

ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΥΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΟΡΦΥΡΗ
ΚΑΙ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ**

ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΠΑΠΑΜΙΧΑΗΛ
Φοιτητής Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Φ. ΠΑΠΠΑΣ
Φοιτητής Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
2.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	9
2.1.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	9
	Συμβατική τριαξονική δοκιμή.....	11
	Τριαξονική δοκιμή – Γενικά στοιχεία.....	12
2.2.	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	15
2.3.	ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΗΟΕΚ & BROWN ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	17
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	22
3.1.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	22
3.2.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΛΗΨΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	25
3.3.	ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	31
	Προετοιμασία δοκιμής τριαξονικής θλίψης.....	31
	Εκτέλεση δοκιμής τριαξονικής θλίψης.....	32
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	37
4.1.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	37
4.2.	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ.....	51
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	53
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54

Ευχαριστίες

Οφείλουμε να εκφράσουμε τις θερμές ευχαριστίες μας στον καθηγητή κ. Παπαλιάγκα Θεοδόσιο για την επίβλεψη αυτής της πτυχιακής εργασίας και για την ευκαιρία που μας έδωσε να την εκπονήσουμε στο εργαστήριο Γεωμηχανικής. Παρά τις αυξημένες υποχρεώσεις του, υπήρξε πάντα πρόθυμος να μας προσφέρει τις γνώσεις και την εμπειρία του για τη βαθύτερη κατανόηση της περιοχής των εργαστηριακών δοκιμών στη Μηχανική των Πετρωμάτων.

Στη συνέχεια, ευχαριστούμε ιδιαίτερα την υποψήφιο διδάκτορα την κ. Τζιλίνη Μαρία, για την αδιάλειπτη συνεισφορά της στη διεξαγωγή των δοκιμών τριαξονικής θλίψης και για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Η κ. Τζιλίνη Μαρία ήταν πάντα διαθέσιμη να ασχοληθεί με κάθε απορία μας σχετική με ακαδημαϊκά ζητήματα.. Την ευχαριστούμε θερμά για τις ιδέες και τη καθοδήγηση που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της Πτυχιακής Εργασίας. Χωρίς την καταλυτική συμβολή της τόσο σε προσωπικό όσο και σε ακαδημαϊκό επίπεδο, η ολοκλήρωσή της θα ήταν αδύνατη.

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1. Διάφορες μέθοδοι για τριαξονική θλίψη. Το παχύ βέλος υποδηλώνει τη θλίψη ή στρέψη διαμέσου συμπαγών βάσεων δοκιμίων. Τα λεπτά βέλη υποδηλώνουν τη θλίψη από την υδροστατική πίεση: α) αξονική θλίψη υπό πλευρική πίεση (συμβατική τριαξονική δοκιμή), b) τριαξονική θλίψη από τρία συμπαγή δύσκαμπτα έμβολα, c) θλίψη και στρέψη κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου υπό πλευρική υδροστατική πίεση, d) τριαξονική θλίψη από διαξονικά συμπαγή έμβολα και πλευρική υδροστατική πίεση (κατά Mogi, 1971 a).....	10
Σχήμα 2. Διάταξη βάσεων δοκιμίων για θλίψη σε ξηρά δοκίμια, θλίψη με πίεση πόρων και για εφελκυσμό (κατά Heard, 1960).....	11
Σχήμα 3. Βασικά συστατικά – επιμέρους τμήματα του συστήματος διάταξης δοκιμών τριαξονικής θλίψης (κατά Elliott M.G., 1989)	13
Σχήμα 4. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Τσουτρέλης, 1985).....	15
Σχήμα 5. Δύο τύποι αλλαγής συμπεριφοράς από ψαθυρή σε πλαστική (Mogi,1974).	16
Σχήμα 6. Μη γραμμική περιβάλλουσα καμπύλη αστοχίας και η σύνδεση της με τον μηχανισμό αστοχίας. Μετάβαση από αξονική αστοχία ($\sigma_3=0$ MPa) σε διατμητική αστοχία ($\sigma_3=10$ MPa). Πολλαπλές διατμητικές ζώνες αστοχίας ($\sigma_3=35$ MPa) και διόγκωση του δοκιμίου (πλαστική παραμόρφωση) πέρα από την γραμμή Mogi ($\sigma_3=100$ MPa). Δεδομένα και φωτογραφίες δοκιμίων από τον Paterson (1958).....	17
Σχήμα 7. Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (1980).....	18
Σχήμα 8. Δεδομένα δοκιμών τριαξονικής θλίψης από 68 ομάδες δειγμάτων βράχου που παρίστανται με διαφορετικό σύμβολο. Τα δείγματα που δείχνουν το άνω και κάτω όριο των δεδομένων παριστάνονται με μεγαλύτερα σύμβολα (Kaiser & Kim, 2008).....	20
Σχήμα 9. Θάλαμος Hoek για την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών (ELE INTERNATIONAL).....	33
Σχήμα 10. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Πορφύρη (63mm).	44
Σχήμα 12. Διάγραμμα μέγιστης (peak) και υπομένουσας (ultimate) αξονικής αντοχής- πλευρικής πίεσης Πορφύρη (63mm)	45
Σχήμα 13. Διάγραμμα Κύκλων Mohr μέγιστης αντοχής (peak).	45
Σχήμα 14. Διάγραμμα κύκλων Mohr υπομένουσας αντοχής (ultimate).	46
Σχήμα 15. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Σχιστόλιθο (60-63mm).	47
Σχήμα 16. Διάγραμμα μέγιστης (peak) και υπομένουσας (ultimate) αξονικής αντοχής- πλευρικής πίεσης Σχιστόλιθου (63mm).....	47
Σχήμα 17. Διάγραμμα Κύκλων Mohr μέγιστης αντοχής (peak).	48
Σχήμα 18. Διάγραμμα κύκλων Mohr υπομένουσας αντοχής (ultimate).	48
Σχήμα 19. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Σχιστόλιθο (54mm).	49
Σχήμα 20. Διάγραμμα μέγιστης (peak) και υπομένουσας (ultimate) αξονικής αντοχής- πλευρικής πίεσης Σχιστόλιθου (54mm).....	50
Σχήμα 21. Διάγραμμα Κύκλων Mohr μέγιστης αντοχής (peak).	50

Σχήμα 22. Διάγραμμα κύκλων Mohr υπομένουσας αντοχής (ultimate).	51
Σχήμα 23. Διάγραμμα συγκρίσεως - συσχετίσεως μέγιστης (peak) αξονικής αντοχής - πλευρικής πίεσης του Πορφύρη (63mm) με τον Σχιστόλιθο (63mm).....	51
Σχήμα 24. Διάγραμμα συγκρίσεως - συσχετίσεως υπομένουσας αξονικής αντοχής - πλευρικής πίεσης του Πορφύρη (63mm) με τον Σχιστόλιθο (63mm).....	52
Σχήμα 25. Διάγραμμα συγκρίσεως - συσχετίσεως μέγιστης (peak) αξονικής αντοχής - πλευρικής πίεσης του Σχιστόλιθου (63mm) με τον Σχιστόλιθο (54mm).	52
Σχήμα 26. Διάγραμμα συγκρίσεως - συσχετίσεως υπομένουσας αξονικής αντοχής - πλευρικής πίεσης του Σχιστόλιθου (63mm) με τον Σχιστόλιθο (54mm).	53

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1. Φωτογραφίες λεπτών τομών πορφύρη.	24
Εικόνα 2. Φωτογραφίες λεπτών τομών σχιστόλιθου.....	25
Εικόνα 3. Εφελκυστική αστοχία λόγω κάμψη	26
Εικόνα 4. Εφελκυστική διάρρηξη	27
Εικόνα 5. Πυρηνοληψία πετρωμάτων.....	27
Εικόνα 6. Κοπή και διαμόρφωση δειγμάτων με την χρήση αδαμαντοτροχού.....	28
Εικόνα 7. Κοπή των δυο άκρων του πυρήνα με τη χρήση αδαμαντοτροχού για τη διαμόρφωση κυλινδρικού σχήματος	29
Εικόνα 8. Συσκευή λείανσης δοκιμίων.....	30
Εικόνα 9. Σύνολο διαμορφωμένων κυλινδρικών δοκιμίων Σχιστόλιθου.	31
Εικόνα 10. Διάταξη τριαξονικής θλίψης.....	34
Εικόνα 11. Διαδικασία για τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης (ELE INTERNATIONAL).....	35
Εικόνα 12. Δεδομένα ενός δοκιμίου από τον καταγραφέα του μηχανήματος.	42
Εικόνα 13. Έντυπο πληροφοριών δοκιμίου.	43

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1. Τιμές της σταθερά m_i για άρρηκτο βράχο διαφορετικών ομάδων πετρωμάτων (Marinos & Hoek , 2000).	21
Πίνακας 2. Μέση χημική σύνθεση του Ελληνικού Χαλαζιακού Πορφύρη	23

ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της πτυχιακής ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς σε τριαξονική θλίψη ενός πυριγενούς και ενός ιζηματογενούς πετρώματος (πορφύρης και σχιστόλιθος, αντίστοιχα), με ιδιαίτερη έμφαση στην επίδραση του μεγέθους των δοκιμίων. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια δυο μεγεθών, NX (D= 54,7 mm) και HQ (D=63,5 mm) με σχέση ύψους προς διάμετρο $H:D=2$, τα οποία υποβλήθηκαν σε τριαξονική θλίψη με πλευρικές πιέσεις μέχρι 70 MPa. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στη θλιπτική μηχανή INSTRON ικανότητας 4000 kN του Εργαστηρίου Σκυροδέματος του ΑΤΕΙΘ.

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 6 δοκίμια πορφύρη διαμέτρου 63 mm και 12 δοκίμια σχιστολίθου από τα οποία τα 6 ήταν διαμέτρου 54 mm και 6 διαμέτρου 63 mm.

Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε τόσο με τη χρήση διαγραμμάτων κύκλων Mohr όσο και με διαγράμματα αξονικής αντοχής – πλευρικής πίεσης (σ_1 - σ_3).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το περιεχόμενο της πτυχιακής εργασίας αναλύεται ανά κεφάλαιο ως ακολούθως:

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση έτσι ώστε να αναλυθεί το θεωρητικό υπόβαθρο. Συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή των θεωρητικών στοιχείων της τριαξονικής θλίψης και περιγραφή της συμπεριφοράς των πετρωμάτων όταν υποβάλλονται σε τριαξονική θλίψη. Επίσης περιγράφονται αναλυτικά οι μηχανισμοί αστοχίας των δοκιμών και οι τύποι αλλαγής συμπεριφοράς από ψαθυρή σε πλαστική. Τέλος, περιγράφεται το κριτήριο Hoek & Brown άρρηκτου πετρώματος.

Στο Κεφάλαιο 3 παρατίθενται η πειραματική διαδικασία. Γίνεται η περιγραφή των πετρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ως προς την προέλευση τους, την ορυκτολογική σύσταση και όπου υπήρχαν βιβλιογραφικά δεδομένα δίνονται οι φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Περιγράφεται αναλυτικά ο εργαστηριακός εξοπλισμός με τον οποίο διαμορφώθηκαν τα δείγματα, έτσι ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές για την εκτέλεση των δοκιμών. Έπειτα, αναλύεται η προετοιμασία και η διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών τριαξονικής θλίψης οι προδιαγραφές που ακολουθούνται, οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν καθώς και το λογισμικό καταγραφής των δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών. Ενδεικτικά παρουσιάζεται ένα έντυπο τριαξονικής θλίψης που πραγματοποιήθηκε και στην συνέχεια τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τριών πετρωμάτων. Δίνονται οι τιμές του συντελεστή m_i που προκύπτουν για το καθένα καθώς και διαγράμματα αξονικής τάσης – παραμόρφωσης και αξονικής -πλευρικής τάσης

Στο Κεφάλαιο 5 δίνεται η βιβλιογραφία της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος, στο Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα εργαστηριακά αποτελέσματα μορφοποιημένα σε τυποποιημένα έντυπα. Επιπλέον, σε κάθε δοκίμιο υπάρχει σχετική φωτογραφική τεκμηρίωση και ότι άλλο προβλέπεται να καταγράφεται πριν και μετά από κάθε δοκιμή.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

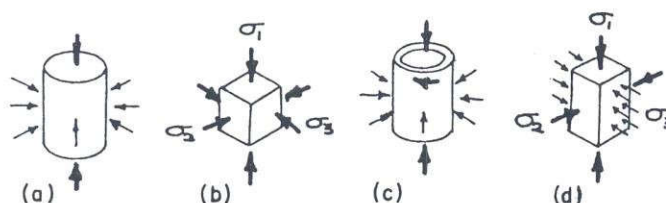
2.1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Οι δοκιμές τριαξονικής θλίψης έχουν αποτελέσει για αρκετά χρόνια αντικείμενο έρευνας από πολλούς για την εκτίμηση και κατανόηση της συμπεριφοράς των πετρωμάτων κατά τη φόρτισή τους υπό συνθήκες τριαξονικής θλίψης, δηλαδή υπό τρισδιάστατες εντατικές καταστάσεις, αλλά και για την επαλήθευση μαθηματικών εξισώσεων που έχουν προκύψει από αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα προσδιορισμού της συμπεριφοράς των πετρωμάτων. Τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών έχουν συντελέσει στην εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών διαφόρων πετρωμάτων και στην κατεύθυνση της διαμόρφωσης των κριτηρίων αστοχίας. Επιπλέον, μέσω των αποτελεσμάτων των τριαξονικών δοκιμών, ερευνητές έχουν αναγνωρίσει πως ο μηχανισμός της ψαθυρής θραύσης δεν είναι ο μόνος που καθορίζει την αντοχή των πετρωμάτων. Ορισμένα είδη πετρωμάτων έχει παρατηρηθεί ότι παρουσιάζουν όλκιμη - πλαστική συμπεριφορά σε υψηλές τιμές μέσης τάσης.

Τα τελευταία χρόνια, αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης έχει αποτελέσει η χρήση των τριαξονικών δοκιμών για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ερπυσμού, της επίδρασης της θερμότητας στην αντοχή των πετρωμάτων, αλλά και τον προσδιορισμό της επιρροής του φυσικού εντατικού πεδίου στην αποτόνωση και σύγκλιση των τοιχωμάτων που παρουσιάζεται γύρω από γεωτρήσεις και υπόγεια ανοίγματα μεγάλου βάθους. Τα πετρώματα υφίστανται *in situ* την επίδραση συνθηκών τριαξονικής φόρτισης και η αντοχή τους υπό αυτές τις συνθήκες αξιοποιείται στο σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης στα μεταλλεία και στη μελέτη του μηχανισμού θλίψης και διάτμησης και δημιουργίας ασυνεχειών αλλά και στη διάτρηση βαθιών γεωτρήσεων. Οι έρευνες αυτές επομένως έχουν συντελέσει στην ενίσχυση της κατανόησης των φυσικών μηχανισμών που καθορίζουν την αντοχή και τη συμπεριφορά των πετρωμάτων.

Δοκιμές τριαξονικής θλίψης μπορούν να πραγματοποιηθούν υπό στατικές ή δυναμικές συνθήκες φόρτισης για τη διερεύνηση της αντοχής ή της δυστροπίας, είτε ενός άρρηκτου δοκιμίου πετρώματος, είτε μιας μεμονωμένης ασυνέχειας, είτε ενός συστήματος ασυνεχειών, υπό συγκεκριμένες τιμές θλιπτικών φορτίων, ρυθμών φόρτισης, ενεργού πορώδους και θερμοκρασίας. Συνεπώς, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός πιθανών διαφοροποιήσεων δοκιμών τριαξονικής θλίψης που μπορούν να διεξαχθούν, με επακόλουθες μεταβολές στη διαδικασία, τις πειραματικές διατάξεις και τα συστήματα μέτρησης. Η πιο ευρέως γνωστή και χρησιμοποιούμενη εργαστηριακή μέθοδος για την επίτευξη συνθηκών τριαξονικής εντατικής κατάστασης περιλαμβάνει την υπέρθεση μιας υδροστατικής πλευρικής πίεσης και μιας μονοαξονικής φόρτισης σε κυλινδρικά δοκίμια που περιβάλλονται από εύκαμπτη ελαστική μεμβράνη. Δοκιμές τέτοιου είδους αναφέρονται απλά ως «τριαξονικές δοκιμές». Τα βασικά πλεονεκτήματα της εν λόγω διαδεδομένης τεχνικής περιλαμβάνουν : α) ευκολία

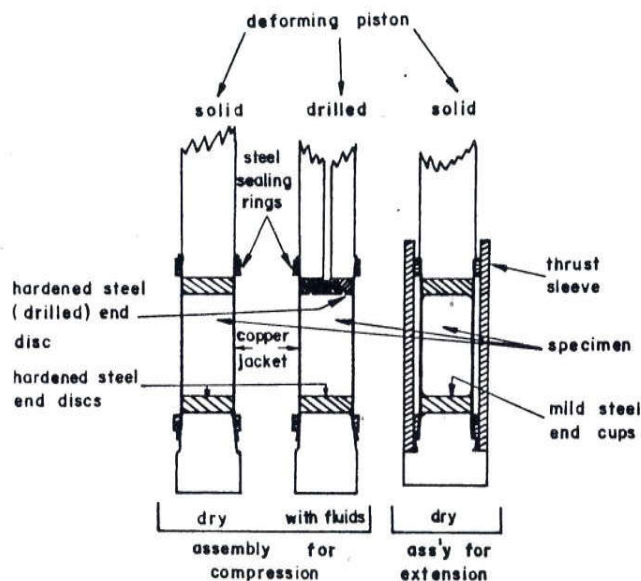
άσκησης φορτίων και μέτρησης μετατοπίσεων με εργαστηριακές διατάξεις, β) οικονομία προετοιμασίας δοκιμών πυρηνοληψίας, γ) αξονική συμμετρία, δ) πλευρικός περιορισμός και στεγανότητα δοκιμών έναντι υδραυλικού περιβάλλοντος με τη χρήση μεμβρανών που περιέχουν τα δοκίμια, ε) δυνατότητα άσκησης υψηλών φορτίων που προσδιορίζονται από τις ακραίες τιμές κύριων τάσεων.



Σχήμα 1. Διάφορες μέθοδοι για τριαξονική θλίψη. Το παχύ βέλος υποδηλώνει τη θλίψη ή στρέψη διαμέσου συμπαγών βάσεων δοκιμίων. Τα λεπτά βέλη υποδηλώνουν τη θλίψη από την υδροστατική πίεση: α) αξονική θλίψη υπό πλευρική πίεση (συμβατική τριαξονική δοκιμή), β) τριαξονική θλίψη από τρία συμπαγή δύσκαμπτα έμβολα, γ) θλίψη και στρέψη κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου υπό πλευρική υδροστατική πίεση, δ) τριαξονική θλίψη από διαξονικά συμπαγή έμβολα και πλευρική υδροστατική πίεση (κατά Mogi, 1971 α)

Οι κοινώς χρησιμοποιούμενες διατάξεις απεικονίζονται στο **σχήμα 2** και περιλαμβάνουν:

1. Αξονική διαμήκης θλίψη και πλευρική πίεση
2. Αξονική θλίψη με πλευρική πίεση και επίδραση της πίεσης των πόρων
3. Αξονικός εφελκυσμός και πλευρική πίεση.



Σχήμα 2. Διάταξη βάσεων δοκιμίων για θλίψη σε ξηρά δοκίμια, θλίψη με πίεση πόρων και για εφελκυσμό (κατά Heard, 1960)

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, τα δοκίμια έχουν σχήμα κυλινδρικό. Στη διάταξη του **σχήματος 2** (Nurukuri, 1989) τα δοκίμια των πετρωμάτων και οι χαλύβδινες πλάκες φόρτισης προστατεύονται έναντι του υγρού της πλευρικής πίεσης μέσω των στεγανωτικών καλυμμάτων από χαλκό ή ορείχαλκο (πάχους 0.10 – 0.15 mm ή 0.004 – 0.006 in για δοκιμές θλίψης και 0.15 – 0.25 mm ή 0.006 – 0.010 in για δοκιμές εφελκυσμού). Τα καλύμματα αυτά είναι στεγανωτικά έναντι των κωνικών επιφανειών του ανώτερου και του κατώτερου εμβόλου με τη χρήση χαλύβδινων στεγανωτικών δακτυλίων. Αρκετά συχνά, εύκαμπτες ελαστικές μεμβράνες χρησιμοποιούνται αντί των στεγανωτικών καλυμμάτων από χαλκό ή ορείχαλκο. Κατά τις δοκιμές με πλευρική πίεση και ενδιάμεση πίεση, τα άκρα των εμβόλων έχουν αρκετά ανοίγματα (3 - 5) διαμέτρου 0,76 mm ή 0.03 in. Στις δοκιμές εφελκυσμού, χρησιμοποιούνται δακτύλιοι για την ευθυγράμμιση των δοκιμίων εντός των κελιών υψηλής πίεσης.

Συμβατική τριαξονική δοκιμή

Οι δοκιμές χαρακτηρίζονται ως συμβατικές τριαξονικές δοκιμές στην περίπτωση όπου η ενδιάμεση κύρια τάση είναι πάντα ίση με μία εκ των ακραίων κυρίων τάσεων (π.χ. την ελάχιστη κύρια τάση). Ωστόσο, η φόρτιση ενδέχεται να πραγματοποιείται με ανεξάρτητη διαφοροποίηση μεταξύ και των τριών κύριων τάσεων, δηλαδή η ενδιάμεση κύρια τάση να μεταβάλλεται ανεξάρτητα από τη μέγιστη και την ελάχιστη κύρια τάση, οπότε η δοκιμή χαρακτηρίζεται ως πραγματική τριαξονική δοκιμή. Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών, ερευνητές έχουν καταλήξει στο ότι αυξάνοντας την ενδιάμεση κύρια τάση, αυξάνεται και η κορυφαία αντοχή των πετρωμάτων. Ωστόσο, η επίπτωση δεν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους συγκριτικά με εκείνη που οφείλεται σε ισοδύναμη αύξηση της ελάχιστης κύριας τάσης (Nurukuri,

1989).

Τριαξονική δοκιμή – Γενικά στοιχεία

Προτού αναλυθεί διεξοδικά η τριαξονική δοκιμή, σκόπιμο κρίνεται να προσδιοριστούν ορισμένοι όροι σχετικά με τις πειραματικές διατάξεις. Στην τριαξονική δοκιμή, κυλινδρικά δοκίμια υποβάλλονται σε καθεστώς τριαξονικής θλίψης όπου ομοαξονικά θλιπτικά φορτία συνδυάζονται με την άσκηση πλευρικού περιορισμού από την υδροστατική πίεση που περιβάλλει το δοκίμιο. Θεωρητικά, το καθεστώς φόρτισης σε οποιοδήποτε σημείο εντός του δοκιμίου, αποτελείται από μία κύρια τάση προσανατολισμένη παράλληλα στον άξονα του δοκιμίου και δύο ισοδύναμες κύριες τάσεις προσανατολισμένα κάθετα προς τον άξονα αυτό. Οι δύο ισοδύναμες κύριες τάσεις είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ασκούμενη πλευρική υδραυλική πίεση, ενώ η τρίτη κύρια τάση αποκλίνει από την τιμή αυτή. Η πίεση που ασκεί το υδραυλικό περιβάλλον καλείται πίεση πλευρικού περιορισμού ή πλευρική πίεση. Η μέση τάση που ασκείται έναντι του δοκιμίου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\frac{(\sigma_1 - 2\sigma_3)}{3}$$

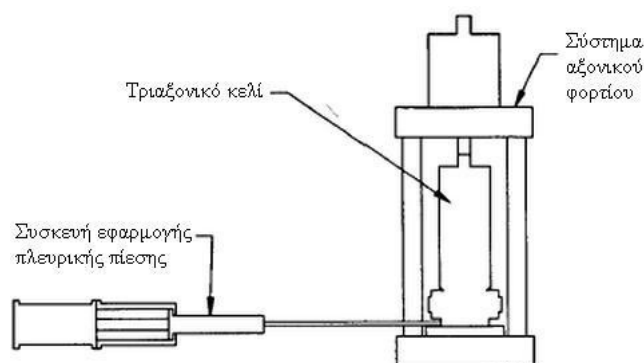
Η πίεση φορτίου που εφαρμόζεται στα άκρα του δοκιμίου (επίπεδες βάσεις) αναφέρεται ως αξονική τάση. Το μέγεθος κατά το οποίο, το αξονικό φορτίο αποκλίνει από την πλευρική πίεση αναφέρεται ως διαφορική ή αποκλίνουσα τάση και υπολογίζεται ως η διαφορά της αξονικής τάσης με την πλευρική πίεση σύμφωνα με τον τύπο: $(\sigma_1 - \sigma_3)$. Η ακόλουθη σύμβαση χρησιμοποιείται κοινώς στη διεθνή βιβλιογραφία της Μηχανικής των Πετρωμάτων:

- (i) Η πίεση πλευρικού περιορισμού θεωρείται θετική.
- (ii) Η μέγιστη κύρια τάση (παράλληλα στον άξονα του δοκιμίου) εφαρμόζει το μεγαλύτερο θλιπτικό φορτίο.
- (iii) Η μέγιστη, ενδιάμεση και ελάχιστη κύρια τάση συμβολίζονται ως σ_1, σ_2 και σ_3 αντίστοιχα.

Αξίζει να σημειωθεί πως στην πράξη, οι κύριες τάσεις ενδέχεται να μη ταυτίζονται με τους άξονες του δοκιμίου λόγω των ανομοιογενειών εντός του δοκιμίου ή άλλων παραμέτρων όπως η επίδραση των συνοριακών συνθηκών.

Τα ουσιώδη επιμέρους τμήματα των εργαστηριακών πειραματικών διατάξεων τριαξονικών δοκιμών περιλαμβάνουν ένα δοχείο πίεσης (γνωστό ως τριαξονικό κελί), το

σύστημα αξονικού φορτίου, και τη συσκευή εφαρμογής της πλευρικής πίεσης όπως αποτυπώνονται στο **σχήμα 3** (κατά Elliott M.G., 1989). Ανάλογα με το σχεδιασμό του τριαξονικού κελιού, το φορτίο που ασκείται από το σύστημα αξονικού φορτίου, είναι ίσο είτε με τη μέγιστη κύρια τάση είτε με την αποκλίνουσα τάση. Κατά τον Elliott M.G. (1989) σχεδόν όλη η διάταξη του οργάνου τριαξονικής δοκιμής για εφαρμογές βραχομηχανικής λειτουργεί σε πλευρικές πιέσεις έως 300 – 500 MPa . Δύο εναλλακτικά επιμέρους τμήματα, το σύστημα πίεσης πόρων και το σύστημα θερμοκρασιών μπορούν να προστεθούν αν η πίεση των πόρων ή/και η θερμοκρασία πρόκειται να συμπεριληφθούν στην τριαξονική δοκιμή. Δοκιμές αυτού του είδους πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες κατώτερες των 500 °C.



Σχήμα 3. Βασικά συστατικά – επιμέρους τμήματα του συστήματος διάταξης δοκιμών τριαξονικής θλίψης (κατά Elliott M.G., 1989)

Η περισσότερο διαδεδομένη εργαστηριακή διαδικασία απαιτεί σταθερές τιμές θερμοκρασίας και πλευρικής πίεσης, διαφοροποιώντας το αξονικό φορτίο για τη διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού μετατόπισης. Μετρήσεις πλευρικής πίεσης, θερμοκρασίας, αξονικού φορτίου, μετατοπίσεων και αλλαγών της πίεσης πόρων ή του όγκου των πόρων καταγράφονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Διαφοροποιήσεις της δοκιμής περιλαμβάνουν : (i) τη ταυτόχρονη μεταβολή της πλευρικής πίεσης και του αξονικού φορτίου, εξετάζοντας παράλληλα τις επιδράσεις των διαδρομών τάσεων, (ii) τη διατήρηση σταθερού αξονικού φορτίου με ταυτόχρονη μείωση της πλευρικής πίεσης, (iii) τη διατήρηση σταθερής πλευρικής πίεσης και εφαρμογή δυνάμεων εφελκυσμού στις βάσεις του δοκιμίου, κάτι που απαιτεί δοκίμια κατάλληλου σχήματος.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πετρωμάτων σε τριαξονική θλίψη είναι ο ρυθμός φόρτισης, ή ρυθμός παραμόρφωσης, το μέγεθος και το σχήμα των δοκιμίων, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η επίδραση των συνοριακών συνθηκών. Η επίδραση των παραγόντων αυτών εκτιμάται αρχικά με δοκιμές μονοαξονικής θλίψης καθώς τυγχάνουν εφαρμογής και στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης.

Η ανοχή των πετρωμάτων επηρεάζεται από τους ρυθμούς και τη διαδρομή φόρτισης. Σύμφωνα με τον Elliott M.G. (1992) οι ρυθμοί μετατόπισης επιλέγονται κατάλληλα ώστε η δοκιμή να διαρκεί 45 λεπτά έως 1 ώρα. Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται προτυποποίηση των διαφορετικών συνόλων αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο της ISRM (1983), τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι κυλινδρικά διαμέτρου NX, με λόγο μήκους προς διάμετρο 2:1 έως 3:1. Οι βάσεις των δοκιμίων πρέπει να είναι επίπεδες και κάθετες στον άξονα του κυλίνδρου, με ανοχή επιπεδότητας ± 0.01 mm και ανοχή καθετότητας με τον άξονα του δοκιμίου < 0.001 ακτίνια. Επιπλέον, τα δοκίμια πρέπει να έχουν λείες πλευρές, η μέτρηση της διαμέτρου να γίνεται με ακρίβεια 0.1 mm σε τρεις θέσεις: στο μέσο και κοντά στις βάσεις του κυλίνδρου, ενώ η μέτρηση του ύψους να γίνεται με ακρίβεια 0.1 mm.

Βασικός σκοπός της χρήσης πλακών φόρτισης με σφαιρική υποδοχή είναι η διόρθωση τυχόν αποκλίσεων των βάσεων από την παραλληλία και η αποφυγή εκδήλωσης φαινομένων λυγισμού στο δοκίμιο και των επιδράσεων των βάσεων και των συνοριακών συνθηκών. Ωστόσο, οι πλάκες με σφαιρική υποδοχή ενδέχεται να επιφέρουν διατμητικές τάσεις στις βάσεις των δοκιμίων, που είναι πιθανό να ποικίλουν κατά τη πρόοδο της δοκιμής, λόγω μεταβολών του προσανατολισμού των πλακών στις θέσεις σφαιρικής υποδοχής των εμβόλων φόρτισης. Με βελτίωση της παραλληλίας των βάσεων του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός αξιοπιστίας και επαναληψιμότητας των εργαστηριακών αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό ο Elliot M. Gordon (1989) προτείνει τη κατεργασία της επιφάνειας των δοκιμίων με χρήση λειαντήρα ακριβείας, για την επίτευξη παραλληλίας 8 μm σε εργαστηριακές δοκιμές.

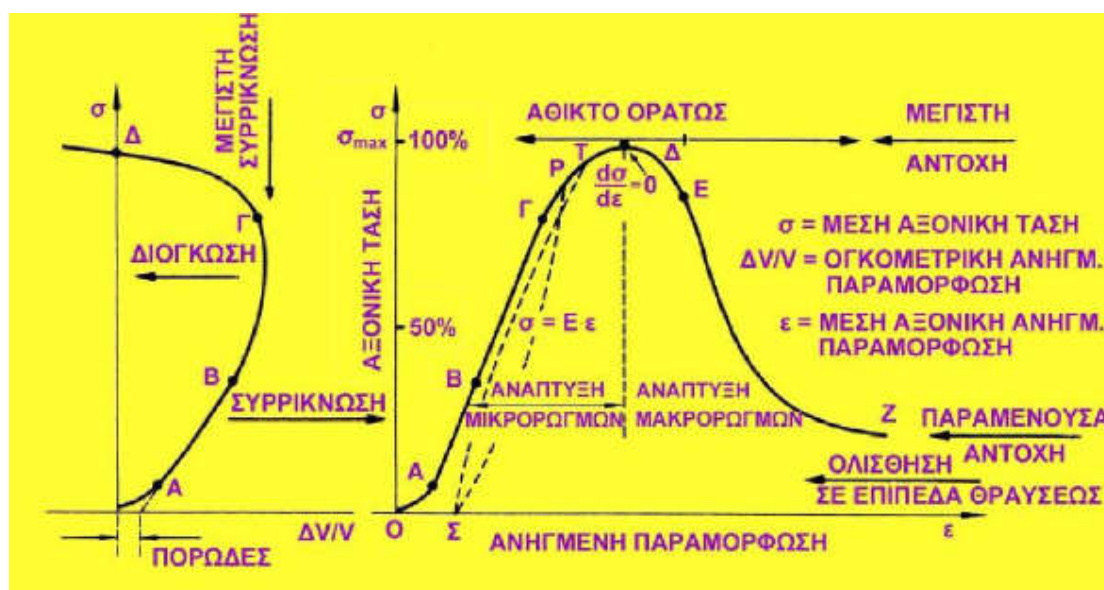
Πολυμερή - ελαστικά από λάτεξ - καουτσούκ, καουτσούκ από νεοπρένιο, θερμό – συστελλόμενο πολυαιθυλένιο αποτελούν τα συνήθη υλικά της στεγανωτικής μεμβράνης. Η εύκαμπτη ελαστική μεμβράνη απομονώνει το δοκίμιο από το υδραυλικό λάδι που ασκεί την πλευρική υδροστατική πίεση. Συνεπώς, η μεμβράνη πρέπει: α) να προσφέρει πλήρη στεγανότητα του δοκιμίου, β) να μην αντιδρά με το υγρό που ασκεί την υδροστατική πίεση αλλά και το νερό του πορώδους του δοκιμίου, γ) να μην επηρεάζεται από την παραμόρφωση, πίεση, ή τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πολυμερή είναι σε θέση να ασκούν ισχυρά φορτία πλευρικής πίεσης – πλευρικού περιορισμού σε περίπτωση που ασκηθούν πιέσεις της τάξεως των 200 - 500 MPa. Επομένως, κατά την επιλογή του πλέον κατάλληλου υλικού των μεμβρανών πρέπει να εξετάζονται οι παράμετροι των συνθηκών δοκιμής και η οικονομικότητα του χρησιμοποιούμενου υλικού. Στα δύο άκρα η μεμβράνη καταλήγει σε ειδικά διαμορφωμένα προστατευτικά για την αποφυγή διαρροών του υγρού, που αποκαλούνται ελαστικοί δακτύλιοι στεγανότητας.

2.2. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

Η συμπεριφορά ενός άρρηκτου πετρώματος σε τριαξονική θλίψη περιγράφεται συνήθως από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Το Σχήμα 4 δείχνει διάφορες καταστάσεις από τις οποίες διέρχεται το πέτρωμα καθώς καταπονείται. Μέχρι το σημείο Γ το πέτρωμα συμπεριφέρεται σαν ελαστικό σώμα, ενώ πέρα από αυτό η συμπεριφορά του χαρακτηρίζεται ως πλαστική. Πιο συγκεκριμένα ως όλκιμη συμπεριφορά χαρακτηρίζεται η πλαστική εκείνη κατάσταση του υλικού που καθώς σε αυτό αυξάνεται η μόνιμη παραμόρφωσή του, συνεχίζει να αυξάνεται και η αντίστασή του προς το επιβαλλόμενο φορτίο.

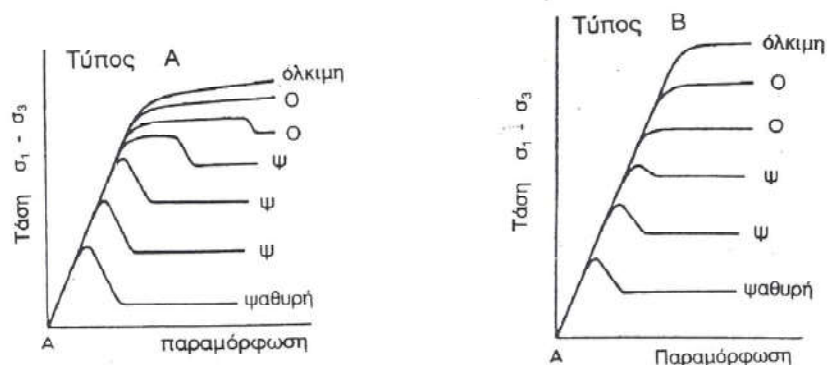
Στη πράξη έχει επικρατήσει να αναφέρονται γενικά σαν όλκιμα τα υλικά εκείνα, που παραμορφώνονται σημαντικά πριν την θραύση, ενώ ψαθυρά χαρακτηρίζονται εκείνα που θραύονται χωρίς να υποστούν σημαντικές παραμορφώσεις (Τσουτρέλης, 1985).



Σχήμα 4. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Τσουτρέλης, 1985).

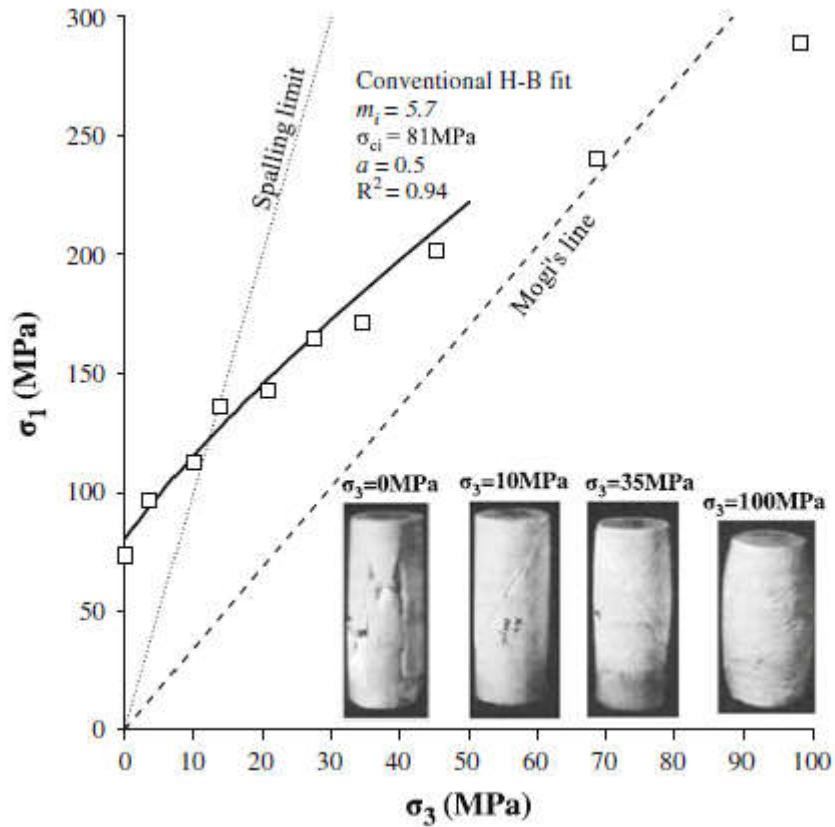
Σύμφωνα με τον Mogi (1972, 1974) υπάρχουν δυο απλοποιημένοι μηχανισμοί παραμόρφωσης των βραχωδών υλικών. Με βάση τους δυο μηχανισμούς ερμηνεύεται η μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν χαρακτηριστεί ως τύπος A (Σχήμα 5A) και τύπος B (Σχήμα 5B) και αντιπροσωπεύουν δυο οριακές καταστάσεις παραμόρφωσης σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο τύπος A αντιστοιχεί σε βραχώδη υλικά που παραμορφώνονται στην πλαστική περιοχή αποκλειστικά με κρυσταλλική πλαστική παραμόρφωση (crystal plasticity), σε αντίθεση ο τύπος B αποκλειστικά με

κατακλαστική ροή (cataclastic flow). Μερικά ανθρακικά πετρώματα, κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες ακολουθούν συμπεριφορά τύπου A, ενώ τα χαλαζιακά πετρώματα ακολουθούν συμπεριφορά τύπου B. Στην πραγματικότητα όμως τα περισσότερα πετρώματα ακολουθούν μια ενδιάμεση συμπεριφορά και στην περιοχή της μετάπτωσης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά συνυπάρχει τόσο ψαθυρή θραύση όσο και πλαστική παραμόρφωση (Mogi, 1974).



Σχήμα 5. Δύο τύποι αλλαγής συμπεριφοράς από ψαθυρή σε πλαστική (Mogi,1974).

Επίσης, ο Mogi(1966, 2007) έχει αποδείξει πως αριστερά της ευθείας $\sigma_1 - \sigma_3 = 3.4\sigma_3$ (Σχήμα 6) κυριαρχεί η ψαθυρή θραύση ενώ από τα δεξιά η όλκιμη. Σε αυτό το συμπέρασμα κατέληξε παρατηρώντας την ψαθυρότητα των πετρωμάτων, δηλαδή την πτώση της αξονικής τάσης μετά την θραύση. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η πτώση τόσο μεγαλύτερη είναι ψαθυρότητα, ενώ αν η πτώση είναι μηδενική τότε η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το δοκίμιο είναι μεταβατική από ψαθυρή σε όλκιμη και εάν δεν υπάρχει θραύση και το φορτίο συνεχώς αυξάνεται τότε βρίσκεται στην όλκιμη περιοχή. Σύμφωνα με τον Hoek (1968) με την αύξηση της πλευρικής πίεσης οι εφελκυστικές ρωγμές του ακέραιου δοκιμίου καταστέλλονται και πραγματοποιείται μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας από αξονική σε διατμητική αστοχία. Ο Kaiser (2000) αναφέρει πως η αξονική θραύση είναι κυρίαρχη αστοχία για πολύ ισχυρά άρρηκτα πετρώματα και εμφανίζεται στα αριστερά της ευθείας του ορίου θρυμματισμού (spalling limit). Αυτό υποστηρίζεται και από τον Buzzi (2013) που εκτέλεσε δοκιμές σε δείγματα άνθρακα. Το όριο αυτό εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση και την ετερογένεια του δοκιμίου και η μετάβαση αυτή μπορεί να περιγραφεί με μια ευθεία με κλίση $\sigma_1/\sigma_3 \approx 10$.



Σχήμα 6. Μη γραμμική περιβάλλουσα καμπύλη αστοχίας και η σύνδεση της με τον μηχανισμό αστοχίας. Μετάβαση από αξονική αστοχία ($\sigma_3=0$ MPa) σε διατμητική αστοχία ($\sigma_3=10$ MPa). Πολλαπλές διατμητικές ζώνες αστοχίας ($\sigma_3=35$ MPa) και διόγκωση του δοκιμίου (πλαστική παραμόρφωση) πέρα από την γραμμή Mogi ($\sigma_3=100$ MPa). Δεδομένα και φωτογραφίες δοκιμίων από τον Paterson (1958).

2.3. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΗΟΕΚ & ΒRΩΝ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Οι Hoek & Brown με βάση τις θεωρίες θραύσης του Griffith(1921,1924) και των McClintock & Walsh (1962) παρουσίασαν το 1980 το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας. Το κριτήριο αυτό ορίζει την τιμή της κύριας τάσης σ_1 ($\sigma_1 > \sigma_3 = \sigma_2$) για την οποία επέρχεται η θραύση σε αντίθεση με το κριτήριο του Mohr – Coulomb που ορίζει την τιμή της διατμητικής τάσης για την οποία αστοχεί ένα υλικό. Το κριτήριο (Σχήμα 7), αναφέρεται σε βράχο με ομοιόμορφη κατάτμηση και ορίζεται με την εξίσωση

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$$

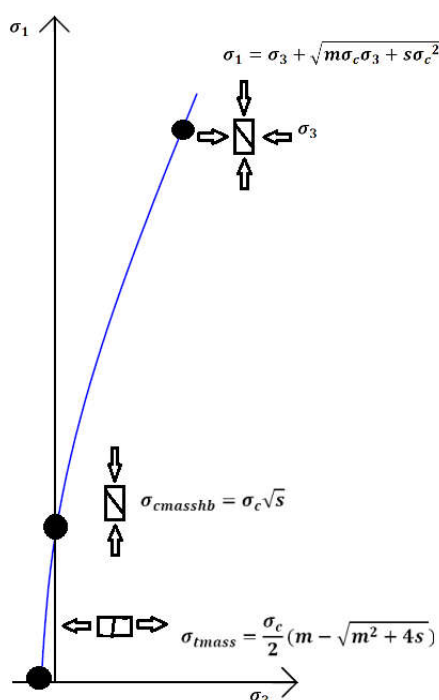
Όπου,

σ_1 η μέγιστη κύρια ενεργός τάση κατά τη θραύση,

σ_3 η ελάχιστη κύρια ενεργός τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο,

σ_c η θλιπτική αντοχή του πετρώματος το οποίο συνθέτει το δοκίμιο εκφράζει τη συνεισφορά της συμπαγούς ύλης στην αντοχή το δοκίμιου,

m, s σταθερές οι οποίες εξαρτώνται από τις ιδιότητες του βράχου και από το βαθμό στον οποίο ο βράχος είναι διακλασμένος πριν υποβληθεί στις τάσεις σ_1, σ_3 .



Σχήμα 7. Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (1980).

Το 1992 οι Hoek & Brown παρουσίασαν μία νέα τροποποιημένη σχέση του κριτηρίου

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \sigma_c$$

Όπου,

a παράμετρος που εξαρτάται από τον τεκτονισμό του πετρώματος και λαμβάνει τιμές από 0,5-0,65 .

Επιπλέον, στην παραπάνω σχέση η παράμετρος m συμβολίζεται με m_b και εκφράζει τις συνθήκες τριβής μεταξύ των συνιστωσών των ορυκτών του πετρώματος.

Η ανάγκη να τροποποιηθεί το κριτήριο προέκυψε όταν πρόσθετα εμπειρικά στοιχεία έδειξαν ότι η εφαρμογή της αρχικής σχέσης πρέπει να περιοριστεί μόνο σε καλής ποιότητας βράχο, κυρίως σε βράχους οι οποίοι χαρακτηρίζονται από γωνιώδη στοιχεία κατάτμησης τα οποία βρίσκονται σε στενή επαφή μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή η παραπάνω σχέση γράφεται

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{0.5}$$

Για άρρηκτο πέτρωμα η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή

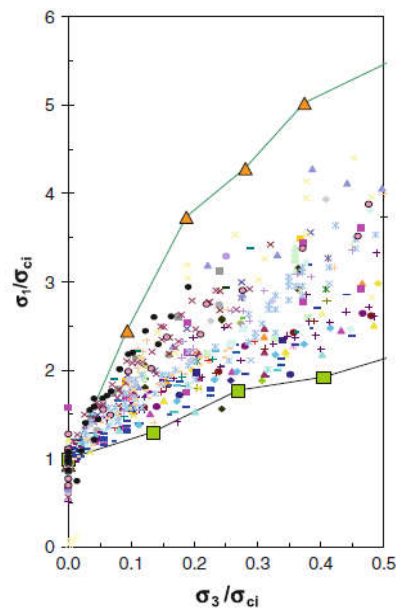
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$$

Γίνεται αντιληπτό πως η σχέση μεταξύ κύριων τάσεων (σ_1, σ_3) κατά την αστοχία για ένα συγκεκριμένο πέτρωμα καθορίζεται από δύο παράγοντες: την σταθερά m_i του πετρώματος και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci} .

Για τον υπολογισμό της παραμέτρου m_i ο Hoek προτείνει μια διαδικασία λήψης δεδομένων από τριαξονικές δοκιμές και σε συγκεκριμένο εύρος, το οποίο είναι $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$ καθώς επίσης και δεδομένα από δοκιμές εφελκυσμού ώστε να προσαρμοστεί καλύτερα η περιβάλλουσα καμπύλη. Το παραπάνω εύρος σύμφωνα με τον Hoek (1983) δόθηκε διότι θεωρεί πως «η πλευρική πίεση θα πρέπει να είναι πάντα μικρότερη της θλιπτικής αντοχής του πετρώματος γιατί από το όριο αυτό και μετά το πέτρωμα συμπεριφέρεται πλαστικά. Επίσης σημειώνει πως σε πετρώματα με μικρή τιμή m_i το όριο μεταξύ ελαστικής και πλαστικής συμπεριφοράς μπορεί να βρεθεί ασκώντας πλευρική πίεση αρκετά πιο χαμηλά από την θλιπτική αντοχή του πετρώματος». Για την σωστή προσαρμογή της περιβάλλουσας και το προσδιορισμό του m_i απαιτούνται τουλάχιστον 5 σημεία με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους έτσι ώστε να καλύπτουν το εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$ καθώς και δεδομένα για την εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου.

Το κριτήριο στηρίχθηκε σε εκατοντάδες τριαξονικές δοκιμές, συγκεκριμένα σε 68 ομάδες δειγμάτων βράχου που εκτελέστηκαν με βάση το παραπάνω εύρος και

παρουσιάζονται στο Σχήμα 8. Όταν τα δοκίμια υποβάλλονται σε τριαξονική θλίψη, η αντοχή τους προσδιορίζεται καλύτερα με ένα μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας. Η μη γραμμικότητα προκύπτει όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 στην αλλαγή συμπεριφοράς του τρόπου αστοχίας του ακέραίου δοκιμίου με την ταυτόχρονη αύξηση της πλευρικής πίεσης. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές της σταθεράς m_i για άρρηκτο βράχο διάφορων τύπων πετρωμάτων σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα.



Σχήμα 8. Δεδομένα δοκιμών τριαξονικής θλίψης από 68 ομάδες δειγμάτων βράχου που παρίστανται με διαφορετικό σύμβολο. Τα δείγματα που δείχνουν το άνω και κάτω όριο των δεδομένων παριστάνονται με μεγαλύτερα σύμβολα (Kaiser & Kim, 2008).

Πίνακας 1. Τιμές της σταθερά m_i για άρρηκτο βράχο διαφορετικών ομάδων πετρωμάτων (Marinos & Hoek , 2000).

Τύπος	Ομάδα	Υφή				
		Αδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά	Κροκαλοπαγή *	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2	Αργιλόλιθοι 4 ± 2	
		Λατυποπαγή *		Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)	
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικρικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
	Οργανικά				Κρητίς 7 ± 2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9 ± 3	Χαλαζίτες 20 ± 3 Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Κερατόλιθοι (19 ± 4)		
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιοι 28 ± 5		
	Πτυχωμένα**		Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχιστές 7 ± 4	
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοιχτόχρωμα	Γρανίτης 32 ± 3	Διορίτης 25 ± 5 Γρανοδιορίτης (29 ± 3)		
		Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοτίτης (25 ± 5)	
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Ηφ.Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφοι (13 ± 5)	

* Τα m_i των κροκαλοπαγών και λατυποπαγών εξαρτάται από το είδος του συνδετικού υλικού και το βαθμό συγκόλλησης. Έτσι η τιμή του m_i μπορεί να κυμαίνεται από αυτήν που αντιστοιχεί στους ψαμμίτες (17±4) έως αυτήν των λεπτόκοκκων ιζημάτων (μικρότερη του 10)

** Οι τιμές του m_i αναφέρονται για δείγματα άρρηκτου πετρώματος που δοκιμάστηκαν κάθετα στη στρώση ή σχιστότητα. Το m_i μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τις αναφερόμενες τιμές αν η θραύση λάβει χώρα κατά μήκος επιφανειών αδυναμίας.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν δυο πετρώματα τα οποία διαμορφώθηκαν σε δυο διαφορετικές διαμέτρους. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ο πορφύρης με διαμόρφωση διαμέτρου (60-61mm) και ο σχιστόλιθος σε δυο διαφορετικές διαμέτρους (60-61mm) και (54mm).

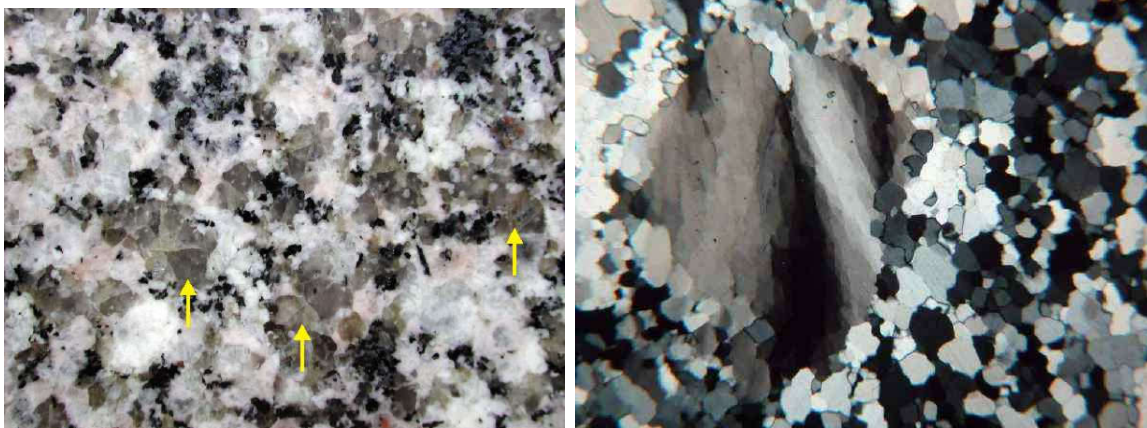
Πορφύρης

Ο πορφύρης είναι ηφαιστειακής ή υποηφαιστειακής γενέσεως πέτρωμα το οποίο απαντάται σε πολλές χρωματικές ποικιλίες όπως πορφυρό,ερυθρόχροο,τεφρόφαιο,τεφρόχροο,τεφρομέλανο ή πράσινο. όσον αφορά τον γενικό επιστημονικό όρο πορφύρης αυτός καλύπτει από πλευράς τύπου και ουσίας όλα τα μαγματικά πετρώματα που έχουν πορφυρικό ιστό. Πορφυριτικός ιστός, είναι ο πρωτογενής εκείνος ιστός, ο οποίος συγκροτείται από μεγαλύτερους κρυστάλλους, τους λεγόμενους φαινοκρυστάλλους, οι οποίοι βρίσκονται παρενεσπαρμένοι εντός μίας μικροκρυσταλλικής ή μικρολιθικής ή αφανιτικής ή / και άμορφης μάζας. Η Ορυκτολογική-ορυκτοχημική σύσταση του Ελληνικού Πορφυρη, είναι αποτέλεσμα του χημισμού του μάγματος και του τρόπου γενέσεως αυτού. Από τις χημικές αναλύσεις που διενεργήθηκαν σε αντιπροσωπευτικά δείγματα πορφύρη, προερχόμενα από το ορεινό συγκρότημα "Κούλα"- "Στράτα Τσούκα", που βρίσκεται βορειοδυτικά και ανάντη του οικισμού ΠΑΧΝΗ της πρώην κοινότητας ΚΟΤΥΛΗ, προέκυψε η παρακάτω μέση χημική σύνθεση:

Πίνακας 2. Μέση χημική σύνθεση του Ελληνικού Χαλαζιακού Πορφύρη

Διοξείδιο του Πυριτίου	SiO ₂	71.73	%
Διοξείδιο του Τιτανίου	TiO ₂	0.58	%
Τριοξείδιο του Αργιλίου	Al ₂ O ₃	14.02	%
Τριοξείδιο του Σιδήρου	Fe ₂ O ₃	1.31	%
Οξείδιο του Σιδήρου	FeO	0.88	%
Οξείδιο του Μαγγανίου	MnO	0.07	%
Οξείδιο του Μαγνησίου	MgO	0.51	%
Οξείδιο του Ασβεστίου	CaO	2.24	%
Οξείδιο του Νατρίου	Na ₂ O	3.81	%
Οξείδιο του Καλίου	K ₂ O	4.09	%
Πεντοξείδιο του Φωσφόρου	P ₄ O ₅	0.09	%
Απώλεια πυρώσεως	L.O.I	0.67	%
Σύνολο 100.00 %			

Από το περιεχόμενο του παραπάνω Πίνακα, γίνεται φανερό, ότι το μάγμα από το οποίο έχει προέλθει ο Πορφύρης, είναι πολύ όξινο (περίσσεια SiO₂) και επομένως αναμένετε ο σχηματισμός πληθώρας κρυστάλλων χαλαζία, όπως και τελικά εγένετο. Οι κρύσταλλοι χαλαζία, που αφθονούν στο πέτρωμα και καλύπτουν ποσοστά 32 έως 36% του συνόλου των ορυκτών αυτού, είναι σε μεγάλο αριθμό μικρού έως μεσαίου μεγέθους (0.2 έως 2 χιλ.). Αφθονούν ακόμη κρύσταλλοι μεγαλύτερου μεγέθους, οι λεγόμενοι φαινοκρύσταλλοι (έως 4 χιλ.), που χαρακτηρίζουν το πέτρωμα, προσδίδοντας του και το όνομα πορφύρης. (βλ. Εικ.1)



Εικόνα 1. Φωτογραφίες λεπτών τομών πορφύρη.

Σε μικρότερο ποσοστό, δηλαδή 24 έως 28%, συμμετέχουν οι κρύσταλλοι των αστρίων, όπως προέκυψε από την εμβαδομέτρηση λεπτών τομών, οι οποίοι παρουσιάζουν εμφανή σχισμό και σε ορισμένες περιπτώσεις ελαφρά εξαλλοίωση. Το είδος των ορυκτών που ανευρίσκονται στον Πορφυρη συμπληρώνουν, σε ποσοστό περίπου 10%, κρύσταλλοι βιοτίτη, κερροσίλβης αλλά και ελάχιστοι κρύσταλλοι ζirkονίου και απατίτη (συμπτωματικά ορυκτά). -12- Το υπόλοιπο 30%, καταλαμβάνει η θεμελιώδης μάζα, που είναι μια φυσική ορυκτή ουσία(matrix), με τη μορφή μικροκρυσταλλικού ή μικρολιθικού ή αφανιτικού ή / και άμορφου διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) η οποία συγκολλά όλους τους ήδη σχηματισθέντες στα προηγούμενα στάδια κρυστάλλους ή πυροκλάστες χαλαζία.

Σχιστόλιθος

Ο σχιστόλιθος είναι ένα μεταμορφωσιγενές πέτρωμα. Είναι πέτρωμα που παρουσιάζει έντονα σχιστοφυή ιστό εξαιτίας της παρουσίας κάποιου φυλλόμορφου ορυκτού το οποίο περιέχει. Με βάση το φυλλόμορφο αυτό ορυκτό (αφού κατά τα άλλα αποτελούνται από χαλαζία και αστρίους) παίρνει το όνομά του. (βλ. Εικ.2)



Εικόνα 2. Φωτογραφίες λεπτών τομών σχιστόλιθου.

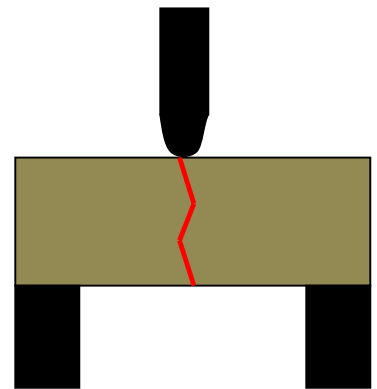
3.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΛΗΨΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η μεθοδολογία της λήψης των δειγμάτων ήταν η ίδια και για τα δύο πετρώματα. Συγκεκριμένα τα δείγματα του πορφύρη και του σχιστόλιθου προήλθαν από γεωτεχνικές έρευνες.

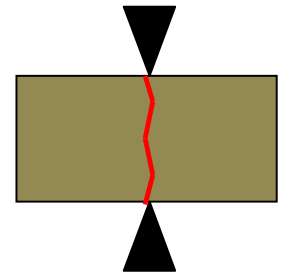
Η δειγματοληψία έγινε με τρόπο ώστε τα δείγματα να είναι αντιπροσωπευτικά του σχηματισμού από τον οποίο προέρχεται. Επίσης, εφόσον η δειγματοληψία έγινε με σκοπό τον εργαστηριακό προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του άρρηκτου πετρώματος, τα δείγματα έπρεπε να είναι όσο είναι δυνατόν υγιή, χωρίς σημεία αποσάθρωσης και χωρίς ασυνέχειες. Η δειγματοληψία του πορφύρη και του σχιστόλιθου πραγματοποιήθηκε σε επιφανειακές εμφανίσεις των πετρωμάτων και για αυτό το λόγο χρειάστηκε ιδιαίτερη προσοχή. Δόθηκε σημασία στην αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων ως προς το σχηματισμό από τον οποίο προέρχονται. Έτσι, εκεί όπου κρίθηκε σκόπιμο, δηλαδή η εμφάνιση του εν λόγω σχηματισμού παρουσίαζε διαφοροποίηση σε όλη της την έκταση, ελήφθησαν περισσότερα από ένα δείγματα. Τα δείγματα του πορφύρη και του σχιστόλιθου αποκολλήθηκαν από τη βραχομάζα σε μορφή που να προσεγγίζει τον κύβο διαστάσεων τουλάχιστον 40 x 40 cm. Από κάθε δείγμα που μεταφέρθηκε στο εργαστήριο διαμορφώθηκαν δοκίμια για τον εργαστηριακό προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων των βραχωδών υλικών.

Τα δοκίμια διαμορφώθηκαν και εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Γεωμηχανικής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Θεσσαλονίκης με εργαστηριακό εξοπλισμό που περιγράφεται στη συνέχεια.

Η δημιουργία των ασυνεχειών πραγματοποιήθηκε είτε με υποβολή πρισμάτων πετρώματος σε κάμψη (Εικόνα 3), είτε με εφελκυστική διάρρηξη με τη χρήση δυο γωνιακών ελασμάτων μέσω των οποίων εφαρμόστηκε το απαιτούμενο γραμμικό φορτίο σε προδιαμορφωμένη εγκοπή κατά πλάτος του δοκιμίου(Εικόνα 4). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι δημιουργούμενες ασυνέχειες να είναι οι πολύ τραχείες και να αντιπροσωπεύουν το άνω όριο της τραχύτητας που είναι δυνατό να απαντηθούν στο ύπαιθρο.



Εικόνα 3. Εφελκυστική αστοχία λόγω κάμψη



Εικόνα 4. Εφελκυστική διάρρηξη

Για τα κυλινδρικά δοκίμια της τριαξονικής θλίψης χρησιμοποιήθηκε αδαμαντοτρύπανο (απλή καρταρία) που είναι εφοδιασμένο με ειδικό κοπτικό άκρο λεπτού τοιχώματος με διαμάντια (Εικόνα 5). Εσωτερικά από το αδαμαντοτρύπανο διέρχεται νερό για την απομάκρυνση των θραυσμάτων πετρώματος και για την ψύξη του κοπτικού άκρου.



Εικόνα 5. Πυρηνοληψία πετρωμάτων.

Επιπλέον, το βραχώδες δείγμα, πριν την τοποθέτησή του στην συσκευή της εργαστηριακής καροταρίας διαμορφώθηκε με τη βοήθεια αδαμαντοτροχού (Εικόνα 6,7), ώστε να υπάρχει λεία βάση για την καλύτερη έδραση στην τράπεζα και να διευκολύνεται στην χρήση το σύστημα συγκράτησης του δείγματος σε αυτή.



Εικόνα 6. Κοπή και διαμόρφωση δειγμάτων με την χρήση αδαμαντοτροχού.

Από τη διάτρηση του κάθε πετρώματος προέκυψαν τουλάχιστον επτά (7) δοκίμια (Εικόνα 9) τα οποία, αφού ελέγχθηκαν για την παρουσία εμφανών μικρορωγμών, αποκόπηκαν και λειάνθηκαν στα άκρα με την χρήση αδαμαντοτροχού και συσκευής λείανσης (Εικόνα 7,8).



Εικόνα 7. Κοπή των δυο άκρων του πυρήνα με τη χρήση αδαμαντοτροχού για τη διαμόρφωση κυλινδρικού σχήματος .



Εικόνα 8. Συσκευή λείανσης δοκιμίων.



Εικόνα 9. Σύνολο διαμορφωμένων κυλινδρικών δοκιμίων Σχιστόλιθου.

3.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της αντοχής σε τριαξονική θλίψη δοκιμίων πετρωμάτων ορθού κυλινδρικού σχήματος. Η δοκιμή αυτή δίνει τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ και της συνοχής c του πετρώματος. Τέλος, οι τιμές της αντοχής όπως προσδιορίζονται με την παραπάνω μέθοδο δίνονται σε τιμές ολικών τάσεων, γιατί δεν υπάρχει πρόβλεψη για την μέτρηση της πίεσης πόρων.

Προετοιμασία δοκιμής τριαξονικής θλίψης

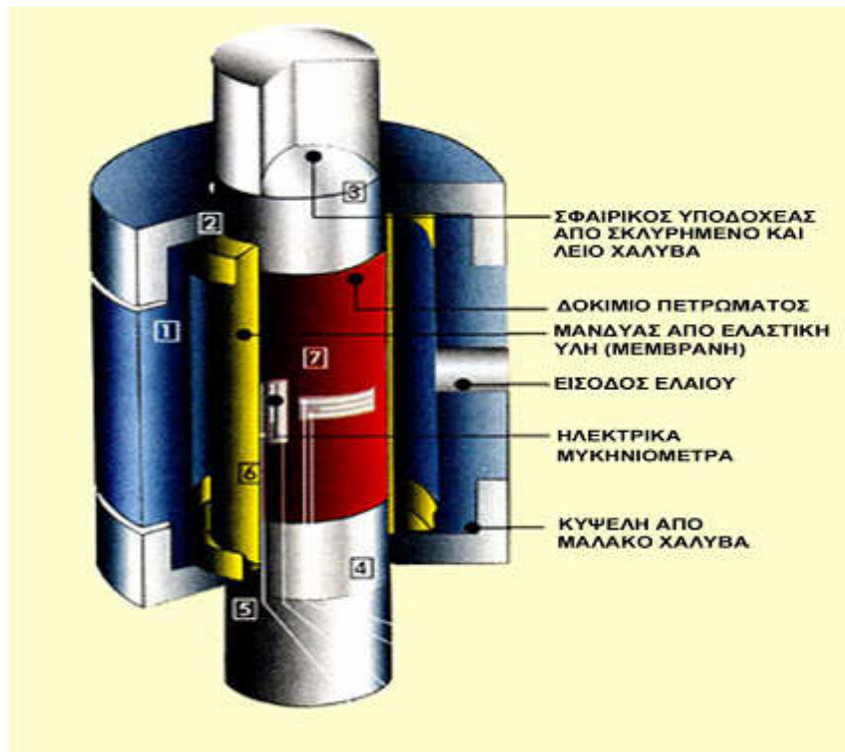
Μετά την πυρηνοληψία των δοκιμίων και τη διαμόρφωση τους με τον κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό, τα δοκίμια θα πρέπει να είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με λόγο ύψους προς διάμετρο (H/D) ίσο με 2,0 με απόκλιση αυτού του λόγου κατά 3%, σε αντίθετη περίπτωση το δοκίμιο θα πρέπει να απορρίπτεται. Επίσης, είναι απαραίτητο η διάμετρος του δοκιμίου να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών του πετρώματος.

Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικές με τις πραγματικές επί τόπου συνθήκες. Είναι δυνατόν όμως οι συνθήκες υγρασίας να είναι διαφορετικές ή τα δοκίμια να είναι σε ξηρά κατάσταση, επομένως οι συνθήκες αυτές της δοκιμής θα πρέπει να αναφέρονται στο έντυπο αποτελεσμάτων. Επιπλέον, τα δοκίμια που εξετάζονται σε ξηρά κατάσταση πρέπει να τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας $105^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ για 24 ώρες.

Ο αριθμός των δοκιμών και των τιμών της πλευρικής πίεσεως εξαρτάται από τον σκοπό για τον οποίο γίνονται οι δοκιμές. Συνιστάται πάντως τα δοκίμια να είναι περισσότερα από πέντε για κάθε δείγμα πετρώματος.

Εκτέλεση δοκιμής τριαξονικής θλίψης

Αρχικά τοποθετείται το δοκίμιο στο τριαξονικό κελί Hoek (Hoek cell) και ακολουθεί η διαδικασία όπως περιγράφεται στο Σχήμα 9. Στη συσκευή αυτή τοποθετούνται τα δοκίμια αφού πρώτα τοποθετηθεί μία αδιαπέρατη εύκαμπτη μεμβράνη ως περίβλημα μέσω της οποίας ασκείται η πλευρική πίεση στο δοκίμιο χωρίς να υπάρχουν διαρροές υδραυλικού υγρού στο δοκίμιο. Επίσης, το κελί είναι εξοπλισμένο με δύο χαλύβδινες πλάκες με σφαιρικές εδράσεις που προσαρμόζονται στις άκρες του δοκιμίου οι οποίες έχουν σκληρότητα κατά Rockwell όχι μικρότερη από HRC 58. Μια ακόμη προδιαγραφή που θα πρέπει να έχει το τριαξονικό κελί είναι να διαθέτει ένα κύλινδρο υψηλής πίεσεως, με κατάλληλες εισόδους για την πλήρη πλήρωσή του με το υδραυλικό υγρό, καθώς επίσης και μια βαλβίδα διαφυγής του αέρα. Σημειώνεται πως το όριο πλευρικής πίεσης του Hoek cell είναι στα 70 MPa.



Σχήμα 9. Θάλαμος Hoek για την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών (ELE INTERNATIONAL).

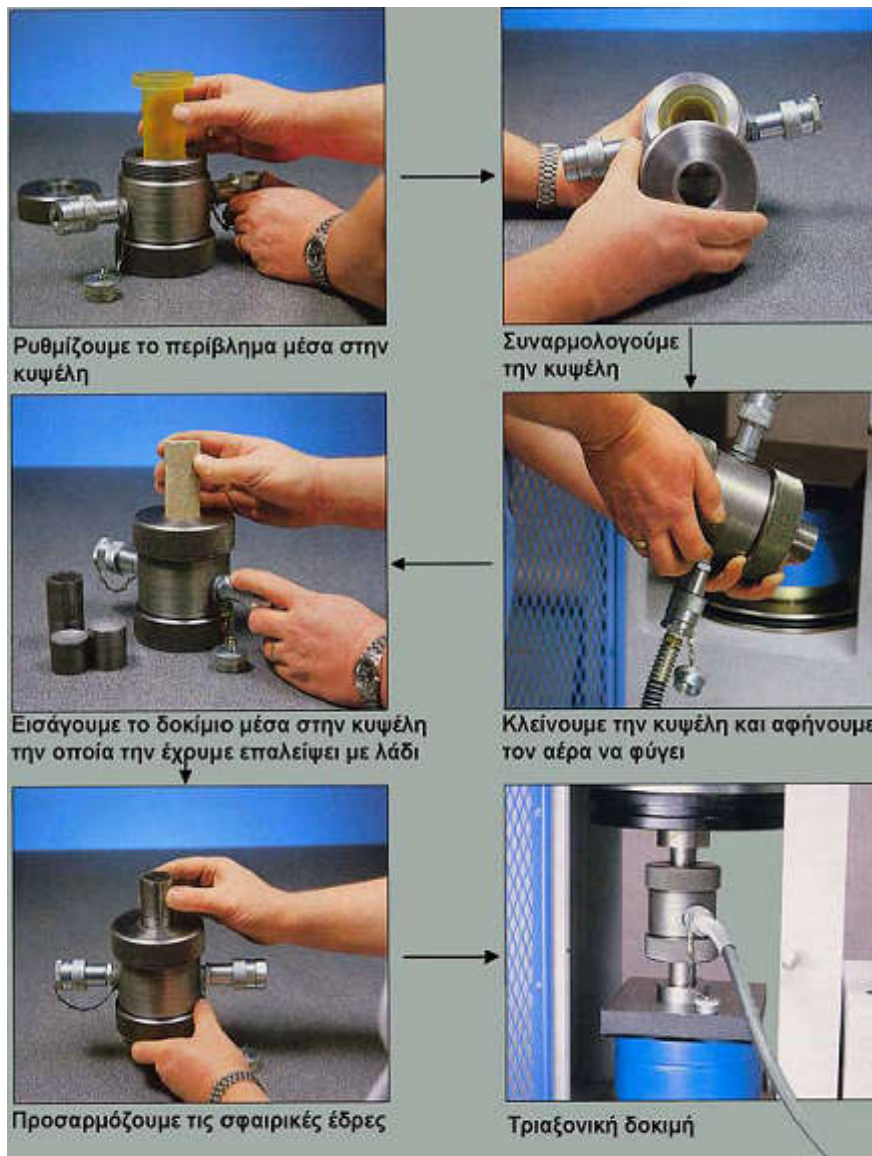
Στην συνέχεια γεμίζει το κελί με το υδραυλικό λάδι και απομακρύνεται ο εγκλωβισμένος αέρας από τη βαλβίδα εξαγωγής. Έπειτα κλείνει η βαλβίδα και εξασκείται μια μικρή πλευρική πίεση για να συγκρατήσει το σύστημα των πλακών και του δοκιμίου στο διάστημα μεταξύ των πλακών της μηχανής φορτίσεως και ασκείται ένα χαμηλό αξονικό φορτίο ενώ γίνεται ταυτόχρονα πραγματοποιείται ευθυγράμμιση του κελιού με τον άξονα φορτίσεως. Έπειτα, αυξάνεται προοδευτικά και ομοιόμορφα το αξονικό φορτίο και η πλευρική πίεση ώστε να εξασφαλίζεται υδροστατική φόρτιση και μέχρι η αξονική και πλευρική πίεση να γίνουν ίσες με την τελική επιθυμητή πλευρική πίεση. Μετά, αυξάνεται συνεχώς και βαθμιαία το αξονικό φορτίο ενώ η πλευρική πίεση διατηρείται σταθερή με απόκλιση από την επιθυμητή τιμή μικρότερη του 2%.

Η ταχύτητα φορτίσεως πρέπει να είναι τέτοια ώστε η θραύση του δοκιμίου να επέλθει μέσα σε 5-15 min από την αρχή της φορτίσεως ή η τιμή της να κυμαίνεται από 0,5 - 1,0 MPa/sec. Επίσης η δοκιμή μπορεί να διεξαχθεί με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης. Στην περίπτωση μας επιλέχθηκε για λόγους σύγκρισης με άλλα βιβλιογραφικά δεδομένα ρυθμός αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta H/H_0$) 10^{-4} έως 10^{-5} ανά δευτερόλεπτο.

Η τιμή της πλευρικής πιέσεως και του αξονικού φορτίου θραύσεως καθώς και του παραμένον φορτίου αναγράφονται στο δελτίο της δοκιμής.



Εικόνα 10. Διάταξη τριαξονικής θλίψης.



Εικόνα 11. Διαδικασία για τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης (ELE INTERNATIONAL).

Υπολογισμοί

Η αντοχή του δοκιμίου σε τριαξονική θλίψη υπολογίζεται δια διαιρέσεως του μεγίστου φορτίου που επιβλήθηκε στο δοκίμιο με το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_1 = \frac{P}{A}$$

Όπου,

σ_1 αντοχή σε τριαξονική θλίψη του δοκιμίου σε MPa.

P μέγιστο αξονικό φορτίο σε kN .

A εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου σε mm².

Η τιμή της αξονικής τάσης σ_1 αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο εφόσον αυτό αστοχεί ψαθυρά. Όταν όμως βρίσκεται στην πλαστική περιοχή η τιμή της σ_1 δεν αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο αλλά στο σημείο που αλλάζει η σταθερή αύξηση του φορτίου με την βράχυνση σε μεταβαλλόμενη.

Εκτός από την αντοχή του δοκιμίου σε τριαξονική θλίψη χρειάζεται και η παραμένουσα αντοχή του δοκιμίου. Αυτή υπολογίζεται δια διαιρέσεως του παραμένουστος φορτίου μετά την θραύση με το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_r = \frac{P_r}{A}$$

Όπου,

σ_r παραμένουσα αντοχή σε τριαξονική θλίψη του δοκιμίου σε MPa.

P_r παραμένον αξονικό φορτίο σε kN .

A εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου σε mm².

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Το πρόγραμμα δοκιμών τριαξονικής θλίψης περιελάμβανε τουλάχιστον έξι δοκίμια ανά πέτρωμα. Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε μια και μοναδική πλευρική πίεση. Συγκεκριμένα, για τον Σχιστόλιθο (60-63mm) εκτελέστηκαν έξι δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Για τον Πορφύρη (60-63mm) εκτελέστηκαν έξι τριαξονικές δοκιμές. Για τον Σχιστόλιθο (54mm) πραγματοποιήθηκαν έξι τριαξονικές δοκιμές.

Σκοπός ήταν να γίνουν οι δοκιμές των δοκιμών σε ένα εύρος σταθερών πλευρικών πιέσεων από $5 \leq \sigma_3 \leq 70$ MPA, ώστε να γίνει η σύγκριση στα διαγράμματα αξονικής αντοχής - πλευρικής πίεσης στις τρεις κατηγορίες δοκιμών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα έντυπο τριαξονικής θλίψης και τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για κάθε πέτρωμα στο οποίο απεικονίζεται το κριτήριο Hoek & Brown. Τα υπόλοιπα έντυπα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης παρατίθενται στο παράρτημα.

Παρακάτω βλέπουμε τα δεδομένα που πήραμε από το καταγραφέα του μηχανήματος για ένα δοκίμιο Εικόνα 12.

788,873 538372,875 181,94475 2,56303 0,02187 0,02628

Χρόνος (s)	Φορτίο (N)	Θλιπτική τάση (MPa)	Βράχυνση (mm)	Θλιπτική παραμόρφωση (Βράχυνση %) (mm/mm)	Βράχυνση %
0	2403,36548	0,81222	-0,51691	-0,00441	0
3	2611,22559	0,88247	-0,50659	-0,00432	9E-05
6	2764,24512	0,93419	-0,49581	-0,00423	0,00018
9	2910,23853	0,98352	-0,48325	-0,00412	0,00029
12	3022,19067	1,02136	-0,47187	-0,00403	0,00038
15	3149,3645	1,06434	-0,45974	-0,00392	0,00049
18	3243,04126	1,096	-0,44897	-0,00383	0,00058
21	3344,90063	1,13042	-0,43648	-0,00372	0,00069
24	3415,72388	1,15435	-0,42453	-0,00362	0,00079
27	3494,60669	1,18101	-0,41414	-0,00353	0,00088
30	3583,49341	1,21105	-0,40194	-0,00343	0,00098
33	3652,97705	1,23453	-0,39048	-0,00333	0,00108
36	3763,40601	1,27185	-0,37839	-0,00323	0,00118
39	3863,51099	1,30569	-0,36625	-0,00312	0,00129
42	3991,89185	1,34907	-0,3548	-0,00303	0,00138
45	4142,47314	1,39996	-0,34289	-0,00293	0,00148
48	4381,84326	1,48086	-0,33138	-0,00283	0,00158
51	4637,03369	1,5671	-0,31964	-0,00273	0,00168
54	4920,21191	1,6628	-0,30766	-0,00263	0,00178
57	5402,68213	1,82585	-0,2965	-0,00253	0,00188
60	6045,71631	2,04317	-0,28422	-0,00243	0,00198
63	6853,28564	2,31609	-0,2724	-0,00232	0,00209
66	7752,42383	2,61996	-0,26081	-0,00223	0,00218
69	8786,25391	2,96934	-0,24946	-0,00213	0,00228
72	9957,95605	3,36532	-0,23696	-0,00202	0,00239
75	11258,6133	3,80488	-0,22574	-0,00193	0,00248
78	12793,3711	4,32356	-0,21379	-0,00182	0,00259
81	14156,3799	4,78419	-0,20228	-0,00173	0,00268
84	15734,5947	5,31755	-0,19056	-0,00163	0,00278
87	17232,5039	5,82378	-0,17896	-0,00153	0,00288
90	18915,7051	6,39262	-0,16698	-0,00142	0,00299
93	20568,1504	6,95107	-0,15444	-0,00132	0,00309
96	22256,8106	7,52176	-0,14417	-0,00123	0,00318
99	23991,543	8,10802	-0,13213	-0,00113	0,00328
102	25780,1309	8,71247	-0,12025	-0,00103	0,00338
105	27644,3945	9,34251	-0,10869	-0,00093	0,00348
108	29609,2227	10,00653	-0,09626	-0,00082	0,00359
111	31616,5781	10,68492	-0,08469	-0,00072	0,00369
114	33576,6797	11,34734	-0,07301	-0,00062	0,00379
117	35711,9297	12,06896	-0,06189	-0,00053	0,00388
120	37812,3398	12,7788	-0,04967	-0,00042	0,00399
123	40057,8906	13,53769	-0,03793	-0,00032	0,00409
126	42244,2539	14,27657	-0,02631	-0,00022	0,00419
129	44636,2891	15,08497	-0,01479	-0,00013	0,00428
132	46953,8789	15,86821	-0,00328	-0,00003	0,00438
135	49329,1016	16,67092	0,00881	0,00008	0,00449
138	51708,543	17,47506	0,0198	0,00017	0,00458
141	54191,6328	18,31423	0,03175	0,00027	0,00468
144	56766,3984	19,18438	0,04396	0,00038	0,00479

147	59433,1836	20,08562	0,05597	0,00048	0,00489
150	61810,3906	20,88901	0,06711	0,00057	0,00498
153	64503,5742	21,79918	0,07921	0,00068	0,00509
156	67192,7813	22,708	0,09075	0,00077	0,00518
159	69954,1016	23,6412	0,1024	0,00087	0,00528
162	72712,7891	24,57351	0,11445	0,00098	0,00539
165	75529,5313	25,52543	0,12578	0,00107	0,00548
168	78318,9531	26,46813	0,13722	0,00117	0,00558
171	81192,0156	27,43909	0,14901	0,00127	0,00568
174	84134,8438	28,43363	0,16133	0,00138	0,00579
177	87075,2578	29,42735	0,17283	0,00147	0,00588
180	89947,4922	30,39803	0,18431	0,00157	0,00598
183	93029,5078	31,43961	0,19588	0,00167	0,00608
186	96101,1484	32,47768	0,20818	0,00178	0,00619
189	99060,6875	33,47786	0,21911	0,00187	0,00628
192	102160,664	34,52551	0,23097	0,00197	0,00638
195	105335,727	35,59853	0,24391	0,00208	0,00649
198	108480,016	36,66115	0,25516	0,00218	0,00659
201	111478,289	37,67443	0,26676	0,00228	0,00669
204	114570,086	38,71931	0,27792	0,00237	0,00678
207	117880,586	39,8381	0,29015	0,00248	0,00689
210	121123,5	40,93406	0,30158	0,00257	0,00698
213	124349,492	42,02429	0,31319	0,00267	0,00708
216	127649,359	43,13949	0,32533	0,00278	0,00719
219	130902,68	44,23896	0,33713	0,00288	0,00729
222	134169,234	45,3429	0,34798	0,00297	0,00738
225	137572,984	46,49321	0,36053	0,00308	0,00749
228	140884,031	47,61219	0,37178	0,00317	0,00758
231	144417,813	48,80644	0,3839	0,00328	0,00769
234	147780,625	49,94291	0,39574	0,00338	0,00779
237	151128	51,07417	0,40754	0,00348	0,00789
240	154502,109	52,21446	0,41857	0,00357	0,00798
243	157963,391	53,38421	0,43077	0,00368	0,00809
246	161416,609	54,55124	0,44287	0,00378	0,00819
249	164934,969	55,74028	0,45407	0,00387	0,00828
252	168355,641	56,8963	0,46562	0,00397	0,00838
255	171898,719	58,0937	0,47741	0,00407	0,00848
258	175427,281	59,28618	0,48917	0,00417	0,00858
261	178983,797	60,48812	0,5009	0,00427	0,00868
264	182523,656	61,68443	0,51261	0,00437	0,00878
267	185000,656	62,52153	0,52441	0,00447	0,00888
270	188289,156	63,63289	0,53555	0,00457	0,00898
273	191643,766	64,76659	0,54812	0,00468	0,00909
276	195105,469	65,93649	0,55953	0,00477	0,00918
279	198620,484	67,1244	0,57102	0,00487	0,00928
282	202159,703	68,32049	0,58312	0,00498	0,00939
285	205798,453	69,55022	0,59467	0,00507	0,00948
288	209271,859	70,72406	0,60632	0,00517	0,00958
291	212894,641	71,94839	0,61765	0,00527	0,00968
294	216390,172	73,12971	0,63007	0,00538	0,00979
297	219942,953	74,33039	0,64119	0,00547	0,00988
300	223474,813	75,52399	0,65374	0,00558	0,00999
303	227164,391	76,7709	0,66542	0,00568	0,01009
306	230799,188	77,99929	0,67638	0,00577	0,01018
309	233911,406	79,05107	0,68927	0,00588	0,01029
312	235189,109	79,48287	0,70009	0,00597	0,01038
315	238867,063	80,72585	0,7115	0,00607	0,01048
318	242561	81,97423	0,72403	0,00618	0,01059
321	246251,141	83,22132	0,73541	0,00627	0,01068

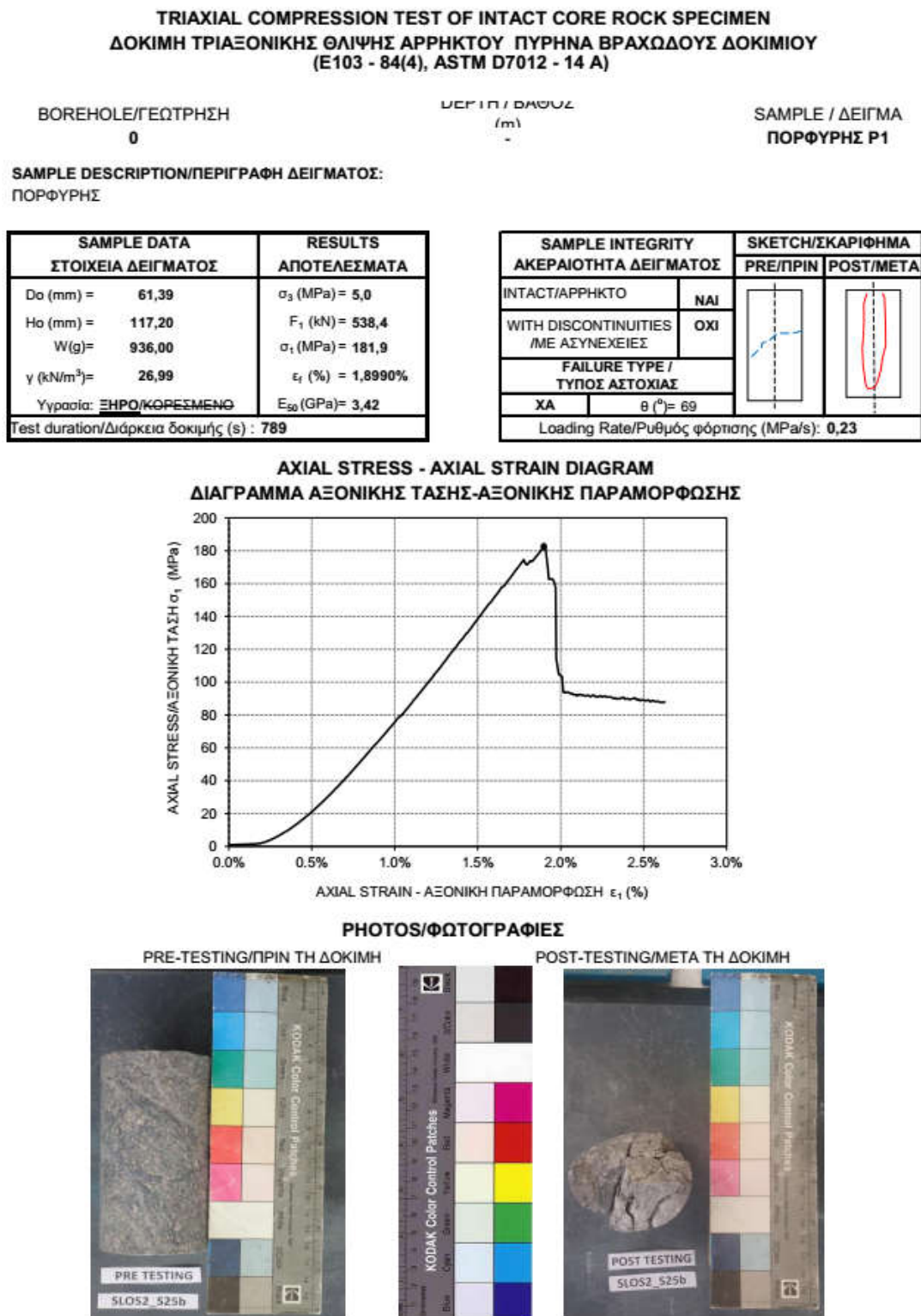
324	249758,188	84,40654	0,74741	0,00638	0,01079
327	253680,063	85,73195	0,75862	0,00647	0,01088
330	257218,344	86,92772	0,77074	0,00658	0,01099
333	260962,25	88,19299	0,78199	0,00667	0,01108
336	264588,469	89,41848	0,79361	0,00677	0,01118
339	268427,188	90,71578	0,80678	0,00688	0,01129
342	272069,188	91,94661	0,81714	0,00697	0,01138
345	275759,781	93,19386	0,82919	0,00707	0,01148
348	279539,656	94,47128	0,84122	0,00718	0,01159
351	283008,344	95,64353	0,85215	0,00727	0,01168
354	286856,063	96,94388	0,8645	0,00738	0,01179
357	290566,344	98,19778	0,87548	0,00747	0,01188
360	294276,531	99,45165	0,88748	0,00757	0,01198
363	298155,625	100,7626	0,89922	0,00767	0,01208
366	301786,219	101,98957	0,91189	0,00778	0,01219
369	305665,625	103,30063	0,9233	0,00788	0,01229
372	309393,594	104,56051	0,93448	0,00797	0,01238
375	313221,219	105,85406	0,94616	0,00807	0,01248
378	316512,188	106,96626	0,9581	0,00817	0,01258
381	320431	108,29063	0,96966	0,00827	0,01268
384	324381,656	109,62577	0,98181	0,00838	0,01279
387	328190,875	110,9131	0,99301	0,00847	0,01288
390	332274,781	112,29327	1,00475	0,00857	0,01298
393	336109,438	113,58921	1,01689	0,00868	0,01309
396	340069,031	114,92736	1,02814	0,00877	0,01318
399	344101,906	116,29028	1,0398	0,00887	0,01328
402	348053,813	117,62585	1,05182	0,00897	0,01338
405	351888,313	118,92172	1,06363	0,00908	0,01349
408	355765,625	120,23208	1,07496	0,00917	0,01358
411	359416	121,46573	1,08722	0,00928	0,01369
414	363521,719	122,85327	1,09937	0,00938	0,01379
417	367261,344	124,11709	1,11037	0,00947	0,01388
420	370743,281	125,29382	1,12219	0,00957	0,01398
423	374546,406	126,57909	1,13416	0,00968	0,01409
426	378491,469	127,91235	1,14569	0,00978	0,01419
429	382585,563	129,29596	1,15721	0,00987	0,01428
432	385135,313	130,15765	1,16944	0,00998	0,01439
435	388926,406	131,43886	1,18028	0,01007	0,01448
438	393020,781	132,82257	1,19287	0,01018	0,01459
441	396894,469	134,1317	1,20368	0,01027	0,01468
444	401079,219	135,54594	1,21585	0,01037	0,01478
447	405120,188	136,91161	1,22756	0,01047	0,01488
450	409285,781	138,31938	1,2401	0,01058	0,01499
453	413317,906	139,68204	1,25104	0,01067	0,01508
456	417295,594	141,02632	1,263	0,01078	0,01519
459	421417,813	142,41943	1,27458	0,01088	0,01529
462	425380,844	143,75874	1,28566	0,01097	0,01538
465	429541,563	145,16487	1,29822	0,01108	0,01549
468	433634,219	146,548	1,30977	0,01118	0,01559
471	437446,875	147,8365	1,32153	0,01128	0,01569
474	440053,281	148,71735	1,33359	0,01138	0,01579
477	443906,969	150,01971	1,34456	0,01147	0,01588
480	447956,531	151,38828	1,35648	0,01157	0,01598
483	451964,969	152,74294	1,368	0,01167	0,01608
486	455861,719	154,05986	1,38035	0,01178	0,01619
489	459768,25	155,38008	1,39159	0,01187	0,01628
492	463694,25	156,70688	1,40318	0,01197	0,01638
495	467724,875	158,06905	1,41508	0,01207	0,01648
498	468953,156	158,48415	1,42674	0,01217	0,01658

501	472754,719	159,76889	1,43856	0,01227	0,01668
504	476918,75	161,17615	1,45023	0,01237	0,01678
507	480807,219	162,49026	1,46191	0,01247	0,01688
510	484927,5	163,88272	1,47388	0,01258	0,01699
513	488900,625	165,22545	1,48495	0,01267	0,01708
516	493019,344	166,61739	1,49705	0,01277	0,01718
519	497172,063	168,02081	1,50883	0,01287	0,01728
522	501211,313	169,38589	1,52095	0,01298	0,01739
525	504907,219	170,63493	1,53234	0,01307	0,01748
528	508796,5	171,94933	1,54405	0,01317	0,01758
531	512617,938	173,2408	1,55548	0,01327	0,01768
534	516537,344	174,56537	1,56658	0,01337	0,01778
537	508974,531	172,00949	1,57875	0,01347	0,01788
540	507570,969	171,53516	1,59069	0,01357	0,01798
543	511519,75	172,86966	1,60333	0,01368	0,01809
546	514635,938	173,92278	1,61441	0,01377	0,01818
549	513407,688	173,50769	1,626	0,01387	0,01828
552	517051,313	174,73906	1,63794	0,01398	0,01839
555	520802,938	176,00694	1,64941	0,01407	0,01848
558	524621,188	177,29733	1,66119	0,01417	0,01858
561	528522,5	178,61578	1,67339	0,01428	0,01869
564	532240,875	179,87242	1,68487	0,01438	0,01879
567	535847	181,09113	1,69627	0,01447	0,01888
570	538372,875	181,94475	1,70872	0,01458	0,01899
573	536396,188	181,27672	1,72078	0,01468	0,01909
576	496888,125	167,92485	1,73755	0,01483	0,01924
579	481890,813	162,85646	1,74248	0,01487	0,01928
582	481765,844	162,81424	1,75499	0,01497	0,01938
585	482243,313	162,9756	1,76707	0,01508	0,01949
588	478193,313	161,60689	1,77814	0,01517	0,01958
591	467218,188	157,89781	1,79063	0,01528	0,01969
594	338743,844	114,47952	1,79528	0,01532	0,01973
597	310112,375	104,80342	1,81312	0,01547	0,01988
600	307921,094	104,06287	1,82537	0,01557	0,01998
603	305304,063	103,17844	1,83684	0,01567	0,02008
606	277726,375	93,85847	1,84633	0,01575	0,02016
609	276756,75	93,53078	1,86005	0,01587	0,02028
612	277749,719	93,86636	1,87194	0,01597	0,02038
615	277600,594	93,81596	1,88328	0,01607	0,02048
618	275020,063	92,94387	1,89529	0,01617	0,02058
621	275723,219	93,1815	1,90706	0,01627	0,02068
624	273166,969	92,31761	1,91918	0,01638	0,02079
627	273619,875	92,47067	1,93271	0,01649	0,0209
630	270917,531	91,5574	1,94249	0,01657	0,02098
633	273080,031	92,28823	1,95377	0,01667	0,02108
636	273356,844	92,38177	1,96595	0,01677	0,02118
639	272477,375	92,08456	1,97777	0,01688	0,02129
642	272437,281	92,07101	1,99122	0,01699	0,0214
645	270557	91,43556	2,00011	0,01707	0,02148
648	271986,875	91,91879	2,01272	0,01717	0,02158
651	272269,781	92,0144	2,02405	0,01727	0,02168
654	269607,469	91,11466	2,036	0,01737	0,02178
657	271286,719	91,68217	2,04825	0,01748	0,02189
660	272480,875	92,08574	2,05981	0,01758	0,02199
663	270108,844	91,2841	2,07096	0,01767	0,02208
666	268881,375	90,86928	2,08321	0,01777	0,02218
669	270338,688	91,36178	2,09478	0,01787	0,02228
672	271677,188	91,81413	2,10716	0,01798	0,02239
675	268948,75	90,89205	2,11855	0,01808	0,02249

678	270443,438	91,39719	2,12941	0,01817	0,02258
681	271115,281	91,62424	2,14167	0,01827	0,02268
684	268731,25	90,81854	2,15293	0,01837	0,02278
687	269084,75	90,93801	2,16541	0,01848	0,02289
690	268924,406	90,88382	2,1773	0,01858	0,02299
693	268292,406	90,67023	2,18877	0,01868	0,02309
696	266193,406	89,96087	2,20104	0,01878	0,02319
699	266953,781	90,21784	2,2125	0,01888	0,02329
702	265540,25	89,74014	2,22402	0,01898	0,02339
705	266291,156	89,9939	2,2361	0,01908	0,02349
708	265993,938	89,89346	2,24651	0,01917	0,02358
711	267711,125	90,47379	2,25972	0,01928	0,02369
714	268519,781	90,74708	2,27084	0,01938	0,02379
717	264963,188	89,54511	2,28221	0,01947	0,02388
720	266146,969	89,94518	2,2942	0,01958	0,02399
723	265370,75	89,68285	2,3056	0,01967	0,02408
726	264890,188	89,52045	2,3176	0,01977	0,02418
729	265363,031	89,68024	2,32914	0,01987	0,02428
732	266882,594	90,19379	2,34135	0,01998	0,02439
735	267102,375	90,26806	2,35319	0,02008	0,02449
738	263930,781	89,19621	2,36408	0,02017	0,02458
741	265117,156	89,59715	2,37628	0,02028	0,02469
744	262147,25	88,59346	2,38818	0,02038	0,02479
747	263738,281	89,13116	2,39985	0,02048	0,02489
750	263932,188	89,19669	2,41175	0,02058	0,02499
753	262298,75	88,64466	2,4229	0,02067	0,02508
756	262839,406	88,82738	2,43464	0,02077	0,02518
759	263777,844	89,14452	2,44654	0,02087	0,02528
762	260701,453	88,10485	2,45765	0,02097	0,02538
765	262050,375	88,56072	2,46999	0,02107	0,02548
768	262910,063	88,85126	2,48085	0,02117	0,02558
771	260812,875	88,1425	2,49358	0,02128	0,02569
774	260711,406	88,10822	2,5049	0,02137	0,02578
777	261574,219	88,3998	2,51686	0,02147	0,02588
780	259693,266	87,76413	2,52884	0,02158	0,02599
783	259443,891	87,67986	2,54011	0,02167	0,02608
786	259199,922	87,5974	2,55186	0,02177	0,02618
788,873	260637	88,08307	2,56303	0,02187	0,02628

Εικόνα 12. Δεδομένα ενός δοκιμίου από τον καταγραφέα του μηχανήματος.

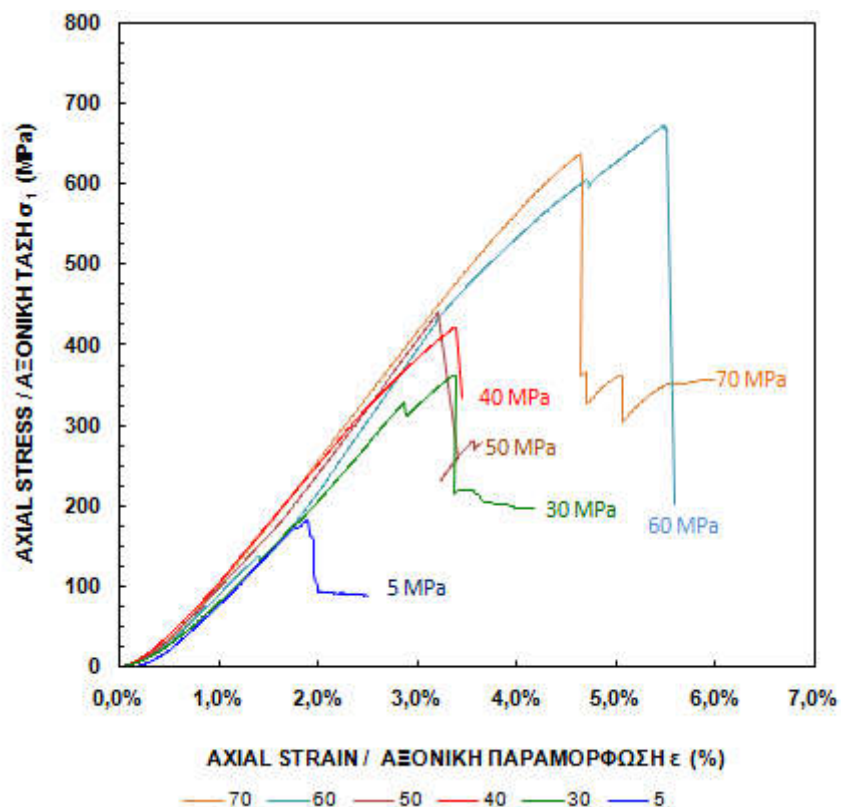
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα έντυπο πληροφοριών για ένα δοκίμιο (**ΠΟΡΦΥΡΗΣ Ρ1**) Εικόνα 13.



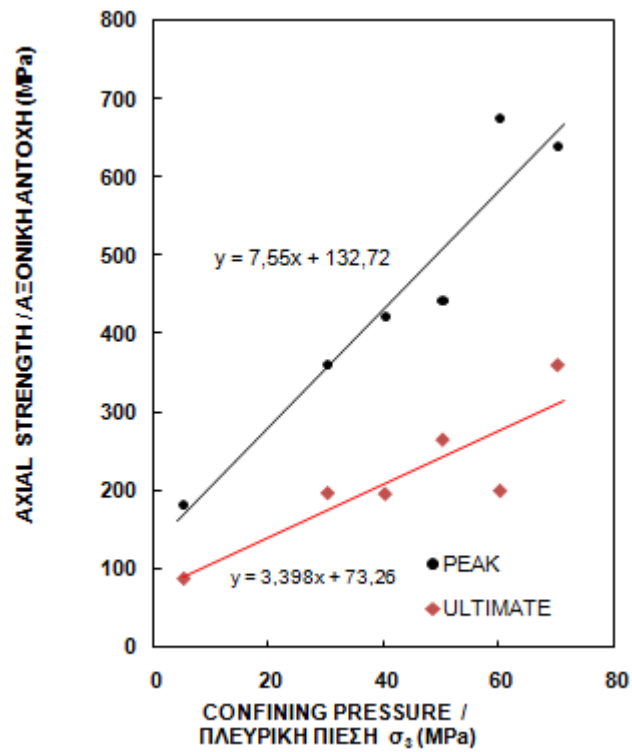
Εικόνα 13. Έντυπο πληροφοριών δοκιμίου.

ΠΟΡΦΥΡΗΣ (60-63mm)

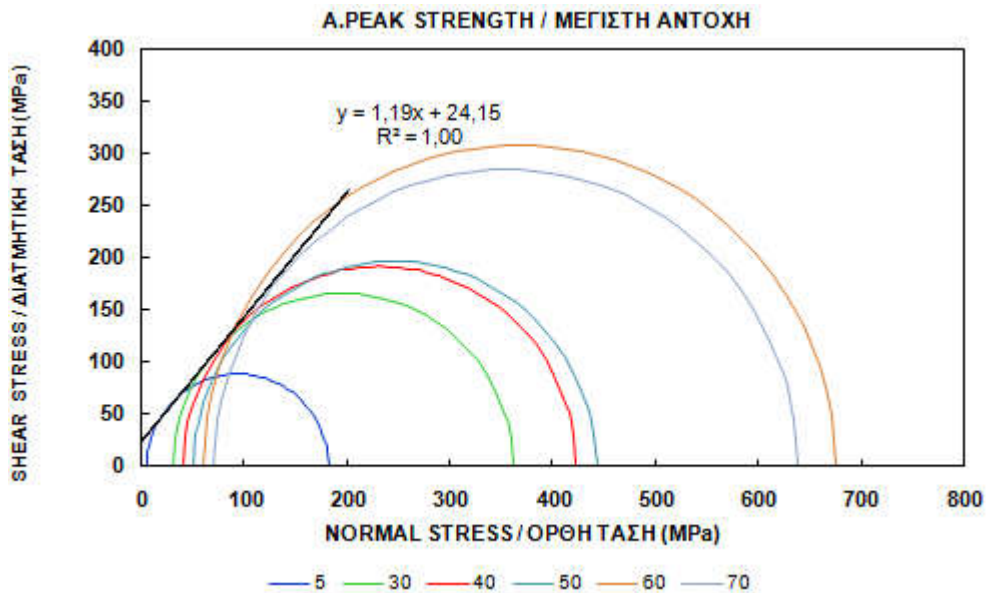
Στα παρακάτω διαγράμματα, αξονικής παραμόρφωσης-αξονική τάσης, αξονικής αντοχής-πλευρικής πίεσης, μέγιστη αντοχή και τελικής αντοχής παρουσιάζονται όλες οι τιμές της πλευρικής πίεσης που ασκήθηκαν. Φαίνεται από το διάγραμμα πως ο Πορφύρης μέχρι τα 70 MPa συμπεριφέρεται ψαθυρά και αυτό τεκμηριώνεται από την απότομη πτώση τάσης μετά την θραύση. Παρότι η πλευρική πίεση είναι πολύ κοντά στην τιμή της μονοαξονικής αντοχής του πετρώματος, αυτό δεν συμπεριφέρεται πλαστικά όπως θα αναμένονταν σύμφωνα με τον Hoek (1983).



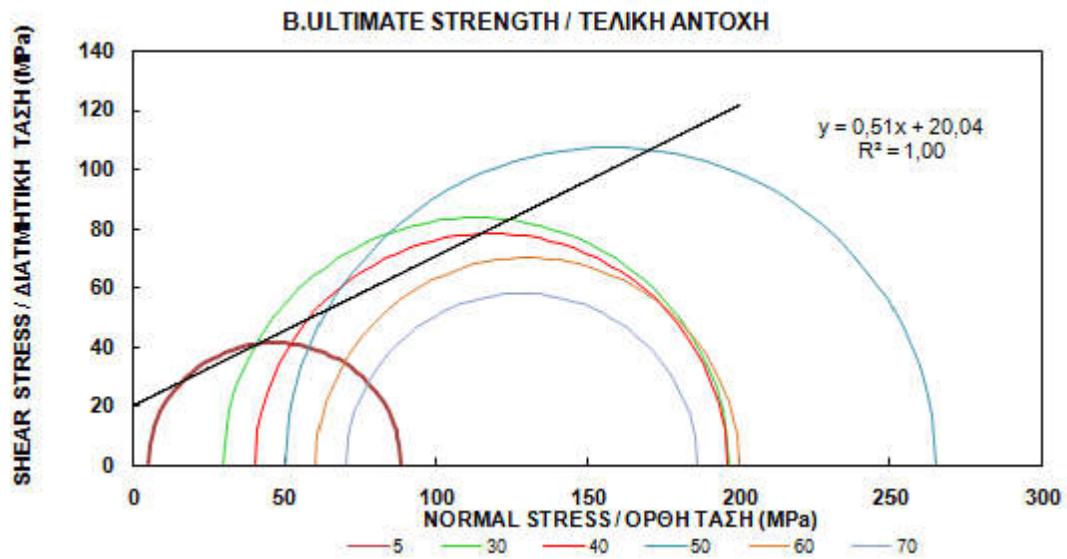
Σχήμα10. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Πορφύρη (63mm).



Σχήμα 12. Διάγραμμα μέγιστης (peak) και υπομένουσας (ultimate) αξονικής αντοχής-πλευρικής πίεσης Πορφύρη (63mm) .



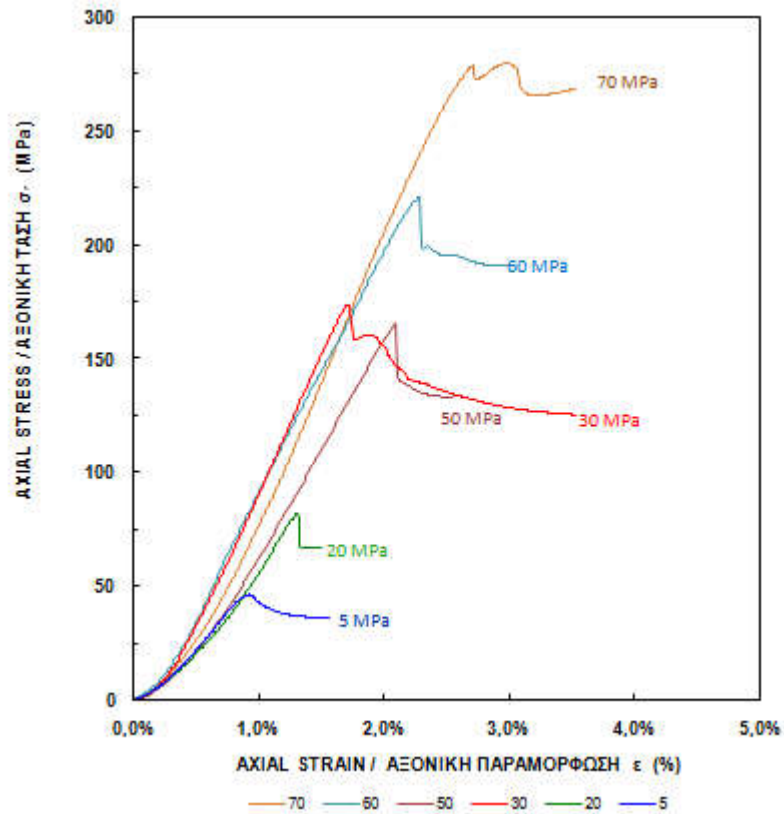
Σχήμα 13. Διάγραμμα Κύκλων Mohr μέγιστης αντοχής (peak).



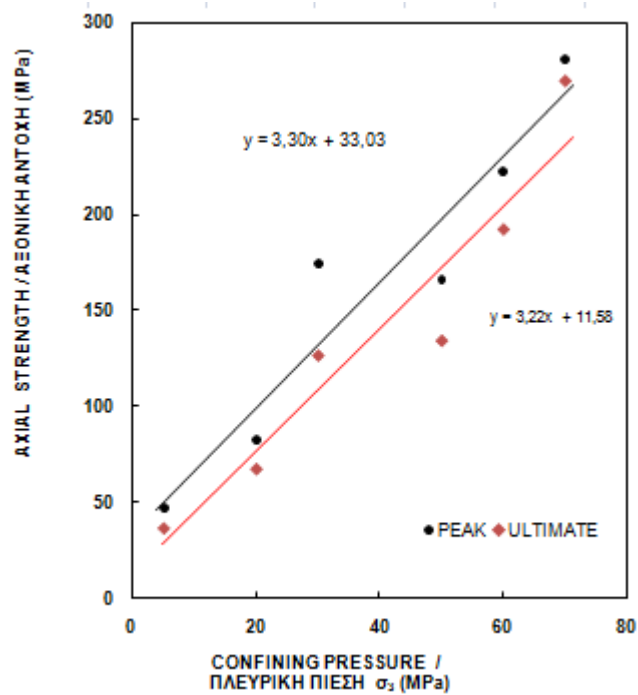
Σχήμα 14. Διάγραμμα κύκλων Mohr υπομένουσας αντοχής (ultimate).

ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ (60-63mm)

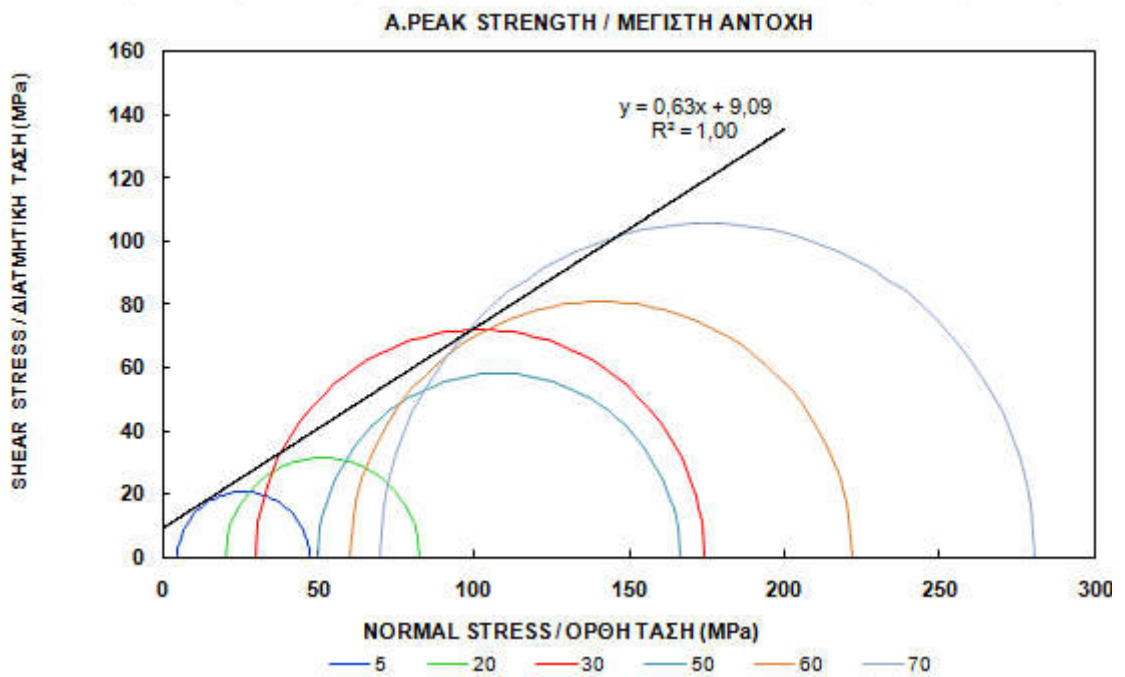
Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης-αξονική τάσης παρουσιάζονται για όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης που ασκήθηκαν. Φαίνεται από το διάγραμμα πως ο σχιστόλιθος μέχρι τα 70MPa συμπεριφέρεται ψαθυρά και αυτό τεκμηριώνεται από την πτώση τάσης μετά την θραύση. Επίσης παρουσιάζονται και τα διαγράμματα αξονικής αντοχής-πλευρικής πίεσης, μέγιστης αντοχής και τελικής αντοχής.



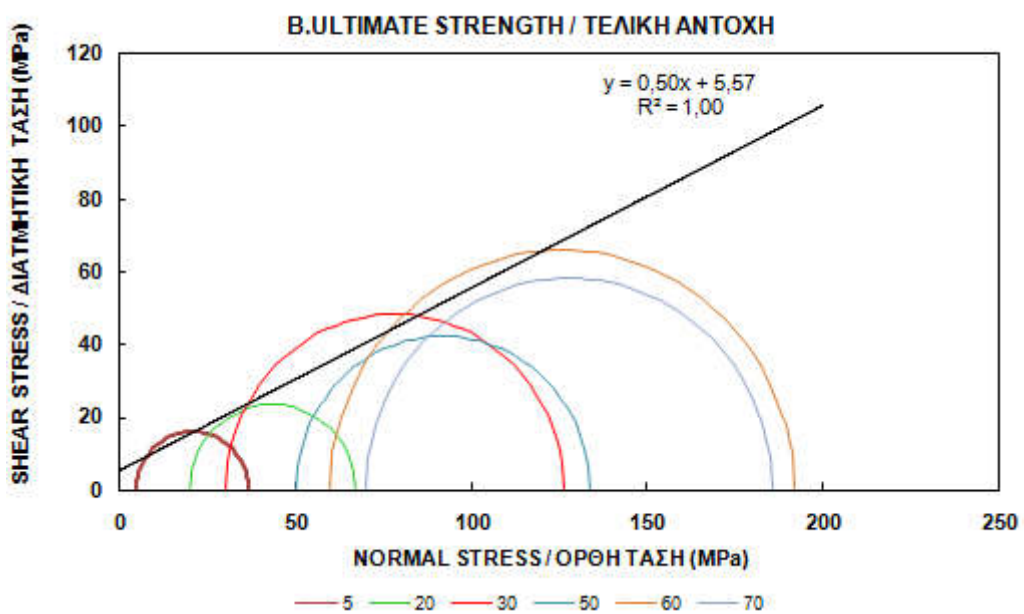
Σχήμα 15. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Σχιστόλιθο (60-63mm).



Σχήμα 16. Διάγραμμα μέγιστης (peak) και υπομένουσας (ultimate) αξονικής αντοχής-πλευρικής πίεσης Σχιστόλιθου (63mm).



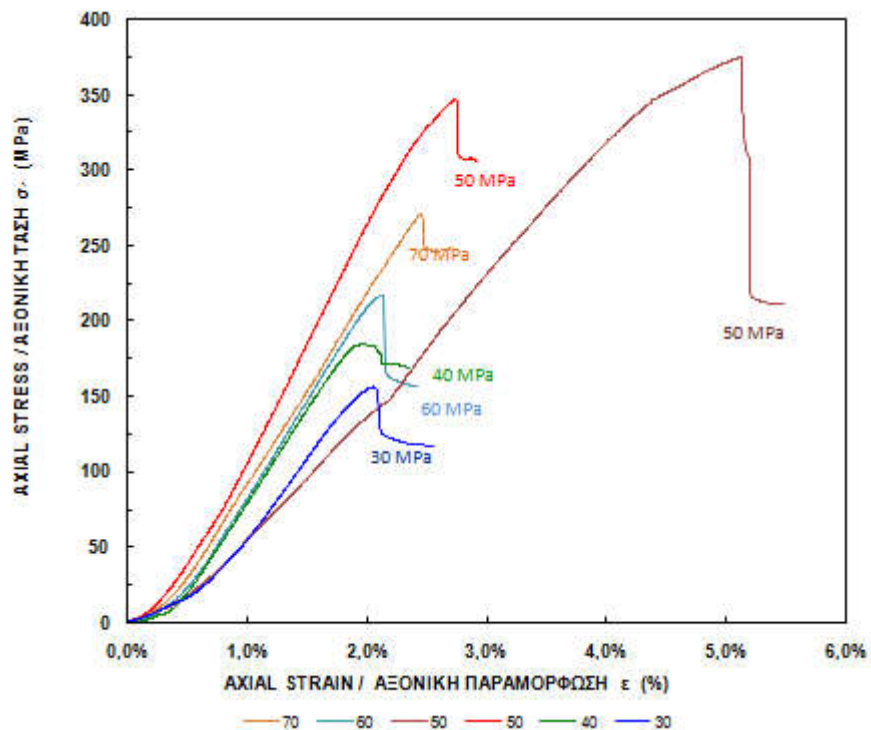
Σχήμα 17. Διάγραμμα Κύκλων Mohr μέγιστης αντοχής (peak).



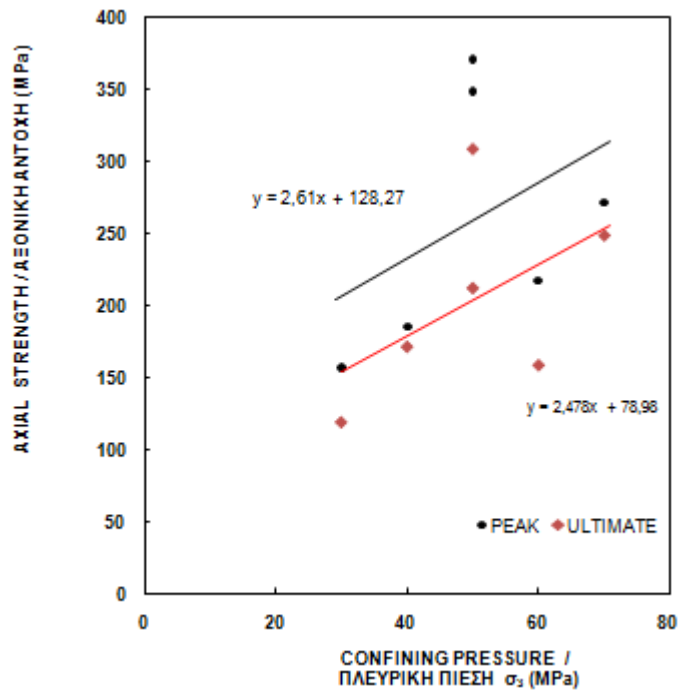
Σχήμα 18. Διάγραμμα κύκλων Mohr υπομένουσας αντοχής (ultimate).

ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ (54mm)

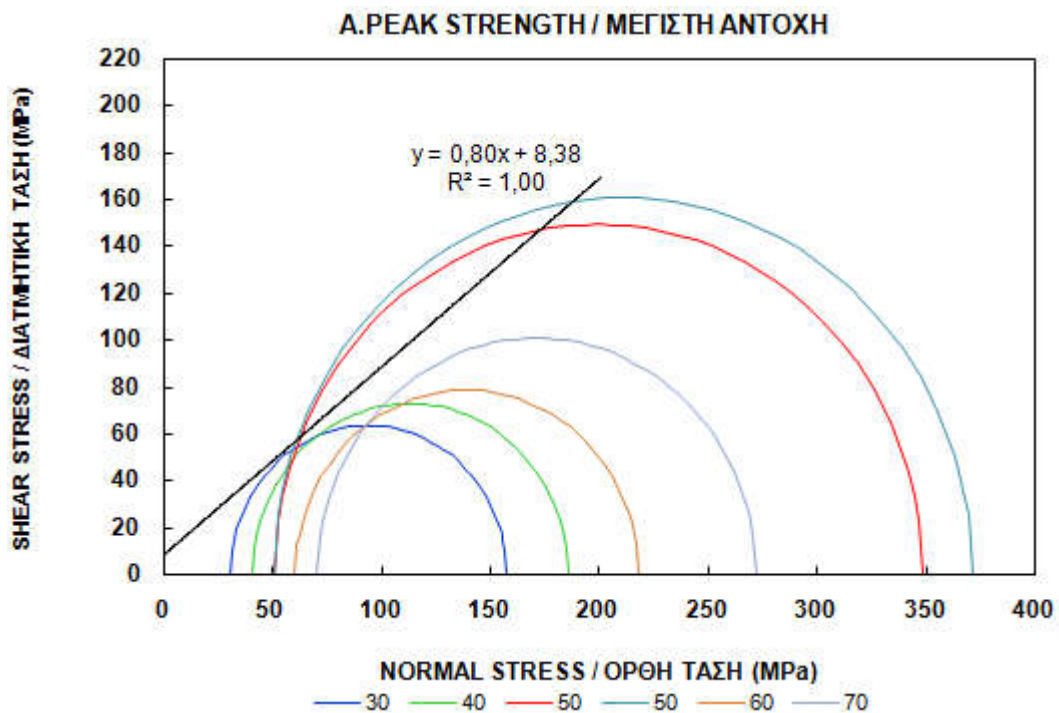
Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης-αξονική τάσης παρουσιάζονται για όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης που ασκήθηκαν. Φαίνεται από το διάγραμμα πως ο Σχιστόλιθος μέχρι τα 70MPa συμπεριφέρεται ψαθυρά και αυτό τεκμηριώνεται από την πτώση τάσης μετά την θραύση. Επίσης παρουσιάζονται και τα διαγράμματα αξονικής αντοχής-πλευρικής πίεσης, μέγιστης αντοχής και τελικής αντοχής.



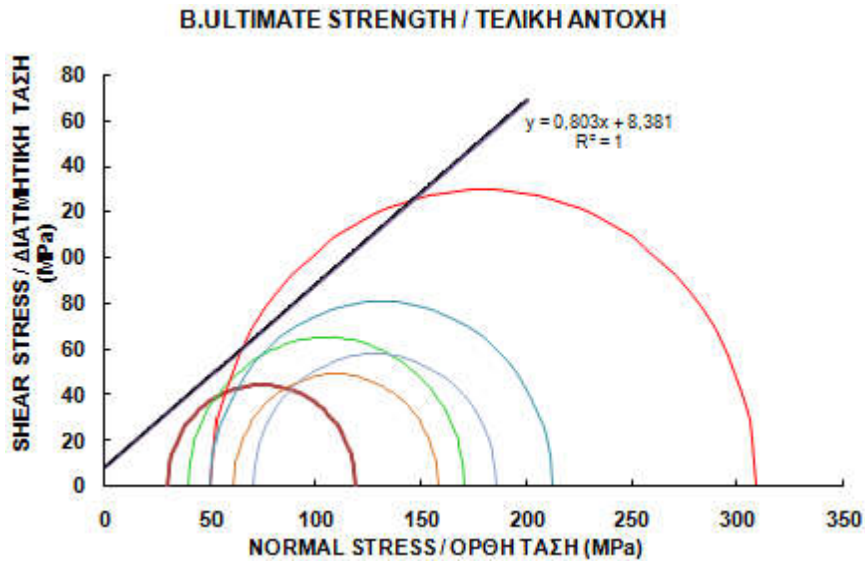
Σχήμα19. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Σχιστόλιθο (54mm).



Σχήμα 20. Διάγραμμα μέγιστης (peak) και υπομένουσας (ultimate) αξονικής αντοχής-πλευρικής πίεσης Σχιστόλιθου (54mm)

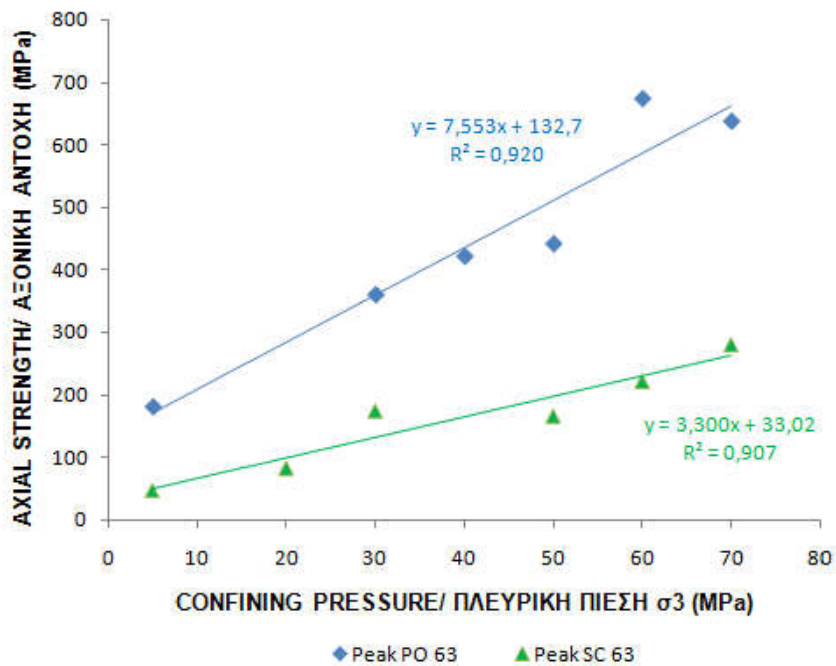


Σχήμα 21. Διάγραμμα Κύκλων Mohr μέγιστης αντοχής (peak).

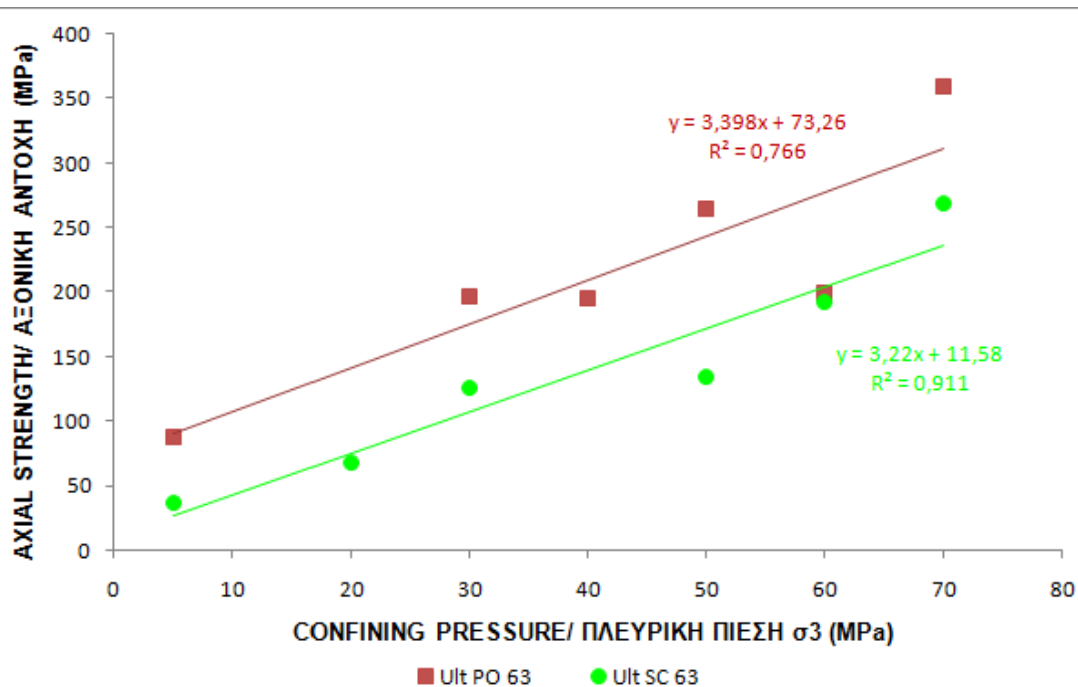


Σχήμα 22. Διάγραμμα κύκλων Mohr υπομένουσας αντοχής (ultimate).

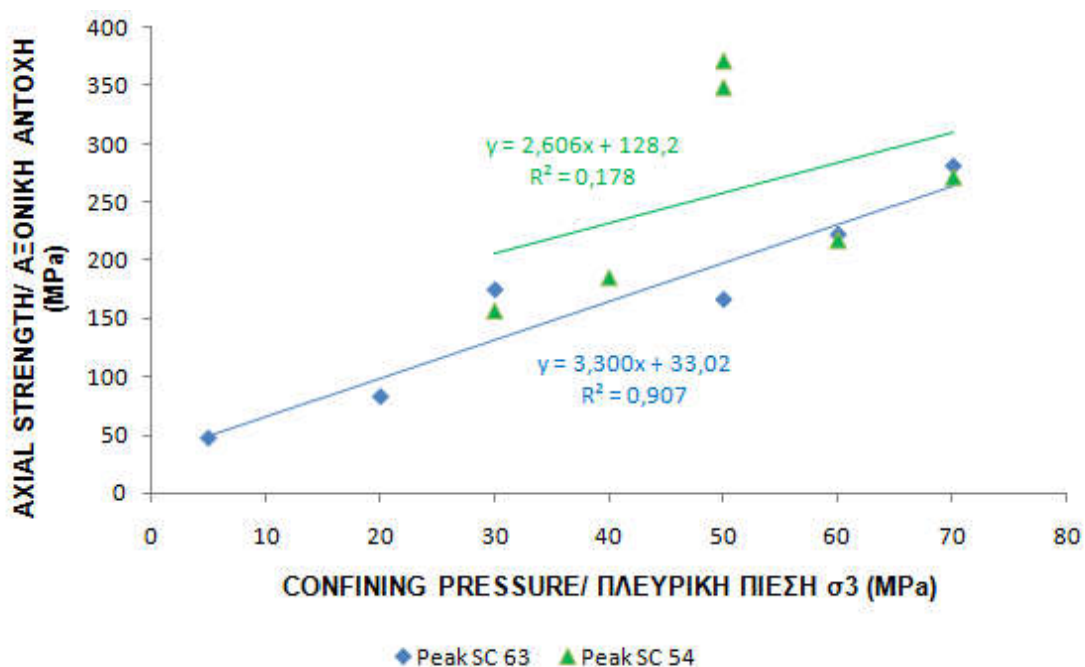
4.2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ



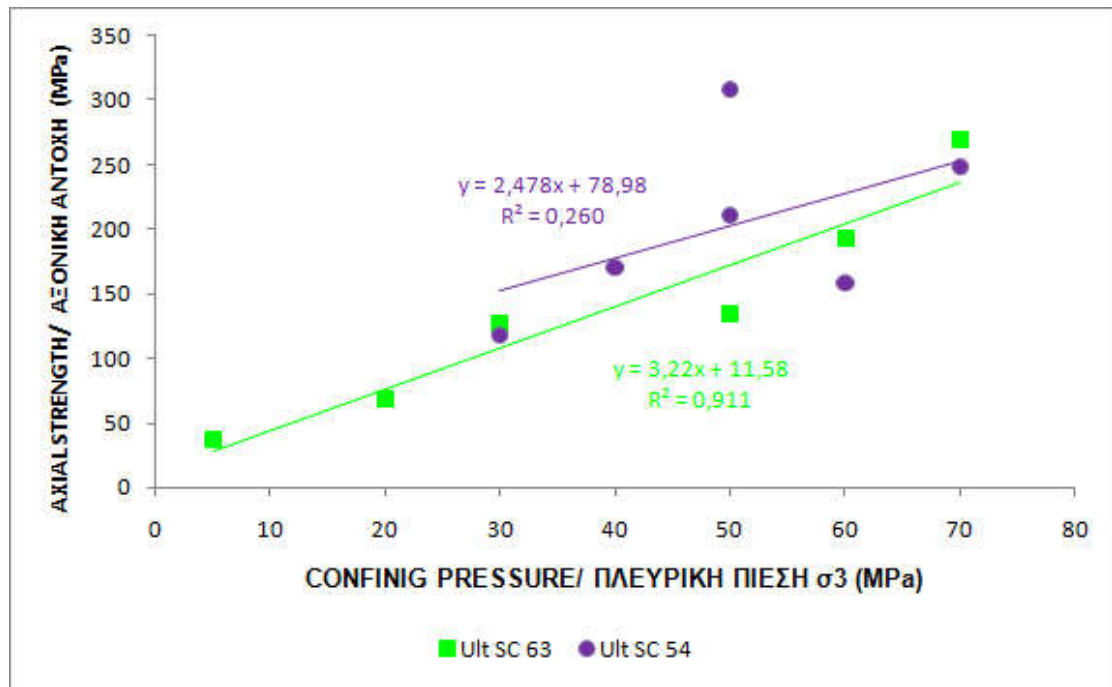
Σχήμα 23. Διάγραμμα συγκρίσεως - συσχετίσεως μέγιστης (peak) αξονικής αντοχής - πλευρικής πίεσης του Πορφύρη (63mm) με τον Σχιστόλιθο (63mm).



Σχήμα 24. Διάγραμμα συγκρίσεως - συσχετίσεως υπομένουσας αξονικής αντοχής - πλευρικής πίεσης του Πορφύρη (63mm) με τον Σχιστόλιθο (63mm).



Σχήμα 25. Διάγραμμα συγκρίσεως - συσχετίσεως μέγιστης (peak) αξονικής αντοχής - πλευρικής πίεσης του Σχιστόλιθου (63mm) με τον Σχιστόλιθο (54mm).



Σχήμα 26. Διάγραμμα συγκρίσεως - συσχετίσεως υπομένουσας αξονικής αντοχής - πλευρικής πίεσης του Σχιστόλιθου (63mm) με τον Σχιστόλιθο (54mm).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Σκοπός της πτυχιακής ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς σε τριαξονική θλίψη πορφύρη και σχιστόλιθου, με ιδιαίτερη έμφαση στην επίδραση του μεγέθους των δοκιμών. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 18 Κυλινδρικά δοκίμια δυο μεγεθών με διάμετρο $D= 54,7 \text{ mm}$ και $63,5 \text{ mm}$ με σχέση ύψους προς διάμετρο $H:D=2$, τα οποία υποβλήθηκαν σε τριαξονική θλίψη με πλευρικές πιέσεις στο εύρος 5-70 MPa.

Από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε τόσο με τη χρήση διαγραμμάτων κύκλων Mohr όσο και με διαγράμματα αξονικής αντοχής – πλευρικής πίεσης ($\sigma_1-\sigma_3$), προέκυψαν τα εξής:

1. Όπως είναι αναμενόμενο ο πορφύρης ως πυριγενές πέτρωμα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από το σχιστόλιθο.

Οι παράμετροι m_i , και σ_{ci} του κριτηρίου Hoek & Brown είναι:

Πορφύρης: $m_i = \dots$, $\sigma_{ci} = \dots$ MPa

Σχιστόλιθος: $m_i = \dots$, $\sigma_{ci} = \dots$ MPa

2. Η αντοχή σε τριαξονική θλίψη μειώνεται με την αύξηση της διαμέτρου των δοκιμίων.
 Η μείωση αυτή είναι της τάξεως του ...% για τον πορφύρη και% για το σχιστόλιθο, και είναι μεγαλύτερη(?) για υψηλότερες τάσεις.
 Η μείωση αυτή της αντοχής με την αύξηση του μεγέθους του δοκιμίου είναι σύμφωνη με βιβλιογραφικά στοιχεία.
3. Για την γενίκευση των αποτελεσμάτων αυτών απαιτούνται περισσότερες δοκιμές σε μεγαλύτερο εύρος τύπων πετρωμάτων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alejano LR, Javier G, Muralha J (2012). Comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment. *Rock Mech Rock Eng*, 45,1023–1035
- Amontons G (1699) De la re'sistance cause'e dans les machines. *Memoires de l'Academie Royale A*, 257–282
- Amidu Jimoh Oladeji (1997). Η έρευνα του Γρανίτη Αρναίας νομού Χαλκιδικής από Γεωλογική και Πετρογραφική άποψη. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη
- Bandis S, Lumsden AC, Barton NR (1981) Scale effects on the shearbehavior of rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*,18,1–21
- Barton N.R (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engng Geology*, 7 , 287-232
- Barton N (1976). The shear strength of rock and rock joints . *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, 13, 255-279
- Barton N (2013). Shear strength criteria for rock , rock joints , rockfill and rock masses : Problems and some solutions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5, 249-261
- Barton N. (2000). *Rock Mechanics Review*, 13, 255-279.
- Barton N, Choubey V (1977). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*, 10, 1–54
- Brown ET (ed) (1981). Suggested methods for determining shear strength. In: *Rock characterisation testing and monitoring*, Pergamon Press, Oxford, pp 129–140
- Bodwen F.P & Tabor D (1950). *The Friction and Lubrication of Solids*. Claredon Press. Oxford

- Bulgarian Academy of Sciences (2015). Personal communication.
- Buzzi O, Sieffert Y, Mendes J, Liu X (2013). Strength of Australian coal under low confinement. *Rock Mech Rock Eng.* doi:10.1007/s00603-013-0493-5
- Byerlee, J.D. (1978). Friction of rocks. *Pure & Appl. Geophys*, 116, 615-626.
- Deere, D. U. & Miller R. P (1966). Engineering classification and index properties of rock. Tech. Report Air Force Weapons Lab. New Mexico, 65-116.
- Dunham R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.* No 1.
- Fecker E, Rengers N (1971). Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass. In: *Proceedings symposium on rock fracture*, Nancy, France, 1–18
- Greenwood J.A & Williamson J.B.P (1966). Contact of nominally flat surfaces. *Proc. Royal Society, A* 295, 300-319.
- Griffith A. A. (1921) The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil Trans. Royal Soc., London* , Series A, 221,163-198
- Griffith A. A. (1924) Theory of rupture , *Proc. Intern. Congress Appl. Mech.* , Delft, 55-63.
- Goodman R. E & Dubois J. (1972). Duplication of dilatancy in analysis of jointed rock. *J. Soil Mech. & Found. Div.* , *Proc. ASCE* 98, SM4, 399-422.
- Hencher S.R & Richards L.R (1989). Laboratory direct shear testing on rock discontinuities. *Ground Engng* 22, 24-31
- Hencher S. Richards L. (2014). Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 883-905
- Hoek E (1968). Brittle failure of rock. In: *Stagg KG, Zienkiewicz OC(eds) Rock mechanics in engineering practice*. Wiley, London, 99–124
- Hoek E, Brown ET (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *J Geotech Eng Div ASCE* 106(GT9):1013–1035
- Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses, 23rd. Rankine Lecture. *Géotechnique*. 33 (3), 187-223
- Hoek E. ,Kaiser P. K., Bawden W. F., (1995) *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema, Rotterdam/Brookfield.
- Hoek E, Brown ET (1997) Practical estimates of rock mass strength. *Int J Rock Mech Min Sci* 34(8),1165–1186

- Hoek, E., & Martin, C. D. (2014). Fracture initiation and propagation in intact rock .
Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering , 6, 287-300
- International Society for Rock Mechanics Commission on Standardisation of
Laboratory and Field Tests. (1978). Suggested methods for the quantitative
description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. &
Geomech. Abstr.15, 319-368.
- Καντηράνης Ν (2014). Πετρογραφική και ορυκτολογική μελέτη ασβεστόλιθου
Μεσαίου Θεσσαλονίκης, Lafarge beton ABEE
- Kaiser PK, Diederichs MS, Martin CD, Sharp J, Steiner W (2000). Underground
works in hard rock tunneling and mining. Geo Eng 2000, An international
conference on geotechnical and geological
- Kaiser PK, B-H Kim (2008) Rock mechanics challenges in underground construction
and mining. Lecture notes in, 1st Southern hemisphere international rock
mechanics symposium, 1,23–38
- Lechnitz W. (1985). Mechanical properties of rock joints. Int. J. Rock Mech. Min.
Sci. & Geomech. Abstr. 22, 313-321.
- Marinos, P. & Hoek, E. "GSI: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength
Estimation". International Conference on Geotechnical & Geological
Engineering (GeoEng 2000), Technomic publ., 1422-1442, Melbourne (2000)
- McClintock F. A, Walsh J. B. (1962) Friction on Griffith cracks under pressure, Proc.
4th National Congress Appl.Mech. , 1015-1021
- Mogi K (1966) Pressure dependence of rock strength and transition from brittle
fracture to ductile flow. Bull Earthq Res Inst, 44,215–232
- Mogi K. (1972).Fracture and flow of Rocks. Tectonophysics, 13, 541-568.
- Mogi K. (1974). On the pressure dependence of strength of rocks and the Coulomb
fracture criterion. Tectonophysics, 21, 273-285.
- Mogi K. (2007). Experimental Rock Mechanics. Taylor & Francis Group. London,
UK.
- Nicholson GA (1994) A test is worth a thousand guesses—a paradox. In: Nelson,
Laubach (eds) Proceedings of 1st NARMS symposium, 523–529
- Orowan E.(1960). Mechanism of seismic faulting. Geol. Soc. Amer. Memoirs 79,
323-345.
- Papaliangas T, Hencher S. & Lumsden A. (1995). A comprehensive peak shear
strength criterion for rock joints. Proc. 8th Int. Congress ISRM, Tokyo, 1,359-
366.

- Papaliangas T. Lumsden A. & Hencher S. (1996). Prediction of in situ peak shear strength of rock joints. EUROCK' 96. Proc. Int. Symp on Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering. Barla G(ed.), 1, 143-149. Rotterdam : Balkema.
- Papaliangas T. (1997) Origin and Magnitude of Shear Resistance of Rocks. 3rd Hellenic conference on geotechnical engineering. 1, 145-152
- Papaliangas T. (1997) A New Peak Shear Strength Criterion for Rock Joints, 3rd Hellenic conference on geotechnical engineering, 1, 153-159
- Papaliangas T. Manolopoulou S. Lumsden A. Hencher S. (1997) Applications of a New Peak Shear Strength Criterion for Rock Joints. 3rd Hellenic conference on geotechnical engineering, 1, 161-168
- Paterson MS (1958) Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble. Bull Geol Soc Am 69,476–485
- Patton F.D (1966). Multiple modes of shear failure in rock and related materials. Ph.D. Thesis, Univ. Illinois, U.S.A
- Patton FD, Deere DU (1970) Significant geological factors in rock slope stability. In: Proceedings symposium on planning open pitmines. A.A. Balkema, Johannesburg, 143–151
- Richards, S. R. H and Richards L. (2014). Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales. Rock Mech. and Rock Eng 48, 883- 905
- Schneider H.J (1976). The friction and deformation behavior of rock joints. Rock Mech. 8,169-184.
- Τσουτρέλης Χ. (1985). Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα.
- Τσιραμπίδης Α. (1996). Τα ελληνικά μάρμαρα και άλλα διακοσμητικά πετρώματα, University Studio Press
- Terzaghi K. (1925). The physical causes of proportionality between pressure and frictional resistance, from Erdbaumechanik, transl. by A. Casagrande in: From theory to practice in soil mechanics. Wiley and Sons.