

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



Μ. Σακελλαρίου, Αναπληρωτής Καθηγητής
Σ. Κοζάνης, Δρ. Μηχανικός

Συνεργάστηκαν:
Μ. Φερεντίνου, Δρ. Γεωλόγος
Ι. Ανδριτσάκης, Γεωλόγος, MSc.
Γ. Ντούλης, Π.Μ. Ε.Μ.Π., Υ.Δ.

Αθήνα 2003

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	3
1 Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής	5
1.1 Κατάλογος δοκιμών.....	5
1.2 Δειγματοληψία.....	7
2 Κοκκομετρική ανάλυση - Μηχανική μέθοδος	9
2.1 Γενικά.....	9
2.2 Χαρακτηριστικά Κόσκινα.....	11
2.3 Ενεργό μέγεθος - Συντελεστής ομοιομορφίας.....	11
2.3.1 Συντελεστής καμπυλότητας.....	12
2.4 Διαδικασία δοκιμής.....	12
2.5 Αξιολόγηση της κοκκομετρικής καμπύλης.....	14
2.5.1 Καλά διαβαθμισμένο έδαφος.....	14
2.5.2 Έδαφος κακής διαβάθμισης.....	14
3 Εργαστηριακός προσδιορισμός της περιεχόμενης υγρασίας	16
3.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός.....	16
4 Εργαστηριακός προσδιορισμών ορίων Atterberg (όρια υδαρότητας και πλαστικότητας εδαφών)	17
4.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός ορίων.....	18
4.1.1 Όριο υδαρότητας.....	19
4.1.2 Όριο πλαστικότητας.....	20
5 Αναγνώριση - Ταξινόμηση εδαφικών υλικών	21
5.1 Ταξινόμηση χονδρόκοκκων υλικών μέσω της κοκκομετρικής δοκιμής.....	21
5.2 Ταξινόμηση λεπτόκοκκων υλικών μέσω του χάρτη πλαστικότητας “Casagrande”.....	22
5.3 Ταξινόμηση εδαφών κατά ASTM.....	23
5.4 Πίνακες ταξινόμησης κατά ASTM.....	24
5.5 Ταξινόμηση με την χρήση λογισμικού.....	31
5.6 Ταξινόμηση κατά AASTHO.....	31
6 Εργαστηριακός προσδιορισμός της υδατοπερατότητας εδαφών	33

6.1	Φυσικό νόημα του συντελεστή υδατοπερατότητας.....	33
6.2	Περιγραφή εργαστηριακής διάταξης.....	34
6.3	Μέτρηση συντελεστή - υπολογισμοί.....	35
7	Δοκιμή του Καλιφορνιακού Λόγου Φέρουσας Ικανότητας (CBR - California Bearing Ratio test)	37
8	Εισαγωγή στις εργαστηριακές μεθόδους προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής εδαφών	40
8.1	Εργαστηριακές μέθοδοι προσδιορισμού της αντοχής	41
8.1.1	Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.....	42
8.1.2	Δοκιμή τριαξονικής θλίψης.....	43
8.1.3	Σύντομη περιγραφή πειράματος τριαξονικής δοκιμής.....	44
8.2	Υπολογισμοί	45

1 Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής

Η εδαφομηχανική είναι ο κλάδος της εφαρμοσμένης μηχανικής όπου πραγματεύεται την συμπεριφορά και τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους (όπως η αντοχή του εδάφους, η συμπεριφορά του εδάφους σύμφωνα με την περιεχόμενη υγρασία), τις μεθόδους σχεδιασμού τεχνικών έργων που εδράζονται και αλληλεπιδρούν σε / με αυτό (όπως θεμελιώσεις κτιριακών έργων και γεφυρών, οδοστρώματα, σήραγγες) καθώς και των κατασκευών από έδαφος (όπως τα χωμάτινα φράγματα, επιχώματα οδοποιίας).

Μία από τις ιδιαιτερότητες της εδαφομηχανικής σε σχέση με άλλους κλάδους της εφαρμοσμένης μηχανικής, είναι η αδυναμία της καταρχήν προδιαγραφής των ιδιοτήτων των υλικών. Ως αντιπαράδειγμα αναφέρουμε τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα όπου τα υλικά (σκυρόδεμα και χάλυβας) κατασκευάζονται βιομηχανικά, με μεθοδολογίες τέτοιες ώστε να ελέγχονται οι ιδιότητες και να πληρούνται οι προδιαγραφές. Στην περίπτωση των κατασκευών επί του (ή και από) εδάφους, ο σχεδιασμός γίνεται σύμφωνα με τις ιδιότητες του υλικού που θα συναντηθεί. Δεν είναι λίγες και οι περιπτώσεις όπου λόγω δυσμενών εδαφοτεχνικών συνθηκών, έργα έχουν αλλάξει θέση (όπως η μεταβολή της χάραξης οδού).

Οι ιδιότητες των εδαφικών υλικών προσδιορίζονται με τις δύο παρακάτω μεθοδολογίες:

- Επί τόπου δοκιμές. Η διαδικασία αυτή αφορά δοκιμές που γίνονται στον τόπο – έδαφος κατασκευής ενός έργου. Αν και δεν διαθέτουν την ακρίβεια των εργαστηριακών δοκιμών στον προσδιορισμό γεωτεχνικών παραμέτρων, είναι πολλές οι περιπτώσεις που μόνο αυτές μπορούν να δώσουν μία εικόνα για τις ιδιότητες του εδάφους. Για παράδειγμα ο εργαστηριακός προσδιορισμός της αντοχής της άμμου είναι δύσκολος καθώς προκαλείται έντονη διατάραξη κατά την διαδικασία της δειγματοληψίας. Η συνήθης πρακτική είναι, οι ιδιότητες της άμμου να προσδιορίζονται με την δοκιμή διείδυσης (SPT – Standard Penetration Test) επί τόπου.
- Εργαστηριακές δοκιμές. Με την διαδικασία της δειγματοληψίας η οποία γίνεται συνήθως με χρήση γεωτρήσεων λαμβάνονται εδαφικά δείγματα τα οποία μεταφέρονται στον χώρο του εργαστηρίου. Με κατάλληλες εργαστηριακές μεθοδολογίες, προσδιορίζονται οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες των εδαφικών δειγμάτων (γεωτεχνικοί παράμετροι).

Οι εργαστηριακές δοκιμές της εδαφομηχανικής έχουν τυποποιηθεί από διάφορους φορείς, ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή των εργαστηριακών δοκιμών και η εξαγωγή συμβατών αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων. Τέτοιοι φορείς είναι οι ΕΛΟΤ για την Ελλάδα αλλά και διεθνείς φορείς όπως οι ISO, ASTM, UCS, BST, DIN κ.α. Οι προδιαγραφές του ΕΛΟΤ για τις εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές εδαφομηχανικής, εκδίδονται από το ΚΕΔΕ (Κέντρο Ελέγχου Δημοσίων Έργων) σε έντυπα που περιγράφουν τις μεθόδους διεξαγωγής και επιπλέον αποτελούν νόμο του κράτους (ΦΕΚ - Τεχνικές προδιαγραφές δοκιμών εδαφομηχανικής). Η τήρηση αυτών των προδιαγραφών είναι υποχρεωτική από τα εργαστήρια, προκειμένου τα αποτελέσματα των δοκιμών να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό έργων.

1.1 Κατάλογος δοκιμών

Παρουσιάζεται η ονοματολογία των πιο συνηθισμένων δοκιμών εδαφομηχανικής και βραχομηχανικής μαζί με προδιαγραφές που εφαρμόζονται.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1: Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ
1	Προπαρασκευή σε ξηρή κατάσταση διαταραγμένου δείγματος.	E105-86, παρ. 1
2	Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας εδάφους.	E105-36, παρ. 2, ASTM D 2216-90
3	Προσδιορισμός φαινόμενου βάρους, συν. υλικού.	E105-86, παρ. 3
4	Προσδιορισμός ειδικού βάρους εδαφών.	E105-36, παρ. 4, ASTM D. 854
5	Προσδιορισμός ορίων υδαρότητας, πλαστικότητας.	E105-36, παρ.5.6, ASTM D 4318-34
6	Προσδιορισμός κόκκου, αναλ. ξηράς μεθόδου.	E105-36, παρ.7, ASTM C 136-34
7	Προσδιορισμός υλικού λεπτότερου του Νο200.	E105-36, παρ.8, ASTM C 36-84
8	Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο.	E105-36, παρ. 9, ASTM C 36-84
9	Προσδιορισμός σχέσης υγρασίας – πυκνότητας εδαφών (Proctor test Standard και Modified).	E105-36, παρ. 10.11, ASTM D 1557
10	Προσδιορισμός καλιφ. Λόγου φερ. ικανότητας CBR.	E105-36, παρ. 125, ASTM D 1883
11	Δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης.	E105-36, παρ. 13, ASTM D 2435-30
12	Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.	E105-36, παρ. 14, ASTM D 2166
13	Τριαξονική δοκιμή.	E105-86, παρ.15-6.1, ASTM D 2350-43
14	Τριαξονική δοκιμή CUPP.	E105-86, παρ.15-6.2, ASTM D 2850-82
15	Τριαξονική δοκιμή CD.	E105-86, παρ. 15-6.31
16	Δοκιμή ταχείας διάτμησης χωρίς στερεοποίηση (UU).	E105-86,παρ.16-5-2.1,ASTM D3080
17	Δοκιμή ταχείας διάτμησης με στερεοποίηση.	E105-86,παρ.16-5-2.2,ASTM D3080
18	Δοκιμή βραδείας διάτμησης με στερεοποίηση.	E105-86,παρ.16-5-2.3,ASTM D3080
19	Δοκιμή υδατοπερατότητας σταθερού ύψους.	E105-86, παρ. 17, E-13 USBR 5600-89
20	Δοκιμή υδατοπερατότητας μεταβλητού ύψους.	E105-86, παρ. 18, E-13 USBR 5600-89
21	Προσδιορισμός συντελεστή υδατοπερατότητας στην συσκευή στερεοποίησης.	E105-86, παρ. 19, E-13 USBR 5600-89
22	Δοκιμή Vane.	ASTM D 2573-72
23	Δοκιμή συμπύκνωσης HARVARD.	S.P. WILSON
24	Δοκιμή PIN-HOLE.	J.O.G.E.D., p. 11846.01/76
25	Προσδιορισμός οργανικών ουσιών.	AASHTO T194-80
26	Προσδιορισμός ανθρακικού ασβεστίου.	ASTM D 4373-84
27	Προσδιορισμός θεικών αλάτων και ιόντων.	ASTM C-114

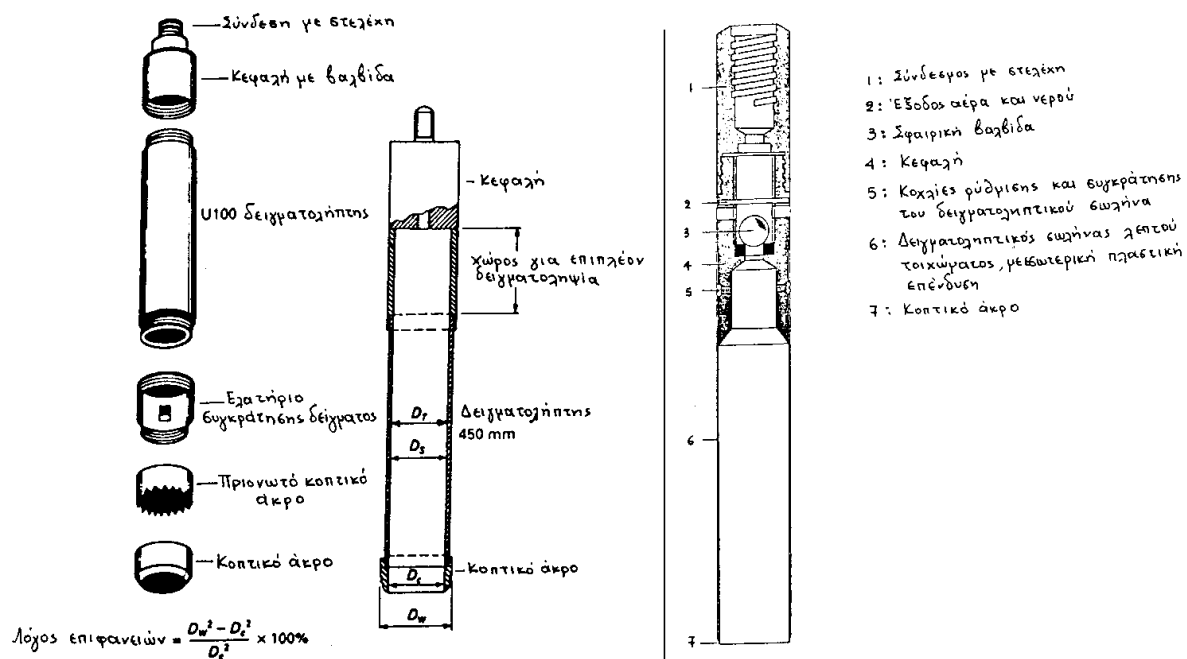
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2: Εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ
1	Προετοιμασία κυλινδρικού δοκιμίου βραχ. δείγμ.	-
2	Φυσική υγρασία δείγματος πετρώματος.	E103-84, παρ. 1
3	Προσδιορισμός πορώδους και πυκνότητας.	E103-84, παρ. 3
4	Προσδιορισμός αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη.	E103-84, παρ. 4, ASTM D2938-86
5	Προσδιορισμός αντοχής σε σημειακή φόρτιση.	E103-84, παρ. 5
6	Προσδιορισμός αντοχής σε τριαξονική θλίψη.	E103-84, παρ. 6, ASTM D2664-36
7	Προσδιορισμός σκληρότητας, με την σφύρα Schmidt.	E103-84, παρ. 7, ISRM Suggested

		Methods p.101-103
8	Προσδιορισμός διατμητικής αντοχής, φυσικής και τεχνητής ασυνέχειας.	ISRM Suggested Methods p.135-136
9	Προσδιορισμός δείκτη χαλάρωσης.	ISRM Suggested Methods p.92-94
10	Έμμεσος προσδιορισμός αντοχής σε εφελκυσμό.	ASTM D 2936-84

1.2 Δειγματοληψία

Προκειμένου να γίνει ο γεωτεχνικός σχεδιασμός ενός έργου (όπως η μελέτη - διαστασιολόγηση των θεμελιώσεων, ο σχεδιασμός τοίχων αντιστήριξης, υπολογισμός των μέτρων υποστήριξης σιράγγων κ.α.) απαιτείται μία εκτενής γεωτεχνική έρευνα. Η έρευνα αυτή απαιτεί ανάλογα με την φύση του έργου, γεωλογική χαρτογράφηση, επιτόπου αναγνώριση ειδικών γεωτεχνικών συνθηκών, αλλά κυρίως την διαδικασία της δειγματοληψίας.



Σχήμα 1.1: Δειγματολήπτες εδάφους αδιατάρακτων δειγμάτων, (α) U100 για συνεκτικά εδάφη, (β) λεπτού τοιχώματος (SHELBY) (Γ. Τσιαμπάος, 2000)

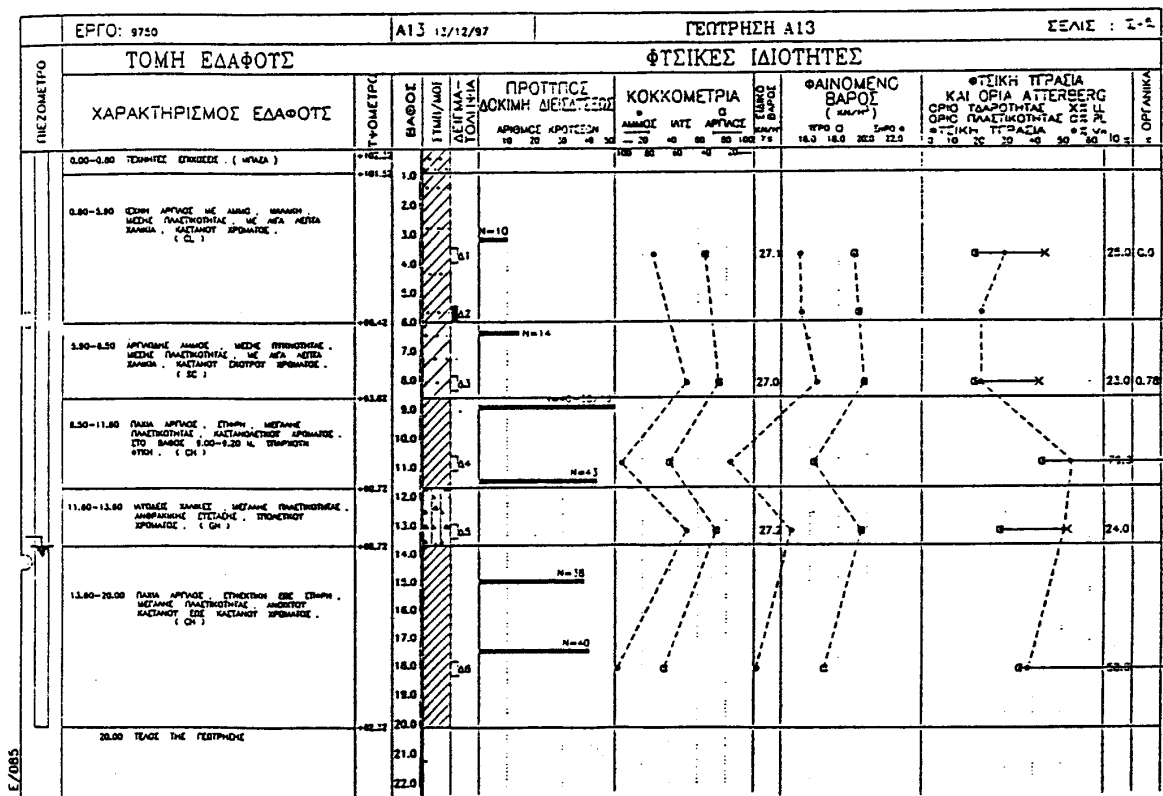
Η δειγματοληψία του εδάφους μπορεί να γίνει με απλή λήψη δειγμάτων από την επιφάνεια. Επειδή όμως τα εδαφικά υλικά διαφοροποιούνται έντονα κατά το βάθος, προτιμάται η χρήση των γεωτρύπανων ώστε με την διάτρηση εδαφικών στρωμάτων να είναι δυνατή η προσέγγισή τους. Η διαδικασία της διάτρησης διακόπτεται ανά διαστήματα (τα οποία αποφασίζονται επί τόπου από τον επιβλέπων γεωλόγο ή μηχανικό) ώστε να γίνει η δειγματοληψία. Η συνηθισμένη πρακτική είναι η κατακόρυφη ή σχεδόν κατακόρυφη διάτρηση, δεν είναι λίγες όμως οι περιπτώσεις που η διάτρηση είναι οριζόντια ώστε να διερευνηθούν οι ιδιότητες του εδάφους κατά μήκος. Η διάτρηση μπορεί να γίνεται με μεθόδους που επιταχύνουν την διαδικασία αλλά διαταράσσουν έντονα το έδαφος. Η δειγματοληψία όμως πρέπει να γίνεται προσεκτικά ώστε το δείγμα που θα ληφθεί να μεταφέρει όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματικότητα στο εργαστήριο. Η διερεύνηση του υπεδάφους θα γίνεται μέχρι το βάθος όπου η αλληλεπίδραση με το έργο κρίνεται σημαντική.

Σε περιπτώσεις που η δειγματοληψία είναι αδύνατη (όπως σε χαλαρά στρώματα άμμου), ο γεωτρυπανιστής μπορεί να εκτελέσει χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό του γεωτρύπανου επί τόπου

δοκιμές (SPT ή CPT κ.α.). Επιπλέον, αν συναντηθεί βραχώδες στρώμα είναι δυνατή η χρήση ειδικών γεωτρύπανων για βραχώδη υλικά (π.χ. διαμάντι, καρβίδια) και περιστροφική διάτρηση (σε συνδυασμό με την χρήση νερού για ψύξη του τρυπανιού προκειμένου για πολύ σκληρό βράχο).

Η λήψη αδιατάραχτων εδαφικών δειγμάτων γίνεται με έμπηξη ενός κυλινδρικού στελέχους στο εδαφικό υλικό, με απλή πίεση, χωρίς περιστροφική κίνηση. Το δείγμα το οποίο θα είναι μήκους έως 30-40 εκ. εισέρχεται σε έναν πλαστικό σωλήνα (PVC) ο οποίος σφραγίζεται με παραφίνη ώστε να μην χάνεται η φυσική υγρασία και μεταφέρεται στο εργαστήριο για δοκιμές. Επιπλέον, τα δείγματα από χαρακτηριστικές θέσεις τοποθετούνται σε ένα κασελάκι κατά την σειρά που συναντήθηκαν, ώστε να δίνουν μία εικόνα της γεώτρησης. Η εικόνα αυτή υποστηρίζεται από την σύνταξη ενός διαγράμματος που θα δείχνει την αλληλουχία των στρωμάτων με την περιγραφή τους, καθώς και κάποιες ιδιότητες.

Τέλος, συλλέγεται το διαταραγμένο εδαφικό υλικό το οποίο αφού προστατευτεί από την απώλεια φυσικής υγρασίας (βάζοντάς στο σε νάλιον σακούλες), μεταφέρεται στο εργαστήριο για δοκιμές που δεν απαιτούν αδιατάραχτα δείγματα (π.χ. δοκιμές δείκτη, μέτρηση περιεχόμενης υγρασίας κ.α.).



Σχήμα 1.2: Πίνακας γεώτρησης. Παρουσιάζονται, η θέση του ΣΥΥ, η περιγραφή των στρωμάτων και το βάθος που εναλλάσσονται, ο συμβολισμός, οι θέσεις των δειγματοληψιών, οι μετρήσεις διεύθυνσης SPT (αριθμός χτύπων N), η κοκκομετρία (ποσοστά άμμου, αργίλου), το ειδικό βάρος (σε kN/m³, με τιμές γύρω στο 27), το φαινόμενο βάρος (υγρό και ξηρό), η φυσική υγρασία η οποία παρουσιάζεται μάλιστα ως προς τα όρια Atterberg. Τέλος, το ποσοστό οργανικών.

2 Κοκκομετρική ανάλυση - Μηχανική μέθοδος

Η κοκκομετρική ανάλυση είναι η πρώτη και η σημαντικότερη από τις δοκιμές που γίνονται με σκοπό την ταξινόμηση των εδαφικών υλικών.

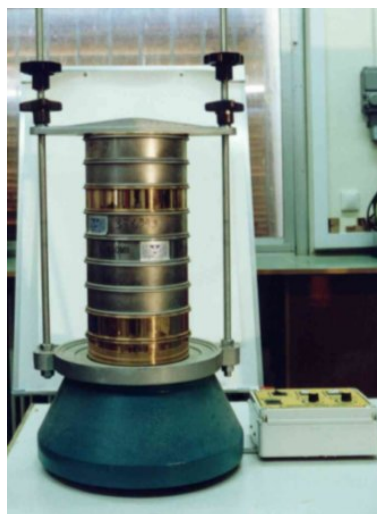
- Εξοπλισμός:** Σειρά κόσκινων.
Γουδί, κονιοποιητής.
Ζυγαριά ακριβείας με ακρίβεια 0.01 g.
- Προδιαγραφές:** ΦΕΚ (Τεχνικές Προδιαγραφές Δοκιμών Εδαφομηχανικής)
ASTM Standards 1994

2.1 Γενικά

Η κοκκομετρική ανάλυση θεωρείται διεθνώς η καταλληλότερη εργαστηριακή δοκιμή για την μηχανική κατάταξη των εδαφών. Η καταλληλότητα ή μη εδαφών για θεμελιώσεις, έργα οδοποιίας και λοιπά συγκοινωνιακά έργα (σιδηροδρομικά δίκτυα, αεροδρόμια), κατασκευή φραγμάτων και αναχωμάτων, επιχωμάτων, προσχώσεων κλπ., εξαρτάται από την κοκκομετρική ανάλυση, δηλαδή, τον προσδιορισμό της σχετικής συμμετοχής κάθε κλάσματος στο δείγμα.

Οι πληροφορίες που παίρνουμε από την κοκκομετρική ανάλυση μπορούν να μας διευκολύνουν στο να προβλέψουμε την συμπεριφορά εδαφών, όσον αφορά την αντοχή και παραμόρφωση, την κίνηση του υπόγειου νερού (διήθηση), την απόκριση σε παγετό. Η σωστή ταξινόμηση των εδαφών μας βοηθά στην επιλογή των κατάλληλων υλικών για φίλτρα προστασίας και συγκράτησης γύρω από τεχνητές και φυσικές αποστραγγίσεις.

Στην πραγματικότητα δεν είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε το κάθε ένα διαφορετικό κοκκομετρικό μέγεθος αλλά το εύρος των διαφόρων μεγεθών που συμμετέχουν στο δείγμα. Αυτό ολοκληρώνεται με το να πάρουμε την ποσότητα του υλικού που διέρχεται μέσα από ένα κόσκινο συγκεκριμένου ανοίγματος και συγκρατείται στο αμέσως μικρότερου ανοίγματος κόσκινο της σειράς. Στη συνέχεια συσχετίζουμε την ποσότητα αυτή με το συνολικό δείγμα.



Σχήμα 2.1: Διάταξη κοκκομετρικής δοκιμής (φωτ. Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής)

Τα κόσκινα είναι κατασκευασμένα από πεπλεγμένο σύρμα, τετραγωνικών ανοιγμάτων των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται από 101.6 mm, το οποίο κατακρατεί τα πλέον χονδρόκοκκα υλικά έως και 0.075 mm (τυποποιημένο φίλτρο Νο200), το οποίο είναι το φίλτρο με τις μικρότερες διαστάσεις και διαχωρίζει τα ιλυώδη-αργιλώδη υλικά από τα αμμώδη - χαλικώδη και έχει ουσιαστική σημασία στην ταξινόμηση του εδάφους. Συχνά είναι απαραίτητη η γνώση της κοκκομετρικής κατανομής του υλικού που διέρχεται το φίλτρο Νο200 (ειδικά όταν το διερχόμενο ξεπερνάει το 12% του συνολικού δείγματος). Σε αυτήν την περίπτωση εφαρμόζεται η υδραυλική δοκιμή (η οποία δεν βασίζεται στον μηχανικό διαχωρισμό αλλά στην ανάλυση με πυκνόμετρο και αραιόμετρο - μέθοδος Stokes).



Σχήμα 2.2: Κόσκινα (από αριστερά) Νο200, Νο4, 6.3 mm, 75 mm (φωτ. Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής)

Συχνά οι κόκκοι είναι κατά τέτοιο τρόπο προσανατολισμένοι ώστε παρόλο που το άνοιγμα του κόσκινου είναι μεγαλύτερο, δεν μπορούν να διέλθουν μέσα από αυτό και έτσι παραμένουν στο μεγαλύτερου μεγέθους κλάσμα. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με κατάλληλη διάταξη δόνησης.

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής δοκιμής παρουσιάζονται με την μορφή καμπύλης. Για να έχουμε καλύτερη εποπτεία της κατανομής και δυνατότητα σύγκρισης των διαφόρων εδαφών, χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα, καθώς η λεπτόκοκκη μάζα έχει κλάσματα της τάξης των 2.00 mm (και μεγαλύτερα) έως και 0.075 mm (Νο200) και έτσι απαιτείται μεγάλη κλίμακα για να αποδοθούν όλα τα μεγέθη με την ίδια ακρίβεια. Η συνήθης πρακτική είναι η απεικόνιση του διερχόμενου ποσοστού στον κατακόρυφο άξονα και της διαμέτρου στον οριζόντιο. Επιπλέον, τα μεγέθη των κόκκων αυξάνονται από αριστερά προς τα δεξιά.

Είναι προφανές πως η κατανομή της κοκκομετρικής καμπύλης είναι προσεγγιστική. Αυτό οφείλεται στις αντικειμενικές δυσκολίες στο να συλλέξουμε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα, επιπλέον, στο γεγονός της παρουσίας συσσωματώσεων κόκκων, στην ανομοιομορφία στο σχήμα των κόκκων και στον προσανατολισμό τους και τέλος στο γεγονός πως το πρόβλημα πρέπει να αντιμετωπιστεί με ένα περιορισμένο αριθμό κόσκινων.

Η ακρίβεια της ανάλυσης θα μπορούσε να αμφισβητηθεί κυρίως για τα δείγματα με μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού. Η συνήθης πρακτική είναι η διαδικασία της ξήρανσης σε φούρνο, η οποία ελάχιστα επηρεάζει τελικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται από το αν το δείγμα είναι αντιπροσωπευτικό και από το αν το δείγμα περιέχει συσσωματώματα κόκκων και όχι τα πιο στοιχειώδη κομμάτια.

Η καμπύλη που παίρνουμε από την παραπάνω διαδικασία είναι ικανοποιητική για να προβλέψουμε τη συμπεριφορά μη συνεκτικών εδαφών, για την εύρεση του σχετικού ποσοστού κόκκων που περνά από το κόσκινο Νο200 καθώς και για την ταξινόμηση των εδαφών.

Μία σειρά κόσκινων αποτελείται εν γένει από 6-7 κόσκινα με άνοιγμα το οποίο διπλασιάζεται από το κατώτερο στο ανώτερα (6, 12, 24 mm) ώστε να απεικονίζονται στο λογαριθμικό διάγραμμα σε ίσες αποστάσεις. Για απλοποίηση της διαδικασίας, επιτρέπεται κάποια από τα κόσκινα να παραληφθούν. Κάτι τέτοιο είναι αποδεκτό αφού η αυστηρή ακολουθία διπλασιασμού του μεγέθους δεν επηρεάζει την καμπύλη κατανομής και εξακολουθεί να διασφαλίζεται η στατιστική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

2.2 Χαρακτηριστικά Κόσκινα

Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης εδαφών της ASTM (βλ. Κεφάλαιο 5), τα παρακάτω κόσκινα χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τα εδαφικά υλικά σε κατηγορίες:

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες εδαφικών υλικών – χαρακτηριστικά κόσκινα.

Λίθοι (πέτρες)	Το κόσκινο των 75 mm , διαχωρίζει το εδαφικό υλικό από τις λίθους.	-	-
Χαλίκια	Τα χαλίκια είναι η διαβάθμιση μεταξύ του κόσκινου των 75 mm και του κόσκινου No4 (4.75 mm) .	Χονδρόκοκα χαλίκια	Τα χονδρόκοκα χαλίκια, συκρατούνται μεταξύ των κόσκινων 75 mm και 19 mm .
		Λεπτόκοκα χαλίκια	Τα λεπτόκοκα χαλίκια συκρατούνται μεταξύ των κόσκινων 19 mm και No4 (4.75 mm) .
Άμμος	Η άμμος συκρατείται μεταξύ των κόσκινων No4 (4.75 mm) και No200 (0.075 mm) .	Χονδρόκοκη άμμος	Η χονδρόκοκη άμμος συκρατείται μεταξύ των κόσκινων No4 (4.75 mm) και No10 (2 mm) .
		Μεσόκοκη άμμος	Η μεσόκοκη άμμος συκρατείται μεταξύ των κόσκινων No10 (2 mm) και No40 (0.425 mm) .
		Λεπτόκοκη άμμος	Η λεπτόκοκη άμμος συκρατείται μεταξύ των κόσκινων No40 (0.425 mm) και No200 (0.075 mm) .
Ιλύς - Άργιλος	Η ιλύς και η άργιλος είναι το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο No200 (0.075 mm)	Ιλύς (0.075 -0.005 mm)	Απαιτείται υδραυλική κοκκομετρική δοκιμή με χρήση αραιόμετρου.
		Άργιλος (έως 0.005 mm)	

2.3 Ενεργό μέγεθος - Συντελεστής ομοιομορφίας

Η γενικότερη έκφραση της διαβάθμισης των εδαφών εκφράζεται με δύο όρους με το *ενεργό μέγεθος* και το *συντελεστή ομοιομορφίας*.

Το ενεργό μέγεθος των κόκκων (D_{10}) ορίζεται ως η μέγιστη διάμετρος από την οποία διέρχεται το 10% κατά βάρος εδαφικών κόκκων και συνδέεται με την ευκολία που περνάει το νερό από το έδαφος. Το D αναφέρεται στο μέγεθος του κόκκου, τη φαινομενική μέση διάμετρο των κόκκων του εδάφους και ο δείκτης 10 δηλώνει το ποσοστό που είναι μικρότερο.

Μία ένδειξη για το εύρος του μεγέθους των κόκκων μας δίνεται από τον συντελεστή ομοιομορφίας, που είναι ο λόγος που λαμβάνεται με την διαίρεση της μέγιστης διαμέτρου του 60% διερχόμενου κατά βάρος εδαφικών κόκκων προς το ενεργό μέγεθος και δίνεται από την παρακάτω σχέση (Hazen):

$$C_u = D_{60}/D_{10} \quad 2.1$$

Μεγάλη τιμή του συντελεστή C_u δηλώνει ότι τα D_{10} και D_{60} διαφέρουν αισθητά. Δεν μας δίνει πληροφορίες για τυχόν χάσματα στη διαβάθμιση όπως όταν απουσιάζει ή υπάρχει σε μικρές ποσότητες το ποσοστό ενός μεγέθους. Μεγάλη τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας δείχνει ότι τα μεγέθη των κόκκων είναι καλά κατανεμημένα από τους μικρότερους κόκκους προς τους μεγαλύτερους κόκκους και δίνει μία γενική εικόνα του μεγίστου μεγέθους κόκκων. Το έδαφος με συντελεστή ομοιομορφίας 1 αποτελείται από κόκκους της ίδιας διαμέτρου ενώ όταν ο συντελεστής ομοιομορφίας παίρνει την τιμή 300 το έδαφος δείχνει καλή διαβάθμιση και έχει μέγιστο μέγεθος κόκκων 25.4 mm. Εδάφη που έχουν τιμές C_u μικρότερους 4 ή 5 καλούνται ομοιόμορφα και αυτά με τιμές C_u μεγαλύτερες του 10 καλούνται καλώς διαβαθμισμένα.

Μικρή τιμή του ενεργού μεγέθους δείχνει ότι το έδαφος περιέχει σημαντικό ποσοστό λεπτών κόκκων.

Όπως και στο σκυρόδεμα όπου το ενεργό μέρος που καθορίζει τις ιδιότητες αυτού είναι το τσιμέντο, έτσι και στα μικτά εδάφη, το ενεργό μέρος αποτελεί το λεπτομερές κλάσμα (κολλοειδής άργιλος) ενώ το υπόλοιπο είναι γενικά αδρανές υλικό.

Σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά ASTM (βλ. Κεφάλαιο 5), αν το ποσοστό που διέρχεται από το φίλτρο No200 είναι άνω του 12%, δεν μπορεί να προσδιοριστεί το D_{10} , κατά συνέπεια ούτε τα C_u και C_c . Σε αυτήν την περίπτωση, η ταξινόμηση δεν λαμβάνει υπόψη τα παραπάνω μεγέθη. Για Διερχόμενο του No200 μεταξύ 10 και 12 % και αν δεν υπάρχουν αποτελέσματα υδραυλικής δοκιμής με αραιόμετρο. (δοκιμή η οποία συνιστάται για διερχόμενο του No200 άνω του 5%), ως D_{10} θα λαμβάνεται η διάσταση του No200 (0.075 mm).

2.3.1 Συντελεστής καμπυλότητας

Ο συντελεστής καμπυλότητας (C_c) είναι ένα μέτρο του σχήματος της καμπύλης ανάμεσα στα χαρακτηριστικά μεγέθη D_{10} , D_{30} και D_{60} και δίνεται από τον τύπο:

$$C_c = D_{30}^2 / (D_{10}D_{60}) \quad 2.2$$

Τιμές του C_c διάφορες του 1, υποδηλώνουν ότι λείπουν κάποια μεγέθη κόκκων ανάμεσα σε αυτά τα όρια. Τα D_{15} και D_{85} μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της καταλληλότητας ενός εδάφους για σχεδιασμό φίλτρου σε χωμάτινο φράγμα ή σε υδρογεωτρήσεις.

2.4 Διαδικασία δοκιμής

1. Επιλέγουμε 500 g δείγματος το οποίο έχει ψηθεί και ξηραθεί. Προσέχουμε ώστε το δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό. Πλύσιμο δείγματος - κονιοποίηση. Το βάρος του δείγματος μπορεί να μεταβληθεί σύμφωνα με την μέγιστη διάσταση των κόκκων του δείγματος. Οι προδιαγραφές των δοκιμών καθορίζουν το ελάχιστο βάρος του δείγματος ώστε τα αποτελέσματα της δοκιμής να είναι αντιπροσωπευτικά για το έδαφος.
2. Αν το δείγμα περιέχει και χαλίκια μπορεί να αποφευχθεί το πλύσιμο του δείγματος. Προσέχουμε επίσης ώστε να μην καταστρέψουμε το κόσκινο και να μην χάσουμε δείγμα. Αν περιέχεται σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικό ακολουθεί κονιοποίηση, πλύσιμο του δείγματος, ξήρανση με φούρνο και η διαδικασία συνεχίζεται την επόμενη μέρα.

3. Ζυγίζουμε το ξηρό ψημένο δείγμα. Περνάμε το δείγμα μέσα από μία σειρά κόσκινων ξεκινώντας από πάνω με το μεγαλύτερο της σειράς και τελειώνοντας προς τα κάτω με το μικρότερο. Για αμμώδη έως λεπτόκοκκα εδάφη προτείνονται οι παρακάτω δύο σειρές:

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: Τυπικές ακολουθίες κόσκινων για την κοκκομετρική δοκιμή.

Τοπική ακολουθία	Διάμετρος Κόσκινου (mm)	Εναλλακτική σειρά	Διάμετρος Κόσκινου (mm)
	75		75
	6.3		6.3
4	4.75	4	4.75
10	2	10	2.0
20	0.85	30	0.84
40	0.425	50	
100	0.150	100	0.150
200	0.075	200	0.075

Για δείγματα μεγαλύτερου κοκκομετρικού μεγέθους δείγματα και μεγαλύτερου βάρους χρησιμοποιείται ανάλογη σειρά. Τα βάρη των δειγμάτων κυμαίνονται από 1500 g για χαλίκια μεγέθους 19 mm έως 5000 g για χαλίκια μέσης διαμέτρου.

4. Τοποθετούμε την σειρά των κόσκινων σε ένα ηλεκτρομαγνητικό δονητή (οριζόντιες και κατακόρυφες κινήσεις) για 5 με 10 λεπτά ανάλογα με την δυσκολία που εμπεριέχει η ποσότητα του υλικού.
5. Αφαιρούμε τα δείγματα από τη συσκευή, ζυγίζουμε τα κόσκινα για να βρούμε το συγκρατούμενο υλικό. Αθροίζουμε αυτά τα βάρη και συγκρίνουμε με το τελικό με το αρχικό βάρος μετά το ψήσιμο. Εντοπίζουμε τυχόν απώλειες δείγματος. Αν παρατηρήσουμε έλλειψη δείγματος μεγαλύτερη από 2% η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί.
6. Υπολογίζουμε το ποσοστό συγκρατούμενου σε κάθε κόσκινο διαιρώντας το βάρος του συγκρατούμενου με το αρχικό συνολικό βάρος του δείγματος, πριν λάβει χώρα η διαδικασία του κοσκινίσματος.
7. Υπολογίζουμε το ποσοστό του διερχόμενου ξεκινώντας από το 100% και αφαιρώντας σταδιακά το ποσοστό του συγκρατούμενου σε κάθε κόσκινο.
Παράδειγμα: Έστω το βάρος του αρχικού δείγματος 500 g και από το κόσκινο Νο4 (το πρώτο της σειράς) συγκρατήθηκε ποσότητα δείγματος 9.700 g. Το διερχόμενο είναι συνεπώς $(500-9.7)= 490.3$ g. Το ποσοστό του συγκρατούμενου είναι $(9.7/500)*100=1.9\%$ και το ποσοστό του διερχόμενου είναι $(100-1.9)=98.1\%$. Εν γένει το ποσοστό του διερχομένου είναι η διαφορά του ποσοστού του συνολικά διερχόμενου μείον το ποσοστό του συγκρατούμενου.
8. Σχεδιάζουμε την καμπύλη σε ένα ημιλογαριθμικό χαρτί όπου στον οριζόντιο (λογαριθμικό) άξονα τοποθετείται το μέγεθος των κόκκων και στον κατακόρυφο το ποσοστό των διερχομένων. Αν το ποσοστό των διερχομένων από το κόσκινο Νο200 είναι μεγαλύτερο από 12% συνιστάται η διενέργεια της υδραυλικής δοκιμής. Για την σχεδίαση της κοκκομετρικής καμπύλης, μπορεί να χρησιμοποιείται ένα λογισμικό φύλλων υπολογισμών (όπως το

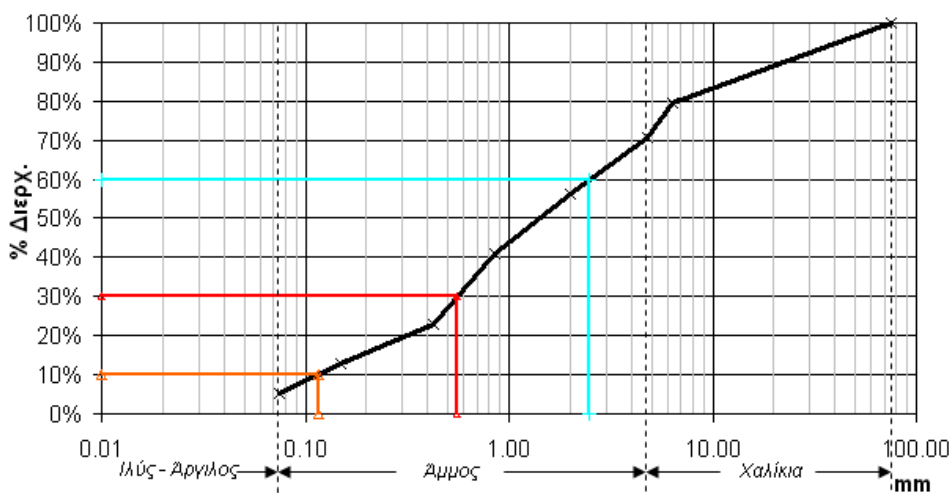
Microsoft Excel). Από την ιστοσελίδα του εργαστηρίου είναι διαθέσιμο ένα τέτοιο λογισμικό (GrainSizeGraph.xls), με την βοήθεια του οποίου σχεδιάζονται τα γραφήματα.

2.5 Αξιολόγηση της κοκκομετρικής καμπύλης

1. Καμπύλη με ισχυρή κλίση δείχνει ότι οι κόκκοι του εδάφους είναι περίπου του ίδιου μεγέθους και άρα αυτό χαρακτηρίζεται ως ομοιόμορφο.
2. Καμπύλη ομαλής κλίσης δείχνει ευρεία σειρά μεγέθους των κόκκων και το έδαφος χαρακτηρίζεται σαν καλά διαβαθμισμένο.
3. Όταν η καμπύλη παρουσιάζει τμήματα διάφορης καμπυλότητας, το έδαφος χαρακτηρίζεται ως μίγμα δύο ή περισσότερων ομοιόμορφων υλικών.

2.5.1 Καλά διαβαθμισμένο έδαφος

Ένα καλά διαβαθμισμένο έδαφος, είναι σχετικά σταθερό, ανθίσταται στην φθορά και την διάβρωση, μπορεί να συμπυκνωθεί καλά και να αποκτήσει μεγάλη πυκνότητα με αποτέλεσμα να αναπτύσσει μεγάλη αντοχή στη διάτμηση και φέρουσα ικανότητα. Οι καλές ιδιότητες του υλικού προέρχονται από το γεγονός πως τα κενά μεταξύ των κόκκων συμπληρώνονται από κόκκους μικρότερης διαμέτρου. Στην συνέχεια τα κενά μεταξύ των κόκκων μικρότερης διαμέτρου συμπληρώνονται από κόκκους ακόμα μικρότερης διαμέτρου, κλπ. Η κοκκομετρική καμπύλη έχει «σιγμοειδή» μορφή με γραμμικό το κύριο σκέλος.



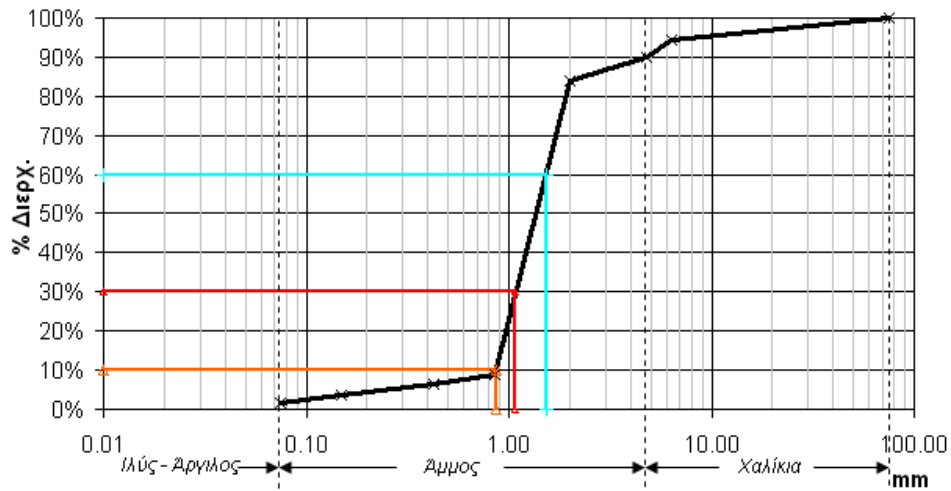
Σχήμα 2.3: Άμμος καλής διαβάθμισης με χαλίκια και άργιλο ($C_u = 21.4$, $C_c = 1.1$)

2.5.2 Έδαφος κακής διαβάθμισης

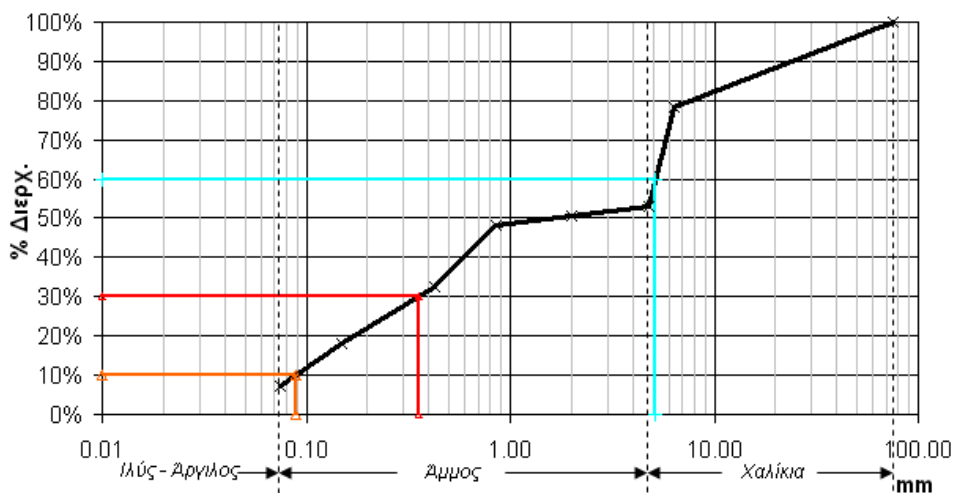
Ένα έδαφος όπου επικρατεί μία συγκεκριμένη διάσταση ή απουσιάζει μία γκάμα διαστάσεων είναι κακής διαβάθμισης. Ένα έδαφος όπου θα επικρατεί μία συγκεκριμένη διάσταση και δεν έχει επαρκή ποσότητα λεπτομερούς κλάσματος για να πληρώσει τα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων, δεν είναι δεκτικό συμπίκνωσης, θα έχει ανοικτή πορώδη δομή και ευκολότερη μετακίνηση των κόκκων και μικρότερη φέρουσα ικανότητα. Η κοκκομετρική καμπύλη ενός τέτοιου εδάφους θα παρουσιάζει ένα κατακόρυφο σκέλος (Σχήμα 2.4).

Ένα έδαφος όπου απουσιάζει μία γκάμα διαστάσεων είναι επίσης κακής διαβάθμισης. Εκτός των προβλημάτων που οφείλονται στην κακή συμπίκνωση, το έδαφος αυτό είναι ευαίσθητο στην διέλευση του νερού, το οποίο συμπαρασύρει τους κόκκους λεπτότερης διαμέτρου και έτσι

δημιουργούνται κενά με δυσμενείς επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους. Η κοκκομετρική καμπύλη ενός τέτοιου εδάφους θα παρουσιάζει ένα οριζόντιο σκέλος (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.4: Άμμος κακής διαβάθμισης ($C_u=1.8$, $C_c=0.9$). Κυριαρχεί το υλικό με διάμετρο 0.85 mm (μέγιστη συγκράτηση υλικού στο κόσκινο No20).



Σχήμα 2.5: Χαλίκια με άμμο, κακής διαβάθμισης ($C_u=57.3$, $C_c=0.3$). Απουσιάζουν τα μεγέθη κόκκων μεταξύ 4.75 mm και 0.85 mm. (δεν συγκρατείται υλικό στα κόσκινα No10 και No20).

3 Εργαστηριακός προσδιορισμός της περιεχόμενης υγρασίας

Το έδαφος είναι ένα τριφασικό υλικό που εμπεριέχει και την στερεή (εδαφικοί κόκκοι) και την υγρή (νερό) και την αέρια φάση (αέρας). Στην ειδική περίπτωση όπου το έδαφος είναι κορεσμένο, το έδαφος είναι διφασικό υλικό αποτελούμενο από τους εδαφικούς κόκκους και το νερό των εδαφικών πόρων.

Η *περιεχόμενη υγρασία* ορίζεται ως το ποσοστό του βάρους του περιεχόμενου νερού, προς το βάρος της στερεάς φάσης (των εδαφικών κόκκων), σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$w (\%) = W_w / W_s * 100 \quad 3.1$$

Ως *φυσική υγρασία* ορίζεται η περιεχόμενη υγρασία ενός εδαφικού δείγματος στην φυσική του κατάσταση. Η μέτρηση της φυσικής υγρασίας θα γίνεται με την μεθοδολογία που ακολουθείται για την μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας, αρκεί το εδαφικό δείγμα να έχει μεταφερθεί προσεκτικά από την περιοχή της γεώτρησης στο εργαστήριο, ώστε να μην χαθεί υγρασία.

3.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός

Εξοπλισμός: Θα χρησιμοποιούμε *κάψες* (γυάλινες κατά προτίμηση ή μεταλλικές) για να τοποθετούμε τα δείγματα. Επιπλέον, θα χρησιμοποιούμε *ζυγό ακριβείας* (0.1 g ή καλύτερα 0.01 g).

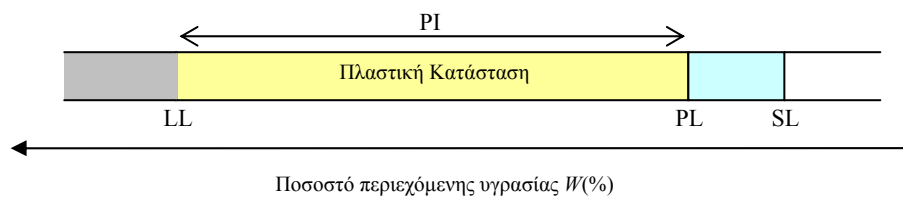
1. Ζυγίζεται η άδεια κάψα η οποία προηγουμένως έχει καθαριστεί από τυχόν ρύπους.
2. Το εδαφικό δείγμα τοποθετείται στην κάψα. Επιθυμητό είναι να γεμίζει όλη η κάψα με το δείγμα.
3. Ζυγίζεται το δείγμα (το οποίο περιέχει υγρασία) μέσα στην κάψα. Το βάρος είναι αυτό της κάψας + των εδαφικών κόκκων + περιεχόμενης υγρασίας..
4. Ξηραίνουμε το δείγμα σε φούρνο 105° C, μέχρι σταθεροποίησης του βάρους (ολική ξήρανση).
5. Ζυγίζεται το αποξηραμένο δείγμα + κάψα. Η διαφορά του βάρους (3) μείον το βάρος (5) δίνει την περιεχόμενη υγρασία (W_w) σε g. Η διαφορά του βάρους (5) μείον το βάρος (1) δίνει το βάρος των στερεών (W_s) σε g. Εφαρμόζουμε την σχέση (3.1) για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας.

4 Εργαστηριακός προσδιορισμών ορίων Atterberg (όρια υδαρότητας και πλαστικότητας εδαφών)

Εξοπλισμός: Συσκευή ορίου υδαρότητας (*συσκευή Casagrande*), κατάλληλο εργαλείο για χάραξη. Δοχεία (*κάψες*) για την μέτρηση της υγρασίας (βλ. Κεφάλαιο 3). Γυάλινη πλάκα για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας. Εξοπλισμός για την ανάμιξη - ύγρανσης των εδαφών (*δοχείο πορσελάνης - σπάτουλα - ογκομετρικό δοχείου νερού*). Ζυγαριά ακριβείας, κατά προτίμηση δύο δεκαδικών ψηφίων. Κόσκινο No40 και μικρό ταψάκι (βλ. Κεφάλαιο 2)

Τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας έχουν προταθεί από τον A. Atterberg και περιγράφουν την μετάπτωση του εδάφους από την υγρή στην πλαστική και στην συνέχεια στην ημιστερεή και στην στερεή κατάσταση, σύμφωνα με τα ποσοστά της περιεχόμενης υγρασίας. Δείχνουν ουσιαστικά την συμπεριφορά ενός εδάφους ανάλογα με την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας και καταδεικνύουν αν κάποιο έδαφος είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της υγρασίας (χαρακτηριστικό που είναι υψηλού ενδιαφέροντος για υλικά που χρησιμοποιούνται σε έργα οδοποιίας.). Η περιγραφή των ορίων είναι η εξής:

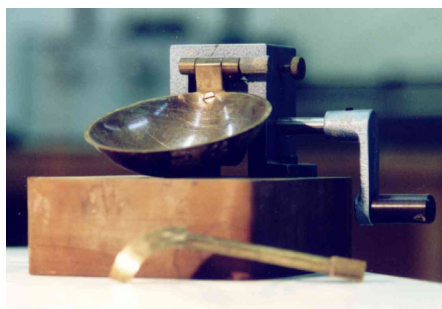
- 1) **Όριο υδαρότητας (LL ή w_L):** Είναι η (%) τιμή της περιεχόμενης υγρασίας που χωρίζει την πλαστική από την υδαρή κατάσταση. Δηλαδή για περιεχόμενη υγρασία πάνω από το όριο υδαρότητας το έδαφος συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ρευστή μάζα (λάσπη). Αμέσως κάτω από αυτό το όριο, το έδαφος θα συμπεριφέρεται ως εύπλαστο υλικό. Το όριο προσδιορίζεται με χρήση της συσκευής Casagrande και είναι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας για την οποία τα τοιχώματα διαμορφωμένης εγκοπής δείγματος εδάφους που τοποθετείται στην συσκευή, έρχονται σε επαφή μεταξύ τους μετά από 25 κρούσεις.
- 2) **Όριο πλαστικότητας (PL ή w_p):** Είναι η (%) τιμή της περιεχόμενης υγρασίας που χωρίζει την πλαστική από ισχνή κατάσταση. Εάν δηλαδή, η περιεχόμενη υγρασία είναι μεταξύ του ορίου πλαστικότητας και του ορίου υδαρότητας, το έδαφος θα συμπεριφέρεται ως εύπλαστο υλικό. Κάτω από αυτό το όριο, το έδαφος όντας κορεσμένα ή μη τείνει να είναι εύθρυπτο όταν επιχειρήσουμε να το πλάσουμε. Ο προσδιορισμός γίνεται με την εύρεση της περιεχόμενης υγρασίας σε εδαφικό δείγμα το οποίο θα αρχίσει να θρυμματίζεται όταν πλάθεται σε λεπτές ίνες, διαμέτρου 3 mm ή μικρότερες.
- 3) **Όριο συρρίκνωσης (SL):** Είναι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας κάτω από την οποία ο όγκος του εδαφικού δείγματος παραμένει σταθερός με συνεχιζόμενη ξήρανση. Για μικρότερη περιεκτικότητα νερού, το δείγμα παύει να είναι κορεσμένο.



Σχήμα 4.1: Όρια Atterberg

Τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας χρησιμοποιούνται διεθνώς για την αναγνώριση και κατάταξη των εδαφών με βάση το διάγραμμα Casagrande και σε συνδυασμό με την μέθοδο της κοκκομετρικής ανάλυσης σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές ASTM. Ειδικά το όριο συρρίκνωσης χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές όπου τα εδάφη υφίστανται μεγάλες αλλαγές στον όγκο τους όταν εναλλάσσονται κύκλοι υγρασίας και ξηρασίας.

Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg πραγματοποιούνται σε εδάφη που διέρχονται από το κόσκινο Νο40. Συνήθως τα δείγματα που παίρνουμε από την γεώτρηση χρειάζονται ξήρανση έτσι ώστε να διέρχονται από το κόσκινο Νο40. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί είτε πραγματοποιώντας τη διαδικασία του κοσκινίσματος με το περιεχόμενο υγρασίας που έχει το δείγμα στο πεδίο, είτε αφήνοντας το δείγμα να ανακτήσει τα πραγματικά του όρια μετά από 24 ή και 48 ώρες.



Σχήμα 4.2: Συσκευή Casagrande (φωτ. Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής)

Μέσω των ορίων Atterberg προσδιορίζονται οι παρακάτω χαρακτηριστικές τιμές (δείκτες):

- 1) **Δείκτης πλαστικότητας (PI):** Είναι το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας στο οποίο το έδαφος είναι πλαστικό. Όσο πιο λεπτομερές είναι το υλικό, τόσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης πλαστικότητας. Μεγάλη τιμή του δείκτη πλαστικότητας δείχνει μεγάλο εύρος για την περιεχόμενη υγρασία, διατηρώντας το έδαφος σε πλαστική κατάσταση. Ο δείκτης:

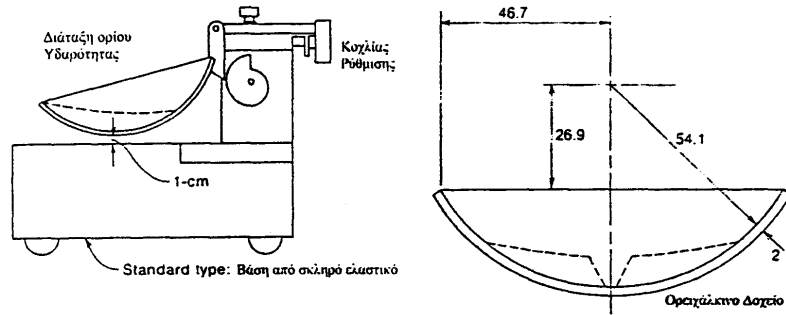
$$PI = LL - PL \quad 4.1$$

- 2) **Δείκτης υδαρότητας (LI):** Μας επιτρέπει να συγκρίνουμε την πλαστικότητα ενός εδάφους με την περιεχόμενη υγρασία. Εάν $LI=100\%$ το έδαφος είναι στο όριο υδαρότητας, ενώ αν $LI=0\%$ το έδαφος είναι στο όριο πλαστικότητας. Ο δείκτης:

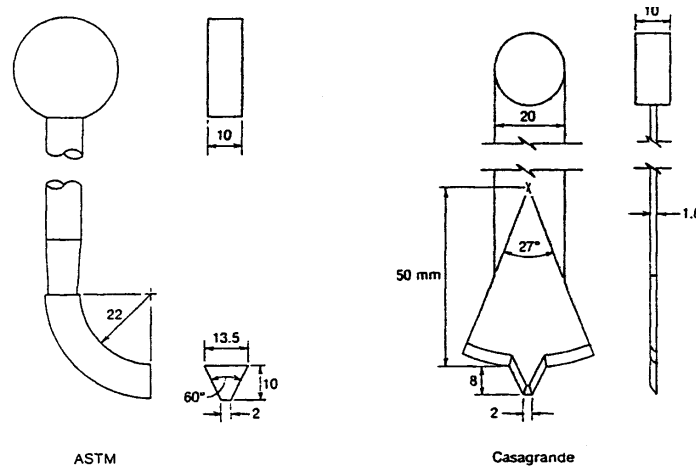
$$LI = (w_L - PL)/PI \quad 4.2$$

4.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός ορίων

Θα χρησιμοποιείται όπως αναφέρθηκε το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο40 (0.425 mm). Το κοκκώδες – ξηρό υλικό, θα υγραίνεται ώστε να μεταβάλλεται η κατάσταση του. Με κατάλληλες μετρήσεις θα προσδιορίζουμε τα όρια Atterberg.



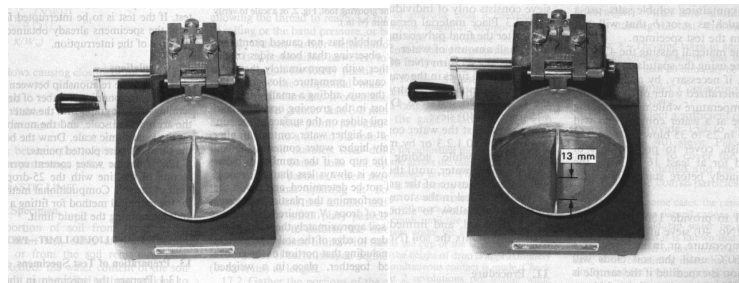
Σχήμα 4.3: Περιγραφή συσκευής Casagrande.



Σχήμα 4.4: Περιγραφή εργαλείων χάραξης.

4.1.1 Όριο υδαρότητας

Υγραίνουμε το δείγμα, το αναμιγνύουμε και το τοποθετούμε στην κάβα της συσκευής Casagrande έτσι ώστε να γεμίσει με δείγμα βάθους 1 cm. Με το ειδικό εργαλείο χάραξης, χαράζουμε το δείγμα καθ' όλο το μήκος του. Με ταχύτητα 2 στροφές ανά δευτερόλεπτο (120 rpm) γυρίζουμε τον μοχλό ώστε η κάβα να πραγματοποιεί πτώσεις. Αν η χαραγή επουλώσει σε 25 κτύπους, τότε η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος είναι το όριο υδαρότητας. Επειδή είναι πρακτικά αδύνατο να καταφέρουμε να έχει το δείγμα περιεχόμενη υγρασία όσο το όριο υδαρότητας, η χαραγή θα επουλώνει σε διαφορετικό αριθμό από 25 χτύπους.



Σχήμα 4.5: Δοκιμή ορίου υδαρότητας, (α) πριν την δοκιμή, (β) η χαραγή έχει επουλωθεί μετά το πέρας της δοκιμής (Bowles).

Υπάρχουν δύο μέθοδοι προσδιορισμού:

- Κάνουμε ένα πλήθος δοκιμών (3-5) αλλάζοντας την περιεχόμενη υγρασία, αυξάνοντας σε κάθε δοκιμή το βαθμό ύγρανσης του δείγματος. Κάθε δοκιμή θα χαρακτηρίζεται από τον αριθμό

χτύπων N όπου η χαραγή θα επουλώνεται καθώς και από την περιεχόμενη υγρασία w (%) του δείγματος. Οι τιμές (N, w) σχεδιάζονται σε ένα ημιλογαριθμικό διάγραμμα και χαράζοντας την ευθεία που προσεγγίζει τα πειράματα, μπορούμε να παρεμβάλουμε την τιμή της περιεχόμενης υγρασίας w (LL) για $N=25$.

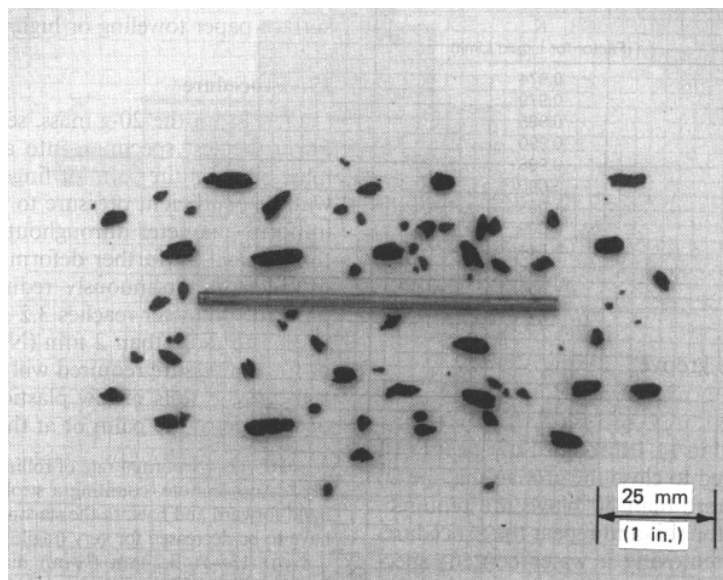
- Η κλίση της παραπάνω ευθείας είναι περίπου η αυτή για τους περισσότερους τύπους εδαφών. Οπότε μπορούμε με την διενέργεια μίας και μόνο δοκιμής να υπολογίσουμε το όριο υδαρότητας από τον παρακάτω τύπο:

$$LL(\%) = w \cdot (N/25)^{0.121} \quad 4.3$$

Όπου N είναι ο αριθμός των χτύπων όπου επουλώνεται η χαραγή και w η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος η οποία θα μετράται όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

4.1.2 Όριο πλαστικότητας

Υγραίνουμε το δείγμα και το πλάθουμε σε ίνες. Όταν οι ίνες θρυμματίζονται σε κομμάτια 1 ίντσας (25 mm), για διάμετρο ίνας = 3 mm, η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος είναι το όριο πλαστικότητας (PL). Θα μεταβάλλουμε συνέχεια την ύγρανση του δείγματος πριν από κάθε δοκιμή, ώστε να «πετύχουμε» το όριο πλαστικότητας. Όταν το δείγμα φτάνει το όριο πλαστικότητας, θα γίνεται προσδιορισμός της περιεχόμενης υγρασίας όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.



Σχήμα 4.6: Δοκιμή ορίου πλαστικότητας (Bowles).

Δεν είναι πάντα δυνατός ο προσδιορισμός του ορίου πλαστικότητας (οι ίνες θρυμματίζονται πολύ πριν φτάσουν τα 3 mm διάμετρο, η περαιτέρω αύξηση της υγρασίας δε, οδηγεί στο όριο υδαρότητας οπότε το δείγμα χάνει τις ιδιότητες της εύπλαστης μάζας). Σε αυτήν την περίπτωση το έδαφος (το λεπτόκοκκο κλάσμα) θα χαρακτηρίζεται ως μη πλαστικό – *Non Plastic (NP)*. Σε αυτήν την περίπτωση $PI=0\%$, οπότε το έδαφος θα ταξινομείται ως ML ή MH (βλ. Κεφάλαιο 5).

5 Αναγνώριση - Ταξινόμηση εδαφικών υλικών

Η διαδικασία της ταξινόμησης των εδαφικών υλικών είναι από τις σημαντικότερες διαδικασίες της γεωτεχνικής έρευνας. Πρόκειται ουσιαστικά για την διαδικασία αναγνώριση του υλικού και ταξινόμησής του σε κάποια από τις γνωστές κατηγορίες εδαφών. Το έδαφος είναι ένα υλικό που δεν έχει προδιαγεγραμμένες ιδιότητες. Σε αντίθεση με τα υλικά που χρησιμοποιούμε στις κατασκευές τα οποία είναι προϊόντα βιομηχανικής - ελεγχόμενης επεξεργασίας, τα γεωτεχνικά υλικά χρησιμοποιούνται όπως τα βρίσκουμε στο φυσικό τους περιβάλλον, ενδεχομένως έχοντας υποστεί απλές κατεργασίες (όπως θραύση αδρανών υλικών) όταν χρησιμοποιούνται ως υλικά «χτισίματος» επιχωμάτων και φραγμάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως δεν επεμβαίνουμε στις ιδιότητές τους και είναι οι περιπτώσεις όπου τα γεωτεχνικά υλικά είναι τελικός φορέας των κατασκευών μας (π.χ. έδαφος θεμελιώσεων, έδαφος σηράγγων). Για τον παραπάνω λόγο είναι σημαντικό να ταξινομούμε κάποιο εδαφικό υλικό σε κάποια από τις γνωστές κατηγορίες, ώστε να έχουμε μία πρώτη εικόνα για τις ιδιότητες και την συμπεριφορά του υλικού. Επιπλέον, η ταξινόμηση δίνει την ονοματολογία των υλικών (ουσιαστικά «βαπτίζει» το εδαφικό δείγμα) ώστε να είναι ευκολότερη η επικοινωνία μεταξύ των ειδικών επιστημόνων που ασχολούνται με την γεωτεχνική (Γεωλόγοι και μηχανικοί).

Μία πρώτη προσέγγιση της ταξινόμησης είναι η απευθείας αναγνώριση του υλικού από κάποιον έμπειρο. Ο έμπειρος ο οποίος μπορεί να είναι Γεωλόγος ή Μηχανικός ταξινομεί το υλικό με το οποίο μπορεί να έχει άμεση επαφή (π.χ. από τα πρηνή ενός ορύγματος οδοποιίας) ή μέσω των «καρότων» της γεώτρησης. Εφαρμόζοντας την κρίση του που βασίζεται στην εμπειρία και χρησιμοποιώντας τα αισθητήρια όργανά του (την όραση, την όσφρηση και την αφή) ταξινομεί το εδαφικό δείγμα. Η ταξινόμηση με βάση την εμπειρία είναι απλούστερη για τις κατηγορίες πετρωμάτων (π.χ. αναγνώριση ιζηματογενών, μεταμορφωμένων ή πυριγενών πετρωμάτων και ειδικότερη ταξινόμηση) και ένας ειδικός μπορεί να περιγράψει με σχετική ακρίβεια το είδος του πετρώματος καθώς έχουν έντονα και διακριτά χαρακτηριστικά. Για την περίπτωση των εδαφικών δειγμάτων είναι δυνατή η ταξινόμηση σε μία από τις τρεις κατηγορίες: «Άμμος», «ΐλύς» ή «Άργιλος» ενδεχομένως με μία εκτίμηση των μεταξύ των προσμίξεων ή του χρωματισμού τους κλπ (π.χ. «παχιά Άργιλος» ή «κόκκινη Άργιλος με λίγο άμμο»).

Η πλήρης διαδικασία της εδαφικής ταξινόμησης γίνεται κατόπιν εργαστηριακών δοκιμών. Εφαρμόζοντας τις δοκιμές που ανεφέρθησαν στα Κεφάλαια 2 και 4 μπορεί να ταξινομηθεί η πλειονότητα των εδαφικών δειγμάτων (απαιτούνται κάποιες επιπλέον δοκιμές για την ταξινόμηση των οργανικών εδαφών) βάσει κάποιων κανόνων που θα αναφερθούν στην συνέχεια.

5.1 Ταξινόμηση χονδρόκοκκων υλικών μέσω της κοκκομετρικής δοκιμής

Το κόσκινο No200 χρησιμοποιείται ως το διαχωριστικό όριο μεταξύ των χονδρόκοκκων υλικών (χαλίγια - άμμος) και των λεπτόκοκκων (ιλύς - άργιλος). Ένα εδαφικό δείγμα όπου ποσοστό μικρότερο από 50% συγκρατείται από το No200 (διέρχεται ποσοστό άνω του 50%) χαρακτηρίζεται ως συνεκτικό έδαφος (ιλυώδες - αργιλώδες). Ωστόσο ένα υλικό όπου ποσοστό μεγαλύτερο από 50% συγκρατείται από το No200 χαρακτηρίζεται κοκκώδες και η σημαντικότερη δοκιμή ταξινόμησης θα είναι η κοκκομετρική. Ειδικότερα όταν το ποσοστό των διερχόμενων από το No200 είναι μικρότερο από 12% ή καλύτερα από το 5%, το εδαφικό δείγμα μπορεί να ταξινομηθεί μόνο με διενέργεια κοκκομετρικής δοκιμής.

Χρησιμοποιώντας 3 μόνο χαρακτηριστικά κόσκινα μπορεί να γίνει μία αρχική κατάταξη του δείγματος σε χαλίκια, άμμο ή ιλύς-άργιλο ως εξής:

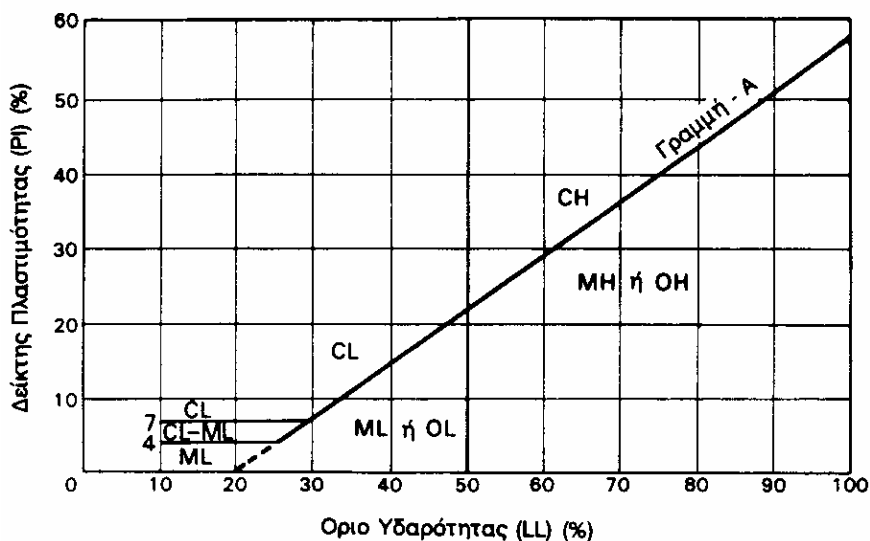
- Το υλικό που συγκρατείται από το φίλτρο No4 (47.5 mm) είναι τα χαλίκια.
- Το υλικό που συγκρατείται μεταξύ των φίλτρων No4 (47.5 mm) και No200 είναι η άμμος.
- Το υλικό που διέρχεται του φίλτρου No200 είναι ιλύς-άργιλος.

Εφόσον το υλικό που διέρχεται του φίλτρο No200 είναι μικρότερο από 50% και το ποσοστιαίο υλικό των χαλικιών είναι μεγαλύτερο από το ποσοστιαίο υλικό της άμμου, τότε έχουμε Χαλίκια. Στην αντίθετη περίπτωση (ποσοστό άμμου > ποσοστό χαλικιών) έχουμε Άμμο. Ανάλογα με τις προσμίξεις του υλικού μπορούμε να μιλάμε π.χ. για Ιλυώδης άμμος ή άμμος με άργιλο ή χαλίκια με ιλύς και άμμο κλπ (βλ. παρακάτω παράγραφο - ταξινόμηση κατά ASTM).

Επιπλέον μέσω των μεγεθών της κοκκομετρικής καμπύλης C_u και C_c , μπορούμε να χαρακτηρίζουμε το υλικό σαν καλής ή κακής διαβάθμισης. Εάν το λεπτόκοκκο υλικό (διερχόμενο του No200) είναι μεγαλύτερο από 5% θα πρέπει η ταξινόμηση για να είναι πλήρης να συμπληρώνεται με τα αποτελέσματα της κατάταξης λεπτόκοκκων σύμφωνα με τον χάρτη του Casagrande (βλ. επόμενη παράγραφο).

5.2 Ταξινόμηση λεπτόκοκκων υλικών μέσω του χάρτη πλαστικότητας “Casagrande”

Η ταξινόμηση των λεπτόκοκκων υλικών θα γίνεται με χρήση του χάρτη πλαστικότητας “Casagrande” Με την μεθοδολογία αυτή είναι δυνατή η ταξινόμηση των συνεκτικών εδαφών (με διερχόμενο από το No200 άνω του 50%) καθώς και η ακριβέστερη ταξινόμηση μη συνεκτικών εδαφών όπου το διερχόμενο από το No200 είναι άνω του 5%.



Σχήμα 5.1: Χάρτης πλαστικότητας Casagrande.

Προκειμένου να γίνει η ταξινόμηση με χρήση του χάρτη πλαστικότητας, προσδιορίζονται τα όρια Atterberg του διερχόμενου του φίλτρου No40, σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 4. Σχεδιάζεται το χαρακτηριστικό σημείο (LL, PI) στον χάρτη πλαστικότητας και ανάλογα την περιοχή που βρίσκεται, ταξινομείται το λεπτόκοκκο υλικό σε κάποια από τις κατηγορίες που έχει ο χάρτης. Τα σημεία κάτω της γραμμής «A» χαρακτηρίζουν κάποιο ιλυώδες υλικό ενώ τα σημεία μεταξύ της γραμμής «A» και της γραμμής «U» χαρακτηρίζουν κάποιο αργιλώδες υλικό.

Η ονοματολογία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:

CL Ισχνή άργιλος.

ML Ιλύς.

CL-ML Ιλυώδης άργιλος.

CH Παχιά άργιλος.

MH Ελαστική ιλύς.

OH – OL Οργανική ιλύς ή άργιλος.

5.3 Ταξινόμηση εδαφών κατά ASTM

Η ταξινόμηση των εδαφών κατά ASTM είναι μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία ταξινόμησης των εδαφικών υλικών και στηρίζεται σε εργαστηριακές δοκιμές. Βασίζεται στην χρήση πινάκων κατάταξης όπου ο μελετητής προσπαθεί να ταυτοποιήσει τις ιδιότητες του υλικού με κάποια κατηγορία. Οι απαραίτητες δοκιμές για την ταξινόμηση είναι οι παρακάτω:

- Κοκκομετρική δοκιμή. Χρησιμοποιείται η βασική σειρά των κόσκινων ώστε να μπορούν να διαχωριστούν τα ποσοστά χαλικιών, άμμου και λεπτόκοκκων καθώς και προσδιορισμός με σχετική ακρίβεια των μεγεθών της κοκκομετρικής καμπύλης (C_c , C_u).
- Προσδιορισμός των ορίων Atterberg του λεπτόκοκκου κλάσματος (διερχόμενου του No40).
- Προσδιορισμός του ποσοστού των οργανικών με χημικές μεθόδους.
- Στην περίπτωση οργανικών, προσδιορισμός του λόγου $LL_{\text{αποξηρ. σε φούρνο}}/LL_{\text{μη αποξηραμένο}}$. Εάν αυτός ο λόγος είναι μικρότερος από 0.75 θα γίνεται ταξινόμηση οργανικών υλικών αν όχι θα ακολουθείται η συνήθης ταξινόμηση για μη οργανικά.

Η ταξινόμηση των εδαφικών δειγμάτων διευκολύνεται όταν χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό (πρόγραμμα) ηλεκτρονικού υπολογιστή. Μάλιστα, έχουν αναπτυχθεί λογισμικά ταξινόμησης που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη (Εμπειρα συστήματα – νευρωνικά δίκτυα). Στην συνέχεια των πινάκων ταξινόμησης παρουσιάζεται μία τέτοια διαδικασία με ένα λογιστικό φύλλο υπολογισμών (Microsoft Excel). Το συγκεκριμένο φύλλο μπορείτε να το «κατεβάσετε» από την σελίδα του εργαστηρίου ή να το ζητήσετε από τον Διδάσκοντα.

5.4 Πίνακες ταξινόμησης κατά ASTM

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: Κύριες κατηγορίες εδαφών, ονοματολογία

ΚΥΡΙΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ		ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΕΛΔΑΦΗ	ΧΑΛΙΚΙΑ (λιγότερο από 50% του χονδρόκοκκου διέρχεται από κόσκινο Νο4)	GW	Χαλίκι καλά διαβαθμισμένο με μίγμα άμμου-χαλικιού. Λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		GP	Χαλίκι κακής διαβάθμισης με μίγμα άμμου-χαλικιού. Λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		GM	Χαλίκια ιλυώδη, μίγμα χαλικιών, άμμου και ιλύος.
		GC	Ιλυώδης άργιλος, μίγμα χαλικιών, άμμου και αργίλου.
	ΑΜΜΟΣ (πάνω από 50% του χονδρόκοκκου διέρχεται από κόσκινο Νο4)	SW	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με χαλίκια, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		SP	Άμμος κακής διαβάθμισης με χαλίκια, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		SM	Ιλυώδης Άμμος.
		SC	Αργιλώδης Άμμος.
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΕΛΔΑΦΗ	ΙΛΥΣ ΚΑΙ ΑΡΓΙΛΟΣ Όριο υδαρότητας 50% ή μικρότερο	ML	Ανόργανη ιλύς, λεπτόκοκκη άμμος, ιλυώδης ή αργιλώδης λεπτόκοκκη άμμος.
		CL	Ανόργανη άργιλος μικρής ή μέσης πλαστιμότητας, χαλικώδης άργιλος, αμμώδης άργιλος, ιλυώδης άργιλος, ισχνή άργιλος.
		OL	Οργανική ιλύς και οργανική ιλυώδης άργιλος χαμηλής πλαστιμότητας.
	ΙΛΥΣ ΚΑΙ ΑΡΓΙΛΟΣ Όριο υδαρότητας μεγαλύτερο του 50%	MH	Ανόργανη ιλύς, μαρμαρυγιακά ή λεπτόκοκκα αμμώδη ή ιλυώδη εδάφη, ελαστική ιλύς.
		CH	Ανόργανη άργιλος μεγάλης πλαστιμότητας, παχιά άργιλος.
		OH	Οργανική άργιλος με μέση ως μεγάλη πλαστιμότητα.
ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΕΛΔΑΦΗ	PT	Χούμος, τύρφη και άλλα έντονα οργανικά εδάφη.	

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: Συνεκτικα εδάφη - συγκρατούμενο από No 200 (D = 0,074 mm) < 50% , LL < 50

ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΟΝΟΜΑΣΙΑ
		ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ No 200		ΑΜΜΟΣ – ΧΑΛΙΚΙΑ	
LL<50	CL	< 30%	< 15% συγκρ. No 200	-	Ισχνή άργιλος
			15-29% συγκρατ. No 200	% άμμου > % χαλικιών	Ισχνή άργιλος με άμμο
		≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	% άμμου < % χαλικιών	Ισχνή άργιλος με χαλίκια Αμμώδης ισχνή άργιλος
			% άμμου < % χαλικιών	% άμμου < % χαλικιών	Αμμώδης ισχνή άργιλος με χαλίκια Χαλικώδης ισχνή άργιλος
	CL - ML	< 30%	< 15% συγκρ. No 200	-	Πλωδής άργιλος
			15-29% συγκρατ. No 200	% άμμου > % χαλίκια	Πλωδής άργιλος με άμμο
		≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	% άμμου < % χαλίκια	Πλωδής άργιλος με χαλίκια Αμμώδης- Πλωδής άργιλος
			% άμμου < % χαλικιών	% άμμου < % χαλίκια	Αμμώδης – Πλωδής άργιλος με χαλίκια Χαλικώδης – Πλωδής άργιλος
			% άμμου < % χαλικιών	% άμμου < % χαλίκια	Χαλικώδης – Πλωδής άργιλος με άμμο Πλωδής άργιλος με άμμο
			% άμμου < % χαλικιών	% άμμου > % χαλίκια	Πλωδής άργιλος με άμμο
ML	< 30%	< 15% συγκρ. No 200	-	Ιλύς	
		15-29% συγκρατ. No 200	% άμμου > % χαλίκια	Ιλύς με άμμο	
	≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	% άμμου < % χαλίκια	Ιλύς με χαλίκια Αμμώδης ιλύς	
		% άμμου < % χαλικιών	% άμμου < % χαλίκια	Αμμώδης ιλύς με χαλίκια Χαλικώδης ιλύς	

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: Συνεκτικά εδάφη - συγκρατούμενο από Νο 200 ($D = 0,074 \text{ mm}$) $< 50\%$, $LL \geq 50$

ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΟΝΟΜΑΣΙΑ		
		ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ No 200		ΑΜΜΟΣ - ΧΑΛΙΚΙΑ			
Σημεία επάνω στη ή επάνω από τη γραμμή «A»	CH	$< 30\%$	$< 15\%$ συγκρ. No 200	-	Παχιά άργιλος		
			$15 - 29\%$ συγκρατ. No 200	% άμμου $>$ % χαλικιών % άμμου $<$ % χαλικιών $< 15\%$ χαλίκια $\geq 15\%$ χαλίκια	Παχιά άργιλος με άμμο Παχιά άργιλος με χαλίκια Αμμώδης παχιά άργιλος Αμμώδης παχιά άργιλος με χαλίκια		
		$\geq 30\%$	% άμμου $>$ % χαλικιών	% άμμου $<$ % χαλικιών	$< 15\%$ άμμος $\geq 15\%$ άμμος	Χαλικώδης παχιά άργιλος Χαλικώδης παχιά άργιλος με άμμο	
			$< 15\%$ συγκρ. No 200	$< 15\%$ συγκρ. No 200	-	Ελαστική ιλύς	
		Σημεία κάτω από τη γραμμή «A»	MH	$< 30\%$	$15 - 29\%$ συγκρατ. No 200	% άμμου $>$ % χαλικιών % άμμου $<$ % χαλικιών	Ελαστική ιλύς με άμμο Ελαστική ιλύς με χαλίκια
					% άμμου $>$ % χαλικιών	% άμμου $<$ % χαλικιών	$< 15\%$ χαλίκια $\geq 15\%$ χαλίκια
$\geq 30\%$	% άμμου $<$ % χαλικιών			% άμμου $<$ % χαλικιών	$< 15\%$ άμμος $\geq 15\%$ άμμος	Χαλικώδης ελαστική ιλύς Χαλικώδης ελαστική ιλύς με άμμο	
	$< 15\%$ συγκρ. No 200			$< 15\%$ συγκρ. No 200	$\geq 15\%$ άμμος	Χαλικώδης ελαστική ιλύς με άμμο	

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: Κοκκώδη εδάφη (χαλίκια > άμμος) - συγκρατούμενο από Νο 200 ($D=0,074 \text{ mm}$) $\geq 50\%$

ΧΑΛΙΚΙΑ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ		ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΛΕΗΤΟΚΟΚΚΩΝ	ΣΥΜΒΟ- ΛΙΣΜΟΣ	ΑΜΜΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	
	ΔΙΕΡΧΟΜ.	ΟΜΟΙΟ- ΜΟΡΦΙΑ					
% άμμος < %/χαλικιών	No 200 <5%	$C_u \geq 4$ και $1 \leq C_c \leq 3$		GW	<15% ≥15%	Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα με άμμο	
		$C_u < 4$ και / ή $C_c < 1$ ή $C_c > 3$		GP	<15% ≥15%	Χαλίκια κακής διαβάθμισης Χαλίκια κακής διαβάθμισης με άμμο	
	No 200 5÷12%	$C_u \geq 4$ και $1 \leq C_c \leq 3$	ML ή MH	GW – GM	<15% ≥15%	Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα με ιλύ Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα με ιλύ και άμμο	
			CL, CH ή (CL – ML)	GW – GC	<15% ≥15%	Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο) Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο) και άμμο	
	No 200 >12%	$C_u < 4$ και / ή $C_c < 1$ ή $C_c > 3$	ML ή MH	GP – GM	<15% ≥15%	Χαλίκια κακής διαβάθμισης με ιλύ Χαλίκια κακής διαβάθμισης με ιλύ και άμμο	
			CL, CH ή (CL – ML)	GP – GC	<15% ≥15%	Χαλίκια κακής διαβάθμισης με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο) Χαλίκια κακής διαβάθμισης με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο) και άμμο	
		No 200 >12%		ML ή MH	GM	<15% ≥15%	Ιλυώδη χαλίκια Ιλυώδη χαλίκια με άμμο
				CL ή CH	GC	<15% ≥15%	Αργιλώδη χαλίκια Αργιλώδη χαλίκια με άμμο
				CL - ML	GC - GM	<15% ≥15%	Ιλοσαργιλώδη χαλίκια Ιλοσαργιλώδη χαλίκια με άμμο

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: Κοκκώδη εδάφη (άμμος > χαλίκια) - συγκρατούμενο από Νο 200 ($D=0,074 \text{ mm}$) $\geq 50\%$

ΑΜΜΟΣ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ		ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΧΑΛΙΚΕΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
	ΔΙΕΡΧΟΜ.	ΟΜΟΙΟ- ΜΟΡΦΙΑ				
% άμμου> %χαλικιών	No 200 <5%	$C_u \geq 6$ και $1 \leq C_c \leq 3$	ML ή MH	SW – SM	<15% $\geq 15\%$	Άμμος καλά διαβαθμισμένη
		$C_u < 6$ και / ή $C_c < 1$ ή $C_c > 3$				Άμμος καλής διαβάθμισης
	No 200 5÷12%	$C_u \geq 6$ και $1 \leq C_c \leq 3$ (1*)	ML ή MH	SW – SC	<15% $\geq 15\%$	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με ιλύ
						CL, CH ή (CL – ML)
			ML ή MH	SP – SM	<15% $\geq 15\%$	Άμμος κακής διαβάθμισης με ιλύ
						CL, CH ή (CL – ML)
	No 200 >12%	$C_u < 6$ και / ή $C_c < 1$ ή $C_c > 3$ (1*)	ML ή MH	SM	<15% $\geq 15\%$	Ίλυδης άμμος
						CL ή CH
			CL – ML	SC – SM	<15% $\geq 15\%$	Αργιλώδης άμμος
						Αργιλώδης άμμος με χαλίκια
			CL – ML	SC – SM	<15% $\geq 15\%$	Ίλυοαργιλώδης άμμος
						Ίλυοαργιλώδης άμμος με χαλίκια

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: *Οργανικά (συνεκτικά) εδάφη - συγκρατούμενο από No 200 (D = 0,074 mm) < 50% , LL < 50 και (LL_αποξηραμένο σε φούρνο / LL_μη αποξηραμένο) < 0,75*

ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΟΝΟΜΑΣΙΑ
		ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ No 200		ΑΜΜΟΣ - ΧΑΛΙΚΙΑ	
PI ≥ 4 Και σημεία επάνω στη ή επάνω από τη γραμμή «A»	OL	< 30%	< 15% συγκρ. No 200		Οργανική άργιλος
			15 – 29% συγκρατ.	% άμμου > %χαλικιών	Οργανική άργιλος με άμμο
			No 200	% άμμου < % χαλικιών	Οργανική άργιλος με χαλίκια
			% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης οργανική άργιλος
			% άμμου < % χαλικιών	≥ 15 % χαλίκια	Αμμώδης οργανική άργιλος με χαλίκια
			χαλικιών	< 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική άργιλος
LL<50	OL	< 30%	< 15% συγκρ. No 200		Οργανική ιλύς
			15 – 29% συγκρατ.	% άμμου > % χαλικιών	Οργανική ιλύς με άμμο
			No 200	% άμμου < % χαλικιών	Οργανική ιλύς με χαλίκια
			% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης οργανική ιλύς
			% άμμου < % χαλικιών	≥ 15% χαλίκια	Αμμώδης οργανική ιλύς με χαλίκια
			χαλικιών	< 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική ιλύς με άμμο

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: Οργανικά (συνεκτικά) εδάφη - συγκρατούμενο από No 200 ($D = 0,074 \text{ mm}$) $< 50\%$, $LL \geq 50$ και ($LL_{\text{αποξηραμένο σε φούρνο}} / (LL_{\text{μη αποξηραμένο}}) < 0,75$

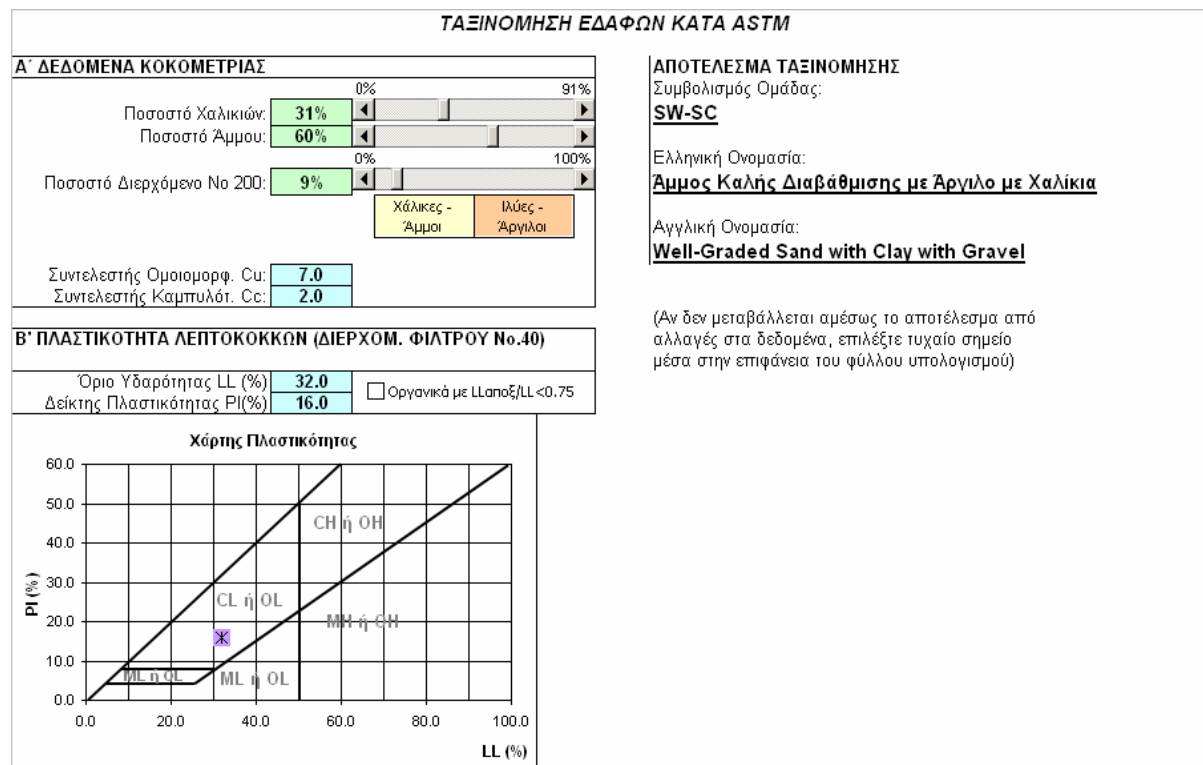
ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ No 200	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ		ΟΝΟΜΑΣΙΑ
			ΑΜΜΟΣ - ΧΑΛΙΚΙΑ		
Σημεία επάνω στη ή επάνω από τη γραμμή «A»	OH	$< 30\%$		$< 15\%$ συγκρ. No 200	Οργανική άργιλος
				$15 - 29\%$ συγκρατ.	Οργανική άργιλος με άμμο
				No 200	Οργανική άργιλος με χαλίκια
				$\% \text{ άμμου} > \%$ χαλικίων	Αμμώδης οργανική άργιλος
				$\% \text{ άμμου} < \%$ χαλικίων	Αμμώδης οργανική άργιλος με χαλίκια
				$\geq 15\%$ άμμος	Χαλικώδης οργανική άργιλος
Σημεία κάτω από τη γραμμή «A»	OH	$\geq 30\%$		$\geq 15\%$ άμμος	Χαλικώδης οργανική άργιλος με άμμο
				$< 15\%$ συγκρ. No 200	Οργανική ιλύς
				$15 - 29\%$ συγκρατ.	Οργανική ιλύς με άμμο
				No 200	Οργανική ιλύς με χαλίκια
				$\% \text{ άμμου} > \%$ χαλικίων	Αμμώδης οργανική ιλύς
				$\% \text{ άμμου} < \%$ χαλικίων	Αμμώδης οργανική ιλύς με χαλίκια
LL ≥ 50				$< 15\%$ άμμος	Χαλικώδης οργανική ιλύς
				$\geq 15\%$ άμμος	Χαλικώδης οργανική ιλύς με άμμο
				$\geq 15\%$ άμμος	Χαλικώδης οργανική ιλύς με άμμο

5.5 Ταξινόμηση με την χρήση λογισμικού

Χρησιμοποιώντας το φύλλο υπολογισμών ClassificationOfSoils.xls (Microsoft Excel) μπορούμε να ταξινομήσουμε εδαφικά δείγματα σύμφωνα με την ASTM. Το φύλλο βασίζεται στους πίνακες ταξινόμησης ASTM και η ταξινόμηση γίνεται με ένα απλό πρόγραμμα VBA (Visual Basic for Applications). Τα δεδομένα εισόδου για το λογισμικό είναι:

- Δεδομένα κοκκομετρίας – Ποσοστά άμμου, χαλικιών, ιλύος και αργίλου, τιμές Cu και Cc.
- Πλαστικότητα λεπτόκοκκων – LL, PI. Τυχόν παρουσία οργανικών.

Παράδειγμα ταξινόμησης με το φύλλο παρουσιάζεται στην συνέχεια:



Σχήμα 5.1: Φύλλο υπολογισμών για την ταξινόμηση εδαφών.

5.6 Ταξινόμηση κατά AASTHO

Η ταξινόμηση AASTHO (Αμερικάνικη Ένωση Κρατικών Λειτουργιών Οδοποιίας) χρησιμοποιείται ευρέως για την ταξινόμηση εδαφικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε έργα οδοποιίας. Η ταξινόμηση βασίζεται όπως και στην περίπτωση της ASTM, στα κοκκομετρικά στοιχεία καθώς και στην πλαστικότητα των λεπτόκοκκων. Η AASTHO διακρίνει δύο κύριες κατηγορίες εδαφών:

- Κοκκώδη υλικά, που έχουν ποσοστό 35% ή μικρότερο διερχόμενο από το κόσκινο Νο200 (συμβολισμός ομάδων A_1, A_2, A_3)
- Ιλυοαργιλώδη υλικά, που έχουν ποσοστό μικρότερο διερχόμενο από το κόσκινο Νο200 (ομάδες A_4, A_5, A_6, A_7).

Κατόπιν, οι πίνακες A_1, A_2 και A_7 διαιρούνται σε υποομάδες σύμφωνα με ειδικότερα χαρακτηριστικά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: Πίνακας ταξινόμησης κατά AASHTO.

Γενική κατάσταση	Κοιυώδη υλιώδη (Διερχόμενο από το υόσεινο Ν° 200 \leq 35%)							Ιλυοαρχιλώδη υλιώδη (Διερχ. από το υόσει. Ν° 200 $>$ 35%)				
	Α-1		Α-3	Α-2				Α-4	Α-5	Α-6	Α-7	
	A-1-a	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7.5	A-7.6
Κοιυομετριυή ανάλυση. % ποσοστό διερχόμενο από: Κόσεινο Ν° 10 Κόσεινο Ν° 40 Κόσεινο Ν° 200	50 max 30 max 15 max	- 50 max 25 max	- 51 min 10 max	- 35 max 35 max	- 35 max 35 max	- 35 max 35 max	- 35 max 35 max	- 36 min 36 min	- 36 min 36 min	- 36 min 36 min	- 36 min 36 min	
Χαραυτηριστιυά εδάφους διερ- χομένου από το υόσεινο Ν° 40 Όριο υδαρότητας LL Δείυτης πλαστιυότητας PI	- 6 max	- NP	40 max 10 max	40 max 10 max	41 min 10 max	40 min 11 min	41 min 11 min	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	
Δείυτης ομάδας I ₆	0	0	0	0	0	4 max	4 max	8 max	12 max	16 max	20 max	
Συνυοδισυμένοι τύποι υλιυών	Λιδοσόνυριμμα χαλίυια υαι άμμος		Λεπυή άμμος	Ιλιυώδη ή αρχιλώδη χαλίυια υαι άμμος				Ιλυώδη εδάφη		Αρχιλώδη εδάφη		
Καταλλυπλότυπα υς υπέδαφος	Εξαιρευτιυή έυς υαλή					Μέυτρια έυς υαυή						

- Ο δείυτης πλαστιυότητας της υυοομάδας Α-7-5 είναι ίσοσ ή μιυρότεροσ του LL-30.
- Ο δείυτης πλαστιυότητας της υυοομάδας Α-7-6 είναι μεγαλύτεροσ του LL-30.

6 Εργαστηριακός προσδιορισμός της υδατοπερατότητας εδαφών

Τα εδάφη ως πορώδη μέσα χαρακτηρίζονται από τριφασικότητα: Στερεά φάση (εδαφικοί κόκκοι), αέρια φάση (αέρας) και υγρή (νερό πόρων). Το νερό έχει την δυνατότητα να ρέει μέσω των πόρων. Η ροή του νερού μάλιστα διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: Ακόρεστη και κορεσμένη (όπου το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού). Η ικανότητα του νερού να ρέει δια μέσω των πόρων δεν είναι η ίδια σε όλους τους τύπους εδαφών. Η ικανότητα αυτή χαρακτηρίζεται με το μέγεθος της «υδατοπερατότητας» ή «υδροπερατότητας». Υλικά όπως χαλίκια και άμμος (χονδρόκοκκα υλικά) χαρακτηρίζονται από μεγάλη υδατοπερατότητα, ενώ υλικά όπως η ιλύς και άργιλος (λεπτόκοκκα υλικά) χαρακτηρίζονται από μικρή υδατοπερατότητα.

Ο βαθμός της υδατοπερατότητας εκφράζεται αριθμητικά μέσω του «συντελεστή υδατοπερατότητας». Ο συντελεστής υδατοπερατότητας μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορες μεθόδους, όπως με τις εργαστηριακές. Η γνώση της υδατοπερατότητας των εδαφών είναι απαραίτητη για την μελέτη γεωτεχνικών έργων όπως φράγματα, εδαφικά φίλτρα, ΧΥΤΑ (χώροι υγειονομικής ταφής), στραγγιστήρια, κ.α.

Ο προσδιορισμός του συντελεστή υδατοπερατότητας μπορεί να γίνει με μία από τις παρακάτω εργαστηριακές διατάξεις:

- *Διαπερατόμετρο σταθερού υδραυλικού φορτίου*, κατάλληλο για τη μέτρηση του συντελεστή υδατοπερατότητας σε χονδρόκοκκα – υδατοπερατά εδάφη (χαλίκια, άμμος, κλπ).
- *Διαπερατόμετρο μεταβλητού υδραυλικού φορτίου*, κατάλληλο για την μέτρηση του συντελεστή υδατοπερατότητας σε λεπτόκοκκα, λίγο διαπερατά εδάφη (όπως η άργιλος).

6.1 Φυσικό νόημα του συντελεστή υδατοπερατότητας

Ο συντελεστής υδατοπερατότητας (k), έχει μονάδες ταχύτητας (m/s) και είναι η ταχύτητα ροής μέσα από το πορώδες μέσο για υδραυλική κλίση ίση με 1 (π.χ. πτώση υδραυλικού φορτίου 1 m για μήκος ροής 1 m). Ο παραπάνω ορισμός απορρέει από τον νόμο του Darcy, εφόσον δε η ροή μέσα από το πορώδες μέσο είναι ομοιόμορφη και εφόσον γίνει θεώρηση γραμμικών απωλειών του υδραυλικού φορτίου, ο νόμος του Darcy μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση:

$$v = -k \cdot i \quad 6.1$$

Όπου, v η μέση ταχύτητα ροής, k ο συντελεστής υδατοπερατότητας και i η υδραυλική κλίση. Η κλίση είναι αρνητική. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, ο συντελεστής μπορεί να υπολογιστεί απευθείας, εφόσον μετρηθούν άμεσα τα υπόλοιπα μεγέθη. Προς τούτο, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$Q = k \cdot A \cdot (\Delta h / L) \quad 6.2$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από το νόμο του Darcy, εφόσον αναπτύξουμε τους όρους της ταχύτητας και της κλίσης. Η παροχή του νερού που θα περνάει μέσα από ένα πορώδες μέσο, θα είναι ανάλογη με τον συντελεστή υδατοπερατότητας, την διατομή αναφορά (A), την πτώση του υδραυλικού φορτίου (Δh) και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους ροής (L).

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστή υδατοπερατότητας για διαφορετικούς τύπους εδαφών.

Τύπος εδάφους	k (m/s)
Χαλίκια	$10^{-2} - 1$
Άμμος με ελάχιστες προσμίξεις	$10^{-5} - 10^{-2}$
Λεπτόκοκκη άμμος, ιλυώδεις άμμος	$10^{-8} - 10^{-5}$
Ιλύς, ιλυώδεις άργιλοι	$10^{-9} - 10^{-6}$
Άργιλοι	$10^{-11} - 10^{-9}$

Η υδατοπερατότητα επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως ο βαθμός συμπίκνωσης του υλικού. Εν γένει η συμπίκνωση και η δόνηση κάποιου κοκκώδους υλικού, έχει ως αποτέλεσμα το «κλείσιμο» των κενών και την μείωση της υδατοπερατότητας. Ωστόσο ο κρίσιμος παράγοντας για την υδατοπερατότητα ενός εδαφικού σχηματισμού, είναι το λεπτόκοκκο κλάσμα που περιέχει. Είναι επίσης προφανές πως εξαρτάται και από την κοκκομετρική διαβάθμιση. Μία σχέση που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της διαπερατότητα ενός σχηματισμού σύμφωνα με την κοκκομετρία είναι η παρακάτω:

$$k \text{ (cm/s)} = 100 * D_{10}^2 \quad 6.3$$

Όπου D_{10} , το ενεργό μέγεθος όπως προκύπτει από την κοκκομετρική καμπύλη εκφρασμένο σε cm. Η σχέση είναι προσεγγιστική και δίνει μία τάξη μεγέθους για τον συντελεστή υδατοπερατότητας.

6.2 Περιγραφή εργαστηριακής διάταξης

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η διάταξη ενός διαπερατόμετρου σταθερού υδραυλικού φορτίου, σαν αυτό που διαθέτει το εργαστήριό μας. Η διάταξη αποτελείται από 4 βασικά τμήματα:



Σχήμα 6.1: Σύστημα παροχής νερού (α), Κυψέλη με εδαφικό δείγμα (β) (φωτ. Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής)

- 1) **Σύστημα παροχής νερού με σταθερή πίεση.** Με την βοήθεια ενός υπερχειλιστή, διατηρούμε σταθερή την στάθμη του νερού στο σύστημα παροχής νερού. Ο υπερχειλιστής βρίσκεται κοντά στο χείλος ενός κυλινδρικού δοχείου χωρητικότητας 5 λίτρων. Στο δάπεδο του δοχείου βρίσκεται η έξοδος νερού προς την κυψέλη. Στο μέσο του δοχείου, ένας σωλήνας τροφοδοτεί

το σύστημα με νερό από το δίκτυο ύδρευσης. Η διάταξη είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνει κάποιο βαθμό απαέρωσης στο νερό.

- 2) **Κυψέλη.** Είναι ένα δοχείο από Plexi-Glass όπου τοποθετείται το εδαφικό δείγμα. Το δείγμα είναι εγκιβωτισμένο από τα τοιχώματα της κυψέλης καθώς και δύο διάτρητες μεταλλικές πλάκες (ώστε να επιτρέπουν την ροή του νερού). Μεταξύ των μεταλλικών πλακών και του δείγματος, τοποθετείται φίλτρο τάξης No40-No100 ώστε να αποτρέπεται το ξέπλυμα της λεπτόκοκκης άμμου. Κατά μήκος της κυψέλης, τρεις οπές που ισαπέχουν, επιτρέπουν την σύνδεση ισάριθμων μανόμετρων για την μέτρηση της πτώσης του υδραυλικού φορτίου. Η διάταξη συμπληρώνεται από την είσοδο του νερού από την **διάταξη 1**, την βαλβίδα απαέρωσης καθώς και από την έξοδο του νερού στην βάση. Ο εγκιβωτισμός του δείγματος βοηθείται από σύστημα συμπίεσης. Η διάταξη κλείνει αεροστεγώς με την βοήθεια 2 o-rings (φλάντζες).



Σχήμα 6.2: Σωλήνες μανόμετρων (φωτ. Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής)

- 3) **Μανόμετρα.** Τα μανόμετρα είναι κατακόρυφοι γυάλινοι σωλήνες στους οποίους έχει προσαρμοστεί ένας γνώμονας (με κλίμακα cm). Το ύψος των σωλήνων είναι τέτοιο που ώστε να επιτρέπει στο νερό να φθάνει το ύψος του υπερχειλιστή σε περίπτωση διακοπής της ροής (μέσω του φαινομένου των συγκοινωνούντων δοχείων). Σημαντικό είναι τα μανόμετρα να είναι τέλεια απαερωμένα.
- 4) **Έξοδος νερού.** Στην βάση της κυψέλης ένας κρουνός επιτρέπει την διακοπή - αποκατάσταση της ροής. Ένας ελαστικός σωλήνας συνδέεται στον κρουνό, ο οποίος καταλήγει σε μία διάταξη μέτρησης της παροχής (ογκομετρικά δοχείο + χρονόμετρο).

6.3 Μέτρηση συντελεστή - υπολογισμοί

Γίνεται σύνδεση της διάταξης - σύνδεση μανόμετρων με την κυψέλη, σύνδεση συστήματος παροχής με την κυψέλη. Οι έξοδοι προς τα μανόμετρα ονομάζονται από πάνω προς τα κάτω: 1, 2 και 3.

Μετράμε το μήκος ροής μεταξύ των εξόδων 1-2 και 2-3 ($= L_a, L_b$). Μετράμε την εσωτερική διάμετρο της κυψέλης D και υπολογίζουμε την επιφάνεια της διατομής του δείγματος $A = \pi D^2/4$.

Επιλέγουμε έναν αντιπροσωπευτικό όγκο από το δείγμα και το τοποθετούμε στην κυψέλη με προσοχή ώστε να διατηρεί ομοιογένεια. Τοποθετούμε τα φίλτρα, κλείνουμε την κυψέλη και εκτελούμε τις απαραίτητες ενέργειες απαέρωσης (διακοπτόμενη ροή - άνοιγμα της βαλβίδας. Για καλύτερα αποτελέσματα κάνουμε αναρρόφηση νερού).

Εφόσον όλα είναι έτοιμα, τροφοδοτούμε συνεχώς την διάταξη με νερό σταθερού υδραυλικού ύψους. Κλείνουμε την παροχή από τον κρουνό εξόδου. Εφόσον έχει γίνει σωστή απαέρωση, όλα τα μανόμετρα θα δείχνουν το ίδιο ύψος και θα έχουν την στάθμη του υπερχειλιστή βάσει του φαινομένου των συγκοινωνούντων δοχείων.

Ανοίγουμε τον κρουνό εξόδου και περιμένουμε να αποκατασταθεί σταθερή και ομοιόμορφη ροή. Τα μανόμετρα δείχνουν την πτώση πίεσης λόγω των γραμμικών απωλειών της ροής. Η πτώση από το μανόμετρο 1 στο 2 είναι Δh_{12} , από το 2 στο 3 είναι Δh_{23} . Υπολογίζουμε τις υδραυλικές κλίσεις:

$$i_{12}=\Delta h_{12}/L_a, i_{23}=\Delta h_{23}/L_b \quad 6.4$$

Εφόσον το δείγμα είναι ομοιογενές, οι κλίσεις πρέπει να ταυτίζονται. Αν υπάρχει μεγάλη διαφορά επαναλαμβάνουμε το πείραμα από την αρχή προετοιμάζοντας νέο δείγμα. Αν οι κλίσεις είναι της αυτής τάξης μεγέθους, υπολογίζουμε την μέση κλίση όπου θα χρησιμοποιήσουμε στους υπολογισμούς:

$$i = (i_{12} + i_{23}) / 2 \quad 6.5$$

Μετράμε την παροχή εξόδου Q , χρησιμοποιώντας ένα ογκομετρικό δοχείο και ένα χρονόμετρο.

Υπολογίζουμε τον συντελεστή υδατοπερατότητας (k) χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση. Προσέχουμε τις μονάδες (χρησιμοποιούμε μέτρα για τα μήκη και δευτερόλεπτα για τον χρόνο). Τα αποτελέσματα είναι σε m/s:

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad 6.6$$

Συγκρίνουμε την τάξη μεγέθους του συντελεστή υδατοπερατότητας με τον Πίνακα 6.1.

7 Δοκιμή του Καλιφορνιακού Λόγου Φέρουσας Ικανότητας (CBR - California Bearing Ratio test)

Ο λόγος CBR είναι ένα μέγεθος που περιγράφει την αντοχή εδαφών. Συγκεκριμένα, είναι ένα μέγεθος που προτάθηκε από τον Τομέα Αυτοκινητοδρόμων της Καλιφόρνια το 1928, ώστε να δυνατή η εκτίμηση της ικανότητας των εδαφών ως υλικά έδρασης έργων οδοποιίας. Η μέθοδος υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων με την χρήση του CBR μάλιστα, υιοθετήθηκε κατά τον Β΄ παγκόσμιο πόλεμο από τον αμερικάνικο στρατό, για την μελέτη - κατασκευή διαδρόμων απογείωσης - προσγείωσης αεροσκαφών.

Η δοκιμή CBR, εκτιμά την διατμητική αντοχή ενός εδάφους υπό ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας - πυκνότητας. Από την εκτέλεση της δοκιμής προκύπτει ο λόγος φέρουσας ικανότητας. Ο λόγος είναι χαρακτηριστικός για τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά την δοκιμή (δηλαδή για την συγκεκριμένη υγρασία - πυκνότητα).

Ο αριθμός CBR υπολογίζεται από τον λόγο της πίεσης (τάσης) που απαιτείται ώστε να προκληθεί ένα συγκεκριμένο βάθος διείδυσης (βάθος αναφοράς) του εμβόλου της δοκιμής, σε ένα συμπαγνωμένο δείγμα εδάφους, σε ορισμένη πυκνότητα και υγρασία, προς την πίεση αναφοράς η οποία είναι η απαιτούμενη πίεση ώστε να προκληθεί αυτό το βάθος σε δείγμα σπασμένης πέτρας. Το βάθος αναφοράς είναι 2.54 mm (1/10") και η πίεση αναφοράς (για το δείγμα της σπασμένης πέτρας) είναι 6.9 MPa. Ο λόγος CBR ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{CBR} = (\text{πίεση δοκιμής}) / (\text{πίεση αναφοράς}) * 100 (\%)$$

7.1

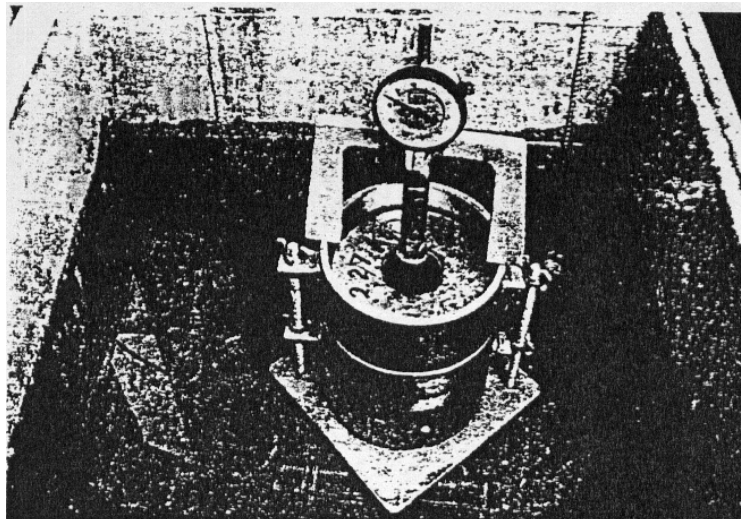


Σχήμα 7.1: Εργαστηριακή διάταξη για την δοκιμή CBR (α), συσκευή πεδίου (β) για χρήση σε εργοτάξιο.

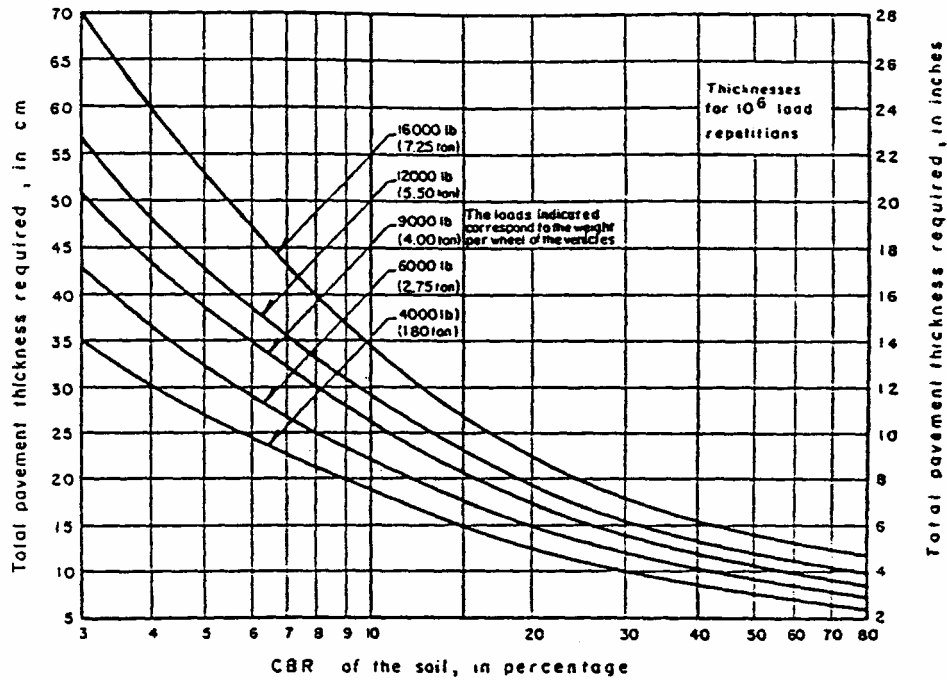
Η σπασμένη πέτρα θεωρείται πως έχει την καλύτερη συμπεριφορά για τα έργα οδοποιίας και θα έχει λόγο CBR σχεδόν 100%. Ένα μαλακό έδαφος θα έχει μικρότερο λόγο CBR. Σύμφωνα με τον λόγο CBR, γίνεται και η επιλογή του πάχους του οδοστρώματος, βάσει νομογραφημάτων (μικρές τιμές CBR, απαιτούν μεγάλο πάχος οδοστρώματος). Τα νομογραφήματα αυτά συντάσσονται ανάλογα με το φορτίο που πρόκειται να φέρει το οδόστρωμα.



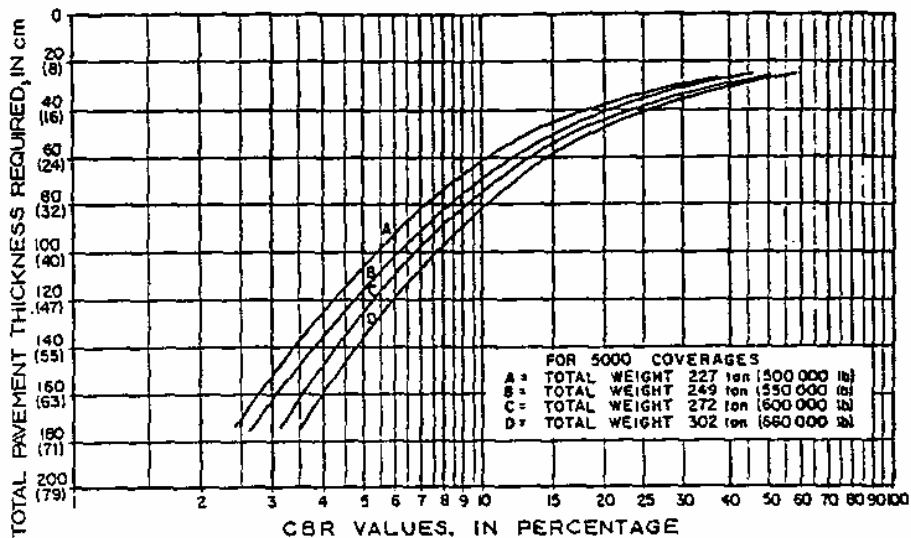
Σχήμα 7.2: Εξοπλισμός για τις δοκιμές CBR. Κάτω αριστερά διακρίνεται η κυψέλη για την δοκιμή αντοχής CBR. (φωτ. Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής)



Σχήμα 7.3: Διάταξη για τον υπολογισμό της διόγκωσης λόγω απορρόφησης νερού. Χρησιμοποιούμε την κυψέλη της δοκιμής CBR, επιπλέον ένα βελόμετρο που προσαρμόζεται στην κυψέλη, καθώς και κάποια βαρίδια.



Σχήμα 7.4: Καμπύλες σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρώματων σύμφωνα με τον λόγο CBR του εδάφους. Οι καμπύλες εκτιμούν το απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος συναρτήσει του CBR και το φορτίο ανά τροχή οχήματος (1.80 – 7.25 τόνους), για 10^6 φορτίσεις.



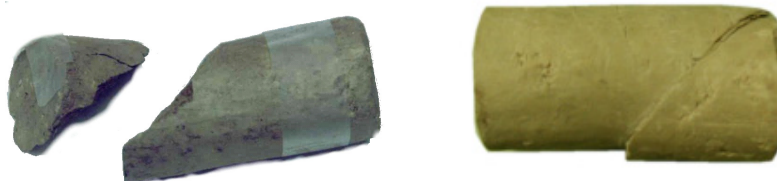
Σχήμα 7.5: Καμπύλες σχεδιασμού εύκαμπτου οδοστρώματος διαδρόμου απογείωσης για φορτία αεροσκάφους Boeing 747, συναρτήσει του λόγου CBR. Συγκρίνετε την τάξη μεγέθους του πάχους του οδοστρώματος (30-180 cm) με το προηγούμενο διάγραμμα (10-70 cm).

8 Εισαγωγή στις εργαστηριακές μεθόδους προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής εδαφών

Η αντοχή του εδάφους είναι μία φυσική ιδιότητα, μεγάλου ενδιαφέροντος για τον σχεδιασμό των τεχνικών έργων που εδράζονται στο έδαφος ή κατασκευάζονται μέσα σε αυτό. Η αντοχή είναι ένα μέγεθος το οποίο μπορεί να εκτιμηθεί με μεθόδους έρευνας πεδίου ή να μετρηθεί με εργαστηριακές μεθόδους. Συνήθως εκφράζεται αριθμητικά με τις παραμέτρους αντοχής οι οποίες είναι άμεσα συνυφασμένες με κάποιο νόμο – μοντέλο αστοχίας.

Τα εδάφη αστοχούν υπό κάποια ένταση, συνήθως σχηματίζοντας *επίπεδα αστοχίας*. Στα επίπεδα εκδηλώνεται η αστοχία με ολίσθηση. Η ολίσθηση προκαλείται από την διατμητική τάση σε αυτό το επίπεδο. Έτσι συνηθίζουμε να μιλάμε για «Διατμητική αστοχία» όπως και για «Διατμητική αντοχή». Η Διατμητική αντοχή είναι το μέγεθος στο οποίο θα αναφερόμαστε και θα είναι αντιπροσωπευτικό για την συνολική αντοχή του εδάφους.

Μερικά μοντέλα αστοχίας του εδάφους που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς είναι: Το μοντέλο μέγιστης διατμητικής τάσης (Tresca) για την πλαστικότητα, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε κορεσμένες – μαλακές αργίλους (και είναι μία υποπερίπτωση του μοντέλου Mohr-Coulomb για $\phi=0$), το μοντέλο διατμητικής αστοχίας του Coulomb (νόμος της τριβής) καθώς και το μοντέλο Cam-Clay. Το μοντέλο του Coulomb στο οποίο βασίζεται ο νόμος Mohr-Coulomb, χρησιμοποιείται ευρύτατα καθώς έχει απλή μαθηματική διατύπωση και έχει φυσικό νόημα.



Σχήμα 8.1: Αστοχία δοκιμίου αργίλου από θλίψη (α) και (β). Η αστοχία εκδηλώνεται σε ένα επίπεδο που σχηματίζει γωνία με την διεύθυνση φόρτισης $\sim 45^\circ$.

Ο νόμος του Mohr, περιγράφει πως η αστοχία θα επέλθει όταν η διατμητική τάση (τ) λάβει κάποια κρίσιμη τιμή η οποία εξαρτάται από την ορθή τάση (σ). Όταν δε η αστοχία γίνεται σε επίπεδο¹, τότε για τις διατμητικές (τ_n), ορθές τάσεις (σ_n) επί του επιπέδου θα ισχύει:

$$\tau_n = f(\sigma_n) \quad 8.1$$

Η παραπάνω συνάρτηση αν απεικονιστεί στο επίπεδο (σ , τ) ως καμπύλη, αποτελεί μία «περιβάλλουσα αστοχίας», το όριο δηλαδή για τις εντατικές καταστάσεις που δεν προκαλούν αστοχία. Υπέρβαση της περιβάλλουσας δεν επιτρέπεται, επιπλέον δε, τιμές της έντασης (σ , τ) επί της περιβάλλουσας περιγράφουν κατάσταση αστοχίας. Όταν εφαρμοστεί στο νόμο του Mohr τον νόμο τριβής του Coulomb, καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση, τον νόμο Mohr-Coulomb:

¹ Στα προβλήματα της εδαφομηχανικής, με θεώρηση ομοιογένειας, συνέχειας και ισοτροπίας, η διεύθυνση του επιπέδου αστοχίας είναι εξαρτημένο από την εντατική κατάσταση (διεύθυνση κύριων τάσεων) καθώς και από την γωνία τριβής ϕ . Σε προβλήματα βραχομηχανικής, συνήθως είναι καθοριστική η διεύθυνση των υπαρχόντων ρωγμών – ασυνεχειών.

$$\tau_n = \sigma_n \tan\varphi + c \quad 8.2$$

Όπου φ , c οι παράμετροι αντοχής: Γωνία εσωτερικής (εφόσον μιλάμε για έδαφος) τριβής (φ) εκφρασμένη σε μοίρες και Συνοχή (c) με μονάδες τάσης (συνήθως $\text{kPa} = \text{kN/m}^2$ για την εδαφομηχανική).

Τα χονδρόκοκα υλικά (άμμος - χαλίκια) στερούνται συνοχής, ωστόσο παρουσιάζουν τιμή στην γωνία τριβής που υπερβαίνει τις 30° (με τιμές που φθάνουν και τις 40°). Λεπτόκοκα υλικά όπως η ιλύς και η άργιλος παρουσιάζουν συνοχή που κυμαίνεται από 15 kPa , συνήθως δε $50-100 \text{ kPa}$ και σε εξαιρετικές περιπτώσεις μέχρι $200-500 \text{ kPa}$ (ημίβραχος). Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους αντοχής φ , c , προχωράμε στον σχεδιασμό των τεχνικών έργων.

Όταν το έδαφος είναι κορεσμένο, λαμβάνεται υπόψη η πίεση του νερού στους πόρους του εδάφους (u) μέσω των ενεργών τάσεων: $\sigma' = \sigma - u$, $\tau' = \tau$. Θα χρησιμοποιούνται σε αυτήν την περίπτωση οι παράμετροι αντοχής φ' και c' . Εν γένει η παρουσία της πίεσης πόρων, μειώνει την ενεργή τάση (σ') με αποτέλεσμα την συνολική μείωση της αντοχής.

8.1 Εργαστηριακές μέθοδοι προσδιορισμού της αντοχής

Οι εκτιμήσεις της αντοχής γίνονται με τις παρακάτω μεθοδολογίες:

- Εμπειρικές εκτιμήσεις, συνήθως σε συνδυασμό με μία μέθοδο ταξινόμησης και παρατήρηση ποιοτικών χαρακτηριστικών. Η εμπειρία δίνει μία τάξη μεγέθους στην αντοχή των εδαφικών σχηματισμών.
- Επιτόπου δοκιμές, όπως SPT (πρότυπη δοκιμή διείδυσης) CPT, φορητό vane test, κλπ
- Εργαστηριακές δοκιμές. Απευθείας διάτμηση, μονοαξονική θλίψη, τριαξονική δοκιμή, CBR, κ.α.

Η δοκιμή απευθείας διάτμησης είναι η πλέον απλή σε σύλληψη δοκιμή για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής. Βασίζεται στην απευθείας διάτμηση ενός εδαφικού όγκου σε συνδυασμό με ορθή τάση. Διαφορετικοί συνδυασμοί ορθής, διατμητικής τάσης που οδηγούν σε αστοχία μπορούν να δώσουν μία προσέγγιση των παραμέτρων φ , c . Η δοκιμή απευθείας διάτμησης δεν έχει επικρατήσει διότι έχει τις ακόλουθες αδυναμίες: Δυσκολία μόρφωσης εδαφικού δείγματος, δυσκολία ελέγχου της πίεσης πόρων (η δοκιμή θα γίνει είτε σε πλήρως στραγγισμένες συνθήκες, είτε σε αστράγγιστες) και τέλος αδυναμία αναπαραγωγής του ιδανικού μοντέλου ορθής τάσης - διάτμησης (κατά την δοκιμή παρουσιάζονται και άλλες τάσεις που αλλοιώνουν τα αποτελέσματα).

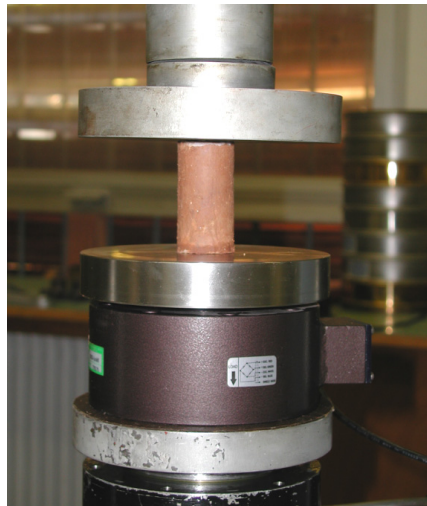
Η μονοαξονική (ανεμπόδιστη) θλίψη χρησιμοποιείται ευρύτατα καθώς είναι η πλέον απλούστερη δοκιμή. Το εδαφικό δοκίμιο (το οποίο έχει μορφωθεί σε κύλινδρο διαμέτρου $35-50 \text{ mm}$) υποβάλλεται σε ταχεία θλίψη μέχρι την αστοχία (ολοκλήρωση πειράματος σε $2-5$ λεπτά, ώστε να αποτραπεί η στράγγιση). Η δοκιμή παρέχει την αστράγγιστη τιμή c (c_u), καθώς και μία πρώτη εκτίμηση για την γωνία τριβής (φ) μέσω της μέτρησης της κλίσης του επιπέδου αστοχίας. Αν έχουν επιτευχθεί αστράγγιστες συνθήκες πρέπει το $\varphi \sim 0^\circ$.

Η τριαξονική θλίψη, είναι η πλέον διαδεδομένη δοκιμή για τον προσδιορισμό της αντοχής των εδαφικών υλικών. Η δοκιμή αυτή παρέχει τιμές φ , c ή φ' , c' . Το πείραμα μπορεί να γίνει είτε σε αστράγγιστες συνθήκες (με μέτρηση ή όχι της πίεσης των πόρων και στερεοποίηση), είτε σε συνθήκες πλήρους στράγγισης (με στερεοποίηση). Με μία σειρά πειραμάτων (3 τουλάχιστον, ή π.χ. 2 και μία μονοαξονική θλίψη), όπου κάθε πείραμα μπορεί να αναπαρασταθεί με κύκλο Mohr, γίνεται η εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής. Τα πειράματα ανάλογα με την κατηγορία (αστράγγιστα ή στραγγιζόμενα), κρατάνε από λίγες ώρες έως ημέρες.

8.1.1 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

Η δοκιμή αυτή γίνεται μόνο σε συνεκτικά εδάφη, που μπορούν να φέρουν μονοαξονικό φορτίο. Τέτοια εδάφη είναι οι στιφρές άργιλοι κ.α. όπου τα μορφωμένα δείγματα μπορούν να διατηρήσουν το σχήμα τους χωρίς την βοήθεια παράπλευρης πίεσης - εγκιβωτισμού.

Το δείγμα τοποθετείται σε μία πρέσα δοκιμών θλίψης. Η φόρτιση γίνεται με ταχύτητα τάξης μεγέθους 1-5 mm/λεπτό. Λόγω της σχετικής υψηλής παραμορφωσιμότητας των δοκιμών έναντι των δύσκαμπτων πλακών της συσκευής (από χάλυβα), το πείραμα γίνεται ουσιαστικά με έλεγχο των παραμορφώσεων (strain controlled).



Σχήμα 8.2: Εδαφικό δοκίμιο σε ανεμπόδιστη θλίψη. (φωτ. Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής)

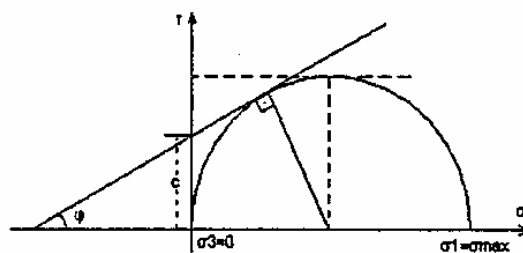
Το φορτίο αυξάνει σταδιακά μέχρι την αστοχία όπου λαμβάνει την μέγιστη τιμή P_{lim} . Έχοντας προμετρήσει την διάμετρο - διατομή του δείγματος, υπολογίζουμε την τάση αστοχίας:

$$\sigma_{max} = P_{lim} / A \quad 8.3$$

Λόγω της μοναξονικής φόρτισης, η τάση αστοχίας είναι μία κύρια τάση (σ_1). Μία πρώτη εκτίμηση της συνοχής του εδάφους είναι:

$$c_1 = \sigma_{max} / 2 \quad 8.4$$

Η παραπάνω τιμή δεν συμβαδίζει με την πραγματική τιμή της συνοχής, ειδικά όταν η γωνία τριβής διαφέρει από το 0. Η παραπάνω τιμή διορθώνεται χρησιμοποιώντας την εκτίμηση της γωνίας τριβής που προκύπτει από την μέτρηση της κλίσης του επιπέδου αστοχίας. Το επίπεδο αστοχίας παρουσιάζει γωνία $45^\circ + \varphi/2$ ως προς την διεύθυνση φόρτισης (σ_1). Έτσι μετρώντας την κλίση, μπορούμε να έχουμε μία πρώτη εκτίμηση για την γωνία τριβής.



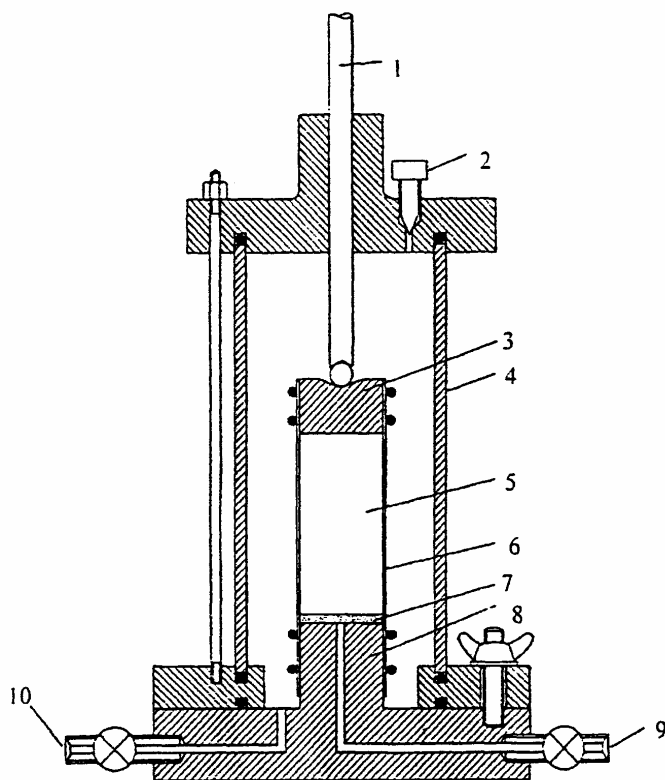
Σχήμα 8.3: Γωνία τριβής, συνοχή σχηματίζουν μία περιβάλλουσα αστοχίας η οποία περιορίζει τον κύκλο Mohr που αντιπροσωπεύει την μονοαξονική αντοχή.

Η ανηγμένη τιμή της συνοχής, έχοντας εκτιμήσει την γωνία τριβής είναι:

$$c = \frac{\sigma_{\max}}{2} \left(\frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} \right) \quad 8.5$$

8.1.2 Δοκιμή τριαξονικής θλίψης

Η δοκιμή τριαξονικής θλίψης είναι ουσιαστικά μία εξέλιξη της μονοαξονικής δοκιμής, όπου είναι δυνατός ο έλεγχος της παράπλευρης τάσης - πίεσης ($\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$). Είναι έτσι δυνατή η διενέργεια πολλών δοκιμών με διαφορετικά σεί (σ_1, σ_3) που οδηγούν στην αστοχία, σχεδιασμός των αντίστοιχων κύκλων Mohr, της περιβάλλουσας αστοχίας και τέλος της εκτίμησης των παραμέτρων ϕ, c . Επιπλέον είναι δυνατός ο έλεγχος της πίεσης - υπερπίεσης πόρων και των συνθηκών στράγγισης. Στην συνέχεια παρουσιάζεται μία τυπική διάταξη τριαξονικής δοκιμής.

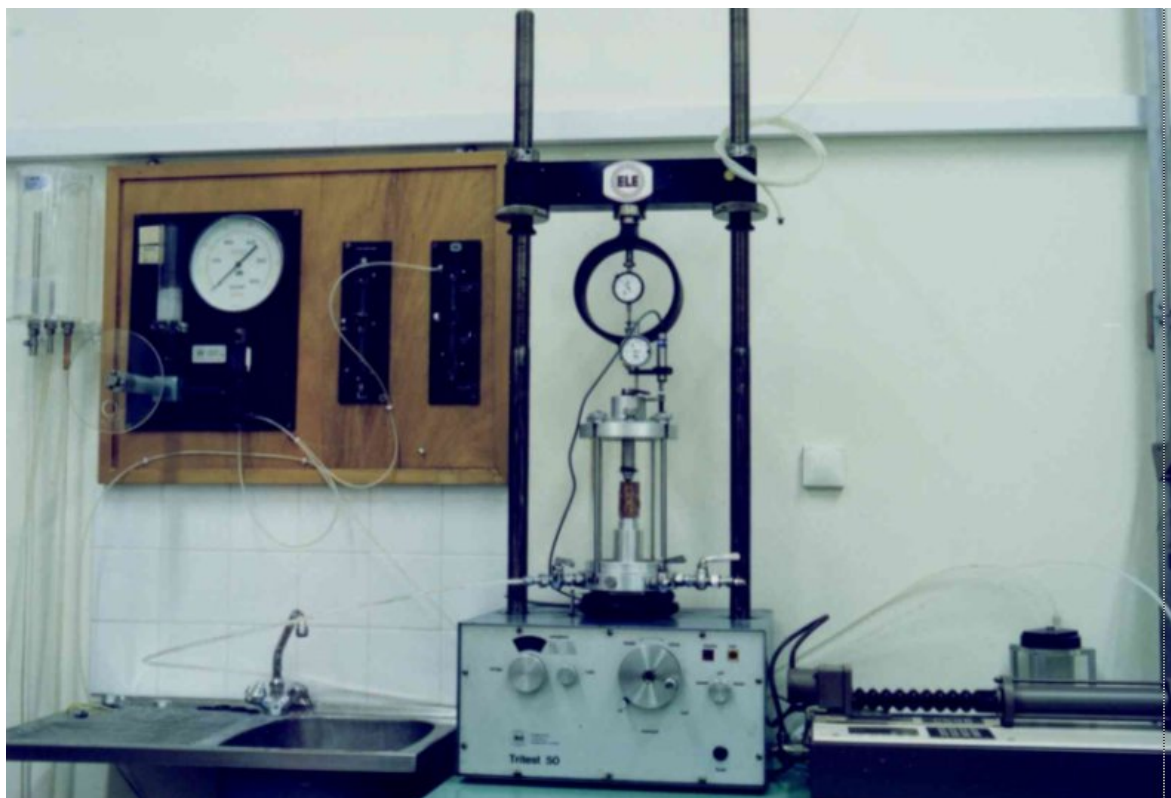


Σχήμα 8.4: Διάταξη τριαξονικής δοκιμής – κυψέλη, σχεδιάγραμμα (α) (Craig, Soil Mechanics), φωτογραφία (β) (φωτ. Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής).

Τα βασικά τμήματα της διάταξης είναι η κυψέλη της δοκιμής (που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του σχήματος) καθώς και της διάταξης φόρτισης. Τα μέρη της παραπάνω διάταξης: Κυψέλη (4), ένας αεροστεγής κύλινδρος όπου τοποθετείται το δείγμα (5). Η κυψέλη είναι γεμάτη νερό το οποίο ελέγχει την παράπλευρη πίεση. Το δείγμα υποβάλλεται σε θλίψη μέσω του εμβόλου (1). Στο έμβολο (1) συνδέεται μετρητής φορτίου. Το δείγμα τοποθετείται σε αδιαπέρατη μεμβράνη (6) ώστε να εξασφαλιστεί η στεγανότητα του δείγματος. Το δείγμα υποβάλλεται σε θλίψη μέσω των μεταλλικών πλακών (3, 8) οι οποίες έχουν οπές που επιτρέπουν την στράγγιση, την επιβολή υπερπίεσης πόρων ή την μέτρηση της πίεσης πόρων. Μεταξύ των πλακών και του δείγματος τοποθετείται διαπερατός πωρόλιθος (7).

Η βαλβίδα (2), επιτρέπει την απαέρωση της κυψέλης. Η βαλβίδα (10) επιτρέπει την παροχή νερού και την επιβολή της παράπλευρης πίεσης. Η βαλβίδα (9) επικοινωνεί με το σύστημα επιβολής υπερπίεσης πόρων και με τον μετρητή πίεσης πόρων. Τοποθετούνται τα κατάλληλα o-rings (φλάντζες - λάστιχα) που εξασφαλίζουν την στεγανοποίηση της κυψέλης, του δείγματος κλπ.

Στην κυψέλη συνδέονται μηκυνσιόμετρα, μετρητές φορτίου. Η κλασσική μέτρηση φορτίου είναι ένα παραμορφώσιμο δακτυλίδι με μετρητή παραμόρφωσης, ο οποίος μπορεί να είναι αναλογικός ή ηλεκτρονικός. Πίνακες μετατροπής παραμόρφωσης σε φορτίο, μας παρέχουν την μέτρηση του φορτίου (βλ. στο τέλος του κεφαλαίου).



Σχήμα 8.5: Διάταξη τριαξονικής δοκιμής, κυψέλη + συστήματα πίεσης. (φωτ.: Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής)

8.1.3 Σύντομη περιγραφή πειράματος τριαξονικής δοκιμής

Το πείραμα είναι αρκετά σύνθετο, θα περιγραφούν τα βασικά στάδια μίας αστράγγιστης δοκιμής χωρίς μέτρηση της πίεσης πόρων:

- 1) Μορφώνεται το δείγμα σε κυλινδρικό δοκίμιο. Η πλέον συνηθισμένη διάμετρος είναι 35 mm. Η μόρφωση γίνεται προσεκτικά ώστε να μην διαταραχθεί το δείγμα.
- 2) Το δείγμα τοποθετείται μεταξύ πωρόλιθων, πλακών φόρτισης. Στεγανοποιούμε το δείγμα χρησιμοποιώντας ελαστική μεμβράνη και o-rings.
- 3) Κλείνουμε ερμητικά την κυψέλη με το σύστημα περισφίξης. Τοποθετούμε την κυψέλη μεταξύ των εμβόλων φόρτισης.
- 4) Γεμίζουμε την κυψέλη νερό, απαερώνουμε και συνδέουμε την διάταξη επιβολής υδροστατικής πίεσης (στήλες υδραργύρου ή κομπρεσέρ ή έμβολα με σερβομηχανισμό). Ανεβάζουμε την υδατική πίεση στο επιθυμητό σημείο. Το δείγμα είναι σε ομοιόμορφη - υδροστατική πίεση $\sigma_r = \sigma_{1,2,3}$. Μηδενίζουμε την μέτρηση κατακόρυφου φορτίου.

- 5) Επιβάλλουμε αξονικό φορτίο στο δείγμα (P). Μετράμε το φορτίο P και την αξονική παραμόρφωση Δl .
- 6) Το δοκίμιο αστοχία όταν με την αύξηση της παραμόρφωσης, το φορτίο μένει σταθερό ή μειώνεται. Καταγράφουμε το οριακό φορτίο για να κάνουμε τους υπολογισμούς αντοχής.



Σχήμα 8.6: Εξοπλισμός για την τριαξονική δοκιμή: Πωρόλιθοι, διάτρητες πλάκες φόρτισης, υδατοστεγής μεμβράνη, λαστιχάκια στεγανοποίησης. (φωτ.: Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής)

8.2 Υπολογισμοί

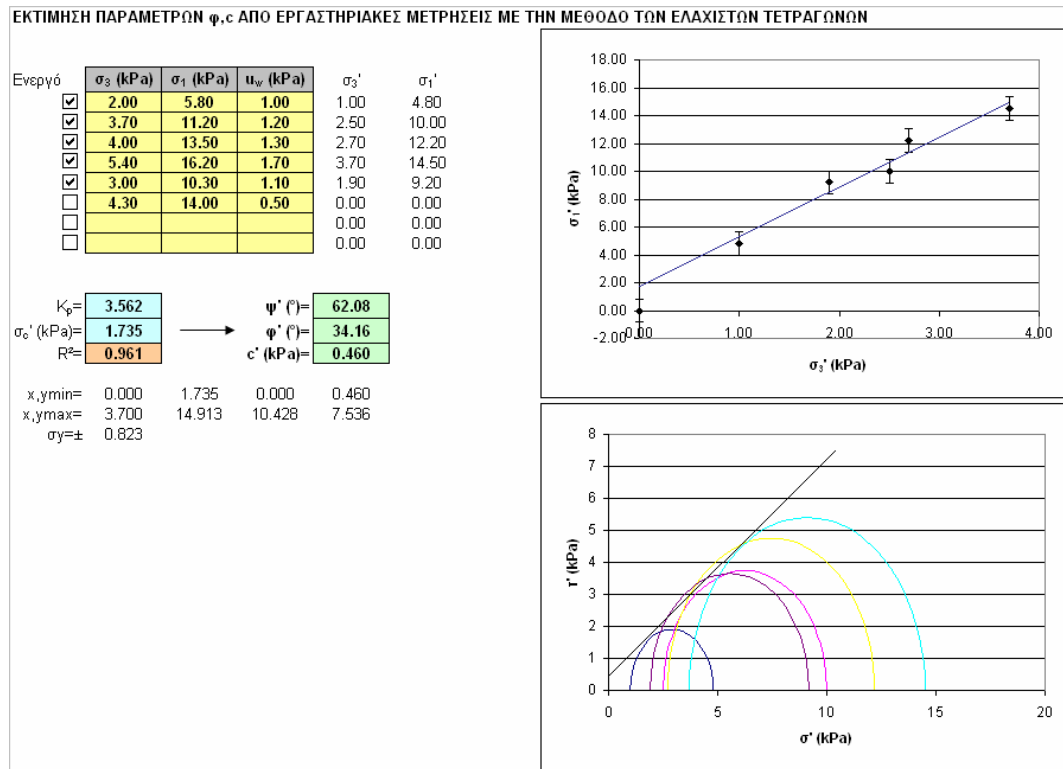
Η παράπλευρη πίεση σ_r είναι ίση με την κύρια τάση σ_3 (και σ_2). Πριν την επιβολή του κατακόρυφου φορτίου η κύρια τάση σ_1 είναι ίση επίσης με την παράπλευρη πίεση. Το κατακόρυφο φορτίο επιβάλλει μία αύξηση της σ_1 κατά ένα μέγεθος q που ονομάζεται «απόκλιση». Είναι δε:

$$q = P/A \quad 8.6$$

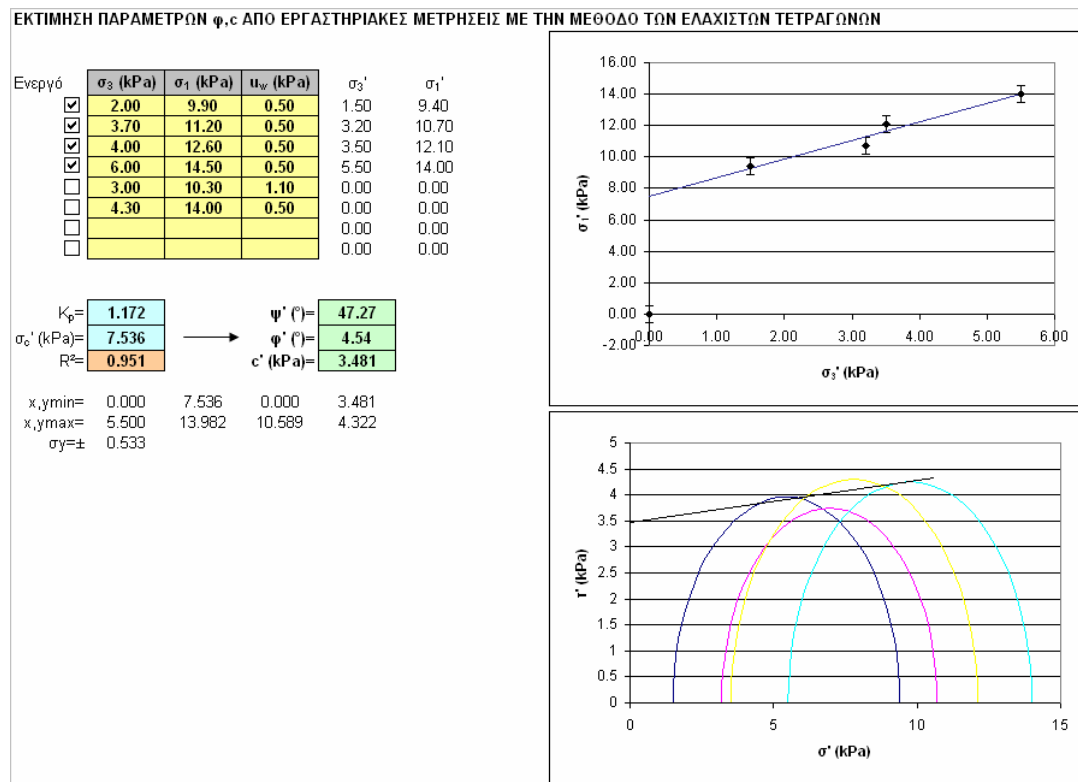
Η κύρια τάση σ_1 κατά την αστοχία είναι:

$$\sigma_1 = \sigma_r + q \quad 8.7$$

Με το σετ τιμών (σ_1, σ_3) σχεδιάζεται ένας κύκλος Mohr αστοχίας. Η εκτίμηση των παραμέτρων ϕ , c γίνεται από μία σειρά πειραμάτων που αντιπροσωπεύονται από κύκλους Mohr, οπότε είναι δυνατή η σχεδίαση της περιβάλλουσας αστοχίας. Για τον σκοπό αυτό μπορεί να χρησιμοποιήσετε το φύλλο υπολογισμών (Excel) που παρέχεται από την ιστοσελίδα του εργαστηρίου `MCPParameters.xls`. Στην συνέχεια παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα υπολογισμών:



Σχήμα 8.7: Εκτίμηση των παραμέτρων ϕ, c με χρήση του φύλλου MCPParameters.xls. Η εκτίμηση γίνεται με την Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων. Παρουσιάζεται η συσχέτιση των δοκιμών (R^2) καθώς και το σφάλμα στην μέτρηση της τάσης.



Σχήμα 8.8: Μία ακόμα εκτίμηση ϕ, c για κάποιο συνεκτικό έδαφος με μικρή γωνία τριβής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1: Μετατροπή φορτίου από τις ενδείξεις του δακτυλίου.

Φορτίο (kN)	Ένδειξη δακτυλίου (υποδιαίρέσεις)
0	0
5	115.0
10	229.7
15	345.2
20	461.4
25	576.8
30	695.9
35	814.0
40	932.0
45	1051.4
50	1171.2