

# Κεφάλαιο 2

## Τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές αντοχής

---

Στα εργαστήρια προσδιορισμού των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων εκτελείται σειρά από δοκιμές με βάση ελληνικά ή διεθνή, πρότυπα ή οδηγίες. Οι συνηθέστερες από αυτές αφορούν τον προσδιορισμό των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την αντοχή και παραμορφωσιμότητα δοκιμίων πετρώματος που καταπονούνται σε θλίψη, εφελκυσμό ή διάτμηση.

### 1 Δοκιμές του πετρώματος σε θλίψη

#### 1.1 Μονοαξονική θλίψη πετρώματος

Η δοκιμή, εκτελούμενη σε δοκίμια από πυρήνες γεωτρήσεων, είναι η συνηθέστερα εκτελούμενη εργαστηριακή δοκιμή. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής  $\sigma_c$ , και των ελαστικών σταθερών  $E$  και  $\nu$  του άρρηκτου πετρώματος.

Για παρόμοια ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος, η  $\sigma_c$  μειώνεται με το πορώδες, το βαθμό αποσάθρωσης, τις μικρορωγματώσεις, και την περιεκτικότητα σε νερό. Γι αυτό η αντοχή δοκιμίων με την ίδια γεωλογική ονομασία δύναται να διαφέρει σημαντικά. Για παράδειγμα, η αντοχή του ψαμμίτη διαφέρει με το μέγεθος των κόκκων, την πυκνότητα, τη φύση και έκταση συγκόλλησης των κόκκων, και το βαθμό συμπίεσης και θερμοκρασίας που το πέτρωμα υπέστη μέχρι σήμερα. Εν τούτοις η γεωλογική ονομασία δίνει χρήσιμα στοιχεία όπως για παράδειγμα ένας σχιστόλιθος αναμένεται να παρουσιάζει σχιστότητα και ένας χαλαζίτης θα είναι γενικά ένα σκληρό ψαθυρό υλικό.

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.

##### 1.1.1 Η εκτέλεση της δοκιμής

Προτεινόμενες τεχνικές για τον καθορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος δίνονται από την Επιτροπή

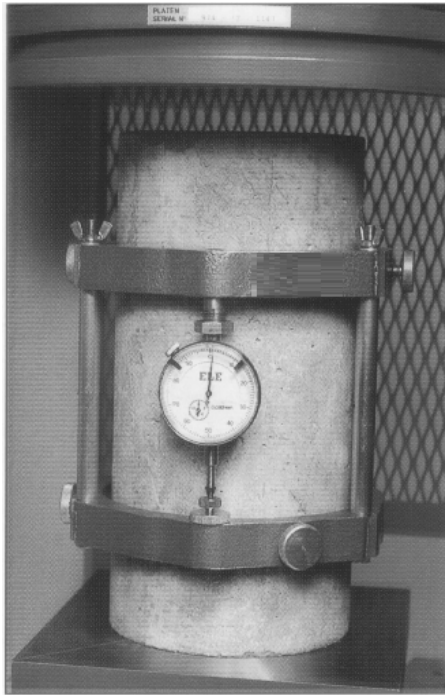
προτυποποίησης εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών της Διεθνούς Ένωσης Βραχομηχανικής (ISRM, 1979). Βασικά χαρακτηριστικά της συνιστώμενης διαδικασίας είναι:

- Τα δοκίμια έχουν κυλινδρική μορφή (Σχήμα 1) με λόγο  $\frac{H}{D} = 2.5$  έως 3

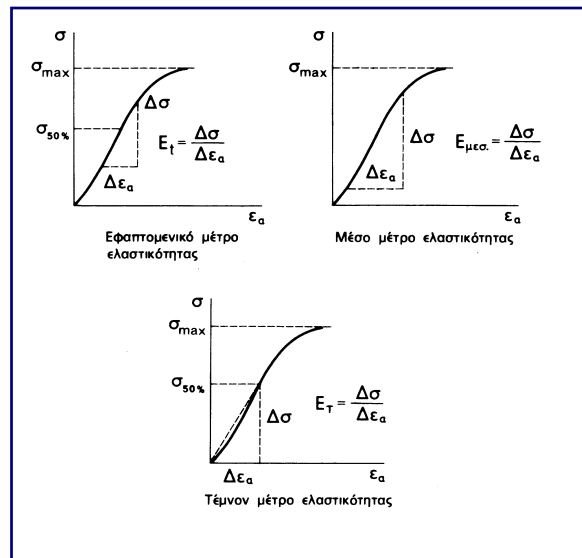
όπου H το ύψος και D η διάμετρος του δοκιμίου.

- 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  $0.5 \div 1$  MPa/s.
- Αξονικό φορτίο και ακτινικές ή διαμετρικές παραμορφώσεις θα καταγράφονται καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.
- Θα πρέπει να εκτελούνται τουλάχιστον πέντε δοκιμές.

Για την εκτέλεση της δοκιμής, κατάλληλα διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια (Σχήμα 1) 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.

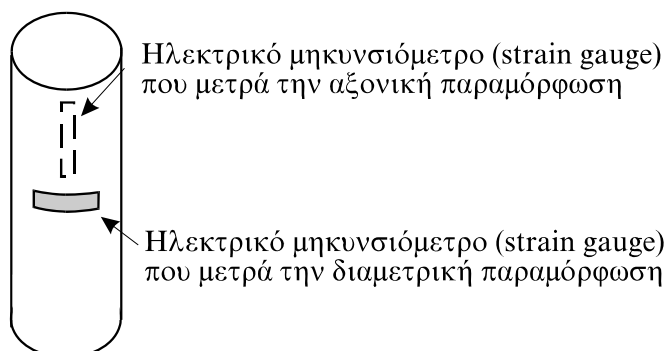


Σχήμα 1. Κυλινδρικό δοκίμιο  
(Τσουτρέλης et al., 2000)



Σχήμα 2. Γραφικός προσδιορισμός διαφόρων μέτρων ελαστικότητας

Επίσης με βάση το διάγραμμα (Σχήμα 2 ή Σχήμα 4) ενεργών τάσεων-τροπών (ανηγμένων παραμορφώσεων), 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, σύμφωνα με το Σχήμα 3. Ο κατακόρυφος μετρητής μετράει την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου, και ο οριζόντιος την διαμετρική παραμόρφωση.



Σχήμα 3. Επικόλληση των μετρητών παραμορφώσεων (Τσουτρέλης et al., 2000)

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:

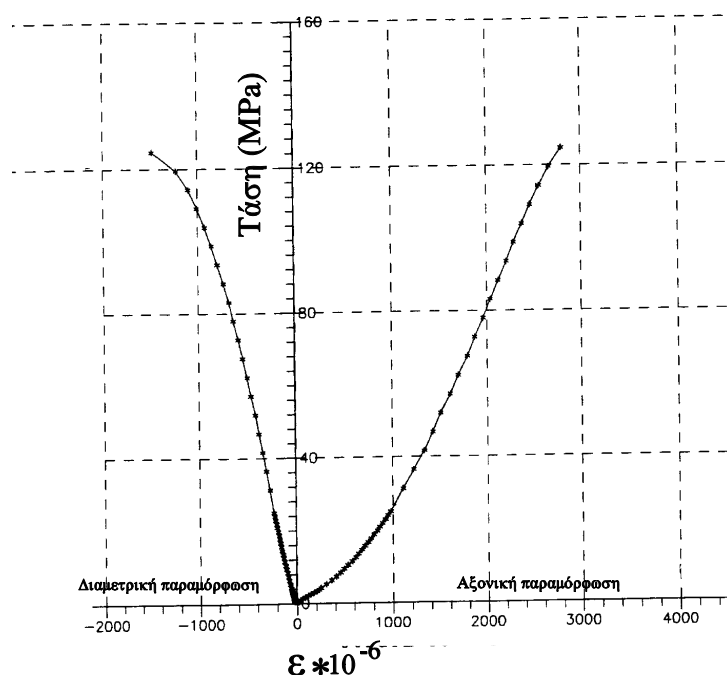
$$\varepsilon_x = \frac{\Delta \ell_x}{\ell_x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta \ell_y}{\ell_y} \quad (1)$$

όπου  $\Delta \ell$  η μεταβολή του μήκους που μετράει ο μετρητής και  $\ell$  το μήκος στο οποίο γίνεται αυτή η μέτρηση (3 cm). Για την περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανοσυνομέτρων, 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:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

όπου  $P$  το θλιπτικό φορτίο σε kN, και  $A_0$  το εμβαδόν της βάσης του κυλινδρικού δοκιμίου όπως μετρήθηκε πριν από τη δοκιμή.



Σχήμα 4. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πετρώματος (Τσουτρέλης et al., 2000).

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας ( $E_t$ ) υπολογίζεται από την καμπύλη τάσης - αξονικής τροπής 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 (Σχήμα 2). Το μέσο μέτρο ελαστικότητας ( $E_{\text{μεσ}}$ ) υπολογίζεται από την μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της ίδιας καμπύλης (Σχήμα 2). Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας ( $E_t$ )

υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που χαράσσεται στην ίδια καμπύλη, για τιμές τάσεως μεταξύ 0 και συνήθως 50% της μέγιστης τάσεως (Σχήμα 2). Τα μέτρα ελαστικότητας εκφράζονται συνήθως σε GPa.

Για τον προσδιορισμό του λόγου του Poisson σχεδιάζονται οι καμπύλες αξονικής τάσης-αξονικής τροπής και αξονικής τάσης - διαμετρικής τροπής που φαίνονται στο Σχήμα 4. Σε συνέχεια υπολογίζονται οι κλίσεις τους  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_a$ ,  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_d$ . Ο λόγος του Poisson υπολογίζεται από τη σχέση:

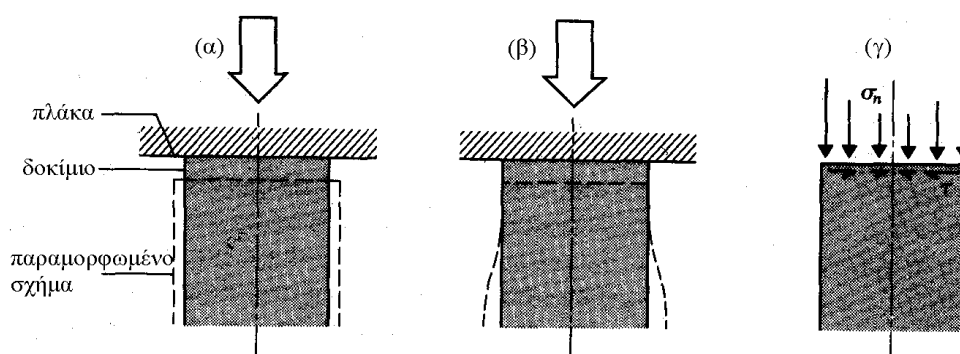
$$\nu = -\frac{\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_a}{\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_d} \quad (3)$$

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).

### 1.1.2 Παράγοντες διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων

#### 1.1.2.1 Επίδραση των άκρων

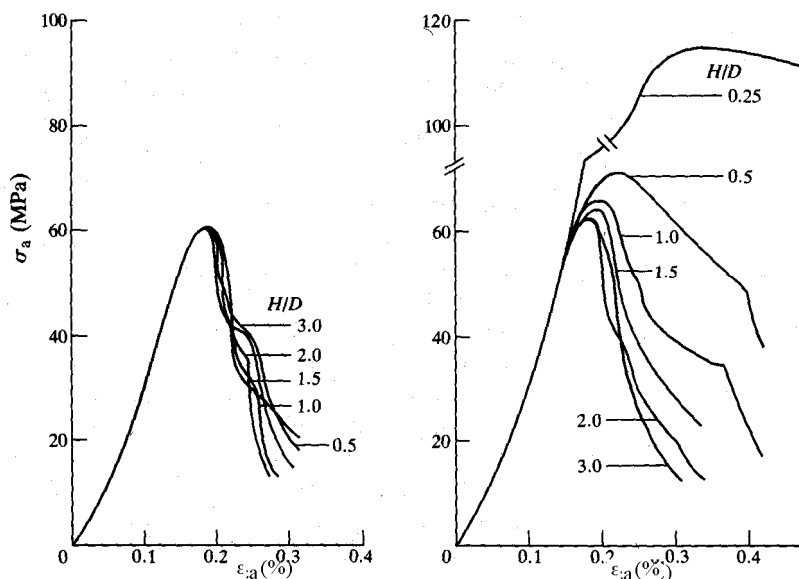
Στο Σχήμα 5α παρατηρούμε την επιδιωκόμενη συμπεριφορά του δοκιμίου (α). Στα σχήματα β. και γ. παρατηρούμε την παρουσιαζόμενη συμπεριφορά του δοκιμίου λόγω πλήρους καταναγκασμού της διαστολής στα άκρα.



Σχήμα 5. Επίδραση του καταναγκασμού των άκρων στις τάσεις και παραμορφώσεις του δοκιμίου.

#### 1.1.2.2 Επίδραση της λυγρότητας

Στο αριστερό διάγραμμα στο Σχήμα 6 παρατηρούμε τη μικρή επίδραση της λυγρότητας στην απόκριση του δοκιμίου σε θλίψη, στην περίπτωση χρήσης πλακών φόρτισης με ακίδες. Αντίθετα στο δεξιό διάγραμμα παρατηρούμε τη σημαντική αύξηση της αντοχής στην περίπτωση κοντών δοκιμίων.



Σχήμα 6. Επίδραση της λυγρότητας στις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων (Brown & Gonano, 1975).

### 1.1.2.3 Επίδραση του όγκου

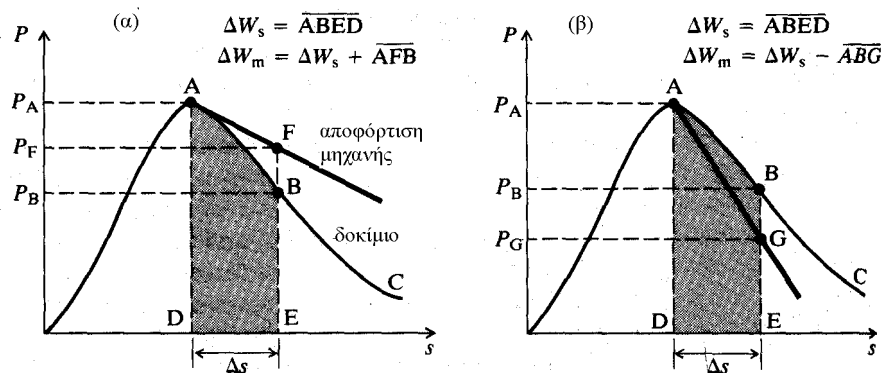
Έχει παρατηρηθεί συχνά ότι για παρόμοια σχήμα του δοκιμίου, η μονοαξονική αντοχή μειώνεται με τον όγκο. Για την εξήγηση του φαινομένου έχουν προταθεί πολλές θεωρίες, χωρίς όμως γενική αποδοχή. Οι πλέον ικανοποιητικές είναι εκείνες στις οποίες η επιφανειακή ενέργεια χρησιμοποιείται ως η βασική ιδιότητα του υλικού.

### 1.1.2.4 Επίδραση της ταχύτητας της δοκιμής

Με την αύξηση της ταχύτητας της δοκιμής αυξάνεται και η αντοχή του δοκιμίου. Εν τούτοις, μεταβολή του ρυθμού φόρτισης από  $10^{-8}/s$  σε  $10^2/s$  διπλασιάζει μόνον τη μετρούμενη αντοχή.

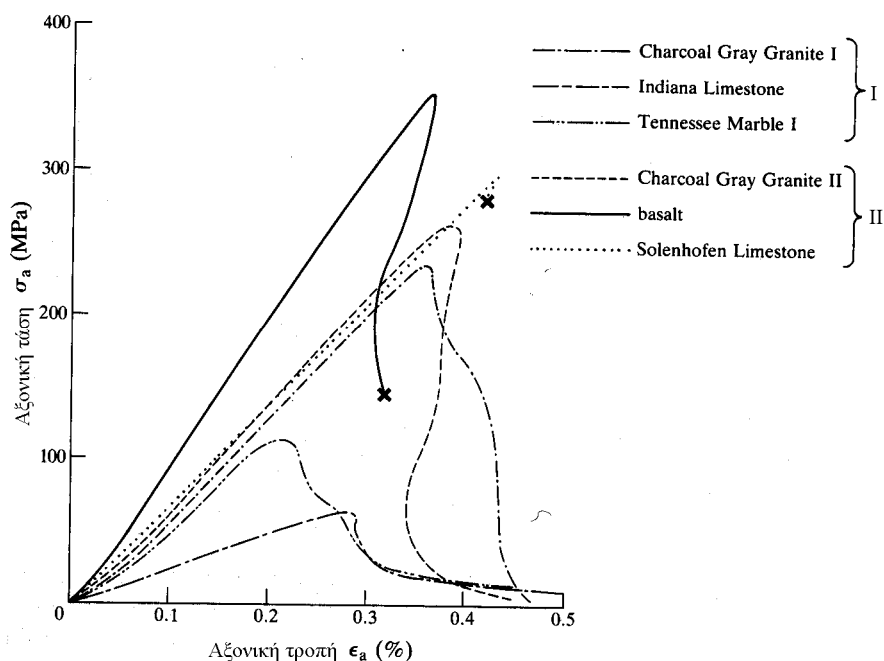
### 1.1.3 Συμπεριφορά μετά την μέγιστη αντοχή

Η μέτρηση της αντοχής μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής απαιτεί τη χρήση δύσκαμπτων μηχανών φόρτισης.



Σχήμα 7. Σχήμα καμπάνας της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων (Brady & Brown, 1993)

Οι εύκαμπτες μηχανές καταστρέφουν το δοκίμιο μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής της αντοχής. Στο Σχήμα 7 παρατηρούμε την εξήγηση του φαινομένου.



Σχήμα 8. Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης τύπου I και II (Waversick & Fairhurst, 1970)

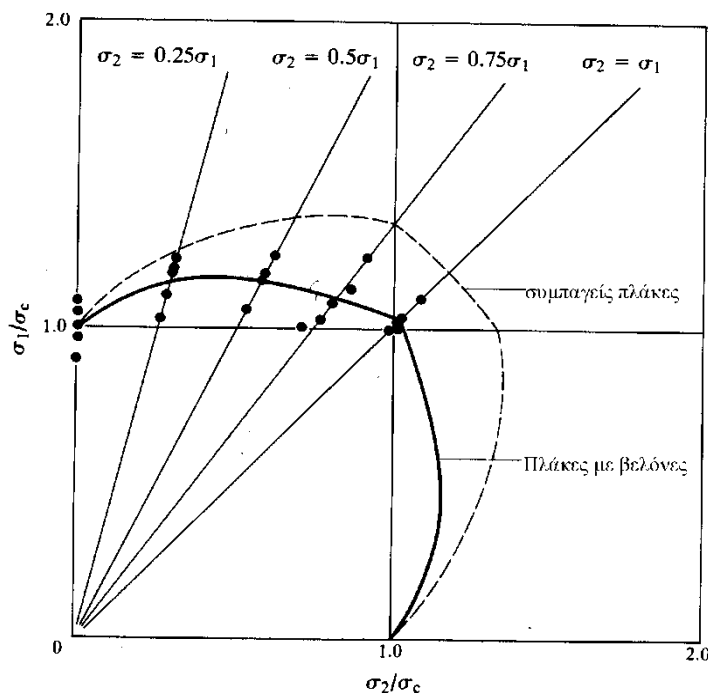
Η μετά τη θραύση συμπεριφορά του δοκιμίου διακρίνει τα πετρώματα σε δύο τύπους (Σχήμα 8). Ο τύπος I, μετά τη θραύση επιτυγχάνει αύξηση των παραμορφώσεων με τη μείωση του φορτίου. Αντίθετα, ο τύπος II, μετά τη θραύση, δεν μπορεί να επιτύχει σταθερή κατάσταση με αύξηση των παραμορφώσεων.

## 1.2 Πολυαξονική θλίψη

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.

### 1.2.1 Διαξονική θλίψη

Η δοκιμή διαξονικής θλίψης πραγματοποιείται με την εφαρμογή διαφορετικών ορθών τάσεων σε δύο ζεύγη εδρών ενός κυβικού, ορθογωνικού ή πλακοειδούς δοκιμίου πετρώματος. Τα αποτελέσματα της δοκιμής διαξονικής θλίψης μαρμάρου του Wombey φαίνονται στο Σχήμα 9. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν τη μικρή επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην τιμή της μέγιστης αντοχής.



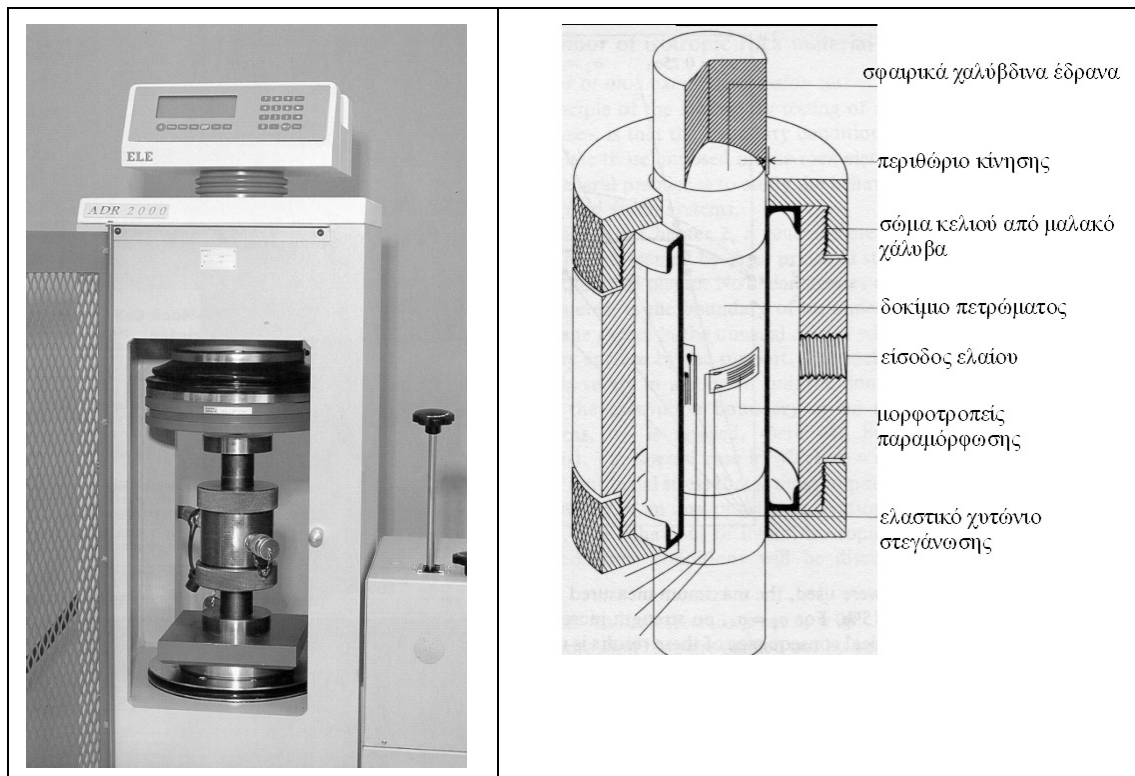
Σχήμα 9. Αποτελέσματα δοκιμής διαξονικής θλίψης για μάρμαρο από το Wombey (Brown, 1974).

### 1.2.2 Τριαξονική θλίψη

Κατά τη δοκιμή αυτή 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 10) μέσω του οποίου εφαρμόζεται πλευρική 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

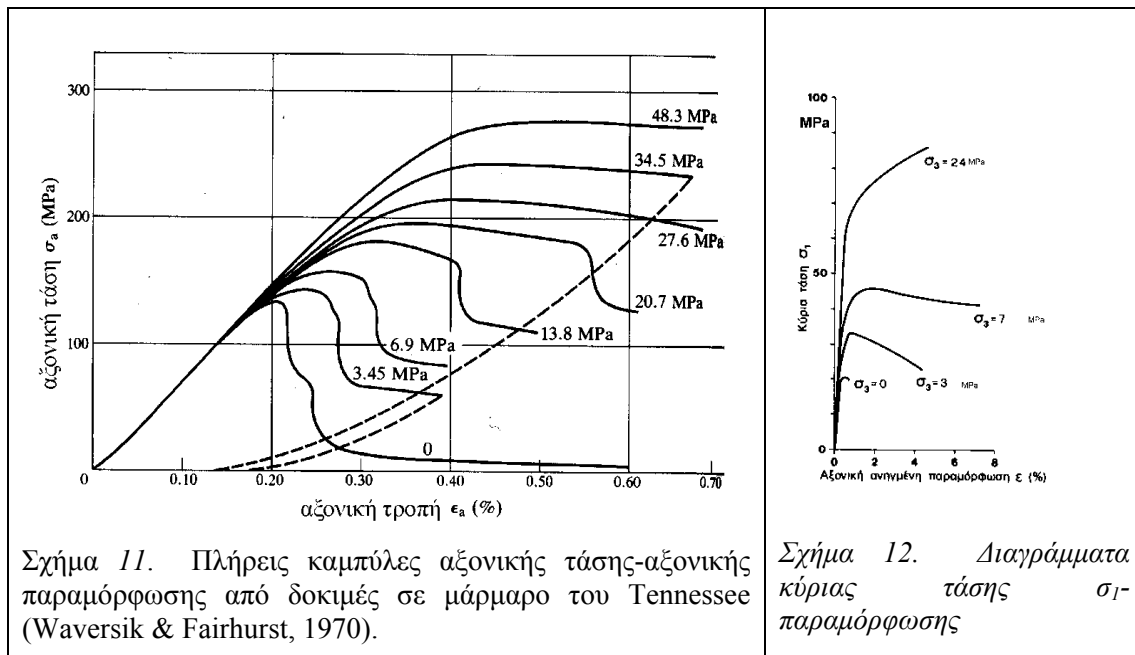


τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test) και μονοαξονικής θλίψης μπορεί να χαραχθεί η περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής του πετρώματος.



Σχήμα 10. Δοκίμιο υποβαλλόμενο σε τριαξονική θλίψη (Τμήμα Μ.Μ.Μ., Ε.Μ.Π.), και όψη του εσωτερικού του κελιού.

Στο Σχήμα 11 δίνονται οι καμπύλες τάσης παραμόρφωσης δοκιμών σε μάρμαρο του Tennessee, για διάφορες τιμές της πλευρικής πίεσης. Παρατηρείται, η μετατροπή της αρχικά ψαθυρής συμπεριφοράς του πετρώματος για χαμηλές τιμές της πλευρικής πίεσης, σε όλκιμη για μεγαλύτερες τιμές αυτής. Στο Σχήμα 12 παρατηρούμε για πολύ υψηλές τιμές της πλευρικής πίεσης την κράτυνση του δοκιμίου του πετρώματος



Στην περίπτωση που υπάρχει πίεση πόρων στο δοκίμιο, τότε η ευνοϊκή δράση της πλευρικής πίεσης αντισταθμίζεται. Όπως και στην εδαφομηχανική, δυνάμεθα να θεωρήσουμε ότι δρώσες τάσεις είναι οι ενεργές τάσεις  $\sigma'_{ij}$  που δίνονται από τη σχέση:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha \cdot u \cdot \delta_{ij}$$

όπου  $\sigma_{ij}$  οι ολικές τάσεις,  $u$  η πίεση των πόρων,  $\alpha$  συντελεστής με τιμή κοντά στη μονάδα, και  $\delta_{ij}$  το σύμβολο του Kronecker.

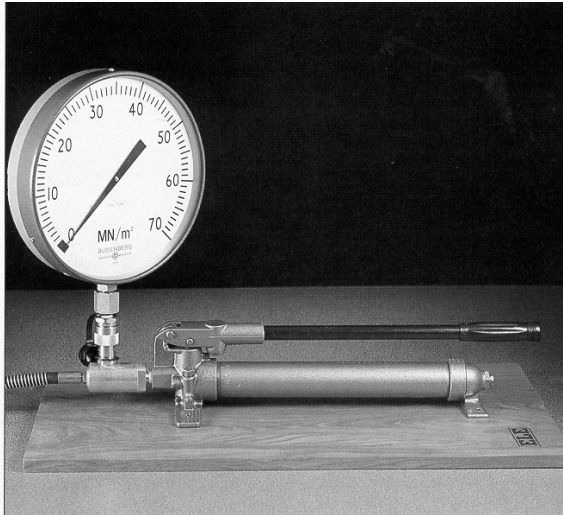
### 1.2.3 Πραγματική τριαξονική θλίψη

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 εισπίζεται υγρό.

### 1.2.4 Εργαστηριακή εφαρμογή

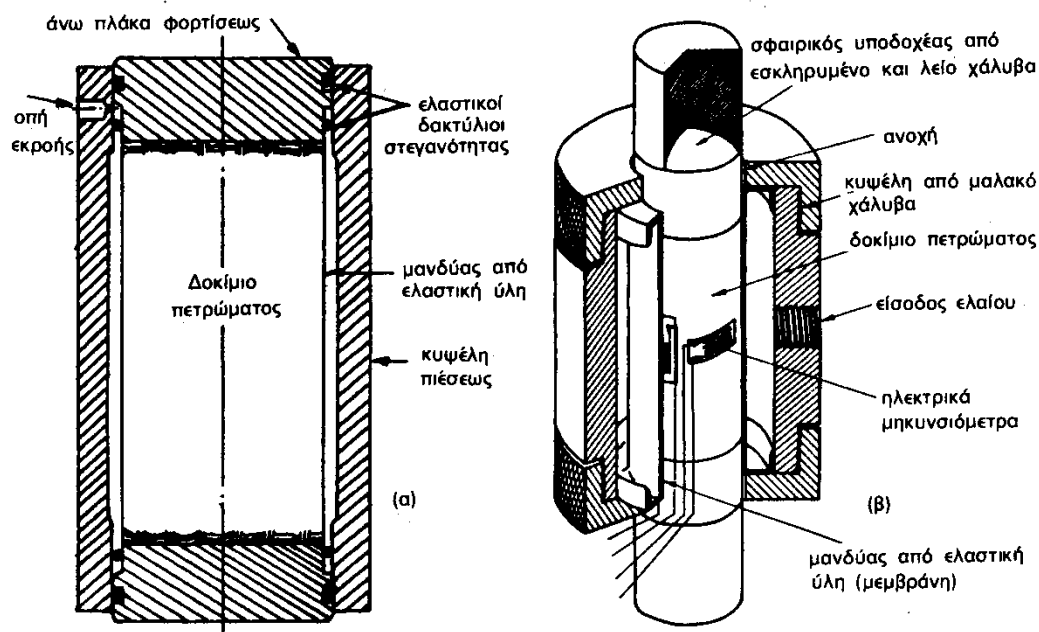
Χρησιμοποιούνται: μηχανή αξονικής θλίψης, χειροκίνητη υδραυλική αντλία, και κυψέλη τριαξονικής φόρτισης (Τσουτρέλης et al., 2000). Η μηχανή αξονικής θλίψης είναι TONIPACT 3000, Γερμανικής προέλευσης, με δυναμικότητα φόρτισης 3000 kN (300 tn), δυνατότητα ελέγχου του ρυθμού φόρτισης και εκτύπωσης της μέγιστης 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 μηχανοστάσια (strain gages), με μήκος 3 cm, δύο γέφυρες Wheatstone και δύο ενισχυτές σήματος.

Για την άσκηση της πλευρικής πίεσεως χρησιμοποιείται χειροκίνητη υδραυλική αντλία λαδιού με δυνατότητα ασκήσεως πίεσεως μέχρι 40 MPa. Στο Σχήμα 13 δίνεται μία τέτοια αντλία δυναμικότητας 70 MPa.

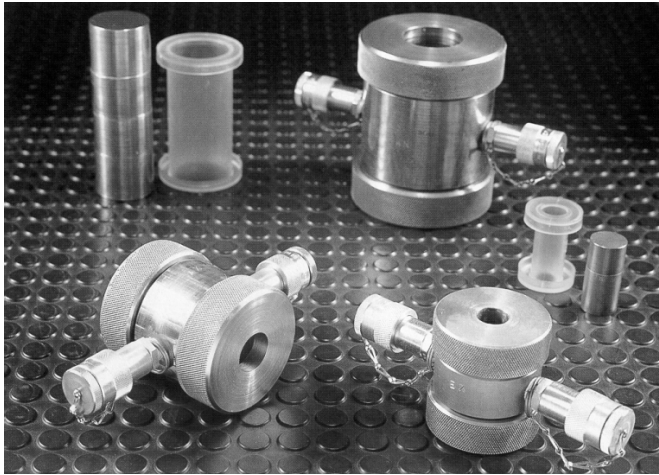


Σχήμα 13. Χειροκίνητη αντλία λαδιού για την άσκηση της πλευρικής πίεσης.

Η κυψέλη HOEK τριαξονικής φορτίσεως είναι του οίκου ELE (Σχήμα 14, Σχήμα 15) 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 δοκίμιου 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.

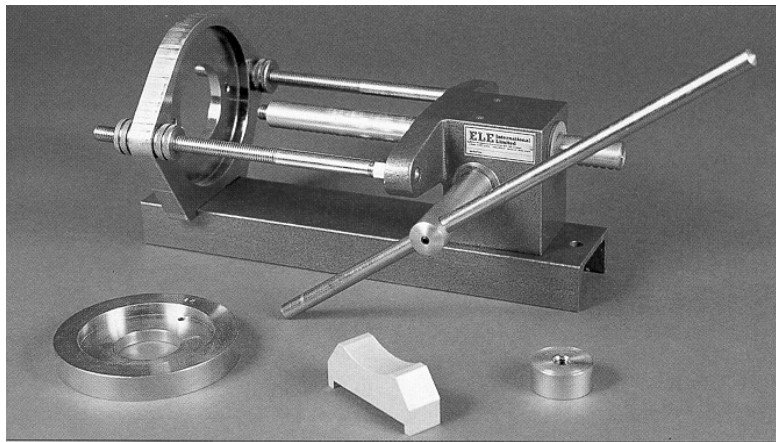


Σχήμα 14. Κυψέλη τριαξονικής φόρτισης δοκιμίων πετρωμάτων τύπου HOEK του οίκου ELE.



Σχήμα 15. Κυψέλες HOEK διαφόρων διαστάσεων.

Ο εξολκέας (Σχήμα 16) 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 16. Εξολκέας δοκιμίων 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

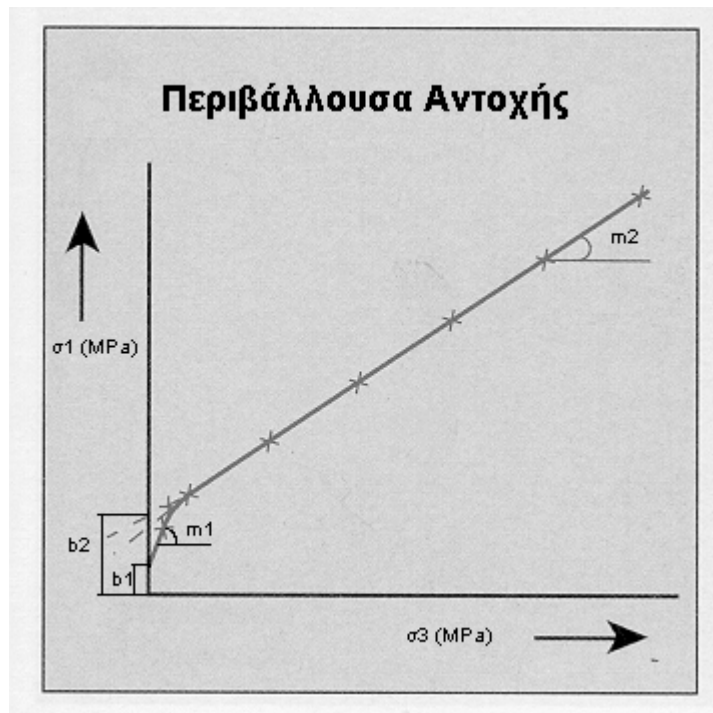
είναι: Φορτίο σε kN και η αξονική παραμόρφωση  $\varepsilon_a$ . Η συχνότητα καταγραφής των μεγεθών αυτών είναι ανά 5 kN. Για την περίπτωση των ηλεκτρικών μηκυνσιομέτρων το μέγεθος  $\varepsilon_a$  δίνεται από την ένδειξη του ενισχυτή αφού αφαιρεθούν από αυτή η αρχική του ένδειξη, και πολλαπλασιαζόμενη επί 4.

Η επεξεργασία αποτελεσμάτων περιλαμβάνει:

1. Σύντομη λιθολογική περιγραφή για το πέτρωμα από το οποίο προήλθαν τα δοκίμια.
2. Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις καθώς επίσης και εκείνες των προηγούμενων πειραμάτων του έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test) και της μονοαξονικής θλίψης χαράσσονται :

α) Τα διαγράμματα κύριας τάσης  $\sigma_1$ -παραμόρφωσης, σύμφωνα με το Σχήμα 12.

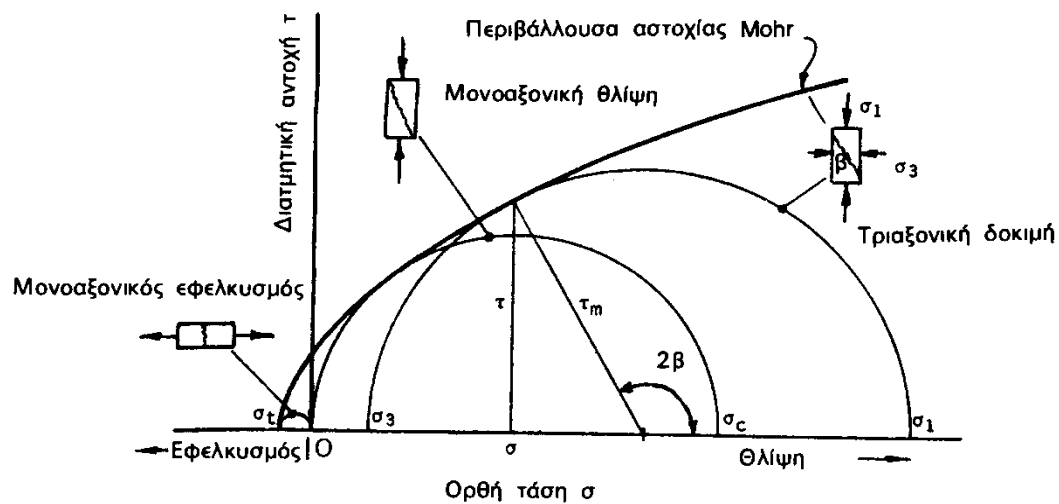
β) Το διάγραμμα με άξονες  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  και η περιβάλλουσα αντοχής σύμφωνα με το Σχ. 7.



Σχήμα 17. Περιβάλλουσα αντοχής πετρώματος

γ) Η περιβάλλουσα αστοχίας του πετρώματος κατά Mohr, σύμφωνα με το Σχήμα 18. Οι τιμές  $c$  και  $\phi$  του πετρώματος υπολογίζονται για συγκεκριμένες περιοχές της  $\sigma_3$ ,

σύμφωνα με τις σχέσεις:  $\phi_i = \arcsin \frac{m_i - 1}{m_i + 1}$ ,  $c_i = b_i \frac{1 - \sin \phi_i}{2 \cos \phi_i}$ .



Σχήμα 18. Χάραξη περιβάλλουσας αστοχίας πετρώματος κατά Mohr.

## 2 Δοκιμές 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 καθοριστεί, κυρίως γιατί υπάρχουν δυσκολίες στον προσδιορισμό μιας αξιόπιστης τιμής για την εφελκυστική αντοχή τους.

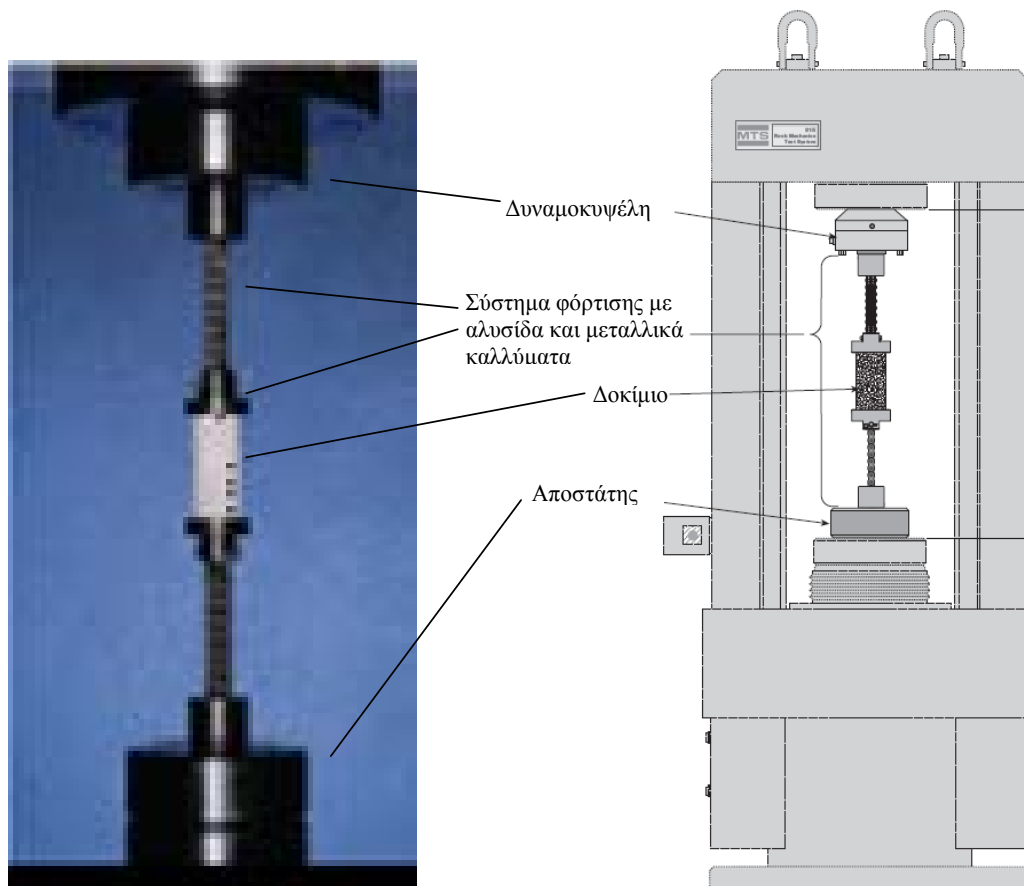
Η εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων έχει μεγάλη σημασία στον προσδιορισμό της απόκρισής τους κατά την υποβολή τους, τόσο σε στατικά φορτία όσον και σε δυναμικά (Roberts, 1977). Συνθήκες που πλησιάζουν τη στατική μονοαξονική εφελκυστική καταπόνηση παρατηρούνται κυρίως στα τοιχώματα υπογείων ανοιγμάτων, όπως σήραγγες, γεωτρήσεις κλπ. Η διάτρηση, η ανατίναξη, και η κοπή των πετρωμάτων με μηχανικά μέσα, δημιουργούν συνθήκες δυναμικής εφελκυστικής καταπόνησης. Παρά τη σημασία της αντοχής σε εφελκυσμό που σχετίζεται με τη δυνατότητα του πετρώματος να ανθίσταται σε δυναμικά ή στατικά φορτία, η τιμή της αντοχής αυτής χρησιμοποιείται ελάχιστα ως παράγοντας σχεδιασμού.

### 2.1 Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού

#### 2.1.1 Γενικά

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. Κάθε βάση τους στερεώνεται, με εποξική ρητίνη ή άλλο ισχυρό τσιμέντο, σε υποδοχείς από χάλυβα ή το αλουμίνιο, οι οποίοι πιάνονται από τη μηχανή (Σχήμα 19). Εναλλακτικά τα άκρα του των κυλινδρικών δοκιμίων τσιμεντάρονται σε μεταλλικά περιλαίμια. Η εφαρμογή της εφελκυστικής δύναμης πρέπει να ελαχιστοποιεί οποιαδήποτε περιστροφή του δοκιμίου. Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι να μορφωθούν, σε τόρνο, τα άκρα του δοκιμίου σε κώδωνα, ώστε κατά τη δοκιμή να έλκονται από ειδικές σιαγώνες. Αυτή η λύση, εντούτοις, απαιτεί μεγαλύτερο κόπο και κόστος, έτσι ώστε τα ειδικά διαμορφωμένα δοκίμια να χρησιμοποιούνται μόνο για έρευνα και τριαξονικές δοκιμές και όχι για τις τυπικές δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού.



Σχήμα 19. Πειραματική διάταξη εργαστηριακής δοκιμής άμεσου εφελκυσμού. Αριστερά: Στερέωση δοκιμίου στη μηχανή· Δεξιά: Σύστημα φόρτισης.

### 2.1.2 Θεωρία της δοκιμής

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.

$$\sigma_t = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D^2}$$

### 2.1.3 Πρότυπη διαδικασία

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:

#### 1. 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.



## 2. Εργαστηριακή συσκευή

(α) Μία κατάλληλη μηχανή χρησιμοποιείται για την εφαρμογή και τη μέτρηση του αξονικού φορτίου στο δοκίμιο. Θα πρέπει να είναι επαρκούς δυναμικότητας και ικανή να εφαρμόσει το φορτίο με ρυθμό σύμφωνα με τις απαιτήσεις της παραγρ. 3. Θα πρέπει να ελέγχεται σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα και να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των προδιαγραφών ASTM-E4 Verification of Testing Machines, είτε των βρετανικών προτύπων BS 1610-Grade A είτε των γερμανικών προτύπων DIN 51-220 και DIN 51-223 Klasse 1.

(β) Κατάλληλα κυλινδρικά μεταλλικά καλύμματα θα πρέπει να ενώνονται στις άκρες των δοκιμών 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.<sup>1</sup>

## 3. Πειραματική διαδικασία

(α) 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.

(β) Τα άκρα του δοκιμίου θα πρέπει να είναι γενικά ομαλά και επίπεδα<sup>2</sup>. 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.

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

(δ) Η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να μετρείται με ακρίβεια 0.1mm με τον υπολογισμό του μέσου όρου δύο μετρήσεων της διαμέτρου κάθετα ή μια στην άλλη περίπτωση 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.

(ε) 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 δοκιμών. 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  $50\% \pm 5\%$ <sup>3</sup>. 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.

<sup>1</sup> Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D2936-95, μία αλυσίδα με κρίκους ή με κυλίνδρους κατάλληλης δυναμικότητας θεωρούνται αποδοτικές για αυτήν την εφαρμογή. Επειδή η αλυσίδα κυλίνδρων κάμπτεται ελεύθερα μόνο σε ένα επίπεδο, το άνω και κάτω τμήμα της τοποθετούνται κάθετα το ένα στο άλλο για να μειώσουν την κάμψη στο δείγμα.

<sup>2</sup> Στις άμεσες δοκιμές εφελκυσμού, η κατάσταση των ακρών των δοκιμών όσον αφορά το βαθμό επιπεδότητας και ομαλότητας λειότητας δεν είναι τόσο κρίσιμη όσο στις δοκιμές θλίψης. Επιφάνειες άκρων όπως προκύπτουν από την κοπή με αδαμαντοτροχό είναι επαρκείς.

<sup>3</sup> Αναγνωρίζεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις για κάποια υλικά (π.χ. σχιστόλιθος), μπορεί να είναι επιθυμητό να εκτελεστούν δοκιμές και με άλλες συνθήκες υγρασίας, π.χ. σε κορεσμένα δείγματα ή σε δείγματα ξηραμένα στους  $105^{\circ}\text{C}$ . Τέτοιες συνθήκες θα πρέπει να σημειώνονται στην έκθεση της δοκιμής.

(στ) 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.

(ζ) 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.

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

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

#### 4. Υπολογισμοί

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

#### 5. Έκθεση αποτελεσμάτων

Θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται τα παρακάτω:

(α) Λιθολογική περιγραφή του πετρώματος.

(β) Προσανατολισμός του άξονα της φόρτισης σε σχέση με την ανισοτροπία του δοκιμίου, π.χ. επίπεδα διαστρώσεως, φυλλώσεις κ.λπ.

(γ) Η πηγή του δείγματος, συμπεριλαμβανομένων: γεωγραφική θέση, βάθος και προσανατολισμός, ημερομηνίες δειγματοληψίας και ιστορικό και περιβάλλον αποθήκευσης.

(δ) Αριθμός δοκιμών που υποβλήθηκαν στη δοκιμή.

(ε) Διάμετρος και ύψος δοκιμίων.

(στ) Περιεκτικότητα σε νερό και βαθμός κορεσμού κατά το χρόνο της δοκιμής.

(ζ) Διάρκεια δοκιμής ή/και ρυθμός τάσης φόρτισης.

(η) Ημερομηνία της δοκιμής και τύπος μηχανής της δοκιμής.

(θ) Τρόπος αστοχίας, π.χ. θέση και προσανατολισμός της επιφάνειας αστοχίας.

(ι) Οποιοσδήποτε άλλες παρατηρήσεις ή τυχόν διαθέσιμες φυσικές ιδιότητες, όπως ειδική πυκνότητα, πορώδες και η διαπερατότητα, αναφέροντας τη μέθοδο προσδιορισμού της κάθε μίας.

(ια) 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).

(ιβ) 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.

Η προτεινόμενη διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής σύμφωνα με την προδιαγραφή της ASTM D 2936-95 είναι παρόμοια, με μικρές διαφοροποιήσεις, όπως:

Η διάμετρος των μεταλλικών καλυμμάτων θα πρέπει να είναι μεταξύ D και 1.1 D, όπου D η διάμετρος του δοκιμίου. Το πάχος τους θα πρέπει να είναι τουλάχιστο 30 mm.

Το πάχος της στρώσης συγκόλλησης πρέπει να είναι τουλάχιστο 1.5 mm και ομοιόμορφο σε όλη την επιφάνεια των άκρων του δοκιμίου ώστε να εξασφαλίζεται η παραλληλότητα μεταξύ της επίπεδης επιφάνειας των μεταλλικών καλυμμάτων. Αυτή πρέπει να ελέγχεται με μέτρηση του μήκους του συστήματος καλύμματα-δοκίμιο σε τρεις θέσεις της περιφέρειας των μεταλλικών καλυμμάτων που σχηματίζουν τόξα 120° μεταξύ τους. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ αυτών των μετρήσεων πρέπει να είναι μικρότερη από 0.1 mm για κάθε 25 mm διαμέτρου δοκιμίου. Κατάλληλο συγκολλητικό μέσο θεωρούνται οι εποξικές ρητίνες υψηλής συνεκτικότητας

Ο ρυθμός φόρτισης πρέπει να διατηρείται σταθερός έτσι ώστε η αστοχία του δοκιμίου να επέλθει σε χρόνο 5 έως 15 min.

#### 2.1.4 Εφαρμογή της δοκιμής<sup>4</sup>

Δοκίμια γρανίτη της περιοχής Inada (Ιαπωνία) υποβλήθηκαν σε δοκιμή άμεσου εφελκυσμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών κατεγράφησαν αξονικές και διαμετρικές τροπές των δοκιμίων και υπολογίστηκε η παραμορφωσιμότητα τους σε εφελκυσμό.

Ο γρανίτης Inada είναι αρκετά τεκμηριωμένος στην διεθνή βιβλιογραφία αφού πολύ συχνά χρησιμοποιείται για τη μελέτη εργαστηριακών προβλημάτων μηχανικής πετρωμάτων. Πρόκειται για βιοτιτικό γρανίτη μέσου μεγέθους κόκκων, που αποτελείται από 36% χαλαζία, 32% πλαγιόκλαστο, 28% αστρίους και 4% βιοτίτη. Έχει ξηρή πυκνότητα 2.63 g/cm<sup>3</sup>, πορώδες 1 % και ταχύτητα διάδοσης διαμήκων κυμάτων 4000 m/sec.

Τα δοκίμια ελήφθησαν, ύστερα από πυρηνοληψία με εργαστηριακό γεωτρύπανο, από πρισματικά δείγματα που συγκεντρώθηκαν από λατομείο της περιοχής, αφού πρώτα σημειώθηκε ο προσανατολισμός τους σε σχέση με αρχική τους θέση *in situ*. Τα κυλινδρικά δοκίμια είχαν διάμετρο 30 mm και μήκος 60 mm. Πριν από τη δοκιμή τα δοκίμια ξηράνθηκαν σε θερμοκρασία 60 °C και αποθηκεύτηκαν σε αφυγραντήρα έως ότου ψυχθούν σε θερμοκρασία δωματίου.

Η εκτέλεση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε σερβο-υδραυλική συσκευή φόρτισης (τύπου MTS-808). Οι άκρες των δοκιμίων στερεώθηκαν με ισχυρή ρητίνη σε κυλινδρικά μεταλλικά καπάκια μέσω των οποίων ασκήθηκαν οι εφελκυστικές δυνάμεις. Η αντοχή της ρητίνης ήταν αρκετή ώστε να μπορεί να φέρει εφελκυστικές τάσεις τουλάχιστο 16 MPa. Οι τροπές μετρήθηκαν με 4 ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα κολλημένα στην περιφέρεια των δοκιμίων.

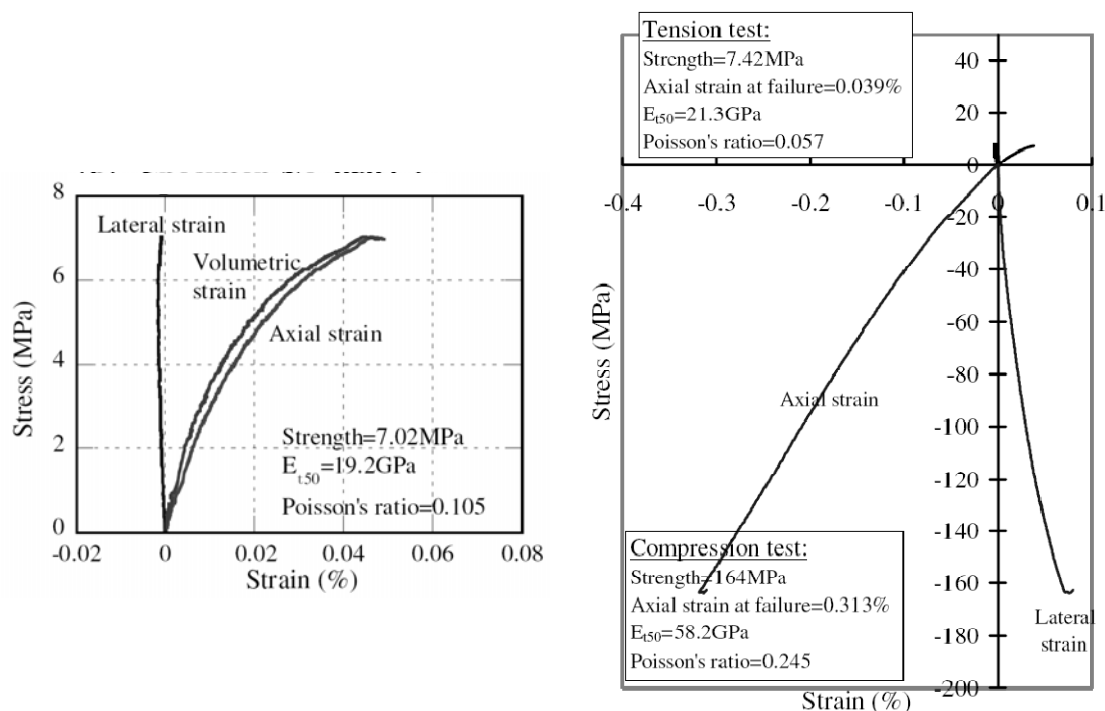
Όλα τα μηκυνσιόμετρα έδειξαν παρόμοιες ενδείξεις και συνεπώς η κατανομή των εφελκυστικών τάσεων μέσα στο δοκίμιο ήταν αρκούντως ομοιόμορφη. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με σταθερό ρυθμό μετατόπισης ίσο με 0.0036 mm/min, από τον οποίο προκύπτει ρυθμός μεταβολής της τροπής  $1 \times 10^{-6}$ /s.

Τυπικά διαγράμματα εφελκυστικής τάσης – αξονικής τροπής, εφελκυστικής τάσης – διαμετρικής τροπής και εφελκυστικής τάσης – ογκομετρικής τροπής δίνονται στο Σχήμα 20α. Τα διαγράμματα τάσης-τροπής είναι μη γραμμικά σε όλο το φάσμα της φόρτισης, από το αρχικό τμήμα έως την αστοχία. Επιπλέον, το εφαπτομενικό μέτρο του Young σε εφελκυσμό μειώνεται με την αύξηση της εφελκυστικής τάσης.

Στο Σχήμα 20β παρατίθενται για σύγκριση τα διαγράμματα τάσης-τροπής σε θλίψη και εφελκυσμό. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες είναι συνεχείς στο μηδέν (δηλ. η μία εμφανίζεται σαν συνέχεια της άλλης). Ενώ όμως το εφαπτομενικό μέτρο του

<sup>4</sup> Πειραματικά στοιχεία από την εργασία των Lin et. al. (2003).

Young μειώνεται με την αύξηση της εφελκυστικής τάσης, η αύξηση της θλιπτικής τάσης προκαλεί αύξηση του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη.



Σχήμα 20. (α) Τυπικά αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών άμεσου εφελκυσμού. (β) Σύγκριση διαγραμμάτων τάσης-τροπής σε θλίψη και εφελκυσμό. (Στα διαγράμματα αυτά οι θλιπτικές και οι θλιπτικές τροπές τάσης θεωρούνται αρνητικές.)

Η μέση εφελκυστική αντοχή του γρανίτη προέκυψε ίση με 7.10 MPa με μέτρο ελαστικότητας 21.3 GPa και λόγο Poisson 0.06.

## 2.2 Δοκιμή Αντιδιαμετρικής Θλίψης (Βραζιλιανή δοκιμή)<sup>5</sup>

### 2.2.1 Γενικά

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.

<sup>5</sup> Πειραματικά στοιχεία από την εργασία των Τσουντρέλης, Γκίκας, Νομικός (2000).

### 2.2.2 Θεωρία της δοκιμής

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  $\sigma_g$  και θλίψεως  $\sigma_r$ , κατά μήκος της διαμέτρου φορτίσεως Y-Y'.

Η μεταβολή των τάσεων αυτών κατά μήκος της Y-Y' δίνεται στο Σχήμα 21, για την περίπτωση όπου  $\theta = \tan^{-1}(1/12) \Rightarrow 2\theta = 9,5^\circ$ . Από αυτήν προκύπτει ότι η τάση  $\sigma_g$ , με εξαίρεση τις αντιδιαμετρικές περιοχές φορτίσεως είναι εφελκυστική στο μεγαλύτερο τμήμα της διαμέτρου Y-Y' και ταυτόχρονα σταθερή.

Η εφελκυστική αυτή τάση δίνεται από τη σχέση:

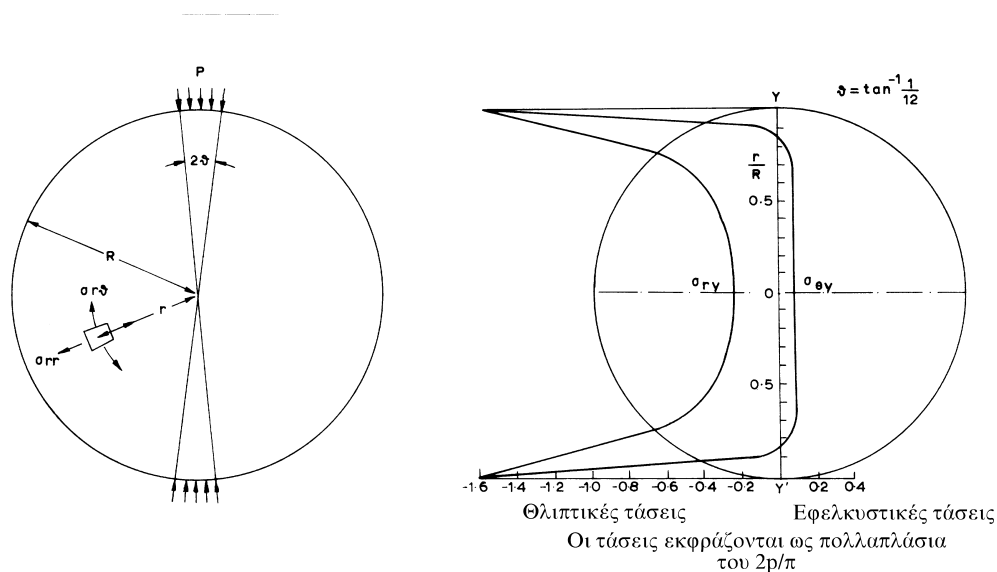
$$\sigma_g = -\frac{P}{\pi \cdot R \cdot t} \cdot \left\{ \frac{\sin 2\theta}{\theta} - 1 \right\} \quad (1)$$

όπου: P = επιβαλλόμενη δύναμη τη στιγμή της αστοχίας.

R = ακτίνα του μορφής δίσκου δοκιμίου.

t = πάχος του μορφής δίσκου δοκιμίου.

$2\theta$  = τόξο γωνίας στο οποίο δρα ομοιόμορφα η δύναμη P επί του δοκιμίου.



Σχήμα 21. Μεταβολή της εφελκυστικής και της θλιπτικής τάσης κατά μήκος της διαμέτρου Y-Y' για φόρτιση υπό γωνία  $2\theta = 9.5^\circ$  (Fairhurst, 1964).

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

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

όπου  $D=2R$ =διάμετρος του δοκιμίου.

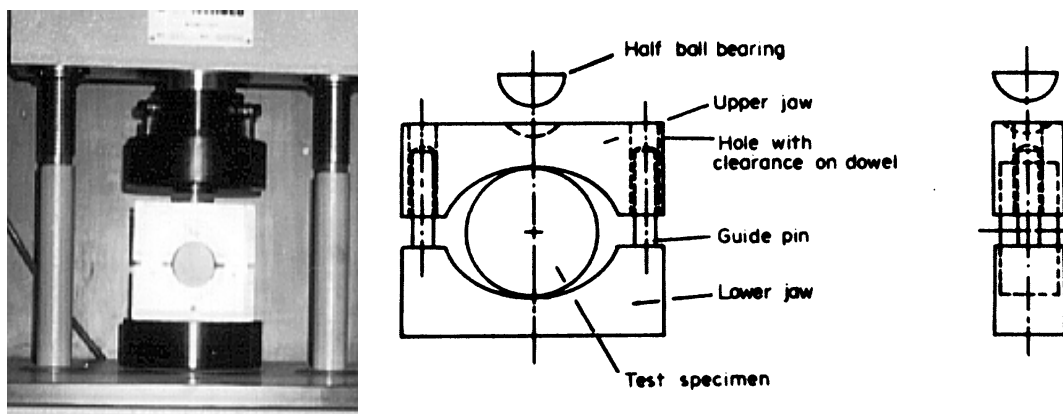
Οι σχέσεις (1) και (2) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντοχής σε εφελκυσμό του πετρώματος, υπό την προϋπόθεση ότι κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρείται έναρξη αστοχίας του δοκιμίου κατά μήκος της διαμέτρου φορτίσεως.

### 2.2.3 Πρότυπη διαδικασία

Σύμφωνα με τις οδηγίες της ISRM (1978), η δοκιμή πραγματοποιείται σε δοκίμια πετρώματος μορφής δίσκου (Σχήμα 22). 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.



Σχήμα 22. Πειραματική διάταξη δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης

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  $10-14^\circ$ , 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.

### 2.2.4 Εφαρμογή δοκιμής

Πέντε δοκίμια από μάρμαρο Βόλακα και άλλα πέντε από μάρμαρο Νάξου εξετάστηκαν με τη δοκιμή αυτή. Το πρώτο είναι δολομιτικό (περιέχει μαγνησίτη σε μερική αντικατάσταση του ασβεστίτη) και λεπτοκρυσταλλικό ( $\leq 0.5\text{mm}$ ). Το μάρμαρο Νάξου είναι πλέον αδροκρυσταλλικό ( $\leq 3.0\text{mm}$ ). Και στους δύο τύπους μαρμάρου ο προσανατολισμός της δειγματοληψίας ήταν παράλληλος προς το επίπεδο σχιστότητας, τα δε δοκίμια τοποθετήθηκαν στην συσκευή έτσι, ώστε η διάμετρος φόρτισης να είναι κάθετη προς το επίπεδο σχιστότητας. Χρησιμοποιήθηκε υδραυλική χειροκίνητη μηχανή της εταιρείας ELE, που αποτελείται από:

Δακτύλιο προσαρμογής του δοκιμίου, αποτελούμενο από δύο σιαγόνες φόρτισης, σχεδιασμένες κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εφάπτονται στο μορφής δίσκου δοκίμιο πετρώματος, σε δύο διαμετρικά αντίθετες επιφάνειες κατά ένα μήκος τόξου  $10^\circ$  τη στιγμή της αστοχίας (Σχήμα 22).

Κατάλληλη μηχανή για την εφαρμογή και μέτρηση θλιπτικού φορτίου στο δοκίμιο. Η μηχανή είναι δυναμικότητας 50 kN, χειροκίνητη.

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα αποτελέσματα της δοκιμής για τους δύο τύπους μαρμάρου:

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Μάρμαρο Βόλακα

| α/α<br>Δοκιμίου | Πάχος<br>Δοκιμίου<br>(mm) | Διάμετρος<br>Δοκιμίου -<br>D (mm) | Φορτίο<br>Αστοχίας<br>(KN) | Τάση<br>Αστοχίας<br>(MPa) | Μέσος<br>Όρος<br>(MPa) | Τυπική<br>Απόκλιση<br>(MPa) |
|-----------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 1               | 27,2                      | 54,7                              | 16                         | 6,85                      | 7,96                   | 1,38<br>(17,3%)             |
| 2               | 26,7                      | 54,7                              | 18,4                       | 8,02                      |                        |                             |
| 3               | 26,35                     | 54,7                              | 18,8                       | 8,3                       |                        |                             |
| 4               | 27,1                      | 54,7                              | 24                         | 10,3                      |                        |                             |
| 5               | 26,6                      | 54,7                              | 14,4                       | 6,3                       |                        |                             |

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Μάρμαρο Νάξου

| α/α<br>Δοκιμίου | Πάχος<br>Δοκιμίου<br>(mm) | Διάμετρος<br>Δοκιμίου -<br>D (mm) | Φορτίο<br>Αστοχίας<br>(KN) | Τάση<br>Αστοχίας<br>(MPa) | Μέσος<br>Όρος<br>(MPa) | Τυπική<br>Απόκλιση<br>(MPa) |
|-----------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 1               | 27                        | 54,7                              | 15,6                       | 6,72                      | 6,08                   | 0,61<br>(10%)               |
| 2               | 27,1                      | 54,7                              | 14                         | 6,01                      |                        |                             |
| 3               | 26,6                      | 54,7                              | 11,4                       | 4,99                      |                        |                             |
| 4               | 27,2                      | 54,7                              | 14,2                       | 6,08                      |                        |                             |
| 5               | 26,4                      | 54,7                              | 15                         | 6,61                      |                        |                             |

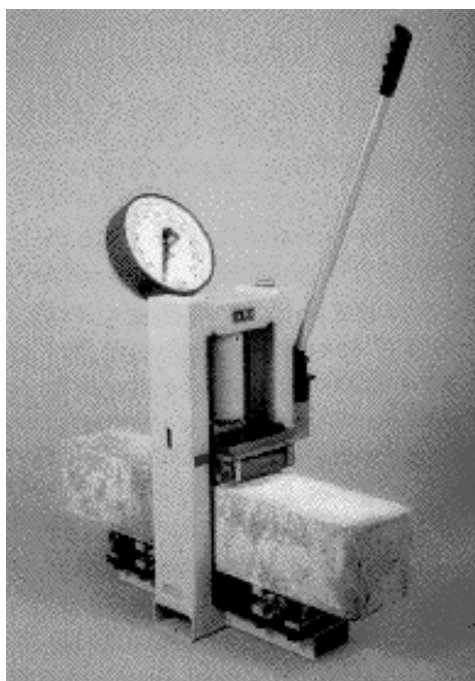
Οι χαμηλότερες τιμές εφελκυστικής αντοχής του μαρμάρου Νάξου, οφείλονται κατά ένα μεγάλο βαθμό στην αδροκρυσταλλική του δομή, η οποία συντείνει στην

δημιουργία στιλπνών μικρο-επιπέδων ασυνεχειών, όπως αυτά καθορίζονται από τις κοινές πλευρές των καλά σχηματισμένων κρυστάλλων, με συνέπεια να υφίστανται περισσότερα σημεία έναρξης της αστοχίας. Πειραματικά έχει ευρεθεί ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής είναι πιο σταθερά και αξιόπιστα, εάν η διάμετρος  $D$  του δοκιμίου είναι 10 φορές μεγαλύτερη του μέγιστου μεγέθους κόκκου του πετρώματος, κάτι που στο παρόν πείραμα ισχύει.

## 2.3 Δοκιμή κάμψης τριών σημείων<sup>6</sup>

### 2.3.1 Γενικά

Κατά τη δοκιμή αυτή κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια πετρώματος υποβάλλονται σε σημειακή φόρτιση περί το μέσο τους Σχήμα 23, 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  $\ell$  χωρίς μεταβολή των άλλων διαστάσεων του δοκιμίου.



Σχήμα 23. Πειραματική διάταξη δοκιμής πετρώματος σε κάμψη

### 2.3.2 Θεωρία της δοκιμής

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:

$$\sigma^k = \frac{M_z}{W} = \frac{M_z}{I_z / y} = \frac{M_z}{I_z} y \quad (1)$$

<sup>6</sup> Πειραματικά στοιχεία από την εργασία των Τσουτρέλης, Γκίκας, Νομικός (2000)



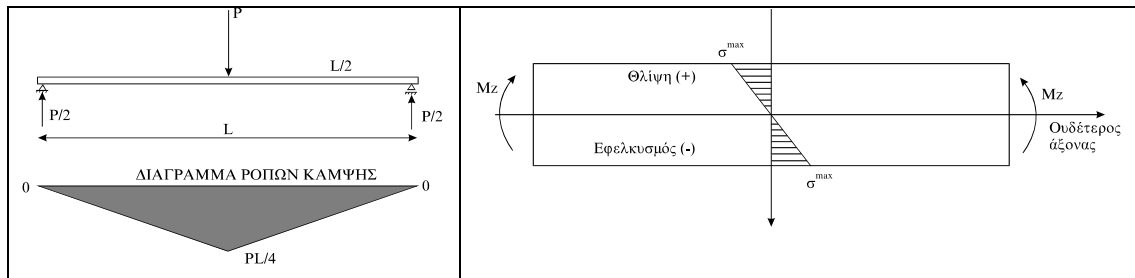
όπου:  $W$  = η ροπή αντίστασης της διατομής,

$Mz$  = η ροπή κάμψης,

$Iz$  = η ροπή αδρανείας της διατομής,

$y$  = η απόσταση της ίνας της δοκού από τον ουδέτερο άξονα.

Στο Σχήμα 24 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.



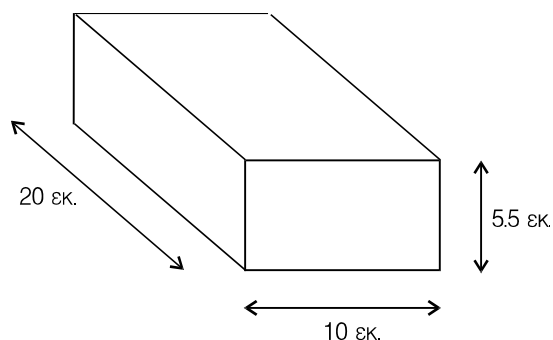
Σχήμα 24. Στατικά μεγέθη δοκιμής σε κάμψη

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 (1) η τάση αυτή είναι:

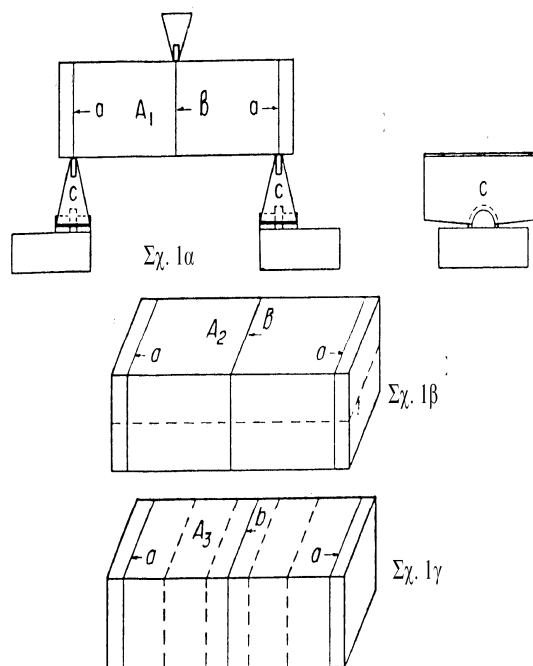
$$\sigma^{\max} = \frac{PL/4}{bh^3/12} \cdot \frac{h}{2} = \frac{3PL}{2bh^2}, \quad (2)$$

### 2.3.3 Πρότυπη διαδικασία

Πρότυπες οδηγίες εκτέλεσης της δοκιμής δίνονται από την ASTM (1985). Οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι περίπου 5.5x10x20 cm (Σχήμα 25). Κάθε δοκίμιο τοποθετείται στη μηχανή κάμψης σύμφωνα με το Σχήμα 26α. Πριν από τη φόρτιση χαράσσονται τρεις γραμμές σε κάθε δοκίμιο (Σχήμα 26β). 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 25. Διαστάσεις δοκιμίων σύμφωνα με ASTM (1985)



Σχήμα 26. Θέσεις έδρασης και φόρτισης σύμφωνα με την προδιαγραφή της ASTM (1985)

### 2.3.4 Εφαρμογή δοκιμής

Χρησιμοποιείται μηχανή κάμψης του οίκου ELE, Αγγλικής προέλευσης, τύπου EL33-604 με κατάλληλη προσαρμογή των στηριγμάτων έδρασης επί των οποίων τοποθετείται το δοκίμιο.

Η δοκιμή πραγματοποιείται σε 3 διαφορετικούς τύπους μαρμάρου.

- **Μάρμαρο Διονύσου (Ασβεστιτικό μεσόκοκκο μάρμαρο)**

Το μάρμαρο αυτό διαθέτει δύο κύριες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις. Αυτή που επικρατεί είναι περίπου 0.45 mm (μεσόκοκκο) και η άλλη που είναι μικρότερη περίπου 0.15 mm. Και τα δύο μεγέθη κρυστάλλων βρίσκονται σε ανάμειξη μεταξύ τους. Στο πέτρωμα περιέχονται ακόμη σε επουσιώδη ποσότητα μεταλλικοί αδιαφανείς κόκκοι (μέγεθος μέχρι 0.11 mm) που είναι διάσπαρτοι, και λίγοι μεμονωμένοι ή σε συσσωματώματα κόκκοι χαλαζία (μέγεθος κόκκων μέχρι 0.28 mm, μέγεθος συσσωματωμάτων μέχρι 0,8 mm), καθώς επίσης και φυλλάρια μοσχοβίτη που συγκεντρώνονται σε μικροδιακλάσεις μαζί με ασβεστιτικό και λίγο δολομιτικό υλικό.

- **Μάρμαρο Βώλακα (Δολομιτικό μάρμαρο)**

Στο μάρμαρο αυτό επικρατούν δύο κύριες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις σε ανάμειξη. Η μία είναι περίπου 0.17 mm και η δεύτερη περίπου 0.40 mm. Τοπικά και σε μικροδιακλάσεις παρατηρείται και λίγος ασβεστίτης σκούρου χρώματος, λόγω των μικροσκοπικών προσμίξεων που περιέχονται σ' αυτόν. Σε πολύ μικρή κλίμακα ο ασβεστίτης αντικαθιστά των δολομίτη (αρχικό στάδιο αποδολομιτίωσης).

- **Μάρμαρο Νάξου (Ασβεστιτικό χονδρόκοκκο μάρμαρο)**

Μέσο μέγεθος κόκκων περίπου 2.5 mm. Σπανίως παρατηρούνται σαν ξένες προσμίξεις αποστρογγυλεμένοι κόκκοι χαλαζία (0.5%), μεγέθους 0.08 mm.

Η κοπή τους έγινε με χρήση αδαμαντοτροχών. Επίσης έγινε λείανση των επιφανειών φόρτισης (10x20 cm), έτσι ώστε να είναι όσο γίνεται λείες, και παράλληλες μεταξύ τους. Για την κατασκευή των δοκιμών ελήφθη υπόψη και ο προσανατολισμός της στρώσης που έχει ο κάθε τύπος μαρμάρου (Σχήμα 27).

Αρχικά εφαρμόζεται φορτίο 10 lb (0.05 kN), και ευθυγραμμίζεται ξανά το δοκίμιο σύμφωνα με τον τρόπο που περιγράφηκε πιο πάνω. Στην συνέχεια συνεχίζεται η φόρτιση με χαμηλό ρυθμό φόρτισης (<1000 lb/min), μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η αντοχή σε κάμψη για κάθε δοκίμιο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{3W\ell}{2bt^2}$$

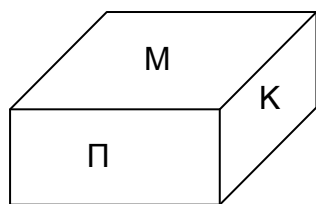
όπου R η αντοχή σε κάμψη (kPa), W το Φορτίο αστοχίας (kN),  $\ell$  το μήκος του ανοίγματος μεταξύ των ακμών στήριξης (m), b το πλάτος του δοκιμίου (m), (t) το πάχος του δοκιμίου (m). Ο Πίνακας 1 δίνει τα γεωμετρικά στοιχεία και τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα Δοκιμής σε κάμψη

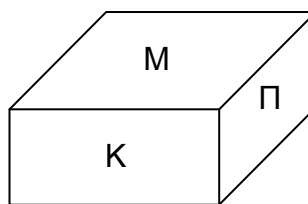
| A/A | ΜΗΚΟΣ l (m) | ΠΑΧΟΣ τ (m) | ΠΛΑΤΟΣ b (m) | ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ W (kN) | ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ R (kPa) |
|-----|-------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------------------|
| Δ1  | 0.178       | 0.055       | 0.101        | 10.2                  | 8913.84                 |
| Δ2  | 0.178       | 0.056       | 0.100        | 12.8                  | 10897.96                |
| Δ3  | 0.178       | 0.055       | 0.100        | 10.4                  | 9179.50                 |
| Δ4  | 0.178       | 0.056       | 0.098        | 9.7                   | 8427.15                 |
| Δ5  | 0.178       | 0.056       | 0.098        | 10.1                  | 8774.66                 |

Παρατηρούμε ότι το δεύτερο δοκίμιο (Δ2) έχει μια αυξημένη αντοχή σε σχέση με τα άλλα δοκίμια. Αυτό οφείλεται, στο ότι η επιβολή φορτίου σ' αυτό το δοκίμιο έγινε με διαφορετικό ρυθμό - (υψηλό, δυναμικό χαρακτήρα)- από αυτό που αναφέρουν οι προδιαγραφές (< 1000lb / min δηλαδή 5kN/ min).

Κανονικά απαιτούνται 3 δοκίμια για κάθε μάρμαρο και για κάθε συγκεκριμένο προσανατολισμό, και από αυτές τις δοκιμές λαμβάνεται ο μέσος όρος. Στο πείραμα, και τα πέντε δοκίμια είναι μαρμάρου Βόλακα, με την διαφορά ότι τα πρώτα τρία δοκίμια είχαν διαφορετική διάταξη ως προς τον προσανατολισμό κοπής στο λατομείο. Ο Πίνακας 2 δίνει τις μέσες αντοχές των δοκιμών.



Διάταξη δοκιμίων (Δ1, Δ2, Δ3 )



Διάταξη δοκιμίων (Δ4, Δ5 )

Σχήμα 27. Διάταξη δοκιμίων. (M: Μέτωπο, Π: Πρόσωπο, Κ: Κεφάλι)

Πίνακας 2. Μέσες αντοχές δοκιμίων

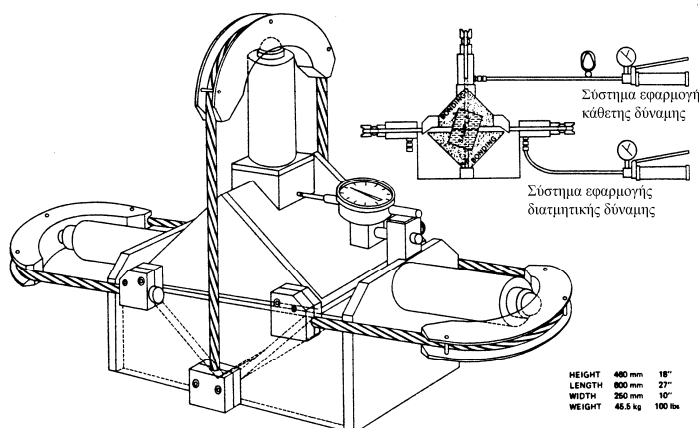
| Δοκίμια            | Αντοχή R [kPa] |
|--------------------|----------------|
| Δ1, Δ2, Δ3         | 9663,80        |
| Δ4, Δ5             | 8600,90        |
| Δ1, Δ2, Δ3, Δ4, Δ5 | 9238,62        |

### 3 Δοκιμή άμεσης διάτμησης

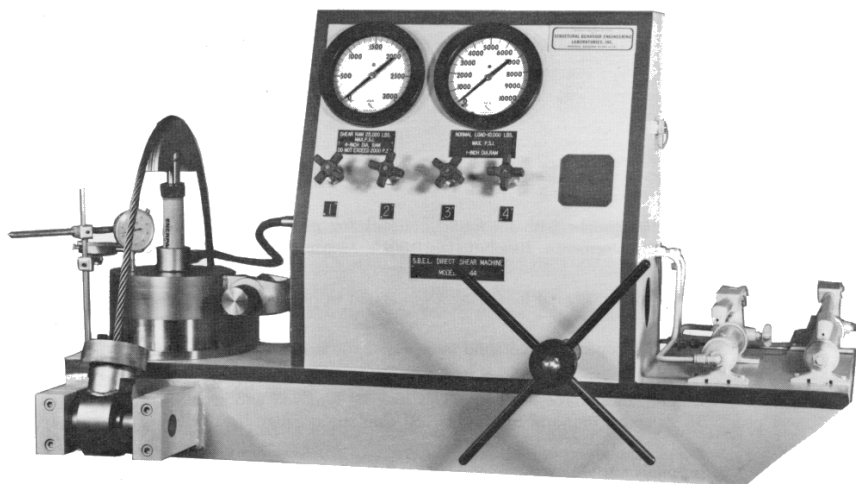
#### 3.1 Γενικά

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 (Σχήμα 27α) ή σταθερή σε μόνιμη θέση στο εργαστήριο (Σχήμα 27β). 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.



(α).- Φορητή συσκευή για την εκτέλεση δοκιμής απευθείας διάτμησης (Field Shear Box, μοντέλο WF 40900).

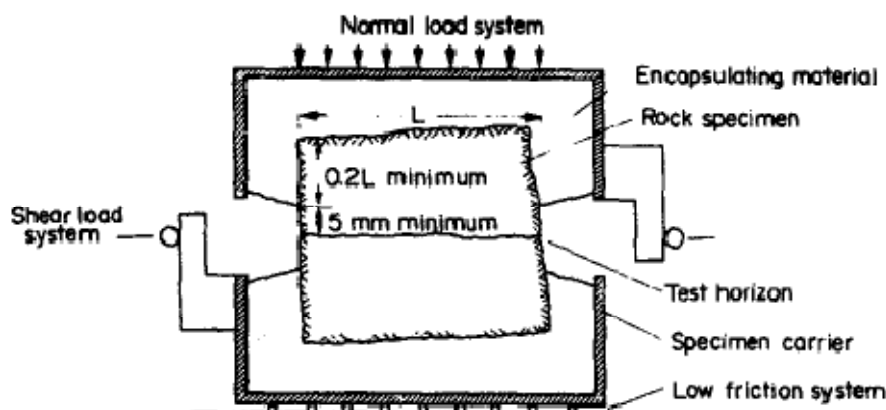


(β).- Μη φορητή συσκευή απ' ευθείας διάτμησης της εταιρείας SBEL.

Σχήμα 28. Φορητή (α) και σταθερή (β) συσκευή δομικής άμεσης διάτμησης.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι μορφής ορθογώνιων πρισμάτων ή κυλινδρικά (από πυρήνες γεωτρήσεων). Οι διαστάσεις τους και ο τρόπος μόρφωσής 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).



Σχήμα 29. Εγκιβωτισμός του δοκιμίου με κατάλληλο υλικό σύνδεσης.

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:

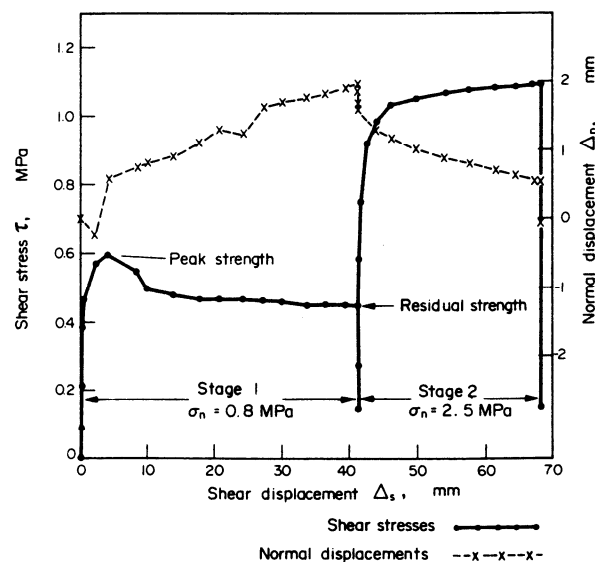
Διατμητική τάση:  $\tau = \frac{P_s}{A}$

Κάθετη τάση:  $\sigma_n = \frac{P_n}{A}$

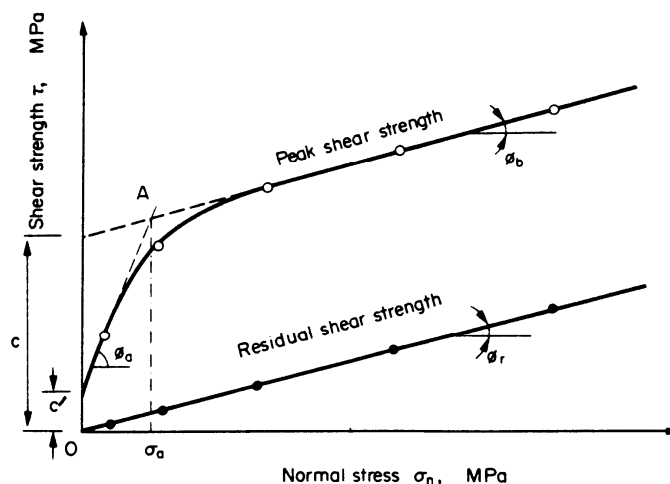
όπου  $P_s$  η ασκούμενη διατμητική δύναμη,  $P_n$  η ασκούμενη κάθετη δύναμη και  $A$  η επιφάνεια του επιπέδου διατμήσεως που είναι ενεργή την κάθε δεδομένη στιγμή.

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. Συγκεκριμένα υπολογίζονται:

- Η παραμένουσα γωνία τριβής  $\phi_r$  (residual friction angle).
- Η φαινόμενη γωνία τριβής  $\phi_a$ , για τιμές της ορθής τάσεως μικρότερες της τιμής  $\sigma_a$  (δηλαδή στην κλίμακα εκείνη των ορθών τάσεων που δεν καταστρέφεται πρακτικά η τραχύτητα της ασυνέχειας).



Σχήμα 30. Διαγράμματα που προκύπτουν από τη δοκιμή άμεσης διάτμησης.



Σχήμα 31. Διάγραμμα μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής συναρτήσει της ορθής τάσης στο επίπεδο διάτμησης.

- Η φαινόμενη γωνία τριβής  $\phi_b$ , για τιμές της κάθετης τάσεως μεγαλύτερες της τιμής  $\sigma_a$  (δηλαδή στην κλίμακα εκείνη των ορθών τάσεων που καταστρέφεται πρακτικά η τραχύτητα της ασυνέχειας). Η  $\phi_b$  είναι συνήθως ίση, ή περίπου ίση, με την  $\phi_r$ .
- Η συνοχή του επιπέδου της ασυνέχειας  $c'$  όπως υπολογίζεται από την καμπύλη της μέγιστης διατμητικής αντοχής. Η τιμή της  $c'$  είναι συχνά μηδενική.
- Η συνοχή του επιπέδου της ασυνέχειας  $c$  (παράμετρος διατμητικής αντοχής).

### 3.2 Πρότυπη διαδικασία

*Προτεινόμενη από την ISRM μέθοδος προσδιορισμού της άμεσης διατμητικής αντοχής*

#### Σκοπός

1 (α) 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.

(β) 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.

(γ) 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.

(δ) 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 της συνθήκες της δοκιμής.

#### Εργαστηριακή συσκευή

2. 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.

### 3. 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

### 4. 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 επιλεγμένη 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 μοφροτροπείς ή ένα αυτόματο καταγραφικό σύστημα τότε μία πρόσφατη βαθμονόμηση πρέπει να περιλαμβάνεται στην έκθεση των αποτελεσμάτων.

## Διαδικασία

### 5. Προετοιμασία

(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  $2500 \text{ mm}^2$ . 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 δε 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 εύθραυστα δείγματα απαιτούν ειδική μεταχείριση, όπως π.χ. συσκευασία με αφρό πολυουρεθάνης.



(γ) Η προστατευτική συσκευασία εκτός από το μεταλλικό σύρμα αφαιρείται και το τέμαχος 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 ενθυλάκωνεται με παρόμοιο τρόπο. Μία ζώνη τουλάχιστο 5 mm εκατέρωθεν του επιπέδου διάτμησης πρέπει να μένει ελεύθερη.

#### 6. 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.

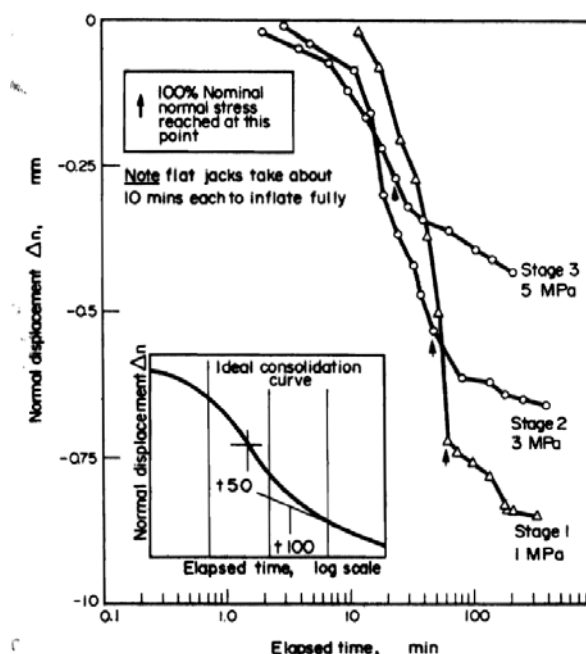
(δ) Η φάση της στερεοποίησης θεωρείται ότι ολοκληρώνεται όταν ο ρυθμός μεταβολής της ορθής μετατόπισης είναι μικρότερος από 0.05 mm σε διάστημα 10 min. Η διατμητική φόρτιση μπορεί τότε να εφαρμοσθεί.

#### 7. 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 αργιλικό υλικό πλήρωσης, ο συνολικός χρόνος για την επίτευξη της μέγιστης αντοχής θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από  $6t_{100}$  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.



### Σχήμα 32. Καμπύλες στερεοποίησης.

(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 και η διάτμηση να συνεχίζεται σύμφωνα με την παράγρ 7 (γ) έως (ε).

(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.

#### Υπολογισμοί

8 (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 28. 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.

(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 ως ακολούθως:

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

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

όπου  $P_s$  η ολική διατμητική δύναμη,  $P_n$  η ολική ορθή δύναμη,  $A$  το εμβαδό της επιφάνειας του επιπέδου διάτμησης σε επαφή (διορθωμένο ώστε να λαμβάνεται υπόψη η διατμητική μετατόπιση)

(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 27.

#### Έκθεση των αποτελεσμάτων

9. 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 διατημημένης 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.

### 3.3 Εφαρμογή της δοκιμής<sup>7</sup>

Δοκίμια διαφόρων πετρωμάτων, που κάθε ένα περιέχει μία ασυνέχεια με τραχεία επιφάνεια, υποβάλλονται σε δοκιμή άμεσης διάτμησης. Χρησιμοποιούνται πρισματικά δοκίμια, που τοποθετούνται στη συσκευή άμεσης διάτμησης έτσι ώστε το επίπεδο διάτμησης να συμπίπτει με την ασυνέχεια. Το εμβαδό της επιφάνειας διάτμησης είναι 100 cm<sup>2</sup>.

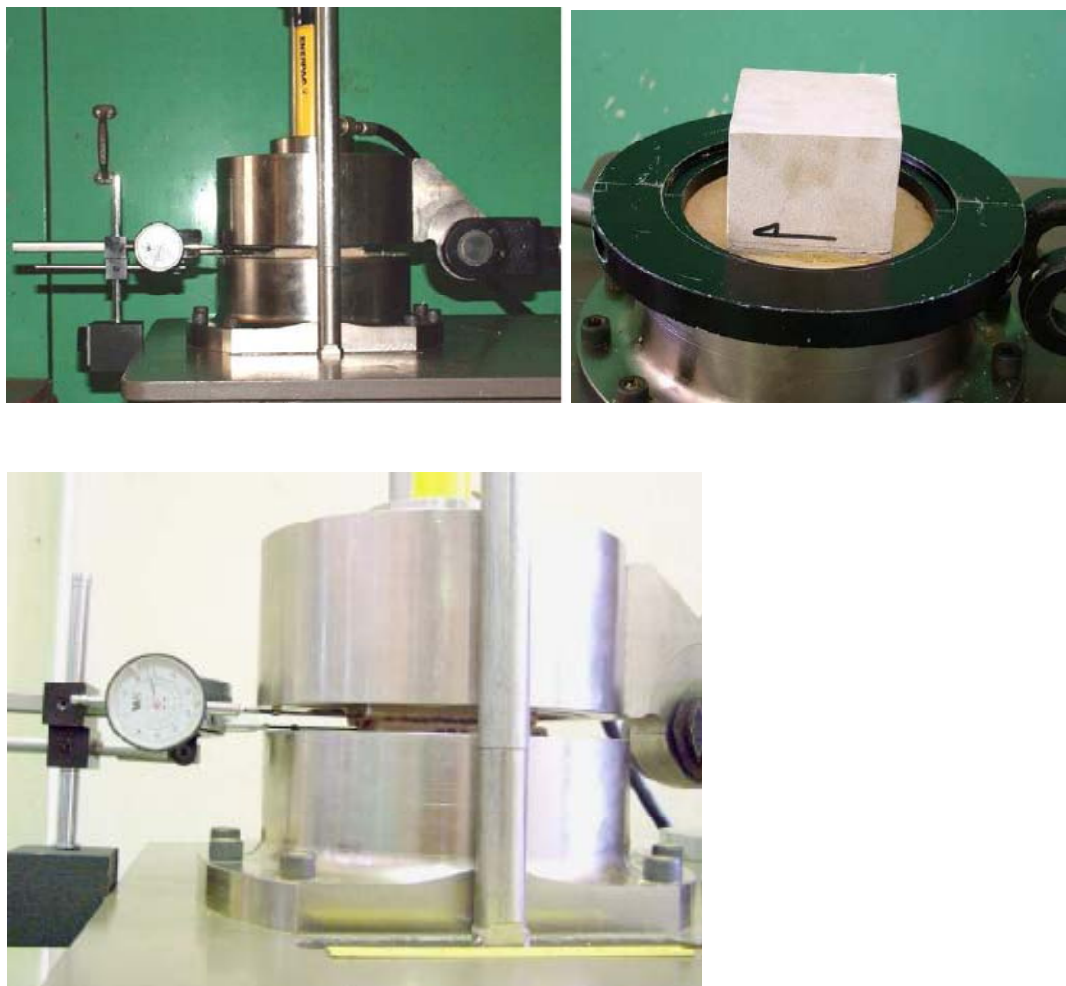
Η ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων δίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3. Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης.

| α/α | Πέτρωμα               | Ορυκτολογική σύσταση                                                                                                        |
|-----|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Βασάλτης              | 50% πυρόξενους (0.5-1.0 mm) και 50% πλαγιόκλαστο (0.3-0.8 mm)                                                               |
| 2   | Ασβεστολιθικό μάρμαρο | 100% ασβεστίτης (1-5 mm)                                                                                                    |
| 3   | Γρανίτης              | 40% Πλαγιόκλαστο (0.5-1 mm), 30% χαλαζίας (2-5 mm), 5% Ορθόκλαστο (3-5 mm), 3% αμφίβολου (1-2 mm), and 2% βιοτίτης (1-2 mm) |
| 4   | Χαλαζιακός ψαμμίτης   | 72% χαλαζίας (0.2-0.8 mm), 20% άστριοι (0.1-0.8 mm), 3% μαρμαρυγίας (0.1-0.3 mm), 5% άλλα (0.5-2 mm)                        |

Η συσκευή άμεσης διάτμησης που χρησιμοποιήθηκε και η τοποθέτηση των δοκιμών δείχνεται στο Σχήμα 33.

<sup>7</sup> Πειραματικά δεδομένα από τον Rutthapol (2006).



Σχήμα 33. Τοποθέτηση των δοκιμών στη συσκευή άμεσης διάτμησης

Ο ρυθμός μεταβολής της διατμητικής μετατόπισης κατά τη διάρκεια της δοκιμής διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 1 mm/min. Η διατμητική δύναμη εφαρμόζεται συνεχώς έως ότου επιτευχθεί μία διατμητική μετατόπιση ίση με 1 cm. Η ορθή τάση, η μέγιστη και η παραμένουσα διατμητική αντοχή υπολογίσθηκαν από τις ασκούμενες δυνάμεις και την ενεργό επιφάνεια διάτμησης από τις σχέσεις:

$$\sigma_n = \frac{P_n}{A} \quad \text{και} \quad \tau = \frac{P_s}{A}$$

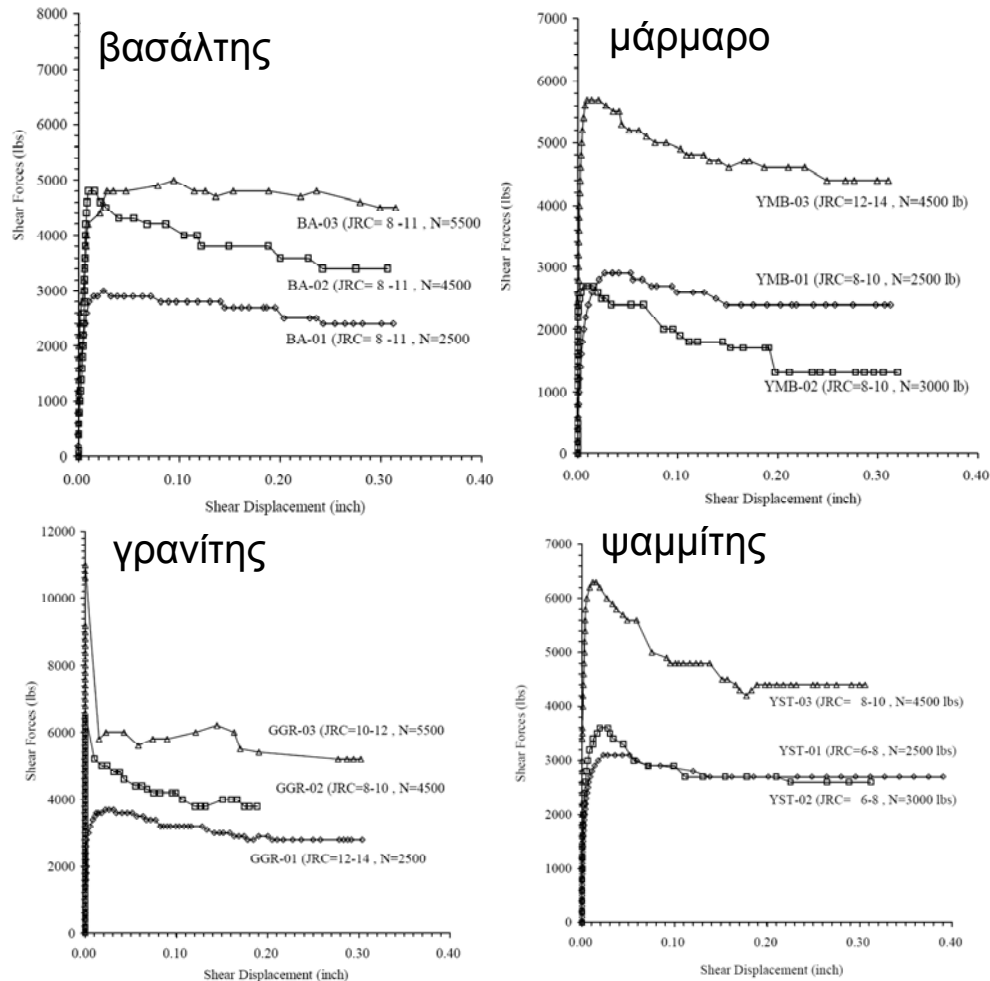
Από τους υπολογισμούς προκύπτουν τα του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4)

Πίνακας 4. Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης.

| Πέτρωμα                 | Ορθή τάση | Μέγιστη διατμητική | Παραμένουσα διατμητική |
|-------------------------|-----------|--------------------|------------------------|
| 1 Βασάλτης              | 1.7       | 2.0                | 1.6                    |
|                         | 3.0       | 3.2                | 2.3                    |
|                         | 3.6       | 3.3                | 3.0                    |
| 2 Ασβεστολιθικό μάρμαρο | 1.1       | 1.3                | 1.0                    |
|                         | 1.6       | 2.1                | 1.6                    |
|                         | 1.9       | 2.5                | 1.9                    |
| 3 Γρανίτης              | 1.1       | 1.6                | 1.2                    |
|                         | 1.9       | 2.8                | 1.6                    |

|   |                        |                   |                   |                   |
|---|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|   |                        | 2.3               | 4.6               | 2.2               |
| 4 | Χαλαζιακός<br>ψαμμίτης | 1.1<br>1.3<br>1.9 | 1.3<br>1.5<br>2.1 | 1.2<br>1.1<br>1.9 |

Τα διαγράμματα διατμητικής τάσης–διατμητικής μετατόπισης δίνονται στο Σχήμα 34.



Σχήμα 34. Διαγράμματα διατμητικής τάσης-διατμητικής μετατόπισης

## 4 Δοκιμές προσδιορισμού δεικτών

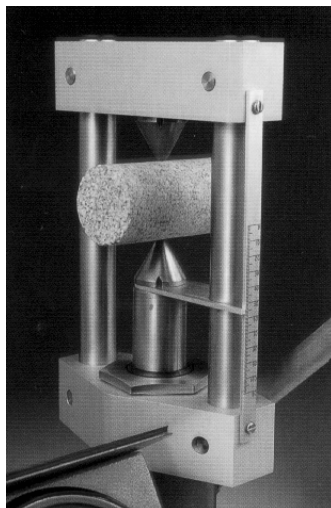
### 4.1 Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης<sup>8</sup>

#### 4.1.1 Γενικά

Η Δοκιμή (Σχήμα 35) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αντοχής δοκιμών πετρωμάτων τόσο στο υπαίθρο 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

<sup>8</sup> Πειραματικά στοιχεία από την εργασία των Τσουτρέλης, Γκίκας, Νομικός (2000)

εκτίμηση χονδρικά της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής σε διαφόρων διαστάσεων δοκίμια πετρώματος μπορεί επίσης να μελετηθεί και η επίδραση του όγκου του δοκιμίου στην αντοχή του.



Σχήμα 35. Συσκευή σημειακής φόρτισης

Η δοκιμή σημειακής φορτίσεως μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κυλινδρικά δοκίμια αξονικά ή αντιδιαμετρικά, καθώς και σε ορθογωνικά ή ακανόνιστης μορφής δοκίμια.

#### 4.1.2 Θεωρία της δοκιμής

Με τη φόρτιση του δοκιμίου μεταξύ των ακμών φόρτισης το δοκίμιο θραύεται σε εφελκυσμό κατ' αναλογία με τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης. Το φορτίο επομένως στο οποίο θραύεται το δοκίμιο συναρτάται άμεσα με την αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό και έμμεσα με την αντοχή του σε θλίψη. Ο μη διορθωμένος Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση (Uncorrected Point Load Strength Index)  $I_s$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad \text{Εξίσωση 1}$$

όπου:

P το φορτίο τη στιγμή της θραύσης του δοκιμίου

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

$D_e^2 = D^2$  για την περίπτωση διαμετρικής δοκιμής

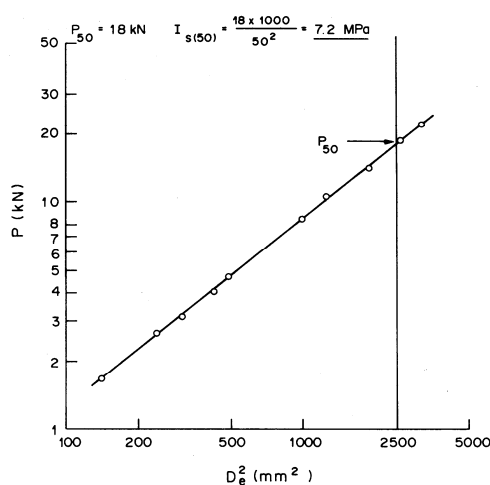
$= 4A/\pi$  για την περίπτωση αξονικής δοκιμής και δοκιμής ορθογωνικού ή ακανόνιστου δοκιμίου, όπου  $A = W \times D$  η επιφάνεια του επιπέδου που διέρχεται από τα σημεία φόρτισης (Σχήμα 38, αριστερά).

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  $D = 50 \text{ mm}$ .

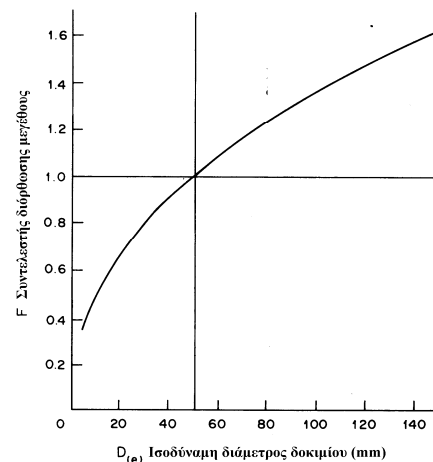
Η καλύτερη μέθοδος για τον υπολογισμό του  $I_{s(50)}$  είναι η πραγματοποίηση διαμετρικής δοκιμής με διάμετρο  $D$  να πλησιάζει τα 50 mm, ώστε είτε να μην απαιτείται διόρθωση ή αυτή να εισάγει ελάχιστο σφάλμα (π.χ. στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δοκίμια διαμέτρου NX,  $D=54.7$  mm).

Η πιο αξιόπιστη μέθοδος για την πραγματοποίηση της διόρθωσης είναι η εκτέλεση μίας σειράς δοκιμών με διάφορες διαμέτρους  $D$  ή  $D_e$  και η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε σύστημα αξόνων  $(P, D_e^2)$  (Σχήμα 36). Εάν χρησιμοποιηθούν λογαριθμικές κλίμακες αξόνων η σχέση  $P - D_e^2$  είναι μία ευθεία από την οποία μπορεί να προσδιορισθεί γραφικά η τιμή  $P_{50}$ , η οποία αντιστοιχεί σε  $D_e^2=2500 \text{ mm}^2$  ( $D_e=50\text{mm}$ ). Ο δείκτης  $I_{s(50)}$  υπολογίζεται τότε από τη σχέση:

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



Σχήμα 36. Αποτελέσματα δοκιμών σημειακής φόρτισης για διάφορες  $D_e$  και γραφικός υπολογισμός του  $P_{50}$ .



Σχήμα 37. Διάγραμμα γραφικού υπολογισμού του συντελεστή διόρθωσης μεγέθους  $F$ .

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

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad \text{Εξίσωση 3}$$

όπου  $F$  ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους (Size Correction Factor,  $F$ ), ο οποίος λαμβάνεται είτε από το

Σχήμα 37 είτε από τη σχέση:

$$F = (D_e/50)^{0.45} \quad \text{Εξίσωση 4}$$

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

$$F = \sqrt{(D_e/50)}$$

Εξίσωση 5

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 5 δίνει τον χαρακτηρισμό της αντοχής του πετρώματος με βάση την τιμή του δείκτη.

Πίνακας 5. 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:

$$\sigma_c \approx 24 \cdot I_s$$

Εξίσωση 6



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:

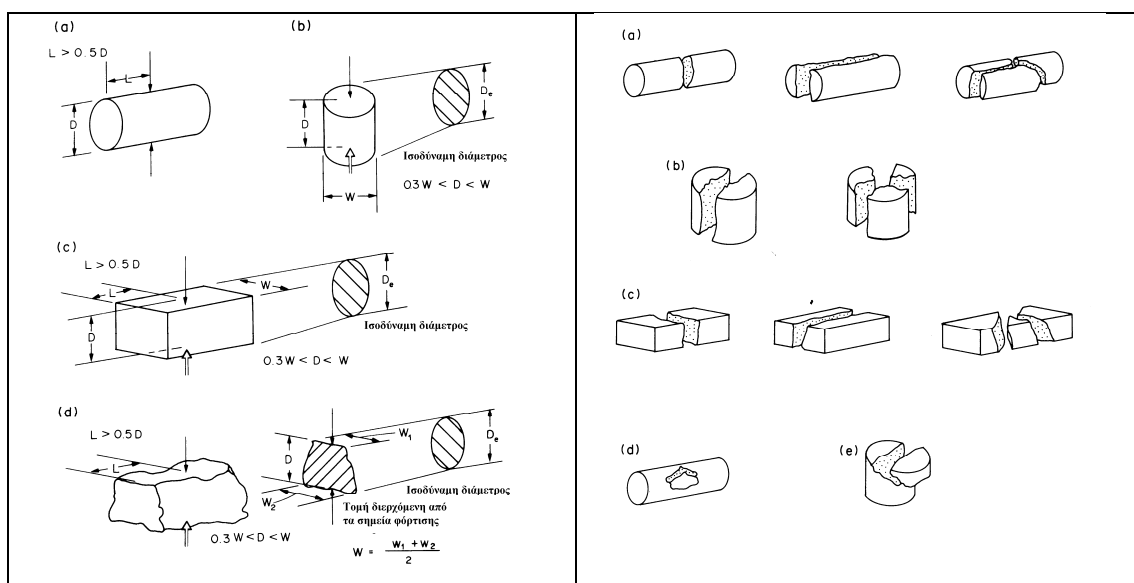
$$\sigma_c \approx (14 + 0.175 \cdot D) \cdot I_s$$

Εξίσωση 7

#### 4.1.3 Πρότυπη διαδικασία

Η ISRM (1985) δίνει οδηγίες για την εκτέλεση τεσσάρων τύπων δοκιμής, ήτοι (Σχήμα 38): (α) Διαμετρική δοκιμή, (β) Αξονική δοκιμή, (γ) Δοκιμή ορθογωνικού δοκιμίου και (δ) Δοκιμή ακανόνιστου δοκιμίου.

Η διαμετρική δοκιμή, (Σχήμα 35, Σχήμα 38α) 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 38, δεξιά, d).



Σχήμα 38. 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 φόρτισης: (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 38, 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 38, 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 38c και Σχήμα 38d 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 38γ και Σχήμα 38δ) πρέπει να είναι τουλάχιστο 0,5W. Η απόσταση D μεταξύ των ακμών φορτίσεως καταγράφεται με ακρίβεια  $\pm 2$  %. Το μικρότερο πλάτος του δοκιμίου W κάθετα προς τη διεύθυνση φορτίσεως καταγράφεται με ακρίβεια  $\pm 5$  %. Εάν οι πλευρές του δοκιμίου δεν είναι παράλληλες τότε το W υπολογίζεται ως  $W = (W_1 + W_2) / 2$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 38d. Το φορτίο αυξάνεται σταδιακά ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει σε χρόνο  $10 \pm 60$  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.

#### 4.1.4 Εφαρμογή της δοκιμής

Η εργαστηριακή μηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας ELE International, τύπου EL77- 0110. Η μηχανή διαθέτει κατάλληλο σύστημα φόρτισης (αποτελούμενο από πλαίσιο φόρτισης, αντλία, έμβολο και ακμές φορτίσεως), σύστημα μέτρησης του επιβαλλόμενου φορτίου και σύστημα μέτρησης της απόστασης μεταξύ των ακμών φόρτισης.

Στις εργαστηριακές δοκιμές που έγιναν χρησιμοποιήθηκαν δείγματα μαρμάρου Νάξου και Βόλακας. Τα αποτελέσματα δίνονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 6 και Πίνακας 7). Από την εξαγχθείσα τιμή του δείκτη  $I_{s(50)}$ , (βλ. Πίνακας 5) το υλικό κρίνεται ως μέσης αντοχής.

Πίνακας 6. Αποτελέσματα πειράματος

|   | Τύπος μαρμάρου | Τύπος δοκιμής | W (mm) | 2L (cm) | D (mm) | A    | D <sub>e</sub> | P (kN) | I <sub>s</sub> *1000 | F    | I <sub>s(50)</sub> |
|---|----------------|---------------|--------|---------|--------|------|----------------|--------|----------------------|------|--------------------|
| 1 | Βόλακας        | διαμετρική    | -      | 8.5     | 54.7   | -    | 54.70          | 8.20   | 2.74                 | 1.04 | 2.85               |
| 2 | Βόλακας        | διαμετρική    | -      | 8.5     | 54.7   | -    | 54.70          | 12.50  | 4.18                 | 1.04 | 4.35               |
| 3 | Βόλακας        | αξονική       | 54.7   | 5       | 50     | 2735 | 59.03          | 12.20  | 3.50                 | 1.08 | 3.77               |
| 4 | Νάξος          | αξονική       | 54.7   | 4       | 40     | 2188 | 52.79          | 7.00   | 2.51                 | 1.02 | 2.57               |
| 5 | Νάξος          | αξονική       | 54.7   | 6       | 60     | 3282 | 64.66          | 12.50  | 2.99                 | 1.12 | 3.36               |

Πίνακας 7. Μέσες τιμές για κάθε μάρμαρο

|                                                  |      |
|--------------------------------------------------|------|
| Μέση τιμή I <sub>s(50)</sub> διαμετρικής Βόλακας | 3.60 |
| Μέση τιμή I <sub>s(50)</sub> αξονικής Νάξου      | 2.97 |
| Μέση τιμή I <sub>s(50)</sub> αξονικής Βόλακας    | 3.77 |

## 4.2 Η μέθοδος του κρουσίμετρου αναπήδησης

### 4.2.1 Η μέθοδος

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 39). 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.

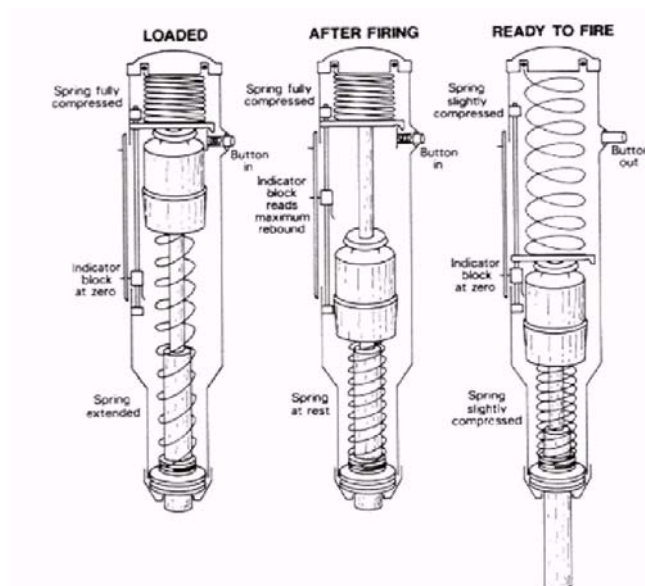


Fig. 2. Working principle of a Schmidt hammer [3].

Σχήμα 39. Αρχή λειτουργίας του κρουσίμετρου Schmidt (McCarroll, 1994)

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.

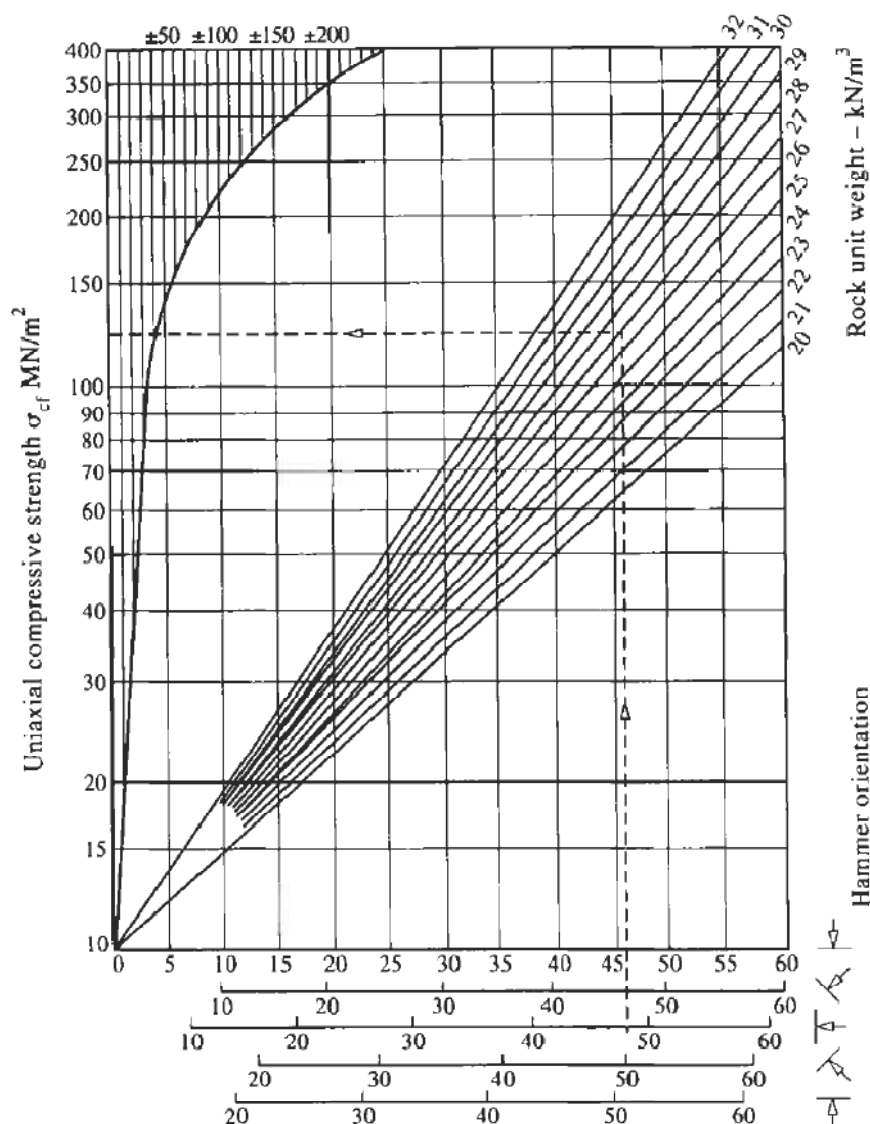
Γεωμετρία επιφάνειας: Ανωμαλίες της επιφάνειας, στην οποία εκτελείται η δοκιμή, επηρεάζουν τις τιμές της αναπήδησης, αφού συχνά θραύονται κάτω από την άκρη του εμβόλου οδηγώντας σε απώλειες της κρουστικής ενέργειας και μικρότερες τιμές αναπήδησης. Η ISRM (1978a) συνιστά τα δοκίμια να έχουν ομαλή επιφάνεια 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. Στο Σχήμα 40 δείχνεται μία σειρά τέτοιων καμπυλών, που έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα. Ο Πίνακας 8, εξάλλου, δίνει 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.



Σχήμα 40. Καμπύλες αναπήδησης - αντοχής από πειραματικά στοιχεία.

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.

Πίνακας 8. Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας από την αναπήδηση (με βάση σχετικό πίνακα των Aydin & Basu, 2005).

| Αναφορά                  | Σχέση                              | $r$  | Εύρος ισχύος δοκιμής          |                  |          |
|--------------------------|------------------------------------|------|-------------------------------|------------------|----------|
|                          |                                    |      | Τύπος πετρώματος              | $\sigma_c$ (MPa) | Et (MPa) |
| Gokceoglu (1996)         | $\sigma_c = 0.0001 * R^{3.27}$     | 0.84 | Μάρμαρο                       | –                | –        |
| Yasar and Erdogan (2004) | $\sigma_c = 0.000004 * R_L^{4.29}$ | 0.89 | Ανθρακικά, ψαμμίτης, βασάλτης | 40–112           | 45–55    |

|                              |                                                                          |              |                                                    |         |                |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------|---------|----------------|
| Dearman and Irfan (1978)     | $\sigma_c = 0.00016 * R_L^{3.47}$<br>$E_t = 1.89 * R_L - 60.55$          | –<br>0.93    | Γρανίτης                                           | 11–266  | 23–62          |
| Xu et al. (1990)             | $\sigma_c = 2.98 * e^{(0.06 * R_L)}$<br>$E_t = 1.77 * e^{(0.07 * R_L)}$  | 0.95<br>0.96 | Μαρμαρυγιακός<br>σχιστόλιθος                       | 9–56    | 17–53          |
|                              | $\sigma_c = 2.99 * e^{(0.06 * R_L)}$<br>$E_t = 2.71 * e^{(0.04 * R_L)}$  | 0.91<br>0.91 | Πρασινοσχιστόλιθος                                 | 8–145   | 21–64          |
|                              | $\sigma_c = 2.98 * e^{(0.063 * R_L)}$<br>$E_t = 2.57 * e^{(0.03 * R_L)}$ | 0.94<br>0.88 | Σερπεντινίτης                                      | –       | –              |
|                              | $\sigma_c = 3.78 * e^{(0.05 * R_L)}$<br>$E_t = 1.75 * e^{(0.05 * R_L)}$  | 0.93<br>0.95 | Γάββρος                                            | –       | –              |
|                              | $\sigma_c = 1.45 * e^{(0.07 * R_L)}$<br>$E_t = 1.04 * e^{(0.06 * R_L)}$  | 0.92<br>0.91 | Γρανίτης                                           | 6–196   | 20–65<br>23–76 |
|                              | $\sigma_c = 0.92 * e^{(0.07 * R_N)}$<br>$E_t = 0.72 * e^{(0.05 * R_N)}$  | 0.94<br>0.92 | Γρανίτης                                           |         |                |
| Yilmaz and Sendir (2002)     | $\sigma_c = 2.27 * e^{(0.06 * R_L)}$<br>$E_t = 3.15 * e^{(0.05 * R_L)}$  | 0.91<br>0.95 | Γύψος                                              | 15–30   | 30–44          |
|                              | $\sigma_c = 2.21 * e^{(0.07 * R_N)}$<br>$E_t = 0.00013 * R_N^{3.09}$     | 0.96<br>0.99 | Ασβεστόλιθος,<br>ψαμμίτης<br>Συηνίτης, γρανίτης    | 11–259  | 24–73          |
| Shorey et al. (1984)         | $\sigma_c = 0.40 * R_N - 3.60$                                           | 0.94         | Άνθρακας                                           | 3–13    | 15–40          |
| Haramy and DeMarco (1985)    | $\sigma_c = 0.99 * R_L - 0.38$                                           | 0.7          | Άνθρακας                                           | 7–46    | 12–44          |
| Ghose and Chakraborti (1986) | $\sigma_c = 0.88 * R_L - 12.11$                                          | 0.87         | Άνθρακας                                           | 13–41   | 28–53          |
| Singh et al. (1983)          | $\sigma_c = 2.00 * R_L$                                                  | 0.86         | ψαμμίτης, ιλύόλιθος,<br>mudstone, seatearth        | 12–73   | 10–35          |
| O' Rourke (1989)             | $\sigma_c = 4.85 * R_L - 76.18$                                          | 0.77         | ψαμμίτης, ιλύόλιθος,<br>Ασβεστόλιθος,<br>ανυδρίτης | 14–215  | 19–52          |
| Sachpazis (1990)             | $\sigma_c = 4.29 * R_L - 67.52$<br>$E_t = 1.94 * R_L - 33.93$            | 0.96<br>0.88 | 33 διαφορετικά<br>ανθρακικά<br>πετρώματα           | 22–311  | 16–60          |
|                              | $\sigma_c = 8.36 * R_L - 416.00$                                         | 0.87         | Γρανίτης                                           | 109–193 | 64–72          |

#### 4.2.2 Προτεινόμενη από την ISRM μέθοδος για τον προσδιορισμό της Σκληρότητας Αναπήδησης Schmidt <sup>9</sup>

##### 1. Πεδίο

(α) Η μέθοδος αυτή προτείνεται για τη χρήση του κρουσίμετρου Schmidt για τον προσδιορισμό της σκληρότητας του πετρώματος.

(β) Η μέθοδος έχει περιορισμένη εφαρμογή στα πολύ μαλακά ή πολύ σκληρά πετρώματα.

<sup>9</sup>Όπως κατασκευάζεται ή εξουσιοδοτείται από E. Schmidt, Βασιλεία, Ελβετία.

## 2. Συσκευή

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.

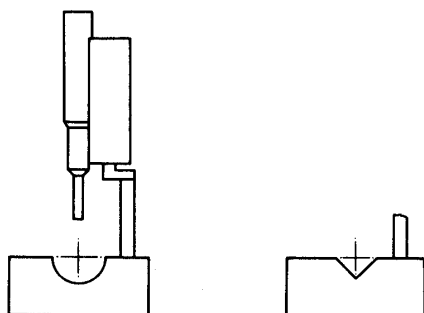
(β) Βάση χάλυβα ελάχιστου βάρους 20 kg στην οποία πρέπει να στερεώνονται τα δοκίμια. Τα δοκίμια πυρηνοληψίας πρέπει να στερεώνονται σε χαλύβδινη βάση με ημικυλινδρική εγκοπή της ίδιας ακτίνας με τον πυρήνα ή πρισματική βάση με εγκοπή σχήματος V (Σχήμα 41).

## 3. Διαδικασία

(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, χρησιμοποιείτε 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 δοκιμών, 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.



Σχήμα 41. Βάσεις στήριξης κυλινδρικών δοκιμίων.

(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 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 ρωγμάτωση 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.

#### 4. Υπολογισμοί

(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.

#### 5. Υποβολή έκθεσης 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 που λαμβάνεται όπως στην παράγραφο 1.2.4.

## 5 Βιβλιογραφία

- 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”.
- Aydin A, Basu A (2005), The Schmidt hammer in rock material characterization, Engineering Geology, Volume 81, Issue 1, pp. 1-14
- Bieniawski ZT (1975). “The point load test in geotechnical practice”, Engineering Geology, 9, 1-11.
- Brady B.H. & Brown E.T. (1993). “Rock Mechanics for Underground Mining”, Chapman and Hall.
- Broch E and Franklin JA (1972). “The point load test”, IJRM, 9, 669-697
- Brown 1974). “Fracture of rock under uniform uniaxial compression”, Advances in rock mechanics, Proc. 3<sup>rd</sup> Conf. ISRM, Denver, 2A, 111-17, Washington, DC, Nat. Acad. Sciences.
- Brown E.T. and Gonano L.P. (1975). “An analysis of size effect behavior in brittle rock”, Proc. 2<sup>nd</sup> Austr.-NZ conf. geomech., 139-43. Sydney: Instn Engrs Aust.
- Fairhurst C (1964). “On the validity of the Brazilian test for brittle materials”, IJRM, 1, 535-546.
- ISRM (1974). “Suggested Methods for Determining Shear Test. Part 2: Suggested Method for Laboratory Determination of Direct Shear Strength”, in ISRM Suggested methods, ed. ET Brown 1981, Pergamon Press.
- ISRM (1978). Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, “Suggested Methods for Determining Sound Velocity”, Committee on Laboratory Tests, Document No 4, (1977). Published in Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, No. 2, pp. 53-58.
- ISRM (1978). Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests “Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials, Part 2: Suggested Method for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazil Test”, Committee on Laboratory Tests, Document No. 8, Published in Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, No. 3, pp. 99-103.
- ISRM (1978). Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, «Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks: Part 3. Suggested Method for Determination of the Schmidt Rebound Hardness», Committee on Laboratory Tests. Published in Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 15, pp. 89-97.
- ISRM (1979). “Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials”, Commission on

- Standardization of Laboratory and Field Tests, , Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, No. 2, pp. 135-140.
- ISRM (1983). “Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression”, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Committee on Laboratory Tests p. 47-51.
- ISRM (1985). “Suggested Method for Determining Point Load Strength”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 2, pp. 51-60, 1985.
- Lama R. D., Vutukuri V. S., «Handbook on mechanical properties of rocks», Vol. I, II, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, 1978.
- Lin W., Kamei A., Takahashi M., Kwasniewski M., Takagi T. and H. Endo. (2003), Deformability of various granitic rocks from Japan in uniaxial tension, ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.
- McCarroll D. (1994), The Schmidt hammer as a measure of degree of rock surface weathering and terrain age. In: C Beck, Editor, Dating in exposed and surface contexts, University of New Mexico Press, Mexico, pp. 29–45
- Roberts A. (1977), “Geotechnology - An introductory text for students and engineers”, Pergamon Press.
- Rutthapol, K. (2006). Determination of rock joint shear strength based on rock physical properties. Msc Thesis, School of Geotechnology, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Wawersik W.R. and Fairhurst C. (1970). “A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments”, I J of Rock Mech. Min. Sci. 7, 561-75.
- Τσουτρέλης Χ. (1985). «Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων», Αθήνα
- Τσουτρέλης Χ., Γκίκας Ν., Νομικός Π. (2000). “Εργαστηριακές ασκήσεις Μηχανικής Πετρωμάτων”, ΕΜΠ.