



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ: ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαριέλλα Παππά

Επιβλέπουσα: Γεωργιάννου Βασιλική
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ: ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαριέλλα Παππά

Επιβλέπουσα: Γεωργιάννου Βασιλική
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3^η Ιουλίου 2023.

Γεωργιάννου Βασιλική
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Γερόλυμο Νικόλαο
Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π.

Παπαδημητρίου Αχιλλέα
Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

.....
Μαριέλλα Π. Παππά

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

Copyright © Μαριέλλα Π. Παππά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε ανάλυση των μη κορεσμένων εδαφών και πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών. Συνήθως, τα εδαφικά υλικά που έχουν ομοιογενές μέγεθος πόρων είναι μη κορεσμένα. Αντίθετα, τα εδάφη με έντονα ανομοιογενές μέγεθος πόρων είναι μερικώς κορεσμένα, καθώς η συγκέντρωση του νερού είναι μεγαλύτερη στους μικρότερους πόρους, ενώ ο αέρας συγκεντρώνεται στους μεγαλύτερους πόρους. Η βασική χαρακτηριστική ιδιότητα των μη κορεσμένων εδαφών είναι ότι η μηχανική τους συμπεριφορά είναι εντελώς διαφορετική από εκείνη των κορεσμένων, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και την εντατική κατάσταση. Η μετάβαση από τον μερικό κορεσμό στον πλήρη κορεσμό προκαλεί διόγκωση ή συρρίκνωση του ίδιου εδαφικού υλικού, ανάλογα με τις δυνάμεις που ασκούνται. Επιπλέον, η μείωση του βαθμού κορεσμού αρχικά αυξάνει τη διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών, αλλά αργότερα αυτή μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται, ανάλογα με το υλικό.

Η πίεση του νερού κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα είναι θετική, καθώς το νερό έχει την τάση να διαφεύγει από το εδαφικό υλικό. Από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και πάνω μέχρι το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης, η πίεση του ύδατος είναι αρνητική, καθώς είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση του αέρα. Συνεπώς, υπό αρνητική πίεση, το νερό έχει την τάση να ελκύει περισσότερο νερό, δηλαδή το έδαφος απορροφά πρόσθετη ποσότητα νερού. Η διαφορά πίεσης του νερού των πόρων και της αέριας φάσης στους πόρους πάνω από την τριχοειδή ανύψωση, όπου υπάρχει συνύπαρξη υγρής και αέριας φάσης, ονομάζεται μύζηση. Η πίεση του νερού στους πόρους πάνω από το υδροφόρο ορίζοντα είναι αρνητική, δηλαδή μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση, επομένως η μύζηση είναι θετική. Αυτό συμβαίνει, καθώς συνήθως η πίεση της αέριας φάσης στους πόρους είναι μηδενική. Για να θεωρηθεί αρνητική η πίεση της υγρής φάσης, η μύζηση πρέπει να υπερβαίνει τα 100 kPa, και η πίεση της αέριας φάσης πρέπει να είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση.

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε η συσκευή συμπιεσομέτρου για ακόρεστα εδάφη. Η εν λόγω συσκευή βασίζεται στην αρχή μετατόπισης των αξόνων και έχει ανεξάρτητο έλεγχο της πίεσης του αέρα και του νερού του δοκιμίου, συνεπώς και έλεγχο της μύζησης. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν από προσωπικό του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής. Οι δοκιμές στο συμπιεσόμετρο για ακόρεστα υλικά έγιναν

σε каоλινίτη, οι δοκιμές στην τριαξονική έγιναν σε αμμώδες υλικό. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε αρχικά πλήρως κορεσμένα δοκίμια каоλινίτη με αρχική υγρασία 50%. Λεπτομέρειες για την παρασκευή των δοκιμίων αναφέρονται από τους Κουρέλη 2016, Μυλωνά-Ροντήρη 2018, Διπλωματικές εργασίες Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Στα δοκίμια επιβάλλεται η επιθυμητή μύζηση ρυθμίζοντας ανεξάρτητα την πίεση του υγρού των πόρων και την πίεση του αέρα στην κυψέλη της συσκευής. Η πίεση του νερού επιβάλλεται μέσω εξωτερικής κυψέλης πίεσης που επικοινωνεί με το κάτω μέρος του δοκιμίου.

Abstract

In this diploma thesis, non-saturated soils were analyzed and a series of tests were carried out. Typically, soil materials that have a homogeneous pore size are unsaturated. In contrast, soils with highly heterogeneous pore sizes are partially saturated, as water concentration is greater in smaller pores, while air is concentrated in larger pores. The main distinguishing property of non-saturated soils is that their mechanical behavior is completely different from that of saturated ones, depending on the type of soil and intensive condition. The transition from partial saturation to full saturation causes swelling or shrinkage of the same soil material, depending on the forces exerted. In addition, reducing the degree of saturation initially increases the shear strength of soil materials, but later this may increase or decrease, depending on the material.

The water pressure below the aquifer is positive, as water tends to escape from the soil material. From the water table level and above to the height of the capillary elevation, the water pressure is negative, as it is less than the atmospheric air pressure.

Therefore, under negative pressure, water tends to attract more water, that is, soil absorbs an additional amount of water. The difference in pressure of pore water and the gas phase in the pores above the capillary elevation, where there is a coexistence of liquid and gas phases, is called suction. The pressure of water in the pores above the aquifer is negative, that is, less than atmospheric pressure, so suction is positive. This is because the pressure of the gas phase in the pores is usually zero. For the pressure of the liquid phase to be considered negative, the suction must exceed 100 kPa, and the pressure of the gas phase must be equal to atmospheric pressure.

This diploma thesis used the oedometer device for unsaturated soils for the tests. This apparatus is based on the axis displacement principle and has independent control of the air and water pressure of the specimen and hence the suction control. The tests were performed by the staff of the Soil Mechanics Laboratory. Oedometer tests for unsaturated materials were performed on kaolinite and triaxial tests on sandy material. The tests were performed on initially fully saturated kaolinite specimens with an initial water content of 50%. Details for the preparation of the specimens are mentioned by Kourelis 2016 and Mylonas - Rontiris 2018, Diploma theses submitted to the School of Civil Engineering NTUA. The desired suction is imposed on the specimens by independently adjusting the pore fluid pressure and

the air pressure in the apparatus cell. The water pressure shall be imposed using an external pressure cell communicating with the bottom of the specimen.

In this diploma thesis, oedometer tests were performed where the specimen was loaded under a constant suction of soil. Constructions in unsaturated compressible soil in a short period are considered to be made under constant suction, as the atmospheric conditions or the level of the underground horizon do not change. Then, a decrease in volume is caused by a constant percentage of moisture, which causes an increase in the degree of saturation and a decrease in suction. The effect of the loading may be insignificant in unsaturated soil materials that have very little compressibility while it may be significant in soil materials with high compressibility, due to the secondary change in suction as a result of loading. Figure 1 shows isotropic compression curves in saturated soils and unsaturated soils under stable suction, relative to specific volume v and mean total stress p on a scale of natural logarithms.

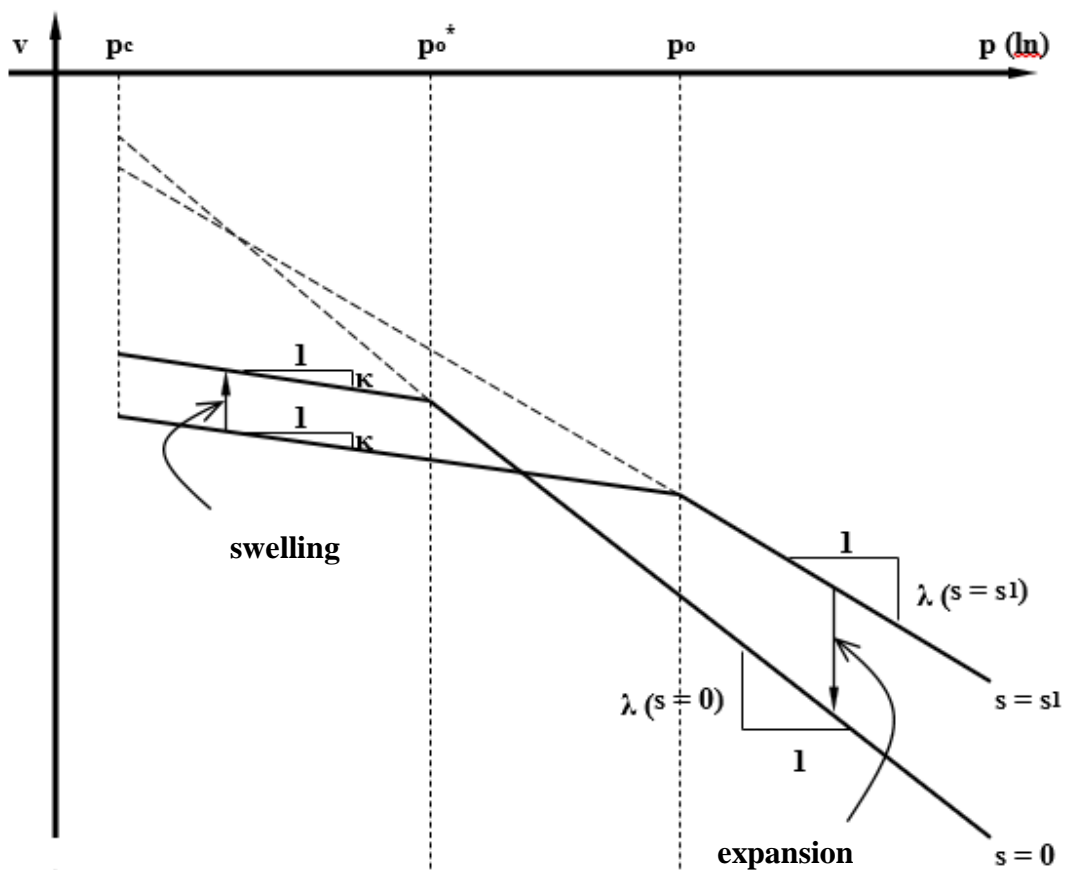


Figure 1: Isotropic compression curves of fully saturated soil and unsaturated soil under constant suction

As can be seen, the compression index decreases progressively, and the tendency of apparent consolidation increases with increasing suction under which isotropic compression is carried out. In addition, with the increase in suction small volume changes are initially observed up to the point of apparent presolidation of apparent consolidation.

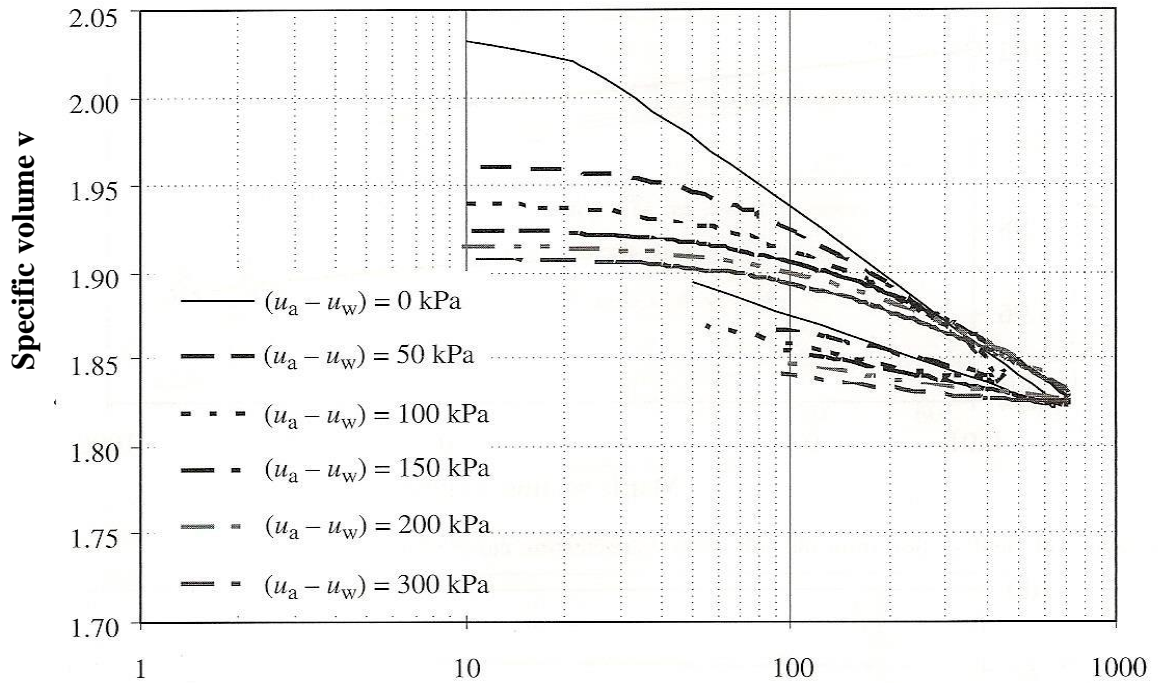


Figure 2: Isotropic compression curves of fully saturated kaolin and unsaturated under stable suction (Thu, et al., 2007).

It was observed that there was little difference between the value of the air penetration pressure and the yield stress. This may be due to the geometric determination of the nominal values of the leakage pressure $v-(\sigma_3-u_a)$ and air penetration on the curves $v-s$ and S_r-s . Figure 3 shows Jennings & Burland's one-dimensional compression tests, 1962, on quartz sludge. In addition, the figure shows the one-dimensional compression curve for refermented quartz matter with a moisture content of 35%. The other curves relate to specimens of the same sludge obtained by drying the refermented material under laboratory atmospheric conditions until the weight of the specimens is stabilized. They were then subjected to one-dimensional compression in cells without water at predetermined stress values to which water was added and loading continued.

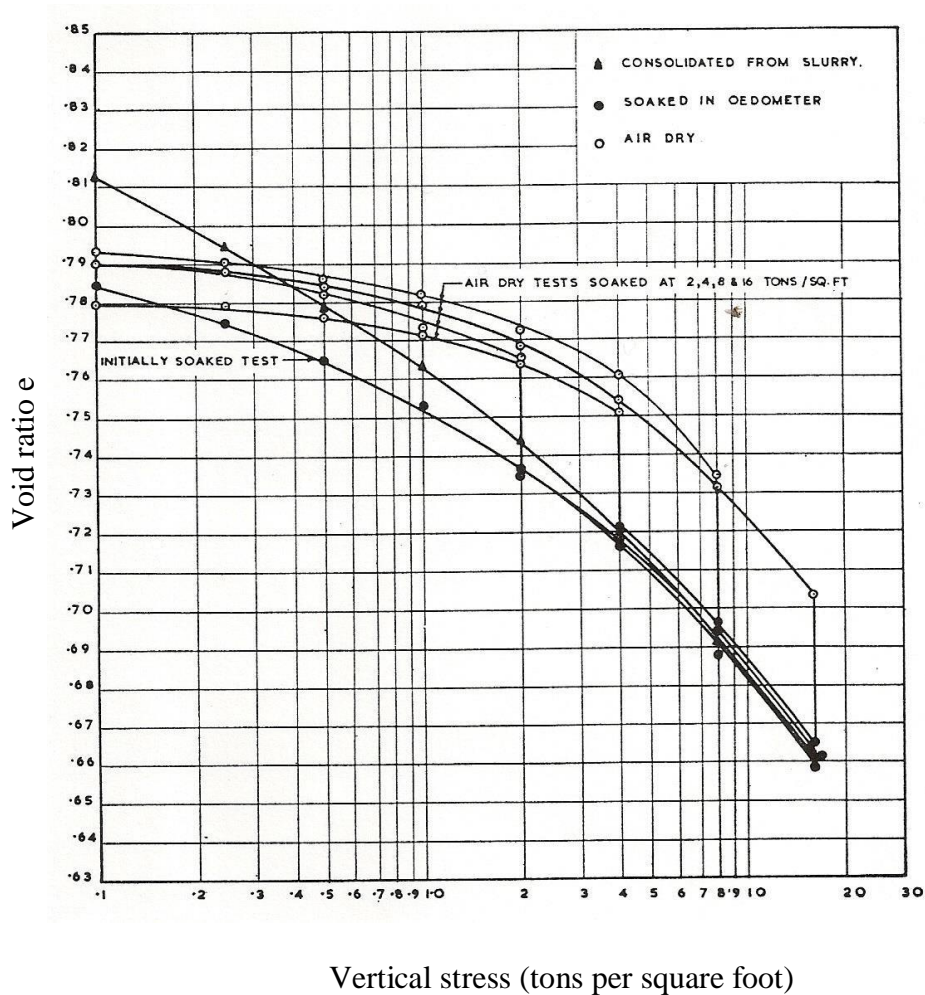


Figure 3: One-dimensional compression curves in fully saturated quartz sludge and in the same sludge after drying under atmospheric conditions (Jennings & Burland, 1962)

There is a decrease in the slope of the compression branch of unsaturated materials but also the tendency for collapse as a percentage of shrinkage during flooding. The tendency to collapse was not examined in this thesis. Figure 4 shows the percentage of shrinkage to the stress of wetting the specimens by one-dimensional compression curves (Jennings & Burland, 1962).

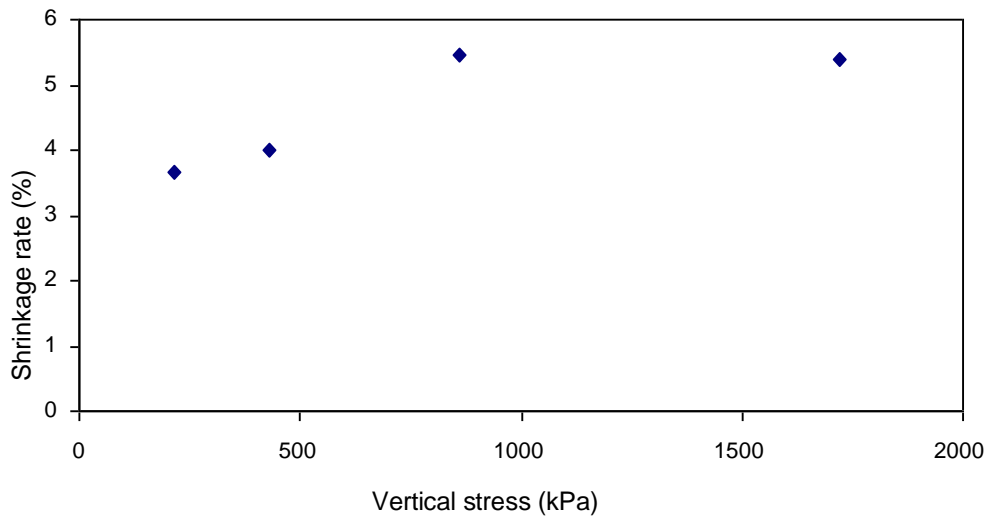


Figure 4: Percentage of shrinkage relative to the vertical stress of specimens (Jennings & Burland, 1962).

Indicative results of the first series of experiments are presented in Figure 5. The increase in soil matrix suction from 50 to 200kPa, through an increase in air pressure (u_a), appears to reduce the compressibility of kaolin as the black curve corresponding to a suction of 50kPa exhibits greater compressibility than the green one corresponding to a suction of 200kPa. Also, the yield stress increases with increasing suction as indicated in Figure 3. These results are consistent with the results of the literature as in Figures 1-4 mentioned above. In Figure 5 the red curve corresponds to a compression test performed under a significantly higher suction of 400kPa. In addition to increasing compressibility according to the above, a further increase in vertical stress leads to a sharp development of volumetric deformation. The simultaneous measurement of the water change in the pores and the settlement of the specimen allows the degree of saturation to be calculated ($S_r = \text{Volume of water} / \text{Volume of voids}$). Specimens with suction of 50 and 200kPa remained saturated throughout loading. Conversely, when suction increases to 400kPa the degree of saturation decreases continuously during charging. Under a certain suction value, air penetrates the pores of the clay material, replacing water. Therefore, 400 kPa is the air entry value for kaolinite $w=50\%$.

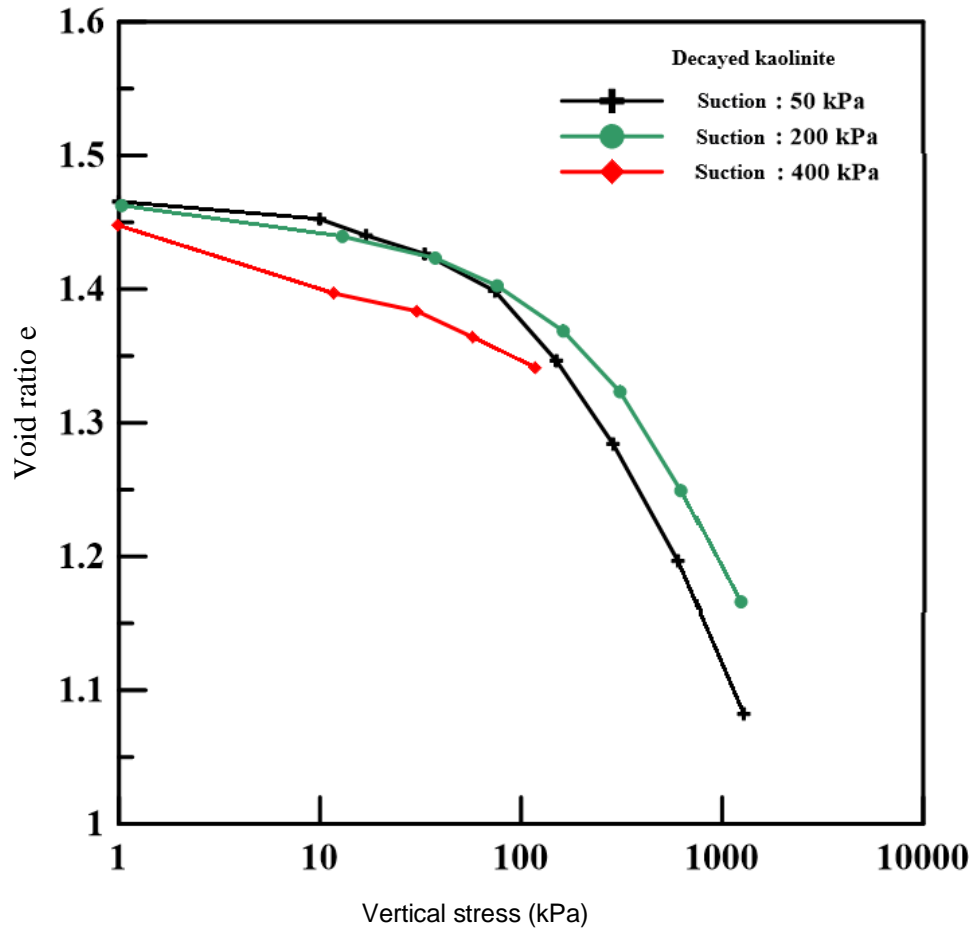


Figure 5: Results of compression tests on decayed kaolinite under different soil matrix suction. Pore indicator to vertical stress

These results are consistent with those of the literature, as shown in Figure 6 where after a suction (>400 kPa) air ingress is observed in the specimens (see dotted line).

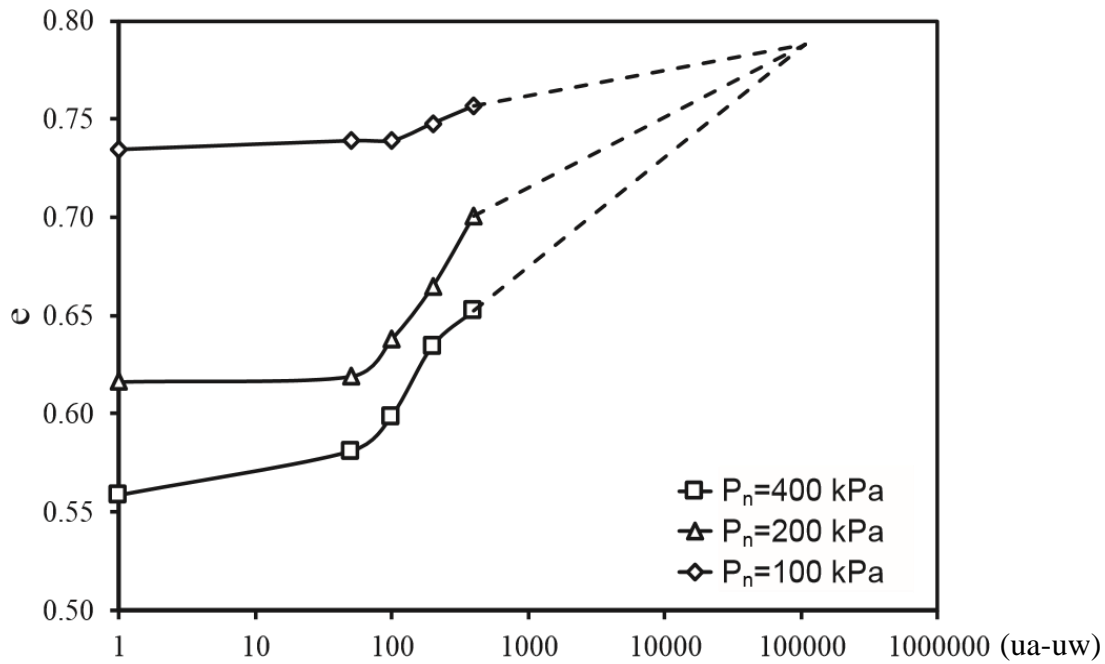


Figure 6: Pore index change with suction increasing under constant vertical stress P_n (Haeri et al., 2015).

The second series of experiments examine the effect of soil matrix suction on the strength of M31 sand under conditions of unconfined compression. The characteristics of M31 sand are described by Georgiannou, V. N., & Konstadinou, M. (2014)¹. Figure 7 shows the maximum vertical stress at failure under constant matrix suction i.e. -10, -20, -30, and -40kPa. The strength of the sand increases with increasing matrix suction and doubles in the suction range examined.

¹ Georgiannou, V. N., & Konstadinou, M. (2014)¹. Torsional Shear Behavior of Anisotropically Consolidated Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000985](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000985).

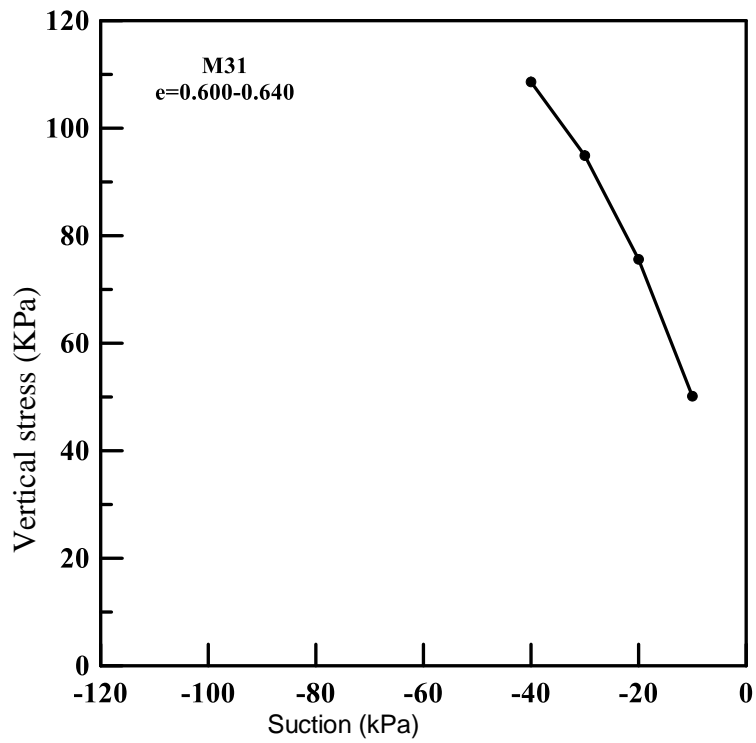


Figure 7: Effect of soil matrix suction on maximum sand strength

Due to low suction values, all specimens remain saturated during loading. Therefore, suction represents the initial effective stress of the specimens. It is therefore to be expected that the strength will increase with increase in the effective stress of the saturated specimens.

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Με αφορμή την εν λόγω εργασία βρίσκω την ευκαιρία να ευχαριστήσω θερμά την κ. Γεωργιάννου Βασιλική, Καθηγήτρια του Τομέα Γεωτεχνικής του Ε.Μ.Π., για την συνεχή καθοδήγηση της και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου προσέφεραν. Έχω την τύχη να τους έχω στη ζωή μου και αποτελούν πηγή έμπνευσης και κίνητρο για να γίνομαι συνέχεια καλύτερος άνθρωπος.

Μαριέλλα Παππά Ιούλιος 2023, Αθήνα

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Ευχαριστίες.....	xv
Περιεχόμενα	xvi
Κατάλογος Εικόνων.....	xviii
Κατάλογος Σχημάτων	xix
Κατάλογος Διαγραμμάτων	xxii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Κατάταξη εδαφών.....	1
1.2 Μη κορεσμένα Εδάφη.....	2
2 Αρνητική Πίεση και Μύζηση	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Η φύση της μύζησης	6
2.2.1 Επιρροή τριχοειδών φαινομένων.....	7
2.2.2 Επιρροή δυνάμεων Van der Waals και ηλεκτρικών δυνάμεων	13
2.3 Η έννοια της μύζησης	14
2.3.1 Αρνητική πίεση.....	17
2.3.2 Δυναμικό Μύζησης.....	19
2.4 Παράμετροι Τάσης	20
2.4.1 Ενεργές Τάσεις	20
2.4.2 Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφών.....	22
2.4.3 Μεταβολές όγκου μη κορεσμένων εδαφών	25
2.4.4 Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους (ΧΚΜΕ).....	30
2.4.1 Διαπερατότητα μη κορεσμένων εδαφών.....	34
3 Μύζηση.....	36
3.1 Γενικά.....	36

3.2	Μέθοδος Μεμβράνης και Μέθοδος Μετατόπισης Άξονα	40
4	Εργαστηριακές δοκιμές	45
	Δοκιμές μεταβαλλόμενου αξονικού υπό σταθερή μύζηση εδαφικού σκελετού (3)	48
4.1	Αξονική φόρτιση υπό σταθερή μύζηση εδαφικού σκελετού	48
4.2	Αποτελέσματα δοκιμών	53
5	Συμπεράσματα	57
6	Βιβλιογραφία	59

Κατάλογος Εικόνων

<i>Εικόνα 1.1: Απεικόνιση α) μη κορεσμένου και β) μερικώς κορεσμένου εδάφους (Μπαρδάνης, 2016)</i>	<i>2</i>
<i>Εικόνα 1.2: Κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη.....</i>	<i>3</i>
<i>Εικόνα 2.1: Ιδεατή απεικόνιση κόκκων.....</i>	<i>6</i>
<i>Εικόνα 2.2: Μοριακές δυνάμεις της υγρής φάσης σε μόρια που βρίσκονται στην επιφάνεια διεπαφής υγρής – αέριας φάσης και σε μεγάλη απόσταση από αυτή.</i>	<i>8</i>
<i>Εικόνα 2.3: Δυνάμεις Τριχοειδούς (Μαμάσης, 2017).....</i>	<i>11</i>
<i>Εικόνα 2.4: Διαφορετική ικανότητα συγκράτησης νερού πόρων των εδαφικών υλικών σε ιδεατό προσομοίωμα πλακών σε διαφορετική απόσταση μεταξύ τους.</i>	<i>12</i>
<i>Εικόνα 2.5:Ιδεατή απεικόνιση κόκκων μεταξύ των οποίων υπάρχει μηνίσκος.....</i>	<i>15</i>
<i>Εικόνα 4.1: Σύσκευή συμπιεσομέτρου για ακόρεστα εδάφη και μετρητής.....</i>	<i>46</i>

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Στατικές και πρότυπες καμπύλες συμπίεσης Proctor για τα τέσσερα εδαφικά μείγματα. (Zhemchuzhnikov, A., Ghavami, K. and dal Toé Casagrande, M., 2015).....	4
Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος (ΔΕΣ) καμπυλωμένης διεπιφάνειας υγρής – αέριας φάσης α) δύο διαστάσεις και β) τρεις διαστάσεις	10
Σχήμα 2.2: Δυνάμεις α) στους κόκκους κορεσμένου εδάφους ενώ στην (β) οι δυνάμεις που ασκούνται στους κόκκους λόγω μερικού κορεσμού. (Μπαρδάνης, 2016)	16
Σχήμα 2.3: Οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές που περιγράφουν την εντατική κατάσταση για ένα μη κορεσμένο έδαφος (Fredlund and Vanapalli, 2002).....	21
Σχήμα 2.4: Επέκταση της περιβάλλουσας αστοχίας κατά Mohr – Coulomb σε μη κορεσμένα εδαφη (Fredlund, Morgenstern & Widger, 1978)	24
Σχήμα 2.5: Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μή κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο μή γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Fredlund, 1994).....	25
Σχήμα 2.6: Καταστατικές επιφάνειες δείκτη κενών και περιεχόμενης υγρασίας μη κορεσμένου εδάφους (Fredlund & Rahardjo, 1993).....	27
Σχήμα 2.7: α) Παρουσιάζεται η εξέλιξη του λόγου κενών με την μύζηση, β) η καμπύλη συρρίκνωσης, ήτοι η εξέλιξη του λόγου κενών με το ποσοστό υγρασίας, δ) η εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με το ποσοστό υγρασίας, και γ) η καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης...	28
Σχήμα 2.8: Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου σε έδαφος σταθερής δομής συνθήκες φόρτισης – αποφόρτισης (Fredlund & Rahardjo, 1993)	29
Σχήμα 2.9: Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου εδάφους που εμφανίζει ασταθή δομή υπό συνθήκες φόρτισης – αποφόρτισης (Fredlund & Rahardjo, 1993).....	30
Σχήμα 3.1: Αρχή της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με μεμβράνη ή κεραμικό πορόλιθο (Μπαρδάνης, 2016)	42
Σχήμα 3.2: Αρχή της μεθόδου μετατόπισης άξονα για τη μέτρηση της μύζησης του εδαφικού σκελετού (Μπαρδάνης, 2016).....	43
Σχήμα 4.1: Σχηματική απεικόνιση συσκευής συμπίεσομέτρου για ακόρεστα εδάφη	46

Σχήμα 4.2: Καμπύλες ισοτροπικής συμπίεσης πλήρως κορεσμένου εδάφους και μη κορεσμένου εδάφους υπό σταθερή μύζηση.....	50
Σχήμα 4.3: Καμπύλες ισοτροπικής συμπίεσης πλήρους κορεσμένου καολίνη και μη κορεσμένο υπό σταθερή μύζηση s (Thu, et al., 2007).	51
Σχήμα 4.4: Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε πλήρως κορεσμένη χαλαζιακή ιλύ και στην ίδια ιλύ μετά από ξήρανση στις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Jennings & Burland, 1962)	52
Σχήμα 4.5: Ποσοστό συρρίκνωσης ως προς την κατακόρυφη τάση διαβροχής των δοκιμίων (Jennings & Burland, 1962).....	53
Σχήμα 4.6: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης σε αναζυμωμένο καολινίτη υπό διαφορετική μύζηση εδαφικού σκελετού. Δείκτης πόρων προς κατακόρυφη τάση	54
Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης σε αναζυμωμένο καολινίτη υπό διαφορετική μύζηση εδαφικού σκελετού. Βαθμός κορεσμού προς κατακόρυφη τάση.....	55
Σχήμα 4.8: Μεταβολή δείκτη πόρων με την αύξηση της μύζησης υπό σταθερή κατακόρυφη τάση P_n (Haeri et al., 2015).	55
Σχήμα 4.9: Επίδραση της μύζησης εδαφικού σκελετού στη μέγιστη αντοχή άμμου.....	56

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 2.1: Εξισώσεις διατμητικής αντοχής μη κορεσμένων εδαφών.....</i>	<i>22</i>
<i>Πίνακας 3.1: Συνόψιση χαρακτηριστικών των μεθόδων μέτρησης της ολικής μύζησης (Μπαρδάνης, 2016)</i>	<i>38</i>
<i>Πίνακας 3.2: Συνόψιση χαρακτηριστικών των μεθόδων μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού (Μπαρδάνης, 2016).....</i>	<i>39</i>
<i>Πίνακας 3.3: Όργανα μέτρησης πίεσης.....</i>	<i>41</i>
<i>Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών.....</i>	<i>48</i>

Κατάλογος Διαγραμμάτων

<i>Διάγραμμα 2.1: Τοπικές καμπύλες μύζησης εδάφους (Fredlund & Rahardjo, 1993).....</i>	<i>31</i>
<i>Διάγραμμα 2.2: Χαρακτηριστική καμπύλη μύζησης για διάφορους τύπους εδάφους (Pérez-García N, 2008).....</i>	<i>32</i>
<i>Διάγραμμα 2.3: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού (López-Acosta NP and Menoza-Promotor JA, 2016)</i>	<i>33</i>
<i>Διάγραμμα 2.4: Ποιοτική απεικόνιση της συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας του νερού k_w με την μύζηση και αντιστοίχισή της με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (Μπαρδάνης, 2016).</i>	<i>35</i>

1 Εισαγωγή

1.1 Κατάταξη εδαφών

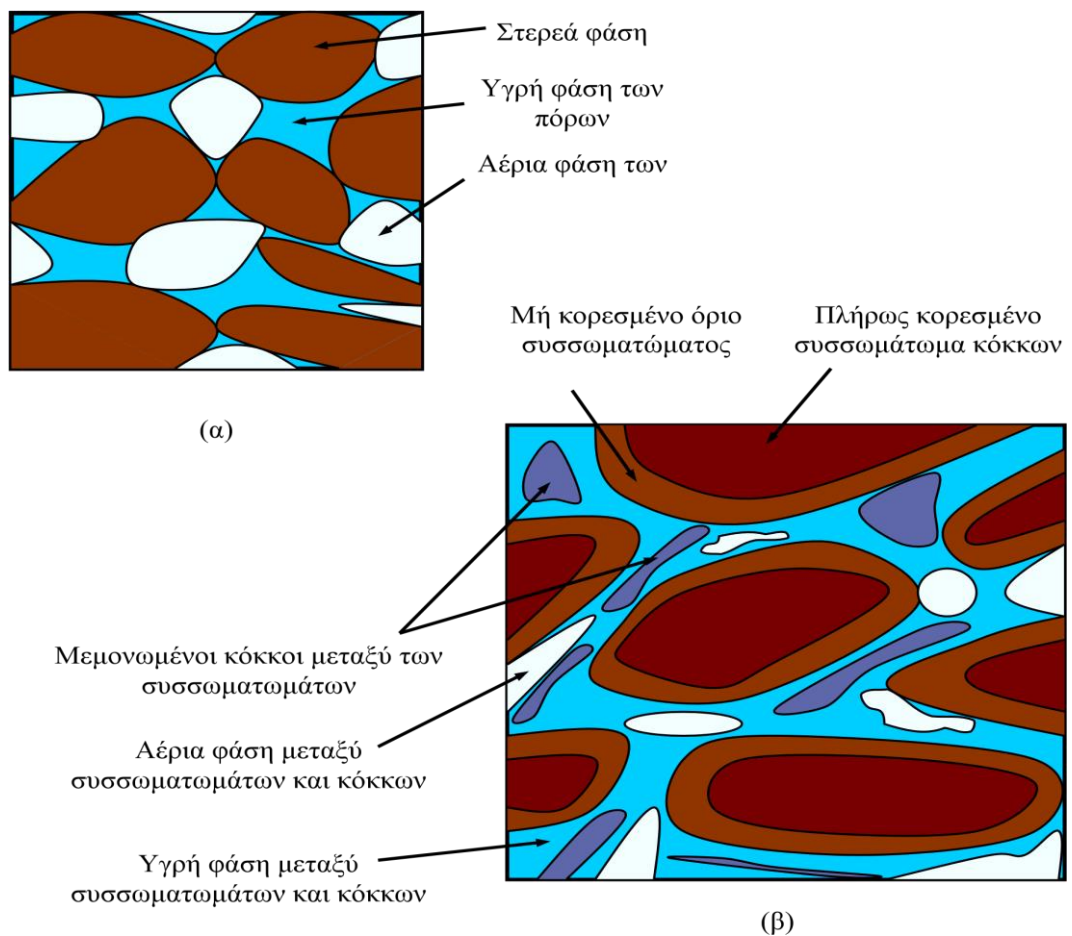
Τα εδάφη μπορούν να καταταχθούν βάση πολλών δοκιμών με τις κυριότερες να αφορούν τη κατάταξη είτε με τη φύση των κόκκων είτε με τη σχέση τους με το νερό.

Τα εδάφη ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους διακρίνονται από αργίλους μέχρι λατύπες. Τα μεγέθη των κόκκων αργίλου και λατυπών έχουν διαφορά ενός εκατομμυρίου. Τα περισσότερα φυσικά εδάφη είναι ένα μίγμα κόκκων διαφορετικού μεγέθους. Από το προσδιορισμό του μεγέθους των κόκκων λαμβάνουμε χρήσιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά τους. Η κοκκομετρική διαβάθμιση προσδιορίζεται με τη διαδικασία κοσκίνισματος και ιζηματοπόθεσης. Το κοσκίνισμα διαχωρίζει κόκκους μεταξύ 75mm και 63mm (χαλίκια και άμμοι) ενώ η ιζηματοπόθεση κόκκους μικρότερους από 63mm. Στις δοκιμές κοσκίνισματος δε περιλαμβάνονται κόκκοι μεγαλύτεροι από 75mm δηλαδή κόκκοι μεγέθους κροκάλας. Αυτοί οι κόκκοι αφαιρούνται από τη δοκιμή και εκτιμάται η αναλογία τους στο εδαφικό δείγμα. Η ιζηματοπόθεση βασίζεται στο νόμο του Stokes ο οποίος λέει ότι όταν ένας λείος σφαιρικός κόκκος αιωρείται σε ένα υγρό καθιζάνει από την επίδραση της βαρύτητας με μία συγκεκριμένη ταχύτητα. Κατά την ιζηματοπόθεση είναι σημαντικό να γίνεται διαχωρισμός των κόκκων του εδάφους πριν τη διαδικασία της δοκιμής. Συνήθως θεωρείται ότι η ιζηματοπόθεση δεν είναι απαραίτητη αν το έδαφος περιέχει λιγότερα από 10% λεπτόκοκκα υλικά.

Ανάλογα με τη σχέση τους με το νερό τα εδάφη διακρίνονται σε κορεσμένα και ακόρεστα. Τα εδάφη θεωρούνται κορεσμένα όταν τα κενά μεταξύ των κόκκων είναι γεμάτα με νερό. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά μη κορεσμένων εδαφών, δηλαδή εδαφών που ο βαθμός κορεσμού είναι μεγαλύτερος του μηδενός και μικρότερος της μονάδας. Ως βαθμός κορεσμού νοείται ο λόγος των κενών του εδαφικού υλικού που πληρούνται με νερό προς τον συνολικό όγκο των κενών του. Η ανάγκη μελέτης αυτών των εδαφών κρίνεται αναγκαία αφού σε πολλές αναπτυγμένες χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, κατασκευάζονται γεωτεχνικά έργα με μη κορεσμένα εδάφη ή πάνω σε αυτά.

1.2 Μη κορεσμένα Εδάφη

Συνήθως, μη κορεσμένα είναι τα εδαφικά υλικά με ομοιογενές μέγεθος πόρων. Αντίθετα μερικώς κορεσμένα εδάφη είναι τα εδάφη με έντονα ανομοιογενές μέγεθος πόρων επομένως δεν υπάρχει ομοιογένεια του βαθμού κορεσμού λόγω συγκέντρωσης του νερού στους μικρότερους πόρους ενώ ο αέρας συγκεντρώνεται στους μεγαλύτερους πόρους. Η βασική ιδιομορφία των μη κορεσμένων εδαφών είναι ότι η μηχανική τους συμπεριφορά ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και την εντατική κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική από εκείνη των κορεσμένων. Η μετάβαση από τον μερικό κορεσμό στο πλήρη κορεσμό οδηγεί σε διόγκωση ή σε συρρίκνωση του ίδιου εδαφικού υλικού αναλόγως της τάσης που ασκείται. Η μείωση του βαθμού κορεσμού οδηγεί σε αρχική αύξηση της διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών, η οποία όμως έπειτα μπορεί είτε να αυξάνεται είτε να μειώνεται ανάλογα με το υλικό.

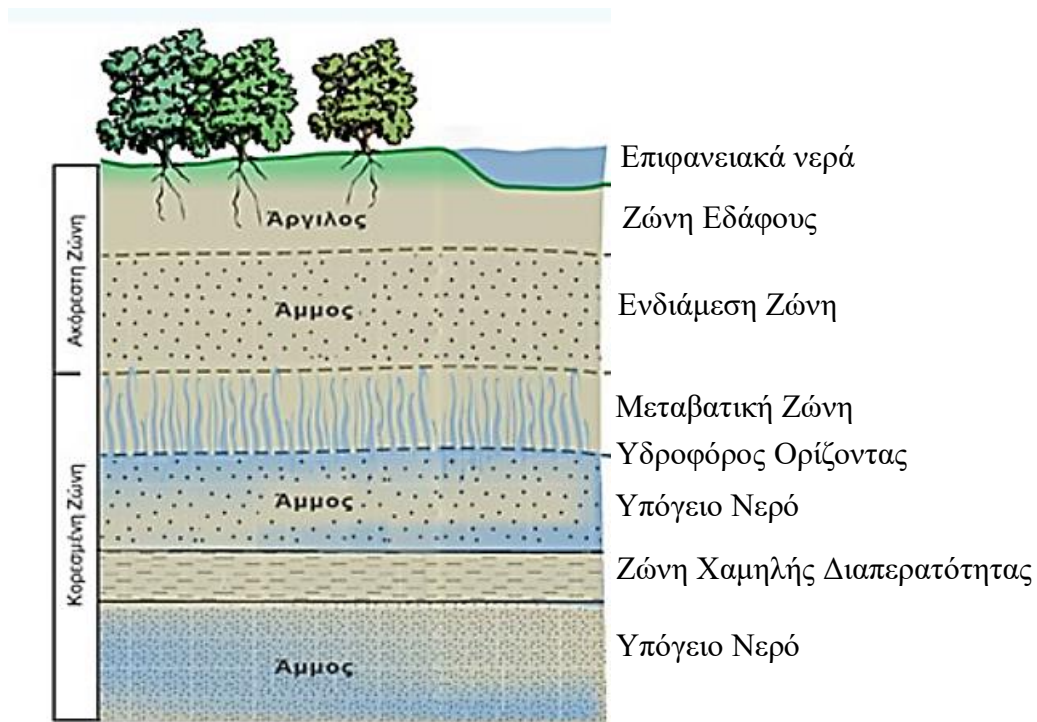


Εικόνα 1.1: Απεικόνιση α) μη κορεσμένου και β) μερικώς κορεσμένου εδάφους (Μπαρδάνης, 2016)

Στην Εικόνα 1.1.(α) παρουσιάζεται η διάταξη κόκκων και πόρων γεμάτων είτε με νερό είτε με αέρα σε μη κορεσμένο έδαφος ενώ στη (β) παρουσιάζεται μια απεικόνιση μεμονωμένων κόκκων μεταξύ των συσσωματωμάτων, η αέρια και η υγρή φάση μεταξύ συσσωματωμάτων και κόκκων σε μερικώς κορεσμένα εδάφη (Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1993)

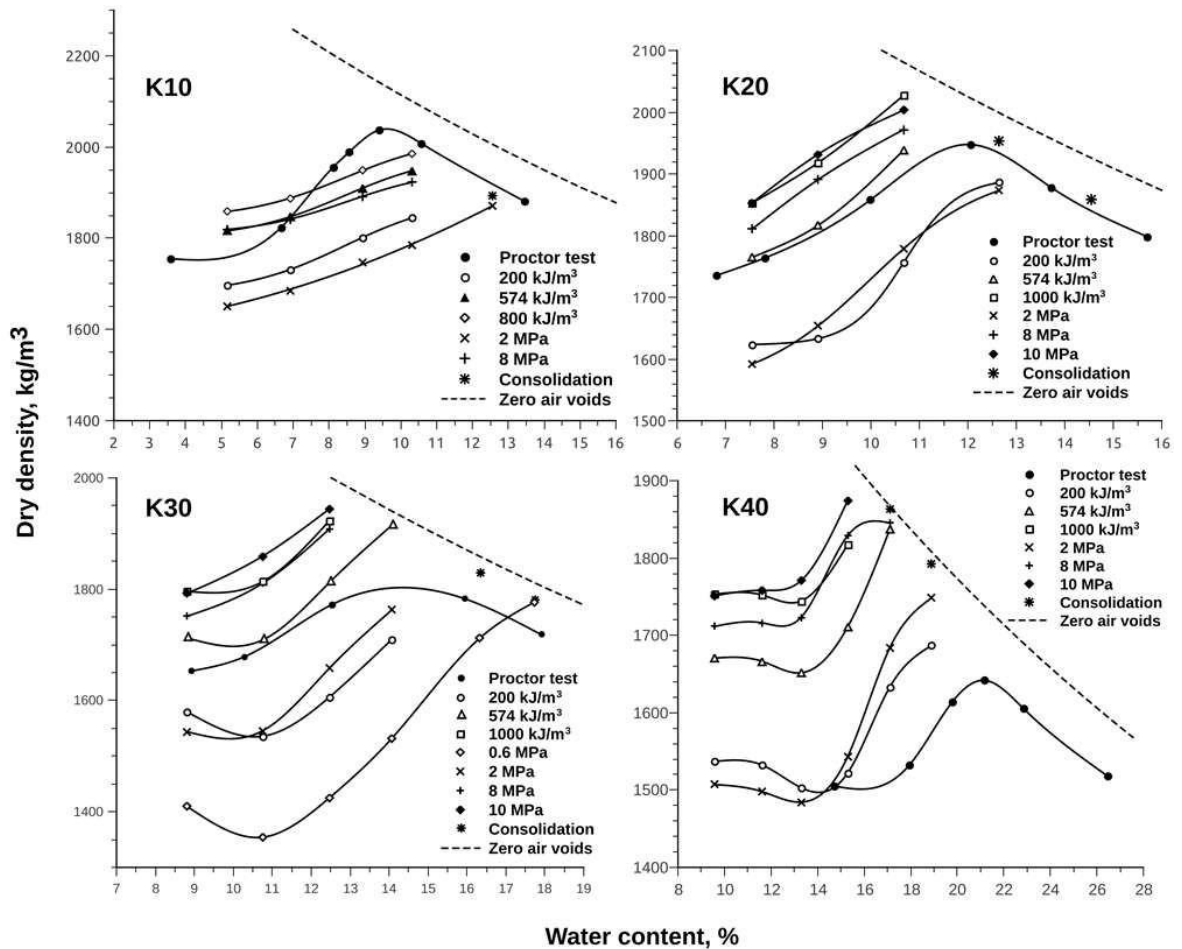
Μη κορεσμένα ή μερικώς κορεσμένα εδαφικά υλικά συναντάμε σε διάφορες μορφές στη φύση ή είναι αποτέλεσμα ανθρώπινης παρέμβασης. Τέτοια είναι κοκκώδη υλικά όπως χάλικες και άμμοι και λεπτόκοκκα υλικά όπως ιλεις και άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας.

Ως αποτέλεσμα του υδρολογικού κύκλου (υπόγεια νερά) είναι αναπόφευκτο οι πόροι του εδάφους να γεμίσουν με νερό μέχρι τον πλήρη κορεσμό τους. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε τη δημιουργία μιας ζώνης κορεσμού κάτω από το επίπεδο του εδάφους, η ανώτερη επιφάνεια της οποίας ονομάζεται υδροφόρος ορίζοντας. Στα σημεία που ο υδροφόρος ορίζοντας είναι σε αρκετό βάθος σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους τότε το έδαφος πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έχει βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100%. Η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού καθορίζει αν αυτό είναι μη κορεσμένο ή μερικώς κορεσμένο. Εξαιρείται μία μεταβατική ζώνη η οποία μπορεί και να παραμένει πλήρως κορεσμένη ενώ έχει αρνητικές πιέσεις πόρων εφόσον βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2..



Εικόνα 1.2: Κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη.

Μια κατηγορία μη κορεσμένων εδαφών είναι τα συμπυκνωμένα εδάφη που καθίστανται πάντα μη κορεσμένα μέχρι να εφαρμοστούν σημαντικά υπερκείμενα ή λόγω κατείσδυσης υδάτων, όπως τα συμπυκνωμένα υλικά χωμάτων φραγμάτων. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξηρού φαινομένου βάρους ποσοστού υγρασίας από δοκιμές Proctor με την πρότυπη και τροποποιημένη ενέργεια συμπίκνωσης στο ίδιο εδαφικό υλικό. Φαίνεται ότι για ποσοστά υγρασίας που είναι μικρότερα από αυτά της βέλτιστης υγρασίας ο βαθμός κορεσμού είναι μικρότερος από 100%.



Σχήμα 1.1: Στατικές και πρότυπες καμπύλες συμπίεσης Proctor για τα τέσσερα εδαφικά μείγματα. (Zhemchuzhnikov, A., Ghavami, K. and dal Toé Casagrande, M., 2015)

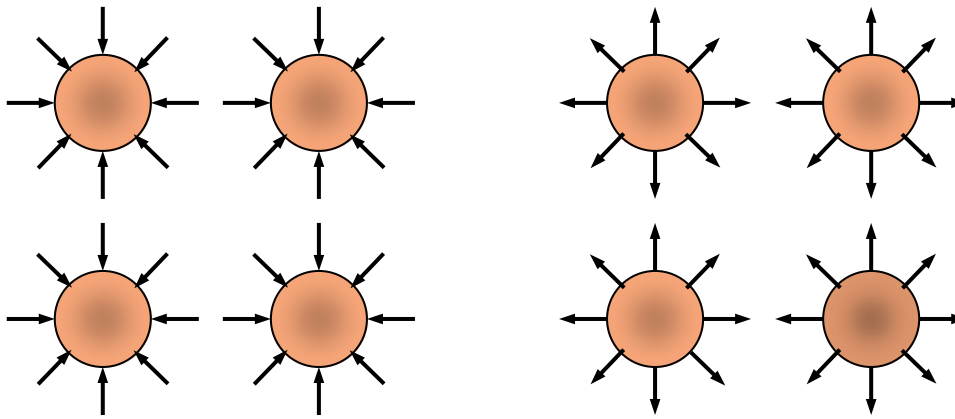
2 Αρνητική Πίεση και Μύζηση

2.1 Γενικά

Στα εδάφη που βρίσκονται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να υπάρχει μόνο η υγρή φάση στους πόρους, αλλά υπάρχουν περιπτώσεις που εντοπίζεται η υγρή και η αέρια φάση ταυτόχρονα. Η πίεση της υγρής φάσης των πόρων είναι αρνητική μόνο στην πρώτη (μεταβατική ζώνη Εικόνα 2.2) από τις δύο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Το φυσικό νόημα της παρουσίας θετικής πίεσης είναι ότι με τη παρουσία της πίεσης αυτής το νερό των πόρων έχει τη τάση να διαφύγει από το εδαφικό υλικό. Σύμφωνα με την αρχή των ενεργών τάσεων για πλήρως κορεσμένα εδάφη η πίεση αυτή αφαιρείται από την ολική τάση. Αντίθετα με τη παρουσία αρνητικής πίεσης το νερό έχει τη τάση να προσφύσει και άλλο επί του εδαφικού υλικού.

Στην περίπτωση που το εδαφικό υλικό είναι πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, ανάλογα με τη φύση του εδάφους, τις συνθήκες που επιδρούν στην επιφάνεια και το πάχος της μη κορεσμένης ζώνης, έχουμε συνύπαρξη της υγρής και αέριας φάσης στους πόρους του υλικού. Η εντατική κατάσταση της υγρής φάσης περιγράφεται από το μέγεθος που ονομάζεται μύζηση (suction). Στην Εικόνα 2.1 (α) παρουσιάζεται μια ιδεατή απεικόνιση κόκκων υπό θετική πίεση του νερού των πόρων, όπου φαίνεται ότι υπάρχει μια τάση για απομάκρυνση. Απεναντίας, στην Εικόνα 2.1 (β) παρουσιάζεται μια ιδεατή απεικόνιση κόκκων υπό αρνητική πίεση του νερού των πόρων, κατά την οποία υπάρχει μία τάση να προσεγγίζουν ο ένας τον άλλον.



(α) Ιδεατή απεικόνιση κόκκων υπό θετική πίεση του νερού των πόρων. Τάση να απομακρυνθούν.
 (β) Ιδεατή απεικόνιση κόκκων υπό αρνητική πίεση του νερού των πόρων. Τάση να προσεγγίσουν ο ένας τον άλλον.

Εικόνα 2.1: Ιδεατή απεικόνιση κόκκων

2.2 Η φύση της μύζησης

Ελεύθερο νερό ονομάζεται το νερό όταν δε υπάρχουν σε αυτό διαλυμένες ουσίες, δεν αλληλοεπιδρά με άλλες φάσεις που μπορούν να προκαλέσουν καμπύλωση της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης και δε ασκούνται σε αυτό άλλες εξωτερικές δυνάμεις εκτός από τις βαρυτικές. Η πίεση στην υγρή φάση εκφράζει την ενέργεια της υγρής φάσης ως προς την ενέργεια αναφοράς που είναι η ενέργεια του ελεύθερου νερού. Το νερό που βρίσκεται στη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα έχει μηδενική πίεση της υγρής φάσης. Έχουμε ως δεδομένο ότι αφού είναι ελεύθερο νερό δε έχει αυξημένο ή μειωμένο δυναμικό ως προς τη χαρακτηριστική αυτή θέση. Το δυναμικό αυτό μειώνεται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και αυξάνεται κάτω από τη στάθμη του. Επομένως, το νερό ευρισκόμενο στη θέση αυτή είναι πάντα σε ισορροπία με τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα (στάθμη αναφοράς).

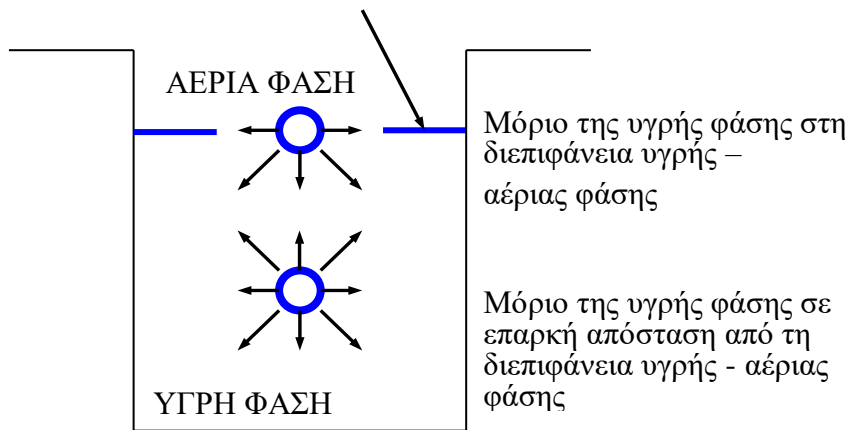
Οι βασικοί μηχανισμοί που προκαλούν τη μείωση του δυναμικού του νερού είναι τα τριχοειδή φαινόμενα, τα φαινόμενα προσρόφησης και τα ωσμωτικά φαινόμενα. Τα τριχοειδή εμφανίζονται σε κορεσμένα εδαφικά υλικά ενώ τα υπόλοιπα έχουν εμφάνιση τόσο σε πλήρως όσο και σε μη κορεσμένα εδάφη. Τα τριχοειδή φαινόμενα οφείλονται στην συνύπαρξη της υγρής και αέριας φάσης στην εξωτερική επιφάνεια του εδάφους με τον αέρα σε επαφή με το νερό των πόρων στο εσωτερικό του εδάφους. Τα φαινόμενα προσρόφησης οφείλονται κυρίως στα πεδία δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω ηλεκτρικών φορτίων και δυνάμεων Van der Waals σε πολύ μικρή απόσταση από την επιφάνεια στερεάς και υγρής

φάσης. Τα φαινόμενα προσρόφησης είναι πιο σημαντικά για λεπτόκοκκα εδάφη. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται οφείλονται στα ηλεκτρικά παιδεία λόγω της αρνητικής φόρτισης στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων. Η επιρροή των ηλεκτρικών δυνάμεων και των δυνάμεων Van der Waals μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από την επιφάνεια των στερεών σωματιδίων. Τα φαινόμενα προσρόφησης είναι πιο σημαντικά εκεί που το ποσοστό υγρασίας και ο βαθμός κορεσμού έχουν μικρές τιμές δηλαδή η υγρή φάση των πόρων περιορίζεται σε λεπτές στρώσεις που περιβάλλουν τη στερεή φάση. Τα οσμωτικά φαινόμενα οφείλονται στις διαλυμένες ουσίες στην υγρή φάση των πόρων των εδαφικών υλικών και προκύπτουν με δύο τρόπους: α) ως εσωτερικά παρεχόμενες διαλυμένες ουσίες στο νερό των πόρων από ανταλλαγή ιόντων από τη κρυσταλλική δομή αργίλων με μόρια νερού των πόρων και β) ως εξωτερικά παρεχόμενες διαλυμένες ουσίες που διεισδύουν στο νερό των πόρων φυσικά (διήθηση). Η αρνητική πίεση πόρων και η μύζηση που αναπτύσσεται λόγω των προαναφερθέντων ονομάζεται ολική μύζηση.

2.2.1 Επιρροή τριχοειδών φαινομένων

Όπως έχουμε αναφέρει στα μη κορεσμένα εδαφικά υλικά υπάρχει συνύπαρξη της υγρής και της αέριας φάσης των πόρων. Στα κορεσμένα εδάφη αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας διεπιφάνειας υγρής- αέριας φάσης στη περιοχή της επαφής. Κατά μήκος της διεπιφάνειας αυτής υπάρχει ισορροπία δυνάμεων. Αυτό οφείλεται στις μοριακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα μόρια της υγρής φάσης που βρίσκονται πολύ κοντά στη διεπιφάνεια. Οι μοριακές αυτές δυνάμεις είναι διαφορετικές από τις δυνάμεις που ασκούνται στα μόρια της υγρής φάσης βαθύτερα μέσα της. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζονται οι μοριακές δυνάμεις της υγρής φάσης σε μόρια που βρίσκονται στην επιφάνεια διεπαφής υγρής – αέριας φάσης και σε μεγάλη απόσταση από αυτή.

ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΓΡΗΣ- ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ



Εικόνα 2.2: Μοριακές δυνάμεις της υγρής φάσης σε μόρια που βρίσκονται στην επιφάνεια διεπαφής υγρής – αέριας φάσης και σε μεγάλη απόσταση από αυτή.

Ένα μόριο το οποίο βρίσκεται βαθύτερα από τη διεπιφάνεια υγρής – αέριας φάσης δέχεται δυνάμεις οι οποίες βρίσκονται σε ισορροπία μεταξύ τους σε όλες τις διευθύνσεις. Για τη εξασφάλιση της ισορροπίας σε ένα μόριο της υγρής φάσης το οποίο βρίσκεται στη διεπιφάνεια υγρής αέριας φάσης συντελεί η επιφανειακή τάση της υγρής φάσης (surface tension) T , καθώς θεωρούμε αμελητέα την επιφανειακή τάση της αέριας φάσης. Η επιφανειακή τάση έχει μονάδες δύναμης ανά μήκος και εκφράζει την αντίσταση σε διάρρηξη της διεπιφάνειας υγρής- αέριας φάσης. Όταν η πίεση των πόρων είναι μικρότερη η διεπιφάνεια καμπυλώνεται προς τη πλευρά της υγρής φάσης ενώ όταν η επιφανειακή τάση είναι μικρότερη η διεπιφάνεια καμπυλώνεται προς την πλευρά της αέριας φάσης. Η ισορροπία εξασφαλίζεται από τις εξισώσεις (2.1) και (2.2) :

$$2T_s \sin\beta = \Delta u(2R_s \sin\beta) \tag{2.1}$$

$$2T_s \cos\alpha = \Delta u(2R_s \cos\alpha) \tag{2.2}$$

όπου

α : η γωνία καμπύλωσης της διεπιφάνειας και

β : η συμπληρωματική γωνία της α

R_s : η ακτίνα καμπυλότητας του θεωρούμενου τμήματος σε ισορροπία

$2 R_s \cos\alpha$ (ή $2 R_s \sin\beta$) : το μήκος του καμπύλου τμήματος θεωρώντας τη καμπύλωση να υπάρχει στο επίπεδο και όχι στο χώρο.

Στο Σχήμα 2.1(α) φαίνεται λεπτομερώς η γεωμετρία που περιεγράφηκε προηγουμένως. Με απαλοιφή των κοινών όρων στα δύο μέρη έχουμε την εξίσωση (2.3) η οποία εκφράζει την διαφορά πίεσης στις δύο ρευστές φάσεις ως συνάρτηση της ακτίνας καμπυλότητας και της επιφανειακής τάσης.

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2.3)$$

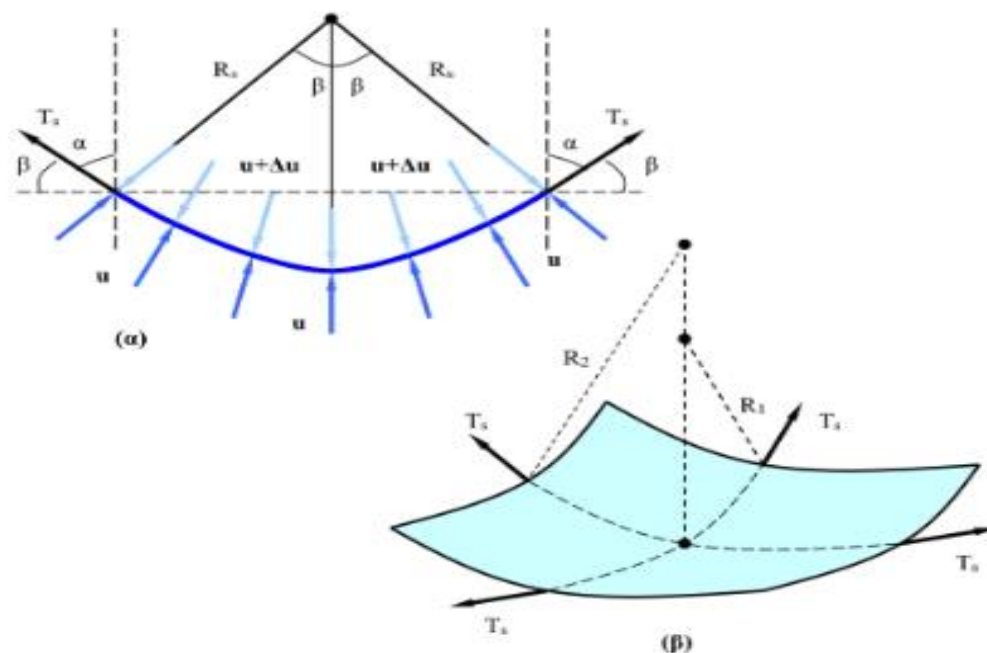
Η εξίσωση (2.4) η οποία είναι γνωστή και ως εξίσωση Young – Laplace περιγράφει τη καμπύλωση της διεπιφάνειας σε τρεις διαστάσεις και εκφράζει τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στις δύο ρευστές φάσεις.

$$\Delta u = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.4)$$

όπου R_1 , R_2 είναι οι ακτίνες καμπυλότητας στις δύο διευθύνσεις. Η εξίσωση 2.5 εκφράζει τη μύζηση του εδαφικού σκελετού σε ένα μη κορεσμένο έδαφος όπου οι ακτίνες καμπυλότητας στα δύο επίπεδα είναι ίδιες. Στο ιδεατό αυτό έδαφος που περιεγράφηκε δεν υπάρχει επιρροή δυνάμεων προσρόφησης μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης και η πίεση της αέριας φάσης u_a είναι μεγαλύτερη της πίεσης της υγρής φάσης u_w .

$$u_a - u_w = 2 \frac{T_s}{R_s} \quad (2.5)$$

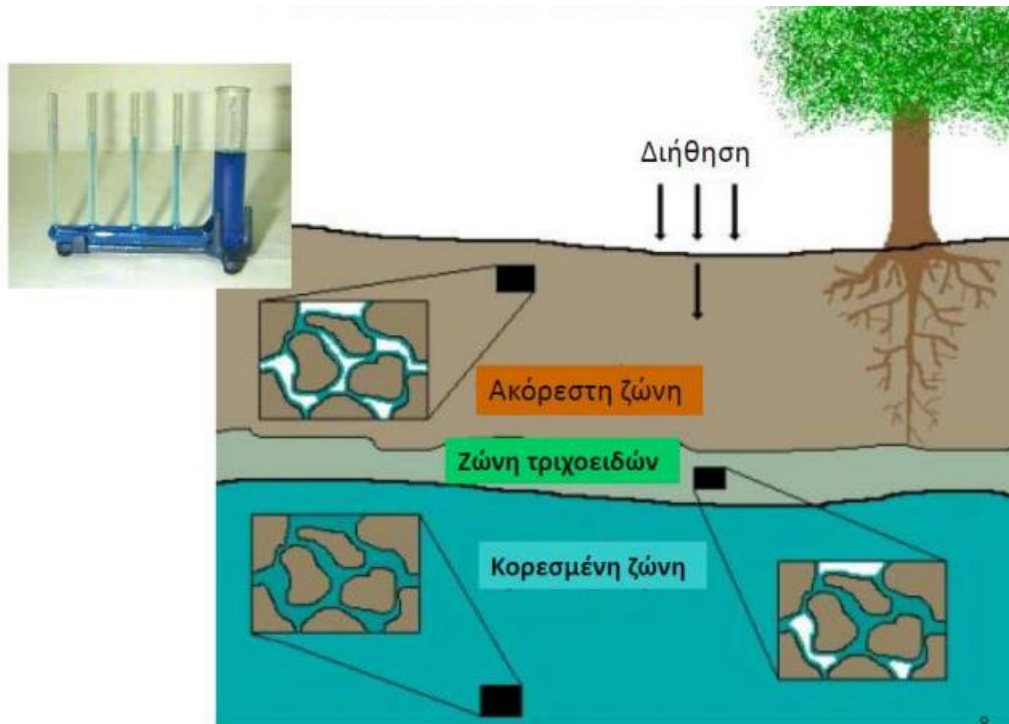
Η παραπάνω εξίσωση για ιδεατό μη κορεσμένο έδαφος περιγράφει τη μύζηση του εδαφικού σκελετού ως συνάρτηση της υγρής και της αέριας φάσης μέσω της επιφανειακής τάσης της διεπιφάνειάς τους και του μεγέθους των πόρων μέσω της ακτίνας καμπυλότητας της καμπυλομένης διεπιφάνειας.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος (ΔΕΣ) καμπυλωμένης διεπιφάνειας υγρής – αέριας φάσης α) δύο διαστάσεις και β) τρεις διαστάσεις

Η κατανόηση των παραπάνω εννοιών γίνεται αντιληπτή με ένα θεωρητικό προσομοίωμα των εδαφικών υλικών. Στο προσομοίωμα αυτό τα εδαφικά υλικά αποτελούνται από παράλληλα διατεταγμένες συμπαγείς πλάκες απείρως εκτεινόμενες σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Αν η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρισκόταν αρχικά στο ύψος h_c πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και σιγά σιγά άρχιζε να χαμηλώνει τότε η πίεση στην υγρή φάση, u , θα γινόταν μικρότερη από αυτή στη αέρια, $u + \Delta u$ και η ισορροπία μεταξύ δύο πλακών περιγράφεται από την εξίσωση (2.2). Στην Εικόνα 2.3 φαίνονται οι δυνάμεις τριχοειδούς. Στην τελική κατάσταση μετά τη βύθιση του υπόγειου ορίζοντα στη τελική θέση και για ισορροπία των δυνάμεων στο νερό που έχει μείνει μεταξύ των πλακών πάνω από τη νέα στάθμη του υπόγειου ορίζοντα ισχύει:

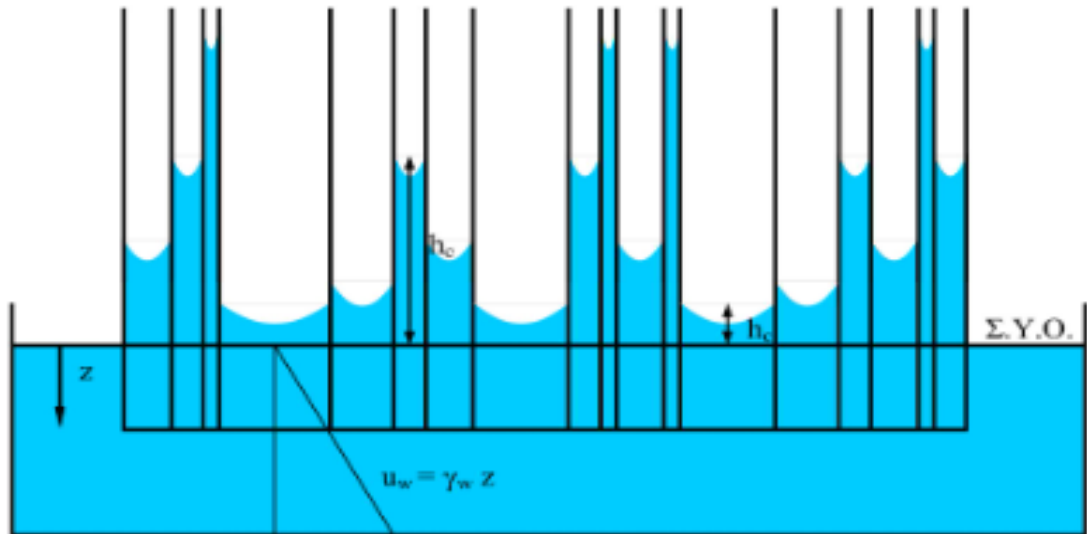
$$\Delta u = \gamma_w h_c \quad (2.6)$$



Εικόνα 2.3: Δυνάμεις Τριχοειδούς (Μαμάσης, 2017)

Στο προσομοίωμα του εδάφους με απειρομήκειες πλάκες ίδιου υλικού κατακόρυφα διατεταγμένες με σταθερή απόσταση μεταξύ τους το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης εξαρτάται μόνο από τη απόσταση των πλακών και είναι σταθερό σε οποιοδήποτε σημείο του εδάφους αφού είναι σταθερή η απόσταση μεταξύ των πλακών. Έτσι θα έχουμε τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα σε μία θέση, νερό μέχρι το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης και από εκεί και πάνω αέρα. Στη περίπτωση όμως που οι πλάκες δεν είχαν σταθερή απόσταση μεταξύ τους αλλά η απόσταση αυτή ήταν διαφορετική τότε θα ήταν διαφορετικό το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης από διάκενο σε διάκενο μεταξύ των πλακών λόγω των διαφορετικών αποστάσεων μεταξύ τους. Το ύψος αυτό θα ήταν ποικίλο από πολύ μικρό ή μηδενικό εκεί που η απόσταση των πλακών ήταν πολύ μεγάλη (μεγάλοι πόροι ιστού εδάφους) και αντίθετα έως πολύ μεγάλο εκεί που η απόσταση των πλακών θα ήταν πολύ μικρή (μικροί πόροι του εδάφους).

Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται η διαφορετική ικανότητα συγκράτησης νερού πόρων των εδαφικών υλικών σε ιδεατό προσομοίωμα πλακών σε διαφορετική απόσταση μεταξύ τους.



Εικόνα 2.4: Διαφορετική ικανότητα συγκράτησης νερού πόρων των εδαφικών υλικών σε ιδεατό προσομοίωμα πλακών σε διαφορετική απόσταση μεταξύ τους.

Όταν η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού είναι τέτοια που να εξασφαλίζεται ίδιο μέγεθος πόρων τότε όταν απομακρυνόμαστε από τον υπόγειο ορίζοντα προς την επιφάνεια του εδάφους το εδαφικό υλικό θα είναι πλήρως κορεσμένο (το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης για το κυρίαρχο μέγεθος πόρων) και από το ύψος αυτό και πάνω θα έχουμε την αέρια φάση. Αντίθετα όταν το εδαφικό υλικό αποτελείται από πόρους διαφορετικών μεγεθών εντός του εδαφικού υλικού αρχικά το εδαφικό υλικό παραμένει πλήρως κορεσμένο μέχρι το ύψος από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μέγεθος πόρων. Έπειτα όσο αυξάνει η πίεση του αέρα το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης που αντιστοιχεί στους μικρότερους πόρους είναι μεγαλύτερο και το έδαφος παραμένει κορεσμένο ενώ στους μεγάλους πόρους φυσαλίδες αέρα εισέρχονται στο νερό των πόρων. Σταδιακά με την αύξηση της πίεσης του αέρα φυσαλίδες εισέρχονται και στο νερό των μικρότερων πόρων προοδευτικά τόσο στους μικρότερους πόρους όσο και στις εσοχές των μεγαλύτερων πόρων. Η θεωρητική προσομοίωση των τριχοειδών φαινομένων υπόκειται σε περιορισμούς που αφορούν στη γεωμετρική αναπαράσταση του σχήματος των πόρων, αφού το νερό μπορεί να υποχωρεί καθώς εισέρχεται ο αέρας στους πόρους αλλά όχι από τις παρυφές τους. Σε αυτές οι αποστάσεις μεταξύ κόκκων και πλακιδίων είναι μικρότερες με αποτέλεσμα σε αυτά τα σημεία των πόρων να είναι διαφορετικές οι αποστάσεις που υπεισέρχονται. Η μετακίνηση του νερού από αυτά τα σημεία γίνεται όταν απομακρυνθούμε δυσανάλογα από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα δηλαδή όσο η πίεση του αέρα αυξάνεται.

2.2.2 Επιρροή δυνάμεων Van der Waals και ηλεκτρικών δυνάμεων

Στο προηγούμενο προσομοίωμα των απειρομηκών πλακών δε έχει δοθεί σημασία στις ιδιαιτερότητες των ορυκτών που αποτελούν τους κόκκους και τα πλακίδια των εδαφικών υλικών. Θεωρήσαμε δηλαδή ότι οι απειρομήκειες πλάκες είναι από υλικό τέτοιο ώστε δε έχει κάποια ιδιαιτερότητα κατά την επαφή του με τα μόρια του νερού. Αυτό το προσομοίωμα λέγεται τριχοειδές και αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το τρόπο αλληλεπίδρασης των χονδρόκοκκων υλικών.

Στα εδαφικά υλικά αναπτύσσονται όμως όπως προαναφέρθηκε ηλεκτρικές δυνάμεις και δυνάμεις Van der Waals. Οι δυνάμεις αυτές είναι ισχυρότερες σε μικρή απόσταση από τη διεπιφάνεια στερεάς και υγρής φάσης και συναντώνται περισσότερο σε λεπτόκοκκα εδάφη όπου η αναλογία των διαστάσεων των πλακιδίων ευνοεί την ανάπτυξη μεγαλύτερων τέτοιων δυνάμεων.

Οι ηλεκτρικές δυνάμεις οφείλονται στην αρνητική φόρτιση στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων. Οι κόκκοι των αργιλικών ορυκτών έχουν επιφάνειες ηλεκτρικά φορτισμένες οι οποίες κυριαρχούν σε κάθε διάταξη των κόκκων. Τα φορτισμένα δίπολα νερού έλκονται στην ηλεκτρικά φορτισμένη επιφάνεια των πλακιδίων σχηματίζοντας διπλή στρώση του προσροφόμενου νερού η οποία περιβάλλεται από το ελεύθερα κινούμενο απορροφημένο νερό.

Οι δυνάμεις Van der Waals οφείλονται στη αλληλεπίδραση δυνάμεων που αναπτύσσονται σε ατομική κλίμακα ανάμεσα στα μόρια που αποτελούν την επιφάνεια της στερεάς φάσης και των μορίων που απαρτίζουν την υγρή φάση.

Οι δυνάμεις αυτές είναι πιο συνήθειες στην υγρή φάση που έχει προσροφηθεί στην επιφάνεια αργιλικών πλακιδίων. Η επιρροή τόσο των δυνάμεων Van der Waals όσο και των ηλεκτρικών δυνάμεων μειώνεται κατά πολύ όσο αυξάνεται η απόσταση από την επιφάνεια των στερεών σωματιδίων. Τα φαινόμενα προσρόφησης έχουν μεγαλύτερη σημασία όταν το ποσοστό υγρασίας και ο βαθμός κορεσμού έχουν μικρές τιμές οπότε η υγρή φάση των πόρων μειώνεται σε λεπτές στρώσεις που περικλείουν τη στερεά φάση. Αυτές οι λεπτές στρώσεις δεν μπορούν να απομακρυνθούν εύκολα από την επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων ή για να απομακρυνθούν η μύζηση πρέπει να γίνει δυσανάλογα μεγάλη για την απομάκρυνση της ίδιας ποσότητας νερού συγκρινόμενη με εκείνη την ποσότητα νερού εκεί που κυριαρχούν τα τριχοειδή φαινόμενα. Έτσι καταλαβαίνουμε ότι υπάρχει μία ποσότητα νερού η οποία όσο

και να απομακρυνθούμε από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα δεν θα απομακρυνθεί. Η ποσότητα αυτή θα παραμείνει όσο και να μειωθεί ο βαθμός κορεσμού του εδαφικού υλικού. Το εδαφικό υλικό έχει λοιπόν ένα παραμένον ποσοστό υγρασίας (residual water content).

2.3 Η έννοια της μύζησης

Η πίεση του νερού κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι θετική, δηλαδή το νερό έχει τη τάση να φεύγει από το εδαφικό υλικό. Πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και μέχρι το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης που υπάρχει η υγρή φάση η πίεση του νερού είναι αρνητική αφού είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης του αέρα. Επομένως, στην αρνητική πίεση το νερό έχει τη τάση να προσελκύσει κι άλλο δηλαδή το έδαφος να προσροφήσει επιπλέον ποσότητα νερού. Η διαφορά της πίεσης του νερού των πόρων από τη πίεση του αέρα των πόρων στο ύψος πάνω από τη τριχοειδή ανύψωση εκεί που ξεκινάει η συνύπαρξη υγρής και αέριας φάσης ονομάζεται μύζηση (suction) και συμβολίζεται με $u_a - u_w$ ή s . Η πίεση του νερού των πόρων πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα είναι αρνητική δηλαδή μικρότερη της ατμοσφαιρικής, επομένως η μύζηση είναι θετική. Αυτό συμβαίνει καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η πίεση του αέρα των πόρων είναι μηδέν. Για να θεωρηθεί αρνητική η πίεση της υγρής φάσης η μύζηση πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από 100kPa και η τιμή της πίεσης της αέριας φάσης να είναι ίση με την ατμοσφαιρική.

Όταν οι κόκκοι ή τα πλακίδια των εδαφικών υλικών περικλείονται εξολοκλήρου από νερό η μύζηση ταυτίζεται με την αρνητική πίεση πόρων και γι' αυτό ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων.

Στην ιδεατή απεικόνιση κόκκων εδαφικού υλικού της ίδιας ακτίνας οι οποίοι είναι σε επαφή σχηματίζεται μηνίσκος στην εγγύτερη περιοχή τους που υπάρχει νερό. Ο μηνίσκος δημιουργεί ελκτική δύναμη ίση με:

$$F = \frac{2\pi RT_s}{1 - \tan^2 \frac{\theta}{2}} \quad (2.7)$$

Όπου

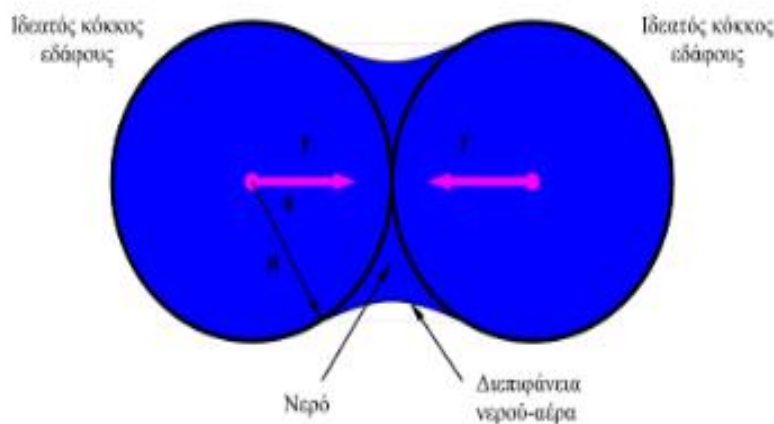
F : η δύναμη που ασκείται σε κάθε κόκκο.

T_s : η επιφανειακή τάση του νερού.

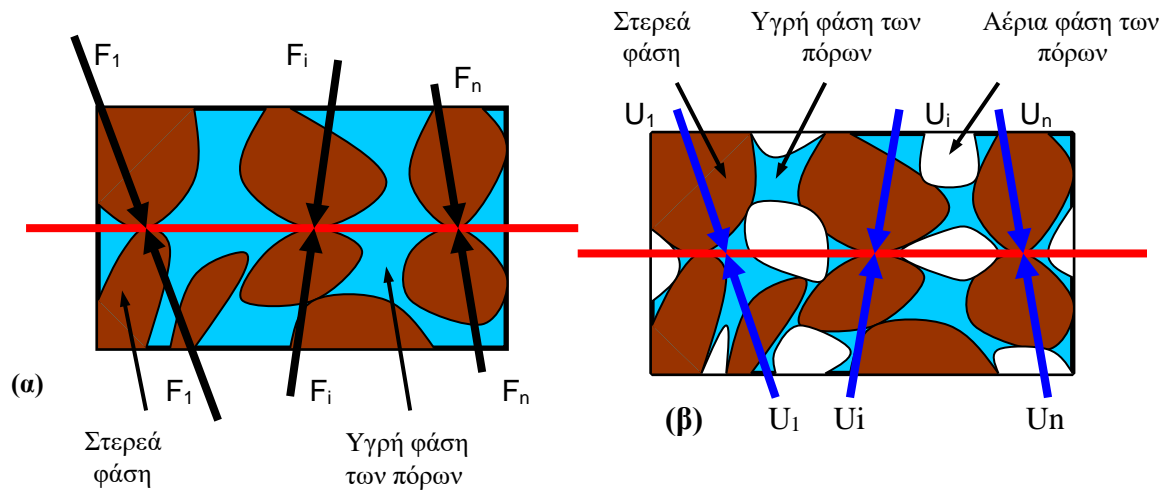
R : η ακτίνα των κόκκων και

θ : η γωνία που σχηματίζει η ευθεία που ενώνει τα κέντρα των δύο κόκκων με την ακτίνα κάθε κόκκου όταν αγγίζει τη περιφέρεια του μηνίσκου (Haines, 1927).

Οι δυνάμεις που δημιουργούν οι μηνίσκοι του νερού στο ιδεατό προσομοίωμα ασκούνται και μεταξύ των κόκκων των πραγματικών εδαφών κατά τη συνύπαρξη της υγρής και της αέριας φάσης. Το ίδιο σύνολο κόκκων θα συναντάται με μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με την περίπτωση που οι μηνίσκοι δεν υπάρχουν όπως στη περίπτωση πλήρους κορεσμένου εδάφους με μηδενική πίεση πόρων και μηδενικές ολικές τάσεις. Η μύζηση είναι το όριο των δυνάμεων που δημιουργούν οι μηνίσκοι του νερού εκεί που η αέρια φάση έχει αποκτήσει τη συνέχειά της και ασκούνται σε δεδομένη επιφάνεια ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους. Η μύζηση εξαρτάται μόνο από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσης της θεωρούμενης επιφάνειας. Επομένως είναι όπως και η πίεση του νερού των πόρων στα πλήρως κορεσμένα εδάφη μέγεθος ισοτροπικό. Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται μια ιδεατή απεικόνιση κόκκων μεταξύ των οποίων υπάρχει μηνίσκος.



Εικόνα 2.5:Ιδεατή απεικόνιση κόκκων μεταξύ των οποίων υπάρχει μηνίσκος



Σχήμα 2.2: Δυνάμεις α) στους κόκκους κορεσμένου εδάφους ενώ στην (β) οι δυνάμεις που ασκούνται στους κόκκους λόγω μερικού κορεσμού. (Μπαρδάνης, 2016)

Η μύζηση τελικά υπολογίζεται με βάσει την εξίσωση του Richards B. G., 1965 ως εξής:

$$\psi = \frac{RT}{u_w \omega_v} \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}} \right) \quad (2.8)$$

Όπου:

- ψ η εδαφική ή ολική μύζηση (kPa)
- R η παγκόσμια σταθερά αερίων με τιμή 8,31432 J/(molK)
- T η απόλυτη θερμοκρασία με τιμή 273,16+t°(K)
- u_w ο ειδικός όγκος νερού που υπολογίζεται $u_w = 1/\rho_w$ (m³/kg)
- ρ_w η πυκνότητα του νερού με τιμή 988 kg/m³ σε t=20°C
- ω_v η μοριακή μάζα υδρατμού με τιμή 18,016kg/mol
- u_v η μερική πίεση υδρατμών νερού των πόρων (kPa)
- u_{v0} η κορεσμένη πίεση υδρατμών σε μια επίπεδη επιφάνεια νερού στην ίδια θερμοκρασία (kPa)

Τα είδη της μύζησης είναι τα εξής:

- Η μύζηση εδαφικού σκελετού (matrix ή matric suction) – $s = u_a - u_w$ η τάση που υπάρχει σε ένα μόριο νερού στην υγρή φάση (δηλ. η αύξηση της μύζησης εδαφικού

σκελετού αυξάνει την ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται στην απώλεια νερού χωρίς αυτό να αλλάζει φάση)

- Η ολική μύζηση (total suction) – ψ , η τάση που απαιτείται ώστε να εξαχθεί ένα μόριο νερού από την υγρή φάση των πόρων και να βρεθεί στην αέρια φάση (δηλ. η αύξηση της ολικής μύζησης αυξάνει την ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται στην απώλεια νερού μετά την μετάπτωση του τελευταίου από την υγρή στην αέρια φάση)

- Η ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης (osmotic component of suction) ή διαφορική μύζηση – π , η διαφορά των δύο προηγούμενων μεγεθών – υπάρχει μεγάλη συζήτηση διεθνώς μέχρι σήμερα αν πράγματι ταυτίζεται με το ωσμωτικό δυναμικό της υγρής φάσης των πόρων, θεωρούμενης ως διάλυμα.

Με βάση τα παραπάνω, τελικά η ολική μύζηση υπολογίζεται:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.9)$$

Όπου:

- $u_a - u_w$ η ελκτική μύζηση ή μύζηση εδαφικού σκελετού
- u_a η πίεση του αέρα των πόρων
- u_w η πίεση του νερού των πόρων
- π η ωσμωτική μύζηση

2.3.1 Αρνητική πίεση

Όπως προαναφέρθηκε, η πίεση στην υγρή φάση είναι δυνατόν να είναι αρνητική – ακόμα και μικρότερη του απόλυτου 0 κάτω της ατμοσφαιρικής πίεσης. Αυτό φαίνεται να έρχεται σε αντίθεση με την κοινή εμπειρία των φυσαλίδων στο νερό όταν η πίεση του νερού είναι κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση και πλησιάζει τα -100 kPa, οπότε το νερό θεωρείται σπηλαιωμένο. Η σπηλαιώση είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο τα υγρά μόρια περνούν από μια υγρή φάση σε μια αέρια φάση σε σταθερή θερμοκρασία λόγω πτώσης της πίεσης του υγρού, όπως ακριβώς θα συνέβαινε αν η θερμοκρασία του υγρού αυξανόταν και έφτανε στο σημείο βρασμού της σε ατμοσφαιρική πίεση (βρασμός εν ψυχρώ).

Ωστόσο, τα περισσότερα υγρά περιέχουν διαλυμένα αέρια. Καθώς η πίεση στο ρευστό των πόρων μειώνεται, αυτά τα αέρια εισέρχονται στην αέρια φάση μέσα στο ρευστό πόρων, σχηματίζοντας διακριτές φυσαλίδες αερίου, όπως θα συνέβαινε αν επιτυγχανόταν η σπηλαίωση του ρευστού (Harveyetal, 1944). Αποδείχθηκε ότι η μέγιστη απόλυτη αρνητική πίεση πριν πραγματοποιηθεί βρασμός εν ψυχρώ, δηλαδή η εφελκυστική αντοχή του νερού είναι περί τα 500 kPa (Tabor, 1979). Τα προσεκτικά απαερωμένα υγρά σε δοχεία με λεία τοιχώματα έχουν υψηλότερες αντοχές εφελκυσμού από ό,τι όταν δεν πληρούνται οι ανωτέρω συνθήκες (Temperley & Chambers, 1946). Οι ελεύθερες φυσαλίδες σε ένα υγρό είναι ασταθείς και συνήθως το αέριο που σχηματίζει τις φυσαλίδες διαλύεται εντός του υγρού. Οι φυσαλίδες σε μια κοιλότητα δοχείου που περιέχει περιβάλλον υγρό μπορεί να παραμείνουν αδιάλυτες ακόμα και μετά την εφαρμογή πολύ υψηλών τιμών πίεσης στο νερό. Όταν η πίεση είναι αρνητική, αυτές οι φυσαλίδες μεγαλώνουν και τελικά οδηγούν σε σπηλαίωση. Η διαδικασία διέπεται από τη διήθηση αερίου κατά μήκος της διεπιφάνειας της φάσης υγρού-αερίου και την κίνηση του ορίου φάσης αερίου-υγρού-στερεού ως συνάρτηση της τάσης σε κάθε φάση.

Η αντοχή σε εφελκυσμό του νερού μετρήθηκε με σωλήνες Berthelot. Αυτοί οι σωλήνες (κλείνουν στα άκρα τους) αρχικά σχεδόν γεμίζουν με νερό, ενώ το κενό μέσα τους καταλαμβάνεται από αέρα και υδρατμούς. Ο σωλήνας στη συνέχεια θερμαίνεται, προκαλώντας διαστολή του υγρού σε αυτόν και προκαλώντας τη διάλυση των αερίων. Κατά την επακόλουθη πτώση θερμοκρασίας, το υγρό παραμένει προσκολλημένο στο τοίχωμα του σωλήνα και υπόκειται σε προοδευτικά αυξανόμενο εφελκυσμό (αρνητική πίεση) μέχρι να καταρρεύσει με την εμφάνιση της αέριας φάσης μέσα στο σωλήνα. Μερικοί κύκλοι θέρμανσης-ψύξης επαρκούν για την ανάπτυξη αντοχής σε εφελκυσμό (Chapmanetal., 1975), η οποία αυξάνεται με πρόσθετους κύκλους θέρμανσης-ψύξης (Jonesetal, 1981) και την εφαρμογή μιας προηγουμένως υψηλής θετικής πίεσης στο υγρό (Tarantino & Mongioni, 2001).

Συνεπώς, τα συμπεράσματα που προκύπτουν:

- Εξ ορισμού του φαινομένου, η εμφάνιση φυσαλίδων αερίου κατά την αποσυμπίεση ενός μη απαερωμένου υγρού δεν συνιστά σπηλαίωση, δηλαδή τη μετάβαση των μορίων υγρού από μια υγρή σε μια αέρια φάση λόγω μείωσης της πίεσης του υγρού.
- Ο μηχανισμός υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του νερού οφείλεται στο γεγονός ότι μικροφυσαλίδες αερίου παραμένουν παγιδευμένες στο υγρό ή κατά μήκος των

μικροκοιλότητων όπου το υγρό έρχεται σε επαφή με το στερεό στο οποίο βρίσκεται, χωρίς να διαλυθούν, ακόμη και μετά από πολύ υψηλή πίεση στο νερό.. Επίσης, τα υπάρχοντα διαλυμένα αέρια μεταβαίνουν εύκολα από την υγρή στην αέρια φάση, προκαλώντας αύξηση του μεγέθους των υπαρχουσών φυσαλίδων αερίου έως ότου τελικά συνενωθούν γρήγορα για να αποκαταστήσουν τη συνέχεια της αέριας φάσης.

- Καθαρό υγρό, απαλλαγμένο από ακαθαρσίες ή διαλυμένες ύλες, απαερωμένο, υποβαλλόμενο σε υψηλή πίεση, ώστε οι μικροφυσαλίδες συντρίβονται και τα αέρια που δημιουργούν τις μικροφυσαλίδες διαλύονται στο υγρό, το οποίο βρίσκεται σε ένα δοχείο μικρού όγκου με πολύ λεία τοιχώματα, έτσι ώστε να μην παραμένουν φυσαλίδες στη διεπιφάνεια υγρού-στερεού, θα αναπτύξει αντοχή σε εφελκυσμό, που αντιστοιχεί σε τιμή πιο χαμηλή των – 100 kPa.

2.3.2 Δυναμικό Μύζησης

Η μύζηση αντιπροσωπεύει την ενέργεια της υγρής φάσης των πόρων και μπορεί να εκφραστεί με τρεις τρόπους:

- ως ενέργεια ανά μονάδα μάζας ή χημικό δυναμικό (μ),
- ως ενέργεια ανά μονάδα όγκου ως δυναμικό πίεσης (ψ) ή
- ως ενέργεια ανά μονάδα βάρους ως δυναμικό ύψους (h).

Η σχέση που συνδέει αυτές τις μονάδες μεγεθών είναι η εξής:

$$\mu = \psi * v_w = h * g * \omega_w \quad (2.10)$$

Όπου:

- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας
- ω_w : η μοριακή μάζα της υγρής φάσης
- v_w : ο μερικός μοριακός όγκος της υγρής φάσης (m³/mol) και το χημικό δυναμικό (J/mol).

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ποσότητα στη γεωτεχνική μηχανική είναι το δυναμικό πίεσης ή η μύζηση σε μονάδες πίεσης.

2.4 Παράμετροι Τάσης

Σε μη κορεσμένα εδάφη υπάρχουν ταυτοχρόνως στερεά, υγρή και αέρια φάση. Επομένως, στην κάθε φάση υπάρχει μια επίδραση τάσης-πίεσης και μαζί εξισορροπούν τη συνολική εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση σ . Στην αέρια και υγρή φάση, μέρος από την τάση που τους αντιστοιχεί μετατρέπεται σε πίεση, οπότε έχουμε τη συνολική εξωτερική τάση, την τάση που αναλαμβάνεται από τη στερεά φάση, την πίεση από την υγρή φάση και την πίεση από την αέρια φάση.

2.4.1 Ενεργές Τάσεις

Ο Terzaghi (1936) διατύπωσε την αρχή των ενεργών τάσεων ως εξής: *«Αναγκαία και ικανή συνθήκη για να αποτελεί ένα μέγεθος ενεργό τάση είναι οι μεταβολές του να προκαλούν κάθε παρατηρούμενη μεταβολή στη μηχανική 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.»*

Οι ολικές κύριες τάσεις σ_1 , σ_2 , και σ_3 μπορούν να προσδιορίσουν τις τάσεις σε κάθε σημείο στην διατομή ενός εδαφικού υλικού. Το άθροισμα της ενεργού τάσης (σ') και της πίεσης των πόρων (u) ορίζουν την ολική τάση, δηλαδή:

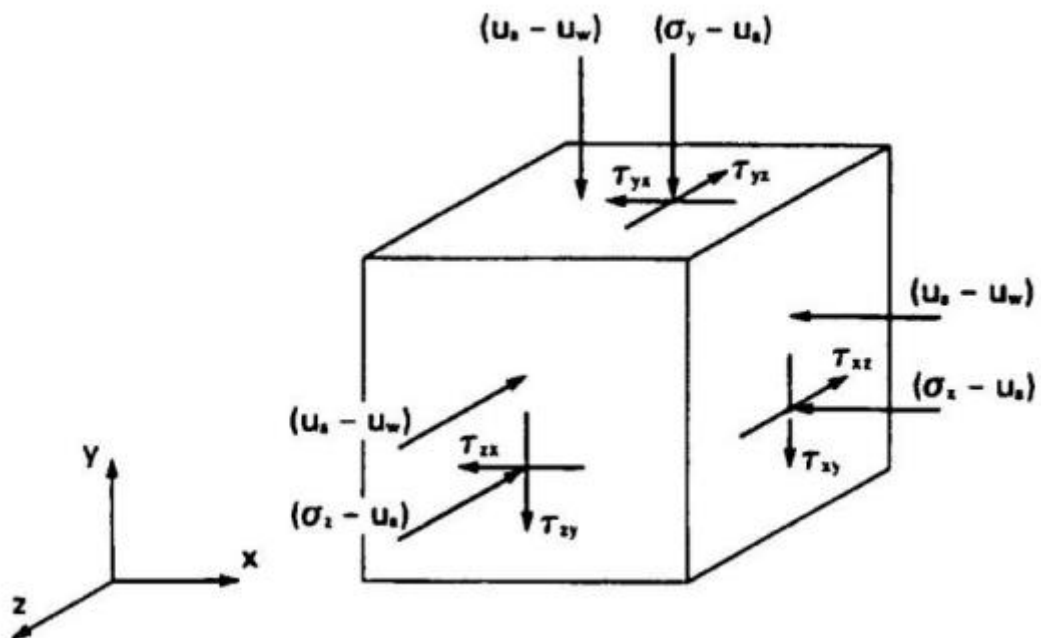
$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.11)$$

Επισημαίνεται, ότι η διαφορά της πίεσης του αέρα των πόρων από την ενεργό τάση ορίζει μια περίσσεια της πίεσης του νερού των πόρων και επεμβαίνει στην στερεά φάση του υλικού.

Συνεπώς, στα μη κορεσμένα εδάφη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο εντελώς ανεξάρτητες μεταβλητές τάσης. Στο Σχήμα 2.7 ασκούνται οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές σε ένα σημείο για μη κορεσμένα εδάφη.

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix}$$



Σχήμα 2.3: Οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές που περιγράφουν την εντατική κατάσταση για ένα μη κορεσμένο έδαφος (Fredlund and Vanapalli, 2002)

Δεδομένου ότι η πίεση του αέρα των πόρων είναι σταθερή (ατμοσφαιρική), είναι λογικό να είναι ανεξάρτητες οι μεταβλητές πίεσης του νερού των πόρων από την πίεση του αέρα των. Η συμπεριφορά των εδαφών (όπως η αλλαγή του όγκου και η αντοχή σε διάτμηση) μπορεί να χαρακτηριστεί από τις ανωτέρω μεταβλητές. Επιπλέον, υπάρχει μια μεταβολή από ακόρεστα σε κορεσμένα εδάφη, τη στιγμή που η πίεση πόρων αέρα γίνεται ίση με την πίεση πόρων νερού, συνεπώς το έδαφος γίνεται κορεσμένο.

2.4.2 Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφών

Με την πάροδο του χρόνου έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών. Κάποιες εξισώσεις που προέκυψαν από έρευνες προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής με χρονολογική σειρά φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Εξισώσεις διατμητικής αντοχής μη κορεσμένων εδαφών

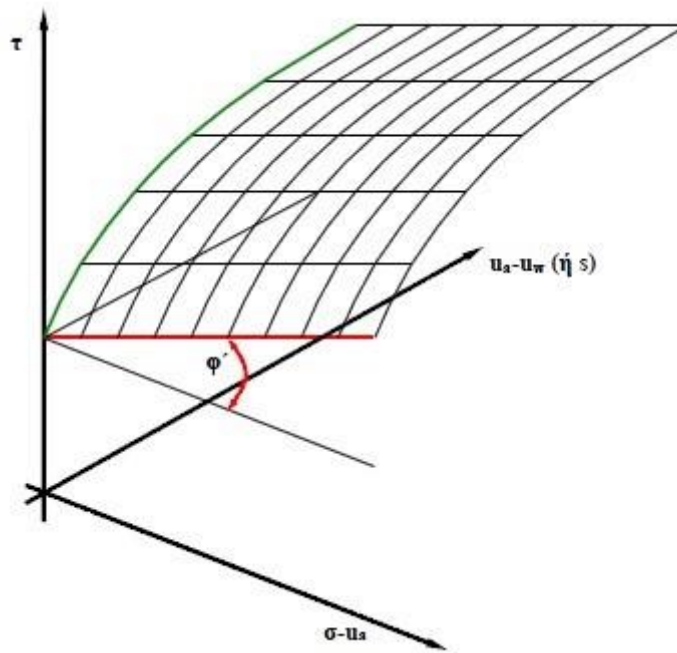
Alpan, Bishop, Blight & Donald (1960)	
$\tau = c' + [\sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)]\tan\phi' \quad (2.12)$	Διατύπωσαν μια από τις πρωταρχικές προσεγγίσεις συμπεριλαμβάνοντας την μεταβλητή χ , η οποία είναι η εδαφική παράμετρος που επηρεάζεται από παράγοντες όπως το είδος, ο βαθμός κορεσμού, η υστερητική κατάσταση υγρασίας και η εντατική κατάσταση του εδάφους
↓	
Fredlund, Morgenstern & Widger (1978)	
$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (2.13)$	Η παράμετρος διατμητικής αντοχής (ϕ^b) προστέθηκε στην εξίσωση, η οποία αντιπροσωπεύει την κλίση της επιφάνειας αστοχίας του επιπέδου διατμητικής τάσης-μύζησης. Η συγκεκριμένη μεταβλητή είναι μια από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του εδάφους.
↓	

Escario & Saez (1986)	
Αποδείχθηκε ότι η ϕ^b δεν είναι πρακτικώς σταθερή	
↓	
Fredlund, Rahardjio & Gan (1987)	
Αποδείχθηκε ότι η ϕ' ισούται με τη ϕ^b σε μικρές τιμές μύζησης, ενώ στη συνέχεια μειώνεται σε μια σταθερή και μικρή τιμή για μεγάλες τιμές μύζησης.	
↓	
Escario, Juca & Coppe (1989)	
$\chi = \frac{\tan\phi^b}{\tan\phi'}(2.14)$	Η ϕ^b σε υψηλές τιμές μύζησης λαμβάνει αρνητικές τιμές. Επιπλέον, η φαινόμενη συνοχή τείνει στο μηδέν, καθώς το έδαφος ξεραίνεται τελείως λόγω υψηλών τιμών μύζησης.

Όπου:

- τ η διατμητική αντοχή
- c' η ενεργός συνοχή
- ϕ' η ενεργός γωνία τριβής
- σ η ολική ορθή τάση στην επιφάνει αστοχίας
- u_a η πίεση αέρα των πόρων
- u_w η πίεση του νερού των πόρων
- χ μια εδαφική παράμετρος που οι τιμές της κυμαίνονται από 0 έως 1, και επηρεάζεται από παράγοντες όπως το είδος, ο βαθμός κορεσμού, η υστερητική κατάσταση υγρασίας και η εντατική κατάσταση του εδάφους
- ϕ^b η κλίση της επιφάνειας αστοχίας στο επίπεδο τ - s (διατμητική τάση – μύζηση), που έχει χαρακτηριστική τιμή για κάθε διαφορετικό εδαφικό σχηματισμό. Η τιμή της είναι σταθερή μόνο για συγκεκριμένο εύρος τιμών μύζησης, που καλύπτει τα πιο πολλά γεωτεχνικά προβλήματα.

Συνεπώς, η επίδραση της μύζησης στη διατμητική αντοχή ισοδυναμεί με αύξηση της ενεργού συνοχής:



Σχήμα 2.5: Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Fredlund, 1994)

2.4.3 Μεταβολές όγκου μη κορεσμένων εδαφών

Οι καταστατικές σχέσεις για μη κορεσμένα εδάφη μπορούν να διατυπωθούν μέσω των ανεξάρτητων μεταβλητών της εντατικής κατάστασης. Η περιγραφή της μεταβολής του όγκου υπό ισοτροπική φόρτιση μπορεί να διατυπωθεί ως προς την μεταβολή του δείκτη κενών με την εξίσωση (2.16):

$$\Delta e = \alpha_t * d(\sigma_c - u_a) + \alpha_m * d(u_a - u_w) \quad (2.16)$$

Όπου:

- α_t, α_m εμπειρικές παράμετροι
- $\sigma_c - u_a$ η ορθή τάση
- u_a η πίεση αέρα των πόρων
- u_w η πίεση του νερού των πόρων

Επισημαίνεται ότι η συγκεκριμένη εξίσωση ισχύει για ισοτροπικές συνθήκες φόρτισης.

Οι μεταβολές του δείκτη κενών είναι ανεξάρτητες από την περιεκτικότητα σε υγρασία ή τον βαθμό κορεσμού, επομένως η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση όγκου – μάζας ενός μη κορεσμένου εδάφους είναι η εξής:

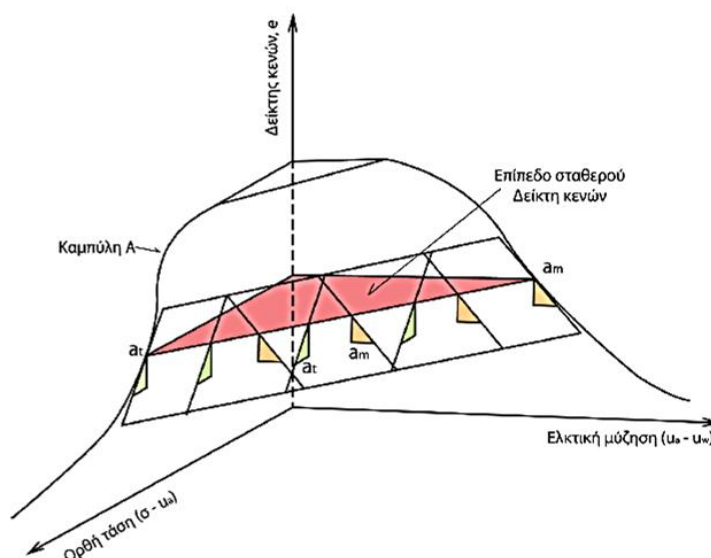
$$\Delta w = b_t * d(\sigma_c - u_a) + b_m * d(u_a - u_w) \quad (2.17)$$

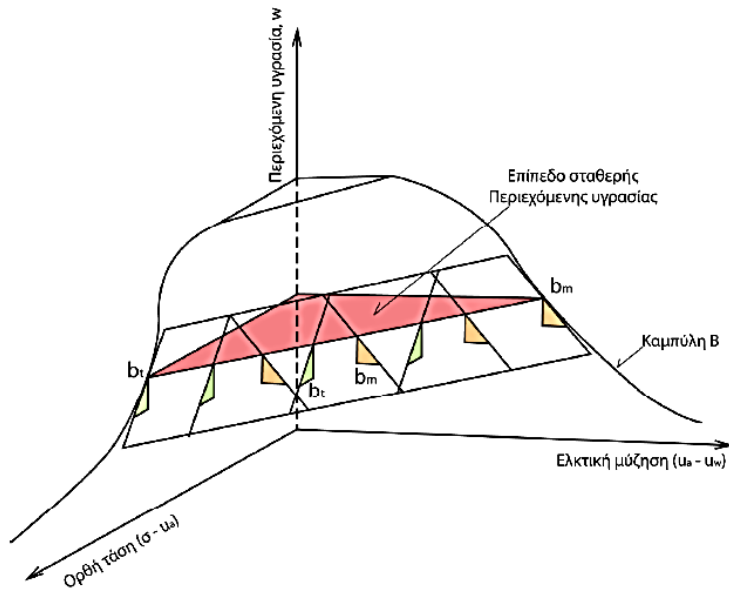
Όπου:

- b_t, b_m εμπειρικές παράμετροι
- $\sigma_c - u_a$ η ορθή τάση
- u_a η πίεση αέρα των πόρων
- u_w η πίεση του νερού των πόρων

Ομοίως, επισημαίνεται ότι η συγκεκριμένη εξίσωση ισχύει για ισοτροπικές συνθήκες φόρτισης.

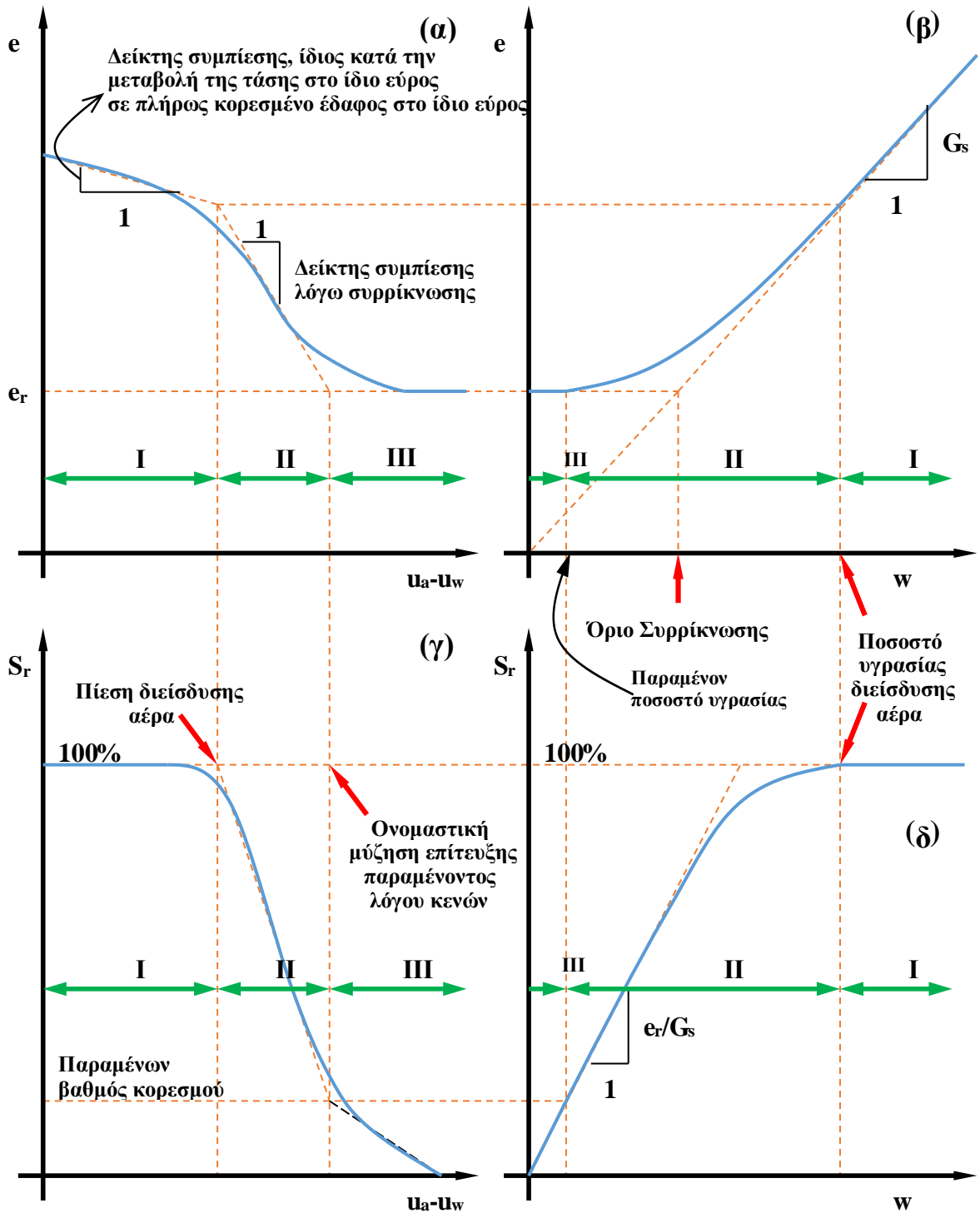
Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται δύο τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις με τις καταστατικές επιφάνειες του δείκτη κενών (e), καθώς και της περιεχόμενης υγρασίας (m) ενός μη κορεσμένου εδάφους. (Fredlund&Rahardjo, 1993).





Σχήμα 2.6: Καταστατικές επιφάνειες δείκτη κενών και περιεχόμενης υγρασίας μη κορεσμένου εδάφους (Fredlund & Rahardjo, 1993)

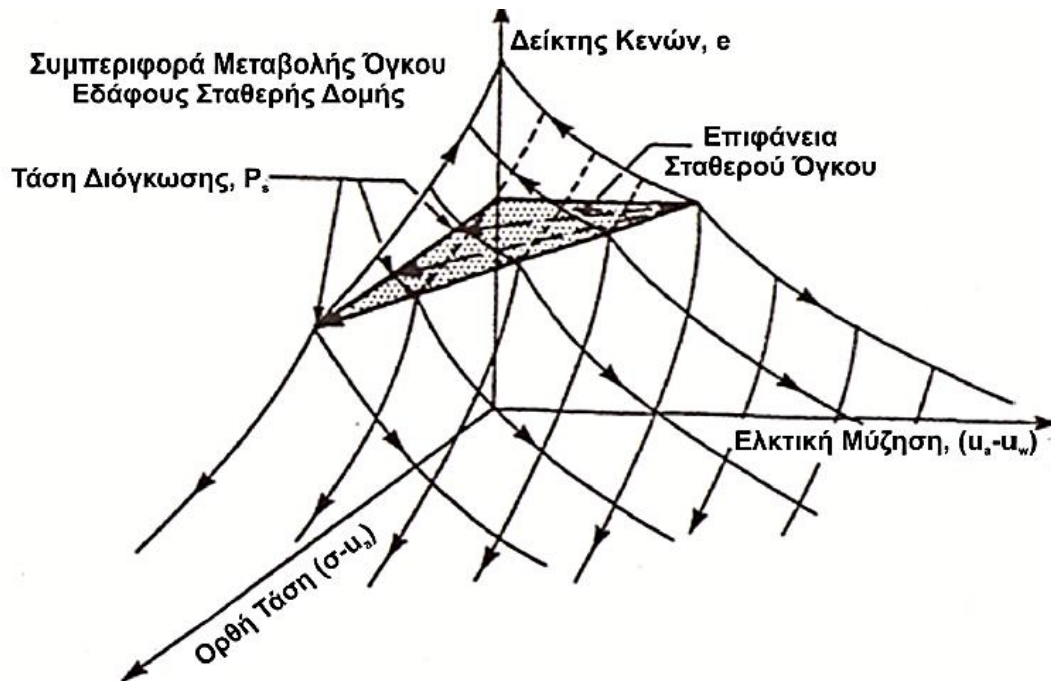
Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται από την αρχική κατάσταση πλήρους κορεσμού η εξέλιξη της παραμόρφωσης των ακόρεστων εδαφών σε σχέση με τη μύζησης.



Σχήμα 2.7: α) Παρουσιάζεται η εξέλιξη του λόγου κενών με την μύζηση, β) η καμπύλη συρρίκνωσης, ήτοι η εξέλιξη του λόγου κενών με το ποσοστό υγρασίας, δ) η εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με το ποσοστό υγρασίας, και γ) η καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης.

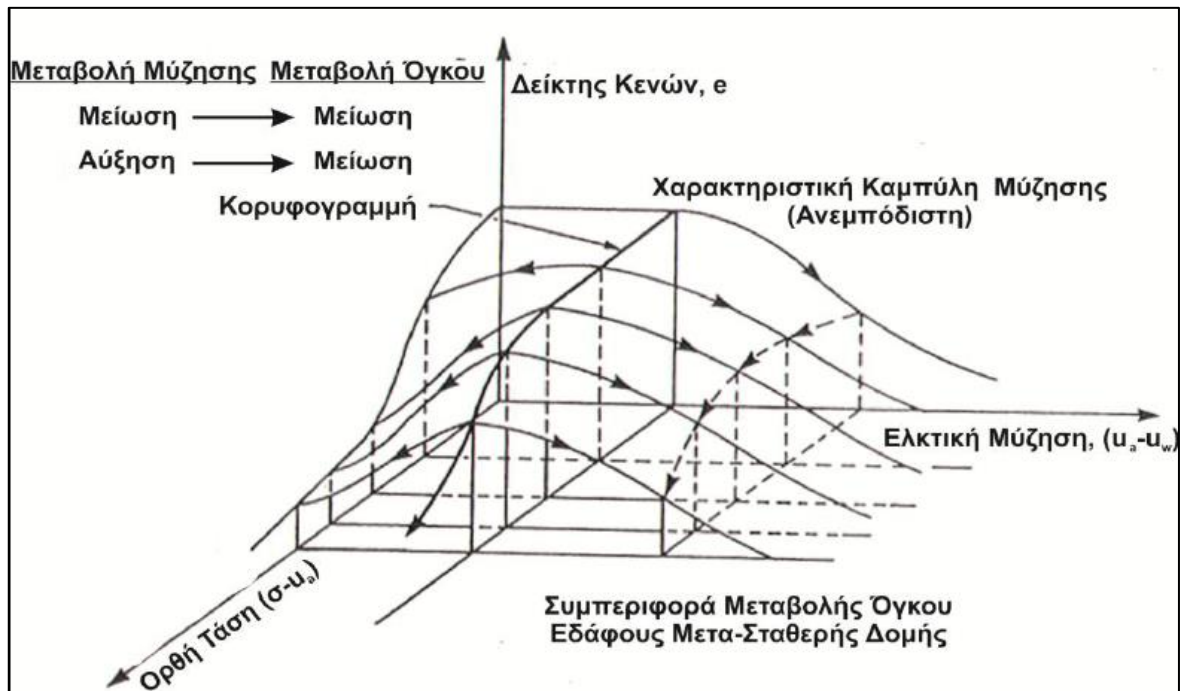
Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση που η μύζηση είναι μηδενική, οι μεταβολές του δείκτη κενών ισοδυναμούν με τις μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας σε σχέση με την απόκρισή τους σε μεταβολές της ολικής τάσης.

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται σε γραφική παράσταση οι καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου όταν το έδαφος έχει σταθερή δομή σε συνθήκες φόρτισης – αποφόρτισης με βάσει τους Fredlund & Rahardjo, 1993.



Σχήμα 2.8: Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου σε έδαφος σταθερής δομής συνθήκες φόρτισης – αποφόρτισης (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζονται σε γραφική παράσταση οι καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου όταν το έδαφος εμφανίζει ασταθή δομή υπό συνθήκες φόρτισης – αποφόρτισης με βάσει τους Fredlund & Rahardjo, 1993.

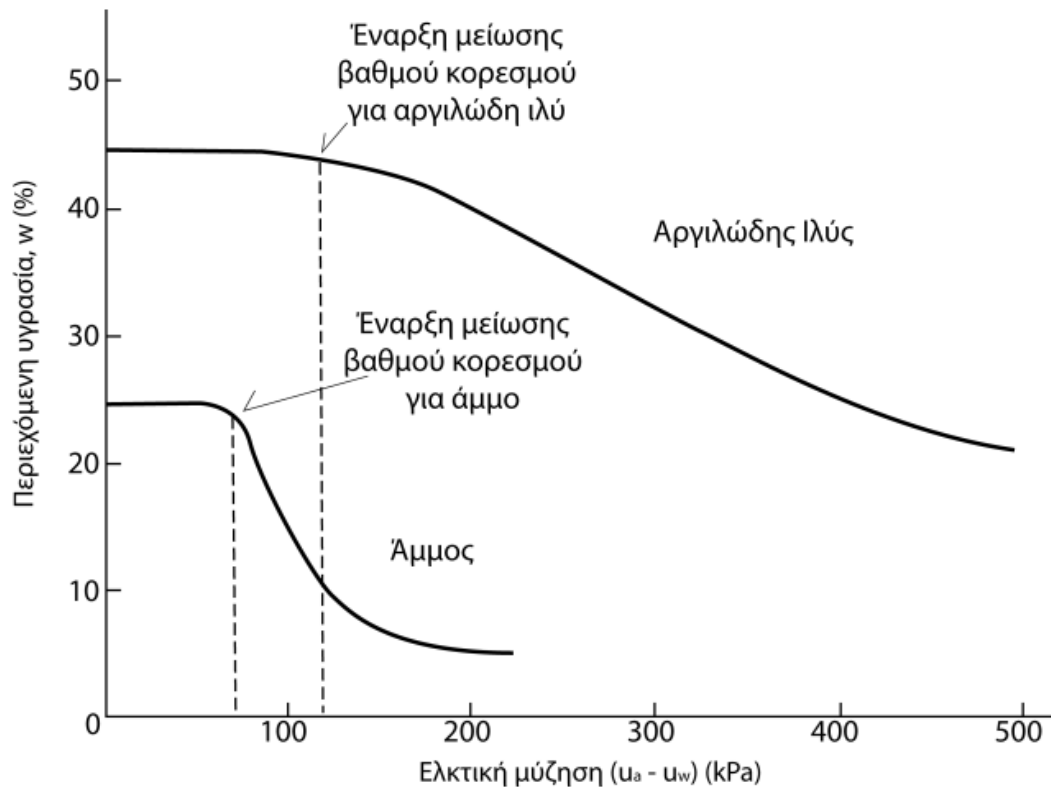


Σχήμα 2.9: Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου εδάφους που εμφανίζει ασταθή δομή υπό συνθήκες φόρτισης – αποφόρτισης (Fredlund & Rahardjo, 1993)

2.4.4 Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους (ΧΚΜΕ)

Για να ποσοτικοποιηθεί η συμπεριφορά του εδάφους σε μη κορεσμένες συνθήκες είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους – Νερού ή Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης Εδάφους (ΧΚΜΕ) (Soil – Water Characteristic Curve), η οποία είναι μια σχέση που ορίζει τη μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους με τη μύζηση και από την καμπύλη αυτή είναι δυνατή η εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του μη κορεσμένου εδάφους.

Στο Διάγραμμα 2.1 παρουσιάζονται οι τυπικές καμπύλες μύζησης εδάφους (Fredlund & Rahardjo, 1993).



Διάγραμμα 2.1: Τυπικές καμπύλες μύζησης εδάφους (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Ένας τρόπος προσέγγισης της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης είναι με την εξίσωση (2.18):

$$\theta_w = \{1/(1 + \alpha|u_a - u_w|^n)\}^m \quad (2.18)$$

Όπου:

- θ_w ο όγκος της περιεχόμενης υγρασίας στο έδαφος
- α μια εδαφική παράμετρος που εξαρτάται από την τιμή πίεσης εισόδου αέρα στο έδαφος
- n, m εδαφικές παράμετροι που εξαρτώνται από το ρυθμό απομάκρυνσης νερού εκ των πόρων του εδάφους.

Σύμφωνα με τον Gardner, 1985, η τιμή της παραμέτρου m έχει οριστεί ως μονάδα. Εντούτοις, άλλες έρευνες προτείνουν συνδυαστικές σχέσεις μεταξύ των δύο παραμέτρων, όπως:

Burdine, 1953:

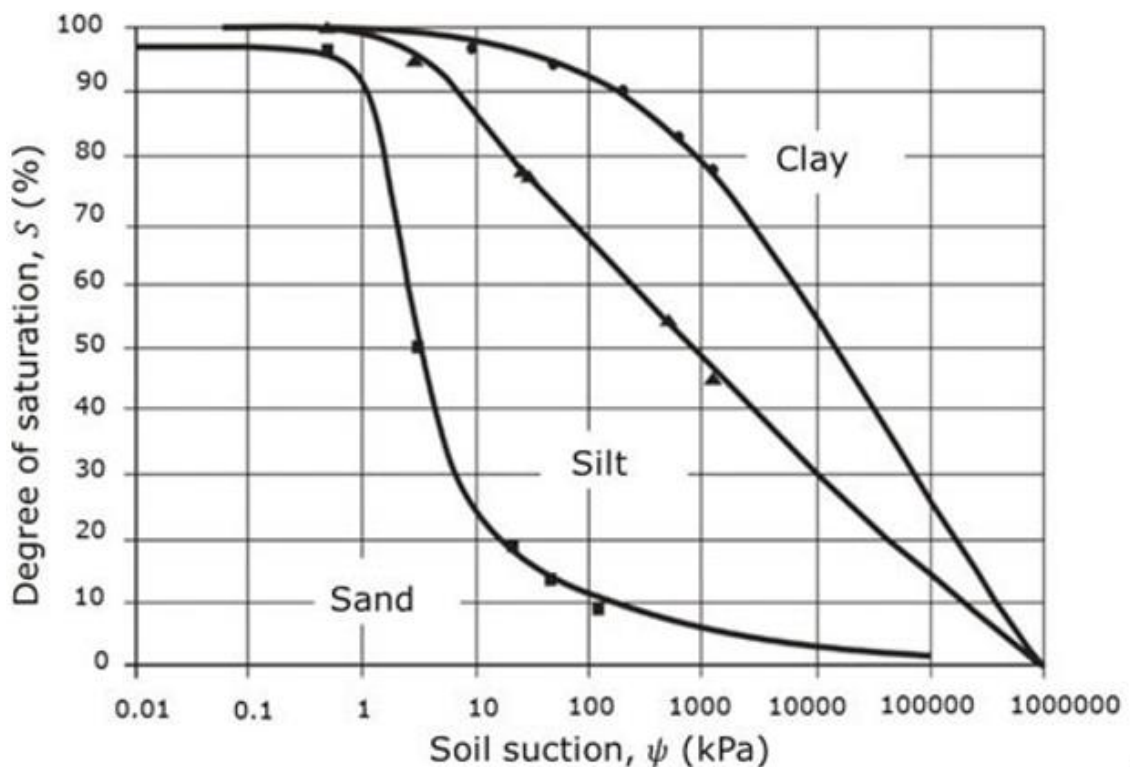
$$m = 1 - 2/n \quad (2.19)$$

Mualem, 1976:

$$m = 1 - 1/n \quad (2.20)$$

Ωστόσο, είναι δυνατή η προσεγγιστική εκτίμηση των παραμέτρων βάσει της μορφής της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης Εδάφους.

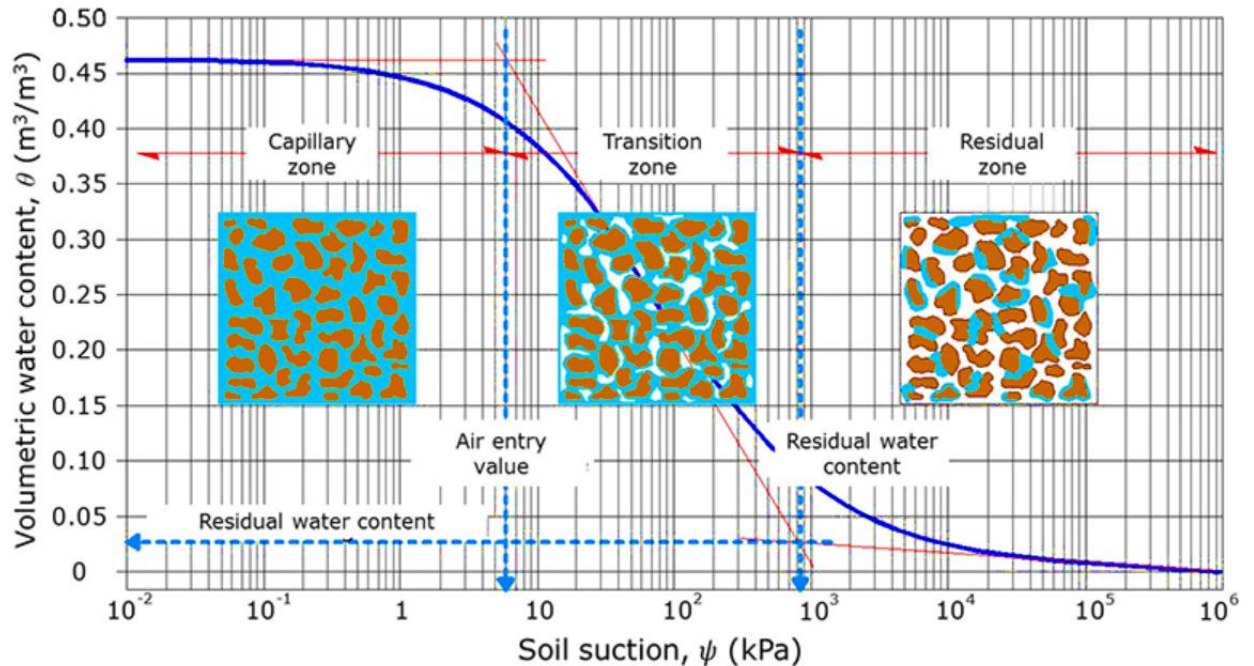
Η ΧΚΜΕ συνδέεται άμεσα με τη κατανομή του μεγέθους των κόκκων και τη δομή του εδάφους. Ο λόγος περιεκτικότητας νερού – μύζησης ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του εδαφικού υλικού όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.2.



Διάγραμμα 2.2: Χαρακτηριστική καμπύλη μύζησης για διάφορους τύπους εδάφους (Pérez-García N, 2008)

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους, πέραν από την συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών, μπορεί να διασυνδεθεί και με άλλες ιδιότητες όπως η αντοχή σε διάτμηση του εδάφους, η διαπερατότητα και οι ογκομετρικές μεταβολές του εδάφους (Fredlund M D, Fredlund D G, Wilson G W, 1997).

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους χωρίζεται συνήθως σε τρεις ζώνες που περιγράφουν τη διαδικασία αποκορεσμού του εδάφους. Επιπλέον, επιτρέπει τον προσδιορισμό το εύρος του ποσοστού υγρασίας στο οποίο το έδαφος παραμένει κορεσμένο, ακόρεστο, ή υπό σταθερό παραμένον ποσοστό υγρασίας, καθώς και των αντίστοιχων τιμών μύζησης, που αποτελούν βασικές παραμέτρους της ΧΚΜΕ. Στο Διάγραμμα 2.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα των βασικών ζωνών τυπικής καμπύλης ΧΚΜΕ.



Διάγραμμα 2.3: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού (López-Acosta NP and Menoza-Promotor JA, 2016)

Η πρώτη ζώνη είναι η κορεσμένη ζώνη με τριχοειδή φαινόμενα (Saturated capillary zone) η οποία είναι μια κορεσμένη κατάσταση του εδάφους και το καθοριστικό όριο αυτής της περιοχής είναι η χαρακτηριστική τιμή εισόδου αέρα στο έδαφος, δηλαδή η τιμή της εδαφικής μύζησης που όταν ξεπερνάται εισέρχεται ο αέρας στους πόρους του εδάφους.

Στη συνέχεια, η δεύτερη ζώνη είναι η ζώνη του αποκορεσμού (desaturation zone), όπου το νερό μετατοπίζεται λόγω της εισόδου του αέρα στους πόρους. Το καθοριστικό όριο της συγκεκριμένης περιοχής είναι το ποσοστό υγρασίας παραμένοντος νερού. Στη ζώνη αυτή ο αέρας εισέρχεται στους πόρους έως το όριο στο οποίο το νερό γίνεται ασυνεχές και η διαπερατότητα του εδάφους μειώνεται σημαντικά.

Η τελευταία ζώνη είναι η παραμένουσα ζώνη (residual zone) στην οποία οι αυξήσεις των τιμών μύζησης δεν προκαλούν σημαντικές αλλαγές στην περιεκτικότητα του νερού. Το νερό βρίσκεται σε μικρό παραμένον ποσοστό υγρασίας και η απομάκρυνσή του πραγματοποιείται μόνο με την εξάτμηση (Hosagasi-Fuselier T., 2006). Αυτή η περιοχή χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά υψηλές τιμές μύζησης.

Η τιμή εισόδου αέρα (air entry value) αντιπροσωπεύει την τιμή της μύζησης κατά την οποία ο αέρας εισέρχεται στους πόρους και μετατοπίζει το νερό.

Παραμένον ποσό υγρασίας (residual water content) είναι η περιεκτικότητα σε νερό όπου απαιτούνται υψηλές τιμές μύζησης για την απομάκρυνση πρόσθετων υδάτων από τη μάζα του νερού.

Η παραμένουσα τιμή (residual value) αντιπροσωπεύει την τιμή της μύζησης κατά την οποία η υγρή φάση του εδάφους γίνεται ασυνεχής.

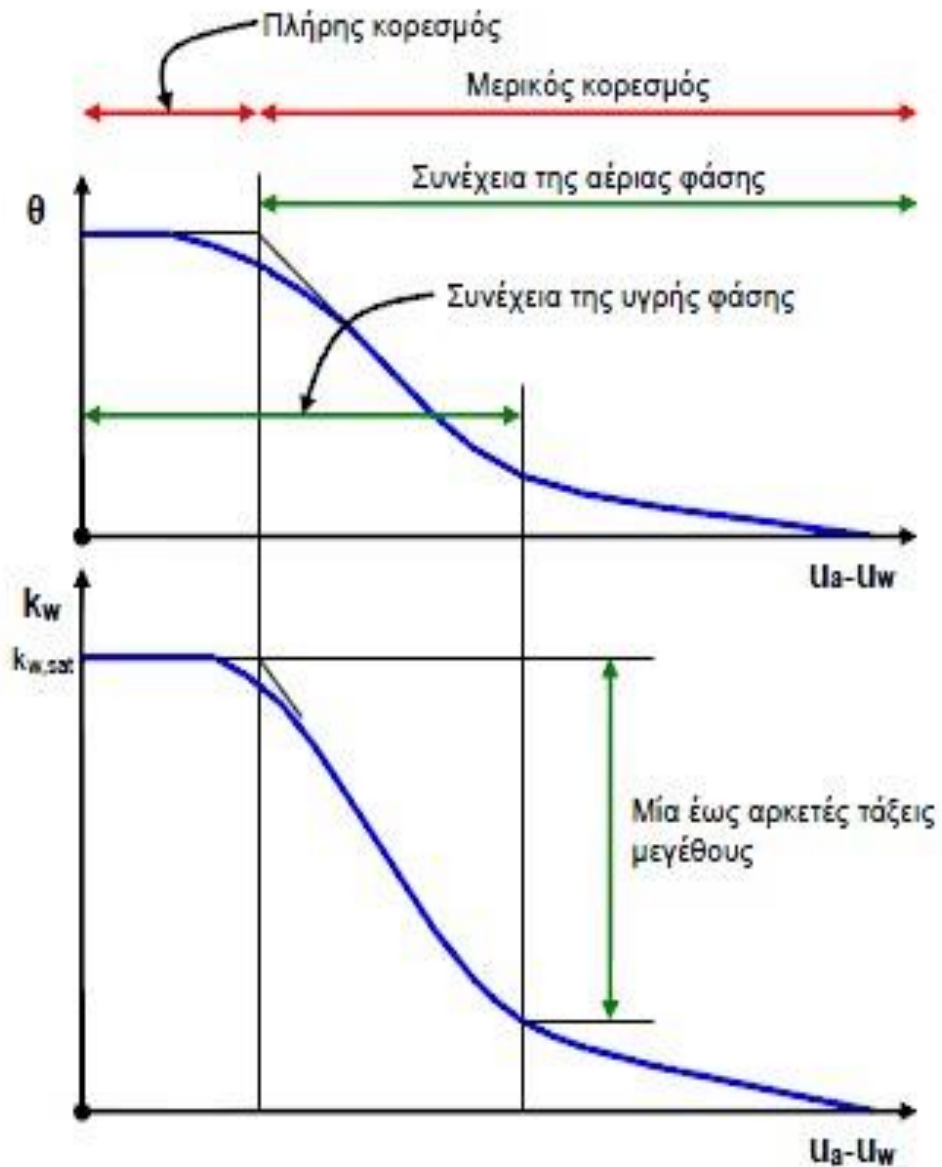
Η περιεκτικότητα σε κορεσμένο νερό (saturated water content) είναι η περιεκτικότητα σε νερό στο έδαφος σε κορεσμένη κατάσταση.

2.4.1 Διαπερατότητα μη κορεσμένων εδαφών

Στα μη κορεσμένα εδάφη νερό και αέρας συνυπάρχουν στους πόρους του εδαφικού υλικού. Έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της μύζησης επιφέρει μείωση του συντελεστή διαπερατότητας, ο οποίος συντελεστής συσχετίζεται με την εξέλιξη της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους Νερού. Αυτό συμβαίνει καθώς η αύξηση της μύζησης επιφέρει μείωση των ελεύθερων διόδων από τις οποίες το νερό μπορεί να εισχωρήσει, αφού αυξάνεται και η αέρια φάση.

Σημειώνεται ότι σε επίπεδο μακρο-διαπερατότητας παρατηρείται αύξηση της δυνατότητας κίνησης νερού εξαιτίας των ρωγμών που παρουσιάζονται στο ξηρότερο

ακόρεστο εδαφικό υλικό, στα αργιλικά εδάφη. Στο Σχήμα παρουσιάζεται η ποιοτική απεικόνιση της συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας του νερού k_w με την μύζηση και η αντιστοίχισή της με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους - νερού (Μπαρδάνης, 2016).



Διάγραμμα 2.4: Ποιοτική απεικόνιση της συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας του νερού k_w με την μύζηση και αντιστοίχισή της με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (Μπαρδάνης, 2016).

3 Μύζηση

3.1 Γενικά

Μέχρι στιγμής, έχουν εφευρεθεί διάφορες μέθοδοι και όργανα για τη μέτρηση της μύζησης οι οποίες συνήθως κατατάσσονται με κριτήριο το είδος της μύζησης που μετράται, δηλαδή αν είναι μύζηση εδαφικού σκελετού, ολική ή ωσμωτική. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη ο χώρος διεξαγωγής της μέτρησης, εάν πραγματοποιείται στο εργαστήριο ή επιτόπου, ο χρόνος πραγματοποίησης της μέτρησης και το εύρος τιμών μύζησης. Τα εν λόγω κριτήρια επηρεάζουν την απόφαση επιλογής κατάλληλης μεθόδου μέτρησης της μύζησης σε κάθε εφαρμογή. Επομένως, για να επιλεγεί μια κατάλληλη μέθοδο μέτρησης μύζησης, ο καθοριστικός παράγοντας που πρέπει πρώτα να διευκρινιστεί είναι ο τύπος των συνθηκών μέτρησης:

- το εύρος αρχικών τιμών (μικρό ή μεγάλο ή ταυτόχρονα μεγάλες και μικρές τιμές),
- η ταχύτητα, το μέγεθος και η φορά των αλλαγών στην μύζηση (αν υπάρχει σημαντική μεταβολή και αν ναι, γρήγορη ή αργή και τέλος μονότονη ή περιοδική)
- το περιβάλλον μέτρησης μύζησης (νερό πόρων με παράγοντες που μπορεί ή όχι να προσβάλουν το όργανο μέτρησης).

Μόλις διευκρινιστούν αυτοί οι παράγοντες, πρέπει να ληφθούν υπόψη λειτουργικοί παράγοντες όπως:

- το κόστος εφαρμογής της κατάλληλης μεθόδου,
- το λειτουργικό κόστος,
- τη διαθεσιμότητα ειδικών για μεθόδους που απαιτούν λεπτούς χειρισμούς και
- τις απαιτήσεις για πρόσθετο εξοπλισμό απαραίτητο για την πλήρη αξιοποίησή της.

Οι μέθοδοι μέτρησης μύζησης χωρίζονται σε:

- Μεθόδους άμεσης μέτρησης μύζησης, που η μύζηση μετράται κατευθείαν, με τρόπο παρόμοιο με την άμεση μέτρηση της θετικής πίεσης νερού πόρων των υλικών του εδάφους.

- Μεθόδους έμμεσης μέτρησης μύζησης, όπου μετράται ένα φυσικό μέγεθος που σχετίζεται με την μύζηση και έτσι υπολογίζεται η μύζηση του εδαφικού υλικού. Οι μέθοδοι έμμεσης μέτρησης χωρίζονται σε:

- μεθόδους έμμεσης μέτρησης και
- μεθόδους έμμεσου προσδιορισμού.

Αναφορικά με τις μεθόδους έμμεσης μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού, είναι η μέθοδος μετατόπισης άξονα με τη χρήση θαλάμου μύζησης με μεμβράνη ή πορόλιθο.

Έπειτα, οι μέθοδοι έμμεσου προσδιορισμού της μύζησης διακρίνονται σε :

- Μέθοδος χάρτινου φίλτρου
- Μέθοδοι μέτρησης της σχετικής υγρασίας
- Μέθοδοι τεμαχίων πορώδους υλικού.

Τέλος, οι μέθοδοι άμεσης μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Μέθοδος τενσιομέτρου με πορώδες άκρο χαμηλής τιμής εισόδου αέρα
- Μέθοδος ωσμωτικού τενσιομέτρου
- Μέθοδος τενσιομέτρου με πορώδες άκρο υψηλής τιμής εισόδου αέρα

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των μεθόδων μέτρησης της ολικής μύζησης, ενώ στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των μεθόδων μέτρησης της μύζησης του εδαφικού σκελετού..

Πίνακας 3.1: Συνοψιση χαρακτηριστικών των μεθόδων μέτρησης της ολικής μύζησης (Μπαρδάνης, 2016)

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Χαρτιών φίλτρου σε απόσταση από το εδαφικό δείγμα	ΝΑΙ	ΝΑΙ (;)	1000 έως 500000 kPa (ακριβέστερα 1000 έως 30000 kPa)	Τουλάχιστον 7-14 ημέρες
Ψυγράμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης	ΝΑΙ	ΟΧΙ	100 – 70000 kPa	Λεπτά έως μία ώρα
Ψυγράμετρα θερμικού ζεύγους	ΝΑΙ	ΝΑΙ	100 – 8000 kPa	Λεπτά έως μία ώρα
Υγράμετρα σημείου δρόσου	ΝΑΙ	ΝΑΙ	100 – 8000 kPa	Λεπτά έως μία ώρα
Υγράμετρα ψυχρού κατόπτρου	ΝΑΙ	ΟΧΙ	100 – 450000 kPa	Λεπτά
Αισθητήρες αντίστασης/ χωρητικότητας πολυμερών	ΝΑΙ	ΝΑΙ	1000 – 1000000 kPa	Δευτερόλεπτα
Αισθητήρες οργανικών μέσων	ΝΑΙ	ΝΑΙ	1000 – 1000000 kPa	Λεπτά

Πίνακας 3.2: Σύντομη χαρακτηριστικών των μεθόδων μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού (Μπαρδάνης, 2016)

	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μύζησης	μέτρησης	Τάξη μεγέθους επίτευξης μέτρησης	χρόνου
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)*	30	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	ΝΑΙ (;)	ΝΑΙ	0 – 1000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	ΝΑΙ	ΝΑΙ	0 - 90 kPa	Λεπτά (1 – 30')
Τενσιόμετρα τύπου Quickdraw	ΝΑΙ	ΝΑΙ	0 - 90 kPa	Λεπτά (2 - 10')
Τενσιόμετρα πορώδους άκρου υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	ΝΑΙ	ΝΑΙ	0 - 2000 kPa	Λεπτά έως ώρες
Ωσμωτικά τενσιόμετρα	ΝΑΙ	ΟΧΙ	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 μετράται η ολική μύζηση.

3.2 Μέθοδος Μεμβράνης και Μέθοδος Μετατόπισης Άξονα

Στην απλή μορφή της μεθόδου μεμβράνης ή πορόλιθου, η μέτρηση της μύζησης αποτελείται από:

- ένα πορώδες άκρο (μεμβράνη ή κεραμικός πορόλιθος),
- ένα σωλήνα με κάποιο υγρό (συνήθως νερό) κάτω από το πορώδες άκρο και
- ένα όργανο για τη μέτρηση της πίεσης στον πόρο του υγρού στο δοχείο

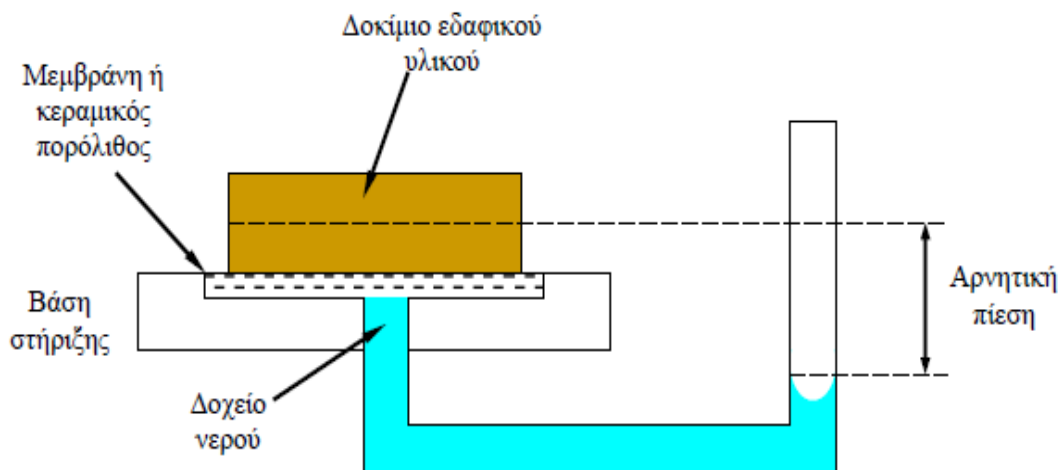
Στον Πίνακα 3.3 παρατίθενται τα βασικά όργανα μέτρησης της πίεσης.

Πίνακας 3.3: Όργανα μέτρησης πίεσης

Α/Α	Όργανα μέτρησης πίεσης	Παρατηρήσεις
1	Μανόμετρο Υδραργύρου	
2	Μετρητής υποπίεσης	
3	Μορφομετατροπέας	
4	Βαθμονομημένη μπιρέτα	Για μικρές τιμές μύζησης

Το πορώδες άκρο είναι συνήθως επίπεδο που επιτρέπει την τοποθέτηση εδαφικών δειγμάτων σε αυτό και το υλικό κατασκευής έχει συνήθως τιμή εισόδου αέρα 100 kPa. Ο σωλήνας υγρού, που προαναφέραμε ότι συνηθίζεται να είναι νερό, κάτω από το πορώδες άκρο συνδέεται τοποθετώντας μια μεμβράνη υψηλής αντοχής και στερεώνοντάς την μεμβράνη στην περίμετρο του υλικού με κάποιο είδος σφιγκτήρα. Διαφορετικά, τοποθετείται σταθερά και στεγανά πάνω στον πορόλιθο μέσω μεταλλικής βάσης στήριξης.

Η τιμή εισόδου αέρα της μεμβράνης ή του πορόλιθου συνήθως περιορίζεται στα 100 kPa, καθώς κάτω από το πορώδες άκρο ο όγκος του νερού στον σωλήνα είναι μεγάλος και μύζηση πάνω από 100 kPa θα προκαλέσει σπηλαιώση. Επομένως, αυτή η μέθοδος μπορεί να κυμανθεί σε τιμές μύζησης μέχρι θεωρητικά 100 kPa, γιατί η σπηλαιώση μπορεί πρακτικά να συμβεί και σε χαμηλότερες τιμές ανάλογα με τον βαθμό απαέρωσης του νερού στον σωλήνα.

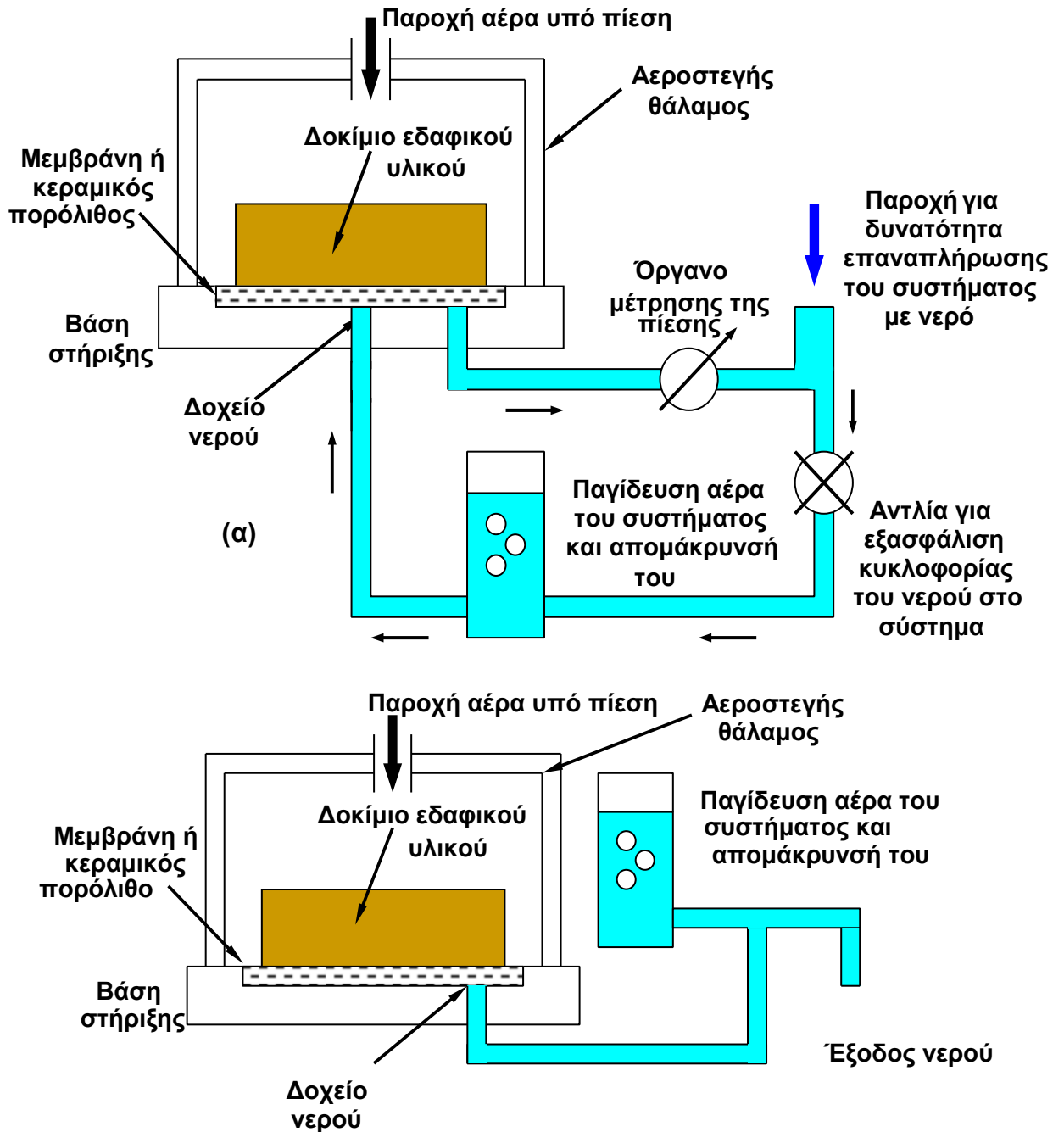


Σχήμα 3.1: Αρχή της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με μεμβράνη ή κεραμικό πορόλιθο (Μπαρδάνης, 2016)

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η αρχή της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με μεμβράνη ή κεραμικό πορόλιθο .

Στη μέθοδο αζονικής μετατόπισης το δείγμα του εδαφικού υλικού τοποθετείται μαζί με το πορώδες υλικό σε έναν κλειστό αεροστεγή θάλαμο, στον οποίο υπάρχει παροχή πεπιεσμένου αέρα, και επικοινωνεί με σωλήνες νερού στο εξωτερικό μέρος του θαλάμου όπου γίνεται και η προσάρτηση του μετρητή πίεσης. Στις φάσεις υγρή – αέρια του εδαφικού υλικού ασκείται η ίδια πίεση αέρα.. Επομένως, όταν αυξάνεται η πίεση του αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου (δηλαδή γίνεται μεγαλύτερη του 0), αυξάνεται και η πίεση του νερού των πόρων (δηλαδή γίνεται μεγαλύτερη από την αρχική αρνητική τιμή της) κατά ίση τιμή με την πίεση που ασκείται μέσα στο θάλαμο.

Με συμβατικά μέσα, όπως μετρητή θετικής πίεσης ή μανόμετρο, μπορεί να μετρηθεί η πίεση του νερού όταν η πίεση του αέρα που ασκείται εντός του θαλάμου μετατρέψει την αρνητική τιμή της σε θετική τιμή. Η διαφορά της πίεσης αέρα στον θάλαμο και της πίεσης στο νερό των σωλήνων αφού εφαρμοστεί η πίεση αέρα στο θάλαμο, είναι η μύζηση του εδαφικού σκελετού.



Σχήμα 3.2: Αρχή της μεθόδου μετατόπισης άξονα για τη μέτρηση της μύζησης του εδαφικού σκελετού (Μπαρδάνης, 2016)

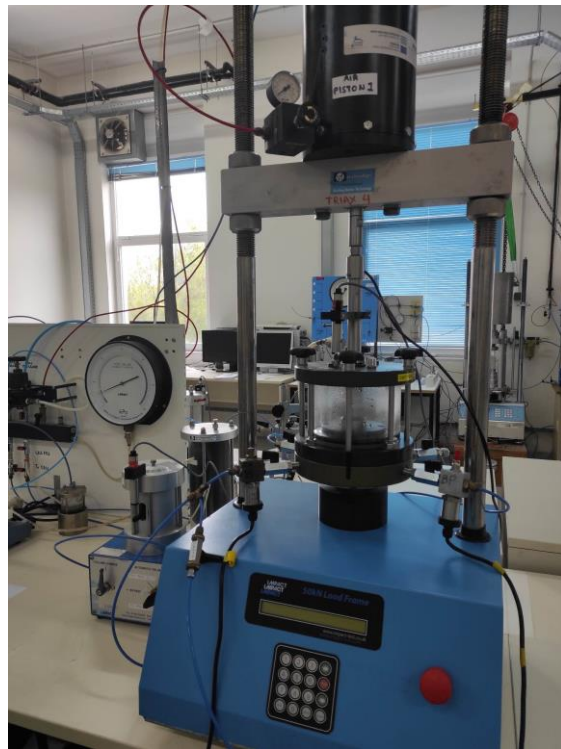
Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η αρχή της μεθόδου μετατόπισης άξονα για μέτρηση της μύζησης. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται είναι ημιπερατές, κατασκευασμένες από σελουλόζη. Οι κεραμικοί πορόλιθοι κατασκευάζονται από αργιλικά υλικά με κατάλληλη ορυκτολογία και διαβάθμιση μεγέθους κόκκου, οι οποίες στη συνέχεια τοποθετούνται σε κλίβανο υψηλής θερμοκρασίας για να αποκτηθούν οι επιθυμητές ιδιότητες. Όσον αφορά τις απαιτήσεις, έχουν υψηλή τιμή εισόδου αέρα, αλλά και σκληρότητα και ανθεκτικότητα που

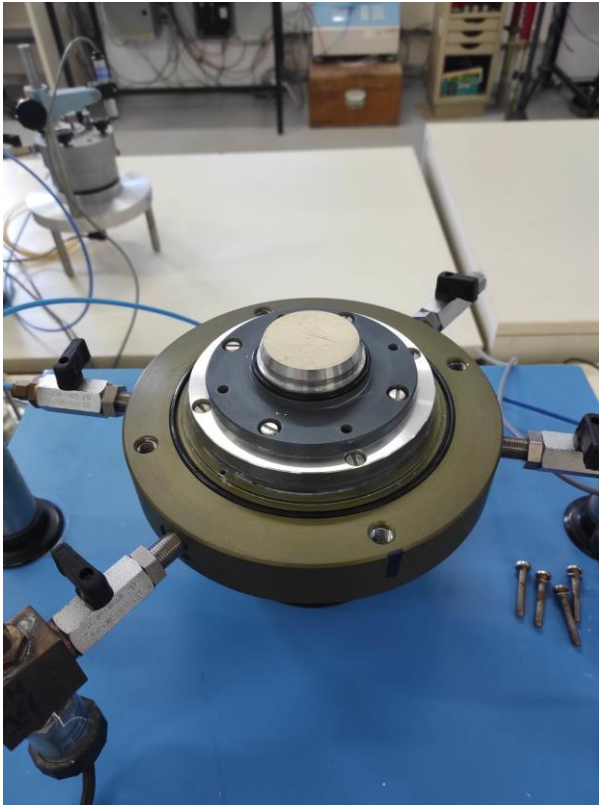
απαιτούνται για την επεξεργασία και χρήσης τους, . Απαιτείται επίσης ελάχιστη συμπίεστικότητα όταν επιβάλλεται αξονική μετατόπιση για τον έλεγχο της μύζησης.

Οι συγκεκριμένες μέθοδοι (η μέθοδος μεμβράνης ή πορόλιθου και η εξέλιξή της στη μέθοδο μετατόπισης άξονα) αποτελούν τις πρώτες μεθόδους μέτρησης μύζησης στο εργαστήριο.

4 Εργαστηριακές δοκιμές

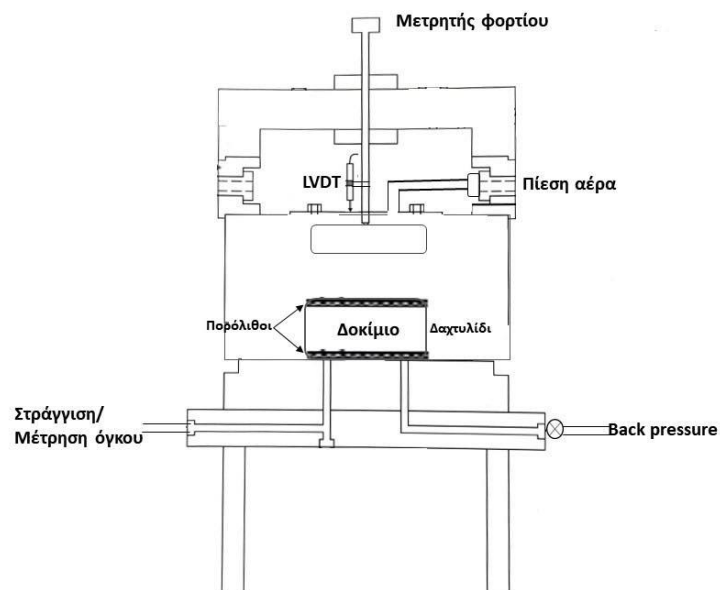
Στην παρούσα Διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η συσκευή συμπιεσομέτρου για ακόρεστα εδάφη. Η συσκευή βασίζεται στην αρχή μετατόπισης των αξόνων, και έχει ανεξάρτητο έλεγχο της πίεσης του αέρα και του νερού του δοκιμίου, συνεπώς έλεγχο της μύζησης όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 3.2. και στο Σχήμα 3.2. Όμως το πλεονέκτημα της συσκευής σε σχέση με την ανωτέρω διάταξη είναι ότι η μύζηση μπορεί να μεταβάλλεται ταυτόχρονα με επιβαλλόμενες διαφορετικές συνθήκες κατακόρυφης φόρτισης, μέσω του μετρητή φορτίου. Στις Εικόνα 4.1 φαίνεται η συσκευή και ο μετρητής. Η συσκευή είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, του Ε.Μ.Π..





Εικόνα 4.1: Συσκευή συμπιεσομέτρου για ακόρεστα εδάφη και μετρητής

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν από το προσωπικό του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση τη συσκευής.



Σχήμα 4.1: Σχηματική απεικόνιση συσκευής συμπιεσομέτρου για ακόρεστα εδάφη

Η συσκευή αυτή απαιτεί τον ανεξάρτητο και αυτόματο έλεγχο πίεσης αέρα, νερού και κατακόρυφου φορτίου μέσω αντιστοίχων μονάδων ελέγχου. Η μετακίνηση του δοκιμίου μετράται με μετρητή ακριβείας (LVDT) όπως και η μεταβολή του όγκου του με διάταξη μέτρησης με αντιπίεση (back pressure). Η τιμή εισόδου αέρα στον πορόλιθο είναι 1500kPa, η μέγιστη πίεση κυψέλης 1800kPa και το εύρος του κατακόρυφου φορτίου 0-10kN.

Ο έλεγχος και η καταγραφή δεδομένων της συσκευής γίνεται με τους ελεγκτές και καταγραφικά που έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ και όχι από εμπορικά πακέτα, συνεπώς είναι δυνατή η εκτέλεση ειδικών δοκιμών ανάλογα με τα μεγέθη που μεταβάλλονται, αυτόματα και υπό διαφορετικές διαδρομές τάσεων.

Στην παρούσα διπλωματική έγιναν τρεις (3) δοκιμές μεταβαλλόμενου αξονικού φορτίου υπό σταθερή μύζηση και μία (1) δοκιμή μεταβαλλόμενης μύζησης υπό σταθερό αξονικό φορτίο στην συσκευή. Επίσης, έγιναν τρεις (3) δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης στην τριαξονική συσκευή για διαφορετικές τιμές μύζησης εδαφικού σκελετού.

Οι δοκιμές στο συμπιεσόμετρο για ακόρεστα υλικά έγιναν σε καολινίτη, οι δοκιμές στην τριαξονική έγιναν σε αμμώδες υλικό. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε αρχικά πλήρως κορεσμένα δοκίμια καολινίτη με αρχική υγρασία 50%. Λεπτομέρειες για την παρασκευή των δοκιμίων αναφέρονται από τους Κουρέλη 2016 και Μυλωνά-Ροντήρη 2018, Διπλωματικές εργασίες Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Στα δοκίμια επιβάλλεται η επιθυμητή μύζηση ρυθμίζοντας ανεξάρτητα την πίεση του υγρού των πόρων και την πίεση του αέρα στην κυψέλη της συσκευής. Η πίεση του νερού επιβάλλεται μέσω εξωτερικής κυψέλης πίεσης που επικοινωνεί με το κάτω μέρος του δοκιμίου.

Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών περιγράφονται στον Πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών

Δοκιμές μεταβαλλόμενου αξονικού υπό σταθερή μύζηση εδαφικού σκελετού (3)	
Υγρασία καολινίτη (%)	50
Μύζηση εδαφικού σκελετού (kPa)	50, 200, 400
Δοκιμή μεταβαλλόμενης μύζησης υπό σταθερό αξονικό φορτίο στην συσκευή (1)	
Υγρασία καολινίτη (%)	50
Κατακόρυφη τάση (kPa)	100, 200, 400
Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης στην τριαξονική συσκευή για διαφορετικές τιμές μύζησης εδαφικού σκελετού (3)	
Υγρασία καολινίτη (%)	50
Μύζηση (kPa)	-10, -20, -30 και -40
Δείκτης πόρων, e	0.600-0.640
Κατακόρυφη τάση (kPa)	110, 95, 75, 50

4.1 Αξονική φόρτιση υπό σταθερή μύζηση εδαφικού σκελετού

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συμπίεσόμετρου όπου το δοκίμιο φορτίστηκε υπό σταθερή μύζηση εδαφικού σκελετού.

Κατασκευές σε ακόρεστο συμπίεστο έδαφος σε σύντομο χρονικό διάστημα θεωρείται ότι γίνονται υπό σταθερή μύζηση, καθώς δεν μεταβάλλονται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες ή η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Κατόπιν, προκαλείται μείωση του όγκου με σταθερό ποσοστό υγρασίας, το οποίο προκαλεί την αύξηση του βαθμού κορεσμού και μείωση της μύζησης. Η επίδραση του φορτίου μπορεί να είναι ασήμαντη σε ακόρεστα εδαφικά υλικά που έχουν πολύ μικρή συμπίεστότητα ενώ μπορεί να είναι σημαντική σε εδαφικά υλικά με μεγάλη συμπίεστότητα, λόγω της δευτερογενούς μεταβολής της μύζησης ως αποτέλεσμα της φόρτισης.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται καμπύλες ιστροπικής συμπίεσης σε πλήρως κορεσμένα εδάφη και μη κορεσμένα εδάφη υπό σταθερή μύζηση, σε σχέση με τον ειδικό όγκο v και τη μέση ολική τάση p σε κλίμακα φυσικών λογαρίθμων. Ο ειδικός όγκος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v = 1 + e \quad (4.1)$$

Στην καμπύλη $s=0$ του παρακάτω σχήματος παρουσιάζεται για ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος ο δείκτης επανασυμπίεσης (κ) και ο δείκτης συμπίεσης $\lambda(s=0)$. Η δεύτερη καμπύλη έχει σταθερή τιμή μύζησης, με δείκτη επανασυμπίεσης (κ) και δείκτη συμπίεσης $\lambda(s=s_1)$. (Alonso, et al., 1990)

Η σχέση του δείκτη συμπίεσης με τη μύζηση διατυπώθηκε με εμπειρικές συσχετίσεις (Alonso et al., 1990):

$$\lambda(s) = b + d \ln s \quad (4.2)$$

όπου b , και d εμπειρικές παράμετροι. Η εν λόγω εξίσωση προέκυψε βάσει των πειραματικών δεδομένων των Lloret & Alonso (1985) και κάνει πρόβλεψη της μείωσης του δείκτη συμπίεσης όταν οι τιμές του d είναι μικρότερες του 0. Εντούτοις, προβλέπει τη συνεχή αύξηση του δείκτη συμπίεσης όσο αυξάνεται η μύζηση, συνεπώς για να χρησιμοποιηθεί πρέπει να περιοριστεί το εύρος τιμών μύζησης.

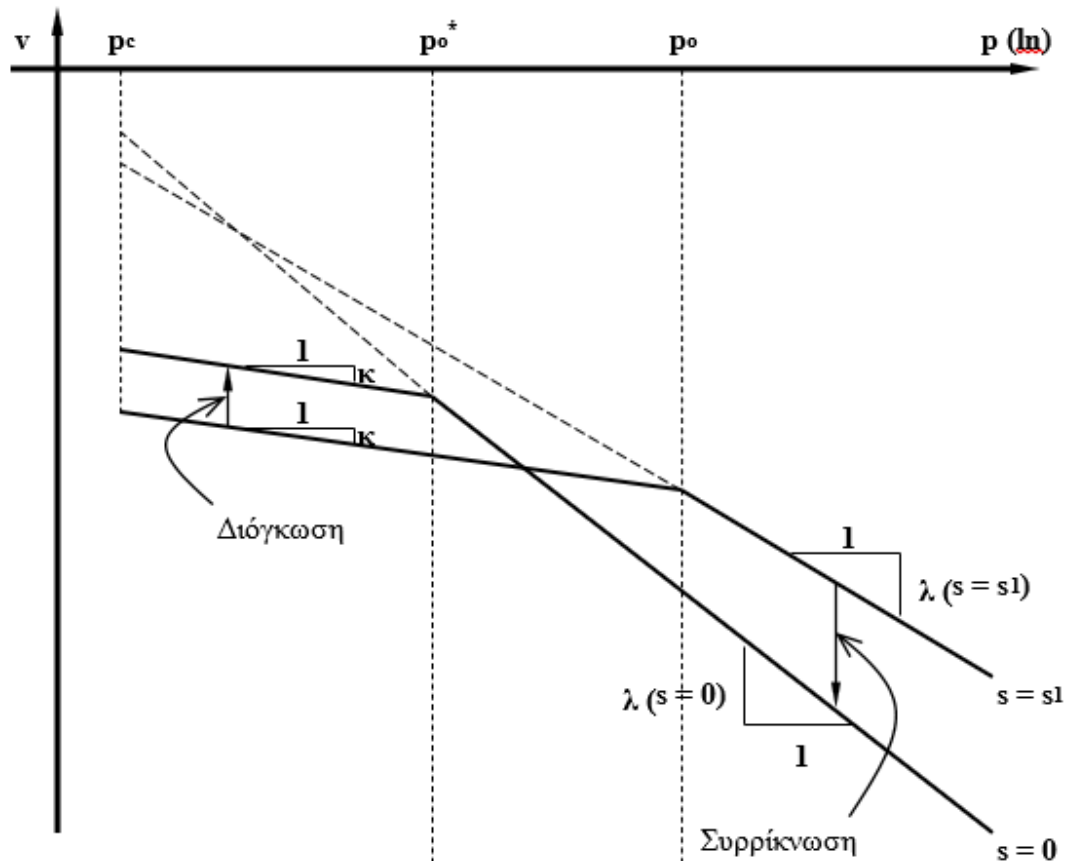
$$\lambda(s) = \lambda(s = 0) [(1 - r) \exp(-\beta s) + r] \quad (4.3)$$

όπου r εμπειρική παράμετρος.

Στη συγκεκριμένη εξίσωση προβλέπεται ότι με την αύξηση της μύζησης, ο δείκτης συμπίεσης τείνει σταδιακά στην ελάχιστη τιμή. Αυτή η τιμή καθορίζεται από την εμπειρική παράμετρο r , η οποία ορίζεται ως ο λόγος του δείκτη συμπίεσης στον οποίο η μύζηση τείνει στο άπειρο προς τον δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους. Ο ρυθμός μείωσης του δείκτη συμπίεσης εκφράζεται με την παράμετρο β .

Η αύξηση τάσης της φαινόμενης προστερεοποίησης (ή τάση διαρροής) είναι επίσης συνέπεια της αύξησης της ακαμψίας όταν μειώνεται ο κορεσμός του εδάφους.

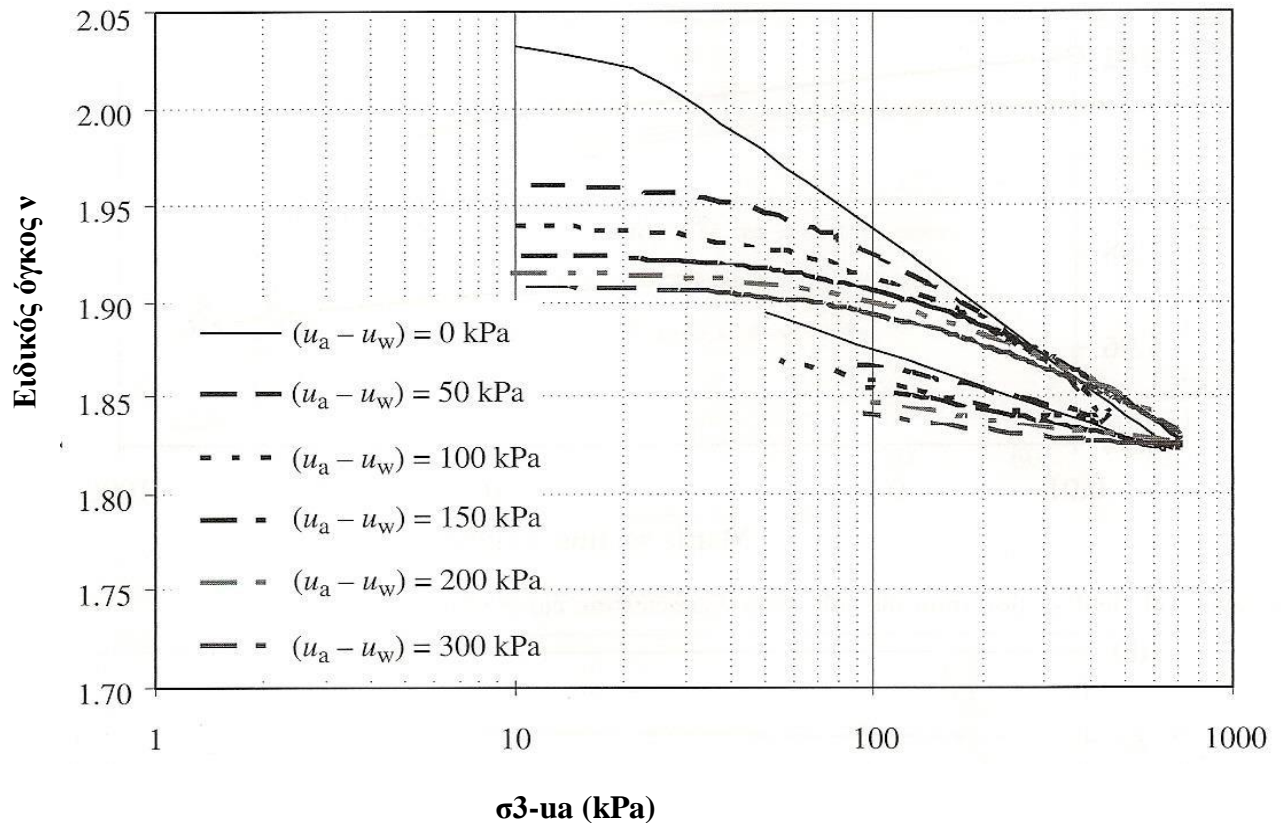
Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες ιστροπικής συμπίεσης με σταθερές τιμές μύζησης σε συμπυκνωμένο Μαλαισιανό καολίνη κοκκομετρικής διαβάθμισης: 15% άργιλος, 85% ιλύς, $I_p=14.5$, $w_L=51\%$, $G_s=2.65$, κατάταξη κατά USCS, ΜΗ (Thu, et al., 2007). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της μετατόπισης άξονα με τριαξονική δοκιμή ελέγχου μύζησης του εδάφους.



Σχήμα 4.2: Καμπύλες ιστροπικής συμπίεσης πλήρως κορεσμένου εδάφους και μη κορεσμένου εδάφους υπό σταθερή μύζηση

Όπως φαίνεται, ο δείκτης συμπίεσης μειώνεται προοδευτικά και η τάση φαινόμενης προστεροποίησης αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης υπό την οποία πραγματοποιείται η ιστροπική συμπίεση.

Επιπρόσθετα, με την αύξηση της μύζησης αρχικά παρατηρούνται μικρές μεταβολές όγκου μέχρι την τάση φαινόμενης προστεροποίησης.



Σχήμα 4.3: Καμπύλες ιστροπικής συμπίεσης πλήρους κορεσμένου καολίνη και μή κορεσμένο υπό σταθερή μύζηση s (Thu, et al., 2007).

Η μεταβολή της τάσης διαρροής ή φαινόμενης προστερεοποίησης με τη μύζηση μπορεί να διατυπωθεί από τη σχέση (Alonso, et al., 1990):

$$\left(\frac{p_0}{p_c}\right) = \left(\frac{p_0^*}{p_c}\right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (4.4)$$

Όπου:

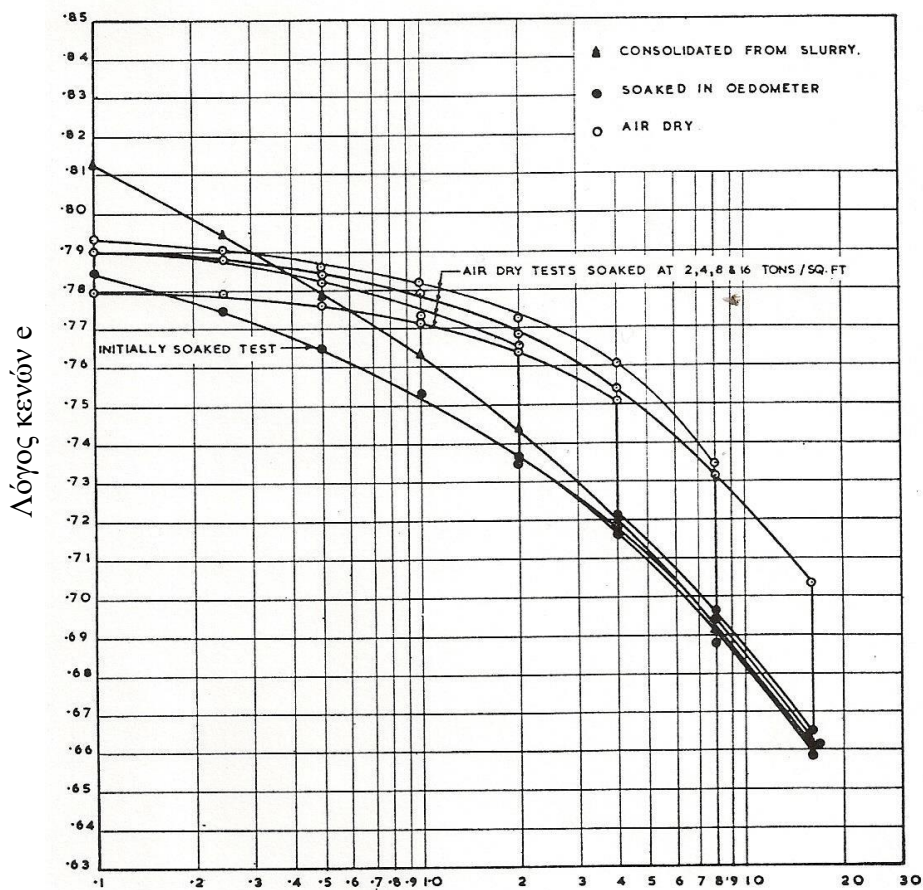
- p_0 η τάση διαρροής για τιμή της μύζησης s ,
- p_0^* η τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους και

p_c τιμή αναφοράς της μέσης ολικής τάσης

Παρατηρήθηκε ότι υπήρχε μικρή διαφορά μεταξύ της τιμής της πίεσης διείσδυσης αέρα και της τάσης διαρροής. Αυτό μπορεί να οφείλεται στον γεωμετρικό προσδιορισμό των

ονομαστικών τιμών της πίεσης διαρροής v -(σ_3 - u_a) και διείσδυσης αέρα στις καμπύλες v - s και S_r - s .

Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης των Jennings & Burland, 1962, σε χαλαζιακή ιλύ. Επιπλέον, στο σχήμα φαίνεται η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης για αναζυμωμένη χαλαζιακή ύλη ποσοστού υγρασίας 35%. Οι λοιπές καμπύλες αφορούν σε δοκίμια της ίδιας ύλης προερχόμενα από ξήρανση του αναζυμωμένου υλικού σε εργαστηριακές ατμοσφαιρικές συνθήκες έως ότου να σταθεροποιηθεί το βάρος των δοκιμίων. Στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε μονοδιάστατη συμπίεση σε κυψέλες χωρίς νερό σε προκαθορισμένες τιμές τάσεων στις οποίες προστέθηκε νερό και συνεχίστηκε η φόρτιση.

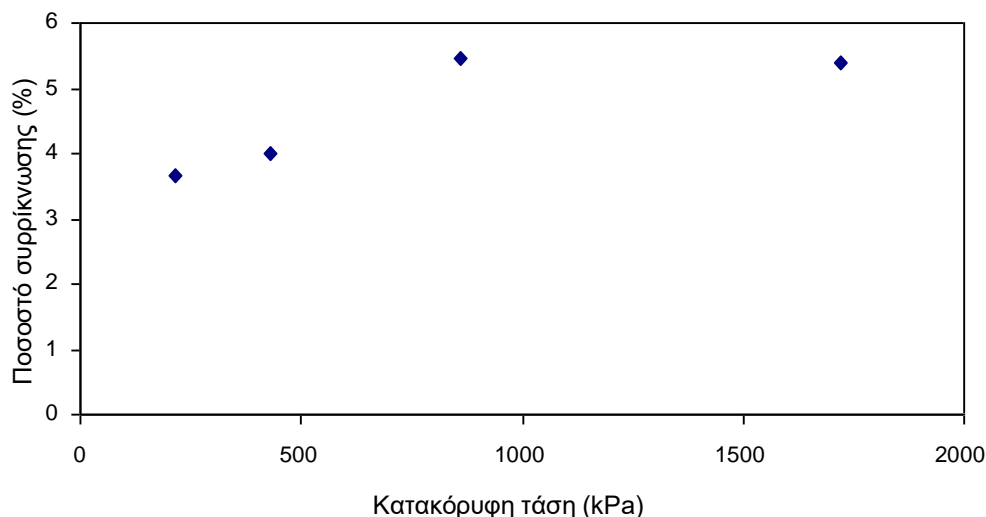


Κατακόρυφη τάση (τόνοι ανά τετραγωνικό πόδι)

Σχήμα 4.4: Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε πλήρως κορεσμένη χαλαζιακή ιλύ και στην ίδια ιλύ μετά από ξήρανση στις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Jennings & Burland, 1962)

Παρατηρείται η μείωση της κλίσης του κλάδου συμπίεσης των ακόρεστων υλικών αλλά και η τάση για κατάρρευση ως ποσοστό συρρίκνωσης κατά την διαβροχή. Η τάση για κατάρρευση δεν εξετάστηκε στην παρούσα Διπλωματική.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το ποσοστό συρρίκνωσης ως προς την τάση που πραγματοποιήθηκε η διαβροχή των δοκιμίων από καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης (Jennings & Burland, 1962).



Σχήμα 4.5: Ποσοστό συρρίκνωσης ως προς την κατακόρυφη τάση διαβροχής των δοκιμίων (Jennings & Burland, 1962).

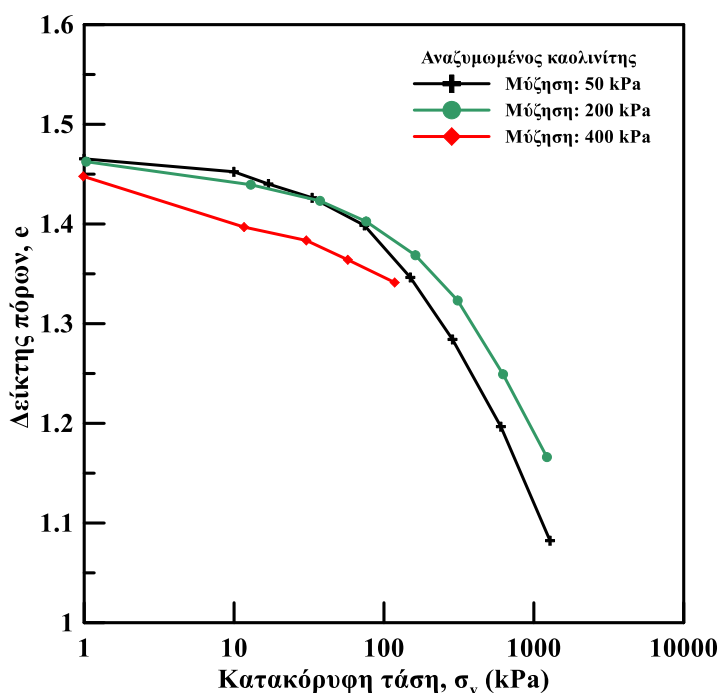
4.2 Αποτελέσματα δοκιμών

Ενδεικτικά αποτελέσματα της πρώτης σειράς των πειραμάτων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.6**. Η αύξηση της μύζησης εδαφικού σκελετού, μέσω της αύξησης της πίεσης του αέρα (u_a), από 50 έως 200kPa φαίνεται να μειώνει τη συμπιεστότητα του αναζυμωμένου καολίνιτη καθώς η μαύρη καμπύλη που αντιστοιχεί σε μύζηση 50kPa εμφανίζει μεγαλύτερη συμπιεστότητα από την πράσινη που αντιστοιχεί σε μύζηση 200kPa. Επίσης, η τάση διαρροής αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης όπως αναφέρεται και στο Σχήμα 4.5.

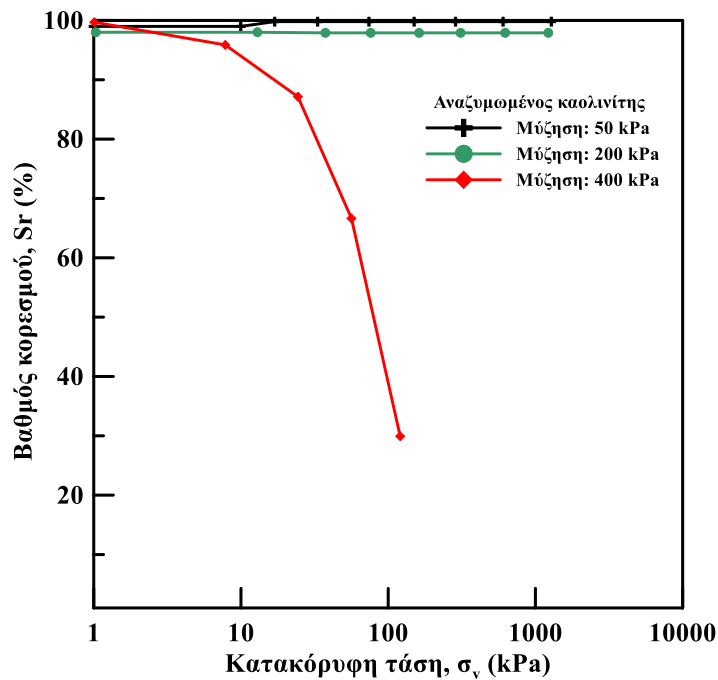
Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας όπως στα Σχήματα 4.2-4.5 που προαναφέρθηκαν.

Στο Σχήμα 4.6 η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί σε μία δοκιμή συμπίεσης που έγινε υπό σημαντικά μεγαλύτερη μύζηση 400kPa. Εκτός από την αύξηση της συμπιεστότητας σύμφωνα με τα ανωτέρω, περαιτέρω αύξηση της κατακόρυφης τάσης οδηγεί σε απότομη ανάπτυξη ογκομετρικής παραμόρφωσης.

Η ταυτόχρονη μέτρηση της μεταβολής του νερού των πόρων και της καθίζησης του δοκιμίου επιτρέπει τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού ($S_r = \text{Όγκος νερού} / \text{Όγκος κενών}$). Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται η μεταβολή του βαθμού κορεσμού με την κατακόρυφη τάση. Τα δοκίμια με μύζηση 50 και 200kPa παρέμειναν κορεσμένα σε όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Αντίθετα, όταν η μύζηση αυξάνεται στα 400kPa ο βαθμός κορεσμού μειώνεται συνεχώς κατά τη φόρτιση. Υπό συγκεκριμένη τιμή μύζησης ο αέρας διεισδύει στους πόρους του αργιλικού υλικού αντικαθιστώντας το νερό. Επομένως τα 400 kPa είναι η τιμή διείσδυσης του αέρα (air entry value) για τον αναζυμωμένο καολινίτη αρχικής υγρασίας $w=50\%$.

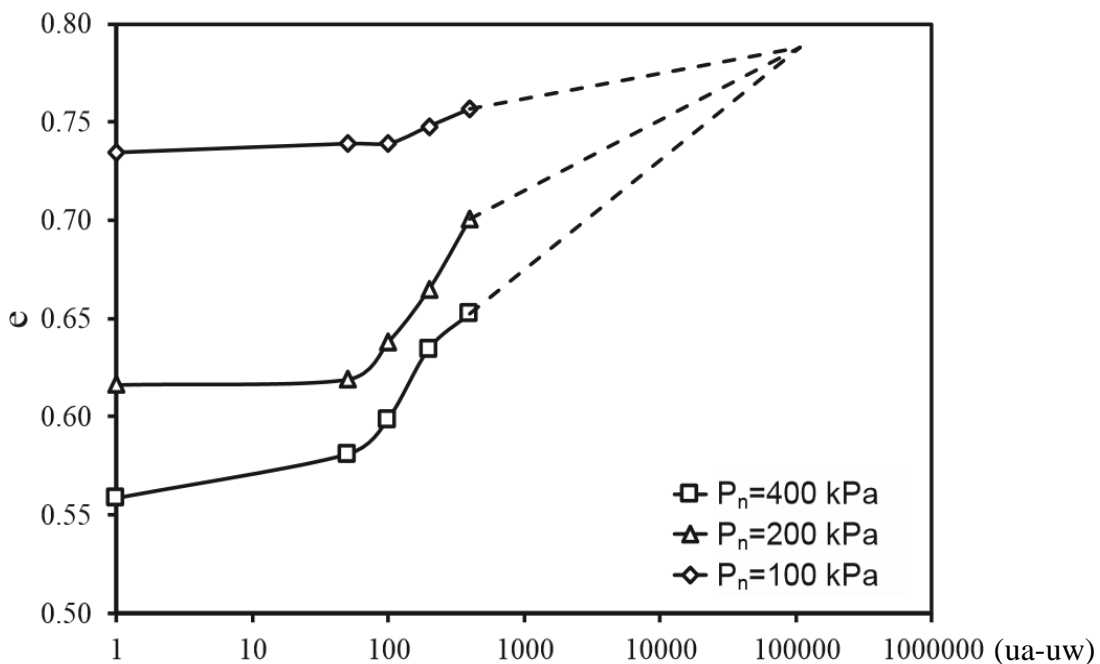


Σχήμα 4.6: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης σε αναζυμωμένο καολινίτη υπό διαφορετική μύζηση εδαφικού σκελετού. Δείκτης πόρων προς κατακόρυφη τάση



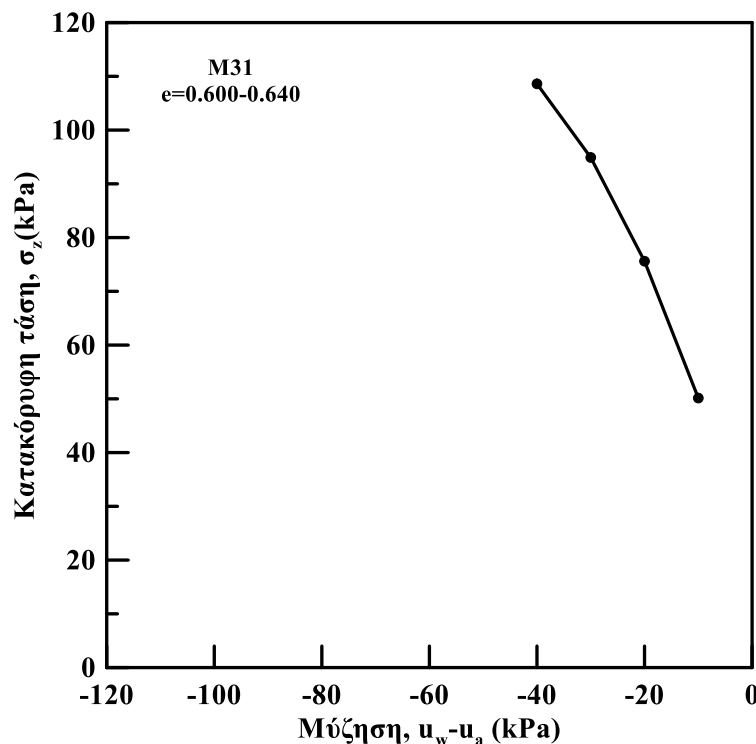
Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης σε αναζυμωμένο καολινίτη υπό διαφορετική μύζηση εδαφικού σκελετού. Βαθμός κορεσμού προς κατακόρυφη τάση

Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8 όπου μετά από μία τιμή μύζησης (>400 kPa) παρατηρείται είσοδος αέρα στα δοκίμια (βλ. διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 4.8: Μεταβολή δείκτη πόρων με την αύξηση της μύζησης υπό σταθερή κατακόρυφη τάση P_n (Haeri et al., 2015).

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων εξετάζεται η επίδραση της μύζησης εδαφικού σκελετού στην αντοχή της άμμου M31 υπό συνθήκες ανεμπόδιστης θλίψης. Τα χαρακτηριστικά της άμμου M31 περιγράφονται από τους Georgiannou, V. N., & Konstadinou, M. (2014). Torsional Shear Behavior of Anisotropically Consolidated Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000985](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000985). Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται η μέγιστη κατακόρυφη τάση κατά την αστοχία για μύζηση εδαφικού σκελετού -10, -20, -30 και -40kPa. Η αντοχή της άμμου αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης και διπλασιάζεται στο εύρος μύζησης που εξετάστηκε.



Σχήμα 4.9: Επίδραση της μύζησης εδαφικού σκελετού στη μέγιστη αντοχή άμμου

Λόγω των χαμηλών τιμών μύζησης όλα τα δοκίμια παραμένουν κορεσμένα κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Συνεπώς η μύζηση αντιπροσωπεύει την αρχική ενεργό τάση των δοκιμίων. Είναι λοιπόν αναμενόμενο η αντοχή να αυξάνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης των κορεσμένων δοκιμίων.

5 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποίησε μια συσκευή συμπίεσομέτρου για ακόρεστα εδάφη. Η συσκευή βασίζεται στην αρχή μετατόπισης των αξόνων και διαθέτει ανεξάρτητο έλεγχο της πίεσης του αέρα και του νερού στο δοκίμιο, καθώς και έλεγχο της μύζησης. Η μύζηση μπορεί να ρυθμιστεί ταυτόχρονα με επιβαλλόμενες διαφορετικές συνθήκες κατακόρυφης φόρτισης χρησιμοποιώντας έναν μετρητή φορτίου. Η συσκευή αυτή είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Ε.Μ.Π.

Ο έλεγχος και η καταγραφή δεδομένων της συσκευής γίνονται με ελεγκτές και καταγραφικά που έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ. Αυτό επιτρέπει την εκτέλεση ειδικών δοκιμών αυτόματα και υπό διαφορετικές διαδρομές τάσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών που διενεργήθηκαν για τη μελέτη της μύζησης και του αξονικού φορτίου σε διάφορες τιμές. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές με μεταβαλλόμενο αξονικό φορτίο και σταθερή μύζηση, καθώς και μια δοκιμή με μεταβαλλόμενη μύζηση και σταθερό αξονικό φορτίο σε μια συσκευή. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε μια τριαξονική συσκευή με διάφορες τιμές μύζησης εδαφικού σκελετού.

Οι δοκιμές στο συμπίεσομετρο πραγματοποιήθηκαν σε καολινίτη και οι δοκιμές στην τριαξονική συσκευή έγιναν σε αμμώδες υλικό. Η ρύθμιση της επιθυμητής μύζησης στις δοκιμές πραγματοποιήθηκε με τη ρύθμιση ανεξάρτητων παραμέτρων, όπως η πίεση του υγρού των πόρων και η πίεση του αέρα στην κυψέλη της συσκευής. Η πίεση του νερού επιβάλλεται μέσω εξωτερικής κυψέλης πίεσης που επικοινωνεί με το κάτω μέρος του δοκιμίου. Οι λεπτομέρειες σχετικά με την παρασκευή των δοκιμών περιγράφονται από προηγούμενες ερευνητικές εργασίες.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις δοκιμές είναι:

1. Η αύξηση της πίεσης του αέρα (u_a) από 50 έως 200 kPa μειώνει τη συμπίεστότητα του αναζυμωμένου καολινίτη. Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε μύζηση 50 kPa έχει μεγαλύτερη συμπίεστότητα από την καμπύλη που αντιστοιχεί σε μύζηση 200 kPa.
2. Η τάση διαρροής αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης.

3. Ο αναζυμωμένος καολινίτης εμφανίζει απότομη ανάπτυξη ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά την αύξηση της κατακόρυφης τάσης, για τη δοκιμή συμπίεσης με μύζηση 400 kPa.
4. Ο βαθμός κορεσμού (Sr) μεταβάλλεται με την κατακόρυφη τάση. Τα δοκίμια με μύζηση 50 και 200 kPa παρέμειναν κορεσμένα κατά τη φόρτιση, ενώ για τη μύζηση 400 kPa παρατηρείται μείωση του βαθμού κορεσμού με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης. Αυτό υποδηλώνει ότι η τιμή 400 kPa είναι η τιμή διείσδυσης του αέρα (air entry value) για τον αναζυμωμένο καολινίτη αρχικής υγρασίας $w=50\%$.
5. Η μέτρηση της μεταβολής του νερού των πόρων και της καθίζησης του δοκιμίου επιτρέπει τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού ($Sr = \text{Όγκος νερού} / \text{Όγκος κενών}$).
7. Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων που αναφέρονται, εξετάζεται η επίδραση της μύζησης εδαφικού σκελετού στην αντοχή της άμμου M31. Παρατηρείται ότι η αντοχή της άμμου αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης, διπλασιάζοντας την αντοχή στο εξεταζόμενο εύρος της μύζησης.
8. Λόγω των χαμηλών τιμών μύζησης, όλα τα δοκίμια παραμένουν κορεσμένα κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η μύζηση, συνεπώς, αντιπροσωπεύει την αρχική ενεργό τάση των δοκιμίων. Επομένως, αναμένεται ότι η αντοχή θα αυξάνεται με την αύξηση της ενεργής τάσης των κορεσμένων δοκιμίων.

6 Βιβλιογραφία

Acar YB, Li H, Gale RJ. *Phenol removal from kaolinite by electrokinetics*. Journal of Geotechnical Engineering 1992;118(11):1837e52.

Adami A, Rinaldi VA. *The influence of amorphous silica on the aging of a remolded loessial soil*. Soils and Foundations 2017;57(3):315e26.

Ali NA. *Performance of partially replaced collapsible soil-field study*. Alexandria Engineering Journal 2015;54(3):527e32.

Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A., 1990, *A constitutive model for partially saturated soils*, Géotechnique, **40**, 3, pp. 405-430.

Αναστασίου, Ν., 2004, *Μελέτη της συμπεριφοράς μειγμάτων άμμου-μπεντονίτη*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Arabzadeh A, Notani MA, Zadeh AK, Nahvi A, Sassani A, Ceylan H. *Electrically conductive asphalt concrete: an alternative for automating the winter maintenance operations of transportation infrastructure*. Composites Part B: Engineering 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106985>.

ASTM D422-63. e2. *Standard test method for particle-size analysis of soils*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2007.

ASTM D4318-10e1. *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2010.

ASTM D5298-94. *Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 1994.

ASTM D854-14. *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2014.

Bahmani SH, Huat BBK, Asadi A, Farzadnia N. *Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement*. Construction and Building Materials 2014;64: 350e9.

Bicalho KV, Correia AG, Ferreira S, Fleureau JM, Marinho FAM. *Filter paper method of soil suction measurement*. In: *Proceedings of the 13th pan-American conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Venezuela: Margarita Island; 2007.

Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E., Donald, I. B., 1960, *Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils*, Proceedings of the ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, University of Colorado, Boulder, Colo., pp. 503-532.

Βλάχος, Β. Χ. (2015). *Εργαστηριακή προσομοίωση των συνθηκών διάτμησης εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες*. Προ/Μεταπτυχιακές Διατριβές στη Βιβλιοθήκη Θεόφραστος του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ.

Brooks RH, Corey AT. *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology Paper 3. Fort Collins, CO, USA: Colorado State University; 1964.

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.

Escario, V., 1980, *Suction controlled penetration and shear tests*, Proc. 4th Int. Conf. on Expansive Soils, Denver, Colo.

Escario, V., Juca, F., 1989, *Strength and deformation of partly saturated soils*, proc. 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 43-46.

Fathi A, Tirado C, Gholamy A, Lemus L, Mazari M, Nazarian S. *Consideration of depth of influence in implementation of intelligent compaction in earthwork quality management*. In: Proceedings of the transportation research board (TRB) 97th annual meeting; 2018.

Fathi A, Mazari M, Saghafi M. *Multivariate global sensitivity analysis of rocking responses of shallow foundations under controlled rocking*. In: Proceedings of the 8th International conference on case histories in geotechnical engineering. American Society of Civil Engineers (ASCE); 2019.

Fredlund, D. G., 1975, *A diffused air volume indicator for unsaturated soils*, Can. Geot. J., Vol. 12, pp. 533-539.

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., 1981, *Seepage in saturated soils. Panel discussion: ground water and seepage problems*, proc. 10th ICSMFE, Stockholm, Sweden, Balkema, Rotterdam, vol. 4, pp. 629-641.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1988, *State-of-development in the measurement of soil suction*, Proc. Int. Conf. on the Engineering Problems of Regional Soils, Beijing, China, pp. 582- 588.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1993, *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, New York, N.Y., 517 pp. Fredlund, D.G., Rahardjo H., & Gan, J. (1987). *Nonlinearity of Strength Envelope for Unsaturated Soils*. Proc. 6th Int, Conf, Expansive Soils, 1, (σσ. 49-54). New Delhi, India.

Fredlund M D, Fredlund D G, Wilson G W, 1997. *Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties*. In: 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils; April 22–25; Rio de Janeiro, Brazil.

Fredlund, D. G., 2004, *Use of soil-water characteristic curves in the implementation of unsaturated soil mechanics*, in Jucá, J. F. T., de Campos, T. M. P., Marinho, F. A. M., (eds), proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 3, Swets&Zeitlinger, Lisse, pp. 887-902.

Georgiannou, V. N., & Konstadinou, M. (2014). Torsional Shear Behavior of Anisotropically Consolidated Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000985](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000985)

Haeri SM, Garakani AA, Khorshidi M. *Collapse potential and variation of the water content in undisturbed loessial samples under K0 condition and controlled matric suction*. In: Proceedings of the 9th International congress on Civil engineering. Rotterdam, the Netherlands: Millpress; 2012.

Haeri SM, Khosravi A, Ghazizadeh S, Garakani A, Meehan C. *Characterization of the effect of disturbance on the hydro-mechanical behavior of a highly collapsible loessial soil*. In: Proceedings of the 6th International conference on unsaturated soils. London, UK: Taylor & Francis Group; 2014b.

Haeri SM, Mohammad Hosseini AM, Shahrabi MM, Soleymani S. *Comparison of strength characteristics of Gorgan loessial soil improved by nanosilica, lime and Portland cement*. In: Proceedings of the 15th pan-American conference on soil mechanics and geotechnical engineering; 2015.

Haeri SM. *Hydro-mechanical behavior of collapsible soils in unsaturated soil mechanics context*. Japanese Geotechnical Society Special Publication 2016;2(1):25e40.

Harvey, E. N., Barnes, D. K., McElroy, W. D., Whiteley, A. H., Pease, D. C., Cooper, K. W., 1944, *Bubble formations in animal, I-Physical Factor*, J. Cellular and Comparative Physiology, 24 (1), pp. 1-22.

Heydartaemeh MR, Aslani S, Ardejani FD. *Loess soil nanoparticles as a novel adsorbent for adsorption of green malachite dye*. Journal of Chromatography & Separation Techniques 2017.

Hosagasi-Fuselier T., 2006. *Evaluation of soil water characteristic curves and permeability functions for modelling of seepage in unsaturated soils* [thesis]. Somerville/Medford, Massachusetts, USA: Tufts University.

Houston SL, El-Ehwany M. *Sample disturbance of cemented collapsible soils*. Journal of Geotechnical Engineering 1991;117(5):731e52. Haines, W. B., 1927, *A further contribution to the theory of capillary phenomena in soils*, J. Agric. Sci., 17, pp. 264-290.

Houston SL, Houston WN, Wagner AM. *Laboratory filter paper measurements*. Geotechnical Testing Journal 1994;17(2):185e94.

Jefferson I, Rogers C, Evststiev D, Karastanev D. *Improvement of collapsible loess in Eastern Europe*. In: Ground improvement case histories: compaction, grouting and geosynthetics; 2015. p. 215e61.

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.

Κουρέλης, Ι., 2017, *Τριαξονικές δοκιμές σε ανισότροπα στερεοποιημένο καολίνη*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Μυλωνάς-Ροντήρης, Α., 2018, *Συμπεριφορά ισότροπα και ανισότροπα στερεοποιημένου καολίνη σε αξονοσυμμετρική φόρτιση*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Notani MA, Arabzadeh A, Ceylan H, Kim S, Gopalakrishnan K. *Effect of carbon fiber properties on volumetrics and Ohmic heating of electrically conductive asphalt concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering 2019;31(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002868](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002868).

Lawton EC, Fragazy R, Hetherington MD. *Review of wetting-induced collapse in compacted soil*. Journal of Geotechnical Engineering 1992;118(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:9\(1376\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:9(1376)).

Lee HC. *An evaluation of instruments to measure soil moisture condition*. MS Thesis. Lubbock, Texas, USA: Texas Tech University; 1991.

Lee HH, Yang JW. *A new method to control electrolyte pH by a circulation system in electrokinetic soil remediation*. Journal of Hazardous Materials 2000;77(1e3): 227e40.

López-Acosta NP and Menoza-Promotor JA (2016) *Study of Unsaturated Soils by Coupled Numerical Analyses of Water Flow-Slope Stability*. Groundwater - Contaminant and Resource Management. InTech. DOI: 10.5772/63903.

Lloret, A., Alonso, E. E., 1985, *State surfaces for partially saturated soils*, Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. FdnEngng, San Francisco, 2, pp. 557-562.

Luo Q, Zhang X, Wang H, Qian Y. *Mobilization of phenol and dichlorophenol in unsaturated soils by non-uniform electrokinetics*. Chemosphere 2005;59(9): 1289e98.

Mattson E, Bowman RS, Lindgren E. *Electrokinetic ion transport through unsaturated soil: 1. Theory, model development, and testing*. Journal of Contaminant Hydrology 2002;54(1e2):99e120.

Μπαρδάνης, Μ. (2016). *Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών* (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).

Okonta FN, Manciya TM. *Compaction and strength of lime-fly ash stabilized collapsible residual sand*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 2010;15:1976e88.

Pashaei A. *Physicochemical properties of loess deposits in Gorgan area*. Geology Science Journal 1997;23e24:67e8.

Pérez-García N, 2008. *Determination of Soil-Water Characteristic Curve with pressure plate test*. Safandila, Querétaro, México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Mexican Transportation Institute. 54 p. Publicación Técnica No. 313 (in Spanish)

Ramirez EM, Jimenez CS, Camacho JV, Rodrigo AR, Canizares P. *Feasibility of coupling permeable bio-barriers and electrokinetics for the treatment of diesel hydrocarbons polluted soils*. *Electrochimica Acta* 2015;181:192e9.

Rashidi M, Saghafi M, Takhtfiroozeh H. *Genetic programming model for estimation of settlement in earth dams*. *International Journal of Geotechnical Engineering* 2018. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1543100>.

Reddy KR, Adams JA, Richardson C. *Potential technologies for remediation of brownfields*. *Practice Periodical of Hazardous Toxic and Radioactive Waste Management* 1999;3(2):61e8.

Roohparvar H. *Evaluation of improvement of collapsible soils by adding lime in conventional and suction controlled oedometer tests: a case study of Gorgan loess*. MS Thesis. Tehran, Iran: Sharif University of Technology; 2012.

Saghafi M, Tabatabaee N, Nazarian S. *Performance evaluation of slurry seals containing reclaimed asphalt pavement*. *Transportation Research Record* 2019;2673(1):358e68.

Saichek RE, Reddy KR. *Effect of pH control at the anode for the electrokinetic removal of phenanthrene from kaolin soil*. *Chemosphere* 2003;51:273e87.

Sakr M, Mashhour M, Hanna A. *Egyptian collapsible soils and their improvement*. In: *Proceedings of the GeoCongress 2008*. ASCE; 2008. p. 654e61.

Senff L, Labrincha JA, Ferreira VM, Hotza D, Repette WL. *Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars*. *Construction and Building Materials* 2009;23(7):2487e91.

Shang JQ, Dunlap WA. *Improvement of soft clays by high voltage electrokinetics*. *Journal of Geotechnical Engineering* 1996;122(4):274e80.

Shiba S, Hirata Y. *In situ electrokinetic remediation of groundwater contaminated by heavy metal*. *Developments in Water Science* 2002;47:883e90.

Sun PP, Zhang MS, Zhu LF. *Typical case study of loess collapse and discussion on related problems*. Geological Bulletin of China 2013;32(6):847e51 (in Chinese).

Tabor, D., 1979, *Gases, liquids and solids*, 2nd Ed., Cambridge University Press.

Tarantino, A., Mongiovi, L., 2001, *Experimental procedures and cavitation mechanisms intensiometer measurements*, Geotechnical and Geological Engineering, 19, 3, pp. 189-210.

Tarantino, A., Mongiovi, L., 2002, *Design and construction of a tensiometer for direct measurement of matric suction*, in Jucá, J. F. T., de Campos, T. M. P., Marinho, F. A. M., (eds), proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 1, Swets&Zeitlinger, Lisse, pp. 319-324.

Temperley, R. N. V., Chambers, L. G., 1946, *The behaviour of water under hydrostatic tension*, Proc. Physics Society, 58, pp. 420-436.

Terzaghi K, Peck RB, Mesri G. *Soil mechanics in engineering practice*. 3rd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 1996.

Tirado C, Fathi A, Mazari M, Nazarian S. *Design verification of earthwork construction by integrating intelligent compaction technology and modulus-based testing*. In: Proceedings of the TRB 98th annual meeting. Washington, D.C., USA; 2019.

Tjandra D, Wulandari PS. *Improving marine clays with electrokinetics method*. Civil Engineering Dimension 2007;9(2):98e102.

Thu, T. M., Rahardjo, H., Leong, E. C., 2007, *Soil-water characteristic curve and consolidation behavior for a compacted silt*, Can. Geot. J., **44**, pp. 266-275.

Thuy TTT, Putra DPE, Budianta W, Hazarika H. *Improvement of expansive soil by electro-kinetic method*. Journal of Applied Geology 2013;5(1):50e9.

van Genuchten M. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal 1980;44(5):892e8.

Virkutyte J, Sillanpaa M, Latostenmaa P. *Electrokinetic soil remediation*. The Science of the Total Environment 2002;289:97e121.

Χατζηγώγος, Ν. Π. Θ. (2015). *Συμβολή στη διερεύνηση των μηχανισμών αστοχίας υπολειμματικών εδαφών* \Contribution to the investigation of failure mechanism of residual

soils. Προ/Μεταπτυχιακές Διατριβές στη Βιβλιοθήκη Θεόφραστος του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ.

Zekkos D, Kabalan M, Flanagan M. *Lessons learned from case histories of dynamic compaction at municipal solid waste sites*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2013;139(5):738e51.

Zhemchuzhnikov, A., Ghavami, K. and dal Toé Casagrande, M. (2015). Static Compaction of Soils with Varying Clay Content. *Key Engineering Materials*, 668, pp.238–246. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.668.238>.

Zia N, Fox P. *Engineering properties of loess-fly ash mixtures for road base construction*. Transportation Research Record 2000;(1714):49e56.