέμιδα Αττικής

Στον υπαίθριο χώρο ιδιωτικής κατοικίας στην Αρτέμιδα Αττικής εγκαταστάθηκε σταθμός παρακολούθησης μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (Σχ. 5). Η συγκεκριμένη θέση έχει παρακολουθηθεί συνεχώς τον Αύγουστο του 2013, σποραδικά το 2017 και συστηματικά από 1/5/2019 μέσω αυτόματου καταγραφικού. Τα αποτελέσματα της παρακολούθησης του 2013, το είδος των αισθητήρων, η δοκιμή διαβροχής που πραγματοποιήθηκε και τα εδαφικά χαρακτηριστικά έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά από τον Bardanis (2015). Στον συγκεκριμένο σταθμό τοποθετήθηκαν πολλαπλοί αισθητήρες διαφορετικών ειδών (Πιν. 4) προκειμένου να διαπιστωθεί το αναμενόμενο εύρος τιμών μύζησης, η απόκριση και συμπεριφορά διαφόρων αισθητήρων και η υδραυλική συμπεριφορά κατά την διαβροχή και μετά από αυτήν. Το βάθος εγκατάστασης όλων των αισθητήρων ήταν 0.30m.

Πιν. 4. Αισθητήρες Σταθμού Αρτέμιδας, 2013.

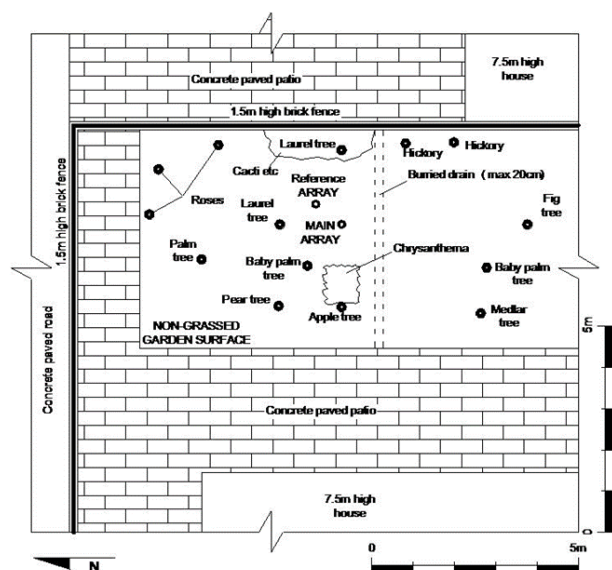
Tab. 4. Artemida Station Sensors, 2013.

Μετρούμενο μέγεθος	Κύρια διάταξη	Διάταξη αναφοράς
Μύζηση	MPS2 τεμάχιο πορώδους υλικού (Decagon Devices, USA)	MPS2 τεμάχιο πορώδους υλικού (Decagon Devices, USA)
	Τεμάχιο γύψου (Soilmoisture Equipment Corp., USA)	
	Τενσιόμετρο (Soilmoisture Equipment Corp., USA)	
Ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας	GS3 (Decagon Devices, USA) ThetaProbe ML2 (Delta-T Devices, UK)	GS3 (Decagon Devices, USA)

Το εδαφικό υλικό στο οποίο τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες ήταν ιλυώδης άμμος με λεπτούς χάλικες και ίχνη μόνο αργίλου κατατασσόμενο ως SM κατά USCS. Τα λεπτόκοκκα ήταν 32% (μόλις 2.5-3.0% μικρότερο από 0.002mm), η άμμος 46% και οι χάλικες 22%. Το υλικό ήταν μη πλαστικό με ποσοστό οργανικών 2.5-3.0% και κατά τον χρόνο λήψης των δειγμάτων στις 30/8/2013 μαζί με την ανάλυση των αισθητήρων το ποσοστό υγρασίας του κυμαινόταν από 1.5 έως 6.0% με μέσο όρο 4.0%. Το ξηρό φαινόμενο βάρος μετρήθηκε επιτόπου με τη μέθοδο κώνου-άμμου και βρέθηκε 14 kN/m³.

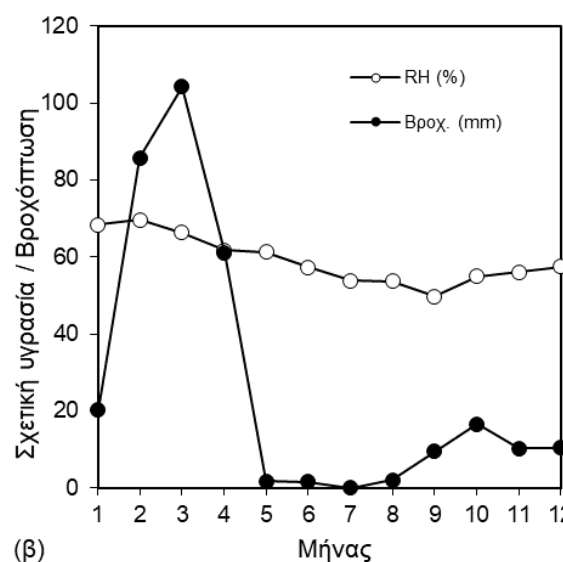
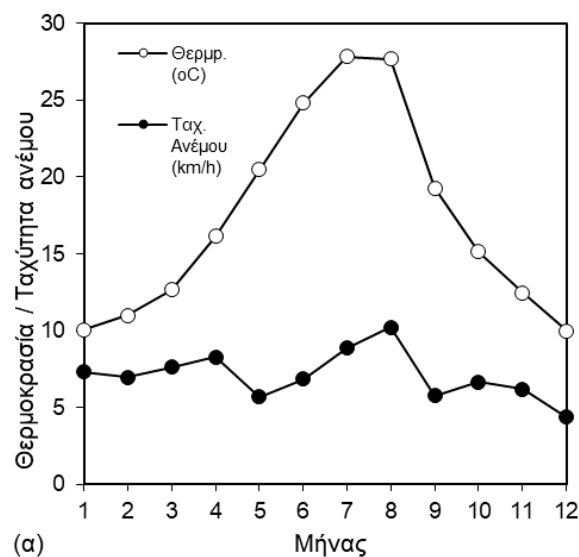
Η περιοχή εγκατάστασης των αισθητήρων επιλέχθηκε λόγω της προσβασιμότητάς της, της εύρεσης θέσης με σκίαση χωρίς απευθείας πρόσπτωση του ηλιακού φωτός και τη δυνατότητα τοποθέτησης κατά την πρώτη περίοδο παρακολούθησης πολλαπλών αισθητήρων. Το μικροκλίμα της περιοχής είναι τυπικό της περιοχής των Μεσογείων (wunderground.com, Σχ. 6).

Στο Σχ. 7 παρουσιάζονται τα βασικά μετεωρολογικά δεδομένα και τα αποτελέσματα των μετρήσεων μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας κατά την πρώτη περίοδο παρακολούθησης (Αύγουστος 2013). Η περίοδος αυτή ήταν διερευνητική και ως προς τους αισθητήρες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά κυρίως για το εύρος τιμών μύζησης που πρέπει να αναμένεται κατά τους θερινούς μήνες σε μία γεωγραφική περιοχή όπως η Αττική.



Σχ. 5. α) Σχηματική παρουσίαση θέσης κύριας διάταξης και διάταξης αναφοράς, β) φωτογραφική άποψη της θέσης τους, και γ) κοντινή άποψη της κύριας διάταξης από πάνω κατά τη δοκιμή διαβροχής.

Fig. 5. a) Layout of the location of the main and reference arrays, b) view of the main (right) and reference (left) arrays, and c) close view from the top of the main array during the inundation test performed.



Σχ. 6. α) Σχηματική παρουσίαση θέσης κύριας διάταξης και διάταξης αναφοράς, β) φωτογραφική άποψη της θέσης τους, και γ) κοντινή άποψη της κύριας διάταξης από πάνω κατά τη δοκιμή διαβροχής.

Fig. 6. Basic meteorological data for the area of the arrays: a) monthly average temperature and wind speed, and b) monthly average relative humidity and precipitation.

Με την έναρξη των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι η μύζηση ήταν τόσο υψηλή που το τενσιόμετρο (πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διεΐσδυσης αέρα, 1 Bar) άδειαζε αμέσως. Μετά από αρκετές προσπάθειες επαναπλήρωσής του, το όργανο εγκαταλείφθηκε προκειμένου η συνεχής πλήρωση και η συνεπακόλουθη διαφυγή ύδατος διά του πορώδους άκρου να μην αλλοιώσει τις

μετρήσεις μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας του φυσικού υλικού στη θέση μέτρησης. Ομοίως, οι μετρήσεις μύζησης με τα τεμάχια γύψου έφτασαν πολύ κοντά στις ελάχιστες ενδείξεις που μπορούν να καταγραφούν με αυτά τα όργανα οδηγώντας σε μεγάλες αβεβαιότητες για τις εκτιμώμενες τιμές μύζησης από αυτές τις ενδείξεις. Καθώς συνεχίζονταν οι μετρήσεις, ελήφθη η απόφαση για την πραγματοποίηση μίας δοκιμής διαβροχής, οπότε και υλοποιήθηκε και βοηθητική διάταξη αναφοράς (reference array) προκειμένου να παρακολουθούνται σε αυτήν οι μετρήσεις της μύζησης μετά από τη δοκιμή διαβροχής στην κύρια διάταξη. Στο Σχ. 7α παρουσιάζονται τα βασικά μετεωρολογικά δεδομένα (σταθμός Artemida, Attica -IATTIKIA14- δικτύου wunderground). Στο Σχ. 7β παρουσιάζονται οι μετρήσεις από τους αισθητήρες MPS2 στην κύρια διάταξη και τη διάταξη αναφοράς, η εκτιμηθείσα μύζηση από τα τεμάχια γύψου και οι μετρήσεις από το τενσιόμετρο μετά τη δοκιμή διαβροχής. Η μέγιστη μύζηση που μετρήθηκε ήταν 2.5 MPa. Καθώς η εγκατάσταση του αισθητήρα MPS2 στην κύρια διάταξη έγινε μετά από κορεσμό του, η ισορροπία με τόσο υψηλή μύζηση επήλθε μετά από 3 ημέρες, και μετά από αυτήν η ημερήσια διακύμανση της μύζησης ήταν της τάξης των 300 kPa. Κατά το στάδιο αυτό η απόκριση των τεμαχίων γύψου ήταν 2 ως 3 φορές πιο αργή από αυτή του αισθητήρα MPS2.

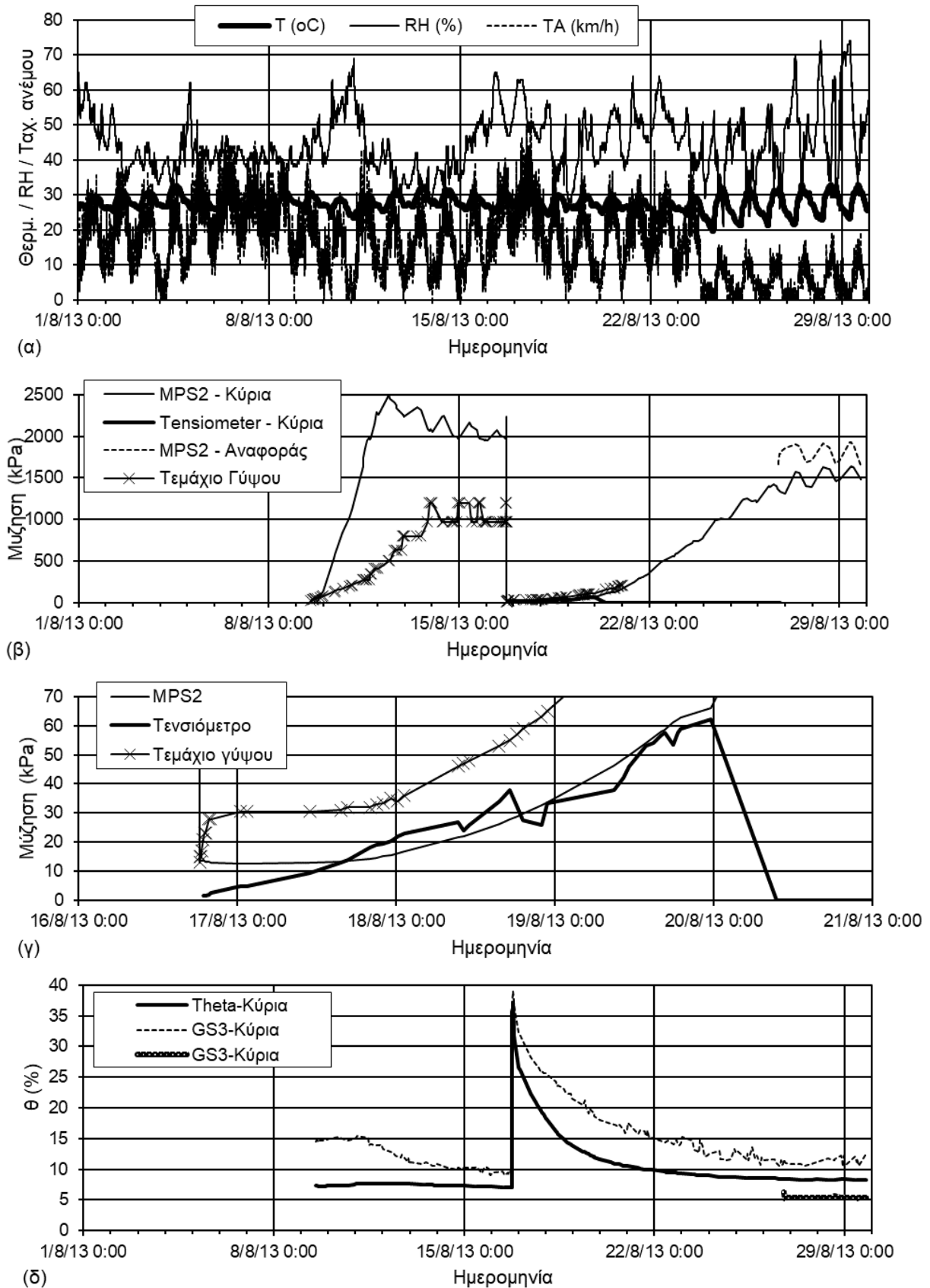
Από την έναρξη της διαβροχής, ο MPS2 αποκρίθηκε μέσα σε 40 λεπτά με ραγδαία μείωση της μύζησης από τα 2 MPa στα 13 kPa (η μικρότερη τιμή που μπορεί να μετρήσει αυτός ο αισθητήρας). Σε αυτό το χρονικό σημείο έγινε πλήρωση του τενσιόμετρου και πάλι και άρχισε η καταγραφή μύζησης και από αυτό το όργανο. Με την παύση της περαιτέρω παροχής ύδατος από την επιφάνεια (μετά από παροχή 33lt σε κυκλική επιφάνεια διαμέτρου 50cm), άρχισε και πάλι η αύξηση της μύζησης και για το στάδιο που οι τιμές ήταν ακόμα μικρές, οι μετρήσεις και από τα τεμάχια γύψου και από τα τενσιόμετρα και από τον αισθητήρα MPS2 παρουσιάζονται στο Σχ. 7γ. Οι ενδείξεις του τενσιόμετρου και του MPS2 βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους με εξαίρεση το εύρος πολύ χαμηλών τιμών της μύζησης, στο οποίο ο MPS2 δεν έχει την ευαισθησία για τη μέτρηση της μύζησης. Φαίνεται επίσης ότι ο MPS2 δεν μπορεί να παρακολουθήσει τις μικροδιακυμάνσεις της μύζησης που καταφέρνει να παρακολουθεί το τενσιόμετρο. Το τεμάχιο γύψου, με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης του κατασκευαστή, υπερεκτίμησε την μύζηση, αλλά γενικά ακολουθεί

τις μετρήσεις του τενσιόμετρου σε βαθμό που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και για τη βαθμονόμηση του συγκεκριμένου τεμαχίου γύψου.

Οι δύο αισθητήρες μέτρησης του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας που χρησιμοποιήθηκαν κατέγραψαν σημαντικές διαφορές (Σχ. 7δ), με τον αισθητήρα GS3 να μετρά αρχικά σχεδόν διπλάσια τιμή από τον αισθητήρα ThetaProbe. Η τιμή αυτή μειώθηκε σε μια τιμή μόλις 30% μεγαλύτερη μέχρι τη δοκιμή διαβροχής. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται σε μικροδιαφορές στην υγρασία και την πυκνότητα του εδάφους αλλά και λίγο μικρότερη απόσταση του GS3 από το τενσιόμετρο από το οποίο στην αρχή της παρακολούθησης γινόταν διαφυγή νερού. Αυτό υποστηρίζεται περαιτέρω από το γεγονός ότι κατά τη χρονική στιγμή μέγιστης τιμής υγρασίας μετά την διαβροχή, η διαφορά των τιμών στους δύο αισθητήρες ήταν μόλις 5.7% (GS3 39.1% & ThetaProbe 37.0%). Ωστόσο ο GS3 συνέχισε να καταγράφει μεγαλύτερες τιμές ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας από τον ThetaProbe ακόμα και αρκετό χρονικό διάστημα μετά τη διαβροχή (περίπου 50%).

Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση των καταγραφών στην κύρια και τη δευτερεύουσα διάταξη, η μύζηση στην κύρια διάταξη ισορρόπησε σε τιμές μύζησης περίπου 20% μικρότερες από τις καταγραφόμενες στη διάταξη αναφοράς. Το δε ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας ισορρόπησε σε τιμές 75% μεγαλύτερες από τις καταγραφόμενες στη διάταξη αναφοράς (καταγραφές σε αισθητήρες του ίδιου τύπου, GS3). Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν παρατηρήθηκαν μακροσκοπικές ενδείξεις παραμορφώσεων λόγω κατάρρευσης κατά τη διαβροχή.

Μετά την ανάσχυση των αισθητήρων της περιόδου μέτρησης 2013, οι ίδιοι αισθητήρες GS3 και MPS2 τοποθετήθηκαν σε δείγμα εδάφους από τη θέση μέτρησης επιτόπου σε εργαστηριακή διάταξη για τη μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του υλικού στο εργαστήριο (Φωτ. 2). Παρασκευάστηκε δοκίμιο υλικού εντός μεταλλικού τύπου με την του πεδίου μετά τον πλήρη κορεσμό και την ίδια ξηρή πυκνότητα και αφέθηκε να ξεραθεί στις ατμοσφαιρικές συνθήκες του εργαστηρίου. Στο Σχ. 8 παρουσιάζονται οι καμπύλες θ-s με συνδυασμό των αισθητήρων τενσιόμετρο-GS3 και MPS2-GS3 από το πεδίο (ώστε με τον πρώτο να προκύψει και το τμήμα της καμπύλης για πολύ χαμηλές τιμές της μύζησης) και η αντίστοιχη καμπύλη από την εργαστηριακή μέτρηση, οι οποίες βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία.



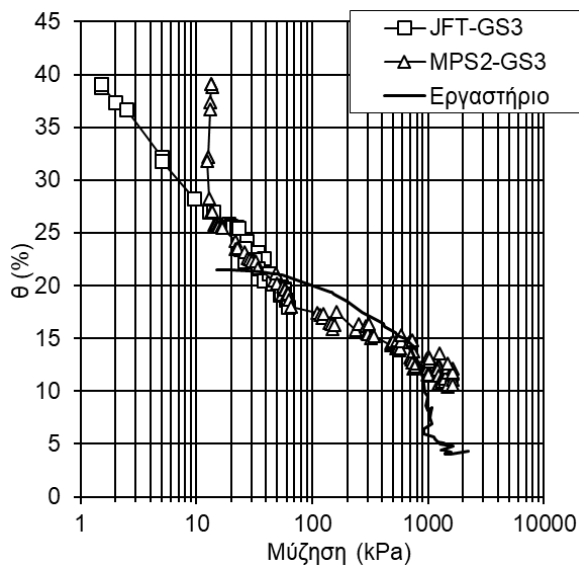
Σχ. 7. α) Βασικά μετεωρολογικά δεδομένα για την περιοχή των διατάξεων τον Αύγουστο 2013, β) μύζηση (πλήρης κλίμακα), γ) μύζηση (περιορισμένη κλίμακα), και δ) ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας.

Fig. 7. a) Basic meteorological data for the area of the arrays in August 2013, b) suction (full scale), c) suction (reduced scale), and d) volumetric water content measurements.



Φωτ. 2. Εργαστηριακή διάταξη μέτρησης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε δείγμα από το Σταθμό Αρτέμιδας μετά την ανάσχυση των αισθητήρων της περιόδου μετρήσεων 2013 με τους ίδιους αισθητήρες.

Phot. 2. Laboratory configuration for measuring the soil-water characteristic curve on sample for the Artemida Station after removal of the sensors of the 2013 measurement period with the same sensors.



Σχ. 8. Καμπύλες θ - s από μετρήσεις πεδίου και στο εργαστήριο με τους ίδιους αισθητήρες.

Fig. 8. θ - s curves from the field and laboratory.

Μετά από την περίοδο μετρήσεων του 2013, η συγκεκριμένη θέση παρακολούθηθηκε ξανά με σποραδικές μετρήσεις το καλοκαίρι έως Νοέμβριο του 2017 καταγράφοντας αντίστοιχες μετρήσεις μύζησης κατά τη θερινή περίοδο και φτάνοντας πρακτικά μέχρι μηδενισμού της μύζησης τον Νοέμβριο. Μετά και από αυτές τις παρατηρήσεις έχει εγκατασταθεί από 1/5/2019 σταθμός μετρήσεων με αυτόματο καταγραφικό και συνεχή λήψη μετρήσεων με σκοπό να γίνει παρακολούθηση της εξέλιξης των μεγεθών, αν είναι δυνατόν μέχρι τον χειμώνα και ίσως και πιο πέρα από αυτήν την περίοδο. Σε αυτήν την περίοδο μετρήσεων έχουν πλέον τοποθετηθεί οι αισθητήρες του Πιν. 5 και υλοποιήθηκε και κύρια διάταξη και διάταξη αναφοράς. Στο Σχ. 9 παρουσιάζονται οι μετρήσεις μύζησης, ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας και θερμοκρασίας στο βάθος των αισθητήρων και στο αυτόματο καταγραφικό. Όπως φαίνεται από το Σχ. 9α αρχικά οι τιμές της μύζησης ήταν περί τα 100 kPa, μηδενίστηκαν με την δοκιμή διαβροχής της 3/5/19 (70lt σε επιφάνεια διαμέτρου 70cm, Φωτ. 3 κατά την περίοδο κάλυψης με μεμβράνη) και επέδειξαν μικρή άνοδο κατά την περίοδο κάλυψης μέχρι τις 15/5/19, οπότε και έγινε η απομάκρυνση της μεμβράνης κάλυψης της επιφάνειας του εδάφους μετά την δοκιμή διαβροχής από την οποία και μετά εντός 5 ημέρων άρχισε ραγδαία αύξηση της μύζησης μέχρι εξισορρόπησης της μετά από 15-20 ημέρες σε τιμές 1600-1800 kPa σε βάθος 0.15m και 1200-1400 kPa σε βάθος 0.30m. Αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχ. 9β, οι τιμές του ογκομετρικού υγρασίας προ διαβροχής ήταν περί το 13% σε βάθος 0.30m και περί το 22-24% σε βάθος 0.15m (ανάλογα με τον αισθητήρα). Τα μεγέθη αυτά ανήλθαν σε 25% και 41% μετά τη διαβροχή, τιμές από τις οποίες άρχισαν να μειώνονται μέχρι 10% και 20% μέχρι 17/6/19. Τέλος, όπως φαίνεται από το Σχ. 9γ, διαρκούς της κάλυψης με την ελαστική μεμβράνη μετά τη διαβροχή, οι θερμοκρασίες εντός του εδάφους είναι στο άνω όριο αυτών που καταγράφονται στο θερμόμετρο του καταγραφικού, ενώ μετά την αποκάλυψη, αυτές αρχικά κυμαίνονται περί τη μέση θερμοκρασία που καταγράφεται στο καταγραφικό, και στη συνέχεια προοδευτικά προς τις χαμηλότερες τιμές του.

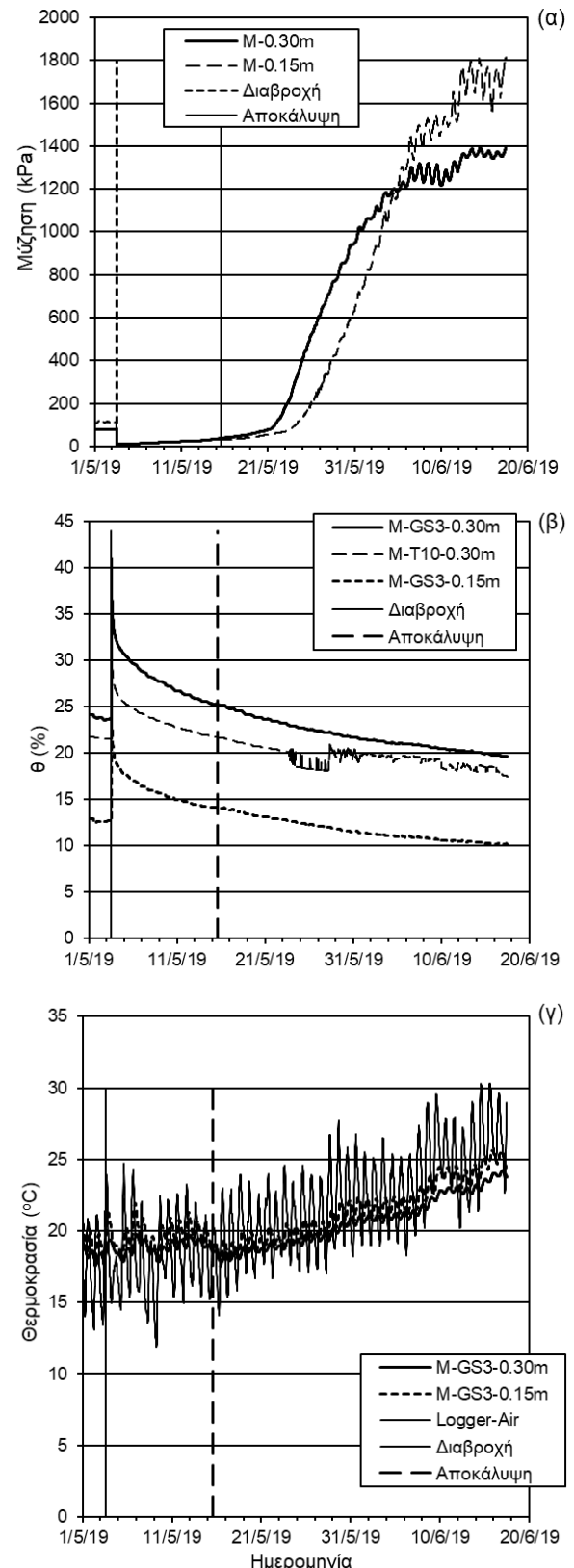
Κατά τη χρονική περίοδο μέτρησης του 2019, επιχειρήθηκε και πάλι η εγκατάσταση και διάταξης αναφοράς έστω μόνο με έναν αισθητήρα σε κοντινή απόσταση από την κύρια διάταξη. Ο αισθητήρας αυτός ήταν τεμάχιο πορώδους υλικού TEROS 21 και τοποθετήθηκε σε βάθος 0.15m. Οι μετρήσεις από αυτόν τον αισθητήρα

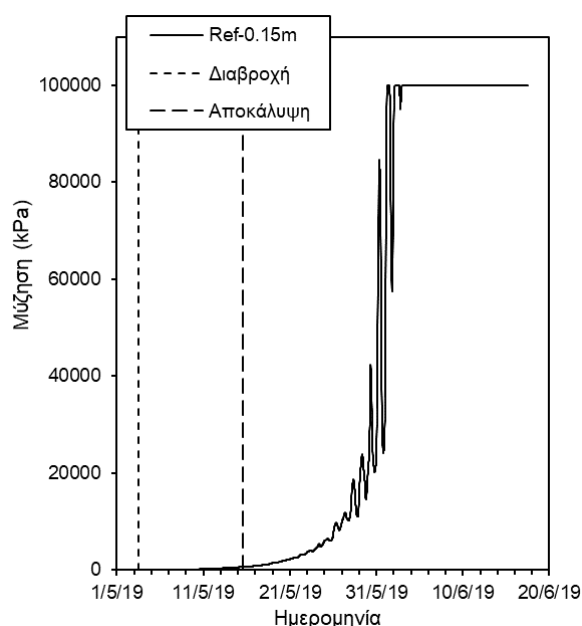
Πιν. 5. Αισθητήρες Σταθμού Αρτέμιδας, 2019.**Tab. 5.** Artemida Station Sensors, 2019.

Μετρούμενο μέγεθος	Αισθητήρες	Βάθος εγκατάστασης
Μύζηση	TEROS 21 τεμάχιο πορώδους υλικού (Meter Group Inc, USA)	0.15 και 0.30m
Ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας	TEROS 10 (Meter Group Inc, USA) GS3 (Decagon Devices, USA)	0.15 (GS3) και 0.30m (GS3 & TEROS 10)

**Φωτ. 3.** Διάταξη μετρήσεων Αρτέμιδας, 2019, κατά το στάδιο κάλυψης με μεμβράνη της επιφάνειας διαβροχής. Επισημαίνονται με βέλη το καταγραφικό (πάνω) και η κάλυψη των καλωδίων προς αυτό για θερμομόνωση.**Phot. 3.** Field measurements array in Artemis, 2019, during the cover stage of the wetting surface. Arrows indicate position of logger (top) and the thermal insulation of the cables from the measurements position to the logger.

παρουσιάζονται στο Σχ. 10. Όπως προκύπτει από το σχήμα αυτό, οι καταγραφές της μύζης σε αυτόν τον αισθητήρα πολύ γρήγορα μετά την

**Σχ. 9.** Μετρήσεις σταθμού Αρτέμιδας, 2019: α) μύζηση, β) ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, και γ) θερμοκρασία αισθητήρων & καταγραφικού.**Fig. 9.** Measurements from Artemis' Station, 2019: a) suction, b) θ , and c) temperature.



Σχ. 10. Μετρήσεις σταθμού Αρτέμιδας 2019: μέτρηση μύζησης στη διάταξη αναφοράς.

Fig. 10. Measurements from Artemis' Station, 2019: suction measurements in the reference array.

απομάκρυνση της μεμβράνης μετά τη δοκιμή διαβροχής άρχισαν να δείχνουν πολύ αυξημένες τιμές και με χαρακτηριστική πολύ μεγάλη διακύμανση μέχρι σταθεροποίησης σε τιμή 100000 kPa. Τέτοια συμπεριφορά κατά τις καταγραφές αισθητήρων πορώδους υλικού είναι δηλωτική της επαφής του αισθητήρα στη θέση τοποθέτησης με τον ατμοσφαιρικό αέρα και επίδρασης της πολύ χαμηλής σχετικής υγρασίας αυτού στην ξήρανση του πορώδους υλικού του αισθητήρα. Τέτοιες ενδείξεις απορρίπτονται και είτε επανατοποθετείται ο αισθητήρας, είτε πραγματοποιείται δοκιμή διαβροχής με τον σκοπό (ή περισσότερο την ελπίδα) η τοπική κατάρρευση στα τοιχώματα των ρωγμών να είναι μόνιμη, οπότε να επιτρέψει στον αισθητήρα να λειτουργήσει κανονικά χωρίς επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

5.2 Μαριτσά Ρόδου

Η θέση της προσωρινής εγκατάστασης μετρήσεων μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας ήταν το χωριό Μαριτσά της Ν. Ρόδου, περί τα 12km νοτιοδυτικά της πόλης της Ρόδου. Η εγκατάσταση ήταν σε κήπο αγροικίας σε αγροτική περιοχή. Ο σταθμός παρακολουθήθηκε για μικρό χρονικό διάστημα τον Αύγουστο του 2018.

Στον συγκεκριμένο σταθμό τοποθετήθηκε μόνο ένα είδος αισθητήρων μέτρησης μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (Πιν. 6).

Το εδαφικό υλικό στο οποίο τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες ήταν ιλυώδης άμμος με χάλικες και ίχνη υλικού αργιλικού μεγέθους κόκκων κατατασσόμενο ως SM κατά USCS (Φωτ. 4). Τα λεπτόκοκκα ήταν 32% (με 5% υλικό λεπτότερο από 0.002mm), η άμμος 45% και οι χάλικες 23%. Το υλικό έχει όριο υδαρότητας 34% και δείκτη πλαστικότητας 10 χωρίς οργανικά και κατά τον χρόνο λήψης των δειγμάτων στις 30/8/2018 οπότε έγινε και η απομάκρυνση των αισθητήρων το ποσοστό υγρασίας του κυμαινό-

Πιν. 5. Αισθητήρες Σταθμού Μαριτσών, 2018.

Tab. 5. Maritsa Station Sensors, 2018.

Μετρούμενο μέγεθος	Αισθητήρες	Βάθος εγκατάστασης
Μύζηση	MPS2 τεμάχιο πορώδους υλικού (Decagon Devices, USA)	0.30m
Ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας	GS3 (Decagon Devices, USA)	0.30m



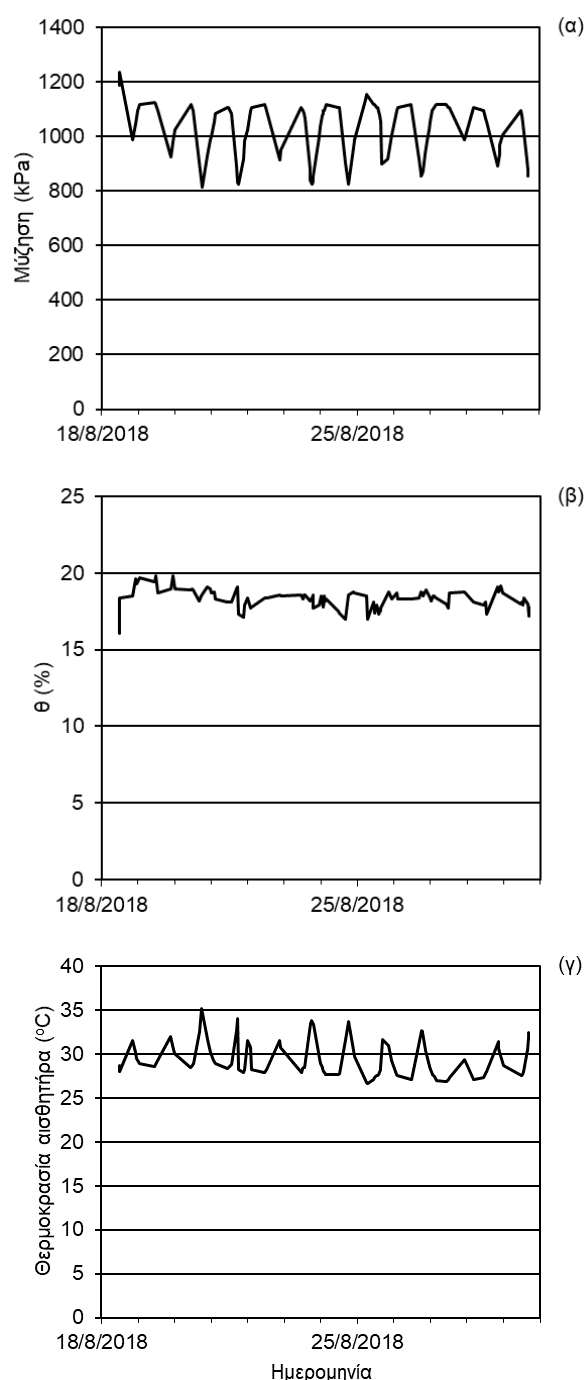
Φωτ. 4. Άποψη θέσεων μέτρησης σε κήπο αγροικίας στα Μαριτσά Ρόδου, 2018.

Phot. 4. View of measurements positions in garden of rural residence in Maritsa, Rhodes, 2018.

ταν από 3.5 έως 13%, με μέσο όρο 9%. Το ξηρό φαινόμενο βάρος μετρήθηκε επιτόπου με τη μέθοδο κώνου-άμμου και βρέθηκε 15 kN/m³.

Η περιοχή εγκατάστασης των αισθητήρων επιλέχθηκε λόγω της προσβασιμότητάς της στον συγκεκριμένο χρόνο, και το ενδιαφέρον για τη μύζηση σε ένα νησί του νοτιοανατολικού Αιγαίου, έστω και για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Στον χώρο εγκατάστασης δεν υπήρχε βλάστηση εξαιρουμένης επιπολαιόριζης χλωρίδας και ο χώρος βρισκόταν πρακτικά συνεχώς στην σκιά λόγω της παρουσίας μεγάλου δέντρου που σκίαζε τον κήπο της αγροικίας. Η θέση λοιπόν παρουσιάζει το ενδιαφέρον θερινών μετρήσεων χωρίς τις επιπτώσεις της απευθείας έκθεσης της επιφάνειας του εδάφους στο ηλιακό φως.

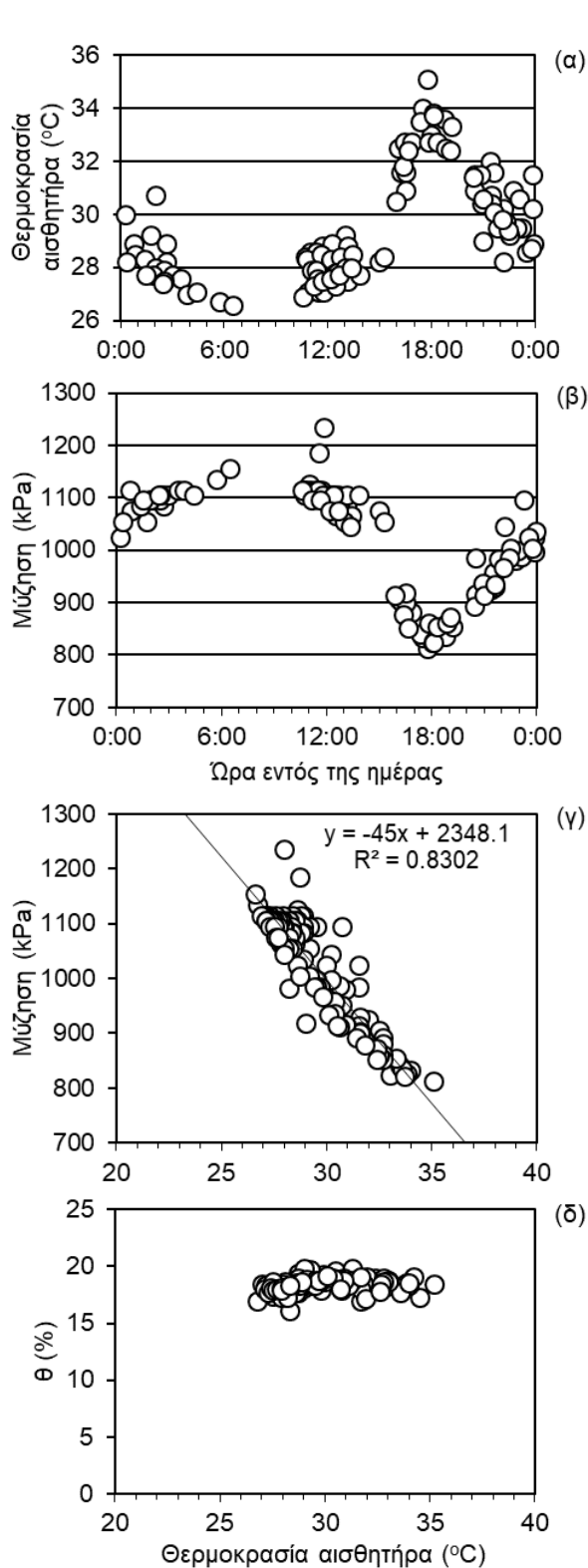
Στο Σχ. 11 παρουσιάζονται οι μετρήσεις μύζησης, ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας και θερμοκρασίας στο βάθος του αισθητήρα. Όπως φαίνεται από το Σχ. 11α η μύζηση ήταν πρακτικά σταθερή αλλά με διακυμάνσεις εντός της ημέρας. Το ίδιο συνέβαινε και στο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας αλλά με μικρότερη διακύμανση όπως φαίνεται στο Σχ. 11β. Δεδομένου ότι οι τιμές μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας ήταν πρακτικά σταθερές με διακύμανση εντός της ημέρας, επιχειρήθηκε η συσχέτισή τους με την ώρα μέτρησης εντός της ημέρας όπως φαίνεται στα Σχ. 12α (θερμοκρασία με την ώρα) και 12β (μύζηση-ώρα). Η εικόνα από αυτά τα σχήματα δείχνει σαφή εξέλιξη εντός της ημέρας. Για να διερευνηθεί το πραγματικό αίτιο, συσχετίστηκαν οι τιμές της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας με τη θερμοκρασία των αισθητήρων κατά το χρόνο λήψης των μετρήσεων όπως φαίνεται στα Σχ. 12γ και 12δ. Όπως προκύπτει από το Σχ. 12γ, η τιμή της μύζησης στον αισθητήρα MPS2 επηρεάζεται πολύ έντονα από τη θερμοκρασία στον αισθητήρα (απώλεια 45 kPa μύζησης ανά βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας). Αντίθετα, το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας παρουσιάζεται σταθερό χωρίς επίδραση της θερμοκρασίας στη μέτρησή του. Σημειώνεται ότι οι καταγραφόμενες θερμοκρασίες έχουν πιθανότατα επηρεαστεί από την έκθεση των καλωδίων στις ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς στον σταθμό αυτόν, τα καλώδια των αισθητήρων είχαν αφεθεί ακάλυπτα (Φωτ. 4). Οι μετρήσεις λοιπόν από αυτόν τον προσωρινό σταθμό επιβεβαιώνουν αφενός τις πολύ υψηλές τιμές που μπορεί να λάβει η μύζηση κατά τους θερινούς μήνες (όπως προέκυψε και από τις μετρήσεις του σταθμού Αρτέμιδας) αλλά και την έντονη επίδραση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στους αισθητήρες κατά τις μετρή-



Σχ. 11. Μετρήσεις σταθμού Μαριτσών Ρόδου: α) μύζηση, β) ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, και γ) θερμοκρασία αισθητήρα εντός εδάφους.

Fig. 11. Measurements from Basale, Skiros, Station: a) suction, b) volumetric water content, and c) temperature of sensor in the ground and logger (atmospheric).

σεις και ως εκ τούτου τη μεγάλη σημασία της θερμομόνωσης των καλωδίων σύνδεσης των αισθητήρων με τα καταγραφικά κατά την εγκατάσταση τέτοιων σταθμών μετρήσεων.



Σχ. 12. Μαριτσά: α) θερμ/σία MPS2 & β) μύζηση στον ίδιο αισθητήρα με την ώρα της ημέρας, γ) μύζηση, & δ) ογκ/κό ποσοστό υγρασίας με τη θερμ/σία στον αισθητήρα.

Fig. 12. Maritsa: a) MPS2 sensor temperature, & b) suction on the sensor with time, c) suction, & d) vol. water content with temperature.

5.3 Μπάσαλε Σκύρου

Στη θέση Μπάσαλε Σκύρου υπάρχει κατολίσθηση εντός μαργαϊκών σχηματισμών. Η κατολίσθηση αυτή έχει διερευνηθεί με γεωτρήσεις στις οποίες έχουν εγκατασταθεί κλισιόμετρα μέσω των οποίων εντοπίστηκε το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης, ενώ μετά την επανενεργοποίησή της τον Φεβρουάριο του 2019 μετά την πολύ υγρή πρόσφατη χειμερινή περίοδο, κοντά στην οφρύν της κατολίσθησης έχει εγκατασταθεί και σταθμός παρακολούθησης μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας. Οι εγκατεστημένοι αισθητήρες παρουσιάζονται στον Πιν. 6.

Το εδαφικό υλικό στο οποίο τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες είναι αμμώδης ιλύς με λεπτούς χάλικες κατά τύπους και λίγη άργιλο κατατασσόμενο ως ML κατά USCS λόγω μικρού δείκτη πλαστικότητας (Φωτ. 5). Τα λεπτόκοκκα είναι 53-78% (με 6-10% υλικό λεπτότερο από 0.002 mm), η άμμος 21-24% και οι χάλικες 2-22%. Το υλικό έχει όριο υδαρότητας 41-50% και δείκτη πλαστικότητας 14-21 χωρίς οργανικά και κατά τον χρόνο λήψης των δειγμάτων στις 22/4/2019 οπότε έγινε και η εγκατάσταση των αισθητήρων το ποσοστό υγρασίας του κυμαινόταν από 31 έως 36%. Το ξηρό φαινόμενο βάρος βρέθηκε 13-14 kN/m³.

Η θέση εγκατάστασης του σταθμού επιλέχθηκε για τις ανάγκες παρακολούθησης της κατολίσθησης, η οποία βεβαιωμένα και κατά τον χρόνο πρώτης εκδήλωσής της με μεγάλες και ραγδαίες εξελισσόμενες μετακινήσεις (16/2/04) αλλά και κατά την πρόσφατη επανενεργοποίησή της (2/19) επηρεάζεται έντονα από τα μεγάλα ύψη βροχόπτωσης. Μορφολογικά παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα ότι είναι πλήρως εκτεθειμένη στους επικρατούντες ανέμους και την ηλιοφάνεια (ανατολικός προσανατολισμός) χωρίς βλάστηση, εξαιρουμένης εποχιακής επιπολαιότητας χλωρίδας (Φωτ. 6).

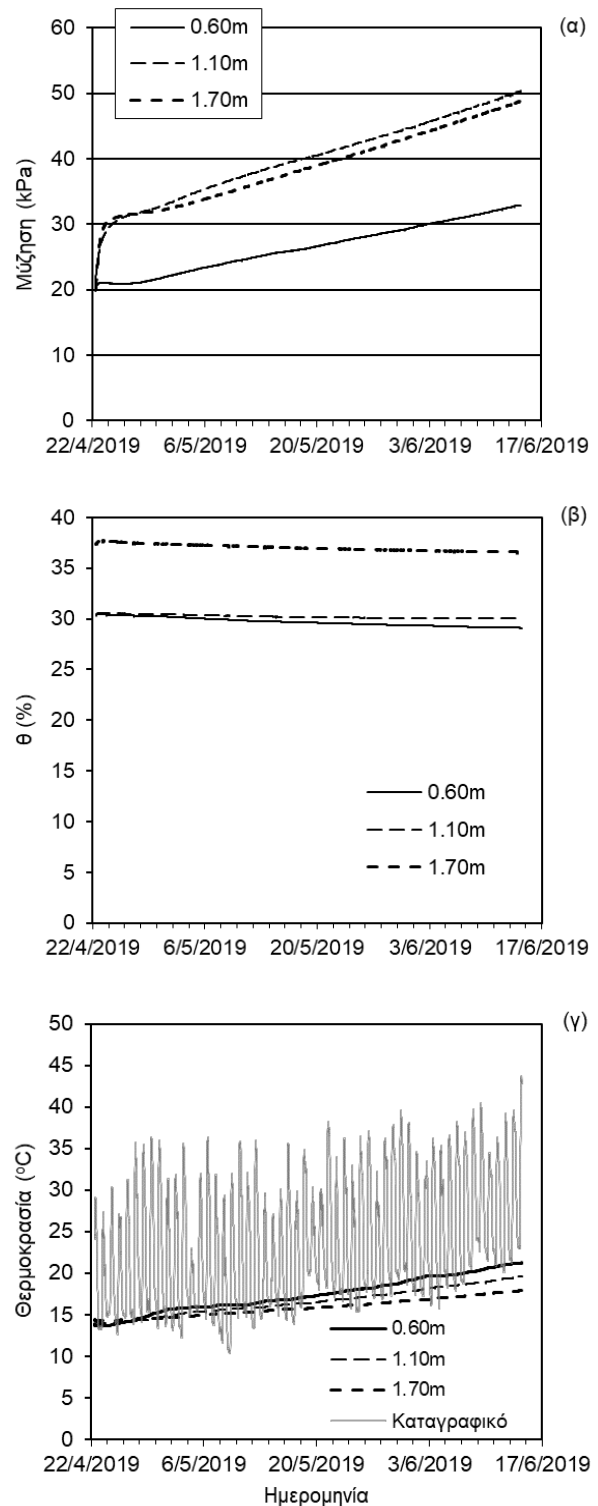
Στο Σχ. 13 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των εγκατεστημένων οργάνων μέχρι και 14/6/19. Οι τιμές μύζησης είναι μικρές και η εξέλιξή τους δηλώνει ότι οι αισθητήρες βρίσκονται ενδεχομένως ακόμα σε στάδιο εξισορρόπησης των τιμών τους. Από την άλλη πλευρά οι τιμές του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας μοιάζουν σταθεροποιημένες σε πραγματικές τιμές και έχει αποκατασταθεί κατανομή θερμοκρασιών με το βάθος εγκατάστασης (Σχ. 13γ, στο οποίο φαίνεται και η σύγκριση των τιμών θερμοκρασίας εντός του εδάφους με την θερμοκρασία στο καταγραφικό - πρακτικά αυτή της ατμόσφαιρας προσαναυξημένη

Πιν. 6. Αισθητήρες Σταθμού Μπάσαλε, 2019.**Tab. 6.** Basale Station Sensors, 2019.

Μετρούμενο μέγεθος	Αισθητήρες	Βάθος εγκατάστασης
Μύζηση	MPS2 τεμάχιο πορώδους υλικού (Decagon Devices, USA)	0.60, 1.10 και 1.70m
Ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας	TEROS 10 (Meter Group Inc, USA) GS3 (Decagon Devices, USA)	0.60, 1.10 (TEROS 10) και 1.70m (GS3)

**Φωτ. 5.** Τομή ερευνητικού φρέατος εντός του οποίου εγκαταστάθηκαν οι αισθητήρες (στην πλευρά απέναντι από τη θέση λήψης).**Phot. 5.** Trial pit side where sensors were installed.

λόγω υλικών κατασκευής καταγραφικού και κλωβού γύρω από αυτό). Στον σταθμό συνεχίζεται η παρακολούθηση με σκοπό τη συσχέτιση των μετρήσεων από αυτόν με τις καταγραφόμενες μετακινήσεις στα κλισιόμετρα και τους επιφανειακούς μάρτυρες.

**Σχ. 13.** Μετρήσεις σταθμού Μπάσαλε Σκύρου: α) μύζηση, β) ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, και γ) θερμοκρασία αισθητήρων εντός εδάφους και καταγραφικού (ατμόσφαιρα).**Fig. 13.** Measurements from Basale, Skiros, Station: a) suction, b) volumetric water content, and c) temperature of sensors in the ground and logger (atmospheric).



Φωτ. 6. Άποψη του ανάντη τμήματος της κατολίσθησης στη θέση Μπάσαλε, Σκύρου. Διακρίνεται αραιή βλάστηση και επισημαίνεται με βέλος η θέση του καταγραφικού του σταθμού μετρήσεων.

Phot. 6. View of the upstream section of the landslide at Basale, Skiros. Scarce vegetation may be observed and the location of the station logger is designated with an arrow.

5.4 Πανεπιστήμιο Κύπρου, Αγλαντζιά Λευκωσίας

Στην Κύπρο επικρατούν κλιματολογικές συνθήκες που επιβάλλουν ακόμα ξηρότερες και θερμότερες μικροκλιματικές συνθήκες στην επιφάνεια του εδάφους και από αυτές που απαντούν σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Η παρουσία αυτών σε συνδυασμό με εξαιρετικά διογκώσιμα εδαφικά υλικά σε σχηματισμούς όπως η Μάργα Λευκωσίας (Loukidis et al., 2016, Lazarou et al., 2019, Λουκίδης, 2019) και οι μπεντονιτικές άργιλοι στην Επαρχία Πάφου και επεισόδια βροχόπτωσης με μεγάλη ένταση και μεγάλα ύψη βροχής (ειδικά στα δυτικά του νησιού) καθιστούν επιτακτική τη μελέτη των μεταβολών του βαθμού κορεσμού και της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών γενικότερα. Σε αυτό το πλαίσιο, τον Ιούλιο του 2015 εγκαταστάθηκε σταθμός μετρήσεων μύζησης εδαφικού σκελετού (matric suction) και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας στην Πανεπιστημιούπολη του Πανεπιστημίου Κύπρου στην Αγλαντζιά Λευκωσίας, ο οποίος και παρακολουθείται έκτοτε. Στον Πιν. 7 αναφέρονται οι εγκατεστημένοι αισθητήρες στον σταθμό αυτόν. Η διάταξη τοποθέτησης των αισθητήρων παρουσιάζεται στο Σχ. 14α μαζί με άποψη της πλευράς του φρέατος που

Πιν. 7. Αισθητήρες Σταθμού Πανεπιστημιούπολης Πανεπιστημίου Κύπρου, Αγλαντζιά Λευκωσίας, 2015-2019.

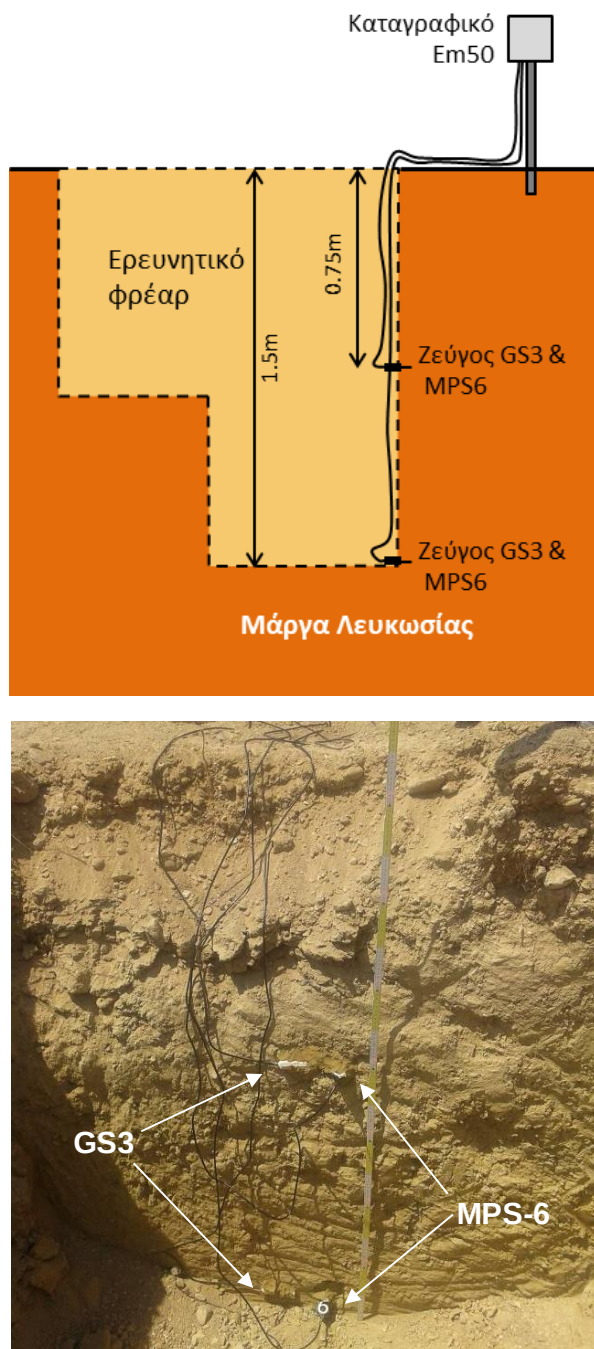
Tab. 7. Aglantzia Campus of University of Cyprus Station sensors, 2015-2019.

Μετρούμενο μέγεθος	Αισθητήρες	Βάθος εγκατάστασης
Μύζηση	MPS6 τεμάχιο πορώδους υλικού (Decagon Devices, USA)	0.75 και 1.50m
Ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας	GS3 (Decagon Devices, USA)	0.75 και 1.50m

τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες. Υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο ότι οι αισθητήρες τεμαχίου πορώδους υλικού μετρούν μύζηση εδαφικού σκελετού (τονίζεται καθώς στη Μάργα Λευκωσίας έχουν μετρηθεί μεγάλες τιμές της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης, Lazarou et al., 2019).

Το εδαφικό υλικό στο οποίο τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες είναι Μάργα του σχηματισμού Λευκωσίας, η οποία στη συγκεκριμένη θέση περιγράφεται με βάση την κοκκομετρική της διαβάθμιση ως αργιλώδης ιλύς με άμμο και κατατάσσεται ως CL έως CH κατά USCS (Σχ. 14β). Τα λεπτόκοκκα είναι 78-83% (με 16-25% υλικό λεπτότερο από 0.002mm), και η άμμος 17-22%. Το υλικό έχει όριο υδαρότητας 39-54% και δείκτη πλαστικότητας 19-29 χωρίς οργανικά και κατά τον χρόνο λήψης των δειγμάτων στις 29/7/2015 οπότε έγινε και η εγκατάσταση των αισθητήρων το ποσοστό υγρασίας του κυμαινόταν από 10 έως 14%. Το ξηρό φαινόμενο βάρος στον ίδιο χρόνο κυμαινόταν από 14.7 έως 16.0 kN/m³. Το ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης προέκυψε 12.6%, η πίεση διόγκωσης μόλις 90 kPa αλλά με παραμόρφωση ελεύθερης διόγκωσης >2.0%. Ο συντελεστής διαπερατότητας του υλικού όπως μετρήθηκε υπό συνθήκες ισοτροπικής συμπίεσης στη συσκευή τριαξονικής θλίψης βρέθηκε 2.6×10^{-9} m/s. Η Μάργα Λευκωσίας απαντά και σε πολύ πιο πλαστική μορφή σε σχέση με αυτή που βρέθηκε στη συγκεκριμένη θέση (Loukidis et al., 2016, Lazarou et al., 2019, Λουκίδης, 2019).

Η θέση εγκατάστασης του σταθμού επιλέχθηκε για τις ανάγκες παρακολούθησης της Μάργας Λευκωσίας από θέση που μπορούσε να εξασφαλιστεί εντός της Πανεπιστημιούπολης η



Σχ. 14. Σχηματική απεικόνιση διάνοιξης ερευνητικού φρέατος (α) για την εγκατάσταση αισθητήρων στο σταθμό του Πανεπιστημίου Κύπρου και άποψη της παρειάς (β).

Fig. 14. Schematic (a) and trial pit side (b) where sensors were installed in Nicosia.

μακροπρόθεσμη διατήρηση του σταθμού χωρίς να επηρεαστεί από το πρόγραμμα κτιριακής ανάπτυξης του πανεπιστημίου. Μορφολογικά παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα ότι είναι πλήρως εκτεθειμένη στους επικρατούντες ανέμους και την ηλιοφάνεια (ανατολικός προσανατολισμός)

χωρίς βλάστηση, εξαιρουμένης εποχιακής επιπολαιόριζης χλωρίδας (Φωτ. 7).

Οι αισθητήρες εγκαταστάθηκαν ανά ζεύγη αισθητήρα μύζησης και αισθητήρα ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε βάθος 0.75 και 1.5m, και αφού αφέθηκαν για επίτευξη ισορροπίας επί δίμηνο, πραγματοποιήθηκε δοκιμή διαβροχής με συνεχή παροχή ύδατος εντός προετοιμασμένης οπής στην επιφάνεια (Φωτ. 8α). Κατά πάγια πρακτική μετά το πέρας της παροχής ύδατος η άμεση περιοχή της θέσης διαβροχής καλύπτεται με ελαστική μεμβράνη ώστε αρχικά η κίνηση των υδάτων να γίνεται μόνο διά βαρύτητας εξασφαλίζοντας την πλήρη εξισορρόπηση ποσοστών υγρασίας και μύζησης, πριν να αρχίσει και πάλι να επηρεάζει η εξάτμιση από την επιφάνεια μετά την απομάκρυνση της ελαστικής μεμβράνης (Φωτ. 8β).

Στο Σχ. 15 συσχετίζονται οι τιμές ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας και μύζησης που μετρήθηκαν στο ζεύγος αισθητήρων σε βάθος 0.75m. Επισημαίνεται ο χρόνος εγκατάστασης και στη συνέχεια ο χρόνος έναρξης διαβροχής και οι χρόνοι συνέχισης της παροχής ύδατος από την επιφάνεια. Αφού αποκαλύφθηκε η επιφάνεια



Φωτ. 7. Σταθμός μετρήσεων του Πανεπιστημίου Κύπρου μετά την επανεπίχωση του ερευνητικού φρέατος, την περίφραξη και την στεγάνωση και θερμομόνωση του κλωβού του καταγραφικού.

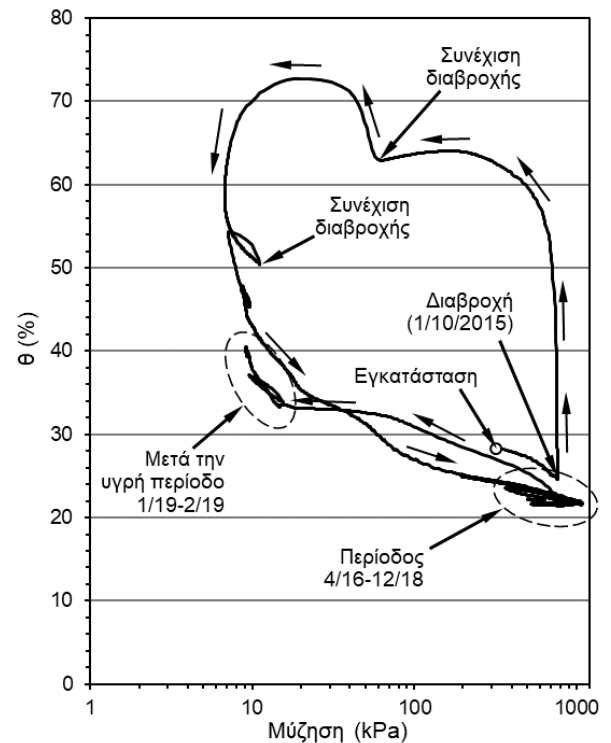
Phot. 7. University of Cyprus measurements station after backfilling of the trial pit, fencing and water and thermal insulation to protect the sensor data acquisition box.



Φωτ. 8. Δοκιμή διαβροχής στον σταθμό μετρήσεων του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Phot. 8. Water infiltration field test at the University of Cyprus measurements station.

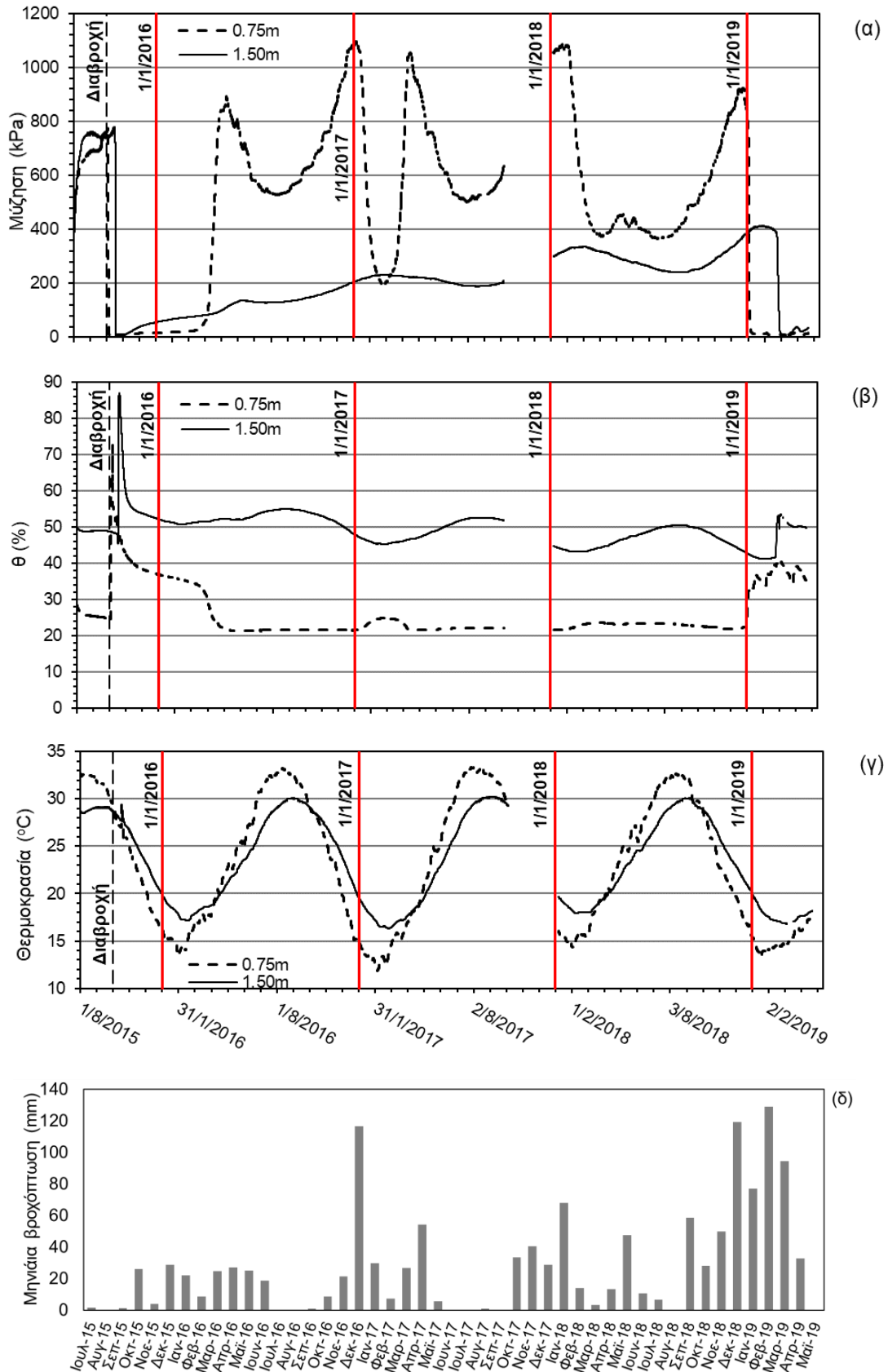
του εδάφους με την απομάκρυνση της μεμβράνης, το έδαφος ξηράνθηκε και περιήλθε στην κατάσταση ισορροπίας που επισημαίνεται στο Σχ. 15 για την περίοδο 4/2016 έως 12/2018. Ο Χειμώνας 2018-2019 ήταν μία εξαιρετικά βροχερή περίοδος και για την Κύπρο, όπως και για την Ελλάδα. Ο μετεωρολογικός σταθμός Αθαλάσσιας (1.2km από τον σταθμό μετρήσεων μύζησης και υγρασίας εδάφους) κατέγραψε συνολικό ύψος βροχής 589mm στο διάστημα Σεπτέμβριος 2018 – Απρίλιος 2019, υπερδιπλάσια ποσότητα από



Σχ. 15. Εξέλιξη ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας με τη μύζηση εδαφικού σκελετού (μύζηση σε λογαριθμική κλίμακα) από το ζεύγος αισθητήρων σε βάθος 0.75m. Τα μικρού μήκους βέλη δηλώνουν φορά εξέλιξης της μεταβολής του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας και τα μεγαλύτερα βέλη χαρακτηριστικά σημεία κατά τον χρόνο ύπαρξης του σταθμού μετρήσεων.

Fig. 15. Evolution of volumetric water content with matric suction (suction in logarithmic scale) for the sensors couple at 0.75m depth. Short arrows indicate direction of volumetric water content change and longer arrows characteristic instances during stations' life.

την ετήσια βροχόπτωση των προηγούμενων τριών ετών. Το εδαφικό υλικό επανυγράνθηκε και από τη «ζώνη» τιμών μύζησης που είχε περιοριστεί μεταξύ 4/2016 έως 12/2018 μετέπεσε σε μία περιοχή πολύ χαμηλών τιμών μύζησης 10-30 kPa, στην οποία είναι πολύ πιθανό, δεδομένης της ακρίβειας μέτρησης των αισθητήρων MPS6, ότι η μύζηση μπορεί να έγινε μηδενική ή και να αναπτύχθηκε ελαφρώς θετική πίεση πόρων (περίοδος 1/2019-2/2019). Για καλύτερη επεξήγηση αυτών, στο Σχ. 16 παρουσιάζονται οι μετρήσεις μύζησης εδαφικού σκελετού, ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας και θερμοκρασίας σε όλους τους αισθητήρες του σταθμού αυτού και για όλο το χρονικό διάστημα παρακολούθησης. Διακρίνεται η μακρά περίο-



Σχ. 16. Σταθμός μετρήσεων Πανεπιστημίου Κύπρου: α) μύζηση, β) ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, γ) θερμοκρασία στο βάθος των αισθητήρων, και δ) μηνιαία βροχόπτωση με τον χρόνο.

Fig. 16. University of Cyprus station: a) suction, b) volumetric water content, c) temperature at sensors' depth, and d) monthly rainfall with time.

δος που το ρηχό ζεύγος πρακτικά παραμένει υπό την επήρεια της δοκιμής διαβροχής, η περίοδος στην οποία το έδαφος ξηραίνεται και διατηρείται σε κατάσταση μερικού κορεσμού, με μύζηση μεγαλύτερη από 200kPa (ακόμη και στις περιόδους βροχοπτώσεων), μέχρι πρακτικά τον 12/2018, για να ακολουθήσει η ραγδαία επιρροή της εξαιρετικά βροχερής περιόδου 12/18 έως 2/19. Σε αυτήν έγινε ραγδαία πτώση της μύζησης από περίπου 900 kPa πρακτικά στο 0, τιμή από την οποία άρχισε στη συνέχεια να έχει μικρή αύξηση. Αντίστοιχη είναι η εικόνα στο βαθύτερο ζεύγος αισθητήρων (1.50m). Σε αυτό το βάθος χρειάστηκαν περί τους 2 μήνες επιπλέον για την επίτευξη πλήρους κορεσμού σε σχέση με το βάθος των 0.75m.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 16α στον ρηχό (0.75m) αισθητήρα μέτρησης μύζησης καταγράφονται παραδόξως υφέσεις (μείωση της μύζησης) κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων των ετών 2016-2018, με κατώτερα σημεία τον Ιούλιο-Αύγουστο. Αντίθετα, οι μετρήσεις του αισθητήρα ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας στα 0.75m βάθος στις αντίστοιχες περιόδους παραμένουν σταθερά χαμηλές, όπως άλλωστε αναμένεται τις ξηρές περιόδους. Αυτά τα τμήματα της καμπύλης μύζησης έχουν έναρξη και τερματισμό σε σημεία απότομης αλλαγής της κλίσης της. Συγκεκριμένα, ξεκινούν με απότομη πτώση της αύξησης της μύζησης τον Απρίλιο-Μάιο και τελειώνουν με απότομη έναρξη μείωσης τον Δεκέμβριο-Ιανουάριο. Επίσης, σε αυτά τα διαστήματα η μύζηση αποκτά μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση με την θερμοκρασία και ακολουθεί μάλιστα τις βραχυπρόθεσμες μικροδιακυμάνσεις της θερμοκρασίας (με περιοδικότητα 1-2 εβδομάδων). Η πιο πιθανή εξήγηση της συμπεριφοράς των μετρήσεων του αισθητήρα μύζησης MPS6 στο ρηχό βάθος είναι ότι τον Απρίλιο-Μάιο συμβαίνει μερική αποκόλληση του αισθητήρα εξαιτίας της έντονης συρρίκνωσης του εδάφους λόγω ξήρανσης, και κατά συνέπεια έχουμε απώλεια της επανομαζόμενης «υδραυλικής επαφής». Αυτό σημαίνει ότι το τεμάχιο πορώδους υλικού του αισθητήρα δεν έχει (τουλάχιστον εν μέρει) επαφή με το έδαφος, με αποτέλεσμα το δεύτερο να μην μπορεί να μεταδώσει τη μύζηση στο πρώτο. Η σχετικά μικρή κατακόρυφη τάση σε αυτό το βάθος βοηθάει στην απώλεια της υδραυλικής επαφής, η οποία αποκαθίσταται στη συνέχεια με διόγκωση του εδάφους με τη διαβροχή κατά τον Δεκέμβριο-Ιανουάριο. Οι διακυμάνσεις μύζησης στις περιόδους αποκόλλησης πιθανόν να

αντικατοπτρίζουν εν μέρει το περιβάλλον υγρασίας αέρα που δημιουργείται στις ρωγμές ξήρανσης (desiccation cracks) κατά τη θερινή περίοδο από την άνοδο του εξατμιζόμενου νερού από τον σχετικά ρηχό (5m-7m βάθος) υδροφορέα της περιοχής.

Στα 1.5m βάθος, οι καμπύλες μετρήσεων μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας συνάδουν μεταξύ τους σε όλη τη διάρκεια του έτους, δηλ. όταν η μύζηση μειώνεται παρατηρούμε αύξηση του ποσοστού υγρασίας (και αντίστροφα) με τον ίδιο ρυθμό. Οι αυξομειώσεις είναι πιο ομαλές από ότι στα 0.75m βάθος, και εμφανίζουν διαφορά φάσης περίπου 6 μηνών από το τι συμβαίνει στην επιφάνεια της γης (χρονική διαφορά μεταξύ μέγιστου στο θ και μέγιστου στη βροχόπτωση). Αντίθετα, αυτή η διαφορά φάσης στα 0.75m βάθος φαίνεται να είναι περίπου 1.5-2 μήνες με βάση το παρατηρούμενο ελάχιστο στη μύζηση και μέγιστο στην υγρασία τον χειμώνα του 2016, τα οποία κορυφώνονται στα τέλη Φεβρουαρίου 2016.

Επίσης παρατηρείται ότι το υλικό στα 1.5m βάθος φαίνεται να έχει επηρεαστεί τόσο πολύ από τη δοκιμή διαβροχής του Οκτωβρίου 2015 ώστε η μύζηση του να μην έχει ανακάμψει στην προηγούμενη τιμή της των 750kPa ακόμα και μετά από δύο περιόδους ξηρασίας.

Το ενδιαφέρον ωστόσο εντοπίζεται στο ότι κατά τη βροχερή περίοδο του χειμώνα 2018-2019, και στα δύο βάθη επήλθε ραγδαία μείωση της μύζησης, πρακτικά μέχρι πλήρους κορεσμού. Η εικόνα αυτή πιθανόν υποδηλώνει την παρουσία ρωγμών λόγω ξήρανσης οι οποίες επέτρεψαν την κατείσδυση των ομβρίων ακόμα και στο βάθος μέτρησης 1.5m (αν και με χρονική υστέρηση 2 μηνών σε σχέση με τα 0.75m).

Τέλος, θα πρέπει να γίνει η πολύ σημαντική επισήμανση ότι οι μετρήσεις ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας που παρουσιάστηκαν στα παραπάνω σχήματα είναι οι τιμές που δίνει απευθείας το καταγραφικό Em50 με βάση την εργοστασιακή βαθμονόμηση, η οποία δεν είναι δεδομένο ότι θα ισχύει πάντα και για όλα τα εδάφη. Έτσι, απουσία βαθμονόμησης ειδικά για το υλικό στο οποίο εμπηγνύεται ένας αισθητήρας GS3 ή άλλης αναγωγής, οι μετρήσεις που βασίζονται στη εργοστασιακή βαθμονόμηση θα πρέπει να ερμηνεύονται ως «σχετικές» μεταβολές του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας. Ενδεικτική είναι η περίπτωση των μετρήσεων του αισθητήρα GS3 εγκατεστημένου στα 1.5m βάθος, ο οποίος σε κατάσταση μερικού

κορεσμού, με τη μύζηση να είναι της τάξης των εκατοντάδων kPa, δίνει τιμές θ περίξ του 0.5. Με δεδομένο ότι ο δείκτης πόρων των δειγμάτων μάργας ήταν 0.65-0.8, αυτή η τιμή θ αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού S_r μεταξύ 112%-127%, τιμές που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας φαίνεται να δίνει τιμές θ διπλάσιες από τις πραγματικές, γεγονός που υποδηλώνει ύπαρξη σημαντικά μεγαλύτερης αγωγιμότητας από τη συνηθισμένη και ενδέχεται να οφείλεται στις τοπικές συγκεντρώσεις οξειδίων μετάλλων που χαρακτηρίζουν τις ασυνέχειες την Μάργας του σχηματισμού Λευκωσίας.

Βαθμονόμηση των αισθητήρων ποσοστού υγρασίας μπορεί να επιτευχθεί στο εργαστήριο ακολουθώντας διαδικασίες που προτείνονται από τον κατασκευαστή, χρησιμοποιώντας δείγματα του εδαφικού υλικού που λαμβάνονται πλησίον του σημείου όπου τοποθετείται ο αισθητήρας. Αντίθετα, οι αισθητήρες μύζησης MPS6 γενικά δεν απαιτούν ξεχωριστή βαθμονόμηση ανά υλικό.

6. Προτάσεις καλής πρακτικής για σταθμούς μέτρησης μύζησης επιτόπου

Από τις μετρήσεις στους σταθμούς που παρουσιάστηκαν προκύπτουν ορισμένες γενικές οδηγίες ως προτάσεις καλής πρακτικής κατά την υλοποίηση σταθμών μέτρησης μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας στο πεδίο:

- Λήψη δειγμάτων για δοκιμές κατάταξης τουλάχιστον, αν όχι και δοκιμές μηχανικών χαρακτηριστικών, και για βαθμονόμηση των αισθητήρων ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας, από τις ακριβείς θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων.
- Επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων για το αναμενόμενο εύρος τιμών της μύζησης. Οι λιγοστές μετρήσεις που παρουσιάστηκαν υποδεικνύουν ότι για τις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας και της Κύπρου, τα τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διεϊσδυσης αέρα (και προφανώς αντίστοιχα πιεζόμετρα δονούμενης χορδής) δεν επαρκούν, καθώς το εύρος της μύζησης κυμαίνεται μεταξύ εκατοντάδων και χιλιάδων kPa.
- Επιλογή αισθητήρων με δυνατότητα μέτρησης και της θερμοκρασίας του εδάφους. Όπως επιδείχθηκε από τις μετρήσεις του προσωρινού σταθμού Μαριτσών, η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει έντονα τη μετρούμενη

μύζηση, όχι όμως και το μετρούμενο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας.

- Επιδίωξη της καλύτερης δυνατής επαφής των αισθητήρων με το έδαφος.
- Τοποθέτηση των αισθητήρων στην πλευρά των φρεάτων διάνοιξης με το λιγότερο διαταραγμένο φυσικό έδαφος.
- Επανεπίχωση κατά «σειρά εκσκαφής» ώστε το υλικό που εκσκάφθηκε να επανατοποθετείται κατά την επίχωση στο ίδιο βάθος με αυτό στο οποίο βρισκόταν αρχικά.
- «Δόντι» στην κορυφή της εκσκαφής, ειδικά στην πλευρά του φρέατος που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες, ώστε κατά την επανεπίχωση να μη δημιουργείται μία κατακόρυφη επιλεκτική δίοδος μέχρι την επιφάνεια του εδάφους από την οποία είναι πολύ πιθανό να υπάρξει κατεϊσδυση του νερού, ειδικά μάλιστα σε αυτήν την πλευρά από την οποία φτάνουν στην επιφάνεια τα καλώδια των αισθητήρων.
- Συμπύκνωση του εδαφικού υλικού κατά την επανεπίχωση, ειδικά στις θέσεις των καλωδίων, ώστε να μην αποτελέσουν επιλεκτικές διόδους του νερού.
- Δημιουργία βρόχων των καλωδίων κοντά στο άκρο τους με τους αισθητήρες ώστε να μην μετακινούνται αυτοί κατά την διαδικασία της εγκατάστασης για τυχαίο λόγο, και σε περίπτωση που προβλέπεται επανεκσκαφή και απομάκρυνση των αισθητήρων, να βρίσκονται πιο εύκολα, με μικρότερες πιθανότητες πρόκλησης ζημιάς στον αισθητήρα τον ίδιο.
- Στεγάνωση και θερμομόνωση καταγραφικού και καλωδίων σύνδεσης αισθητήρων με καταγραφικό. Είναι χαρακτηριστική η περίπτωση του προσωρινού σταθμού Μαριτσών Ρόδου, στον οποίο η πρακτικά σταθερή μύζηση σε μικρό βάθος επηρεαζόταν πολύ έντονα από τη θερμοκρασία που ανέπτυσσαν τα εκτεθειμένα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος καλώδια των αισθητήρων. Ενώ επηρεάζεται η μύζηση στα συγκεκριμένα τεμάχια πορώδους υλικού σε αυτόν τον σταθμό, το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας δεν επηρεάστηκε από τις ίδιες θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Εκτέλεση δοκιμής διαβροχής. Η διαβροχή από την επιφάνεια μέχρι επίτευξης πλήρους κορεσμού ακόμα και των βαθύτερα εγκατεστημένων αισθητήρων (διαπιστούμενου από τον μηδενισμό της μύζησης) αποτελεί μία δύσκολη εργασία που ανάλογα την περίπτωση μπορεί να εγκυμονεί και κινδύνους αστοχίας (π.χ. σε έναν σταθμό σε πρανές). Απαιτεί δε λεπτομερή και επιμελή προετοιμασία καθώς

ανάλογα με το βάθος εγκατάστασης των αισθητήρων μπορεί να απαιτήσει από μερικές δεκάδες λίτρα έως και κυβικά μέτρα νερού. Από την άλλη αποτελεί δοκιμή πεδίου μεγάλης κλίμακας που δίνει ποιοτική πληροφορία για τον ρυθμό προχώρησης του μετώπου διαβροχής και υπό προϋποθέσεις και ποσοτική μέσω της εκτίμησης του συντελεστή διαπερατότητας του μη κορεσμένου εδάφους και της εξέλιξής του με τη μύζηση. Κυρίως όμως αποτελεί κρίσιμη δοκιμή για την ίδια την αξιοπιστία του σταθμού, των αισθητήρων και των μετρήσεών τους, καθώς διαπιστώνεται η απόκριση των αισθητήρων και ο χρόνος απόκρισής τους, η αξιοπιστία των μετρήσεων μέσω της σύγκρισης τιμών μύζησης πριν και μετά τη διαβροχή (σταθμός Αρτέμιδας, 2013) και τη διαπίστωση της επιρροής ρωγμών που επιτρέπουν την επικοινωνία αέρα από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τη θέση μέτρησης.

- Ιδανικά μετά την παύση της παροχής ύδατος από την επιφάνεια, είναι σκόπιμο η άμεση περιοχή του σταθμού να καλυφθεί με ελαστική μεμβράνη. Η κάλυψη αυτή θα εμποδίσει για ένα χρονικό διάστημα την εξάτμιση από την επιφάνεια, οπότε κυριαρχεί μόνο η διάβαρυνότητα και τριχοειδών φαινομένων κίνηση του νερού, προς εξισορρόπηση ποσοστού υγρασίας και καταγραφών στους αισθητήρες. Υπό προϋποθέσεις σε επαρκώς διαπερατά εδαφικά υλικά αποτελεί και την περίοδο πιο αξιόπιστης εκτίμησης της εξέλιξης του συντελεστή διαπερατότητας με τη μύζηση.

7. Συνόψιση - Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκαν οι βασικές μέθοδοι μέτρησης της μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας στο πεδίο καθώς και τα αποτελέσματα μετρήσεων σε τέσσερις σταθμούς στην Ελλάδα και στην Κύπρο. Κατά την θερινή περίοδο οι κατάγραφές τιμές της μύζησης είναι πολύ υψηλές και φτάνουν ακόμα και 2.5 MPa. Μάλιστα στον σταθμό της Αγλαντζιάς Λευκωσίας στην Κύπρο διαπιστώθηκε ότι μπορεί να συντηρηθούν μεγάλες τιμές της μύζησης και για υπερετήσιες περιόδους. Από την άλλο πλευρά, εξαιρετικά βροχερές περίοδοι όπως ο χειμώνας 2018-2019 μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια της μύζησης αυτής και μάλιστα με ταχύ ρυθμό (αν και αυτός ο ρυθμός που καταγράφηκε στην Κύπρο είναι πιθανόν αποτέλεσμα της παρουσίας ρωγμών λόγω ξηράνσεως και συνεπακόλουθης συρρίκνωσης) ή και διατήρηση χαμηλών για την εποχή τιμών όπως καταγράφηκε στον σταθμό μετρή-

σεων στην κατολίσθηση της περιοχής Μπάσαλε στη Σκύρο.

Οι λιγοστές μετρήσεις που παρουσιάστηκαν πάνω από όλα υπογραμμίζουν την ανάγκη για συνέχιση της προσπάθειας συστηματικής μέτρησης της αναπτυσσόμενης μύζησης στο έδαφος σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας και της Κύπρου. Εάν τεκμηριωθεί συστηματικά η ανάπτυξη τιμών της μύζησης όπως αυτές που επιδείχθηκαν στις μετρήσεις των σταθμών που παρουσιάστηκαν κατά τους θερινούς μήνες, τότε τεκμηριώνεται η δυνατότητα εκμετάλλευσης χαρακτηριστικών των μη κορεσμένων εδαφών προς όφελος της οικονομίας των έργων που μεταβάλλουν πάρα πολύ τις τιμές στις οποίες μας οδηγεί η υπόθεση πλήρους κορεσμού κατά τους υπολογισμούς. Προφανώς, το κρίσιμο σημείο της αξιολόγησης όλων των μετρήσεων θα είναι οι προϋποθέσεις και η ταχύτητα απώλειας της μύζησης (όπως καταγράφηκε στον σταθμό του Πανεπιστημίου Κύπρου) ώστε το όφελος αυτό για την οικονομία των έργων (υπό προσωρινές συνθήκες) να μην θέσει επ' ουδενί σε κίνδυνο την ασφάλεια των έργων.

Ευχαριστίες

Οι εργαστηριακές δοκιμές που παρουσιάζονται στο άρθρο έχουν εκτελεστεί στο Εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. Ο ιστότοπος wunderground διέθεσε ευγενικά για χρήση στο άρθρο τα μετεωρολογικά στοιχεία για τον σταθμό Artemida, Attica (IATTKIA14).

Βιβλιογραφία

- Λουκίδης, Δ., 2019, Διόγκωση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 83-100.
- Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2016, Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ 2016, σελ. 1300.
- Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2019, Φύση, μηχανική συμπεριφορά και εμφάνιση μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 1-42.
- Μπαρδάνης, Μ., Γρίφιζα, Σ., 2010, Μηχανική συμπεριφορά ενός συμπυκνωμένου αποσαθρωμένου σερπεντινίτη από την Σκύρο, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής

- & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Βόλος, 2010, 29/9-1/10, Τόμος 1, σελ. 151-158.
- Σιταρένιος, Π., 2019, Καταστατική συμπεριφορά της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 127-154.
- ASTM, 2013, D 2216, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, D 2922, Standard Test Methods for Density of Soil and Soil Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, D 3017, Standard Test Method for Water Content of Soil and Rock in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 3404, Standard Guide for Measuring Matric Potential in Vadose Zone Using Tensiometers, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, D 4643, Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 4944, Standard Test Method for Determination of (Water) Moisture Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 4959, Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, D 5195, Standard Test Method for Density of Soil and Rock In-Place at Depths Below Surface by Nuclear Methods, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, D 5220, Standard Test Method for Water Mass per Unit Volume of Soil and Rock In-Place by the Neutron Probe Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 6565, Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Time-Domain Reflectometry (TDR) Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 6780, Standard Test Method for Water Content and Density of Soil in situ by Time-Domain Reflectometry (TDR), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 6938, Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 7013, Standard Guide for Calibration Facility Setup for Nuclear Surface Gauges, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 7698, Standard Test Method for In-Place Estimation of Density and Water Content of Soil and Aggregate by Correlation with Complex Impedance Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 7759, Standard Guide for Nuclear Surface Moisture and Density Gauge Calibration, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2013, D 7830, Standard Test Method for In-Place Density (Unit Weight) and Water Content of Soil Using an Electromagnetic Soil Density Gauge, International, West Conshohocken, PA.
- Bardanis, M., 2015, Field suction and volumetric water content measurements in semi-urban area near Athens, Greece, proc. Int. Symp. Shrink-Swell Processes in Soils, Climate & Construction, 18-19 June 2015, Marne-la-Vallée, France, pp. 463-472.
- Bardanis, M., 2016, Time response of two types of porous blocks for suction measurement, Proc. 3rd Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, France, 12-14 September, 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160910005.
- Bardanis, M., 2016, Volumetric water content measurement probes in earth-dam construction, Proc. 3rd Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, France, 12-14 September, 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160916004.
- Biddle P.G. (1983). Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils. *Géotechnique*, vol. 33, no 2, pp. 107-126.
- Blight G.E. (1997). Interactions between the atmosphere and the earth. *Géotechnique*, vol. 47, no 4, pp. 715-767.

- Blight G.E. (2009). Solar heating of the soil and evaporation from a soil surface. *Géotechnique*, vol. 59, no 4, pp. 355-363.
- Bozozuk M., Burn K.N. (1960). Vertical ground movements near elm trees. *Géotechnique*, vol. 10, pp. 19-32.
- Cui Y.J., Gao Y.B., Ferber V. (2010). Simulating the water content and temperature changes in an experimental embankment using meteorological data. *Engineering Geology*, vol. 141, no 3-4, pp. 456-471.
- Cui Y.J., Lu Y.F., Delage P., Riffard M. (2005). Field simulation of in-situ water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions. *Géotechnique*, vol. 55, no 7, pp. 557-567.
- Cui Y.J., Ta A.N., Hemmati S., Tang A.M., Gatmiri B. (2013). Experimental and numerical investigation of soil-atmosphere interaction. *Engineering Geology*, vol. 165 (2013), pp. 20-28.
- Fraden, J., 2010, *Handbook of Modern Sensors*, Springer, 4th Edition, New York, p. 663.
- Fredlund D.G., Hung V.Q. (2001). Prediction of volume change in an expansive soil as a result of vegetation and environmental changes. "Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations", Vipulanandan, Addison & Hasen (eds). ASCE Geotechnical Special Publication No. 115, pp. 24-43.
- International Atomic Energy Agency, 2008, *Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology*, Vienna.
- Lazarou, G., Loukidis, D. Bardanis, M., 2019, *Moisture migration under mat foundations in Nicosia marl*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, pp. 1585-1608.
- Loukidis, D., Bardanis, M., Lazarou, G., 2016, *Classification, soil-water characteristic curve and swelling/collapse behaviour of the Nicosia marl, Cyprus*. , *Proceedings of the 3rd European Conference on Unsaturated Soils*, Paris, France, 12-14 September, 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160911009.
- Ng C.W.W., Zhan L.T., Bao C.G., Fredlund D.G., Gong B.W. (2003). Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration. *Géotechnique*, vol. 53, no 2, pp. 143-157.
- Rahardjo H., Satyanaga A., Leong E.C. (2013). Effects of flux boundary conditions on pore-water pressure distribution in slope. *Engineering Geology*, vol. 165 (2013), pp. 133-142.
- Rahardjo H., Lee T.T., Leong E.C., Rezaur R.B. (2005). Response of a residual soil slope to failure. *Can. Geotech. J.*, vol. 42, no 2, pp. 340-351.
- Rothe, A., W. Weis, K. Kreutzer, D. Matthies, U. Hess, and B. Ansorge. 1997. Changes in soil structure caused by the installation of time domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture. *Water Resour. Res.* 33:1585-1593.
- Smethurst J.A., Clarke D., Powrie W. (2006). Seasonal changes in pore water pressure in a grass-covered cut slope in London Clay. *Géotechnique*, vol. 56, no 8, pp. 523-537.
- Sorbino G., Nicotera M.V. (2013). Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides. *Engineering Geology*, vol. 165 (2013), pp. 105-132.
- Springman S.M., Jommi C., Teyssie P. (2003). Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history. *Géotechnique*, vol. 53, no 1, pp. 3-10.
- Tarantino, A., Ridley, A.M., Toll, D.G., 2009, Field measurement of suction, water content, and water permeability, in "Laboratory and field testing of unsaturated soils", by Tarantino, Romero & Cui (eds) – reprinted from *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 26, No. 6, 2008, Springer.
- Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan. 1982. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and Steep Gradients. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 46:672-678.
- Tsagaras I., Rahardjo H., Toll D.G., Leong E.C. (2003). Infiltration characteristics of two instrumented residual soil slopes. *Can. Geotech. J.*, vol. 40, no 5, pp. 1012-1032.
- www.wunderground.com. Meteorological data recorded for Artemida, Attica (IATTIKIA14) weather station.
- Zhan T.L.T., Ng C.W.W., Fredlund D.G. (2007). Field study of rainfall infiltration into a grassed unsaturated expansive soil slope. *Can. Geotech. J.*, vol. 44, no 4, pp. 392-408.

ΑΓΓΛΟ-ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

ENGLISH-GREEK GLOSSARY OF TERMS RELATED TO THE SUBJECT OF UNSATURATED SOILS

Μ. Ε. Μπαρδάνης¹

Δρ Πολιτικός Μηχανικός

Γενικός Γραμματέας Ελληνικής
Επιστημονικής Εταιρείας Εδαφομηχανικής
& Γεωτεχνικής Μηχανικής

ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Δεδομένου ότι η βιβλιογραφία στο αντικείμενο των μη κορεσμένων εδαφών στα ελληνικά είναι ελάχιστη και συνήθως οι ενδιαφερόμενοι καταφεύγουν στην αγγλική βιβλιογραφία για την ενημέρωση για το αντικείμενο, καλούμενοι στη συνέχεια να αποδώσουν όρους επί του αντικειμένου από την αγγλική γλώσσα στην ελληνική, συντάχθηκε το παρόν αγγλοελληνικό λεξικό όρων σχετικών με το αντικείμενο των μη κορεσμένων εδαφών προς υποβοήθηση της ελληνικής γεωτεχνικής κοινότητας. Προφανώς το παρόν συνιστά μια πρώτη συλλογή όρων για την οποία αναμένονται διορθώσεις, εμπλουτισμός και επικαιροποίηση σε επόμενες επιστημονικές συναντήσεις και συνέδρια καθώς περισσότερα μέλη της ελληνικής γεωτεχνικής κοινότητας θα εμπλέκονται στο αντικείμενο συνεισφέροντας με τη γνώση και την εμπειρία που θα αποκτούν.

ABSTRACT: Given that references on the subject of unsaturated soils in Greek are very few and usually colleagues interested on the subject resort in references in English and are later called to translate terms on the particular subject in Greek, this english-greek glossary of terms related to the subject of unsaturated soils was drafted for assistance. Obviously this glossary is only an early collection of terms expected to be revised, enriched and updated as

more members of the greek geotechnical community get involved with the subject and contribute with their knowledge and experience.

A

Acid solution: *Διάλυμα οξέων*

Acid solution, saturated: *Κορεσμένο διάλυμα οξέων*

Acid solution, unsaturated: *Μη κορεσμένο διάλυμα οξέων*

Acid solutions total suction control method: *Μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με διαλύματα οξέων*

Air entry: *Διείσδυση αέρα*

Air entry pressure: *Πίεση διείσδυσης αέρα*

Apparent cohesion: *Φαινόμενη συνοχή*

Apparent compression index: *Φαινόμενος δείκτης συμπίεσης*

Apparent preconsolidation stress: *Τάση φαινόμενης προστερεοποίησης*

Apparent strength: *Φαινόμενη αντοχή*

Apparent yield stress: *Τάση φαινόμενης διαρροής*

Axis translation method for suction control: *Μέθοδος μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης*

B

Block, gypsum: *Τεμάχιο γύψου*

Block, porous: *Τεμάχιο πορώδους υλικού*

Bulk water: *Νερό σε ελεύθερη μορφή στους πόρους του εδάφους*

Bulk air: *Αέρας σε ελεύθερη μορφή στους πόρους του εδάφους*

C

Capillarity: *Το φαινόμενο της τριχοειδούς ανύψωσης*

Capillary: *Τριχοειδής*

Capillary fringe: *Τριχοειδής ζώνη, ή περιγραφικά: το τμήμα της ζώνης από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τη Στάθμη του Υπόγειου Ορίζοντα που το έδαφος είναι*

¹ Ηλεκτρονική διεύθυνση επικοινωνίας:
mbardanis@edafos.gr

πλήρως κορεσμένο με νερό λόγω τριχοειδών φαινομένων

Capillary height: Ύψος τριχοειδούς ανύψωσης

Capillary phenomena: Φαινόμενα τριχοειδούς ανύψωσης

Capillary rise: Τριχοειδής ανύψωση

Cavitation: Σπηλαιώση

Collapse: Κατάρρευση

Collapse due to inundation/wetting:

Κατάρρευση λόγω υδρεμποτισμού/διαβροχής

Collapsible soils: Καταρρεύσιμα εδάφη

Contractile skin: Συσταλτική στοιβάδα, διεπιφάνεια νερού-αέρα

D

Desaturation: Αποκορεσμός

Desaturation suction: Μύζηση αποκορεσμού

Drying: Ξήρανση

Drying branch (main): Κλάδος ξήρανσης (κύριος)

Drying path: Διαδρομή ξήρανσης

E

Evaporation: Εξάτμιση

Evapotranspiration: Εξατμισοδιαπνοή

Expansive soils: Διογκώσιμα εδάφη

F

Filter paper: Χαρτί φίλτρου

Filter paper suction measurement method: Μέθοδος μέτρησης μύζησης με χαρτιά φίλτρου

G

Generalised Mohr-Coulomb failure criterion: Γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Gravimetric water content: Ποσοστό υγρασίας σε όρους μάζας

Gypsum block: Τεμάχιο γύψου

H

Hydration: Ύγρυνση

Hydroconsolidation: Υδροστερεοποίηση

Hygrometer, chilled-mirror: Υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου

Hygrometer, dew point: Υγρόμετρο σημείου δρόσου

Hysteresis of soil-water characteristic curve: Υστέρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού

I

Imbibition: Απορρόφηση

Inundation: Υδρεμποτισμός

L

Loading-collapse (curve/surface): (Καμπύλη/Επιφάνεια) Φόρτισης-κατάρρευσης

M

Matric or Matrix Suction: Μύζηση εδαφικού σκελετού

N

Negative pore-water pressure: Αρνητική πίεση νερού των πόρων

Net stress: Ανηγγμένη (ολική) τάση

Nucleisation: Φαινόμενη σπηλαιώση

O

Occluded air: Αποκλεισμένος αέρας, εναλλακτικά απομονωμένος αέρας

Occluded air bubbles: Φυσαλίδες αποκλεισμένου αέρα, εναλλακτικά φυσαλίδες απομονωμένου αέρα

Osmotic diffusion: Ωσμωτική διάχυση

Osmotic method for matric suction control: Ωσμωτική μέθοδος ελέγχου της μύζησης εδαφικού σκελετού

P

Partial vapour pressure: Μερική πίεση υδρατμών

Partly or partially saturated soil: μερικώς κορεσμένο έδαφος

Permeability, saturated: Διαπερατότητα πλήρως κορεσμένου εδάφους

Permeability, unsaturated: Διαπερατότητα μί κορεσμένου εδάφους

Pore air phase: *Αέρια φάση των πόρων*
Pore water phase: *Υγρή φάση των πόρων*
Porous block sensor: *Αισθητήρας πορώδους τεμαχίου*
Pressure chamber: *Θάλαμος μύζησης*
Pressure chamber, membrane: *Θάλαμος μύζησης μεμβράνης*
Pressure chamber, porous stone: *Θάλαμος μύζησης πορολίθου*
Pressure extractor: *Θάλαμος μύζησης*
Psychrometer: *Ψυχρόμετρο*
Psychrometer, thermistor: *Ψυχρόμετρο θερμικά ευαίσθητης αντίστασης*
Psychrometer, thermocouple: *Ψυχρόμετρο φαινομένου Peltier*

R

Relative humidity: *Σχετική υγρασία*
Residual degree of saturation: *Παραμένων βαθμός κορεσμού*
Residual water content: *Παραμένον ποσοστό υγρασίας*
Residual void ratio: *Παραμένων λόγος κενών*

S

Salt solution: *Διάλυμα αλάτων*
Salt solution, saturated: *Κορεσμένο διάλυμα αλάτων*
Salt solution, unsaturated: *Μη κορεσμένο διάλυμα αλάτων*
Salt solutions total suction control method: *Μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με διαλύματα αλάτων*
Saturation: *Κορεσμός*
Saturation, degree of: *Βαθμός κορεσμού*
Saturation, partial: *Μερικός κορεσμός*
Scanning curves: *Καμπύλες επαναξήρανσης – επανύγρυνσης (αναφέρεται σε κλάδους μεταξύ των κύριων καμπυλών ύγρυνσης και ξήρανσης σε χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με υστέρηση)*
Shrinkage: *Συρρίκνωση*
Shrinkage limit: *Όριο συρρίκνωσης*
Shrinking soils: *Καταρρεύσιμα εδάφη*
Soil suction: *Εδαφική μύζηση, απομύζηση, αναρρόφηση*

Soil-water characteristic curve: *Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού*
Suction: *Μύζηση, απομύζηση, αναρρόφηση*
Suction, osmotic: *Ωσμωτική μύζηση, ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης*
Suction, matric or matrix: *Μύζηση εδαφικού σκελετού*
Suction, total: *Ολική μύζηση*
Surface tension: *Επιφανειακή τάση*
Swelling: *Διόγκωση*
Swelling index: *Δείκτης διόγκωσης*
Swelling potential: *Δυναμικό διόγκωσης*
Swelling pressure: *Πίεση διόγκωσης*
Swelling soils: *Διογκούμενα εδάφη*

T

Tensiometer: *Τενσιόμετρο*
Tensiometer, high-air entry pressure porous tip: *Τενσιόμετρο πορώδους άκρου υψηλής πίεσης διείδυσης αέρα*
Tensiometer, low-air entry pressure porous tip: *Τενσιόμετρο πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείδυσης αέρα*
Tensiometer, osmotic: *Ωσμωτικό τενσιόμετρο*
Thermal conductivity sensor: *Αισθητήρας θερμικής αγωγιμότητας*
Transpiration: *Διαπνοή*

U

Unsaturated soil: *Μη κορεσμένο έδαφος, ακόρεστο έδαφος*

V

Vadose zone: *Η ζώνη από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τη Στάθμη του Υπόγειου Ορίζοντα*
Vapour equilibrium total suction control method: *Μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με εξισορρόπηση υδρατμών*
Volumetric water content: *Ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας*
Volumetric water content, normalised: *Κανονικοποιημένο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας*

W

Water menisci: *Μηνίσκοι νερού, τροχιλίες νερού*

Water retention: *Συγκράτηση ύδατος στους πόρους του εδάφους*

Water retention curve: *Καμπύλη συγκράτησης ύδατος (όρος εναλλακτικός του όρου χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού)*

Water potential: *Υδατικό δυναμικό*

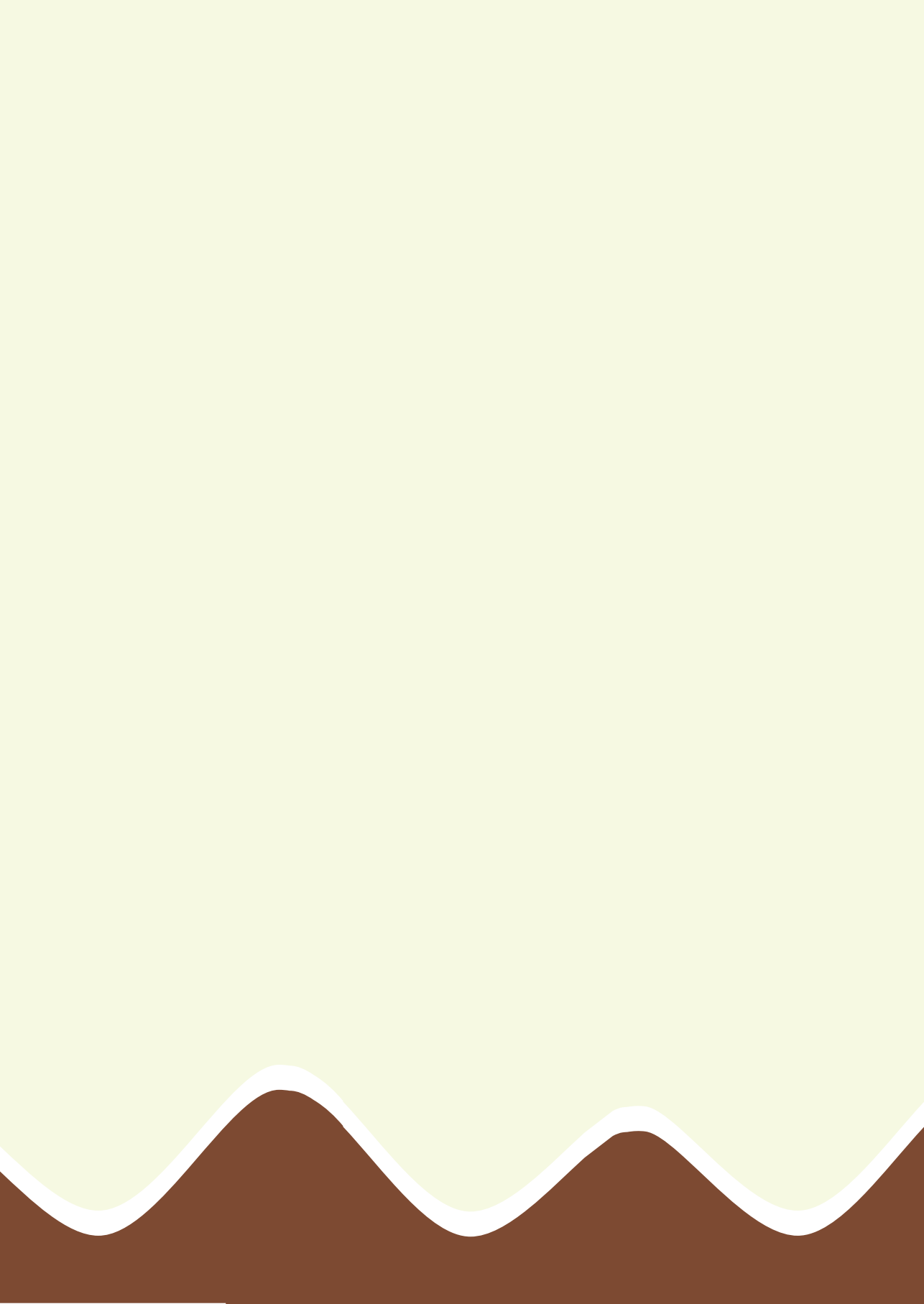
Water vapour: *Υδρατμοί*

Wetting branch (main): *Κλάδος ύγρυνσης (κύριος)*

Wetting path: *Διαδρομή ύγρυνσης*

Ευχαριστίες

Ο κ. Π. Σιταρένιος και η κα Αικ. Τσιαμπούση συνέβαλαν στο παρόν με προτάσεις όρων και απόδοσής τους.





ΕΛΛΗΝΙΚΗ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ
ΕΤΑΙΡΕΙΑ
ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
& ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ