



Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Διπλωματική Εργασία

«Σύγκριση αποτελεσμάτων συμβατικής
τριαξονικής δοκιμής και πολυεπίπεδης
τριαξονικής δοκιμής σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο»

ΚΕΧΑΓΙΑΣ Α. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Εξεταστική Επιτροπή

Αγιουτάντης Ζαχαρίας (Επιβλέπων), Καθηγητής

Εξαδάχτυλος Γεώργιος, Καθηγητής

Καικλής Κωνσταντίνος, Δρ

Χανιά, Ιούνιος 2012

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο, εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία συγκρίνονται τα αποτελέσματα που εξάγονται από συμβατικές τριαξονικές δοκιμές θλίψης σε σχέση με τις πολυεπίπεδες τριαξονικές δοκιμές θλίψης σε δοκίμια βιοκλαστικού ασβεστόλιθου (Αλφά). Κατά την πολυεπίπεδη τριαξονική δοκιμή θλίψης, τα δοκίμια φορτίζονται μέχρι την έναρξη της πλαστικής περιοχής, στη συνέχεια αποφορτίζονται, αυξάνεται η πλευρική πίεση και φορτίζονται μέχρι το επόμενο αντίστοιχο βήμα. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την παραπάνω πειραματική διαδικασία στα δοκίμια του Αλφά έδειξαν ότι η πολυεπίπεδη τριαξονική δοκιμή δίνει αποτελέσματα χαμηλότερα από αυτά που λαμβάνονται από τις συμβατικές τριαξονικές δοκιμές. Τέλος, προτείνονται διάφοροι τρόποι ελέγχου των αποτελεσμάτων τέτοιων δοκιμών.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	V
Κατάλογος διαγραμμάτων.....	VI
Κατάλογος εικόνων	VII
Κατάλογος σχημάτων	VIII
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2	3
Ιδιότητες των πετρωμάτων και κριτήρια αστοχίας τους	3
2.1 Γενικά	3
2.2 Ιδιότητες των πετρωμάτων	4
2.2.1 Κατηγοριοποίηση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων	4
2.2.2 Φυσικές ιδιότητες.....	5
2.2.3 Μηχανικές ιδιότητες.....	9
2.2.4 Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες του Αλφά.....	11
2.3 Κριτήρια Αστοχίας	13
Κεφάλαιο 3.....	16
Εργαστηριακές Δοκιμές Προσδιορισμού της Αντοχής σε Θλίψη	16
3.1 Γενικά	16
3.2 Μονοαξονική, Ανεμπόδιση Θλίψη και Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης	17
3.2.1 Μονοαξονική, Ανεμπόδιση Θλίψη.....	17
3.2.2 Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης	21
2.2.5 Συσχετισμός της Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη με τον Δείκτη Σημειακής Φόρτισης	25
3.3 Τριαξονική Θλίψη (Triaxial Test)	28
3.4 Τριαξονική, Πολυεπίπεδη Δοκιμή (Multi - Stage Triaxial Test) ..	29

Κεφάλαιο 4.....	31
Πειραματική διαδικασία και επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων	31
4.1 Μορφοποίηση δοκιμίων	31
4.2 Εξοπλισμός	32
4.3 Δοκιμή Ανεμπόδιστης Μονοαξονικής Θλίψης (Uniaxial Test) ..	37
4.3.1 Πειραματική διαδικασία	37
4.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	38
4.4 Τριαξονική Δοκιμή (Triaxial Test).....	47
4.4.1 Πειραματική διαδικασία	47
4.4.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	47
4.5 Τριαξονική, Πολυεπίπεδη Δοκιμή (Multi - Stage Triaxial Test) ..	52
Κεφάλαιο 5.....	60
Συμπεράσματα και προτάσεις	60
5.1 Συμπεράσματα	60
5.2 Προτάσεις	61
Βιβλιογραφία	64
Διεθνής Βιβλιογραφία	64
Ελληνική Βιβλιογραφία	64

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών του Αλφά.	12
Πίνακας 3.1 Ταξινόμηση ακέραιου πετρώματος με βάση το δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (Bieniawski, 1975).....	25
Πίνακας 4.1 Μακροσκοπική περιγραφή των δοκιμών.....	32
Πίνακας 4.2 Μέγιστη τάση που δέχτηκε κάθε δοκίμιο και η αντίστοιχη παραμόρφωση.....	46
Πίνακας 4.3 Μέγιστη τάση που δέχτηκε κάθε δοκίμιο στις αντίστοιχες πλευρικές τάσεις και παραμορφώσεις.....	49
Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα τριαξονικής πολυεπίπεδης δοκιμής για το δοκίμιο No.9.....	54
Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα τριαξονικής πολυεπίπεδης δοκιμής για το δοκίμιο No.16.....	54
Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα τριαξονικής πολυεπίπεδης δοκιμής για το δοκίμιο No.15.....	54

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1 Σχέση της USC ως προς $I_{s(50)}$ για όλα τα εξεταστέα πετρώματα (Akram και Bakar 2005).....	27
Διάγραμμα 3.2 Σχέση της USC ως προς τον $I_{s(50)}$ για την ομάδα Α.....	27
Διάγραμμα 3.3 Σχέση της USC ως προς τον $I_{s(50)}$ για την ομάδα Β (Akram και Bakar 2005)	28
Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.1..	40
Διάγραμμα 4.2 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.2.	41
Διάγραμμα 4.3 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.3..	42
Διάγραμμα 4.4 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.4..	43
Διάγραμμα 4.5 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.5..	44
Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.6..	45
Διάγραμμα 4.7 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.7, πλευρικής πίεσης $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$	48
Διάγραμμα 4.8 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.8, πλευρικής πίεσης $\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$	48
Διάγραμμα 4.9 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.10, πλευρικής πίεσης $\sigma_3 = 6 \text{ MPa}$	49
Διάγραμμα 4.10 « σ_1 vs σ_3 » για τα δοκίμια Νο.7 και Νο.10	50
Διάγραμμα 4.11 Κύκλοι του Mohr για το σύνολο των τριαξονικών δοκιμών	51
Διάγραμμα 4.12 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.9, σε πλευρικές πιέσεις: 2,1 MPa / 3,68 MPa / 5,26 MP	52
Διάγραμμα 4.13 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.16, σε πλευρικές πιέσεις: 2,1 MPa / 3,68 MPa / 5,26 MP	53
Διάγραμμα 4.14 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωση δοκιμίου Νο.15, σε πλευρικές πιέσεις: 2,1 MPa / 3,68 MPa / 5,26 MP	53
Διάγραμμα 4.15 « σ_1 vs σ_3 » για το δοκίμιο Νο.9	55
Διάγραμμα 4.16 « σ_1 vs σ_3 » για το δοκίμιο Νο.16	55
Διάγραμμα 4.17 « σ_1 vs σ_3 » για το δοκίμιο Νο.15	56
Διάγραμμα 4.18 Κύκλοι του Mohr για το δοκίμιο Νο.9	57
Διάγραμμα 4.19 Κύκλοι του Mohr τους για το δοκίμιο Νο.15.....	58
Διάγραμμα 4.20 Κύκλοι του Mohr για το δοκίμιο Νο.16	59

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1 Παρατήρηση ευεδρικών φαινοκρυστάλλων του ορυκτού ολιβίνη, σε μικροκρυσταλλική μάζα και ύαλο (Πηγή: Χατζηθεοδωρίδης 2003, 2004)	5
Εικόνα 3.1 Μηχανή θλίψης μέγιστης πίεσης 160 ton του οίκου MTS και ηλεκτρονικός υπολογιστής	18
Εικόνα 3.2 Όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων: (α) Δακτύλιος με μηχανσιόμετρα, (β) Ηλεκτρικά μηχανσιόμετρα (strain gauges), (γ) Παραμορφωτικός δακτύλιος με ηλεκτρονικά μηχανσιόμετρα (Νιμέρτης και Κορδούλης 2005)	19
Εικόνα 3.3 Εξοπλισμός δοκιμής σημειακής φόρτισης (Νιμέρτης και Κορδούλης 2005).....	22
Εικόνα 4.1 Πρέσα τύπου MTS-815	34
Εικόνα 4.2 Κυλινδρική μεμβράνη υψηλής αντοχής	35
Εικόνα 4.3 Τριαξονικό κελί WF40035	36
Εικόνα 4.4 Ρυθμιστής πίεσης WF40060	37
Εικόνα 4.5 Το δοκίμιο No.1 πριν την δοκιμή	40
Εικόνα 4.6 Το δοκίμιο No.1 μετά την δοκιμή	40
Εικόνα 4.7 Το δοκίμιο No.2 πριν την δοκιμή	41
Εικόνα 4.8 Το δοκίμιο No.2 μετά την δοκιμή	41
Εικόνα 4.9 Το δοκίμιο No.3 πριν την δοκιμή	42
Εικόνα 4.10 Το δοκίμιο No.3 μετά την δοκιμή	42
Εικόνα 4.11 Το δοκίμιο No.4 πριν τη δοκιμή	43
Εικόνα 4.12 Το δοκίμιο No.4 μετά τη δοκιμή.....	43
Εικόνα 4.13 Το δοκίμιο No.5 πριν την δοκιμή	44
Εικόνα 4.14 Το δοκίμιο No.5 μετά την δοκιμή	44
Εικόνα 4.15 Το δοκίμιο No.6 πριν την δοκιμή	45
Εικόνα 4.16 Το δοκίμιο No.6 μετά την δοκιμή	45

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1 Γραφική παράσταση του κριτηρίου Coulomb	14
Σχήμα 2.2 Το κριτήριο Griffith σε άξονες σ_1 , σ_2 και σε άξονες τ , σ	15
Σχήμα 3.1 Α) Μέτρο ελαστικότητας σε γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης Β) Εφαπτομενικό και Τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε μη γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης (Τσιαμπάος 2009)...	20
Σχήμα 3.2 Μονοαξονική, ανεμπόδιστη θλίψη: Α) Επίπεδο αστοχίας του δοκιμίου, Β) Διάγραμμα ελευθέρου σώματος, Γ) Κύκλος του Mohr με την εφαπτομένη του (Jumikis 1983).....	20
Σχήμα 3.3 Σχέσεις μεταξύ των διαστάσεων του δείγματος για τα διάφορα είδη των δοκιμών: (α) Αντιδιαμετρική δοκιμή, (β) Αξονική δοκιμή, (γ) Δοκιμή σε ακανόνιστης μορφής δείγμα, (δ) Δοκιμή σε μορφής κύβου δείγμα (Νιμέρτης και Κορδούλης 2005).....	22
Σχήμα 3.4 Τρόποι θραύσης σε έγκυρες και άκυρες δοκιμές σημειακής φόρτισης: (α) έγκυρες διαμετρικές δοκιμές (β) έγκυρες αξονικές δοκιμές, (γ) έγκυρες δοκιμές σε πρισματικά δοκίμια, (δ) άκυρη αντιδιαμετρική δοκιμή, (ε) άκυρη αξονική δοκιμή (Πηγή: Νιμέρτης και Κορδούλης 2005)	24
Σχήμα 3.5 Περιβάλλουσα αστοχίας του Mohr (Πηγή: Σοφιανός και Νομικός 2008)	29
Σχήμα 4.1 Απλοποιημένο σχεδιάγραμμα μηχανής κλειστού βρόχου.	33
Σχήμα 5.1 Το σημείο Α αντιπροσωπεύει το σημείο τερματισμού. Κάτω από σημείο Β βρίσκεται η ελαστική περιοχή. Το μήκος Β-Γ αντιπροσωπεύει την πλαστική περιοχή. Το σημείο Γ αντιπροσωπεύει το σημείο θραύσης.....	61
Σχήμα 5.2 Πρότυπες καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης σε τρεις διαφορετικές πλευρικές πιέσεις για το ίδιο πέτρωμα. Διακρίνονται οι πλαστικές περιοχές με το μπλε χρώμα.	63

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η αντοχή σε θλίψη και η συνοχή των πετρωμάτων είναι δύο από τις σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες που υπεισέρχονται στις περισσότερες εφαρμογές στην βραχομηχανική.

Οι ιδιότητες αυτές χρησιμοποιούνται άμεσα σαν παράμετροι στα γενικότερα κριτήρια αστοχίας και καταστατικές εξισώσεις, καθώς και άμεσα, έμμεσα ή και σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές, όπως στην ταξινόμηση των πετρωμάτων, στον χαρακτηρισμό και την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας και της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών, στον προσδιορισμό της διατρησιμότητας, εκσκαψιμότητας, φέρουσας ικανότητας των βραχωδών υλικών κ.α.

Σκοπός λοιπόν της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων της πολυεπίπεδης τριαξονικής δοκιμής, σε σχέση με τα αποτελέσματα μιας σειράς συμβατικών τριαξονικών δοκιμών. Από τα αποτελέσματα αυτά και στην περίπτωση που τα πετρώματα υπακούουν στον νόμο Mohr-Coulomb, μπορεί να υπολογισθεί η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής.

Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια συγκεκριμένων διαστάσεων και υποβλήθηκαν στις παραπάνω πειραματικές μεθόδους. Τα πειραματικά δεδομένα αποθηκεύτηκαν σε Η/Υ και επεξεργάστηκαν ώστε να παρουσιασθούν τα αποτελέσματα τα οποία χαρακτηρίζουν το άρρηκτο πέτρωμα από το οποίο λήφθηκαν.

Η εργασία περιλαμβάνει 6 ΚΕΦΑΛΑΙΑ, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται περιληπτικά παρακάτω:

- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 αναφέρονται οι ιδιότητες των πετρωμάτων καθώς και πιο σημαντικά κριτήρια αστοχίας τους.
- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο όλων των ειδών των θλιπτικών δοκιμών.

- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 περιγράφεται η παρασκευή των δοκιμίων, οι διαδικασίες των μονοαξονικών, τριαξονικών και πολυεπίπεδων-τριαξονικών δοκιμών και η λήψη των πειραματικών αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται επίσης φωτογραφίες των δοκιμών πριν και μετά τη δοκιμή τους, υπολογίζονται οι μηχανικές παράμετροι και δίνονται διαγράμματα και στατιστικά στοιχεία.
- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα των υπολογισμών και διατυπώνονται προτάσεις για την πληρέστερη διεξαγωγή ανάλογης εργασίας και για την επέκτασή της.

Κεφάλαιο 2

Ιδιότητες των πετρωμάτων και κριτήρια αστοχίας τους

2.1 Γενικά

Σύμφωνα με την γεωλογική ορολογία, ως πετρώματα χαρακτηρίζονται όλα τα συστατικά του φλοιού της γης. Διαχωρίζονται σε *συνεκτικά* (συμπαγής και σκληρές μάζες όπως ο ασβεστόλιθος και ο γρανίτης) και *μη-συνεκτικά* (εδάφη όπως η άμμος και η άργιλος) [Jumikis 1983]. Για λόγους ευκολίας όμως, ως πετρώματα θα αναφέρονται τα σκληρά και συμπαγή γεωυλικά.

Ως προς τον τρόπο γένεσής τους, ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- πυριγενή (igneous), όπως γρανίτης, βασάλτης, γάββρος, κλπ
- ιζηματογενή (sedimentary), όπως ασβεστόλιθος, ψαμμίτης, τόφφοι, κλπ
- μεταμορφωμένα (metamorphic), όπως μάρμαρο, σχιστόλιθος, γνεύσιος, κλπ

Ο μηχανικός δεν ενδιαφέρεται τόσο για την ιστορία και την ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος, αλλά για την συμπεριφορά που επιδεικνύει σε ένα τεχνικό έργο. Η *Μηχανική Πετρωμάτων* λοιπόν είναι η θεωρητική και εφαρμοσμένη επιστήμη, η οποία ασχολείται με τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων τόσο στο εργαστήριο, όσο και στο φυσικό τους περιβάλλον. Η γνώση αυτή είναι πολύ σημαντική για τον μηχανικό που εκτελεί ένα γεωτεχνικό έργο (διάνοιξη μεταλλευτικής στοάς, κατασκευή πρσανούς, όρυξη γεώτρησης κ.α.), διότι από αυτή εξαρτώνται:

- η ποιότητα και η εργονομία του γεωτεχνικού έργου
- η ταχύτητα υλοποίησής του

- η οικονομικότητά του
- η ασφάλειά του

Στη συνέχεια, κατηγοριοποιούνται και αναπτύσσονται οι πιο σημαντικές ιδιότητες των πετρωμάτων (properties of rocks), καθώς και τα πιο σημαντικά κριτήρια αστοχία τους (failure criteria).

2.2 Ιδιότητες των πετρωμάτων

2.2.1 Κατηγοριοποίηση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων

Τα πετρώματα, ως φυσικά υλικά, χαρακτηρίζονται από τις ιδιότητές τους, οι οποίες ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- στις φυσικές ιδιότητες, οι οποίες αναφέρονται ποσοτικά ή / και ποιοτικά στα φυσικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων και
- στις μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες αναφέρονται στην αντοχή των πετρωμάτων, σε διάφορες μορφές καταπονήσεων και περιλαμβάνουν τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά τους.

Εκτός των παραπάνω ιδιοτήτων, τα πετρώματα χαρακτηρίζονται και από άλλες ιδιότητες όπως:

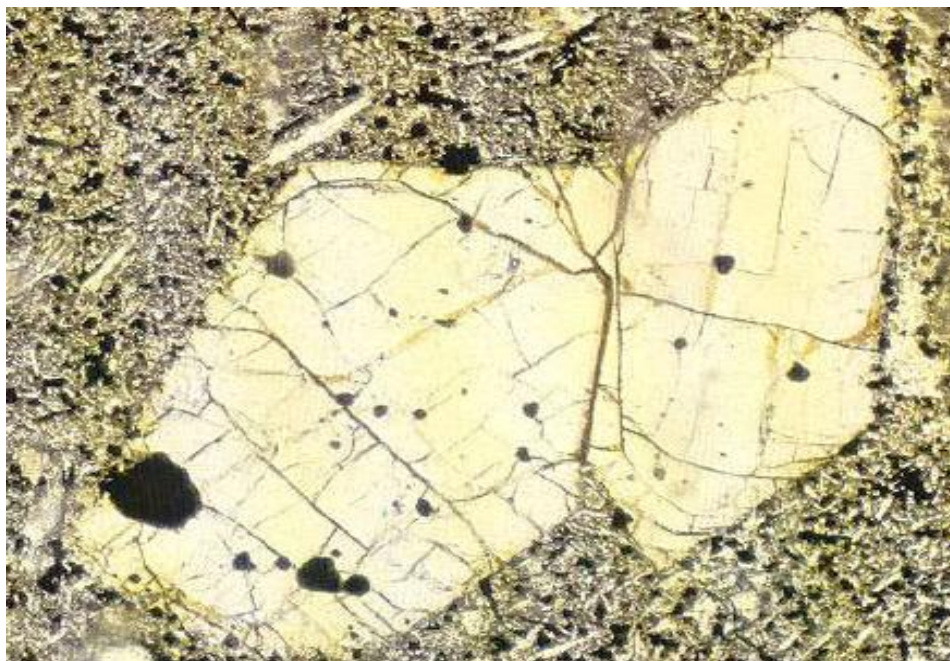
- ηλεκτρικές (ηλεκτρική αγωγιμότητα)
- θερμικές (θερμική αγωγιμότητα, θερμοχωρητικότητα)
- χημικές (χημική αντίδραση με νερό η/και οξέα)
- δυναμικές (ταχύτητα διάδοσης των ηχητικών κυμάτων)

Στις παρακάτω ενότητες περιγράφονται οι πιο σημαντικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.

2.2.2 Φυσικές ιδιότητες

Ορυκτολογική σύσταση, ιστός και υφή

Παρόλο ότι είναι γνωστά πάνω από 2000 είδη ορυκτών, εννέα μόνο συμμετέχουν αποφασιστικά στην ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων. Αυτά είναι: χαλαζίας, άστριοι, μαρμαρυγίες, κεροστίλβη, αυγίτης, ολιβίνης, ασβεστίτης, καολινίτης και δολομίτης. Τα πετρώματα που περιέχουν χαλαζία ως συνδετικό υλικό είναι τα πιο ανθεκτικά και ακολουθούν αυτά με ασβεστίτη και σιδηρούχα ορυκτά. Τα πετρώματα που έχουν αργιλικό υλικό για συνδετικό υλικό, είναι τα πιο ασθενή [Jumikis 1983]. Για τον ακριβή προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης ενός πετρώματος, κατασκευάζονται μικροσκοπικά παρασκευάσματα, λεπτές τομές πάχους 0,02-0,03 mm. Τα ορυκτά καθίστανται διαφανή και είναι δυνατό να αναγνωρισθούν με τη βοήθεια μικροσκοπίου (Εικ. 2.1), αλλά και να υπολογισθούν ποσοτικά με διάφορες μεθόδους όπως η σημειομέτρηση.



Εικόνα 2.1 Παρατήρηση ευεδρικών φαινοκρυστάλλων του ορυκτού ολιβίνη, σε μικροκρυσταλλική μάζα και ύαλο (Πηγή: Χατζηθεοδωρίδης 2003, 2004)

Ο ιστός (structure) των πετρωμάτων ορίζεται ως το σχετικό μέγεθος των ορυκτολογικών συστατικών του και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους. Τέλος, υφή (texture) καλείται η διάταξη των ορυκτολογικών συστατικών του πετρώματος στον χώρο και η μορφή που προκύπτει από την πλήρωση του χώρου αυτού. Ο ιστός και η υφή είναι διαφορετικές έννοιες. Ο ιστός αναφέρεται στις σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ των ορυκτών, ενώ η υφή στον τρόπο της διάταξής τους. Παρόλα αυτά, στις αγγλόφωνες χώρες χρησιμοποιείται ο όρος *fabric* και για τις δύο έννοιες [Θεοδωρίκας 2002].

Ειδικό βάρος (Specific Gravity)

Ως ειδικό βάρος (G_s) ενός πετρώματος, ορίζεται ο λόγος του βάρους μοναδιαίου όγκου υλικού προς το βάρος ίδιου όγκου νερού και επομένως είναι αδιάστατο μέγεθος. Πρακτικά, το G_s είναι ένας αριθμός που εκφράζει πόσες φορές βαρύτερο ή ελαφρύτερο είναι ένα υλικό από ίσο όγκο νερού και δίνεται από τη σχέση:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} \quad (2.1)$$

όπου: W_s , το βάρος του υλικού

V_s , ο ίσος όγκος νερού

γ_w , η πυκνότητα του νερού ($1\text{g} / \text{cm}^3$)

Μοναδιαίο Βάρος (Unit Weight)

Το μοναδιαίο βάρος (γ) ενός υλικού, ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού βάρους του υλικού, προς τον συνολικό όγκο του υλικού, μετράται σε kN / m^3 ή σε g / cm^3 και δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.2)$$

Πορώδες (Porosity)

Οι πόροι των πετρωμάτων αποτελούν μία πολύ σημαντική μορφή ανομοιομορφίας του ιστού και της υφής τους. Είναι μικρά κενά που επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με τον αέρα και η παρουσία τους έχει αρνητική επίπτωση στην αντοχή των πετρωμάτων. Είναι δε αποτέλεσμα

των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται από εξωτερικούς παράγοντες, ατελούς συσσωμάτωσης και βίαιης εξαγωγής αερίων από τη μάζα των πετρωμάτων. Ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών (V_v), προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος (V):

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.3)$$

Συνήθως όμως εκφράζεται επί τοις εκατό:

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Λόγος Κενών (Void Ratio)

Ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών (V_v), προς τον όγκο της στερεής μάζας του πετρώματος (V_s), ισχύει δηλαδή:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.5)$$

Εξ ορισμού όμως:

$$V = V_v + V_s \quad (2.6)$$

Συνδυάζοντας επομένως τις (2.3), (2.4), (2.5), προκύπτει η έκφραση του e ως προς n :

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2.7)$$

αλλά και του n ως προς e :

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2.8)$$

Βαθμός Κορεσμού (Degree of Saturation)

Ο βαθμός κορεσμού S ενός πετρώματος, ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του περιεχόμενου νερού του (V_w), ως προς τον συνολικό όγκο των πόρων του δείγματος:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.9)$$

και συνήθως εκφράζεται επί τοις εκατό:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Συνδυάζοντας την (2.8) με τις (2.1), (2.2), (2.3) και (2.4) προκύπτουν οι:

$$S = \frac{W \cdot G}{e} \quad (2.11)$$

και

$$S = \frac{W \cdot G \cdot (1 - n)}{n} \quad (2.12)$$

Υδατοπερατότητα (Permeability to Water)

Είναι η ικανότητα του πετρώματος να επιτρέπει τη διέλευση του νερού μέσω των πόρων του. Ομοίως ορίζεται και η περατότητα σε άλλα υγρά, αλλά και αέρια. Η αντίσταση στη ροή των ρευστών που προβάλλει ένα πέτρωμα εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος, τη γεωμετρία των πόρων (μέγεθος και σχήμα) και την επιφανειακή τάση του νερού (επίδραση της θερμοκρασίας και του ιξώδους).

Στην πραγματικότητα, όλα τα πετρώματα είναι περισσότερο ή λιγότερο πορώδη. Επομένως, ο όρος *υδατοπερατότητα* αναφέρεται σε πετρώματα που είναι αρκετά πορώδη ώστε να επιτρέπουν τη διέλευση του νερού διαμέσου της μάζας τους. Τα πετρώματα που επιτρέπουν τη διέλευση του νερού με μεγάλη δυσκολία, είναι πρακτικά αδιαπέρατα.

Το νερό κινείται διαμέσου των πετρωμάτων, με ταχύτητα συνήθως αρκετά μικρότερη από την κρίσιμη τιμή στην οποία εμφανίζεται τυρβώδης ροή. Στην περίπτωση αυτή, η παροχή από μία διατομή A , δίνεται από τον νόμο του Darcy:

$$Q = v \cdot A = k \cdot i \cdot A \cdot t \quad (2.13)$$

με $v = k \cdot i \cdot t$, η ταχύτητα ροής και:

$$k = \frac{v}{i} = \tan a, \text{ ο συντελεστής διαπερατότητας, έχει μονάδες μέτρησης}$$

ταχύτητας και είναι χαρακτηριστικός για κάθε πέτρωμα

$$i = \frac{h}{L}, \text{ η υδραυλική κλίση}$$

2.2.3 Μηχανικές ιδιότητες

Ελαστικότητα

Κάθε υλικό παραμορφώνεται με την άσκηση τάσης. Εάν η τάση αυτή δεν ξεπεράσει κάποιο όριο, το υλικό θα επανέλθει στο αρχικό μέγεθος και σχήμα του, όταν πάψει να επιδρά πάνω του. Η ιδιότητα των υλικών να ανακτούν τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά μετά την επίδραση τάσεων, ονομάζεται ελαστικότητα. Αν ένα υλικό επανέλθει πλήρως, ονομάζεται πλήρως ελαστικό. Εάν δεν επανέλθει πλήρως, τότε βρίσκεται υπό την επίδραση παραμένουσας τάσης και ονομάζεται μερικά πλαστικό.

Λόγω των πολλαπλών παραγόντων που παρουσιάζονται κατά τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, γίνονται κάποιες παραδοχές προς απλούστευση, οι οποίες βέβαια αποδίδουν αποδεχτό σφάλμα στα διεξαγόμενα αποτελέσματα. Οι παραδοχές αυτές είναι:

- Τα πετρώματα θεωρούνται συνεχή, ομοιογενή, γραμμικά-ελαστικά, ισότροπα υλικά.
- Τα πετρώματα σε κάποια περιοχή φορτίου μπορεί να θεωρηθεί ότι υπακούουν στον νόμο του Hooke, σύμφωνα με τον οποίο η παραμόρφωση είναι γραμμική συνάρτηση της τάσης. Η μαθηματική διατύπωση του νόμου αυτού σε μία διάσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.14)$$

όπου E, το μέτρο ελαστικότητας του Young (Young's modulus of elasticity)

- Οι παραμορφώσεις που δέχεται το πέτρωμα κάτω από ένα εντατικό πεδίο είναι τόσο μικρές, έτσι ώστε να θεωρείται ότι βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας.

Άλλη μία παράμετρος της ελαστικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων είναι ο λόγος *Poisson* (*Poisson's ratio*), ο οποίος ορίζεται ως:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (2.15)$$

όπου $(-\varepsilon_x)$ η εγκάρσια παραμόρφωση και $(+\varepsilon_y)$ η ανηγμένη, αξονική παραμόρφωση σε μονοαξονική καταπόνηση.

Πλαστικότητα

Πλαστικότητα ενός στερεού υλικού είναι η ιδιότητα να παραμένει μόνιμα παραμορφωμένο μετά την άρση των επιβαλλόμενων τάσεων, χωρίς όμως να επέλθει αστοχία. Κάποια υλικά παρουσιάζουν το φαινόμενο της πλαστικής ροής, συνεχίζουν δηλαδή να παραμορφώνονται υπό σταθερή τάση.

Η μαθηματική διατύπωση της πλαστικής θεωρίας είναι δύσκολη σε σχέση με αυτή της ελαστικής για τους παρακάτω λόγους:

- η πλαστική παραμόρφωση είναι μία μη αντιστρεπτή διεργασία, σε αντίθεση με την ελαστική παραμόρφωση που είναι αντιστρεπτή,
- η ελαστική συμπεριφορά εξαρτάται μόνο από την αρχική και την τελική κατάσταση της τάσης και της παραμόρφωσης, ενώ αντίθετα η πλαστική συμπεριφορά εξαρτάται και από τον τρόπο με τον οποίο η τάση και η παραμόρφωση έφτασαν στην τελική τους κατάσταση,
- στην πλαστική περιοχή δεν υπάρχει μία εύκολα μετρήσιμη ποσότητα (ιδιότητα του υλικού) που να συσχετίζει την τάση με την παραμόρφωση, σε αντίθεση με την ελαστική περιοχή, όπου αυτή η ποσότητα ήταν το μέτρο ελαστικότητας (ή το μέτρο διάτμησης, κ.τ.λ.).

2.2.4 Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες του Αλφά

Το πέτρωμα που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές θλίψης είναι ένας υψηλά μεταμορφωμένος, μαργαϊκός ασβεστόλιθος. Ονομάζεται «Αλφάς», ή / και «Αλφόπετρα» από την τοποθεσία προέλευσής του (Αλφά Ρεθύμνου).

Η Επιτροπή Συντήρησης Μνημείων Επιδαύρου εξέτασε τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά μία σειράς από δομικούς λίθους (συμπεριλαμβανομένου του Αλφά), προκειμένου να επιλέξει τον πιο κατάλληλο για τις απαραίτητες αναστηλωτικές εργασίες [Νινής κ.α., 2001]. Τα κριτήρια επιλογής λίθου της επιτροπής, αλλά και το πόρισμά της, δεν αποτελούν αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας. Τα στοιχεία όμως που παραθέτει για τον Αλφά (Πίνακας 2.1) είναι πλούσια και σπάνια, αφού δεν υπάρχει σχετική βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο πέτρωμα.

Δεύτερη πηγή φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του Αλφά αποτελεί η ιστοσελίδα της εταιρείας που τον εξορύσσει στην ευρύτερη περιοχή της Αλφάς Ρεθύμνου. Η «ΠΕΤΡΕΣ ΑΛΦΑΣ Μ. & Δ. ΣΑΡΡΗΣ Α.Β.Ε.Ε» παρουσιάζει τα παρακάτω στοιχεία:

- Ορυκτολογική σύσταση : Ασβεστίτης (99%), Χαλαζίας (0,5%), Αραγωνίτης (0,5%)
- Φαινόμενη πυκνότητα : 1440 kg/m³
- Υδατοαπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση (EN 13755) : 14,3% κ.β.
- Ανοιχτό πορώδες (EN 1936) : 35,2% κ.ο.
- Αντοχή σε κάμψη (EN 12372) : 7,4 MPa
- Αντοχή σε θλίψη (EN 1926) : 31,5 MPa
- Αντίσταση σε τριβή (EN 14157 – ΜΕΘΟΔΟΣ Α) : 44,0 mm
- Ενέργεια θραύσης (κρούση) (EN 141158) : 2 Joule

Πίνακας 2.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών του Αλφά.

A: Δοκιμές μηχανικής αντοχής		
1	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (kg/cm ²)	238
2	Αντοχή σε κάμψη (kg/cm ²)	104
B: Δοκιμές πορώδους δομής		
3	Απόλυτη πυκνότητα (g/cm ³)	2,45
4	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	1,73
5	Πορώδες (%)	29,3
Γ: Δοκιμές μεταφοράς νερού		
6	Απορροφητικότητα (%)	14
7	Συντελεστής Διαπερατότητας (10 ⁻⁸ m/s)	12
8	Διόγκωση (10 ⁻⁶)	13
Δ: Δοκιμές προσομοίωσης φθορών		
9	Απώλεια λόγω δοκιμής Υγείας (%)	48

2.3 Κριτήρια Αστοχίας

Δεδομένης της εντατικής κατάστασης ενός πετρώματος, είναι πολύ σημαντικό να προβλεφθεί εάν αυτό αστοχήσει (μόνιμη παραμόρφωση ή θραύση). Για τη λύση του προβλήματος αυτού έχουν αναπτυχθεί κάποια κριτήρια αστοχίας, βασισμένα σε εργαστηριακά πειράματα και τα οποία εκφράζονται με εμπειρικές, μαθηματικές εξισώσεις. Παρακάτω αναφέρονται τα πιο γνωστά κριτήρια αστοχίας, τα οποία είναι και τα περισσότερο αποδεκτά στη μηχανική πετρωμάτων:

Κριτήριο της μέγιστης εφελκυστικής τάσης

Το κριτήριο αυτό υποθέτει, ότι τα πετρώματα αστοχούν με ψαθυρή θραύση, όταν η εφαρμοζόμενη, ελάχιστη κύρια τάση ($-\sigma_3$) εξισωθεί με την μονοαξονική του αντοχή σε εφελκυσμό, $\sigma_t(\max)$.

$$\sigma_3 = \sigma_t(\max) \quad (2.16)$$

Κριτήριο αστοχίας κατά Tresca (κριτήριο της μέγιστης διατμητικής τάσης)

Το κριτήριο αυτό ισχύει στην περίπτωση των ισότροπων και ελατών υλικών και υποθέτει, ότι η αστοχία τους επέρχεται, όταν η μέγιστη διατμητική τάση $t_{\max}$, εξισωθεί με την διατμητική τους αντοχή, s .

$$s = t_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.17)$$

όπου σ_1 και σ_3 η μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση αντίστοιχα.

Κριτήριο αστοχίας κατά Coulomb

Αποτελεί το πιο σημαντικό κριτήριο και η γενική, εμπειρική του εξίσωση είναι:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n + c \quad (2.18)$$

όπου:

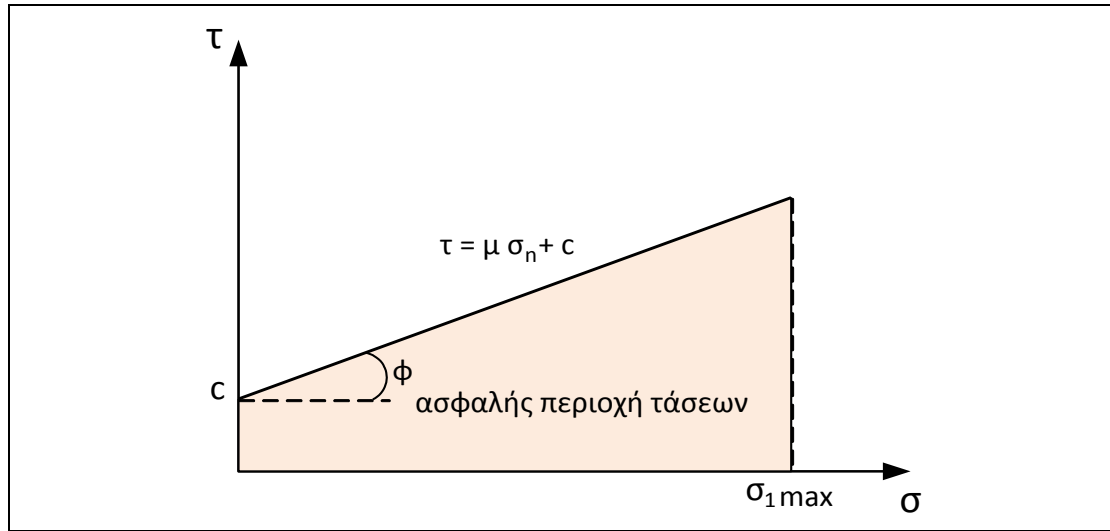
τ , η μέγιστη διατμητική τάση

μ , ο συντελεστής εσωτερικής τριβής του υλικού (coefficient of internal friction), με $\mu = \tan \phi$ και ϕ , τη γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού (angle of internal friction)

σ_n , η κάθετη τάση στο επίπεδο ολίσθησης / αστοχίας

c , η συνοχή (cohesion) του υλικού

Η γραφική παράσταση της (2.16) παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1 Γραφική παράσταση του κριτηρίου Coulomb

Κριτήριο κατά Mohr

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, η μέγιστη διατμητική τάση στην οποία αστοχεί το πέτρωμα, δεν είναι γραμμική συνάρτηση της κάθετης στο επίπεδο ολίσθησης / αστοχίας τάσης, όπως στο κριτήριο κατά Coulomb, αλλά μια παραβολική συνάρτηση της μορφής $\tau = f(\sigma_n)$ και σχεδιάζεται ως εξής: Σε διάγραμμα τ vs σ , σχεδιάζονται οι κύκλοι του Mohr, μετά από ισοδύναμα πειράματα τριαξονικής θλίψης. Κατόπιν, φέρεται η περιβάλλουσα των κύκλων (Mohr's failure envelope) και προσδιορίζεται η παραβολική της εξίσωση (Σχήμα 3.5).

Κριτήριο κατά Griffith (κριτήριο της ψαθυρής αστοχίας)

Ο Griffith θεωρεί ότι τα πετρώματα περιέχουν λεπτές, επίπεδες, στενές και ελλειπτικού σχήματος μικρορωγμές (ρωγμές Griffith). Αστοχία

επέρχεται όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση στην ρωγμή με τον πιο επικίνδυνο προσανατολισμό, υπερβεί μία κρίσιμη χαρακτηριστική τιμή για το υλικό [Jumikis 1983]. Το κριτήριο αυτό μπορεί να εκφρασθεί ως συνάρτηση της διατμητικής και της ορθής τάσης που ενεργούν στο επίπεδο που περιέχει τον μεγάλο άξονα ρωγμής σύμφωνα με την παραβολική σχέση:

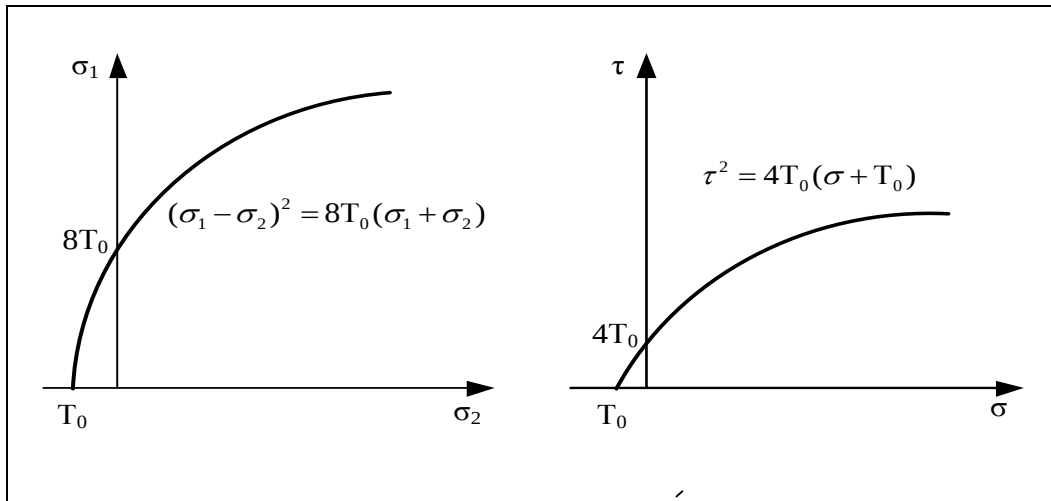
$$\tau^2 = 4T_0(\sigma + T_0) \quad (2.19)$$

αλλά και ως συνάρτηση των κύριων τάσεων σ_1 και σ_2 επίσης με παραβολική εξίσωση:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 8T_0(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.20)$$

όπου T_0 μία θετική ποσότητα που αντιπροσωπεύει την αντοχή σε εφελκυσμό του ακέραιου πετρώματος πριν από τη θραύση [Αγιουτάντης 2002].

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των (2.20) και (2.19) αντίστοιχα:



Σχήμα 2.2 Το κριτήριο Griffith σε άξονες σ_1, σ_2 και σε άξονες τ, σ

Κεφάλαιο 3

Εργαστηριακές Δοκιμές Προσδιορισμού της Αντοχής σε Θλίψη

3.1 Γενικά

Η πιο σημαντική κατηγορία μηχανικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα πετρώματα, είναι αυτή που αναφέρεται στην αντοχή τους. Ως αντοχή (strength) ενός πετρώματος χαρακτηρίζεται η ικανότητά του να ανθίσταται σε εξωτερικά επιβαλλόμενες τάσεις και εκφράζεται σε μονάδες τάσης.

Γενικά όταν ένα υλικό αστοχεί, δεν μπορεί πια φέρει το φορτίο για το οποίο σχεδιάστηκε, ενώ η αστοχία δεν ταυτίζεται πάντα με την θραύση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι κολώνες οπλισμένου σκυροδέματος (το σκυρόδεμα θεωρείται τεχνητό πέτρωμα), μετά από έναν σεισμό, όπου παρατηρούνται ρωγμές. Η κολώνα δεν έχει σπάσει, η φέρουσα ικανότητά της όμως έχει μειωθεί και αποτελεί αντικείμενο μελέτης το ερώτημα εάν μπορεί πλέον να υποστηρίξει ικανοποιητικά την σκεπή ή τους παραπάνω ορόφους, ή θα σπάσει τελικά μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

Η αντοχή ενός πετρώματος εξαρτάται από χαρακτηριστικά που διέπουν το ίδιο το πέτρωμα όπως:

- το είδος του πετρώματος,
- η θέση του στο περιβάλλον,
- η ορυκτολογική του σύσταση,
- ρωγμές, κενά, ασυνέχειες,
- βαθμός κορεσμού,
- ελαστικότητα / πλαστικότητα,
- επίδραση του χρόνου,

καθώς και από τον τύπο της καταπόνησης, οπότε ορίζεται και το αντίστοιχο είδος της αντοχής:

- αντοχή σε θλίψη (με ή χωρίς την παρουσία πλευρικών τάσεων),

- αντοχή σε εφελκυσμό,
- αντοχή σε διάτμηση,
- αντοχή σε κάμψη,
- αντοχή σε στρέψη.

Εκτός των παραπάνω, υπάρχει και μία άλλη σειρά παραμέτρων αντοχής των πετρωμάτων:

- αντοχή στην κρούση,
- αντοχή στη μηχανική απότριψη,
- αντοχή στην αποσάθρωση,
- αντοχή σε κύκλους ψύξης – θέρμανσης,
- αντοχή στην επίδραση χημικών.

3.2 Μονοαξονική, Ανεμπόδιστη Θλίψη και Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης

3.2.1 Μονοαξονική, Ανεμπόδιστη Θλίψη

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS, uniaxial compressive strength) ενός υλικού θεωρείται η απαιτούμενη τάση για την αστοχία ενός δοκιμίου, στο οποίο η τάση εφαρμόζεται επί της μίας έδρας του, ενώ πλευρικά είναι ελεύθερο [Ρόζος, 2007].

Η εργαστηριακή δοκιμή της ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων καθώς είναι γρήγορη, εύκολη στην εκτέλεση της και χαμηλού κόστους. Πραγματοποιείται σε κυλινδρικά ή πρισματικά δοκίμια που εξάγονται από το άρρηκτο πέτρωμα στα οποία ασκείται αξονική φόρτιση με κατάλληλη άκαμπτη μηχανή φόρτισης και τα δεδομένα καταγράφονται σε Η/Υ (Εικ. 3.1). Τα δοκίμια μπορεί να αστοχήσουν κατά μήκος του άξονά τους ή ακανόνιστα, συνηθέστερα όμως αστοχούν σε διάτμηση και εφελκυσμό.



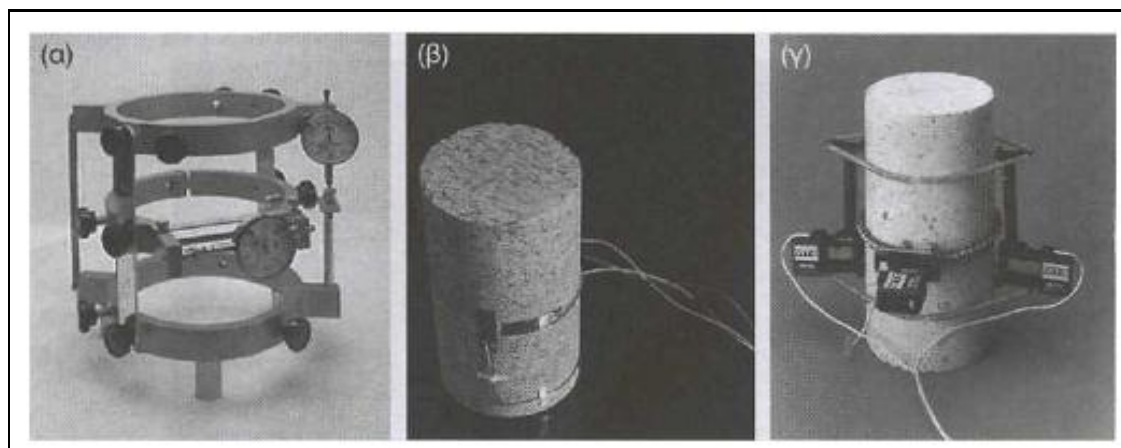
Εικόνα 3.1 Μηχανή θλίψης μέγιστης πίεσης 160 ton του οίκου MTS και ηλεκτρονικός υπολογιστής

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο τρόπος αστοχίας ενός δοκιμίου δεν εξαρτάται μόνο από τα μηχανικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του (συννοχή, ασυνέχειες κ.τ.λ.) αλλά και από την κατασκευή και την προετοιμασία του δοκιμίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές της δοκιμής. Θα μπορούσε για παράδειγμα ένα δοκίμιο του οποίου οι βάσεις δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στη γενέτειρα του καθώς και η τραχύτητά τους να μην είναι η προβλεπόμενη, να αστοχήσει σε διάτμηση παρά σε αξονική κατάτμηση. Είναι λοιπόν πολύ σημαντική η κατασκευή των δοκιμίων καθώς και η σωστή εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας.

Οι αξονικές και πλευρικές παραμορφώσεις του δοκιμίου μετρώνται με τη βοήθεια κατάλληλα τοποθετημένων μηκυνσιομέτρων (Εικ. 3.2). Διακρίνονται τρία είδη μηκυνσιομέτρων [Νιμέρτης και Κορδούλης 2005]:

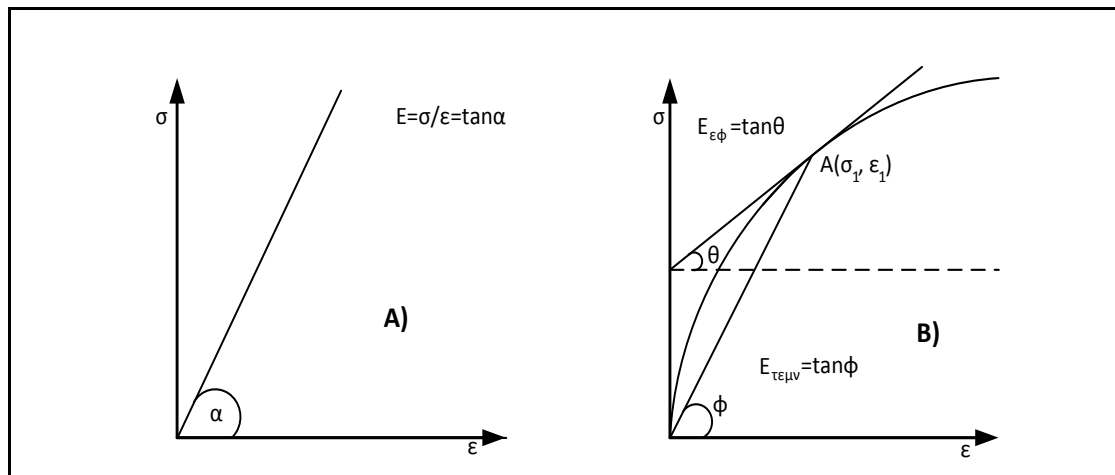
- Μηχανικά μηκυνσιόμετρα τα οποία προσδένονται κατάλληλα πάνω στο δοκίμιο (με ειδικό δακτύλιο). Η τοποθέτηση τους γίνεται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου και σε απόσταση όχι μικρότερη του $D/2$ από τα άκρα του (όπου D η διάμετρος του δοκιμίου).

- Ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα προσαρμοσμένα σε κατάλληλο παραμορφωτικό δακτύλιο που προσδένεται πάνω στο δοκίμιο. Η τοποθέτηση διάφορων συστημάτων για τη λήψη έμμεσων μετρήσεων εκτός δοκιμίου (π.χ. μέτρηση μετακινήσεων στις πλάκες της πρέσας ή στο έμβολο αυτής) δεν είναι αποδεκτές για την εκτέλεση της δοκιμής.
- Ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) τα οποία επικολλούνται στο δοκίμιο παράλληλα και κάθετα στον άξονα φόρτισης για τη μέτρηση αξο-νικών και διαμετρικών παραμορφώσεων αντίστοιχα. Η επικόλληση γίνεται με ειδική κόλλα και ακολουθεί επίστρωση με προστατευτικό υλικό (π.χ. σιλικόνη). Το μήκος τους πρέπει να είναι μεγαλύτερο του δεκαπλασίου του μέσου μεγέθους των κόκκων του βράχου και η επικόλληση γίνεται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου και σε απόσταση όχι μικρότερη του $D/2$ από τα άκρα του.



Εικόνα 3.2 Όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων: (α) Δακτύλιος με μηκυνσιόμετρα, (β) Ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges), (γ) Παραμορφωτικός δακτύλιος με ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα (Νιμέρτης και Κορδούλης 2005)

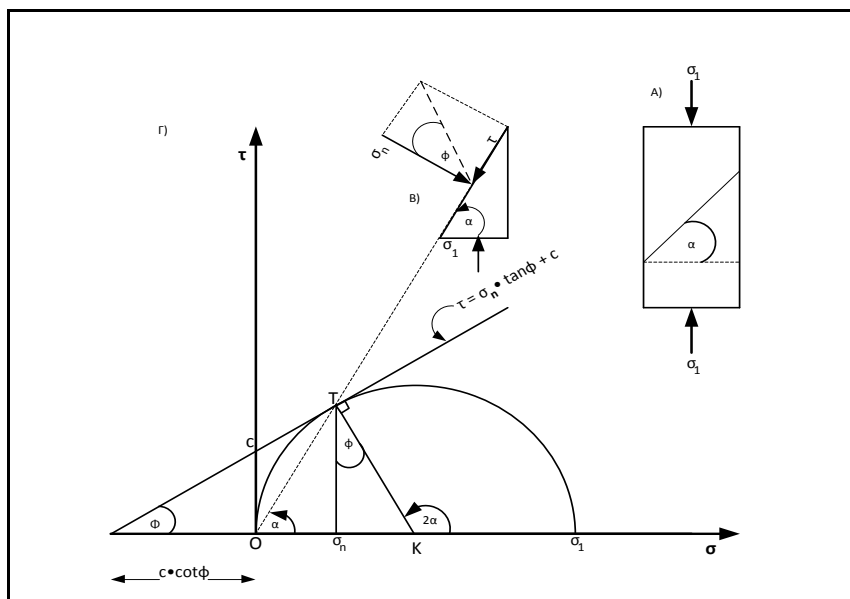
Από τα δεδομένα τους υπολογίζεται ο λόγος του Poisson ν , καθώς και το μέτρο ελαστικότητας E , μέσω του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης και κατάλληλων υπολογισμών. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται εύκολα στα υλικά τα οποία έχουν γραμμική σχέση τάσης - παραμόρφωσης (Σχήμα 3.1 Α) χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.14). Για τα υλικά που έχουν μη γραμμική σχέση τάσης - παραμόρφωσης χρησιμοποιείται το τέμνον, ή το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε δεδομένο σημείο της καμπύλης (Σχήμα 3.1 Β) [Τσιαμπάος, 2009].



Σχήμα 3.1 Α) Μέτρο ελαστικότητας σε γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης Β) Εφαπτομενικό και Τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε μη γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης (Τσιαμπάος 2009)

Από τα δεδομένα της ανεμπόδιστης, μονοαξονικής θλίψης υπολογίζονται έμμεσα η διατμητική τάση τ , στην οποία αστοχεί το δοκίμιο, η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και η συνοχή c (σχέση 2.18). Η σ_n είναι η κάθετη στο επίπεδο αστοχίας τάση και εκφράζεται συναρτήσει της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 ως εξής:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1}{2}(1 + \cos 2\alpha) \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.2 Μονοαξονική, ανεμπόδιστη θλίψη: Α) Επίπεδο αστοχίας του δοκιμίου, Β) Διάγραμμα ελευθέρου σώματος, Γ) Κύκλος του Mohr με την εφαπτομένη του (Jumikis 1983)

Επίσης, από τη γεωμετρία του σχήματος 3.2 ισχύει:

$$2\alpha = \frac{\pi}{2} + \varphi \quad (3.2)$$

άρα

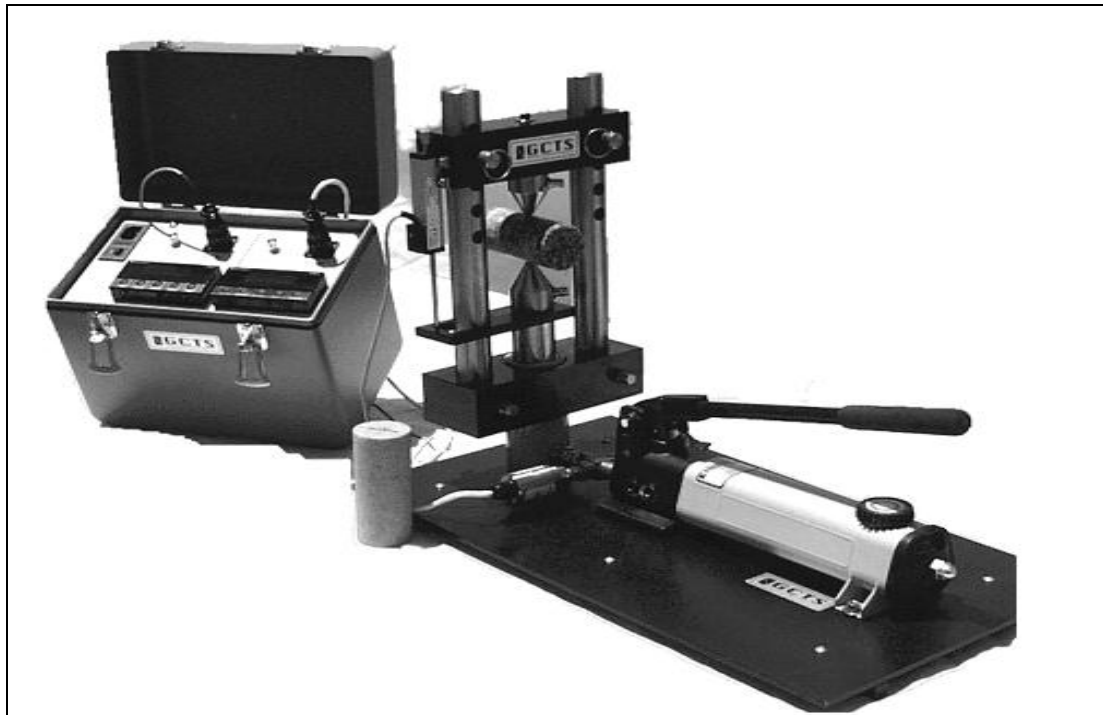
$$\varphi = 2\alpha - \frac{\pi}{2} \quad (3.3)$$

3.2.2 Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης

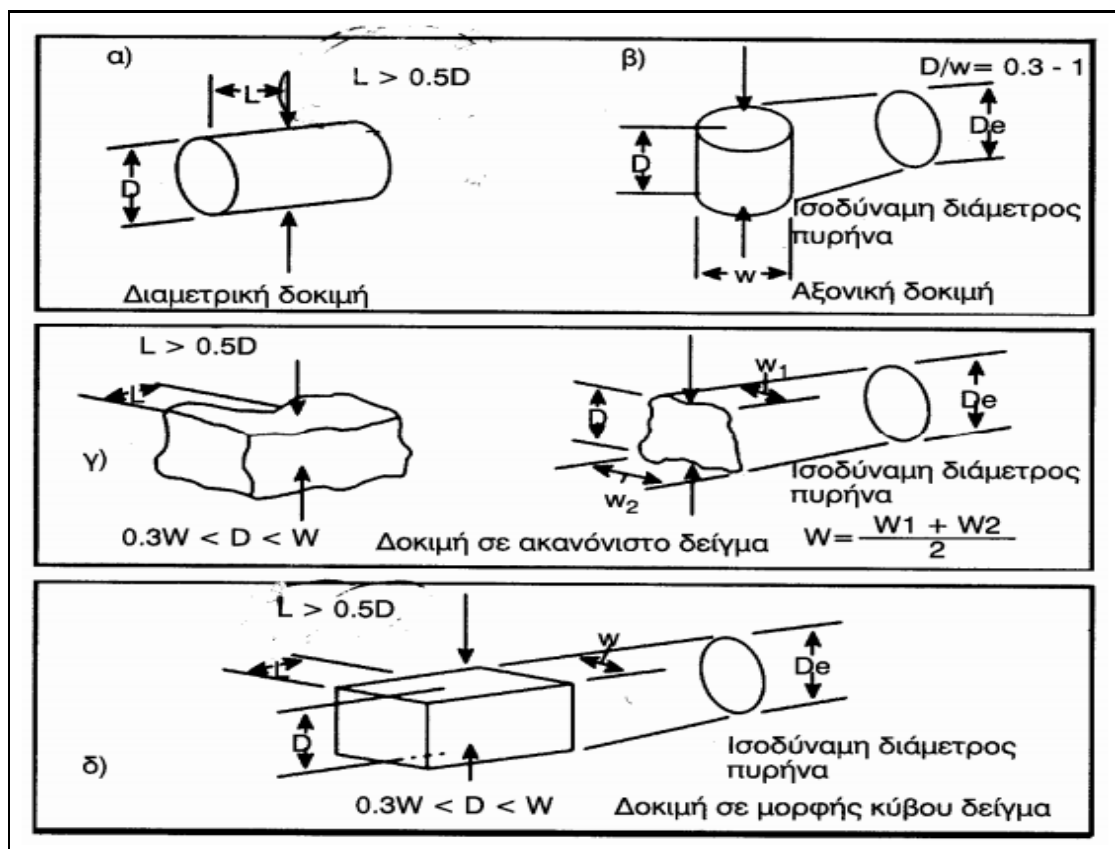
Η δοκιμή σημειακής φόρτισης (Point Load Test) είναι μία απλή δοκιμή που έχει σαν σκοπό την ταξινόμηση του ακέραιου πετρώματος από πλευράς αντοχής και τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής σε μοναξονική θλίψη. Η δοκιμή γίνεται συνήθως στο εργαστήριο αλλά και επιτόπου, λόγω της σχετικά εύκολης μεταφοράς του εργαστηριακού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται.

Η αντοχή του πετρώματος μετριέται με την εφαρμογή μιας αντιδιαμετρικά ασκούμενης δύναμης από τα δύο κωνικά άκρα της ειδικής συσκευής (Εικ. 3.3) και προσδιορίζεται ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_s . Συσκευές σημειακής φόρτισης υπάρχουν δύο κυρίως τύπων και αποτελούνται από ένα μεταλλικό πλαίσιο, δύο μεταλλικές πλάκες που φέρουν κωνικά άκρα 60° με ακτίνα καμπυλότητας 5mm, μία χειροκίνητη υδραυλική αντλία για την επιβολή της πίεσης, ένα έμβολο για τη μετακίνηση της μίας πλάκας και ένα ή δύο μανόμετρα για τη μέτρηση της πίεσης του εμβόλου ή του επιβαλλόμενου φορτίου [Νιμέρτης και Κορδούλης 2005].

Για την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιούνται συνήθως κυλινδρικά δοκίμια του πετρώματος για αντιδιαμετρική ή αξονική φόρτιση, αλλά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και δοκίμια σε μορφή κύβου ή ακόμα και σε ακανόνιστη μορφή. Βασική προϋπόθεση για τη δοκιμή κάποιου συγκεκριμένου είδους (δηλαδή αντιδιαμετρική, αξονική ή σε ακανόνιστο δείγμα) είναι να ικανοποιούνται οι σχέσεις μεταξύ της απόστασης των κωνικών άκρων D , του μήκους L και της χαρακτηριστικής διάστασης W του δοκιμίου που φαίνονται στο Σχήμα 3.3.



Εικόνα 3.3 Εξοπλισμός δοκιμής σημειακής φόρτισης (Νιμέρτης και Κορδούλης 2005)



Σχήμα 3.3 Σχέσεις μεταξύ των διαστάσεων του δείγματος για τα διάφορα είδη των δοκιμών: (α) Αντιδιαμετρική δοκιμή, (β) Αξονική δοκιμή, (γ)

Δοκιμή σε ακανόνιστης μορφής δείγμα, (δ) Δοκιμή σε μορφής κύβου δείγμα (Νιμέρτης και Κορδούλης 2005)

Το δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ των κωνικών άκρων, ώστε η φόρτιση να γίνεται στο μέσο μήκος του δοκιμίου και κατά τη διάμετρο του. Η επιβολή του φορτίου πρέπει να γίνεται βαθμιαία και με σταθερή ταχύτητα μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Το φορτίο θραύσης σημειώνεται στο δελτίο δοκιμής.

Με την εκτέλεση της δοκιμής υπολογίζεται ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_s , που είναι ο λόγος του φορτίου θραύσης P προς το τετράγωνο της ισοδύναμης διάστασης D_e :

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (3.4)$$

Η μονάδα μέτρησης του I_s είναι επίσης το MPa. Η ισοδύναμη διάσταση ή διάμετρος D_e για αντιδιαμετρική δοκιμή είναι ίση με την απόσταση D (διάμετρος του δοκιμίου). Στους άλλους τύπους δοκιμών η ισοδύναμη διάσταση D_e δίνεται από τη σχέση:

$$D_e^2 = \frac{4DW}{\pi} \quad (3.5)$$

με τις διαστάσεις των D και W σε να δίνονται σε mm.

Ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_s μεταβάλλεται ανάλογα με την ισοδύναμη διάμετρο του δοκιμίου D_e . Για το λόγο αυτό απαιτείται να γίνει διόρθωση του δείκτη αυτού και η εύρεση ενός ανηγμένου δείκτη σημειακής φόρτισης που θα αναφέρεται σε μια τυποποιημένη διάμετρο δοκιμίου. Ο νέος αυτός δείκτης $I_{s(50)}$ καλείται ανηγμένος δείκτης σημειακής φόρτισης και αναφέρεται σε διαμετρική δοκιμή με τυποποιημένη διάμετρο δοκιμίου $D = 50\text{mm}$ [Νιμέρτης και Κορδούλης 2005].

Ο δείκτης $I_{s(50)}$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \quad (3.6)$$

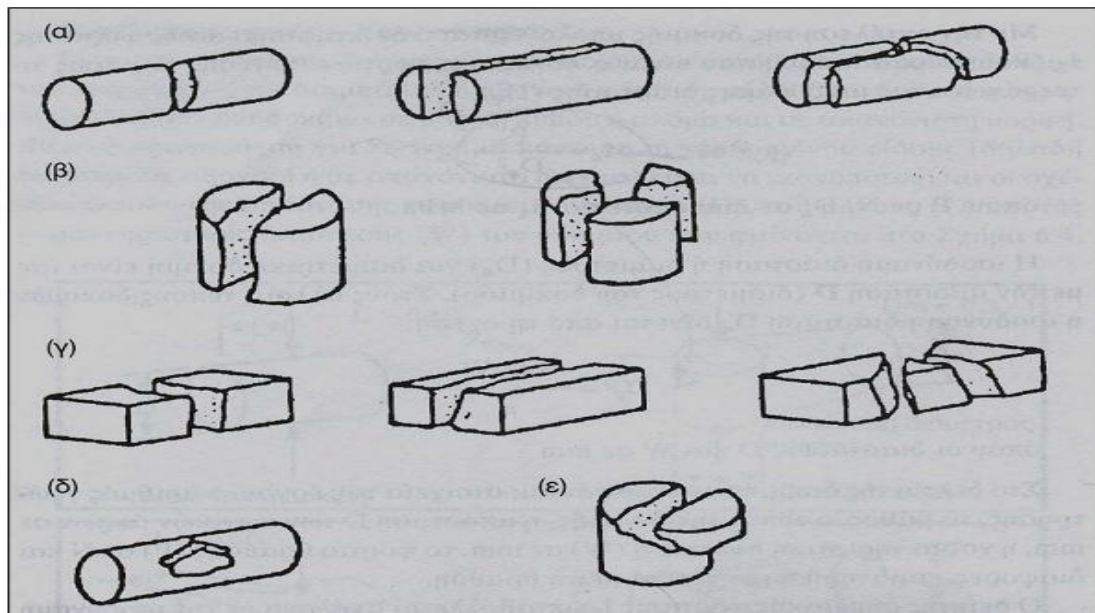
όπου F είναι ένας συντελεστής διόρθωσης που εκτιμάται από τη σχέση:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad (3.7)$$

άρα

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \cdot I_s \quad (3.8)$$

Ο ανηγμένος δείκτης $I_{s(50)}$ εκφράζεται επίσης σε ΜΡα. Η αξιοπιστία εκτέλεσης της δοκιμής εξαρτάται από το είδος θραύσης των δοκιμίων. Η θραύση γενικά πρέπει να γίνεται κατά μήκος των δύο αιχμών της συσκευής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η δοκιμή αυτή, δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για D μεγαλύτερο των 42mm. Γενικά η διαμετρική δοκιμή είναι περισσότερο αξιόπιστη σε σχέση με την αξονική και τη δοκιμή σε ακανόνιστο ή κυβικού σχήματος δείγμα.



Σχήμα 3.4 Τρόποι θραύσης σε έγκυρες και άκυρες δοκιμές σημειακής φόρτισης: (α) έγκυρες διαμετρικές δοκιμές (β) έγκυρες αξονικές δοκιμές, (γ) έγκυρες δοκιμές σε πρισματικά δοκίμια, (δ) άκυρη αντιδιαμετρική δοκιμή, (ε) άκυρη αξονική δοκιμή (Πηγή: Νιμέρτης και Κορδούλης 2005)

Τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση των πετρωμάτων ως προς την αντοχή τους με βάση τον πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 Ταξινόμηση ακέραιου πετρώματος με βάση το 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	Δε συνίσταται η δοκιμή

3.2.3 Συσχετισμός της Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη με τον Δείκτη Σημειακής Φόρτισης

Τα πλεονεκτήματα της μονοαξονικής, ανεμπόδιστης θλίψης για τον προσδιορισμό της αντοχής (UCS) των πετρωμάτων έχουν ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 3.2.1. Παρόλα αυτά, η μέθοδος της σημειακής φόρτισης χρησιμοποιείται ευρέως διότι αποτελεί μία ακόμη πιο γρήγορη και οικονομική λύση. Τα σημαντικότερα όμως πλεονεκτήματά της είναι δύο:

- α) ο εξοπλισμός δοκιμής σημειακής φόρτισης μεταφέρεται εύκολα και οι δοκιμές μπορούν να πραγματοποιηθούν στο πεδίο,
- β) απαιτεί την κατασκευή λιγότερων ή και καθόλου δοκιμών.

Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διάφορες εξισώσεις συσχέτισης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, η αλλιώς q_u , με τον $I_{s(50)}$ και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο μετασχηματισμός αυτός εξαρτάται από το είδος του εκάστοτε πετρώματος. Παρακάτω παρατίθενται οι πιο σημαντικές από αυτές [Akram και Bakar 2005]:

κατά D'Adrea (1964):

$$q_u = 16,3 + 15,3 \cdot I_{s(50)} \quad (3.9)$$

κατά Broch και Franklin (1972):

$$q_u = 24 \cdot I_{s(50)} \quad (3.10)$$

Οι Broch και Franklin κατασκεύασαν επίσης ένα διάγραμμα διόρθωσης για δοκίμια διαμέτρου διαφορετική των 50 mm, αλλά ο Pells απέδειξε ότι αποδίδουν σφάλμα της τάξεως του 20% για πετρώματα όπως ο δολερίτης, ο νορίτης και ο πυροξενίτης.

Κατά Bieniawski (1975):

$$q_u = (14 + 0,177 \cdot D) \cdot I_{s(50)} \quad (3.11)$$

όπου D, η διάμετρος του δοκιμίου

κατά Cargill και Shakoor (1990):

$$q_u = 13 + 23 \cdot I_{s(50)} \quad (3.12)$$

κατά Rusnak και Mark (2000):

$$q_u = 23,62 \cdot I_{s(50)} - 2,69 \quad (3.13)$$

για λιγνίτες και

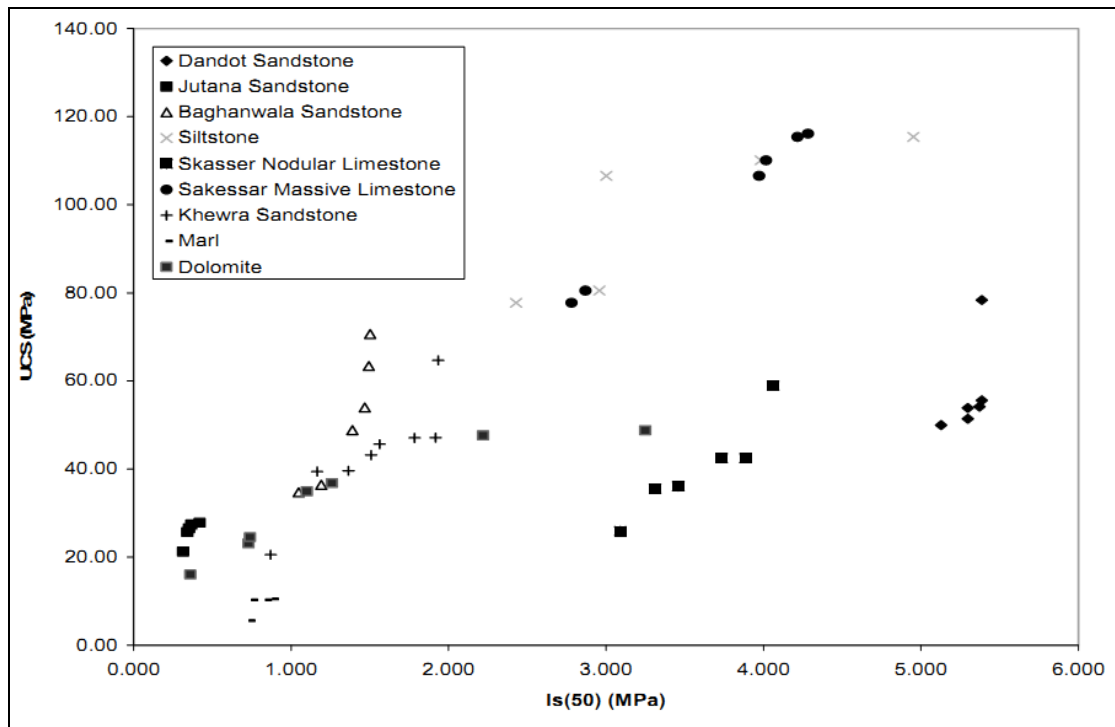
$$q_u = 8,41 \cdot I_{s(50)} + 9,51 \quad (3.14)$$

για τα υπόλοιπα πετρώματα.

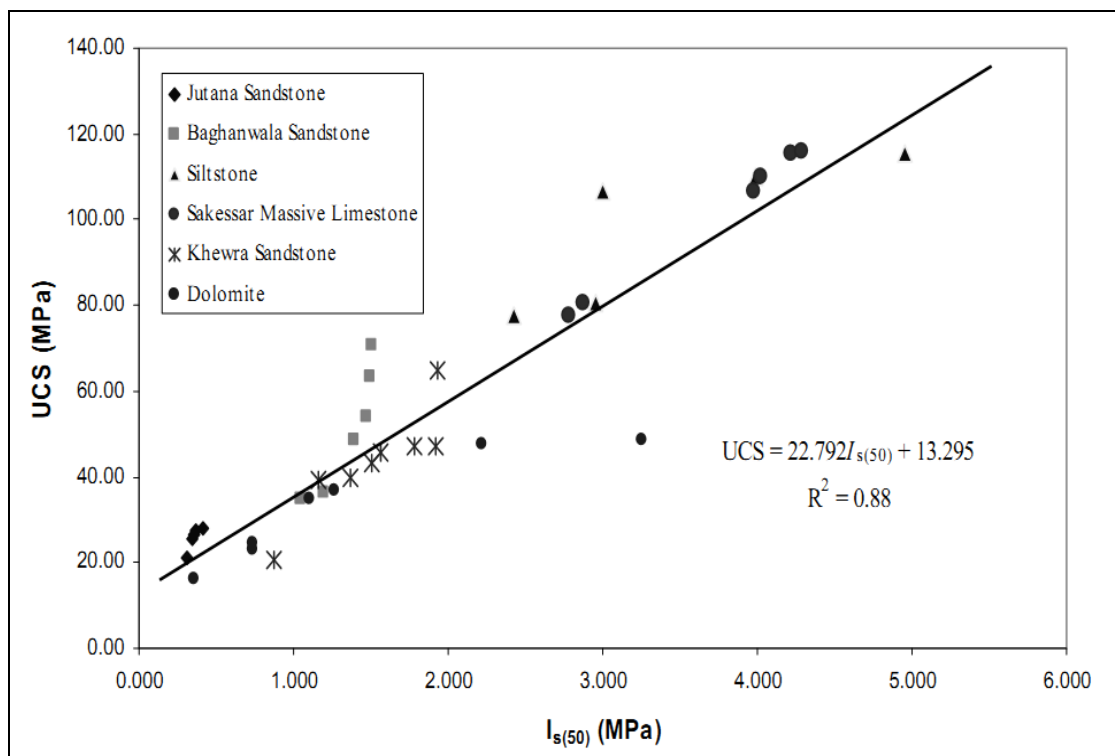
Κατά Fener (2005):

$$q_u = 9,08 \cdot I_{s(50)} + 39,32 \quad (3.15)$$

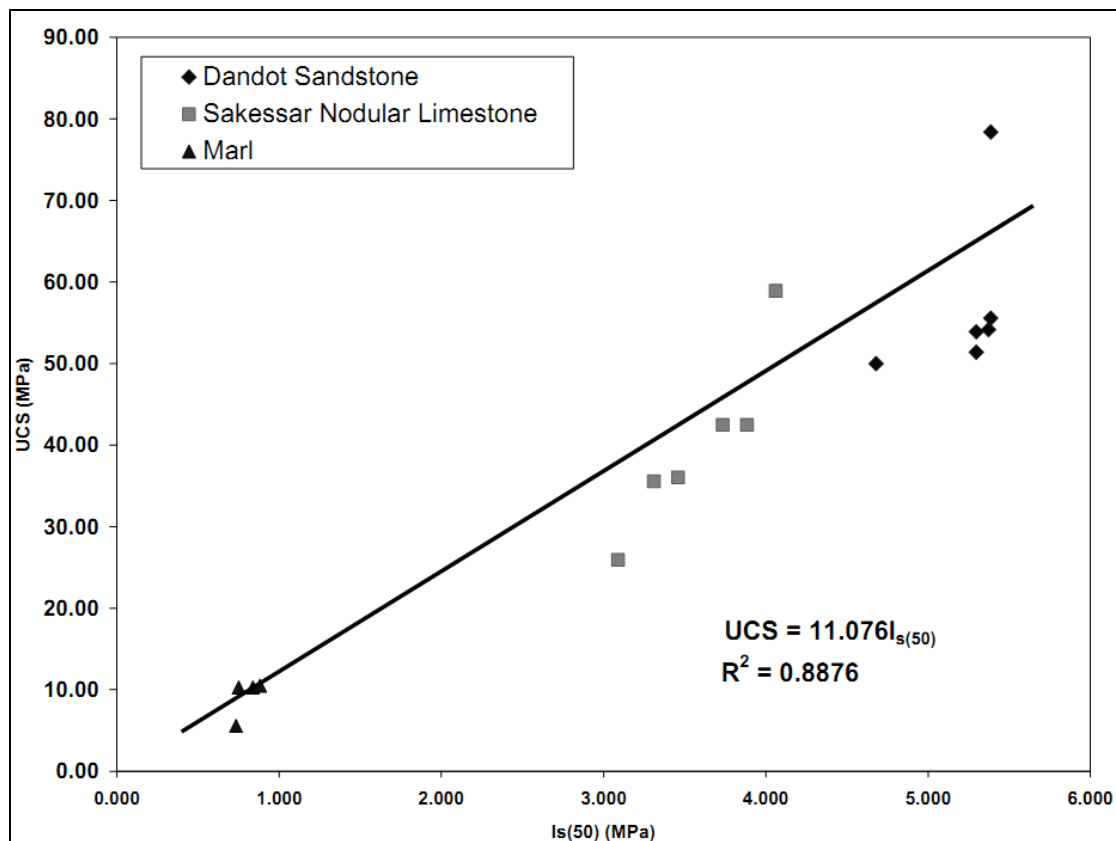
Οι Akram και Bakar εξέτασαν εννέα είδη πετρωμάτων από την περιοχή Salt Range του βορειοανατολικού Πακιστάν, για να υπολογίσουν τη σχέση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, ως προς τον δείκτη σημειακής φόρτισης. Το αποτέλεσμα της έρευνάς τους ήταν η ανάδειξη δύο ομάδων πετρωμάτων, όπου η κάθε ομάδα διέπεται από μία γραμμική σχέση της USC ως προς τον $I_{s(50)}$, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 3.1 έως και 3.3:



Διάγραμμα 3.1 Σχέση της USC ως προς $I_{s(50)}$ για όλα τα εξεταστέα πετρώματα (Akram και Bakar 2005)



Διάγραμμα 3.2 Σχέση της USC ως προς τον $I_{s(50)}$ για την ομάδα Α (Akram και Bakar 2005)



Διάγραμμα 3.3 Σχέση της USC ως προς τον $I_{s(50)}$ για την ομάδα Β (Akram και Bakar 2005)

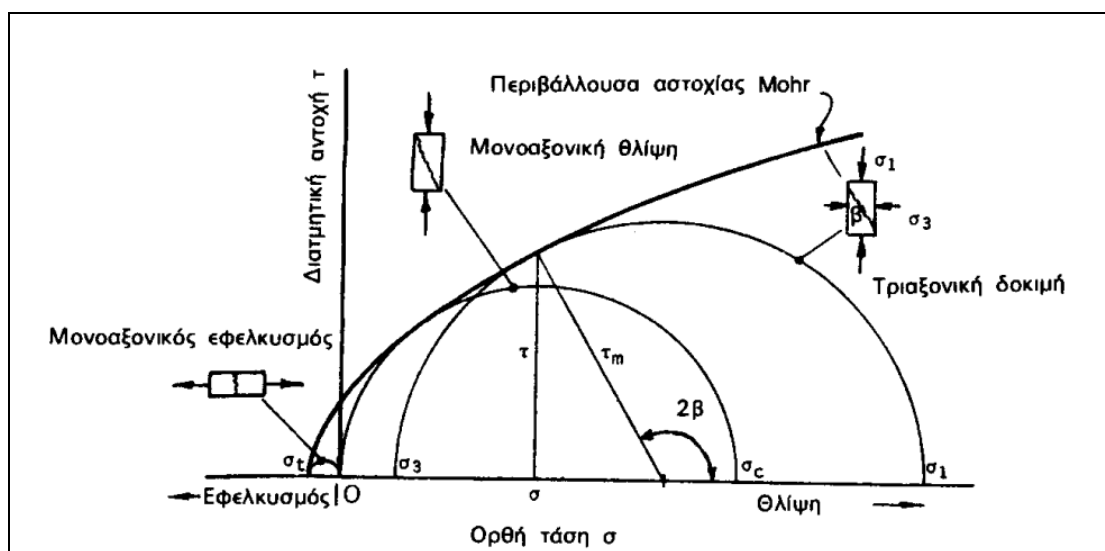
3.3 Τριαξονική Θλίψη (Triaxial Test)

Στη δοκιμή τριαξονικής θλίψης το κυλινδρικό δοκίμιο φορτίζεται αξονικά όπως και στη δοκιμή της ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, με τη μοναδική διαφορά ότι φορτίζεται και πλευρικά. Η πλευρική πίεση επιτυγχάνεται με τη εισαγωγή του δοκιμίου σε κατάλληλο κελί, το οποίο πληρώνεται με νερό ή έλαιο. Προηγουμένως όμως «ντύνεται» με αδιάβροχη μεμβράνη, ώστε να μην εισέλθει υγρό στους πόρους του.

Όπως αποδεικνύουν και τα πειράματα, η πλευρική πίεση αυξάνει την αντοχή του δοκιμίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μία πέτρα που βυθίζεται στον πάτο του ωκεανού. Η τεράστια πίεση λόγω του βάρους του υπερκείμενου νερού θα έπρεπε να την θρυμματίσει. Η πέτρα όμως παραμένει αλώβητη διότι ασκείται σε αυτή ίση πλευρική πίεση.

Η μέθοδος αυτή είναι χρονοβόρα. Το δοκίμιο πρέπει να τοποθετηθεί σωστά μέσα στο κελί και αυτό να ασφαλίσει. Έπειτα απαιτείται χρόνος

έτσι ώστε η πλευρική πίεση να ανέλθει στην επιθυμητή τιμή. Μετά την αστοχία του δοκιμίου, απαιτείται επιπλέον χρόνος ώστε να αποστραγγιστεί το νερό από το κελί και να αφαιρεθεί τελικά το κατεστραμμένο δοκίμιο. Τα πλεονεκτήματα όμως που προσφέρει είναι σημαντικά. Για κάθε πλευρική πίεση αποκτάται διαφορετική τιμή της αντοχής, και άρα ένας νέος κύκλος του Mohr στο διάγραμμα τ-σ. Έχοντας λοιπόν τρεις κύκλους από αντίστοιχα τρεις τριαξονικές δοκιμές, έναν κύκλο από μονοαξονική δοκιμή (προκύπτει από τη μέση αντοχή πολλών μονοαξονικών δοκιμών) και έναν κύκλο από δοκιμή εφελκυσμού (προκύπτει από τη μέση αντοχή πολλών εφελκυστικών δοκιμών) στο ίδιο διάγραμμα τ-σ, κατασκευάζεται η περιβάλλουσα των κύκλων και προσδιορίζεται η εξίσωσή της (Σχήμα 3.5) [Σοφιανός και Νομικός 2008].



Σχήμα 3.5 Περιβάλλουσα αστοχίας του Mohr (Πηγή: Σοφιανός και Νομικός 2008)

3.4 Τριαξονική, Πολυεπίπεδη Δοκιμή (Multi - Stage Triaxial Test)

Σκοπός της τριαξονικής, πολυεπίπεδης δοκιμής είναι ο υπολογισμός των μηχανικών παραμέτρων των πετρωμάτων, ως εναλλακτική μέθοδος μιας σειράς από τριαξονικές δοκιμές, χρησιμοποιώντας ένα μόνο δοκίμιο. Για τον λόγο αυτό, το δοκίμιο δεν θραύεται υπό σταθερή πλευρική πίεση, αλλά προηγούνται μία με δύο αυξήσεις της και εξάγονται δύο ή τρεις κύκλοι του Mohr αντίστοιχα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν υπάρχει περιορισμένος αριθμός δοκιμών και περιορισμένος χρόνος δοκιμών. Έχει επίσης το πλεονέκτημα της οικονομικότητας.

Η τριαξονική, πολυεπίπεδη δοκιμή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του '70 και κατοχυρώθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματά της με αυτά από σειρά τριαξονικών δοκιμών. Διαπιστώθηκε ότι αποτελεί καλή μέθοδο εκτίμησης των μηχανικών παραμέτρων σε σχιστόλιθο, αλλά όχι σε άμμους [Youn και Tonon 2009].

Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να υπολογίσουν το σημείο αλλαγής της πλευρικής πίεσης και την αύξησή της στο επόμενο επίπεδο (immiment point, stopping point), που σε κάθε περίπτωση πρέπει να βρίσκεται εντός της ελαστικής περιοχής του δοκιμίου [Youn και Tonon 2009]. Η ελαστική περιοχή κάθε βήματος μπορεί να υπολογισθεί ικανοποιητικά από προηγούμενες μονοαξονικές και τριαξονικές δοκιμές. Εάν αυτές δεν έχουν πραγματοποιηθεί λόγω έλλειψης δοκιμών (όταν πχ ο αρχικός πυρήνας του πετρώματος λαμβάνεται από μία βαθειά και μοναδική γεώτρηση), τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται από την αντίστοιχη βιβλιογραφία. Ο υπολογισμός του σημείου αυτού είναι πολύ σημαντικός, διότι αν ξεπεραστεί υπάρχει μεγάλος κίνδυνος αστοχίας του δοκιμίου πριν ολοκληρωθούν όλα τα επίπεδα του πειράματος.

Κεφάλαιο 4

Πειραματική διαδικασία και επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων

4.1 Μορφοποίηση δοκιμίων

Προκειμένου να προσδιοριστούν πειραματικά οι μηχανικές ιδιότητες ενός πετρώματος, είναι απαραίτητη η δημιουργία δοκιμίων (συνήθως κυλινδρικά) και κατόπιν η δοκιμή τους στην καταστρεπτική μέθοδο της θλίψης.

Αρχικά, ο πυρηνολήπτης λαμβάνει ένα δείγμα από το μητρικό πέτρωμα, το λεγόμενο «καρότο», το οποίο στη συνέχεια κόβεται στις βάσεις του με το δισκοπρίονο και λειαίνεται από τον λειαντή, έτσι ώστε να είναι επίπεδες και λείες.

Η Διεθνής κοινότητα της Μηχανικής Πετρωμάτων (International Society of Rock Mechanics) έχει προτείνει τις παρακάτω προδιαγραφές όσον αφορά τη δημιουργία των δοκιμίων:

- Οι βάσεις των κυλινδρικών δοκιμίων πρέπει να είναι επίπεδες και παράλληλες μεταξύ τους με ανοχή 0.02 mm και να μην αποκλίνουν από την καθετότητα ως προς τον άξονα του δοκιμίου περισσότερο από 0.001 ακτίνια (περίπου 3.5 λεπτά της μοίρας) ή 0.05 mm σε μήκος 50 mm.
- Η παράπλευρη επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να είναι λεία και ευθύγραμμη με ανοχή ± 0.3 mm κατά την έννοια όλου του μήκους του δοκιμίου.
- Η διάμετρος των δοκιμίων μετρείται 6 φορές με ακρίβεια 0.1 mm. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των μετρήσεων που είναι δύο κάθετες μεταξύ τους μετρήσεις αντίστοιχα στη κορυφή, την μέση και την βάση του δοκιμίου. Από το αποτέλεσμα αυτό υπολογίζεται το

εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου που αντιστοιχεί στην επιφάνεια φόρτισης του.

- Το ύψος του δοκιμίου μετράται με ακρίβεια 1.0 mm.

Κατασκευάστηκαν δεκαέξι (16) δοκίμια, μετρήθηκαν τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και καταγράφηκε η μακροσκοπική περιγραφή τους (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1 Μακροσκοπική περιγραφή των δοκιμίων

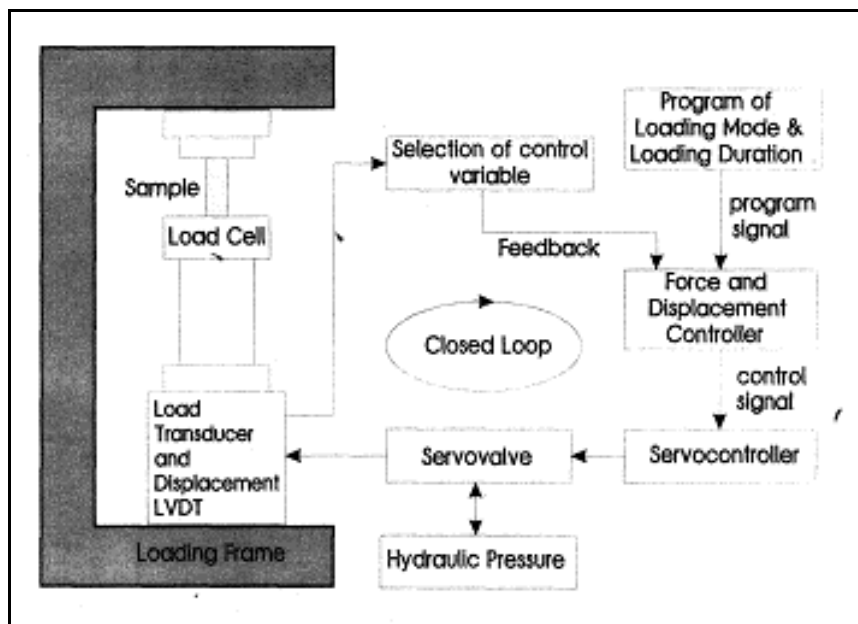
Αριθμός Δοκιμίου	Βάρος (g)	Ύψος (cm)	Διάμετρος (cm)	Επιφάνεια βάσης (cm ²)	Όγκος (cm ³)	Πυκνότητα (g/cm ³)
1	407,7	10,42	5,19	21,14	220,19	1,85
2	417,1	10,73	5,18	21,07	226,02	1,85
3	410,6	10,50	5,19	21,18	222,42	1,85
4	373,9	10,37	5,18	21,07	218,68	1,71
5	358,8	9,78	5,20	21,24	207,59	1,73
6	383,8	9,89	5,19	21,13	209,03	1,84
7	377,2	10,23	5,17	20,97	214,48	1,76
8	419,5	10,63	5,20	21,20	225,39	1,86
9	352,5	9,71	5,20	21,20	205,71	1,71
10	366,9	9,95	5,19	21,18	210,80	1,74
11	377,3	10,24	5,19	21,14	216,49	1,74
12	404,6	10,25	5,18	21,06	215,80	1,88
13	373,0	10,15	5,20	21,25	215,77	1,73
14	409,7	10,59	5,20	21,20	224,43	1,83
15	390,4	10,17	5,19	21,14	215,05	1,82
16	429,7	10,41	5,20	21,24	221,08	1,94

4.2 Εξοπλισμός

Οι συσκευές και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία είναι οι ακόλουθες:

- Συσκευή φόρτισης: πρόκειται για την άκαμπτη πρέσα τύπου MTS-815 με δυναμικότητα ± 1600 kN μέγιστης δύναμης (σε θλίψη και

εφελκυσμό) και μέγιστης μετατόπισης $\pm 50\text{mm}$ του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η συσκευή έχει την δυνατότητα να επιβάλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο ενώ συγχρόνως μετρά και καταγράφει σε Η/Υ το επιβαλλόμενο φορτίο καθώς και την μετατόπιση των εμβόλων. Για τον αυτόματο έλεγχο των δοκιμών χρησιμοποιεί ολοκληρωμένη ηλεκτρονική μικροκονσόλα (MTS 458.20) η οποία παρέχει έλεγχο κλειστού βρόγχου του σερβοϋδραυλικού συστήματος (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Απλοποιημένο σχεδιάγραμμα μηχανής κλειστού βρόχου.

Εκεί καταγράφονται τα δεδομένα σε ψηφιακή μορφή και επεξεργάζονται σε μεταγενέστερη φάση. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιήθηκε και στους τρεις τρόπους θλιπτικής φόρτισης (ανεμπόδιστη, τριαξονική και πολυεπίπεδη τριαξονική). Η μηχανή θλίψης φαίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 Πρέσα τύπου MTS-815

Επίσης:

- Πλάκες φόρτισης: Οι πλάκες φόρτισης χρησιμεύουν στο να μεταφέρουν το φορτίο και πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους.
- Σφαιρική κεφαλή έδρασης: Η σφαιρική κεφαλή έδρασης βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοκιμίου και ο άξονας είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης.

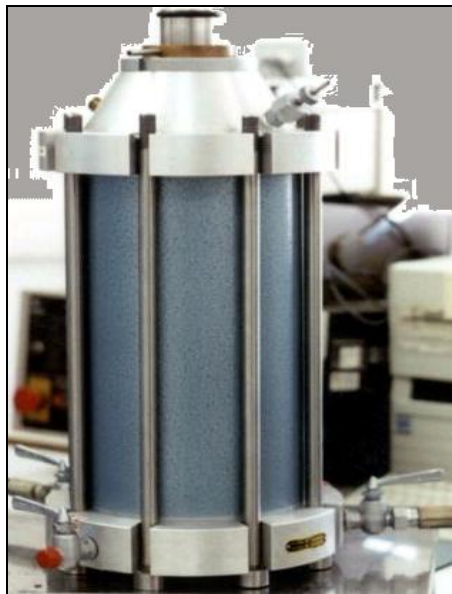
- Χαλύβδινες πλάκες έδρασης: Οι χαλύβδινες πλάκες έδρασης (platens), τοποθετούνται ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης και στο δοκίμιο και έχουν σαν στόχο να μειώσουν τις δυνάμεις της τριβής στα σημεία επαφής ώστε να αποφευχθούν οι συνέπειες του φαινομένου αυτού.
- Πλαστική μεμβράνη υψηλής αντοχής Εικόνα (4.2): Πρόκειται για μια μεμβράνη με κυλινδρικό σχήμα, αντίστοιχης διαμέτρου με τα δοκίμια, τα οποία περιβάλλει κατά την πραγματοποίηση των τριαξονικών δοκιμών. Χρησιμοποιείται για την αποφυγή εισροής νερού στους πόρους του δοκιμίου κατά την εφαρμογή της πλευρικής πίεσης, από τον ρυθμιστή πίεσης.



Εικόνα 4.2 Κυλινδρική μεμβράνη υψηλής αντοχής

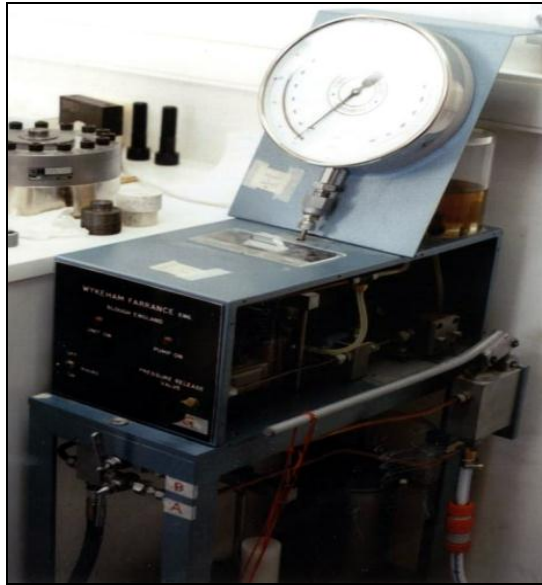
- Τριαξονικό κελί WF40035 (Εικόνα 4.3): Χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση τριαξονικών δοκιμών. Στο εσωτερικό του προσαρμόζεται το δοκίμιο, που είναι καλυμμένο με ελαστική μεμβράνη, έτσι ώστε να μην εισέλθει στους πόρους του το νερό, με το οποίο θα συμπιεστεί αργότερα για να επιτευχθεί η πλευρική πίεση. Το κελί τοποθετείται στην συσκευή φόρτισης για την εφαρμογή της αξονικής δύναμης, ενώ για την εφαρμογή της

πλευρικής πίεσης, συνδέεται κατάλληλα με τον ρυθμιστή πίεσης WF40060.



Εικόνα 4.3 Τριαξονικό κελί WF40035

- Ρυθμιστής πίεσης WF40060 (Εικόνα 4.4): Χρησιμοποιείται στις τριαξονικές δοκιμές για να αυξάνει την πίεση στο εσωτερικό του τριαξονικού κελιού και να εφαρμόζεται κατ' αυτόν τον τρόπο η πλευρική πίεση στο δοκίμιο



Εικόνα 4.4 Ρυθμιστής πίεσης WF40060

4.3 Δοκιμή Ανεμπόδιστης Μονοαξονικής Θλίψης (Uniaxial Test)

4.3.1 Πειραματική διαδικασία

Η φόρτιση ενός εργαστηριακού δοκιμίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

- A) Με έλεγχο φορτίου
- B) Με έλεγχο μετατόπισης

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η φόρτιση πραγματοποιείται κατά τον διαμήκη άξονά του και καταγράφεται η ανηγμένη παραμόρφωση που υφίσταται, μετρώντας την σύγκλιση των πλακών από τις οποίες εφαρμόζεται η θλιπτική τάση στο δοκίμιο.

Σύμφωνα με την αρχή του Saint Venant, η αντοχή του δοκιμίου θεωρείται ότι υπολογίζεται μακριά από τα σημεία επιβολής του φορτίου,

έτσι ώστε να θεωρείται ότι εφαρμόζεται ομοιόμορφο εντατικό πεδίο στο υλικό [Love, 1927].

Η αξονική τάση που επιβάλλει η μηχανή θλίψης, δεν έχει διατμητικές συνιστώσες, $\tau_{xy}=0$ (εφόσον οι έδρες του δοκιμίου είναι παράλληλες μεταξύ τους και αυτό έχει τοποθετηθεί σωστά), άρα ταυτίζεται με μία κύρια τάση, ισχύει δηλαδή: $\sigma_z = \sigma_1$. Ισχύει επίσης ότι: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ διότι το δοκίμιο είναι πλευρικά ελεύθερο.

Η παραπάνω εντατική κατάσταση του δοκιμίου που υφίσταται μονοαξονική καταπόνηση, είναι ιδανική. Στην πραγματικότητα, εμφανίζονται διατμητικές τάσεις στις περιοχές των πλακών φόρτισης λόγω της τριβής. Το φαινόμενο αυτό εξαλείφεται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό με την προσθήκη λιπαντικών μέσων (συνήθως βαζελίνης) ανάμεσα στις βάσεις των δοκιμίων και των πλακών φόρτισης.

4.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Κατά την διάρκεια της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, ο υπολογιστής που είναι συνδεδεμένος με την μηχανή φόρτισης, καταγράφει με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού την μετατόπιση l (mm) της πλάκας φόρτισης, καθώς και την δύναμη F (kN) που επιβάλλει στο δοκίμιο σε προκαθορισμένα χρονικά βήματα. Λαμβάνονται δηλαδή ζεύγη δεδομένων της μορφής:

$$li \ (l_1, l_2, l_3, \dots, l_n)$$

$$Fi \ (F_1, F_2, F_3, \dots, F_n)$$

Από τα παραπάνω στοιχεία μπορεί να εντοπιστεί η μέγιστη δύναμη που επεβλήθη στο δοκίμιο και να δοθεί το φορτίο θραύσης σε kN, καθώς και η αντίστοιχη μετατόπιση. Δύναται επίσης να κατασκευαστεί διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης και να δοθεί η γραφική λύση του προβλήματος.

Είναι όμως πιο βολικό να κατασκευαστεί διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης γι' αυτό και τα δεδομένα μετατρέπονται σε:

$$\varepsilon_i (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_n)$$

$$\sigma_i (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n)$$

σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\varepsilon_i = \frac{l_{i+1} - l_i}{h} \quad (4.1)$$

όπου h , το ύψος του δοκιμίου σε mm και

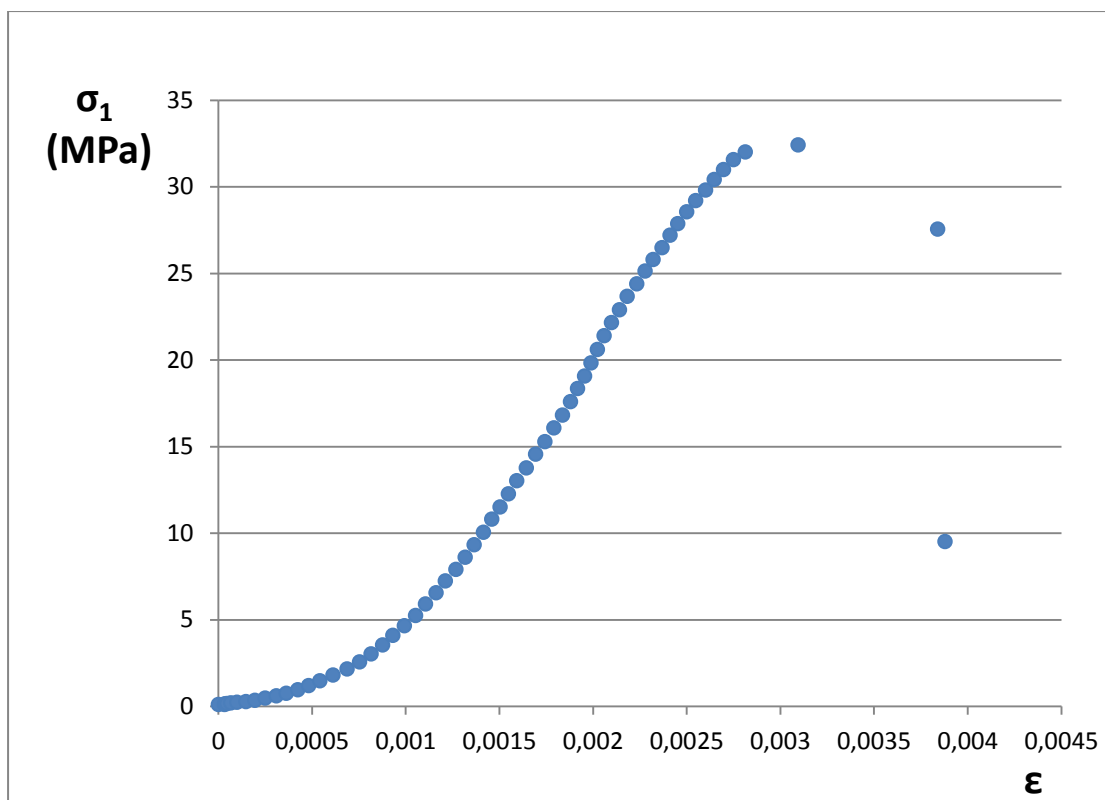
$$\sigma_i = \frac{F_i}{1000A} \quad (4.2)$$

όπου A το εμβαδό της κυκλικής διατομής του δοκιμίου σε m^2

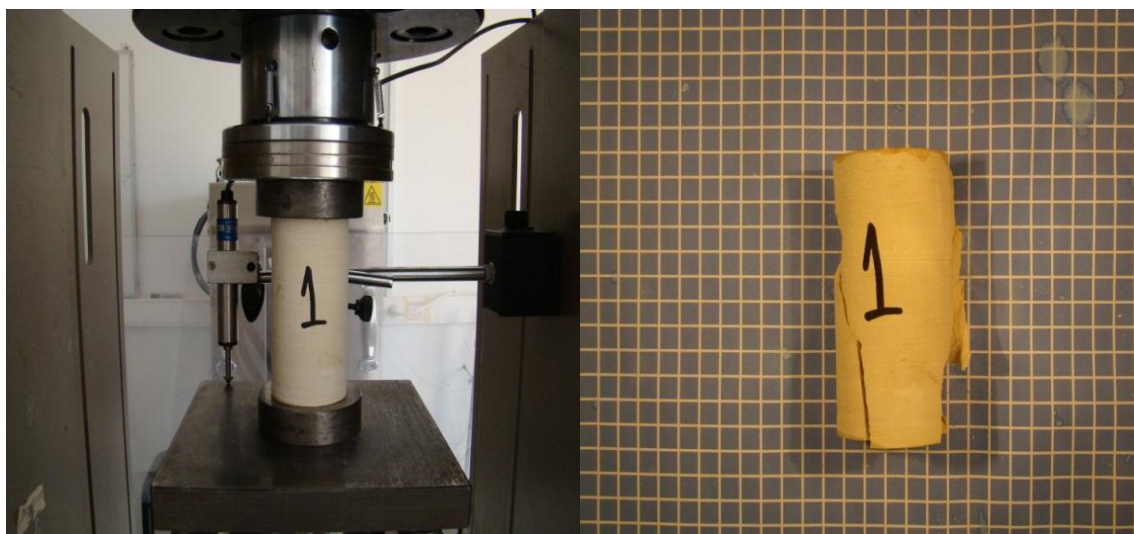
Από τις παραπάνω σχέσεις επαληθεύεται ότι η παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος, ενώ η τάση δίνεται σε MPa. Υπενθυμίζεται ότι:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / 1 \text{ m}^2$$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης έξι (6) δοκιμίων, τα οποία υπέστησαν δοκιμή μονοαξονικής θλίψης καθώς και φωτογραφίες πριν και μετά την δοκιμή τους.

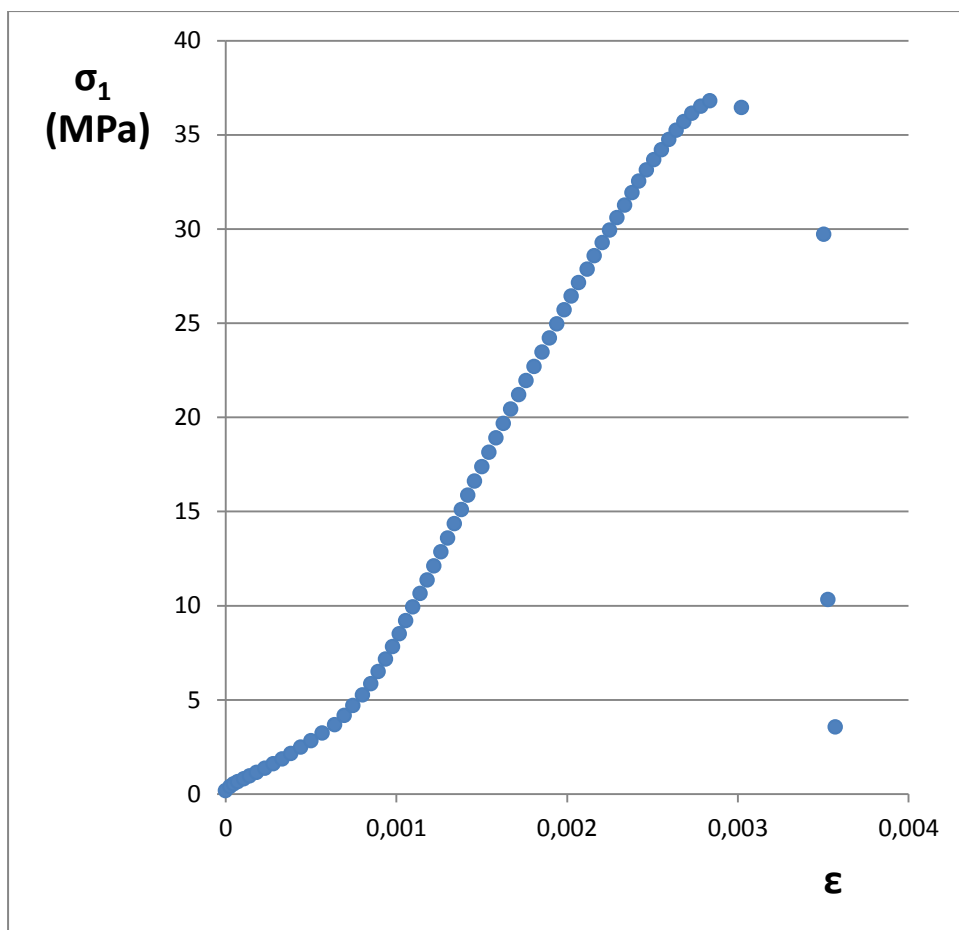


Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.1



Εικόνα 4.5 Το δοκίμιο Νο.1 πριν την δοκιμή

Εικόνα 4.6 Το δοκίμιο Νο.1 μετά την δοκιμή



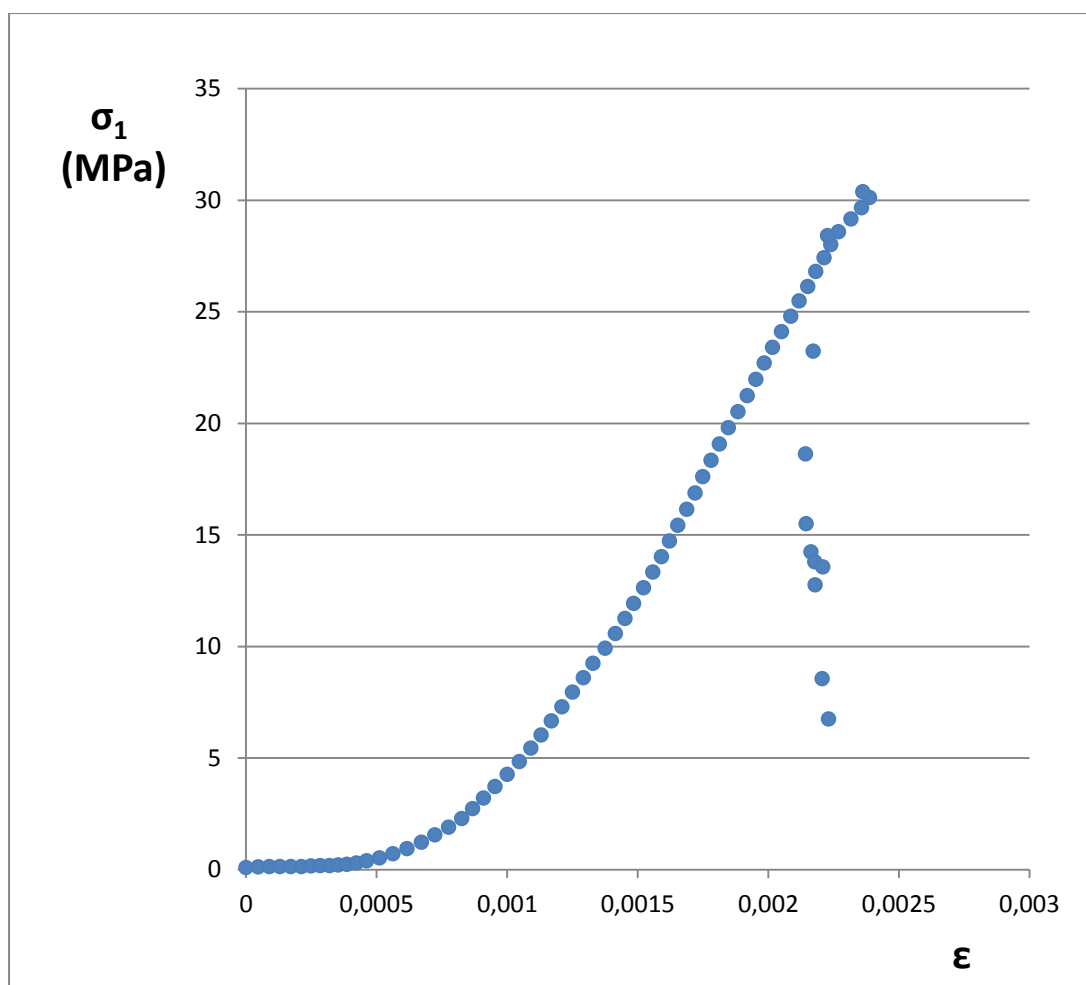
Διάγραμμα 4.2 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου No.2



Εικόνα 4.7 Το δοκίμιο No.2 πριν την δοκιμή



Εικόνα 4.8 Το δοκίμιο No.2 μετά την δοκιμή

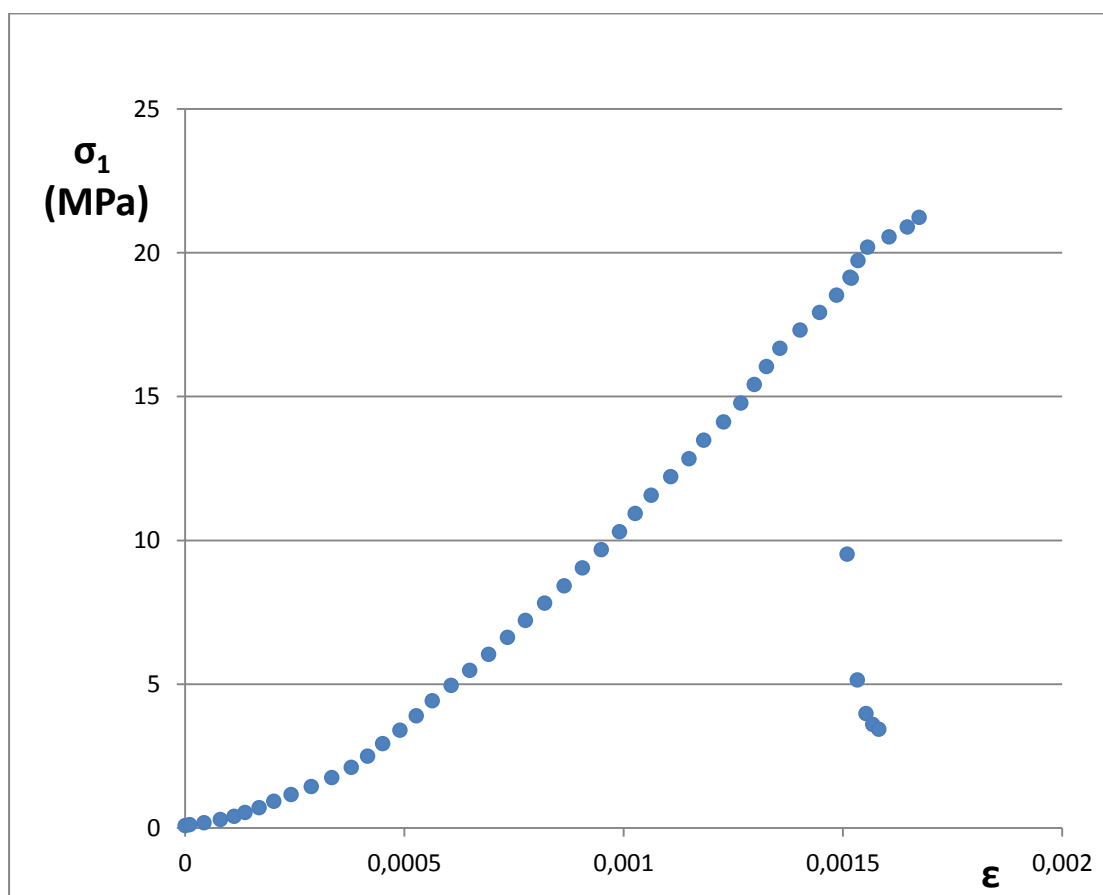


Διάγραμμα 4.3 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.3

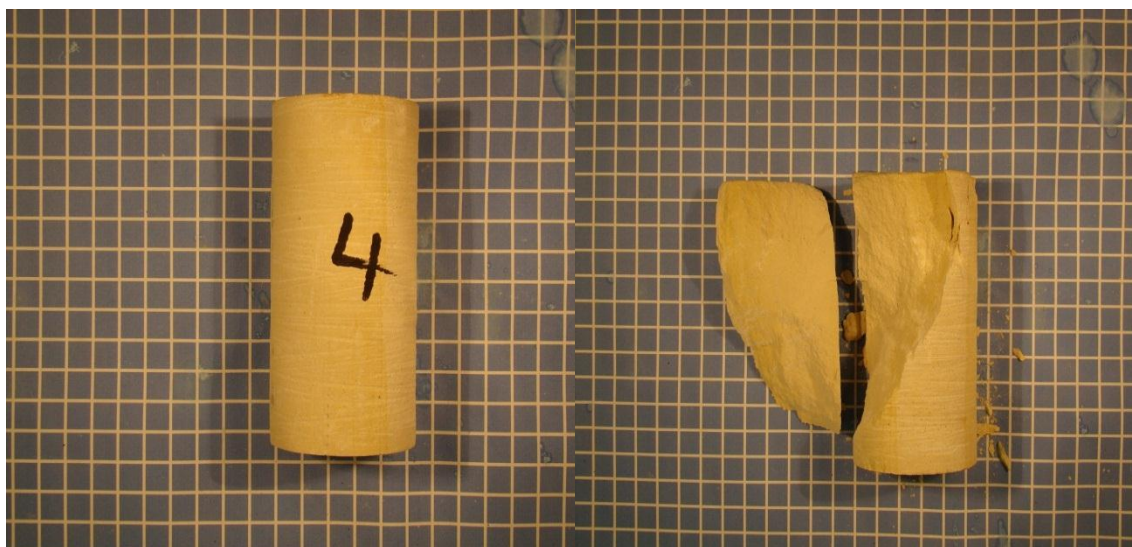


Εικόνα 4.9 Το δοκίμιο Νο.3 πριν την δοκιμή

Εικόνα 4.10 Το δοκίμιο Νο.3 μετά την δοκιμή

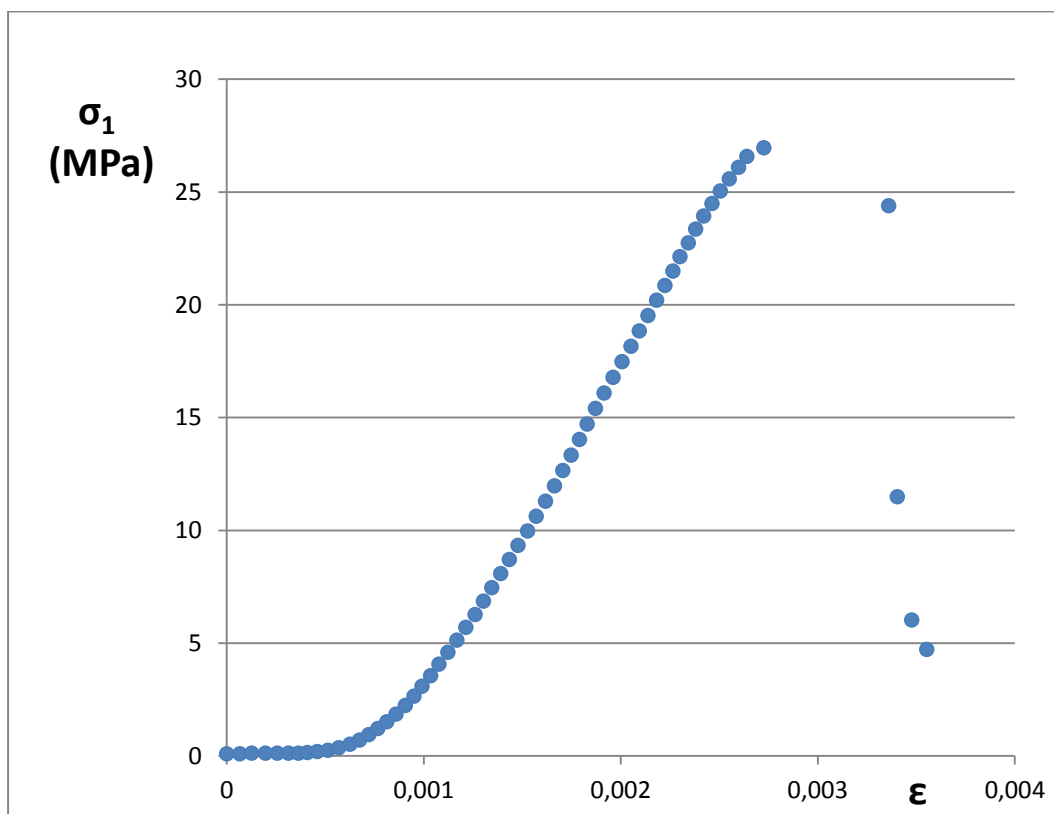


Διάγραμμα 4.4 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.4

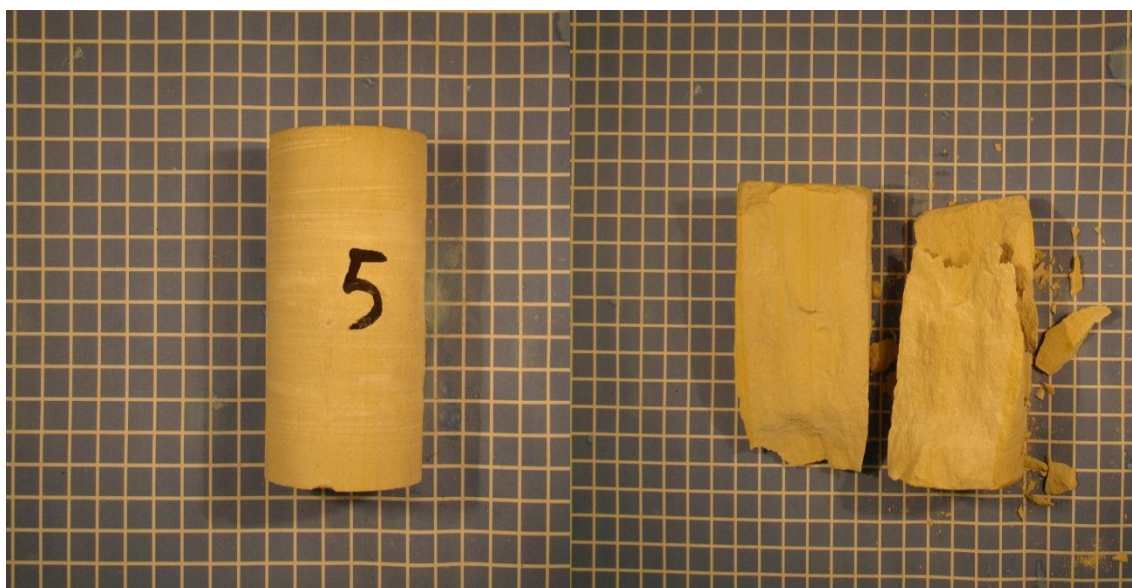


Εικόνα 4.11 Το δοκίμιο Νο.4 πριν τη δοκιμή

Εικόνα 4.12 Το δοκίμιο Νο.4 μετά τη δοκιμή

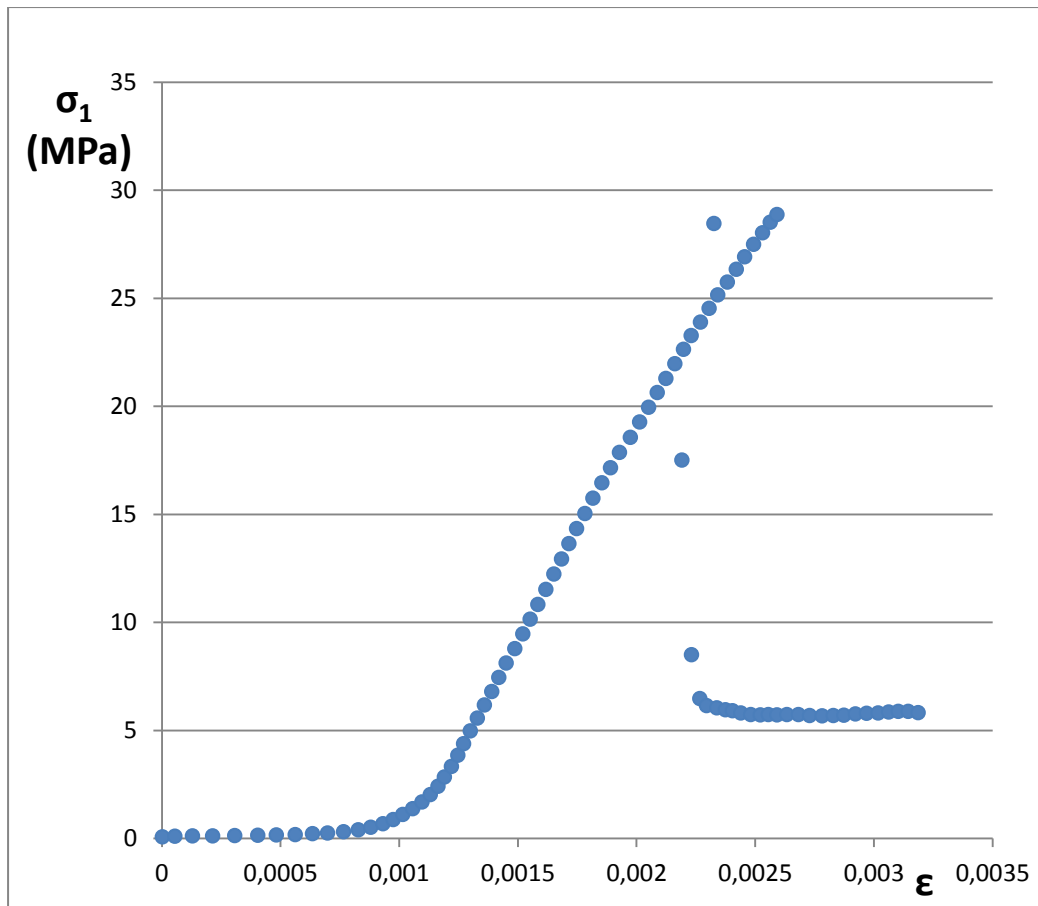


Διάγραμμα 4.5 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.5



Εικόνα 4.13 Το δοκίμιο Νο.5 πριν την δοκιμή

Εικόνα 4.14 Το δοκίμιο Νο.5 μετά την δοκιμή



Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.6



Εικόνα 4.15 Το δοκίμιο Νο.6 πριν την δοκιμή

Εικόνα 4.16 Το δοκίμιο Νο.6 μετά την δοκιμή

Στον πίνακα 4.2 δίνεται η μέγιστη τάση που δέχτηκε το καθένα από αυτά (σ_0 = αντοχή του δοκιμίου), καθώς και η αντίστοιχη παραμόρφωση.

Πίνακας 4.2 Μέγιστη τάση που δέχτηκε κάθε δοκίμιο και η αντίστοιχη παραμόρφωση

Αριθμός Δοκιμίου	σ_0 (MPa)	ϵ
1	32,41	0,31
2	36,80	0,28
3	30,37	0,24
4	21,23	0,17
5	26,96	0,27
6	28,87	0,26

Από τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα υπολογίζεται η μέση τιμή της αντοχής των δοκιμίων καθώς και η τυπική απόκλιση.

Μέση τιμή

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{\sigma_{0(1)} + \sigma_{0(2)} + \sigma_{0(3)} + \sigma_{0(4)} + \sigma_{0(5)} + \sigma_{0(6)}}{6} \Rightarrow \bar{\sigma}_0 = 29.44 \text{MPa}$$

Τυπική απόκλιση

$$S^2 = \frac{1}{6} \{ [\sigma_{0(1)} - \bar{\sigma}_0]^2 + [\sigma_{0(2)} - \bar{\sigma}_0]^2 + [\sigma_{0(3)} - \bar{\sigma}_0]^2 + [\sigma_{0(4)} - \bar{\sigma}_0]^2 + [\sigma_{0(5)} - \bar{\sigma}_0]^2 + [\sigma_{0(6)} - \bar{\sigma}_0]^2 \}$$

$\Rightarrow$

$$\Rightarrow S^2 = 22.96 \text{MPa}^2 \Rightarrow S = 4.78 \text{MPa}$$

4.4 Τριαξονική Δοκιμή (Triaxial Test)

4.4.1 Πειραματική διαδικασία

Το δοκίμιο “ντύνεται” με αδιάβροχη μεμβράνη και τοποθετείται στο κέντρο κελιού μέγιστης πλευρικής πίεσης 14 MPa. Το καπάκι του κελιού βιδώνεται σφιχτά και τοποθετείται στην μηχανή θλίψης.

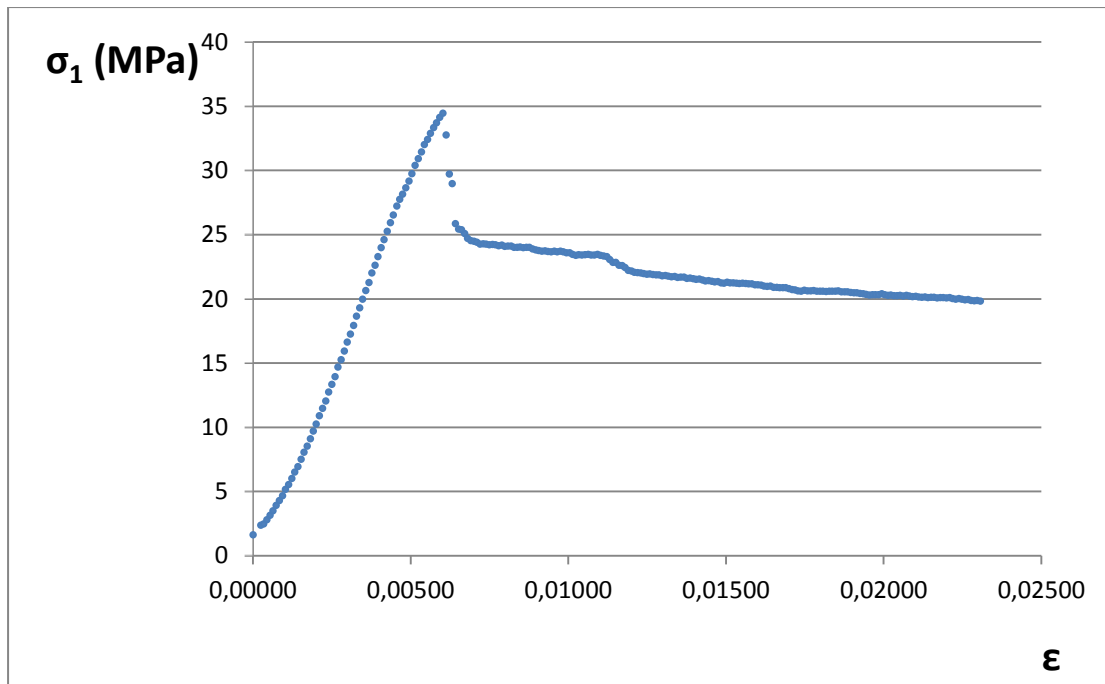
Ένα δοχείο λαδιού που πιέζεται από την εφαρμογή βάρους, πιέζει με την σειρά του το νερό που λαμβάνεται απ’ευθείας από την βρύση και αυτό προκαλεί την πλευρική πίεση που ασκείται ομοιόμορφα γύρω από το δοκίμιο. Ισχύει δηλαδή: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, συγκεκριμένο βάρος που ασκείται στο δοχείο, προκαλεί συγκεκριμένη πλευρική πίεση.

Τέλος, σημειώνεται η σπουδαιότητα της αδιάβροχης μεμβράνης: Εάν εισαχθεί νερό στους πόρους του δοκιμίου, η αντοχή του θα αυξηθεί, διότι η μηχανή θλίψης θα πρέπει να υπερνικήσει και την πίεση των πόρων του. Φυσικά, αύξηση του βαθμού κορεσμού συνεπάγεται και αύξηση της αντοχής του.

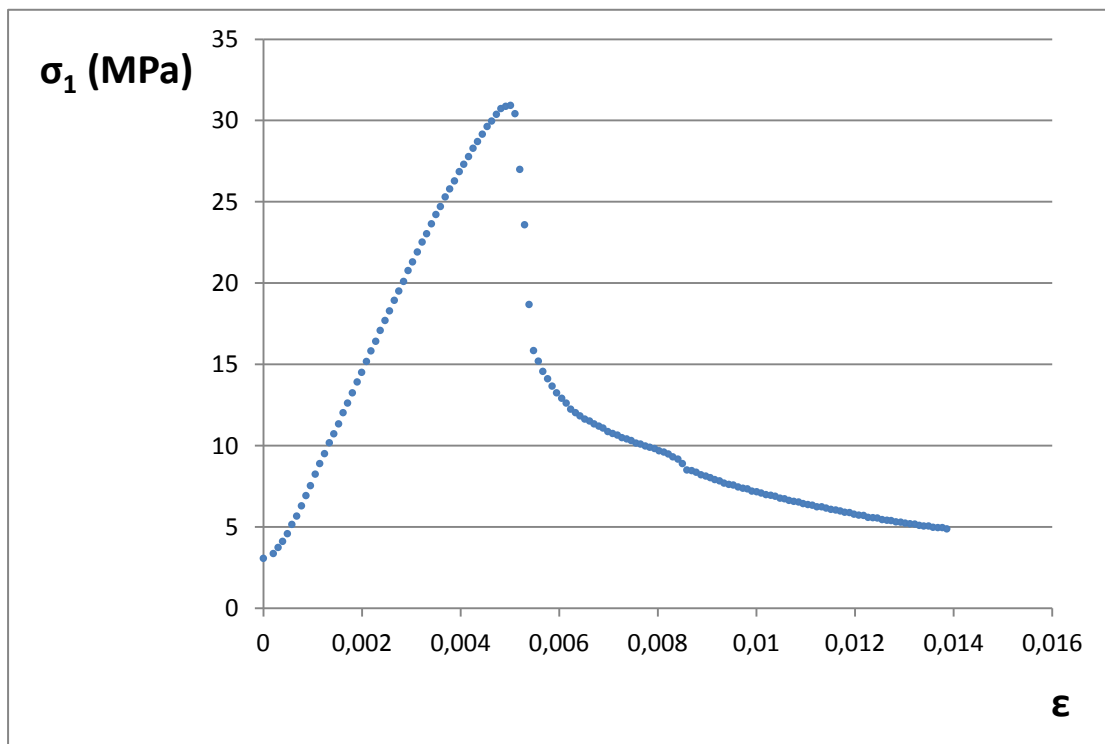
4.4.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Η διαδικασία είναι ίδια με αυτή της μονοαξονικής θλίψης και τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης έχουν την ίδια μορφή. Απαιτείται όμως η αναφορά της πλευρικής πίεσης για κάθε δοκίμιο ως επαλήθευση, διότι θεωρητικά, η καμπύλη αρχίζει από τον άξονα της σ_1 και από την τιμή της πλευρικής πίεσης όπου πραγματοποιήθηκε το πείραμα.

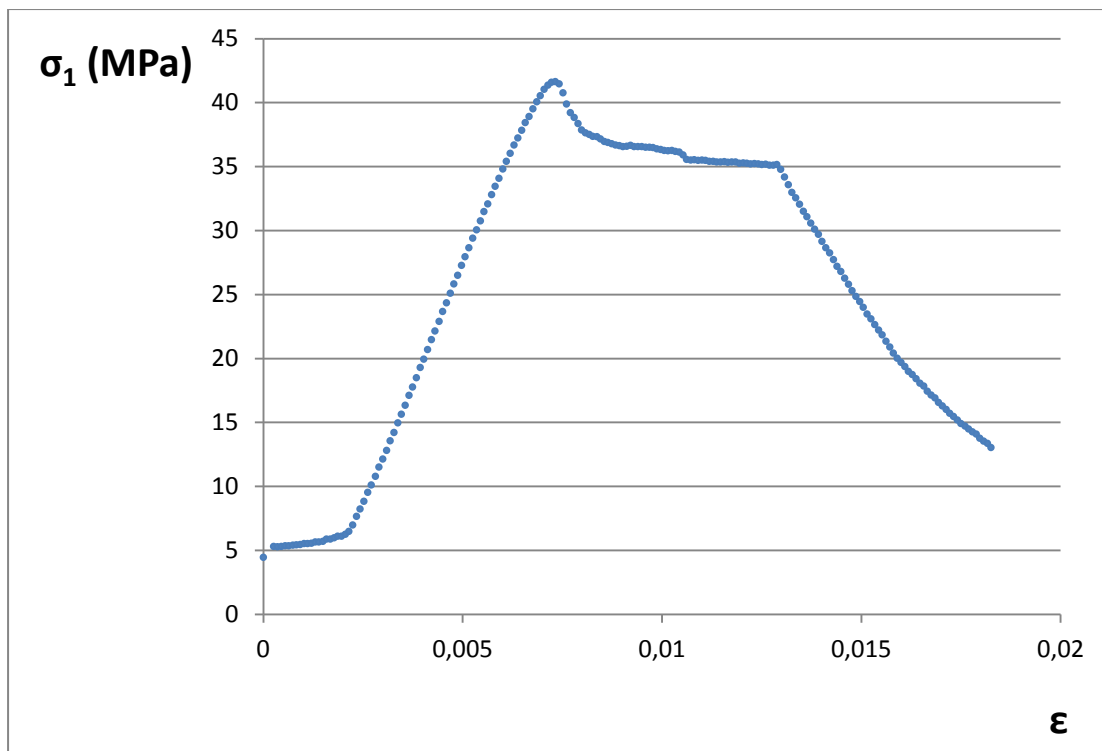
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης τριών (3) δοκιμίων, τα οποία υπέστησαν δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται συνοπτικά η μέγιστη τάση που δέχτηκε το καθένα από αυτά (αντοχή του δοκιμίου), σε ποιά πλευρική πίεση, καθώς και σε ποιά παραμόρφωση.



Διάγραμμα 4.7 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.7, πλευρικής πίεσης $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$



Διάγραμμα 4.8 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.8, πλευρικής πίεσης $\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$



Διάγραμμα 4.9 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.10, πλευρικής πίεσης $\sigma_3= 6$ MPa

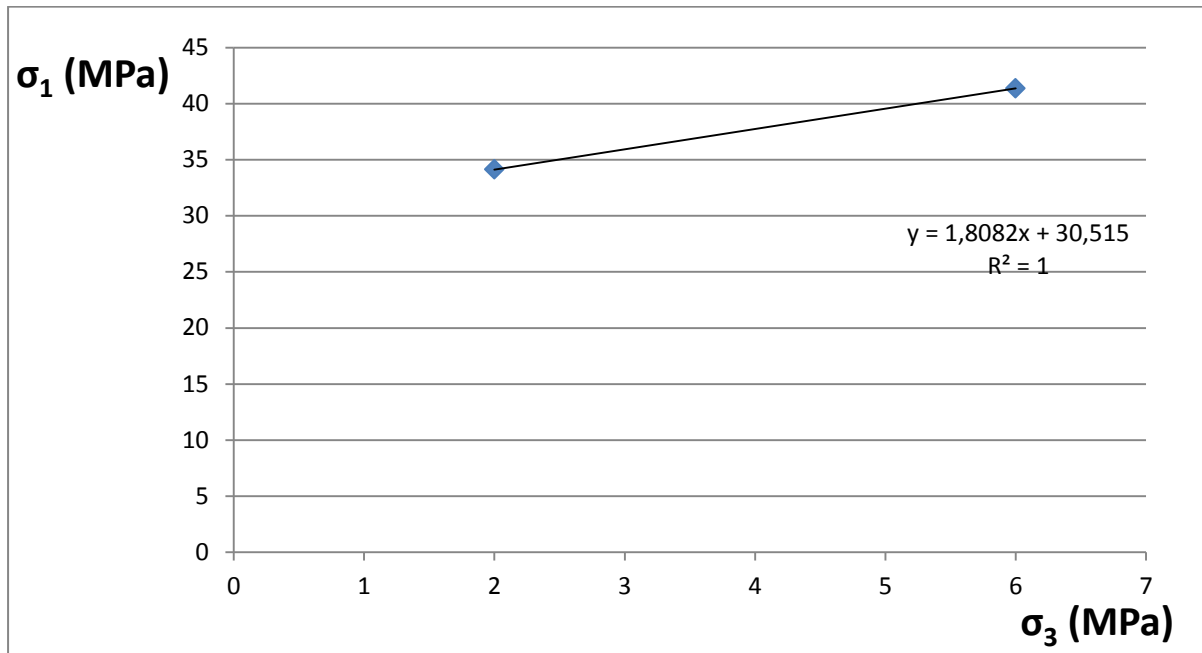
Πίνακας 4.3 Μέγιστη τάση που δέχτηκε κάθε δοκίμιο στις αντίστοιχες πλευρικές τάσεις και παραμορφώσεις

Αριθμός δοκιμίου	σ_0 (MPa)	σ_3 (MPa)	ϵ
7	34,13	2	0,59
8	30,89	4	0,49
10	41,36	6	0,71

Η αντοχή του δοκιμίου Νο.8 παρουσιάζεται χαμηλότερη ακόμη και από αυτή του δοκιμίου Νο.7, παρόλο που η πλευρική πίεση αυξήθηκε κατά 2 MPa. Αυτό ίσως οφείλεται σε κάποια εσωτερική ασυνέχεια.

Από τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα (εκτός από αυτά του δοκιμίου Νο.8) κατασκευάζεται διάγραμμα « σ_1 vs σ_3 ». Η ευθεία που προκύπτει, τέμνει τον άξονα του σ_1 σε μία νέα εκτίμηση της αντοχής του πετρώματος

και η οποία συγκρίνεται με την υπολογισθείσα αντοχή των μονοαξονικών δοκιμών.



Διάγραμμα 4.10 « σ_1 vs σ_3 » για τα δοκίμια No.7 και No.10

Από την εξίσωση του διαγράμματος και για $x=0$, προκύπτει ότι $y=30.51\text{MPa}$. Η εκτίμηση αυτή βρίσκεται πολύ κοντά με την υπολογισθείσα αντοχή των μονοαξονικών δοκιμών.

Επίσης, με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος «Graph» κατασκευάζονται οι κύκλοι του Mohr σε διάγραμμα « τ vs σ ». Η περιβάλλουσα ευθεία των κύκλων τέμνει τον άξονα του « τ » σε μία εκτίμηση της συνοχής του πετρώματος.

Το πρόγραμμα δύναται να κατασκευάσει οποιαδήποτε γραφική παράσταση, αρκεί να του δοθεί στη μορφή $y = f(x)$.

Η γενική εξίσωση του κύκλου είναι:

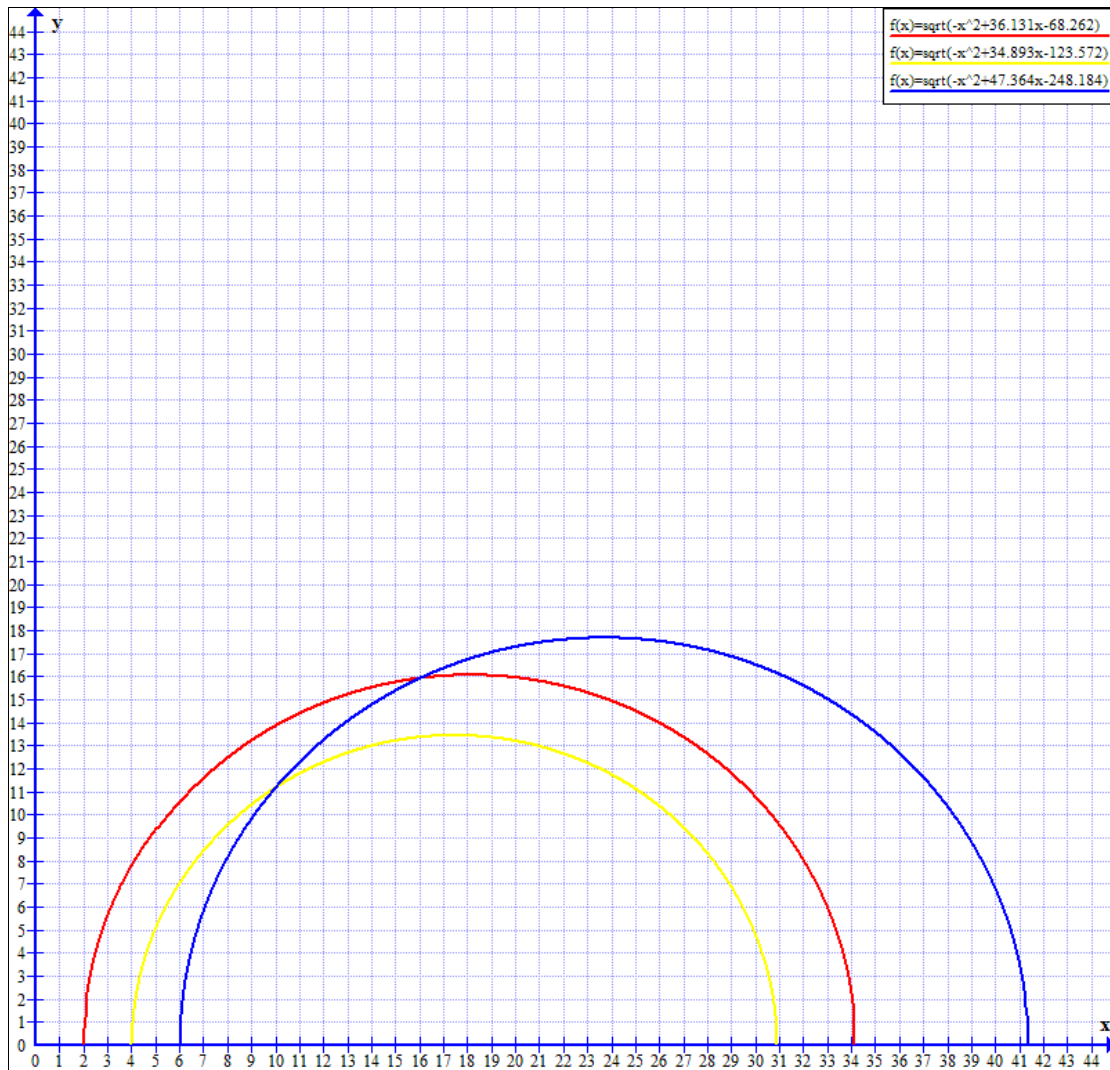
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (4.3)$$

όπου $K(x_0, y_0)$ οι συντεταγμένες του κέντρου του και R η ακτίνα του.

Αντικαθιστώντας $x_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, $y = 0$ και $R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ προκύπτει η

$$y = \sqrt{-x^2 + (\sigma_1 + \sigma_3)x - \sigma_1\sigma_3} \quad (4.4)$$

Εφαρμόζοντας την (4.4) στο «Graph» για τις τιμές σ_1 και σ_3 των δοκιμίων No.7, No.8 και No.10, λαμβάνεται το διάγραμμα 4.11:



Διάγραμμα 4.11 Κύκλοι του Mohr για το σύνολο των τριαξονικών δοκιμών

Παρατηρείται ότι ο κύκλος του δοκιμίου No.8 εμπεριέχεται στον κύκλο του δοκιμίου No.7, όπως άλλωστε αναμενόταν από τα δεδομένα του πίνακα 4.3. Ο σχεδιασμός του πραγματοποιήθηκε για λόγους σύγκρισης.

Οι εξισώσεις των κύκλων των δοκιμίων No.7, No.8 και No.10 είναι αντίστοιχα οι εξής:

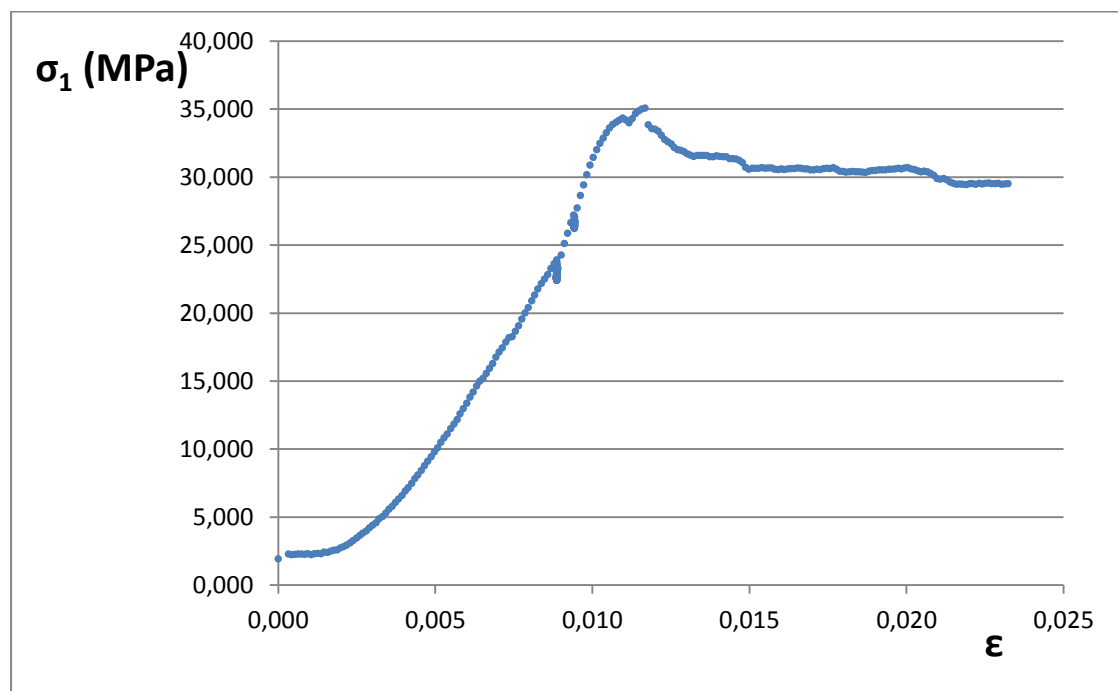
- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 48.532x - 227.61072}$

- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 34.893x - 123.572}$
- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 47.364x - 248.184}$

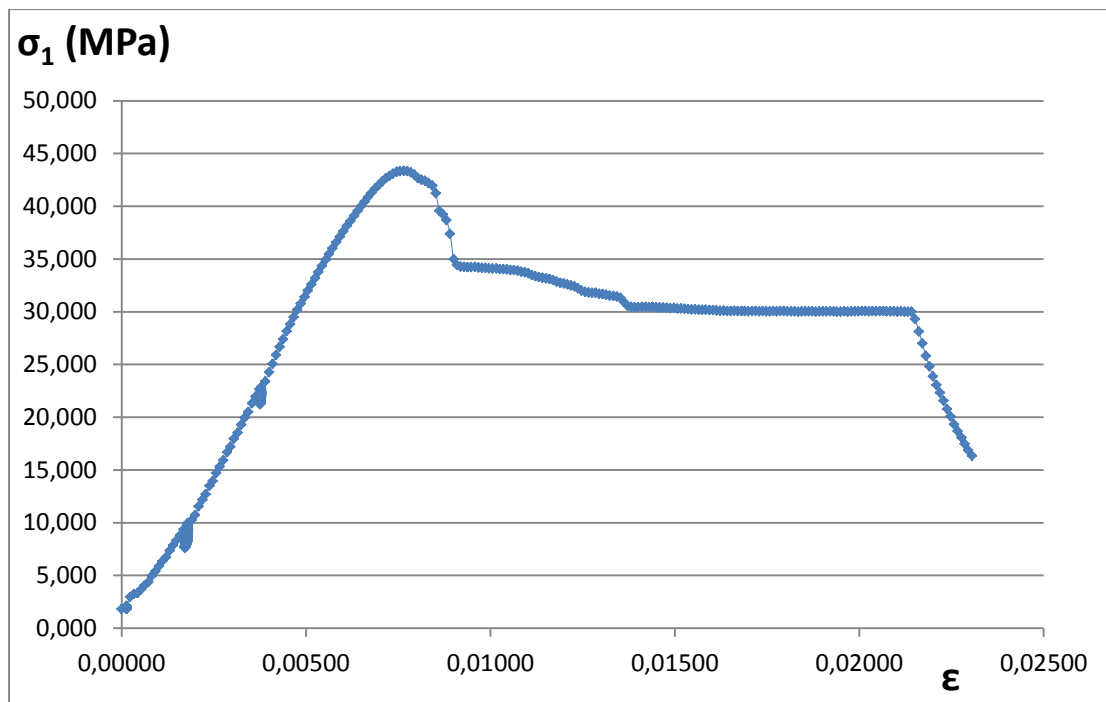
4.5 Τριαξονική, Πολυεπίπεδη Δοκιμή (Multi - Stage Triaxial Test)

Τα πειράματα τριαξονικής, πολυεπίπεδης δοκιμής για τρία δοκίμια έδωσαν τα παρακάτω διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης. Από τα δεδομένα κάθε δοκιμίου κατασκευάζεται διάγραμμα « σ_1 vs σ_3 » και προκύπτουν άλλες δύο εκτιμήσεις για την αντοχή του πετρώματος. Επίσης, από τα δοκίμια Νο.9 και Νο.16 κατασκευάζονται τρεις κύκλοι του Mohr ενώ από το δοκίμιο Νο.15 μόνο δύο διότι αστόχησε πριν τη δεύτερη αύξηση της πλευρικής πίεσης.

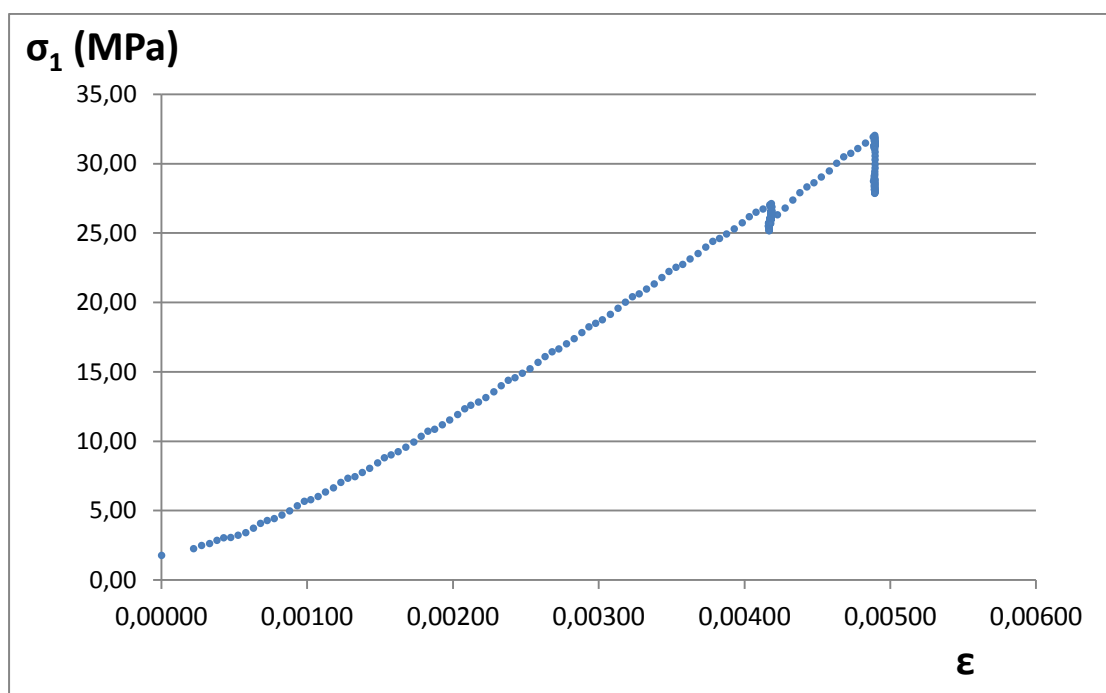
Όπως ήδη προαναφέρθηκε, η πλευρική τάση αυξάνεται λίγο πριν το δοκίμιο αστοχήσει. Σαν σ_3 όμως θα χρησιμοποιηθεί η τελική τάση κάθε βήματος διότι βρίσκεται πολύ κοντά στην αντοχή του πετρώματος για δεδομένη πλευρική πίεση.



Διάγραμμα 4.12 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.9, σε πλευρικές πιέσεις: 2,1 MPa / 3,68 MPa / 5,26 MP



Διάγραμμα 4.13 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου Νο.16, σε πλευρικές πιέσεις: 2,1 MPa / 3,68 MPa / 5,26 MP



Διάγραμμα 4.14 Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωση δοκιμίου Νο.15, σε πλευρικές πιέσεις: 2,1 MPa / 3,68 MPa / 5,26 MP

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα τριαξονικής πολυεπίπεδης δοκιμής για το δοκίμιο No.9

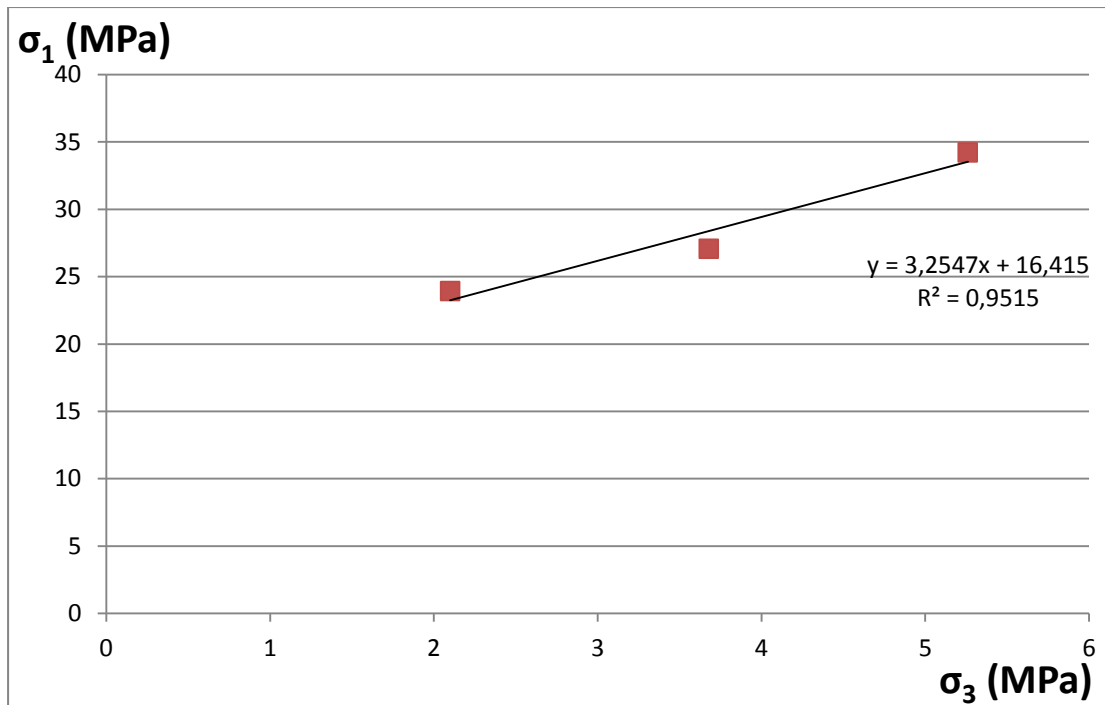
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
23,920	2,10
27,052	3,68
34,205	5,26

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα τριαξονικής πολυεπίπεδης δοκιμής για το δοκίμιο No.16

σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
9,378	2,10
22,656	3,68
43,272	5,26

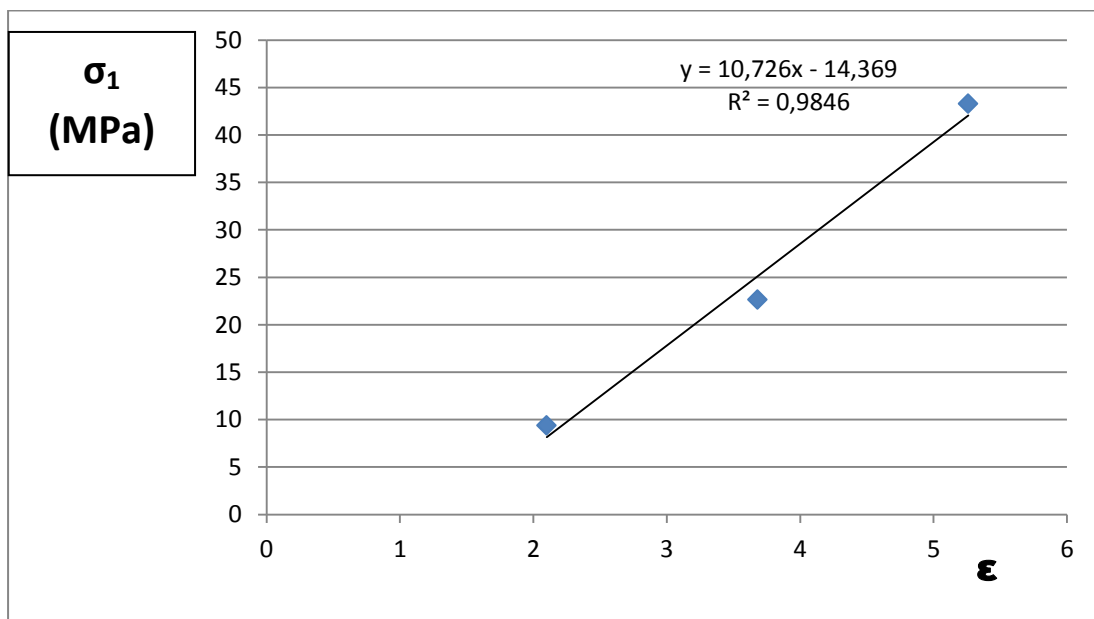
Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα τριαξονικής πολυεπίπεδης δοκιμής για το δοκίμιο No.15

σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
22,730	2,10
26,840	3,68



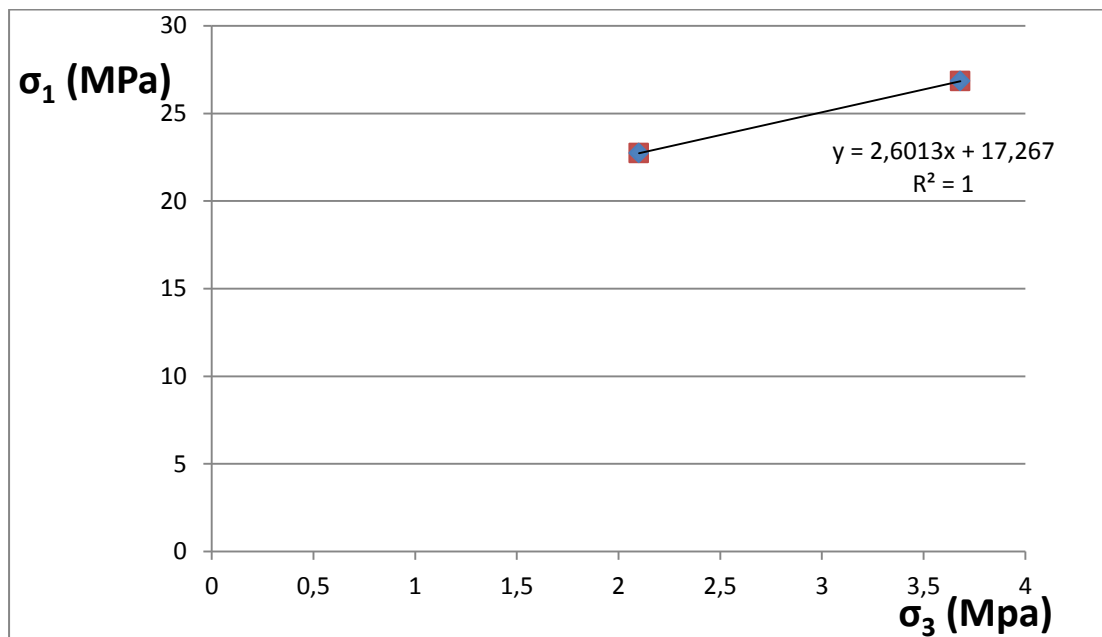
Διάγραμμα 4.15 « σ_1 vs σ_3 » για το δοκίμιο No.9

Θέτοντας $x=0$ στην εξίσωση της ευθείας του παραπάνω διαγράμματος, λαμβάνεται ότι $y=16.42\text{MPa}$. Η εκτίμηση της αντοχής του πετρώματος με αυτή τη μέθοδο είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις προηγούμενες δύο. Η παραδοχή της χρήσης της τελικής τάσης κάθε βήματος ως σ_1 αποδεικνύεται λανθασμένη.



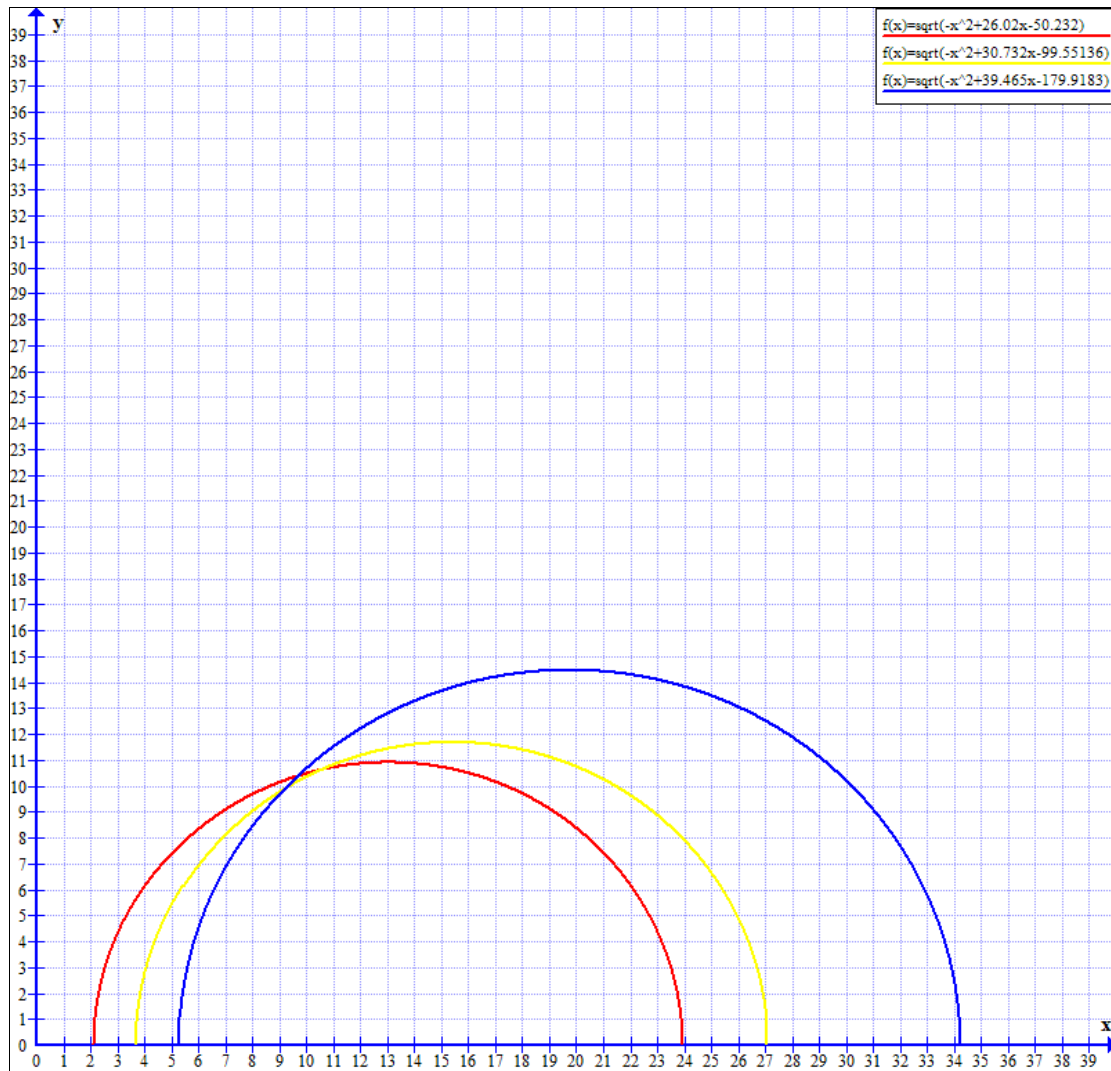
Διάγραμμα 4.16 « σ_1 vs σ_3 » για το δοκίμιο No.16

Θέτοντας $x=0$ στην εξίσωση της ευθείας του παραπάνω διαγράμματος, λαμβάνεται ότι $y=-14,37\text{MPa}$. Η αρνητική τιμή της εκτιμώμενης αντοχής δεν είναι φυσικά αποδεκτή. Στην περίπτωση του δοκίμιου No.16, οι αυξήσεις των πλευρικών πιέσεων πραγματοποιήθηκαν πριν η κατακόρυφη τάση πλησιάσει αρκετά την τάση αστοχίας του κάθε βήματος.



Διάγραμμα 4.17 « σ_1 vs σ_3 » για το δοκίμιο No.15

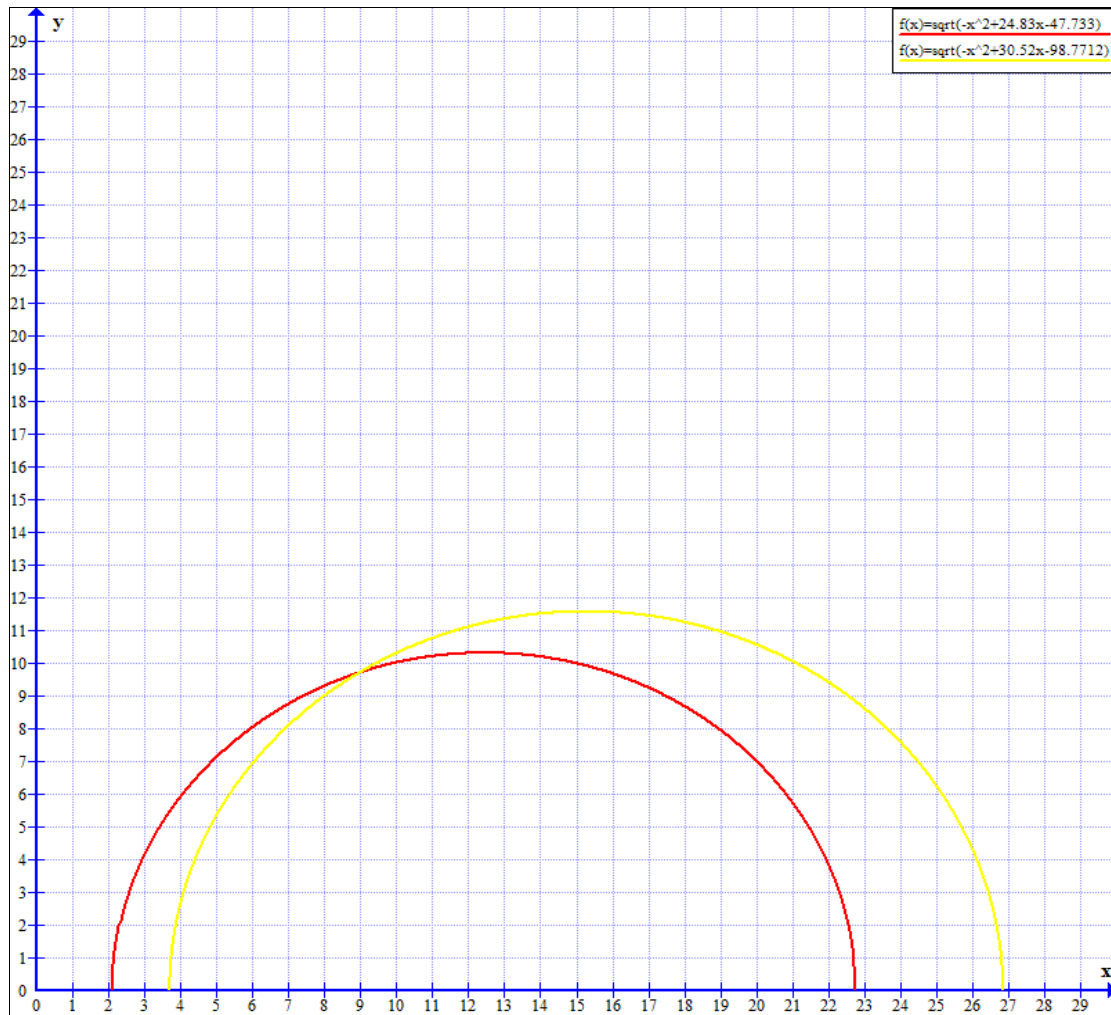
Ομοίως και για την εξίσωση του διαγράμματος 4.4.6, για $x=0$ λαμβάνεται ότι $y=17.23\text{MPa}$. Η εκτίμηση αυτή προσεγγίζει αυτή του διαγράμματος 4.4.4, αλλά και οι δύο βρίσκονται μακριά από τις εκτιμήσεις των δύο προηγούμενων μεθόδων.



Διάγραμμα 4.18 Κύκλοι του Mohr για το δοκίμιο Νο.9

Οι εξισώσεις των κύκλων για το δοκίμιο Νο.9 είναι οι εξής:

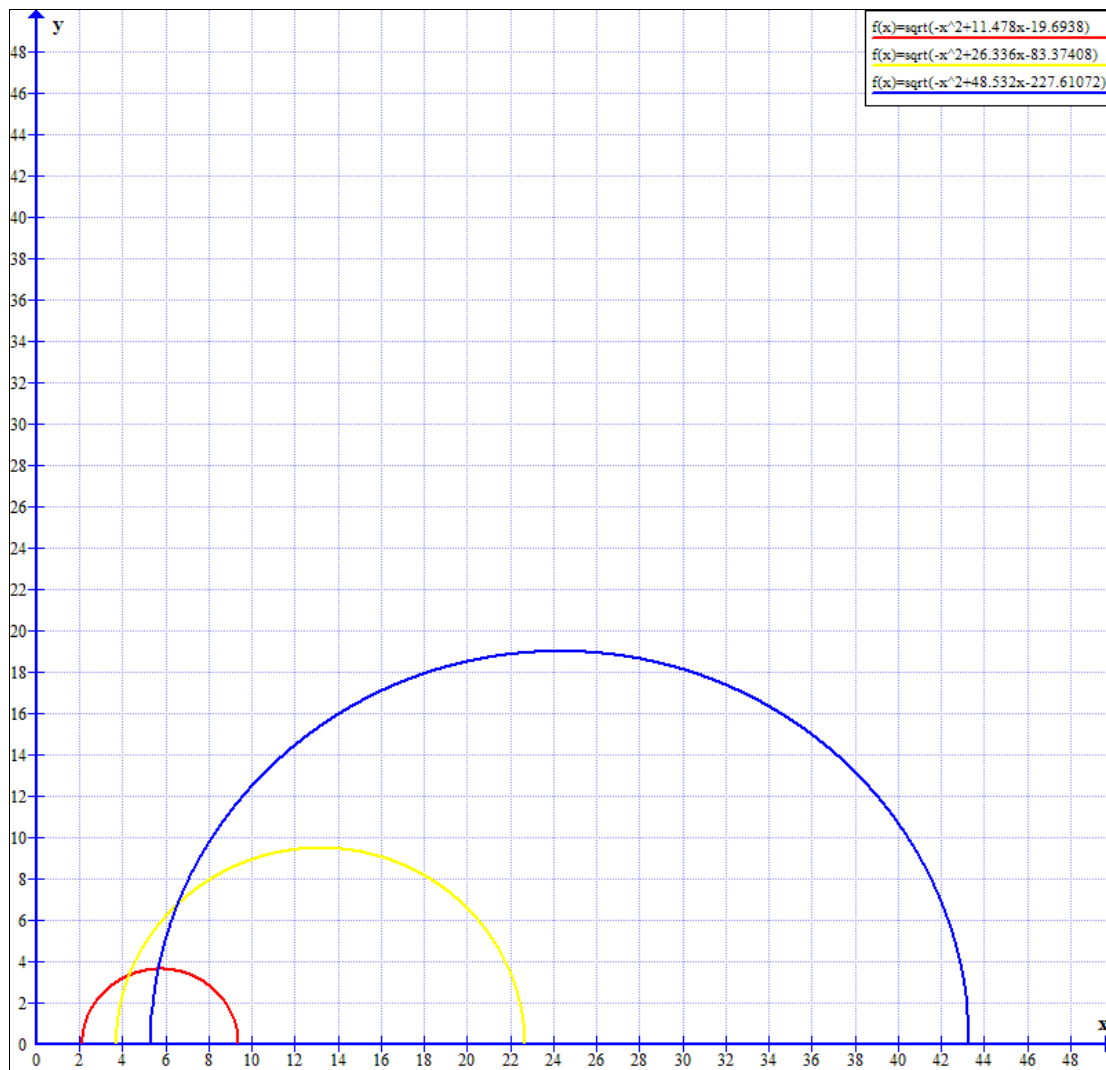
- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 26.02x - 50.232}$
- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 30.732x - 99.55136}$
- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 39.465x - 179.9183}$



Διάγραμμα 4.19 Κύκλοι του Mohr τους για το δοκίμιο No.15

Οι εξισώσεις των κύκλων για το δοκίμιο No.15 είναι οι εξής:

- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 24.83x - 47.733}$
- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 30.52x - 98.7712}$



Διάγραμμα 4.20 Κύκλοι του Mohr για το δοκίμιο No.16

Οι εξισώσεις των κύκλων για το δοκίμιο No.16 είναι οι εξής:

- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 11.478x - 19.6938}$
- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 26.336x - 83.37408}$
- $f(x) = \sqrt{-x^2 + 48.532x - 227.61072}$

Κεφάλαιο 5

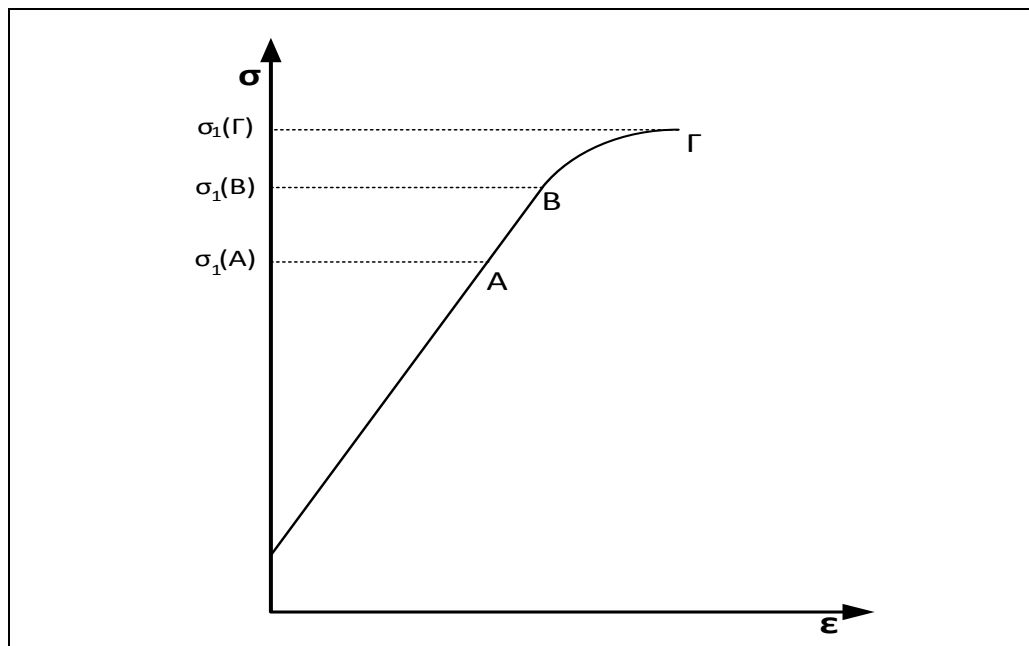
Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Θεωρώντας ότι τα πετρώματα διέπονται από το κριτήριο αστοχίας του Coulomb, επιχειρήθηκε να συγκριθεί η Πολυεπίπεδη Τριαξονική Δοκιμή με μία σειρά από απλές Τριαξονικές Δοκιμές. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν ισάριθμα πειράματα και συγκρίθηκαν τα διεξαγόμενα αποτελέσματά τους όσον αφορά την αντοχή των δοκιμών σε θλίψη.

Τα αποτελέσματα από τις Ανεμπόδιστες Μονοαξονικές και Τριαξονικές δοκιμές είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους και επαληθεύονται από τη βιβλιογραφία. Οι Πολυεπίπεδες Τριαξονικές δοκιμές όμως δίνουν πολύ μικρότερες τιμές αντοχής σε θλίψη και σε μία περίπτωση μάλιστα λαμβάνεται αρνητική τιμή, η οποία φυσικά απορρίπτεται. Η εξήγηση για το παραπάνω φαινόμενο είναι ότι για τους υπολογισμούς της αντοχής του πετρώματος θεωρήθηκε ότι το σημείο τερματισμού σχεδόν ταυτίζεται με την αντοχή του πετρώματος στη συγκεκριμένη πλευρική πίεση. Η αλλαγή της πλευρικής πίεσης κάθε βήματος όμως, πραγματοποιούνταν πολύ πριν το σημείο τερματισμού προσεγγίσει τη $\sigma_1(\max)$, το σημείο δηλαδή όπου το δοκίμιο αστοχεί, ώστε να μην επέλθει δηλαδή ανεπιθύμητη αστοχία (σχ.5.1).

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η Πολυεπίπεδη Τριαξονική δοκιμή πάντα θα αποδίδει διαφορετική τιμή (και μάλιστα προς τα κάτω) σε σχέση με μία σειρά από απλές Τριαξονικές δοκιμές, διότι τα βήματα του πειράματος θα διακόπτονται πριν το δοκίμιο αστοχήσει (εκτός από το τελευταίο βήμα). Το μέγεθος του σφάλματος εξαρτάται από το πόσο απέχει το σημείο τερματισμού του βήματος (stopping point) από το σημείο αστοχίας του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα εξαρτάται από το εύρος της πλαστικής περιοχής του πετρώματος, εφόσον το ιδανικό σημείο τερματισμού βρίσκεται στο ανώτατο όριο της ελαστικής του περιοχής.



Σχήμα 5.1 Το σημείο Α αντιπροσωπεύει το σημείο τερματισμού. Κάτω από σημείο Β βρίσκεται η ελαστική περιοχή. Το μήκος Β-Γ αντιπροσωπεύει την πλαστική περιοχή. Το σημείο Γ αντιπροσωπεύει το σημείο θραύσης.

5.2 Προτάσεις

Ένας έμπειρος χειριστής μηχανής θλίψης είναι ικανός να διακόψει το βήμα του πειράματος πριν η τάση φόρτισης εισέλθει στην πλαστική περιοχή, παρακολουθώντας την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης που σχηματίζεται στην οθόνη του υπολογιστή ενώ εκτελείται το πείραμα και έχοντας υπόψη τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης από τις αντίστοιχες τριαξονικές δοκιμές. Το σφάλμα όμως λόγω της πλαστικής περιοχής παραμένει και πρέπει να βρεθεί τρόπος να εξαλειφθεί.

Αρχικά προτείνεται η επανάληψη των πειραμάτων με ένα τέλεια ελαστικό πέτρωμα, ένα πέτρωμα δηλαδή που να μην παρουσιάζει πλαστική περιοχή (βασάλτης, υλιόλιθος, τσιμέντο κατάλληλης σύστασης). Χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο υλικό είναι πιο εύκολο για τον χειριστή της μηχανής θλίψης να διακόψει το βήμα διότι δε χρειάζεται να λάβει υπόψη του την πλαστική περιοχή, καθώς επιτυγχάνεται ταύτιση των σημείων $\sigma_1(B)$ και $\sigma_1(\Gamma)$. Κατόπιν να μετρηθεί το απόλυτο σφάλμα (αναμένεται να είναι αρκετά μικρό) που θα παρουσιάσει το αποτέλεσμα της πολυεπίπεδης τριαξονικής δοκιμής σε σχέση με τη σειρά των απλών τριαξονικών και να προκύψει μία σχέση της μορφής:

$$\sigma_1^{(m_tr)} = \sigma_1^{(tr)} - \varepsilon \quad (5.1)$$

όπου:

$\sigma_1^{(m_tr)}$: η αντοχή που δίνεται από την πολυεπίπεδη τριαξονική δοκιμή,

$\sigma_1^{(tr)}$: η αντοχή που δίνεται από τη σειρά απλών τριαξονικών δοκιμών,

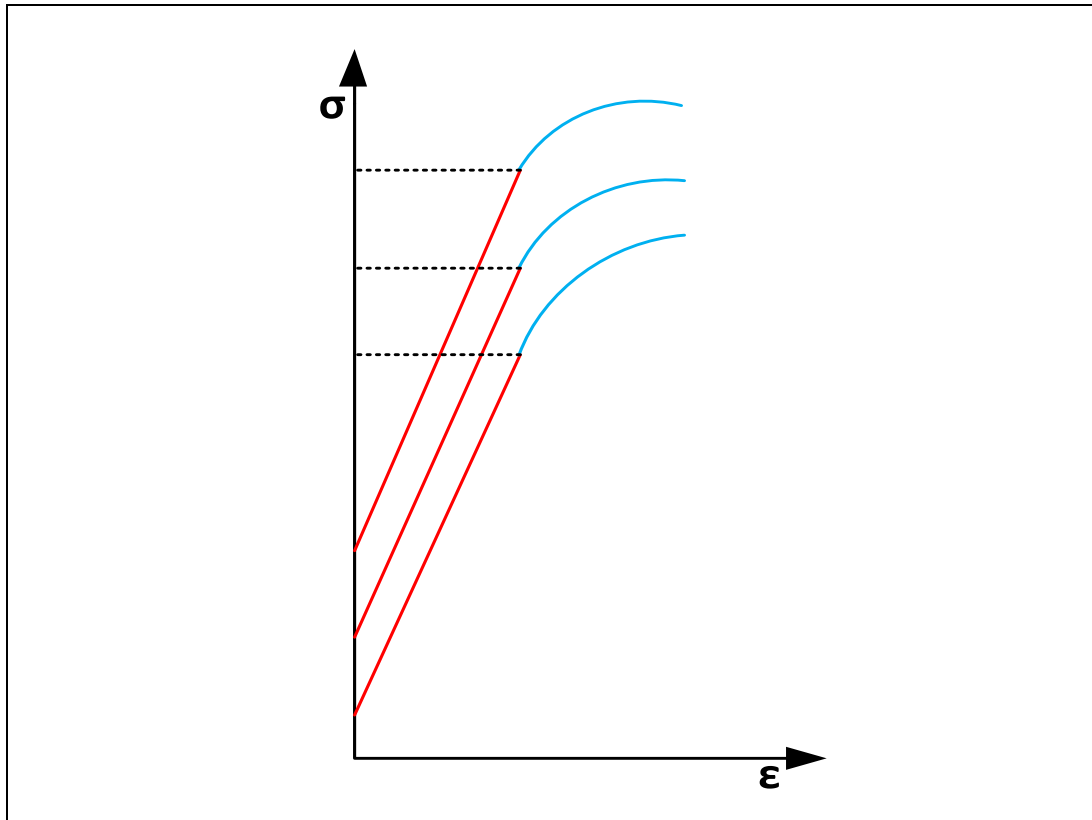
ε : το απόλυτο σφάλμα των μεθόδων.

Η θετική ποσότητα c , δεν έχει πρόσημο « $\pm$ », διότι το $\sigma_1^{(m_tr)}$ είναι πάντοτε μικρότερο του $\sigma_1^{(tr)}$.

Για τα πετρώματα που έχουν πλαστική περιοχή προτείνεται η ίδια μεθοδολογία. Η τιμή του c , αναμένεται μεγαλύτερη και όσο μεγαλύτερη είναι η πλαστική περιοχή του πετρώματος, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η τιμή του c .

Όσον αφορά την τριαξονική πολυεπίπεδη δοκιμή, θα πρέπει να μειωθεί ο χρόνος που χρειάζεται ο ρυθμιστής πίεσης για να αυξήσει την πλευρική πίεση κάθε βήματος (ο ρυθμιστής του εργαστηρίου χρειάζεται 10 λεπτά περίπου). Ο λόγος είναι ότι παρουσιάζονται φαινόμενα ερπυσμού λόγω της επίδρασης του χρόνου. Απαιτείται λοιπόν πιο σύγχρονος εξοπλισμός με δυνατότητα αύξησης της πλευρικής πίεσης της τάξεως του μισού λεπτού.

Τέλος, προτείνεται η δημιουργία ενός εγχειριδίου που θα περιέχει πρότυπες καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης τριαξονικών δοκιμών σε συγκεκριμένες πλευρικές πιέσεις όπου θα προσδιορίζεται η πλαστική τους περιοχή για μία πληθώρα πετρωμάτων (σχ. 5.2). Με τον τρόπο αυτό, ο χειριστής της μηχανής θλίψης θα αποκτήσει ενδεικτικές τιμές για τα σημεία τερματισμού κάθε βήματος και θα μπορεί να συγκρίνει τα αποτελέσματά του με αυτά της βιβλιογραφίας.



Σχήμα 5.2 Πρότυπες καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης σε τρεις διαφορετικές πλευρικές πιέσεις για το ίδιο πέτρωμα. Διακρίνονται οι πλαστικές περιοχές με το μπλε χρώμα.

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Agustawijaya, D., (2007), "The uniaxial compressive strength of soft rock", Mataram University, Mataram, Indonesia.
2. Akram, M. and Bakar, A., (2005), "Correlation between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Index for Salt-Range Rocks" University of Engineering and Technology, Lahore, Pakistan.
3. Jumikis , A.R., (1983), "Rock Mechanics", 2nd edition, Trans-Tech Publications, Germany.
4. Love, A.E.H., (1927) , "A treatise on the mathematical theory of elasticity" Cambridge University Press.
5. Musaed, N., (2000), "Simple correlation to evaluate Mohr-Coulomb failure criterion using uniaxial compressive strength", King Saud University, Saudi Arabia.
6. Youn, H., Tonon F., (2010), "Multi-stage triaxial test on brittle rock" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 47, Number 4, p.678-684.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ., (2002), "Στοιχεία Γεωμηχανικής- Μηχανική Πετρωμάτων", Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
2. Θεοδωρίκας, Σ.Σ., (2002), "Ορυκτολογία – Πετρολογία " 2^η έκδοση. Εκδόσεις Χρυσούλα Σαούλη Ο.Ε. Γραφικές τέχνες «Μέλισσα», Θεσσαλονίκη.
3. Νιμέρτης και Κορδούλης, (2005), "Αποτίμηση Φυσικών και Μηχανικών Παραμέτρων Ασβεστόλιθου και Φλύσχη", Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.

4. Νινής, Λ., Κουρκουλής, Σ.Κ., Σακελλαρίου, Α., (2001), “Κριτήρια Αξιολόγησης Δομικών Λίθων στα Αναστηλωτικά Έργα του Ασκληπιείου Επιδαύρου”, Επιστημονική ημερίδα “Ο δομικός λίθος στα μνημεία”, Αθήνα.
5. Ρόζος, Δ., (2007), “Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Ι”, Ηλεκτρονικές διαλέξεις, Ε.Μ.Π.
6. Σακελλαράκης, Γ., (), “Βαθμονόμηση καταστατικού προσομοιώματος πετρωμάτων σε θλιπτική φόρτιση: Πείραμα και θεωρία”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
7. Σοφιανός, Α., Νομικός, Π., (2008), “Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων” Σημειώσεις μαθήματος, Ε.Μ.Π.
8. Τσιαμπάος, Γ., (2009), “ Νεότερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων”, Σημειώσεις μαθήματος, Ε.Μ.Π.
9. Φιλοθέου, Λ., (2003), “Εγχειρίδιο αρχών και μεθόδων στην αντοχή των υλικών”, Σημειώσεις μαθήματος, Τ.Ε.Ι. Λάρισας.
10. Χατζηθεοδωρίδης, Η., (2004) “Αναγνώριση ορυκτών με το πετρογραφικό μικροσκόπιο” Ηλεκτρονικές διαλέξεις, Ε.Μ.Π.