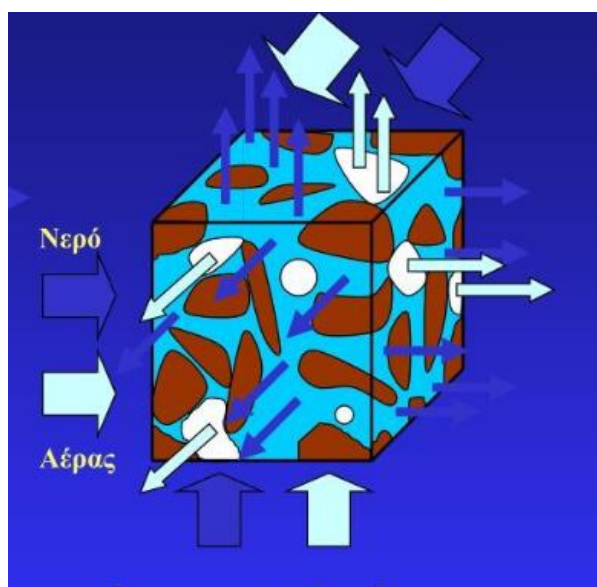




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ Ι. ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΚΑΛΛΙΟΓΛΟΥ ΠΟΛΥΞΕΝΗ
ΔΡ. ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ , ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος καθώς συνδέεται με φαινόμενα έντονης κλιματικής αλλαγής. Τα ακόρεστα εδάφη έχουν έντονη παρουσία σε διάφορες περιοχές του πλανήτη. Τα κλιματικά φαινόμενα επηρεάζουν τον βαθμό κορεσμού των γεωυλικών και κατά συνέπεια τη μηχανική συμπεριφορά.

Στα ακόρεστα εδάφη, οι εδαφικοί πόροι καλύπτονται εν μέρει από νερό και εν μέρει από αέρα. Η διερεύνηση της μηχανικής τους απόκρισης συνδέεται με την ασφάλεια των κατασκευών και των υποδομών.

Η παρούσα διπλωματική έχει στόχο την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών. Τα ακόρεστα εδάφη παρουσιάζουν το φαινόμενο της μύζησης, το οποίο προκαλεί πολλά προβλήματα. Η μέτρηση του φαινομένου της μύζησης γίνεται με διάφορες μεθόδους που με την πάροδο του χρόνου εξελίσσονται.

ABSTRACT

Research into the engineering behavior of partially saturated soils is gaining more and more ground as it is connected to extreme climate change phenomena. Partially saturated soils have an intense presence in various regions of the planet. Climate phenomena affect the degree of saturation of the geomaterials and consequently engineering behavior.

In the partially saturated soils, the ground sources are partially covered by water and partially covered by air. The engineering research into their response is connected to the safety of constructions and infrastructure.

The objective of this thesis is the understanding of the engineering behavior of saturated soils. Saturated soils display the phenomenon of suction which causes many issues. The measurements of this suction phenomenon can be taken using various methods which with the passage of time evolve.

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	11
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	13
2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	13
2.1.1 Φυσικά εδάφη.....	13
2.1.2 Συμπυκνωμένα εδάφη	13
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	13
2.2.1 ΜΥΖΗΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ	13
2.2.2 Η ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ	17
2.2.3 ΥΣΤΕΡΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ	20
2.2.4 ΟΡΙΟ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗΣ	21
2.3 ΜΥΖΗΣΗ ΣΕ ΞΗΡΑ ΚΛΙΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	22
2.4 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ	24
2.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ	37
3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΥΖΗΣΗΣ	37
3.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΥΖΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ – ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΥΖΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΑΞΟΝΑ (AXIS TRANSLATION TECHNIQUE)	38
3.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΧΑΡΤΙΝΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ (FILTER PAPER METHOD)	40
3.1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	41
3.1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΥΖΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	46
3.1.4.1 Ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης (thermistor psychrometers)	46
3.1.4.2 Ψυχρόμετρα φαινομένου Peltier	48
3.1.4.3 Υγρόμετρα σημείου δρόσου (dew-point hygrometers)	49
3.1.4.4 Υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου (chilled-mirror hygrometers)	49
3.1.4.5 Αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών (polymer resistance/ capacitance sensors) .	51
3.1.4.6 Αισθητήρες οργανικών μέσων	52
3.1.5 ΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΑ (TENSIO METERS)	52

3.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	69
4.1 ΘΕΡΜΟ-ΥΔΡΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΟ ΜΕΣΟ.....	69
4.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ Χ.Κ.....	70
4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΤΜΙΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	72
4.4 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	73
4.4.1 Κορεσμένα Εδάφη	73
4.4.2 Ακόρεστα Εδάφη	74
4.5 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΙΣΟΡΡΡΠΙΑΣ.....	76
4.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	82
5.1 ΡΟΗ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ.....	82
5.2 ΡΟΗ ΣΤΑ ΧΩΜΑΤΙΝΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ	83
5.3 ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΡΡΕΟΝΤΑ ΕΔΑΦΗ.....	84
5.3.1 Διογκούμενα εδάφη	84
5.3.2 Καταρρέοντα εδάφη	88
5.4 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ	89
5.5 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	106

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A : Επιφάνεια

C : Συνοχή σε όρους ολικών τάσεων

c' : Συνοχή σε όρους ενεργού τάσης

D : Διάμετρος κόκκων

D₁₀ : Ποσοστό διερχομένων κόκκων 10% ,ενεργό μέγεθος

D₅₀ : Ποσοστό διερχομένων κόκκων 50% ,μεσαίο μέγεθος

D_{max} : Μέγιστη διάμετρος κόκκων

d : Διάμετρος

E : Μέτρο ελαστικότητας

e : Δείκτης πόρων

F : Δύναμη ,συντελεστής στράγγισης

f : Συντελεστής σχήματος

G : Μέτρο διάτμησης

G_s : Ειδική βαρύτητα των κόκκων

H : Υδραυλικό φορτίο

h_c : Τριχοειδής ανύψωση

h_w : Βάθος μέχρι τον υδροφόρο ορίζοντα

i : Υδραυλική κλίση

i_c : Κρίσιμη υδραυλική κλίση

K : Απόλυτη ή ειδική διαπερατότητα

k_s : Δείκτης συμπιεστότητας λόγω μύζησης

M : Κλίση κρίσιμης γραμμής

n : Πορώδες

p_o' : Μέση ενεργός τάση

p_o : Μέση ολική τάση

PI : Δείκτης πλαστικότητας (ή I_p)

p_{atm} : Ατμοσφαιρική πίεση

p_s : Πίεση διόγκωσης

q : Ολική εκτροπική ή αποκλίνουσα τάση

q' : Ενεργός εκτροπική ή αποκλίνουσα τάση

R_s : Ακτίνα καμπυλότητας

r : Ακτίνα

S_r : Βαθμός κορεσμού

s_o : Άμεση καθίζηση

s_{eq} : Μύζηση αποκορεσμού

T_s : Επιφανειακή τάση στην διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης

t : Χρόνος

u : Ολική πίεση πόρων

u_a : Πίεση αέρα πόρων

u_w : Πίεση νερού πόρων

u_{u1}/u_{u0} : Σχετική υγρασία

V_w : Όγκος νερού

v : Ειδικός όγκος

w : Ποσοστό υγρασίας

x,y,z : Άξονες συντεταγμένων

α : Γωνία επαφής ,γωνιακή παραμόρφωση

β : Γωνία

γ : Γωνία διατμητικής παραμόρφωσης

γ : Ειδικό βάρος

γ_d : Ξηρό ειδικό βάρος

γ_{sat} : Ειδικό βάρος κορεσμένου εδάφους

γ_w : Ειδικό βάρος νερού

Δ : Μεταβολή

ϵ : Παραμόρφωση
 ϵ_v : Ογκομετρική παραμόρφωση
 ϵ_{vi} : Παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού
 θ : Ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας
 λ_{vp} : Παράμετρος συμπιεστότητας
 λ_o : Συμπιεστότητα κορεσμένου υλικού
 λ_d : Συμπιεστότητα ξηρού υλικού
 μ_1 : Συντελεστής επιρροής
 μ_o : Διόρθωση για το βάθος
 ν : Λόγος του Poisson
 ξ : Συντελεστής συσχέτισης
 σ : Ολική τάση
 σ' : Ενεργός τάση
 σ_v : Ολική κατακόρυφη τάση
 σ_v' : Ενεργός κατακόρυφη τάση
 τ : Διατμητική τάση
 ϕ : Γωνία τριβής
 ϕ' : Γωνία τριβής σε όρους ενεργού τάσης
 ϕ_b : Η κλίση της επιφάνειας αστοχίας στο επίπεδο διατμητικής τάσης-μύζησης
 χ : Αναλογία της διατομής που έχει πληρωθεί με νερό
 ψ : Επίδραση του λόγου κενών
 a, b : Εμπειρικές παράμετροι

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 : Ο κύκλος του νερού.....	12
Σχήμα 1.2 : Δομή ακόρεστων εδαφών.	12
Σχήμα 2.1 : Κατηγορίες ακόρεστων γεωυλικών βάσει της γεωυλικής τους προέλευσης.....	27
Σχήμα 2.2 : Οι τρεις φάσεις (στερεή, υγρή, αέρια) σε ακόρεστο έδαφος.	27
Σχήμα 2.3 : Δοκιμή Proctor.....	28
Σχήμα 2.4 : Στάθμη ύδατος και τριχοειδούς ανύψωσης σε προσομοίωμα.....	28
Σχήμα 2.5 : Διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων (υγρής και αέριας).	29
Σχήμα 2.6 : Προσομοίωμα από απειρομήκειες πλάκες με διάφορες αποστάσεις μεταξύ τους.....	29
Σχήμα 2.7 : Μεταβολή της ποσότητας ύδατος με το ύψος ύδατος πάνω από τη Σ.Υ.Ο. για το προσομοίωμα με σταθερή απόσταση μεταξύ των πλακών(α) και με μεταβαλλόμενη απόσταση (β).	29
Σχήμα 2.8 : Κατανομή της πίεσης του ύδατος των πόρων (α), των φάσεων (στερεή, υγρή και αέρια) (β), και της υγρασίας και του βαθμού κορεσμού (γ) του εδάφους με το βάθος.	30
Σχήμα 2.9 : Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού.	31
Σχήμα 2.10 : Περιβάλλουσα αστοχίας ακόρεστων εδαφών κατά το κριτήριο Mohr-Coulomb (α) και το μη γραμμικό κριτήριο (β).	32
Σχήμα 2.11 : α) Χρονική μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού σε χονδρόκοκη άμμο και β) της μύζησης.	32
Σχήμα 2.12 : Βαθμός κορεσμού και ενεργός ζώνη.....	33
Σχήμα 2.13 : Επίδραση μεταβολών όγκου (διόγκωση) εδάφους στις πασσαλοθεμελιώσεις.	33
Σχήμα 2.14 : Επίδραση μεταβολών όγκου (συρρίκνωση) εδάφους στις πασσαλοθεμελιώσεις.	34
Σχήμα 2.15 : Υδραυλική υστέρηση χαρακτηριστικής καμπύλης.....	34
Σχήμα 2.16 : Παράδειγμα (α)ξήρανσης και (β) διαβροχής εδάφους.....	35
Σχήμα 2.17 : Σχηματική εξήγηση υδραυλικής υστέρησης χαρακτηριστικής καμπύλης.	35
Σχήμα 2.18 : Καμπύλη συρρίκνωσης.....	36
Σχήμα 2.19 : Ζώνες κορεσμού εδάφους.....	36
Σχήμα 3.1 : Προσδιορισμός μύζησης με τη μέθοδο μεμβράνης ή με τη χρήση κεραμικού πορόλιθου. ...	61
Σχήμα 3.2 : Προσδιορισμός μύζησης με τη μέθοδο μετατόπισης του άξονα.	61
Σχήμα 3.3 : Μέθοδος προσδιορισμού μύζησης με τη μέθοδο θαλάμου μύζησης.....	61
Σχήμα 3.4 : Έξοδοι αέρα στο θάλαμο μύζησης (α) και είσοδος πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο (β).	62
Σχήμα 3.5 : Μέθοδος προσδιορισμού μύζησης με τη μέθοδο του χάρτινου φίλτρου.....	62
Σχήμα 3.6 : Μέθοδος προσδιορισμού μύζησης με τη χρήση γύψου.	63
Σχήμα 3.7 : Ύψος και σύστημα μέτρησης για τον προσδιορισμό της μύζησης (α) τμήματα γύψου (β) πορώδες υλικό (γ) τα ίδια μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης στο πεδίο.	63
Σχήμα 3.8 : Αισθητήρας θερμικής αγωγιμότητας.	64
Σχήμα 3.9 : Αισθητήρας FDR για τον προσδιορισμό της ογκομετρικής υγρασίας στο έδαφος (α), ακίδες μέτρησης (β και γ) και μήτρα με συμπυκνωμένο εδαφικό υλικό και αισθητήρα μέτρησης (δ).....	64
Σχήμα 3.10 : Ψυχρόμετρο θερμικά ευαίσθητης αντίστασης.	65
Σχήμα 3.11 : Διάταξη επαφών εντός ψυχομέτρου φαινομένου Peltier.	65
Σχήμα 3.12 : Σχηματική απεικόνιση υγρομέτρου με ψυχρό κάτοππο.	66
Σχήμα 3.13 : Μέτρηση της μύζησης με τη χρήση τενσιόμετρου με το όργανο μέτρησης (α) στην επιφάνεια του εδάφους και (β) εντός του εδάφους κοντά στο πορώδες άκρο του τενσιόμετρου.	66
Σχήμα 3.14 : Σχηματική απεικόνιση τενσιόμετρου (υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα).	67

Σχήμα 3.15 : Προσδιορισμός Χ.Κ.....	67
Σχήμα 3.16 : Προσδιορισμός Χ.Κ. μέσω κοκκομετρικής καμπύλης.....	68
Σχήμα 4.1 : Μέτρηση διαπερατότητας για ακόρεστα εδάφη.....	79
Σχήμα 4.2: Μέτρηση της διαπερατότητας για διάφορες τιμές μύζησης.....	79
Σχήμα 4.3 : Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb στην περίπτωση των ακόρεστων εδαφών.....	80
Σχήμα 4.4 : Γραμμή συμπίεσης λόγω μύζησης.....	80
Σχήμα 4.5 : Κυκλική διαβροχή και ξήρανση συμπυκνωμένου υλικού.....	81
Σχήμα 4.6 : Χαρακτηριστική καμπύλη.....	81
Σχήμα 5.1 : Μεταβολή της μύζησης κατά τη διάρκεια (α) εξάτμισης και (β) βροχόπτωσης.....	94
Σχήμα 5.2 : Κατανομή πίεσης πόρων με βάσει τη Σ.Υ.Ο. εξαιτίας παρατεταμένης βροχόπτωσης σε ακόρεστο έδαφος.....	94
Σχήμα 5.3 : Ροή σε κορεσμένη και σε ακόρεστη ζώνη ενός φράγματος.....	95
Σχήμα 5.4 : Ροή σε φράγμα (α) ροή πάνω από τον πυρήνα του φράγματος και (β) ροή στην ακόρεστη ζώνη εντός φράγματος.....	95
Σχήμα 5.5 : Ροή σε κορεσμένη ζώνη φράγματος.....	95
Σχήμα 5.6 : Φράγμα με ροή σε κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη.....	96
Σχήμα 5.7 : Τελική κατάσταση του φρεάτιου ορίζοντα μετά απο΄25 μέρες.....	96
Σχήμα 5.8 : Εδαφικό προφίλ διογκούμενου εδάφους.....	96
Σχήμα 5.9 : Ενυδάτωση κατιόντων.....	97
Σχήμα 5.10 : Ωσμωτική πίεση.....	97
Σχήμα 5.11 : Διόγκωση εδάφους θεμελίωσης λόγω βροχόπτωσης.....	98
Σχήμα 5.12 : Συρρίκνωση εδάφους θεμελίωσης λόγω εξάτμισης.....	98
Σχήμα 5.13 : Διόγκωση σε έδαφος θεμελίωσης στο κέντρο του κτηρίου.....	99
Σχήμα 5.14 : Ανάλυση διόγκωσης σε 2-Δ.....	99
Σχήμα 5.15 : Ανάλυση διόγκωσης σε 3-Δ.....	100
Σχήμα 5.16 : Υπολογισμός διόγκωσης σε διογκώσιμη άργιλο με τριχοειδούς ανύψωση.....	101
Σχήμα 5.17 : Υπολογισμός διόγκωσης σε διογκώσιμο έδαφος με ξηρή ζώνη.....	102
Σχήμα 5.18 : Χαλαρή δομή καταρρέοντων εδαφών (Καββαδάς, 2021).....	102
Σχήμα 5.19 : Μηχανισμοί κατάρρευσης εδάφους (α) έκθεση στο νερό και (β) έκπλυση κατιόντων.....	103
Σχήμα 5.20 : (α) Στερεοποίηση κορεσμένου εδάφους και (β) στερεοποίηση ακόρεστου εδάφους.....	103
Σχήμα 5.21 : Μηχανισμός αστοχίας του επιχώματος στο Καναδά.....	103
Σχήμα 5.22 : Απόθεση ξηρής τέφρας στο ανθρακωρυχείο Lenthabo.....	104
Σχήμα 5.23 : (α) Πειραματικά δεδομένα κατά την ύγρανση δοκιμίου που δείχνουν τη μείωση της συνοχής με την αύξηση του βαθμού κορεσμού, και (β) την επίδραση του βαθμού κορεσμού στις περιβάλλουσες αστοχίας.....	104
Σχήμα 5.24 : Τοίχος αντιστηρίξεως με διαγράμματα ωθήσεων για κορεσμένο και ακόρεστο έδαφος ...	105
Σχήμα 5.25 : Φέρουσα Ικανότητα σε επιφανειακή θεμελίωση.....	105

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 : Ο βαθμός κορεσμού ανά έδαφος.....	12
Πίνακας 3.1 : Όργανα μέτρησης μύζησης.....	59
Πίνακας 3.2 : Μέθοδοι προσδιορισμού μύζησης.	59
Πίνακας 3.3 : Στοιχεία μεθόδων προσδιορισμού ολικής μύζησης.	59
Πίνακας 3.4 : Στοιχεία μεθόδων προσδιορισμού της μύζησης εδαφικού σκελετού	60
Πίνακας 4.1 : Εξισώσεις της ενεργού τάσης για τα ακόρεστα εδάφη.....	78
Σχήμα 4.1 : Μέτρηση διαπερατότητας για ακόρεστα εδάφη.	79
Πίνακας 5.1 : Όρια Atterberg.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η κλασική εδαφομηχανική ασχολείται με τη μελέτη των πλήρως κορεσμένων ($S_r=100\%$) και των ξηρών εδαφών ($S_r=0$). Η θεώρηση των εδαφικών πόρων πλήρως γεμάτων με νερό ήταν για πολλές δεκαετίες συνυφασμένη με την έννοια της ασφάλειας (π.χ. η διατμητική αντοχή ενός πλήρως κορεσμένου εδάφους είναι μικρότερη από αυτήν του ίδιου εδάφους στην ακόρεστη κατάσταση). Ωστόσο, η εκτεταμένη παρουσία ακόρεστων (ή μερικώς κορεσμένων) εδαφών κάνει επιβεβλημένη την ορθή θεώρηση της φύσης τους καθώς επίσης και της μηχανικής τους συμπεριφοράς, ιδιαίτερα σε περιοχές με θερμό κλίμα όλο και περισσότερο. Στο Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες των εδαφών με βάση το βαθμό κορεσμού.

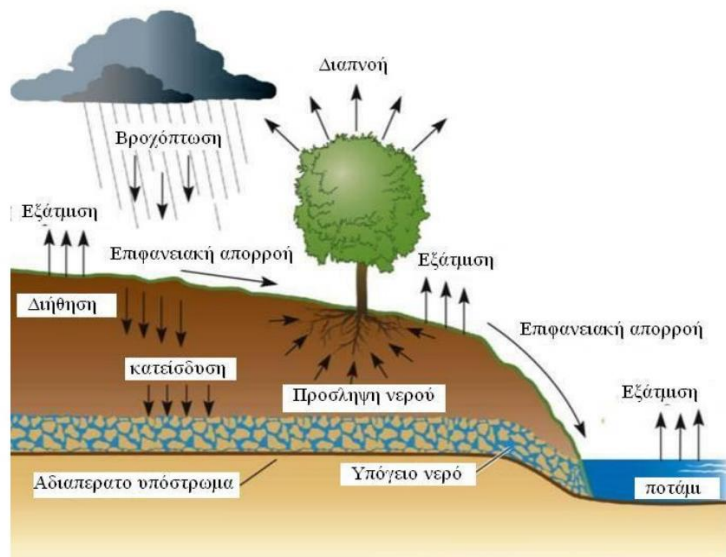
Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μελέτη της αλληλεπίδρασης της υγρής με την αέρια φάση στους εδαφικούς πόρους, Σχήμα 1.1.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

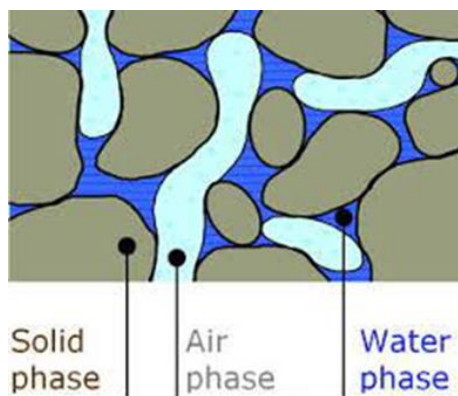
Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών. Στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση των χαρακτηριστικών των συγκεκριμένων εδαφών με έμφαση στη μύζηση, Σχήμα 1.2, τις μεθόδους προσδιορισμού της και τα προβλήματα με τα οποία συνδέονται τα ακόρεστα εδάφη. Επιπλέον θα παρουσιαστούν παραδείγματα μερικώς κορεσμένων εδαφών και η συμπεριφορά αυτών και τέλος τα συμπεράσματα της έρευνας μέσα από την πρακτική εφαρμογή.

Πίνακας 1.1 : Ο βαθμός κορεσμού ανά έδαφος.

Έδαφος	Βαθμός κορεσμού (S_r)
Ξηρό	0
Ακόρεστο ή μερικώς κορεσμένο	$0 < S_r < 1$
Πλήρως κορεσμένο	1



Σχήμα 1.1 : Ο κύκλος του νερού. (Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος, 2020)



Σχήμα 1.2 : Δομή ακόρεστων εδαφών. (Hellenic Mediterranean University, 2019)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Τα ακόρεστα εδάφη είναι είτε φυσικά είτε συμπυκνωμένα εδάφη. Αποτελούν συνδυασμό λιμναίων, αιολικών και αλλουβιακών αποθέσεων, που δημιουργούνται σε χαμηλής ενέργειας, καταθετικό περιβάλλον και αποτελούνται από γεωυλικά με διάφορες διαβαθμίσεις, Σχήμα 2.1.

2.1.1 Φυσικά εδάφη

Τα ακόρεστα εδάφη στη φύση αποτελούνται από χονδρόκοκκα ή και λεπτόκοκκα υλικά. Η υγρή φάση των ακόρεστων εδαφών, και κατά συνέπεια η μηχανική τους απόκριση, εξαρτώνται από το ύψος του νερού στο υπέδαφος, τον τύπο του υπεδάφους (κοκκομετρική διαβάθμιση, ορυκτολογική σύσταση), την υγρασία και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, Σχήμα 2.2.

2.1.2 Συμπυκνωμένα εδάφη

Τα συμπυκνωμένα εδάφη αποτελούνται από υλικά τεχνητής διαβάθμισης. Ο βαθμός κορεσμού αυτών των εδαφών είναι γενικά μικρότερος της μονάδας. Η μέγιστη πυκνότητα των συμπυκνωμένων εδαφών επιτυγχάνεται με κατάλληλο ποσοστό υγρασίας και ενέργεια συμπίκνωσης, Σχήμα 2.3.

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.2.1 ΜΥΖΗΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ

2.2.1.1 Μύζηση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διαφορά των ακόρεστων εδαφών από τα ξηρά και τα πλήρως κορεσμένα, αποδίδεται στην ταυτόχρονη παρουσία ύδατος και αέρα στα κενά του εδάφους και στην αλληλεπίδρασή τους. Η διαφορά μεταξύ των πιέσεων του ύδατος και του αέρα εντός του υπεδάφους ορίζεται ως μύζηση ($u_a - u_w$). Η μύζηση είναι στην ουσία η αντίσταση των ακόρεστων εδαφών στην επιπλέον μείωση του περιεχόμενου νερού στους πόρους τους.

Για καλύτερη κατανόηση των παραπάνω, αναλύεται το προσομοίωμα των Σχήματα 2.4 και 2.5. Τα εδάφη προσομοιώνονται με πλάκες απείρων διαστάσεων σε παράλληλη διάταξη με σταθερή απόσταση μεταξύ τους, d . Η στάθμη του ύδατος

συνδέεται αρχικά με την πίεση του αέρα. Στην περίπτωση αυτή η ισορροπία μεταξύ δύο διαδοχικών πλακών εκφράζεται από την Εξ.(1), ενώ η διαφορά πίεσης των δύο φάσεων από την Εξ.(2). Μετά την ταπείνωση της στάθμης του νερού στο τελικό ύψος, ισχύει για την ισορροπία δυνάμεων στο εναπομένον νερό η Εξ.(3).

$$2T_s \sin a = \Delta u (2R_s \cos a) \quad \text{Εξ.(1)}$$

$$\Delta u = (T_s/R_s) \quad \text{Εξ.(2)}$$

$$\Delta u = \gamma_w h_c \quad \text{Εξ.(3)}$$

Η Εξ.(4) συνδέει το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης του ύδατος με τη διεπιφάνεια μεταξύ του νερού και του αέρα και συγκεκριμένα την ακτίνα καμπυλότητας μεταξύ των δύο αυτών φάσεων. Η Εξ.(5) συνδέει την ακτίνα καμπυλότητας με την απόσταση μεταξύ των πλακών. Η Εξ.(6) ισχύει για το ύψος μέχρι το οποίο το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο. Ως συνέπεια της μύζησης, η πίεση του ύδατος πόρων στα ακόρεστα εδάφη είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με αυτήν του περιεχόμενου αέρα.

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

$$R_s = \frac{\frac{d}{2}}{\cos a} \quad \text{Εξ.(5)}$$

$$h_c = 2T_s \cos a / \gamma_w d \quad \text{Εξ.(6)}$$

Παρατηρείται πως η στάθμη της τριχοειδούς ανύψωσης είναι σταθερή καθώς εξαρτάται μόνο από το d. Εάν η απόσταση μεταξύ των πλακών δεν είναι σταθερή, τότε και το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης επίσης δεν είναι σταθερό (πολύ μεγάλη απόσταση πλακών->μηδενικό ύψος και αντίστροφα), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.

Το παραπάνω προσομοίωμα επιτρέπει τη θεωρητική κατανόηση λειτουργίας των πόρων των ακόρεστων εδαφών, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά το διαφορετικό μέγεθος κόκκων (που συχνά παρατηρείται στα φυσικά εδάφη) και που συνδέεται με το διαφορετικό μέγεθος πόρων. Σε εδάφη με πρακτικά ισομεγεθείς κόκκους, και κατά συνέπεια ίσο μέγεθος πόρων, στο μεσοδιάστημα μεταξύ της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της τριχοειδούς ανύψωσης, το έδαφος θεωρείται με βαθμό κορεσμού 100%. Μετά το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης αρχίζει η μη συγκέντρωση του μερικού νερού, Σχήμα 2.7α. Στη περίπτωση εδαφών με κοκκομετρική ποικιλομορφία, και διαφορετικό μέγεθος πόρων, και ενώ αρχικά στο

ύψος του υδροφόρου ορίζοντα το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο, πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα(μικρότεροι πόροι) οι πόροι διώχνουν το νερό, Σχήμα 2.7β. Η χαρακτηριστική καμπύλη προκύπτει από τη συσχέτιση του ποσοστού της παραμένουσας ποσότητας ύδατος με το ύψος πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7. Αποτελεί δε τη βάση της κατανόησης της συμπεριφοράς εδαφών σε ακόρεστη κατάσταση.

Ύστερα από την ανάλυση του παραπάνω προσομοιώματος, που φανερώνει τους λόγους για τους οποίους παρατηρείται νερό πάνω από τη Σ.Υ.Ο., παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Στο τμήμα της καμπύλης (η οποία ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη), με θετική πίεση ύδατος πόρων (κάτω από τη Σ.Υ.Ο.) η υγρασία, καθώς και τα θ και S_r δε μεταβάλλονται. Αντίθετα, στο τμήμα της καμπύλης με αρνητική πίεση (πάνω από τη Σ.Υ.Ο.) αναγνωρίζονται τα δύο σημεία καμπής Α και Β, που ορίζουν τις ζώνες I, II, και III :

α. Το σημείο Α, αποτελεί το όριο της ζώνης I και αντιστοιχεί στο ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης.

β. Το σημείο Β διαχωρίζει τις ζώνες II και III, και αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας.

Στην περιοχή I το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο ($S_r=100\%$) μέχρι το ύψος της Σ.Υ.Ο. και η πίεση του ύδατος πόρων έχει θετικές τιμές και κυμαίνεται από 0 έως $z\gamma_w$ (όπου z μετρά κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα). Στην ίδια περιοχή αλλά πάνω από τη Σ.Υ.Ο., το έδαφος εξακολουθεί να είναι σε κατάσταση πλήρους κορεσμού ($S_r=100\%$) καθ' όλο το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης, δηλαδή στο ύψος εκείνο που λόγω της αρνητικής πίεσης πόρων (μικρότερες τιμές από την ατμοσφαιρική πίεση), οι τελευταίοι καταλαμβάνονται μόνο από τα μόρια του νερού (και όχι του αέρα). Λόγω της αρνητικής πίεσης αέρα, η ενεργή τάση αυξάνεται και συνεπώς η διατμητική αντοχή του εδάφους αυξάνεται. Σε όλη την Περιοχή I το έδαφος έχει μόνο δύο φάσεις, τη στερεή και την υγρή, (η οποία είναι συνεχής).

Η Περιοχή II ορίζεται μεταξύ του ανώτερου σημείου της τριχοειδούς ανύψωσης (στους πόρους με το μικρότερο μέγεθος) και της πιέσεως διείσδυσης του περιεχόμενου αέρα (ορίζεται ως η απαιτούμενη πίεση αέρα για τη διείσδυση αέρα σε συνεχή μορφή). Σε όλη την Περιοχή II το έδαφος είναι μη κορεσμένο ($S_r<100\%$) και έχει τρεις φάσεις, τη στερεή, την υγρή και την αέρια, οι οποίες είναι συνεχής.

Σε αντίθεση με την Περιοχή Ι, εδώ δεν ισχύει η αρχή της ενεργούς τάσης. Σημειώνεται πως στο μεταβατικό σημείο (σημείο Α) μεταξύ των δύο περιοχών (Ι και ΙΙ) υπάρχει μια πολύμορφη περιοχή, όπου το έδαφος είναι μη κορεσμένο, και η αέρια φάση είναι με τη μορφή φυσαλίδων μέσα στην υγρή φάση.

Η Περιοχή ΙΙΙ εκτείνεται μετά το πέρας της Περιοχής ΙΙ και μέχρι το σημείο μηδενισμού της υγρασίας. Στην περιοχή αυτή η υγρή φάση είναι ασυνεχής και η αρχή των ενεργών τάσεων παύει να ισχύει.

2.2.1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού

Η σχέση μεταξύ της μύζησης και του βαθμού κορεσμού ή της υγρασίας εκφράζεται με τη χαρακτηριστική καμπύλη. Ονομάζεται και καμπύλη συγκράτησης νερού στο έδαφος και εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους (κοκκομετρία), το δείκτη πόρων, και τη φάση διάβροχης ή ξήρανσης του εδάφους. Η χαρακτηριστική καμπύλη επηρεάζει τη διαπερατότητα, την υδραυλική ροή, την αντοχή, την συμπιεστότητα αλλά και την αλληλεπίδραση των παραπάνω παραμέτρων. Σημειώνεται πως μια τιμή μύζησης μπορεί να αντιστοιχεί σε δύο ή και περισσότερους βαθμούς κορεσμού, και αυτό εξαρτάται από τους κύκλους ξήρανσης ή διαβροχής, καθώς και το δείκτη πόρων. Η εκτίμηση της χαρακτηριστικής καμπύλης με εργαστηριακές δοκιμές είναι δύσκολη και συγχρόνως υποχρεωτική διαδικασία.

(α) Σχήμα χαρακτηριστικής καμπύλης και ζώνες εδαφικής συμπεριφοράς

Ο βαθμός κορεσμού σε ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος, ισούται με τη μονάδα (100%). Με σταδιακή ξήρανση του εδάφους, ο βαθμός κορεσμού μειώνεται, και η μύζηση αυξάνεται. Συγκεκριμένα, το περιεχόμενο νερό συγκεντρώνεται στους μικρότερους εδαφικούς πόρους με συνέπεια την καμπυλότητα της διεπιφάνειας νερού και αέρα (αύξηση μύζησης). Η σχέση ανάμεσα στη μύζηση και στο βαθμό κορεσμού έχει τη μορφή ανάστροφης σιγμοειδούς καμπύλης στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα, Σχήμα 2.9.

Στο Σχήμα 2.9 παρατηρούνται τα 4 στάδια (1, 2, 3 και 4), κατά την διαδικασία της ξήρανσης του εδάφους. Το νερό των πόρων του εδάφους υπάρχει ως εξής:

α. ελεύθερο,

β. με τη μορφή μηνίσκων, και

γ. ως υδρατμοί

Ο αέρας των πόρων υπάρχει ως εξής:

α. ελεύθερος,

β. με τη μορφή φυσαλίδων, και

γ. διαλυμένος στο νερό.

(β) Εργαστηριακός προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης πραγματοποιείται σε συμπυκνωμένα, αναζυμωμένα ή αδιατάρακτα δοκίμια διαφόρων μεγεθών, στα οποία δεν έχει επιβληθεί κανενός είδους φόρτιση. Τα δοκίμια υποβάλλονται σε φάσεις διαβροχής και ξήρανσης, με σταδιακή μεταβολή της επιβαλλόμενης μύζησης και μέτρηση της εδαφικής υγρασίας και του εδαφικού όγκου. Τα αναζυμωμένα δοκίμια, καθώς είναι πλήρως κορεσμένα, υποβάλλονται αρχικά μόνο σε ξήρανση. Η δοκιμή είναι χρονοβόρα (με διάρκεια που μπορεί να φθάσει τους μερικούς μήνες), καθώς πρέπει να επέλθει ισορροπία μεταξύ της επιβαλλόμενης μύζησης στα όρια του δοκιμίου και της μετρηθείσας μύζησης στους εδαφικούς πόρους.

Οι περισσότεροι διαδεδομένες μέθοδοι προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι:

α. Η μέθοδος χάρτινου φίλτρου (filter paper)

β. Η μέθοδος ισορροπίας υδρατμών.

2.2.2 Η ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

2.2.2.1 Σημαντικότητα

Η μύζηση είναι βασική παράμετρος της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών τα οποία δεν έχουν πάντα την ίδια μηχανική συμπεριφορά συγκριτικά με τα πλήρως κορεσμένα εδάφη. Η μέτρηση της μύζησης είναι απαραίτητη για να αποφευχθούν καταστροφές. Οι πιο συχνές καταστροφές που παρατηρούνται είναι κατολισθήσεις και διάφορες μορφές κατάρρευσης κτηρίων και υποδομών. Όλες οι παραπάνω καταστροφές είναι αποτέλεσμα της μεταβολής της μύζησης η οποία προκαλεί μεταβολές στην αντοχή (αστοχία πρανών) και στον όγκο (προβλήματα διόγκωσης και συρρίκνωσης). Οι μεταβολές της μύζησης προκαλούν μεταβολές μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η διαπερατότητα, η οποία επηρεάζει την ανάλυση

ροής. Η διαπερατότητα είναι έμμεσο μέγεθος που επηρεάζει την αντοχή και τον όγκο.

2.2.2.2 Συνέπειες μύζησης

(α) Διατμητική αντοχή

Σύμφωνα με τους Fredlund et al. (1978) η αύξηση της μύζησης συνεπάγεται την αύξηση της διατμητικής αντοχής, όπως φαίνεται στην Εξ.(7).

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad \text{Εξ.(7)}$$

η ϕ_b αντιστοιχεί στην κλίση της ευθείας που περιγράφει την περιβάλλουσα αστοχίας στο επίπεδο τ-σ'. Οι παράμετροι ϕ' και ϕ_b εξαρτώνται από τη μύζηση και δεν είναι σταθερές.

Παρ' όλο που η Εξ.(7) παρουσιάζει την σχέση της διατμητικής αντοχής και μύζησης γραμμική, υπάρχουν και πειράματα που έδειξαν ότι ο ρυθμός αύξησης της αντοχής προσοδευτικά μειώνεται, Σχήμα 2.10.

Το μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας περιγράφει τη συσχέτιση τ-($u_a - u_w$) για τα λεπτόκκοκα εδάφη. Στα χονδρόκοκκα εδάφη η επίδραση της μύζησης στη διατμητική αντοχή είναι είτε θετική είτε αρνητική. Σε όλα τα εδάφη η διατμητική αντοχή αυξάνεται μέχρι να αποκτήσουν πίεση διείσδυσης αέρα με γωνία διατμητικής αντοχής του ίδιου εδάφους πλήρως κορεσμένο. Η μεγάλη αντοχή των εδαφών που αναλύονται είναι η αιτία, που δεν λαμβάνεται υπόψιν ο μερικός κορεσμός για λόγους ασφαλείας. Αυτή η απλοποίηση δεν είναι ορθή διότι υπάρχει ανάγκη για τη γνώση της παραμένουσας διατμητικής αντοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής, στη μελέτη των κατολισθήσεων.

(β) Μεταβολή όγκου

Με την αύξηση της μύζησης παρατηρείται μεταβολή του εδαφικού όγκου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση του εδαφικού όγκου και συνεπώς συρρίκνωση του εδάφους με την αύξηση των τιμών της μύζησης, ενώ η μείωση της μύζησης συνεπάγεται τη διόγκωση των εδαφών.

Μείωση της μύζησης

Με τη μείωση της μύζησης παρατηρείται αύξηση του βαθμού κορεσμού και συνεπώς διόγκωση των εδαφών η οποία οδηγεί στην κατάρρευση της δομής τους.

Εργαστηριακή μελέτη μιας χονδροκόκκης άμμου με μικρό ποσοστό υγρασίας υπό συμπίεση σε 50 KPa ανέπτυξε αρχικά μικρή μύζηση, η οποία μεταβλήθηκε ελάχιστα με την αύξηση της τάσης συμπίεσης. Ο υδρεμποτισμός του δοκιμίου που ακολούθησε, προκάλεσε μείωση της μύζησης, αύξηση του βαθμού κορεσμού (μέχρι τον πλήρως κορεσμένη κατάσταση) και κατάρρευση της εδαφικής δομής, Σχήμα 2.11 (Μπαρδάνης 2014)

Η κατάρρευση των εδαφών λόγω διόγκωσης έχει συνέπειες και στις κατασκευές όπως :

Στα κτήρια επιφανειακής θεμελίωσης που ο βαθμός κορεσμού του εδάφους μεταβάλλεται κατά την διάρκεια ζωής του έργου, λόγω καιρικών περιοδικών φαινομένων. Στην επιφάνεια του εδάφους οι διακυμάνσεις της υγρασίας και της μύζησης είναι πιο εμφανείς λόγω της ευκολότερης έκθεσης στα καιρικά φαινόμενα σε αντίθεση με μεγαλύτερα βάθη, Σχήμα 2.12. Το εδαφικό προφίλ που είναι μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και το βάθος που πλέον δεν επηρεάζεται από τα καιρικά φαινόμενα ονομάζεται ενεργός ζώνη.

Η λύση της θεμελίωσης με πασσάλους, αν και αντιοικονομική, θεωρείται η ασφαλέστερη ενάντια στην διόγκωση του εδάφους. Ωστόσο, η βαθιά πασσαλοθεμελίωση αντιμετωπίζει προβλήματα, διότι το έδαφος στην ζώνη διαβροχής διογκώνεται και υπόκειται ο πάσσαλος σε πλευρική πίεση με οριζόντιες τάσεις κοντά στην τάση διόγκωσης p_s . Οι τριβές αυτές είναι πολύ μεγαλύτερες από τις συνηθισμένες που ασκούνται στο κορμό του πασσάλου. Επιπλέον ασκούνται και κατακόρυφες τάσεις προς τα πάνω στον κεφαλόδεσμο. Η πλευρική πίεση και οι κατακόρυφες τάσεις έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της εφελκυστικής δύναμης στους πασσάλους, Σχήμα 2.13.

Αύξηση της μύζησης

Με αυξανόμενη μύζηση και συνεπώς μειούμενο ποσοστό υγρασίας στο έδαφος, παρατηρείται συρρίκνωση των εδαφών. Η βασικότερη αστοχία που παρατηρείται στις κατασκευές είναι στην θεμελίωση των κτηρίων. Κατά τους ξηρούς μήνες του χρόνου είναι πιθανή η ανάπτυξη διάκενων μεταξύ φρεατοπασσάλων και εδάφους, δηλαδή αποκόλληση στα ανώτερα τμήματα της εδαφικής τομής. Αυτό συμβαίνει όταν η κατασκευή της πασσαλοθεμελίωσης έλαβε χώρα την περίοδο βροχών. Το φαινόμενο της αποκόλλησης δεν παρουσιάζει πλευρικές τάσεις, όταν υπάρχει μεγάλη σεισμικότητα, αλλά αυτή δεν είναι η επιθυμητή κατάσταση, διότι δεν

υπάρχει αντίσταση από τους πασσάλους προς το έδαφος σε μικρά βάθη και θα πρέπει να μελετηθεί το ενδεχόμενο αυτό στον αντισεισμικό σχεδιασμό των θεμελιώσεων, Σχήμα 2.14.

Άλλο ένα εμφανές πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά την ξήρανση των ακόρεστων εδαφών τους καλοκαιρινούς μήνες είναι οι πιθανές κατολισθήσεις που οφείλονται στη μείωση της διατμητικής αντοχής λόγω της μείωσης της υγρασίας του εδάφους.

2.2.3 ΥΣΤΕΡΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ

Η υδραυλική υστέρηση είναι μια από τις βασικότερες ιδιότητες της χαρακτηριστικής καμπύλης και εκφράζεται από δύο καμπύλα τμήματα που περιγράφουν τη φάση ξήρανσης και διαβροχής του εδάφους, Σχήμα 2.15. Αν ένα κορεσμένο έδαφος ξηραθεί ή ένα ξηρό έδαφος υγρανθεί, η μορφή είναι η ίδια αλλά παρατηρείται ο βρόχος υστερήσεως. Αν σε ένα ενδιαμέσο σημείο της καμπύλης πραγματοποιηθεί π.χ. από συνεχή ξήρανση, ύγρανση, θα δημιουργηθούν μικροί βρόχοι. Το ίδιο θα συμβεί και στην αντίθετη περίπτωση. Ο βρόχος πραγματοποιείται λόγω της διαφοράς των μεγεθών των πόρων.

Στο Σχήμα 2.16α στην περίπτωση της ξήρανσης, υπάρχει ένα έδαφος που αρχικά έχει λεπτούς πόρους, στη συνέχεια λίγο παρακάτω είναι χοντροί και μετά ξανά λεπτοί. Αν υποθέσουμε ότι η πίεση των πόρων είναι μηδέν το δοχείο ισοσταθμεί στο σημείο Α. Αν κατεβάσω το δοχείο θα δημιουργηθεί μύζηση, γιατί το νερό προσπαθεί να κατέβει. Το νερό δεν θα υποβαθμιστεί μέχρι τη Σ.Υ.Ο. διότι υπάρχει και η τριχοειδούς ανύψωση. Άρα το νερό μέσα στο έδαφος θα παραμείνει υψηλότερα και θα έχει μύζηση. Συνεπώς θα υπάρχει μια στάθμη που το νερό θα φτάνει μέχρι το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης, κατά τη διάρκεια της ξήρανσης.

Στο Σχήμα 2.16β υπάρχει μια περίπτωση ύγρανσης. Το έδαφος αρχικά είναι ξηρό, βρίσκεται στην κατάσταση του σημείου Β και το ανεβάζω προς τα πάνω. Η στάθμη θα ανέβει πολύ λίγο διότι έχω μεγάλο μέγεθος πόρων. Αριστερά θα έχει διαφορετική στάθμη.

Η αιτία που σημειώνεται υδραυλική υστέρηση έχει σχέση με την ακτίνα καμπυλότητας των μηνίσκων που μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται και η ποσότητα νερού στα κενά των κόκκων του εδάφους, Σχήμα 2.17. Το Σχήμα 2.17 δείχνει ότι κατά το άδειασμα του νερού από τους πόρους οι μηνίσκοι σχηματίζουν

μικρή ακτίνα καμπυλότητας που αντιπροσωπεύει μεγάλη τιμή μύζησης, ενώ στην διαβροχή η διαδικασία αντιστρέφεται και η μύζηση έχει μικρή τιμή.

2.2.4 ΟΡΙΟ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗΣ

Κατά την διάρκεια της ξήρανσης ο όγκος ενός εδάφους μειώνεται όσο μειώνεται και ο βαθμός κορεσμού. Η συρρίκνωση του εδάφους εκφράζεται με την κλίση της καμπύλης συρρίκνωσης (μέτρο μύζησης συνάρτηση του ποσοστού υγρασίας(w)), Εξ.(8):

$$C_w(w) = de/dw \quad \text{Εξ.(8)}$$

με de : μεταβολή δείκτη πόρων και dw : μεταβολή ποσοστού υγρασίας. Σύμφωνα με την Εξ.(8) το μέτρο της μύζησης είναι η μεταβολή του δείκτη πόρων προς τη μεταβολή του ποσοστού υγρασίας.

Η καμπύλη συρρίκνωσης είναι το δεύτερο πιο σημαντικό στοιχείο για τα ακόρεστα εδάφη, Σχήμα 2.18. Εδάφη όπως οι άμμοι και οι ιλύες εκφράζονται από ευθεία καμπύλη συρρίκνωσης διότι δεν επηρεάζονται έντονα από την διαδικασία συρρίκνωσης, ενώ τα αργιλικά εδάφη επηρεάζονται και ο όγκος τους μειώνεται έντονα με την μείωση της υγρασίας, άρα η καμπύλη τους έχει μεγάλη κλίση. Η καμπύλη συρρίκνωσης βοηθά στην παραγωγή της Χ.Κ. μύζησης ως προς το ποσοστό υγρασίας ($w\%$) ή τον δείκτη πόρων (e).

Από τον προσδιορισμό της καμπύλης συρρίκνωσης υπολογίζεται και το όριο συρρίκνωσης. Το όριο συρρίκνωσης αποτελεί ένα από τα τρία όρια Atterberg. Τα όρια Atterberg είναι:

α. όριο υδαρότητας β. όριο πλαστικότητας και γ. όριο συρρίκνωσης.

Το όριο υδαρότητας είναι το υψηλότερο σημείο (Σημείο Α) της καμπύλης συρρίκνωσης. Αν ξεκινήσει ξήρανση το έδαφος φτάνει στο όριο πλαστικότητας (Σημείο Β). Το όριο πλαστικότητας συμβολίζει τη στιγμή που το νερό αρχίζει να μπαίνει μέσα στους πόρους του εδάφους, άρα μειώνεται ο βαθμός κορεσμού συνεπώς η καμπύλη συρρίκνωσης διαχωρίζεται από τη γραμμή $S_r=1$. Μετά το όριο πλαστικότητας ξεκινάει η μεταβολή του όγκου του εδάφους, άρα δεν μεταβάλλεται πλέον ο δείκτης πόρων και τελικά η διαδικασία ξήρανσης φτάνει στο όριο συρρίκνωσης (Σημείο Γ). Το όριο συρρίκνωσης είναι το ποσοστό της υγρασίας κάτω από το οποίο όταν συνεχίζεται η διαδικασία ξήρανσης του εδάφους δεν μειώνεται

άλλο ο όγκος. Στο όριο συρρίκνωσης παρατηρείται και ο ελάχιστος όγκος. Σύμφωνα με τη λογική της Χ.Κ. το όριο συρρίκνωσης αντιστοιχεί στην παραμένουσα κατάσταση.

Η καμπύλη συρρίκνωσης είναι πολύ σημαντική για τα διογκούμενα εδάφη, δείχνει πόσο διογκούμενο είναι ένα έδαφος. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των δεικτών πόρων μεταξύ των σημείων Β και Γ, τόσο πιο διογκούμενο είναι ένα έδαφος.

2.3 ΜΥΖΗΣΗ ΣΕ ΞΗΡΑ ΚΛΙΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η μύζηση των εδαφών επηρεάζεται και τους καλοκαιρινούς μήνες. Η μύζηση στην παραμένουσα ζώνη αποκτά μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τη μύζηση στην τριχοειδή ανύψωση ($s=\gamma_w z$), λόγω της ασυνέχειας της υγρής φάσης και επειδή η μύζηση εξαρτάται πλέον από την σχετική υγρασία του περιεχόμενου αέρα. Ο αέρας είναι συνεχής με της ατμόσφαιρα, συνεπώς ο αέρας της παραμένουσας ζώνης ανταλλάζει υγρασία με τον αέρα της ατμόσφαιρας. Άρα η υγρασία της ατμόσφαιρας επηρεάζει την υγρασία του εδάφους. Η ατμόσφαιρα περιέχει υδρατμούς, οι υδρατμοί αυτοί έχουν μια μερική πίεση. Η μερική πίεση μπορεί να φτάσει μέχρι τη πίεση ισορροπίας.

Πίεση υδρατμών πάνω από επίπεδη επιφάνεια νερού

Σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας η πίεση ισορροπίας ($P_{sat}=P_v^o$) των υδρατμών πάνω από επίπεδη επιφάνεια νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία (T), σύμφωνα με την Εξ.(9) (Clausius-Cloreyron):

$$P_v^o = c e^{\left(-\frac{L}{RT}\right)} \quad \text{Εξ. (9)}$$

με c: σταθερά ρευστού, L: ειδική ευθαλπία και R: σταθερά αερίων.

Εάν η πίεση των υδρατμών (P_v) είναι μικρότερη της πίεσης ισορροπίας (P_v^o) τότε συμβαίνει εξάτμιση με ρυθμό που εξαρτάται από την διαφορά και την διατιθέμενη ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση.

Πίεση υδρατμών πάνω από καμπύλη επιφάνεια νερού

Στην περίπτωση καμπύλης διεπιφάνειας μεταξύ νερού και αέρα, η πίεση ισορροπίας των υδρατμών (P_v^c) είναι μικρότερη από τη πίεση ισορροπίας των υδρατμών σε επίπεδη επιφάνεια (P_v^o) και δίνεται από την Εξ.(10) (Kelvin):

$$P_v^c = P_v^o e^{\left(-\frac{2T_s V_m}{RrT}\right)} \quad \text{Εξ. (10)}$$

με T_s : επιφανειακή τάση (δύναμη/μ) μεταξύ κόκκων και επιφάνειας του νερού των πόρων, V_m : μοριακός όγκος των υδρατμών (=0.018 lt/mol), r : ακτίνα της καμπύλης διεπιφάνειας, R : παγκόσμια σταθερά αερίων=8,134 Nm/mol^oK και T : θερμοκρασία (°K).

Η επιφανειακή τάση σχετίζεται με τη μύζηση με την Εξ.(11):

$$s = 2T_s/r \quad \text{Εξ. (11)}$$

η οποία αντιπροσωπεύει την ισορροπία δυνάμεων σε τριχοειδή φαινόμενα. Ο συνδυασμός των Εξ.(10) και (11) δίνει τη μύζηση παραμένουσας ζώνης που αντιστοιχεί σε δεδομένη σχετική υγρασία στον αέρα των πόρων, Εξ.(12):

$$s = \left(\frac{RT}{V_m}\right) \ln \left(\frac{P_v^o}{P_v^c}\right) = -\left(\frac{RT}{V_m}\right) \ln (RH) \quad \text{Εξ. (12)}$$

με $RH = P_v^c/P_v^o$: σχετική υγρασία.

Βασικές πληροφορίες για την έρευνα στην παραμένουσα κατάσταση δίνει και η παραμένουσα διατμητική αντοχή μέσω της εργασίας του Skempton (1964). Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης που δείχνουν την ενεργοποίηση διατμητικής αντοχής σε παραμορφώσεις μεγαλύτερες από αυτήν που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τον ορισμό και τον προσδιορισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής που αποτελεί την ελάχιστη αντοχή του εδάφους (χωρίς δηλαδή περαιτέρω μεταβολή της με την αύξηση της παραμόρφωσης). Η παραμένουσα διατμητική αντοχή οφείλεται αποκλειστικά σε φαινόμενα τριβής μεταξύ των κόκκων, δηλαδή η συνοχή $c_r=0$, και συνεπώς εκφράζεται από την Εξ.(13):

$$\tau_r = \sigma'_n \tan \phi'_r \quad \text{Εξ. (13)}$$

όπου τ_r είναι η παραμένουσα αντοχή, σ'_n είναι η ενεργός ορθή τάση στην επιφάνεια διάτμησης και ϕ'_r η γωνία τριβής στην παραμένουσα κατάσταση.

Η γνώση της γωνίας εσωτερικής τριβής στην παραμένουσα κατάσταση είναι απαραίτητη για την λύση των κατολισθήσεων. Συγκεκριμένα στις κατολισθήσεις που ενεργοποιήθηκαν στο παρελθόν, έχει δημιουργήσει μια επιφάνεια διάτμησης η οποία χαρακτηρίζεται από την παραμένουσα αντοχή εξαιτίας των μεγάλων

διατμητικών παραμορφώσεων. Η γωνιά παραμένουσας διατμητικής αντοχής υπολογίζεται από αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας αντί για εργαστηριακές δοκιμές.

2.4 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ

(α) Συνιστώσες μύζησης

Η μύζηση διαχωρίζεται σε τρεις συνιστώσες:

Μύζηση εδαφικού σκελετού

Το φαινόμενο της τριχοειδούς ανύψωσης είναι συνυφασμένο με την εκδήλωση αρνητικής πίεσης στους εδαφικούς πόρους, γνωστή και μύζηση εδαφικού σκελετού. Η τελευταία εκφράζει την τάση που έχει ένα μόριο νερού της υγρής φάσης στο έδαφος που δεν επιτρέπει την αποβολή νερού από τους εδαφικούς πόρους. Η μύζηση εδαφικού σκελετού είναι πολύ σημαντική στην τριχοειδή και την μεταβατική ζώνη ($S_r > 50\%$) και φθάνει σε τιμές έως 1-1.5 MPa. Στην παραμένουσα ζώνη σημαντική είναι η ωσμωτική μύζηση.

Ωσμωτική μύζηση

Η ωσμωτική μύζηση οφείλεται στα ωσμωτικά φαινόμενα που παράγουν αρνητική πίεση πόρων, η οποία εκφράζει τη διαφορά πίεσης των υδρατμών του αέρα που περιέχεται στους εδαφικούς πόρους και του αέρα που βρίσκεται διαλυμένος στο νερό που περιέχεται στους εδαφικούς πόρους και περιέχει κατιόντα και άλατα. Προϋπόθεση ανάπτυξης της ωσμωτικής μύζησης είναι η συνέχεια της αέριας φάσης των πόρων. Η ωσμωτική μύζηση αναπτύσσεται στην παραμένουσα και μεταβατική ζώνη ($S_r < 50\%$). Η ωσμωτική μύζηση αυξάνεται όσο αυξάνει η περιεκτικότητα των κατιόντων στο νερό των πόρων. Η ωσμωτική πίεση στην μεταβατική ζώνη είναι μικρότερη (300-400 Kpa) σε σχέση με την παραμένουσα ζώνη (έως 1000 MPa).

Ολική μύζηση

Ο συνδυασμός των παραπάνω φαινομένων έχει ως αποτέλεσμα την ολική μύζηση, η οποία εκφράζεται μέσω της Εξ.(14) ως το άθροισμα της ωσμωτικής και της μύζησης του εδαφικού σκελετού:

$$s = \left(\frac{RT}{V_m}\right) \ln \left(\frac{P_v^o}{P_v^c}\right) = \left(\frac{RT}{V_m}\right) \ln \left(\frac{P_v^o}{P_{v(no\ salt)}}\right) + \left(\frac{RT}{V_m}\right) \ln \left(\frac{P_{v(no\ salt)}}{P_v}\right) \quad \text{Εξ. (14)}$$

Στην παραμένουσα ζώνη, η συνολική μύζηση καθορίζεται κυρίως από τη τάση για εξάτμιση προς την επιφάνεια και τις μερικές πιέσεις του διαλυμένου αέρα στους πόρους. Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει παραμένουσα ζώνη (μικρό βάθος Υ.Ο.), η συνολική μύζηση είναι κυρίως η μύζηση εδαφικού σκελετού.

(β) Μηχανισμοί τροφοδοσίας νερού στην ακόρεστη ζώνη

Ένα ποσοστό του νερού που κατακρημνύται στο έδαφος λόγω των καιρικών συνθηκών διηθείται μέσα σε αυτό. Μέρος του διηθούμενου ύδατος εισχωρεί σε βαθύτερα στρώματα και τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφορείς. Η παρουσία ύδατος στις εδαφικές στρώσεις δημιουργεί σε αυτές ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη. Τα επιφανειακά στρώματα είναι συνήθως στην ακόρεστη ζώνη. Η παρουσία φυτικής γης στα στρώματα αυτά διευκολύνει μέσω των φυτικών ριζών τη διήθηση του ύδατος στα βαθύτερα στρώματα.

Οι μηχανισμοί τροφοδοσίας νερού είναι τρεις, Σχήμα 2.19:

Κατείδυση ομβρίων και τριχοειδής ανύψωση

Είναι η ροή νερού προς την ακόρεστη ζώνη. Οφείλεται στην διαφορά πίεσης του νερού στην επιφάνεια ($u_w > 0$) και του νερού των πόρων ($u_w < 0$). Οι δύο μηχανισμοί ελέγχονται από τους νόμους ροής και την διαπερατότητα του εδάφους.

Η μύζηση λόγω των μηχανισμών αυτών είναι κυρίως μύζηση εδαφικού σκελετού. Αναπτύσσεται στις ζώνες που το νερό είναι συνεχές, στην τριχοειδή και την μεταβατική. Η μύζηση που αναπτύσσεται εξαιτίας των μηχανισμών αυτών σε ισορροπία έχει γραμμική αύξηση με τη στάθμη μέσω της Εξ. (15) για $z < 0$:

$$u_w = \gamma_w z \quad \text{Εξ. (15)}$$

Εξάτμιση

Η εξάτμιση οφείλεται στην διαφορά πίεσης των υδρατμών της ατμόσφαιρας ($P_v > 0$) και των υδρατμών και προσροφημένου νερού εντός των πόρων ($P_v < 0$). Ο μηχανισμός της εξάτμισης ελέγχεται από τους νόμους διάχυσης των υδρατμών και αναπτύσσεται στην παραμένουσα ζώνη του εδάφους (σε ξηρά κλίματα).

Η μύζηση του νερού των πόρων στον συγκεκριμένο μηχανισμό είναι κυρίως ωσμωτική μύζηση, αναπτύσσεται στην παραμένουσα ζώνη, με ασυνεχές νερό πόρων και είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μύζηση εδαφικού σκελετού.

2.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

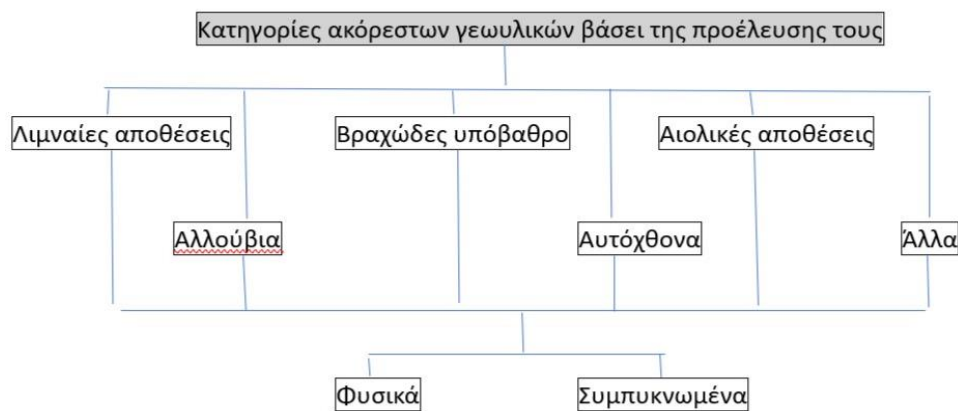
Η μεταβολή της μύζησης επηρεάζει τον εδαφικό όγκο την αντοχή και την διαπερατότητα. Η μεταβολή της μύζησης εξαρτάται από:

α. το είδος του εδάφους

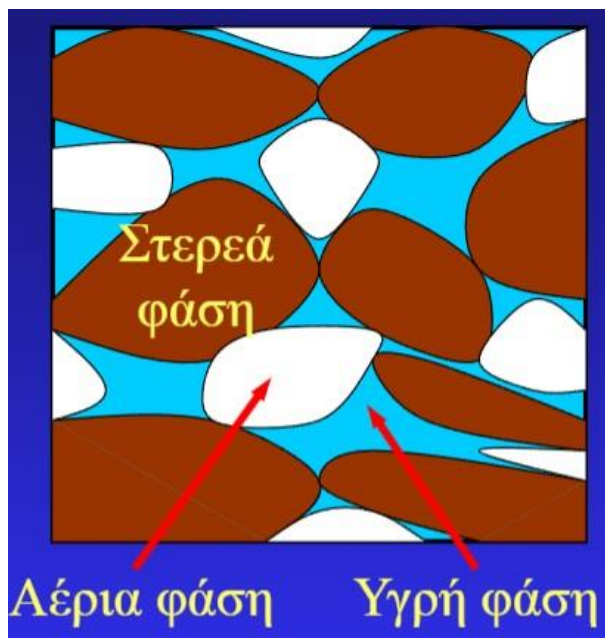
οι μεταβολές είναι έντονες σε αργιλικά εδάφη που περιέχουν διογκούμενα ορυκτά (π.χ. μοντμοριλλονίτη). Τα διογκούμενα υλικά συναντώνται σε πολλές περιοχές παγκοσμίως. Στην Ελλάδα υπάρχουν κυρίως στα νησιά του Αιγαίου με ηφαιστειακά υλικά που περιέχουν διογκούμενα ορυκτά (Λέσβος), αλλά και στο εξωτερικό (π.χ. Κύπρος)

β. τις οριακές υδραυλικές συνθήκες (βροχόπτωση, εξάτμιση, άνοδος Σ.Υ.Ο.) που επηρεάζουν τον απαιτούμενο χρόνο για τη μεταβολή της μύζησης, δηλαδή την ροή της ακόρεστης ζώνης. Τα φαινόμενα βροχοπτώσεων, εξάτμισης και ανόδου Σ.Υ.Ο. είναι χρονικός μεταβαλλόμενα. Η διάρκεια και η ένταση των φαινομένων αυτών επηρεάζουν τη μεταβολή της μύζησης.

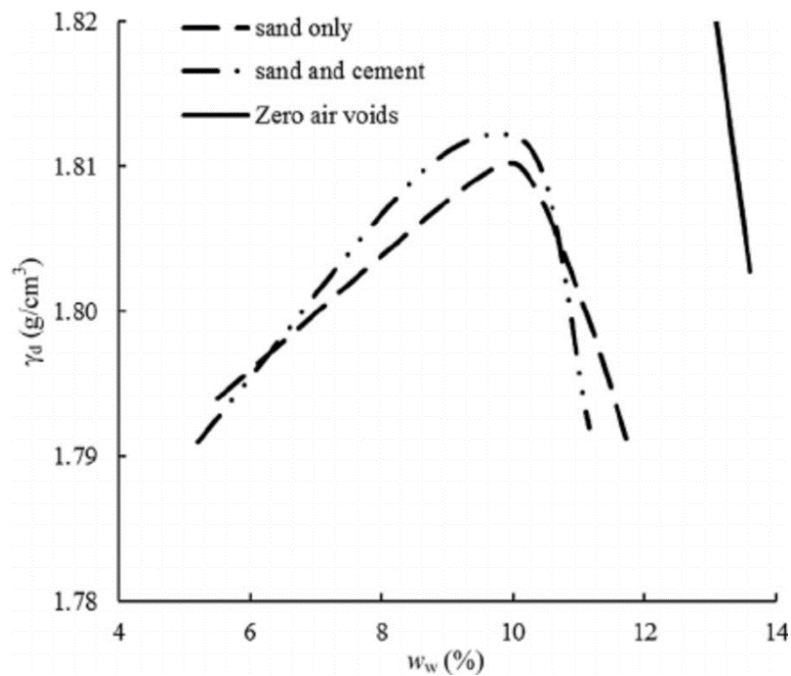
Όλα αυτά επηρεάζουν τη ροή στην ακόρεστη ζώνη συνεπώς επηρεάζουν την διατμητική αντοχή και τον όγκο.



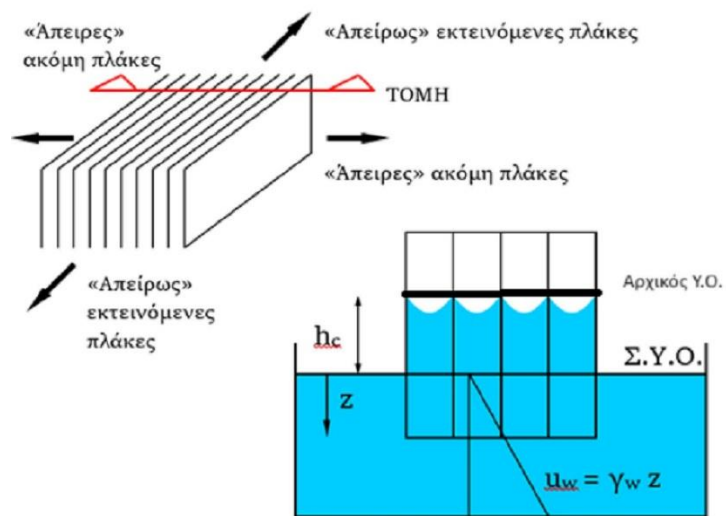
Σχήμα 2.1 : Κατηγορίες ακόρεστων γεωυλικών βάσει της γεωυλικής τους προέλευσης. (Fedlund, 1993)



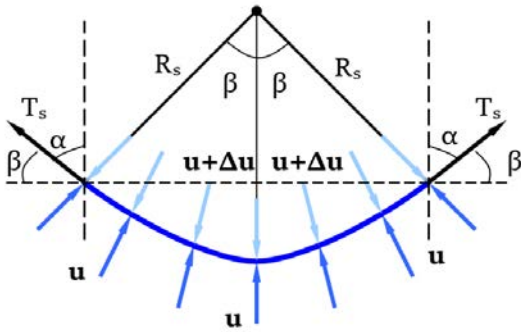
Σχήμα 2.2 : Οι τρεις φάσεις (στερεή, υγρή, αέρια) σε ακόρεστο έδαφος (Μ. Φεγιάς, 2022)



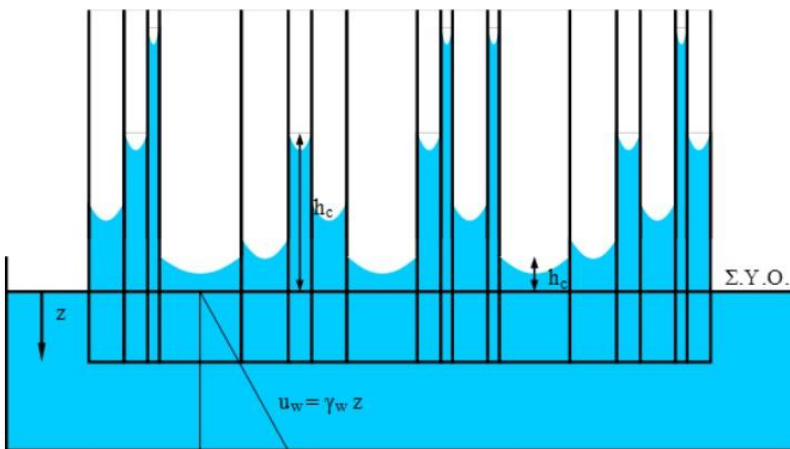
Σχήμα 2.3 : Δοκιμή Proctor (Sum Hashemi, 2015)



Σχήμα 2.4 : Στάθμη ύδατος και τριχοειδούς ανύψωσης σε προσομοίωμα. (Μπαρδάνης, 2019)



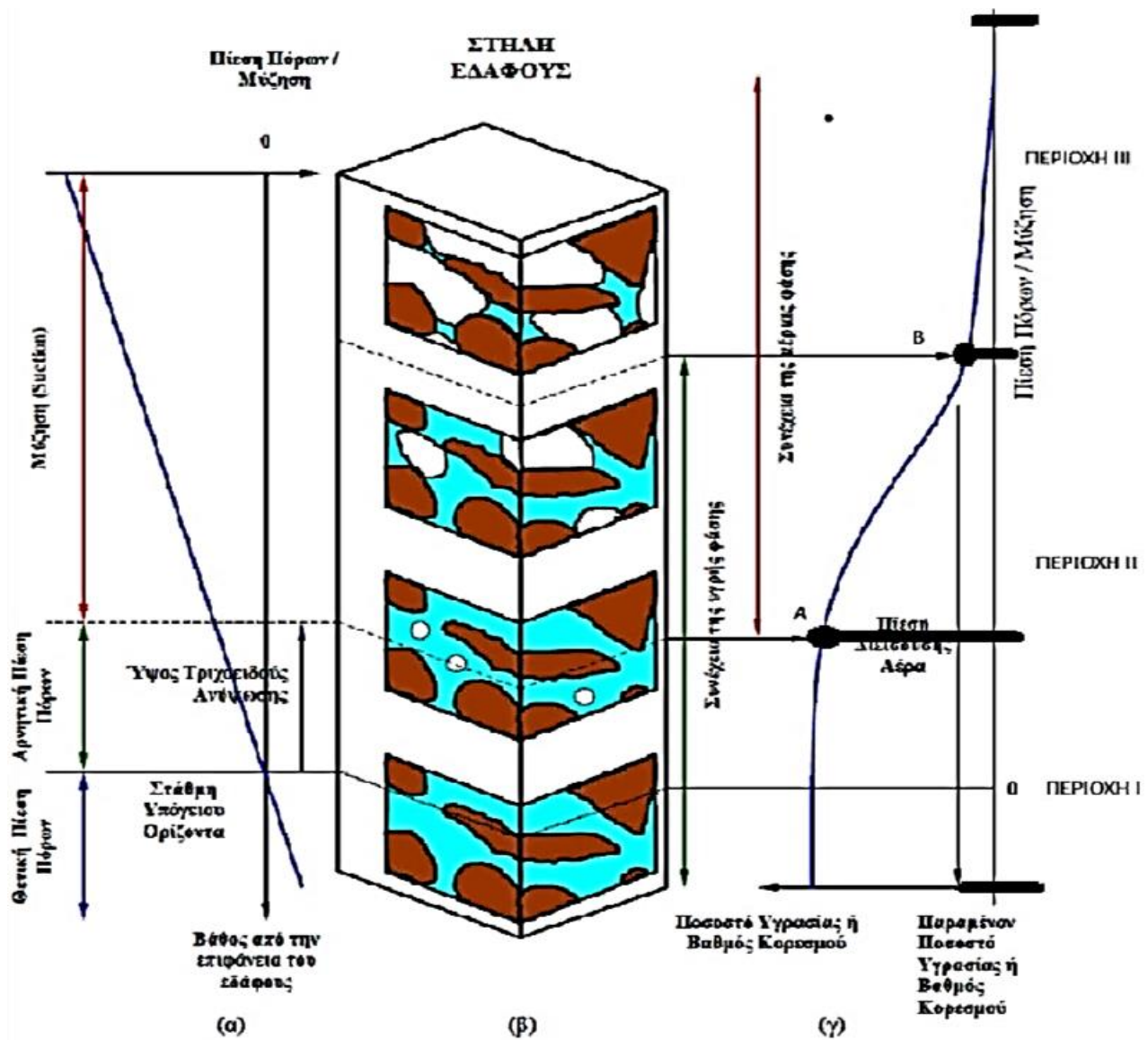
Σχήμα 2.5 : Διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων (υγρής και αέριας). (Μπαρδάνης, 2019)



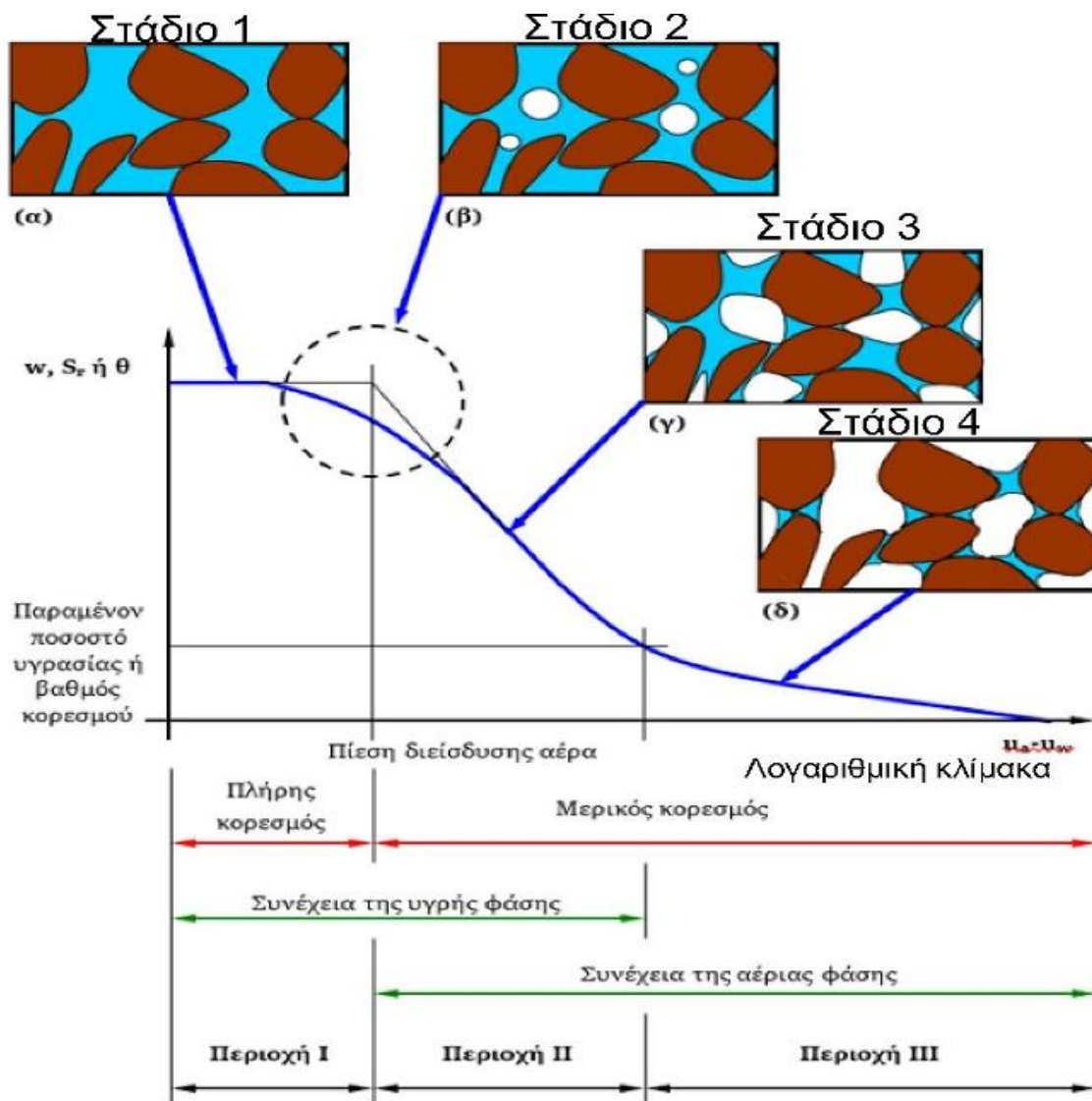
Σχήμα 2.6 : Προσομοίωμα από απειρομήκειες πλάκες με διάφορες αποστάσεις μεταξύ τους. (Μπαρδάνης, 2019)



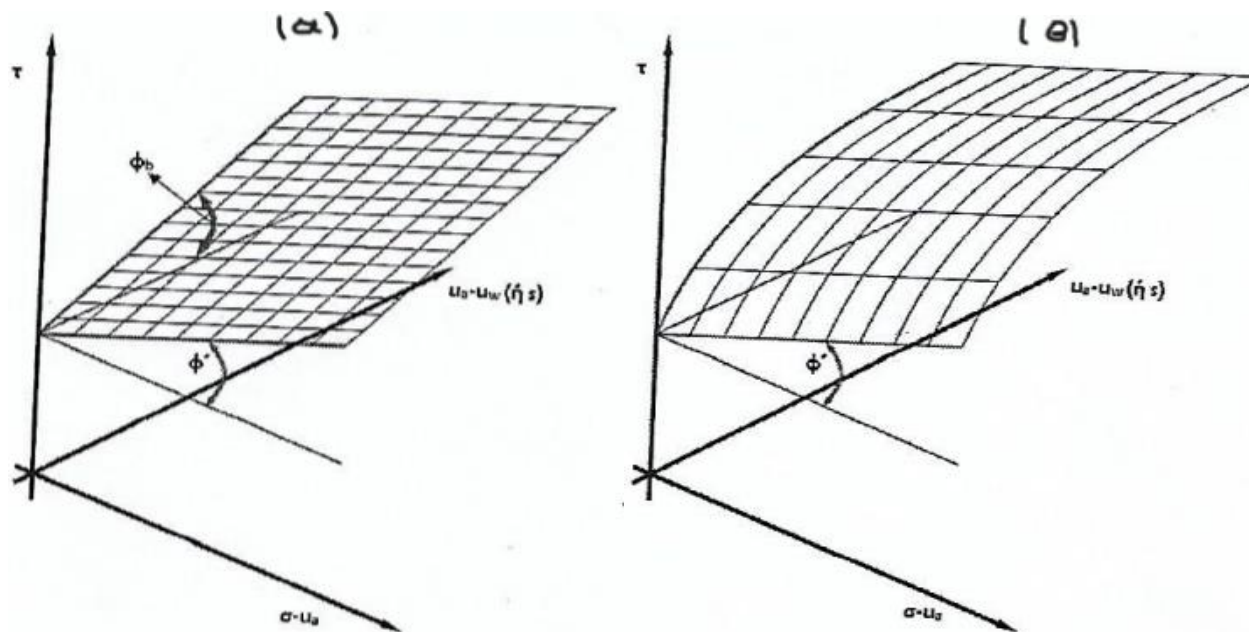
Σχήμα 2.7 : Μεταβολή της ποσότητας ύδατος με το ύψος ύδατος πάνω από τη Σ.Υ.Ο. για το προσομοίωμα με σταθερή απόσταση μεταξύ των πλακών(α) και με μεταβαλλόμενη απόσταση (β). (Μπαρδάνης, 2019)



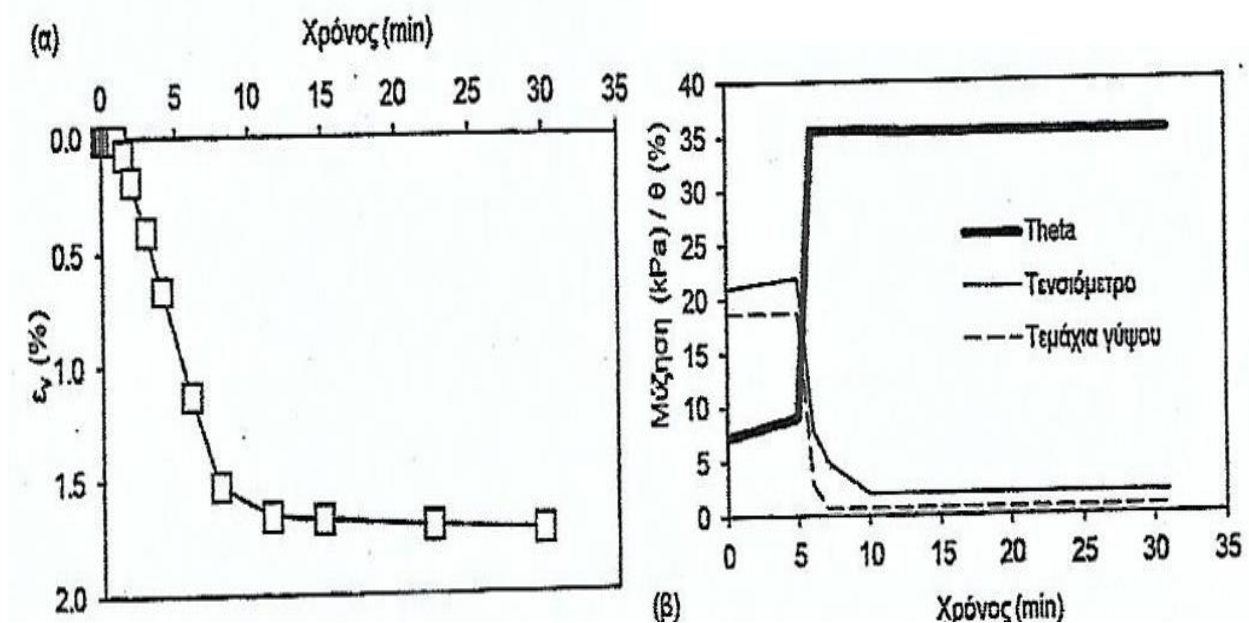
Σχήμα 2.8 : Κατανομή της πίεσης του ύδατος των πόρων (α), των φάσεων (στερεή, υγρή και αέρια) (β), και της υγρασίας και του βαθμού κορεσμού (γ) του εδάφους με το βάθος. (Μ. Φεγιάς, 2022)



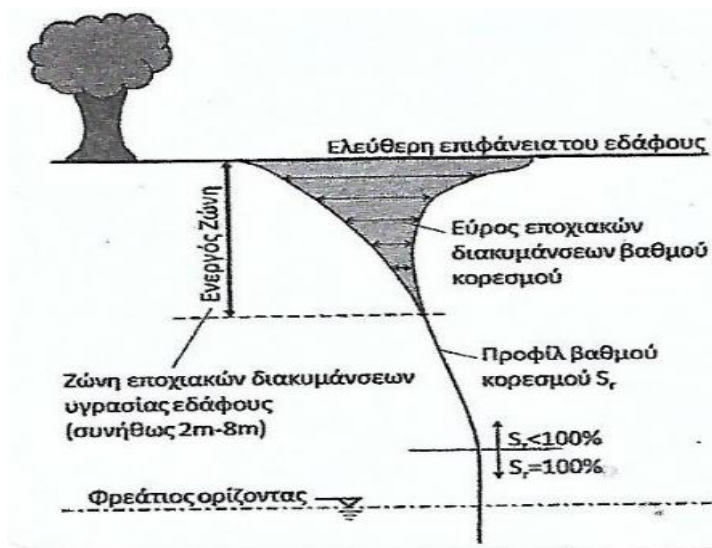
Σχήμα 2.9 : Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. (Μ. Φεγιάς, 2022)



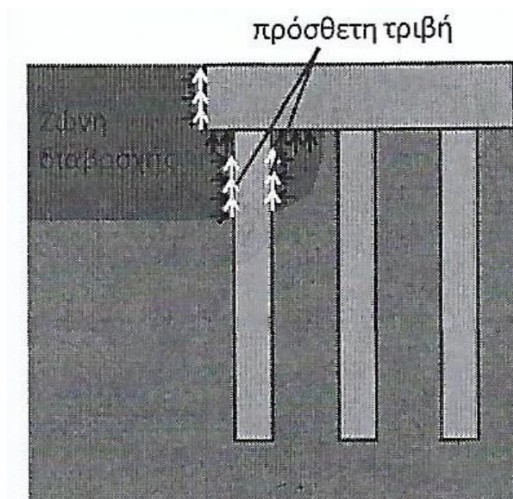
Σχήμα 2.10 : Περιβάλλουσα αστοχίας ακόρεστων εδαφών κατά το κριτήριο Mohr-Coulomb (α) και το μη γραμμικό κριτήριο (β). (Μπαρδάνης, 2019)



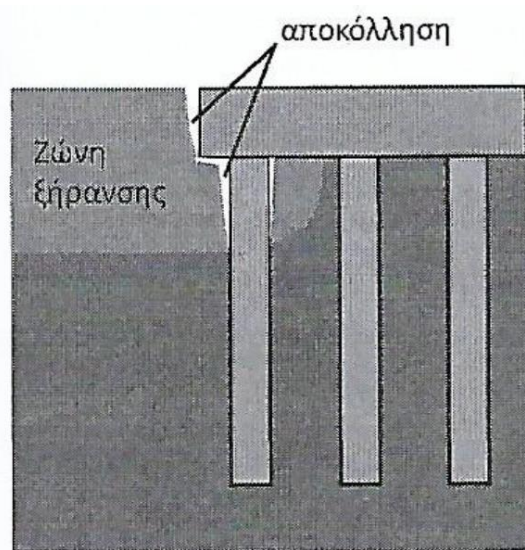
Σχήμα 2.11 : α) Χρονική μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης λόγω υδρεμποτισμού σε χονδρόκοκη άμμο και β) της μύζησης. (Χατζηγώγος, 2019)



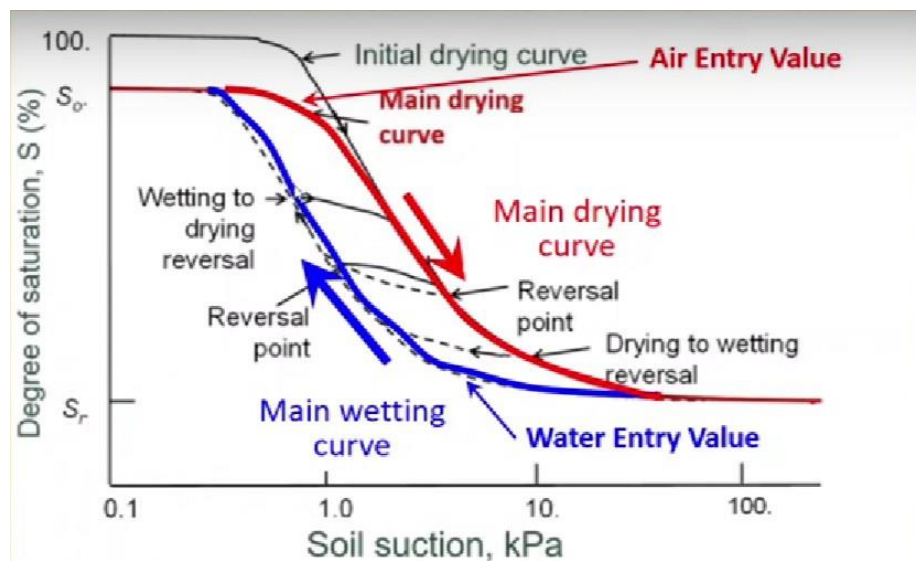
Σχήμα 2.12 : Βαθμός κορεσμού και ενεργός ζώνη (Λουκίδης, 2019)



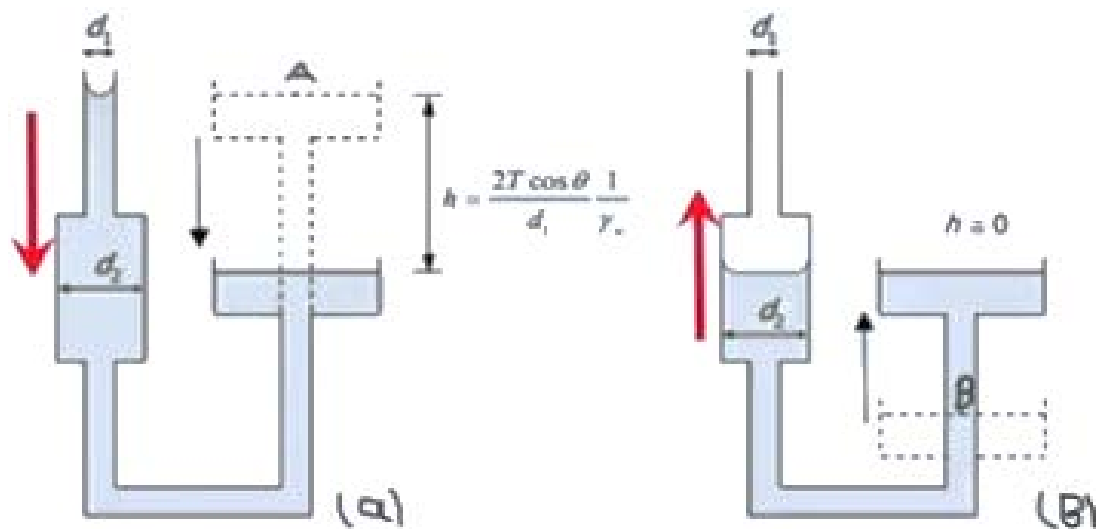
Σχήμα 2.13 : Επίδραση μεταβολών όγκου (διόγκωση) εδάφους στις πασσαλοθεμελιώσεις. (Λουκίδης, 2019)



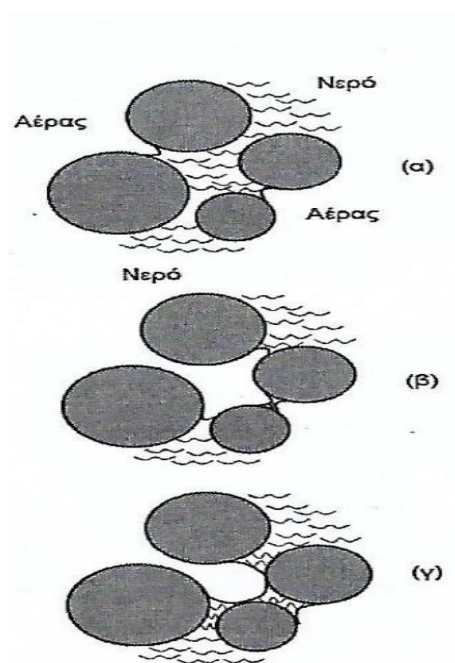
Σχήμα 2.14 : Επίδραση μεταβολών όγκου (συρρίκνωση) εδάφους στις πασσαλοθεμελιώσεις. (Λουκίδης, 2019)



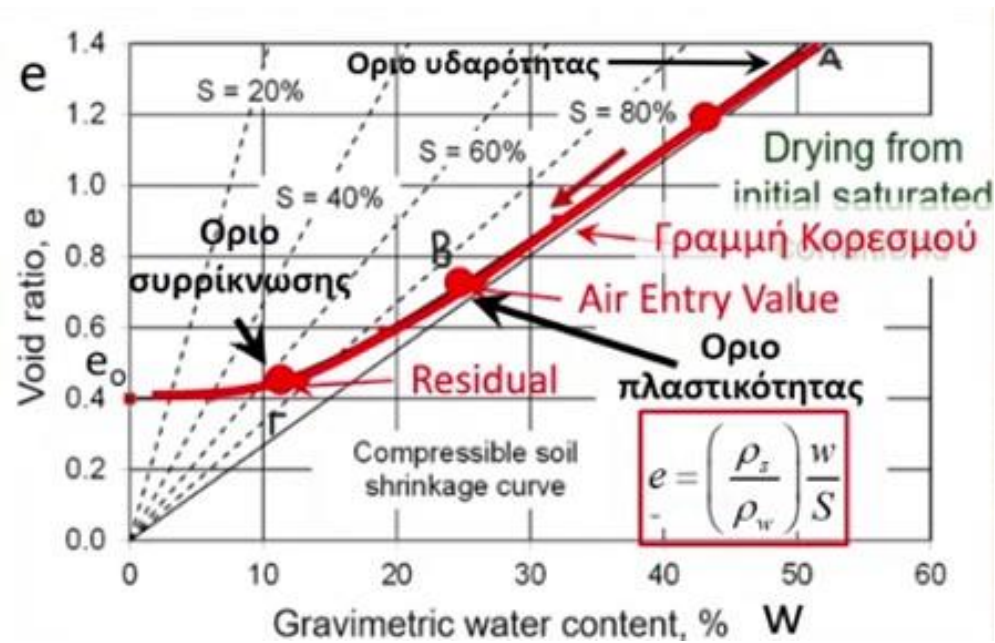
Σχήμα 2.15 : Υδραυλική υστέρηση χαρακτηριστικής καμπύλης (Μ.Καββαδάς, 2021)



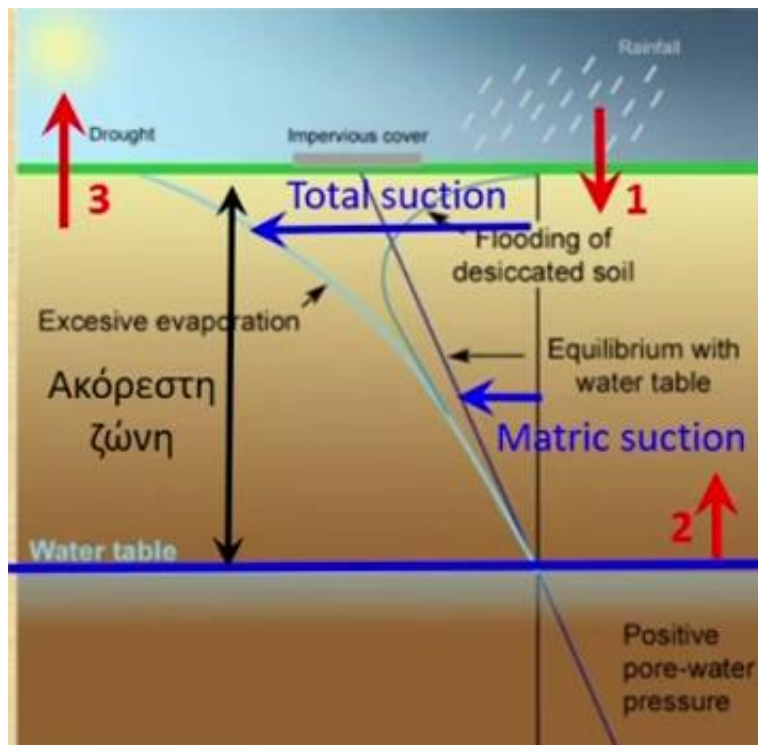
Σχήμα 2.16 : Παράδειγμα (α)ξήρανσης και (β) διαβροχής εδάφους (Μ.Καββαδάς, 2021)



Σχήμα 2.17 : Σχηματική εξήγηση υδραυλικής υστέρησης χαρακτηριστικής καμπύλης (Τσιαμπούση, 2019).



Σχήμα 2.18 : Καμπύλη συρρίκνωσης (Μ.Καββαδάς, 2021)



Σχήμα 2.19 : Ζώνες κορεσμού εδάφους (Μ.Καββαδάς, 2021)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ

Η παρουσία ακόρεστων εδαφών στο περιβάλλον έχει επιβάλει τον προσδιορισμό της μύζησης. Σπανίως η μύζηση προσδιορίζεται με επιτόπου μεθόδους. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι επιτόπου και οι εργαστηριακές μέθοδοι προσδιορισμού της μύζησης και της χαρακτηριστικής καμπύλης. Με τη πάροδο του χρόνου οι μέθοδοι της μέτρησης της μύζησης αλλάζουν σύμφωνα με την τεχνολογία που διατίθεται. Ο προσδιορισμός της Χ.Κ. γίνεται μέσω εμπειρικών σχέσεων με τη βοήθεια των μεθόδων μέτρησης της μύζησης.

3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΥΖΗΣΗΣ

Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφοροι τρόποι μέτρησης της μύζησης μέσω μεθόδων και διάφορων οργάνων, Πίνακας 3.1. Οι μέθοδοι προσδιορισμού της μύζησης διαχωρίζονται σε έμμεσες και άμεσες, Πίνακα 3.2. Οι μέθοδοι άμεσης μέτρησης υπολογίζουν τη μύζηση απευθείας όπως την θετική πίεση, ενώ στις μεθόδους έμμεσης μέτρησης, αρχικά γίνεται μέτρηση άλλου φυσικού μεγέθους που συσχετίζεται με την μύζηση και ύστερα με βάση αυτό γίνεται ο υπολογισμός της μύζησης.

Η κατηγορία Α και η κατηγορία Β του Πίνακα 3.2 κατατάσσονται στις έμμεσες μεθόδους με μια εξαίρεση στη μέθοδο μετατόπισης άξονα διότι δεν είναι ξεκάθαρα τα κριτήρια κατάταξης της στις έμμεσες μεθόδους. Στη κατηγορία Γ του Πίνακα 3.2 καταγράφονται οι άμεσες μέθοδοι μέτρησης μύζησης. Τα βασικότερα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι ο τύπος της μύζησης, το παραγόμενο αποτελέσματα και ο απαιτούμενος χρόνος. Τα κριτήρια βοηθούν στην επιλογή μεθόδου που ακολουθείται σε κάθε μελέτη. Σε κάθε μελέτη λαμβάνονται υπόψιν και το κόστος, τα όργανα που απαιτούνται και η αξιοπιστία της κάθε μεθόδου πριν την επιλογή. Τα διάφορα είδη της μύζησης διακρίνονται από κάποια χαρακτηριστικά στους Πίνακες 3.3 και 3.4.

3.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΥΖΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ – ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΥΖΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΑΞΟΝΑ (AXIS TRANSLATION TECHNIQUE)

Η μέθοδος μετατόπισης άξονα είναι αποτέλεσμα του προσδιορισμού της μύζησης με μεμβράνη ή πορόλιθο (κεραμικό υλικό) και είναι η πρώτη μέθοδος προσδιορισμού της μύζησης που δημιουργήθηκε. Η μέθοδος μετατόπισης άξονα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μύζησης των εδαφών στο εργαστήριο. Για την εφαρμογή της μεθόδου μεμβράνης, για τον προσδιορισμό της μύζησης χρειάζεται μια μεμβράνη ή ένας κεραμικός δίσκος, ένα δοχείο ύδατος κάτω από τη μεμβράνη ή τον κεραμικό δίσκο και έναν μετρητή για τον υπολογισμό της πίεσης ύδατος, Σχήμα 3.1.

Η πίεση μπορεί να υπολογισθεί με ένα μανόμετρο υδραργύρου, ένα μετρητή υποπίεσης, ένα μορφοτροπέας ή αν πρόκειται για ελάχιστη μύζηση και με μία βαθμονομημένη μπιρέτα, που υπολογίζει τη μεταβολή της στάθμης του ύδατος στο εσωτερικό της, σε σύγκριση με τη στάθμη του δοκιμίου επί της μεμβράνης ή του κεραμικού δίσκου, Σχήμα 3.1.

Το δοχείο με το υγρό δημιουργείται βάζοντας μια πλαστική μεμβράνη, μεγάλης αντοχής, γύρω από τον κεραμικό δίσκο και με την σταθεροποίηση της μεμβράνης με κάποιον σφικτήρα ή τοποθετώντας τον κεραμικό δίσκο (σταθερά και στεγανά) πάνω από μεταλλική βάση.

Η μεμβράνη ή ο πορόλιθος είναι επίπεδα για να υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης ενός εδαφικού δείγματος πάνω σε αυτό, και το υλικό κατασκευής τους συνήθως έχει πίεση διείσδυσης αέρα 100 kPa, διότι με υψηλότερη τιμή δεν θα υπήρχε νόημα. Ο όγκος του ύδατος είναι τόσο μεγάλος που ένα δοκίμιο εδαφικού υλικού με μετρούμενη μύζηση μεγαλύτερη από τη πίεση διείσδυσης αέρα θα δημιουργούσε φαινόμενη σπηλαίωση. Συνεπώς η μέθοδος περιορίζεται στο προσδιορισμό της μύζησης έως τα 100 Kpa (85-90 Kpa).

Η μέθοδος μετατόπισης άξονα αναπτύχθηκε από την μέθοδο μεμβράνης, από τον Hilf J.W. για να λυθεί το θέμα της φαινόμενης σπηλαίωσης των εδαφών σε χαμηλή πίεση πόρων. Το δοκίμιο και το πορώδες άκρο τοποθετούνται μέσα σε ένα αεροστεγώς κλεισμένο θάλαμο. Ο θάλαμος έχει αέρα υπό πίεση και παρέχει

επικοινωνία του ύδατος με το εξωτερικό του θαλάμου, όπου τοποθετείται κάποιο όργανο προσδιορισμού της πίεσης, Σχήμα 3.2.

Όταν ο θάλαμος έχει κλείσει αεροστεγώς με το πορώδες άκρο να έχει κορεστεί πλήρως και το δοχείο του ύδατος να είναι πλήρες απαερωμένου και απεσταγμένου νερού, ξεκινάει η εφαρμογή αέρα υπό πίεση. Η πίεση που ασκεί ο αέρας των πόρων είναι ισάξια μεταξύ των φάσεων (υγρή και αέρια) των εδαφικών πόρων, και στο υγρό του δοχείου. Τελικά η πίεση του αέρα των πόρων από μηδενική, αυξάνεται μέχρι τη τιμή της πίεσης που εφαρμόζεται εντός του θαλάμου, και η πίεση του ύδατος των πόρων από αρνητική αυξάνεται, ανάλογα με την πίεση αέρα εντός του θαλάμου. Εάν η πίεση του αέρα εντός του θαλάμου είναι αρκετή ώστε η αρχική αρνητική τιμή της πίεσης του ύδατος των πόρων γίνει θετική ή μηδενική και ισούται με την πίεση του υγρού στο δοχείο, τότε μπορεί να υπολογισθεί με συμβατικά μέσα (ένα μανόμετρο ή έναν μορφοτροπέα μέτρησης θετικής πίεσης). Τελικά η μύζηση υπολογίζεται ως η διαφορά της πίεσης του αέρα εντός θαλάμου και της ήδη υπολογισμένης πίεσης του νερού, Σχήμα 3.3.

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται τοποθετούνται σε κλίβανο πολύ υψηλής θερμοκρασίας για να έχουν τις σωστές ιδιότητες πριν αξιοποιηθούν. Οι ιδανικές ιδιότητες είναι:

α. η μεγάλη πίεση διείσδυσης αέρα

β. η σκληρότητα και η ανθεκτικότητα για την εύκολη επεξεργασία και χρήση των μεμβρανών.

Απαραίτητο προϋπόθεση για τη χρήση της μεθόδου για τον προσδιορισμό της μύζησης, είναι η μικρή συμπιεστότητα του εδαφικού υλικού.

Οι περισσότερες συσκευές (θάλαμοι) προσδιορισμού της μύζησης με την συγκεκριμένη μέθοδο έχει 4 εξόδους ύδατος, γι' αυτό μπορεί να δεχτεί τέσσερις κεραμικούς δίσκους, άρα πιο πολλά δοκίμια. Επιπλέον στο σημείο εισαγωγής του αέρα έχει τοποθετηθεί βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης για ασφάλεια, Σχήμα 3.4.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι:

α. δεν χρησιμοποιούνται χημικά στοιχεία στον προσδιορισμό της μύζησης, συνεπώς δεν υπάρχει κίνδυνος να αλλάξει η χημεία του υγρού των πόρων,

β. η μέθοδος μετατόπισης άξονα χρησιμοποιείται για δοκιμές με κορεσμένα εδάφη, εφόσον υπάρχει δυνατότητα τροποποίησης της συσκευής, συμπεριλαμβάνοντας κανάλι υψηλού αέρα και πηγή εισαγωγής του στο σύστημα,

γ. η τεχνική εφαρμόζεται επιτυχώς σε πολλά είδη δοκιμών.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα είναι:

α. δεν αποδίδει ακριβή αποτελέσματα,

β. οι συνθήκες αέρος και νερού πρέπει να είναι συνεχής ανάμεσα στους πόρους του εδάφους και στην συσκευή εκτίμησης για τον υπολογισμό πραγματικών τιμών μύζησης,

γ. απαιτεί πολύ χρόνο,

δ. ο αέρας των πόρων προκαλεί φυσαλίδες και εισάγονται λάθος εκτιμήσεις.

3.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΧΑΡΤΙΝΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ (FILTER PAPER METHOD)

Η μέθοδος χάρτινου φίλτρου μπορεί να εφαρμοστεί και για τον υπολογισμό δύο ειδών μύζησης (εδαφικού σκελετού και ολικής). Είναι σχετικά οικονομική μέθοδος αλλά παρουσιάζει εύρος τιμών μύζησης. Η μέθοδος χάρτινου φίλτρου είναι έμμεση μέθοδος προσδιορισμού της μύζησης. Η μέθοδος χάρτινου φίλτρου βασίζεται στην ικανότητα απορροφητικότητας νερού του χάρτινου φίλτρου. Όταν το χάρτινο φίλτρο εκτίθεται σε εδαφικό περιβάλλον, θα αποβάλλει ή θα απορροφήσει υγρασία μέχρι η μύζηση μέσα στο χαρτί φίλτρου και το έδαφος να είναι ίση. Ουσιαστικά, το χάρτινο φίλτρο πετυχαίνει την ισορροπία με το δείγμα με ροή, ύδατος (υπολογισμός μύζησης εδαφικού σκελετού) ή υδρατμών (υπολογισμός ολικής μύζησης). Το χάρτινο φίλτρο λειτουργεί ως ανιχνευτής υγρασίας, Σχήμα 3.5.

Τα χάρτινα φίλτρα είναι μια εύστροφη δοκιμαστική τεχνική για τον υπολογισμό μύζησης εδαφικού σκελετού εξαιτίας των πλεονεκτημάτων σε σχέση με άλλες τεχνικές που προσδιορίζουν το ίδιο είδος μύζησης και διακρίνονται σε χάρτινα φίλτρα με επαφή για μύζηση εδαφικού σκελετού και χωρίς επαφή για ολική μύζηση.

α) χάρτινα φίλτρα επαφής

Το συγκεκριμένο είδος χάρτινου φίλτρου πετυχαίνει την ισορροπία με το έδαφος με τη ροή νερού. Η μύζηση εδαφικού σκελετού προσδιορίζεται από την

περιεχόμενη υγρασία μέσα στο φίλτρο. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο είδη χάρτινου φίλτρου για την αξιολόγηση της μύζησης:

- i) Schleicher & Schuell No. 589 και
- ii) Whatman No. 42,

με το δεύτερο να φαίνεται πιο αξιόπιστο. Οι πόροι του δείγματος ελέγχουν την ποσότητα υγρασίας που απορροφάτε από το φίλτρο. Η ακρίβεια της διαδικασίας εξαρτάται από:

- i) τη φύση του φίλτρου
- ii) την καμπύλη βαθμονόμησης και
- iii) την ευαισθησία της ζυγαριάς της μεθόδου.

Η καμπύλη βαθμονόμησης για το χάρτινο φίλτρο αναπτύσσεται με την ισορροπία φίλτρου σε πλάκα πίεσης σε διαφορετικές τιμές πίεσης και την περιεχόμενη υγρασία του φίλτρου να υπολογίζεται μόνη της.

β) χάρτινα φίλτρα χωρίς επαφή

Το συγκεκριμένο είδος χάρτινου φίλτρου χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί ολική μύζηση. Σε αυτή την τεχνική η φάση ατμού απομονώνει το χάρτινο φίλτρο και το έδαφος. Η μεταφορά διαλυμένων ουσιών δεν είναι δυνατή. Ένα στεγνό χάρτινο φίλτρο κρέμεται πάνω από ένα εδαφικό δείγμα σε αεροστεγώς γυάλα για να επέλθει η ισορροπία υδρατμών ανάμεσα στο έδαφος και το φίλτρο, σε σταθερή θερμοκρασία. Οι υδρατμοί πάνω από το εδαφικό δείγμα λειτουργούν σαν αυθεντικό ημί-πορώδες μεμβράνη στον ατμό νερού και όχι στα ιόντα από το νερό των πόρων, άρα προσδιορίζεται μόνο η ολική μύζηση. Μετά που η ισορροπία διακόπτεται το χάρτινο φίλτρο αφαιρείται και η περιεχόμενη υγρασία στο φίλτρο υπολογίζεται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα. Πριν τον υπολογισμό της ολικής μύζησης το χάρτινο φίλτρο βαθμονομείται για να περιγράψει τη συσχέτιση ανάμεσα στην σχετική υγρασία και τη μεταβολή ύδατος, διότι η μέτρηση της μύζησης γίνεται με εξισώσεις καμπυλών βαθμονόμησης.

3.1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τεμάχια πορωδών υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους για τον προσδιορισμό της μύζησης των εδαφικών υλικών. Οι διάφοροι τρόποι μέτρησης στηρίζονται στον τρόπο που μεταβάλλεται μια χαρακτηριστική ιδιότητα των

πορώδων υλικών σε σχέση με το βαθμό κορεσμού τους. Η μύζηση που μετριέται σε κάθε βαθμό κορεσμού πραγματοποιείται κάθε φορά με διαφορετική μετρούμενη ιδιότητα, ανεξάρτητα από το είδος του πορώδους υλικού. Τέτοιες χαρακτηριστικές ιδιότητες είναι:

α) η ηλεκτρική αγωγιμότητα (μέθοδος τεμαχίων γύψου)

β) η θερμική αγωγιμότητα (μέθοδος αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας)

γ) η δυνατότητα στη μεταφορά ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ηλεκτρομαγνητική μέθοδος).

Η αλλαγή των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων πραγματοποιείται εξαιτίας των διαφορετικών τιμών που έχουν στο νερό και σε ένα ξηρό πορώδες υλικό. Οι τιμές των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων σε ένα πορώδες υλικό πλήρως κορεσμένο και σε ένα ξηρό μεταβάλλονται στην ανάμειξή τους με νερό. Ανεξάρτητα από την ιδιότητα, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των δύο ακραίων τιμών της ιδιότητας, τόσο περισσότερη ευαισθησία έχει το όργανο μέτρησης.

Όσο λιγότερη είναι η πίεση διείσδυσης αέρα του πορώδους υλικού, τόσο μικρότερη η μύζηση που είναι εφικτό να υπολογισθεί. Αντίστοιχα όσο μεγαλύτερη η πίεση διείσδυση αέρα ώστε το έδαφος να έχει παραμένον ποσοστό υγρασίας, τόσο μεγαλύτερες τιμές της μύζησης υπολογίζονται. Η χαρακτηριστική ιδιότητα υπολογίζεται από την ποσότητα του νερού εντός του πορώδους υλικού και όχι της εντατικής κατάστασης του νερού στους πόρους, γι' αυτό πρέπει να είναι γνωστή η Χ.Κ. της μύζησης με το ποσοστό υγρασίας του πορώδους υλικού, δηλαδή η καμπύλη συγκράτησης νερού του πορώδους υλικού, στη οποία παρατηρούνται υστερητικά φαινόμενα σε κύκλους ξήρανσης-ύγρυνσης, που μεταφέρονται στις καμπύλες τιμών της χαρακτηριστικής ιδιότητας-μύζησης. Γι' αυτό πρέπει να υπολογίζεται η υστέρηση της καμπύλης βαθμονόμησης του πορώδους υλικού.

Το βασικότερο πλεονέκτημα των των τεμαχίων πορώδων υλικών σε αντίθεση με τα χάρτινα φίλτρα, είναι ότι δεν χρειάζεται να μεταφερθούν από το σημείο μέτρησης της μύζησης, εφόσον ο υπολογισμός της χαρακτηριστικής ιδιότητας γίνεται στο πεδίο με τη βοήθεια καλωδίων που συνδέουν το τεμάχιο με κάποια θέση πρόσβασης ή με αισθητήρες προσδιορισμού της ιδιότητας μέσα στο πορώδες υλικό. Οι μέθοδοι αυτές βοηθούν σε μακροχρόνιες επιτόπου μετρήσεις, με μόνα ουσιαστικά μειονεκτήματα τη χαμηλή ακρίβειά τους και τον πολύ χρόνο

πραγματοποίησης τους. Είναι εφικτό οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν πορώδες υλικά, μπορούν να υπολογίζουν την χαρακτηριστική ιδιότητα απευθείας στο έδαφος και όχι από ένα τεμάχιο τοποθετημένο εντός του εδάφους, αλλά έχοντας γνωστή Χ.Κ. εδάφους-νερού του εδάφους που μελετάται, αντί για την καμπύλη του πορώδους υλικού που επιτρέπει τον προσδιορισμό της μύζησης σε οποιοδήποτε δοκίμιο εδάφους.

3.1.3.1 Μέθοδος τεμαχίων πορώδους υλικού (Porous blocks method) – Μέθοδος τεμαχίων γύψου (Gypsum blocks method)

Η μέθοδος τεμαχίων γύψου, είναι μέθοδος έμμεσου προσδιορισμού της μύζησης των εδαφικών υλικών. Η μέθοδος τεμαχίων γύψου έχει ως αρχή τη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού που μπορεί να απορροφήσει νερό, βάσει το βαθμό κορεσμού του. Η αντίσταση και η μύζηση των εδαφών εξαρτάται από τον βαθμό κορεσμού του εδάφους. Οι αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας υπολογίζουν την ηλεκτρική αντίσταση του πορώδους υλικού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος στο οποίο η μύζηση πρέπει να μετρηθεί, Σχήμα 3.6. Η ηλεκτρική αντίσταση του πορώδους τεμαχίου μειώνεται με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας. Η συσκευή είναι σχεδιασμένη με δύο ομόκεντρα ηλεκτρικά ηλεκτρόδια εγκατεστημένα σε διαπερατό υλικό που συνήθως είναι φτιαγμένο από γύψο, Σχήμα 3.7.

Στα Σχήματα 3.7α και 3.7β απεικονίζονται κομμάτια γύψου και ο μετρητής τους. Στα Σχήματα 3.7γ και 3.7δ απεικονίζονται κομμάτια πορώδους υλικού FDR. Εκτός από τον μετρητή, απαραίτητο κομμάτι των οργάνων της μεθόδου είναι και ο υποδοχέας βαθμονόμησης των τεμαχίων γύψου, Σχήμα 3.7α. Ο υποδοχέας βαθμονόμησης είναι συνήθως τυποποιημένο εξάρτημα μέσα στο οποίο τοποθετείται κάθε τεμάχιο γύψου περιβεβλημένο από εδαφικό δείγμα και το σύνολο τοποθετείται εντός θαλάμου μύζησης. Ο σωλήνας του υποδοχέα βαθμονόμησης επιτρέπει την εκροή του νερού από το σύστημα εδαφικό δείγμα-τεμάχιο γύψου εκτός του θαλάμου. Η καμπύλη βαθμονόμησης μέτρησης της περιεχόμενης υγρασίας συσχετίζεται με τη μύζηση και την ηλεκτρική αντίσταση του τεμαχίου γύψου.

Αφού η σύσταση των τεμαχίων γύψου επιτρέπει την κίνηση όλων των διαλυμένων ουσιών, στο νερό των πόρων κατά την προσρόφηση ή την αποβολή ύδατος από

τους πόρους του, μέχρι την υδραυλική ισορροπία, τα τεμάχια γύψου προσδιορίζουν μύζηση εδαφικού σκελετού.

3.1.3.2 Μέθοδος αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας (Thermal conductivity sensors)

Η μύζηση των εδαφών εκτιμάται έμμεσα χρησιμοποιώντας αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας. Η βασική αρχή είναι ότι η διαφορά μύζησης ανάμεσα στο δείγμα και το πορώδες τεμάχιο προκαλεί ροή νερού μέχρι να επέλθει υδραυλική ισορροπία (ίσες τιμές μύζησης). Η περιεχόμενη υγρασία μέσα στο πορώδες υλικό εξαρτάται από την μύζηση που εφαρμόζεται στο πορώδες τεμάχιο από το περιβάλλον έδαφος. Ο χρόνος ισορροπίας εξαρτάται από την τιμή της θερμοκρασίας, την υδραυλική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου και το περιβάλλον έδαφος.

Οι Shaw B. & Baver L.P. σχεδίασαν μια συσκευή που περιλάμβανε έναν αισθητήρα θερμοκρασίας και θερμάστρα, που μπορεί να στηθεί κατευθείαν στο έδαφος ώστε να υπολογισθεί η θερμική αγωγιμότητα.

Ο Richards L.A. πρότεινε ηλεκτροθερμικό εξάρτημα για να μετράει την υγρασία στα πορώδη μέσα. Το εξάρτημα είναι σχεδιασμένο με θερμόμετρο αντίστασης τυλιγμένο σε μικρότερη σπείρα θερμότητας. Επίσης πρότεινε τη χρήση αμμώδη υλικού για πορώδες τεμάχιο.

Ο αισθητήρας θερμικής αγωγιμότητας αποτελείται από πορώδες κεραμικό υλικό που περιέχει εξάρτημα που ανιχνεύει θερμοκρασία, και μια μικρής κλίμακας θερμάστρα. Η θερμική αγωγιμότητα του κεραμικού μέσου ποικίλει με την περιεχόμενη υγρασία μέσα στο τεμάχιο, Σχήμα 3.8.

Για την μέτρηση της μύζησης είναι απαραίτητη η χρήση βαθμονομημένου αισθητήρα, ώστε να τοποθετηθεί ο αισθητήρας στο έδαφος και να μπορεί να πραγματοποιηθεί η ισορροπία με την πίεση νερού των πόρων. Το τμήμα αίσθησης εγκαθίσταται σε πορώδες υλικό το οποίο θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο, και να περιέχει παλμό θερμότητας χωρίς αντίσταση, από το περιβάλλον έδαφος. Η εκτίμηση θερμικής αγωγιμότητας σε ισορροπία εξαρτάται από την μύζηση στο έδαφος που προσδιορίζεται μέσω καμπύλης βαθμονόμησης.

Η διασπορά θερμότητας μέσα στο διαπερατό υλικό υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την θερμική αγωγιμότητα. Η περιεχόμενη υγρασία μέσα στο

πορώδες υλικό εκτιμάται με την θέρμανση του υλικού, με θερμάστρα ενσωματωμένη στο κέντρο του πορώδους υλικού και με τη μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας, κατά την θέρμανση.

Η βαθμονόμηση απαιτείται και σε αυτή την περίπτωση για πραγματοποιηθούν αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις. Η βαθμονόμηση εκτελείται βάζοντας αισθητήρες μέσα στο νερό. Όταν στεγνώσουν οι αισθητήρες εκτελούνται μετρήσεις βαθμονόμησης με συγκεκριμένη εφαρμοσμένη μύζηση.

3.1.3.3 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος μέτρησης

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε πιο πρόσφατα από τις δύο προηγούμενες και χρησιμοποιεί ίδια τεμάχια, εντός των οποίων εισάγονται αισθητήρες ηλεκτρομαγνητικής μέτρησης του ποσοστού υγρασίας του πορώδους υλικού.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας και της πυκνότητας των εδαφικών υλικών επιτόπου. Η αρχή της μεθόδου είναι ο υπολογισμός της ηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους, με βάσει το ποσοστό υγρασίας του. Με την ηλεκτρική σταθερά, από την αντίστοιχη καμπύλη ηλεκτρικής σταθεράς-ποσοστού υγρασίας μετρείται η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους. Για να υπολογισθεί η ηλεκτρική σταθερά πρέπει να προσδιοριστεί ο χρόνος διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος (TDR), ή η συχνότητα (FDR), που δημιουργείται μέσα στο εδαφικό υλικό. Η FDR έχει αξιοποιηθεί και για τον προσδιορισμό της μύζησης. Τα ηλεκτρόδια που μεταδίδουν έναν ηλεκτρομαγνητικό κύμα απευθείας εντός του εδάφους έχουν τοποθετηθεί σε ένα πορώδες τεμάχιο με προσδιορισμένη την συσχέτισης ηλεκτρικής σταθεράς και ποσοστού υγρασίας, αλλά και γνωστή την συσχέτισης ποσοστού υγρασίας και μύζησης.

Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζεται ο πλήρης εξοπλισμός μίας συσκευής τέτοιου είδους, Σχήμα 3.9α, η διάταξη των ακίδων, Σχήματα 3.9β και 3.9γ και η συσκευή σε χρήση με τις ακίδες εντός δοκιμίου συμπακνωμένου αποσαθρωμένου σερπεντινίτη Σκύρου μέσα στη μήτρα συμπίκνωσης, Σχήμα 3.9δ.

3.1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΥΖΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Η μέτρηση της μύζησης με τη βοήθεια της σχετικής υγρασίας πραγματοποιείται με ψυχρόμετρα, τα οποία μετράνε την ολική μύζηση σε επιτόπου δοκιμές στην ύπαιθρο. Αυτή η διαδικασία θέλει λίγο χρόνο και επιφέρει μεγάλης ακρίβειας αποτελέσματα. Ωστόσο επειδή δεν υπολογίζει την μύζηση εδαφικού σκελετού είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της συγκεκριμένης μύζησης ταυτόχρονα, με κατάλληλες μεθόδους υπολογισμού. Τα ψυχρόμετρα επειδή υπολογίζουν μύζηση με βάση την σχετική υγρασία είναι ευάλωτα στις μεταβολές θερμοκρασίας, άρα θα πρέπει να γίνει έλεγχος της θερμοκρασίας στο χώρο δράσης ή καταγραφή της θερμοκρασίας ταυτόχρονα με τη μέτρηση των τιμών μύζησης. Στις υποενότητες περιγράφονται τα διαφορετικά ψυχρόμετρα, οι τρόποι μέτρησης στους οποίους βασίζονται και ο εξοπλισμός που απαιτείται για τον έμμεσο προσδιορισμό της μύζησης.

3.1.4.1 Ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης (thermistor psychrometers)

Τα ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ολικής μύζησης σε έδαφος έμμεσα, με τη βοήθεια της σχετικής υγρασίας. Το συγκεκριμένο όργανο δημιουργήθηκε και ενισχύθηκε για να επιτρέψει τη μέτρηση μεγάλου εύρους τιμών μύζησης (100 Kpa - 10^4 Kpa). Σύμφωνα με τους Woodburn J.A., Holden J.C. & Peter P. η ενίσχυση των υπολογισμών επιτυγχάνεται με βαθμονόμηση και καινοτομία σε εφαρμοσμένη επιστήμη μικρο-τσιπ. Το εύρος και η ακρίβεια στους υπολογισμούς εξαρτάται από την ευαισθησία των συγκεκριμένων ψυχρομέτρων, από αλλαγές της θερμοκρασίας. Η Soil Mechanics Instrumentation παράγει δύο είδη από θερμικά προστατευμένα δοχεία για τους ανιχνευτές των ψυχρομέτρων θερμικά ευαίσθητης αντίστασης:

α) μονάδα 12-ανιχνευτών και

β) μονάδα 8-ανιχνευτών.

Η μονάδα 8-ανιχνευτών είναι εξοπλισμένο με μονωμένο κάλυμμα για καλύτερο έλεγχο θερμοκρασίας.

Κάθε αισθητήρας μπορεί να μετρήσει μια ολική μύζηση σε 1 ώρα, άρα οι υπολογισμοί της ολικής μύζησης εδαφικών δειγμάτων μέσω των δύο ειδών ανιχνευτών μπορεί να επιτευχθεί σε 1 ώρα.

Σύμφωνα με τους Bulut R., Park S.W. & Lytton R.L. το ψυχρόμετρο θερμικά ευαίσθητης αντίστασης υπολογίζει πιο ορθά αποτελέσματα ολικής μύζησης για χαμηλά ποσοστά υγρασίας. Η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία στο χώρο των υδρατμών του εδάφους μετρούνται για να υπολογιστεί η ολική μύζηση με το νόμο του Kelvin (Εξ.(10), Κεφ.2).

Το ψυχρόμετρο αυτού του τύπου περιλαμβάνει θερμικά μονωμένη δεξαμενή που κρατάει τους ανιχνευτές και όργανο καταγραφής δεδομένων. Τα ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης αποτελούνται από ένα υγρό και ένα στεγνό θερμόμετρο, στα οποία χρησιμοποιούνται στεγνοί και υγροί ανιχνευτές θερμικά ευαίσθητης αντίστασης. Τα ψυχρόμετρα αυτά εκτιμούν την σχετική υγρασία στον αέρα που υπάρχει στους ανιχνευτές (επιφάνειες) με το εδαφικό δείγμα. Επειδή τα θερμόμετρα είναι μικρά άρα υπολογίζουν μικρές θερμοκρασίες και συνεπώς μεγάλα ποσοστά υγρασίας, άρα μικρές τιμές μύζησης, η θερμοκρασία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας θερμικά ευαίσθητες ηλεκτρικές αντιστάσεις, Σχήμα 3.10. Οι υγρές και οι στεγνές επιφάνειες χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες θέρμανσης και η διαφορά που καταγράφεται μεταξύ τους αξιοποιείται για τον προσδιορισμό της ολικής μύζησης.

Η καμπύλη βαθμονόμησης επηρεάζεται από αλλαγές θερμοκρασίας, υστέρησης και το μέγεθος σταγόνων νερού που τοποθετούνται στις επιφάνειες. Οι ανιχνευτές για την επίτευξη ισορροπίας χρειάζονται 4 ώρες, σε μηδενική ολική μύζηση εδάφους πάνω από αποσταγμένο νερό. Η διαφορά θερμοκρασίας αλλάζει υπό αρχική μηδενική μέτρηση πριν την διαδικασία βαθμονόμησης για τον υπολογισμό της μύζησης. Κατόπιν η διαφορά δυναμικού καταγράφεται 1 ώρα μετά από την ισορροπία.

Η θερμικά μονωμένη δεξαμενή διατηρεί μια σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Μεγαλύτερη ακρίβεια και εύρος τιμών μύζησης μπορούν να αποκτηθούν σε ένα χώρο με ελεγχόμενη θερμοκρασία γύρω στο $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

3.1.4.2 Ψυχρόμετρα φαινομένου Peltier

Τα ψυχρόμετρα τύπου Petlier είναι μια μέθοδος που προσδιορίζει την μύζηση της υγρής φάσης του δείγματος από εκτιμήσεις των υδρατμών που είναι σε ισορροπία με το δείγμα. Η ολική μύζηση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την σχετική υγρασία ή την πίεση πόρων αέρα. Ο συσχετισμός της σχετικής υγρασίας των υδρατμών και ενδεχόμενου νερού της υγρής φάσης περιγράφεται με τη σχέση Kelvin (Εξ(10), Κεφ. 2).

Τα ψυχρόμετρα Petlier, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ολικής μύζησης που κυμαίνεται από 100 έως 8000 Kpa στο πεδίο και στο εργαστήριο. Οι τύποι ψυχομέτρων του Spanner D.C. (1951) και των Richards L.A. & Ogata G. (1958), (παρόμοια με τα ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης), είναι οι δύο πιο ουσιαστικής τύποι ψυχομέτρων Petlier. Τα δύο είδη ψυχομέτρων έχουν διαφορετικό τρόπο ύγρανσης της επιφάνειας εξάτμισης, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία. Το Σχήμα 3.11 παρουσιάζει ένα ψυχρόμετρο Peltier που χρησιμοποιείται συχνά από πολιτικούς μηχανικούς.

Τα ψυχρόμετρα Peltier συμπεριλαμβάνουν καλώδια διαμέτρου 0,025 mm, μίας επαφής αναφοράς (χαλκό και νικέλιο) και μιας “υγρής” επαφής (χρώμιο). Οι επαφές σταθεροποιούνται σε πλαστικό υλικό που είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, και περιβάλλονται από πορώδες προστατευτικό κάλυμμα (ανοξείδωτος χάλυβας ή κεραμικό υλικό), για την προστασία από τυχαίες επαφές με το εδαφικό υλικό ή ζημιές των επαφών λόγω κακής χρήσης. Αν αφαιρεθεί το κάλυμμα ελαττώνεται ο χρόνος που απαιτείται για ισορροπία ώστε να γίνει η μέτρηση. Ο χρόνος που απαιτείται για ισορροπία είναι μεγαλύτερος όταν υπάρχει κάλυμμα, διότι είναι δύσκολη η ανταλλαγή υδρατμών μεταξύ του αέρα ανάμεσα το όργανο και το δείγμα και του αέρα εντός του καλύμματος των επαφών.

Η αξιολόγηση της ολικής μύζησης επιτυγχάνεται, τοποθετώντας το ψυχρόμετρο κοντά στο δείγμα σε κλειστό θάλαμο. Στο σημείο που η ισορροπία έχει τελειώσει, υπολογίζεται η σχετική υγρασία. Η ισοθερμική ισορροπία ανάμεσα στον αέρα και στο έδαφος εκτελείται πριν να καταγραφεί η μέτρηση του ψυχομέτρου. Η ακρίβεια της θερμοκρασίας στο $\pm 0,001$ °C είναι απαραίτητη για μετρήσεις μύζησης με ακρίβεια ± 10 Kpa, (Krahn J. & Fedlund D.G.). Η θερμική ισορροπία στο ψυχρόμετρο πραγματοποιείται, ρυθμίζοντας το μικρό βολτόμετρο στο μηδέν. Η καμπύλη βαθμονόμησης χρειάζεται διόρθωση ανάλογα με τη θερμοκρασία που

πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του οργάνου. Όταν τα ψυχρόμετρα Peltier χρησιμοποιούνται στο πεδίο, η θερμοκρασία γειτονικών εδαφών, θα πρέπει να υπολογισθεί από διαφορετική καμπύλη βαθμονόμησης για να εγγυηθεί ότι η βαθμονόμηση του ψυχομέτρου είναι έγκυρη σε θερμοκρασία εδάφους.

3.1.4.3 Υγρόμετρα σημείου δρόσου (dew-point hygrometers)

Το φαινόμενο Peltier βοηθάει στα υγρόμετρα σημείου δρόσου για να κρατηθεί η επαφή με το σημείο της δρόσου, συνεπώς δεν πρέπει να μεταβάλλεται η υγρασία, εφόσον η σύνδεση στο σημείο δρόσου δεν επιτρέπει μεταφορά θερμότητας από και προς το περιβάλλον. Σύμφωνα με τους Campbell et al. (1973), ένα υγρόμετρο αποτελείται από μια «ξηρή» επαφή που ψύχεται πρώτα ώστε να συμπυκνωθούν υδρατμοί επί αυτής. Έχοντας το συντελεστή ψύχρασης της επαφής (που εξαρτάται από την θερμοκρασία), η επαφή ψύχεται ή θερμαίνεται (φαινομένου Seebeck) μέχρι τη τιμή θερμοκρασίας που δεν μεταβάλλεται η θερμική ενέργεια από το περιβάλλον (σημείο δρόσου). Σε αυτή την κατάσταση η μετρούμενη διαφορά δυναμικού του σημείου δρόσου σχετίζεται μονοσήμαντα με τη σχετική υγρασία στη δεδομένη θερμοκρασία. Αν ότι ο συντελεστής ψύχρασης έχει υπολογισθεί σωστά στην αρχή της δοκιμής, τα υγρόμετρα σημείου δρόσου μπορούν να μετρήσουν με ακρίβεια τη σχετική υγρασία.

Το υγρόμετρο σημείου δρόσου σε σχέση με το ψυχρόμετρο φαινομένου Peltier παράγει μεγαλύτερη και σταθερή διαφορά δυναμικού, κάνοντας την μέτρηση εύκολη. Σήμερα υπάρχουν σύνθετα ψυχρόμετρα φαινομένου Peltier, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν στη συνήθη διαμόρφωση τους ή στη διαμόρφωση υγρομέτρου σημείου δρόσου.

3.1.4.4 Υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου (chilled-mirror hygrometers)

Οι Gee et al. (1992) ανακάλυψαν ένα σύστημα ψυχρού κατόπτρου για τον προσδιορισμό της μύζησης, Σχήμα 3.12. Το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου είναι μια έμμεση μέθοδος προσδιορισμού ολικής μύζησης του εδάφους. Το σύστημα ψυχρού κατόπτρου σημείου δρόσου διεξάγεται υπό ισοθερμικές συνθήκες σε κλειστό θάλαμο. Ο υπολογισμός της μύζησης εξαρτάται από την ισορροπία της υγρής φάσης του εδαφικού δείγματος με τους ατμούς πάνω από το δείγμα, σε αεροστεγή θάλαμο, (Bulut R. & Leong E.C.).

Ο εξοπλισμός είναι παρόμοιος με του ψυχομέτρου Peltier. Ο υπολογισμός των τιμών μύζησης έχει εύρος 150 Kpa-30MPa, με χρόνο ισορροπίας τα 10'. Το αεροστεγές δοχείο περιέχει :

- α. έναν ανεμιστήρα,
- β. έναν αισθητήρα φωτός,
- γ. μια αντίσταση,
- δ. ένα κάτοπτρο και
- ε. το εδαφικό δείγμα.

Το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου διατηρεί το σημείο δρόσου και καταγράφεται θερμοκρασία του κενού πάνω από το δείγμα. Το δείγμα τοποθετείται σε ένα κλειστό θάλαμο για να περιοριστεί ο αποκορεσμός του εδαφικού δείγματος. Οι υδρατμοί που προκαλούνται επιτρέπεται να πυκνώνουν στο κάτοπτρο και ένας φωτοηλεκτρικός αισθητήρας χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει το σημείο πύκνωσης του κατόπτρου.

Η θερμική μέτρηση του δείγματος που είναι η ίδια με την μέτρηση του χώρου υδρατμών, υπολογίζεται με τη βοήθεια θερμόμετρου. Η σχετική υγρασία του δείγματος προσδιορίζεται από το εκτιμώμενο σημείο δρόσου και τη θερμοκρασία.

Ο ανεμιστήρας χρησιμοποιείται για να κυκλοφορήσει τον αέρα στο θάλαμο για επέλθει ισορροπία υδρατμών. Τα εδαφικά δείγματα και οι συσκευές κρατούνται σε παρόμοια περιοχή για αρκετές ώρες για ισορροπία θερμοκρασίας πριν την δοκιμή. Το ψυχρό κάτοπτρο δίνει ουσιαστική προσέγγιση της υγρασίας της περιοχής των υδρατμών. Ο έλεγχος θερμοκρασίας είναι σημαντικός και ο υπολογισμός της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στο σημείο δρόσου και του δείγματος πρέπει να διατηρείται χαμηλή.

Η καμπύλη βαθμονόμησης γίνεται χρησιμοποιώντας πρότυπα διαλύματα αλατιού με γνωστές συγκεντρώσεις ενάντια στις ωσμωτικές μυζήσεις τους. Οι Leong E.C., Tripathy S. & Ranjo H. ερεύνησαν την ακρίβεια της μεθόδου για συμπαγής δείγματα εδάφους. Η βαθμονόμηση του οργάνου γίνεται προσεκτικά χρησιμοποιώντας κάποια πρότυπα διαλύματα αλατιού. Η ισορροπία επέρχεται σύντομα, όταν επρόκειτο να προσδιοριστεί ολική μύζηση και βαθμονόμηση, περίπου 15'. Η ολική μύζηση των συμπαγών δειγμάτων συγκρίνεται με τις επιμέρους μυζήσεις

(εδαφικού σκελετού και ωσμωτική) που υπολογίζονται ξεχωριστά (μέθοδος μετατόπισης άξονα και ηλεκτρικής αγωγιμότητας). Τα αποτελέσματα δοκιμών υπέδειξαν ότι η ολική μύζηση που υπολογίσθηκε ήταν μεγαλύτερη από το σύνολο των άλλων δύο. Αν παρθούν υπόψιν οι διαφορές στους υπολογισμούς διατηρείται η ισορροπία μεταξύ δείγματος και ατμών. Η τεχνική υγρού κατόπτρου θεωρείται η πιο ακριβείς προσέγγιση για τον προσδιορισμό της ολικής μύζησης.

3.1.4.5 Αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών (polymer resistance/ capacitance sensors)

Οι αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών, σύμφωνα με τους Albecht B.A., Benson C.H. & Beuermann S., περιλαμβάνουν

- α. δύο ηλεκτρόδια απομονωμένα με μεμβράνη,
- β. πολυμερές θερμοστάτη που απελευθερώνει ή απορροφάει υγρασία, όταν αλλάζει η σχετική πυκνότητα του αέρα στο περιβάλλον.

Κατά τη διάρκεια της μεταβολής της υγρασίας από το πολυμερές μεταβάλλεται η αντίσταση και η χωρητικότητα του αισθητήρα. Κάνοντας βαθμονόμηση για γνωστές τιμές της σχετικής υγρασίας προκύπτουν καμπύλες βαθμονόμησης σχετικής υγρασίας-αντίστασης ή σχετικής υγρασίας-χωρητικότητας. Οι αισθητήρες κάνουν μετρήσεις για σχετική υγρασία από σχεδόν 0% έως σχεδόν 100%.

Οι διαφορές των συγκεκριμένων οργάνων είναι:

- α. οι αισθητήρες αντίστασης παρουσιάζουν γραμμικότητα των καμπυλών βαθμονόμησης για ποσοστό σχετικής υγρασίας μεγαλύτερο από 95% αλλά στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις για σχετική υγρασία μικρότερη του 20%.
- β. Οι αισθητήρες χωρητικότητας έχουν γραμμικές καμπύλες βαθμονόμησης για μεγαλύτερο εύρος τιμών της σχετικής υγρασίας σε αντίθεση με τους αισθητήρες αντίστασης, είναι λιγότερο ευαίσθητοι σε μεταβολές θερμοκρασίας και δεν επηρεάζονται από ξένες ουσίες στο εδαφικό υλικό.

Και οι δύο κατηγορίες οργάνων είναι φθηνά, έχουν μικρό χρόνο απόκρισης (δευτερόλεπτα), παρουσιάζουν μικρή υστέρηση (1 έως 6% σχετικής υγρασίας), άριστη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά (± 1 έως $\pm 3\%$ σχετικής υγρασίας ανά έτος) και είναι μικρά όργανα για να υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης σε συσκευές

εκτέλεσης δοκιμών μηχανικών χαρακτηριστικών για συνεχή έλεγχο της μύζησης, ή για μακροχρόνιο και συνεχή έλεγχο της μύζησης στο πεδίο. Όταν πρόκειται να καταπονηθεί ο αισθητήρας, πρέπει να καλυφθεί με προστατευτικό κάλυμμα (πλέγμα από πλαστικό ή ανοξείδωτο χάλυβα).

3.1.4.6 Αισθητήρες οργανικών μέσων

Οι Siemens & Blatz (2005) χρησιμοποίησαν αισθητήρες οργανικών μέσων για το προσδιορισμό ολικής μύζησης εδαφικών δειγμάτων με τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας. Η δομή του οργάνου είναι:

α. μία μικρή χαλύβδινη ράβδος η οποία περιβάλλεται από κρυστάλλους οργανικής και μη οργανικής σύστασης. Ο όγκος των κρυστάλλων οργανικής σύστασης μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές της σχετικής υγρασίας στον περιβάλλοντα αέρα.

β. μετρητές παραμόρφωσης επί της χαλύβδινης ράβδου που υπολογίζουν τις μεταβολές του όγκου των κρυστάλλων και έτσι προσδιορίζεται η σχετική υγρασία εάν έχει προηγηθεί βαθμονόμηση για γνωστές τιμές της σχετικής υγρασίας.

Υπάρχει αισθητήρας με ή χωρίς προστατευτικό κάλυμμα με ικανότητα μέτρησης της σχετικής υγρασίας από 0% έως 100% με ακρίβεια $\pm 3\%$, περιλαμβάνει φαινόμενα μη γραμμικότητας, υστέρησης και επαναληψιμότητας και ευαισθησία 0.01% για ολόκληρο το εύρος τιμών μέτρησης της σχετικής υγρασίας.

Η καμπύλη βαθμονόμησης παρουσιάζεται γραμμική για όλο το εύρος τιμών της σχετικής υγρασίας. Παρά την οργανική σύσταση των κρυστάλλων, τέτοια όργανα έχουν χρησιμοποιηθεί συνεχώς ακόμα και για 10 χρόνια για τον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας.

3.1.5 ΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΑ (TENSIO METERS)

Τα τενσιόμετρα χρησιμοποιούνται για να υπολογίζουν επί τόπου την μύζηση εδάφους. Η βασική αρχή της λειτουργίας τους είναι ότι το νερό που περιέχεται στο τενσιόμετρο από υλικό με υψηλή πίεση αέρα, θα έχει ροή ύδατος όταν η ισορροπία έχει ολοκληρωθεί, μεταξύ του δείγματος και της συσκευής μέτρησης. Εφόσον δεν υπάρχει ημιπερατή μεμβράνη για διάλυτα άλατα η ωσμωτική μύζηση δεν υπολογίζεται. Επομένως η πίεση πόρων νερού που υπολογίζεται αντιστοιχεί σε μύζηση εδαφικού σκελετού.

Εκτός αυτού, εξαιτίας του φαινομένου σπηλαίωσης νερού στο тенσιόμετρο, το κεραμικό υλικό της υψηλής διείσδυσης αέρα περιορίζει την εκτίμηση της μύζησης, στα 90 Kpa.

Ένα συμβατικό тенσιόμετρο με υψηλή διείσδυση αέρα και πορώδες κεραμικό υλικό επισυνάπτεται σε μετρητή πίεσης. Το тенσιόμετρο προσαρμόζεται πριν την χρήση για να αποκτήσει ακριβή αποτελέσματα. Το κεραμικό υλικό ελέγχεται για σχίσματα και τα κενά αέρος αποβάλλονται πριν το στήσιμο.

Ο χρόνος αντίδρασης του тенσιόμετρου ελέγχεται, επιτρέποντας μια αύξηση αρνητικής πίεσης νερού μέχρι 90 Kpa. Η αρνητική πίεση δημιουργείται με εξάτμιση που συμβαίνει στο κεραμικό υλικό, μετά που βυθίζεται το κεραμικό κύπελο σε νερό. Το πορώδες υλικό πρέπει να διατηρείται βυθισμένο σε νερό πριν να στηθεί για να αποφευχθεί ο αποκορεσμός, λόγω εξάτμισης. Το έτοιμο тенσιόμετρο τοποθετείται σε δείγμα, σε εργαστήριο ή σε οπή στο πεδίο. Είναι απαραίτητη η καλή επαφή με το δείγμα, για να εξασφαλιστεί συνοχή στο νερό του σωλήνα тенσιόμετρου και του νερού των πόρων του εδαφικού δείγματος.

Η απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους και του πορώδους άκρου είναι η αρνητική τιμή που προστίθεται στη μύζηση που εκτιμάται από την μέτρηση και καθορίζει τη μύζηση στο βάθος του πορώδους άκρου. Η θετική στήλη νερού του тенσιόμετρου λαμβάνεται υπόψιν. Η χρήση της διαφοράς του ύψους είναι κατάλληλο μόνο όταν χρησιμοποιούνται μετατροπείς για την μέτρηση της πίεσης.

Υπάρχουν τρία είδη тенσιομέτρων:

- α. τα тенσιόμετρα με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα,
- β. τα тенσιόμετρα με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα και
- γ. τα ωσμωτικά тенσιόμετρα.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των συμβατικών тенσιομέτρων είναι:

- α. μετρήσεις στο πεδίο και στο εργαστήριο σε λίγο χρόνο
 - β. εύκολη χρήση των οργάνων με ελάχιστη διατάραξη των εδαφικών υλικών και
 - γ. εύκολη αλλαγή κεραμικού υλικού,
- ενώ τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- α. η μέτρηση γίνεται προβληματική λόγω σπηλαιώσης,
- β. η ικανότητα μέτρησης τιμών μύζησης είναι μόνο 90 Kpa,
- γ. ο αέρας στον αισθητήρα προκαλεί ανακριβή αποτελέσματα.

3.1.5.1 Τενσιόμετρα με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα

Οι Pan H., Qing Y. & Pei-yong L. ανέπτυξαν καθετήρα μύζησης για άμεση μέτρηση μύζησης, Σχήμα 3.13. Είναι μικρά τενσιόμετρα που πρωτό-προτάθηκαν από το Imperial Collage του Λονδίνου και έχουν την ικανότητα να υπολογίσουν μύζηση της τάξης 1500 Kpa.

Η αρχή για την διεξαγωγή υπολογισμού της μύζησης χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο τενσιόμετρο, εξαρτάται από την ισορροπία ανάμεσα στην πίεση νερού των πόρων στον θάλαμο και στο έδαφος. Πριν την επίτευξη της ισορροπίας το νερό μετακινείται από το θάλαμο στο έδαφος ή αντίστροφα. Το τενσιόμετρο χρησιμοποιείται για να καθορίσει την πίεση του νερού των πόρων. Η μύζηση τελικά υπολογίζεται σύμφωνα με την γνωστή εφαρμοσμένη πίεση αέρα, ως η διαφορά των πιέσεων πόρων νερού και αέρα.

Ο καθετήρας μύζησης φτιάχνεται χρησιμοποιώντας κεραμικό δίσκο υψηλής πίεσης αέρος, 100 Kpa, καθορισμένο στην άκρη του μετατροπέα και έναν αισθητήρα. Η δεξαμενή νερού τοποθετείται στο μικρό χώρο ανάμεσα στη διαπερατή πλάκα και το διάφραγμα.

Και σε αυτή την περίπτωση κατά την διάρκεια της μέτρησης υπάρχει πιθανότητα σπηλαιώσης νερού και η διασπορά αέρα μέσω του κεραμικού δίσκου. Η μέτρηση πραγματοποιείται μέσα σε βάθος 0-5m, σε γεώτρηση ή σε δείγματα στο εργαστήριο. Ο χρόνος ισορροπίας είναι περίπου 5'.

Το μήκος των οργάνων μέτρησης της πίεσης είναι μέχρι 1.5 m αν και είναι δυνατή η επιμήκυνση τους αλλά υπολογίζουν μικρότερες τιμές μύζησης, λόγω αύξησης της απόστασης ανάμεσα στον κεραμικό δίσκο και το όργανο μέτρησης, και αύξησης του όγκου του νερού στο δοχείο. Αν το όργανο καταγραφής της πίεσης τοποθετηθεί στο ίδιο ύψος με το πορώδες άκρο, τότε η μεγαλύτερη τιμή μύζησης που μπορεί θεωρητικά να υπολογισθεί θα είναι ίση με τη πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου. Στην πράξη αυτό είναι αδύνατον διότι, όταν η μύζηση του δείγματος αυξάνει προσεγγίζοντας τα 100 kPa, αρχίζει να παράγεται αέρα στο

δοχείο νερού ώσπου να φτάσει η μύζη στα 100 kPa (πρακτικά 90-95 Kpa) και να μην είναι πια δυνατές οι μετρήσεις πίεσης. Αντίθετα αν υπάρχει διαφορά ύψους μεταξύ πορώδους άκρου και οργάνου προσδιορισμού της μύζησης, Σχήμα 3.13α, τότε η μεγαλύτερη δυνατή υπολογίσιμη μύζη ελαττώνεται ανάλογα όσο αυξάνεται η διαφορά ύψους στα δύο αντικείμενα.

Όταν απαιτείται ο προσδιορισμός της μύζησης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, η μέτρηση μπορεί να γίνει με ένα μικρού μήκους τενσιόμετρο, το οποίο εισάγεται στο έδαφος από την επιφάνεια, χωρίς να αλλοιώνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης. Αντίθετα αν πραγματοποιηθεί εισαγωγή του τενσιόμετρου σε μεγάλο βάθος, τότε αλλοιώνονται τα αποτελέσματα μέτρησης της μύζησης του εδάφους. Αυτή είναι η αιτία που χρησιμοποιούνται μορφοτροπείς αντί για μανόμετρα. Οι μορφοτροπέας, μπορεί να τοποθετηθεί πολύ κοντά στο πορώδες άκρο, και το τενσιόμετρο να τοποθετηθεί σε προετοιμασμένης οπής με μόνο το καλώδιο σύνδεσης με τον μορφοτροπέα να βρίσκεται στην επιφάνεια για να μπορεί κάποια συσκευή να αναγνωρίζει τις μετρήσεις, Σχήμα 3.13β. Έτσι σε οποιοδήποτε βάθος και αν τοποθετηθεί αυτό το όργανο, θα μπορεί να καταγράφει όλο το εύρος τιμών μύζησης.

Για τον προσδιορισμό της μύζησης στο πεδίο υπάρχουν και τα τενσιόμετρα τύπου Quickdraw. Τα Quickdraw χρησιμοποιούνται για γρήγορες μετρήσεις της μύζησης γι' αυτό τοποθετούνται για μικρό χρονικό διάστημα στη θέση μέτρησης και στη συνέχεια να αφαιρούνται για να πραγματοποιήσουν καινούρια μέτρηση σε άλλη θέση. Με τα Quickdraw δεν χρειάζεται χρόνος (περίπου 1') επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας αλλά επιτάχυνσή της μέσω της προσρόφησης νερού στο όργανο από τον μελετητή.

3.1.5.2 Τενσιόμετρα με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα

Η μέθοδος αυτή είναι η τελευταία μέθοδος προσδιορισμού της μύζησης εδαφικού σκελετού και η μοναδική με εύρος τιμών 0-2MPa. Η μετρήσεις της μύζησης μπορούν να επιτευχθούν στο πεδίο (και σε περιβάλλον ραγδαίων μη μονοτονικών μεταβολών) και στο εργαστήριο, σε μικρή διάρκεια για την επίτευξη της υδραυλικής ισορροπίας. Η μέτρηση με τα συγκεκριμένα τενσιόμετρα είναι ιδανική μέθοδος για μακροχρόνια παρακολούθηση. Το είδος αυτού του τενσιόμετρου είναι το μοναδικό που μπορεί να ενωθεί εύκολα με άλλες εργαστηριακές συσκευές, εντός των δοκιμών, Σχήμα 3.14.

Οι βασικοί λόγοι που δίνουν τη δυνατότητα στα συγκεκριμένα τενσιόμετρα να μετρούν απευθείας υψηλές τιμές της μύζησης χωρίς να προκληθεί φαινόμενη σπηλαίωση στο νερό του δοχείου είναι:

- η υψηλή πίεση διείσδυσης αέρα του κεραμικού δίσκου,
- η σωστή κατεργασία του εσωτερικού του δοχείου νερού,
- η αξιοποίηση μόνο απεσταγμένου, απιονισμένου, απαερωμένου νερού για όπου χρειάζεται,
- η σωστή απαέρωση του κεραμικού δίσκου και του δοχείου νερού πριν ξεκινήσει ο κορεσμός, και
- η συμπίεση του νερού μέχρι να καταγραφούν σημαντικές τιμές της πίεσης πριν μετρηθεί η μύζηση.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα είναι:

- α. ο εξοπλισμός προετοιμασίας των τενσιόμετρων,
- β. το κόστος που απαιτείται για το ίδιο το τενσιόμετρο,
- γ. ο μη κορεσμός του τενσιόμετρου όταν ο πορόλιθος του αποκορεστεί κατά την μέτρηση και
- δ. η απαραίτητη προσοχή κατά την μέτρηση με τα συγκεκριμένα τενσιόμετρα.

3.1.5.3 Ωσμωτικά τενσιόμετρα

Οι Peck & Rabbage (1969) ώστε να προσπεράσουν τις δυσκολίες των καθετήρων μύζησης και για να μεγεθύνουν το εύρος τιμών της μύζησης, αντικατέστησαν το νερό του καθετήρα του Watson (1967) με ένα υγρό υψηλής ωσμωτικής πίεσης και τοποθέτησαν μία ημιδιαπερατή μεμβράνη πίσω από το πορώδες υλικό. Όταν το ωσμωτικό τενσιόμετρο εισάγεται σε καθαρό νερό με συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, δημιουργείτε μεγάλη πίεση στο δοχείο υγρού, λόγω ώσμωσης, με εισροή νερού από το καθαρό νερό προς το τενσιόμετρο. Βγάζοντας το τενσιόμετρο από το καθαρό νερό και φέρνοντας το σε επαφή με εδαφικό δείγμα η πίεση του ύδατος στους πόρους είναι αρνητική, εξέρχεται νερό από το δοχείο (με τη βοήθεια της μεμβράνης) προς το δείγμα, μειώνοντας τη θετική πίεση στο εσωτερικό του δοχείου, η οποία όμως παραμένει θετική για να μην προκληθεί φαινόμενη σπηλαίωση εντός του δοχείου.

Ο χρόνος μέτρησης που απαιτείται μπορεί να είναι περίπου 2 ώρες και όταν το тенσιόμετρο πραγματοποιεί συνεχή μέτρηση των τιμών της μύζησης, η πίεση αναφοράς μπορεί να ελαττωθεί κατά τη διάρκεια, εξαιτίας διαρροών του περιεχόμενου διαλύματος ή εξαιτίας ελάττωσης της συγκέντρωσης αυτού. Άλλες προτάσεις τέτοιων οργάνων είναι των Bocking & Fredlund (1980). Ωστόσο καμία πρόταση για το συγκεκριμένο тенσιόμετρο δεν εφαρμόστηκε, λόγω συστηματικών μεταβολών της πίεσης στο επιλεγμένο υγρό με το χρόνο και τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

3.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ

Κάποιες μέθοδοι μέτρησης της μύζησης εξυπηρετούν και στον προσδιορισμό της Χ.Κ.. Η Χ..Κ. μπορεί να υπολογισθεί στο εργαστήριο ή επιτόπου, με τη βοήθεια μεθόδων όπως:

- α. тенσιόμετρα όταν η μύζηση παίρνει τιμές μικρότερες από 1500 Kpa και
- β. ξηραντήρες κενού όταν η μύζηση παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 1500 Kpa.

Η Χ.Κ. μπορεί να προσδιορισθεί και με εμπειρικούς τρόπους όπως:

- α. με τον προσδιορισμό της ογκομετρικής καμπύλης,
- β. με κάποια χαρακτηριστικά από τις ογκομετρικές καμπύλες, όπως τα όρια Atterberg και
- γ. με έτοιμες εμπειρικές καμπύλες ανάλογα με το είδος του εδάφους.

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι μέθοδοι υπολογισμού και προσδιορισμού της Χ.Κ. από τα αριστερά προς τα δεξιά με κριτήριο την ακρίβεια των υπολογισμών.

Ένας άλλος τρόπος για να παραχθεί η Χ.Κ. ενός εδάφους είναι με τη βοήθεια της κοκκομετρικής καμπύλης (Fredlung), Σχήμα 3.16.

Κάποιες από τις εμπειρικές σχέσεις που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της Χ.Κ. είναι:

(α) του ογκομετρικού ποσοστού (θ) συναρτήσει της μύζησης (s):

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & \forall s \leq s_d \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(\alpha s)^{-\lambda} & \forall s > s_d \end{cases} \quad \text{Εξ. (1)}$$

με θ : ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, θ_r : υπολειπόμενο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας θ_s : κορεσμένο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας a : παράμετρος s : μύζηση, s_d : κινούμενη μύζηση και λ : δείκτης πόρων

$$\theta = \theta_r + (\theta_s + \theta_r)/(1 + as^b)^c \quad \text{Εξ. (2)}$$

με a , b , και c : παράμετροι

$$\theta = C(s)\theta_s/[\ln(e + (s/a)^b)]^c \quad \text{Εξ. (3)}$$

με $C(s)$: συνάρτηση διόρθωσης που αναγκάζει το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας να μηδενιστεί για μύζηση 10^6 Kpa

(β) του ποσοστού υγρασίας (w) συναρτήσει της μύζησης (s):

$$w = \begin{cases} w_u - S_1 \log(s) & \forall 1 \leq s \leq s_{aev} \\ w_{aev} - S_2 \log(s/s_{aev}) & \forall s_{aev} \leq s \leq s_r \\ S_3 \log(10^6/s) & \forall s_r \leq s \leq 10^6 \text{ kpa} \end{cases} \quad \text{Εξ. (4)}$$

με w_u : ποσοστό υγρασίας για μύζηση 1 Kpa, w_{aev} : ποσοστό υγρασίας στο σημείο εισόδου αέρα, S_1 , S_2 , S_3 : παράμετροι, s_{aev} : μύζηση στο σημείο εισόδου αέρα και s_r : υπολειπόμενη μύζηση.

Πίνακας 3.1 : Όργανα μέτρησης μύζησης (Καββαδάς, 2021)

Όργανο μέτρησης	Είδος μύζησης που μετρούν	Επιτόπου ή εργαστήριο	Κατάταξη μεθόδου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Χρόνος απόκρισης
Πιεζόμετρα δονούμενης χορδής	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Μόνο επιτόπου	Άμεσης μέτρησης	0-75kPa	Δευτερόλεπτα έως λεπτά
Τενσιόμετρα πορολίθου ΠΔΑ 100kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Και τα δύο	Άμεσης μέτρησης	0-75kPa	Λεπτά
Τενσιόμετρα πορολίθου ΠΔΑ 1500kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Μόνο στο εργαστήριο	Άμεσης μέτρησης	0-1500kPa	Λεπτά έως ώρες
Θάλαμοι μύζησης (Pressure plates)	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Μόνο στο εργαστήριο	Έμμεσης μέτρησης	0-1500kPa	Λεπτά έως ώρες
Ψυχρόμετρα (υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου)	Ολική μύζηση	Μόνο στο εργαστήριο	Έμμεσου προσδιορισμού	100kPa-1000000kPa	Λεπτά έως ώρες
Τεμάχια πορωδών υλικών	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Μόνο επιτόπου	Έμμεσου προσδιορισμού	10kPa-100MPa	Λεπτά έως ημέρες
Χαρτιά φίλτρου	Και τα δύο είδη	Μόνο στο εργαστήριο	Έμμεσου προσδιορισμού	10kPa-1000000kPa	Ημέρες έως εβδομάδες

Πίνακας 3.2 : Μέθοδοι προσδιορισμού μύζησης. (Μπαρδάνης & Λουκίδης, 2019)

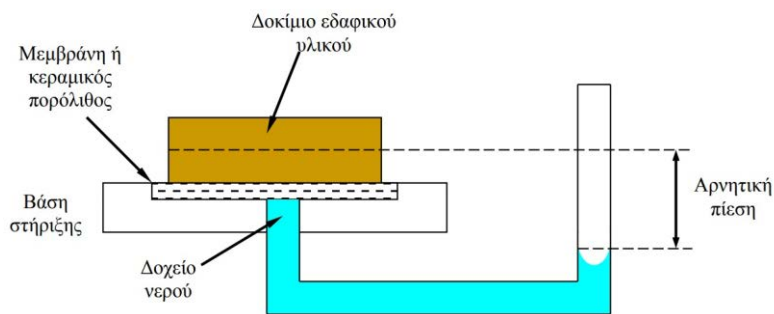
Κατηγορία μεθόδων μέτρησης της μύζησης	Μέθοδος μέτρησης της μύζησης	Εφαρμογή
Α. Μέθοδοι έμμεσης μέτρησης της μύζησης.	Μέθοδος μετατόπισης άξονα με χρήση θαλάμου μύζησης με μεμβράνη ή πορόλιθο	Εργαστήριο
Β. Μέθοδοι έμμεσου προσδιορισμού της μύζησης.	Μέθοδος χαρτιού φίλτρου	Και εργαστήριο και πεδίο (δύσκολα)
	Μέθοδοι τεμαχίων πορώδους υλικού	Πεδίο
	Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης μέσω μέτρησης της σχετικής υγρασίας	Εργαστήριο. Πολύ δύσκολα στο πεδίο.
Γ. Μέθοδοι άμεσης μέτρησης της μύζησης.	Μέθοδος τενσιόμετρου με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διεύθυνσης αέρα	Και εργαστήριο και πεδίο.
	Μέθοδος τενσιόμετρου με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διεύθυνσης αέρα	Και εργαστήριο και πεδίο.
	Μέθοδος ωσμωτικού τενσιόμετρου	Και εργαστήριο και πεδίο.

Πίνακας 3.3 : Στοιχεία μεθόδων προσδιορισμού ολικής μύζησης. (Μπαρδάνης & Λουκίδης, 2019)

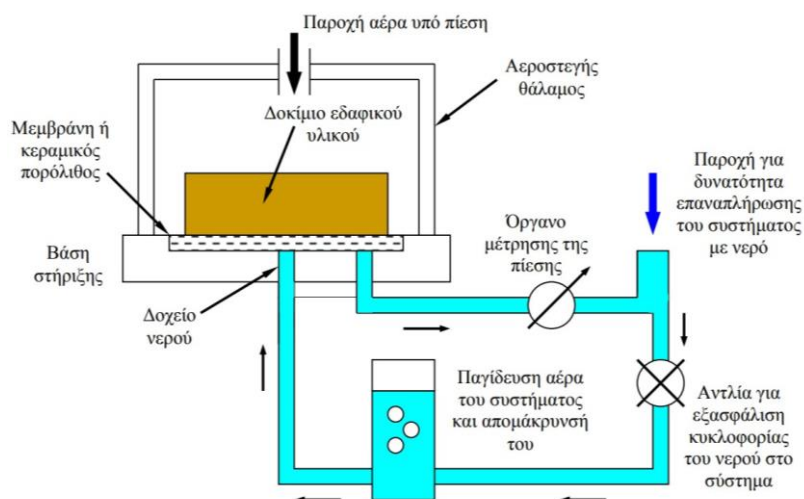
Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Χαρτιών φίλτρου σε απόσταση από το εδαφικό δείγμα	NAI	NAI (;)	1000 έως 500000 kPa (ακριβέστερα 1000 έως 30000 kPa)	Τουλάχιστον 7-14 ημέρες
Ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης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

Πίνακας 3.4 : Στοιχεία μεθόδων προσδιορισμού της μύζησης εδαφικού σκελετού (Μπαρδάνης & Λουκίδης, 2019)

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Μεμβράνης ή πορολίθου	NAI	OXI	Έως 100 kPa	Ώρες
Μετατόπισης άξονα	NAI	OXI	Όση η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορολίθου. Συνήθως 1500 kPa	Ώρες έως 24ώρα
Χαρτιών φίλτρου σε επαφή με το εδαφικό δείγμα	NAI	NAI (;)	0 έως 500000 kPa (ακριβέστερα 30 έως 3000 kPa)*	Τουλάχιστον 7 ημέρες
Τεμαχίων γύψου	NAI	NAI	5 – 3000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τεμαχίων κοκκώδους σκελετού	NAI	NAI	0 – 200 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τεμαχίων πορωδών υλικών FDR	NAI	NAI	10 – 100000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας	NAI	NAI	5 – 1500 kPa	5-25 ημέρες (υπάρχουν ενδείξεις για επίτευξη μέσα σε ώρες για πολύ καλή επαφή αισθητήρα-εδάφους)
Ηλεκτρομαγνητική	NAI (;)	NAI	0 – 1000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	NAI	NAI	0 - 90 kPa	Λεπτά (1 – 30')
Τενσιόμετρα τύπου Quickdraw	NAI	NAI	0 - 90 kPa	Λεπτά (2 - 10')
Τενσιόμετρα πορώδους άκρου υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	NAI	NAI	0 - 2000 kPa	Λεπτά έως ώρες
Ωσμωτικά τενσιόμετρα	NAI	OXI	0 - 1500 kPa	Ώρες



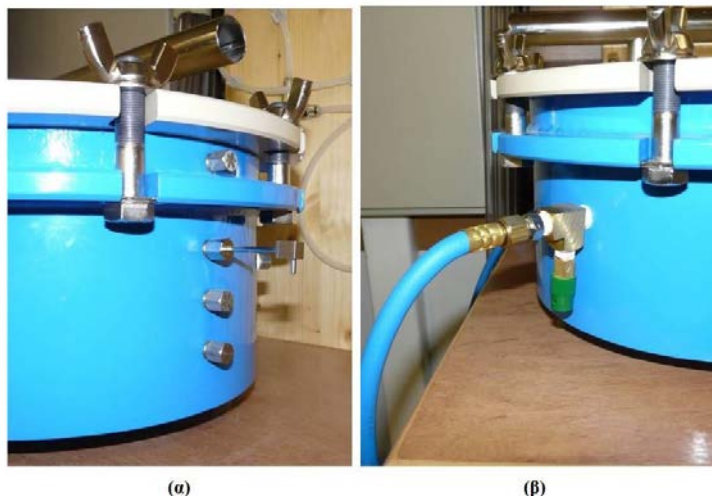
Σχήμα 3.1 : Προσδιορισμός μύζησης με τη μέθοδο μεμβράνης ή με τη χρήση κεραμικού πορόλιθου. (Μπαρδάνης, 2016)



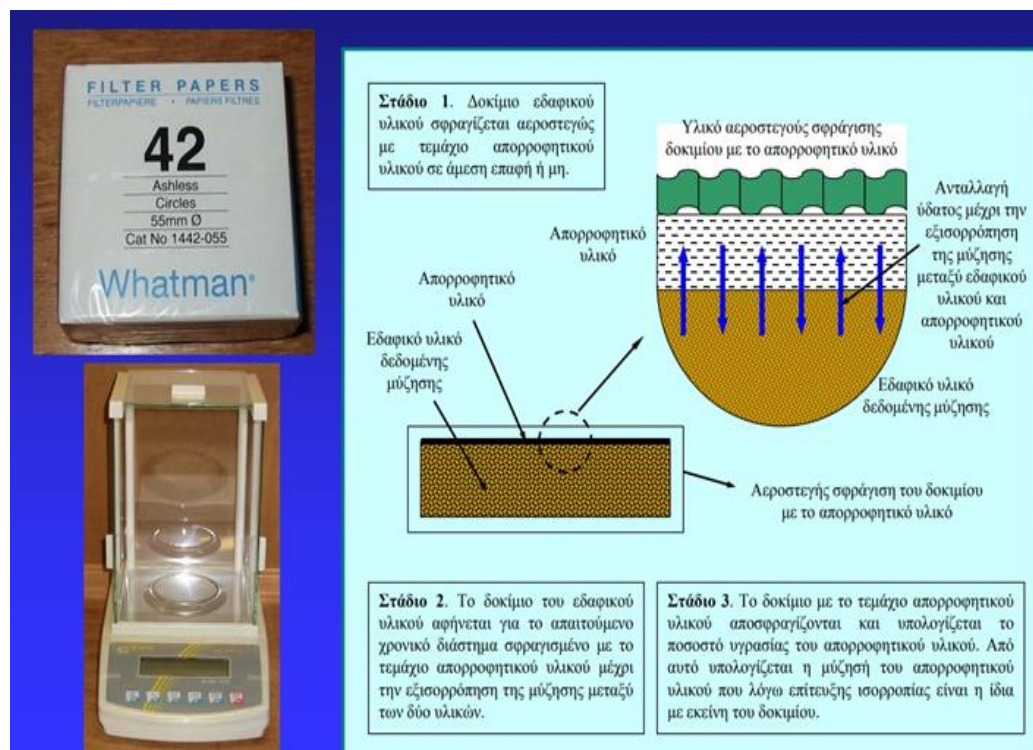
Σχήμα 3.2 : Προσδιορισμός μύζησης με τη μέθοδο μετατόπισης του άξονα. (Μπαρδάνης, 2016)



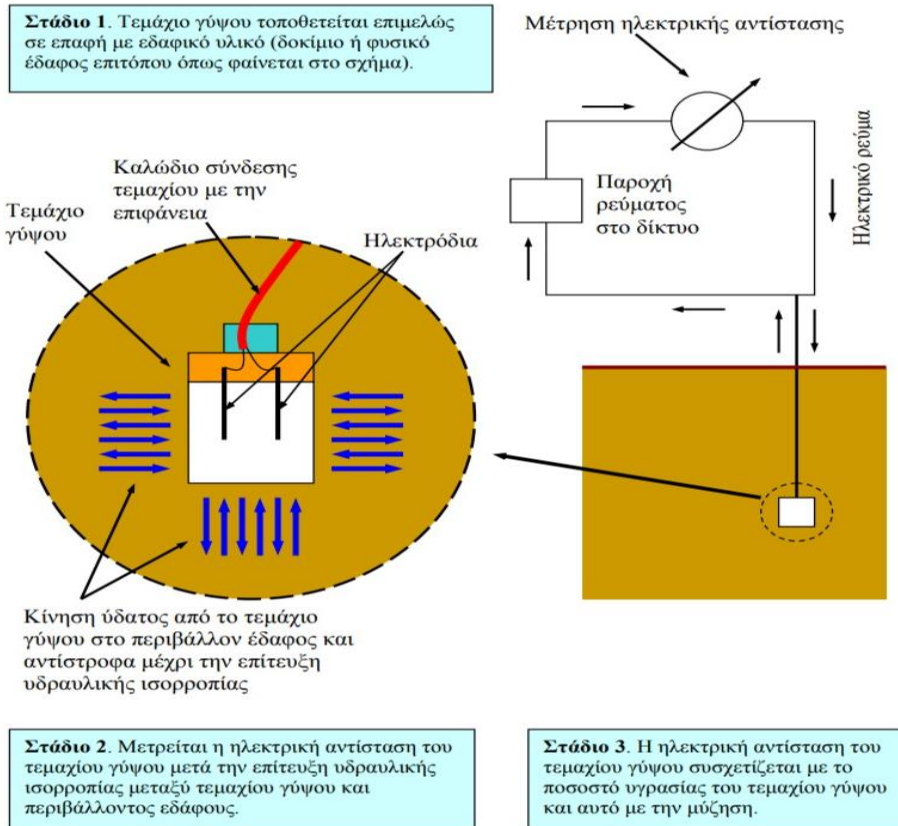
Σχήμα 3.3 : Μέθοδος προσδιορισμού μύζησης με τη μέθοδο θαλάμου μύζησης. (Μπαρδάνης & Καββαδάς, 2005)



Σχήμα 3.4 : Έξοδοι αέρα στο θάλαμο μύζησης (α) και είσοδος πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο (β).
(Μπαρδάνης, 2016)



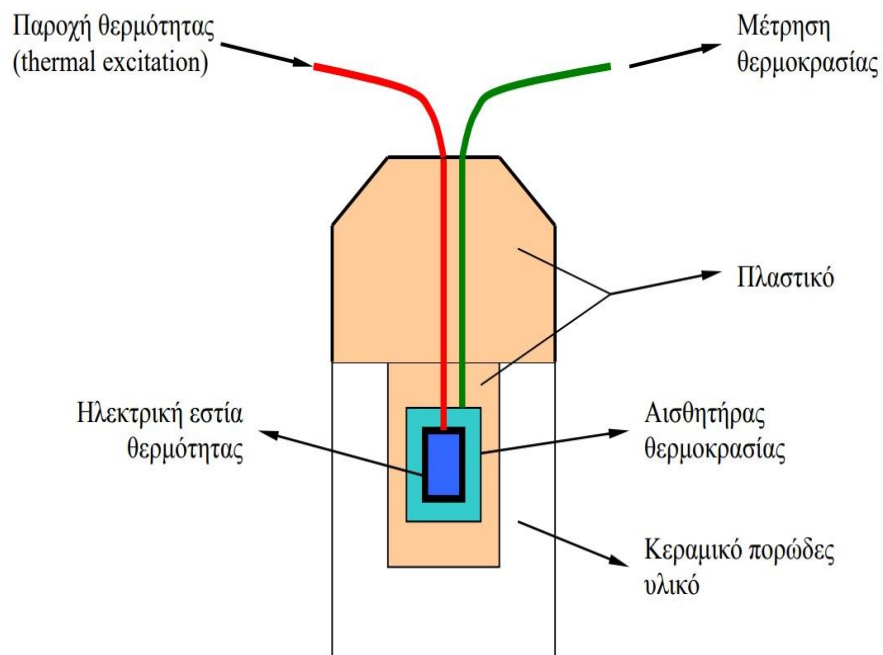
Σχήμα 3.5 : Μέθοδος προσδιορισμού μύζησης με τη μέθοδο του χάρτινου φίλτρου
(Μπαρδάνης, 2012)



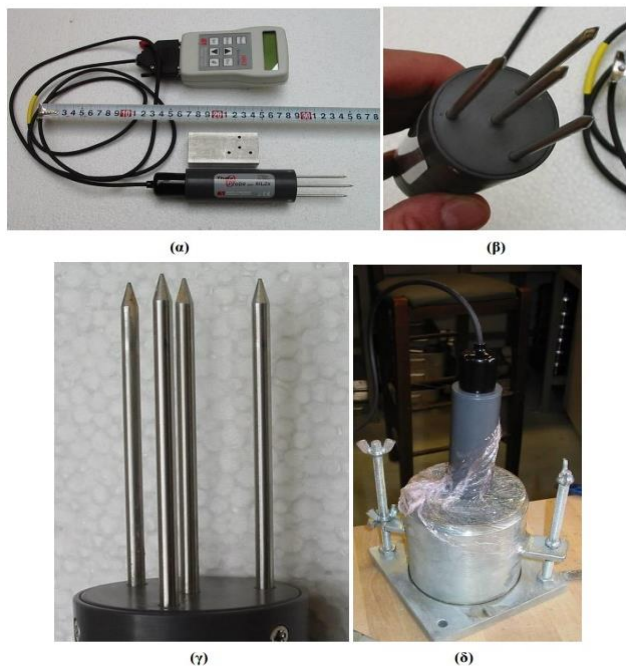
Σχήμα 3.6 : Μέθοδος προσδιορισμού μύζησης με τη χρήση γύψου. (Μπαρδάνης, 2016)



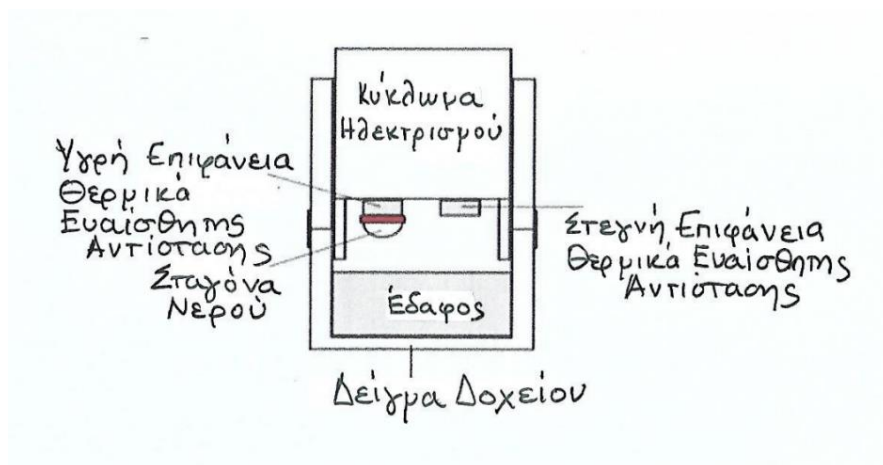
Σχήμα 3.7 : Ύψος και σύστημα μέτρησης για τον προσδιορισμό της μύζησης (α) τμήματα γύψου (β) πορώδες υλικό (γ) τα ίδια μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης στο πεδίο. (Μπαρδάνης, 2016)



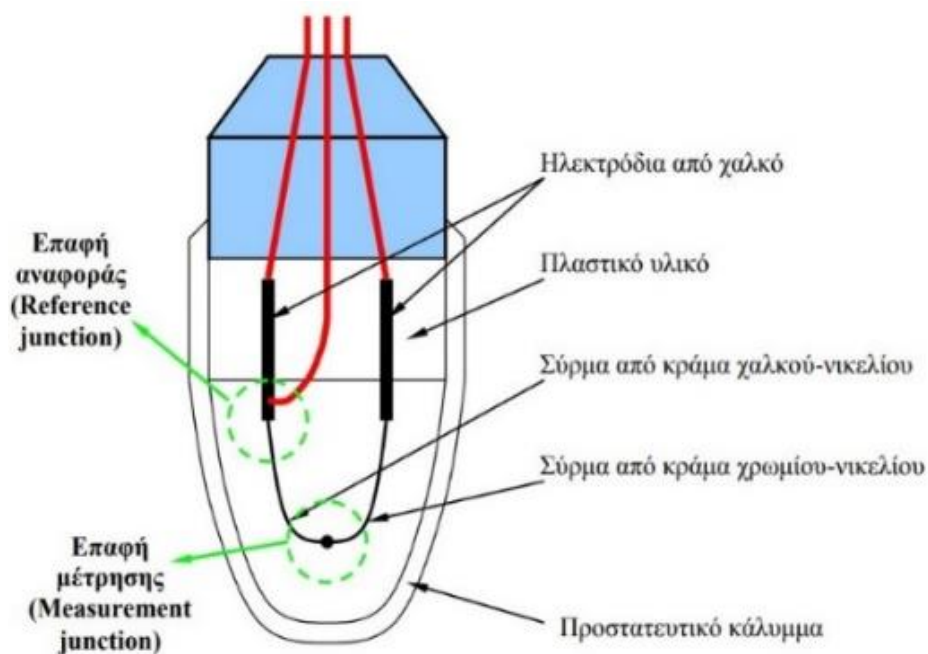
Σχήμα 3.8 : Αισθητήρας θερμικής αγωγιμότητας. (Μπαρδάνης, 2016)



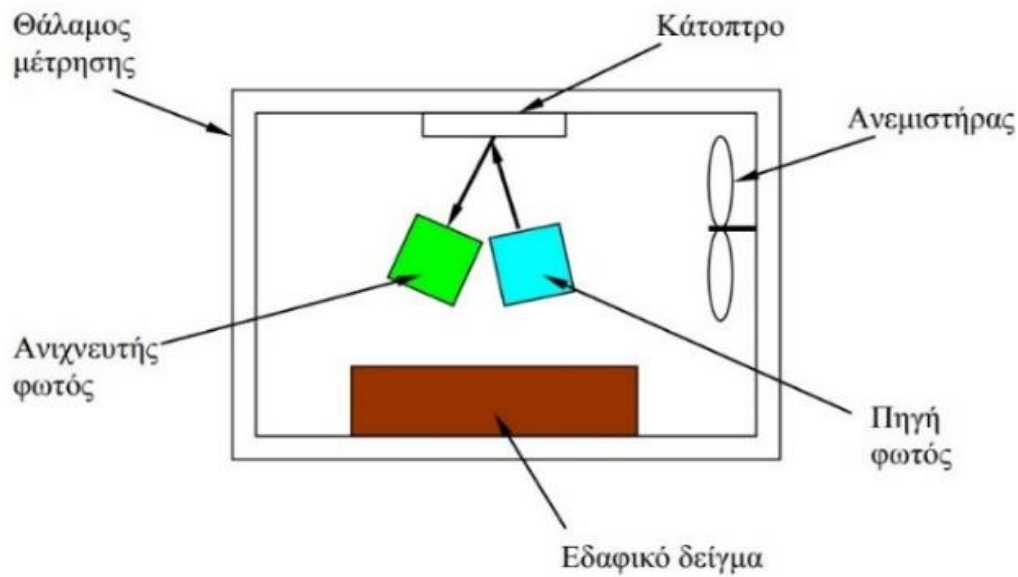
Σχήμα 3.9 : Αισθητήρας FDR για τον προσδιορισμό της ογκομετρικής υγρασίας στο έδαφος (α), ακίδες μέτρησης (β και γ) και μήτρα με συμπυκνωμένο εδαφικό υλικό και αισθητήρα μέτρησης (δ). (Μπαρδάνης, 2016)



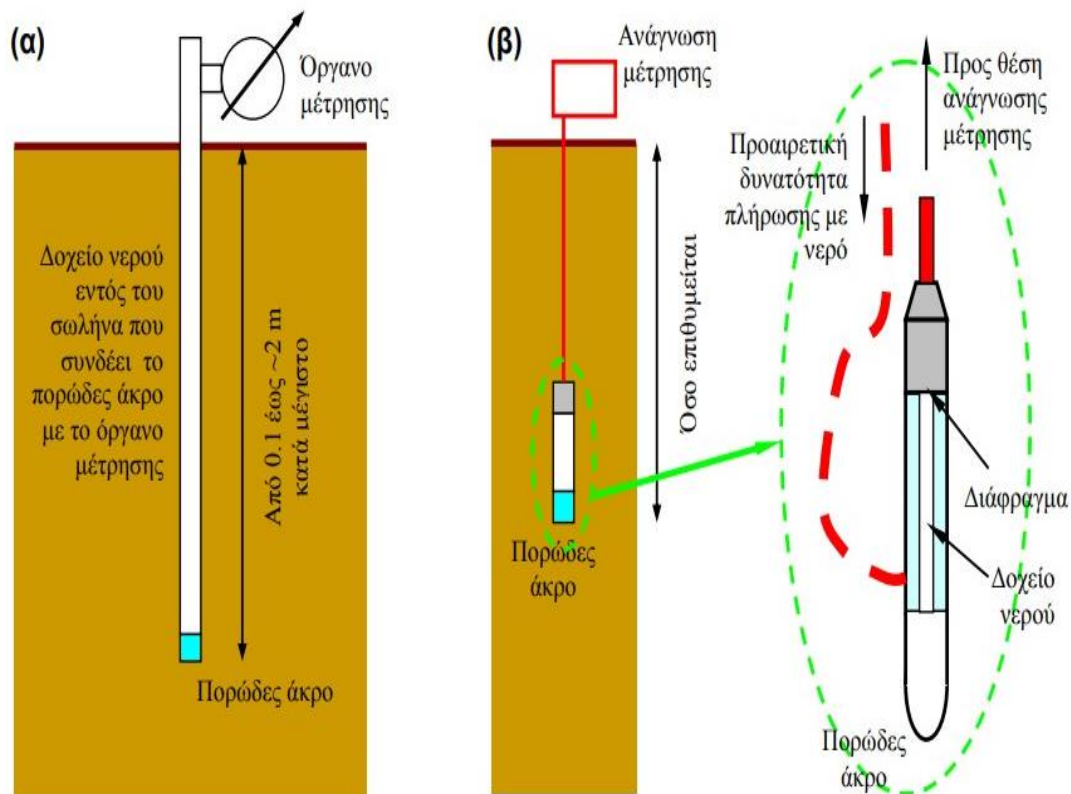
Σχήμα 3.10 : Ψυχρόμετρο θερμικά ευαίσθητης αντίστασης. (Fonjo, Ray & Theron, 2020)



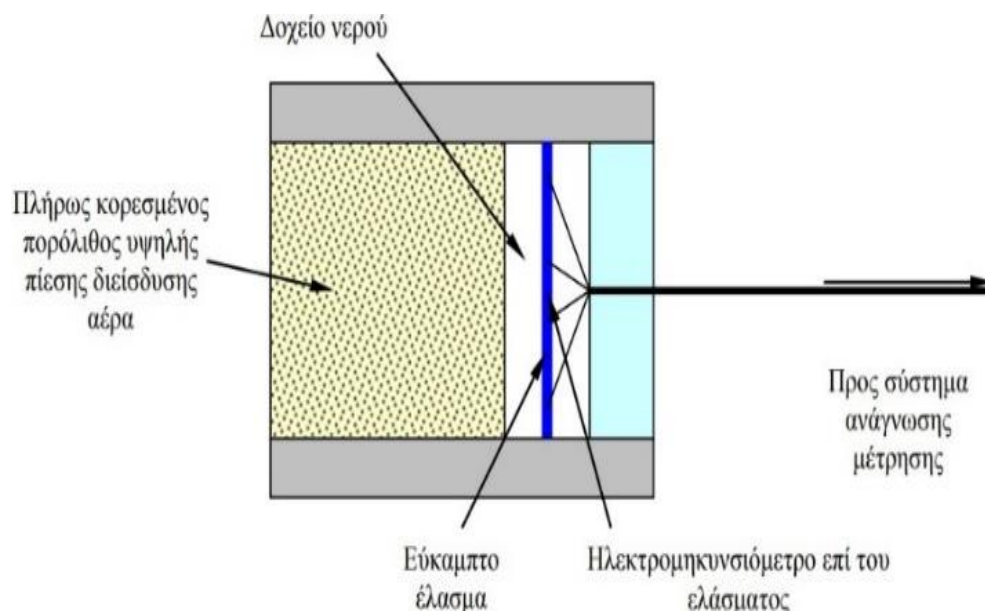
Σχήμα 3.11 : Διάταξη επαφών εντός ψυχρομέτρου φαινομένου Peltier. (Μπαρδάνης, 2016)



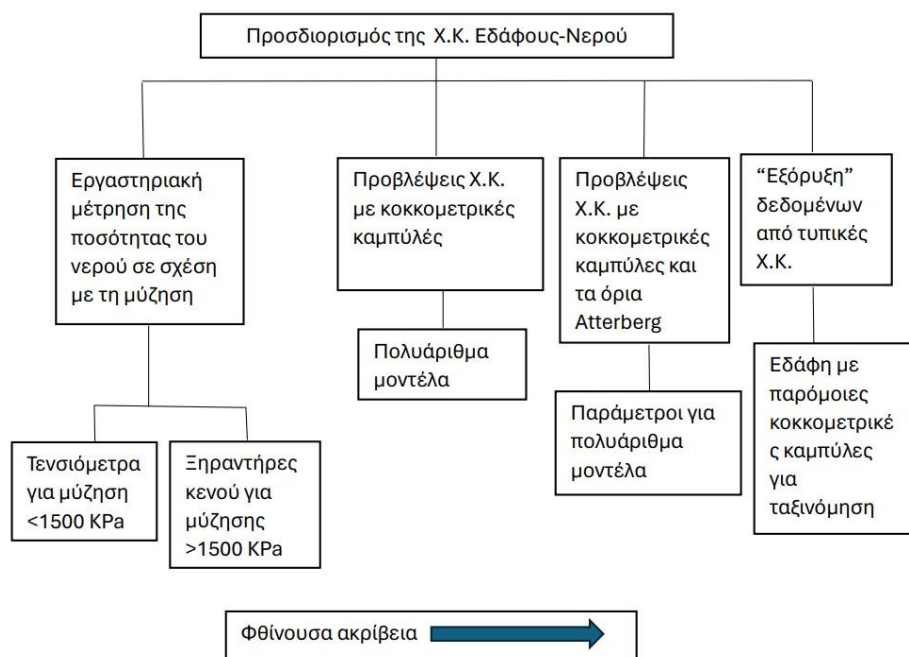
Σχήμα 3.12 : Σχηματική απεικόνιση υγρομέτρου με ψυχρό κάτοπτρο. (Μπαρδάνης, 2016)



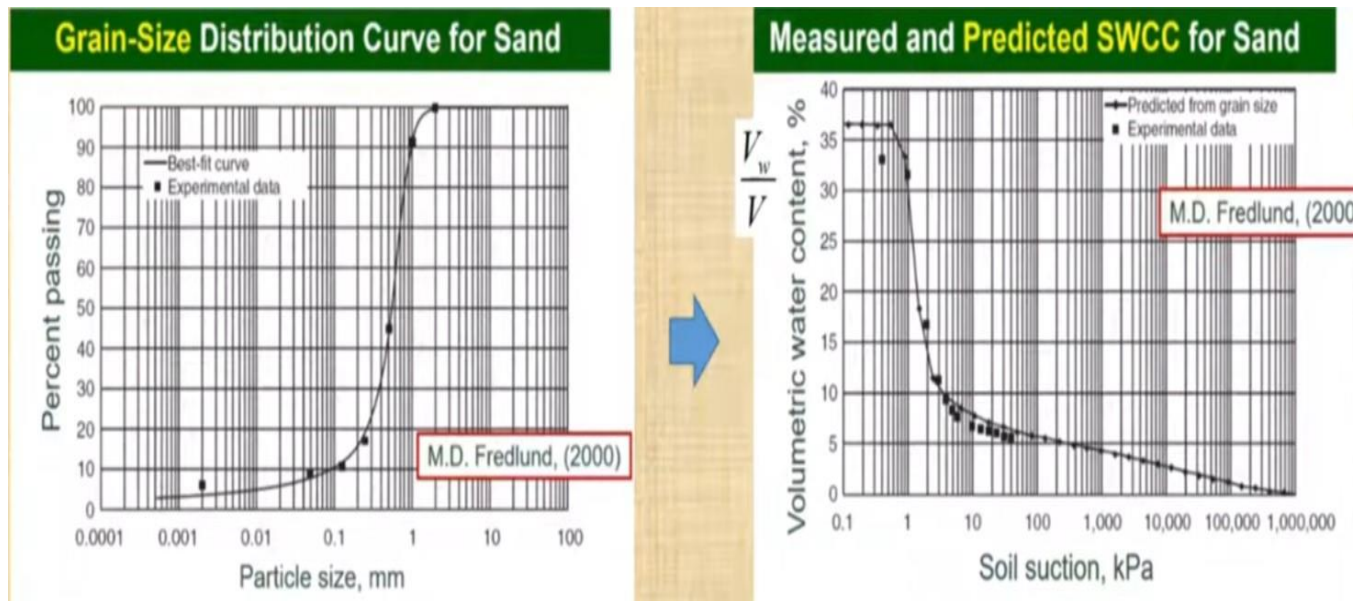
Σχήμα 3.13 : Μέτρηση της μύζησης με τη χρήση тенσιόμετρου με το όργανο μέτρησης (α) στην επιφάνεια του εδάφους και (β) εντός του εδάφους κοντά στο πορώδες άκρο του тенσιόμετρου. (Μπαρδάνης, 2016)



Σχήμα 3.14 : Σχηματική απεικόνιση τενσιόμετρου (υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα). (Μπαρδάνης, 2016)



Σχήμα 3.15 : Προσδιορισμός Χ.Κ. (Μ.Καββαδάς, 2021)



Σχήμα 3.16 : Προσδιορισμός Χ.Κ. μέσω κοκκομετρικής καμπύλης. (Μ.Καββαδάς, 2021)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Η μελέτη των ακόρεστων εδαφών παρουσιάζει και πολλά προβλήματα, όπως η δυσκολία στους υπολογισμούς διάφορων μεγεθών που αποτελούν βάση για την κατανόηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Για τον υπολογισμό της πραγματικής μύζησης σε ένα πραγματικό πρόβλημα απαιτείται η ανάλυση του προβλήματος, η μέτρηση των παραμέτρων του προβλήματος καθώς και η αριθμητική επίλυση. Η αριθμητική επίλυση πραγματοποιείται συνήθως σε σύνθετα προβλήματα. Για τα παραπάνω έχουν δημιουργηθεί καταστατικά προσομοιώματα.

4.1 ΘΕΡΜΟ-ΥΔΡΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΟ ΜΕΣΟ

Στο κομμάτι της ανάλυσης ενός προβλήματος ακόρεστων εδαφών χρειάζονται οι εξισώσεις ισορροπίας. Εκτός από τις εξισώσεις ισορροπίας (μηχανική συμπεριφορά) απαιτείται ανάλυση της κίνησης του νερού των εδαφών και πολλές φορές η επιρροή της θερμότητας στο πρόβλημα. Σε περίπτωση εξάτμισης θερμαίνεται το έδαφος οπότε η εξάτμιση είναι ένα πρόβλημα των ακόρεστων εδαφών που εξαρτάται και από τη θερμοκρασία εκτός από τη κίνηση του νερού. Σε πολλά ακόρεστα εδάφη υπάρχουν θέματα θέρμανσης μέσα από την αποθήκευση πυρηνικών αποβλήτων, τα οποία είναι θερμά άρα η κίνηση του νερού μέσα στους πόρους του εδάφους εξαρτάται και από τη θερμοκρασία. Τελικά το πρόβλημα των ακόρεστων εδαφών είναι ένα θερμο-υδρο-μηχανικό πρόβλημα σε πολυφασικό υλικό (αέρας, νερό και κόκκοι). Για την επίλυση του θερμο-υδρο-μηχανικού προβλήματος χρειάζονται οι τρεις νόμοι: t

A. Διατήρηση της ορμής (Εξισώσεις ισορροπίας)

Για την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας χρησιμοποιείται η εξίσωση τάσεων-παραμορφώσεων. Για τον υπολογισμό της εξίσωσης τάσεων-παραμορφώσεων απαιτείται μέτρηση παραμέτρων, όπως το μέτρο ελαστικότητας (E):

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x = 0 \quad \text{Εξ.(1)}$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y = 0 \quad \text{Εξ.(2)}$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0 \quad \text{Εξ.(3)}$$

με εξίσωση τάσεων-παραμορφώσεων:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Εξ. (4)}$$

Β. Διατήρηση της μάζας (Εξίσωση συνέχειας)

$$\nabla v = \nabla(k \nabla h) = \frac{k_x^w \partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial k_x^w}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{k_y^w \partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial k_y^w}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} = -m_2^w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Εξ. (5)}$$

με το νόμο του Darcy:

$$v = -k \nabla h \Rightarrow vx = -kx \frac{\partial h}{\partial x}, vy = -ky \frac{\partial h}{\partial y}, vz = -kz \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{Εξ. (6)}$$

Γ. Διατήρηση της ενέργειας (Διάχυση θερμότητας)

$$\nabla(K_T \nabla T) = -\frac{p_c dT}{dt} \quad \text{Εξ. (7)}$$

με:

$$q = -K_T \nabla T \quad \text{Εξ. (8)}$$

Οι εξισώσεις ισορροπίας για τον υπολογισμό της κίνησης διότι σε ένα ασυμπίεστο έδαφος, δηλαδή όταν η διάταξη των κόκκων παραμένει σταθερή το πρόβλημα μπορεί να λυθεί μόνο με την εξίσωση συνέχειας, αλλά στη πραγματικότητα όταν υπάρχει κίνηση νερού στους πόρους αλλάζει η μύζηση συνεπώς και η συμπίεστικότητα του εδάφους (αλλαγή του δείκτη πόρων e). Όταν γίνεται μεταβολή του δείκτη πόρων ενός εδάφους, αλλάζουν οι τάσεις, συνεπώς οι εξισώσεις ισορροπίας. Δηλαδή η κίνηση του νερού εξαρτάται από τη μύζηση και η μύζηση απαιτεί την ανάλυση των εξισώσεων ισορροπίας (Στερεοποίηση Terzaghi).

Εξαιτίας της μύζησης που δημιουργείται στους πόρους του εδάφους αλλάζει ο όγκος. Αν η διαπερατότητα του εδάφους εξαρτάται και από τη θερμότητα τότε εμπλέκεται η διάχυση της θερμότητας. Δηλαδή πρέπει να καταγράφεται σε κάθε σημείο πόσο θερμό είναι το έδαφος, για τον προσδιορισμό της σχετικής υγρασίας και μέσω αυτής την εκτίμηση της μύζησης.

4.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ Χ.Κ.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν έμμεσα τη χαρακτηριστική καμπύλη είναι οι παράμετροι των καταστατικών σχέσεων:

μηχανικές:

συμπιεστότητα και αντοχή

ροής νερού

Διαπερατότητα και υδραυλική αποθηκευτικότητα

ροής θερμότητας

Διαπερατότητα και θερμική αποθηκευτικότητα

Οι παράμετροι εξαρτώνται από τη μύζηση και είναι εντόνως μη γραμμικές. Η μέτρηση των παραμέτρων πρέπει να γίνει για ένα εύρος τιμών μύζησης. Επιπλέον απαιτούνται εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές πεδίου για το προσδιορισμό τους.

Ωστόσο συχνά για τη μείωση του κόστους οι παράμετροι των ακόρεστων εδαφών εκτιμώνται με εμπειρικούς τρόπους μέσω της Χ.Κ. Η Χ.Κ. δίνει μια ιδέα της συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών (τριχοειδούς ανύψωση, εύρος μύζησης), αποτελεί καταστατική σχέση για την ανάλυση προβλημάτων στην ακόρεστη ζώνη (σχέση θ - s) και βοηθά στον υπολογισμό των εδαφικών παραμέτρων στην ακόρεστη ζώνη (παράμετροι ροής, παράμετροι συμπιεστότητας και παράμετροι αντοχής).

Διαπερατότητα (για διάφορες τιμές της μύζησης)

Ο υπολογισμός της διαπερατότητας γίνεται με συμβατικά διαπερατόμετρα, Σχήμα 4.1. Στο διαπερατόμετρο τοποθετείται το δείγμα σε ένα κουτί. Από την πάνω πλευρά υπάρχει ένα υψηλό πιεζομετρικό φορτίο (s_1) και από την κάτω πλευρά ένα χαμηλό πιεζομετρικό φορτίο (s_2). Με την πίεση που ασκείται το νερό κινείται δια μέσου του εδάφους και γίνεται μέτρηση της διαφοράς των πιέσεων (T_1-T_2). Με την διαδικασία αυτή υπολογίζεται η πτώση του πιεζομετρικού φορτίου δια του μήκους ($(s_1-s_2)/d_1$), συνεπώς υπολογίζεται η υδραυλική κλίση (i). Μετά υπολογίζεται η ταχύτητα και αν διαιρεθεί με την υδραυλική κλίση, υπολογίζεται η διαπερατότητα. Για τα ακόρεστα εδάφη το διαπερατόμετρο διαθέτει και ένα σύστημα μέτρησης της μύζησης. Τελικά γίνεται ταυτόχρονα μέτρηση της μύζησης, της παροχής και της πτώσης του υδραυλικού φορτίου για να υπολογισθεί η διαπερατότητα για διάφορες τιμές της μύζησης, Σχήμα 4.1.

Η διαπερατότητα μειώνεται όταν πραγματοποιείται αποκορεσμός των ακόρεστων εδαφών. Η μείωση της διαπερατότητας με την αύξηση της μύζησης είναι 3-4 τάξεις

μεγέθους, Σχήμα 4.2. Η μείωση της διαπερατότητας πραγματοποιείται εξαιτίας της μείωσης του νερού στους πόρους του εδάφους και της δυσκολίας της ροής του νερού που μπορεί να πραγματοποιηθεί. Οι Fredlund & Reharjo (1993) συμπέραναν ότι η μεταβολή της διαπερατότητας μπορεί να εκφραστεί σε συνάρτηση της μύζησης ή συνάρτηση του βαθμού κορεσμού. Στη σχέση μεταξύ διαπερατότητας και μύζησης παρατηρείται υστέρηση.

Παρατηρείται αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα λόγω της αύξησης της τιμής της μύζησης. Η επίδραση αυτή εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$k_a = k_d \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_{res}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_{res}}\right)} \right] \cdot \frac{1}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right) \right]^m} \right\}^2 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_{res}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_{res}}\right)} \right] \cdot \frac{1}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right) \right]^m} \right\}^{1/q}$$

Εξ.(9)

4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΤΜΙΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Όσο μεγαλύτερη είναι η μύζηση τόσο μεγαλώνει η αντοχή. Τα ακόρεστα εδάφη έχουν μεγάλη αντοχή. Σε περίπτωση βροχόπτωσης αυξάνει ο βαθμός κορεσμού του εδάφους λόγω της βροχόπτωσης που εισχωρεί στο έδαφος, μειώνεται η μύζηση και συνεπώς και η αντοχή και τελικά καταρρέουν τα πρανή.

Ο προσδιορισμός της αντοχής των ακόρεστων εδαφών έχει απασχολήσει πολλούς μελετητές. Ένας από τους πρώτους προσδιορισμούς είναι των Bishop et al 1960:

$$\tau = c' + [\sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad \text{Εξ.(10)}$$

για $\chi=0$ στα ξηρά κλήματα και $\chi=1$ στα κορεσμένα, η Εξ.(10) συμφωνεί με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, Εξ.(11):

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \varphi' \quad \text{Εξ.(11)}$$

Αρχικά θεωρήθηκε ότι οι γωνίες τριβής κορεσμένων και ακόρεστων εδαφών (φ' και φ_b) δεν επηρεάζονται από την τιμή της μύζησης, άρα η επίδραση της μύζησης στην μέτρηση της διατμητικής αντοχής είναι ισοδύναμη με την αύξηση της ενεργούς συνοχής, Εξ.(12):

$$C = c' + (u_a - u_w) \varepsilon \varphi \varphi_b \quad \text{Εξ. (12)}$$

Οι Escario και Saez 1986 με δοκιμή άμεσης διάτμησης έδειξαν ότι η φ_b δεν είναι δυνατόν να θεωρείται σταθερή σε συνέχεια της μεταβολής της μύζησης. Η άποψη των Escario et al 1989 είναι ότι για μεγάλες τιμές μύζησης, οι τιμές της φ_b είναι αρνητικές και της φαινόμενης συνοχής προσεγγίζουν στο μηδέν κατά την ξήρανση των εδαφών. Επιπλέον έρευνες από τους Fredlund, Raharjo και Gan 1987 απέδειξαν παρόμοια αποτελέσματα, δηλαδή ότι η φ_b αρχικά είναι ίση με την φ' και όσο αυξάνεται η μύζηση καταλήγει σε μια σταθερή μικρή τιμή. Τελικά σύμφωνα με τις παραπάνω μελέτες για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της φ_b και της μύζησης, Σχήμα 4.3.

Οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής μπορούν να μετρηθούν και με δοκιμές όπως:

(α) τριαξονική δοκιμή

Οι τριαξονικές δοκιμές πραγματοποιούνται με τον έλεγχο και τη μέτρηση των πιέσεων ύδατος και αέρα και της μεταβολής του όγκου στο εσωτερικό του δοκιμίου. Το άθροισμα της μεταβολής του όγκου νερού και αέρα δίνει τη συνολική μεταβολή του όγκου του δοκιμίου. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την εφαρμογή της επιθυμητής μύζησης στο δοκίμιο. Η ακρίβεια των μετρήσεων των μεταβολών του όγκου από διάφορες μελέτες είναι ικανοποιητική υπό κατάλληλες προφυλάξεις ή αποφυγή διαρροών από τα όργανα μέτρησης.

(β) δοκιμή άμεσης διάτμησης

Για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης χρησιμοποιείται η αυτοματοποιημένη συσκευή κλειστού τύπου, η οποία ελέγχει τις πιέσεις των πόρων. Για τη πραγματοποίηση της δοκιμής εφαρμόζεται μια τιμή πίεση αέρα στο δείγμα. Ο αέρας αποθηκεύεται σε θάλαμο. Επίσης γίνεται εφαρμογή της πίεσης του ύδατος των πόρων και έλεγχος της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κυψέλης.

4.4 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

4.4.1 Κορεσμένα Εδάφη

Στα πλήρως κορεσμένα εδάφη η τάση που προκαλείται από το στερεό κομμάτι σ_s , του εδάφους είναι η διαφορά της εξωτερικής ολικής τάσης σ και της πίεση του

ύδατος των πόρων u_w . Η υγρή φάση δεν παραλαμβάνει διατμητική τάση άρα το ποσοστό τάσης μεταφράζεται σε πίεση, άρα ισχύει:

$$\sigma_s = \sigma - u_w \quad \text{Εξ. (13)}$$

Οι μεταβολές των τάσεων συμβαίνουν εξαιτίας της μεταβολής της ενεργού τάσης, χωρίς την επιρροή της ενεργού τάσης στη μεταβολή της ολικής τάσης ή στη μεταβολή της πίεσης πόρων. Είναι αδύναμη η αρχή των ενεργών τάσεων για εδάφη γεμάτα με νερό όπως και η ορθότητα της πρότασης αυτής: «Όλα τα παρατηρούμενα φαινόμενα που προκαλεί η μεταβολή της τάσης οφείλονται αποκλειστικά σε μεταβολές στην μέση ενεργό τάση (λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του χρόνου)».

Στα εδάφη γεμάτα με νερό, δεν έχει βρεθεί έννοια που να συσχετίζει την ολική τάση με την πίεση του ύδατος των πόρων και, κάθε μεταβολή των τάσεων στα εδάφη συμβαίνει εξαιτίας της μεταβολής της ενεργού τάσης, χωρίς να έχει σημασία από που προκαλείται η μεταβολή της. Η ύπαρξη έννοιας που να συσχετίζει την ολική τάση και την πίεση του ύδατος δεν προκαλεί προβληματισμό, αν η έννοια μένει ανεπηρέαστη από την κατάσταση του εδάφους.

Η πιο σωστή διατύπωση για τις συνιστώσες τάσεις των κορεσμένων εδαφών είναι ο τανιστής στο τρισδιάστατο χώρο:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x - u_w & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_w & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_w \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. (14)}$$

4.4.2 Ακόρεστα Εδάφη

Στα ακόρεστα εδάφη συνυπάρχουν έδαφος, νερό και αέρας. Κάθε στοιχείο αναπτύσσει μία τάση που επιδρά και όλες μαζί ισορροπούν με την εξωτερική ολική τάση. Το νερό και ο αέρας δεν αναπτύσσουν διατμητική τάση, επομένως αναπτύσσουν πίεση και ισχύει:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad \text{Εξ. (15)}$$

Έχει γίνει μια προσπάθεια και στα ακόρεστα εδάφη για τον συνδυασμό των τάσεων και των πιέσεων να διατυπωθεί με μια και μοναδική παράμετρο, οι μεταβολές της οποίας θα αντιπροσωπεύουν την αναγκαία και ικανή συνθήκη για

την επεξήγηση όλων των μεταβολών στη μηχανική απόκριση των ακόρεστων εδαφών.

Για την κατανόηση της αρχής των ενεργών τάσεων πρέπει να αναφερθεί η αρχή κατά Terzaghi (1936) και η έννοια της ενεργό τάσης: Απαραίτητη προϋπόθεση για να ορίζεται μια ποσότητα ενεργό τάση είναι οι μεταβολές του, να επηρεάζουν κάθε μεταβολή που συμβαίνει στη μηχανική απόκριση του εδάφους, και κάθε διαφοροποίηση στη μηχανική απόκριση του εδάφους να αντιστοιχεί σε μία αλλαγή της τιμής της ποσότητας αυτής, σε συνάρτηση με το χρόνο, ανεξάρτητα από τις μεμονωμένες μεταβολές που συμβαίνουν στις φάσεις του υλικού που επηρεάζουν την τελική μεταβολή της ενεργό τάσης. Έχοντας επιβεβαιώσει πειραματικά αυτήν ακριβώς την αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία, ο Terzaghi (1936) συμπέρανε: «Οι τάσεις σε οποιοδήποτε σημείο σε μία διατομή ενός εδαφικού υλικού μπορούν να υπολογιστούν από τις ολικές κύριες τάσεις σ_1 , σ_2 και σ_3 που δρουν σε αυτό το σημείο. Αν τα κενά του εδαφικού υλικού είναι γεμάτα με νερό ευρισκόμενο υπό πίεση u , οι ολικές κύριες τάσεις διακρίνονται σε δύο μέρη. Το ένα μέρος u δρα επί του νερού και του εδάφους με την ίδια ένταση και ονομάζεται ουδέτερη τάση ή πίεση του νερού των πόρων. Η διαφορά:

$$\sigma_1' = \sigma_1 - u, \sigma_2' = \sigma_2 - u, \sigma_3' = \sigma_3 - u \quad \text{Εξ. (16)}$$

αποτελεί μία περίσσεια επί της πίεσης του νερού των πόρων u και δρα αποκλειστικά επί της στερεάς φάσης του εδαφικού υλικού. Το τμήμα αυτό της ολικής κύριας τάσης ονομάζεται ενεργός κύρια τάση».

Οι εξισώσεις της ενεργό τάσης για ακόρεστα εδάφη και η προέλευση τους φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Σε όλες τις εξισώσεις γίνεται χρήση της ολικής τάσης και της πίεση ύδατος ή κάποιας ποσότητας που συνδέεται με αυτήν. Σε μερικές από τις εξισώσεις αξιοποιείται και η πίεση του αέρα. Οι περισσότερες εξισώσεις περιέχουν στο ελάχιστο μία παράμετρος η οποία συσχετίζει τα εντατικά μεγέθη που δρουν στις διαφορετικές φάσεις.

Όπως έχει αποδειχτεί, οι παράμετροι στις εξισώσεις για τον ορισμό της ενεργό τάσης, για ακόρεστα εδάφη δεν πληρούν αυτήν την απαίτηση αλλά εξαρτώνται από την κατάσταση του εδάφους με αποτέλεσμα οι εξισώσεις να ορίζονται ως καταστατικές εξισώσεις. Για πλήρη και ορθή ανάλυση απαιτείται τανιστής τάσεων στο τρισδιάστατο χώρο, ο οποίος έχει δύο μέλη:

(α) καθαρός τανυστής κανονικής τάσης

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. (17)}$$

(β) τανυστής μύζησης

$$s = \begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. (18)}$$

4.5 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Στις εξισώσεις ισορροπίας (αρχή διατήρησης της ορμής) που εκφράζονται μέσω της ολικής τάσης δεν λαμβάνεται υπόψη η μύζηση διότι για την Εξ.(1) από την §4.1 και να προστεθεί η μύζηση ισχύει : $\frac{\partial u_a}{\partial x} = 0$, αντίστοιχα για τις Εξ.(2) και (3) για τις συνιστώσες γ: $\frac{\partial u_a}{\partial y} = 0$ και z: $\frac{\partial u_a}{\partial z} = 0$.

Η μύζηση εισάγεται στην ανάλυση μέσω των καταστατικών σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων διότι η ογκομετρική παραμόρφωση εξαρτάται από τη μύζηση:

$$\Delta \varepsilon_v = \Delta \varepsilon_v (\Delta p, \Delta s) \quad \text{Εξ. (19)}$$

με $\Delta \varepsilon_v$: μεταβολή της παραμόρφωσης.

Με την εισαγωγή της μύζησης απαιτείται και μίας παραμόρφωσης, το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας (θ):

$$\theta = V_w / V \quad \text{Εξ. (20)}$$

με V_w : όγκος νερού και V : συνολικός όγκος.

4.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Η συσχέτιση της μύζησης με τη συμπίεστικότητα των εδαφών ήταν από τις πρώτες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστήριο. Οι Alonso et al. (1990) θεώρησαν ότι η συμπίεστικότητα ήταν αρχικά σταθερή, k_s . Η θεώρηση για την συμπίεστικότητα σταθερή, ισχύει όσο η τρέχουσα μύζηση δεν ξεπερνά τη τιμή που έχει λάβει παλιότερα. Όταν η μύζηση ξεπεράσει τη τιμή του παρελθόντος, η συμπίεστικότητα

αυξάνεται, $\lambda_s > k_s$, όπως και οι ογκομετρικές παραμορφώσεις λόγω υδραυλικής φόρτισης, Σχήμα 4.3.

Η θεώρηση αυτή φαίνεται σωστή. Το Σχήμα 4.4 δείχνει δύο περιπτώσεις μεταβολής του όγκου συμπυκνωμένων υλικών με τη κυκλική μεταβολή της μύζησης. Από το Σχήμα 4.4 παρατηρείται μεταβολή της συμπίεστικότητας πριν την παρελθοντική τιμή της μύζησης. Τα αποτελέσματα αυτά δεν αντιπροσωπεύουν την θεώρηση των Alonso et al..

Η χαρακτηριστική καμπύλη του Σχήματος 4.5 δείχνει ότι η γραμμή συμπίεσης δεν είναι γραμμική, διαφορετικά δεν θα υπήρχε συμβατότητα και την σύνδεση της συμπίεστικότητας με το βαθμό κορεσμού. Σύμφωνα με τους Tsiamprousi et al. (2013), ο δείκτης συμπίεστικότητας ορίζεται από την Εξ.(21).

$$k_s = \chi(S_r)^\omega \quad \text{Εξ. (21)}$$

Σύμφωνα με τη παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους και ισοδύναμης ενεργούς τάσης ο Bishop υπολόγισε τις παραμέτρους συμπίεστικότητας με τις εξισώσεις Hooke:

(α) κορεσμένα εδάφη

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - u_w}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_y + \sigma_z - 2u_w) \quad \text{Εξ. (22)}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y - u_w}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_z - 2u_w) \quad \text{Εξ. (23)}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - u_w}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y - 2u_w) \quad \text{Εξ. (24)}$$

με μ : αναλογία Poisson

(β) ακόρεστα εδάφη

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - u_w}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_y + \sigma_z - 2u_a) + \frac{u_a - u_w}{H} \quad \text{Εξ. (25)}$$

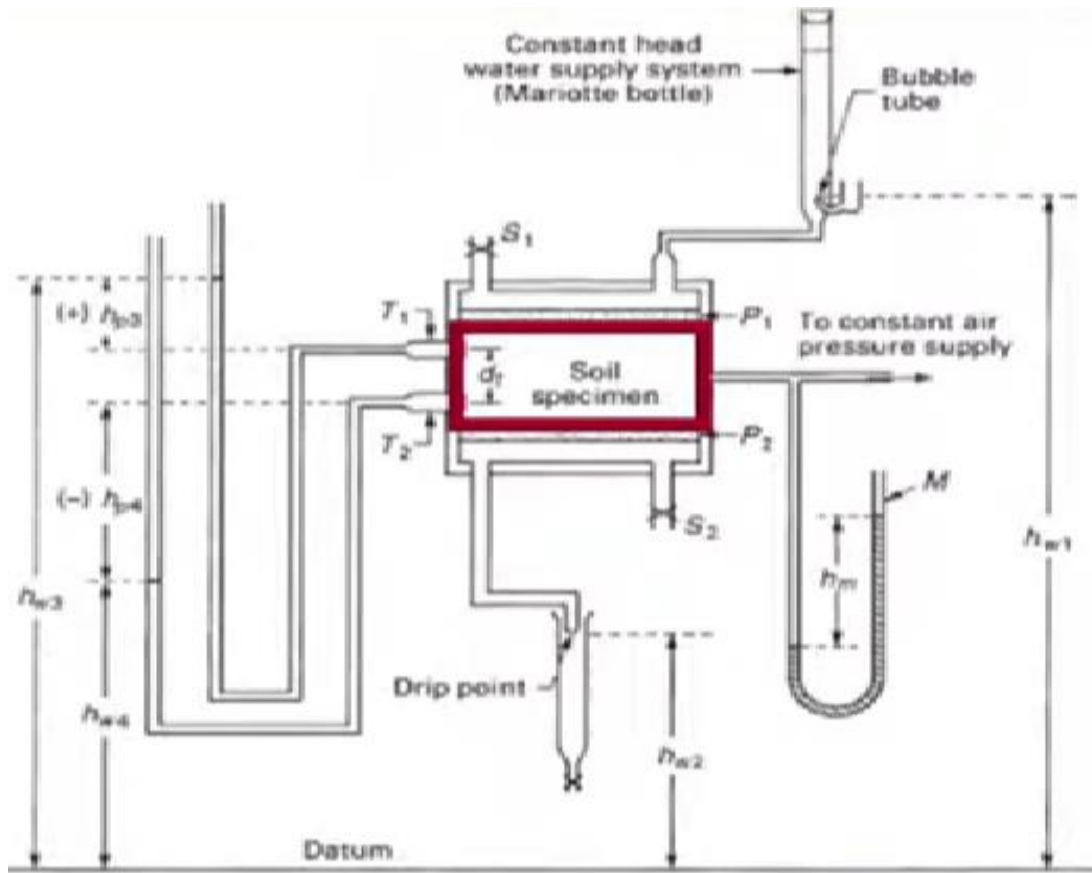
$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y - u_w}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_z - 2u_a) + \frac{u_a - u_w}{H} \quad \text{Εξ. (26)}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - u_w}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y - 2u_a) + \frac{u_a - u_w}{H} \quad \text{Εξ. (27)}$$

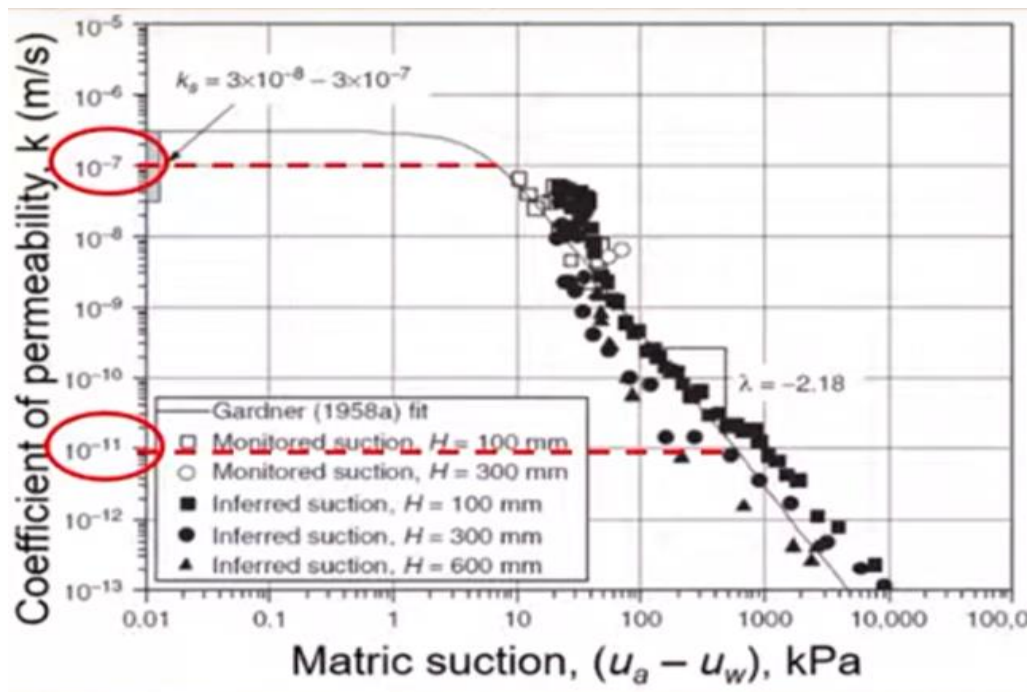
με $H=E/\chi$: παράμετρος συμπίεστικότητας για τα ακόρεστα εδάφη που εξαρτάται από τη μύζηση.

Πίνακας 4.1 : Εξισώσεις της ενεργού τάσης για τα ακόρεστα εδάφη (Μπαρδάνης 2016)

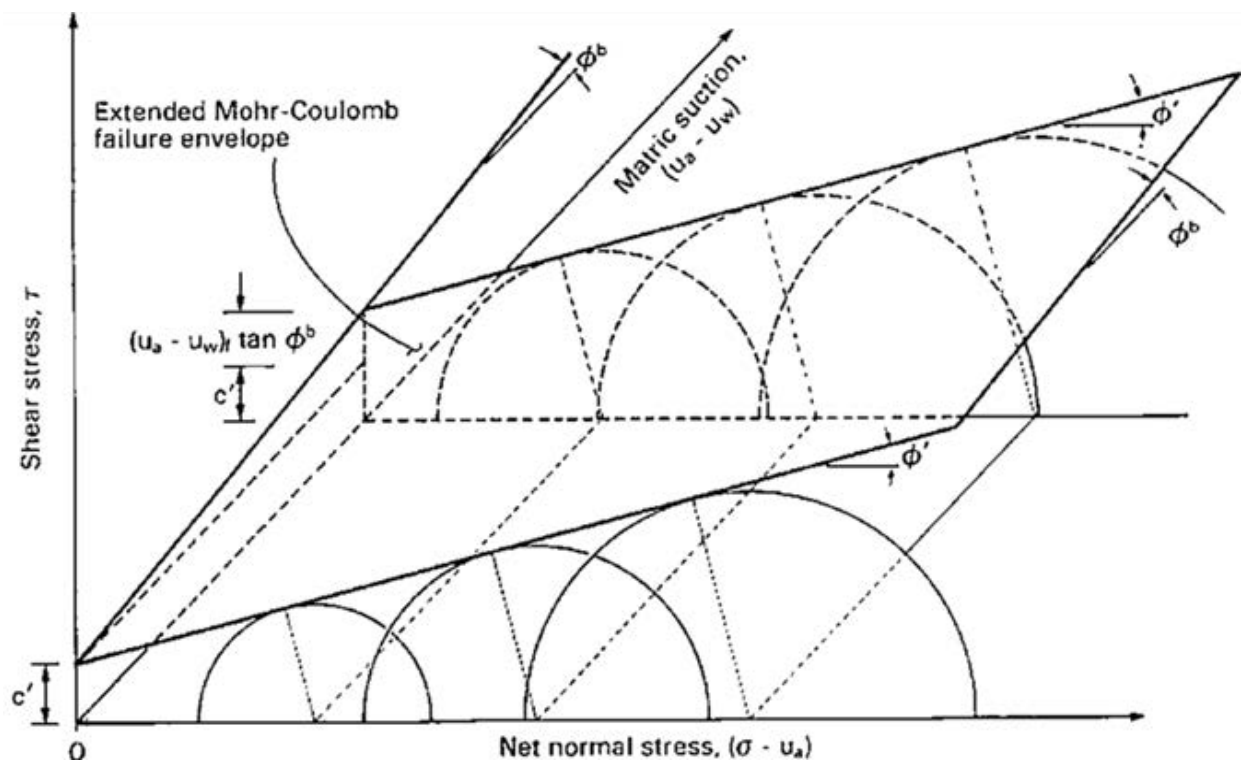
Πηγή	Εξίσωση για την Αρχή των Ενεργών Τάσεων	Περιγραφή μεταβλητών
Hilf, 1956	$u = u_a + u_c,$ (2.20) όπου $u_c = (-) T \{1/r_1 + 1/r_2\}$	T: επιφανειακή τάση του νερού r_1, r_2 : εσωτερική και εξωτερική ακτίνα μηνίσκων υγρής φάσης
Croney, Coleman & Black, 1958	$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$ (2.21)	β' : Παράμετρος «συγκόλλησης» που αποτελεί το μέτρο του αριθμού των δεσμών υπό εφελκυσμό που συνεισφέρουν στην διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού
Bishop, 1959	$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w)$ (2.22)	χ : Παράμετρος που συσχετίζεται με τον βαθμό κορεσμού
Lambe, 1960	$\sigma = \sigma \alpha_m + u_a \alpha_a + u_w \alpha_w + R - A$ (2.23)	α_a : Ποσοστό συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από αέρα α_w : Ποσοστό συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από νερό α_m : Ποσοστό συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από τη στερεά φάση
Aitchison, 1961	$\sigma' = \sigma + \psi p''$ (2.24)	ψ : Παράμετρος με τιμές από 0 έως 1 p'' : υπόλειμμα πίεσης του νερού των πόρων
Jennings, 1961	$\sigma' = \sigma + \beta p''$ (2.25)	β : Στατιστικός συντελεστής ίδιου τύπου με την επιφάνεια επαφής. Πρέπει να μετρείται πειραματικά σε κάθε ξεχωριστή περίπτωση
Richards, 1966	$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m (h_m + u_a) + \chi_s (h_s + u_a)$ (2.26)	χ_m : Παράμετρος ενεργού τάσης για την μύζηση εδαφικού σκελετού h_m : Μύζηση εδαφικού σκελετού χ_s : Παράμετρος ενεργού τάσης για την ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης h_s : Ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης



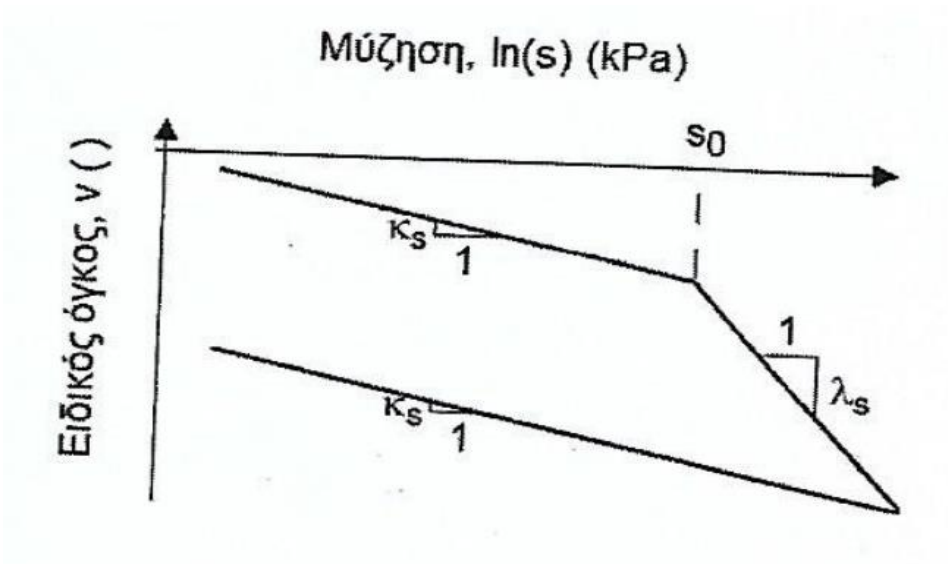
Σχήμα 4.1 : Μέτρηση διαπερατότητας για ακόρεστα εδάφη. (Καββαδάς, 2021)



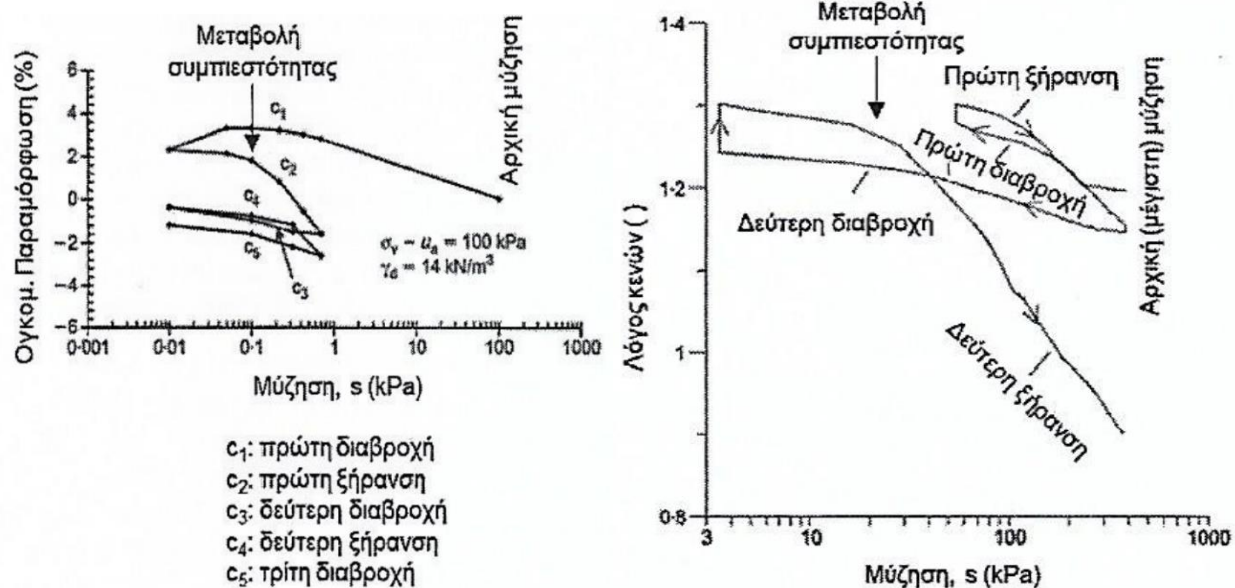
Σχήμα 4.2: Μέτρηση της διαπερατότητας για διάφορες τιμές μύζησης. (Καββαδάς, 2021)



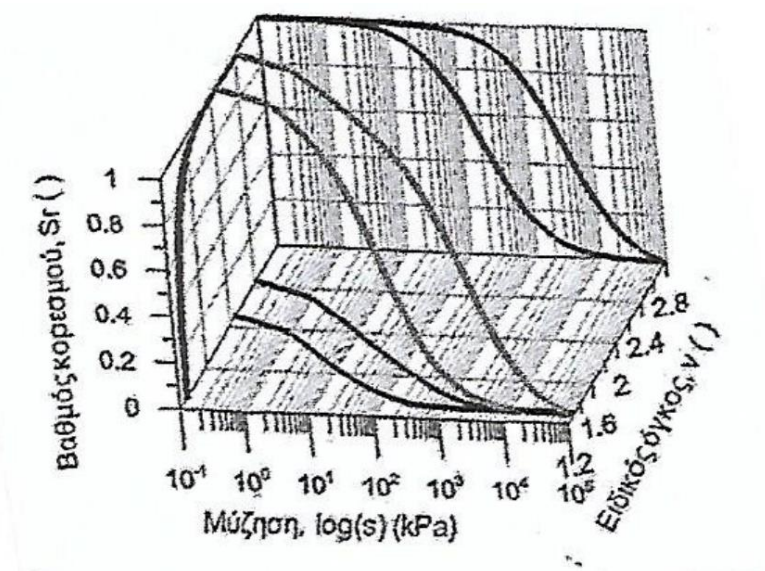
Σχήμα 4.3 : Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb στην περίπτωση των ακόρεστων εδαφών. (UM, 2012)



Σχήμα 4.4 : Γραμμή συμπίεσης λόγω μύζησης. (Αικ.Τσιαμπούση, 2019)



Σχήμα 4.5 : Κυκλική διαβροχή και ξήρανση συμπυκνωμένου υλικού. (Αικ.Τσιαμπούση, 2019)



Σχήμα 4.6 : Χαρακτηριστική καμπύλη. (Αικ.Τσιαμπούση, 2019)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν παραδείγματα προβλημάτων που παρουσιάζονται στα ακόρεστα εδάφη όπως η ροή στην ακόρεστη ζώνη των εδαφών εξαιτίας διάφορων φαινομένων (βροχόπτωση, εξάτμιση ή άνοδος του Υ.Ο.), η ροή στα φράγματα, η συμπεριφορά των διογκούμενων και των καταρρέοντων εδαφών και η ευστάθεια πρανών και θεμελιώσεων.

5.1 ΡΟΗ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ

Αρχικά σε ένα ακόρεστο έδαφος υπάρχει υδροστατική ισορροπία, για την οποία κάτω από τη Σ.Υ.Ο η πίεση πόρων είναι θετική και πάνω από τη Σ.Υ.Ο. αρνητική με γραμμική μεταβολή. Στην πραγματικότητα όμως δεν ισχύει η υδροστατική ισορροπία λόγω ροής του νερού προς την επιφάνεια εξαιτίας της εξάτμισης άρα η μεταβολή της πίεσης πόρων και συνεπώς της μύζησης είναι μη γραμμική, Σχήμα 5.1α. Αργότερα εξαιτίας μιας έντονης βροχόπτωσης που εισχωρεί νερό στο έδαφος, μειώνεται η μύζηση και ανεβαίνει η Σ.Υ.Ο. Η μύζηση μπορεί να φτάσει μηδενικές τιμές, μέχρι και θετικές τιμές αν από την έντονη βροχόπτωση δημιουργηθεί φρεάτιος υδροφορέας στο έδαφος, Σχήμα 5.1β. Για τον υπολογισμό της μεταβολής της μύζησης απαιτείται ανάλυση της ροής του εδάφους με τη βοήθεια της εξίσωσης συνέχειας.

Παράδειγμα

Αρχικά σε ένα έδαφος υπάρχει Σ.Υ.Ο. σε βάθος 6m, με την πάροδο του χρόνου κατά τη διάρκεια παρατεταμένης βροχόπτωσης πραγματοποιείται εισροή όμβριων υδάτων από την επιφάνεια και ανεβαίνει η Σ.Υ.Ο. 6m, στην επιφάνεια του εδάφους, Σχήμα 5.2. Στο παράδειγμα του Σχήματος 5.2 δεν υπάρχει ξηρή ζώνη, διότι στην αρχική Σ.Υ.Ο. έχω μηδενική πίεση πόρων και από εκεί και κάτω θετική, ενώ από εκεί και πάνω αρνητική (μέχρι 60 kPa, σημείο Α, στην επιφάνεια του εδάφους). Κάποια στιγμή αρχίζει να βρέχει μέχρι να δημιουργηθεί η τελική Σ.Υ.Ο. στην επιφάνεια του εδάφους. Μετά από τη διαδικασία αυτή παρατηρείται μετατόπιση του σημείου Α (60 KPa, 6m) διότι είναι συνοριακή συνθήκη, αλλά σε κατανομή με το βάθος σε διάφορους χρόνους καταγράφονται διάφορες κατανομές πιέσεων των πόρων με βάσει το χρόνο, Σχήμα 5.2. Τελικά μετά από πολλές μέρες (64d) η πίεση πόρων φτάνει στα +30 KPa διότι υπάρχουν και 3m νερό από πάνω διότι καλύφθηκε το έδαφος με 3m λίμνη. Στην τελική κατάσταση σε βάθος 6m θα έχω +90 KPa και στην

επιφάνεια +30 Kpa άρα η μεταβολή της πίεσης πόρων και μετά από 64 μέρες θα είναι 60 Kpa. Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την άνοδο της Σ.Υ.Ο. (64d) δείχνει ότι το έδαφος έχει μεγάλη διαπερατότητα διότι ήταν σύντομη διαδικασία. Σε εδάφη με μικρή διαπερατότητα η αντίστοιχη διαδικασία θα απαιτούσε χρόνια.

5.2 ΡΟΗ ΣΤΑ ΧΩΜΑΤΙΝΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Η ροή σε φράγματα συμβαίνει και στη κορεσμένη ζώνη και στην ακόρεστη ζώνη οι οποίες διαχωρίζονται με τον εσωτερικό φρεάτιο υδροφορέα, Σχήμα 5.3. Η ροή του νερού μπορεί να παρατηρηθεί:

α. πάνω από τον πυρήνα ενός φράγματος, Σχήμα 5.4α

β. στην ακόρεστη ζώνη μέσα σε ένα φράγμα, Σχήμα 5.4β.

Θεώρηση ροής μόνο στην κορεσμένη ζώνη του φράγματος

Η θεώρηση ότι ένα φράγμα έχει ροή μόνο στη κορεσμένη ζώνη κάνει πιο απλή την επίλυση της εξίσωσης συνέχειας. Η αρχή διατήρησης της μάζας λέει ότι η ταχύτητα καθαρής εκροής είναι ίση με την αύξηση του όγκου του νερού μέσα στο όγκο του εδάφους. Αν έχω μόνιμη ροή, από την αρχή διατήρησης της μάζας ισχύει η Εξ.(1):

$$\text{div}(\text{velocity}) = \partial(v_m)/\partial t = 0 \quad \text{Εξ.(1)}$$

και με τη βοήθεια της εξίσωσης Darcy η επίλυση της μόνιμης ροής γίνεται με την εξίσωση Laplace, Εξ.(2):

$$\partial^2 h / \partial x^2 + \partial^2 h / \partial y^2 + \partial^2 h / \partial z^2 = 0 \Rightarrow \nabla^2 h = 0 \quad \text{Εξ.(2)}$$

και γίνεται καταγραφή των ισοδυναμικών γραμμών και των γραμμών ροής του φράγματος, Σχήμα 5.5.

Θεώρηση ροής και στη κορεσμένη και στην ακόρεστη ζώνη του φράγματος

Με τη θεώρηση ροής και πάνω και κάτω από το φρεάτιο ορίζοντα παρατηρείται μη μόνιμη ροή στο φράγμα, Σχήμα 5.6, άρα η Εξ.(1) δεν ισχύει και γίνεται:

$$\text{div}(\text{velocity}) = \partial(v_m)/\partial t \neq 0 \quad \text{Εξ.(3)}$$

Η μη μόνιμη ροή εξαρτάται από τον βαθμό κορεσμού (S_r) και τη συμπιεστότητα του εδάφους, άρα το πρόβλημα είναι μη γραμμικό συνεπώς έχει υποχρεωτικά μια λύση αριθμητική. Με την αριθμητική λύση του προβλήματος πρέπει να εξεταστεί η κατάσταση σε διάφορους χρόνους και πως αλλάζει ο φρεάτιος ορίζοντας με τη

πάροδο του χρόνου. Ο φρεάτιος ορίζοντας μετά από κάποιο χρόνο (25d) θα φτάσει σε μια τελική μορφή, Σχήμα 5.7. Άρα υπάρχει ροή και στην ακόρεστη ζώνη.

5.3 ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΡΡΕΟΝΤΑ ΕΔΑΦΗ

Τα εδάφη χωρίζονται σε διογκούμενα και καταρρέοντα εδάφη, τα οποία αντιδρούν αντίθετα σε καταστάσεις ύγρυνσης και ξήρανσης. Τα διογκούμενα εδάφη διογκώνονται κατά την ύγρυνση και συρρικνώνονται κατά την ξήρανση, ενώ τα καταρρέοντα εδάφη συρρικνώνονται κατά την ύγρυνση.

5.3.1 Διογκούμενα εδάφη

Τα διογκούμενα εδάφη που διογκώνονται κατά την ύγρυνση και συρρικνώνονται κατά τη ξήρανση αποτελούνται από φυσικά εδάφη (ιζηματογενή) και συμπυκνωμένα υλικά υψηλής πλαστικότητας με μεγάλη περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη. Τα διογκούμενα εδάφη μετρούν μεγάλες τιμές μύζησης στην Χ.Κ. εξαιτίας της μεγάλης τάσης προσρόφησης λόγω του μοντμοριλλονίτη.

Σε μια τυπική περίπτωση ακόρεστου εδάφους στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζονται η κατανομή του ορίου υδαρότητας (LL), του ορίου πλαστικότητας (PL) και της φυσικής υγρασίας (w). Αρχικά στην υψηλή ζώνη παρατηρείται ότι η διαφορά των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας είναι περίπου 50% ($LL=30\%$ και $PL=80\%$), άρα ο δείκτης πλαστικότητας ($PI=PL-LL$) στην υψηλή ζώνη του υλικού είναι 50%, δηλαδή πολύ πλαστικό υλικό. Στην ανάλυση του εδάφους του Σχήματος 5.8 φαίνεται ότι η φυσική υγρασία είναι χαμηλότερη από το όριο πλαστικότητας. Αν κοντά στην επιφάνεια μια εδαφική ζώνη έχει φυσική υγρασία χαμηλότερη από το όριο πλαστικότητας και το έδαφος έχει μεγάλο δείκτη πλαστικότητας τότε είναι πρακτικά διογκώσιμο.

Μηχανισμοί διόγκωσης

Οι μηχανισμοί διόγκωσης του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη είναι:

α. Ενυδάτωση κατιόντων

Μια άργιλο σε ξηρή κατάσταση έχει τα πλακίδια αρνητικά φορτισμένα στην παράπλευρη επιφάνεια και γι' αυτό προσελκύει κατιόντα θετικά φορτισμένα, Σχήμα 5.9. Τα θετικά φορτία των κατιόντων εξουδετερώνουν τα αρνητικά των πλακιδίων της αργίλου, συνεπώς τα πλακίδια βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, Σχήμα 5.9α. Αν αρχίσει η εισροή νερού στο έδαφος, τα κατιόντα προσελκύουν το

νερό (τα μόρια του νερού είναι διπλά, από τη μια πλευρά το οξυγόνο (O) και από την άλλη τα υδρογόνα (H₂). Το οξυγόνο που είναι αρνητικά φορτισμένο προσελκύει τα θετικά κατιόντα), που είναι αρνητικά φορτισμένο, Σχήμα 5.9β, συνεπώς λόγω του όγκου του νερού που προστίθεται μέσα στο έδαφος τα πλακίδια απομακρύνονται και προκαλείται διόγκωση, Σχήμα 5.9γ. Το ποσοστό διόγκωσης εξαρτάται από τον αριθμό των κατιόντων, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των κατιόντων τόσο μεγαλύτερη η ανάγκη για ενυδάτωση άρα τόσο μεγαλύτερη η διόγκωση του εδάφους.

β. ωσμωτική πίεση

Σε ένα αργιλικό έδαφος, Σχήμα 5.10, η διαφορά συγκέντρωσης των κατιόντων στην περιοχή με συγκέντρωση C₁ (περιοχή I) και στην περιοχή ελεύθερου νερού με συγκέντρωση C₂ (περιοχή II), προκαλείται ωσμωτική πίεση και γίνεται μεταφορά μορίων νερού από την περιοχή II στην περιοχή I για να μειωθεί η διαφορά (C₁>>C₂). Η μεταφορά αυτή προκαλεί απομάκρυνση των πλακιδίων της αργίλου, άρα διόγκωση.

Διόγκωση εδάφους σε θεμελιώσεις κτηρίων

Το φαινόμενο της διόγκωσης/συρρίκνωσης στο έδαφος θεμελίωσης των κτιρίων πραγματοποιείται με τις εποχιακές αλλαγές της μύζησης που προκαλεί μεταβολές στο δείκτη πόρων. Με τη διόγκωση/συρρίκνωση των εδαφών θεμελίων παρατηρούνται καθιζήσεις/ανυψώσεις στα άκρα των κτηρίων (υγρή/ξηρή περίοδος) ή διόγκωση στο κέντρο του κτηρίου λόγω αύξησης της υγρασίας (αδυναμία εξάτμισης).

Παραδείγματα

1) Σε ένα σπίτι πάνω σε διογκώσιμο έδαφος στις έντονες βροχοπτώσεις, τους χειμερινούς μήνες υγραίνεται το έδαφος της θεμελίωσης και ιδιαίτερα η άκρη του κτηρίου λόγω ευκολότερης έκθεσης στα καιρικά φαινόμενα και διογκώνεται πολύ περισσότερο από τη περιοχή κάτω από το κτήριο. Η περιοχή κάτω από το κτήριο δεν είναι διαθέσιμη λόγω της πλάκας του κτηρίου και θέλει περισσότερο χρόνο να φτάσει το νερό, άμα ξανά έρθει ξηρή περίοδος, Σχήμα 5.11.

2) Σε ένα σπίτι πάνω σε διογκώσιμο έδαφος τους καλοκαιρινούς μήνες, το έδαφος θεμελίωσης πραγματοποιεί εξάτμιση. Με τη εξάτμιση αποβάλλεται νερό από το έδαφος και το έδαφος συρρικνώνεται. Με τη συρρίκνωση η άκρη του κτηρίου έχει

καθίζηση. Η περιοχή του υπόλοιπου κτηρίου λόγω της πλάκας δεν αντιλαμβάνεται την καθίζηση διότι δεν υφίσταται εξάτμιση, Σχήμα 5.12.

3) Στην περίπτωση που ένα έδαφος θεμελίωσης κτηρίου έχει υγρασία, η περισσότερη υγρασία θα βρίσκεται κάτω από το κέντρο του κτηρίου διότι δεν πραγματοποιείται η ίδια εξάτμιση που παρατηρείται στο άκρο. Ότι ποσότητα βροχής εισχωρεί στο έδαφος θεμελίωσης, έπειτα εξατμίζεται από τα άκρα του κτηρίου, αλλά παραμένει στο κέντρο και με τη πάροδο του χρόνου αυξάνεται. Με την αύξηση της υγρασίας διογκώνεται το έδαφος καίτω από το κεντρικό τμήμα του κτηρίου και σπάνε οι πλάκες, Σχήμα 5.13.

Παράμετροι διόγκωσης

Για τα κορεσμένα εδάφη ισχύει η Εξ.(4):

$$\Delta e = C_s \Delta(\log \sigma') \quad \text{Εξ.(4)}$$

ενώ για τα ακόρεστα εδάφη η μεταβολή του όγκου δεν είναι μονοσήμαντη, εξαρτάται από δύο ανεξάρτητες παραμέτρους, τη μύζηση ($s=u_a-u_w$) και την ολική τάση ($p=\sigma-u_a$) και ισχύει η Εξ.(5):

$$\Delta e = C_c \Delta[\log(\sigma - u_a)] + C_m \Delta[\log(u_a - u_w)] \quad \text{Εξ.(5)}$$

Αν γίνει περιγραφή της διόγκωσης με διάγραμμα δείκτη πόρων-ολική τάση, παρατηρούνται περίεργα τα αποτελέσματα, Σχήμα 5.14, διότι στην απεικόνιση έχει αμεληθεί ο άξονας της μύζησης (πρόβλημα 3-Δ σε 2-Δ). Ενώ αν γίνει περιγραφή της διόγκωσης με το διάγραμμα 3-Δ, φαίνονται πιο καθαρά οι καμπύλες των αποτελεσμάτων, Σχήμα 5.15.

Παράδειγματα

1) Σε διογκώσιμη άργιλο θεωρώ τριχοειδής ανύψωση. Στο δίγραμμα Casacrande, Σχήμα 5.16α, η άργιλος τοποθετείται στο σημείο Α και έχει πυκνότητα κόκκων $\rho_s=2.60 \text{ Mg/m}^3$, όρια Atterberg: $w_l=60\%$, $w_p=25\%$ και $w_s=10.5\%$ με αντίστοιχους δείκτες πόρων: $e_l=1.56$, $e_p=0.72$ και $e_s=0.44$ στην καμπύλη συρρίκνωσης, Σχήμα 5.16β. Από τη σχέση:

$$Sr = (\rho_s/\rho_w) * (w/e) \quad \text{Εξ.(6)}$$

υπολογίζεται ο βαθμός κορεσμού στα τρία κρίσιμα σημεία (I, II, III): $S_{rI}=100\%$, $S_{rP}=90\%$ και $S_{rS}=62\%$.

Για το αντίστοιχο ογκομετρικό ποσοστό από τη σχέση:

$$\theta = V_w/V = Sre/(1 + e) \quad \text{Εξ.(7)}$$

υπολογίζονται: $\theta_I=61\%$, $\theta_P=38\%$ και $\theta_S=19\%$.

Μετά μετρίεται η Χ.Κ., Σχήμα 5.16γ, προς των δείκτη πόρων και υπολογίζονται στα σημεία II και III οι αντίστοιχες τιμές μύζησης: $s_{aev}=20$ Kpa και $s_{residual}=1000$ Kpa.

Τελικά γίνεται μέτρηση στο συμπιεσόμετρο, σε κορεσμένο δείγμα: $C_c=0.4$ και $C_s=0.06$, τα οποία ισχύουν και σε ακόρεστο δείγμα με τη μύζηση.

2) Για τον υπολογισμό της διόγκωσης σε έδαφος με ξηρή ζώνη ορίζεται ο δείκτης συρρίκνωσης (I_{ps}) ως η κατακόρυφη παραμόρφωση (διόγκωση/συρρίκνωση) ανά λογαριθμικό κύκλο μεταβολής της μύζησης. Με αυτό το τρόπο υπολογίζεται πόση διόγκωση συμβαίνει για κάθε μεταβολή της μύζησης από 10 Kpa 1 Kpa κ.α., υπό μηδενική φόρτιση και μηδενική οριζόντια τάση. Με τη βοήθεια εμπειρικών πινάκων, Πίνακας 5.1, για διάφορα εδάφη προσδιορίζεται ο δείκτης συρρίκνωσης, το ύψος συρρίκνωσης (δηλαδή το βάθος διόγκωσης), ανάλογα με το κλίμα. Μετά τον προσδιορισμό του δείκτη συρρίκνωσης γίνεται η προσαρμογή με ένα συντελεστή α ανάλογα με το πλευρικό εγκιβωτισμό (1- Δ) με την εξίσωση:

$$I_{ps} = \alpha I_{ps} \quad \text{Εξ.(8)}$$

($\alpha=1$ για $z=1.5m$, $\alpha=2$ στην επιφάνεια του εδάφους και μειούμενο ως $\alpha=1$ για $z=5m$ και $\alpha=1$ για $z>5m$).

Μετά για τη μεταβολή της μύζησης γίνεται ανάλυση ροής πριν και μετά τη συρρίκνωση, συνεπώς γίνεται υπολογισμός διόγκωσης για κάθε στρώση, Σχήμα 5.17:

$$H_s = \Sigma(\Delta z_i) \quad \text{Εξ.(9)}$$

για κάθε z_i μειώνεται η μύζηση από s_{in} μέχρι s_{fin} , άρα η ανύψωση της επιφάνειας υπολογίζεται από την Εξ.(10):

$$\rho_0 = \Sigma(\Delta \varepsilon_i)(\Delta z_i) \quad \text{Εξ.(10)}$$

και η παραμόρφωση διόγκωσης από την Εξ.(11):

$$\Delta \varepsilon_i = \alpha I_{ps} \log(s_{in}/s_{fin})$$

Εξ.(11)

5.3.2 Καταρρέοντα εδάφη

Τα καταρρέοντα εδάφη κατά την ύγρανση συρρικνώνονται και τελικώς καταρρέουν. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε φυσικά εδάφη υψηλού πορώδους (μικρή πυκνότητα). Το υψηλό πορώδες διατηρείται λόγω δεσμών συγκόλλησης των κόκκων (ασβεστικοί δεσμοί) ή ηλεκτρικών δεσμών μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων κ.α. Το υψηλό πορώδες οφείλεται στο γεγονός της απόθεσης χωρίς νερό, διότι έχουν αποτεθεί κυρίως από τον άνεμο (αλόνες-κόκκοι άμμου) και συγκολλούνται με κάποιο αργιλικό υλικό σε χαλαρή δομή, Σχήμα 5.18. Η χαλαρή δομή προσφέρει μεγάλη αντοχή. Στη συνέχεια φορτίζονται και δεν συμπεκνώνονται περισσότερο διότι έχουν μικρή συμπίεστικότητα λόγω του συγκολλητικού υλικού. Σε αργιλικά υλικά η συγκόλληση γίνεται στα πλακίδια λόγω ηλεκτρικών δεσμών. Αν σπάσουν οι δεσμοί χάνεται η αντοχή του υλικού που οφείλονταν στους δεσμούς και λόγω της χαλαρής δομής θα καταρρεύσει. Η απώλεια των δεσμών μπορεί να γίνει με την έκθεση του υλικού στο νερό, Σχήμα 5.19α, με σεισμούς και με έκπλυση κατιόντων (αλλαγή PH), Σχήμα 5.19β. Η κατάρρευση μπορεί να γίνει σε ακόρεστα εδάφη και σε κορεσμένα υψηλού πορώδους.

Παράδειγμα

Σε απόθεση αργίλου μαζί με άλατα ασβεστίου διαλυμένα στο νερό των πόρων στο πυθμένα της θάλασσας, τα άλατα ασβεστίου συγκολλούν τους κόκκους της αργίλου. Όταν το υλικό καλυφθεί με ιζήματα πάχους 125m, η ενεργός τάση είναι 1000 Kpa και τα άλατα ασβεστίου στερεοποιούνται και συγκολλούνται στους κόκκους. Οι κόκκοι που συγκολλήθηκαν έχουν αντοχή των δεσμών 2500 Kpa. Στη συνέχεια τα ιζήματα ανυψώνονται πάνω από το νερό και η ενεργός τάση αυξάνεται στα 2250 Kpa, αλλά το υλικό δεν έχει μεγάλη συμπύκνωση διότι η τάση είναι μικρότερη από την αντοχή των κόκκων (2500 Kpa). Το υλικό δεν έχει ξεπεράσει την τάση προστερεοποίησης γι' αυτό έχει πολύ μικρή παραμόρφωση (από 1000 Kpa στα 2250 Kpa-καμπύλη 1), Σχήμα 5.20α. Αν το υλικό φορτίσει παραπάνω και φτάσει την αντοχή των κόκκων, οι δεσμοί σπάνε και το υλικό πραγματοποιεί κανονική στερεοποίηση-καμπύλη 2, Σχήμα 5.20α, άρα θα υπάρξει απότομη μείωση του δείκτη πόρων ($\Delta e = 0.25$). Η μείωση του δείκτη πόρων στα κορεσμένα εδάφη προκαλεί συρρίκνωση, ενώ σε ακόρεστα εδάφη προκαλεί καθιζήσεις-καμπύλη 3, Σχήμα 5.20β.

5.4 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

Η ευστάθεια πρανών είναι η πιο σημαντική εφαρμογή των ακόρεστων εδαφών, με πολλά παραδείγματα στην Ελλάδα και σε ολόκληρο τον κόσμο. Η ευστάθεια πρανών είναι σημαντική για την αποφυγή κατολισθήσεων κατά τη διάρκεια βροχερών περιόδων. Γι' αυτό είναι απαραίτητη η ανάλυση ευστάθειας πρανών.

Η ακόρεστη ζώνη ενός πρανούς έχει αρνητικές πιέσεις πόρων και με την βροχόπτωση μειώνονται, συνεπώς χάνεται η αντοχή του πετρώματος που οφειλόταν στη μύζηση. Η μύζηση σύμφωνα με την εξίσωση Bishop προκαλεί μια ισοδύναμη συνοχή στο έδαφος, η οποία χάνεται με τη μείωση της μύζησης, άρα μειώνεται η αντοχή του εδάφους. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχει μύζηση στη στρώση του εδάφους πάνω από τη Σ.Υ.Ο. και υπολογίζεται η αντοχή του εδάφους με μηδενική μύζηση. Στην περίπτωση που αγνοηθεί η μύζηση, οι παράμετροι αντοχής (c, ϕ) υπολογίζονται πολύ μεγαλύτερες από τις πραγματικές, για τον επαρκή συντελεστή ασφαλείας ($F.S.=1.2$) για να στέκεται η στρώση πάνω από τη Σ.Υ.Ο. (αντίστροφη ανάλυση). Οι παράμετροι που έχουν υπολογισθεί με τη αγνόηση της μύζησης δεν είναι σωστές γι' αυτό όταν ανέβει η Σ.Υ.Ο., θα υπολογισθεί μικρή αύξηση πίεσης πόρων σε αντίθεση με τη μύζηση που χάθηκε. Η αύξηση πίεσης πόρων είναι όση η άνοδος της Σ.Υ.Ο. (π.χ. 2m άνοδο της Σ.Υ.Ο. προκαλεί αύξηση πίεσης πόρων 20 Kpa), συνεπώς θα θεωρηθεί ότι το πρανές δεν αστοχεί με μια μεταβολή $\Delta u=20$ Kpa, ενώ στην πραγματικότητα θα αστοχήσει. Άρα σε τέτοιες αναλύσεις πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συνοχή λόγω μύζησης και η ίδια η μύζηση (ειδικά σε ξηρά κλίματα).

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ξηρή ζώνη αλλά ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης, η αγνόηση της μύζησης είναι σωστή διότι η αύξηση της πίεσης πόρων της ανόδου της Σ.Υ.Ο., είναι ίση με την μείωση της μύζησης.

Παραδείγματα

1) Σύμφωνα με τους Kahn et al., (1989), στον Καναδά, σε μια κατολίσθηση σιδηροδρομικού επιχώματος, η αστοχία ξεκίνησε μετά από χρόνια. Το έδαφος του αποτελούνταν από συμπυκνωμένη ιλύ λυμναίων αποθέσεων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάστηκε ρηχή αστοχία και στις δύο πλευρές του έργου σε μεγάλο μήκος με μεταβαλλόμενο πάχος από 20 cm έως 2 m και μετατόπιση του εδάφους για αρκετά μέτρα.

Ο μηχανισμός αστοχίας που εκδηλώθηκε, Σχήμα 5.21. προκλήθηκε στο εδαφικό υλικό διότι αρχικά είχε αρκετά μεγάλη αντοχή λόγω μύζησης. Με την μείωση της μύζησης η αντοχή του υλικού ελαττώθηκε ως την υπολογίσιμη από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του εδάφους σαν πλήρως κορεσμένο, οι οποίες δεν ήταν ικανοποιητικές για την ευστάθεια του, εφόσον αυτό είχε δημιουργηθεί με κλίση πρανών περίπου ίση με τη γωνία διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού. Το υλικό είχε συμπυκνωθεί στο πεδίο κατά την δημιουργία του έργου πρακτικά στο 100 % της κανονικής δοκιμής συμπύκνωσης Proctor.

Πέρα από την εργαστηριακή έρευνα με δείγματα του υλικού έγιναν και υπολογισμοί της μύζησης στο πεδίο με τενσιόμετρα τύπου Quickdraw. Οι καταγραφές των Quickdraw κυμαίνονταν από 5 έως 68 kPa με τάση μείωσης της υπολογίσιμης μύζησης να παρατηρείται κοντά στην επιφάνεια των πρανών της κατασκευής. Αυτά τα αποτελέσματα δικαιολογούν την μείωση της διατμητικής αντοχής πλησιέστερα στην επιφάνεια των πρανών, αφού για συμπύκνωση περίπου ως τη βέλτιστη υγρασία ήταν αυτονόητη η ανάπτυξη μύζησης 50 kPa, η οποία κοντά στην επιφάνεια των πρανών είχε φτάσει στα 5 έως 10 kPa, εξαιτίας της αύξησης του ποσοστού υγρασίας, αφού υπήρξε κατείδυση νερού.

Για τις μετρούμενες παραμέτρους διατμητικής αντοχής η πτώση της μύζησης προκαλεί μείωση του συντελεστή ασφαλείας έναντι επιφανειακής ολίσθησης, από το 3 στο 1, Σχήμα 5.21. Οι αστοχίες εκδηλώθηκαν μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα διότι, η μείωση του βαθμού κορεσμού επιφέρει και μείωση του συντελεστή διαπερατότητας, συνεπώς απαιτείτε πολύς χρόνος για την κατείδυση νερού σε βάθος που η μύζηση που αναπτύχθηκε κατά την συμπύκνωση, να μειωθεί σε πολύ χαμηλή τιμή ώστε να αστοχίσει.

2) Σύμφωνα με μελέτη των Fourie, et al., (1999) συνέβησαν αβαθείς αστοχίες σε πρανή στην Ν. Αφρική. Το υλικό των πρανών ήταν ξηρή τέφρα ανθρακορυχείου. Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιθάνθρακες στο Lethabo της Ν. Αφρικής παράγει τέφρα, που αρχικά υγραίνεται για να ελεγχθεί η σκόνη και μετά πραγματοποιείται απόθεση, για να επέλθει υγρασία 15 με 30 %. Στη συνέχεια διατίθεται ασυμπύκνωτη σε πρανή με ελεύθερη επιλογή κλίσης από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του εδάφους, Σχήμα 5.22.

Από τις εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής προέκυψαν τιμές $c' = 0$ και $\phi' = 34^\circ$, από τις οποίες προκύπτει

το ερώτημα πως σχηματίζονται πρηνή μεγαλύτερης κλίσης. Αρχικές μελέτες των ιδιοτήτων του υλικού συμπέραναν ότι είναι εφικτή η ανάπτυξη πρόσθετης διατμητικής αντοχής λόγω ποζολανικής σκλήρυνσης, που μπορεί να δικαιολογηθεί από την εμφάνιση ποσότητας υδρασβέστου στην τέφρα. Η πιθανότητα αυτή απορρίφθηκε, αφού αποδείχθηκε ότι αν και δεν ήταν εφικτό ένα τέτοιο φαινόμενο, δεν θα υπήρχε δυνατότητα να συμβεί τόσο σύντομα ώστε να αναπτυχθεί πρόσθετη αντοχή κατά την απόθεση της τέφρας.

Συγχρόνως, τα πρηνή της απόθεσης είχαν επίπεδη αστοχία μικρού βάθους κατά μήκος της επιφάνειας του πρηνούς, οι οποία συνέβαινε κατά την διάρκεια και αμέσως μετά από επεισόδια βροχόπτωσης. Μετρήσεις της μύζησης στο πεδίο συμπέραναν ότι η πρόσθετη αντοχή που επέτρεπε την διαφορά μεταξύ της γωνίας κλίσης του πρηνούς και της γωνίας διατμητικής αντοχής δημιουργούνταν εξαιτίας της μύζησης που είχε αναπτυχθεί μέσα στην τέφρα εξαιτίας του ποσοστού υγρασίας. Στην υγρασία συμπεριλαμβάνονταν η μύζηση που είχε αναπτυχθεί, λόγω επεισοδίων βροχόπτωσης και μειώθηκε ο συντελεστής ασφαλείας.

3) Πρηνές που αστόχησε από τεχνητή βροχόπτωση, Springman et al. (2003). Οι συγκεκριμένοι μελετητές εγκατέστησαν όργανα προσδιορισμού της μύζησης και προσομοιωτές βροχόπτωσης σε δύο πρηνή, υπό συνθήκες παγετού (μοραίνες). Το πρώτο πρηνές είχε κλίση 31° και 100 m^2 έκταση και το δεύτερο κλίση 42° και 55 m^2 έκταση. Το υλικό της μοραίνης αποτελούνταν περίπου από 20% λίθους, 40% χάλικες, 20% άμμο και 20% αργιλοίλυ, με την άργιλο μόλις στο 2-3%. Το ξηρό φαινόμενο βάρος του υλικού ήταν περίπου στα 20 kN/m^3 , η φυσική του υγρασία περίπου στο 4.5% και ο λόγος κενών του περίπου στο 0.30. Τα όργανα παρακολούθησης περιλάμβαναν ηλεκτρομαγνητικούς αισθητήρες και тенσιόμετρα σε διάφορα βάθη, βροχογράφους και μηκυνσιόμετρα για την καταγραφή παραμορφώσεων στα δύο πρηνή.

Οι τεχνητές βροχόπτωσης εφαρμόστηκαν με παροχές 10 mm/h για μία εβδομάδα με μέγιστες τιμές κατά διαστήματα τα 30 και τα 40 mm/h . Σύμφωνα με τις βροχοπτώσεις από τον πλησιέστερο βροχομετρικό σταθμό παρατηρήθηκαν μεγαλύτερα φαινόμενα διήμερων και επταήμερων επεισοδίων βροχόπτωσης, 5.9 και 2.3 mm/h αντίστοιχα, ενώ σύμφωνα με τις ίδιες μετρήσεις τα μελλοντικά αποτελέσματα, ήταν 9.0 και 3.5 mm/h αντίστοιχα. Από την καταγραφή της μύζησης και των άλλων στοιχείων, προέκυψε ότι με το εβδομαδιαία τεχνητή βροχόπτωση, η μύζηση ελαττώθηκε κατά 20 KPa , και ο βαθμός κορεσμού αντίστοιχα αυξήθηκε

κατά 20%. Για προσδιορισμό των μεταβολών αυτών στην διατμητική αντοχή του υλικού πραγματοποιήθηκαν δοκιμές άμεσης διάτμησης, οι οποίες έδειξαν ότι η συνοχή του υλικού της μοραίνης από πρακτικά μηδενική τιμή ($S_r=75-80\%$) φτάνει ακόμα και τα 15 kPa ($S_r<50\%$), Σχήμα 5.23α, ενώ η τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής παραμένει σταθερή, μέχρι γωνία διατμητικής αντοχής 41° , Σχήμα 5.23β.

Εκτός από τις δοκιμές άμεσης διάτμησης έγιναν και δοκιμές τριαξονικής φόρτισης σταθερού ποσοστού υγρασίας. Για να προσομοιωθεί η διαδικασία της κατείσδυσης υπογείων νερών, διατηρήθηκε σταθερή η διεκτροπική τάση, και μειωνόταν η μέση τάση. Τα αποτελέσματα έδειξαν κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης 1.59 από την οποία υπολογίστηκε γωνία διατμητικής αντοχής 39° .

Τελικά οι Springman, et al. (2003) αξιολόγησαν την συμπεριφορά των δύο πρανών διαφορετικής κλίσης εξηγώντας την σταθερότητα του πρανούς κλίσης 31° και την αστάθεια που επήλθε στο πρανές κλίσης 42° υπό την τεχνητή βροχόπτωση που εφάρμοσαν.

5.5 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Τα ακόρεστα εδάφη μπορούν να εμφανιστούν πίσω από τοίχους αντιστηρίξεως ή και σε ανάλυση υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας σε μια θεμελίωση.

Παραδείγματα

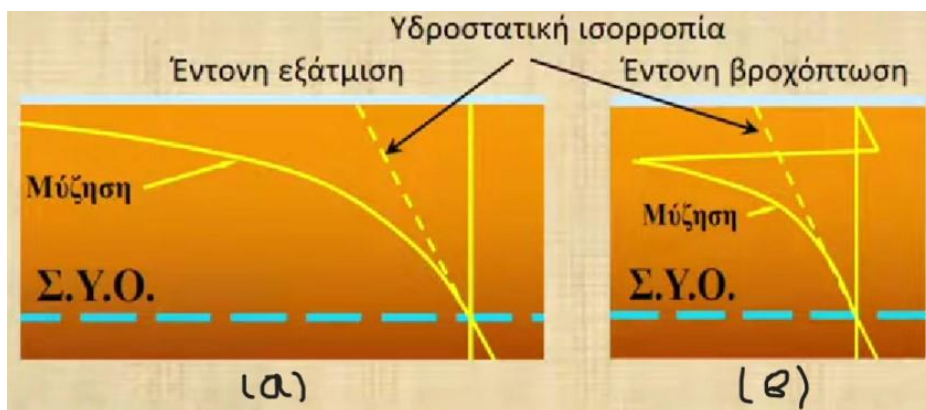
1) Ένας τοίχος αντιστηρίξεως στερεώνεται για θεμελίωση κάποιου βάθους. Ο τοίχος αντιστηρίξεως δέχεται πιέσεις από το ακόρεστο έδαφος που βρίσκεται δίπλα από την κατασκευή. Σύμφωνα με την ανάλυση του εδάφους στο οποίο πραγματοποιείται η κατασκευή μετά από ορισμένο χρόνο γίνεται καταγραφή των ωθήσεων που ασκούνται στο τοίχο αντιστηρίξεως, Σχήμα 5.24. Παρατηρώντας το διάγραμμα ωθήσεων του εδάφους, φαίνεται η κατανομή αρνητικών ωθήσεων σε ακόρεστο έδαφος, όπως και η αρνητική πίεση πόρων σε ένα διάγραμμα μύζησης με το βάθος. Δηλαδή το διάγραμμα ωθήσεων επηρεάζεται από τη μύζηση του εδάφους. Άρα σύμφωνα με το Σχήμα 5.24, σε περίοδο βροχόπτωσης, όσο αυξάνεται η πίεση πόρων, μειώνεται η μύζηση και οι ωθήσεις που ασκεί το έδαφος στον τοίχο αντιστηρίξεως.

2) Σε ένα πέδιλο μιας θεμελίωσης γίνεται υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, Σχήμα 5.25. Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας απαιτείται ο υπολογισμός της συνοχής του εδάφους. Η συνοχή του εδάφους επηρεάζεται από

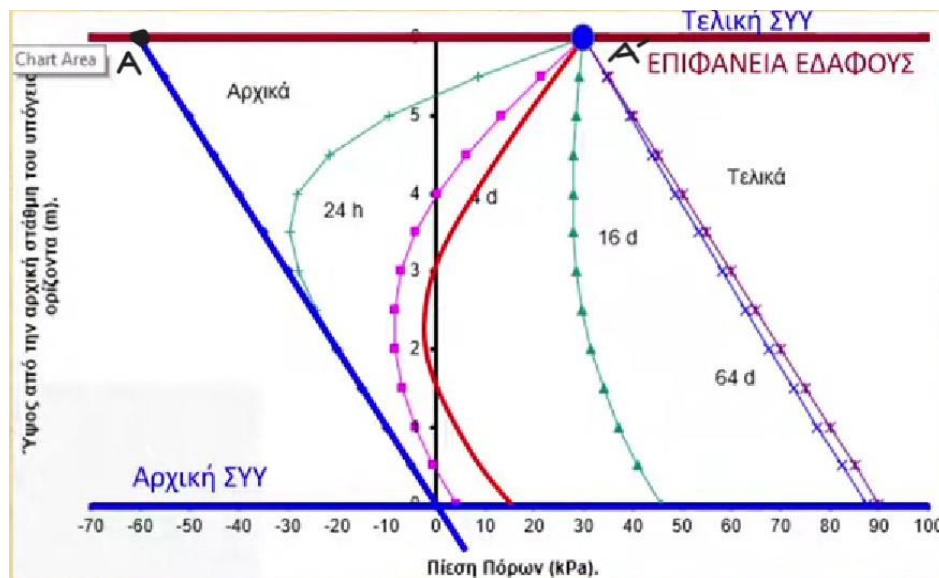
την πίεση πόρων με ή χωρίς μύζηση στο έδαφος. Αν ένα έδαφος έχει μεγάλη συνοχή, δηλαδή δεν παρατηρείται μύζηση (κορεσμένο), τότε έχει και μεγάλη φέρουσα ικανότητα. Άρα με τη μείωση της μύζησης σε ένα έδαφος επιτυγχάνεται μεγάλη φέρουσα ικανότητα. Ενώ σε ένα ακόρεστο έδαφος που υπάρχει μεγάλη μύζηση, η συνοχή είναι μικρή και αποτελείται από δύο συνιστώσες. Σε περίπτωση μικρής συνοχής, η φέρουσα ικανότητα είναι μικρή. Όσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας τόσο πιο πιθανή είναι η θραύση του εδάφους θεμελίωσης.

Πίνακας 5.1 : Όρια Atterberg. (Καββαδάς, 2021).

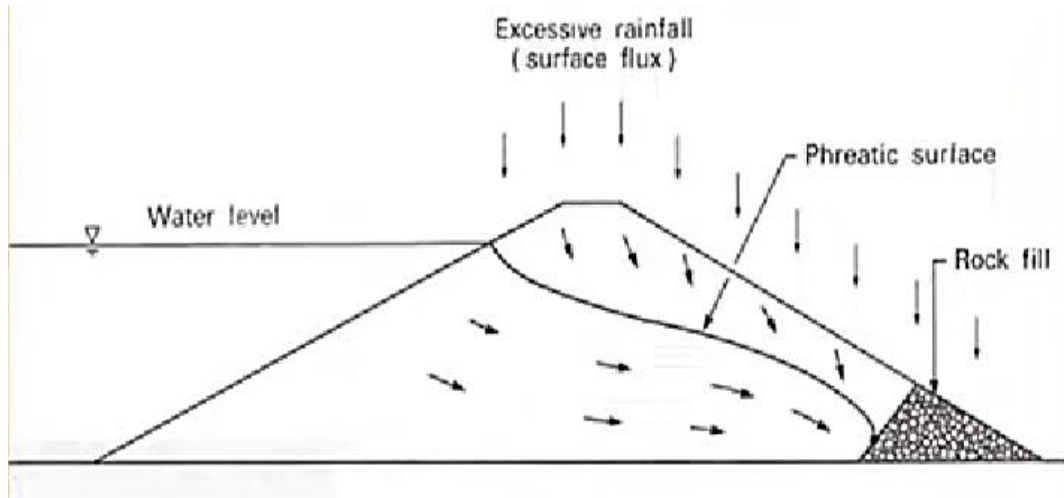
Unified Soil Classification	Plasticity	Plasticity Index (%)	Shrinkage Index I_{ps} (% strain/ log (kPa))
CL	Very low to low	0 – 10	0 - 1
CI	Low to medium	10 – 30	1 - 2
CH	High	30 – 45	2 – 3.5
CH ¹	High	45 – 60	3.5 - 5
CH ¹	Very high	> 60	> 5 up to 10%



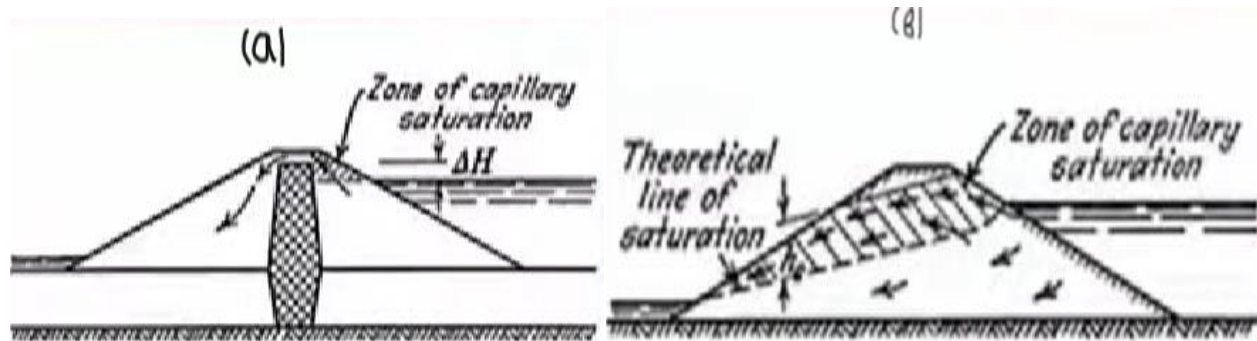
Σχήμα 5.1 : Μεταβολή της μύξης κατά τη διάρκεια (α) εξάτμισης και (β) βροχόπτωσης (Καββαδάς, 2021)



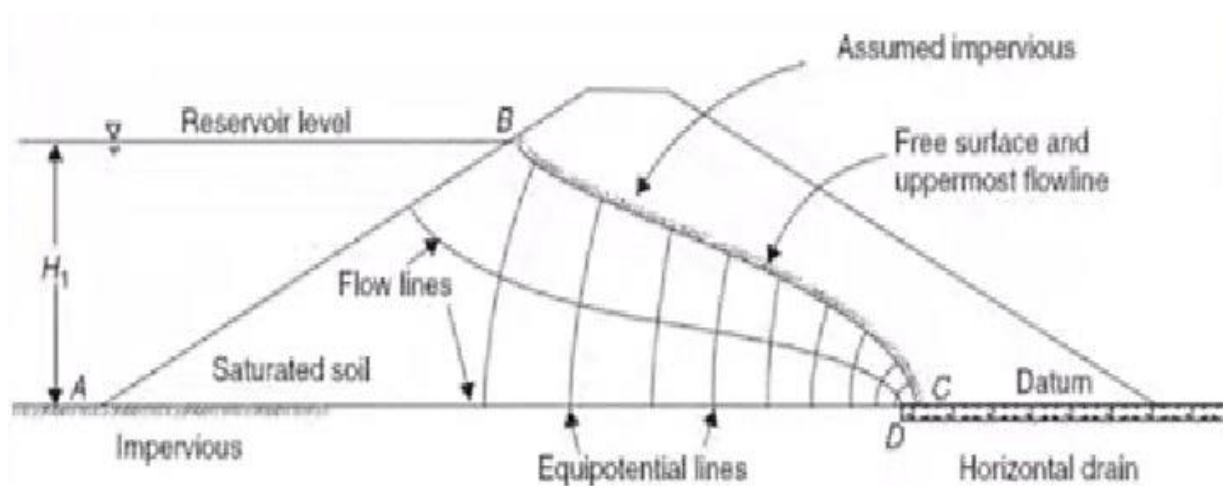
Σχήμα 5.2 : Κατανομή πίεσης πόρων με βάσει τη Σ.Υ.Ο. εξαιτίας παρατεταμένης βροχόπτωσης σε ακόρεστο έδαφος (Καββαδάς, 2021)



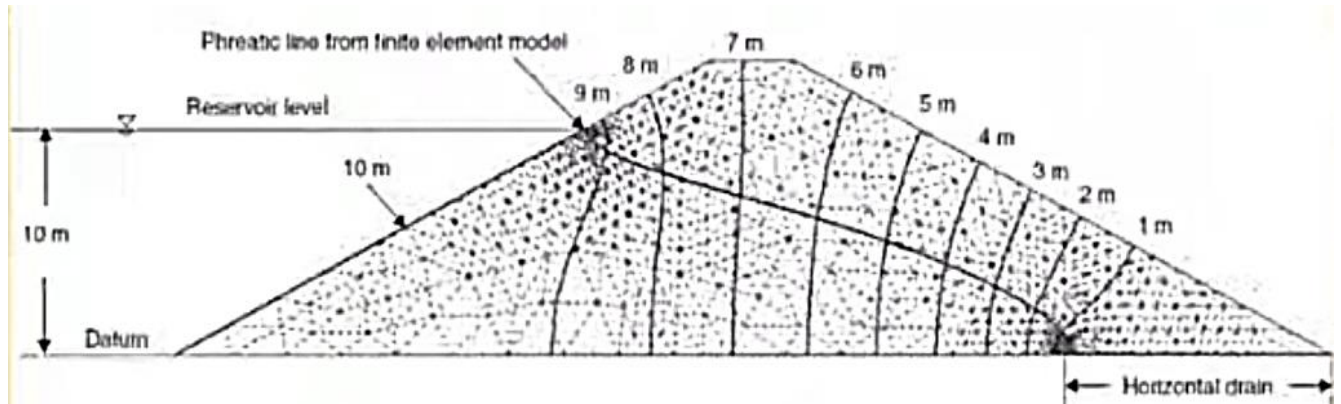
Σχήμα 5.3 : Ροή σε κορεσμένη και σε ακόρεστη ζώνη ενός φράγματος (Καββαδάς, 2021)



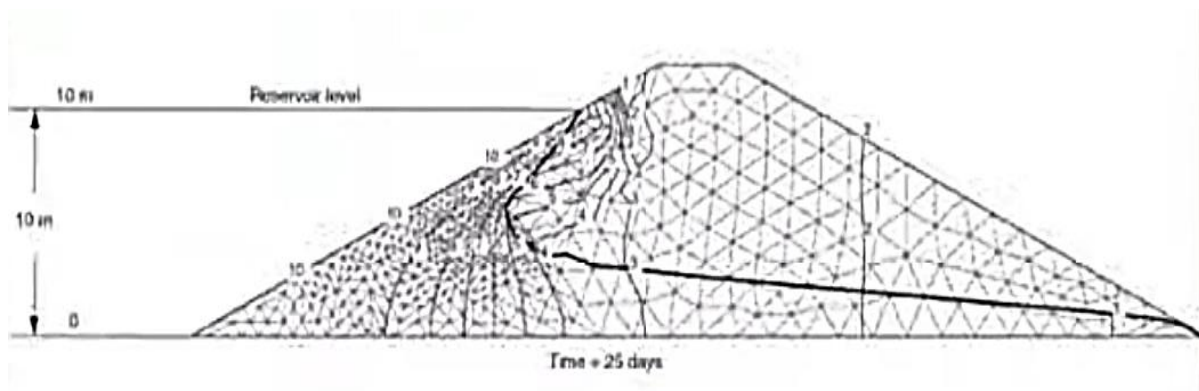
Σχήμα 5.4 : Ροή σε φράγμα (α) ροή πάνω από τον πυρήνα του φράγματος και (β) ροή στην ακόρεστη ζώνη εντός φράγματος (Καββαδάς, 2021).



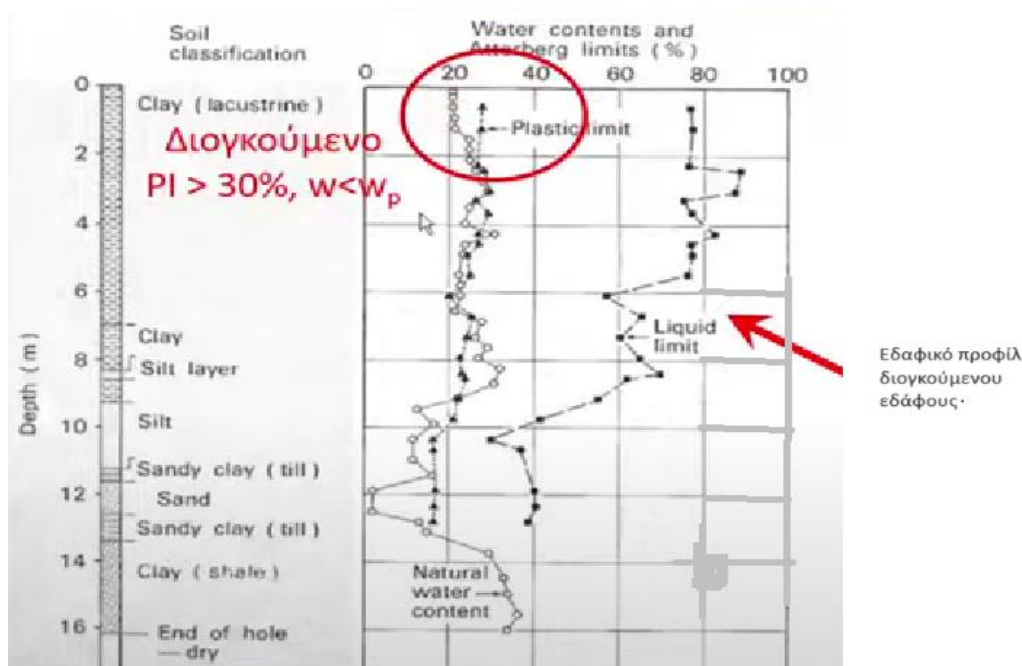
Σχήμα 5.5 : Ροή σε κορεσμένη ζώνη φράγματος (Καββαδάς, 2021).



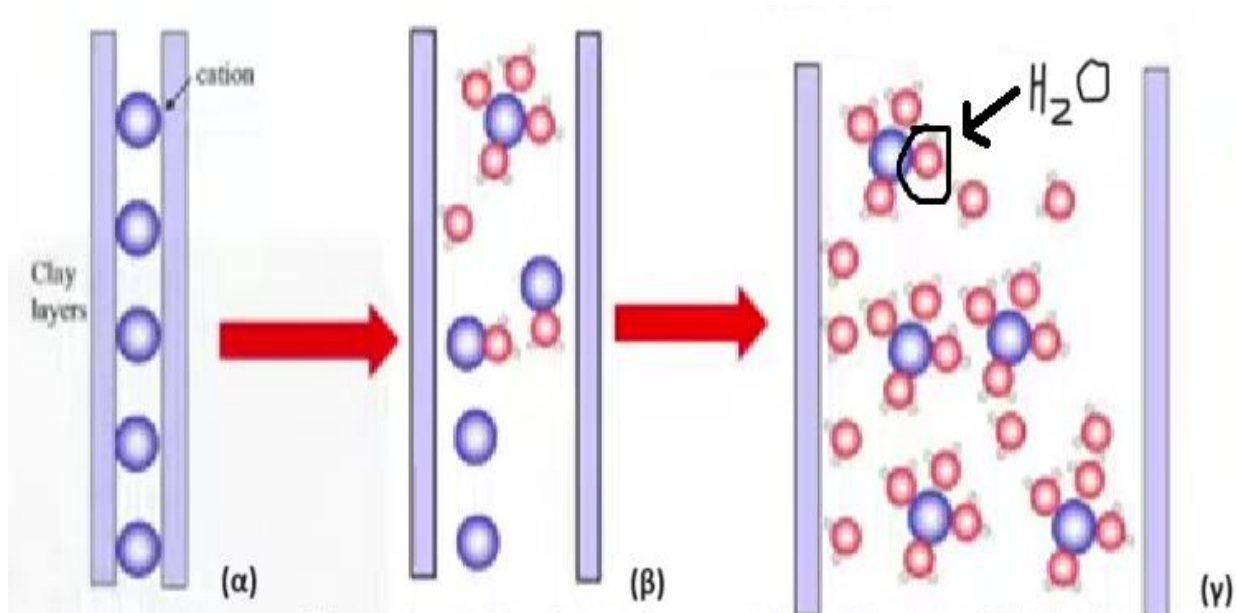
Σχήμα 5.6 : Φράγμα με ροή σε κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη (Καββαδάς, 2021).



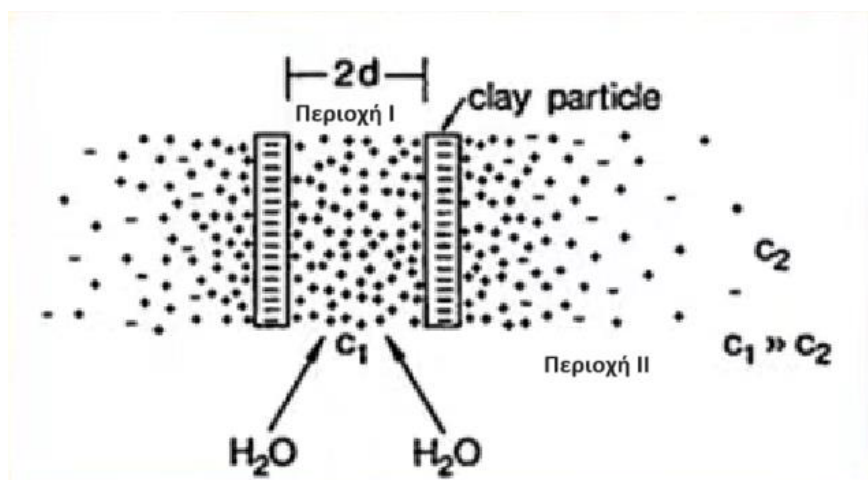
Σχήμα 5.7 : Τελική κατάσταση του φρεατίου ορίζοντα μετά απο' 25 μέρες (Καββαδάς, 2021).



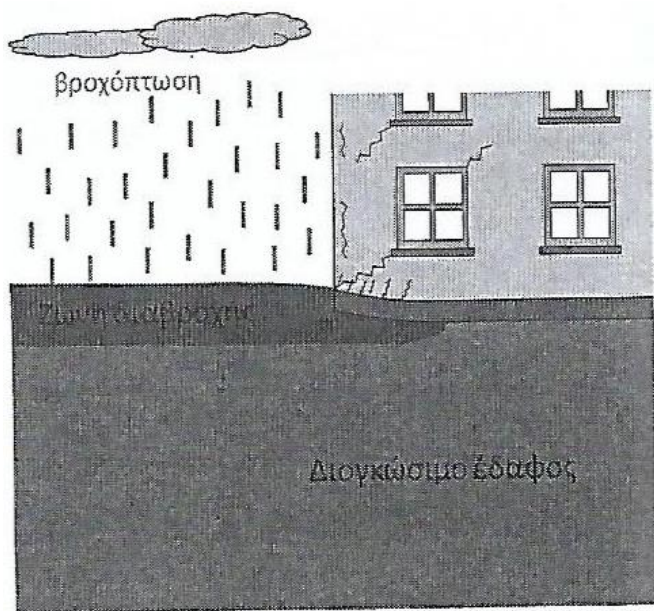
Σχήμα 5.8 : Εδαφικό προφίλ διογκούμενου εδάφους (Καββαδάς, 2021).



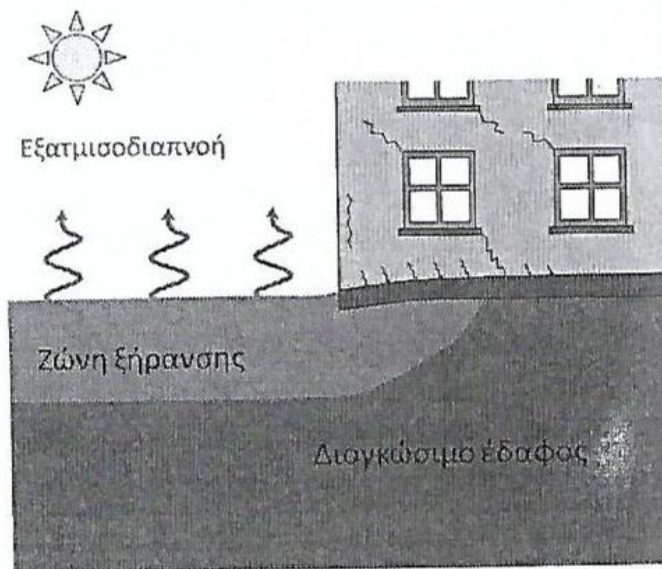
Σχήμα 5.9 : Ενυδάτωση κατιόντων (Καββαδάς, 2021).



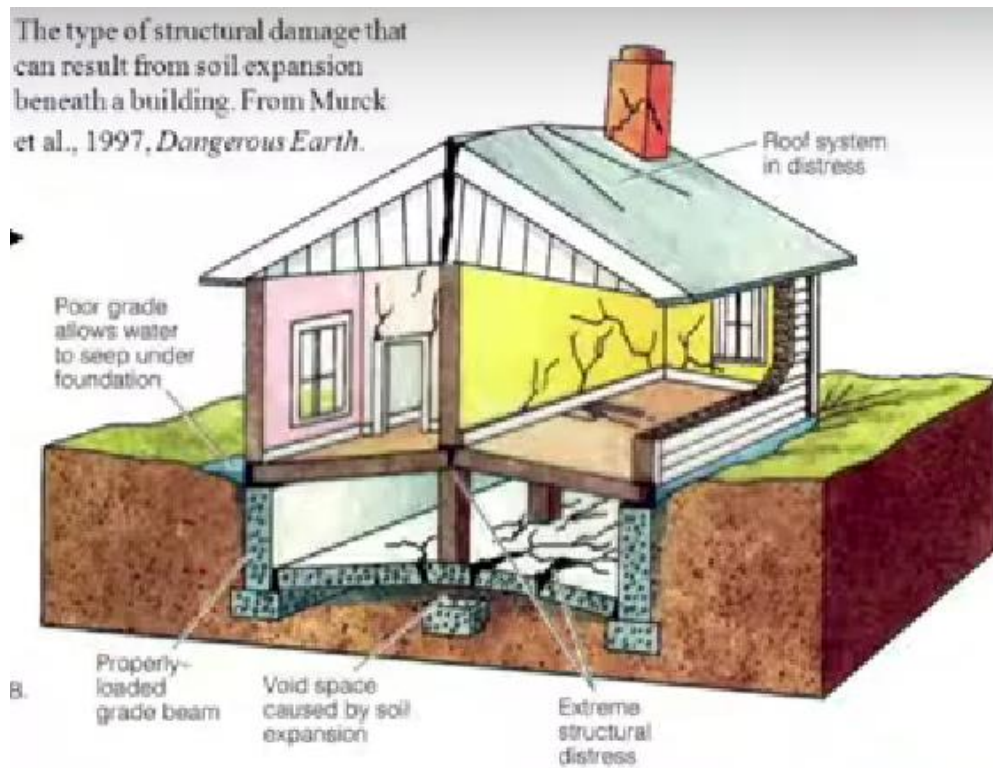
Σχήμα 5.10 : Ωσμωτική πίεση (Καββαδάς, 2021).



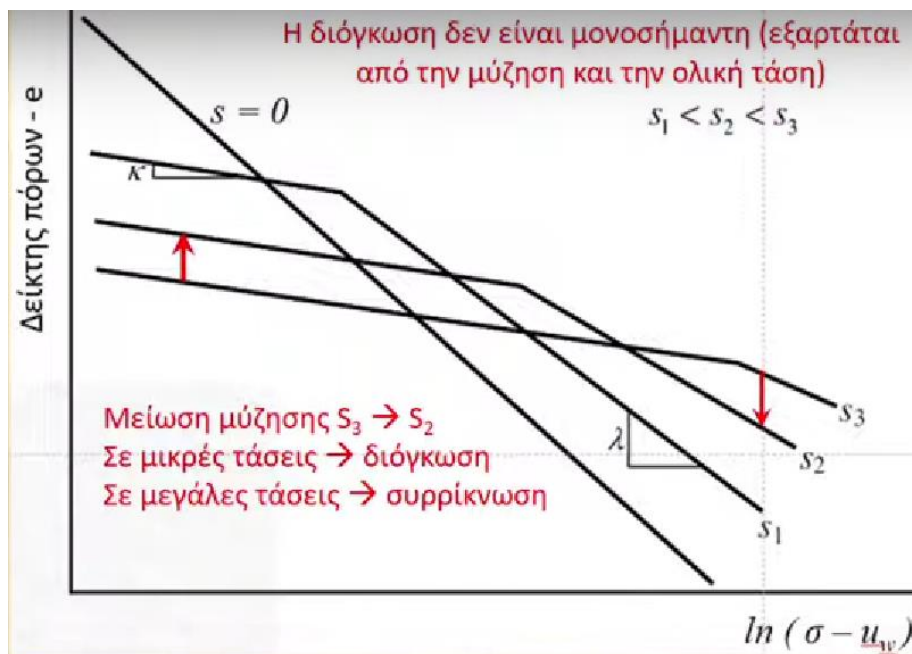
Σχήμα 5.11 : Διόγκωση εδάφους θεμελίωσης λόγω βροχόπτωσης (Λουκίδης, 2019).



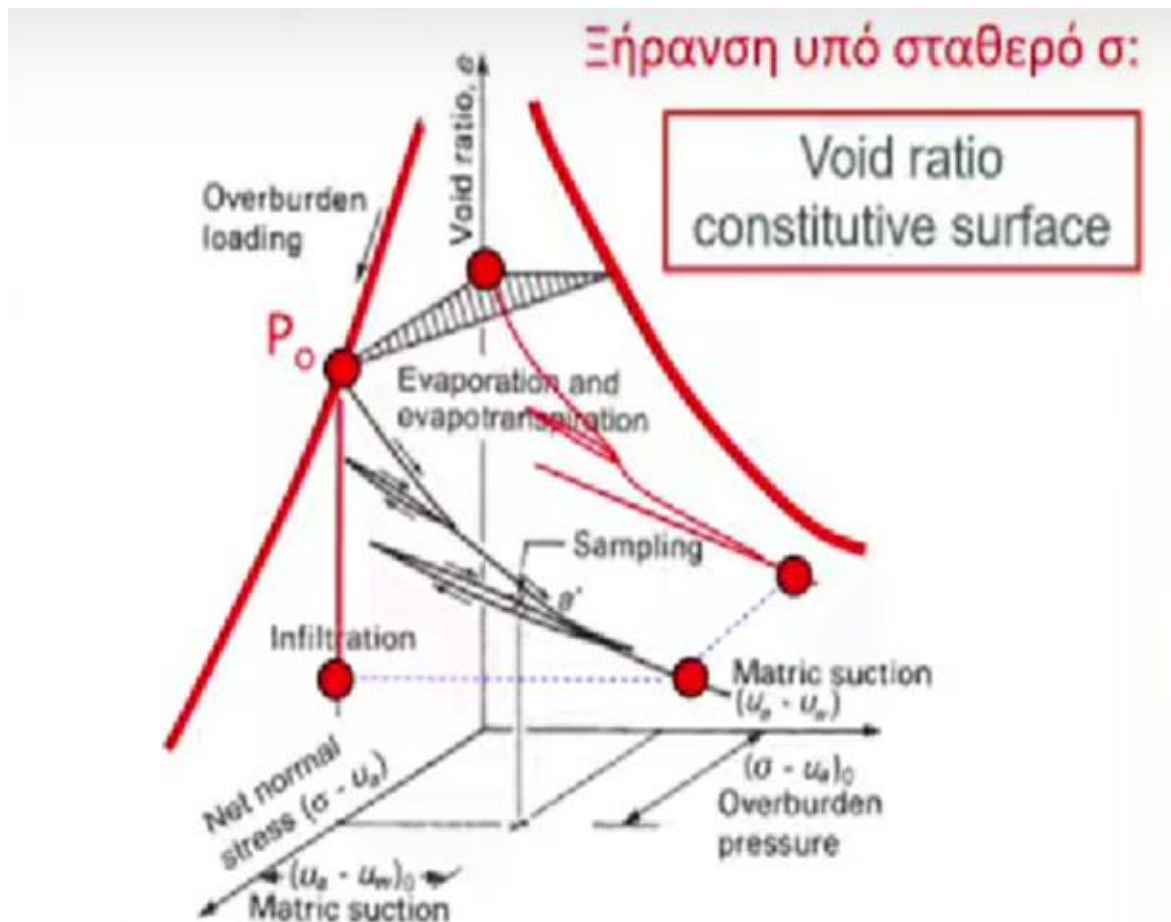
Σχήμα 5.12 : Συρρίκνωση εδάφους θεμελίωσης λόγω εξάτμησης (Λουκίδης, 2019).



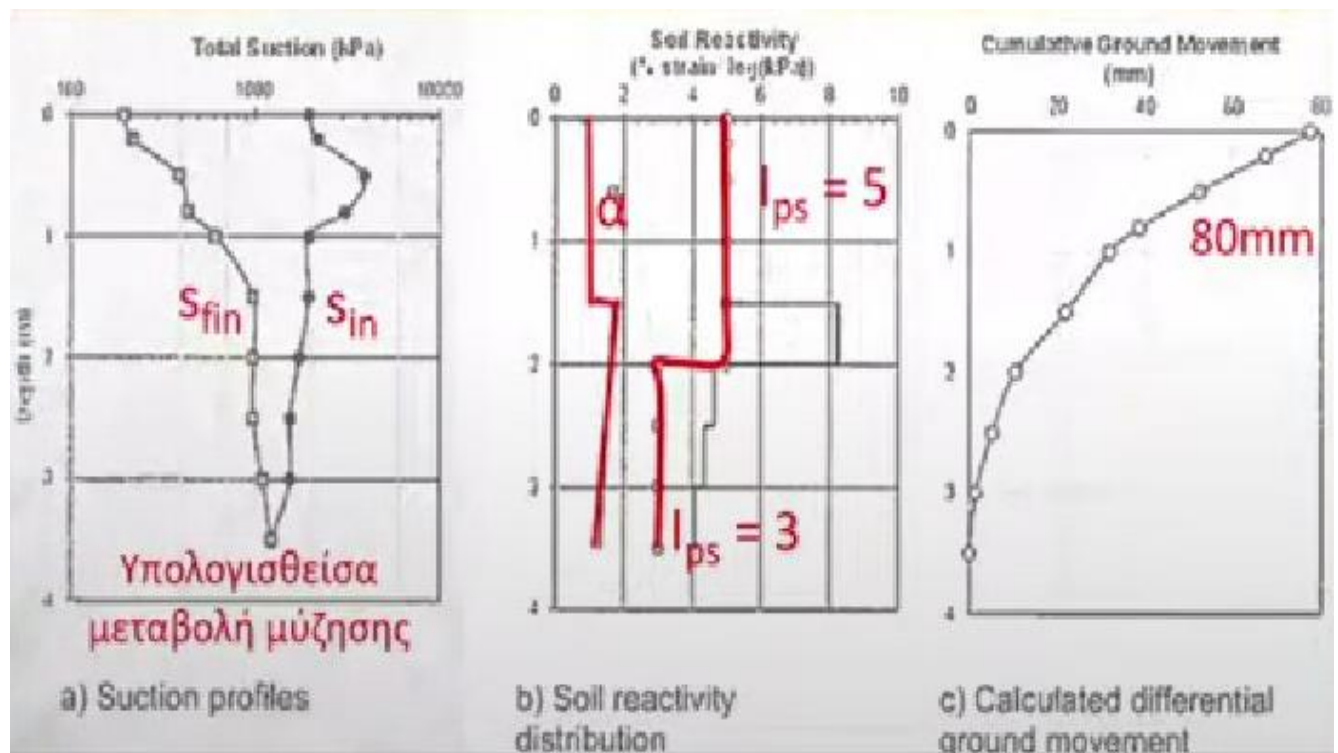
Σχήμα 5.13 : Διόγκωση σε έδαφος θεμελίωσης στο κέντρο του κτηρίου (Καββαδάς, 2021).



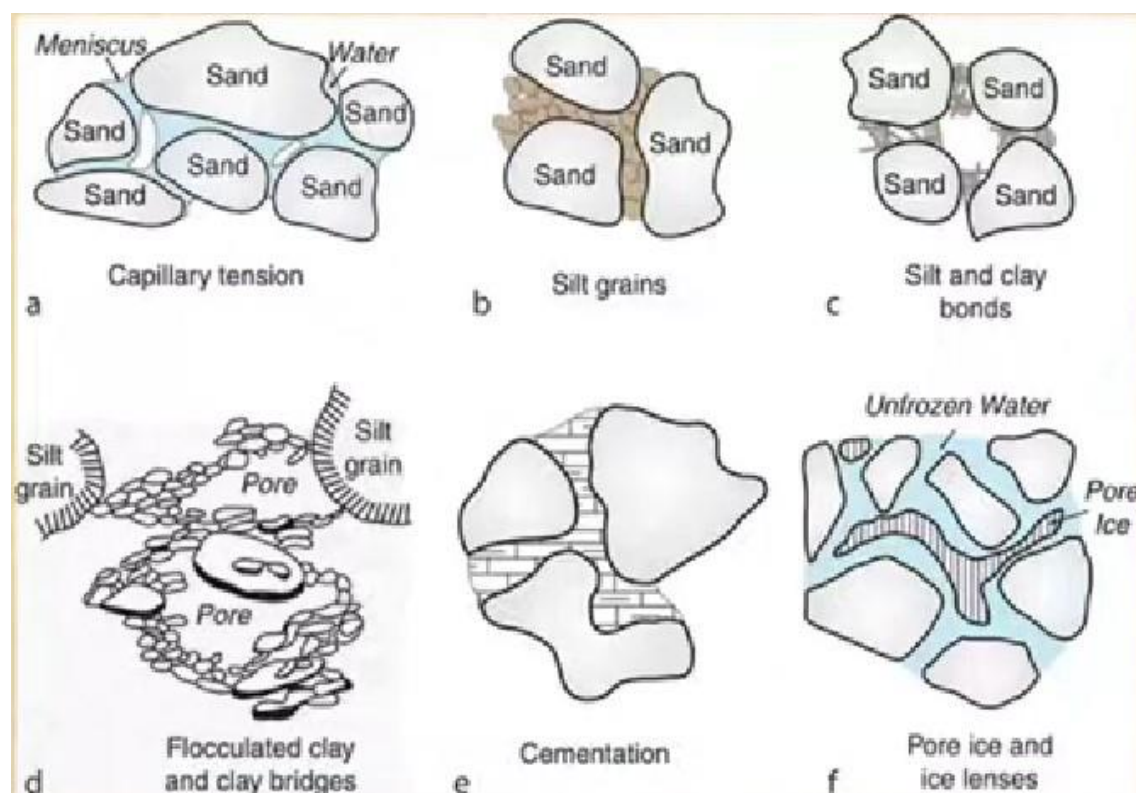
Σχήμα 5.14 : Ανάλυση διόγκωσης σε 2-Δ (Καββαδάς, 2021).



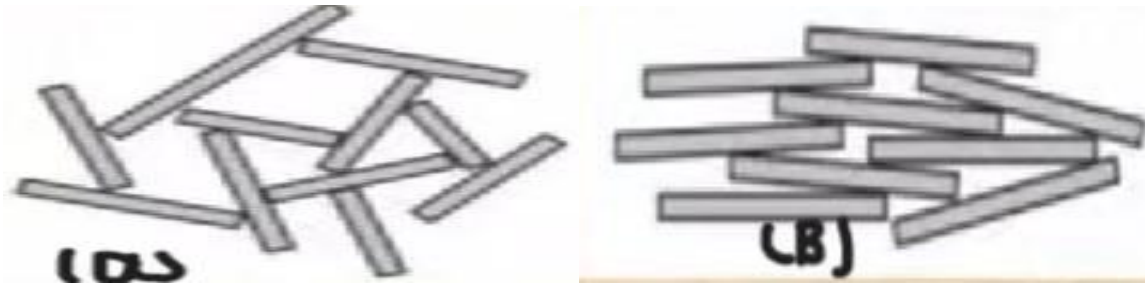
Σχήμα 5.15 : Ανάλυση διόγκωσης σε 3-Δ (Καββαδάς, 2021).



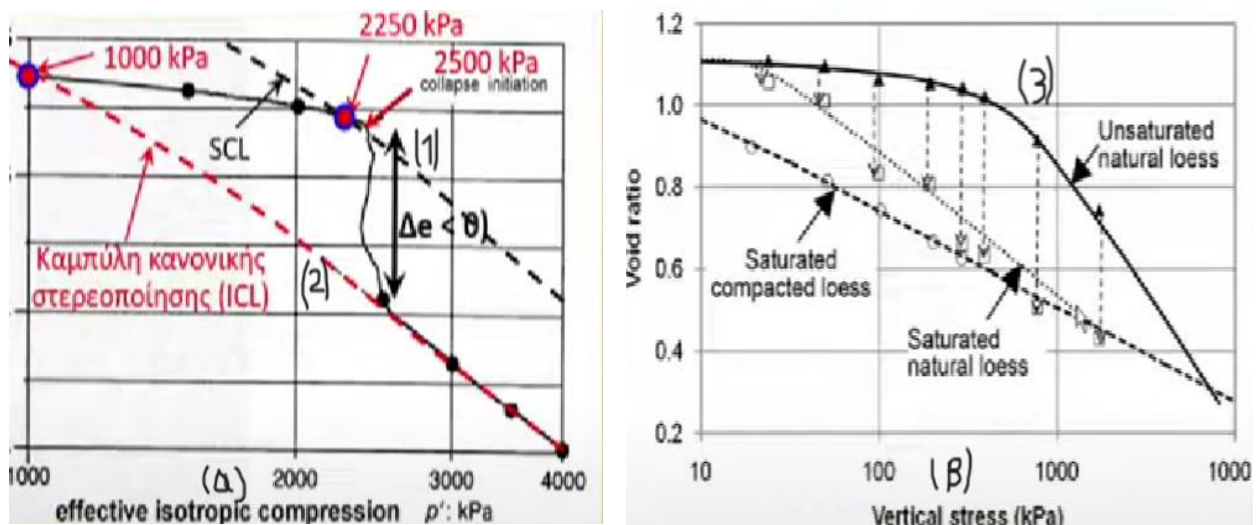
Σχήμα 5.17 : Υπολογισμός διόγκωσης σε διογκώσιμο έδαφος με ξηρή ζώνη (Καβαδάς, 2021).



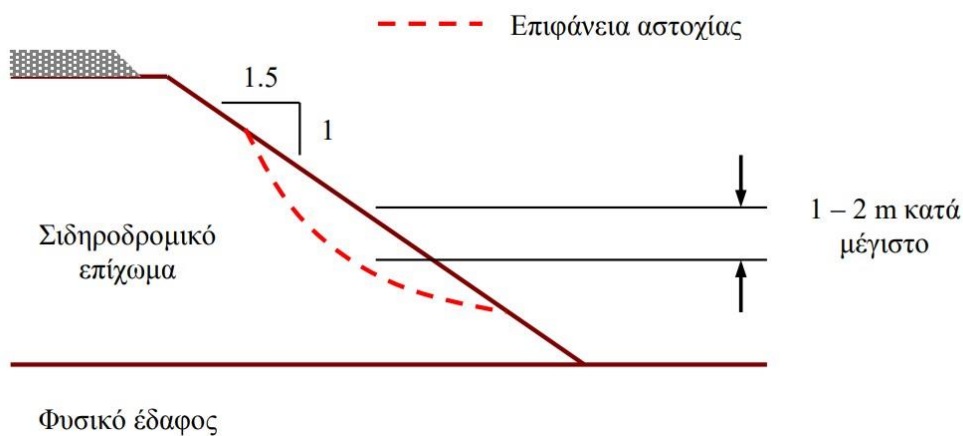
Σχήμα 5.18 : Χαλαρή δομή καταρρέοντων εδαφών (Καβαδάς, 2021).



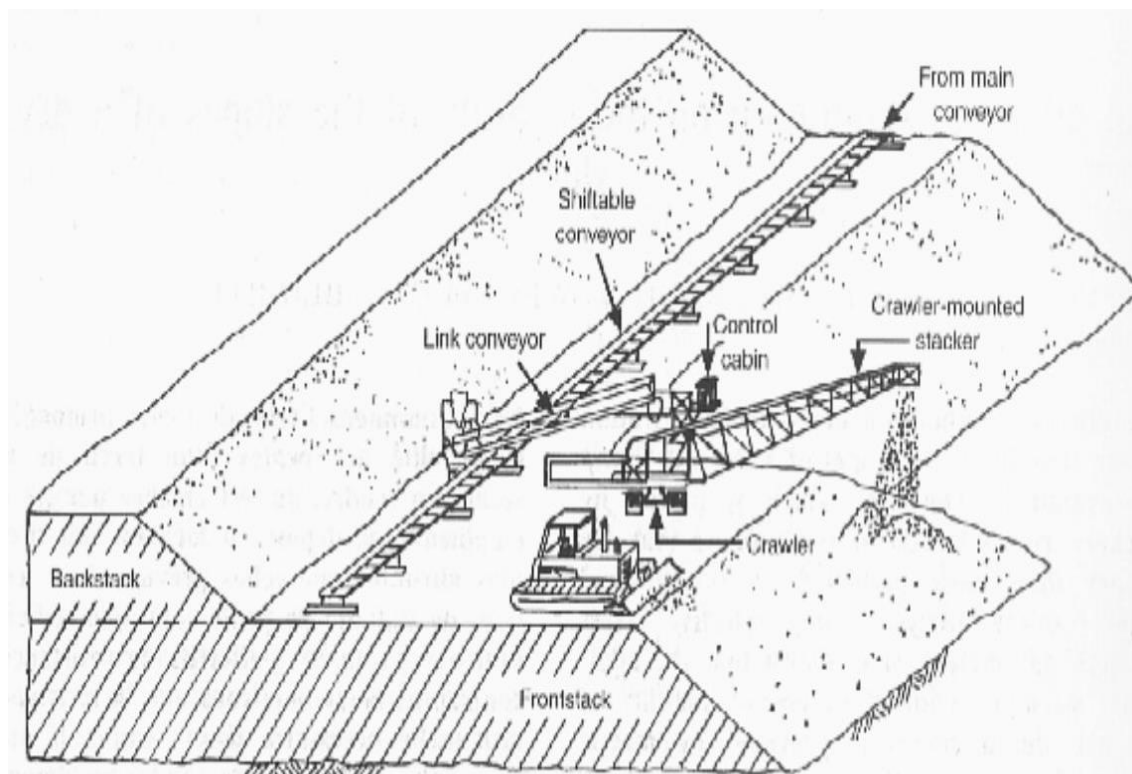
Σχήμα 5.19 : Μηχανισμοί κατάρρευσης εδάφους (α) έκθεση στο νερό και (β) έκπλυση κατιόντων (Καββαδάς, 2021).



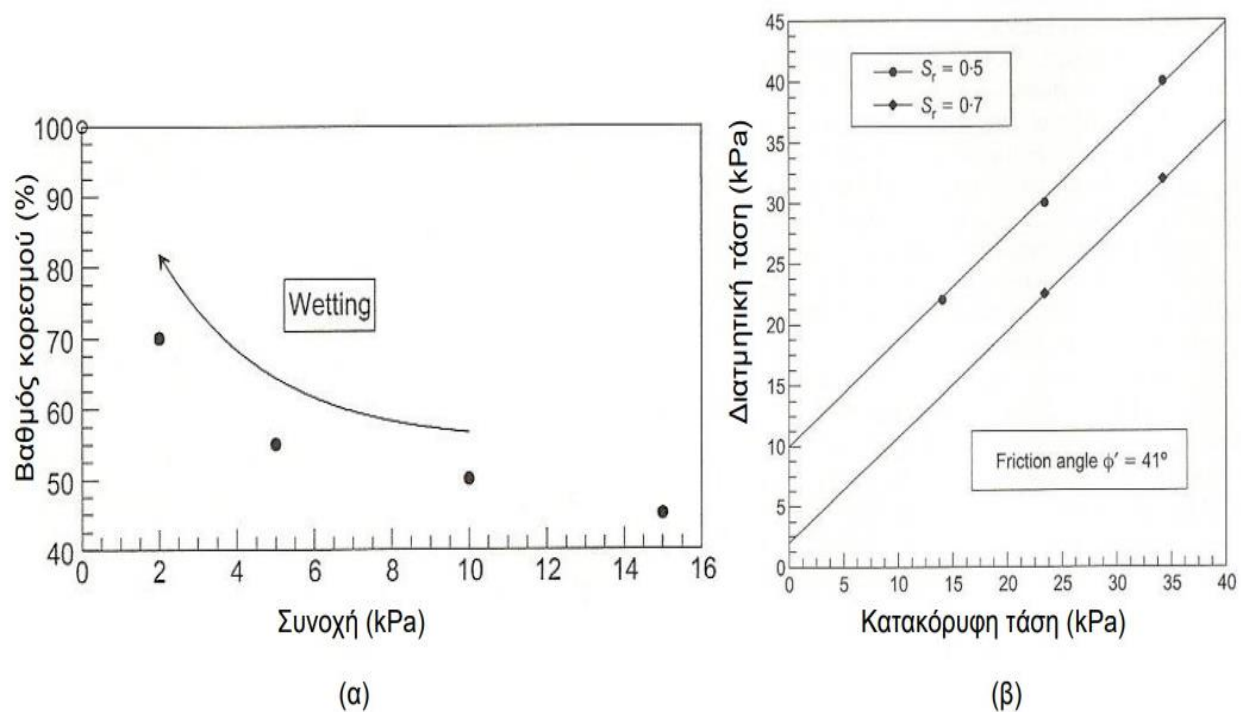
Σχήμα 5.20 : (α) Στερεοποίηση κορεσμένου εδάφους και (β) στερεοποίηση ακόρεστου εδάφους (Καββαδάς, 2021).



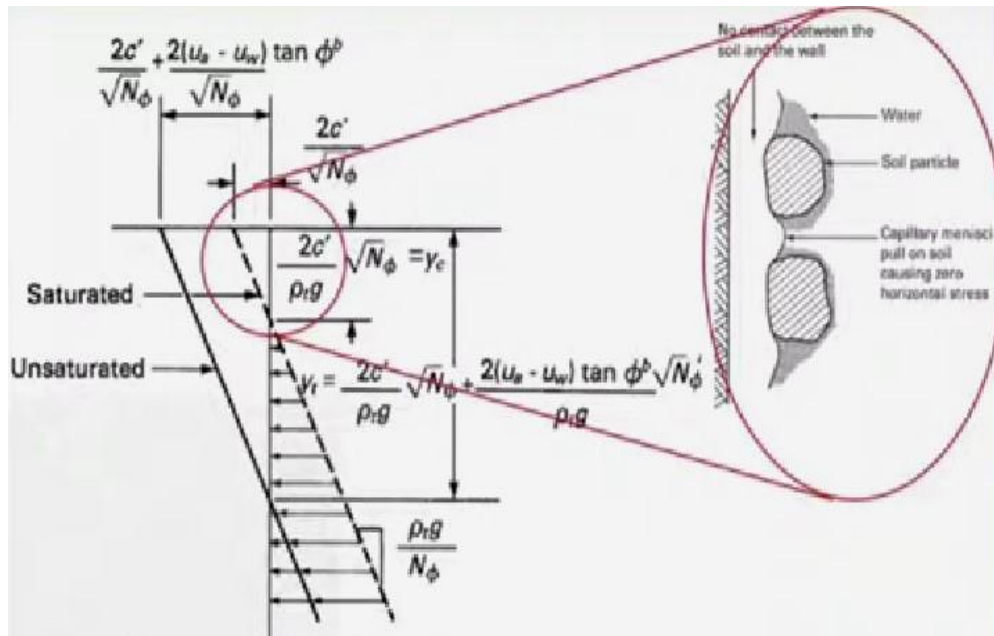
Σχήμα 5.21 : Μηχανισμός αστοχίας του επιχώματος στο Καναδά (Μπαρδάνης, 2016).



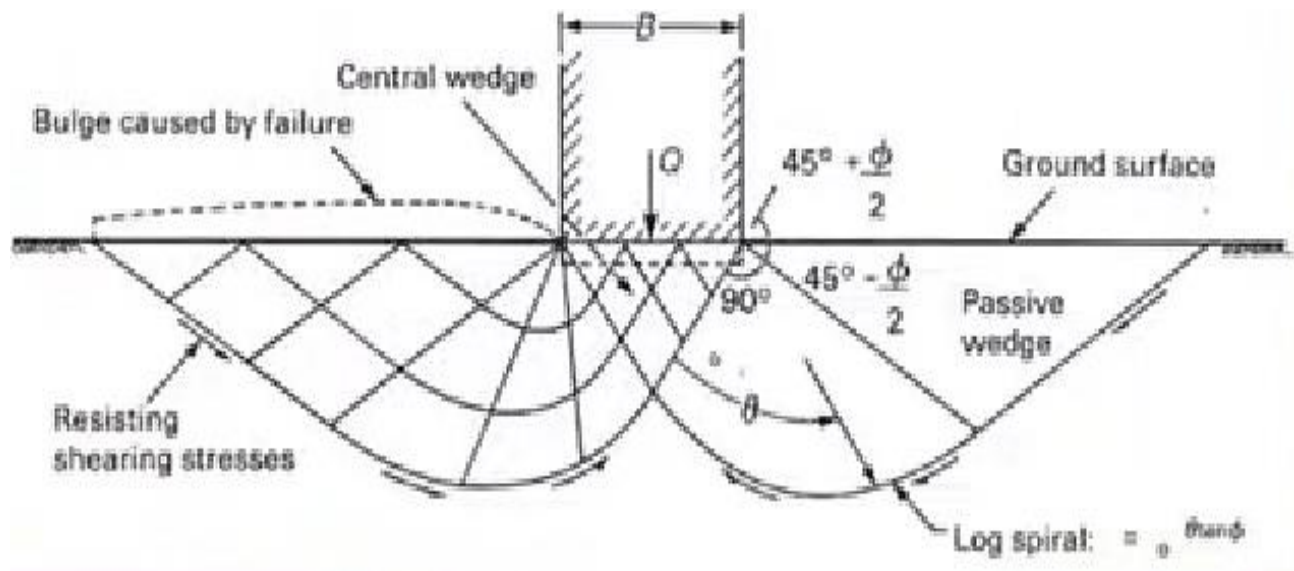
Σχήμα 5.22 : Απόθεση ξηρής τέφρας στο ανθρακωρυχείο Lenthabo (Μπαρδάνης, 2016).



Σχήμα 5.23 : (α) Πειραματικά δεδομένα κατά την ύγρανση δοκίμιου που δείχνουν τη μείωση της συνοχής με την αύξηση του βαθμού κορεσμού, και (β) την επίδραση του βαθμού κορεσμού στις περιβάλλουσες ατοχίας. (Μπαρδάνης, 2016).



Σχήμα 5.24 : Τοίχος αντιστηρίξεως με διαγράμματα ωθήσεων για κορεσμένο και ακόρεστο έδαφος (Καββαδάς, 2021).



Σχήμα 5.25 : Φέρουσα Ικανότητα σε επιφανειακή θεμελίωση (Καββαδάς, 2021).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Συνοψίζοντας:

1) Η μηχανική συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών αναφέρεται σε φυσικά εδάφη πάνω από τη Σ.Υ.Ο. (κυρίως σε ξηρά κλίματα) και σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά (επιχώματα οδοποιίας κ.α.). Η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών είναι σημαντική για την μελέτη της ευστάθειας των πρανών (φυσικά υλικά) και για διάφορα προβλήματα που εμφανίζονται σε επιχώματα οδοποιίας (συμπυκνωμένα υλικά), όπως επιφανειακές αστοχίες που καταστρέφουν την επιφάνεια των πρανών.

2) Το κύριο χαρακτηριστικό στα ακόρεστα εδάφη είναι η μύζηση (αρνητική πίεση του νερού των πόρων στην ακόρεστη ζώνη των εδαφών), η οποία μεταβάλλεται λόγω:

α. της εποχιακής μεταβολής των βροχοπτώσεων (μεταβολή Σ.Υ.Ο.),

β. της εξάτμισης σε ξηρές περιόδους.

Η μύζηση είναι σημαντική παράμετρος για την ανάλυση των ακόρεστων εδαφών διότι, οι μεταβολές που δέχεται σε ένα έδαφος προκαλούν μεταβολές στην αντοχή και τον όγκο (προβλήματα διόγκωσης/συρρίκνωσης) του εδάφους. Οι μεταβολές της μύζησης επηρεάζουν και τη μηχανική απόκριση των εδαφών, κυρίως την διαπερατότητα (επιρροή στην ανάλυση ροής).

Το μέγεθος της μεταβολής της αντοχής, του όγκου και της διαπερατότητας εξαρτώνται από τη μεταβολή της μύζησης. Η μεταβολή της μύζησης επηρεάζεται από:

α. το είδος του εδάφους (σε αργιλικά εδάφη που περιέχουν διογκούμενα υλικά είναι έντονες),

β. τις οριακές υδραυλικές συνθήκες (βροχόπτωση, εξάτμιση, άνοδος Σ.Υ.Ο.), που επηρεάζουν τον απαιτούμενο χρόνο μεταβολής της μύζησης, δηλαδή τη ροή στην ακόρεστη ζώνη των εδαφών.

Για το πόση μεταβολή θα επέλθει σε ένα έδαφος και ποια θα είναι η επιρροή της πάνω στο έδαφος υπολογίζονται με την ανάλυση της ροής στην ακόρεστη ζώνη.

Πρέπει να γίνει ανάλυση του πολυφασικού θερμο-υδρο-μηχανικού προβλήματος με τη χρήση:

α. καταστατικών μοντέλων, που απαιτούν μετρήσεις διάφορων ιδιοτήτων των εδαφών,

β. μη γραμμικών αριθμητικών μεθόδων.

Η μέτρηση της μύζησης επιτρέπει τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης Χ.Κ., η οποία αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την κατανόηση της μηχανικής απόκρισης των ακόρεστων εδαφών. Η Χ.Κ. είναι απαραίτητη για:

α. την εκτίμηση της επιρροής της μύζησης, δηλαδή αν ένα έδαφος με συγκεκριμένη Χ.Κ. έχει μικρές ή μεγάλες τιμές μύζησης,

β. την εκτίμηση των σχετικών μηχανικών παραμέτρων.

Η μέτρηση της μύζησης και η παραγωγή της Χ.Κ. είναι δύσκολες και ακριβές διαδικασίες, για τις οποίες χρησιμοποιούνται εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού σε συσχέτιση με την ογκομετρική καμπύλη ή μέσω εμπειρικών τύπων.

Στη μελέτη των ακόρεστων εδαφών δίνεται έμφαση στη παραγωγή της Χ.Κ. ενός εδάφους, χωρίς να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στα αποτελέσματα, δηλαδή στη μεταβολή της μύζησης μέσα σε ένα έδαφος και πόσο επηρεάζεται η διόγκωση και η αντοχή των εδαφών.

→ Αν γίνει η παραδοχή ότι εξαφανίζεται η μύζηση καταλήγουμε στη πιο ακριβή λύση αλλά όχι πάντα στην πιο σωστή.

3) Σε αντίθεση με τη μελέτη της απόκρισης των πλήρως κορεσμένων εδαφών, η οποία καθορίζεται από την ενεργό τάση ($\sigma' = \sigma - u_w$), η μηχανική συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών δεν καθορίζεται από ένα μοναδικό μέγεθος τάσεως, αλλά πρέπει να μελετηθούν ξεχωριστά:

- η επιρροή από τις ολικές τάσεις ($\sigma - u_a$)

- η επιρροή της μύζησης ($u_a - u_w$).

Σε κάποιες περιπτώσεις (ευστάθεια πρανών) αρκεί η περιγραφή της αντοχής μέσω μιας ισοδύναμης «ενεργού» τάσης (Bishop), για τον καθορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών.

4) Η ανάλυση της συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών είναι δύσκολη, καθώς απαιτεί υπολογισμό των μεταβολών της μύζησης (η χρήση της Χ.Κ. είναι το εύκολο βήμα του υπολογισμού των μεταβολών της μύζησης). Ο δύσκολος δρόμος για τον υπολογισμό των μεταβολών της μύζησης είναι η ανάλυση ροής σε πολυφασικό υλικό (κόκκοι, νερό και αέρας), με πολλές διαφορικές εξισώσεις (ισορροπίας, ροής νερού, ροής αέρα, ροής θερμότητας). Οι εξισώσεις για να λυθούν απαιτούν καταστατικές σχέσεις (σ-ε, s-ε κ.α.), που είναι μη γραμμικές και η μέτρηση των παραμέτρων δυσκολεύει.

5) Τα σημαντικότερα προβλήματα των ακόρεστων εδαφών είναι:

- η ροή στην ακόρεστη ζώνη των εδαφών,
- η διόγκωση/συρρίκνωση για τα διογκούμενα εδάφη και η κατάρρευση για τα καταρρέοντα εδάφη,
- η ευστάθεια πρανών και θεμελιώσεων, λόγω της αλλαγής της αντοχής στην ακόρεστη ζώνη των εδαφών μέσω της μεταβολής της μύζησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αντωνόπουλος Ζ. Βασίλειος (2020). Βιβλίο «Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους». Βιβλιοθήκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [2] Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο. E-Class, Αρδεύσεις (2019).
- [3] Καββαδάς Μιχάλης (2021). Παρουσιάσεις «Unsaturated Soil Mechanics». Youtube.
- [4] Καραπάντσιος Θ. Κεφάλαιο «Ξήρανση».
- [5] Λουκίδης Δ. (2019). Κεφάλαιο 4 «Διόγκωση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού και επιπτώσεις στις κατασκευές». Εσπερίδα μη κορεσμένων εδαφών. Τόμος Πρακτικών. Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής.
- [6] Λουκίδης Δ. (2019). Κεφάλαιο 7 «Μακροχρόνιες μετρήσεις μύζησης στην Ελλάδα και στην Κύπρο». Εσπερίδα μη κορεσμένων εδαφών. Τόμος Πρακτικών. Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής.
- [7] Μακρόπουλος Χ. & Κουτσογιάννης Δ. (2016). Άρθρο «Ο υδραυλικός κύκλος». Researchgate.
- [8] Μπαρδάνης Ε. Μηχάλης (2011). Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής. Docplayer.
- [9] Μπαρδάνης Ε. Μηχάλης (2011). Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής. Yumru.
- [10] Μπαρδάνης Ε. Μηχάλης (2016). Διδακτορική διατριβή «Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών».
- [11] Μπαρδάνης Ε. Μηχάλης (2019). Κεφάλαιο 1 «Φύση, μηχανική συμπεριφορά και εμφάνιση μη κορεσμένων εδαφών». Εσπερίδα μη κορεσμένων εδαφών. Τόμος Πρακτικών. Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής. Researchgate.
- [12] Μπαρδάνης Ε. Μηχάλης (2019). Κεφάλαιο 5 «Κατάρρευση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού». Εσπερίδα μη κορεσμένων εδαφών. Τόμος

Πρακτικών. Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής.

[13] Μπαρδάνης Ε. Μηχάλης (2019). Κεφάλαιο 7 «Μακροχρόνιες μετρήσεις μύζησης στην Ελλάδα και στην Κύπρο». Εσπερίδα μη κορεσμένων εδαφών. Τόμος Πρακτικών. Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής.

[14] Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

[15] Παπαδόπουλος Μ. Στέφανος (2014). Διδακτορική διατριβή (Τόμος Ι) «Η επίδραση της ταχύτητας διάτμησης στην παραμένουσα αντοχή φλύσχη».

[16] Σιταρένιος Χ. Π. (2019). Κεφάλαιο 6 «Καταστατική προσομοίωση μη κορεσμένων εδαφών». Εσπερίδα μη κορεσμένων εδαφών. Τόμος Πρακτικών. Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής.

[17] Τσιαμπούση Αικ. (2019). «Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και η σημασία της». Εσπερίδα μη κορεσμένων εδαφών. Τόμος Πρακτικών. Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής.

[18] Φεγιάς Μαριάννα (2022). Διπλωματική εργασία «Η επίδραση του μερικού κορεσμού στη διατμητική αντοχή των εδαφών: Εργαστηριακή και υπολογιστική διερεύνηση σε προβλήματα ευστάθειας πρανών».

[19] Χατζηγώγος Θ. Νικόλαος-Παναγιώτης (2015). Διδακτορική διατριβή «Συμβολή στη διερεύνηση των μηχανισμών αστοχίας υπολειματικών εδαφών».

[20] Χατζηγώγος Θ. Νικόλαος-Παναγιώτης (2019). Κεφάλαιο 3 «Διερεύνηση της διατμητικής αντοχής γεωυλικών σε ακόρεστες συνθήκες». Εσπερίδα μη κορεσμένων εδαφών. Τόμος Πρακτικών. Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής.

[21] Χατζηγώγος Θ. Νικόλαος-Παναγιώτης (2019). Κεφάλαιο 5 «Κατάρρευση εδαφών λόγω μεταβολής του βαθμού κορεσμού». Εσπερίδα μη κορεσμένων εδαφών. Τόμος Πρακτικών. Ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και γεωτεχνικής μηχανικής.

[22] Abdolhossein Khalilnejad & Faisal Hj. Ali & Normaniza Osman (2012). Άρθρο «Contribution of The Root To Slope Stability». Researchgate.

- [23] Armand A. Fondjo & Richard P. Ray & Elizabeth Theron (2020). 'Αρθρο «Assessment of Various Methods to Measure the Soil Suction». Researchgate.
- [24] Delwyn D. Fredlund & H. Rahardjo (1993). 'Αρθρο «Soil mechanics for unsaturated soils». Researchgate.
- [25] Sam Hashemi & Noun Melkounian & Abbas Taheri (2015). 'Αρθρο «A borehole stability study by newly designed laboratory tests on thick-walled hollow cylinders». Researchgate.