



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΚΛΗΡΩΝ ΒΡΑΧΩΝ ΣΕ  
ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ**

υπό

**ΑΔΑΜΑΝΤΙΑ ΑΙΜΙΛΙΑ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

Βόλος, Φεβρουάριος 2020

© 2020 Αδαμαντία Αιμιλία Βασιλείου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης και τα υπόλοιπα μέλη της κριτικής επιτροπής, τη Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Θεοφάνη Γραμμένο. Επιπλέον, ευχαριστώ τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Εύχαρις Βασιλείου, την αδελφή μου Βαρβάρα και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Αδαμαντία Αιμιλία Βασιλείου

# Μηχανική συμπεριφορά σκληρών βράχων σε διάφορους τύπους φόρτισης

Βασιλείου Αδαμαντία Αιμιλία

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Επιβλέπων Καθηγητής: Εφραιμίδης Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς σκληρών βράχων (πετρωμάτων) σε διάφορους τύπους φόρτισης, μέσω μιας βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Τα πετρώματα που αναφέρονται στην παρούσα διπλωματική είναι σκληροί βράχοι (υγιείς/άρρηκτοι βράχοι) και βραχώμαζες αυτών, υλικά τα οποία είναι κατάλληλα για θεμελιώσεις τεχνικών έργων, για έργα οδοποιίας, για διάνοιξη σηράγγων και γενικά για έργα πολιτικού μηχανικού. Συνεπώς είναι πολύ σημαντικός ο ακριβής προσδιορισμός της αντοχής τους και γενικά όλων των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται μέσω των πειραματικών δοκιμών, όπως είναι η ομοιόμορφη θλιπτική τάση, η συμβατική τριαξονική δοκιμή ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$  ή  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ ) και η πραγματική τριαξονική δοκιμή ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ). Στην εργασία γίνεται συζήτηση σχετικά με την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  στην αντοχή των πετρωμάτων. Η αντοχή στη θραύση αυξάνεται όχι μόνο με την αύξηση της  $\sigma_3$ , αλλά και με την αύξηση της  $\sigma_2$ , εκτός από πολύ υψηλές τιμές της  $\sigma_2$ . Η εξάρτηση της  $\sigma_2$  είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη της  $\sigma_3$ , αλλά η επίδραση της  $\sigma_2$  είναι επίσης σημαντική. Επίσης παρουσιάζεται η επίδραση της ανισοτροπίας και της ανομοιογένειας ενός βράχου στην αντοχή του.

# **Mechanical behavior of hard rocks under various loading types**

Vasileiou Adamantia Aimilia

Department of Civil Engineering, University of Thessaly

Supervisor: George Efremidis, Assistant Professor

## **SUMMARY**

The purpose of the thesis is to study the mechanical behavior of hard rocks under various loading types through a bibliographic review. The rocks mentioned in this thesis are hard rocks, which are suitable for foundations of technical works, road works, and civil engineering in general; there may also be masses during tunneling. It is therefore very important to accurately determine their strength and generally all their mechanical properties. This is determined by the experimental tests, where the compressive stress is uniform, the conventional triaxial test ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$  or  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ ) and the actual triaxial test ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ). The effect of intermediate  $\sigma_2$  main stress on rock strength is discussed. Fracture resistance increases not only with increasing  $\sigma_3$  but also with increasing  $\sigma_2$ , in addition to very high values of  $\sigma_2$ . The dependence of  $\sigma_2$  is clearly less than that of  $\sigma_3$ , but the effect of  $\sigma_2$  is also significant. The effect of anisotropy and heterogeneity of a rock on its strength is also presented.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

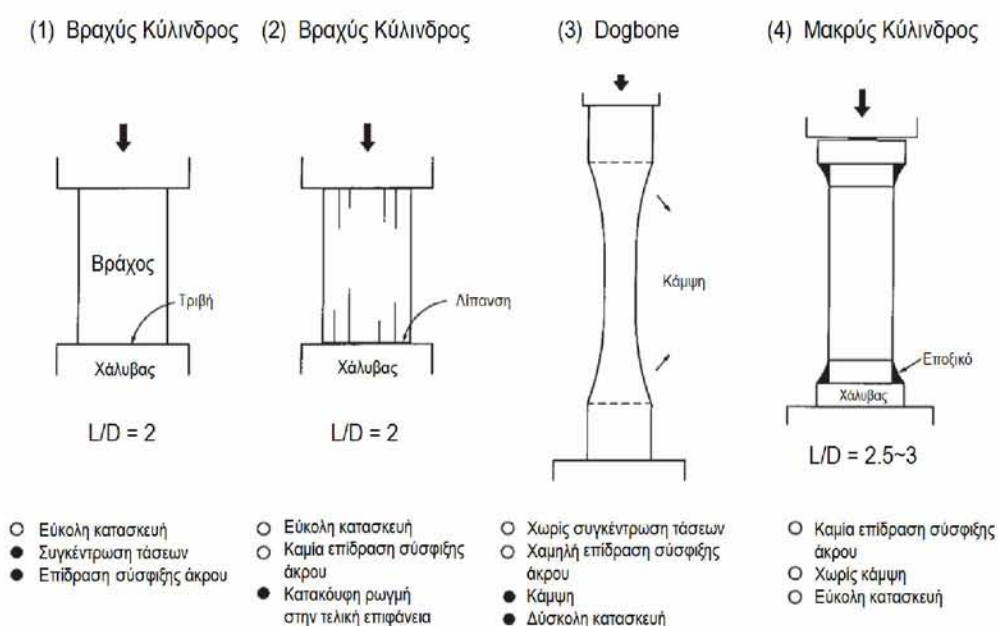
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	8
ΑΚΡΙΒΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΤΑΣΗ .....	8
1.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ .....	10
1.2 Ο ΛΟΓΟΣ ΜΗΚΟΥΣ / ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΓΩΝΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ .....	12
1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ .....	20
1.4 ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΑΚΡΟΥ ΜΕ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	24
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.....	24
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	24
2.1.1 Πειραματική διαδικασία και η σχέση τάσης-παραμόρφωσης .....	24
2.1.2 Μέτρο ελαστικότητας.....	30
2.1.3 Μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση.....	33
2.1.4 Επιπτώσεις της προηγούμενης φόρτισης.....	35
2.1.5 Περίληψη των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης.....	39
2.2 Η ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΑΠΟ ΨΑΘΥΡΗ ΣΕ ΟΛΚΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΠΙΕΣΗ.....	40
2.2.1 Σχέση μεταξύ αντοχής και πλευρικής πίεσης .....	40
2.2.2 Το κριτήριο θραύσης Mohr – Coulomb.....	45
2.2.3 Η μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	59
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ .....	59
3.1. ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΘΛΙΨΗΣ.....	59
3.1.1 Δοκιμή αξονικής φόρτισης υπό πλευρική πίεση.....	60
3.1.2 Η πραγματική δοκιμή τριαξονικής θλίψης .....	61
3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΥΠΟ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ .....	65
3.2.1 Εισαγωγή .....	65
3.2.2 Πειραματική διαδικασία .....	65
3.2.3 Τα πετρώματα των δοκιμών .....	66

3.2.4 Εξέταση της ισοτροπίας και της ομοιογένειας με μονοαξονικές δοκιμές θλίψης .....	66
3.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ .....	71
3.3.1 Ιστορική αναδρομή ανάπτυξης των τεχνικών της πραγματικής τριαξονικής δοκιμής .....	71
3.3.2 Σύγκριση διαφόρων ειδών “πραγματικών” τριαξονικών συσκευών .....	77
3.3.3 Σχεδιασμός της “πραγματικής” τριαξονικής συσκευής .....	78
3.3.4 Διαμόρφωση δοκιμίων και μέτρηση ανηγμένων παραμορφώσεων .....	81
3.3.5 Πειραματικά αποτελέσματα - Καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης και τάσεις θραύσης .....	84
3.3.6 Πειραματικά αποτελέσματα - Τάσεις διαρροής .....	102
3.3.7 Κριτήρια αστοχίας των πετρωμάτων .....	107
3.3.8 Ολκιμότητα, πρότυπα θραύσης και διαστολή .....	111
3.3.9 Θραύση ανομοιογενούς και ανισότροπου πετρώματος .....	129
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	142
Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	142
4.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	142
4.2 ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ .....	142
α) Πλουτωνικά Πετρώματα .....	143
α1) Γρανιτικά Πετρώματα (Οξίνα) .....	143
α2) Βασικά– Υπερβασικά Πλουτωνικά Πετρώματα .....	144
β) Ηφαιστειακά Πετρώματα .....	144
4.3 ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ .....	145
α) Χημικά Ιζηματογενή Πετρώματα .....	147
4.4 ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ .....	147
4.5 ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ .....	148
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	150
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	150
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	153

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΑΚΡΙΒΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΤΑΣΗ

Η πιο διαδεδομένη πειραματική διαδικασία για την μελέτη της ψαθυρής και όλκιμης συμπεριφοράς ενός πετρώματος, σε μελέτες ελαστικής συμπεριφοράς πετρωμάτων, καθώς και σε μελέτες ερπυσμού, είναι η συμβατική δοκιμή θλίψης, στην οποία το δοκίμιο του πετρώματος, υπό μορφή κυλίνδρου, φορτίζεται αξονικά. Η εν λόγω δοκιμή παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής (Seldenrath and Gramberg, 1958; Fairhurst, 1961).



**Σχήμα 1.1.** Διάφορες μέθοδοι δοκιμής δειγμάτων πετρωμάτων υπό συνθήκες μονοαξονικής θλίψης (Mogi, 2007).

Αρχικά, η χαλύβδινη κεφαλή της μηχανής θλίψης έρχεται σε επαφή με το κυλινδρικό δοκίμιο βράχου (σχήμα 1.1). Οι ελαστικές ιδιότητες του χάλυβα και του βράχου είναι διαφορετικές, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ακτινικά δυνάμεις διάτμησης στη διεπιφάνεια (χάλυβα/βράχου), όταν ασκείται φορτίο στο δείγμα του πετρώματος. Οι δυνάμεις αυτές στους περισσότερους βράχους αναπτύσσονται εσωτερικά με αποτέλεσμα να εκδηλώνεται η επίδραση σύσφιξης (clamping effect) στην βάση του κυλινδρικού δοκιμίου (Filon, 1902). Αυτό προκαλεί τα δύο ακόλουθα αποτελέσματα: α) λόγω της απότομης αλλαγής της τάσης διατμήσεως κοντά στο εξωτερικό άκρο της επαφής χάλυβα-βράχου, αναπτύσσεται συγκέντρωση τάσης (Nadai, 1924) και β) σε περίπτωση που μια θραύση διαδίδεται στην περιοχή κοντά στο άκρο του δείγματος, η



ανάπτυξη της θραύσης μπορεί να παρεμποδιστεί. Τα δύο αυτά αποτελέσματα επηρεάζουν, με διαφορετικό τρόπο, την φαινόμενη αντοχή ενός τυπικού βραχώδους υλικού: i) η συγκέντρωση τάσης τείνει να μειώνει, ενώ αντίθετα η σύσφιξη τείνει να αυξάνει την φαινόμενη αντοχή.

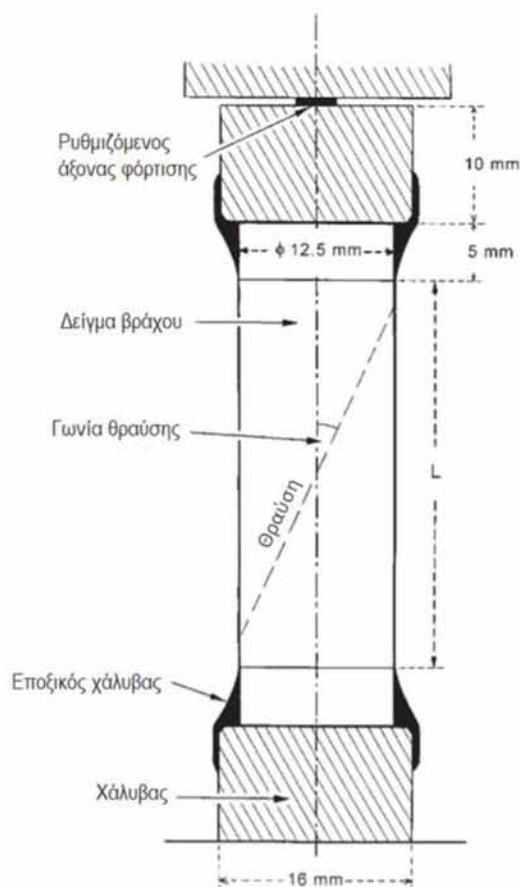
Μια απλή μέθοδος για να εξαλειφθεί η επίδραση άκρου τύπου σύσφιξης (clamping end effect) που προκαλείται από την τριβή στη διεπαφή βράχου-χάλυβα, είναι η εφαρμογή διαφόρων ειδών λιπαντικών μεταξύ της επιφάνειας του άκρου του πετρώματος και της χαλύβδινης πλάκας, σχήμα 1.1 (2). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, αναπτύσσονται κατακόρυφες ρωγμές οι οποίες εκτείνονται από τα δύο άκρα του δοκιμίου του πετρώματος προς το μέσο του. Η χρήση λιπαντικού στο δείγμα του πετρώματος είναι υπεύθυνη για την δημιουργία του παραπάνω φαινομένου. Η αντοχή σε θλίψη που επιτυγχάνεται με αυτή τη μέθοδο είναι διαφορετική για διαφορετικά λιπαντικά και για αυτόν τον λόγο η μέθοδος δεν ενδείκνυται.

Μια άλλη μέθοδος που θα μπορούσε να εφαρμοστεί είναι η επαφή του κυλίνδρου με το πέτρωμα μέσω ενός μετάλλου που είχε πανομοιότυπες μηχανικές ιδιότητες. Με αυτό τον τρόπο δεν αναπτύσσεται συγκέντρωση τάσεων στις γωνίες, διότι δεν αναπτύσσονται δυνάμεις διάτμησης στη διεπιφάνεια δοκιμαστικής μηχανής-βράχου. Η αναλογία μήκους/διαμέτρου (L/D) είναι συνήθως περίπου 2, έτσι ώστε κάθε ρωγμή με φυσική κλίση μικρότερη από περίπου  $25^{\circ}$  έως τη μέγιστη θλίψη να διαχωρίζει μία από τις επιφάνειες των άκρων του δείγματος. Στην πραγματικότητα, είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να «ταιριάξουν» οι μηχανικές ιδιότητες ενός πετρώματος με τα μέταλλα, επειδή τα περισσότερα πετρώματα παρουσιάζουν πολύπλοκα μη ελαστικά χαρακτηριστικά πριν από τη θραύση. Συνεπώς, η προσέγγιση αυτή δεν είναι ρεαλιστική.

Επίσης μια άλλη προσέγγιση είναι η βελτίωση του σχήματος του δοκιμίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επίδραση της αναντιστοιχίας (mismatch), που παρατηρείται στα άκρα του δείγματος, να μην εμφανίζεται στις εσωτερικές περιοχές του δείγματος όπου λαμβάνει χώρα η θραύση. Το δείγμα έχει σχήμα όπου ονομάζεται "dog-bone" (κόκκαλο σκύλου) με κεντρικό τμήμα (μικρού πάχους) και μεγάλης καμπυλότητας, το οποίο προτάθηκε από τον Brace (1964), σχήμα 1.1 (3). Η συγκέντρωση τάσεων στα δοκίμια αυτά είναι εξαιρετικά μικρή και μπορεί να αγνοηθεί, σύμφωνα με την τρισδιάστατη φωτοελαστική ανάλυση. Ταυτοχρόνως, οι επιδράσεις της σύσφιξης και της συγκέντρωσης τάσεων στη διεπιφάνεια χάλυβα-βράχου εξακολουθούν να εμφανίζονται στο δοκίμιο, αλλά αυτό δεν είχε καμία επιρροή στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου. Τα δοκίμια του Brace ήταν αρκετά λεπτά με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται καμπτικές τάσεις. Οι τάσεις αυτές υπολογίστηκαν με τη χρήση επιμηκυνσιόμετρων ενώ οι αξονικές τάσεις διορθώθηκαν για κάμψη, σε κάθε δοκιμή.

## 1.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

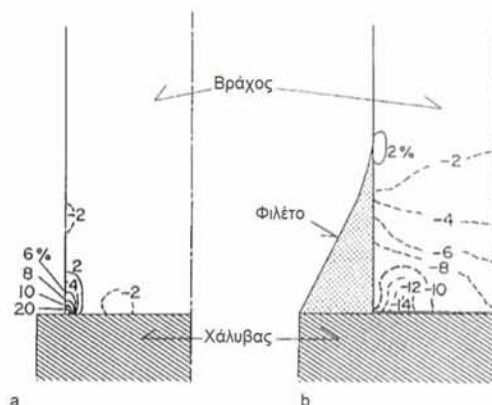
Ο Mogi (1966) πρότεινε μια διαφορετική διαμόρφωση δοκιμίου, διότι τα δείγματα του Brace έχουν ένα μειονέκτημα διότι απαιτούν μια τεχνική λείανσης αρκετά περίπλοκη σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ευθύγραμμων λείων κυλίνδρων. Η διαμόρφωση που προτάθηκε από τον Mogi συνδυάζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά του δείγματος Brace με μεγαλύτερη ευκολία κατασκευής. Το δείγμα είναι ένας μακρύς κύλινδρος του οποίου τα άκρα έρχονται σε επαφή με τον χάλυβα μέσω εποξικού υλικού (epoxy), το οποίο περιλαμβάνει μία λεπτή επίστρωση με μικρά σωματίδια χάλυβα. Το πάχος του εποξικού υλικού μειώνεται σταδιακά από τα ακραία τεμάχια χάλυβα προς το μέσο του δοκιμίου για να σχηματίσει μία λεία επίστρωση. Υπάρχουν πιθανότητες να εξαλειφθεί το μεγαλύτερο μέρος της συγκέντρωσης τάσης κατά την επαφή του βράχου με το χάλυβα, λόγω της σταδιακής μείωσης του πάχους του εποξικού υλικού.



*Σχήμα 1.2. Η προτεινόμενη διαμόρφωση του δοκιμαστικού δοκίμιο (Mogi, 2007).*

Το εποξικό υλικό έχει μέτρο ελαστικότητας ελαφρώς μικρότερο σε σχέση με την πλειοψηφία των περισσότερων βράχων. Σημειώνεται ότι το ακριβές σχήμα της επιφάνειας της επίστρωσης δεν αποτελεί κρίσιμη παράμετρο. Τα δοκίμια αστοχούν

με τέτοιον τρόπο όπου φαίνεται πως δεν υπάρχει συγκέντρωση τάσης κοντά στα άκρα του δοκιμίου. Οι θραύσεις εμφανίζονται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου και δεν εισέρχονται στην περιοχή της επίστρωσης του δοκιμίου με τον εποξικό χάλυβα. Γενικά δεν δημιουργούνται θραύσεις στην περιοχή των επιστρώσεων. Οι Yoshikawa και Mogi (1990) με αριθμητικό υπολογισμό (σχήμα 1.3), απέδειξαν ότι η κατανομή τάσεων, στο κύριο τμήμα, είναι ομοιογενής και πως δεν υπάρχει συγκέντρωση τάσης κοντά στην περιοχή της επίστρωσης.



**Σχήμα 1.3.** Κατανομή αξονικής τάσης, στην οποία φαίνεται η απόκλιση της εφαρμοζόμενης τάσης στο κέντρο του δείγματος. Οι θετικές τιμές δηλώνουν πλεόνασμα και οι αρνητικές τιμές δηλώνουν έλλειψη τιμών τάσης (κανονικοποιημένες ως προς τη μέση εφαρμοζόμενη τάση), αντίστοιχα. (α) Άμεση εφαρμογή φορτίου σε βράχο. (β) Εφαρμογή φορτίου από χάλυβα σε βράχο με επίστρωση (fillet) (Yoshikawa and Mogi, 1990).

Η συγκέντρωση τάσης κοντά στα άκρα του βραχώδους δοκιμίου εξασθενεί, αλλά παρ'όλα αυτά μπορεί να εμφανιστεί σύσφιξη (clamping) στα άκρα του. Το δοκίμιο έχει μήκος που επιτρέπει την πλήρη διάδοση των θραύσεων (propagation of fractures) εντός ενός ομοιόμορφου πεδίου τάσεων, έχοντας ως αποτέλεσμα την αποφυγή της επίδρασης της σύσφιξης. Το μεγαλύτερο δοκίμιο που απαιτείται ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο σύσφιξης, καθιστά πιθανή την εμφάνιση κάμψης, κυρίως λόγω της αναντιστοιχίας των αξόνων φόρτισης και των δοκιμίων. Για να διατηρηθεί στο ελάχιστο η κάμψη πρέπει :

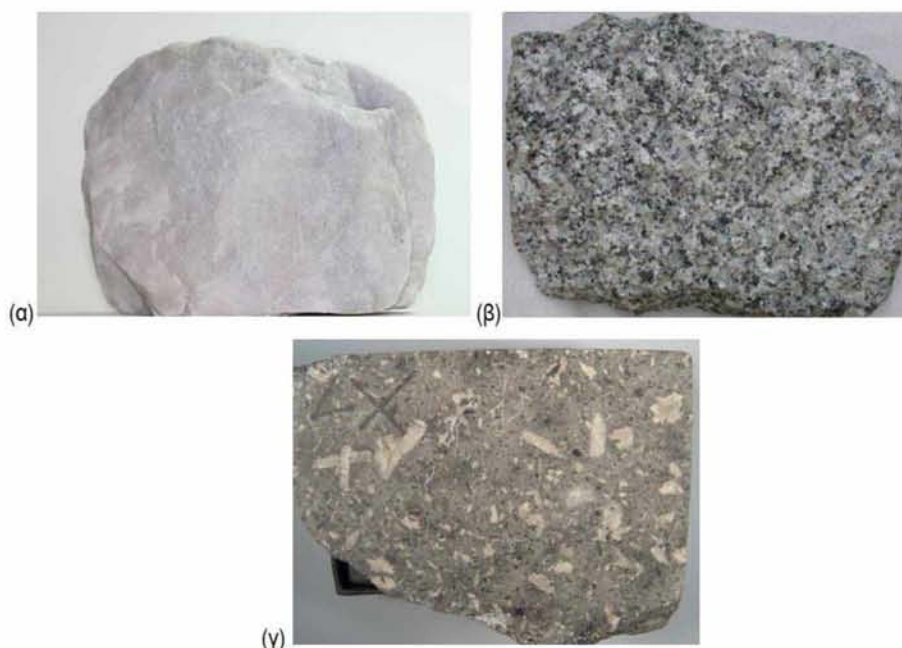
- τα άκρα του δείγματος να είναι παράλληλα μεταξύ τους,
- το φορτίο να εφαρμοστεί σε μία μικρή περιοχή στο κέντρο του ανώτερου χαλύβδινου τμήματος στην περιοχή δηλαδή του ρυθμιζόμενου άξονα φόρτισης (όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2),
- να διατηρηθεί όσο το δυνατό πιο μικρό το μήκος των ακραίων τμημάτων του δοκιμίου.

Συνεπώς, η διαμόρφωση δείγματος του Mogi φαίνεται να είναι πιο πρακτική σε σχέση με του Brace, εξαλείφοντας τα περισσότερα αρνητικά χαρακτηριστικά του

μικρού μήκους κυλίνδρου. Επίσης η διαμόρφωση του είναι εξίσου εύκολη γιατί και στις δύο περιπτώσεις το δείγμα του βράχου είναι κυκλικού κυλινδρικού σχήματος.

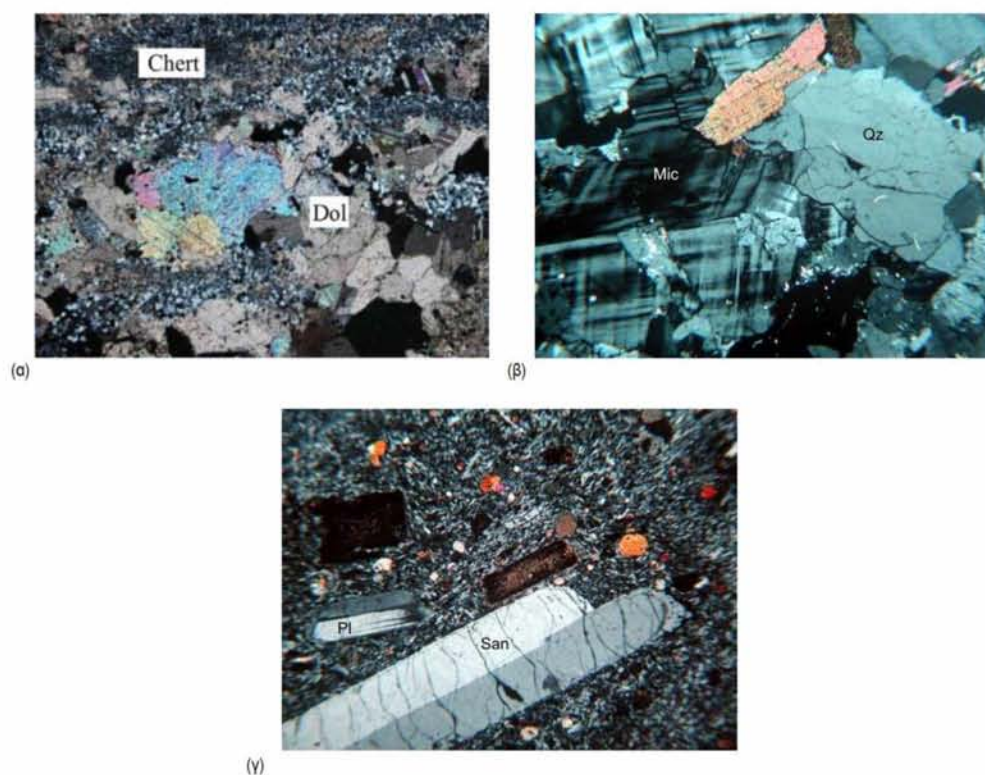
## 1.2 Ο ΛΟΓΟΣ ΜΗΚΟΥΣ / ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΓΩΝΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε στη προηγούμενη ενότητα, τα βραχώδη δοκίμια τα οποία έχουν μικρό μήκος αναπτύσσουν μεγαλύτερη αντοχή λόγω του φαινομένου σύσφιξης. Το φαινόμενο αυτό μειώνεται καθώς αυξάνουμε τον λόγο μήκους/διαμέτρου και εξαφανίζεται έως ότου φθάσουμε σε μια κρίσιμη τιμή. Από την κρίσιμη τιμή και πάνω, η αντοχή θα παραμένει σταθερή και θα είναι ίση με την πραγματική αντοχή του δείγματος υπό ομοιόμορφη θλίψη. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν αποτελέσματα από πειράματα μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης που πραγματοποιήθηκαν από τον Mogi έτσι ώστε να ληφθεί η κρίσιμη τιμή του λόγου μήκους/διάμετρος καθώς και η σχέση μεταξύ της φαινόμενης αντοχής και της κρίσιμης τιμής του λόγου αυτού. Στα πειράματα που πραγματοποίησε ο Mogi, ο ρυθμός καταπόνησης διατηρήθηκε σταθερός σε περίπου  $10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  και η συσκευή τριαξονικής δοκιμής που σχεδιάστηκε από τον Brace χρησιμοποιήθηκε για δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.



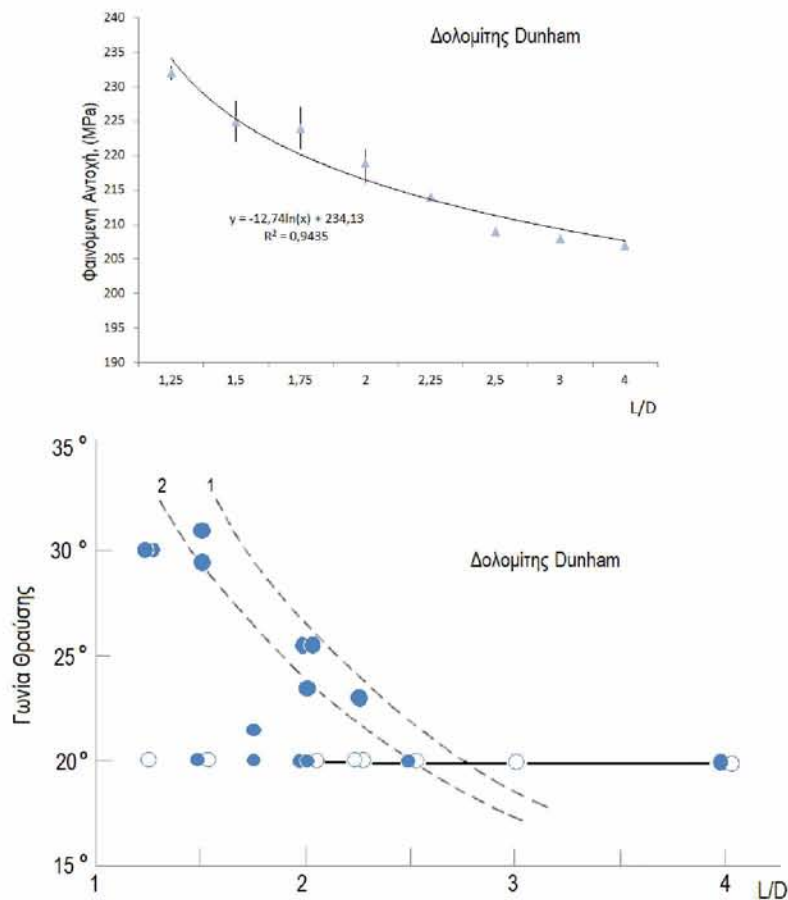
**Εικόνα 1.1.** (α) Δολομίτης (β) Γρανίτης (γ) Τραχείτης. (Πηγή: Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι δολομίτης (Dunham), γρανίτης (Westerly) και τραχείτης (Mizuho). Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζονται δείγματα από κάποιους παρεμφερείς τύπους των πετρωμάτων αυτών. Στα πειράματα του Mogi έγιναν μετρήσεις της φαινόμενης αντοχής σε θλίψη και της γωνίας θραύσης σε σχέση με τον λόγο μήκους/διαμέτρου (Mogi, 1966). Ο δολομίτης Dunham και ο γρανίτης Westerly είναι συμπαγείς βράχοι ομοιόμορφης δομής, ενώ ο τραχείτης Mizuho είναι πορώδης (πορώδες 8,5%) με μη ομοιόμορφη κατανομή πόρων. Στην εικόνα 1.2 στην οποία παρατίθενται φωτογραφίες μικροσκοπίου (από Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης) παρεμφερών τύπων των πετρωμάτων αυτών φαίνεται καλύτερα η κρυσταλλική δομή τους. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο τραχείτης διακρίνεται από μία μικροκρυσταλλική (υαλώδη) δομή με μεγάλους φαινοκρυστάλλους αλκαλιούχων αστρίων (σανίδιο) σε αντίθεση με τους άλλους δύο τύπους πετρωμάτων. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποίησε ο Mogi συνοψίζονται στον πίνακα 1.1 και στα σχήματα 1.4, 1.5 και 1.6. Σημειώνεται ότι, L και D είναι το μήκος και η διάμετρος του κεντρικού κυλινδρικού τμήματος του δοκιμίου, αντίστοιχα.



**Εικόνα 1.2.** Φωτογραφίες των πετρωμάτων από μικροσκόπιο. **(α)** Δολομίτης ([https://www.researchgate.net/figure/Microscopic-and-SEM-photos-of-chert-and-dolomite-a-b-and-c-are-microscopic-photos\\_fig2\\_314714731](https://www.researchgate.net/figure/Microscopic-and-SEM-photos-of-chert-and-dolomite-a-b-and-c-are-microscopic-photos_fig2_314714731)) **(β)** Γρανίτης ~ Mic:Μικρολινής, Qz:χαλαζίας, Bi:Βιοτίτης (Πηγή: Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης) **(γ)** Τραχείτης~ Pl:Πλαγιόκλαστο, San:Σανίδιο, Bi:Βιοτίτης, Crx:Κλινοπυρόξενος (Πηγή: Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης) .

Δολομίτης Dunham (Σχήμα 1.4). Στο σχήμα αναγράφονται οι μέσες τιμές δύο ή τριών μετρήσεων αντοχής και η τυπική απόκλιση. Η αναπαραγωγιμότητα (reproducibility) της αντοχής (1% ή καλύτερα) είναι πολύ καλή. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην ομοιογενή δομή αυτού του βράχου και στην υψηλή ακρίβεια της παρούσας μέτρησης. Η φαινόμενη αντοχή μειώνεται αισθητά με την αύξηση του λόγου L/D, αλλά η τιμή γίνεται σχεδόν σταθερή σε υψηλές τιμές L/D. Η κρίσιμη τιμή,  $(L/D)_{critical}$ , πάνω από την οποία η φαινόμενη αντοχή γίνεται σχεδόν σταθερή, είναι περίπου 2,5. Σ' αυτό το βράχο, η θραύση είναι τύπου διάτμησης. Η γωνία μεταξύ της θραύσης και του άξονα φόρτισης επίσης μειώνεται σημαντικά με αύξηση του λόγου L/D και γίνεται σχεδόν σταθερή ( $20^{\circ}$ ) πάνω από  $(L/D)_{critical}$ . Στο σχήμα 1.4 (κάτω), οι μεγάλοι κλειστοί κύκλοι δείχνουν τις γωνίες των επιπέδων ρηγμάτωσης που διαπερνούν όλο το δοκίμιο και οι μικροί κλειστοί κύκλοι δείχνουν τμηματικά επίπεδα ρηγμάτωσης.



**Σχήμα 1.4.** Η σχέση της φαινόμενης αντοχής σε θλίψη (πάνω σχήμα) και της γωνίας θραύσης (κάτω σχήμα) συναρτήσεως του λόγου μήκους/διαμέτρου στον δολομίτη Dunham. Κάτω σχήμα: μεγάλος κλειστός κύκλος: καλή ρηγμάτωση, μικρός κλειστός κύκλος: μερική ρηγμάτωση, ανοικτός κύκλος: μικροδιαρρήξεις, διακεκομμένες γραμμές 1 και 2: υπολογισμένες καμπύλες (Mogi, 2007).

Εκτός από τις πραγματικές ρηγματώσεις, παρατηρήθηκαν κανονικά πρότυπα μικροθραύσεων, χωρίς μετατόπιση λόγω διάτμησης, στο κεντρικό τμήμα ορισμένων δοκιμίων. Η γωνία μεταξύ αυτών των μικροθραύσεων και του άξονα φόρτισης

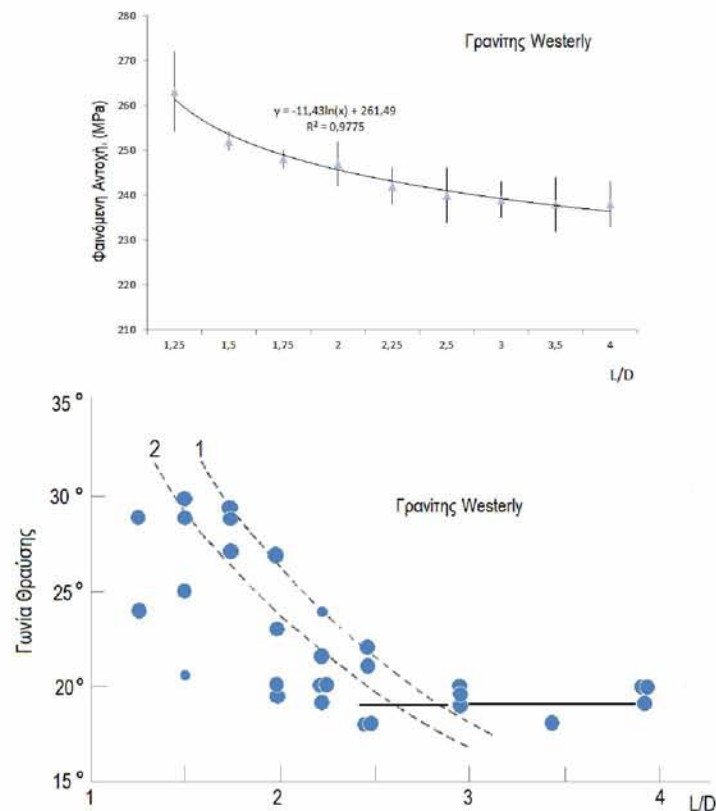
υποδεικνύεται με ανοικτούς κύκλους. Ο προσανατολισμός των κύριων θραύσεων εξαρτάται από τον λόγο  $L/D$ , ενώ για τον προσανατολισμό των μικροθραύσεων δεν ισχύει το ίδιο. Σημειώνεται ότι για μεγάλες τιμές  $L/D$  οι παραπάνω προσανατολισμοί συμπίπτουν. Η διακεκομμένη καμπύλη (1) στο Σχήμα 1.4 (κάτω) υπολογίζει την τιμή  $\theta$  από την σχέση

$$\cot \theta = L/D, \quad (1.1)$$

όπου  $\theta$  είναι η φαινόμενη γωνία θραύσης. Η διακεκομμένη καμπύλη (2) υπολογίζει την τιμή  $\theta$  από την σχέση

$$\cot \theta = (L + 0.25)/D \quad (1.2)$$

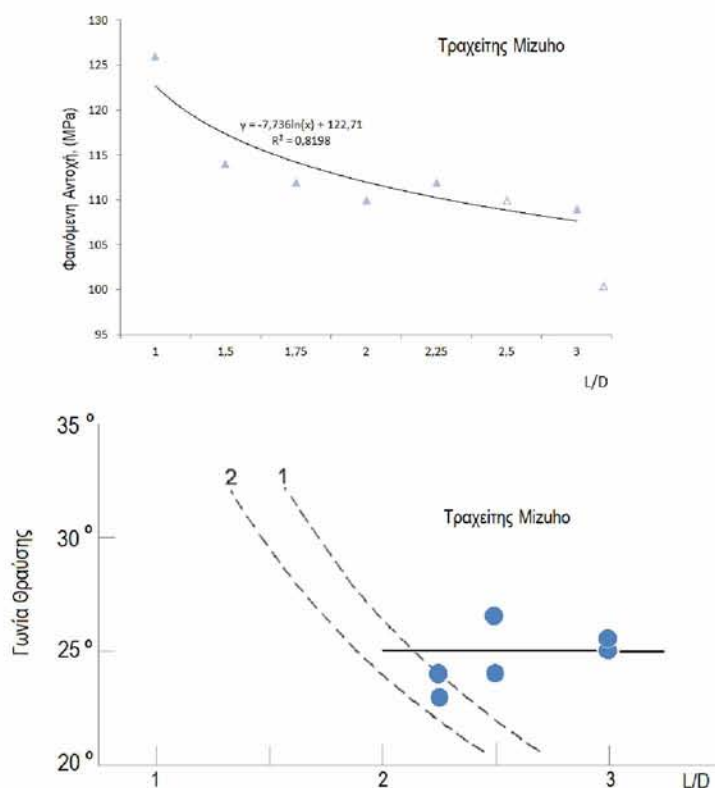
και λαμβάνει υπόψη ότι μία ευθεία ρηγμάτωση απέχει περίπου 3mm από τη βάση του επιστρώματος (fillet) και όχι ακριβώς στη βάση του επιστρώματος, όπως στην εξίσωση (1). Τα παρατηρούμενα σημεία, των πειραματικών δεδομένων, φαίνονται να βρίσκονται περίπου μεταξύ των καμπυλών (1) και (2), γεγονός που υποδηλώνει ότι η γωνία του επίπεδου θραύσης (fault angle) σε μικρά δοκίμια επηρεάζεται έντονα από την σύσφιξη στα άκρα των δοκιμίων. Δηλαδή, η ρωγμάτωση αναγκάζεται να διαδοθεί μεταξύ των αντίθετων γωνιακών άκρων του δείγματος.



**Σχήμα 1.5.** Η σχέση της φαινόμενης αντοχής σε θλίψη (πάνω σχήμα) και της γωνίας θραύσης (κάτω σχήμα) συναρτήσει του λόγου μήκους/διαμέτρου στον γρανίτη Westerly (Mogi, 2007).

*Γρανίτης Westerly* (σχήμα 1.5). Η επίδραση του λόγου  $L/D$  στη δύναμη και στη γωνία θραύσης είναι παρόμοια με αυτή του δολομίτη, με διαφορά την μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών αντοχής. Αυτή η διακύμανση (<3%) μπορεί να οφείλεται στο μεγαλύτερο μέγεθος των κόκκων και στην υψηλή ευθραυστότητα (brittleness) αυτού του πετρώματος. Η αντοχή παραμένει σταθερή σε δείγματα μεγάλου μήκους. Η κρίσιμη τιμή του λόγου  $L/D_{critical}$  είναι επίσης 2.5, όπως και στην περίπτωση του δολομίτη Dunham. Οι γωνίες θραύσης επίσης αλλάζουν με την αλλαγή της αναλογίας  $L/D$  και γίνονται σταθερές ( $\theta=19^{\circ}$ ) σε μεγαλύτερα δοκίμια. Σε αυτή την περίπτωση, η τυπική επιφάνεια θραύσης δεν είναι τόσο επίπεδη όσο στον δολομίτη και επίσης δεν εμφανίζονται μικροθραύσεις.

*Τραχείτης Mizuho* (σχήμα 1.6). Η αντοχή επίσης μειώνεται με την αύξηση του λόγου  $L/D$  και γίνεται σταθερή πάνω από μια κρίσιμη τιμή (2.0) του λόγου  $L/D_{critical}$ , αλλά αυτή η τιμή είναι μικρότερη από εκείνη που λαμβάνεται για τα προαναφερθέντα δοκίμια δολομίτη και γρανίτη. Η τελική τιμή της γωνίας θραύσης είναι μεγαλύτερη ( $>25^{\circ}$ ) από τις άλλες δύο. Σε αυτό το πέτρωμα, μερικές φορές αναπτύσσονται καμπτικές αστοχίες (θραύσεις) σε υψηλότερες τιμές  $L/D$ . Μια τέτοια θραύση σχηματίζεται κάθετα στον άξονα του δοκιμίου. Η αντοχή των άλλων δύο ήταν σημαντικά χαμηλότερη από την κανονική περίπτωση, όπως φαίνεται από τους ανοικτούς κύκλους στο Σχήμα 1.5 (πάνω). Η κάμψη μπορεί να προκλήθηκε από μία ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων στο δείγμα λόγω της πορώδους δομής.



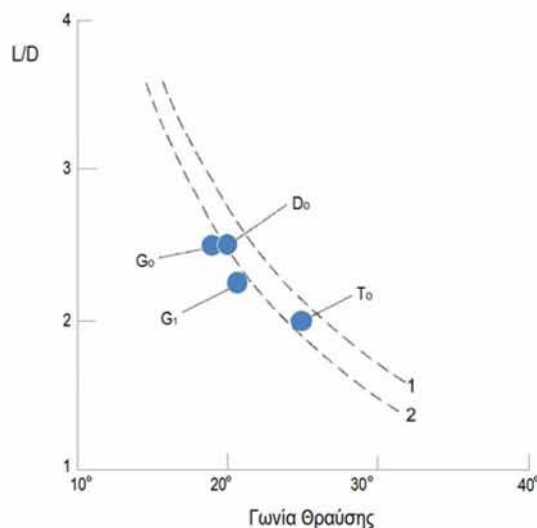
**Σχήμα 1.6.** Η σχέση της φαινόμενης μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (πάνω σχήμα) και της γωνίας θραύσης (κάτω σχήμα) συναρτήσει του λόγου μήκους/διαμέτρου στον τραχείτη Mizuho. Ανοιχτό τρίγωνο: εμπεριέχει και κάμψη (Mogi, 2007).



Έτσι, η επίδραση του λόγου  $L/D$  στην αντοχή και τη γωνία θραύσης για αυτούς τους τρεις τύπους πετρωμάτων είναι σημαντική σε δείγματα μικρών διαστάσεων (μικρού μήκους). Πάνω από μια κρίσιμη τιμή του λόγου  $L/D$ , η δύναμη και η γωνία θραύσης γίνονται ανεξάρτητες από την αναλογία  $L/D$ . Αυτή η τελική τιμή της αντοχής και της γωνίας θραύσης αντιπροσωπεύει (πιθανώς) τη αντοχή και τη γωνία θραύσης υπό ομοιόμορφη θλιπτική τάση για τους ακόλουθους λόγους:

1. Η θραύση αρχίζει και τελειώνει στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου. Επομένως, οι συγκεντρώσεις τάσεων στα άκρα δεν έχουν επίδραση στην αντοχή.
2. Η αντοχή και η γωνία θραύσης είναι ανεξάρτητες από τον λόγο  $L/D$ , οπότε δεν λαμβάνεται υπόψη και το φαινόμενο σύσφιξης (clamping effect).
3. Εάν η κάμψη είναι σημαντική, η αντοχή θα πρέπει να μειώνεται με την αύξηση του μήκους του δοκιμίου. Σημειώνεται ότι σε μεγαλύτερα δείγματα ( $L/D < 4$ ), μια τέτοια μείωση της αντοχής είναι σχετικά μικρή και έτσι το φαινόμενο κάμψης είναι πρακτικά αμελητέο.

Η σχέση μεταξύ της κρίσιμης αναλογίας μήκους/διαμέτρου ( $L/D$ ) και της τελικής γωνίας θραύσης  $\theta_0$  παρουσιάζεται στο Σχ. 1.7. Οι καμπύλες (1) και (2) σε αυτό το σχήμα υπολογίζονται όπως αναφέρεται παραπάνω από τις σχέσεις (1.1) και (1.2). Η συμφωνία μεταξύ της παρατήρησης (πείραμα) και του υπολογισμού (αριθμητικές μέθοδοι) είναι καλή, ειδικά για την καμπύλη (2)

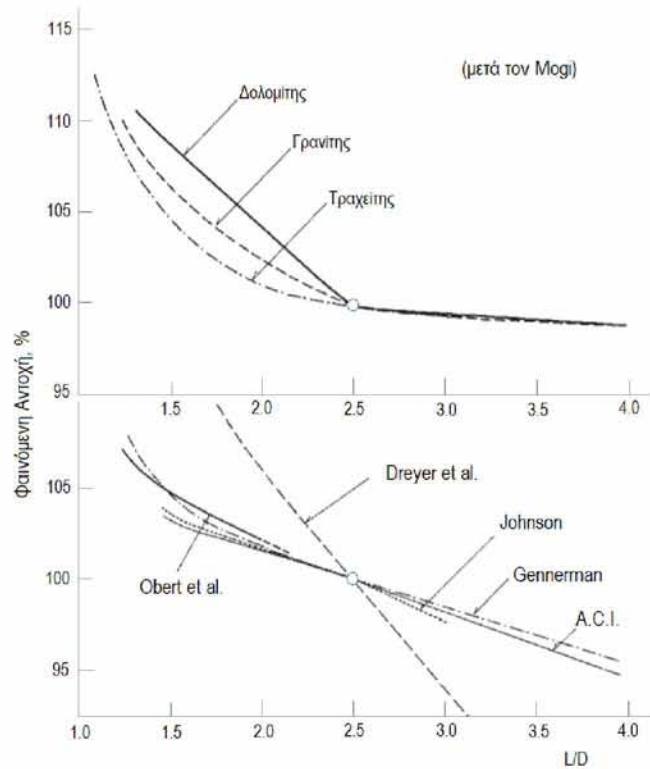


**Σχήμα 1.7.** Η σχέση μεταξύ της γωνίας θραύσης και της κρίσιμης αναλογίας μήκους/διαμέτρου. Διακεκομμένες γραμμές 1 και 2: υπολογισμένες καμπύλες.  $D_0$ : δολομίτης (πλευρική πίεση = 0,1 MPa).  $G_0$ : γρανίτης (0,1 MPa).  $G_1$ : γρανίτης (17MPa).  $T_0$ : τραχείτης (0,1 MPa) (Mogi, 2007).

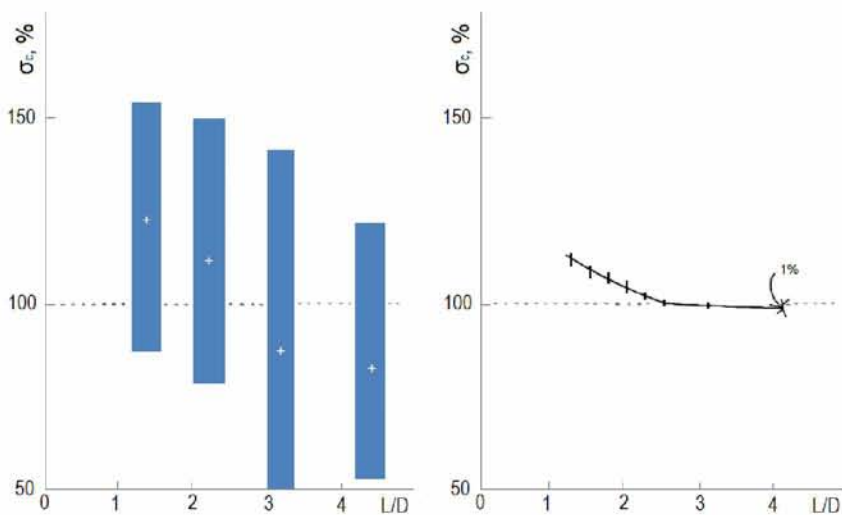
Βράχος	L/D	Νο. των δειγμάτων	Φαινομενική Αντοχή, Μρα
Δολομίτης Dunham	1.25	2	232 ± 1
	1.50	3	225 ± 3
	1.75	1	224 ± 3
	2.00	3	219 ± 3
	2.25	2	214 ± 0
	2.50	2	209 ± 0
	3.00	2	208 ± 0
	4.00	1	207
Γρανίτης Westerly	1.25	2	263 ± 9
	1.50	2	252 ± 2
	1.75	2	248 ± 2
	2.00	3	247 ± 5
	2.25	3	242 ± 4
	2.50	4	240 ± 6
	3.00	2	239 ± 4
	3.50	2	238 ± 6
Τραχείτης Mizuho	1.00	1	126
	1.50	1	114
	1.75	1	112
	2.00	1	110
	2.25	1	112
	2.50	1	110
	3.00	1	109

*Πίνακας 1.1. Η φαινομενική αντοχή των δειγμάτων με διαφορετική αναλογία μήκους/διαμέτρου υπό μονοαξονική θλίψη (Mogi, 2007).*

Πολλοί ερευνητές έχουν διερευνήσει την επίδραση του λόγου μήκους/διαμέτρου στην φαινόμενη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη για τους βράχους (π.χ., Obertetal., 1946, Dreyer et al., 1961) και για το σκυροδέμα (π.χ., Gonneman, 1925, Johnson, 1943, ACI, 1914 ). Αυτά τα πειράματα διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας την συμβατική μέθοδο στην οποία χρησιμοποιήθηκαν ίσοι κυκλικοί κύλινδροι ή πρίσματα και συνεπώς υπήρχαν συγκεντρώσεις τάσεων στην βάση του δοκιμίου. Στο Σχ. 1.8, παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα αυτών πειραμάτων (κατώτερο σχήμα) μαζί με τα προαναφερθέντα αποτελέσματα των πειραμάτων του Mogi (πάνω εικόνα). Η φαινόμενη αντοχή μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του λόγου L/D. Η έντονη επίδραση του λόγου L/D σε μικρότερα δοκίμια ( $L/D < 2$ ) προκαλείται σαφώς από την επίδραση σύσφιξης. Και αυτά τα πειράματα (των Obertetal, Dreyer κ.α.) δεν έδωσαν μια σταθερή τελική τιμή αντοχής και γωνίας θραύσης για μεγάλα L/D. Η φαινόμενη αντοχή εξακολουθεί να μειώνεται με λόγο L/D πάνω από την αναμενόμενη κρίσιμη αναλογία  $(L/D)_{critical}$ . Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στην κάμψη που προκαλείται από μια ασυμμετρία του δείγματος και του άξονα φόρτισης, ή από την ανομοιόμορφη δομή του βράχου και του σκυροδέματος.



**Σχήμα 1.8.** Σύγκριση των αποτελεσμάτων του Mogi, 1966 (πάνω εικόνα) με άλλα πειραματικά αποτελέσματα που δεν ακολουθούν την θεωρία του Mogi (κάτω σχήμα). Η σχετική αντοχή υπολογίζεται εκ νέου, η αντοχή για  $L/D=2.5$ . Obert et al. (1946): μέσος όρος για διάφορους τύπους βράχων. Dreyer et al. (1961): rock salt. A.C.I. (1914), Genneman (1925), Johnson (1943): σκυρόδεμα (Mogi, 2007).



**Σχήμα 1.9.** Απλοποιημένες σχέσεις φαινόμενης αντοχής (σχετικές τιμές) συναρτήσει της αναλογίας  $L/D$ . Αριστερή εικόνα: ανδεσίτης (Shimmura και Takata, 1961). Δεξιά εικόνα: Δολομίτης Dunham (Mogi, 1966).

Στο Σχήμα 1.9. (αριστερά) παρουσιάζεται ένα παράδειγμα παρόμοιων μετρήσεων σε ανδεδίτη από τους Shimomura και Takata (1961). Η διακύμανση των τιμών αντοχής (~ 50%) στο πείραμά τους είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του προαναφερθέντος πειράματος στον δολομίτη Dunham (Mogi) που παρουσιάζεται στο δεξί διάγραμμα του Σχ. 1.9. Από αυτό το πειραματικό αποτέλεσμα είναι αδύνατο να ληφθούν σημαντικές πληροφορίες. Τέτοιες μεγάλες διακυμάνσεις ίσως οφείλονται κυρίως στην υψηλή ανομοιογένεια των δειγμάτων των βράχων. Αυτά τα προηγούμενα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 1.8 και Σχ. 1,9 δείχνουν ότι μια κατάλληλη επιλογή από μηχανικά ομοιόμορφα δείγματα βράχου είναι πολύ σημαντική στη μηχανική των πετρωμάτων.

### 1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η συμβατική δοκιμή, η οποία χρησιμοποιεί μικρούς κυλίνδρους, συνοδεύεται από φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων και την επίδραση σύσφιξης. Σύμφωνα με τα παρόντα αποτελέσματα, τέτοιες δοκιμές μπορεί να δώσουν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή και μεγαλύτερη γωνία θραύσης. Δεδομένου ότι τα ακραία τμήματα του κυλίνδρου στερεώνονται πλευρικά σε ένα σκληρό περιμετρικό στέλεχος, το μήκος του κεντρικού τμήματος, όπου η τάση είναι σχεδόν ομοιόμορφη, είναι ακόμη μικρότερο από το πραγματικό μήκος του. Για σύγκριση με την παρούσα μέθοδο, ο Mogi πραγματοποίησε μερικές μονοαξονικές δοκιμές θλίψης χρησιμοποιώντας την συμβατική μέθοδο. Στον δολομίτη Dunham, η αντοχή που μετρήθηκε ήταν 231 MPa και η γωνία θραύσης ήταν 30°. Αυτές οι τιμές είναι 10 % και 50 % μεγαλύτερες, αντίστοιχα, από εκείνες που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας την παρούσα μέθοδο. Για το Westerly γρανίτη, η αντοχή και η γωνία θραύσης ήταν 250 MPa και 26°, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι 5 % και 36 % μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας την παρούσα μέθοδο. Έτσι, η εφαρμογή της συμβατικής δοκιμής σε παρόμοιους σκληρούς βράχους μπορεί να δώσει σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή και μεγαλύτερη γωνία θραύσης. Στο Mizuho τραχείτη, για το οποίο η πραγματική γωνία θραύσης είναι υψηλότερη, η διαφορά μεταξύ της μεθόδου που προτείνει ο Mogi και της προηγούμενης μεθόδου ήταν πολύ μικρή.

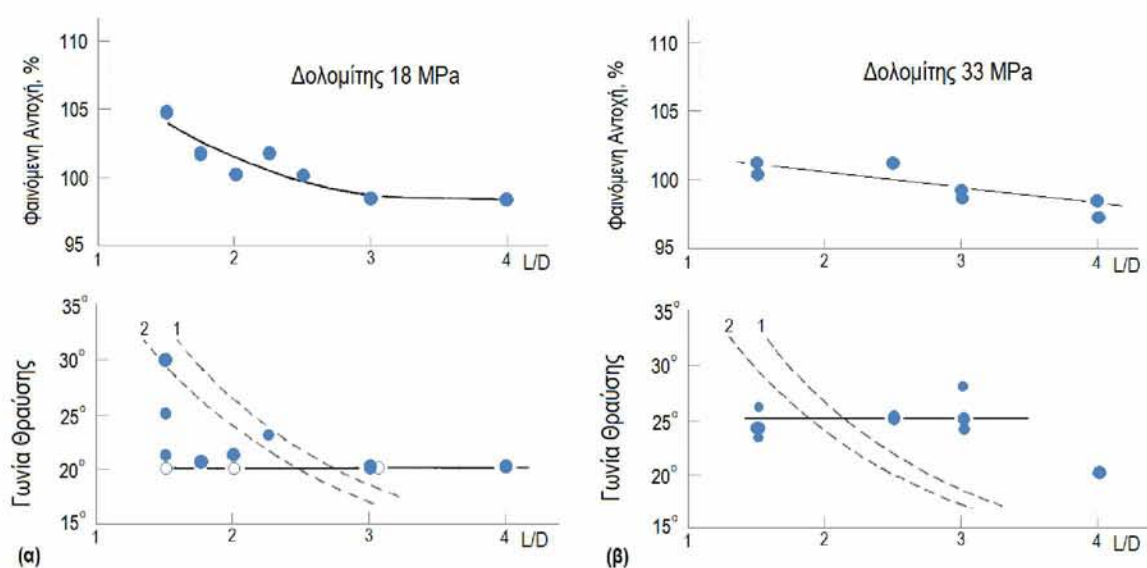
Έτσι, οι ακριβείς μετρήσεις της πραγματικής αντοχής σε θλίψη και της γωνίας θραύσης υπό μονοαξονική θλίψη μπορούν να διεξαχθούν καλύτερα με τη χρήση της διαμόρφωσης δείγματος που πρότεινε ο Mogi, που είναι ένας μακρύτερος (μεγαλύτερου μήκους) κύλινδρος με μία μικρού πάχους εποξικής επίστρωσης στα άκρα του βραχώδους δοκιμίου, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1 (4). Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αναλογία μήκους/διαμέτρου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 2.5 ( $D/L > 2.5$ ).

## 1.4 ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΑΚΡΟΥ ΜΕ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

Οι επιδράσεις άκρου (end effects) μπορούν να μετρηθούν αν υπάρξει πλευρική πίεση, φαινόμενο που διερεύνησε ο Mogi το 1966 διεξάγοντας πειράματα μετρώντας την αντοχή και την γωνία θραύσης των δειγμάτων που έχουν διάφορες αναλογίες μήκους/διαμέτρου υπό πλευρική πίεση.

Το σχήμα του δοκιμίου και η πειραματική διαδικασία είναι όμοια με την περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης, με την διαφορά ότι το δείγμα περικλείεται σε μία μεμβράνη (jacket) για να προστατευτεί από εισροές του υπό πίεση υγρού (λάδι) μέσω του οποίου ασκείται η πλευρική πίεση στο δοκίμιο. Διορθώσεις γίνονται για να ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις τριβής μεταξύ του αξονικού εμβόλου και του στεγανοποιητικού δακτυλίου του δοχείου πίεσης (pressure vessel).

Δολομίτης Dunham. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχ. 1.10 (α) και 1.10 (β). Υπό πλευρική πίεση 18 MPa, η τελική γωνία θραύσης και η κρίσιμη τιμή του λόγου L/D είναι σχεδόν η ίδια όπως και στην μονοαξονική δοκιμή. Ωστόσο, η επίδραση του λόγου L/D στη αντοχή του δοκιμίου είναι σημαντικά μικρότερη από ό, τι στην μονοαξονική περίπτωση. Η αντοχή και η γωνία θραύσης τιμή πλευρικής πίεσης μικρότερης από 33 MPa είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την αναλογία L/D.

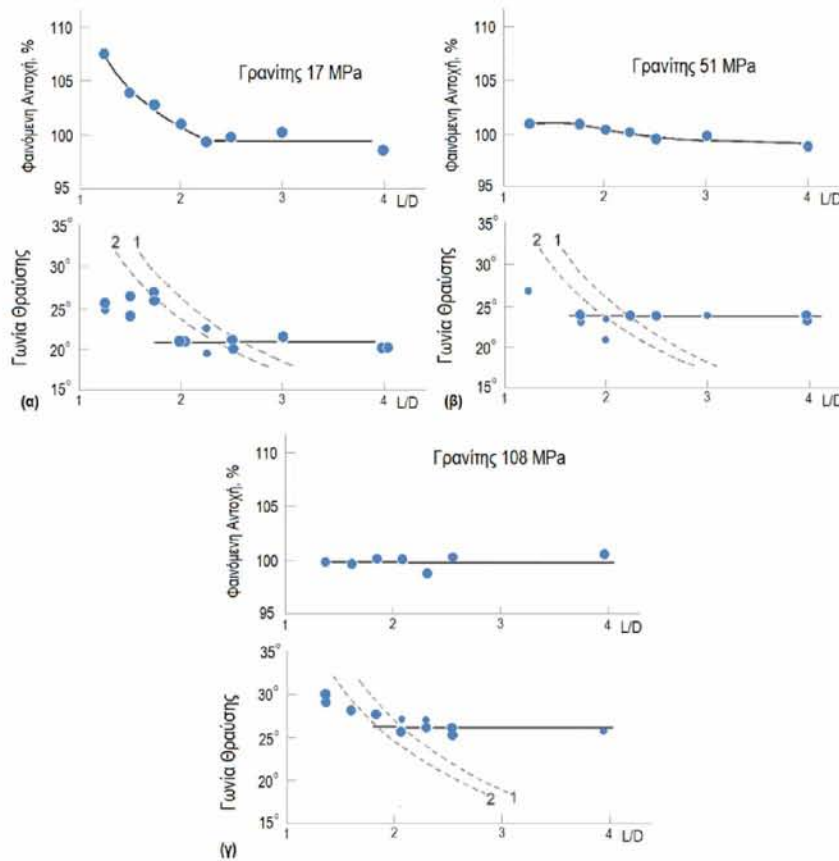


**Σχήμα 1.10.** Η σχέση της αντοχής (πάνω σχήμα) και της γωνίας θραύσης (κάτω σχήμα) εν συναρτήσει της αναλογίας L/D για τον δολομίτη Dunham υπό πλευρική πίεση (α) 18 MPa και (β) 33 MPa (Mogi, 2007).

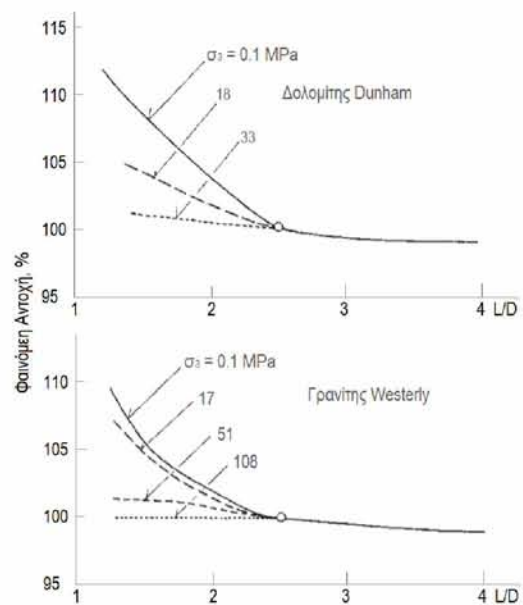
Γρανίτης Westerly. Η επίδραση του λόγου L/D προσδιορίστηκε για τρεις τιμές πλευρικής πίεσης: 17 MPa, 51 MPa και 108 MPa. Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης, η επίδραση του λόγου L/D στη δύναμη και στη γωνία θραύσης μειώνεται,

όπως φαίνεται στα σχ. 1.11 (α) - 1.11 (γ). Η γωνία θραύσης αυξάνεται σταδιακά με την πλευρική πίεση και η κρίσιμη τιμή του λόγου L/D μειώνεται επίσης.

Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι επιδράσεις άκρου μειώνονται βαθμιαία με αύξηση της πλευρικής πίεσης και γίνονται πολύ μικρές υπό πλευρική πίεση μεγαλύτερη από 30-50 MPa, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.12. Αυτή η μείωση του φαινόμενου άκρου μπορεί να οφείλεται (1) στην σχετική μείωση της επίδρασης του πλευρικού περιορισμού στα άκρα του δοκιμίου με την αύξηση της πλευρικής πίεσης, (2) στην αύξηση της γωνίας θραύσης υπό πλευρική πίεση, και (3) την αύξηση της ολκιμότητας των πετρωμάτων. Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι το σχήμα του δοκιμίου καθίσταται λιγότερο κρίσιμο σε υψηλή πίεση και έτσι η συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης μπορεί επίσης να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα όπως και η μέθοδος που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή.



**Σχήμα 1.11.** Η σχέση της αντοχής (πάνω σχήματα) και της γωνίας θραύσης (κάτω σχήματα) συναρτήσει της αναλογίας L/D για τον γρανίτη Westerly υπό πλευρική πίεση, (α) 17 MPa, (β) 51 MPa και (γ) 108 MPa (Mogi, 2007).



**Σχήμα 1.12.** Η σχέση της φαινόμενης αντοχής συναρτήσει της αναλογίας  $L/D$  για τον δολομίτη Dunham (πάνω σχήμα) και για τον γρανίτη Westerly (κάτω σχήμα) (Mogi, 2007).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

Μια εντατική κατάσταση που είναι ικανή να προκαλέσει την αστοχία σε ένα σημείο ενός βράχου, μπορεί να περιγραφεί από τις τρεις κύριες τάσεις  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ . Σε αυτή την εργασία, η θλιπτική τάση θα θεωρείται θετική και  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , δηλαδή η  $\sigma_1$  είναι η μέγιστη κύρια τάση, η  $\sigma_2$  είναι η ενδιάμεση κύρια τάση και η  $\sigma_3$  είναι η ελάχιστη κύρια τάση. Στις σύστημα κύριων συντεταγμένων, τα σημεία ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) αντιπροσωπεύουν διαφορετικές καταστάσεις τάσης που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη μιας επιφάνειας αστοχίας για ένα δεδομένο υλικό που περιγράφεται από την σχέση,

$$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3). \quad (2.1)$$

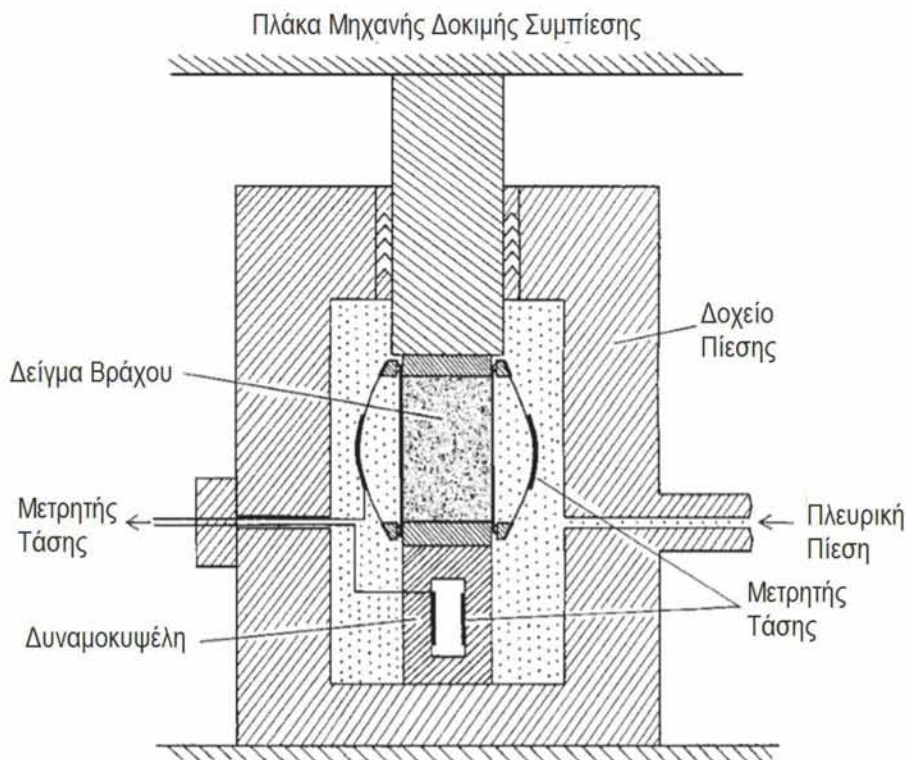
Πολλά πειράματα έχουν γίνει χρησιμοποιώντας τη τριαξονική δοκιμή, στην οποία δύο κύριες τάσεις είναι ίσες,  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$  (von Kármán, 1911, Griggs, 1936, Handin, 1966) ή  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 > 0$  (Böker, 1915). Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο όρος "συμβατική τριαξονική δοκιμή" ενώ η "πραγματική τριαξονική δοκιμή" χρησιμοποιείται για τη γενική περίπτωση στην οποία  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης και η εξάρτηση της πίεσης με την αντοχή των πετρωμάτων από τη συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης, κυρίως με βάση τα πειράματα του Mogi (Mogi, 2007).

#### 2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

##### 2.1.1 Πειραματική διαδικασία και η σχέση τάσης-παραμόρφωσης

Τα αποτελέσματα από τα πειράματα τα οποία θα επεξεργαστούμε, αφορούν δοκίμια βράχων διαφόρων τύπων από την Ιαπωνία όπου δοκιμάστηκαν σε θερμοκρασία δωματίου με τη συμβατική μέθοδο τριαξονικής θλίψης (Mogi, 1965). Η σχηματική όψη της συσκευής παρουσιάζεται στο Σχ. 2.1. Τα δείγματα δοκιμής ήταν κύλινδροι διαμέτρου 40 mm για ασθενέστερους βράχους και διαμέτρου 20 mm για σκληρούς βράχους, όπου ο λόγος ύψους / διαμέτρου ήταν σχεδόν 2,0. Τα δείγματα πρέπει να περιβάλλονται από μαλακό ελαστικό (soft rubber) για να εμποδίσουν το υγρό υπό πίεση να εισέλθει σε πορώδη δείγματα πετρωμάτων. Η αξονική τάση εφαρμόζεται από μια υδραυλική μηχανή δοκιμής. Η πλευρική πίεση παρέχεται ανεξάρτητα από



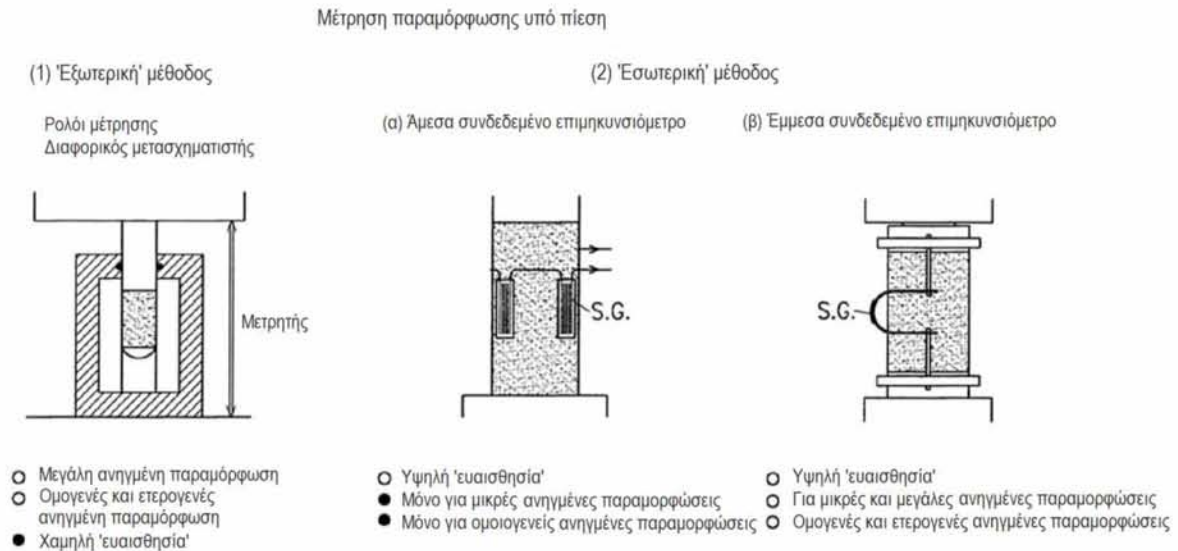


**Σχήμα 2.1.** Σχηματική όψη της τριαξονικής συσκευής (Mogi, 2007).

έναν άλλο συμπιεστή υγρού (ελαίου). Το αξονικό φορτίο μετριέται από μια κυψέλη φορτίου τοποθετημένη μεταξύ ενός ακραίου τεμαχίου χάλυβα στερεωμένου στο δείγμα δοκιμής και στον πυθμένα του δοχείου πίεσης. Η κυψέλη φόρτισης είναι ένας κλειστός κοίλος χάλυβας με ηλεκτρικό επιμηκυσιόμετρο (strain gage) συνδεδεμένο στο εσωτερικό του κυλίνδρου, το οποίο μετράει το αξονικό φορτίο χωρίς κανένα σφάλμα λόγω τριβής.

Στο Σχ. 2.2, παρουσιάζονται διάφορες μέθοδοι μέτρησης αξονικής παραμόρφωσης. Η μέθοδος (1) στα αριστερά, έχει ένα ρολόι μέτρησης ή διαφορικό μετασχηματιστή, στον οποίο η παραμόρφωση λαμβάνεται από την μετατόπιση του εμβόλου του πιεστηρίου, δεν είναι αρκετά ακριβής για μια ακριβή ανάλυση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης και δεν ισχύει για κυκλική φόρτιση επειδή αυτό το σύστημα παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη υστέρηση. Για ακριβείς μετρήσεις της παραμόρφωσης καταλληλότερη είναι η μέθοδος (2) στα δεξιά, στην οποία υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι η (α) και η (β) οι οποίες παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχ. 2.2. Στην πρώτη μέθοδο (α), ο ηλεκτρομαγνητικός δείκτης αντοχής συνδέεται απευθείας στην επιφάνεια του δείγματος πετρώματος. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα 'ευαίσθητη' και εύκολη στη χρήση, επομένως χρησιμοποιείται πιο συχνά. Ωστόσο, η μέθοδος (α) είναι ακατάλληλη για τη μέτρηση της μέσης ανηγμένης παραμόρφωσης σε ετερογενείς παραμορφώσεις, συμπεριλαμβανομένων των μικροθραύσεων, μικρών διαρροών κ.λπ. και για τη μέτρηση μεγάλων παραμορφώσεων. Στη μέθοδο (β), οι

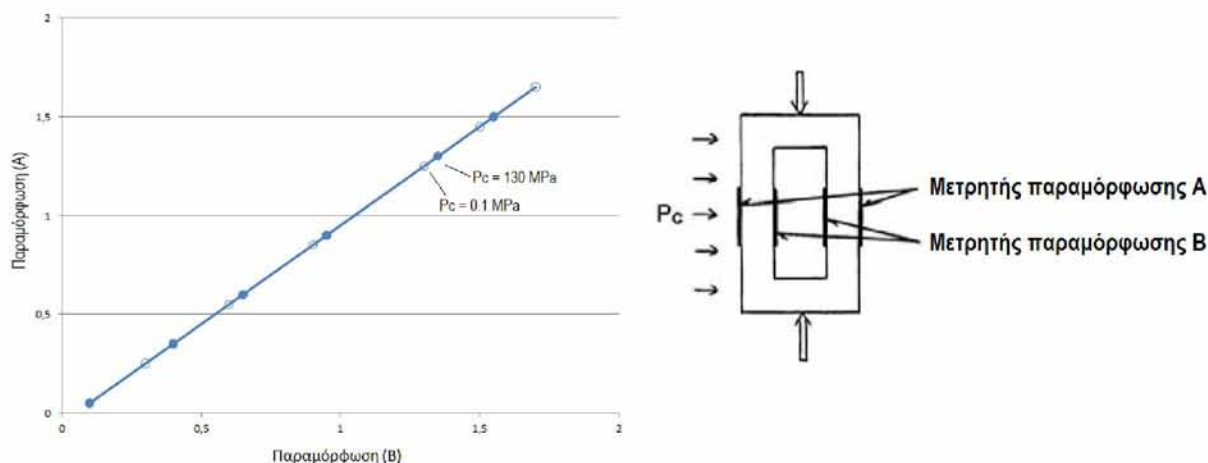
χαλύβδινες πλάκες κάμψης στερεώνονται στα άνω και κάτω άκρα χάλυβα που συνδέονται με το δείγμα πετρώματος και η συρρίκνωση του κυλινδρικού δοκιμίου κατά την δοκιμή προκαλεί την κάμψη των λεπτών χαλύβδινων πλακών. Η παραμόρφωση κάμψης της πλάκας μετράται με τους συνδεδεμένους μετρητές ανηγμένης παραμόρφωσης.



**Σχήμα 2.2.** Διάφορες μέθοδοι μέτρησης αξονικής παραμόρφωσης (Mogi, 2007).

Καθώς η ελαστική παραμόρφωση των ακραίων εμβόλων του χάλυβα είναι γενικά αμελητέα λόγω του μικρού τους πάχους, η έξοδος (output) του δείκτη παραμόρφωσης υποδεικνύει την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου πετρώματος. Δεδομένου ότι αυτό το σύστημα μέτρησης της παραμόρφωσης δεν παρουσιάζει αξιόλογη υστέρηση για φόρτιση και αποφόρτιση, αυτή η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη για πειράματα κυκλικής φόρτισης και επίσης είναι κατάλληλη για μετρήσεις μεγάλων παραμορφώσεων.

Οι ανοιχτοί κύκλοι (χωρίς γέμισμα χρώματος) στο Σχ. 2.3 αντιστοιχούν σε ατμοσφαιρική πίεση 0.1 MPa, ενώ οι κλειστοί κύκλοι αντιστοιχούν σε πίεση 130 MPa. Δεδομένου ότι η σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης (A) και της παραμόρφωσης (B) είναι σχεδόν παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις (Σχ. 2.2), η υδροστατική πίεση δεν έχει σημαντική επιρροή στον μετρητή της παραμόρφωσης. Έτσι, η μέθοδος (β) που παρουσιάζεται στην Σχήμα 2.2 ή στην Σχήμα 2.1 είναι εφαρμόσιμη σε ακριβείς μετρήσεις μικρών και μεγαλύτερων ανηγμένων παραμορφώσεων διαφόρων πετρωμάτων υπό κυκλικές φορτίσεις. Το αξονικό φορτίο που είχε εφαρμοστεί από τον Mogi ήταν με ρυθμό σχεδόν σταθερής ανηγμένης παραμόρφωσης 0,15 - 0,2% ανά λεπτό. Η διαφορική τάση μειώθηκε στο μηδέν σε διάφορα στάδια παραμόρφωσης.



**Σχήμα 2.3.** Οι παραμορφώσεις (Α) και (Β) είναι οι αξονικές παραμορφώσεις στην αντίστοιχη εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια του χαλύβδινου κοίλου κυλίνδρου που υπόκειται σε πλευρική πίεση (Mogi, 2007).

Τα πετρώματα που δοκιμάστηκαν από τον Mogi ήταν περιδοτίτης, διορίτης, γρανίτης, ανδেসίτης και τραχείτης. Η πυκνότητα και το πορώδες αυτών των βράχων φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

No.	Πέτρωμα	Πυκνότητα (gm/cm <sup>3</sup> )	Πορώδες (%)
1.	Περιδοτίτης Nabe-ishi	3.16	0.02
2.	Διορίτης Oricabe	2.78	0.4
3.	Γρανίτης Mannari	2.62	0.7
4.	Μάρμαρο Mito	2.69	0.2
5.	Ανδесίτης Shirochola	2.45	5.1
6.	Τόφφος Tatsuyama	2.46	10.2
7.	Τραχείτης Mizuho	2.24	8.5
8.	Ανδесίτης Shinkomatsu	2.17	12.6
9.	Τόφφος Ao-ishi	2.01	17.3
10.	Συγκολλημένος τόφφος Saku-ishi	1.95	21.6

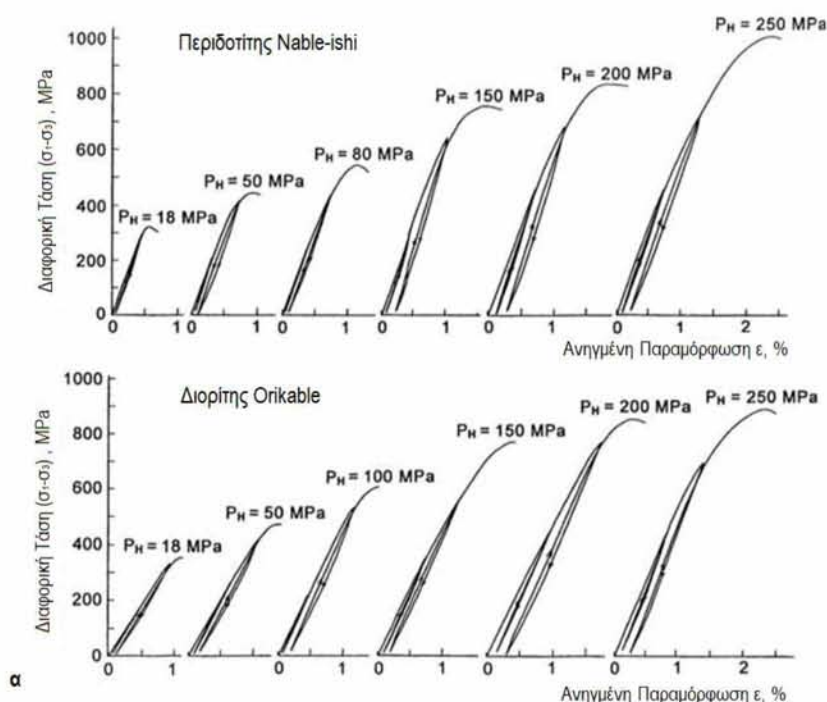
**Πίνακας 2.1.** Τα δείγματα πετρωμάτων (Mogi, 2007).

Τα δείγματα δοκιμής εξετάστηκαν για θραύση (σε συνθήκες θλίψης) για σκληρούς βράχους και σε 3%-4% ανηγμένης παραμόρφωσης για τους πιο μαλακούς βράχους. Σε διάφορα στάδια παραμόρφωσης η τάση μειώθηκε στο μηδέν ή σε πολύ μικρές τιμές και στη συνέχεια αυξήθηκε και πάλι. Οι καμπύλες τάσεως-ανηγμένης παραμόρφωσης ορισμένων από αυτούς τους βράχους κάτω από την συμβατική

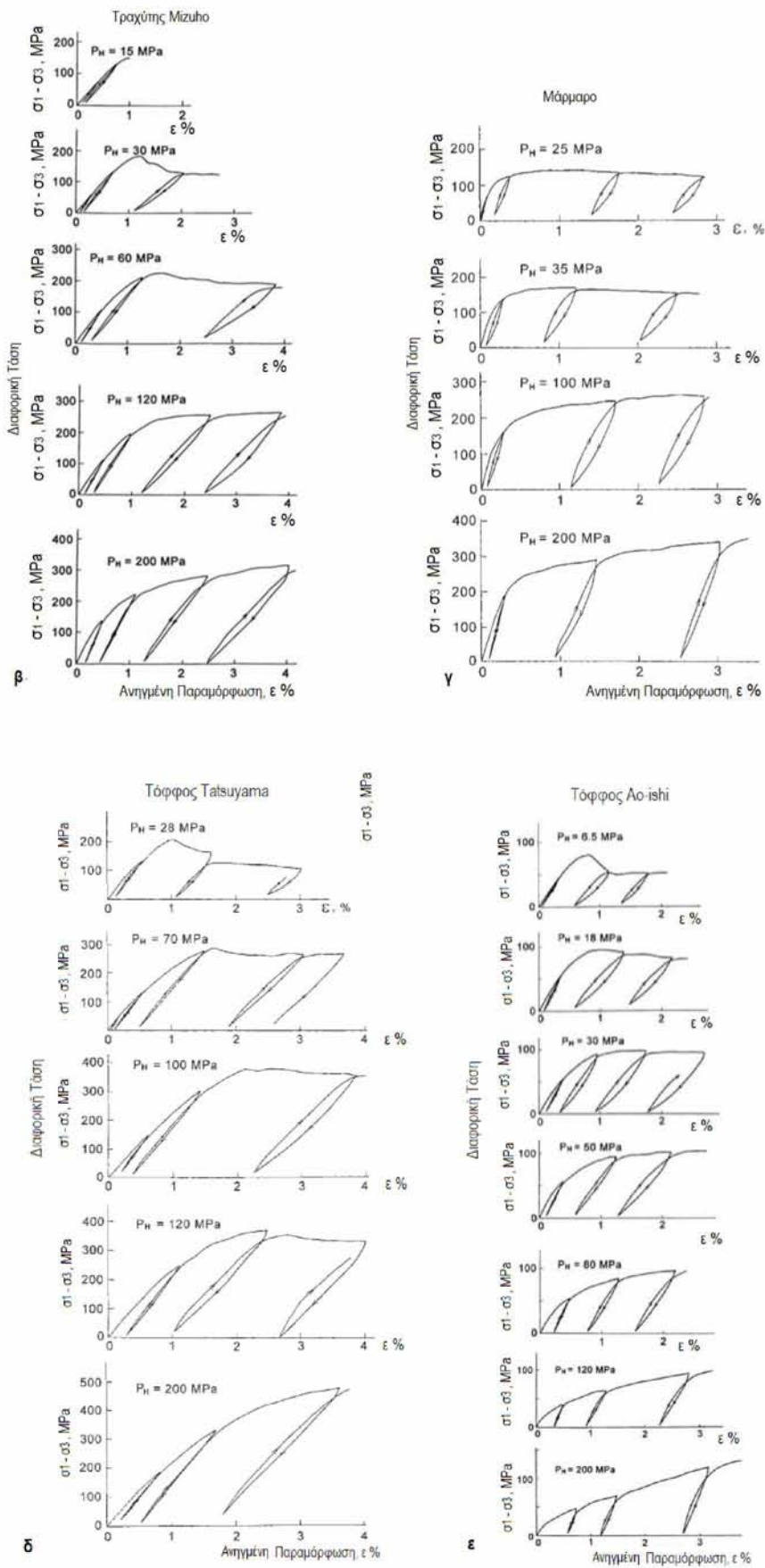
τριαξονική θλίψη για διαφορετικές τιμές της πλευρικής πίεσης ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) φαίνονται στα Σχ. 2.4 (α) - (στ). Ο κάθετος άξονας είναι η διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) σε MPa και ο οριζόντιος άξονας είναι η ανηγμένη παραμόρφωση σε ποσοστό επί τοις εκατό.

Τα πειραματικά αποτελέσματα του Mogi, δείχνουν ότι τα συμπαγή πυριγενή πετρώματα είναι πολύ ψαθυρά και γίνονται αξιοσημείωτα ισχυρότερα με την αύξηση της πλευρικής πίεσης, ενώ άλλα πορώδη και πιο μαλακά πετρώματα γίνονται όλκιμα ακόμη και υπό χαμηλή πλευρική πίεση. Ωστόσο, το ακριβές χαρακτηριστικό αυτών των καμπυλών υποδηλώνει πολύπλοκες διαδικασίες παραμόρφωσης. Για παράδειγμα, το αρχικό τμήμα της παραμόρφωσης πριν από την διαρροή, το οποίο ονομάζεται ελαστικό τμήμα, είναι σημαντικά καμπύλης (μη-γραμμικής) μορφής και περιλαμβάνει, σε πολλές περιπτώσεις, αξιόλογη μόνιμη παραμόρφωση.

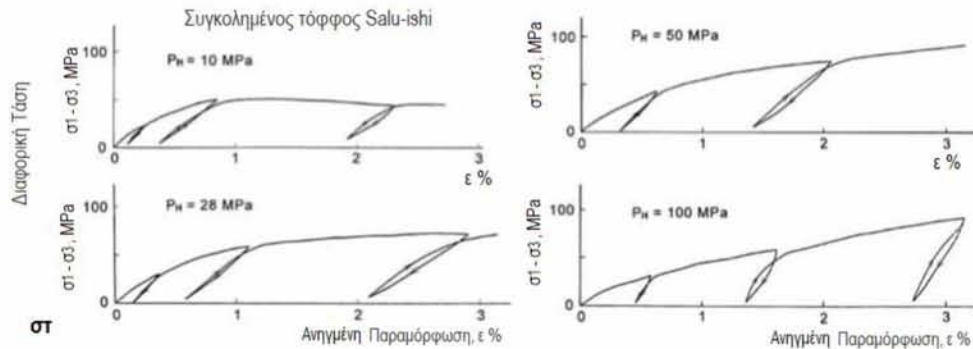
Η *ψαθυρή* συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από ξαφνική αλλαγή κλίσης στην καμπύλη τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης κοντά στο σημείο διαρροής που ακολουθείται από πλήρη απώλεια συνοχής ή αισθητή πτώση της διαφορικής πίεσης. Η *όλκιμη* συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από την παραμόρφωση χωρίς κλίση προς τα κάτω μετά το σημείο διαρροής.



**Εικόνα 2.4.** Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης υπό κυκλική αξονική φόρτιση διαφόρων ειδών πετρωμάτων.  $P_H$ : πλευρική πίεση (Mogi, 2007).



Σχήμα 2.4. Συνέχεια

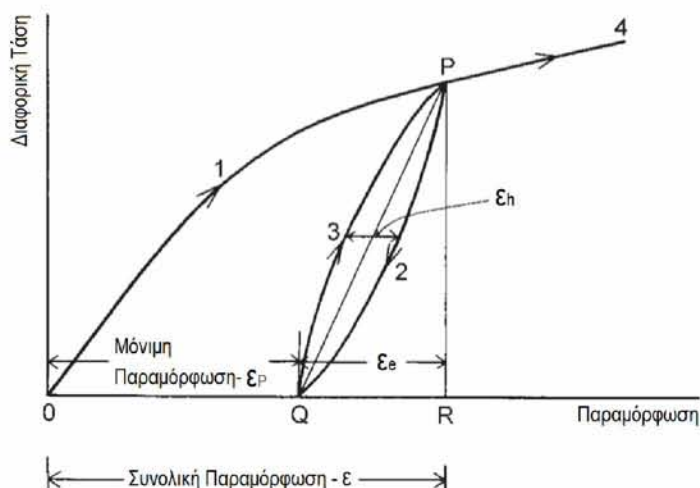


Εικόνα 2.4. Συνέχεια

### 2.1.2 Μέτρο ελαστικότητας

Όταν σε ένα δοκίμιο βράχου ασκείται θλιπτική τάση προς ένα σημείο P (της καμπύλης διαφορικής τάσης - παραμόρφωσης), (Σχήμα 2.5) και έπειτα αποφορτίζεται σε μηδενική διαφορική τάση και στη συνέχεια επαναφορτίζεται, οι κλάδοι (P2Q, Q3P) διαφέρουν από την καμπύλη φόρτισης (O1P) σε πολλές περιπτώσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Οι καμπύλες αποφόρτισης και επαναφόρτισης συνήθως διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα στενό βρόχο (P2Q3). Η καμπύλη επαναφόρτισης (Q34) διέρχεται πολύ κοντά στο σημείο P από το οποίο ο κλάδος αποφόρτισης πέφτει κάτω και συνεχίζει στην αρχική καμπύλη φόρτισης (O1P). Αυτός ο στενός βρόχος που περιβάλλεται από τους κλάδους αποφόρτισης και επαναφόρτισης μπορεί να αντικατασταθεί κατά προσέγγιση από μια ευθεία γραμμή PQ. Η κλίση αυτής της γραμμής λαμβάνεται ως μέσος όρος του μέτρου του Young (το μέτρο ελαστικότητας).

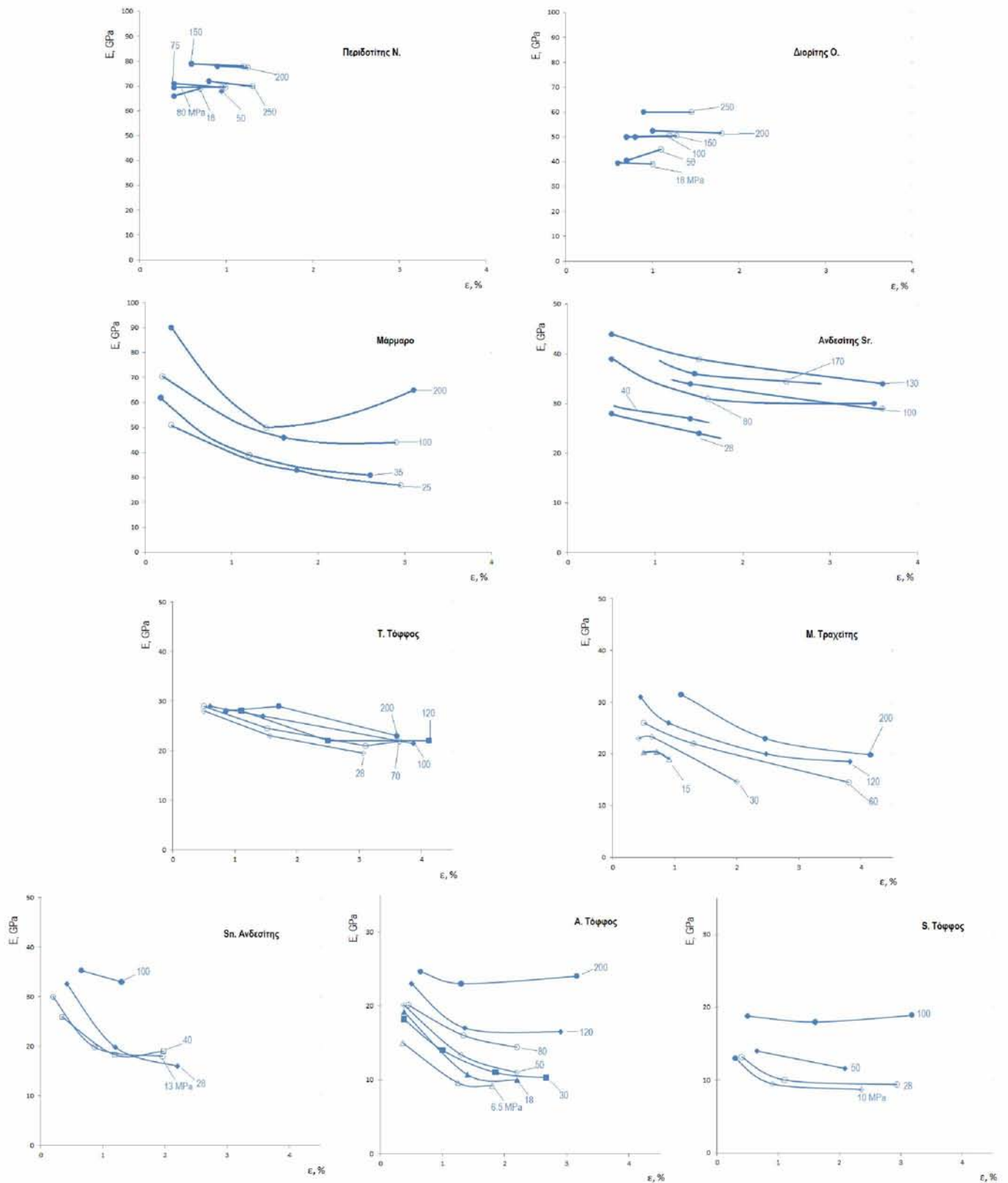
Το Σχήμα 2.6 δείχνει τη σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας Young (E) και της συνολικής ανηγμένης παραμόρφωσης (ε), η οποία ορίζεται στο Σχήμα 2.5, για διαφορετικές τιμές της πλευρικής πίεσης. Σύμφωνα με αυτό το αποτέλεσμα, το μέτρο ελαστικότητας Young διαφέρει σημαντικά σε διάφορα στάδια παραμόρφωσης. Στους συμπαγείς πυριγενείς βράχους, το μέτρο του Young είναι σχεδόν σταθερό μέχρι τη θραύση τους. Σε άλλους πορώδεις βράχους, μειώνεται γενικά με την αυξανόμενη ανηγμένη παραμόρφωση (ε), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Εντούτοις, το μέτρο ελαστικότητας Young (E) κάποιων όγκιμων βράχων (τόφφοι και μάρμαρο) υπό υψηλή πλευρική πίεση αρχίζει να αυξάνεται με την παραμόρφωση αμέσως μετά την διαρροή. Η αξιοσημείωτη μείωση του μέτρου ελαστικότητας Young (E) με την αυξανόμενη ανηγμένη παραμόρφωση (ε) αποδίδεται στη μικροθραύση σε αυτά τα δείγματα βράχου και η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας Young (E) σε μεγάλο στάδιο παραμόρφωσης κάτω από υψηλή πλευρική πίεση σε μαλακούς βράχους μπορεί να αποδοθεί στη συμπύκνωση των δειγμάτων που έχουν υποστεί θραύση.



**Σχῆμα 2.5.** Τυπικὲς καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ὑπὸ κυκλικὴ φόρτιση (Mogi, 2007).

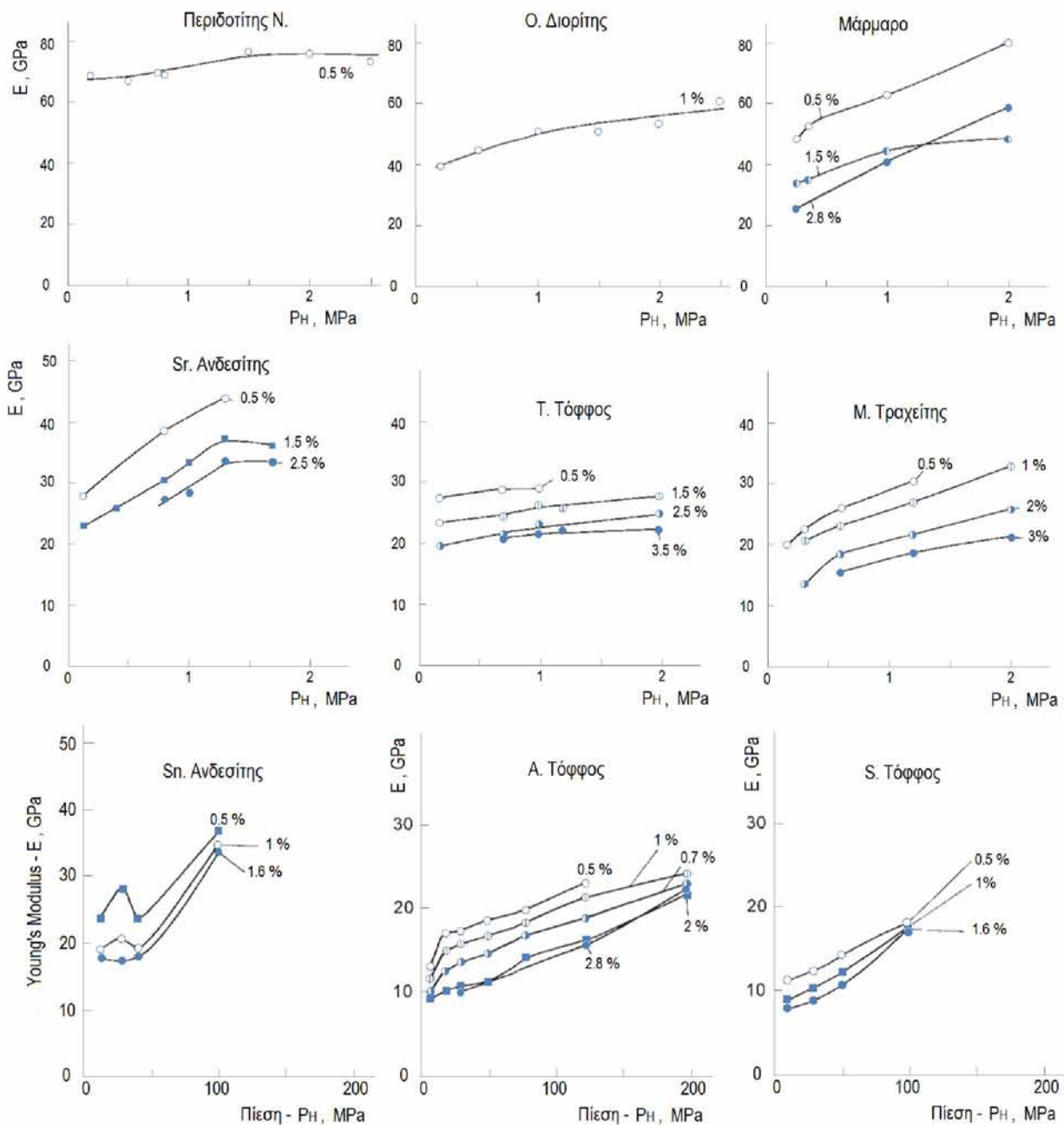
Οι σχέσεις μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας Young ( $E$ ) και της πλευρικής πίεσης ( $\sigma_3 = \sigma_2$ ) εμφανίζονται για διαφορετικὲς τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης στο Σχῆμα 2.7. Κανονικὰ, το μέτρο ελαστικότητας Young αυξάνεται με την πίεση. Το μέτρο ελαστικότητας του Young του περιδοτίτη Nabe-ishi, ο οποίος είναι ο πιο συμπαγῆς βράχος (πορώδες 0,02%) μεταξύ των εξεταζόμενων βράχων, στη παρούσα εργασία, είναι μεγαλύτερο και αυξάνεται ελαφρά με την υποβολή της πλευρικής πίεσης. Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του διορίτη Orikabe (πορώδες 0,4%) είναι μικρότερο από αυτό του περιδοτίτη και η αύξηση του με την πλευρική πίεση είναι πιο αισθητή. Σε πιο πορώδη πετρώματα, το μέτρο ελαστικότητας Young αυξάνεται πιο έντονα με την υποβολή της πλευρικής πίεσης, ὅπως φαίνεται στο Σχῆμα 2.7.

Η εξάρτηση της πίεσης με το μέτρο ελαστικότητας Young του ανδεσίτη Shinkomatsu είναι ασυνήθιστη σε χαμηλές πιέσεις, ὅπως φαίνεται στο Σχῆμα 2.7. Το μέτρο ελαστικότητας Young αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης στα 28 MPa και πέφτει αισθητὰ στα 40 MPa. Αυτὴ ἡ πτώση του μέτρου ελαστικότητας Young δεν είναι τόσο ξεκάθαρη σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Αυτὴ ἡ μη φυσιολογικὴ ἀλλαγὴ στο μέτρο ελαστικότητας Young φαίνεται να αποδίδεται στη μηχανικὴ δομὴ αὐτοῦ του πετρώματος. Δηλαδή, το πορώδες αὐτοῦ του ηφαιστειακοῦ βραχώδους υλικοῦ είναι αξιοσημείωτα υψηλό (12,6%) και οἱ περισσότεροι πόροι εἶναι απομονωμένα στρογγυλά κενά σε συνεχῆ πλαίσιο, ἐνῶ ἄλλα πορώδη ἰζηματογενῆ πετρώματα ἔχουν σφηνοειδῆ ανοίγματα μεταξύ των κόκκων. Η προαναφερθεῖσα ἀνώμαλη συμπεριφορὰ του ανδεσίτη φαίνεται να οφείλεται στη καταστροφὴ της δομῆς ραυτοῦ του πετρώματος ἀπὸ την πλευρική πίεση.



**Σχήμα 2.6.** Σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας Young και της πλευρικής πίεσης. Για κάθε κομπόλη δίνονται οι τιμές της συνολικής αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης (Mogi, 2007).





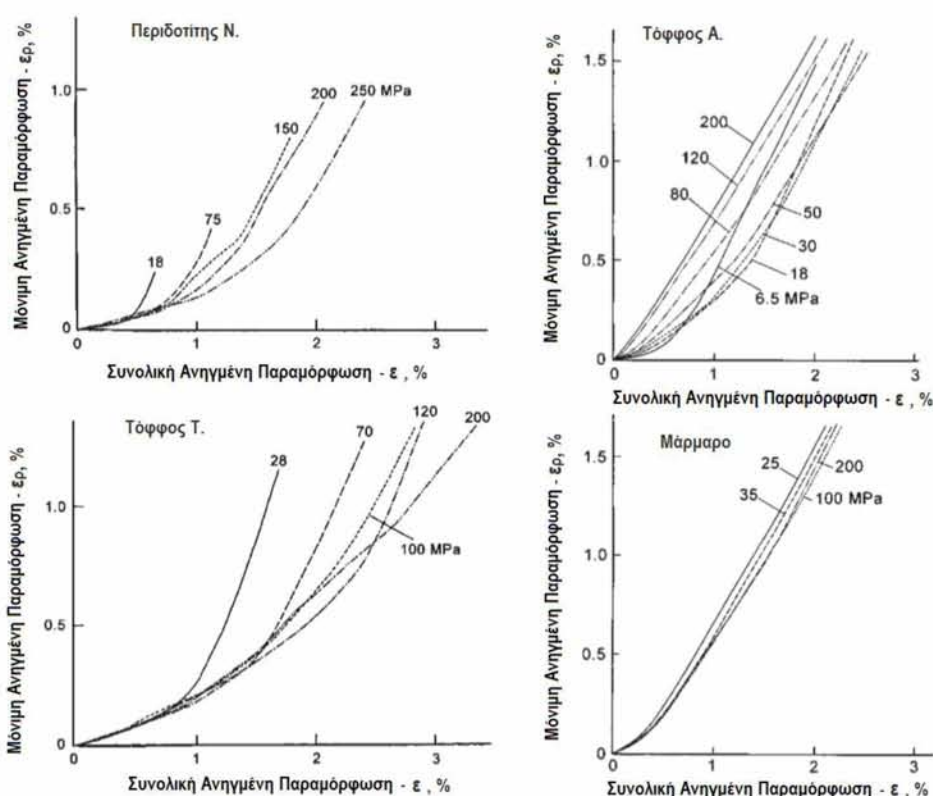
**Σχήμα 2.7.** Σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας *Young* και της πλευρικής πίεσης. Για κάθε καμπύλη δίνονται οι τιμές της συνολικής αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης (Mogi, 2007).

### 2.1.3 Μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση

Η ανηγμένη παραμόρφωση των πετρωμάτων, που υπόκεινται σε διάφορες εντατικές καταστάσεις, είναι εν μέρει ελαστική και εν μέρει μόνιμη (πλαστική). Η ελαστική ανηγμένη παραμόρφωση αποτελεί την ανακτημένη παραμόρφωση κατά την

αποφόρτιση σε μηδενική διαφορική τάση, ενώ η μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση λαμβάνεται ως μη ανακτημένη (μόνιμη) παραμόρφωση (Σχήμα 2.5). Αυτή η μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση περιλαμβάνει διάφορους τύπους μη ανακτήσιμων (μόνιμων) παραμορφώσεων (unrecovered deformation) εξαιτίας των εξαρμώσεων (dislocations), της ιξώδους ροής, των μικρορωγμών κλπ. και έτσι αυξάνει σε κάποιο βαθμό με τη μείωση του ρυθμού ανηγμένης παραμόρφωσης (Heard, 1963).

Στο Σχήμα 2.8, η σχέση μεταξύ μόνιμης (πλαστικής) ανηγμένης παραμόρφωσης ( $\epsilon_p$ ) και συνολικής ανηγμένης παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) παρουσιάζεται για διαφορετικές πλευρικές πιέσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση υπολογίζεται, στα περισσότερα πετρώματα, ακόμη και στο αρχικό στάδιο παραμόρφωσης. Στα συμπαγή πυριγενή πετρώματα που είναι πολύ ψαθυρά, η ανηγμένη μόνιμη παραμόρφωση εμφανίζεται ελαφρώς στο σχεδόν γραμμικό τμήμα της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης και αυξάνεται απότομα. Σε μερικά πορώδη πυριτικά πετρώματα, όπως ο τόφος Tatsuyama (πορώδες 10,2%), η μόνιμη παραμόρφωση αυξάνεται γραμμικά στο αρχικό στάδιο και η κλίση αυτής της καμπύλης αυξάνεται ξαφνικά σε κάποιο στάδιο.



Σχήμα 2.8. Η σχέση της μόνιμης ανηγμένης παραμόρφωσης-συνολικής ανηγμένης παραμόρφωσης. Οι τιμές της πλευρικής πίεσης δίνονται για κάθε καμπύλη (Mogi, 2007).

Στα αρκετά πορώδη πυριτικά πετρώματα, όπως ο τόφος Ao-ishi (πορώδες 17,3%), η μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση είναι πολύ μεγάλη και αυξάνεται συνεχώς χωρίς οποιαδήποτε τέτοια αιφνίδια μεταβολή στην κλίση της καμπύλης, ιδιαίτερα όταν υπόκειται σε υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης. Σε ανθρακικά πετρώματα, τα οποία παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ανθεκτική συμπεριφορά, η σχέση  $\varepsilon_p - \varepsilon$  είναι πολύ διαφορετική από αυτή των πυριτικών πετρωμάτων. Η περίπτωση του μάρμαρου Mito (πορώδες 0,2%) φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Ο λόγος  $\varepsilon_p / \varepsilon$  είναι πολύ μεγάλος (60-80%) εκτός από το αρχικό στάδιο παραμόρφωσης και σχεδόν ανεξάρτητος από την πλευρική πίεση. Έτσι προκύπτει ότι, το κύριο μέρος της μεγάλης παραμόρφωσης (large deformation) του μαρμάρου είναι μόνιμη παραμόρφωση, όπως φαίνεται στα Σχ. 2.4 (γ) και 2.8.

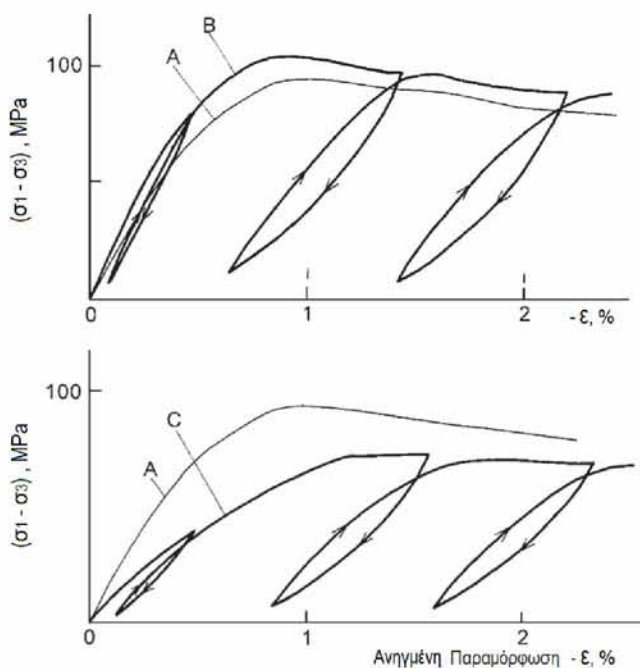
#### 2.1.4 Επιπτώσεις της προηγούμενης φόρτισης

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, τα πετρώματα δεν είναι εντελώς ελαστικά υλικά αλλά παρουσιάζουν αξιοσημείωτη πλαστικότητα. Κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης των πετρωμάτων δημιουργούνται μικροθραύσεις σε πολλές περιπτώσεις. Επομένως, η σχέση τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης επηρεάζεται από το ιστορικό παραμόρφωσης. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποιες επιδράσεις που επιφέρει η προηγούμενη (αρχική) φόρτιση (previous loading) σε μερικές απλές περιπτώσεις, από τα πειράματα που πραγματοποίησε ο Mogi το 1965.

##### *Υδροστατική πίεση*

Έχει μελετηθεί η επίδραση της προηγούμενης εφαρμοζόμενης υδροστατικής πίεσης. Στα δοκίμια του τόφου Ao-ishi ασκήθηκε αρχικά υδροστατική πίεση 80 MPa και 200 MPa.

Ακολουθώς, τα δοκίμια αυτά μαζί με ένα αρχικό (παρθένο/virgin) δοκίμιο δοκιμάστηκαν κάτω από συμβατικές συνθήκες τριαξονικής θλίψης σε 18 MPa πλευρικής πίεσης. Οι καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης (B) και (C) στο Σχήμα 2.9 δείχνουν τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων τα οποία αρχικά εκτέθηκαν σε υδροστατική πίεση 80 MPa και 200 MPa αντίστοιχα και η καμπύλη (A) είναι αυτή του αρχικού δείγματος. Τόσο η αντοχή σε θλίψη όσο και το μέτρο ελαστικότητας του Young σε περίπτωση υδροστατικής πίεσης 80 MPa δεν διαφέρουν σημαντικά από εκείνες του αρχικού βράχου (virgin rock). Από την άλλη πλευρά, η αντοχή στη θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας του Young στην περίπτωση των 200 MPa είναι σημαντικά χαμηλότερα από αυτά του αρχικού βράχου.



**Σχήμα 2.9.** Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης του τόφου Ao-ishi υπό πλευρική πίεση 18 MPa (Mogi, 2007).

(A): παρθένο δείγμα

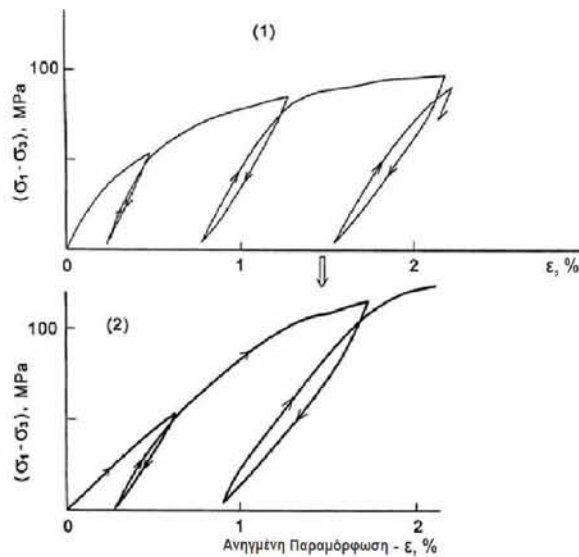
(B): δείγμα προηγουμένως εκτεθειμένο σε υδροστατική πίεση 80 MPa

(C): δείγμα προηγουμένως εκτεθειμένο σε υδροστατική πίεση 200 MPa

### Αξονική θλίψη

Όπως φαίνεται από τις καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης που λαμβάνονται από την κυκλική φόρτιση, το μέτρο ελαστικότητας του Young και η πλαστικότητα επηρεάζονται από προηγούμενη θλίψη. Μετά την αρχική θλίψη, η καμπύλη τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης μεταβάλλεται αισθητά σε σύγκριση με την καμπύλη των αρχικών βράχων. Το πειραματικό αποτέλεσμα του τόφου Ao-ishi (από τον Mogi) φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Ένα δοκίμιο βραχύνθηκε αξονικά κατά 2,2% μέσω της συμβατικής δοκιμής τριαξονικής θλίψης (με πλευρική πίεση 80 MPa). Αφού αφέθηκε 18 ώρες σε ατμοσφαιρική πίεση, έγινε δοκιμή στο δοκίμιο και πάλι φορτίστηκε θλιπτικά υπό πλευρική πίεση 80 MPa καμπύλη (2).

Το μέτρο ελαστικότητας του Young μειώνεται κάπως λόγω της προηγούμενης φόρτισης, αλλά η τιμή του αντιστοιχεί σε εκείνη της παραμόρφωσης που συνεχίζεται χωρίς κάποια διακοπή στη φόρτιση (φόρτιση χωρίς κύκλους φόρτισης). Η καμπύλη τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης πριν από την διαρροή στην καμπύλη (2) είναι σχεδόν γραμμική και η μόνιμη παραμόρφωση σε αυτό το στάδιο είναι μικρότερη σε σύγκριση με το αρχικό τμήμα της παραμόρφωσης του αρχικού βράχου. Η πιο αισθητή αλλαγή μεταξύ των δύο καμπυλών (1) και (2) είναι η έντονη αύξηση της φαινόμενης τάσης διαρροής στο προηγουμένως φορτισμένο δείγμα. Από αυτό το αποτέλεσμα, μπορεί να συναχθεί ότι η τάση διαρροής αντιστοιχεί στο μέγεθος της τάσης που εφαρμόστηκε προηγουμένως σε τέτοιες περιπτώσεις.

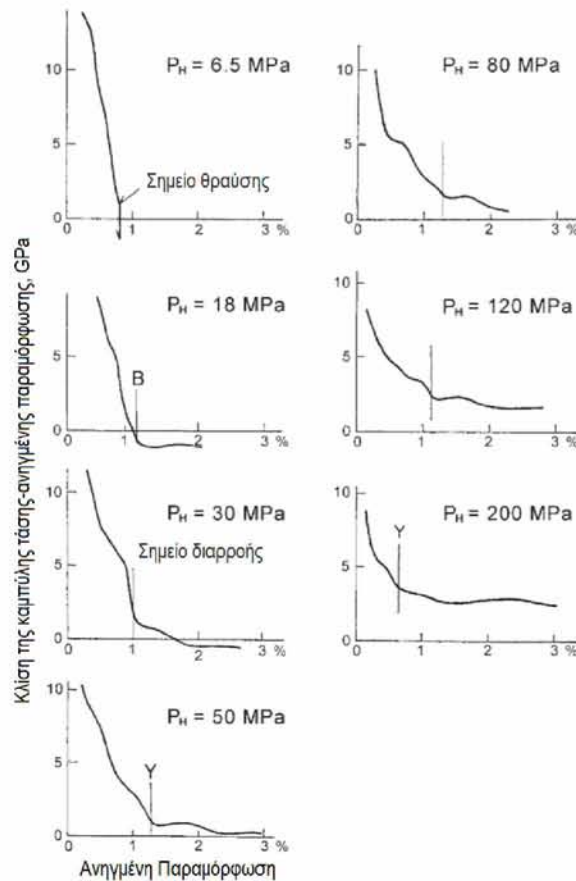


**Σχήμα 2.10.** Καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του τόφρου Aoi-ishi υπό πλευρική πίεση 80 MPa. (1): Παρθένο δείγμα. (2): Δείγμα προηγουμένως μειωμένο κατά 2,2% (Mogi, 2007).

Οι επιπτώσεις μιας προηγούμενης φόρτισης μπορεί να είναι περίπλοκες. Εντούτοις, σε ένα ιστορικό παραμόρφωσης ενός βραχώδους δοκιμίου, σε γενικές γραμμές διατηρούνται οι μηχανικές ιδιότητες, όπως η ελαστικότητα, η πλαστικότητα, η αντοχή σε θραύση, τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις και άλλες ιδιότητες. Έτσι, τα πειράματα παραμόρφωσης από αυτή την άποψη μπορεί να είναι χρήσιμα για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των γεωυλικών.

### Τάση διαρροής

Η αντοχή στην ψαθυρή κατάσταση είναι η μέγιστη τάση που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια ενός πειράματος. Αυτή η τιμή προσδιορίζεται με ακρίβεια. Ωστόσο, η τάση διαρροής στην όλκιμη κατάσταση, συνήθως δεν υπολογίζεται εύκολα. Γενικά, η τάση διαρροής είναι η τάση στην οποία λαμβάνει χώρα η ξαφνική μετάβαση από την ελαστική προς την πλαστική κατάσταση παραμόρφωσης και επομένως η τάση στο «γόνατο» των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης είναι η τάση διαρροής (Robertson, 1955). Σε μερικά πετρώματα, το γόνατο της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης είναι καθαρό και ο προσδιορισμός της τάσης διαρροής είναι εύκολος. Ωστόσο, σε άλλα πετρώματα υπάρχει σταδιακή μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική κατάσταση, δηλαδή η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης αλλάζει σταδιακά. Στην περίπτωση αυτή, ο οριστικός προσδιορισμός της τάσης διαρροής είναι δύσκολος.



**Σχήμα 2.11.** Σχέση μεταξύ του  $\Delta(\sigma_1-\sigma_3)/\Delta\epsilon$  και της ανηγμένης παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τον τόφο *Ao-ishi*. Για κάθε καμπύλη δίνονται οι τιμές στις πλευρικής πίεσης (Mogi, 2007).

Μερικές φορές το σημείο διαρροής ορίζεται ως ένα σημείο που έχει μια αξιόλογη οριακή τιμή μόνιμης παραμόρφωσης. Αυτός ο ορισμός δεν είναι πάντοτε κατάλληλος για κάποια βραχώδη υλικά, επειδή η τιμή της μόνιμης παραμόρφωσης στο χαρακτηριστικό “σπάσιμο” της καμπύλης τάσης- παραμόρφωσης δεν είναι σταθερή και ποικίλλει αρκετά.

Η τάση διαρροής των πετρωμάτων μπορεί γενικά να οριστεί με τον ακόλουθο τρόπο. Η τοπική διαρροή αρχίζει να συμβαίνει ακόμη και κάτω από χαμηλή τάση, επειδή η τάση σε ένα δοκίμιο πετρώματος που έχει μη ομοιόμορφη δομή διανέμεται συγκεντρωτικά γύρω από δομικά ακανόνιστα σημεία. Η διαρροή σε τέτοια μη ομοιόμορφα υλικά λαμβάνει χώρα σταδιακά σε ένα ευρύ φάσμα τιμών της τάσης και η μακροσκοπική διαρροή μπορεί να ολοκληρωθεί σε μια ορισμένη τιμή τάσης. Αυτή η τελική τάση θεωρείται η τάση διαρροής. Στην πραγματικότητα, η κλίση της καμπύλης της τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης μειώνεται βαθμιαία με την αύξηση της ανηγμένης παραμόρφωσης και γίνεται σχεδόν σταθερή στην τάση διαρροής σε πολλές περιπτώσεις. Ο ορισμός αυτός συνάδει και με τον συνήθη ορισμό στην περίπτωση που χαρακτηρίζεται από έντονο “σπάσιμο” της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της

κλίσης της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης  $[\Delta(\sigma_1-\sigma_3)/\Delta\varepsilon]$  και της αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης ( $\varepsilon$ ) του τόφφου Ao-ishi. Το σημείο στο οποίο ο λόγος  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$  γίνεται σχεδόν σταθερός θεωρείται ως το σημείο διαρροής (yield point).

### 2.1.5 Περίληψη των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης

Χρησιμοποιώντας τη συμβατική τριαξονική δοκιμή ο Mogi, δημιούργησε τις καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης σε κυκλική φόρτιση για διάφορους τύπους πετρωμάτων. Τα ελεγχόμενα πυριτικά πετρώματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες ανάλογα με τις μηχανικές τους ιδιότητες. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται συνοπτικά οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των πετρωμάτων καθώς και το εύρος του πορώδους τους. Μπορεί να φανεί σαφώς ότι το πορώδες είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για τις μηχανικές ιδιότητες των πυριτικών πετρωμάτων. Οι μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου είναι σημαντικά διαφορετικές από εκείνες των πυριτικών πετρωμάτων. Αν και το πορώδες του μαρμάρου είναι πολύ μικρό (περίπου 0,2%), οι ιδιότητές του είναι σχεδόν όμοιες με την τρίτη κατηγορία. Αυτό δείχνει ότι η ανόργανη σύνθεση είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας στη μηχανική συμπεριφορά κατά την παραμόρφωση ενός πετρώματος υπό πίεση.

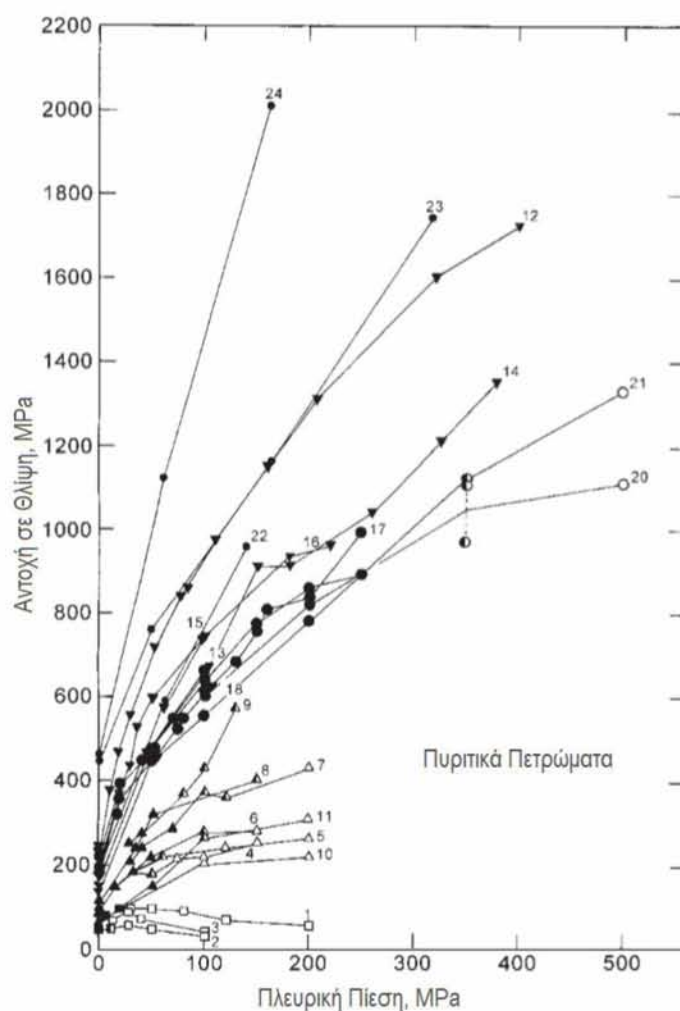
Πετρώματα	N. Περιδοίτης O. Διορίτης M. Γρανίτης	Sr. Ανδεσίτης T. Τόφφος M. Τραχείτης	Sn. Ανδεσίτης A. Τόφφος S. Τόφφος
Πορώδες (%)	0 - 1	5 - 10	10 - 25
Τάση - Ανηγμένη Παραμόρφωση			
Μέτρο Ελαστικότητας του Young - Ανηγμένη Παραμόρφωση			
$\frac{\text{Μόνιμη Ανηγμένη Παραμόρφωση} - \varepsilon_p}{\text{Συνολική Ανηγμένη Παραμόρφωση} - \varepsilon}$ - Ανηγμένη Παραμόρφωση			
Ελαστική Υστέρηση - Ανηγμένη Παραμόρφωση			
Τάση - Πίεση			
Μέτρο Ελαστικότητας του Young - Πίεση			
$\frac{\text{Μόνιμη Ανηγμένη Παραμόρφωση} - \varepsilon_p}{\text{Συνολική Ανηγμένη Παραμόρφωση} - \varepsilon}$ - Πίεση			

Σχήμα 2.12. Περίληψη των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης των πυριτικών πετρωμάτων υπό πλευρική πίεση, σε θερμοκρασία δωματίου (Mogi, 1965).

## 2.2 Η ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΑΠΟ ΨΑΘΥΡΗ ΣΕ ΟΛΚΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΠΙΕΣΗ

### 2.2.1 Σχέση μεταξύ αντοχής και πλευρικής πίεσης

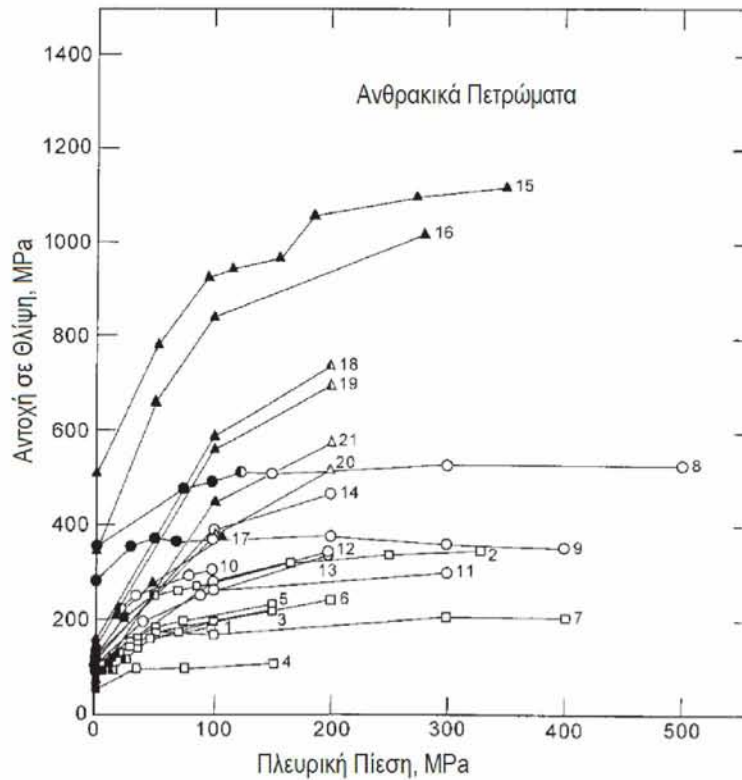
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η αντοχή σε θλίψη των πετρωμάτων γενικά αυξάνεται με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Επίσης, η αντοχή θραύσης των ψαθυρών σκληρών πετρωμάτων αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της πίεσης. Από την άλλη πλευρά, η τάση διαρροής (yield stress) των όλκιμων βράχων, όπως μερικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα, δεν αυξάνεται αισθητά με την αύξηση της πίεσης.



**Σχήμα 2.13.** Σχέση μεταξύ της αντοχής σε θλίψη και της πλευρικής πίεσης πυριτικών πετρωμάτων. Οι αριθμοί που αναγράφονται δίπλα από κάθε καμπύλη αντιστοιχούν στα πετρώματα που παρατίθενται στον Πίνακα 2.2. Κλειστά σύμβολα: ψαθυρή συμπεριφορά, ημί-κλειστά σύμβολα: μεταβατική συμπεριφορά, ανοιχτά σύμβολα: όλκιμη συμπεριφορά (Mogi, 2007).



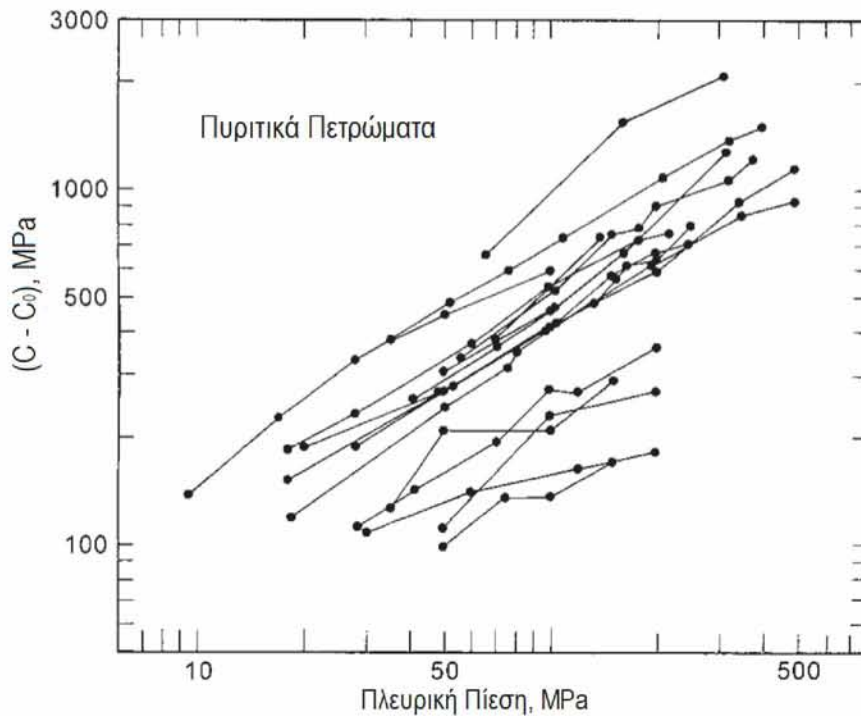
Η μεταβολή της αντοχής σε θλίψη ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) πυριτικών και ανθρακικών πετρωμάτων συναρτήσει της πλευρικής πίεσης ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13 και στο Σχήμα 2.14 αντίστοιχα (Mogi, 1966). Στα σχήματα, τα κλειστά, ημίκλειστα και ανοιχτά σύμβολα υποδηλώνουν ψαθυρή, μεταβατική και όλκιμη συμπεριφορά, αντίστοιχα. Αυτά τα πετρώματα χωρίζονται σε διάφορες ομάδες για ευκολία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2. Αυτές οι καμπύλες αντοχής-πίεσης είναι περισσότερο ή λιγότερο κοίλες προς τα κάτω με περίπου παρόμοιο σχήμα. Το Σχήμα 2.15 δείχνει τη σχέση μεταξύ της (C-Co) και της πλευρικής πίεσης των πυριτικών πετρωμάτων σε λογαριθμική κλίμακα, όπου C και Co είναι η θλιπτική αντοχή σε αυξημένες πλευρικές πιέσεις και σε ατμοσφαιρική πίεση, αντίστοιχα. Αυτή η συλλογή δεδομένων αντοχής και η αντίστοιχη γραφική παράσταση τους έχουν παρουσιαστεί από έναν αριθμό ερευνητών (Handin, 1966).



**Σχήμα 2.14.** Σχέση μεταξύ της αντοχής σε θλίψη και της πλευρικής αντοχής ανθρακικών πετρωμάτων. Οι αριθμοί που αναγράφονται δίπλα από κάθε καμπύλη αντιστοιχούν στα πετρώματα που παρατίθενται στον Πίνακα 2.2. Κλειστά σύμβολα: ψαθυρή συμπεριφορά, ημίκλειστα σύμβολα: μεταβατική συμπεριφορά, ανοιχτά σύμβολα: όλκιμη συμπεριφορά. (Mogi, 2007).

No.	Πετρώματα	Δοκιμή από	Ομάδα
<i>A. Πυριτικά πετρώματα</i>			
1.	Τόφφος Ao-ishi	Mogi (1965)	} S1 Αρκετά πορώδη , Πορώδες: >10%
2.	Συγκολλημένος τόφφος Sakuishi	Mogi (1965)	
3.	Ανδεσίτης Shinkomatsu	Mogi (1965)	
4.	Τραχείτης Mizuho (1)	Mogi (1964)	} S2 Πορώδη , Πορώδες: 1-10%
5.	Τραχείτης Mizuho (2)	Mogi (1965)	
6.	Τόφφος Tatsuyama (1)	Mogi (1964)	
7.	Τόφφος Tatsuyama (2)	Mogi (1965)	
8.	Ανδεσίτης Shirochoba (1)	Mogi (1964)	
9.	Ανδεσίτης Shirochoba (2)	Mogi (1965)	
10.	Ψαμμίτης Bartlesville	Handin & Hager (1957)	
11.	Ψαμμίτης Bartlesville (1)	Handin & Hager (1957)	
12.	Γρανίτης Westerly	Mogi (1966)	} S3 Καθόλου πορώδη , Πορώδες < 1%
13.	Γρανίτης Barre	Robertson (1955)	
14.	Γρανίτης Katishirakawa	Matsushima (1960)	
15.	Γρανίτης Inada	Mogi (1964)	
16.	Γρανίτης Mannari	Mogi (1965)	
17.	Περιδοίτης Nabeishi	Mogi (1965)	
18.	Διορίτης Ukigane	Mogi (1964)	
19.	Διορίτης Urikabe	Mogi (1965)	
20.	Σερπεντινίτης Cabramurra	Raleigh & Paterson (1965)	
21.	Σερπεντινίτης Tumut Pond	Raleigh & Paterson (1965)	
22.	Γάββρος Pala	Serdengecti et al. (1961)	
23.	Δολομίτης Frederic	Brace (1964)	
24.	Χαλαζίτης Cheshire	Brace (1964)	
<i>B. Ανθρακικά Πετρώματα</i>			
1.	Μάρμαρο Wombeyan	Paterson (1958)	} CM (Μάρμαρο)
2.	Μάρμαρο Carrara	Karman (1911)	
3.	Μάρμαρο Yamaguchin (Fine)	Mogi (1964)	
4.	Μάρμαρο Yamaguchi (Coarse)	Mogi (1964)	
5.	Μάρμαρο Mito (1)	Mogi (1964)	
6.	Μάρμαρο Mito (2)	Mogi (1965)	
7.	Μάρμαρο Danby	Robertson (1955)	
8.	Ασβεστόλιθος Solnhofen (1)	Heard (1958)	} CL (Ασβεστόλιθος)
9.	Ασβεστόλιθος Solnhofen (2)	Karman (1911)	
10.	Ασβεστόλιθος Wellw Station	Mogi (1964)	
11.	Ασβεστόλιθος Becraft	Mogi (1964)	
12.	Ασβεστόλιθος Devonian	Mogi (1964)	
13.	Ασβεστόλιθος Fussleman	Mogi (1965)	
14.	Ασβεστόλιθος Wolfcamp	Robertson (1955)	
15.	Δολομίτης Blair (1)	Brace (1964)	} CD (Δολομίτης)
16.	Δολομίτης Blair (2)	Robertson (1955)	
17.	Δολομίτης Webatack	Brace (1964)	
18.	Δολομίτης Clear Fork	Handin & Hager (1957)	
19.	Δολομίτης Fusselman	Handin & Hager (1957)	
20.	Δολομίτης Hasmark (T)	Handin & Hager (1957)	
21.	Δολομίτης Luning	Handin & Hager (1957)	

Πίνακας 2.2. Η λίστα των πετρωμάτων. (Mogi, 2007)



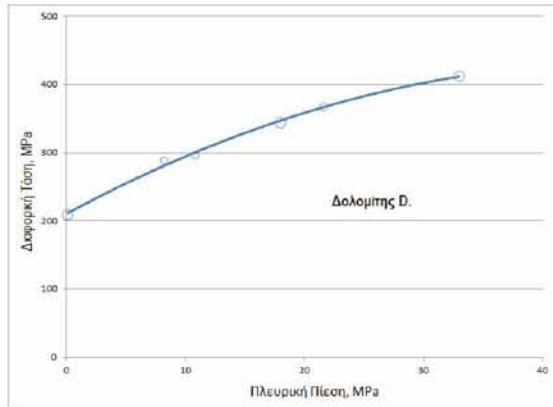
*Σχήμα 2.15. Η σχέση μεταξύ του  $(C - C_0)$  και της πλευρικής πίεσης για πυριτικά πετρώματα, εκτός από τα πολύ πορώδη πετρώματα ( $S_1$ ).  $C$ : αντοχή σε θλίψη,  $C_0$ : αντοχή σε ατμοσφαιρική πίεση. (Mogi, 2007)*

Τα πειραματικά αποτελέσματα για τον γρανίτη Westerly και τον δολομίτη Dunham τα οποία ελήφθησαν από τα πειράματα που πραγματοποίησε ο Mogi συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3 και στα Σχ. 2.16-2.17. Οι μεγαλύτεροι κύκλοι στα σχήματα αυτά αντιπροσωπεύουν τη μέση αντοχή των δειγμάτων των οποίων ο λόγος μήκους/διαμέτρου ήταν μεγαλύτερος από την κρίσιμη τιμή τους  $[(L/D)_c=2.5]$ , έτσι η αξιοπιστία τους είναι υψηλή. Οι μικρότεροι κύκλοι αποκτήθηκαν από ένα ή δύο πειράματα (του Mogi) χρησιμοποιώντας δείγματα μήκους/διαμέτρου=2.5, οπότε η αξιοπιστία τους είναι περιορισμένη.

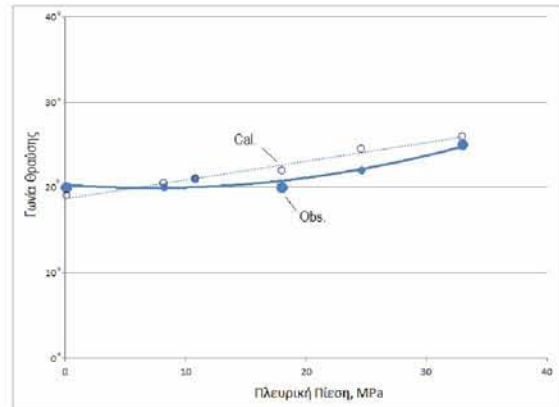
Οι θραύσεις σε δοκίμια γρανίτη Westerly είναι πολύ βίαιες και εκρηκτικές, και ακολούθησε ξαφνική πτώση της πίεσης υπό την δοκιμή της πλευρικής πίεσης (<400MPa). Αξίζει να σημειωθεί ότι η καμπύλη αντοχής-πίεσης δεν είναι γραμμική, αλλά είναι κοίλη προς τα κάτω, ειδικά σε χαμηλή πίεση. Αυτό το αποτέλεσμα φαίνεται να είναι ασυμβίβαστο με ορισμένα κριτήρια θραύσης που προβλέπουν μια γραμμική σχέση. Στον δολομίτη, η δύναμη αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την πίεση.

Οι γωνίες θραύσης και στους δύο αυτούς τύπους πετρωμάτων φαίνονται στο σχήμα 2.16(β) και 2.17(β). Σε αυτά τα σχήματα έχουν σχεδιαστεί δύο καμπύλες, η μία προκύπτει από τη θεωρία του Mohr, και η δεύτερη προκύπτει από τις παρατηρούμενες γωνίες στα αναφερθέντα πειράματα του Mogi. Στον δολομίτη Dunham, η διαφορά είναι μικρή ( $0^0-2.5^0$ ) και όχι συστηματική, επομένως η θεωρία

Μοhr φαίνεται να ισχύει. Στον Westerly γρανίτη, η υπολογισμένη καμπύλη είναι παράλληλη με την παρατηρούμενη καμπύλη και οι υπολογισμένες τιμές είναι ελαφρώς χαμηλότερες από τις παρατηρούμενες τιμές.

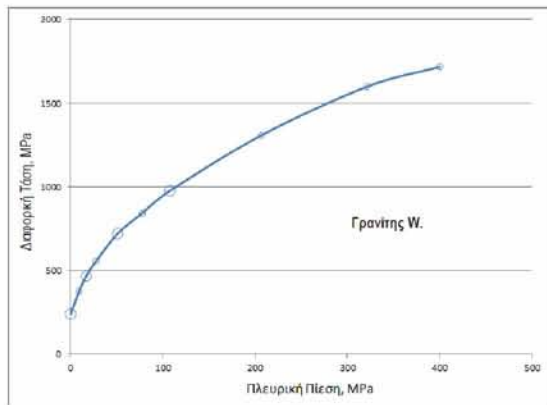


(α)

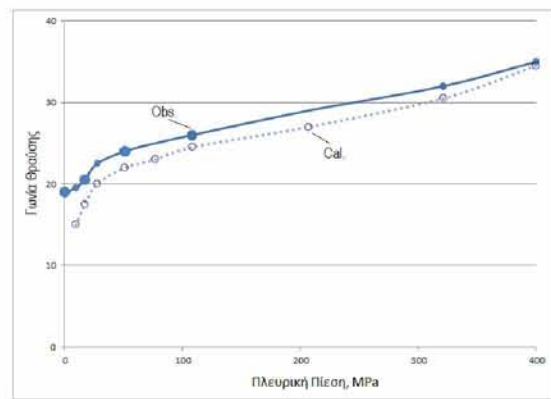


(β)

**Σχήμα 2.16.** (α) Η σχέση της θλιπτικής αντοχής και της πλευρικής πίεσης για τον δολομίτη Dunham. (β) Η σχέση της γωνίας θραύσης και της πλευρικής πίεσης για τον δολομίτη Dunham. Κλειστός κύκλος: παρατηρούμενη γωνία από τα πειράματα του Mogi. Ανοιχτός κύκλος: γωνία υπολογισμένη από το κριτήριο Mohr.



(α)



(β)

**Σχήμα 2.17.** (α) Η σχέση της θλιπτικής αντοχής και της πλευρικής πίεσης για τον γρανίτη Westerly. (β) Η σχέση της γωνίας θραύσης και της πλευρικής πίεσης για τον γρανίτη Westerly. Κλειστός κύκλος: παρατηρούμενη γωνία από τα πειράματα του Mogi. Ανοιχτός κύκλος: γωνία υπολογισμένη από το κριτήριο Mohr.

Η διαφορά μεταξύ τους είναι ( $2^{\circ}$ - $4^{\circ}$ ) κάτω από τη χαμηλότερη πλευρική πίεση και μειώνεται όσο αυξάνεται η πίεση. Η θεωρία του Mohr υποθέτει ότι η θραύση συμβαίνει με τη διάτμηση σε ένα επίπεδο ολίσθησης που εξαρτάται από την τιμή της ορθής τάσης στο επίπεδο αστοχίας. Η θραύση στον δολομίτη είναι ένας τυπικός

τύπος διάτμησης. Η θραύση των δειγμάτων γρανίτη είναι σαφώς τύπου διάτμησης υπό υψηλή πλευρική πίεση, αλλά σε συνθήκες ατμοσφαιρικής ή χαμηλής πλευρικής πίεσης είναι συχνά καμπύλη και αρκετά ακανόνιστη. Η διαφορά που προαναφέρθηκε μεταξύ της παρατήρησης και του υπολογισμού μπορεί να είναι μια ένδειξη αυτών των αποκλίσεων. Ωστόσο, η διαφορά (μέση τιμή 2,2 ) μεταξύ τους μπορεί να μην είναι σημαντική επειδή η ακρίβεια της μέτρησης γωνίας στον γρανίτη δεν είναι πολύ υψηλή.

Από τις πραγματοποιούμενες μετρήσεις που έκανε ο Mogi, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η θεωρία Mohr συγκλίνει με τα αποτελέσματα για την θραύση σε διάτμηση για τον γρανίτη και για τον δολομίτη στη συμβατική τριαξονική θλίψη (conventional triaxial compression), όπου  $\sigma_2 = \sigma_3$ .

Πέτρωμα	Πλευρική Πίεση (MPa)	Διαφορική Τάση (MPa)	Παρατηρούμενη Γωνία Θραύσης (Mogi)	Υπολογισμένη Γωνία Θραύσης (Mohr)
Δολομίτης Dunham	0.1	209	20°	19°
	8.2	289	20°	20.5°
	10.8	296	21°	21°
	18.0	344	20°	22°
	21.6	367	22°	24.5°
	33.0	412	25°	26°
Γρανίτης Westerly	0.1	239	19°	-
	9.5	378	19.5°	15°
	17.0	467	20.5°	17.5°
	27.5	555	22.5°	20°
	51.0	720	24°	22°
	77.0	840	-	23°
	108.0	977	26°	24.5°
	207.0	1308	-	27°
	321.0	1597	32°	30.5°
	400.0	1717	35°	34.5°

**Πίνακας 2.3.** Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Mogi για την αντοχή και την γωνία θραύσης υπό πλευρική πίεση σε δύο τύπους πετρωμάτων (δολομίτη και γρανίτη).

### 2.2.2 Το κριτήριο θραύσης Mohr – Coulomb

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η θλιπτική αντοχή των ψαθυρών πετρωμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ασκούμενη πλευρική πίεση. Διάφορα κριτήρια θραύσης έχουν προταθεί από πολλούς επιστήμονες. Μεταξύ αυτών, το κριτήριο

Coulomb, το οποίο εισήχθη από τον Coulomb (1773), είναι το απλούστερο και πιο ευρέως εφαρμόσιμο και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της επίδρασης της πλευρικής πίεσης. Το κριτήριο δηλώνει ότι η διατμητική θραύση λαμβάνει χώρα όταν η διατμητική τάση ( $\tau$ ) γίνεται ίση με το άθροισμα της συνεκτικής διατμητικής αντοχής ( $\tau_0$ ) (cohesive shear strength) και του γινομένου του συντελεστή εσωτερικής τριβής ( $\mu_i$ ) με την ορθή τάση ( $\sigma_n$ ) κατά μήκος του επιπέδου αστοχίας:

$$\tau = \tau_0 + \mu_i \sigma_n \quad (2.2)$$

Εάν υπάρχει πίεση πόρων-ρευστού, ο ρόλος της ορθής πίεσης αντικαθίσταται από την ενεργό ορθή πίεση (Terzaghi, 1945). Η εξίσωση Coulomb (2.2) είναι παρόμοια με την ακόλουθη εξίσωση για ολίσθηση τριβής σε εξωτερικές επιφάνειες (Jaeger, 1959, Byerlee, 1967):

$$\tau = S_0 + \mu \sigma_n \quad (2.3)$$

όπου  $\tau$  είναι η αντίσταση τριβής,  $\sigma_n$  είναι η ορθή τάση,  $\mu$  είναι ο συντελεστής εξωτερικής τριβής και το  $S_0$  είναι μια μικρή σταθερά. Με τη σύγκριση των Εξισώσεων (2.2) και (2.3), προτείνεται ότι η  $\mu_i$  στην Εξίσωση (2.2) είναι παρόμοια με  $\mu$  στην Εξίσωση (2.3). Ο δεύτερος όρος στη δεξιά πλευρά της Εξίσωσης (2.2) ερμηνεύτηκε συχνά ως αντίσταση τριβής.

Ωστόσο, ο Handin (1969) τόνισε ότι η φυσική ερμηνεία της εξίσωσης Coulomb μπορεί να είναι ασαφής. Σημείωσε ότι μέχρι να σπάσει (υπερκεραστεί) η συνοχή του πετρώματος, δεν υπάρχει ολισθαίνουσα επιφάνεια στο ακέραιο σώμα και έτσι η εξίσωση Coulomb φαίνεται να είναι αντιφατική ή η έννοια της εσωτερικής τριβής δεν είναι ικανοποιητική. Επίσης, αρκετοί ερευνητές έχουν επίσης υποστηρίξει ότι η ερμηνεία του κριτηρίου θραύσης Coulomb δεν μπορεί να είναι σωστή επειδή δεν υπάρχει ολίσθηση στο επίπεδο θραύσης μέχρι να παραχθεί η θραύση (Scholz, 1990, Paterson, 1978).

Από την άλλη πλευρά, ο Mogi (1974) πρότεινε ένα πολύ απλό μοντέλο για φυσική ερμηνεία του κριτηρίου του Coulomb και οι Savage, Byerlee και Lockner (1996) επέκτειναν αυτό το μοντέλο ώστε να συμπεριλάβουν το κριτήριο θραύσης Mohr.

Σύμφωνα με μετρήσεις διαστολής (dilatancy) και ακουστικής εκπομπής (acoustic emission) που πραγματοποίησε ο Mogi, εμφανίζονται πολλές μικρορωγμές κατά τη διάρκεια της παραμορφωτικής διαδικασίας πριν από την μακροσκοπική θραύση. Το σχήμα 2.18 (A) δείχνει σχηματικά τις θέσεις των ρωγμών κατά μήκος του οιονεϊ επιπέδου αστοχίας. Η περιοχή του τελικού επιπέδου αστοχίας (F-F') λίγο πριν την αστοχίας χωρίζεται στα τρία μέρη,  $A_1$ ,  $A_2$  και  $A_3$  σχήμα 2.18. Η  $A_1$  είναι η περιοχή που είναι ακόμα άθικτη, η  $A_2$  είναι η συνολική επιφάνεια των κλειστών επιφανειακών ρωγμών και η  $A_3$  είναι η συνολική επιφάνεια των ανοικτών επιφανειακών ρωγμών. Δεδομένου ότι οι ανοιχτές ρωγμές δεν έχουν καμία επίδραση στην διατμητική αντοχή, η επίδραση της  $A_3$  μπορεί να αγνοηθεί σε πρώτο στάδιο. Επιπλέον, θεωρείται

ότι η συνολική αντίσταση διάτμησης ( $T$ ) στη μακροσκοπική διατμητική θραύση το άθροισμα της διατμητικής αντοχής ( $T_1$ ) στο άρρηκτο τμήμα ( $A_1$ ), το οποίο είναι ανεξάρτητο της ορθής τάσης και η διατμητική αντίσταση ( $T_2$ ) στις κλειστές ρωγμές ( $A_2$ ), που απλά θεωρείται ότι είναι η αντίσταση τριβής (Mogi, 2007). Επομένως η διατμητική τάση ( $\tau$ ) κατά την αστοχία είναι:

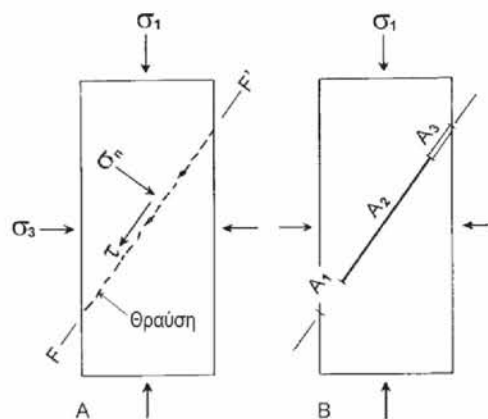
$$\begin{aligned} \tau &= \frac{T}{A} \\ &= \frac{T_1}{A} + \frac{T_2}{A} \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$= \tau_1 \left( \frac{A_1}{A} \right) + \mu \sigma_n \left( \frac{A_2}{A} \right), \quad (2.5)$$

όπου  $\tau_1$  είναι η προϋπάρχουσα διατμητική αντοχή του ακέραιου τμήματος που είναι ανεξάρτητη από την πίεση και  $\mu$  είναι ο συντελεστής εξωτερικής τριβής. Από τη σύγκριση των εξισώσεων (2.2) και (2.5) προκύπτει ότι:

$$\tau_0 = \tau_1 (A_1/A), \quad (2.6)$$

$$\mu_i = \mu \left( \frac{A_2}{A} \right). \quad (2.7)$$



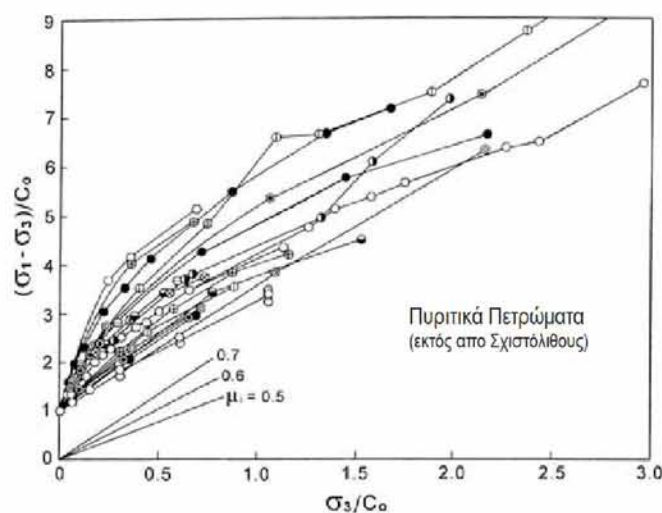
**Σχάμα 2.18.** Απλουστευμένα μοντέλα των ρωγμών κατά μήκος του ενδεχομένου επιπέδου βλάβης λίγο πριν την αστοχία. (Mogi, 2007)

Αυτές οι σχέσεις προτείνουν ένα φυσικό μοντέλο για την δύναμη συνοχής ( $\tau_0$ ) και τον συντελεστή εσωτερικής τριβής ( $\mu_i$ ).

Η συνολική επιφάνεια της κλειστής επιφάνειας ρωγμών ( $A_2$ ) λίγο πριν από την μακροσκοπική θραύση αντιπροσωπεύει πιθανώς ένα μεγάλο τμήμα της περιοχής του

επιπέδου αστοχίας (A). Συνεπώς, ο συντελεστής εσωτερικής τριβής ( $\mu_i$ ) είναι σχεδόν ίσος με τον συντελεστή της εξωτερικής τριβής ( $\mu$ ). Η δύναμη συνοχής ( $\tau_0$ ) είναι πολύ μικρότερη από την εγγενή δύναμη διάτμησης ( $\tau_1$ ) του τέλεια άθικτου τμήματος του βραχώδους δοκιμίου. Για παράδειγμα, οι  $A_2 / A$  και  $\tau_0 / \tau_1$  για τον γρανίτη Westerly εκτιμήθηκαν από την καμπύλη αντοχής έναντι πίεσης στα 7/8 και 1/8, αντίστοιχα. Αυτό είναι ένα μοντέλο που προτείνει ο Mogi για επεξήγηση της φυσικής σημασίας της εξίσωσης Coulomb.

Ορισμένοι ερευνητές (Brace, 1964, Hoek, 1965) ισχυρίστηκαν ότι υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ της παρατηρούμενης αντοχής σε θραύση ορισμένων ψαθυρών πετρωμάτων και της πρόβλεψης του κριτηρίου Coulomb, λαμβάνοντας τον συντελεστή εσωτερικής τριβής 0,5-1,5. Επίσης, σε πειραματικά αποτελέσματα κάτω από ένα ευρύτερο φάσμα πίεσης, οι καμπύλες αντοχής - πίεσης ορισμένων πετρωμάτων είναι σημαντικά κοίλες προς τον άξονα πίεσης σε χαμηλή πλευρική πίεση και κοντά στην πίεση μετάβασης ψαθυρού-όλκιμου. Επομένως, το κριτήριο Coulomb δεν ισχύει πάντοτε για μια ευρεία κλίμακα πιέσεων και οι καμπύλες αντοχής έναντι πίεσης εκφράζονται μάλλον από μια εκθετική συνάρτηση (Matsushima, 1960, Murrell, 1965, Mogi, 1966, Byerlee, 1969).



**Σχήμα 2.19.** Η θλιπτική αντοχή ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) πυριτικών πετρωμάτων, εκτός από σχιστόλιθους, εν συνάρτησει της πλευρικής πίεσης ( $p = \sigma_2 = \sigma_3$ ), διαιρούμενη με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή  $C_0$ .  $\mu_i$ : συντελεστής εσωτερικής τριβής. (Mogi, 2007).

Στη συνέχεια, φαίνεται ότι η επίδραση πίεσης στην αντοχή των ψαθυρών πετρωμάτων εκφράζεται θεμελιωδώς από τη θεωρία Coulomb, εκτός από μια περιοχή χαμηλής πίεσης σε ορισμένους τύπους πετρωμάτων. Το σχήμα 2.19 δείχνει τις καμπύλες αντοχής έναντι πίεσης για πυριτικά πετρώματα (με εξαίρεση τους σχιστόλιθους), βάσει δημοσιευμένων δεδομένων μέχρι το 1974 (Robertson, 1955, Handin and Hager, 1957, Matsushima, 1960, Brace, 1964, Mogi, 1964, 1965, Murrell, 1965 · Raleigh and Paterson, 1965 · Franklin and Hoek, 1970 · Hoshino et al., 1972).



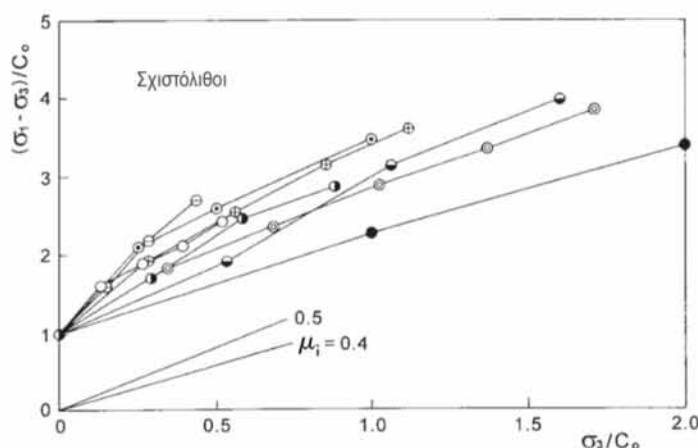
Αυτές οι καμπύλες περιορίζονται σε μια πολύ ψαθυρή περιοχή και δεν περιλαμβάνεται η περιοχή υψηλής πίεσης κοντά στην πίεση μεταβάσεως από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά. Σε αυτό το σχήμα, η θλιπτική αντοχή και η πλευρική πίεση κανονικοποιούνται διαιρούμενες από την μονοαξονική θλιπτική αντοχή  $C_0$ . Σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων, η εξίσωση Coulomb εκφράζεται από:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{C_0} = 1 + \alpha \sigma_3 / C_0, \quad (2.8)$$

όπου ο συντελεστής  $\alpha$  σχετίζεται με τον συντελεστή εσωτερικής τριβής  $\mu_i$ , σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha = \frac{\left[ (\mu_i^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu_i \right]}{\left[ (\mu_i^2 + 1)^{\frac{1}{2}} - \mu_i \right]} - 1. \quad (2.9)$$

Στο σχήμα 2.19, ορισμένες από τις παρατηρούμενες καμπύλες αντοχής έναντι πίεσης είναι σχεδόν γραμμικές και παράλληλες μεταξύ τους. Άλλες καμπύλες, οι οποίες είναι κοίλες προς τον άξονα πίεσης στην περιοχή χαμηλής πίεσης και σχεδόν γραμμικές στην περιοχή υψηλότερης πίεσης. Τα γραμμικά τμήματα και στις δύο περιπτώσεις είναι κατά προσέγγιση παράλληλα μεταξύ τους. Η μέση κλίση ( $\alpha$ ) του γραμμικού τμήματος των καμπυλών αντοχής και πίεσης αυτών των πυριτικών πετρωμάτων (εκτός από τους σχιστόλιθους) αντιστοιχεί σε συντελεστή εσωτερικής τριβής περίπου 0,6. Σύμφωνα με πρόσφατες μετρήσεις τριβής, οι συντελεστές της τριβής ολισθήσεως των διαφόρων πυριτικών πετρωμάτων είναι σχεδόν ίσοι με τον προαναφερθέντα συντελεστή εσωτερικής τριβής.

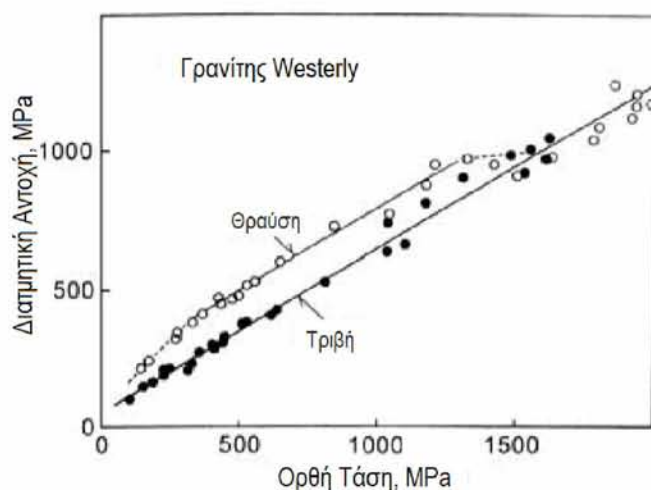


**Σχήμα 2.20.** Η θλιπτική αντοχή ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) των σχιστόλιθων έναντι της πλευρικής πίεσης ( $p = \sigma_2 = \sigma_3$ ), κανονικοποιημένη με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή  $C_0$ ,  $\mu_i$ : συντελεστής εσωτερικής τριβής. (Mogi, 2007)

Εάν ισχύει το κριτήριο της θραύσης Coulomb, θα πρέπει η κλίση ( $\alpha$ ) των καμπυλών αντοχής και πίεσης των σχιστόλιθων να είναι μικρότερη από την κλίση άλλων

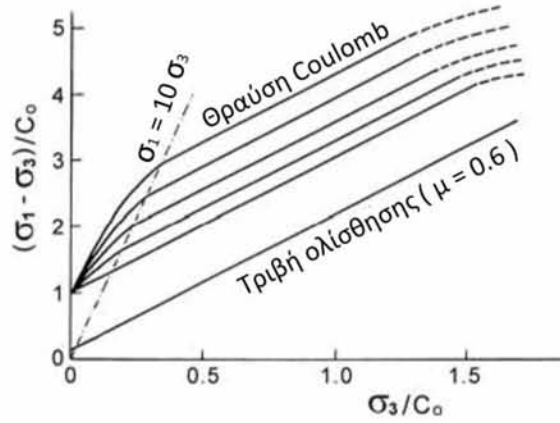
πυριτικών πετρωμάτων. Το σχήμα 2.20 δείχνει ότι αυτό ισχύει. Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής (περίπου 0,4-0,5) που προκύπτει από τη μέση κλίση του γραμμικού τμήματος φαίνεται να είναι περίπου ίσος με το συντελεστή ολίσθησης τριβής ( $\mu$ ) που προκύπτει από το πειραματικό αποτέλεσμα της Mauger.

Το σχήμα 2.21 δείχνει την σχέση μεταξύ των καμπυλών θραύσης και τριβής από τα δεδομένα του Byerlee (1967). Σε αυτό το σχήμα, μπορούν να επισημανθούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: α) Στο γρανίτη Westerly, η καμπύλη της διαμητικής τάσης εν συναρτήσει της καμπύλης ορθής τάσης κατά την θραύση είναι σχεδόν γραμμική και παράλληλη με την καμπύλη της τριβής ολίσθησης, εκτός από τις περιοχές χαμηλής πίεσης (~ 400MPa) και υψηλής πίεσης (~1300MPa). β) Στην περιοχή πίεσης >1500MPa και άνω, η καμπύλη της θραύσης συμφωνεί με την καμπύλη τριβής και έτσι η απόκλιση από τη γραμμική σχέση κοντά στην ορθή πίεση των 1500 MPa αποδίδεται στη μετάβαση ψαθυρής-όλκιμης συμπεριφοράς.

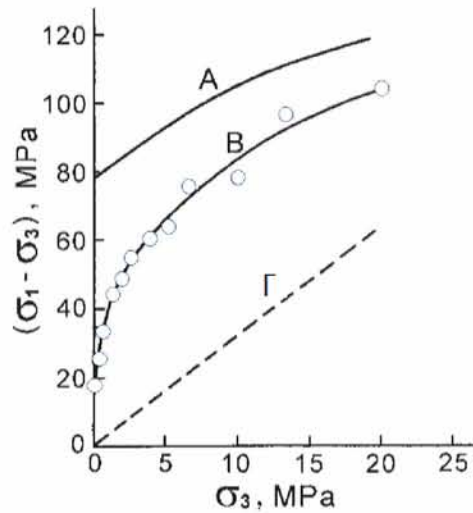


**Σχήμα 2.21** Η διαμητική αντοχή έναντι της ορθής τάσης κατά την θραύση (ανοιχτοί κύκλοι) και την τριβή ολίσθησης (συμπαγείς κύκλοι) για τις ίδιες επιφάνειες στον γρανίτη Westerly (Byerlee, 1967).

Επομένως, το κριτήριο θραύσης Coulomb φαίνεται να ισχύει στην ψαθυρή αστοχία πολλών πετρωμάτων, εκτός από μια περιοχή χαμηλής πίεσης και κοντά στην πίεση μετάβασης ψαθυρό-όλκιμο. Το σχήμα 2.22 δείχνει σχηματικά τις καμπύλες αντοχής-πίεσης διαφόρων πετρωμάτων. Ορισμένες από αυτές τις καμπύλες είναι κοίλες προς τον άξονα πίεσης στην περιοχή χαμηλών πιέσεων (Byerlee, 1967, Handin, 1969).



**Σχήμα 2.22.** Τυπικές καμπύλες, αντοχής συναρτήσει της πλευρικής πίεσης, πετρωμάτων και η οριακή γραμμή ( $\sigma_1 \approx 10\sigma_3$ ) των περιοχών (στα δεξιά της) στις οποίες ισχύει το κριτήριο. (Mogi, 2007)



**Σχήμα 2.23.** Η θλιπτική αντοχή ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ως συνάρτηση της πλευρικής πίεσης ( $p = \sigma_2 = \sigma_3$ ) για μάρμαρο. Καμπύλη A : αρχική κατάσταση μαρμάρου. Καμπύλη B : μάρμαρο με όρια κόκκων αποσυντιθέμενα με θέρμανση (μετά Rosengren και Jaeger, 1968). Ευθεία Γ: ολίσθηση τριβής ( $\mu=0.6$ ). (Mogi, 2007)

Ένα ενδιαφέρον πείραμα από τους Rosengren και Jaeger (1968) προτείνει μια πιθανή ερμηνεία της υψηλής ευαισθησίας της αντοχής των πετρωμάτων σε χαμηλή πλευρική πίεση. Τα αποτελέσματά τους φαίνονται στο σχήμα 2.23. Οι καμπύλες A και B είναι η θλιπτική αντοχή σε θραύση έναντι των καμπυλών της πλευρικής πίεσης για ένα αρχικό (virgin) μάρμαρο και για το ίδιο μάρμαρο με κόκκους που αποσυντιθενται με θέρμανση, αντίστοιχα. Η ευθεία γραμμή Γ δείχνει το μάρμαρο με μία κοινή τριβή ολίσθησεως. Είναι κατανοητό ότι η καμπύλη B για το εξαιρετικά ραγισμένο μάρμαρο είναι πολύ διαφορετική από τις καμπύλες A και Γ. Αυτή η διαφορά μπορεί να εξηγηθεί από τις ακόλουθες ερμηνείες. Η πρώτη είναι ότι η διατμητική αντοχή σε ολίσθηση για εξαιρετικά τραχείες και αλληλοσυνδεόμενες επιφάνειες (interlocked

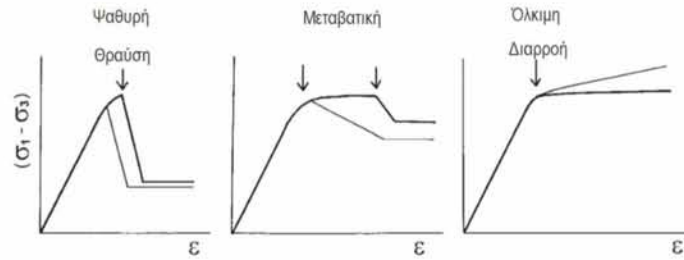
surfaces), όπως τα όρια των κόκκων ή οι ρωγμές, είναι αρκετά υψηλή από εκείνη στις λείες επιφάνειες υπό χαμηλή πλευρική πίεση. Η δεύτερη είναι ότι πολλές ανοιχτές ρωγμές σε ατμοσφαιρική πίεση κλείνουν με την αύξηση της πλευρικής πίεσης και έτσι η  $A_2$  στην Εξίσωση (2.5) ή (2.7) αυξάνει, δηλαδή, η διατμητική αντοχή των κλειστών ρωγμών αυξάνεται σημαντικά κάτω από την πλευρική πίεση. Έτσι, είναι λογικό ότι η ευαισθησία της αντοχής λόγω υψηλής πίεσης του αποσαθρωμένου μαρμάρου, αποδίδεται στις επιδράσεις της ρηγματωμένης κατάστασης. Οι καμπύλες αντοχής - πίεσης στην περιοχή χαμηλής πίεσης των πυριτικών πετρωμάτων που φαίνονται στα Σχ. 2.19 και 2.20 μπορούν επίσης να αποδοθούν στην κατάσταση των ρωγμών στο βράχο. Για υψηλό πορώδες λόγω ρηγμάτωσης, η ευαισθησία στη πλευρική πίεση της αντοχής σε θραύση είναι πολύ υψηλή για χαμηλή πλευρική πίεση και μειώνεται με την αυξανόμενη πλευρική πίεση και έτσι η καμπύλη αντοχής - πίεσης τείνει να είναι κοίλη προς τον άξονα πίεσης σε χαμηλή πλευρική πίεση. Σε πολύ συμπαγείς βράχους, χωρίς αξιόλογες προϋπάρχουσες ανοιχτές ρωγμές, η καμπύλη αντοχής είναι σχεδόν ευθεία. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει το κριτήριο θραύσης Coulomb. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν αξιοσημείωτες ανοιχτές ρωγμές, η καμπύλη αντοχής έναντι πίεσης είναι κοίλη προς τον άξονα πίεσης και μπορεί να εφαρμοστεί το κριτήριο Mohr.

Οι Savage, Byerlee και Lockner το 1996 συζήτησαν αυτό το θέμα με βάση τις ακριβείς μετρήσεις τους σχετικά με τη θραύση και τριβή του γρανίτη Westerly υπό πλευρική πίεση, από μια άποψη παρόμοια με αυτή του Mogi. Έλαβαν τους λόγους  $A1/A$ ,  $A2/A$  και  $A3/A$  συναρτήσεως της ορθής τάσης σε όλη αυτή την επιφάνεια σε περίπτωση αστοχίας και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι "η καμπυλότητα στην καμπύλη αντοχής έναντι της ορθής τάσης εξηγείται στο μοντέλο Mogi ως προκαλούμενη από μεταβολές στις σχετικές αναλογίες διαρρηγμένων και άθικτων περιοχών στην αρχική επιφάνεια ρήξης, αναλογίες που εξαρτώνται από την τροχιά φόρτισης πριν την αστοχία. "Δηλώνουν ότι αυτό που ονομάζεται εσωτερική τριβή είναι απλά μια εκδήλωση της συνηθισμένης τριβής. Επιπλέον, η καμπυλότητα της περιβάλλουσας αστοχίας Mohr είναι συνέπεια αλλαγών στην αρχική επιφάνεια ρήξης, που καταλαμβάνουν οι κλειστές ρωγμές και ότι το τμήμα αυτό εξαρτάται με τη σειρά του από τη βλάβη που συσσωρεύεται κατά μήκος της διαδρομής τάσης που χρησιμοποιείται για να φθάσει στην αστοχία. Τα αποτελέσματα του Mogi (1974) και των Savage et al. (1996) έδειξαν ότι το κριτήριο Coulomb-Mohr δεν είναι αυστηρά εμπειρικό, αλλά μπορεί να εξηγηθεί από ένα λογικό φυσικό μοντέλο.

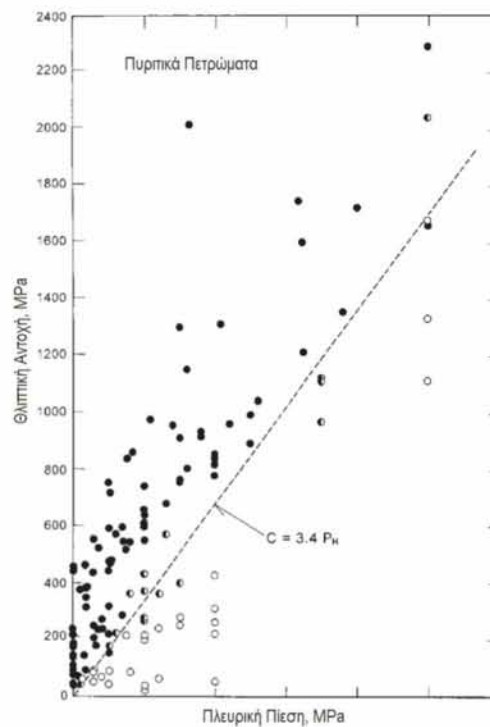
### 2.2.3 Η μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση

Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης, η όλκιμότητα, η οποία ορίζεται ως η ικανότητα να υφίσταται το υλικό μεγάλη μόνιμη παραμόρφωση χωρίς να ρηγματώνεται (Handin, 1966), αυξάνεται σημαντικά και η μετάβαση από την ψαθυρή προς την όλκιμη κατάσταση λαμβάνει χώρα σε κάποια τιμή της πλευρικής πίεσης. Το σχήμα

2.24 δείχνει τυπικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης στην ψαθυρή, την μεταβατική και την όλκιμη κατάσταση. Εικ. 2.25 και 2.26 δείχνουν την ψαθυρή-όλκιμη συμπεριφορά στην συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης εν συναρτήσει της πλευρικής πίεσης και της θλιπτικής αντοχής των πυριτικών πετρωμάτων και ανθρακικών πετρωμάτων αντίστοιχα .



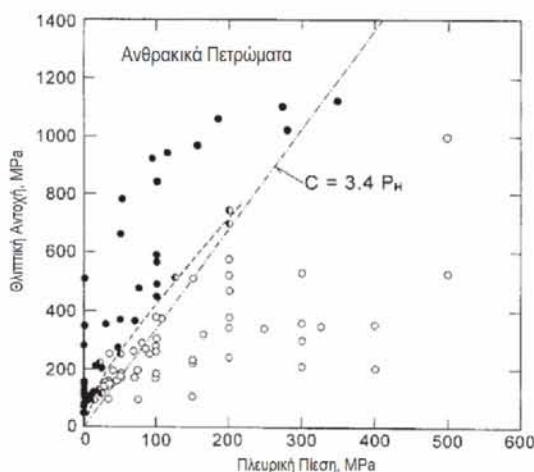
**Σχήμα 2.24.** Τυπικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης στην ψαθυρή, στην μεταβατική και στην όλκιμη κατάσταση (Mogi, 2007).



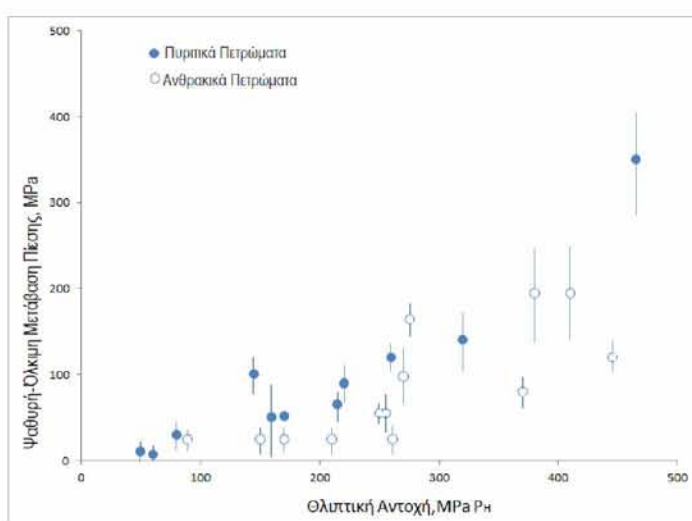
**Σχήμα 2.25.** Συμπεριφορά αστοχίας πυριτικών πετρωμάτων για διάφορες τιμές της θλιπτικής αντοχής και της πλευρικής πίεσης. Ευθεία γραμμή : όριο μεταξύ της ψαθυρής και της όλκιμης περιοχής. Κλειστοί κύκλοι: ψαθυρή κατάσταση. Ημι-κλειστοί: μεταβατική κατάσταση. Ανοιχτοί κύκλοι: όλκιμη κατάσταση (Mogi, 2007).

Στα πυριτικά πετρώματα, η ψαθυρή περιοχή (κλειστοί κύκλοι) και η όλκιμη περιοχή (ανοικτοί κύκλοι) διαχωρίζονται από μία ευθεία γραμμή Σχήμα 2.25. Αυτή η οριακή γραμμή εκφράζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 3.4\sigma_3 \quad (2.10)$$

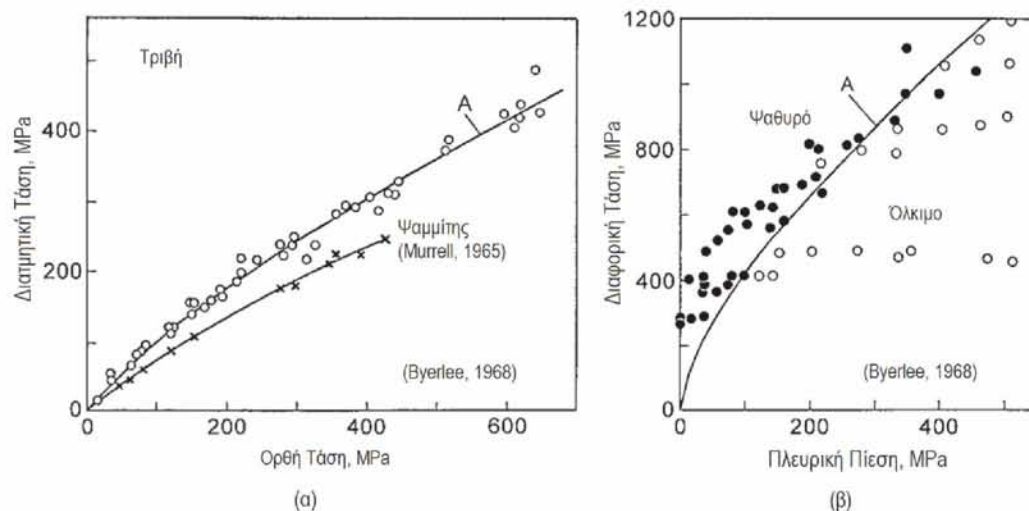


**Σχήμα 2.26.** Συμπεριφορά αστοχίας ανθρακικών πετρωμάτων σε διάφορες τιμές της αντοχής και της πίεσης. Ευθεία γραμμή : όριο μεταξύ της ψαθυρής και της όλκιμης περιοχής. Κλειστοί κύκλοι: ψαθυρή κατάσταση. Ημι-κλειστοί: μεταβατική κατάσταση. Ανοιχτοί κύκλοι: όλκιμη κατάσταση. (Mogi, 2007)



**Σχήμα 2.27.** Η σχέση μεταξύ της μεταβατικής πίεσης ψαθυρής-όλκιμης κατάστασης εν συνάρτησει της θλιπτικής αντοχής σε πίεση 50 MPa. (Mogi, 2007)

Από την άλλη πλευρά, το όριο των ανθρακικών πετρωμάτων είναι κάπως διαφορετικό από αυτό των πυριτικών πετρωμάτων και σαφώς μετατοπίζεται προς την αριστερή πλευρά (Εικ.2.26). Το Σχήμα 2.27 δείχνει τη σχέση της μεταβατικής πίεσης ψαθυρής-όλκιμης κατάστασης εν συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής σε πίεση 50 MPa σε πυριτικά πετρώματα (κλειστούς κύκλους) και ανθρακικά πετρώματα (ανοικτοί κύκλοι).

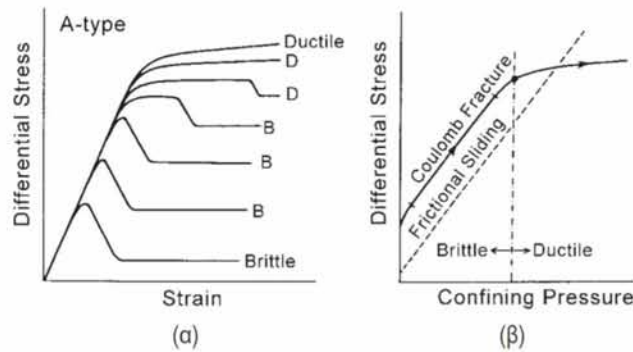


**Σχήμα 2.28.** (α) Η διατμητική τάση σε σχέση με την ορθή τάση για τριβή. Κύκλοι: έξι βράχοι, συμπεριλαμβανομένου του ασβεστόλιθου Solnhofen και του γρανίτη Westerly (Byerlee, 1968). Σταυροί: Darley Dale (Murrell, 1965). (β) Ψαθυρή-όλκιμη συμπεριφορά πέντε πετρωμάτων συναρτήσει της πλευρικής πίεσης και της διαφορικής τάσης στη θραύση ή σε παραμόρφωση 5% εάν το δείγμα ήταν όλκιμο. Η καμπύλη A είναι το όριο μεταξύ των ψαθυρών και όλκιμων περιοχών που προσδιορίζονται από τα δεδομένα τριβής (Byerlee, 1968).

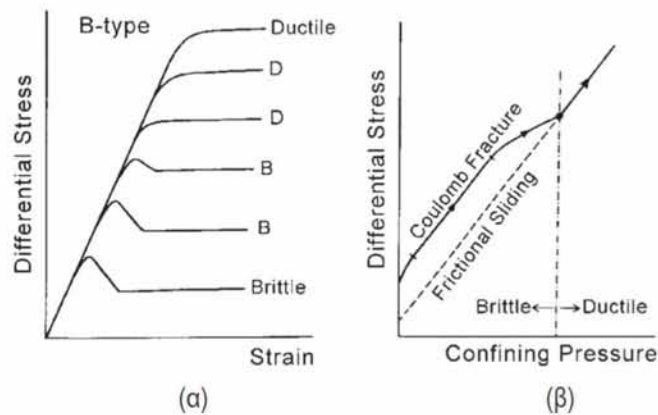
Οι πιέσεις μετάβασης ψαθυρότητας-ολκιμότητας των πυριτικών πετρωμάτων είναι αισθητά υψηλότερες από αυτές των ανθρακικών πετρωμάτων. Αυτή η διαφορά υποδηλώνει ότι υπάρχουν διαφορετικοί μηχανισμοί της ψαθυρής-όλκιμης μετάβασης, ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος.

Ο Ogowan (1960) πρότεινε ότι η πτώση της τάσης που χαρακτηρίζει τη θραύση δεν συμβαίνει σε υψηλή πίεση, επειδή η αντίσταση τριβής στην επιφάνεια θραύσης γίνεται υψηλότερη από την διατμητική αντοχή του πετρώματος. Αυτή η ιδέα χρησιμοποιήθηκε ως πιθανή εξήγηση για την μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη περιοχή, από τους Maurer (1965), Mogi (1966), Byerlee (1968) και άλλους. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο Mogi επεσήμανε ότι το όριο της ψαθυρής-ολκιμής μετάβασης στα διαγράμματα αντοχής έναντι πίεσης, προσομοιάζεται από μια σχεδόν γραμμική καμπύλη, για διάφορα πυριτικά πετρώματα και ο μηχανισμός μετάβασης

μπορεί να εξηγηθεί από την υπόθεση τριβής του Ogowan. Το όριο μετάβασης στα ανθρακικά πετρώματα είναι κάπως διαφορετικό από εκείνο των πυριτικών πετρωμάτων, γεγονός που αποδίδεται σε διαφορετικό μεταβατικό μηχανισμό. Ο Byerlee (1968) μελέτησε αυτό το πρόβλημα με βάση την μέτρηση της τριβής των πετρωμάτων και ισχυρίστηκε ότι το όριο της ψαθυρής - όλκιμης μετάβασης είναι ανεξάρτητο από τον τύπο του πετρώματος και ότι η υπόθεση τριβής του Ogowan είναι εφαρμόσιμη τόσο για τα πυριτικά όσο και για τα ανθρακικά πετρώματα. Το Σχήμα 2.28 δείχνει τα αποτελέσματα της έρευνας του Byerlee (1968).



**Σχήμα 2.29.** (α) Τυπικές καμπύλες τάση- παραμόρφωσης των πετρωμάτων τύπου A για διαφορετικές τιμές πλευρικής πίεσης. (β) Καμπύλη αντοχής- πλευρικής πίεσης και συμπεριφορά κατά την θραύση σε πετρώματα τύπου A.



**Σχήμα 2.30.** (α) Τυπικές καμπύλες τάση- παραμόρφωσης των πετρωμάτων τύπου B για διαφορετικές τιμές πλευρικής πίεσης. (β) Καμπύλη αντοχής- πλευρικής πίεσης και συμπεριφορά κατά την θραύση σε πετρώματα τύπου B.

Ο Mogi πρότεινε ότι η υπόθεση της ολισθήσεως με τριβή είναι εφαρμόσιμη για τη διαδικασία μετάβασης από τη ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά των πετρωμάτων (σημειώνεται ως B-τύπου) στον οποίο η μόνιμη παραμόρφωση στην περιοχή μετά την θραύση συμβαίνει με κατακλαστική ροή (cataclastic flow) ή τριβή ολισθήσεως. Αντιθέτως δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε A-τύπου πετρώματα, στα οποία εμφανίζεται μεγάλη μόνιμη παραμόρφωση πριν από τη θραύση με ομοιογενή πλαστική παραμόρφωση. Οι τυπικές καμπύλες τάσης- παραμόρφωσης των τύπων A και B



παρίστανται σχηματικά στα σχ. 2.29 και 2.30, αντίστοιχα. Μερικά ανθρακικά πετρώματα, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι τύπου Α, ενώ πετρώματα πυριτικού άλατος είναι τύπου Β.

Έτσι, η εξάρτηση της αντοχής των πετρωμάτων από την πλευρική πίεση, κοντά στην πίεση μετάβασης ψαθυρότητας – ολκιμότητας, είναι διαφορετική μεταξύ των τύπων Α και Β. Οι καμπύλες αντοχής και πλευρικής πίεσης και οι πιθανές ερμηνείες τους συνοψίζονται στα ακόλουθα.

Σημειώνεται ότι με τον όρο κατακλαστική ροή αναφέρεται η διαδικασία με την οποία μια μακροσκοπική γεωμετρία, ενός πετρώματος, αλλάζει το σχήμα της με τη θραύση των μικροσκοπικών συστατικών τους (της μικροδομής του). Σε μια μικροκλίμακα, αυτή είναι μια διαδικασία ψαθυρής παραμόρφωσης. Οι μικροθραύσεις μπορεί να εμφανιστούν στα όρια των κόκκων ή στους κόκκους του πετρώματος.

### 1. Τύπος Α

Οι τυπικές καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης των πετρωμάτων τύπου Α για διαφορετικές πλευρικές πιέσεις και η καμπύλη αντοχής έναντι πίεσης φαίνονται στο σχήμα 2.29. Σε αυτή την περίπτωση, η ρηγμάτωση εμφανίζεται μετά από κάποια μόνιμη παραμόρφωση, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται η πίεση. Η μεγάλη μόνιμη παραμόρφωση (large deformation) στην περιοχή μετά την διαρροή (post-yield) και πριν από τη θραύση λαμβάνει χώρα με ομοιογενή πλαστική παραμόρφωση. Η ψαθυρή-όλκιμη μετάβαση συμβαίνει όταν η αντοχή σε θραύση (fracture strength) είναι ίση με την τάση διαρροής (yield stress). Στο Σχήμα 2.29 (β) η αντοχή σε μια ψαθυρή περιοχή αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της πίεσης και στη συνέχεια η καμπύλη προσεγγίζει το όριο της ψαθυρής-όλκιμης μετάβασης ενώ παράλληλα μειώνεται η κλίση της καμπύλης, η οποία μπορεί να αποδοθεί στη βαθμιαία αύξηση της τοπικής διαρροής λόγω ετερογένειας (Mogi, 1966). Σε υψηλότερη πλευρική πίεση, η τάση διαρροής προσεγγίζει μια σταθερή τιμή.

### 2. Τύπος Β

Οι τυπικές καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης σε αυτή την περίπτωση φαίνονται στο σχήμα 2.30(α). Η πτώση της πίεσης λαμβάνει χώρα αμέσως μετά το σημείο διαρροής και η μόνιμη παραμόρφωση στην περιοχή μετά την διαρροή, παρουσιάζεται με κατακλαστική ροή ή ολίσθηση με τριβή. Η πίεση μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά είναι η πίεση στην οποία η αντοχή του βράχου, κατά τη ρηγμάτωση, είναι ίση με την αντοχή λόγω της αντίστασης τριβής μετά τη ρηγμάτωση (Orowan, 1960). Το σχήμα 2.30(β) δείχνει την τυπική καμπύλη αντοχής έναντι πίεσης. Αυτή η καμπύλη είναι σχεδόν παράλληλη με την καμπύλη που αντιστοιχεί στην ολίσθηση τριβής (frictional sliding) πάνω στην επιφάνεια ρηγμάτωσης, με εξαίρεση μιας περιοχής χαμηλής πίεσης. Η κλίση της καμπύλης μειώνεται βαθμιαία κοντά στην τιμή της πίεσης μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά. Αυτή η σταδιακή μείωση στην κλίση της καμπύλης αποδίδεται στην αύξηση των τοπικών θραύσεων, πριν από την μακροσκοπική αστοχία, λόγω

ετερογένειας. Δηλαδή, η περιοχή του άρρηκτου τμήματος (A1) στην Εξίσωση (2.6) μειώνεται σταδιακά κοντά στην μεταβατική πίεση, στην οποία το A1 γίνεται μηδέν. Σε πιέσεις υψηλότερες από την μεταβατική πίεση, η καμπύλη αντοχής έναντι πίεσης συμφωνεί με την καμπύλη τριβής ολίσθησης, στην οποία η αντοχή αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η πίεση. Η σχέση αντοχής και πίεσης του γρανίτη Westerly που φαίνεται στο σχήμα 2.21 είναι χαρακτηριστική για τον τύπο B. Οι περισσότεροι βράχοι, ωστόσο, συμπεριφέρονται κατά τρόπο ενδιάμεσο μεταξύ των τύπων A και B. Κοντά στη μεταβατική πίεση, πιθανότατα συμβαίνει η ανελαστική παραμόρφωση, λίγο πριν και μετά την διαρροή, τόσο με θραύση όσο και με πλαστική παραμόρφωση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ

#### 3.1. ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΘΛΙΨΗΣ

Ένας βασικός στόχος των εργαστηριακών δοκιμών της βραχομηχανικής είναι να προσδιοριστεί η παραμόρφωση και η συμπεριφορά της αντοχής υπό εντατικές συνθήκες που προσομοιάζουν εκείνες που συναντώνται στο πεδίο (*in situ*). Ωστόσο, τα περισσότερα πειράματα διεξάγονται σε κυλινδρικά δείγματα που υπόκεινται σε ομοιόμορφη πλευρική πίεση. Τέτοιες «συμβατικές τριαξονικές δοκιμές» προσομοιώνουν μια ειδική περίπτωση συνθηκών του φλοιού (*crustal condition*), στην οποία οι ενδιάμεσες και οι ελάχιστες κύριες τάσεις,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ , είναι ίσες. Οι τριαξονικές δοκιμές έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων, λόγω της απλότητας του εξοπλισμού και τη βολική προετοιμασία των δειγμάτων και τις διαδικασίες δοκιμών. Βασική υπόθεση των συμβατικών τριαξονικών δοκιμών είναι ότι η ενδιάμεση κύρια τάση, ακόμη και όταν δεν είναι ίση με την ελάχιστη κύρια τάση, έχει αμελητέα επίδραση στα χαρακτηριστικά αστοχίας των πετρωμάτων, όπως εκφράζεται στο κριτήριο Coulomb, και τις θεωρίες του Griffith (Jaeger, Cook, 1979)

Εντούτοις, ένας αυξανόμενος αριθμός *in situ* μετρήσεων, σε συνθήκες μεγάλου έως ενδιάμεσου βάθους του φλοιού της γης, έχει δείξει ότι τέτοιες τάσεις είναι σχεδόν πάντα ανισότροπες, δηλ.  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  (Haimson, 1978; McGarr, Gay, 1978; Brace, Kohlstedt, 1980). Επιπλέον, αρκετοί ερευνητές αντιμετωπίζουν προβλήματα με την χρήση των προαναφερθέντων κριτηρίων. Για παράδειγμα, οι Vernik και Zoback διαπίστωσαν ότι η χρήση του γραμμικοποιημένου κριτηρίου Mohr-Coulomb της αντοχής στις σχετικές διατομές διάνοιξης οπής γεωτρήσεως, στις επικρατούσες επί τόπου (*in situ*) εντατικές συνθήκες, σε κρυσταλλικά πετρώματα, δεν παρείχε ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Σε αυτή την εργασία, συζητούνται οι επιδράσεις της εντατικής κατάστασης στην αντοχή σε αστοχία, στην γωνία θραύσης και στην ολκιμότητα των πετρωμάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εντατική κατάσταση (*stress state*) μπορεί να προσδιοριστεί από τις τρεις κύριες τάσεις  $\sigma_1$  όπου είναι η μέγιστη κύρια τάση,  $\sigma_2$  όπου είναι η ενδιάμεση κύρια τάση και  $\sigma_3$  όπου είναι η ελάχιστη κύρια τάση (η θλιπτική τάση θα θεωρείται θετική).

Οι Adams και Nicolson (1901), πραγματοποίησαν πολλές πειραματικές μελέτες παραμόρφωσης και αστοχίας των πετρωμάτων σε φορτίσεις, όπου οι τάσεις

συνδιάζονται μεταξύ τους. Τα κύρια πειράματα της παραμόρφωσης των πετρωμάτων υπό συνδυασμένες τάσεις παρουσιάζονται κατά χρονολογική σειρά στον Πίνακα 3.1.

Date	Researcher	Stress system	Method	Remarks
1901	Adams & Nicolson	$\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$	$\sigma_1$ : στερεό έμβολο $\sigma_2 = \sigma_3$ : συμπαγή σωλήνα	{ χαμηλή ακρίβεια   με τριβή
1911	Kármán	$\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$	$\sigma_1$ : στερεό έμβολο $\sigma_2 = \sigma_3$ : πίεση ρευστού	{ υψηλή ακρίβεια   υψηλή πίεση
1915	Böker	$\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$	$\sigma_1 = \sigma_2$ : πίεση ρευστού $\sigma_3$ : στερεό έμβολο	{ υψηλή ακρίβεια   υψηλή πίεση
1935	Griggs	$\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$	same as Kármán $\sigma_3$ : δείγμα κοίλου κυλίνδρου	{ υψηλή ακρίβεια   υψηλή πίεση
1967	Handin et al.	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	σταθερής πίεσης στερεό έμβολο (συμπίεση + στρέψη) + πίεση υγρού	{ χαμηλή ακρίβεια
1968	Hojem & Cook	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	$\sigma_1$ : στερεό έμβολο $\sigma_2, \sigma_3$ : λεπτή επίπεδη υποδοχή (nearly πίεση ρευστού)	{ υψηλή ακρίβεια   χαμηλή πίεση   λίγα δεδομένα
1969*	Mogi	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	$\sigma_1, \sigma_2$ : στερεό έμβολο $\sigma_3$ : πίεση ρευστού	{ υψηλή ακρίβεια   υψηλή πίεση
1977	Mogi	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	$\sigma_1$ : στερεό έμβολο $\sigma_2, \sigma_3$ : πίεση ρευστού	{ υψηλή ακρίβεια   υψηλή πίεση

\* see Appendix

*Πίνακας 3.1. Η ιστορία των πειραμάτων τριαξονικής θλίψης (Mogi, 2007).*

Σε αυτόν τον πίνακα απαριθμούνται συνοπτικά τα κύρια σημεία των διαφόρων πειραματικών μεθόδων και πληροφορίες που σχετίζονται με την πειραματική ακρίβεια και τα επίπεδα τάσης. Για ποσοτικές συζητήσεις, η πειραματική ακρίβεια είναι απαραίτητη. Η δυνατότητα πειραμάτων σε συνθήκες υψηλής πίεσης είναι επίσης πολύ σημαντική, επειδή η εφαρμογή υψηλής πίεσης είναι απαραίτητη για τη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων σε μεγάλο βάθος.

### 3.1.1 Δοκιμή αξονικής φόρτισης υπό πλευρική πίεση

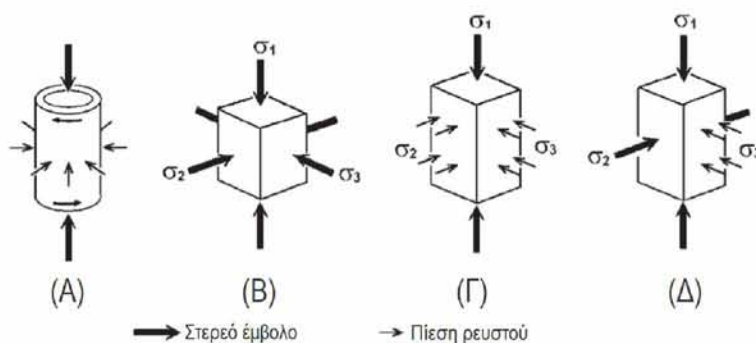
Οι Adams και Nicolson (1901) εφάρμοσαν αξονική θλιπτική τάση σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο βράχου που καλύφθηκε από μεταλλικό σωλήνα. Η πλευρική θλιπτική τάση εφαρμόζεται στο δοκίμιο βράχου, με την αύξηση της πλευρικής διαστολής λόγω της αξονικής θλίψης. Προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα της πλευρικής πίεσης: (1) έντονη αύξηση της αντοχής σε θραύση και (2) αισθητή αύξηση της ολκιμότητας. Από αυτό το πείραμα διαπιστώθηκαν αυτές οι δύο σημαντικές επιδράσεις της πλευρικής πίεσης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτά ήταν ποιοτικά, επειδή ήταν δύσκολη η ποσοτική εκτίμηση της πλευρικής πίεσης και ήταν πολύπλοκη η επίδραση της τριβής μεταξύ του δείγματος πετρώματος και του μεταλλικού σωλήνα.

Τα ποσοτικά τριαξονικά πειράματα χρονολογούνται από το έργο του von Κάρμάν (1911). Σε αυτές τις δοκιμές, η  $\sigma_1$  εφαρμόζεται σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος με ένα αξονικό στερεό έμβολο και η πλευρική τάση εφαρμόζεται από την πλευρική πίεση που προκαλεί το υγρό. Η τριαξονική μηχανή δοκιμής τύπου Κάρμάν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως χωρίς ουσιαστική αλλαγή από πολλούς ερευνητές. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το τελικό αποτέλεσμα της αξονικής θλίψης μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Ως εκ τούτου, η κατανομή τάσεων στο δείγμα βράχου είναι αρκετά ομοιόμορφη και μπορούν να διεξαχθούν ακριβείς μετρήσεις της τάσης και της παραμόρφωσης. Χρησιμοποιώντας ένα δοχείο υψηλής πίεσης, μπορούν να εφαρμοστούν υψηλές τάσεις χωρίς τεχνικές δυσκολίες. Σε αυτή τη συνηθισμένη δοκιμή τριαξονικής συμπίεσης, οι τάσεις είναι αξονοσυμμετρικές ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ).

Ο Bøker (1915) έκανε πειράματα στα οποία η πλευρική πίεση ήταν μεγαλύτερη από την αξονική τάση, έτσι ώστε  $\sigma_1 = \sigma_2 < \sigma_3$ . Αυτή είναι η τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού (triaxial extension test). Στη συνέχεια, αρκετοί ερευνητές πραγματοποίησαν πειράματα αυτού του τύπου και συχνά μελετούσαν αν η σχετική τιμή της  $\sigma_2$  επηρεάζει την αντοχή στη θραύση, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικής θλίψης και τριαξονικού εφελκυσμού (triaxial extension).

### 3.1.2 Η πραγματική δοκιμή τριαξονικής θλίψης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε αυτές τις συμβατικές τριαξονικές δοκιμές του τύπου Κάρμάν, δύο κύριες τάσεις είναι ίσες ( $\sigma_2 = \sigma_3$  ή  $\sigma_1 = \sigma_2$ ). Το Σχήμα 3.1 δείχνει σχηματικά τις διάφορες μεθόδους (Α), (Β), (Γ) και (Δ) που επινοήθηκαν για την πραγματική δοκιμή τριαξονικής συμπίεσης (true triaxial compression test) στην οποία όλες οι τρεις κύριες τάσεις είναι διαφορετικές,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 > 0$ . Τα παχιά βέλη δείχνουν συμπίεση ή στρέψη μέσω συμπαγούς εμβόλου ή ακραίων τεμαχίων και τα λεπτά βέλη δείχνουν συμπίεση με πίεση ρευστού.

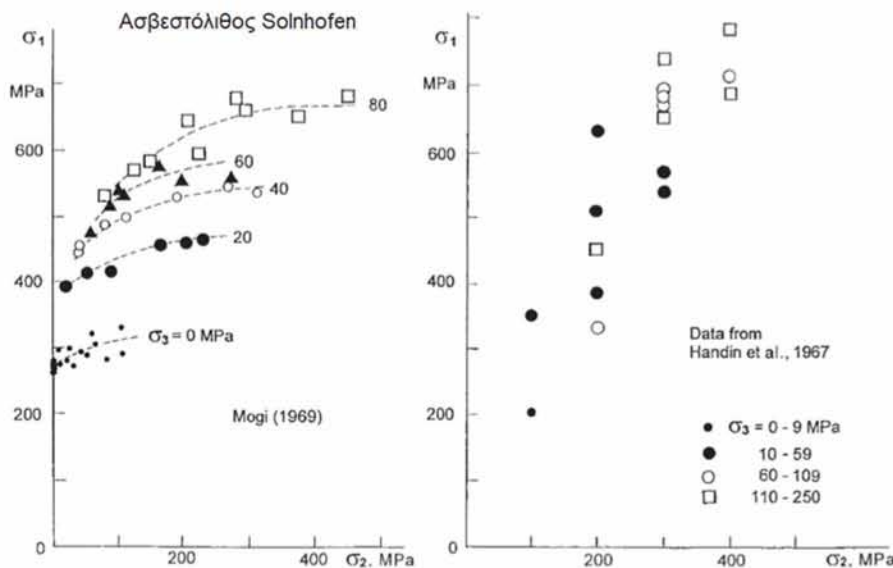


**Σχήμα 3.1.** Διάφορες μέθοδοι που σχεδιάστηκαν για την δοκιμή δειγμάτων πετρωμάτων υπό συνθήκες στις οποίες οι τρεις κύριες τάσεις είναι διαφορετικές (Mogi, 2007).

- **Πείραμα τύπου-A: Θλίψη και στρέψη κοίλου κυλίνδρου υπό πλευρική πίεση ρευστού**

Ένας χονδρόπαχος κοίλος κύλινδρος χρησιμοποιήθηκε σε αυτόν τον τύπο πειραματικής διάταξης από τους Robertson (1955) και Hoskins (1969). Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή των τάσεων είναι ανομοιογενής στα δοκίμια των πετρωμάτων, οπότε η σημασία των πειραματικών αποτελεσμάτων δεν είναι ξεκάθαρη.

Προκειμένου να επιτευχθεί σχεδόν ομοιογενής κατανομή τάσεων, οι Handin, Heard και Magouirk (1967) χρησιμοποίησαν έναν πολύ λεπτό κοίλο κύλινδρο. Με αξονική θλίψη και στρέψη ενός λεπτότοιχου κοίλου κυλίνδρου υπό πλευρική πίεση μέσω του ρευστού, μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικές τρεις κύριες τάσεις. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με την πειραματική διάταξη σε όγκια μέταλλα. Η μελέτη αυτή αποτελεί μια σημαντική έρευνα για την επίδραση της  $\sigma_2$  σε βραχώδη υλικά. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Mogi, η πειραματική μέθοδος τους έχει ένα σημαντικό ελάττωμα. Στο Σχήμα 3.2 (δεξιά), απεικονίζονται σε διάγραμμα  $\sigma_1$ - $\sigma_2$ , τα πειραματικά δεδομένα που παρατίθενται στην εν λόγω εργασία. Τα διαφορετικά σύμβολα υποδεικνύουν διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$ . Σε αυτό το σχήμα, τα δεδομένα διασκορπίζονται πολύ, και έτσι δεν μπορεί να αναγνωριστεί οποιαδήποτε σημαντική κανονικότητα. Στην αριστερή εικόνα στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από τον Mogi, 1970. Αυτά τα δύο γραφήματα είναι αρκετά διαφορετικά.



**Σχήμα 3.2.** Δεξιά εικόνα: Πειραματικά αποτελέσματα της σχέσης  $\sigma_1$  -  $\sigma_2$  για τον ασβεστόλιθο Solnhofen που αναφέρθηκε από τους Handin και άλλων (1967). Αριστερή εικόνα: παρόμοια εικόνα από τον Mogi(1969).

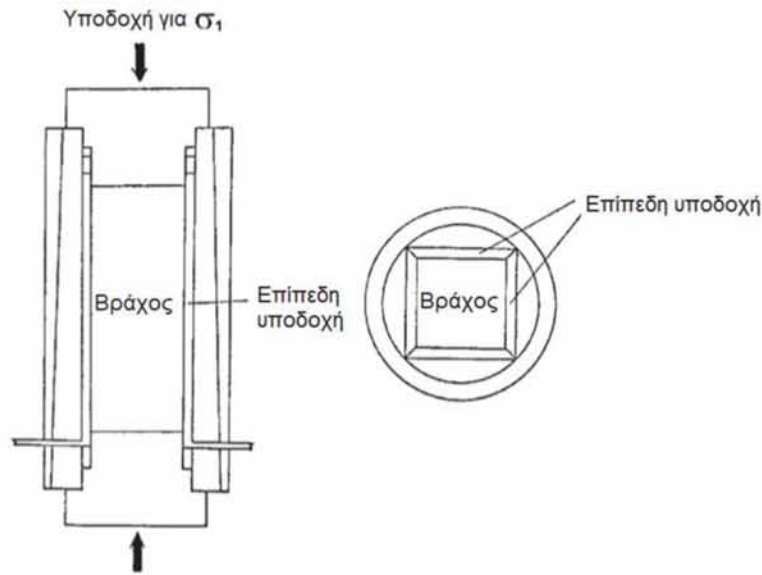
Τέτοια έντονη διασπορά ή πολύ χαμηλή αναπαραγωγικότητα των πειραματικών δεδομένων μπορεί να αποδοθεί στη χρήση ενός πολύ λεπτού κοίλου κυλινδρικού δείγματος. Το πάχος τοιχώματος σε αυτό το πείραμα είναι μόνο 0,7 mm. Κατά την κατασκευή ενός τέτοιου κοίλου κυλίνδρου ψαθυρού πετρώματος (ασβεστόλιθος Solnhofen), η δημιουργία μικρορωγμών είναι αναπόφευκτη. Αυτή η κατάσταση των ψαθυρών πετρωμάτων είναι αρκετά διαφορετική από αυτή των όλκιμων μετάλλων. Αυτές οι ρωγμές του λεπτού κοίλου κυλίνδρου έχουν σοβαρές επιδράσεις στη μέτρηση της αντοχής. Εν κατακλείδι, η μέθοδος Handin, Heard και Magouirk (1967) είναι ακατάλληλη για την πραγματική τριαξονική δοκιμή θλίψης

- ***Πείραμα τύπου-B: Τριαξονικής θλίψης από τρία στερεά έμβολα***

Υπάρχουν πολλά πειράματα στα οποία τα τρία απέναντι ζεύγη όψεων των κυβικών δειγμάτων συμπιέζονται με συμπαγή έμβολα ( Niwa, Kobayashi και Koyanagi, 1967). Σε αυτές τις περιπτώσεις, λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις για την ελαχιστοποίηση του περιορισμού της τριβής στις πλάκες φόρτισης. Ωστόσο, η κατανομή τάσεων σε δείγματα πετρωμάτων δεν είναι ομοιογενής με τη χρήση αυτής της μεθόδου. Επομένως, αυτή η μέθοδος δεν προσεγγίζει την ακριβή πραγματική τριαξονική δοκιμή.

- ***Πείραμα τύπου-Γ: Αξονική θλίψη ( $\sigma_1$ ) από ένα στερεό έμβολο και πλευρική θλίψη ( $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ ) από δύο διαφορετικές πιέσεις ρευστού***

Το σχήμα 3.3 δείχνει το τριαξονικό κελί που αναπτύχθηκε από τους Hojem and Cook (1968). Η  $\sigma_1$  εφαρμόζεται από ένα αξονικό στερεό έμβολο, και οι  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  εφαρμόζονται ανεξάρτητα από δύο ζεύγη χάλκινων επίπεδων-υποδοχών (flat-jacks). Δεδομένου ότι οι επίπεδοι υποδοχείς είναι μαλακοί, η πλευρική πίεση φαίνεται να είναι σχεδόν ίση με την πίεση ρευστού. Παρατηρήθηκε από τους Hojem and Cook (1968) ότι η επίδραση της  $\sigma_2$  ήταν αξιοσημείωτη, αν και ήταν πολύ μικρότερη από την επίδραση της  $\sigma_3$ . Παρόλο που δεν υπήρχε άμεση απόδειξη για την ομοιογενή κατανομή της τάσης, αυτό το πείραμα φαίνεται να είναι μια αξιόπιστη πραγματική δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Σε αυτή τη μέθοδο, ωστόσο, η εφαρμογή υψηλών πλευρικών πιέσεων είναι δύσκολη λόγω της περιορισμένης αντοχής της λεπτής μαλακής μεμβράνης χαλκού στον επίπεδο κύλινδρο.



*Σχήμα 3.3. Το κελί τριαξονικής φόρτισης από Hojset και Cook (1968). Η  $\sigma_1$  εφαρμόζεται από στερεό έμβολο, και η  $\sigma_2$  και η  $\sigma_3$  εφαρμόζεται από δύο επίπεδους υποδοχείς (Mogi, 2007).*

- **Πείραμα τύπου-Α: Τριαξονική θλίψη από δύο ζεύγη στερεών εμβόλων ( $\sigma_1$  και  $\sigma_2$ ) και πλευρική πίεση από ρευστό ( $\sigma_3$ )**

Αυτή η μέθοδος πραγματικής τριαξονικής συμπίεσης αναπτύχθηκε από τον Mogi το 1969 και το 1970. Αυτή η μέθοδος επιτεύχθηκε με μια σημαντική τροποποίηση της συσκευής τριαξονικού ελέγχου τύπου Kármán. Η  $\sigma_1$  εφαρμόζεται από το αξονικό στερεό έμβολο και η  $\sigma_2$  εφαρμόζεται από ένα πλευρικό έμβολο και η  $\sigma_3$  εφαρμόζεται από την πλευρική πίεση μέσω του ρευστού. Η ελάχιστη κύρια τάση ( $\sigma_3$ ) είναι μεγαλύτερη από 800 MPa η οποία μπορεί να εφαρμοστεί με τη χρήση του χονδρόπαχου δοχείου υψηλής πίεσης. Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, είναι δυνατή η ομοιογενής πραγματική δοκιμή τριαξονικής θλίψης σε ένα ευρύ φάσμα τάσεων, χρησιμοποιώντας αυτή την πειραματική διάταξη. Με μια σειρά πειραμάτων που πραγματοποίησε ο Mogi, διερεύνησε τις επιδράσεις της ενδιάμεσης κύριας τάσης ( $\sigma_2$ ) στην αντοχή της αστοχίας, τη γωνία θραύσης, την ολκιμότητα και πρότεινε κάποια εμπειρικά κριτήρια αστοχίας.

Το 1979, η μηχανή δοκιμής τριαξονικής θλίψης διατέθηκε στην αγορά, ως "μηχανή πραγματικής τριαξονικής δοκιμής τύπου Mogi" από την Marui Company, Osaka, Japan. Στην Κίνα, ο Xu (1980) δημιούργησε "την τριαξονική μηχανή τύπου Mogi" και η ομάδα του πραγματοποίησε διάφορα πειράματα για την επίδραση της  $\sigma_2$  στην αντοχή σε θραύση των βράχων με τη χρήση αυτής της μηχανής. Ωστόσο, η τριαξονική συσκευή τους διαφέρει σημαντικά από τη μηχανή τύπου "Mogi". Οι Wawersik et al. (1997) και οι Haimson και Chang (2000) δημιούργησαν τα πραγματικά τριαξονικά κελιά που υιοθετούν τον αρχικό σχεδιασμό του Mogi. Η σπουδαιότητα του προβλήματος της επίδρασης της  $\sigma_2$  έχει απασχολήσει διάφορους



ερευνητές (π.χ., Colmenares και Zoback, 2002, Fjær και Ruistuen, 2002, Al-Ajmi και Zimmerman, 2005).

## 3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΥΠΟ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

### 3.2.1 Εισαγωγή

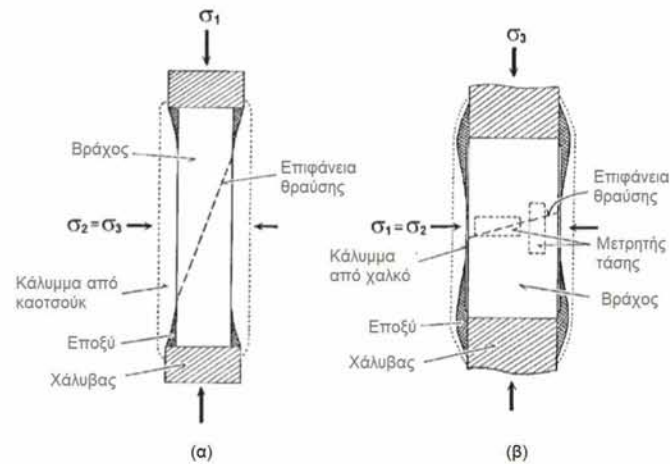
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, από τα πρωτοπόρα έργα των von Kármán (1911) και Böker (1915) σχετικά με την τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό (extension test), έγιναν πολλές πειραματικές μελέτες για την θραύση των πετρωμάτων υπό συνδυασμένες καταπονήσεις. Σύμφωνα με την τριαξονική δοκιμή συμπίεσης του τύπου Kármán ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ), η αντοχή θραύσης των ψαθυρών πετρωμάτων αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_3$ . Αυτή η επίδραση της  $\sigma_3$  εξηγείται καλά από τις θεωρίες Coulomb, Mohr, Griffith και την τροποποιημένη θεωρία Griffith, οι οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ . Ο Böker (1915) συνέκρινε το αποτέλεσμα της δοκιμής εφελκυσμού ( $\sigma_1 = \sigma_2 < \sigma_3$ ) στο μάρμαρο Carrara με εκείνο της δοκιμής θλίψης στο ίδιο πέτρωμα από τον von Kármán. Ο Böker βρήκε μια μικρή διαφορά μεταξύ τους, η οποία έχει αποδοθεί από πολλούς ερευνητές στην επίδραση της ενδιάμεσης κύριας πίεσης. Αυτό το συμπέρασμα μπορεί να μην είναι βέβαιο, διότι υπάρχει μια πιθανότητα, η διαφορά αυτή να οφείλεται σε μια ανισοτροπία του πετρώματος. Ο Mogi πραγματοποίησε αρκετά προσεκτικές και ακριβείς μετρήσεις για να μελετηθεί η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  σε πετρώματα.

### 3.2.2 Πειραματική διαδικασία

Όταν η πλευρική πίεση εφαρμόζεται για πρώτη φορά, τότε το αξονικό φορτίο αυξάνεται στις δοκιμές θλίψης ή μειώνεται σε δοκιμές εφελκυσμού (extension), έως ότου συμβεί η θραύση. Οι δύο από τις κύριες τάσεις είναι ίσες με την πλευρική πίεση.

#### *Δοκιμή πλευρικής θλίψης (Confined compression test)*

Η μέτρηση της αντοχής σε θλίψη ενός κυλινδρικού δοκιμίου πετρώματος υπό πλευρική πίεση ρευστού πραγματοποιείται με τη χρήση της διαμόρφωσης δείγματος που εξεξηγήθηκε στο τμήμα 1.1. Το δείγμα υπό πλευρική πίεση περιτυλίγεται με μεμβράνη καουτσούκ σιλικόνης (silicone rubber jacket) (Σχήμα.3.4α).



**Σχήμα 3.4.** (α) Δείγμα για δοκιμή μονοαξονικής και πλευρικής θλίψης. (β) Δείγμα για δοκιμή πλευρικού εφελκυσμού (Mogi, 2007)

### Δοκιμή πλευρικού εφελκυσμού (Confined extension test)

Οι δοκιμές εφελκυσμού (extension) πραγματοποιούνται επίσης με τη χρήση της διαμόρφωσης του δοκιμίου, που φαίνεται στο Σχήμα 3.4 (β). Η αξονική τάση  $\sigma_3$  είναι αισθητά μικρότερη από την πλευρική τάση  $\sigma_1 = \sigma_2$  (πλευρική πίεση).

### 3.2.3 Τα πετρώματα των δοκιμών

Στα πειράματα τα οποία πραγματοποίησε ο Mogi χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα πετρώματα: γρανίτης Westerly, δολομίτης Dunham, ασβεστόλιθος Solnhofen και μάρμαρο. Στον Πίνακα 3.2, περιγράφεται η μηχανική τους ομοιογένεια και ισοτροπία, τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν από μονοαξονικές δοκιμές θλίψης. Τα δοκίμια θλίψης ήταν κυκλικοί κύλινδροι διαμέτρου 1.6 cm και μήκους 5.0 cm. Τα δοκίμια εφελκυσμού (extension) ήταν από 2.30 cm έως 2.54 cm σε διάμετρο και 5 cm μήκος.

### 3.2.4 Εξέταση της ισοτροπίας και της ομοιογένειας με μονοαξονικές δοκιμές θλίψης

Οι μονοαξονικές θλιπτικές αντοχές τριών ομάδων δοκιμών, που πάρθηκαν από θέσεις δείγματος που σχηματίζουν ορθή γωνία μεταξύ τους, μετρήθηκαν από τον

Μογι για α) τον γρανίτη Westerly, β) τον δολομίτη Dunham, γ) τον ασβεστόλιθο Solnhofen και δ) ενός μεσόκκοκκου λευκού μαρμάρου. Οι τιμές αντοχής στις τρεις διευθύνσεις 1, 2 και 3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Η αναπαραγωγιμότητα (reproducibility) στις μετρήσεις αντοχής, στην ίδια διεύθυνση, ήταν πολύ καλή, ακόμη και στο μάρμαρο. Η υψηλή αναπαραγωγιμότητα δείχνει την ομοιογενή δομή αυτών των πετρωμάτων και την υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων. Υπάρχουν κάποιες διαφορές αντοχής σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Αυτή η εξάρτηση της αντοχής μπορεί να αποδοθεί στην ανισοτροπική δομή. Οι μεγαλύτερες διαφορές για τρεις αμοιβαίες κάθετες διευθύνσεις εμφανίζονται επίσης στο Πίνακα 3.2 επί τοις εκατό της μέσης τιμής αντοχής. Η διαφορά αυτή ήταν μικρότερη από 8% για τα πετρώματα εκτός από το μάρμαρο, για τα οποία η διαφορά ήταν πολύ μεγάλη (περίπου 25%). Οι διαφορές αντοχής 10 έως 50% συνδέονται με την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης.

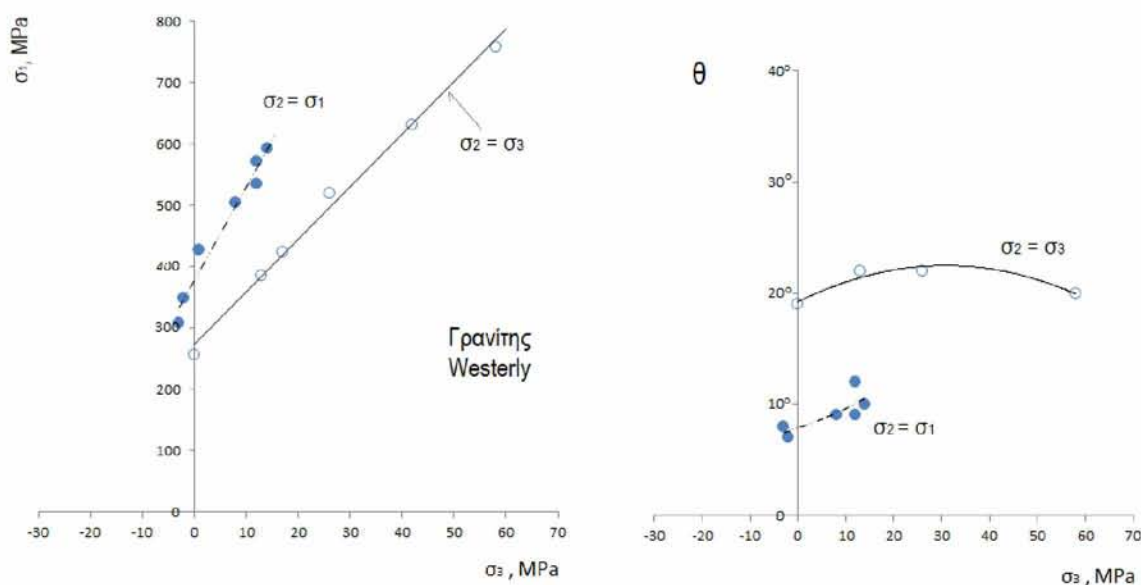
Πείραμα Νο.	Προσανατολισμός	Αντοχή σε θλίψη (Μρα)	Σχετική αντοχή (%)	Ανισοτροπικός παράγοντας (%)	
<b>Γρανίτης Westerly</b>					
1	1	243			
2	1	252			
Μέση τιμή	1	248	97		
6	2	251			
5	2	257			
Μέση τιμή	2	252	98		
4	3	266			
3	3	273			
Μέση τιμή	3	269	105		
		Συνολικά	256±10	100±4	8
<b>Δολομίτης Dunham</b>					
1	1	210			
2	1	214			
Μέση τιμή	1	212	98		
4	2	213			
3	2	215			
Μέση τιμή	2	214	99		
5	3	225			
6	3	226			
Μέση τιμή	3	225	104		
		Συνολικά	217±6	100±3	6
<b>Ασβεστόλιθος Solnhofen</b>					
3	1	288			
4	1	288			
Μέση τιμή	1	288	98		
5	2	298			
6	2	292			
Μέση τιμή	2	295	100		
1	3	300			
2	3	292			
Μέση τιμή	3	296	101		
		Συνολικά	293±5	100±2	3
<b>Μάρμαρο</b>					
1	1	48.9			
3	1	49.6			
2	1	21.0			
Μέση τιμή	1	49.8	89		
6	2	52.5			
4	2	53.5			
5	2	56.7			
Μέση τιμή	2	54.2			
7	3	62.0	97		
8	3	62.8			
9	3	65.7			
Μέση τιμή	3	63.5	114		
		Συνολικά	55.8±5.9	100±11	25

### Πίνακας 3.2. Περίληψη μονοαξονικών δοκιμών θλίψης (Mogi, 2007).

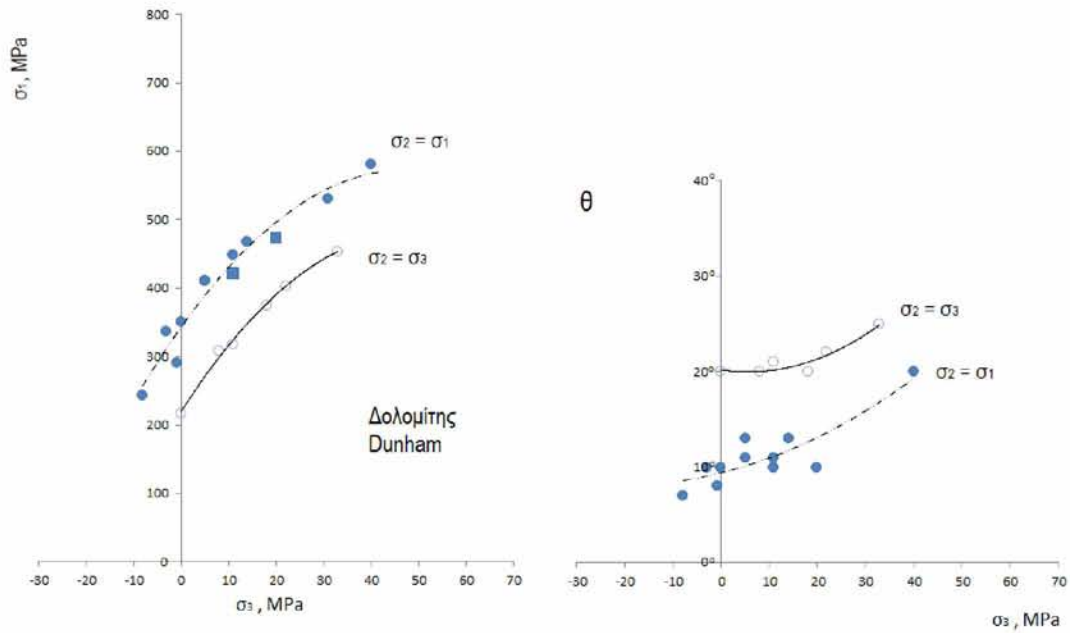
#### Σύγκριση πλευρικών δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού

Τα δεδομένα τα οποία λήφθηκαν από τις δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού που παρατίθενται στα Σχήματα 3.6, 3.7 και 3.8. Εάν η ενδιάμεση κύρια τάση είναι χωρίς επιρροή, η καμπύλη  $\sigma_1 - \sigma_3$  για τις δοκιμές εφελκυσμού θα πρέπει να συμπίπτει με την καμπύλη για τις δοκιμές θλίψης. Στον γρανίτη Westerly και στον δολομίτη Dunham, οι καμπύλες για τις δύο δοκιμές είναι σχεδόν παράλληλες, αλλά η καμπύλη εφελκυσμού βρίσκεται πολύ πάνω από την καμπύλη θλίψης. Οι διαφορές της μέγιστης κύριας τάσης μεταξύ των δύο διαφορετικών δοκιμών ήταν 30 έως 50% της τιμής στη θλίψη. Από αυτό συνάγεται το συμπέρασμα ότι η ενδιάμεση κύρια τάση έχει αξιοσημείωτη επίδραση στις συνθήκες αστοχίας σε αυτά τα πετρώματα. Οι θραύσεις στο παρόν πείραμα ήταν καθαρά τύπου διάτμησης για υψηλές τιμές της  $\sigma_3$ , αλλά σε αρνητική ή χαμηλή θετική τιμή της  $\sigma_3$  ήταν συχνά καμπυλόγραμμες και ακανόνιστες. Στα Σχ. 3.6 έως 3.8 απεικονίζεται η μεταβολή της τάσης αστοχίας  $\sigma_1$  και της γωνίας θραύσης  $\theta$  συναρτήσει της ελάχιστης τάσης ( $\sigma_3$ ).

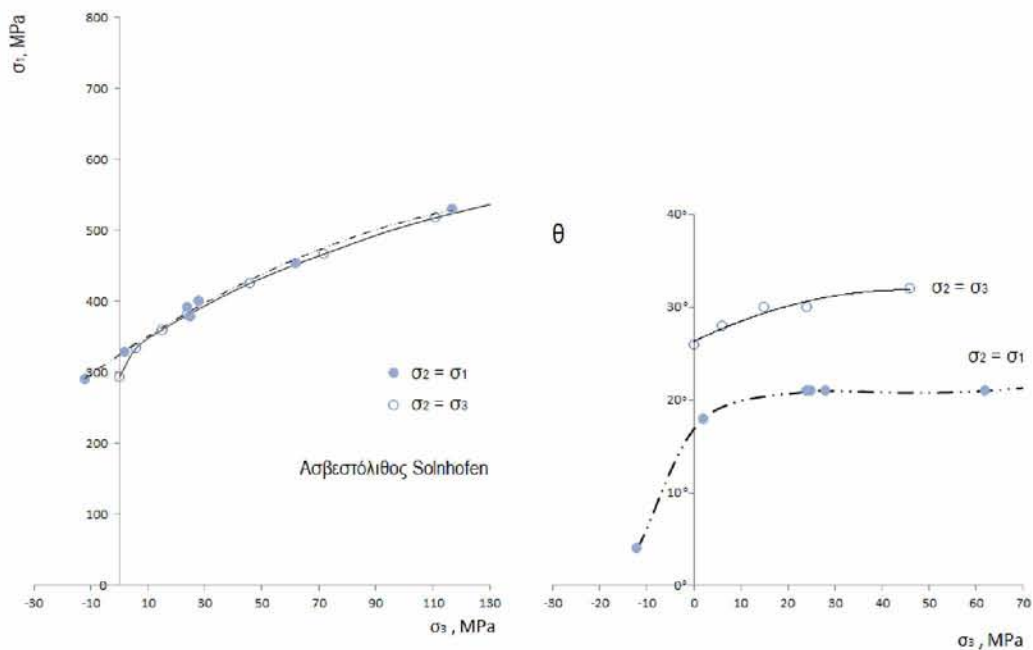
Σε αυτούς τους βράχους, οι γωνίες θραύσης που παρατηρήθηκαν στις δοκιμές εφελκυσμού ήταν 30 έως 50% χαμηλότερες από εκείνες στις δοκιμές θλίψης σε μια δεδομένη τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης. Η διαφορά αυτή οφείλεται επίσης στην επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης.



Σχήμα 3.6. Η τάση αστοχίας ( $\sigma_1$ ) και η γωνία θραύσης ( $\theta$ ) εν συναρτήσει της ελάχιστης κύριας τάσης ( $\sigma_3$ ) για τον γρανίτη Westerly. Ανοιχτός κύκλος: θλίψη. Συμπαγής κύκλος: εφελκυσμός (Mogi, 2007).



**Σχήμα 3.7.** Η τάση αστοχίας ( $\sigma_1$ ) και η γωνία θραύσης ( $\theta$ ) εν συναρτήσει της ελάχιστης κύριας τάσης ( $\sigma_3$ ) για τον δολομίτη Dunham. Ανοιχτός κύκλος: θλίψη. Συμπαγής κύκλος : εφελκυσμός με χαλύβδινη υποδοχή. Συμπαγής τετράγωνο : εφελκυσμός με χάλυβα (Mogi, 2007).



**Σχήμα 3.8.** Η τάση αστοχίας ( $\sigma_1$ ) και η γωνία θραύσης ( $\theta$ ) εν συναρτήσει της ελάχιστης κύριας τάσης ( $\sigma_3$ ) για τον ασβεστόλιθο Solnhofen. Ανοιχτός κύκλος: θλίψη. Συμπαγής κύκλος: εφελκυσμός (Mogi, 2007).

Στον ασβεστόλιθο Solnhofen δεν βρέθηκε αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των καμπυλών της τάσης αστοχίας για δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού. Η καμπύλη εφελκυσμού βρίσκεται επίσης πάνω από την καμπύλη θλίψης σε χαμηλές τιμές της

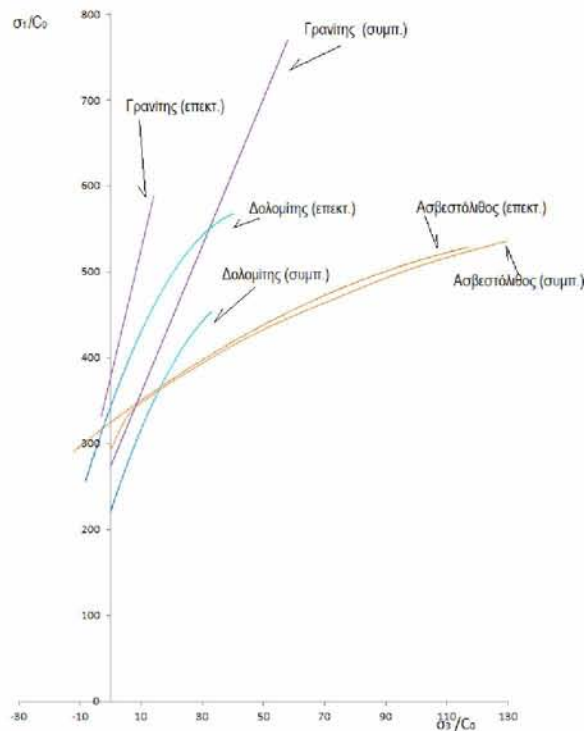
$\sigma_3$ , αλλά και οι δύο καμπύλες συμφωνούν περίπου σε υψηλότερες τιμές της  $\sigma_3$ . Η σύμπτωση των δύο καμπυλών δεν σημαίνει πάντοτε ότι η ενδιάμεση κύρια τάση δεν ασκεί επιρροή. Επίσης, ο ασβεστόλιθος Solnhofen έδειξε όλκιμη συμπεριφορά για υψηλές τιμές της  $\sigma_3$ . Ωστόσο, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην τάση αστοχίας δεν είναι μεγάλη. Αυτή η μικρή επίδραση της  $\sigma_2$  μπορεί να συνδέεται με το γεγονός ότι ο ασβεστόλιθος Solnhofen συμπεριφέρεται ως όλκιμο υλικό σε μεγάλη πλευρική πίεση. Διακρίνονται επίσης σημαντικές διαφορές στις γωνίες θραύσης μεταξύ των δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού. Οι γωνίες θραύσης ήταν περίπου 30% χαμηλότερες στις δοκιμές εφελκυσμού σε σύγκριση με τις δοκιμές θλίψης σε δεδομένη τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης. Στο Σχήμα 3.9, τα παρατηρούμενα αποτελέσματα, που περιλαμβάνουν τα πειράματα του Mogi για τις δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού, συνοψίζονται στις κύριες συντεταγμένες,  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$ , κανονικοποιημένες ως προς τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή ( $C_0$ ). Έτσι εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Κάθε καμπύλη είναι ελαφρά κοίλη προς τα κάτω. Η κλίση αυτών των καμπυλών σε οποιαδήποτε τιμή  $\sigma_3/C_0$  είναι διαφορετική για διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων. Η καμπύλη δοκιμών εφελκυσμού είναι σχεδόν παράλληλη με την καμπύλη θλίψης, αλλά η καμπύλη εφελκυσμού βρίσκεται αισθητά πάνω από την καμπύλη θλίψης.

2. Η διαφορά  $\sigma_1/C_0$  ανάμεσα στις δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού σε δεδομένη τιμή  $\sigma_3/C_0$  είναι ανάλογη προς την κλίση της καμπύλης θλίψης. Αυτό υποδηλώνει ότι η εξάρτηση της  $\sigma_2$  από την τάση αστοχίας είναι ανάλογη με την εξάρτηση από την  $\sigma_3$ , αλλά σε μικρότερο βαθμό.

3. Οι γωνίες θραύσης μεταξύ της μέγιστης κύριας τάσης και του διατμητικού επιπέδου θραύσης είναι αξιοσημείωτα μικρότερες σε δοκιμές εφελκυσμού σε σύγκριση με τις δοκιμές θλίψης.

Αυτά τα αποτελέσματα είναι ασυμβίβαστα με τα γραμμικά κριτήρια αστοχίας, όπως τα κριτήρια Coulomb, Mohr, Griffith και τροποποιημένο κριτήριο Griffith, τα οποία δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της  $\sigma_2$ .



**Σχήμα 3.9.** Σύνοψη των συνθηκών αστοχίας στις δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για τρεις τύπους πετρωμάτων.  $C_0$ : μονοαξονική θλιπτική αντοχή (Mogi, 2007).

### 3.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται κατανοητό πως η ενδιάμεση κύρια τάση  $\sigma_2$  επηρεάζει την αντοχή του πετρώματος κατά την θραύση. Η συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  ή  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ ) δεν λαμβάνει υπόψιν αυτή την επιρροή όπως επίσης αδυνατεί να προσομοιώσει την εντατική κατάσταση του εδάφους όπου οι κύριες τάσεις είναι άνισες μεταξύ τους. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τύποι των πραγματικών τριαξονικών μηχανών και μελετάται η θραύση και η παραμόρφωση διαφόρων πετρωμάτων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του Mogi κάτω από την παραματική τριαξονική θλίψη.

#### 3.3.1 Ιστορική αναδρομή ανάπτυξης των τεχνικών της πραγματικής τριαξονικής δοκιμής

Από τη δεκαετία του 1960, υπήρχε η ανάγκη να μελετηθεί η χαρακτηριστική αντοχή και η συμπεριφορά μη-γραμμικής παραμόρφωσης των πετρωμάτων και του σκυροδέματος λόγω των παγκόσμιων απαιτήσεων κατασκευής μεγάλων φραγμάτων πυρηνικών σταθμών, εκμετάλλευσης ορυκτών πρώτων υλών κλπ. Με την πρόοδο της

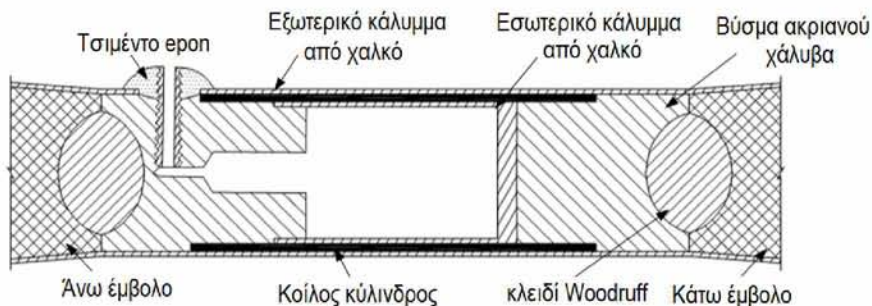
έρευνας στη μηχανική των πετρωμάτων, οι θεωρίες και τα κριτήρια που δεν σχετίζονται με τη ενδιάμεση τάση  $\sigma_2$  σταδιακά ήρθαν σε διαφωνία με τα παρατηρούμενα φαινόμενα, είτε από εργαστηριακές δοκιμές, είτε από την κλασική μηχανική. Επιπλέον, η ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων (π.χ. η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων), και η ευρεία χρήση υπολογιστών μεγάλης χωρητικότητας και υψηλής ταχύτητας έκαναν εύκολη την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς βραχωδών υλικών σε τρισδιάστατα προβλήματα. Έτσι, η μέθοδος της πραγματικής τριαξονικής δοκιμής (true triaxial test) βελτιώθηκε και αναπτύχθηκε ως μια ελκυστική πειραματική μέθοδος θλιπτικής καταπόνησης και εν συνεχεία παρουσιάστηκε ένας αριθμός μηχανών πραγματικής τριαξονικής φόρτισης που έχουν σχεδιαστεί από κορυφαίους ερευνητικούς οργανισμούς για πειραματικές μελέτες.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (3.2), βγήκε το συμπέρασμα ότι η ενδιάμεση κύρια τάση ( $\sigma_2$ ) είχε αξιοσημείωτη επίδραση στην αντοχή θραύσης και στις γωνίες θραύσης των πετρωμάτων. Ωστόσο η ενταντική κατάσταση ήταν μια ειδική περίπτωση στην οποία δύο κύριες τάσεις είναι ίσες ( $\sigma_2 = \sigma_3$  ή  $\sigma_1 = \sigma_2$ ). Ως εκ τούτου, ένας αριθμός ερευνητών εκτέλεσε σειρά πειραματικών δοκιμών «πραγματικής» τριαξονικής θλίψης στα οποία όλες οι τρεις κύριες τάσεις είναι διαφορετικές ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ). Οι ερευνητές αυτοί προσπάθησαν να καταστήσουν σαφή τον ρόλο όλων των κύριων τάσεων στη συμπεριφορά αστοχίας των πετρωμάτων. Αυτές οι δοκιμές σε πρώιμο στάδιο περιλάμβαναν στρέψη συμπαγών και κοίλων κυλίνδρων υπό θλίψη, διάτρηση (punching) υπό πλευρική πίεση και δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian tests) υπό πλευρική πίεση (Robertson, 1955, Handin, Higgs και O'Brien, 1960, Jaeger και Hoskins, 1966). Η παρατηρούμενη διαφορά σε διαφορετικές εντατικές καταστάσεις, αποδόθηκε στην επίδραση της  $\sigma_2$  (Jaeger and Hoskins, 1966). Σε αυτά τα πειράματα, ωστόσο, οι κατανομές ανομοιογενών τάσεων στα δείγματα βράχου εισάγουν σοβαρά σφάλματα στην τάση αστοχίας που υπολογίζεται από τη θεωρία ελαστικότητας με γραμμική καταστατική σχέση τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Επιπλέον, υπάρχει μια άγνωστη επίδραση των βαθμίδων τάσης (stress gradients).

Κατ' αρχάς, φαίνεται ότι οι τριαξονικές ομοιογενείς τάσεις,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , επιτυγχάνονται φορτίζοντας ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κατά μήκος των τριών απέναντι κάθετων επιφανειών αντίστοιχα [Σχ. 3.1 (B)]. Εάν εφαρμόζονται τάσεις μέσω των ακραίων τεμαχίων του χάλυβα, η τριβή μεταξύ των ακραίων τεμαχίων και των δοκιμίων και η συγκέντρωση τάσης στα άκρα των δοκιμίων θα μπορούσαν να προκαλέσουν σημαντικά σφάλματα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι Handin, Heard και Magouirk (1967) διεξήγαγαν ένα πείραμα υποβάλλοντας πολύ λεπτούς κοίλους κυλίνδρους σε συνδυασμένη θλίψη και στρέψη υπό πλευρική πίεση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Εντούτοις, η αναπαραγωγιμότητα στη δοκιμή στρέψης ήταν πολύ χαμηλή για να προκύψει κάποιο σημαντικό συμπέρασμα.





Σχήμα 3.10. Σχέδιο κοίλου κυλίνδρου για δοκιμή στρέψης (Handin et al., 1967).

Οι Hojem και Cook (1968) έκαναν μια νέα τριαξονική δοκιμή, στην οποία εφαρμόστηκαν πλευρικές τάσεις ( $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ ) από δύο ζεύγη λεπτών επίπεδων βυσμάτων (υποδοχών) από χαλκό (thin copper flat jacks). Αυτή η μέθοδος φαίνεται να επιτυγχάνει ομογενείς τριαξονικές τάσεις και τα αποτελέσματά τους ήταν αρκετά καλά. Σε αυτή τη μέθοδο, ωστόσο, η εφαρμογή υψηλών πλευρικών πιέσεων είναι δύσκολη λόγω της περιορισμένης αντοχής της λεπτής μαλακής μεμβράνης χαλκού στο επίπεδο βύσμα.

Ο Mogi το 1966 σχεδίασε μια νέα συσκευή “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης και την κατασκεύασε σε συνεργασία με τη Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc., Τόκιο, Ιαπωνία. Μετά από προκαταρκτικά πειράματα, όπως και στην εργοστασιακή συσκευή “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης, ολοκληρώθηκε το 1968. Το 1969, τα πρώτα αξιόπιστα πειραματικά αποτελέσματα διαβάστηκαν στην επίσημη Μηνιαία Συνάντηση του Ινστιτούτου Σεισμικών Ερευνών του Πανεπιστημίου του Τόκιο και στην Ετήσια Συνάντηση της Σεισμολογικής Εταιρείας του 1969 Ιαπωνία. Με τη χρήση αυτής της συσκευής, μετρήθηκε η παραμόρφωση και η συμπεριφορά αστοχίας πολλών πετρωμάτων κάτω από το γενικό σύστημα τριαξονικής θλίψης σε θερμοκρασία δωματίου και σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης.

Ωστόσο, οι τεχνικές των πειραμάτων της “πραγματικής” τριαξονικής δοκιμής για βράχους χρήζουν βελτίωσης. Δεν υπάρχει εκτενώς χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός ως τυποποιημένη συσκευή όπως στην συμβατική τριαξονική δοκιμή (conventional triaxial test), ακόμα και αν έχει αναπτυχθεί έντονα τις τελευταίες δεκαετίες. Οι τεχνικές της πραγματικής τριαξονικής δοκιμής αντιμετώπιζαν μια σειρά δυσκολιών και προβλημάτων όπως η τελική τριβή, η γωνιακή φόρτιση, το υψηλό κόστος κλπ. Επιπλέον, καμία χώρα και ακαδημαϊκή κοινότητα που σχετίζεται με τη μηχανική πετρωμάτων δεν είχε εφαρμόσει, μέχρι το 2007, πραγματικές διαδικασίες και συνθήκες τριαξονικού ελέγχου.

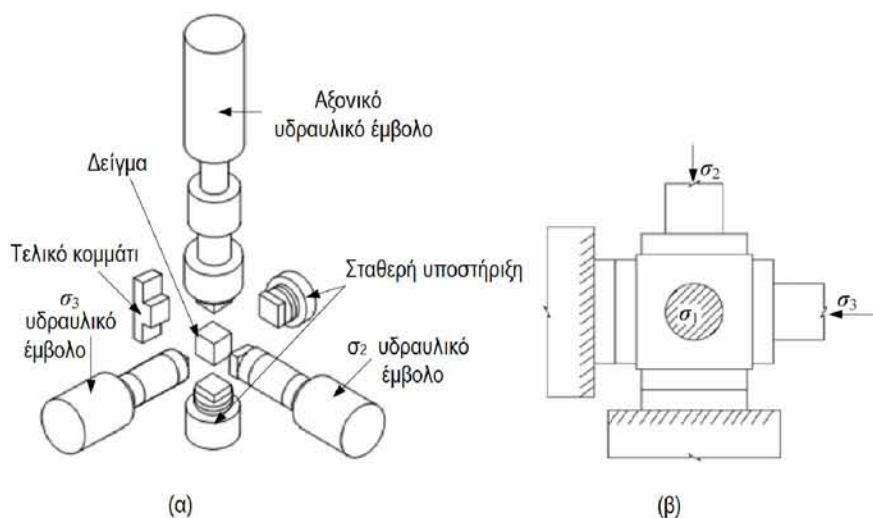
Για τις επόμενες δεκαετίες στο πεδίο της “πραγματικής” τριαξονικής δοκιμής, οι τρεις βασικές τάσεις εφαρμόζονται απευθείας από δεκάδες συσκευές. Σύμφωνα με τους Takahashi κ.α. (1989, 2001) και Mogi (2007), η συσκευή της πραγματικής

τριαξονικής δοκιμής μπορεί να ταξινομηθεί με σαφήνεια σε τρεις τύπους όσον αφορά τις μεθόδους φόρτωσης, δηλ. Τύπος I: άκαμπτος τύπος πλάκας, τύπος II: μεσαίος εύκαμπτος τύπος, τύπος III: μεικτός τύπος.

### Τύπος I: Άκαμπτος τύπος πλάκας

Αυτός ο τύπος συσκευής πραγματικής τριαξονικής δοκιμής ο οποίος εξελίχθηκε από διαξονική δοκιμή σε σκυρόδεμα στις αρχές της δεκαετίας του '60 (Weigler & Becker 1961, 1963), έχει τρία ζεύγη στερεών εμβόλων και τα φορτία μεταδίδονται όλα από άκαμπτες πλάκες. Ένας αριθμός παρόμοιων συσκευών αναπτύχθηκε σε πεδίο σκυροδέματος από τους Bertacchi (1964), Andenaes κ.α. (1977), κλπ. Μετά από αυτό, οι συσκευές “πραγματικής” τριαξονικής δοκιμής αυτού του τύπου, για πειράματα βράχου, αναπτύχθηκαν από τους Zhang κ.ά. (1979), Furuzumi & Sugimoto (1986), He κ.α. (2007, 2010) κ.λπ.

Η συσκευή αυτού του τύπου έχει συνήθως μεγάλες χωρητικότητες φόρτισης και είναι σε θέση να φορτίσει ένα δείγμα με μεγάλες διαστάσεις (από μερικές έως δεκάδες εκατοστά). Η δομή των συσκευών που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή σκυροδέματος και πετρωμάτων εμφανίζεται λίγο πολύ η ίδια. Ωστόσο, το μέγεθος του δοκιμίου βράχου είναι συνήθως μικρότερο από 10 cm, το οποίο είναι μικρότερο από το μέγεθος του δοκιμίου σκυροδέματος.



**Σχήμα 3.11.** Σχέδιο της συσκευής της “πραγματικής” τριαξονικής δοκιμής από τους Furuzumi & Sugimoto (1986). (α) Διάγραμμα της συσκευής. β) Ανάλυση δυνάμεων του δείγματος. (X. Li, L. Shi, B. Bai, Q. Li & D. Xu, 2011).

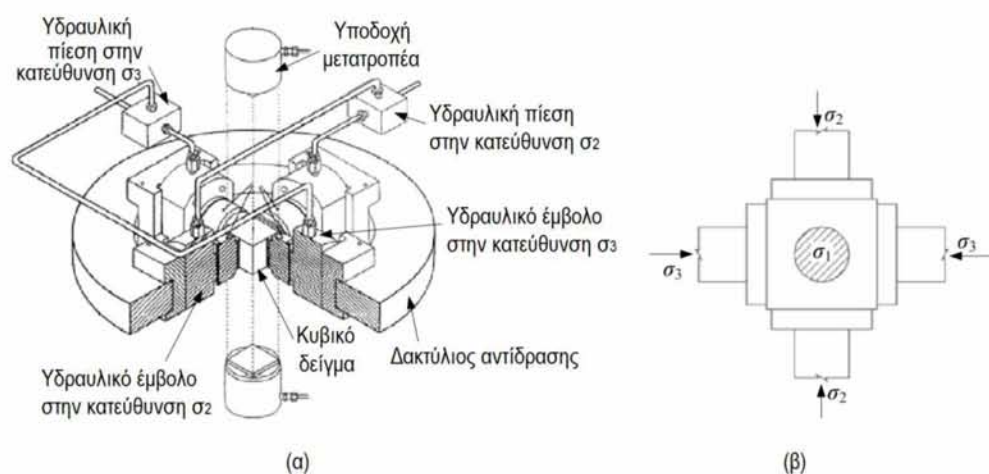
Για παράδειγμα, οι συσκευές των Furuzumi & Sugimoto (1986) και King (2003) απεικονίζονται στο Σχήμα 3.11 και στο Σχήμα 3.12 αντίστοιχα. Τα φορτία και των δύο εφαρμόζονται από υδραυλικό έμβολο μέσω των άκαμπτων άκρων. Όπως φαίνεται, υπάρχουν τρία υδραυλικά έμβολα στη συσκευή Furuzumi Sugimoto και τα αντίστοιχα φορτία αντίδρασης δημιουργούνται από σταθερά στηρίγματα. Ωστόσο, το

κέντρο του δοκιμίου αποκλίνει από το κέντρο φόρτισης με την παραμόρφωση να αυξάνεται, και αυτό προφανώς δεν είναι ιδανικό. Σε αντίθεση με τη συσκευή του Furuzumi & Sugimoto (1986), στην συσκευή King υπάρχουν τρία ζεύγη υδραυλικών εμβόλων. Κάθε ζευγάρι εμβόλων έχει απόλυτα ίση υδραυλική πίεση και αυτό σημαίνει ότι το δοκίμιο παραμορφώνεται προς το κέντρο ανάλογα για το φορτίο σε κάθε όψη προς την ίδια κατεύθυνση. Τα μεγαλύτερα τρία έμβολα αύξησαν σημαντικά την πολυπλοκότητα και το κόστος της συσκευής. Επιπλέον, ένας δακτύλιος αντίδρασης χρησιμοποιείται συνήθως με δύο πλευρικά "συγκροτήματα" στερεωμένα πάνω του. Ακολουθώς, η αντίδραση μαζί με δύο πλευρικά "συγκροτήματα" τοποθετείται επί του αξονικού πλαισίου. Ως εκ τούτου, η χωρητικότητα του εμβόλου που ασκεί την τάση  $\sigma_2$  είναι πολύ μικρότερη από την αξονική.

Επίσης, τα ακόλουθα τέσσερα σημεία είναι αξιοσημείωτα:

- (1) Προκειμένου να αποφευχθεί η επαφή μεταξύ των ακραίων πλακών, οι πλάγιες πλάκες σχεδιάζονται πάντοτε λίγο μικρότερες από τη διάσταση των επιφανειών του δοκιμίου.
- (2) Η επιφάνεια θραύσης δεν μπορεί εύκολα να σχηματιστεί λόγω του άκαμπτου κελιού φόρτισης που είναι τοποθετημένο το δοκίμιο.
- (3) Για ένα δοκίμιο σε ένα στάδιο μετά την αστοχία, η ανηγμένη παραμόρφωση  $\epsilon_3$  στην κατεύθυνση  $\sigma_3$  είναι πιο ευαίσθητη από τις άλλες δύο. Ωστόσο, η  $\epsilon_3$  δεν μετριέται απευθείας σε δύο μέτωπα του δείγματος και μειώνει σημαντικά την ακρίβεια μέτρησης.
- (4) Η διαπερατότητα και η ακουστική εκπομπή του πετρώματος είναι δύσκολο να μετρηθούν.

Συνολικά, τα μειονεκτήματα, όπως το υψηλό κόστος, η πολυπλοκότητα, η σχετική κατανομή ανομοιογενών τάσεων, έχουν εμποδίσει την ανάπτυξη και την εφαρμογή συσκευών αυτού του τύπου.

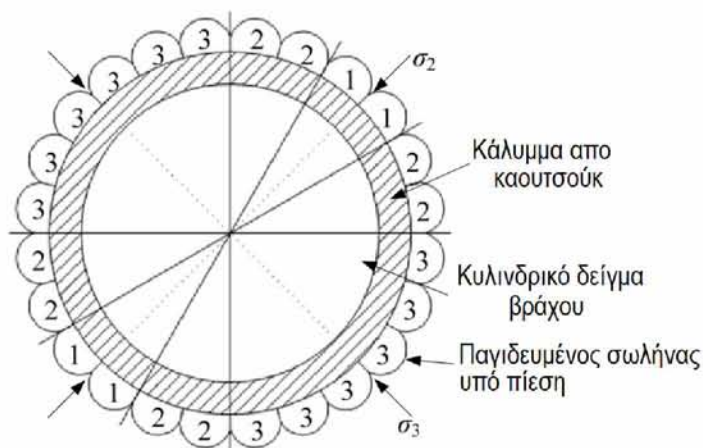


**Σχήμα 3.12.** Σχέδιο της συσκευής της "πραγματικής" τριαξονικής δοκιμής από τους King et al. (1995). (α) Διάγραμμα της συσκευής. β) Ανάλυση δυνάμεων του δείγματος. (X. Li, L. Shi, B. Bai, Q. Li & D. Xu, 2011).

## Τύπος II: Μεσαίος εύκαμπτος τύπος

Για αυτόν τον τύπο συσκευής, σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις ο φόρτιση γίνεται με πίεση ρευστού. Τα πλήρως ευλύγιστα μαξιλάκια (cushions) μεταδίδουν ομοιόμορφη οριακή φόρτιση στις επιφάνειες του δοκιμίου και του επιτρέπουν να παραμορφωθεί χωρίς περιορισμούς.

Το εύκαμπτο μέσο μπορεί να εφαρμόζει το φορτίο πλήρως στην επιφάνεια χωρίς να υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ γειτονικών πλακών. Η συσκευή εύκαμπτου τύπου αναπτύχθηκε αρχικά από τον Hojem & Cook (1968), και στη συνέχεια από τον Atkinson & Ko (1973), Michelis κ.α. (1985), Smart (1995), κλπ. Η  $\sigma_1$  εφαρμόζεται στα επίπεδα των άκρων με άκαμπτα χαλύβδινα έμβολα και μια διάταξη με 24 παγιδευμένους σωλήνες διατεταγμένους γύρω από την κυλινδρική επιφάνεια (Σχήμα 3.13) αναπτύσσει ένα ελλειπτικό πεδίο τάσης. Το χαρακτηριστικό της συσκευής του Smart είναι να πραγματοποιήσει πραγματική τριαξονική φόρτιση σε κυλινδρικό δοκίμιο, το οποίο κατασκευάζεται εύκολα και χρησιμοποιείται ευρέως στη συμβατική τριαξονική δοκιμή. Έτσι, μπορεί να γίνει πιο στενή σύγκριση της “πραγματικής” τριαξονικής δοκιμής και της συμβατικής τριαξονικής δοκιμής. Εκτός από τη συσκευή του Smart (1995), υπάρχει και αυτή που αναπτύχθηκε από τους Michelis et al. (1985) με σάκο από PVC και χαλύβδινα πρίσματα ως μέσο φόρτωσης, και αυτή που αναπτύχθηκε από την Hojem & Cook (1968) με επίπεδες υποδοχές χαλκού.



**Σχήμα 3.13.** Προβολή κάποιου πραγματικού τριαξονικού φορτίου από τον Smart (1995). Τα 1, 2 και 3 ισχύουν για τρία ανεξάρτητα υδραυλικά κυκλώματα με χειροκίνητο servo-controlled. (X. Li, L. Shi, B. Bai, Q. Li & D. Xu, 2011).

Ο εύκαμπτος τύπος συσκευής έχει εξαιρετικό πλεονέκτημα για να αποφύγει τη γωνιακή φόρτιση και να πραγματοποιήσει ομοιόμορφη οριακή φόρτιση. Έτσι φαίνεται να είναι η κατάλληλη συσκευή για την πραγματική τριαξονική δοκιμή. Ωστόσο, στον ερευνητικό τομέα της μηχανικής των πετρωμάτων, οι σχετικές χαμηλές

ικανότητες φόρτισης της εύκαμπτης φόρτισης δεν είναι κατάλληλες για τη δοκιμή της αντοχής σε θλίψη των σκληρών πετρωμάτων υπό υψηλή γενική εντατική κατάσταση. Για αυτό τον λόγο, είναι ανεπαρκής για την έρευνα σχετικά με τα προβλήματα μηχανικής πετρωμάτων σε μεγάλα βάθη και σεισμού. Ωστόσο, είναι ιδανικός σχεδιασμός για τη δοκιμή εδάφους και μαλακού βράχου.

### **Τύπος III: Μικτός τύπος**

Η συσκευή μικτού τύπου εφαρμόζει μία ή δύο τάσεις από άκαμπτες πλάκες και η άλλη από εύκαμπτα μέσα (πίεση λαδιού ή μεμβράνες). Το πρώτο πρωτότυπο μιας τέτοιας συσκευής φτιάχτηκε από τον Mogi (1970, 2007) με μια εξαιρετική τροποποίηση της συσκευής τριαξονικής δοκιμής τύπου Karman. Η συσκευή της “πραγματικής” τριαξονικής δοκιμής που αναπτύχθηκε από το Mogi έχει τα εξής πλεονεκτήματα, σε σχέση με τον Τύπο I:

- (1) Η ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_3$ , η οποία έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αντοχή του δοκιμίου, κατανέμεται ομοιόμορφα.
- (2) Οι τάσεις  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  εφαρμόζονται από κινητά πλαίσια, έτσι ώστε οι άξονες του δοκιμίου να διατηρούνται αμετάβλητοι κατά τη διάρκεια ολόκληρης της δοκιμής.
- (3) Η ανηγμένη παραμόρφωση  $\epsilon_3$  μετράται απευθείας σε δύο όψεις του δοκιμίου.
- (4) Έχει χαμηλό κόστος.
- (5) Η μέτρηση της διαπερατότητας και ο έλεγχος της θερμοκρασίας μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα (Li 2001).

Παρόλο που η συσκευή του Mogi διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα, εξακολουθεί να έχει κάποιες ατέλειες. Για παράδειγμα, η επίδραση της τριβής του άκρου αλλά και της της κενής γωνίας (blank corner) δεν λύνεται εντελώς αλλά περιορίζεται αρκετά. Επιπλέον, στην αρχή της δοκιμής, το δοκίμιο πρέπει να στερεωθεί σε προφόρτιση.

Από την ανάπτυξη της συσκευής τύπου Mogi αναπτύχθηκαν πολυάριθμες συσκευές με απομίμηση και βελτίωση, π.χ. από τους Spetzler et al (1981), Takahashi κ.α. (1988), Li κ.α. (1988), Zhou (1982) κ.α. (1990), Warwersik κ.α.. (1997), Haimson & Chang (2000). Όσον αφορά την ποσότητα, η συσκευή Τύπου I και Τύπου III είναι περίπου ίση. Για την επίλυση της ακατάλληλης εγκατάστασης του δοκιμίου, υιοθετήθηκε, από τους Takahashi (1988) το σταθερό πλευρικό πλαίσιο με δύο γρύλους.

### **3.3.2 Σύγκριση διαφόρων ειδών “πραγματικών” τριαξονικών συσκευών**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε τύπος “πραγματικής” τριαξονικής συσκευής έχει ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κανένας από αυτούς τους τύπους δεν αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τυποποιημένη συσκευή, όσον αφορά τις

συμβατικές τριαξονικές συσκευές. Ο καλύτερος τύπος εξαρτάται από το σκοπό και τις ιδιότητες του προς δοκιμή υλικού. Για παράδειγμα, η συσκευή που σχεδιάστηκε από τους He κ.α. (2007, 2010) είναι άκαμπτος τύπος πλάκας έτσι ώστε η ενδιάμεση κύρια τάση  $\sigma_2$  να μπορεί να εκφορτιστεί ξαφνικά, έτσι μπορεί να παρατηρηθεί και να παρακολουθηθεί το φαινόμενο της έκρηξης των βράχων. Ενώ για τους σκοπούς των μετρήσεων διαπερατότητας, θα πρέπει να υιοθετηθεί η συσκευή Τύπου III, ειδικά ο τύπος Mogi, για να αποφευχθεί η απολέπιση των υλικών του περιβλήματος και η παράκαμψη της ροής.

Μέθοδος	Άκαμπτο έμβολο	Ευέλικτα μέσα		Mogi-type
		Atkinson & Ko (1973)	Smart (1995)	
Οριακές συνθήκες και ο προσδιορισμός τους	③	①	①	②
Επίδραση γωνίας	④	②	①	③
Επίδραση τριβής του άκρου	④	②	①	③
Ακρίβεια των μετρήσεων πααμόρφωσης	④	③	②	②
Χωρητικότητα φόρτισης	①	④	④	②
Ακαμψία του συστήματος φόρτισης	①	④	④	②
Έλεγχος θερμοκρασίας	⑤	⑤	⑤	①
Παρουσία Πίεση πόρων και διαπερατότητα	⑤	⑤	③	①
πιθανής Διαφορετική διαδρομή τάσης	①	①	③	②
διαθεσιμότητας Μεγάλου μεγέθους δείγμα	①	③	③	②
Οικονομία και συμπαγή δομή	④	①	②	②
Εκκεντρικότητα	④	④	①	②

①: άριστο, ②: καλό, ③: συνηθισμένο, ④: συγκριτικά φτωχό, ⑤: αδύνατο.

**Πίνακας 3.3.** Σύγκριση των επιδόσεων διαφόρων ειδών συσκευών πραγματικής τριαξονικής δοκιμής. (X. Li, L. Shi, B. Bai, Q. Li & D. Xu, 2011).

Η σύγκριση διαφόρων ειδών συσκευών “πραγματικής” τριαξονικής δοκιμής παρατίθεται στον Πίνακα 3.3. Είναι σαφές ότι κάθε τύπος συσκευής “πραγματικής” τριαξονικής δοκιμής είναι κατάλληλος αναλόγως της περίπτωσης. Ωστόσο, ο τύπος Mogi, ο οποίος ανήκει σε μικτό τύπο, χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά όσον αφορά τον έλεγχο της θερμοκρασίας και τη μέτρηση της διαπερατότητας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο τύπος Mogi είναι πιο δημοφιλής από άλλους, στον τομέα της βραχομηχανικής.

### 3.3.3 Σχεδιασμός της “πραγματικής” τριαξονικής συσκευής

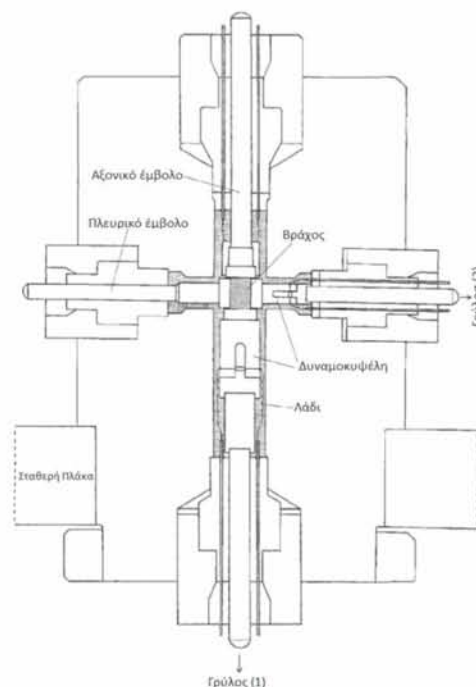
Σε αυτή την παράγραφο αναλύεται ο σχεδιασμός της πραγματικής τριαξονικής συσκευής του Mogi, η οποία είναι η βάση όλων των “πραγματικών” τριαξονικών συσκευών. Για τον σχεδιασμό της συσκευής, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες συνθήκες:

1. Οι τρεις βασικές τάσεις πρέπει να εφαρμοστούν ανεξάρτητα.

2. Μπορούν να εφαρμοστούν υψηλές τάσεις.
3. Η κατανομή τάσεων στο δοκίμιο είναι ομοιογενής (χωρίς συγκέντρωση τάσης).

Σύμφωνα με τα προηγούμενα πειράματα, η επίδραση της ελάχιστης κύριας τάσης  $\sigma_3$  στην αντοχή θραύσης είναι πολύ μεγάλη στα πιο ψαθυρά πετρώματα. Για παράδειγμα, το  $\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3$  είναι περίπου 4 ή μεγαλύτερο στον δολομίτη Dunham. Επομένως, είναι απαραίτητη η αρκετά ομοιόμορφη εφαρμογή της  $\sigma_3$  και η ακριβής μέτρησή της. Συνεπώς, αποφασίστηκε από τον Mogi ότι η  $\sigma_3$  θα εφαρμοζόταν με πλευρική πίεση ρευστού, όπως στην συμβατική τριαξονική δοκιμή.

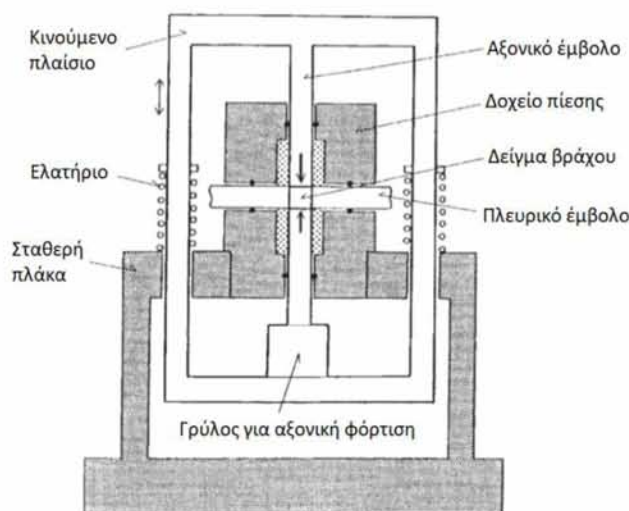
Από την άλλη πλευρά, γενικά η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με αυτή της  $\sigma_3$ . Αυτό υποδηλώνει ότι η  $\sigma_2$  μπορεί να εφαρμοστεί μέσω στερεών τεμαχίων στα άκρα, χωρίς σοβαρά σφάλματα, υπό πλευρική πίεση. Η τριβή μεταξύ των επιφανειών του δείγματος και των ακραίων τεμαχίων μπορεί να αφαιρεθεί σε μεγάλο βαθμό με λίπανση. Σύμφωνα με τον Mogi (1966), η επίδραση της συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα του δοκιμίου του πετρώματος στην τριαξονική συμπίεση μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Αυτή η επίδραση της πλευρικής πίεσης παίζει σημαντικό ρόλο για την διασφάλιση μιας ομοιογενούς τριαξονικής καταπόνησης σε δοκίμια πετρωμάτων.



**Σχήμα 3.14.** Η τριαξονική κυψέλη για την πραγματική δοκιμή τριαξονικής θλίψης στην οποία οι τρεις κύριες τάσεις είναι διαφορετικές (κατακόρυφο τμήμα) (Mogi, 2007).

Αυτή η συσκευή τριαξονικής θλίψης φαίνεται στα Σχ. 3.14-3.16. Η σημαντικότερη διαφορά στην κατασκευή μεταξύ της συμβατικής τριαξονικής συσκευής και αυτής της συσκευής για πραγματική δοκιμή τριαξονικής θλίψης, είναι τα πλευρικά έμβολα

που έχουν σχεδιαστεί για την ανεξάρτητη εφαρμογή της  $\sigma_2$ . Το δοχείο πίεσης είναι ένας χονσόροπαχος κοίλος κύλινδρος, με διαμετρικές οπές για πλευρικά έμβολα. Μια πλευρική πίεση  $p$  ( $= \sigma_3$ ) μπορεί να εφαρμοστεί στα δοκίμια σε αυτό το δοχείο. Τα αξονικά έμβολα για την εφαρμογή της  $\sigma_1$  συνδέονται σε ένα γρύλο (1) και τα πλευρικά έμβολα σε έναν άλλο γρύλο (2), όπου η δύναμη που ασκεί ο γρύλος (1) είναι μεγαλύτερη από την δύναμη που ασκεί ο γρύλος (2) (βλ. σχήμα 3.14). Τα αξονικά και πλευρικά φορτία υπολογίζονται από δυναμοκυψέλες μέσα στο δοχείο πίεσης.

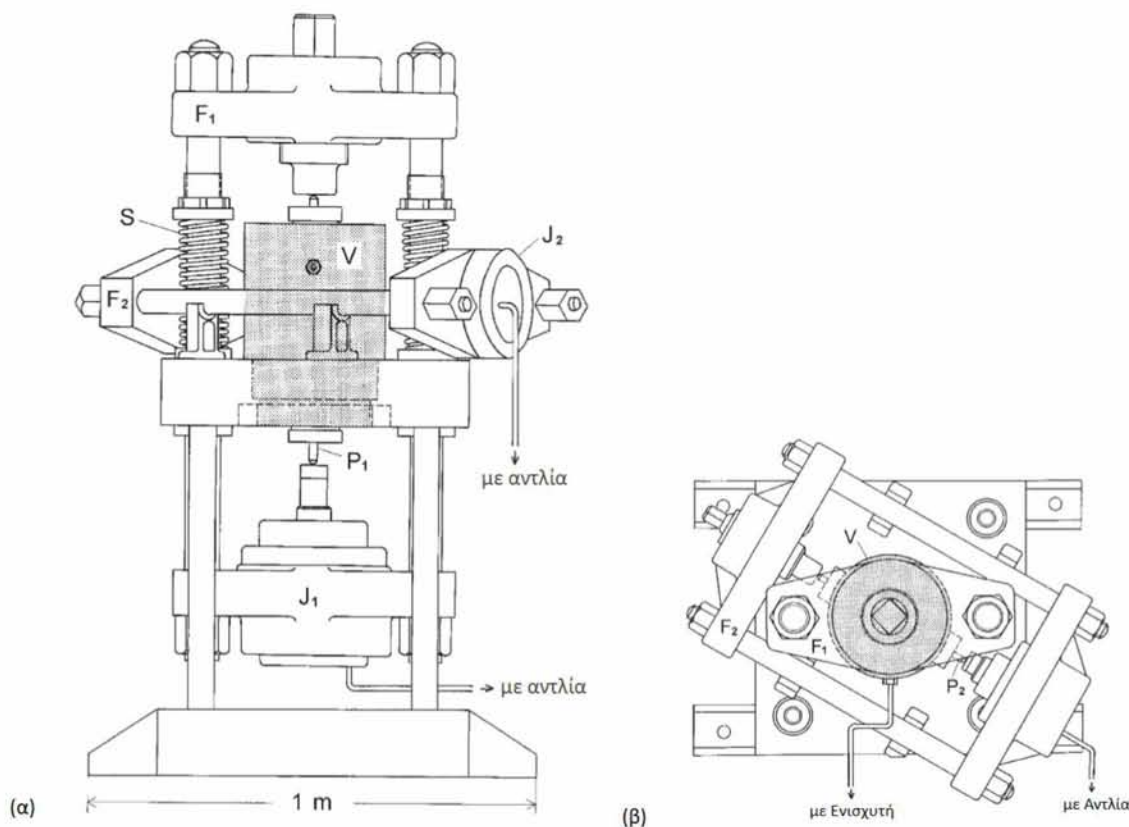


**Σχήμα 3.15.** Σχηματικό διάγραμμα της δομής της “πραγματικής” τριαξονικής μηχανής στην οποία ένα δοκίμιο πετρώματος διατηρείται στην ίδια θέση κατά τη διάρκεια του πειράματος παραμόρφωσης βράχου (Mogi, 2007).

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του σχεδιασμού είναι η ικανότητα να διατηρείται ένα δοκίμιο πετρώματος στην ίδια θέση κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσής του. Αυτό επιτυγχάνεται με μια απλή μηχανική διάταξη, όπως φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 3.15. Αν το άνω έμβολο για την αξονική φόρτιση είναι στερεωμένο στο δοχείο πίεσης, το δοκίμιο πρέπει να κινηθεί προς τα πάνω με αξονική φόρτιση από τον γρύλο (1). Από την άλλη πλευρά, το δοκίμιο στερεώνεται στην αξονική κατεύθυνση από τα πλάγια έμβολα και συνεπώς οι τάσεις που εφαρμόζονται στο δοκίμιο βράχου μπορεί να είναι πολύπλοκες. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, τα πλαίσια και τα έμβολα για την αξονική και πλευρική φόρτιση ρυθμίζονται ώστε να είναι ελεύθερα κινούμενα. Το πλαίσιο για το αξονικό έμβολο διατηρείται στην ουδέτερη θέση σε σχέση με το δοχείο πίεσης με μαλακά ελατήρια που υποστηρίζουν το βάρος του συστήματος πλαισίου-εμβόλου και έτσι μπορεί να κινηθεί, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης του δοκίμιου, με μια πολύ μικρή δύναμη. Το πλευρικό σύστημα του γρύλου-εμβόλου και του πλαισίου μπορεί επίσης να κινείται ελεύθερα έτσι ώστε η πλευρική παραμόρφωση του δοκίμιου



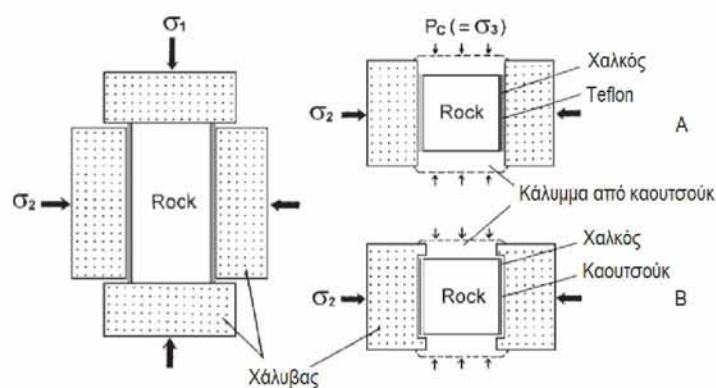
βράχου να πραγματοποιείται χωρίς οποιαδήποτε ανεπιθύμητη εφαρμογή τάσης. Έτσι, αυτή η τριαξονική συσκευή καθιστά δυνατή μια σωστή τριαξονική δοκιμή θλίψης, στην οποία κάθε βασική τάση είναι ομοιογενής και ανεξάρτητα ελέγξιμη. Αυτή η συσκευή δεν είναι πολύ σύνθετη στη δομή και κατασκευάστηκε με χαμηλό κόστος.



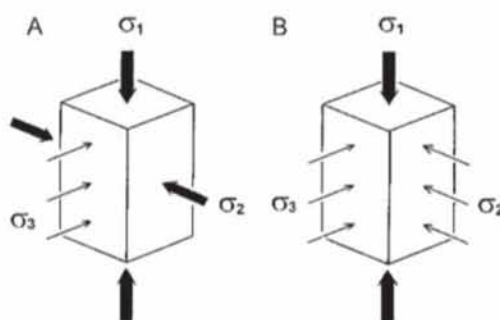
**Σχήμα 3.16.** Σχηματικό διάγραμμα της “πραγματικής” συσκευής τριαξονικής θλίψης. *V*: τριαξονικό κελί. *J*<sub>1</sub>: γρύλος για αξονική φόρτιση. *J*<sub>2</sub>: γρύλος για πλευρική φόρτιση. *F*<sub>1</sub>: κινητό πλαίσιο για αξονική φόρτιση. *F*<sub>2</sub>: κινητό πλαίσιο για πλευρική φόρτιση. *S*: ελατήριο. *P*<sub>1</sub>: αξονικό έμβολο, *P*<sub>2</sub>: πλευρικό έμβολο (α): εμπρόσθιο τμήμα, (β): οριζόντια τομή (Mogi, 2007).

### 3.3.4 Διαμόρφωση δοκιμίων και μέτρηση ανηγμένων παραμορφώσεων

Η διαμόρφωση του δοκιμίου παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 3.17. Το δοκίμιο είναι ορθογώνιο πρίσμα 1,5 cm τετραγωνικό και μήκους 3,0 cm, σε πολλές περιπτώσεις. Τα κυλινδρικά ακραία τεμάχια χάλυβα στο επάνω και στο κάτω μέρος του δοκιμίου συνδέονται με το δοκίμιο με εποξύ (epoxy) και τα πλευρικά ακραία τεμάχια είναι προσαρμοσμένα στις πλευρές του δοκιμίου δημιουργώντας διεπαφές μείωσης της τριβής.



**Σχήμα 3.17.** Δοκιμαστικό δείγμα για την πραγματική δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Αριστερά: μπροστινό τμήμα. δεξιά: οριζόντια τομή μέθοδος A και B, (Mogi, 1977).

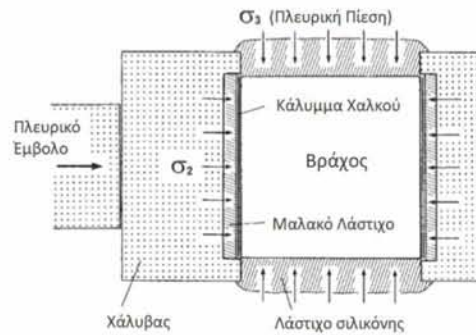


**Σχήμα 3.18.** Απλοποιημένο σκίτσο της μεθόδου A και B για πραγματική τριαξονική θλίψη. Χοντρό βέλος: στερεό έμβολο. λεπτό βέλος: πίεση ρευστού (Mogi, 2007).

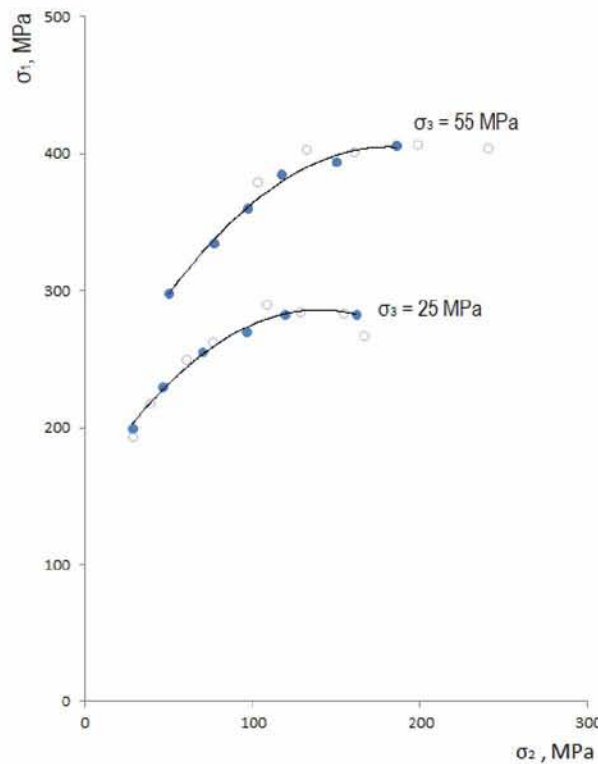
Στη μέθοδο A στα Σχ. 3.17 και 3.18, φύλλα τεφλόν (teflon sheets) χρησιμοποιούνται ως λιπαντικό με το οποίο μειώνεται αποτελεσματικά η τριβή μεταξύ των επιφανειών χάλυβα και βράχου στην κατεύθυνση  $\sigma_2$ . Για να αποφευχθεί η εισροή τεφλόν στο δοκίμιο, οι πλευρές του δοκιμίου περιβάλλονται με λεπτά φύλλα χαλκού. Το δοκίμιο πρέπει να περιβληθεί με κάποιο κάλυμμα π.χ. με καουτσούκ σιλικόνης για να αποτραπεί η εισβολή του ρευστού στο δοκίμιο.

Αν και η επίδραση της κατανομής τάσεων μειώνεται σε μεγάλο βαθμό με τον περιορισμό της πίεσης (πλευρική πίεση), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι συνέπειες της τριβής και της κατανομής της ανομοιογενούς θλίψης, που προκαλείται από την εφαρμογή της  $\sigma_2$  από πλευρικά στερεά έμβολα, παραμένουν ακόμα. Το πρόβλημα αυτό ελέγχθηκε με την τροποποιημένη μέθοδο όπως φαίνεται στα Σχ. 3.17 B και 3.19, που αντιστοιχεί σχεδόν στην περίπτωση B στο Σχήμα 3.17. Στη μέθοδο B, το  $\sigma_2$  εφαρμόστηκε με σχεδόν πίεση ρευστού μέσα από χοντρά κομμάτια από μαλακό καουτσούκ χρησιμοποιώντας χαλύβδινα πλευρικά τεμάχια με ειδικό σχήμα, όπως

φαίνεται στο Σχήμα 3.19 (Mogi, 1977). Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η  $\sigma_2$  εφαρμόζεται ομοιόμορφα.



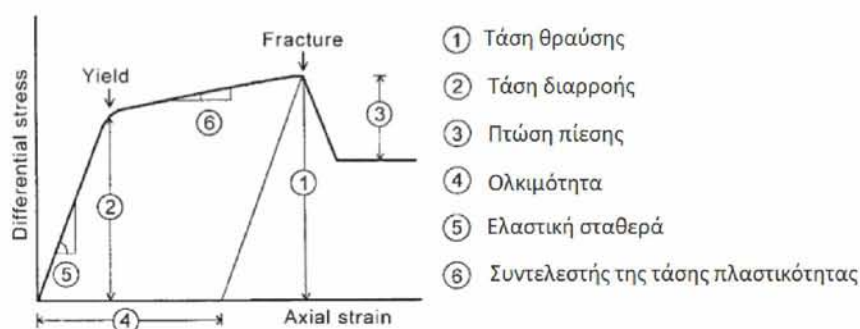
**Σχήμα 3.19.** Το οριζόντιο τμήμα της μεθόδου Β. Η  $\sigma_2$  εφαρμόζεται με σχεδόν πίεση ρευστού μέσα από χοντρά κομμάτια από μαλακό καουτσούκ χρησιμοποιώντας τα ειδικά τεμάχια χάλυβα (Mogi, 1977).



**Σχήμα 3.20.** Η τάση θραύσης ( $\sigma_1$ ) ως συνάρτηση του  $\sigma_2$ . Κλειστές κύκλοι με τη μέθοδο Α και ανοικτοί κύκλοι με τη μέθοδο Β (Mogi, Igarashi και Mochizuki, 1978).

Το σχήμα 3.20 δείχνει τη μέγιστη κύρια τάση ( $\sigma_1$ ) ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης ( $\sigma_2$ ) που λαμβάνεται από την τριαξονική συσκευή για το μάρμαρο Yamaguchi (Mogi, Igarashi and Mochizuki, 1978), όπου οι ανοικτοί κύκλοι και οι κλειστοί κύκλοι αντιστοιχούν στις μεθόδους Α και Β, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι, και οι δύο μέθοδοι Α και Β δίνουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα. Αυτό επιβεβαιώνει ότι δεν υπάρχει πρόβλημα στην εφαρμογή της  $\sigma_2$  από πλευρικά συμπαγή έμβολα.

### 3.3.5 Πειραματικά αποτελέσματα - Καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης και τάσεις θραύσης

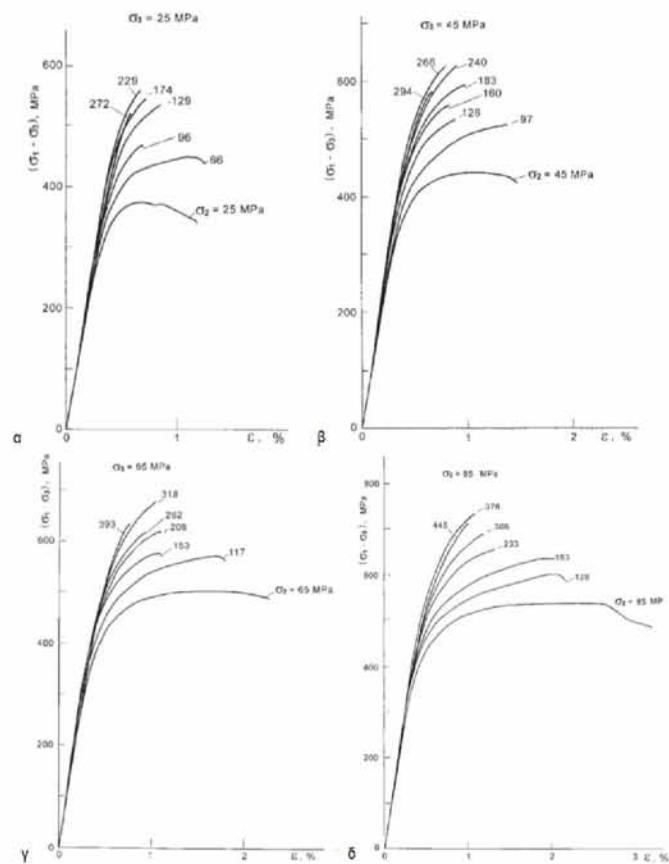


Σχήμα 3.21. Τυπικό διάγραμμα διαφορικής τάσης – αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης (Mogi, 2007).

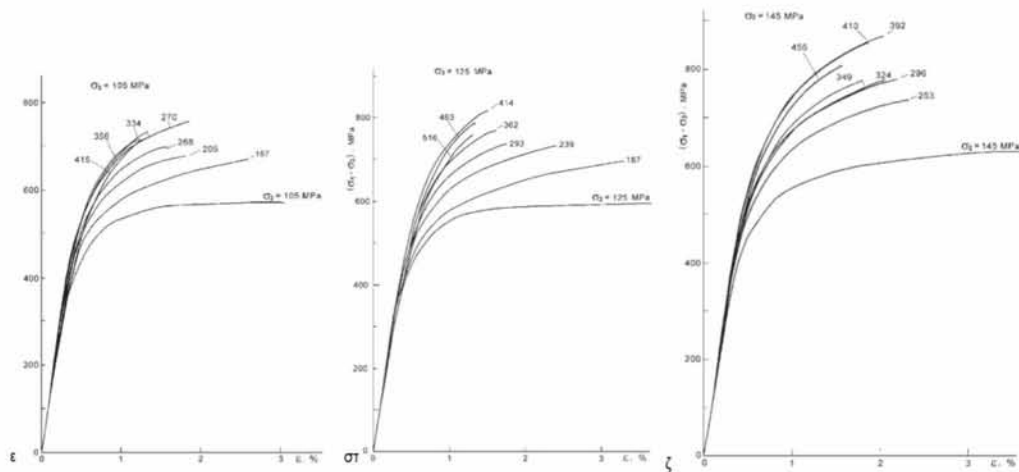
1. Η τάση θραύσης ή η αντοχή σε θραύση είναι η διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ή  $\sigma_1$  στη θραύση.
2. Η τάση διαρροής είναι η τάση κατακερματισμού ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ή  $\sigma_1$  κατά την έναρξη της μόνιμης ανηγμένης παραμόρφωσης, η οποία χαρακτηρίζεται από αιφνίδια διακοπή της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Ωστόσο, επειδή αυτό είναι ασαφές για ορισμένα πετρώματα, λαμβάνεται η τάση σε κάποια μικρή μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση, όπως το 0,2%.
3. Πτώση πίεσης στη θραύση.
4. Η ολκιμότητα ορίζεται ποιοτικά ως η ικανότητα του υλικού να υποστεί μεγάλη μόνιμη παραμόρφωση χωρίς θραύση. Η μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση πριν από τη θραύση λαμβάνεται ως μέτρο της ολκιμότητας.
5. Ελαστική σταθερά λαμβάνεται από την κλίση της καμπύλης στο αρχικό γραμμικό τμήμα ή πιο αυστηρά από την κλίση της καμπύλης αποφόρτισης και επαναφόρτισης.
6. Ο συντελεστής της τάσης πλαστικότητας της ανηγμένης παραμόρφωσης λαμβάνεται από την κλίση της καμπύλης στην περιοχή μετά το σημείο-διαρροής.
7. Η γωνία θραύσης είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου διάτμησης και του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ( $\sigma_1$ ).
8. Ο συντελεστής της τάσης πλαστικότητας της ανηγμένης παραμόρφωσης λαμβάνεται από την κλίση της καμπύλης στην περιοχή μετά το σημείο-διαρροής.
9. Η γωνία θραύσης είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου διάτμησης και του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ( $\sigma_1$ ).

### Δολομίτης Dunham

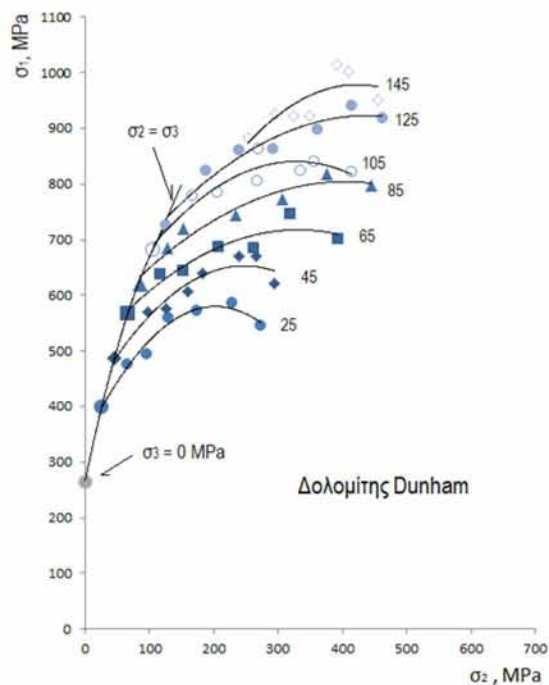
Αυτός ο βράχος είναι εξαιρετικά ομοιογενής και ισότροπος. Μια σειρά από καμπύλες διαφορετικής τάσης ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) συναρτήσει ανηγμένης παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ), για διαφορετικές τιμές της πλευρικής τάσης  $\sigma_2$ , με  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ , σε συμβατικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης, φαίνονται στο Σχήμα 3.22 (α)-(ζ). Αυτή η σειρά καμπυλών παραμόρφωσης υποδεικνύει μια αξιοσημείωτη επίδραση της  $\sigma_2$  στη συμπεριφορά αστοχίας. Η τελική αντοχή υπό μια σταθερή  $\sigma_3$  αυξάνεται σαφώς με την αύξηση της  $\sigma_2$ , εκτός της περίπτωσης που η  $\sigma_2$  παίρνει μεγάλες τιμές. Στα σχήματα αυτά, μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι η ολκιμότητα ( $\epsilon_n$ ) μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της πίεσης  $p$  ( $p = \sigma_2 = \sigma_3$ ).



**Σχήμα 3.22.** (α) - (ζ). Οι καμπύλες διαφορετικής τάσης ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - ανηγμένης παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_2$ , (η καθεμιά για ίδια  $\sigma_3$ ), του δολομίτη Dunham. (α)  $\sigma_3 = 25 \text{ MPa}$ . (β)  $\sigma_3 = 45 \text{ MPa}$ ; (γ)  $\sigma_3 = 65 \text{ MPa}$ . (δ)  $\sigma_3 = 85 \text{ MPa}$ . (ε)  $\sigma_3 = 105 \text{ MPa}$ ; (στ)  $\sigma_3 = 125 \text{ MPa}$ ; (ζ)  $\sigma_3 = 145 \text{ MPa}$  (Mogi, 2007).



Σχήμα 3.22. Συνέχεια

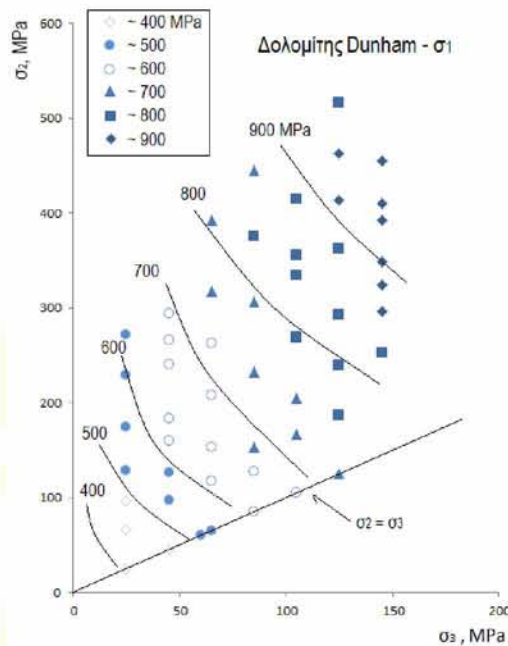


Σχήμα 3.23. Η τάση θραύσης ( $\sigma_1$ ) συναρτήσει της πλευρικής τάσης  $\sigma_2$  για τον δολομίτη Dunham. Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν τις διαφορετικές  $\sigma_3$ , που υποδεικνύονται με αριθμούς σε MPa. Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).

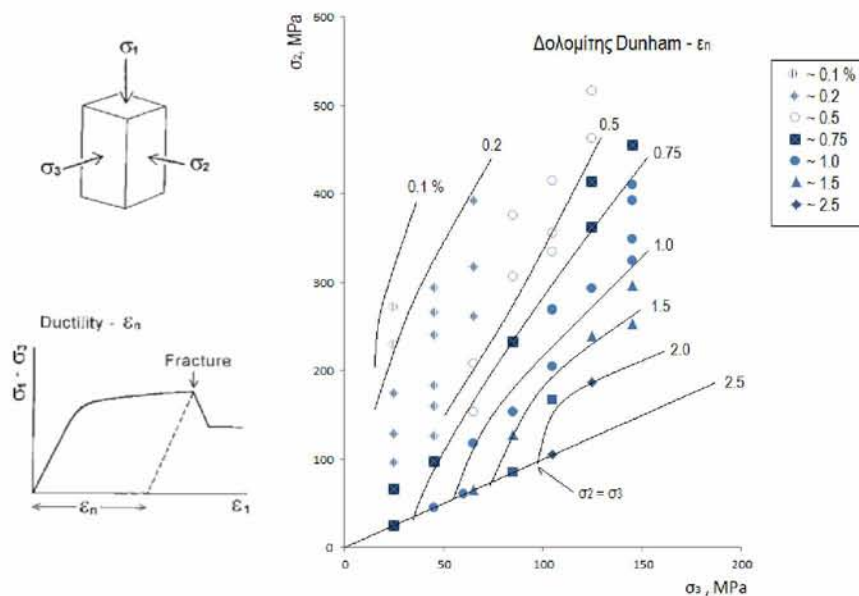
Το Σχήμα 3.23 δείχνει τη μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  κατά τη θραύση, η οποία είναι η μέγιστη τάση που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια ενός πειράματος στις περισσότερες περιπτώσεις, ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ , για διάφορες ελάχιστες κύριες τάσεις  $\sigma_3$ . Τα μεγαλύτερα σύμβολα στην αριστερή πλευρά αυτού του γραφήματος δείχνουν τις τιμές στην περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Η καμπύλη  $\sigma_1$  εν συναρτήσει της  $\sigma_2$  στη  $\sigma_3 = 0$  σε αυτό το σχήμα λήφθηκε από τη συμβατική διαξονική δοκιμή, στην οποία η κατανομή τάσεων είναι ομοιογενής σε κάποιο βαθμό και έτσι η αξιοπιστία αυτής της καμπύλης δίνεται παρακάτω. Σε αυτό το σχήμα, η επίδραση της

$\sigma_2$  είναι μεγάλη σε χαμηλές τιμές της  $\sigma_2$  και σταδιακά μειώνεται με την αύξηση της  $\sigma_2$ , δηλαδή, οι καμπύλες  $\sigma_1 - \sigma_2$  είναι κοίλες προς τα κάτω.

Το Σχήμα 3.24 δείχνει τη  $\sigma_1$  ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2 - \sigma_3$ . Οι γραμμές περιγράμματος (contour lines) αντιστοιχούν σε ίσες τιμές τάσης θραύσης ( $\sigma_1$ ). Από την κλίση αυτών των καμπύλων, ο λόγος της εξάρτησης  $\sigma_2$  προς την εξάρτηση  $\sigma_3$ , της τάσης θραύσης ( $\sigma_1$ ) υπολογίζεται περίπου στο 0.2, εκτός από τις πολύ χαμηλές τιμές της διαφοράς ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ).



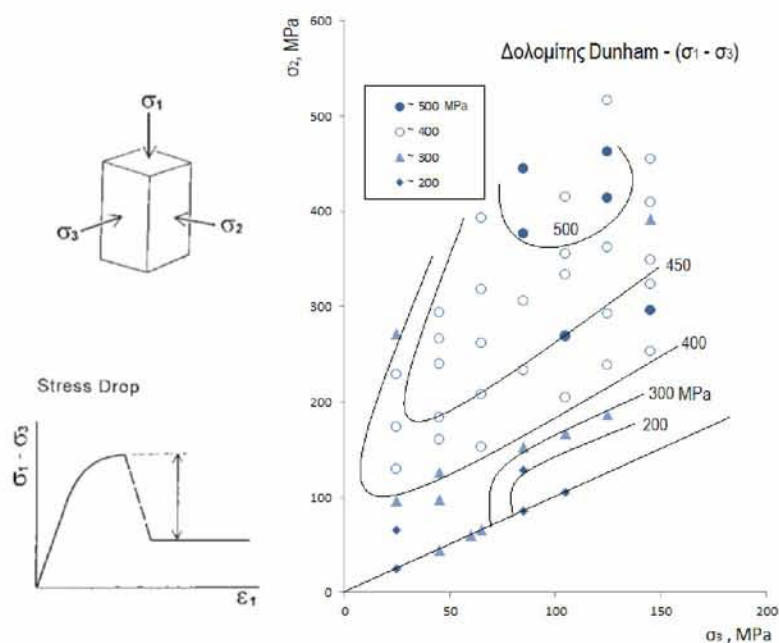
Σχήμα 3.24. Η  $\sigma_1$  κατά τη θραύση ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2 - \sigma_3$ , για τον δολομίτη Dunham (Mogi, 2007).



Σχήμα 3.25. Η ολκιμότητα ( $\epsilon_n$ ) ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2 - \sigma_3$ , στον δολομίτη Dunham (Mogi, 2007).

Στο Σχήμα 3.25, το  $\varepsilon_n$  που δείχνει την ολκιμότητα, παρουσιάζεται συναρτήσει των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ . Είναι αισθητή η γραμμικότητα και παραλληλία των γραμμών περιγράμματος (που αντιστοιχούν σε ίσες τιμές  $\varepsilon_n$ ). Από την τάση των γραμμών περιγράμματος, ο λόγος της εξάρτησης της  $\sigma_2$  προς την εξάρτηση  $\sigma_3$ , της ολκιμότητας εκτιμάται ότι είναι περίπου  $-0.3$ . Η τάση των γραμμών περιγράμματος της ολκιμότητας είναι σχεδόν κάθετη στην τάση των γραμμών περιγράμματος των τάσεων θραύσης. Αυτό δείχνει ότι η επίδραση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στην ολκιμότητα ( $\varepsilon_n$ ) είναι η αντίστροφη από εκείνη της τάσης θραύσης ( $\sigma_1$ ).

Το σχήμα 3.26 δείχνει την πτώση τάσεων κατά την θραύση, ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ . Η πτώση της τάσης αυξάνεται επίσης με την αύξηση της  $\sigma_2$ , αλλά παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές για μέτριες τιμές των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ . Οι γραμμές περιγράμματος που δείχνουν ίση πτώση τάσεων είναι κάπως παρόμοιες με εκείνες του  $\varepsilon_n$ , αλλά πιο σύνθετες.

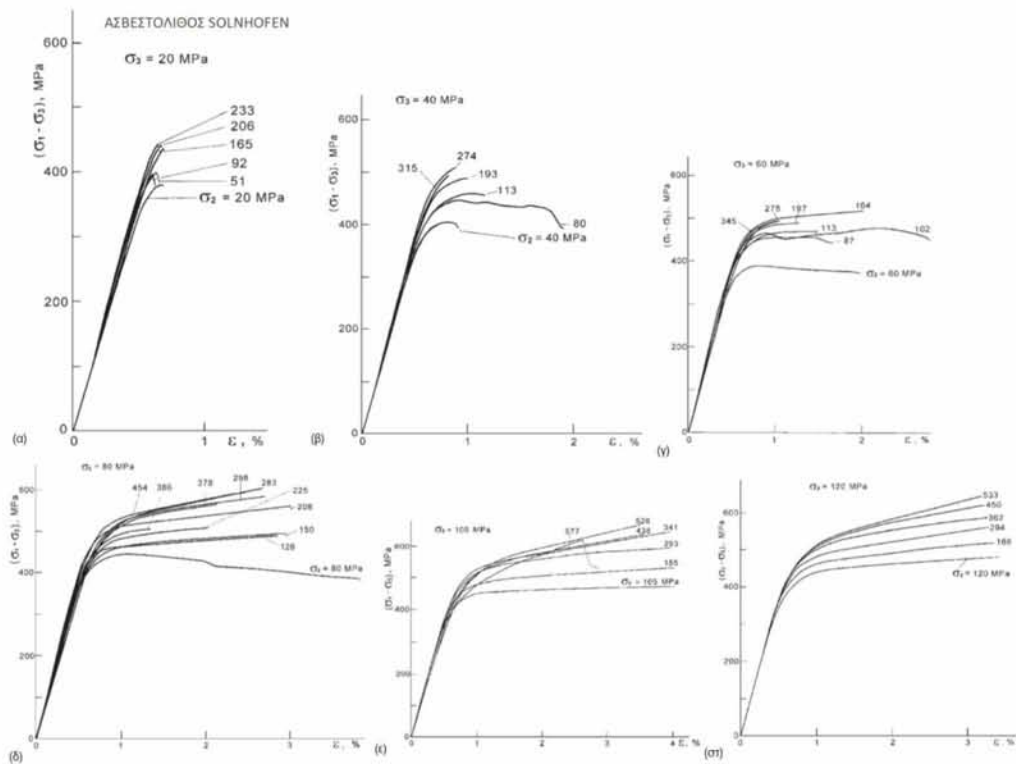


Σχήμα 3.26. Πτώση της τάσης κατά τη θραύση ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ , στον δολομίτη Dunham (Mogi, 2007).

Από τα προαναφερθέντα αποτελέσματα, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η ενδιάμεση κύρια τάση  $\sigma_2$  έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά αστοχίας του δολομίτη Dunham, επομένως δεν αρκεί η συζήτηση της θραύσης χωρίς την θεώρηση της  $\sigma_2$ . Από αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να φανεί ότι, η συμπεριφορά αστοχίας κατά τη συμβατική τριαξονική θλίψη (στην οποία δύο από τις κύριες τάσεις είναι ίσες) είναι ειδική περίπτωση και το αποτέλεσμα δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση “πραγματικών” τριαξονικών εντατικών καταστάσεων.



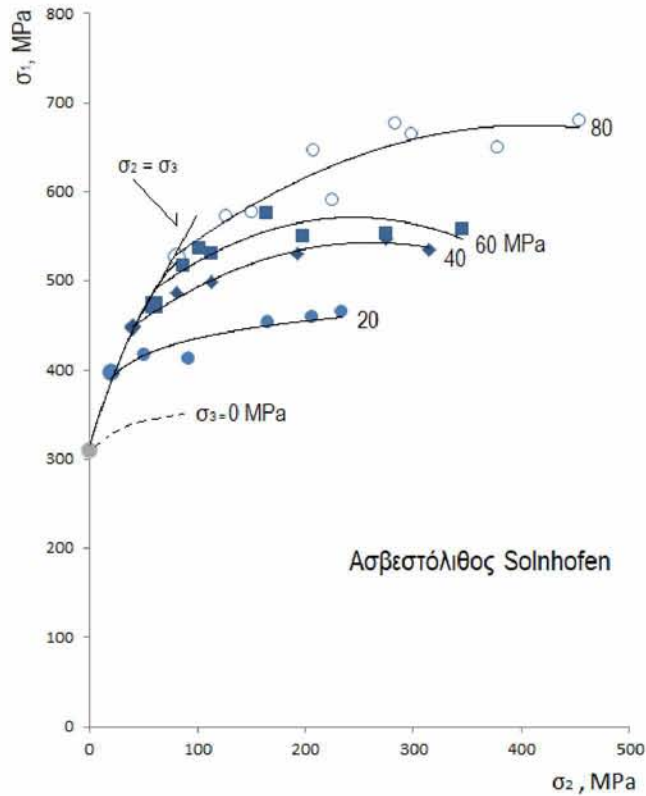
Η ανηγμένη παραμόρφωση και η θραύση αυτού του πετρώματος, ο οποίος είναι επίσης εξαιρετικά ομοιογενής και ισότροπος, έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές, τα παρακάτω διαγράμματα έχουν σχεδιαστεί με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του Mogi.



Σχήμα 3.27 (α) - (στ). Οι καμπύλες τάσεις  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  -αξονική ανηγμένη παραμόρφωση  $(\epsilon)$  για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_2$ , (η καθεμία για ίδια  $\sigma_3$ ), σε ασβεστόλιθο Solnhofen. α)  $\sigma_3 = 20$  MPa , (β)  $\sigma_3 = 40$  MPa , (γ)  $\sigma_3 = 60$  MPa , δ)  $\sigma_3 = 80$  MPa , ε)  $\sigma_3 = 105$ MPa , στ)  $\sigma_3 = 120$ MPa (Mogi, 2007).

Κάθε διάγραμμα στο Σχήμα 3.27 (α) - (στ) δείχνει μια σειρά καμπυλών τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_2$ , (κάθε διάγραμμα αντιστοιχεί σε σταθερή τιμή της  $\sigma_3$ ). Αυτές οι καμπύλες δείχνουν επίσης μία αξιοσημείωτη επίδραση της  $\sigma_2$ , σχεδόν παρόμοια με εκείνη του δολομίτη Dunham.

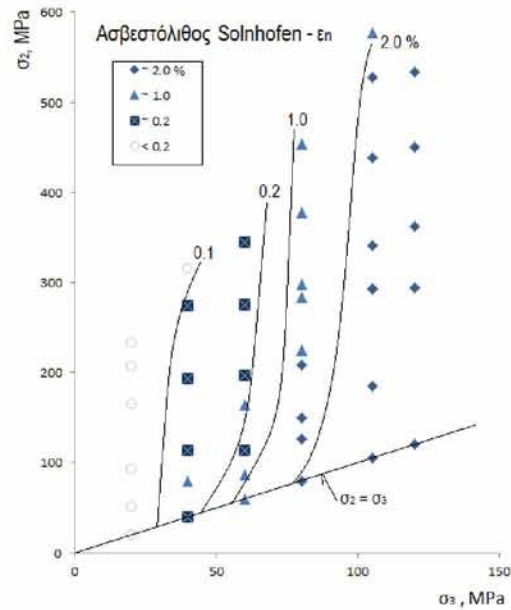
Στο Σχήμα 3.28, η μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  κατά θραύση, σχεδιάζεται ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ . Το γενικό χαρακτηριστικό της σχέσης  $\sigma_1$  προς  $\sigma_2$  αυτού του τύπου πετρώματος είναι παρόμοιο με αυτό του δολομίτη, αλλά η επίδραση της  $\sigma_2$  ( $\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_2$ ) είναι αισθητά μικρότερη από εκείνη που παρατηρείται στον δολομίτη, καθώς η επίδραση της πλευρικής πίεσης ( $p = \sigma_2 = \sigma_3$ ) είναι μικρότερη.



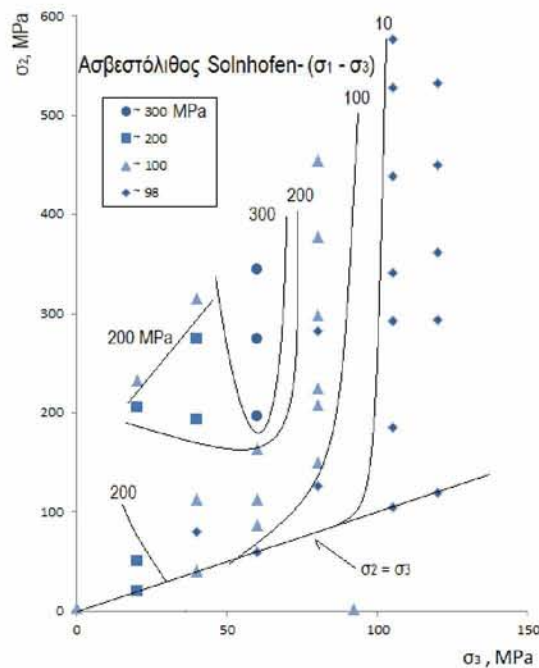
**Σχήμα 3.28.** Η τάση θραύσης  $\sigma_1$  συναρτήσει της  $\sigma_2$  για τον ασβεστόλιθο Solnhofen. Τα διαφορετικά σύμβολα αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$ , που υποδεικνύονται με αριθμούς σε MPa. Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).

Το σχήμα 3.29 απεικονίζει την ολκιμότητα  $\varepsilon_n$  ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ . Οι γραμμές περιγράμματος, που κάθε μια αντιστοιχεί σε σταθερή τιμή  $\varepsilon_n$ , είναι σχεδόν γραμμικές και παράλληλες μεταξύ τους, όπως συνέβη και με τον δολομίτη. Η  $\varepsilon_n$  αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_3$ , αλλά μειώνεται με την αύξηση της  $\sigma_2$ . Από την μορφή των καμπυλών αυτών, ο λόγος της εξάρτησης  $\sigma_2$  της  $\varepsilon_n$  προς την εξάρτηση  $\sigma_3$  εκτιμάται περίπου ίσος με  $-0,05$ , που είναι σημαντικά μικρότερος από την τιμή που ελήφθη για τον δολομίτη.

Η πτώση τάσης φαίνεται ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο Σχήμα 3.30. Αν και η οριακή τιμή των  $\sigma_1$  και  $\varepsilon_n$  αλλάζει μονοτονικά στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ , όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πτώση τάσεων (stress drop) έχει μέγιστη τιμή σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Η καμπύλη στη περιοχή μέγιστης πτώσης τάσης είναι σχεδόν παράλληλη με τον άξονα  $\sigma_2$ . Δηλαδή, η εξάρτηση από την  $\sigma_3$  είναι πολύ μεγαλύτερη από την εξάρτηση  $\sigma_2$ .



Σχήμα 3.29. Η ολκιμότητα ( $\epsilon_n$ ) ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ , στον ασβεστόλιθο Solnhofen (Mogi, 2007).

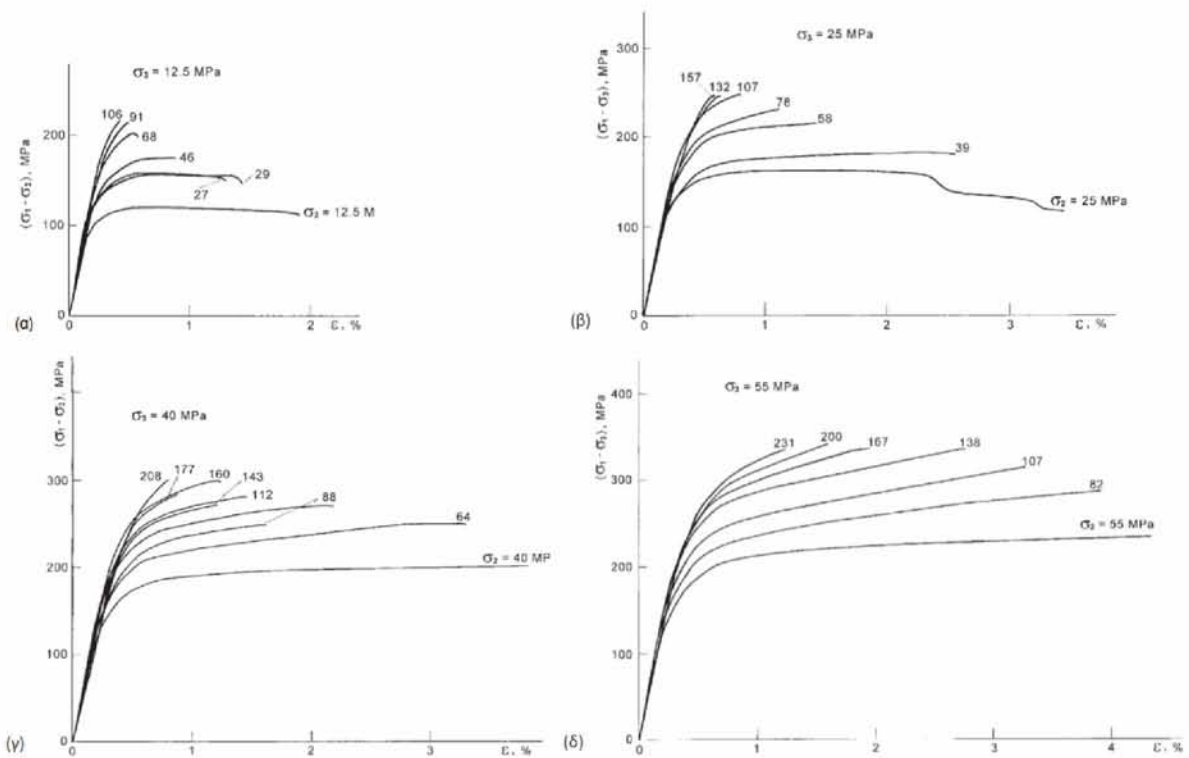


Σχήμα 3.30. Η πτώση τάσης στην θραύση ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ , στον ασβεστόλιθο Solnhofen (Mogi, 2007).

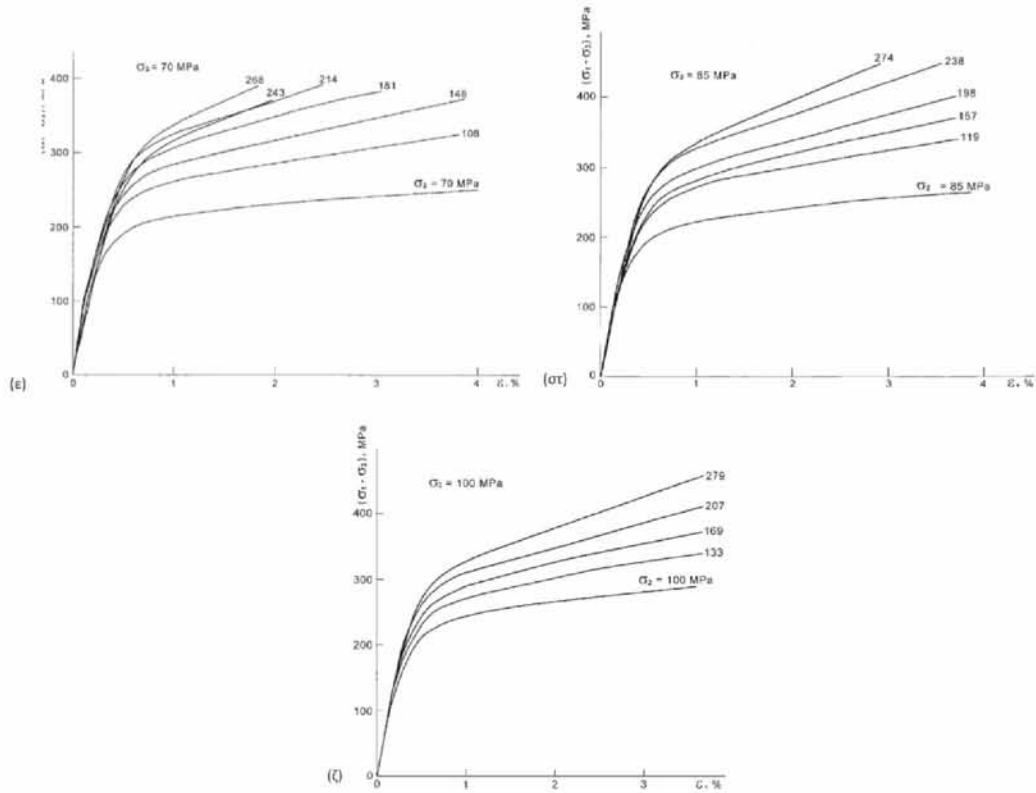
Συμπερασματικά, η επίδραση της τριαξονικής εντατικής κατάστασης στον ασβεστόλιθο Solnhofen είναι παρόμοια με εκείνη του δολομίτη Dunham. Ποσοτικά όμως, τόσο οι εξαρτήσεις από την  $\sigma_2$  όσο και από την  $\sigma_3$ , της τάσης θραύσης είναι αισθητά χαμηλότερες στον ασβεστόλιθο από ό,τι στον δολομίτη. Συγκεκριμένα, η επίδραση της τάσης  $\sigma_2$  στην ολκιμότητα και στην πτώση της τάσης, είναι σημαντικά χαμηλότερη στον ασβεστόλιθο από ό,τι στον δολομίτη.

### Μάρμαρο Yamaguchi

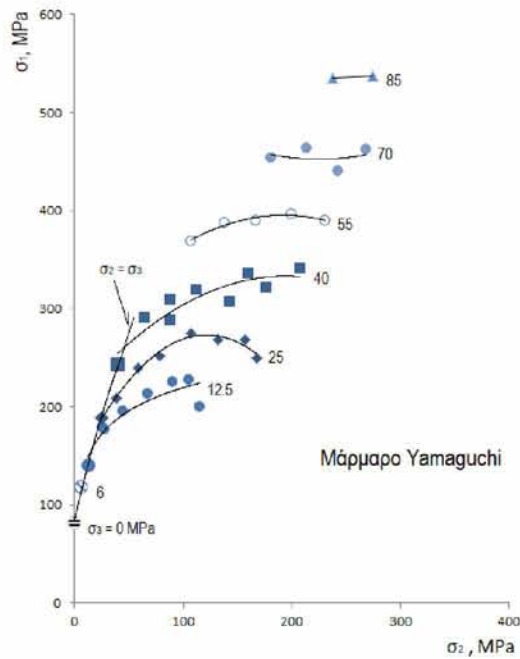
Αυτός ο τύπος πετρώματος είναι ένα μεσόκκοκο ασβεστολιθικό μάρμαρο. Κάθε διάγραμμα στο Σχήμα 3.31 (α) - (ζ) δείχνει μια σειρά καμπυλών τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης για διαφορετικές τιμές πλευρικής τάσης  $\sigma_2$  και ίδια τιμή  $\sigma_3$ . Παρατηρείται πολύ καθαρά, η αύξηση της αντοχής και η μείωση της ολκιμότητας με την αύξηση της  $\sigma_2$ . Για την πλευρική πίεση  $p(= \sigma_3)$  ίση με 100 MPa και μεγαλύτερη, δεν παρατηρήθηκε σημαντική πτώση τάσεων ακόμη και για πολύ υψηλές τιμές της  $\sigma_2$  [Σχήμα 3.31 (ζ)]. Η επίδραση της πλευρικής τάσης στην καμπύλη παραμόρφωσης είναι ουσιαστικά παρόμοια με αυτή που παρατηρείται στα δύο ανθρακικά πετρώματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.



**Σχήμα 3.31.** (α) - (ζ). Οι καμπύλες τάσεις  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  -αξονική παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_2$ , η καθεμία για ίδια  $\sigma_3$ , για το μάρμαρο Yamaguchi. (α)  $\sigma_3 = 12,5 \text{ MPa}$ , (β)  $\sigma_3 = 25 \text{ MPa}$ , (γ)  $\sigma_3 = 40 \text{ MPa}$ , (δ)  $\sigma_3 = 55 \text{ MPa}$ , (ε)  $\sigma_3 = 70 \text{ MPa}$ , (στ)  $\sigma_3 = 85 \text{ MPa}$ , (ζ)  $\sigma_3 = 100 \text{ MPa}$  (Mogi, 2007).



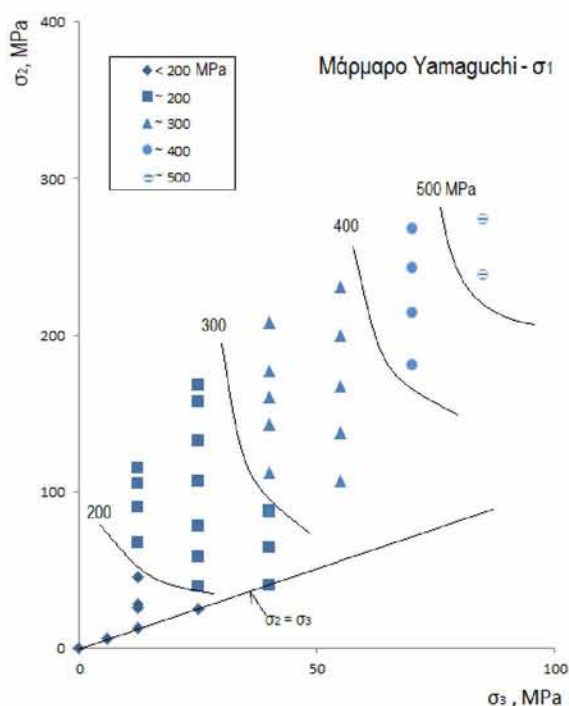
Σχήμα 3.31. (συνέχεια)



Σχήμα 3.32. Η τάση κατά τη θραύση ( $\sigma_1$ ) συναρτίζεται της τάσης  $\sigma_2$  στο μάρμαρο Yamaguchi. Διαφορετικά σύμβολα δείχνουν τα διαφορετικά  $\sigma_3$ , που υποδεικνύονται με αριθμούς σε MPa. Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).

Στο Σχήμα 3.32, η μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  κατά τη θραύση σχεδιάζεται συναρτήσει της  $\sigma_2$ . Διαφορετικά σύμβολα υποδεικνύουν διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$  και μεγαλύτερα σύμβολα στην αριστερή πλευρά του γραφήματος υποδεικνύουν την περίπτωση όπου  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Οι τιμές της  $\sigma_1$  στη θραύση επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τα  $\sigma_3$  και  $\sigma_2$  και οι καμπύλες  $\sigma_1$  σε συνάρτηση  $\sigma_2$  είναι αισθητά κοίλες προς τα κάτω.

Το σχήμα 3.33 δείχνει τιμές της  $\sigma_1$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ . Υπάρχει έλλειψη δεδομένων για μια περιοχή χαμηλής ( $\sigma_2$ - $\sigma_3$ ), διότι δεν προέκυψε θραύση σε αυτή την περιοχή λόγω της πολύ υψηλής ολκιμότητας.

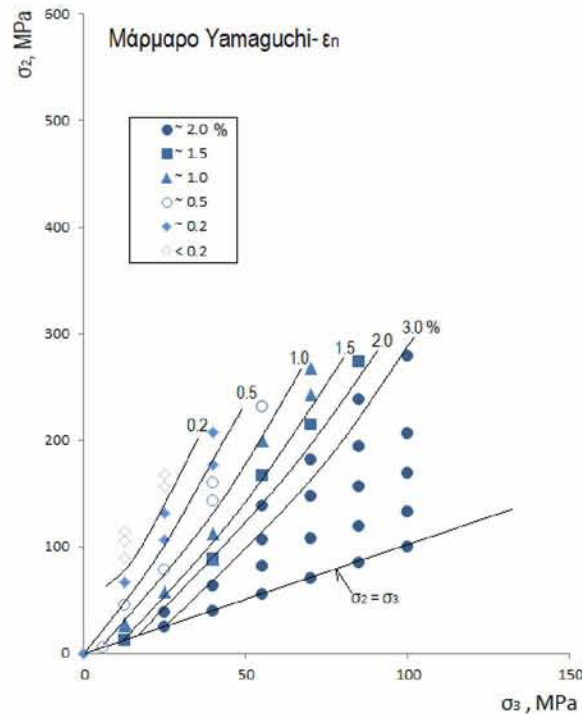


**Σχήμα 3.33.** Η  $\sigma_1$  κατά τη θραύση ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ , στο μάρμαρο Yamaguchi (Mogi, 2007).

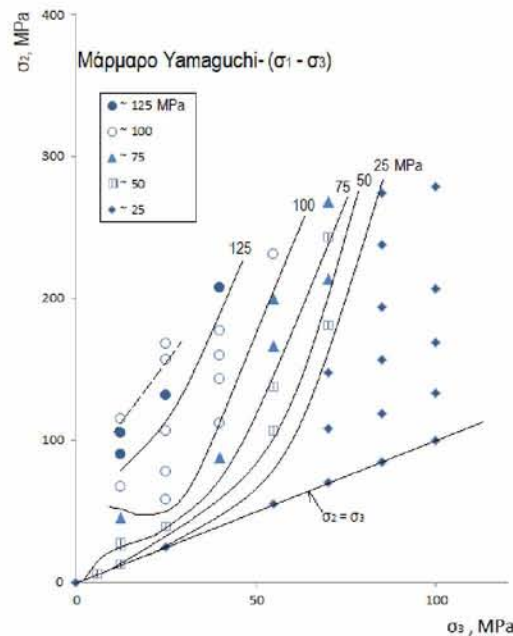
Το σχήμα 3.34 δείχνει την ολκιμότητα ( $\epsilon_n$ ) ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ . Οι γραμμές περιγράμματος που αναφέρονται σε ίσες τιμές  $\epsilon_n$  είναι σχεδόν ευθύγραμμες και παράλληλες μεταξύ τους. Από την κλίση των γραμμών περιγράμματος, ο λόγος της εξάρτησης  $\sigma_2$  προς την εξάρτηση  $\sigma_3$  υπολογίζεται περίπου στο -0.25. Σε αυτό το πέτρωμα, η όλκιμη συμπεριφορά εμφανίζεται σε χαμηλότερη πλευρική πίεση από ότι στον δολομίτη.

Η πτώση τάσης (stress drop) φαίνεται ως μια συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  (Σχήμα 3.35). Το σχήμα των γραμμών περιγράμματος που παριστάνουν ίση πτώση τάσεων είναι παρόμοιο με αυτό των  $\epsilon_n$ , αν και είναι πιο πολύπλοκο. Σε αυτή την περίπτωση, οι

μέγιστες τιμές της πτώσης τάσης εντοπίζονται στην περιοχή της υψηλότερης  $\sigma_2$  με τις γραμμές περιγράμματος σχεδόν παράλληλες προς τις γραμμές περιγράμματος του  $\varepsilon_n$ .



Σχήμα 3.34. Η ολκιμότητα ( $\varepsilon_n$ ) ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ , στο μάρμαρο Yamaguchi (Mogi, 2007).



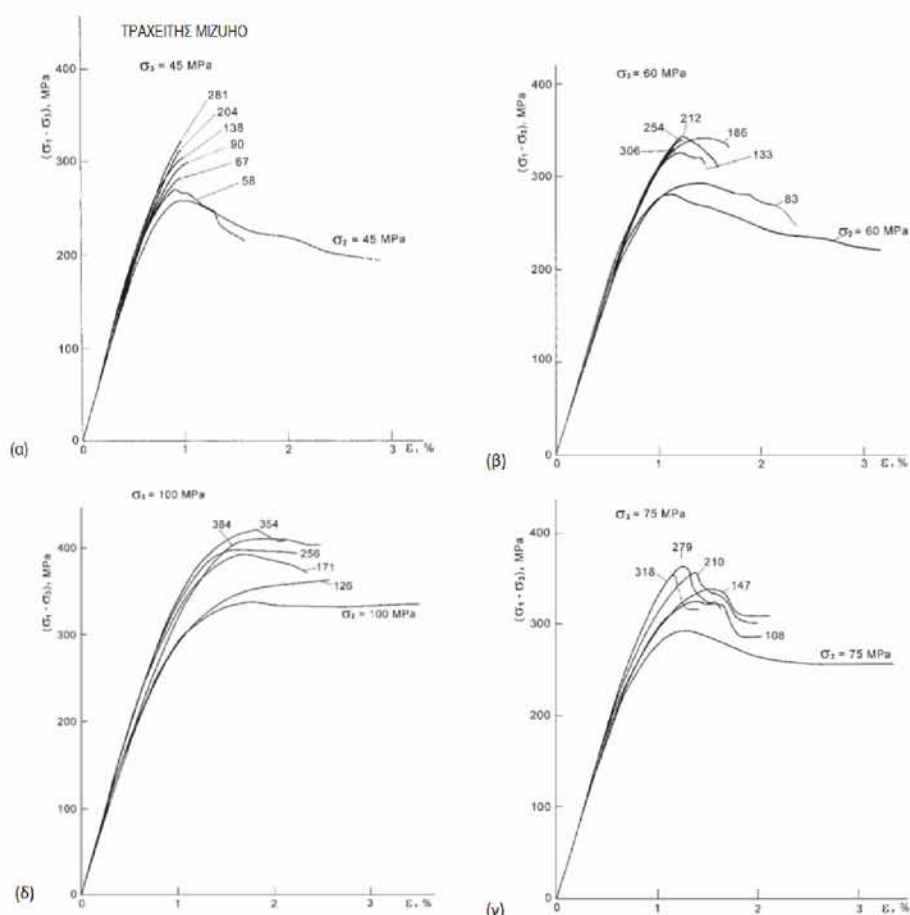
Σχήμα 3.35. Η πτώση τάσης στη θραύση ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ , στο μάρμαρο Yamaguchi (Mogi, 2007).

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω διαγράμματα, η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  στη συμπεριφορά θραύσης στο μάρμαρο Yamaguchi είναι σχεδόν παρόμοια

με εκείνη του δολομίτη Dunham και μεγαλύτερη από αυτή του ασβεστόλιθου του Solnhofen.

### Τραχείτης Mizuho

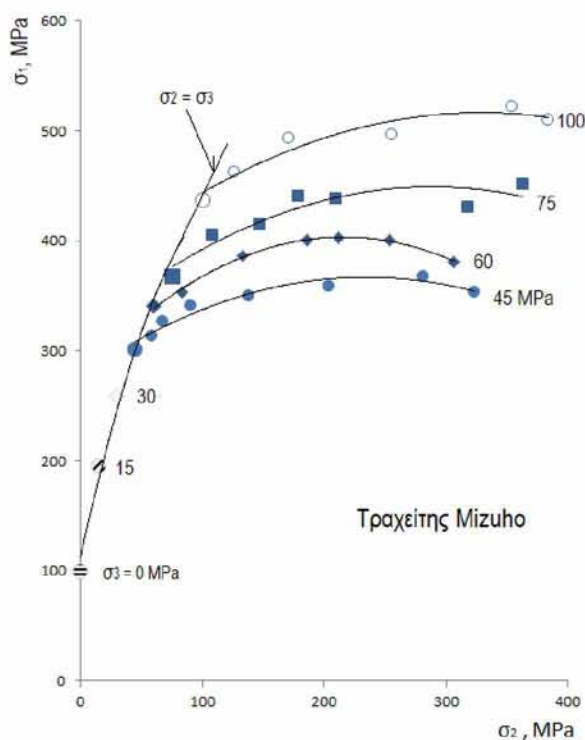
Αυτός ο τύπος πετρώματος, είναι ένας μέτρια πορώδης και αρκετά ομοιογενής πυριτικής σύστασης βράχος. Το Σχήμα 3.36 (α) - (δ) δείχνει μια σειρά καμπυλών τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_2$  υπό σταθερές τιμές της  $\sigma_3$ . Η αντοχή αυξάνεται αισθητά με την πλευρική πίεση  $\sigma_2$ , και το φαινόμενο της πτώσης της τάσης είναι πιο αισθητό για υψηλότερες τιμές της  $\sigma_2$ , όπως παρατηρήθηκε και στα ανθρακικά πετρώματα στις προηγούμενες ενότητες. Ωστόσο, οι καμπύλες παραμόρφωσης είναι κάπως διαφορετικές από εκείνες των ανθρακικών πετρωμάτων. Όταν η διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) αυξάνεται, σε μια διαδικασία παραμόρφωσης, η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται σε μια μικρή μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση, δηλαδή μικρότερη από 1% και ακολουθεί ξαφνική ή σταδιακή μείωση της τάσης. Αυτή η μείωση της πίεσης προκαλείται πιθανώς από κατακλαστική ροή. Επομένως, ο προαναφερθείς ορισμός της ολκιμότητας ως η τιμή της  $\epsilon_n$  δεν ισχύει για αυτόν τον πυριτικής σύστασης βράχο.



**Σχήμα 3.36** (α) - (δ). Οι καμπύλες τάσεις ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )-αξονική παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_2$ , η καθεμία για ίδια  $\sigma_3$ , για τον τραχείτη Mizuho. (α)  $\sigma_3 = 45\text{MPa}$ . (β)  $\sigma_3 = 60\text{MPa}$ , (γ)  $\sigma_3 = 75\text{MPa}$ , (δ)  $\sigma_3 = 100\text{MPa}$  (Mogi, 2007).

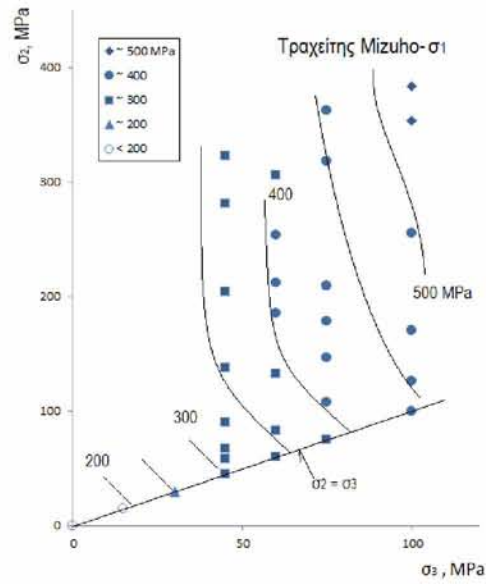


Το Σχήμα 3.37 δείχνει τις οριακές τιμές της μέγιστης κύριας τάσης  $\sigma_1$ , η οποία είναι η μέγιστη τάση που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια ενός πειράματος, ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ . Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$  και τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Οι καμπύλες  $\sigma_1$  έναντι  $\sigma_2$  είναι παρόμοιες με αυτές των ανθρακικών βράχων. Το Σχήμα 3.38 δείχνει την τελική τάση ( $\sigma_1$ ) κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θραύσης στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$  και το Σχήμα 3.39 δείχνει την πτώση τάσης ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ . Η μορφή των γραμμών περιγράμματος, στα σχήματα αυτά, είναι σχεδόν όμοια με εκείνα του ασβεστόλιθου Solnhofen.

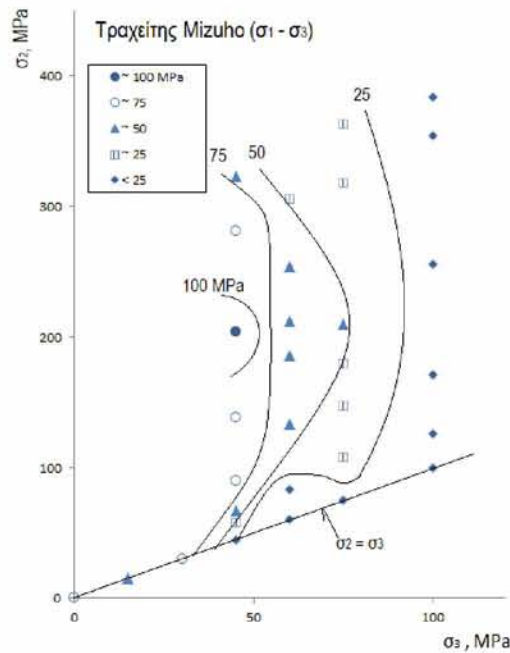


**Σχήμα 3.37.** Η τάση κατά τη θραύση ( $\sigma_1$ ) ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης ( $\sigma_2$ ) στον τραχείτη Mizuho. Διαφορετικά σύμβολα δείχνουν τα διαφορετικά  $\sigma_3$ , που υποδεικνύονται με αριθμούς σε MPa. Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).

Έτσι, δεν υπάρχει καμία ουσιαστική διαφορά στην επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  στη συμπεριφορά ρηγμάτωσης μεταξύ αυτού του πυριτικού πετρώματος και των προηγούμενων ανθρακικών πετρωμάτων.



Σχήμα 3.38. Η  $\sigma_1$  κατά τη θραύση ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ , στον τραχείτη Mizuho (Mogi, 2007).

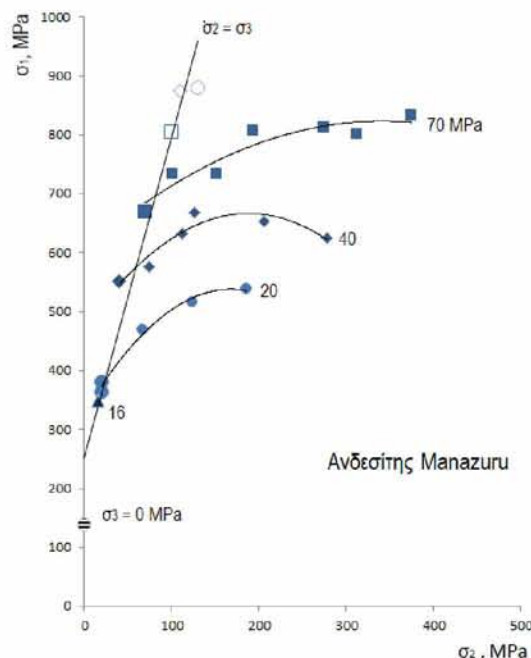


Σχήμα 3.39. Η πτώση τάσης στη θραύση ως συνάρτηση των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στο επίπεδο  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ , στον τραχείτη Mizuho (Mogi, 2007).

#### Ανδεσίτης Manazuru

Αυτός ο τύπος πετρώματος που συλλέχθηκε στο Manazuru της Ιαπωνίας, και χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα του Mogi, είναι ένας συμπαγής, ανοιχτόχρωμος βράχος. Το σχήμα 3.40 δείχνει τη μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  κατά τη θραύση ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ . Τα διαφορετικά σύμβολα αντιστοιχούν

σε διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$  και τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση όπου  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Η εξάρτηση της  $\sigma_2$  στην αντοχής θραύσης είναι επίσης σημαντική σε αυτό το βράχο, αν και είναι πολύ μικρότερη από την εξάρτηση  $\sigma_3$ . Για πολύ μεγάλες τιμές  $\sigma_2$  παρατηρήθηκαν μερικές φορές απροσδόκητα χαμηλότερες τιμές αντοχής.

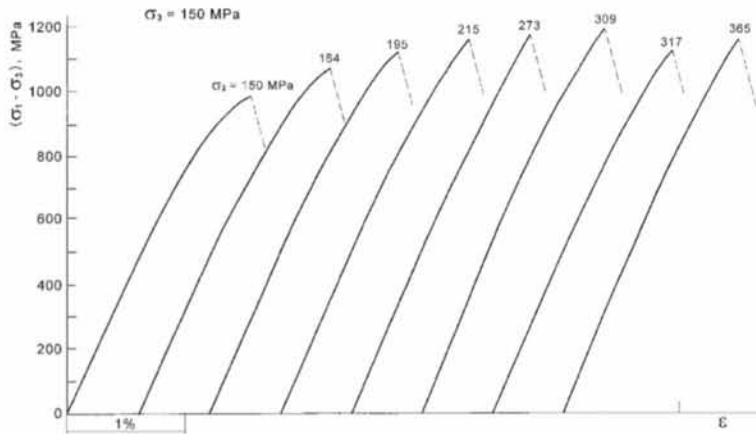


**Σχήμα 3.40.** Η τάση κατά τη θραύση ( $\sigma_1$ ) ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης ( $\sigma_2$ ) στον ανδεσίτη Manazuru. Διαφορετικά σύμβολα δείχνουν τα διαφορετικά  $\sigma_3$ , που υποδεικνύονται με αριθμούς σε MPa. Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).

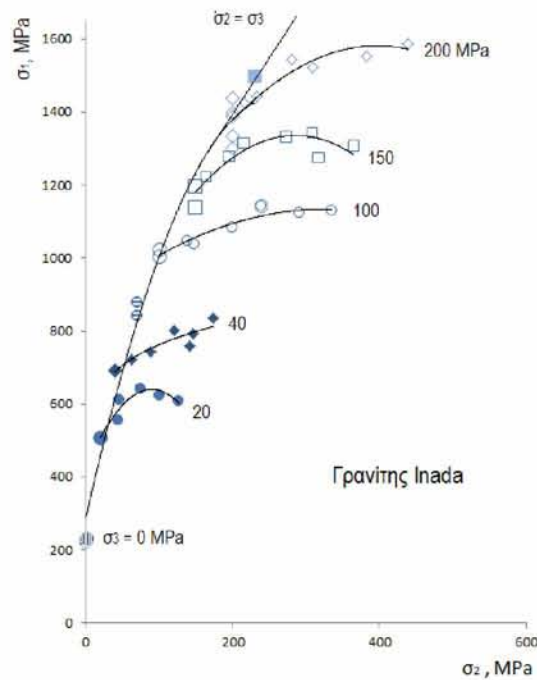
### Γρανίτης Inada

Αυτός ο βιοτιτικός γρανίτης που εξορύσσεται στην Ινάδα της Ιαπωνίας, και χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα του Mogi, είναι μεσόκκοκος και με ανοιχτό γκρι χρώμα. Το Σχήμα 3.41 δείχνει μια σειρά διαφορετικών τάσεων ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) - ανηγμένων παραμόρφωσεων ( $\epsilon$ ) για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_2$  κάτω από μια σταθερή τιμή  $\sigma_3$  ( $\sigma_3 = 150\text{MPa}$ ). Οι επιδράσεις των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στην αντοχή θραύσης είναι επίσης αξιοσημείωτες. Αυτές οι καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης είναι χαρακτηριστικές των πολύ ψαθυρών υλικών και μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ελαφρά μείωση της ολκιμότητας ( $\epsilon_n$ ) με την αύξηση της  $\sigma_2$ .

Το σχήμα 3.42 δείχνει τη μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  κατά τη θραύση συναρτήσει της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ . Τα διαφορετικά σύμβολα αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές  $\sigma_3$  και τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση όπου  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Αν και τα δεδομένα παρουσιάζουν διασπορά, εντούτοις οι επιδράσεις των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  επί της  $\sigma_1$ , κατά τη θραύση σε αυτό το πέτρωμα, είναι σχεδόν παρόμοιες με εκείνες των πετρωμάτων που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες.



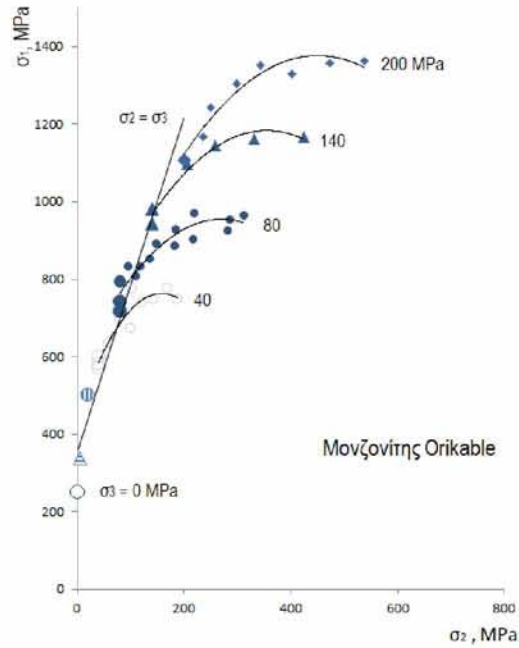
**Σχήμα 3.41.** Οι καμπύλες διαφορικής τάσης ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ), για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_2$  κάτω από μια σταθερή  $\sigma_3$  ( $= 150$  MPa) για τον γρανίτη Inada. Οι αριθμοί για κάθε καμπύλη είναι οι τιμές της  $\sigma_2$  σε MPa (Mogi, 2007).



**Σχήμα 3.42.** Η τάση κατά τη θραύση ( $\sigma_1$ ) συναρτήσσει της  $\sigma_2$  για τον γρανίτη Inada. Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν τα διαφορετικά  $\sigma_3$ , που υποδεικνύονται με αριθμούς σε MPa. Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).

### Μονζονίτης Orikabe

Πρόκειται για ψαθυρό τύπο πετρώματος. Το σχήμα 3.43 δείχνει τη μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  κατά τη θραύση ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ . Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν διαφορετικές τιμές  $\sigma_3$  και τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση όπου  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Οι επιδράσεις των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στην αντοχή σε θραύση, είναι σχεδόν παρόμοιες με εκείνες που παρατηρούνται στους άλλους βράχους και η επίδραση της  $\sigma_2$  φαίνεται να είναι υψηλότερη για χαμηλές τιμές της  $\sigma_2$ .



**Σχήμα 3.43.** Η τάση κατά τη θραύση ( $\sigma_1$ ) εν συναρτήσει του  $\sigma_2$  για τον μονζονίτη Orikabe. Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν τα διαφορετικά  $\sigma_3$ , που υποδεικνύονται με αριθμούς σε MPa. Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).

### Συμπεράσματα επί των πειραματικών δοκιμών

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων, με τη χρήση της νέας τεχνικής τριαξονικής θλίψης, ελήφθησαν οι σχέσεις τάσης ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) - ανηγμένης παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τρία ανθρακικά πετρώματα και τέσσερα πυριτικά πετρώματα υπό συνθήκες “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ), και μελετήθηκε η επίδραση των συνδυασμένων τάσεων. Ιδιαίτερα η επίδραση της  $\sigma_2$ , στην αντοχή σε θραύση και στην ολκιμότητα αυτών των πετρωμάτων, ήταν εμφανής. Παρόλο που τα πετρώματα αυτά παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά αστοχίας, μπορούν να διατυπωθούν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

- (1) Η θραυστική αντοχή αυξάνεται όχι μόνο με την αύξηση της  $\sigma_3$ , αλλά και με την αύξηση της  $\sigma_2$ , εκτός από πολύ υψηλές τιμές της  $\sigma_2$ . Η εξάρτηση της  $\sigma_2$  είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη της  $\sigma_3$ , αλλά η επίδραση της  $\sigma_2$  είναι επίσης σημαντική. Επιπλέον, οι επιδράσεις των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  φαίνεται να είναι σχεδόν ανάλογες μεταξύ τους. Οι καμπύλες  $\sigma_1$  έναντι  $\sigma_2$  είναι κοίλες (στρέφουν τα κοίλα) προς τα κάτω.
- (2) Η ολκιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της  $\sigma_3$ , αλλά μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ . Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε κυρίως στα ανθρακικά πετρώματα, αλλά βρέθηκε ακόμη και σε αρκετά ψαθυρά πυριτικά πετρώματα, αν και δεν ήταν πολύ έντονο.
- (3) Η πτώση της πίεσης (stress drop) στη θραύση μειώνεται γενικά με την αύξηση της  $\sigma_3$ , αλλά αυξάνει με την αύξηση της  $\sigma_2$ . Σε αυτή την

περίπτωση, ωστόσο, έχει τις μέγιστες τιμές για ορισμένες υψηλότερες τιμές της  $\sigma_2$ .

- (4) Η συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης, στην οποία δύο από τις κύριες τάσεις είναι ίσες, είναι συγκεκριμένη και τα αποτελέσματά της δεν μπορούν να εφαρμοστούν στη γενική περίπτωση της “πραγματικής” τριαξονικής κατάστασης τάσεων.
- (5) Σε προηγούμενες μελέτες, αναφέρθηκε ότι η ολκιμότητα αυξάνεται με τη μέση πίεση. Ωστόσο, αυτή το συμπέρασμα δεν είναι σωστό, επειδή οι επιδράσεις των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στην ολκιμότητα είναι αντίθετες μεταξύ τους. Η επίδραση της μέσης πίεσης στη συμπεριφορά αστοχίας είναι πολύπλοκη.

### 3.3.6 Πειραματικά αποτελέσματα - Τάσεις διαρροής

Όπως φαίνεται στις καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης, οι καμπύλες παραμόρφωσης στα τρία ανθρακικά πετρώματα (δολομίτης Dunham, ασβεστόλιθος Solnhofen, μάρμαρο Yamaguchi) και στο πυριτικό πέτρωμα (τραχειίτη Mizuho) είναι γραμμικές στο αρχικό στάδιο και στη συνέχεια, απότομα ή σταδιακά, κάμπτονται προς τα κάτω. Όταν η κλίση της καμπύλης αλλάζει απότομα, η τάση διαρροής ( $\sigma_1$ ) μπορεί να προσδιοριστεί οριστικά ως η πίεση σε αυτή την αλλαγή κλίσης της καμπύλης. Για τα προαναφερθέντα τρία ανθρακικά πετρώματα, η τάση διαρροής μπορεί να προσδιοριστεί ως η τάση που απαιτείται για να παραχθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα μόνιμης ανηγμένης παραμόρφωσης. Για τον τραχειίτη Mizuho, ωστόσο, η κάμψη των καμπυλών παραμόρφωσης δεν είναι απότομη και έτσι υπάρχει κάποια ασάφεια στον προσδιορισμό της τάσης διαρροής. Επομένως, η ακόλουθη συζήτηση περιορίζεται στα τρία ανθρακικά πετρώματα. Οι σημαντικές αλλαγές στην κλίση κάθε καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης παρατηρήθηκαν σε μια μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση περίπου 0,2-0,5% σε αυτά τα πετρώματα. Στον δολομίτη Dunham, καθώς η μεταβολή της κλίσης κάθε καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης είναι ελαφρώς βαθμιαία, η αξονική τάση σε μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση 0,5%, ελήφθη ως τάση διαρροής. Στο ασβεστόλιθο Solnhofen και το μάρμαρο Yamaguchi, ωστόσο, τονίζεται ότι το 0,2% αντισταθμίστηκε ως τάση διαρροής. Αυτή η μικρή διαφορά στη μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση για τον προσδιορισμό των σημείων διαρροής φαίνεται να μην έχει σημαντική επίδραση (Mogi, 2007).

#### *Δολομίτης Dunham*

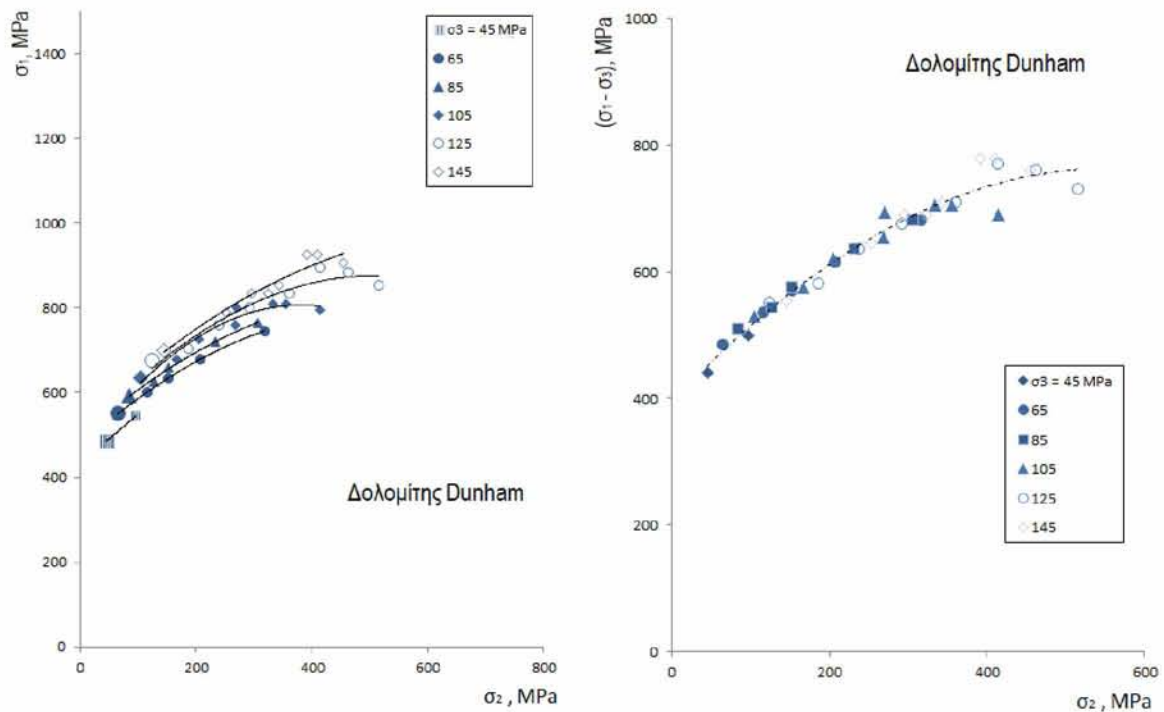
Το σχήμα 3.44 (αριστερά) δείχνει τη μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  στο σημείο διαρροής (yield point) ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  για διάφορες ελάχιστες κύριες τάσεις  $\sigma_3$  στο δολομίτη Dunham. Σε αυτή την περίπτωση, είναι φανερό πως η  $\sigma_1$  αυξάνεται με την αύξηση της  $\sigma_2$ . Το σχήμα 3.44 (δεξιά) δείχνει τη διαφορική τάση

( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) στο σημείο διαρροής (yield point) ως συνάρτηση της  $\sigma_2$ , για διάφορες τιμές  $\sigma_3$ . Αυτό το σχήμα δείχνει ότι οι καμπύλες ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) έναντι  $\sigma_2$  για διάφορες τιμές  $\sigma_3$  είναι σχεδόν παρόμοιες και μπορούν να εκφραστούν από μία απλή καμπύλη. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι η τάση διαρροής ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) είναι ανεξάρτητη από το  $\sigma_3$ , αλλά η ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ . Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μία εμπειρική σχέση για τάση ιαροής, την οποία έχει προτείνει ο Mogi :

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = f(\sigma_2) \quad \text{ή} \quad (3.3)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + f(\sigma_2) \quad (3.4)$$

όπου  $f$  είναι μονότονη συνάρτηση.

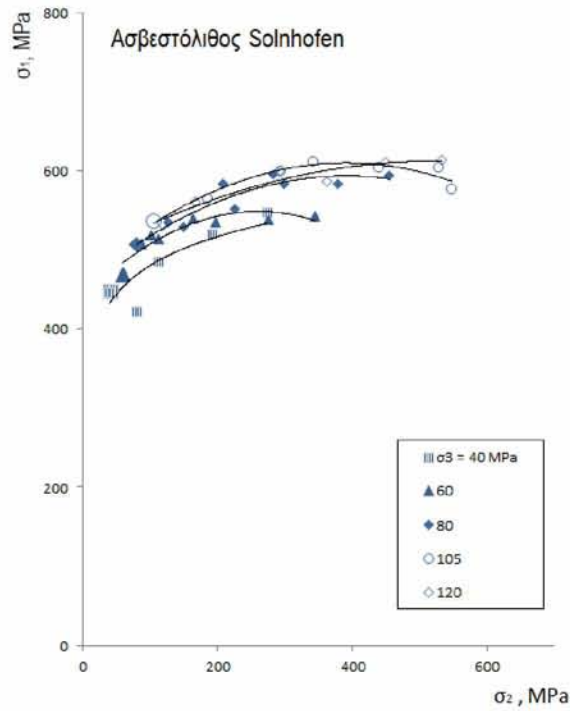


**Σχήμα 3.44.** Αριστερά: Η μέγιστη κύρια τάση ( $\sigma_1$ ) στο σημείο διαρροής εν συναρτήσει του  $\sigma_2$  στον δολομίτη Dunham. Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν τις διαφορετικές ελάχιστες κύριες τάσεις  $\sigma_3$ . Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Δεξιά: Η διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) στο σημείο διαρροής ως συνάρτηση του  $\sigma_2$  στο δολομίτη Dunham για διάφορες τιμές της  $\sigma_3$ . Η σχέση μεταξύ της τάσης διαρροής ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) και  $\sigma_2$  είναι ανεξάρτητη από  $\sigma_3$ , αλλά η ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του  $\sigma_2$  (Mogi, 2007.)

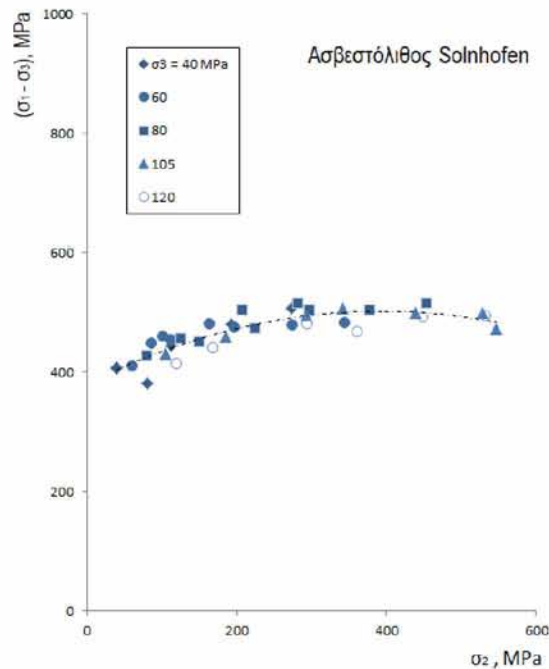
### Ασβεστόλιθος Solnhofen

Το σχήμα 3.45 δείχνει τη μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  στο σημείο διαρροής ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ , για διάφορες ελάχιστες κύριες τάσεις  $\sigma_3$ . Στην περίπτωση του ασβεστόλιθου Solnhofen, η επίδραση της  $\sigma_2$  είναι πολύ μικρότερη από ότι στην περίπτωση του δολομίτη Dunham. Παρομοίως, η επίδραση της  $\sigma_3$  στην τάση

θραύσης του ασβεστόλιθου Solnhofen είναι πολύ μικρότερη από εκείνη που παρατηρείται στον δολομίτη Dunham.



Σχήμα 3.45. Η μέγιστη κύρια τάση ( $\sigma_1$ ) στο σημείο διαρροής συναρτήσει της  $\sigma_2$  στον ασβεστόλιθο Solnhofen. Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν τις διαφορετικές ελάχιστες κύριες τάσεις  $\sigma_3$ . Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).



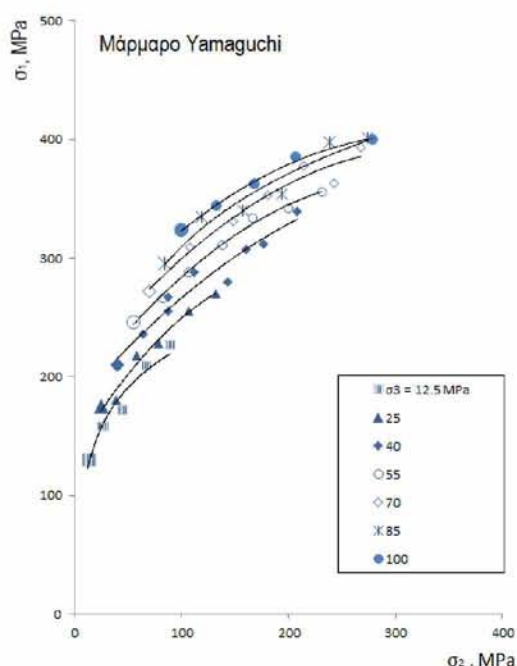
Σχήμα 3.46. Η διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) στο σημείο διαρροής ως συνάρτηση της  $\sigma_2$  στον ασβεστόλιθο Solnhofen για διάφορες τιμές της  $\sigma_3$  (Mogi, 2007).



Το σχήμα 3.46 δείχνει τη διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) στο σημείο διαρροής ως συνάρτηση της  $\sigma_2$ , για διάφορες τιμές της  $\sigma_3$ . Αυτό το σχήμα δείχνει ότι αυτές οι καμπύλες ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) έναντι της  $\sigma_2$  είναι σχεδόν παρόμοιες και ότι μπορούν να εκφραστούν με μία μόνο καμπύλη. Παρατηρείται με ευκολία ότι η επίδραση της  $\sigma_2$  είναι μικρή σε αυτό το πέτρωμα.

### Μάρμαρο Yamaguchi

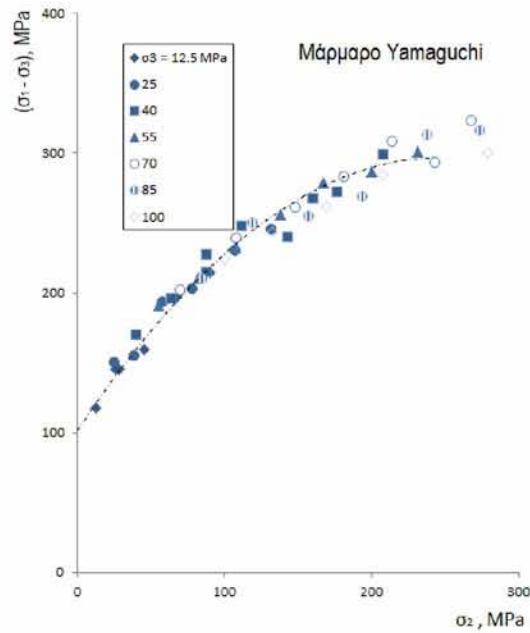
Το σχήμα 3.47 δείχνει τη μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  στο σημείο διαρροής ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  για διάφορες ελάχιστες κύριες τάσεις  $\sigma_3$ . Σε αυτή την περίπτωση, το  $\sigma_1$  αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του  $\sigma_2$ .



**Σχήμα 3.47.** Η  $\sigma_1$  στο σημείο διαρροής ως συνάρτηση της  $\sigma_2$  για το μάρμαρο Yamaguchi. Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν τις διαφορετικές τιμές  $\sigma_3$ . Τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$ . (Mogi, 2007)

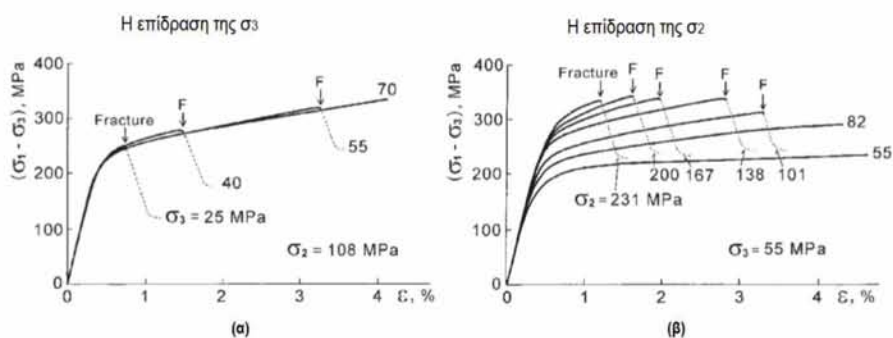
Το σχήμα 3.48 δείχνει τη διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) στο σημείο διαρροής ως συνάρτηση του  $\sigma_2$ , για διάφορες τιμές  $\sigma_3$ . Το σχήμα αυτό δείχνει ότι οι καμπύλες ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) έναντι  $\sigma_2$  για διάφορες τιμές  $\sigma_3$  συμφωνούν καλά μεταξύ τους και μπορούν να εκφραστούν με μία μόνο καμπύλη. Το αποτέλεσμα αυτό είναι παρόμοιο με αυτό του δολομίτη Dunham, δηλαδή, η τάση διαρροής ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) είναι ανεξάρτητη από  $\sigma_3$  και αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του  $\sigma_2$ .

Το σχήμα 3.49 δείχνει την σχέση της τάσης ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - ανηγμένης παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) ( $\alpha$ ) για μια σταθερή  $\sigma_2$  ( $= 108\text{MPa}$ ) και ( $\beta$ ) για μια σταθερή  $\sigma_3$  ( $= 55\text{MPa}$ ). Όταν η  $\sigma_2$  είναι σταθερή (αριστερά), αν και η αντοχή σε θραύση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ποικίλλει σαφώς με διαφορετικές  $\sigma_3$ , το σχήμα των καμπυλών τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης δεν αλλάζει για διάφορες τιμές της  $\sigma_3$  (είναι δηλ. ανεξάρτητο από την  $\sigma_3$ ).



Σχήμα 3.48. Η διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) στο σημείο διαρροής ως συνάρτηση του  $\sigma_2$  στο μάρμαρο Yamaguchi για διάφορες τιμές  $\sigma_3$ . Η τάση διαρροής ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) είναι ανεξάρτητη από  $\sigma_3$ , αλλά ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του  $\sigma_2$ . (Mogi, 2007)

Όταν η  $\sigma_3$  είναι σταθερή σχήμα 3.49 (δεξιά), το σχήμα των καμπυλών τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης αλλάζει σημαντικά και η τάση διαρροής αυξάνεται αισθητά με την αύξηση του  $\sigma_2$ . Αυτό το σχήμα δείχνει άμεσα τα αποτελέσματα των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ , τα οποία είναι αρκετά διαφορετικά. Έτσι, αποδείχθηκε ότι η ενδιάμεση κύρια τάση  $\sigma_2$  παίζει σημαντικό ρόλο στην παραμόρφωση του βράχου. Για την τάση διαρροής και των τριών προαναφερθέντων ισοτροπικών ομοιογενών ανθρακικών πετρωμάτων, μπορεί να εφαρμοστεί η εξίσωση (3.3) ή (3.4).



Σχήμα 3.49. (α) Η επίδραση της  $\sigma_3$  υπό σταθερή  $\sigma_2$  ( $= 108 \text{ MPa}$ ) και (β) η επίδραση της  $\sigma_2$  υπό σταθερή  $\sigma_3$  ( $= 55 \text{ MPa}$ ), για το μάρμαρο Yamaguchi (Mogi, 2007).

### 3.3.7 Κριτήρια αστοχίας των πετρωμάτων

Γενικά, οι τάσεις κατά τη θραύση και την διαρροή μπορούν να εκφραστούν με

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= f(\sigma_2, \sigma_3) \quad \text{ή} \\ f'(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) &= 0 .\end{aligned}\quad (3.5)$$

Οι εντατικές καταστάσεις, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την θραύση ή τη διαρροή των πετρωμάτων, έχουν ερευνηθεί από πολλούς ερευνητές και έχουν εφαρμοστεί ευρέως τα ακόλουθα κριτήρια θραύσης:

Κριτήριο θραύσης Coulomb  $\tau = \tau_0 + \mu_i \sigma_n$ , (3.6)

$$\text{ή } \sigma_1 = \sigma_c + \mu'_i \sigma_3.$$

Κριτήριο θραύσης Mohr  $\tau = f''(\sigma_n)$ , (3.7)

$$\text{ή } \sigma_1 = \sigma_c + f'''(\sigma_3) .$$

Κριτήριο θραύσης Griffith  $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8\sigma_T(\sigma_1 + \sigma_3)$ , εάν  $\sigma_1 - 3\sigma_3 > 0$ . (3.8)

Κριτήριο θραύσης Griffith τροποποιημένο από τους McClintock και Walsh (1962)

$$(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu)^{1/2} + \mu(\sigma_1 + \sigma_3) = 4\sigma_T , \quad (3.9)$$

όπου  $\tau$  είναι η διατμητική τάση,  $\sigma_n$  είναι η ορθή τάση,  $\sigma_c$  είναι η μονοαξονική θλιπτική αντοχή,  $\sigma_T$  είναι η εφελκυστική αντοχή,  $\mu$ ,  $\mu_i$  και  $\mu'_i$  είναι οι σταθερές που σχετίζονται με την τριβή ολίσθησης, και  $f-f''-f'''$  είναι μονότονα αύξουσες συναρτήσεις. Τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τη συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) ερμηνεύονται σωστά από το κριτήριο Mohr-Coulomb (και επίσης από την τροποποιημένη θεωρία του Griffith). Ωστόσο, αν η επίδραση της  $\sigma_2$  είναι επίσης σημαντική, αυτά τα κριτήρια δεν λαμβάνουν υπόψη αυτή την επίδραση.

Μεταξύ των κριτηρίων αστοχίας που λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της  $\sigma_2$ , η εκτεταμένη εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας von Mises για όλκιμα μέταλλα έχει τεκμηριωθεί με εκτεταμένες μελέτες (Nadai, 1950). Το κριτήριο αυτό εκφράζεται με τη χρήση της οκταεδρικής διατμητικής τάσης ( $\tau_{oct}$ ) ως εξής:

$$\tau_{oct} = \text{συνεχής},$$

$$\tau_{oct} \equiv \frac{1}{3} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} . \quad (3.10)$$

Αυτό το κριτήριο μπορεί να ερμηνευθεί ορίζοντας ότι η διαρροή θα συμβεί όταν η στρεπτική ενέργεια παραμόρφωσης (distortional strain energy) φθάσει σε μια σταθερή τιμή. Η θεωρία von Mises ερμηνεύτηκε επίσης από τον Nadai (1950) ως κριτήριο ότι η θραύση θα συμβεί όταν η οκταεδρική διατμητική τάση ( $\tau_{oct}$ ) φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή.

Οι Lode (1928) και Nadai (1950) πρότειναν επίσης τον ακόλουθο τύπο.

$$\tau_{oct} = f(\sigma_{oct}), \quad (3.11)$$

όπου  $\sigma_{oct} \equiv \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ .

Αυτό το κριτήριο θεωρεί ότι η οκταεδρική διατμητική τάση ( $\tau_{oct}$ ) κατά τη θραύση, είναι μια μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση της μέσης τάσης ( $\sigma_{oct}$ ) και προτάθηκε για να εξηγήσει την, εξαρτώμενη από την πίεση, αντοχή των ψαθυρών υλικών. Διάφορες παραλλαγές αυτού του τύπου προτάθηκαν από διάφορους ερευνητές. Για παράδειγμα η σχέση,

$$\tau_{oct} = C_1\sigma_{oct} + C_2, \quad (3.12)$$

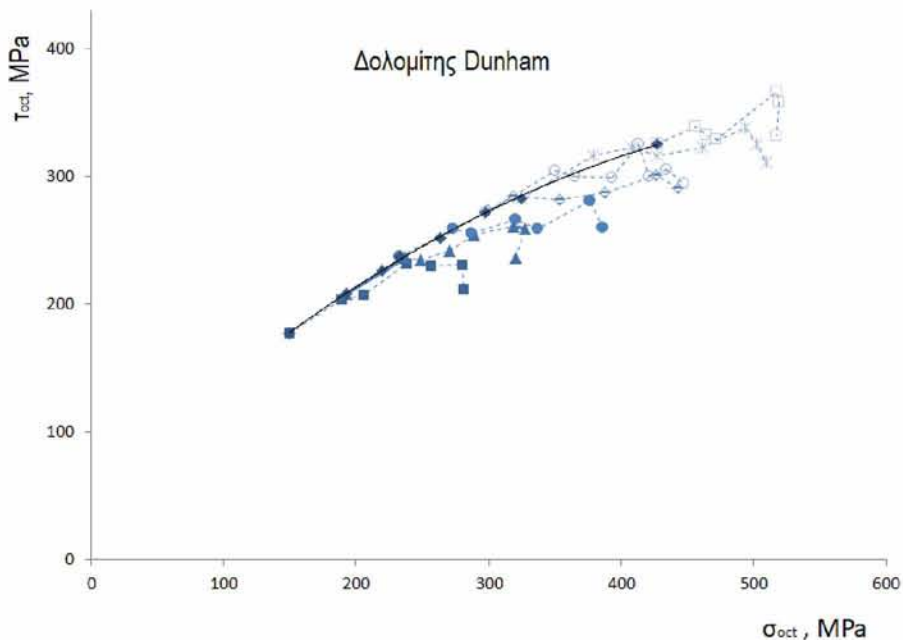
εφαρμόστηκε από τους Bresler και Pister (1957) για το σκυρόδεμα. Επίσης η σχέση

$$\tau_{oct}^2 = C\sigma_{oct}, \quad (3.13)$$

παρουσιάστηκε από τον Murrell (1965) ως επέκταση της θεωρίας του Griffith σε τρεις διαστάσεις. Οι Sakurai και Serata (1967) πρότειναν την ακόλουθη εξίσωση,

$$\tau_{oct} = f(\alpha\sigma_{oct} + \beta\sigma_3 + \gamma), \quad (3.14)$$

όπου  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$  είναι σταθερές.



**Σχήμα 3.50.** Εξέταση κριτηρίου θραύσης που προτάθηκε από τους Lode και Nadai. Τα πειραματικά δεδομένα της τάσης θραύσης στο δολομίτη του Dunham είναι από τον Mogi, όπου παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά στο γράφημα  $\tau_{oct} - \sigma_{oct}$  (Mogi, 2007).

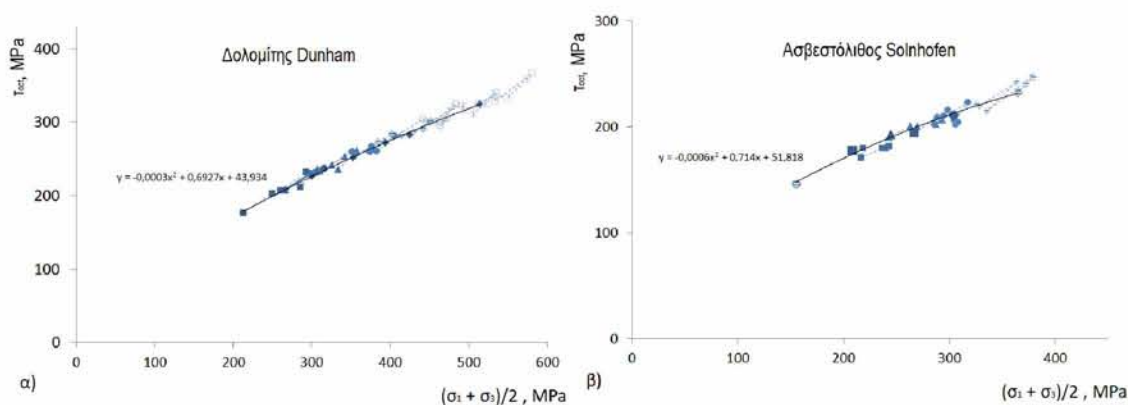
Ωστόσο, ο Mogi (1970) εξέτασε τα πειραματικά του δεδομένα σύμφωνα με τα κριτήρια θραύσης και απέδειξε πως δεν συσχετίζονται. Το Σχήμα 3.50 δείχνει μια περίπτωση εξέτασης κριτηρίου θραύσης που προτάθηκε από τους Lode (1928), Nadai (1950) και άλλους. Τα πειραματικά δεδομένα της τάσεως θραύσεως του δολομίτη Dunham απεικονίστηκαν στο γράφημα συναρτήσεως της  $\tau_{oct} - \sigma_{oct}$ . Τα σύμβολα σε αυτό το σχήμα είναι ευρέως διασκορπισμένα (σε διασπορά). Αυτό υποδεικνύει ότι αυτό το κριτήριο θραύσης αποτυγχάνει να συσχετιστεί με τα πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν από την πραγματική δοκιμή τριαξονικής θλίψης.

Η επιφάνεια της διατμητικής αστοχίας κατά τη θραύση είναι ένα σχεδόν επίπεδο μέτωπο παράλληλο προς την κατεύθυνση  $\sigma_2$ . Επομένως, υποτίθεται ότι η κρίσιμη στρεπτική ενέργεια παραμόρφωσης αυξήθηκε με την ενεργή μέση ορθή τάση  $1/2 (\sigma_1 + \sigma_3)$ . Επομένως, το κριτήριο που πρότεινε ο Mogi, το οποίο προέρχεται από την γενίκευση του von Mises, είναι το εξής:

$$\text{Θραύση} : \tau_{oct} = f_1(\sigma_1 + \sigma_3), \quad (3.15)$$

όπου  $f_1$  είναι μονοτονικά αύξουσα συναρτησιμότητα. Δηλαδή, η  $\tau_{oct}$  δεν είναι πάντα σταθερή, αλλά αυξάνει μονοτονικά με  $(\sigma_1 + \sigma_3)$  για θραύση.

Το Σχ. 3.51 δείχνει την  $\tau_{oct}$  στη θραύση εν συναρτήσεως του  $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ , με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του Mogi για τον δολομίτη Dunham και τον ασβεστόλιθο Solnhofen. Τα διαφορετικά σύμβολα αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές  $\sigma_3$  και τα μεγαλύτερα σύμβολα δείχνουν την περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Καθώς τα σύμβολα για την πραγματική τριαξονική εντατική κατάσταση σχηματίζουν μία μόνο καμπύλη για κάθε βράχο, φαίνεται ότι το κριτήριο θραύσης στην Εξίσωση 3.15 είναι ορθότερο από τα προηγούμενα.



**Σχήμα 3.51.** Η οκταεδρική τάση διάτμησης ( $\tau_{oct}$ ) στη θραύση έναντι  $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$  (α) του δολομίτη Dunham και (β) του ασβεστόλιθου Solnhofen. Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$ . (Mogi, 2007)

Ένας εμπειρικός τύπος από τον Mogi είναι η ακόλουθη εκθετική συνάρτηση:

$$\tau_{oct} \approx A(\sigma_1 + \sigma_3)^n, \quad (3.16)$$

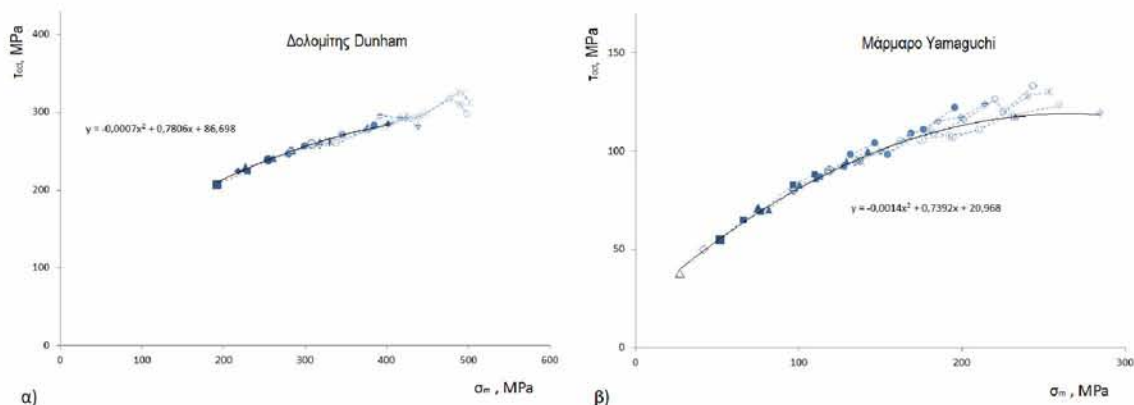
όπου  $A$  και  $n$  είναι εμπειρικές σταθερές.

Η φυσική ερμηνεία του κριτηρίου θραύσης του Mogi μπορεί να αποδοθεί ως εξής: η θραύση θα συμβεί όταν η στρεπτική ενέργεια παραμόρφωσης φθάσει σε μια κρίσιμη τιμή, η οποία αυξάνεται με την ενεργή μέση ορθή τάση στο επίπεδο αστοχίας. Η θραύση του πετρώματος σε συνθήκες “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης, εμφανίζεται με διατμητική αστοχία, της οποίας η διεύθυνση είναι πάντα παράλληλη προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$  και έτσι η μέση ορθή πίεση στο επίπεδο αστοχίας είναι ίση με  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ . Ωστόσο, το επίπεδο αστοχίας δεν είναι ακριβώς επίπεδο και παράλληλο στην κατεύθυνση  $\sigma_2$ . Επομένως, ο τύπος (Εξίσωση 3.15) μπορεί να τροποποιηθεί στην ακόλουθη μορφή:

$$\tau_{oct} = f(\sigma_1 + \sigma_3 + a\sigma_2), \quad (3.17)$$

όπου  $a$  είναι μια μικρή σταθερά. Η Εξίσωση 3.15 μπορεί να εφαρμοστεί ως εμπειρικό κριτήριο θραύσης Mogi. Ωστόσο, η εφαρμογή της Εξίσωσης 3.15 δεν ισχύει για υψηλές τιμές  $\sigma_2$ . Αυτό οφείλεται ίσως στο γεγονός ότι το επίπεδο αστοχίας δεν είναι ακριβώς επίπεδο και παράλληλο προς την κατεύθυνση  $\sigma_2$ . Σε μια τέτοια περίπτωση, η Εξίσωση 3.17 είναι χρήσιμη.

Το κριτήριο von Mises εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η τάση διαρροής είναι ανεξάρτητη από την πλευρική πίεση. Σύμφωνα με τον Paterson (1967) η τάση διαρροής των πετρωμάτων αυξάνει με την αυξανόμενη πλευρική πίεση σε πολλές περιπτώσεις. Το γενικευμένο κριτήριο von Mises εξαρτάται από την πλευρική τάση για την διαρροή βράχων, όπως και για την ψαθυρή θραύση. Από την άποψη αυτή, εξετάστηκαν διάφορα κριτήρια με βάση τα αποτελέσματα των πραγματικών δοκιμών τριοξικής συμπίεσης.



**Σχήμα 3.52.** (α) Η οκταεδρική διατμητική τάση ( $\tau_{oct}$ ) στο σημείο διαρροής απεικονίζεται γραφικά σε σχέση με τη μέση τάση  $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$  για α) τον δολομίτη Dunham, β) το μάρμαρο Yamaguchi. Τα διαφορετικά σύμβολα που αντιστοιχούν στα διαφορετικά  $\sigma_3$  αποτελούν σχεδόν μια γραμμή. (Mogi, 2007)

Στο Σχ. 3.52 (α) - (β), η  $\tau_{oct}$  κατά την διαρροή παρίσταται γραφικώς σε σχέση με τη μέση τάση  $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$  για τον δολομίτη Dunham και το μάρμαρο Yamaguchi. Τα σημεία δεδομένων που λαμβάνονται από τις πραγματικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης που πραγματοποίησε ο Mogi, σχηματίζουν μία καμπύλη για κάθε βράχο. Έτσι, το  $\tau_{oct} = f(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  (Εξίσωση 3.11), που προτάθηκε από το Nadai (1950), είναι ικανοποιητικό ως κριτήριο διαρροής για τα πετρώματα.

Επομένως, το κριτήριο που πρότεινε ο Mogi, το οποίο προέρχεται από τον Nadai, είναι το εξής:

$$\text{Διαρροή : } \tau_{oct} = f_2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) , \quad (3.19)$$

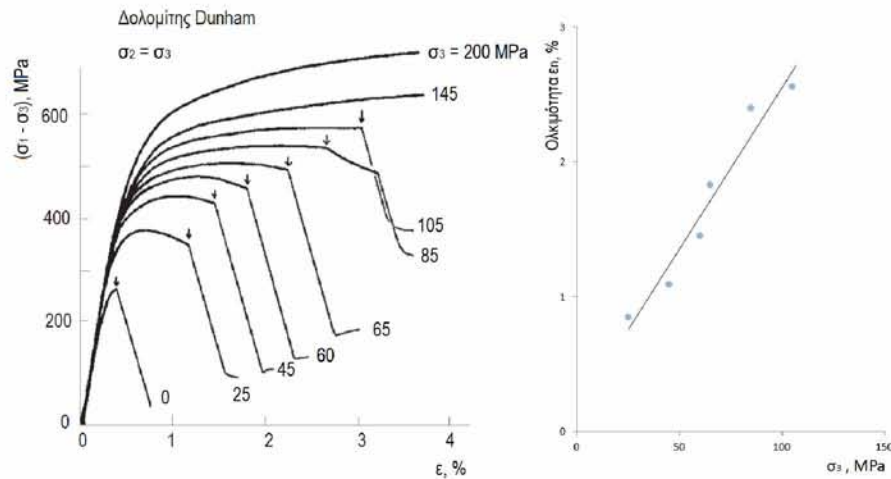
όπου η  $f_2$  είναι μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση. Δηλαδή, η  $\tau_{oct}$  δεν είναι πάντα σταθερή, αλλά αυξάνει μονοτονικά με  $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  για διαρροή.

Η φυσική ερμηνεία των κριτηρίων μπορεί να δηλώνεται ως εξής: Η θραύση ή η διαρροή των πετρωμάτων θα συμβεί όταν η στρεπτική ενέργεια παραμόρφωσης φθάσει σε μια κρίσιμη τιμή. Αυτή η κρίσιμη ενέργεια δεν είναι σταθερή, αλλά αυξάνει μονοτονικά με την ενεργή κύρια ορθή τάση. Σε θραύση, μια διατμητική αστοχία λαμβάνει χώρα σε ένα επίπεδο παράλληλο προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$  και έτσι η ενεργητική ορθή τάση μπορεί να είναι ανεξάρτητη από την  $\sigma_2$ . Από την άλλη πλευρά, η διαρροή δεν συμβαίνει σε τέτοια μακροσκοπικά επίπεδα ολίσθησης σε καθορισμένη κατεύθυνση, έτσι η μέση τάση  $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  λαμβάνεται ως η ενεργητική μέση ορθή τάση. Έτσι, η διαφορά μεταξύ θραύσεως και διαρροής μπορεί εύκολα να ερμηνευτεί.

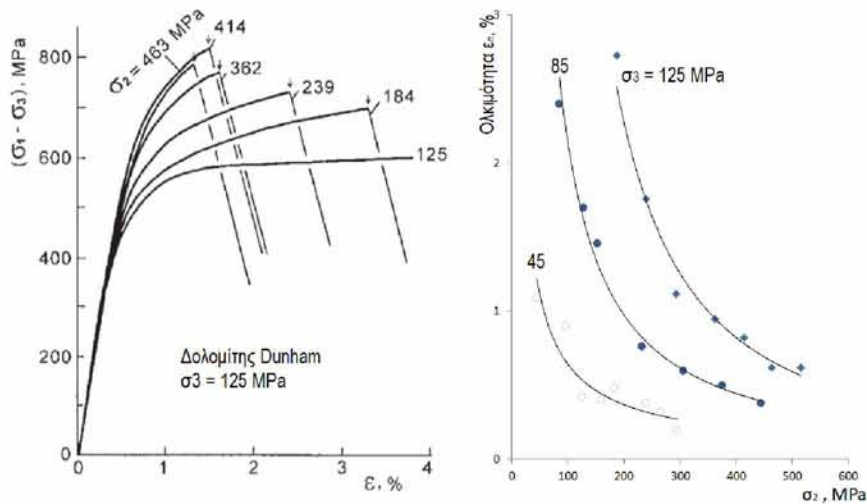
### 3.3.8 Ολκιμότητα, πρότυπα θραύσης και διαστολή

#### *Ολκιμότητα και πτώση τάσης*

Το σχήμα 3.53 δείχνει τις καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης του δολομίτη Dunham και την εξάρτηση, της ολκιμότητας του βράχου, από την πίεση στη συμβατική τριαξονική δοκιμή ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ). Η ολκιμότητα ( $\epsilon_n$ ), μετρούμενη με μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση πριν από τη θραύση, αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Το Σχήμα 3.54 δείχνει καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης σε διάφορες τιμές της ενδιάμεσης κύριας τάσης ( $\sigma_2$ ) και της ελάχιστης κύριας τάσης ( $\sigma_3$ ) των 125 MPa για τον δολομίτη Dunham (αριστερό σχήμα) και της ολκιμότητας για διάφορες τιμές της  $\sigma_3$  ως συναρτήσεις της  $\sigma_2$  (δεξί σχήμα). Η ολκιμότητα αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_3$ , αλλά μειώνεται αισθητά με την αύξηση της  $\sigma_2$ .



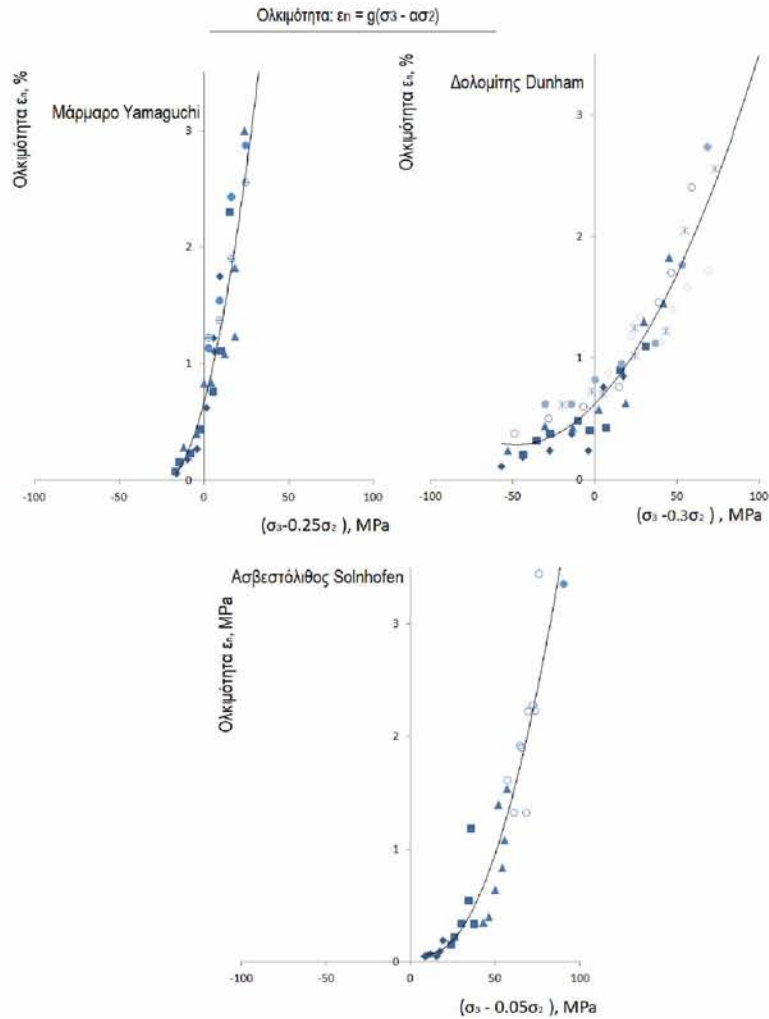
**Σχήμα 3.53.** Οι καμπύλες τάσεων-ανηγμένης παραμόρφωσης του δολομίτη Dunham (αριστερά) και η μεταβολή της ολκιμότητας ( $\epsilon_n$ ) συναρτήσει της τάσης  $\sigma_3$  (δεξιά) στην συμβατική τριαξονική δοκιμή ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) (Mogi, 2007).



**Σχήμα 3.54.** Οι καμπύλες τάσεων-ανηγμένης παραμόρφωσης του δολομίτη Dunham για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_2$  ( $\sigma_3 = 125\text{MPa}$ ) και η μεταβολή της ολκιμότητας ( $\epsilon_n$ ) συναρτήσει της τάσης  $\sigma_2$ , για διάφορες τιμές της  $\sigma_3$  στην πραγματική τριαξονική δοκιμή (δεξιά) (Mogi, 2007).

Στο Σχήμα 3.55, δείχνει την γραφική παράσταση της ολκιμότητα ( $\epsilon_n$ ) συναρτήσει της παράστασης ( $\sigma_3 - \sigma_2$ ) σε πραγματική τριαξονική θλίψη για το μάρμαρο Yamaguchi, τον δολομίτη Dunham και τον ασβεστόλιθο Solnhofen, όπου τα διαφορετικά σύμβολα αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$  σε κάθε γραφική παράσταση. Αυτός ο αριθμός υποδηλώνει ότι η σχέση μεταξύ  $\epsilon_n$  και ( $\sigma_3 - \sigma_2$ ) μπορεί να εκφραστεί περίπου με μία μόνο μονοτονική καμπύλη για διαφορετικές τιμές  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ .





**Σχήμα 3.55.** Η ολκιμότητα ( $\epsilon_n$ ) σχεδιάζεται συναρτήσει της παράστασης  $(\sigma_3 - \alpha\sigma_2)$ , για το μάρμαρο Yamaguchi ( $\alpha=0.25$ ), τον δολομίτη Dunham ( $\alpha=0.3$ ) και τον ασβεστόλιθο Solnhofen ( $\alpha=0.05$ ). Τα διαφορετικά σύμβολα αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$  (Mogi, 2007).

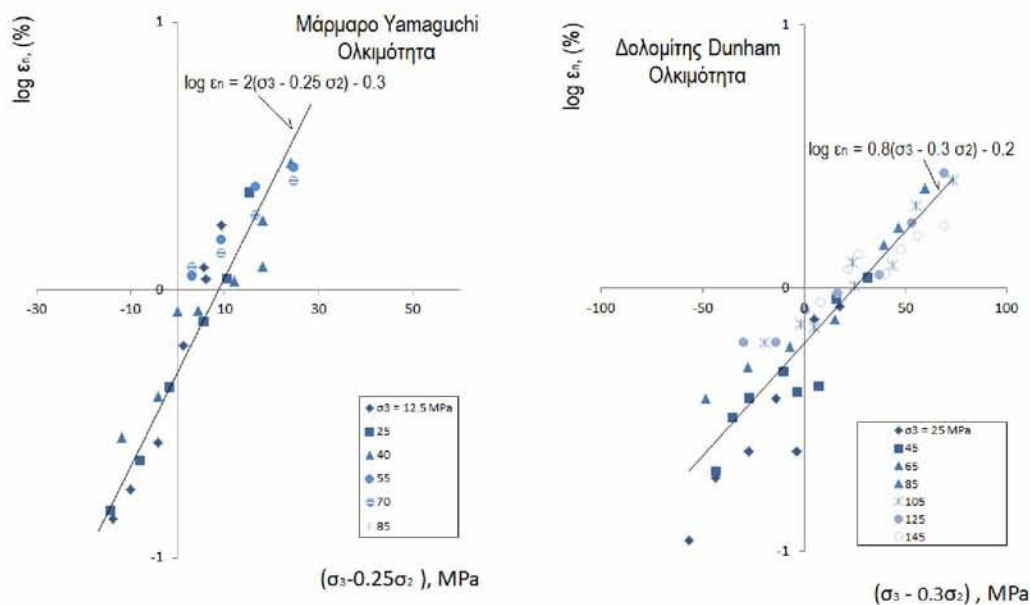
Στο Σχήμα 3.56, ο λογάριθμος της ολκιμότητας ( $\log \epsilon_n$ ) του μαρμάρου Yamaguchi και του δολομίτη Dunham σχεδιάζεται ως προς την ποσότητα  $(\sigma_3 - \alpha\sigma_2)$ . Παρόλο που οι κύκλοι κάπως διασκορπίζονται, μπορούν να τοποθετηθούν αρκετά καλά με μία μόνο γραμμή. Επομένως, μπορεί να εφαρμοστεί ο ακόλουθος εμπειρικός τύπος:

$$\text{Log} \epsilon_n = K_1(\sigma_3 - \alpha\sigma_2) + K_2 \quad , \quad (3.21)$$

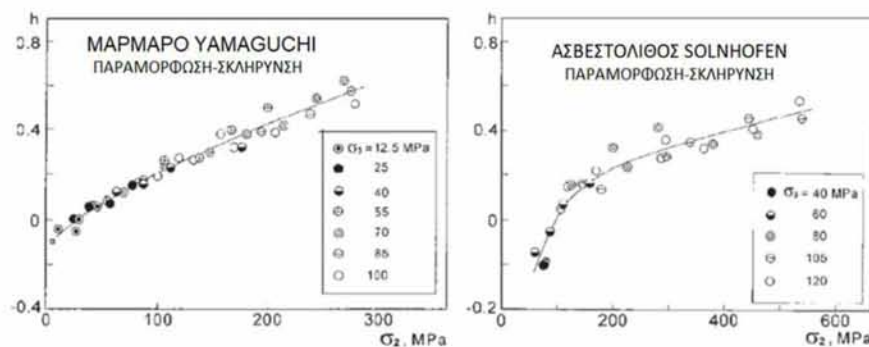
όπου  $\alpha$ ,  $K_1$  και  $K_2$  είναι σταθερές. Η τιμή του  $\alpha$  είναι 0,25 για το μάρμαρο Yamaguchi και 0,3 για τον δολομίτη Dunham και 0,05 για τον ασβεστόλιθο Solnhofen. Έτσι, συμπεραίνεται ότι οι επιδράσεις των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  στην ολκιμότητα είναι αντίθετες και ότι το μέγεθος της επίδρασης  $\sigma_2$  στην ολκιμότητα είναι σημαντικά διαφορετικό για διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων.

Ο συντελεστής ανηγμένης παραμόρφωσης - σκλήρυνσης ( $h$ ) (coefficient of strain-hardening), ορίζεται ως η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης-

παραμόρφωσης στην περιοχή μετά την διαρροή, και παρουσιάζει ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό. Στο Σχήμα 3.57, ο συντελεστής ( $h$ ) του μαρμάρου Yamaguchi και του ασβεστόλιθου Solnhofen απεικονίζεται γραφικά κατά  $\sigma_2$ . Τα διαφορετικά σύμβολα δείχνουν διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$ . Όλοι οι κύκλοι μπορούν να μοντελοποιηθούν με μία μόνο καμπύλη. Δηλαδή, ο συντελεστής ( $h$ ) αυξάνεται μονοτονικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ , αλλά είναι σχεδόν ανεξάρτητος από την  $\sigma_3$ . Το γεγονός ότι το σχήμα της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης πριν από την θραύση, που καθορίζεται κυρίως από τον συντελεστή ( $h$ ), επηρεάζεται σημαντικά από την ενδιάμεση κύρια τάση  $\sigma_2$  και ανεξάρτητα από την ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_3$ , αποτελεί μία σημαντική παρατήρηση (Mogi, 1972 a).

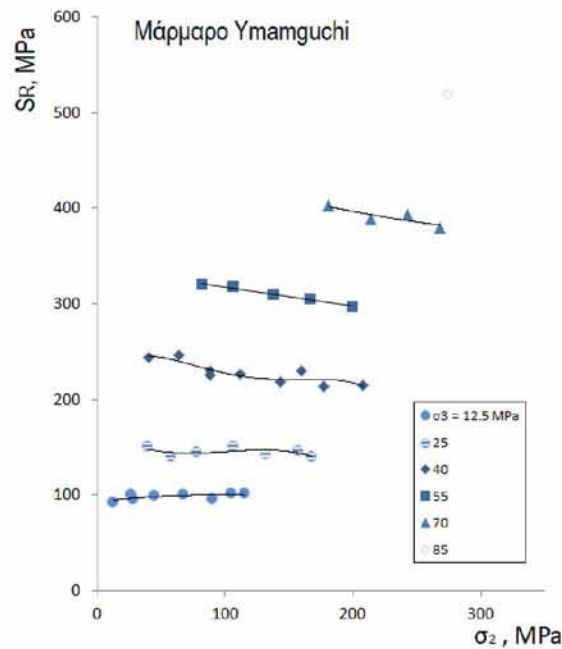


**Σχήμα 3.56.** Το  $\log \epsilon_n$  του μαρμάρου Yamaguchi και του δολομίτη Dunham σχεδιάζεται έναντι της παράστασης  $(\sigma_3 - \alpha\sigma_2)$ , και μοντελοποιείται με γραμμική συνάρτηση (Mogi, 2007).



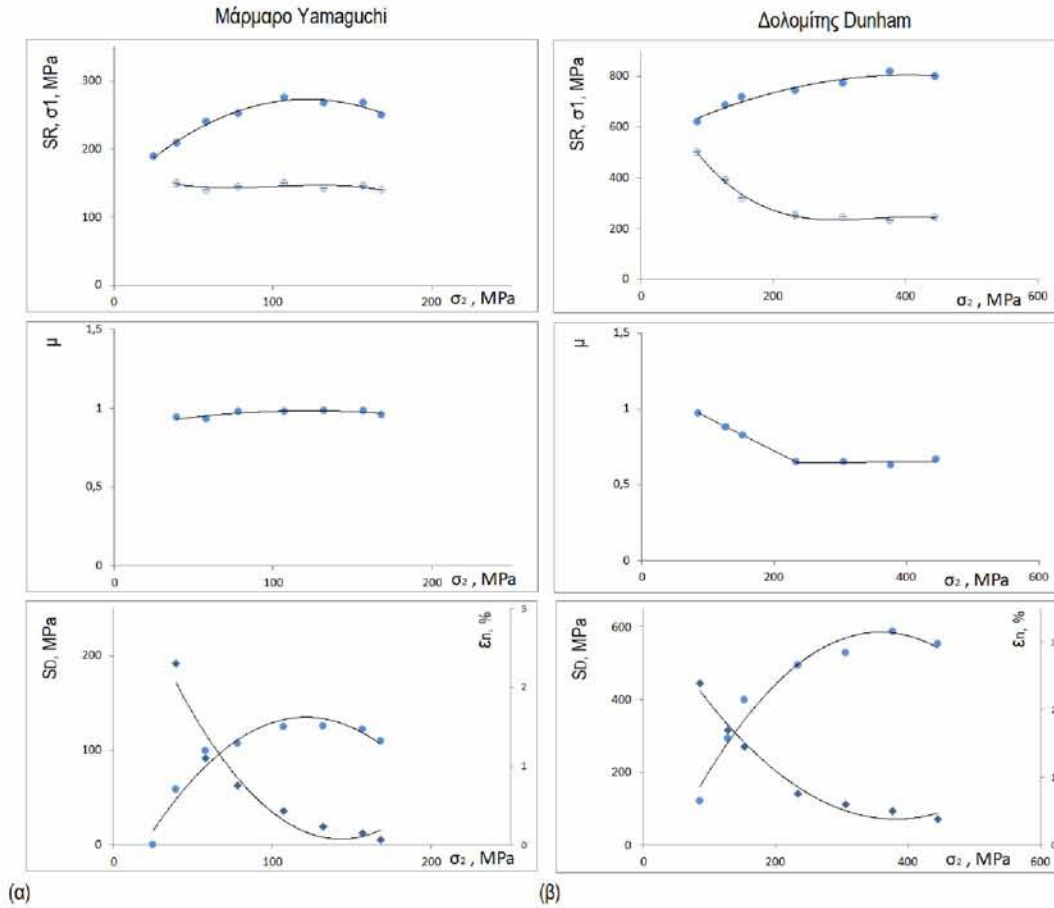
**Σχήμα 3.57.** Ο συντελεστής ανηγμένης παραμόρφωσης - σκλήρυνσης ( $h$ ), του μαρμάρου Yamaguchi και του ασβεστόλιθου Solnhofen συναρτίζεται της μεσαίας κύριας τάσης  $\sigma_2$ . Ο  $h$  αυξάνεται μονοτονικά με την αύξηση της  $\sigma_2$  και είναι ανεξάρτητος της  $\sigma_3$  (Mogi, 2007).

Το Σχήμα 3.58 δείχνει την παραμένουσα τάση (residual stress) ( $S_R$ ) κατά τη θραύση του μαρμάρου Yamaguchi συναρτήσει της  $\sigma_2$ , για διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$ . Η  $S_R$  αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_3$  αλλά δεν αλλάζει σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ .



**Σχήμα 3.58.** Παραμένουσα τάση ( $S_R = \mu\sigma_n$ ) κατά τη θραύση του μαρμάρου Yamaguchi για διαφορετικές τιμές  $\sigma_3$  ως συνάρτηση του  $\sigma_2$ .  $\mu$ : συντελεστής τριβής ολίσθησης. (Mogi, 2007)

Στο Σχήμα 3.59 παρουσιάζονται τα διαγράμματα: της τάσης θραύσης ( $\sigma_1$ ), της παραμένουσας τάσης ( $S_R = \mu\sigma_n$ ), του συντελεστή τριβής ( $\mu$ ), της πτώση τάσης (stress drop), ( $S_D = \sigma_1 - \mu\sigma_n$ ) και της ολκιμότητας ( $\epsilon_n$ ) του μαρμάρου Yamaguchi και του δολομίτη Dunham συναρτήσει της ενδιάμεσης κύριας τάσης ( $\sigma_2$ ) υπό σταθερές τιμές της  $\sigma_3$ . Η μηχανική συμπεριφορά που φαίνεται σε αυτό το σχήμα είναι σχεδόν παρόμοια σε αυτούς τους δύο τύπους πετρωμάτων



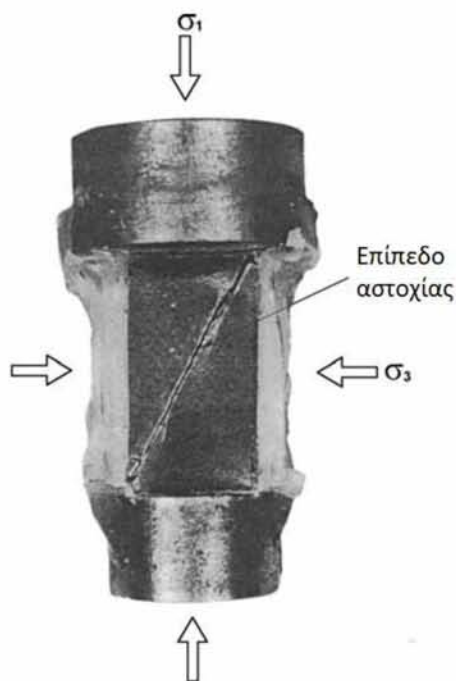
Σχήμα 3.59. Η τάση θραύσης ( $\sigma_1$ ), η παραμένουσα τάση ( $S_R = \mu\sigma_n$ ), ο συντελεστής τριβής ( $\mu$ ), η πτώση τάσης ( $S_D = \sigma_1 - \mu\sigma_n$ ) και η ολκιμότητα ( $\epsilon_n$ ) ως συναρτήσεις της  $\sigma_2$ , α) μάρμαρο Yamaguchi,  $\sigma_3 = 25$  MPa, β) δολομίτης Dunham,  $\sigma_3 = 85$  MPa (Mogi, 2007).

### Σχέδιο (ή μορφή) θραύσης

Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα των “πραγματικών” δοκιμών τριαξονικής θλίψης είναι ότι η ψαθυρή θραύση ισότροπων και ομοιογενών πετρωμάτων εμφανίζεται με διατμητική αστοχία και η επιφάνεια θραύσης είναι ένα σχεδόν ένα επίπεδο το οποίο είναι παράλληλο με την διεύθυνση της  $\sigma_2$ . Στο σχήμα 3.60, παρουσιάζεται ένα δοκίμιο βράχου, στο οποίο ασκείται φόρτιση από δύο χαλύβδινα έμβολα, το οποίο είναι καλυμμένο με μεμβράνη από καουτσούκ σιλικόνης.

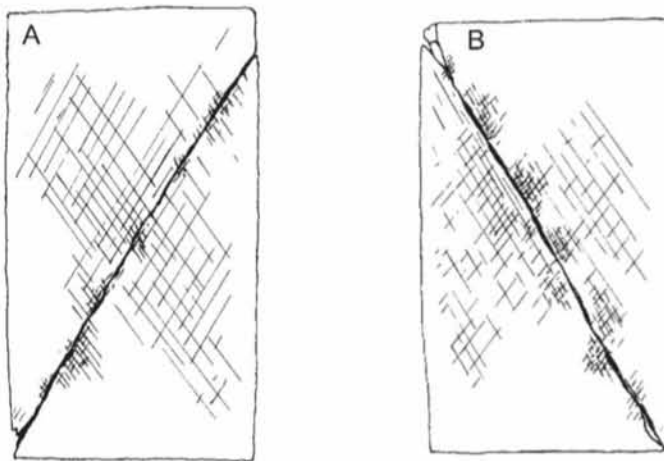
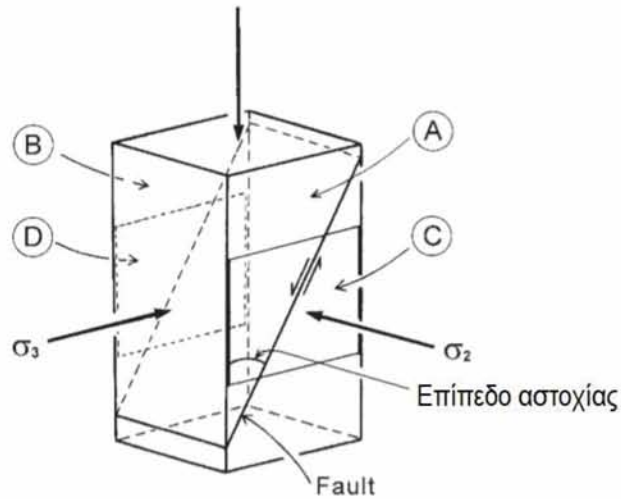
Το Σχήμα 3.61 (πάνω σχήμα) δείχνει σχηματικά ένα δοκίμιο βράχου, στο οποίο αναπτύχθηκε διατμητική ρηγμάτωση (shear faulting) μετά την δοκιμή. Το επίπεδο αστοχίας είναι παράλληλο προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$  και η γωνία μεταξύ του επιπέδου αστοχίας και της διεύθυνσης εφαρμογής της μέγιστης κύριας τάσης ( $\sigma_1$ ) υποδηλώνεται από τη γωνία θραύσης ( $\theta$ ), η οποία εξαρτάται από τις τιμές της  $\sigma_2$ . Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα δύο επίπεδα (A και B), τα οποία είναι κάθετα στην διεύθυνση της  $\sigma_2$  και βρίσκονται στις δύο πλευρές του ορθογώνιου

παραλληλεπίπεδου δοκιμίου του πετρώματος, και οι μορφές των θραύσεων φαίνονται σε μια μεγεθυμένη κλίμακα στο κεντρικό τμήμα αμφοτέρων των πλευρών C και D.



**Σχήμα 3.60.** Ένα βραχώδες δείγμα που δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας την συσκευή “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης (Mogi, 2007).

Το Σχήμα 3.61 (κάτω εικόνα) δείχνει δύο παραδείγματα από την σχηματική απεικόνιση τυπικών μορφών θραύσης του δολομίτη Dunham. Τα κύρια ρήγματα είναι αρκετά γραμμικά και πολλές από τις λεπτές ρωγμές είναι παράλληλες με το κύριο ρήγμα ενώ άλλες λεπτές ρωγμές είναι συζευγμένες με αυτό. Η πυκνότητα των μικρορωγμών αλλάζει τοπικά και αντιστοιχεί στην ανομοιομορφία του κύριου ρήγματος. Αυτό το σχέδιο υποδεικνύει την τοπική κατανομή της τάσης κατά μήκος του ρήγματος. Όπως φαίνεται στο αριστερό σχήμα, το κύριο ρήγμα μερικές φορές δεν περνάει κοντά στη γωνία του βραχώδους δείγματος και επίσης η διεύθυνση του κύριου ρήγματος συμπίπτει αρκετά με τις διευθύνσεις των μικρορωγμών. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι δεν υπάρχει σημαντική επίδραση άκρων (end effect) και επομένως η γωνία θραύσης ( $\theta$ ), που προσδιορίζεται από την διεύθυνση του κύριου ρήγματος, είναι αξιόπιστη.

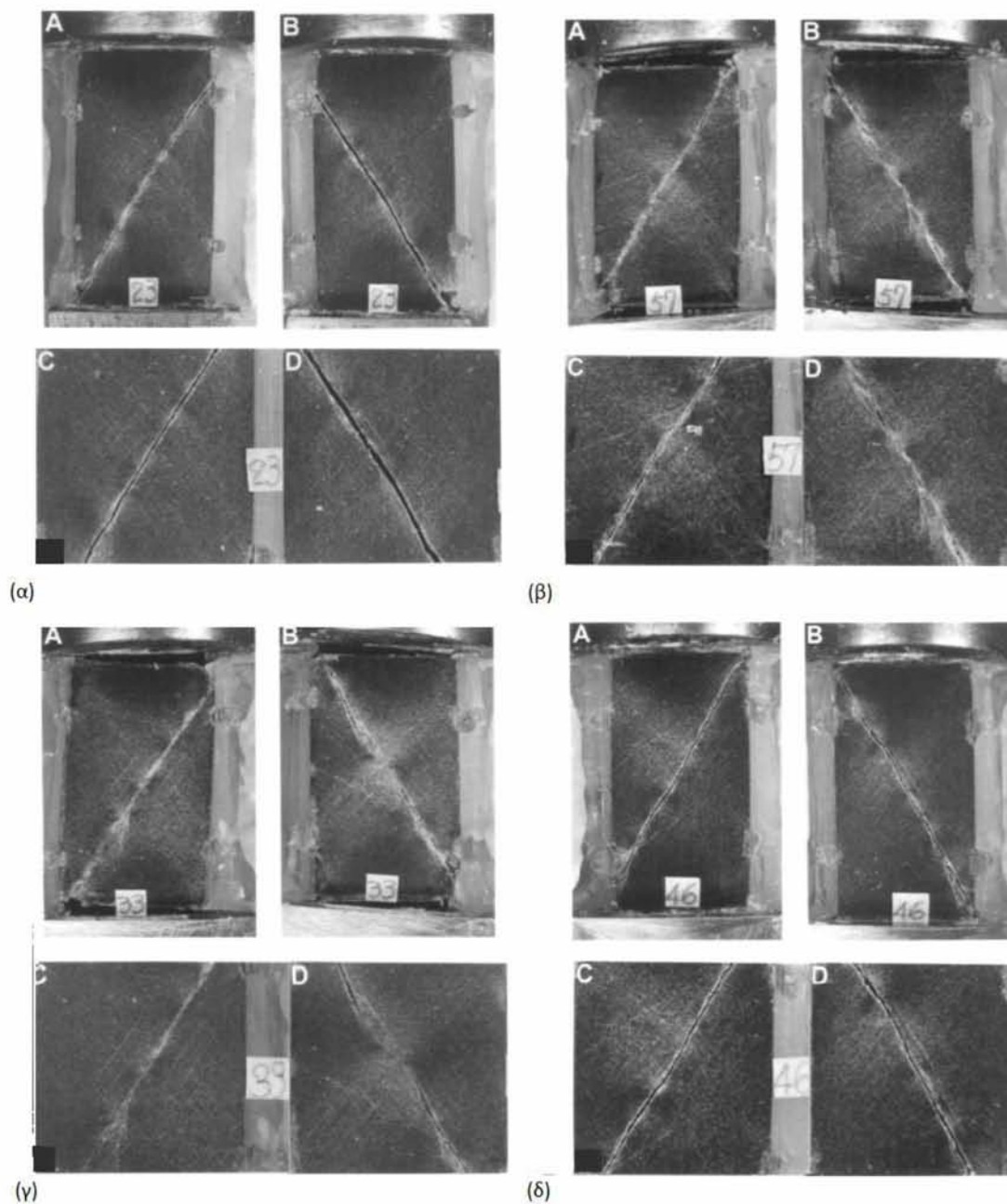


**Σχήμα 3.61.** Οι εικόνες πάνω και κάτω δείχνουν σχηματικά το δοκίμιο πετρώματος στο οποίο αναπτύχθηκε διατμητική ρηγματώση κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Τα κάτω σχήματα δείχνουν δύο παραδείγματα από την σχηματική απεικόνιση τυπικών μορφών θραύσης του δολομίτη Dunham (Mogi, 2007).

#### Δολομίτης Dunham

Ο δολομίτης Dunham είναι ένα ιδανικά ομοιογενές, ισότροπο και λεπτόκοκκο ανθρακικό πέτρωμα. Το χρώμα του είναι βαθύ γκρίζο ή μαύρο και μετά την εκτέλεση των πεοραματικών δοκιμών μπορεί να παρατηρηθεί με σαφήνεια, η κύρια ρηγματώση, καθώς και οι λεπτές μικρορωγμές. Το Σχήμα 3.62 (α) δείχνει την περίπτωση ενός δοκιμίου από το συγκεκριμένο πέτρωμα. Τα ίχνη των κύριων ρηγματώσεων στα επίπεδα A και B είναι κεκλιμένες ευθείες γραμμές οι οποίες είναι εντελώς συμμετρικές. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι το ρήγμα (fault) είναι ένα σχεδόν επίπεδο μέτωπο παράλληλο προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ . Διακρίνονται καθαρά, τα συζευγμένα γραμμικά μοτίβα των μικρορωγμών και οι διευθύνσεις κάποιων από αυτές συμπίπτουν με την διεύθυνση του κύριου ρήγματος. Από την διεύθυνση του

κυρίου ρήγματος υπολογίζεται, με ακρίβεια, η γωνία θραύσης μεταξύ του επιπέδου του ρήγματος και του άξονα  $\sigma_1$ .



**Σχήμα 3.62.** Μορφές θραύσης του δολομίτη Dunham (α) - (δ). (α)  $\sigma_1 = 952\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 455\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 145\text{MPa}$ , (β)  $\sigma_1 = 1002\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 410\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 145\text{MPa}$ , (γ)  $\sigma_1 = 1015\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 392\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 145\text{MPa}$ , (δ)  $\sigma_1 = 922\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 349\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 145\text{MPa}$  (Mogi, 2007).

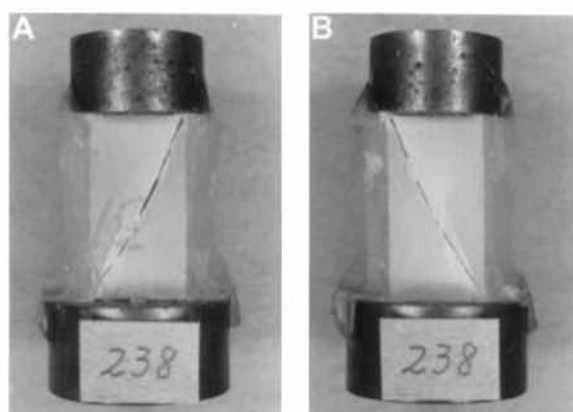
Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι μορφές θραύσης είναι πιο σύνθετες. Στην περίπτωση του Σχήματος 3.60 (β), το ίχνος της κύριας ρηγματώσης στο επίπεδο A είναι απλό, αλλά μετατοπίζεται ελαφρώς στην κεντρική περιοχή. Από την άλλη

πλευρά, η κύρια ρηγμάτωση στο επίπεδο B είναι σύνθετη και περιλαμβάνει αρκετές μετρίου μήκους ρωγμές. Επίσης στην περίπτωση του Σχήματος 3.60 (γ), το ίχνος της κύριας ρηγμάτωσης στο επίπεδο A είναι μία ευθεία γραμμή, αλλά το ίχνος της κύριας ρηγμάτωσης στο επίπεδο B μετατοπίζεται σημαντικά στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου. Αυτά οι σύνθετες μορφές θραύσης μπορούν να αποδοθούν στην επίδραση μιας ατελούς συζυγούς ρηγμάτωσης. Η κατανομή των μικρορωγμών είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, διότι η περιοχή μεγάλης πυκνότητας των μικρορωγμών πιθανόν αντιστοιχεί στην περιοχή που ασκείται μεγάλη τάση.

Αν και τα ίχνη του ρήγματος δεν είναι πάντοτε εντελώς γραμμικά όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από τα πολλά πειραματικά αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι το επίπεδο της κύριας ρηγμάτωσης του δολομίτη Dunham υπό πραγματική τριαξονική θλίψη είναι ουσιαστικά μία σχεδόν επίπεδη επιφάνεια, παράλληλη προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ .

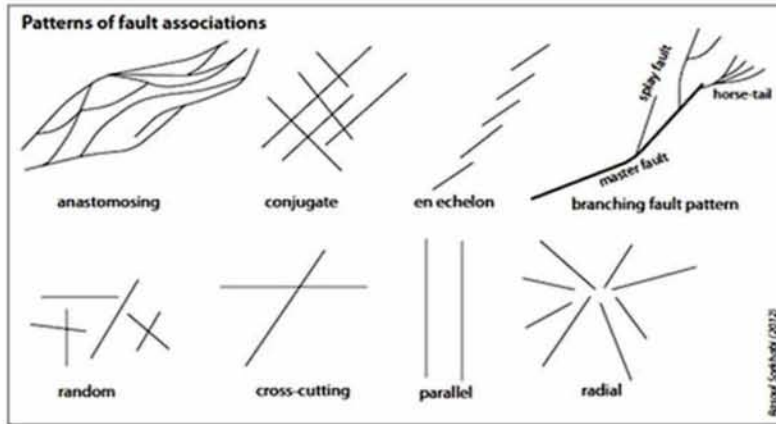
#### Ασβεστόλιθος Solnhofen

Ο ασβεστόλιθος Solnhofen είναι επίσης ένα ιδανικά ομογενές ισότροπο και πολύ λεπτόκοκκο ανθρακικό πέτρωμα λευκού χρώματος (σαν ελεφαντόδοντο). Στο Σχήμα 3.63 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές μορφές θραύσης σε πραγματική τριαξονική θλίψη. Τα κύρια ίχνη του ρήγματος, στα επίπεδα A και B, είναι κεκλιμένες ευθείες γραμμές που είναι εντελώς συμμετρικές. Σε αυτό το πέτρωμα, ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική μορφή μικρορωγμών, όπως στην περίπτωση του δολομίτη Dunham. Αυτό στη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος λόγω της εξαιρετικά λεπτόκοκκης δομής του. Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι το ίχνος του ρήγματος δεν είναι μια απλή ευθεία γραμμή, αλλά ένας ‘en echelon’ σχηματισμός (απεικονίζεται στο Σχήμα 3.64). Αυτό το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι το επίπεδο ρηγμάτωσης δεν είναι μία τέλεια επίπεδη επιφάνεια, αλλά παρουσιάζει τραχύτητα μικρής κλίμακας.



**Σχήμα 3.63.** Μορφές θραύσης του ασβεστόλιθου Solnhofen, για  $\sigma_1 = 665\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 298\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 80\text{MPa}$  (Mogi, 2007).



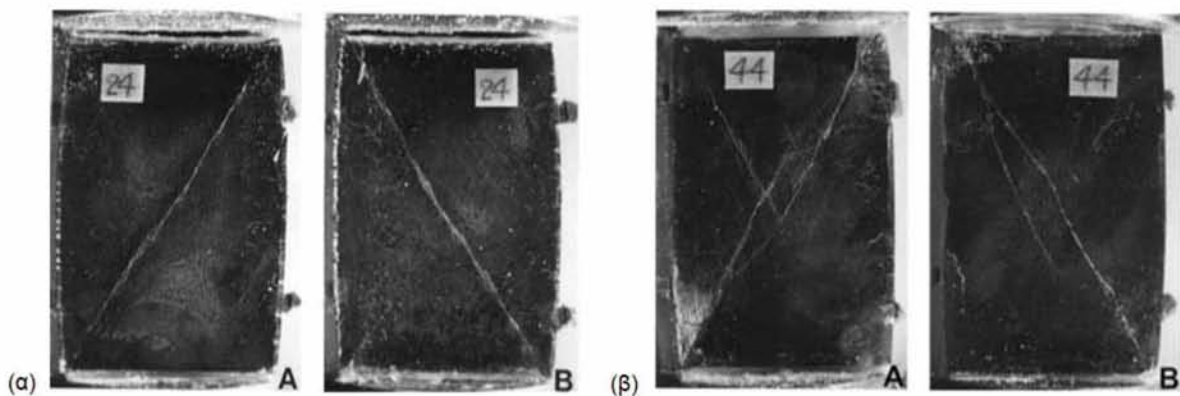


Σχήμα 3.64. Σχηματική απεικόνιση των μορφών αστοχίας (Rasoul Sorkhabi, 2005).

Συνολικά, τα αποτελέσματα των πειραμάτων, έδειξαν ότι το επίπεδο αστοχίας αποτελεί μια σχεδόν επίπεδη επιφάνεια παράλληλη προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ , όπως και στην περίπτωση του δολομίτη Dunham.

#### Μάρμαρο Yamaguchi

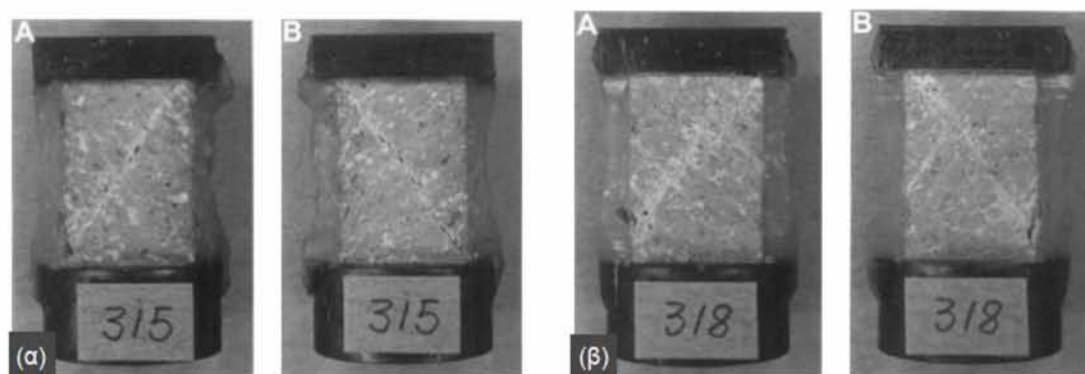
Το μάρμαρο Yamaguchi είναι ένα ομογενές, ισότροπο και λεπτόκοκκο λευκό μάρμαρο. Το Σχήμα 3.65 (α) - (β) δείχνει τις προκύπτουσες μορφές θραύσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα κύρια ίχνη στα επίπεδα A και B, είναι κεκλιμένα και συμμετρικά. Αν και το ίχνος ρηγμάτωσης, μερικές φορές, είναι μια ελαφρώς καμπύλη γραμμή ή διακλάδωση, στις περισσότερες των περιπτώσεων το επίπεδο της κύριας ρηγμάτωσης του μαρμάρου Yamaguchi υπό πραγματική τριαξονική θλίψη είναι ουσιαστικά μια σχεδόν επίπεδη επιφάνεια παράλληλη προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ .



Σχήμα 3.65. Μορφές θραύσης μαρμάρου Yamaguchi (α)  $\sigma_1 = 396\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 200\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 55\text{MPa}$ ; (β)  $\sigma_1 = 177\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 28\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 12.5\text{MPa}$  (Mogi, 2007).

### Τραχειίτης Mizuho

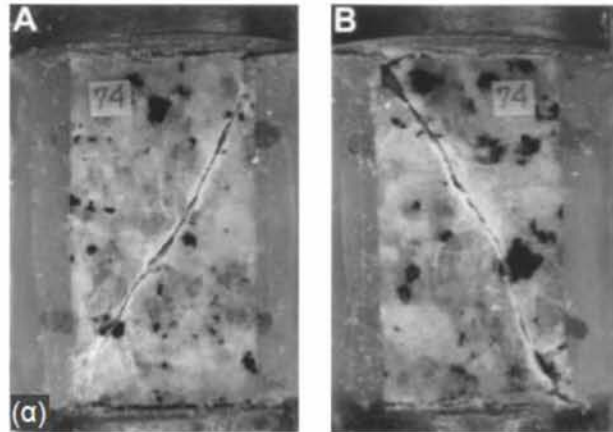
Ο τραχειίτης Mizuho είναι ένα μακροσκοπικά ομογενές, ισότροπο και μεσόκκοκο ηφαιστειακό πέτρωμα. Το σχήμα 3.66 δείχνει δύο περιπτώσεις από δοκίμια που έχουν αστογήσει υπό συνθήκες “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα ίχνη των κύριων ρηγματώσεων, στα επίπεδα A και B, είναι κεκλιμένες, περίπου ευθείες και συμμετρικές γραμμές. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ρηγμάτωση είναι μια, κατά προσέγγιση, επίπεδη επιφάνεια παράλληλη προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ . Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να παρατηρηθεί ένας μία συζυγής μορφή θραύσης (π.χ., Σχήμα 3.66 (β)). Έτσι, το επίπεδο ρηγμάτωσης μπορεί να μην είναι ένα απλό επίπεδο μέτωπο και να έχει πολλές μικρές αστάθειες οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με τα όρια κόκκων και άλλες μηχανικές ετερογένειες. Ωστόσο, σε αυτό το βράχο επίσης, ο Mogi είχε καταλήξει στο συμπέρασμα ότι το επίπεδο ρηγμάτωσης είναι ουσιαστικά ένα κατά προσέγγιση επίπεδο μέτωπο παράλληλο προς την κατεύθυνση  $\sigma_2$ .



**Σχήμα 3.66.** Μορφές θραύσης του τραχειίτη Mizuho. (α)  $\sigma_1=403\text{MPa}$ ,  $\sigma_2=212\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=60\text{MPa}$ , (β)  $\sigma_1=401\text{MPa}$ ,  $\sigma_2=186\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=60\text{MPa}$  (Mogi, 2007).

### Γρανίτης Inada

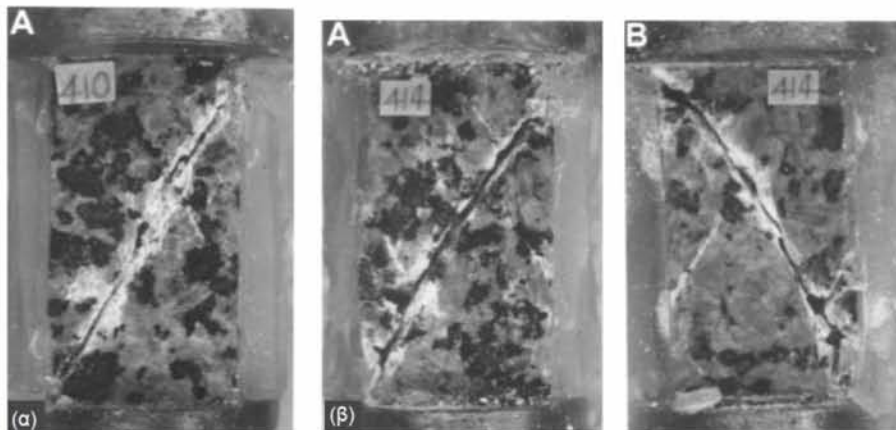
Ο γρανίτης Inada είναι ένα μακροσκοπικά ομογενές, ισότροπο, χονδρόκοκκο και πυρίμαχο σκληρό πέτρωμα. Στο σχήμα 3.67 φαίνεται ένα παράδειγμα δοκιμίου που αστόχησε σε συνθήκες “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης. Σε κάποιες περιπτώσεις η μορφή της θραύσης είναι πολύπλοκη και η κύρια ρηγμάτωση δεν είναι εντελώς γραμμική. Ωστόσο, στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα ίχνη της κύριας ρηγμάτωσης, στα επίπεδα A και B είναι κεκλιμένες, κατά προσέγγιση, συμμετρικές ευθείες. Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το επίπεδο της κύριας ρηγμάτωσης του γρανίτη Inada, υπό πραγματική τριαξονική θλίψη, είναι ουσιαστικά παράλληλο προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ .



*Σχήμα 3.67. Μορφές θραύσης του γρανίτη Inada.  $\sigma_1=1342\text{MPa}$ ,  $\sigma_2=309\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=150\text{MPa}$  (Mogi, 2007).*

#### Μονζονίτης Orikabe

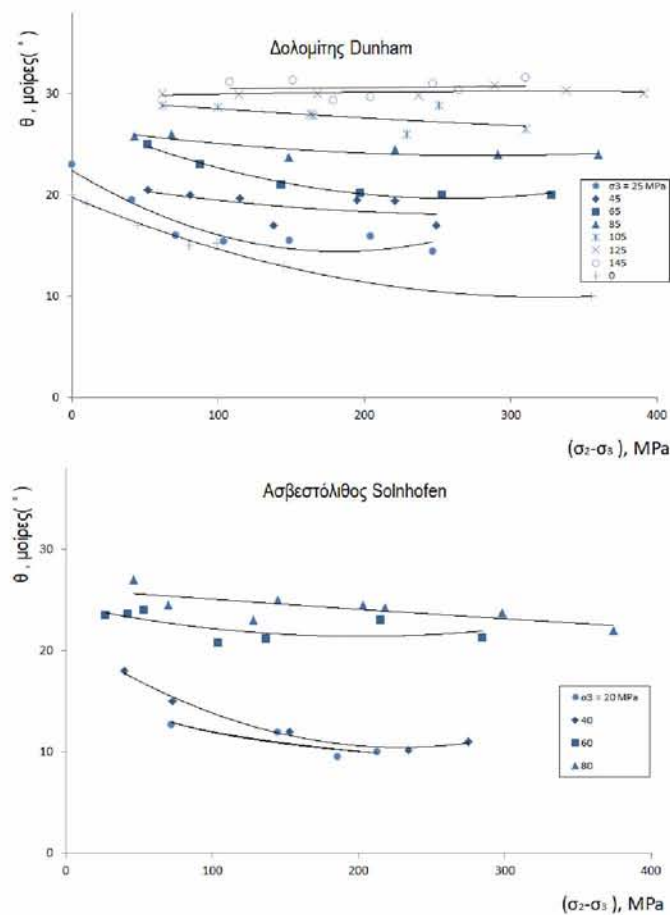
Ο μονζονίτης Orikabe είναι επίσης ένα μακροσκοπικά ομοιογενές, ισότροπο και χονδρόκοκκο πυρίμαχο σκληρό πέτρωμα. Τα σχήματα 3.68 (α) (β) επεικονίζουν δύο δοκίμια που έχουν αστοχήσει υπό συνθήκες “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης. Οι μορφές θραύσης αυτού του πετρώματος περιλαμβάνουν ένα απλό ίχνος της κύριας ρηγμάτωσης και πολύπλοκες μικρές ρωγμές. Το ίχνος ρηγμάτωσης του ενός δοκιμίου (No.410) είναι αρκετά γραμμικό, αλλά για το άλλο δοκίμιο (No.414) είναι ελαφρώς καμπύλο. Το κύριο χαρακτηριστικό της μορφής θραύσης αυτού του πετρώματος είναι ουσιαστικά παρόμοιο με εκείνο του γρανίτη Inada και των άλλων πετρωμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω.



*Σχήμα 3.68. Μορφές θραύσης του μονζονίτη Orikabe. (α) No.410  $\sigma_1=1396\text{MPa}$ ,  $\sigma_2=387\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=230\text{MPa}$ , (β) No.414  $\sigma_1=1353\text{MPa}$ ,  $\sigma_2=499\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=230\text{MPa}$  (Mogi, 2007).*

## Γωνίες θραύσης

Τα πειραματικά αποτελέσματα για τον δολομίτη Dunham και τον ασβεστόλιθο Solnhofen έδειξαν πως η κύρια επιφάνεια αστοχίας είναι σχεδόν επίπεδη και παράλληλη προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ , και συνεπώς, η γωνία θραύσης ( $\theta$ ) μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Το σχήμα 3.69 δείχνει τη γωνία θραύσης ( $\theta$ ) του δολομίτη Dunham και του ασβεστόλιθου Solnhofen, υπό πραγματική τριαξονική θλίψη ως συνάρτηση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ . Τα διαφορετικά σύμβολα αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της  $\sigma_3$ . Η γωνία θραύσης αυξάνεται με την αύξηση της  $\sigma_3$ , αλλά μειώνεται με την αύξηση της  $\sigma_2$ , ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές της  $\sigma_3$ . Αυτό παρατηρείται και στα δύο πετρώματα.



**Σχήμα 3.69.** Γωνία θραύσης ( $\theta$ ) υπό πραγματική τριαξονική θλίψη ως συνάρτηση της διαφορικής τάσης ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ), για διαφορετικές τιμές  $\sigma_3$ . Πάνω σχήμα: δολομίτης Dunham. Κάτω σχήμα: ασβεστόλιθος Solnhofen (Mogi, 2007).

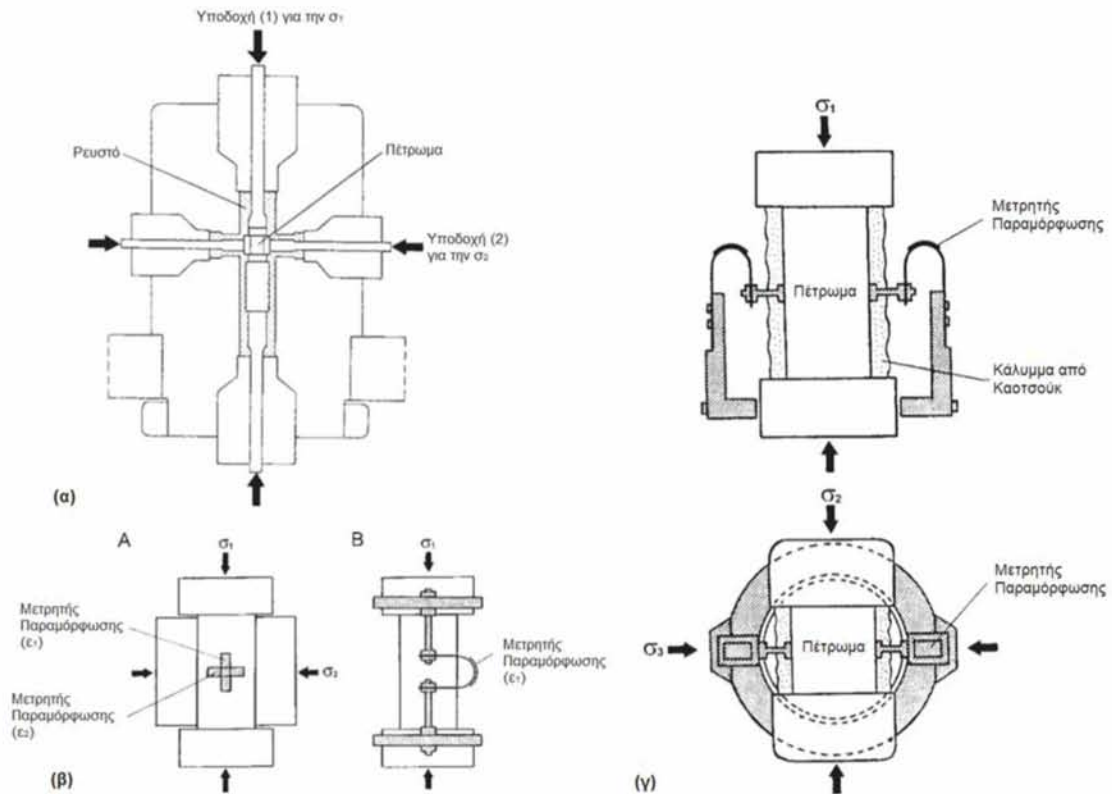
## Διόγκωση

Η ανελαστική παραμόρφωση, η οποία είναι συνδυασμός πλαστικής παραμόρφωσης και μικροθραύσης (microfracturing), αναπτύσσεται πριν από τη θραύση σε πολλά πετρώματα. Οι πλαστικές παραμορφώσεις δεν παράγουν ογκομετρική ανηγμένη παραμόρφωση, αλλά η παραμόρφωση που σχετίζεται με την μικροθραύση προκαλεί αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης (volumetric strain), επειδή η μικροθραύση στα ψαθυρά πετρώματα περιλαμβάνει άνοιγμα ρωγμών (Matsushima, 1960 · Brace, Paulding και Scholz, 1966). Σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης, τα πετρώματα με υψηλό πορώδες ανταποκρίνονται στη θλίψη με ελαστική παραμόρφωση μέχρι μια μεγάλη τιμή πλευρικής πίεσης. Αντίθετα, τα πετρώματα με χαμηλό πορώδες (π.χ. κρυσταλλικά πετρώματα), παρουσιάζουν διόγκωση ακόμη και σε πολύ μικρή παραμόρφωση. Η διόγκωση προκαλείται από την απόκλιση των ορθών και διατμητικών τάσεων. Αυτό οδηγεί σε μια θετική διατμητική παραμόρφωση, που συμβαίνει σε μικροσκοπικά τμήματα του δοκιμίου, και συνοδεύεται από τον σχηματισμό μικροθραύσεων. Η ανηγμένη παραμόρφωση επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις δομικές αλλαγές στη βάση των κρυσταλλικών κόκκων. Ο Cook έχει δείξει ότι η διόγκωση δεν είναι επιφανειακό φαινόμενο λόγω της ανώμαλης επιφανειακής παραμόρφωσης, αλλά μια διάχυτη ιδιότητα.

Ο Mogi, 1977 μέτρησε τη διόγκωση σε συνθήκες “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης. Οι μέθοδοι μέτρησης της ανηγμένης παραμόρφωσης στις διευθύνσεις των τριών κύριων τάσεων φαίνονται στο Σχήμα 3.70 (β) (γ). Οι  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  και  $\epsilon_3$  είναι οι ανηγμένες παραμορφώσεις στις διευθύνσεις των αξόνων  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ , αντίστοιχα, που αναπτύσσονται λόγω της αύξησης της αξονικής τάσης ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) κάτω από σταθερές τιμές των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  [ $(\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$  για  $(\sigma_1 - \sigma_3) = 0$ )]. Η ογκομετρική παραμόρφωση λόγω της αύξησης της αξονικής διαφορικής τάσης ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

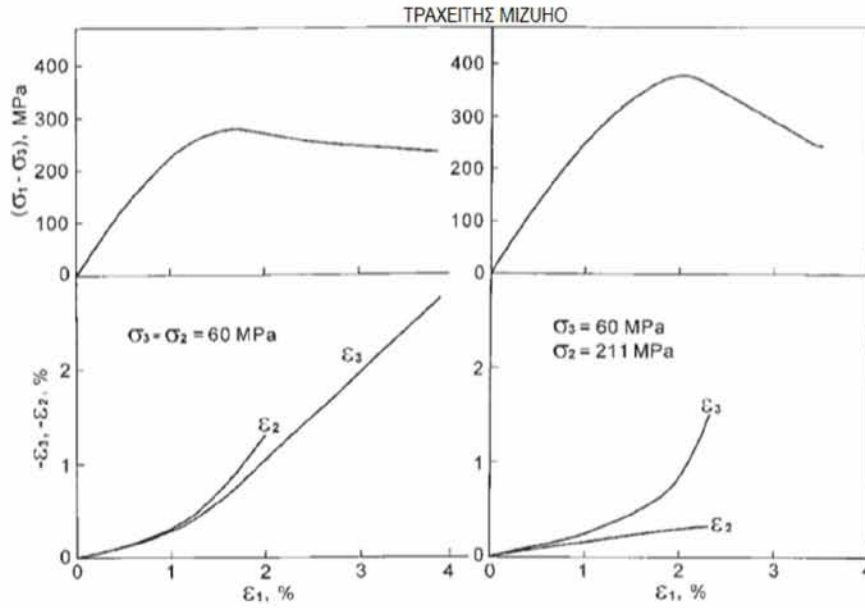
$$\Delta V/V_0 = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3, \quad (3.22)$$

όπου  $\Delta V$  και  $V_0$  είναι η μεταβολή του όγκου και ο αρχικός όγκος του δοκιμίου, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η εξίσωση εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση που η παραμόρφωση συμβαίνει σχεδόν ομοιόμορφα εντός του δοκιμίου.

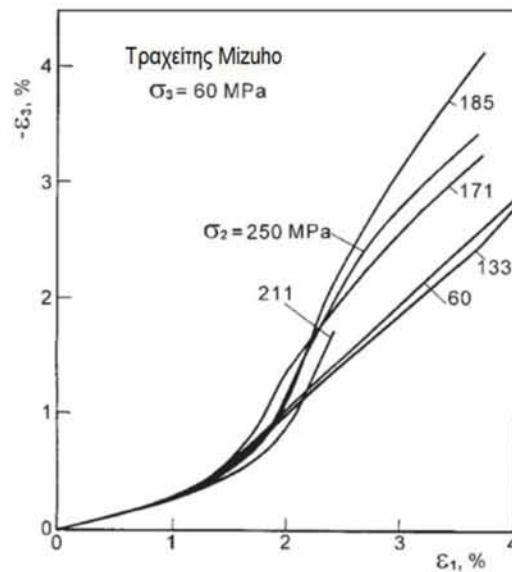


**Σχήμα 3.70.** (α) Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση της κυψέλης της συσκευής “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης και του δείγματος πετρώματος στο εσωτερικό της κυψέλης. (β) Μέθοδοι μετρήσεων αξονικής παραμόρφωσης ( $\epsilon_1$ ) και πλευρικής παραμόρφωσης ( $\epsilon_2$ ). (γ) Μέθοδος μέτρησης της πλευρικής παραμόρφωσης προς την κατεύθυνση της ελάχιστης θλίψης (άξονας  $\sigma_3$ ). Πάνω: μπροστινό τμήμα. κάτω: οριζόντια διατομή (Mogi, 2007).

Παρακάτω παρατίθενται μερικά διαγράμματα για τον τραχείτη Mizuho, σχετικά με την μηχανική του συμπεριφορά. Στο Σχήμα 3.71, οι διαφορικές τάσεις ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) (πάνω γραφήματα) και οι πλευρικές ανηγμένες παραμορφώσεις  $\epsilon_2$  και  $\epsilon_3$  (κάτω γραφήματα) παρουσιάζονται ως συναρτήσεις της αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης  $\epsilon_1$ . Το αριστερό σχήμα δείχνει την περίπτωση της αξονοσυμμετρικής εντατικής κατάστασης ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ). Στην περίπτωση αυτή, οι δύο πλευρικές ανηγμένες παραμορφώσεις ( $\epsilon_2$  και  $\epsilon_3$ ) είναι σχεδόν ίσες. Το δεξί σχήμα δείχνει μια τυπική περίπτωση της “πραγματικής” δοκιμής τριαξονικής θλίψης ( $\sigma_2 = 211\text{MPa}$  και  $\sigma_3 = 60\text{MPa}$ ). Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη αντοχή ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ )  $\max$  είναι υψηλότερη και η μείωση τάσης μετά την διαρροή (yielding) είναι μεγαλύτερη από εκείνη στην περίπτωση της συμβατικής τριαξονικής θλίψης (που φαίνεται στο αριστερό σχήμα), και παρατηρείται ότι η  $\epsilon_3$  είναι πολύ μεγαλύτερη από την  $\epsilon_2$ .

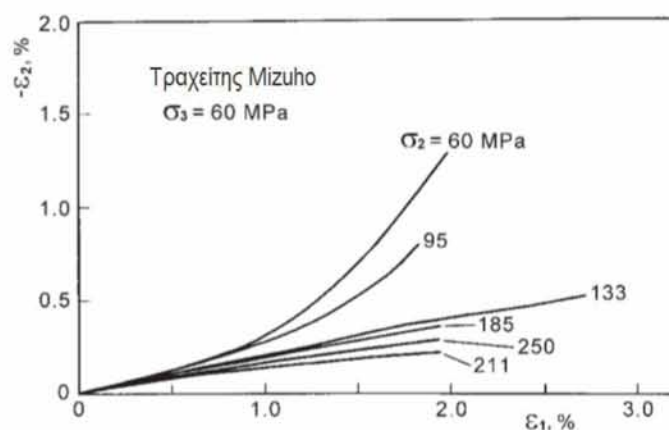


**Σχήμα 3.71.** Η διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) και οι πλευρικές ανηγμένες παραμορφώσεις  $\varepsilon_2$  και  $\varepsilon_3$  ως συναρτήσεις της αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης  $\varepsilon_1$ , για τον τραχείτη Mizuho. Αριστερά: αξονοσυμμετρική εντατική κατάσταση ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ). Δεξιά: η περίπτωση της “πραγματικής” τριαξονικής θλίψης (Mogi, 2007).



**Σχήμα 3.72.** Πλευρική ανηγμένη παραμόρφωση  $\varepsilon_3$ , κατά την διεύθυνση της ελάχιστης τάσης  $\sigma_3$ , συναρτήσει της αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης  $\varepsilon_1$ , για τον τραχείτη Mizuho. Οι αριθμοί για κάθε καμπύλη αντιστοιχούν σε τιμές της  $\sigma_2$  σε MPa (Mogi, 2007).

Το Σχήμα 3.72 δείχνει την  $\varepsilon_3$  συναρτήσει της  $\varepsilon_1$  σε πραγματική τριαξονική εντατική κατάσταση. Σε αυτή την περίπτωση, η  $\sigma_3$  είναι σταθερή (60 MPa), και οι αριθμοί για κάθε καμπύλη αντιστοιχούν σε τιμές της  $\sigma_2$  σε MPa. Τα γραφήματα είναι γραμμικά στο αρχικό στάδιο και κοίλα προς τα πάνω στην περιοχή  $\varepsilon_1$  από 1-2%. Σε μεταγενέστερο στάδιο, η  $\varepsilon_3$  φαίνεται να αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ .

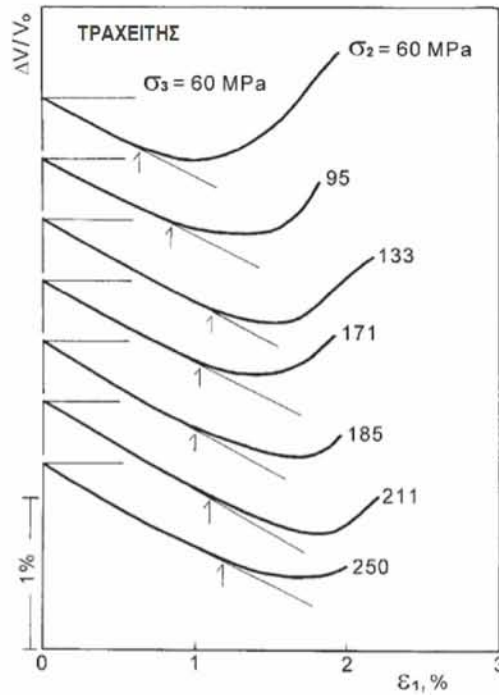


**Σχήμα 3.73.** Πλευρική ανηγμένη παραμόρφωση  $\varepsilon_2$  προς την κατεύθυνση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  εν συναρτήσει της αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης  $\varepsilon_1$  για τον τραχειίτη Mizuho. Οι αριθμοί για κάθε καμπύλη είναι οι τιμές της  $\sigma_2$  σε MPa (Mogi, 2007).

Το Σχήμα 3.73 δείχνει την  $\varepsilon_2$  συναρτήσει της  $\varepsilon_1$ . Οι αριθμοί για κάθε καμπύλη αντιστοιχούν στις τιμές της  $\sigma_2$ , σε MPa. Οι καμπύλες στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω, για χαμηλότερες τιμές της  $\sigma_2$ , αλλά είναι σχεδόν γραμμικές για υψηλότερες τιμές της  $\sigma_2$ . Η ανηγμένη παραμόρφωση  $\varepsilon_2$  μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ .

Στο Σχήμα 3.74, η ογκομετρική παραμόρφωση  $\Delta V/V_0$  παρουσιάζεται ως συνάρτηση της  $\varepsilon_1$  η οποία αυξάνεται μονότονα με την  $\sigma_1$  μέχρι την αστοχία. Οι αριθμοί για κάθε καμπύλη αντιστοιχούν στις τιμές της  $\sigma_2$  σε MPa και η  $\sigma_3 = 60\text{MPa}$ . Η ογκομετρική παραμόρφωση μειώνεται γραμμικά, στο αρχικό στάδιο, και οι καμπύλες στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω, μέχρι κάποια τιμή της  $\varepsilon_1$ . Οι Matsushima (1960) και Brace, Paulding and Scholz (1966), συμπέραναν ότι η παραμόρφωση στο γραμμικό τμήμα αυτών των καμπυλών είναι ελαστική και η απόκλιση από την ελαστική καμπύλη σε μεταγενέστερο στάδιο οφείλεται στη διόγκωση (αύξηση της ανελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης). Σε αυτό το σχήμα, η διόγκωση αρχίζει να συμβαίνει σε υψηλότερη αξονική ανηγμένη παραμόρφωση  $\varepsilon_1$ , για υψηλότερες τιμές της  $\sigma_2$ . Εφόσον η  $\varepsilon_1$  αυξάνει μονότονα με την  $\sigma_1$ , μέχρι το στάδιο της διάρρηξης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι το επίπεδο της αξονικής τάσης ( $\sigma_1$ ), κατά την έναρξη της διόγκωσης, αυξάνεται με την ενδιάμεση κύρια τάση  $\sigma_2$ .





Σχήμα 3.74. Η ογκομετρική παραμόρφωση  $\Delta V/V_0$  συναρτήσει της αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης  $\epsilon_1$  για τον τραχείτη Mizuho. Οι αριθμοί για κάθε καμπύλη αντιστοιχούν στις τιμές της  $\sigma_2$  σε MPa (Mogi, 2007).

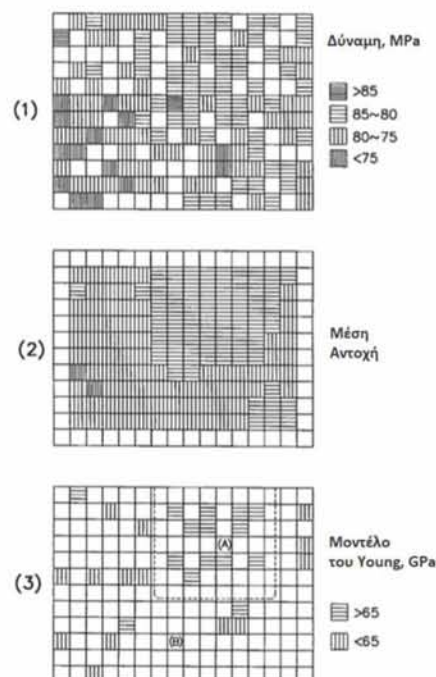
### 3.3.9 Θραύση ανομοιογενούς και ανισότροπου πετρώματος

Στις προηγούμενες ενότητες εξετάστηκαν βραχώδη δοκίμια που είναι ομογενή και ισότροπα, επειδή η διασπορά πειραματικών δεδομένων είναι γενικά μικρή σε αυτά και έτσι είναι κατάλληλα για ακριβείς μελέτες της βασικής μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων. Ωστόσο, πολλά πετρώματα, στο φλοιό της γης, είναι περισσότερο ή λιγότερο ανομοιογενή και ανισότροπα. Η συντριπτική πλειοψηφία των βραχομαζών είναι ανισότροπη λόγω παραγόντων όπως η στρώση, οι ακανόνιστες επιτόπιες αστοχίες, οι ρωγμές, τα κενά και οι ασυνέχειες. Εν τω μεταξύ, δεδομένης της συχνά ασύμμετρης κατανομής των κενών, του μεγέθους των κόκκων ή της διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης σε διαφορετικές περιοχές της βραχομαζας, συχνά αυτά τα υλικά θεωρούνται ανομοιογενή.

#### Ανομοιογενές πέτρωμα

Ο Mogi (1959) σε ένα πρώιμο πείραμα, εξέτασε προσεκτικά την ανομοιογένεια ενός δείγματος πετρώματος, όπου χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα/μπλοκ (block) από μάρμαρο με διαστάσεις 45cm x 35cm x 4cm, για να μελετηθεί η επίδραση του ρυθμού της τάσης στην αντοχή θραύσης. Σε αυτή την περίπτωση, ήταν σημαντικό να ελαχιστοποιηθεί η διασπορά δεδομένων αντοχής.

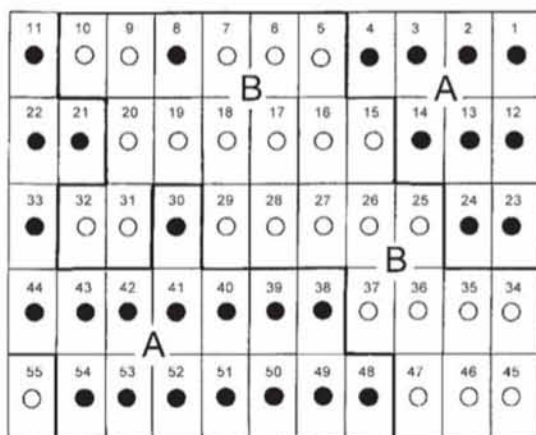
Για το σκοπό αυτό, λήφθηκαν 192 δείγματα από το block μαρμάρου και αριθμήθηκαν από 1 έως 192 για να δείξουν την αρχική χωρική τους θέση. Η εικόνα (1) στο Σχήμα 3.75 δείχνει την χωρική κατανομή της μονοαξονικής αντοχής σε θραύση κάθε δοκιμίου που λαμβάνεται με τη συμβατική μέθοδο. Η μεσαία εικόνα (2) δείχνει τη χωρική κατανομή της τιμής "μέσης αντοχής" του ελεγχόμενου δοκιμίου, δηλαδή της μέσης τιμής εννέα δοκιμαστικών δοκιμίων που αποτελούνται από ένα κεντρικό δοκίμιο και οκτώ δοκίμια που το περιβάλλουν. Η κάτω εικόνα (3) δείχνει τη χωρική κατανομή του συντελεστή Young. Αν και το block του μαρμάρου είναι φαινομενικά ομοιογενές, η αντοχή σε θραύση και ο συντελεστής Young δεν είναι ομοιόμορφα και συστηματικά μεταβάλλονται χωρικά, μέσα στο block, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.75. Η αντοχή θραύσης (μέση αντοχή) διαφοροποιείται σημαντικά για τις διαφορετικές περιοχές (A) και (B), που υποδεικνύονται στην κάτω εικόνα. Η μέση αντοχή σε θραύση είναι 81,8 MPa στην περιοχή (A) και 78,2 MPa στην περιοχή (B). Η μέγιστη τιμή στην περιοχή (A) είναι 83,5 MPa και η ελάχιστη τιμή στην περιοχή (B) είναι 74,8 MPa. Η μέγιστη διαφορά στη μέση αντοχή στο block, του φαινομενικά ομοιογενούς μαρμάρου, έφθασε στο 11%. Με τη διόρθωση αυτής της ανομοιογένειας, η επίδραση του ρυθμού της τάσης στην αντοχή σε θραύση λήφθηκε με ακρίβεια. Αυτή η έρευνα υποδηλώνει ότι η προσεκτική εξέταση της ανομοιογένειας σε ένα δείγμα πετρώματος μπορεί να είναι χρήσιμη για την εξαγωγή ακριβών αποτελεσμάτων σε προβλήματα θραύσης βράχου.



**Σχήμα 3.75.** Η κατανομή της αντοχής στη θραύση και του συντελεστή Young σε δείγμα μαρμάρου (Mogi, 1959).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αποτελέσματα, ο Xu (1980) πραγματοποίησε μια δοκιμή σε έναν πορώδη ψαμμίτη, που αποτελεί ένα τυπικά ασθενές ιζηματογενές πέτρωμα, χρησιμοποιώντας την πραγματική συσκευή τριαξονικής θλίψης. Αν και η μάζα αυτού του πετρώματος θεωρήθηκε αρχικά ομοιογενής, εξετάστηκε η

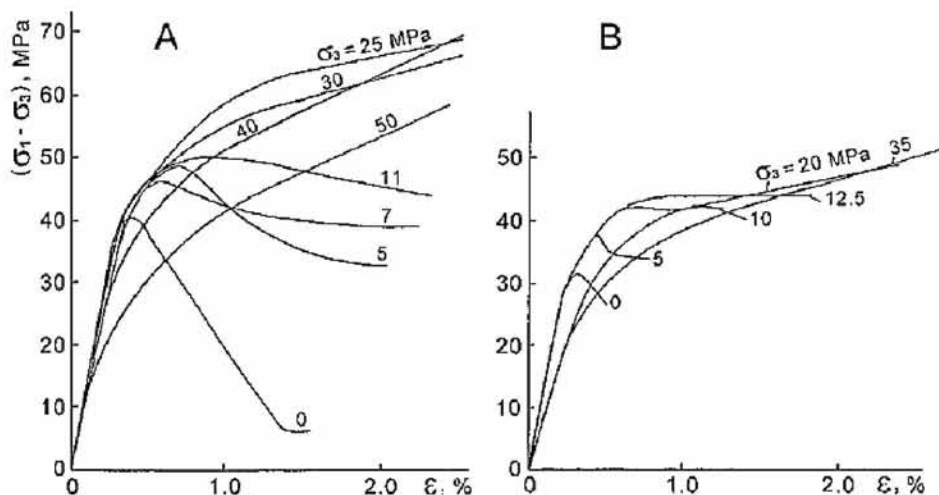
ανομοιογένειά του με τη συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Για το σκοπό αυτό, λήφθηκαν 55 δοκίμια και αριθμήθηκαν από 1 έως 55, ως ένδειξη της αρχικής τους χωρικής θέσης (Σχήμα 3.76). Σύμφωνα με τη συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ), υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι καμπυλών παραμόρφωσης (τύποι A και B) (Σχήμα 3.77). Η τάση θραύσης ή διαρροής του δείγματος τύπου-A ήταν γενικά υψηλότερη από εκείνη του δείγματος τύπου-B και το πρότυπο θραύσης ήταν διαφορετικό σε αυτούς τους δύο τύπους, δηλαδή, είχε παρατηρηθεί μονάχα ένα ίχνος διατμητικής αστοχίας σε δείγμα τύπου-A και η μορφή θραύσης στο δείγμα τύπου-B ήταν σύνθετη και υποδήλωνε διάρρηξη με συμπύκνωση (rupture by compaction). Αυτή η διαφορά αποδίδεται στη διαφορά του πορώδους.



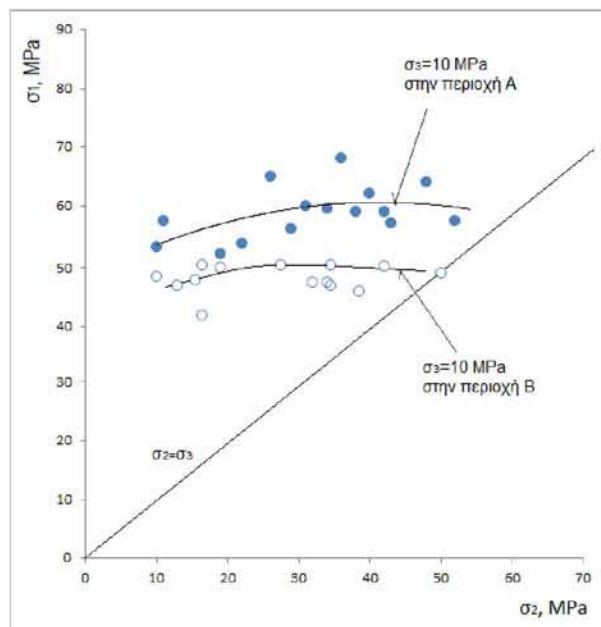
**Σχήμα 3.76.** Τα 55 δείγματα δοκιμής που αποκόπηκαν από ένα block ψαμμίτη. Μαύροι κύκλοι: Τύπος-A (ισχυρότερο). Λευκοί κύκλοι: Τύπος-B (ασθενέστερο). (Xu , 1980).

Στο σχήμα 3.76 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των δοκιμίων τύπου-A (μαύροι κύκλοι) και τύπου-B (λευκοί κύκλοι). Αυτοί οι δύο τύποι δεν κατανέμονται τυχαία, αλλά συσσωματώνονται σε ομάδες, δηλαδή, η μηχανική συμπεριφορά αλλάζει συστηματικά και σημαντικά, μέσα στο block του ψαμμίτη.

Στο Σχήμα 3.78, φαίνονται τα αποτελέσματα πραγματικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης του ψαμμίτη. Η μέγιστη κύρια τάση ( $\sigma_1$ ) κατά τη διάρρηξη καταγράφεται σε σχέση με την ενδιάμεση κύρια τάση ( $\sigma_2$ ). Σε αυτή την περίπτωση, καθώς τα μέγιστα των καμπυλών τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης είναι μερικές φορές ασαφή, η τάση σε μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση  $\epsilon_p = 0,2\%$  ή  $0,4\%$  ελήφθη ως τάση διάρρηξης ( $\sigma_1$ ). Εντούτοις, το χαρακτηριστικό που φαίνεται στο Σχήμα 3.78 δεν διαφέρει για τις δύο περιπτώσεις και έτσι η περίπτωση  $\epsilon_p = 0,2\%$  φαίνεται στο Σχήμα 3.78. Η ελάχιστη κύρια τάση ( $\sigma_3$ ) διατηρείται στα 10 MPa. Τα σύμβολα (με γέμισμα και χωρίς γέμισμα), υποδεικνύουν τα δεδομένα στην περιοχή A και στην περιοχή B, αντίστοιχα. Εάν όλα τα δεδομένα χρησιμοποιούνται, χωρίς να ληφθεί υπόψη η



Σχήμα 3.77. Καμπύλες τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε δοκίμια ψαμμίτη A-τύπου και B-τύπου (Xu et al., 1980).



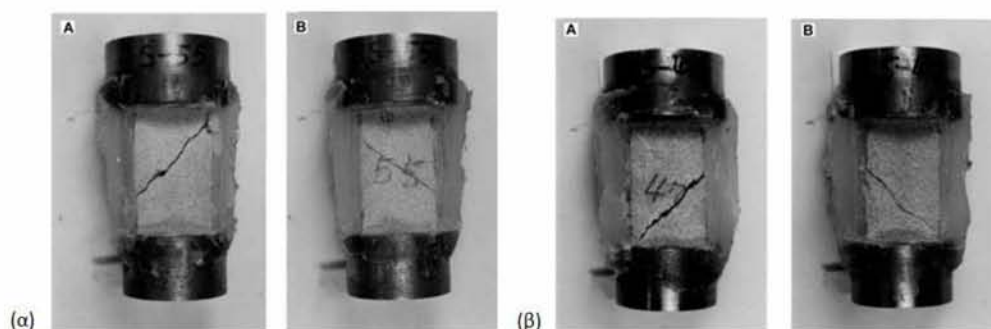
Σχήμα 3.78. Μέγιστη κύρια τάση κατά τη διάρρηξη ή η τάση σε μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση  $\epsilon_p = 0,2\%$  ( $\sigma_1$ ) συναρτήσει της  $\sigma_2$  ( $\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$ ) (Xu, 1980).

προαναφερθείσα ανομοιογένεια αυτού του block, δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την επίδραση της  $\sigma_2$ , λόγω της μεγάλης διασποράς των δεδομένων. Ωστόσο, εάν τα δεδομένα στην περιοχή A και στην περιοχή B σχεδιάζονται χωριστά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.78, τότε οι δύο αυτές ομάδες δεδομένων δεν επικαλύπτονται και η διασπορά τους μειώνεται σημαντικά. Από αυτό το αποτέλεσμα, αναγνωρίζεται η επίδραση της  $\sigma_2$  στην αντοχή διάρρηξης ( $\sigma_1$ ) αν και εξακολουθεί να υφίσταται η διασπορά δεδομένων. Σημειώνεται ότι το μέγεθος της επίδρασης της  $\sigma_2$

στον ασθενή ψαμμίτη είναι πολύ μικρότερο από αυτό των προαναφερθέντων σκληρών πετρωμάτων.

Τα σχήματα 3.79 (α) και (β) παρουσιάζουν παραδείγματα της μορφής θραύσης των δοκιμίων ψαμμίτη. Στα σχήματα αυτά, παρατηρείται ότι τα κεκλιμένα επίπεδα ρηγμάτωσης A και B είναι συμμετρικά. Αυτό σημαίνει ότι η θραύση συνέβη με διάτμηση και το επίπεδο ρηγμάτωσης είναι, κατά προσέγγιση, μία επίπεδη επιφάνεια, παράλληλη προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ , όπως παρατηρήθηκε και στα πετρώματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Έτσι, το πραγματικό πείραμα τριαξονικής θλίψης ενός ανομοιογενούς ασθενούς ψαμμίτη πραγματοποιείται με εφαρμογή μιας προσεκτικής μεθόδου, σύμφωνα με την οποία μειώνεται η επίδραση της μη-ομοιόμορφης κατανομής των μηχανικών ιδιοτήτων. Γενικά, η επίδραση της  $\sigma_2$  σε αυτόν τον ασθενή ψαμμίτη είναι παρόμοια με τους προηγούμενους τύπους πετρωμάτων. Ειδικότερα όμως, η επίδραση της  $\sigma_2$  στην αντοχή είναι σχετικά μικρή. Ωστόσο, η παρούσα μέθοδος εξέτασης της ανομοιογένειας μπορεί να μην είναι πάντοτε εφαρμόσιμη ειδικά όταν πρόκειται για σύνθετους (complex) ανομοιογενείς βράχους.



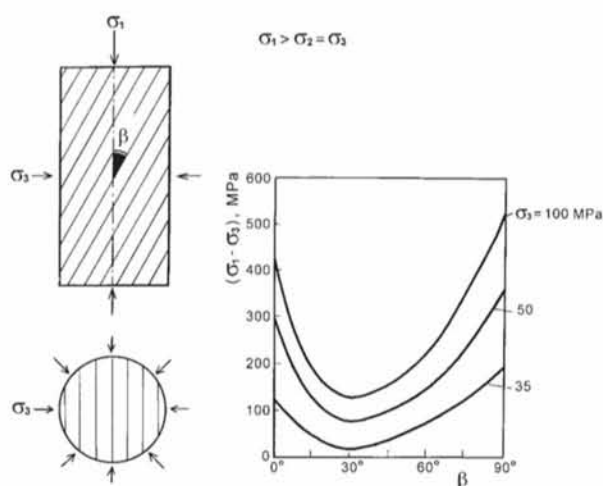
**Σχήμα 3.79.** (α) Ψαμμίτης No.155, (β) Ψαμμίτης No.147 (Mogi, 2007).

### *Ανισότροπο πέτρωμα*

Η ανισοτροπία είναι ένα από τα πιο ξεχωριστά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων, και θα πρέπει να δίνεται η δέουσα προσοχή, στην μηχανική πετρωμάτων για έργα πολιτικού μηχανικού, όπως θεμελιώσεις, ευστάθεια πρανών, ορυχεία, λατομεία, εκσκαφές, εξόρυξη πετρελαίου κλπ. Η ανισοτροπία των ιδιοτήτων των πετρωμάτων οφείλεται κυρίως στη παρουσία σχισμών, φυλλώσεων, επιπέδων στρώσης, σχιστότητας, ασυνεχών και άλλων μικροσκοπικών ή μακροσκοπικών ατελειών. Αυτά τα δομικά χαρακτηριστικά κάνουν τις μηχανικές, σεισμικές, υδραυλικές και θερμικές ιδιότητες των πετρωμάτων, να ποικίλλουν ανάλογα με τον προσανατολισμό τους.

Τα περισσότερα πετρώματα με φυλλώσεις (πολύ λεπτές στρώσεις) είναι τα μεταμορφωμένα, όπως ο σχιστόλιθος, ο γνεύσιος και ο φυλλίτης, που περιέχουν παράλληλες διατάξεις επίπεδων ή επιμηκών ορυκτών. Η μεταμόρφωση αλλάζει τον αρχικό τεκτονικό ιστό των πετρωμάτων. Η φύλλωση που προκαλείται από τον μη τυχαίο προσανατολισμό των ορυκτών συστατικών, οι παράλληλες θραύσεις, οι μικροσκοπικές ορυκτές πλάκες, είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά της δομής των μεταμορφωμένων πετρωμάτων που οδηγούν σε ιδιότητες πετρώματος οι οποίες εξαρτώνται, σε μεγάλο βαθμό, από τον προσανατολισμό των εν λόγω χαρακτηριστικών.

Η επίδραση της εντατικής κατάστασης στη συμπεριφορά αστοχίας σε ανισότροπα πετρώματα, έχει μελετηθεί, κατά το παρελθόν, από διάφορους ερευνητές (π.χ., Donath, 1961, 1964, 1972, Mc Lamore and Gray, 1967) χρησιμοποιώντας τη συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ). Μεταξύ αυτών, ο Donath εξέτασε διεξοδικά την ισχυρή επίδραση της επίπεδης ανισοτροπίας τόσο στην αντοχή θραύσης όσο και στη γωνία θραύσης. Το σχήμα 3.80 δείχνει σχηματικά την πειραματική μέθοδο και τα παρατηρούμενα αποτελέσματα (Donath, 1964).



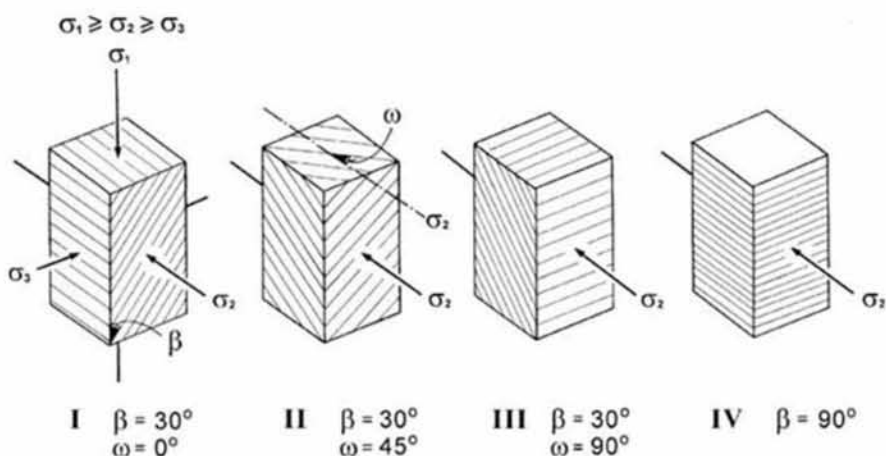
**Σχήμα 3.80.** Η αντοχή στη θραύση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) των ανισότροπων πετρωμάτων ως συνάρτηση της γωνίας ( $\beta$ ) μεταξύ της μέγιστης κύριας τάσης ( $\sigma_1$ ) και των επιπέδων αδυναμίας σε συμβατική τριαξονική θλίψη (Donath, 1964).

Η γωνία  $\beta$  είναι η γωνία μεταξύ της μέγιστης κύριας τάσης ( $\sigma_1$ ) και των επιπέδων αδυναμίας, όπως π.χ. τα επίπεδα φύλλωσης. Το δεξί γράφημα στο Σχήμα 3.80 δείχνει τη διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) κατά τη θραύση, ως συνάρτηση της γωνίας  $\beta$ , για διαφορετική πλευρική πίεση ( $P_c = \sigma_2 = \sigma_3$ ). Όπως φαίνεται σε αυτό το σχήμα (και σε πολλές άλλες περιπτώσεις), η αντοχή στη θραύση του ανισότροπου βράχου είναι χαμηλότερη γύρω από την περιοχή  $\beta = 30^\circ$ . Δεδομένου ότι οι γωνίες θραύσης ( $\theta$ ) των ισότροπων πετρωμάτων είναι σχεδόν  $30^\circ$ , σε πολλές περιπτώσεις, το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι είναι πιθανό να εμφανιστεί θραύση ανισότροπων πετρωμάτων όταν η γωνία  $\beta$ , που δείχνει τον προσανατολισμό των αδύναμων επιπέδων του ανισότροπου

πετρώματος, είναι σχεδόν ίση με την γωνία θραύσης ( $\theta$ ) ισότροπων πετρωμάτων με περίπου παρόμοια στερεότητα (solidity).

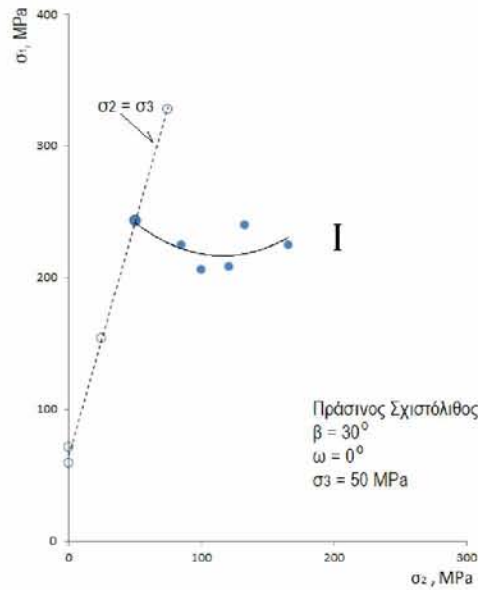
### Τάση θραύσης

Με την μέθοδο της πραγματικής τριαξονικής θλίψης, ο Mogi πραγματοποίησε μετρήσεις για τέσσερις περιπτώσεις πειραμάτων: **I**, **II**, **III** και **IV**, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 3.81. Η γωνία  $\beta$  είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της  $\sigma_1$  και των επιπέδων φύλλωσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η γωνία  $\omega$  είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της  $\sigma_2$  και των επιπέδων φύλλωσης, η οποία είναι κάθετη στην διεύθυνση της  $\sigma_1$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.81. Στο σχήμα αυτό, απεικονίζεται ο προσανατολισμός των τριών κύριων τάσεων ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ ) σε σχέση με τα επίπεδα φύλλωσης.



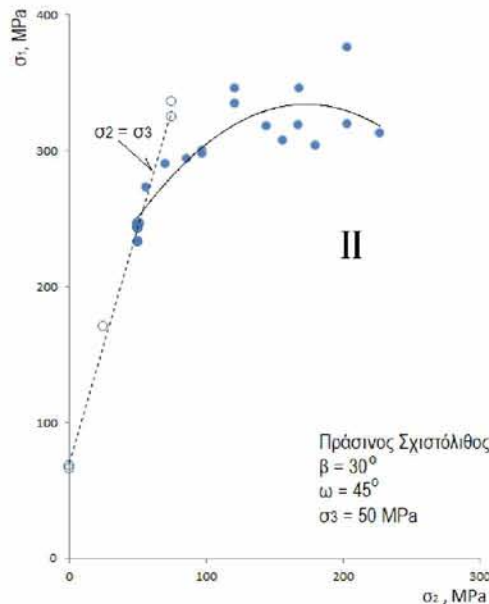
*Σχήμα 3.81. Πειράματα για τις τέσσερις περιπτώσεις (I, II, III και IV διαφορετικών προσανατολισμών των επιπέδων φύλλωσης) από την πραγματική τριαξονική θλίψη για το πρασινο-σχιστόλιθο (Mogi, 2007).*

Στο Σχήμα 3.82, η τάση θραύσης  $\sigma_1$  στην περίπτωση **I** (κύκλοι με γέμισμα) σχεδιάζεται γραφικά έναντι της  $\sigma_2$ . Οι μικροί κύκλοι (χωρίς γέμισμα) και διακεκομμένη γραμμή δείχνουν τη σχέση μεταξύ  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  που λαμβάνεται από τις συμβατικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Στην περίπτωση **I**, στην οποία τα επίπεδα φύλλωσης είναι παράλληλα προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$  και με τη γωνία  $\beta = 30^\circ$ , η τάση θραύσης ( $\sigma_1$ ) είναι σχεδόν σταθερή, δηλαδή σε αυτή την περίπτωση, δεν μπορεί να αναγνωριστεί η επίδραση της  $\sigma_2$ .



**Σχήμα 3.82.** Σχέση μεταξύ τάσης αστοχίας ( $\sigma_1$ ) και ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ , στην περίπτωση **I**, για πρασινο-σχιστόλιθο (κύκλοι με γέμισμα). Κύκλοι χωρίς γέμισμα: η περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).

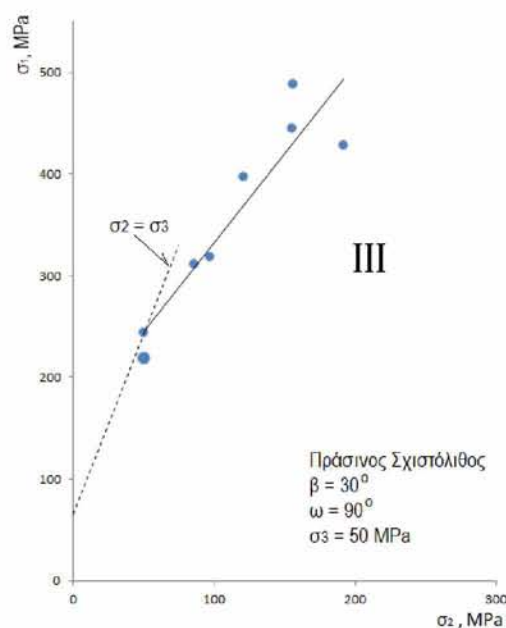
Το σχήμα 3.83 δείχνει τη σχέση μεταξύ της μέγιστης κύριας τάσης στη θραύση ( $\sigma_1$ ) και της ενδιάμεσης κύριας τάσης ( $\sigma_2$ ) στην περίπτωση **II**. Σε αυτή την περίπτωση, η  $\sigma_1$  αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ , στην περιοχή χαμηλής  $\sigma_2$ , αλλά η κλίση της καμπύλης  $\sigma_1$ - $\sigma_2$  μειώνεται σταδιακά με τη  $\sigma_2$ , μέχρι να φτάσει στο μηδέν. Εντούτοις, σημειώνεται ότι η διασπορά δεδομένων αντοχής είναι αξιοσημείωτη στην περιοχή υψηλών τιμών  $\sigma_2$ . Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η επίδραση της  $\sigma_2$  είναι σαφώς εμφανής, αλλά μέτρια.



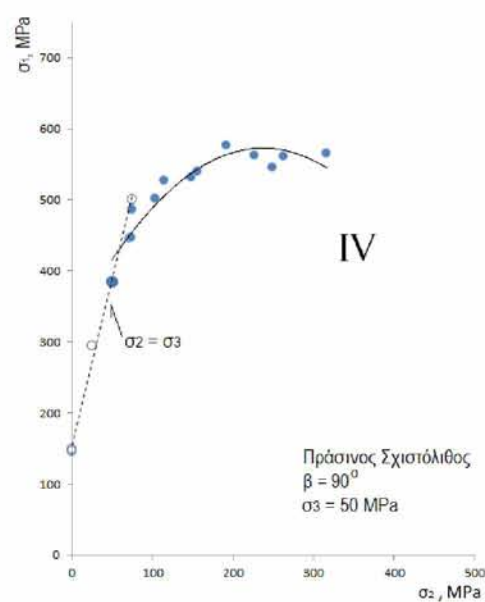
**Σχήμα 3.83.** Σχέση μεταξύ τάσης αστοχίας ( $\sigma_1$ ) και ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  στην περίπτωση **II**, για πρασινο-σχιστόλιθο (συμπαγής κύκλος). Ανοικτός κύκλος: η περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).



Το σχήμα 3.84 δείχνει την αντοχή σε θραύση ( $\sigma_1$ ) συναρτήσει της  $\sigma_2$ . Στην περίπτωση **III**, όπου η κατεύθυνση  $\sigma_2$  είναι κάθετη προς τα ίχνη των επιπέδων φύλλωσης, η τάση θραύσης ( $\sigma_1$ ) αυξάνεται γρήγορα και γραμμικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ . Σε αυτή την περίπτωση, είναι εύκολο να καταλάβουμε ότι η αύξηση της  $\sigma_2$  επηρεάζει έντονα την τάση θραύσης, επειδή η αντίσταση τριβής κατά μήκος των επιπέδων φύλλωσης αυξάνεται δραστικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ .



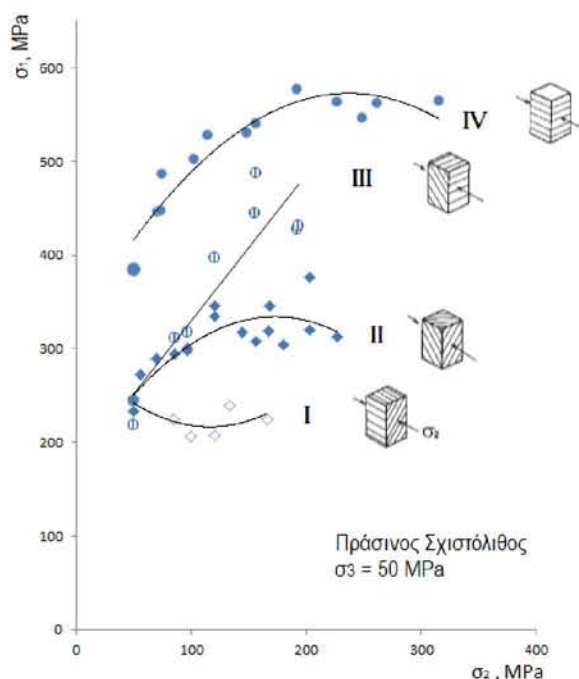
**Σχήμα 3.84.** Σχέση μεταξύ τάσης αστοχίας ( $\sigma_1$ ) και  $\sigma_2$  στην περίπτωση **III**, για πρασινο-σχιστόλιθο (συμπαγής κύκλος). Διακεκομμένη γραμμή:  $\sigma_1$ - $\sigma_2$  σχέση στην περίπτωση  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).



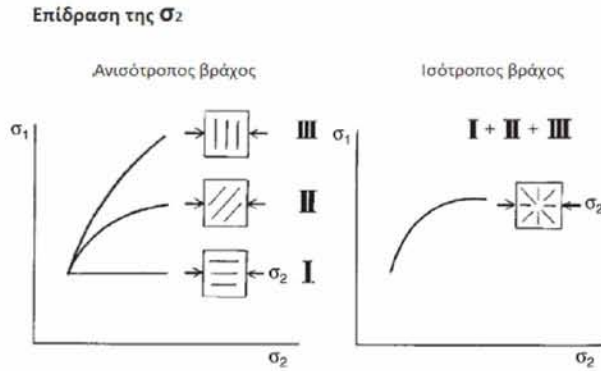
**Σχήμα 3.85.** Σχέση μεταξύ τάσης αστοχίας ( $\sigma_1$ ) και  $\sigma_2$  στην περίπτωση **IV**, για πρασινο-σχιστόλιθο (συμπαγής κύκλος). Ανοικτός κύκλος: η περίπτωση του  $\sigma_2 = \sigma_3$  (Mogi, 2007).

Το σχήμα 3.85 δείχνει την αντοχή σε θραύση ( $\sigma_1$ ) ως συνάρτηση της  $\sigma_2$ . Στην περίπτωση **IV**, στην οποία η κατεύθυνση  $\sigma_1$  είναι κάθετη προς τα επίπεδα φύλλωσης ( $\beta = 90^\circ$ ), η  $\sigma_1$  αυξάνεται σημαντικά με αύξηση της  $\sigma_2$  στο αρχικό στάδιο, αλλά η κλίση της καμπύλης  $\sigma_1$ - $\sigma_2$  μειώνεται βαθμιαία με την αύξηση της  $\sigma_2$ . Η επίδραση της  $\sigma_2$  στην τάση θραύσης, σε αυτή την περίπτωση, είναι αρκετά παρόμοια με αυτή των ισότροπων πετρωμάτων, που αναφέρθηκε προηγουμένως. Δεδομένου ότι τα επίπεδα φύλλωσης είναι κάθετα στην κατεύθυνση  $\sigma_1$ , η ύπαρξη των επιπέδων φύλλωσης πιθανότατα δεν έχει σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά αστοχίας των πετρωμάτων.

Τα προαναφερθέντα πειραματικά αποτελέσματα για τις τέσσερις περιπτώσεις (Σχήματα 3.82, 3.83, 3.84 και 3.85) του πρασινο-σχιστόλιθου Chichibu συνοψίζονται στο Σχήμα 3.86. Μπορούν να φανούν καθαρά οι διαφορές της αντοχής σε θραύση και των επιδράσεων της  $\sigma_2$ , για διαφορετικούς προσανατολισμούς των επιπέδων φύλλωσης. Η γωνία  $\omega$  μεταξύ της διεύθυνσης της  $\sigma_2$  και του ίχνους της επίπεδης στρώσης στο οριζόντιο επίπεδο (όταν η διεύθυνση της  $\sigma_1$  είναι κατακόρυφη) είναι  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  και  $90^\circ$  στις περιπτώσεις I, II και III, αντίστοιχα. Η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  είναι αμελητέα στην περίπτωση I (η διεύθυνση της  $\sigma_2$  είναι παράλληλη προς τα επίπεδα αδυναμίας), μέτρια στην περίπτωση II, και αρκετά σημαντική στην περίπτωση III (η διεύθυνση της  $\sigma_2$  είναι κάθετη προς τα ίχνη των επιπέδων αδυναμίας). Στην περίπτωση IV ( $\beta = 90^\circ$ ), η τάση θραύσης είναι η υψηλότερη, επειδή τα επίπεδα αδυναμίας δεν έχουν σημαντική επίδραση στην συμπεριφορά αστοχίας του ανισότροπου πετρώματος.



**Σχήμα 3.86.** Σύννοψη της σχέσης  $\sigma_1$ - $\sigma_2$  στους τέσσερις διαφορετικούς προσανατολισμούς των επιπέδων φύλλωσης για τον πρασινο-σχιστόλιθο (Mogi, 2007).



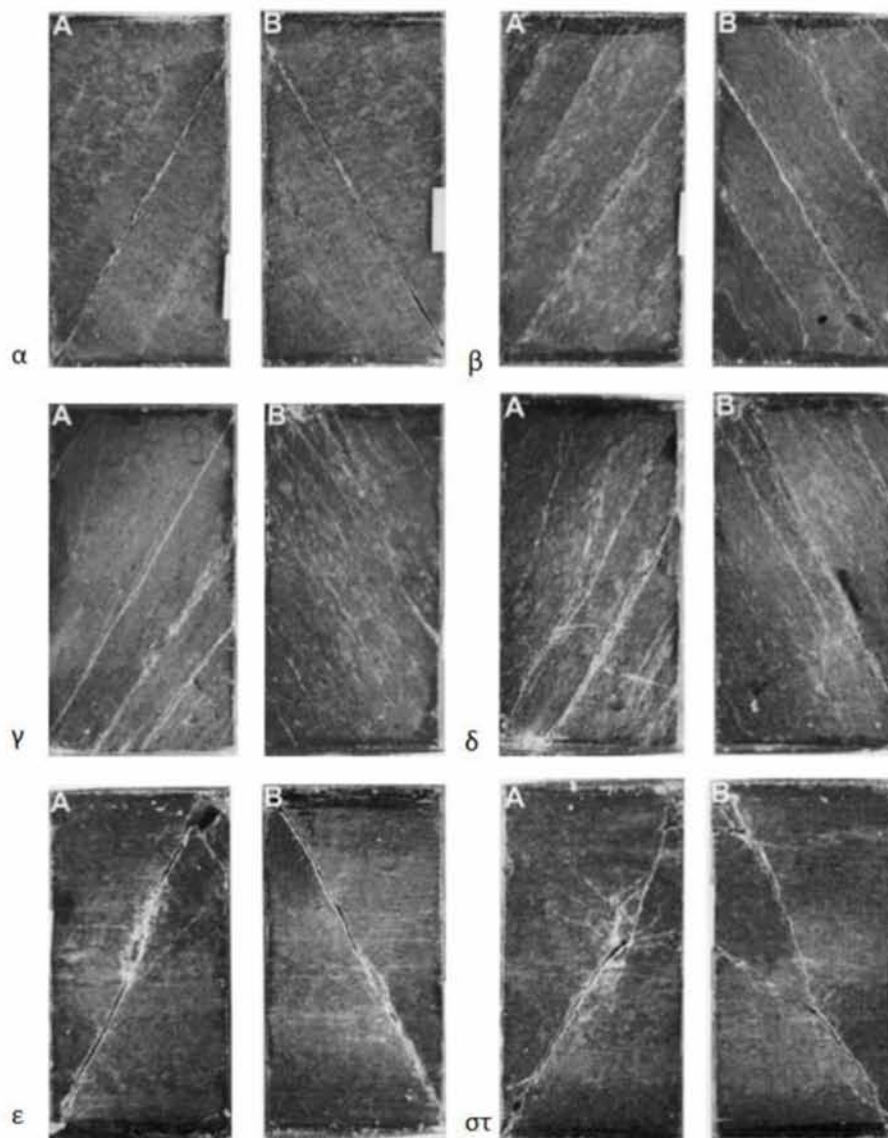
**Σχήμα 3.87.** Ένα απλό μοντέλο για την κατανόηση της επίδρασης της  $\sigma_2$  (Mogi, 1983).

Το σχήμα 3.87 δείχνει ένα απλό μοντέλο για την κατανόηση της επίδρασης της  $\sigma_2$  (Mogi, 1983). Η αριστερή εικόνα δείχνει τις επιδράσεις της  $\sigma_2$  για τους τρεις τυπικούς προσανατολισμούς επιπέδων αδυναμίας ενός ανισότροπου πετρώματος που αντιστοιχούν στις προαναφερθείσες περιπτώσεις **I**, **II** και **III**. Το μέγεθος της επίδρασης της  $\sigma_2$  εξαρτάται έντονα από τον προσανατολισμό των επιπέδων αδυναμίας ενός ανισότροπου βράχου. Το δεξί σχήμα απεικονίζει ένα μοντέλο που εξηγεί την επίδραση της  $\sigma_2$  σε ισότροπο βράχο, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για ένα ανισότροπο βράχο, που αναφέρθηκε παραπάνω. Σε ισότροπα πετρώματα, οι ρωγμές μικρής κλίμακας ή τα όρια των κόκκων με διάφορους προσανατολισμούς κατανέμονται τυχαία. Η επίδραση της  $\sigma_2$  σε τέτοια πετρώματα, που περιέχουν πολλά επίπεδα αδυναμίας, μικρής κλίμακας, με διάφορους προσανατολισμούς, μπορεί κατά προσέγγιση να αντιπροσωπεύεται από τον μέσο όρο της επίδρασης της  $\sigma_2$  των τριών τυπικών περιπτώσεων (**I**, **II** και **III**). Αυτό φαίνεται σχηματικά στο δεξί γράφημα του σχήματος 3.87.

### Μοτίβο θραύσης

Τα μοτίβα θραύσης των ανισότροπων πετρωμάτων, σε συνθήκες πραγματικής τριαξονικής θλίψης, επηρεάζονται έντονα από τους προσανατολισμούς των επιπέδων αδυναμίας (Kwasniewski and Mogi, 1990, 1996, 2000). Το σχήμα 3.88 (α) δείχνει τα αποτελέσματα στην περίπτωση **I**, στην οποία τα επίπεδα φύλλωσης είναι παράλληλα προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ . Τα επίπεδα A και B είναι τα δύο επίπεδα κάθετα στην διεύθυνση της  $\sigma_2$  και στις δύο πλευρές ενός δοκιμίου βράχου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.61. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να φανεί καθαρά ένα ενιαίο, γραμμικό, κεκλιμένο ρήγμα (επίπεδο αστοχίας) και τα ίχνη των ρηγμάτων (επιπέδων αστοχίας), στα επίπεδα A και B, είναι συμμετρικά. Αυτό το σχήμα δείχνει ότι το κύριο ρήγμα (επίπεδο αστοχίας) αποτελεί μία αρκετά επίπεδη

επιφάνεια παράλληλη προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ . Είναι πολύ πιθανό ότι η ρηγμάτωση συνέβη κατά μήκος ενός από τα επίπεδα φύλλωσης του πρασινο-σχιστόλιθου.



**Σχήμα 3.88.** Μορφές θραύσης του πρασινο-σχιστόλιθου Chichibu. (α) - (στ). (α) Κατ. **I**  $\sigma_1 = 206\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 100\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 50\text{MPa}$ , (β), Κατ. **II**  $\sigma_1 = 244\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 50\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 50\text{MPa}$ , (γ), Κατ. **II**  $\sigma_1 = 300\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 97\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 50\text{MPa}$ , (δ), Κατ. **II**  $\sigma_1 = 346\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 168\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 50\text{MPa}$ , (ε), Κατ. **IV**  $\sigma_1 = 540\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 156\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 50\text{MPa}$ , (στ), Κατ. **IV**  $\sigma_1 = 562\text{MPa}$ ,  $\sigma_2 = 262\text{MPa}$ ,  $\sigma_3 = 50\text{MPa}$ . (Kwasniewski and Mogi, 1990).

Το σχήμα 3.88 (β) δείχνει τα μοτίβα θραύσης του δοκιμίου της περίπτωσης **II**, σε συνθήκες αξονο-συμμετρικής εντατικής κατάστασης. Παρατηρούνται ίχνη 4 ή 5 κεκλιμένων επιφανειών ολίσθησης. Επίσης, τα ίχνη των επιφανειών ολίσθησης στα επίπεδα A και B είναι σχεδόν συμμετρικά. Αυτές οι ολισθήσεις πιθανότατα συνέβησαν κατά μήκος των επιπέδων φύλλωσης.

Το σχήμα 3.88 (γ) και (δ) παρουσιάζει τα μοτίβα θραύσης των δοκιμίων της περίπτωσης **II**, υπό πραγματική τριαξονική θλίψη. Οι τιμές της  $\sigma_2$  είναι διαφορετικές σε αυτές τις δοκιμές. Σε αυτά τα σχήματα, τα μοτίβα θραύσης στο επίπεδο A και το επίπεδο B δεν είναι εντελώς συμμετρικά και είναι σύνθετα σε κάποιο βαθμό. Σε αυτή την περίπτωση, τα επίπεδα ρηγμάτωσης δεν είναι παράλληλα προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$ .

Στην περίπτωση **III**, στην οποία η παράταξη (strike) των κεκλιμένων επιπέδων φύλλωσης είναι κάθετη στην διεύθυνση της  $\sigma_2$  ( $\omega = 90^\circ$ ), τα επίπεδα ρηγμάτωσης δεν είναι παράλληλα προς την διεύθυνση της  $\sigma_2$  αλλά προς την διεύθυνση της  $\sigma_3$ . Η έντονη επίδραση της  $\sigma_2$  στην αντοχή θραύσης του πρασινο-σχιστόλιθου Chichibu μπορεί να αποδοθεί στη μεγάλη διαφορά στις παρατάξεις των επιπέδων φύλλωσης και στη  $\sigma_2$ . Σε αυτή την περίπτωση, η αντοχή τριβής κατά μήκος των επιπέδων φύλλωσης αυξάνεται με την αύξηση της  $\sigma_2$ , επειδή η ορθή τάση στα επίπεδα φύλλωσης αυξάνει με την αύξηση της  $\sigma_2$ . Σε αυτό το πείραμα, το μέγεθος της  $\sigma_2$  ήταν μικρό. Ωστόσο, εάν πραγματοποιούνται πειράματα για μεγαλύτερες τιμές  $\sigma_2$ , το μοτίβο θραύσης είναι πιθανό να αλλάξει.

Το σχήμα 3.88 (ε) και (στ) δείχνει τα μοτίβα θραύσης στην περίπτωση **IV** στην οποία τα επίπεδα φύλλωσης είναι κάθετα στην διεύθυνση της  $\sigma_1$ . Τα μοτίβα θραύσης σε αυτή την περίπτωση είναι κάπως πολύπλοκα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποια ομοιογένεια του ελεγχόμενου δοκιμίου, αλλά η κύρια ρηγμάτωση είναι παρόμοια με εκείνη της περίπτωσης των ομογενών πετρωμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

#### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

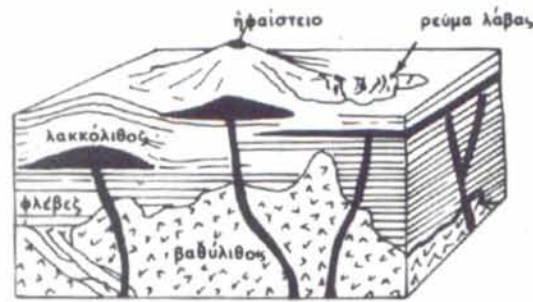
Σε αυτή την εργασία συλλέχθηκαν κάποια από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποίησε ο Mogi για σκληρά πετρώματα. Τα συγκεκριμένα πετρώματα υπάρχουν και στον Ελλαδικό χώρο και χρησιμοποιούνται σε έργα πολιτικού μηχανικού. Αυτά τα πετρώματα είναι ο γρανίτης, ο τραχείτης, ο ανδεσίτης, ο περιδοτίτης, ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης, ο δολερίτης, το μάρμαρο και ο σχιστόλιθος. Οι εφαρμογές της βραχομηχανικής απαντούν σε μεγάλο αριθμό κατασκευών και στα περισσότερα έργα υποδομής. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικά τεχνικά έργα πολιτικού μηχανικού όπου εφαρμόζεται η επιστήμη της βραχομηχανικής:

1. Μεγάλες κατασκευές, όπως ψηλά κτίρια, γέφυρες, μεγάλες βιομηχανικές μονάδες, επίγειοι σταθμοί ενέργειας κ.λ.π.
2. Κατασκευές όπου τα πετρώματα έχουν ασυνήθιστες ιδιότητες (π.χ. διογκούμενα)
3. Φράγματα.
4. Οδοποιία και τεχνική μεταφορών, (π.χ. ορύγματα αυτοκινητοδρόμων και σιδηροδρομικών γραμμών, οδικές σήραγγες, υπόγειοι σιδηρόδρομοι κ.λ.π.)
5. Μεγάλα υπόγεια έργα, (π.χ. μεταλλεία, σήραγγες, υπόγειες αποθήκες κ.λ.π.)
6. Σχεδιασμός γεωτρήσεων.
7. Επιλογή θέσεων για πυρηνικά και τοξικά απόβλητα.

Τα πετρώματα διακρίνονται, ανάλογα με τον τρόπο προέλευσής τους, σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τα πυριγενή, τα ιζηματογενή και τα μεταμορφωμένα. Παρακάτω ακολουθεί περιγραφή σχετικά με την τεχνική συμπεριφορά των πετρωμάτων.

#### 4.2 ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Τα πετρώματα αυτά σχηματίζονται από τη στερεοποίηση του μάγματος που αν συμβεί κάτω από την επιφάνεια της γης δημιουργεί τα πλουτωνικά πετρώματα, ενώ αν εκχυθεί στην επιφάνεια του εδάφους, μέσω των ηφαιστείων, τότε δημιουργεί τα ηφαιστειακά πετρώματα (σχήμα 4.1).

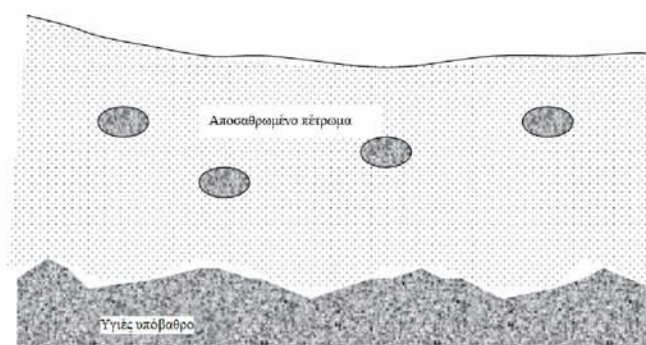


**Σχήμα 4.1.** Πυρριγενή πετρώματα. (Αντωνίου, 2005).

## α) Πλουτωνικά Πετρώματα

### α1) Γρανιτικά Πετρώματα (Οξίνα)

Πρόκειται για **γρανίτες** και γρανодиορίτες που έχουν παρόμοια ορυκτολογική σύσταση και ιστό (χαλαζίας, άστριοι, μαρμαρυγίας, κεροστίλβη). Ο τυπικός γρανίτης αποτελείται από άστριους, χαλαζία και μαρμαρυγία σε αναλογία 8:4:1. Οι γρανίτες αποσαθρώνονται εύκολα, ειδικά αν περιέχουν βιοτίτη, με τελικό στάδιο τη δημιουργία χαλαζιακής άμμου (αρένα), λόγω της παρουσίας αστρίου που μετατρέπεται κυρίως σε καολίνη, ενώ ο χαλαζίας παραμένει αναλλοίωτος. Επιπλέον χαρακτηριστικό τους είναι η κατάτμησή τους σε τρεις επιφάνειες διαχωρισμού περίπου ορθογώνιες μεταξύ τους που πληθαίνουν από τον τεκτονισμό που υφίσταται το πέτρωμα και που κοντά στην επιφάνεια είναι αρκετά ανοικτές, διευκολύνοντας τη γρήγορη αποσάθρωση του πετρώματος. Έτσι τα γρανιτικά τεμάχια αποχωρίζονται, προοδευτικά αποκτούν σφαιρική μορφή και «κολυμπούν» μέσα σε αρένες για να καταλήξουν και αυτά σε γρανιτικά εδάφη (σχήμα 4.2).



**Σχήμα 4.2.** Σχηματική απεικόνιση της σφαιρικής μορφής των αποσαθρωμένων τεμαχίων γρανίτη κατά το σχηματισμό ενός γρανιτικού εδάφους. (Αντωνίου, 2005)

Το φαινόμενο βάρος του γρανίτη κυμαίνεται γύρω στα  $26\text{KN/m}^3$  και η αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη από  $120\text{MPa}$  έως  $250\text{MPa}$ , εξαρτώμενη κυρίως από το μέγεθος των κρυστάλλων του και το βαθμό εξαλλοίωσης του και διαρρηξέως του.

Όταν είναι υγιής, είναι πέτρωμα πολύ υψηλών αντοχών που παρουσιάζει πλήρως ελαστική συμπεριφορά με ψαθυρή θραύση. Αντιθέτως η αντοχή του μειώνεται όσο πιο αποσαθρωμένο εμφανίζεται. Στην Ελλάδα απαντάται σε πολλές περιοχές όπως στη Καβάλα, Ξάνθη, Χαλκιδική, Μύκονο, Τήνο, Δήλο, Σέριφο, Νάξο, Ικαρία, Πάρο, κ.α.

Ο **διορίτης** είναι κρυσταλλικό, κοκκώδες πυριγενές πέτρωμα, που αποτελείται από δυο κύρια ορυκτολογικά συστατικά, πλαγιόκλαστο (50% ανορθίτης) και κεροστίλβη ή βιοτίτης. Ο διορίτης έχει φαινόμενο ειδικό βάρος  $2700 \text{ kg/m}^3$  μέχρι  $2900 \text{ kg/m}^3$ , αντοχή σε θλίψη  $1800 \text{ kg/m}^3$  μέχρι  $3000 \text{ kg/m}^3$ , δύσκολα κατεργάζεται, παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και την τριβή, επιδέχεται όμως στίλβωση με καλά αποτελέσματα. Στην Ελλάδα διορίτες συνήθως βρίσκονται ως μέλη μεγαλύτερων πυριγενών σχηματισμών.

## **α2) Βασικά– Υπερβασικά Πλουτωνικά Πετρώματα**

Στην οικογένεια αυτή ανήκουν οι γάββροι, οι **περιδοτίτες**, ο βασάλτης και ο διαβάσης, ενώ συχνά εμφανίζονται ως ένα σύστημα πετρωμάτων γνωστό και ως οφιόλιθος. Η ορυκτολογική σύσταση του περιδοτίτη που είναι ο ολιβίνης επιτρέπει την αποσάθρωση η οποία μπορεί να προχωρήσει και σε μεγαλύτερα βάθη λόγω της απουσίας του χαλαζία, αλλά και λόγω της εντονότερης ρωγμάτωσης. Η έντονη ρωγμάτωση βοηθά στην κατείσδυση του νερού σε βάθος με συνέπεια να δημιουργούνται υπόγεια αποθέματα νερού κατάλληλα προς εκμετάλλευση, όχι όμως ίδιου δυναμικού με αυτό των ασβεστιτικών πετρωμάτων.

Ο περιδοτίτης είναι το σπουδαιότερο υπερβασικό πυριγενές πέτρωμα. Όταν είναι υγιής είναι πολύ υψηλών αντοχών και κατάλληλος για την θεμελίωση οπουδήποτε τεχνικού έργου. Πολλές φορές όμως μετατρέπεται σε σερπεντινίτη χωρίς σαφή όρια μεταξύ υγιούς και αποσαθρωμένου τμήματος. Σε περίπτωση διάνοιξης σήραγγας μέσα στην μάζα του σερπεντινίτη μπορεί να παρουσιαστεί διόγκωση και για τον λόγο αυτό χρειάζεται συνεχή και μεγάλης κλίμακας υποστήριξη. Ο περιδοτίτης συναντιέται συχνά στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στη Θεσσαλία, Δομοκό, Λαμία, Χαλκιδική, Βοιωτία και στην Εύβοια.

## **β) Ηφαιστειακά Πετρώματα**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ο ρυόλιθος, ο **τραχείτης**, ο **ανδρείτης**, οι ηφαιστειακοί τόφοι κλπ. Συνήθως τα πετρώματα αυτά προέρχονται από έκχυση λάβας πάνω σε προϋπάρχοντα πετρώματα που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης και πολλές φορές διακόπτουν την κατά βάθος ανάπτυξη μιας ιζηματογενούς σειράς πετρωμάτων. Γενικά είναι σκληρά πετρώματα, κατάλληλα για θεμελιώσεις τεχνικών έργων, αλλά παρουσιάζουν πρωτογενή κενά που οφείλονται στη διαδικασία ψύξης της λάβας καθώς έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, τα οποία δεν είναι απαραίτητο να επικοινωνούν μεταξύ τους. Η ύπαρξη των κενών αυτών μπορεί να



οδηγήσει σε διαφορετικές καθιζήσεις, ενώ γενικά καθιζήσεις αναμένονται και όταν χαλαρά ηφαιστειακά πετρώματα (τόφφοι) διακόπτουν ιζηματογενή σειρά. Η χρήση τσιμεντενέσεων στα υλικά αυτά προκειμένου να στεγανοποιηθούν δεν συναντά ιδιαίτερες δυσκολίες.

Ο τραχείτης έχει χαρακτηριστικό πορφυριτικό ιστό και μεγάλους φαινοκρυστάλλους αστρίων, που είναι ευπρόσβλητοι από την αποσάθρωση με συνέπεια τα πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά του. Παρουσιάζει αντοχή σε θλίψη  $600 \text{ kg/cm}^2 - 700 \text{ kg/cm}^2$  και μεγάλο πορώδες. Ο τραχείτης απαντάει στην Ελλάδα στη Μήλο και τα Μέθανα. Ο ανδেসίτης, αποτελεί το αντίστοιχο έκχυτο πέτρωμα του διορίτη, είναι σκοτεινόχρωμος με πορφυτικό ιστό και παρουσιάζει ιδιαίτερη αντοχή στην αποσάθρωση. Το ειδικό βάρος του ανδেসίτη είναι  $2,5 \text{ gr/cm}^3$  μέχρι  $2,9 \text{ gr/cm}^3$  και αντοχή σε θλίψη από  $600 \text{ kg/cm}^2$  μέχρι  $2400 \text{ kg/cm}^2$ . Οφείλει το ονομά του στο γεγονός ότι βρέθηκε για πρώτη φορά στις Άνδεις, είναι δε το κυριότερο συστατικό της οροσειράς των ηφαιστειών που περιβάλλουν τον Ειρηνικό ωκεανό. Στην Ελλάδα απαντάται στην Αίγινα, Μέθανα, Σαντορίνη, Αλμωπία. Χρησιμοποιείται ως αδρανές για την κατασκευή αντιολισθητικών ταπήτων στα έργα οδοποιίας.

### 4.3 ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Τα πετρώματα αυτά σχηματίστηκαν σε βαθιές ωκεάνιες λεκάνες ως προϊόντα αποσάθρωσης παλαιότερων γεωλογικά πετρωμάτων (σχήμα 4.3). Η μεταφορά και η απόθεση γίνεται είτε με μορφή αιώρησης (κλαστικά ιζήματα), είτε με μορφή διάλυσης (χημικά ιζήματα). Τα κλαστικά πετρώματα είναι ανάλογα του μέγεθους του συνθετικού τους κόκκου (κροκαλοπαγή, λατυποπαγή, ψαμμίτες, ιλυόλιθοι, αργιλικοί σχιστόλιθοι). Τα χημικά ιζηματογενή πετρώματα είναι κυρίως οι **ασβεστόλιθοι** (προέρχονται από ασβεστίτη  $\text{CaCO}_3$ ), οι **δολομίτες** (προέρχονται από  $\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$ ), οι κερατόλιθοι και οι εβαπορίτες (ορυκτό αλάτι, γύψος, ανυδρίτης). Επιπλέον βιογενή πετρώματα που δημιουργήθηκαν από συσσώρευση οργανικής ύλης (τύρφη, λιγνίτης, βιογενής ασβεστόλιθος) ανήκουν στα ιζηματογενή πετρώματα.



**Σχήμα 4.3.** Σχηματική απεικόνιση της μεταφοράς και της απόθεσης των φερτών υλικών (Αντωνίου, 2005).

Τα ιζηματογενή πετρώματα αναπτύσσονται στο χώρο οριζόντια (παρουσιάζουν μεγάλη εξάπλωση στην επιφάνεια της γης), σε στρώσεις, και οι διάφορες τεκτονικές δράσεις τα αναδύουν με τη μορφή κεκλιμένων στρωμάτων. Οι στρώσεις μπορεί να διαχωρίζουν ένα ιζηματογενές πέτρωμα σε λεπτά (πάχους cm), μέσου πάχους (μερικά m) και τέλος παχιά (πολλά m) στρώματα. Αν δε διακρίνεται στρώση τότε ονομάζονται άστρωτα. Σχετικά με την τεχνική τους συμπεριφορά, επειδή η στρώση είναι επίπεδο αδυναμίας, το λεπτοπλακώδες στρώμα παρουσιάζει τις χαμηλότερες αντοχές. Επιπλέον ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει το φορτίο ενός τεχνικού έργου με το επίπεδο της στρώσης θα παρουσιάζει υψηλότερη ή χαμηλότερη αντοχή το ιζηματογενές πέτρωμα. Γενικά τα πετρώματα αυτά αποσαθρώνονται λιγότερο έντονα από τα πυριγενή. Όμως ενδέχεται να εμφανίσουν:

- Φαινόμενα διάλυσης του συνδετικού υλικού μεταξύ των κόκκων του πετρώματος (κλαστικά πετρώματα).
- Φαινόμενα διόγκωσης λόγω προσρόφησης νερού ( π.χ. ανυδρίτης που μετατρέπεται γύψο).
- Φαινόμενα γενικότερης χαλάρωσης λόγω χαλάρωσης των δεσμών μεταξύ των κόκκων, χωρίς τη διάλυσή τους.

Τα ιζηματογενή πετρώματα γενικά είναι αδιαπέρατα, εκτός από το επιφανειακό τους τμήμα που παρουσιάζεται αποσαθρωμένο. Εξαιρέση αποτελούν τα ανθρακικά πετρώματα που παρουσιάζουν μεγάλη περατότητα λόγω διάλυσής τους από το νερό (ασβεστόλιθοι, δολομίτες) καθώς και τα κροκαλοπαγή που παρουσιάζουν συγκόλληση μεταξύ των κροκαλών με ασβεστιτικό υλικό. Πρέπει όμως να τονισθεί ότι η διάλυση των πετρωμάτων αυτών είναι αργή και δε συντελείται στη διάρκεια ζωής ενός τεχνικού έργου.

## α) Χημικά Ιζηματογενή Πετρώματα

Ο καθαρός **ασβεστόλιθος** είναι λευκός, είναι πέτρωμα με υψηλές αντοχές κατάλληλο για δομικά έργα. Το ειδικό βάρος του ασβεστόλιθου είναι  $2,7\text{g/cm}^3$  και η αντοχή σε θλίψη  $800\text{ kg/cm}^2$  έως  $1800\text{ kg/cm}^2$ . Ωστόσο η συμπεριφορά τους αλλάζει όταν έχουν προσβληθεί από καρστική διάβρωση. Η ύπαρξη κραστικών κενών δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα τόσο στις θεμελιώσεις τεχνικών έργων, όσο και στην διάνοιξη σηράγγων. Στις σήραγγες είναι σημαντικό να καθοριστεί αν η διάτρηση γίνεται κάτω από την στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (ζώνη κορεσμού πετρώματος), είτε πάνω από αυτή (ζώνη μετάβασης) με αιφνίδιες παροχές νερού λόγω βροχοπτώσεων στην επιφάνεια του εδάφους και γρήγορη κατείσδυση.

Οι **δολομίτες** αποτελούνται από μίγμα αθρακικών αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου. Παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά με τους ασβεστόλιθους, όμως η καρστικοποίηση τους είναι λιγότερο έντονη λόγω της ύπαρξης των αλάτων μαγνησίου που διαλύονται δυσκολότερα από το νερό και παραμένει ως άμμος μέσα στις ρωγμές και στους καρστικούς αγωγούς του πετρώματος.

## 4.4 ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα προέρχονται από τη μεταμόρφωση πετρωμάτων που προϋπήρχαν (πυριγενή ή ιζηματογενή). Η μεταμόρφωση αλλάζει τη διάταξη των ορυκτών δημιουργώντας ζωνώδη ή σχιστοφυή ιστό κάτω από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Έτσι τα ορυκτά ανακρυσταλλώνονται και αναδιατάσσονται.

Το κύριο χαρακτηριστικό του ιστού των πετρωμάτων αυτών είναι η παράλληλη διάταξη των ορυκτών τους, με συνέπεια να εμφανίζονται επίπεδα (επίπεδα αδυναμίας), με μειωμένης αντοχής ορυκτά (όπως μαρμαρυγίες και γλωρίτες), που οδηγούν σε διαχωρισμό των πετρωμάτων αυτών, κυρίως στους σχιστόλιθους, σε φύλλα ή λεπτές πλάκες. Επιπλέον χαρακτηριστικό των πετρωμάτων αυτών είναι και η έντονη ανισοτροπία.

Τα επίπεδα σχιστότητας και ο προσανατολισμός τους σε σχέση με τον προσανατολισμό της φόρτισης είναι καθοριστικά για τη συμπεριφορά των **σχιστόλιθων**. Παρουσιάζουν χαμηλή αντοχή σε διάτμηση ή εφελκυσμό όταν φορτίζονται παράλληλα ή κάθετα στις επιφάνειες σχιστότητας. Οι ταλκικοί σχιστόλιθοι παρουσιάζουν λείες επιφάνειες σχιστότητας με σαπωνοειδή υφή λόγω της παρουσίας του τάλκη (σκληρότητα 1 της κλίμακας Mohs). Οι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε θλίψη και κάμψη, αλλά εμφανίζουν αστάθεια σε δυσμενείς προσανατολισμούς στα πρηνή. Είναι στεγανοί σχηματισμοί,

με εξαίρεση τα ανώτερα τμήματα που παρουσιάζουν μικρή περατότητα λόγω των επιφανειακών ρωγμών.

Το **μάρμαρο** προέρχεται από την μεταμόρφωση του ασβεστόλιθου και ξεχωρίζει από αυτόν λόγω του ολοκρυσταλλικού ιστού. Δεν παρουσιάζει αποσάθρωση, και μόνο τα ανώτερα τμήματά του, κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, παρουσιάζουν ρωγμές που όμως κλείνουν με το βάθος. Παρουσιάζει πολύ υψηλές αντοχές, αλλά όταν βρίσκεται σε περιβάλλον που υπάρχουν οξείδια του θείου αλλοιώνεται προς γύψο και αποφλοιώνεται (π.χ. σε προσόψεις κτιρίων που χρησιμοποιείται ως διακοσμητικό στοιχείο). Στην Ελλάδα απαντάται στη Πάρο, Αττική, Πεντέλη, Υμητό, Λαύριο, Σκύρο, Τήνο, Θάσο, Εύβοια, Μάνη, Κοζάνη, Λάρισα, Λακωνία.

#### 4.5 ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Τα τεχνικά έργα κατά κανόνα κατασκευάζονται επί ή εντός κερματισμένου βραχώδους υλικού, δηλαδή σε βραχώμαζα, και όχι σε άρρηκτο βράχο. Σε ένα άρρηκτο πέτρωμα οι διατμητικές τάσεις μπορεί να προκαλέσουν ψαθυρή θραύση κάτω από πολύ υψηλές τάσεις π.χ. σε βαθιές σήραγγες. Γενικά σκληροί και υψηλής αντοχής σχηματισμοί προσφέρονται για θεμελιώσεις τεχνικών έργων.

Εάν εξαίρεσει κανείς τις πλέον ασθενείς φάσεις των σχιστόλιθων, μαργόλιθων, μαργών, πυροκλαστικών πετρωμάτων και ορισμένους τύπους εύθρυπτων ψαμμιτών υπάρχουν λίγοι σχηματισμοί μη ικανοί, να αντέξουν μεγάλες φορτίσεις (π.χ. φορτία υψηλών φραγμάτων). Γενικά κατάλληλοι για θεμελίωση φραγμάτων είναι οι σκληροί και υψηλής αντοχής σχηματισμοί. Πετρώματα τα οποία είναι πολύ υδατοπερατά, λόγω διακλάσεων, ρηγμάτων και ζωνών επαφής προκαλούν σοβαρά προβλήματα διαφυγών νερού και έτσι για την στεγανοποίησή τους θα πρέπει να ληφθούν προστατευτικά μέτρα (π.χ. τσιμεντενέσεις). Στην περίπτωση ενός φράγματος βαρύτητας (κατασκευασμένο από σκυρόδεμα) μπορεί να χρειάζονται και κουρτίνες τσιμεντενέσεων, για τη μείωση της παραμορφωσιμότητας και της αύξησης της μηχανικής αντοχής της υποκείμενης βραχώμαζας. Όσον αφορά στις συνθήκες θεμελίωσης σε χαλαρούς σχηματισμούς, μπορούν να προκύψουν προβλήματα διαφορικής καθίζησης (differential settlement) ή ολίσθησης από την παρουσία ασθενών στρωμάτων (όπως π.χ. τόφοι). Ο σχισμός (cleavage), η σχιστότητα (schistosity) και η φύλλωση (foliation) μπορεί να επηρεάσουν δυσμενώς την αντοχή και προκαλούν προβλήματα ευστάθειας των βραχώδων σχηματισμών. Επίσης, οι διακλάσεις, διαρρήξεις, ρήγματα και ζώνες διάτμησης δημιουργούν έναν σαθρό μανδύα πετρώματος (σε πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα), ο οποίος σε περιπτώσεις θεμελιώσεων φραγμάτων, θα πρέπει να απομακρύνεται ή να ενισχύεται. Μικρό άνηγμα των διακλάσεων κατά την εκσκαφή οδηγεί σε ανεπαίσθητη περιστροφή και ολίσθηση βραχώδων μαζών, που είναι δυνατόν να μειώσουν σημαντικά την αντοχή και δυσκαμψία της υποκείμενης βραχώμαζας.

Επίπεδες διακλάσεις, παράλληλες στην τοπογραφική επιφάνεια, μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της ευστάθειας στα πρανή της κοιλάδας. Μεγάλης κλίμακας επί τόπου δοκιμές μπορεί να είναι απαραίτητες για τη μέτρηση της διατμητικής αντοχής και επιδεκτικότητας σε ολίσθηση, η τελευταία μάλιστα είναι κρίσιμη εάν τα πετρώματα κλίνουν προς τα κατόντη. Μερικοί σχιστόλιθοι γίνονται ολισθηροί με την αποσάθρωση και αστοχούν κάτω από μικρές ακόμα φορτίσεις.

Σημαντικός είναι ο ρόλος των χαρακτηριστικών της βραχώμαζας για διάφορα τεχνικά έργα, (π.χ. σήραγγες, πρανή, θεμελιώσεις, μεταλλεία):

- Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού, η οποία προσδιορίζεται με εκτέλεση της εργαστηριακής δοκιμής σε ακέραιο τμήμα του πετρώματος.
- Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, όπου προκύπτει από συστηματικές μετρήσεις στην ύπαιθρο. Προτιμάται η μεγάλη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών.
- Η κατάσταση των ασυνεχειών, για παράδειγμα είναι προτιμότερο να υπάρχουν πολύ τραχείες επιφάνειες, με σκληρά τοιχώματα παρά να υπάρχουν ολισθηρές επιφάνειες με συνεχείς διακλάσεις.
- Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με την γεωμετρία του τεχνικού έργου (προσανατολισμός άξονα σήραγγας, μέτωπο πρανούς κ.λ.π.).
- Οι υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του έργου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν για την μηχανική συμπεριφορά σκληρών βράχων σε διάφορους τύπους φόρτισης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά αποτελέσματα τα οποία είχε κάνει ο Mogi, για τους εξής βράχους: δολομίτη, ασβεστόλιθο, γρανίτη, μάρμαρο, τραχειίτη, ανδεδσίτη, μονζονίτη, περιδοτίτη και σχιστόλιθο. Τα πετρώματα υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη, σε συμβατική τριαξονική δοκιμή θλίψης ( $\sigma_2 = \sigma_3$  ή  $\sigma_1 = \sigma_2$ ) και σε πραγματική τριαξονική δοκιμή θλίψης ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ). Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών συζητούνται στη συγκεκριμένη εργασία, σχετικά με την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  στην αντοχή σε θραύση και στην παραμορφωση. Επίσης γίνεται συζήτηση του σημαντικού ρόλου που έχει η επίδραση της ανομοιογένειας και της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά ενός πετρώματος.

Η μονοαξονική θλίψη είναι η πιο διαδεδομένη πειραματική διαδικασία για την μελέτη της ψαθυρής και όλκιμης συμπεριφοράς ενός πετρώματος. Χρειάζεται όμως να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην διαμόρφωση του δοκιμίου. Το δείγμα δεν πρέπει να έρθει σε απευθείας επαφή με την χαλύβδινη κεφαλή φόρτισης, διότι οι ελαστικές ιδιότητες αυτών των δύο υλικών είναι διαφορετικές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ακτινικών διατμητικών δυνάμεων στο εσωτερικό του πετρώματος, οι οποίες προκαλούν σύσφιξη στη βάση του κυλινδρικού δοκιμίου. Έτσι αναπτύσσεται συγκέντρωση τάσης και σε περίπτωση που μια θραύση διαδίδεται στην περιοχή κοντά στο άκρο του δείγματος, η ανάπτυξη της θραύσης μπορεί να παρεμποδιστεί. Τα δύο αυτά αποτελέσματα επηρεάζουν, με διαφορετικό τρόπο, την φαινόμενη αντοχή ενός τυπικού βραχώδους υλικού, δηλαδή η συγκέντρωση τάσης τείνει να μειώνει, ενώ αντίθετα η σύσφιξη τείνει να αυξάνει την φαινόμενη αντοχή.

Κάποιες από τις προτάσεις οι οποίες αναπτύχθηκαν για να εξαλείψουν το φαινόμενο της σύσφιξης είναι οι ακόλουθες: α) Η εφαρμογή διαφόρων ειδών λιπαντικών μεταξύ της επιφάνειας του άκρου του πετρώματος και της χαλύβδινης πλάκας. Όμως αναπτύσσονται κατακόρυφες ρωγμές οι οποίες εκτείνονταν από τα δύο άκρα του δοκιμίου του πετρώματος προς το μέσο του. Η χρήση λιπαντικού στο δείγμα του πετρώματος είναι υπεύθυνη για την δημιουργία του παραπάνω φαινομένου. Επομένως επηρεάζει την αντοχή σε θλίψη και για αυτόν τον λόγο η μέθοδος δεν ενδείκνυται. β) Η χρήση μιάς μεταλλικής κεφαλής η οποία έχει πανομοιότυπες μηχανικές ιδιότητες με το πέτρωμα. Με αυτό τον τρόπο δεν αναπτύσσεται συγκέντρωση τάσεων στις γωνίες, διότι δεν αναπτύσσονται δυνάμεις διάτμησης στη διεπιφάνεια της κεφαλής με το πέτρωμα. Στην πραγματικότητα, είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να «ταιριάξουν» οι μηχανικές ιδιότητες ενός πετρώματος με τα μέταλλα, άρα η προσέγγιση αυτή δεν είναι ρεαλιστική.

Έγιναν και άλλες προτάσεις από διάφορους επιστήμονες, αλλά αυτή που επικατεί μέχρι σήμερα είναι του Mogi. Το δείγμα είναι ένας μακρύς κύλινδρος του οποίου τα άκρα έρχονται σε επαφή με τον χάλυβα μέσω εποξικού υλικού (epoxy), το οποίο περιλαμβάνει μία λεπτή επίστρωση με λεπτά σωματίδια χάλυβα. Το πάχος του εποξικού υλικού μειώνεται σταδιακά από τα ακραία τεμάχια χάλυβα προς το μέσο του δοκιμίου για να σχηματίσει μία λεία επίστρωση. Τέλος ο λόγος μήκους/διαμέτρου πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 2.5, από αυτή τη τιμή και πάνω, η αντοχή θα παραμένει σταθερή και θα είναι ίση με την πραγματική αντοχή του δείγματος υπό ομοιόμορφη θλίψη.

Οι επιδράσεις άκρου (end effects) μπορούν να μετρηθούν αν υπάρξει πλευρική πίεση και γίνονται πολύ μικρές υπό πλευρική πίεση μεγαλύτερη από 30-50 MPa. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το σχήμα του δοκιμίου καθίσταται λιγότερο κρίσιμο σε υψηλή πίεση και έτσι η συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης μπορεί επίσης να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι δοκιμές τριαξονικής θλίψης χρησιμοποιούνται στη μηχανική των πετρωμάτων για την κατανόηση της συμπεριφοράς του πετρώματος υπό διάφορες τριδιάστατες εντατικές καταστάσεις, καθώς και για την επαλήθευση των μαθηματικών και αριθμητικών μοντέλων πρόβλεψης αυτής της συμπεριφοράς. Η απλούστερη και συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την επίτευξη τριαξονικής εντατικής κατάστασης σε ένα δοκίμιο πετρώματος στο εργαστήριο είναι η συμβατική τριαξονική δοκιμή, όπου στο πέτρωμα ασκείται η μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$ , ενώ οι άλλες δύο κύριες τάσεις είναι ίσες μεταξύ τους και ίσες με την πίεση στην πλευρική επιφάνεια του δοκιμίου ( $\sigma_2 = \sigma_3 = p$ ). Η συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης χρησιμοποιείται συχνότερα στα εργαστήρια μηχανικής πετρωμάτων, κυρίως για πρακτικούς λόγους, μεταξύ των οποίων είναι η ευκολία προετοιμασίας των δοκιμίων, η σχετική ευκολία εφαρμογής των τάσεων και μέτρησης των παραμορφώσεων του δοκιμίου. Σε αυτή την εργασία φαίνεται η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  στην αντοχή θραύσης και στην παραμόρφωση των πετρωμάτων. Συνεπώς η συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης, η οποία δεν περιλαμβάνει αυτή την επίδραση, δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα.

Σύμφωνα με πολλές πειραματικές μελέτες που έγιναν συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από την συμβατική τριαξονική δοκιμή ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) με τα αποτελέσματα της δικιμής εφελκυσμού ( $\sigma_1 = \sigma_2 < \sigma_3$ ), διαπιστώθηκε πως υπάρχει διαφορά μεταξύ των καμπυλών  $\sigma_1 - \sigma_3$ . Συνεπώς δεν μπορεί να παραληφθεί η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης, και κατά συνέπεια τα γραμμικά κριτήρια αστοχίας είναι ασυμβίβαστα με αυτά τα αποτελέσματα (όπως τα κριτήρια Coulomb, Mohr, Griffith και τροποποιημένο κριτήριο Griffith). Τα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα : α) Η αντοχή στη θραύση αυξάνεται όχι μόνο με την αύξηση της  $\sigma_3$ , αλλά και με την αύξηση της  $\sigma_2$ , εκτός από πολύ υψηλές τιμές της  $\sigma_2$ . β) Η εξάρτηση της  $\sigma_2$  είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη της  $\sigma_3$ , αλλά η επίδραση της  $\sigma_2$  είναι επίσης σημαντική. γ) Οι επιδράσεις των  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  φαίνεται να είναι σχεδόν ανάλογες μεταξύ τους. δ) Η ολκιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της  $\sigma_3$ , αλλά μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της  $\sigma_2$ .

Η επίδραση της ανομοιογένειας και της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά των σκληρών πετρωμάτων είναι επίσης αξιοσημείωτη. Ένας ανομοιογενής βράχος χωρίζεται σε δύο μέρη, στην περιοχή Α στην οποία το πέτρωμα εμφανίζεται ισχυρότερο και στην περιοχή Β στην οποία το πέτρωμα εμφανίζεται ασθενέστερο σε σχέση με την τάση θραύσεως της περιοχής Α. Εάν όλα τα δεδομένα χρησιμοποιούνται χωρίς να ληφθεί υπόψη η προαναφερθείσα ανομοιογένεια των πετρωμάτων δεν μπορεί να επιτευχθεί σημαντικό αποτέλεσμα στη επίδραση της  $\sigma_2$ . Έτσι, το πείραμα της πραγματικής τριαξονικής θλίψης ενός ανομοιογενούς βράχου πρέπει να πραγματοποιείται με την εφαρμογή μιας μεθόδου, στην οποία «χωρίζουμε» το δείγμα σε δύο περιοχές. Η επίδραση της  $\sigma_2$  είναι ουσιαστικά παρόμοια με τους ομοιογενείς βράχους. Έπειτα η ανισοτροπία είναι ένα από τα πιο ξεχωριστά χαρακτηριστικά που πρέπει να δοθεί η δέουσα προσοχή στην μηχανική πετρωμάτων σε θέματα που αφορούν έργα πολιτικού μηχανικού. Η ανισοτροπία των ιδιοτήτων των πετρωμάτων οφείλεται κυρίως στις παρουσίες των σχισμών, των φυλλώσεων, των επιπέδων στρώσης, της σχιστότητας, των ασυνεχιών και των μικρών ή μακροσκοπικών ατελειών. Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι προσανατολισμοί των επιπέδων φύλλωσης.

Εν κατακλείδι, η πραγματική τριαξονική δοκιμή θλίψης δείνει τα ακριβέστερα αποτελέσματα, λόγω της εντατικής κατάστασης η οποία προσομοιάζει αυτή του πεδίου. Πριν γίνει η εκτέλεση του πειράματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αν το πέτρωμα είναι ομοιογενές και ισότροπο ή αν είναι ανομοιογενές και ανισότροπο, διότι διαφορετικά θα εξετρασθούν τα εκάστοτε αποτελέσματα.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξενόγλωσσες:

1. B. Haimson & C. Chang (1999). A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite.
2. X. Li, L. Shi, B. Bai, Q. Li & D. Xu (2012). True-triaxial testing techniques of rocks – State of the art and future perspectives.
3. Matsukura Y, Hashizume K, Oguchi CT.(2002) Effect of microstructure and weathering on the strength anisotropy of porous rhyolite. Eng Geol
4. Am. Concrete Inst. (A.C.I.) (1914). Report of committee on specifications and methods of tests for concrete materials. Proc. Am. Concrete Inst.
5. Shuai Henga, Yingtong Guoa, Chunhe Yanga, Jack J.K. Daemenb, Zhi Li (2015). Experimental and theoretical study of the anisotropic properties of shale.
6. Brace, W.F.(1964). Brittle fracture of rocks. In: State of stress in the Earth's Crust. Judd, W.R. (ed.) NewYork: Elsevier.
7. Dreyer, W. and H. Borchert. (1961). Zur Druckfestigkeit von Salzgesteinen. Kali und Steinsalz, Heft.
8. Fairhurst, C. (1961). Laboratory measurement of some physical properties of rock. In 4th Symp. on Rock Mechanics, Bull. Mineral Industries Expt. Sta. Penn. State Univ., No. 76. Hartman,H.L.
9. Filon, L.N.G. (1902). On the elastic equilibrium of circular cylinders under certain practical systems of load. Phil.Trans.R.Soc., London, Ser.
10. Gonnerman, H. F. (1925). Effect of size and shape of test specimen on compressive strength of concrete.Proc.A.S.T.M.
11. Johnson, J.W. (1943). Effect of height of test specimen on compressive strength of concrete. A.S.T. M.Bulletin.
12. Mogi, K. (1966). Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive stress. Felsmechanik und Ingenieurgeologie.
13. Mogi K. (2007). Experimental Rock Mechaninics, Taylor and Francis, Balkema.
14. Nadai, A. (1924). Über die Gleitund Verzweigungsflächen einiger Gleichgewichtszustände, Z.Physik.
15. Handin, J. (1966). Strength and ductility. In: Handbook of Physical Constants, Revised ed., Clark, S.P.(ed.), Geol. Soc. Am. Memoir.
16. Handin J. (1969). On the Coulomb-Mohr failure criterion. J.Geophys. Res.
17. Handin, J. and R. V. Hager. (1957). Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: tests at room temperature on dry samples. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.
18. Kármán, T. von (1911). Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. Z.Verein. Dtsch. Ing.
19. Mogi, K. (1964). Deformation and fracture of rocks under confining pressure (1) Compression tests on dry rock sample. Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.

20. Al-Harathi AA. Effect of planar structures on the anisotropy of Ranyeh sandstone, Saudi Arabia. Eng Geol 1998.
21. Kohl T, Evansi KF, Hopkirk RJ, et al. Coupled hydraulic, thermal and mechanical considerations for the simulation of hot dry rock reservoirs. Geothermics 1995.
22. Hudson JA, Stephansson O, Andersson J. Guidance on numerical modelling of thermo-hydro-mechanical coupled processes for performance assessment of radioactive waste repositories. Int J Rock Mech Min Sci 2005.
23. Kim H, Cho JW, Song I, et al. Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea. Eng Geol 2012.
24. Tien YM, Kuo MC. A failure criterion for transversely isotropic rocks. Int J Rock Mech Min Sci 2001.

#### **Ελληνόγλωσσες:**

25. Εφραιμίδης Γ. (2018), Βραχομηχανική, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
26. Ανδρέας Α. Αντωνίου Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Εφαρμογές τεχνικής γεωλογίας στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού, 2005.
27. Δημοκρίτειο Παν/μιο Θράκης, τμ. Πολιτικών μηχανικών, Σημειώσεις μαθήματος Δομικά Υλικά.
28. ΤΕΙ Θεσσαλίας, Σημειώσεις μαθήματος Ιδιότητες Υλικών, Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>.

#### **Διαδίκτυο:**

29. Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης:  
<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo317y/>
30. [https://www.researchgate.net/figure/Microscopic-and-SEM-photos-of-chert-and-dolomite-a-b-and-c-are-microscopic-photos\\_fig2\\_314714731](https://www.researchgate.net/figure/Microscopic-and-SEM-photos-of-chert-and-dolomite-a-b-and-c-are-microscopic-photos_fig2_314714731)
31. [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3477/1/02\\_chapter\\_06.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3477/1/02_chapter_06.pdf)