



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εργαστηριακές Δοκιμές Εδαφομηχανικής – Βραχομηχανικής σε
Δείγματα από Πρανή, από τον Υπό Κατασκευή Αυτοκινητόδρομο της
Εγνατίας Οδού, στην Περιοχή της Ασπροβάλλτας του Νομού
Θεσσαλονίκης.**

Θεοφάνης Κ. Ζάχος
A.E.M.: 3855

ΥΠΕΥΘΥΝΟΙ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: Σούλιος Γεώργιος, Χρηστάρας Βασίλειος
ΑΡΜΟΔΙΟΣ ΠΑΡΑΚΟΥΛΟΥΘΗΣΗΣ: υπ. Διδ. Χατζηγώγος Νικόλαος

Θεσσαλονίκη, Μάιος 2008



Η ανάγκη για διαρκή βελτίωση της ασφάλειας των τεχνικών κατασκευών, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την καταλληλότητα των εδαφών, καθώς και από τις ιδιότητές τους, από τις οποίες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η συμπεριφορά των δομικών έργων. Είναι λοιπόν ξεκάθαρο, ότι παράλληλα με την ανάγκη για την μελέτη της συμπεριφοράς των κατασκευών και των ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής, είναι απαραίτητη πλέον η συστηματική μελέτη της συμπεριφοράς των εδαφών σε διάφορες συνθήκες.

Το έδαφος, είναι ένα πολυσύνθετο και πολύπλοκο υλικό, το οποίο δύσκολα μπορεί να μελετηθεί λόγω της διαφορετικής του σύστασης, των διαφορετικών ορυκτών και πετρωμάτων από τα οποία προήλθε, του διαφορετικού τρόπου με τον οποίο σχηματίστηκε, των οργανικών και ανόργανων συστατικών που περιέχει ή διαφόρων άλλων παραγόντων που ενδέχεται να υπάρχουν, οι ιδιότητες των εδαφών ποικίλουν. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι είναι σε θέση, να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση ενός εδάφους και τελικά την κατάταξή του βάσει συγκεκριμένων προδιαγραφών. Η γρήγορη ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και άλλων ηλεκτρονικών αυτοματοποιημένων συστημάτων, οδήγησε στην εξέλιξη της μελέτης των ιδιοτήτων των εδαφών, αλλά και στην εξαγωγή ασφαλέστερων αποτελεσμάτων.

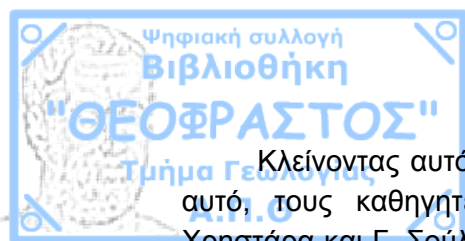
Η παρούσα εργασία, βασίζεται στην μελέτη με τίτλο «*The mechanical behavior of gneissous rocks and selection of strength parameters for stability analysis of excavated slopes*», των Ν. Χατζηγώγου – Θ. Μακεδώνα και Σ. Τσότσου.

Η ιδιαιτερότητα αυτής της διπλωματικής, ήταν ότι τα δείγματα στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι εργαστηριακές δοκιμές, δεν ήταν εδαφικά, αλλά προήλθαν από την έντονη διάβρωση ενός γνευσιακού πετρώματος. Έτσι, εκτός από το τελείως αποσαθρωμένο υλικό που έγινε τελικά εδαφικό, υπήρχαν και κάποια πιο διατηρημένα κομμάτια, αποσαθρωμένα σε μικρότερο βαθμό, που διατηρούσαν τη συνοχή τους (σε ορισμένο βαθμό) και τη σχιστότητα τους.

Αυτά τα πιο διατηρημένα κομμάτια γνευσίου, δε μπορούσαν να αντιμετωπισθούν με τη θεωρία και τις δοκιμές της εδαφομηχανικής. Το υλικό δηλαδή, βρισκόταν σε οριακή κατάσταση μεταξύ εδάφους και πετρώματος και συνεπώς σε οριακή κατάσταση μεταξύ εδαφομηχανικής και βραχομηχανικής αντιμετώπισης.

Το δείγμα που μελετήθηκε, προήλθε από το υπό κατασκευή τμήμα της Εγνατίας Οδού στην περιοχή της Ασπροβάλτας, του Νομού Θεσσαλονίκης.

Η παρούσα εργασία, έγινε με σκοπό να μελετηθούν, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, μέρος των εργαστηριακών δοκιμών της εδαφομηχανικής και της βραχομηχανικής, που πραγματοποιούνται πριν από την κατασκευή κάθε τεχνικού έργου. Απετέλεσε επίσης μία πολύ καλή ευκαιρία, για να προσεγγίσω εκτενέστερα το αντικείμενο των εργαστηριακών δοκιμών αλλά και να κατανοήσω ορισμένες βασικές ορολογίες και ιδιότητες που θα σταθούν βασικοί αρωγοί στην περαιτέρω επαγγελματική μου σταδιοδρομία ως γεωλόγος.



Κλείνοντας αυτόν το σύντομο πρόλογο, θα ήθελα να ευχαριστήσω στο σημείο αυτό, τους καθηγητές του τομέα Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας Β. Χρηστάρα και Γ. Σούλιο, καθώς και όλη τη διδακτική ομάδα του τομέα και ιδιαίτερως το Ν. Χατζηγώγο, (υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.), για την καθοδήγηση και τη συνεργασία, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Θεοφάνης Κ. Ζάχος
Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2008

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

11

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΔΑΦΩΝ

1.1 Προέλευση και φύση του εδάφους	19
1.1.1 Σχέσεις μεταξύ των φάσεων	20
1.2 Φυσικά χαρακτηριστικά μη-συνεκτικών εδαφών	23
1.2.1 Σχετική πυκνότητα	24
1.3 Ιδιότητες εδαφών	25
1.4 Κατάταξη εδαφών	26

2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

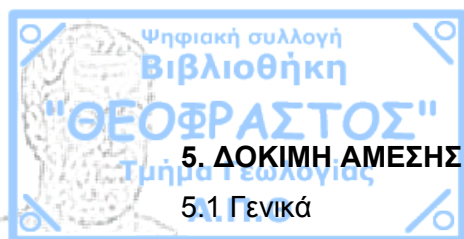
2.1 Γενικά	27
2.2 Πειραματικός προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε νερό εδαφικού δείγματος	27
2.2.1 Εκτέλεση δοκιμής και υπολογισμοί	28
2.3 Μέθοδος προσδιορισμού φαινομένου βάρους	29
2.4 Προσδιορισμός ειδικού βάρους	29
2.5 Προσδιορισμός πορώδους εδαφικού δείγματος με τη χρήση της συσκευής κενού	29
2.6 Προσδιορισμός δείκτη πόρων, ξηρής πυκνότητας, βαθμού κορεσμού και σχετικής πυκνότητας	30

3. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΚΟΣΚΙΝΑ

3.1 Γενικά	32
3.2 Εκτέλεση δοκιμής	34
3.2.1 Υπολογισμοί	40

4. ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΕΔΑΦΩΝ (ΔΟΚΙΜΗ PROCTOR)

4.1 Γενικά	42
4.2 Πρότυπη μέθοδος Proctor	44
4.3 Εκτέλεση δοκιμής	45



5. ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

5.1 Γενικά	47
5.2 Εκτέλεση δοκιμής	47

6. ΔΟΚΙΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (POINT LOAD TEST)

6.1 Γενικά	50
6.1.1 Διαμετρική δοκιμή	51
6.1.2 Αξονική δοκιμή	51
6.1.3 Δοκιμή ορθογωνικού και ακανόνιστου δοκιμίου	51
6.2 Εκτέλεση δοκιμής και υπολογισμοί	55

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	59
2. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΚΟΣΚΙΝΑ	60
3. ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PROCTOR	62
4. ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	64
5. ΔΟΚΙΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (POINT LOAD TEST)	79

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

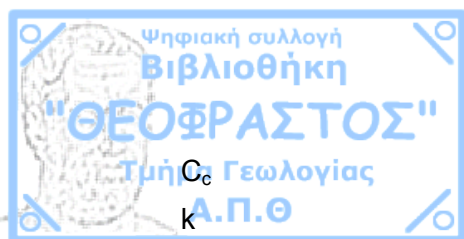
80

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

84

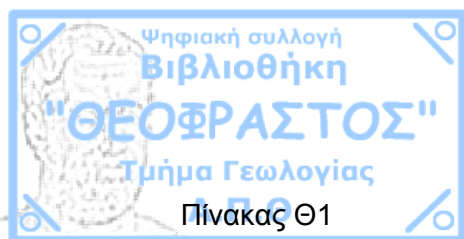
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

W	:	Βάρος
W_a	:	Βάρος αέρα των πόρων
W_w	:	Βάρος νερού των πόρων
W_s	:	Βάρος στερεών κόκκων
kg	:	Βάρος σε κιλά
V	:	Όγκος
V_a	:	Όγκος των πόρων που πληρούται από αέρα
V_w	:	Όγκος των πόρων που πληρούται από νερό
V_v	:	Ολικός όγκος πόρων
V_s	:	Όγκος στερεών κόκκων
n	:	Πορώδες
e	:	Δείκτης πόρων
e_{max}	:	Μέγιστη τιμή του δείκτη πόρων
e_{min}	:	Ελάχιστη τιμή του δείκτη πόρων
S	:	Βαθμός κορεσμού
m	:	Ποσοστό υγρασίας
ρ	:	Πυκνότητα εδαφικού υλικού
ρ_s	:	Πυκνότητα στερεών κόκκων
ρ_w	:	Πυκνότητα νερού
ρ_d	:	Ξηρή πυκνότητα
ρ_{sat}	:	Πυκνότητα κορεσμένου εδαφικού υλικού
D_r	:	Σχετική πυκνότητα
γ	:	Φαινόμενο βάρος
γ_s	:	Ειδικό βάρος
γ_d	:	Ξηρό φαινόμενο βάρος
S_w	:	Βαθμός κορεσμού
C°	:	Βαθμοί Κελσίου
sec	:	Χρόνος σε δευτερόλεπτα
m	:	Μήκος σε μέτρα
cm	:	Μήκος σε εκατοστά
mm	:	Μήκος σε χιλιοστά
in	:	Μήκος σε ίντσες ($1\text{ in} = 2,54\text{ cm}$)
d_{60}, d_{10}	:	Άνοιγμα κοσκίνου δια μέσου του οποίου διέρχεται το 60% και το 10% αντίστοιχα
d_{30}	:	Άνοιγμα κοσκίνου δια μέσου του οποίου διέρχεται το 30%
U	:	Συντελεστής ομοιομορφίας του <i>Hazen</i>



C_e	:	Βαθμός διαβάθμισης
k	:	Συντελεστής διαπερατότητας
E_s	:	Μέτρο ακαμψίας
φ	:	Γωνία εσωτερικής τριβής
c	:	Συνοχή
I_s	:	Μη διορθωμένος δείκτης αντοχής
$I_{s(50)}$	:	Διορθωμένος δείκτης αντοχής
F	:	Συντελεστής διόρθωσης μεγέθους
$I_{a(50)}$	:	Δείκτης ανισοτροπίας της αντοχής
c	:	Σταθερά

Χάρτης 1	:	Γεωτεκτονικές ζώνες της Αν. Μακεδονίας – Θράκης
Χάρτης 2	:	Γεωτεκτονικές ζώνες και γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης
Χάρτης 3	:	Τμήμα της Εγνατίας Οδού και η περιοχή από την οποία προήλθαν τα δείγματα
Εικόνα 1	:	Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής μελέτης
Εικόνα 2	:	Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής μελέτης
Εικόνα 3	:	Ηλεκτρικός φούρνος εργαστηρίου
Εικόνα 4	:	Ηλεκτρικός φούρνος εργαστηρίου
Εικόνα 5	:	Ηλεκτρονικός ζυγός ακριβείας
Εικόνα 6	:	Σειρά κοσκίνων
Εικόνα 7	:	Μήτρα, κόπανος και δακτύλιος
Εικόνα 8	:	Μήτρα, κόπανος και δακτύλιος
Εικόνα 9	:	Κιβώτιο συσκευής άμεσης διάτμησης
Εικόνα 10	:	Κιβώτιο συσκευής άμεσης διάτμησης
Εικόνα 11	:	Συσκευή άμεσης διάτμησης
Εικόνα 12	:	Συσκευή άμεσης διάτμησης
Εικόνα 13	:	Επιβολή φορτίου
Εικόνα 14	:	Συσκευή σημειακής φόρτισης (<i>Point load</i>)
Εικόνα 15	:	Δοκίμιο 1 ^ο – δοκιμή 1 ^η (<i>Point load</i>)
Εικόνα 16	:	Δοκίμιο 1 ^ο – δοκιμή 1 ^η (<i>Point load</i>)
Εικόνα 17	:	Δοκίμιο 1 ^ο – δοκιμή 1 ^η (<i>Point load</i>)
Εικόνα 18	:	Δοκίμιο 2 ^ο – δοκιμή 2 ^η (<i>Point load</i>)
Εικόνα 19	:	Δοκίμιο 2 ^ο – δοκιμή 2 ^η (<i>Point load</i>)
Εικόνα 20	:	Δοκίμιο 2 ^ο – δοκιμή 2 ^η (<i>Point load</i>)
Εικόνα 21	:	Δοκίμιο 3 ^ο – δοκιμή 3 ^η (<i>Point load</i>)
Εικόνα 22	:	Δοκίμιο 3 ^ο – δοκιμή 3 ^η (<i>Point load</i>)
Εικόνα 23	:	Δοκίμιο 3 ^ο – δοκιμή 3 ^η (<i>Point load</i>)
Εικόνα 24	:	Δείγματα στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές <i>Point load</i>
Σχήμα 1	:	Δομή, διάταξη και φάσεις του εδάφους
Σχήμα 2	:	Τυπικές μορφές αστοχίας κατά τη δοκιμή <i>Point Load</i>
Διάγραμμα Θ1	:	Διάγραμμα κοκκομετρικής καμπύλης
Διάγραμμα Θ2	:	Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών
Διάγραμμα Θ3	:	Διάγραμμα $\gamma_{dmax} - m_{opt}$
Διάγραμμα Θ4	:	Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων <i>Point Load</i>
Διάγραμμα Θ5	:	Διάγραμμα γραφικού υπολογισμού F

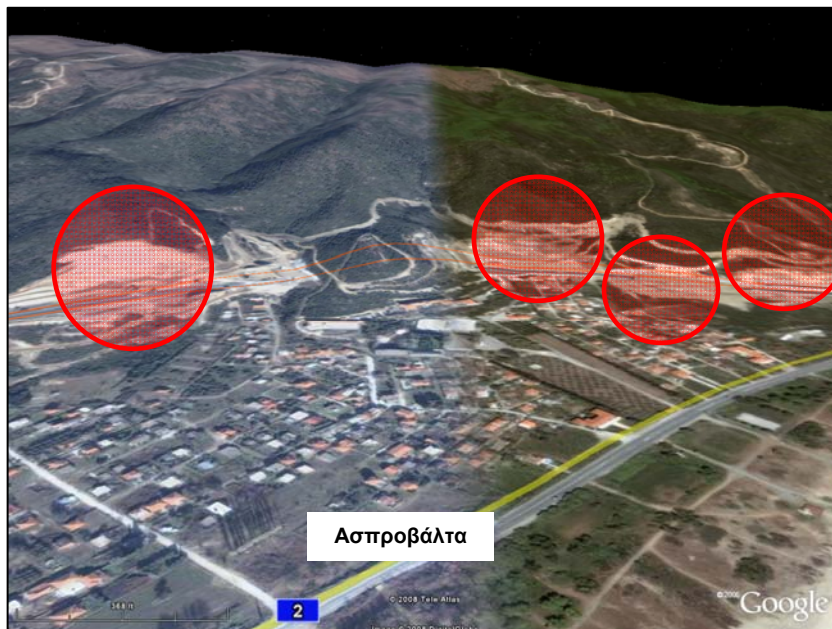


Πίνακας Θ1	:	Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των τριών ενοτήτων
Πίνακας Θ2	:	Κατάταξη αμμωδών εδαφών με βάση τη σχετική πυκνότητα
Πίνακας Θ3	:	Κατηγορίες εδαφών
Πίνακας Θ4	:	Τυπολόγιο φυσικών εδαφικών μεγεθών
Πίνακας Θ5	:	Ονομασία εδαφών με βάση το μέγεθος των κόκκων
Πίνακας Θ6	:	Αντιστοιχία αριθμού κοσκίνου–χιλιοστών
Πίνακας Θ7	:	Χαρακτηρισμός υλικών με βάση το συντελεστή ομοιομορφίας

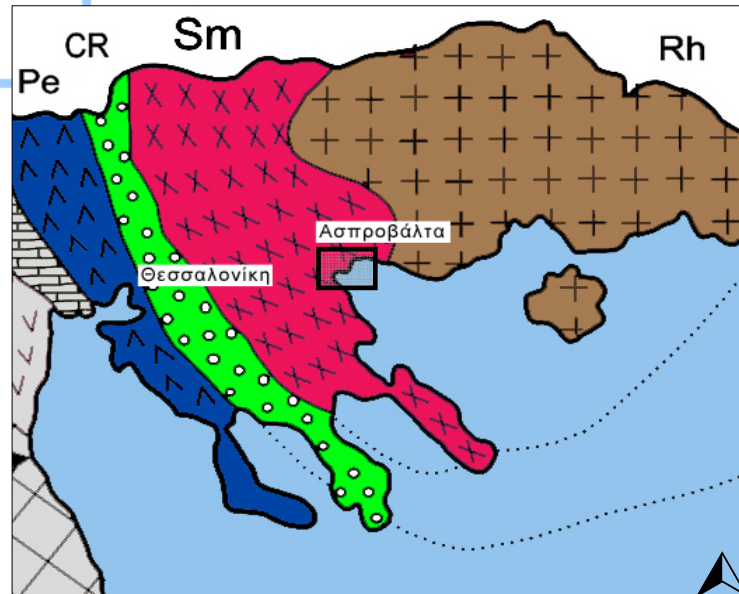
Η επιλογή των παραμέτρων αντοχής σε εκσκαπτόμενα πρανή, είναι πολύ σημαντική και καθορίζει το αποτέλεσμα της όποιας μεθοδολογίας έχει εφαρμοστεί για την ανάλυση της ευστάθειας των πρανών, αλλά και για το γενικότερο σχεδιασμό. Είναι γνωστό, πως σε τέτοιου είδους γεωτεχνικά προβλήματα, ο σχεδιασμός πρέπει να συμφωνεί με δύο πολύ σημαντικά στοιχεία. Πρώτον, τον τύπο της ενδεχόμενης αστοχίας, όσον αφορά το μηχανισμό αστοχίας, τις μηχανικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του βράχου ή του εδάφους στο οποίο πρόκειται να εφαρμοστεί, με σκοπό να επιτευχθεί η καλύτερη πιθανή ερμηνεία της συμπεριφοράς της βραχώδους μάζας. Η κλασσική προσέγγιση αυτού του προβλήματος είναι είτε η υλοποίηση μιας άμεσης ανάλυσης βράχου, με δομικά ελεγχόμενο μηχανισμό αστοχίας, ο οποίος αστοχεί βάσει του προσανατολισμού των ασυνεχειών του, καθώς επίσης και την αντοχή του υγιούς πετρώματος, είτε με ανάλυση μίας έμμεσης αστοχίας βασισμένη στα χαρακτηριστικά ενός πετρώματος χωρίς μεγάλη συνοχή ή ψαθυρού εδάφους. Ο δεύτερος τύπος της ανάλυσης, είναι αυτός που συνήθως πραγματοποιείται σε περιπτώσεις πολύ αποσάθρωμένων πετρωμάτων και εντόνως διερρηγμένων, τα οποία συμπεριφέρονται ως εδάφη. Τα αποτελέσματα όμως συνήθως δεν είναι επαρκή, είτε δεν απεικονίζουν την πραγματικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι παρόλο που αυτού του τύπου τα πετρώματα παρουσιάζουν μικρής κλίμακας δομικές ελεγχόμενες αστοχίες οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερης κλίμακας αστοχίες με το πέρασμα του χρόνου, εξομοιώνονται ως ισότροπα υλικά με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά με στόχο την παραγωγή μίας έμμεσης σειράς αστοχιών.

Αυτή η εργασία, έγινε με στόχο την διερεύνηση των μηχανισμών αστοχίας και των μηχανικών ιδιοτήτων τέτοιου είδους πετρωμάτων σε εκσκαπτόμενα πρανή, τα οποία παρουσιάζουν αστοχίες κατά μήκος του νέου αυτοκινητόδρομου της Εγνατίας Οδού, στην Ανατολική Μακεδονία. Αυτά τα πρανή, αποτελούνται από ισχυρά τεκτονισμένα γνευσιακά πετρώματα, σε διάφορους βαθμούς αποσάθρωσης και διάρρηξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η δομή τους είναι αρκετά πολύπλοκη και για το λόγο αυτό, αναφέρονται ως «χαοτικά» και η αποσάθρωση τους είναι αρκετά υψηλή με αποτέλεσμα να αναφέρονται ως «εδαφοποιημένα» υλικά.

Η περιοχή μελέτης, εκτείνεται κατά μήκος του νέου αυτοκινητόδρομου της Εγνατίας Οδού στην ανατολική Μακεδονία, κοντά στο χωριό Ασπροβάλτα του Ν. Θεσσαλονίκης (Εικόνες 1,2). Ο δρόμος, διέρχεται από την ενότητα των Κερδυλλίων της Σερβομακεδονικής μάζας, η οποία θεωρείται ηπειρωτική μάζα και αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα (Χάρτης 1,2). Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται τμήμα της Λαυρασίας, ενώ έχουν διατηρηθεί πολλοί γεωλογικοί σχηματισμοί ως αποδείξεις της προέλευσης της, λόγω των πολλαπλών τεκτονικών γεγονότων.



Εικόνες 1,2. Δορυφορικές φωτογραφίες της περιοχής της Ασπροβάλτας. Μέσα στους κύκλους υποδεικνύονται τα πρανή από τα οποία έγινε η δειγματοληψία. Με πορτοκαλί χρώμα σημειώνεται το υπό κατασκευή τμήμα της Εγνατίας Οδού.

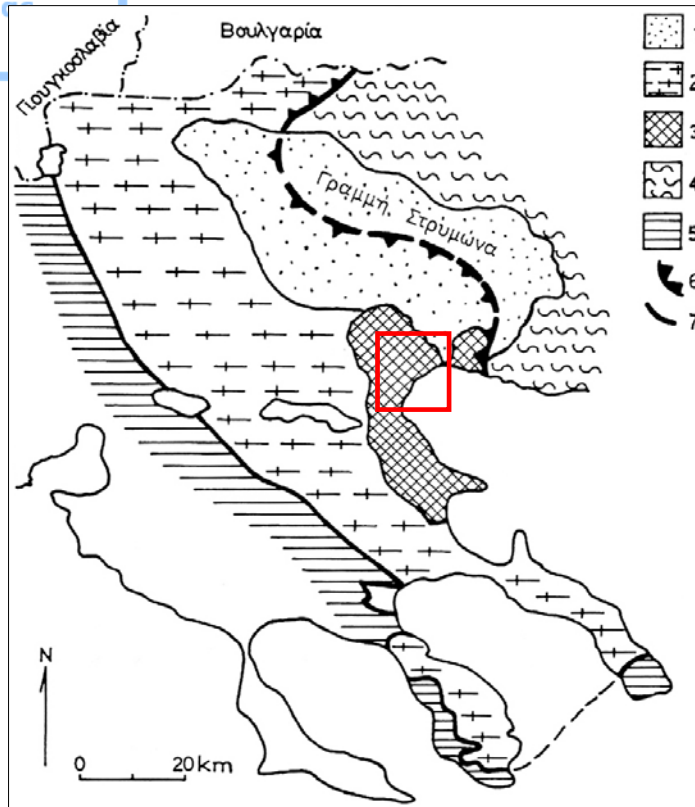


Χάρτης 1. Rh: Μάζα Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική Μάζα, CR: Περιροδοπική Μάζα, Pe: Ζώνη Παιονίας. Στο πλαίσιο υποδεικνύεται η ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Στην περιοχή μελέτης, τα πετρώματα της ζώνης εμφανίζονται κυρίως ως βιοτιτικοί γνεύσιοι, με παρεμβολές κεροστιλβικών γνεύσιων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, επιδοτικών – ακτινολιθικών σχιστολίθων και αμφιβολιτών. Επίσης, εμφανίζονται βιοτιτικοί γνεύσιοι με παρεμβολές κεροστιλβικών γνεύσιων, αμφιβολιτών και λεπτών ενστρώσεων μαρμάρων. Τέλος, εμφανίζονται λευκά μάρμαρα με παρεμβολές αμφιβολιτών και γνεύσιων.

Αυτά τα πετρώματα έχουν υποστεί δύο μεταμορφικές φάσεις (κορδιεριτική – αμφιβολιτική φάση στους $670 - 680^{\circ}\text{C}$ και σε συνθήκες πίεσης περίπου $3,7\text{ kbar}$) και τουλάχιστον τρία μεγάλα τεκτονικά γεγονότα κατά τη διάρκεια της γεωτεκτονικής εξέλιξης της Σερβομακεδονικής μάζας.

Είναι επομένως εντόνως καταπονημένα και διερρηγμένα καθώς και υδροθερμικά αλλοιωμένα λόγω της μαγματικής διεξόδου κατά μήκος των μεγάλων τεκτονικών διαρρήξεων. Τα πετρώματα της περιοχής όπου βρίσκονται τα πρανή, παρουσιάζουν μια μεγάλη διακύμανση στο βαθμό των διακλάσεων. Δεν υπάρχουν μεγάλης κλίμακας ρήγματα στην συγκεκριμένη περιοχή και οι κύριες ασυνέχειες είναι μικρότερης κλίμακας ρήγματα. Ο κύριος προσανατολισμός των ασυνεχειών, καθορίζεται από ένα πεδίο τιμών, που προσδιορίζεται έπειτα από στατιστική ανάλυση και εφαρμόζεται στην ανάλυση αστοχίας του κάθε πρανούς. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών του κάθε τμήματος, υπολογίζονται μέσω εργαστηριακών δοκιμών καθώς και από τη συσχέτιση των πληροφοριών που συλλέχθηκαν στην ύπαιθρο.



Χάρτης 2. Σερβομακεδονική ζώνη, 1: Μεταλπικά ιζήματα της κοιλάδας του Στρυμώνα, 2: Σειρά Βερτίσκου, 3: Σειρά Κερδυλλίων, 4: Μάζα Ροδόπης, 5: Περιροδοτική ζώνη, 6: Ανατολικό όριο Σερβομακεδονικής (Γραμμή Στρυμώνα), 7: Δυτικό όριο Σερβομακεδονικής. Στο πλαίσιο υποδεικνύεται η περιοχή από την οποία προήλθαν τα δείγματα.

Ο βαθμός αποσάθρωσης των βιοτιτικών γνευσίων της περιοχής μελέτης, είναι ένας κρίσιμος παράγοντας όσων αφορά τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας. Η διαδικασία αποσάθρωσης σε μεταμορφωμένα πετρώματα τέτοιου είδους, επηρεάζεται άμεσα από την τεκτονική εξέλιξη των πετρωμάτων. Τα πετρώματα της περιοχής παρουσιάζουν διαφορετικούς βαθμούς αποσάθρωσης σύμφωνα με συγκεκριμένες διευθύνσεις, οι οποίες ακολουθούν το κύριο σύστημα διάρρηξης. Αυτή η μηχανική αποσάθρωση, επιπλέον, επηρεάζεται από την υδροθερμική δραστηριότητα, η οποία συμβάλει στη χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, είναι ο σχηματισμός μίας τελείως ανισότροπης βραχομάζας, η οποία αποτελείται από ζώνες διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με το βαθμό αποσάθρωσης. Από τις μετρήσεις που έγιναν επιτόπου και από τη συλλογή πληροφοριών, διαπιστώθηκαν τρεις τέτοιες ζώνες στη βραχώδη μάζα, οι οποίες με τις ακόλουθες αναλύσεις θεωρήθηκαν ως ευδιάκριτα ομογενή τμήματα, τα οποία συνδυασμένα, συνθέτουν τη δομή όλων των πρηνών τα οποία μελετήθηκαν.

Το υλικό που χαρακτηρίζεται ως «Unit A», είναι ένα σχετικά «υγιές» πέτρωμα, λεπτόκοκκο, αποσαθρωμένο τοπικά και αντιπροσωπεύει το μικρότερο μέρος της βραχομάζας στην περιοχή. Το υλικό που χαρακτηρίζεται αντίστοιχα ως «Unit B» είναι ένα γνευσιακό πέτρωμα, υψηλά ως τελείως αποσαθρωμένο και το οποίο τοπικά περιέχει μέρη του «Unit A» και αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της βραχομάζας στην

περιοχή που εξετάζουμε. Το τρίτο τμήμα, που χαρακτηρίζεται ως «Unit C», είναι ένα τελείως αποσπασμένο – μυλωνικό γενευσιακό υλικό, το οποίο σχηματίστηκε κατά μήκος των μεγάλων επιφανειών ασυνέχειας και μοιάζει με έδαφος με υψηλή περιεχόμενη υγρασία και πλαστικότητα, αποτελεί το πιο αποσπασμένο και αδύναμο τμήμα της βραχώδους μάζας.

Όλα οι ενότητες, διατηρούν τη δομή του «υγιούς» πετρώματος σε διαφορετικούς βαθμούς, αλλά παρουσιάζουν εκτεταμένες ορυκτολογικές διαφορές, εξαιτίας της χημικής αποσάθρωσης της βραχομάζας. Η αρχική δομή, είναι ευδιάκριτη στις ενότητες A και B, αλλά όχι και στην C, η οποία ωστόσο, διατηρεί ελαφρώς τις διευθύνσεις της σχιστότητας και της ορυκτολογικής σύστασης.

Στις ενότητες «Unit A» και «Unit C», πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων τους, ενώ για την ενότητα «Unit B» έγινε εκτενέστερη μελέτη με τα χαρακτηριστικά που δίνονται στον παρακάτω πίνακα, (Χατζηγώγος-Μακεδών-Τσότσος).

Unit	Βαθμός αποσάθρωσης	Συνοχή c (t/m ²)	Γωνία εσωτερικής τριβής φ°
A	I-II	19,5-39	30-40
B	III-V	4,1 (peak) 2,7 (res.)	29,7 (peak) 32 (res.)
C	V-VI	1,83	23

Πίνακας Θ1. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των τριών ενοτήτων, που μελετήθηκαν στην περιοχή.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών που προηγήθηκαν, είτε in situ, είτε στο εργαστήριο, καταλαβαίνουμε ότι ο καθορισμός ενός μόνο «σετ» παραμέτρων, το οποίο μπορεί να περιγράψει επαρκώς την μηχανική συμπεριφορά ενός ανισότροπου βραχώδους υλικού, είναι ένα πολυσύνθετο θέμα.

Τέτοια υλικά, υψηλής αποσάθρωσης και εντόνως διερρηγμένα μεταμορφωμένα πετρώματα, είναι καλύτερο να ερμηνευτούν με έννοιες μηχανισμών αστοχίας, μέσω ενός ελεγχόμενου – κατασκευασμένου υλικού με προσανατολισμένη ανάλυση αστοχίας.

Η εσωτερική δομή τέτοιων πετρωμάτων, είναι «κληρονομημένη» από το μητρικό πέτρωμα και συμφωνεί με το γεωλογικό υπόβαθρο, άσχετα με το βαθμό αποσάθρωσης. Αυτά τα «κληρονομημένα» χαρακτηριστικά, δεν είναι δυνατό να αγνοηθούν, αλλά παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των πρανών, που σχηματίζονται σε τέτοιου είδους βραχομάζες. Η ανισοτροπία δημιουργείται από την «κληρονομημένη» δομή του αρχικού πετρώματος και ευνοεί μικρής κλίμακας αστοχίες, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν μεγαλύτερης κλίμακας αστοχίες.

Αυτή η μελέτη, προτείνει την προσομοίωση της βραχομάζας και την αντιμετώπιση της ως στερεό εδαφικό υλικό, ελεγχόμενο από την εναπομείνουσα δομή. Οι παράμετροι τάσεων, πρέπει να καθοριστούν βάσει την ταξινόμηση των ομογενών τμημάτων στο εσωτερικό της βραχώδους μάζας.

Συνοψίζοντας, η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος, περιλαμβάνει τη θεωρητική ανάλυση των βασικών όρων και των εννοιών του θέματος και γίνεται η περιγραφή των πειραμάτων που χρειάζονται και πραγματοποιούνται για την ανάγκη της εργασίας, με τις όποιες παραλλαγές απαιτούνται στα επιμέρους πειράματα, λόγω των απαιτήσεων και της ιδιαιτερότητας αυτής. Στο δεύτερο μέρος, παρατίθενται οι μετρήσεις των πειραμάτων και τα αποτελέσματα μετά από την επεξεργασία αυτών με εφαρμογή των γνωστών σχέσεων εδαφομηχανικής-βραχομηχανικής, που ισχύουν για κάθε περίπτωση. Στο τελευταίο κεφάλαιο, αναφέρονται τα ουσιαστικά συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις της σχετικής ερευνητικής εργασίας.

Το εδαφικό υλικό, στο οποίο έγιναν οι εργαστηριακές δοκιμές, όπως προαναφέρθηκε, προέρχεται από το υπό κατασκευή τμήμα της Εγνατίας οδού, στην περιοχή της Ασπροβάλτας του Νομού Θεσσαλονίκης (Χάρτης 3).

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Κοκκομετρική ανάλυση του αποσαθρωμένου υλικού και καθορισμός του ποσοστού των λεπτόκοκκων.
- Καθορισμός της βέλτιστης υγρασίας m_{opt} και του μέγιστου ξηρού φαινόμενου βάρους gd_{max} , με την πρότυπη μέθοδο συμπίκνωσης του *Proctor*.
- Δοκιμές σημειακής φόρτισης *Point load* στα πιο διατηρημένα κομμάτια, κάθετα και παράλληλα προς τη σχιστότητα.
- Δοκιμές άμεσης διάτμησης χωρίς συμπίκνωση, του εδαφοποιημένου υλικού και των πιο διατηρημένων δειγμάτων, με τη σχιστότητα παράλληλα προς τη διεύθυνση διάτμησης και στη συνέχεια με τυχαίο προσανατολισμό της σχιστότητας, ως προς τη διεύθυνση διάτμησης.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια γενική θεωρητική ανάλυση σχετικά με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Αναφέρονται επίσης βασικές αρχές και ορισμοί της εδαφομηχανικής.

Από το δεύτερο κεφάλαιο μέχρι το έκτο, πραγματοποιείται η θεωρητική ανάλυση των εκτελούμενων εργαστηριακών δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα:

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφεται ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων του δείγματος. Ο τρόπος εργασίας, η δοκιμή, καθώς και οι υπολογισμοί που έγιναν.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται η περιγραφή της κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύεται η δυναμική συμπίκνωση εδαφών με τη πρότυπη μέθοδο του *Proctor*.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφεται η δοκιμή της άμεσης διάτμησης. Αρχικά η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο αποσαθρωμένο υλικό με δύο διαφορετικά φορτία. Η δεύτερη δοκιμή, πραγματοποιήθηκε σε διατηρημένα κομμάτια, με τη σχιστότητα τους παράλληλα προς τη διεύθυνση διάτμησης, με δύο διαφορετικά φορτία. Η τρίτη και τελευταία δοκιμή, πραγματοποιήθηκε πάλι σε διατηρημένα κομμάτια, με τυχαίο προσανατολισμό ως προς τη διεύθυνση διάτμησης, με δύο διαφορετικά φορτία.

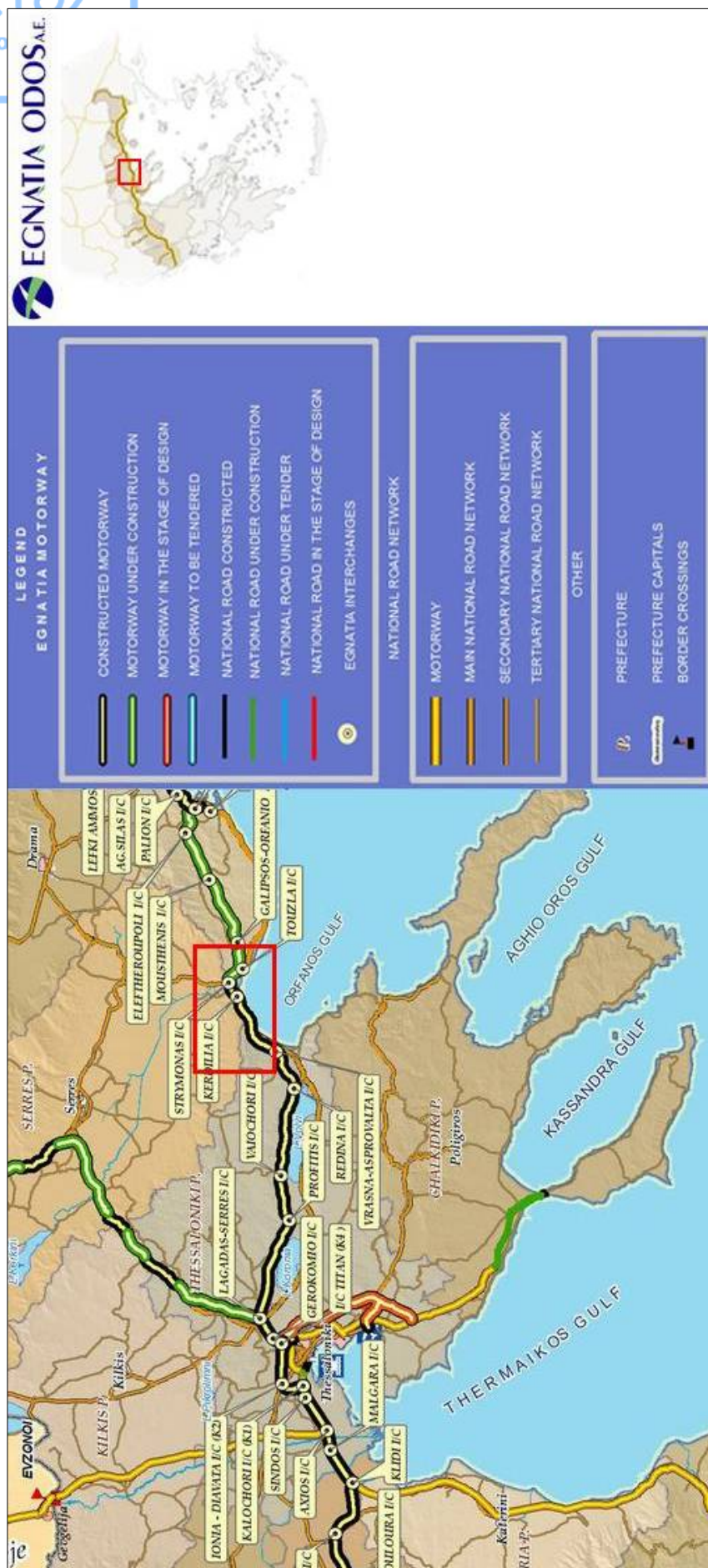
Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται η περιγραφή και η ανάλυση της δοκιμής σημειακής φόρτισης, *Point Load*, σε τρία δοκίμια, κάθετα και παράλληλα προς τη στρώση των δειγμάτων.

Από το έβδομο κεφάλαιο και μετά, παρατίθεται το πειραματικό μέρος, με όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και την επεξεργασία αυτών.

Όπως προαναφέρθηκε, στο τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της ερευνητικής αυτής διπλωματικής εργασίας.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής, ήταν να περιγραφεί εκτενέστερα το υλικό βάσει των δοκιμών και των προδιαγραφών, να βρεθεί η διατμητική αντοχή του υλικού παράλληλα στη σχιστότητα και τέλος να βρεθεί η διατμητική αντοχή του παραγόμενου έπειτα από θρυμματισμό υλικού και να συγκριθεί με τις τιμές της διατμητικής αντοχής που βρέθηκαν, παράλληλα με τη σχιστότητα.

Το μεγαλύτερο μέρος του πειραματικού τμήματος της εργασίας, πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ., ενώ η δοκιμή *Point Load* πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ.



Χάρτης 3. Εγνατία Οδός και περιοχή από την οποία προήλθαν τα εδαφικά δείγματα.

1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΔΑΦΩΝ

1.1 Προέλευση και φύση του εδάφους

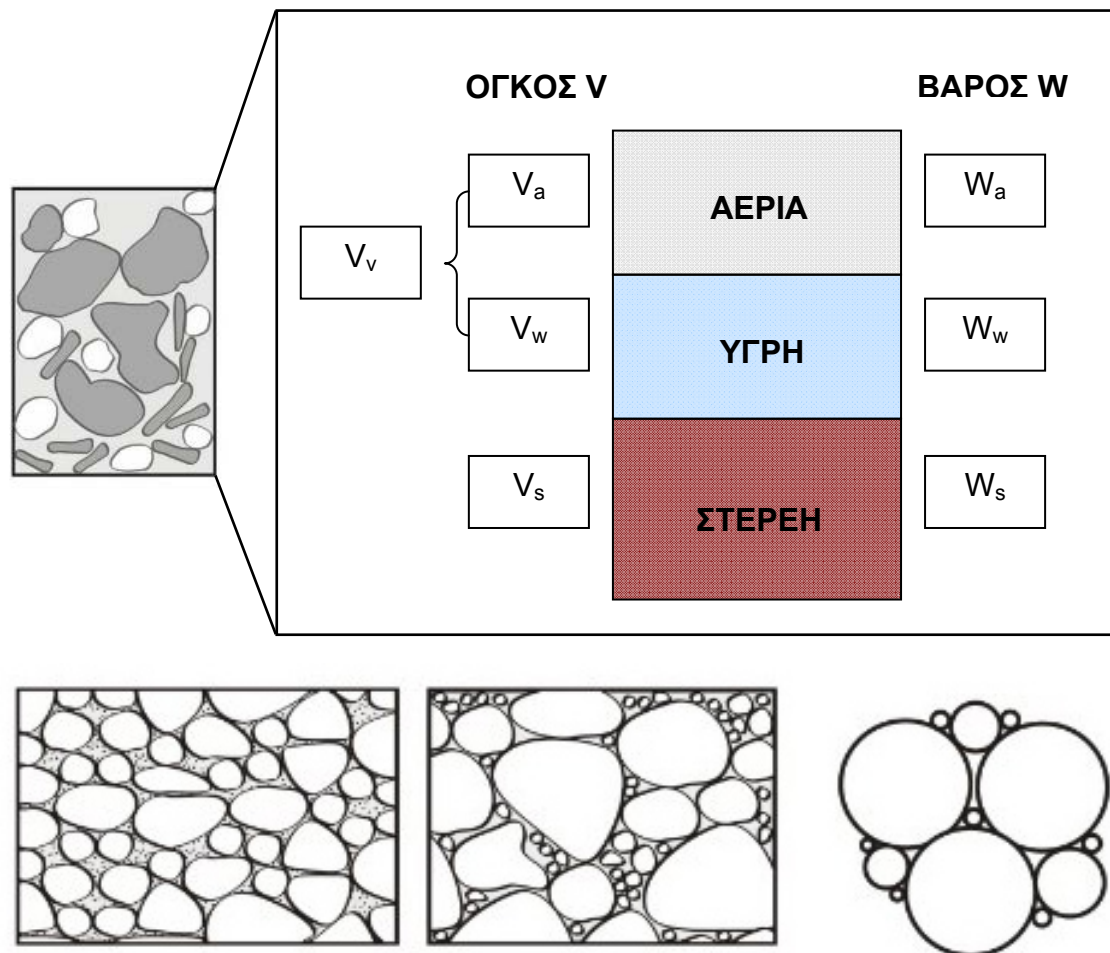
Το έδαφος είναι ένα μη-συμπαγές πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από ασύνδετους ή ελαφρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους. Τα κενά μεταξύ των κόκκων, οι πόροι, περιέχουν συνήθως νερό ή/και αέρα. Τα εδαφικά υλικά, προέρχονται είτε από μηχανική είτε από χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Η μηχανική αποσάθρωση οφείλεται σε παράγοντες, όπως ο παγετός, οι συνεχείς θερμοκρασιακές μεταβολές, η διάβρωση από το νερό και τον αέρα, οι λειτουργίες φυτών, ζώων και του ανθρώπου, και οδηγεί σε κατατεμαχισμό και θρυμματισμό των βράχων. Αντίστοιχα, η χημική αποσάθρωση προκαλεί την αποσύνθεση των πετρωμάτων λόγω οξείδωσης, ενανθράκωσης, αναγωγής και άλλων χημικών διαδικασιών. Γενικά, η χημική αποσάθρωση είναι ο κυριότερος παράγων γένεσης λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών (ιλύων και αργίλων), ενώ η μηχανική αποσάθρωση συντελεί κυρίως στη δημιουργία των χονδρόκοκκων εδαφών (χαλικών και άμμων), χωρίς όμως να αποκλείεται και η μερική συμμετοχή της εναλλακτικής μεθόδου αποσάθρωσης στη γένεση εδαφικών σχηματισμών κάθε τύπου.

Με βάση τον τρόπο μεταφοράς και τελικής απόθεσης των προϊόντων της αποσάθρωσης, τα εδάφη διακρίνονται σε αυτόχθονα και ιζηματογενή. Τα αυτόχθονα εδάφη προέρχονται από την επιτόπου απόθεση των προϊόντων αποσάθρωσης, χωρίς να μεσολαβήσει μεταφορά τους μακριά από την περιοχή της αποσάθρωσης. Αντίθετα, τα ιζηματογενή εδάφη προέρχονται από τη μεταφορά των προϊόντων αποσάθρωσης με τα νερά των ποταμών μακριά από την αρχική τους θέση και την επακόλουθη απόθεσή τους στην περιοχή των εκβολών. Σε ορισμένες περιπτώσεις η μεταφορά των προϊόντων της αποσάθρωσης γίνεται και από τον αέρα (αιολικές αποθέσεις). Η μεταφορά και απόθεση των ιζηματογενών εδαφικών σχηματισμών με το νερό οδηγεί στο διαχωρισμό τους κατά μέγεθος κόκκων. Έτσι, χονδρόκοκκα ιζήματα (χάλικες και άμμοι) αποτίθενται συνήθως στις κοίτες των ποταμών και σε περιοχές κοντά στις εκβολές τους. Αντίθετα, τα λεπτόκοκκα ιζήματα (ιλείς και άργιλοι) μεταφέρονται αιωρούμενα σε μεγάλες αποστάσεις και αποτίθενται με αργό ρυθμό στον πυθμένα των θαλασσών και λιμνών μακριά από τις εκβολές των ποταμών, σχηματίζοντας οριζόντιες ή σχεδόν οριζόντιες στρώσεις. Αρκετά συνηθισμένη είναι και η διαδοχική απόθεση στρώσεων χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων ιζημάτων στην ίδια περιοχή, που οφείλεται είτε σε τεκτονικές κινήσεις του γήινου φλοιού, που μπορούν να μετατρέψουν κοίτες ποταμών σε πυθμένες ωκεανών και το αντίθετο, είτε στη διαδοχή περιόδων έντονων βροχοπτώσεων και απορροών, οι οποίες οδηγούν στην απόθεση χονδροκλαστικών κυρίως ιζημάτων με ήπιες περιόδους, που οδηγούν στην απόθεση λεπτόκοκκων εδαφών.

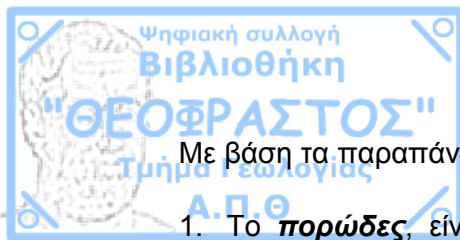
Ανεξάρτητα από τον τρόπο γένεσης, μεταφοράς και απόθεσης των εδαφών, η διάταξη των κόκκων τους δημιουργεί κενά, τα οποία, κατά την ιζηματογένεση στους πυθμένες των θαλασσών, πληρώνονται με νερό. Στο μακρό χρονικό διάστημα, όμως, που μεσολάβησε από την ιζηματογένεση πολλοί εδαφικοί σχηματισμοί βρέθηκαν τελικώς πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και το νερό των πόρων αντικαταστάθηκε μερικά ή ολικά από αέρα. Έτσι, σήμερα, τα περισσότερα εδάφη περιέχουν στους πόρους τους και νερό και αέρα.

1.1.1 Σχέσεις μεταξύ των φάσεων

Όπως προαναφέρθηκε, το έδαφος είναι ένα πολυφασικό υλικό, που αποτελείται αφενός μεν από στερεούς κόκκους αφετέρου δε από τα κενά (πόρους) που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων και περιέχουν νερό ή/και αέρα. Ο συνολικός όγκος V του εδάφους αποτελείται από τον όγκο V_s που καταλαμβάνουν οι στερεοί κόκκοι και τον όγκο V_v των πόρων. Ο όγκος των πόρων πληρούται από νερό (με όγκο V_w) και αέρα (με όγκο V_a). Οι αντίστοιχες μάζες M ή, ισοδύναμα, τα βάρη W των ανωτέρω ποσοτήτων είναι: W (ολικό βάρος), W_s (βάρος στερεών κόκκων), W_w (βάρος νερού των πόρων) και W_a (βάρος του αέρα των πόρων), (Σχήμα 1). Στα επόμενα, το βάρος του αέρα των πόρων αμελείται, επειδή η πυκνότητα του αέρα είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις πυκνότητες των υπολοίπων μεγεθών (στερεών κόκκων και νερού).



Σχήμα 1. Δομή, διάταξη και φάσεις του εδάφους.



Με βάση τα παραπάνω μεγέθη, ορίζονται οι εξής χρήσιμες ποσότητες:

1. Το **πορώδες**, είναι ο λόγος του όγκου των κενών προς τον ολικό όγκο του εδάφους:

$$n = \frac{V_w}{V}$$

Το πορώδες εκφράζεται και σαν ποσοστό επί τοις %.

2. Ο **δείκτης πόρων**, είναι ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών κόκκων:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Το πορώδες και ο δείκτης πόρων συσχετίζονται ως εξής:

$$n = \frac{e}{1+e}, \quad e = \frac{n}{1-n}$$

3. Ο **βαθμός κορεσμού**, είναι ο λόγος του όγκου του νερού των πόρων προς τον όγκο των κενών:

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

εκφράζει το ποσοστό (συνήθως επί τοις εκατό) του όγκου των πόρων που πληρούται με νερό. Οι πιθανές τιμές του βαθμού κορεσμού ενός εδαφικού υλικού κυμαίνονται μεταξύ 0 και 100%. Ένα ξηρό εδαφικό υλικό έχει βαθμό κορεσμού μηδέν, ενώ ένα εδαφικό υλικό του οποίου το σύνολο των πόρων πληρούται με νερό (κορεσμένο) έχει βαθμό κορεσμού 1 (100%).

4. Το **ποσοστό υγρασίας**, είναι ο λόγος της μάζας του νερού των πόρων προς τη μάζα των στερεών κόκκων:

$$m = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100(\%)$$

συχνά εκφράζεται και επί τοις %. Το ποσοστό υγρασίας ενός ξηρού εδαφικού υλικού είναι μηδέν.

Το ποσοστό υγρασίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$m = \frac{W - W_s}{W_s} \cdot 100(\%)$$

5. Η **πυκνότητα του εδαφικού υλικού**, (κατά τον συνήθη ορισμό της πυκνότητας ενός υλικού) είναι ο λόγος της μάζας του εδαφικού δείγματος προς τον όγκο του:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

6. Η **πυκνότητα των στερεών κόκκων**, που είναι ο λόγος της μάζας των στερεών κόκκων προς τον όγκο τους:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

7. Τέλος, η **πυκνότητα του νερού**, κατά τον συνήθη ορισμό, είναι:

$$\rho_w = \frac{M_w}{V_w} = 1 \text{ Mg} / \text{m}^3$$

Οι προηγούμενες ποσότητες συνδέονται με τις εξής σχέσεις:

$$\rho = \rho_s \left(\frac{1 + w}{1 + e} \right), \quad \rho_s w = S e \rho_w$$

Εκτός από τις ανωτέρω θεμελιώδεις ποσότητες μπορούν να ορισθούν και τα εξής παράγωγα μεγέθη:

- i. Η **ξηρή πυκνότητα** του εδαφικού υλικού:

$$\rho_d = \rho_s \frac{1}{1 + e}$$

που είναι η πυκνότητα ενός εδαφικού υλικού με ποσοστό υγρασίας μηδέν.

- ii. Η **πυκνότητα κορεσμένου εδαφικού υλικού**:

$$\rho_{sat} = \frac{\rho_s + e \rho_w}{1 + e}$$

που είναι η πυκνότητα ενός εδαφικού υλικού με βαθμό κορεσμού $S = 1$.

iii. Η υπό **άνωση πυκνότητα ενός (κορεσμένου) εδαφικού υλικού:**

$$\rho_b = \rho_{sat} - \rho_w = \frac{\rho_s - \rho_w}{1 + e}$$

Παρακάτω, δίνονται μερικές τυπικές τιμές των θεμελιωδών μεγεθών για διάφορα εδαφικά υλικά:

1. Πορώδες:

Άμμοι: 0,30 έως 0,50

Άργιλοι: 0,20 έως 0,60 (ή και υψηλότερο)

2. Δείκτης πόρων:

Άμμοι: 0,40 έως 1,00

Άργιλοι: 0,30 έως 1,50 (ή και υψηλότερος)

3. Βαθμός κορεσμού:

0 έως 1

4. Ποσοστό υγρασίας:

Κυμαίνεται συνήθως στις άμμους από 0 έως 0,40 (40%) και στις αργίλους από 0 έως 1 (100%). Σε ορισμένα εδάφη (π.χ. οργανικά ή ευαίσθητες αργίλους) μπορεί να φθάνει και το 5 (500%).

5. Πυκνότητα εδαφικού υλικού (σε Mg/m³):

Άμμοι και χάλικες: 1,70 έως 2,40

Ιλείς και άργιλοι: 1,40 έως 2,10

Οργανικά και ευαίσθητες άργιλοι: 1,00 έως 1,60.

6. Πυκνότητα στερεών κόκκων:

Για όλους τους τύπους εδαφών (πλην οργανικών):

$$\rho_s = 2,50 - 2,80 \text{ Mg/m}^3$$

Τα οργανικά εδάφη μπορεί να έχουν πυκνότητα στερεών κόκκων πολύ μικρότερη από 2,50 Mg/m³.

1.2 Φυσικά χαρακτηριστικά μη-συνεκτικών εδαφών

Τα κυριότερα φυσικά χαρακτηριστικά των μη-συνεκτικών (αμμωδών, κοκκωδών ή χονδρόκοκκων) εδαφικών υλικών είναι η σχετική πυκνότητα και η κοκκομετρική διαβάθμιση, που μελετώνται στα επόμενα εδάφια.

1.2.1 Σχετική πυκνότητα

Ένα συγκεκριμένο μη-συνεκτικό εδαφικό υλικό μπορεί να εμφανισθεί στη φύση με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων e , που εξαρτώνται από την εκάστοτε διάταξη (δομή) των κόκκων του. Η πλέον χαλαρή διάταξη των κόκκων με το μέγιστο ποσοστό κενών αντιστοιχεί στην ελάχιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη βραδεία απόθεση μιας άμμου μέσα στο νερό με συνθήκες αντίστοιχες με αυτές της ιζηματογένεσης. Κατά συνέπεια, πρόσφατες αποθέσεις άμμων τείνουν να έχουν πυκνότητες που προσεγγίζουν την ελάχιστη πυκνότητα. Η πλέον πυκνή διάταξη των κόκκων με το ελάχιστο ποσοστό κενών αντιστοιχεί στη μέγιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με παρατεταμένη και έντονη δόνηση της άμμου, που προκαλεί συμπύκνωση με την επαναδιάταξη των κόκκων της σε πυκνότερη δομή. Είναι σαφές ότι τόσο η ελάχιστη όσο και η μέγιστη πυκνότητα είναι συμβατικά μεγέθη και αναφέρονται σε πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές (π.χ. συγκεκριμένος τρόπος απόθεσης ή συγκεκριμένος τρόπος δόνησης μιας άμμου). Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν μια άμμος να υπάρξει στη φύση σε κατάσταση με πυκνότητα μικρότερη από την ελάχιστη ή μεγαλύτερη από τη μέγιστη συμβατική.

Ένα χρήσιμο μέγεθος για το χαρακτηρισμό της κατάστασης μιας άμμου σε σχέση με την ελάχιστη και τη μέγιστη πυκνότητα είναι η λεγόμενη **σχετική πυκνότητα D_r** , η οποία ορίζεται ως εξής:

$$D_r \equiv \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} * 100 \quad (\%)$$

όπου: e , είναι ο πραγματικός δείκτης πόρων της άμμου,

$e_{\max}$, είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συμβατική πυκνότητα (μέγιστη τιμή του δείκτη πόρων) και

$e_{\min}$, είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στη μέγιστη συμβατική πυκνότητα (ελάχιστη τιμή του δείκτη πόρων).

Οι τιμές της μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας μιας άμμου εξαρτώνται από το σχήμα και την ποικιλία των μεγεθών της. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η ποικιλία μεγεθών των κόκκων και όσο πιο σφαιρικοί είναι οι κόκκοι σε ένα αμμώδη εδαφικό σχηματισμό, τόσο η ελάχιστη και η μέγιστη πυκνότητα είναι μεγαλύτερες. Η κατάταξη των αμμωδών εδαφών με βάση τη σχετική τους πυκνότητα γίνεται σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα:

Σχετική πυκνότητα (%)	Περιγραφή μη-συνεκτικού εδάφους
0 – 15	Πολύ χαλαρό
15 – 35	Χαλαρό
35 – 65	Μέσης πυκνότητας
65 – 85	Πυκνό
85 – 100	Πολύ πυκνό

Πίνακας Θ2. Κατάταξη αμμωδών εδαφών με βάση τη σχετική τους πυκνότητα.

1.3 Ιδιότητες εδαφών

Προϋπόθεση για τη χρησιμοποίηση ενός υλικού είναι η γνώση των ιδιοτήτων αυτού, σε τέτοιο βαθμό που να επιτρέπεται πλήρης εκμετάλλευσή του. Το έδαφος, υπό τη γενική έννοια, αποτελεί ένα υλικό χρησιμοποιούμενο ανέκαθεν είτε ως μέσο έδρασης, είτε ως υλικό κατασκευής, ως εκ τούτου το πεδίο εφαρμογής αυτού παρουσιάζει μέγιστη ευρύτητα. Η γνώση των χαρακτηριστικών παραμέτρων αυτού αποτελεί βασική προϋπόθεση για την άνευ κινδύνου χρήση του.

Ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων ενός υλικού με τη μέγιστη δυνατή σαφήνεια και ασφαλή χρησιμοποίησή του, εξαρτάται κυρίως από την ομοιογένεια και ισοτροπία αυτού. Για τους παραπάνω λόγους το έδαφος καθίσταται δύσκολο υλικό, λόγω των άπειρων μορφών εδάφους, που βρίσκονται στη φύση. Έτσι, λόγω των άπειρων μορφών του εδάφους, δεν είναι δυνατή η τυποποίηση και η εκ των προτέρων γνώση των ιδιοτήτων ενός εδάφους.

Η μακροσκοπική παρατήρηση του εδάφους δίνει ένα πρώτο βασικό διαχωρισμό αυτού σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

Χονδρόκοκκα εδάφη

Λεπτόκοκκα εδάφη

Τη μακροσκοπική αυτή παρατήρηση χρησιμοποίησαν οι διάφοροι γεωλόγοι-μελετητές ως βάση, για την εύρεση ενός συστήματος ταξινόμησης των εδαφών. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκαν διάφορα συστήματα ταξινόμησης εδαφών τα οποία και κατετάγησαν σε επιμέρους κατηγορίες βάσει των διαφόρων κοινών ιδιοτήτων αυτών.

Για την κατάταξη ενός εδάφους σε μία κατηγορία, απαιτείται πλήρης εργαστηριακός έλεγχος. Οι χαρακτηριστικοί παράμετροι για την κατάταξη του υλικού σε μία κατηγορία εδάφους πρέπει να διευκρινιστεί ότι κυμαίνονται εντός ορισμένων ορίων τα οποία είναι δυνατόν να είναι και ευρέα.

Για την απαιτούμενη λειτουργικότητα του εδάφους δημιουργήθηκαν διάφορα συστήματα ταξινόμησης εδαφών στηριζόμενα σε ορισμένα χαρακτηριστικά των εδαφών.

Βασικά χαρακτηριστικά της ταξινόμησης των εδαφών είναι:

- Η κοκκομετρική τους σύνθεση.
- Τα όρια Atterberg, δηλαδή το όριο υδαρότητας LL, το όριο πλαστικότητας PL και ο δείκτης πλαστικότητας PI.

Επομένως για την αναγνώριση ενός εδάφους και τη χρησιμοποίησή του είναι αναγκαία η πειραματική εξέταση του, επιτόπου και στο εργαστήριο για την εύρεση των χαρακτηριστικών παραμέτρων και την απεικόνιση του με τη βοήθεια αριθμητικών συντελεστών. Κατά συνέπεια, ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών παραμέτρων του εδαφικού υλικού αποτελεί κύριο μέλημα της εδαφομηχανικής.

Οι πειραματικές μέθοδοι αποσκοπούν στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων αντοχής, οι οποίες είναι η *γωνία εσωτερικής τριβής ϕ* , η *συνοχή c* , ο *δείκτης πόρων e* , το *πορώδες n* , ο *δείκτης συμπίεστότητας C_c* και το μέτρο *ακαμψίας E_s* . Εκτός από αυτούς βεβαίως προσδιορίζονται, η κοκκομετρική

τους σύνθεση και οι διάφοροι συντελεστές, όπως τα *όρια Atterberg*, τα φαινόμενα βάρη και τα λοιπά. Οι θεωρητικοί μέθοδοι υπολογισμού, στηρίζονται σε διάφορες παραδοχές και εμφανίζουν πολλές αντιφάσεις.

1.4 Κατάταξη εδαφών

Ανάλογα με την προέλευση των συστατικών τους, τα εδάφη διακρίνονται σε δύο γενικές κατηγορίες:

- Εδάφη που αποτελούνται κύρια από προϊόντα χημικής και φυσικής αποσάθρωσης των πετρωμάτων.
- Εδάφη οργανικής προέλευσης.

Μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες εδαφών:

Κατηγορίες εδαφών
Άμμος και χάλικες
Ανόργανος ιλύς
Οργανική ιλύς
Άργιλος
Οργανική άργιλος
Τύρφη

Πίνακας Θ3. Κατηγορίες εδαφών.

Η κατάταξη των εδαφών είναι πολύ χρήσιμη για την αναγνώρισή τους, προκειμένου να κατασκευαστούν διάφορα τεχνικά έργα (οδοποιία, φράγματα, αεροδιάδρομοι, σιδηροδρομικές γραμμές κ.α.). Η ένταξη των εδαφών σε κάποιο σύστημα κατάταξης γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε κάθε ομάδα να δίνει ενδείξεις που αφορούν στις γενικές ιδιότητες των εδαφών και στην συμπεριφορά τους. Έτσι γίνεται δυνατή η χονδρική εκτίμηση των τριών κυρίων ιδιοτήτων ενός εδάφους. Δηλαδή της διαπερατότητας, της συμπιεστότητας και της αντοχής σε διάτμηση. Για την κατάταξη των εδαφών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν πάρα πολλές ιδιότητες τους, που διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Τις ιδιότητες των εδαφικών κόκκων.
- Τις ιδιότητες του εδάφους σαν άθροισμα κόκκων.

2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους περιλαμβάνει το προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε νερό, του φαινόμενου βάρους, του ειδικού βάρους των στερεών συστατικών, του δείκτη πόρων, της ξηρής πυκνότητας, του πορώδους, του βαθμού κορεσμού και της σχετικής πυκνότητας.

2.2 Πειραματικός προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε νερό εδαφικού δείγματος

Το νερό που περιέχεται στα κενά μεταξύ των στερεών κόκκων του εδάφους, είναι δυνατόν να είναι:

- Υγροσκοπικό νερό, το οποίο προσφύεται στους κόκκους του εδάφους.
- Υμενώδες νερό, το οποίο σχηματίζει υμένα γύρω από τους κόκκους.
- Τριχοειδές νερό, το οποίο συγκρατείται με τριχοειδείς δυνάμεις.
- Βαρυτητικό νερό, το οποίο κινείται με τη δράση της βαρύτητας.

Όταν ένα έδαφος στη φυσική του κατάσταση, αφεθεί για ξήρανση σε θερμοκρασία εργαστηρίου, το νερό βαρύτητας και το νερό των τριχοειδών απομακρύνονται. Για την απομάκρυνση και του υγροσκοπικού νερού, το έδαφος, πρέπει να ξηραθεί σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του σημείου ζέσεως του νερού (100° C).

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός της περιεχόμενης υγρασίας ενός δείγματος εδάφους, γίνεται πιο συχνά από οποιαδήποτε άλλη εργαστηριακή δοκιμή, επειδή η φυσική υγρασία του δείγματος, πρέπει να είναι γνωστή για την καλύτερη εκτέλεση των περαιτέρω δοκιμών.

Η δοκιμή αυτή έχει σαν σκοπό τη μέτρηση της μάζας του νερού που περιέχεται στο δείγμα του εδαφικού σχηματισμού. Ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του νερού που υπάρχει μέσα στους πόρους (W_w), προς το βάρος των ξηρών κόκκων (W_s):

$$m = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100(\%)$$

Το ποσό του εδάφους που λαμβάνεται για τον προσδιορισμό της υγρασίας, εξαρτάται από τον τύπο του εδαφικού σχηματισμού και τη διατιθέμενη ποσότητα. Γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο τόσο ακριβέστερος είναι ο προσδιορισμός, γιατί τα προσδιοριζόμενα βάρη είναι μεγαλύτερα.

Γενικά, η περιεκτικότητα σε νερό ενός εδαφικού δείγματος, είναι δυνατόν να ποικίλει από 0% (όταν το έδαφος είναι τελείως ξηρό) μέχρι μιας μέγιστης τιμής, (όταν το έδαφος είναι κορεσμένο από νερό).

2.2.1 Εκτέλεση δοκιμής και υπολογισμοί

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας m , σε νερό, ενός εδαφικού δείγματος (ASTM D-2216/80). Τα δείγματα αρχικά ζυγίζονται με ακρίβεια, (Εικόνα 5), σε μεταλλική κάψα και σημειώνεται το αρχικό τους βάρος W σε gr. Στη συνέχεια το δοκίμιο ξηραίνεται σε φούρνο (Εικόνες 3,4), σε θερμοκρασία 105°C . Ο χρόνος ξηράνσεως εξαρτάται από τον τύπο, την ποσότητα και το σχήμα του δοκιμίου. Για να είμαστε σίγουροι ότι το δοκίμιο έχει ξηραθεί εντελώς, συνιστάται χρόνος ξήρανσης μίας ημέρας.



Εικόνες 3,4. Ηλεκτρικός φούρνος εργαστηρίου.



Εικόνα 5. Ηλεκτρονικός ζυγός ακριβείας.

Μετά την απομάκρυνσή του από το φούρνο, το δείγμα ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου και έπειτα ζυγίζεται εκ νέου, (W_s). Η περιεκτικότητα σε νερό εκφράζεται επί τοις % και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$m = \frac{W - W_s}{W_s} \cdot 100(\%)$$

Όταν η μέτρηση αναφέρεται σε δείγμα προερχόμενο από φυσική θέση ονομάζεται φυσική υγρασία.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι εδάφη που περιέχουν κρυσταλλικό νερό ή οργανικά, δεν πρέπει να θερμαίνονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 80° C. Στα εδάφη αυτά είναι προτιμότερο να αυξάνεται ο χρόνος ξήρανσης.

2.3 Μέθοδος προσδιορισμού φαινομένου βάρους

Το φαινόμενο βάρος ορίζεται ως το πηλίκο του βάρους του εδάφους, προς τον όγκο του εδάφους:

$$\gamma = \frac{W}{V} \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

όπου W το συνολικό βάρος του δείγματος όπου συμπεριλαμβάνονται και οι πόροι με το περιεχόμενό τους (αέρας + νερό) και V ο συνολικός όγκος του δείγματος.

2.4 Προσδιορισμός ειδικού βάρους

Το ειδικό βάρος ενός εδάφους είναι ο λόγος του βάρους ορισμένου όγκου κόκκων εδάφους, προς το βάρος ίσου όγκου αποσταγμένου νερού, θερμοκρασίας 4° C.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w}$$

Με δεδομένο ότι το ειδικό βάρος του νερού γ_w , σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας ισούται με 1, το ειδικό βάρος των στερεών συστατικών γ_s ενός εδάφους ισούται αριθμητικά με το λόγο του βάρους της στερεάς ύλης (δηλαδή μόνο το βάρος των κόκκων) προς τον αντίστοιχο όγκο.

2.5 Προσδιορισμός πορώδους εδαφικού δείγματος με τη χρήση της συσκευής κενού

Πορώδες ονομάζεται ο λόγος του όγκου των κενών V_v ενός δείγματος δια του συνολικού του όγκου V.

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100(\%)$$

Με τη συσκευή κενού, μπορούμε να υπολογίσουμε τον όγκο των στερεών συστατικών V_s . Από τη σχέση $V_v = V - V_s$ υπολογίζουμε τον όγκο των κενών και επομένως και το πορώδες.

2.6 Προσδιορισμός δείκτη πόρων, ξηρής πυκνότητας, βαθμού κορεσμού και σχετικής πυκνότητας

Δείκτης πόρων, ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών V_v ενός πετρώματος ή εδαφικού σχηματισμού προς τον όγκο των στερεών συστατικών V_s .

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1 - n}$$

Σε συνθήκες κορεσμού ισχύει:

$$e = m \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

ενώ για μερικά κορεσμένο έδαφος είναι:

$$e = m \cdot \frac{\gamma_s}{S}$$

Ξηρό φαινόμενο βάρος ή ξηρή πυκνότητα είναι το ξηρό βάρος του υλικού, προς τον συνολικό όγκο του δείγματος.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

Σε συνθήκες κορεσμού ισχύει: $\gamma_d < \gamma < \gamma_{\text{sat}}$.

Βαθμός κορεσμού. Η σχέση των κενών χώρων (του πορώδους) που είναι γεμάτοι με νερό, προς το συνολικό πορώδες, χαρακτηρίζει το βαθμό κορεσμού του εδάφους:

$$S_w = \frac{n_w}{n} = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\gamma_s \cdot m}{\gamma_w \cdot e}$$

Στην κατάσταση κορεσμού ($S = 1$), η περιεκτικότητα σε νερό έχει τη μεγαλύτερη τιμή της.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται διάφοροι τύποι μετασχηματισμού των παραπάνω μεγεθών, (Ν. Παπαχαρίσης, 1999):

Μεγέθη	Γενικές συνθήκες	Συνθήκες κορεσμού
Όγκος ολικός	$v = v_s + v_w + v_a$	$V = V_s + V_w$
Όγκος κενών	$v_v = v_v + v_a = v - v_s = v_w / s_r$	$V_v = V_w$
Δείκτης πόρων	$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n} = \frac{V_s}{V_d} - 1 = \frac{V_s(1+w)}{V} - 1$	$e = \frac{V_w}{V_s} = \frac{V_s}{V_w} \cdot w$
Πορώδες	$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e} = 1 - \frac{V_d}{V_s}$	$n = \frac{V_w}{V} = \frac{V_d}{V_w} \cdot w$
Βαθμός κορεσμού	$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_s \cdot w}{V_w \cdot e}$	$S_r = 1$
Βάρος ολικό	$W_o = W_d + W_w \quad (W_a = 0)$	(W_d = βάρος στερεών συστατικών)
Περιεκτικότητα σε νερό	$W_c = \frac{W_w}{W_d} = S_r e \frac{V_w}{V_s}$	$W_c = e \frac{V_w}{V_s}$
Φαινόμενο βάρος	$\gamma = \frac{W_o}{V_o} = \gamma_d(1+w) = \frac{S_r \gamma_w \cdot V_s (1+w)}{S_r \cdot V_w + V_s w}$	$\gamma = \gamma_{sat} = \frac{w+1}{w+1/\gamma}$
Φαινόμενο βάρος στερεών συστατικών	$\gamma_s = \frac{W_d}{V_d}, 2,70 \text{ gr/cm}^3$	(για $\gamma_w = 1,00 \text{ gr/cm}^3$)
Ξηρό φαινόμενο βάρος	$\gamma_d = \frac{W_d}{W_o} = (1-n)\gamma_s = \frac{V_s}{1+e} = \frac{\gamma}{1+w}$	$\gamma_d < \gamma < \gamma_{sat}$
Φαινόμενο βάρους κορεσμένου εδάφους		$\gamma_{sat} < \gamma_d + n\gamma_w = \gamma = \frac{\gamma_s \cdot V_w \cdot e}{1+e}$
Φαινόμενο βάρους κορεσμένου εδάφους (με άνωση)		$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = \gamma_d - (1-n)\gamma_w$ $\gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} = \gamma_d \left(1 - \frac{V_w}{V_s}\right)$ @0,60 γ_d

Πίνακας Θ4. Τυπολόγιο φυσικών εδαφικών μεγεθών.

3. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΚΟΣΚΙΝΑ

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 τεχνικά έργα, εξαρτάται από την κοκκομετρική ανάλυση, δηλαδή, τον προσδιορισμό της σχετικής συμμετοχής κάθε κλάσματος στο δείγμα.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφών, η γνώση της οποίας είναι ιδιαιτέρως σημαντική, παρουσιάζεται συνήθως παραστατικά με την σχεδίαση κατάλληλης καμπύλης σε διάγραμμα αντιπροσωπευτικής διάστασης των κόκκων διερχομένου ή συγκρατούμενου ποσοστού.

Επειδή οι διαστάσεις των κόκκων ποικίλουν μεταξύ μεγάλων ορίων, η κλίμακα του αντίστοιχου άξονα είναι λογαριθμική. Για τη σχεδίαση της καμπύλης για κάθε δείγμα είναι αναγκαίο να βρεθεί πειραματικά ικανός αριθμός σημείων και στη συνέχεια να χαραχθεί η γραμμή παλινδρόμησης.

Το μέγεθος των κόκκων, εκφράζεται σαν απλή διάμετρος. Η περιοχή μεγεθών των συνήθων εδαφικών κόκκων, είναι περίπου από 10 mm μέχρι 0,0001 mm. Οι μεγάλοι κόκκοι δηλαδή, είναι μέχρι και 1.000.000 φορές μεγαλύτεροι από τους πλέον μικρότερους. Στην περιοχή αυτή, υπάρχουν κόκκοι μικροσκοπικού μεγέθους ή άλλοι που είναι ορατοί μόνο με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Το μέγεθος των κόκκων ενός εδάφους, εξετάζεται για την ονομασία του και την ταξινόμησή του. Τα μεγέθη αυτά των κόκκων κατανέμονται κατά ομάδες, όπου τα μέρη βάρους καθεμιάς προσδιορίζονται με τη μέθοδο των κόσκινων ή με την μέθοδο του αραιομέτρου. Το όριο ανάμεσα στη χρησιμοποίηση αυτών των δύο μεθόδων βρίσκεται στους κόκκους που έχουν διάμετρο 0,075 mm (όριο άμμου-ιλύος). Έτσι, αν έχουμε κόκκους με $d > 0,075$ mm χρησιμοποιούμε τη μέθοδο με τα κόσκινα, ενώ αν έχουμε $d < 0,075$ mm χρησιμοποιούμε την μέθοδο του αραιομέτρου. Αν ένα δείγμα περιέχει περισσότερο από 25% κόκκους με $d < 0,075$ mm τότε είναι απαραίτητη μια συνδυασμένη ανάλυση, τόσο με κόσκινα όσο και με την ανάλυση ιλύος.

Τα εδάφη χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: στα χονδρόκοκκα, στα λεπτόκοκκα και στα οργανικά. Ένα χονδρόκοκκο έδαφος περιέχει λιγότερο από 35% εδάφους με κοκκομετρία μικρότερη από 0,075 mm. Επί πλέον τα χονδρόκοκκα εδάφη χωρίζονται σε άμμους και χάλικες. Τα λεπτόκοκκα εδάφη περιέχουν περισσότερο από 35% υλικά λεπτότερα των 0,075 mm και χωρίζονται σε ιλύ και άργιλο.

Τα εδάφη ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων λαμβάνουν τα παρακάτω ονόματα, (ASTM, 1989):

Ονομασία	Μέγεθος
Κροκάλες - Λίθοι (bounders-stones)	76, 2 mm (3 in)
Χαλίκια (gravel) - G - χονδροί (coarse) - λεπτοί (fine)	76,2 mm - 19,0 mm (3/4 in, ASTM) 19,0 mm - 4,76 mm (N 4, ASTM)
Άμμος (sand) - S - χονδρή (coarse) - μέση (medium) - λεπτή (fine)	4,76 mm – 2 mm (No. 10, ASTM) 2 mm - 0,425 mm (No. 40, ASTM) 0,425 mm - 0,07 mm (No. 200, ASTM)
Ιλύς (silt) - M	0,075 mm - 0,002 mm
Άργιλος (clay) - C	< 0,002 mm

Πίνακας Θ5. Ονομασία εδαφών με βάση το μέγεθος των κόκκων.

Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιούμε, ανάλογα με το υλικό που έχουμε να εξετάσουμε και διαφορετική ποσότητα δείγματος. Έτσι για λεπτή έως μέση άμμο χρειαζόμαστε 100-200 gr, για χοντρή άμμο μέχρι λεπτά χαλίκια χρειαζόμαστε 0,5 kg και για χονδρά χαλίκια και κροκάλες 5 kg και περισσότερο. Τα κόσκινα χρησιμοποιούνται με σειρά μεγέθους αυξανόμενη από κάτω προς τα πάνω.

Αριθμός κοσκίνου	Χιλιοστά (mm)
1"	25,00
3/4"	19,00
1/2"	12,50
3/8"	9,50
1/4"	6,30
4	4,75
10	2,00
20	0,84
40	0,425
50	0,300
80	0,180
100	0,150
200	0,075

Πίνακας Θ6. Αντιστοιχία αριθμού κοσκίνου-χιλιοστών.

3.2 Εκτέλεση δοκιμής

Για την κοκκομετρική ανάλυση των εδαφών με κόσκινα, χρησιμοποιούνται εργαστηριακά κόσκινα, που έχουν συγκεκριμένο σχήμα, μέγεθος, άνοιγμα βροχίδων και πάχος των συρμάτων τους. Μία σειρά κόσκινων αποτελείται από 6 ή 7 κόσκινα (Εικόνα 6), με άνοιγμα το οποίο διπλασιάζεται από το κατώτερο στο ανώτερο. Για απλοποίηση της διαδικασίας, επιτρέπεται κάποια από τα κόσκινα να παραληφθούν, (AASHTO T-27/66, ASTM C-136).



Εικόνα 6. Σειρά κοσκίνων.

Τα δείγματα για την κοκκομετρική ανάλυση πρέπει να παίρνονται από τα προς εξέταση υλικά με τη μέθοδο του τετραμερισμού.

Επιπλέον, το δείγμα πρέπει να αποτελείται από χονδρόκοκκα υλικά, στεγνά, με χωρισμένους κόκκους και χωρίς ξένα σώματα. Έτσι το δείγμα ξηραίνεται και ζυγίζεται με ακρίβεια σε ζυγό ακριβείας.

Έπειτα, κοσκινίζεται στο κόσκινο No. 4 για να διαχωριστούν τα χονδρόκοκκα απ' τα λεπτόκοκκα. Το υλικό που θα περάσει από το κόσκινο No. 4, το αδειάζουμε μέσα στο κόσκινο No. 200 και το πλένουμε κάτω από τη βρύση, μέχρι το νερό που διέρχεται απ' το κόσκινο, να είναι διαυγές.

Το υλικό που θα παραμείνει μέσα στο κόσκινο, ξηραίνεται σε φούρνο 105° C για 48 ώρες. Στη συνέχεια βγαίνει από το φούρνο και ζυγίζεται με ακρίβεια.

Κατόπιν αδειάζουμε το υλικό μέσα σε μια σειρά κόσκινων με διαφορετική διάμετρο. Το τελευταίο κόσκινο με $d = 0,075 \text{ mm}$ (No. 200) αντιπροσωπεύει το τελευταίο κλάσμα της άμμου. Μεταφέρουμε ολόκληρη τη στήλη σε αυτόματη συσκευή κοσκινίσματος και κοσκινίζουμε για 15' περίπου.

Το υλικό που έχει μείνει σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται και μετατρέπεται σε ποσοστό επί τοις % του συνολικού βάρους του δείγματος. Στο τέλος ζυγίζουμε και το περιεχόμενο του δίσκου που βρίσκεται κάτω από το τελευταίο κόσκινο και περιέχει τα λεπτόκοκκα υλικά (ιλύς και άργιλος). Η διαφορά βάρους ανάμεσα στο αρχικό ζύγισμα

και στο σύνολο των συγκρατούμενων υλικών των διαφορετικών κόσκινων δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 1% του αρχικού βάρους.

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης περιγράφονται: (α) με τα επί τοις % ποσοστά που συγκρατούνται σε κάθε κόσκινο και (β) με τα επί τοις % ποσοστά που διέρχονται από κάθε κόσκινο. Τα ποσοστά υπολογίζονται με βάση το ολικό βάρος του δείγματος συμπεριλαμβανομένου και του υλικού του λεπτότερου του κόσκινου No. 200. Η κοκκομετρική διαβάθμιση παριστάνεται με την κοκκομετρική καμπύλη (Διάγραμμα Θ1).

Η κοκκομετρική καμπύλη είναι μια αθροιστική καμπύλη των μερών εκείνων που παίρνουμε με τη μέθοδο των κοσκίνων εκφρασμένα σε ποσοστά επί τοις % αθροιστικά επί του συνόλου του δείγματος. Τα αθροιστικά αυτά ποσοστά μεταφέρονται μαζί με τις αντίστοιχες διαμέτρους των κόκκων σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα, με τη διάμετρο στη λογαριθμική κλίμακα. Η καμπύλη αυτή κινείται πάντοτε από κάτω αριστερά προς τα πάνω δεξιά και αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος για να χαρακτηρίσουμε ένα έδαφος.

Από την κοκκομετρική καμπύλη μπορούμε να διακρίνουμε τον κύριο τύπο του εδάφους και τις υπάρχουσες προσμίξεις. Ως κύριο έδαφος χαρακτηρίζεται το έδαφος εκείνο στο οποίο κυριαρχεί το μεγαλύτερο ποσοστό βάρους.

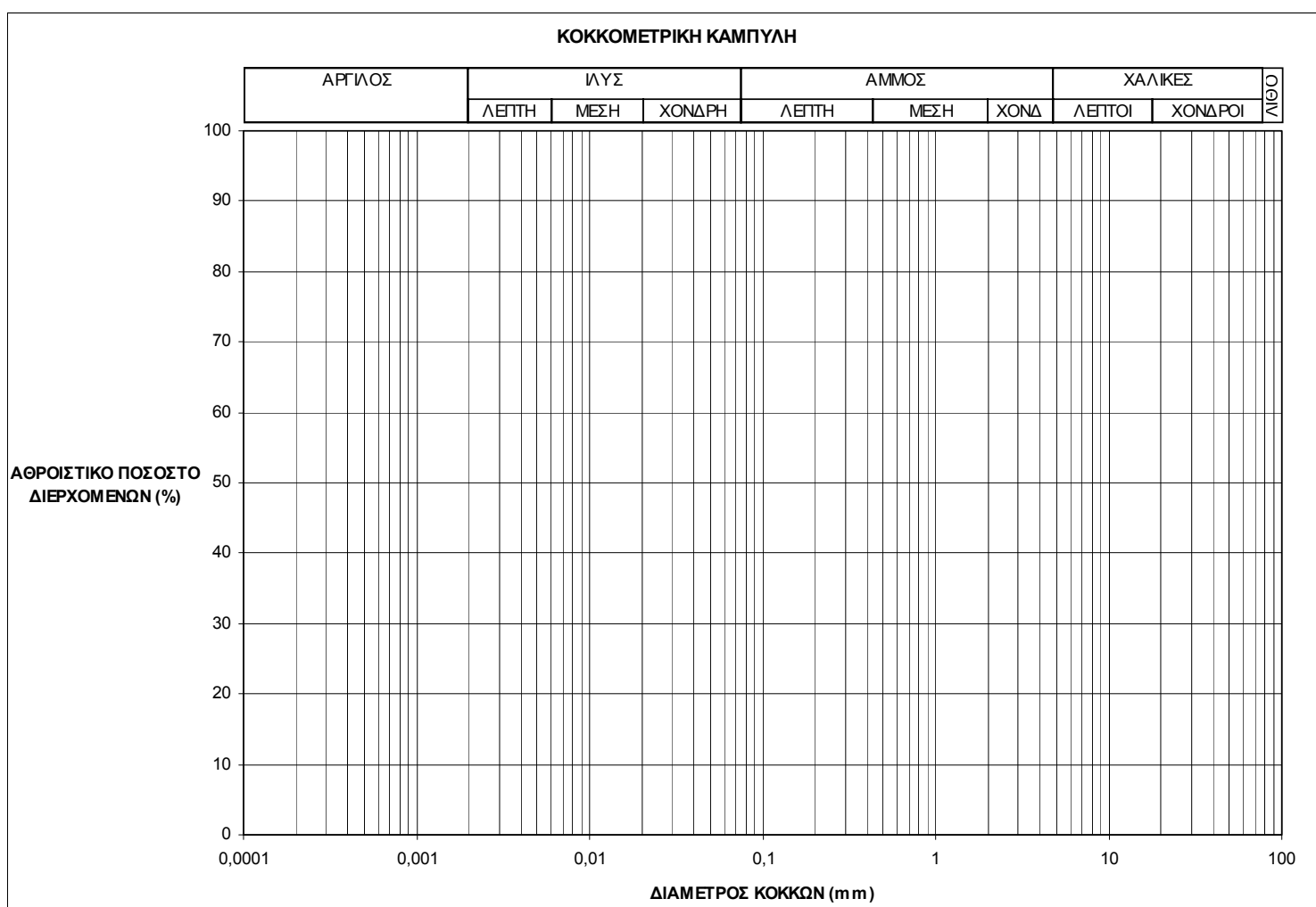
Στη συνέχεια υποδεικνύονται ένα δελτίο κοκκομετρικής ανάλυσης και ένα διάγραμμα στο οποίο σχεδιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη, καθώς και δύο πίνακες με τους οποίους υπολογίζεται η καταλληλότητα των εδαφών στα τεχνικά έργα (κατά Hunt, 1984):

ΔΕΛΤΙΟ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Προέλευση		Αριθμός δείγματος	
Βάρος ολικού δείγματος		Ημερομηνία	

Αριθμός κόσκινου	Άνοιγμα κόσκινου	Συγκρατούμενο βάρος		Διερχόμενο βάρος	
		gr	%	gr	%
2 in.	50.00				
1 1/2 in.	37.50				
1 in.	25.00				
3/4 in.	19.00				
1/2 in.	12.50				
3/8 in.	9.50				
1/4 in.	6.30				
No. 4	4.75				
No. 10	2.00				
No. 30	0.600				
No. 40	0.425				
No. 50	0.300				
No. 80	0.180				
No. 100	0.150				
No. 200	0.075				
	Παιπάλη				
	Ολικό βάρος				

Παρατηρήσεις:



Διάγραμμα Θ1. Διάγραμμα κοκκομετρικής καμπύλης.

α	Κύριος διαχωρισμός	Συμβολισμός	Κατάλληλα για υπόστρωμα θεμελίου, όταν δεν υπόκειται σε δράση παγετού	Κατάλληλα για υπόβαση θεμελίου, όταν δεν υπόκειται σε δράση παγετού	Κατάλληλα για βάση θεμελίου, όταν δεν υπόκειται σε δράση παγετού	Δυναμική δράση παγετού
1	Χονδρόκοκκα εδάφη	GW	Άριστη	Άριστη	Καλή	Μηδενική έως ελάχιστη
2			Καλή έως άριστη	Καλή	Μέτρια έως καλή	Μηδενική έως ελάχιστη
3		GM	Καλή έως άριστη	Καλή	Μέτρια έως καλή	Ελάχιστη έως μέτρια
4			Καλή	Μέτρια	Πολύ μέτρια έως ακατάλληλη	Ελάχιστη έως μέτρια
5		GC	Καλή	Μέτρια	Πολύ μέτρια έως ακατάλληλη	Ελάχιστη έως μέτρια
6	Άμμοι και αμμώδη εδάφη	SW	Καλή	Μέτρια έως καλή	Πολύ μέτρια	Μηδενική έως ελάχιστη
7		SP	Μέτρια έως καλή	Μέτρια	Πολύ μέτρια έως ακατάλληλη	Μηδενική έως ελάχιστη
8		SM	Μέτρια έως καλή	Μέτρια έως καλή	Πολύ μέτρια	Ελάχιστη έως μεγάλη
9			Μέτρια	Πολύ μέτρια έως μέτρια	Ακατάλληλη	Ελάχιστη έως μεγάλη
10		SC	Πολύ μέτρια έως μέτρια	Πολύ μέτρια	Ακατάλληλη	Μέτρια έως πολύ μεγάλη
11		ML	Πολύ μέτρια έως μέτρια	Ακατάλληλη	Ακατάλληλη	Μέτρια έως μεγάλη
12		CL	Πολύ μέτρια έως μέτρια	Ακατάλληλη	Ακατάλληλη	Μέτρια έως μεγάλη
13	Λεπτόκοκκα εδάφη	OL	Πολύ μέτρια	Ακατάλληλη	Ακατάλληλη	Μέτρια έως μεγάλη
14		MH	Πολύ μέτρια	Ακατάλληλη	Ακατάλληλη	Μέτρια έως πολύ μεγάλη
15		CH	Πολύ μέτρια έως μέτρια	Ακατάλληλη	Ακατάλληλη	Μέτρια
16		OH	Πολύ μέτρια έως κακή	Ακατάλληλη	Ακατάλληλη	Μέτρια
17	Πολύ οργανικά εδάφη		Ακατάλληλη	Ακατάλληλη	Ακατάλληλη	Ελάχιστη

Τα SM_d είναι εδάφη με LL≤28 και PI≤6 τα SM_u είναι εδάφη με LL>28
Πηγή: USAE, 1953.

α	Συμπύκνωση και διόγκωση	Αποστράγγιση	Κατάλληλο σαν επίχωμα	Συμπύκνωση	Κατάλληλο σαν θεμέλιο	Απαιτήσεις για έλεγχο αποστράγγισης
1	Σχεδόν μηδενική	Άριστη	Πολύ σταθερά, διαπερατά τοιχώματα αναχωμάτων και φραγμάτων	Καλή, με λαστυχωτούς εκκυστήρες, και κοινούς οδοστρώτες	Μεγάλη φέρουσα ικανότητα	Θετικό διάφραγμα
2	Σχεδόν μηδενική	Άριστη	Ικανοποιητικά σταθερά, διαπερατά τοιχώματα αναχωμάτων και φραγμάτων	Καλή, με λαστυχωτούς εκκυστήρες, και κοινούς οδοστρώτες	Μεγάλη φέρουσα ικανότητα	Θετικό διάφραγμα
3	Πολύ μικρή	Μέτρια έως πολύ μέτρια	Ικανοποιητικά σταθερά, όχι ιδιαίτερα κατάλληλα για τοιχώματα αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθούν σαν αδιαπέρατοι πυρήνες ή κουρτίνες	Καλή, με συνεχή έλεγχο, κοινούς οδοστρώτες και οδοντωτούς οδοστρώτες	Μεγάλη φέρουσα ικανότητα	Καμία μέχρι τάφρο πόδα
4	Μικρή	Μέτρια έως αδιαπέρατα	Αρκετά σταθερά, μπορεί να χρησιμοποιηθούν για αδιαπέρατους πυρήνες	Μέτρια με οδοντωτούς οδοστρώτες και οδοστρώτες με ελαστικούς τροχούς	Μεγάλη φέρουσα ικανότητα	Καμία
5	Μικρή	Μέτρια έως αδιαπέρατα	Πολύ σταθερά, διαπερατά τμήματα, απαιτούνται μέτρα προστασίας πρανών	Καλή, με εκκυστήρες	Μεγάλη φέρουσα ικανότητα	Ανάντη κουρτίνα και στραγγιστήρια πόδα ή οπές
6	Σχεδόν μηδενική	Άριστη	Ικανοποιητικά σταθερά, μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε αναχωμάτα με επίπεδα πρανή	Καλή, με εκκυστήρες	Μεγάλη έως πολύ μέτρια φέρουσα ικανότητα ανάλογα με την πυκνότητα	Ανάντη κουρτίνα και στραγγιστήρια πόδα ή οπές
7	Σχεδόν μηδενική	Άριστη	Αρκετά σταθερά, όχι ιδιαίτερα κατάλληλα για κάλυμμα αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθούν για αδιαπέρατοι πυρήνες ή αναχώματα	Καλή, με συνεχή έλεγχο, κοινούς οδοστρώτες και οδοντωτούς οδοστρώτες	Μεγάλη έως πολύ μέτρια φέρουσα ικανότητα ανάλογα με την πυκνότητα	Ανάντη κουρτίνα και στραγγιστήρια πόδα ή οπές
8	Πολύ μικρή	Μέτρια έως πολύ μέτρια	Αρκετά σταθερά, κατάλληλα για αδιαπέρατους πυρήνες σε αντιστηρίξεις κατασκευές	Μέτρια με οδοντωτούς οδοστρώτες και οδοστρώτες με ελαστικούς τροχούς	Μεγάλη έως πολύ μέτρια φέρουσα ικανότητα	Καμία
9	Μικρή έως μέτρια	Μέτρια έως αδιαπέρατα	Αρκετά σταθερά, διαπερατά τμήματα, απαιτούνται μέτρα προστασίας πρανών	Μέτρια με οδοντωτούς οδοστρώτες και οδοστρώτες με ελαστικούς τροχούς	Μεγάλη έως πολύ μέτρια φέρουσα ικανότητα	Καμία
10	Μικρή έως μέτρια	Μέτρια έως αδιαπέρατα	Αρκετά σταθερά, διαπερατά τμήματα, απαιτούνται μέτρα προστασίας πρανών	Μέτρια με οδοντωτούς οδοστρώτες και οδοστρώτες με ελαστικούς τροχούς	Μεγάλη έως πολύ μέτρια φέρουσα ικανότητα	Καμία
11	Μικρή έως μέτρια	Μέτρια έως πολύ μέτρια	Ασταθή, χρησιμοποιείται σε προσχώσεις με κατάλληλο έλεγχο	Καλή μέχρι μέτρια, με συνεχή έλεγχο, κοινούς οδοστρώτες και οδοστρώτες με ελαστικούς τροχούς	Κακό, επιδεκτικό σε ρευστοποίηση	Καμία μέχρι τάφρο πόδα
12	Μέτρια	Αδιαπέρατα	Σταθερά, αδιαπέρατοι πυρήνες και κουρτίνες	Καλή μέχρι μέτρια, με οδοντωτούς οδοστρώτες	Μεγάλη έως πολύ μέτρια φέρουσα ικανότητα	Καμία
13	Μέτρια έως μεγάλη	Πολύ μέτρια	Ακατάλληλο για προσχώσεις	Καλή μέχρι μέτρια, με οδοντωτούς οδοστρώτες	Μέτρια έως πολύ μέτρια φέρουσα ικανότητα, πιθανή καθίζηση	Καμία
14	Μεγάλη	Μέτρια έως πολύ μέτρια	Λίγο σταθερά, πυρήνες χωμάτινων φραγμάτων, ακατάλληλα	Μέτρια μέχρι πολύ μέτρια, με οδοντωτούς οδοστρώτες	Πολύ μέτρια φέρουσα ικανότητα	Καμία
15	Μεγάλη	Αδιαπέρατα	Μέτρια ευστάθεια σε οριζόντια πρανή, λεπτοί πυρήνες, κουρτίνες και αναχώματα	Καλή μέχρι μέτρια, με οδοντωτούς οδοστρώτες	Μέτρια έως πολύ μέτρια φέρουσα ικανότητα	Καμία
16	Μεγάλη	Αδιαπέρατα	Ακατάλληλο για προσχώσεις	Μέτρια μέχρι πολύ μέτρια, με οδοντωτούς οδοστρώτες	Μικρή φέρουσα ικανότητα	Καμία
17	Πολύ μεγάλη	Μέτρια έως πολύ μέτρια	Δεν χρησιμοποιούνται σε κατάσκευές	Μέτρια μέχρι πολύ μέτρια, με οδοντωτούς οδοστρώτες	Απομακρύνονται από τη θεμελίωση	Καμία

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης των εδαφών αξιοποιούνται, εκφράζοντας τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά τους, με σχέσεις που χρησιμοποιούν αριθμητικές τιμές των διαμέτρων των κόκκων της καμπύλης διαβάθμισης (Διάγραμμα Θ2).

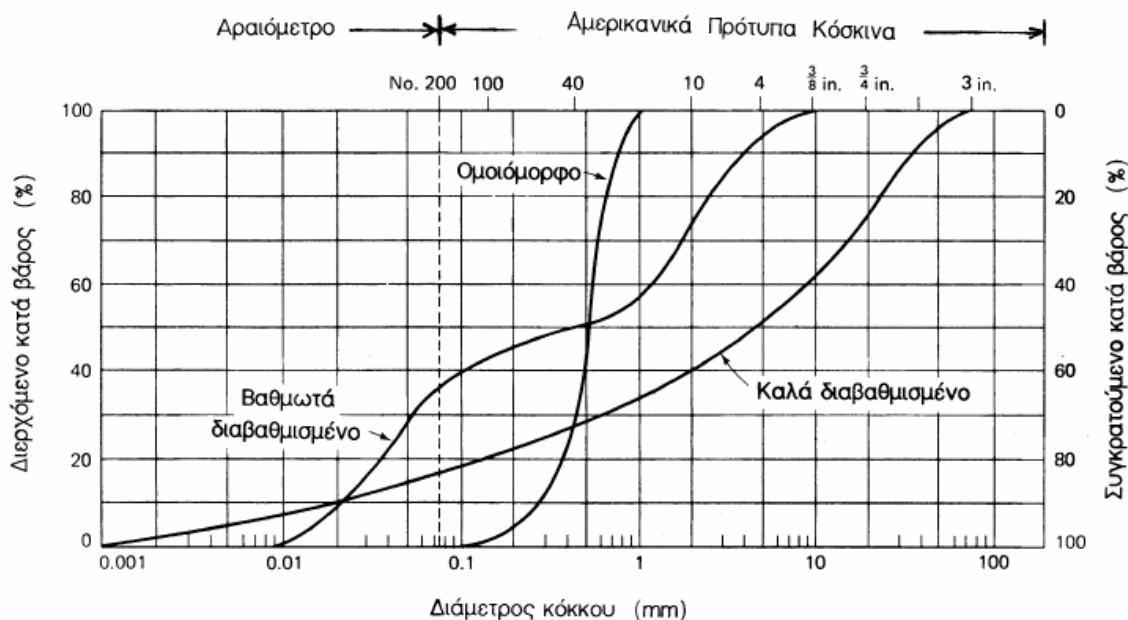
Από την κλίση της κοκκομετρικής καμπύλης μεταξύ των διαμέτρων d_{60} και d_{10} , διαπιστώνεται η ομοιομορφία του εδάφους. Η κλίση της κοκκομετρικής καμπύλης, αριθμητικά εκφράζεται με το **συντελεστή Hazen**, δηλαδή το **συντελεστή ομοιομορφίας**:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

όπου, d_{60} και d_{10} είναι οι διάμετροι των κόκκων σε ποσοστά διερχόμενων αντίστοιχα 60% και 10% του βάρους πάνω στην κοκκομετρική καμπύλη. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται ο χαρακτηρισμός του υλικού με βάση το συντελεστή ομοιομορφίας:

Συντελεστής ομοιομορφίας	Χαρακτηρισμός υλικού
$U < 5$	Ομοιόμορφο
$5 < U < 15$	Ανομοιόμορφο
$U > 15$	Πολύ ανομοιόμορφο

Πίνακας Θ7. Χαρακτηρισμός του υλικού με βάση το συντελεστή ομοιομορφίας.



Διάγραμμα Θ2. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών.

Ο συντελεστής ομοιομορφίας μας δίνει πληροφορίες σχετικά με τη συμπίκνωση μη συνεκτικών ή ελαφρά συνεκτικών εδαφών (όταν $U > 15 \Rightarrow$ τα εδάφη συμπτυνώνονται καλά).

Η διαίρεση των εδαφών με βάση το μέγεθος των κόκκων έχει μεγάλη σημασία. Η ικανότητα συγκρατήσεως υδροσκοπικού νερού και η πλαστική συμπεριφορά εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων. Έτσι ένα έδαφος είναι τόσο περισσότερο πλαστικό όσο πιο λεπτόκοκκο είναι.

Επίσης, από την κοκκομετρική καμπύλη μπορούμε να υπολογίσουμε το **συντελεστή κύρτωσης, ή συντελεστή κοιλότητας ή βαθμό διαβάθμισης** του εδαφικού υλικού που είναι:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$$

Καλή διαβάθμιση του εδάφους, σημαίνει, ότι αυτό είναι σχετικά σταθερό, ανθίσταται στη φθορά και στη διάβρωση, μπορεί να συμπτυνωθεί καλά και να αποκτήσει μεγάλη πυκνότητα με αποτέλεσμα μεγάλη αντοχή στη διάτμηση και φέρουσα ικανότητα, ενώ σε εδάφη κακής διαβάθμισης δεν υπάρχει επαρκής ποσότητα λεπτομερούς κλάσματος για να πληρώσει τα κενά των μεγαλύτερων κόκκων.

Ένα άλλο μέγεθος το οποίο είναι πολύ σημαντικό και το υπολογίζουμε με την κοκκομετρική ανάλυση, είναι ο **συντελεστής διαπερατότητας**.

Η διαπερατότητα ορίζεται με το συντελεστή διαπερατότητας k που εκφράζει την ταχύτητα με την οποία κινείται το υπόγειο νερό μέσα στον σχηματισμό όταν η υδραυλική κλίση είναι ίση με μονάδα. Ο συντελεστής k εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως το μέγεθος των κόκκων, το δείκτη πόρων, το βαθμό κορεσμού και το ιξώδες του περιεχόμενου ρευστού.

Ο συντελεστής διαπερατότητας συνδέεται με την κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού με την εμπειρική εξίσωση που πρότεινε για χαλαρές και ομοιόμορφες άμμους ο *Hazen* (1911) και είναι:

$$k = c \cdot d_{10}^{-2} \text{ (cm/sec)}$$

όπου, d_{10} η οπή κοσκίνου, από την οποία διέρχεται το 10% του υλικού (d_{10} σε cm) και $c = 45,8 - 142$ για κοκκομετρική διαβάθμιση από αργιλώδη άμμο έως καθαρή αντίστοιχα. Στην πράξη δεχόμαστε εμπειρικά μια μέση τιμή $c = 100$.

Το κοσκίνισμα είναι η πιο συνηθισμένη και απλή μέθοδος ανάλυσης μεγέθους χονδρόκοκκων υλικών που χρησιμοποιείται ευρύτατα και έχει καθιερωθεί σαν η πιο αποτελεσματική και ακριβής μέθοδος μηχανικής ανάλυσης. Οι κύριοι παράγοντες που δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή της μεθόδου των κόσκινων είναι το σχήμα και το ειδικό βάρος των κόκκων του ιζήματος που αποτελεί και ένα μειονέκτημα της μεθόδου γιατί η έννοια του μεγέθους δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική συμπεριφορά των κόκκων στο φυσικό τους περιβάλλον.

4. ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΕΔΑΦΩΝ (ΔΟΚΙΜΗ PROCTOR)

Η τάση για κατασκευή μικρών ή μεγαλύτερων τεχνικών έργων, σε όλο και πιο δύσκολα κατασκευαστικές περιοχές, έχει ως αποτέλεσμα την εκσκαφή περιοχών για το τυχόν εντοπισμό καλύτερου εδάφους θεμελίωσης ή τη χρησιμοποίηση του εδάφους εκσκαφής για την κατασκευή κυρίως επιχωμάτων.

Σε ένα πολύ μικρό ποσοστό εδαφών (κυρίως υποστερεοποιημένα), η εκσκαφή αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των χαρακτηριστικών παραμέτρων της φυσικής εδαφικής μάζας. Παρατηρούμε δηλαδή κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, της μεταφοράς και της απόθεσης του εδάφους, μια αύξηση του όγκου.

Η αύξηση αυτή του όγκου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του πορώδους, της διαπερατότητας και της συμπιεστότητας του εδάφους καθώς επίσης τη μείωση της πυκνότητας και διατμητικής αντοχής του. Προβλήματα τέτοιου τύπου, απαιτούν μια συμπύκνωση της μάζας του εδάφους στη νέα θέση για την πρόληψη αστοχιών σε έργα όπως χωμάτινα ή λιθόρριπτα φράγματα, επιχώματα οδοποιίας, αναχώματα υδραυλικών έργων κ.λ.π.

Με τον όρο συμπύκνωση εννοούμε την τεχνητή αύξηση της πυκνότητας του εδάφους, με μηχανικά μέσα. Με τη συμπύκνωση, επιτυγχάνουμε αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους, μείωση των καθιζήσεων και της διαπερατότητας του. Η διαδικασία της συμπύκνωσης, εφαρμόζεται στα τεχνικά έργα, για την κατασκευή ασφαλέστερων έργων.

Η συμπύκνωση, δεν είναι τίποτα άλλο παρά μία κατάλληλη επαναδιάταξη των κόκκων της εδαφικής μάζας, που παραμένει πλέον αμετάβλητη μέσα σε όρια που δίνονται από τις κατάλληλες προδιαγραφές για το εκτελούμενο έργο. Η επίτευξη αυτής της συμπύκνωσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι η κοκκομετρική σύνθεση του εδάφους, η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους, το σχήμα και η σκληρότητα των κόκκων.

Η επαναδιάταξη των κόκκων απαιτεί την καταβολή έργου που θα πρέπει να είναι ικανό για το σκοπό αυτό. Έτσι για τις δύο μεγάλες κατηγορίες εδαφών, τα συνεκτικά και τα μη-συνεκτικά ή ψαθυρά, εφαρμόζονται για το σκοπό αυτό μέθοδοι στατικής ή δυναμικής συμπτυνώσεως και δονητικές μέθοδοι αντίστοιχα.

Παρακάτω, δίνονται σε απλοποιημένους πίνακες, τι επιτυγχάνεται με τη συμπύκνωση εδαφών και που αυτή εφαρμόζεται.

Με την συμπίκνωση επιτυγχάνεται

Η αύξηση της διατμητικής αντοχής και της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.

Η μείωση της συμπιεστότητας και επομένως των προκαλούμενων καθιζήσεων του εδάφους, σε συνθήκες εξωτερικής φόρτισης.

Η μείωση της διαπερατότητας του εδάφους.

Η αύξηση της αντίστασης του εδάφους σε αποσάθρωση.

Η συμπίκνωση του εδάφους εφαρμόζεται

Για τη σταθεροποίηση του εδάφους για θεμελίωση τεχνικών έργων.

Για τη δημιουργία ανθεκτικότερης εδαφικής επιφάνειας.

Για την ομογενοποίηση του εδάφους θεμελίωσης.

Για τη δημιουργία στερεών εδαφικών επιχωμάτων, για την κατασκευή δρόμων κ.α.

Για την κατασκευή χωμάτων φραγμάτων.

Για τη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας και μείωση των ενδεχόμενων καθιζήσεων εδαφικών υλικών.

Για την αύξηση της παθητικής αντίστασης του εδάφους σε πλευρικές φορτίσεις.

4.2 Πρότυπη μέθοδος Proctor

Ο *Proctor* έκανε τις πρώτες συστηματικές εργαστηριακές μελέτες και προσπάθησε να βρει τη σχέση ανάμεσα στην περιεκτικότητα σε νερό και την ενέργεια συμπίκνωσης.

Το έδαφος συμπυκνώνεται με την ελεύθερη πτώση σφύρας σε κυλινδρική μεταλλική μήτρα, όπου το δείγμα τοποθετείται σε στρώσεις.

Ο βαθμός συμπίκνωσης ενός εδάφους εκφράζεται με την ξηρή πυκνότητα του εδάφους. Επομένως μεταβολή της τιμής της ξηρής πυκνότητας μετά από συμπίκνωση, εκφράζει την μεταβολή όγκου για το ίδιο ξηρό βάρος, δηλαδή εκφράζει το βαθμό συμπίκνωσης του υλικού. Η μέγιστη συμπίκνωση, δηλαδή η μέγιστη ξηρή πυκνότητα του εδάφους επιτυγχάνεται με προσθήκη συγκεκριμένης ποσότητας ύδατος που ευνοεί τη μείωση της συνοχής και των τριβών μεταξύ των εδαφικών κόκκων, καθώς και της διατμητικής αντοχής του εδάφους έτσι ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορη αναδιάταξη των κόκκων σε πυκνότερη δομή.

Επομένως, αν μεταβάλλουμε την περιεκτικότητα σε νερό του εδαφικού δείγματος, διατηρώντας σταθερή την ενέργεια συμπίκνωσης (βάρος σφύρας, ύψος πτώσης, αριθμό κτύπων ανά στρώση, διατομή στρώσεων) και κάνουμε το διάγραμμα μεταβολής του ξηρού φαινομένου βάρους γ_d σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα σε νερό m (%), τότε παίρνουμε μία καμπύλη που παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή του γ_{dmax} για μια ορισμένη περιεκτικότητα σε νερό m (%), που χαρακτηρίζεται σαν βέλτιστη υγρασία m_{opt} κατά *Proctor*.

Αν αυξήσουμε την ενέργεια συμπίκνωσης, αυξάνεται και η μέγιστη τιμή του γ_d και μειώνεται η τιμή optimum της περιεκτικότητας σε νερό. Η μορφή της καμπύλης συμπίκνωσης μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Η τιμή της βέλτιστης υγρασίας αυξάνει λογαριθμικά με την αύξηση των λεπτόκοκκων στο έδαφος, ενώ εμφανίζει γενικά γραμμική σχέση με την αύξηση του ποσοστού της λεπτής άμμου.

4.3 Εκτέλεση δοκιμής

Για την εκτέλεση της δοκιμής, χρησιμοποιείται ένας μεταλλικός κύλινδρος, ή αλλιώς μήτρα, με έναν πρόσθετο δακτύλιο ύψους περίπου 60,3 mm. Η χωρητικότητα και οι διαστάσεις του, είναι συγκεκριμένες και είναι οι ακόλουθες, (AASHTO T-99/74, ASTM D-698/78):

- Χωρητικότητα: $(943 \pm 8) \cdot 103 \text{ mm}^3$
- Εσωτερική διάμετρος: $101,6 \pm 0,406 \text{ mm}$
- Ύψος: $116,4 \pm 0,127 \text{ mm}$



Εικόνες 7,8. Μήτρα, κόπανος και δακτύλιος για την δοκιμή συμπίκνωσης εδαφών.

Μια μεταλλική σφύρα ή κόπανος, με κυκλική διατομή διαμέτρου $50,8 \pm 0,127 \text{ mm}$ και βάρους $2,49 \pm 0,01 \text{ kg}$. Η σφύρα είναι εφοδιασμένη με κατάλληλο οδηγό (διάταξη) για τον έλεγχο του ύψους πτώσεως, ώστε να πέφτει ελεύθερα από ύψος $304,8 \pm 1,524 \text{ mm}$ από τη στάθμη του εδαφικού δοκιμίου.

Η πρότυπη μέθοδος βασίζεται στη συμπίκνωση του εδαφικού δείγματος εντός σιδηρού δοχείου, διαμέτρου $101,6 \text{ mm}$. Το δείγμα τοποθετείται σε τρεις ισοπαχείς στρώσεις. Στην κάθε στρώση προκαλούνται 25 χτύποι με τη μεταλλική σφύρα, βάρους $2,5 \text{ kg}$ που πέφτει από ύψος $304,8 \text{ mm}$. Το κυλινδρικό δοχείο και ο πρόσθετος δακτύλιος συνδέονται σταθερά με την ανεξάρτητη πλάκα βάσης.

Το δείγμα του εδάφους, εάν είναι υγρό, ξηραίνεται (μέχρι 60° C) και στη συνέχεια θραύονται τα συσσωματώματά του. Το εδαφικό υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε θα πρέπει να διέρχεται από το κόσκινο No. 4 ($4,75 \text{ mm}$). Στη συνέχεια παίρνουμε αντιπροσωπευτικό δείγμα από το κοσκινισμένο έδαφος (περίπου 3 kg).

Το αντιπροσωπευτικό δείγμα, αναμιγνύεται καλά με επαρκή ποσότητα νερού. Έπειτα τοποθετείται σε τρεις ίσες στρώσεις μέσα στο μεταλλικό δοχείο με το δακτύλιο προσαρμοσμένο για την παρασκευή ενός υλικού συμπυκνωμένου βάρους περίπου 127 mm . Κάθε στρώση, συμπυκνώνεται με 25 ομοιόμορφα διανεμημένους κτύπους με την σφύρα.

Μετά τη συμπίκνωση απομακρύνεται από το δοχείο ο δακτύλιος και περικόπτεται με μαχαίρι το συμπυκνωμένο έδαφος μέχρι τα χείλη του δοχείου και

ζυγίζεται. Πολλαπλασιάζεται το βάρος του συμπυκνωμένου δοκιμίου μαζί με το δοχείο, μείον το βάρος του δοχείου (σε kg), επί 1059. Το αποτέλεσμα είναι το υγρό φαινόμενο βάρος γ συμπυκνωμένου εδάφους (Kg/m^3).

Το δοκίμιο εξάγεται από το δοχείο και από το κέντρο του λαμβάνεται δείγμα για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας m . Η ξηρή πυκνότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + m} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Προσθέτουμε νερό στο εδαφικό δείγμα ώστε να αυξηθεί η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία για κάθε νέα αύξηση της υγρασίας. Συνεχίζεται η σειρά αυτή των προσδιορισμών μέχρι που να ελαττωθεί ή δεν μεταβληθεί το υγρό φαινόμενο βάρος του συμπυκνωθέντος εδάφους.

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας δίδονται σε διάγραμμα «ξηρής πυκνότητας (γ_d) - υγρασίας (m)», (Διάγραμμα Θ3), με τη βοήθεια του οποίου προσδιορίζεται το ζεύγος τιμών «μέγιστη ξηρή πυκνότητα ($\gamma_{d\max}$) - βέλτιστη υγρασία (m_{opt})» στο ανώτατο σημείο της καμπύλης.



Διάγραμμα Θ3. Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας (γ_d) – περιεχόμενης υγρασίας (m).

Σε πολλές περιπτώσεις η υπάρχουσα υγρασία του εδάφους είναι μεγαλύτερη της βέλτιστης, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η συμπύκνωση του εδάφους. Στις περιπτώσεις αυτές επιχειρείται είτε αποστράγγιση του εδαφικού χώρου, είτε πιο απλά σταθεροποίηση του εδάφους με χημικά πρόσθετα που θα αυξήσουν την απαιτούμενη βέλτιστη υγρασία για συμπύκνωση.

Με τη δοκιμή άμεσης διάτμησης, είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε σε ένα δείγμα, τις δύο χαρακτηριστικές παραμέτρους αντοχής του, δηλαδή τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και τη συνοχή c .

Κατά τη δοκιμή της άμεσης διάτμησης, το επίπεδο θραύσης είναι προκαθορισμένο. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε συσκευή όπου το δείγμα τοποθετείται και πληρεί δύο μισού ύψους τετραγωνικές ή κυκλικές υποδοχές. Οι συσκευές διάτμησης έχουν κιβώτια διάτμησης διαφόρων τύπων, όπου ο ένας από τους δύο μισούς δακτυλίους μετακινείται (συνήθως ο επάνω), και ο άλλος με το κιβώτιο είναι σταθερός, όπως στην περίπτωση του πειράματός μας. Αντίστοιχα στον ένα κινητό δακτύλιο επιβάλλεται η διατμητική δύναμη διαμέσου ατσάλινου κυκλικού δυναμόμετρου (*proving ring*), ενώ στην άλλη περίπτωση των δύο κινητών δακτυλίων, επιβάλλεται στον έναν από τους δακτυλίους η διατμητική φόρτιση και στον άλλο δακτύλιο μετρείται διαμέσου του ατσάλινου κυκλικού δυναμόμετρου (*proving ring*), η φόρτιση.

Οι συσκευές διακρίνονται σε συσκευές ελεγχόμενων παραμορφώσεων ή ελεγχόμενων τάσεων. Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων μελετάται καλύτερα με τη συσκευή ελεγχόμενων παραμορφώσεων και γι' αυτό το λόγο προτιμάται και στο πείραμά μας.

Μεγάλη επίδραση στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων αντοχής, παρουσιάζει η σχέση μεταξύ της κοκκομετρικής διαβάθμισης και των διαστάσεων του κιβωτίου διάτμησης. Αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης των διαστάσεων είναι η χρησιμοποίηση κιβωτίων διαφόρων διαστάσεων.

Έτσι στα συνεκτικά εδάφη συνήθως, και στις λεπτόκοκκες – μεσόκοκκες άμμους χρησιμοποιείται η συσκευή του κιβωτίου *Casagrande* με δακτύλιο δείγματος διαστάσεων διαμέτρου 2,5 in και ύψους 1,0 in, ενώ αντίθετα στα χονδρόκοκκα (άμμοι-αμμοχάλικα) χρησιμοποιείται η συσκευή με κιβώτιο διάτμησης *Bishop*, με διαστάσεις τετραγωνικού κιβωτίου 12·12 in και ύψους 6 in.

5.2 Εκτέλεση δοκιμής

Όσον αφορά της συσκευές διάτμησης, υπάρχουν διάφορες συσκευές όπου η διάτμηση του εδαφικού υλικού επιβάλλεται κατά μία ή δύο επίπεδες επιφάνειες τετραγωνικού ή κυλινδρικού δοκιμίου (ASTM D-3080/79, E 105-86).

Στον συνήθη τύπο ο υποδοχέας του δοκιμίου αποτελείται από δύο δακτυλίους. Το δοκίμιο κρατείται μέσα σ' αυτούς και μεταξύ δύο πορόλιθων με τέτοιο τρόπο ώστε να αποκλείεται η στρέψη του δοκιμίου. Η συσκευή διατμήσεως θα πρέπει να επιτρέπει την εφαρμογή ορθής και διατμητικής τάσης, κάθετης και παράλληλης προς το επίπεδο διατμήσεως αντίστοιχα. Συναρμολογείται η συσκευή με τα πλαίσια ευθυγραμμισμένα και σταθερά. Πριν την εκτέλεση της δοκιμής, γίνεται ελαφρό γρασάρισμα στις επιφάνειες επαφής των πλαισίων ώστε να εξασφαλίζεται υδατοστεγανότητα, στην περίπτωση που γίνεται στερεοποίηση του δοκιμίου πριν

από την κυρίως δοκιμή της διάτμησης και επίσης για τη μείωση των τριβών κατά τη διάρκεια της.

Το δοκίμιο τοποθετείται προσεκτικά και γίνεται η σύνδεση των μηχανισμών φορτίσεως. Τοποθετούνται τα μηχανοσκόπια για τη μέτρηση της διατμητικής παραμόρφωσης και της μεταβολής του ύψους του δοκιμίου.

Προσδιορίζεται το αρχικό ύψος του δοκιμίου. Ανάλογα με τον τύπο της δοκιμής ακολουθείται και ο αντίστοιχος τρόπος φόρτισης και θραύσης του δοκιμίου.

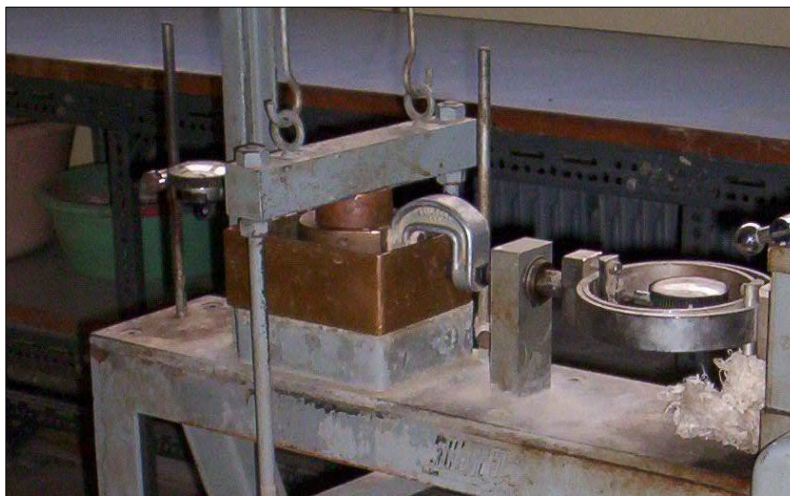
Κατά τη δοκιμή είναι δυνατό να μετρούνται εκτός από τις εφαρμοζόμενες τάσεις και η μεταβολή του πάχους του δοκιμίου και η διατμητική παραμόρφωση με ειδικά μηχανοσκόπια. Το πλαίσιο που κρατά το δοκίμιο θα πρέπει να είναι αρκετά άκαμπτο, έτσι ώστε να αποφεύγεται η στρέβλωση του δοκιμίου.



Εικόνες 9,10,11,12. Το κιβώτιο διάτμησης και η συσκευή άμεσης διάτμησης.

Η συσκευή άμεσης διάτμησης, (κιβώτιο *Casagrande*), περιλαμβάνει:

- Το κιβώτιο διάτμησης που αποτελείται από παραλληλεπίπεδο δοχείο, που στον πυθμένα του υπάρχει σταθερά προσαρμοσμένος δακτύλιος διαμέτρου 2,5 in. Στο δακτύλιο αυτό προσαρμόζεται δεύτερος δακτύλιος της ίδιας διαμέτρου που φέρει βραχίονα, όπου και εξασκείται η δύναμη διάτμησης. Το δείγμα διαμέτρου 6,33 cm και ύψους 1 in (2,54 cm) τίθεται στο κενό των δύο δακτυλίων ανάμεσα σε δύο πορώδεις λίθους.
- Ηλεκτροκίνητη συσκευή επιβολής οριζόντιας σταθερής δύναμης, διαμέσου του δακτυλίου, μεταβλητής ταχύτητας.
- Σύστημα επιβολής φόρτισης με βάρη.
- Μηκυνσιόμετρα.



Εικόνα 13. Επιβολή φορτίου.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές άμεσης διάτμησης. Κατά την πρώτη δοκιμή, το δείγμα που εξετάσθηκε ήταν το αποσαθρωμένο - εδαφοποιημένο υλικό, χωρίς διατηρημένα κομμάτια του γνευσίου. Η δοκιμή έγινε με δύο διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης τάσης (σ_n), 50 kPa – 200 kPa. Η δεύτερη δοκιμή έγινε με τα διατηρημένα κομμάτια του γνευσίου και με τη σχιστότητα των δειγμάτων, παράλληλα στη σχιστότητα διάτμησης. Κατά τη δοκιμή αυτή, εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης τάσης (σ_n), 50 kPa – 100 kPa. Τέλος, η τρίτη δοκιμή, έγινε πάλι με διατηρημένα κομμάτια του γνευσιακού υλικού, αλλά με τυχαίο προσανατολισμό της σχιστότητας ως προς τη σχιστότητα διάτμησης.

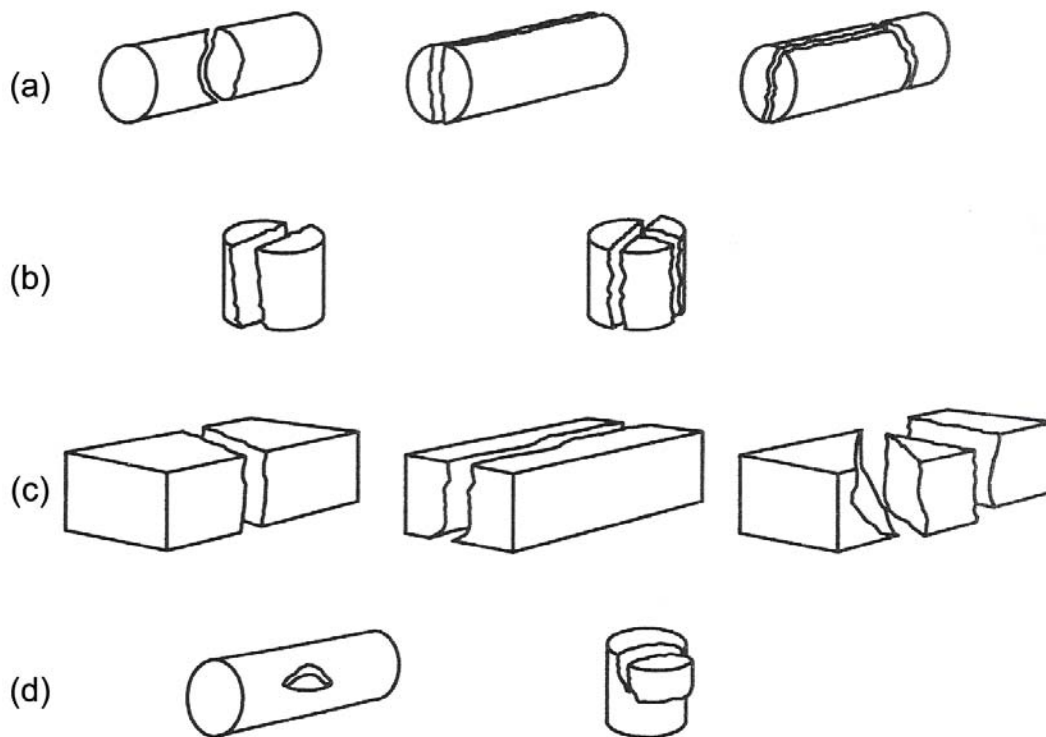
Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι δοκιμές αυτές που πραγματοποιήθηκαν, με το συγκεκριμένο υλικό, δεν προβλέπονται από τις προδιαγραφές της εδαφομηχανικής. Οι προδιαγραφές του κιβωτίου της διατμητικής συσκευής, απαιτούν ψαθυρά ή συνεκτικά – αδιατάρακτα δείγματα. Λόγω της ιδιαιτερότητας του δείγματος, έγιναν ορισμένες δοκιμαστικές διατμήσεις, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν είναι εφικτό, να χρησιμοποιηθεί η συσκευή για τέτοιου είδους δείγματα και να αξιολογηθούν, κατά κάποιο τρόπο, τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών, πριν πραγματοποιηθούν οι κανονικές δοκιμές.

6. ΔΟΚΙΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (POINT LOAD TEST)

6.1 Γενικά

Η δοκιμή σημειακής φόρτισης ή αλλιώς φόρτισης αιχμής, (Εικόνα 14), χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αντοχής δοκιμίων πετρωμάτων, τόσο στο ύπαιθρο, όσο και στο εργαστήριο. Από τη δοκιμή, λαμβάνεται ο διορθωμένος δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση $I_{s(50)}$, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάταξη των πετρωμάτων από πλευράς αντοχής, αλλά και για την άμεση εκτίμηση χονδρικά της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής σε διάφορων διαστάσεων δοκίμια πετρώματος, μπορεί επίσης να μελετηθεί και η επίδραση του όγκου του δοκιμίου στην αντοχή του.

Η δοκιμή σημειακής φορτίσεως, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε κυλινδρικά, είτε σε ορθογωνικά, είτε σε ακανόνιστης μορφής δοκίμια, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση μας. Οι αντίστοιχες μορφές της δοκιμής είναι (Σχήμα 2): (α) διαμετρική δοκιμή, (β) αξονική δοκιμή, (γ) δοκιμή ορθογωνικού δοκιμίου και (δ) δοκιμή ακανόνιστου δοκιμίου, η οποία και πραγματοποιήθηκε.



Σχήμα 2. Τυπικές μορφές αστοχίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή της σημειακής φόρτισης: (α) Αποδεκτές διαμετρικές δοκιμές, (β) Αποδεκτές αξονικές δοκιμές, (γ) Αποδεκτές δοκιμές ορθογωνικού δοκιμίου, (δ) Μη αποδεκτές δοκιμές.

6.1.1 Διαμετρική δοκιμή

Στην περίπτωση αυτή, ένα τεμάχιο πυρήνα, φορτίζεται αντιδιαμετρικά μέχρι θραύσεως με ένα ζεύγος χαλύβδινων ακμών. Κατάλληλα δοκίμια για την εκτέλεση της δοκιμής, θεωρούνται αυτά με λόγο μήκος προς διάμετρο, μεγαλύτερο από 1,0. Η απόσταση D μεταξύ των ακμών φορτίσεως, καταγράφεται με ακρίβεια $\pm 2\%$. Το φορτίο αυξάνεται σταδιακά ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει. Η δύναμη P στην οποία θραύεται ο πυρήνας δίνεται από το δείκτη καταγραφής φορτίου. Η δοκιμή δεν είναι αποδεκτή εάν η επιφάνεια αστοχίας του δοκιμίου διέρχεται μόνο από το ένα σημείο φόρτισης (σχήμα 2a).

6.1.2 Αξονική δοκιμή

Η δοκιμή πραγματοποιείται με φόρτιση του δοκιμίου παράλληλα με τον άξονά του. Τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια πρέπει να έχουν λόγο ύψους προς διάμετρο 0,3/1,0. Η απόσταση D μεταξύ των ακμών φορτίσεως, καταγράφεται με ακρίβεια $\pm 2\%$. Το πλάτος του δοκιμίου W κάθετα προς τη διεύθυνση φορτίσεως, καταγράφεται με ακρίβεια $\pm 5\%$. Το φορτίο αυξάνεται σταδιακά ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει. Η δύναμη P στην οποία θραύεται ο πυρήνας, δίνεται από το δείκτη καταγραφής φορτίου. Η δοκιμή, δεν είναι αποδεκτή εάν η επιφάνεια αστοχίας του δοκιμίου διέρχεται από το ένα σημείο φόρτισης (σχήμα 2b).

6.1.3 Δοκιμή ορθογωνικού και ακανόνιστου δοκιμίου

Τα ορθογωνικού ή ακανόνιστης μορφής δοκίμια πρέπει να έχουν μέγεθος $50 \pm 35 \text{ mm}$. Ο λόγος D/W πρέπει να είναι μεταξύ 0,3 και 1,0 και προτιμάται να πλησιάζει το 1,0. Η απόσταση L πρέπει να είναι τουλάχιστο $0,5W$. Η απόσταση D μεταξύ των ακμών φορτίσεως καταγράφεται με ακρίβεια $\pm 2\%$. Το μικρότερο πλάτος του δοκιμίου W κάθετα προς τη διεύθυνση φορτίσεως καταγράφεται με ακρίβεια $\pm 5\%$. Εάν οι πλευρές του δοκιμίου δεν είναι παράλληλες τότε το W υπολογίζεται ως $W = (W_1 + W_2)/2$. Το φορτίο αυξάνεται σταδιακά ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει. Η δύναμη P στην οποία θραύεται ο πυρήνας, δίνεται από το δείκτη καταγραφής φορτίου. Η δοκιμή δεν είναι αποδεκτή εάν η επιφάνεια αστοχίας του δοκιμίου διέρχεται μόνο από το ένα σημείο φόρτισης (σχήμα 2c&2d).

6.2 Εκτέλεση δοκιμής και υπολογισμοί

Η δοκιμή της σημειακής φόρτισης (*Point load test*), είναι σχετικά απλή. Στη λειτουργία, μοιάζει αρκετά με την μονοαξονική δοκιμή, με τη διαφορά ότι τα δοκίμια μπορεί να είναι ακανόνιστα ενώ η πίεση ασκείται από δύο αιχμηρές άκρες, ανάμεσα στις οποίες τοποθετείται το δοκίμιο.



Εικόνα 14. Συσκευή σημειακής φόρτισης (*Point load*).

Ο μη διορθωμένος δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση I_s , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

όπου: P , το φορτίο τη στιγμή της θραύσεως του δοκιμίου

D_e , η ισοδύναμη διάμετρος του δοκιμίου, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$D_e^2 = D^2$$

για την περίπτωση διαμετρικής δοκιμής

= $4A/\pi$ για την περίπτωση αξονικής δοκιμής και δοκιμής ορθογωνικού ή ακανόνιστου δοκιμίου, όπου $A = W \cdot D$ η επιφάνεια του επιπέδου που διέρχεται από τα σημεία φορτίσεως.

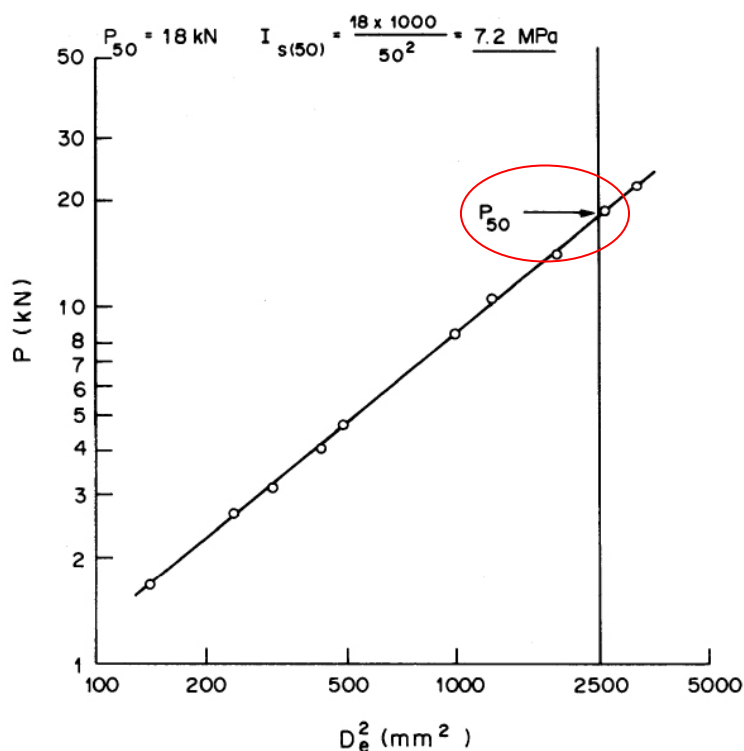
Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα δοκιμών σε διάφορες διαμέτρους, απαιτείται διόρθωση του ως ανωτέρω υπολογιζόμενου δείκτη I_s , ο οποίος είναι συνάρτηση της ισοδύναμης διαμέτρου D_e του δοκιμίου.

Ο διορθωμένος δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση $I_{s(50)}$, ορίζεται ως η τιμή του I_s όταν πραγματοποιείται διαμετρική δοκιμή με $D = 50$ mm.

Η καλύτερη μέθοδος για τον υπολογισμό του $I_{s(50)}$ είναι η πραγματοποίηση διαμετρικής δοκιμής με διάμετρο D να πλησιάζει τα 50 mm, ώστε είτε να μην απαιτείται διόρθωση ή αυτή να εισάγει ελάχιστο σφάλμα.

Η πιο αξιόπιστη μέθοδος για την πραγματοποίηση της διόρθωσης είναι η εκτέλεση μίας σειράς δοκιμών με διάφορες διαμέτρους D ή D_e και η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε σύστημα αξόνων (P, D_e^2) . Εάν χρησιμοποιηθούν λογαριθμικές κλίμακες αξόνων, η σχέση $P - D_e^2$, είναι μία ευθεία από την οποία μπορεί να προσδιορισθεί γραφικά η τιμή $P_{(50)}$, η οποία αντιστοιχεί σε $D_e^2 = 2500$ mm² ($D_e = 50$ mm). Ο δείκτης $I_{s(50)}$, υπολογίζεται τότε από τη σχέση:

$$I_{s(50)} = \frac{P_{(50)}}{50^2}$$



Διάγραμμα Θ4. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων που προκύπτουν από δοκιμές σημειακής φόρτισης με διάφορες ισοδύναμες διαμέτρους D_e και γραφικός υπολογισμός του $P_{(50)}$.

Όταν τα παραπάνω δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν, τότε η διόρθωση μεγέθους μπορεί να γίνει με τη σχέση:

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s$$

όπου F , ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους, ο οποίος λαμβάνεται είτε γραφικά, είτε από τη σχέση:

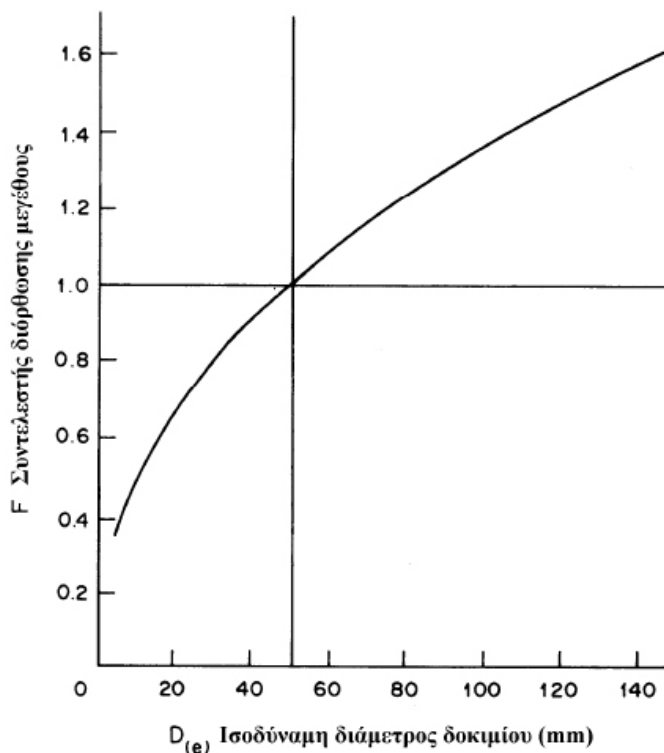
$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45}$$

Όταν η ισοδύναμη διάμετρος D_e πλησιάζει τα 50 mm, τότε για τον υπολογισμό του F μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσεγγιστική σχέση:

$$F = \sqrt{\left(\frac{D_e}{50} \right)}$$

Σύμφωνα με τις οδηγίες της ISRM (1985), η παραπάνω διόρθωση μεγέθους είναι εφαρμόσιμη ανεξάρτητα από τη ύπαρξη ανισοτροπίας στο πέτρωμα και από τη διεύθυνση της φορτίσεως σε σχέση με τα επίπεδα αδυναμίας του πετρώματος.

Ο δείκτης ανισοτροπίας της αντοχής σε σημειακή φόρτιση $I_{a(50)}$, ορίζεται ως ο λόγος του δείκτη $I_{s(50)}$ για φόρτιση κάθετα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος ως προς τον δείκτη $I_{s(50)}$ για φόρτιση παράλληλα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος. Ο δείκτης $I_{a(50)}$, λαμβάνει τιμές κοντά στο 1,0 για την περίπτωση σχετικά ισότοπου πετρώματος και μεγαλύτερες τιμές όταν το πέτρωμα είναι ανισότροπο.



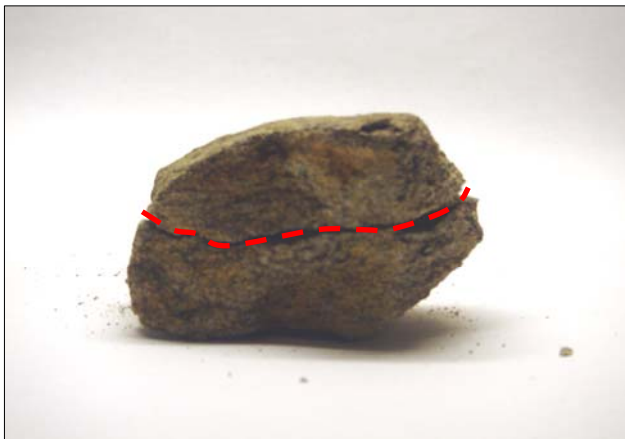
Διάγραμμα Θ5. Διάγραμμα γραφικού υπολογισμού του συντελεστή διόρθωσης μεγέθους F .

Πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές, σε τρία ακανόνιστου σχήματος δοκίμια. Πριν την κάθε δοκιμή, μετρήθηκαν το πάχος D_e , το μήκος L και το πλάτος H του κάθε δοκίμιου.

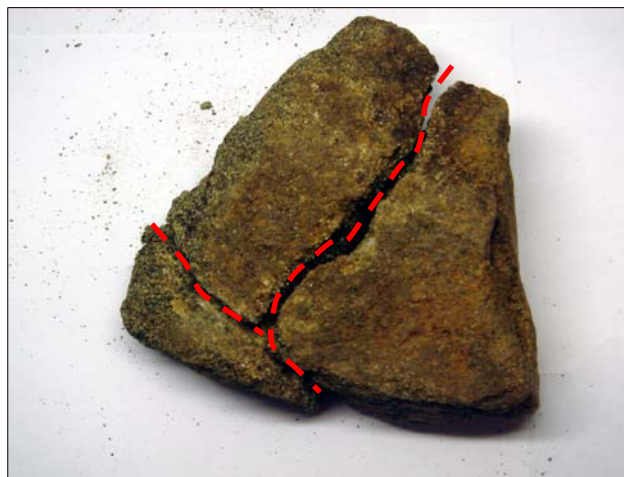
Στην πρώτη και στη δεύτερη δοκιμή, τα δείγματα τοποθετήθηκαν κάθετα προς τη στρώση, ενώ στην τρίτη δοκιμή, το δείγμα τοποθετήθηκε παράλληλα προς τη στρώση.

Παρακάτω φαίνονται τα τρία δοκίμια πριν και μετά τη δοκιμή, καθώς και οι επιφάνειες στις οποίες έσπασε το κάθε δοκίμιο (Εικόνες 15-23).

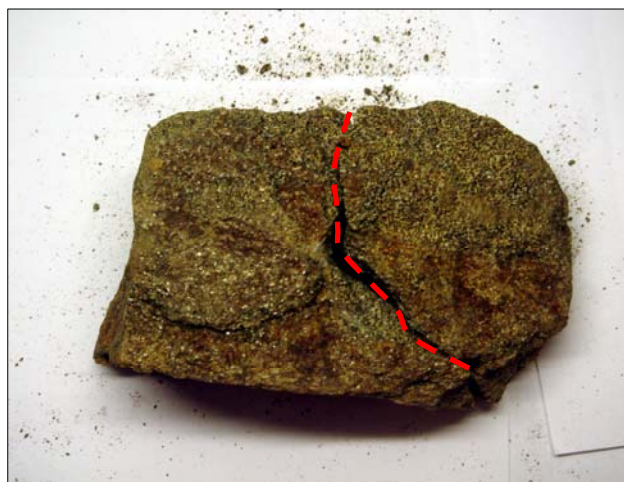
ΔΟΚΙΜΙΟ 1
ΔΟΚΙΜΗ 1^η



ΔΟΚΙΜΙΟ 2
ΔΟΚΙΜΗ 2^η



ΔΟΚΙΜΙΟ 3
ΔΟΚΙΜΗ 3^η





Εικόνα 24. Τα δείγματα στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές Point load.



Πειραματικό μέρος

1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

α) Αποτελέσματα δοκιμής προσδιορισμού περιεχόμενης υγρασίας.

ΔΟΚΙΜΗ	1	2
Βάρος κάψας (gr)	16,66	16,74
Βάρος υγρού εδάφους & κάψας (gr)	49,82	49,98
Βάρος ξηρού εδάφους & κάψας W_s (gr)	48,07	48,15
Βάρος νερού W_w (gr)	1,75	1,83
Περιεχόμενη υγρασία m (%)	3,64	3,80
M.O %	3,72	

Πίνακας Π1. Αποτελέσματα δύο δοκιμών προσδιορισμού της φυσικής υγρασίας και ο μέσος όρος αυτών.

β) Αποτελέσματα δοκιμής προσδιορισμού υγρού φαινόμενου βάρους.

Διαστάσεις δακτυλίου	
– Υψος (cm)	1,3
– Διάμετρος (cm)	2,54
– Εμβαδό επιφάνειας δακτυλίου (cm ²)	5,065
– Όγκος V (cm ³)	6,584
$\gamma = W/V$ (gr/cm³)	1,523

Πίνακας Π2. Αποτελέσματα δοκιμής προσδιορισμού υγρού φαινόμενου βάρους γ .

2. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΚΟΣΚΙΝΑ

Αρχικό ξηρό βάρος πριν την πλύση: 648,31 gr

Ξηρό βάρος μετά την πλύση: 533,33 gr

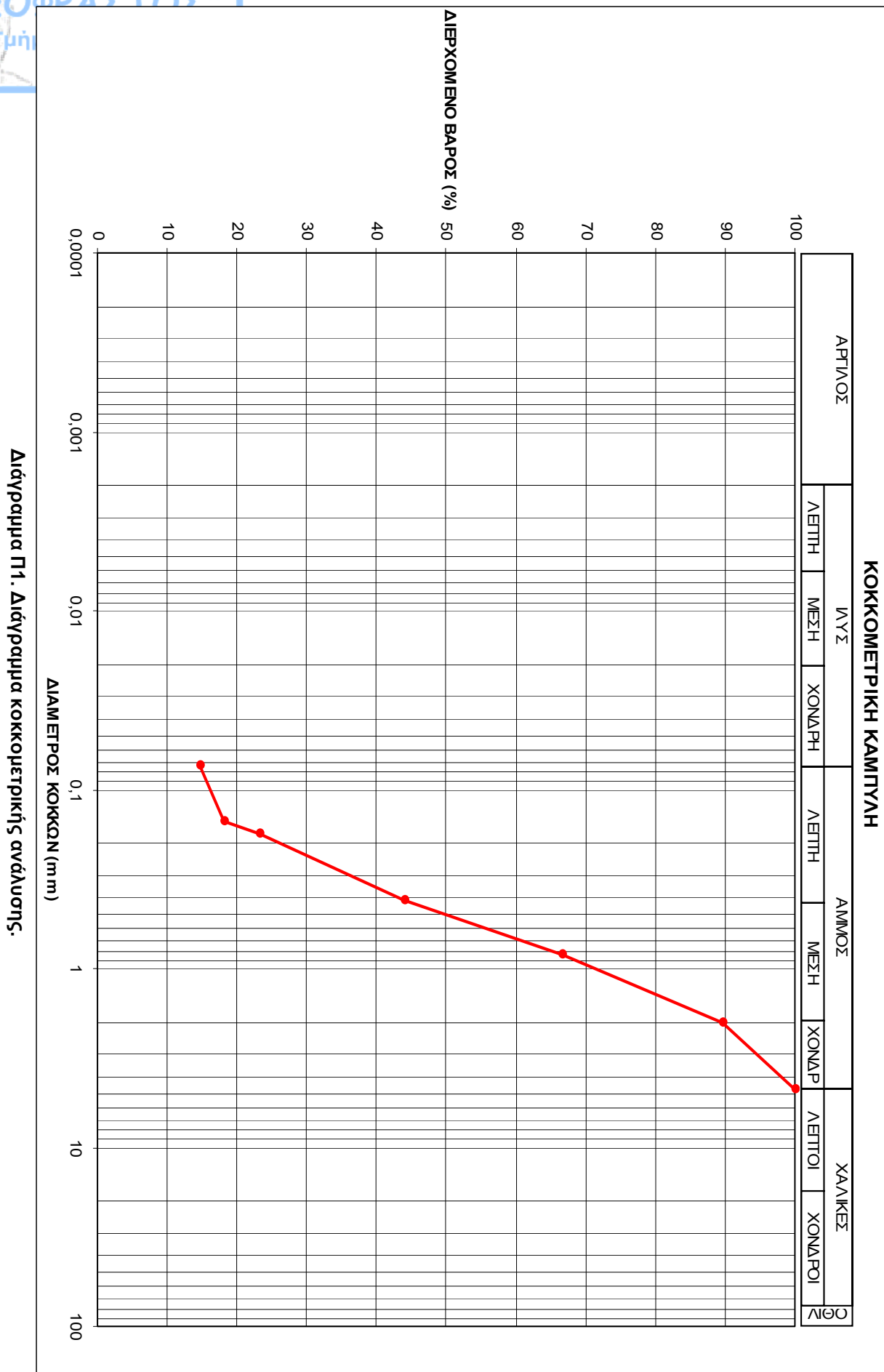
α/α	No.	Ανοιγμα κοσκίνου (mm)	Ίντσες (in)	Βάρος κόσκινου (gr)	Βάρος κοσκίνου + έδαφος (gr)	Συγκρ. βάρος (gr)	Σύνολο συγκρ. βάρος (gr)	Συγκρατ. βάρος %	Διερχ. Βάρος %
1	4	4,76	0,187	450,74	450,91	0,17	0,17	0,026	99,974
2	10	2	0,0787	386,79	454,06	67,27	67,44	10,402	89,598
3	20	0,84	0,0331	359,78	509,04	149,26	216,7	33,425	66,575
4	40	0,42	0,0165	313,37	459,95	146,58	363,28	56,035	43,965
5	80	0,177	0,007	287,26	422,04	134,78	498,06	76,824	23,176
6	100	0,149	0,0059	282,25	315,12	32,87	530,93	81,894	18,106
7	200	0,074	0,0029	272,58	294,98	22,4	553,33	85,350	14,650
Παιπάλη				322,71	417,69	94,98	648,31	100,000	0,000

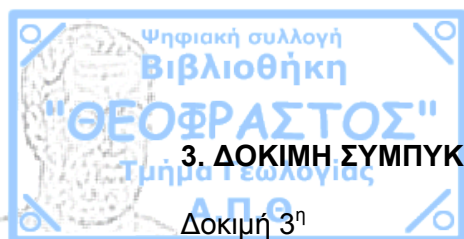
Πίνακας Π3. Κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο των κοσκίνων.

- Συντελεστής ομοιομορφίας: $U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \Rightarrow U = 11,43$

Το δείγμα χαρακτηρίζεται *ανομοιομόρφο* σύμφωνα με τον πίνακα Θ7 ($5 < U < 15$).

- Βαθμός διαβάθμισης: $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \Rightarrow C_c = 1,12$





3. ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PROCTOR

Δοκιμή 3^η

Βάρος κάψας: 100 gr

Μεικτό ξηρό κοσκινισμένο βάρος: 3,05 kg

Καθαρό ξηρό κοσκινισμένο βάρος: 2,95 kg

Χαρακτηριστικά μεταλλικής μήτρας και δείγματος:

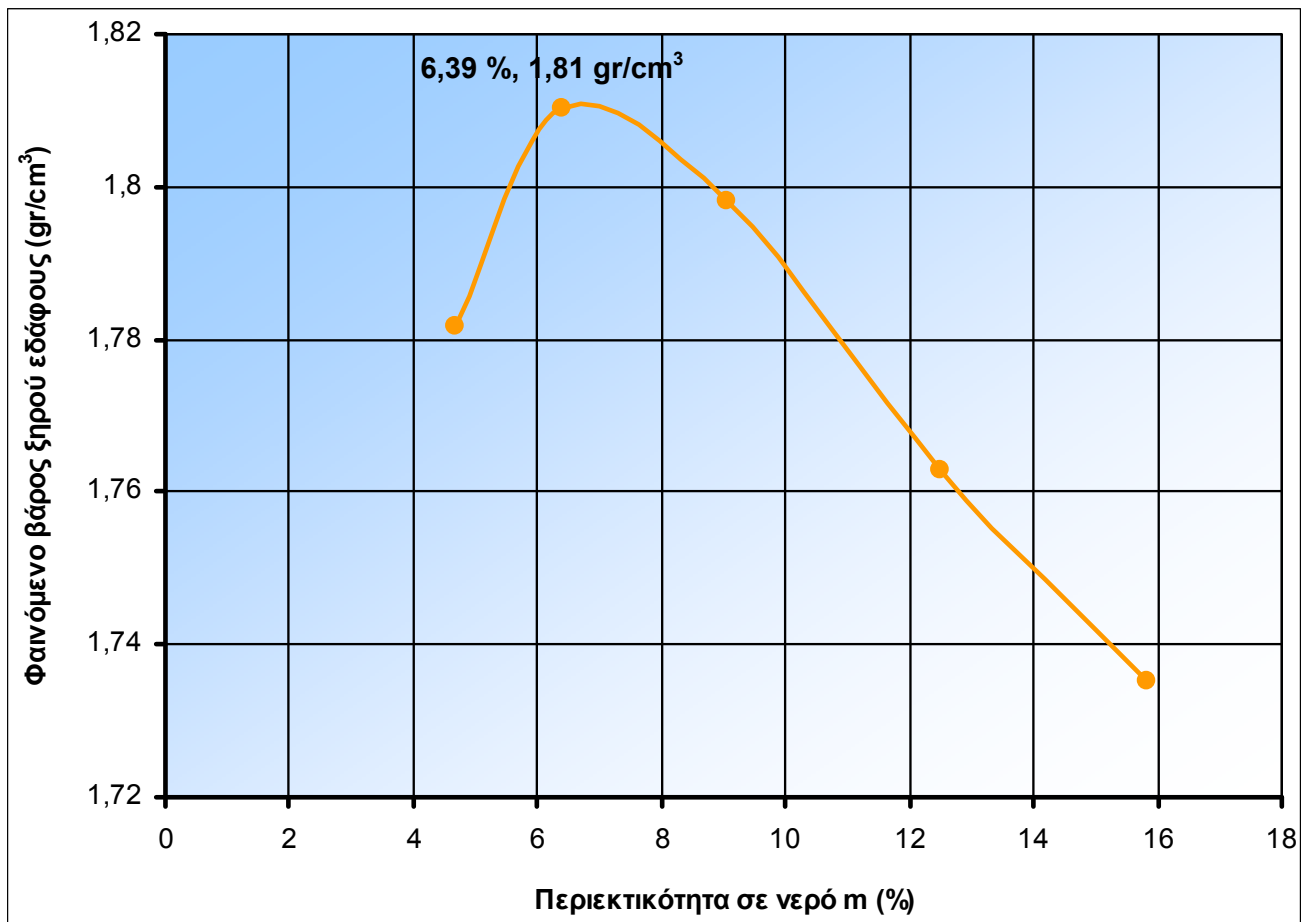
- Διάμετρος δείγματος: 10,16 cm
- Ύψος δείγματος: 11,64 cm
- Βάρος μήτρας: 4140 gr
- Επιφάνεια δείγματος: 81,03 cm²
- Όγκος δείγματος: 943,21 cm³

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	1	2	3	4	5
Υγρασία %	4,68	6,39	9,06	12,49	15,84
Βάρος υγρού εδάφους & απόβαρο (gr)	5819	5957	5990	6010	6130
Βάρος υγρού εδάφους (gr)	1679	1817	1850	1870	1990
Φαινόμενο βάρος υγρού εδάφους (gr/cm ³)	1,865	1,929	1,961	1,983	2,01
Φαινόμενο βάρος ξηρού εδάφους (gr/cm ³)	1,781	1,813	1,80	1,762	1,740

Πίνακας Π4. Αποτελέσματα δοκιμής συμπίκνωσης με τη μέθοδο του Proctor.

Βάρος κάψας (gr)	17,43	17,75	17,36	26,81	17,8
Βάρος υγρού εδάφους & κάψας (gr)	86,56	73,34	104,76	132	113,29
Βάρος ξηρού εδάφους & κάψας (gr)	83,47	70	97,5	120,32	100,23
Βάρος νερού (gr)	3,09	3,34	7,26	11,68	13,06
Περιεχόμενη υγρασία m (%)	4,68	6,39	9,06	12,49	15,84

Πίνακας Π5. Προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας.



Διάγραμμα Π2. Διάγραμμα συμπίκνωσης εδάφους.

4. ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές διατμήσεων, με διαφορετική τοποθέτηση του δείγματος κάθε φορά.

Α' ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

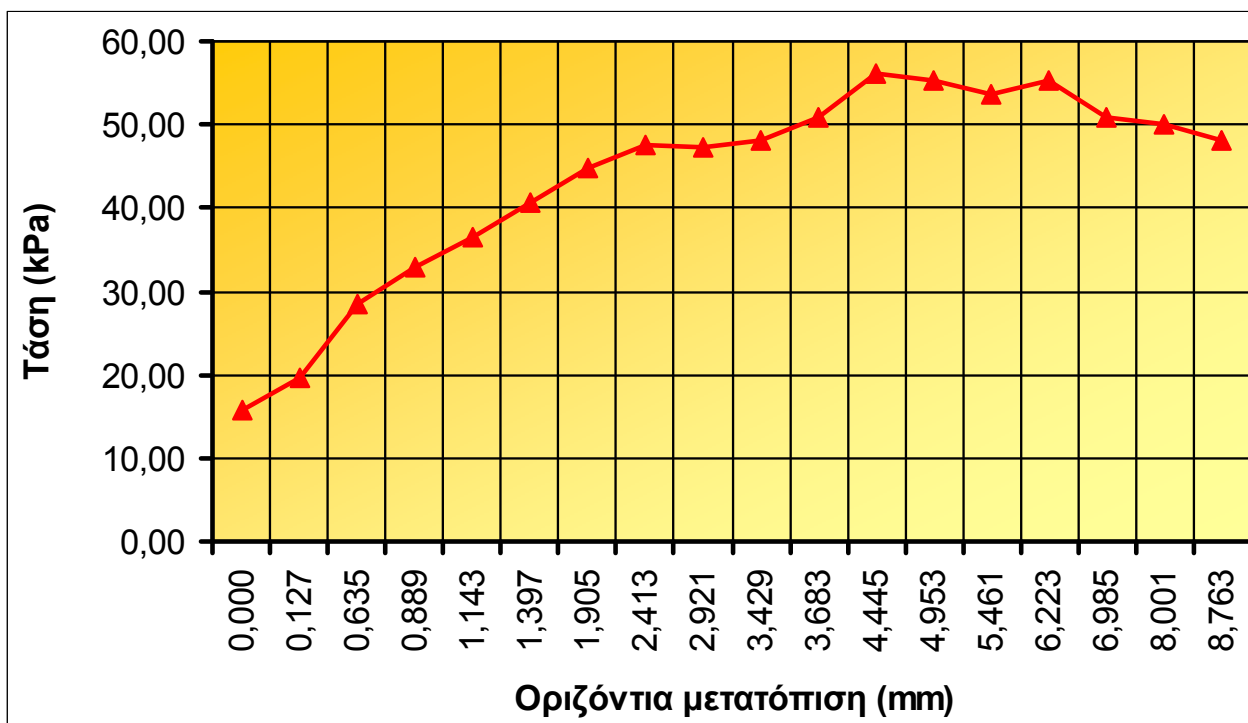
Δοκιμή Α1: Τυχαία τοποθέτηση αποσαθρωμένου υλικού χωρίς υγιή κομμάτια.

Διάμετρος δείγματος (mm)	63,3
Ύψος δοκιμίου (mm)	39,5
Κατακόρυφη τάση (kPa)	50,0
Συντελεστής διακρίβωσης δακτυλίου (Nt/mm)	1,432

Μεταβολή διαμέτρου ($\times 10^{-3}$ inch)	Ένδειξη δυναμομέτρου	Δύναμη διάτμησης (Nt)	Οριζόντια μετατόπιση (mm)	Τάση (kPa)
5	44	63,00	0,000	15,72
10	55	78,74	0,127	19,65
30	80	114,54	0,635	28,59
40	92	131,72	0,889	32,87
50	102	146,04	1,143	36,45
60	114	163,22	1,397	40,73
80	125	178,97	1,905	44,66
100	133	190,42	2,413	47,52
120	132	188,99	2,921	47,17
140	135	193,28	3,429	48,24
150	142	203,30	3,683	50,74
180	157	224,78	4,445	56,10
200	155	221,92	4,953	55,38
220	150	214,76	5,461	53,60
250	155	221,92	6,223	55,38
280	142	203,30	6,985	50,74
320	140	200,44	8,001	50,02
350	135	193,28	8,763	48,24

Πίνακας Π6. Μετρήσεις από τη δοκιμή Α1.

ΔΟΚΙΜΗ Α1



Διάγραμμα Π3. Μεταβολή της διατμητικής τάσης συναρτήσει των οριζόντιων παραμορφώσεων.

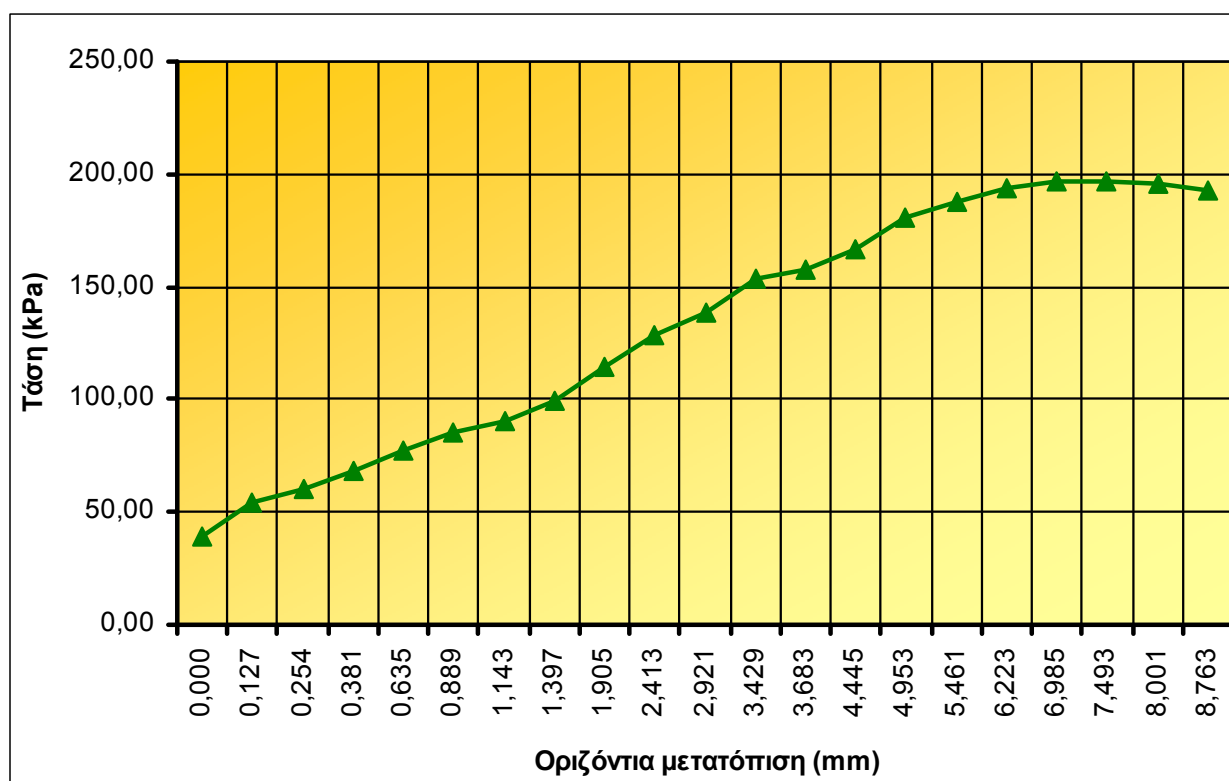
Δοκιμή Α2: Τυχαία τοποθέτηση αποσαθρωμένου υλικού χωρίς υγιή κομμάτια.

Διάμετρος δείγματος (mm)	63,3
Ύψος δοκιμίου (mm)	39
Κατακόρυφη τάση (kPa)	200,0
Συντελεστής διακρίβωσης δακτυλίου (Nt/mm)	1,432

Μεταβολή διαμέτρου ($\times 10^{-3}$ inch)	Ένδειξη δυναμομέτρου	Δύναμη διάτμησης (Nt)	Οριζόντια μετατόπιση (mm)	Τάση (kPa)
5	110	157,49	0,000	39,30
10	151	216,19	0,127	53,95
15	168	240,53	0,254	60,03
20	190	272,03	0,381	67,89
30	215	307,82	0,635	76,82
40	240	343,61	0,889	85,76
50	254	363,66	1,143	90,76
60	279	399,45	1,397	99,69
80	320	458,15	1,905	114,34
100	360	515,42	2,413	128,63
120	387	554,08	2,921	138,28
140	430	615,64	3,429	153,65
150	442	632,82	3,683	157,93
180	467	668,61	4,445	166,87
200	505	723,02	4,953	180,44
220	526	753,08	5,461	187,95
250	543	777,42	6,223	194,02
280	550	787,45	6,985	196,52
300	552	790,31	7,493	197,24
320	547	783,15	8,001	195,45
350	540	773,13	8,763	192,95

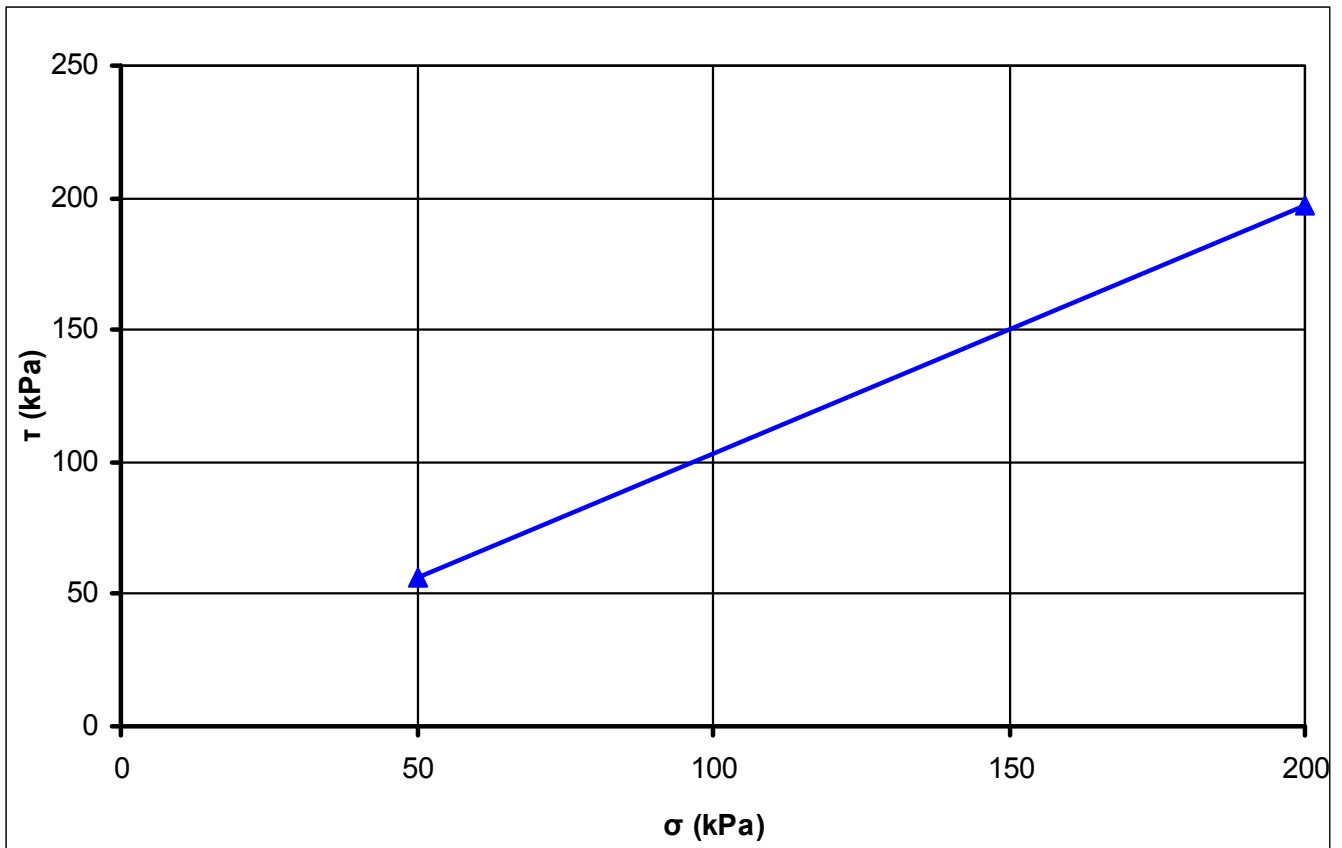
Πίνακας Π7. Μετρήσεις από τη δοκιμή Α2.

ΔΟΚΙΜΗ Α2



Διάγραμμα Π4. Μεταβολή της διατμητικής τάσης συναρτήσει των οριζόντιων παραμορφώσεων.

c (kPa)	φ
15,3	29°



Διάγραμμα Π5. Προσδιορισμός της ευθείας θραύσης, της γωνίας εσωτερικής τριβής φ και της συνοχής c , για την Α' σειρά δοκιμών (Α1, Α2, Α3), αποσαθρωμένου υλικού χωρίς υγιή κομμάτια.

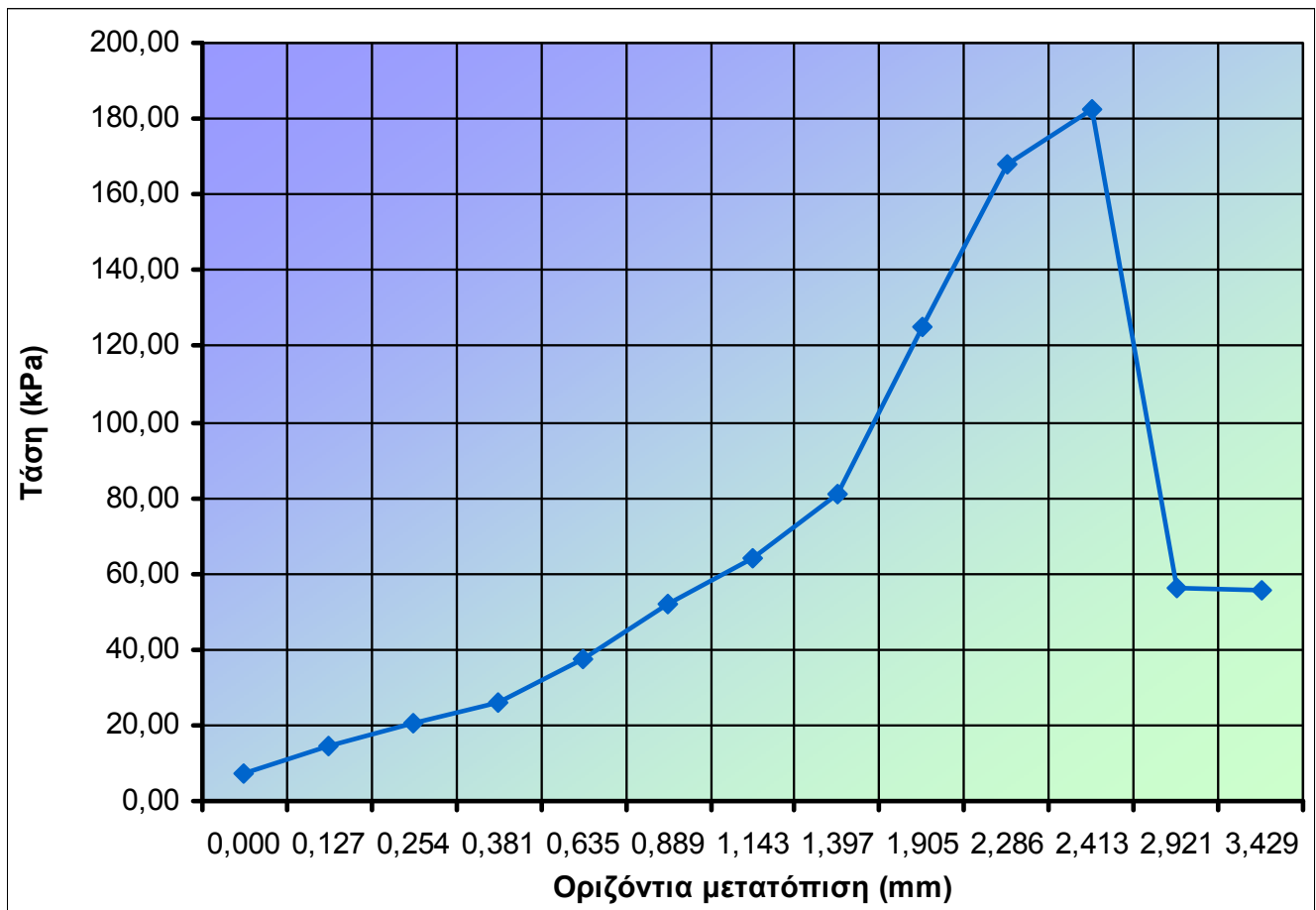
Δοκιμή B1: Υγρές πέτρωμα, με τη σχιστότητα παράλληλα στη διεύθυνση διάτμησης.

Διάμετρος δείγματος (mm)	63,3
Ύψος δοκιμίου (mm)	31,5
Κατακόρυφη τάση (kPa)	50,0
Συντελεστής διακρίβωσης δακτυλίου (Nt/mm)	1,432

Μεταβολή διαμέτρου ($\times 10^{-3}$ inch)	Ένδειξη δυναμομέτρου	Δύναμη διάτμησης (Nt)	Οριζόντια μετατόπιση (mm)	Τάση (kPa)
5	20	28,63	0,000	7,15
10	40	57,27	0,127	14,29
15	58	83,04	0,254	20,72
20	72	103,08	0,381	25,73
30	105	150,33	0,635	37,52
40	146	209,03	0,889	52,17
50	179	256,28	1,143	63,96
60	227	325,00	1,397	81,11
80	350	501,10	1,905	125,06
95	470	672,91	2,286	167,94
100	510	730,18	2,413	182,23
120	157	224,78	2,921	56,10
140	155	221,92	3,429	55,38

Πίνακας Π8. Μετρήσεις από τη δοκιμή B1.

ΔΟΚΙΜΗ Β1



Διάγραμμα Π6. Μεταβολή της διατμητικής τάσης συναρτήσει των οριζόντιων παραμορφώσεων.

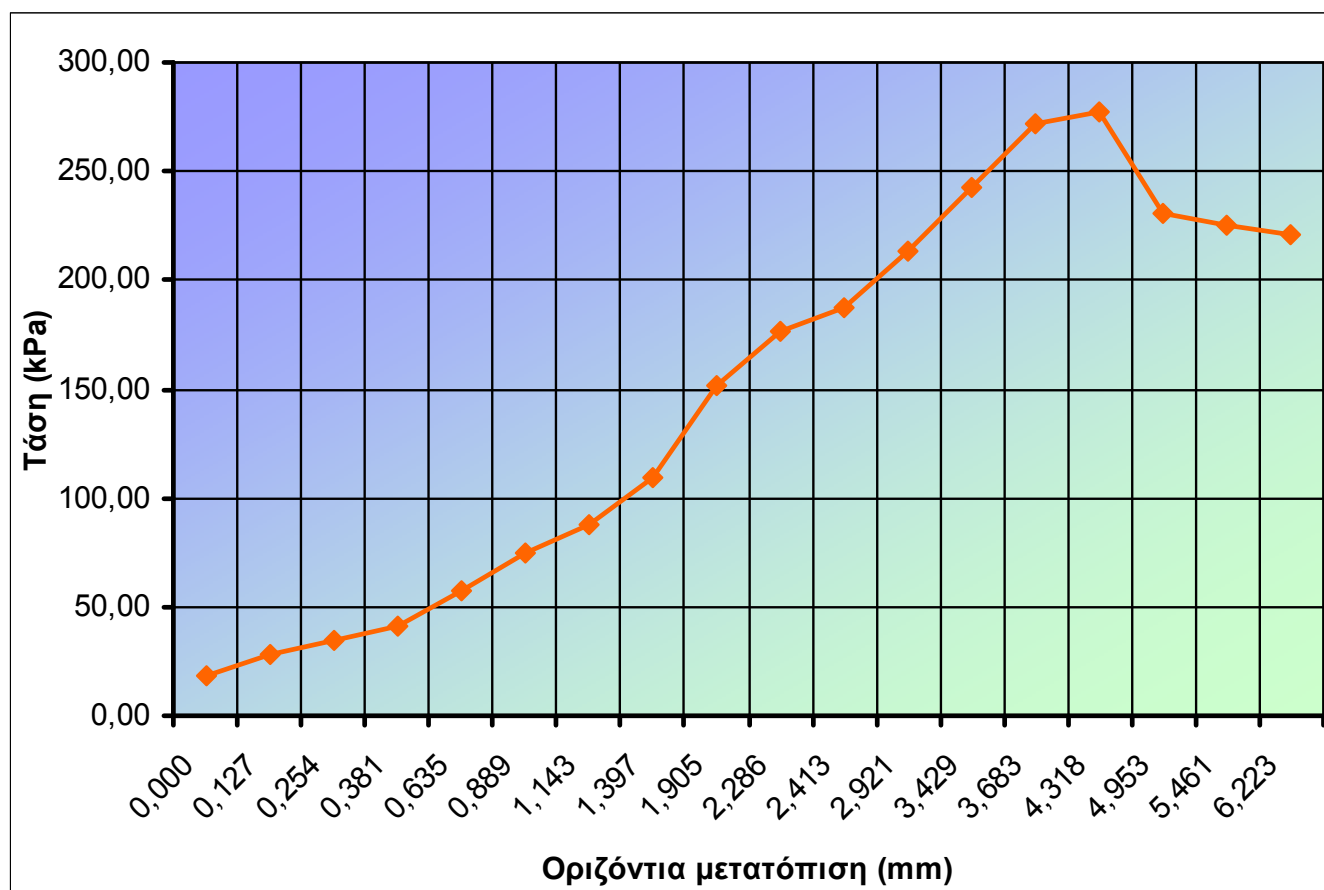
Δοκιμή B2: Υγιές πέτρωμα, με τη σχιστότητα παράλληλα στη διεύθυνση διάτμησης.

Διάμετρος δείγματος (mm)	63,3
Ύψος δοκιμίου (mm)	28,5
Κατακόρυφη τάση (kPa)	100,0
Συντελεστής διακρίβωσης δακτυλίου (Nt/mm)	1,432

Μεταβολή διαμέτρου ($\times 10^{-3}$ inch)	Ένδειξη δυναμομέτρου	Δύναμη διάτμησης (Nt)	Οριζόντια μετατόπιση (mm)	Τάση (kPa)
5	52	74,45	0,000	18,58
10	79	113,11	0,127	28,23
15	96	137,45	0,254	34,30
20	115	164,65	0,381	41,09
30	162	231,94	0,635	57,88
40	210	300,66	0,889	75,04
50	247	353,63	1,143	88,26
60	305	436,67	1,397	108,98
80	425	608,48	1,905	151,86
95	495	708,70	2,286	176,87
100	525	751,65	2,413	187,59
120	598	856,17	2,921	213,67
140	680	973,57	3,429	242,97
150	760	1088,11	3,683	271,56
175	775	1109,58	4,318	276,92
200	645	923,46	4,953	230,47
220	630	901,98	5,461	225,11
250	618	884,80	6,223	220,82

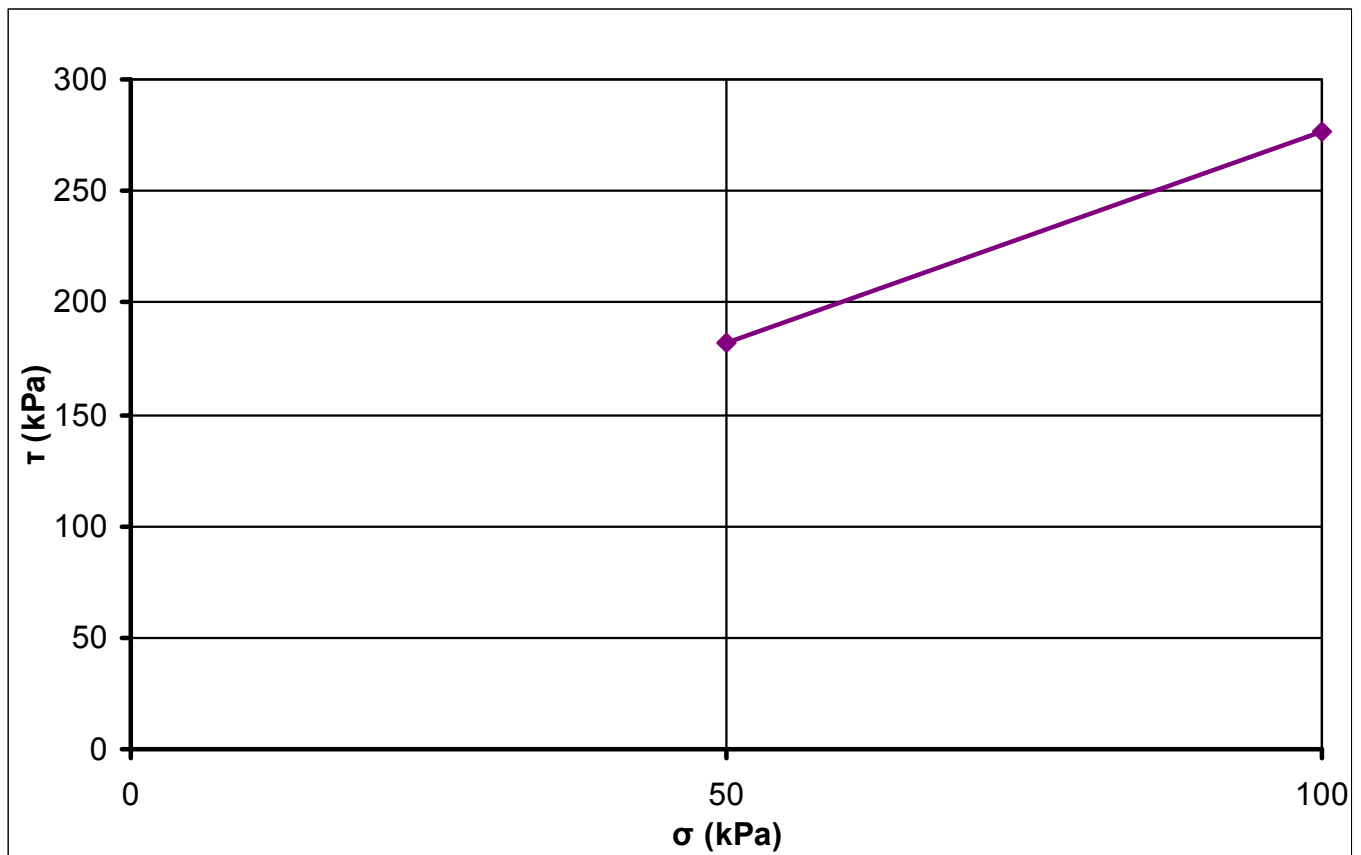
Πίνακας Π9. Μετρήσεις από τη δοκιμή B2.

ΔΟΚΙΜΗ Β2



Διάγραμμα Π7. Μεταβολή της διατμητικής τάσης συναρτήσει των οριζόντιων παραμορφώσεων.

c (kPa)	φ
88,63	22°



Διάγραμμα Π8. Προσδιορισμός της ευθείας θραύσης, της γωνίας εσωτερικής τριβής φ και της συνοχής c , για τη Β' σειρά δοκιμών (B1, B2), σε υγιή πετρώματα, με τη σχιστότητα παράλληλα στη διεύθυνση διάτμησης.

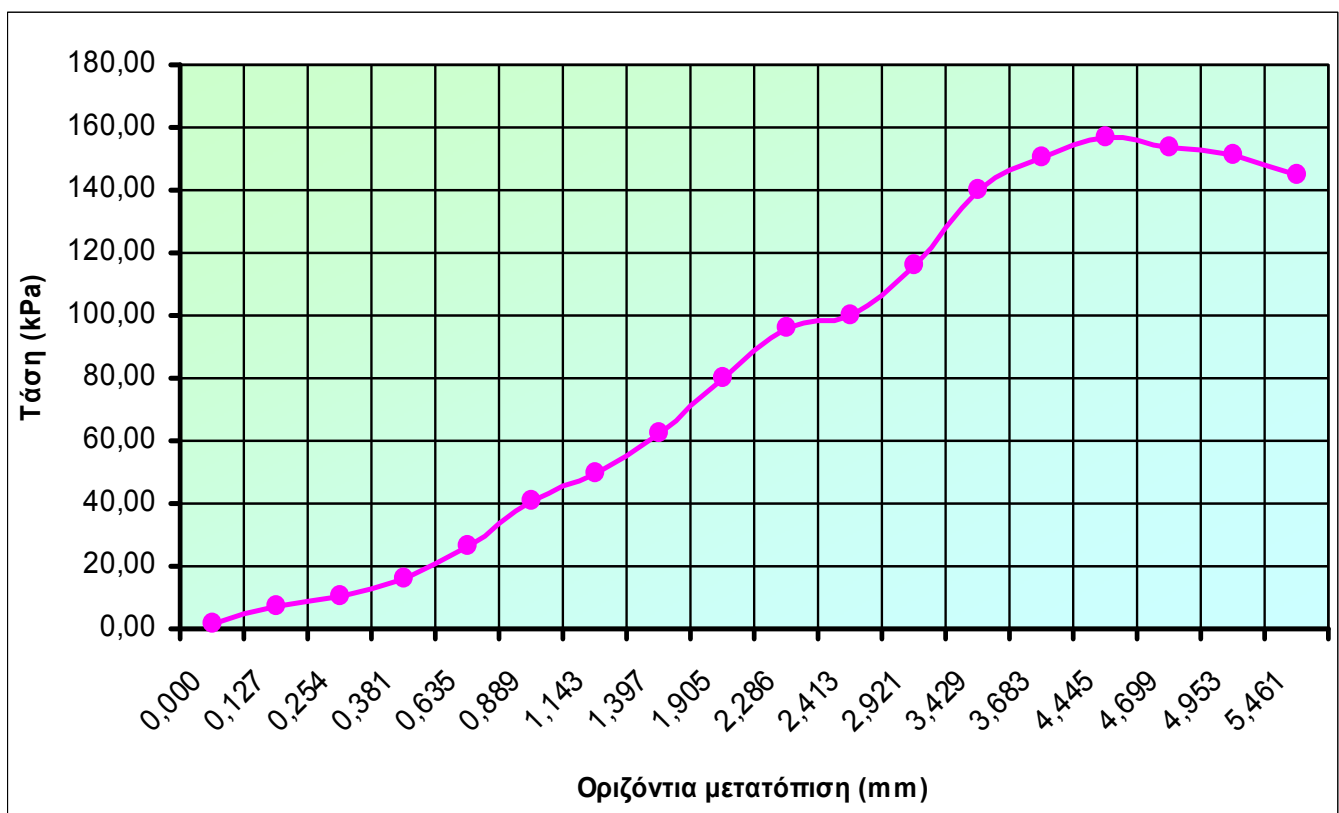
Δοκιμή Γ1: Υγιές πέτρωμα, με τυχαίο προσανατολισμό.

Διάμετρος δείγματος (mm)	63,3
Ύψος δοκιμίου (mm)	30,5
Κατακόρυφη τάση (kPa)	50,0
Συντελεστής διακρίβωσης δακτυλίου (Nt/mm)	1,432

Μεταβολή διαμέτρου ($\times 10^{-3}$ inch)	Ένδειξη δυναμομέτρου	Δύναμη διάτμησης (Nt)	Οριζόντια μετατόπιση (mm)	Τάση (kPa)
5	5	7,16	0,000	1,79
10	20	28,63	0,127	7,15
15	30	42,95	0,254	10,72
20	44	63,00	0,381	15,72
30	74	105,95	0,635	26,44
40	115	164,65	0,889	41,09
50	138	197,58	1,143	49,31
60	175	250,55	1,397	62,53
80	223	319,27	1,905	79,68
95	269	385,13	2,286	96,12
100	280	400,88	2,413	100,05
120	325	465,31	2,921	116,13
140	392	561,23	3,429	140,07
150	420	601,32	3,683	150,07
180	438	627,09	4,445	156,50
190	430	615,64	4,699	153,65
200	423	605,62	4,953	151,14
220	405	579,85	5,461	144,71

Πίνακας Π10. Μετρήσεις από τη δοκιμή Γ1.

ΔΟΚΙΜΗ Γ1



Διάγραμμα Π9. Μεταβολή της διατμητικής τάσης συναρτήσει των οριζόντιων παραμορφώσεων.

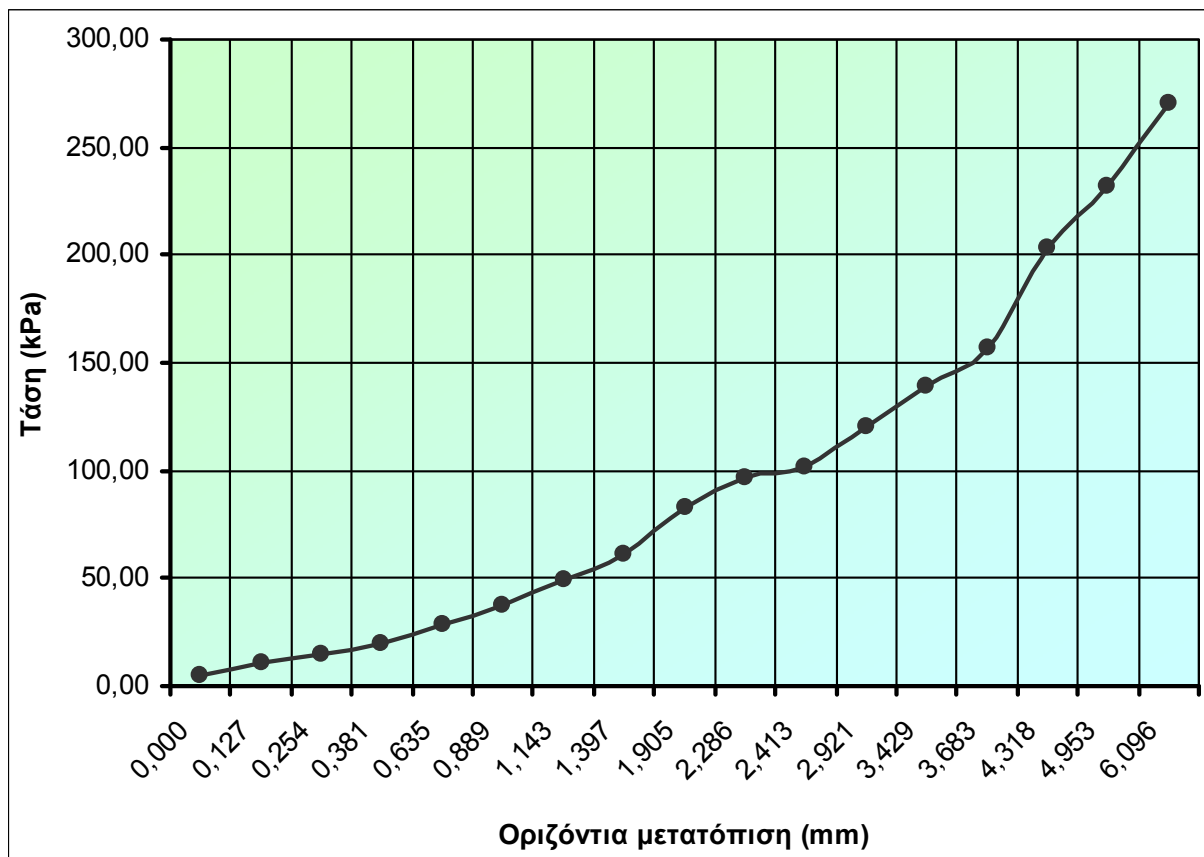
Δοκιμή Γ2: Υγίς πέτρωμα, με τυχαίο προσανατολισμό.

Διάμετρος δείγματος (mm)	63,3
Ύψος δοκιμίου (mm)	37,5
Κατακόρυφη τάση (kPa)	100,0
Συντελεστής διακρίβωσης δακτυλίου (Nt/mm)	1,432

Μεταβολή διαμέτρου ($\times 10^{-3}$ inch)	Ένδειξη δυναμομέτρου	Δύναμη διάτμησης (Nt)	Οριζόντια μετατόπιση (mm)	Τάση (kPa)
5	15	21,48	0,000	5,36
10	30	42,95	0,127	10,72
15	42	60,13	0,254	15,01
20	56	80,18	0,381	20,01
30	80	114,54	0,635	28,59
40	105	150,33	0,889	37,52
50	138	197,58	1,143	49,31
60	172	246,26	1,397	61,46
80	232	332,16	1,905	82,90
95	270	386,56	2,286	96,47
100	284	406,61	2,413	101,48
120	338	483,92	2,921	120,77
140	390	558,37	3,429	139,35
150	440	629,96	3,683	157,22
175	570	816,08	4,318	203,67
200	650	930,62	4,953	232,25
245	758	1085,24	6,096	270,84

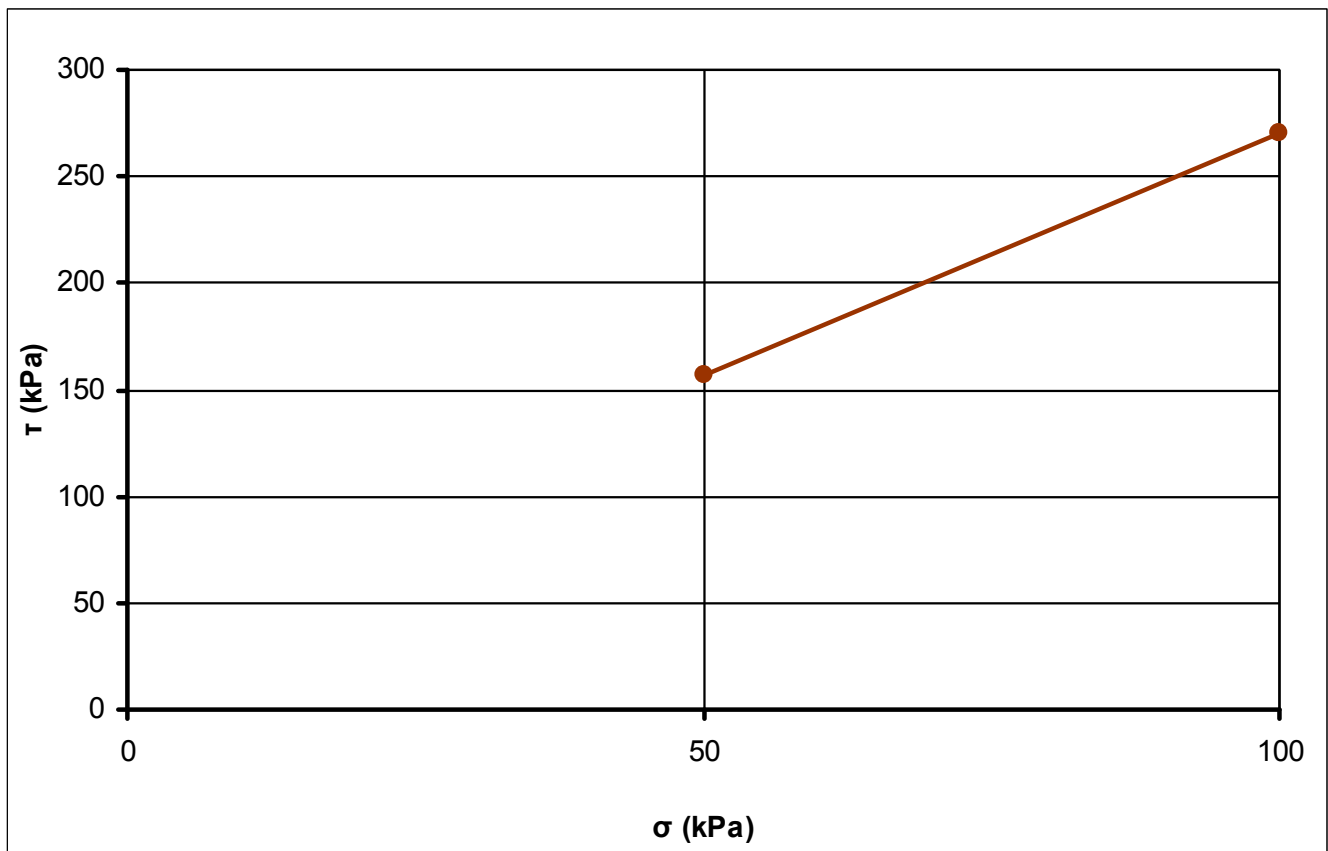
Πίνακας Π11. Μετρήσεις από τη δοκιμή Γ2.

ΔΟΚΙΜΗ Γ2



Διάγραμμα Π10. Μεταβολή της διατμητικής τάσης συναρτήσει των οριζόντιων παραμορφώσεων.

c (kPa)	φ
43,18	25°



Διάγραμμα Π12. Προσδιορισμός της ευθείας θραύσης, της γωνίας εσωτερικής τριβής φ και της συνοχής c , για τη Γ' σειρά δοκιμών (Γ1, Γ2), σε υγιή πετρώματα, με τυχαίο προσανατολισμό.

5. ΔΟΚΙΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (POINT LOAD TEST)

Δοκιμή 5^η: Αποτελέσματα δοκιμής σημειακής φόρτισης.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές ως εξής:

Δοκιμή 1 ➔ Κάθετα στη στρώση

Δοκιμή 2 ➔ Κάθετα στη στρώση

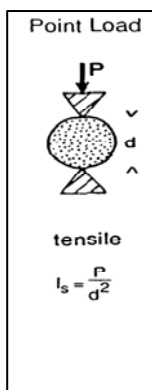
Δοκιμή 3 ➔ Παράλληλα στη στρώση

Στοιχεία Δοκιμίου	θα πρέπει $L > D_e$
1. Πάχος: $D_e = 55,5$ mm	Μήκος: $L = 131$ mm
2. Πάχος: $D_e = 40$ mm	Μήκος: $L = 122$ mm
3. Πάχος: $D_e = 48,6$ mm	Μήκος: $L = 73,7$ mm

Πίνακας Π12. Χαρακτηριστικά των τριών δοκιμών.

Δοκιμή	Φορτίο θραύσης P (KN)	Συντελ. Διόρθωσης F	I_s (MPa)	$I_{s(50)}$ (MPa)
1	3,800	1,048	0,340	0,357
2	3,000	0,904	0,565	0,511
3	2,500	0,987	0,418	0,413
M.O				0,427

Πίνακας Π13. Αποτελέσματα δοκιμών.



Παρατηρήσεις:

$$I_s = P/D_e^2$$

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s, \text{ όπου } F = (D_e/50)^{0.45}$$

Τα σ_c και E_t υπολογίζονται βάσει του $I_{s(50)}$

$$\sigma_c = 22 \cdot I_{s(50)}$$

$$E_t = (0.588 \cdot I_s + 0.084) \cdot 10^4$$

Χαρακτηρισμός αντοχής	$I_{s(50)}$
Πολύ υψηλής αντοχής	> 8
Υψηλής αντοχής	4-8
Μέσης αντοχής	2-4
Χαμηλής αντοχής	1-2
Πολύ χαμηλής αντοχής	Δε συνιστάται δοκιμή

Πίνακας Π14. Χαρακτηρισμός αντοχής σύμφωνα με την τιμή του $I_{s(50)}$.

Χαρακτηρισμός αντοχής ➔ Πολύ χαμηλής αντοχής

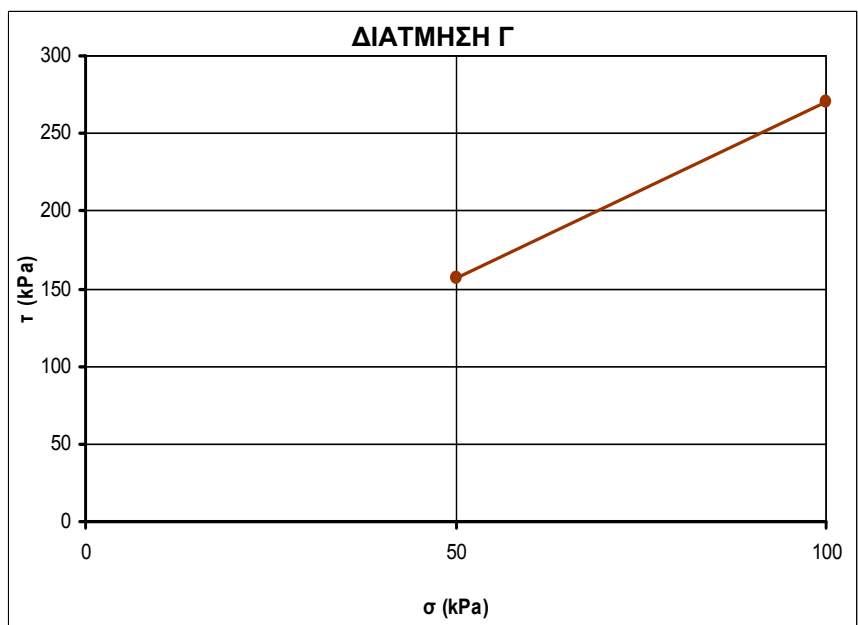
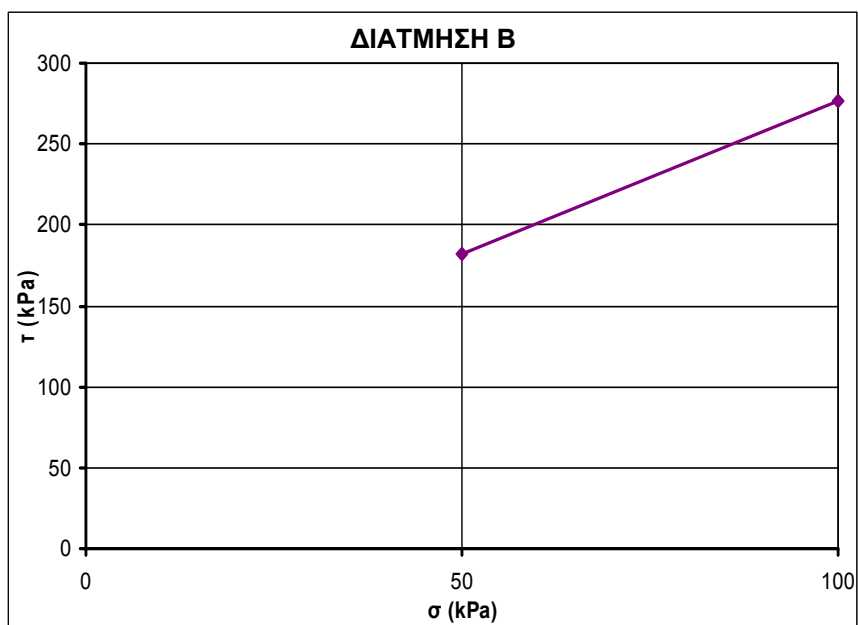
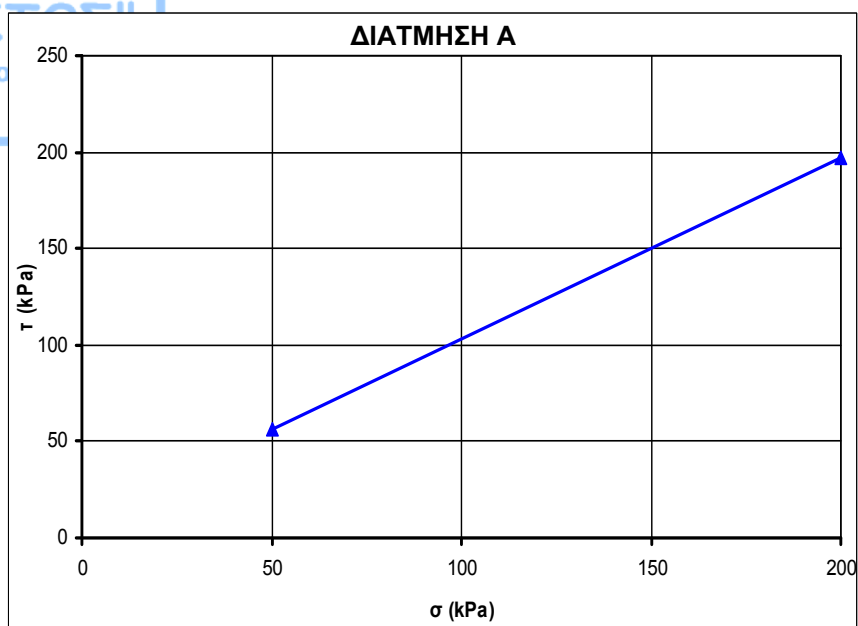
Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση των παραμέτρων του «Unit B». Πρόκειται, όπως προαναφέρθηκε, για ένα γνευσιακό πέτρωμα, υψηλά ως τελείως αποσασθρωμένο – εδαφοποιημένο υλικό και το οποίο τοπικά περιέχει κάποια πιο διατηρημένα κομμάτια, λιγότερο αποσασθρωμένα, τα οποία διατηρούν σε ορισμένο βαθμό τη συνοχή και τη σχιστότητα τους.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στις δοκιμές άμεσης διάτμησης, αφού οι παράμετροι της συνοχής c και της γωνίας εσωτερικής τριβής φ , είναι αυτές που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ευστάθεια των πρηνών και συνεπώς συνδέονται άμεσα με την ασφάλεια των τεχνικών έργων.

Από τις τρεις σειρές δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, στο αποσασθρωμένο υλικό, στο διατηρημένο υλικό με τη σχιστότητα προσανατολισμένη παράλληλα με τη διεύθυνση διάτμησης και στο διατηρημένο υλικό τυχαία προσανατολισμένο ως προς τη διεύθυνση διάτμησης, οι παράμετροι c και φ διακυμάνθηκαν αντίστοιχα ως εξής:

Unit B	Διάτμηση A	Διάτμηση B	Διάτμηση Γ
c (kPa)	15,3	88,63	43,18
φ	29°	22°	25°

Πίνακας Π15. Τιμές των παραμέτρων c και φ όπως προέκυψαν από τις τρεις σειρές δοκιμών άμεσης διάτμησης.



Συγκρίνοντας τις τρεις τιμές των c και φ από τις τρεις διατμήσεις, παρατηρούμε ότι:

Στο πλήρως εδαφοποιημένο υλικό (Διάτμηση Α), η γωνία εσωτερικής τριβής φ έχει τη μεγαλύτερη τιμή (29°), ενώ στα αποσαθρωμένα κομμάτια με τη σχιστότητα παράλληλα ως προς τη διεύθυνση διάτμησης (Διάτμηση Β), η γωνία εσωτερικής τριβής φ παίρνει τη μικρότερη τιμή στις 22° και ξαναυξάνεται στις 25° για τα αποσαθρωμένα κομμάτια, τυχαία προσανατολισμένα ως προς τη διεύθυνση διάτμησης, (Διάτμηση Γ).

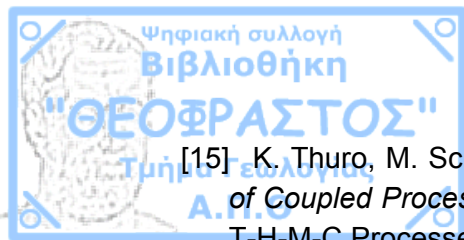
Συμπεραίνουμε δηλαδή, ότι η υψηλή τιμή της γωνίας φ για το πλήρως εδαφοποιημένο υλικό (Διάτμηση Α), οφείλεται στην απώλεια δομής. Επομένως, για τις άλλες δύο περιπτώσεις (Διάτμηση Β και Διάτμηση Γ), η γωνία εσωτερικής τριβής φ , παίρνει μικρότερες τιμές, με χειρότερη περίπτωση την Β, λόγω του προσανατολισμού της σχιστότητας παράλληλα με τη διεύθυνση της διάτμησης.

Όσον αφορά τη συνοχή c , διακυμάνθηκε ως εξής: Για τη Διάτμηση Α, πήρε τη μικρότερη τιμή $15,3 \text{ kPa}$. Για τη Διάτμηση Β πήρε τη μεγαλύτερη τιμή $88,63 \text{ kPa}$, ενώ για την Διάτμηση Γ, πήρε μια ενδιάμεση τιμή $43,18 \text{ kPa}$. Η περίπτωση δηλαδή του πλήρους εδαφοποιημένου υλικού είναι και η δυσμενέστερη περίπτωση, όπως είναι φυσικό. Η διακύμανση των τιμών για τις άλλες δύο περιπτώσεις, οφείλεται στη διαφορά του βαθμού αποσάθρωσης.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ				ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PROCTOR		ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ			ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (POINT LOAD)			
Περιεχόμενη Υγρασία m (%)	Υγρό Φαινόμενο Βάρος γ (gr/cm ³)	ΚΟΣΚΙΝΑ				ΚΑΤΑΤΑΞΗ	Βέλτιστη Υγρασία m _{opt} (%)	Φαινόμενο Βάρος Ξηρού Εδάφους γ _{dmax} (gr/cm ³)	ΔΟΚΙΜΗ			ΔΟΚΙΜΗ		
		4	10	40	200				A	B	Γ	1	2	3
3,72	1,523	Διερχόμενο %				(ΣΧΕΤΙΚΑ) ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΜΜΟΣ (S) 75 % ΑΜΜΟΣ 15 % ΑΡΓΙΛΟΣ	6,4	1,813	Γωνία Εσωτερικής Τριβής φ			I _s (MPa)		
		99,974	89,598	43,965	14,650				29°	22°	25°	0,340	0,565	0,418
		Συντελεστής ομοιομορφίας							Συνοχή c (kPa)			I _{s(50)} (MPa)		
		U = 0,05 ⇒ Ομοιόμορφο										0,357 0,511 0,413		
		Βαθμός διαβάθμισης							23,6 88,63 43,18			Χαρακτηρισμός Αντοχής		
C _c = 0,01							Πολύ χαμηλής αντοχής							

Πίνακας Π16. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών.

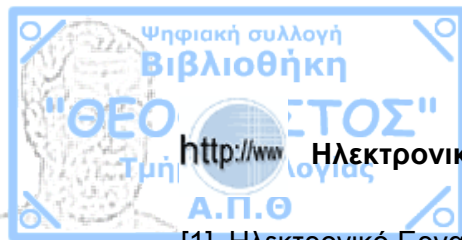
- [1] Γ. Δημόπουλος, «Τεχνική Γεωλογία», Εκδόσεις Παχούδη, Θεσσαλονίκη 1986.
- [2] Γ. Κούκης – Ν. Σαμπατακάκης, «Τεχνική Γεωλογία», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2002.
- [3] Α. Κίλιας, «Εισαγωγή στη Τεκτονική Γεωλογία», Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1997.
- [4] Χ. Μαραγκός, «Τεχνικά Έργα Υποδομής – Κατασκευές στην Επιφάνεια του Βράχου, Υπόγειες Κατασκευές, Φράγματα», Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1997.
- [5] Δ. Μουντράκης, «Γεωλογία Ελλάδας», Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη 1985 (Πρώτη Έκδοση).
- [6] Σ. Μπαντής, «Τεχνική Γεωλογία», Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2004.
- [7] Ν. Παπαχαρίσης, Ν. Μάνου – Ανδρεάδη, Ι. Γραμματικόπουλος, «Γεωτεχνική Μηχανική», Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη, 1999.
- [8] Μ. Σακελλαρίου, Μ. Φερεντίνου – Ι. Ανδριτσάκης – Γ. Ντούλης, «Εργαστηριακές Δοκιμές Εδαφομηχανικής», Τμήμα Εκδόσεων Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006.
- [9] Γ. Σούλιος, «Γενική Υδρογεωλογία», Πρώτος τόμος, Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη 1996.
- [10] Χ. Τσουτρέλης, «Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων», Τμήμα Εκδόσεων Ε.Μ.Π., Αθήνα 1985.
- [11] Ν. Χατζηγώγος – Θ. Μακεδών – Σ. Τσότσος, «*The Mechanical Behavior of Gneissous Rocks and Selection of Strength Parameters for Stability Analysis of Excavated slopes*»
- [12] Β. Χρηστάρας, «Εργαστηριακές και επί τόπου Δοκιμές Εδαφομηχανικής», Τμήμα Εκδόσεων Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας – Β' Έκδοση, Αθήνα, 2006.
- [13] Β. Χρηστάρας, «Συνοπτική Περιγραφή των Συνηθέστερων Εργαστηριακών Δοκιμών Βραχομηχανικής – Εδαφομηχανικής», Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2005.
- [14] Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής (Ε 105-86), Φ.Ε.Κ. υπ' αριθμόν 955/31-12-86, Δεύτερο Τεύχος, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε – Διεύθυνση Ερευνών Εδαφών, Αθήνα 1986.



[15] K. Thuro, M. Scholz, «*Deep Weathering and Alteration in Granites - A Product of Coupled Processes*», Proceedings of the International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems, Stockholm, Sweden, October 2003, 13-15.

[16] T. N. W. Akroyd, «*Laboratory Testing in Soil Engineering*», Soil Mechanics Ltd., 1957.

[17] McGraw – Hill, «*Dictionary of Geology & Mineralogy*», McGraw – Hill, Second Edition, 2003.



Ηλεκτρονική βιβλιογραφία – Ιστοσελίδες

- [1] Ηλεκτρονικό Εργαστήριο Εδαφομηχανικής – Βραχομηχανικής, Τμήματος Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας Α.Π.Θ.
<http://www.geo.auth.gr/883/>

- [2] Ηλεκτρονικό Μάθημα Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήματος Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας Α.Π.Θ.
<http://www.geo.auth.gr/758/>

- [3] Τράπεζα Δεδομένων Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής, Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
<http://diocles.civil.duth.gr/links/home/edafomihaniki>

- [4] Μηχανική Πετρωμάτων, Τμήματος Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.
http://tunnelling.metal.ntua.gr/downloads/post-grad_files/A3.pdf

- [5] Εγνατία Οδός Α.Ε.
<http://www.egnatia.eu/page/>

- [6] Μηχανή αναζήτησης Google.
<http://www.google.com/>

- [7] Google Earth.
<http://earth.google.com/>