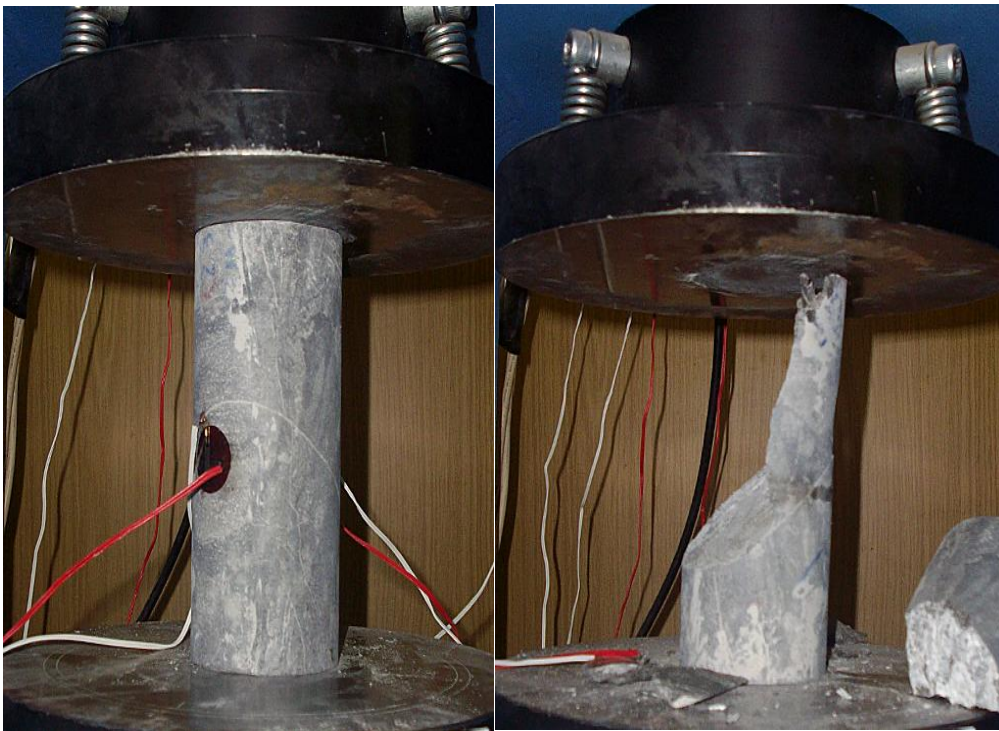




ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Τ.Ε.



Εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής για γεωτεχνικές εφαρμογές



Πτυχιακή εργασία

Κωλέτσης Μιχαήλ

Χανιά, Ιούνιος 2025



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Τ.Ε.



Εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής για γεωτεχνικές εφαρμογές

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωλέτσος Μιχαήλ

Επιβλέπων : Δρ. Βασίλειος Σάλτας

Αναπληρωτής Καθηγητής

Επιτροπή αξιολόγησης: Βασίλειος Σάλτας, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Ιωάννης Μακρής, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Κούλη Μαρία, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΛΜΕΠΑ

Ημερομηνία Παρουσίασης:

Αύξων Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας:

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Φυσικής Εσωτερικού της Γης και Γεωκαταστροφών του Πανεπιστημιακού Κέντρου Έρευνας και Καινοτομίας του ΕΛΜΕΠΑ, στα Χανιά κατά το εαρινό εξάμηνο του ακαδημαϊκού έτους 2024-25, σε συνεργασία με την εταιρεία SRM&Partners.

Ολοκληρώνοντας την πτυχιακή μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή καθηγητή Βασίλειο Σάλτα του Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών για την ανάθεση του πολύ ενδιαφέροντος θέματος, αλλά και για την σπουδαία καθοδήγηση του καθώς και την πολύτιμη βοήθεια και συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια της πτυχιακής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την οικονομική και ψυχολογική βοήθεια για τα 4 χρόνια που φοίτησα στο ίδρυμα, όπως και τους φίλους και φίλες μου για την καθημερινή τους συμπαράσταση, την κατανόηση και την θετική τους σκέψη.

Ιούνιος 2025

Κωλέτσης Μιχαήλ

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα μετρήσεων που χαρακτηρίζουν την μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων εκτελώντας μια σειρά δοκιμών με βάση ελληνικά ή διεθνή, πρότυπα ή οδηγίες. Οι δοκιμές χωρίζονται σε φυσικές και μηχανικές. Οι συνηθέστερες από αυτές αφορούν τον προσδιορισμό των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα δοκιμίων πετρώματος που καταπονούνται σε θλίψη, εφελκυσμό, κρούση ή διάτμηση.

Laboratory rock mechanic tests for geotechnical applications

Abstract

This thesis presents measurement results that characterize the mechanical behavior of rocks by performing a series of tests based on Greek or international standards or guidelines. The tests are divided into physical and mechanical. The most common of these concern the determination of the parameters that characterize the strength and deformability of rock specimens subjected to compression, tension, impact or shear.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	4
Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή	4
Κεφάλαιο 2^ο - Προσδιορισμός Φυσικών ιδιοτήτων	13
2.1 Προσδιορισμός περιεχόμενης υγρασίας δειγμάτων πετρώματος	13
2.1.1 Σκοπός	
2.1.2 Πεδίο εφαρμογής	13
2.1.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός	14
2.1.4 Εκτέλεση δοκιμής	17
2.1.5 Υπολογισμοί	17
2.2 Προσδιορισμός του πορώδους και της πυκνότητας του πετρώματος	20
2.2.1 Σκοπός	24
2.2.2 Πεδίο εφαρμογής	25
2.2.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός	25
2.2.4 Εκτέλεση δοκιμής	26
2.2.5 Υπολογισμοί	32
Κεφάλαιο 3^ο–Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων	27
3.1 Προσδιορισμός αντοχής σε θλίψη	27
3.1.1 Προσδιορισμός αντοχής σε Μονοαξονική θλίψη βραχώδους δοκιμίου	30
3.1.1.1 Σκοπός	33
3.1.1.2 Πεδίο εφαρμογής	34
3.1.1.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός	34
3.1.1.3 Περιγραφή	35
3.1.1.4 Εκτέλεση δοκιμής	36
3.1.1.5 Πρόγραμμα καταγραφήςWinhost	38
3.1.1.6 Υπολογισμοί	38
3.1.2 Προσδιορισμός του δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης πετρώματος	39
3.1.2.1 Σκοπός	90
3.1.2.2 Πεδίο εφαρμογής	90
3.1.2.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός	90
3.1.2.4 Προετοιμασία δειγμάτων	90
3.1.2.5 Εκτέλεση δοκιμής	90
3.1.2.6 Σφάλμα μέτρησης διάστασης D	90

3.1.2.7 Υπολογισμοί	90
3.2 Προσδιορισμός αντοχής σε εφελκυσμό	90
3.2.1 Έμμεσος προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής	90
3.2.1.1 Σκοπός	90
3.2.1.2 Πεδίο εφαρμογής	90
3.2.1.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός	90
3.2.1.4 Προετοιμασία δειγμάτων	90
3.2.1.5 Σήμανση, διαστασιολόγηση και τοποθέτηση δειγμάτων	90
3.2.1.6 Εκτέλεση δοκιμής	90
3.3. Προσδιορισμός αντοχής σε κρούση	90
3.3.1 Προσδιορισμός σκληρότητας δειγμάτων πετρώματος με σφυρί Schmidt	90
3.3.1.1 Σκοπός	90
3.3.1.2 Πεδίο εφαρμογής	90
3.3.1.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός	90
3.3.1.4 Προετοιμασία δειγμάτων	90
3.3.1.5 Διακρίβωση σφύρας	90
3.3.1.6 Εκτέλεση δοκιμής	90
3.3.1.7 Υπολογισμοί	90
3.4 Προσδιορισμός αντοχής σε διάτμηση ασυνεχειών	90
3.4.1 Προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής φυσικών και τεχνητών ασυνεχειών	90
3.4.1.1 Σκοπός	90
3.4.1.2 Πεδίο εφαρμογής	90
3.4.1.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός	90
3.4.1.4 Εκτέλεση δοκιμής	90
3.4.1.5 Υπολογισμοί	90
Κεφάλαιο 4^ο–Πειραματικά αποτελέσματα	43
.1 Πειραματική διαδικασία	43
4.1 Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης ξηρών δοκιμίων	43
4.2 Αποτελέσματα σημειακής φόρτισης	53
4.3 Αποτελέσματα εφελκυστικής αντοχής (BrazilianTest).....	65
4.4 Αποτελέσματα σκληρότητας δειγμάτων πετρώματος με σφυρί Schmidt	90
4.5 Αποτελέσματα διάτμησης ασυνεχειών	90
Κεφάλαιο 5^ο - Συμπεράσματα.....	70
Βιβλιογραφία.....	73

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Η εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής έχει ως σκοπό την απόκτηση της βασικής πληροφόρησης σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες και τη μηχανική συμπεριφορά του ακέραιου πετρώματος (βραχώδες υλικό), τη γεωτεχνική ταξινόμηση και το χαρακτηρισμό του με βάση τους διάφορους δείκτες ταξινόμησης, καθώς και την εκτίμηση των παραμέτρων εκείνων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα στον σχεδιασμό των διάφορων τεχνικών έργων στο πέτρωμα.

Οι σπουδαιότερες και συχνότερα εκτελούμενες εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής, σε ότι αφορά τις φυσικές παραμέτρους, περιλαμβάνουν τη φυσική υγρασία, το πορώδες και την πυκνότητα. Οι παράμετροι αντοχής αφορούν σε:

- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη
- Αντοχή σε σημειακή φόρτιση
- Σκληρότητα (Σφύρα Schmidt)
- Αντοχή σε τριαξονική θλίψη
- Διάτμηση ασυνεχειών
- Αντοχή σε εφελκυσμό (Brazilian)

Οι εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής είναι προδιαγεγραμμένες σε κανονισμούς, οι πιο σημαντικοί των οποίων αναφέρονται στη Διεθνή Ένωση Βραχομηχανικής (ISRM), στην Αμερικάνικη Ένωση Δοκιμών και Υλικών (ASTM), στα Βρετανικά Πρότυπα (BS) και στις αντίστοιχες Ελληνικές προδιαγραφές του ΥΠΕΧΩΔΕ (Ε 103-84). Ο μηχανολογικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται (συσκευές ελέγχου και καταγραφής, πρέσες) πρέπει να είναι διακριβωμένος, δηλαδή να διαθέτουν πιστοποιητικά ελέγχου, τα οποία εκδίδονται σε ετήσια βάση. Όλη η διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών θα πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τις αυστηρές προδιαγραφές και τα προβλεπόμενα από τα πιστοποιητικά ποιότητας.

Στην παρούσα εργασία θα πραγματοποιηθούν κάποιες φυσικές και εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια πετρώματος. Τα δοκίμια αυτά είναι από την ευρύτερη περιοχή της Χαλκιδικής. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί τύποι πετρωμάτων, τα ιζηματογενή και τα μεταμορφωμένα, στους οποίους περιλαμβάνονται ασβεστόλιθος, ψαμμίτης και σχιστόλιθος, φυλλίτης, γνεύσιος αντίστοιχα. Στο κεφάλαιο 2 συγκεντρώνεται όλη η απαραίτητη θεωρία των φυσικών παραμέτρων όπου γίνεται αναφορά στον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας, του πορώδους και της πυκνότητας των δοκιμών πετρώματος. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος των μηχανικών δοκιμών. Παρουσιάζονται κάποιες από τις πιο διαδεδομένες δοκιμές θλίψης, όπως η μονοαξονική ανεμπόδιστη θλίψη, η δοκιμή αντοχής σημειακής φόρτισης, ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson, δοκιμές εφελκυσμού (Brazilian Test), δοκιμές κρούσης (Σφύρα Schmidt) και δοκιμές διάτμησης ασυνεχειών. Στο κεφάλαιο 4 χωρίζεται σε τρία υποκεφάλαια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα δοκίμια πετρώματος. Πιο συγκεκριμένα στο υποκεφάλαιο 4.1 δίνονται τα αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης, στο 4.2 τα αποτελέσματα προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson και στο 4.3 τα αποτελέσματα διάτμησης ασυνεχειών. Στο κεφάλαιο 5 διατυπώνονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος παρατίθεται η σχετική Βιβλιογραφία και το Παράρτημα που περιλαμβάνει τους πίνακες και τα σχήματα.

Κεφάλαιο 2^ο

Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων

2.1 Προσδιορισμός περιεχόμενης υγρασίας δειγμάτων πετρώματος

2.1.1 Σκοπός

Η μέθοδος καλύπτει τον εργαστηριακό προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας βράχου κατά βάρος, όπου η μείωση της μάζας κατά την ξήρανση οφείλεται στην απώλεια του νερού. Η περιεχόμενη υγρασία υπολογίζεται ως λόγος, εκφρασμένος επί τοις εκατό, της μάζας του νερού των πόρων ή του ελεύθερου νερού σε δεδομένη μάζα υλικού, προς την μάζα του στερεού υλικού.

2.1.2 Πεδίο εφαρμογής

Η οδηγία εργασίας εφαρμόζεται στον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας βράχου κατά βάρος σύμφωνα με τις ακόλουθες μεθόδους:

- ASTM D2216-19
- ISRM Suggested Methods, 1981
- ΥΠΕΧΩΔΕ ΚΕΔΕ Ε103 – 84, Νο 1

2.1.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας των δοκιμίων πετρωμάτων, χρησιμοποιείται ο παρακάτω εξοπλισμός:

- Κλίβανος ικανός να διατηρεί σταθερή θερμοκρασία (110 ± 2) °C σε όλο το θάλαμο
- Ζυγός τάξης GP1 ευαισθησίας 0,01 g για δείγματα μάζας έως 200 g
- Ζυγός τάξης GP2 ευαισθησίας 0,1g για δείγματα μάζας μεγαλύτερης των 200g

- Υποδοχείς δειγμάτων
- Ξηραντήρας δειγμάτων

2.1.4 Εκτέλεση δοκιμής

Καταγράφεται ο κωδικός και προσδιορίζεται το βάρος ενός καθαρού και στεγνού υποδοχέα (A) με το κάλυμμα του. Επιλέγουμε δείγμα βράχου που αποτελείται από 10 δοκίμια πετρώματος που η μάζα καθενός είναι μεγαλύτερη από 50gr, ή το μέγεθος του είναι δεκαπλάσιο του μέγιστου κόκκου των ορυκτών που συνιστούν το πέτρωμα. Έπειτα τοποθετείται το υγρό δείγμα στον υποδοχέα (B), σφραγίζεται με το κάλυμμα και προσδιορίζεται το βάρος τους. Αφαιρούμε το κάλυμμα, τοποθετείται ο υποδοχέας με το δοκίμιο στον κλίβανο και ξηραίνεται το δοκίμιο μέχρι σταθερής μάζας σε θερμοκρασία 105°C. Όταν το δείγμα φτάσει σε σταθερή μάζα απομακρύνεται από τον κλίβανο, επανατοποθετείται το κάλυμμα του υποδοχέα και αφήνεται να κρυώσει σε ξηραντήρα για 30 λεπτά. Στην συνέχεια προσδιορίζεται η μάζα του υποδοχέα και του ξηρού δείγματος (C).

2.1.5 Υπολογισμοί

Η περιεχόμενη υγρασία εκφράζεται με ακρίβεια 0,1 % και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W = \frac{B - C}{C - A} \times 100\%$$

όπου

W, η περιεχόμενη υγρασία (%)

B, το βάρος υποδοχέα και υγρού δείγματος (σε g)

C, το βάρος υποδοχέα και ξηρού δείγματος (σε g)

A, το βάρος υποδοχέα (σε g)

2.2 Προσδιορισμός του πορώδους και της πυκνότητας του πετρώματος

2.2.1 Σκοπός

Η μέθοδος καλύπτει τον εργαστηριακό προσδιορισμό της πυκνότητας και του πορώδους δειγμάτων πετρώματος κανονικού γεωμετρικού σχήματος. Το πορώδες ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών ή αλλιώς πόρων (V_v) ενός δείγματος, δια του συνολικού όγκου (V) και μετριέται σε ποσοστό επί τοις εκατό. Η πυκνότητα, ή αλλιώς το φαινόμενο βάρος, ορίζεται ως το πηλίκο του βάρους του δοκιμίου πετρώματος προς τον όγκο του. Στο βάρος του δοκιμίου συμπεριλαμβάνονται και οι πόροι που μπορεί να περιέχουν αέρα και νερό)

ενώνεται ο συνολικός όγκος του δείγματος. Στον Πίνακα 2.1 αναφέρονται οι ιδιότητες αυτές για διαφόρους τύπους εδαφών.

2.2.2 Πεδίο εφαρμογής

Η οδηγία εργασίας εφαρμόζεται στον προσδιορισμό της πυκνότητας και του πορώδους δειγμάτων πετρώματος σύμφωνα με τις μεθόδους:

- ISRM Suggested Methods, 1981
- ΥΠΕΧΩΔΕ ΚΕΔΕ Ε103 – 84, Νο 2

2.2.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Για τον προσδιορισμό του πορώδους και της πυκνότητας των δοκιμών πετρωμάτων, χρησιμοποιείται ο παρακάτω εξοπλισμός:

- Κλίβανος ικανός να διατηρεί ομοιόμορφη θερμοκρασία $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ σε όλο το θάλαμο
- Ζυγός τάξης GP1 ευαισθησίας 0,01 g για δείγματα μάζας έως 200 g
- Ζυγός τάξης GP2 ευαισθησίας 0,1g για δείγματα μάζας μεγαλύτερης των 200g
- Υποδοχείς δειγμάτων
- Ξηραντήρας
- Παχύμετρο
- Αντλία κενού και δοχείο απαέρωσης

2.2.4 Εκτέλεση δοκιμής

Από ένα δείγμα πετρώματος διαμορφώνονται σε κανονικό γεωμετρικό σχήμα τρία δοκίμια που το καθένα έχει μάζα μεγαλύτερη των 50gr. Για κάθε ένα από τα δοκίμια ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφεται στην συνέχεια. Με το παχύμετρο, μετρούνται οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου με ακρίβεια 0,1 mm και υπολογίζεται ο όγκος τους V. Το δοκίμιο τοποθετείται στο δοχείο απαέρωσης και καλύπτεται με νερό για να υποστεί κορεσμό. Η αντλία τίθεται σε λειτουργία για εφαρμογή κενού 800 Pa, για χρονικό διάστημα μίας ώρας. Κατά περιόδους αναδύεται το δοχείο για την απελευθέρωση εγκλωβισμένων φυσαλίδων αέρα. Στη συνέχεια απομακρύνεται το δοκίμιο από το δοχείο και σκουπίζεται η επιφάνεια του με ένα απορροφητικό ύφασμα. Ζυγίζεται και καταγράφεται η μάζα και ο κωδικός ενός καθαρού και στεγνού υποδοχέα (Α). Τοποθετείται το δοκίμιο εντός του υποδοχέα και προσδιορίζεται το βάρος του (Β). Ο υποδοχέας με το δοκίμιο τοποθετείται στον κλίβανο σε θερμοκρασία 105°C . Όταν το δείγμα φτάσει σε σταθερή μάζα απομακρύνεται από τον κλίβανο και αφήνεται να κρυώσει σε ξηραντήρα για 30 λεπτά. Τέλος προσδιορίζεται η μάζα του υποδοχέα και του ξηρού δείγματος (Γ).

2.2.5 Υπολογισμοί

Από τα μετρούμενα μεγέθη, υπολογίζονται τα παρακάτω:

$$\text{Όγκος πόρων – κενών: } V_p = \frac{M_{sat} - M_s}{P_w}$$

$$\text{Πορώδες: } n = \frac{V_p}{V} \times 100\%$$

$$\text{Ξηρά πυκνότητα: } P_d = \frac{M_s}{V}$$

$$\text{Υγρά πυκνότητα: } P_{sat} = \frac{M_s + V_p \times P_w}{V}$$

Όπου:

M_{sat} = Μάζα κορεσμένου επιφανειακά ξηρού δοκιμίου (g)

$$M_{sat} = (B - A)$$

M_s = Μάζα ξηρού δοκιμίου (g)

$$M_s = (\Gamma - A)$$

P_w = Πυκνότητα νερού (kg/m^3)

V = Όγκος δοκιμίου (m^3)

Πίνακας 2.1. Πορώδες, λόγος κενών περιεχόμενη υγρασία και φαινόμενο βάρος διαφόρων εδαφών (από ΛΑΓΓΙΩΤΗ ΚΑΙ ΣΠΗΛΙΩΤΟΠΟΥΛΟ, 1978)

<i>Χαρακτηρισμός εδάφους</i>	<i>Πορώδες N (%)</i>	<i>Λόγος κενών V_p</i>	<i>Περιεχόμενη υγρασία W (%)</i>	<i>Φαινόμενο βάρος Psat(gr/cm³)</i>
<i>Ομοιόμορφη άμμος, χαλαρή</i>	46	0.85	32	1.89
<i>Ομοιόμορφη άμμος, πυκνή</i>	34	0.51	19	2.09
<i>Διαβαθμισμένη άμμος, χαλαρή</i>	40	0.67	25	1.99
<i>Διαβαθμισμένη άμμος, πυκνή</i>	30	0.43	16	2.16
<i>Παγετώδες έδαφος, ευρείας διαβάθμισης</i>	20	0.25	9	2.32
<i>Παγετώδες άργιλος,μαλακή</i>	55	1.2	45	1.77
<i>Παγετώδες άργιλος, πυκνή</i>	37	0.6	22	2.07
<i>Ελαφρά οργανική άργιλος,μαλακή</i>	66	1.9	70	1.58
<i>Πολύ οργανική άργιλος,μαλακή</i>	75	3.0	110	1.43
<i>Μπεντονίτης, μαλακός</i>	84	5.2	194	1.27

Κεφάλαιο 3^ο

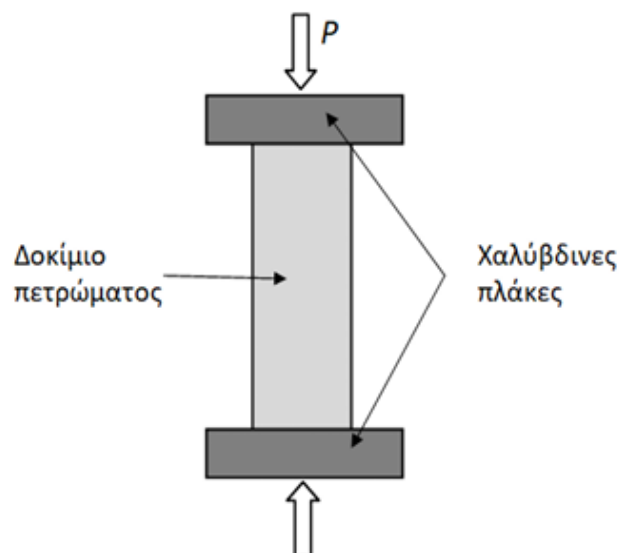
Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων

3.1. Προσδιορισμός αντοχής σε θλίψη

3.1.1 Προσδιορισμός αντοχής σε Μονοαξονική θλίψη βραχώδους δοκιμίου

3.1.1.1 Σκοπός

Η μέθοδος καλύπτει τον εργαστηριακό προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων πετρωμάτων κυλινδρικού σχήματος (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1. Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος.

3.1.1.2 Πεδίο εφαρμογής

Η οδηγία εργασίας εφαρμόζεται στον προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη βραχιδών δοκιμίων σύμφωνα με τα πρότυπα:

- ASTM D 7012-23, ASTM D2938-95 (Reapproved 2002)
- ΥΠΕΧΩΔΕ ΚΕΔΕ Ε103-84, Νο 4
- ISRMSuggestedMethods, 1981

3.1.1.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων πετρωμάτων, χρησιμοποιείται ο παρακάτω εξοπλισμός:

- Ηλεκτροκίνητη μηχανή θλίψεως 2000kN (πρέσσα), με ενσωματωμένο ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου και εκτυπωτικό μηχανισμό
- Ηλεκτρονική συσκευή αυτόματης καταγραφής (DataLogger) και αποθήκευσης εργαστηριακών μετρήσεων
- Θερμόμετρο ακρίβειας 1°C
- Κλίβανος ικανός να διατηρεί ομοιόμορφη θερμοκρασία (110±5) °C σε όλο το θάλαμο (ΚΛΙΒ-1)
- Ζυγός τάξης GP2 ευαισθησίας 0.1g
- Υποδοχείς δειγμάτων
- Ξηραντήρας
- Εργοταξιακά γάντια, λαβίδες για την μεταφορά και τον χειρισμό των θερμών υποδοχέων

3.1.1.3 Περιγραφή

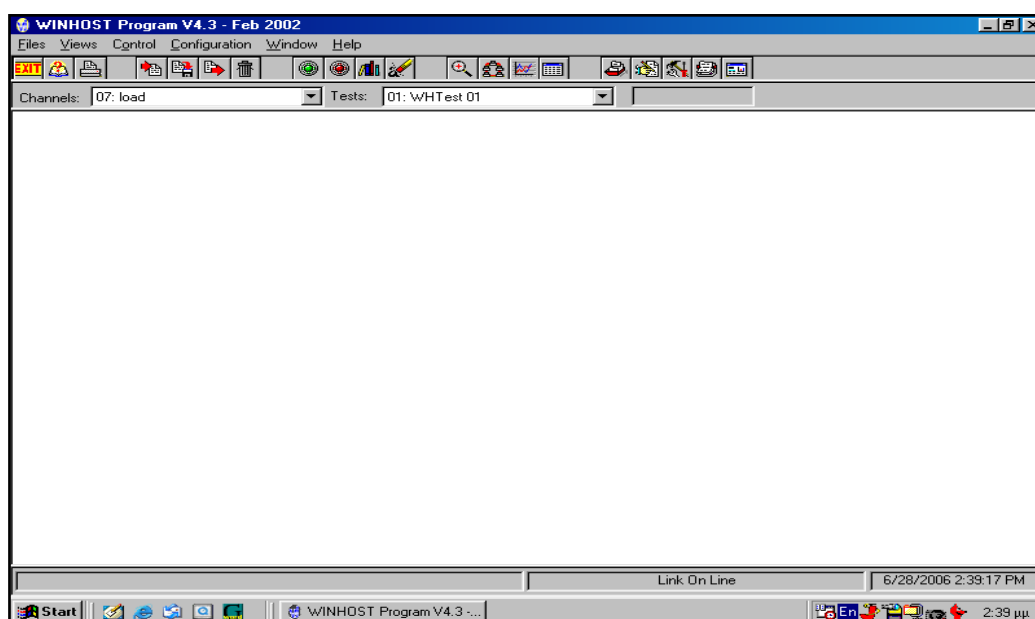
Η δοκιμή, εκτελείται σε δοκίμια από πυρήνες γεωτρήσεων και είναι η πιο συχνά εκτελούμενη εργαστηριακή δοκιμή. Τα δοκίμια είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με λόγω ύψους L προς διάμετρο D, L/D ίσο με 2.0 μέχρι 3.0, και διάμετρο όχι μικρότερη των 54mm. Το ύψος των δοκιμίων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιο της διαμέτρου τους. Απαραίτητα, η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να είναι δεκαπλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών που αποτελούν την δομή του πετρώματος. Οι επιφάνειες έδρασης του δοκιμίου θα πρέπει να είναι λείες και επίπεδες, με μέγιστη απόκλιση 0.02mm και παράλληλες μεταξύ τους. Η περιμετρική κυλινδρική επιφάνεια θα πρέπει να είναι ελεύθερη από προεξοχές, δηλαδή λεία και απαλλαγμένη από απότομες ανωμαλίες με μέγιστη απόκλιση από την ευθεία για όλο το μήκος του δοκιμίου 0.3mm.

3.1.1.4 Εκτέλεση δοκιμής

Για την εκτέλεση της δοκιμής μετρίεται η διάμετρος D του δοκιμίου με ακρίβεια 0.1mm , με την εύρεση του μέσου όρου δύο μετρήσεων της διαμέτρου σε ορθή γωνία στο μέσο του δοκιμίου, όπως και στο άνω και κάτω άκρο αυτού. Ο μέσος όρος των έξι αυτών μετρήσεων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου. Το ύψος L μετρίεται με ακρίβεια 0.1mm . Στη συνέχεια, καταγράφεται το βάρος W του δοκιμίου με ακρίβεια 0.1gr , για να γίνει ο υπολογισμός την πυκνότητας. Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου κατά την δοκιμή καλό θα είναι να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές και επιτόπου συνθήκες. Σε περίπτωση που οι συνθήκες υγρασίας είναι διαφορετικές ή το δοκίμιο είναι σε ξηρή κατάσταση, αυτό θα πρέπει να το καταγράψουμε στο έντυπο της δοκιμής. Τα δοκίμια που εξετάζονται σε ξηρή κατάσταση τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ για 24 ώρες.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι όλα τα δεδομένα καταγράφονται ηλεκτρονικά στην συσκευή αυτόματης καταγραφής (DataLogger). Με τη χρήση του λογισμικού Winhost(Σχήμα 3.2) καταχωρούνται όλα τα δεδομένα και πραγματοποιούνται οι επόμενες ενέργειες.

3.1.1.5 Λογισμικό καταγραφής Winhost



Σχήμα 3.2. Λογισμικό καταγραφής Winhost

Αρχικά,καθαρίζουμε τις πλάκες της πρέσαςώστε να μην έχει μείνει κάποιο θραύσμα από προηγούμενη δοκιμή, καθώς και τις επιφάνειες του δοκιμίου. Τοποθετούμε το δοκίμιο στην κατώτερη πλάκα και εφαρμόζουμε ένα μικρό αξονικό φορτίο της τάξης των 100N για να εφαρμόσει η ανώτερη πλάκα στο δοκίμιο. Εφαρμόζουμε μία καρτέλα με τα στοιχεία του δοκιμίου στο μπροστινό τμήμα των

πλακών της πρέσας και το φωτογραφίζουμε πριν την θραύση. Έπειτα τοποθετούμε στην συσκευή θλίψης το μετρητή παραμόρφωσης (βελόμετρο), εφαρμόζοντας τον σε κατακόρυφη θέση στην κατώτερη πλάκα της πρέσας, και ελέγχοντας τον μηδενισμό του μέσω του λογισμικού Winhost. Υπολογίζουμε το ρυθμό φόρτισης από την ένδειξη. Θέτουμε σε λειτουργία την συσκευή θλίψης και ταυτόχρονα το πρόγραμμα καταγραφής (Winhost). Η θραύση του δοκιμίου πρέπει να επέλθει μεταξύ 2 – 15 min και ολοκληρώνεται μόλις σταθεροποιηθεί ή μειωθεί η ένδειξη του φορτίου, ή μόλις επιτευχθεί μια προκαθορισμένη τιμή της αξονικής παραμόρφωσης. Μόλις ολοκληρωθεί η δοκιμή, απενεργοποιούμε την συσκευή θλίψης και το πρόγραμμα καταγραφής (Winhost) και χωρίς να μηδενίσουμε την πίεση του εμβόλου, φωτογραφίζουμε και πάλι το δοκίμιο. Στη συνέχεια καταγράφουμε στο έντυπο μια σύντομη περιγραφή της θραύσης του δοκιμίου ως προς τον άξονα φόρτισης. Ζυγίζουμε και καταγράφουμε το βάρος ενός καθαρού και στεγνού υποδοχέα. Αφαιρούμε το δοκίμιο από την συσκευή θλίψης, το τοποθετούμε μέσα στον υποδοχέα και προσδιορίζουμε το βάρος τους. Τέλος μεταφέρεται ο υποδοχέας με το δείγμα στον κλίβανο και ξηραίνεται στους (110 ± 5) °C. Όταν το δείγμα φτάνει σε σταθερή μάζα απομακρύνεται από τον κλίβανο, και αφήνεται να κρυώσει σε ξηραντήρα για 30 λεπτά. Έτσι προσδιορίζεται η μάζα του υποδοχέα και του ξηρού δείγματος.

3.1.1.6 Υπολογισμοί

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη υπολογίζεται με διαίρεση του μέγιστου φορτίου που επιβλήθηκε στο δοκίμιο με το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

όπου

σ_c = Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του δοκιμίου σε MPa

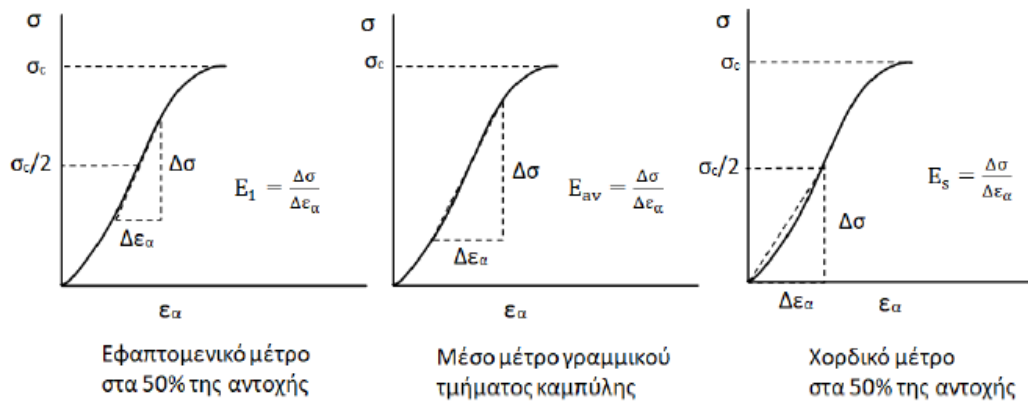
P = Μέγιστο φορτίο σε kN

A = Εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου σε m^2

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, η Διεθνής Ένωση Βραχομηχανικής (ISRM, 1981) προτείνει τους παρακάτω ορισμούς. (Σχήμα 3.3)

Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας (Tangent Young's modulus, Et) που προσδιορίζεται ως η κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων, που αντιστοιχεί σε δεδομένη τάση. Συνήθως ως τέτοια τάση λαμβάνεται το 50% της αντοχής του πετρώματος σε μοναξονική θλίψη.

Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας (Average Young's modulus, E_{av}). Υπολογίζεται από τη μέση κλίση του γραμμικού ελαστικού τμήματος της καμπύλης τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 3.3. Διαγράμματα αξονικής τάσης-παραμόρφωσης για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας Young (Από ISRM, 1981)

- Αύξηση της πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση της αντοχής
- Αύξηση του πορώδους οδηγεί σε μείωση της αντοχής
- Αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας οδηγεί σε μείωση της αντοχής

Πίνακας 3.1. Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (κατά ISRM, 1981)

<i>Κατάταξη πετρώματος</i>	<i>Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)</i>	<i>Επί τόπου εκτίμηση</i>	<i>Παραδείγματα</i>
<i>Εξαιρετικά υψηλής αντοχής</i>	>250	Ο πυρήνας δεν σπάει με γεωλογικό σφυρί	Υγιής βασάλτης, χαλαζίτης, γνεύσιος, γρανίτης, πυριτιόλιθος
<i>Πολύ υψηλής αντοχής</i>	100 – 250	Για να σπάσει χρειάζονται πολλά χτύπηματα	Αμφιβολίτης, ψαμμίτης, βασάλτης, γάββρος, περιδοτίτης, ρυόλιθος
<i>Υψηλής αντοχής</i>	50 – 100	Για να σπάσει χρειάζονται πάνω από ένα χτύπημα	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, ψαμμίτης, σχιστόλιθος
<i>Μέσης αντοχής</i>	25 – 50	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι. Σπάει και με ένα μόνο χτύπημα	Σκυρόδεμα, φυλλίτης, σχιστόλιθος, ιλυόλιθος
<i>Χαμηλής αντοχής</i>	5 – 25	Χαράσσεται δύσκολα με μαχαίρι	Κιμωλία, αργιλόλιθος, ποτάσα, μάργα, ορυκτό αλάτι
<i>Πολύ χαμηλής αντοχής</i>	1 – 5	Με ένα χτύπημα σπάει σε πολλά κομμάτια και χαράσσεται εύκολα	Έντονα αποσαθρωμένοι ή εξαλλοιωμένοι βράχος
<i>Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής</i>	0.25 – 1	Χαράσσεται με το νύχι	Στιφρό υλικό πλήρωσης ρήγματος

3.1.2 Προσδιορισμός του δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης πετρώματος

3.1.2.1 Σκοπός

Η μέθοδος καλύπτει τον εργαστηριακό προσδιορισμό του δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης ($I_s(50)$) δοκιμίων πετρώματος. Η δοκιμή σημειακής φόρτισης (PointLoadTest) έχει ως σκοπό την ταξινόμηση του αέριου πετρώματος από πλευράς αντοχής, όπως επίσης και τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Η δοκιμή γίνεται στο εργαστήριο αλλά και επιτόπου του έργου, λόγω του ότι έχει εύκολη μεταφορά η ειδική συσκευή του (Σχήματα 3.4 – 3.6). Η αντοχή του πετρώματος υπολογίζεται με την εφαρμογή μιας αντιδιαμετρικά ασκούμενης δύναμης από τα δύο κωνικά άκρα της ειδικής συσκευής και προσδιορίζεται ο δείκτης σημειακής φόρτισης (I_s).

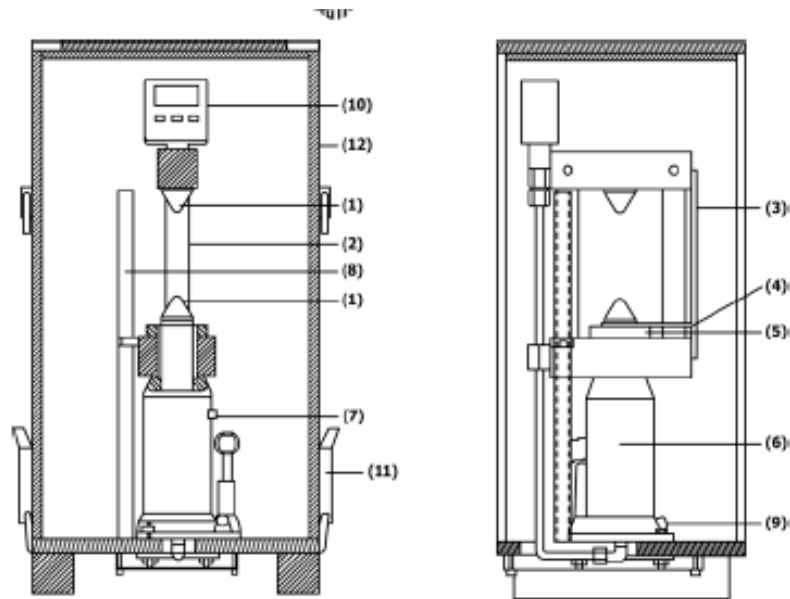
3.1.2.2 Πεδίο εφαρμογής

Η οδηγία εργασίας εφαρμόζεται στον προσδιορισμό του δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης ($I_s(50)$) δειγμάτων πετρώματος σύμφωνα με τις μεθόδους:

- ASTM D5731-16
- ΥΠΕΧΩΔΕ ΚΕΔΕ Ε103-84, Νο 5
- ISRM Suggested Methods, 1984



Σχήμα 3.4. Συσκευής δοκιμής σημειακής φόρτισης (pointloadtester).



Note 1—Load frame general information (Fig. 1):

- (1) Load is applied to the specimens through two standard hardened points
- (2) Two column fixed crosshead frame
- (3) Scale
- (4) Scale pointer
- (5) Bolt
- (6) Hydraulic pump body
- (7) Oil filler cap
- (8) Pump handle for hydraulic piston
- (9) Pressure release valve for hydraulic piston
- (10) Case latched for top cover
- (11) Digital pressure readout
- (12) Point load tester top cover

Σχήμα 3.5. Σχηματικό διάγραμμα συσκευής σημειακής φόρτισης όπου αναφέρονται τα επιμέρους εξαρτήματά της.

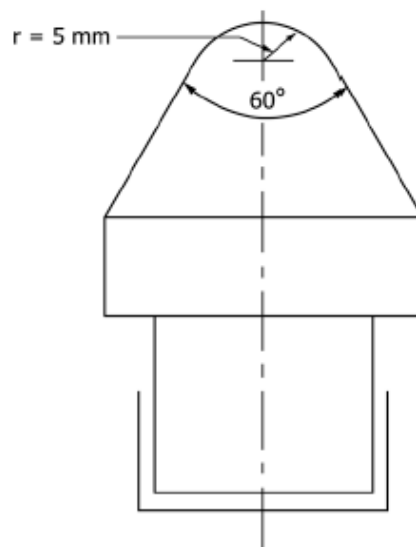


FIG. 2 Truncated, Conical Platen Dimensions for Point Load Apparatus

Σχήμα 3.6. Λεπτομέρεια της κωνικής κεφαλής της συσκευής σημειακής φόρτισης.

3.1.2.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Για τον προσδιορισμό του δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης των δοκιμίων πετρωμάτων, χρησιμοποιείται ο παρακάτω εξοπλισμός:

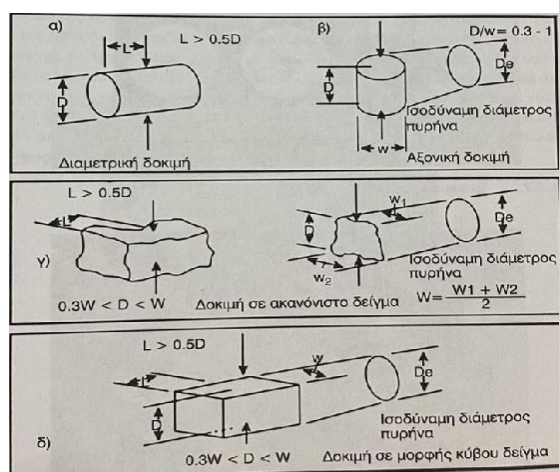
- Συσκευή σημειακής φόρτισης βραχιδών δοκιμίων
- Παχύμετρο
- Κλίβανος
- Ζυγός ευαισθησίας 0.1g
- Κλίβανος ικανός να διατηρεί ομοιόμορφη θερμοκρασία $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ σε όλο το θάλαμο (ΚΛΙΒ-1)

3.1.2.4 Προετοιμασία δειγμάτων

(α) Δειγματοληψία: Τα δείγματα του πετρώματος συγκεντρώνονται με βάση των τύπο του πετρώματος και την εκτιμώμενη αντοχή. Όταν εξετάζονται κυλινδρικά δείγματα, επιλέγονται τουλάχιστον 10 δείγματα. Όταν εξετάζονται ακανόνιστων διαστάσεων δοκίμια, επιλέγονται τουλάχιστον 20 δείγματα. Τα δείγματα κυλινδρικής μορφής προτιμώνται για ακριβέστερη κατάταξη.

(β) Μέτρηση διαστάσεων: Οι εξωτερικές διαστάσεις των δειγμάτων δεν πρέπει να είναι μικρότερες από 30mm και μεγαλύτερες από 85 mm και με προτεινόμενη διάσταση περίπου 50mm (Σχήμα 3.7).

(γ) Σήμανση και μέτρηση των δειγμάτων: Ο επιθυμητός προσανατολισμός δοκιμής του δοκιμίου πρέπει να επιδεικνύεται με γραμμές-ενδείξεις πάνω σε αυτό. Οι γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση του δοκιμίου στην μηχανή δοκιμής και για την εξασφάλιση του σωστού προσανατολισμού κατά την δοκιμή. Η μέτρηση κάθε διάστασης του δοκιμίου γίνεται πάνω σε τρία διαφορετικά σημεία και υπολογίζονται μέσοι όροι.



Σχήμα 3.7. Διαστάσεις πετρώματος για την δοκιμή σημειακής φόρτισης

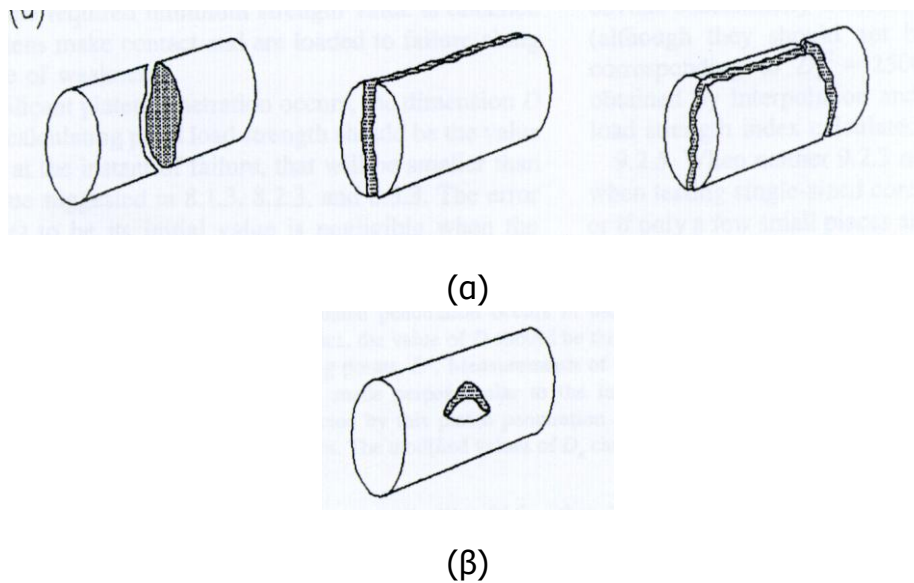
3.1.2.5 Εκτέλεση δοκιμής σημειακής φόρτισης

Για την εκτέλεση της δοκιμής και τον υπολογισμό της αντοχής σε σημειακή φόρτιση χρησιμοποιούνται συνήθως κυλινδρικά δοκίμια του πετρώματος για διαμετρική ή αξονική φόρτιση, αλλά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και δοκίμια σε μορφή κύβου ή και σε ακανόνιστη μορφή. Αναγκαία προϋπόθεση για να γίνει η δοκιμή σε οποιοδήποτε είδος (διαμετρική, αξονική, ακανόνιστο δείγμα), είναι να ικανοποιούνται οι σχέσεις μεταξύ της απόστασης των κωνικών ακρών (D), του μήκους (L) και της χαρακτηριστικής διάστασης (W) του δοκιμίου (Σχήμα 3.7).

(α) Διαμετρική Δοκιμή

Για την διαμετρική δοκιμή χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δείγματα με λόγο μήκους προς διάμετρο μεγαλύτερο της μονάδας. Πριν την εκτέλεση της δοκιμής, πραγματο-ποιούμε μια συνοπτική περιγραφή (λιθολογία, βαθμός αποσάθρωσης, δομή) και μετριέται η διάσταση L. Έπειτα το δείγμα τοποθετείται στην συσκευή σημειακής φόρτισης (Σχήμα 3.4) και με το μοχλό σταθεροποιείται ανάμεσα στις πλάκες. Από τον μετρητή που βρίσκεται στον πλαϊνό τμήμα της συσκευής, μετράται η διάσταση D του δείγματος, σύμφωνα με τον τύπο που προέκυψε από την βαθμονόμηση της συσκευής ($D = 138 \text{ Ένδειξη συσκευής}$). Εξασφαλίζουμε ότι η απόσταση L, ανάμεσα στα σημεία επαφής και το πλησιέστερο ελεύθερο άκρο, είναι τουλάχιστον 0.5 φορές η διάμετρος του πυρήνα ($L > 0,5 D$). Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται σταθερά το φορτίο ώστε η θραύση να επέλθει σε χρονικό διάστημα από 10 έως 60 sec και καταγράφεται το φορτίο, P. Η δοκιμή θα πρέπει να απορρίπτεται εάν η επιφάνεια θραύσης περάσει μέσα από μόνο την μία πλάκα της συσκευής σημειακής φόρτισης (Σχήμα 3.9). Με την ολοκλήρωση της δοκιμής, καταγράφονται παρατηρήσεις για την μορφή της θραύσης.

Έπειτα, προσδιορίζεται και καταγράφεται ο κωδικός και το βάρος ενός καθαρού και στεγνού υποδοχέα. Τοποθετούμε το δείγμα στον υποδοχέα και προσδιορίζεται το βάρος του δείγματος με τον υποδοχέα. Τοποθετείται ο υποδοχέας με το δείγμα στον κλίβανο και ξηραίνεται το δείγμα μέχρι σταθερής μάζας, σε θερμοκρασία $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Όταν το δείγμα φτάσει σε σταθερή μάζα, απομακρύνεται από τον κλίβανο και αφήνεται να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου, μέχρι ο υποδοχέας να μπορεί να πιάνεται με γυμνά χέρια, ώστε η λειτουργία του ζυγού να μην επηρεάζεται από την μεταφορά θερμότητας και την θέρμανσή του. Αν το δείγμα τείνει να απορροφά υγρασία από το περιβάλλον, το τοποθετούμε στον ξηραντήρα. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μάζα του υποδοχέα και του ξηρού δείγματος χρησιμοποιώντας τον ίδιο ζυγό που χρησιμοποιήθηκε κατά την ζύγιση του υποδοχέα και του υγρού δείγματος.



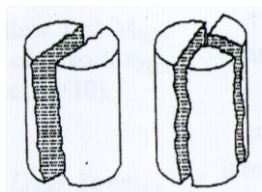
Σχήμα 3.9. (α) Αποδεκτές μορφές και (β) μη αποδεκτή μορφή διαμετρικής θραύσης κατά ISRM 1984.

(β) Αξονική Δοκιμή

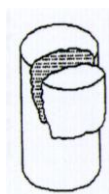
Για την αξονική δοκιμή χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δείγματα με λόγο μήκους προς διάμετρο $1/3$ έως 1 . Πριν την εκτέλεση της δοκιμής, πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή (λιθολογία, βαθμός αποσάθρωσης, δομή) και μετράτε η διάσταση W . Έπειτα, το δείγμα τοποθετείται στην συσκευή σημειακής φόρτισης και με το μοχλό σταθεροποιείται ανάμεσα στις πλάκες. Από το μετρητή που βρίσκεται στο πλαϊνό τμήμα της συσκευής, μετράτε η διάσταση D του δείγματος, σύμφωνα με τον τύπο που προέκυψε από τη βαθμονόμηση της συσκευής ($D = 138 - \text{ένδειξη συσκευής}$). Εδώ είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι για τη διάσταση W ισχύει η σχέση, $0.3W < D < W$. Με αυτό τον τρόπο, αυξάνεται σταθερά το φορτίο, ώστε η θραύση να επέλθει σε χρονικό διάστημα από 10 έως 60 sec και καταγράφεται το φορτίο P . Η δοκιμή θα πρέπει να απορριφθεί εάν η επιφάνεια θραύσης περάσει μέσα από την μία μόνο πλάκα της συσκευής σημειακής φόρτισης (Σχήμα 3.10).

Με την ολοκλήρωση της δοκιμής, καταγράφονται οι παρατηρήσεις για την μορφή της θραύσης. Προσδιορίζεται και καταγράφεται ο κωδικός και το βάρος ενός καθαρού και στεγνού υποδοχέα. Τοποθετούμε το δοκίμιο στον υποδοχέα και προσδιορίζεται το βάρος του δείγματος με τον υποδοχέα. Τοποθετείται ο υποδοχέας με το δοκίμιο στον κλίβανο και ξηραίνεται το δοκίμιο, μέχρι σταθερής μάζας σε θερμοκρασία $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Όταν το δοκίμιο φτάσει σε σταθερή μάζα, απομακρύνεται από τον κλίβανο και αφήνεται να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου, μέχρι ο υποδοχέας να μπορεί να πιάνεται με γυμνά χέρια, ώστε η λειτουργία του ζυγού να μην επηρεάζεται από την μεταφορά θερμότητας και την

θέρμανσή του. Αν το δοκίμιο τείνει να απορροφά υγρασία από το περιβάλλον, το τοποθετούμε στον ξηραντήρα. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μάζα του υποδοχέα και του ξηρού δοκιμίου χρησιμοποιώντας τον ίδιο ζυγό που χρησιμοποιήθηκε κατά την ζύγιση του υποδοχέα και του υγρού δοκιμίου.



(α)



(β)

Σχήμα 3.10. (α) Αποδεκτές μορφές και (β) μη αποδεκτή μορφή αξονικής θραύσης κατά ISRM 1984.

3.1.2.6 Σφάλμα μέτρησης διάστασης D

Εάν προκύψει σημαντική διείδυση των πλακών, η διάσταση D που θα χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό της αντοχής σημειακής φόρτισης θα πρέπει να είναι η τιμή D' μετρούμενη την στιγμή της αστοχίας, που είναι μικρότερη από την αρχική τιμή που λαμβάνεται κατά την τοποθέτηση του δοκιμίου. Το σφάλμα στην παραδοχή ότι το D είναι η αρχική του τιμή είναι αμελητέο όταν το δείγμα είναι μεγάλο ή ανθεκτικό. Η διάσταση κατά την αστοχία μπορεί πάντα να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική στην αρχική τιμή και προτιμάται.

3.1.2.7 Υπολογισμοί

Μετά από την εκτέλεση της δοκιμής υπολογίζεται ο μη διορθωμένος δείκτης σημειακής φόρτισης (I_s), που ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου θραύσης (P) προς το τετράγωνο της ισοδύναμης διάστασης (D_e). Η ισοδύναμη διάσταση ή διάμετρος (D_e) για διαμετρική δοκιμή είναι ίση με την απόσταση D (D = διάμετρος του δοκιμίου)

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}, \text{ σε MPa}$$

όπου

P = φορτίο αστοχίας σε N

D_e = ισοδύναμη διάμετρος δοκιμίου = D , για διαμετρικές δοκιμές (σε mm) και

$D_e^2 = D^2$ για δοκίμια σε mm², ή

$D_e^2 = \frac{4A}{\pi}$, για δοκιμές αξονικές block ή ακανόνιστου σχήματος σε mm²

με

$A = W \times D$ = ελάχιστο εμβαδόν διατομής επιπέδου μέσω των σημείων επαφής των πλακών

Εάν κατά την δοκιμή προκύψει σημαντική διείδυση των πλακών, η τιμή του D θα πρέπει να είναι η τελική τιμή, D' . Οι τροποποιημένες τιμές D_e μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση:

$D_e^2 = D \times D'$ για πυρήνες και $D_e^2 = (4/\pi)W \times D'$ για άλλα σχήματα

Ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_s μεταβάλλεται με την ισοδύναμη διάμετρο του δοκιμίου (D_e) στην αξονική δοκιμή και ως συνάρτηση της (D) στην διαμετρική δοκιμή. Με γνώμονα αυτό, πρέπει να γίνει διόρθωση του δείκτη αυτού και να βρεθεί ένας διορθωμένος δείκτης σημειακής φόρτισης, ο οποίος θα αναφέρεται σε μία τυποποιημένη διάμετρο του δοκιμίου για να προκύπτει μία μοναδική τιμή αντοχής. Ο νέος αυτός διορθωμένος δείκτης $I_{s(50)}$ σημειακής φόρτισης (I_s) αναφέρεται σε διάμετρο δοκιμίου $D = 50$ mm.

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

όπου

Είναι ο συντελεστής διόρθωσης που εκτιμάται από την σχέση:

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

Συνεπώς από τις παραπάνω σχέσεις ισχύει ότι:

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \times I_s \text{ (σεMPa)}$$

Η αξιοπιστία της δοκιμής εξαρτάται από το είδος θραύσης των δοκιμίων. Τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα είναι αυτά με τιμές $D > 42$ mm. Με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης, η ταξινόμηση ακέραίου πετρώματος δίνεται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2. Ταξινόμηση ακέραίου πετρώματος με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (BIENIAWSKI, 1975)

Χαρακτηρισμός αντοχής	Δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (MPa)
Πολύ υψηλής αντοχής	>8
Υψηλής αντοχής	4 – 8
Μέσης αντοχής	2 – 4

Χαμηλής αντοχής	1 – 2
Πολύ χαμηλής αντοχής	Δεν συνιστάται η δοκιμή

3.1.3 Προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson βραχώδους δοκιμίου (STRAIN)

3.1.3.1 Σκοπός

Η μέθοδος καλύπτει τον εργαστηριακό προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson βραχώδους δοκιμίου.

3.1.3.2 Πεδίο εφαρμογής

Η Οδηγία Εργασίας εφαρμόζεται στον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson βραχώδους δοκιμίου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής Μονοαξονικής Θλίψης με χρήση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain gauges) και καταγραφικού (datalogger) και εκτελείται σύμφωνα με τις μεθόδους:

- ASTM D3148
- ISRM Suggested Methods, 1981

3.1.3.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός:

- Ηλεκτροκίνητη μηχανή θλίψεως 2000kN (πρέσα), με ενσωματωμένο ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου και εκτυπωτικό μηχανισμό.
- Ηλεκτρονική συσκευή αυτόματης καταγραφής (Data Logger) και αποθήκευσης εργαστηριακών μετρήσεων. Η συσκευή είναι συνδεδεμένη με ηλεκτρομηκυνσιομέτρα (strain gauges), αισθητήρα πίεσης (10000 psi) για μέτρηση φορτίου και αισθητήρες μέτρησης παραμόρφωσης (LSCT 10mm). Σύνδεση με Η/Υ (μέσω Winhost) για επεξεργασία δεδομένων.
- Θερμόμετρο ακρίβειας 1°C
- Κλίβανος ικανός να διατηρεί ομοιόμορφη θερμοκρασία (110 ± 5)°C σε όλο το θάλαμο
- Ζυγός τάξης GP2 ευαισθησίας 0.1g
- Υποδοχείς δειγμάτων.
- Ξηραντήρας
- Εργοταξιακά γάντια, λαβίδες, κ.ά., για την μεταφορά και τον χειρισμό των θερμών υποδοχέων

3.1.3.4 Εκτέλεση δοκιμής

Εφαρμόζουμε στο δοκίμιο 2 ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, αντιδιαμετρικά και στο κέντρο κατά μήκος του πυρήνα, προσέχοντας ώστε η επιφάνεια επικόλλησης να είναι λεία και καθαρή (απαιτείται καθαρισμός της επιφάνειας του δοκιμίου με οινόπνευμα πριν την επικόλληση). Κάθε ηλεκτρομηκυνσιόμετρο, αποτελείται από 2 αισθητήρες οι οποίοι πρέπει να τοποθετούνται κάθετα μεταξύ τους. Για την εξασφάλιση της κατακόρυφης θέσης των αισθητήρων, σχεδιάζονται οι κατακόρυφες στο δοκίμιο, στο σημείο επικόλλησης πριν την τοποθέτηση των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων. Η επικόλληση εκτελείται με ελαφρά πίεση στο δοκίμιο, λόγω της ευαισθησίας των αισθητήρων παραμόρφωσης. Μετά την επικόλληση των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων, το δοκίμιο αφήνεται σε ηρεμία σε θερμοκρασία δωματίου για τουλάχιστον 24 ώρες. Τα δοκίμια δοκιμάζονται με την περιεχόμενη τους υγρασία, η οποία και υπολογίζεται μετά τη θραύση, όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Πριν την εκτέλεση της δοκιμής γίνεται αναλυτική περιγραφή του δοκιμίου, δηλαδή, της λιθολογίας, της δομής των ασυνεχειών και οποιονδήποτε πρόσθετων χαρακτηριστικών.

Καθαρίζουμε τις πλάκες τις πρέσας και τις επιφάνειες του δείγματος και τοποθετούμε το δείγμα στην κατώτερη πλάκα. Συνδέουμε τα ελεύθερα άκρα των αισθητήρων των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων με τις εξόδους των καναλιών του datalogger. Εφαρμόζουμε ένα μικρό αξονικό φορτίο της τάξης των 100N για να εφαρμόσει η ανώτερη πλάκα στο δοκίμιο. Στο μπροστινό τμήμα των πλακών της πρέσας, εφαρμόζουμε καρτέλα με τα στοιχεία του δείγματος και φωτογραφίζουμε το δείγμα πριν την θραύση. Καταγράφουμε τον αριθμό της φωτογραφίας στο έντυπο. Τοποθετούμε στη συσκευή θλίψης το μετρητή παραμόρφωσης (βελόμετρο), εφαρμόζοντας τον σε κατακόρυφη θέση στην κατώτερη πλάκα της πρέσας, και ελέγχοντας το μηδενισμό του μέσω του προγράμματος Winhost (δες Μονοαξονική δοκιμή). Υπολογίζουμε το ρυθμό φόρτισης από τη ένδειξη αντοχής με τη σφύρα Schmidt, (από το έντυπο προταξινόμησης) διαιρώντας την αντοχή αυτή με την επιφάνεια του δοκιμίου (mm^2) και υπολογίζουμε κατά προσέγγιση σε πόσα kN θα σπάσει το δοκίμιο. Διαιρούμε τα kN με 15 min (μέγιστος επιτρεπτός χρόνος θραύσης) και υπολογίζουμε το ρυθμό φόρτισης. Δεν πρέπει να επιτρέψουμε να διαφοροποιηθεί ο ρυθμός φόρτισης κατά τη διάρκεια της δοκιμής περισσότερο από 10% από αυτόν που επιλέξαμε. Ξεκινάμε τη συσκευή θλίψης και ταυτόχρονα το πρόγραμμα καταγραφής (Winhost). Η θραύση του δοκιμίου πρέπει να επέλθει μεταξύ 2-15 λεπτών και ολοκληρώνεται μόλις σταθεροποιηθεί ή μειωθεί η ένδειξη του φορτίου (load) ή μόλις επιτευχθεί μια προκαθορισμένη τιμή παραμόρφωσης. Μόλις ολοκληρωθεί η δοκιμή, κλείνουμε τη συσκευή θλίψης και το πρόγραμμα καταγραφής (Winhost) χωρίς να απελευθερώσουμε την πίεση των λαδιών, φωτογραφίζουμε και πάλι το δοκίμιο και καταγράφουμε τον αριθμό της φωτογραφίας στο έντυπο. Επίσης καταγράφουμε στο έντυπο μια σύντομη

περιγραφή της θραύσης του δοκιμίου ως προς τον άξονα φόρτισης. Ζυγίζουμε και καταγράφουμε το βάρος ενός καθαρού και στεγνού υποδοχέα. Αφαιρούμε το δοκίμιο από την συσκευή θλίψης, το τοποθετούμε μέσα στον υποδοχέα και προσδιορίζουμε το βάρος τους. Ακολούθως μεταφέρεται ο υποδοχέας με το δοκίμιο στον κλίβανο και ξηραίνεται στους (110 ± 5) °C. Όταν το δείγμα φτάσει σε σταθερή μάζα απομακρύνεται από τον κλίβανο, και αφήνεται να κρυώσει σε ξηραντήρα για 30 λεπτά. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μάζα του υποδοχέα και του ξηρού δείγματος.

3.1.3.5 Υπολογισμοί

Η αξονική καταπόνηση (ϵ_a), και η πλευρική καταπόνηση (ϵ_l), μπορούν να ληφθούν άμεσα από τις ενδείξεις παραμόρφωσης.

$$1) \text{ Αξονική καταπόνηση: } \epsilon_a = \frac{\Delta L}{L}$$

όπου:

L= Αρχικό μη παραμορφωμένο αξονικό μήκος μέτρησης, και

ΔL = Αλλαγή στο μετρούμενο αξονικό μήκος (αρνητικό για μείωση μήκους)

$$2) \text{ Πλευρική καταπόνηση: } \epsilon_l = \frac{\Delta D}{D}$$

όπου:

D=αρχική μη παραμορφωμένη διάμετρος, και

ΔD =αλλαγή διαμέτρου (θετικό πρόσημο για αύξηση στη διάμετρο)

Ο υπολογισμός της θλιπτικής τάσης στο δοκίμιο δοκιμής από το θλιπτικό φορτίο και το αρχικά υπολογιζόμενο εμβαδόν διατομής, γίνεται από τη σχέση:

$$3) \sigma = \frac{P}{A}$$

όπου, σ =τάση, P=φορτίο, και A=εμβαδόν

4) Διάγραμμα της καμπύλης τάσης – καταπόνησης για την αξονική και την πλευρική κατεύθυνση. Η καμπύλη δίνει την καλύτερη περιγραφή της συμπεριφοράς παραμόρφωσης των πετρωμάτων που έχουν μη γραμμικές σχέσεις σε υψηλά και χαμηλά επίπεδα τάσης.

5) Το αξονικό μέτρο Ελαστικότητας E, μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση οποιασδήποτε από αρκετές μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην μηχανική. Οι πιο κοινές μέθοδοι, που περιγράφονται, είναι οι ακόλουθες:

- Εφαπτομενικό μέτρο σε επίπεδο τάσης που είναι κάποιο σταθερό ποσοστό (συνήθως 50%) της μέγιστης αντοχής.
- Μέση κλίση του τμήματος της λίγο-πολύ ευθείας γραμμής της καμπύλης τάσης – καταπόνησης. Η μέση κλίση μπορεί να υπολογιστεί είτε με διαχωρισμό της αλλαγής σε τάση με την αλλαγή σε καταπόνηση ή κατασκευάζοντας μία γραμμική σχέση μέσω ελάχιστων τετραγώνων, σύμφωνα με τα στοιχεία τάσης – καταπόνησης στο τμήμα της ευθείας γραμμής της καμπύλης.

Πίνακας 3.3. Διαχωρισμός πετρωμάτων

ΠΕΤΡΩΜΑ	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή (MPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Μέτρο Ελαστικού -τητας (GPa)	Λόγος Poisson	Αξονική Παραμόρφωση κατά την θραύση (%)	Σημειακή Φόρτιση $I_{s(50)}$ (MPa)
ΠΥΡΙΓΕΝΗ						
Γρανίτης	100-300	7-25	30-70	0,17	0,25	5-15
Δολερίτης	100-350	7-30	30-100	0,10-0,20	0,3	-
Γάββρος	150-250	7-30	40-100	0,20-0,35	0,3	6-15
Ρυόλιθος	80-160	5-10	10-50	0,2-0,4	-	-
Ανδεσίτης	100-300	5-15	10-70	0,2	-	10-15
Βασάλτης	100-350	10-30	40-80	0,1-0,2	0,35	9-15
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ						
Κροκαλοπαγές	30-230	3-10	10-90	0,10-0,15	0,16	-
Ψαμμίτης	20-170	4-25	15-50	0,14	0,2	1-8
Αργιλικός σχιστόλιθος	5-100	2-10	5-30	0,1	-	-
Μαργόλιθοι	10-100	5-30	5-70	0,15	0,15	0,1-6
Δολομίτης	20-120	6-15	30-70	0,15	0,17	-
Ασβεστόλιθος	30-250	6-25	20-70	0,3	-	3-7
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ						
Γνεύσιος	100-250	7-20	30-80	0,24	0,12	5-15
Σχιστόλιθος	70-150	4-10	5-60	0,15-0,25	-	5-10
Φυλλίτης	5-150	6-20	10-85	0,26	-	-
Σχίστες	50-180	7-20	20-90	0,20-0,30	0,35	1-9
Μάρμαρο	50-200	7-20	30-70	0,15-0,30	0,4	4-12
Χαλαζίτες	150-300	5-20	50-90	0,17	0,2	5-15

- Μέτρο τέμνουσας, συνήθως από μηδενική τάση σε κάποιο σταθερό ποσοστό της μέγιστης αντοχής.
- 6) Η τιμή του λόγου Poisson ν , επηρεάζεται κατά πολύ από τις μη γραμμικότητες σε χαμηλά επίπεδα τάσης στις αξονικές και πλευρικές καμπύλες τάσης – καταπόνησης. Προτείνεται ο λόγος Poisson να υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\nu = \frac{\text{κλίση αξονικής καμπύλης}}{\text{κλίση πλευρικής καμπύλης}} = \frac{E}{\text{κλίση πλευρικής καμπύλης}}$$

όπου η κλίση της πλευρικής καμπύλης καθορίζεται με τον ίδιο τρόπο που διενεργήθηκε για το μέτρο Ελαστικότητας, E. Μηχανικές ιδιότητες των διαφορετικών ειδών πετρωμάτων, δίνονται στο Πίνακα 3.3.

3.2 Προσδιορισμός αντοχής σε εφελκυσμό

3.2.1 Έμμεσος προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής - Braziliantest

3.2.1.1 Σκοπός

Η μέθοδος καλύπτει τον εργαστηριακό προσδιορισμό με έμμεσο τρόπο της εφελκυστικής αντοχής βραχωδών δοκιμίων.

3.2.1.2 Πεδίο Εφαρμογής

Η οδηγία Εργασίας εφαρμόζεται στον έμμεσο προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής βραχωδών δοκιμίων σύμφωνα με τους μεθόδους:

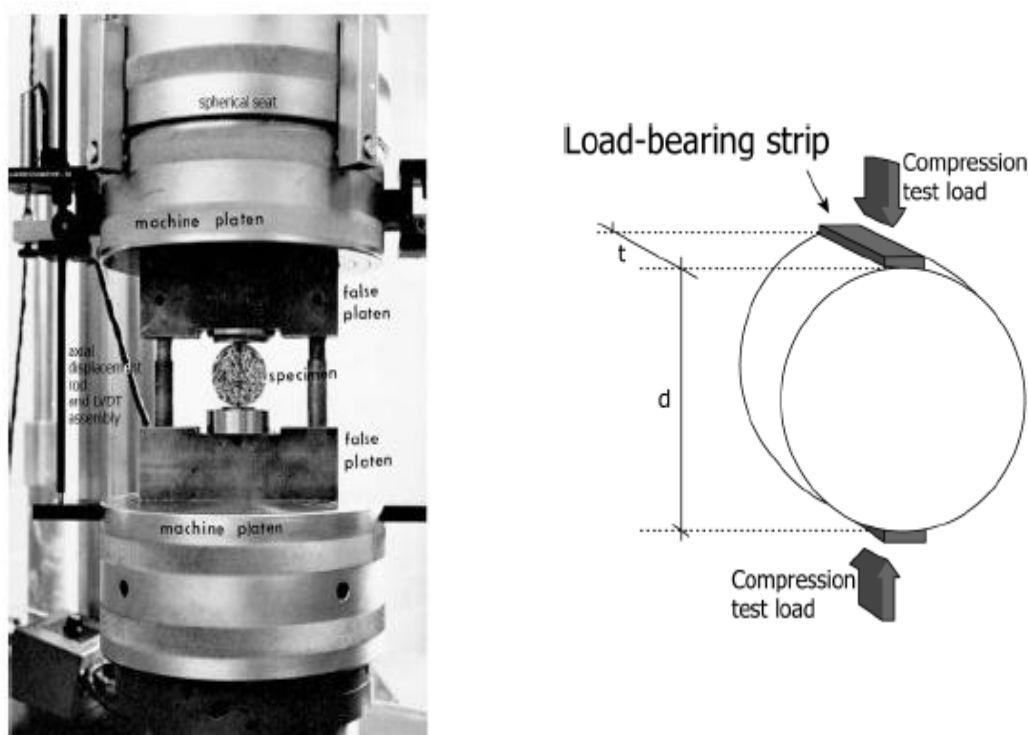
- ASTM D3967-23
- ISRM Suggested Methods, 1981

3.2.1.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός

- Ηλεκτροκίνητη μηχανή θλίψεως 2000kN(πρέσα), με ενσωματωμένο ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου και εκτυπωτικό μηχανισμό (Σχήμα 3.12)
- Μεταλλική συσκευή (φορέας με εσωτερική καμπυλότητα πλακών εφαρμογής), προσαρτημένης στην ηλεκτροκίνητη μηχανική θλίψης (πρέσα), για την εκτέλεση δοκιμής Θλίψης (Braziliantest)
- Διαστημόμετρο
- Ζυγός με ακρίβεια 0,1% της μάζας του δείγματος (ΖΥΓ-1,ΖΥΓ-2,ΖΥΓ-3)
- Κλίβανος ικανός να διατηρεί θερμοκρασία (110±5) °C ομοιόμορφα σε όλο το θάλαμο (ΚΛΙΒ-1)
- Υποδοχείς δειγμάτων
- Χαρτοταινία

3.2.1.4 Προετοιμασία δειγμάτων

Τα δοκίμια πρέπει να είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με λόγω ύψους προς διάμετρο, $L/D = 0,2 - 0,75$, όπου η διάμετρος πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη της διαμέτρου του μέγιστου κόκκου του δείγματος. Μία διάμετρος περίπου 50 mm ικανοποιεί τις απαιτήσεις της δοκιμής. Για να υπολογίσουμε τον μέσο όρο της εφελκυστικής αντοχής, ελέγχονται τουλάχιστον 10 δοκίμια του ίδιου δείγματος εκτός και αν ο συντελεστής απόκλισης των επιμέρους αντοχών είναι μικρότερος του 5%, οπότε μπορεί να γίνει αποδεκτός και μικρότερος αριθμός δοκιμών. Η επιφάνεια της περιφέρειας του δείγματος πρέπει να είναι λεία και με επιπεδότητα έως 0,5mm. Τα άκρα του δείγματος πρέπει να αποκόπτονται παράλληλα μεταξύ τους και να εξασφαλίζεται η καθετότητα του δείγματος (μέγιστη απόκλιση 0,5%). Τα δοκίμια ελέγχονται με την περιεχόμενη τους υγρασία, η οποία και υπολογίζεται μετά την θραύση, όπως περιγράφεται στην συνέχεια. Πριν την εκτέλεση της δοκιμής γίνεται αναλυτική περιγραφή του δοκιμίου και οποιονδήποτε πρόσθετων παρατηρήσεων.



Σχήμα 3.12. Εργαστηριακός εξοπλισμός για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής δοκιμών πετρωμάτων

3.2.1.5 Σήμανση, διαστασιολόγηση και τοποθέτηση δειγμάτων

Ο επιθυμητός κατακόρυφος προσανατολισμός του δείγματος, πρέπει να υποδεικνύεται με σχεδίαση μιας διαμετρικής γραμμής σε κάθε άκρο του δείγματος

(Σχήμα 3.13). Αυτές οι γραμμές χρησιμοποιούνται για το κεντράρισμα του δείγματος στην συσκευή ώστε να εξασφαλίζεται σωστός προσανατολισμός, αλλά και ως γραμμές αναφοράς για την μέτρηση των διαστάσεων του δείγματος. Αν το δείγμα είναι ανισότροπο, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε η σχεδίαση των γραμμών σε κάθε δοκίμιο να γίνεται στον ίδιο προσανατολισμό. Πριν τον σχεδιασμό των διαμετρικών γραμμών, πρέπει να ελέγχεται η επαφή, μεταξύ πλακών και δείγματος. Περιστρέφουμε το δοκίμιο γύρω από τον άξονα του, και σταθεροποιούμε στο σημείο όπου δεν υπάρχει ορατό φως στην επαφή δοκιμίου – πλακών. Σχεδιάζουμε την κατακόρυφη διαμετρική γραμμή σε αυτό στο σημείο. Προσδιορίζουμε την διάμετρο του δοκιμίου με ακρίβεια 0,25mm, λαμβάνοντας το μέσο όρο 3 τουλάχιστον μετρήσεων, η μία εκ των οποίων παράλληλα στον άξονα φόρτισης. Προσδιορίζουμε το πάχος του δοκιμίου με ακρίβεια 0,25mm λαμβάνοντας το μέσο όρο 3 τουλάχιστον μετρήσεων, η μία εκ των οποίων στο κέντρο του δείγματος.



Σχήμα 3.13. Σχεδίαση μιας διαμετρικής γραμμής σε κάθε άκρο του δοκιμίου

3.2.1.6 Εκτέλεση δοκιμής

Ζυγίζουμε και καταγράφουμε την μάζα του δοκιμίου πριν την δοκιμή. Σκουπίζουμε τις πλάκες της πρέσσας και της επιφάνειας του δείγματος και τοποθετούμε το δείγμα όπως προαναφέραμε. Στο μπροστινό τμήμα των πλακών τη πρέσσας, εφαρμόζουμε καρτέλα με τα στοιχεία του δείγματος, φωτογραφίζουμε το δείγμα πριν την θραύση και καταγράφουμε τον αριθμό της φωτογραφίας στο έντυπο. Έπειτα εφαρμόζουμε συνεχές αυξανόμενο φορτίο ώστε να επιτευχθεί ρυθμός φόρτισης από 0,05 έως 0,35 MPa/sec (ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος). Η θραύση του δοκιμίου πρέπει να επέλθει σε χρονικό διάστημα από 1 έως 10 min. Μόλις ολοκληρωθεί η δοκιμή, κλείνουμε την συσκευή θλίψης, φωτογραφίζουμε πάλι το δοκίμιο και καταγράφουμε τον αριθμό της φωτογραφίας. Καταγράφουμε στο έντυπο μια σύντομη περιγραφή της θραύσης του δοκιμίου ως προς τον άξονα φόρτισης. Ζυγίζουμε και καταγράφουμε το βάρος ενός καθαρού και στεγνού υποδοχέα. Αφαιρούμε το δοκίμιο από την συσκευή θλίψης, το τοποθετούμε μέσα στον υποδοχέα και προσδιορίζουμε το βάρος τους. Τέλος μεταφέρεται ο υποδοχέας με το δείγμα στον κλίβανο και ξηραίνεται στους $110\pm 5^{\circ}\text{C}$. Όταν το δείγμα φτάσει σε σταθερή μάζα απομακρύνεται από τον κλίβανο και αφήνεται να κρυώσει σε ξηραντήρα για 30 λεπτά. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μάζα του υποδοχέα και του ξηρού δείγματος.

3.2.1.7 Υπολογισμοί

Η εφελκυστική αντοχή του δείγματος εκφράζεται με ακρίβεια 2 δεκαδικών και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

όπου:

σ_t = Η εφελκυστική αντοχή σε MPa

P = Το φορτίο θραύσης σε N

L = Το μέσο πάχος του δοκιμίου σε mm

D = Η μέση διάμετρος του δοκιμίου σε mm

3.3. Προσδιορισμός αντοχής σε κρούση

3.3.1 Προσδιορισμός σκληρότητας δειγμάτων πετρώματος με σφυρί Schmidt

3.3.1.1 Σκοπός

Η μέθοδος καλύπτει τον εργαστηριακό προσδιορισμό της σκληρότητας δειγμάτων πετρώματος με τη χρήση του σφυριού αναπήδησης Schmidt. Το σφυρί αναπήδησης Schmidt είναι μία ελαφριά φορητή συσκευή, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στο εργαστήριο όσο και στην ύπαιθρο σε επιφάνειες πετρωμάτων, για να γίνει εκτίμηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας (Σχήμα 3.14). Σχεδιάστηκε για να εκτελεί άμεσες επί τόπου δοκιμές σε μπετόν και σε επιφάνειες πετρώματος χωρίς να τις καταστρέφει. Όμως μπορεί να προκαλέσει ρωγματώσεις των δοκιμίων που έχουν αντοχή μικρότερη των 50 MPa. Η ενέργεια κρούσης του είναι 0,74 N και φέρει κλίμακα ενδείξεων των τιμών αναπήδησης που αντιστοιχούν στην σκληρότητα του πετρώματος. Για την εξέταση κυλινδρικών δοκιμίων πετρώματος απαιτείται μεταλλική βάση βάρους 20 kg στην οποία είναι χαραγμένη αυλακωτή τομή σχήματος U ή V για την συγκράτηση του δοκιμίου.

3.3.1.2 Πεδίο εφαρμογής

Η οδηγία εργασίας εφαρμόζεται στον προσδιορισμό της σκληρότητας δειγμάτων πετρώματος με τη χρήση του σφυριού αναπήδησης Schmidt σύμφωνα με τις μεθόδους:

- ASTM D5873-14
- ΥΠΕΧΩΔΕ ΚΕΔΕ E103-84, Νο7
- ISRM Suggested Methods, 1981

Στην περίπτωση που τα πετρώματα είναι πολύ σκληρά ή πολύ μαλακά, η μέθοδος έχει περιορισμένη εφαρμογή.

3.3.1.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός

- Σφυρί Schmidt (Σχήμα 3.14)
- V – Block
- Πέτρα λείανσης (Σχήμα 3.15)
- Πρότυπο διακρίβωσης σφύρας



Σχήμα 3.14. Σφύρα Schmidt και παράδειγμα δοκιμής σε κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος



Σχήμα 3.15. Πέτρα λείανσης

3.3.1.4 Προετοιμασία δειγμάτων

Προσδιορίζουμε το μήκος των δειγμάτων, λαμβάνοντας το μέσο όρο τεσσάρων μετρήσεων, σε τέσσερις ίσες αποστάσεις της περιφέρειας του δείγματος. Με τον ίδιο τρόπο προσδιορίζουμε τη διάμετρο του δείγματος, λαμβάνοντας το μέσο όρο των δύο μετρήσεων με γωνία 90° μεταξύ τους, στο μέσο μήκος του δείγματος. Καταγράφουμε τις διαστάσεις με ακρίβεια 5 mm και τις συνθήκες

υγρασίας του δείγματος. Η επιφάνεια του δείγματος πρέπει να είναι ομαλή δηλαδή να μην έχει μικρορωγμές ή άλλες ασυνέχειες μέχρι βάθους περίπου 6 cm από την επιφάνεια κρούσεως. Στην περίπτωση που η επιφάνεια του δείγματος δεν είναι ομαλή, χρησιμοποιούμε την πέτρα λείανσης για να λειάνουμε την επιφάνεια του.

3.3.1.5 Διακρίβωση σφύρας

Πριν ξεκινήσει η δοκιμή, γίνεται βαθμονόμηση της σφύρας με το πρότυπο διακρίβωσης. Υπολογίζουμε το μέσο όρο δέκα μετρήσεων της σφύρας στο πρότυπο διακρίβωσης. Προσδιορίζουμε το συντελεστή διόρθωσης των ενδείξεων της σφύρας, διαιρώντας την τιμή σκληρότητας του προτύπου διακρίβωσης όπως δίνεται από τον κατασκευαστή με τον μέσο όρο των δέκα μετρήσεων που παίρνουμε από την σφύρα. Όταν οι ενδείξεις της διακρίβωσης είναι εντός των ορίων που παρέχει ο κατασκευαστής τότε η σφύρα χρησιμοποιείται σωστά.

3.3.1.6 Εκτέλεση δοκιμής

Η σφύρα Schmidt πρέπει να βρίσκεται σε ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας με το δοκίμιο, για 2 ώρες πριν την εκτέλεση της δοκιμής. Το V – Block τοποθετείται σε επίπεδη και σταθερή επιφάνεια. Τα δείγματα ασφαλιζονται για να μην μετακινηθούν ή δημιουργηθεί κάποια δόνηση τους κατά την διάρκεια της δοκιμής. Το σφυρί τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση με το έμβολο προς τα κάτω με μέγιστη απόκλιση $\pm 5^\circ$. Δεν πρέπει να λάβουμε μέτρηση σε απόσταση μικρότερη της διαμέτρου του εμβόλου από τα άκρα του δείγματος. Το έμβολο του σφυριού πιέζεται σταθερά πάνω στην επιφάνεια του δείγματος, μέχρι να απελευθερωθεί το ελατήριο κρούσεως και να ακουστεί ο χαρακτηριστικός κρότος. Η ένδειξη σκληρότητας διαβάζεται στην βαθμονομημένη κλίμακα που υπάρχει στο κυρίως σώμα του σφυριού, πριν την απελευθέρωση του εμβόλου. Θα πρέπει να γίνονται τουλάχιστον δέκα μετρήσεις σε κάθε δείγμα πετρώματος, ενώ κάθε κρούση που θα φέρει θραύση πρέπει να απορρίπτεται. Οι μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται σε απόσταση μεταξύ τους, όση είναι η διάμετρος του εμβόλου και μεγαλύτερη.

Ορισμένοι παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν τις μετρήσεις είναι:

- Η εκτέλεση της δοκιμής να γίνει σε θερμοκρασία μικρότερη των 0°C .
- Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του σφυριού και του δείγματος.
- Η χρήση διαφορετικών σφυρών Schmidt στο ίδιο δείγμα παρουσιάζει διαφοροποίηση στις μετρήσεις από 1 έως 3 μονάδες και πρέπει να αποφεύγεται.

3.3.1.7 Υπολογισμοί

Από τα δεδομένα των 10 μετρήσεων που λάβαμε, απορρίπτονται όσες διαφέρουν από το μέσο, περισσότερο από 7 μονάδες και προσδιορίζουμε το μέσο

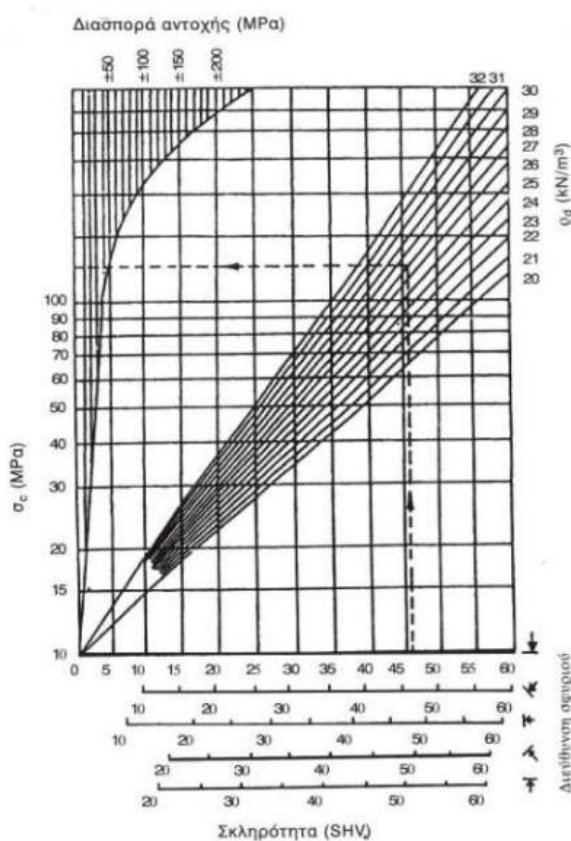
όρο από τις υπόλοιπες. Ο μέσος όρος πολλαπλασιαζόμενος με το συντελεστή διόρθωσης δίνει την αντιπροσωπευτική σκληρότητα του δοκιμίου (Πίνακας 3.4). Ο συντελεστής διόρθωσης C , δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{K}{K_{10}}$$

όπου:

K = Η σταθερή τιμή σκληρότητας του πρότυπου διακρίβωσης

K_{10} = Η μέση τιμή 10 μετρήσεων του σφυριού κατά την βαθμονόμηση του στο πρότυπο διακρίβωσης



Σχήμα 3.16. Διάγραμμα υπολογισμού της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη του ακέραίου πετρώματος με βάση το μέσο όρο των μετρήσεων σκληρότητας (SHV) και της πυκνότητας του (ρ_d) (DEERE and MILLER, 1966)

Πίνακας 3.4. Ταξινόμηση ακεραίου πετρώματος με βάση την σκληρότητά του

Κατηγορία πετρωμάτων	Μέση ένδειξη σφυριού Schmidt
Πολύ μαλακά πετρώματα	<10
Μαλακά πετρώματα	10 – 20
Μέτρια πετρώματα	20 – 50
Σκληρά πετρώματα	50 – 60
Πολύ σκληρά πετρώματα	>60

3.4 Προσδιορισμός αντοχής σε διάτμηση ασυνεχειών

3.4.1 Προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής φυσικών και τεχνητών ασυνεχειών

3.4.1.1 Σκοπός

Η δοκιμή αυτή έχει στόχο τον προσδιορισμό της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής ασυνεχειών πετρώματος σαν συνάρτηση του ορθού φορτίου στο επίπεδο διάτμησης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της ευστάθειας σε σήραγγες, βραχώδη πρανή και για προβλήματα ευστάθειας στη θεμελίωση φραγμάτων.

3.4.1.2 Πεδίο εφαρμογής

Η οδηγία εργασίας εφαρμόζεται στον προσδιορισμό της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής ασυνεχειών σύμφωνα με τις μεθόδους:

- ASTM D5607-16
- ISRM Suggested Methods, 1981

3.4.1.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός

- Συσκευή άμεσης διάτμησης ασυνεχειών (φυσικών και τεχνητών) βραχωδών δοκιμίων (Σχήμα 3.17)
- Προφιλόμετρο
- Μηκυσιόμετρο ακριβείας 0,01mm
- Μήτρες (καλούπια) προετοιμασίας δειγμάτων
- Σφιγκτήρας για την τοποθέτηση του δοκιμίου στη μήτρα
- Παχύμετρο



Σχήμα 3.17. : Συσκευή διάτμησης

3.4.1.4 Προετοιμασία δειγμάτων

Αρχικά επιλέγεται η φυσική ασυνέχεια ή προετοιμάζεται τεχνητή επιφάνεια ασυνέχειας, κόβοντας τον πυρήνα με αδαμαντοτροχό. Το δοκίμιο διαμορφώνεται έτσι ώστε η ελάχιστη επιφάνεια ασυνέχειας να είναι περίπου 2500mm^2 . Καταγράφονται:

- Η διάμετρος του δοκιμίου (μέσος όρος 2 κάθετων διαμέτρων)
- Ο τύπος της ασυνέχειας (φυσική ή τεχνητή)
- Η κατάσταση της επιφάνειας ασυνέχειας (λεία, τραχιά) καθώς και το υλικό πλήρωσης εάν υπάρχει
- Το περίγραμμα των επιφανειών του δοκιμίου παράλληλα και κάθετα στη διεύθυνση της διάτμησης με χρήση του προφίλομέτρου
- Η μακροσκοπική περιγραφή του δείγματος

Ακολούθως, τα δύο τμήματα που σχηματίζουν το δοκίμιο, δένονται μεταξύ τους σταυρωτά με σύρμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.18. Δοκίμιο βράχου όπου έχει προετοιμαστεί για καλούπωμα

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να προετοιμαστεί η μήτρα στην οποία θα τοποθετηθούν τα δύο τμήματα του δείγματος, κάνοντας λίπανση των τοιχωμάτων της και βιδώνοντας τις δύο βίδες που φέρει για συγκράτηση του δοκιμίου στο κάτω μέρος. Στη συνέχεια κεντράρονται τα πλευρικά αδιαφανή πλαστικά της και γίνεται σύσφιξη των βιδών. Το δείγμα συγκρατείται με τον ειδικό σφιγκτήρα. Τοποθετείται ο σφιγκτήρας με το δείγμα κατά μήκος της μισής μήτρας, με τρόπο ώστε το επίπεδο διάτμησης να ταυτίζεται με την οριζόντια χάραξη του πλαϊνού αδιαφανούς. Τοποθετείται το επίπεδο διάτμησης στο οριζόντιο επίπεδο έως ότου επιτευχθεί η κεντρική συμμετρία για την αξονική φόρτιση. Το δοκίμιο με τον σφιγκτήρα αφαιρείται. Προετοιμάζεται σε δοχείο ρευστός πολτός γύψου-τσιμέντου με τον οποίο πληρούν τα $4/5$ περίπου της μήτρας. Η πλήρωση πρέπει να είναι τέτοια ώστε μόλις τοποθετηθεί το συγκρατημένο με το σφιγκτήρα δοκίμιο, η επιφάνεια του πολτού να φθάσει στα χείλη της μήτρας. Η απόσταση της επιφάνειας ασυνέχειας από τη στάθμη του γύψου πρέπει να είναι περίπου 5mm . Στη συνέχεια δονείται η μήτρα, ώστε να απομακρυνθούν τυχόν φυσαλίδες αέρα και να επιτευχθεί η

καλύτερη δυνατή συμπύκνωση. Αφήνεται για 2 ώρες τουλάχιστον να πήξει το μίγμα και στη συνέχεια αφαιρείται ο σφιγκτήρας συγκράτησης του δοκιμίου. Απομακρύνονται επίσης και τα πλαϊνά διαφανή τα οποία και τοποθετούνται στην άλλη μισή μήτρα. Στην άλλη μισή μήτρα γίνεται κεντράρισμα και τοποθέτηση ρευστού πολτού. Τοποθετείται η μισή μήτρα με το δοκίμιο πάνω στην άλλη μισή που περιέχει το ρευστό πολτό και αφού πατήσει καλά το ένα δοκίμιο πάνω στο άλλο γίνεται σύσφιξη και στις άλλες βίδες. Δονείται ξανά η μήτρα, ώστε να απομακρυνθούν τυχόν φυσαλίδες αέρα. Συμπληρώνονται ή απομακρύνονται μικρές ποσότητες πολτού μέσω των σχισμών που υπάρχουν στα διαφανή πλαϊνά και αφήνεται να πήξει για 24 έως 48 ώρες. Τέλος απομακρύνονται όλες οι βίδες και αφαιρείται το δοκίμιο από τη μήτρα. Με τον τρόπο αυτό έχουμε πλέον το δοκίμιο εγκιβωτισμένο μέσα στο εκμαγείο από γύψο. Αποκόπτονται τα δύο σύρματα που συγκρατούν το δοκίμιο κατά μήκος.

3.4.1.5 Εκτέλεση δοκιμής

Συνδέεται η αντλία επιβολής του κατακόρυφου (ορθού) φορτίου με το αντίστοιχο γρύλο της συσκευής καθώς επίσης και η αντλία επιβολής του οριζόντιου (διατμητικού) φορτίου με τον αντίστοιχο γρύλο (Σχήμα 3.17).

Τοποθετείται το δοκίμιο στο κάτω μέρος της συσκευής η οποία και συναρμολογείται τοποθετώντας με προσοχή το άνω μέρος. Έπειτα τοποθετείται το συρμάτινο καλώδιο πάνω από τη σφαιρική βάση στο άνω έμβολο και εφαρμόζεται ένα μικρό φορτίο με την αντλία ορθού φορτίου. Αποκόπτονται και τα δύο άλλα εγκάρσια σύρματα που περιβάλλουν το δοκίμιο. Τοποθετείται το μηκυσιόμετρο στο κάτω μέρος του κορμού της συσκευής το οποίο και μηδενίζεται ώστε να μετρά κάθε οριζόντια μετακίνηση.

Στη συνέχεια τοποθετείται το συρμάτινο καλώδιο που βρίσκεται στο κάτω μέρος του άνω τμήματος της συσκευής στο οριζόντιο έμβολο και εφαρμόζεται ένα μικρό φορτίο με την αντλία του διατμητικού φορτίου, οπότε και μηδενίζεται πάλι το μηκυσιόμετρο. Αφού με τη μία αντλία επιτευχθεί το επιθυμητό ορθό φορτίο, με τη δεύτερη εφαρμόζεται σταδιακά και αργά στο δοκίμιο το διατμητικό φορτίο και παρακολουθείται το μηκυσιόμετρο για ομοιόμορφη μετατόπιση. Παρακολουθείται επίσης διαρκώς και το ορθό φορτίο καθώς σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί να διορθωθεί ελαφρώς κατά τη διάρκεια της διάτμησης ώστε να διατηρείται σταθερή η τιμή του. Καταγράφεται στο φύλλο δοκιμής το ορθό φορτίο καθώς και οι τιμές του διατμητικού φορτίου για κάθε 0,5 ή 1mm μετατόπιση. Όταν καταγραφεί το μέγιστο διατμητικό φορτίο, συνεχίζεται για λίγο η δοκιμή πέραν του μεγίστου, ώστε να έχουμε στοιχεία για την καμπύλη διατμητικού φορτίου-οριζόντιας μετατόπισης και παράλληλα για μια μέση παραμένουσα διατμητική αντοχή. Η μετατόπιση που απαιτείται για την αξιοπιστία της δοκιμής πρέπει να είναι τουλάχιστον το 10% του μήκους του δοκιμίου. Αφού ολοκληρωθεί η δοκιμή

για το συγκεκριμένο ορθό φορτίο, γίνεται αποφόρτιση και πλήρης αποσύνδεση της συσκευής. Καταγράφονται οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις από την επιφάνεια διάτμησης στο φύλλο δοκιμής και καθαρίζονται επιμελώς οι επιφάνειες αυτές. Επαναλαμβάνεται όλη η προηγούμενη διαδικασία, επιβάλλοντας υψηλότερο ορθό φορτίο. Η εργασία αυτή γίνεται τουλάχιστον για τρία διαφορετικά ορθά φορτία στο ίδιο δοκίμιο.

Με την ολοκλήρωση της δοκιμής καταγράφονται επίσης:

- Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας των ασυνεχειών JRC, όπως υπολογίζεται από το προφίλ της ασυνέχειας σε σχέση με τα τυπικά προφίλ (χρήση του προφιλόμετρου, Σχήμα 3.19)
- Η αντοχή της επιφάνειας ασυνέχειας JCS (MPa) (Με χρήση της σφύρας Schmidt)

3.4.1.6 Υπολογισμοί

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας (ϕ και c), προβάλλονται σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων (διατμητική αντοχή-ορθή τάση) οι μέγιστες διατμητικές αντοχές για μια σειρά δοκιμών που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ορθές τάσεις. Σχεδιάζεται η καμπύλη που περνά από τα διάφορα σημεία και μετριέται η γωνία τριβής ϕ και η φαινόμενη συνοχή c από τις εφαπτόμενες της καμπύλης για διάφορες τιμές ορθών τάσεων. Συνήθως σχεδιάζεται η ευθεία που διέρχεται από τα σημεία με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Όταν η δοκιμή εκτελείται σε φυσική ασυνέχεια, εκτιμάται επίσης και η γωνία τριβής της παραμένουσας αντοχής. Επίσης, σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων (διατμητικών τάσεων-μετατοπίσεων) σχεδιάζουμε τις καμπύλες τάσεων-μετατοπίσεων για κάθε τιμή ορθού φορτίου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η δοκιμή κυρίως εκτελείται για την εκτίμηση της βασικής γωνίας τριβής των ασυνεχειών (δηλαδή σε προκατασκευασμένη τεχνητή ασυνέχεια) που αποτελεί στην ουσία την παραμένουσα γωνία τριβής (Πίνακας 3.5).

$$\text{Ενεργή ορθή τάση: } \sigma_n = \frac{P_n}{A}$$

$$\text{Ενεργή διατμητική τάση: } \tau = \frac{P_s}{A}$$

όπου:

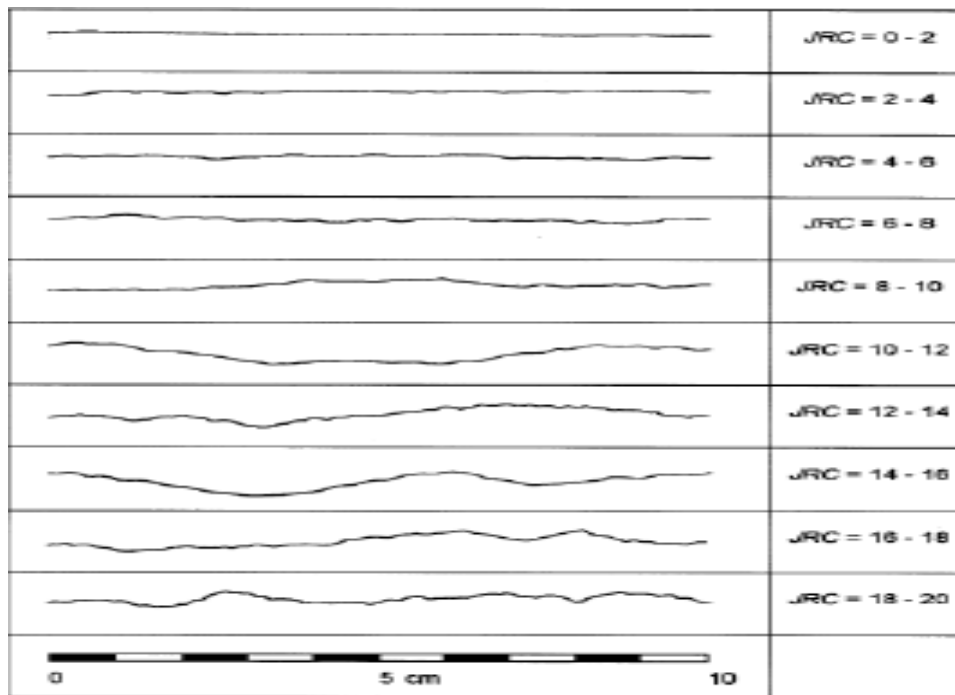
P_n = Ορθό φορτίο σε kN

P_s = Διατμητικό φορτίο σε kN

A = Ονομαστικό αρχικό εμβαδόν διατομής σε m^2

Πίνακας 3.5. Βασική γωνία τριβής για διάφορα πετρώματα (Academia.edu/11169854/Chapter_4_Properties_of_Rock_Materials)

Πέτρωμα	Βασική γωνία τριβής, ϕ_0 (°)		Αναφορά
	Ξηρή Κατάσταση	Υγρή Κατάσταση	
Ιζηματογενή			
Ασβεστόλιθος	31-37	27-35	Coulson (1972)
Ασβεστόλιθος	36-37		Grasselli and Egger (2003)*
Διολίθος		31	Ripley and Lee (1962)
Διολίθος	31-33	27-31	Coulson (1972)
Κρητίδα		30	Hutchinson (1972)
Κροκαλοπαγές	35		Krsmanovic (1967)
Σχίστης		27	Ripley and Lee (1962)
Ψαμίτης	26-35	25-33	Patton (1966)
Ψαμίτης		29	Ripley and Lee (1962)
Ψαμίτης	31-33		Krsmanovic' (1967)
Ψαμίτης	32-34	31-34	Coulson (1972)
Ψαμίτης		33	Richards (1975)
Ψαμίτης	37		Grasselli and Egger (2003)*
Πυριγενή			
Βασάλτης	35-38	31-36	Coulson (1972)
Γρανίτης (χονδρόκοκκος)	31-35	31-33	Coulson (1972)
Γρανίτης (λεπτόκοκκος)	31-35	29-31	Coulson (1972)
Γρανίτης	34		Grasselli and Egger (2003)*
Δολερίτης	36	32	Richards (1975)
Πορφύρης	31	31	Barton (1971)
Μεταμορφωσιγενή			
Αμφιβολίτης	32		Wallace et al. (1970)
Γνεύσιος	26-29	23-26	Coulson (1972)
Γνεύσιος	36		Grasselli and Egger (2003)*
Μάρμαρο	37		Grasselli and Egger (2003)*
Σερπεντινίτης	39		Grasselli and Egger (2003)*
Σχιστόλιθος	25-30		Barton (1971)
Σχιστόλιθος	30	21	Richards (1975)



Σχήμα 3.19. Τυπικά προφίλ και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC (Barton & Choubey, 1977).

Κεφάλαιο 4

Πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών

Η διαμόρφωση όλων των δοκιμών, όπως και η εκτέλεση όλων των εργαστηριακών δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Βραχομηχανικής της SRM, με εργαστηριακό εξοπλισμό που περιγράφεται στην συνέχεια. Η διαμόρφωση των κυλινδρικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού του εργαστηρίου που περιλαμβάνει τη χρήση αδαμαντοτροχού. Κατά την διάτρηση διέρχεται νερό ώστε να πραγματοποιείται η διαφυγή των θραυσμάτων του πετρώματος καθώς και η ταυτόχρονη ψύξη του κοπτικού άκρου. Μετρήθηκαν οι διαστάσεις των δοκιμών με ακρίβεια με την χρήση του παχυμέτρου, για να ταιριάζουν στις διαστάσεις της εκάστοτε δοκιμής.

Για όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες πετρωμάτων, τα ιζηματογενή και τα μεταμορφωμένα. Ιζηματογενή πετρώματα ονομάζονται εκείνα τα πετρώματα που έχουν δημιουργηθεί μέσω καταβύθισης υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση μέσα σε ένα ρευστό μέσο (αέρας, νερό). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα απολιθώματα τα οποία ανακαλύπτονται εντός τέτοιου είδους πετρωμάτων. Στη κατηγορία των μεταμορφωμένων ή μεταμορφωσιγενών ή κρυσταλλοσχιστωδών πετρωμάτων ανήκουν τα πετρώματα εκείνα που έχουν ανακρυσταλλωθεί, δηλαδή έχουν μετασχηματισθεί κάτω από θερμότητα και πίεση σε βαθμό τέτοιο, ώστε να εμφανίζουν μορφή πολύ διαφορετική από τα αρχικά πετρώματα.

4.1 Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης ξηρών δοκιμών

Για την δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης χρησιμοποιήθηκαν 5 ξηρά δοκίμια πετρώματος με διαφορετική λιθολογική περιγραφή/προέλευση από την ευρύτερη περιοχή της Χαλκιδικής. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Για κάθε ένα δοκίμιο, παρουσιάζονται σε γραφήματα η ορθή τάση και η παραμόρφωση κατά τη μονοαξονική θλίψη μέχρι και

την θραύση τους, φωτογραφίες τους πριν και μετά τις δοκιμές, καθώς και η λιθολογική περιγραφή τους.

Στα Σχήματα 4.1α, 4.2α, 4.3α, 4.4α και 4.5α απεικονίζονται φωτογραφίες των δοκιμών πριν τις δοκιμές, καθώς και μετά τη θραύση τους. Στα Σχήματα 4.1β, 4.2β, 4.3β, 4.4β, 4.5β παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης των άρρηκτων δοκιμών κατά τη διάρκεια της μονοαξονικής θλίψης τους. Στους Πίνακες 4.1 και 4.2 περιέχονται τα χαρακτηριστικά των δοκιμών και τα βασικά αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.1. Διαστάσεις και λιθολογική προέλευση των δοκιμών πετρωμάτων

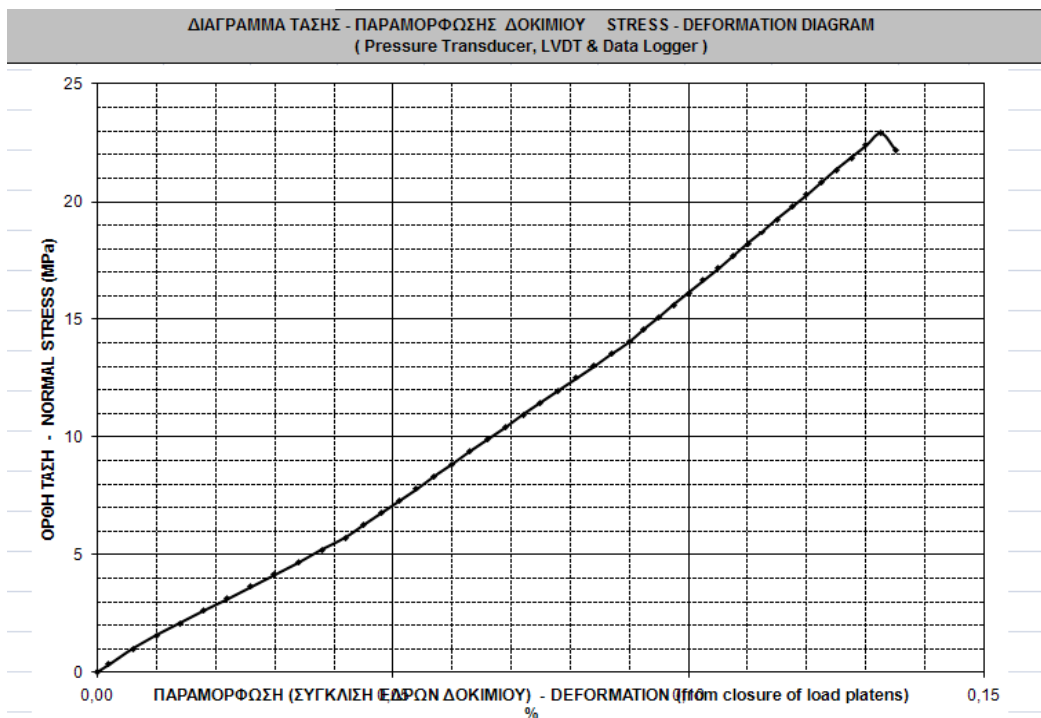
Δοκίμιο	Περιγραφή		Ύψος (mm)	Διάμετρος (mm)	Βάρος (gr)
1	Ιζηματογενή δοκίμια	Λευκός Ασβεστόλιθος	152.49	71.60	1617
2		Τεφρός ψαμμίτης	143.59	71.62	1476
3	Μεταμορφωμένα δοκίμια	Πράσινος Σχιστόλιθος	140.99	83.39	2034
4		Τεφροπράσινος Φυλλίτης	166.87	85.24	2499
5		Τεφρός Σχιστόλιθος	138.36	61,19	1053

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης

Δοκίμιο	Περιγραφή		Δύναμη θραύσης (kN)	Αξονική παραμόρφωση (%)
1	Ιζηματογενή δοκίμια	Λευκός Ασβεστόλιθος	92.2	0.13
2		Τεφρός ψαμμίτης	108.2	0.31
3	Μεταμορφωμένα δοκίμια	Πράσινος Σχιστόλιθος	180.1	0.60
4		Τεφροπράσινος Φυλλίτης	83.8	0.42
5		Τεφρός Σχιστόλιθος	132.7	0.65



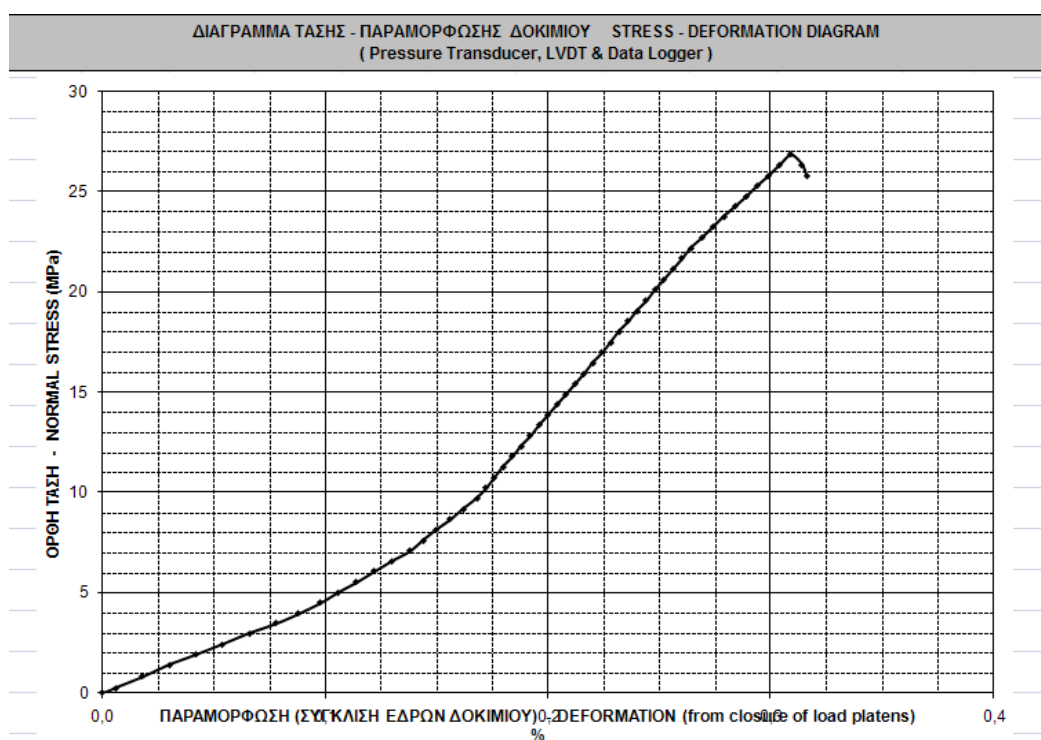
Σχήμα 4.1α Φωτογραφίες του δοκιμίου #1 πριν και μετά τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 4.1β Καμπύλη ορθής τάσης – παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης του δοκιμίου #1.



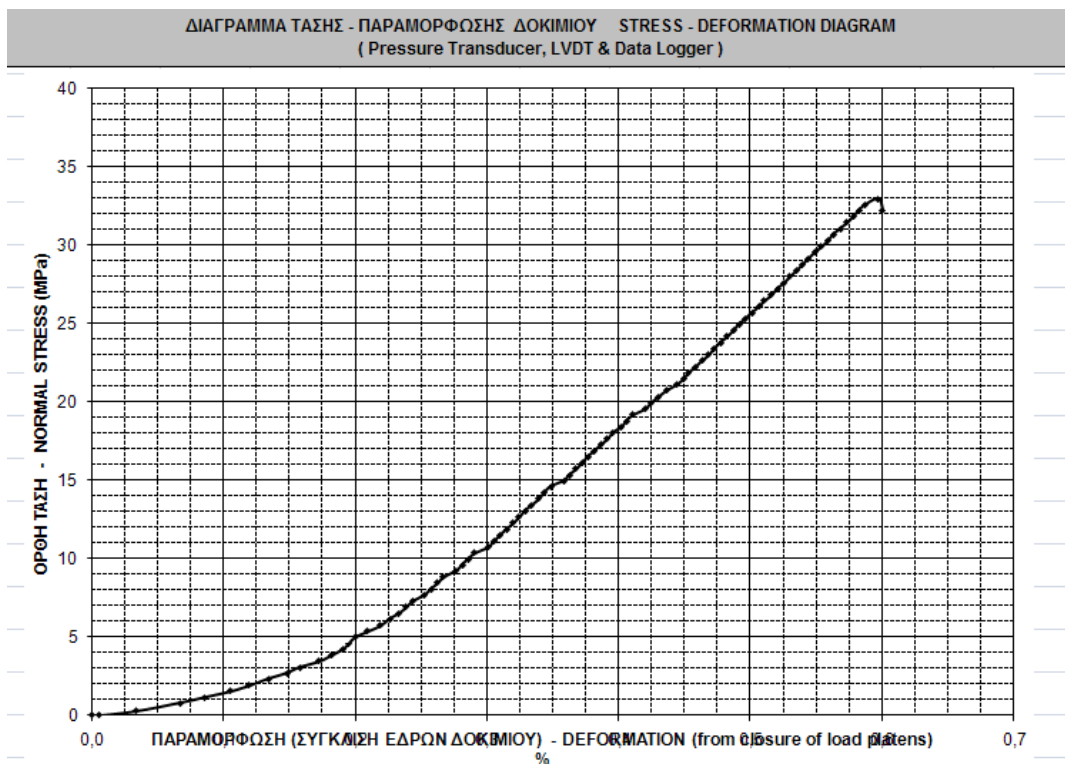
Σχήμα 4.2α Φωτογραφίες του δοκιμίου #2 πριν και μετά τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 4.2β Καμπύλη ορθής τάσης – παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης του δοκιμίου #2.



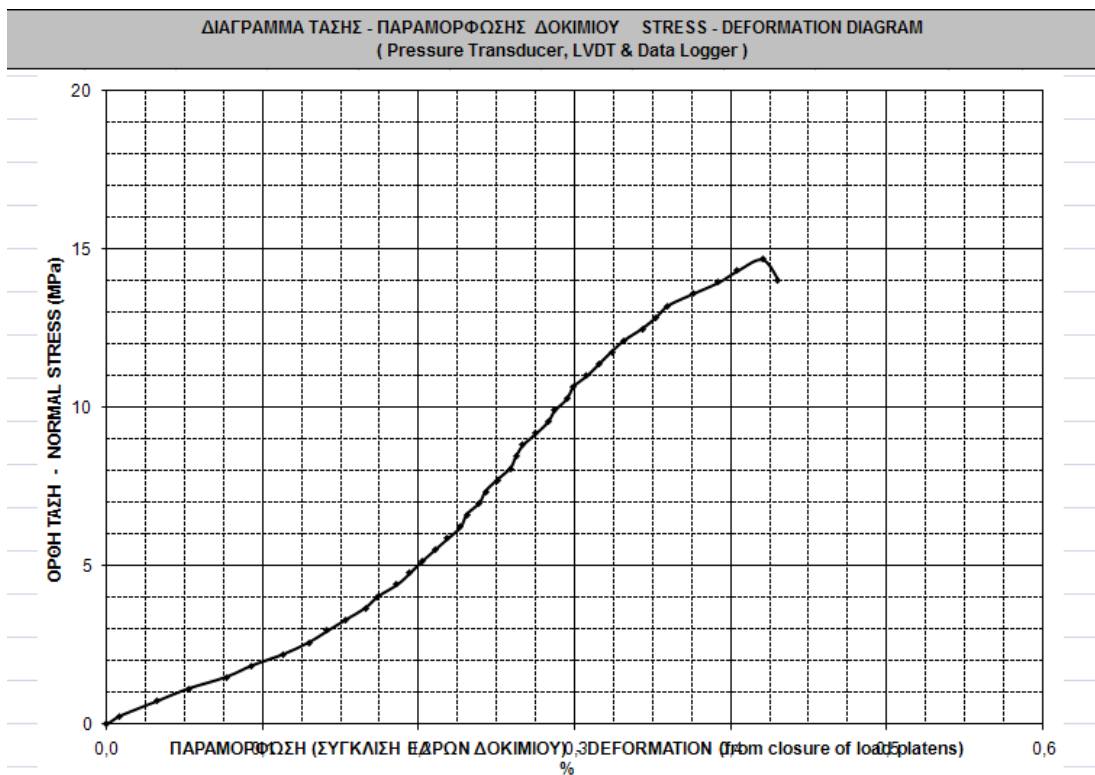
Σχήμα 4.3α Φωτογραφίες δοκιμίου #3 πριν και μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 4.3β Καμπύλη ορθής τάσης – παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης του δοκιμίου #3.



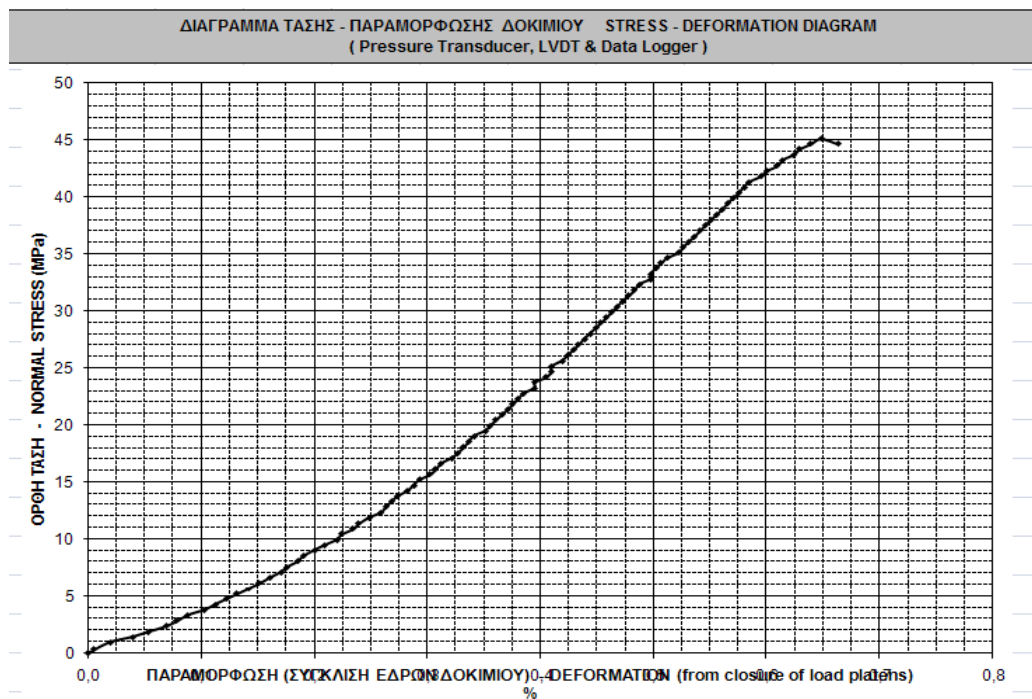
Σχήμα 4.4α Φωτογραφίες δοκιμίου #4 πριν και μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 4.4β Καμπύλη ορθής τάσης – παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης του δοκιμίου #4.



Σχήμα 4.5α Φωτογραφίες δοκιμίου #5 πριν και μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης



Σχήμα 4.5β Καμπύλη ορθής τάσης – παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης του δοκιμίου #5.

4.2 Αποτελέσματα προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson ξηρών δοκιμίων

Σε αυτή την δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν 4 ξηρά δοκίμια πετρώματος με διαφορετική λιθολογική περιγραφή/προέλευση από την ευρύτερη περιοχή της Χαλκιδικής. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Για κάθε ένα δοκίμιο, παρουσιάζονται σε γραφήματα η ορθή τάση και η αξονική και η διαμετρική παραμόρφωση μέχρι και την θραύση τους. Επίσης παρουσιάζονται φωτογραφίες τους πριν και μετά τις δοκιμές, καθώς και η λιθολογική περιγραφή τους.

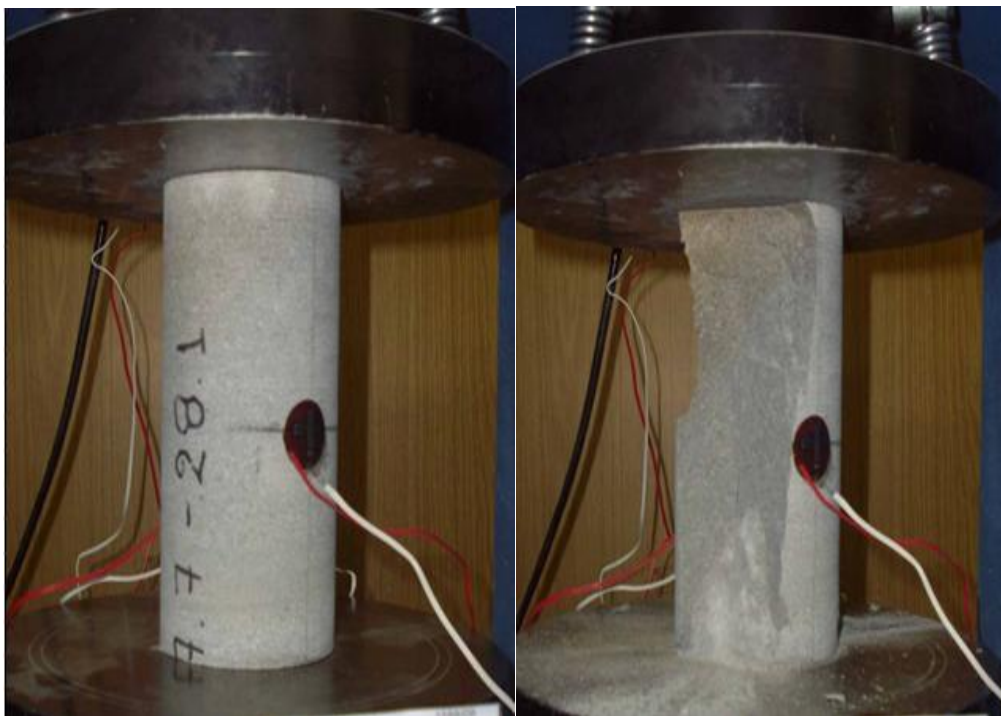
Στα σχήματα 4.6α, 4.7α, 4.8α και 4.9α απεικονίζονται φωτογραφίες των δοκιμών πριν και μετά τη δοκιμή μέχρι και τη θραύση τους. Στα σχήματα 4.6β, 4.7β, 4.8β, 4.9β παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης - παραμορφώσεων των άρρηκτων δοκιμών κατά τη διάρκεια των μονοαξονικών δοκιμών.

Πίνακας 4.3. Διαστάσεις και λιθολογική προέλευση των πετρωμάτων

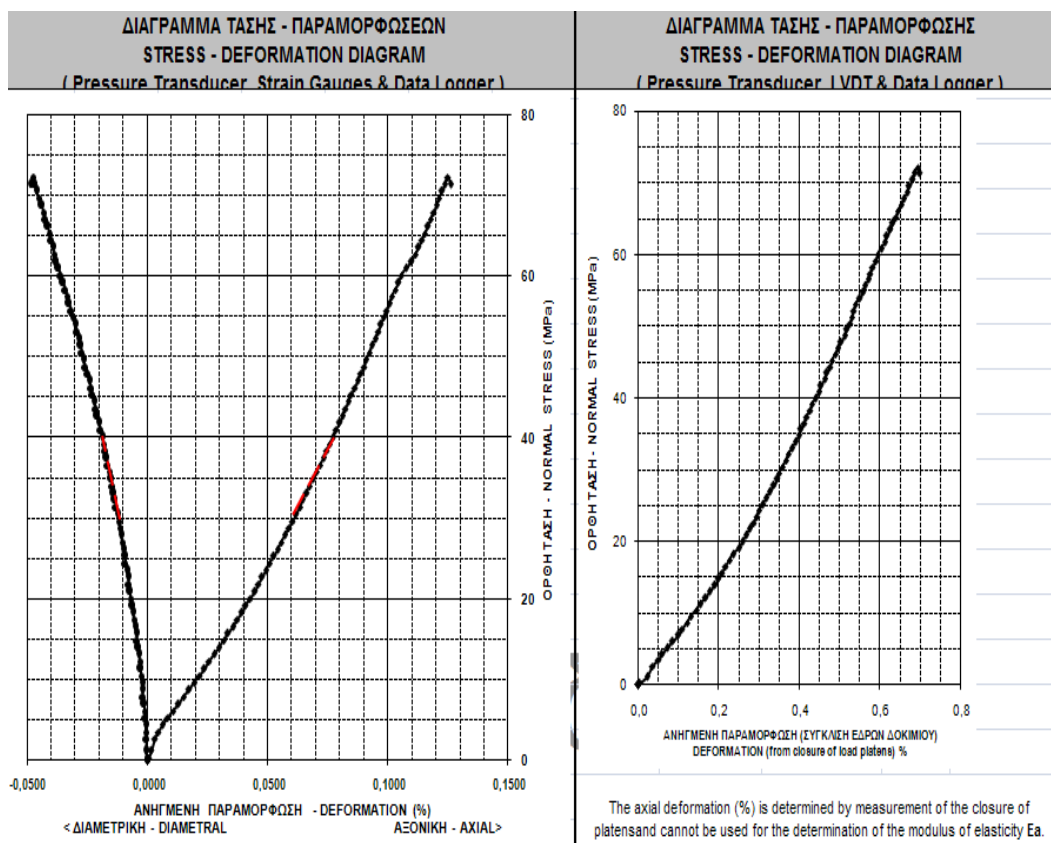
Δοκίμιο	Περιγραφή		Ύψος (mm)	Διάμετρος (mm)	Βάρος (gr)
1	Ιζηματογενές	Τεφρός ψαμμίτης	148,38	71,48	1540
2	Μεταμορφωμένο	Τεφρός Σχιστόλιθος	137,13	61,18	1075
3	Ιζηματογενές	Λευκός Ασβεστόλιθος	177,03	85,64	2710
4	Μεταμορφωμένο	Γνεύσιος	167,62	83,42	2389

Πίνακας 4.4. Διαστάσεις και λιθολογική προέλευση των πετρωμάτων

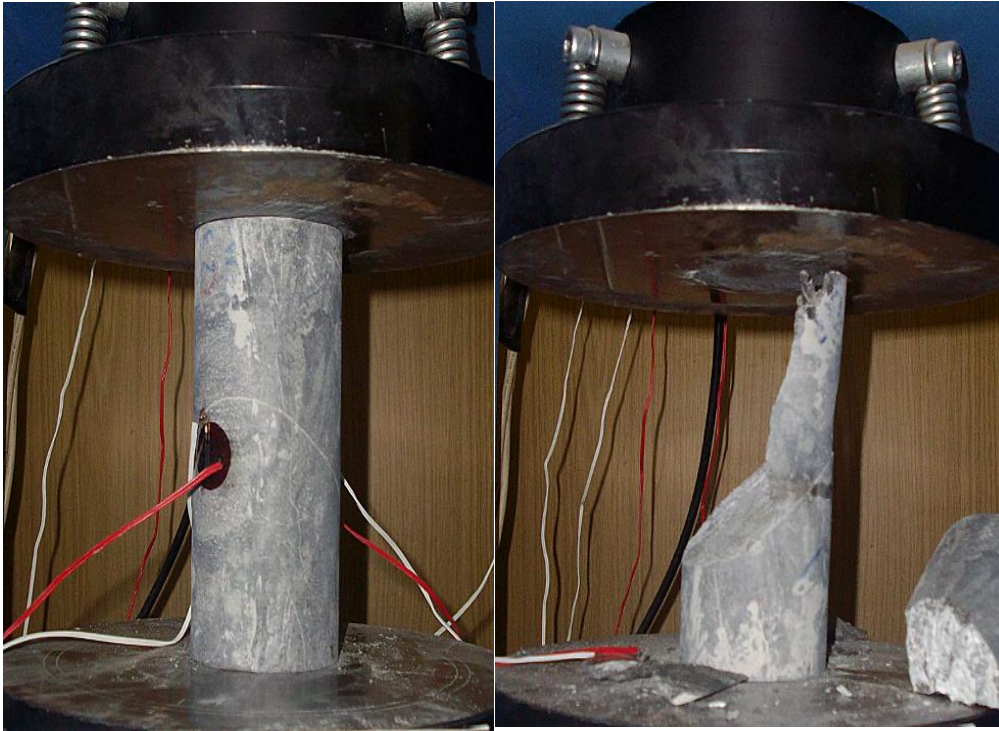
Δοκίμιο		Δύναμη θραύσης (kN)	Αξονική παραμόρφωση (%)	Μέτρο ελαστικότητας	Λόγος Poisson
1	Τεφρός ψαμμίτης	289,8	0,69	61,688	0,416
2	Τεφρός Σχιστόλιθος	212,0	1,41	19,271	0,270
3	Λευκός Ασβεστόλιθος	144,5	0,14	20,00	0,400
4	Γνεύσιος	264,0	0,52	38,462	0,115



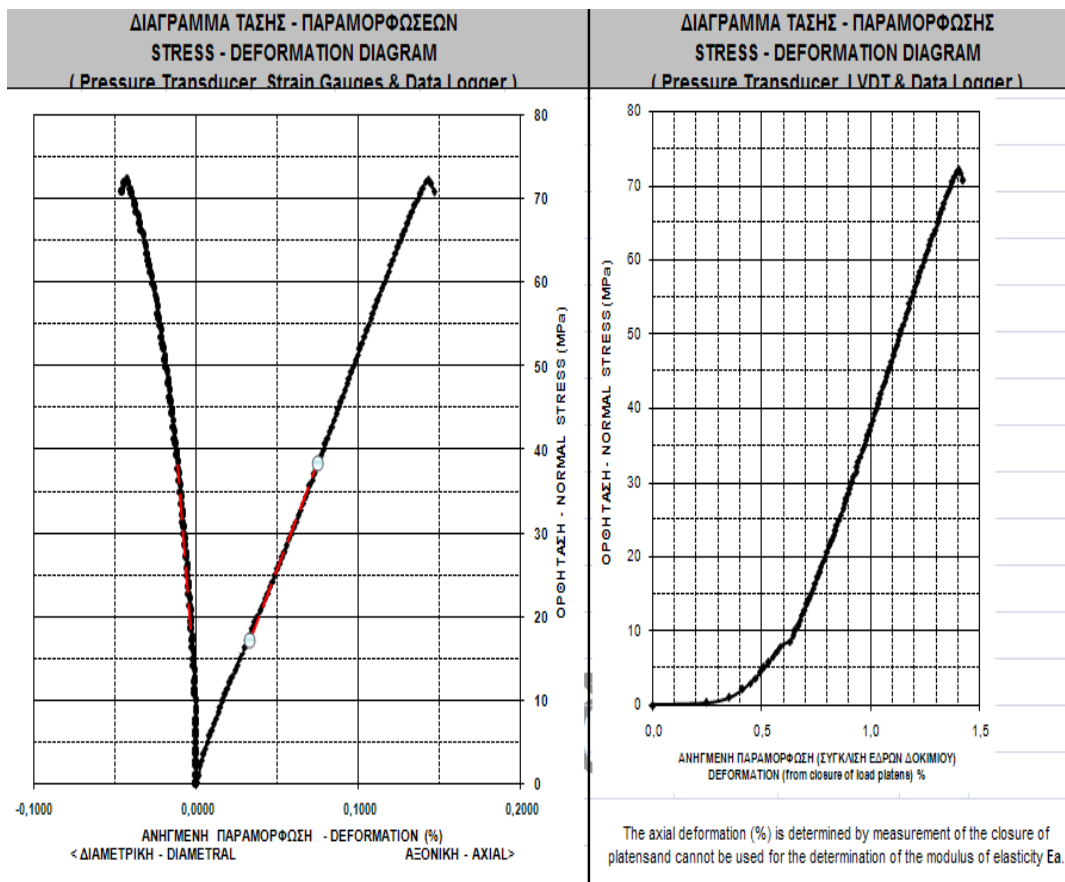
Σχήμα 4.6α Φωτογραφίες του δοκιμίου #1 πριν και μετά τη δοκιμή stress-strain



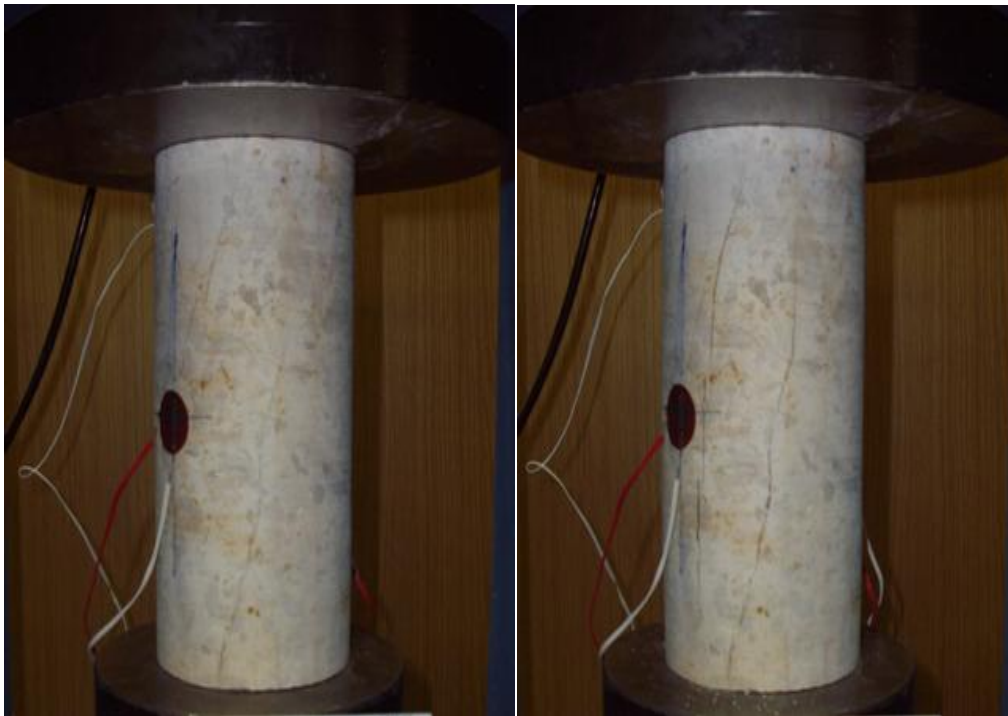
Σχήμα 4.6β Η θραύση του δοκιμίου #1 επέρχεται στα 289.8 kN και ο λόγος Poisson υπολογίζεται στην τιμή 0.416



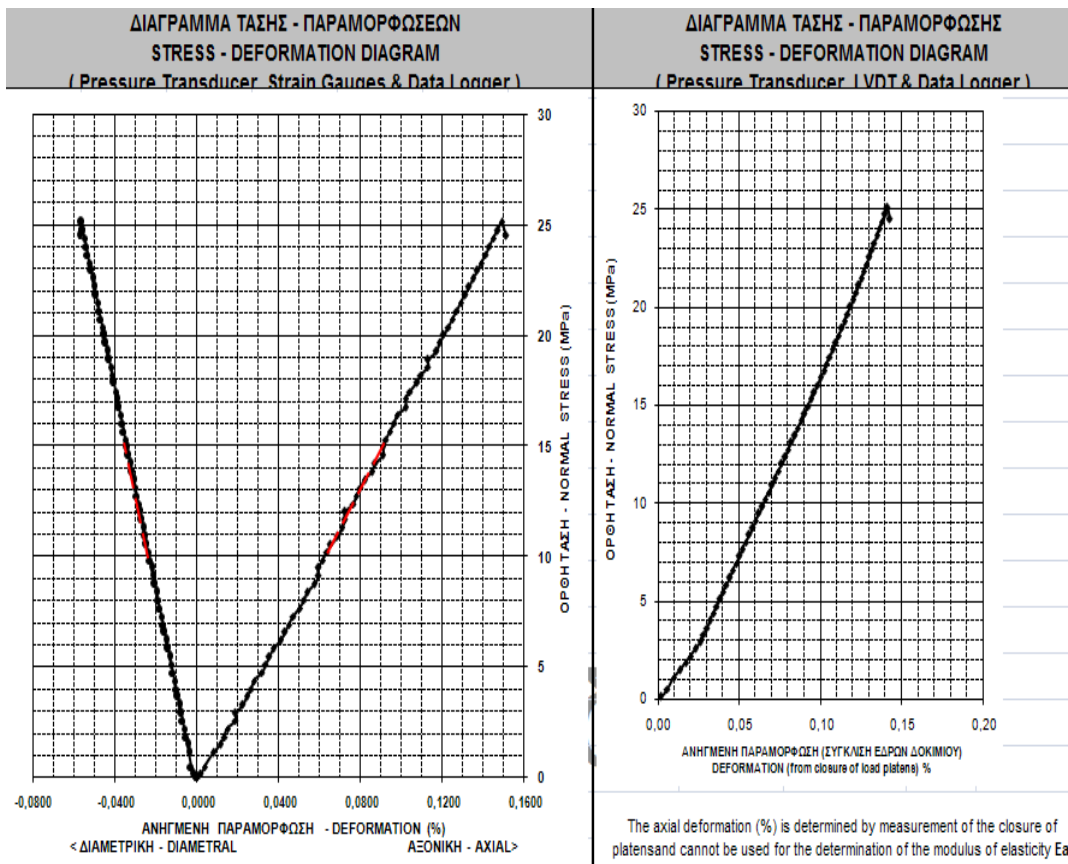
Σχήμα 4.7α Φωτογραφίες του δοκιμίου #2 πριν και μετά τη δοκιμή stress-strain



Σχήμα 4.7β Η θραύση του δοκιμίου #2 επέρχεται στα 212kN και ο λόγος Poisson υπολογίζεται στην τιμή 0.270



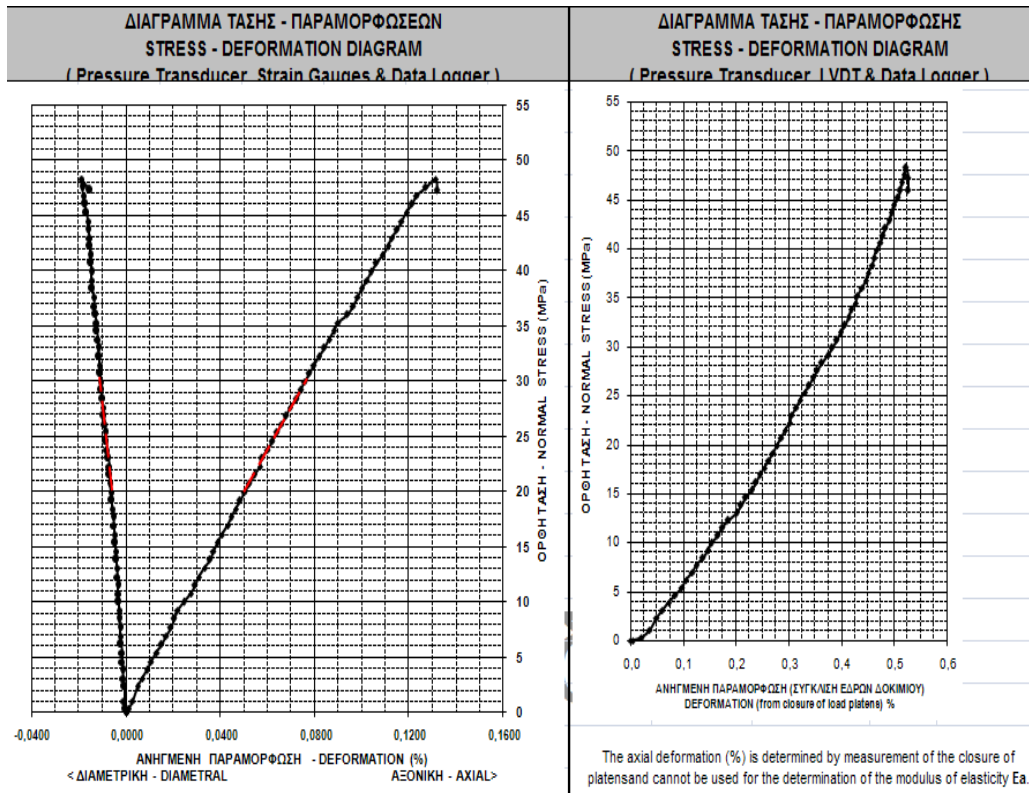
Σχήμα 4.8α Φωτογραφίες δοκιμίου #3 πριν και μετά τη δοκιμή stress-strain



Σχήμα 4.8β Η θραύση του δοκιμίου #3 επέρχεται στα 144.5 kN και ο λόγος Poisson υπολογίζεται στην τιμή 0.400



Σχήμα 4.9α Φωτογραφίες δοκιμίου #4 πριν και μετά τη δοκιμή stress-strain



Σχήμα 4.9β Η θραύση του δοκιμίου #4 επέρχεται στα 264 kN και ο λόγος Poisson υπολογίζεται στην τιμή 0.115

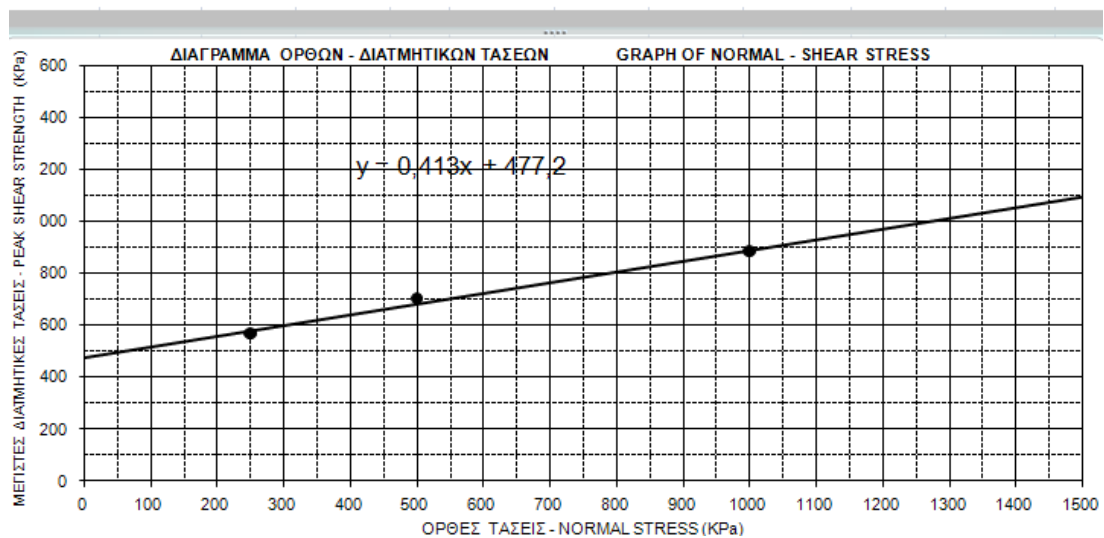
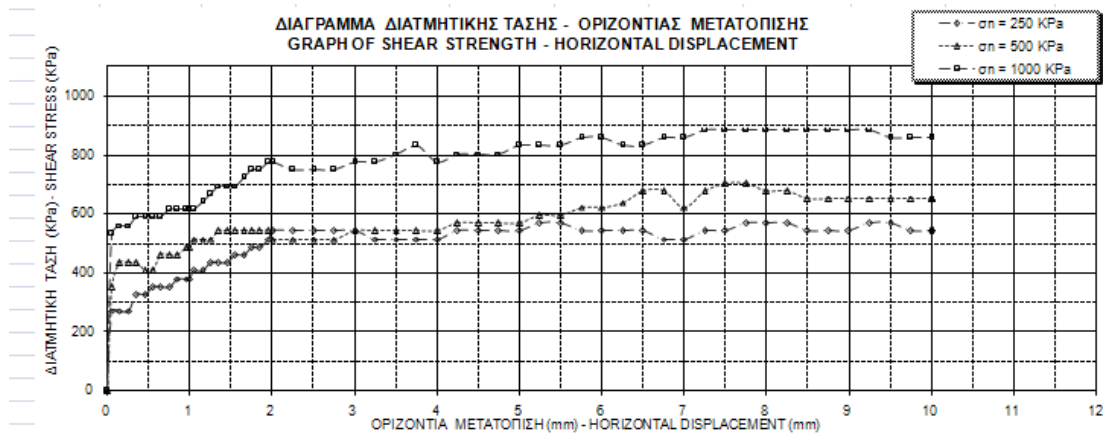
4.3 Αποτελέσματα προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής φυσικών και τεχνητών ασυνεχειών

Σε αυτή την δοκιμή χρησιμοποιήσαμε 4 ξηρά δοκίμια πετρώματος με ίδια λιθολογική περιγραφή/προέλευση από την ευρύτερη περιοχή της Χαλκιδικής (Πίνακας 4.4).

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Για κάθε ένα δοκίμιο, παρουσιάζονται σε γραφήματα(α) η διατμητική τάση ως προς την οριζόντια μετατόπιση και (β) οι μέγιστες διατμητικές τάσεις ως προς την ορθή τάση, μέχρι και την θραύση τους. Στα Σχήματα 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 παρουσιάζεται η συμπεριφορά των άρρηκτων δοκιμίων κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Πίνακας 4.4. Διαστάσεις και λιθολογική προέλευση των πετρωμάτων

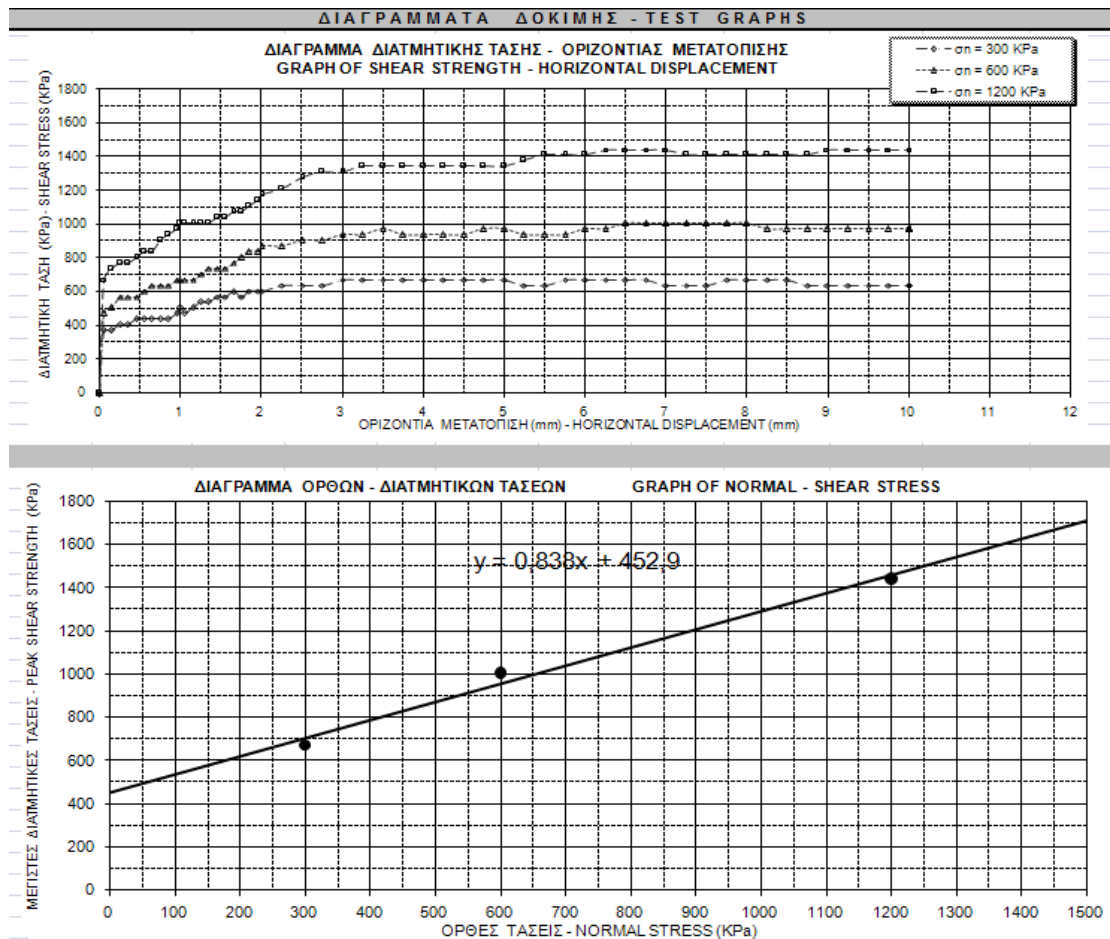
Δοκίμιο	Περιγραφή	Αντοχή επιφάνειας ασυνέχειας JCS (MPa)	Περίγραμμα επιφανειών δοκιμίου διάτμησης	Κλίση της ασυνέχειας ως προς τον άξονα	Επιφάνεια ασυνέχειας (cm ²)
1	Τεφρός Σχιστόλιθος	26	Παράλληλα 2-4 Κάθετα 4-6	45°	36.97
2	Τεφρός Σχιστόλιθος	28	Παράλληλα 2-4 Κάθετα 4-6	80°	29.80
3	Τεφρός Σχιστόλιθος	25	Παράλληλα 1-4 Κάθετα 4-6	80°	30.51
4	Τεφρός φυλλίτης	44	Παράλληλα Κάθετα	90	56.81



Σχήμα 4.10 Δοκίμιο #1. Η συχνότητα Cείναι 477.2 KPa και η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ_b είναι 22.4°

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα Δοκιμίου #1

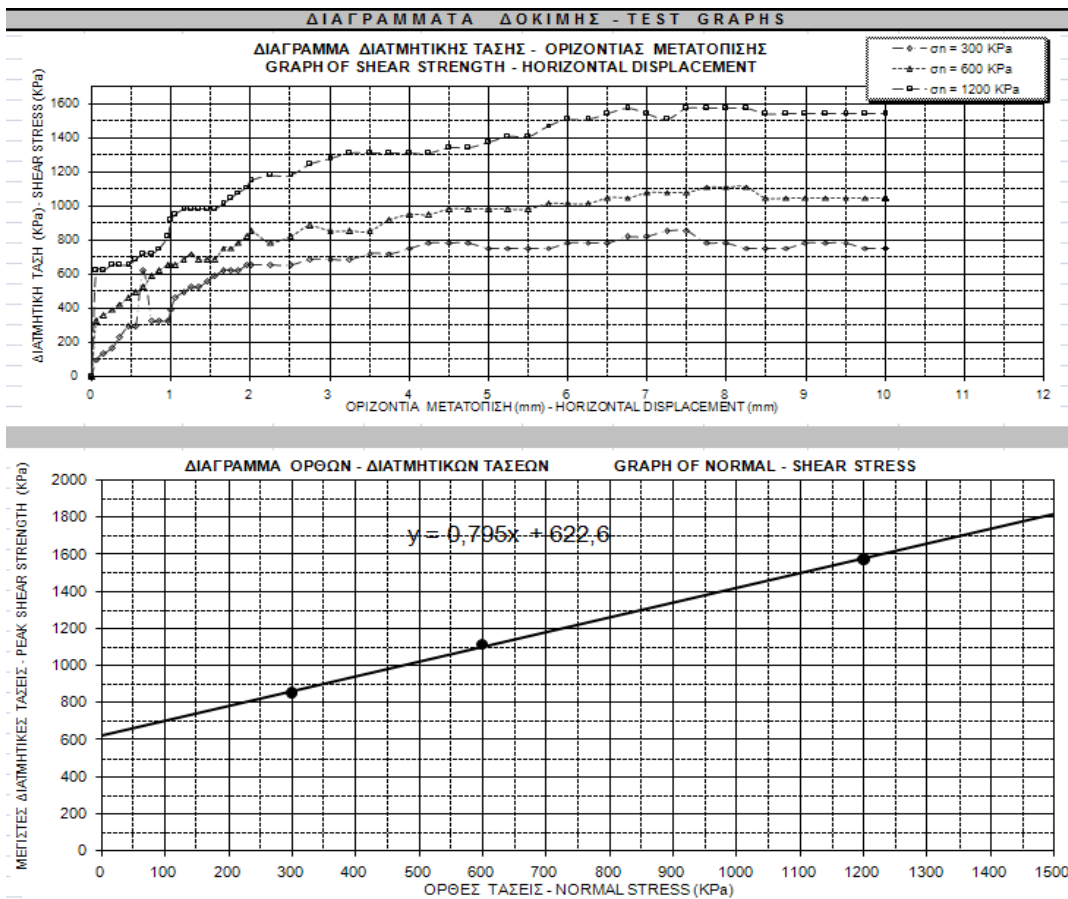
ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - LOAD INCREMENTS	ΟΡΘΗΤΑΣΗ NORMAL STRESS σ_n (KPa)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ - PEAK SHEAR STRESS τ_p (KPa)	ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ RESIDUAL SHEAR STRESS τ_r (KPa)
1	250	568,0	540,9
2	500	703,2	649,1
3	1000	884,6	857,5



Σχήμα 4.11 Δοκίμο #2. Η συχνότητα είναι 452.9 KPa και η Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ_b είναι 39.99°

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα Δοκιμίου #2

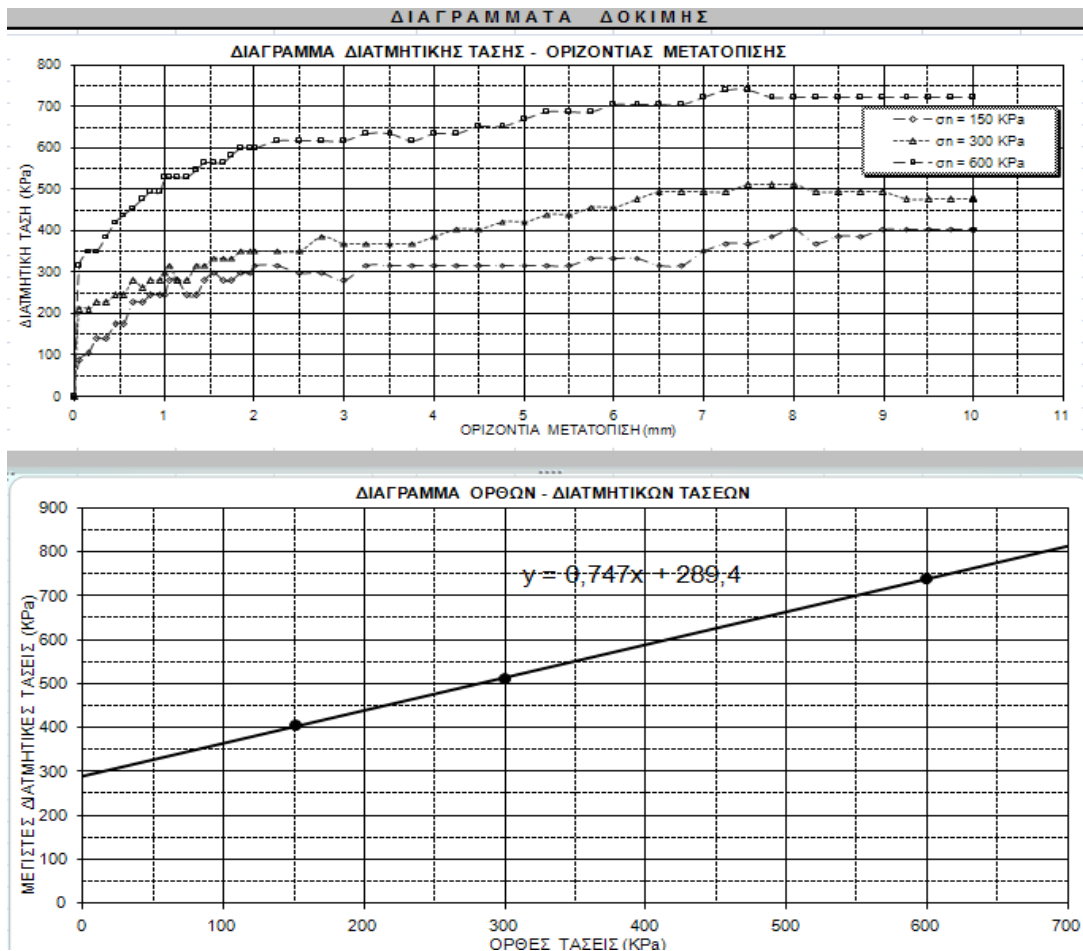
ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - LOAD INCREMENTS	ΟΡΘΗΤΑΣΗ NORMAL STRESS σ_n (KPa)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ PEAK SHEAR STRESS τ_p (KPa)	ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ RESIDUAL SHEAR STRESS τ_r (KPa)
1	300	671,1	637,5
2	600	1006,6	973,1
3	1200	1442,9	1442,9



Σχήμα 4.12 Δοκίμιο 3 Όπου η συχνότητα C είναι 622.6 ΚΡα και η Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ_b είναι 38.51°

Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα Δοκιμίου #3

ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - LOAD INCREMENTS	ΟΡΘΗΤΑΣΗ NORMAL STRESS σ_n (KPa)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ PEAK SHEAR STRESS τ_p (KPa)	ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ RESIDUAL SHEAR STRESS τ_r (KPa)
1	300	852,1	753,8
2	600	1114,3	1048,7
3	1200	1573,1	1540,3



Σχήμα 4.13 Δοκίμιο 4 Όπου η συχνότητα είναι 289.48 ΚΡα και η Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ_b είναι 36.78°

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα Δοκιμίου #4

ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ σ_n (ΚΡα)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ τ_p (ΚΡα)	ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ τ_r (ΚΡα)
1	151	404,8	404,8
2	300	510,5	475,3
3	600	739,3	721,7

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι να αναλύσουμε κάποιες εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής σε δοκίμια πετρώματος. Τα δοκίμια όπου εξετάσαμε είχαν προέλευση από την Χαλκιδική και περιλάμβαναν δύο διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων (ιζηματογενή και μεταμορφωμένα). Τα ιζηματογενή ήταν διάφοροι τύποι ψαμμίτη και ασβεστόλιθου. Ενώ τα μεταμορφωμένα ήταν διάφοροι τύπου σχιστόλιθου, φυλλίτη και γνεύσιου.

Στα αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης παρατηρήσαμε ότι δοκίμια που είχαν παρόμοια αντοχή μπορούν να εμφανίσουν διαφορετική ελαστικότητα. Για παράδειγμα, στα δύο δοκίμια ιζηματογενή πετρωμάτων όπου είχαμε στην κατοχή μας, ο τεφρός ψαμμίτης(δοκίμιο #2) έδειξε μεγαλύτερη ελαστικότητα από τον λευκό ασβεστόλιθο(δοκίμιο #1), παρόλο που είχαν όμοια δύναμη θραύσης. Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει την θραύση είναι η σχιστότητα όπου έχουν τα δοκίμια μεταμορφωμένα πετρωμάτων. Αυτό μπορεί να προκαλέσει την αστοχία του δοκιμίου σε μικρότερα εφαρμοζόμενα φορτία. Στα ιζηματογενή πετρώματα, το ίδιο φαινόμενο αναφέρεται ως ασυνέχεια. Στα δοκίμια μεταμορφωμένων πετρωμάτων και οι δύο σχιστόλιθοι(δοκίμια #3 και #5) παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή και μεγαλύτερη ελαστικότητα σε σύγκριση με τον φυλλίτη (δοκίμιο #4).

Στα αποτελέσματα προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson παρατηρήσαμε ότι στα δοκίμια ιζηματογενών πετρωμάτων το μέτρο ελαστικότητας ήταν μεγαλύτερο από ότι στα μεταμορφωμένα. Τα δοκίμια μεταμορφωμένων πετρωμάτων μπορεί να έχουν παρόμοια δύναμη θραύσης και μεγαλύτερη σε κάποιες περιπτώσεις από τα ιζηματογενή. Για παράδειγμα, ο γνεύσιος (δοκίμιο #4) είχε μεγαλύτερη δύναμη θραύσης από τον ασβεστόλιθο (δοκίμιο #3). Σε όλες τις περιπτώσεις, τα ιζηματογενή έχουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας οπότε είναι πιο εύθρυπτα.

Στα αποτελέσματα προσδιορισμού της αντοχής σε διάτμηση ασυνεχειών όπου έγινε χρήση της σφύρας Schmidt, όλα τα δοκίμια ήταν μεταμορφωμένων πετρωμάτων και είχαν όλα παρόμοια αντοχή, με μέτρια σκληρότητα. Τα δοκίμια αυτά είχαν υψηλές γωνίες εσωτερικής τριβής, λόγω της κρυσταλλικής δομής τους. Τα δοκίμια #2 , #3 και #4 έχουν παρόμοιες γωνίες εσωτερικής τριβής δηλαδή είναι κάθετα στην κατακόρυφη φόρτιση και είχαν όλα υψηλότερη κλίση της ασυνέχειας προς τον άξονα σε σχέση με το δοκίμιο #1 που είχε 45°. Στο πρώτο δοκίμιο αναμέναμε όμοια γωνία σχιστότητας αλλά η αστοχία επήλθε νωρίτερα.

Με βάση τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας, προτείνεται να γίνει επέκταση της μελέτης σε άλλους τύπους πετρωμάτων διαφορετικής γεωλογικής προέλευσης. Θα ήταν σκόπιμη η συμπερίληψη πετρωμάτων με ομοιογενή σύσταση, ώστε να υπάρχει επαναληψιμότητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS
- ΥΠΕΧΩΔΕΚΕΔΕ
- ISRM Suggested Method for determining Point Load Strength
- E.Hoek, Estimating the stability of excavated slopes in opencast mines
- Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

ASTM D 3967-95a (Reapproved 2004)- Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens

ASTM D7012 – 23 Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

Πίνακας 2.1. Πορώδες, λόγος κενών περιεχόμενη υγρασία και φαινόμενο βάρος διαφόρων εδαφών (από ΛΑΓΓΙΩΤΗ ΚΑΙ ΣΠΗΛΙΩΤΟΠΟΥΛΟ, 1978)

Σχήμα 3.1. Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος.

Σχήμα 3.3. Διαγράμματα αξονικής τάσης-παραμόρφωσης για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας Young (Από ISRM, 1981)

Πίνακας 3.1. Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (κατά ISRM, 1981)

Σχήμα 3.4. Συσκευής δοκιμής σημειακής φόρτισης (pointloadtester). Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.5. Σχηματικό διάγραμμα συσκευής σημειακής φόρτισης όπου αναφέρονται τα επιμέρους εξαρτήματά της. Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.6. Λεπτομέρεια της κωνικής κεφαλής της συσκευής σημειακής φόρτισης. Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.7. Διαστάσεις πετρώματος για την δοκιμή σημειακής φόρτισης Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.9. Αποδεκτές μορφές και (β) μη αποδεκτή μορφή διαμετρικής θραύσης κατά ISRM 1984.

Σχήμα 3.10. Αποδεκτές μορφές και (β) μη αποδεκτή μορφή αξονικής θραύσης κατά ISRM 1984

Πίνακας 3.2. Ταξινόμηση ακέραιου πετρώματος με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (BIENIAWSKI, 1975)

Πίνακας 3.3. Διαχωρισμός πετρωμάτων Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.12. Εργαστηριακός εξοπλισμός για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής δοκιμίων πετρωμάτων Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.13 Σχεδίαση μιας διαμετρικής γραμμής σε κάθε άκρο του δοκιμίου Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.14. Σφύρα Schmidt και παράδειγμα δοκιμής σε κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.15. Πέτρα λείανσης Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.16 Διάγραμμα υπολογισμού της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη του ακέραιου πετρώματος με βάση το μέσο όρο των μετρήσεων σκληρότητας (SHV) και της πυκνότητας του (ρ_d) (DEERE and MILLER, 1966)

Πίνακας 3.4. Ταξινόμηση ακεραίου πετρώματος με βάση την σκληρότητά του Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.17. Συσκευή διάτμησης Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Σχήμα 3.18. Δοκίμιο βράχου όπου έχει προετοιμαστεί για καλούπωμα Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

Πίνακας 3.5. Βασική γωνία τριβής για διάφορα πετρώματα Γ.Κούκης-Ν.Σαμπατακάκης «Τεχνική Γεωλογία»

(Academia.edu/11169854/Chapter_4_Properties_of_Rock_Materials)

Σχήμα 3.19. Τυπικά προφίλ και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC (Barton & Choubey, 1977).

<http://ikee.lib.auth.gr/record/136088/files/GRI-2015-14028.pdf>

<http://users.ntua.gr/mpanta/EG/YpenthymisiTypwn.pdf>

<http://11gym->

<http://irakl.ira.sch.gr/news/attachments/article/420/%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%A4.%20%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%97%20%CE%9F%CE%93%CE%9A%CE%9F%CE%A5-%CE%A0%CE%A5%CE%9A%CE%9D.pdf>

<https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/GEO319/%CE%A0%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%B4%CE%B9%CE%BF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82%20%CE%A0%CE%BF%CF%81%CF%8E%CE%B4%CE%BF%CF%85%CF%82%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CE%95%CE%B9%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CE%B7%CF%82%20%CE%95%CF%80%CE%B9%CF%86%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82%20%CE%9E%CE%B1%CE%BD%CE%B8%CE%BF%CF%80%CE%BF%CF%8D%CE%BB%CE%BF%CF%85%2024..pdf>

<http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2756/Chimieia-A-Lykeiou-html-empl/index1-2.html>

http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXC151/Diafaneies%20paradoseon/Diafaneies_Porodes_Peratotita.pdf

https://www.academia.edu/11169854/Chapter_4_Properties_of_Rock_Materials_C
[HAPTER 4 PROPERTIES OF ROCK MATERIALS Physical Properties of Rock Mater](#)
[ial 4 1 1 Density Porosity and Water Content](#)

[\(PDF\) Chapter 4 Properties of Rock Materials CHAPTER 4 PROPERTIES OF ROCK](#)
[MATERIALS Physical Properties of Rock Material 4.1.1 Density, Porosity and Water](#)
[Content](#)