



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εργαστηριακή διερεύνηση της επίδρασης του βαθμού
ρωγμάτωσης των πετρωμάτων στην ταχύτητα
διάδοσης των υπερήχων**

ΚΑΛΛΙΜΟΓΙΑΝΝΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Επιβλέπων:

Τσιαμπάος Γεώργιος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων:

Σαρόγλου Χαράλαμπος

Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2016

**Εργαστηριακή διερεύνηση της επίδρασης του βαθμού
ρωγμάτωσης των πετρωμάτων στην ταχύτητα
διάδοσης των υπερήχων**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον κύριο Γεώργιο Τσιαμπάο, Καθηγητή του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.), επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της εργασίας, την καθοδήγηση και τη βοήθειά του, καθώς και για τις προϋποθέσεις που δημιούργησε προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι εργαστηριακές δομικές στο εργαστήριο Βραχομηχανικής και Τεχνικής Γεωλογίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Χάρη Σαρόγλου, Διδάκτωρ του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση και την παροχή του θεωρητικού υποβάθρου καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, τη βοήθεια διαμόρφωσης των δοκιμών και την εκτέλεση των δοκιμών καθώς και την βοήθειά αντιμετώπισης των προβλημάτων που δημιουργήθηκαν στο εργαστήριο. Επίσης τον ευχαριστώ θερμά για τις υποδείξεις και τις ιδέες του στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων, τις διορθώσεις και τη συνεχή στήριξη κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Ο αστείρευτος ενθουσιασμός του για έρευνα αποτέλεσε έμπνευση για εμένα.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον κύριο Παύλο Π. Νομικό, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μεταλλείων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την δυνατότητα διεξαγωγής της δοκιμής Ακουστικής Εκπομπής στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, την παροχή γνώσης της εκτέλεση και του θεωρητικού υποβάθρου της δοκιμής και της ενασχόλησης του στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη συμπαράσταση, την ενθάρρυνση και την πολύτιμη στήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια.

Καλλιμογιάννης Βασίλειος ,

Ιούλιος 2016

Περιεχόμενα

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ABSTRACT.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.1 ΑΡΡΗΚΤΟ ΠΕΤΡΩΜΑ	15
1.1.1 Αντοχή άρρηκτου πετρώματος (Intact Rock Strength)	15
1.2 ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΟ ΠΕΤΡΩΜΑ-ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ.....	16
1.2.1 Ταξινόμηση βραχομάζας	16
1.2.1.1 Σύστημα RMR (Biewniawski, 1973)	16
1.2.1.2 Σύστημα Q (Barton, 1974)	18
1.2.1.3 Σύστημα GSI (Hoek & Μαρίνος, 2000).....	19
1.2.2 Αντοχή Βραχομάζας (Rockmass strength).....	22
1.3 ΓΡΑΝΙΤΗΣ.....	23
1.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά Γρανιτών	23
1.3.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά Γρανιτών.....	26
1.3.2.1 Αντοχή σε θλίψη.....	26
1.3.2.2 Αντοχή σε εφελκυσμό	26
1.3.2.3 Μέτρο ελαστικότητας.....	27
1.4 Εγκάρσια και διατμητικά κύματα (P,S)	28
1.4.1 Κύματα P (Primary waves-Πρωτεύοντα κύματα).....	28
1.4.2 Κύματα S (Secondary waves-Δευτερεύοντα κύματα).....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΤΑΣΗ.....	30
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΓΡΑΝΙΤΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ.....	30
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ.....	32
2.2.1 Θεωρία του Griffith (1920)	32
2.2.2 Γεωμετρία μικρορωγμών.....	36
2.2.3 Διαφορές μικρορωγμάτωσης σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη	38

2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΩΝ (σ_{ci}) ΚΑΙ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ (σ_{cd}).....	39
2.3.1 Εντοπισμός σ_{ci} και σ_{cd} με βάση τα δεδομένα παραμόρφωσης.....	39
2.3.1.1 Εντοπισμός σ_{ci}	39
2.3.1.2 Εντοπισμός σ_{cd}	41
2.3.2 Ακουστική Εκπομπή.....	42
2.3.2.1 Συσχέτιση Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ) με τα στάδια ρωγμάτωσης. ...	45
2.3.2.2 Εντοπισμός σ_{ci} και σ_{cd} με τη μέθοδο Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ).....	47
2.4 Αποτύπωση ρωγμάτωσης.....	49
2.4.1 Δείκτης P_{10}	50
2.4.2 Δείκτης P_{20}	51
2.4.3 Δείκτης P_{21}	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΕΠΙΜΗΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	53
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	53
3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	54
3.2.1 Τύπος του πετρώματος	54
3.2.2 Αποσάθρωση	58
3.2.3 Βαθμός κορεσμού.....	59
3.2.4 Θερμοκρασία	60
3.3 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ.....	61
3.3.1 Συσχέτιση ταχυτήτων διάδοσης και βαθμού ρωγμάτωσης χωρίς προϋπάρχοντα δεδομένα.....	62
3.3.2 Προσέγγιση με δύο υπάρχουσες συσχετίσεις ταχυτήτων και βαθμού ρωγμάτωσης.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	67
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	67
4.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ-ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	67
4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	72
4.3.1 Εισαγωγή	72
4.3.2 Προσδιορισμός δείκτη πόρων και πορώδους (με τη χρήση μικρομέτρου και συσκευής κενού).....	73
4.4 ΣΥΣΚΕΥΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ-ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΡΧΙΚΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ (ULTRA SONIC PULSE METHOD)	76

4.4.1 Δοκιμή υπερήχων	76
4.4.2 Αποτελέσματα δοκιμής υπερήχων.....	80
4.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	85
4.5.1 Εισαγωγή	85
4.5.2 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	86
4.5.3 Δοκιμή τριαξονικής θλίψης	89
4.5.4 Δοκιμή αντιδιαμετρικής Θλίψης (Brazilian)	94
4.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΚΑΙ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΩΝ	97
4.6.1 Προσδιορισμός E, ν και των τάσεων σ_{ci} και σ_{cd} μέσω των δεδομένων παραμόρφωσης της μονοαξονικής δοκιμής.....	97
4.6.2 Προσδιορισμός σ_{ci} και σ_{cd} μέσω της δοκιμής ακουστικής εκπομπής (ΑΕ).	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΔΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	114
5.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	114
5.1.1 Καταγραφή ταχυτήτων σε ποσοστά της αντοχής των δοκιμίων	114
5.1.2 Καταγραφή ταχυτήτων με βάση τους δείκτες ρωγμάτωσης	114
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	116
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	129
5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ..	143
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	143
6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	143
6.2.1 Μονοαξονική-Τριαξονική Θλίψη.....	143
6.2.2 Μονοαξονική θλίψη-Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian).....	147
6.2.3 Συνδυαστικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών	149
6.3 ΠΙΝΑΚΕΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	155
6.4 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	157
6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ	164

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	168
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	172
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-1: ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ: Δοκιμές με σκοπό τον υπολογισμό E_v και σ_{ucs}.....	181
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-2: ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ: Δοκιμές σε στάδια φόρτισης μεκαταγραφή ταχυτήτων.....	190
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-3: ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ: Δοκιμές με σκοπό τον υπολογισμό της αξονικής τάσης αστοχίας σ_1 για ορισμένες πλευρικές τάσεις σ_3 με καταγραφή ταχυτήτων στη θραύση.....	203
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-4: ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ: Δοκιμές σε στάδια φόρτισης με καταγραφή ταχυτήτων.....	213
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-5: ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ: Υπολογισμός εφελκυστικής αντοχής-Καταγραφή ταχυτήτων στην αρχική κατάσταση και στη θραύση των δοκιμίων-Αποτύπωση ρωγμάτωσης.....	231
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-6: Ακουστική Εκπομπή.....	238

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

σ_{cc} (MPa): Τάση κλεισίματος των μικρορωγμών (crack closure stress).

σ_{ci} (MPa): Τάση έναρξης της μικρορωγμάτωσης (crack initiation stress).

σ_{cd} (MPa): Τάση ασταθούς διάδοσης των μικρορωγμών (crack damage stress).

σ_{ucs} (MPa): Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.

σ_t (MPa): Εφελκυστική αντοχή.

$P_{10} \left(\frac{\text{Ίχνη}}{\text{Μήκος γραμμών}} \right)$: Δείκτης ρωγμάτωσης της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων.

$P_{20} \left(\frac{\text{Ίχνη}}{\text{Εμβαδόν Δοκιμίου}} \right)$: Δείκτης ρωγμάτωσης της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων.

$P_{21} \left(\frac{\text{Μήκος Ρωγμών}}{\text{Εμβαδόν Δοκιμίου}} \right)$: Δείκτης ρωγμάτωσης της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων.

V_p (m/s): Ταχύτητα διάδοσης επιμήκων κυμάτων.

V_s (m/s): Ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων.

E_d (GPa): Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας.

E_{tangent} (GPa):: Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας.

G_d (GPa):: Δυναμικό μέτρο διάτμησης.

ν_d : Δυναμικός λόγος Poisson.

ρ (Mg/m³): Πυκνότητα του πετρώματος.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής γίνεται διερεύνηση της επίδρασης του βαθμού ρωγμάτωσης γρανιτικού πετρώματος στις ταχύτητες διάδοσης υπερήχων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές με σκοπό την ελεγχόμενη ρωγμάτωση μίας σειράς δοκιμίων του πετρώματος υπό θλιπτική και εφελκυστική τάση και στη συνέχεια τον προσδιορισμό της μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων.

Τα ψαθυρά πετρώματα κατά τη φόρτισή τους υφίστανται την διεργασία ρωγμάτωσης η οποία στα αρχικά στάδια αναπτύσσεται σε μικροσκοπική κλίμακα (μικρορωγμάτωση). Η μικρορωγμάτωση αυτή είναι μία διαδικασία κατά την οποία καταστρέφονται οι δεσμοί συγκόλλησης των κόκκων καθώς νέες ή ήδη υπάρχουσες μικρορωγμές επεκτείνονται στο άρρηκτο υλικό, με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης. Η έναρξη, διάδοση και συνένωση των μικρορωγμών είναι η διαδικασία η οποία οδηγεί τελικά το πέτρωμα στη θραύση. Η πορεία ρωγμάτωσης του πετρώματος έχει θεμελιώδη σημασία στην επίδραση της μεταβολής των ταχυτήτων διάδοσης υπερήχων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επίδρασης του βαθμού ρωγμάτωσης γρανιτικού πετρώματος στις ταχύτητες διάδοσης των επίμηκων και των διατμητικών κυμάτων στο εργαστήριο.

Η διερεύνηση έγινε σε γρανιτικό πέτρωμα δεδομένου ότι η θραύση του είναι καθαρά ψαθυρή και υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τη διαδικασία ρωγμάτωσης στη βιβλιογραφία. Το γρανιτικό πέτρωμα προέρχεται από την περιοχή της Αττικής και συγκεκριμένα από γρανοδιοριτική διείδυση στην Πλάκα Κερατέας.

Αρχικά, εξετάστηκε η διαδικασία μικρορωγμάτωσης του πετρώματος με την υποβολή δοκιμίων σε μονοαξονική φόρτιση. Η διαδικασία αυτή χωρίζεται σε στάδια που ορίζονται από :

- ✓ το κλείσιμο,
- ✓ την έναρξη και
- ✓ τη διάδοση των μικρορωγματώσεων

Εκφράζονται σε ποσοστά της αντοχής του πετρώματος για κάθε δοκιμή. Ο εντοπισμός τους πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση των δεδομένων παραμόρφωσης στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και μέσω των παραμέτρων των ηχητικών κυμάτων που καταγράφηκαν στη δοκιμή ακουστικής εκπομπής.

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας ήταν η συσχέτιση της μείωσης των ταχυτήτων διάδοσης υπερήχων σε σχέση με τον αυξανόμενο βαθμό ρωγμάτωσης του πετρώματος. Η αρχική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η φόρτιση, σε μονοαξονική θλίψη, των δοκιμίων σε ορισμένα ποσοστά επί της αντοχής του πετρώματος. Για το λόγο αυτό, αρχικά έγινε ο εντοπισμός της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικές συνθήκες φόρτισης. Στη συνέχεια, έγινε η φόρτιση δοκιμίων σε διάφορα ποσοστά επί της αντοχής και καταγράφηκε η μεταβολή των ταχυτήτων διάδοσης.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, η μεταβολή των ταχυτήτων που καταγράφηκε ήταν εξαιρετικά μικρή ($< 0,5\%$) με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η άμεση συσχέτιση της μείωσης των ταχυτήτων με τα στάδια ρωγμάτωσης. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από τα αποτελέσματα της διερεύνησης στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής. Προκειμένου να επιτευχθεί περαιτέρω ρωγμάτωση στα δοκίμια, προτιμήθηκε

διαφορετική μεθοδολογία φόρτισης στη μονοαξονική θλίψη. Η μεθοδολογία που επελέχθηκε, προέβλεπε αρχικά τη φόρτιση των δοκιμίων σε σημαντικό ποσοστό 80% της αντοχής τους (85% - 90%) και στη συνέχεια την επαναφόρτιση σε μικρότερες τάσεις. Με τη διαδικασία αυτή, κατέστη εφικτή η περαιτέρω ρωγμάτωση του πετρώματος χωρίς να επέλθει η θραύση του.

Αντιθέτως, στην τριαξονική δοκιμή, η μεθοδολογία φόρτισης σε ποσοστά της αντοχής είχε ως αποτέλεσμα πιο υψηλή μείωση των ταχυτήτων στα επιμέρους στάδια φόρτισης σε σχέση με την αντίστοιχη στη μονοαξονική θλίψη. Έτσι, η διαδικασία φόρτισης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την αρχική μεθοδολογία.

Για να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης επελέχθηκε να γίνει η καταγραφή της ρωγμάτωσης των δοκιμίων σε κάθε στάδιο φόρτισης και για τις δύο δοκιμές. Για την καταγραφή, χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες P_{10} , P_{20} , P_{21} με τους οποίους αποτυπώνεται και καταγράφεται ποσοτικά η εξωτερική ρωγμάτωση των δοκιμίων. Η επιφάνεια του δοκιμίου και οι ρωγμές που έχουν προκύψει στο εξωτερικό περίβλημα του δοκιμίου αποτυπώνονται σε διαφανές χαρτί και ακολουθείται συγκεκριμένη μεθοδολογία για τον υπολογισμό του κάθε δείκτη. Η χρήση των συγκεκριμένων δεικτών επελέχθηκε, γιατί δεν ήταν εφικτός ο εντοπισμός της μικρορωγμάτωσης με χρήση μικροσκοπίου και η εξέταση λεπτών τομών του πετρώματος.

Επιπρόσθετα, έγιναν δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian) με σκοπό τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής του γρανιτικού πετρώματος αλλά και την καταγραφή των ταχυτήτων στην αρχική κατάσταση και στη θραύση τους. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων καταγραφής των ταχυτήτων με τα δεδομένα των άλλων δοκιμών έγινε με τη χρήση του δείκτη P_{21} αφού ήταν ο μοναδικός δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη δοκιμή.

Με βάση τα παραπάνω, προέκυψε ότι η μείωση των ταχυτήτων με την αύξηση του βαθμού ρωγμάτωσης όπως αυτός εκφράζεται σε κάθε περίπτωση (μέσω των δεικτών P_{10} , P_{20} , P_{21}) είναι σημαντική. Τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης καταδεικνύουν μία σαφώς μικρότερη μείωση των ταχυτήτων διάδοσης υπερήχων με την αύξηση του βαθμού ρωγμάτωσης σε σχέση με τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικής θλίψης. Γενικά, προέκυψε καλή συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων διάδοσης των επίμηκων κυμάτων και των δεικτών ρωγμάτωσης. Η μεταβολή των ταχυτήτων σε όλες τις περιπτώσεις περιγράφεται σε καλό βαθμό από εκθετική συνάρτηση.

ABSTRACT

The objective of the current thesis was to study the effect of the degree of fracturing on the wave velocities of rock. In order to achieve this, a detailed methodology of producing increasing degree of fracturing on intact granite was followed and the respective wave velocities were measured.

Granite was selected as it has brittle behaviour and its crack initiation – damage process is well documented in literature (e.g. Lac du Bonnet granite in Canada). The rock testes originates from a granodioritic intrusion in Plaka, Attica region.

Initially, the microcracking process was studied in detail by performing uniaxial compression tests with stress and strain measurement. The stages of micro-cracking of the granite were identified as follows:

- ✓ crack closure
- ✓ crack initiation
- ✓ crack propagation - damage

These stages are expressed as a percentage of the peak uniaxial compressive strength of the rock. In order to distinguish these stages, the following methods were used:

- Determination of complete stress - strain curves (volumetric strain)
- Acoustic emission tests (AE).

As the objective was to correlate ultrasonic velocities and fracturing degree, a specific testing methodology was selected. The initial methodology was to load the intact rock samples at certain percentages of the peak rock strength and subsequently ultrasonic velocities were recorded.

The resulted in a minor decrease of the wave velocities (<0,5 %), proposing an inadequate correlation of velocities decrease with the stages of cracking. This conclusion constitutes a very important finding.

In order to achieve the extension of cracking damage (network of fractures), an alternative methodology was chosen. The samples were initially loaded to a critical percentage of their peak strength (85% - 90%) in uniaxial compression and then re-loaded in smaller stress levels. Following this procedure, it was possible to achieve a more extensive fracture network without causing sample failure.

Additionally, triaxial tests were performed using the initial methodology (first time loading) and resulted in higher decrease in ultrasonic velocities in comparison with the uniaxial test results.

The degree of fracturing was quantified by recording the trace of visible fractures on the samples's external surface and measured by using the fracture indices P_{10} , P_{20} , P_{21} . The external surface and the fracture pattern of each sample was captured on a

transparent paper and the indices were determined for subsequent stages of loading in uniaxial and triaxial compression. The use of these specific indices was chosen, as the observation of the micro-cracking in thin sections was not feasible, at this stage.

Finally, a number of Brazilian tests were performed in order to determine the tensile strength of the granite and to record the wave velocities of the samples both before and after the tests.

Based on the test results, the decrease of wave velocities of longitudinal and transverse waves in relation to increasing degree of fracturing (as expressed via the indices P_{10} , P_{20} , P_{21}) is significant. The results from the uniaxial tests demonstrate a clearly smaller decrease of the wave velocities in comparison to the triaxial test results (for the same degree of fracturing).

The correlation between longitudinal wave velocity and the degree of fracturing is very good. In all cases, the decay of the ultrasonic velocities with the increasing degree of fracturing is best described by an exponential function.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΡΡΗΚΤΟ ΠΕΤΡΩΜΑ

Με τον όρο άρρηκτο πέτρωμα (intact rock) χαρακτηρίζεται η πολυκρυσταλλική δομή του βραχώδους υλικού μεταξύ δύο διαδοχικών ασυνεχειών (I.S.R.M., 1981). Οι ιδιότητες του εξαρτώνται από τις ιδιότητες των ορυκτών του και από τον τρόπο που είναι συνδεδεμένα.

Το άρρηκτο πέτρωμα απαντάται σπάνια στη φύση ενώ υπάρχουν συχνά μικρορωγμές οι οποίες δεν γίνονται αντιληπτές χωρίς μικροσκόπιο. Στην πράξη θεωρούμε άρρηκτο το πέτρωμα που είναι απαλλαγμένο από μακροσκοπικές ρωγμές. Η μελέτη και η ευρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών του άρρηκτου πετρώματος έχει μεγάλη σημασία στην επιστήμη της βραχομηχανικής αφού για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά μιας βραχομάζας απαιτείται ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του άρρηκτου βράχου.

1.1.1 Αντοχή άρρηκτου πετρώματος (Intact Rock Strength)

Η αντοχή του πετρώματος εκφράζει το μέτρο της μέγιστης επιβαλλόμενης σε αυτό τάσης, με αποτέλεσμα να το οδηγεί σε αστοχία (failure). Η αστοχία του πετρώματος εκφράζεται με τη θραύση του ή με παραμόρφωσή του πάνω από κάποια οριοθετημένα αποδεκτά όρια.

Η αντοχή οφείλεται στις δυνάμεις συνοχής των ορυκτών του πετρώματος, του συνδετικού υλικού, καθώς και στις δυνάμεις τριβής που εμποδίζουν την ολίσθηση. Δεν αποτελεί μία εγγενής ιδιότητα αφού εξαρτάται από το είδος και τον τρόπο επιβολής των τάσεων.

Η αντοχή του πετρώματος ανάλογα με τις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, διακρίνεται σε :

- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη
- Αντοχή σε τριαξονική θλίψη (συνήθως οι δύο από τις κύριες πλευρικές τάσεις συμπίπτουν $\sigma_2 = \sigma_3$)
- Αντοχή σε εφέλκυσμό

1.2 ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΟ ΠΕΤΡΩΜΑ-ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

Με τον όρο βραχομάζα χαρακτηρίζεται η κατάσταση του πετρώματος κατά την οποία τα τεμάχια του άρρηκτου βράχου είναι τεμαχισμένα λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών. Το πλήθος, η τραχύτητα και η διεύθυνση των ασυνεχειών, οι οποίες αποτελούν επίπεδα χαμηλής αντοχής και δυσκαμψίας, καθορίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας.

Η βραχομάζα δεν είναι ομοιογενής, ισότροπη και συνεχής. Συνήθως διασχίζεται από ποικίλες επιφάνειες αδυναμίας, είναι ανομοιόμορφα καταπονημένη ή αποσαθρωμένη και η απόκριση της σε φόρτιση εξαρτάται από τη διεύθυνση καταπόνησης. Επομένως, η απόκριση του πετρώματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των άρρηκτων τεμαχίων πετρώματος και των γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών. Οι ιδιότητες της βραχομάζας καθορίζονται από την ταξινόμηση αυτής.

1.2.1 Ταξινόμηση βραχομάζας (Rockmass classification)

Η ταξινόμηση (ή κατάταξη) της βραχομάζας αναφέρεται στην μεθοδολογία για τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας σύμφωνα με τις ιδιότητες των άρρηκτου πετρώματος και τις ιδιότητες των ασυνεχειών. Η ταξινόμηση της βραχομάζας τυποποιεί το υλικό σε κάποια κατηγορία ενώ δίνει μία εκτίμηση για την μηχανική συμπεριφορά ποσοτικοποιώντας τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας.

Συγκεκριμένα ως προς το θέμα των παραμέτρων μηχανικής συμπεριφοράς, πολλές φορές η ταξινόμηση είναι η μόνη μεθοδολογία που μπορεί να τις παράσχει. Η ταξινόμηση βασίζεται στις φυσικές παρατηρήσεις στα πετρώματα και στις ασυνεχείες τους (αντοχή άρρηκτου πετρώματος, αποστάσεις μεταξύ ασυνεχειών, κατακερματισμός, τραχύτητα, συνθήκες υπογείων υδάτων, κ.α.). Τα συστήματα ταξινόμησης που είναι ευρείας αποδοχής είναι τα:

1.2.1.1 Σύστημα RMR (Biewniawski, 1973)

Προτάθηκε από τον Biewniawski το 1973 και έχει δεχθεί διάφορες τροποποιήσεις (1979). Το σύστημα RMR (**Rock Mass Rating**) βασίζεται στην συνεκτίμηση πέντε παραγόντων:

1. Της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος,
2. του βαθμού κατακερματισμού RQD,
3. την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών,
4. την κατάσταση των ασυνεχειών και
5. την κατάσταση των υπογείων νερών.

Ο δείκτης παίρνει αριθμητικές τιμές μεταξύ 0 και 100 και χαρακτηρίζει την βραχομάζα σε μία από πέντε κατηγορίες I - V (Πολύ καλή - Πολύ πτωχή).

Με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR μπορεί να γίνει προσδιορισμός των μέτρων υποστήριξης σε σήραγγες, εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας, των παραμέτρων αντοχής κ.α.

ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (BIENIAWSKI, 1989)
Ενότητα Α. Παράμετροι – κριτήρια ταξινόμησης και βαθμονόμησή τους

Παράμετροι ταξινόμησης		Εύρος τιμών							
1	Αντοχή άρρηκτου πετρώματος	$I_{S(50)}$ (MPa)	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	Προτιμάται η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης		
		σ_c (MPa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5–25	1–5	<1
	Βαθμός	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25			
	Βαθμός	20	17	13	8	3			
3	Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m)	>2	0.6 – 2	0.2 – 0.6	0.06 – 0.2	< 60 mm			
	Βαθμός	20	15	10	8	5			
4	Κατάσταση ασυνεχειών	Πολύ τραχιές επιφάνειες. Ασυνεχείς. Χωρίς διαχωρισμό. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχιές επιφάνειες. Διαχωρισμός < 1mm. Ελαφρά αποσπασθρόμενα τοιχώματα	Ελαφρά τραχιές επιφάνειες. Διαχωρισμός < 1mm. Πολύ αποσπασθρόμενα τοιχώματα	Ολισθηρές επιφάνειες ή υλικό πλήρωσης < 5 mm ή διακλάσεις ανοικτές 1-5 mm. Συνεχείς διακλάσεις	Μαλακό υλικό πλήρωσης πάχους > 5mm ή διακλάσεις ανοικτές > 5mm. Συνεχείς διακλάσεις			
	Βαθμός	30	25	20	10	0			
5	Υπόγειο νερό	Εισροή για 10 m μήκους σήραγγας (l/m)	καμία	< 10	10 – 25	25 – 125	> 125		
		Τιμή λόγου (πίεση νερού διακλάσεων / μέγιστη κυρία τάση)	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5		
	Γενικές συνθήκες	Εντελώς στεγνό	Μέτρια υγρό	Υγρό μόνο	Νερό σε μέτρια πίεση	Ροή νερού			
	Βαθμός	15	10	7	4	0			
Συνολική βαθμολογία παραμέτρων ταξινόμησης από 1 μέχρι 100 : RMR_{bas}									

Παράμετρος	Βαθμοί				
Συνέχεια	<1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m
	6	4	2	1	0
Διαχωρισμός (άνοιγμα)	Κανένα	<0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	>5 mm
	6	5	4	1	0
Τραχύτητα	Πολύ τραχιές	Τραχιές	Ελαφρά τραχιές	Ομαλές	Ολισθηρές
	6	5	3	1	0
Υλικό πλήρωσης	κανένα	σκληρό <5 mm	σκληρό >5 mm	μαλακό <5 mm	μαλακό >5 mm
	6	4	2	2	0
Αποσάθρωση τοιχωμάτων	υγιές	ελαφρά	μέτρια	πολύ	αποσυνθεμένο
	6	5	3	1	0

Ενότητα Β. Προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών

Οδηγίες για την ταξινόμηση της επίδρασης του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην κατασκευή σιηράγγων

Διεύθυνση ασυνέχειας κάθετη στον άξονα της σιηράγγας				Διεύθυνση ασυνέχειας παράλληλη στον άξονα της σιηράγγας	
Προχώρηση σύμφωνα με την κλίση		Προχώρηση αντίθετα με την κλίση			
Κλίση 45° – 90°	Κλίση 20° – 45°	Κλίση 45° – 90°	Κλίση 20° – 45°	Κλίση 45° – 90°	Κλίση 20° – 45°
Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	Μέτρια
Για κλίση ασυνέχειας 0° – 20° ανεξάρτητα από τη διεύθυνσή της σε σχέση με τον άξονα χαρακτηρίζεται Μέτρια					

Διεύθυνση και κλίση ασυνεχειών		Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
Βαθμοί	Σιηράγγες και μεταλλεία	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Θεμελιώσεις	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Πρανή	0	- 5	- 25	- 50	- 60

Σχήμα 1.1 Σύστημα ταξινόμησης Βραχομάζας RMR (Biewniaskwi, 1989)

$$RMR = RMR_{bas} - \text{βαθμός από προσαρμογή}$$

με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών (1.1)

1.2.1.2 Σύστημα Q (Barton, 1974)

Το σύστημα ταξινόμησης Q προτάθηκε από τον Barton το 1974 και έχει δεχθεί διάφορες τροποποιήσεις (πλέον πρόσφατη: Barton & Grimstad, 1993). Η μεθοδολογία αυτή ταξινόμησης συνδέεται άμεσα με την λεγόμενη «Νορβηγική Μέθοδο» για την κατασκευή σιηράγγων. Όπως και η ταξινόμηση RMR βασίζεται στην συνεκτίμηση διάφορων δεικτών. Η βαθμολογία Q λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0 και 400 ή και μεγαλύτερες για βραχομάζα εξαιρετικά καλής ποιότητας. Το σύστημα Q δίνει καλά αποτελέσματα για κρυσταλλικά πετρώματα.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

Όπου :

- i. RQD: Βαθμός κερματισμού (%).
- ii. J_n : Αριθμητικός παράγοντας του πλήθους των συστημάτων ασυνεχειών.
- iii. J_r : Αριθμητικός παράγοντας της τραχύτητας των ασυνεχειών.
- iv. J_a : Αριθμητικός παράγοντας του βαθμού αποσάθρωσης-αλλοίωσης τοιχωμάτων των ασυνεχειών.








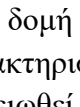
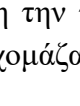

- v. J_w : Συντελεστής απομείωσης λόγω ύπαρξης νερού στις ασυνέχειες.
- vi. SRF: Συντελεστής απομείωσης λόγω των επιτόπου τάσεων.

Q	Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχομάζας
< 0.01	Εξαιρετικά πτωχή
0.01 – 0.1	Πάρα πολύ πτωχή
0.1 – 1	Πολύ πτωχή
1 – 4	Πτωχή
4 – 10	Μέτρια
10 – 40	Καλή
40 – 100	Πολύ καλή
100 – 400	Πάρα πολύ καλή
>400	Εξαιρετικά καλή

Πίνακας 1.1: Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχομάζας με χρήση του δείκτη Q.

1.2.1.3 Σύστημα GSI (Hoek & Μαρίνος, 2000)

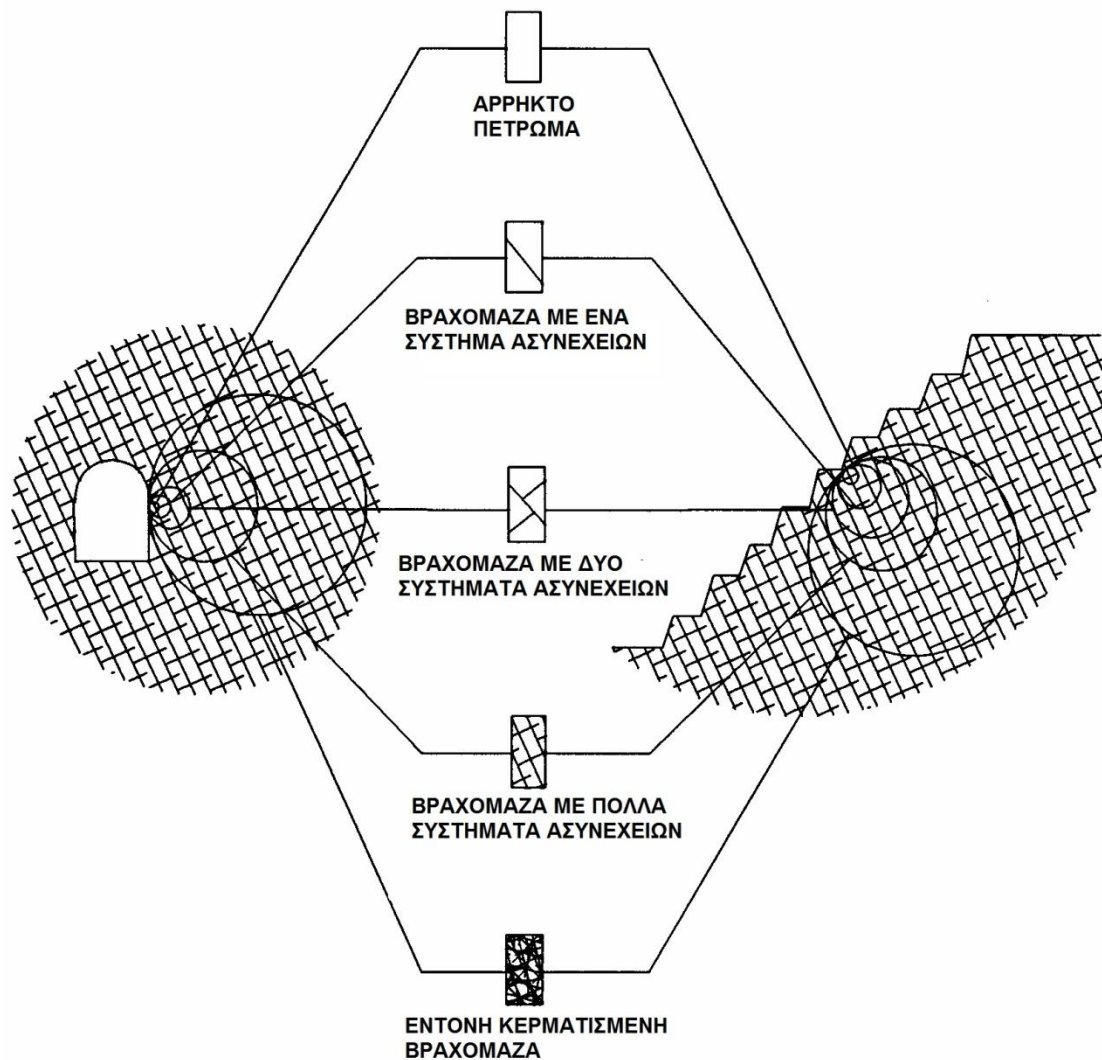
Το σύστημα GSI (**Geological Strength Index**) βασίζεται στην συνεκτίμηση δύο παραγόντων: Του βαθμού κατακερματισμού - τεκτονισμού της βραχομάζας και της κατάστασης των ασυνεχειών. Η διαδικασία της ταξινόμησης με το GSI είναι απλή, βασίζεται σε έναν απλό εικονογραφημένο πίνακα και έχει επιπλέον το πλεονέκτημα πως είναι «φιλική μέθοδος». Ο δείκτης GSI λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 100, μάλιστα μπορεί να χρησιμοποιείται στην θέση του RMR για $RMR > 25$. Ο δείκτης GSI μπορεί να μας παράσχει τις παραμέτρους αντοχής m, s, a για το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown. Επιπλέον, συνεκτιμά τους παράγοντες αντοχής του άρρηκτου πετρώματος (μέσω της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και της παραμέτρου m_i του πετρώματος) καθώς και του καθεστώτος των επιτόπου τάσεων για την εξαγωγή παραμέτρων αντοχής τύπου Mohr-Coulomb, παραμέτρων υποστήριξης κ.α. Ο δείκτης GSI φαίνεται να ταιριάζει πολύ καλά στα πετρώματα που συναντάμε στην Ελλάδα. Οι Hoek και Μαρίνος μάλιστα έχουν προτείνει μεθοδολογία για την εκτίμηση του GSI σε σχηματισμούς Φλύσχη ο οποίος είναι πολύ συνηθισμένος σχηματισμός στην Ελλάδα.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (Ε. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000) Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώμαζας εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καρπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχομαζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
ΔΟΜΗ		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθαιμένες και οξειδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθαιμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντή επιφλοιομάτα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθαιμένες με μολακό αργιλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοιομάτας
 ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90				N/A	N/A
 ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70				
 ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών	70	60	50			
 ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή αχιστότητας	60	50	40	30		
 ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων	50	40	30	20		
 ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΗΜΜΕΝΗ Φυλλώδης ή αχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)	40	30	20	10		
 ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Αποσπασθαιμένη βραχώμαζα με πολύ πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων	30	20	10			
 ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Πολύ πτωχά βραχώδη τεμάχια με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	20	10				
 ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Πολύ πτωχά βραχώδη τεμάχια με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	10					
 ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Πολύ πτωχά βραχώδη τεμάχια με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	N/A	N/A				

Σχήμα 1.2: Σύστημα ταξινόμησης Βραχώμαζας GSI (Hoek και Μαρίνος, 2000)

Η δομή του πετρώματος και η κατάσταση των ασυνεχειών αποτελούν κύρια χαρακτηριστικά στα οποία βασίζεται η ταξινόμηση και στα τρία συστήματα. Να σημειωθεί ότι κομβικό ρόλο παίζουν οι ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος αφού με βάση την ταξινόμηση γίνεται μία απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας με βάση αυτών του άρρηκτου πετρώματος. Η συμπεριφορά εξαρτάται

έντονα από την κλίμακα αναφοράς καθώς μεταβάλλεται το πλήθος των ασυνεχειών που περιέχονται στη βραχομάζας που ενεργοποιείται κατά την κατασκευή και την λειτουργία ενός έργου ανάλογα με το μέγεθος του.



Σχήμα 1.3 : Θεωρητικό διάγραμμα που δείχνει τη μεταβολή από άρρηκτο βράχο σε έντονα κερματισμένη βραχομάζα με την αύξηση του μεγέθους του δείγματος (Hoek & Brown, 1980)

1.2.2 Αντοχή Βραχομάζας (Rockmass strength)

Τα μοντέλα συμπεριφοράς για την αστοχία της βραχομάζας είναι αρκετά σύνθετα λόγω της φύσης του υλικού. Επιγραμματικά μπορούμε να διαχωρήσουμε τις παρακάτω δύο περιπτώσεις:

- Για κανονικά ρωγματωμένη βραχομάζα όπου η συμπεριφορά αυτής ελέγχεται τα από επίπεδα ασυνεχειών (ανισότροπη συμπεριφορά), θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κριτήρια αστοχίας που λαμβάνουν υπόψη τις μεμονωμένες ομάδες ασυνεχειών και των διεύθυνσεών τους στον χώρο. Τέτοια μοντέλα είναι των Jaeger - Cook (1960) και Amadei (1986, 1988) και βασίζονται στις συνθήκες ολίσθησης στις διακλάσεις. Επιπλέον είναι δυνατή η ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη τους δυνατούς μηχανισμούς αστοχίας που δημιουργούνται. Τέτοιες είναι για παράδειγμα οι σφήνες που δημιουργούνται από την συμβολή 2-3 ομάδων ασυνεχειών και των τοιχωμάτων σήραγγας ή των πρανών ορύγματος. Για την εκτίμηση αυτού του κινδύνου χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο η απεικόνιση των διακλάσεων και των επιφανειών των έργων σε στερεογραφική προβολή. Κατόπιν χαράσσεται ο κύκλος τριβής και εξετάζεται αν οι δημιουργούμενες σφήνες μπορούν να αστοχήσουν με την συμβολή της βαρύτητας.
- Για την έντονα ρωγματωμένη βραχομάζα όπου η συμπεριφορά είναι ουσιαστικά ιστροπική χρησιμοποιείται κάποιο κριτήριο αστοχίας και συνηθισμένες μεθοδολογίες της μηχανικής για την ανάλυση. Τα πλέον ευρέως διαδεδομένα κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιούνται για την αντοχή της ιστροπικής βραχομάζας είναι των Mohr-Coulomb και των Hoek-Brown (1980).

Το κριτήριο Mohr-Coulomb χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση της αντοχής του εδάφους, ενώ για την περίπτωση της βραχομάζας πρέπει να χρησιμοποιείται για συγκεκριμένο επίπεδο επιτόπου τάσεων (λόγω παραβολικής καμπύλης αντοχής της βραχομάζας). Το κριτήριο των Hoek-Brown χρησιμοποιεί τρεις παραμέτρους αντοχής: m_b , s , a οι οποίες μπορούν να εκτιμηθούν από τον γεολογικό δείκτη αντοχής GSI. Στην συνέχεια με χρήση του κριτηρίου Hoek-Brown και των παραμέτρων του, τις επιτόπου τάσεις και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, είναι δυνατή η εκτίμηση παραμέτρων ϕ και c του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Αυτό είναι χρήσιμο όταν πρέπει να εφαρμοστούν μέθοδοι ανάλυσης που βασίζονται σε αυτές τις παραμέτρους.

1.3 ΓΡΑΝΙΤΗΣ

Στην Ελλάδα γρανίτες υπάρχουν στο χώρο της Μακεδονίας και της Θράκης. Επίσης υπάρχουν στο Λαύριο και σε ορισμένα νησιά του Αιγαίου (Μύκονος, Σαμοθράκη, Νάξος).

Ο Γρανίτης είναι ένα διαδεδομένο, φυσικό πυριγενές, πλουτώνιο πέτρωμα με κοκκώδη ιστό και όξινη σύσταση με μεγάλη σκληρότητα. Ανήκει στα πλουτώνια πυριγενή πετρώματα επειδή δημιουργήθηκε από την στερεοποίηση και κρυστάλλωση του μάγματος στο εσωτερικό του φλοιού σε μεγάλο βάθος, γι' αυτό διαθέτει ολοκρυσταλλικό, κοκκώδη ιστό. Το όνομά του μάλιστα προέρχεται από την λατινική λέξη *granum*, δηλαδή κόκκος και οφείλεται στην κοκκώδη υφή του. Ένα πλουτώνιο πέτρωμα, για να χαρακτηριστεί ως γρανίτης, πρέπει υποχρεωτικά να περιέχει αστρίους, (αλκαλικούς αστρίους και πλαγιόκλαστα) και χαλαζία, συνήθως όμως, οι γρανίτες περιέχουν σιδηρομαγνησιούχα ορυκτά (μαρμαρυγίες, πυροξένους κ.α.) και σύνδρομα (ζιρκόνια, απατίτη, τιτανίτη κλπ.). Ο χαλαζίας συμμετέχει με περιεκτικότητα >10%, και το άθροισμα χαλαζίας + αλκαλιούχοι άστριοι είναι >40%. Η σύστασή του καθορίζει το χρώμα του ενώ γενικά χαρακτηρίζεται ως μεσόκοκκο πέτρωμα.

1.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά Γρανιτών

1.3.1.1 Φαινόμενο ειδικό βάρος

Φαινόμενο ειδικό βάρος ή φαινόμενη πυκνότητα είναι ο λόγος της μάζας του πετρώματος προς το φαινόμενο όγκο του, δηλαδή τον όγκο που περιλαμβάνει και τα κενά που υπάρχουν στη μάζα του πετρώματος, όπως οι πόροι, οι μικρορωγμές κ.α.

Αντίστοιχα, πραγματική πυκνότητα είναι ο λόγος της μάζας του πετρώματος προς τον πραγματικό του όγκο, αυτόν δηλαδή χωρίς τα κενά.

Στα συμπαγή πετρώματα οι διαφορές ανάμεσα στην πραγματική και στη φαινόμενη πυκνότητα είναι πολύ μικρές για αυτό και προσδιορίζεται μόνο η φαινόμενη πυκνότητα, ενώ η πραγματική προσδιορίζεται μόνο για τα πορώδη πετρώματα.

Η φαινόμενη και η πραγματική πυκνότητα μετρούνται σύμφωνα με τα οριζόμενα στην προδιαγραφή πρότυπα (ISRM 1977) σε kg/m^3 .

Η φαινόμενη πυκνότητα για γρανίτες είναι 2600-2700 kg/m^3 .

1.3.1.2 Πορώδες (n) και δείκτης πόρων (e)

Το πορώδες (n) ενός εδαφικού ή βραχώδους υλικού ορίζεται ως ο λόγος των κενών χώρων του δείγματος προς τον ολικό του όγκο. Ο δείκτης πόρων (e) του εδαφικού ή βραχώδους υλικού ορίζεται ως ο λόγος των κενών χώρων του δείγματος προς τον όγκο της ξηράς μάζας του δείγματος. (Καββαδάς, 2009)

- $n = \frac{V_v}{V} (\%)$

- $e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n} (\%)$

Όπου:

V_v : Ο όγκος των κενών του δείγματος.

V_s : Ο όγκος της στερεάς μάζας του δείγματος.

V : Ο συνολικός όγκος του δείγματος.

Για γρανιτικά πετρώματα το πορώδες κυμαίνεται από 0,4 έως 1,5 (%) ενώ ο δείκτης πόρων από 0,67 έως 3,0 (%) αντίστοιχα.

1.3.1.4 Αποσαθρωσιμότητα

Ορίζεται ως η επιδεκτικότητα των πετρωμάτων στη χρονική αποσάθρωση (Fookes et al.,1978). Οι Γρανίτες αποσαθρώνονται εύκολα λόγω της παρουσίας του άστριου που μετατρέπεται σε καολίνη και άλλα ορυκτά (ασβεστίτης). Από τα άλλα ορυκτά ο χαλαζίας παραμένει αναλλοίωτος ενώ ο βιοτίτης (μαύρος μαργαρυγίας) μπορεί να αποσαθρωθεί τελικά προς αργιλικό υλικό και οξείδιο του σιδήρου ωστόσο είναι πιο ανθεκτικός από τον άστριο. Η τελική φάση της αποσαθρώσεων είναι η απώλεια κάθε συνοχής στο πέτρωμα και η μετατροπή του σε χαλαζιακή άμμο με αργιλικό υλικό. Εκτός από την αποσάθρωση και σε συνδυασμό με αυτήν, άλλο χαρακτηριστικό των γρανιτικών πετρωμάτων είναι η χαρακτηριστική γι'αυτά κατάτμηση σε τρεις επιφάνειες διαχωρισμού, χαρακτηριστικές για το πέτρωμα και περίπου ορθογώνιες μεταξύ τους. Οι επιφάνειες αυτές εντείνονται και πληθαίνουν και από τον τεκτονισμό που υπέστη το πέτρωμα, ενώ στην επιφάνεια του εδάφους είναι αρκετά ανοιχτές από την αποφόρτιση των τάσεων του πετρώματος. Η κατάτμηση του γρανίτη δίνει στο πρακτικά αδιαπέρατο πέτρωμα κάποια περατότητα.



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα χημικής αποσάθρωσης γρανιτικού πετρώματος (Μπαντής, 2012).

1.3.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά Γρανιτών

1.3.2.1 Αντοχή σε θλίψη

Ως αντοχή σε θλίψη ενός πετρώματος ορίζεται ο λόγος του μέγιστου φορτίου κατά τη θραύση που ασκείται σ' ένα δοκίμιο προς το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του (κάθετη στη διεύθυνση φόρτισης). Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή σε θλίψη ενός πετρώματος είναι: Η ορυκτολογική σύσταση, το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων, η ανισοτροπία, το πορώδες, η περιεχόμενη υγρασία και η πυκνότητα. Μονάδα μέτρησης της θλιπτικής αντοχής είναι τα Kg/cm^2 ή MPa (I.S.R.M., 1999).

Η αντοχή σε θλίψη άρρηκτου γρανίτη κυμαίνεται από **120** έως **290 MPa** και συνεπώς κατατάσσεται στα πολύ υψηλής-εξαιρετικής αντοχής πετρώματα.

1.3.2.2 Αντοχή σε εφελκυσμό

Τα πετρώματα γενικά έχουν σημαντικά μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με την αντοχή τους σε θλίψη. Θεωρητικά ο λόγος μονοαξονικής θλιπτικής προς εφελκυστική αντοχή είναι 8:1. Πρακτικά ο λόγος αυτός διαφέρει από την τιμή αυτή (συνήθως προς τα επάνω) αλλά και δεν είναι εύκολο να καθοριστεί, κυρίως γιατί υπάρχουν δυσκολίες στον προσδιορισμό μιας αξιόπιστης τιμής για την εφελκυστική αντοχή τους. Η εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων έχει μεγάλη σημασία στον προσδιορισμό της απόκρισής τους κατά την υποβολή τους, τόσο σε στατικά όσον και σε δυναμικά φορτία (Roberts, 1977). Συνθήκες που πλησιάζουν τη στατική μονοαξονική εφελκυστική καταπόνηση παρατηρούνται κυρίως στα τοιχώματα υπογείων ανοιγμάτων, όπως σήραγγες, γεωτρήσεις κλπ. Η διάτρηση, η ανατίναξη και η κοπή των πετρωμάτων με μηχανικά μέσα, δημιουργούν συνθήκες δυναμικής εφελκυστικής καταπόνησης. Παρά τη σημασία της αντοχής σε εφελκυσμό που σχετίζεται με η δυνατότητα του πετρώματος να ανθίσταται σε δυναμικά ή στατικά φορτία, η τιμή της αντοχής αυτής χρησιμοποιείται ελάχιστα ως παράγοντας σχεδιασμού.

Το εύρος τιμών εφελκυστικής αντοχής του άρρηκτου γρανίτη είναι **15** έως **40 MPa**

1.3.2.3 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού, σαν φυσική έννοια, εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει το υλικό σε ελαστική παραμόρφωση και εξαρτάται άμεσα από την ισχύ των χημικών δεσμών μεταξύ των ατόμων του υλικού. Εκφράζει τη σταθερά συσχέτισης τάσης-παραμόρφωσης όταν το υλικό βρίσκεται εντός της γραμμικής ελαστικής περιοχής. Η συσχέτιση αυτή γίνεται μέσω του νόμου του Hooke, που γενικότερα είναι γνωστός σαν νόμος γραμμικής ελαστικότητας:

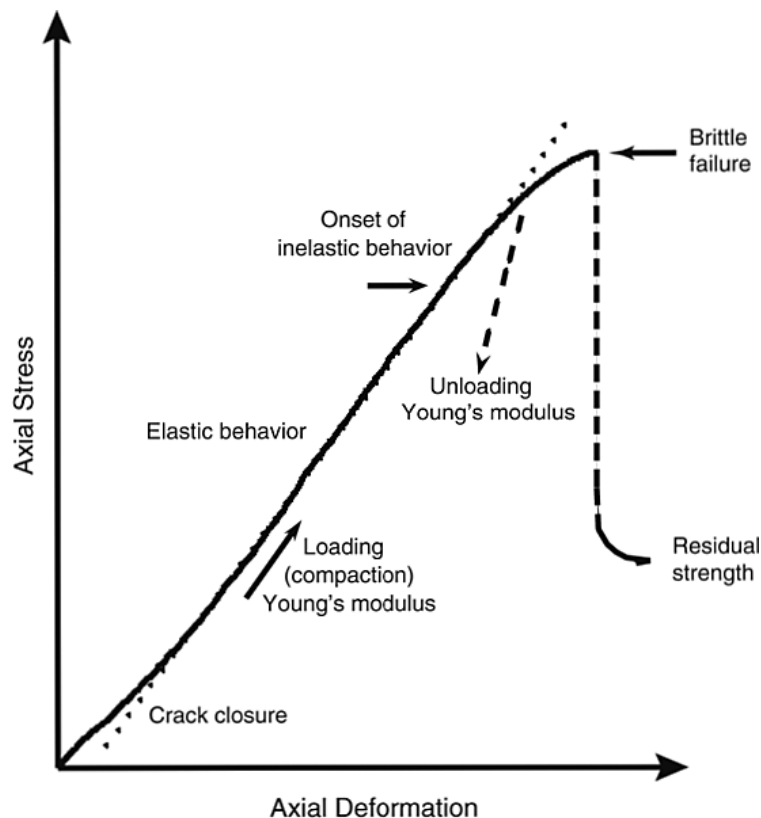
$$\sigma = E * \varepsilon$$

Όπου:

σ : Η ασκούμενη τάση (MPa).

ε : Η ανηγμένη παραμόρφωση.

E: Το μέτρο ελαστικότητας (elasticity modulus) ή μέτρο Young (GPa).



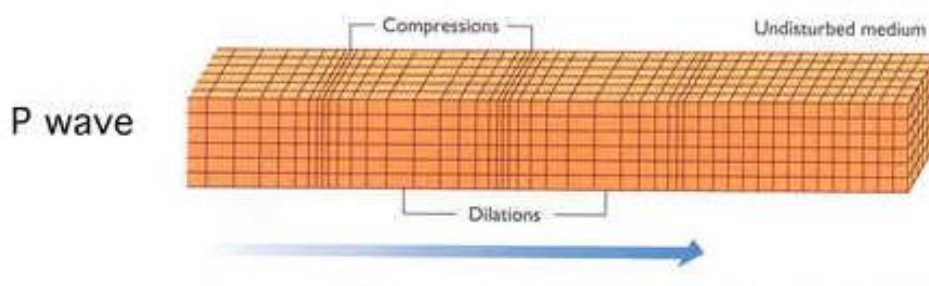
Σχήμα 1.5: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για ψαθυρό βράχο. Στην αρχική περιοχή το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά και προσδιορίζεται το μέτρο ελαστικότητας E.

Στο γρανίτη το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται απο **35** έως **85 GPa**.

1.4 Εγκάρσια και διατμητικά κύματα (P,S)

1.4.1 Κύματα P (Primary waves-πρωτεύοντα κύματα)

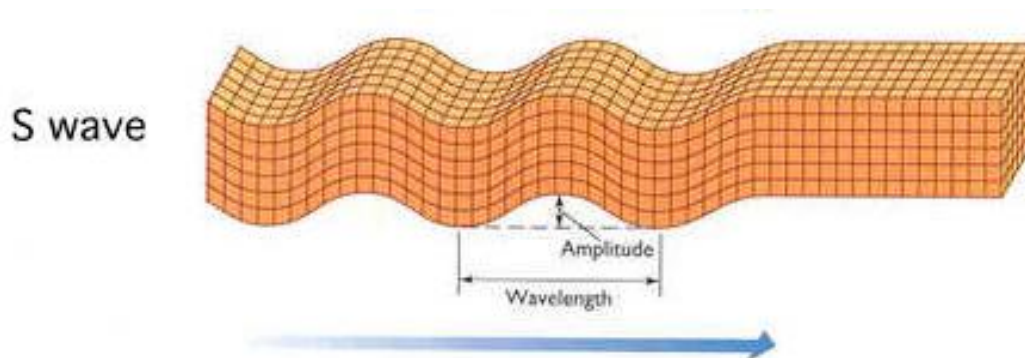
Τα κύματα P (primary waves ή πρωτεύοντα κύματα) είναι διαμήκη ελαστικά κύματα. Τα διαμήκη κύματα ταλαντώνουν τις μονάδες ταλάντωσης του μέσου από το οποίο διέρχονται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσής τους. Προκαλούν πυκνώματα και αραιώματα της ύλης (για αυτό είναι επίσης γνωστά και ως κύματα συμπίεσης) σε επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης και μάλιστα διαδίδονται σε οποιοδήποτε συμπίεστο (σε μεγέθη μήκους κύματος) μέσο έχει μνήμη του όγκου του και τον διατηρεί, τουλάχιστον στον χρόνο που το διάμηκες κύμα τον οδεύει. Στερεά, υγρά, αέρια και πλάσμα έως κάποιας πυκνότητας καθώς και ενδιάμεσες καταστάσεις ρευστότητας πληρούν με ευκολία τη συνθήκη αυτή για εύρη συχνοτήτων. Τα κύματα P μπορούν και εναλλάσσουν μέσα διάδοσης και συνεχίζουν να διαδίδονται διαθλώμενα σε αυτά. Σε ιστροπικά και ομοιογενή στερεά, η διεύθυνση διάδοσης ενός κύματος P είναι πάντα διαμήκης. Τα σωματίδια στο στερεό δονούνται κατά μήκος ή παράλληλα προς την κατεύθυνση της ενέργειας του κύματος. Τα κύματα P ονομάζονται και σεισμικά κύματα στην σεισμολογία. Διαδίδονται σε όλα τα στρώματα της Γης, από το φλοιό ως τον πυρήνα. Τέλος, έχουν τη μεγαλύτερη ταχύτητα από τα υπόλοιπα είδη σεισμικών κυμάτων και σε γρανίτη διανύουν περίπου 6 km/s.



Σχήμα 1.6: Διάδοση κύματος τύπου P σε αδιατάρακτο ισότροπο ελαστικό μέσο

1.4.2 Κύματα S (Secondary waves-Δευτερεύοντα κύματα)

Τα κύματα S (secondary waves ή δευτερεύοντα κύματα) είναι εγκάρσια ελαστικά κύματα. Τα κύματα αυτά είναι διατμημικά κύματα, δηλαδή διαδίδονται με ταλαντώσεις των υλικών κάθετες στην κατεύθυνση του κύματος αλλάζοντας προς στιγμήν το σχήμα του μέσου το οποίο διατρέχουν. Διαδίδονται σε μέσα που οι μονάδες ταλάντωσης συνδέονται ελαστικά, δηλαδή υπάρχει μνήμη του σχήματος του υλικού. Το μέσο προσπαθεί να διατηρήσει το σχήμα του, τουλάχιστον σε μήκος ελαφρά πολλαπλάσιο του μήκους κύματος και για χρόνο όσο τουλάχιστον το άθροισμα των περιόδων μερικών ταλαντώσεων. Τα στερεά έχουν ισχυρή μνήμη και έτσι τα κύματα S διαδίδονται στη λιθόσφαιρα, με ασυνέχειες στους ωκεανούς και την ατμόσφαιρα, που δεν πληρούν την παραπάνω συνθήκη ελαστικότητας σε σχέση με τις παραμέτρους διάδοσης των συγκεκριμένων σεισμικών κυμάτων. Η κατάσταση ρευστότητας στον μανδύα φαίνεται πως δίνει στο υλικό του ικανή ελαστικότητα ώστε τα κύματα S να διαδίδονται εκεί. Έτσι διαδίδονται από τη λιθόσφαιρα ως και το κάτω μέρος του μανδύα, σταματούν όμως φθάνοντας στον εξωτερικό πυρήνα της Γης που φαίνεται πως είναι πιο ρευστός ή και υγρός. Τα κύματα S ταξιδεύουν πιο αργά από τα κύματα P φθάνοντας πιο αργά (από εκεί παίρνουν και το χαρακτηρισμό δευτερεύοντα) και έχουν ταχύτητα κίνησης στον γρανίτη περίπου 3,6 km/s.



Σχήμα 1.7: Διάδοση κύματος τύπου S σε αδιατάρακτο ισότροπο ελαστικό μέσο.

Κεφάλαιο 2: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΤΑΣΗ

2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΓΡΑΝΙΤΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

Η συσχέτιση τάσης-παραμόρφωσης και τα χαρακτηριστικά της θραύσης ενός ψαθυρού πετρώματος έχουν απασχολήσει ένα μεγάλο αριθμό ερευνητών τις τελευταίες δεκαετίες (Brace, 1964 ; Bieniawski, 1967 ; Wawersik & Fairwurst, 1970 ; Lajtai, 1974 ; Brace & Tarponier, 1976 ; Martin & Chandler ,1994). Το γενικό σκεπτικό αυτών των μελετών είναι ότι η διαδικασία της θραύσης μπορεί να χωριστεί σε κάποια στάδια με βάση τα χαρακτηριστικά τάσης-παραμόρφωσης (αξονικής και διαμετρικής). Τα στάδια αυτά σύμφωνα με τους Brace (1964) και Bieniawski (1967) είναι τα εξής:

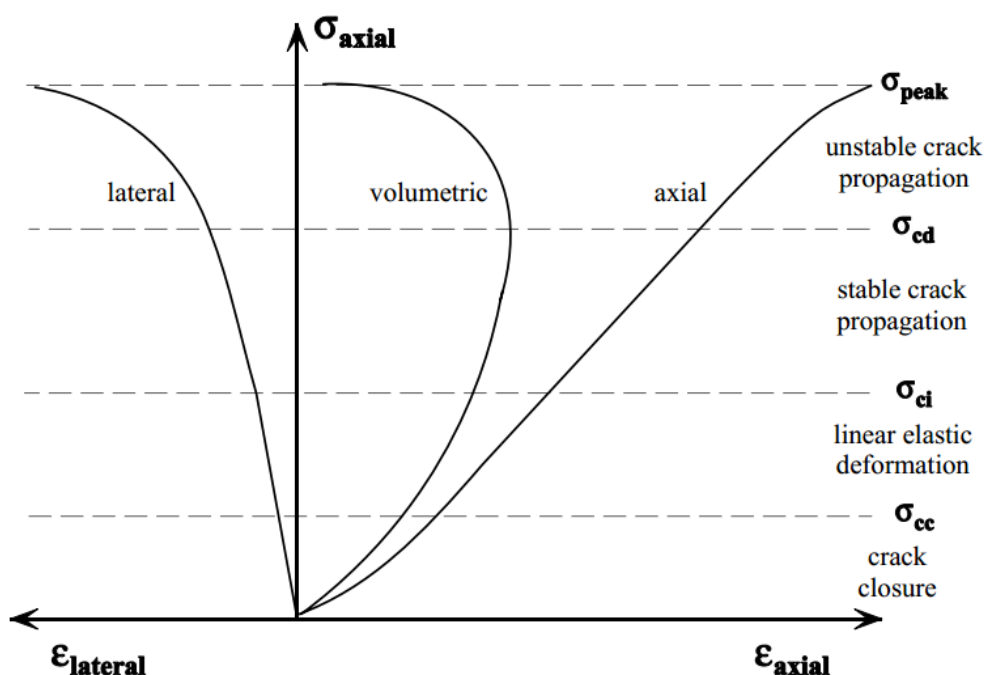
- Κλείσιμο των μικρορωγματώσεων (Crack closure)
- Άρρηκτη φάση πετρώματος-ελαστική συμπεριφορά (Linear elastic deformation)
- Έναρξη και ευσταθής διάδοση μικρορωγμάτωσης (Crack initiation and stable crack growth)
- Κρίσιμη απελευθέρωση ενέργειας και ασταθής ανάπτυξη μικρορωγματώσης (Critical energy release and unstable crack growth)
- Θραύση (Failure)

Όπως έχει ειπωθεί και στο **υπόκεφάλαιο 1.1** το άρρηκτο πέτρωμα είναι απαλλαγμένο από μακροσκοπικές ρωγμές, ωστόσο υπάρχουν μικρορωγμές οι οποίες δεν είναι διακριτές χωρίς μικροσκόπιο. Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας θραύσης αναφέρεται στο κλείσιμο αυτών των μικρορωγμών. Η απόκριση της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική (ανελαστική συμπεριφορά) και παρατηρείται μία αύξηση της αξονικής δυσκαμψίας (αύξηση του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας).

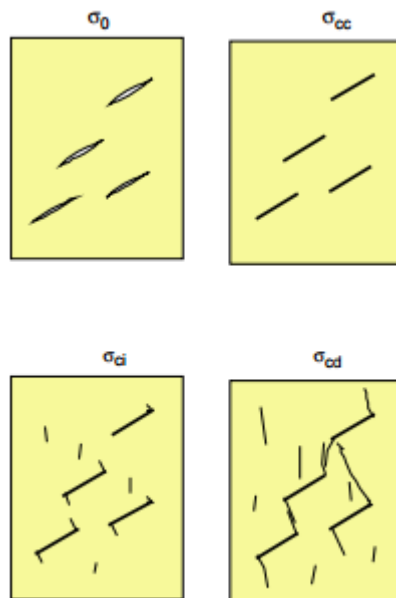
Η έκταση της ανελαστικής αυτής περιοχής εξαρτάται από την πυκνότητα των μικρορωγμών και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Όταν η πλειονότητα των μικρορωγμών έχει κλείσει ακολουθεί μία γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Στο τμήμα αυτό του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης μετρώνται οι ελαστικές σταθερές του πετρώματος (μέτρο ελαστικότητας E και λόγος Poisson ν).

Στη συνέχεια, η συμπεριφορά του πετρώματος διαφοροποιείται λόγω της έναρξης μικρορωγμάτωσης (crack initiation). Ως έναρξη των μικρορωγμών στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (αξονικής και διαμετρικής) θεωρείται το σημείο όπου παρεκκλίνει από την ελαστικότητα. Με αύξηση του φορτίου ακολουθεί η διάδοση των μικρορωγμών (crack propagation). Σε αυτό το στάδιο η διάδοση θεωρείται ευσταθής διότι σταθεροποιώντας το επιβαλλόμενο φορτίο σταματάει η ανάπτυξη της μικρορωγμάτωσης.

Αυτή η συμπεριφορά συνεχίζεται μέχρι ένα κρίσιμο σημείο από το οποίο και μετά η διάδοση της μικρορωγμάτωσης είναι ασταθής και αναμένεται να μην σταματήσει εάν το επιβαλλόμενο φορτίο σταθεροποιηθεί. Η διάδοση των μικρορωγμών εξαρτάται πλέον και από άλλες παραμέτρους, όχι αποκλειστικά δηλαδή από το φορτίο. Στο σημείο αυτό (crack damage) σύμφωνα με τον Bieniawski (1967) λαμβάνει χώρα μία σημαντική έκλυση ενέργειας ενώ ξεκινάει η ογκομετρική διαστολή του δοκιμίου. Η ασταθής διάδοση της μικρορωγμάτωσης συνεχίζεται μέχρι το σημείο στο οποίο πολλαπλές μικρορωγμές ενώνονται και μετατρέπονται σε μεγαλύτερες ρωγμές (μερικές διακριτές και με γυμνό μάτι) ενώ το δοκίμιο δεν μπορεί να αντέξει περαιτέρω αύξηση φορτίου. Το σημείο αυτό ορίζεται ως η αντοχή του δοκιμίου (peak strength). Σύμφωνα με τον Martin (1993) η αντοχή του πετρώματος δεν είναι αποκλειστικά ιδιότητα του υλικού αλλά εξαρτάται και από τις συνθήκες φόρτισης όπως η ταχύτητα επιβολής φορτίου, ωστόσο τα σημεία έναρξης της μικρορωγμάτωσης (crack initiation) και έναρξης της ασταθούς ανάπτυξης μικρορωγμάτωσης (crack damage) είναι ουσιαστικά ανεξάρτητα από τις συνθήκες φόρτισης.



Σχήμα 2.1: Καμπύλη τάσης-αξονικής και διαμετρικής παραμόρφωσης που συμπεριλαμβάνει τα στοιχεία ανάπτυξης της μικρορωγμάτωσης (Eberhardt, 1998).



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της πορείας ρωγμάτωσης ψαθυρού πετρώματος (M. Cai et. al., 2004).

Η έναρξη της μικρορωγμάτωσης (crack initiation) δε συμβαίνει ταυτόχρονα για όλες τις μικρορωγμές. Ουσιαστικά υπάρχει μία περιοχή τάσεων όπου ανοίγουν μικρορωγμές με χαμηλότερη και υψηλότερη αντοχή αντίστοιχα. Ως μονοσήμαντη τιμή της τάσης έναρξης της μικρορωγμάτωσης λαμβάνεται ο μέσος όρος τους.

Τέλος, είναι σημαντικό να τονιστεί πως στη διαδικασία ρωγμάτωσης, μεγάλο ρόλο παίζει η επίδραση της κλίμακας. Η ανάπτυξη της ρωγμάτωσης σε επίπεδο εργαστηριακής διερεύνησης (δοκίμια διαμέτρου περίπου 50mm.) αναμένεται να είναι διαφορετική από τη ρωγμάτωση που απαντάται σε βραχομάζες.

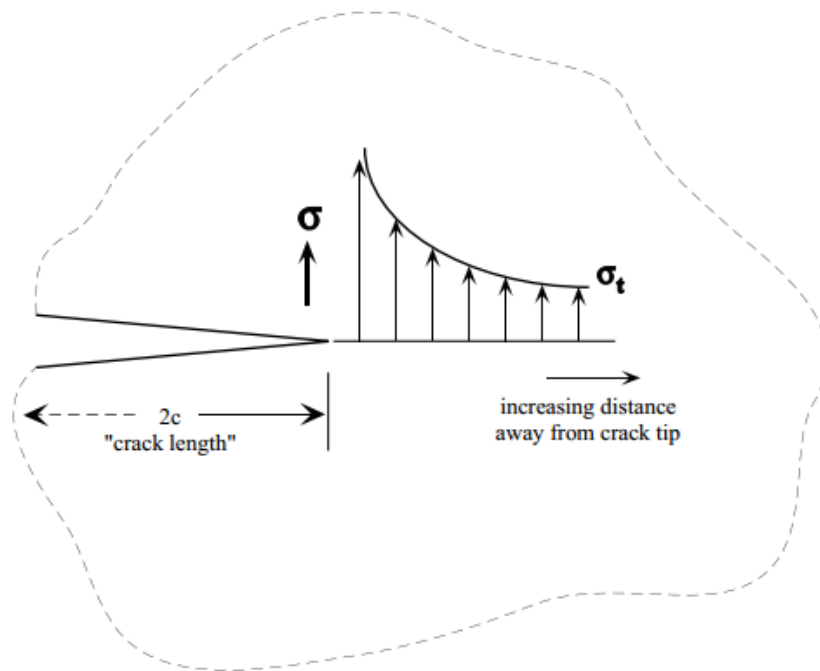
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ

Η μικρορωγμάτωση είναι μία διαδικασία στην οποία οι δεσμοί σπάνε καθώς νέες ή ήδη υπάρχουσες μικρορωγμές διαδίδονται στο κατά τα άλλα άρρηκτο υλικό. Η έναρξη, διάδοση και συνένωση των μικρορωγμών έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση της αντοχής του υλικού οδηγώντας το τελικά στη θραύση. Όπως και στα περισσότερα πετρώματα, η θραύση του γρανίτη είναι ψαθυρή και συνεπώς οι μηχανισμοί και οι συνθήκες έναρξης και διάδοσης των μικρορωγμών είναι αξιοσημείωτοι.

2.2.1 Θεωρία του Griffith (1920)

Οι περισσότερες θεωρίες ψαθυρής αστοχίας προϋποθέτουν την έναρξη της μικρορωγμάτωσης σε προϋπάρχουσες ατέλειες του υλικού οι οποίες δρουν ως συγκεντρωτές τάσεων. Σύμφωνα με τον Griffith (1920), κάθε ψαθυρό υλικό περιέχει ένα πλήθος λεπτών μικρορωγματώσεων, στα οποία δημιουργείται συγκέντρωση

τάσεων, έτσι ώστε οι τάσεις κοντά στα ρήγματα να ξεπερνούν την θεωρητική αντοχή του υλικού σε θραύση, παρότι μακριά από τα ρήγματα μπορεί να βρίσκονται σε αρκετά χαμηλές τιμές. Όταν οποιοδήποτε από τα ρήγματα αυτά προωθείται μέσα στο υλικό, τότε δημιουργούνται δύο νέες ελεύθερες επιφάνειες, δηλαδή οι πλευρικές επιφάνειες του ρήγματος.



Σχήμα 2.3 Εφελκυστικές τάσεις στις άκρες μικρορωγμών σε ισότροπο-ομοιογενές υλικό (Broek, 1986).

Ο Griffith Χρησιμοποιώντας το θεώρημα "Ελάχιστης Δυνητικής Ενέργειας" διατύπωσε την εξής θεωρία:

"Η κατάσταση ισορροπίας ενός ελαστικού υλικού το οποίο παραμορφώνεται υπό την επίδραση επιφανειακών δυνάμεων, είναι τέτοια ώστε η ενέργεια σε όλο το σύστημα να είναι ελάχιστη. Η θέση ισορροπίας, εάν η ισορροπία είναι δυνατή, θα βρίσκεται στο σημείο όπου συνέβη η ρήξη του υλικού και εφόσον το σώμα μπορεί να υποστεί καταστροφική διαδικασία μειώνοντας συνεχώς την δυνητική ενέργεια".

Η πορεία καταστροφής συμβαίνει με την έναρξη των ρωγμών. Με άλλα λόγια, το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία εξισώνοντας την παρεχόμενη ενέργεια με την απορρόφηση της λόγω ελαστικής παραμόρφωσης και την παροχέτευσή της στην έναρξη των μικρορωγμών.

$$W = W_e + W_s \quad (2.1)$$

Όπου:

W : Συνολική ενέργεια συστήματος.

W_e : Ενέργεια αποθηκευμένη λόγω ελαστικής παραμόρφωσης.

W_s : Ενέργεια που καταναλώνεται στη διάνοιξη των ρωγμών.

Στη συνέχεια ο Griffith (1924) κατάφερε να ποσοτικοποιήσει τα ενεργειακά αυτά μεγέθη ως συνάρτηση του ανοίγματος της ρωγμής και των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού (εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας). Ωστόσο η έλλειψη πειραματικών τεχνικών που βασίζονται στη μέτρηση της ενέργειας οδήγησε σε ανάπτυξη πολλών σχέσεων με βάση την εφαρμοζόμενη τάση. Επίσης ήταν ο πρώτος που έδωσε τη δυνατότητα μαθηματικής επεξεργασίας του πειραματικά επιβεβαιωμένου φαινομένου της συγκέντρωσης των τάσεων με την προσομοίωση του σχήματος της ρωγμής με έλλειψη. Τελικά εξήγαγε μία σχέση για την απαιτούμενη μονοαξονική εφελκυστική και θλιπτική τάση καθώς και τις επιμέρους τάσεις διαξονικής φόρτισης για εξάπλωση της ρωγμάτωσης.

$$\sigma_t \geq \sqrt{\frac{2 * E * \alpha}{\pi * c}} \quad (2.2)$$

$$\sigma_c \geq 8 * \sqrt{\frac{2 * E * \alpha}{\pi * c}} \quad (2.3)$$

$$\sigma_1 = \frac{-8 * \sigma_t * (1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_1})}{(1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_1})^2} \quad (2.4)$$

Όπου :

σ_t : Απαιτούμενη μονοαξονική εφελκυστική τάση για εξάπλωση ρωγμάτωσης.

σ_c : Απαιτούμενη μονοαξονική θλιπτική τάση για εξάπλωση ρωγμάτωσης.

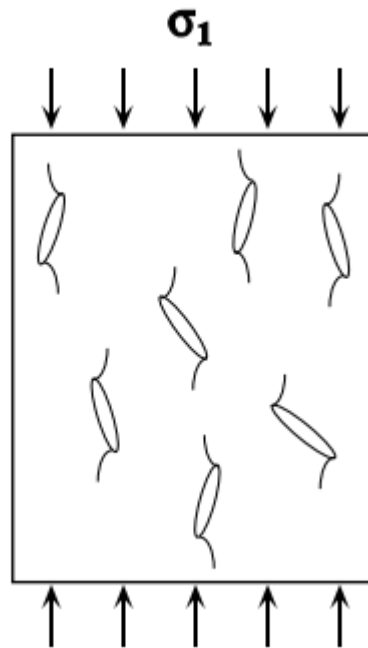
σ_1 : Ορθή τάση σε διαξονική καταπόνηση.

σ_3 : Πλευρική τάση σε διαξονική καταπόνηση.

E: Μέτρο ελαστικότητας.

c: Επιφανειακή ενέργεια ανά μονάδα εμβαδού ρωγμής.

a: το 50% του μήκους της ρωγμής.



Σχήμα 2.4 Κεκλιμένες ρωγμές με ελλειπτικό σχήμα (Griffith, 1924)

Μεταγενέστερα η δισδιάστατη θεωρία του Griffith επεκτάθηκε στις τρεις διαστάσεις από μεγάλο αριθμό ερευνητών όπως τους Murrell (1979), Andriev (1995), Paterson και Wong (2005) οι οποίοι συμπέραναν πως η επίδραση της ενδιάμεσης

τάσης σ_2 είναι αμελητέα. Αποδείχθηκε ότι η θεωρία του Griffith ταιριάζει απόλυτα μόνο σε τελείως ψαθυρά υλικά (με απουσία δηλαδή πλαστικότητας) ενώ ήταν αυτή που οδήγησε στην ανάπτυξη της επιστήμης της θραυστομηχανικής.

2.2.2 Γεωμετρία μικρορωγμών

Για να αναπτυχθεί μία σειρά μαθηματικών σχέσεων βασισμένων στην ύπαρξη μίας προϋπάρχουσας ρωγμής η οποία λειτουργεί σαν συγκεντρωτής τάσεων, έπρεπε να γίνει μία σειρά απλοποιήσεων όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ρωγμής. Τα επικρατέστερα γεωμετρικά σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

1. Η κεκλιμένη έλλειψη (Griffith, 1924)
2. Η κεκλιμένη έλλειψη μηδενικού πάχους
3. Η αξονική έλλειψη

Η κεκλιμένη έλλειψη ήταν βασισμένη στη θεωρία του Griffith και χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε μελέτες εξάπλωσης της ρωγμάτωσης (Brace & Bombolakis, 1963 ; Hoek & Bieniawski , 1965 ; Bombolakis, 1968 ; Latjai, 1971 ; Adam & Sines , 1978). Με τη μαθηματική λύση του ελλειψοειδούς για ομοιογενές, ισότροπο, συνεχές υλικό, παρατηρούνται εφαπτομενικές τάσεις κοντά στις άκρες της ρωγμής οι οποίες εξαρτώνται από τη φόρτιση και τα χαρακτηριστικά της έλλειψης.

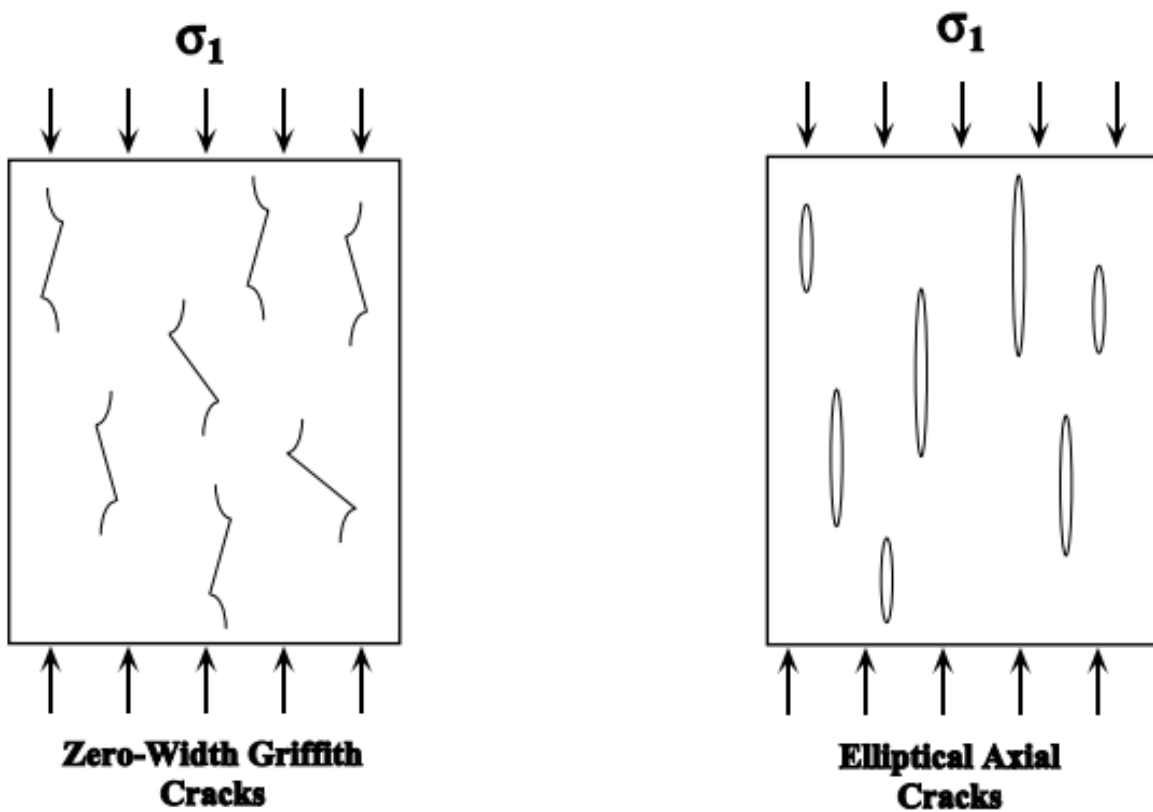
Μία παρόμοια γεωμετρία είναι η κεκλιμένη έλλειψη μηδενικού πλάτους. Η προσέγγιση αυτή είναι μεταγενέστερη και εφαρμόστηκε από ερευνητές της θραυστομηχανικής (LEFM : Linear Elastic Fracture Mechanics). Η κλειστή έλλειψη οδηγεί σε μία ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στο επίπεδο της ρωγμής αποτρέποντας τη συγκέντρωση των τάσεων στα άκρα της ρωγμής (Adams & Sines, 1978). Η θεωρία αυτή χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό σε αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης ρωγμάτωσης (Ingraffea & Heuze, 1980; Dyskin et. al., 1994; Carpinteri et. al., 1996). Και στις δύο περιπτώσεις η έλλειψη θα πρέπει να βρίσκεται σε κεκλιμένο, σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, επίπεδο.

Τέλος, η αξονική έλλειψη διαφέρει ως προς τον προσανατολισμό της. Αποτελείται από ρωγμές παράλληλες με το επίπεδο της κύριας τάσης. Οι ρωγμές αυτές είναι κυρίως προϊόν παρατήρησης είτε με το μάτι είτε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM: Scanning Electron Microscope) στο οποίο οι ελλειπτικές ρωγμές σπάνια εμφανίζονται.

Η προέλευση της διαφορετικότητας αυτών των ρωγμών οδήγησε σε μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον σε μικροσκοπικό επίπεδο. Οι Simmons & Richter (1976) και Kranz (1983) κατηγοριοποίησαν τις ρωγμές με βάση τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά τους:

1. Ρωγμές στα όρια του κόκκου (Ρωγμές στο συνθετικό υλικό που βρίσκεται ανάμεσα στους κόκκους).
2. Ρωγμές μέσα στους κόκκους.
3. Ρωγμές που ξεκινάνε στο όριο ενός κόκκου και εξαπλώνονται μεσά σε άλλον κόκκο.
4. Ρωγμές που εξαπλώνονται μέσα σε πολλαπλούς κόκκους και όρια.

Ο Brace (1961) συμπέρανε πως σε ανυδρίτες και ασβεστόλιθους οι πρώτες εντοπίσιμες ρωγματώσεις ξεκινάνε στα όρια των κόκκων ενώ οι Brace et. al. (1972) βρήκαν ότι κρίσιμες είναι επίσης και οι ρωγμές μέσα στους κόκκους που συμβαίνουν στα πιο αδυναμα ορυκτα όπως ο άστριος και ο βιοτίτης.

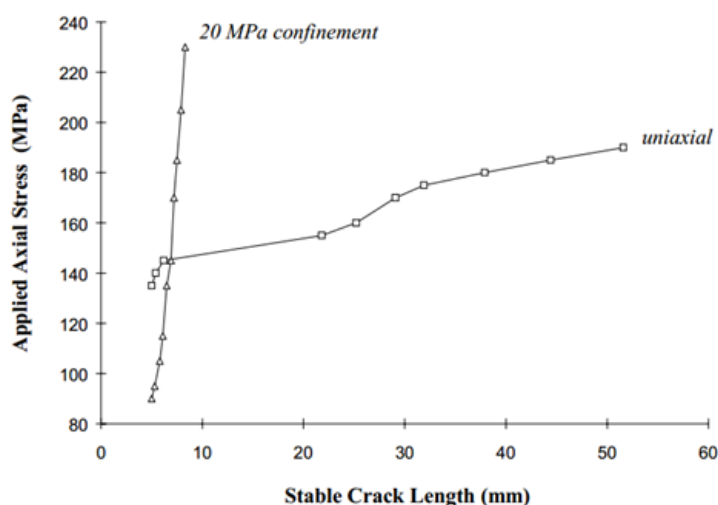


Σχήμα 2.5: Κεκλιμένες ρωγμές ελλειπτικού σχήματος μηδενικού πάχους και αξονικές ρωγμές ελλειπτικού σχήματος.

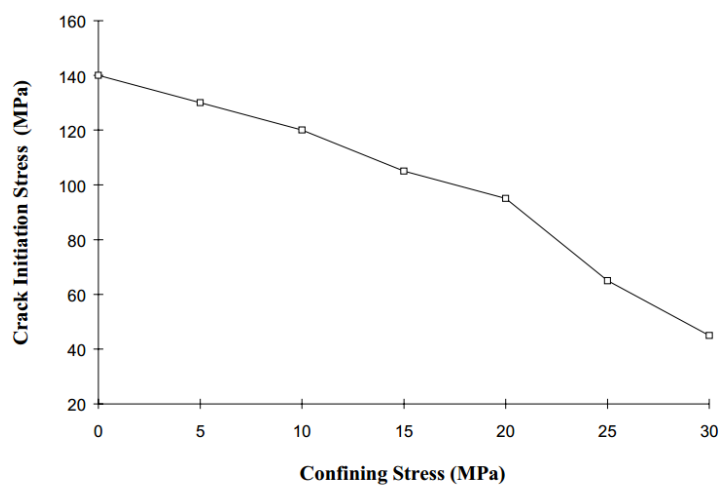
2.2.3 Διαφορές μικρορωγμάτωσης σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη

Τα στάδια ρωγμάτωσης δε διαφέρουν ποιοτικά στην δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης. Υπάρχει όμως ποσοτική διαφοροποίηση η οποία είναι κρίσιμη για την κατανόηση της μικρορωγμάτωσης ανάλογα με τη δοκιμή.

Σύμφωνα με τον Eberhardt (1998) η πλευρική πίεση αυξάνει τις εφεκλυστικές τάσεις στα άκρα των προϋπάρχουσων μικρορωγμών με αποτέλεσμα η έναρξη της μικρορωγμάτωσης να συμβαίνει σε μικρότερη ορθή τάση απ'ότι στη μονοαξονική θλίψη. Αντιθέτως η διάδοση της μικρορωγμάτωσης γίνεται πολύ πιο αργά και σε μικρότερο βαθμό. Το φαινόμενο αυτό παίρνει μεγαλύτερες διαστάσεις όσο αυξάνεται η εφαρμοζόμενη πλευρική τάση.



Σχήμα 2.6: Συσχέτιση αξονικής τάσης με την διάδοση της μικρορωγμάτωσης σε μονοαξονική και τριαξονική δοκιμή (Eberhardt , 1998)



Σχήμα 2.7: Επιρροή της πλευρικής πίεσης στην έναρξη της μικρορωγμάτωσης (Eberhardt , 1998)

Τέλος, σύμφωνα με έρευνες των Kwong (1983) και Bezys (1984) ο αριθμός των μικρορωγμών (πυκνότητα μικρορωγμών) είναι μεγαλύτερος στην τριαξονική θλίψη απ'ότι στην μονοαξονική θλίψη. Οι μελέτες αυτές έγιναν με οπτικά και ηλεκτρονικά μικροσκόπια (SEM)

2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΩΝ (σ_{ci}) ΚΑΙ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ (σ_{cd}).

Μεγάλος αριθμός τεχνικών εντοπισμού και μελέτης της εξάπλωσης της ρωγμάτωσης έχει αναπτυχθεί από πολλούς ερευνητές. Οι πιο δημοφιλείς περιελάμβαναν τη αξιοποίηση της αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης συσχετίζοντάς τες με τη ρωγμάτωση του δοκιμίου (Bieniawski, 1967; Martin, 1993). Για τη μέτρηση των παραμορφώσεων συνήθως χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές αντιστάσεις (strain gauge). Πιο πρόσφατη μέθοδος αποτελεί η Ακουστική Εκπομπή (ΑΕ) με την οποία γίνεται η προσπάθεια συσχέτισης της ρωγμάτωσης με τον αριθμό γεγονότων ήχητικής προέλευσης (Scholz, 1968; Ohnaka & Mogy, 1982; Khair, 1984). Στην παρούσα διπλωματική έγινε η ανάλυση της ρωγμάτωσης και με τις δύο μεθόδους στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Εδώ πρέπει να διευκρινιστεί πως ο όρος σ_{ci} αναφέρεται αποκλειστικά στην τάση ανοίγματος των μικρορωγμών και δεν πρέπει να συγχέεται με την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος η οποία φέρει τον ίδιο συμβολισμό στη βιβλιογραφία.

Άλλες τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς περιλαμβάνουν τη χρήση φωτοελαστικών υλικών (Brace & Bombolakis, 1963; Hoek & Bieniawski, 1965;), τη μέθοδο οπτικής περίθλασης (Wawersik & Fairhurst, 1970), τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (Kranz, 1979; Batzle et. Al., 1980; Zhao et. Al., 1993), τη χρήση κηλίδας laser (Chengyong et. Al., 1990) και άλλες εφαρμογές.

2.3.1 Εντοπισμός σ_{ci} και σ_{cd} με βάση τα δεδομένα παραμόρφωσης.

Η μέθοδος αυτή δίνει μεγάλες δυνατότητες σκιαγράφησης των σταδίων εξάπλωσης της μικρορωγμάτωσης. Η χρήση της ήταν περιορισμένη σε παλαιότερες μελέτες λόγω της μειωμένης ικανότητας επεξεργασίας και καταγραφής των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ωστόσο τώρα είναι εφικτή η καταγραφή της παραμόρφωσης με υψηλή ακρίβεια και συχνότητα (εώς και 200 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο) και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε λογικά χρονικά πλαίσια.

2.3.1.1 Εντοπισμός σ_{ci}

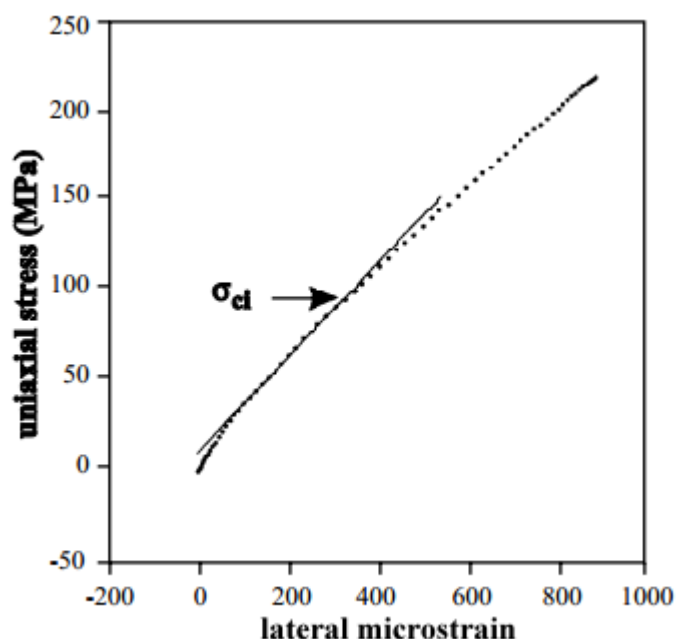
Όπως έχει ειπωθεί και στο **υποκεφάλαιο 2.1**, την έναρξη των ρωγμών διαδέχεται μία ελαστική συμπεριφορά, προϊόν της άρρηκτης φάσης του πετρώματος. Έτσι με χρήση των δεδομένων τάσης-αξονικής παραμόρφωσης αρκεί να βρεθεί το σημείο

όπου παρεκκλίνει από την ελαστική συμπεριφορά. Ο εντοπισμός του ζητούμενου σημείου δεν είναι εντελώς σαφής καθώς η θεωρητική γραμμική ελαστική συμπεριφορά δεν επιτυγχάνεται απόλυτα στην πράξη και κατά συνέπεια η έναρξη της μη γραμμικής συμπεριφοράς είναι αμφιλεγόμενη με βάση τα δεδομένα. Ωστόσο το γεγονός αυτό δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα καθώς εξ' ορισμού το σ_{ci} δεν έχει μονοσήμαντη τιμή αλλά αποτελεί ένα διάστημα στο οποίο συμβαίνει η έναρξη της μικρορωγμάτωσης.

Για την εξαγωγή του σ_{ci} με βάση την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι:

- Γραφική μέθοδος
- Αναλυτική μέθοδος

Στη γραφική μέθοδο το σ_{ci} εξάγεται απ' ευθείας από την καμπύλη τάσης- αξονικής παραμόρφωσης εντοπίζοντας γραφικά το σημείο που τελειώνει η γραμμική σχέση τάσης- παραμόρφωσης (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8 Εντοπισμός της τάσης ανοίγματος των ρωγμών (σ_{ci}) με τη γραφική μέθοδο (Eberhardt (1998) από Latjai & Dzik, 1996).

Στην αναλυτική μέθοδο υπολογίζεται σε λογιστικό φύλλο η κλίση του διαγράμματος σε κάθε σημείο με βάση τα αριθμητικά δεδομένα της καμπύλης. Εφόσον υπάρχει ένα τμήμα που η συμπεριφορά είναι ελαστική, η κλίση του διαγράμματος σε αυτό θα είναι σταθερή. Έτσι το σημείο που θα παρατηρηθεί αλλαγή της τιμής της κλίσης θα είναι το ζητούμενο σ_{ci} . Η μέθοδος αυτή είναι πιο ακριβής

αλλά ελλοχεύει κινδύνους που προκύπτουν από την πεπερασμένη ακρίβεια των μετρήσεων και την ευαισθησία των οργάνων σε μικρές διαφορές παραμορφώσεων.

Στην παρούσα διπλωματική η προσέγγιση μας περιλάμβανε τη χρήση της γραφικής μεθόδου ως αρχική ένδειξη και στη συνέχεια την περαιτέρω επεξεργασία με την αναλυτική μέθοδο.

2.3.1.2 Εντοπισμός σ_{cd}

Ο εντοπισμός του σ_{cd} γίνεται με τη χρησιμοποίηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Σύμφωνα με τον Martin (1993), η ασταθής εξάπλωση της μικρορωγματώσης συμπίπτει με τη μετάβαση του δοκιμίου από συστολική σε διαστολική συμπεριφορά. Η ογκομετρική παραμόρφωση ($\epsilon_{vol} = \Delta V/V$) με βάση τα δεδομένα αξονικής και διαμετρικής παραμόρφωσης προκύπτει:

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_{αξονική} + 2 * \epsilon_{διαμετρική} \quad (2.5)$$

Η σχέση αυτή είναι αποτέλεσμα της γενικής εξίσωσης υπολογισμού της ογκομετρικής παραμόρφωσης σε τριαξονικό σύστημα x,y,z με $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_{διαμετρική}$

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \quad (2.6)$$

Επιπρόσθετα, ο Martin (1993) προσπάθησε να υπολογίσει την τάση σ_{ci} και σ_{cd} αναλύοντας την ογκομετρική παραμόρφωση σε δύο επιμέρους τμήματα. Το πρώτο ήταν η ελαστική ογκομετρική παραμόρφωση και το δεύτερο η ογκομετρική παραμόρφωση λόγω ρωγμάτωσης.

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_{vol(elastic)} + \epsilon_{vol(crack)} \quad (2.7)$$

με:

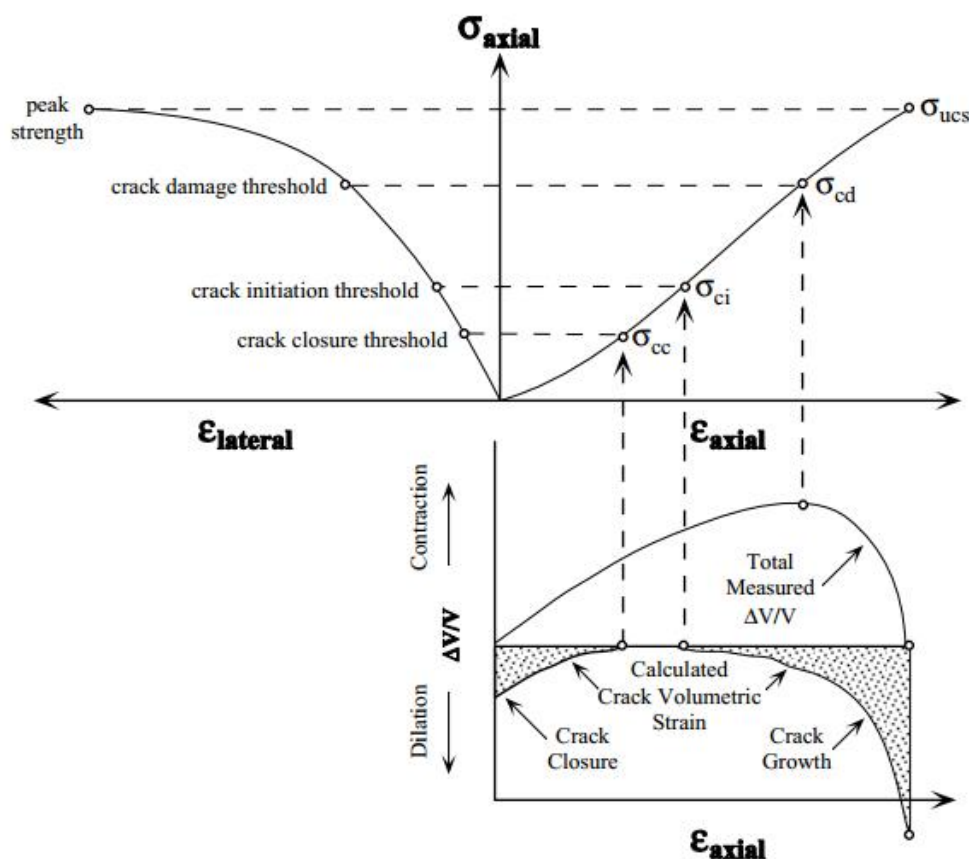
$$\epsilon_{vol(elastic)} = \frac{1-2*\nu}{E} * \sigma_{αξονική} \quad (2.8)$$

Όπου E, ν :Οι ελαστικές παράμετροι.

Έτσι από τα δεδομένα καταγραφής υπολογίζεται η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση, και από την εξίσωση (2.8) η ελαστική παραμόρφωση. Από την εξίσωση (2.7) προκύπτει:

$$\epsilon_{vol(crack)} = \epsilon_{vol} - \epsilon_{vol(elastic)} \quad (2.9)$$

Η σχέση αυτή δίνει μία αναλυτική έκφραση της ρωγμάτωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό της σ_{ci} και της σ_{cd} . Το μειονέκτημα της εμπίπτει στο σφάλμα που μπορεί να εμπεριέχει η χρήση των ελαστικών παραμέτρων E, ν στον υπολογισμό της ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης. Η αναμενόμενη απόκριση της σχέσης (2.9) όπως και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.9**.



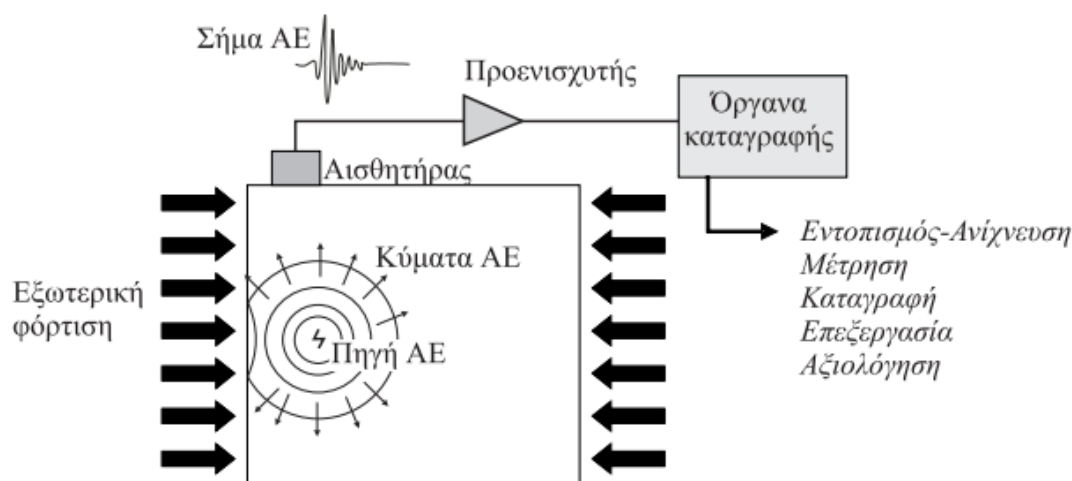
Σχήμα 2.9: Εντοπισμός της τάσης ανοίγματος (σ_{ci}) και της τάσης εξάπλωσης (σ_{cd}) των ρωγμών με χρήση της ογκομετρικής παραμόρφωσης (Martin, 1993).

2.3.2 Ακουστική Εκπομπή.

Σύμφωνα με ορισμό της ISRM (2002), ως Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό κάποιου υλικού. Η προέλευση της AE στα πετρώματα σχετίζεται με ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος ή με έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, όταν αυτό βρίσκεται υπό ένταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή. Τα κύματα της AE διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν να ανιχνευθούν από

αισθητήρες ΑΕ (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων) σε επαφή με αυτό, οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με τη σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Η τεχνική αυτή, που σήμερα γνωρίζεται σημαντική ανάπτυξη διεθνώς, είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique, AET). Τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15 kHz έως μερικά MHz, δηλαδή σε συχνότητες υπερήχων.

Στο **Σχήμα 2.10** απεικονίζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ. Ένα γεγονός ΑΕ στην πηγή προκαλεί απελευθέρωση ενέργειας η οποία διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα αυτό διαδίδεται μέχρι τα όρια του σώματος και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας.



Σχήμα 2.10 Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης ακουστικής εκπομπής (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Τα εκπεμπόμενα σήματα από την πηγή είναι συνήθως περίπλοκα και περιέχουν διάφορα είδη κυμάτων. Καθώς το κύμα διαδίδεται στο πέτρωμα και ανακλάται, μεταβάλλει τις ιδιότητες του, και εφόσον η λήψη μας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα, τα ανιχνεύσιμα σήματα θα είναι διαφορετικά από τα αρχικά εκπεμπόμενα. Υπάρχουν δύο βασικά είδη σημάτων που λαμβάνονται για επεξεργασία :

- Συνεχή: Τα συνεχή θεωρούνται ως προερχόμενα από διαρροές πίεσης, υδραυλικοί ήχοι και ονομάζονται ως μηχανικός θόρυβος. Τα σήματα

συνεχούς μορφής χαρακτηρίζονται συνήθως από τη μέση τετραγωνική ρίζα του πλάτους URMS του καταγραφόμενου σήματος.

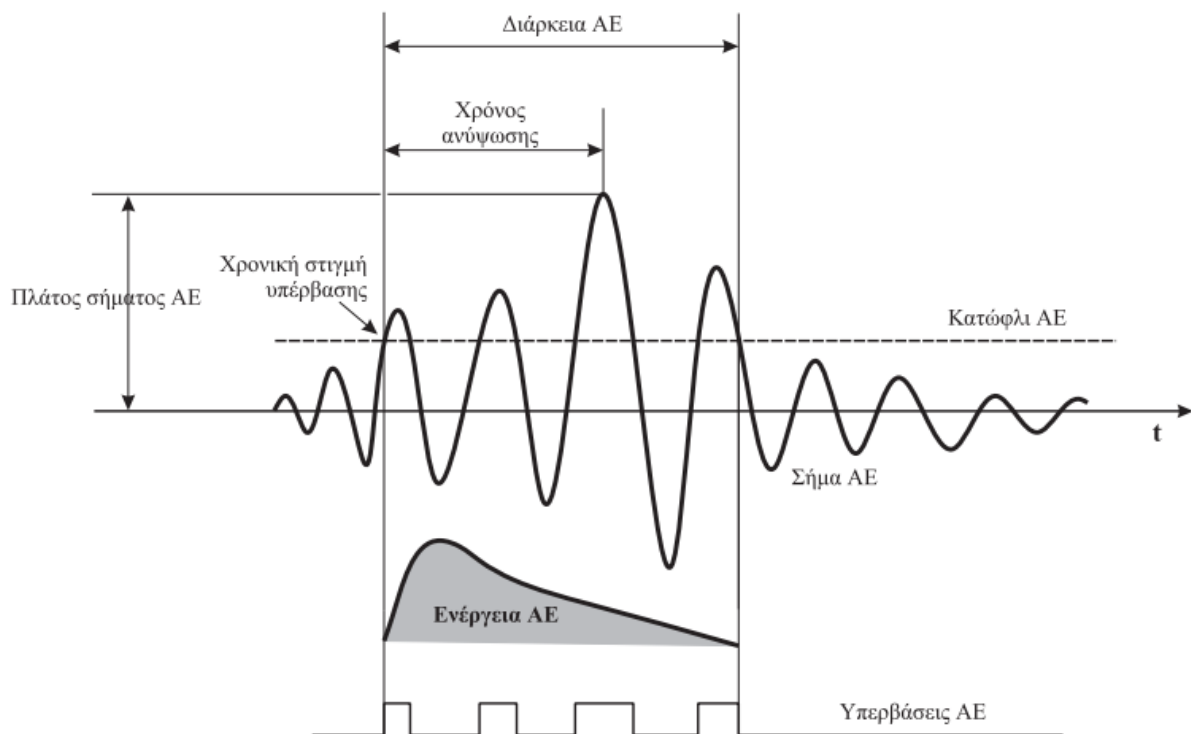
- Κρουστικά: Τα κρουστικά κύματα θεωρούνται ότι προέρχονται από διακριτά γεγονότα. Πολλές πιθανές πηγές μπορούν να εκπέμψουν κρουστικά κύματα αλλά δεχόμαστε ότι προέρχονται κυρίως από την ανάπτυξη ρωγμών. Χαρακτηρίζονται από ταχύ χρόνο ανύψωσης στο μέγιστο του πλάτους σήματος και εκθετική απόσβεση.

Γενικά, το ανιχνευόμενο σήμα έχει πολύπλοκη μορφή, που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένιση, ανακλάσεις και συμβολές) όσο και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Αυτές οι επιδράσεις διαφοροποιούν τα ανιχνεύσιμα σήματα ΑΕ από αυτά που εκπέμπονται από την πηγή.

Οι κύριοι παράμετροι ενός σήματος Ακουστικής Εκπομπής είναι:

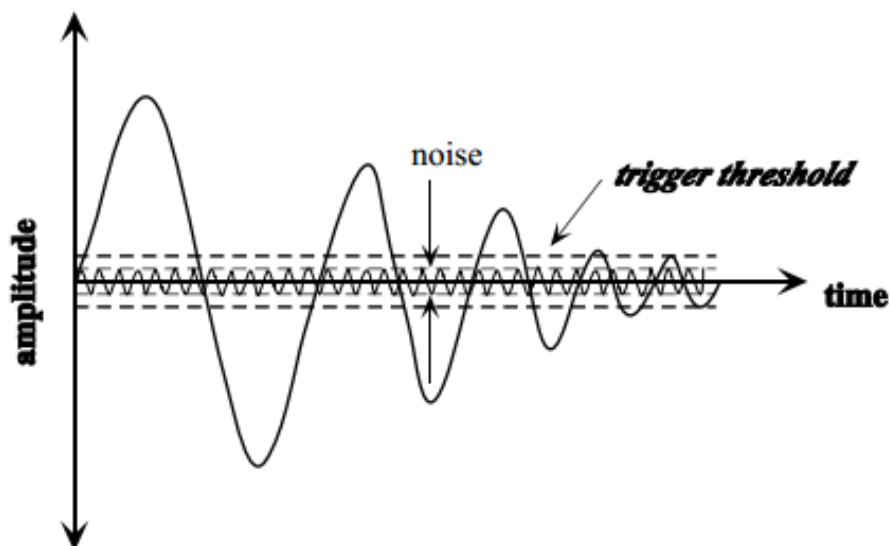
- Το πλάτος του σήματος (amplitude)
- χρόνος ανύψωσης (rise time)
- Η διάρκεια του σήματος (duration)

Στο **Σχήμα 2.11** παρουσιάζεται ένα τυπικό σήμα ακουστικής εκπομπής και τα κύρια χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 2.11 Κυματομορφή γεγονότος ακουστικής εκπομπής και ορισμένα απο τα προκύπτοντα χαρακτηριστικά του (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Κατώφλι ΑΕ (threshold): Αποτελεί το όριο κάτω απο το οποίο δεν καταγράφονται γεγονότα ακουστικής εκπομπής. Έτσι αποφεύγεται η καταγραφή ηχητικών γεγονότων μη σχετικών με την δοκιμή που θα οδηγούσε σε παραποίηση των αποτελεσμάτων. Το κατώφλι ορίζεται από το χρήστη του λογισμικού επεξεργασίας και η τιμή του προκύπτει απο την αξιολόγηση των εξωτερικών θορύβων. Συνήθως κυμαίνεται απο 30-50 dB.



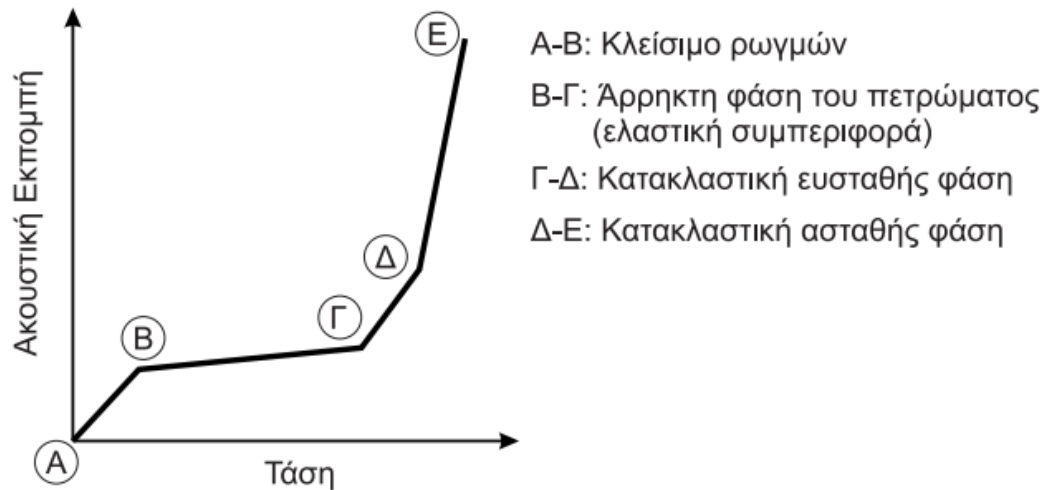
Σχήμα 2.12 Με τη χρήση κατωφλιού φιλτράρεται ο εξωτερικός συνεχής ήχος (Spanner et. Al. 1987).

Η παράμετρος “Απαριθμήσεις” (counts) προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι, ενώ το πλάτος είναι η μέγιστη τάση της κυματομορφής ΑΕ και αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος. Το διάστημα μεταξύ της χρονικής στιγμής που το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μέγιστου πλάτους ονομάζεται χρόνος ανύψωσης (rise time).

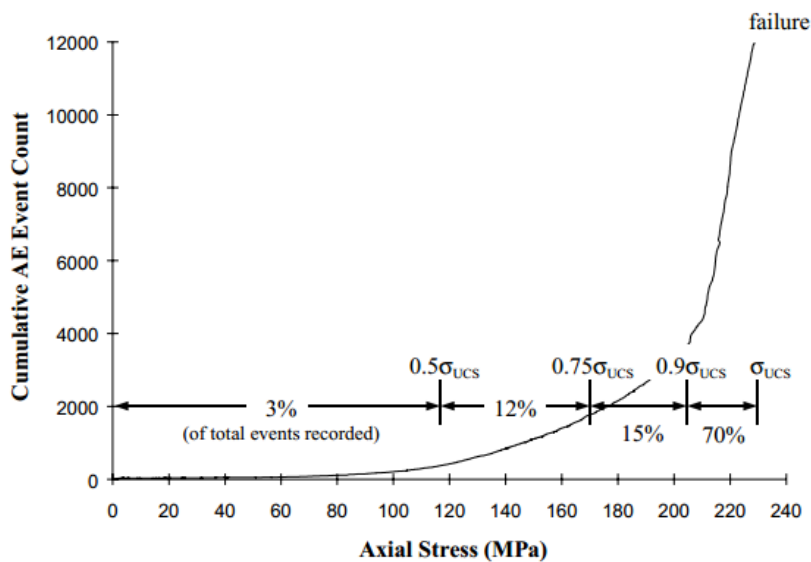
2.3.2.1 Συσχέτιση Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ) με τα στάδια ρωγμάτωσης.

Από τις πρώτες μελέτες της ΑΕ στα πετρώματα διαπιστώθηκε ότι υπό θλιπτική φόρτισης ο ρυθμός ΑΕ αυξάνεται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Σημαντικό έργο στον τομέα αυτό έχει γίνει από τους Ohnaka και Mogi (1962), οι οποίοι δίνουν σε διάγραμμα (**Σχήμα 2.13**) τη γενική μορφή της σχέσης μεταξύ της ΑΕ και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Στο ίδιο διάγραμμα συνδυάζεται από τους Boyce et al. (1981) η ΑΕ με τη διαδικασία καταστροφής του δοκιμίου κατά τις δοκιμές θλίψης που έχει παρουσιαστεί στο **Κεφάλαιο 2.1** (Σοφιανός, 2008). Παρόμοια συσχέτιση έγινε πιο πρόσφατα απο τον

Eberhardt (1998) σε πέτρωμα παρόμοιο με το εξεταζόμενο στην παρούσα διπλωματική γρανίτη (Σχήμα 2.14). Στο γρανίτη του Eberhardt παρατηρείται πολύ μικρή απόκριση των ακουστικών γεγονότων στα πρώτα στάδια της φόρτισης και ραγδαία αύξηση της ΑΕ όσο πλησιάζουμε στη θραύση του δοκιμίου. Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα της ψαθυρής φύσης του γρανιτικού πετρώματος.



Σχήμα 2.13: Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης-ακουστικής εκπομπής ΑΕ (Ohnaka & Mogi, 1962) και η συσχέτισή της με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Boyce et al., 1981).



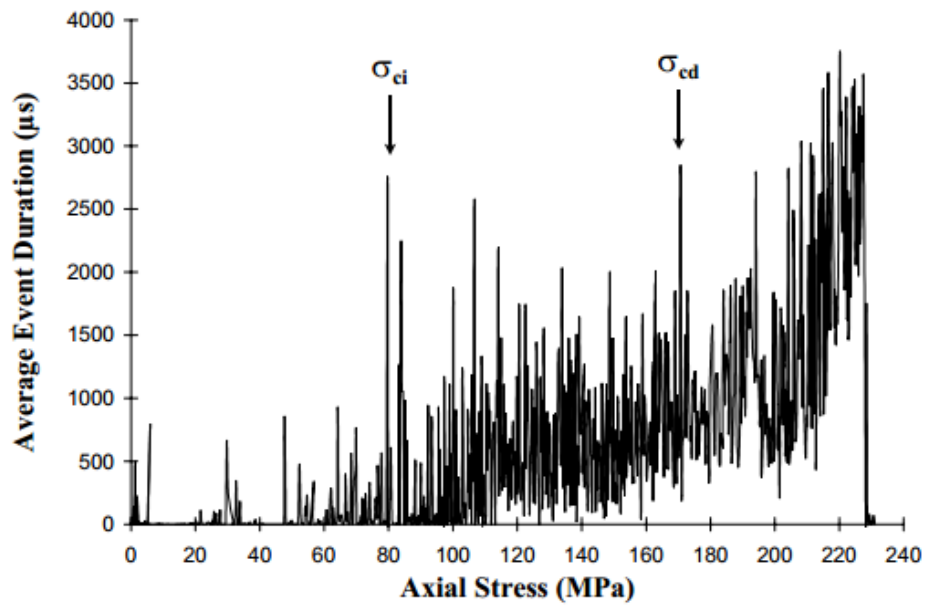
Σχήμα 2.14: Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης-ακουστικής εκπομπής ΑΕ για γρανίτη Lac du Bonnet (Eberhardt, 1998).

2.3.2.2 Εντοπισμός σ_{ci} και σ_{cd} με τη μέθοδο Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ).

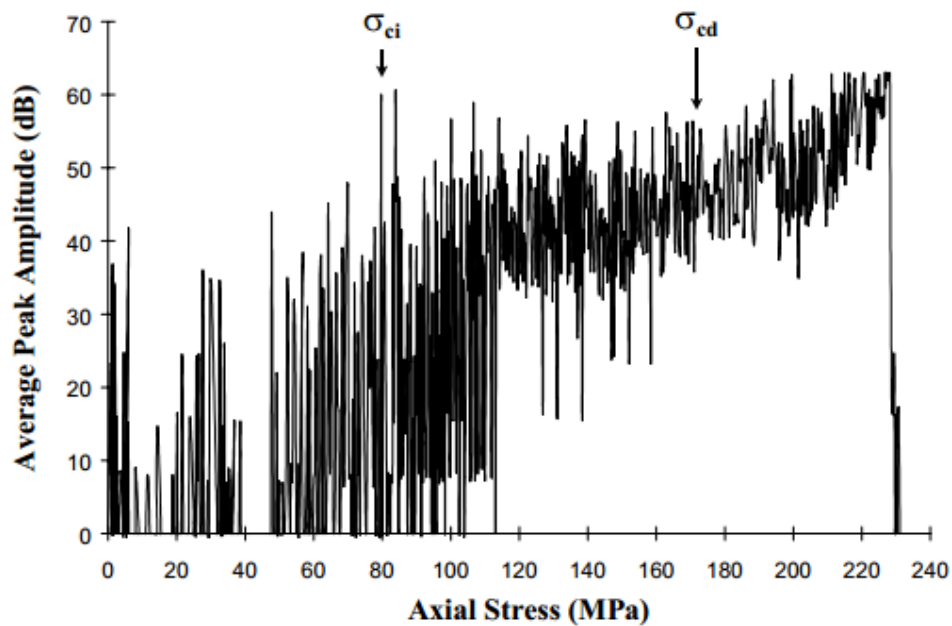
Το διάγραμμα Τάσης-Αριθμού γεγονότων ακουστικής εκπομπής αποτελεί το σημαντικότερο διάγραμμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων της ρωγμάτωσης. Με βάση το διάγραμμα του Mogi (1962) αλλά γνωρίζοντας πως η συμπεριφορά του γρανιτικού πετρώματος θα είναι παρόμοια με την ανωτέρω συμπεριφορά που παρουσιάζεται από τον Eberhardt (1998) θα γίνει η εξαγωγή των συμπερασμάτων ρωγμάτωσης μετά την πειραματική διαδικασία. Ουσιαστικά η ζητούμενη τάση σ_{ci} έπεται της άρρηκτης φάσης του πετρώματος (στην οποία θεωρητικά παρατηρούνται φαινόμενα ΑΕ σε πολύ μικρό βαθμό) όποτε αναμένεται μία απότομη εκδήλωση γεγονότων ΑΕ η οποία θα συνεχιστεί με ένα σχετικά σταθερό ρυθμό. Στη συνέχεια μία δεύτερη αύξηση του ρυθμού ΑΕ θα είναι αποτέλεσμα της μετάβασης στην ασταθή περιοχή ρωγμάτωσης και θα οδηγήσει στον εντοπισμό της σ_{cd} .

Στην πειραματική διαδικασία της ακουστικής εκπομπής (η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο **υποκεφάλαιο 4.6.2**) υπάρχουν πολλά μετρούμενα μεγέθη πέραν των γεγονότων ΑΕ. Μερικά από αυτά είναι : Το πλάτος των κυμάτων, η διάρκεια του σήματος, η εκλυόμενη ενέργεια, η συχνότητα και άλλα. Έτσι υπάρχουν πολλά δεδομένα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη ρωγμάτωση. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο **υπόκεφάλαιο 4.6.2**, κύριος άξονας της ανάλυσης είναι το διάγραμμα Τάσης-Γεγονότων ακουστικής εκπομπής ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία μπορούν να επιβεβαιώσουν τα εξαγόμενα συμπεράσματα.

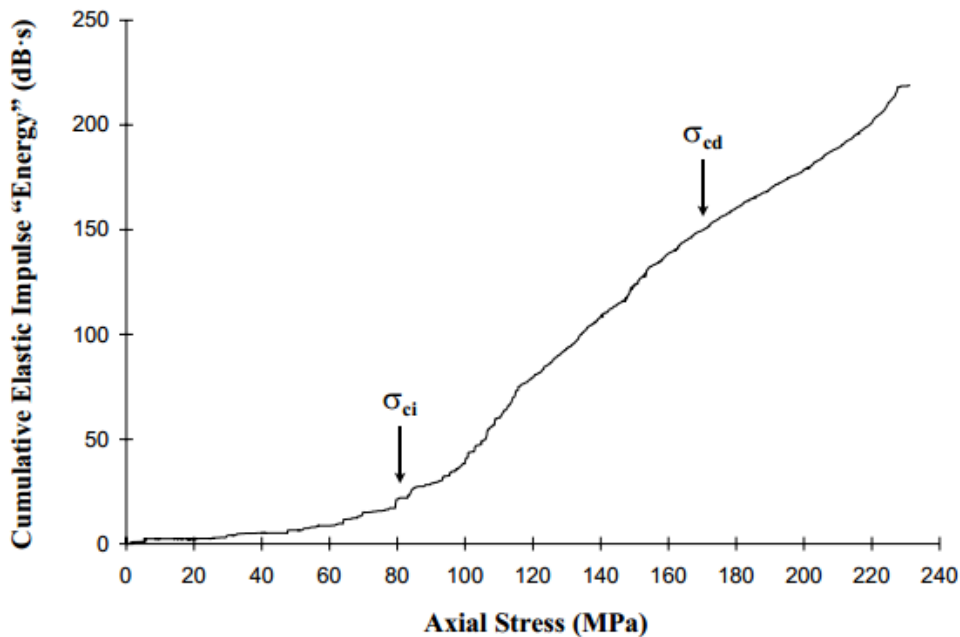
Στα **Σχήματα 2.15, 2.16, 2.17** παρουσιάζονται τυπικά διαγράμματα μέσης διάρκειας γεγονότων, μέσου μέγιστου πλάτους και αθροιστικής ελαστικής ενέργειας σε συσχέτιση με την εφαρμοζόμενη τάση (Eberhardt, 1998). Να σημειωθεί ότι ο Eberhardt (1998) έχει ήδη εντοπίσει τις τάσεις σ_{ci} και σ_{cd} από το διάγραμμα Τάσης-Γεγονότων ΑΕ σε συνδυασμό με τη μέθοδο εντοπισμού μέσω των δεδομένων παραμόρφωσης η οποία έχει παρουσιαστεί στο **υποκεφάλαιο 2.3.1**. Είναι ξεκάθαρο πως τα διαγράμματα αυτά από μόνα τους δεν θα μπορούσαν να είναι απολύτως σαφή για τον προσδιορισμό των τάσεων σ_{ci} και σ_{cd} ωστόσο μπορούν να λειτουργήσουν σαν μία μορφή επιβεβαίωσης της ορθής εκτίμησης.



Σχήμα 2.15: Διάγραμμα μέσης διάρκειας γεγονότων-επιβαλλόμενης τάσης για το γρανίτη Lac du Bonnet. Στο διάγραμμα σημειώνονται οι τάσεις σ_{ci} και σ_{cd} (Eberhardt,1998)



Σχήμα 2.16: Διάγραμμα μέσου μέγιστου πλάτους-επιβαλλόμενης τάσης για το γρανίτη Lac du Bonnet. Στο διάγραμμα σημειώνονται οι τάσεις σ_{ci} και σ_{cd} (Eberhardt,1998)



Σχήμα 2.17: Διάγραμμα αθροιστικής ελαστικής ενέργειας-επιβαλλόμενης τάσης για γρανίτη Lac du Bonnet. Στο διάγραμμα σημειώνονται οι τάσεις σ_{ei} και σ_{cd} (Eberhardt,1998)

2.4 Αποτύπωση ρωγμάτωσης

Η αποτύπωση και ποσοτικοποίηση του βαθμού της ρωγμάτωσης στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμών έγινε με τη χρήση των δεικτών P_{10} , P_{20} , P_{21} . Η διαδικασία αποτύπωσης που ακολουθήθηκε όπως προτάθηκε από τους Dershowitz & Herda (1992) είναι η εξής: Η εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου και οι όποιες επιφανειακές ρωγμές είναι εμφανής αποτυπώνονται σε διαφανές χαρτί. Στη συνέχεια χαράσσονται κάθετες γραμμές (scanlines) ανά ίσες αποστάσεις κατά τον άξονα φόρτισης του δοκιμίου.

Στη βιβλιογραφία δεν προτείνεται συγκεκριμένος αριθμός γραμμών. Ωστόσο, με την άυξη των γραμμών αυξάνεται και η ακρίβεια των δεικτών. Στην πειραματική διαδικασία έγινε χάραξη δέκα γραμμών σε όλα τα δοκίμια για λόγους ομοιομορφίας. Αφού γίνει η χάραξη μετρείται ο αριθμός των σημείων τομής γραμμών-ρωγμών τα οποία ονομάζονται ίχνη (traces). Τέλος το διαφανές χαρτί αποτυπώνεται σε ηλεκτρονική μορφή και μέσω προγράμματος (Autocad 2013) υπολογίζεται το μήκος των ρωγμών. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την εξαγωγή των προαναφερθέντων δεικτών.

Οι δείκτες είναι εύχρηστοι καθώς δεν απαιτείται η χρήση κάποιας ειδικής συσκευής ή η χρήση μικροσκοπίου όπως σε άλλες μεθόδους (όπως π.χ. CT tomography).

Το βασικό τους μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι αποτυπώνουν ρωγμές που είναι επιφανειακές κι εμφανής μακροσκοπικά. Αυτό σημαίνει πως δεν είναι κατάλληλοι για την αποτύπωση της μικρορωγμάτωσης (αποτυπώνουν μόνο τη μακρορωγμάτωση). Οι ρωγμές αρχίζουν να είναι εμφανής μακροσκοπικά στην ασταθή περιοχή εξάπλωσης των ρωγμών, μετά δηλαδή την τάση σ_{cd} . Ωστόσο

αποδείχθηκε πειραματικά πως οι ταχύτητες διάδοσης κυμάτων στο γρανιτικό πέτρωμα που εξετάστηκε δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια της μικρορωγμάτωσης (όπως αναλύεται στο **Κεφάλαιο 5**).

2.4.1 Δείκτης P₁₀

Ο δείκτης P₁₀ εκφράζει την πυκνότητα των ρωγμών ανά μέτρο μήκους γραμμών χάραξης και ορίζεται ως:

$$P_{10} = \frac{\text{Αριθμός σημείων τομής γραμμών χάραξης – ρωγμών}}{\text{Μήκος γραμμών χάραξης}}$$

$$P_{10} = \frac{\text{Traces}}{\text{Length of scanlines}} \text{ (Traces/m)}$$

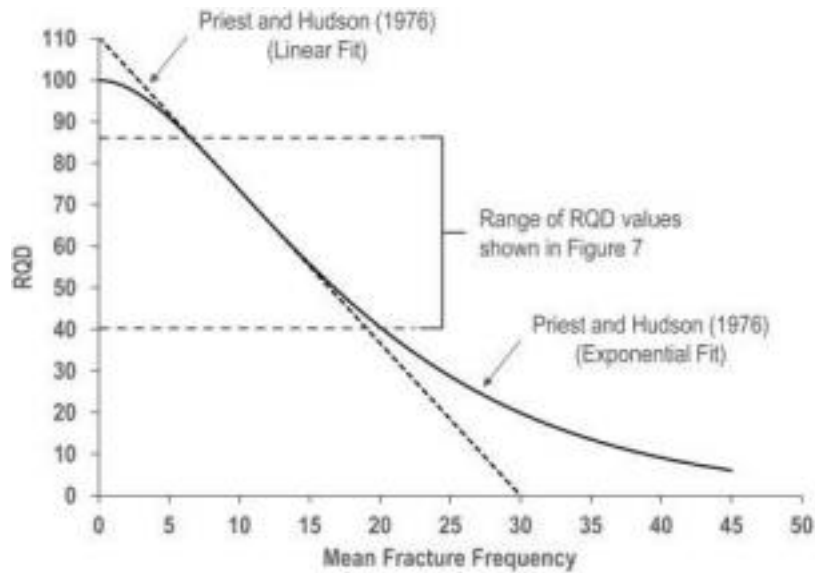
Μελέτες των Priest and Hudson (1976) έδειξαν πως ο δείκτης P₁₀ μπορεί να συσχετιστεί με τον δείκτη ποιότητας του πετρώματος RQD (Rock Quality Designation), (Deere, 1963) ο οποίος είναι πιο διαδεδομένος στην επιστήμη της βραχομηχανικής. Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος ως το ποσοστό του συνολικού μήκους τεμαχίων (πυρήνα) με μήκος μεγαλύτερο των 10cm. προς το μήκος της δειγματοληψίας

$$RQD = 100 * \frac{\text{Συνολικό μήκος τμημάτων χωρίς ασυνέχειες (t > 10 cm.)}}{\text{Συνολικό μήκος δειγματοληψίας}}$$

Ο δείκτης RQD είναι εύχρηστος σε πυρηνοληψίες γεωτρήσεων κι όχι σε εργαστηριακά δοκίμια λόγω του αυξημένου αναγκαίου μήκους μέτρησης.

Σύμφωνα με τους Priest and Hudson (1976) η συσχέτιση RQD - P₁₀ είναι, με καλή προσέγγιση, γραμμική όταν ο δείκτης P₁₀ κυμαίνεται απο 6-16 ίχνη/m. ενώ ακολουθεί μία εκθετική σχέση για μεγαλύτερες τιμές του P₁₀. Για τιμές μικρότερες του 3 και του 6 ίχνη/m. το RQD ξεπερνάει το 95% και το 90% αντίστοιχα.

$$RQD = \begin{cases} > 90\% & , 0 < P_{10} < 6 \\ 110,4 - 3,68 * P_{10} & , 6 < P_{10} < 16 \\ 100 * e^{-0,1 * P_{10}} * (0,1 * P_{10} + 1) , & P_{10} > 16 \end{cases}$$



Σχήμα 2.18: Συσχέτιση του δείκτη RQD και του δείκτη P_{10} (Priest and Hudson, 1976).

2.4.2 Δείκτης P_{20}

Ο δείκτης P_{20} εκφράζει την πυκνότητα των ρωγμών στο εμβαδόν του δοκιμίου και ορίζεται ως:

$$P_{20} = \frac{\text{Αριθμός σημείων τομής γραμμών χάραξης – ρωγμών}}{\text{Εμβαδόν δοκιμίου}}$$

$$P_{20} = \frac{\text{Traces}}{\text{Area}} \text{ (Traces/m}^2\text{)}$$

Οι δείκτες P_{10} και P_{20} εξαρτώνται από τις γραμμές χάραξης. Αλλαγή στη θέση τους κατά μήκος του δοκιμίου αλλά κυρίως στον προσανατολισμό τους θα είχε ως αποτέλεσμα διαφορετικές τιμές αυτών των δεικτών. Στη παρούσα διπλωματική ο προσανατολισμός τους λαμβάνεται κάθετα στον άξονα φόρτισης για όλα τα δοκίμια είτε σε μονοαξονικές είτε σε τριαξονικές συνθήκες όπως άλλωστε ενδείκνεται και στη βιβλιογραφία (Chernis, 1984).

2.4.3 Δείκτης P₂₁

Ο δείκτης P₂₁ εκφράζει το συνολικό μήκος των ρωγμών ως προς το εμβαδόν του δοκιμίου.

$$P_{21} = \frac{\text{Μήκος ρωγμών}}{\text{Εμβαδόν δοκιμίου}}$$

$$P_{21} = \frac{\text{Length of total fractures}}{\text{Area}} \text{ (m/m}^2\text{)}$$

Η μέτρηση του μήκους των ρωγμών γίνεται με χρήση του Autocad (2013) αφού η γεωμετρία τους είναι πολύπλοκη κι έτσι δεν είναι εφικτή η μέτρηση με πιο απλά μέσα. Στο πρόγραμμα Autocad χωρίζονται οι αποτυπωμένες ρωγμές σε μικρά τμήματα τα οποία προσομοιώνονται με ευθείες προσεγγίζοντας έτσι το μήκος των ρωγμών με αρκετά μεγάλη ακρίβεια.

Κεφάλαιο 3: ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΕΠΙΜΗΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων P και S είναι σημαντικές στην επιστήμη της βραχομηχανικής και της εδαφομηχανικής καθώς εξαρτώνται από τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του εδαφικού ή του βραχώδους υλικού. Με την επί τόπου μέτρηση των ταχυτήτων είναι δυνατός ο προσδιορισμός του εδαφικού υποβάθρου καθώς και ο εντοπισμός του υδροφόρου ορίζοντα. Σημαντική είναι η συνεισφορά τους στην εύρεση διατμημένων ζωνών και ρηγμάτων. Οι ζώνες αυτές δίνουν μικρότερες ταχύτητες από το περιβάλλον υπόβαθρο κι επομένως ο εντοπισμός τους είναι εύκολος. Μετά τη δεκαετία του 1960 οι ταχύτητες των κυμάτων P,S άρχισαν να χρησιμοποιούνται ως δείκτης ποιότητας πετρώματος. Η ταχύτητα διάδοσης είναι χαρακτηριστική για κάθε πέτρωμα και αποτελεί ένα έμμεσο μέτρο εκτίμησης των ιδιοτήτων του πετρώματος. Τα κύματα P είναι πιο εύκολο να εντοπιστούν σε επί τόπου δοκιμές (όπως και στο εργαστήριο) και έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό σε μετρήσεις.

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αυτών εξαρτάται από την πυκνότητα ρ και τις δυναμικές ιδιότητες του πετρώματος και μπορεί να υπολογισθεί από τις σχέσεις:

$$V_p(m/s) = \sqrt{\frac{E_d * (1 - \nu_d)}{\rho * (1 - 2 * \nu_d) * (1 + \nu_d)}} \quad (3.1)$$

$$V_s(m/s) = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_d}{2 * \rho * (1 + \nu_d)}} \quad (3.2)$$

Προκύπτει:

$$V_p = V_s * \sqrt{\frac{2 * (1 - \nu_d)}{1 - 2 * \nu_d}} \quad (3.3)$$

Όπου:

E_d : Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος σε kPa.

G_d : Το δυναμικό μέτρο διάτμησης του πετρώματος σε kPa.

ρ : Η πυκνότητα του πετρώματος σε Mg/m^3 .

ν_d : Ο δυναμικός λόγος Poisson.

Επειδή κατά τη μέτρηση των ταχυτήτων V_p , V_s οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές χρησιμοποιείται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (dynamic modulus) αντιστοιχεί στην πολύ μικρή στιγμιαία παραμόρφωση και δίνεται κατά προσέγγιση από το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο (initial tangent modulus) που είναι το εφαπτομενικό μέτρο για μια γραμμή με αφετηρία το μηδέν. Ομοίως το δυναμικό μέτρο διάτμησης αντιστοιχεί σε πολύ μικρή στιγμιαία γωνιακή παραμόρφωση και υπολογίζεται κατά τον ίδιο τρόπο. Στο γρανίτη ανεμούνται 20-30% υψηλότερα από τα αντίστοιχα στατικά μέτρα. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος.

3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Οι περισσότερες μελέτες και αναλύσεις έχουν γίνει πάνω στις ταχύτητες επιμήκων κυμάτων (V_p). Ο λόγος είναι ότι ο εντοπισμός των κυμάτων P είναι πιο εύκολος σε επί τόπου δοκιμές. Ωστόσο η συσχέτιση V_p - V_s (εξίσωση 3.3) είναι γραμμική. Έτσι η συμπεριφορά των δύο μεγεθών σε σχέση με τους παράγοντες που θα αναλυθούν είναι παρεμφερής.

3.2.1 Τύπος του πετρώματος

Ο τύπος του πετρώματος χαρακτηρίζεται από τις εξής ιδιότητες:

1. Ορυκτολογική σύσταση
2. Πυκνότητα
3. Πορώδες
4. Ανισοτροπία

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι χαρακτηριστικές ταχύτητες επιμήκων και εγκάρσιων κυμάτων για διάφορα ορυκτά (Fourmaintraux, 1976).

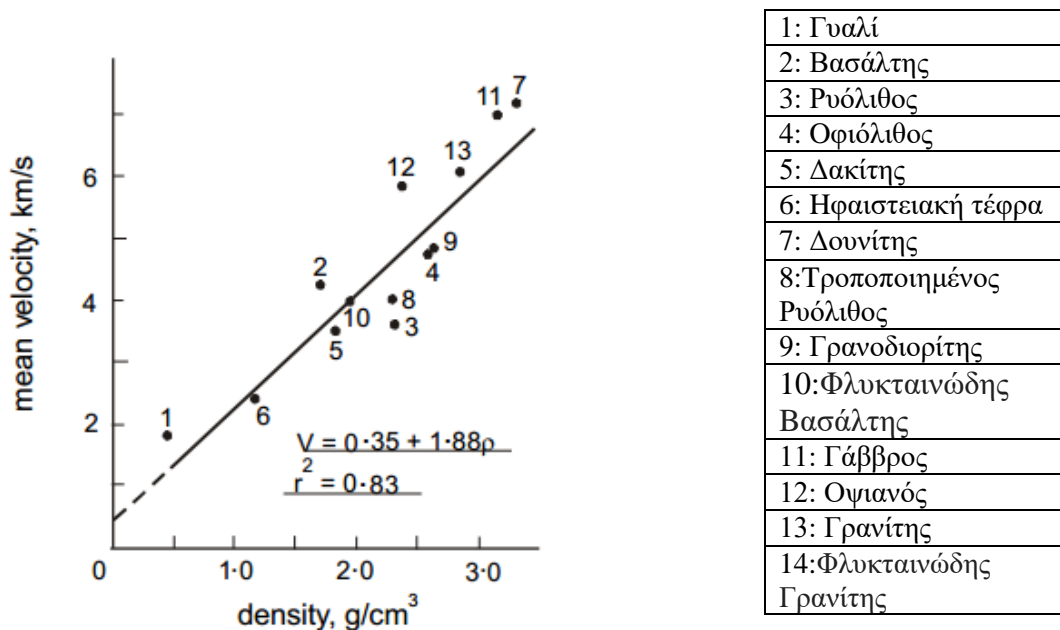
Ορυκτό	V_p (km/s)	V_s (km/s)
Αμφιβολίτης	7,20	3,90
Ασβεστίτης	6,60	3,20
Δολομίτης	7,50	4,40
Γύψος	5,20	2,70
Μαγνητίτης	7,40	4,20
Σιδηροπυρίτης	8,00	5,10
Ολιβίνης	8,40	4,80
Χαλαζίας	6,05	4,10
Πλαγιόκλαστα	6,25	3,40
Αλκαλικοί Άστριοι	5,80	3,50

Πίνακας 3.1: Ταχύτητες επιμήκων και διατμητικών κυμάτων κάποιων ορυκτών (Fourmaintraux, 1976)

Σε άρρηκτο γρανίτη όπου μεγάλο ποσοστό των ορυκτών του αποτελούν ο χαλαζίας, τα πλαγιόκλαστα και οι αλκαλικοί άστριοι αναμένεται ταχύτητα επιμήκων και διατμητικών κυμάτων 6,00 και 3,70 km/s περίπου αντίστοιχα.

Η ταχύτητα διαδόσης κυμάτων P αυξάνεται με την άυξηση της πυκνότητας. Εκ πρώτης όψεος αυτό αντιβαίνει στην εξίσωση (3.1) όπου η πυκνότητα βρίσκεται στον παρονομαστή. Ωστόσο μεγαλύτερη πυκνότητα σημαίνει και μεγαλύτερη στοιβαρότητα του πετρώματος συνεπώς αύξηση του μέτρου ελαστικότητας (δυναμικού και στατικού) και μάλιστα με μεγαλύτερο συντελεστή από αυτόν που αυξάνεται η πυκνότητα. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί δύο σχέσεις οι οποίες βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα. Οι Bur και Hjelmstad (1970) αφού υπολόγισαν τις ταχύτητες για κάποια πετρώματα διαφορετικών πυκνότητων πρότειναν μία γραμμική συσχέτιση των δύο μεγεθών. Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζουν είχαν καλή συσχέτιση ($r^2=0,83$).

$$V_p(km/s) = 0,35 + 1,88 * \rho(g/cm^3) \quad (3.4)$$

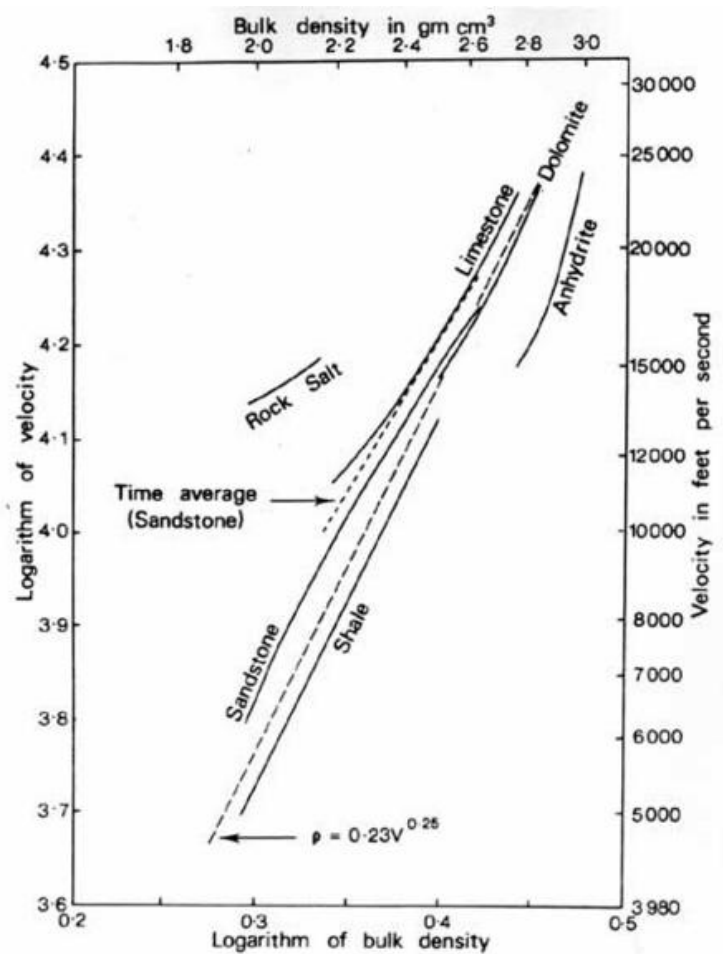


Σχήμα 3.1: Συσχέτιση ταχύτητας διάδοσης κυμάτων P με την πυκνότητα του εκάστοτε πετρώματος (Bur και Hjelmstad , 1970)

Η δεύτερη σχέση προτάθηκε από τους Gardner et al. (1974) με βάση πειραματικά αποτελέσματα σε ασβεστόλιθους, δολομίτες, ανυδρίτες, σχιστόλιθους και ψαμμίτες. Η σχέση ήταν εφαρμόσιμη για ταχύτητες μεγαλύτερες από 1500 km/s. Η συσχέτιση μεταξύ ταχύτητας και πυκνότητας δίνεται από μία εξίσωση τετάρτου βαθμού.

$$V_p(\text{km/s}) = \frac{\rho^4 (\text{g/cm}^3)}{9,17} \quad (3.4)$$

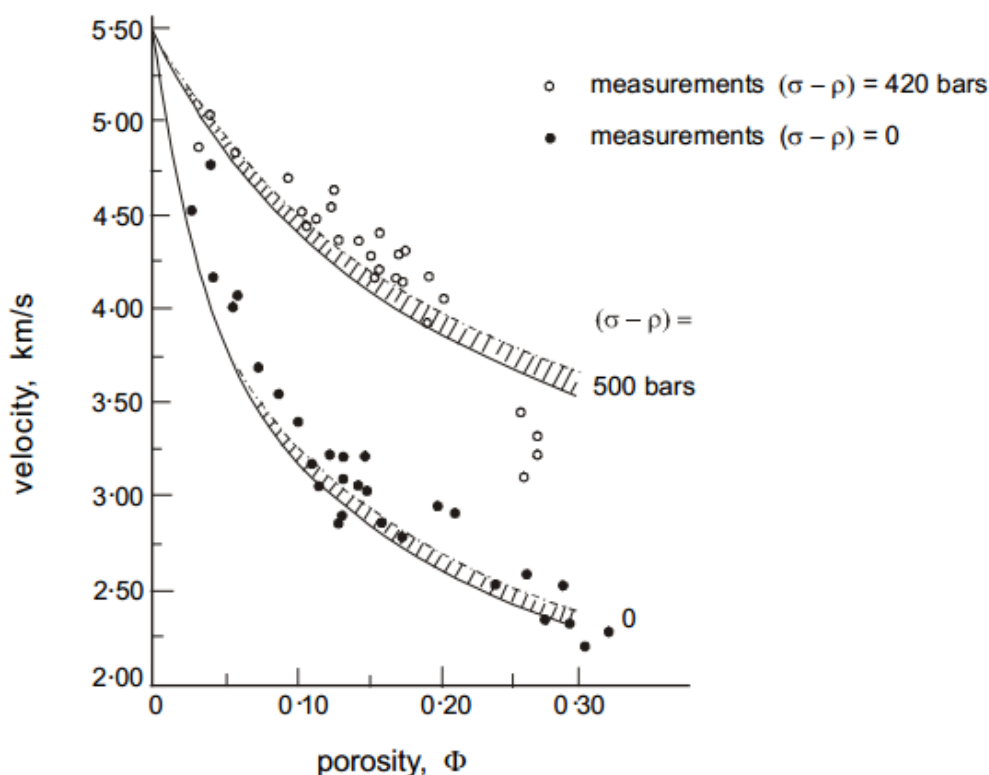
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας των Gardner et al. (1974) στην προσπάθεια συσχέτισης ταχύτητας κύματος και πυκνότητας.



Σχήμα 3.2: Συσχέτισης ταχύτητας διάδοσης κυμάτων P με την πυκνότητα του εκάστοτε πετρώματος (Gardner et al., 1974)

Στην περίπτωση αύξησης του πορώδους, η ταχύτητα διάδοσης κύματος μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι στο υλικό πλήρωσης των κενών (αέρας ή νερό) τα κύματα διαδίδονται πιο αργά απ'ότι στο άρρηκτο τμήμα του πετρώματος (ορυκτά). Ωστόσο επειδή στο νερό τα κύματα διαδίδονται πέντε φορές πιο γρήγορα απ'ότι στον αέρα, ο κορεσμός οδηγεί σε μεγαλύτερη ταχύτητα από την ξηρή κατάσταση.

Παρακάτω παρουσιάζεται η συσχέτιση ταχύτητας-πορώδους για δύο διαφορετικές τιμές ενεργής τάσης. Η ενεργός τάση είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τις ταχύτητες διάδοσης κύματος. Γενικά όσο αυξάνεται η ενεργός τάση κλείνουν οι μικρορωγμές και συμπιέζονται οι κόκκοι (και το συνθετικό υλικό των κόκκων) με αποτέλεσμα μία σκλήρυνση της δομής του πετρώματος. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας κατά τη διάδοση κύματος. Πρέπει να τονιστεί πως στη διαδικασία αυτή δεν παίζει ρόλο η ολική ασκούμενη τάση αλλά η διαφορά της από την πίεση πόρων (ενεργός τάση).



Σχήμα 3.3: Συσχέτιση ταχύτητας διάδοσης κυμάτων P με το πορώδες για ενεργό τάση 0 και 420 bar (42 MPa) (Bur και Hjelmstad , 1970)

Τέλος, η ανισοτροπία του πετρώματος αποτελεί έναν κύριο παράγοντα που επηρεάζει τις ταχύτητες διάδοσης κύματος και χρήζει εκτενούς μελέτης σε

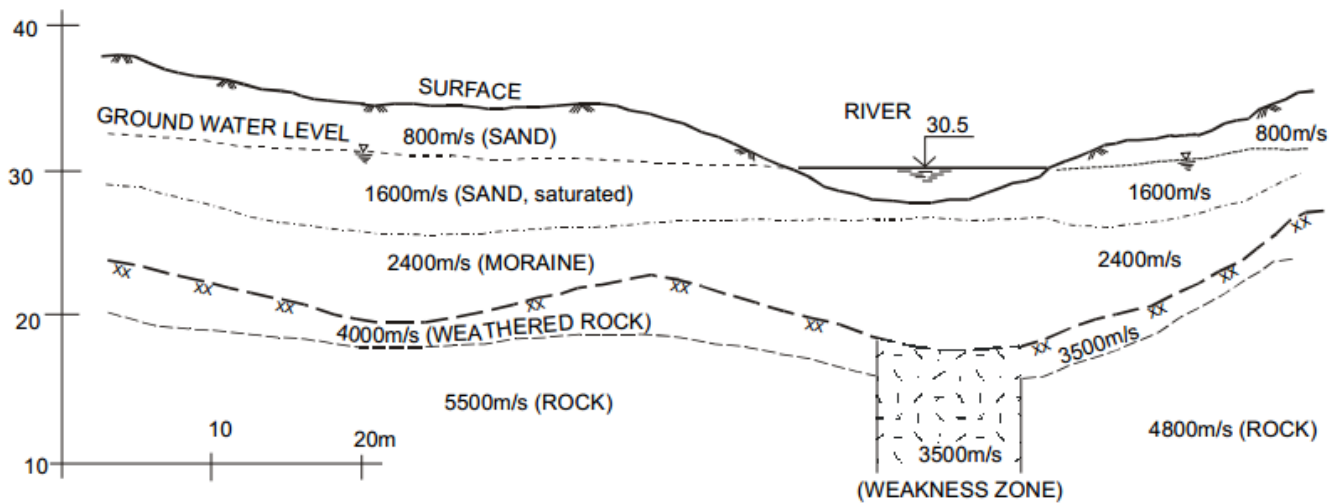
ανισότροπα πετρώματα. Στη παρούσα διπλωματική θα γίνει μία συνοπτική αναφορά στην ανισοτροπία καθώς το πέτρωμα που έχει επιλέχθει είναι ισότροπο.

Εάν οι ασυνέχειες ή τα επίπεδα στρώσης είναι προσανατολισμένες σε κάποια διεύθυνση στο δοκίμιο τότε μπορούμε να πούμε πως οι ταχύτητες σε διεύθυνση κάθετη προς αυτές είναι πάντα μικρότερες από τις ταχύτητες σε διεύθυνση παράλληλη προς αυτές. Για γωνίες μέτρησης ανάμεσα στην κάθετη και την παράλληλη διεύθυνση των στρωμάτων αναμένονται ενδιάμεσες ταχύτητες (Σαρόγλου, 2007).

Μελέτες που έγιναν από τους Bergh και Christensen (1968) δείχνουν πως σε σχιστόλιθους και φυλλίτες η διαφορά των δύο ταχυτήτων (παράλληλης και κάθετης στα στρώματα) μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές (τούλαχιστον διπλάσια η ταχύτητα παράλληλη στα στρώματα από την ταχύτητα κάθετη στα στρώματα). Ωστόσο σε έρευνα των Lama και Vutukuri (1978) για πετρώματα με μικρότερο βαθμό ανισοτροπίας (Ασβεστόλιθος, Ανυδρίτης, Μάργες, Γρανοδιορίτης, Ψαμμίτης και άλλα) η μέγιστη διαφορά που παρατηρείται είναι της τάξης του 40%. Η επίδραση της ανισοτροπίας μπορεί να μειωθεί με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου κατά τη μέτρηση.

3.2.2 Αποσάθρωση

Η αποσάθρωση του πετρώματος γενικά προκαλεί μείωση των ταχυτήτων διάδοσης κύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αποσάθρωση απομειώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων (μέτρο ελαστικότητας E , μέτρο διάτμησης G). Ποσοτικοποιημένες μελέτες για τη συσχέτιση μείωσης ταχυτήτων-αποσάθρωσης δεν έχουν γίνει. Μόνο ο Barton (2002) συσχετίζει τον δείκτη Q (**υπόκεφάλαιο 1.2.1.2**) με την ταχύτητα V_p . Ο δείκτης Q λαμβάνει υπ' όψιν και τη διάβρωση του πετρώματος. Ωστόσο, η χρησιμότητα των ταχυτήτων V_p και V_s ως προς την αποσάθρωση έγκειται στον επί τόπου εντοπισμό της ζώνης αποσάθρωσης σε ένα πεδίο (Topal & Doyuran, 1994). Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως γίνεται ο χαρακτηρισμός του εδαφικού προφίλ και της ζώνης αποσάθρωσης του βράχου με βάση τις μετρούμενες ταχύτητες V_p . Προφανώς χρειάζονται κι άλλα στοιχεία για τον πλήρη χαρακτηρισμό του στρωμάτων (για παράδειγμα μία γεώτρηση) ωστόσο με τη μέτρηση των ταχυτήτων δίνεται μία καλή προσέγγιση των σχηματισμών στο πεδίο.

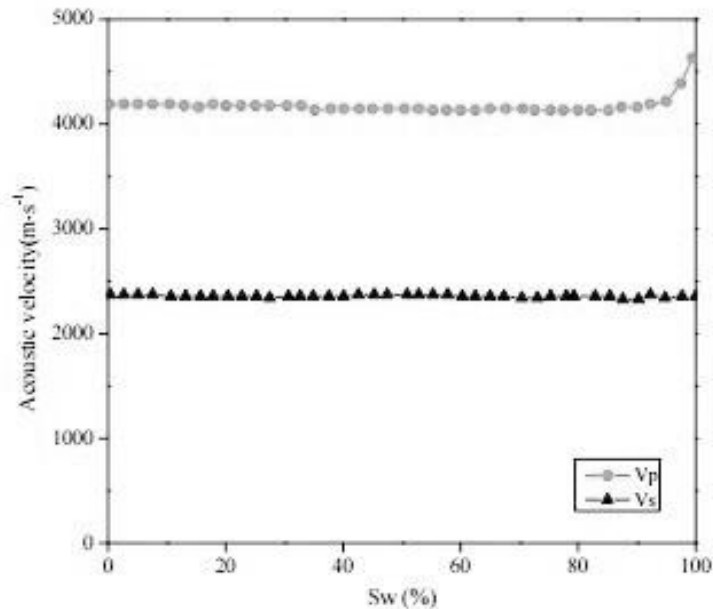


Σχήμα 3.4: Χαρακτηρισμός εδαφικού προφίλ με βάση της ταχύτητες διάδοσης κύματων P (Broch, 1988)

3.2.3 Βαθμός κορεσμού

Ο βαθμός κορεσμού επηρεάζει κυρίως την ταχύτητα επιμήκων κυμάτων. Όσο πιο μεγάλο πορώδες έχει το πέτρωμα τόσο πιο σημαντική είναι η επίδραση του κορεσμού. Για παράδειγμα, στα εδάφη που παρουσιάζουν μεγάλο δείκτη πόρων, η ταχύτητα κορεσμένου δείγματος μπορεί να πάρει έως και δεκαπλάσια τιμή από την αντίστοιχη μερικώς κορεσμένου ή στεγνού. Στο βράχο, αναλόγως βέβαια και τον τύπο του πετρώματος, οι διαφορές είναι πολύ μικρότερες (αύξηση έως και 50%). Συγκεκριμένα για το γρανίτη της παρούσας διπλωματικής η αναμενόμενη αύξηση είναι της τάξης του 2,5-5,0%. Τα κύματα S δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τον βαθμό κορεσμού. Σύμφωνα με τη θεωρία του Gassmann (1951) το μέτρο διάτμησης (ελαστικό και δυναμικό) δεν σχετίζεται με το βαθμό κορεσμού. Η πυκνότητα του κορεσμένου δείγματος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του στεγνού συνεπώς η ταχύτητα V_p θεωρητικά θα έπρεπε οριακά να μειώνεται.

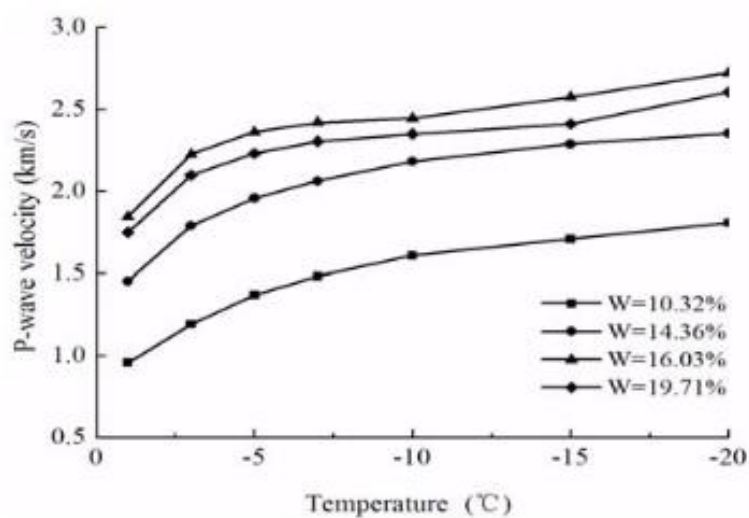
Στο **Σχήμα 3.5** παρουσιάζεται η συσχέτιση ταχύτητας εγκάρσιων και επιμήκων κυμάτων με τον βαθμό κορεσμού σε Ρυόλιθο με λίγα κενά (Liu and Zhao, 2016).



Σχήμα 3.5: Συσχέτιση ταχύτητας εγκάρσιων & επιμήκων κυμάτων-βαθμού κορεσμού σε Ρυόλιθο με λίγα κενά (Liu and Zhao,2016)

3.2.4 Θερμοκρασία

Οι ταχύτητες διάδοσης κύματος μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε εδαφικούς σχηματισμούς (**Σχήμα 3.6**) η διαφορές στις ταχύτητες μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες ενώ σε βράχους η μείωση περιορίζεται σε μικρότερα ποσοστά. Παρατηρείται επίσης μεγάλη επιρροή της υγρασίας (w) των δειγμάτων. Στον **Πίνακα 3.2** παρουσιάζεται η μείωση της ταχύτητας εγκάρσιων κυμάτων για διάφορα πετρώματα.



Σχήμα 3.6: Συσχέτιση ταχύτητας επιμήκων κυμάτων και θερμοκρασίας (X. Huang & W. Peng, 2015)

ΠΕΤΡΩΜΑ	ΜΕΙΩΣΗ ΑΝΑ 100°C (%)
Ψαμμίτης	-1
Ασβεστόλιθος	-1,2
Μάρμαρο	-3
Διαβάσης	-5

Πίνακας 3.2: Μείωση ταχύτητας εγκάρσιων κυμάτων με αύξηση θερμοκρασίας κατά 100°C (Ide, 1937; Lama & Vutukuri, 1978)

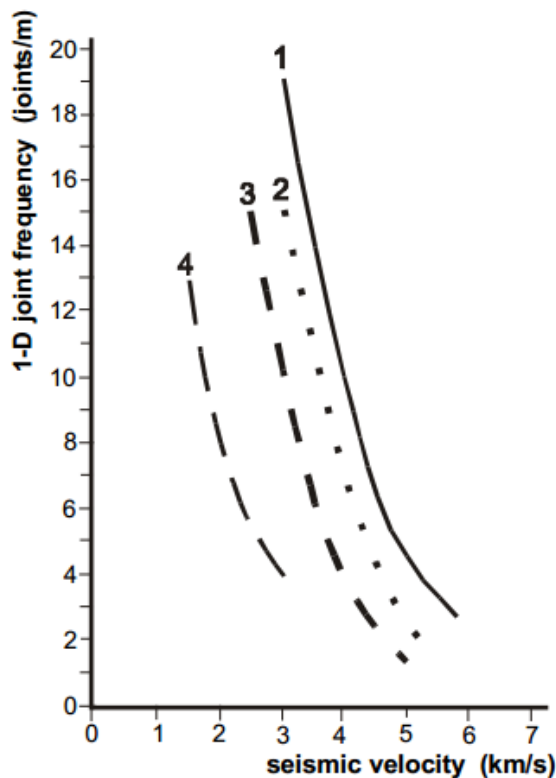
3.3 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ

Όπως έχει αναφερθεί, η συσχέτιση της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων με το βαθμό της μικρο-ρωγμάτωσης είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. (και στο κεφάλαιο Στόχος της διπλωματικής στην αρχή).

Να διευκρινιστεί ότι οι έρευνες που αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο αφορούν τη βραχομάζα και βασίζονται σε δοκιμές πεδίου. Δεν έχουν άμεση σχέση με την επίδραση της μικρορωγμάτωσης στην ταχύτητα διάδοσης στο εργαστήριο, λόγω της ύπαρξης της επιρροής της κλίμακας. Αναφέρονται εντούτοις, γιατί δίνουν ποιοτικά στοιχεία για την επίδραση της ύπαρξης των ασυνεχειών στις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων.

Οι έρευνες σε αυτό το πεδίο είναι πρόσφατες (Sjögren et al., 1979 και Sjögren, 1984) και ως παράγοντας της ρωγμάτωσης χρησιμοποιείται ο όρος joints/m. Ουσιαστικά δηλαδή ο δείκτης ρωγμάτωσης P_{10} όπως ορίζεται στο **υπόκεφάλαιο 2.4**. Στο **Σχήμα 3.7** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας του Sjögren για τέσσερα διαφορετικά πετρώματα.

Η αρχική ταχύτητα (V_0) διαφέρει για κάθε πέτρωμα λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών των άρρηκτων πετρωμάτων. Η ταχύτητα V_0 αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του άρρηκτου πετρώματος σε τασικές και θερμοκρασιακές συνθήκες παρόμοιες με αυτές του πεδίου. Προφανώς με αύξηση της ρωγμάτωσης, και στη συγκεκριμένη περίπτωση του δείκτη P_{10} , οι ταχύτητες μειώνονται. Οι έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί κυρίως για τις ταχύτητες επιμήκων κυμάτων V_p .



Καμπύλη	Πέτρωμα
1	Πυριγενή πετρώματα στη Σκανδιναβία
2	Ρωγματομένοι γρανίτες και γρανοδιορίτες στις Άνδεις (Sjögren, 1970)
3	Ρωγματομένα και αποσαθρωμένα μεταμορφωμένα πετρώματα στις Άνδεις (Sjögren, 1993)
4	Ρωγματομένοι Ψαμμίτες

Σχήμα 3.7: Συσχέτιση ταχύτητας επιμήκων κυμάτων και δείκτη ρωγμάτωσης P_{10} (Sjögren et al., 1979 και Sjögren, 1984)

Η θεωρητική προσέγγιση συσχέτισης της ρωγμάτωσης και των ταχυτήτων διάδοσης γίνεται στη βιβλιογραφία με τις δύο ακόλουθες μεθόδους:

1η μέθοδος: Δεν υπάρχουν πληροφορίες συσχέτισης ταχυτήτων και ρωγμάτωσης.

2η μέθοδος: Έχουν γίνει τουλάχιστον δύο συγκριτικές μελέτες ρωγμάτωσης του πετρώματος και σεισμικών ταχυτήτων.

3.3.1 Συσχέτιση ταχυτήτων διάδοσης και βαθμού ρωγμάτωσης χωρίς προϋπάρχοντα δεδομένα

Η μαθηματική επίλυση που ακολουθείται όταν δεν υπάρχουν δεδομένα συσχέτισης των δύο μεγεθών είναι τέτοια ώστε να συνάδει με την εκθετική μεταβολή των καμπυλών στο **Σχήμα 3.8** ως:

$$P_{10} = b * V^a \quad (3.5)$$

Όπου :

V: Η σεισμική ταχύτητα σε km/s

a,b: Παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό του πετρώματος, το τασικό πεδίο, τα χαρακτηριστικά των ρωγμών και άλλα.

Σε πολλά κείμενα ο δείκτης P_{10} αναφέρεται ως NI (Number of Joints). Δύο διαφορετικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την εύρεση των παραμέτρων a και b .

- i. Η παράμετρος a παίρνει την τιμή $-2,8$ ενώ η παράμετρος b εκφράζεται ως συνάρτηση της αρχικής ταχύτητας V_0 (ταχύτητα του άρρηκτου πετρώματος υπό τις ίδιες συνθήκες στο πεδίο) ως:

$$b = V_0^{3,4} \quad (3.6)$$

Έτσι η σχέση (3.5) γίνεται :

$$P_{10} = V_0^{3,4} * V^{-2,8} \quad (3.7)$$

Η προσέγγιση αυτή κρίνεται ικανοποιητική στο μεγαλύτερο φάσμα ρωγμάτωσης. Εξαιρούνται οι ακραίες τιμές (Πολύ μεγάλος ή πολύ μικρός βαθμός ρωγμάτωσης).

- ii. Και οι δύο παράμετροι a, b εξαρτώνται από την αρχική ταχύτητα V_0 . Οι συσχετίσεις προέκυψαν από τις καμπύλες του σχήματος 3.8.

$$a = -\frac{V_0}{2} \quad (3.8)$$

$$b = \frac{3}{V_0^a} = 3 * V_0^{V_0/2} \quad (3.9)$$

Συνεπώς με αντικατάσταση των όρων a, b η σχέση (3.5) γίνεται:

$$P_{10} = 3 * \left(\frac{V_0}{V} \right)^{V_0/2} \quad (3.10)$$

Η μέθοδος αυτή δίνει ικανοποιητική ακρίβεια σε όλες της καμπύλης του **Σχήματος 3.7** εκτός από την καμπύλη 3. Ωστόσο στις υπόλοιπες καμπύλες η προσέγγιση είναι πιο αποτελεσματική από την πρώτη μέθοδο.

Στον **Πίνακα (3.3)** παρουσιάζεται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων καθώς και οι πραγματικοί δείκτες ρωγμάτωσης P_{10} όπως μετρήθηκαν για κάθε καμπύλη. Παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση της μεθόδου (ii) στην καμπύλη (3) όπως και η απόκλιση της μεθόδου (i) σε κάποιες ακραίες τιμές.

Correlation Nl = b · v ^a	FIELD VELOCITY in km/s						
	1.5	2	2.5	3	4	5	5.5
Joints/m in curve 1 (V ₀ = 5.8 km/s)				19	9.5	4.5	3.5
i: Nl = 394 v ^{-2.8} =				18.2	8.1	4.3	3.3
ii: Nl = 490 v ^{-2.9} = →				20	8.8	4.6	3.5
Joints/m in curve 2 (V ₀ = 5.5 km/s)				15	7.5	3	2
i: Nl = 329 v ^{-2.8} =				15.2	6.8	3.6	2.8
ii: Nl = 325 v ^{-2.75} = →				15.8	7.2	3.1	3.0
Joints/m in curve 3 (V ₀ = 5.3 km/s)			15	10.5	4	1.5	
i: Nl = 290 v ^{-2.8} =			22	3.4	6.0	3.2	
ii: Nl = 229 v ^{-2.65} = →			20	12.5	5.8	3.2	
Joints/m in curve 4 (V ₀ = 3.5 km/s)	13	8	5.5	4			
i: Nl = 70 v ^{-2.8} =	22	10	5.4	3.2			
ii: Nl = 27 v ^{-1.75} = →	13.3	8	5.4	3.9			

Πίνακας 3.3: Συσχέτιση ταχυτήτων εγκάρσιων κυμάτων και βαθμού ρωγμάτωσης για τα πραγματικά μετρούμενα μεγέθη και τις θεωρητικές σχέσεις των μεθόδων (i) και (ii)

3.3.2 Προσέγγιση με δύο υπάρχουσες συσχετίσεις ταχυτήτων και βαθμού ρωγμάτωσης.

Οι Sjögren et al. (1979) παρουσίασαν μία μέθοδο υπολογισμού του βαθμού ρωγμάτωσης από υπάρχουσες μετρήσεις ταχυτήτων σε ένα εδαφικό ή βραχώδες προφίλ. Η μέθοδος απαιτεί τουλάχιστον δύο μετρήσεις ταχυτήτων στο πεδίο. Η σχέση που προέκυψε είναι η ακόλουθη:

$$\frac{1}{V} = \frac{x}{V_z} + \frac{(1-x)}{V_n} \quad (3.11)$$

Όπου:

V_n: Η μέγιστη ή αλλιώς "φυσική" ταχύτητα του πετρώματος *

V_z: Η ταχύτητα του θρυμματισμένου (ή πολύ μεγάλης) ρωγμάτωσης) πετρώματος

V: Η επί τόπου ταχύτητα μετρούμενη στο πεδίο

x: Το μήκος στο πεδίο όπου ο σχηματισμός παρουσιάζει ταχύτητα V_z

Η Σχέση (3.8) μετατρέπεται ώστε να γίνει η σύνδεση με το βαθμό ρωγμάτωσης:

$$k_s * P_{10} = \frac{1}{V} - \frac{1}{V_n} \quad (3.12)$$

Όπου:

k_s : Σταθερά που αντιπροσωπεύει τις επί τόπου συνθήκες

Οι δύο άγνωστες σταθερές υπολογίζονται από τα υπάρχοντα δεδομένα (τουλάχιστον δύο) ταχύτητας- P_{10} . Τα δεδομένα αυτά θα ονομαστούν V_1 - $P_{10(1)}$ και V_2 - $P_{10(2)}$. Η μέγιστη ταχύτητα V_n και η σταθερά k_s υπολογίζονται ως εξής:

$$V_n = \frac{V_1 * V_2 * (P_{10(2)} - P_{10(1)})}{P_{10(2)} * V_2 - P_{10(1)} * V_1} \quad (3.13)$$

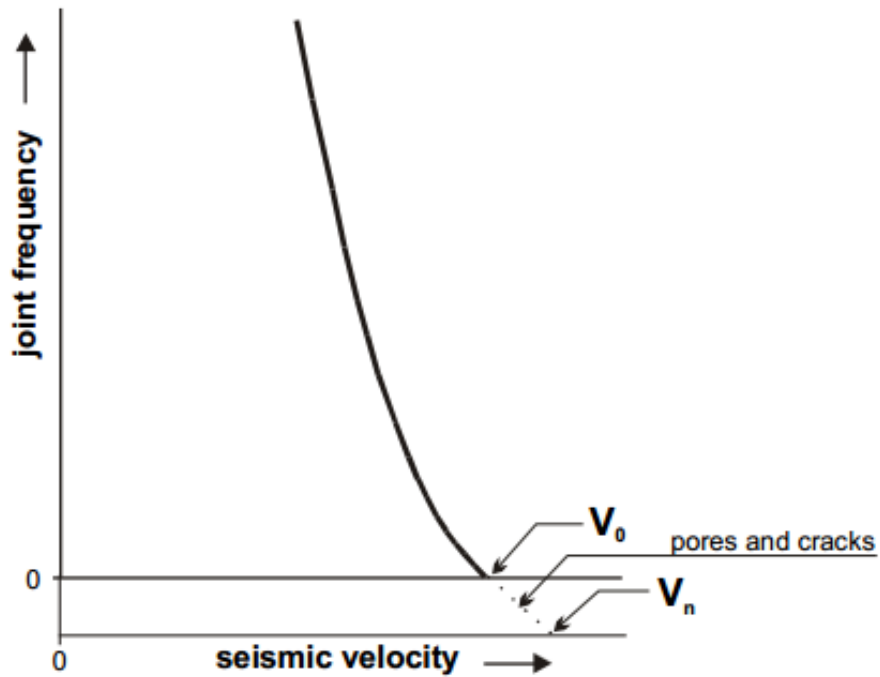
$$k_s = \frac{1}{P_{10(1)}} * \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_n} \right) \quad (3.14)$$

Έτσι με αντικατάσταση των όρων V_n και k_s στην εξίσωση (3.9) προκύπτει ο τελικός τύπος για τον υπολογισμό της ρωγμάτωσης σε πεδίο με δύο τουλάχιστον συσχετίσεις ταχύτητας V - βαθμού ρωγμάτωσης P_{10} :

$$P_{10} = (V_n - V) * (V_n * V * k_s) \quad (3.15)$$

***Σημείωση:** Η ταχύτητα του άρρηκτου πετρώματος V_0 μετράται στο εργαστήριο. Το πέτρωμα θεωρείται άρρηκτο όταν η δειγματοληψία έχει γίνει από περιοχή με άρρηκτα τεμάχια κι όταν εξωτερικά το δοκίμιο δεν παρουσιάζει κάποια ασυνέχεια ή ρωγμή. Ωστόσο το πέτρωμα παρουσιάζει μικρορωγμές στο εσωτερικό του οι οποίες είναι φυσικό να υπάρχουν και οι οποίες δεν είναι εμφανής χωρίς μικροσκόπιο. Η ταχύτητα V_n αφορά το πέτρωμα που είναι απαλλαγμένο από αυτές τις μικρορωγμές και το οποίο επιπροσθέτως δεν παρουσιάζει καθόλου κενά. Η ταχύτητα V_0 αναφέρεται στο πρακτικώς άρρηκτο πέτρωμα και μετριέται στο εργαστήριο ενώ η ταχύτητα V_n είναι η «φυσική» ταχύτητα και είναι θεωρητική (πρακτικά δεν μπορεί να μετρηθεί).

Μία εποπτική εικόνα της διαφοροποίησης των δύο ταχυτήτων δίνεται στο **Σχήμα 3.8**.



Σχήμα 3.8: Διαφοροποίηση της βασικής (V_0) και της μέγιστης ή φυσικής (V_n) σεισμικής ταχύτητας.

Στον **Πίνακα (3.4)** παρουσιάζονται οι μέγιστες ταχύτητες για κάποια πετρώματα. Αφού τα πετρώματα είναι απαλλαγμένα από μικρορωγμές και πόρους, οι ταχύτητες βασίζονται αποκλειστικά στην ορυκτολογική τους σύσταση και στο συνθετικό υλικό τους.

ΠΕΤΡΩΜΑ	V_n (km/s.)
Γάββρος	7,0
Ασβεστόλιθος	6,0-6,5
Ψαμμίτης	6,0
Βασάλτης	6,5-7,0
Δολομίτης	6,5-7,0
Γρανίτης	5,5-6,0

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικές μέγιστες ταχύτητες διαφόρων πετρωμάτων (Goodman ,1989)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εργαστηριακές δοκιμές έγιναν σε κυλινδρικά δοκίμια γρανίτη τα οποία διαμορφώθηκαν από τεμάχια άρρηκτου πετρώματος. Οι δοκιμές που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο είναι οι ακόλουθες:

- Προσδιορισμός πορώδους, πυκνότητας
- Μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων
- Δοκιμή Ακουστικής εκπομπής
- Δοκιμή Μονοαξονικής θλίψης
- Δοκιμή Τριαξονικής Θλίψης
- Δοκιμή Έμμεσου εφελκυσμού

Οι εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής είναι επακριβώς και σαφώς προδιαγραμμένες σε κανονισμούς και οδηγίες, οι πιο σημαντικοί των οποίων είναι της I.S.R.M (1981).

4.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ-ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η δειγματοληψία του γρανιτικού τεμάχους έγινε στην Αττική και συγκεκριμένα στην περιοχή της Πλάκας Κερατέας. Η επιλογή του τεμάχους έγινε με γνώμονα την απουσία μακροσκοπικής ρωγμάτωσης ώστε να βρίσκεται σε άρρηκτη κατάσταση. Η θέση από την οποία λαμβάνεται καθώς και ο ακριβής προσανατολισμός του σημειώνονται πάντοτε επάνω στο δείγμα κατά τρόπο σαφή. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν ακανόνιστου σχήματος ενώ δεν παρουσίασε διαφοροποίηση ορυκτολογικής σύστασης καθ' όλο τον όγκο του.

Από το τεμάχος του πετρώματος παρασκευάστηκαν δοκίμια για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών. Τα δοκίμια, που χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές δοκιμές είναι κυλινδρικά. Συνήθως οι μηχανικές ιδιότητες προσδιορίζονται σε κυλινδρικά δοκίμια με τυπικές διαμέτρους μεταξύ 5.0 - 7.5 cm. Σπανιότερα χρησιμοποιούνται διάμετροι μέχρι 10 ή 15 cm. Τα κυλινδρικά δοκίμια λαμβάνονται με εργαστηριακή καροταρία με κοπρικό άκρο αδαμαντοκορώνας όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.1**. Η διάμετρος των δοκιμίων που προέκυψαν από την εξόρυξη ήταν περίπου 5,2 cm.



Σχήμα 4.1: Φωτογραφία καροταρίας.

Διαδικασία διάτρησης του τεμάχου:

Το τέμαχος τοποθετείται στην εργαστηριακή καροταρία με στόχο την απόληψη δοκιμίων. Στη συνέχεια επιλέγεται το σημείο διάτρησης. Νερό διοχεύεται στην καροταρία για να διευκολύνει την κοπή και να αποτρέπει την ανάπτυξη μεγάλης θερμοκρασίας λόγω τριβής. Η καροταρία τοποθετείται πολύ αργά και ελεγχόμενα πάνω στο τέμαχος έως ότου διεισδύσει εξ'ολοκλήρου στο εσωτερικό του πετρώματος. Μέχρι να συμβεί αυτό η τραχύτητα της εξωτερικής επιφάνειας του τεμάχου προκαλεί πολλές δονήσεις και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην προκληθεί ρωγμάτωση στο δοκίμιο. Στη συνέχεια η διαδικασία επιταχύνεται σχετικά έως ότου ο τροχός φτάσει στο κάτω μέρος του τεμάχου. Σε αυτό το σημείο σταματάει η παροχή ισχύος στον τροχό ωστόσο η καροταρία πρέπει να ανελκυστεί πρώτου σταματήσει η περιστροφική της κίνηση. Σημειώνεται τέλος ότι, αντί νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί πεπιεσμένος αέρας για την ψύξη του κοπτικού άκρου και την απαγωγή των θραυσμάτων, στα πετρώματα εκείνα που επηρεάζονται από το νερό. Στην περίπτωση αυτή η διάτρηση είναι βραδύτερη και χρειάζεται μεγαλύτερη προσοχή. Στο **Σχήμα 4.2** φαίνεται το τέμαχος του γρανίτη μετά την απόληψη όλων των δοκιμίων.



Σχήμα 4.2 : Γρανιτικό τεμάχος μετά την απόληψη όλων των δοκιμίων.

Εδώ πρέπει να αναφερόθει ότι κατά την διάτρηση του γρανίτη, παρουσιάστηκαν κάποια προβλήματα εξαιτίας της σκληρότητας του πετρώματος. Ο χρόνος κοπής ήταν κατά μεσο όρο περίπου 45 λεπτά ενώ σε κάποια δοκίμια ξεπέρασε τη μία ώρα . Ο αριθμός των δοκιμίων που ελήφθησαν ήταν ικανοποιητικός (18 δοκίμια). Τα δοκίμια αριθμήθηκαν με βάση τη σειρά εξόρυξής τους.

Τα δείγματα μορφής πυρήνα που προέκυψαν από το πέτρωμα ελέγχονται στην συνέχεια μακροσκοπικά για ασυνέχειες και μετά αποκόπτονται με αδαμαντοτροχό σε κατάλληλα μήκη ανάλογα με την επιθυμητή σχέση μήκους/διαμέτρου (L/D). Η γεωμετρία του τεμάχους ήταν τέτοια ώστε τα δοκίμια που προέκυψαν από το κέντρο του να έχουν επαρκές μήκος ώστε να τηρείται η αναλογία 2,5 προς 1, σε αντίθεση με τα δοκίμια που προέκυψαν από τα άκρα του, τα οποία διαμορφώθηκαν με λόγο μήκους προς διάμετρο 2 προς 1. Πολλά τμήματα του πυρήνα που απέμεναν μετά την κοπή χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία δοκιμίων με μήκος περίπου το ήμισυ της διαμέτρου για τη δοκιμή έμμεσου εφεκλυσμού.

Ο τελικός αριθμός των δοκιμίων γρανίτη με τις αντίστοιχες διαστάσεις που προέκυψαν είναι:

- 8 δοκίμια με λόγο μήκους-διάμετρον 2,5 προς 1
- 10 δοκίμια με λόγο μήκους-διαμέτρου 2 προς 1
- 10 δοκίμια με λόγο μήκους-διαμέτρου 0,5 προς 1

Μετά την κοπή ακολουθεί προσεκτική λείανση των εδρών του δοκιμίου σε δίσκο λειάνσεως. Η λείανση πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη μέριμνα καθώς οι βάσεις των δοκιμίων πρέπει να είναι επίπεδες με ανοχή 0,02 mm, και κάθετες στον διαμήκη άξονα συμμετρίας του δοκιμίου με απόκλιση όχι περισσότερο από 0,001 rad ή 0,05mm στα 50mm ενώ η πλευρική επιφάνεια πρέπει να είναι λεία, με ανοχή όχι περισσότερο από 0,3 mm. Κατά τη διαδικασία της λείανσης αντιμετωπίστηκαν κάποια τεχνικά προβλήματα τα οποία οφείλονταν κυρίως στην σκληρότητα του πετρώματος.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται αναλυτικά τα δοκίμια με τις διαστάσεις τους μετά απο τη διαδικασία κοπής και λείανσης. Η διάμετρος εξάγεται ως ο μέσος όρος τριών μετρήσεων καθ' ύψος του δοκιμίου ενώ το ύψος ομοίως ως αποτέλεσμα τριών μετρήσεων σε διαφορετικές θέσεις του. Τα δοκίμια που προορίζονται για δοκιμή μονοαξονικής ή τριαξονικής θλίψη έχουν το χαρακτηριστικό γράμμα "Δ" μπροστά απο την αριθμητική τους κατάταξη ενώ τα δοκίμια που προορίζονται για δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού έχουν την πρόθεση "BZL" (Brazilian).

Δοκίμιο	Διάμετρος D(cm.)	Ύψος H(cm.)	Λόγος H/D
Δ1	5,218	12,823	2,46
Δ2	5,201	12,790	2,46
Δ3	5,206	12,730	2,45
Δ4	5,184	12,449	2,40
Δ5	5,184	12,558	2,42
Δ6	5,174	12,711	2,46
Δ7	5,201	12,310	2,37
Δ8	5,207	9,870	1,90
Δ9	5,213	9,485	1,82
Δ10	5,206	9,640	1,85
Δ11*	5,203	10,140	1,95
Δ12	5,210	10,040	1,927
Δ13	5,208	9,947	1,910
Δ14	5,203	9,945	1,91
Δ15	5,211	9,870	1,89
Δ16	5,228	9,855	1,89
Δ17*	5,20	12,20	2,35
Δ18*	5,204	10,176	1,96
BZL 1	5,201	2,448	0,47
BZL 2	5,179	2,479	0,48
BZL 3*	5,209	2,811	0,54
BZL 4*	5,200	2,826	0,54
BZL 5	5,206	3,101	0,60
BZL 6	5,206	2,771	0,53
BZL 7	5,183	2,760	0,53
BZL 8	5,204	2,619	0,50
BZL 9	5,225	2,652	0,51
BZL 10	5,208	2,358	0,45

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των δοκιμίων με τις διαστάσεις τους μετά απο κόπη και λείανση.

Σημείωση *: Τα δοκίμια που έχουν επισημανθεί με * παρουσίασαν κάποια ασυνέχεια στην επιφάνεια τους. Η ρωγμάτωση αυτή μπορεί είτε να προϋπήρχε είτε να δημιουργήθηκε κατά την εξόρυξη με την καροταρία λόγω διατάραξης του γρανιτικού τεμάχους. Σε κάποια από αυτά η ρωγμή ήταν μικρής κλίμακας και εμπολωμένη (Δ11) ενώ σε άλλα (Δ17,Δ18) είχε αρκετά μεγάλο άνοιγμα και μήκος. Οι ρωγμές αυτές καταγράφηκαν και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τα δοκίμια αυτά θα ενταχθούν με μία αρχική ρωγμάτωση κι όχι ως εντελώς άρρηκτα.

Στην παρακάτω φωτογραφία παρουσιάζεται το πρώτο δοκίμιο μετά από κοπή και λείανση (Στο Παράρτημα Π1 έως Π5 παρουσιάζονται φωτογραφίες από τα δοκίμια πριν και μετά τη θραύσης τους).

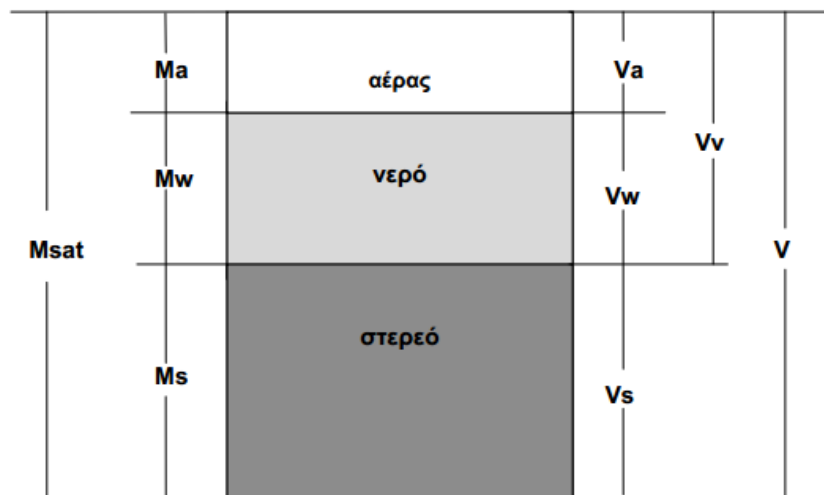


Σχήμα 4.3 : Φωτογραφία δοκιμίου γρανίτη.

4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

4.3.1 Εισαγωγή

Οι φυσικές ιδιότητες που προσδιορίζονται πειραματικά είναι το φαινόμενο ειδικό βάρος, το πορώδες (n) και ο δείκτης πόρων (e). Το πέτρωμα αποτελείται από το στερεό μέρος και από κενά (πόροι), που υπάρχουν μεταξύ των ορυκτών ή του συνδετικού υλικού. Το πορώδες, ανάλογα με την προέλευσή του, χαρακτηρίζεται ως πρωτογενές ή δευτερογενές. Το πρωτογενές πορώδες δημιουργείται κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης (δεν αφορά το γρανιτικό πέτρωμα) και αποτελείται είτε από τα διάκενα μεταξύ των κόκκων (διακοκκικό-intergranular) είτε από διάκενα μέσα στη δομή των κόκκων (ενδοσωματιδιακό-intraparticle). Το δευτερογενές πορώδες μπορεί να δημιουργηθεί από διεργασίες διάλυσης, αφυδάτωσης ή ανακρυστάλλωσης, που προκαλούνται αργότερα στον ταμιευτήρα ή από τεκτονικές δράσεις οι οποίες επιφέρουν ρωγματώσεις και πτυχώσεις. Τα κενά αυτά μερικώς περιέχουν νερό και ο υπόλοιπος χώρος που καταλαμβάνουν περιέχουν συνήθως ατμοσφαιρικό αέρα. Η εικόνα αυτή του πετρώματος δίνεται στο **Σχήμα 4.4** όπου διακρίνονται το στερεό μέρος του και τα κενά (πόροι) του, που μερικώς έχουν γεμίσει με νερό.

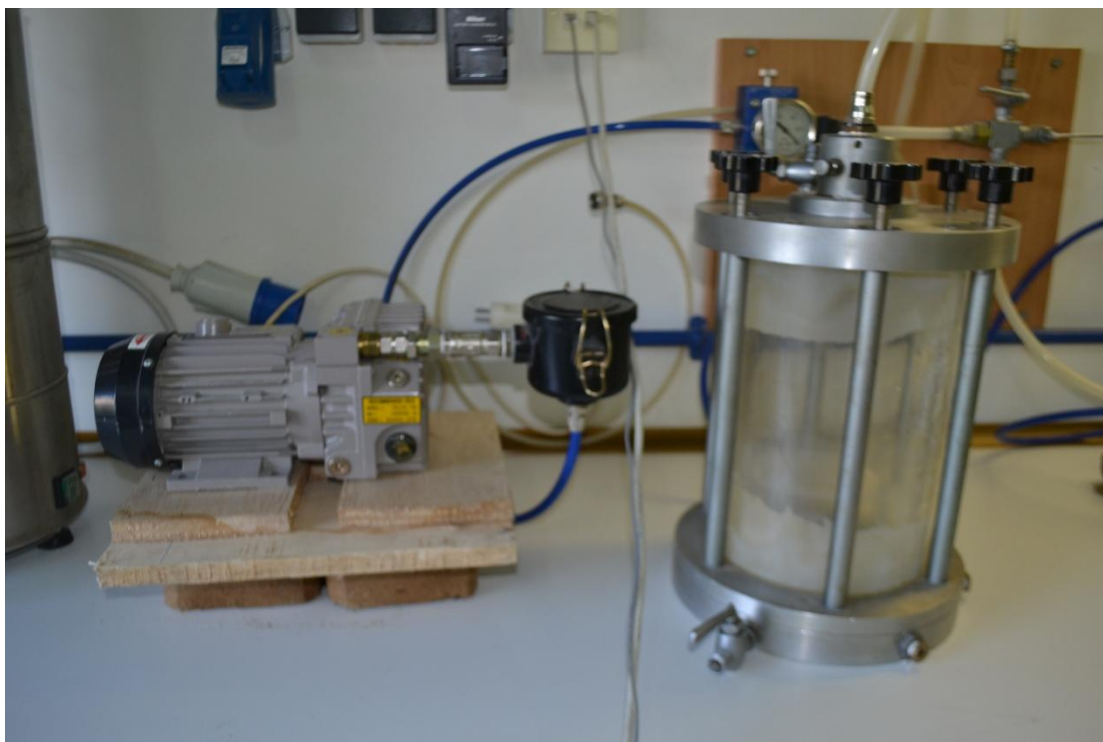


Σχήμα 4.4: Διάγραμμα που περιέχει τις σχέσεις των Βαρών και των Όγκων των στερεών, του νερού, και του αέρα στο Πέτρωμα (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002).

4.3.2 Προσδιορισμός δείκτη πόρων και πορώδους (με τη χρήση μικρομέτρου και συσκευής κενού)

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζονται η πυκνότητα (ή φαινόμενο βάρος), το πορώδες (n) και ο λόγος κενών (e) (κατά I.S.R.M., 1981) σε δοκίμια πετρώματος κανονικού γεωμετρικού σχήματος. Επίσης είναι δυνατός ο προσδιορισμός της υγρής πυκνότητας (P_{sat}). Για την εκτέλεση της δοκιμής απαιτείται ο παρακάτω εξοπλισμός:

- Φούρνος που διατηρεί σταθερή θερμοκρασία στους $105 \pm 5 \text{ } ^\circ \text{C}$
- Ξηραντήρας
- Ζυγός ακριβείας 0,01 gr
- Μικρόμετρο (παχύμετρο) ακριβείας 0,1 mm
- Συσκευή δημιουργίας κενού της τάξης των 800 Pa (**Σχήμα 4.5**)



Σχήμα 4.5: Συσκευή δημιουργίας κενού για τον κορεσμό των δοκιμίων. Στο δοχείο (δεξιά) τοποθετούνται τα δοκίμια. Η αντλία (αριστερά) δημιουργεί το κενό με υποπίεση 0,8-1,1 bar.

Εκτέλεση δοκιμής :

1. Επιλέγονται τρία δοκίμια (περιορισμός που αφορά τη χωρητικότητα του δοχείου) που έχουν περάσει τη διαδικασία κοπής και λείανσης που με προϋπόθεση το καθένα έχει μάζα μεγαλύτερη των 50 g. Με μικρόμετρο μετριοούνται οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου με ακρίβεια 0,1 mm και υπολογίζεται ο όγκος (V) του καθενός σε m^3 .
2. Τα δείγματα τοποθετούνται στη συσκευή κενού όπου και παραμένουν μία ώρα βυθισμένα στο νερό ώστε να υποστούν κορεσμό. Η συσκευή ανακινείται περιοδικά για απομάκρυνση φυσαλίδων αέρα.
3. Τα δείγματα απομακρύνονται από τη συσκευή κενού, σφογγίζονται με υγρό πανί επιφανειακά, προσεκτικά ώστε να μην απομακρυνθεί κάποιο χαλαρωμένο κομμάτι πετρώματος, ζυγίζονται και υπολογίζεται η υγρή μάζα του καθενός (M_{sat}).
4. Τοποθετούνται σε φούρνο σε θερμοκρασία $105^\circ C$ για 24 ώρες και στη συνέχεια σε ξηραντήρα για 1 ώρα. Τέλος, ζυγίζονται και υπολογίζεται η ξηρή μάζα του καθενός (M_s).

Υπολογισμοί :

Όγκος κενών:

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (4.1)$$

Όγκος στερεού:

$$V_s = V - V_v \quad (4.2)$$

Ξηρή πυκνότητα:

$$P_d = \frac{M_s}{V} \quad (4.3)$$

Υγρή πυκνότητα:

$$P_{sat} = \frac{M_s + V_v * P_w}{V} \quad (4.4)$$

Πορώδες:

$$n = \frac{V_v}{V} * 100\% \quad (4.5)$$

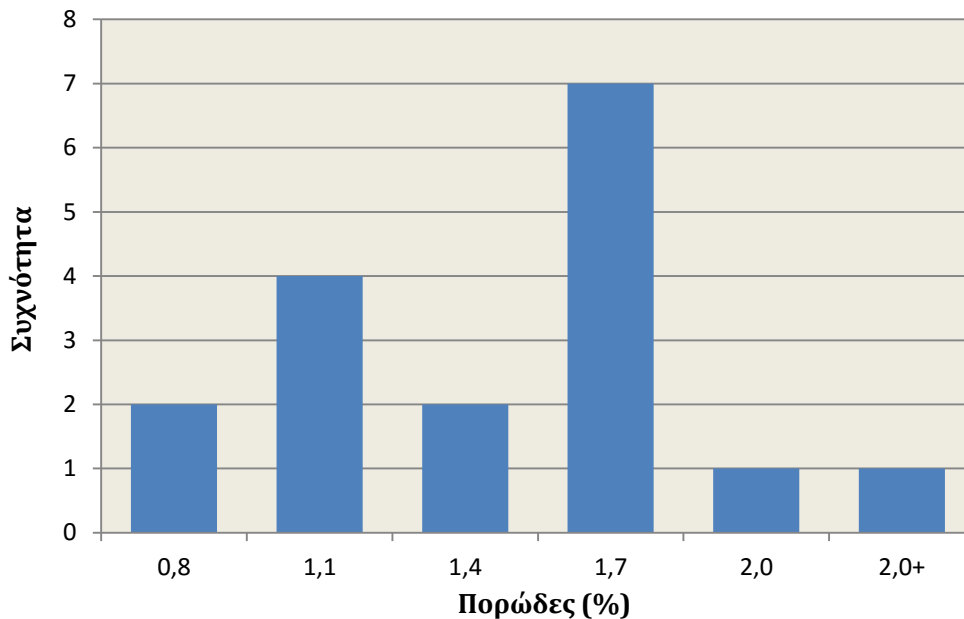
Λόγος κενών:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (4.6)$$

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας παρατίθενται στον Πίνακα 4.2.

Δοκίμιο	Βάρος ξηρού(g)	Βάρος κορεσμένου(g)	Ξηρή πυκνότητα P_d (kN/m ³)	Υγρή πυκνότητα P_{sat} (kN/m ³)	Λόγος κενών e	Πορώδες n (%)
Δ1	720,04	723,26	25,75	25,87	0,012	1,17
Δ2	728,84	732,99	25,78	25,92	0,015	1,50
Δ3	718,41	722,34	25,90	26,04	0,015	1,44
Δ4	696,90	700,25	26,01	26,14	0,013	1,28
Δ5	700,43	704,32	25,92	26,06	0,015	1,47
Δ6	702,66	705,88	25,79	25,91	0,012	1,21
Δ7	712,03	714,77	25,82	25,92	0,010	1,01
Δ8	574,08	575,74	26,78	26,86	0,008	0,79
Δ9	546,08	548,20	26,45	26,55	0,011	1,05
Δ10	549,41	550,90	26,26	26,33	0,007	0,73
Δ11*	574,67	578,04	26,14	26,30	0,016	1,56
Δ12	558,01	561,27	25,56	25,71	0,015	1,52
Δ13	564,12	567,40	26,11	26,26	0,016	1,55
Δ14	571,80	575,17	26,52	26,67	0,016	1,59
Δ15	558,20	560,04	26,01	26,10	0,009	0,87
Δ16	580,72	582,67	26,92	27,01	0,009	0,92
Δ17*	678,80	683,90	25,70	25,89	0,020	1,98
Δ18*	569,14	573,61	25,79	26,00	0,021	2,07

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα προσδιορισμού του δείκτη πόρων n και του λόγου κενών e για όλα τα δοκίμια.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα με τις αριθμητικές τιμές του πορώδους (%) για όλα τα γρανιτικά δοκίμια.

Συνοψίζοντας τα δοκίμια γρανίτη παρουσιάζουν πορώδες που κυμαίνεται από 0,73% έως 2,07% με μέση τιμή 1,32 % και τυπική απόκλιση 0,38. Η τιμή είναι εύλογη αφού όπως αναφέρεται και στο **υπόκεφάλαιο 1.3**, το πορώδες του άρρηκτου γρανίτη κυμαίνεται από 0,4% έως 1,5% . Ωστόσο επειδή έχουν ληφθεί υπ'όψιν και δοκίμια τα οποία παρουσίασαν κάποια ασυνέχεια και ως αποτέλεσμα είχαν μεγαλύτερο πορώδες (για παράδειγμα το Δ17 με 2,07%) συμπεραίνουμε πως το πορώδες του άρρηκτου πετρώματος είναι ακόμα μικρότερο. Χωρίς να ληφθούν υπ'όψιν τα δοκίμια Δ11, Δ17, Δ18 τα οποία παρουσιάζουν κάποιες επιφανειακές ρωγμές, το πορώδες έχει μέση τιμή 1,20% και τυπική απόκλιση 0,29.

4.4 ΣΥΣΚΕΥΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ-ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΡΧΙΚΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ (ULTRA SONIC PULSE METHOD)

4.4.1 Δοκιμή υπερήχων

Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός των ταχυτήτων V_p και V_s των κυμάτων (επιμήκων και διατμητικών) των υπερήχων στο βραχώδες υλικό. Εφαρμόζεται η προδιαγραφή της I.S.R.M., 1981. Αρχικά καταγράφονται οι αρχικές ταχύτητες των δοκιμίων. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εκτίμηση των δυναμικών παραμέτρων E_0 , ν_0 και G_0 του άρρηκτου πετρώματος. Όλα τα δοκίμια μετρήθηκαν μετά τον κορεσμό και μετά την ξήρανση (με εξαίρεση τα δοκίμια που προορίζονταν για τη δοκιμή Brazilian τα οποία μετρήθηκαν μόνο σε ξηρή κατάσταση) ώστε να

διαμορφωθεί και μία σχέση για την επιρροή του νερού στις ταχύτητες. Οι αρχικές ταχύτητες αναφοράς για τις δοκιμές που ακολούθησαν όμως είναι αυτές της ξηρής κατάστασης αφού τα δείγματα διατηρούνται στο ξηρά εργαστήριο.

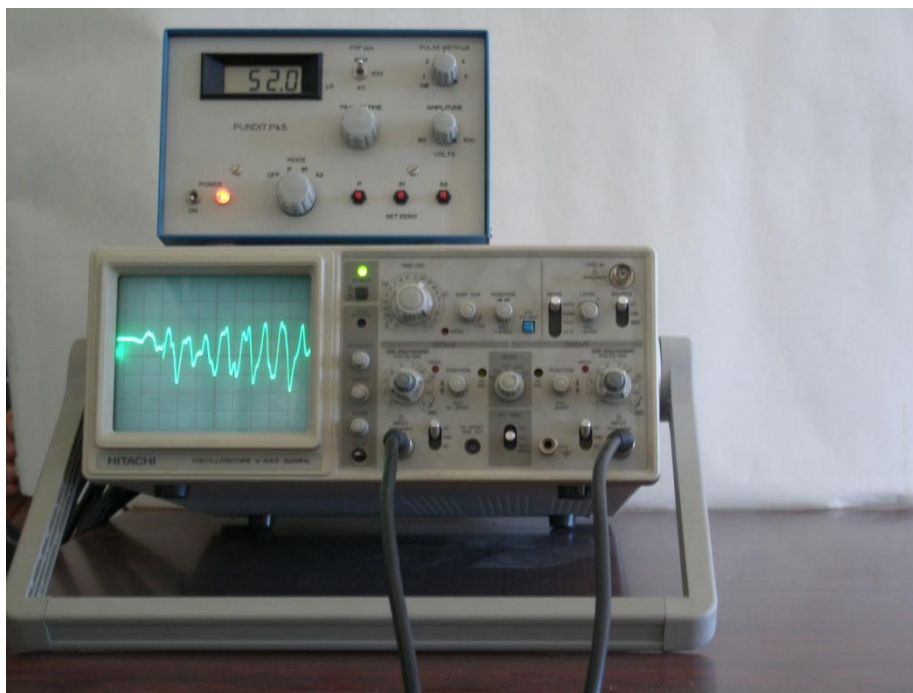
Η πειραματική διαδικασία απαιτεί:

- Σύστημα παραγωγής κυμάτων υπερήχων γνωστής συχνότητας (50 kHz).
- Δύο πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς που τοποθετούνται σε επαφή με τις δύο βάσεις του κυλινδρικού δοκιμίου, για την εκπομπή και τη λήψη αντίστοιχα των κυμάτων.
- Παλμογράφος αποτύπωσης της κυματομορφής.
- Φυλλάρια μολύβδου.
- Συσκευή φόρτισης (πρέσα).

Στα Σχήματα 4.7, 4.8 παρουσιάζεται το σύστημα συσκευών μέτρησης των ταχυτήτων που βρίσκεται στο εργαστήριο Βραχομηχανικής και Τεχνικής Γεωλογίας του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 4.7: Συσκευή φόρτισης και πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς.



Σχήμα 4.8: Παλμογράφος αποτύπωσης της κυματομορφής. Η αριθμητική ένδειξη υποδεικνύει τον χρόνο σε μς.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχουν αρκετοί τύποι συσκευών προσδιορισμού ταχύτητας των υπερήχων, οι οποίες βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Πιθανόν να έχουν διαφορετικές δυνατότητες μέτρησης και η ακρίβειά τους να διαφέρει. Η περιγραφή που ακολουθεί αναφέρεται στη συσκευή του εργαστηρίου Βραχομηχανικής και Τεχνικής Γεωλογίας του Ε.Μ.Π. η οποία θεωρείται σύγχρονη με πολλαπλές δυνατότητες μέτρησης.

Περιγραφή δοκιμής:

Πριν την έναρξη της δοκιμής γίνεται ρύθμιση και μηδενισμός όλου του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: Αφού γίνει η συνδεσμολογία των επί μέρους τμημάτων της συσκευής, τοποθετείται από ένα φυλλάριο μολύβδου, τόσο ώστε να καλύπτει τις επιφάνειες επαφής των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων. Τοποθετείται ο ένας μετατροπέας επάνω στον άλλο, με τις δύο επιφάνειές τους να είναι σε επαφή και στη σωστή θέση (η έξοδος των Ρ πάνω από την είσοδο των Ρ και το ίδιο και για τα S) και ενδιάμεσά τους να πιέζονται τα δύο φυλλάρια μολύβδου. Οι δύο σε επαφή μετατροπείς τοποθετούνται στη συσκευή φόρτισης και εφαρμόζεται σε αυτούς ένα φορτίο της τάξεως 3 – 5 kN. Τοποθετείται ο διακόπτης επιλογής (mode) της συσκευής παραγωγής κυμάτων στη θέση Ρ και στην οθόνη του παλμογράφου από μία ευθεία γραμμή που υπήρχε, τώρα εμφανίζεται μία συγκεκριμένη κυματομορφή. Περιστρέφοντας τον ειδικό διακόπτη μέτρησης χρόνου (transmit time) ο φωτεινός δρομέας στον παλμογράφο μετακινείται πάνω στην κυματομορφή. Όταν ο δρομέας φτάσει στη θέση που η κυματομορφή από ευθεία γραμμή παίρνει τη μορφή ημιτονοειδούς καμπύλης (σημείο καμπής), ρυθμίζεται με το διακόπτη μηδενισμού ώστε ο ψηφιακός πίνακας που δείχνει το χρόνο να έχει την ένδειξη 00.0. Η ίδια

εργασία επαναλαμβάνεται και για τα κύματα S, αφού πρώτα τοποθετηθεί ο διακόπτης επιλογής στη θέση S. Τώρα πλέον έχει ολοκληρωθεί η ρύθμιση και ο μηδενισμός όλου του συστήματος και μπορεί να γίνει η έναρξη της δοκιμής. Σε άλλου τύπου πιο απλές συσκευές χρησιμοποιείται γράσσο αντί για φυλλάριο μολύβδου και η ρύθμιση γίνεται άμεσα στην οθόνη ψηφιακών ενδείξεων χρόνου (οι συσκευές αυτές δε διαθέτουν παλμογράφο). Επίσης, σε μερικές συσκευές η ρύθμιση του χρόνου γίνεται με τη χρήση μεταλλικού πρότυπου δοκιμίου γνωστών χρόνων διέλευσης κυμάτων P και S.

Στη συνέχεια τοποθετείται το δοκίμιο του πετρώματος μεταξύ των δύο μετατροπέων, προσέχοντας πάντα το φυλλάριο μολύβδου να μην είναι τσακισμένο ή σχισμένο και η θέση των μετατροπέων να είναι σωστή. Τώρα όλο το σύστημα (μετατροπέας, φυλλάριο μολύβδου, δοκίμιο, φυλλάριο μολύβδου, μετατροπέας) τοποθετείται στη συσκευή φόρτισης και επιβάλλεται το φορτίο (3 – 5 kN). Έπειτα ρυθμίζεται ο διακόπτης επιλογής στη θέση P και στον παλμογράφο φαίνεται η κυματομορφή των P κυμάτων. Με το διακόπτη μεγέθυνσης γίνεται ρύθμιση της ευκρίνειας της κυματομορφής και περιστρέφοντας το διακόπτη μέτρησης χρόνου γίνεται μέτρηση του χρόνου εισόδου των κυμάτων P στη θέση της πρώτης καμπής της κυματομορφής. Στο σημείο αυτό καταγράφεται ο χρόνος εισόδου (T) των διαμήκων κυμάτων P στο ψηφιακό πίνακα του οργάνου σε ms (T_p). Η ίδια εργασία επαναλαμβάνεται και για τον υπολογισμό του χρόνου (T) των διατμητικών κυμάτων S (T_s) αφού τοποθετηθεί ο διακόπτης επιλογής στη θέση S. Οι τιμές T_p και T_s καταχωρούνται στο έντυπο της δοκιμής.

Αφού προσδιοριστούν οι χρόνοι T_p και T_s , μπορούν να υπολογιστούν οι ταχύτητες των επιμήκων V_p και εγκάρσιων κυμάτων V_s από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_p = \frac{H_\delta}{T_p} \quad (4.7)$$

$$V_s = \frac{H_\delta}{T_s} \quad (4.8)$$

Όπου:

H_δ : το ύψος του δοκιμίου.

Από τις ταχύτητες διέλευσης των κυμάτων υπολογίζονται οι ελαστικές δυναμικές παράμετροι δηλαδή το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d , ο δυναμικός λόγος Poisson

v_d και δυναμικό μέτρο διάτμησης G_d , που αντίστοιχα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις οι οποίες αποτελούν μία διαφορετική έκφραση των σχέσεων (3.1) και (3.2):

$$G_d = p * V_s^2 (4.9)$$

$$E_d = \frac{p * V_s^2 * (3 * V_p^2 - 4 * V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} (4.10)$$

$$v = \frac{V_p^2 - 2 * V_s^2}{2 * (V_p^2 - V_s^2)} (4.11)$$

Όπου :

p : η πυκνότητα του πετρώματος (Mg/m^3)

4.4.2 Αποτελέσματα δοκιμής υπερήχων

Στον Πίνακες 4.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα υπολογισμού των ταχυτήτων για όλα τα δοκίμια σε ξηρή και κορεσμένη κατάσταση:

Δοκίμιο	Ταχύτητα κορεσμένου $V_{p(κορ)}$ (m/s)	Ταχύτητα κορεσμένου $V_{s(κορ)}$ (m/s)	Ταχύτητα P ξηρού V_p (m/s)	Ταχύτητα S ξηρού V_s (m/s)	E_d (GPa)	v	G_d (GPa)
Δ1	5191,5	3142,9	4970,2	3166,2	61,0	0,159	26,3
Δ2	5220,4	3104,4	4826,4	3104,4	58,3	0,148	27,1
Δ3	5260,3	3060,1	4915,1	3060,1	58,8	0,184	24,8
Δ4	5102,0	3216,8	4959,8	3192,1	62,0	0,146	27,0
Δ5	5125,7	3081,9	4566,5	3033,3	53,8	0,105	24,3
Δ6	5024,1	3077,7	4656,0	3077,7	55,4	0,112	24,9
Δ7	5053,6	3191,7	4974,6	3207,8	62,0	0,144	27,1
Δ8	5306,5	3312,1	5240,6	3277,6	69,7	0,179	29,5
Δ9	5099,5	3304,9	5099,5	3259,5	66,2	0,155	28,7
Δ10	5239,1	3312,7	5127,7	3312,7	67,1	0,142	29,4
Δ11	4970,6	3219,0	4875,0	3198,7	61,2	0,122	27,3
Δ12	4873,8	3118,0	4781,0	3098,8	57,0	0,138	25,0
Δ13	4876,0	2802,0	4876,0	3089,1	59,2	0,165	25,4
Δ14	5234,2	3137,2	4972,5	3137,2	62,2	0,169	26,6
Δ15	5193,2	3300,0	5220,6	3333,4	68,1	0,156	29,5
Δ16	5242,0	3375,0	5186,8	3375,0	70,8	0,133	31,3
Δ17	5214,1	3088,9	4692,7	3081,1	55,8	0,121	24,9
Δοκίμιο	Ταχύτητα κορεσμένου	Ταχύτητα κορεσμένου	Ταχύτητα P ξηρού	Ταχύτητα S ξηρού	E_d (GPa)	v_d	G_d (GPa)

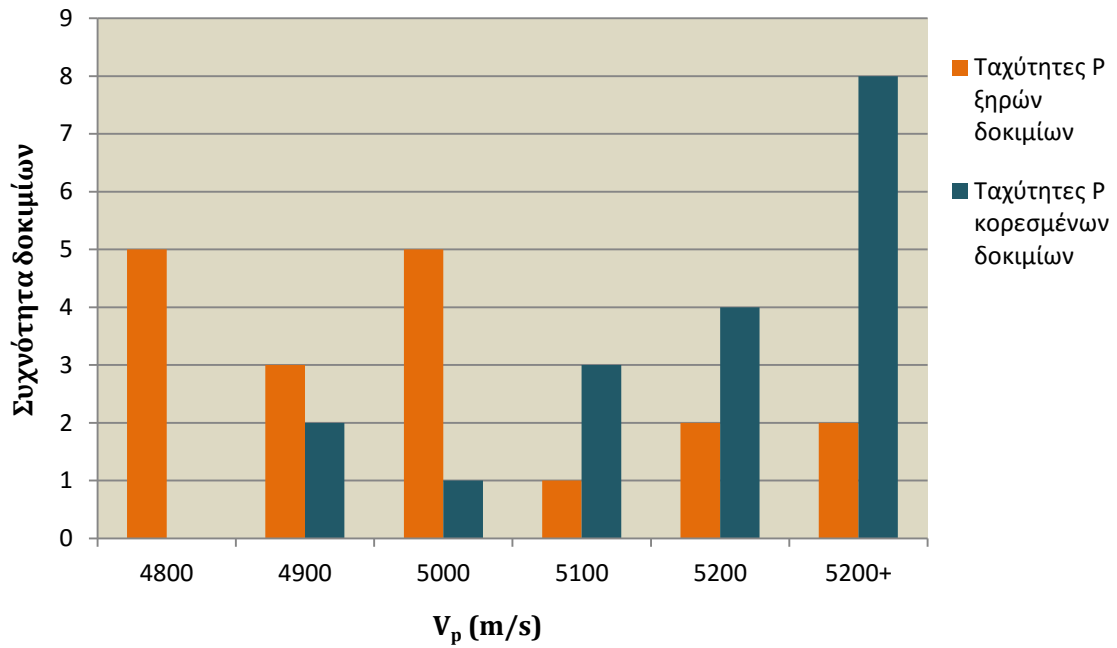
	$V_{p(\kappaορ)}$ (m/s)	$V_{s(\kappaορ)}$ (m/s)	V_p (m/s)	V_s (m/s)			
Δ18	5272,5	3111,9	4733,0	3102,4	56,9	0,123	25,3
BZL 3	-	-	4324,6	2839,4	-	-	-
BZL 4	-	-	4789,8	3175,3	-	-	-
BZL 5	-	-	4560,3	3164,3	-	-	-
BZL 6	-	-	4696,6	3148,9	-	-	-
BZL 8	-	-	5036,5	3273,8	-	-	-
BZL 9	-	-	4572,4	3274,1	-	-	-

Πίνακας 4.3: Ταχύτητες κυμάτων P,S για όλα τα δοκίμια σε κορεσμένη και ξηρή κατάσταση

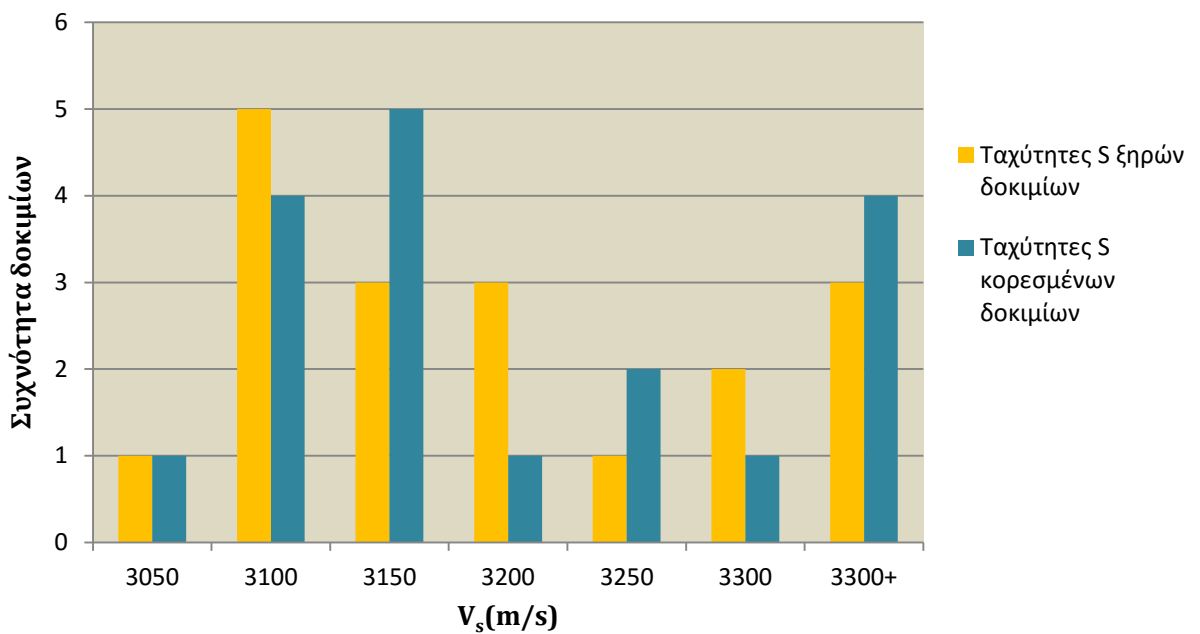
Από τα αποτελέσματα για τα γρανιτικά δοκίμια (χωρίς τα δοκίμια που προορίζονται για τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης) προκύπτουν οι εξής μέσες τιμές των ταχυτήτων:

- $\overline{V_{p(\kappaορ)}} = 5138,84 \text{ m/s}$
- $\overline{V_{s(\kappaορ)}} = 3164,29 \text{ m/s}$
- $\overline{V_p} = 4926,86 \text{ m/s}$
- $\overline{V_s} = 3173,31 \text{ m/s}$

Παρατηρείται μία αύξηση της τάξης του $\frac{\overline{V_{p(\kappaορ)}} - \overline{V_p}}{\overline{V_p}} = \frac{5138,84 - 4926,86}{4926,86} = 4,3\%$ στις ταχύτητες εγκάρσιων κυμάτων και μία μείωση $\frac{\overline{V_{s(\kappaορ)}} - \overline{V_s}}{\overline{V_s}} = \frac{3164,29 - 3173,31}{3173,31} = -0,28\%$ στις ταχύτητες διάδοσης διατμητικών κυμάτων. Τα αποτελέσματα συνάδουν με το θεωρητικό υπόβαθρο αφού τα κύματα P διαδίδονται πέντε φορές πιο γρήγορα στο νερό απ'ότι στον αέρα οπότε η αύξηση είναι λογική. Τα κύματα S δεν επηρεάζονται από τον κορεσμό του δοκιμίου αφού δεν διαδίδονται ούτε στον αέρα ούτε στο νερό. Η οριακή μείωση εξηγείται από την αύξηση της πυκνότητας του δοκιμίου από ξηρή σε κορεσμένη κατάσταση. Σε πετρώματα όπως ο γρανίτης με μικρό πορώδες η αύξηση αυτή είναι αμελητέα και πρακτικώς οι ταχύτητες V_s δεν επηρεάζονται.



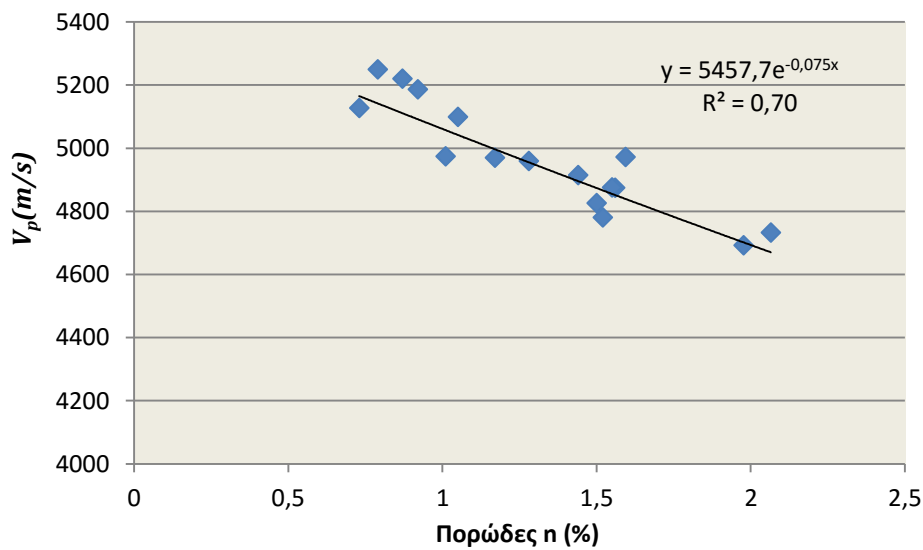
Σχήμα 4.9: Ιστόγραμμα επίμηκων ταχυτήτων για όλα τα δοκίμια σε ξηρή και κορεσμένη κατάσταση.



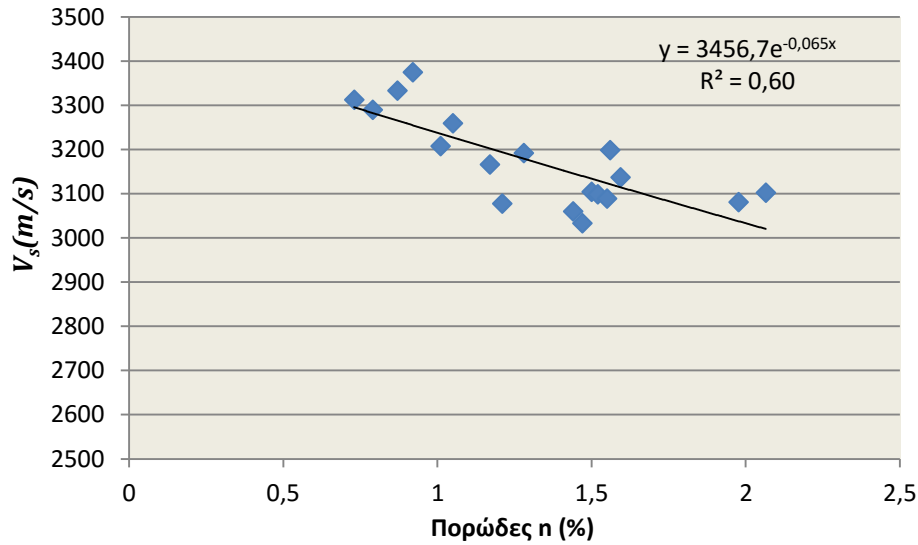
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα διατμητικών ταχυτήτων για όλα τα δοκίμια σε ξηρή και κορεσμένη κατάσταση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση των μετρούμενων ταχυτήτων με το πορώδες του κάθε δοκιμίου. Παρατηρείται σημαντική μείωση και καλή συσχέτιση των ταχυτήτων με την αύξηση του πορώδους για τα ξηρά δοκίμια. Στα κορεσμένα δοκίμια αν και

υπάρχει μία τάση μείωσης των εγκάρσιων ταχυτήτων, φαίνεται πως το πορώδες δεν διαδραματίζει πολύ μεγάλο ρόλο. Στις ταχύτητες διατμητικών κυμάτων όμως παρατηρείται παρόμοια μείωση με αυτήν στη ξηρή κατάσταση. Αυτό συμβαίνει διότι τα επιμήκη κύματα επηρεάζονται από το βαθμό κορεσμού και μάλιστα οι ταχύτητες αυξάνονται με την αύξηση του υγρής φάσης στο δείγμα. Έτσι ένα ξηρό δείγμα με μεγάλο πορώδες παρουσιάζει μεγάλη μείωση της ταχύτητας επίμηκων κυμάτων από ένα αντίστοιχα ξηρό δείγμα με μικρότερο πορώδες. Ωστόσο, ένα υγρό δείγμα με μεγάλο πορώδες δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλη μείωση ταχύτητας σε σχέση με ένα αντίστοιχο δείγμα με μικρότερο πορώδες διότι το νερό που συμπλήρωσε τα κενά οδηγεί σε μεγαλύτερη ταχύτητα από τον αέρα που υπήρχε στην ξηρή κατάσταση.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα μεταβολής ταχύτητας V_p με το πορώδες n .

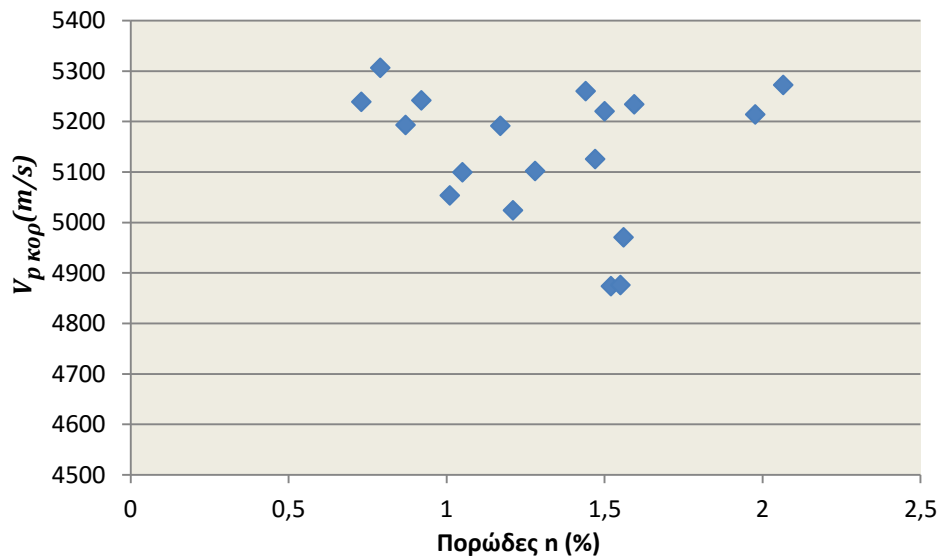


Σχήμα 4.12: Διάγραμμα μεταβολής ταχύτητας V_s με το πορώδες n .

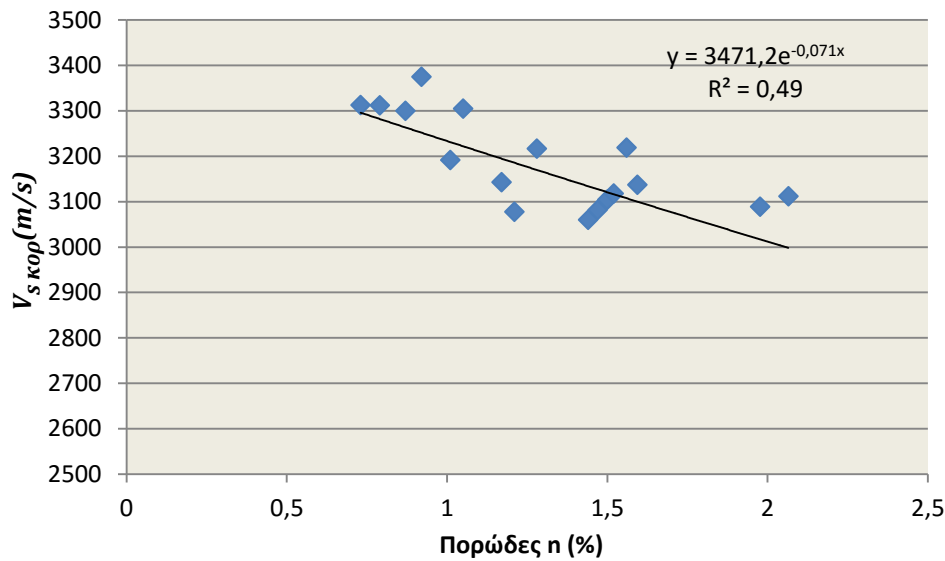
Οι ταχύτητες των ξηρών δειγμάτων V_p και V_s παρουσιάζουν αρκετά καλή συσχέτιση $R_1^2=0,70$ και $R_2^2=0,60$ αντίστοιχα. Οι δύο συσχετίσεις περιγράφονται από τις εξίσωσεις:

$$V_p = 5457,7 * e^{-0,075*n(\%)} \quad (4.12)$$

$$V_s = 3456,7 * e^{-0,065*n(\%)} \quad (4.13)$$



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα μεταβολής ταχύτητας $V_{p(\text{κορ})}$ με το πορώδες n .



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα μεταβολής ταχύτητας $V_{s(κορ)}$ με το πορώδες n .

Στις ταχύτητες εγκάρσιων κυμάτων δεν έχει νόημα η εισαγωγή κάποιας μαθηματικής εξίσωσης αφού η συσχέτιση των αποτελεσμάτων είναι αμυδρή. Στις ταχύτητες διατμητικών κυμάτων η μείωση περιγράφεται καλύτερα με συσχέτιση $R^2=0,49$ η οποία που κρίνεται μέτρια. Η εξίσωση που περιγράφει τη μείωση των ταχυτήτων V_s είναι:

$$V_{s(κορ)} = 3471,2 * e^{-0.071*n(\%)} \quad (4.14)$$

4.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

4.5.1 Εισαγωγή

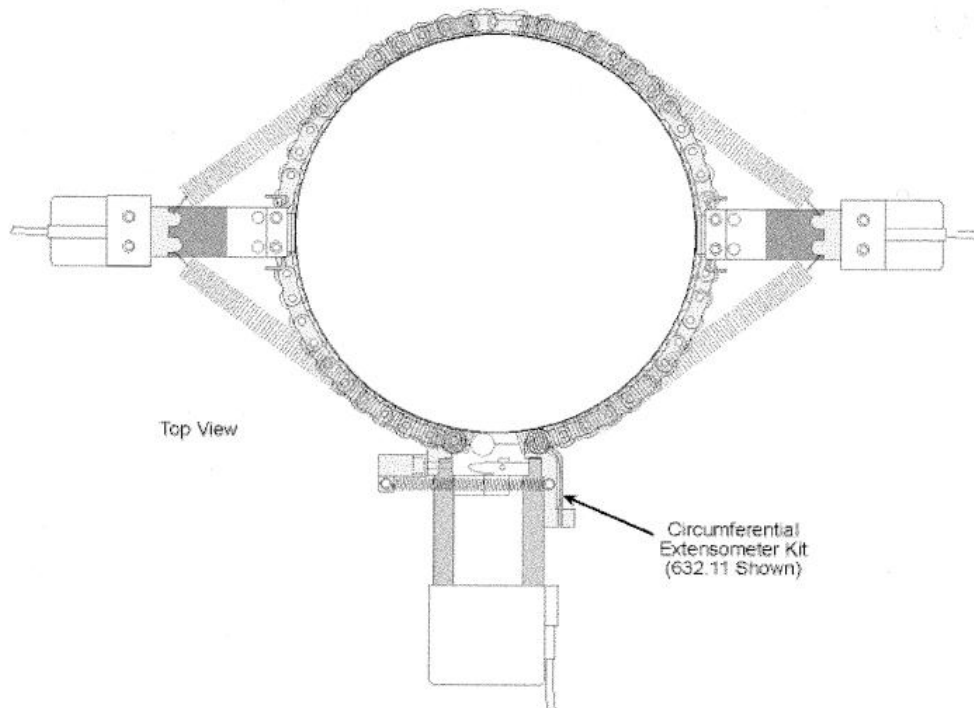
Οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος που θα υπολογιστούν είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson και η αντοχή σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη (περιβάλλουσα αστοχίας για τρεις διαφορετικές πλευρικές πιέσεις σ_3). Η μέτρηση της αντοχής είναι πολύ σημαντική για την παρούσα διπλωματική διότι οι τάσεις στα στάδια ρωγμάτωσης σ_{ci} και σ_{cd} πρέπει να αναφέρονται σε ποσοστά της αντοχής. Για το λόγο αυτό οκτώ δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της αντοχής σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη.

4.5.2 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

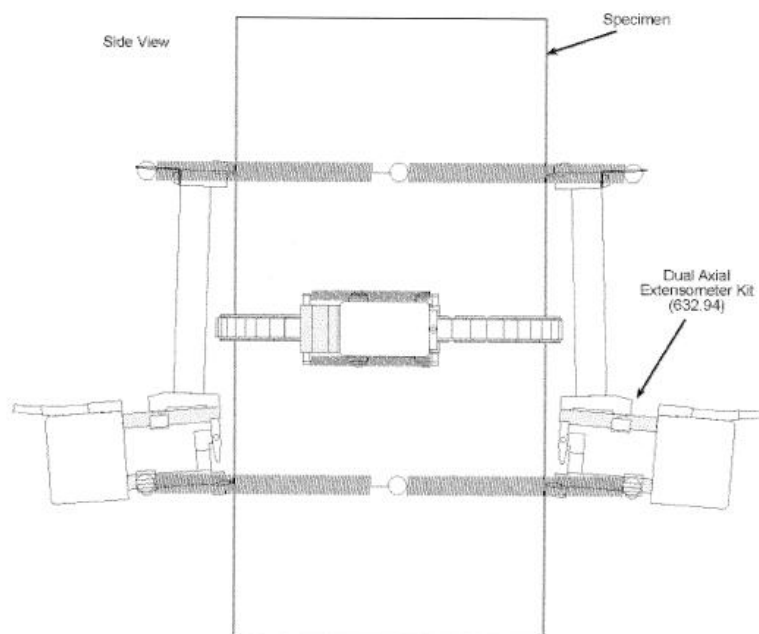
Η δοκιμή αυτή έχει σαν σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων πετρωμάτων. Τα δοκίμια πρέπει να είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με λόγο ύψους προς διάμετρο $L/D : 2.0 - 3.0$ και διάμετρο όχι μικρότερη των 50 mm. Οποσδήποτε η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να είναι δεκαπλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών που αποτελούν την δομή του πετρώματος. Τα άκρα του δοκιμίου πρέπει να είναι λεία και επίπεδα με μέγιστη απόκλιση 0,02 mm και να είναι παράλληλα μεταξύ τους ώστε να μην αποκλίνουν από την κάθετο προς τον άξονα του δοκιμίου περισσότερο από 0,001 rad. Η κυλινδρική επιφάνεια (περίμετρος) πρέπει να είναι ελεύθερη από προεξοχές δηλαδή να είναι λεία και απαλλαγμένη από απότομες ανωμαλίες με μέγιστη απόκλιση από την ευθεία για όλο το μήκος του δοκιμίου 0,3 mm. Τα κυλινδρικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαμέτρου 52 mm. Χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια Δ1, Δ3, Δ6. Επιπλέον στο δοκίμιο Δ1 τοποθετήθηκαν μονάδες μέτρησης παραμόρφωσης (extensometers) ώστε, εκτός από την αντοχή, να προκύψει η καμπύλη τάσης-αξονικής και διαμετρικής παραμόρφωσης. Οι καμπύλες αυτές καθώς και καμπύλη ογκομετρικής παραμόρφωσης του δοκιμίου είναι πολύ σημαντικές καθώς υπολογίζονται το μέτρο ελαστικότητας E , το μέτρο διάτμησης G και ο λόγος του poisson ν και επιπλέον μέσω των δεδομένων τάσης-παραμόρφωσης μπορούν να προσδιοριστούν οι τάσεις σ_{ci} και σ_{cd} όπως έχει αναλυθεί στο **υποκεφάλαιο 2.3**.

Η μέτρηση της παραμόρφωσης επιτυγχάνεται μέσω μονάδων μέτρησης επιμήκυνσης (extensometers). Οι μονάδες αυτές μπορούν να μετρήσουν την αλλαγή μήκους ενός αντικειμένου με πολύ μεγάλη ακρίβεια (Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο είχαν ακρίβεια 0,1 μm). Οι μετρήτες τοποθετούνται στο δοκίμιο πριν αρχίσει η διαδικασία της δοκιμής και βρίσκονται πάνω του καθ'όλη τη διάρκεια της. Οι μονάδες αυτές ονομάζονται μονάδες επαφής (contact extensometers). Τοποθετούνται δύο μονάδες, μία διαμετρικά ώστε να μετριέται η διαμετρική παραμόρφωση και μία αξονικά ώστε να μετριέται η αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου. Ο μετρητής διαμετρικής παραμόρφωσης τοποθετείται οριζόντια στη μέση του δοκιμίου. Ο μετρητής αξονικής παραμόρφωσης τοποθετείται παράλληλα στο ύψος του δοκιμίου ώστε οι δύο άκρες του να απέχουν περίπου 25mm. από το κέντρο του δοκιμίου (δηλαδή με συνολικό μήκος 50mm.) ενώ υπάρχουν δύο καταγραφείς επιμήκυνσης από τους οποίους εξάγεται ο μέσος όρος. Η τοποθέτηση τους πρέπει να γίνει με προσοχή καθώς τα όργανα είναι αρκετά ευαίσθητα. Οι μονάδες φαίνονται στα **Σχήματα 4.15, 4.16**. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, οι παραμορφώσεις μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα μέσω ειδικής συσκευής και τα δεδομένα καταγράφονται σε υπολογιστικό πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η συχνότητα των μετρήσεων μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 200Hz. Η διαδρομή που μπορούν να καταγράψουν ο αξονικός και ο διαμετρικός μετρητής είναι 5mm. και 4mm. αντίστοιχα. Το περιθώριο είναι βέβαια μεγάλο για τα δεδομένα παραμόρφωσης στη μονοαξονική θλίψη γρανιτικού πετρώματος ωστόσο θα πρέπει να τοποθετούνται,

στο βαθμό που γίνεται, απαραμόρφωτοι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος υπέρβασης του ορίου καταγραφής τους.



Σχήμα 4.15: Μετρητής διαμετρικής παραμόρφωσης (ISRM,1999)



Σχήμα 4.16: Μετρητής αξονικής παραμόρφωσης (ISRM,1999)

Εκτέλεση δοκιμής:

Τοποθετούμε το δοκίμιο στη συσκευή φόρτισης. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το δοκίμιο, οι χαλύβδινες πλάκες και η σφαιρική έδραση να είναι κεντρωμένα σε σχέση με τον άξονα φορτίσεως. Η πρέσα πρέπει να είναι εξοπλισμένη με δύο χαλύβδινες πλάκες κυκλικού σχήματος σκληρότητας όχι μικρότερης του HRC 58. Η μία από τις πλάκες πρέπει να έχει σφαιρική έδραση και η άλλη να είναι άκαμπτη και επίπεδη. Οι πλάκες αυτές θα πρέπει να έχουν πάχος μεγαλύτερο των 15 mm και οι επιφάνειες τους δεν θα πρέπει να αποκλίνουν του επιπέδου περισσότερο από 0,005 mm. Δίνουμε στο σερβομηχανισμό τη λειτουργία μονοαξονικής θλίψης και ορίζουμε την ταχύτητα φόρτισης (0.5-1.5 Μρα σύμφωνα με τις προδιαγραφές). Η ταχύτητα φόρτισης πρέπει να είναι τέτοια ώστε η δοκιμή να διαρκεί 5-10 min. Το φορτίο πρέπει να εφαρμόζεται συνεχώς και βαθμιαία στο δοκίμιο με σταθερή την ταχύτητα φορτίσεως.

Υπολογισμοί-Αποτελέσματα:

Η αντοχή του δοκιμίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{ucs} = \frac{F}{A} = \frac{kN}{m^2} = kPa \quad (4.15)$$

Όπου:

σ_{ucs} : Η αντοχή του δοκιμίου σε kPa

F: Το μέγιστο φορτίο σε kN

A: Το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου σε m²

Στον **Πίνακα 4.4** παρατίθενται τα αποτελέσματα μονοαξονικής αντοχής για τα δοκίμια Δ1, Δ3, Δ6 και Δ5*.

Σημείωση *: Το δοκίμιο Δ5 χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή ακουστικής εκπομπής στην οποία θα αναφερθούμε εκτενώς στη συνέχεια. Επειδή στη διαδικασία ΑΕ μετριέται και η αντοχή του δοκιμίου όπως και οι σχέσεις τάσεις-παραμόρφώσεις τα σχετικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μέσης αντοχής του πετρώματος και για αυτό το λόγο παρατίθενται εδώ.

Δοκίμιο	Εμβαδόν (cm ²)	Φορτίο (kN)	Αντοχή σ_{ucs} (MPa)
Δ1	21,38	449,8	210,40
Δ3	21,29	448,5	210,43
Δ5	21,11	358,2	169,69
Δ6	21,03	402,4	191,41

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Έτσι η αντοχή του πετρώματος προσδιορίζεται ως ο μέσος όρος των τεσσάρων δοκιμών:

$$\sigma_{ucs} = 195,48 \text{ Mpa}$$

Το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως πολύ υψηλής αντοχής με βάση την κατάταξη της I.S.R.M.

4.5.3 Δοκιμή τριαξονικής θλίψης

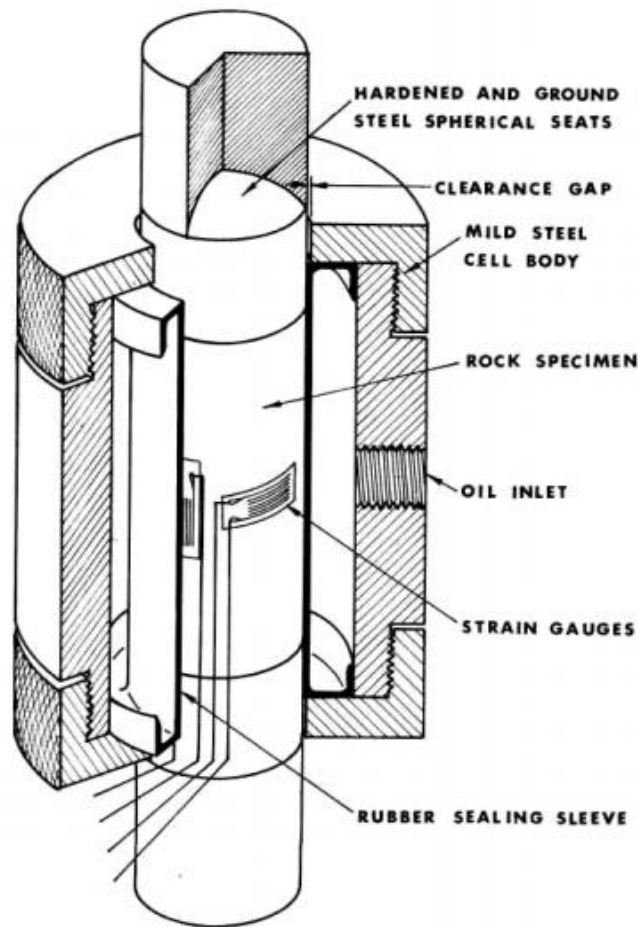
Η δοκιμή αυτή έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής σε τριαξονική θλίψη δοκιμίων πετρωμάτων. Τα δοκίμια πρέπει να είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με λόγο ύψους (H) προς διάμετρο (D) $H/D \sim 2.0$ και διάμετρο όχι μεγαλύτερη των 54 mm. Η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να είναι δεκαπλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών που αποτελούν τη δομή του πετρώματος. Τα άκρα του δοκιμίου πρέπει να είναι λεία και επίπεδα με μέγιστη απόκλιση 0.02 mm και να είναι παράλληλα μεταξύ τους ώστε να μην αποκλίνουν από την κάθετο προς τον άξονα του δοκιμίου περισσότερο από 0.001 rad. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην τριαξονική δοκιμή είχαν λόγο $H/D \sim 2.0$. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα δοκίμια για τον υπολογισμό της τάσης αστοχίας σε διαφορετικές πλευρικές πιέσεις.

Ο αριθμός των δοκιμίων και του εύρους της πλευρικής πίεσης εξαρτάται από τον σκοπό για τον οποίο γίνονται οι δοκιμές (π.χ. για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερα ζεύγη τιμών εκτός της τιμής της μονοαξονικής αντοχής). Οι δοκιμές έγιναν σε πλευρικές πιέσεις 1, 10, 20, 30 MPa.

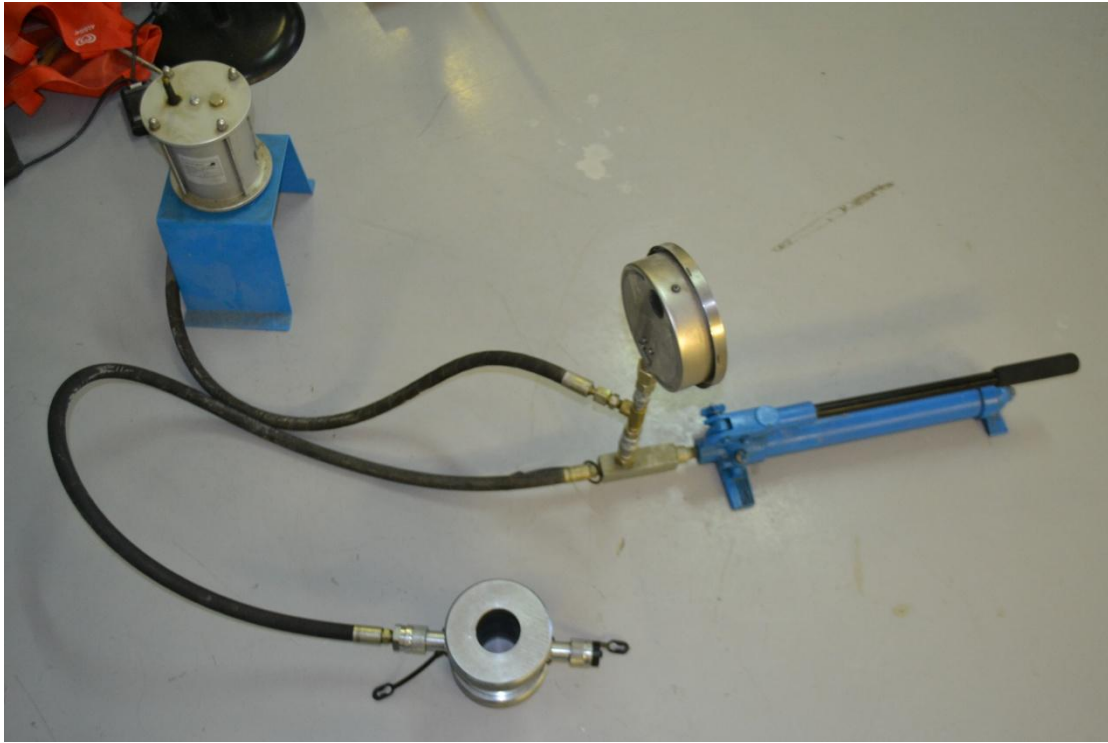
Εκτέλεση δοκιμής:

Το δοκίμιο τοποθετείται στο κελί Hoek και περιβάλλεται από μία αδιαπέρατη εύκαμπτη μεμβράνη (Σχήμα 4.17). Το κελί πρέπει να είναι εξοπλισμένο με τέσσερις χαλύβδινες προσθήκες με σφαιρική έδραση που προσαρμόζονται ανά δύο στις άκρες του δοκιμίου και που έχουν σκληρότητα όχι μικρότερη από HRC 58. Οι επιφάνειές τους δεν θα πρέπει να αποκλίνουν του επιπέδου περισσότερο από 0,005 mm. Το τριαξονικό κελί πρέπει να έχει κατάλληλη είσοδο για την πλήρωσή του με λάδι καθώς επίσης και μία βαλβίδα διαφυγής του αέρα (δύο ταχυσύνδεσμοι). Το κελί του Hoek είναι συνδεδεμένο με συσκευή εφαρμογής και μέτρησης πλευρικής πίεσης (πρέσα πλευρικής πίεσης). Αυτή πρέπει να περιλαμβάνει μία υδραυλική αντλία για την επιβολή σταθερής πλευρικής πίεσης και να την διατηρεί με απόκλιση όχι μεγαλύτερη του 2% της επιθυμητής καθώς επίσης και έναν κατάλληλο μηχανισμό για τον έλεγχο και μέτρησής της (μανόμετρο ή ηλεκτρονική ένδειξη) (Σχήμα 4.18). Στη συνέχεια το κελί κλείνεται από δύο χαλύβδινες προσθήκες και εφαρμόζεται μία αρχική πίεση 1

MPa από την πρέσα πλευρικής πίεσης. Έπειτα το σύστημα τοποθετείται στη συσκευή αξονικής φόρτισης όπου στερεώνεται στις εναπομείναντες δύο χαλύβδινες προσθήκες (Σχήμα 4.19). Στην πρέσα αξονικής φόρτισης επιλέγεται η επιθυμητή ταχύτητα φόρτισης και η δοκιμή ξεκινάει. Το φορτίο πρέπει να εφαρμόζεται συνεχώς και βαθμιαία στο δοκίμιο με σταθερή ταχύτητα φορτίσεως 0.5 έως 1.0 MPa/s. Η θραύση του δοκίμιου πρέπει να επέλθει σε 5 - 15 min. Η πλευρική πίεση πρέπει να εφαρμόζεται παράλληλα με την αξονική. Δηλαδή το δοκίμιο να βρίσκεται σε μία κατάσταση ισότροπης συμπίεσης μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής πλευρικής τάσης. Τέλος το δοκίμιο εξάγεται μέσω συσκευή εξαγωγής από το τριαξονικό κελί μετά τη δοκιμή (εξολκείας).



Σχήμα 4.17: Τοποθέτηση δοκίμιου και μεμβράνης στο κελί Hoek.



Σχήμα 4.18: Σύστημα επιβολής πλευρικής πίεσης με τριαξονική κυψέλη Hoek.



Σχήμα 4.19: Τοποθέτηση κυψέλης Hoek στη συσκευή επιβολής αξονικού φορτίου.

Υπολογισμοί-Αποτελέσματα:

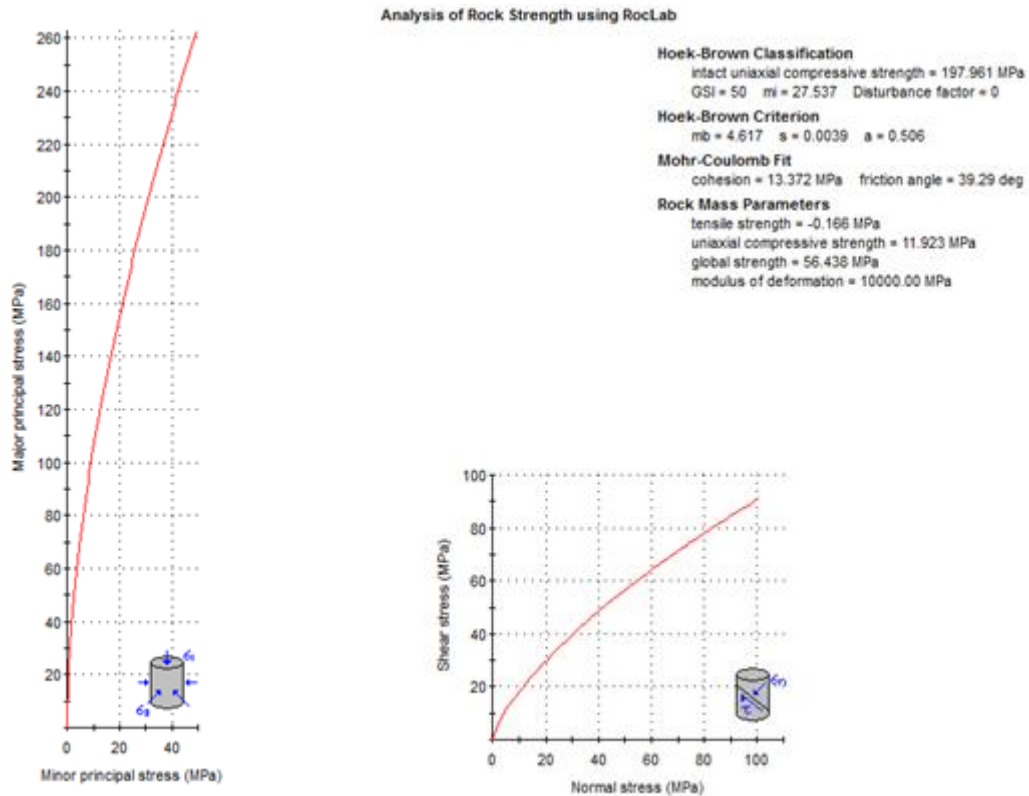
Η τάση αστοχίας για κάθε δοκιμή υπολογίζεται όπως και στη μονοαξονική σύμφωνα με τη σχέση (4.7).

Στον **Πίνακα 4.5** παρατίθενται τα αποτελέσματα μονοαξονικής αντοχής για τα δοκίμια Δ15, Δ16, Δ10 και Δ13.

Δοκίμιο	Εμβαδόν (cm ²)	Πλευρική πίεση σ_3 (Μρα)	Αξονικό φορτίο (kN)	Ορθή τάση αστοχίας σ_1 (Μρα)
Δ15	21,33	10	700,1	328,27
Δ16	21,47	20	891,2	415,16
Δ10	21,29	30	984,0	462,27
Δ13	21,30	1	398,1	186,74

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης

Τα αποτελέσματα εισάγονται στο πρόγραμμα Roclab από το οποίο προκύπτει η περιβάλλουσα αστοχίας και εξάγονται οι παράμετροι αντοχής με βάση τα κριτήρια Mohr-Coulomb και Hoek-Brown.



Σχήμα 4.20: Περιβάλλουσα αστοχίας σε διαγράμμα σ_1 - σ_3 (ορθή και πλευρική τάση) και τ - σ_n (διατμητική και ορθή τάση στο επίπεδο της θραύσης) από πρόγραμμα Roclab (Rocscience).

Προκύπτει:

σταθερά $m_i=27,5$

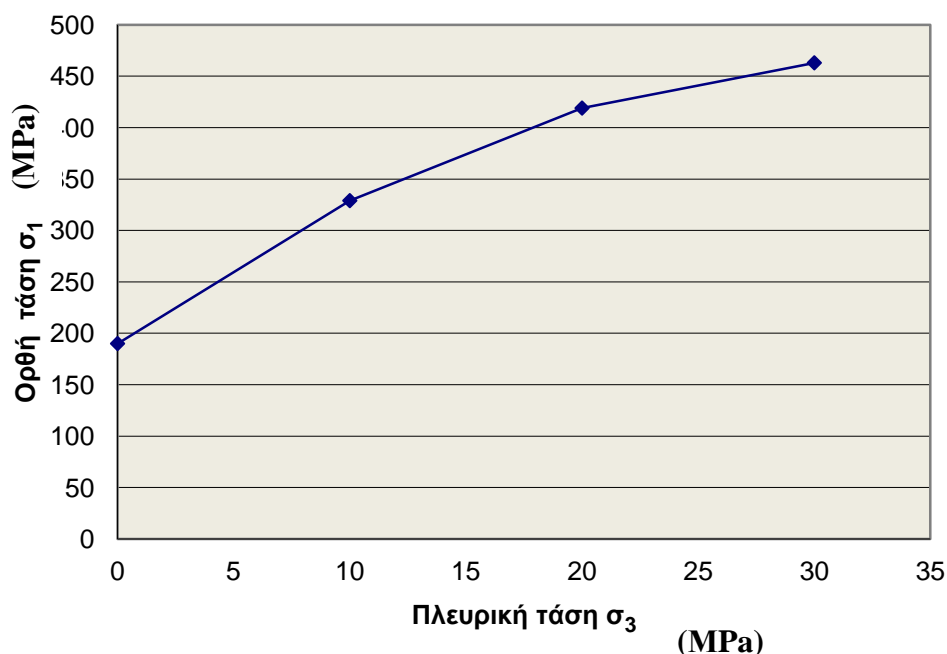
συνοχή $c=13,2$ Mpa

γωνία τριβής $\varphi= 39,3^\circ$

Μονοαξονική αντοχή $\sigma_{ci}=197,96$ MPa

Η τιμή της μονοαξονικής αντοχής που προκύπτει μέσω των αποτελεσμάτων της τριαξονικής έχει πολύ καλή προσέγγιση με την τιμή που έχει εξαχθεί από τα αποτελέσματα της μονοαξονικής με σφάλμα μόλις $\frac{\sigma_{τριαξ.} - \sigma_{μονοαξ.}}{\sigma_{μονοαξ.}} = \frac{197,96 - 195,48}{195,48} = 1\%$.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διαγράμμα ορθής-πλευρικής τάσης (σ_1 - σ_3) με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης.



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα ορθής-πλευρικής τάσης (σ_1 - σ_3) στη δοκιμή τριαξονικής θλίψης.

4.5.4 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian)

Η δοκιμή έχει σκοπό την έμμεση μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται έχουν μορφή δίσκου και υποβάλλονται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι θραύσης. Σε αυτό το πεδίο φόρτισης το αστοχούν κατά τη διάμετρο σε εφελκυσμό. Η εφελκυστική τάση, που προκαλεί την αστοχία αυτή, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Η δοκιμή βασίζεται στο γεγονός, ότι τα περισσότερα πετρώματα, όταν βρεθούν σε διαξονικό εντατικό πεδίο αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση θλιπτική και εφ' όσον το μέγεθος της τελευταίας δεν υπερβαίνει το τριπλάσιο της κύριας εφελκυστικής τάσης (Σοφιανός και Νομικός, 2008).

Εκτέλεση δοκιμής:

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τις οδηγίες της ISRM (1978). Οι κυλινδρικές επιφάνειες θα πρέπει να είναι λείες και οι όποιες ανωμαλίες τους δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 0,025 mm. Η διάμετρος του δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 54,7 mm. ενώ το πάχος πρέπει να είναι περίπου το ήμισυ της διαμέτρου. Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχής και να πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό. Προτεινόμενος ρυθμός φόρτισης είναι 200 N/s. Το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι την αστοχία του.

Η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος προκύπτει :

$$\sigma_t = \frac{2 * P}{\pi * D * L} \quad (4.16)$$

Όπου:

P: Το επιβαλλόμενο φορτίο σε kN

D: Η διάμετρος του δοκιμίου

L: Το πάχος του δοκιμίου

Τα αποτελέσματα της δοκιμής Brazilian παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.6**.

Δείγμα	περιγραφή	Φορτίο θραύσης P _t (kN)	Διάμετρος D (cm)	Πάχος t (cm)	Τάση θραύσης σ _t (MPa)
1	θραύση	32,1	5,201	2,488	15,80
7	θραύση	38,0	5,183	2,760	16,91
10	θραύση	28,0	5,208	2,358	14,52

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα υπολογισμού εφελκυστικής αντοχής στη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.



Σχήμα 4.22: Δοκίμιο Brazilian πριν τη δοκιμή.



Σχήμα 4.23: Δοκίμιο Brazilian στη θραύση.

Τα αποτελέσματα των τάσεων αστοχίας έχουν μικρή απόκλιση. Εξάγεται η μέση εφεκλυστική τάση:

$$\bar{\sigma}_t = 15,74 \text{ MPa}$$

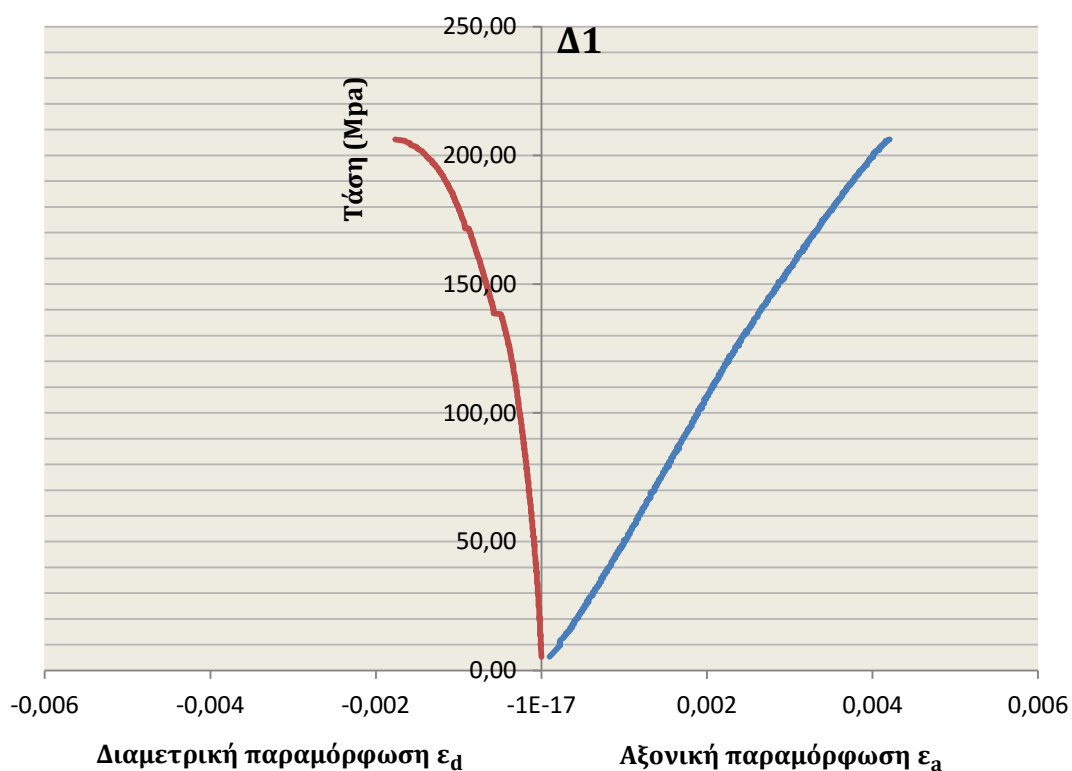
4.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΚΑΙ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΩΝ

4.6.1 Προσδιορισμός E, ν και των τάσεων σ_{ci} και σ_{cd} μέσω των δεδομένων παραμόρφωσης της μονοαξονικής δοκιμής.

Το θεωρητικό υπόβαθρο εντοπισμού των τάσεων σ_{ci} και σ_{cd} έχει αναπτυχθεί στο υπόκεφάλαιο 2.3. Στη συνέχεια θα εξετάσει η καμπύλη τάσης-αξονικής παραμόρφωσης με σκοπό την εύρεση της ελαστικής περιοχής και του σημείου που ξεκινάει να αποκλίνει από την ελαστικότητα το οποίο θα είναι το σημείο σ_{ci} . Έπειτα, το σ_{cd} θα βρεθεί από την ογκομετρική παραμόρφωση του δοκιμίου αφού ορίζεται ως το σημείο που το δοκίμιο ξεκινάει να έχει διαστολική συμπεριφορά.

Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για αυτή τη διαδικασία ήταν το Δ1.

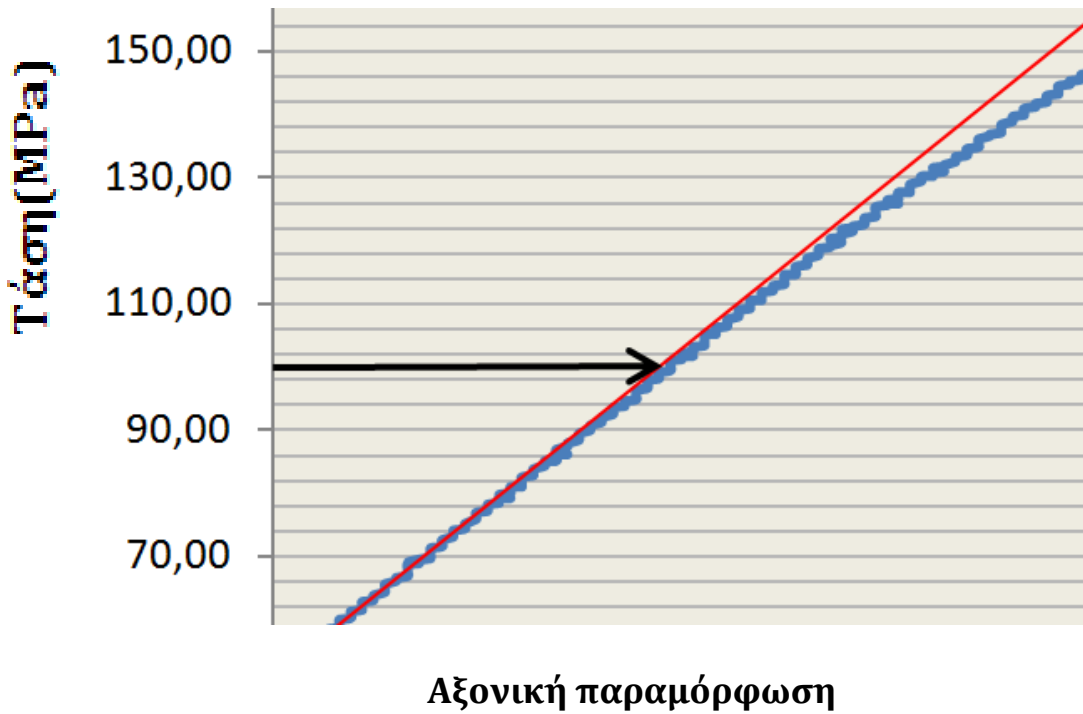
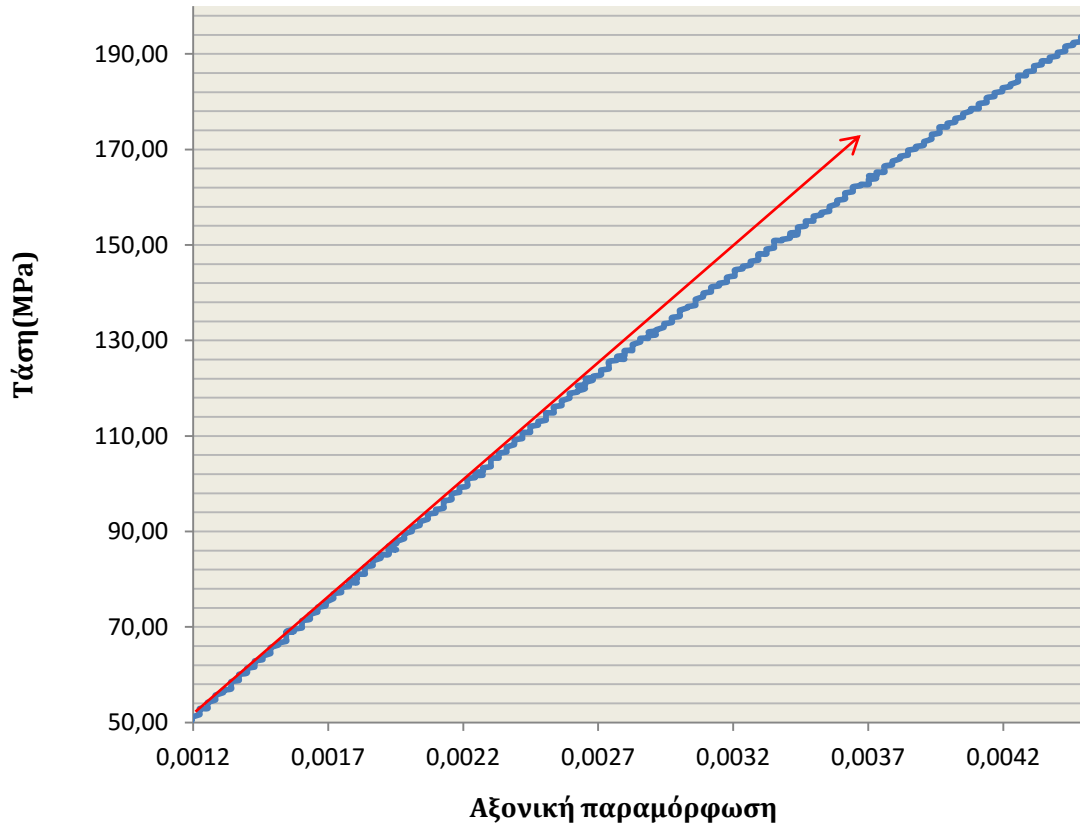
Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης-αξονικής και διαμετρικής παραμόρφωσης του δοκιμίου Δ1.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής και διαμετρικής παραμόρφωσης του δοκιμίου Δ1.

Το δοκίμιο Δ1 αστόχησε στα 210,4 MPa. Η περιοχή στην έναρξη της φόρτισης η οποία στρέφει τα κοίλα προς τα άνω αποτελεί την περιοχή του κλεισίματος των ρωγμών (crack closure). Στη συνέχεια ακολουθεί όπως αναμενόταν μία γραμμική-ελαστική περιοχή (linear elastic deformation). Στο τμήμα αυτό του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης μετρώνται οι ελαστικές σταθερές του πετρώματος (Μέτρο ελαστικότητας E και λόγος Poisson ν). Ζητούμενο αποτελεί η εύρεση του σημείου που παρεκκλίνει από την ελαστικότητα αφού αυτό το σημείο αποτελεί την έναρξη της μικρορωγμάτωσης (crack initiation). Το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.24** δεν μπορεί να δώσει σαφή εικόνα για την ακριβή θέση του σημείου αυτού. Ωστόσο εάν επικεντρώσουμε την προσοχή μας στην περιοχή κοντά στα 100 MPa όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.25**, ο προσδιορισμός μπορεί να γίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια.

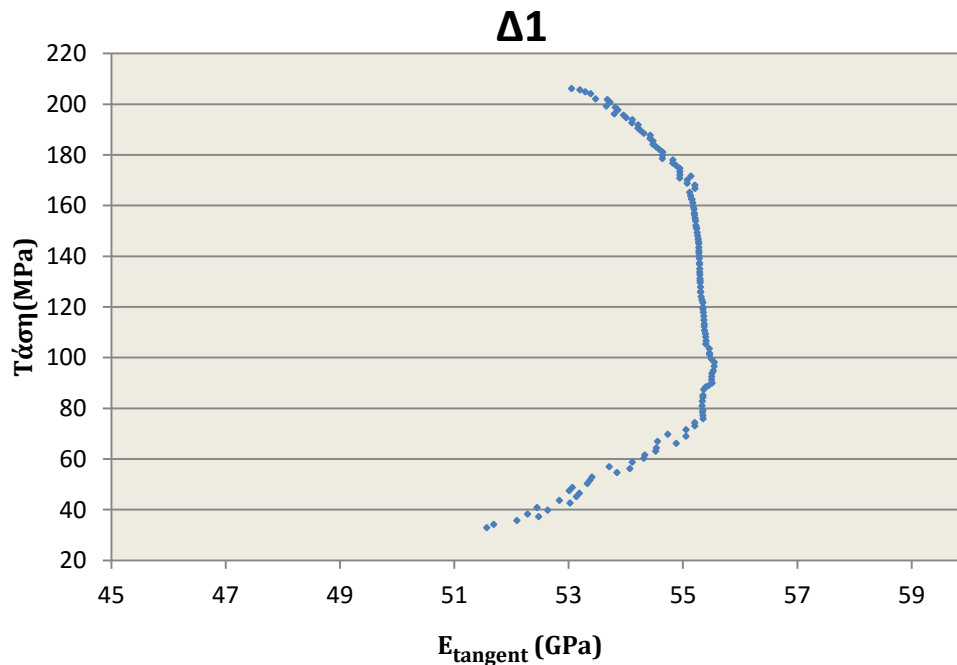
Δ1



Σχήμα 4.25: Διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής και διαμετρικής παραμόρφωσης του δοκιμίου Δ1 με κεντράρισμα στην περιοχή της παρέκκλισης από την ελαστικότητα.

Έτσι γραφικά υπολογίζεται η τάση ανοίγματος των ρωγμών η οποία προκύπτει:
 $\sigma_{ci} = 99 \text{ Mpa}$

Για περισσότερη ανάλυση υπολογίζεται η κλίση του διαγράμματος τάσης-αξονικής παραμόρφωσης. Η κλίση αυτή αποτελεί και το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_{tangent} . Στην ελαστική περιοχή αναμένεται το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας να είναι σταθερό ενώ μετά την έναρξη των ρωγμών αναμένεται μία καθοδική μείωση του. Να τονιστεί ότι η προσέγγιση του E_{tangent} με χρήση των δεδομένων τάσης-παραμόρφωσης ελλοχεύει κινδύνους λόγω της ευαισθησίας των οργάνων και της ακρίβειας των μετρήσεων σε μικροπαραμορφώσεις. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα τάσης-εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας.



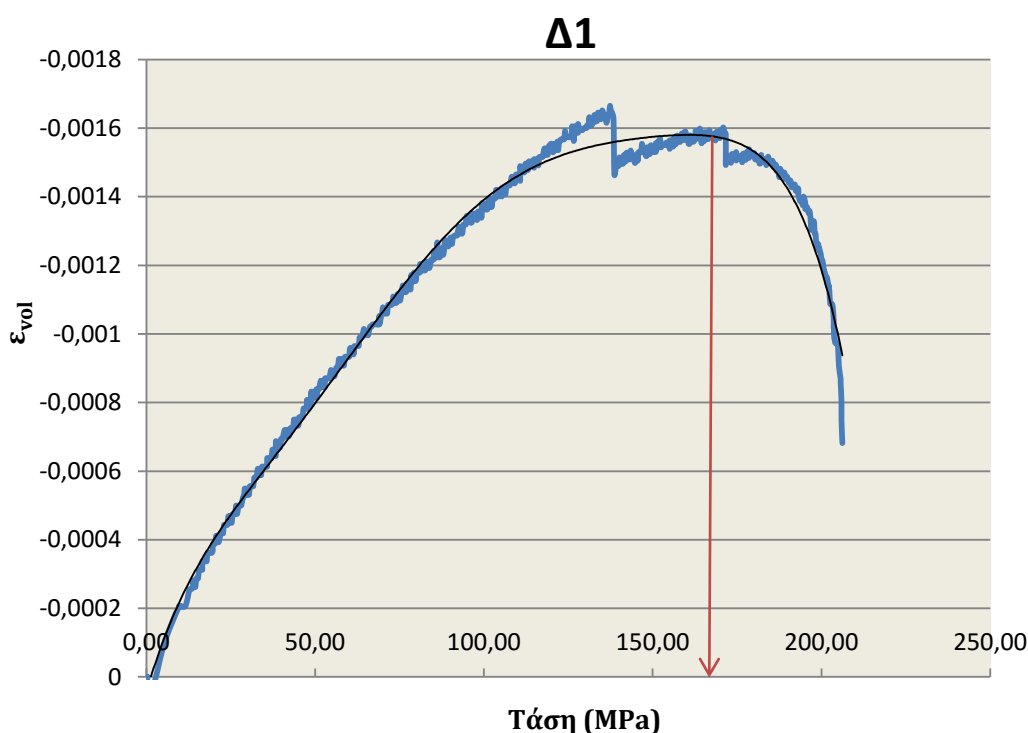
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα αξονικής τάσης-εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Δ1.

Στο διάγραμμα παρατηρείται πράγματι μία περιοχή προσεγγιστικά σταθερού εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας (ελαστική περιοχή). Το σημείο που το E_{tangent} αρχίζει να μειώνεται είναι στα 98-100 Mpa συνεπώς η προσέγγιση του σ_{ci} στα 99 Mpa με την γραφική μέθοδο κρίνεται ορθή. Συνεπώς για το δοκίμιο Δ1 η έναρξη της μικρορωγμάτωση έγινε σε ποσοστό:

$$\sigma_{ci(\Delta 1)} = \frac{99}{210,4} \% \sigma_{ucs(\Delta 1)} = 47\% \sigma_{ucs(\Delta 1)}$$

Έτσι η πρώτη προσέγγιση για την έναρξη της μικρορωγμάτωσης στο γρανιτικό πέτρωμα της παρούσας διπλωματικής είναι πως συμβαίνει σε ποσοστό 47% της αντοχής του πετρώματος στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Για τον εντοπισμό του σημείου ασταθούς διάδοσης των μικρορωγμών (σ_{cd}) χρησιμοποιούνται τα δεδομένα ογκομετρικής παραμόρφωσης. Το σ_{cd} υπολογίζεται κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης ως το σημείο όπου το δοκίμιο περνάει από συστολική, σε διαστολική συμπεριφορά. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης-τάσης του δοκιμίου Δ1.



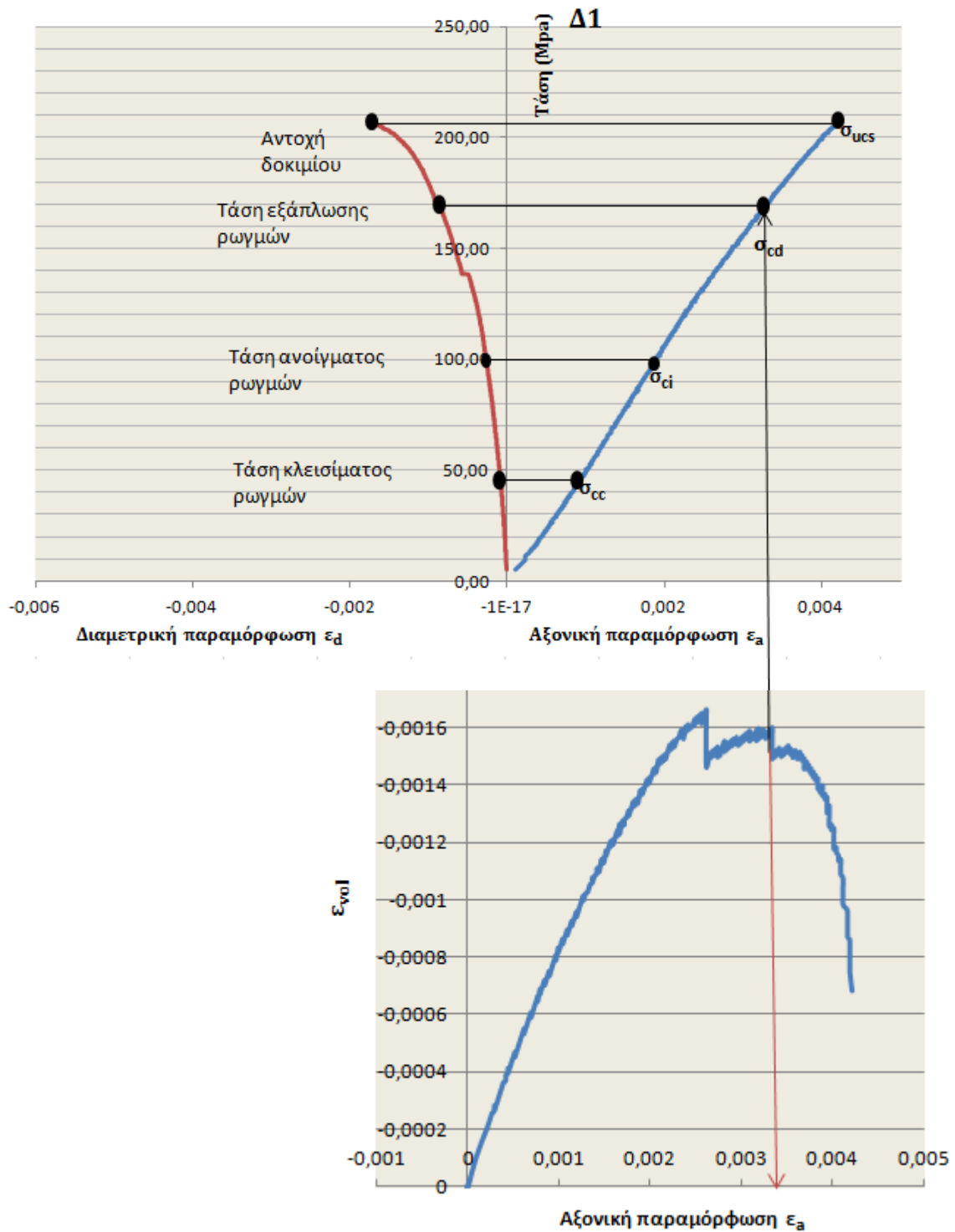
Σχήμα 4.27: Διάγραμμα αξονικής τάσης-ογκομετρικής παραμόρφωσης του δοκιμίου Δ1.

Στο διάγραμμα 4.27, η καμπύλη ογκομετρικής παραμόρφωσης προσεγγίζεται καλύτερα με τη βοήθεια πολυωνυμικής γραμμής τάσης (trendline) πέμπτου βαθμού. Η μετάβαση από συστολική σε διαστολική συμπεριφορά γίνεται στα 165 MPa. Έτσι η τάση διάδοσης των μικρορωγμών στο δοκίμιο Δ1 είναι:

$$\sigma_{cd(\Delta 1)} = \frac{165}{210,4} \% \sigma_{ucs(\Delta 1)} = 78\% \sigma_{ucs(\Delta 1)}$$

Συμπερασματικά, η ασταθής διάδοση της ρωγμάτωσης στο δοκίμιο Δ1 ξεκινάει στο 78% της αντοχής του.

Στο διάγραμμα 4.28 παρουσιάζονται εποπτικά τα στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου Δ1 όπως προέκυψαν από τα δεδομένα παραμόρφωσης σύμφωνα με το πρότυπο διάγραμμα του Martin (1993) (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 4.28: Στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου Δ1 κατά τη μονοαξονική φόρτιση

Επιπλέον απο τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είναι δυνατός ο υπολογισμός του μέσου μέτρου ελαστικότητας ή μέτρου Young και του λόγου Poisson. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ως:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a} \quad (4.16)$$

Όπου:

$\Delta\sigma$: Η διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης στην ελαστική ζώνη.

$\Delta\varepsilon_a$: Η διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης παραμόρφωσης στην ελαστική ζώνη.

Η ελαστική περιοχή ξεκινάει στην τάση σ_{cc} και τελειώνει στην τάση σ_{ci} οι οποίες έχουν υπολογιστεί. Οι αντίστοιχες παραμόρφώσεις για κάθε τάση είναι γνωστές από τα δεδομένα παραμόρφωσης. Οπότε μέσω της εξίσωσης 4.16 προκύπτει:

$$E_1 = \frac{99 - 45}{0,001869 - 0,001079} = 55,6 \text{ GPa}$$

Ο λόγος Poisson υπολογίζεται επίσης στην ελαστική ζώνη του πετρώματος ως:

$$\nu = -\frac{\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_a}{\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_d} \quad (4.17)$$

Από την εξίσωση 4.16 με τις τιμές παραμορφώσης που αντιστοιχούν στην ελαστική περιοχή προκύπτει:

$$\nu_1 = 0,18$$

Μετρήσεις παραμόρφωσης διεξήχθησαν και στο δοκίμιο Δ2 και προέκυψαν:

$$E_2 = 51,61 \text{ GPa}$$

$$\nu_2 = 0,16$$

Έτσι από τις δύο αυτές δοκιμές εξάγεται μία μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson για το γρανιτικό πέτρωμα :

$$\bar{E} = 53,61 \text{ GPa}$$

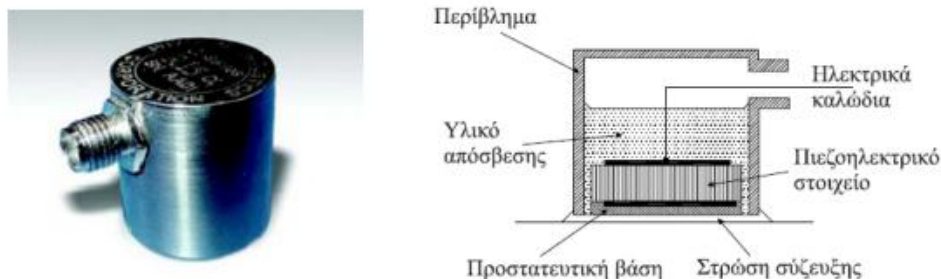
$$\bar{\nu} = 0,17$$

4.6.2 Προσδιορισμός σ_{ci} και σ_{cd} μέσω της δοκιμής ακουστικής εκπομπής (ΑΕ).

Για τη δοκιμή της ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο Δ5. Η δοκιμή έγινε σε μονοαξονικές συνθήκες φόρτισης.

Περιγραφή δοκιμής:

Στο δοκίμιο τοποθετούνται τέσσερις αισθητήρες για την καταγραφή των δεδομένων ακουστικής εκπομπής. Η ευαισθησία και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του αισθητήρα είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου κατά περίπτωση αισθητήρα σε ένα σύστημα παρακολούθησης ΑΕ. Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες σήμερα είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Πρόκειται για ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT (leadzirconate- titanate) το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλεται στην επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες (sensors) μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και μορφοτροπείς (transducers). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας- μορφοτροπέας δίνεται στο **Σχήμα 4.29**.



Σχήμα 4.29: Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και κατασκευαστικές λεπτομέρειες.

Μια λεπτή μεμβράνη ρευστού τοποθετηθεί ανάμεσα στον αισθητήρα και στην επιφάνεια. Η χρήση κάποιου είδους ενδιάμεσου συγκολλητικού είναι σχεδόν απαραίτητη για τον εντοπισμό χαμηλού επιπέδου ακουστικών σημάτων. Σε μικροσκοπική κλίμακα οι επιφάνειες του αισθητήρα και του υλικού είναι αρκετά τραχειές, μόνο μερικά σημεία στην πραγματικότητα ακουμπούν το ένα το άλλο, όταν είναι σε επαφή. Η τάση είναι δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας και η πραγματική περιοχή που μεταδίδει την δύναμη είναι πολύ μικρή. Εάν τα μικροσκοπικά κενά πληρώνονται με ρευστό, η πίεση θα κατανεμηθεί και διανεμηθεί ομοιόμορφα μεταξύ των επιφανειών. Ειδικότερα τα διατμητικά κύματα με διεύθυνση διάδοσης κάθετη στην επιφάνεια, αδυνατούν να μεταδοθούν ικανοποιητικά. Σε αυτή την περίπτωση γεμίζοντας τα κενά με υγρό χαμηλού ιξώδους δεν θα προσφέρει βοήθεια, μιας και τα υγρά δεν μεταφέρουν διατμητικά κύματα. Ωστόσο, ένα υγρό υψηλού ιξώδους ή στερεό θα βοηθήσει στη μετάδοση του παράλληλου στις επιφάνειες κύματος. Ο σκοπός του ενδιάμεσου είναι να διασφαλίζει καλή επαφή μεταξύ δυο επιφανειών σε μικροσκοπικό επίπεδο. Το ενδιάμεσο μπορεί είναι οποιοδήποτε υλικό που βοηθά τη διάδοση ακουστικών κυμάτων ανάμεσα σε δυο επιφάνειες, ενώ ο δεσμός (bond) κρατά σε επαφή τον αισθητήρα με την επιφάνεια.

Οι αισθητήρες τοποθετούνται , ανά δύο, αντιδιαμετρικά στο δοκίμιο και μένουν στη θέση τους με επιβολή πίεση από λάστιχο.

Οι παραμορφώσεις του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης καταγράφονται από μηχανοσυστοιχίες ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges). Τοποθετούνται κατά την περιφέρεια του δοκιμίου, με τη βοήθεια εποξικής ρητίνης, στο μέσο του περίπου, σε ζεύγος ώστε το ένα να καταγράφει την αξονική και το άλλο τη διαμετρική παραμόρφωση.

Το δοκίμιο θα φτάσει στη θραύση. Ο ρυθμός φόρτισης που επελέχθηκε ήταν 0,7 kN/s ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει σε περίπου δέκα λεπτά. Η τιμή αυτή προέκυψε από τα υπάρχοντα δεδομένα αντοχής των δοκιμίων ($\Delta 1$, $\Delta 3$, $\Delta 6$).

Το σύστημα παρακολούθησης AE του εργαστηρίου τεχνολογίας και διάνοιξης σπράγγων λειτουργεί βάση του προγράμματος PAC AE Win Windows Software και ενσωματώνει μία κάρτα οχτώ καναλιών PCI - 8 της ομώνυμης εταιρίας PAC. Η κάρτα αυτή αποτελεί ένα πλήρες σύστημα AE (“AE System on a Board”) και οι προδιαγραφές της είναι συνοπτικά οι ακόλουθες:

- Ψηφιακή κάρτα (Digital Signal Processing) υψηλής απόδοσης.
- Σύνθετη αντίσταση (impedance) 50 Ω.
- Ενσωματωμένο σύστημα αυτόματου ελέγχου των αισθητήρων AST (Auto Sensor Test).
- Απόκριση συχνότητας 1 kHz - 400 kHz.

- Όταν η ενίσχυση (gain) της κύριας μονάδας ρυθμίζεται στα 0 dB, 6 dB, 12 dB τότε η ελάχιστη τάση κατωφλιού επιλέγεται αντίστοιχα στα 26 dB, 20 dB, 16 dB.
- Μέγιστο πλάτος καταγεγραμμένου σήματος 100 dB.
- Οχτώ (8) κανάλια ΑΕ υψηλής ταχύτητας ανάκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 3 MSPS) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανόδου, υπερβάσεις κατωφλιού, συνολικές υπερβάσεις κατωφλιού, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κτλ.), προβολή παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο.
- Τέσσερα (4) φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass) (1 kHz, 5.0 kHz, 20 kHz, 100 kHz) και 4 φίλτρα διαχωρισμού υψηλών συχνοτήτων (Low Pass) (10 kHz, 40 kHz, 100 kHz, 400 kHz) για κάθε κανάλι, ελεγχόμενα από το software.
- Μετατροπέας A/D 16 bit (Digital Analog Converter - DAC), με μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 1 MSPS ανά κανάλι.
- Έως δύο (2) αναλογικά παραμετρικά κανάλια τα οποία μπορούν να αξιολογήσουν επιπλέον παραμετρικά στοιχεία όπως η παραμόρφωση, το φορτίο, η θερμοκρασία κτλ.

Οι παράμετροι που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής ήταν οι εξής:

1. Το πλάτος (Amplitude)
2. Η ενέργεια γεγονότος (Event Energy) : Η ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής.
3. Counts : Οι φορές που ένα σήμα ΑΕ πέρασει το κατώφλι (threshold)
4. Διάρκεια σήματος (Duration)
5. RMS (Root Mean Square) (σε Volts) : Ορίζεται ως το ανορθωμένο, χρονικά μέσο σήμα ΑΕ, μετρούμενο σε γραμμική κλίμακα. Αποτελεί απλουστευμένη μέτρηση της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της καταπόνησης.
6. ASL (Average Signal level) (σε dB): Αποτελεί το μέσο πλάτος του σήματος ΑΕ. Και αυτό αντίστοιχα αποτελεί απλουστευμένη μέτρηση της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της καταπόνησης.
7. Χρόνος Ανύψωσης (Risetime): Ο χρόνος στον οποίο ένα σήμα ΑΕ φτάνει στο μέγιστο του, αφότου διασχίσει για πρώτη φορά το όριο ανίχνευσης.
8. Counts to Peak : Ο αριθμός counts έως το σημείο που το κύμα φτάνει στο μέγιστο πλάτος του.
9. Μέση συχνότητα (Average frequency) του σήματος.
10. Συχνότητα Αντίχησης (Reverberation Frequency).

11. Ισχύς Σήματος (Signal Strength): Η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνεύσιμου σήματος ΑΕ. Επίσης γνωστό ως "σχετική ενέργεια" (relative energy).
12. Συνολική Εκλυόμενη Ενέργεια (Absolute Energy).

Χρησιμοποιήθηκε μία παράμετρος εξωτερικού μεγέθους (Parametric 1). Το μέγεθος αυτό εκφράζεται σε Volt και αποτελεί μία διαφορά δυναμικού dV με την οποία υπολογίζεται το ασκούμενο φορτίο και μετέπειτα η ασκούμενη τάση με χρήση γραμμικής συσχέτισης (Scale και Offset). Σε άλλες καταγραφές μπορεί να υπάρξουν περισσότερα μεγέθη (Parametric Inputs) που μπορούν να μετρηθούν και αποθηκευτούν ως μέρος της περιγραφής των σημάτων ΑΕ (θερμοκρασία, πίεση κ.α.). Το κατώφλι ορίστηκε στα 40dB.

Τέλος έγινε η επιλογή των χρονικών παραμέτρων. Το χρονικό διάστημα (μs) μεταξύ της πρώτης υπέρβασης του κατωφλιού και του μεγίστου του σήματος ΑΕ (PDT - Peak Definition Time) ρυθμίζεται στα 100 μs, ενώ η χρονική διάρκεια ενός κτύπου (HDT - Hit Definition Time) ρυθμίζεται στα 400 μs. Η ορθή επιλογή των χρονικών παραμέτρων εξασφαλίζει πως κάθε σήμα ΑΕ θα αντιστοιχεί σε έναν και μόνο κτύπο (hit). Ο HLT (Hit Lockout Time) ρυθμίζεται από το λογισμικό και διατηρείται ως έχει στα 500 μs.

Αποτελέσματα δοκιμής :

- Χρόνος δοκιμής: 586 s
- Φορτίο θραύσης: 359,2 kN
- Ρυθμός φόρτισης: 0,7 kN/s
- Τάση θραύσης: 169,2 MPa

Στη συνέχεια έγινε η επεξεργασία των δεδομένων στο πρόγραμμα Noesis. Το πρόγραμμα Noesis χρησιμοποιεί τα δεδομένα για τη χάραξη διαγραμμάτων συσχετίζοντας όσες παραμέτρους ζητηθούν από το χρήστη. Πέρα από τη χάραξη των διαγραμμάτων το Noesis δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων (export data) όλων των τιμών των παραμέτρων που μετρήθηκαν. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται με το πρόγραμμα excel.

Αρχικά μετατρέπουμε το parametric 1 από Volt σε τάση (MPa)

Γνωρίζοντας δύο τιμές για κάθε μέγεθος και δεδεμένου τη γραμμικότητας της συσχέτισης τους έχουμε:

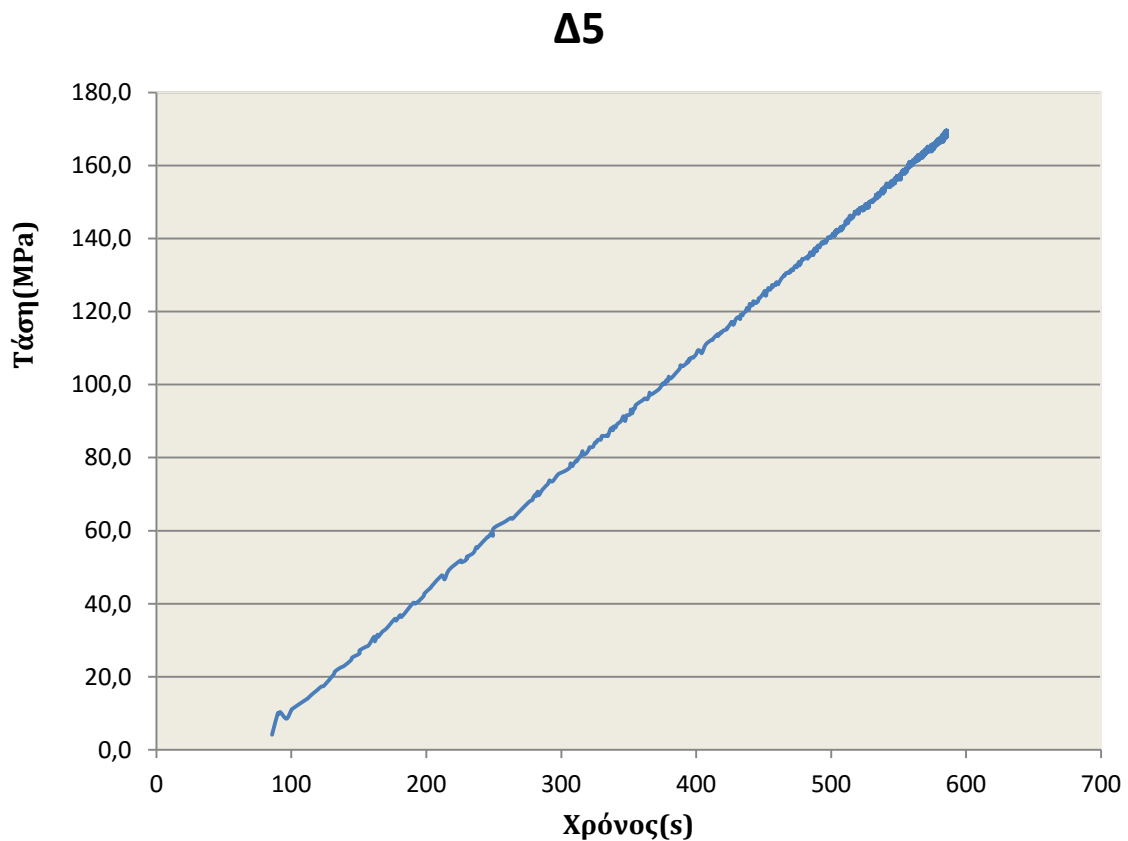
$$Scale=(\sigma_{\tau\epsilon\lambda}-\sigma_{\alpha\rho\chi})/(V_{\tau\epsilon\lambda}-V_{\alpha\rho\chi})=-889,47$$

$$\text{Offset} = \sigma_{\text{αρχ}} - \text{Scale} * V_{\text{αρχ}} = -2241,46$$

Οι αρχικές μετρήσεις καθώς και οι μετρήσεις μετά τη θραύση απορρίπτονται για την εξαγωγή των διαγραμμάτων.

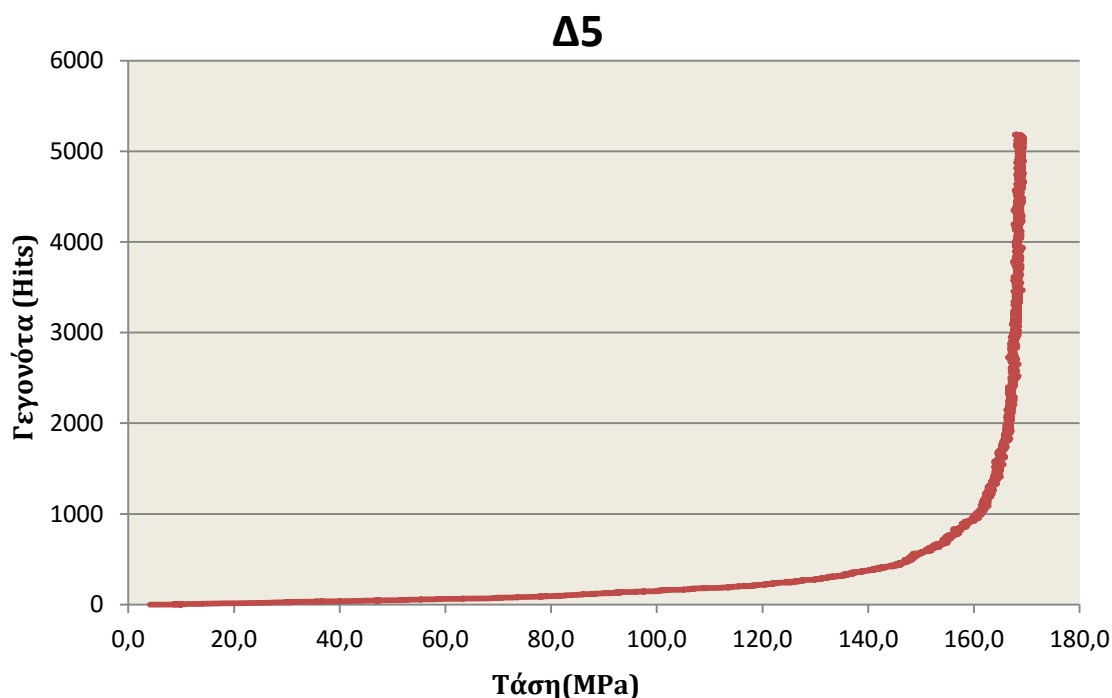
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποια από τα διαγράμματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα Noesis. Όπως αναμενόταν το διάγραμμα που αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της ανάλυσης είναι το διάγραμμα γεγονότων ΑΕ-Τάσης.

Αρχικά δίνεται το διάγραμμα Τάσης-Χρόνου ώστε να φανεί ότι πράγματι η επιβολή του φορτίου έγινε με σταθερό ρυθμό.



Σχήμα 4.30: Διάγραμμα τάσης-χρόνου κατά τη μονοαξονική φόρτιση στο δοκίμιο Δ5.

Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα γεγονότων ΑΕ-Τάσης:



Σχήμα 4.31: Διάγραμμα Τάσης-Αριθμού γεγονότων ΑΕ.

Σε πρώτη ανάλυση παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση της ακουστικής εκπομπής η οποία φτάνει σε πολύ υψηλά επίπεδα όσο ο δοκίμιο πλησιάζει στη θραύση. Αρχικά θα γίνει μία σύγκριση του διαγράμματος με τα αντίστοιχα των Eberhardt του **Σχήματος 2.14** (ειδική μορφή σχέσης μεταξύ της ΑΕ και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης για γρανίτη Lac du Bonnet) και Boyce et Al. του **Σχήματος 2.13** (γενική μορφή σχέσης μεταξύ της ΑΕ και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης).

Σύγκριση διαγραμμάτος Τάσης-ΑΕ με το διάγραμμα γρανιτή Lac du bonnet (**Σχήμα 2.14**) :

Τάση (%) επί της αντοχής σ_{ucs}	Καταγεγραμμένα γεγονότα (Events recorded) (%)	
	Δοκίμιο Δ5	Lac du Bonnet
0-50	2,3	3
50-75	2,7	12
75-90	7,1	15
90-100	87,9	70

Πίνακας 4.7: Σύγκριση διαγράμματος Τάσης-ΑΕ του δοκιμίου Δ5 με το γρανιτικό δείγμα Lac du Bonnet.

Παρατηρούμε πως για μικρές τιμές του φορτίου η συμπεριφορά της ακουστικής εκπομπής είναι παρόμοια. Ωστόσο μετά το 50% της αντοχής τα γεγονότα της ακουστικής εκπομπής στο γρανίτη Lac du Bonnet αυξάνονται με ταχύτερο ρυθμό. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει μεγαλύτερη διαβάθμιση στη ρωγμάτωση του γρανιτή Lac

du Bonnet ενώ στο πέτρωμα της παρούσας διπλωματικής φαίνεται πως η έντονη ρωγμάτωση συμβαίνει πολύ κοντά στη θραύση του δοκιμίου. Επίσης τα γεγονότα στο γρανίτη Lac du Bonnet είναι περίπου διπλάσια από τα γεγονότα που καταγράφηκαν στο δοκίμιο Δ5. Συνεπώς και η ρωγμάτωση του δοκιμίου Δ5 είναι λιγότερο έντονη. Με άλλα λόγια το πέτρωμα της παρούσας διπλωματικής είναι πιο ψαθυρό από το γρανίτη Lac du Bonnet.

Σύγκριση διαγραμμάτος Τάσης-ΑΕ με το διάγραμμα γενικής μορφής (Σχήμα 2.13):

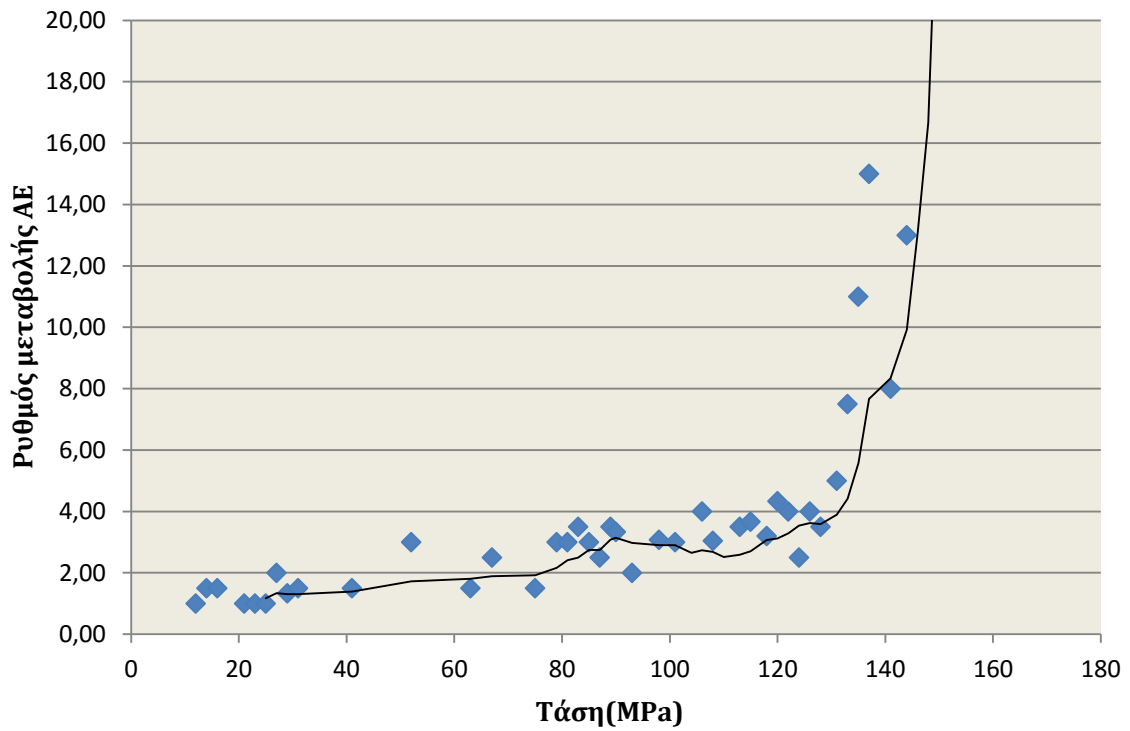
Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά της περιοχή ΑΒ (κλείσιμο των μικρορωγμών) δεν εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό στη περίπτωση του δοκιμίου του πειράματος. Έτσι συμπεραίνουμε πως η διαδικασία του κλεισίματος των μικρορωγμών (crack closure) δεν πήρε μεγάλες διαστάσεις κατά τη δοκιμή.

Η περιοχή ΒΓ (άρρηκτη φάση πετρώματος) παρουσιάζει μία κράτυνση ως προς τα γεγονότα ΑΕ και ταιριάζει ικανοποιητικά με τη συμπεριφορά του δοκιμίου μέχρι τα 75-80 MPa.

Στη συνέχεια η περιοχή ΓΔ(κατακλαστική ευσταθής φάση πετρώματος) έχει μία ανοδική σταθερή αύξηση της ΑΕ και προσομοιώνει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του δοκιμίου στην περιοχή 80-125 MPa.

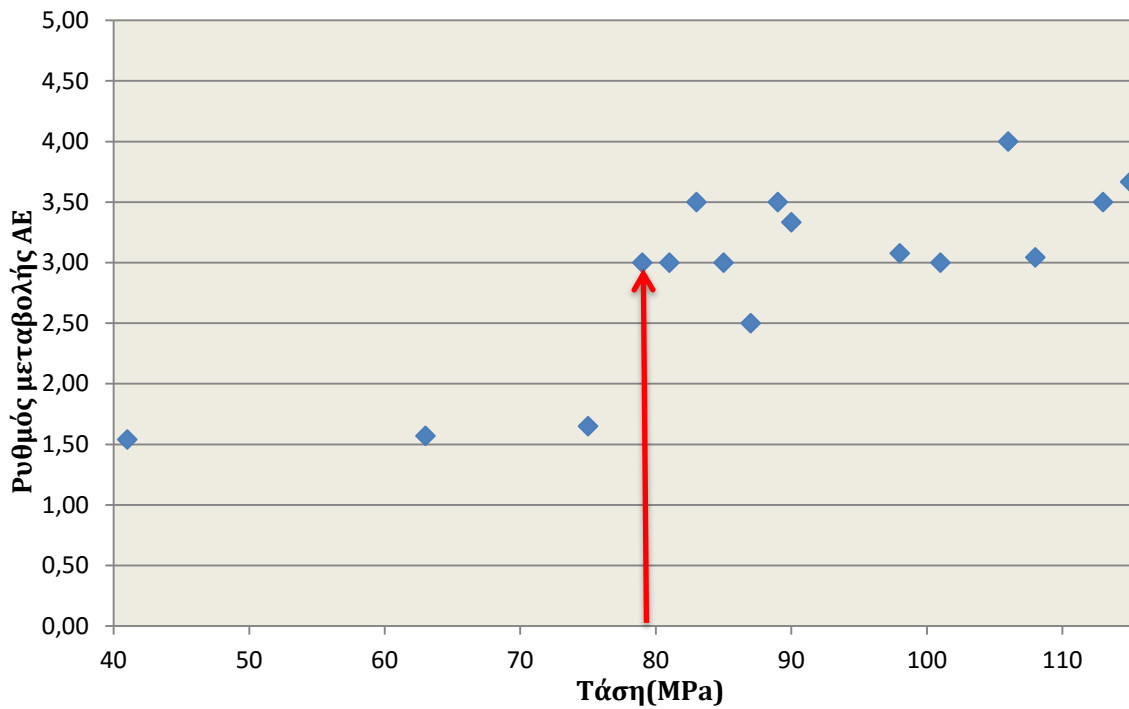
Ομοίως η περιοχή ΔΕ (κατακλαστική ασταθής φάση πετρώματος) έχει επίσης μία ανοδική σταθερή αύξηση της ΑΕ και προσομοιώνει τη συμπεριφορά του δοκιμίου στην περιοχή 125-169 MPa. Ωστόσο στη περίπτωση της φόρτισης του πειράματος παρατηρείται μία διφασική συμπεριφορά (αλλαγή κλίσης στα 145 MPa). Η έρεση των σταδίων ρωγμάτωσης δεν είναι ιδιαιτέρως εύκολη με το διάγραμμα αυτό αν κι έχουν προσδιοριστεί τα σημεία αναφοράς. Για περαιτέρω ανάλυση θα υπολογιστεί και θα σχεδιαστεί το διάγραμμα του ρυθμού μεταβολής των γεγονότων ΑΕ και της τάσης. Θεωρητικά για τον ρυθμό μεταβολής της ΑΕ αναμένεται:

1. μία σταθερή τιμή στο τμήμα κλεισίματος των μικρορωγμών και στην ελαστική περιοχή.
2. σκαλοπάτι και συνεχής αύξηση μεταξύ του ανοίγματος των ρωγμών και την τάση ασταθούς διάδοσης των μικρορωγμών.
3. σκαλοπάτι στην τάση ασταθούς διάδοσης των μικρορωγμών και συνεχής αύξηση έως τη θραύση.



Σχήμα 4.32: Ρυθμός μεταβολής γεγονότων ΑΕ-Τάση.

Με επεξεργασία του διαγράμματος είναι εφικτή η προσέγγιση των τάσεων σ_{ci} και σ_{cd} . Αρχικά θα εστιάσουμε στην περιοχή κοντά που παρατηρείται το πρώτο σκαλοπάτι της κλίσης (**Σχήμα 4.33**).



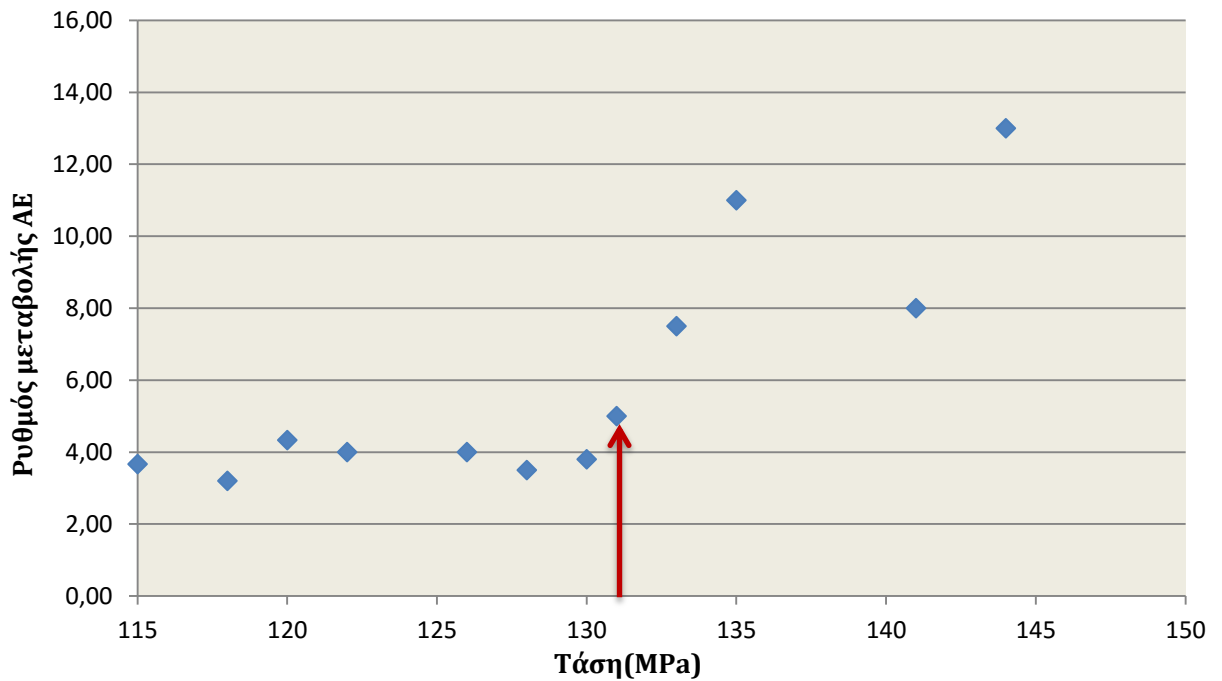
Σχήμα 4.33: Ρυθμός μεταβολής γεγονότων ΑΕ-Τάση με εστίαση στην περιοχή 40-110 MPa.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος **4.33**, το πρώτο σκαλοπάτι συμβαίνει περίπου στα 78,5 MPa και μας υποδεικνύει την τάση έναρξης της μικρορωγμάτωσης σ_{ci} .

Έτσι από τα δεδομένα του αριθμού γεγονότων ΑΕ σε συσχέτιση με την τάση εξάγεται η ποσοστιαία τιμή της τάσης έναρξης της μικρορωγμάτωσης:

$$\sigma_{ci(AE)} = \frac{78,5}{169,69} \% \sigma_{ucs(AE)} = 46\% \sigma_{ucs(AE)}$$

Στη συνέχεια θα γίνει εστίαση στην περιοχή που συμβαίνει η δεύτερη απότομη αλλαγή της κλίσης.



Σχήμα 4.34: Κλίση διαγράμματος τάσης-αριθμού γεγονότων ΑΕ με εστίαση στην περιοχή 115-150 MPa.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 4.34**, το πρώτο σκαλοπάτι συμβαίνει περίπου στα 131,5 MPa και μας υποδεικνύει την τάση έναρξης της μικρορωγμάτωσης σ_{ci} .

Έτσι από τα δεδομένα του αριθμού γεγονότων ΑΕ σε συσχέτιση με την τάση εξάγεται η ποσοστιαία τιμή της τάσης ασταθούς διάδοσης της μικρορωγμάτωσης:

$$\sigma_{cd(AE)} = \frac{131,5}{169,69} \% \sigma_{ucs(AE)} = 77\% \sigma_{ucs(AE)}$$

Από τα δεδομένα ΑΕ προέκυψαν ακόμη πολλά διαγράμματα τα οποία όμως δεν ήταν ιδιαίτερος ωφέλιμα για το σκοπό της έυρεσης των τάσεων σ_{ci} και σ_{cd} . Ωστόσο πολλά από αυτά λειτουργούν σαν μία μορφή επιβεβαίωσης της ορθής επιλογής που έγινε μέσω της συσχέτισης τάσης-αριθμού γεγονότων ΑΕ. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π-6.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων προσέγγισης των τάσεων σ_{ci} και σ_{cd} (δεδομένα παραμόρφωσης και ΑΕ) συμφωνούν σε πολύ καλό βαθμό. Η τάση έναρξης της μικρορωγμάτωσης κυμαίνεται στο 47-48 % ενώ η τάση διάδοσης των μικρορωγμών στο 77-78 % της αντοχής του δοκιμίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΔΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

5.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

5.1.1 Καταγραφή ταχυτήτων σε ποσοστά της αντοχής των δοκιμίων

Η αρχική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιελάμβανε τη φόρτιση των δοκιμίων σε διάφορα ποσοστά της αντοχής τους και στη συνέχεια τη μέτρηση των ταχυτήτων διάδοσης υπερήχων. Τα στάδια φόρτισης έγιναν σε ποσοστά: 10% , 20% , 40%, 60%, 70% ,80%, 90% επί της αντοχής. Στην τελευταία φόρτιση το δοκίμιο έφτανε στη θραύση. Θεωρητικά οι ταχύτητες αναμένονται σχετικά αμετάβλητες έως την έναρξη της μικρορωγμάτωσης (περίπου στο 48% της αντοχής του πετρώματος όπως υπολογίστηκε στο **υπόκεφαலைο 4.5**). Μετά την τάση σ_{ci} οι ταχύτητες θα πρέπει να μειώνονται ως αποτέλεσμα της μικρορωγμάτωσης εσωτερικά του πετρώματος. Η μείωση αυτή θα πρέπει να εντείνεται περισσότερο μετά την τάση ασταθούς διάδοσης των μικρορωγμών σ_{cd} , δηλαδή σε ποσοστό περίπου 78% της αντοχής του πετρώματος (**υπόκεφαலைο 4.5**). Στην τριαξονική δοκιμή η μεθοδολογία αυτή ήταν επιτυχής και καταγράφηκαν αξιοσημείωτες μειώσεις των ταχυτήτων. Ωστόσο στη μονοαξονική δοκιμή η μεθοδολογία αυτή δεν έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Η μείωση των ταχυτήτων που προέκυψε ήταν πολύ μικρή (0,1%-0,5%). Το γεγονός αυτό δεν σημαίνει ότι υπήρξε κάποιο σφάλμα της μεθοδολογίας ή του θεωρητικού υποβάθρου αλλά πως για το συγκεκριμένο πέτρωμα, υπό μονοαξονικές συνθήκες φόρτισης, η μείωση των ταχυτήτων μετά την έναρξη και διάδοση των μικρορωγμών συμβαίνει σε μικρότερο βαθμό. Ουσιαστικά, λόγω της ψαθυρής φύσης του πετρώματος, οι μικρορωγμές εξαπλώνονται και διαδίδονται σε μεγάλο βαθμό (σχεδόν ακαριαία) πολύ κοντά στη θραύση ωστόσο δεν είναι εφικτή η μέτρηση των ταχυτήτων σε αυτήν την κατάσταση για τα δοκίμια της μονοαξονικής θλίψης. Οι μετρήσεις αυτές είναι αξιοσημείωτες και αποτελούν σημαντικό αποτέλεσμα της παρούσας διπλωματικής.

5.1.2 Καταγραφή ταχυτήτων με βάση τους δείκτες ρωγμάτωσης

Δεδομένου ότι η ρωγμάτωση συμβαίνει σε μεγάλο βαθμό αλλά κοντά στη θραύση όπου η καταγραφή των ταχυτήτων δεν είναι δυνατή, αποφασίστηκε η επιλογή μιας διαφορετικής μεθοδολογίας ώστε να προκύπτει σημαντική ρωγμάτωση των δοκιμίων χωρίς αυτά να φτάσουν στη θραύση. Έτσι σε μία τέτοια κατάσταση θα είναι εφικτή η

καταγραφή των ταχυτήτων. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

Η πρώτη φόρτιση έφτανε σε ποσοστό 85%-90% της αντοχής του δοκιμίου έτσι ώστε να έχει ξεπεράσει την τάση ασταθούς διάδοσης μικρορωγμών (crack damage). Στη συνέχεια αφού γινόταν η καταγραφή των ταχυτήτων, το δοκίμιο επαναφορτιζόταν σε ποσοστά της αρχικής αντοχής του όπως και στην αρχική μεθοδολογία. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα δίκτυο ρωγμών στην πρώτη φόρτιση και οι μετέπειτα φορτίσεις ουσιαστικά το επεκτείνουν χωρίς να καταστρέφουν το δοκίμιο. Προφανώς μετά την πρώτη φόρτιση (crack damage) έχει γίνει απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος και συνεπώς η αντοχή του δεν παραμένει ίδια με την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Τα ποσοστά επαναφόρτισης βρίσκονται σε συσχέτιση με την αρχική αντοχή του δοκιμίου ώστε να υπάρχει ένας κοινός παρονομαστής ανάμεσα στα δοκίμια κατά την πειραματική διαδικασία. Σε κάθε στάδιο επαναφόρτισης καταγράφονται οι ταχύτητες υπερήχων.

Επιπλέον, στην μεθοδολογία αυτή, είναι ευνόητο πως δεν έχει νόημα η συσχέτιση των ταχυτήτων με τα στάδια ρωγμάτωσης όπως παρουσιάστηκαν στο **υποκεφάλαιο 2.1**. Για το λόγο αυτό έγινε η προσπάθεια της καταγραφής της ρωγμάτωσης στα διάφορα επίπεδα φόρτισης. Χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες P_{10} , P_{20} και P_{21} (**υποκεφάλαιο 2.4**) για την αποτύπωση της εξωτερικής ρωγμάτωσης των δοκιμίων. Αρτιότερη θα ήταν η καταγραφή της ρωγμάτωσης στο εσωτερικό του πετρώματος καθώς δεν είναι απαραίτητο η διάδοση των ρωγμών να αποτυπωθεί εξωτερικά των δοκιμίων. Ωστόσο για την καταγραφή αυτή απαιτείται η χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Να σημειωθεί πως σε αυτή τη μεθοδολογία εφόσον κατά την πρώτη φόρτιση γίνεται υπέρβαση του σ_{cd} , η μετέπειτα ρωγμάτωση περνάει σε μακροσκοπικό επίπεδο. Στα επόμενα στάδια επαναφόρτισης δεν έχουμε μικρορωγμάτωση αλλά επέκταση των ήδη διαμορφωμένων ρωγμών. Γι'αυτό άλλωστε είναι εφικτή και η καταγραφή πολλών από αυτών των ρωγμών στην επιφάνεια του δοκιμίου.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

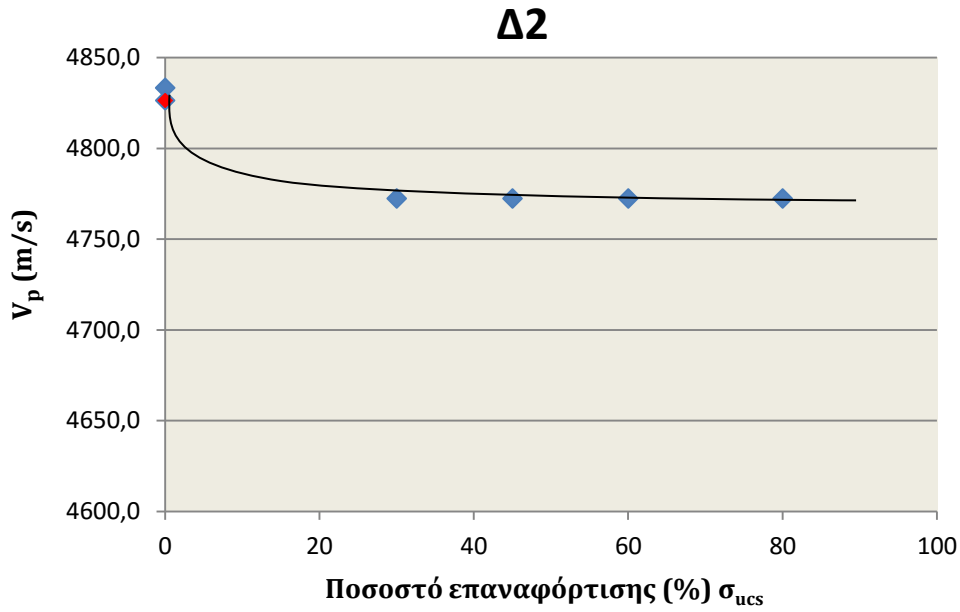
Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της καταγραφής των ταχυτήτων στα επίπεδα φόρτισης για ένα τυπικό δοκίμιο και συγκεκριμένα για το Δ2.

Η αρχική φόρτιση έγινε στα 160 MPa όπου το δοκίμιο έφτασε κοντά στη θραύση. Μάλιστα εμφανίστηκε μία ρωγμή στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου η οποία και κατεγράφη. Στην συνέχεια έγινε επαναφόρτιση σε ποσοστά 30%, 45%, 60%, 80% της αρχικής αντοχής. Στην φόρτιση σε ποσοστό 90% της αντοχής, το δοκίμιο αστόχησε (αφού οι μηχανικές του ιδιότητες έχουν απομειωθεί λόγω της ρωγμάτωσης). Τα αποτελέσματα της καταγραφής των ταχυτήτων υπερήχων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.1**. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d , το δυναμικό μέτρο διάτμησης G_d και ο δυναμικός λόγος Poisson ν_d υπολογίζονται από τις σχέσεις 4.9, 4.10, 4.11.

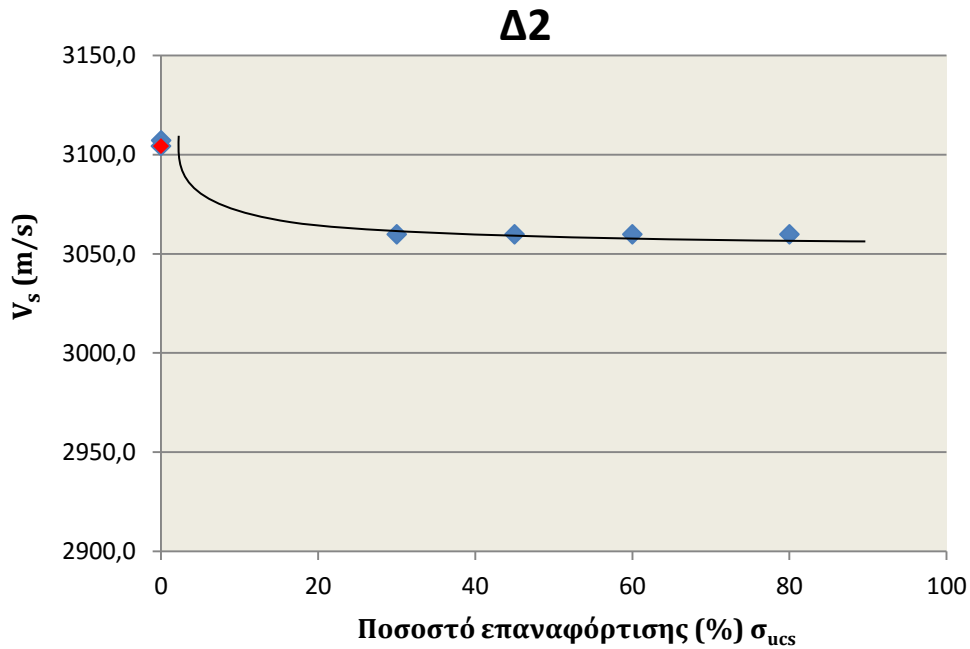
Δοκίμιο Δ2	Τάση επαναφόρτισης (%) σ_{ucs} (MPa)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	E_d (GPa)	ν	G_d (GPa)
Αρχική Κατάσταση	0	4826,42	3104,37	58,25	0,148	27,09
Φόρτιση στα 160MPa	0	4826,42	3104,37	58,12	0,147	26,50
Επαναφόρτιση στα 48 MPa	30	4772,39	3059,81	56,66	0,151	26,50
Επαναφόρτιση στα 72 MPa	45	4772,39	3059,81	56,66	0,151	26,50
Επαναφόρτιση στα 96 MPa	60	4772,39	3059,81	56,66	0,151	26,50
Επαναφόρτιση στα 128MPa	80	4772,39	3059,81	56,66	0,151	26,50
Θραύση	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα καταγραφής ταχυτήτων υπερήχων και υπολογισμού των δυναμικών παραμέτρων σε στάδια επαναφόρτισης.

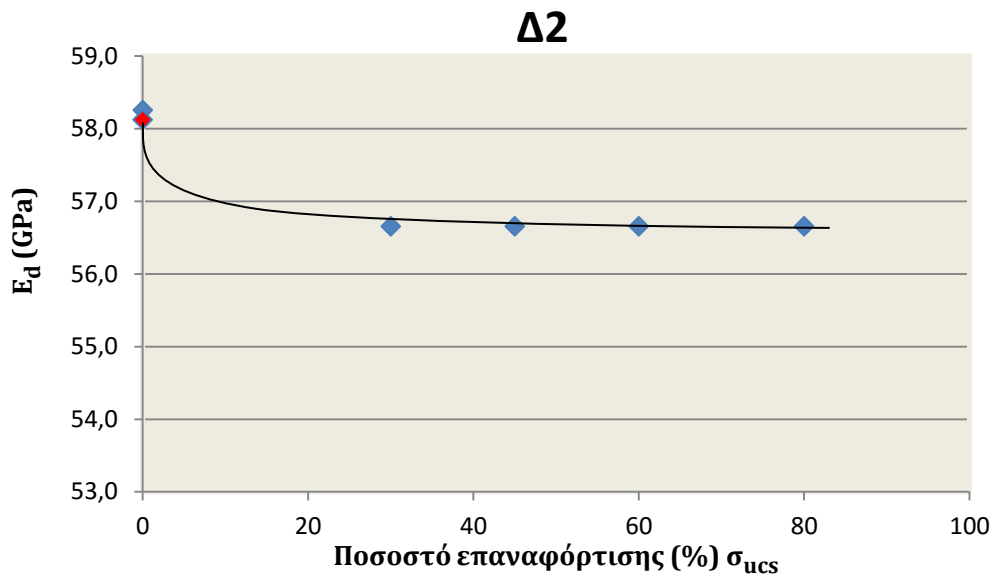
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα μέτρησης των ταχυτήτων υπερήχων στο δοκίμιο Δ2. Στα διαγράμματα θα επισημαίνεται με διαφορετικό χρώμα το σημείο της πρώτης φόρτισης ώστε να μην υπάρχει σύγχυση με το σημείο της αρχικής κατάστασης (αφού και στα δύο έχει οριστεί συμβατικά μηδενικό ποσοστό επαναφόρτισης).



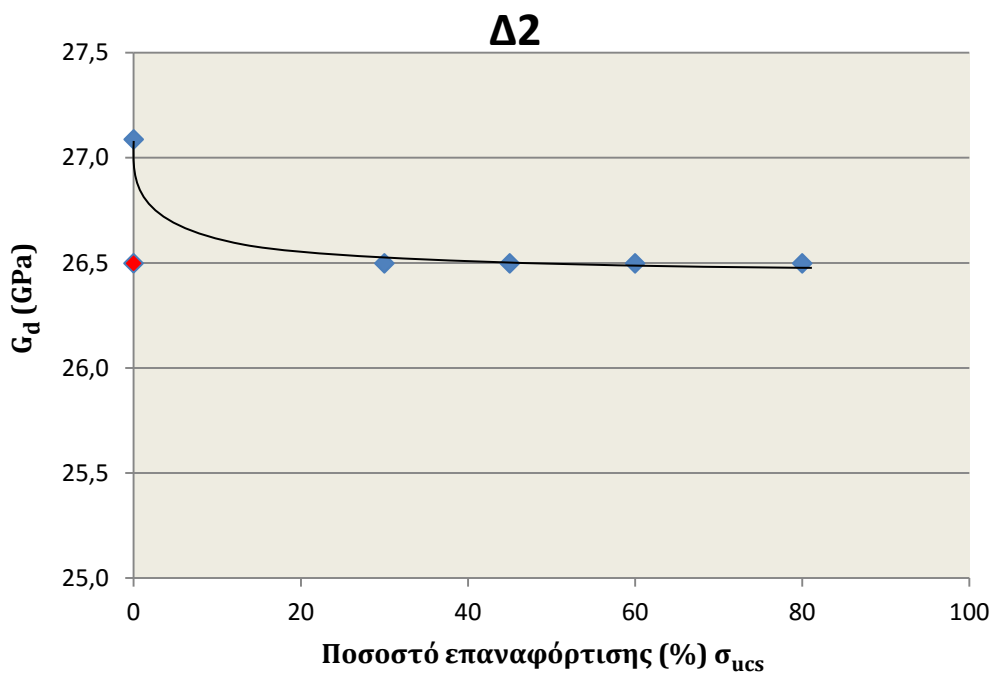
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ταχυτήτων επιμήκων κυμάτων V_p σε συσχέτιση με το ποσοστό επαναφόρτισης του δοκιμίου. Το σημείο που εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει την ταχύτητα μετά την πρώτη φόρτιση.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ταχυτήτων εγκάρσιων κυμάτων V_s σε συσχέτιση με το ποσοστό επαναφόρτισης του δοκιμίου. Το σημείο που εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει την ταχύτητα μετά την πρώτη φόρτιση.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα δυναμικού μέτρου διάτμησης E_d σε συσχέτιση με το ποσοστό επαναφόρτισης του δοκιμίου. Το σημείο που εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει την ταχύτητα μετά την πρώτη φόρτιση.

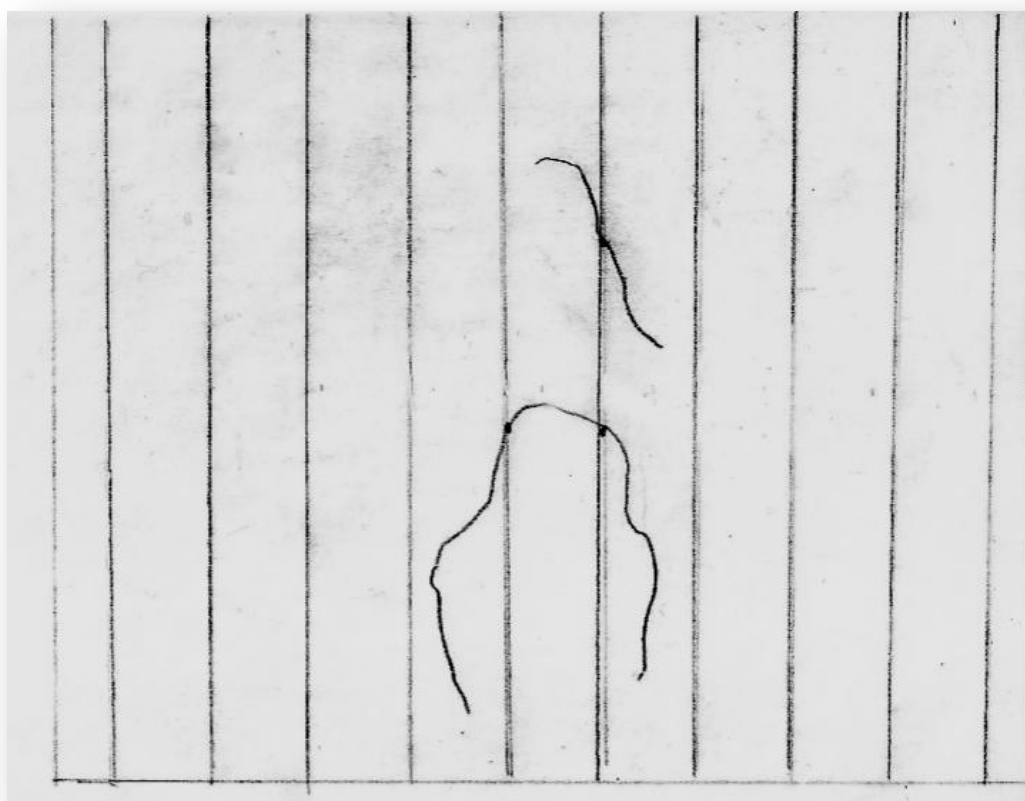


Σχήμα 5.4: Διάγραμμα δυναμικού μέτρου ελαστικότητας G_d σε συσχέτιση με το ποσοστό επαναφόρτισης του δοκιμίου. Το σημείο που εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει την ταχύτητα μετά την πρώτη φόρτιση.

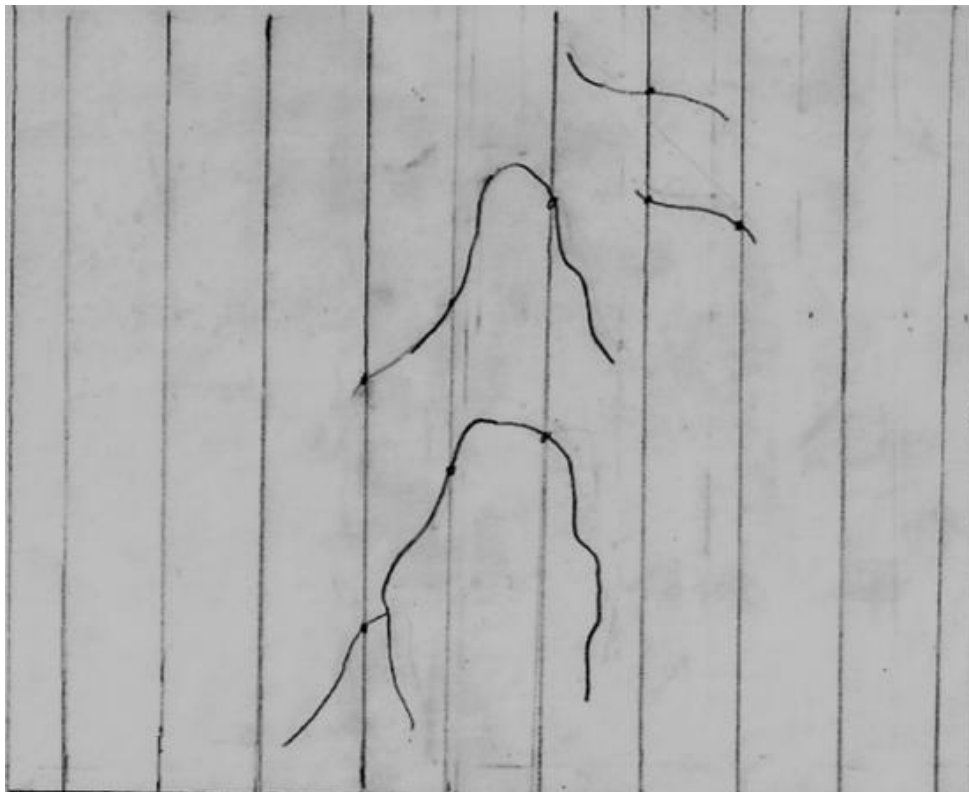
Η μείωση που παρατηρείται στις ταχύτητες επιμήκων και διατμητικών κυμάτων είναι 1,26% και 1,50% αντίστοιχα. Επιπροσθέτως σημειώνεται ότι μετά την φόρτιση στο 30% της αρχικής αντοχής και μέχρι τη θραύση δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στις μετρήσεις.

Επιπλέον, στο δοκίμιο έγινε η αποτύπωση της ρωγμάτωσης με τη χρήση των δεικτών P_{10} , P_{20} , P_{21} . Η διαδικασία της αποτύπωσης περιγράφεται στο **υπόκεφαலைο 2.5**. Η ρωγμάτωση παρουσιάστηκε στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου από την πρώτη φόρτιση (160 MPa) και έμεινε (εξωτερικά τουλάχιστον αναλλοίωτη) μέχρι και τη φόρτιση στο 30% της αρχικής αντοχής. Στη συνέχεια οι ρωγμές αυτές επεκτάθηκαν κατά την επόμενη φόρτιση στο 45% της αρχικής αντοχής και παρέμειναν και πάλι αμετάβλητες έως τη θραύση. Στην κατάσταση θραύσης έγινε επίσης αποτύπωση της ρωγμάτωσης.

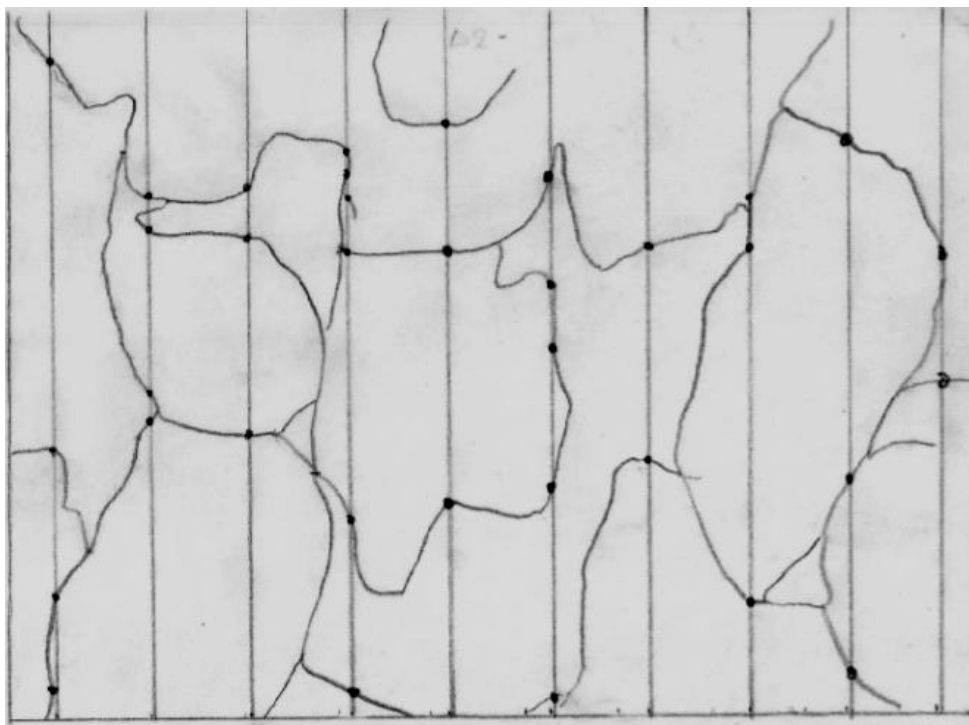
Παρακάτω παρουσιάζεται η αποτύπωση της ρωγμάτωσης.



Σχήμα 5.5: Αποτύπωση ρωγμάτωσης για το δοκίμιο Δ2 από την πρώτη φόρτιση (crack damage) έως τη φόρτιση στο 30% της αρχικής αντοχής



Σχήμα 5.6: Αποτύπωση ρωγμάτωσης για το δοκίμιο Δ2 από τη φόρτιση στο 45% της αρχικής αντοχής του έως τη θραύση του.



Σχήμα 5.7: Αποτύπωση ρωγμάτωσης του δοκιμίου Δ2 στη θραύση του.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών ρωγμάτωσης. Η μέτρηση του μήκους των ρωγμών έγινε με χρήση του προγράμματος AutoCAD (2013).

Δοκίμιο Δ2	Τάση επαναφόρτισης (%) σ_{ucs} (MPa)	P_{20} (ίχνη/ m^2)	P_{10} (ίχνη/m)	P_{21} (cm/ cm^2)
Αρχική Κατάσταση	0	0,000	0,000	0,000
Φόρτιση στα 160MPa	0	14,354	2,346	0,074
Επαναφόρτιση στα 48 MPa	30	14,354	2,346	0,074
Επαναφόρτιση στα 72 MPa	45	43,063	7,037	0,134
Επαναφόρτιση στα 96 MPa	60	43,063	7,037	0,134
Επαναφόρτιση στα 128MPa	80	43,063	7,037	0,134
Θραύση	-	167,468	27,365	0,493

Πίνακας 5.2: Δείκτες ρωγμάτωσης στα στάδια φόρτισης του δοκιμίου Δ2.

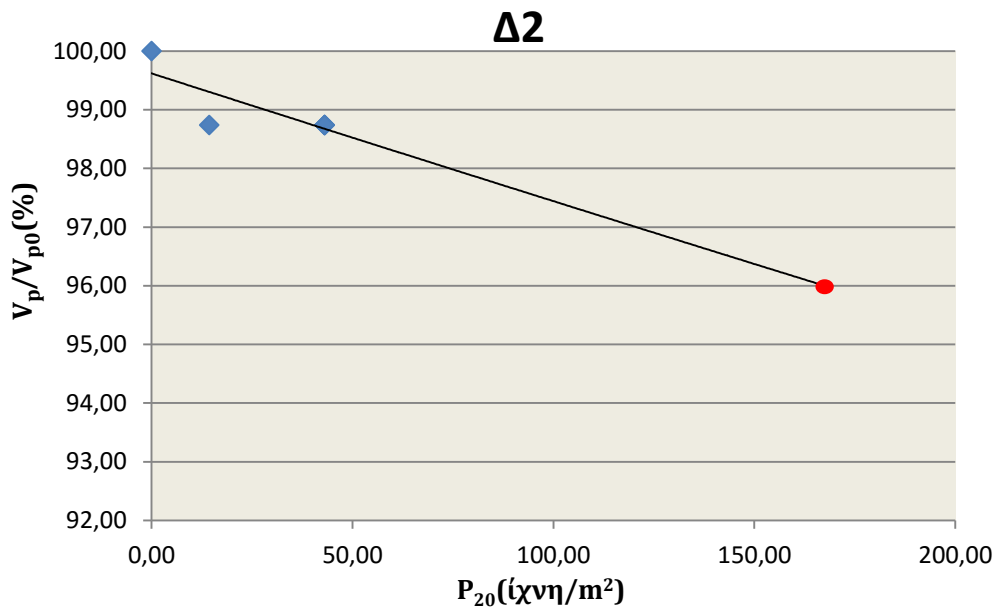
Στο παράρτημα 1 παρουσιάζεται ολοκληρωμένος ο πίνακας με όλα τα βοηθητικά μεγέθη που χρειάστηκαν για τον υπολογισμό των δεικτών (ίχνη, γραμμές και μήκος ρωγμάτωσης).

Παρακάτω παρουσιάζεται το δοκίμιο Δ2 πριν και μετά τη θραύση.

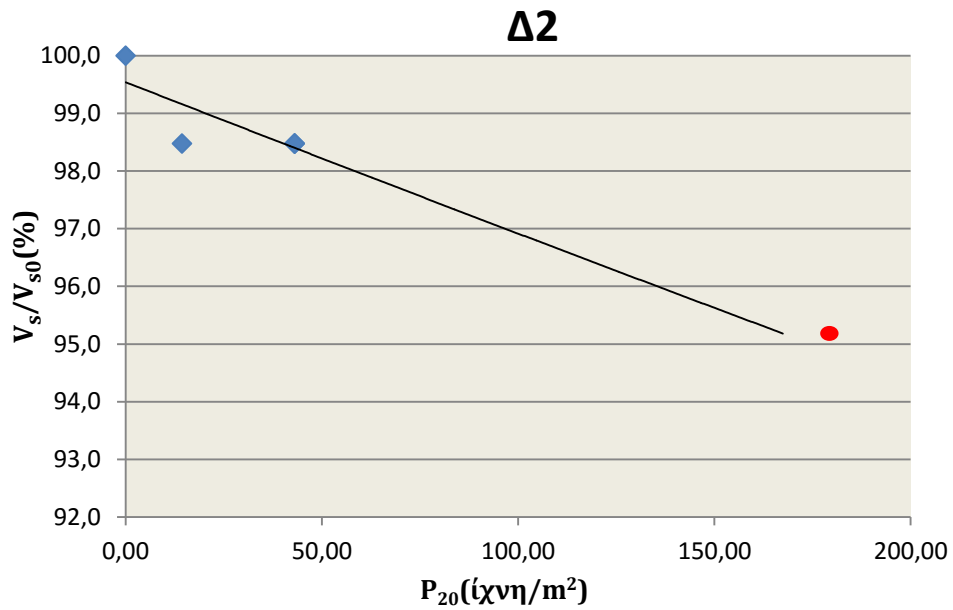


Σχήμα 5.8: Φωτογραφία δοκιμίου Δ2 πριν και μετά τη θραύση.

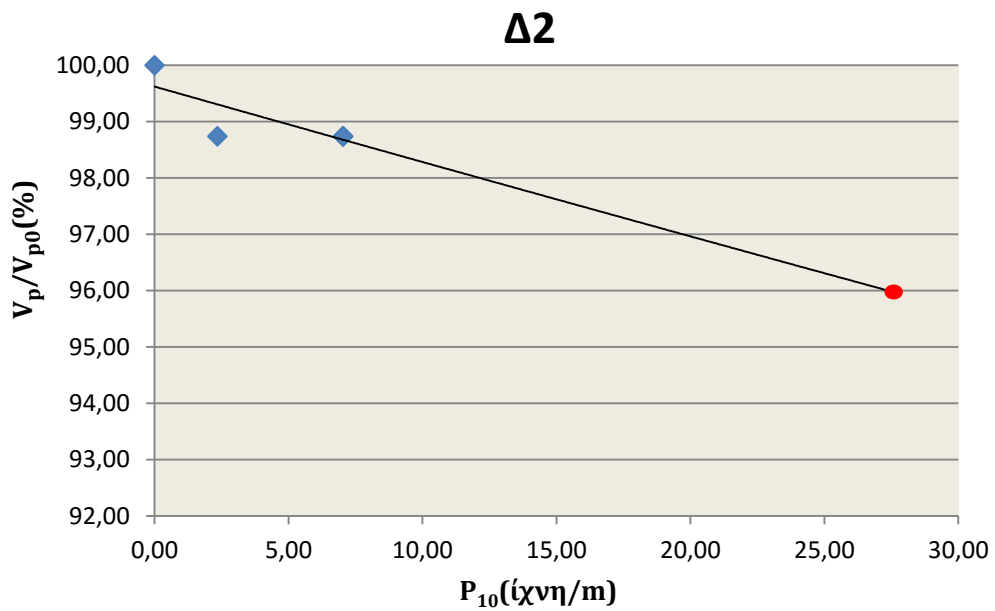
Στη συνέχεια έγινε η συσχέτιση των δεικτών με τις καταγεγραμμένες ταχύτητες. Στα διαγράμματα που ακολουθούν σημειώνεται με διαφορετικό χρώμα το σημείο με τους δείκτες που αποτυπώθηκαν στη θραύση του δοκιμίου. Δεν υπάρχουν δεδομένα για τη συγκεκριμένη κατάσταση αλλά πρόβλεψη (forecast) μέσω χρήσης εκθετικής συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά των ταχυτήτων. Έτσι γίνεται η προσπάθεια προσέγγισης της μείωσης τους σε ρωγμάτωση αντίστοιχη με αυτήν που παρουσιάζει το δοκίμιο στη θραύση του. Οι ταχύτητες παρουσιάζονται σε ποσοστιαία κλίμακα.



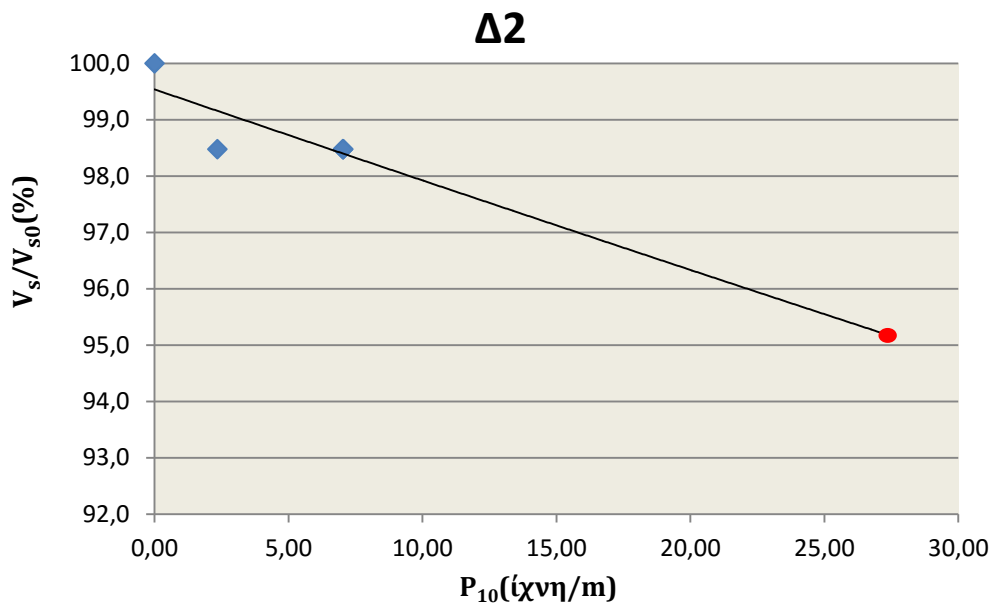
Σχήμα 5.9: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{20} .



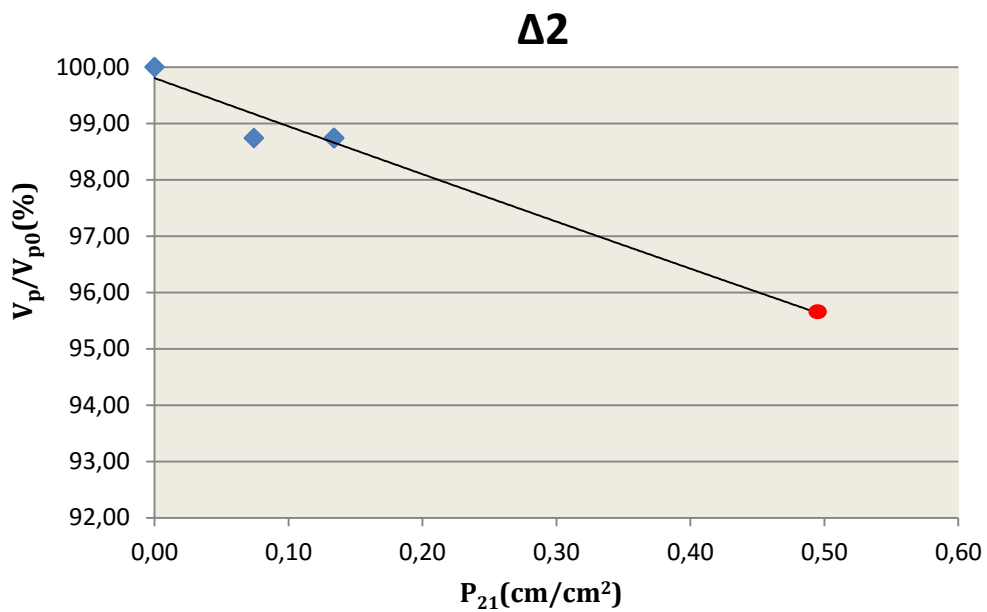
Σχήμα 5.10: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_s σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{20} .



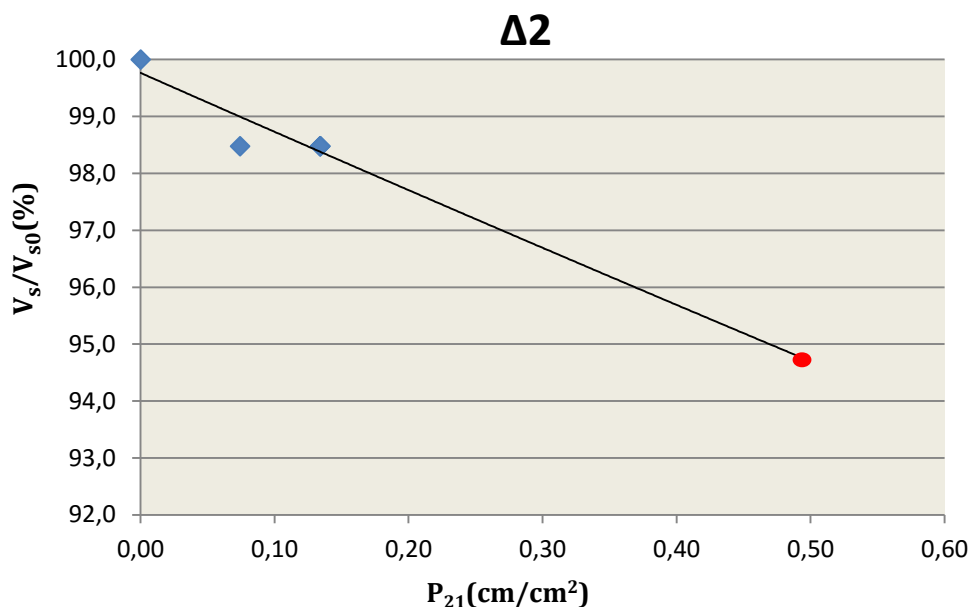
Σχήμα 5.11: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{10} .



Σχήμα 5.12: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_s σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{10} .



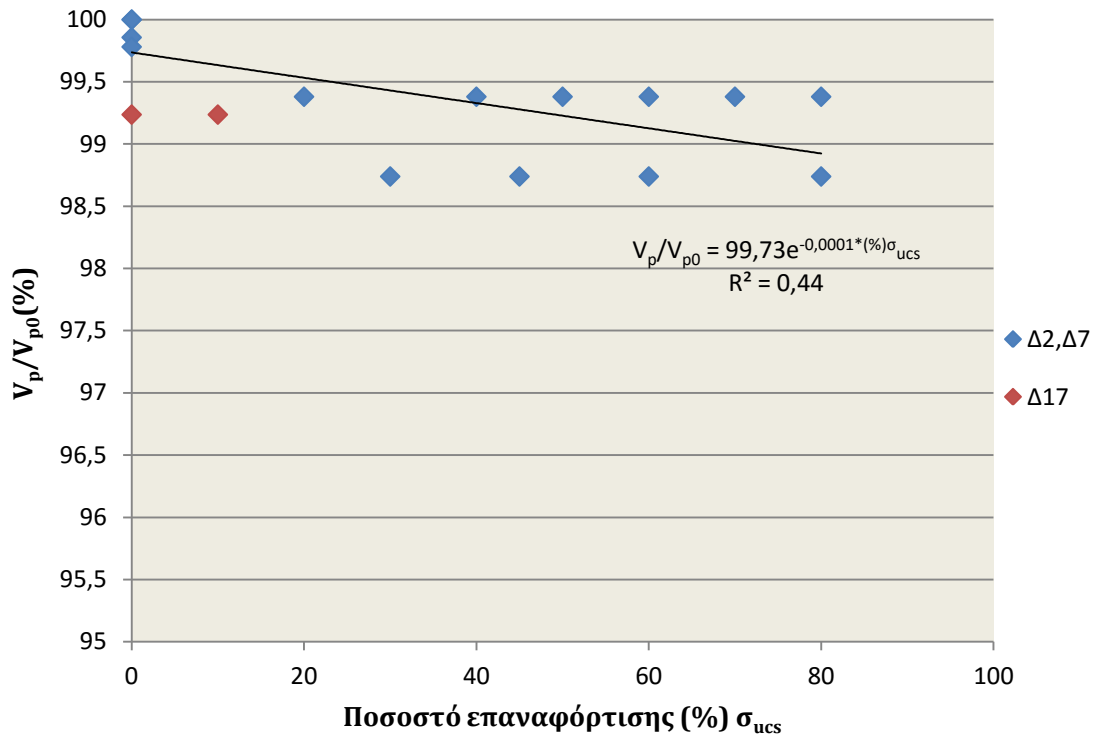
Σχήμα 5.13: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{21} .



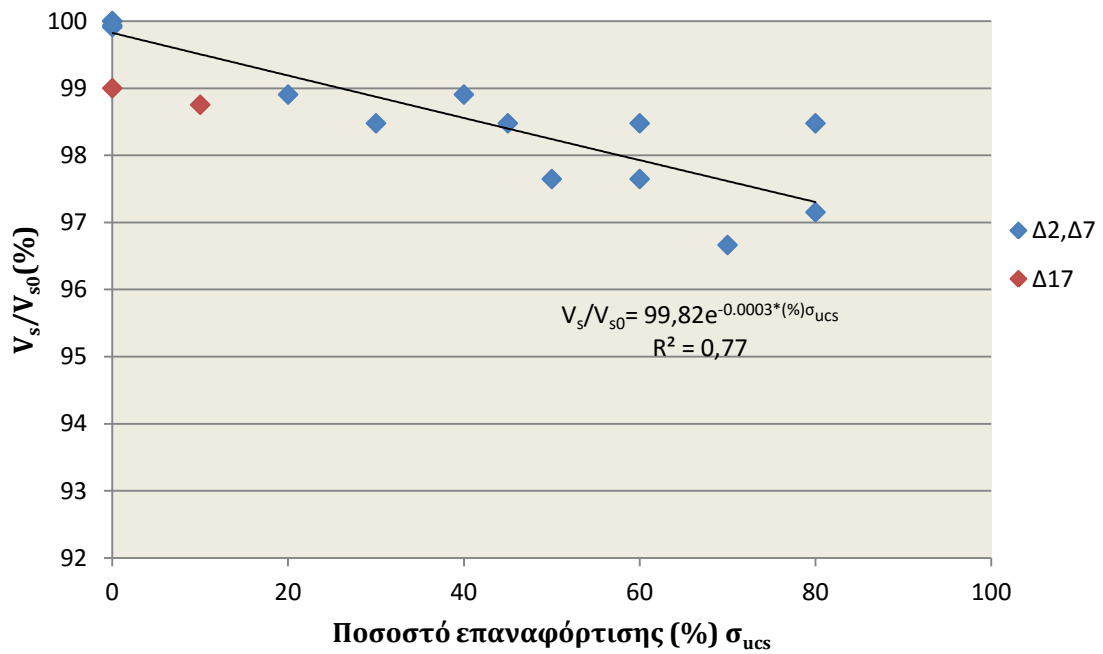
Σχήμα 5.14: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_s σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{21} .

Η ίδια μεθοδολογία ακολουθηθήκε και στα δοκίμια Δ7 και Δ17. Για το Δ7 η μεταβολή των ταχυτήτων είχε παρόμοια συμπεριφορά με εκείνη του Δ2. Το Δ17 παρουσίασε μία ασυνέχεια συνέπως δεν μπορεί να θεωρηθεί εντελώς άρρηκτο. Έτσι έγινε μία προσέγγιση μειωμένης αντοχής και η πειραματική διαδικασία φόρτισης συνεχίστηκε κανονικά. Το δοκίμιο αστόχησε μόλις στο δεύτερο στάδιο επαναφόρτισης (20% της αρχικής θεωρητικής αντοχής) χωρίς να εμφανίσει περαιτέρω ρωγμάτωση στην εξωτερική επιφάνεια του από την αρχική. Τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα της ρωγμάτωσης και μεταβολής των ταχυτήτων για τα δοκίμια Δ7 και Δ17 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π-2.

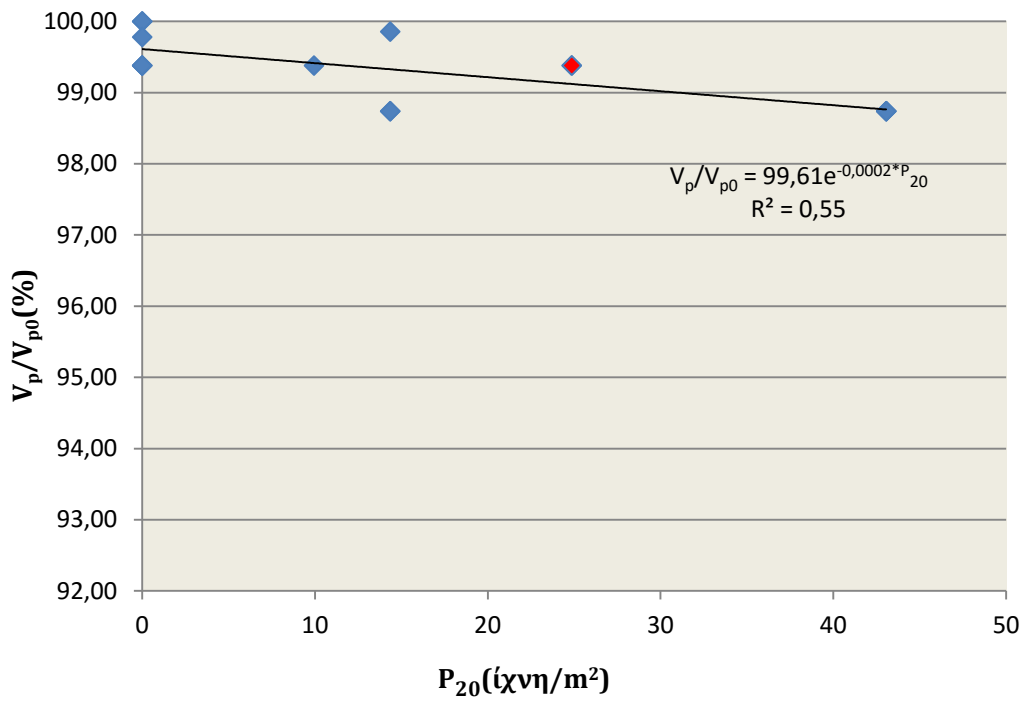
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεταβολής των ταχυτήτων για όλα τα δοκίμια στην δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



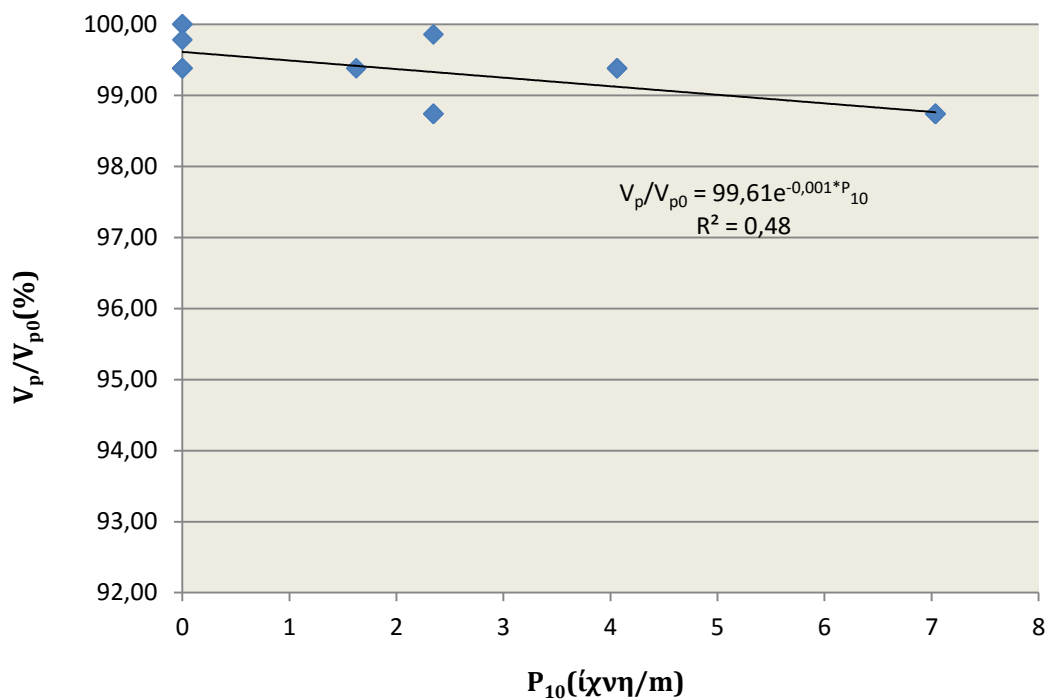
Σχήμα 5.15: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με τα ποσοστά επαναφόρτισης για όλα τα δοκίμια στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



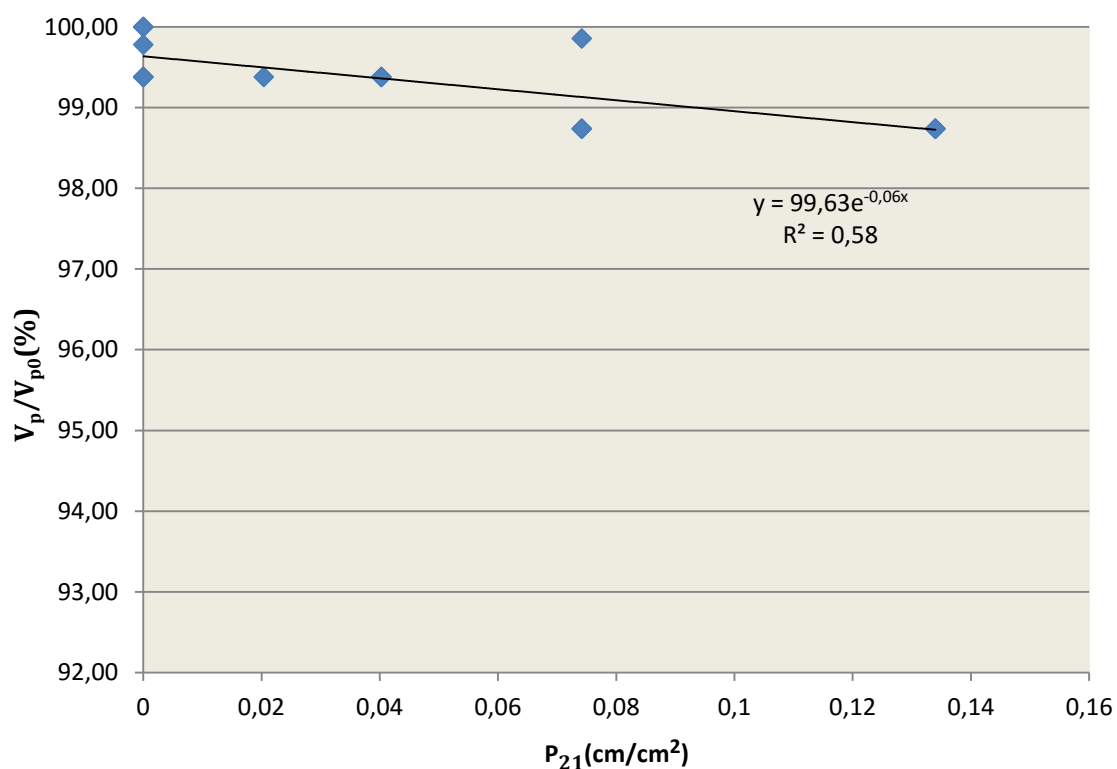
Σχήμα 5.16: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_s σε σύγκριση με τα ποσοστά επαναφόρτισης για όλα τα δοκίμια στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 5.17: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{20} .



Σχήμα 5.18: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{10} .



Σχήμα 5.19: Ποσοστιαίο διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτων P_{21} .

Από τα **Σχήματα 5.15, 5.17, 5.18 και 5.19** φαίνεται η μεταβολή των ταχυτήτων επίμηκων κυμάτων V_p . Η μείωση των ταχυτήτων δεν παίρνει μεγάλες διαστάσεις (μέγιστη μείωση 1,25%) ενώ η συσχέτιση των αποτελεσμάτων κρίνεται μέτρια. Στις ταχύτητες V_s δεν παρατηρείται καλή συσχέτιση των αποτελεσμάτων. Η μείωση είναι αρκετά μεγαλύτερη (μέγιστη μείωση 2,85 %). Με περισσότερα δεδομένα είναι πιθανό η συσχέτιση στη μείωση των ταχυτήτων V_s να ήταν καλύτερη.

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Στη δοκιμή της τριαξονικής θλίψης ακολουθήθηκε η αρχική μεθοδολογία μέτρησης των ταχυτήτων (υποκεφάλαιο 5.1.1) αφού υπήρχε μεγαλύτερη μείωση των ταχυτήτων σε σχέση με τα δοκίμια της μονοαξονικής θλίψης. Το πλεονέκτημα της δοκιμής έγκειται στο γεγονός ότι η καταγραφή των ταχυτήτων είναι δυνατή και στη θραύση.

Οι δοκιμές έγιναν σε πλευρικές τάσεις 10, 15, 20, και 30 MPa. Στις τάσεις 10,20 και 30 MPa έχουν γίνει δοκιμές θραύσεις συνεπώς η αξονική τάση αστοχίας είναι γνωστή. Για την δοκιμή στα 15 MPa χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος της αντοχής των δοκιμών στα 10 και 20 MPa.

Στον Πίνακα 5.3 τα αποτελέσματα της καταγραφής των ταχυτήτων στα δοκίμια που έφτασαν απ'ευθείας στη θραύση όπου σε όλα τα δοκίμια εκτός από το Δ10, η καταγραφή των ταχυτήτων ήταν εφικτή.

Δοκίμιο	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αρχική ταχύτητα V_p	Ταχύτητα V_{p0} στη θραύση	Αρχική ταχύτητα V_{s0}	Ταχύτητα V_s στη θραύση
Δ13	1	4876,0	3079,6	3089,1	1905,6
Δ15	10	5220,6	4180,9	3333,4	2316,2
Δ16	20	5186,8	3060,6	3375,0	1818,3

Πίνακας 5.3: Ταχύτητες υπερήχων δοκιμίων στη θραύση υπό τριαξονική θλίψη

Παρατηρείται σημαντική μείωση των ταχυτήτων σε σχέση με τις αρχικές τιμές τους (33% για τα επιμήκη και 39% για τα διατημητικά κύματα κατά μέσο όρο). Η θραύση του δοκιμίου προκαλεί πολύ μεγάλη ρωγμάτωση με συνέπεια την απομείωση των ταχυτήτων που καταγράφηκαν. Οι αντίστοιχοι δείκτες ρωγμάτωσης για τα δοκίμια Δ13, Δ15 και Δ16 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Δοκίμιο	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	P_{20} (ίχνη/ m^2)	P_{10} (ίχνη/m)	P_{21} (cm/cm ²)
Δ13	1	196,55	32,17	0,577
Δ15	10	136,20	22,30	0,391
Δ16	20	203,88	33,49	0,525

Πίνακας 5.4: Δείκτες ρωγμάτωσης δοκιμίων στη θραύση υπό τριαξονική θλίψη.

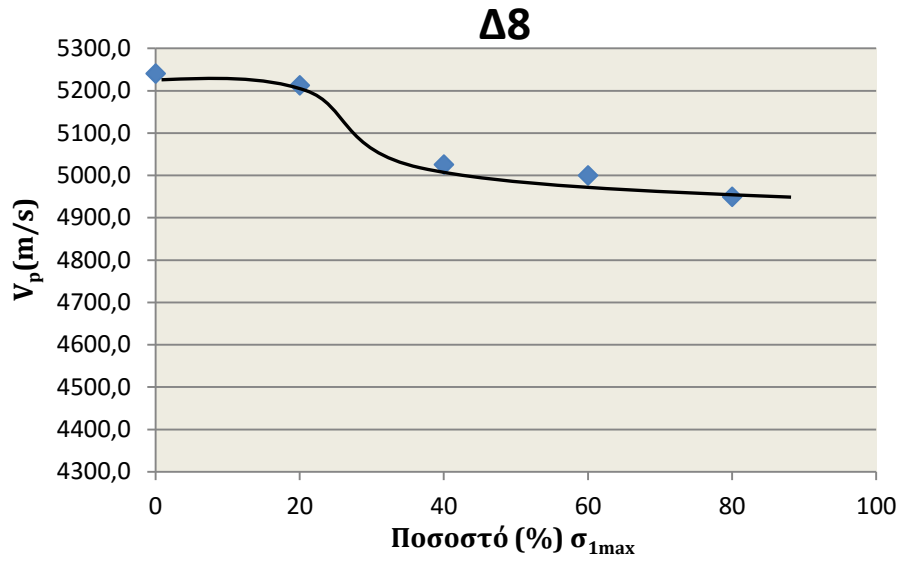
Για τα δοκίμια Δ8, Δ9, Δ12, Δ14, Δ18 ακολουθήθηκε η πειραματική διαδικασία της αρχικής μεθοδολογίας (υπόκεφαλαιο 5.1). Τονίζεται πως η χρήση των δεικτών ρωγμάτωσης γίνεται κυρίως στη θραύση των δοκιμίων στη δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Στα στάδια φόρτισης δεν παρατηρήθηκε σημαντική ρωγμάτωση εξωτερικά των δοκιμίων. Έτσι στον Πίνακα 5.6 δεν παρουσιάζονται οι δείκτες για όλα τα στάδια ρωγμάτωσης αφού η τιμή τους είναι μηδενική. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα καταγραφής των ταχυτήτων της τριαξονικής θλίψης σε στάδια φόρτισης για το δοκίμιο Δ8. Η φόρτιση έγινε σε ποσοστά 20% , 40% , 60% , 80% ενώ το δοκίμιο αστόχησε στην φόρτιση στο 90% της θεωρητικής αντοχής του. Η πλευρική τάση που επιβλήθηκε ήταν 20 MPa και συνεπώς η θεωρητική αντοχή λήφθηκε ίση με 415 MPa (Όση και του δοκιμίου Δ16 που είχε φτάσει στη θραύση υπό πλευρική πίεση 20MPa).

Στον Πίνακα 5.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα της καταγραφής των ταχυτήτων στα στάδια φόρτισης για το Δ8.

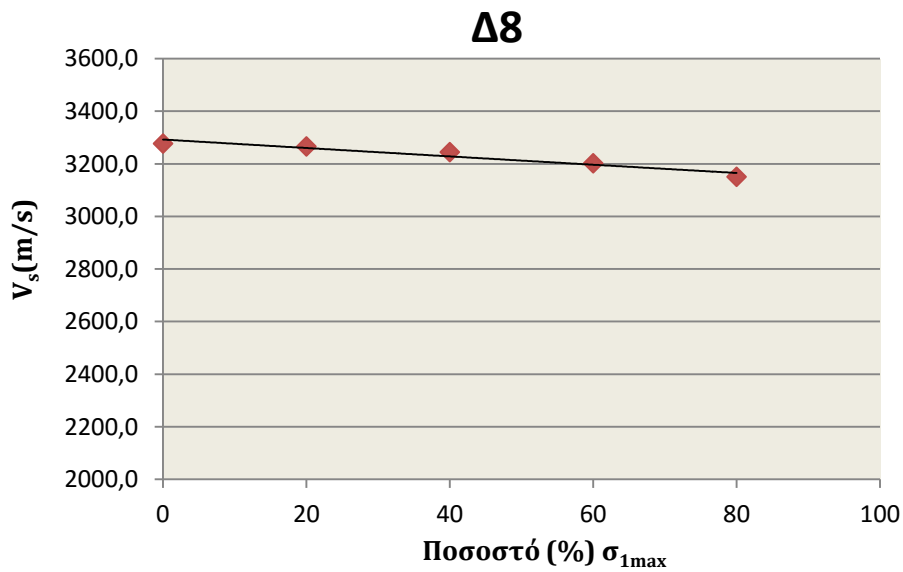
Δοκίμιο Δ8	Τάση φόρτισης (%) σ_{ucs} (MPa)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	E_d (GPa)	ν	G_d (GPa)
Αρχική Κατάσταση	0	5240,6	3277,6	69,7	0,18	29,6
Φόρτιση στα 83 MPa	20	5212,8	3266,7	66,0	0,18	28,1
Φόρτιση στα 166 MPa	40	5025,6	3245	63,3	0,14	27,7
Φόρτιση στα 249 MPa	60	5000	3202,6	62,1	0,15	27,0
Φόρτιση στα 332 MPa	80	4949,5	3151,1	60,5	0,16	26,10
Θραύση	-	3438,6	2487,3	30,9	-	16,3

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα καταγραφής ταχυτήτων για το δοκίμιο Δ8 στη δοκιμή τριαξονικής θλίψης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα μέτρησης των ταχυτήτων υπερήχων στο δοκίμιο Δ8. Σε αντίθεση με τις καταγραφές στη μονοαξονική, στην τριαξονική δοκιμή σημαντική μείωση των ταχυτήτων παρουσιάζεται και πριν την τάση εξάπλωσης των μικρορωγμών (crack damage).



Σχήμα 5.20: Διάγραμμα μεταβολής ταχυτήτων V_p σε συσχέτιση με το ποσοστό φόρτισης του δοκιμίου.

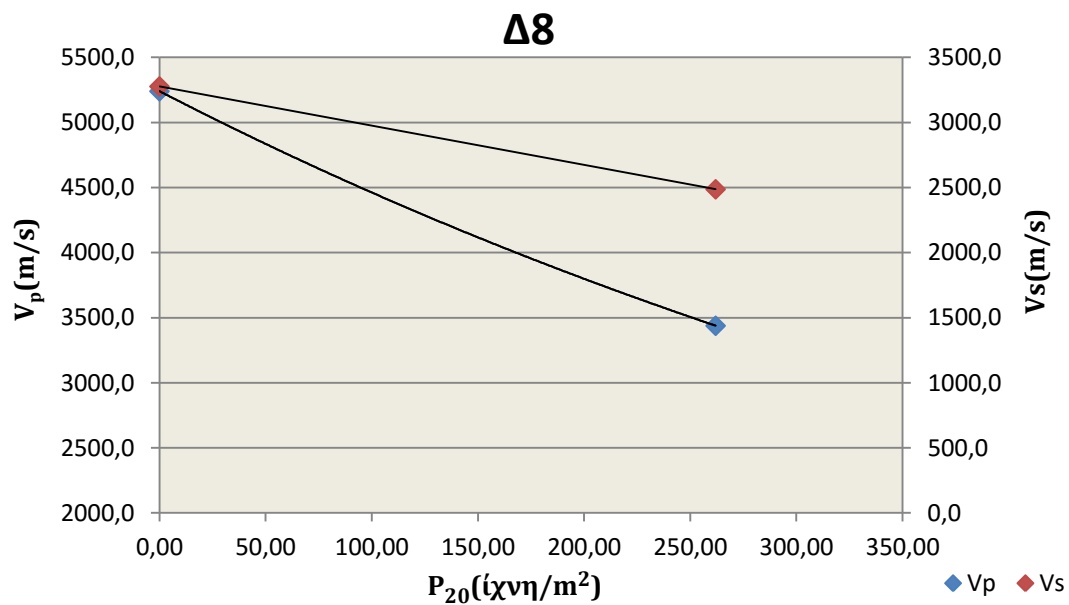


Σχήμα 5.21: Διάγραμμα μεταβολής ταχυτήτων V_s σε συσχέτιση με το ποσοστό φόρτισης του δοκιμίου.

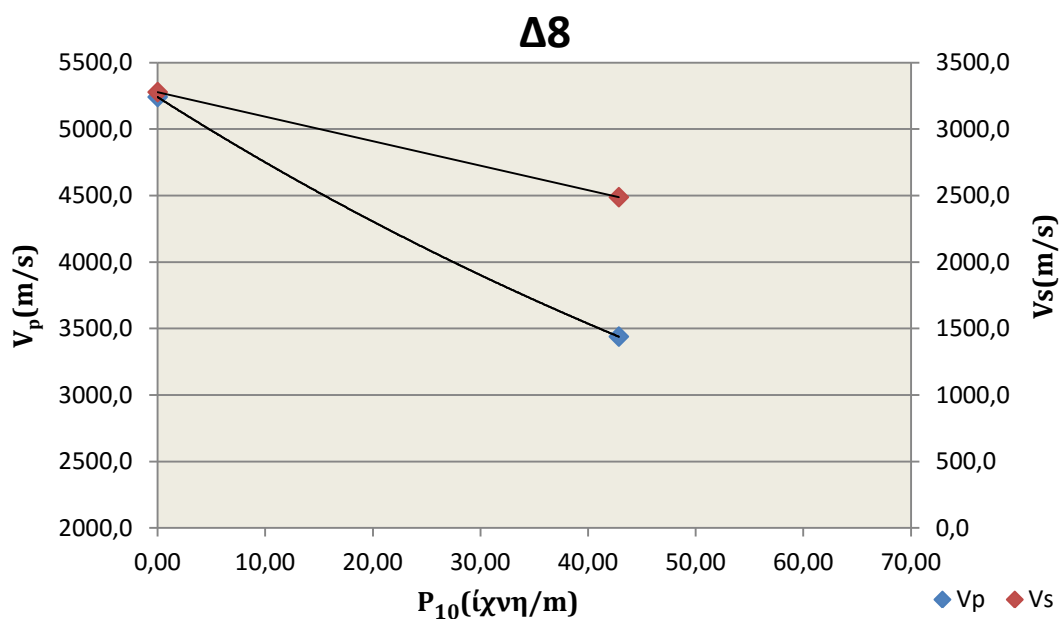
Στα διαγράμματα **5.20** και **5.21** δεν παρουσιάζεται η μεταβολή των ταχυτήτων στη θραύση του δοκιμίου. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, στη θραύση όπου η ρωγμάτωση ήταν σημαντική, έγινε η χρήση των δεικτών ρωγμάτωσης.

Δοκίμιο Δ8	Τάση επαναφόρτισης (%) σ_{1max} (MPa)	P_{20} (ίχνη/ m^2)	P_{10} (ίχνη/ m)	P_{21} (cm/ cm^2)
Αρχική Κατάσταση	0	0,000	0,000	0,000
Θραύση	-	167,468	27,365	0,493

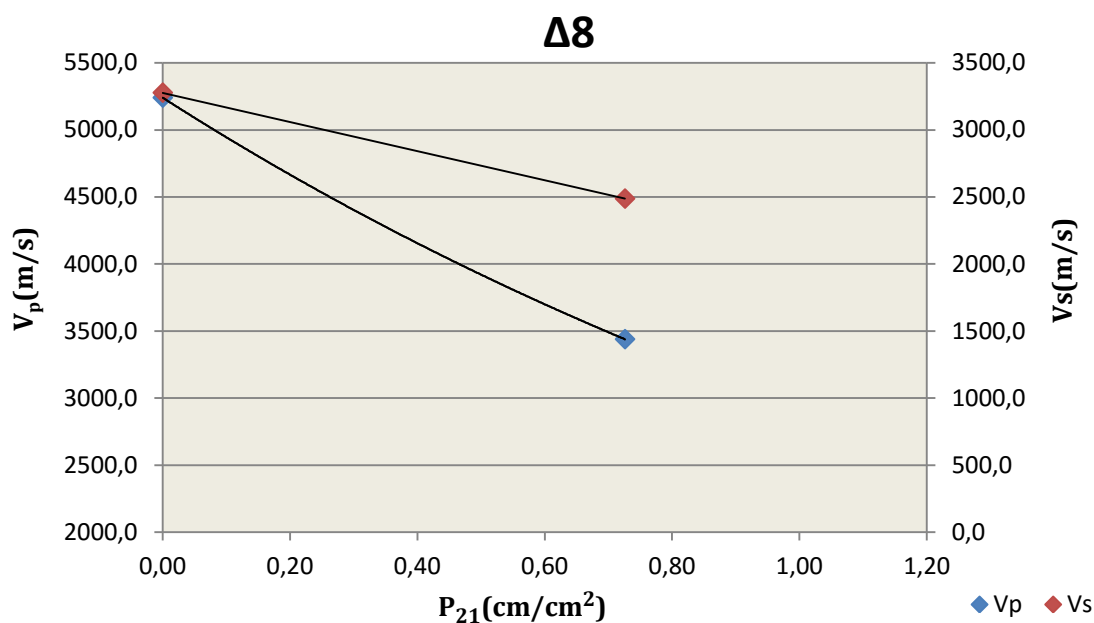
Πίνακας 5.6: Δείκτες ρωγμάτωσης στην αρχική κατάσταση και στη θραύση του δοκιμίου Δ8



Σχήμα 5.22: Διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p και V_s στην αρχική κατάσταση και στη θραύση σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{20} .



Σχήμα 5.23: Διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p και V_s στην αρχική κατάσταση και στη θραύση σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{20} .

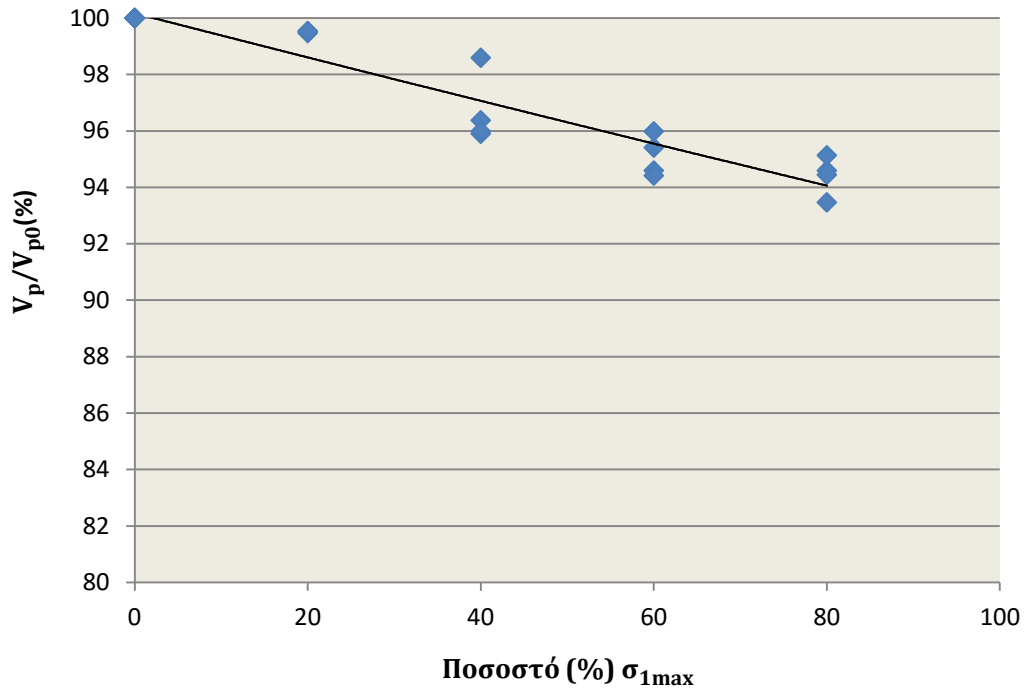


Σχήμα 5.24: Διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p και V_s στην αρχική κατάσταση και στη θραύση σε σύγκριση με το δείκτη ρωγμάτωσης P_{21} .

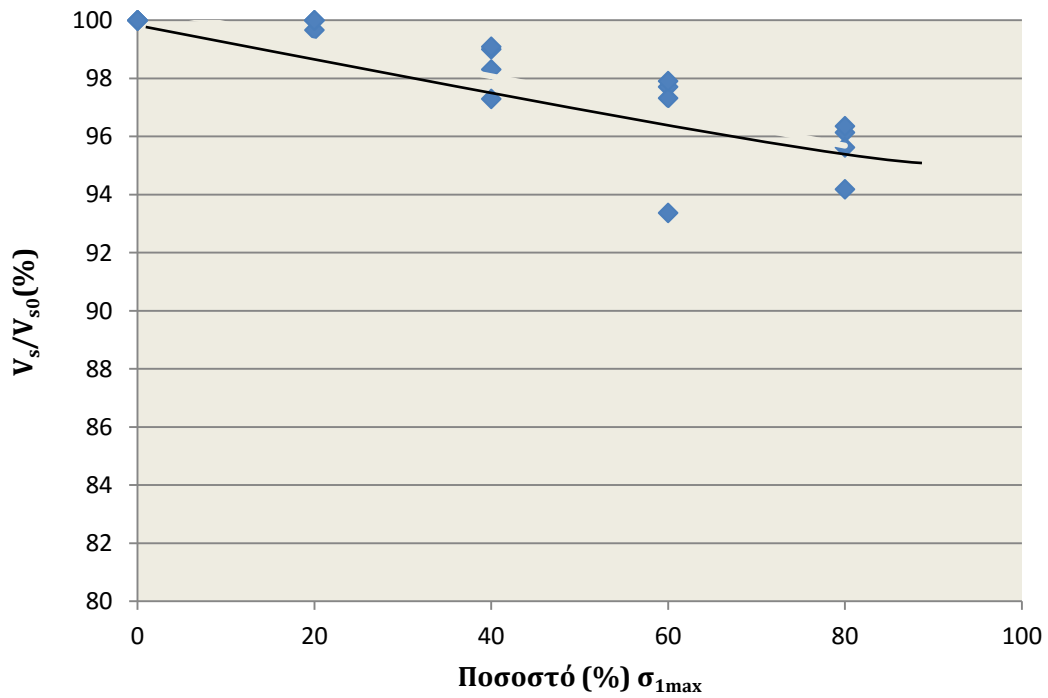
Η μείωση των ταχυτήτων στην θραύση του δοκιμίου είναι 34% και 24% για τις ταχύτητες επίμηκων και διατμητικών κυμάτων αντίστοιχα.

Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλα τα δοκίμια στην τριαξονική δοκιμή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά στο Παράρτημα Π-3 και Π-4.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της καταγραφής των ταχυτήτων για όλα τα δοκίμια της τριαξονικής δοκιμής.



Σχήμα 5.25: Διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σχέση με το ποσοστό φόρτισης για όλα τα δοκίμια της τριαξονικής δοκιμής.



Σχήμα 5.26: Διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_s σε σχέση με το ποσοστό φόρτισης για όλα τα δοκίμια της τριαξονικής δοκιμής.

Από τα αποτελέσματα της καταγραφής των ταχυτήτων σε ποσοστά της αρχικής αντοχής του δοκιμίου προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Οι ταχύτητες παρουσιάζουν σταδιακή μείωση κυρίως μετά το 40% της αντοχής του δοκιμίου.
- Μεγαλύτερη μείωση σημειώνεται στις ταχύτητες επιμήκων κυμάτων (~6% στο 80% της αντοχής) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ταχύτητες των διατμητικών (~4% στο 80% της αντοχής).
- Η μεταβολή των ταχυτήτων περιγράφεται με καλή συσχέτιση από εκθετική συνάρτηση :

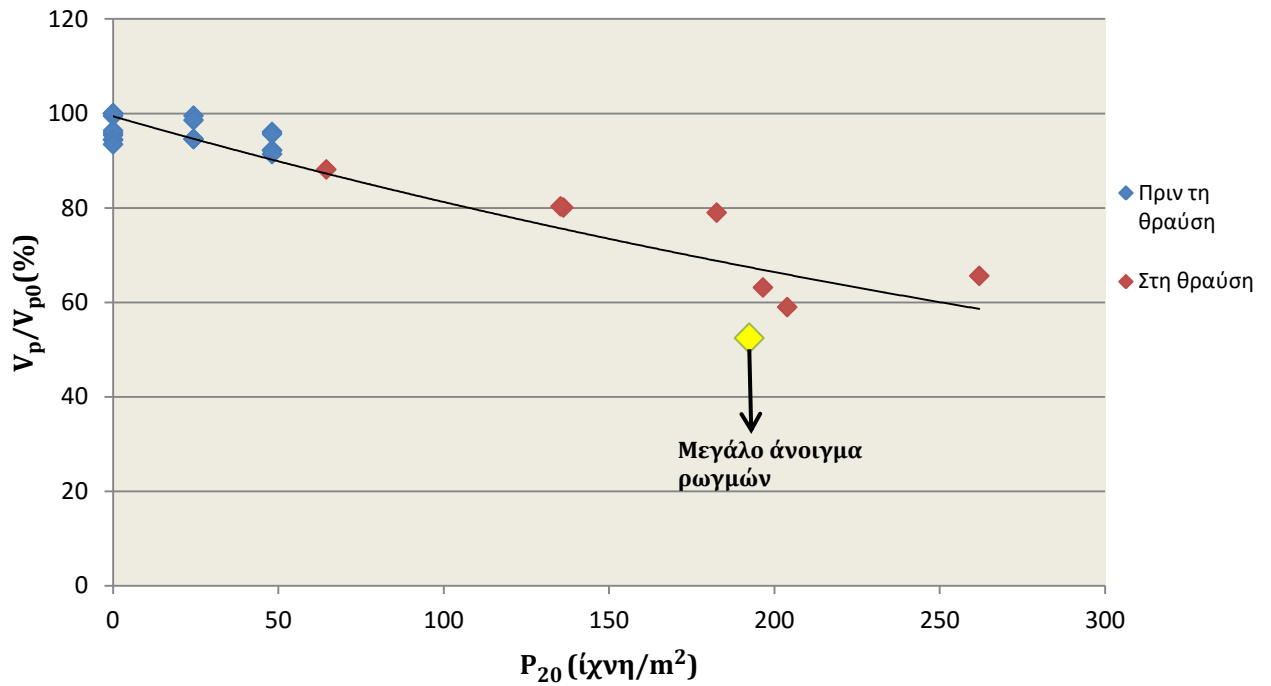
$$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 100 * e^{-0,0008 * \text{Ποσοστό}(\%) \sigma_{1max}} \quad (5.1)$$

με πολύ καλή συσχέτιση $R^2 = 0,89$ και

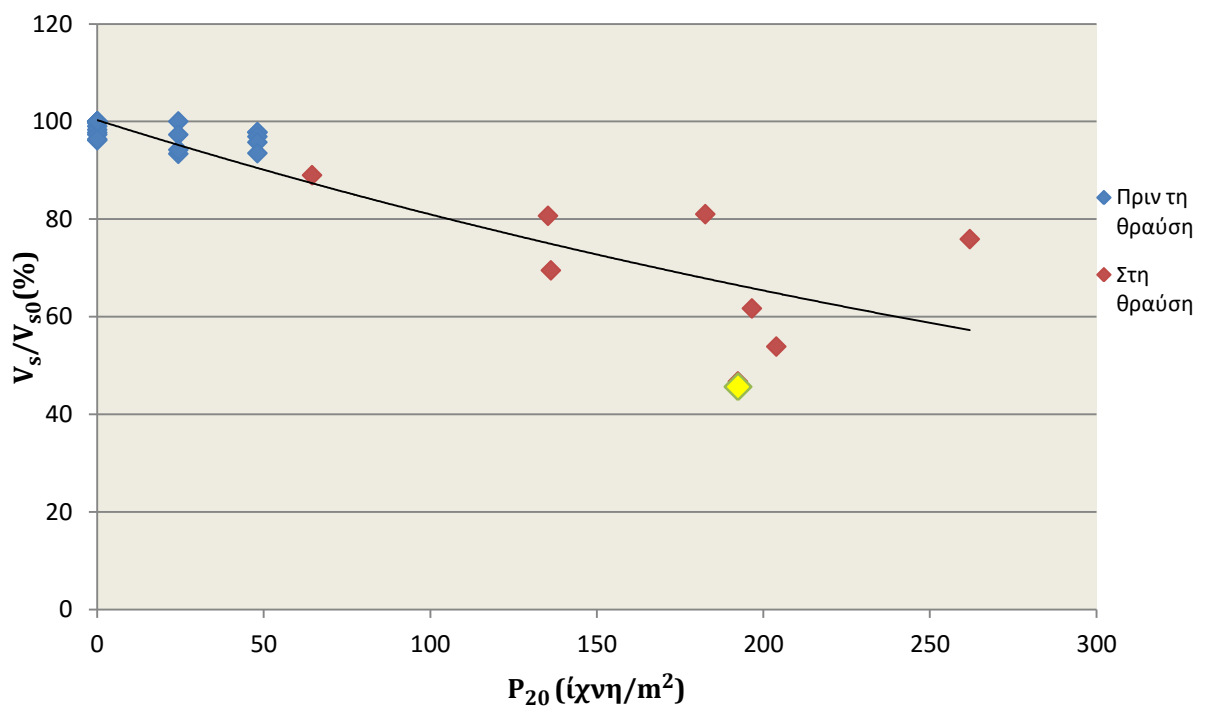
$$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 100,4 * e^{-0,0006 * \text{Ποσοστό}(\%) \sigma_{1max}} \quad (5.2)$$

με καλή συσχέτιση $R^2 = 0,73$

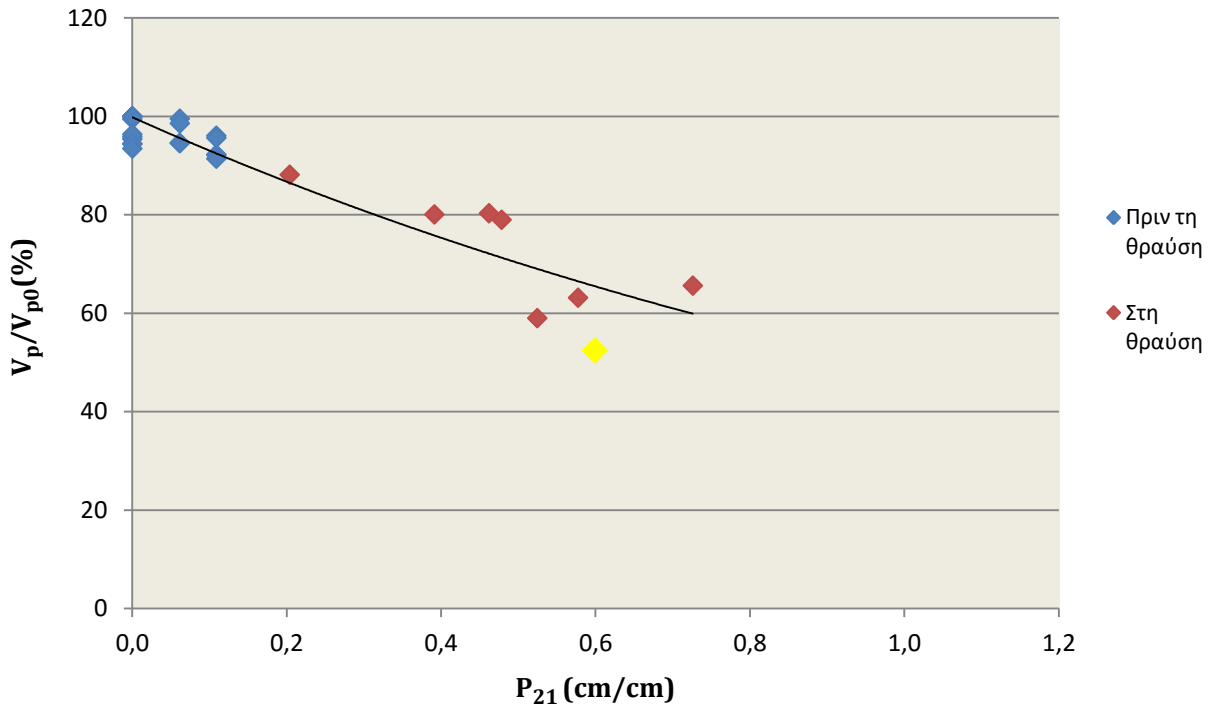
Στα διαγράμματα **5.25** και **5.26** δεν έχει συμπεριληφθούν τα αποτελέσματα της καταγραφής των ταχυτήτων στη θραύση καθώς είναι πιο εύλογη η χρήση τους σε συνάρτηση με τους δείκτες ρωγμάτωσης P_{20} και P_{21} . Έτσι στα **Σχήματα 5.27, 5.28, 5.29, 5.30** παρατίθενται τα αποτελέσματα μεταβολής των ταχυτήτων σε σχέση με τους δείκτες ρωγμάτωσης. Στο δοκίμιο Δ18 παρουσιάσε μεγάλο άνοιγμα των ρωγμών στη θραύση του με αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση των ταχυτήτων σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Τα σημεία αυτά αποτυπώνονται με διαφορετικό χρώμα στα διαγράμματα. Το άνοιγμα των ρωγμών είναι παράγοντας που επηρεάζει τις ταχύτητες διάδοσης ωστόσο δεν εξετάζεται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.



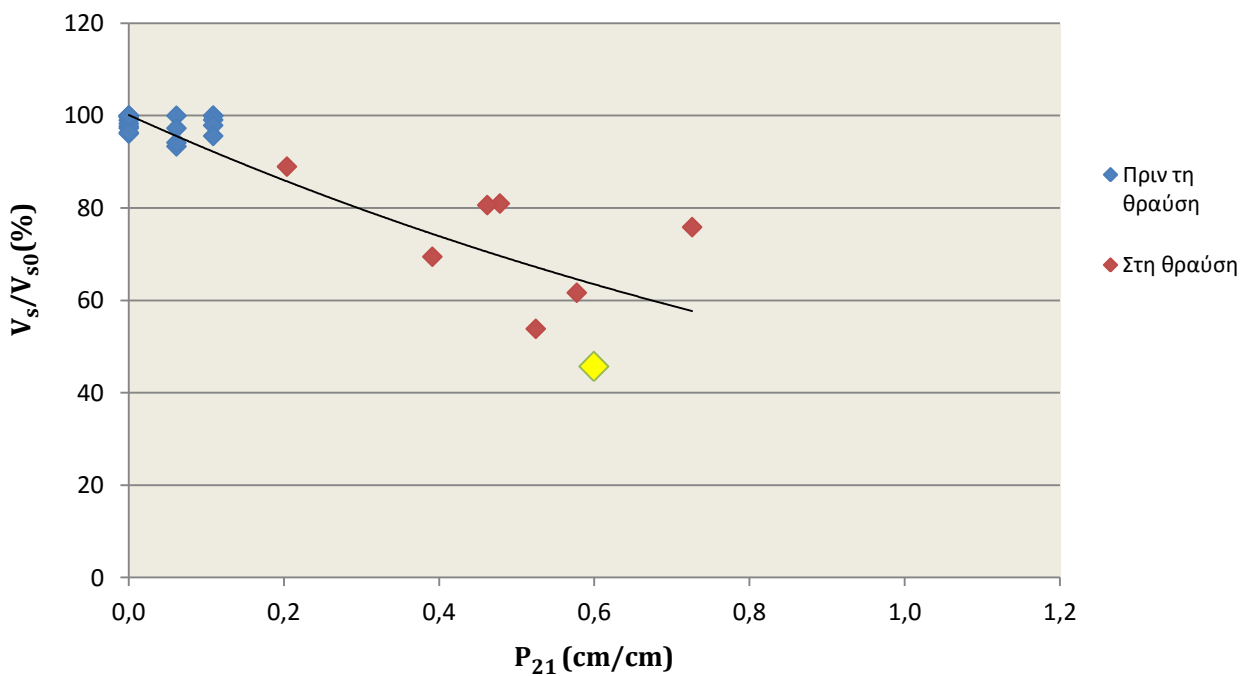
Σχήμα 5.27: Διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σχέση με το δείκτη P_{20} για όλα τα δοκίμια της τριαξονικής δοκιμής.



Σχήμα 5.28: Διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_s σε σχέση με τον δείκτη P_{20} για όλα τα δοκίμια της τριαξονικής δοκιμής.



Σχήμα 5.29: Διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_p σε σχέση με το δείκτη P_{21} για όλα τα δοκίμια της τριαξονικής δοκιμής.



Σχήμα 5.30: Διάγραμμα μείωσης ταχυτήτων V_s σε σχέση με το δείκτη P_{21} για όλα τα δοκίμια της τριαξονικής δοκιμής.

Τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής δείχνουν πως η μεταβολή των ταχυτήτων πριν τη θραύση έχει μία πιο συντηρητική προσέγγιση μείωσης σε σχέση με την αντίστοιχη μεταβολή τους στη θραύση σε συνάρτηση με τους δείκτες ρωγμάτωσης. Το φαινόμενο αυτό θα αναλυθεί περαιτέρω στο **Κεφάλαιο 6**. Οι συναρτήσεις που περιγράφουν τη συνολική συμπεριφορά των ταχυτήτων για όλες τις μετρήσεις είναι οι εξής:

- Δείκτης P₂₀:

$$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 99,395 * e^{-0,002 * P_{20}} \quad (5.3)$$

με πολύ καλή συσχέτιση $R^2=0,84$

$$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 100,29 * e^{-0,002 * P_{20}} \quad (5.4)$$

με καλή συσχέτιση $R^2=0,72$

- Δείκτης P₂₁:

$$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 99,83 * e^{-0,704 * P_{21}} \quad (5.5)$$

με πολύ καλή συσχέτιση $R^2=0,85$

$$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 100,3 * e^{-0,76 * P_{21}} \quad (5.6)$$

με καλή συσχέτιση $R^2=0,74$

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως οι ταχύτητες V_p και V_s μειώνονται με παραπλήσιο ρυθμό ως προς την έκταση της ρωγμάτωσης.

5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

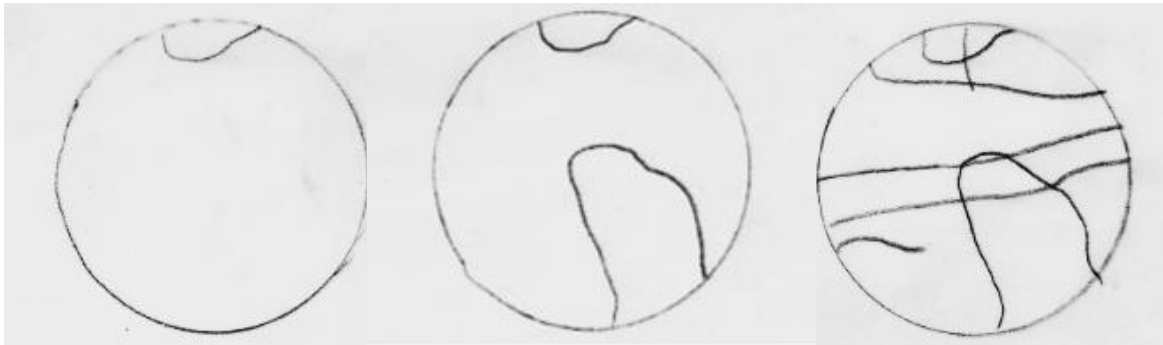
Εκτός από τις καταγραφές ταχυτήτων στις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης, έγιναν και μετρήσεις στη δοκιμή Brazilian. Τα δοκίμια έφταναν στη θραύση τους όπου η μέτρηση των ταχυτήτων ήταν δυνατή. Τα περισσότερα δοκίμια αστόχησαν διαμετρικά σε εφελκυσμό ωστόσο κάποια δοκίμια αστόχησαν σε διάτμηση λόγω προϋπάρχουσας ασυνέχειας. Η μέτρηση της ρωγμάτωσης έγινε και στις δύο περιπτώσεις με την αποτύπωση των ρωγμών και την εξαγωγή του δείκτη P_{21} όπως και στις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης. Η λεπτομερής αποτύπωση σε διαφανές χαρτί είχε νοήμα μόνο στην περίπτωση που η αστοχία του δοκιμίου δεν ήταν διαμετρική αφού στην διαμετρική αστοχία είναι γνωστό το μήκος της ρωγμής. Σε δεύτερη φάση έγινε η προσπάθεια περαιτέρω ρωγμάτωσης των δοκιμίων brazilian με επαναφόρτιση σε κάθετο άξονα από την αρχική διάμετρο αστοχίας.

Στον **Πίνακα 5.7** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα καταγραφής ταχυτήτων για το δοκίμιο BZL 5, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού δεν αστόχησε διαμετρικά όπως τα περισσότερα δοκίμια στη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.

Δοκίμιο	Φόρτιση	Αριθμός Φόρτισης	P_{21}	V_p (m/s)	V_s (m/s)
BZL 5	Αρχική	0	0	4560,3	3164,3
BZL 5	Φόρτιση έως crack damage	1	0,118	4494,2	3070,3
BZL 5	Φόρτιση έως διαμετρική αστοχία	2	0,428	4430,0	3070,3
BZL 5	Φορτιση σε κάθετο άξονα	3	1,200	3975,6	2744,2

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα καταγραφής ταχυτήτων για το δοκίμιο BZL 5

Η ρωγμάτωση που προέκυψε για το δοκίμιο BZL 5 παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.34**:



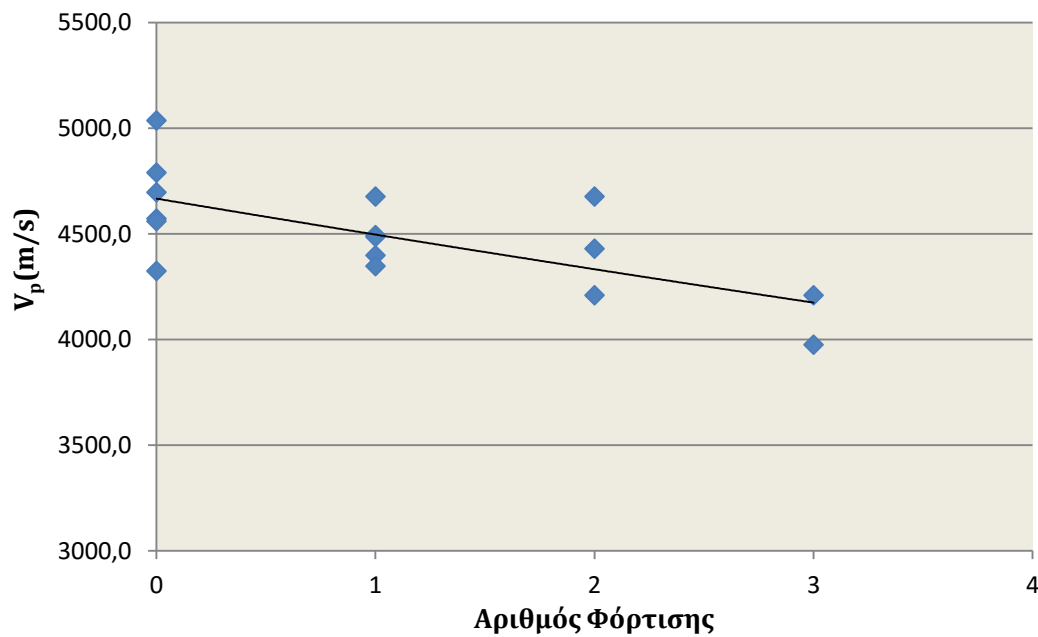
(i)

(ii)

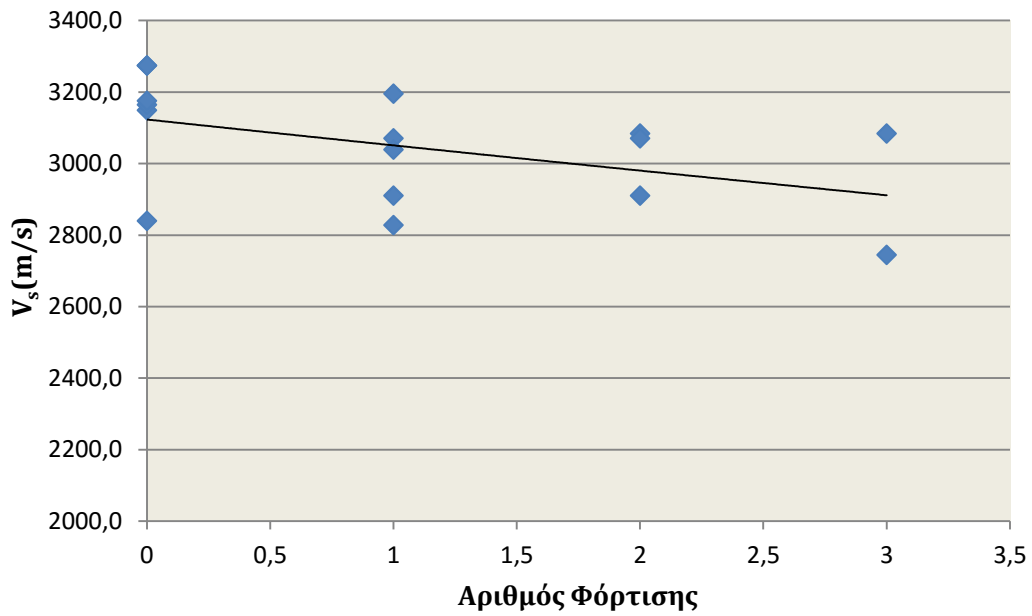
(iii)

Σχήμα 5.31: Αποτύπωση ρωγμάτωσης του δοκιμίου BZL 5 στο (i) crack damage, (ii) Θραύση στην αρχική διάμετρο φόρτισης και (iii) Φόρτιση σε κάθετο άξονα και περαιτέρω ανάπτυξη της ρωγμάτωσης.

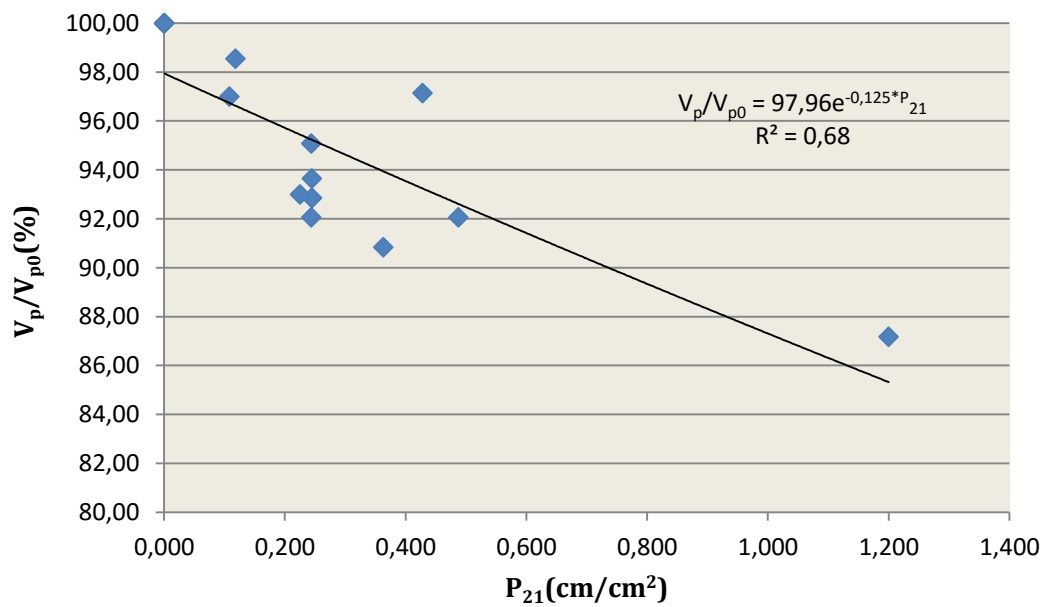
Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλα τα δοκίμια της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται μέσω διαγραμμάτων παρακάτω:



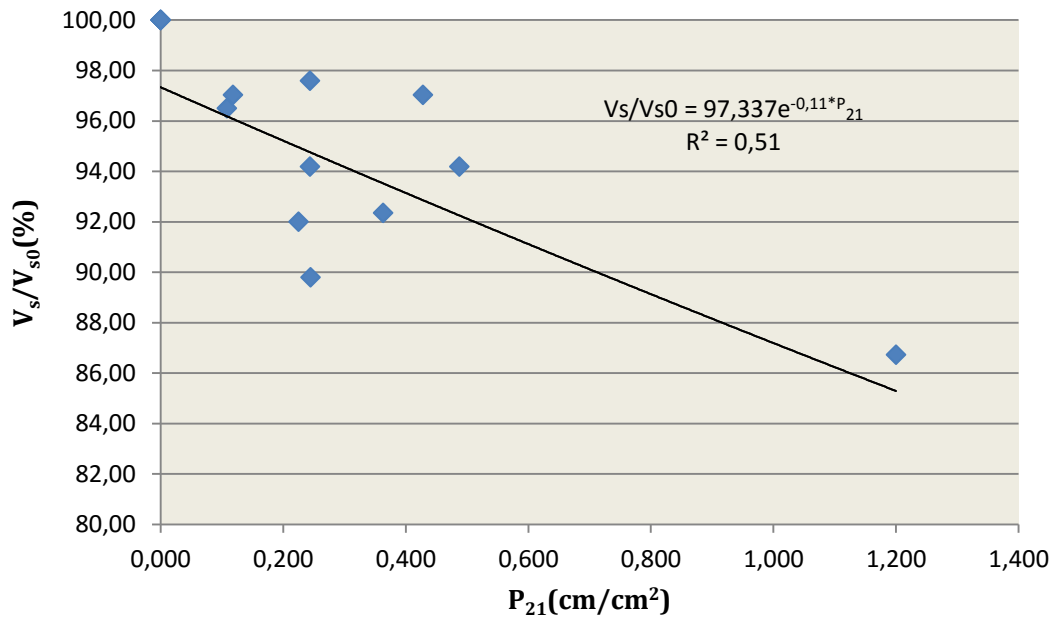
Σχήμα 5.32: Μεταβολή των επίμηκων ταχυτήτων V_p σε σχέση με τον αριθμό φορτίσεων του δοκιμίου.



Σχήμα 5.33: Μεταβολή των εγκάρσιων ταχυτήτων V_s σε σχέση με τον αριθμό φορτίσεων του δοκιμίου.



Σχήμα 5.34: Μεταβολή των εγκάρσιων ταχυτήτων V_p σε σχέση με τον δείκτη P_{21} .



Σχήμα 5.35: Μεταβολή των εγκάρσιων ταχυτήτων V_s σε σχέση με τον δείκτη P_{21}

Πολύ μικρή συσχέτιση των αποτελεσμάτων παρατηρείται σε σχέση με τον αριθμό φορτίσεων των δοκιμίων και συνεπώς ο δείκτης αυτός δεν θα συμπεριληφθεί στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Αντιθέτως ο δείκτης ρωγμάτων P_{21} παρουσιάζει σχετικά καλή συσχέτιση με τη μεταβολή των ταχυτήτων ιδιαίτερα στις ταχύτητες V_p .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών για να εκτιμηθεί η μείωση της ταχύτητας των υπερήχων σε σχέση με το βαθμό ρωγμάτωσης των δοκιμίων σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Αρχικά θα γίνει η συσχέτιση των ακολούθων αποτελεσμάτων καταγραφής ταχυτήτων :

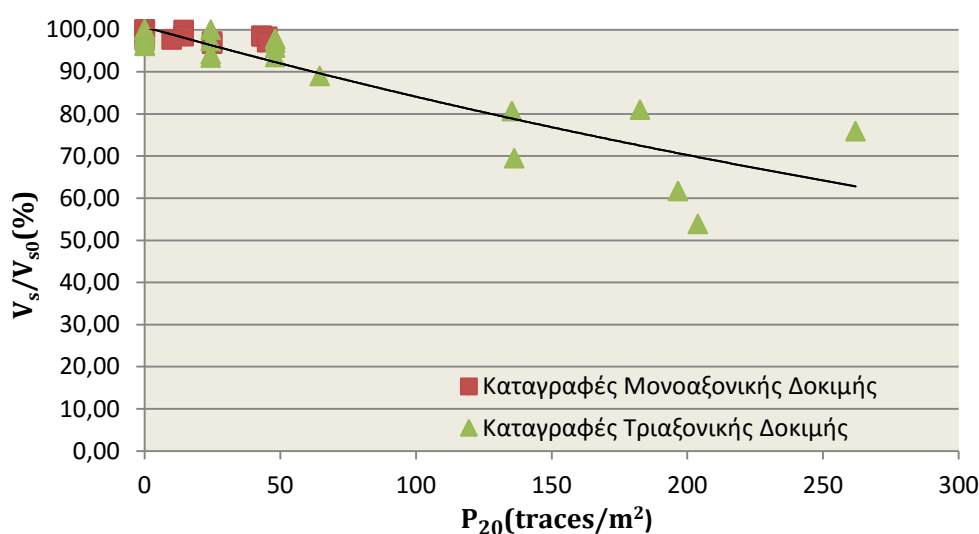
- i) Μονοαξονική- Τριαξονική δοκιμή
- ii) Μονοαξονική δοκιμή- Brazilian
- iii) Όλες οι δοκιμές μαζί

Στη συνέχεια θα γίνει αξιολόγηση και θα αναλυθούν οι συσχετίσεις που προκύπτουν από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα αλλά και από τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής ξεχωριστά. Οι δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι P_{20} και P_{21} .

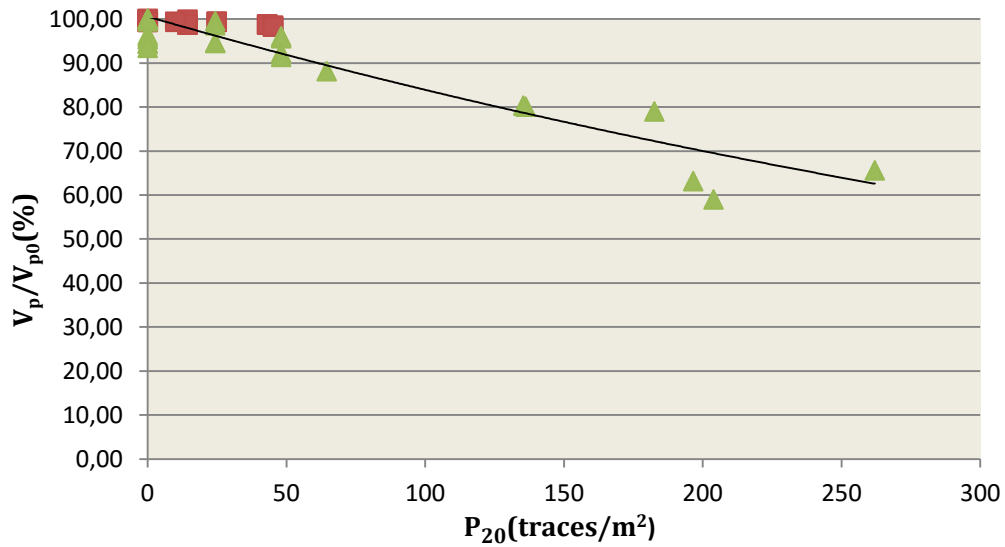
6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.2.1 Μονοαξονική-Τριαξονική Θλίψη

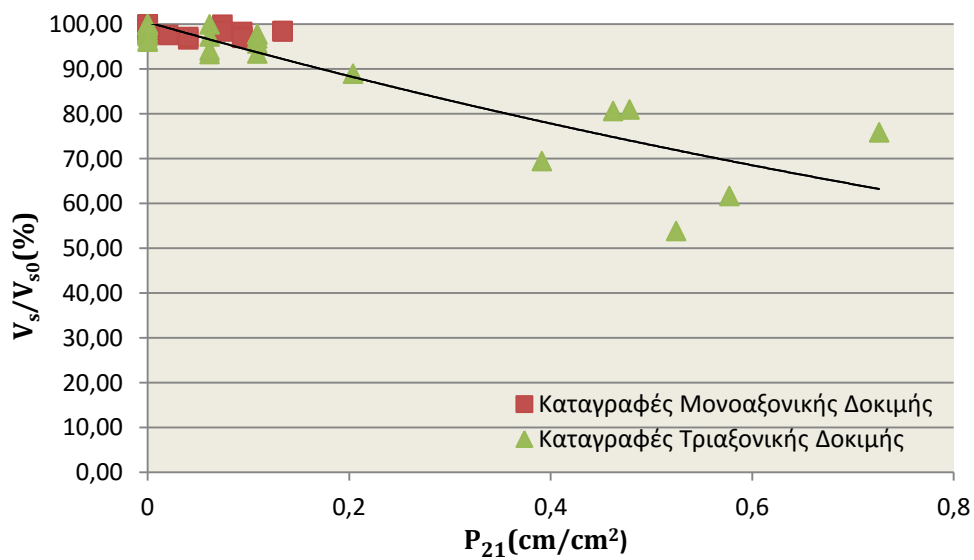
Παρατίθενται τα διαγράμματα που προκύπτουν με συνδυασμό των αποτελεσμάτων καταγραφής ταχυτήτων της μονοαξονικής και τριαξονικής δοκιμής.



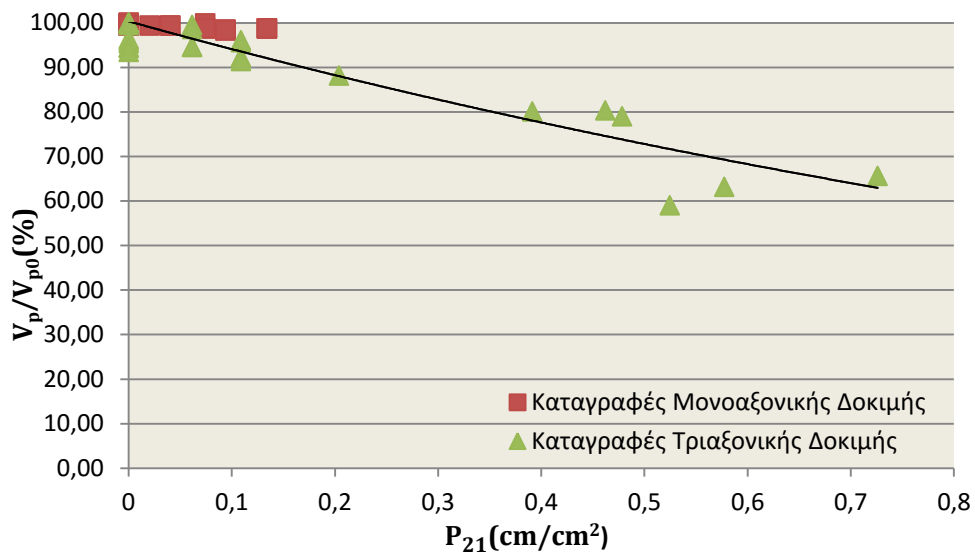
Σχήμα 6.1: Συνδυαστικό διάγραμμα μεταβολής των εγκάρσιων ταχυτήτων με τον δείκτη P_{20} για τις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.



Σχήμα 6.2: Συνδυαστικό διάγραμμα μεταβολής των επίμηκων ταχυτήτων με τον δείκτη P_{20} για τις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.



Σχήμα 6.3: Συνδυαστικό διάγραμμα μεταβολής των εγκάρσιων ταχυτήτων με τον δείκτη P_{21} για τις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.



Σχήμα 6.4: Συνδυαστικό διάγραμμα μεταβολής των επίμηκων ταχυτήτων με τον δείκτη P_{21} για τις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν όπως φαίνεται και στα διαγράμματα είναι:

- Για τον δείκτη P_{20} :

$$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 100,56 * e^{-0,002 * P_{20}} \quad (6.1)$$

με πολύ καλή συσχέτιση $R^2=0,85$

$$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 100,66 * e^{-0,002 * P_{20}} \quad (6.2)$$

με καλή συσχέτιση $R^2=0,75$

- Για τον δείκτη P_{21} :

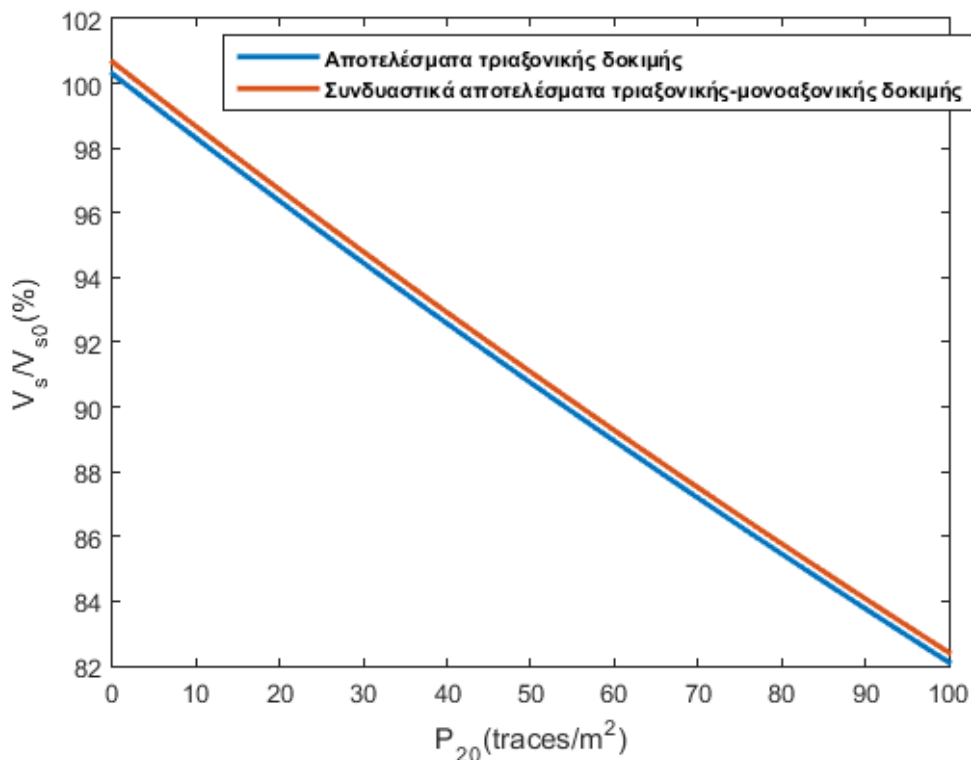
$$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 100,35 * e^{-0,642 * P_{21}} \quad (6.3)$$

με πολύ καλή συσχέτιση $R^2=0,86$

$$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 100,45 * e^{-0,638 * P_{21}} \quad (6.4)$$

με καλή συσχέτιση $R^2=0,77$

Παρατηρείται ότι ο βαθμός συσχέτισης της ταχύτητας των επιμήκων και διατμητικών κυμάτων με τους δείκτες P_{20} και P_{21} είναι καλός έως πολύ καλός. Η μεταβολή των ταχυτήτων είναι παρόμοια με αυτήν που παρουσιάζεται στα **Σχήματα 5.30, 5.31, 5.32, 5.33** που αφορά τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής. Ωστόσο η συνδυαστική συσχέτιση των αποτελεσμάτων των μονοαξονικών και τριαξονικών δοκιμών οδηγεί σε μικρότερο βαθμό μείωσης των ταχυτήτων. Στο **Σχήμα 6.5** παρουσιάζεται η μαθηματική έκφραση της μεταβολής των εγκάρσιων ταχυτήτων με βάση τα συνδυαστικά αποτελέσματα αλλά και τα αποτελέσματα της τριαξονικής με το δείκτη P_{20} . Η ανάλυση γίνεται στο πρόγραμμα **Matlab (2015)**.

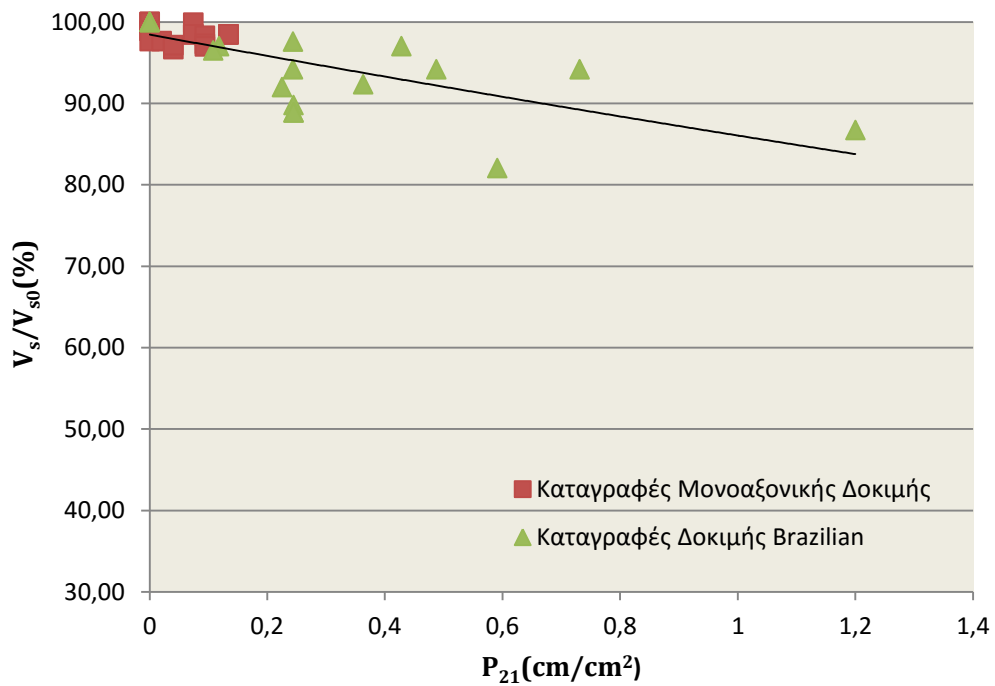


Σχήμα 6.5: Μεταβολή των διατμητικών ταχυτήτων σε σύγκριση με τον δείκτη P_{20} για τις συνδυαστικές καταγραφές μονοαξονικής-τριαξονικής και τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής.

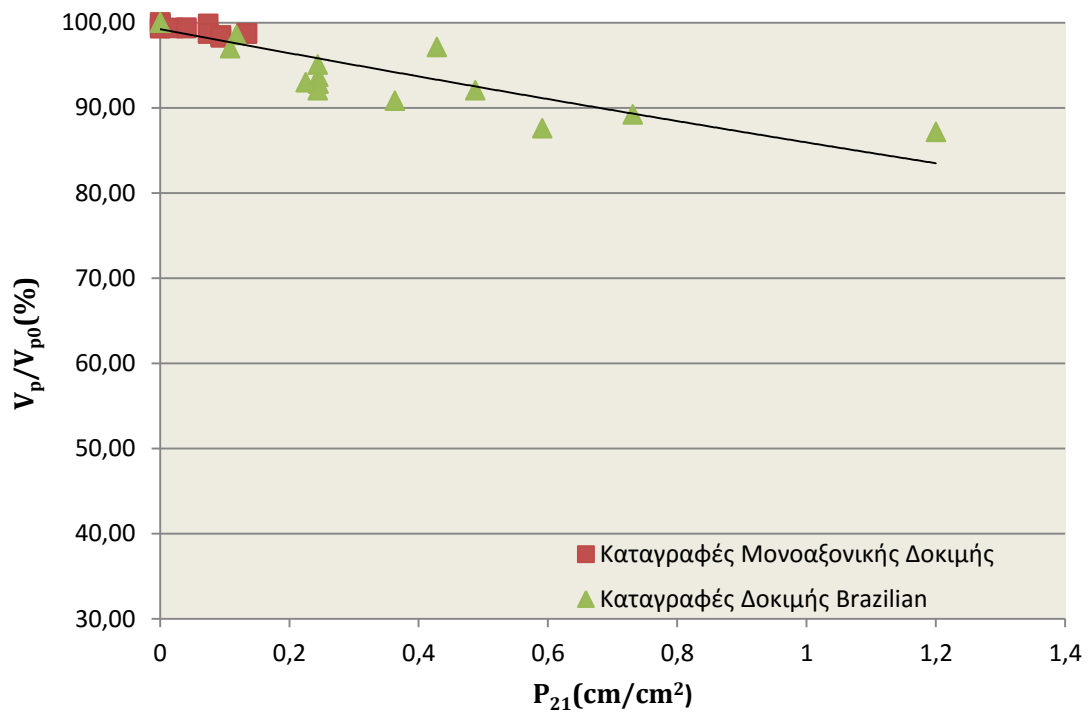
Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι υπόλοιπες σχέσεις.

6.2.2 Μονοαξονική θλίψη-Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προκύπτουν με συνδυασμό των αποτελεσμάτων καταγραφής ταχυτήτων της μονοαξονικής θλίψης και της δοκιμής Brazilian. Η σύγκριση χρησιμοποιώντας μόνο το δείκτη P_{21} αφού μόνο αυτός χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή Brazilian.



Σχήμα 6.6: Συνδυαστικό διάγραμμα μεταβολής των ταχυτήτων V_s με τον δείκτη P_{21} για τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και Brazilian.



Σχήμα 6.7: Συνδυαστικό διάγραμμα μεταβολής των ταχυτήτων V_p με τον δείκτη P_{21} για τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και Brazilian.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν από το συνδυασμό των αποτελεσμάτων της δοκιμής Brazilian με τη μονοαξονική θλίψη για τον δείκτη P_{21} είναι:

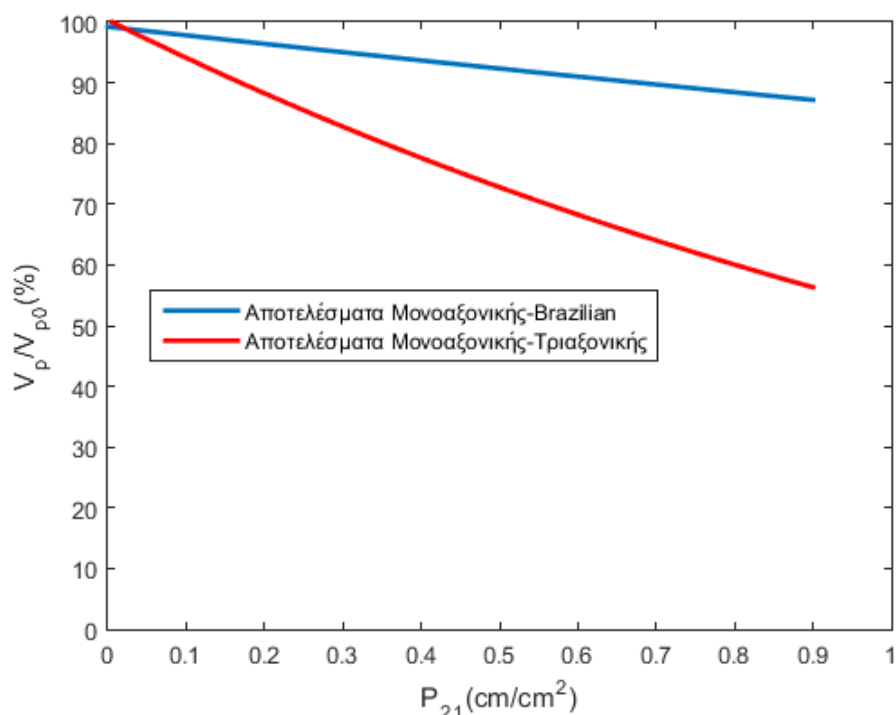
$$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 99,223 * e^{-0,144 * P_{21}} \quad (6.5)$$

με πολύ καλή συσχέτιση $R^2=0,78$

$$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 98,46 * e^{-0,135 * P_{21}} \quad (6.6)$$

με καλή συσχέτιση $R^2=0,53$

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης προβλέπουν εμφανώς πιο μικρό βαθμό μείωσης των ταχυτήτων σε σχέση με αυτόν από τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής. Στο **Σχήμα 6.8** παρουσιάζονται οι μαθηματικές εκφράσεις των σχέσεων (6.3) και (6.6).

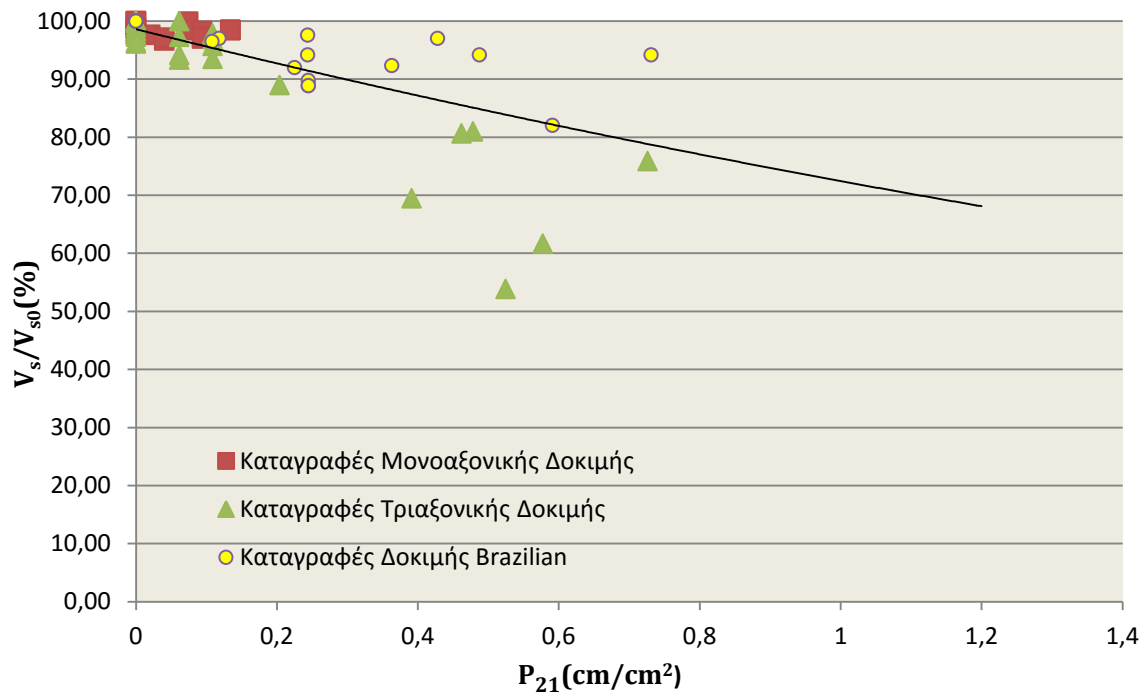


Σχήμα 6.8: Μεταβολή των επίμηκων ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με τον δείκτη P_{21} για τα αποτελέσματα μονοαξονικής-τριαξονικής δοκιμής και μονοαξονικής-δοκιμής Brazilian.

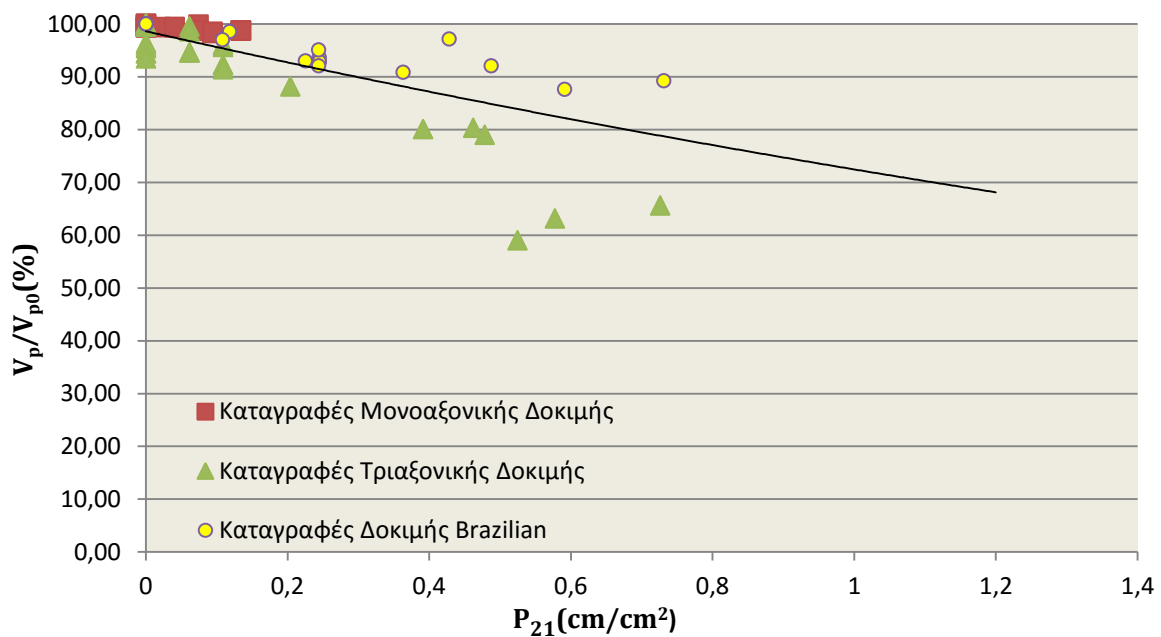
Παρόμοια μεταβολή παρουσιάζει και το αντίστοιχο διάγραμμα για τις ταχύτητες εγκάρσιων κυμάτων.

6.2.3 Συνδυαστικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα που προκύπτουν με συνδυασμό των αποτελεσμάτων καταγραφής ταχυτήτων και των τριών δοκιμών. Η σύγκριση γίνεται με το δείκτη P_{21} αφού για τη δοκιμή Brazilian ήταν ο μόνος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε. Ωστόσο σε γενικές γραμμές και από τα αποτελέσματα της μονοαξονικής και τριαξονικής δοκιμής προκύπτει πως είναι ο πιο αξιόπιστος δείκτης.



Σχήμα 6.9: Μεταβολή των ταχυτήτων V_s σε σύγκριση με τον δείκτη P_{21} για τα αποτελέσματα μονοαξονικής-τριαξονικής και δοκιμής brazilian.



Σχήμα 6.10: Μεταβολή των ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με τον δείκτη P_{21} για τα αποτελέσματα μονοαξονικής-τριαξονικής και δοκιμής brazilian.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση των ταχυτήτων σε σχέση με το δείκτη ρωγμάτωσης λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και των τριών δοκιμών έχει μια ενδιάμεση τάση μείωσης σε σχέση με αυτή που προκύπτει από τα αποτελέσματα της

τριαξονικής δοκιμής και της δοκιμής Brazilian. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα αποτελέσματα, ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ της ταχύτητας και του δείκτη ρωγμάτων μειώνεται. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η ποσοστιαία απομείωση των ταχυτήτων P και S σχεδόν ταυτίζεται. Οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την απομείωση των ταχυτήτων ως προς το δείκτη P_{21} είναι:

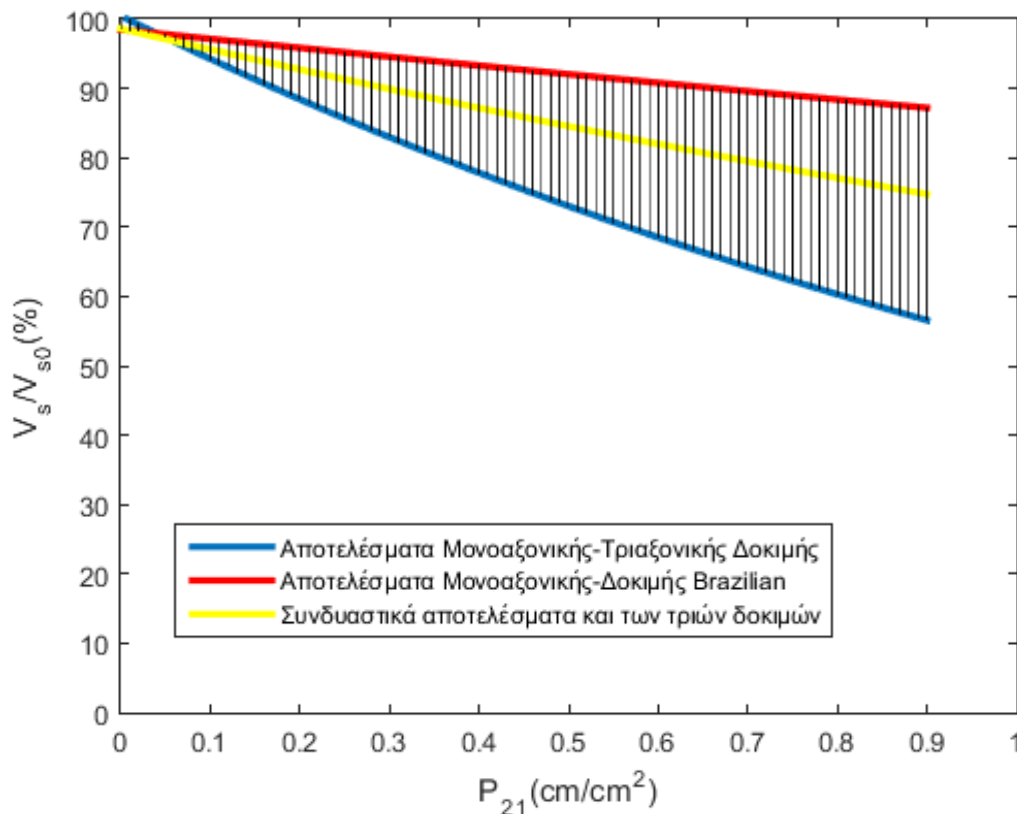
$$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 98,612 * e^{-0,308 * P_{21}} \quad (6.7)$$

με βαθμό συσχέτισης $R^2=0,47$

$$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 98,611 * e^{-0,308 * P_{21}} \quad (6.8)$$

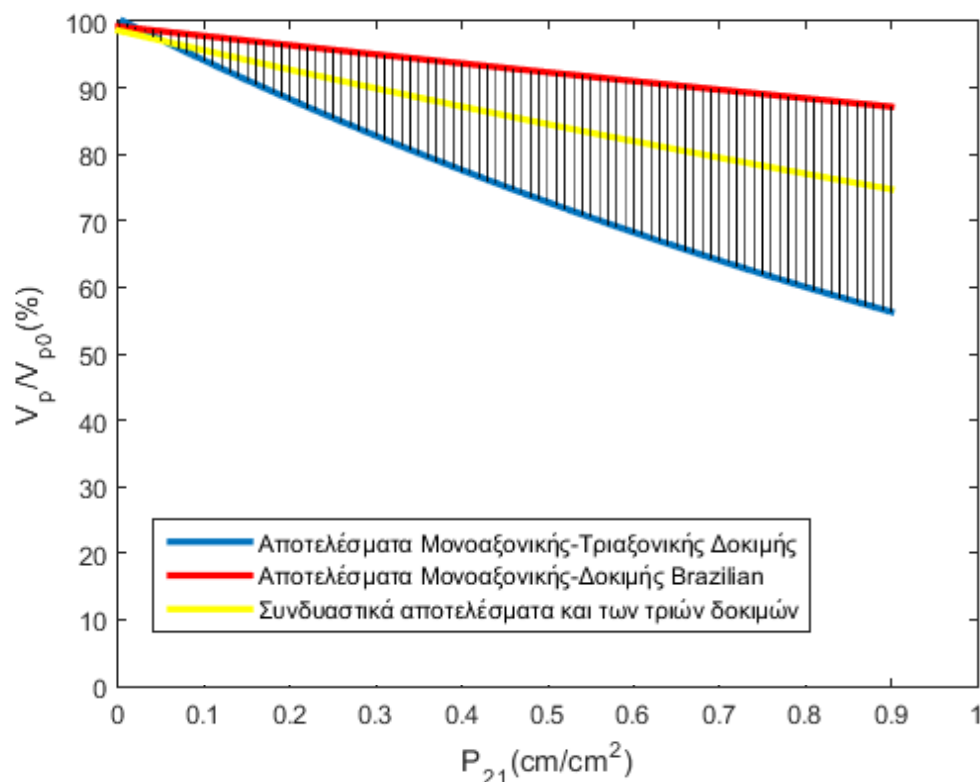
με μέτριο βαθμό συσχέτιση $R^2=0,51$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μαθηματικές εκφράσεις των σχέσεων (6.4), (6.6), (6.8).



Σχήμα 6.11: Μεταβολή των ταχυτήτων V_s σε σύγκριση με τον δείκτη P_{21} για τα αποτελέσματα Μονοαξονικής-Τριαξονικής δοκιμής, Μονοαξονικής-δοκιμής Brazilian και τα συνδυαστικά αποτελέσματα και των τριών δοκιμών.

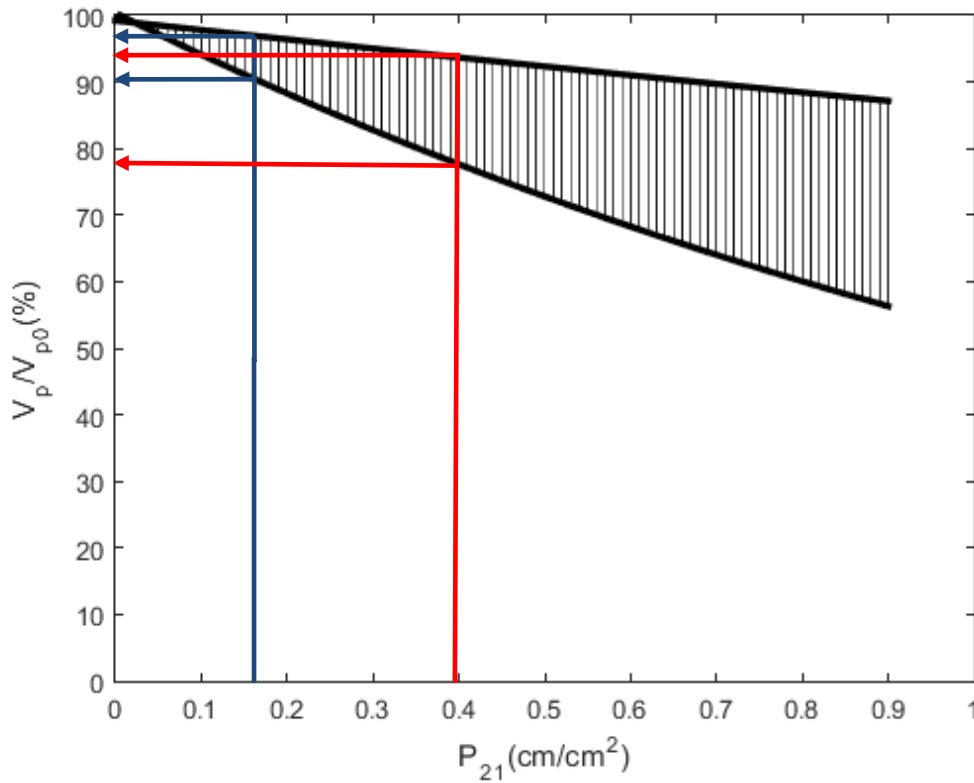
Το αντίστοιχο διάγραμμα για τα κύματα P είναι παρόμοιας μορφής και παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12: Μεταβολή των ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με τον δείκτη P_{21} για τα αποτελέσματα Μονοαξονικής-Τριαξονικής δοκιμής, Μονοαξονικής-δοκιμής Brazilian και τα συνδυαστικά αποτελέσματα και των τριών δοκιμών.

Τα διαγράμματα αυτά είναι σημαντικά καθώς, πέρα από τις μαθηματικές σχέσεις που παρουσιάζουν για κάθε δοκιμή, παρέχουν και το εύρος διακύμανσης της μείωσης των ταχυτήτων για συγκεκριμένο βαθμό ρωγμάτωσης. Το εύρος αυτό μεγαλώνει με την αύξηση του βαθμού ρωγμάτωσης ωστόσο για τα δοκίμια με προϋπάρχουσες ασυνέχειες και τα δοκίμια που εμφάνισαν εξωτερικά ρωγμές κατά τα στάδια φόρτισης ο δείκτης P_{21} έχει μέση τιμή $0,15 \text{ cm/cm}^2$ ενώ για τα δοκίμια στη θραύση $0,47 \text{ cm/cm}^2$ αντίστοιχα. Έτσι η προσέγγιση της μείωσης των ταχυτήτων ειδικά για δοκίμια που δεν παρουσιάζουν τόσο έντονη ρωγμάτωση έχει μικρή απόκλιση με τη χρήση του συνδυαστικού διαγράμματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται εφαρμογή υπολογισμού του εύρους επίμηκων ταχυτήτων για βαθμό ρωγμάτωσης που αντιστοιχεί σε βραχώδες υλικό πριν τη θραύση και για βαθμό ρωγμάτωσης που αντιστοιχεί σε βραχώδες υλικό στη θραύση:



Σχήμα 6.13: Εύρος ταχυτήτων V_p για βαθμό ρωγμάτωσης $P_{21(\alpha)}=0,17\text{cm/cm}^2$ και για βαθμό ρωγμάτωσης $P_{21(\beta)}=0,40\text{ cm/cm}^2$.

- Για βαθμό ρωγμάτωσης $P_{21(\alpha)}=0,17\text{cm/cm}^2$:

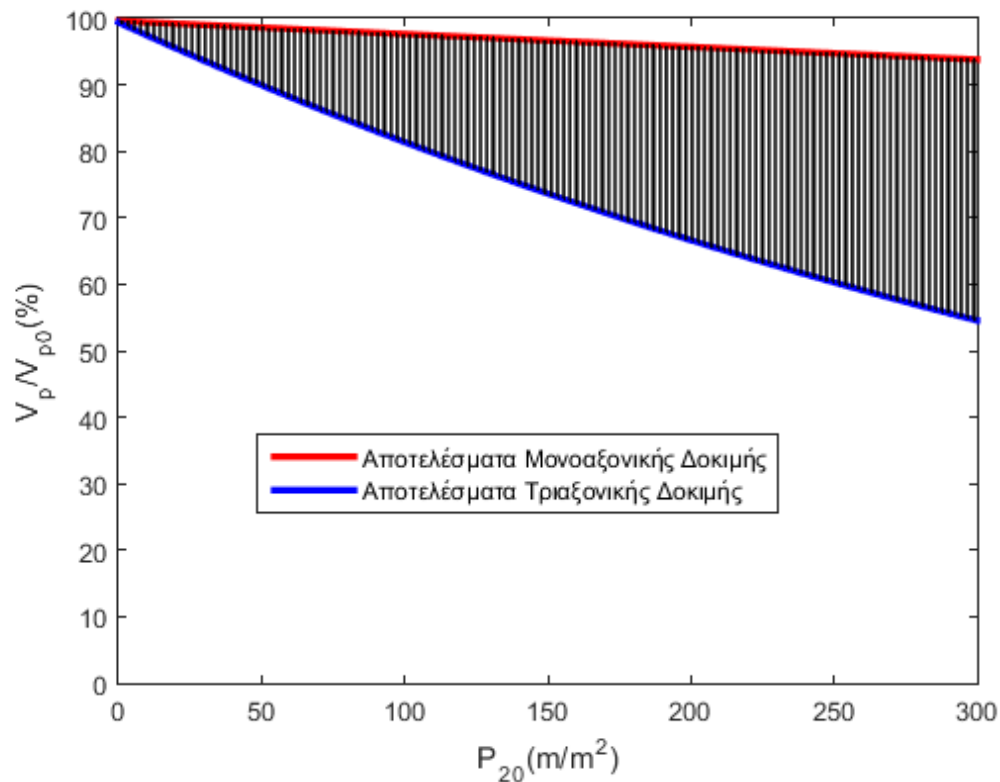
$$\frac{V_p}{V_{p0}} = 90,5 - 97,3 \text{ (\%)}$$

- Για βαθμό ρωγμάτωσης $P_{21(\beta)}=0,40\text{ cm/cm}^2$:

$$\frac{V_p}{V_{p0}} = 78,0 - 94,5 \text{ (\%)}$$

Ο δείκτης P_{21} είναι ο πιο κομβικός από τους δείκτες ρωγμάτωσης καθώς είναι ο μοναδικός που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές Brazilian. Ωστόσο μπορεί να υπολογιστεί κι ένα εύρος απομείωσης των επίμηκων ταχυτήτων για το δείκτη P_{20} με βάση τα αποτελέσματα της μονοαξονικής και αντίστοιχα τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής. Όσον αφορά τα εγκάρσια κύματα, οι καταγραφές της

μονοαξονικής δοκιμής δεν είχαν καλή συσχέτιση με το δείκτη P_{20} κι έτσι δεν κρίνεται ορθή η χρησιμοποίησή τους. Το ίδιο ισχύει και για τα αποτελέσματα της μονοαξονικής δοκιμής για τις ταχύτητες επιμήκων και διατμητικών κυμάτων και το δείκτη P_{10} . Στο **Σχήμα 6.13** παρατίθεται το εύρος διακύμανσης των ταχυτήτων V_p με βάση τις καταγραφές της μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης ως προς το δείκτη P_{20} .



Σχήμα 6.14: Μεταβολή των ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με τον δείκτη P_{20} για τα αποτελέσματα Μονοαξονικής και Τριαξονικής δοκιμής.

Το διάγραμμα της μεταβολής των ταχυτήτων V_s έχει παρόμοια μορφή.

6.3 ΠΙΝΑΚΕΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αρχικά θα παρουσιαστεί σε πίνακα η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μονοαξονικής και της τριαξονικής δοκιμής με τις δύο διαφορετικές μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από την εξαγωγή των μέσων όρων για κάθε δοκιμή.

ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	Μονοαξονική θλίψη με τη μεθοδολογία επαναφόρτισης σε στάδια (5.1.2)		Τριαξονική θλίψη με τη μεθοδολογία απ'ευθείας φόρτισης σε στάδια (5.1.1)	
	ΠΟΣΟΣΤΟ (%) σ_{1max}	V_p (%)	V_s (%)	V_p (%)
20	-0,93	-1,3	-0,5	-0,1
40	-0,93	-1,3	-3,7	-1,2
60	-1,11	-1,93	-4,4	-2,4
80	-1,25	-1,93	-5,7	-4,0

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα μεταβολής των ταχυτήτων V_p και V_s για τις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης ανά στάδιο φόρτισης.

Το γεγονός ότι οι ταχύτητες παρουσιάζουν μεγαλύτερη μείωση στο 20% επί της αρχικής αντοχής στη μονοαξονική θλίψη έχει να κάνει με τη διαφορετική μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για κάθε περίπτωση. Στη μονοαξονική θλίψη τα δοκίμια είχαν ήδη φτάσει στην τάση διάδοσης των μικρορωγμών πριν την επαναφόρτιση τους σε στάδια. Ωστόσο στη συνέχεια βλέπουμε πως οι μεταβολές στην τριαξονική δοκιμή είναι πολύ μεγαλύτερες.

Επιπλέον, θα παρουσιαστούν οι βασικές εξισώσεις που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα για τη μείωση των ταχυτήτων με το βαθμό ρωγμάτωσης του βραχώδους υλικού:

Συσχέτιση	Δοκιμή	Εξίσωση	Βαθμός συσχέτισης R ²
V _p – ποσοστό μέγιστης τάσης	Μονοαξονική θλίψη	$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 99,82 * e^{-0,0003*(\%)\sigma_{ucs}}$	0,77
V _p – ποσοστό μέγιστης τάσης	Τριαξονική θλίψη	$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 100,0 * e^{-0,0008*(\%)\sigma_{1max}}$	0,89
V _p – δείκτης P ₂₀	Τριαξονική θλίψη	$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 99,395 * e^{-0,002*P_{20}}$	0,84
V _p – δείκτης P ₂₁	Τριαξονική θλίψη	$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 99,83 * e^{-0,704*P_{21}}$	0,85
V _s – δείκτης P ₂₁	Τριαξονική θλίψη	$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 100,3 * e^{-0,760*P_{21}}$	0,74
V _p – δείκτης P ₂₁	Δοκιμή Brazilian	$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 97,96 * e^{-0,125*P_{21}}$	0,68
V _p – δείκτης P ₂₀	Μονοαξονική-Τριαξονική θλίψη	$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 100,56 * e^{-0,002*P_{20}}$	0,85
V _s – δείκτης P ₂₀	Μονοαξονική-Τριαξονική θλίψη	$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 100,66 * e^{-0,002*P_{20}}$	0,75
V _s – δείκτης P ₂₁	Μονοαξονική-Τριαξονική θλίψη	$\frac{V_s}{V_{s0}} (\%) = 100,45 * e^{-0,638*P_{21}}$	0,77
V _p – δείκτης P ₂₁	Μονοαξονική θλίψη-Δοκιμή Brazilian	$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 99,223 * e^{-0,144*P_{21}}$	0,78

Πίνακας 6.2: Βασικές σχέσεις που προέκυψαν από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

*Σημείωση: Με το σύμβολο (%) σ_{ucs} εκφράζεται το πόσοστο επαναφόρτισης επί της αρχικής αντοχής στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης ενώ με το σύμβολο (%) σ_{1max} , το ποσοστό απ'ευθείας φόρτισης επί της αξονικής τάσης αστοχίας στη δοκιμή τριαξονικής θλίψης.

6.4 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι καταγραφές των ταχυτήτων διάδοσης κυμάτων P και S έδωσαν σημαντικές μειώσεις με αύξηση της μικρορωγμάτωσης. Ωστόσο υπάρχουν δύο βασικά ζητήματα τα οποία πρέπει να αποσαφηνιστούν:

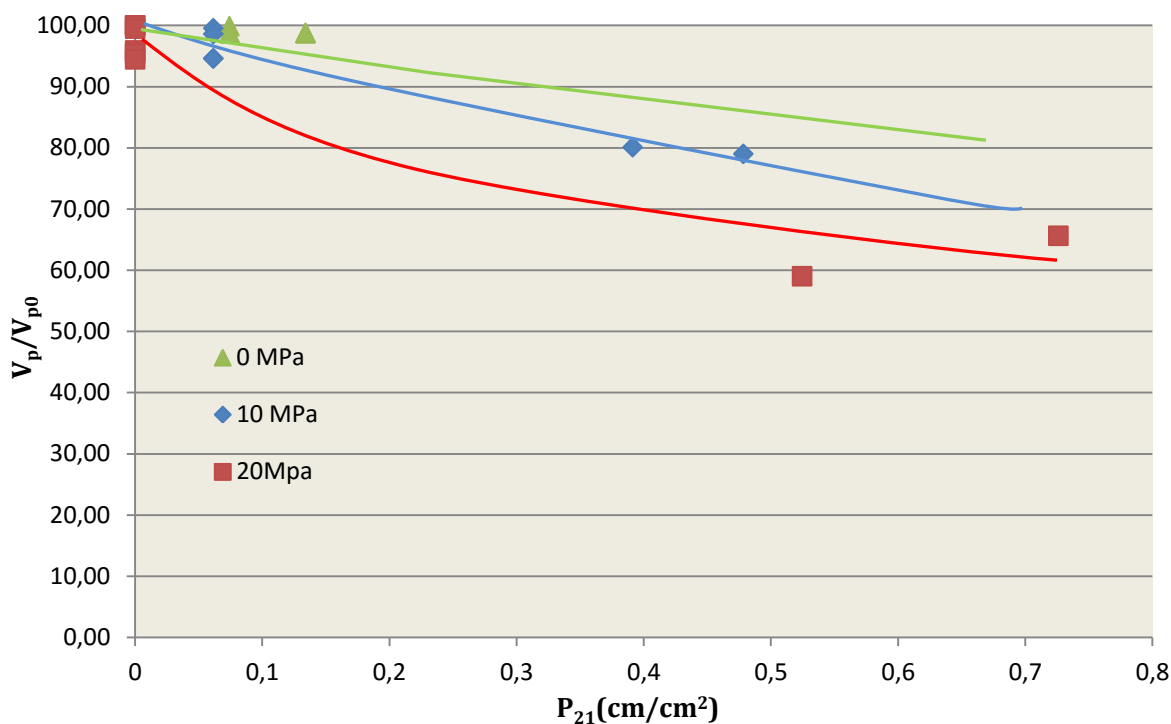
1. Το γεγονός πως οι καταγραφές στην τριαξονική δοκιμή δίνουν μεγαλύτερες μειώσεις των ταχυτήτων σε σχέση με τις καταγραφές της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης και της δοκιμής Brazilian για παρεμφερή βαθμό ρωγμάτωσης (μέσω των εξισώσεων που προκύπτουν από τις καταγραφές).
2. Στις καταγραφές της τριαξονικής δοκιμής, τα δοκίμια που μετρήθηκαν στη θραύση οδηγούν σε εξισώσεις που προβλέπουν μεγαλύτερη μείωση των ταχυτήτων σε σχέση με αυτές που προέκυψαν από τα δοκίμια που μετρήθηκαν πριν τη θραύση. Δηλαδή για την ίδια τιμή του βαθμού ρωγμάτωσης οι εξισώσεις που προκύπτουν από τις μετρήσεις στη θραύση δίνουν μεγαλύτερη μείωση των ταχυτήτων από αυτές των καταγραφών πριν τη θραύση.

Στην τριαξονική θλίψη η μικρορωγμάτωση διαφέρει (**υποκεφάλαιο 2.2.3**). Η πυκνότητα των μικρορωγμών είναι μεγαλύτερη ωστόσο η διάδοση τους καθυστερεί λόγω της πλευρικής πίεσης. Σε μακροσκοπικό επίπεδο ουσιαστικά το πέτρωμα ξεκινάει να παρουσιάζει μία όγκιμη συμπεριφορά η οποία εντείνεται με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.6** η ανάπτυξη των μικρορωγμών παίρνει πολύ μικρότερες διαστάσεις στην τριαξονική απ'ότι στην μονοαξονική θλίψη.

Έτσι είναι πιθανόν, η ρωγμάτωση που αναπτύσσεται στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της τριαξονικής δοκιμής, να μην αποτυπώνεται εξ' ολοκλήρου στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου. Συνεπώς με τη χρήση των δεικτών αποτυπώσης της εξωτερικής ρωγμάτωσης (P_{10} , P_{20} , P_{21}), υπάρχει το ενδεχόμενο να υποεκτιμάται ο βαθμός ρωγμάτωσης.

Για το λόγο αυτό, σε επόμενο στάδιο της έρευνας, θα πρέπει να γίνει η διερεύνηση του βαθμού ρωγμάτωσης σε επίπεδο μικροκλίμακας (με χρήση εικόνων από μικροσκόπιο) σε δοκίμια που έχουν υποβληθεί σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό, θα εντοπιστεί ο βαθμός ανάπτυξης μικρορωγματώσεων στα όρια των κρυστάλλων εντός του πετρώματος. Με βάση την βιβλιογραφία, αναμένεται η μικρορωγμάτωση να είναι μεγαλύτερη στα δοκίμια που έχουν υποβληθεί σε τριαξονική δοκιμή σε σχέση με αυτά που έχουν υποβληθεί σε μονοαξονική δοκιμή.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μείωση των ταχυτήτων επίμηκων κυμάτων ως προς το δείκτη P_{21} για δοκίμια πετρώματος που έχουν υποβληθεί σε μονοαξονική θλίψη, σε τριαξονική θλίψη με πλευρική πίεση 10 MPa και σε τριαξονική θλίψη με πλευρική πίεση 20 MPa.



Σχήμα 6.15: Μεταβολή των επίμηκων ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με τον δείκτη P_{21} για πλευρική τάση 0, 10 και 20 MPa.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 6.14**, η μείωση των ταχυτήτων V_p οξύνεται με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Επομένως, για σταθερό βαθμό ρωγμάτωσης P_{21} , η μείωση των ταχυτήτων είναι πιο έντονη με την αύξηση της πλευρικής πίεσης.

Επίσης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο βαθμός ρωγμάτωσης που αποτυπώνεται στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου στη δοκιμή τριαξονικής θλίψης δεν είναι απολύτως αντιστοιχος με το βαθμό μικρορωγμάτωσης στο εσωτερικό του δοκιμίου, είναι δηλαδή μικρότερος. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται με την αύξηση της πλευρικής πίεσης και σε αυτό οφείλεται η υποτίμηση των δεικτών ρωγμάτωσης (όπως καταγράφετε εξωτερικά) αλλά και η διαφορά της εκτίμησης μείωσης των ταχυτήτων.

Επιπλέον εκτιμάται ότι η αιτία απόκλισης των καταγραφών των ταχυτήτων πριν τη θραύση και στη θραύση έχει να κάνει με τη φύση των ρωγμών. Παρατηρήθηκε πως οι ρωγμές στη θραύση πέραν της μεγαλύτερης πυκνότητας που λογικά παρουσίαζαν σε σχέση με τα προηγούμενα στάδια φόρτισης, είχαν και μεγαλύτερο άνοιγμα (πάχος). Σε αυτό μπορεί να οφείλεται η περαιτέρω μείωση των ταχυτήτων που προβλέπει η ανάλυση με τα αποτελέσματα καταγραφής ταχυτήτων στη θραύση.

την παρούσα διπλωματική δεν ήταν δυνατή η έρευνα της επιρροής του πάχους των ρωγμών στις μεταβολές των ταχυτήτων. Ωστόσο για περαιτέρω ανάλυση προτείνεται η χρήση του δείκτη P_{22} ο οποίος ορίζεται ως:

$$P_{22} = \frac{\text{Area of fracture traces}}{\text{Area of exposure}} = \frac{\text{Εμβαδόν ρωγμών}}{\text{Εμβαδόν δοκιμίου}} \left(\frac{m^2}{m^2} \right) \quad (6.9)$$

Το γεγονός ότι η απομείωση των ταχυτήτων μπορεί να συμπεριλαμβάνει και άλλους παράγοντες (για παράδειγμα, όπως προαναφέρθηκε, το άνοιγμα των ρωγμών) ή πως η ρωγμάτωση στην τριαξονική δοκιμή ενδέχεται να μην αποτυπώνεται σε όλο της το εύρος στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου, δίνει ιδιαίτερη αξία στα διαγράμματα των **Σχημάτων 6.11, 6.12 και 6.14**. Είναι δηλαδή πιο ορθή η προσέγγιση της συμπεριφοράς των ταχυτήτων με ένα εύρος που κυμαίνεται από τις πιο συντηρητικές στις πιο έντονες μειώσεις.

Τέλος, μία σημαντική διαπίστωση είναι πως οι ταχύτητες V_p και V_s παρουσίασαν παρόμοιες ποσοτικά μειώσεις σε σχέση με το βαθμό ρωγμάτωσης. Αυτό είναι εμφανές από τις εξισώσεις που προκύπτουν στα συνδυαστικά αποτελέσματα (**Κεφάλαιο 6**) αλλά και στα αποτελέσματα κάθε δοκιμής (**Κεφάλαιο 5**).

Συνέπεια του φαινομένου αυτού είναι πως μέσω της σχέσης **4.11** ο δυναμικός λόγος του Poisson ν_d παραμένει σχεδόν σταθερός για τα δοκίμια σε άρρηκτη και σε ρωγματώμενη κατάσταση. Επίσης ισχύει η εξής σχέση μεταξύ του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d και του δυναμικού μέτρου διάτμησης G_d :

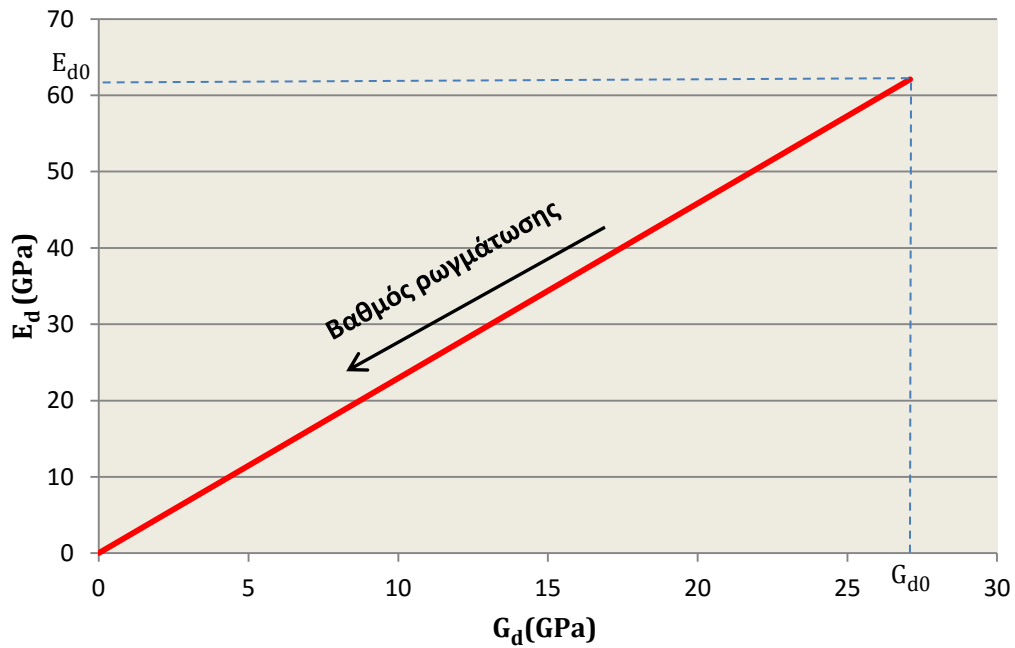
$$E_d = \frac{G_d}{2 * (1 + \nu_d)} \quad (6.10)$$

Παρατηρείται ότι με σταθερό λόγο του Poisson ν_d , η αναλογία του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d με το δυναμικό μέτρο διάτμησης G_d δεν αλλάζει. Δηλαδή όσο μειώνεται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας λόγω της ρωγμάτωσης τόσο θα απομειωθεί και το δυναμικό μέτρο διάτμησης. Από τον πίνακα (4.4) εξάγονται οι μέσες τιμές των δυναμικών παραμέτρων για τα δοκίμια σε άρρηκτη κατάσταση. Προκύπτει:

$$E_{d0} = 62,1 \text{ GPa} \text{ και}$$

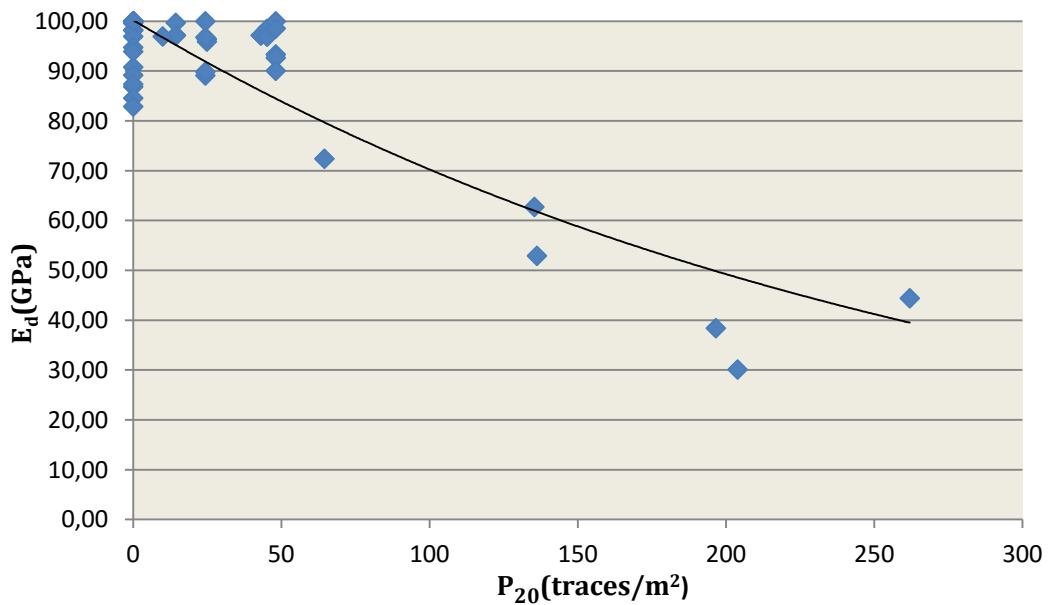
$$G_{d0} = 27,1 \text{ GPa}$$

Στο **Σχήμα 6.15** περιγράφεται γραφικά η σχέση των δυναμικών μέτρων με τον βαθμό ρωγμάτωσης των δοκιμίων με βάση παρόμοια μείωση των ταχυτήτων V_p και V_s .

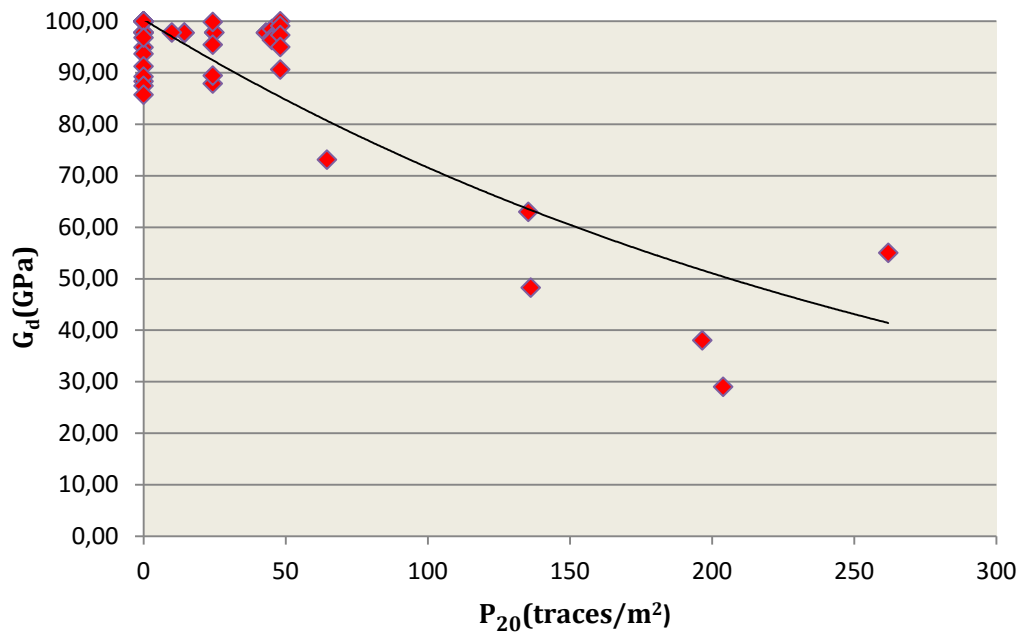


Σχήμα 6.16: Συσχέτιση δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και δυναμικού μέτρου διάτμησης για παρεμφερή μείωση των ταχυτήτων V_p και V_s .

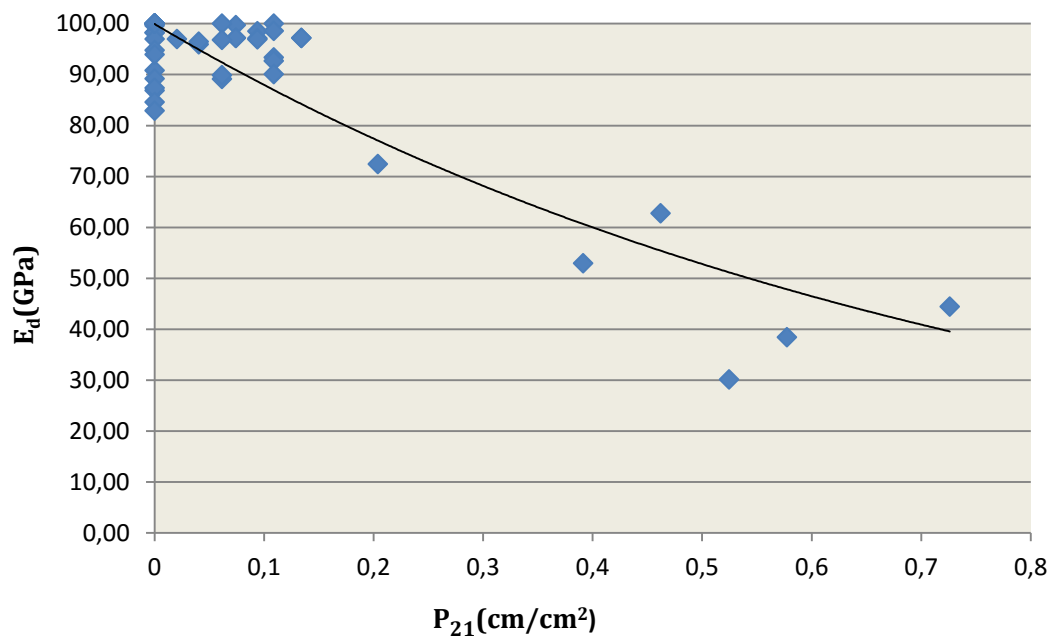
Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή των δυναμικών παραμέτρων E_d και G_d με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής.



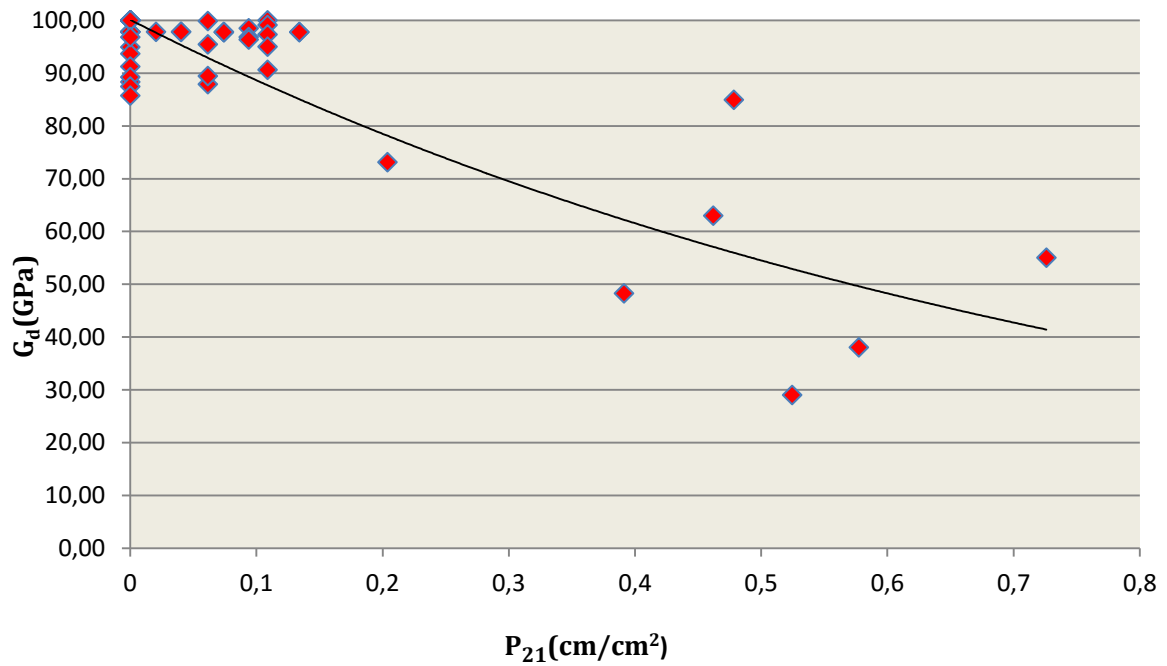
Σχήμα 6.17: Μεταβολή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το δείκτη P_{20} με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 6.18: Μεταβολή του δυναμικού μέτρου διάτμησης σε σχέση με το δείκτη P_{20} με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 6.19: Μεταβολή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το δείκτη P_{21} με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 6.20: Μεταβολή του δυναμικού μέτρου διάτμησης σε σχέση με το δείκτη P_{21} με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.

Όπως φαίνεται και στα πειραματικά αποτελέσματα η μείωση των E_d και G_d είναι παρεμφερής. Έτσι η θεωρητική συμπεριφορά του διαγράμματος 6.16 προσεγγίζεται σε πολύ καλό βαθμό από τα πειραματικά δεδομένα. Η σχέση δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και δυναμικού μέτρου διάτμησης είναι γραμμική με την αύξηση του βαθμού ρωγμάτωσης.

Οι αναλυτικές εξισώσεις που προέκυψαν για τα δυναμικά μέτρα σε σύγκριση με το βαθμό ρωγμάτωσης είναι η εξής:

Για τον δείκτη P_{20} :

$$\frac{E_d}{E_{d0}} (\%) = 100,22 * e^{-0,0038 * P_{20}} \quad (6.11)$$

με βαθμό συσχέτισης $R^2=0,74$

$$\frac{G_d}{G_{d0}} (\%) = 100,35 * e^{-0,0037 * P_{20}} \quad (6.12)$$

με βαθμό συσχέτισης $R^2=0,69$

Για τον δείκτη P_{21} :

$$\frac{E_d}{E_{d0}} (\%) = 99,94 * e^{-1,276 * P_{21}} \quad (6.13)$$

με βαθμό συσχέτισης $R^2=0,75$

$$\frac{G_d}{G_{d0}} (\%) = 100,11 * e^{-1,215 * P_{21}} \quad (6.14)$$

με βαθμό συσχέτισης $R^2=0,68$

6.5) ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

Μεγάλο τμήμα της ανάλυσης της συμπεριφοράς των ταχυτήτων διατμητικών και επίμηκων κυμάτων έχει γίνει στο **Κεφάλαιο 3**. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν ποσοτικές σχέσεις μεταβολής των ταχυτήτων ως προς τη ρωγμάτωση του πετρώματος και θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής. Να σημειωθεί πως οι περισσότερες έρευνες και συσχετίσεις που έχουν γίνει αφορούν ρωγματωμένη βραχομάζα στο υπαίθρο κι όχι πέτρωμα εργαστηρίου. Έτσι επεισέρονται κι άλλοι παράγοντες που πρέπει να συνυπολιστούν όπως για παράδειγμα το φαινόμενο της κλίμακας, η αποσάθρωση και η ενεργός τάση.

Οι περισσότερες ποσοτικοποιημένες μελέτες έχουν ως αντικείμενο μελέτης τις ταχύτητες επίμηκων κυμάτων. Ωστόσο με βάση τα αποτελέσματα των καταγραφών και το θεωρητικό υπόβαθρο μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως οι ταχύτητες P και S έχουν παρόμοια τάση μείωσης ως προς το βαθμό ρωγμάτωσης.

Οι Deere et al. (1967) διαπίστωσαν πως η αναλογία V_{field}/V_{lab} είναι πολύ κοντά

στην τιμή του RQD όταν υψωθεί στο τετράγωνο. Η ταχύτητα V_{field} αναφέρεται στην ταχύτητα επίμηκων κυμάτων σε επί τόπου δοκιμές στο πεδίο ενώ η V_{lab} στην ταχύτητα του άρρηκτου πετρώματος που μετράται στο εργαστήριο. Δηλαδή:

$$RQD(\%) = 100 * \left(\frac{V_{field}}{V_{lab}}\right)^2 \quad (6.15)$$

Σε συνέχεια αυτής αλλά και μεταγενέστερων ερευνών ο McDowell (1993) πρότεινε τη σχέση αξιολόγησης βραχομάζας με βάση το ποσοστό μείωσης των ταχυτήτων.

$\left(\frac{V_{field}}{V_{lab}}\right)^2$	RQD(%)	Συχνότητα Ρωγμών (m ⁻¹)	Ποιότητα Βραχομάζας
0-0,2	0-25	>18	Πολύ πτωχή
0,2-0,4	25-50	15-18	Πτωχή
0,4-0,6	50-75	5-8	Μέτρια
0,6-0,8	75-90	1-5	Καλή
0,8-1,0	90-100	0-1	Εξαιρετική

Πίνακας 6.3: Συσχέτιση λόγου επίμηκων ταχυτήτων πεδίου και άρρηκτου πετρώματος για το χαρακτηρισμό της βραχομάζας (McDowell, 1993)

Η αντιστοιχία των παραπάνω παραμέτρων με την ανάλυση της παρούσας διπλωματικής είναι η εξής:

- $V_{\text{field}} \rightarrow V_p$ στα στάδια φόρτισης και στη θραύση
- $V_{\text{lab}} \rightarrow V_{p0}$ στην αρχική κατάσταση του πετρώματος
- Συχνότητα των ρωγμών \rightarrow Είναι ο δείκτης P_{10} (ίχνη/m.)

Επίσης σημαντική έρευνα έχει γίνει από τους Sjogren et al. (1979) και Sjogren (1984,1993) όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3. Η Σχέση 3.10 με επίλυση ως προς την ποσοστιαία μείωση των ταχυτήτων γίνεται:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{3}{P_{10}}\right)^{\frac{2}{V_0}} \quad (6.11)$$

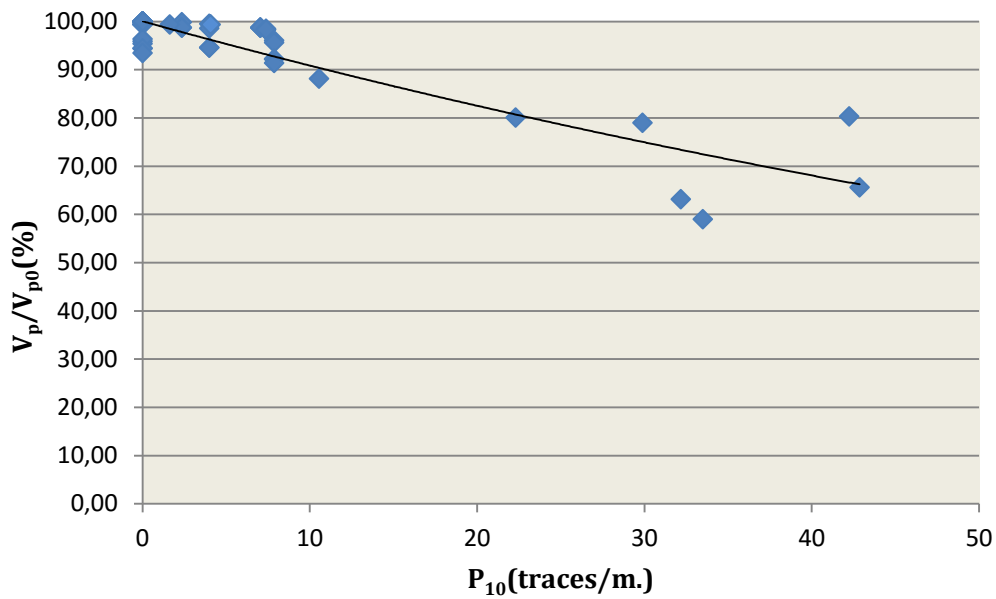
Η εξίσωση αυτή υποδεικνύει πως η μείωση των ταχυτήτων δεν είναι αποκλειστικά συνάρτηση του βαθμού ρωγμάτωσης αλλά και της αρχικής ταχύτητας του άρρηκτου πετρώματος. Συνδέεται δηλαδή και με τις ιδιότητες του πετρώματος.

Για τη σύγκριση με τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής θα χρησιμοποιήσουμε τη μέση τιμή των ταχυτήτων επίμηκων κυμάτων όπως προέκυψε από τις καταγραφές στην αρχική κατάσταση των δοκιμίων ($\overline{V_p} = 4926,86 \text{ m/s}$).

Έτσι η σχέση 6.11 γίνεται:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{3}{P_{10}}\right)^{0,41} \quad (6.12)$$

Στη συνέχεια θα παρουσιάσει το διάγραμμα επίμηκων ταχυτήτων με τον δείκτη P_{10} όπως προέκυψε από τις καταγραφές της μονοαξονικής και της τριαξονικής δοκιμής στα δοκίμια της παρούσας διπλωματικής. Οι σχέσεις των ταχυτήτων με το δείκτη P_{10} δεν παρουσιάζονται διεξοδικά στα προηγούμενα κεφάλαια αφού παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τις αντίστοιχες σχέσεις του δείκτη P_{20} . Ωστόσο οι βιβλιογραφικές σχέσεις αναφέρονται κυρίως στο δείκτη P_{10} συνεπώς είναι απαραίτητη η παρουσίαση της παρακάτω συσχέτισης.



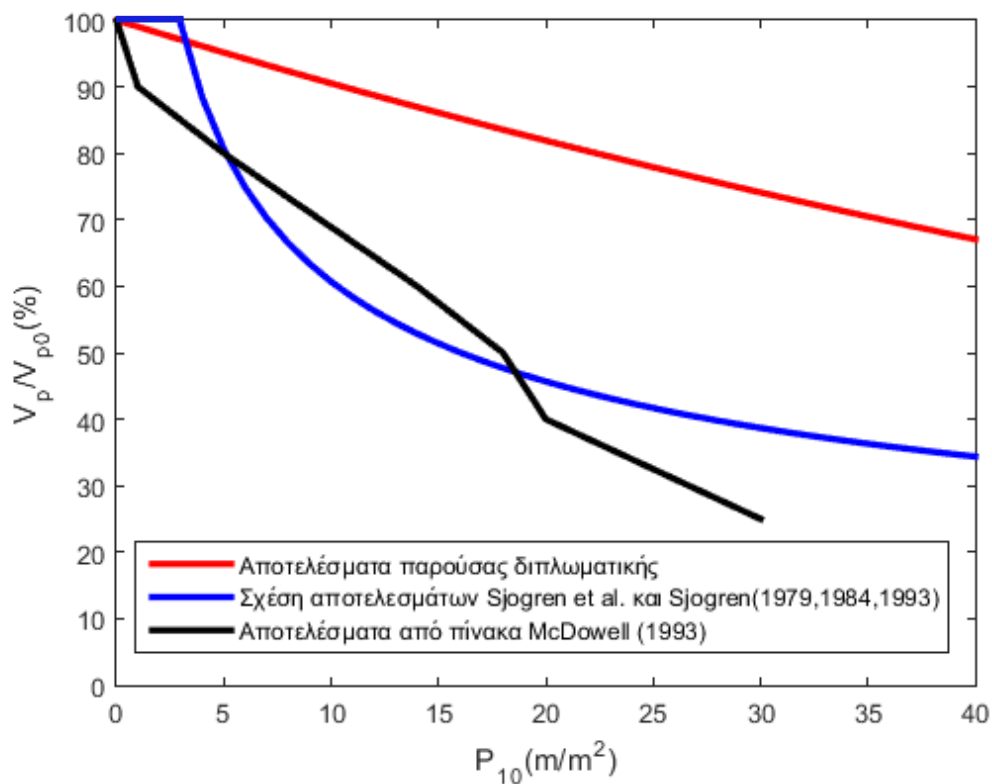
Σχήμα 6.21: Μεταβολή των ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με τον δείκτη P_{10} για τα αποτελέσματα Μονοαξονικής και Τριαξονικής δοκιμής.

Η εξίσωση που προκύπτει για την απομείωση των ταχυτήτων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα είναι:

$$\frac{V_p}{V_{p0}} (\%) = 100,04 * e^{-0,01 * P_{10}} \quad (6.13)$$

με πολύ καλό βαθμό συσχέτισης $R^2=0,80$

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν σε κοινό οι σχέσεις (6.12), (6.13) και οι συσχετίσεις του McDowell (1993) από τον Πίνακα 6.3:



Σχήμα 6.22: Μεταβολή των επίμηκων ταχυτήτων V_p σε σύγκριση με τον δείκτη P_{10} για τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής, τις καταγραφές των Sjogren et al. (1979) και Sjogren (1984,1993) και τον πίνακα του McDowell (1993).

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής δίνουν σαφώς πιο συντηρητικές μειώσεις των ταχυτήτων διάδοσης κυμάτων P . Η διαφορετική ρωγμάτωση που επιτυγχάνεται στο εργαστήριο, το φαινόμενο της κλίμακας, οι ιδιότητες του πέτρωματος (τα αποτελέσματα των βιβλιογραφικών αναφορών αφορούν ένα πλήθος πετρωμάτων κι όχι ένα συγκεκριμένο πέτρωμα), η αποσάθρωση, η ενεργός τάση είναι κάποιοι παράγοντες στους οποίους μπορεί να οφείλεται το φαινόμενο αυτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η διερεύνηση της απομείωσης των ταχυτήτων επιμήκων και διατμητικών κυμάτων σε γρανιτικό πέτρωμα που έχει υποστεί μικρορωγμάτωση-ρωγμάτωση μέσω θλιπτικής και εφελκυστικής έντασης.

Η εργαστηριακή διερεύνηση έγινε σε γρανιτικό πέτρωμα και περιελάμβανε τα ακόλουθα:

1. Μέτρηση του πορώδους
2. Μονοαξονική θλίψη με μέτρηση E και ν
3. Τριαξονική θλίψη
4. Έμμεσο εφελκυσμό
5. Ακουστική Εκπομπή
6. Καταγραφή ταχυτήτων διάδοσης υπερήχων

Η φόρτιση δεν είχε σκοπό τη θραύση του πετρώματος, αλλά τη δημιουργία και την επέκταση των μικρορωγμών, γι' αυτό και μετά τη δοκιμή ήταν εφικτή η καταγραφή των ταχυτήτων διάδοσης στη συσκευή υπερήχων.

Η έναρξη και η διάδοση της μικρορωγμάτωσης συμβαίνει σε σταθερά ποσοστά της αντοχής του πετρώματος. Ο εντοπισμός των τάσεων έναρξης και διάδοσης της μικρορωγμάτωσης έγινε με τη μέθοδο ακουστικής εκπομπής και με τη χρήση των δεδομένων παραμόρφωσης. Στη δοκιμή ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) αν και λαμβάνονται πολλά δεδομένα από την καταγραφή των ηχητικών κυμάτων (πλάτος, συχνότητα, ενέργεια, ισχύς σήματος κ.α.), η σημαντικότερη παράμετρος για τον εντοπισμό των τάσεων έναρξης και διάδοσης των μικρορωγμών, είναι ο η αθροιστική κατανομή των συμβάντων ΑΕ σε σχέση με την επιβαλλόμενη τάση (Σχήμα 4.26).

Ο προσδιορισμός των τάσεων έναρξης και ασταθούς διάδοσης των μικρορωγμών με βάση τις δύο μεθόδους, παρουσίασε πολύ καλή συσχέτιση:

$$\sigma_{ci} = 46\% - 47\% \sigma_{ucs}$$

$$\sigma_{cd} = 77\% - 78\% \sigma_{ucs}$$

όπου σ_{ucs} είναι η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

Σε επόμενο στάδιο έγινε φόρτιση των δοκιμών σε ποσοστά επί της αρχικής αντοχής στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Ο σκοπός ήταν να διαπιστωθεί η μεταβολή των ταχυτήτων πριν και μετά το επίπεδο των τάσεων σ_{ci} και σ_{cd} . Ωστόσο, η μείωση των ταχυτήτων χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία αυτή δεν ήταν η αναμενόμενη (<0,5%). Αυτό οφείλεται στις ιδιότητες του γρανιτικού πετρώματος και στη διαδικασία μικρορωγμάτωσης του κατά τη μονοαξονική φόρτιση. Η πυκνότητα των μικρορωγμών δεν ήταν αρκετά μεγάλη, ώστε να προξενήσει σημαντική αλλαγή

των ταχυτήτων V_p και V_s . Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό συμπέρασμα της παρούσας διπλωματικής.

Ωστόσο, με την εναλλακτική μεθοδολογία φόρτισης που ακολουθήθηκε (φόρτιση στο επίπεδο τάσεων διάδοσης της ρωγμάτωσης και επαναφόρτιση σε ποσοστά της αρχικής αντοχής) η μείωση των ταχυτήτων ήταν πιο σημαντική.

Αντιθέτως, στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης η απομείωση των ταχυτήτων ήταν αξιοσημείωτη σε ποσοστά φόρτισης επί της αρχικής αντοχής. Έτσι, οι καταγραφές των ταχυτήτων έγιναν με βάση την αρχική μεθοδολογία. Επιπλέον, ήταν εφικτή η καταγραφή των ταχυτήτων στη θραύση με αποτέλεσμα την εξαγωγή συμπερασμάτων και για μεγάλο βαθμό ρωγμάτωσης.

Η ανάλυση της απομείωσης των ταχυτήτων σε σχέση με τις τάσεις έναρξης και διάδοσης των μικρορωγμών στην τριαξονική δοκιμή δεν ήταν δυνατή. Οι τάσεις σ_{ci} και σ_{cd} έχουν διαφορετικές τιμές στην τριαξονική απ'ότι στην μονοαξονική θλίψη και δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός τους στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής.

Εφόσον στις δύο δοκιμές εφαρμόστηκαν διαφορετικές μεθοδολογίες, ήταν απαραίτητη η χρήση των δεικτών ρωγμάτωσης P_{10} , P_{20} , P_{21} ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν προταθεί γενικώς για την εκτίμηση του βαθμού ρωγμάτωσης των πετρωμάτων και σε εργαστηριακό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο βραχομάζας στο πεδίο.

Επιπλέον, έγινε και η καταγραφή ταχυτήτων σε δείγματα που υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό (δοκιμή Brazilian) στην αρχική κατάσταση και μετά τη θραύση τους. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης έγινε με το δείκτη P_{21} . Γενικά ο δείκτης που χρησιμοποιήθηκε περισσότερο για την ανάλυση των καταγραφών ήταν ο P_{21} , αφού τα αποτελέσματα παρουσίαζαν καλύτερη συσχέτιση, αλλά κυρίως διότι ο δείκτης μπορεί να προσδιοριστεί και στις τρεις δοκιμές.

Από την επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η ποσοστιαία μεταβολή των ταχυτήτων περιγράφεται με καλή προσέγγιση από εκθετική συνάρτηση τύπου: $V = V_0 * e^{-a*x}$,
Όπου x : είτε το ποσοστό φόρτισης ή επαναφόρτισης (ανάλογα με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε) της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, είτε ένας από τους δείκτες ρωγμάτωσης.

Ο εκθέτης a είναι μία παράμετρος που πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω. Εικάζεται πως εξαρτάται από τις ιδιότητες του πετρώματος καθώς και από χαρακτηριστικά των ρωγμών που δεν ήταν εφικτός ο προσδιορισμός τους στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης (όπως για παράδειγμα το άνοιγμα των

ρωγμών). Η ταχύτητα V_0 είναι αποκλειστική ιδιότητα του άρρηκτου πετρώματος και εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση και τη μικροδομή του.

2. Η μείωση της ταχύτητας των επιμήκων κυμάτων σε σχέση με τους δείκτες ρωγμάτωσης παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση σε σχέση με την αντίστοιχη μείωση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων.
3. Τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης προβλέπουν πιο μικρές μειώσεις των ταχυτήτων σε σύγκριση με τα αποτελέσματα τριαξονικής θλίψης, ενώ τα αποτελέσματα της δοκιμής Brazilian αποδίδουν ενδιάμεσες τιμές μεταβολής τους. Εκτιμάται, πως το φαινόμενο αυτό οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο ρωγμάτωσης του βραχώδους υλικού σε κάθε δοκιμή, όπως έχει αναλυθεί στο **Κεφάλαιο 6.4**.
4. Συνδυάζοντας όλα τα αποτελέσματα, ήταν δυνατή η εξαγωγή ενός γραφήματος εύρους διακύμανσης της μείωσης των ταχυτήτων V_p και V_s . Με βάση τον δείκτη P_{21} χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα και των τριών δοκιμών (**Σχήμα 6.11, 6.12**) ενώ με τον δείκτη P_{20} τα αποτελέσματα μονοαξονικής και τριαξονικής (**Σχήμα 6.14**).
5. Τα πειραματικά αποτελέσματα προβλέπουν πιο μικρή μεταβολή των ταχυτήτων σε σχέση με αυτά από έρευνες της βιβλιογραφίας που έχουν γίνει κυρίως όμως σε κλίμακα βραχομάζας στο ύπαιθρο. Το φαινόμενο της κλίμακας, η διαφορετικού τύπου ρωγμάτωση και η αποσάθρωση της βραχομάζας είναι κάποιοι από τους παράγοντες στους οποίους μπορεί να οφείλεται η απόκλιση αυτή.

Τέλος, με βάση την επεξεργασία των δεδομένων, προέκυψε πως οι ταχύτητες επιμήκων και διατμητικών κυμάτων μειώνονται με παρόμοιο ρυθμό. Συνεπώς, ο λόγος Poisson παραμένει σχετικά αμετάβλητος ανάμεσα στο άρρηκτο και στο ρωγματωμένο, λόγω φόρτισης, πέτρωμα. Συμπερασματικά, η αναλογία δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και δυναμικού μέτρου διάτμησης παραμένει σταθερή με την αύξηση του βαθμού ρωγμάτωσης. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα

Από την παρούσα διπλωματική εργασία μπορούν να προκύψουν οι ακόλουθες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία έγινε αποτύπωση της εξωτερικής ρωγμάτωσης του βραχώδους υλικού, σε επόμενο στάδιο θα μπορούσε να γίνει η

ανάλυση της μικρορωγμάτωσης με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Αυτή η προσέγγιση θα έδινε μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση του βαθμού ρωγμάτωσης καθώς εκτιμάται πως ειδικά στην τριαξονική δοκιμή, οι ρωγμές δεν διαδίδονται εντός του δοκιμίου σε μεγάλο βαθμό ώστε να αποτυπωθούν εξ' ολοκλήρου στην εξωτερική επιφάνεια του.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να γίνει μελέτη καταγραφής των ταχυτήτων σε διαφορετικά πετρώματα. Έτσι, θα είναι εφικτή η εκτίμηση της επίδρασης των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού στην μεταβολή των ταχυτήτων.

Τέλος, κρίσιμη θεωρείται και η διερεύνηση άλλων χαρακτηριστικών της μικρορωγμάτωσης-ρωγμάτωσης, για τα οποία δεν έγινε εμβάθυνση στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Όπως προαναφέρθηκε, σημαντική είναι η επίδραση του ανοίγματος των ρωγμών στην απομείωση των ταχυτήτων. Σε επόμενο στάδιο με χρήση μικροσκοπίου θα μπορούσε να μετρηθεί το άνοιγμα των μικρορωγμών και να εκτιμηθεί η επίδρασή του στις ταχύτητες διάδοσης υπερήχων και με την χρήση και άλλων δεικτών όπως π.χ. ο P_{22} (υποκεφάλαιο 6.4).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adams M., Sines G. (1978). "Crack extension from flaws in a brittle material subjected to compression". *Tectonophysics*. 49 (1/2) : 97-118.
- Amadei B. (1980). "Strength of a regularly jointed rock mass under biaxial and axisymmetric loading conditions", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 25(1), 3-13.
- Andreev G.E. (1995). "Brittle Failure of Rock Materials: Test Results and Constitutive Models. A.A. Balkema". Rotterdam, p. 446.
- Barton N. (2002). "Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design". *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* nr. 39, p. 185-216.
- Barton N. (2007). "Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy". Taylor & Francis Group, London, UK, p.69-76.
- Batzle M.L. ,Simmons G. ,Siegfried R.W. (1980). "Microcrack closure in rocks under stress: Direct observation". *Journal of Geophysical Research*. 85 (B12): 7072-7090.
- Bergh-Christensen J. (1968). "On the blastability of rocks (in Norwegian)". Lic. Techn. thesis, Geological Institute, Technical University of Norway, Trondheim.
- Bezys R. (1984). "Fracture Initiation, Propagation and Arrest Produced by Compressive Loading and Unloading in the Lac du Bonnet Batholith". B.Sc. thesis, Department of Earth Sciences, University of Manitoba, Winnipeg, p. 72.
- Bieniawski Z.T. (1967). "Mechanism of brittle rock fracture: Part I - Theory of the fracture progress". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. 4(4): 407-423.
- Bombolakis E.G. (1968). "Photoelastic study of initial stages of brittle fracture in compression". *Tectonophysics*. 18: 231-248.
- Boyce G.M., McCabe G.M., Koerner R.M. (1981). "Acoustic emission signatures of various rock types in unconfined compression". *Proc Acoustic Emissions in Geotechnical Engineering Practice, ASTM STP 750*, p.142-154.
- Brace W.F. (1961). "Dependence of fracture strength of rocks on grain size". *Bulletin of the Mineral Industries Experiment Station, Mining Engineering Series, Rock Mechanics*. 76:99-103.

- Brace W.F. (1964). "Brittle fracture of rocks. State of stress in the Earth's Crust (Ed. W. R. Judd)". Elsevier, New York, p.111-174.
- Brace W.F., Bombolakis E.G. (1963). "A note on brittle crack growth in compression". *Journal of Geophysical Research*, 68(12): 3709-3713.
- Brace W.F., Silver E., Hadley K., Goetze C. (1972). "Cracks and pores: A closer look". *Science*. 178 (4057): 162-164.
- Broch E. (1988). "Site investigations". *Norwegian Tunnelling*, Tapir publ. Emnafeporks Trondheim, Norway, p. 49 - 52.
- Broek D. (1986). "Elementary Engineering Fracture Mechanics". Martinus Nijhoff Publishers, Boston, p.446.
- Bur T.R., Hjelmstad K.E. (1970). "Elastic and attenuation symmetries of simulated lunar rocks". *Elsevier*, 13 (3): p. 414-423.
- Cai M. et al. (2004). "Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. 41(5): 833-847.
- Carpinteri A., Scavia C., Yang G.P. (1996). "Microcrack propagation, coalescence and size effects in compression". *Engineering Fracture Mechanics*. 54(3): 335-347.
- Chengyong W., Peide L., Rongsheng H., Xiutang S. (1990). "Study of the fracture process zone in rock by laser speckle interferometry". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. 27 (1): 65-69.
- Chernis P.J. (1984). "Comparison of the pore-microstructure of shallow and deep samples of the Lac du Bonnet granite". *Technical Record 223*. Ontario, Canada: Atomic Energy of Canada Limited.
- Crosby T. (2003). "Determination of Rock Mass Q-Values using Seismic P-Wave Velocities in Ferguson Canyon". Salt Lake County, Utah GG 5075 Introduction to Geological Engineering.
- Deere D.U. (1963). "Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes". *Felsmechanik and Ingenieurgeologie (Rock Mechanics and Engineering Geology)*, Vol. 1, No 1, 1963, p. 16-22.
- Deere D.U., Hendron A.J., Patton F.D., Cording E.J. (1967). "Design of surface and near-surface construction". In *Rock, Failure and Breakage of Rock*, Fairhurst C. (Ed.): p. 237-302, New York: Society of Mining Engineers of AIME.

Dershowitz WS, Herda H. (1992). "Interpretation of fracture spacing and intensity". In: Proceedings of the 33rd US Symposium on Rock Mechanics, p. 757.

Diederichs MS. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: mechanist

Dyskin A.V., Germanovich L.N., Lee K.K., Ring L.M., Ingraffea A.R. (1994). "Modelling crack propagation in compression". In Rock Mechanics: Models and Measurements, Challenges from Industry, Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium, Austin. Edited by P.P. Nelson and S.E. Laubach, A.A. Balkema, Rotterdam, 451-460.

Eberhardt E. (1998). "Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression", Department of geological sciences, University of Saskatchewan.

Fookes et al. (1978). "Rock weathering in engineering time". Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 21, 33-57.

Fowler C.M.R. (2005). "The solid earth: an introduction to global geophysics (2nd ed.), §4.1 Waves through the Earth". Cambridge University Press, p. 100.

Fourmaintraux D. (1976). "Characterization of rocks : laboratory tests". Chapter IV in La Mecanique des roches appliquee aux ouvrages du genie civil by Marc Panet et. al., Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris.

Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory, A.R. (1974). "Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps". Geophysics, 39, 770-780.

Gassmann, F., (1951). "On elasticity of porous media". In Pelissier, M. A., H. Hoerber, N. van de Coevering, and I. F. Jones, eds., Classics of Elastic Wave Theory, volume 24, 389-407, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

Goodman R.E. (1989). "Introduction to rock mechanics". John Wiley & Sons, New York, p. 561

Griffith A.A. (1920). "The phenomena of rupture and flow in solids". Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences. 221(587): 163-198.

Griffiph A.A. (1924). "The theory of rupture". In Proceedings of the First International Congress for Applied Mechanics, Delft. Edited by C.B. Biezeno and J.M. Burgers, J. Waltman Jr., 55-63.

Guo H., Aziz N.I. (1993). "Rock fracture-toughness determination by the Brazilian test". Elsevier, 33 (3): 177-188.

- Hoek E. (1983). "Strength of jointed rock masses", 23rd Rankine Lecture, *Géotechnique* 33(3).
- Hoek E., Bieniawski Z.T. (1965). "Brittle fracture propagation in rock under compression". *International Journal of Fracture Mechanics*. 1(3):137-155.
- Hoek E., Brown E.T. (1980) "Underground Excavations in Rock". Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E., Marinos, P., Marinos, E. (2005). "The geological strength index: applications and limitations". *Bull Eng Geol Environ*. 64: 55–65.
- Huang X., Peng W. (2015). "Experimental study on acoustic characteristics and physico-mechanical properties of frozen silty". *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(7): 1489-1496.
- Ingraffea A.R., Heuze F.E. (1980). "Finite element models for rock fracture mechanics". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 4(1): 25-43.
- I.S.R.M. (1978). Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, "Suggested Methods for Determining Sound Velocity", Committee on Laboratory Tests, Document No 4, (1977). Published in *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 15, No. 2, pp. 53-58.
- I.S.R.M. (1979). "Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials". Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, , *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 16, No. 2, pp. 135-140.
- I.S.R.M. (1999)." Suggested Method for the Complete Stress-Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36 (1999), p. 279-289
- I.S.R.M. (1981). "Rock Characterization Testing and Monitoring", Editor E. Brown, Pergamon Press.
- ISRM (1983). "Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression", Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Committee on Laboratory Tests p. 47-51.
- I.S.R.M.(1997)."Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties" .Part 1.
- I.S.R.M. (2002), Commission on Application of Geophysics to Rock Engineering. Suggested method for in-situ stress measurement from a rock core using the

Acoustic Emission technique. 5th Int Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering, pp.61-66.

Jaeger J.C., Cook N.G.W. (1979) "Fundamentals of rock mechanics". 3rd ed., Science Paperbacks.

Khair A.W. (1984). "Acoustic emission pattern: An indicator of mode of failure in geologic materials as affected by their natural imperfections". In Proceedings, Third Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, University Park. Edited by H.R. Hardy Jr., Leighton F.W., Trans Tech Publication, Clausthal-Zellerfeld, 45-66.

Kranz R.L. (1979). "Crack-crack and crack-pore interactions in stressed granite". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts. 16 (1): 37-47.

Kranz R.L. (1983). "Microcracks in rocks: A review". Tectonophysics. 100(1-3): 449-480.

Kwong L.S. (1983). "Photomicrographic Analysis of Cracks Produced by Compression in Lac du Bonnet Quartz Monzonite". B.Sc. thesis, Department of Earth Sciences, University of Manitoba, Winnipeg, p. 71.

Lajtai E.Z. (1971). "A theoretical and experimental evaluation of the Griffith theory of brittle fracture". Tectonophysics. 11: 129-156.

Lajtai E.Z. , Lajtai V.N. (1974). "The evolution of brittle fracture in rocks". Journal of the Geological Society of London. 130(1): 1-18.

Lama R.D., Vutukuri V.S. (1978). "Handbook on mechanical properties of rocks". Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, 1978, p. 1650.

Lambe T. William, Robert V.(1969). "Soil mechanics". Whitman.

Levin H.L. (2005). Rocks and minerals: Documents that record earth's history, chapter 4, p. 6, Georgia Perimeter College, Clarkston, GA

Marinos P.G., Hoek E. (2000) GSI: A geological friendly tool for rock mass estimation. Proceeding of GeoEng2000, Melbourne, pp. 1422-1446, Technomic Publishers, Lancaster, Pennsylvania.

Martin C.D. (1993). "Strength of Massive Lac du Bonnet Granite Around Underground Openings". Ph.D. thesis, Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, p. 278

- Martin C.D, Chandler N.A. (1994). "The progressive fracture of Lac du Bonnet granite". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. 31(6): 643-659.
- Martin CD, Stimpson B. (1994).The effect of sample disturbance on laboratory properties of Lac du Bonnet granite. *Canadian Geotechnical Journal*. 31 (5):692-702.
- McDowell P.W. (1993). "Seismic investigation for rock engineering". *Comprehensive Rock Engineering*, Hundon J.A. (editor in chief), vol. 3, Rock Testing and Site Characterization, Oxford: Pergamon Press, p. 619-634.
- Milsom, J. (2003). "Field Geophysics, The geological field guide series 25",p. 232
- Mishra D.A., Basu A. (2013). "Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system".Department of Geology & Geophysics, Indian Institute of Technology Kharagpur, India.
- Muller J. 1979. "Contributions to engineering geology and slope movement investigations. In *Rockslides and Avalanches*" (ed. B. Voight), Part 2,. 95-109, Elsevier, New York.
- Ohnaka M., Mogi K. (1982)."Frequency characteristics of acoustic emissions in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure". *Journal of Geophysical Research*. 87 (B5): 3873-3884.
- Paterson M.S., Wong Teng-Fong (2005). "Experimental Rock Deformation - The Brittle Field". Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ed. 2.
- Perras M.A., Diederichs M.S. (2014). "A review of the tensile strength of rock: concepts and testing". *Geotech Geol Eng*, 32:525–546.
- Priest S.D., Hudson J.A. (1987). "Discontinuity spacings in rock". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*.
- Proceedings of International Symposium (2003). "Industrial Minerals and Building Stones". IAEG, Istanbul.
- Roberts R. (1977). "Fracture Mechanics for Bridge Design". Department of Transportation, Federal Highway Administration, p. 197 - 207.
- Scholz C.H. (1968). " Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression". *Journal of Geophysical Research*. 96 (B10): 16529-16533.
- Simmons G., Richter D. (1976)."Microcracks in rocks. In the *Physics and Chemistry of Minerals and Rocks*". Edited by R.G.J. Strens, John Wiley & Sons, Toronto, 105-137.

Sjögren B., Övsthus A. and Sandberg J. (1979) "Seismic classification of rock mass qualities". Geophysical Prospecting, Vol. 27, No. 2, pp. 409-442. 1747.

Sjögren B. (1984). "Shallow refraction seismics". Chapman and Hall, London, 270 p.

Spanner M.A., Peterson D.L., Running S.W., Teuber K.B. (1987). "Relationship of thematic mapper simulator data to leaf area index of temperate coniferous forests". Elsevier, 22(3): p.323-341.

Steiakakis, C., (2013). "The Mohr – Coulomb strength criterion". Geotechnica blog.

Stowe R.L. (1969). "Strength and deformation properties of granite, basalt, limestone and tuff at various loading rates". Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

Tapponnier P., Brace W.F. (1976). "Development of stress-induced microcrack in Westely granite. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts. 13(4): 103-112.

Topal, T., and Doyuran, V., (1994). "Effect of deterioration on the chemical and physical properties of Goreme tufts". Proc. 7th. International Congr. of IAEG, Lisboa, Vol.5, p.3527-3536.

Wawersik W.R., Fairhurst C. (1970). "A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts. 7(5): 561-575.

Zhao Y., Huang J., Wang R. (1993). "Real-time SEM observations of the microfracturing process in rock during a compression test". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts. 30 (6) : 643-652.

Zhao Y., Liu X. (2016). "Seismic anisotropy tomography: New insight into subduction dynamics". Elsevier, 33, p. 24-43.

Καββαδάς Μ.Ι. (2009). "Στοιχεία Εδαφομηχανικής". Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Εκδόσεις Συμμεών.

Καββαδάς Μ.Ι, Τσιαμπάος Γ. (2014). "Βραχομηχανική-Σήραγγες: Σημειώσεις μαθήματος". ΕΜΠ

Κορωνάιος Α.Γ., Πουλάκος Γ.Ι. (2006). "Τεχνικά Υλικά, Φυσικοί Λίθοι", Ε.Μ.Π., σελ. 6-9

Κούκης, Γ. και Σαμπατακάκης Ν. (2002). "Τεχνική Γεωλογία". Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Μαρίνος Π.Γ. (1998). "Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας". Ε.Μ.Π.

Μπαντής Σ., Μπακάσης Η., Δημάδη Α., Μανωλοπούλου Σ.(2012). "ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΙΙ Έρευνα και αξιολόγηση γεωλογικών / γεωτεχνικών προβλημάτων στα τεχνικά έργα". Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Σαρόγλου Χ. (2007). "Γεωλογικοί Παράγοντες που Επηρεάζουν τις Γεωτεχνικές Παραμέτρους του Βράχου. Η Επίδραση της Ανισοτροπίας". Διαδακτορική Διατριβή. Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. σελ .470.

Σοφιανός Α.Ι., Νομικός Π.Π. (2008). "Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων". ΕΜΠ.

Στεφανίδης Π. (2002)."Πετρογραφία, Γενική και Τεχνική Γεωλογία". Εκδόσεις Χριστοδουλίδη.

Τσιαμπάος Γ. (2009). "Νεότερες απόψεις απόψεις για τις παραμέτρους παραμέτρους μηχανικής μηχανικής συμπεριφοράς συμπεριφοράς των πετρωμάτων"

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-1:**ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ : Δοκιμές με σκοπό τον υπολογισμό E, ν και σ_{ucs}**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Δείγμα : Δ1

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,218

Ύψος (cm): 12,823

Βάρος (gr): 720,04

Ρυθμός επιβολής φορτίου (kN/sec) : 0,7

Χρόνος Θραύσης: 10 min. 35 sec.

Πυκνότητα (kN/m³): 25,75

Φορτίο Θραύσης (kN): 449,8

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 210,40 MPa

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας

Αθήνα, 3/12/2015

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Δείγμα : Δ3
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,206

Ύψος (cm): 12,730

Βάρος (gr): 718,41

Ρυθμός επιβολής φορτίου: 0,7 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: 11 min. 45 sec.

Πυκνότητα (kN/m³): 25,90

Φορτίο Θραύσης(kN): 448,5 kN

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 210,43 MPa

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Δείγμα : Δ5 (Χρησιμοποιήθηκε στην ακουστική εκπομπή με δυνατότητα καταγραφής της αντοχής του)

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,184

Ύψος (cm): 12,558

Βάρος (gr): 700,43

Ρυθμός επιβολής φορτίου: 0,7 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: 9 min. 40 sec.

Πυκνότητα (kN/m³): 25,92

Φορτίο Θραύσης(kN): 358,2 kN

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 169,69 MPa

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Δείγμα : Δ6

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,174

Ύψος (cm): 12,711

Βάρος (gr): 702,66





Ρυθμός επιβολής φορτίου: 0,7 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: 10 min. 50 sec.





Πυκνότητα (kN/m³): 25,79

Φορτίο Θραύσης(kN): 402,4 kN

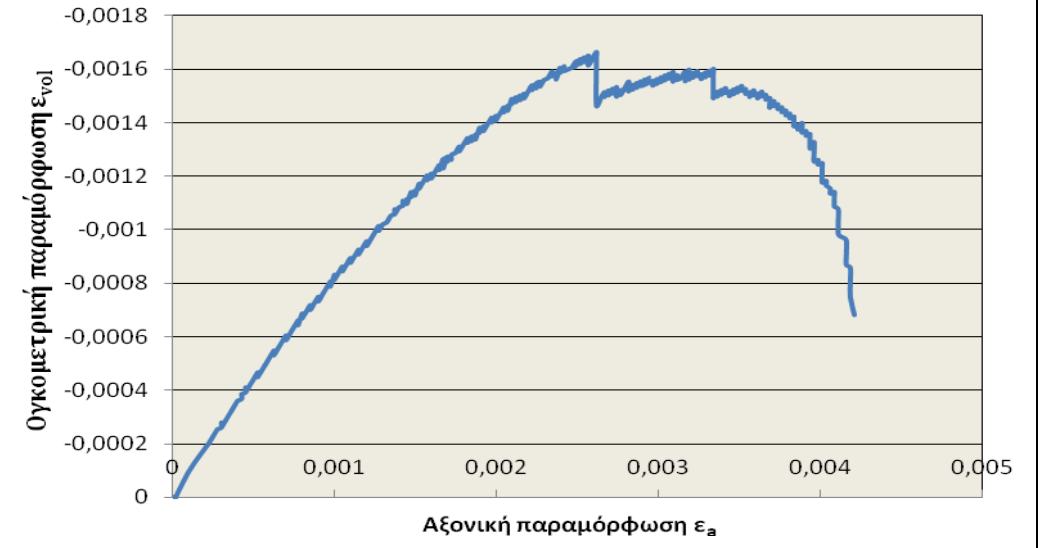
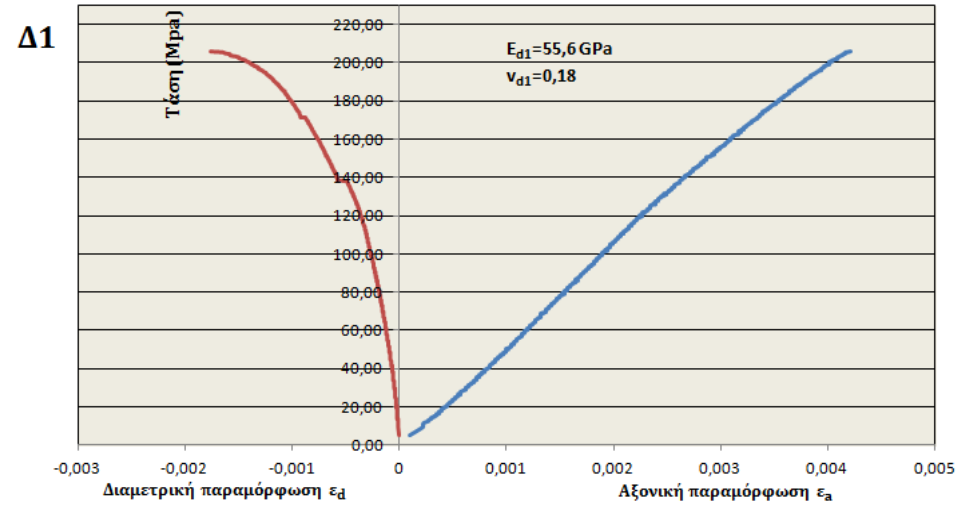
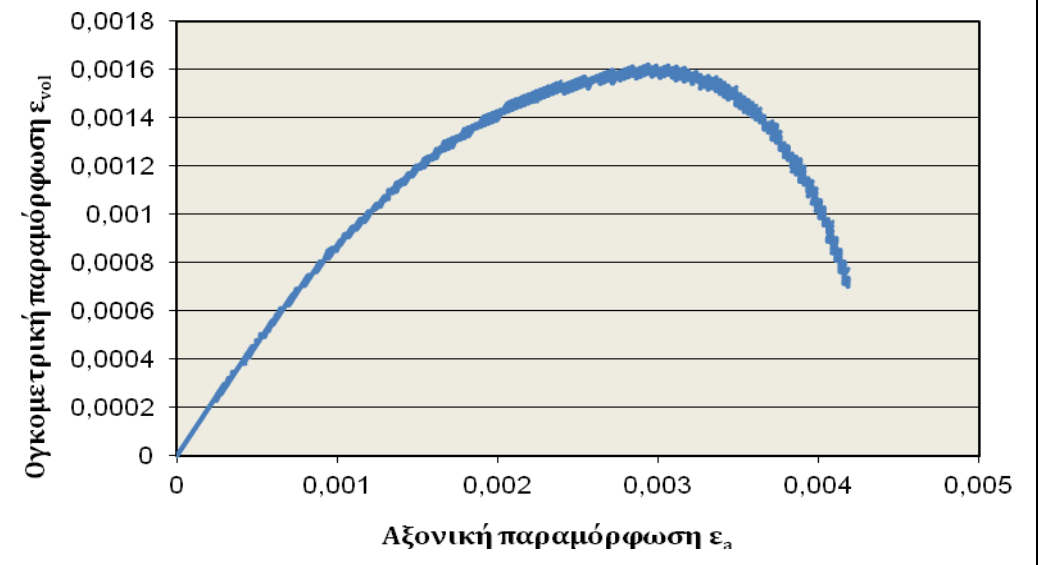
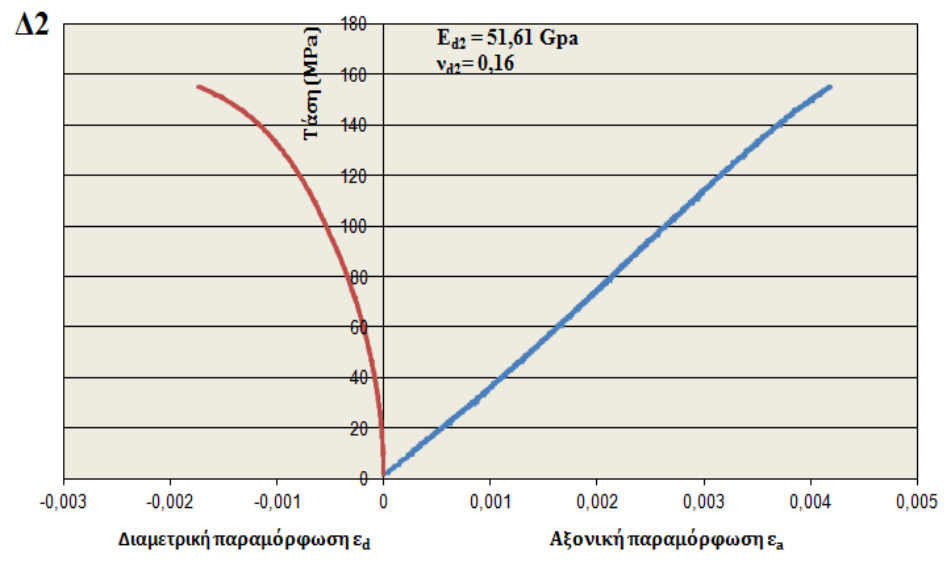
Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 191,41 MPa

Δοκίμιο	Τάση θραύσης σ_{ucs} (MPa)	Φωτογραφία πριν τη θραύση	Φωτογραφία μετά τη θραύση
Δ1	210,40		
Δ3	210,43		

Πίνακας Π1-1: Τάσεις αστοχίας και φωτογραφίες των δοκιμίων Δ1 και Δ3 πριν και μετά τη θραύση.

Δοκίμιο	Τάση θραύσης σ_{ucs} (MPa)	Φωτογραφία πριν τη θραύση	Φωτογραφία μετά τη θραύση
Δ5	169,69	 A cylindrical concrete specimen labeled Δ5 is shown vertically next to a white ruler. The specimen is intact and has a light grey, speckled texture.	 The same specimen Δ5 is shown after failure. The top portion is broken and crumbled, with a jagged, dark grey fracture surface. The remaining lower portion is still attached to the ruler.
Δ6	191,41	 A cylindrical concrete specimen labeled Δ6 is shown vertically next to a white ruler. The specimen is intact and has a light grey, speckled texture.	 The same specimen Δ6 is shown after failure. The top portion is broken and crumbled, with a jagged, dark grey fracture surface. The remaining lower portion is still attached to the ruler.

Πίνακας Π1-2: Τάσεις αστοχίας και φωτογραφίες των δοκιμών Δ5 και Δ6 πριν και μετά τη θραύση.



Σχήμα Π-1.1: Διαγράμματα τάσης-αξονικής και διαμετρικής παραμόρφωσης και ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης για τα δοκίμια που έγιναν μετρήσεις παραμόρφωσης (Δ1 και Δ2).

Δοκίμιο	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	Λόγος Poisson ν	Μέτρο Διάτμησης $G = \frac{E}{2*(1+\nu)}$ (GPa)
Δ1	55,60	0,18	23,56
Δ2	51,61	0,16	22,25
Μέσος Όρος	53,61	0,17	22,91

Πίνακας Π1-3: Τιμές του μέτρου ελαστικότητας E, μέτρου διάτμησης G και λόγου Poisson ν για τα δοκίμια Δ1 και Δ2.


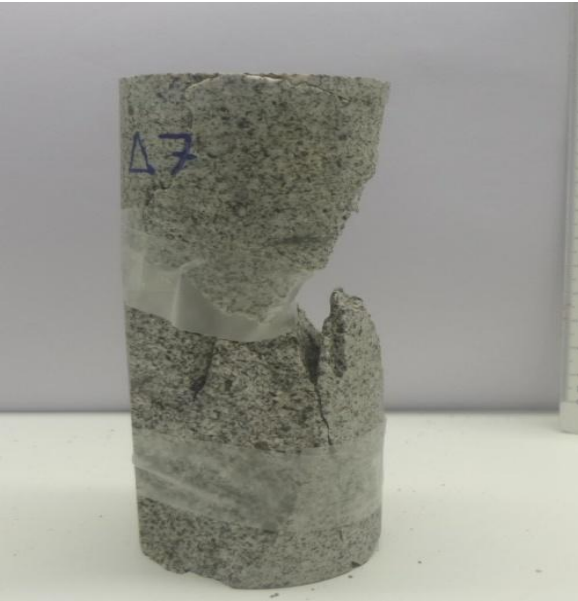


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-2:

ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ :Δοκιμές σε στάδια φόρτισης με καταγραφή των ταχυτήτων.

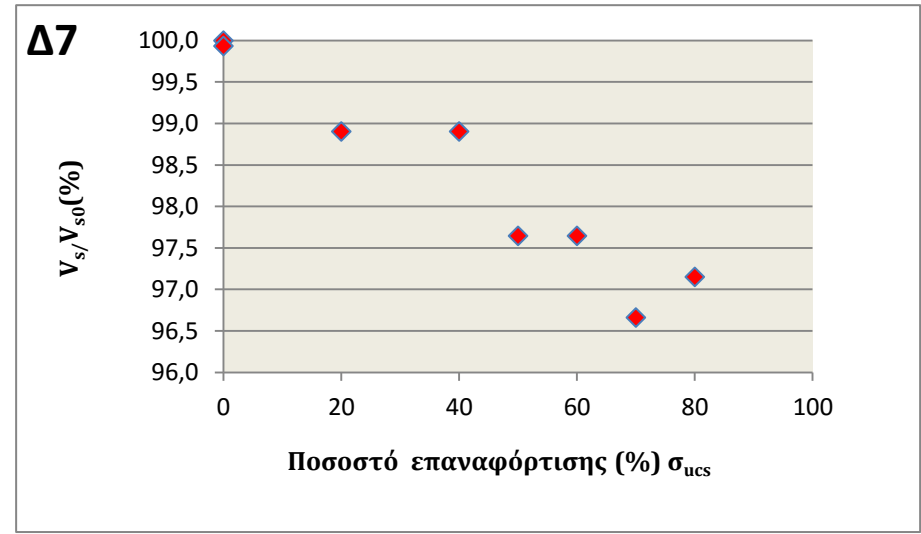
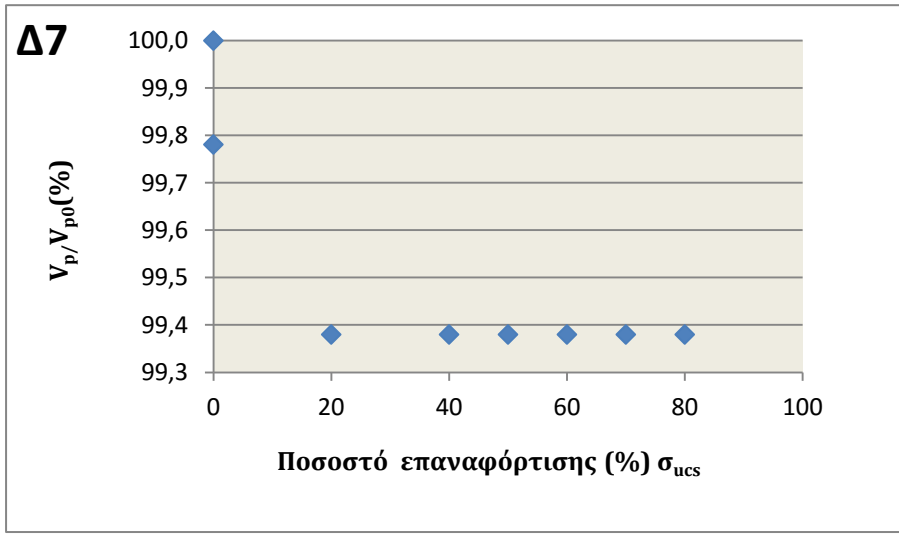
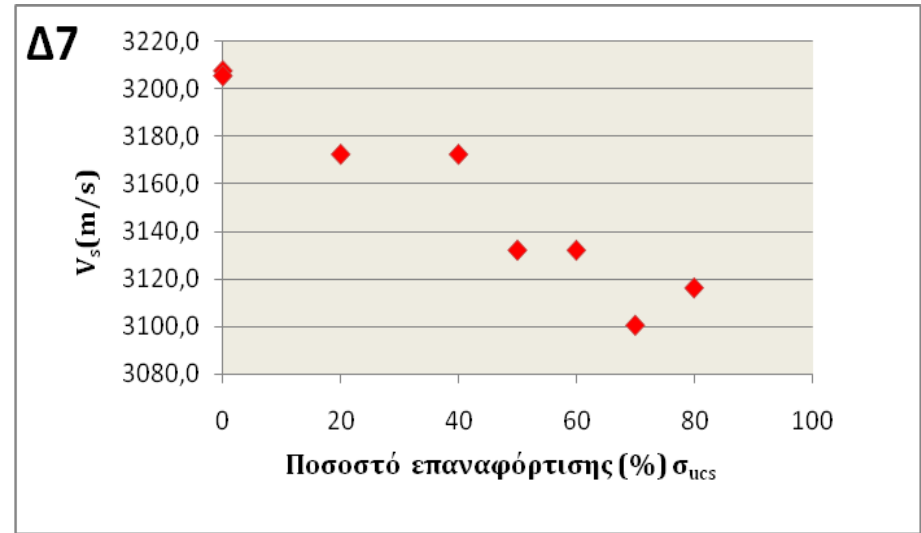
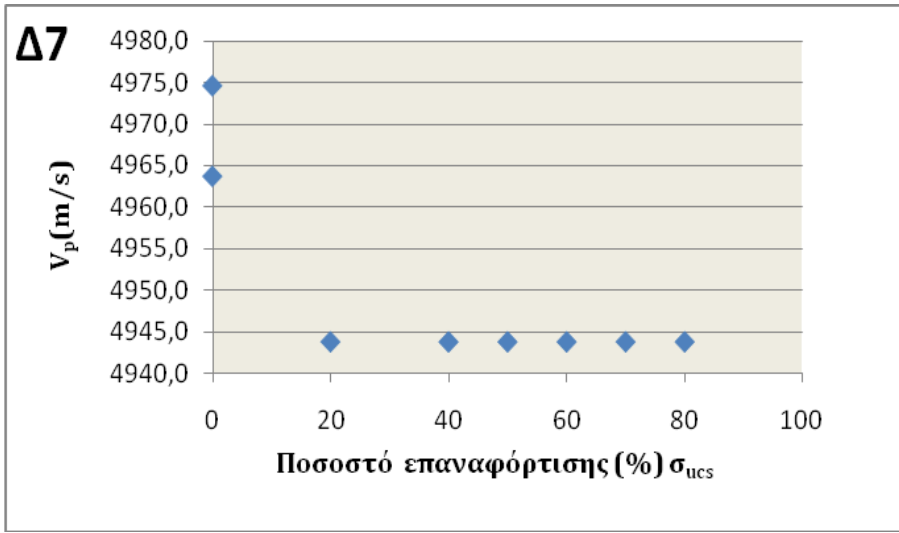
Δείγμα	Τάση επαναφόρτισης (%) σ_{ucs} (MPa)	T_p (μs)	T_s (μs)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)	E_d (GPa)	ν	G_d (GPa)
$\Delta 7$	0	25,6	39,7	4974,61	3207,81	100,00	100,00	61,96	0,14	27,09
$\Delta 7$ (φόρτιση στο crack damage 169,5MPa)	0	24,8	38,4	4963,71	3205,73	99,78	99,94	61,71	0,14	26,50
$\Delta 7$ (επαναφόρτιση)	20	24,9	38,8	4943,78	3172,68	99,38	98,90	60,85	0,15	26,50
$\Delta 7$ (επαναφόρτιση)	40	24,9	38,8	4943,78	3172,68	99,38	98,90	60,85	0,15	26,50
$\Delta 7$ (επαναφόρτιση)	50	24,9	39,3	4943,78	3132,32	99,38	97,65	60,08	0,16	26,50
$\Delta 7$ (επαναφόρτιση)	60	24,9	39,3	4943,78	3132,32	99,38	97,65	60,08	0,16	26,50
$\Delta 7$ (επαναφόρτιση)	70	24,9	39,7	4943,78	3100,76	99,38	96,66	59,43	0,18	26,50
$\Delta 7$ (επαναφόρτιση)	80	24,9	39,5	4943,78	3116,46	99,38	97,15	59,76	0,17	26,50

Δείγμα	Ποσοστό επαναφόρτισης σ_{ucs} MPa (%)	T_p (μs)	T_s (μs)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)	E_d (GPa)	ν	G_d (GPa)
$\Delta 17$	0	26,00	39,60	4692,69	3081,06	100,00	100,00	55,78	0,12	24,88
$\Delta 17$ (Φόρτιση στο crack damage 117,72 MPa)	0	26,20	40,00	4656,87	3050,25	99,24	99,00	55,00	0,12	24,46
$\Delta 17$ (επαναφόρτιση)	10	26,20	40,10	4656,87	3042,64	99,24	98,75	54,88	0,13	24,34

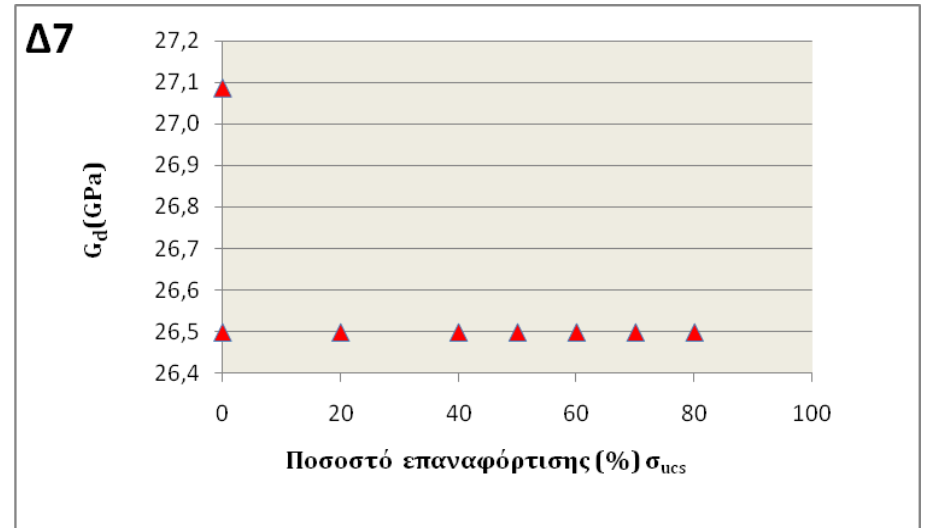
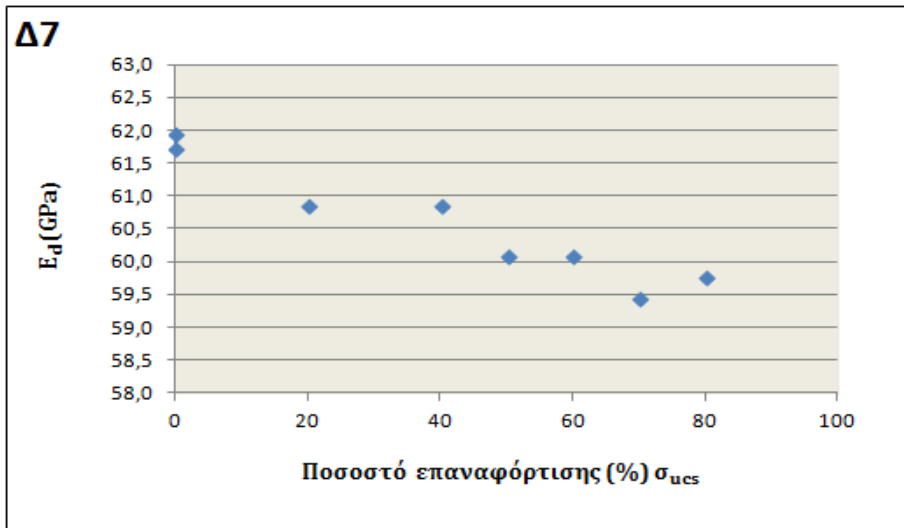
Πίνακες Π-2.1-Π-2.2: Αποτελέσματα δοκιμής υπερήχων στα δοκίμια $\Delta 7$ και $\Delta 12$ κατά τα στάδια φόρτισης.

Δοκίμιο	Φωτογραφία πριν τη θράυση	Φωτογραφία μετά τη θράυση
Δ7	 A cylindrical concrete specimen, labeled Δ7 in blue ink, is shown vertically. It is intact and has a light grey, porous appearance. A white ruler is visible to its right for scale.	 The same specimen Δ7 is shown after being crushed. It is broken into several pieces, with a significant portion of the top and side missing, revealing a rough, fractured surface. The ruler is still visible to the right.
Δ17	 A cylindrical concrete specimen, labeled Δ17 in blue ink, is shown vertically. It is intact and has a light grey, porous appearance. A white ruler is visible to its right for scale.	 The same specimen Δ17 is shown after being crushed. It is broken into several pieces, with a significant portion of the top and side missing, revealing a rough, fractured surface. The ruler is still visible to the right.

Πίνακας Π-2.3: Φωτογραφίες δοκιμίων Δ7 και Δ17 πριν και μετά τη θράυση.



Σχήμα Π-2.1: Διαγράμματα απομείωσης των ταχυτήτων V_p και V_s σε συσχέτιση με το ποσοστό επαναφόρτισης επί της αρχικής αντοχής σ_{ucs} για το δοκίμιο



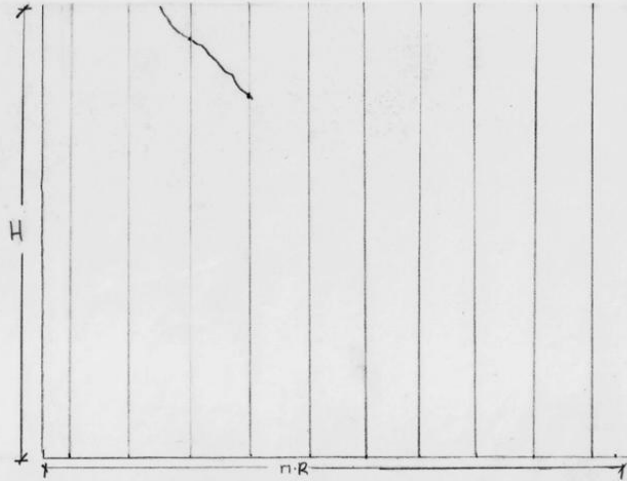
Σχήμα Π-2.2: Διαγράμματα μεταβολής του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d και του δυναμικού μέτρου διάτμησης G_d σε συσχέτιση με το ποσοστό επαναφόρτισης επί της αρχικής αντοχής σ_{ucs} για το δοκίμιο Δ7.

$\Delta 7$	Ποσοστό επαναφόρτισης (%) σ_{ucs}	Ίχνη(Traces)	Γραμμές (Lines)	Μήκος ρωγμών (cm)	$P_{20}(\text{traces}/\text{m}^2)$	$P_{10}(\text{traces}/\text{m})$	$P_{21}(\text{cm}/\text{cm}^2)$
Αρχική κατάσταση	-	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Φόρτιση στο 80% της σ_{ucs}	-	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Επαναφόρτιση	20	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Επαναφόρτιση	40	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Επαναφόρτιση	50	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Επαναφόρτιση	60	2	10	4,1	9,94	1,62	0,020
Επαναφόρτιση	70	5	10	8,1	24,86	4,06	0,040
Επαναφόρτιση	80	5	10	8,1	24,86	4,06	0,040
-	Θραύση	23	10	76	114,34	18,684	0,378

$\Delta 17$	Ποσοστό επαναφόρτισης (%) σ_{ucs}	Ίχνη(Traces)	Γραμμές (Lines)	Μήκος ρωγμών (cm)	$P_{20}(\text{traces}/\text{m}^2)$	$P_{10}(\text{traces}/\text{m})$	$P_{21}(\text{cm}/\text{cm}^2)$
Αρχική κατάσταση	-	9	10	18,7	45,16	7,38	0,09
Φόρτιση στο 80% της σ_{ucs}	-	9	10	18,7	45,16	7,38	0,09
Επαναφόρτιση	10	9	10	18,7	45,16	7,38	0,09
-	Θραύση	11	10	56	55,20	9,02	0,28

Πίνακες Π-2.4, Π-2.5: Καταγραφή εξωτερικής ρωγμάτωσης των δοκιμίων $\Delta 7$ και $\Delta 17$ στα στάδια φόρτισης.

$\Delta 7 \sim 60\% - 80\%$

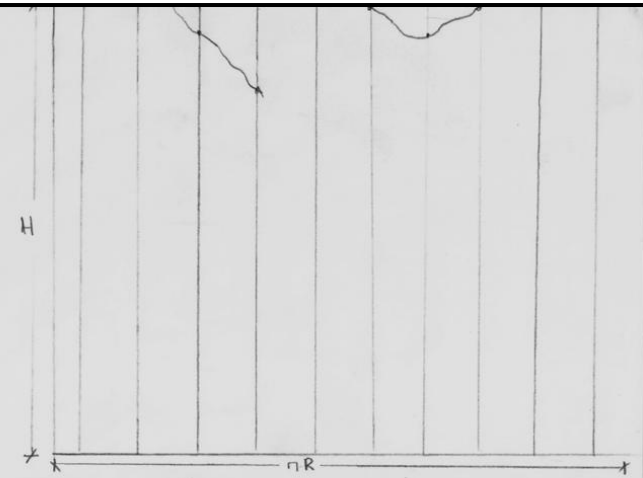


$$P_{20} = \frac{N_{\text{traces}} / \mu \text{lines}}{E} \Leftrightarrow P_{20} = \frac{2 \text{traces} / 10 \text{lines}}{2 \cdot nR \cdot H} = 4,97 \text{ traces/m}^2$$

$$P_{10} = \frac{N_{\text{traces}}}{\sum_{i=1}^n L(\text{lines})} \Leftrightarrow P_{10} = \frac{2 \text{traces}}{10 \cdot 12,3110^{-2} \text{m}} = 1,62 \text{ traces/m}$$

$$P_{21} = \frac{\text{Length of fractures}}{E} \Leftrightarrow P_{21} = \frac{4,1 \text{cm}}{2 \cdot nR \cdot H} = 0,01 \text{ cm/cm}^2$$

$\Delta 7 \sim 80\%$ έως θραύση.



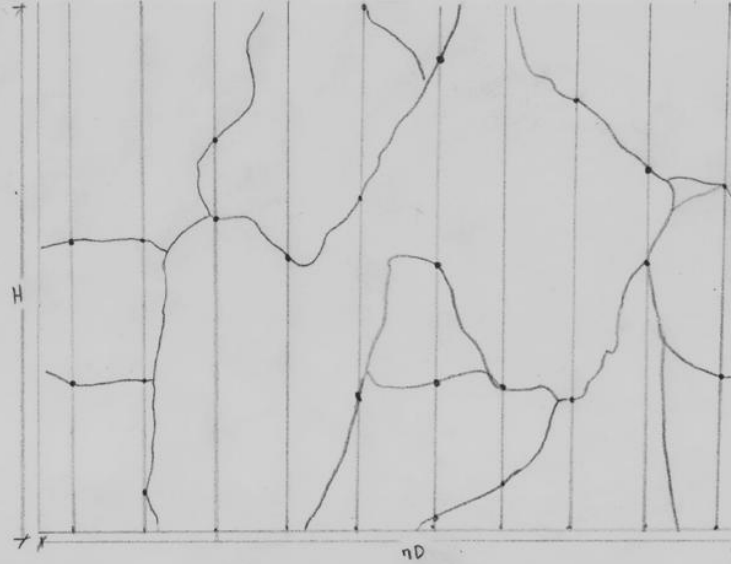
$$P_{20} = \frac{N_{\text{traces}} / \mu \text{lines}}{E} \Leftrightarrow P_{20} = \frac{5 \text{traces} / 10 \text{lines}}{2 \cdot nR \cdot H} = 12,43 \text{ traces/m}^2$$

$$P_{10} = \frac{N_{\text{traces}}}{\sum_{i=1}^n L(\text{lines})} \Leftrightarrow P_{10} = \frac{5 \text{traces}}{10 \cdot 12,3110^{-2} \text{m}} = 4,05 \text{ traces/m}$$

$$P_{21} = \frac{\text{Length of fractures}}{E} \Leftrightarrow P_{21} = \frac{8,1 \text{cm}}{2 \cdot nR \cdot H} = 0,02 \text{ cm/cm}^2$$

Σχήμα Π-2.3: Αποτύπωση εξωτερικής ρωγμάτωσης κι επί τόπου υπολογισμός των δεικτών ρωγμάτωσης σε ποσοστά επαναφόρτισης 60% και 80% της αντοχής σ_{ucs} του δοκιμίου $\Delta 7$.

Δ7 - ΘΡΑΥΞΗ



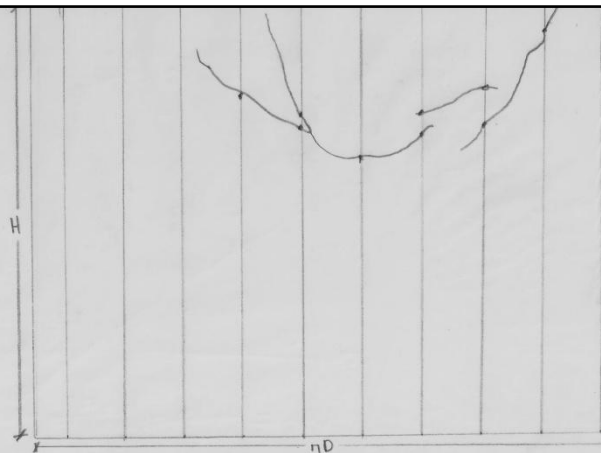
$$P_{21} = \frac{N_{\text{traces}}/H \text{ lines}}{E} = \frac{23/10}{\pi D H} = 114,35 \text{ traces/m}^2$$

$$P_{10} = \frac{N_{\text{traces}}}{\sum_{i=1}^n L(\text{lines})} = \frac{23}{10 H 10^{-2}} = 18,684 \text{ traces/m}$$

$$P_{21} = \frac{\text{Length of fractures}}{E} = \frac{76}{E} = 0,378 \text{ cm/cm}^2$$

Σχήμα Π-2.4: Αποτύπωση εξωτερικής ρωγμάτωσης κι επί τόπου υπολογισμός των δεικτών ρωγμάτωσης στη θραύση του δοκιμίου Δ7.

Δ17 - ΠΡΟΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ
Ε=Σ ΘΡΑΥΞΗ

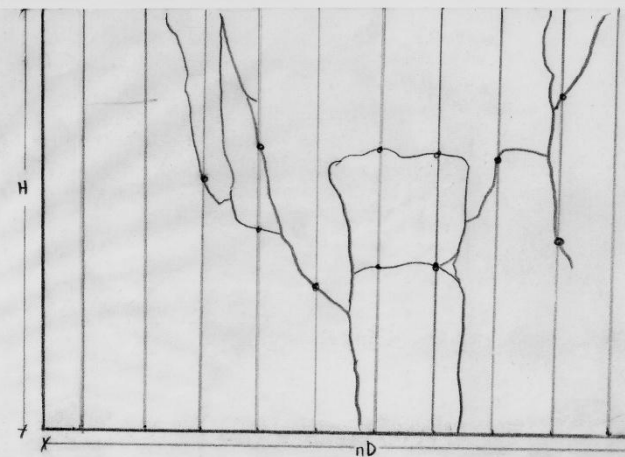


$$P_{20} = \frac{N_{\text{traces}} / \mu \text{lines}}{E} \Leftrightarrow P_{20} = \frac{9/10}{nD \cdot H} = 45,16 \text{ traces/m}^2$$

$$P_{10} = \frac{N_{\text{traces}}}{\sum_{i=1}^m L_i \text{lines}} \Leftrightarrow P_{10} = \frac{9}{10 \cdot H \cdot 10^{-2}} = 7,38 \text{ traces/m}$$

$$P_{21} = \frac{\text{Length of fractures}}{E} \Leftrightarrow P_{21} = \frac{18,7 \text{ cm}}{E} = 0,094 \text{ cm/cm}^2$$

Δ17 - ΘΡΑΥΞΗ



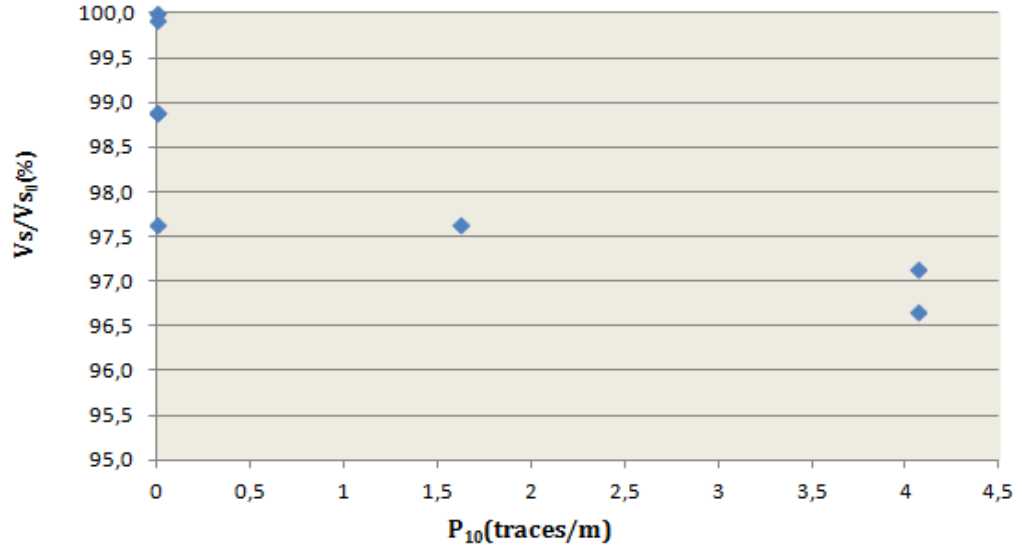
$$P_{20} = \frac{N_{\text{traces}} / \mu \text{lines}}{E} \Leftrightarrow P_{20} = \frac{11/10}{nD \cdot H} \Leftrightarrow P_{20} = 55,2 \text{ traces/m}^2$$

$$P_{10} = \frac{N_{\text{traces}}}{\sum_{i=1}^m L_i \text{lines}} \Leftrightarrow P_{10} = \frac{11}{10 \cdot H \cdot 10^{-2}} = 9,02 \text{ traces/m}$$

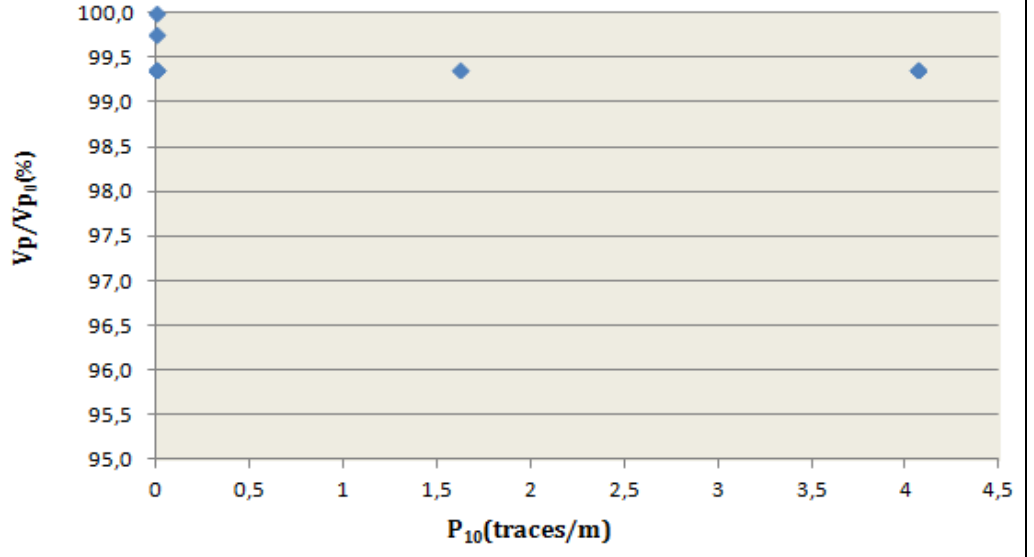
$$P_{21} = \frac{\text{Length of fractures}}{E} \Leftrightarrow P_{21} = \frac{56}{nD \cdot H} = 0,28 \text{ cm/cm}^2$$

Σχήμα Π-2.5: Αποτύπωση της εξωτερικής ρωγμάτωσης του δοκιμίου Δ17 στην αρχική του κατάσταση (προϋπάρχουσα ασυνέχεια) και στη θραύση του. Στα ενδιάμεσα στάδια φόρτισης δεν παρουσιάστηκε περαιτέρω εξωτερική ρωγμάτωση από την αρχική.

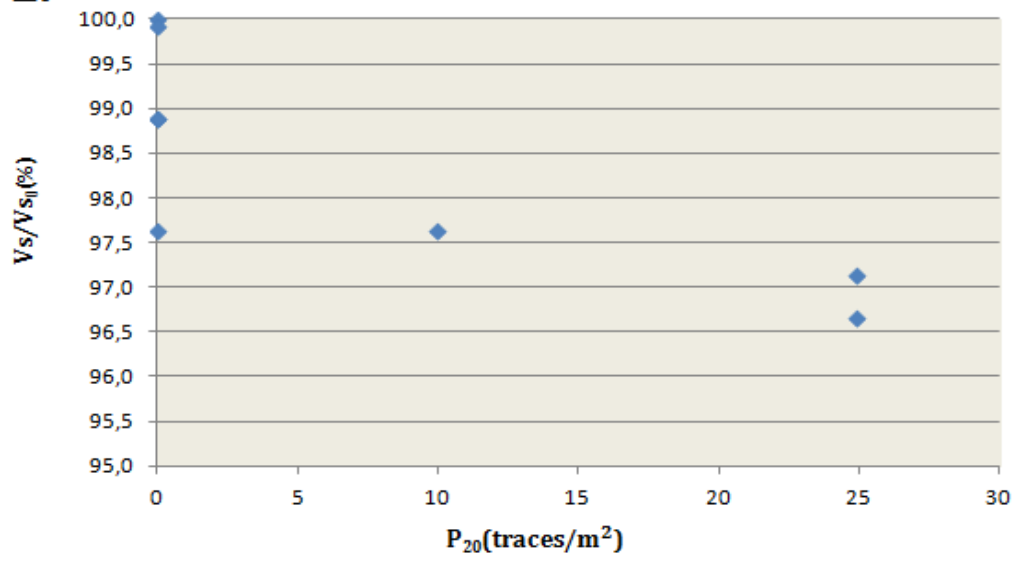
$\Delta 7$



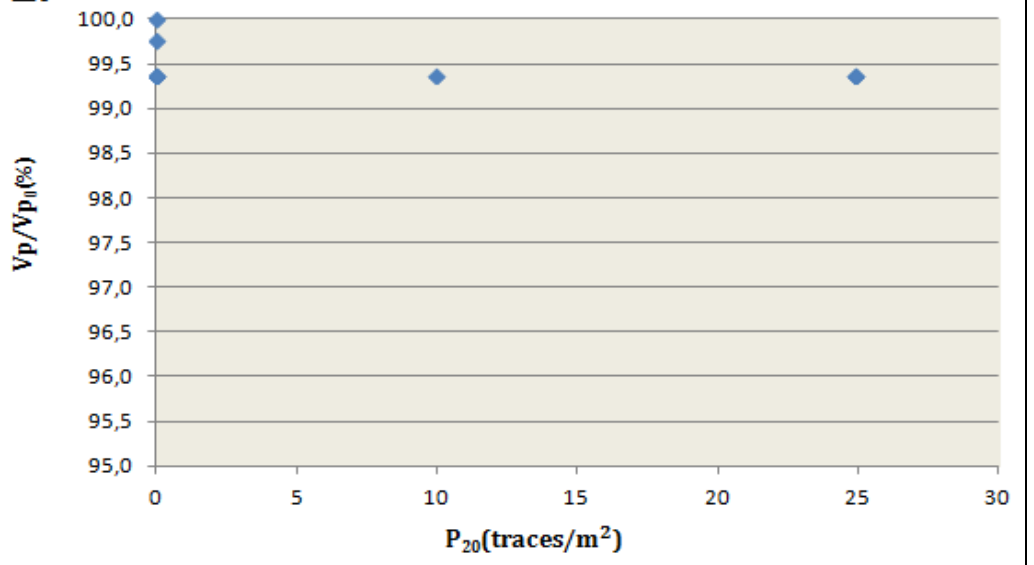
$\Delta 7$

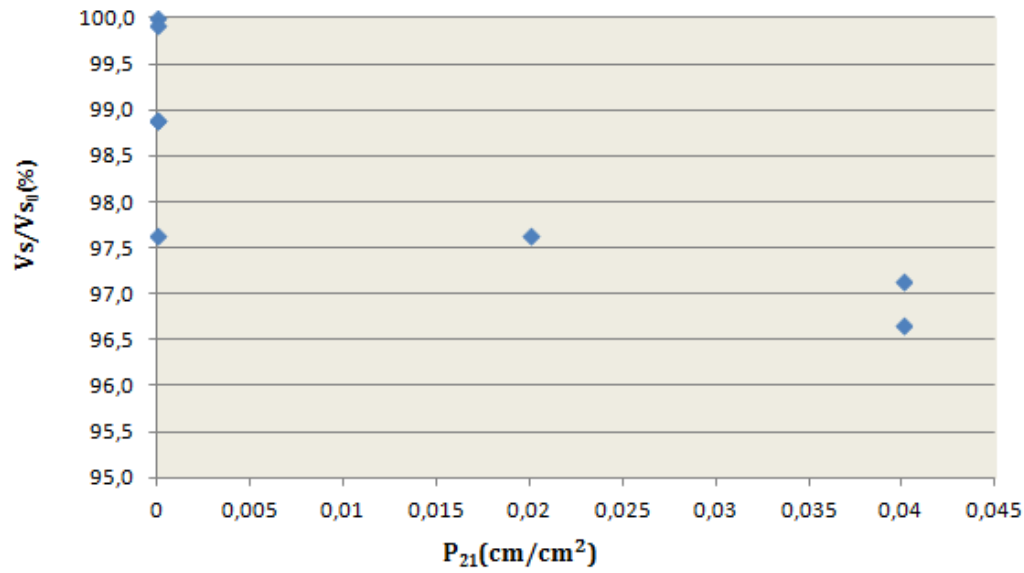
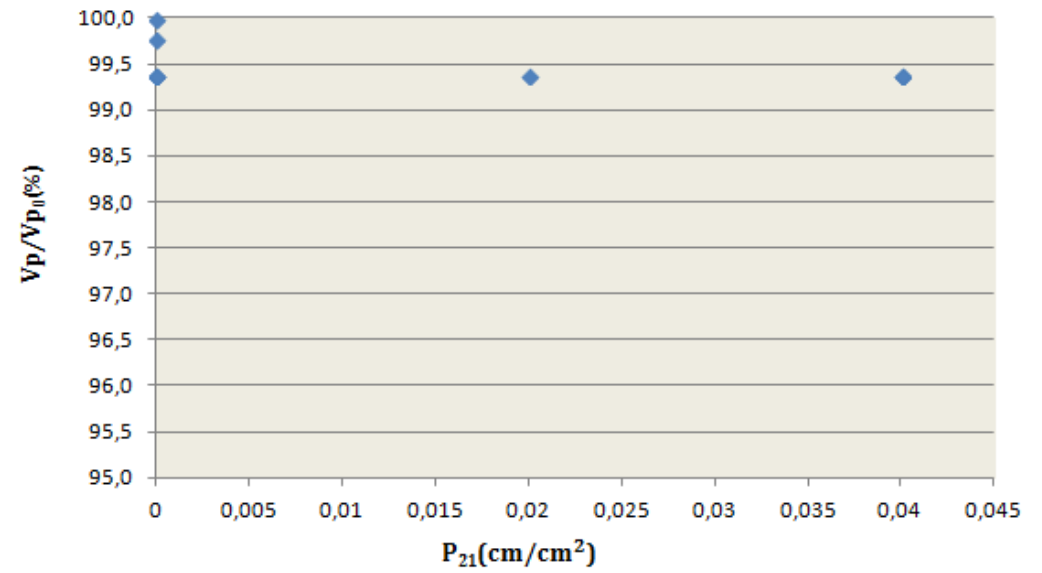


$\Delta 7$



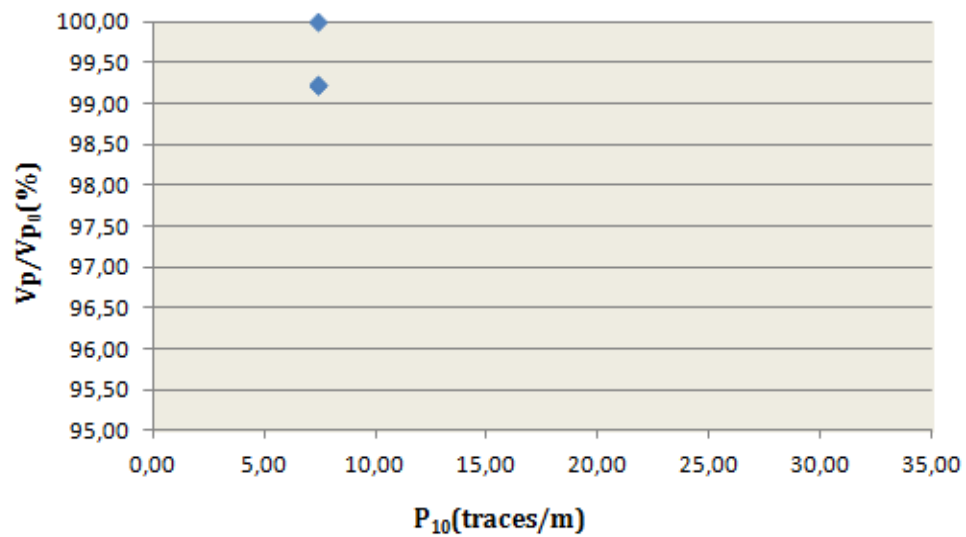
$\Delta 7$



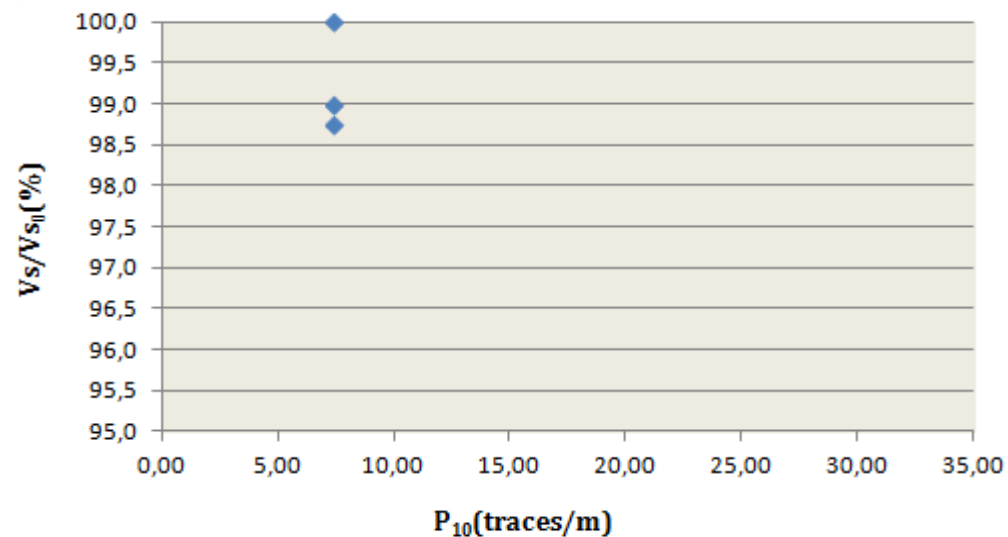
Δ7**Δ7**

Σχήμα Π2-6: Διαγράμματα ποσοστιαίας μείωσης των ταχυτήτων V_p και V_s σε σύγκριση με τους δείκτες P_{10} , P_{20} , P_{21} για τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου Δ7.

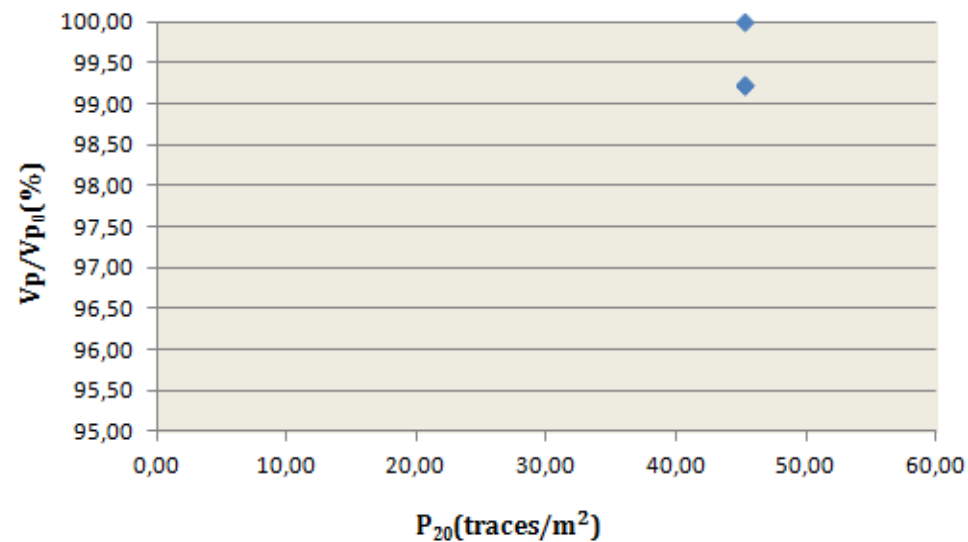
$\Delta 17$



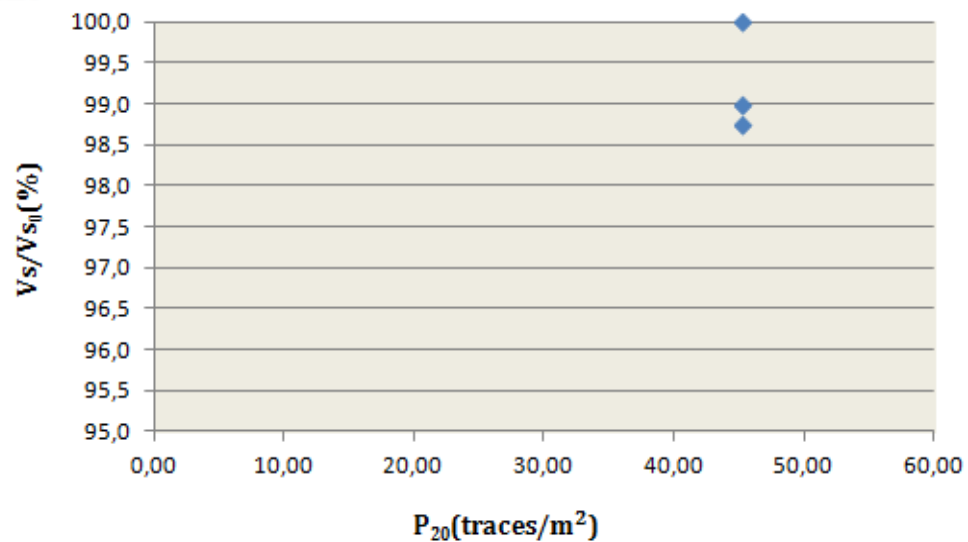
$\Delta 17$



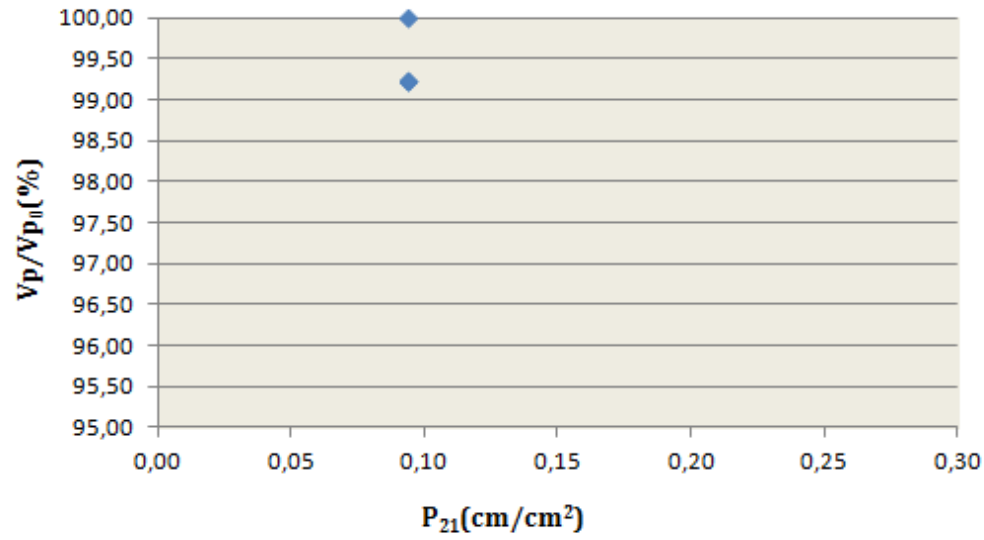
$\Delta 17$



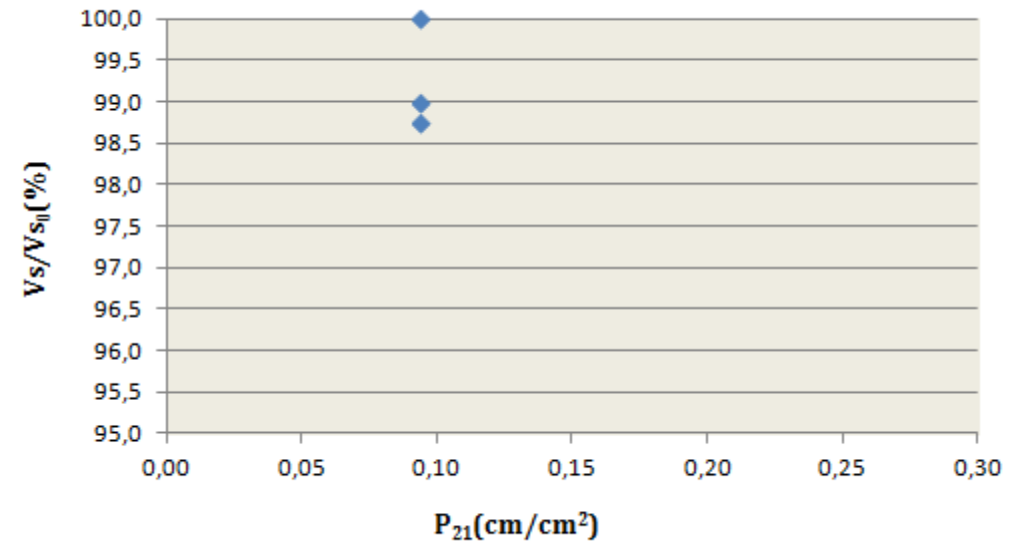
$\Delta 17$



Δ17



Δ17



Σχήμα Π2-7: Διαγράμματα ποσοστιαίας μείωσης των ταχυτήτων V_p και V_s σε σύγκριση με τους δείκτες P_{10} , P_{20} , P_{21} για τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου Δ17

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-3:

ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ : Δοκιμές με σκοπό τον υπολογισμό της αξονικής τάσης αστοχίας σ_1 για ορισμένες πλευρικές τάσεις σ_3 και καταγραφή ταχυτήτων στη θραύση.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ
ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΤΑΣΗ 10 MPa.**

Δείγμα : Δ15

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,211

Ύψος (cm): 9,867

Βάρος (gr): 558,20

Ρυθμός επιβολής φορτίου: 1,0 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: 11 min. 5 sec.

Πλευρική Τάση σ_3 : 10 MPa

Φορτίο Θραύσης(kN): 700,1 kN

Αξονική Τάση Αστοχίας σ_1 : 328,27 MPa

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας

Αθήνα, 18/1/2016

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΤΑΣΗ 20 MPa.

Δείγμα : Δ16

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,228

Ύψος (cm): 9,855

Βάρος (gr): 580,72

Ρυθμός επιβολής φορτίου: 1,5 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: 10 min. 15 sec.

Πλευρική Τάση σ_3 : 20 MPa

Φορτίο Θραύσης(kN): 891,2 kN

Αξονική Τάση Αστοχίας σ_1 : 415,16 MPa

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ
ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΤΑΣΗ 30 MPa.**

Δείγμα : Δ10

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,206

Ύψος (cm): 9,640

Βάρος (gr): 549,41

Ρυθμός επιβολής φορτίου: 1,5 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: 12 min. 7 sec.

Πλευρική Τάση σ_3 : 30 MPa

Φορτίο Θραύσης(kN): 984 kN

Αξονική Τάση Αστοχίας σ_1 : 462,27 MPa

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΤΑΣΗ 1 MPa.

Δείγμα : Δ13

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,210

Ύψος (cm): 9,947

Βάρος (gr): 564,12





Ρυθμός επιβολής φορτίου: 1,5 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: - (Η πρέσσα ανέβασε πολύ γρήγορα φορτίο με αποτέλεσμα το δοκίμιο να αστοχήσει στην παρακάτω αναγραφόμενη τάση υπό πλευρική πίεση 1 MPa.)





Πλευρική Τάση σ_3 : 1 MPa

Φορτίο Θραύσης(kN): 398,1 kN

Αξονική Τάση Αστοχίας σ_1 : 186,74 MPa

Δοκίμιο	Φωτογραφία πριν τη θραύση	Φωτογραφία μετά τη θραύση
Δ10	 A cylindrical concrete specimen labeled Δ10 in blue ink. It is positioned next to a white ruler for scale. The specimen appears intact and has a light grey, speckled texture.	 The same cylindrical concrete specimen Δ10 after a fracture test. The top portion is broken and tilted, showing a jagged, dark grey fracture surface. A ruler is visible in the background for scale.
Δ16	 A cylindrical concrete specimen labeled Δ16 in blue ink. It is positioned next to a white ruler for scale. The specimen appears intact and has a dark grey, speckled texture.	 The same cylindrical concrete specimen Δ16 after a fracture test. The specimen is broken into two main parts, with a visible horizontal fracture line. A ruler is visible in the background for scale.

Πίνακας Π-3.1: Φωτογραφίες δοκιμίων Δ10 και Δ16 πριν και μετά τη θραύση

Δοκίμο	Φωτογραφία πριν τη θραύση	Φωτογραφία μετά τη θραύση
Δ13	 A cylindrical concrete specimen labeled Δ13 in blue ink. The specimen is intact and has a light grey, porous appearance. A white ruler is visible in the background for scale.	 The same cylindrical concrete specimen Δ13 after a vertical fracture. The specimen is split into two halves, with a clear crack running down the center. The ruler is still visible in the background.
Δ15	 A cylindrical concrete specimen labeled Δ15 in blue ink. The specimen is intact and has a light grey, porous appearance. A white ruler is visible in the background for scale.	 The same cylindrical concrete specimen Δ15 after a vertical fracture. The specimen is split into two halves, with a clear crack running down the center. The ruler is still visible in the background.

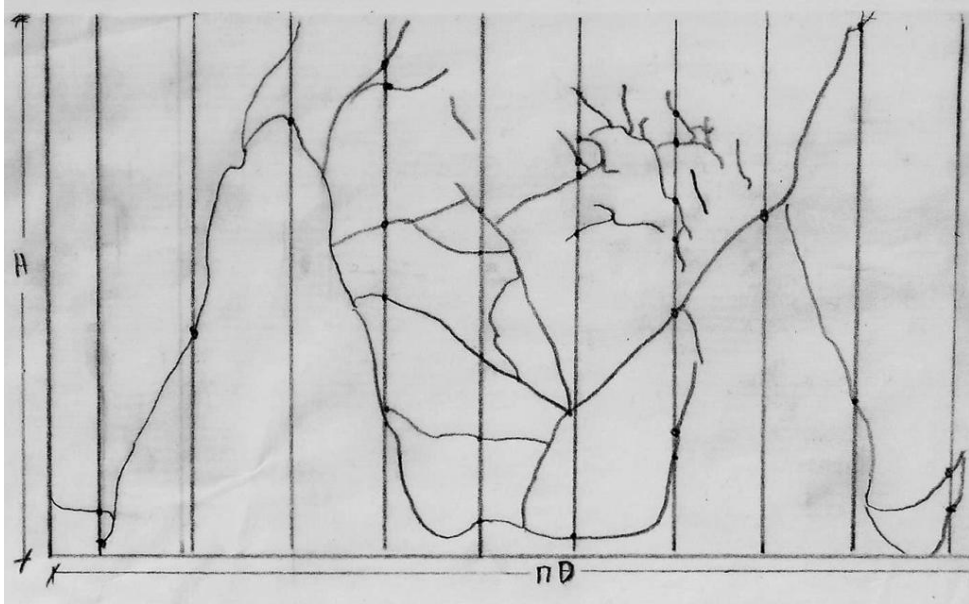
Πίνακας Π-3.2: Φωτογραφίες δοκιμών Δ13 και Δ15 πριν και μετά τη θραύση

Δοκίμιο	Κατάσταση	V_p(m/s)	V_s(m/s)
Δ15	Αρχική κατάσταση	5220,6	3333,4
	Θραύση	4180,9	2316,2
Δ16	Αρχική κατάσταση	5186,8	3375,0
	Θραύση	3060,6	1818,3
Δ10	Αρχική κατάσταση	5127,7	3312,7
	Θραύση (δεν ήταν εφικτή η καταγραφή)	-	-
Δ13	Αρχική κατάσταση	4876,0	3089,1
	Θραύση	3079,6	1905,6

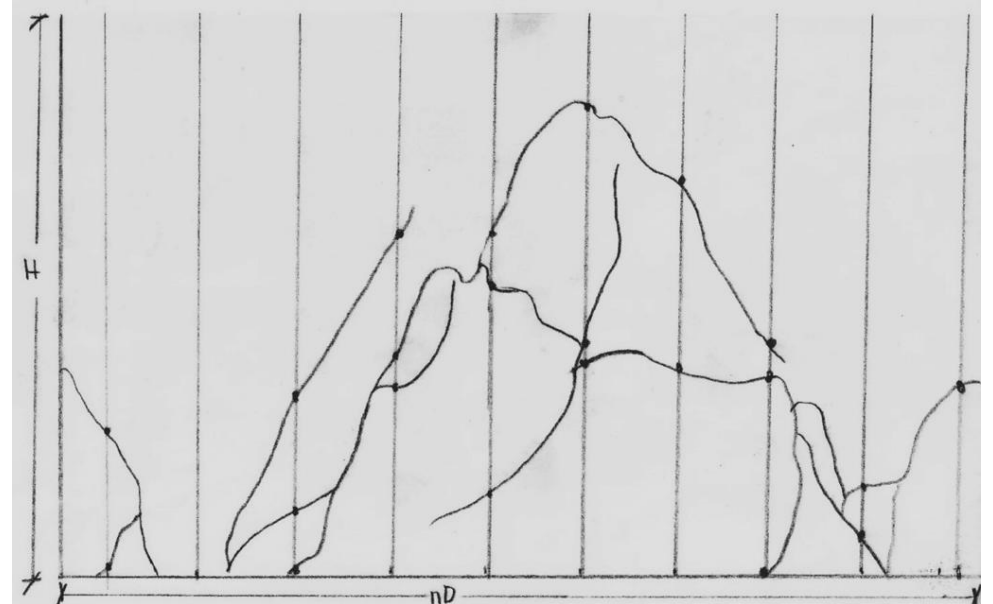
Πίνακας Π3-3: Καταγραφές ταχυτήτων V_p και V_s για τα δοκίμια Δ15, Δ16, Δ10 και Δ13 στην αρχική τους άρρηκτη κατάσταση και στη θραύση. (Η θραύση του Δ10 ήταν τέτοια ώστε να μην επιτρέπει την καταγραφή των ταχυτήτων στη δοκιμή υπερήχων)

Δοκίμιο	Κατάσταση	Ίχνη(Traces)	Γραμμές (Lines)	Μήκος Ρωγμών(cm/cm ²)	P ₂₀ (traces/m ²)	P ₁₀ (traces/m)	P ₂₁ (cm/cm ²)
Δ15	Αρχική κατάσταση	0	0	0	0,00	0,00	0,00
	Θραύση	22	10	63,2	136,20	22,297	0,391
Δ16	Αρχική κατάσταση	0	0	0	0	0	0
	Θραύση	33	10	84,9	203,88	33,49	0,525
Δ10	Αρχική κατάσταση	0	0	0	0	0	0
	Θραύση (δεν ήταν εφικτή η καταγραφή)	-	-	-	-	-	-
Δ13	Αρχική κατάσταση	0	0	0	0	0	0
	Θραύση	32	10	94	196,55	32,17	0,577

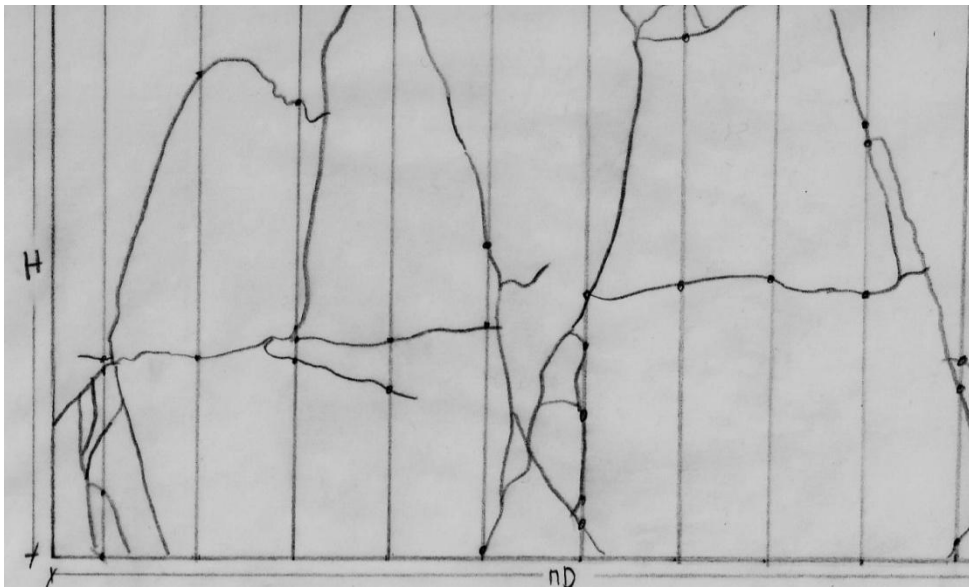
Πίνακας Π3-4: Καταγραφές στοιχείων εξωτερικής ρωγμάτωσης για τα δοκίμια Δ15, Δ16, Δ10 και Δ13 στην αρχική τους άρρηκτη κατάσταση και στη θραύση.



Δ13-ΘΡΑΥΣΗ



Δ15-ΘΡΑΥΣΗ



Δ16-ΘΡΑΥΣΗ

Σχήμα Π3-1: Καταγραφή της εξωτερικής ρωγμάτωσης των δοκιμίων Δ13, Δ15, Δ16 στη θραύση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-4:

ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ :Δοκιμές σε στάδια φόρτισης με καταγραφή των ταχυτήτων.

Δείγμα	Πλευρική Τάση σ_3 (MPa)	Τάση φόρτισης (%) σ_{1max} (Mpa)	T_p (μs)	T_s (μs)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)	E_d (GPa)	ν_d	G_d (GPa)
$\Delta 12$	10	0	21,0	32,4	4781,0	3098,8	100,00	100,00	57,0	0,138	25,0
$\Delta 12$	10	20	21,1	32,4	4758,3	3098,8	99,53	100,00	57,1	0,132	25,2
$\Delta 12$	10	40	21,3	33,3	4713,6	3015,0	98,59	97,31	55,1	0,154	23,9
$\Delta 12$	10	60	22,2	34,7	4522,5	2893,4	94,59	93,42	50,8	0,154	22,0
$\Delta 12$	10	80	22,2	34,4	4522,5	2918,6	94,59	94,24	51,2	0,143	22,4
$\Delta 12$	10	Θραύση	23,6	35,3	4254,2	2844,2	79,00	81,06	-	-	-

Δείγμα	Πλευρική Τάση σ_3 (MPa)	Τάση φόρτισης (%) σ_{1max} (Mpa)	T_p (μs)	T_s (μs)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)	E_d (GPa)	ν_d	G_d (GPa)
$\Delta 18$	15	0	21,5	32,8	4733,0	3102,4	96,08	97,88	57,4	0,123	25,5
$\Delta 18$	15	20	21,6	32,8	4711,1	3102,4	95,64	97,88	56,5	0,117	25,3
$\Delta 18$	15	40	22,4	33,1	4542,9	3074,3	92,22	96,91	53,5	0,078	24,8
$\Delta 18$	15	60	22,4	33,5	4542,9	3037,6	92,22	95,70	53,2	0,096	24,3
$\Delta 18$	15	80	22,6	34,3	4502,7	2966,8	91,41	93,52	51,7	0,116	23,1
$\Delta 18$	15	Θραύση	39,4	70,2	2582,7	1449,6	52,43	45,70	-	-	-

Πίνακες Π-4.1, Π-4.2: Αποτελέσματα δοκιμής υπερήχων για τα δοκίμια $\Delta 12$ και $\Delta 18$ στην τριαξονική δοκιμή. Η θραύση του δοκιμίου $\Delta 18$ προξένησε ρωγμές μεγαλύτερου ανοίγματος σε σχέση με αυτές των υπόλοιπων δοκιμίων στη θραύση με αποτέλεσμα η μείωση των ταχυτήτων να είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης καταγραφής σημειώνονται με κόκκινο χρώμα.


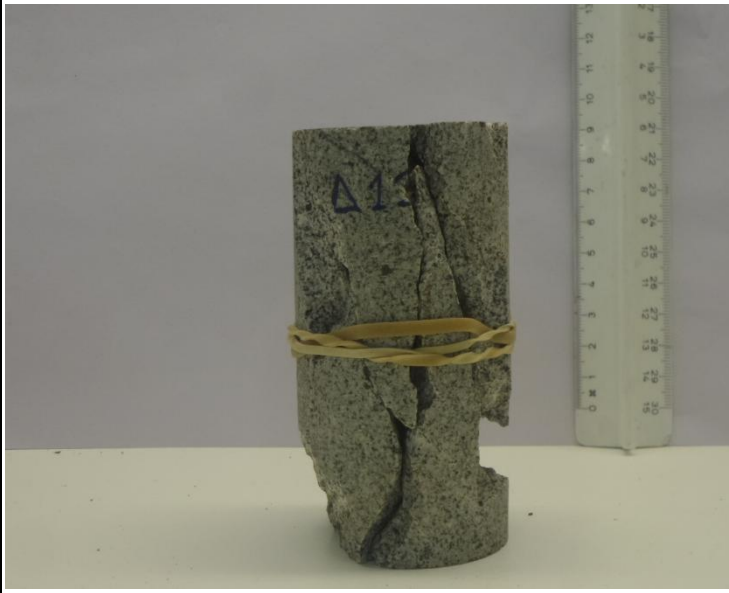

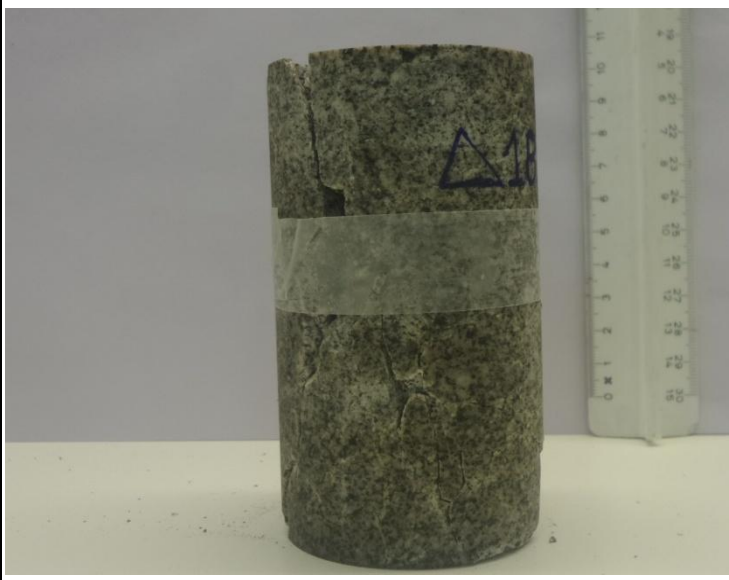
Δείγμα	Πλευρική Τάση σ_3 (MPa)	Τάση φόρτισης (%) σ_{1max} (Mpa)	T_p (μs)	T_s (μs)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)	E_d (GPa)	ν_d	G_d (GPa)
$\Delta 8$	20	0	18,7	29,9	5240,6	3277,6	100,00	100,0	69,7	0,179	29,5
$\Delta 8$	20	20	18,8	30,0	5212,8	3266,7	99,47	99,7	66,0	0,177	28,1
$\Delta 8$	20	40	19,5	30,2	5025,6	3245,0	95,90	99,0	63,3	0,142	27,7
$\Delta 8$	20	60	19,6	30,6	5000,0	3202,6	95,41	97,7	62,1	0,152	27,0
$\Delta 8$	20	80	19,8	31,1	4949,5	3151,1	94,44	96,1	60,5	0,159	26,1
$\Delta 8$	20	Θραύση	28,5	39,4	3438,6	2487,3	65,61	75,9	30,9	-	16,3

Δείγμα	Πλευρική Τάση σ_3 (MPa)	Τάση φόρτισης (%) σ_{1max} (Mpa)	T_p (μs)	T_s (μs)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)	E_d (GPa)	ν_d	G_d (GPa)
$\Delta 9$	30	0	18,6	29,1	5099,5	3259,5	100,00	100,0	69,8	0,155	30,2
$\Delta 9$	30	40	19,3	29,6	4914,5	3204,4	96,37	98,3	61,0	0,130	27,0
$\Delta 9$	30	60	19,7	29,9	4814,7	3172,2	94,42	97,3	59,1	0,116	26,5
$\Delta 9$	30	80	19,9	30,2	4766,3	3140,7	93,47	96,4	57,9	0,116	25,9
$\Delta 9$	30	Θραύση	21,1	32,7	4495,3	2900,6	88,15	89,0	50,6	0,143	22,1





Πίνακες Π-4.3, Π-4.4: Αποτελέσματα δοκιμής υπερήχων για τα δοκίμια $\Delta 8$ και $\Delta 9$ στην τριαξονική δοκιμή.

Δείγμα	Πλευρική Τάση σ_3 (MPa)	Τάση φόρτισης (%) σ_{1max} (Mpa)	T_p (μs)	T_s (μs)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)	E_d (GPa)	ν_d	G_d (GPa)
$\Delta 14$	30	0	20,0	31,7	4972,5	3137,2	100,00	100,0	62,5	0,169	26,7
$\Delta 14$	30	20	20,6	31,7	4827,7	3137,2	97,09	100,0	58,7	0,135	25,9
$\Delta 14$	3	Θραύση	24,9	39,3	3994,0	2530,5	80,32	80,7	39,2	0,165	16,8


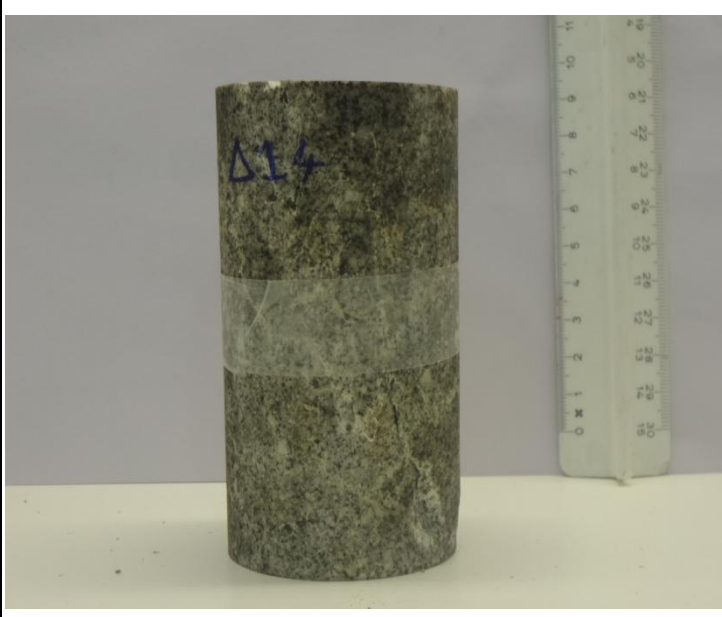
Πίνακας Π-4.5: Αποτελέσματα δοκιμής υπερήχων για το δοκίμιο $\Delta 14$ στην τριαξονική δοκιμή. Κατά τη δεύτερη φάση φόρτισης η πρέσσα ανέβασε πολύ γρήγορα φορτίο με αποτέλεσμα το δοκίμιο να αστοχήσει στα 190 MPa σε πλευρική τάση 3 MPa.

Δοκίμο	Φωτογραφία πριν τη θραύση	Φωτογραφία μετά τη θραύση
Δ12		
Δ18		

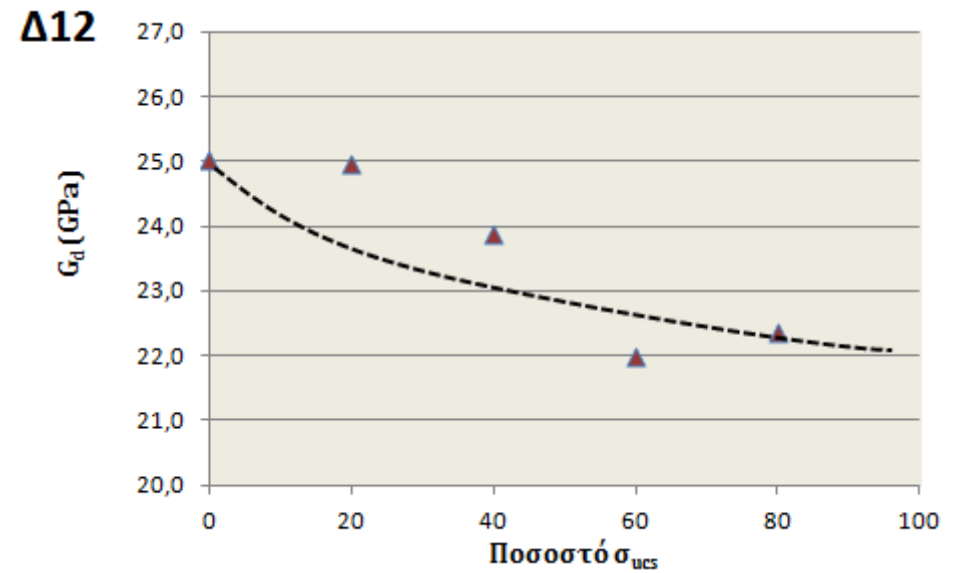
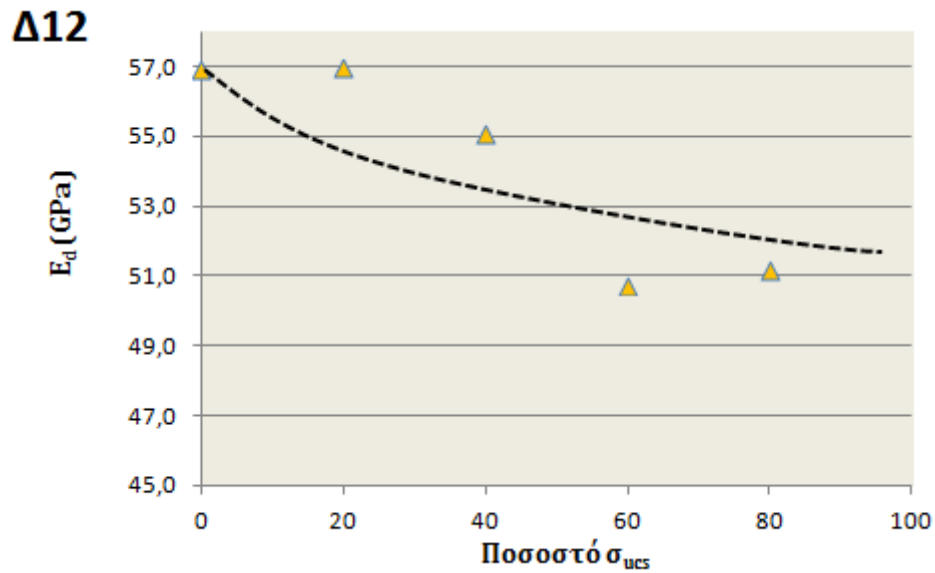
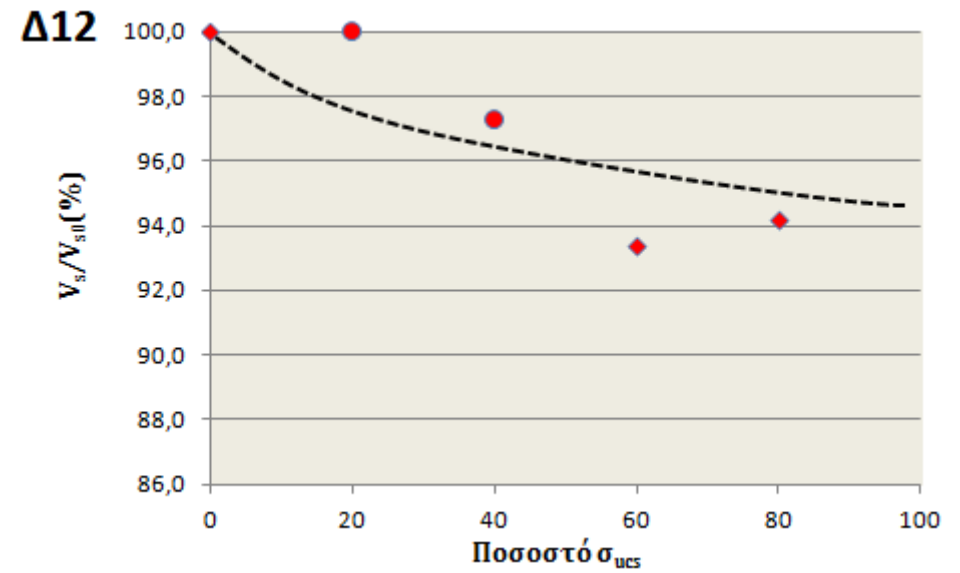
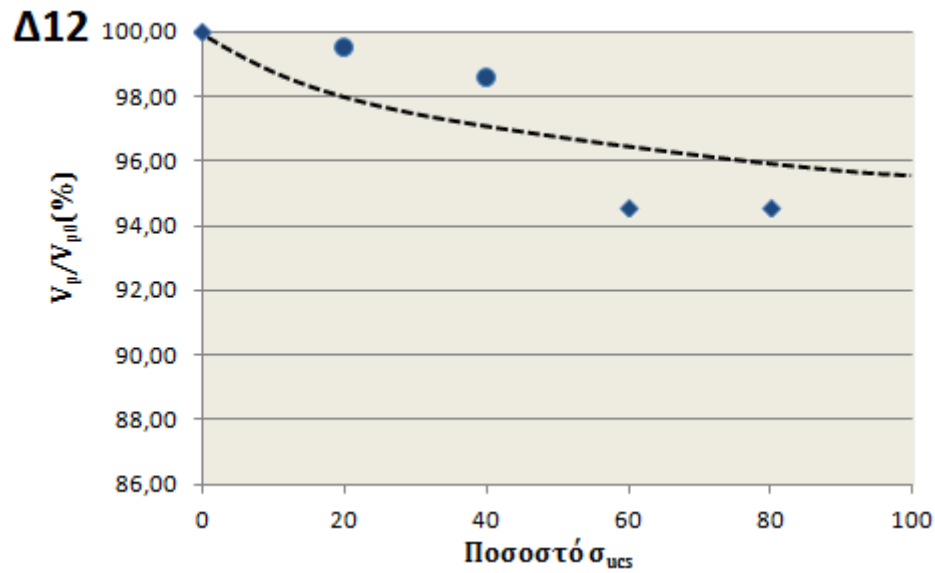
Πίνακας Π4-6: Φωτογραφίες δοκιμίων Δ12 και Δ18 πριν και μετά τη θραύση.

Δοκίμο	Φωτογραφία πριν τη θραύση	Φωτογραφία μετά τη θραύση
Δ8		
Δ9		

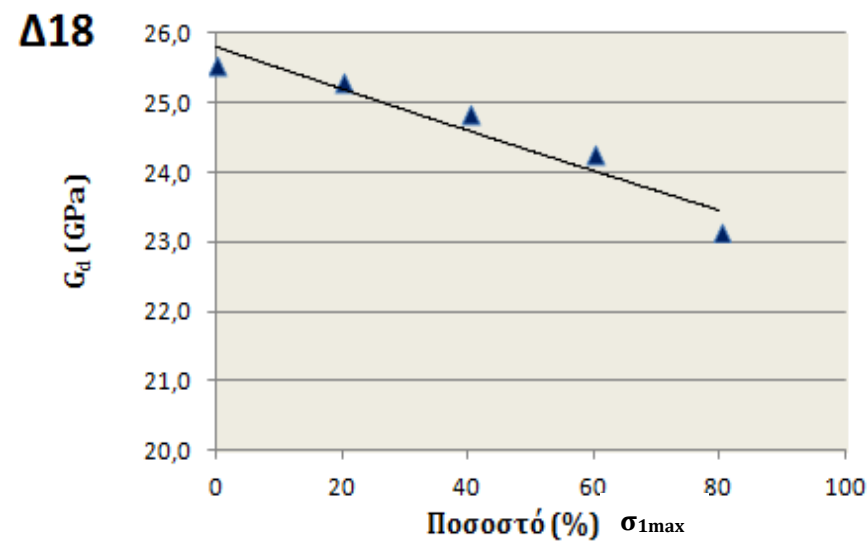
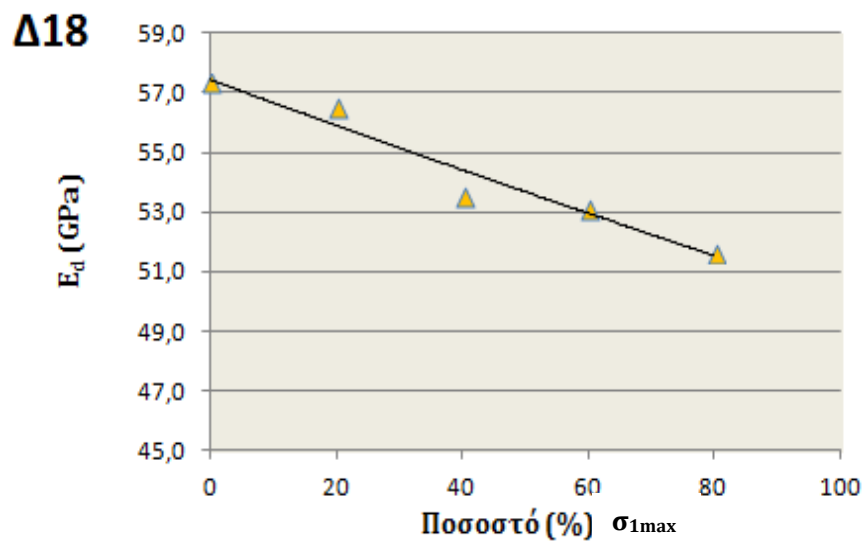
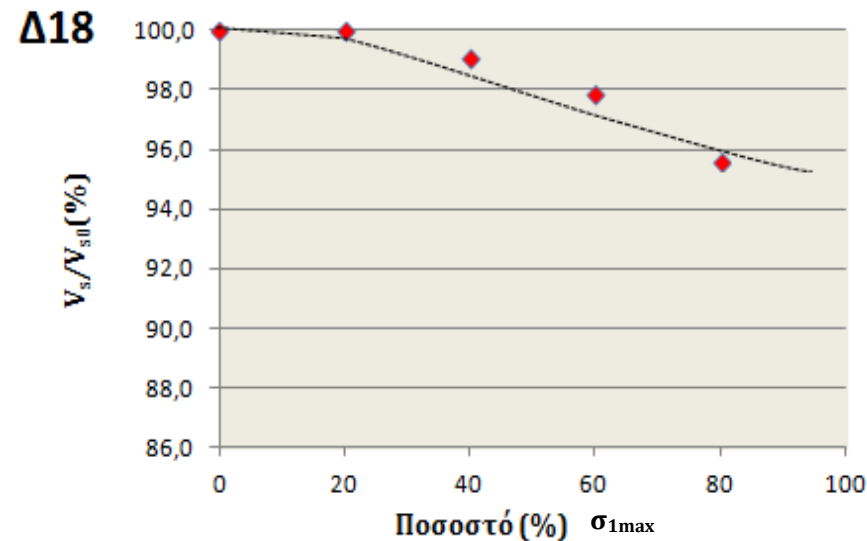
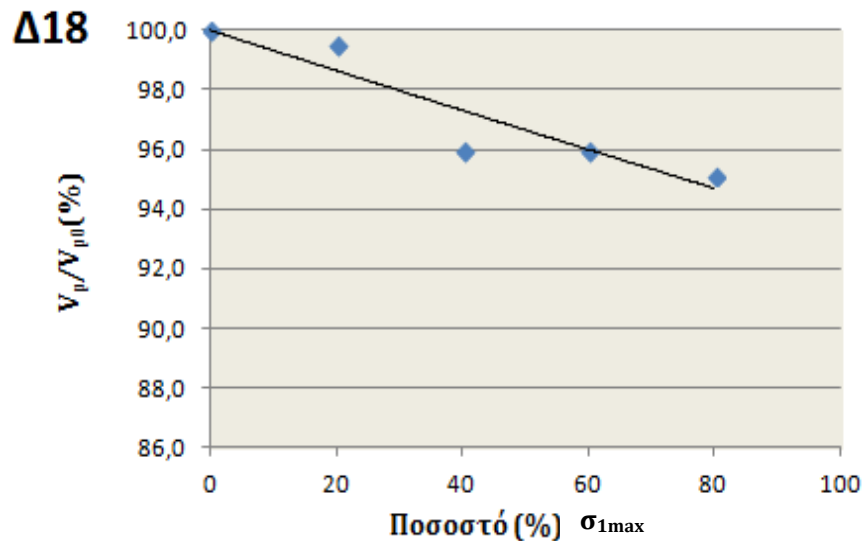
Πίνακας Π4-7: Φωτογραφίες δοκιμίων Δ8 και Δ9 πριν και μετά τη θραύση.

Δοκίμο	Φωτογραφία πριν τη θραύση	Φωτογραφία μετά τη θραύση
<p style="text-align: center;">Δ14</p>		

Πίνακας Π4-8: Φωτογραφίες δοκιμών Δ14 πριν και μετά τη θραύση

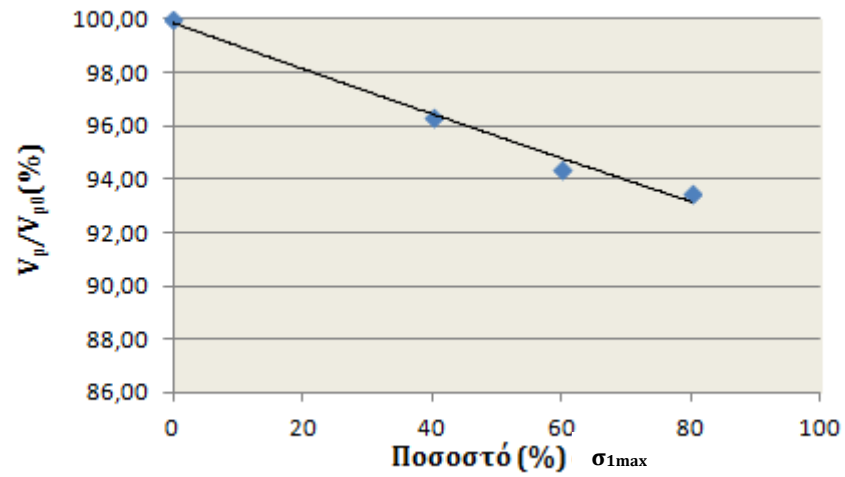


Σχήμα Π-4.1: Διαγράμματα ποσοστιαίας μεταβολής των ταχυτήτων, του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d και του δυναμικού μέτρου διάτμησης G_d σε σχέση με το ποσοστό φόρτισης επί της αντοχής του δοκιμίου Δ12

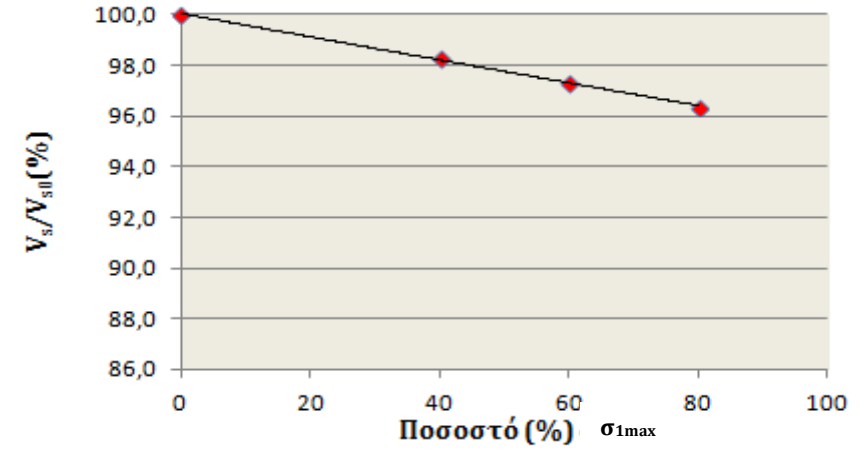


Σχήμα Π-4.2: Διαγράμματα ποσοστιαίας μεταβολής των ταχυτήτων, του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d και του δυναμικού μέτρου διάτμησης G_d σε σχέση με το ποσοστό φόρτισης επί της αντοχής του δοκιμίου Δ18.

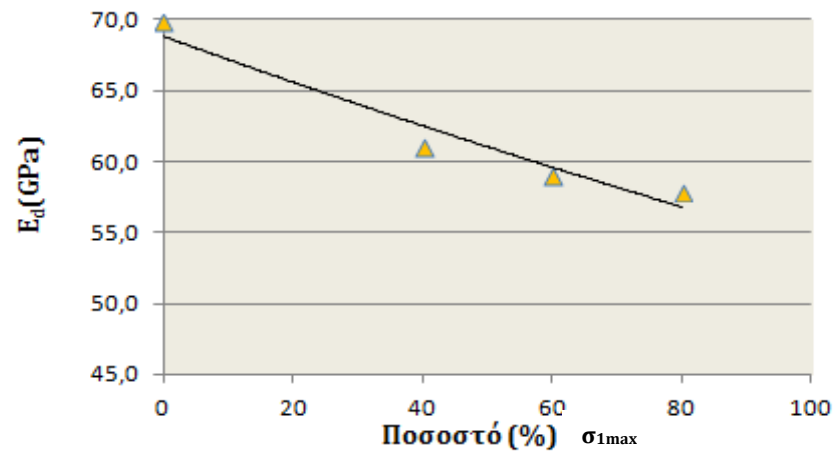
Δ9



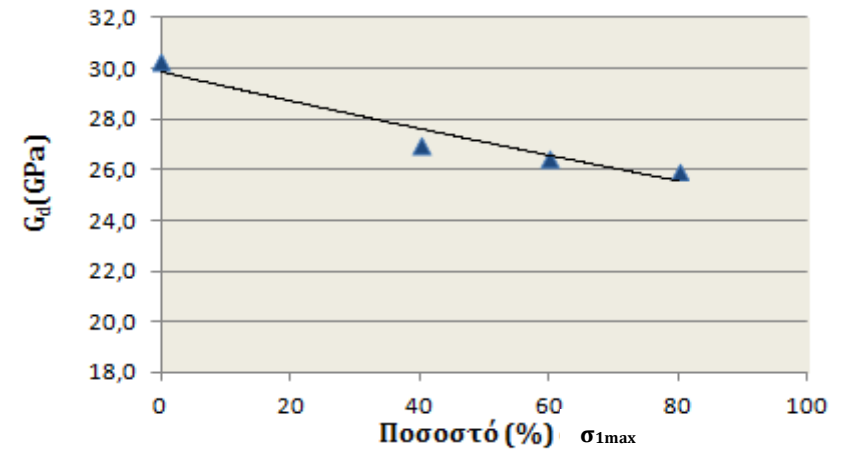
Δ9



Δ9

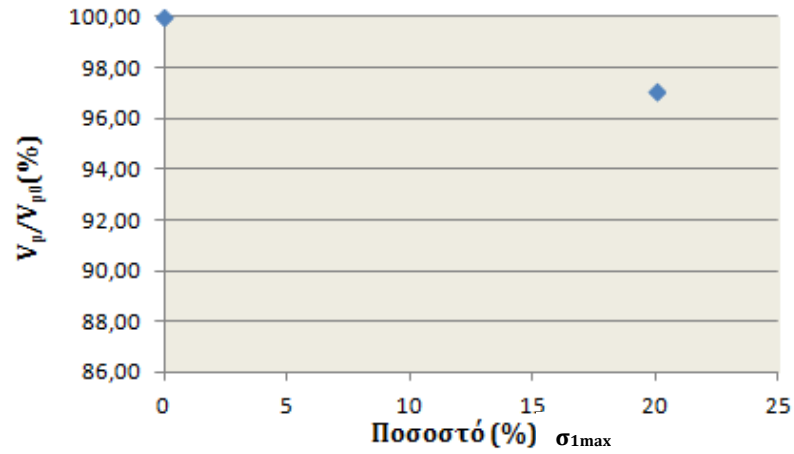


Δ9

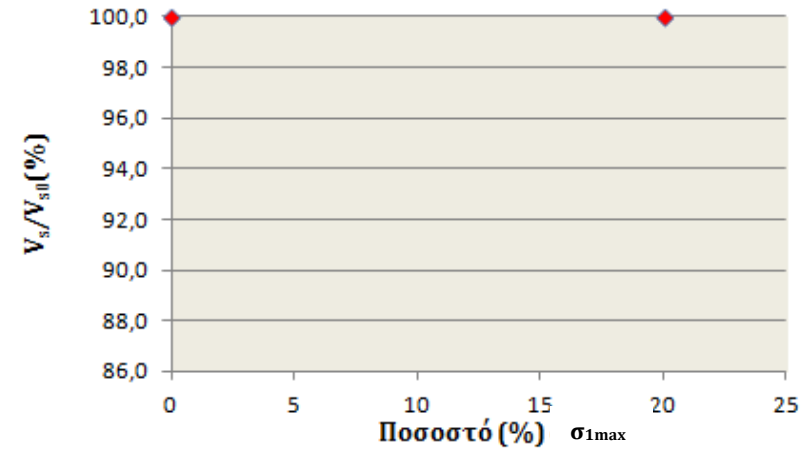


Σχήμα Π4-3: Διαγράμματα ποσοστιαίας μεταβολής των ταχυτήτων, του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d και του δυναμικού μέτρου διάτμησης G_d σε σχέση με το ποσοστό φόρτισης επί της αντοχής του δοκιμίου Δ9.

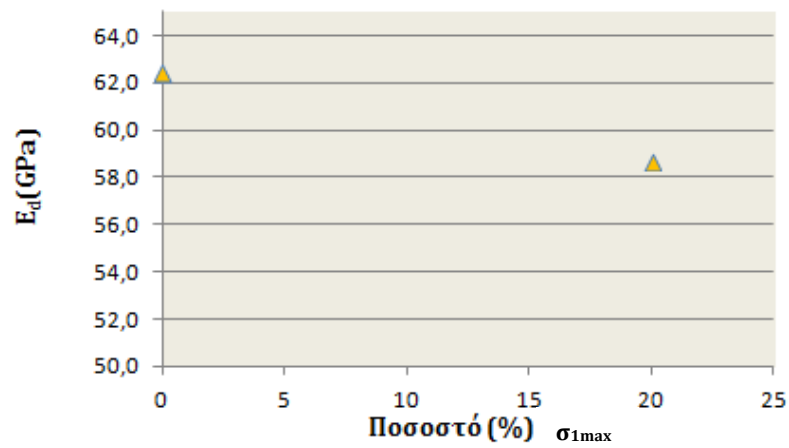
Δ14



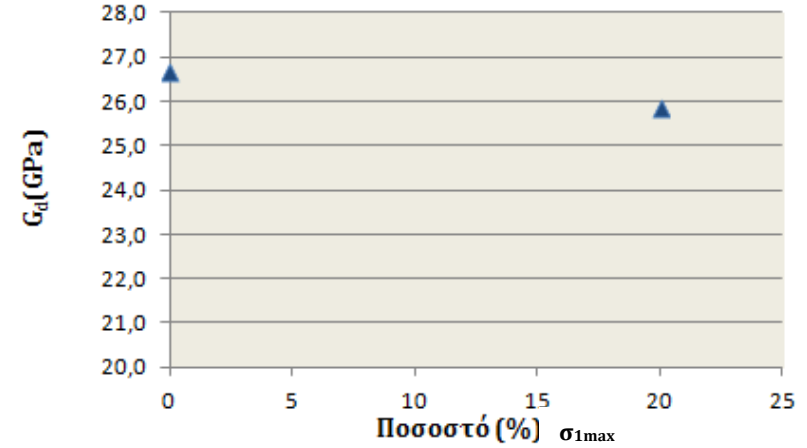
Δ14



Δ14



Δ14



Σχήμα Π4-4: Διαγράμματα ποσοστιαίας μεταβολής των ταχυτήτων, του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d και του δυναμικού μέτρου διάτμησης G_d σε σχέση με το ποσοστό φόρτισης επί της αντοχής του δοκιμίου Δ14.

$\Delta 12$	Ποσοστό φόρτισης (%) σ_{1max}	Ίχνη(Traces)	Γραμμές (Lines)	Μήκος ρωγμών (cm)	$P_{20}(\text{traces/m}^2)$	$P_{10}(\text{traces/m})$	$P_{21}(\text{cm/cm}^2)$
Αρχική κατάσταση	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Φόρτιση	20	4	10	10,1	24,34	3,98	0,061
Φόρτιση	40	4	10	10,1	24,34	3,98	0,061
Φόρτιση	60	4	10	10,1	24,34	3,98	0,061
Φόρτιση	80	4	10	10,1	24,34	3,98	0,061
-	Θραύση	30	10	78,6	182,56	29,880	0,478

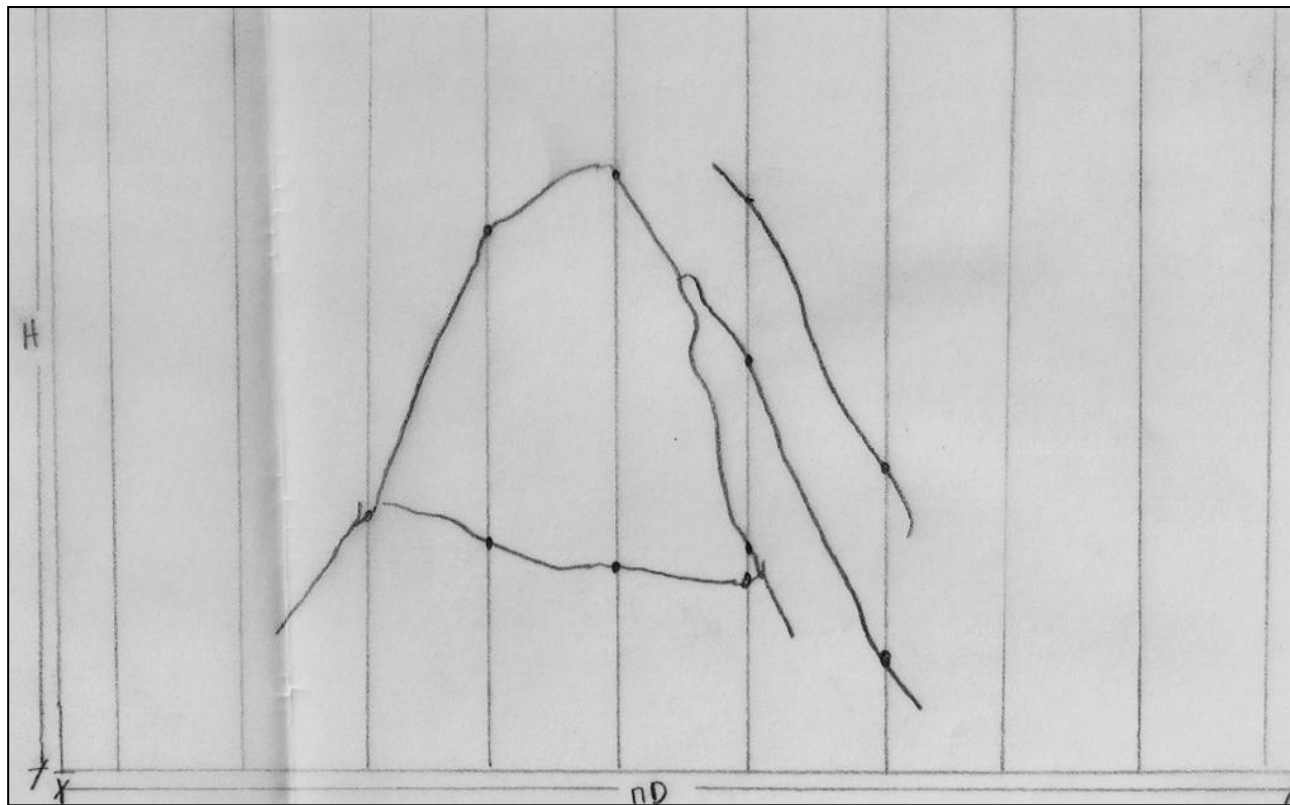
$\Delta 18$	Ποσοστό φόρτισης (%) σ_{1max}	Ίχνη(Traces)	Γραμμές (Lines)	Μήκος ρωγμών (cm)	$P_{20}(\text{traces/m}^2)$	$P_{10}(\text{traces/m})$	$P_{21}(\text{cm/cm}^2)$
Αρχική κατάσταση	0	8	10	18,1	48,09	7,86	0,109
Φόρτιση	20	8	10	18,1	48,09	7,86	0,109
Φόρτιση	40	8	10	18,1	48,09	7,86	0,109
Φόρτιση	60	8	10	18,1	48,09	7,86	0,109
Φόρτιση	80	8	10	18,1	48,09	7,86	0,109
-	Θραύση	32	10	99,7	192,35	31,447	0,599

Πίνακας Π4-9-Π4-10: Καταγραφή εξωτερικής ρωγμάτωσης των δοκιμών $\Delta 12$ και $\Delta 18$ στα στάδια φόρτισης.

Δ9	Ποσοστό φόρτισης (%) σ_{1max}	Τυχη(Traces)	Γραμμές (Lines)	Μήκος ρωγμών (cm)	P₂₀(traces/m²)	P₁₀(traces/m)	P₂₁(cm/cm²)
Αρχική κατάσταση	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Φόρτιση	20	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Φόρτιση	40	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Φόρτιση	60	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Φόρτιση	80	0	0	0	0,00	0,00	0,00
-	Θραύση	10	10	31,6	64,50	10,543	0,204

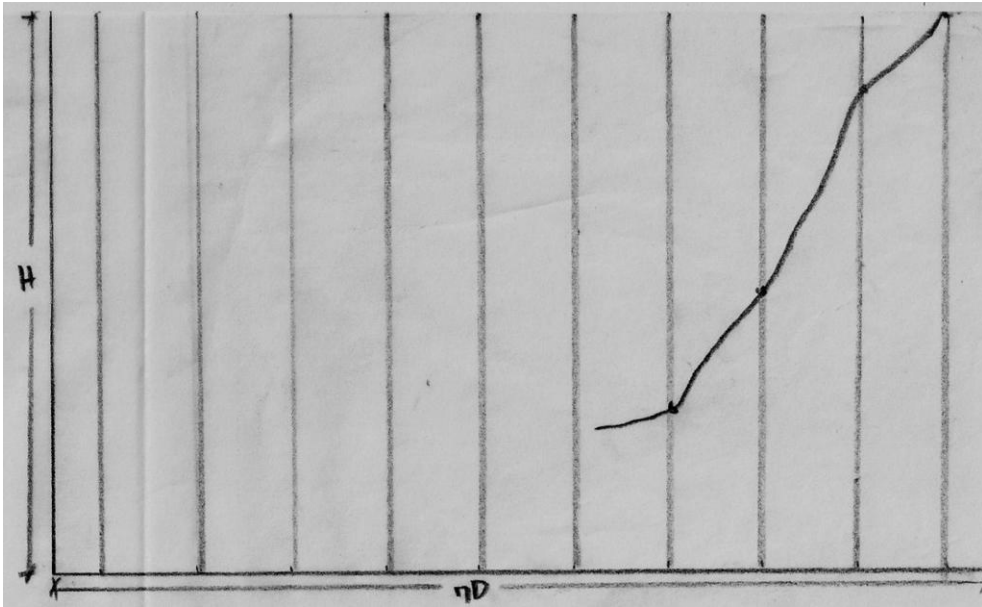
Δ14	Ποσοστό φόρτισης (%) σ_{1max}	Τυχη(Traces)	Γραμμές (Lines)	Μήκος ρωγμών (cm)	P₂₀(traces/m²)	P₁₀(traces/m)	P₂₁(cm/cm²)
Αρχική κατάσταση	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Φόρτιση	20	0	0	0	0,00	0,00	0,00
-	Θραύση	22	10	75,1	135,34	42,232	0,462

Πίνακες Π4-11, Π4-12: Καταγραφή εξωτερικής ρωγμάτωσης των δοκιμίων Δ12 και Δ18 στα στάδια φόρτισης.

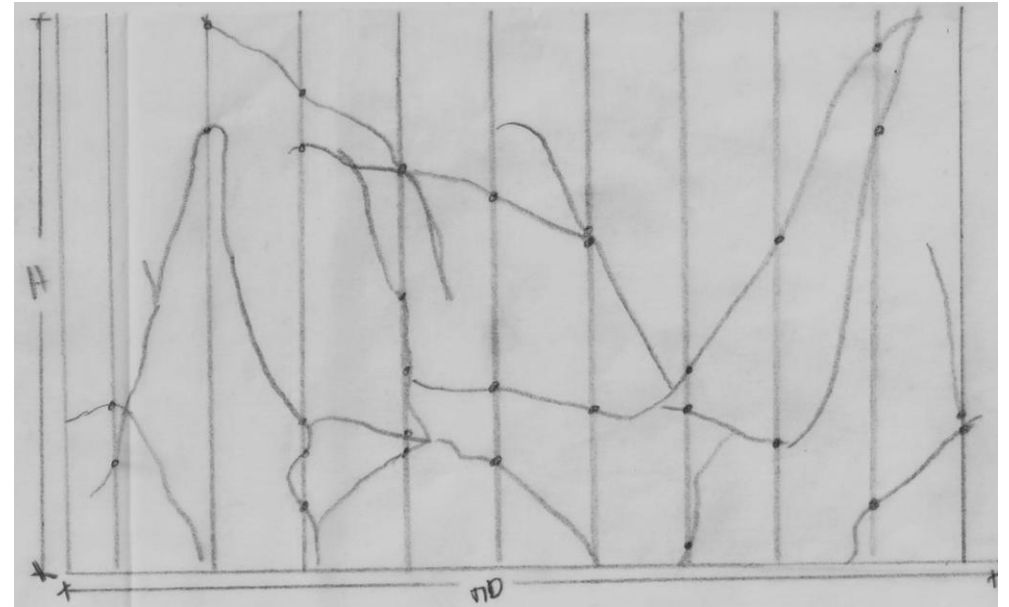


Δ9-ΘΡΑΥΣΗ

Σχήμα Π4-5: Αποτύπωση της εξωτερικής ρωγμάτωσης του δοκιμίου Δ9 στη Θραύση.



Δ12-ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ 40%
ΕΠΙ ΤΗΣ σ_{1max}



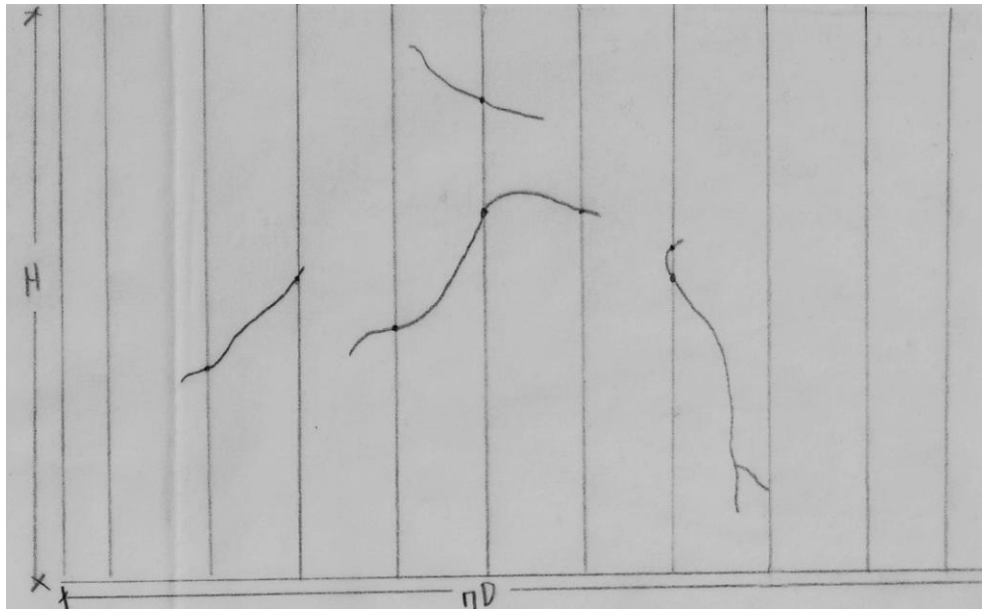
Δ12-ΘΡΑΥΣΗ

Σχήμα Π4-6: Αποτύπωση της εξωτερικής ρωγμάτωσης του δοκιμίου Δ12 στη φόρτιση στο 40% επί της αντοχής και στη θραύση.



Δ14-ΘΡΑΥΣΗ

Σχήμα Π4-7: Αποτύπωση εξωτερικής ρωγμάτωσης του δοκιμίου Δ14 στη θραύση.

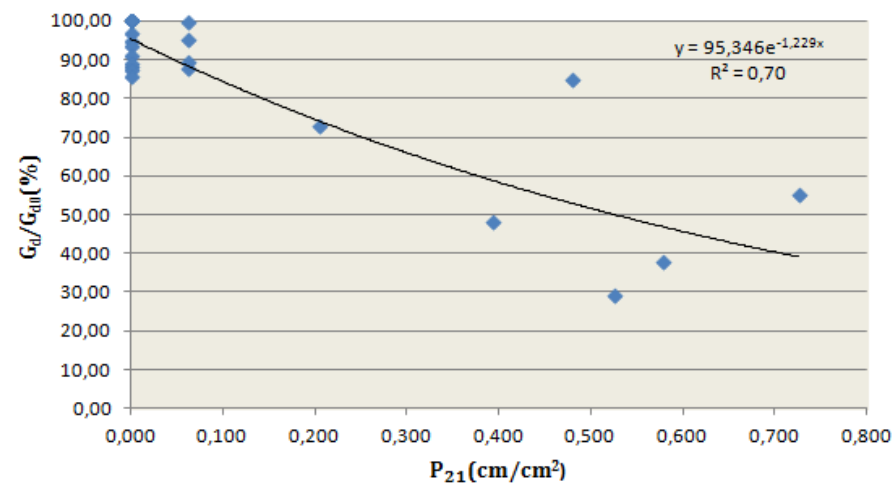
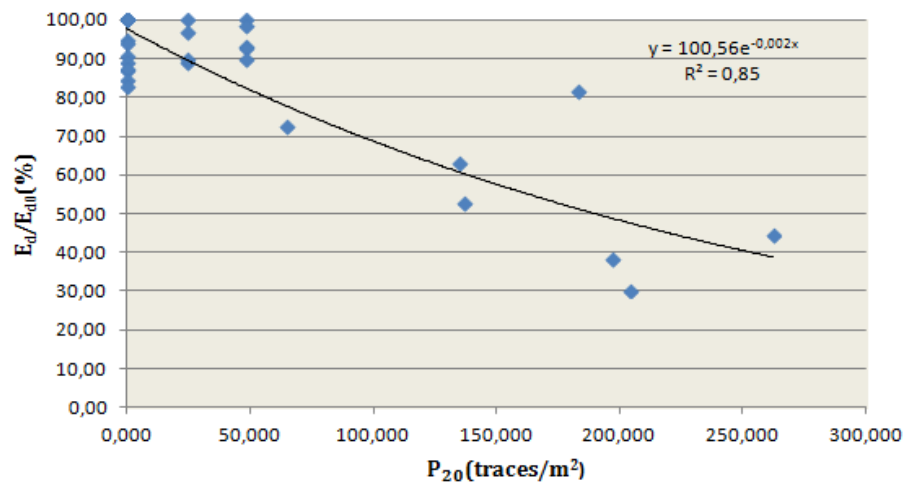
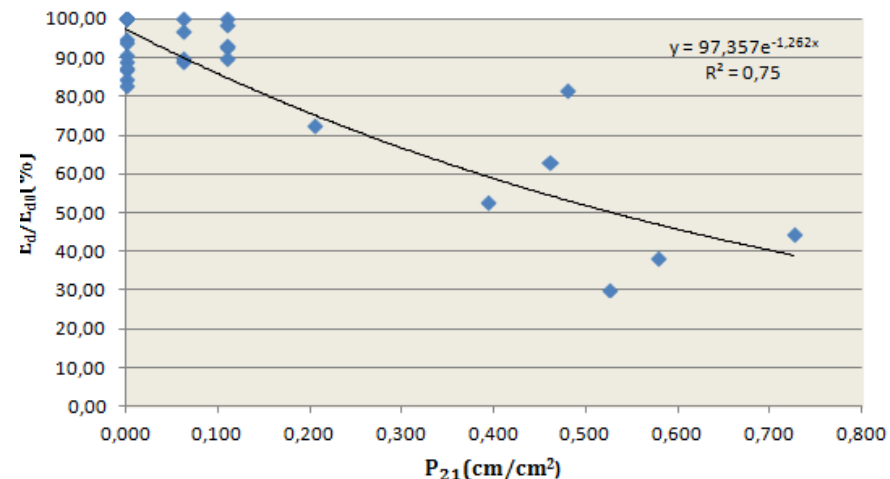
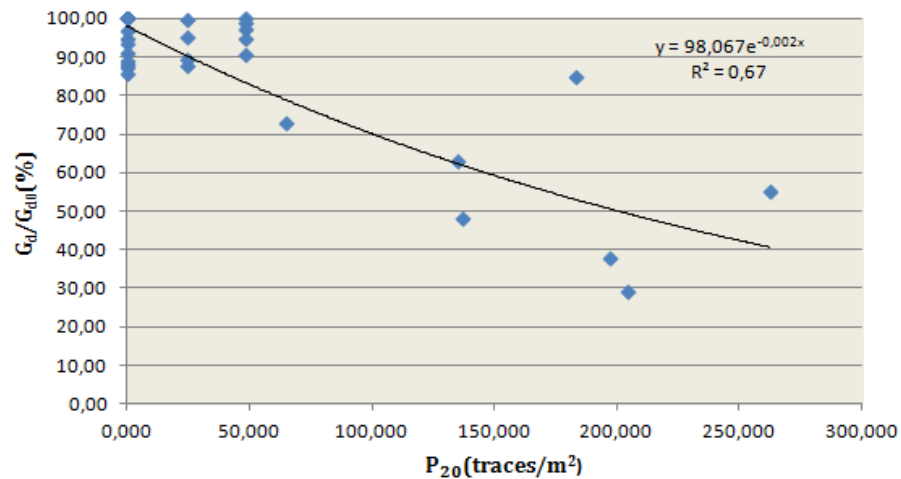


**Δ18-ΠΡΟΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ
ΡΩΓΜΕΣ**



Δ18-ΘΡΑΥΣΗ

Σχήμα Π4-8: Αποτύπωση εξωτερικής ρωγμάτωσης του δοκιμίου Δ18 στην αρχική του κατάσταση (προϋπάρχουσες ρωγμές) και στη θραύση του.



Σχήμα Π4-9: Μεταβολή δυναμικού μέτρου διάτμησης και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε συσχέτιση με τους δείκτες ρωγμάτωσης P_{20} και P_{21} για τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-5:

ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ: Υπολογισμός εφελκυστικής αντοχής-Καταγραφή ταχυτήτων στην αρχική κατάσταση και στη θραύση των δοκιμίων-Αποτύπωση ρωγμάτωσης.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.**

Δείγμα : BZL 1

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,201

Πάχος (cm): 2,488

Βάρος (gr): 151,23

Ρυθμός επιβολής φορτίου: 0,2 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: 2 min. 41 sec.

Φορτίο Θραύσης(kN): 32,1 kN

Εφελκυστική Αντοχή σ_c : 15,80 MPa

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας

Αθήνα, 9/2/2016

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.

Δείγμα : BZL 7

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,183

Πάχος (cm): 2,760

Βάρος (gr): 148,75

Ρυθμός επιβολής φορτίου: 0,2 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: 3 min. 10 sec.

Φορτίο Θραύσης(kN): 38,0 kN

Εφελκυστική Αντοχή σ_c : 16,91 MPa

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.**

Δείγμα : BZL 10

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Διάμετρος (cm): 5,208

Πάχος (cm): 2,358

Βάρος (gr): 127,94

Ρυθμός επιβολής φορτίου: 0,2 kN/sec.

Χρόνος Θραύσης: 2 min. 20 sec.

Φορτίο Θραύσης(kN): 28,0kN

Εφελκυστική Αντοχή σ_c : 14,52 MPa

Δοκίμιο	Φόρτιση	Αριθμός Φόρτισης	P_{21}	V_p (m/s)	V_s (m/s)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)
BZL 6	Αρχική	0,00	0,00	4696,61	3148,86	100,00	100,00
BZL 6	Φόρτιση έως διαμετρική αστοχία	1,00	0,24	4398,41	2827,55	93,65	89,80

Δοκίμιο	Φόρτιση	Αριθμός Φόρτισης	P_{21}	V_p (m/s)	V_s (m/s)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)
BZL 8	Αρχική	0	0	5036,54	3273,75	100,00	100,00
BZL 8	Φόρτιση έως διαμετρική αστοχία	1	0,245	4676,8	2910,0	92,86	88,89
BZL 8	Επαναφόρτιση σε κάθετο άξονα	2	0,245	4676,79	2910	92,86	88,89

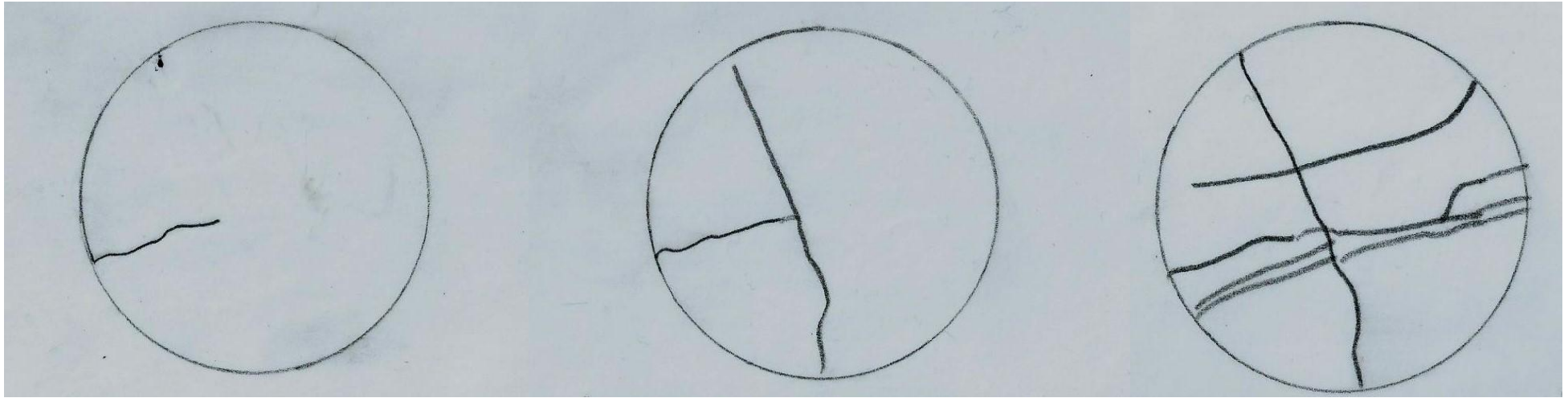
Δοκίμιο	Φόρτιση	Αριθμός Φόρτισης	P_{21}	V_p (m/s)	V_s (m/s)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)
BZL 9	Αρχική	0	0	4572,41	3274,07	100,00	100,00
BZL 9	Φόρτιση έως διαμετρική αστοχία	1	0,244	4347,5	3195,2	95,08	97,59
BZL 9	Επαναφόρτιση σε κάθετο άξονα	2	0,487	4209,52	3083,72	92,06	94,19

Πίνακες Π5-1, Π5-2, Π5-3: Καταγραφή των ταχυτήτων και της ρωγμάτωσης των δοκιμίων BZL 6, BZL 8, BZL 9 στη αρχική κατάσταση, στη διαμετρική αστοχία και στη μετέπειτα επαναφόρτιση σε κάθετο άξονα της αστοχίας, εάν ήταν εφικτή, στη δοκιμή Brazilian.

Δοκίμιο	Φόρτιση	Αριθμός Φόρτισης	P_{21}	V_p (m/s)	V_s (m/s)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)
BZL 4	Αρχική	0	0,108	4789,83	3175,28	100,00	100,00
BZL 4	Φόρτιση έως διαμετρική αστοχία	1	0,363	4485,7	3038,7	93,10	95,61

Δοκίμιο	Φόρτιση	Αριθμός Φόρτισης	P_{21}	V_p (m/s)	V_s (m/s)	V_p/V_{p0} (%)	V_s/V_{s0} (%)
BZL 3	Αρχική	0	0,225	4324,62	2839,39	100,00	100,00
BZL 3	Φόρτιση έως διαμετρική αστοχία	1	0,415	4073,9	2532,4	94,20	89,19

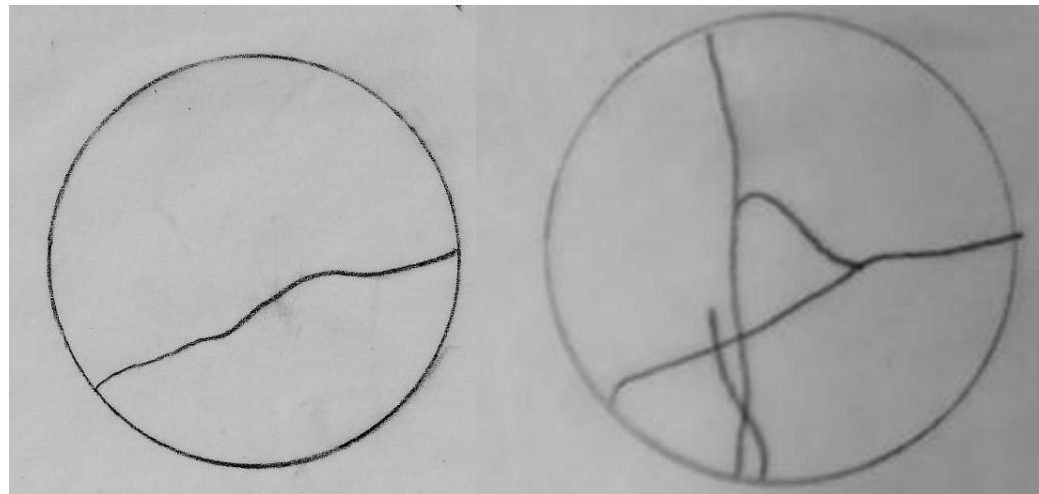
Πίνακες Π5-4, Π4-5: Καταγραφή των ταχυτήτων και της ρωγμάτωσης των δοκιμίων BZL 4, BZL 3 στην αρχική κατάσταση, στη διαμετρική αστοχία στη δοκιμή Brazilian.



i) Αρχική Κατάσταση BZL 4

ii) Θραύση BZL 4

iii) Επαναφόρτιση σε κάθετο άξονα της επιφάνειας θραύσης BZL 4.



i) Αρχική Κατάσταση BZL 3

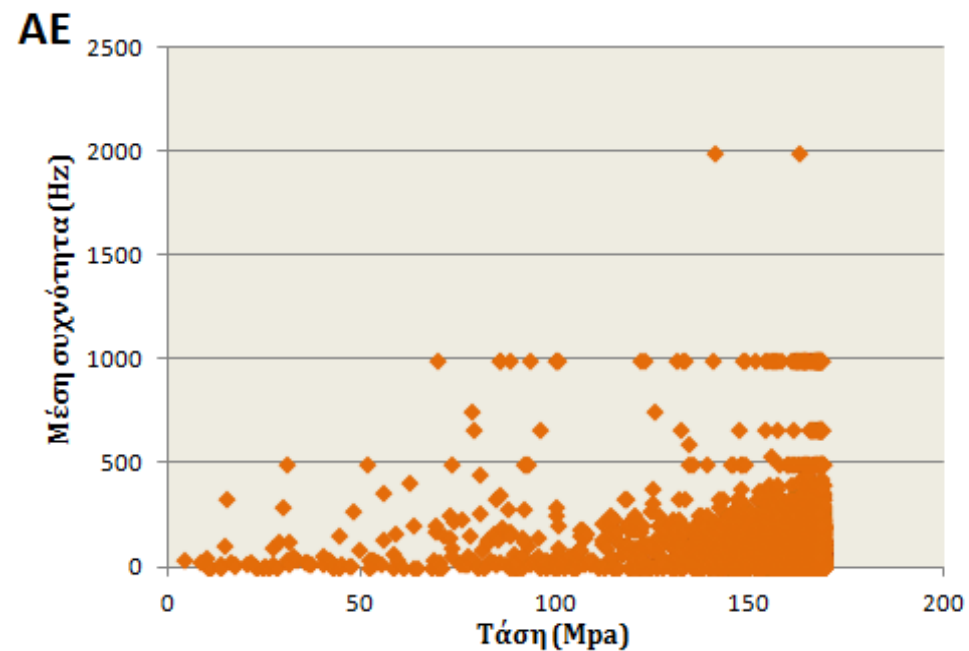
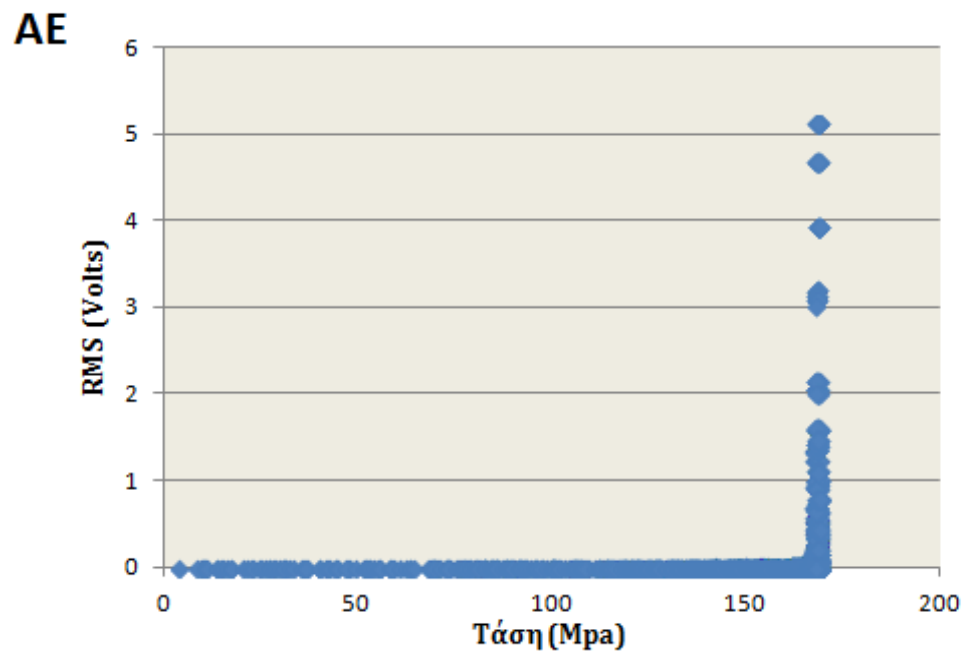
ii) Θραύση BZL 3

Σχήματα Π5-1, Π5-2: Αποτύπωση ρωγμάτωσης για τα δοκίμια BZL 3 και BZL 4 τα οποία παρουσίασαν αρχική ασυνέχεια στην επιφάνειά τους και επομένως η ρωγμάτωση στη θραύση τους δεν ήταν μόνο κατά τη διάμετρο φόρτισης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-6:
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ



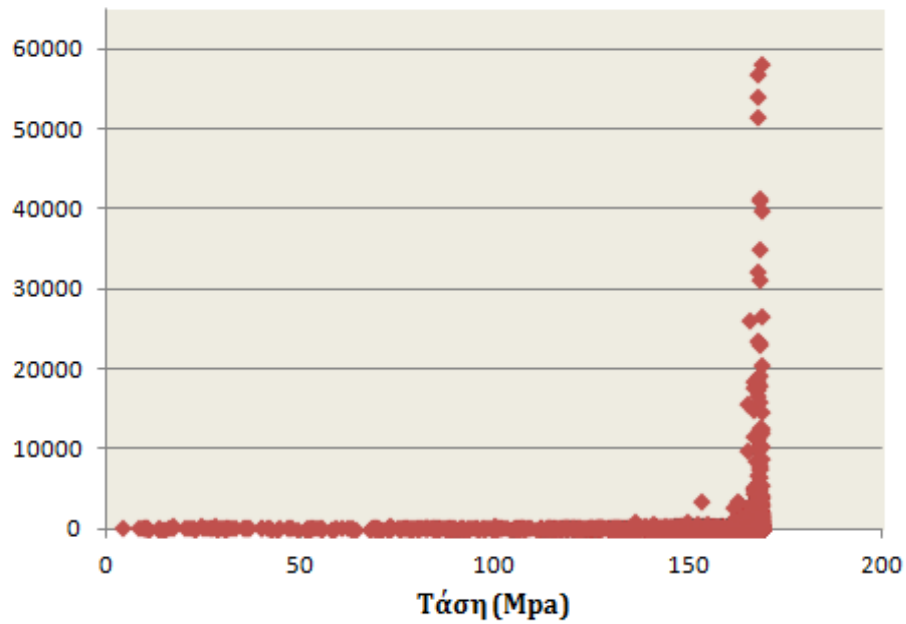
Σχήμα Π6-1, Π6-2: Φωτογραφία πρέσσας επιβολής αξονικού φορτίου στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων (αριστερά)- Διάταξη αισθητήρων και τοποθέτηση strain gauges (δεξιά).



Σχήμα Π6-3, Π6-4: Διάγραμμα Τάσης-RMS (Root mean square) (αριστερά)- Διάγραμμα Τάσης-Μέσης συχνότητας σήματος (δεξιά) στη δοκιμή Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ).

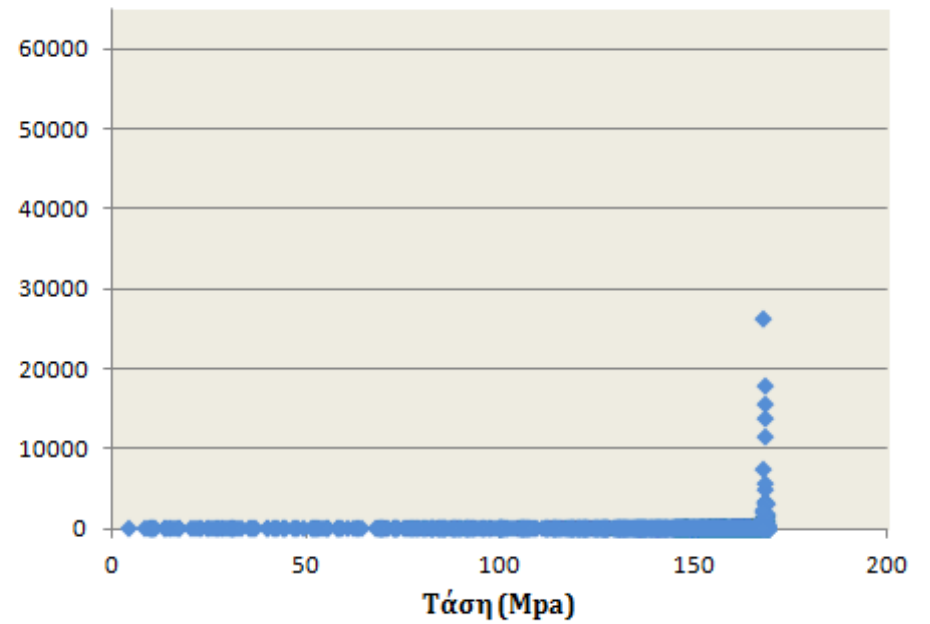
ΑΕ

Εκλυόμενη Ενέργεια (J)

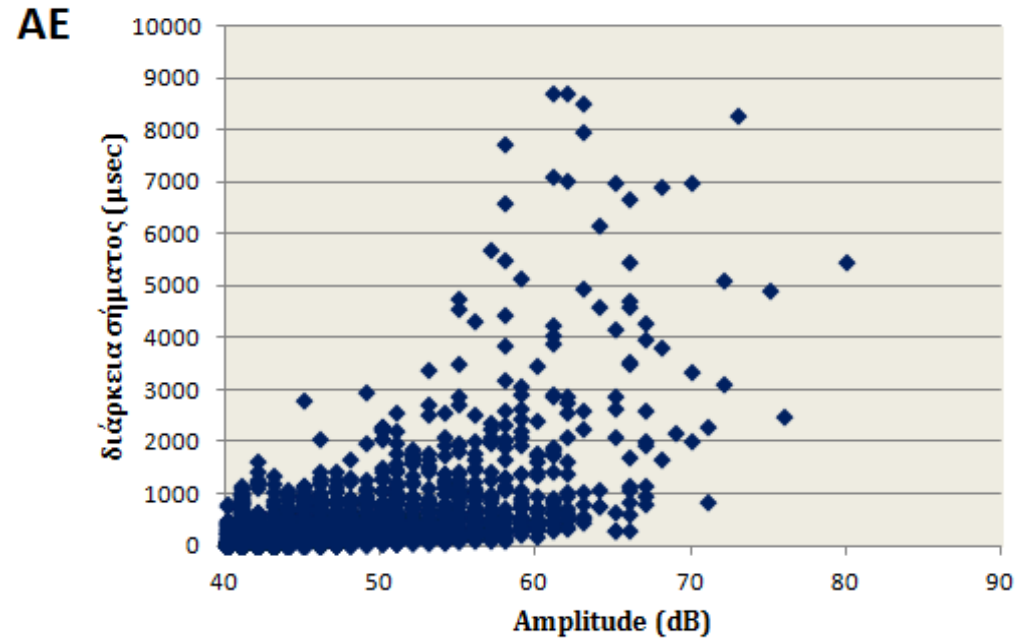
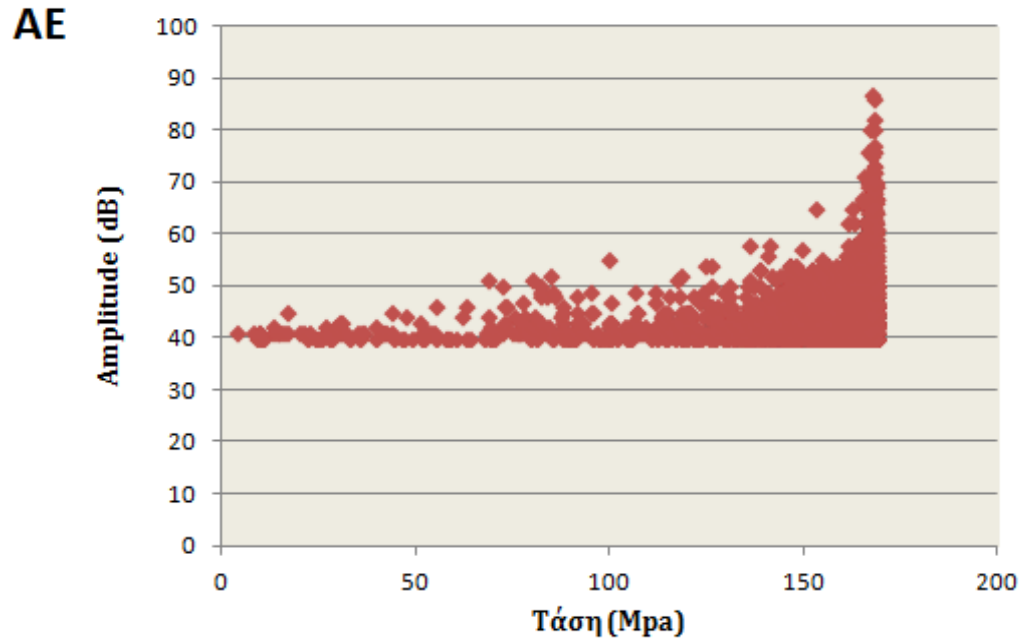


ΑΕ

Counts

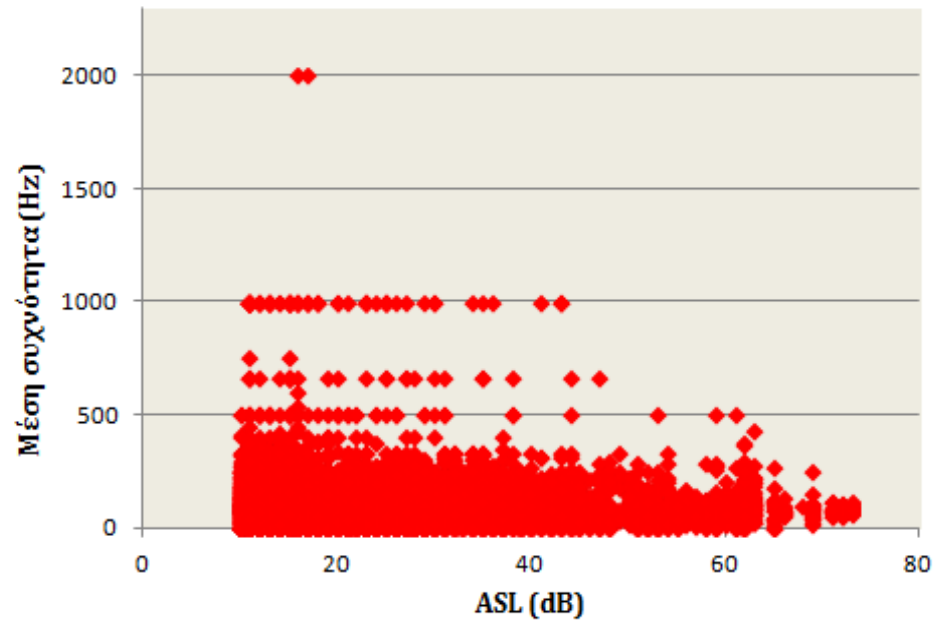


Σχήμα Π6-3, Π6-4: Διάγραμμα Τάσης-Εκλυόμενης Ενέργειας (αριστερά)- Διάγραμμα Τάσης-Counts (δεξιά) στη δοκιμή Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ).

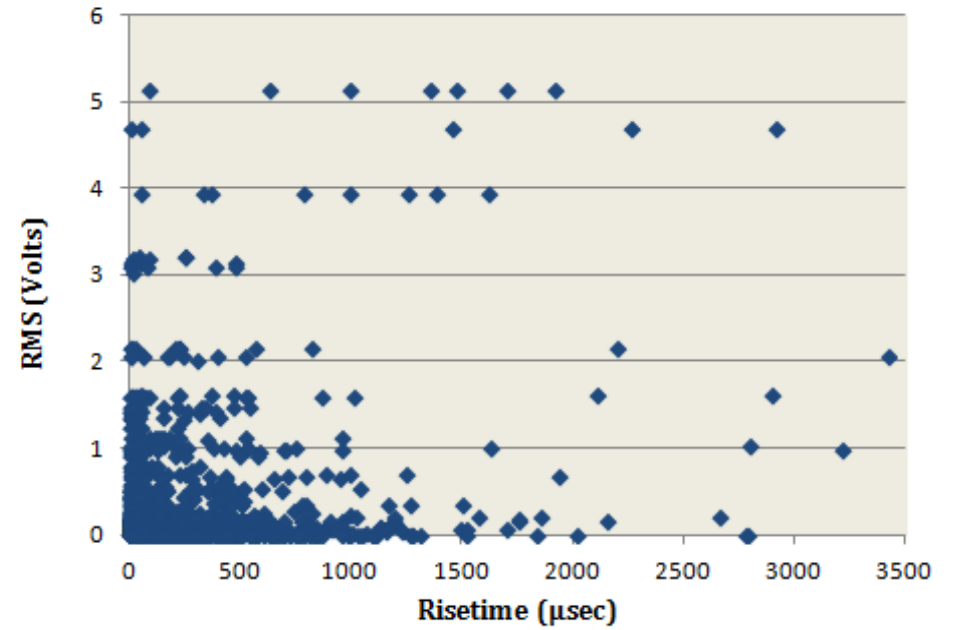


Σχήμα Π6-5, Π6-6: Διάγραμμα Τάσης-Πλάτους Σήματος (αριστερά)- Διάγραμμα Πλάτους σήματος-Διάρκειας σήματος (δεξιά) στη δοκιμή Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ).

ΑΕ



ΑΕ



Σχήμα Π6-7, Π6-8: Διάγραμμα ASL (Average Signal Level)-Μέση Συχνότητα Σήματος (αριστερά)- Διάγραμμα Πλάτος Σήματος-Διάρκεια Σήματος (δεξιά) στη δοκιμή Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ).

