

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ  
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΕΣ  
ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΦΟΙΤΗΤΩΝ:  
ΚΑΜΠΙΩΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ (Α.Μ. 4665)  
ΚΟΛΙΟΠΑΝΟΣ ΘΩΜΑΣ (Α.Μ. 4636)  
ΚΑΡΑΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Α.Μ. 4480)

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

**ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ  
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΕΣ  
ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η περιγραφή των κυριότερων εργαστηριακών δοκιμών που γίνονται για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων βράχου και του απαιτούμενου εργαστηριακού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για αυτές τις δοκιμές. Για τους βράχους, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους που θα αναφερθούν στη συνέχεια είναι δύσκολο να περιγραφούν ακριβώς ιδιότητες όπως η αντοχή, η σκληρότητα ή η απορροφητικότητα. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητος ο πειραματικός προσδιορισμός αυτών των ιδιοτήτων σε κάθε δοκίμιο βράχου.

Η πλειοψηφία των βραχωδών σχηματισμών, ιδιαίτερα αυτών που βρίσκονται κάποια εκατοντάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, συμπεριφέρονται ως ασυνεχή μέσα, με τις ασυνέχειες να παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά των βράχων. Πέρα από τη γεωλογική προέλευση της βραχώμαζας, είναι επίσης βασικό να γνωρίζει κανείς τόσο τη δομή της βραχώμαζας όσο και τη φύση των ασυνεχειών. Αυτές οι παράμετροι είναι ιδιαίτερα σημαντικό, να μπορούν να ποσοτικοποιηθούν έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάποιου είδους ανάλυσης ευστάθειας.

Για παράδειγμα στην περίπτωση ευστάθειας ενός πρανού σε βραχώδεις σχηματισμούς, υπάρχουν συγκεκριμένες παράμετροι, όπως η διατμητική αντοχή μιας ασυνέχειας ή κλίση της, που πρέπει να προσδιορισθούν για να επιλεγεί ο τύπος αστοχίας του πρανού καθώς και η μεθοδολογία ανάλυσης ευστάθειας. Τα πρανή σε βραχώδεις σχηματισμούς παρουσιάζουν μια μεγάλη ποικιλία αστοχιών (ολίσθηση σε κυκλική επιφάνεια, ολίσθηση σφήνας ή ανατροπή) ανάλογα με το τύπο του υλικού και τον προσανατολισμό των γεωλογικών ασυνεχειών.

Πολλές φορές ο τρόπος που συμπεριφέρεται μια βραχώμαζα, δηλαδή το σύστημα τεμαχίων συμπαγούς βράχου σε συσχέτισμό με τα συστήματα (οικογένειες) ασυνεχειών εξαρτάται πολύ από την κλίμακα του έργου σε σχέση με την πυκνότητα των ασυνεχειών. Σε πολύ μικρή κλίμακα (διάμετρος γεώτρησης π.χ. 50 mm), σημασία έχει η αντοχή και παραμορφωσιμότητα του συμπαγούς βράχου. Σε λίγο μεγαλύτερη κλίμακα σημασία έχει ο προσανατολισμός και η διατμητική αντοχή μιας ασυνέχειας ή ο συνδυασμός δύο

ασυνεχειών. Σε ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα (π.χ. 0.5 έως 1 φορά τη διάμετρο) τη συμπεριφορά καθορίζουν 2 έως 5 οικογένειες ασυνεχειών που συνήθως τοπικά προσδιορίζουν τη βραχόμαζα σαν ανισότροπο υλικό. Σε ακόμη μεγαλύτερη κλίμακα (π.χ διαστάσεις ενός τούνελ) και με ύπαρξη περισσότερων ασυνεχειών το υλικό μπορεί να συμπεριφέρεται στατιστικά περίπου σαν ισότροπο.

Εξαιτίας, λοιπόν, αυτής της ποικιλομορφίας που παρουσιάζουν οι βράχοι, είναι αρκετά δύσκολο να ταξινομηθούν βάσει κριτηρίων αστοχίας, να προσδιορισθεί με ακρίβεια η αντοχή τους και γενικά να υπάρχει η δυνατότητα περιγραφής των χαρακτηριστικών ενός βράχου μόνο και μόνο από την ονομασία του, όπως γίνεται στα εδάφη π.χ. για μια άργιλο, τον καολινίτη. Επομένως κατανοεί κάποιος πόσο σημαντική είναι η επι-τόπου παρατήρηση, οι δοκιμές πεδίου όσο και οι εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μιας βραχόμαζας.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα ασχοληθούμε εκτενώς με τις σημαντικότερες εργαστηριακές δοκιμές σε βράχο και θα δούμε αναλυτικά τον εξοπλισμό που θα πρέπει να έχει κάθε σύγχρονο εργαστήριο βραχομηχανικής.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	1
1.1.1 Διάρρηξη πετρώματος και ελαστική θεωρία .....	1
1.1.2 Ασυνέχειες βραχόμαζας.....	2
1.1.3 Συλλογή γεωλογικών δεδομένων.....	2
1.1.4 Εργαστηριακές δοκιμές βράχων.....	3
1.1.5 Ταξινόμηση βραχόμαζας.....	4
1.1.6 Αντοχή βραχόμαζας.....	5
1.1.7 Μέτρηση τάσεων στο πεδίο (επί – τόπου δοκιμές).....	6
1.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	7
1.2.1 Κριτήριο αστοχίας των Mohr – Coulomb.....	9
1.2.2 Κριτήριο αστοχίας των Hoek και Brown.....	10
1.2.3 Κριτήριο αστοχίας του Griffith.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	14
2.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	14
2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....	17
2.2.1 Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας βράχου και ξηρού φαινομένου βάρους.....	17
2.2.2 Προσδιορισμός πορώδους και πυκνότητας βράχου.....	19
2.2.3 Προσδιορισμός απορροφητικότητας βράχου.....	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	27
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....	27
3.1 Αντοχή πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη.....	27
3.2 Αντοχή σε τριαξονική φόρτιση.....	30
3.3 Δοκιμή υγείας.....	36
3.4 Δοκιμή εφελκυσμού.....	38
3.4.1 Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού.....	38
3.4.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Βραζιλιάνικη δοκιμή).....	42
3.4.3 Δοκιμή κάμψης τριών σημείων.....	45
3.5 Δοκιμή άμεσης διάτμησης.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	60
ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΕΙΚΤΩΝ.....	60
4.1 Δοκιμή σημειακής φόρτισης.....	60
4.2 Μέθοδος του κρουσίμετρου αναπήδησης.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	73
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	73
5.1 Ταξινόμηση κατά ISRM.....	73
5.2 Ταξινόμηση κατά Deere – Miller.....	74
5.3 Άλλες ταξινομήσεις.....	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

Σχήμα 1.1: Γεωλογικές πυξίδες και συλλέκτης γεωλογικών δεδομένων.....	3
Σχήμα 1.2: Συσκευή για επί – τόπου προσδιορισμό του πεδίου των τάσεων μιας βραχώμαζας.....	6
Σχήμα 1.3: Διάγραμμα τάσης – αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει της εφαρμοζόμενης πίεσης σε τριαξονικές δοκιμές (Bieniawski (1972)).....	8
Σχήμα 1.4: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων .....	8
Σχήμα 1.5: Κριτήριο αστοχίας των Mohr – Coulomb.....	10
Σχήμα 1.6: Κριτήριο αστοχίας των Hoek και Brown.....	12
Σχήμα 1.7: α) Ιδεατή ρωγή Griffith, β) Περιβάλλουσα αστοχίας Griffith.....	13
Σχήμα 2.1: Συσκευή λείανσης εδρών δοκιμίων βράχου .....	14
Σχήμα 2.2: Τριβείο λείανσης επιφανειών δοκιμίων βραχομηχανικής.....	15
Σχήμα 2.3: Διάταξη ελέγχου επιπεδότητας εδρών κυλινδρικών και κυβικών δοκιμίων .....	15
Σχήμα 2.4: Λείανση επιφάνειας δοκιμίου με τροχό.....	16
Σχήμα 2.5: Κοπή τεμαχίων βράχου με διαμαντόδισκο.....	16
Σχήμα 2.6: α) Εργαστηριακός κλίβανος, β) Εργαστηριακός ζυγός.....	18
Σχήμα 2.7: Συσκευή κορεσμού δειγμάτων με κενό.....	21
Σχήμα 2.8: Σχηματική απεικόνιση της συσκευής κορεσμού δειγμάτων με κενό.....	22
Σχήμα 2.9: α) Τυπική διάταξη υδατόλουτρου, β) Θάλαμος συντήρησης δοκιμίων σε σταθερές συνθήκες.....	23
Σχήμα 2.10: Σχηματική απεικόνιση της συσκευής υπολογισμού όγκου με χρήση	

υδραργύρου.....	25
Σχήμα 3.1: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	28
Σχήμα 3.2: Ηλεκτρονικά ψηφιακά και αναλογικά μηκυσιόμετρα.....	29
Σχήμα 3.3: Δοκίμιο υποβαλλόμενο σε τριαξονική θλίψη και όψη του εσωτερικού του κελιού.....	31
Σχήμα 3.4: Χειροκίνητη αντλία λαδιού για την άσκηση της πλευρικής πίεσης.....	32
Σχήμα 3.5: Κυψέλες Hoek διαφόρων διαστάσεων.....	33
Σχήμα 3.6: Εξολκείας δοκιμίων τριαξονικής φόρτισης.....	34
Σχήμα 3.7: Περιβάλλουσα αντοχής πετρώματος.....	35
Σχήμα 3.8: Χάραξη περιβάλλουσας αστοχίας κατά Mohr.....	35
Σχήμα 3.9: Αδρανή υλικά πριν και μετά τη δοκιμή υγείας.....	37
Σχήμα 3.10: Πειραματική διάταξη εργαστηριακής δοκιμής άμεσου εφελκυσμού.....	38
Σχήμα 3.11: Τυπικά αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών άμεσου εφελκυσμού.....	42
Σχήμα 3.12: Μεταβολή της εφελκυστικής και της θλιπτικής τάσης κατά μήκος της διαμέτρου Y-Y' για φόρτιση υπό γωνία $2\theta=9.5\sigma$ (Fairhurst, 1964).....	43
Σχήμα 3.13: Πειραματική διάταξη δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης.....	45
Σχήμα 3.14: Πειραματική διάταξη δοκιμής πετρώματος σε κάμψη.....	46
Σχήμα 3.15: Στατικά μεγέθη δοκιμής σε κάμψη.....	47
Σχήμα 3.16: α) Διαστάσεις δοκιμίων σύμφωνα με ASTM (1985),β) Θέσεις έδρασης και φόρτισης σύμφωνα με την προδιαγραφή της ASTM (1985).....	48
Σχήμα 3.17: Πειραματική διάταξη δοκιμής άμεσης διάτμησης.....	49
Σχήμα 3.18: Αντοχή ασυνέχειας σε διάτμηση.....	51
Σχήμα 3.19: Διατμητική αντοχή τραχειών επιφανειών ασυνέχειας.....	51



Σχήμα 3.20: Τυπικές καμπύλες στερεοποίησης.....	57
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα διατμητικών και ορθών τάσεων.....	58
Σχήμα 3.22: Τοποθέτηση δοκιμίων στη συσκευή άμεσης διάτμησης.....	59
Σχήμα 4.1: Τυπική διάταξη δοκιμής σημειακής φόρτισης.....	60
Σχήμα 4.2: Αποτελέσματα δοκιμών σημειακής φόρτισης για διάφορες $D_e$ και γραφικός υπολογισμός του $P_{50}$ .....	63
Σχήμα 4.3: Αριστερά: Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης: (α) Διαμετρική δοκιμή, (β) Αξονική δοκιμή, (γ) Δοκιμή σε ορθογωνικό δοκίμιο και (δ) Δοκιμή σε ακανόνιστο δοκίμιο Δεξιά: Τυπικές μορφές αστοχίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σημειακής φορτίσεως: (α) Αποδεκτή διαμετρική δοκιμή, (β) Αποδεκτή αξονική δοκιμή, (γ) Αποδεκτή δοκιμή σε ορθογωνικό δοκίμιο, (δ) Μη αποδεκτή διαμετρική δοκιμή, (ε) Μη αποδεκτή αξονική δοκιμή.....	65
Σχήμα 4.4: Κρουσίμετρο Schmidt.....	67
Σχήμα 4.5: Αρχή λειτουργίας του κρουσίμετρου Schmidt (McCarroll, 1994).....	69
Σχήμα 4.6: Βάσεις στήριξης κυλινδρικών δοκιμίων.....	70
Σχήμα 5.1: Τυπική ταξινόμηση για εκρηξιγενή πετρώματα κατά Deere – Miller (1966)....	75
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα Franklin et al (1971).....	76
Σχήμα 5.3: Η αντοχή σε θλίψη σε συνάρτηση με την πυκνότητα για μια ομάδα ανθρακικών φυσικών λίθων.....	77
Σχήμα 5.4: Η αντοχή σε θλίψη σε συνάρτηση με το πορώδες για μια ομάδα χαλαζιακών λίθων.....	77
Σχήμα 5.5: Καμπύλες αναπήδησης – αντοχής από πειραματικά στοιχεία.....	78

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

<i>Πίνακας 1.1: Ταξινόμηση βραχώμαζας κατά Barton.....</i>	<i>4</i>
<i>Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση πετρώματος με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης <math>I_s(50)</math> σε <math>MPa</math> (Bieniawski, 1975).....</i>	<i>63</i>
<i>Πίνακας 5.1: Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή (ISRM 1981).....</i>	<i>73</i>
<i>Πίνακας 5.2: Ταξινόμηση άρρηκτου πετρώματος.....</i>	<i>74</i>
<i>Πίνακας 5.3: Προτεινόμενες σχέσεις προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής από τον διορθωμένο δείκτη σημειακής φόρτισης <math>IS(50)</math> (Kahraman et al, 2005).....</i>	<i>79</i>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

---

## 1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### 1.1.1 Διάρρηξη πετρώματος και ελαστική θεωρία

Η διάρρηξη πετρωμάτων προκύπτει όταν αναπτύσσεται υψηλή συγκέντρωση τάσεων γύρω από υπόγεια ανοίγματα, φυσικά ή τεχνητά όπως για παράδειγμα φυσικά σπήλαια ή τεχνητά τούνελ. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα οξύ σε μεγάλου βάθους ορυχεία σε εύθραυστη βραχώμαζα. Τα μεγάλου βάθους ορυχεία χρυσού στην περιοχή Witwatersrand στη Νότια Αφρική, τα ορυχεία χρυσού στην Ινδία, τα ορυχεία νικελίου στο Sudbury του Καναδά, τα ορυχεία στην περιοχή Coeur d'Alene στο Idaho των Ηνωμένων Πολιτειών και τα ορυχεία χρυσού στην περιοχή Kalgoorlie της Αυστραλίας, είναι μερικά από τα ορυχεία που αντιμετωπίζουν προβλήματα διάρρηξης πετρώματος.

Ένα χαρακτηριστικό σχεδόν όλων των διαρρήξεων είναι ότι προκύπτουν σε γενικά εύθραυστους βράχους που υπόκεινται σε υψηλές εσωτερικές τάσεις. Συνεπώς, η ανάλυση των τάσεων γύρω από υπόγειες εκσκαφές, που αποτελεί το κλειδί της γένεσης των διαρρήξεων, μπορεί να γίνει με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας. Αρχικές εργασίες πάνω στη βραχομηχανική, με κύρια εφαρμογή στα ορυχεία, επικεντρώνονταν στο πρόβλημα των διαρρήξεων. Για τη μελέτη του προβλήματος, οι θεωρητικές λύσεις που λαμβάνονταν υπόψη θεωρούσαν το βράχο ως ισότροπο ελαστικό υλικό χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ασυνέχειες των πετρωμάτων. Χαρακτηριστικά, στην πρώτη έκδοση του βιβλίου των Jaeger και Cook *Fundamentals of Rock Mechanics* (1969), γίνεται ελάχιστη αναφορά στις δομικές ασυνέχειες της βραχώμαζας.

Η χρήση της ελαστικής θεωρίας για τη μελέτη προβλημάτων μηχανικής βράχων είχε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το κύριο μειονέκτημα ήταν ότι αγνοήθηκε ο σημαντικός ρόλος των δομικών χαρακτηριστικών του βράχου, όπως οι ασυνέχειες. Το θετικό από κάθε άποψη ήταν ότι η ελαστική θεώρηση είχε τρομερά πλεονεκτήματα όσον αφορά την απλούστευση του προβλήματος έναντι της θεώρησης μιας πιο δύσκολης γενικής ανάλυσης που μπορεί να μην οδηγούσε πουθενά.

### **1.1.2 Ασυνέχειες βραχώμαζας**

Ο Stini ήταν ένας από τους πρωτεργάτες της βραχομηχανικής στην Ευρώπη και έδωσε έμφαση στη σπουδαιότητα των δομικών ασυνεχειών του βράχου, θεωρώντας τις ασυνέχειες υπεύθυνες για τη συμπεριφορά της βραχώμαζας (Müller (1979)). Ο Stini ασχολήθηκε με μια ποικιλία εργασιών του πολιτικού μηχανικού και για αυτό το λόγο έδωσε έμφαση στο ρόλο των ασυνεχειών μιας και αυτό διαπίστωνε ως κύριο πρόβλημα στις δουλειές του. Όμοια το βιβλίο του Talobre (1957), αντανakλά τη γαλλική προσέγγιση της μηχανικής των βράχων, αναγνωρίζοντας το ρόλο της δομής του βράχου σε σημαντικό στοιχείο, πράγμα που δεν έκαναν άλλοι επιστήμονες όπως οι Jaeger and Cook, Coates και Obert και Duvall.

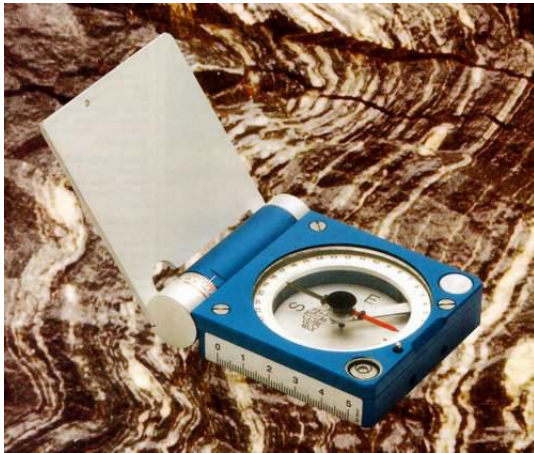
Μια μεγάλη ώθηση προς αυτή την κατεύθυνση δόθηκε από την αστοχία του φράγματος του Malpasset καθώς και της καταστροφής του Vajont. Η σημαντική εργασία από τον Londe και τους συνεργάτες του στη Γαλλία (Londe (1965)), Londe et al (1969,1970)) και από τους Wittke (1965) και John (1968) στη Γερμανία έθεσε τα θεμέλια για την τριδιάστατη ανάλυση που εφαρμόζουμε σήμερα.

### **1.1.3 Συλλογή γεωλογικών δεδομένων**

Ο ακρογωνιαίος λίθος κάθε πρακτικής ανάλυσης βραχομηχανικής είναι η βάση γεωλογικών δεδομένων πάνω στην οποία βασίζεται ο ορισμός του τύπου του βράχου, των δομικών ασυνεχειών και τις ιδιότητες του υλικού. Ακόμη και η πιο εξελιγμένη ανάλυση μπορεί να αποβεί μια ασήμαντη άσκηση εάν οι γεωλογικές πληροφορίες πάνω στις οποίες βασίζεται είναι ανεπαρκείς ή ανακριβείς.

Οι μέθοδοι για τη συλλογή γεωλογικών δεδομένων δεν έχουν αλλάξει πολύ τα τελευταία 25 χρόνια ενώ ακόμη δεν υπάρχει αποδεκτό υποκατάστατο για τη χαρτογράφηση τομέα και τη λήψη πυρήνων δοκιμίων. Έχουν γίνει κάποια βήματα στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τη λήψη δοκιμίων και ένα τυπικό παράδειγμα είναι η ηλεκτρονική πυξίδα, που φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Επιφανειακά και υπόγεια γεωφυσικά μηχανήματα και συσκευές, όπως κάμερες για διερεύνηση μιας γεώτρησης, είναι διαθέσιμα

και η αξιοπιστία τους και η χρησιμότητάς τους σταδιακά βελτιώνονται καθώς η τεχνολογία διαρκώς αναπτύσσεται.



*Σχήμα 1.1: Γεωλογικές πυξίδες και συλλέκτης γεωλογικών δεδομένων*

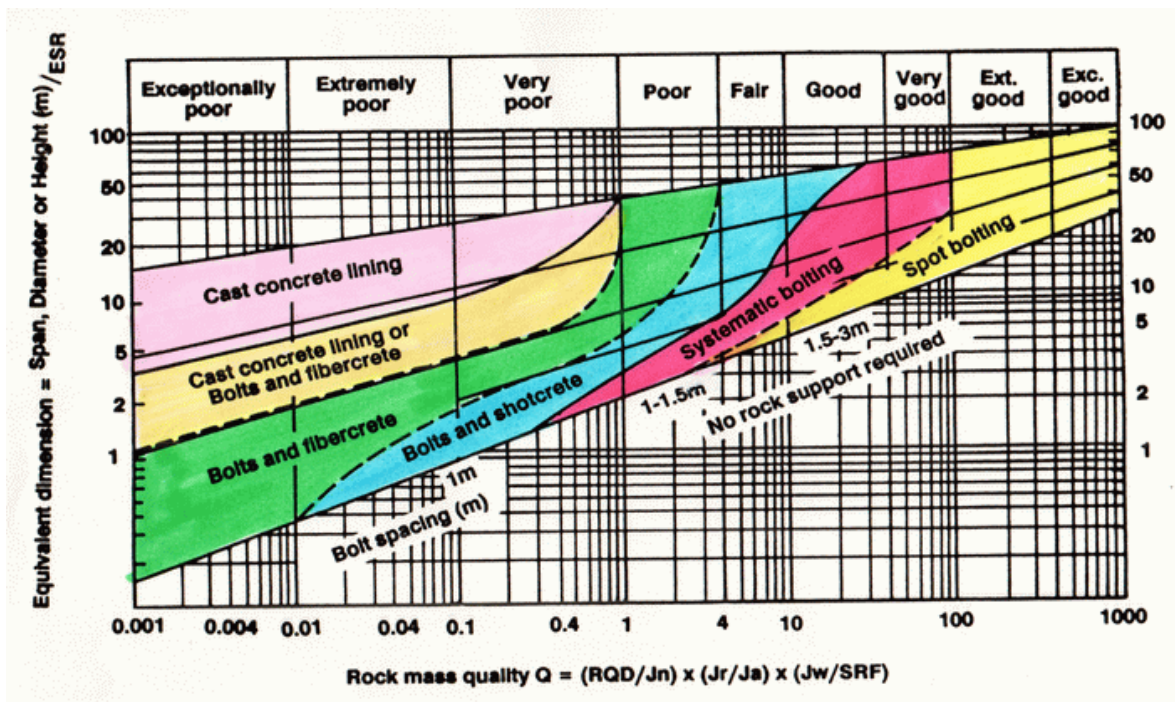
#### **1.1.4 Εργαστηριακές δοκιμές βράχων**

Οι τεχνικές εργαστηριακών δοκιμών βράχων έχουν δανειστεί από τις εργαστηριακές δοκιμές εδάφους και τις δοκιμές της αντοχής υλικών και παραμένουν σε χρήση εδώ και 30 χρόνια. Εξαιρεση αποτελεί η ανάπτυξη μηχανών που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων του βράχου. Αυτή η πληροφορία είναι σημαντική για το σχεδιασμό υπόγειων εκσκαφών, καθώς οι ιδιότητες του βράχου που περιβάλλει την εκσκαφή έχει σημαντική επιρροή πάνω στην σταθερότητα της εκσκαφής.

### 1.1.5 Ταξινόμηση της βραχώμαζας

Για τη ταξινόμηση της βραχώμαζας έχουν προταθεί διάφορα συστήματα. Τα τρία κυριότερα είναι το σύστημα της γεωτεχνικής ταξινόμησης ή Bieniawski ή RMR, το σύστημα γεωλογικού δείκτη αντοχής ή σύστημα GSI που προτάθηκε από τον Hoek και σχεδιάστηκε να είναι συμβατό με το RMR και το σύστημα του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου NGI ή σύστημα Q που προτάθηκε από τον Barton και τους συνεργάτες του. Όλες οι ταξινομήσεις δημιουργήθηκαν αρχικά για να απαντήσουν στο πρόβλημα των σφράγγων και για αυτά τα έργα η χρήση τους είναι προς το παρόν αξιόπιστη.

Πίνακας 1.1: Ταξινόμηση βραχώμαζας κατά Barton



### 1.1.6 Αντοχή βραχόμαζας

Το μεγαλύτερο ίσως πρόβλημα που αντιμετωπίζει κάποιος μηχανικός που θέλει να φτιάξει μια οποιαδήποτε κατασκευή σε βράχο είναι ο προσδιορισμός της αντοχής του πετρώματος. Η βραχόμαζα αποτελείται συνήθως από διακριτά κομμάτια βράχου συνδεδεμένα μεταξύ τους. Αυτά τα κομμάτια βραχόμαζας, διαμορφωμένα με διαφορετικό τρόπο μέσα στο χρόνο, μπορεί να έχουν τραχείες επιφάνειες επαφής ή λείες, καλυμμένες από ασβεστόλιθο.

Ο προσδιορισμός της αντοχής του πετρώματος στο πεδίο (η πραγματική δηλαδή αντοχή του), μέσα από εργαστηριακές δοκιμές δε θεωρείται αξιόπιστος. Είναι φανερό ότι η εκτίμηση της αντοχής ενός δοκιμίου βράχου, που έχει αποκολληθεί από την υπόλοιπη βραχόμαζα, στο εργαστήριο περιέχει πολλά σφάλματα. Αυτός ήταν ένας καίριος προβληματισμός για τους Hoek και Brown (1980), που χρησιμοποίησαν θεωρητικές μελέτες και πειραματικά μοντέλα καθώς και ένα περιορισμένο αριθμό διαθέσιμων αντοχών, προκειμένου να αναπτύξουν ένα εμπειρικό κριτήριο αστοχίας για βραχόμαζα.

Επίσης ο Hoek πρότεινε ότι οι παράμετροι του εμπειρικού κριτηρίου μπορούν να βρεθούν από το σύστημα ταξινόμησης βραχόμαζας. Πράγματι το κριτήριο αστοχίας των Hoek και Brown δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα.

Παρακάτω δίνονται κάποιοι βασικοί όροι που χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό της μηχανικής απόκρισης των πετρωμάτων. Αντοχή ή μέγιστη αντοχή, είναι η μέγιστη τάση που το πέτρωμα δύναται να αναλάβει για δεδομένες συνθήκες. Μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής το δοκίμιο μπορεί να εξακολουθεί να αναλαμβάνει κάποιο φορτίο. Η παραμένουσα αντοχή, όταν επιτυγχάνεται, συμβαίνει μετά από σημαντική παραμόρφωση. Ψαθυρή θραύση είναι η διαδικασία κατά την οποία συμβαίνει ξαφνική απώλεια αντοχής με ελάχιστη ή μηδενική πλαστική παραμόρφωση. Όλκιμη παραμόρφωση ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία το πέτρωμα συνεχίζει να παραμορφώνεται χωρίς να χάνει τη φέρουσα ικανότητά του. Διαρροή ονομάζεται η κατάσταση κατά την οποία η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων αποκλίνει από την ελαστική συμπεριφορά. Η τάση διαρροής αντιστοιχεί στην έναρξη της διαρροής. Αστοχία είναι ένας γενικότερος όρος που άλλες φορές ταυτίζεται με την επίτευξη της μέγιστης αντοχής, άλλες φορές με την αδυναμία ανάληψης των δρώντων φορτίων, άλλοτε με υπερβολικές παραμορφώσεις, κ.α.

### **1.1.7 Μέτρηση τάσεων στο πεδίο (επιτόπου δοκιμές)**

Κατά τη διάρκεια διερεύνησης πεδίου (site investigation), όταν δεν ήταν δυνατή η πρόσβαση στο υπέδαφος, η μόνη πρακτική μέθοδος για μετρήσεις στο πεδίο ήταν μια τεχνική κατά την οποία η υδραυλική πίεση, που απαιτείται για να ανοίξει μια υπάρχουσα διάρρηξη στο πέτρωμα, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τάσης στο συγκεκριμένο σημείο (Haimson (1978)). Από τη στιγμή βέβαια που η πρόσβαση στο υπέδαφος έγινε εφικτή αναπτύχθηκαν και άλλες τεχνικές για τον επιτόπου προσδιορισμό των τάσεων. Ένα από τα όργανα μέτρησης για επιτόπου εκτίμηση τάσεων φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



*Σχήμα 1.2: Συσκευή για επί – τόπου προσδιορισμό του πεδίου των τάσεων μιας βραχόμαζας*



## 1.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Τα κριτήρια αστοχίας είναι μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν τις διάφορες συνιστώσες του τανυστή των τάσεων τη στιγμή που εκδηλώνεται η αστοχία.

Στην περίπτωση διάτμησης κατά μήκος μιας ασυνέχειας (ρωγμής) η σχέση αυτή έχει τη μορφή  $\tau = f(\sigma)$ . Στη γενική περίπτωση η σχέση αυτή συνδέει τις ορθές τάσεις  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ . Όμως στην πράξη για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών και γιατί τα πειράματα με ανεξάρτητα ελεγχόμενες  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  είναι δύσκολα, αγνοούμε την επιρροή της ενδιάμεσης τάσης  $\sigma_2$  (το σφάλμα είναι συνήθως μικρό). Τότε τα κριτήρια αστοχίας μπορούν να πάρουν τη μορφή:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = f(\sigma_1 + \sigma_3) \quad \text{ή} \quad \sigma_1 = f(\sigma_3) \quad \text{ή} \quad \tau = f(\sigma) \quad (1.1)$$

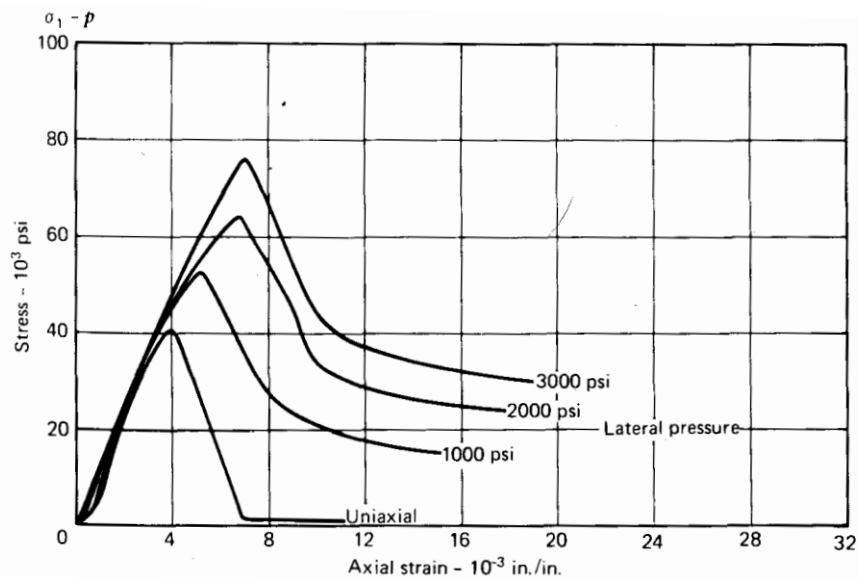
Η γνώση των κριτηρίων αστοχίας απαιτεί τον πειραματικό καθορισμό ορισμένων παραμέτρων, των παραμέτρων αντοχής. Οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται από :

- α) το ίδιο το υλικό
- β) τη γεωμετρία του δοκιμίου
- γ) την κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων στην επιφάνεια του δοκιμίου  
(δηλαδή από τις οριακές συνθήκες φόρτισης)
- δ) τη ταχύτητα της φόρτισης (χρόνος)
- ε) τη θερμοκρασία
- στ) και για ψαθυρά υλικά από τον όγκο του δοκιμίου.

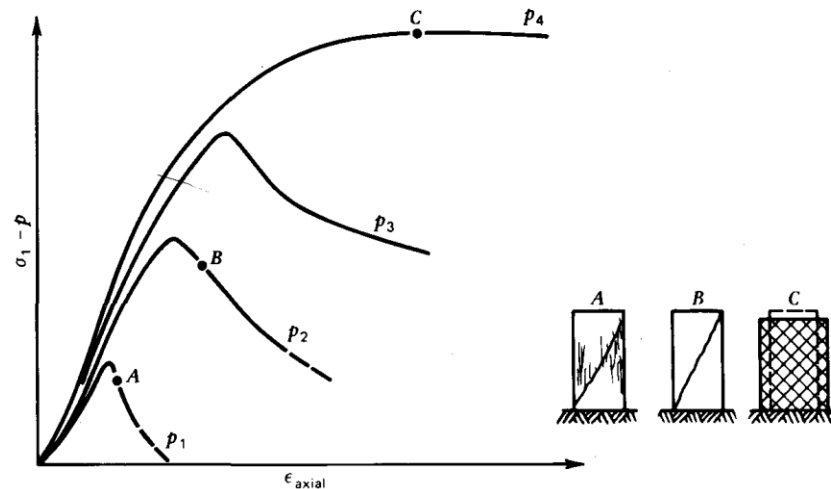
Η πιο συνηθισμένη δοκιμή είναι η τριαξονική δοκιμή με  $\sigma_2 = \sigma_3$ , η οποία θα περιγραφεί λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο. Τυπικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για συμπαγή βραχώδη υλικά παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα. Παρατηρούμε ότι όσο η πλευρική τάση αυξάνεται τόσο η συμπεριφορά της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων καθώς και η μορφή του δοκιμίου μετά την αστοχία μεταβάλλεται από ψαθυρή σε όλκιμη. Υπάρχει δε μια μεταβατική πλευρική τάση που χωρίζει την περιοχή ψαθυρής και όλκιμης συμπεριφοράς.

Σα σημείο αστοχίας θεωρείται το σημείο που αντιστοιχεί στη μέγιστη αναπτυσσόμενη ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) στην καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων (ψαθυρή περιοχή).

Η προσπάθεια για να διαμορφωθούν ικανοποιητικά κριτήρια αστοχίας τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική άποψη συνεχίζεται. Ικανοποιητικά κριτήρια αστοχίας από πρακτική άποψη πρέπει να είναι α) εύκολα στη χρήση, β) να αναπαράγουν με μικρό σφάλμα τα κύρια χαρακτηριστικά του υλικού.



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα τάσης – αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει της εφαρμοζόμενης πίεσης σε τριαξονικές δοκιμές (Bieniawski (1972))



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων

Δεδομένης της πολυπλοκότητας των πετρωμάτων είναι προφανές ότι ένα κριτήριο δε μπορεί να καλύψει όλες τις περιπτώσεις. Επιπλέον, ούτε διαφορετικά κριτήρια που να καλύπτουν ικανοποιητικά όλες τις περιπτώσεις και κυρίως τη συμπεριφορά της ρηγματωμένης μάζας, βραχώμαζας, έχουν καθιερωθεί.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των πιο γνωστών και προς το παρόν χρήσιμων για τις εφαρμογές κριτηρίων αστοχίας. Αυτά καλύπτουν τις εξής περιπτώσεις:

- α) Ισότροπα υλικά (συμπαγής βράχος)
- β) Στρωσιγενή υλικά με ένα έως τρία επίπεδα αδυναμίας ή ασυνέχειες
- γ) Ρηγματωμένα υλικά χωρίς επιλεκτικό προσανατολισμό των ασυνεχειών (στο χώρο περισσότερες από μια οικογένειες ασυνεχειών).

### **1.2.1 Κριτήριο αστοχίας των Mohr – Coulomb**

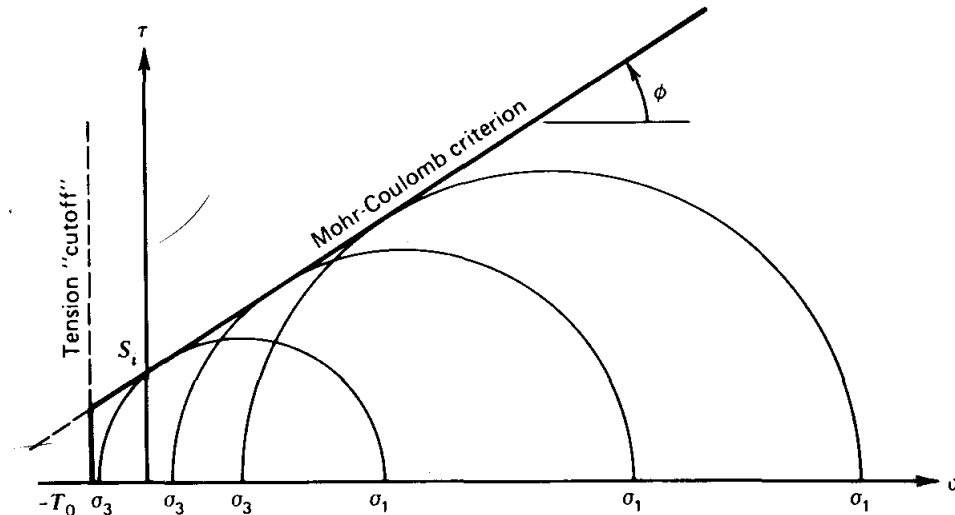
Για τα ισότροπα συμπαγή υλικά χρησιμοποιείται το γραμμικό κριτήριο των Mohr – Coulomb (σχήμα 1.5). Το γραμμικό κριτήριο Mohr – Coulomb είναι το ίδιο που χρησιμοποιείται και στην εδαφομηχανική. Βέβαια ο συμπαγής βράχος καθώς και το σκυρόδεμα έχουν μη γραμμική περιβάλλουσα αστοχίας. Καθώς όμως μεταβαίνουμε από βράχο υψηλής αντοχής προς το σκληρό έδαφος η περιβάλλουσα πλησιάζει περισσότερο προς το γραμμικό κριτήριο. Παρά την απόκλισή του από τη πραγματική συμπεριφορά του υλικού, το γραμμικό κριτήριο χρησιμοποιείται στην πράξη διότι σε πολλά προβλήματα όπου η περιοχή διακύμανσης των τάσεων  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  μπορεί να εκτιμηθεί, η πραγματική περιβάλλουσα μπορεί να αντικατασταθεί προσεγγιστικά από μια ευθεία. Σε αυτή την περίπτωση, η συνοχή  $c$  και η γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$  δε μπορούν να θεωρηθούν σα φυσικές σταθερές του υλικού, αλλά σαν ισοδύναμες ή φαινομενικές παράμετροι του υλικού.

Στη βραχομηχανική χρησιμοποιείται πιο συχνά η αντοχή σε απλή θλίψη  $c_0$  και εφελκυσμό  $T_0$ . Το γραμμικό κριτήριο μπορεί να πάρει διάφορες μορφές ανάλογα με το αν πρόκειται για υλικό συνεκτικό ή μη συνεκτικό, εάν έχουμε απλή θλίψη ή απλό εφελκυσμό ή εάν υπάρχει πίεση του νερού των πόρων.

Ενδεικτικά για μη συνεκτικά υλικά (συνοχή μηδενική) το κριτήριο παίρνει τη μορφή:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (K_p - 1)\sigma_3 \quad (1.2)$$

όπου  $K_p$ , ο συντελεστής παθητικών ωθήσεων.



Σχήμα 1.5: Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

### 1.2.2 Κριτήριο αστοχίας των Hoek και Brown

Στην προσπάθεια να εκφράσουν τη μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών διάφοροι ερευνητές έχουν προτείνει μια μεγάλη ποικιλία κριτηρίων αστοχίας για συμπαγείς βράχους. Ένα από αυτά τα κριτήρια το οποίο φιλοδοξεί να δώσει μια μόνο μαθηματική έκφραση τόσο για το συμπαγές υλικό όσο και για τη βραχώμαζα είναι το κριτήριο των Hoek και Brown (σχήμα 1.6). Βασιζόμενοι στα πειραματικά δεδομένα μπορούμε να πούμε ότι το κριτήριο αυτό είναι πολύ ικανοποιητικό για συμπαγή υλικά των οποίων η αντοχή κυμαίνεται από πολύ υψηλή έως μέση και λιγότερο ικανοποιητικό αλλά ανεκτό στην πράξη για συμπαγείς βράχους χαμηλότερης αντοχής. Η εφαρμογή του κριτηρίου σε βραχώμαζα είναι λιγότερο τεκμηριωμένη.

Το κριτήριο των Hoek και Brown στη πιο γενικευμένη μαθηματική του έκφραση είναι:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1.3)$$

όπου  $\sigma_{ci}$ , η θλιπτική αντοχή του συμπαγούς βράχου,  $s$  μια παράμετρος που για συμπαγή υλικά παίρνει τη τιμή  $s = 1$  ενώ για βραχώμαζα ισχύει  $0 \leq s \leq 1$ ,  $m_b$  μια παράμετρος του βραχώδους υλικού, που για συμπαγή υλικά ισούται με  $m_i$  και προσδιορίζεται πειραματικά μέσω τριαξονικών δοκιμών, όπως θα αναφερθεί πιο κάτω.

Όπως ήδη αναφέρθηκε το κριτήριο Hoek και Brown είναι εφαρμόσιμο και σε βραχώμαζα. Οι παράμετροι  $m_b$ ,  $s$  και  $a$  προσδιορίζονται από τις ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις:

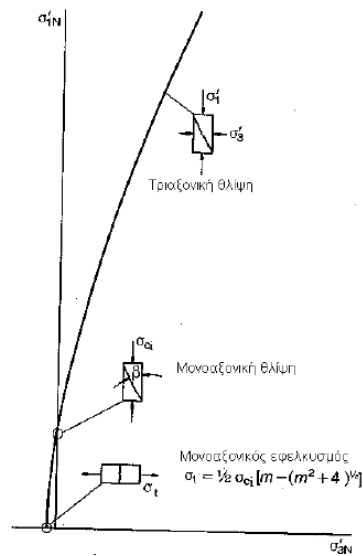
$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad (1.4)$$

και για  $GSI > 30$  τότε:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right), \quad a = 0.5 \quad (1.5)$$

ενώ για  $GSI < 30$  ισχύει:

$$s = 0, \quad a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (1.6)$$



Σχήμα 1.6: Κριτήριο αστοχίας Hoek και Brown

### 1.2.3 Κριτήρια αστοχίας του Griffith

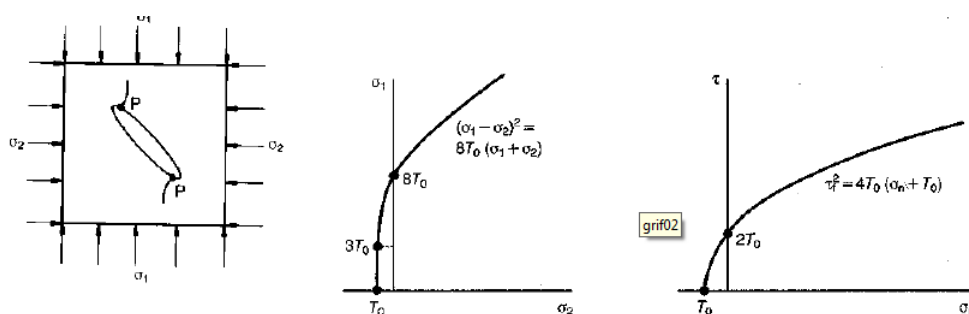
Τα κριτήρια αστοχίας του Griffith (σχήμα 1.7) έχουν ίσως λιγότερη άμεση πρακτική σημασία, όμως είναι σημαντικά για λόγους τόσο θεωρητικούς όσο και κατανόησης των παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο της θραύσης (αστοχίας ψαθυρού τύπου). Μεθοδολογικά η θεωρία του Griffith διαφέρει από τις άλλες εμπειρικές θεωρίες που βασίζονται κυρίως σε απλή προσαρμογή καμπυλών στα πειραματικά δεδομένα, διότι δέχεται ένα μηχανισμό θραύσης στο επίπεδο των κόκκων ή κρυστάλλων του υλικού και συνάγει το κριτήριο αστοχίας σαν απόρροια αυτού του μηχανισμού. Με άλλα λόγια, η θεωρία του Griffith δέχεται ότι τα ψαθυρά υλικά που υποβάλλονται σε εντατική κατάσταση αστοχούν σε εφελκυσμό, λόγω της ύπαρξης μικρορωγμών. Η ύπαρξη μικρορωγμών δημιουργεί τυπικά εφελκυστικές τάσεις που επεκτείνουν τις μικρορωγμές μέχρι την ολική θραύση.

Κάνοντας θεώρηση συνθηκών επίπεδης έντασης ο Griffith κατέληξε στην ακόλουθη σχέση:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - 8T_o(\sigma_1 + \sigma_2) = 0 \quad (1.7)$$

όπου  $T_o$  η μονοαξονική εφελκυστική αντοχή του άθραυστου υλικού. Στο σχήμα 1.7 φαίνεται η περιβάλλουσα Griffith σε άξονες κυρίων τάσεων, καθώς σε διατμητικών και ορθών τάσεων. Η θεωρία προβλέπει τη μονοαξονική θλιπτική τάση κατά την επέκταση της ρωγμής, ίση με οκτώ φορές την εφελκυστική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Το κριτήριο εκφραζόμενο με συντεταγμένες την ορθή και διατμητική τάση στο επίπεδο της ρωγμής, γίνεται:

$$\tau_f^2 = 4T_o(\sigma_n + T_o) \quad (1.8)$$



Σχήμα 1.7: α) Ιδεατή ρωγμή Griffith, β) Περιβάλλουσα αστοχίας του Griffith

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

---

## 2.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Οι εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής εκτελούνται σύμφωνα με τις ισχύουσες ελληνικές προδιαγραφές του ΥΠΕΧΩΔΕ (Ε103-84) και τις αντίστοιχες οδηγίες και προδιαγραφές της ASTM (American Society for Testing and Materials), της ISRM (International Society for Rock Mechanics) και της BS (British Standards).

Πριν από οποιαδήποτε δοκιμή δειγμάτων βράχου, είναι σημαντική η διαμόρφωση των δοκιμίων ώστε να μπορούν να εισέλθουν στις εργαστηριακές συσκευές. Με άλλα λόγια πρέπει να πάρουν καθορισμένο μέγεθος και σχήμα για να χωρέσουν στη συσκευή για την εκτέλεση της δοκιμής. Πολλές φορές η ακρίβεια μιας μέτρησης εξαρτάται από το πόσο καλά είναι διαμορφωμένο ένα δοκίμιο π.χ. η επιτυχία μιας τριαξονικής δοκιμής εξαρτάται από το πόσο λείες είναι οι βάσεις ενός κυλινδρικού δοκιμίου. Οπότε υπάρχουν ειδικές συσκευές, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.1 για τη διαμόρφωση των δοκιμίων της βραχόμαζας.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται διάφορες συσκευές λείανσης και κοπής δοκιμίων πετρωμάτων.



Σχήμα 2.1: Συσκευή λείανσης εδρών δοκιμίων βράχου





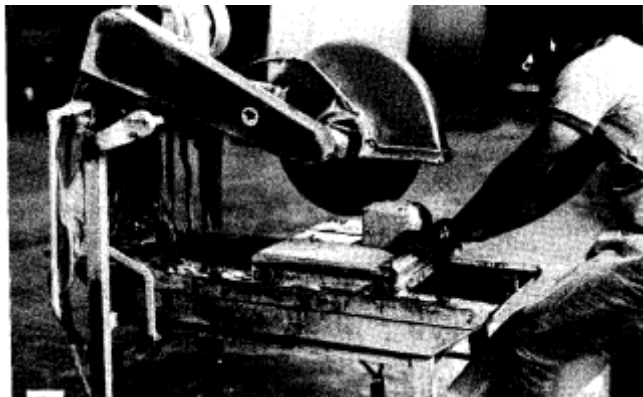
*Σχήμα 2.2: Τριβείο λείανσης επιφανειών δοκιμίων βραχομηχανικής*



*Σχήμα 2.3: Διάταξη ελέγχου επιπεδότητας εδρών κυλινδρικών και κυβικών δοκιμίων*



*Σχήμα 2.4: Λείανση επιφάνειας δοκιμίου με τροχό*



*Σχήμα 2.5: Κοπή τεμαχίων βράχου με διαμαντόδισκο*

## 2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Αρχικά είναι σημαντικός ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, που δεν απαιτεί κάποιο ιδιαίτερο εργαστηριακό εξοπλισμό. Οι κυριότερες εξ' αυτών είναι ο προσδιορισμός της *φυσικής υγρασίας*, ο προσδιορισμός του *πορώδους* και της *πυκνότητας*, η εύρεση του *ξηρού φαινόμενου βάρους* και ο προσδιορισμός της *απορροφητικότητας* του πετρώματος.

### 2.2.1 Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας βράχου και ξηρού φαινόμενου βάρους

Η υγρασία μιας βραχώδους μάζας είναι η ποσότητα του νερού που περιέχει ένα πέτρωμα στο φυσικό του περιβάλλον και εκφράζεται συνήθως επί τοις εκατό.

Στον απαιτούμενο εξοπλισμό για αυτή τη δοκιμή περιλαμβάνονται:

- 1.1 Κατάλληλοι υποδοχείς (π.χ. ύαλοι ωρολογίου) τέτοιοι ώστε να προλαμβάνεται απώλεια υγρασίας κατά τη διάρκεια της ζυγίσεως και μεταλλικά κουτιά για τη τοποθέτηση των δειγμάτων.
- 1.2 Κλίβανος θερμοκρασίας 110° C.
- 1.3 Ζυγός ευαισθησίας 0,01 % του βάρους του δείγματος.

Κατά την επιλογή ενός δείγματος για τον προσδιορισμό της υγρασίας πρέπει να δοθεί προσοχή στη λήψη ενός αντιπροσωπευτικού δοκιμίου. Επίσης πολλά εδαφικά δείγματα είναι πιθανό να έχουν ξηραθεί επιφανειακά, οπότε παίρνεται δείγμα από το εσωτερικό του δοκιμίου.

Το ποσό του δείγματος που λαμβάνεται για τον προσδιορισμό υγρασίας εξαρτάται από το τύπο του βράχου και τη διατιθέμενη ποσότητα. Γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο τόσο ακριβέστερος είναι ο προσδιορισμός, διότι τα βάρη είναι μεγαλύτερα.



Σχήμα 2.6: α) Εργαστηριακός κλίβανος, β) Εργαστηριακός ζυγός

Ένα δοκίμιο για τον προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας πρέπει να ζυγίζεται όσο το δυνατό γρηγορότερα μετά την έναρξη της δοκιμής, ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι επιδράσεις από την επιφανειακή ξήρανση.

Μετά την προσεκτική ζύγιση το δοκίμιο ξηραίνεται σε φούρνο θερμοκρασίας 105 – 110° C. Ο χρόνος ξηράνσεως εξαρτάται από το τύπο, τη ποσότητα και το σχήμα του δοκιμίου. Συνήθως το δείγμα αφήνεται στο φούρνο για τουλάχιστον ένα 24-ωρο.

Μετά την απομάκρυνσή του από το φούρνο, το δοκίμιο ψύχεται και έπειτα ζυγίζεται.

Για την εύρεση τελικά της περιεκτικότητας σε νερό ακολουθούνται οι εξής υπολογισμοί:

α) βάρος νερού = (βάρος δοχείου + υγρού δείγματος) – (βάρος δοχείου + ξηρού δείγματος)

β) βάρος στερεών = (βάρος δοχείου + ξηρού δείγματος) – (βάρος δοχείου)

γ) φυσική υγρασία = (βάρος νερού / βάρος στερεών) × 100 %.

Η φυσική υγρασία εκφράζεται επί τοις % ενώ ο αριθμός γράφεται με ακρίβεια δεκάτου.

Το ξηρό φαινόμενο βάρος υπολογίζεται πολύ εύκολα ως ο λόγος του βάρους προς τον ολικό όγκο του δοκιμίου, μετά από ξήρανση 24 ωρών στους 110° C.

### **2.2.2 Προσδιορισμός πορώδους και πυκνότητας βράχου**

Ο προσδιορισμός του πορώδους και της πυκνότητας μιας βραχώμαζας μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους ανάλογα με τη γεωμετρία του δείγματος, με το αν είναι συμπαγής ο βράχος, με το αν θρυμματίζεται μετά τη ξήρανση ή διαλύεται όταν βυθίζεται στο νερό, με το αν το συγκεκριμένο δείγμα θα χρησιμοποιηθεί και σε άλλες δοκιμές για τον προσδιορισμό άλλων ιδιοτήτων.

Μια προτεινόμενη μέθοδος για τον προσδιορισμό του πορώδους και της πυκνότητας ενός δείγματος συμπαγούς βράχου με κανονικό σχήμα (συνήθως κυλινδρικό), που δεν θρυμματίζεται μετά τη ξήρανση και δε διαλύεται κατά τη βύθιση στο νερό ενώ στη συνέχεια είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες δοκιμές, απαιτεί τον ακόλουθο εργαστηριακό εξοπλισμό:

2.3 Κλίβανος θερμοκρασίας 105 -110° C.

2.4 Όργανο μέτρησης μήκους π.χ. βερνιέρος, με δυνατότητα να διαβάσει κανείς διαστάσεις με ακρίβεια 0,1 mm.

2.5 Συσκευή κορεσμού δειγμάτων με κενό (Vacuum saturation equipment) τέτοιο ώστε τα δοκίμια να βυθίζονται στο νερό υπό πίεση λιγότερη από 800 Pa για μια χρονική περίοδο τουλάχιστο μιας ώρας.

2.6 Ζυγός ευαισθησίας, ικανός να προσδιορίζει τη μάζα ενός δοκιμίου με ακρίβεια 0,01 %.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι απλή. Αρχικά επιλέγονται τρία δοκίμια από ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα υλικού, τα οποία λειαινούνται ώστε να πάρουν ακριβώς τη μορφή ενός κυλίνδρου ή πρίσματος. Το ελάχιστο μέγεθος κάθε δοκιμίου πρέπει να είναι τέτοιο ώστε η μάζα του να είναι τουλάχιστον 50 gr ή η μικρότερη διάσταση του δοκιμίου να είναι

τουλάχιστο δέκα φορές το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου, από τη σύγκριση αυτών των δυο επιλέγεται το μεγαλύτερο.

Ο όγκος,  $V$ , του κάθε δοκιμίου υπολογίζεται, αφότου έχουν μετρηθεί οι διαστάσεις τους με ακρίβεια 0,1 mm.

Στη συνέχεια τα δοκίμια βυθίζονται στο νερό για πάνω από ώρα, ενώ περιοδικά τα κινούμε ώστε να φύγει ο παγιδευμένος αέρας από τα κενά της βραχόμαζας και να επέλθει πλήρης κορεσμός.

Ακολούθως τα δοκίμια βγαίνουν από το νερό και με ένα ύφασμα απομακρύνεται το νερό από την επιφάνειά τους, προσέχοντας να μη σπάσει το δοκίμιο και χαθούν κομμάτια υλικού. Η μάζα του κορεσμένου δείγματος,  $M_{sat}$ , ζυγίζεται.

Τα δοκίμια ξηραίνονται στο κλίβανο στους 110° C, ψύχονται και ζυγίζονται ξανά για να βρεθεί τώρα το βάρος του ξηρού βράχου,  $M_s$ .

Στους υπολογισμούς περιλαμβάνονται η εύρεση του όγκου κενών, του πορώδους και της πυκνότητας σύμφωνα με τους ακόλουθους τύπους:

$$\text{όγκος κενών} \quad V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (2.1)$$

$$\text{πορώδες} \quad n = \frac{100 \times V_v}{V} \% \quad (2.2)$$

$$\text{πυκνότητα βραχόμαζας} \quad \rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (2.3)$$

όπου  $\rho_w$ , η πυκνότητα του νερού.

Από τις τιμές που προκύπτουν για τα τρία δοκίμια, εξάγεται ένας μέσος όρος. Οι τιμές της πυκνότητας πρέπει να δίνονται στη κοντινότερη τιμή των 10 kg / m<sup>3</sup> ενώ οι τιμές του πορώδους στο κοντινότερο 0,1 %.

Σε αυτό το σημείο, θα αναφέρουμε κάποιες λεπτομέρειες παραπάνω όσον αφορά τον εξοπλισμό, για την ύγρανση των δειγμάτων, με χρήση κενού (vacuum saturation process). Σκοπός της διαδικασίας είναι η γρήγορη και αποτελεσματική επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού υγρασίας ενός δείγματος. Ο τυπικός εξοπλισμός φαίνεται στο σχήμα 2.7 και μια σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8. Ο εξοπλισμός

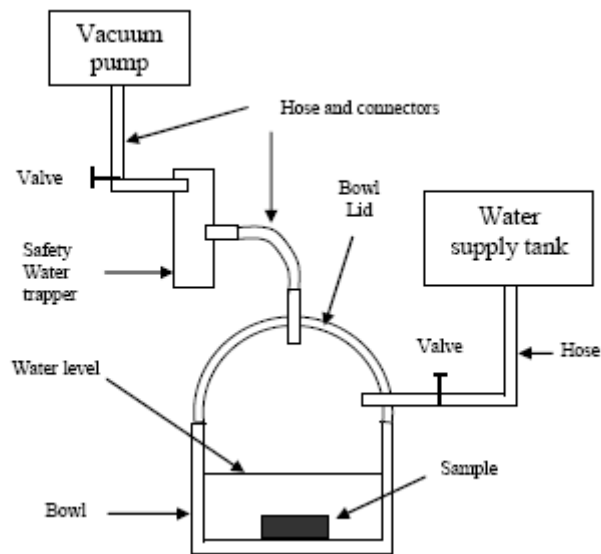
αποτελείται από ένα μπολ με ένα σωληνάκι στο πάνω μέρος, μια παροχή νερού και μια αντλία πίεσης συνοδευόμενη από μια βαλβίδα ασφαλείας. Όλα τα επιμέρους τμήματα συνδέονται με πλαστικά σωληνάκια και συνδετήρες.

Η τυπική διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: αρχικά το δείγμα τοποθετείται στο μπολ (χωρίς νερό) και βρίσκεται υπό πίεση για 30 λεπτά, έπειτα ανοίγουμε την παροχή νερού και γεμίζουμε μέχρι το δείγμα να είναι πλήρως βυθισμένο στο νερό. Στο βυθισμένο δείγμα ασκείται πίεση για ακόμη 30 λεπτά. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παρατηρούνται φυσαλίδες αέρα στο νερό, οι οποίες ήταν παγιδευμένες στα κενά του δείγματος. Λόγω της ασκούμενης πίεσης το νερό διεισδύει πιο εντατικά στη μάζα του δείγματος. Μετά από αυτό το δείγμα αφήνεται στο νερό βυθισμένο για ακόμη μισή ώρα. Ολόκληρη η διαδικασία απαιτεί συνολικά μιάμιση ώρα.

Η διαδικασία αυτή είναι πολύ γρήγορη και έχει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με το να αφήναμε το δείγμα για 24 ώρες ή παραπάνω στο νερό, μέχρι να κορεστεί πλήρως.



*Σχήμα 2.7: Συσκευή κορεσμού δειγμάτων με κενό*



Σχήμα 2.8: Σχηματική απεικόνιση της συσκευής κορεσμού δειγμάτων με κενό

Στη συνέχεια θα δούμε μια άλλη μέθοδο προσδιορισμού πορώδους και πυκνότητας βραχώμαζας, κατάλληλη για ακανόνιστα δείγματα βράχου που δεν είναι συμπαγή και μπορούν να διαλυθούν κατά τη βύθισή τους σε νερό. Για αυτή την εργαστηριακή δοκιμή χρειάζεται επιπλέον ο ακόλουθος εξοπλισμός:

- 3.1 Ζυγός ακόμα μεγαλύτερης ακρίβειας, που να μπορεί να μετρήσει 0.001 gr.
- 3.2 Συσκευή μέτρησης όγκου με χρήση υδραργύρου (mercury – displacement) μέτρησης του όγκου δοκιμίων με ακρίβεια 0.5 % (σχήμα 2.10).
- 3.3 Συσκευή άλεσης του δείγματος ώστε να μετατραπεί σε πούδρα με μέγεθος κόκκου μικρότερο από 150  $\mu\text{m}$ .
- 3.4 Υδατόλουτρο ή χώρος σταθερής θερμοκρασίας, για τη διατήρηση σε σταθερή θερμοκρασία του εδαφικού αιωρήματος κατά τη διάρκεια εκτελέσεως της δοκιμής. Ικανοποιητικό υδατόλουτρο αποτελεί μια μικρή δεξαμενή νερού καλά μονωμένη που να διατηρεί το αιώρημα σε κατάλληλη σταθερή θερμοκρασία όσο το δυνατό πιο κοντά στους 20° C.
- 3.5 Ογκομετρικοί κύλινδροι των 1000 mL
- 3.6 Μαλακό βουρτσάκι





*Σχήμα 2.9: α) Τυπική διάταξη υδατόλουτρου, β) Θάλαμος συντήρησης δοκιμίων σε σταθερές συνθήκες*

Η διαδικασία της δοκιμής είναι αρκετά διαφορετική από αυτή που περιγράφηκε προηγούμενα.

Αρχικά επιλέγονται δέκα περίπου αντιπροσωπευτικά δείγματα, των οποίων το σχήμα και το μέγεθος να είναι τέτοια ώστε να χωράνε στη συσκευή μέτρησης όγκου (το ελάχιστο μέγεθος κάθε δοκιμίου και πάλι υπολογίζεται με τον τρόπο που αναφέρθηκε στην προηγούμενη δοκιμή). Κάθε δοκίμιο βουρτσίζεται προσεκτικά ώστε να απομακρυνθούν θρυμματισμένα υπολείμματα υλικού και στη συνέχεια μετριέται ο όγκος του,  $V$ , με τη συσκευή υδραργύρου.

Στη συνέχεια ζυγίζεται το δοχείο που τοποθετείται το δοκίμιο,  $A$ , και ακολούθως ζυγίζεται το δοχείο μαζί με το δοκίμιο,  $B$  (που έχει κάποια αρχική υγρασία). Όπως και στη προηγούμενη δοκιμή, το δοκίμιο ξηραίνεται στον κλίβανο, ψύχεται και μετά ζυγίζεται,  $C$ . Η πιο πάνω διαδικασία ακολουθείται για όλα τα δοκίμια.

Σε επόμενο βήμα, θρυμματίζονται και αλέθονται όλα τα δοκίμια μαζί έτσι ώστε ο μεγαλύτερος κόκκος να μη ξεπερνά σε μέγεθος τα 150  $\mu\text{m}$ . Από τη πούδρα του υλικού που σχηματίζεται, συλλέγεται ένας αντιπροσωπευτικός αριθμός δειγμάτων, των 15 gr, που στη συνέχεια ξηραίνονται στο κλίβανο.

Αφού ζυγιστεί ο ογκομετρικός κύλινδρος, D, πληρώνεται με κάποιο υγρό, όπως τολουόλιο, που δεν αντιδρά με το βραχώδες υλικό, έως τα  $50 \text{ cm}^3$  και τοποθετείται στο υδατόλουτρο σταθερής θερμοκρασίας. Όταν το υγρό αποκτήσει τη θερμοκρασία του υδατόλουτρου τότε ο ογκομετρικός κύλινδρος εξάγεται από το υδατόλουτρο και ζυγίζεται, η μάζα του E.

Ακολούθως απομακρύνεται το υγρό από τον ογκομετρικό κύλινδρο και αφού στεγνώσει, μεταφέρονται εκεί τα 15 gr δείγματος της πούδρας και ξαναγίνεται ζύγιση, F. Ο κύλινδρος με το δείγμα αναταράσσεται για περίπου 20 min και επαρκής ποσότητα υγρού προστίθεται ώστε να βραχεί πλήρως το δείγμα. Προστίθεται και άλλο υγρό μέχρι τα  $50 \text{ cm}^3$  και ο κύλινδρος αναταράσσεται προσεκτικά ώστε να φύγει όλος ο αέρας. Ο ογκομετρικός κύλινδρος τοποθετείται στο υδατόλουτρο σταθερής θερμοκρασίας.

Μετά το υδατόλουτρο, ο κύλινδρος με το περιεχόμενό του αφήνεται να ψυχθεί και ζυγίζεται ξανά, G. Πρέπει να αναφέρουμε ότι όλα τα παραπάνω βήματα πρέπει να γίνουν για όλα τα δείγματα πούδρας που έχουμε πάρει.

Οι ζητούμενες ιδιότητες της βραχώμαζας δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\text{περιεκτικότητα σε νερό} \quad w = \frac{B - C}{C - A} \times 100\% \quad (2.4)$$

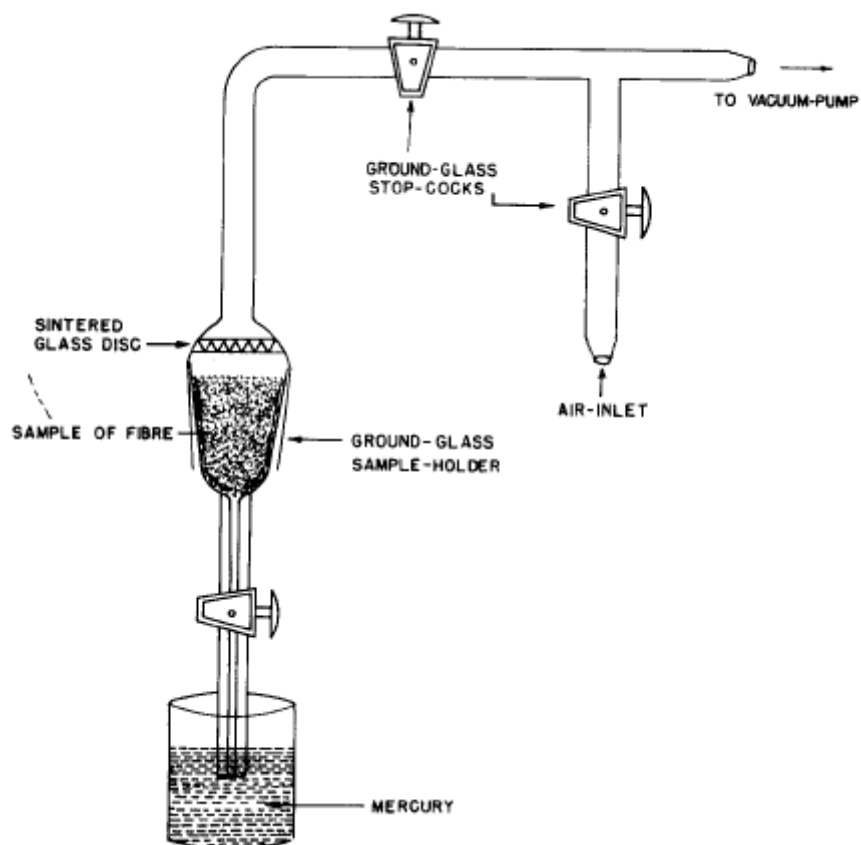
$$\text{ειδικό βάρος κόκκων} \quad \rho_s = \frac{F - D}{V_f \left( 1 - \frac{G - F}{E - D} \right)} \quad (2.5)$$

όπου  $V_f$  είναι ο όγκος αναφοράς, συνήθως  $50 \text{ cm}^3$ .

$$\text{μάζα κόκκων} \quad M_s = C - A \quad (2.6)$$

$$\text{πυκνότητα βραχώμαζας} \quad \rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (2.7)$$

$$\text{πορώδες} \quad n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \times 100\% . \quad (2.8)$$



Σχήμα 2.10: Σχηματική απεικόνιση της συσκευής υπολογισμού όγκου με χρήση υδραργύρου

### 2.2.3 Προσδιορισμός απορροφητικότητας βράχου

Η δοκιμή αυτή έχει ως σκοπό τη μέτρηση του όγκου των κενών που είναι γεμάτοι με νερό, που συνδέεται άμεσα με την απορροφητικότητα της βραχώμαζας. Ουσιαστικά υπολογίζεται ως ποσοστό του ξηρού φαινόμενου βάρους, μετά από 24-ωρο εμποτισμό σε νερό, σε συνθήκες κενού. Ο λόγος του όγκου των πόρων που είναι γεμάτοι με νερό προς τον ολικό όγκο των πόρων ονομάζεται βαθμός υδατοκορεσμού.

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι εξαιρετικά απλός:

- α) Μεταλλικό κουτί
- β) Ποσότητα από αφυδατωμένο τζέλ πυριτίου

γ) Ζυγός ευαισθησίας, με ακρίβεια 0.5 g.

Επιλέγεται ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα βραχόμαζας (τουλάχιστον δέκα δοκίμια). Το μέγεθος του κάθε δοκιμίου επιλέγεται με τον τρόπο που έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Το δείγμα σε συνθήκες, όπως βρίσκεται σε συνθήκες δωματίου τοποθετείται στο κουτί. Κάθε δείγμα ξεχωρίζεται από το άλλο και περιβάλλεται από κρυστάλλους αφυδατωμένου τζέλ πυριτίου, και όλο το δείγμα αφήνεται ένα 24-ωρο.

Μετά τις 24 ώρες το δείγμα αφαιρείται από το μεταλλικό κουτί και αφού καθαριστεί προσεκτικά, ώστε να μην υπάρχουν υπολείμματα θρυμματισμένης βραχόμαζας και κρύσταλλοι του τζέλ, προσδιορίζεται η μάζα του,  $A$ , με ακρίβεια 0.5 g.

Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται ξανά στο κουτί και προστίθεται ποσότητα νερού, τέτοια ώστε τελικά το δείγμα να βυθιστεί τελείως στο νερό, όπου παραμένει για μια ώρα.

Τέλος, μετά το πέρας της ώρας, το δείγμα απομακρύνεται από το νερό και με ένα απορροφητικό ρούχο απομακρύνουμε την υγρασία από την επιφάνειά του, προσέχοντας να μη χαθούν κομμάτια της βραχόμαζας. Το δείγμα ζυγίζεται και προσδιορίζεται η μάζα του,  $B$ , με ακρίβεια 0.5 g.

Το ποσοστό των κενών υπολογίζεται με βάση την απλή σχέση:

$$I_v = \frac{B - A}{A} \times 100 \% \quad (2.9)$$

όπου η τιμή δίνεται με στρογγυλοποίηση στο κοντινότερο 1%.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

---

## ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων μιας βραχώμαζας. Όταν μιλάμε για μηχανικές ιδιότητες βραχώμαζας εννοούμε την εύρεση της αντοχής του πετρώματος σε *μονοαξονική θλίψη*, με παράλληλη εύρεση του *μέτρου ελαστικότητας*,  $E$ , και του *λόγου Poisson*,  $\nu$ , τον προσδιορισμό της αντοχής σε *σημειακή φόρτιση*, της αντοχής σε *εφελκυσμό*, με παράλληλη εύρεση της *συνοχής*,  $c$ , και της *γωνίας τριβής*,  $\phi$ , του πετρώματος. Επίσης στις μηχανικές ιδιότητες περιλαμβάνονται ο υπολογισμός των *δυναμικών παραμέτρων ελαστικότητας*, ο *βαθμός αποσάθρωσης* του πετρώματος, η *μηχανική ανισοτροπία* ενός στερεού υλικού και η *δυνατότητα παραμόρφωσης* υπό συγκεκριμένη φόρτιση.

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων απαιτείται ειδικός εργαστηριακός εξοπλισμός για την εκτέλεση των αντίστοιχων δοκιμών, που μπορεί να δίνουν άμεσα ή έμμεσα τις ζητούμενες παραμέτρους.

### 3.1 Αντογή πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

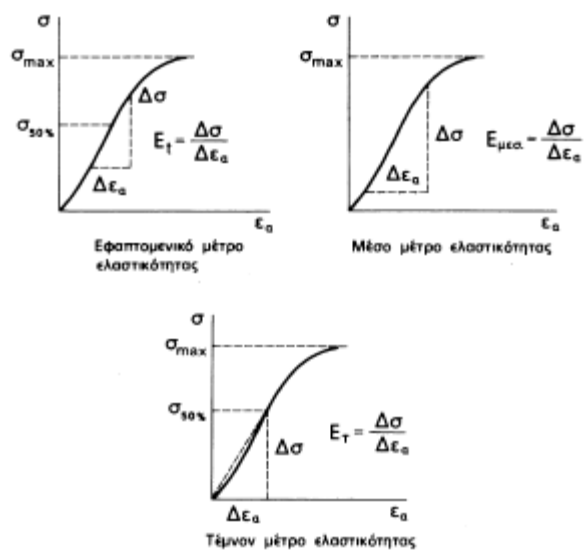
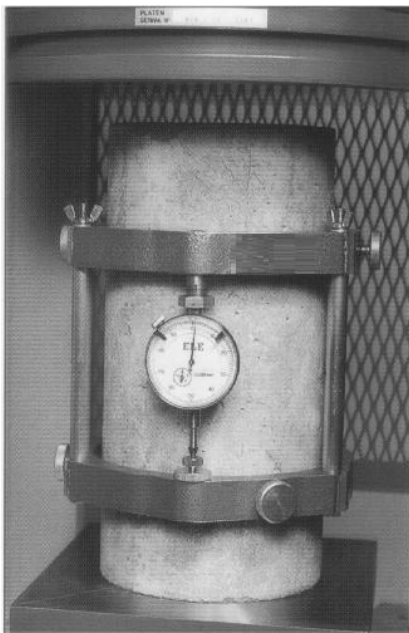
Τα βασικά χαρακτηριστικά της συνιστώμενης διαδικασίας για τον προσδιορισμό της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη είναι:

- Τα δοκίμια έχουν κυλινδρική μορφή με λόγο 2.5 έως 3 όπου  $H$  το ύψος και  $D$  η διάμετρος του δοκιμίου.
- Η διάμετρος δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 54 mm (NX μέγεθος πυρήνα) και πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από το μέγιστο μέγεθος κόκκου του υπό δοκιμή πετρώματος.

- Οι βάσεις των δοκιμίων πρέπει να είναι επίπεδες με ανοχή 0.02 mm, και κάθετες στον διαμήκη άξονα συμμετρίας του δοκιμίου με απόκλιση όχι περισσότερο από 0.001 rad ή 0.05mm στα 50mm.
- Η πλευρική επιφάνεια πρέπει να είναι λεία, με ανοχή όχι περισσότερο από 0.3 mm.
- Τα δοκίμια πρέπει να έχουν ληφθεί πριν από 30 ημέρες το πολύ από το μητρικό πέτρωμα, έτσι ώστε να διατηρούν, κατά το δυνατόν, τη φυσική τους υγρασία.
- Το φορτίο θα εφαρμόζεται στο δοκίμιο με σταθερό ρυθμό  $0.5 \pm 1$  MPa/s.
- Αξονικό φορτίο και ακτινικές ή διαμετρικές παραμορφώσεις θα καταγράφονται καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής.
- Θα πρέπει να εκτελούνται τουλάχιστον πέντε δοκιμές.

Για την εκτέλεση της δοκιμής, κατάλληλα διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη με σκοπό να υπολογιστεί η αντοχή του πετρώματος, δηλαδή η μέγιστη τάση (μέση τιμή σε ένα επίπεδο) την οποία ένα πέτρωμα δύναται να αντέξει. Η αντοχή υπολογίζεται ως ο λόγος της εφαρμοζόμενης δύναμης θραύσης προς την επιφάνεια εφαρμογής της δύναμης.

Η συσκευή μονοαξονικής θλίψης φαίνεται στο ακόλουθη σχήμα 3.1,α:



Σχήμα 3.1: α) Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, β) Γραφικός προσδιορισμός μέτρων ελαστικότητας

Επίσης με βάση το διάγραμμα ενεργών τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων (σχήμα 3.1,β), που σχεδιάζεται από τη δοκιμή αυτή, μπορούν να υπολογιστούν διάφορα μέτρα ελαστικότητας  $E$  (Young's Modulus) του πετρώματος καθώς και ο λόγος του Poisson  $\nu$ . Στη συνήθη περίπτωση που δεν υφίσταται πίεση νερού των πόρων, η ενεργή τάση ταυτίζεται με την δρώσα αξονική δύναμη διαιρεμένη με την επιφάνεια φόρτισης του δοκιμίου. Η μέτρηση των παραμορφώσεων επιτυγχάνεται συνήθως με την τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) που επικολλώνται με τη χρήση ειδικής κόλλας, σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Ηλεκτρονικά ψηφιακά και αναλογικά μηχανοσκόμμετρα

Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχόμενη με σταθερό ρυθμό. Η θραύση του δοκιμίου, ανάλογα με την αντοχή του, επιτυγχάνεται συνήθως μέσα σε 5 έως 10 λεπτά. Κατά την διεξαγωγή της δοκιμής καταγράφονται οι ενδείξεις φορτίου της θλιπτικής μηχανής και οι ενδείξεις παραμορφώσεων των δύο ενισχυτών σήματος. Η αξονική και η διαμετρική παραμόρφωση,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l_x}{l_x} \quad , \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta l_y}{l_y} \quad (3.1)$$

όπου  $\Delta l$  είναι η μεταβολή του μήκους που μετράει ο μετρητής και  $l$  το μήκος στο οποίο γίνεται η μέτρηση. Για την περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανοσκόμμετρων, τα μεγέθη  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  δίνονται από τις ενδείξεις των ενισχυτών του, πολλαπλασιαζόμενες με κατάλληλο συντελεστή.

Η θλιπτική τάση με την οποία καταπονείται το δοκίμιο, δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.2)$$

όπου P το θλιπτικό φορτίο σε kN, και A<sub>0</sub> το εμβαδόν της βάσης του κυλινδρικού δοκιμίου όπως μετρήθηκε πριν από τη δοκιμή.

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E<sub>t</sub>) υπολογίζεται από την καμπύλη τάσης - αξονικής τροπής (σχήμα 3.1, β) ως εξής. Σε σημείο που αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό της μέγιστης τάσεως (συνήθως το 50%) φέρεται η εφαπτομένη. Η κλίση της ευθείας αυτής είναι το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας (E<sub>μεσο</sub>) υπολογίζεται από την μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της ίδιας καμπύλης. Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας (E<sub>τ</sub>) υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που χαράσσεται στην ίδια καμπύλη, για τιμές τάσεως μεταξύ 0 και συνήθως 50% της μέγιστης τάσεως. Τα μέτρα ελαστικότητας εκφράζονται συνήθως σε GPa.

Για τον προσδιορισμό του λόγου του Poisson σχεδιάζονται οι καμπύλες αξονικής τάσης – αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης και αξονικής τάσης – διαμετρικής ανηγμένης ροπής. Σε συνέχεια υπολογίζονται οι κλίσεις τους  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_a$ ,  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_d$ . Ο λόγος του Poisson υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\nu = -\frac{\Delta\sigma / \Delta\varepsilon_a}{\Delta\sigma / \Delta\varepsilon_d} \quad (3.3)$$

όπου η κλίση της καμπύλης τάσεως – διαμετρικής παραμόρφωσης υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε κάθε μία από τις τρεις κλίσεις της καμπύλης τάσεως- αξονικής παραμόρφωσης, για τον προσδιορισμό των μέτρων ελαστικότητας. Αποτελέσματα τέτοιων δοκιμών βρίσκονται στη βιβλιογραφία (π.χ. Lama and Voutoukouri, 1978).

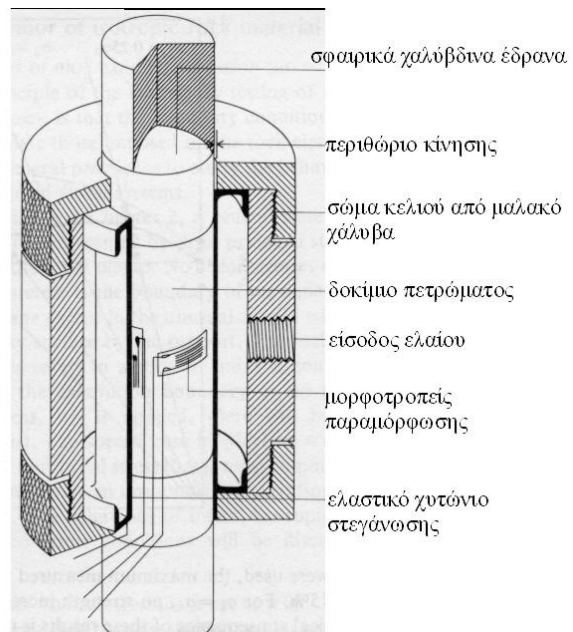
### **3.2 Αντογή σε τριαξονική φόρτιση**

Μία βασική αρχή των εργαστηριακών δοκιμών σε πετρώματα, για απόκτηση δεδομένων και χρήση τους σε αναλύσεις σχεδιασμού, είναι ότι οι οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο δοκίμιο θα πρέπει να προσομοιώνουν τις συνθήκες του επί τόπου πετρώματος. Στη γενική περίπτωση, θα υφίσταται μία κατάσταση πολυαξονικής ή



πραγματικής τριαξονικής έντασης, ήτοι με κύριες τάσεις  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ . Ειδικότερες περιπτώσεις αποτελούν η κατάσταση τριαξονικής έντασης, όπου  $\sigma_2 = \sigma_3$ , και διαξονικής έντασης, όπου  $\sigma_1 \geq \sigma_2, \sigma_3 = 0$ . Σημασία έχει επίσης (Brady and Brown, 1993) και η διαδρομή των τάσεων μέχρι τη θραύση.

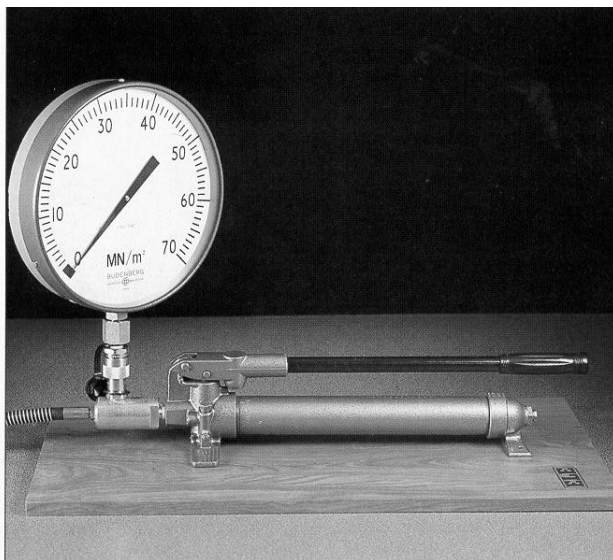
Κατά τη τριαξονική δοκιμή κατάλληλα διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια, παρόμοια με αυτά που παρασκευάζονται για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, υποβάλλονται σε τριαξονική θλίψη σύμφωνα με την ISRM (1983). Το δοκίμιο τοποθετείται μέσα σε ειδικό κελί (Σχήμα 3.3) μέσω του οποίου εφαρμόζεται πλευρικά υδραυλική πίεση  $\sigma_3$  σε διάφορες τιμές. Ένα πλαστικό περίβλημα απομονώνει συνήθως το δοκίμιο από το πλευρικό υγρό που συνήθως είναι έλαιο. Η αξονική τάση  $\sigma_1$  επιβάλλεται στο δοκίμιο μέσω εμβόλου που διέρχεται μέσα από το κελί, με σκοπό να υπολογιστεί κάθε φορά η αντοχή του πετρώματος σε αξονική θλίψη για δεδομένη τιμή πλευρικής πίεσης. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test) και μονοαξονικής θλίψης μπορεί να χαραχθεί η περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής του πετρώματος.



Σχήμα 3.3: Δοκίμιο υποβαλλόμενο σε τριαξονική θλίψη και όψη του εσωτερικού κελιού

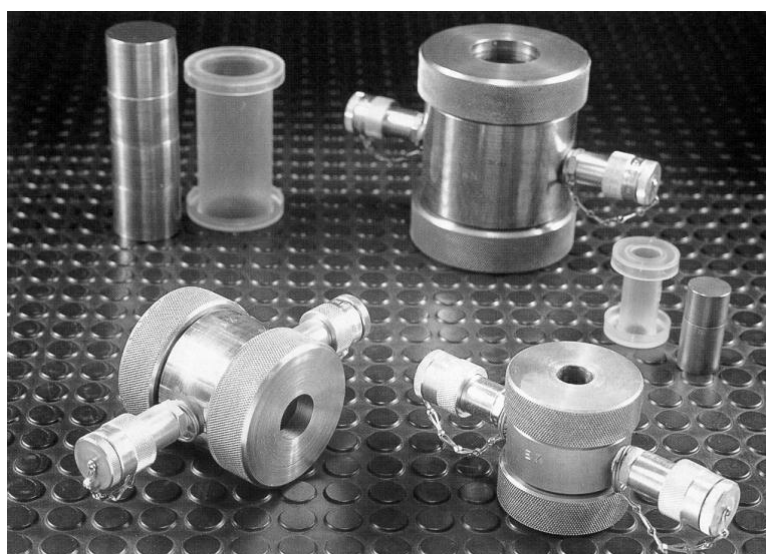
Για την πραγματική τριαξονική φόρτιση, οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται σε κυβικά ή σε ορθογωνικά δοκίμια πετρώματος. Σε κάθε ζεύγος απέναντι πλευρών εξασκείται διαφορετική ορθή τάση. Η πραγματοποίηση των δοκιμών αυτών γενικά υποδεικνύει την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αντοχή του πετρώματος. Πολυαξονική δοκιμή επιτυγχάνεται και με τη φόρτιση κυλινδρικού δοκιμίου με κεντρική οπή στην οποία εισπιέζεται υγρό.

Η δοκιμή τριαξονικής φόρτισης πραγματοποιείται σε κυλινδρικά δοκίμια πετρώματος, ενώ ο εργαστηριακός εξοπλισμός αποτελείται από τα εξής: μηχανή αξονικής θλίψης, χειροκίνητη υδραυλική αντλία, και κυψέλη τριαξονικής φόρτισης (Τσουτρέλης et al., 2000). Η μηχανή αξονικής θλίψης είναι TONIPACT 3000, γερμανικής προέλευσης, με δυναμικότητα φόρτισης 3000 kN (300 tn), δυνατότητα ελέγχου του ρυθμού φόρτισης και εκτύπωσης της μέγιστης τιμής φορτίου της δοκιμής, ψηφιακή ένδειξη του φορτίου σε kN, δυνατότητα περιστροφής της άνω πλάκας φόρτισης, ώστε να εφάπτεται αυτή με τη βάση του δοκιμίου. Συμπληρώνεται από ηλεκτρικούς μετρητές παραμορφώσεων της Kyowa, Ιαπωνικής κατασκευής με δυνατότητα απ' ευθείας καταγραφής των παραμορφώσεων. Αυτοί αποτελούνται από δύο ηλεκτρικά μηχανοσκόμια (strain gages), με μήκος 3 cm, δύο γέφυρες Wheatstone και δύο ενισχυτές σήματος.



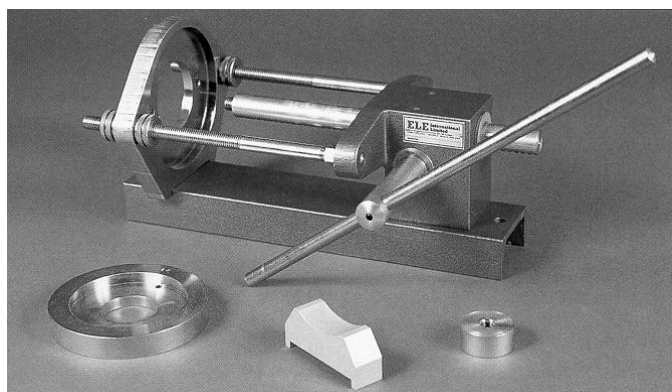
Σχήμα 3.4: Χειροκίνητη αντλία λαδιού για την άσκηση της πλευρικής πίεσης

Η κυψέλη HOEK τριαξονικής φορτίσεως είναι του οίκου ELE (Σχήμα 3.5) και δέχεται δοκίμια διαμέτρου NX (54.7 mm). Αποτελείται από ένα κυλινδρικό χαλύβδινο κέλυφος το οποίο στα άκρα του φέρει 2 ειδικές χαλύβδινες βάσεις με οπές. Εντός της κυψέλης τοποθετείται κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος. Μεταξύ του δοκιμίου και των εσωτερικών τοιχωμάτων του κελιού τοποθετείται λάδι το οποίο όμως δεν έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο αφού μεταξύ τους παρεμβάλλεται μία ελαστική μεμβράνη με αντοχή στην υψηλή πίεση μέχρι 31 MPa. Η πλευρική πίεση ασκείται μέσω ειδικών βαλβίδων, που βρίσκονται στις πλευρές της κυψέλης και σε αυτές συνδέεται η χειροκίνητη υδραυλική αντλία.



*Σχήμα 3.5: Κυψέλες Hoek διαφόρων διαστάσεων*

Ο εξολκέας (Σχήμα 3.6) χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του δοκιμίου μετά την εκτέλεση της δοκιμής, ώστε να ληφθεί το δοκίμιο χωρίς να τεμαχιστεί. Όταν εκτελούνται δοκιμές με υψηλή τιμή πλευρικής πίεσης είναι σύνηθες το φαινόμενο αδυναμίας λήψης του θραυσθέντος δοκιμίου από την τριαξονική κυψέλη. Η χρήση του εν λόγω εξολκέα απλουστεύει τη διαδικασία αυτή και μειώνει τον κίνδυνο τραυματισμού της ελαστικής μεμβράνης.



Σχήμα 3.6: Εξολκείας δοκιμών τριαξονικής δοκιμής

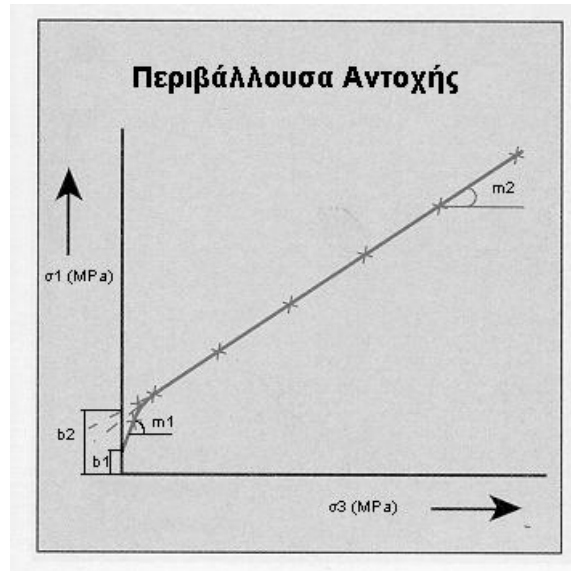
Τα δοκίμια των πετρωμάτων είναι κυλινδρικά διαμέτρου NX (54.7 mm) και ύψους 110-116 mm. Η προετοιμασία τους συνίσταται στην λήψη πυρήνων από ακανόνιστα τεμάχια πετρώματος, στην κοπή των βάσεων τους με χρήση ειδικού τροχού, ώστε αυτές να είναι παράλληλες μεταξύ τους, και στην λείανση των βάσεων σε ειδική συσκευή Lap Master, ώστε τα δοκίμια να είναι σύμφωνα με τις ανοχές παραλληλότητας και επιπεδότητας, που δίνει ο εφαρμοζόμενος κανονισμός της I.S.R.M.

Ο αριθμός των εκτελουμένων δοκιμών είναι τουλάχιστον 3. Κάθε δοκιμή εκτελείται με διαφορετική τιμή της πλευρικής πίεσεως. Η δοκιμή διαρκεί από 5 έως 10 λεπτά, ανάλογα με τον ρυθμό φόρτισης, τον τύπο του πετρώματος και την τιμή της πλευρικής πίεσεως. Τα μεγέθη που καταγράφονται κατά την εκτέλεση των δοκιμών είναι: Φορτίο σε kN και η αξονική παραμόρφωση  $\epsilon_a$ . Η συχνότητα καταγραφής των μεγεθών αυτών είναι ανά 5 kN. Για την περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανομετρών το μέγεθος  $\epsilon_a$  δίνεται από την ένδειξη του ενισχυτή αφού αφαιρεθούν από αυτή η αρχική του ένδειξη, και πολλαπλασιαζόμενη επί 4.

Η επεξεργασία αποτελεσμάτων περιλαμβάνει σύντομη λιθολογική περιγραφή για το πέτρωμα από το οποίο προήλθαν τα δοκίμια και με βάση τις παραπάνω μετρήσεις καθώς επίσης και εκείνες των πειραμάτων του έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test), που θα δούμε παρακάτω, και της μονοαξονικής θλίψης χαράσσονται :

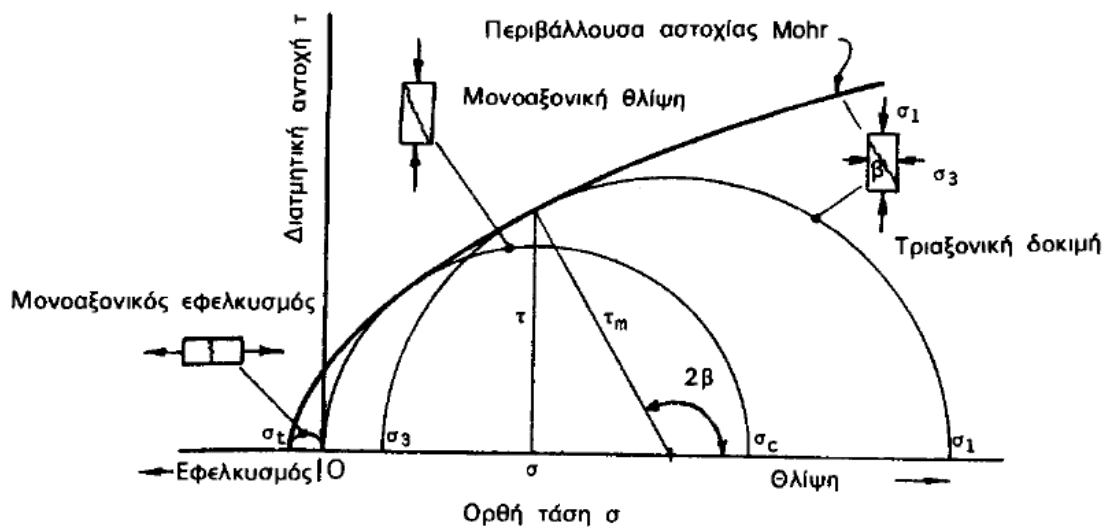
α) Τα διαγράμματα κύριας τάσης  $\sigma_1$  – παραμόρφωσης.

β) Το διάγραμμα με άξονες  $\sigma_1 - \sigma_3$  και η περιβάλλουσα αντοχής σύμφωνα με το σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Περιβάλλουσα αντοχής πετρώματος

γ) Η περιβάλλουσα αστοχίας του πετρώματος κατά Mohr, σύμφωνα με το Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Χάραξη περιβάλλουσας αστοχίας πετρώματος κατά Mohr

Οι τιμές  $c$  και  $\varphi$  του πετρώματος υπολογίζονται για συγκεκριμένες περιοχές της  $\sigma_3$ , σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\varphi_i = \arcsin \frac{m_i - 1}{m_i + 1} \quad , \quad c_i = b_i \frac{1 - \sin \varphi_i}{2 \cos \varphi_i} \quad (3.4)$$

### 3.3 Δοκιμή υγείας

Η αντοχή σε επίδραση θεικών αλάτων, ή αλλιώς δοκιμή υγείας του πετρώματος καθορίζει την ανθεκτικότητά του σε αποσάθρωση λόγω των εναλλασσόμενων καιρικών επιδράσεων και κυρίως της ψύξης και της θέρμανσης. Η προσομοίωση της μεταβολής του όγκου των δοκιμίων γίνεται με την κρυσταλλοποίηση αλάτων θεικού νατρίου ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ή θεικού μαγνησίου ( $\text{Mg}_2\text{SO}_4$ ) κατά τη φάση της ξήρανσης των κορεσμένων δοκιμίων. Τα δοκίμια εμβαπτίζονται για 16-18 ώρες σε διάλυμα θεικού νατρίου ή μαγνησίου και κατόπιν ξηραίνονται σε θερμοκρασία  $110^\circ \text{C}$ . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνήθως πέντε φορές. Μετά το πέρας των επαναλαμβανόμενων βυθίσεων και του στεγνώματος τα δοκίμια ξεπλένονται με νερό θερμοκρασίας  $43^\circ \text{C}$ , έτσι ώστε να φύγει όλο το θεικό μαγνήσιο ή νάτριο. Τα ξεπλυμένα δοκίμια ξηραίνονται στους  $110^\circ$  με  $150^\circ \text{C}$  και ζυγίζονται.

Στο σχήμα 3.9 φαίνονται τα αδρανή πριν και μετά τη δοκιμή υγείας.

Συνήθως αυτή η δοκιμή γίνεται για αδρανή υλικά τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ασφαλομιγμάτων και για οδοστρωσία. Με την εναλλαγή των εποχιακών θερμοκρασιών καθώς και την επαφή με τους τροχούς των αυτοκινήτων, ουσιαστικά επέρχεται μεταβολή του όγκου των αδρανών υλικών και στην περίπτωση κατά την οποία τα αδρανή δεν είναι ανθεκτικά (υγιή) επέρχεται θρυμματισμός τους με καταστρεπτικά αποτελέσματα για το οδόστρωμα ( απώλεια φέρουσας ικανότητας, ρηγμάτωση, οπές και αποσάθρωση).



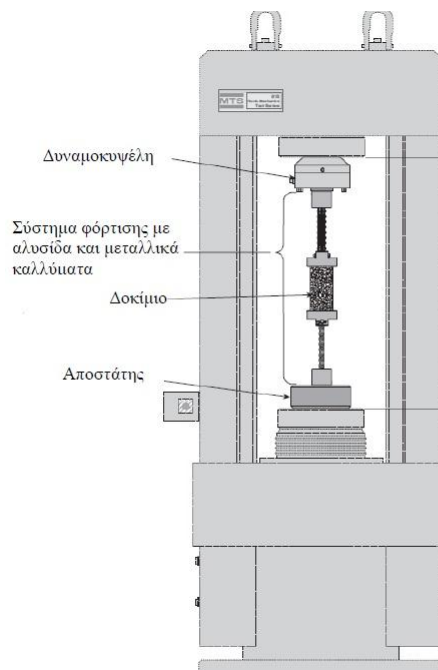
Σχήμα 3.9: Αδρανή υλικά πριν και μετά τη δοκιμή υγείας

### 3.4 Δοκιμή εφελκυσμού

Τα πετρώματα γενικά είναι αδύναμα σε εφελκυσμό σε αντίθεση με την σημαντική αντοχή τους σε θλίψη. Θεωρητικά ο λόγος μονοαξονικής θλιπτικής προς εφελκυστική αντοχή είναι 8:1. Πρακτικά εν τούτοις ο λόγος αυτός διαφέρει από την τιμή αυτή, συνήθως προς τα επάνω, αλλά και δεν είναι εύκολο να καθορισθεί, κυρίως γιατί υπάρχουν δυσκολίες στον προσδιορισμό μιας αξιόπιστης τιμής για την εφελκυστική αντοχή τους.

### 3.4.1 Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού

Η δοκιμή άμεσου προσδιορισμού της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής των πετρωμάτων πραγματοποιείται συνήθως σε κυλινδρικά δοκίμια. Η πραγματοποίηση της δοκιμής αντιμετωπίζει σοβαρές δυσκολίες στη συγκράτηση του δοκιμίου από τους υποδοχείς της μηχανής, προκειμένου να μην καταστρέφεται η επιφάνεια του δοκιμίου και αφετέρου η δύναμη που εφαρμόζεται να είναι παράλληλη προς τον άξονα του δοκιμίου για να ασκείται καθαρός εφελκυσμός (Τσουτρέλης, 1985). Με τη συγκόλληση, με ρητίνη υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, των βάσεων του δοκιμίου σε κατάλληλους μεταλλικούς υποδοχείς επιτυγχάνεται η πραγματοποίηση της δοκιμής σχετικά ευκολότερα. Οι μέθοδοι πραγματοποίησης της δοκιμής περιλαμβάνουν την προετοιμασία κυλινδρικών δοκιμίων κομμένων με ακρίβεια και λειασμένων στα άκρα.



Σχήμα 3.10: Πειραματική διάταξη εργαστηριακής δοκιμής άμεσου εφελκυσμού

Η εφελκυστική δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο εκτιμάται ότι κατανέμεται ομοιόμορφα στη διατομή του κάθετα στη δύναμη φόρτισης. Επομένως, ως εφελκυστική αντοχή του πετρώματος λαμβάνεται η ομοιόμορφη τάση  $\sigma_t$  που ασκείται στο δοκίμιο κατά



τη θραύση. Αυτή υπολογίζεται ως ο λόγος της ασκούμενης εφελκυστικής δύναμης P, κατά τη θραύση, προς το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου D, όπως δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$\sigma_t = -\frac{4P}{\pi D^2} \quad (3.5)$$

Η δοκιμή πραγματοποιείται σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Συνήθη πρότυπα που εφαρμόζονται είναι της ISRM, ASTM, BS, DIN, κλπ. Η προτεινόμενη μέθοδος δοκιμής από την ISRM (1978) δίνεται παρακάτω:

#### **α) Σκοπός**

Η μέθοδος αποσκοπεί στην άμεση μέτρηση της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής ενός δοκιμίου αρρήκτου πετρώματος με συνήθη γεωμετρία. Τα αποτελέσματα της δοκιμής χρησιμοποιούνται κυρίως για την ταξινόμηση και το χαρακτηρισμό του άρρηκτου πετρώματος.

#### **β) Εργαστηριακός εξοπλισμός:**

Μία κατάλληλη μηχανή χρησιμοποιείται για την εφαρμογή και τη μέτρηση του αξονικού φορτίου στο δοκίμιο (σχήμα 3.10). Θα πρέπει να είναι επαρκούς δυναμικότητας και ικανή να εφαρμόσει το φορτίο με ρυθμό σύμφωνα με τις απαιτήσεις των προδιαγραφών.

Κατάλληλα κυλινδρικά μεταλλικά καλύμματα θα πρέπει να ενώνονται στις άκρες των δοκιμίων με συγκολλητική ουσία, ώστε μέσω αυτών να μπορεί να εφαρμοστεί το μονοαξονικό εφελκυστικό φορτίο. Η διάμετρος των μεταλλικών καλυμμάτων δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή του δοκιμίου ούτε να την υπερβαίνει περισσότερο από 2mm. Το πάχος τους θα πρέπει να είναι τουλάχιστο 15mm. Τα καλύμματα πρέπει να συνοδεύονται από κατάλληλο σύστημα συνδέσμων για τη μεταφορά φορτίων από τη συσκευή φόρτισης στο δοκίμιο. Το σύστημα θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε το φορτίο να διέρχεται από τον άξονα του δοκιμίου χωρίς την (ανεπιθύμητη) εφαρμογή καμπτικών ή στρεπτικών τάσεων. Το μήκος των συνδέσμων σε κάθε άκρο θα πρέπει να είναι τουλάχιστο διπλάσιο της διαμέτρου των μεταλλικών καλυμμάτων.

#### **γ) Πειραματική διαδικασία**

(1) Τα δοκίμια θα πρέπει να είναι κυλινδρικά με λόγο ύψους προς διάμετρο 2.5-3.0 και διάμετρο κατά προτίμηση όχι μικρότερη από μέγεθος πυρήνα NX, δηλ. 54mm περίπου. Η διάμετρος τους πρέπει να είναι τουλάχιστο 10 φορές μεγαλύτερη από το μέγεθος του μεγαλύτερου κόκκου του πετρώματος.

(2) Τα άκρα του δοκιμίου θα πρέπει να είναι γενικά ομαλά και επίπεδα. Η απόκλιση του επιπέδου τους από την κάθετο στον άξονα του δείγματος δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.001 ακτίνια (περίπου 3.5 λεπτά της μοίρας) ή 0.05mm στα 50mm.

(3) Οι πλευρές του δοκιμίου πρέπει είναι λείες, ελεύθερες απότομων ανωμαλιών και ευθείες με ανοχή 0.1mm στο πλήρες μήκος του δοκιμίου.

(4) Η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να μετρείται με ακρίβεια 0.1mm με τον υπολογισμό του μέσου όρου δύο μετρήσεων της διαμέτρου κάθετα η μια στην άλλη περίπου στο μέσο του δοκιμίου. Η μέση διάμετρος θα πρέπει να χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της διατομής. Το ύψος του δοκιμίου θα πρέπει να καθορίζεται με ακρίβεια 1.0mm.

(5) Τα δείγματα δεν θα πρέπει να αποθηκεύονται για περισσότερο από 30 ημέρες, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η φυσική περιεκτικότητα σε νερό όσο το δυνατόν περισσότερο, μέχρι το χρόνο της προετοιμασίας των δοκιμίων. Μετά από την προετοιμασία τους, τα δοκίμια θα πρέπει να αποθηκεύονται πριν από τη δοκιμή για 5-6 ημέρες σε θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  και υγρασία  $50\% \pm 5\%$ . Η υγρασία του δοκιμίου θα πρέπει να αναφέρεται σύμφωνα με την προτεινόμενη από την ISMR μέθοδο για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε υγρασία δείγματος πετρώματος.

(6) Τα μεταλλικά καλύμματα θα πρέπει να συγκολλούνται στο δοκίμιο με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η ευθυγράμμιση των αξόνων τους με το διαμήκη άξονα του. Το πάχος του στρώματος συγκόλλησης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1.5mm σε κάθε άκρο. Αφού έχει σκληρυνθεί αρκετά η συγκόλληση ώστε να υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος, το δοκίμιο θα πρέπει να τοποθετείται στη μηχανή της δοκιμής με κατάλληλη ευθυγράμμιση του συστήματος μεταφοράς φορτίων.

(7) Το εφελκυστικό φορτίο στο δοκίμιο θα πρέπει να εφαρμόζεται με σταθερό ρυθμό τάσης έτσι ώστε η αστοχία να εμφανίζεται μέσα σε 5 min· εναλλακτικά ο ρυθμός της τάσης φόρτισης θα πρέπει να είναι μεταξύ 0.5 MPa/s και 1.0 MPa/s.

(8) Το μέγιστο φορτίο στο δοκίμιο θα πρέπει να καταγράφεται με ακρίβεια 1%.

(9) Ο αριθμός δοκιμίων ανά δείγμα πρέπει να καθορίζεται με βάση πρακτικούς λόγους, αλλά προτιμούνται τουλάχιστον πέντε.

#### **(δ) Υπολογισμοί**

Η αντοχή σε εφελκυσμό του δοκιμίου θα πρέπει να υπολογίζεται διαιρώντας το μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο με την αρχική διατομή του δοκιμίου.

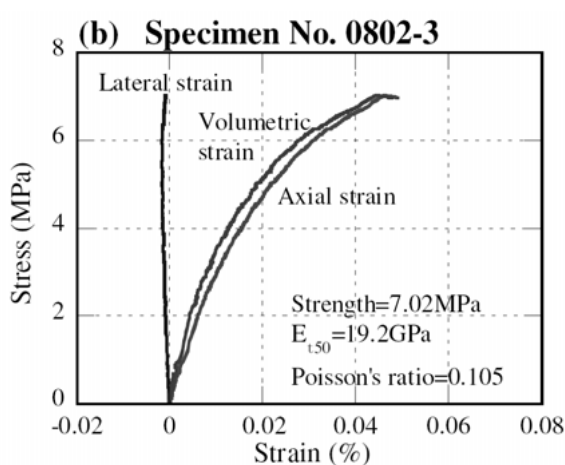
#### **(ε) Έκθεση αποτελεσμάτων**

Θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται τα παρακάτω:

- (1) Λιθολογική περιγραφή του πετρώματος.
- (2) Προσανατολισμός του άξονα της φόρτισης σε σχέση με την ανισοτροπία του δοκιμίου, π.χ. επίπεδα διαστρώσεως, φυλλώσεις κ.λπ.
- (3) Η πηγή του δείγματος, συμπεριλαμβανομένων: γεωγραφική θέση, βάθος και προσανατολισμός, ημερομηνίες δειγματοληψίας και ιστορικό και περιβάλλον αποθήκευσης.
- (4) Αριθμός δοκιμίων που υποβλήθηκαν στη δοκιμή.
- (5) Διάμετρος και ύψος δοκιμίων.
- (6) Περιεκτικότητα σε νερό και βαθμός κορεσμού κατά το χρόνο της δοκιμής.
- (7) Διάρκεια δοκιμής ή/και ρυθμός τάσης φόρτισης.
- (8) Ημερομηνία της δοκιμής και τύπος μηχανής της δοκιμής.
- (9) Τρόπος αστοχίας, π.χ. θέση και προσανατολισμός της επιφάνειας αστοχίας.
- (10) Οποιοσδήποτε άλλες παρατηρήσεις ή τυχόν διαθέσιμες φυσικές ιδιότητες, όπως ειδική πυκνότητα, πορώδες και η διαπερατότητα, αναφέροντας τη μέθοδο προσδιορισμού της κάθε μίας.
- (11) Η εφελκυστική αντοχή κάθε δοκιμίου του δείγματος, εκπεφρασμένη με ακρίβεια τριών σημαντικών ψηφίων, μαζί με το μέσο όρο του δείγματος. Ως μονάδες μέτρησης της

τάσης και της αντοχής θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τα Pascal (Pa), ή τα kilo-Pascal (kPa) ή τα Mega-Pascal (MPa).

(12) Εάν είναι απαραίτητο σε ορισμένες περιπτώσεις να διενεργηθεί η δοκιμή σε δοκίμια που δεν συμμορφώνονται με τις ανωτέρω προδιαγραφές, αυτό θα πρέπει να σημειώνεται στην έκθεση της δοκιμής.



Σχήμα 3.11: Τυπικά αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών άμεσου εφελκυσμού.

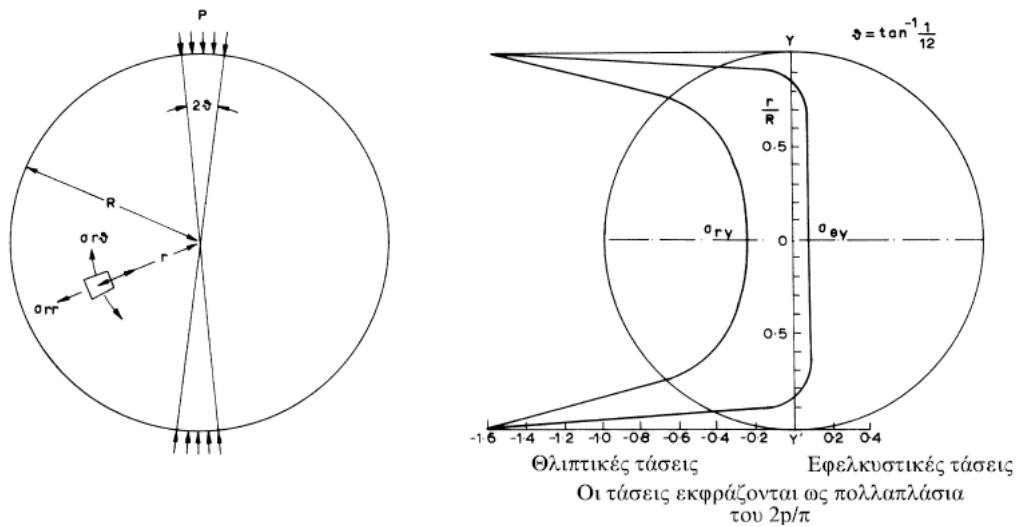
### 3.4.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Βραζιλιάνικη δοκιμή)

Η δοκιμή χρησιμοποιείται για την έμμεση μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή δοκίμιο μορφής δίσκου υποβάλλεται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι θραύσης. Υπό τις συνθήκες αυτές φόρτισης το δοκίμιο αστοχεί κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό και η εφελκυστική τάση, που προκαλεί την αστοχία αυτή, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Η δοκιμή βασίζεται στο γεγονός, ότι τα περισσότερα πετρώματα, όταν βρεθούν σε διαξονικό εντατικό πεδίο αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση θλιπτική και εφ' όσον το μέγεθος της τελευταίας δεν υπερβαίνει το τριπλάσιο της κύριας εφελκυστικής τάσης.

Στην περίπτωση δίσκου από ομοιογενές, ισότροπο και γραμμικώς ελαστικό υλικό, ο οποίος φορτίζεται ομοιόμορφα αντιδιαμετρικά, είναι δυνατό, με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας, να υπολογισθούν οι τάσεις εφελκυσμού  $\sigma_\theta$  και θλίψεως  $\sigma_r$ , κατά μήκος της διαμέτρου φορτίσεως Y-Y'.

Η μεταβολή των τάσεων αυτών κατά μήκος της Y-Y' δίνεται στο Σχήμα 3.12, για την περίπτωση όπου  $\theta = \tan^{-1}(1/12) \Rightarrow 2\theta = 9,50$ . Από αυτήν προκύπτει ότι η τάση, με εξαίρεση τις αντιδιαμετρικές περιοχές φορτίσεως είναι εφελκυστική στο μεγαλύτερο τμήμα της διαμέτρου Y-Y' και ταυτόχρονα σταθερή.



Σχήμα 3.12. Μεταβολή της εφελκυστικής και της θλιπτικής τάσης κατά μήκος της διαμέτρου Y-Y' για φόρτιση υπό γωνία  $2\theta=9.50$  (Fairhurst, 1964).

Η εφελκυστική αυτή τάση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_\theta = -\frac{P}{\pi R t} \left( \frac{\sin 2\theta}{\theta} - 1 \right) \quad (3.6)$$

όπου  $P$  είναι η επιβαλλόμενη δύναμη τη στιγμή της αστοχίας,  $R$  είναι η ακτίνα του μορφής δίσκου δοκιμίου,  $t$  είναι το πάχος του μορφής δίσκου δοκιμίου και  $2\theta$  είναι τόξο γωνίας στο οποίο δρα ομοιόμορφα η δύναμη  $P$  επί του δοκιμίου.

Η παραπάνω σχέση, για μικρές γωνίες  $2\theta$ , δίνεται με ικανοποιητική προσέγγιση από την σχέση:

$$\sigma_g = -\frac{2P}{\pi D t} \quad (3.7)$$

όπου  $D = 2R$  διάμετρος του δοκιμίου.

Οι σχέσεις (3.6) και (3.7) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντοχής σε εφελκυσμό του πετρώματος, υπό την προϋπόθεση ότι κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρείται έναρξη αστοχίας του δοκιμίου κατά μήκος της διαμέτρου φορτίσεως.

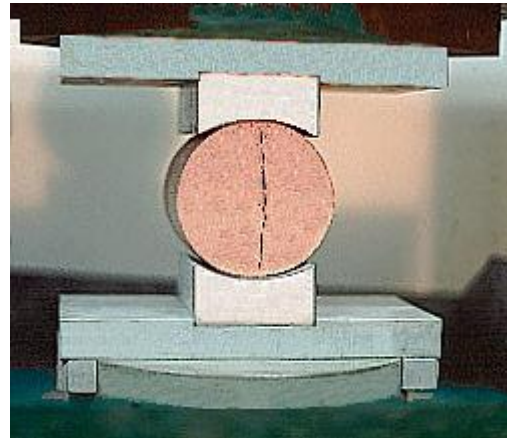
Σύμφωνα με τις οδηγίες της ISRM (1978), η δοκιμή πραγματοποιείται σε δοκίμια πετρώματος μορφής δίσκου. Βάση αυτής, τα δοκίμια πρέπει να αποκόπτονται και να προετοιμάζονται με χρήση καθαρού νερού. Οι κυλινδρικές επιφάνειες θα πρέπει να είναι ελεύθερες από εμφανή σημεία των εργαλείων και οι όποιες ανωμαλίες τους δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 0.025 mm. Ο προσανατολισμός του δοκιμίου θα πρέπει να είναι γνωστός, ενώ η διάμετρος του δεν πρέπει να είναι μικρότερη από NX (54,7 mm), και το πάχος του ίσο με την ακτίνα του. Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχής και να πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό. Προτεινόμενος ρυθμός φόρτισης είναι 200 N/s (20 kgf/s).

Το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι τη στιγμή της αστοχίας του. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην μέτρηση του φορτίου αστοχίας, καθόσον υπάρχουν περιπτώσεις όπου το δοκίμιο εξακολουθεί να αναλαμβάνει αυξημένα φορτία ακόμη και ύστερα από την αστοχία του. Σημειώνεται ότι κατά την αρχική αστοχία του δοκιμίου παρατηρείται μια μικρής διάρκειας παύση στην κίνηση του σχετικού δείκτη. Παρά ταύτα, η διαφορά μεταξύ του φορτίου αρχικής θραύσεως και του τελικού φορτίου, που δύναται να αναλάβει το δοκίμιο είναι το πολύ 5 %.

Ο αριθμός των απαιτούμενων δοκιμών ανά δείγμα καθορίζεται από τη διαθέσιμη ποσότητα δείγματος. Η ISRM προτείνει 10 δοκιμές ανά δείγμα.

Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής πετρώματος, που υπολογίζεται από τη δοκιμή Brazilian επηρεάζεται από τη γωνία  $2\theta$ , στο τόξο της οποίας εφαρμόζεται το θλιπτικό φορτίο, το λόγο πάχους προς διάμετρο του δοκιμίου ( $t/D$ ), το πάχος του δοκιμίου και το ρυθμός φορτίσεως.

Η γωνία  $2\theta$  λαμβάνεται μεταξύ 10-140, ο λόγος  $t/D=0.5$  και  $t=25-30$  mm. Αύξηση του λόγου  $t/D$  οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό του δοκιμίου, ενώ αύξηση του ρυθμού φορτίσεως δίνει γενικά αύξηση της αντοχής.

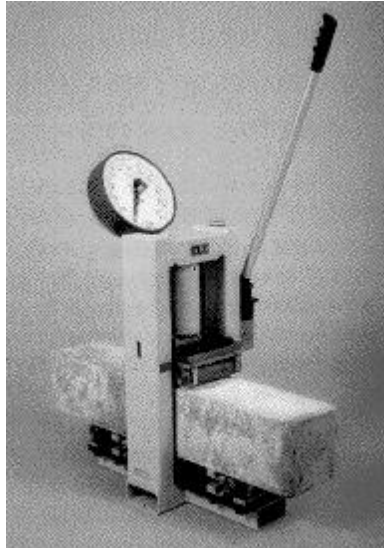


Σχήμα 3.13: Πειραματική διάταξη δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης

### 3.4.3 Δοκιμή κάμψης τριών σημείων

Κατά τη δοκιμή αυτή κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια πετρώματος υποβάλλονται σε σημειακή φόρτιση περί το μέσο τους (σχήμα 3.14), με σκοπό να υπολογιστεί η αντοχή τους σε κάμψη ( $R$ ). Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στον καθορισμό της αντοχής σε κάμψη ενός πετρώματος με αναπτυγμένη διάστρωση (laminated rock). Στην πράξη η δοκιμή αυτή προσεγγίζει την περίπτωση καθορισμού του μέγιστου δυνατού ανοίγματος ενός υπόγειου θαλάμου, που έχει ως οροφή ένα ιζηματογενές πέτρωμα με διάστρωση παράλληλη προς

την οροφή του θαλάμου. Η δοκιμή μπορεί να επαναληφθεί με αύξηση του μήκους του ανοίγματος χωρίς μεταβολή των άλλων διαστάσεων του δοκιμίου.



Σχήμα 3.14: Πειραματική διάταξη δοκιμής πετρώματος σε κάμψη

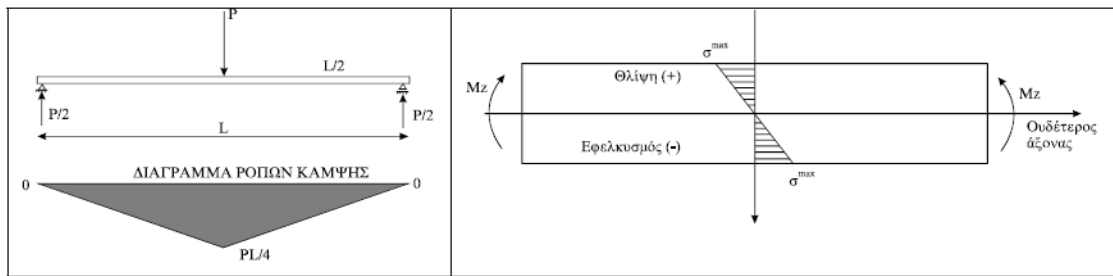
Η εντατική κατάσταση δοκού, που καταπονείται σε κάμψη, είναι μονοαξονική, και μεταβάλλεται σε κάθε διατομή της δοκού. Υποθέτοντας ότι η τιμή της ροπής κάμψης είναι τέτοια, ώστε το υλικό παραμένει εντός της ελαστικής περιοχής, οι τάσεις σε μία διατομή δίνονται από τη σχέση:

$$\sigma^k = \frac{M_z}{W} = \frac{M_z}{I_z / y} = \frac{M_z}{I_z} y \quad (3.8)$$

όπου  $W$ , είναι η ροπή αντίστασης της διατομής,  $M_z$  είναι η ροπή κάμψης,  $I_z$ , η ροπή αδρανείας της διατομής,  $y$ , η απόσταση της ίνας της δοκού από τον ουδέτερο άξονα.

Στο Σχήμα 3.15 υπολογίζεται η ροπή κάμψης δοκού που φορτίζεται με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο του μήκους της και δίνεται η κατανομή των τάσεων στην μεσαία διατομή της δοκού.



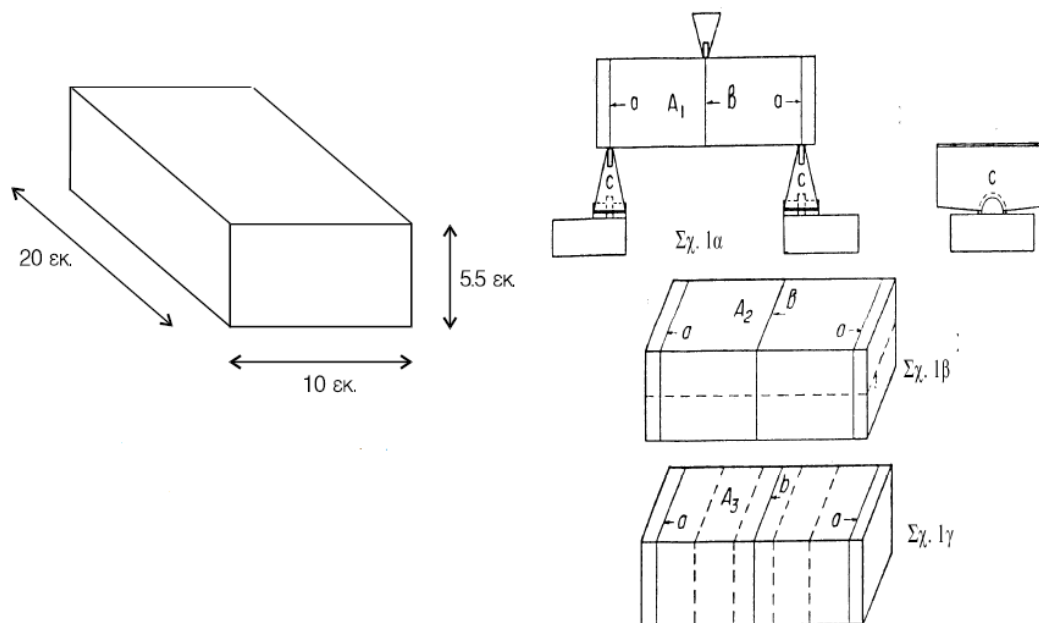


Σχήμα 3.15: Στατικά μεγέθη δοκιμής σε κάμψη

Από το διάγραμμα του σχήματος συνάγεται ότι η κρίσιμη διατομή της δοκού είναι η μεσαία, στην οποία αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή κάμψης. Η μέγιστη ορθή τάση αναπτύσσεται στην ακραία ίνα της διατομής αυτής. Αν η διατομή της δοκού έχει πάχος  $b$  και ύψος  $h$ , τότε σύμφωνα με την εξίσωση (3.8) η τάση αυτή είναι:

$$\sigma^{\max} = \frac{PL/4}{bh^3/12} \frac{h}{2} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3.9)$$

Πρότυπες οδηγίες εκτέλεσης της δοκιμής δίνονται από την ASTM (1985). Οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι περίπου 5.5x10x20 cm. Κάθε δοκίμιο τοποθετείται στη μηχανή κάμψης σύμφωνα με το Σχήμα (3.16α). Πριν από τη φόρτιση χαράσσονται τρεις γραμμές σε κάθε δοκίμιο (Σχήμα 3.16β). Η γραμμή β χαράσσεται στο μέσο του δοκιμίου και ευθυγραμμίζεται με το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Οι γραμμές α χαράσσονται σε απόσταση 3.5'' (8.9 εκ.) εκατέρωθεν της γραμμής β, και ευθυγραμμίζονται με τα σημεία στήριξης της μηχανής.

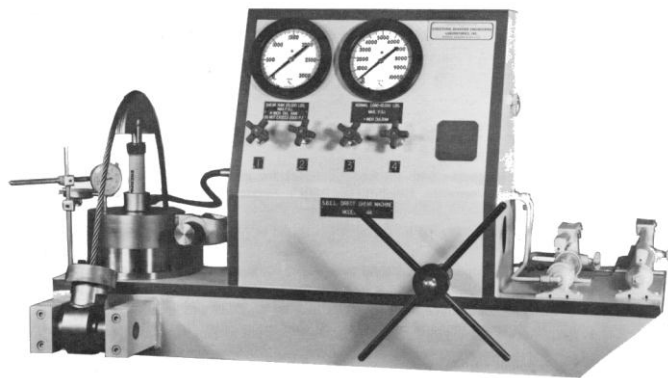
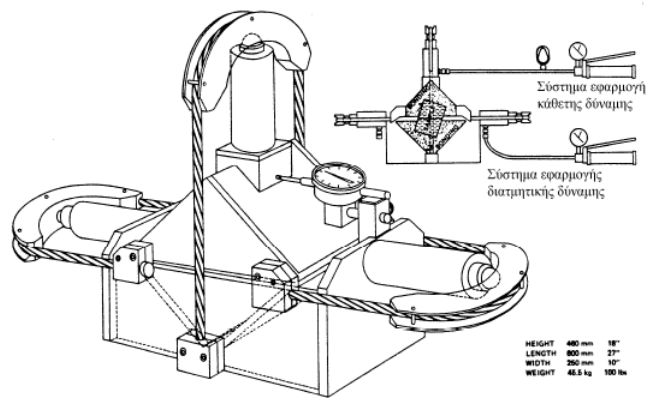


Σχήμα 3.16: α) Διαστάσεις δοκιμίων σύμφωνα με ASTM (1985), β) Θέσεις έδρασης και φόρτισης σύμφωνα με την προδιαγραφή της ASTM (1985)

### 3.5 Δοκιμή άμεσης διάτμησης

Η δοκιμή άμεσης διάτμησης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής ως συνάρτηση της ορθής τάσης στο επίπεδο διατμήσεως. Αν και μπορεί να εφαρμοσθεί για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής δοκιμίων άρρηκτου πετρώματος, συνηθέστερα το επίπεδο διάτμησης ταυτίζεται με ένα επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος (π.χ. μία ασυνέχεια).

Η εργαστηριακή συσκευή για την εκτέλεση δοκιμής διάτμησης, μπορεί να είναι φορητή ή σταθερή σε μόνιμη θέση στο εργαστήριο. Η συσκευή πρέπει να περιλαμβάνει κατάλληλο σύστημα επιβολής ορθής και διατμητικής δύναμης καθώς και σύστημα μέτρησης των δυνάμεων αυτών. Οι αναγνώσεις της κάθετης και διατμητικής μετατόπισης μπορεί να λαμβάνονται οπτικά (με αναλογικά βελόμετρα) ή να προσαρμοσθεί κατάλληλο σύστημα αυτοματοποίησης, το οποίο να δίνει τις επιθυμητές ψηφιακές ενδείξεις.



Σχήμα 3.17: Πειραματική Διάταξη δοκιμής άμεσης διάτμησης

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι μορφής ορθογωνίων πρισμάτων ή κυλινδρικά (από πυρήνες γεωτρήσεων). Οι διαστάσεις τους και ο τρόπος μόρφωσης τους πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μη χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία τους στο εργαστήριο. Το επίπεδο διατμήσεως πρέπει να είναι κατά προτίμηση τετράγωνο με ελάχιστη επιφάνεια 2500 mm. Τα δύο τεμάχια του δοκιμίου εκατέρωθεν του επιπέδου αδυναμίας πρέπει να διατηρηθούν σε επαφή μέχρι την στιγμή πραγματοποίησης της δοκιμής. Αυτό επιτυγχάνεται με το δέσιμο των τεμαχίων με μεταλλικό σύρμα μικρής διαμέτρου ή πλαστική ταινία.

Τα δύο τεμάχια του δοκιμίου τοποθετούνται στη συσκευή, και εγκιβωτίζονται με κατάλληλο υλικό στερεώσεως του δείγματος (γύψος, τσιμέντο, ή ειδική ρητίνη).

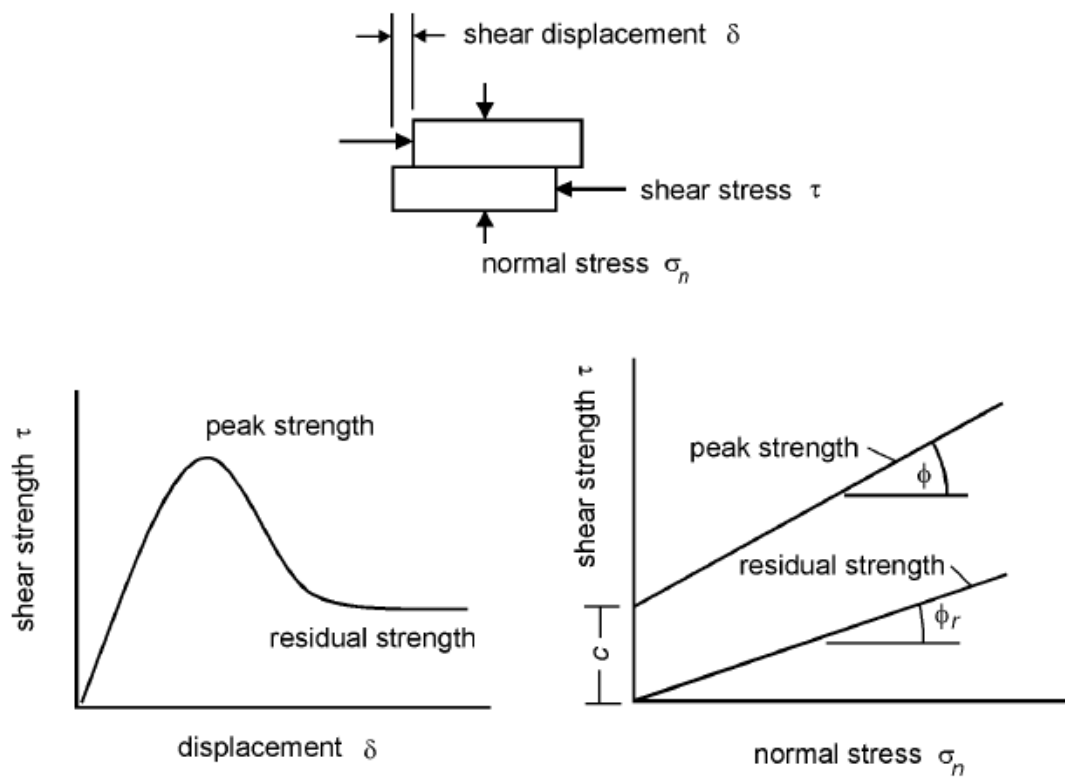
Η δοκιμή αρχίζει με την εφαρμογή της ορθής δύναμης (το στάδιο αυτό μπορεί να περιλαμβάνει και σχετική στεροποίηση) και στη συνέχεια της διατμητικής . Η αντίστοιχη ορθή και διατμητική τάση υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\text{Διατμητική τάση} \quad \tau = \frac{P_s}{A} \quad (3.10)$$

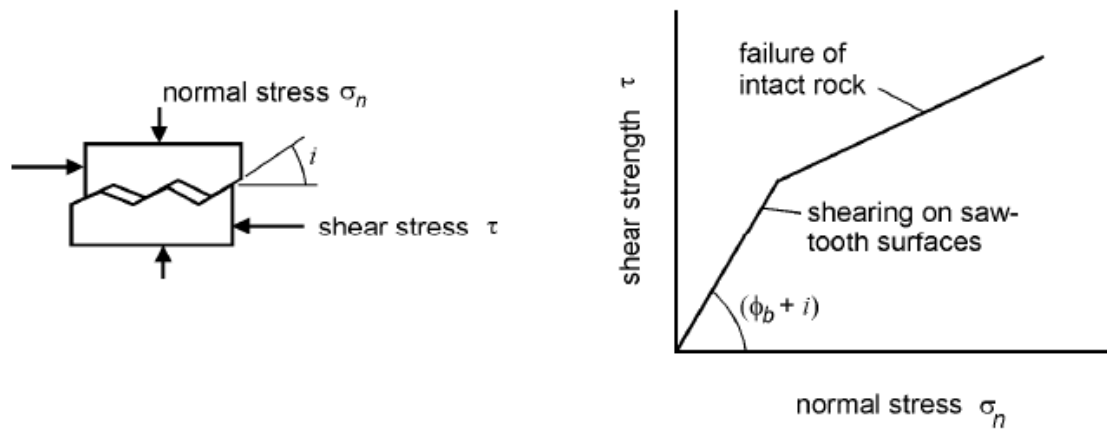
$$\text{Ορθή τάση} \quad \sigma_n = \frac{P_n}{A} \quad (3.11)$$

όπου  $P_s$  η ασκούμενη διατμητική δύναμη,  $P_n$  η ασκούμενη κάθετη δύναμη και  $A$  η επιφάνεια του επιπέδου διατμήσεως που είναι ενεργή την κάθε δεδομένη στιγμή.

Για κάθε δοκιμή κατασκευάζονται τα διαγράμματα διατμητικής τάσης - διατμητικής μετατόπισης και ορθής τάσης-διατμητικής μετατόπισης. Από αυτά λαμβάνονται οι τιμές της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής και οι τιμές των αντίστοιχων ορθών και διατμητικών μετατοπίσεων. Εάν εκτελεστεί μία σειρά δοκιμών με διάφορες ορθές τάσεις τότε μπορούν να κατασκευαστούν διαγράμματα μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής συναρτήσει της ορθής τάσης, από τα οποία εξάγονται αποτελέσματα για τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας. Ανάλογα με τη τραχύτητα της ασυνέχειας υπολογίζονται: α) η παραμένουσα γωνία τριβής  $\varphi_r$  (residual friction angle), β) η φαινόμενη γωνία τριβής  $\varphi_a$ , για τιμές της ορθής τάσεως μικρότερες της τιμής  $\sigma_a$  γ) η φαινόμενη γωνία τριβής  $\varphi_b$ , για τιμές της κάθετης τάσεως μεγαλύτερες της τιμής  $\sigma_a$  δ) η συνοχή του επιπέδου της ασυνέχειας  $c'$  όπως υπολογίζεται από την καμπύλη της μέγιστης διατμητικής αντοχής, η τιμή της  $c'$  είναι συχνά μηδενική δ) η συνοχή του επιπέδου της ασυνέχειας  $c$  (παράμετρος διατμητικής αντοχής).



Σχήμα 3.18: Αντοχή ασυνέχειας σε διάτμηση



Σχήμα 3.19: Διατμητική αντοχή τραχειών επιφανειών ασυνέχειας

Στη συνέχεια ακολουθεί η προτεινόμενη από την ISRM μέθοδος προσδιορισμού της άμεσης διατμητικής αντοχής.

#### **α) Σκοπός**

(1) Με τη δοκιμή αυτή μετρώνται η μέγιστη και παραμένουσα άμεση διατμητική αντοχή συναρτήσει της ορθής τάσης στο επίπεδο διάτμησης. Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν π.χ. στην ανάλυση οριακής ισορροπίας προβλημάτων ευστάθειας πρανών ή για την ανάλυση ευστάθειας της θεμελίωσης φραγμάτων.

(2) Η κλίση του δοκιμίου σε σχέση με το επί τόπου πέτρωμα και ο προσανατολισμός κατά την στερέωση στη συσκευή της δοκιμής επιλέγονται συνήθως έτσι ώστε το επίπεδο διάτμησης να ταυτίζεται με ένα επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος, όπως π.χ. μία ασυνέχεια, επίπεδο στρώσης, σχιστότητα ή σχισμός, ή με τη διεπιφάνεια εδάφους και πετρώματος ή πετρώματος και σκυροδέματος υποστήριξης.

(3) Ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής θα πρέπει κατά προτίμηση να περιλαμβάνει τουλάχιστο πέντε (5) δοκιμές με τον ίδιο προσανατολισμό δείγματος με κάθε δοκίμιο να υποβάλλεται σε διαφορετική αλλά σταθερή κατά τη διάρκεια της δοκιμής ορθή τάση.

(4) Κατά την εφαρμογή των αποτελεσμάτων της δοκιμής, οι συνθήκες πίεσης του νερού των πόρων και η πιθανότητα προοδευτικής αστοχίας πρέπει να συνεκτιμώνται κατά το σχεδιασμό καθώς μπορεί να διαφοροποιούνται από τις συνθήκες της δοκιμής.

#### **β) Εργαστηριακός εξοπλισμός**

*1) Ο εξοπλισμός για τη λήψη των δειγμάτων περιλαμβάνει:*

(α) εξοπλισμό για την κοπή του δείγματος. Για παράδειγμα ένα δειγματολήπτη μεγάλης διαμέτρου, δίσκους κοπής, γεωλογικό σφυρί και καλέμι, καθώς και εξοπλισμό για τη μέτρηση της κλίσης, της διεύθυνσης κλίσης, της τραχύτητας και άλλων χαρακτηριστικών στοιχείων του επιπέδου διάτμησης.

(β) υλικά για τη συγκράτηση του δοκιμίου, π.χ. σύρμα ή μεταλλικά τσέρκια

(γ) υλικά για την προστασία του δοκιμίου από μηχανική διαταραχή ή μεταβολές της φυσικής υγρασίας τόσο κατά τη διάρκεια της κοπής όσο και κατά τη μεταφορά στο

εργαστήριο. Για παράδειγμα προστατευτικές συσκευασίες και μουςαμάδες ή παρόμοια υδατοστεγή υλικά.

2) *Εξοπλισμός προσαρμογής/στερέωσης του δοκιμίου συμπεριλαμβανομένων:*

(α) φορείς του δείγματος που να σχηματίζουν ένα αποσυναρμολογούμενο τμήμα του εξοπλισμού της συσκευής.

(β) τσιμέντο, γύψο, ρητίνη ή παρόμοια ισχυρά υλικά ενθυλάκωσης μαζί με κατάλληλα μέσα ανάμιξης

3) *Εξοπλισμό εκτέλεσης της δοκιμής που να περιλαμβάνει:*

(α) κατάλληλο μέσο για την εφαρμογή του ορθού φορτίου, τυπικά υδραυλικό, πνευματικό ή βασιζόμενο σε βάρη σύστημα, κατάλληλα σχεδιασμένο ώστε να εξασφαλίζεται ότι το φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το επίπεδο διάτμησης. Η συνισταμένη δύναμη πρέπει να δρα κάθετα στο επίπεδο διάτμησης και να διέρχεται από το κέντρο της διατμητικής επιφάνειας. Το σύστημα θα πρέπει να έχει διαδρομή φόρτισης μεγαλύτερη από την αναμενόμενη διαστολή ή συρρίκνωση και να είναι ικανό να διατηρήσει την ορθή δύναμη σταθερή εντός ποσοστού 2 % της επιλεγμένης τιμής καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

(β) κατάλληλο μέσο για την εφαρμογή του διατμητικού φορτίου, τυπικά ένα υδραυλικό έμβολο ή ένα μηχανικό σύστημα, σχεδιασμένο ώστε το φορτίο να κατανέμεται ομοιόμορφα στη μία επιφάνεια διάτμησης και η συνισταμένη ορθή δύναμη να εφαρμόζεται στο επίπεδο διάτμησης. Ο εξοπλισμός θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος για διαδρομή παράλληλα στο επίπεδο διάτμησης μεγαλύτερη από 10% του μήκους του δοκιμίου. Η διατμητική αντίσταση λόγω της κίνησης της συσκευής πρέπει να είναι μικρότερη από το 1% της μέγιστης διατμητικής δύναμης που εφαρμόζεται στη δοκιμή.

(γ) εξοπλισμό για την ανεξάρτητη μέτρηση των διατμητικών και ορθών δυνάμεων με ακρίβεια καλύτερη από  $\pm 2$  % των μέγιστων δυνάμεων που αναπτύσσονται στη δοκιμή. Πρόσφατα δεδομένα βαθμονόμησης της συσκευής πρέπει να προσαρτώνται στην έκθεση των αποτελεσμάτων της δοκιμής.

(δ) εξοπλισμό για τη μέτρηση της διατμητικής, της ορθής και της πλευρικής μετατόπισης, για παράδειγμα αναλογικά βελόμετρα ή ηλεκτρικοί μοφροτροπείς. Το

σύστημα μέτρησης της διατμητικής μετατόπισης πρέπει να έχει διαδρομή μεγαλύτερη από 10% του μήκους του δοκιμίου και ακρίβεια 0.1 mm. Τα συστήματα μέτρησης της ορθής και της πλευρικής μετατόπισης πρέπει να έχουν διαδρομή μεγαλύτερη από 20 mm και ακρίβεια καλύτερη από 0.05 mm. Μηδενισμός των ενδείξεων των οργάνων κατά τη διάρκεια της δοκιμής θα πρέπει εάν είναι δυνατόν να αποφεύγεται. Εάν χρησιμοποιούνται ηλεκτρικοί μορφοτροπέις ή ένα αυτόματο καταγραφικό σύστημα τότε μία πρόσφατη βαθμονόμηση πρέπει να περιλαμβάνεται στην έκθεση των αποτελεσμάτων.

### **γ) Προτεινόμενη διαδικασία**

#### *1) Προετοιμασία δοκιμής*

(α) Επιλέγεται το επίπεδο της δοκιμής και καταγράφεται η κλίση, η διεύθυνση κλίσης και άλλα σχετικά γεωλογικά χαρακτηριστικά. Δείγματα (τεμάχια ή πυρήνες) που περιέχουν το επίπεδο διάτμησης συλλέγονται με μεθόδους ώστε να ελαχιστοποιείται η διαταραχή και εάν είναι δυνατόν με τρόπο ώστε να διατηρείται η φυσική υγρασία του δείγματος. Οι διαστάσεις του δείγματος και η θέση του επιθυμητού επιπέδου διάτμησης μέσα στο δείγμα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να επιτρέπουν, αν είναι δυνατόν, την απευθείας προσαρμογή του δείγματος στη συσκευή χωρίς περεταίρω κοπή στο εργαστήριο, ενώ θα πρέπει να μένει αρκετός χώρος για την ενθυλάκωση του δείγματος. Το επίπεδο της δοκιμής θα πρέπει κατά προτίμηση να είναι τετραγωνικό με επιφάνεια 2500 mm<sup>2</sup>. Η μηχανική ακεραιότητα του δείγματος πρέπει να προστατεύεται δένοντας σφικτά το δείγμα με μεταλλικό σύρμα ή ταινία που πρέπει να παραμένει στη θέση του μέχρι τη στιγμή της δοκιμής.

(β) Τα δείγματα που δεν ενθυλακώνονται άμεσα για δοκιμή πρέπει να προστατεύονται με υδατοστεγή περιβλήματα, να χαρακτηρίζονται και να συσκευάζονται ώστε να αποφεύγεται η καταστροφή τους κατά τη μεταφορά στο εργαστήριο. Τα εύθραυτα δείγματα απαιτούν ειδική μεταχείριση, όπως π.χ. συσκευασία με αφρό πολυουρεθάνης.

(γ) Η προστατευτική συσκευασία εκτός από το μεταλλικό σύρμα αφαιρείται και το τμήμας στηρίζεται στον ένα από τους δύο φορείς του δείγματος ώστε το επίπεδο της δοκιμής να έχει σωστή θέση και προσανατολισμό. Περιχύνεται το υλικό ενθυλάκωσης και μετά τη σκλήρυνση του το άλλο μισό του δείγματος ενθυλακώνεται με παρόμοιο τρόπο. Μία ζώνη τουλάχιστο 5 mm εκατέρωθεν του επιπέδου διάτμησης πρέπει να μένει ελεύθερη.



## 2) Στερεοποίηση

(α) Η φάση στερεοποίησης επιτρέπει την αποτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων του πετρώματος και του τυχόν υλικού πλήρωσης στην περιοχή πλησίον του επιπέδου διάτμησης υπό πλήρη ορθή φόρτιση πριν την έναρξη της διάτμησης. Η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης μπορεί επίσης να επιβάλλει ένα επιτρεπτό όριο στο ρυθμό της διάτμησης.

(β) Μετά την τοποθέτηση του δείγματος στο διατμητικό κιβώτιο ελέγχονται όλοι οι μετρητές και εφαρμόζεται ένα δοκιμαστικό φορτίο καταγράφοντας τις αναγνώσεις των φορτίων και των μετατοπίσεων.

(γ) Το ορθό φορτίο ανυψώνεται στην πλήρη προκαθορισμένη τιμή για τη δοκιμή, καταγράφοντας της ορθές μετατοπίσεις (στερεοποίηση) του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου και του εφαρμοζόμενου φορτίου.

(δ) Η φάση της στερεοποίησης θεωρείται ότι ολοκληρώνεται όταν ο ρυθμός μεταβολής της ορθής μετατόπισης είναι μικρότερος από 0.05 mm σε διάστημα 10 min. Η διατμητική φόρτιση μπορεί τότε να εφαρμοσθεί.

## 3) Διάτμηση

(α) Σκοπός της διάτμησης είναι ο καθορισμός της μέγιστης και παραμένουσας άμεσης διατμητικής αντοχής του επιπέδου της δοκιμής.

(β) Η διατμητική δύναμη μπορεί να εφαρμόζεται επαυξητικά, συνήθως όμως εφαρμόζεται συνεχώς με τέτοιο τρόπο ώστε να ελέγχεται ο ρυθμός της διατμητικής μετατόπισης.

(γ) Κατά προσέγγιση 10 σειρές αναγνώσεων θα πρέπει να λαμβάνονται πριν από την επίτευξη της μέγιστης αντοχής. Ο ρυθμός διατμητικής μετατόπισης θα πρέπει να είναι μικρότερος από 0.1 mm/min σε ένα διάστημα 10 min πριν από τη λήψη μίας σειράς αναγνώσεων. Ο ρυθμός αυτός μπορεί να αυξάνεται μέχρι 0.5 mm/min μεταξύ των αναγνώσεων εφόσον εξασφαλίζεται ότι μπορεί να καταγραφεί επαρκώς η μέγιστη αντοχή. Για δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και ειδικότερα όταν δοκιμάζονται ασυνέχειες με αργλικό υλικό πλήρωσης, ο συνολικός χρόνος για την επίτευξη της μέγιστης αντοχής θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 6t100 όπως προσδιορίζεται από την καμπύλη

στερεοποίησης. Εάν είναι απαραίτητο ο ρυθμός της διάτμησης θα πρέπει να μειώνεται ή ο χρόνος μεταξύ των βημάτων αύξησης της διατμητικής δύναμης να παρατείνεται ώστε να ικανοποιηθεί η προηγούμενη απαίτηση.

(δ) Μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής, οι αναγνώσεις να πρέπει να λαμβάνονται σε κάθε αύξηση της διατμητικής μετατόπισης κατά 0.5 έως 5 mm, όπως απαιτείται για τον επαρκή καθορισμό των διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης. Ο ρυθμός της διατμητικής μετατόπισης θα πρέπει να είναι μεταξύ 0.02-0.2 mm/min στο χρονικό διάστημα των 10 min πριν από την λήψη μιας σειράς αναγνώσεων και μπορεί να αυξηθεί μέχρι 1 mm/min μεταξύ των αναγνώσεων.

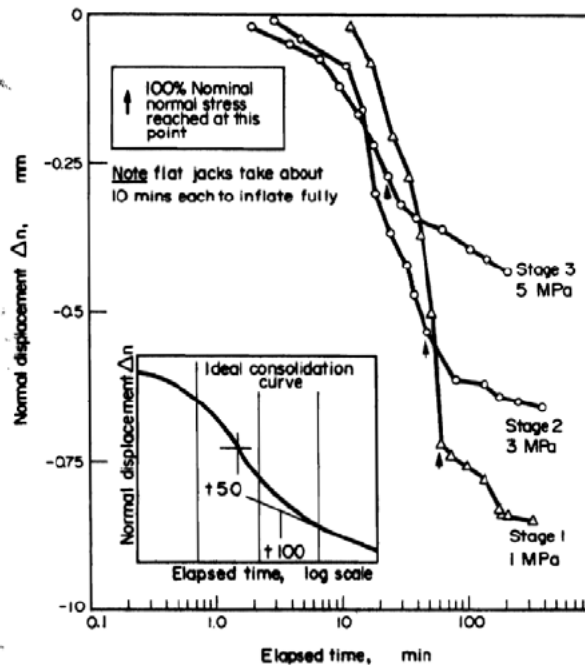
(ε) Είναι δυνατόν να καθορισθεί η τιμή της παραμένουσας διατμητικής αντοχής όταν το δείγμα υποβάλλεται σε διάτμηση υπό σταθερή ορθή δύναμη και τουλάχιστο τέσσερις σειρές αναγνώσεων δείχνουν μεταβολή της διατμητικής τάσης μικρότερη από 5 % για διατμητική μετατόπιση 1 cm.

(στ) Έχοντας καθορίσει μία τιμή για την παραμένουσα διατμητική αντοχή η ορθή τάση μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί και η διάτμηση να συνεχισθεί για την λήψη επιπλέον τιμών παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Το δείγμα πρέπει να στερεοποιείται ύστερα από την εφαρμογή κάθε νέας ορθής τάσης.

(ζ) Ύστερα από την ολοκλήρωση της δοκιμής το επίπεδο διάτμησης θα πρέπει να περιγράφεται πλήρως. Το εμβαδό της επιφάνειας διάτμησης μετρείται και λαμβάνονται τυχόν απαιτούμενες φωτογραφίες. Δείγματα του πετρώματος του υλικού πλήρωσης και θραύσματα λόγω της διάτμησης θα πρέπει να λαμβάνονται για δοκιμές κατάταξης.

#### **δ) Υπολογισμοί**

(α) Μία καμπύλη στερεοποίησης σχεδιάζεται κατά τη διάρκεια της φάσης στερεοποίησης. Ο χρόνος  $t_{100}$  για την ολοκλήρωση της "αρχικής στερεοποίησης" προσδιορίζεται φέροντας τις εφαπτόμενες στην καμπύλη, όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.20. Το χρονικό διάστημα από την έναρξη της διάτμησης μέχρι την επίτευξη της μέγιστης αντοχής πρέπει να είναι μεγαλύτερο από  $6t_{100}$  ώστε να είναι δυνατή η αποτόνωση της πίεσης πόρων.



Σχήμα 3.20: Τυπικές καμπύλες στερεοποίησης

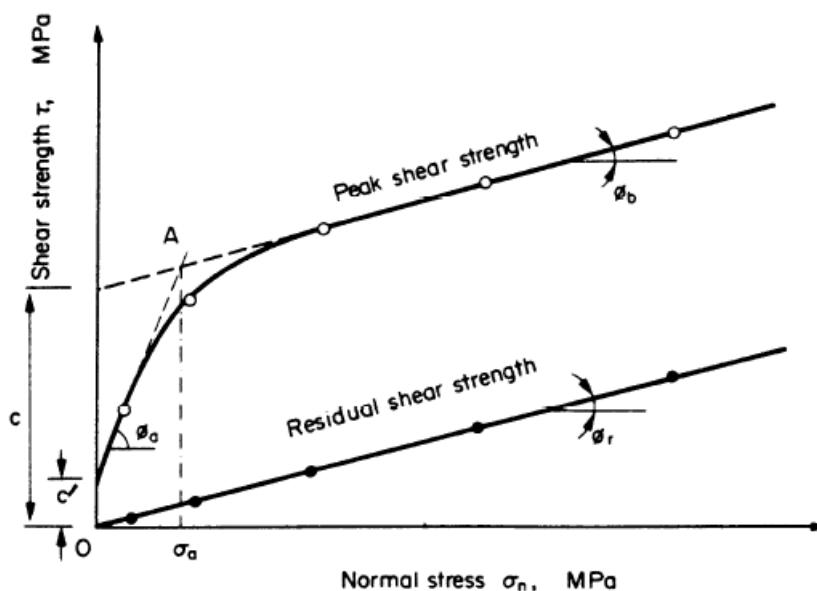
(β) Υπολογίζονται οι μέσες τιμές των διατμητικών και ορθών μετατοπίσεων  $\Delta s$  και  $\Delta n$ . Οι πλευρικές μετατοπίσεις καταγράφονται μόνο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής, παρόλο που εάν είναι σημαντικές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της επιφάνειας επαφής.

(γ) Η διατμητική και η ορθή τάση υπολογίζονται από τις σχέσεις 3.10 και 3.11.

(δ) Για κάθε δοκίμιο σχεδιάζονται τα διαγράμματα διατμητικής τάσης (ή διατμητικής δύναμης) και ορθής μετατόπισης συναρτήσει της διατμητικής μετατόπισης με σημειωμένη την ονομαστική ορθή τάση και τυχόν μεταβολές αυτής κατά τη διάτμηση. Οι τιμές της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής και η αντίστοιχη ορθή τάση, διατμητική μετατόπιση και ορθή μετατόπιση λαμβάνονται από τα διαγράμματα αυτά.

(ε) Διαγράμματα της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής συναρτήσει της ορθής τάσης σχεδιάζονται συνδυάζοντας τα αποτελέσματα από όλα τα δείγματα. Οι

παράμετροι διατμητικής αντοχής  $\phi_a$ ,  $\phi_b$ ,  $\phi_r$ ,  $c'$  και  $c$  εξάγονται από αυτά τα διαγράμματα όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21: Διάγραμμα διατμητικών τάσεων – ορθών τάσεων

### ε) Έκθεση αποτελεσμάτων

Η έκθεση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

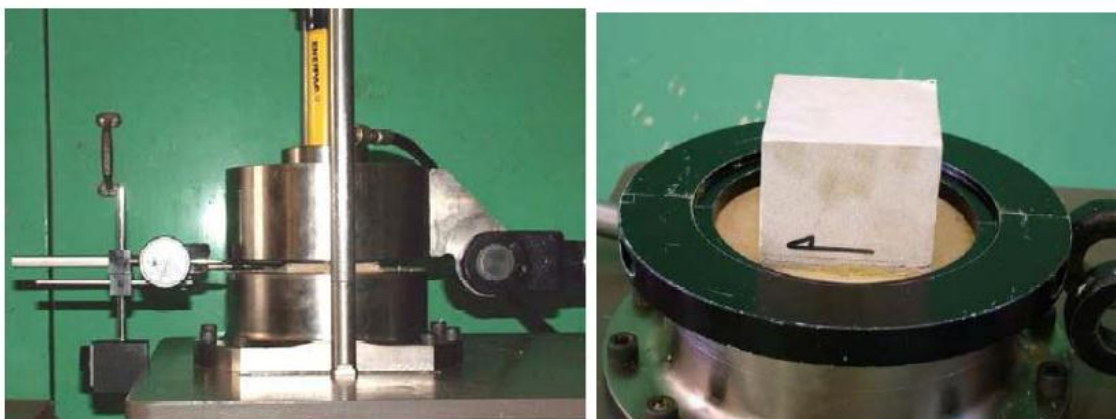
(α) Ένα διάγραμμα και περιγραφή του εξοπλισμού της δοκιμής και μία περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη, τη συσκευασία, τη μεταφορά, την αποθήκευση, την προσαρμογή στη συσκευή και την δοκιμή των δειγμάτων. (Μπορεί να γίνει αναφορά στην προτεινόμενη μέθοδο της ISRM παραθέτοντας μόνο τις διαφοροποιήσεις από τις προδιαγεγραμμένες τεχνικές).

(β) Για κάθε δείγμα μία πλήρης γεωλογική περιγραφή του άρρηκτου πετρώματος, της διατμημένης επιφάνειας, του υλικού πλήρωσης και των θραυσμάτων της διάτμησης κατά προτίμηση συνοδευόμενα από δεδομένα σχετικών δοκιμών κατάταξης (π.χ. προφίλ τραχύτητας, όρια Atterberg, περιεκτικότητα σε υγρασία και κατανομή μεγέθους κόκκων των υλικών πλήρωσης).

(γ) Διαγράμματα και κατά προτίμηση φωτογραφίες που να δείχνουν την θέση δειγματοληψίας, την κλίση και τη διεύθυνση κλίση του επιπέδου της δοκιμής, καθώς επίσης τις διαστάσεις και οποιαδήποτε χαρακτηριστικό γνώρισμα των δειγμάτων

(δ) Για κάθε δείγμα μία σειρά από πίνακες δεδομένων, ένα διάγραμμα στερεοποίησης και διαγράμματα διατμητικής τάσης και ορθής μετατόπισης συναρτήσει της διατμητικής μετατόπισης. Οι εξαγόμενες τιμές της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής θα πρέπει να πινακοποιούνται με τις αντίστοιχες τιμές της ορθής τάσης, της διατμητικής μετατόπισης και της ορθής μετατόπισης.

(ε) Για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής συνολικά, τα διαγράμματα και οι πινακοποιημένες τιμές της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής συναρτήσει της ορθής τάσης, μαζί με τις εξαγόμενες τιμές για τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής.



*Σχήμα 3.22: Τοποθέτηση δοκιμίων σε συσκευή άμεσης διάτμησης*

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

---

## ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΕΙΚΤΩΝ

### 4.1 Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης

Η Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αντοχής δοκιμίων πετρωμάτων τόσο στο ύπαιθρο όσο και στο εργαστήριο. Από τη δοκιμή λαμβάνεται ο Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση  $I_s(50)$ , ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάταξη των πετρωμάτων από πλευράς αντοχής αλλά και για την έμμεση εκτίμηση χονδρικά της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής σε διάφορων διαστάσεων δοκίμια πετρώματος μπορεί επίσης να μελετηθεί και η επίδραση του όγκου του δοκιμίου στην αντοχή του. Η δοκιμή σημειακής φορτίσεως μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κυλινδρικά δοκίμια αξονικά ή αντιδιαμετρικά, καθώς και σε ορθογωνικά ή ακανόνιστης μορφής δοκίμια. Για την εκτέλεση αυτής της δοκιμής απαιτείται μια συσκευή σημειακής φόρτισης σαν και αυτή που φαίνεται στο Σχήμα (4.1).



Σχήμα 4.1: Τυπική διάταξη δοκιμής σημειακής φόρτισης

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής ένα δοκίμιο φορτίζεται αντιδιαμετρικά από δυο έμβολα με σφαιρικά άκρα ακτίνας 5 mm. Η δοκιμή μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε κυλινδρικό είτε σε ακανόνιστου σχήματος δοκίμιο και ειδικά στην περίπτωση του κυλινδρικού, η φόρτιση μπορεί να γίνει κάθετα ή παράλληλα στον άξονά του. Προτιμητέα είναι συνήθως η διαμετρική δοκιμή, διότι μπορεί να εκτελεστεί σε πυρήνες γεωτρήσεων χωρίς καμιά επεξεργασία.

Εξαιτίας της εφαρμοζόμενης θλιπτικής δύναμης αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις κάθετα σε μια επίπεδη επιφάνεια η οποία διέρχεται από τον άξονα της δύναμης που ορίζεται από τα δύο σημεία φόρτισης και ποικίλει ανάλογα με το σχήμα και την ανισοτροπία του δοκιμίου. Η αστοχία επέρχεται με θραύση λόγω των εφελκυστικών τάσεων στην επιφάνεια αυτή. Αν το επίπεδο της αστοχίας δεν διέρχεται και από τα δύο σημεία φόρτισης ή αν ταυτίζεται με την επιφάνεια κάποιας ασυνέχειας το πείραμα δεν είναι αποδεκτό.

Το φορτίο αστοχίας εξαρτάται από το εμβαδόν της μικρότερης επιφάνειας η οποία διέρχεται από τον άξονα της δύναμης και όχι από την απόσταση των ακμών της φόρτισης, αλλά ούτε και από την επιφάνεια θραύσης (Brook, 1985).

Από το φορτίο αστοχίας λαμβάνεται ο δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση  $I_s$  ως το πηλίκο του φορτίου αστοχίας  $P$  προς το τετράγωνο της απόστασης  $D$  μεταξύ των ακμών φόρτισης:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (4.1)$$

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

- $D_e^2 = D^2$  για την περίπτωση της διαμετρικής φόρτισης.
- $D_e^2 = 4 \times A / \pi$  για την περίπτωση της αξονικής φόρτισης, όπου  $A = W \times D$  το εμβαδόν που διέρχεται από τα σημεία φόρτισης και  $W$ , το πλάτος του επιπέδου που διέρχεται από τις ακμές φόρτισης.

Ο υπολογισμός της ισοδύναμης διαμέτρου γίνεται για να ληφθεί υπόψη η επίδραση σχήματος.

Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα δοκιμών σε διάφορες διαμέτρους απαιτείται διόρθωση του ως ανωτέρω υπολογιζόμενου δείκτη  $I_s$ , ο οποίος είναι συνάρτηση της ισοδύναμης διαμέτρου  $D_e$  του δοκιμίου. Ο διορθωμένος Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση  $I_{s(50)}$  (size-corrected Point Load Strength Index) ορίζεται ως η τιμή του  $I_s$  όταν πραγματοποιείται διαμετρική δοκιμή με  $D = 50$  mm.

Αν το δοκίμιο έχει  $D_e \neq 50$  mm, τότε πρέπει να γίνει και διόρθωση κλίμακας (ή μεγέθους) και να υπολογιστεί ο δείκτης  $I_{s(50)}$  που είναι ο τυποποιημένος δείκτης αναφοράς. Συχνά χρησιμοποιείται ένας συντελεστής διόρθωσης  $F$  ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με το  $I_s$  δίνει το  $I_{s(50)}$ :

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (4.2)$$

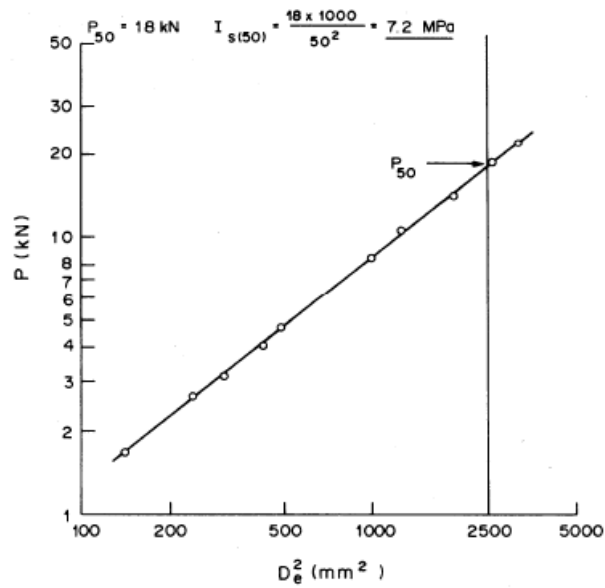
όπου το  $F$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F = \left( \frac{D_e}{50} \right)^{0.45} \quad (4.3)$$

Η πιο αξιόπιστη μέθοδος για την πραγματοποίηση της διόρθωσης είναι η εκτέλεση μίας σειράς δοκιμών με διάφορες διαμέτρους  $D$  ή  $D_e$  και η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε σύστημα αξόνων ( $P$ ,  $D_{e2}$ ) (Σχήμα 4.2). Εάν χρησιμοποιηθούν λογαριθμικές κλίμακες αξόνων η σχέση  $P$ -  $D_{e2}$  είναι μία ευθεία από την οποία μπορεί να προσδιορισθεί γραφικά η τιμή  $P_{50}$ , η οποία αντιστοιχεί σε  $D_{e2}=2500$  mm<sup>2</sup> ( $D_e=50$ mm). Ο δείκτης  $I_{s(50)}$  υπολογίζεται τότε από τη σχέση:

$$I_{s(50)} = \frac{P_{(50)}}{50^2} \quad (4.4)$$





Σχήμα 4.2: Αποτελέσματα δοκιμών σημειακής φόρτισης για διάφορες  $D_e$  και γραφικός υπολογισμός του  $P_{50}$ .

Το ιδανικό πάντως είναι η εκτέλεση των πειραμάτων να γίνεται απευθείας σε δοκίμια με τη τυποποιημένη διάμετρο των 50 mm, ώστε στους υπολογισμούς να μην απαιτείται διόρθωση, η οποία μειώνει την ακρίβεια των υπολογισμών.

Σύμφωνα με τις οδηγίες της I.S.R.M. η παραπάνω διόρθωση μεγέθους είναι εφαρμόσιμη ανεξάρτητα από τη ύπαρξη ανισοτροπίας στο πέτρωμα και από τη διεύθυνση της φορτίσεως σε σχέση με τα επίπεδα αδυναμίας του πετρώματος. Ο Πίνακας 4.1 δίνει τον χαρακτηρισμό της αντοχής του πετρώματος με βάση την τιμή του δείκτη.

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση πετρώματος με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης  $I_{s(50)}$  σε MPa (Bieniawski, 1975).

Περιγραφή	Δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (MPa)
Πολύ υψηλής αντοχής	>8
Υψηλής αντοχής	4-8
Μέσης αντοχής	2-4
Χαμηλής αντοχής	1-2
Πολύ χαμηλής αντοχής	Δεν συνίσταται η δοκιμή (<1)

Ο Δείκτης Ανισοτροπίας της Αντοχής σε σημειακή φόρτιση  $I_{a(50)}$  (Strength Anisotropy Index) ορίζεται ως ο λόγος του δείκτη  $I_{s(50)}$  για φόρτιση κάθετα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος ως προς τον δείκτη  $I_{s(50)}$  για φόρτιση παράλληλα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος. Ο δείκτης  $I_{a(50)}$  λαμβάνει τιμές κοντά στο 1.0 για την περίπτωση σχετικά ισότροπου πετρώματος και μεγαλύτερες τιμές όταν το πέτρωμα είναι ανισότροπο.

Σύμφωνα με τους Broch and Franklin (1972) ο μέσος όρος του δείκτη  $I_{s(50)}$ , που έχει προκύψει ύστερα από την εκτέλεση σημαντικού αριθμού δοκιμών, σε κυλινδρικής μορφής δοκίμια σε διαμετρική δοκιμή, μπορεί να συσχετισθεί με τη μονοαξονική αντοχή πετρώματος σε θλίψη του πετρώματος. Για δοκίμια με  $D=50$  mm, βρέθηκε ότι:

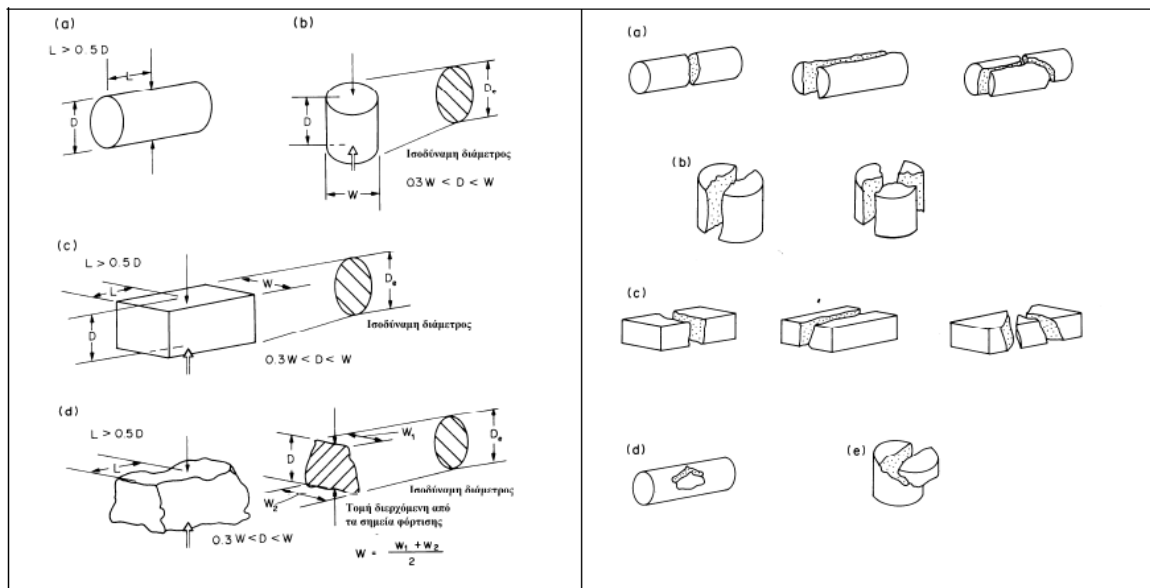
$$\sigma_c \approx 24 I_s \quad (4.5)$$

Για άλλες τιμές της διαμέτρου  $D$  απαιτείται μια σχετική διόρθωση. Ο Bieniawski (1975) προτείνει την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση μεταξύ των  $\sigma_c$ ,  $I_s$  και τη διάμετρο  $D$  (mm) του πυρήνα:

$$\sigma_c \approx (14 + 0.175 D) I_s \quad (4.6)$$

Η ISRM (1985) δίνει οδηγίες για την εκτέλεση τεσσάρων τύπων δοκιμής, ήτοι (Σχήμα 4.3): (α) Διαμετρική δοκιμή, (β) Αξονική δοκιμή, (γ) Δοκιμή ορθογωνικού δοκιμίου και (δ) Δοκιμή ακανόνιστου δοκιμίου.

Η διαμετρική δοκιμή πραγματοποιείται με αντιδιαμετρική φόρτιση ενός τεμαχίου πυρήνα μέχρι θραύσης με ένα ζεύγος χαλύβδινων ακμών. Κατάλληλα δοκίμια για την εκτέλεση της δοκιμής θεωρούνται αυτά με λόγο μήκους προς διάμετρο μεγαλύτερο από 1.0. Η απόσταση  $D$  μεταξύ των ακμών φορτίσεως, που εδώ είναι ίση με τη διάμετρο του δοκιμίου, καταγράφεται με ακρίβεια  $\pm 2\%$ . Το φορτίο αυξάνεται σταδιακά ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει σε χρόνο 10-60 sec. Η δύναμη  $P$  στην οποία θραύεται ο πυρήνας δίνεται από το δείκτη καταγραφής φορτίου. Η δοκιμή δεν είναι αποδεκτή εάν η επιφάνεια αστοχίας του δοκιμίου διέρχεται μόνο από το ένα σημείο φόρτισης (Σχήμα 4.3, δεξιά, d).



Σχήμα 4.3: Αριστερά: Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης: (α) Διαμετρική δοκιμή, (β) Αξονική δοκιμή, (γ) Δοκιμή σε ορθογωνικό δοκίμιο και (δ) Δοκιμή σε ακανόνιστο δοκίμιο. Δεξιά: Τυπικές μορφές αστοχίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σημειακής φορτίσεως: (α) Αποδεκτή διαμετρική δοκιμή, (β) Αποδεκτή αξονική δοκιμή, (γ) Αποδεκτή δοκιμή σε ορθογωνικό δοκίμιο, (δ) Μη αποδεκτή διαμετρική δοκιμή, (ε) Μη αποδεκτή αξονική δοκιμή.

Η αξονική δοκιμή πραγματοποιείται με φόρτιση του δοκιμίου παράλληλα προς τον άξονά του (Σχήμα 4.3, b). Τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια πρέπει να έχουν λόγο ύψους προς διάμετρο  $0.3 \div 1.0$ . Η απόσταση  $D$  μεταξύ των ακμών φορτίσεως, που εδώ είναι ίση με το μήκος του δοκιμίου, καταγράφεται με ακρίβεια  $\pm 2\%$ . Το πλάτος του δοκιμίου  $W$  κάθετα προς τη διεύθυνση φορτίσεως καταγράφεται με ακρίβεια  $\pm 5\%$ . Το φορτίο αυξάνεται σταδιακά ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει σε χρόνο 10 - 60 sec. Η δύναμη  $P$  στην οποία θραύεται ο πυρήνας δίνεται από το δείκτη καταγραφής φορτίου. Η δοκιμή δεν είναι αποδεκτή εάν η επιφάνεια αστοχίας του δοκιμίου διέρχεται μόνο από το ένα σημείο φόρτισης (Σχήμα 4.3, δεξιά, e).

Η Δοκιμή Ορθογωνικού και Ακανόνιστου Δοκιμίου (Block Test and Irregular Lump Test) πραγματοποιείται σε δοκίμια ορθογωνικής ή ακανόνιστης μορφής που πρέπει να έχουν μέγεθος  $50 \pm 35$  mm και να είναι της μορφής που δίνεται στο Σχήμα 4.3 c και Σχήμα 4.3 d αντίστοιχα. Ο λόγος  $D/W$  πρέπει να είναι μεταξύ 0.3 και 1.0 και προτιμάται να πλησιάζει το 1.0. Η απόσταση  $L$  (Σχήμα 4.3γ και Σχήμα 4.3δ) πρέπει να είναι τουλάχιστο

0,5W. Η απόσταση D μεταξύ των ακμών φορτίσεως καταγράφεται με ακρίβεια  $\pm 2\%$ . Το μικρότερο πλάτος του δοκιμίου W κάθετα προς τη διεύθυνση φορτίσεως καταγράφεται με ακρίβεια  $\pm 5\%$ . Εάν οι πλευρές του δοκιμίου δεν είναι παράλληλες τότε το W υπολογίζεται ως  $W = (W1 + W2) / 2$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3d. Το φορτίο αυξάνεται σταδιακά ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει σε χρόνο  $10 \div 60$  sec. Η δύναμη P στην οποία θραύεται ο πυρήνας δίνεται από το δείκτη καταγραφής φορτίου. Η δοκιμή δεν είναι αποδεκτή εάν η επιφάνεια αστοχίας του δοκιμίου διέρχεται μόνο από το ένα σημείο φόρτισης.

## 4.2. Η μέθοδος του κρουσίμετρου αναπήδησης

Η μέθοδος του κρουσίμετρου αναπήδησης (γνωστό και ως κρουσίμετρο ή σφύρα Schmidt) βασίζεται στην εκτίμηση της επιφανειακής σκληρότητας των ελεγχόμενων πετρωμάτων. Η βασική αρχή είναι η διατήρηση σε επαφή με την επιφάνεια του πετρώματος ενός μεταλλικού εμβόλου, ενώ ταυτόχρονα μια μάζα διευθυνόμενη από ελατήριο προσβάλλει την άλλη πλευρά του εμβόλου και αναπηδά (Σχήμα 4.5). Η δύναμη με την οποία το ελατήριο ωθεί το έμβολο, είναι σταθερή και ανεξάρτητη της αντίστασης της επιφάνειας και της ταχύτητας που εκτελείται η μέτρηση. Το ύψος αναπήδησης της μάζας, το οποίο εξαρτάται από την επιφανειακή σκληρότητα του πετρώματος, αναγράφεται σε κατάλληλη κλίμακα εντός του οργάνου και αποτελεί το δείκτη σκληρομέτρησης (A). Όσο υψηλότερη είναι η σκληρότητα του πετρώματος τόσο μεγαλύτερο είναι το ύψος αναπήδησης. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αφ' ενός για τη διαπίστωση της ομοιογένειας του πετρώματος και αφ' ετέρου για την εκτίμηση της αντοχής του.



Σχήμα 4.4: Κρουσίμετρο Schmidt

Ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της δοκιμής περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια:

Τύπος κρουσιμέτρου: τα τυποποιημένα κρουσίμετρα Schmidt, τύπου L και τύπου N, είναι σχεδιασμένα ώστε να παράγουν διαφορετικά επίπεδα ενέργειας κρούσης: 0.735 και 2.207 NM, αντίστοιχα. Η ISRM (1978a) συνιστά τη χρήση κρουσιμέτρου τύπου L ενώ η ASTM (2000) δεν καθορίζει τύπο κρουσιμέτρου.

Διεύθυνση κρουσιμέτρησης: για δοκιμή που εκτελείται σε διευθύνσεις διαφορετικές από την οριζόντιο, οι τιμές της αναπήδησης επηρεάζονται από τη δύναμη της βαρύτητας και πρέπει να διορθώνονται. Τόσο η ISRM όσο και η ASTM σημειώνουν ότι η διόρθωση πρέπει να γίνεται χρησιμοποιώντας τα σχετικά διαγράμματα του κατασκευαστή.

Μέγεθος δοκιμίων: Για εργαστηριακή κρουσιμέτρηση, τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερων διαστάσεων. Προκειμένου για κυβικά δοκίμια, η ακμή τους πρέπει να είναι τουλάχιστο 6 cm σύμφωνα με την ISRM (1978a) και τουλάχιστο 15 cm κατά την ASTM (2000). Τα κυλινδρικά δοκίμια πρέπει να είναι τουλάχιστο διαμέτρου NX.

Γεωμετρία επιφάνειας: Ανωμαλίες της επιφάνειας, στην οποία εκτελείται η δοκιμή, επηρεάζουν της τιμές της αναπήδησης, αφού συχνά θραύονται κάτω από την άκρη του εμβόλου οδηγώντας σε απώλειες της κρουστικής ενέργειας και μικρότερες τιμές

αναπήδησης. Η ISRM (1978α) συνιστά τα δοκίμια να έχουν ομαλή επιφάνεια στα σημεία που εκτελείται η δοκιμή.

Αποσάθρωση και υγρασία: το κρουσίμετρο Schmidt μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της επιφανειακής αποσάθρωσης ενός πετρώματος (ή του τοιχώματος μίας ασυνέχειας). Οι ενδείξεις του κρουσιμέτρου μπορούν να μειώνονται σημαντικά με την αποσάθρωση της επιφάνειας. Εντούτοις, στα πετρώματα με πολλά ορυκτά οι αλλαγές της μικροδομής με την αποσάθρωση είναι πολύπλοκες λόγω της διαφορετικής ευαισθησίας των συνήθων ορυκτών των πετρωμάτων, όπως ο χαλαζίας και οι άστριοι. Συνεπώς, η διασπορά των αποτελεσμάτων της δοκιμής αυξάνεται με τη διάβρωση, ειδικότερα στα χονδροκρυσταλλικά πετρώματα.

Η επίδραση της υγρασίας στις ενδείξεις του κρουσιμέτρου διαφέρει ανάλογα τον τύπο του πετρώματος. Γενικά, οι τιμές της αναπήδησης μειώνονται (μη – γραμμικά) με την αύξηση της υγρασίας.

Ο απαιτούμενος αριθμός δοκιμών ανά δείγμα καθορίζεται από την ISRM σε τουλάχιστο 20. Οι δέκα χαμηλότερες τιμές απορρίπτονται και από τις υπόλοιπες 10 λαμβάνεται ο μέσος όρος. Η ASTM συνιστά τουλάχιστο δέκα δοκιμές, από τις οποίες απορρίπτονται όσες διαφέρουν από το μέσο όρο περισσότερο από 7 μονάδες. Και τα δύο πρότυπα συνιστούν οι θέσεις των δοκιμών να απέχουν τουλάχιστο όσο η διάμετρος του εμβόλου του κρουσιμέτρου.

Η εκτίμηση της αντοχής του πετρώματος από την αναπήδηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια καμπυλών συσχέτισης, που έχουν προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα. Επίσης υπάρχουν διάφορες εμπειρικές σχέσεις μεταξύ της αναπήδησης και της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του πετρώματος. Οι σχέσεις αυτές εκφράζονται με γραμμικές, παραβολικές ή εκθετικές συναρτήσεις.

Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν προχωρεί στην εκτίμηση της ποιότητας του πετρώματος σε βάθος. Το βάθος επιρροής κυμαίνεται από 2 έως 3 cm. Επίσης η διασπορά των αποτελεσμάτων κυμαίνεται στο  $\pm 10\%$  περίπου που είναι σχετικά υψηλή. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου θα πρέπει να αναφερθούν η ευκολία στην εφαρμογή της, οι μικρές απαιτήσεις σε εξοπλισμό και το μικρό σχετικά κόστος του καθώς και η άμεση διαθεσιμότητα των αποτελεσμάτων.

Ακολούθως δίνεται η προτεινόμενη από την ISRM μέθοδος για τον προσδιορισμό της Σκληρότητας Αναπήδησης Schmidt.

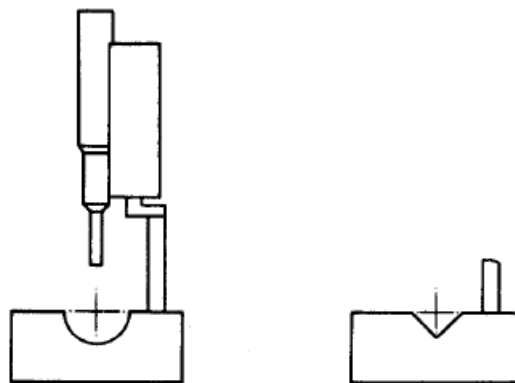
Γενικά σκοπός της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της σκληρότητας του πετρώματος και η μέθοδος αυτή έχει περιορισμένη εφαρμογή στα πολύ μαλακά ή πολύ σκληρά πετρώματα.

Η συσκευή αποτελείται από:

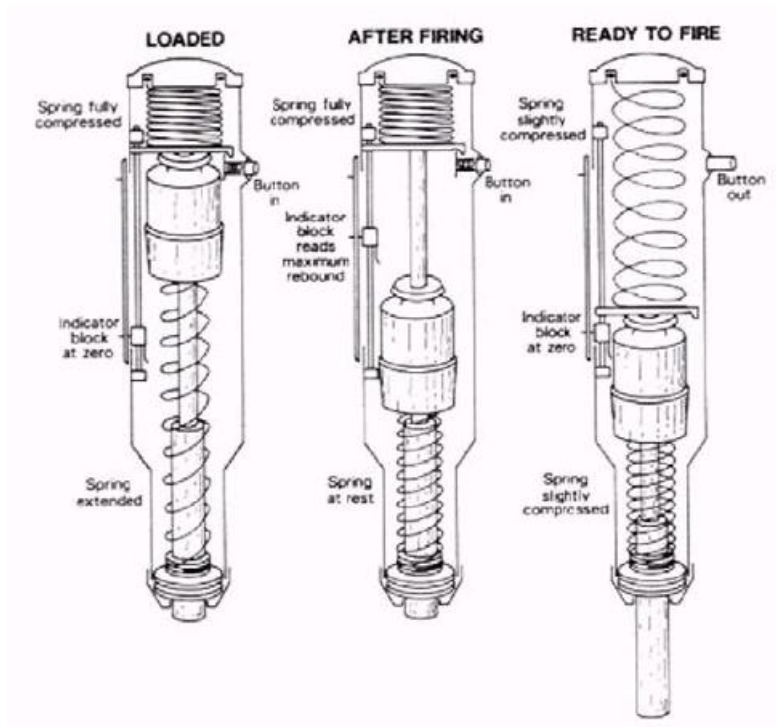
(α) Το κρουσίμετρο Schmidt, με το οποίο προσδιορίζεται η σκληρότητα αναπήδησης ενός δοκιμίου πετρώματος. Το έμβολο του κρουσίμετρου τοποθετείται ενάντια στο δοκίμιο και πιέζεται με ώθηση του προς το δοκίμιο. Η ενέργεια αποθηκεύεται σε ελατήριο που απελευθερώνεται αυτόματα σε ορισμένο ενεργειακό επίπεδο και κρούει μια μάζα στο έμβολο. Το ύψος αναπήδησης της μάζας μετρείται σε κλίμακα και λαμβάνεται ως μέτρο της σκληρότητας. Η συσκευή είναι φορητή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στο εργαστήριο όσο και επί τόπου.

Πρότυπα κρουσίμετρα είναι διαθέσιμα σε διάφορα επίπεδα ενέργειας κρούσης. Ο τύπος L, που έχει ενέργεια κρούσης 0.74 Nm, χρησιμοποιείται σε αυτή την προτεινόμενη μέθοδο.

(β) Βάση χάλυβα ελάχιστου βάρους 20 kg στην οποία πρέπει να στερεώνονται τα δοκίμια. Τα δοκίμια πυρηνοληψίας πρέπει να στερεώνονται σε χαλύβδινη βάση με ημικυλινδρική εγκοπή της ίδιας ακτίνας με τον πυρήνα ή πρισματική βάση με εγκοπή σχήματος V (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Βάσεις στήριξης κυλινδρικών δοκιμίων



Σχήμα 4.6: Αρχή λειτουργίας του κρουσίμετρου Schmidt (McCarroll, 1994)

Η διαδικασία που προτείνεται είναι η ακόλουθη:

(α) Πριν από κάθε δοκιμή η σφύρα Schmidt πρέπει να βαθμονομείται χρησιμοποιώντας ένα αμόνι δοκιμής βαθμονόμησης, που παρέχεται από τον κατασκευαστή για το σκοπό αυτό. Κατά τη βαθμονόμηση πρέπει να λαμβάνεται ο μέσος όρος 10 αναγνώσεων στο αμόνι δοκιμής.

(β) Τα δοκίμια που λαμβάνονται για εργαστηριακές δοκιμές θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά του πετρώματος που μελετάται. Εφόσον είναι δυνατό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα τεμάχια του πετρώματος για τις δοκιμές σκληρότητας Schmidt. Ο τύπος σφύρας L πρέπει να χρησιμοποιείται σε δείγματα πυρήνων NX ή μεγαλύτερα ή πρισματικά δοκίμια με μήκος ακμής τουλάχιστον 6 cm.

(γ) Η επιφάνεια δοκιμής όλων των δοκιμίων, είτε στο εργαστήριο είτε στο ύπαιθρο, θα είναι ομαλή και επίπεδη στην περιοχή που καλύπτεται από την άκρη του εμβόλου. Αυτή η



περιοχή και το πέτρωμα κάτω από αυτή μέχρι βάθους 6 cm θα πρέπει να είναι ελεύθερη από ρωγμές ή οποιεσδήποτε τοπικές ασυνέχειες της βραχώμαζας.

(δ) Τα μικρά τεμάχια πετρώματος, είτε εξετάζονται στο εργαστήριο είτε στο ύπαιθρο, θα πρέπει να στερεώνονται σε μια άκαμπτη βάση για να εξασφαλίζεται επαρκώς το δοκίμιο έναντι δόνησης και μετακίνησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Η βάση πρέπει να τοποθετείται σε επίπεδη επιφάνεια που να παρέχει σταθερή υποστήριξη.

(ε) Η μετρηθείσα τιμή της σκληρότητας επηρεάζεται από τον προσανατολισμό του κρουσίμετρου. Συνιστάται η σφύρα να χρησιμοποιείται σε μία από τις τρεις ακόλουθες θέσεις: κατακόρυφη με ανοδική κατεύθυνση, οριζόντια, ή κατακόρυφη με καθοδική κατεύθυνση με τον άξονα της σφύρας εντός εύρους  $\pm 5^\circ$  από την επιθυμητή θέση. Όταν η χρήση ενός από τους τρεις αυτούς προσανατολισμούς δεν είναι εφικτή (π.χ. επί τόπου δοκιμή σε μια κυκλική σήραγγα), η δοκιμή πρέπει να διεξάγεται στην επιβεβλημένη γωνία και τα αποτελέσματα να διορθώνονται ως προς την οριζόντια ή κατακόρυφη θέση χρησιμοποιώντας τις καμπύλες διορθώσεων που παρέχονται από τον κατασκευαστή. Ο προσανατολισμός της σφύρας κατά τη δοκιμή και οποιεσδήποτε διορθώσεις που εφαρμόζονται για μη κατακόρυφους και μη οριζόντιους προσανατολισμούς πρέπει να καταγράφονται και να αναφέρονται στα αποτελέσματα.

(ι) Τουλάχιστον 20 μεμονωμένες δοκιμές θα πρέπει να εκτελούνται σε κάθε ένα δοκίμιο πετρώματος. Οι θέσεις δοκιμής θα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους κατά τουλάχιστο μια διάμετρο εμβόλου. Οποιαδήποτε δοκιμή προκαλεί ρηγμάτωση ή άλλη ορατή αστοχία θα καθιστά τη δοκιμή και το δοκίμιο απορριπτέα. Σφάλματα κατά την προετοιμασία των δοκιμίων και την τεχνική δοκιμής τείνουν να προκαλέσουν χαμηλές τιμές σκληρότητας.

Για τους υπολογισμούς λαμβάνουμε υπόψη τα εξής:

(α) Ο συντελεστής διόρθωσης υπολογίζεται ως:

$$\text{Συντελεστής διόρθωσης} = \frac{\text{Καθορισμένη πρότυπη τιμή του αμονιού}}{\text{Μέσος όρος 10 αναγνώσεων στο αμόνι βαθμολόγησης}}$$

(β) Οι μετρούμενες τιμές κατά τη δοκιμή του δείγματος θα πρέπει να ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά. Το κατώτερο 50% των μετρούμενων τιμών πρέπει να απορρίπτεται και ο μέσος όρος λαμβάνεται από το υψηλότερο 50 % των μετρούμενων τιμών. Αυτός ο μέσος όρος θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή διόρθωσης για να λαμβάνεται η Σκληρότητα Αναπήδησης Schmidt.

Στην έκθεση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να αναφέρονται οι ακόλουθες πληροφορίες:

(α) Λιθολογική περιγραφή του πετρώματος. Θέση λήψης του δείγματος, συμπεριλαμβανομένων: γεωγραφική θέση, βάθος και προσανατολισμός δείγματος.

(β) Τύπος δοκιμίου (πυρήνας, προϊόν ανατίναξης, προϊόν θραύσης πετρώματος, επί τόπου πέτρωμα). Μέγεθος και σχήμα δείγματος πυρήνα ή πρισματικού.

(γ) Ημερομηνία της δειγματοληψίας, ημερομηνία της δοκιμής και κατάσταση της αποθήκευσης (δηλ. έκθεση σε ακραίες θερμοκρασίες, ξήρανση αέρα, υγρασία, κλπ.).

(δ) Προσανατολισμός του άξονα της σφύρας στη δοκιμή.

(ε) Μέθοδος της στερέωσης του δείγματος (εγκοπή σχήματος V ή σφικτήρες).

(στ) Η τιμή της σκληρότητας Schmidt.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει τα αποτελέσματα των δοκιμών αξιοποιούνται για τη ταξινόμηση των πετρωμάτων σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τις εφαρμογές ή για την εξαγωγή εμπειρικών κριτηρίων.

### 1. Ταξινόμηση κατά ISRM

Η ακόλουθη ταξινόμηση προτείνεται από τη διεθνή ένωση βραχομηχανικής (ISRM/1981) και βασίζεται στη θλιπτική αντοχή (μονοαξονική) που συμβολίζεται συνήθως με  $C_0$  ή  $\sigma_c$ .

Πίνακας 5.1: Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή (ISRM 1981)

Περιγραφή	$\sigma_{ci}$ (MPa)	Επί τόπου εκτίμηση της αντοχής	Παραδείγματα
Εξαιρετικά ισχυρό	>250	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί.	Υγής βασάλτης, χαλαζίτης, διάβασης, γνεύσιος, γρανίτης, πυριτόλιθος
Πολύ ισχυρό	100-250	Θραύεται μετά από πολλούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί.	Αμφιβολίτης, ψαμμίτης, βασάλτης, γάββρος, γνεύσιος, γρανοδιορίτης, περιδοτίτης, ρυόλιθος, τόφος
Ισχυρό	50-100	Θραύεται με περισσότερο από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί.	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, ψαμμίτης, σχιστόλιθος
Μετρίως ισχυρό	25-50	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι. Θραύεται με ένα μόνο κτύπο με γεωλογικό σφυρί.	Σκυρόδεμα, φυλλίτης, σχιστόλιθος, ιλυόλιθος
Ασθενές	5-25	Χαράσσεται δύσκολα με μαχαίρι.	Κιμωλία, αργιλόλιθος, ποτάσα, μάργα, αργιλικός σχιστόλιθος, ορυκτό αλάτι
Πολύ ασθενές	1-5	Θρυμματίζεται με ισχυρά χτυπήματα με γεωλογικό σφυρί. Χαράσσεται με μαχαίρι.	Έντονα αποσαθρωμένος ή εξαλλοιωμένος βράχος
Εξαιρετικά ασθενές	0.25-1	Χαράσσεται με το νύχι.	Στιφρό υλικό πλήρωσης ρήγματος

## 2. Ταξινόμηση κατά Deere – Miller

Οι Deere – Miller (1966) έκαναν κατάταξη με βάση την αντοχή των πετρωμάτων,  $\sigma_{ci}$ , και το λόγο εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας,  $E_t$ , προς την αντοχή, όπου το  $E_t$  λαμβάνεται για  $\sigma = \sigma_{ci} / 2$ .

Το πρώτο κριτήριο σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή, αποτελεί η αντοχή σε θλίψη, διακρίνεται σε πέντε κατηγορίες, που αναλύονται ως εξής:

(α) Το όριο μεταξύ της κατηγορίας A και B είναι η τιμή των 220 περίπου MN/m<sup>3</sup>, που αντιστοιχεί περίπου στην ανώτερη τιμή αντοχής για τα πετρώματα. Λίγα πετρώματα εμπίπτουν δηλαδή στην κατηγορία A, όπως χαλαζίτες, διαβάσες, βασάλτες, κλπ,

(β) Η κατηγορία B αναφέρεται σε εύρος κύμανσης αντοχής που αντιστοιχεί στην αντοχή των λοιπών εκρηξιγενών, των σκληρών μεταμορφωμένων, των ασβεστολίθων και δολομιτών, αλλά και των σκληρών ιζημάτων,

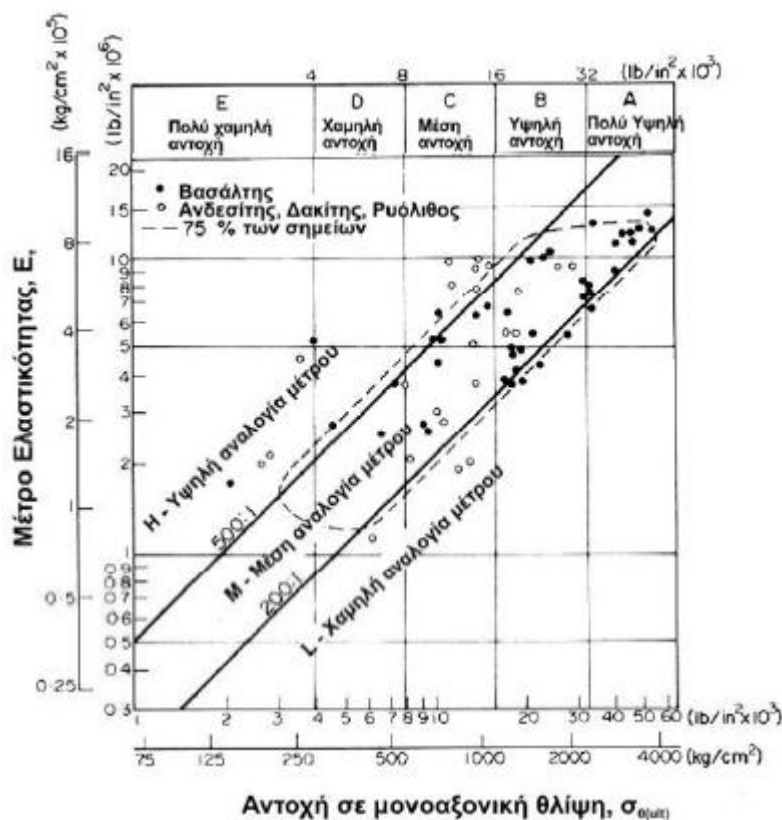
(γ) στην κατηγορία C εντάσσονται τα λοιπά μεταμορφωμένα και τα πορώδη ιζήματα.

(δ) στις κατηγορίες D και E υπάγονται τα χαμηλής αντοχής, πορώδη, εύθρυπτα και αποσαθρωμένα πετρώματα.

Πίνακας 5.2: Ταξινόμηση άρρηκτου πετρώματος

Κατηγορία	Αντοχή, σε MPa	Περιγραφή
A	>220	Πολύ υψηλή αντοχή
B	110 - 220	Υψηλή αντοχή
C	55 - 110	Μέση αντοχή
D	28 - 55	Χαμηλή αντοχή
E	<28	Πολύ χαμηλή αντοχή

Το δεύτερο κριτήριο είναι ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη για το πέτρωμα που εξετάζεται. Αναφορικά με την αναλογία του λόγου αυτού, τα πετρώματα διακρίνονται σε αυτά με χαμηλή (L), μέτρια (M) και υψηλή (H) αναλογία μέτρου, με τα όρια της μέτριας αναλογίας να βρίσκονται μεταξύ 500:1 και 200:1.



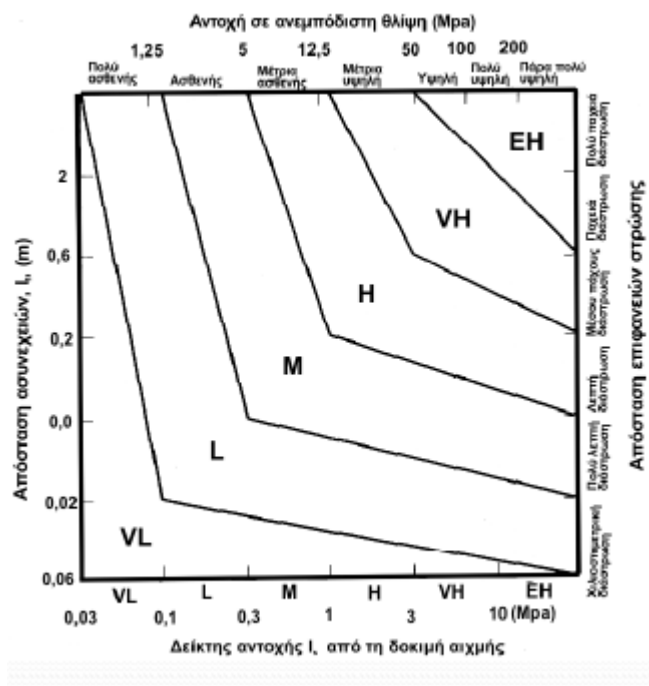
Σχήμα 5.1: Τυπική ταξινόμηση για εκρηξιγενή πετρώματα κατά Deere – Miller (1966)

### 3. Άλλες ταξινομήσεις

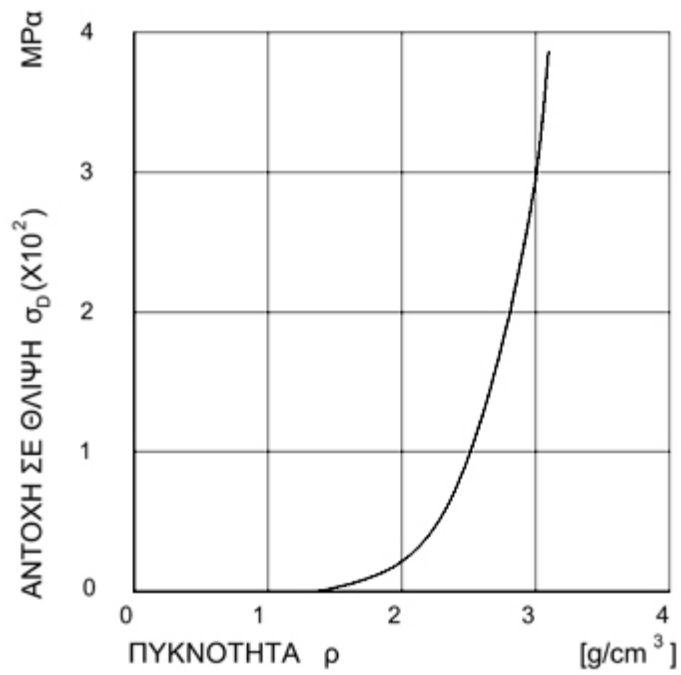
Οι Franklin et al (1971) έκαναν μια ταξινόμηση με συνδυασμό δύο δεικτών: αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη και απόσταση των ασυνεχειών, για να παρουσιάσουν ένα δείκτη ποιότητας πετρώματος. Αρχικά διέκριναν επτά κατηγορίες αναφορικά με την αντοχή σε θλίψη (από πολύ ασθενή έως πάρα πολύ υψηλή), που αποτυπώνονται στο άνω μέρος του διαγράμματος (σχήμα 5.2).

Εκτός από τις ταξινομήσεις που βασίζονται στα μηχανικά χαρακτηριστικά, άλλες ταξινομήσεις μπορεί να είναι χρήσιμες και να βασίζονται σε φυσικές ιδιότητες όπως το ολικό ή το ενεργό πορώδες, η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων, ηλεκτρική αντίσταση και θερμική αγωγιμότητα (σχήματα 5.3 και 5.4).

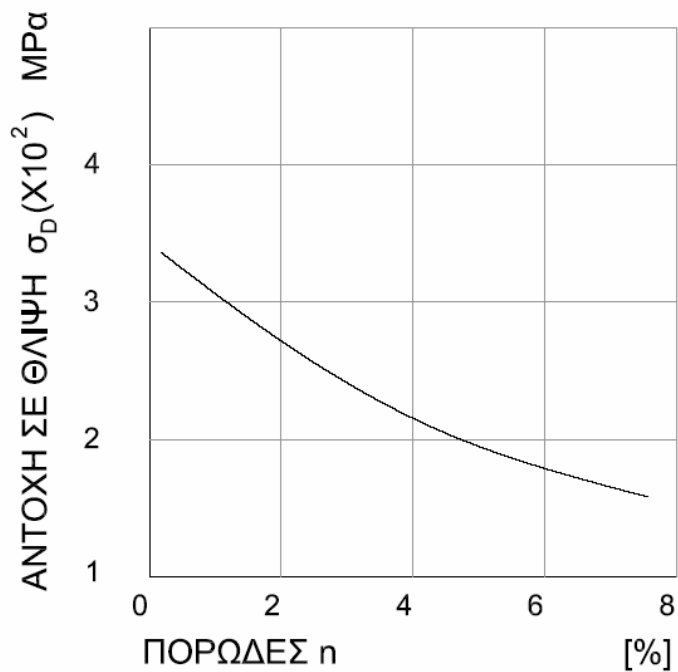
Για τη μέτρηση της αντοχής των τοιχωμάτων πετρώματος χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ακρίβεια η σφύρα Schmidt τύπου “L”. Λαμβάνονται πολλές μετρήσεις και εκτιμάται ο μέσος όρος. Υπάρχει νομογράφημα όπου ανάλογα με τη γωνία προσέγγισης της επιφάνειας κατά τη μέτρηση και την ένδειξη υπολογίζεται η αντοχή σε MPa (σχήμα 5.5).



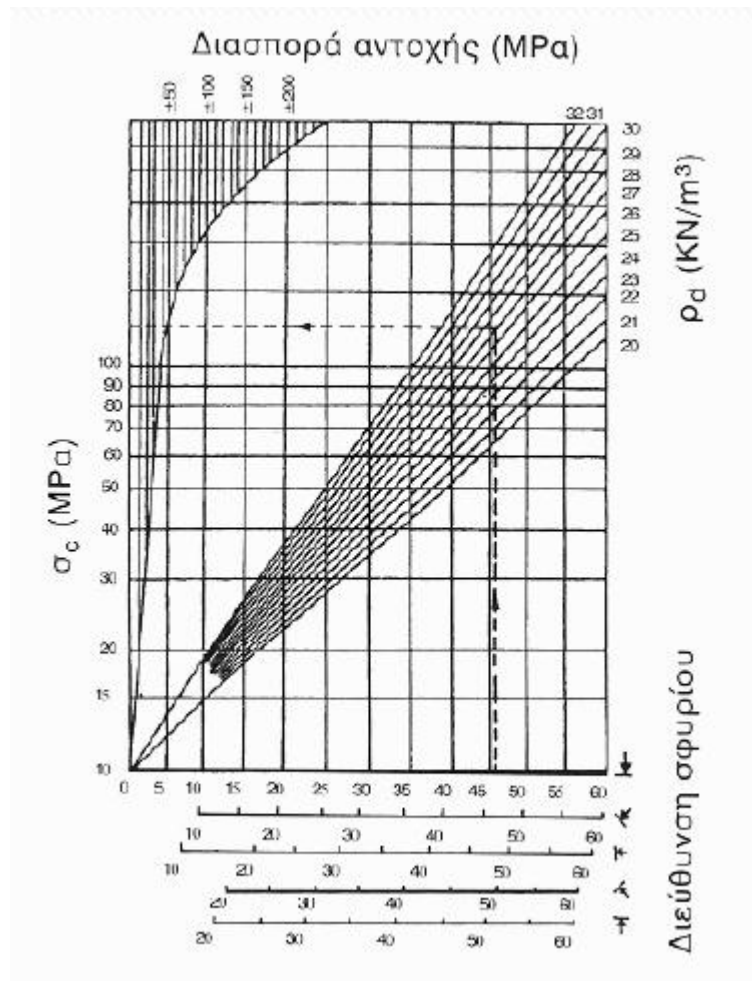
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα Franklin et al (1971)



Σχήμα 5.3 : Η αντοχή σε θλίψη σε συνάρτηση με την πυκνότητα για μια ομάδα ανθρακικών φυσικών λίθων



Σχήμα 5.4: Η αντοχή σε θλίψη σε συνάρτηση με το πορώδες για μια ομάδα χαλαζιακών φυσικών λίθων



Σχήμα 5.5: Καμπύλες αναπήδησης – αντοχής από πειραματικά στοιχεία

Τέλος, στον επόμενο πίνακα 5.3 παρουσιάζονται συνοπτικά διάφορες εμπειρικές σχέσεις, που έχουν προταθεί βάσει του διορθωμένου δείκτη σημειακής φόρτισης, έτσι όπως δίνονται από τους Kahraman et al (2005).



Πίνακας 5.3: Προτεινόμενες σχέσεις προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής από τον διορθωμένο δείκτη σημειακής φόρτισης  $I_{s50}$  (από Kahraman et al, 2005)

Αναφορές	Σχέσεις
D'Andrea et al.	$UCS = 15.3I_{s50} + 16.3$
Deer and Miller	$UCS = 20.7I_{s50} + 29.6$
Broch and Franklin	$UCS = 24I_{s50}$
Bieniawski	$UCS = 23I_{s50}$
Hassani et al.	$UCS = 29I_{s50}$
Read et al.	
(1) Sedimentary rocks	$UCS = 16I_{s50}$
(2) Basalts	$UCS = 20I_{s50}$
Singh	$UCS = 18.7I_{s50} - 13.2$
Forster	$UCS = 14.5I_{s50}$
Gunsallus and Kulhawy	$UCS = 16.5I_{s50} + 51.0$
ISRM	$UCS = 20 \dots 25I_{s50}$
Vallejo et al.	$UCS = 8.6 \dots 16I_{s50}$
Cargill and Shakoor	$UCS = 23I_{s54} + 13$
Tsidzi	$UCS = 14 \dots 82I_{s50}$
Ghosh and Srivastava	$UCS = 16I_{s50}$
Grasso et al.	
(1) Power relation	$UCS = 25.67(I_{s50})^{0.57}$
(2) Linear relation	$UCS = 9.30I_{s50} + 20.04$
Ulusay et al.	$UCS = 19I_{s50} + 12.7$
Chau and Wong	$UCS = 12.5I_{s50}$
Smith	$UCS = 14.3I_{s50}$
Kahraman	
(1) 22 different rock type	$UCS = 8.41I_{s50} + 9.51$
(2) Coal measure rocks	$UCS = 23.62I_{s50} - 2.69$
Quane and Russel	
(1) Strong rocks	$UCS = 24.4I_{s50}$
(2) Weak rocks	$UCS = 3.86(I_{s50})^2 + 5.65 I_{s50}$
Tsiambaos and Sabatakakis	
(1) Power relation	$UCS = 7.3(I_{s50})^{1.71}$
(2) Linear relation	$UCS = 23I_{s50}$
Palchik and Hatzor	$UCS = 8 \dots 18I_{s50}$

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASTM (1985). Designation: C99. "Modulus of Rupture of Natural Building Stone".
- ASTM (1995). Designation D2936-95 "Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens".
- ASTM (2000a), Designation: D 5873-00 "Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method".
- Barton, N. 1976. The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **13**, 1-24.
- Bieniawski Z.T. (1975). "The point load test in geotechnical practice", *Engineering Geology*, 9, 1-11.
- Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York. 251 pages.
- British Standard Code of Practice, 1987. BS 8081, *Ground Anchorage*, 89-115.
- Deere, D.U. and Miller, R.P. 1966. *Engineering classification and index properties of rock*. Technical Report No. AFNL-TR-65-116. Albuquerque, NM: Air Force Weapons Laboratory.
- Fairhurst, C. and Cook, N.G.W., 1966. The phenomenon of rock splitting parallel to a free surface under compressive stress. *Proc. 1st. Cong. ISRM, Lisbon* **1**, 687-692
- Franklin, J.A. and Hoek, E. 1970. Developments in triaxial testing equipment. *Rock Mech.* **2**, 223-228. Berlin: Springer-Verlag.
- Goodman R. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. 2<sup>nd</sup> Edition, John Willey and Sons
- Hoek, E. and Brown, E.T. 1988. The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. In *Rock engineering for underground excavations, proc. 15th Canadian rock mech. symp.*, (ed. J.C. Curran), 31-38. Toronto: Dept. Civ. Engineering, University of Toronto.
- 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.
- International Society for Rock Mechanics. 1981. *Rock characterisation, testing and monitoring - ISRM suggested methods*. Oxford: Pergamon.
- Παπαντωνόπουλος Κ., (2005). *Εισαγωγή στη βραχομηχανική*, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Σοφιανός ΑΙ και ΠΠ Νομικός, *Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων*, Οκτώβριος 2008, ΕΜΠ
- Τσουτρέλης Χ. (1985). «Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων», Αθήνα