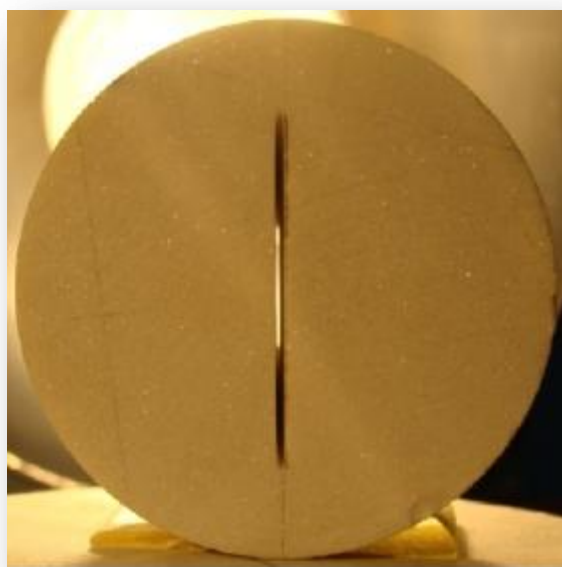




Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

**"Αξιολόγηση ακουστικών εκπομπών κατά τη δοκιμή Βραζιλιανού
δίσκου με εγκοπή 'chevron' σε δοκίμια μαρμάρου"**



Μεταπτυχιακή Εργασία
Δασκαλάκη Κατερίνα
Διπλ. Μηχανικός Ορυκτών Πόρων

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθ. Εξαδάκτυλος Γεώργιος (επιβλέπων)

Καθ. Αγιουτάντης Ζαχαρίας

Καθ. Βαλλιανάτος Φίλιππος

Χανιά,
Οκτώβριος, 2015

This work was supported by the THALES Program of the Ministry of Education of Greece and the European Union in the framework of the project “Integrated understanding of Seismicity, using innovative methodologies of Fracture Mechanics along with Earthquake and Non-Extensive Statistical Physics - Application to the geodynamic system of the Hellenic Arc - SEISMO FEAR HELLARC.”

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

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η μεταπτυχιακή αυτή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του "Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον" της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το θέμα που διαπραγματεύεται αφορά την ανάλυση ακουστικών εκπομπών κατά τη δοκιμή Βραζιλιανού δίσκου με εγκοπή σε δοκίμια μαρμάρου. Το πειραματικό μέρος διεξήχθη στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων της σχολής.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους βοήθησαν και συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής και συγκεκριμένα:

- Τους καθηγητές κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία και κ. Εξαδάκτυλο Γιώργο για την συνεχή καθοδήγηση τους και τις πολύτιμες συμβουλές τους.
- Τον καθηγητή του ΤΕΙ Κρήτης κ. Βαλλιανάτο Φίλιππο για την συμμετοχή και την αξιολόγηση της εργασίας αυτής.
- Τον Μεταλλειολόγο Μηχανικό κ. Κακλή Κωνσταντίνο, για την καθοδήγηση και την βοήθεια του στο πρακτικό μέρος της εργασίας.
- Τον Μεταλλειολόγο Μηχανικό κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο για την καθοριστική συμβολή του στην εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών.
- Τους συνεργάτες του κ. Βαλλιανάτου και ιδιαίτερα τον επίκουρο καθηγητή Β.Σάλτα για την συμμετοχή τους στην διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών και την διάθεση του απαραίτητου εξοπλισμού.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους και κυρίως την οικογένεια μου για την πολύτιμη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια συμβάλλοντας καθοριστικά στην παρούσα εξέλιξη μου.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της απόκρισης των ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της αστοχίας δοκιμίων με εγκοπή τύπου CCNBD σε αντιδιαμετρική θλίψη (Brazilian test). Το μάρμαρο που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από το λατομείο Κομνηνών Νέστου.

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας διαμορφώθηκαν δοκίμια με εγκοπή τύπου CCNBD (Central Chevron Notched Brazilian Disk) σύμφωνα με τις προδιαγραφές και πραγματοποιήθηκαν πειράματα έμμεσου εφελκυσμού στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε καταγραφή των Ακουστικών Εκπομπών χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων όσο και τον εξοπλισμό του εργαστηρίου Γεωφυσικής και Σεισμολογίας του Τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΤΕΙ Κρήτης.

Σκοπός των πειραματικών δοκιμών είναι να μελετηθεί πως μεταβάλλονται οι χαρακτηριστικοί παράμετροι των Ακουστικών Εκπομπών καθώς εξελίσσεται η φόρτιση και επέρχεται η αστοχία των δοκιμίων.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2: Ακουστικές Εκπομπές ΑΕ.....	4
2.1 Ηχητικά κύματα.....	4
2.1.1 Είδη κυμάτων	5
2.1.2 Ιδιότητες ηχητικών κυμάτων.....	5
2.2 Ορισμός της Ακουστικής Εκπομπής ΑΕ	8
2.3 Δημιουργία του σήματος Ακουστικής Εκπομπής ΑΕ	10
2.4 Παράμετροι Ακουστικών Εκπομπών ΑΕ.....	11
2.5 Θόρυβος και εξασθένιση	14
2.6 Εφαρμογές Ακουστικών Εκπομπών	16
2.7 Συστήματα παρακολούθησης Ακουστικών Εκπομπών ΑΕ.....	17
2.7.1 Αισθητήρες	17
2.7.2 Προενισχυτής	18
2.7.3 Μονάδα επεξεργασίας ΑΕ.....	19
Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό υπόβαθρο δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού και ρωγμής.....	21
3.1 Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.....	21
3.1.1 Γενικά.....	21
3.1.2 Κατανομή των τάσεων στον Βραζιλιανό δίσκο	22
3.1.3 Συνθήκη θραύσης του δίσκου.....	24
3.2 Θεωρία Griffith και Θραυστομηχανική.....	26
3.2.1 Το κριτήριο του Griffith	26
3.2.2 Αντοχή σε εφελκυσμό	29
3.2.3 Αντοχή σε εφελκυσμό και προϋπάρχουσες ρωγμές.....	30
3.2.4 Έναρξη ρωγμής και διάδοση ρωγμής.....	30
3.3 Τασική ανάλυση των ρωγμών	30
3.3.1 Συντελεστής Έντασης της Τάσης	32
3.3.2 Σχέση μεταξύ K και συνολικής απόκρισης	33
3.3.3 Άνοιγμα χελιών στην αιχμή της ρωγμής	35
Κεφάλαιο 4: Πειραματική ανάλυση Βραζιλιανών δίσκων με εγκοπή chevron σε δοκίμια μαρμάρου Νέστου σε συνδυασμό με ΑΕ.....	38

4.1 Γενικά.....	38
4.2 Βραζιλιανοί δίσκοι με εγκοπή chevron	38
4.2.1 Περιγραφή γεωμετρίας Βραζιλιανών δοκιμών με εγκοπή chevron	39
4.2.2 Υπολογισμός του συντελεστή έντασης των τάσεων K	41
4.3 Εξεταζόμενο υλικό.....	45
4.3.1 Γενικά στοιχεία για το μάρμαρο	45
4.3.2 Γένεση και φυσικά χαρακτηριστικά	46
4.3.3 Μάρμαρο Κομνηνών Νέστου	47
4.4 Προετοιμασία δοκιμών με εγκοπή chevron για τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.....	48
4.4.1 Προδιαγραφές και προετοιμασία των δοκιμών	48
4.4.2 Δημιουργία εγκοπής στα δοκίμια	49
4.5 Περιγραφή εργαστηριακού εξοπλισμού & συστημάτων καταγραφής ΑΕ	50
4.5.1 Εξοπλισμός φόρτισης δοκιμών	50
4.5.2 Εξοπλισμός Ακουστικών Εκπομπών ΑΕ.....	53
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα πειραματικής ανάλυσης Βραζιλιανών δίσκων με εγκοπή chevron σε δοκίμια μαρμάρου Νέστου σε συνδυασμό με ΑΕ	56
5.1 Γενικά.....	56
5.2 Άρρηκτα δοκίμια μαρμάρου Κομνηνών Νέστου.....	56
5.3 Δοκίμια μαρμάρου Κομνηνών Νέστου με εγκοπή CCNBD σε συνδυασμό με τις Ακουστικές Εκπομπές ΑΕ.....	57
5.3.1 Δοκίμια με εγκοπή chevron παράλληλα στον άξονα φόρτισης	58
5.3.2 Δοκίμια με εγκοπή chevron στις 45° από τον άξονα φόρτισης	63
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	71
6.1 Συμπεράσματα	71
6.2 Προτάσεις	73
Βιβλιογραφία	74
Ελληνική	74
Ξενόγλωσση	75
Παράρτημα.....	78

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Ο μηχανικός όταν σχεδιάζει μια κατασκευή έχει σαν στόχο την εξασφάλιση της λειτουργικότητας της κατασκευής για τον συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα με τον πιο οικονομικό και τεχνικά άρτιο τρόπο. Για να προβλέψει ο μηχανικός την αστοχία ή μάλλον για να σχεδιάσει μια ασφαλή κατασκευή θα πρέπει να εκτιμήσει με ποιο τρόπο το πέτρωμα ή η βραχομάζα, ή το σύνολο της βραχομάζας και επιδομής (φράγμα, οικοδομή), δηλαδή η αλληλεπίδραση των στοιχείων του συνόλου της κατασκευής, μπορεί να φτάσει στην αστοχία.

Μερικές από τις καταστροφές σε κατασκευές από διάφορα υλικά (πέτρωμα, μέταλλα, σκυρόδεμα, κ.τ.λ.), αποδίδονται σε κακούς θεωρητικούς υπολογισμούς ή στο γεγονός ότι οι κατασκευές βρέθηκαν εκτός των ορίων σχεδιασμού λειτουργίας τους. Γι' αυτό, πριν το σχεδιασμό ενός υπαίθριου ή υπόγειου έργου (πχ. στοών, σιράγγων κ.λπ.) πρέπει να προηγείται ο λεπτομερής χαρακτηρισμός της βραχομάζας και ο ποιοτικός χαρακτηρισμός των γεωμηχανικών συνθηκών που επικρατούν. Το ανησυχητικό στοιχείο είναι όταν πολλές από τις καταστροφές δεν μπορούν να αποδοθούν στις παραπάνω αιτίες.

Το πρόβλημα συνήθως ανάγεται στον προσδιορισμό των μεγίστων τάσεων που θα δημιουργηθούν στο πέτρωμα μετά την εξόρυξη ή γενικότερα στην κατανομή των τάσεων γύρω από το έργο. Η κατανομή των τάσεων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, από την μορφή του έργου, το μέγεθος και τις κατευθύνσεις των φορτίων, τις συνοριακές συνθήκες, κλπ. Ιδιαίτερα, για τον σχεδιασμό του βέλτιστου συστήματος θραύσης ψαθυρών πετρωμάτων, είτε με ανατίναξη είτε με μηχανικό τρόπο, πρέπει να εκτιμηθεί η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα του πετρώματος.

Μέρος της έρευνας αφορά επίσης, στον ρόλο που παίζουν οι ατέλειες που βρίσκονται μέσα σε μια κατασκευή και πως αυτές τελικά επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής της. Ατέλειες μπορεί να προϋπάρχουν στα υλικά από τα οποία απαρτίζεται η κατασκευή. Επιπλέον μπορούν να δημιουργηθούν κατά την κατασκευαστική φάση ή να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια χρησιμοποίησης της κατασκευής.

Η περιγραφή μιας ατέλειας σε ένα σώμα πραγματοποιείται με την εισαγωγή της γεωμετρίας της. Στη συνέχεια αναζητείται το τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο γύρω από την ατέλεια και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι ομογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό.

Η πρώτη αξιοσημείωτη προσέγγιση του προβλήματος εμφανίζεται στις αρχές του εικοστού αιώνα από τον Inglis (1913). Αυτός υπολόγισε το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται εντός άπειρου ελαστικού σώματος, το οποίο έχει ελλειπτική τρύπα και υποβάλλεται σε ομοιόμορφη τάση στο άπειρο. Λίγο αργότερα ο Muskhelishvili (1963) πρότεινε απλούστερη λύση του ίδιου προβλήματος, ενώ ο Griffith απέδειξε ότι υπάρχει σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών γεωμετρικών στοιχείων της ατέλειας με το μέγεθος των εφαρμοζόμενων φορτίων επί της κατασκευής. Δηλαδή, ότι οι υπάρχουσες ατέλειες επιδεινώνονται όταν τα επιβαλλόμενα εξωτερικά φορτία φθάσουν σε μια ορισμένη κρίσιμη τιμή.

Μέχρι και σήμερα, τα κύρια ερωτήματα που καλούνται να απαντηθούν είναι:

- Ποια είναι η αντοχή της κατασκευής που φέρει ατέλεια, και πως εξαρτάται από τη γεωμετρία αυτής;
- Ποιο είναι το μέγιστο μέγεθος οπής (κρίσιμο μέγεθος) για το οποίο η κατασκευή δεν θα αστοχήσει;
- Πως το μέγεθος της οπής συνδέεται με τα εφαρμοζόμενα εξωτερικά φορτία;
- Ποιο είναι το κρίσιμο φορτίο για να αρχίσει η ρωγμή να διαδίδεται;
- Ποιος είναι ο τρόπος διάδοσης της ρωγμής;

Η αντοχή σε εφελκυσμό των πετρωμάτων είναι μια παράμετρος που σχετίζεται έντονα με πολλές από τις μηχανικές εφαρμογές (μηχανική συμπεριφορά των ορυκτών, διάτρηση και ανατίναξη των πετρωμάτων, στην αστοχία των πετρωμάτων σε υπόγειες και επιφανειακές εργασίες, όπως επίσης και στις κατασκευές). Γι' αυτό είναι ενδιαφέρον να βρεθούν κατάλληλες εργαστηριακές μέθοδοι που θα οδηγήσουν στον προσδιορισμό της αντοχής των πετρωμάτων.

Η διαδικασία που ακολουθείται ώστε να διαπιστωθεί ότι τα εφαρμοζόμενα φορτία δεν θα υπερβούν τα αναμενόμενα επίπεδα αντοχής του πετρώματος, για δεδομένες συνθήκες εξόρυξης, και να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του έργου, είναι η εφαρμογή ενός τυπικού πειράματος σε δοκίμια από το υλικό που θα

χρησιμοποιηθεί για να γίνει μια κατασκευή. Αν η μέγιστη υπολογιζόμενη τάση στην κατασκευή πολλαπλασιαζόμενη με ένα κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας, είναι μικρότερη από τη μέση αντοχή που κατέδειξαν τα πειράματα, τότε η κατασκευή θεωρείται ασφαλής (Κακλής, 2003).

Ο προσδιορισμός της μηχανικής κατάστασης των πετρωμάτων χωρίς την λήψη δειγμάτων είναι ένα θέμα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα και δίνει κίνητρα για την εύρεση μη καταστροφικών μεθόδων οι οποίες μπορούν να δώσουν κρυμμένες πληροφορίες για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται μια κατασκευή. Η μέθοδος ακουστικών εκπομπών είναι μια ευρύτατα διαδεδομένη μη καταστροφική τεχνική. Είναι μια εύκολα εφαρμόσιμη διαδικασία με την χρήση κατάλληλων αισθητήρων και μετρητικού εξοπλισμού. Δίνει την εποπτική εικόνα της εξέλιξης πιθανών ρωγμών και ατελειών στο εσωτερικό του υλικού που δεν είναι εύκολη η μικροσκοπική διερεύνηση τους.

Η χρήση της μεθόδου των ακουστικών εκπομπών θα μπορούσε να βοηθήσει στην εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του μαρμάρου κατασκευής των μνημείων και της εξέλιξης αυτής, σε πραγματικό χρόνο και επομένως να συμβάλλει στην πρόβλεψη πιθανών αστοχιών.

Η αρχή της εφαρμογής της τεχνικής της ακουστικής εκπομπής στην μηχανική πετρωμάτων έγινε από τους Obert και Duvall (1942) οι οποίοι την χρησιμοποίησαν για να προβλέψουν βίαιες εκτινάξεις πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας του 1930. Σήμερα η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής είναι δημοφιλής και ως εργαλείο για τον μη καταστρεπτικό έλεγχο (NDT) στη βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται για την επιτόπια ανίχνευση της εξέλιξης των ρωγμών και τον έλεγχο ασφάλειας κατασκευών (κυρίως μεταλλικών) (Κυπριωτάκη, 2012).

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της απόκρισης ακουστικών εκπομπών κατά την φόρτιση δοκιμών μαρμάρου με εγκοπή (Central Chevron Notched Brazilian Disk - CCNBD) σε αντιδιαμετρική θλίψη. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από μάρμαρο Κομνηνών Νέστου.

Κεφάλαιο 2: Ακουστικές Εκπομπές ΑΕ

2.1 Ηχητικά κύματα

Ήχος καλείται το αίσθημα που δημιουργείται λόγω μεταβολών των πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα ή άλλου μέσου διάδοσης και λαμβάνεται με τα αντίστοιχα όργανα. Οι μεταβολές αυτές διαδίδονται με την μορφή ηχητικών κυμάτων. Ο ορισμός του κύματος, που εξυπηρετεί καλύτερα σε αυτό το πεδίο μελέτης είναι: Κύμα είναι ένας μηχανισμός διάδοσης μιας κάποιας ελαστικής διαταραχής μέσα σε ένα ελαστικό μέσο. Κατά την διάδοση της ελαστικής αυτής διαταραχής επιτυγχάνεται μεταφορά ενέργειας από σημείο σε σημείο του ελαστικού μέσου χωρίς όμως την μεταφορά της ύλης.

Το μέσο διάδοσης των κυμάτων μπορεί να είναι οποιοδήποτε στερεό, υγρό, αέριο. Ελαστικό μέσο είναι το σώμα στο οποίο οι όποιες παραμορφώσεις που προκαλούνται από διάφορες εξωτερικές αιτίες εμφανίζονται ευθύς αμέσως μόλις πάψουν να επενεργούν οι εξωτερικές αιτίες που τις προκαλούν. Ισότροπο ελαστικό μέσο ως προς μια συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα ονομάζεται κάθε ελαστικό μέσο, που έχει τη συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα με το αυτό μέτρο προς όλες τις διευθύνσεις. Έτσι για παράδειγμα ένα ελαστικό μέσο, στο οποίο η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος είναι η ίδια (έχει το ίδιο μέτρο) προς όλες τις διευθύνσεις, είναι ισότροπο, όσον αφορά την ταχύτητα διάδοσης του κύματος (Μπακογιάννης, 2011).

Η παρακάτω εξίσωση της κυματικής ισχύει για όλα τα κύματα και για όλα τα ελαστικά μέσα δια των οποίων διαδίδονται αυτά:

$$\lambda = c/f \quad \text{και} \quad \lambda = c \cdot T$$

όπου

λ : μήκος κύματος, η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου,

c : ταχύτητα,

T : περίοδος, το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών,

f : η συχνότητα, ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν ανά μονάδα χρόνου.

2.1.1 Είδη κυμάτων

Ανάλογα με την γωνία που σχηματίζουν η διεύθυνση της ταλάντωσης με την διεύθυνση διάδοσης της ταλάντωσης διακρίνονται δύο κατηγορίες τα εγκάρσια και τα διαμήκη ή επιμήκη κύματα. Εγκάρσια κύματα ονομάζονται τα κύματα των οποίων διεύθυνση διάδοσης τους είναι κάθετη στη διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων που αποτελούν το μέσο διάδοσης. Στα εγκάρσια κύματα εμφανίζονται μέγιστα και ελάχιστα που ονομάζονται όροι και κοιλίες και διαδίδονται μόνο στα στερεά σώματα και κατά προσέγγιση στην επιφάνεια των υγρών. Διαμήκη κύματα είναι εκείνα των οποίων η διεύθυνση διάδοσης τους είναι παράλληλη στη διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων που αποτελούν το μέσο διάδοσης. Με την κίνηση που πραγματοποιούν τα σωματίδια του μέσου στα διαμήκη κύματα παρατηρούνται πυκνώματα και αραιώματα. Διαμήκη κύματα διαδίδονται στα στερεά, υγρά και αέρια σώματα (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

2.1.2 Ιδιότητες ηχητικών κυμάτων

Ταχύτητα

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων διαμέσου ενός ελαστικού μέσου εξαρτάται κυρίως από το είδος του κύματος (αν είναι εγκάρσιο ή διαμήκες) και από τις ιδιότητες του ελαστικού μέσου, διότι η ενέργεια μεταβιβάζεται από το ένα μέσο στο άλλο, εξαιτίας της σύζευξης που υπάρχει ανάμεσα τους. Οι ταχύτητες διάδοσης υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους (Μπακογιάννης, 2011):

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4 \cdot G}{3}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}}$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)} \quad , \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Όπου,

V_p : η ταχύτητα διάδοσης του διαμήκους κύματος,

V_s : η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού (εγκάρσιου) κύματος,

E: μέτρο ελαστικότητας,

ν : λόγος Poisson,

K: μέτρο ελαστικής συστολής,

G: μέτρο διάτμησης.

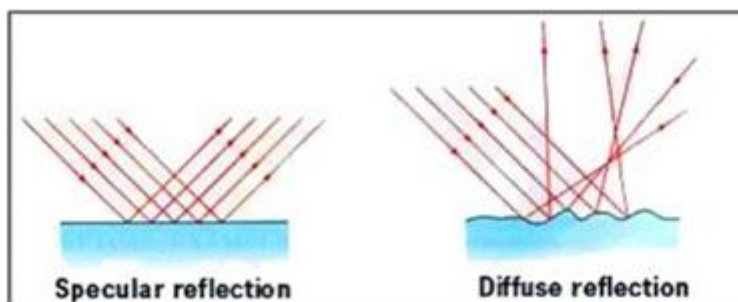
Στον πίνακα 2.1 δίνονται ενδεικτικές τιμές των ταχυτήτων αυτών σε διάφορα πετρώματα και εδάφη (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Πίνακας 2.1 : Ταχύτητες διάδοσης σε πετρώματα και εδάφη (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Πέτρωμα	Πυκνότητα [kg/m ³]	V_p [m/s]	V_s [m/s]
Ξηρή άμμος, χαλαρή δομή	1,5-1,7	300-1000	50-400
Ξηρή άμμος	1,6-1,7	1000-1700	400-900
Υγρή άμμος, χαλαρή δομή	1,8-2,2	1500-2000	50-400
Υγιής ψαμμίτης	2,0-2,65	1800-4500	1000-3000
Ψαμμίτης Berea	2,2	3800-4000	2300-2400
Ασθενής ψαμμίτης	2,7-2,0	1000-2000	600-1200
Ψαμμίτης Wildmoor (λεπτόκοκκος, πορώδης)	2	1700-2000	1100-1300
Άργιλος	2,3-2,8	1500-1600	100-300
Άργιλος του Λονδίνου	2,35	1700-1800	800-1100
Αργιλικός σχιστόλιθος	1,4-1,7	1600-4500	700-3000
Weak Shale, North Sea	1,7-2,4	2400-2600	1200-1300
Τάλκης, υψηλό πορώδες	2,4-2,7	1800-2600	1000-1500
Τάλκης, χαμηλό πορώδες		2600-5000	1500-3500
Ασβεστόλιθος		3500-6000	2000-3500
Ασβεστόλιθος		6000-6500	
Δολομίτης		6500-7000	
Βασάλτης	2,5-2,9	3500-5500	1700-3400
Βασάλτης		6500-7000	
Γάββρος		7000	
Γρανίτης		5500-6000	
Γρανίτης	2,6-2,7	5500-6500	3000-3500

Ανάκλαση

Όταν η επιφάνεια είναι λεία και στιλπνή, δηλαδή οι όποιες ανωμαλίες της είναι ασήμαντες μπροστά στο μήκος κύματος λ των ηχητικών κυμάτων, τότε συμβαίνει κανονική ανάκλαση όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Τα κύματα φαίνεται σαν να προέρχονται από το συμμετρικό ως προς το εμπόδιο είδωλο της ηχητικής πηγής. Στην αντίθετη περίπτωση η επιφάνεια θεωρείται τραχειά και τα ηχητικά κύματα διασκορπίζονται ή σκεδάζονται (Μπακογιάννης, 2011).



Σχήμα 2.1: Ανάκλαση και σκέδαση ηχητικού κύματος (Μπακογιάννης, 2011).

Διάθλαση

Το φαινόμενο της διάθλασης των ηχητικών κυμάτων παρατηρείται, όταν στην διαδρομή του ήχου εμφανίζεται διαφορά πυκνότητας του ελαστικού μέσου διάδοσης, με αποτέλεσμα την εκτροπή του ηχητικού κύματος από την ευθύγραμμη τροχιά διάδοσης του (Μπακογιάννης, 2011, Κούρτης, 2013).

Περίθλαση

Το φαινόμενο της περίθλασης συνδέεται με το φαινόμενο της ανάκλασης και παρατηρείται, όταν υπάρχει ένα εμπόδιο στη διαδρομή των ηχητικών κυμάτων του οποίου οι διαστάσεις δεν είναι σαφώς μεγαλύτερες από το μήκος κύματος λ του ηχητικού κύματος. Σε αυτή την περίπτωση το ηχητικό κύμα περιθλάται γύρω από το εμπόδιο και φτάνει σε σημεία που δεν είναι ορατά από την ηχητική πηγή (Μπακογιάννης, 2011).

Συμβολή

Το φαινόμενο της συμβολής εμφανίζεται όταν δύο ή περισσότερα κύματα συναντώνται στο ίδιο σημείο ενός ελαστικού μέσου. Τα κύματα προστίθενται γεωμετρικά (διανυσματικά) με αποτέλεσμα τη μεταβολή του πλάτους κύμανσης του

εν λόγω σημείου του ελαστικού μέσου. Αυτή η μεταβολή του πάτους μπορεί να κυμαίνεται από μια μέγιστη τιμή έως και μια ελάχιστη τιμή, συμπεριλαμβανομένης και της μηδενικής (Μπακογιάννης, 2011).

Απορρόφηση

Η απορρόφηση του ήχου είναι μια διαδικασία με την οποία η ακουστική ενέργεια ελαττώνεται, όταν ο ήχος περνά μέσα από ένα μέσο (ηχομόνωση) ή όταν πέφτει και ανακλάται σε μια επιφάνεια (ηχοαπορρόφηση). Στην απορρόφηση του ήχου συνήθως η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και ταυτόχρονα εξασθενεί και η ένταση του ηχητικού κύματος (Μπακογιάννης, 2011).

Μονάδα μέτρησης

Η μονάδα μέτρησης είναι τα decibel (dB), που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην Ακουστική. Η μέτρηση της στάθμης της ισχύος ενός σήματος (PL = Power Level) ισούται με το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου του λόγου των αριθμητικών τιμών της ισχύος δύο σημάτων, ένα εκ των οποίων λαμβάνεται ως σήμα αναφοράς, δηλαδή:

$$PL \text{ (dB)} = 10 \log (\text{Αριθμητική τιμή ισχύος σήματος} / \text{Αριθμητική τιμή ισχύος σήματος αναφοράς})$$

(Μπακογιάννης, 2011).

Αφού το ηχητικό κύμα έχει την ανακλαστική ιδιότητα οι ασυνέχειες της δομής του πετρώματος θα το επηρεάζουν. Έτσι θα υπάρχει διαφορά ταχύτητας ανάμεσα σε δύο καταστάσεις του πετρώματος, άρρηκτη- ρωγματοωμένη.

2.2 Ορισμός της Ακουστικής Εκπομπής ΑΕ

Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών συγκαταλέγεται στις μη καταστροφικές μεθόδους για τον προσδιορισμό του φυσικού εντατικού πεδίου και την παρακολούθηση των κατασκευών. Εάν η φόρτιση γίνεται σε ένα ψαθυρό υλικό, όπως είναι το μάρμαρο, οδηγεί σε αυξημένη συγκέντρωση τάσεων γύρω από μικροσκοπικές ασυνέχειες οι οποίες προέρχονται από οποιαδήποτε διακοπή της συνέχειας του πετρώματος ή και από την διαταραχή της ομοιογένειας και ισοτροπίας του υλικού όπως είναι τα όρια των κόκκων. Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων, που αποτελεί ένα δείκτη της έντασης που επικρατεί γύρω

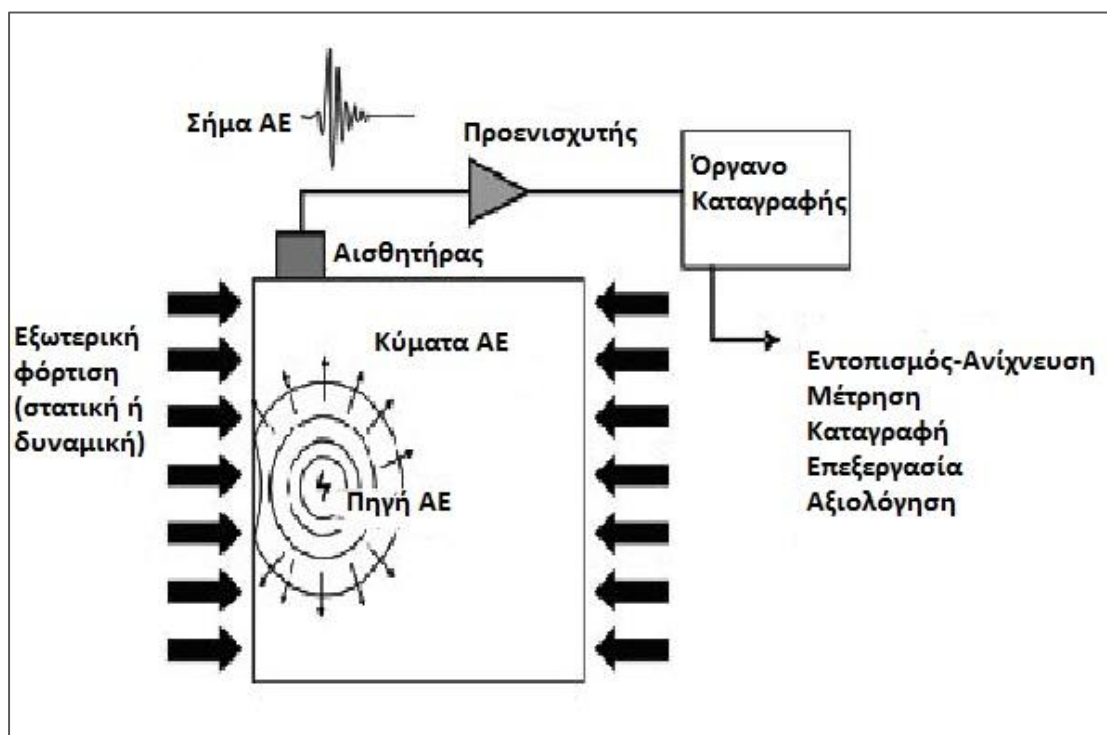
από μία μικροσκοπική ατέλεια, υπερβεί μία οριακή τιμή, συσσωρευμένη ελαστική ενέργεια απελευθερώνεται απότομα, η οποία εξαρτάται από την ψαθυρότητα του υλικού και το ποσοστό της ελαστικής παραμόρφωσης σε σχέση με την πλαστική, στην περιοχή της αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων. Η ενέργεια που απελευθερώνεται διαδίδεται μέσα στο υλικό με τη μορφή ελαστικών κυμάτων και το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ακουστική εκπομπή (Κατσιογιάννης κ.ά., 2007).

Σύμφωνα με τον ορισμό της ISRM, 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 την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος ή με την 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 (ISRM, 2002).

Τα κύματα της AE διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες AE, συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων, σε επαφή με αυτό, οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με την σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτά συστήματα AE. Η τεχνική αυτή, είναι διεθνώς διαδεδομένη και είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique). Τα σήματα της Ακουστικής Εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15 KHz έως μερικά MHz, δηλαδή σε συχνότητες υπερήχων (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

2.3 Δημιουργία του σήματος Ακουστικής Εκπομπής ΑΕ

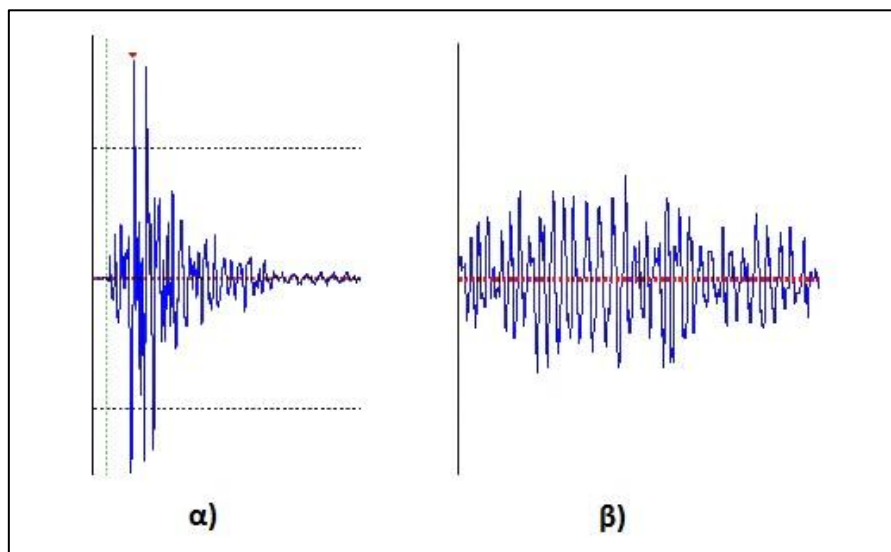
Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης των σημάτων ΑΕ. Λόγω επιβολής φορτίου σε δοκίμιο πετρώματος παρατηρείται απελευθέρωση ενέργειας από την πηγή με την μορφή ΑΕ η οποία διαδίδεται στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα διαδίδεται μέχρι τα όρια του δοκιμίου και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ, ο οποίος με την σειρά του μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στην συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και στην μονάδα επεξεργασίας (Σοφιανός & Νομικός, 2008).



Σχήμα 2.2: Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης ΑΕ (Μπακογιάννης, 2011).

Το σήμα που φτάνει στον αισθητήρα περιέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, από μερικές δεκάδες ΚHz μέχρι μερικά MHz (εκπομπή υπερήχων). Τα εκπεμπόμενα σήματα είναι συνήθως περίπλοκα και εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος του αισθητήρα που έχει εγκατασταθεί στο δοκίμιο, από το μέσο διάδοσης καθώς τα κύματα που ανακλώνται συμβάλλουν μεταξύ τους και εξασθενούν, και από τα χαρακτηριστικά της πηγής. Κάθε σήμα ονομάζεται κυματομορφή ΑΕ ή γεγονός ΑΕ. Τα δύο κύρια σήματα που ανιχνεύονται και επεξεργάζονται από ένα

σύστημα παρακολούθησης ακουστικών εκπομπών είναι τα κρουστικά και τα συνεχή, όπου η μια τυπική μορφή τους δίνεται στο σχήμα 2.3.

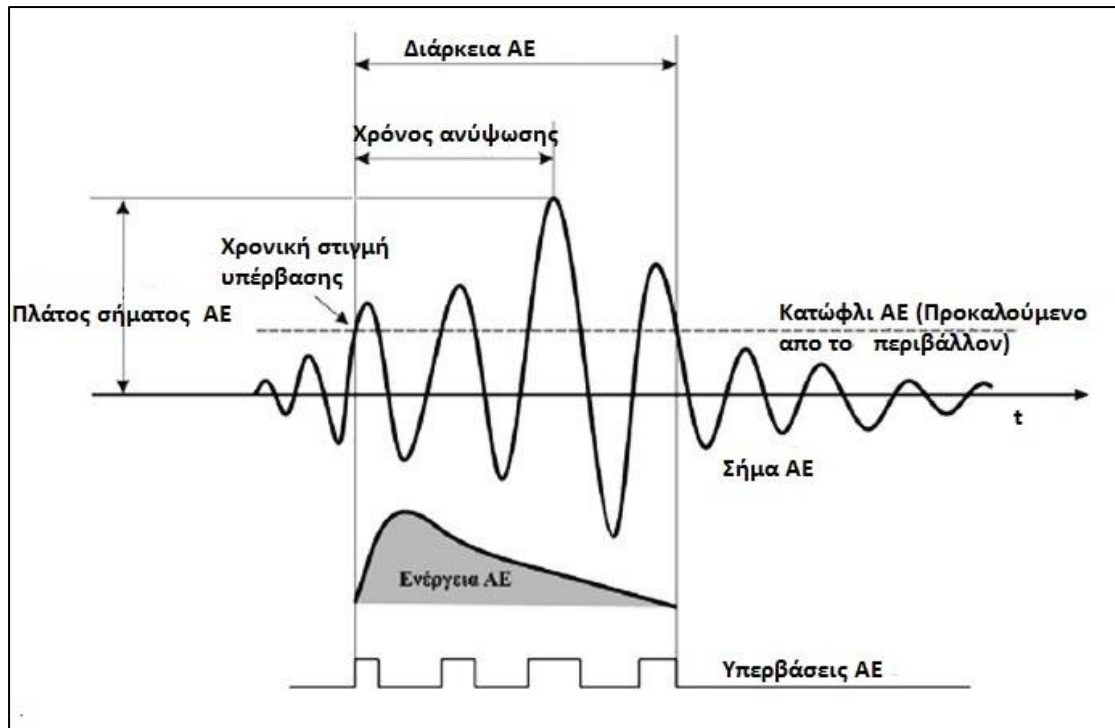


Σχήμα 2.3: Τυπική μορφή α) κρουστικού κύματος και β) συνεχούς κύματος (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Τα σήματα συνεχούς μορφής χαρακτηρίζονται συνήθως από την μέση τετραγωνική ρίζα πλάτους U_{RMS} του καταγραφικού σήματος. Ενώ για τα κρουστικά σήματα θα πρέπει να γίνει καθορισμός μιας τάσης κατωφλίου (threshold) πάνω από τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Ο καθορισμός του κατωφλίου καθορίζεται επίσης από το πλάτος των καταγραφόμενων σημάτων ΑΕ και το επιθυμητό μέγεθος καταγραφόμενων δεδομένων. Όταν ένα σήμα υπερβεί το κατώφλι σημειώνεται ένας κτύπος και καταγράφεται ως γεγονός ΑΕ (Κατσιογιάννης κ.ά., 2007).

2.4 Παράμετροι Ακουστικών Εκπομπών ΑΕ

Σε μια τυπική μελέτη ΑΕ καταγράφονται εκατοντάδες ή και χιλιάδες γεγονότα καθιστώντας την επεξεργασία αρκετά χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό από κάθε κυματομορφή εξάγονται χαρακτηριστικές παράμετροι που καλούνται παράμετροι ΑΕ όπως αυτές φαίνονται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Σύμφωνα με τους Grosse & Ohtsu (2008) η ερμηνεία των σημαντικότερων παραμέτρων μιας ακουστικής εκπομπής είναι:

- Κατώφλι (Threshold): Το όριο τάσης πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα.
- Συμβάν (Event): τοπική αλλαγή ενός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή.
- Κτύπος (Hit): όταν το σήμα γεγονότος ΑΕ υπερβεί το κατώφλι και προκαλεί σε ένα σύστημα καναλιών να καταγράψει ένα κτύπο, μια κυματομορφή.
- Απαριθμήσεις (Counts): ο αριθμός των φορών που καταγράφεται μια υπέρβαση του κατωφλίου κατά τη διάρκεια ενός σήματος, κτύπου.
- Απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο (Counts to peak): ο αριθμός των απαριθμήσεων σε ένα κτύπο μέχρι να καταγραφεί το μέγιστο πλάτος.
- Πλάτος σήματος ΑΕ (Amplitude): η μέγιστη τιμή (peak) κάθε καταγεγραμμένου γεγονότος εκφρασμένη σε decibel (dB).
- Διάρκεια (Duration): ένα χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που προκλήθηκε ένα σήμα ΑΕ και του χρόνου εξαφάνισής του. Η διάρκεια

εκφράζεται σε μικροδευτερόλεπτα (μs), η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της πηγής και το φιλτράρισμα του θορύβου.

- Χρόνος ανύψωσης (Rise Time): ο χρόνος μεταξύ της στιγμής όπου το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι ως την χρονική στιγμή μεγίστου πλάτους.
- Ενέργεια AE (Energy): γενικά ορίζεται ως το τετράγωνο του πλάτους του γεγονότος. Η ενέργεια προτιμάται για να ερμηνεύσει το μέγεθος της εκδήλωσης πηγής διότι είναι στενά συνδεδεμένη με το πλάτος και τη διάρκεια και εξαρτάται λιγότερο από την τάση του κατωφλίου και τις συχνότητες λειτουργίας.

Άλλοι παράμετροι που πρέπει να σημειωθούν είναι:

- Συσσωρευμένη ενέργεια: το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.
- Ρυθμός Ενέργειας (ER): το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται ανά μονάδα χρόνου.
- Ενεργοποίηση AE (Activation): η εκδήλωση AE λόγω εφαρμογής αιτίου όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα κ.λπ.
- Δραστηριότητα AE (Activity): Μέτρηση της ποσότητας εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας των γεγονότων.
- Event Data Set: η συλλογή αριθμών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός γεγονότος, σύμφωνα με την επεξεργασία δεδομένων που αναγνωρίζει ότι ένα ξεχωριστό γεγονός μπορεί να παράγει περισσότερους από ένα κτύπους.
- Hit Data Set: η ανίχνευση/διαδικασία εντοπισμού και μέτρησης ενός σήματος AE σε ένα κανάλι.
- Hit Definition Time (HDT): ορίζεται ο μέγιστος χρόνος διάρκειας ενός σήματος ώστε να αποφεύγεται η καταγραφή των ανακλάσεων του.
- Hit Lockout Time (HLT): είναι ο χρόνος που θα πρέπει να αναμένει το σύστημα μέχρι να ξεκινήσει την καινούρια καταγραφή.
- Peak Definition Time (PDT): καθορίζει το μέγιστο χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του σήματος.

- Συχνότητα (Frequency): για ένα ταλαντευόμενο σήμα ή διεργασία, ο αριθμός των κύκλων που συμβαίνουν στην μονάδα του χρόνου.
- Μέση συχνότητα (Average frequency): μετρούμενο μέγεθος από τον λόγο των απαριθμήσεων προς την διάρκεια και χρησιμοποιείται όταν το σήμα της κυματομορφής είναι πρακτικά δύσκολο να χρησιμοποιηθεί.
- Θόρυβος (Noise): μη σχετικές ενδείξεις, σήματα παραγόμενα από αιτίες διαφορετικές από αυτές τις ΑΕ, ή από πηγές ΑΕ που δεν έχουν σχέση με το σκοπό της δοκιμής.
- Σήμα ΑΕ (Signal): το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μορφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας).
- Περιγραφή σήματος (Signal description): το αποτέλεσμα της διαδικασίας: μια ψηφιακή (αριθμητική) περιγραφή του σήματος ΑΕ και/ή του περιβαλλοντικού πλαισίου.
- Χαρακτηριστικά σήματος (Signal features): μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος ΑΕ, όπως το πλάτος, ενέργεια σήματος ΑΕ, διάρκεια, απαριθμήσεις και χρόνος ανύψωσης.
- Ισχύς σήματος (Signal strength): η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνεύσιμου σήματος ΑΕ. Επίσης γνωστό ως σχετική ενέργεια (relative energy).

2.5 Θόρυβος και εξασθένιση

Για να είναι επιτυχημένος ένας έλεγχος με την μέθοδο της ΑΕ, η δυνατότητα ανίχνευσης των σημάτων που μας ενδιαφέρουν έχει πρωταρχικό ρόλο. Χρησιμοποιώντας αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχίας της μελέτης. Για να εξαλειφθεί ο θόρυβος πρέπει να είναι γνωστή όμως η προέλευση του. Υπάρχουν δύο κατηγορίες πηγών θορύβου: ο ηλεκτρομαγνητικός και ο μηχανικός (Κατσιογιάννης κ.ά., 2007). Στην κατηγορία της ηλεκτρομαγνητικής πηγής θορύβου ανήκει:

- Ο θόρυβος από τον προενισχυτή που καθορίζεται και η ευαισθησία του συστήματος. Αυτή η πηγή θορύβου είναι αναπόφευκτη μπορεί όμως να ελαττωθεί με την χρήση PZT αισθητήρων (Grosse & Ohtsu, 2008).
- Τα καλώδια που μεταφέρουν το σήμα από τον αισθητήρα στον ενισχυτή, επίσης παράγουν ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, γι αυτό τον λόγο επιβάλλεται η χρήση καλωδίων μικρού μήκους με ειδική επικάλυψη (Grosse & Ohtsu, 2008).
- Η κακή γείωση του συστήματος (Grosse & Ohtsu, 2008).
- Θόρυβος που προκαλείται από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της ΑΕ λόγω ακτινοβολίας όπως πρίζες, παρακείμενοι πομποί ή δέκτες, λάμπες μεγάλης ισχύος (Κατσιογιάννης κ.ά., 2007).

Στην κατηγορία του μηχανικού θορύβου συγκαταλέγονται:

- Η κίνηση ενός μηχανικού μέρους που είναι σε επαφή με το δοκίμιο προκαλεί κρουστικά κύματα και αποτελεί μια πιθανή πηγή μηχανικού θορύβου (Κατσιογιάννης κ.ά., 2007).
- Ο θόρυβος της μηχανής που χρησιμοποιείται για το πείραμα.
- Η ροή του ρευστού για την ψύξη του συστήματος.
- Ο θόρυβος που προκαλείται από την ανθρώπινη δραστηριότητα στον περιβάλλοντα χώρο π.χ. άλλες μηχανές σε λειτουργία.

Ο μηχανικός θόρυβος ελαττώνεται σημαντικά σε συχνότητες άνω των 100 kHz, γι αυτό τον λόγο το εύρος των συχνοτήτων επιλέγεται συνήθως 100-400 kHz. Άλλοι μέθοδοι για την απαλοιφή του θορύβου είναι η χρήση ειδικών φίλτρων για τις συχνότητες, κατάλληλη γείωση του συστήματος και έλεγχος του επιβαλλόμενου φορτίου του συστήματος.

Εκτός από τον θόρυβο η ανιχνευσιμότητα ενός σήματος επηρεάζεται από την εξασθένιση του κύματος κατά την διάδοση του. Η εξασθένιση αναφέρεται στην μείωση του πλάτους του κύματος κατά την διάδοση του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δυσκολότερη ανίχνευση των πηγών σήματος ΑΕ. Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί που επηρεάζουν την εξασθένιση είναι:

- η γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο όπου το πλάτος φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης,

- οι απώλειες ενέργειας και η απόσβεση στο μέσο διάδοσης. Αντίστοιχα λόγω απώλειας ενέργειας το πλάτος φθίνει εκθετικά με την απόσταση από την πηγή.

Στις εργαστηριακές δοκιμές η εξασθένιση λόγω απόσβεσης και γεωμετρικής εξάπλωσης δεν περιορίζει την ανιχνευσιμότητα των σημάτων ΑΕ λόγω των περιορισμένων διαστάσεων των δοκιμών (Κατσικογιάννης κ.ά., 2007).

2.6 Εφαρμογές Ακουστικών Εκπομπών

Στην μηχανική πετρωμάτων το φαινόμενο της ΑΕ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της αστοχίας και της παραμόρφωσης των ψαθυρών πετρωμάτων υπό μηχανική καταπόνηση, συνδέοντας τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος με παραμέτρους της ΑΕ όπως το πλήθος, το πλάτος, η ενέργεια των γεγονότων πρόκλησης ΑΕ, η θέση της πηγής και το συχνοτικό περιεχόμενο των σημάτων ΑΕ (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Σημαντικό πεδίο εφαρμογής της ΑΕ επί τόπου αποτελούν τα υπόγεια μεταλλεία μεγάλου βάθους, όπου υπάρχει ο κίνδυνος της βίαιης εκτίναξης των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Επιπλέον στα υπόγεια μεταλλεία υπάρχει η διαρκής ανάγκη πρόβλεψης ενδεχομένων αστοχιών της οροφής, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες να κινδυνέψουν οι εργαζόμενοι και ο εξοπλισμός.

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής για την πρόβλεψη καταπτώσεων της οροφής των υπόγειων μεταλλευτικών εκσκαφών έχει αρχίσει και χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο. Με την εφαρμογή της ΑΕ επιτυγχάνεται πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστόλιθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα. Σε όλες τις περιπτώσεις η ακουστική δραστηριότητα αυξήθηκε πριν από την επικείμενη αστοχία. Καθοριστικός παράγοντας στην επιτυχή πρόβλεψη είναι η μορφή της αστοχίας, δηλαδή αν είναι προοδευτική ή επεισοδιακή και το αν δίνει πρόδρομα φαινόμενα ή όχι. Άλλες εφαρμογές ΑΕ in situ έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρηνή, στη μελέτη ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

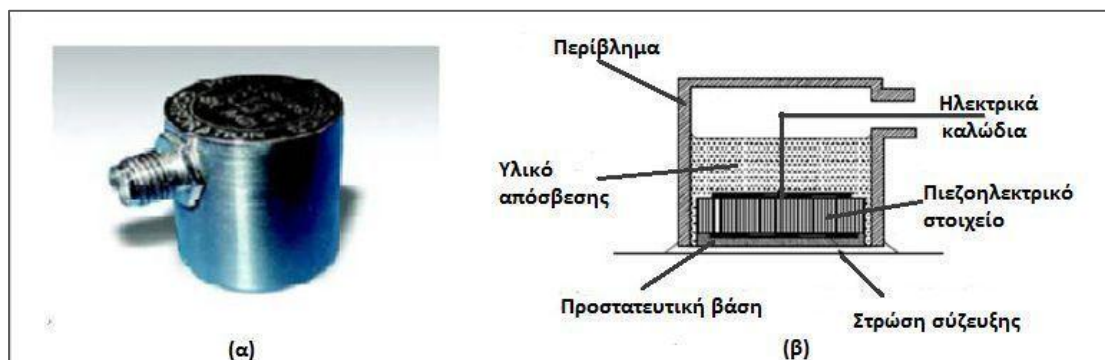
Η ακουστική εκπομπή χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς και άλλων διαφόρων υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά, σκυρόδεμα κ.α., για σκοπούς όπως η διάδοση ρωγμών, διαρροή, γήρανση, διάβρωση και ερπυσμός. Ακόμα μέσω ΑΕ πραγματοποιείται μη καταστρεπτικός έλεγχος κατά την κατεργασία υλικών, την αλλαγή φάσης σε μέταλλα και κράματα και σε παραμορφωτικές κατεργασίες όπως σφυρηλάτηση, διέλαση.

Επιπρόσθετα μερικές από τις ειδικές εφαρμογές των ΑΕ που έχουν αναφερθεί είναι χημικές και πετροχημικές (σε δεξαμενές αποθήκευσης, δοχεία αντιδράσεων, υπεράκτιες πλατφόρμες, γεωτρήσεις κ.α.), ηλεκτρικές (δεξαμενές πυρηνικών αντιδραστήρων, παραγωγοί ατμού, μεταλλάκτες κ.α.), στην αεροναυπηγική (ρωγμές γήρανσης, διάβρωση, σύνθετες κατασκευές κ.α.) (Μπακογιάννης, 2011).

2.7 Συστήματα παρακολούθησης Ακουστικών Εκπομπών ΑΕ

2.7.1 Αισθητήρες

Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Πρόκειται για ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά ΡΖΤ (μολύβδου- ζirkονίου- τιτανίου), το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Οι αισθητήρες ακουστικής εκπομπής μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια που έχει ένα ελαστικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα γι αυτό και η καταλληλότερη ονομασία τους είναι μορφοτροπείς (transducer). Το ενεργό στοιχείο ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα είναι ένας λεπτός δίσκος πιεζοηλεκτρικού υλικού (υλικό που μπορεί να μετατρέψει τη μηχανική παραμόρφωση σε ηλεκτρική τάση). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας δίνεται στο σχήμα 2.5 (Μπακογιάννης, 2011).



Σχήμα 2.5: (α) Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της ΡΑC, (β) κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Όταν ένας αισθητήρας έχει απλά τοποθετηθεί στην επιφάνεια ενός υλικού που παράγει ακουστικά κύματα διαπιστώνεται ότι ο αισθητήρας παράγει πολύ ασθενές σήμα. Για να αξιοποιηθεί λοιπόν η υψηλή ευαισθησία του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πρέπει να εφάπτεται στο υπό εξέταση υλικό με τέτοιο τρόπο, ώστε η ακουστική ενέργεια να περνά τον αισθητήρα με την ελάχιστη απώλεια στην διεπιφάνεια αισθητήρα – υλικού.

Ανάμεσα στον αισθητήρα και το υλικό χρησιμοποιείται ένα είδος ενδιάμεσου συγκολλητικού ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ακουστικής ενέργειας και να είναι δυνατή η ανίχνευση χαμηλού επιπέδου ακουστικών κυμάτων. Το ενδιάμεσο συγκολλητικό είναι συνήθως μια λεπτή μεμβράνη ενός ρευστού με υψηλό ιξώδες το οποίο διασφαλίζει την καλή επαφή των επιφανειών του αισθητήρα και του υλικού με μικροσκοπικό επίπεδο και βοηθά τη διάδοση των ακουστικών κυμάτων μεταξύ των δύο επιφανειών. Επιπλέον διασφάλιση της καλής επαφής του αισθητήρα με το υλικό είναι η επιπλέον χρήση ενός δεσμού (π.χ. κολλητική ταινία) (Μπακογιάννης, 2011, Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Σημαντικός παράγοντας για την επιλογή ενός αισθητήρα είναι τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, η συχνότητα λειτουργίας του, η ευαισθησία και οι προδιαγραφές του (ευαισθησία, διακριτική ικανότητα, ακρίβεια, λειτουργικό εύρος συχνοτήτων (Κούρτης, 2013).

2.7.2 Προενισχυτής

Στην ιδανική περίπτωση που ένα σήμα φτάνει στην μονάδα παρακολούθησης απαλλαγμένο από περιβαλλοντικό θόρυβο και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές δεν θα ήταν απαραίτητη η χρήση προενισχυτή. Στην πράξη αυτό δεν ισχύει και γι αυτό οι αισθητήρες και οι προενισχυτές σχεδιάζονται ώστε να απορρίπτουν τις διαταραχές και να ενισχύει το αρχικό σήμα σε υψηλότερη τάση ώστε να είναι κατάλληλο για επεξεργασία (Κούρτης, 2013).

Για την μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) τοποθετείται συνήθως κοντά ή μέσα στο περίβλημα του αισθητήρα. Οι προενισχυτές τύπου PAC έχουν την δυνατότητα ενίσχυσης της έντασης του σήματος AE κατά 20/40/60 dB

$\pm 0,5\%$ dB. Η επιλογή ενίσχυσης του εισερχόμενου σήματος γίνεται μέσω διακόπτη (Gain Select). Το πλάτος του σήματος που καταγράφεται στο σύστημα υπολογίζεται λογαριθμικά από τη σχέση (Μπακογιάννης, 2011):

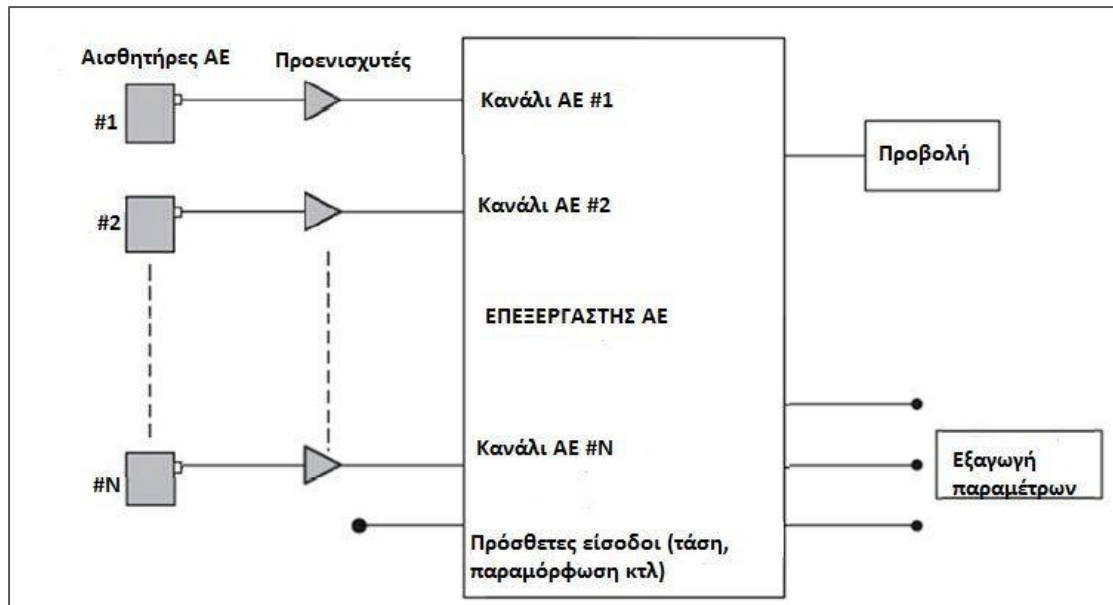
$$\text{dB} = 20 \cdot \log(V_{\text{max}}/1\mu\text{Volt}) - (\text{ενίσχυση προενισχυτή σε dB})$$

Στα σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης ΑΕ το ελάχιστο σήμα που μπορεί να ανιχνευτεί πάνω από τον ηλεκτρονικό θόρυβο, στην έξοδο ενός τυπικού αισθητήρα είναι της τάξης των 4μV. Το πλάτος ενός σήματος ΑΕ εκφράζεται σε dB, όπου 1μV αντιστοιχεί σε 0 dB και 100mV σε 100dB (Grosse & Ohtsu, 2008).

Επειδή ο προενισχυτής παράγει και αυτός θόρυβο, όπως και ο αισθητήρας είναι αναγκαία η χρήση φίλτρου για ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Η σύνδεση φίλτρου δίνει τη δυνατότητα επιλογής του διερχόμενου σήματος. Υπάρχουν φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass Filter), υψηλών συχνοτήτων (Low Pass Filter) και ανοιχτού τύπου (Band Pass Filter) (Μπακογιάννης, 2011).

2.7.3 Μονάδα επεξεργασίας ΑΕ

Το ενισχυμένο φιλτραρισμένο σήμα οδηγείται σε ηλεκτρικό σύστημα επεξεργασίας ακουστικών εκπομπών. Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι μονοκάναλα ή πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος ικανούς για καταγραφή σε πραγματικό χρόνο των παραμέτρων του σήματος. Τα κανάλια ΑΕ είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε έναν ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής. Για κάθε σήμα ΑΕ μετριοούνται χαρακτηριστικοί παράμετροι όπως το πλάτος (Amplitude – dB), το πλήθος των απαριθμήσεων (Counts), ο χρόνος ανύψωσης (Rise time- μs), η συνολική διάρκεια (Duration – μs) (Κούρτης, 2013).



Σχήμα 2.6: Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Στο σχήμα 2.6 απεικονίζεται μια κάρτα οχτώ καναλιών (PCI-8) καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων ΑΕ της PAC (Physical Acoustics Corporation). Τα δεδομένα ανιχνεύονται και καταγράφονται σε ένα προηγμένο ψηφιακό παραμετρικό σύστημα παρακολούθησης. Τα οχτώ κανάλια είναι υψηλής ταχύτητας απόκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 32 Megabytes/sec) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων, ενώ το συνοδευτικό λογισμικό έχει τη δυνατότητα προβολής παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τα οχτώ κανάλια ΑΕ το σύστημα διαθέτει δύο επιπλέον εισόδους (παραμετρικές εισοδοι) για την περίπτωση εισαγωγής σήματος από εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα από ένα κελί φορτίου. Αυτές οι παραμετρικές εισοδοι, που καταγράφουν ταυτόχρονα με την καταγραφή δεδομένων ΑΕ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συσχέτιση των παραμέτρων ΑΕ με άλλες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα η εφαρμοζόμενη τάση σε ένα δοκίμιο ή η παραμόρφωση του (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό υπόβαθρο δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού και ρωγμής

3.1 Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού

3.1.1 Γενικά

Η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test) γίνεται με τη συμπίεση μέσω διαμετρικά αντίθετων συγκεντρωμένων φορτίων ενός δοκιμίου που έχει τη μορφή δίσκου. Η δοκιμή αυτή πρωτοεμφανίστηκε το 1953 από Βραζιλιάνους (Carneiro και Barcellos) και Ιάπωνες ερευνητές (Akazawa) και από τότε είναι πάρα πολύ δημοφιλής για τον προσδιορισμό (με έμμεσο τρόπο) της αντοχής σε εφελκυσμό πετρωμάτων καθώς και προϊόντων τσιμέντου.

Η θεωρητική θεμελίωση, της δοκιμής Brazil είναι η λύση για τις τάσεις, η οποία προτάθηκε το 1883 από τον Hertz και μερικά χρόνια αργότερα από τον Mitchell. Έχουν γίνει πολλές ερευνητικές προσπάθειες για να διερευνηθεί το πεδίο εφαρμογής της δοκιμής αυτής, καθώς και να βελτιωθεί η απόδοση της.

Ο Hondros (1959), θεωρώντας το υλικό ομογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό, δημιούργησε μια πλήρη επίλυση του τασικού πεδίου για την περίπτωση ενός ακτινικού φορτίου κατανεμημένου πάνω σε ένα πεπερασμένο αριθμό κυκλικών τόξων του δίσκου και θεωρείται ότι αυτός ο τύπος του φορτίου μπορεί να είναι καλύτερος από το αρχικό συγκεντρωμένο γραμμικό φορτίο για το δοκίμιο, δίνοντας έτσι μια ολοκληρωμένη λύση για συνθήκες επίπεδης τάσης (plain stress) (π.χ. δίσκους) και επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) (π.χ. κυλίνδρους).

Το 1978 η δοκιμή Brazil προτάθηκε από τη Διεθνή Εταιρεία Μηχανικής Πετρωμάτων σαν η προτεινόμενη μέθοδος για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής πετρωμάτων. Στην συνέχεια η δοκιμή αυτή τυποποιήθηκε από την Αμερικάνικη Εταιρεία A.S.T.M. για τον προσδιορισμό της αντοχής σε δοκίμια τσιμέντου. Γενικά θεωρείται ότι η δοκιμή Brazil είναι, μια εύκολη και βολική μέθοδος για την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής σε πετρώματα και τσιμέντο.

Το 1993 οι Guo και Aziz πρότειναν μία απλή μέθοδο για τον προσδιορισμό της σκληρότητας θραύσης K_T χρησιμοποιώντας τη δοκιμή Brazil. Η δοκιμή αυτή δεν απαιτεί ούτε αρχική ρωγμή ούτε αρχική εγκοπή και φαίνεται να δουλεύει. Όμως η

χρήση του δίσκου Brazil για το σκοπό αυτό δεν έχει ωριμάσει ακόμα και υπάρχουν προβλήματα που δεν έχουν επιλυθεί, σε επίπεδο θεωρίας. Για παράδειγμα η διαδικασία της φόρτισης μέσω τόξου είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί στην πράξη. Πρόσφατα (2004) ο Wang και οι συνεργάτες του βελτίωσαν την μέθοδο του Guo για τη δοκιμή σκληρότητας θραύσης: έγινε σαφές ότι η αρχική έναρξη της ρηγματώσης στην περιοχή του κέντρου του δίσκου Brazil ήταν ένα πρόβλημα κλειδί το οποίο έπρεπε να επιλυθεί κατάλληλα. Στη μελέτη αυτή προτείνεται μια τροποποίηση του δίσκου Brazil με την εισαγωγή δύο παράλληλων επιπέδων πεπλατυσμένων πλευρών οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την επιβολή του φορτίου. Αυτός ο τρόπος φόρτισης θεωρείται καλύτερος από τον αρχικό τρόπο φόρτισης σε γραμμή όσον αφορά το θέμα της τοπικής αστοχίας, λόγω της υπερβολικής συγκέντρωσης τάσεων και πιθανόν να είναι καλύτερος από την φόρτιση σε τόξο, η οποία χρησιμοποιεί ένα σύνθετο σύστημα φόρτισης δοκιμών (Wang et al., 2004).

3.1.2 Κατανομή των τάσεων στον Βραζιλιανό δίσκο

Θεωρώντας ότι η αρχική θραύση ξεκινά από το κέντρο του δίσκου και εκτείνεται κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης, η κατανομή των τάσεων κατά μήκος αυτής της διαμέτρου έχει μεγάλο ενδιαφέρον. Η κάθετη συνιστώσα της τάσης στην διάμετρο φόρτισης γ είναι η σ_θ , και η παράλληλη προς αυτήν είναι η σ_r , όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.

Η εφαπτομενική συνιστώσα δίνεται από την παρακάτω σχέση (Hondros, 1959):

$$\sigma_\theta = + \frac{F}{\pi r_o t \alpha} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{r_o} \right)^4} - \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{r_o} \right)^2}{1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (3.1)$$

ενώ η ακτινική συνιστώσα δίνεται από την επόμενη σχέση (Hondros, 1959):

$$\sigma_r = - \frac{F}{\pi r_o t \alpha} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{r_o} \right)^4} + \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{r_o} \right)^2}{1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (3.2)$$

Όπου:

σ_θ : η συνιστώσα της τάσης, κάθετη στη διάμετρο φόρτισης,

σ_r : η συνιστώσα της τάσης, παράλληλη στη διάμετρο φόρτισης,

F : η επιβαλλόμενη δύναμη,

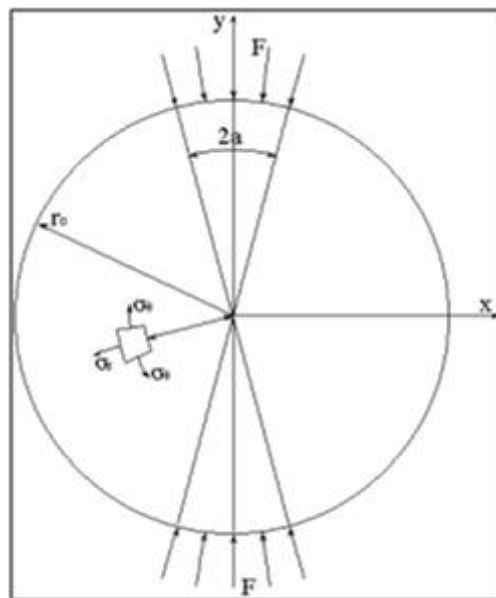
r_0 : η ακτίνα του δίσκου,

t : το πάχος του δίσκου,

2α : η ακτινική απόσταση κατά την οποία θεωρείται ότι η δύναμη F κατανέμεται ακτινικά (συνήθως $\leq 15^\circ$),

r : η απόσταση από το κέντρο του δίσκου.

Η εφελκυστική τάση λαμβάνεται θετική (σύμβαση μηχανικής του στερεού σώματος).



Σχήμα 3.1: Το τασικό πεδίο ενός Βραζιλιάνικου δίσκου (Hondros, 1959).

Η εφαπτομενική τάση σ_θ και η ακτινική τάση σ_r στο κέντρο του δίσκου θα δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις αντίστοιχα (Hondros, 1959):

$$\sigma_\theta = +\frac{F}{\pi r_0 t} \left[\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right] \approx +\frac{F}{\pi r_0 t} \quad (3.3)$$

$$\sigma_r = -\frac{F}{\pi r_0 t} \left[\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right] \approx -\frac{3F}{\pi r_0 t} \quad (3.4)$$

Αν η φόρτιση γίνει κατά μήκος τόξου επαφής 15° , το σφάλμα που εισάγεται για τον υπολογισμό της σ_θ από την παραπάνω σχέση είναι 2%. Η έκφραση που υπολογίζει

την εφελκυστική αντοχή (tensile strength) του υλικού στο κέντρο του δίσκου συναρτήσει του φορτίου F είναι (Hondros, 1959):

$$\sigma_{\theta} = \frac{F}{\pi r_0 t} = \frac{2F}{\pi D t} \quad (3.5)$$

3.1.3 Συνθήκη θραύσης του δίσκου

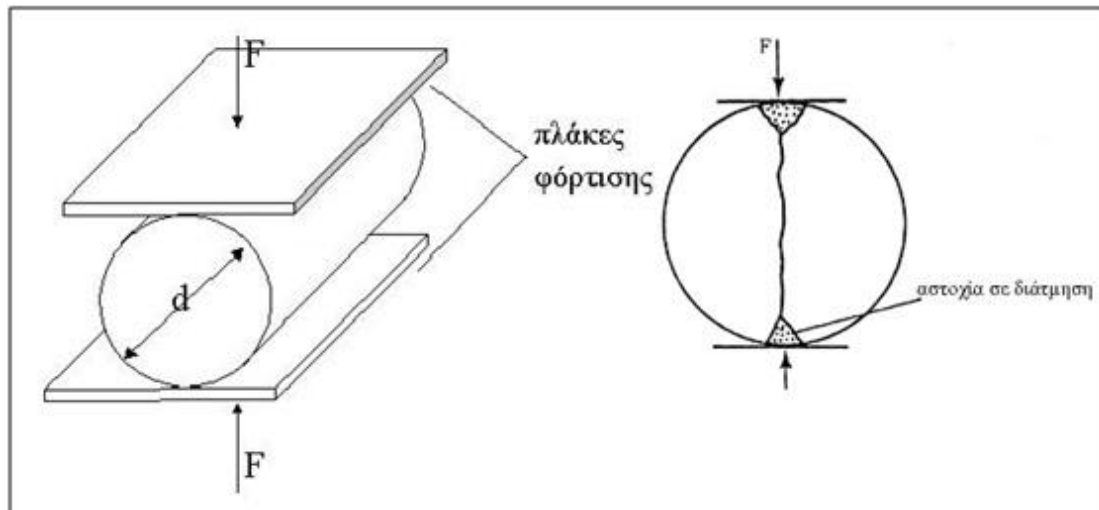
Από την παραπάνω σχέση που υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή, προκύπτει ότι η τιμή της τάσης στο κέντρο είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο φόρτισης, δηλαδή από το αν η φόρτιση είναι σημειακή ή κατανεμημένη σε μήκος τόξου $2a$. Η αστοχία θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη από τις θλιπτικές τάσεις που εμφανίζονται κατά μήκος του άξονα φόρτισης Y και από τις κάθετες τάσεις του επιπέδου XY του δίσκου όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1. Επίσης η αστοχία είναι κυρίως εφελκυστική.

Όμως οι προτεινόμενες λύσεις δεν είχαν την απαιτούμενη εμβάθυνση όσον αφορά την ανάλυση σφάλματος και είναι δύσκολο να πραγματοποιήσει κανείς την απαιτούμενη ομοιόμορφη και ακτινική φόρτιση μέσα από ένα ζεύγος τόξων σε ένα πραγματικό πείραμα.

Για να είναι η δοκιμή Brazil αξιόπιστη, η αστοχία του δίσκου πρέπει να συμπίπτει με μια κάθετη ρωγμή κατά μήκος του άξονα φόρτισης, ξεκινώντας από το κέντρο του δίσκου. Στην πραγματικότητα, βέβαια, οι συνθήκες είναι κάπως διαφορετικές (Δημοπούλου, 2004).

Ο Fairhurst (1964) πρώτος και αργότερο ο Colback (1966), συζήτησε το βασικό θέμα της αξιοπιστίας της δοκιμής Brazil. Οι μελέτες τους έδειξαν ότι η αστοχία ακολουθεί το κριτήριο Griffith και για μικρές γωνίες επαφής μπορεί να συμβεί μακριά από το κέντρο του δίσκου.

Όταν η φόρτιση είναι σημειακή, αναπτύσσονται μεγάλες διατμητικές τάσεις οι οποίες προκαλούν τοπικά θρυμματισμό, αλλάζοντας έτσι τις συνθήκες φόρτισης. Στην περιοχή της επαφής, αναπτύσσονται σημαντικές εφαπτομενικές τάσεις οι οποίες καθορίζουν την κατανομή των τάσεων τοπικά. Αυτές προκαλούν το σχηματισμό μικρών σφηνών όπως απεικονίζονται στο σχήμα 3.2 (Δημοπούλου, 2004).



Σχήμα 3.2: Αστοχία δίσκου σε διάτμηση (τροποποιημένο από Hobbs, 1964)

Οι Addinall και Hackett (1965) βρήκαν πειραματικά ότι η γενέτειρα της ρωγμής κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, είναι συνάρτηση της επιφάνειας επαφής και τα πειράματά τους έδειξαν ότι η αρχή της ρωγμής δεν είναι στο κέντρο του δίσκου. Για να μεταβάλλουν το τόξο επαφής, χρησιμοποίησαν μαλακά ελαστικά υλικά στη διεπιφάνεια. Το μέγεθος των σφηνών βρέθηκε ότι εξαρτάται από το ελαστικό υλικό.

Οι Mellor και Hawkes (1971) απέδειξαν αρκετά ικανοποιητικά ότι σε μια σωστά πραγματοποιημένη δοκιμή, η ρωγμή δεν ξεκινά από την επαφή με τις πλάκες, καθώς σε πολλούς δίσκους η ρωγμή κατέληγε περίπου στο 1/10 της διαμέτρου από το όριο. Συζήτησαν συγκεκριμένα τις τάσεις επαφής κάτω από τα επιβαλλόμενα φορτία και στη συνέχεια σχεδίασαν ένα σύστημα σιαγόνων με καμπύλες επιφάνειες επαφής για το σκοπό αυτό. Όμως η κατασκευή των σιαγόνων αυτών δεν είναι μια εύκολη υπόθεση και στην πραγματικότητα πρέπει να υπάρχει μια σειρά τέτοιων σιαγόνων ανάλογα με τις διαμέτρους των δοκιμίων. Επιπλέον η κατανομή των δυνάμεων επαφής μεταξύ των σιαγόνων και του δοκιμίου είναι ακόμα υπό αμφισβήτηση. Γενικά, η δοκιμή δίνει ικανοποιητικές μετρήσεις της αντοχής, για τα υλικά τύπου Griffith.

Οι Barla και Innaurato (1973) παρατήρησαν ότι σε δίσκους γνευσίου ότι αστόχησαν κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης, ενώ δίσκοι σχιστόλιθου, κατά μήκος των επιπέδων ανισοτροπίας, καταλήγοντας ότι η τεχνική είναι κατάλληλη για

τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής σε πετρώματα με μέτρια ανισοτροπία (Δημοπούλου, 2004).

Ο Hudson και οι συνεργάτες του (1972) παρατήρησαν από τα πειράματα τους σε γρανίτη και μάρμαρο, ότι η αστοχία στη δοκιμή Brazil ξεκινούσε πάνω κάτω από τα σημεία φόρτισης εάν κανείς χρησιμοποιούσε επίπεδες χαλύβδινες πλάκες, το οποίο βέβαια στην πραγματικότητα αντίκρουε τη χρήση της δοκιμής αυτής για τον υπολογισμό της αντοχής σε εφελκυσμό. Οι δοκιμές τους έγιναν σε υδραυλική μηχανή με ελεγχόμενη μετατόπιση, ώστε η αστοχία να είναι ελεγχόμενη και τα δοκίμια (μάρμαρο, γρανίτης) να μην καταστραφούν όπως συνέβη με άλλες συμβατικές μηχανές επιβολής φορτίου.

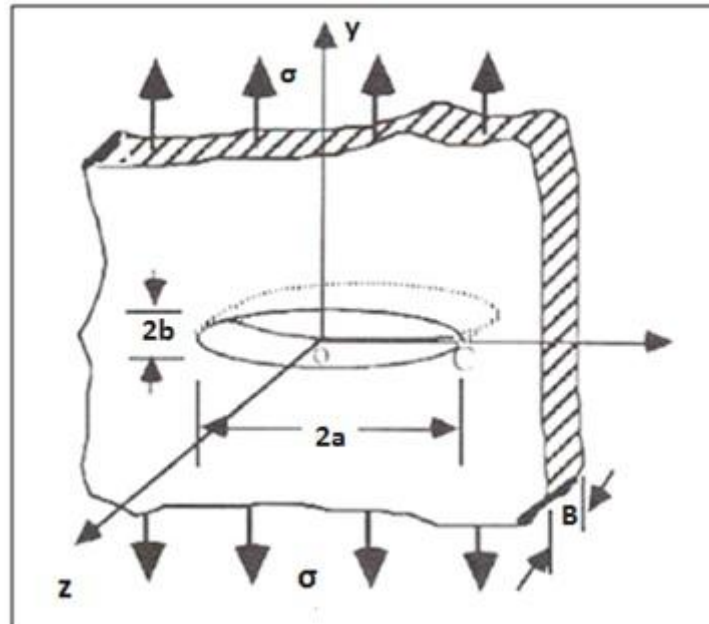
3.2 Θεωρία Griffith και Θραυστομηχανική

Είναι κοινά αποδεκτό ότι η αντοχή σε θραύση (κρίσιμη τάση) είναι μια έμφυτη ιδιότητα των ψαθυρών υλικών αφού έχει αποδειχτεί ότι τα υλικά αυτά τείνουν προς θραύση όταν φορτιστούν πέραν του επιπέδου της κρίσιμης τάσης. Σαν συνεπακόλουθο αυτού, δημιουργήθηκαν σειρές από κριτήρια για να μπορούν να υπολογίζουν τις μέγιστες τάσεις που μπορεί να δεχθεί μια κατασκευή χωρίς να ξεπερνά το όριο της κρίσιμης τάσης. Η πιο πάνω προσέγγιση είναι γνωστή ως συμβατική. Η αντοχή σε θραύση ενός ψαθυρού υλικού δεν μπορεί να αναπαραχθεί εύκολα. Οι μεταβολές στην αντοχή θραύσης είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως, η εργαστηριακή μέθοδος, οι διαστάσεις των δοκιμίων, τα χαρακτηριστικά της κατασκευής και πολλά άλλα (Whitaker et al, 1992).

3.2.1 Το κριτήριο του Griffith

Η θεωρία αυτή βασίζεται στην υπόθεση του Griffith (1921) ότι η θραύση του υλικού οφείλεται σε συγκέντρωση τάσεων στα άκρα μικροσκοπικών ρωγμών (ρωγμές Griffith), με συνέπεια να προκαλείται επέκταση των ρωγμών αυτών (για συγκεκριμένη τιμή τάσης αντίστοιχο προσανατολισμό ρωγμής), η οποία οδηγεί στην αστοχία του υλικού. Επομένως, αστοχία επέρχεται, όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση στην ρωγμή με τον πλέον επικίνδυνο προσανατολισμό υπερβεί μία κρίσιμη χαρακτηριστική τιμή για το υλικό. Η θεωρία έχει αποδειχτεί σε πειράματα

εφελκυστικής αντοχής σε ίνες γυαλιού. Στο σχήμα 3.3 διακρίνεται το μοντέλο ανάλυσης του Griffith στο οποίο μια λεπτή πλάκα απείρων διαστάσεων η οποία περιέχει ένα στενό ελλειπτικό άνοιγμα, υπόκειται σε ομοιόμορφη μονοαξονική εφελκυστική τάση σ . Με το μοντέλο αυτό ο Griffith προσπάθησε να προσομοιώσει την εσωτερική ρωγμή στο υλικό και να προβλέψει την αντοχή του σε θραύση.



Σχήμα 3.3: Ελλειπτικό άνοιγμα σε μια άπειρων διαστάσεων πλάκα που υπόκειται σε ομοιόμορφο εφελκυσμό (Whittaker et al, 1992).

Το κριτήριο αστοχίας του Griffith (1924) είναι απλό σαν σκέψη και βασίζεται στις εξής παραδοχές (Αγιουτάντης, 2002):

- Τα ψαθυρά υλικά περιέχουν στη δομή τους τυχαία προσανατολισμένες μικροσκοπικές ρωγμές, που στην επίπεδη θεώρηση έχουν σχήμα έλλειψης. Το υλικό κατά τα άλλα θεωρείται ελαστικό και ομογενές.
- Μια ρωγμή είναι δυνατόν να επεκταθεί, όταν οι εφαπτομενικές τάσεις στην επιφάνεια υπερβούν κάποιο όριο χαρακτηριστικό για το υλικό.
- Η διεύθυνση θραύσης είναι πάντοτε κάθετη στην επιφάνεια της ρωγμής.
- Από ενεργειακή άποψη, μία ρωγμή θα επεκταθεί (δηλαδή θα αυξηθεί το μήκος της), όταν η συνολική δυναμική ενέργεια του συστήματος των εξωτερικών δυνάμεων και του υλικού ελαττώνεται ή παραμένει σταθερή).

Εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται στο σύνορο τυχαίας ρωγμής όταν ένα υλικό υπόκειται σε θλίψη ή σε εφελκυσμό. Δεδομένου ότι η θλίψη λαμβάνεται θετική και $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, η αστοχία συμβαίνει όταν:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 8\sigma_T \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) = 0 \quad \text{αν} \quad \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \quad (3.6)$$

$$\sigma_3 = \sigma_T \quad \text{αν} \quad \sigma_1 + \sigma_3 \leq 0 \quad (3.7)$$

Όπου,

σ_1, σ_2 : η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση αντίστοιχα στο άπειρο,

σ_T : η μονοαξονική εφελκυστική αντοχή.

Το κριτήριο αυτό μπορεί να εκφραστεί εναλλακτικά σε σχέση με τον λόγο των κυρίων τάσεων σ_3/σ_1 και την μονοαξονική εφελκυστική αντοχή ή την μονοαξονική θλιπτική αντοχή (Whittaker et al, 1992):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 - 4\sigma_T \left[1 + \sqrt{1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_T}} \right] & \text{αν} \quad \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \\ \sigma_3 &= \sigma_T & \text{αν} \quad \sigma_1 + \sigma_3 < 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

ή

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{2 \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \sigma_c} & \text{αν} \quad \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \\ \sigma_3 &= \sigma_T & \text{αν} \quad \sigma_1 + \sigma_3 < 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Όπου, σ_c η μονοαξονική θλιπτική αντοχή.

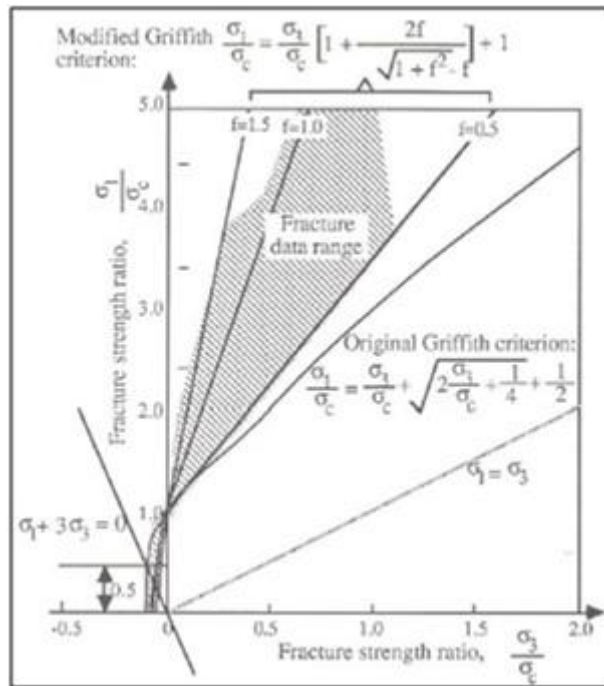
Το κριτήριο τάσης θραύσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4, στο οποίο περιλαμβάνεται και το τροποποιημένο κριτήριο Griffith από τους McClintock και Walsh (1962). Το κριτήριο Griffith μπορεί να εκφραστεί και από έναν παραβολικό φάκελο Mohr σύμφωνα με την σχέση που ακολουθεί (Whittaker et al, 1992):

$$\tau^2 = 4\sigma_T(\sigma_T - \sigma) \quad (3.10)$$

Όπου,

τ : η διατμητική τάση που δρα κατά μήκος του επιπέδου της επιφάνειας της ρωγμής,

σ : η ορθή τάση που δρα κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής.



Σχήμα 3.4: Το αρχικό και το τροποποιημένο κριτήριο θραύσης Griffith (Whittaker et al, 1992).

3.2.2 Αντοχή σε εφελκυσμό

Σύμφωνα με τον Whittaker που συγκέντρωσε διάφορα στοιχεία από μελέτες για την αντοχή σε εφελκυσμό, αναφέρει ότι η αντοχή σε θραύση αυξομειώνεται περίπου μια τάξη μεγέθους. Η θεωρητική τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό για ιδανικό ψαθυρό υλικό είναι περίπου: $E/10$, όπου το E , είναι το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου. Στην πράξη όμως η αντοχή σε εφελκυσμό είναι της τάξης: $E/10^3 - E/10^2$. Μπορεί ακόμα να αναφερθεί η τιμή αυτή να είναι ακόμα μικρότερη, της τάξης του $E/10^4 - E/10^3$ (Αγιουτάντης, 2002).

Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αντοχή σε θραύση δεν είναι μια ιδιότητα των υλικών. Κατά τον Griffith, η ιδιότητα του υλικού που συνδέεται με την θραύση είναι: η μονάδα έργου θραύσης συγκεκριμένης επιφανειακής ενέργειας, που είναι η ενέργεια που απαιτείται για να σχηματίσει μια νέα επιφάνεια θραύσης, παρά η αντοχή σε εφελκυσμό (Whittaker et al, 1992).

3.2.3 Αντοχή σε εφελκυσμό και προϋπάρχουσες ρωγμές

Η μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό ενός ψαθυρού υλικού, οφείλεται σε προϋπάρχουσες ρωγμές ή ασυνέχειες στο υλικό. Σύμφωνα με τον Griffith (1921), ο οποίος κατέδειξε ότι οι προϋπάρχουσες ρωγμές λειτουργούν σαν πρόδρομος της αστοχίας καταλήγοντας σε μια σχέση μεταξύ της τάσης θραύσης και του μεγέθους της ρωγμής. Η προσέγγιση αυτή είναι γνωστή ως ισοζύγιο ενέργειας του Griffith με την οποία εξήγησε ποσοτικά ότι η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μικρότερη από την θεωρητική τιμή διότι όλα τα υλικά περιέχουν ατέλειες και μικρορωγμές (Whittaker et al, 1992).

3.2.4 Έναρξη ρωγμής και διάδοση ρωγμής

Η θεωρία του Griffith εφαρμόζεται σε απλοποιημένη μορφή και σε περιορισμένες εφαρμογές, ιδιαίτερα στην περίπτωση αστοχίας από θλιπτικές τάσεις. Εξαιτίας των περιορισμών για την εφαρμογή της θεωρίας του Griffith, αναπτύχθηκαν διάφορες τροποποιήσεις οι οποίες βασίζονται στον διαχωρισμό έναρξης θραύσης και της διάδοσης θραύσης. Η έναρξη θραύσης ορίζεται σαν η διαδικασία θραύσης από την οποία προϋπάρχουσες ρωγμές ξεκινάνε να διευρύνονται ως αποτέλεσμα της έναρξης της θραύσης. Η έναρξη θραύσης αντιπροσωπεύει το ξεκίνημα της διερεύνησης της ρωγμής και περιορίζεται στην περιοχή της αιχμής της ρωγμής, ενώ η διάδοση θραύσης αντιπροσωπεύει την διαδικασία που οδηγεί το δείγμα σε καταστροφική αστοχία από τις αιχμές της ρωγμής μέχρι τα εξωτερικά όρια του δείγματος (Whittaker et al, 1992).

3.3 Τασική ανάλυση των ρωγμών

Αν προσδιοριστεί ένα σύστημα αξόνων πολικών συντεταγμένων με αρχή των αξόνων στην άκρη (κορυφή) της ρωγμής (Σχήμα 3.5), το πεδίο τάσεων για κάθε γραμμικά ελαστικό σώμα δίνεται από την παρακάτω σχέση (Anderson, 1995):

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}}\right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (3.11)$$

όπου,

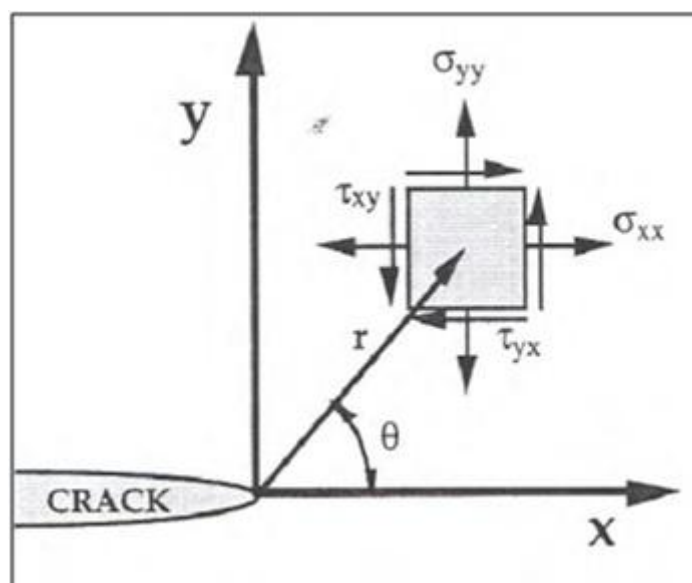
σ_{ij} : ο τανυστής τάσης,

r και θ : προσδιορίζονται στο σχήμα 3.5,

k : σταθερά,

f_{ij} : αδιάστατη συνάρτηση του θ .

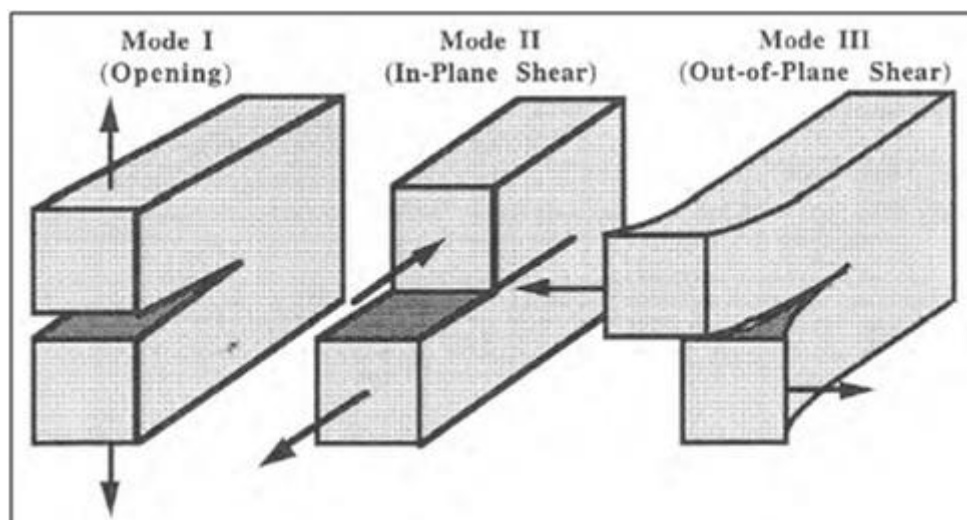
Η λύση περιέχει έναν πρωτεύοντα όρο που είναι ανάλογος του $\frac{1}{\sqrt{r}}$. Καθώς $r \rightarrow 0$, ο πρωτεύον όρος προσεγγίζει το άπειρο, αλλά οι υπόλοιποι όροι παραμένουν πεπερασμένοι ή πλησιάζουν στο μηδέν. Γι αυτό το λόγο η τάση κοντά στην κορυφή της ρωγμής μεταβάλλεται με το $\frac{1}{\sqrt{r}}$, ανεξάρτητα από τη μορφή του σώματος. Μπορεί επίσης να αποδειχθεί ότι η μετατόπιση κοντά στην κορυφή της ρωγμής μεταβάλλεται συναρτήσει του \sqrt{r} . Η παραπάνω σχέση περιγράφει μια "ιδιομορφία" της τάσης, όταν είναι ασυμπτωτική στο $r=0$ (Anderson, 1995).



Σχήμα 3.5: Προσδιορισμός της αρχής των αξόνων στην κορυφή της ρωγμής (Anderson, 1995).

Υπάρχουν τρεις τύποι φόρτισης στους οποίους μπορεί να υποβληθεί μια ρωγμή (Σχήμα 3.6). Ο τύπος I (Mode I), όπου η κύρια φόρτιση εφαρμόζεται κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής και η ρωγμή τείνει να ανοίξει, ο τύπος II (Mode II) που αντιστοιχεί σε διατμητική φόρτιση και με τον οποίο οι επιφάνειες της ρωγμής τείνουν να "γλιστρήσουν" προς αντίθετες κατευθύνσεις και ο τύπος III (Mode III) με τον οποίο εφαρμόζεται διατμητική τάση κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής. Ένα σώμα

μπορεί να φορτιστεί με κάθε έναν από αυτούς τους τύπους, ή και με συνδυασμό δύο ή τριών τύπων φόρτισης (Anderson, 1995).



Σχήμα 3.6: Οι τρεις τύποι φόρτισης που μπορούν να εφαρμοστούν σε μια ρωγμή (Anderson, 1995).

3.3.1 Συντελεστής Έντασης της Τάσης

Κάθε τύπος φόρτισης παράγει την "ιδιομορφία" $\frac{1}{\sqrt{r}}$ στην κορυφή της ρωγμής, αλλά η σταθερά k και το f_{ij} εξαρτώνται από τον τύπο φόρτισης. Η σταθερά k συνδέεται με τον συντελεστή έντασης της τάσης (Stress Intensity Factor, SIF) K με την ακόλουθη σχέση (Anderson, 1995):

$$K = k\sqrt{2\pi} \quad (3.12)$$

Με τον συντελεστή έντασης της τάσης δίνεται συνήθως σαν δείκτης και ο τύπος φόρτισης, δηλαδή, K_I , K_{II} , K_{III} . Γι αυτό, τα πεδία τάσης μπροστά από την κορυφή μιας ρωγμής σε ένα ισότροπο γραμμικά ελαστικό υλικό δίνονται ως εξής (Anderson, 1995):

$$\left. \begin{aligned} \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta) \\ \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(II)} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(II)}(\theta) \\ \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(III)} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(III)}(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Σε ένα σύνθετο πρόβλημα φόρτισης ισχύει η παρακάτω σχέση (Anderson, 1995):

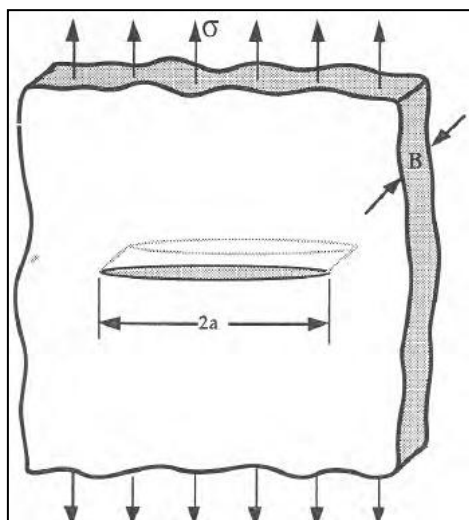
$$\sigma_{ij}^{(\text{ολικό})} = \sigma_{ij}^{(I)} + \sigma_{ij}^{(II)} + \sigma_{ij}^{(III)} \quad (3.14)$$

Ο συντελεστής έντασης της τάσης καθορίζει το πλάτος (amplitude) της ιδιομορφίας στην κορυφή της ρωγμής. Αυτό είναι οι τάσεις κοντά στην κορυφή της ρωγμής που αυξάνονται σε αναλογία με το K . Επιπλέον, ο συντελεστής έντασης της τάσης καθορίζει πλήρως τις συνθήκες στην κορυφή της ρωγμής.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί ανάλυση του συντελεστή έντασης των τάσεων K για δοκίμια Βραζιλιάνικου δίσκου με εγκοπή καθώς και της διαδικασίας υπολογισμού του στην παρούσα εργασία.

3.3.2 Σχέση μεταξύ K και συνολικής απόκρισης

Μια λύση κλειστής μορφής για το K είναι η διάταξη του σχήματος 3.7 στην οποία υπάρχει μια ρωγμή μέσα στο σώμα μιας απείρου μεγέθους πλάκας η οποία υποβάλλεται σε εφελκυσμό (Anderson, 1995).

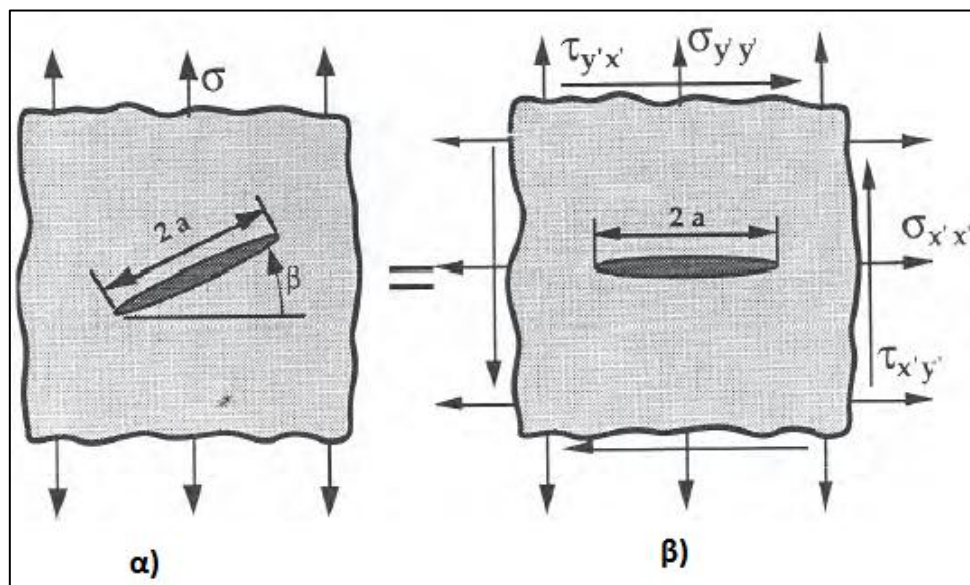


Σχήμα 3.7: Ρωγμή μέσα στο σώμα απείρων διαστάσεων πλάκας η οποία υποβάλλεται σε εφελκυστική τάση (Anderson, 1995).

Αφού η τάση σ είναι κάθετη στο επίπεδο της ρωγμής, ο τύπος φόρτισης είναι τύπος I. Σε αυτή την περίπτωση η σχέση μεταξύ K_I και των συνολικών συνθηκών (global conditions) είναι η εξής (Anderson, 1995):

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.15)$$

Στην συνέχεια θεωρείται μια ρωγμή μέσα σε μια πλάκα ημιαπείρων διαστάσεων όπου η κάθετη στο επίπεδο της ρωγμής είναι προσανατολισμένη κατά μια γωνία β με τον άξονα φόρτισης (Σχήμα 3.8α). Αν $\beta \neq 0$, η ρωγμή δέχεται φόρτιση των τύπων I και II.



Σχήμα 3.8: Ρωγμή μέσα σε πλάκα ημιαπείρων διαστάσεων για την γενική περίπτωση όπου η κύρια τάση δεν είναι κάθετη στο επίπεδο της ρωγμής (Anderson, 1995).

Το K_{III} είναι μηδέν όσο ο άξονας φόρτισης και η ρωγμή είναι κάθετα στο επίπεδο της πλάκας. Αν επαναπροσδιοριστούν οι άξονες ώστε να συμπίπτουν με τον προσανατολισμό της ρωγμής (Σχήμα 3.8β), φαίνεται ότι η εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να αναλυθεί στις ορθή και διατμητική συνιστώσα. Η κάθετη τάση στο επίπεδο της ρωγμής $\sigma_{y'y'}$, παράγει τύπο φόρτισης I, ενώ η $\tau_{x'y'}$ με την σ και το β μέσω του κύκλου του Mohr (Anderson, 1995):

$$K_I = \sigma_{y'y'}\sqrt{\pi a} = \sigma \cos^2(\beta)\sqrt{\pi a} \quad (3.16)$$

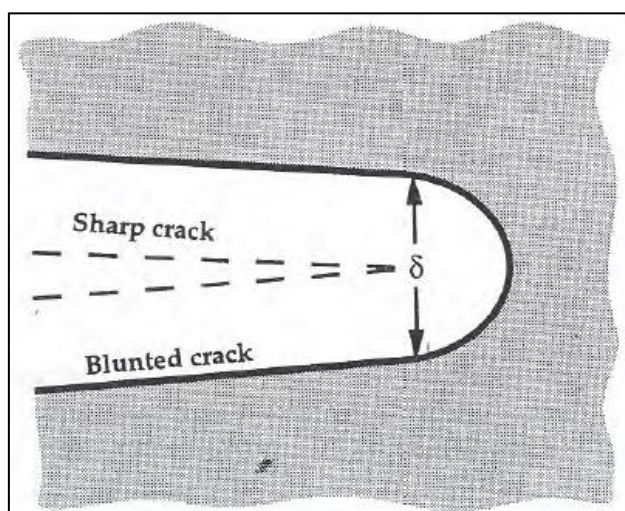
και

$$K_{II} = \tau_{x'y'}\sqrt{\pi a} = \sigma \sin(\beta)\cos(\beta)\sqrt{\pi a} \quad (3.17)$$

3.3.3 Άνοιγμα χειλέων στην αιχμή της ρωγμής

Το άνοιγμα χειλέων στην αιχμή της ρωγμής (Crack Tip Opening Displacement, CTOD) είναι μια ελαστοπλαστική παράμετρος η οποία περιγράφει τις συνθήκες που επικρατούν στην κορυφή (άκρη) μιας ρωγμής σε ένα ελαστοπλαστικό υλικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κριτήριο θραύσης (Anderson, 1995).

Ο Wells (1961) πρώτος παρατήρησε κατά την εξέταση ρωγματωμένων δοκιμίων, ότι οι επιφάνειες των ρωγμών μετακινιόντουσαν χωριστά προς την θραύση του υλικού. Η πλαστική παραμόρφωση άμβλυνη την αρχική οξεία ρωγμή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9. Ο βαθμός της άμβλυνσης της ρωγμής αυξανόταν αναλογικά με την σκληρότητα του υλικού. Το γεγονός αυτό οδήγησε τον Wells στο να εισάγει τον όρο CTOD σαν μέτρο της αντοχής θραύσης (Anderson, 1995).

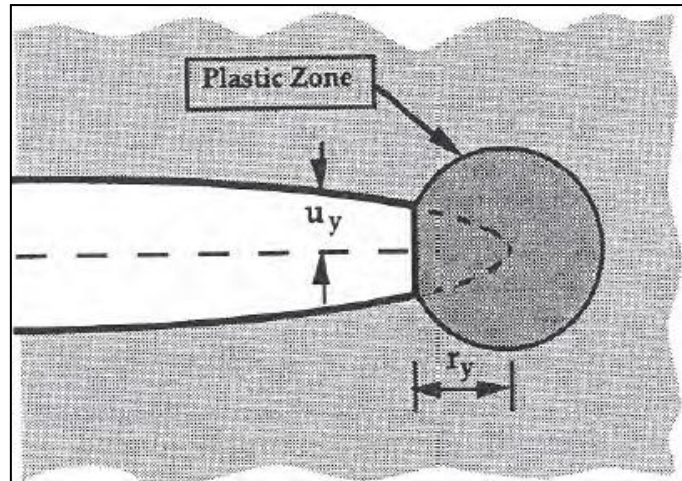


Σχήμα 3.9: CTOD. Μια αρχική αιχμηρή ρωγμή η οποία αμβλύνεται με την πλαστική παραμόρφωση με αποτέλεσμα μια πεπερασμένη μετατόπιση στην κορυφή της ρωγμής (Anderson, 1995).

Αν θεωρηθεί μια ρωγμή με μια μικρή πλαστική ζώνη (Σχήμα 3.10) το CTOD δίνεται από την παρακάτω σχέση (Anderson, 1995):

$$\delta = 2u_y = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} E} \quad (3.18)$$

όπου, δ το CTOD.



Σχήμα 3.10: Προσδιορισμός του CTOD από την μετατόπιση της ρωγμής στην πλαστική ζώνη (Anderson, 1995).

Εναλλακτικά το CTOD μπορεί να συσχετιστεί με τον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας ως εξής (Anderson, 1995):

$$\delta = \frac{4}{\pi} \frac{G}{\sigma_{YS}} \quad (3.19)$$

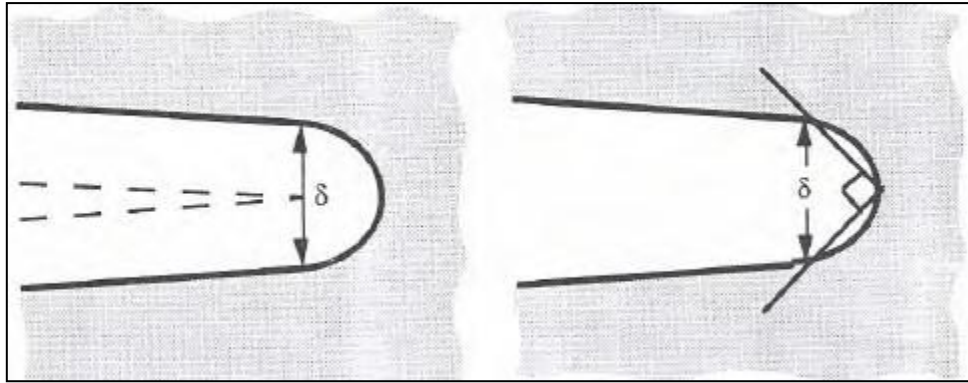
Επίσης το CTOD για μια ρωγμή σε μια πλάκα απείρων διαστάσεων η οποία υποβάλλεται σε εφελκυστική τάση είναι (Anderson, 1995):

$$\delta = \frac{8\sigma_{YS}\alpha}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\sigma}{\sigma_{YS}} \right) \quad (3.20)$$

όπου με ανάπτυγμα του όρου $\ln \sec$ προκύπτει ότι (Anderson, 1995):

$$\delta = \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} E} = \frac{G}{\sigma_{YS}} \quad (3.21)$$

Υπάρχει μεγάλος αριθμός εναλλακτικών προσδιορισμών του CTOD. Οι πιο συνηθισμένοι διακρίνονται στο σχήμα 3.11 και είναι η μετατόπιση στην κορυφή της ρωγμής και η αποτέμνουσα που αντιστοιχεί σε γωνία 90° . Ο τελευταίος προσδιορισμός του CTOD χρησιμοποιείται κυρίως στην Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.



Σχήμα 3.11: Διαφορετικοί προσδιορισμοί του CTOD (**α**) μετατόπιση στην κορυφή της ρωγμής (**β**) Μετατόπιση στο σημείο τομής δύο κάθετων μεταξύ τους στην κορυφή της ρωγμής (Anderson, 1995).

Κεφάλαιο 4: Πειραματική ανάλυση Βραζιλιανών δίσκων με εγκοπή chevron σε δοκίμια μαρμάρου Νέστου σε συνδυασμό με ΑΕ

4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η γεωμετρία του Βραζιλιανού δίσκου με εγκοπή και ο υπολογισμός του κρίσιμου συντελεστή έντασης των τάσεων όπως αυτή προτάθηκε από την ISRM το 1995 και θα δοθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του μαρμάρου Κομνηνών Νέστου. Στην συνέχεια θα αναλυθεί η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία αυτή τόσο για την κατασκευή των δοκιμίων όσο και για την φόρτιση τους σε συνδυασμό με την εφαρμογή των ακουστικών εκπομπών.

4.2 Βραζιλιανοί δίσκοι με εγκοπή chevron

Ιστορικά, διάφοροι τύποι δειγμάτων και μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την δοκιμή υπολογισμού του κρίσιμου συντελεστή έντασης των τάσεων (θραυστική στοιβαρότητα) και τα αποτελέσματα που προέκυπταν δεν ήταν συγκρίσιμα. Ως εκ τούτου, η ISRM συνέστησε δύο προτεινόμενες μεθόδους με σκοπό να παρέχει μεθόδους δοκιμής που θα δώσουν συνεπείς τιμές για την θραυστική στοιβαρότητα. Η μια μέθοδος αφορά δοκίμια Βραζιλιανού δίσκου με απευθείας ρωγμή (Central Straight-through Crack Brazilian Disk – CSCBD) και τον Βραζιλιανό δίσκο με εγκοπή (Central through Chevron Notched Brazilian Disk – CCNBD). Στην παρούσα εργασία θα διαμορφωθούν δοκίμια με εγκοπή τύπου CCNBD. Η δοκιμή αυτή προορίζεται για την μέτρηση της δυσθραυστότητας της βραχομάζας. Η κύρια χρήση της ιδιότητας αυτής είναι για την ταξινόμηση και τον χαρακτηρισμό του πετρώματος σε σχέση με την αντοχή του στη διάδοση των ρωγμών. Άλλες σημαντικές χρήσεις είναι ως δείκτης για πετρώματα σε διαδικασίες κατακερματισμού σε διάνοιξη σηράγγων, ή στην ανάλυση υδραυλικών ή εκρηκτικών θραύσεων και την υποστήριξη (Fowell et al, 1995).

4.2.1 Περιγραφή γεωμετρίας Βραζιλιανών δοκιμών με εγκοπή chevron

Η γεωμετρία του δοκιμίου με εγκοπή chevron (CCNBD) παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1. Όλες οι διαστάσεις της γεωμετρίας θα πρέπει να μετατρέπονται σε αδιάστατες παραμέτρους με την ακτίνα R και διάμετρο D του δοκιμίου σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις (Fowell et al, 1995):

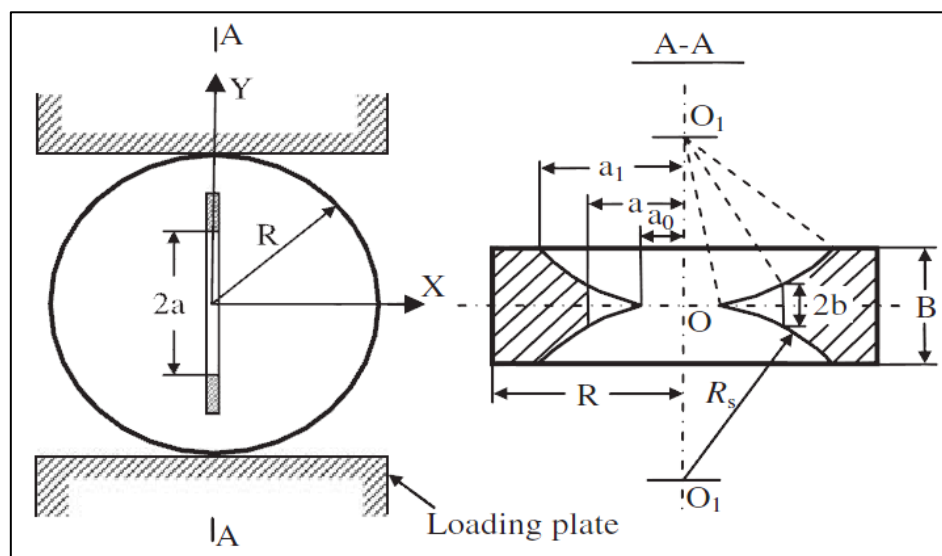
$$\alpha_0 = a_0/R \quad (4.1)$$

$$\alpha_B = B/R \quad (4.2)$$

$$\alpha_1 = a_1/R \quad (4.3)$$

$$\alpha_s = D_s/D \quad (4.4)$$

Οι διαστάσεις αυτές φαίνονται χαρακτηριστικά στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Η γεωμετρία του Βραζιλιανού δίσκου με εγκοπή chevron – CCNBD (Fowell et al, 2006).

Οι προτεινόμενες διαστάσεις για το δοκίμιο με εγκοπή σύμφωνα με την ISRM απεικονίζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Προτεινόμενοι γεωμετρικοί παράμετροι από την ISRM (Fowell et al, 1995).

Μέγεθος	Τιμές	Αδιάστατη σχέση
Διάμετρος D (mm)	75.0	
Πάχος B (mm)	30.0	$\alpha_B = B/R = 0.80$
Αρχικό μήκος εγκοπής α_0 (mm)	9.89	$\alpha_0 = \alpha_0/R = 0.2637$
Τελικό μήκος εγκοπής α_1 (mm)	24.37	$\alpha_1 = \alpha_1/R = 0.65$
Διάμετρο κοπτικού D_s (mm)	52.0	$\alpha_s = D_s/D = 0.6933$
Πάχος κοπής h_c (mm)	26.97	
Y_{min}^* (αδιάσταστο)	0.84	
a_m (mm)	19.31	$\alpha_m = \alpha_m/R = 0.5149$

Μπορούν βέβαια να επιλεχθούν και άλλες διαστάσεις των δοκιμών όμως θα πρέπει τα μεγέθη να πληρούν κάποιους περιορισμούς όπως: $0,4 \leq \alpha_1 \leq 0,8$ και $\alpha_B \leq 1,04$. Το αρχικό μήκος της ρωγμής α_0 θα πρέπει να καθοριστεί μεταξύ του $(0,20-0,30) \cdot R$. Τα $\alpha_0(\alpha_0)$, $\alpha_1(\alpha_1)$ και $\alpha_B(B)$ είναι τρεις βασικοί γεωμετρικοί παράμετροι για τα δοκίμια με εγκοπή CCNBD. Όταν είναι γνωστές οι άλλες γεωμετρικοί παράμετροι (Σχήμα 4.1) μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω σχέσεις (Fowell et al, 1995):

$$\alpha_s = R_s/R = \sqrt{\alpha_0^2 + \left(\alpha_1^2 - \alpha_0^2 + \alpha_B^2/4\right)^2} \div \alpha_B^2 \quad (4.5)$$

$$h_c = \left(\alpha_s - \sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_1^2}\right) \cdot R = \left(\alpha_s - \sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_0^2}\right) \cdot R + B/2 \quad (4.6)$$

$$\alpha_0 = \sqrt{\alpha_s^2 - \left(\sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_1^2} + \alpha_B/2\right)^2} \quad (4.7)$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha_s^2 - \left(\sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_0^2} - \alpha_B/2\right)^2} \quad (4.8)$$

$$\alpha_B = 2 \cdot \left(\sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_0^2} - \sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_1^2}\right) \quad (4.9)$$

Με την βοήθεια ενός κυκλικού κοπτικού δίσκου με διαμάντια θα κατασκευασθεί η εγκοπή chevron στους Βραζιλιανούς δίσκους. Οι πλευρές της εγκοπής θα πρέπει να είναι ευθείες γιαυτό και το κοπτικό απαιτείται να είναι γραμμικής κίνησης κοπής. Θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι οι εγκοπές θα κατασκευαστούν στο κέντρο του δίσκου και ότι οι γεωμετρικοί διαστάσεις σύμφωνα με τις δεδομένες ανοχές.

4.2.2 Υπολογισμός του συντελεστή έντασης των τάσεων K

Οι συντελεστές έντασης των τάσεων είναι μέτρο του μεγέθους των τάσεων πολύ κοντά στην αιχμή στις ρωγμές, είναι, κατ' αρχήν θεμιτό να θεωρήσει κανείς ότι μπορεί να περιγράψει στις συνθήκες αστοχίας στις υλικού συναρτήσει του συντελεστή αυτού κατ' ευθείαν, χωρίς αναφορά στις αντίστοιχες τάσεις. Ως αστοχία υλικού θεωρείται η εκκίνηση και ασταθής διάδοση στις προϋπάρχουσες ρωγμές, ώστε τελικώς, η κατασκευή να απωλέσει την ικανότητα στις να φέρει φορτία. Η διατύπωση στις τέτοιου κριτηρίου είναι προφανής: Η ρωγμή θα ξεκινήσει όταν ο συντελεστής έντασης των τάσεων K_I λάβει μια κρίσιμη τιμή έστω K_{IC} (Τριγγιλίδα, 2011).

Ο συντελεστής έντασης των τάσεων K , είναι και μια ποσοτική παράμετρος που χαρακτηρίζει (Whittaker et al, 1992):

- την μοναδιαία συμπεριφορά,
- την συγκέντρωση τάσεων καθώς επίσης και
- την αντοχή που μπορεί να παρουσιαστεί σε μια αιχμή ρωγμής.

Ο συντελεστής έντασης των τάσεων K , εξαρτάται από το μέγεθος της ρωγμής, την γεωμετρία και το επίπεδο φόρτισης. Ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων K_c ή αλλιώς σκληρότητα θραύσης ή δυσθραυστότητα, προσδιορίζει την ανοχή των ρωγμών σε μια κατασκευή υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Στην παρούσα εργασία ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων υπολογίστηκε από διαφορετικούς τύπους για τις δύο ομάδες των δοκιμών λόγω του διαφορετικού τρόπου διάδοσης της ρωγμής. Για τα δοκίμια όπου η εγκοπή 'chevron' ήταν προσανατολισμένη παράλληλα με τον άξονα φόρτισης ο K_{IC} υπολογίσθηκε με βάση την προσέγγιση των Fowell et al (1995) και Atkinson et al (1982) και για τα δοκίμια όπου η εγκοπή 'chevron' ήταν προσανατολισμένη στις 45° από τον άξονα φόρτισης με βάση την προσέγγιση των Atkinson et al (1982). Οι δύο αυτές προσεγγίσεις αναλύονται παρακάτω.

Ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο στην περίπτωση όπου η διάδοση της ρωγμής είναι τύπου I (Fowell et al, 2006):

$$K_{IC} = \frac{P_{\max}}{B \cdot \sqrt{R}} \cdot Y_{\min}^* \quad (4.10)$$

όπου, Y_{\min}^* : κρίσιμη αδιάστατη τιμή του συντελεστή έντασης των τάσεων η οποία καθορίζεται από στις διαστάσεις του δοκιμίου α_0 , α_1 και α_B μόνο. Το Y_{\min}^* υπολογίζεται από την σχέση (Fowell et al, 1995):

$$Y_{\min}^* = u \cdot e^{v \cdot \alpha_1} \quad (4.11)$$

Όπου u και v είναι παράμετροι που προσδιορίζονται από α_0 και α_B όπου η ISRM είχε δώσει στις σχετικούς πίνακες, αν ταιριάζουν με αυτές, για τον υπολογισμό τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 4.2. Σε διαφορετική περίπτωση γίνεται χρήση της γραμμικής παρεμβολής για να υπολογιστούν (Fowell et al, 1995).

Πίνακας 4.2: Τιμές u και v (Fowell et al, 1995).

α_0	0.100	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450
u														
α_B														
0.440	0.2747	0.2774	0.2791	0.2808	0.2825	0.2844	0.2865	0.2883	0.2914	0.2943	0.2979	0.3024	0.3069	0.3120
0.480	0.2727	0.2752	0.2765	0.2782	0.2795	0.2812	0.2833	0.2856	0.2882	0.2918	0.2954	0.2994	0.3039	0.3090
0.520	0.2708	0.2727	0.2740	0.2757	0.2771	0.2788	0.2806	0.2828	0.2857	0.2887	0.2925	0.2968	0.3013	0.3060
0.560	0.2689	0.2705	0.2716	0.2733	0.2744	0.2763	0.2781	0.2805	0.2831	0.2867	0.2901	0.2943	0.2989	0.3039
0.600	0.2667	0.2684	0.2696	0.2709	0.2721	0.2739	0.2757	0.2782	0.2812	0.2844	0.2882	0.2921	0.2967	0.3015
0.640	0.2649	0.2665	0.2674	0.2685	0.2701	0.2719	0.2738	0.2764	0.2791	0.2825	0.2863	0.2905	0.2947	0.2992
0.680	0.2632	0.2646	0.2655	0.2667	0.2682	0.2704	0.2718	0.2744	0.2774	0.2807	0.2848	0.2888	0.2930	0.2971
0.720	0.2611	0.2628	0.2637	0.2650	0.2667	0.2683	0.2705	0.2727	0.2763	0.2794	0.2831	0.2871	0.2916	0.2954
0.760	0.2598	0.2612	0.2625	0.2637	0.2650	0.2668	0.2693	0.2719	0.2744	0.2781	0.2819	0.2860	0.2895	0.2934
0.800	0.2582	0.2602	0.2611	0.2625	0.2641	0.2657	0.2680	0.2706	0.2736	0.2772	0.2811	0.2845	0.2878	0.2916
0.840	0.2572	0.2586	0.2599	0.2612	0.2628	0.2649	0.2672	0.2699	0.2727	0.2763	0.2801	0.2831	0.2867	0.2891
0.880	0.2562	0.2578	0.2593	0.2602	0.2621	0.2642	0.2668	0.2691	0.2723	0.2754	0.2793	0.2816	0.2853	0.2867
0.920	0.2553	0.2572	0.2582	0.2598	0.2613	0.2634	0.2658	0.2684	0.2716	0.2747	0.2782	0.2811	0.2831	0.2856
0.960	0.2549	0.2566	0.2578	0.2593	0.2612	0.2633	0.2655	0.2685	0.2710	0.2746	0.2767	0.2799	0.2811	0.2825
1.000	0.2547	0.2564	0.2576	0.2591	0.2610	0.2630	0.2653	0.2679	0.2709	0.2738	0.2768	0.2786	0.2794	0.2794
1.040	0.2544	0.2565	0.2576	0.2593	0.2608	0.2627	0.2653	0.2678	0.2708	0.2727	0.2747	0.2769	0.2769	0.2765
v														
0.440	1.7813	1.7820	1.7820	1.7833	1.7863	1.7893	1.7923	1.7967	1.7966	1.7977	1.7973	1.7932	1.7901	1.7850
0.480	1.7748	1.7763	1.7787	1.7800	1.7843	1.7881	1.7907	1.7934	1.7952	1.7929	1.7923	1.7901	1.7866	1.7811
0.520	1.7694	1.7734	1.7758	1.7769	1.7808	1.7845	1.7884	1.7907	1.7911	1.7920	1.7897	1.7860	1.7823	1.7784
0.560	1.7644	1.7701	1.7732	1.7748	1.7794	1.7822	1.7856	1.7877	1.7885	1.7864	1.7857	1.7820	1.7779	1.7725
0.600	1.7620	1.7668	1.7692	1.7727	1.7770	1.7792	1.7826	1.7835	1.7833	1.7831	1.7805	1.7782	1.7733	1.7689
0.640	1.7580	1.7631	1.7671	1.7707	1.7732	1.7757	1.7788	1.7794	1.7795	1.7779	1.7753	1.7716	1.7686	1.7652
0.680	1.7550	1.7602	1.7640	1.7676	1.7707	1.7711	1.7757	1.7759	1.7754	1.7741	1.7700	1.7666	1.7630	1.7612
0.720	1.7536	1.7580	1.7616	1.7647	1.7661	1.7698	1.7708	1.7722	1.7693	1.7683	1.7652	1.7617	1.7574	1.7562
0.760	1.7497	1.7553	1.7568	1.7600	1.7635	1.7656	1.7649	1.7652	1.7662	1.7624	1.7593	1.7554	1.7548	1.7528
0.800	1.7474	1.7506	1.7538	1.7557	1.7581	1.7611	1.7613	1.7603	1.7596	1.7561	1.7525	1.7512	1.7509	1.7494
0.840	1.7430	1.7487	1.7500	1.7522	1.7545	1.7547	1.7551	1.7548	1.7535	1.7499	1.7469	1.7473	1.7448	1.7497
0.880	1.7392	1.7438	1.7446	1.7487	1.7490	1.7492	1.7478	1.7487	1.7463	1.7452	1.7403	1.7434	1.7414	1.7493
0.920	1.7357	1.7390	1.7413	1.7423	1.7440	1.7446	1.7443	1.7432	1.7411	1.7389	1.7360	1.7363	1.7417	1.7448
0.960	1.7299	1.7337	1.7358	1.7370	1.7372	1.7373	1.7372	1.7346	1.7344	1.7309	1.7343	1.7331	1.7414	1.7483
1.000	1.7243	1.7279	1.7300	1.7308	1.7310	1.7307	1.7306	1.7297	1.7273	1.7270	1.7258	1.7302	1.7394	1.7525
1.040	1.7196	1.7213	1.7231	1.7232	1.7246	1.7256	1.7237	1.7231	1.7204	1.7238	1.7272	1.7293	1.7423	1.7569

Οι συντελεστές έντασης των τάσεων υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις στην περίπτωση όπου η διάδοση της ρωγμής είναι μίξη τύπου I-II (Atkinson et al, 1982):

$$K_I = \frac{P}{\pi \cdot R \cdot B} \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha} \cdot N_I = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot \sqrt{\alpha} \cdot N_I \quad (4.12)$$

$$K_{II} = \frac{P}{\pi \cdot R \cdot B} \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha} \cdot N_{II} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot \sqrt{\alpha} \cdot N_{II} \quad (4.13)$$

Όπου,

P: φορτίο,

R: ακτίνα δοκιμίου,

B: πάχος δοκιμίου,

α: μισό μήκος εγκοπής αδιάστατο,

N_I , N_{II} : αδιάστατοι συντελεστές που εξαρτώνται από το α και την γωνία θ δηλαδή από τον προσανατολισμό της εγκοπής σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.

Στις σχέσεις 4.12 και 4.13 όταν αντικατασταθεί το φορτίο θραύσης στη θέση του φορτίου προκύπτουν οι K_{IC} και K_{IIC} αντίστοιχα.

$$N_I = \sum_{i=1}^n T_i (\alpha)^{2i-2} \cdot A_i(\theta) \quad (4.14)$$

$$N_{II} = 2\sin 2\theta \cdot \sum_{i=1}^n S_i (\alpha)^{2i-2} \cdot B_i(\theta) \quad (4.15)$$

Όπου T_i , S_i , A_i και B_i προκύπτουν από τους παρακάτω πίνακες.

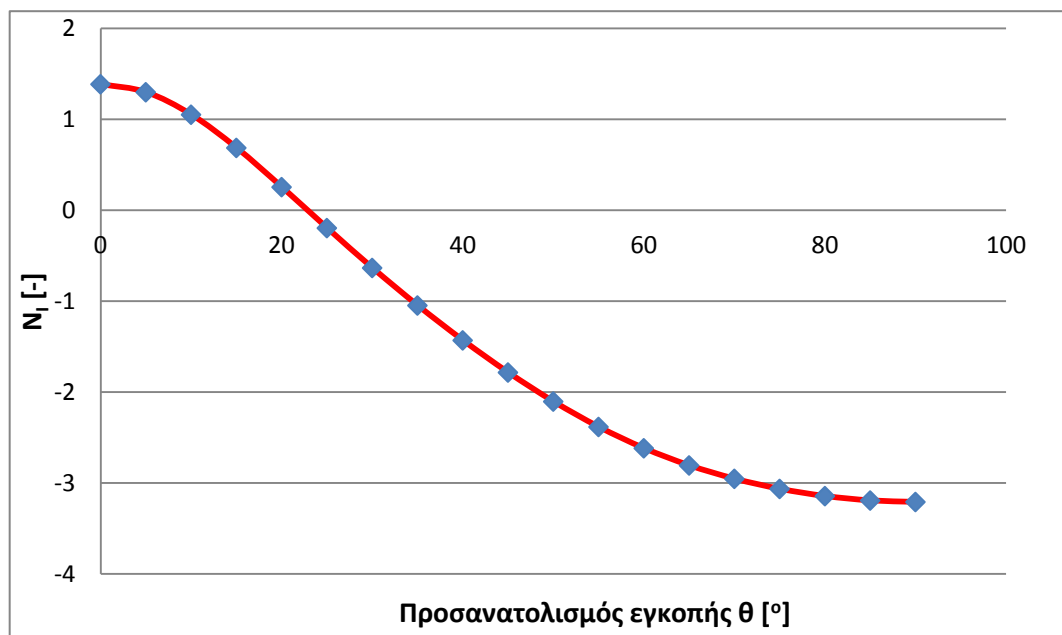
Πίνακας 4.3: Τιμές T_i και S_i (Atkinson et al, 1982).

α	T1	T2	T3	T4	T5
	S1	S2	S3	S4	S5
0,1	1,014998	0,503597	0,376991	0,376991	0,314159
	1,009987	0,502341	0,376363	0,376363	0,314159
0,2	1,060049	0,514907	0,382430	0,383392	0,318086
	1,039864	0,509959	0,379956	0,380584	0,316245
0,3	1,135551	0,533477	0,391640	0,393835	0,325033
	1,089702	0,522272	0,386086	0,387518	0,320834
0,4	1,243134	0,559734	0,404603	0,408597	0,334831
	1,160796	0,539824	0,394822	0,397403	0,327411
0,5	1,387239	0,594892	0,421949	0,428353	0,347941
	1,257488	0,563966	0,406869	0,410966	0,336447
0,6	1,578258	0,642124	0,445387	0,454861	0,365559
	1,390654	0,597985	0,424037	0,430072	0,349219

Πίνακας 4.4: Τιμές A_i και B_i (Atkinson et al, 1982).

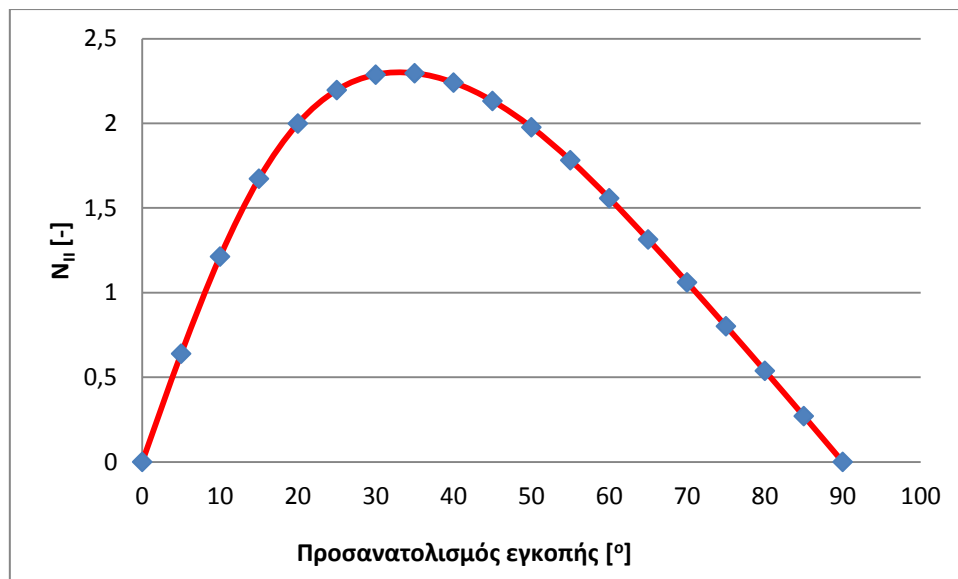
A_1	$1-4\cos^2\theta$
A_2	$8\sin^2\theta(1-4\cos^2\theta)$
A_3	$-4\sin^2\theta(3-36\cos^2\theta+48\cos^4\theta)$
A_4	$-16\sin^2\theta(-1+24\cos^2\theta-80\cos^4\theta+64\cos^6\theta)$
A_5	$-20\sin^2\theta(1-40\cos^2\theta+240\cos^4\theta-448\cos^6\theta+256\cos^8\theta)$
B_1	1
B_2	$-5+8\cos^2\theta$
B_3	$-3+8(1-2\cos^2\theta)(2-3\cos^2\theta)$
B_4	$3+16(1-2\cos^2\theta)-12(1-2\cos^2\theta)^2-32(1-2\cos^2\theta)^3$
B_5	$5-16(1-2\cos^2\theta)-60(1-2\cos^2\theta)^2+32(1-2\cos^2\theta)^3+80(1-2\cos^2\theta)^4$

Στα σχήματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι συντελεστές N_I και N_{II} για $\alpha=0,5$ σε σχέση με τον προσανατολισμό της εγκοπής από τον άξονα φόρτισης.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα συντελεστή N_I συναρτήσει της γωνίας που σχηματίζει η εγκοπή από τον κατακόρυφο άξονα.

Από το σχήμα 4.2 παρατηρείται ότι στις 23° μηδενίζεται ο συντελεστής και επομένως ο συντελεστής έντασης των τάσεων K_I θα είναι μηδέν. Από τις 24° ως τις 90° ο συντελεστής N_I είναι αρνητικός, άρα και ο K_I όπου υποδηλώνει το κλείσιμο της ρωγμής.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα συντελεστή N_{II} συναρτήσει της γωνίας που σχηματίζει η εγκοπή από τον κατακόρυφο άξονα.

Στο σχήμα 4.3 παρατηρείται ότι ο συντελεστής N_{II} μηδενίζεται όταν η εγκοπή είναι στις 0° και 90° από τον άξονα φόρτισης με αποτέλεσμα να μηδενίζεται και ο K_{II} . Επομένως στις γωνίες αυτές ο τρόπος φόρτισης της ρωγμής είναι μόνο τύπου I και όχι μίξη τύπου I-II.

4.3 Εξεταζόμενο υλικό

4.3.1 Γενικά στοιχεία για το μάρμαρο

Η προέλευση της λέξης μάρμαρο είναι αρχαιοελληνική. Κατά τους ομηρικούς χρόνους η λέξη μάρμαρο σήμαινε πέτρα. Η αρχαία ελληνική λέξη «μερμέρω» σημαίνει γυαλίζω την πέτρα. Στην ελληνική και τη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για την λέξη μάρμαρο ανάλογα με τον τομέα στον οποίο χρησιμοποιείται, χωρίς όμως ο ένας να αναιρεί τον άλλο (Εξαδάκτυλος, 2006).

Γεωλογικά, μάρμαρο σημαίνει το προϊόν της μεταμόρφωσης ασβεστολίθων, δηλαδή πέτρωμα που αποτελείται από κρυστάλλους ασβεστίτη ή δολομίτη ή μίγμα αυτών των δύο ορυκτών. Τεχνικά, μάρμαρο ονομάζεται κάθε πέτρωμα που μπορεί να εξορυχθεί σε όγκους ικανών διαστάσεων και μπορεί να κοπεί να λειανθεί και να στυλβωθεί. Μάρμαρα μπορούν να θεωρηθούν ο ασβεστόλιθος (που επιδεικνύει μικρή κρυσταλλική δομή), ο όνυχας, ο σερπεντίνης και ο τραβερτίνης. Εμπορικά, η

λέξη μάρμαρο αναφέρεται σε κάθε πέτρωμα που μπορεί να πωληθεί σε όγκους και πλάκες. Ο ορισμός αυτός συμπεριλαμβάνει τους γρανίτες, τους σχιστόλιθους κ.ά. Σύμφωνα με την ASTM (C 119) ο ορισμός του μαρμάρου είναι: ανθρακικό πέτρωμα που διακρίνεται από την κρυσταλλική δομή του εξαιτίας ανακρυστάλλωσης, συνήθως από θέρμανση ή πίεση κατά τη διάρκεια μεταμόρφωσης, το οποίο συνιστάται κυρίως από ανθρακικά ορυκτά ασβεστίτη ή δολομίτη, αποκλειστικά ή σε συνδυασμό (Εξαδάκτυλος, 2006).

4.3.2 Γένεση και φυσικά χαρακτηριστικά

Το μάρμαρο είναι ένας ασβεστόλιθος οργανικής προέλευσης με σακχαρώδεις κόκκους, ο οποίος είναι αποτέλεσμα έντονων διεργασιών μεταμόρφωσης, οι οποίες επέφεραν μια πλήρη ανακρυστάλλωση του ανθρακικού ασβεστίου το οποίο αποτελεί τη μάζα του πετρώματος. Το μάρμαρο είναι προϊόν μεταμόρφωσης ασβεστολίθων ή δολομιτών. Πολλές ποικιλίες μαρμάρων έχουν δημιουργηθεί από μια απλής δράσης μεταμόρφωση, δηλαδή πρώτα κατατεμαχίζονται από δυναμικές δράσεις και έπειτα ανασυγκολλούνται με απόθεση ανθρακικού ασβεστίου μέσα στις ρωγμές.

Τα μάρμαρα μπορούν να σχηματιστούν και στις τρεις ζώνες θερμοκρασιών και πίεσης. Έτσι, ανάλογα με τα συμπτωματικά ορυκτά που περιέχουν, διακρίνονται σε μάρμαρα υψηλών θερμοκρασιών (καταζώνης), μέσων θερμοκρασιών (μεσοζώνης), ή χαμηλών θερμοκρασιών (επιζώνης) (Ιστάντσο, 2008).

Τα χαρακτηριστικά των μαρμάρων που δίνουν σε αυτά την ανάλογη εμπορική τους αξία είναι:

- η χρωματική και αισθητική τους εμφάνιση,
- ο ιστός τους,
- η παρουσία ή όχι φλεβιδίων και η διάταξη και το χρώμα αυτών,
- η παρουσία εγκλεισμάτων, καθώς και η ύπαρξη και η συχνότητα των λεγόμενων "λεκέδων",
- οι φυσικές, χημικές, μηχανικές και τεχνικές τους ιδιότητες.

Ένα από τα σημαντικότερα φυσικά γνωρίσματα του μαρμάρου είναι το χρώμα του, το οποίο καθορίζεται από τη φύση των συστατικών του. Έτσι τα μάρμαρα που αποτελούνται από καθαρό ασβεστίτη ή δολομίτη είναι λευκά, λόγω του λευκού

χρώματος των ορυκτών αυτών. Τα σερπεντινικά μάρμαρα έχουν πράσινο χρώμα, εφόσον το ορυκτό του σερπεντίνη το οποίο κυριαρχεί στη σύσταση αυτού του τύπου μαρμάρου έχει πράσινο χρώμα. Οι προσμίξεις διαφόρων ξένων ουσιών προσδίδουν διάφορες αποχρώσεις σε ένα λευκό αγνό μάρμαρο. Αυτές οι προσμίξεις κατανέμονται είτε ομοιόμορφα δίδοντας στο μάρμαρο ένα ομοιόμορφο χρωματισμό, είτε μπορεί να εμφανίζονται με ζωνώδη μορφή “μπαλωμάτων” αποδίδοντας στο μάρμαρο ανομοιόμορφο χρωματισμό.

Τα μάρμαρα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά, για την παρασκευή αδρανών υλικών, χημικών προϊόντων (συνθετικού μαγνησίτη, αλκαλίων, ανθρακασβεστίου, λευκαντικών, φωσφορικού ασβεστίου, οργανικών χημικών ενώσεων), υάλου, ως προσθετικό στις ζωοτροφές κ.λπ. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρασκευή κονιωδούς ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο χρησιμοποιείται ως πληρωτικό υλικό στη χαρτοβιομηχανία, τη βιομηχανία πλαστικών, ελαστικών και χρωμάτων και σε διάφορα είδη στόκων και σε οικοδομικά υλικά (Ιστάντσο, 2008).

4.3.3 Μάρμαρο Κομνηνών Νέστου

Το υπό εξέταση μάρμαρο Κομνηνών Νέστου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια με εγκοπή - CCNBD εξορύσσεται με υπαίθρια εκμετάλλευση σε λατομείο που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 35 km ανατολικά της Καβάλας προς Ξάνθη. Η συνηθέστερη χρήση του είναι ως δομικό υλικό.

Το μάρμαρο Κομνηνών Νέστου είναι λευκό με γκρίζα “νερά” λόγω ύπαρξης δολομίτη. Η ορυκτολογική σύσταση κατά βάρος, σύμφωνα με την ορυκτολογική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, είναι ασβεστίτης 93,4%, δολομίτης 6% και χαλαζίας 0,6%. Έχει ειδικό βάρος $2,67 \text{ g/cm}^3$ και συντελεστής απορρόφησης κατά βάρος 0,09% (Κακλής κ.α., 2010).

4.4 Προετοιμασία δοκιμών με εγκοπή chevron για τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.

Η Διεθνής Ένωση για τη Μηχανική Πετρωμάτων (ISRM) έχει προτείνει μια σειρά διαδικασιών πειραματικής μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό διαφόρων ιδιοτήτων στα πετρώματα, όπως είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή σε εφελκυσμό κ.λπ. Οι διαδικασίες αυτές πρέπει να εφαρμόζονται, όπου είναι δυνατόν, ώστε οι μετρήσεις να είναι τυποποιημένες και τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με αυτά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Αγιουτάντης, 2002).

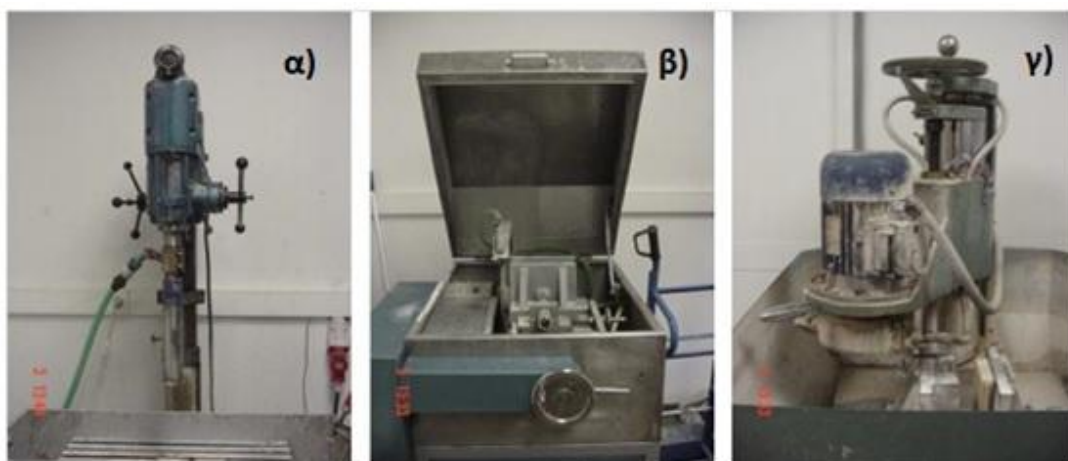
4.4.1 Προδιαγραφές και προετοιμασία των δοκιμών

Οι προδιαγραφές για τον κλασσικό Βραζιλιανό δίσκο αναφέρουν ότι θα πρέπει (Αγιουτάντης, 2002):

- η διάμετρος των δοκιμών πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με NX (δηλαδή περίπου 54 mm) και το πλάτος τους περίπου ίσο με την ακτίνα τους (27mm).
- Τα δοκίμια πρέπει να προετοιμασθούν χρησιμοποιώντας μόνο καθαρό νερό (στα κοπτικά και λειαντικά εργαλεία). Οι κυλινδρικές επιφάνειες πρέπει να είναι λείες με ανοχή 0,025 mm. Τα άκρα του κυλίνδρου πρέπει να είναι επίπεδα και παράλληλα με ανοχή 0,25 mm.

Με βάση τα παραπάνω, η προετοιμασία των δοκιμών στο εργαστήριο ακολούθησε τα επόμενα στάδια:

- Διάτρηση του όγκου του δείγματος και λήψη πυρήνων, σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Γι' αυτό το σκοπό, το δείγμα στερεώνεται σε κατάλληλη βάση διάτρησης (Drill press), σχήμα 4.4α.
- Κοπή των κυλίνδρων (πυρήνων) σε κατάλληλο περιστροφικό πριόνι με δίσκο καρβιδίων (Carbide disk saw), σχήμα 4.4β.
- Λείανση των βάσεων των δοκιμών σε κατάλληλο λειαντικό μηχάνημα (Grinding machine), σχήμα 4.4γ.
- Μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμών με τις ανοχές που προβλέπει η σχετική διαδικασία.



Σχήμα 4.4: (α) πυρηνολήπτης, (β) δίσκος κοπής, (γ) λειαντής εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τον σκοπό αυτής της πειραματικής διερεύνησης, προέκυψαν από κύβους μαρμάρου Κομνηνών Νέστου.

4.4.2 Δημιουργία εγκοπής στα δοκίμια

Η δημιουργία της εγκοπής chevron πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις αδιάστατες σχέσεις του παραπάνω πίνακα 4.1 σε δοκίμια με διάμετρο $D \approx 52\text{mm}$ και $H \approx 21\text{mm}$. Η μείωση του ύψους από 27mm σε 21mm έγινε ώστε το τελικό μήκος της εγκοπής να είναι σύμφωνα με το προτεινόμενο πρότυπο της ISRM. Το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της εγκοπής ήταν τύπου Dremel με διάμετρο κοπτικού δίσκου $D_s = 38\text{mm}$ (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Κατασκευή εγκοπής σε δοκίμια Βραζιλιάνικου δίσκου με την βοήθεια κοπτικού δίσκου.

4.5 Περιγραφή εργαστηριακού εξοπλισμού & συστημάτων καταγραφής ΑΕ

4.5.1 Εξοπλισμός φόρτισης δοκιμίων

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής με την δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης κυκλικού δίσκου, χρησιμοποιούνται δύο χαλύβδινες σιαγώνες φόρτισης, με τέτοιο τρόπο ώστε το τόξο επαφής με το δίσκο του πετρώματος κατά την αστοχία να είναι περίπου 10° . Οι κρίσιμες διαστάσεις των σιαγόνων αυτών είναι η ακτίνα καμπυλότητας τους, το διάκενο, το μήκος των οδηγών τους και το πάχος τους. Πιο συγκεκριμένα (Κακλής, 2003):

- λόγος ακτίνας / ακτίνα δοκιμίου ίσο με 1,5,
- διάκενο μεταξύ οδηγών και άνω σιαγόνας ίσο με 0,1mm,
- διείσδυση οδηγών ίση με 25mm,
- στροφή της μιας σιαγόνας ως προς την άλλη μέχρι $4 \cdot 10^{-3}$.
- Λόγος πάχους σιαγόνας / πάχος δοκιμίου ίσο με 1,1.

Το εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης χρησιμοποιεί συστήματα του οίκου MTS, τα οποία είναι σχεδιασμένα για διάφορους τύπους δοκίμων υλικών. Για τα συστήματα αυτά υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας με δύο τρόπους: μη αυτοματοποιημένη ή τοπική λειτουργία, όπου ο έλεγχος του συστήματος γίνεται από την κονσόλα και αυτοματοποιημένη ή απομακρυσμένη λειτουργία, όπου ο έλεγχος του συστήματος γίνεται κατά μεγάλο μέρος από Η/Υ συνδεδεμένο με την κονσόλα.

Το εργαστήριο διαθέτει μια συσκευή φόρτισης τύπου MTS – 815 (σχήμα 4.6), που περιλαμβάνει τα ακόλουθα τμήματα (Κακλής, 2003):

- Πλαίσιο φόρτισης: στη βάση του πλαισίου φόρτισης είναι ενσωματωμένο υδραυλικό έμβολο επιβολής δυνάμεων. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να επιβάλλει το έμβολο αυτό είναι ± 1600 kN (τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό). Η μέγιστη μετατόπιση του εμβόλου είναι 100mm ή 1mm από μια θέση ισορροπίας. Το έμβολο αυτό οδηγείται από υδραυλικό ενεργοποιητή ± 50 mm

- Μορφοτροπείς μέτρησης φορτίου/ μετατόπισης: Οι μορφοτροπείς αυτοί είναι ενσωματωμένοι στο έμβολο φόρτισης.
- Άνω και κάτω πλάκες φόρτισης: Οι πλάκες αυτές τοποθετούνται στο άνω μέρος του πλαισίου και επάνω στο έμβολο αντίστοιχα και αποτελούν τις βάσεις για την τοποθέτηση πρόσθετου εξοπλισμού.
- Ενδιάμεσες πλάκες φόρτισης: Οι πλάκες αυτές χρησιμεύουν για να μειώσουν το άνοιγμα ανάμεσα στην άνω και κάτω πλάκα, για την περίπτωση δοκιμών μικρού ύψους.
- Σφαιρική κεφαλή έδρασης: Η κεφαλή αυτή στερεώνεται στην άνω πλάκα και έχει σαν σκοπό τη μεταφορά φορτίων ακόμα και σε επιφάνειες που δεν είναι απολύτως κάθετες στον άξονα φόρτισης.



Σχήμα 4.6: Συσκευή φόρτισης MTS-815.

Η παροχή υδραυλικής ενέργειας γίνεται μέσω μιας αντλίας συγκεκριμένου όγκου (μοντέλο 506.02F). Η αντλία αυτή εξασφαλίζει υδραυλική ενέργεια με ροή 24.2 lt/min. Το σύστημα παροχής υδραυλικής ενέργειας μπορεί να λειτουργεί είτε αυτόνομα, είτε απομακρυσμένα μέσω ειδικού συστήματος ελέγχου το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι ενσωματωμένο στη μικρό-κονσόλα ελέγχου του πλαισίου φόρτισης. Υπάρχουν δύο δυνατότητες λειτουργίας: χαμηλής πίεσης (με τυπική πίεση εξόδου 150 psi ή 1,03 MPa) και υψηλής πίεσης (με τυπική πίεση εξόδου 3000 psi ή 20,68 MPa).

Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί την μικροκονσόλα τύπου MTS 458.20 για τη δημιουργία ενός ελέγχου κλειστού βρόγχου στο σερβουδραυλικό σύστημα. Τα επιπρόσθετα στοιχεία του συστήματος περιλαμβάνουν μορφοτροπίες, ενεργοποιητές, σερβοβαλβίδες, παροχή υδραυλικής πίεσης κ.λπ. Περιλαμβάνεται εξάλλου πολυλειτουργική οθόνη για τις ενδείξεις του συστήματος και τη ρύθμιση συνθηκών της δοκιμής. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα σύνδεσης και άλλων συσκευών, όπως παλμογράφου ή Η/Υ.

Συγκεκριμένα για τον προγραμματισμό/ αυτοματοποίηση δοκιμών με έλεγχο δύναμης ή μετατόπισης, χρησιμοποιείται ένα από τα συστήματα επέκτασης της μικρό-κονσόλας, η μικρό-γεννήτρια παλμών (Μ.Π). Πρόκειται για μια συσκευή παραγωγής κυματομορφών, βασισμένη σε μικρό-επεξεργαστή. Η έξοδος πλήρους κλίμακας της Μ.Π είναι $\pm 10\text{Volts}$. Για τον έλεγχο της συσκευής φόρτισης χρησιμοποιούνται δύο ελεγκτές: ο ελεγκτής μετατόπισης (AC controller) τύπου MTS 458.13 και ο ελεγκτής δύναμης (DC controller) τύπου MTS 458.11. Οι ελεγκτές αυτοί είναι συστήματα επέκτασης στη μικρό-κονσόλα και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο καναλιών του σέρβο-υδραυλικού συστήματος δοκιμών (Κακλής, 2003).

Οι λειτουργίες που εκτελούνται από ελεγκτές μετατόπισης/ δύναμης είναι οι εξής:

- Ρύθμιση και επεξεργασία σήματος μορφοτροπέων,
- Επεξεργασία εντολών,
- Ρυθμίσεις σέρβο-βρόγχου,
- Ανίχνευση σφάλματος, δηλαδή ανίχνευση απόκλισης της κατάστασης φόρτισης από την επιθυμητή,
- Ανίχνευση ανώτατου ή κατώτατου ορίου στις καταστάσεις φόρτισης/ μετατόπισης.

Η βαθμονόμηση των ελεγκτών μετατόπισης/ δύναμης γίνεται με ειδικά συστήματα ρύθμισης περιοχής (range cartridges), τα οποία χρησιμοποιούν κάποιο είδος αντιστάθμισης για την αντίστοιχη τιμή εξόδου του κάθε ελεγκτή με την κλίμακα του προσδιοριζόμενου μεγέθους (Κακλής, 2003).

Η μέτρηση του αξονικού φορτίου και της αξονικής μετατόπισης γίνεται μέσω γραμμικών μεταβλητών διαφορικών μορφοτροπέων (Linear Variable Differential Transducer, LVDT), που είναι ενσωματωμένοι στη βάση του εμβόλου φόρτισης από

την κατασκευάστρια εταιρεία. Επίσης, γίνονται δύο επιπλέον εξωτερικές μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών. Η μέτρηση του φορτίου γίνεται με εξωτερικό κελί φόρτισης τύπου V760N504-5BA της εταιρείας Thames Side - Maywood (500kN), ενώ η μέτρηση μετατοπίσεων γίνεται μέσω LVDT 25mm.

Οι καταγραφές γίνονται μέσω Η/Υ που είναι εξοπλισμένος με πρόγραμμα καταγραφής και ελέγχου PCS- 100A της εταιρίας Kyowa, 2 αναλογικές εξωτερικές κάρτες PCD-330B καταγραφής φορτίων και μετατοπίσεων 8 καναλιών και 2 κάρτες ψηφιακών καταγραφών ηλεκτρικών μηχανομετρώων (strain gages) PCD-300A της εταιρίας Kyowa. Και τα τέσσερα ως άνω εξωτερικά καταγραφικά επικοινωνούν με τον Η/Υ μέσω των διαύλων USB.

4.5.2 Εξοπλισμός Ακουστικών Εκπομπών ΑΕ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 8 USB AE Node στα δοκίμια 1.2, 2.2, 2.3 και 3.1 και 2 USB AE Node στα δοκίμια 2.1, 3.2, 4.2, 3.3, 4.3, 5.1, 6.1 και 6.3. Το καταγραφικό σύστημα με 6 αισθητήρες ανήκει στο ΤΕΙ Κρήτης και το καταγραφικό σύστημα με 2 αισθητήρες ανήκει στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων. Το κάθε σύστημα επεξεργασίας συνδέεται με καλώδιο mini USB στον υπολογιστή για να πάρει ρεύμα και να μεταφέρει τα δεδομένα. Στην συνέχεια τοποθετείται ένα λεπτό στρώμα από το υλικό σύζευξης στο δοκίμιο και προσαρμόζονται στο σημείο εκείνο οι αισθητήρες PICO. Η συλλογή των δεδομένων έγινε από δυο καταγραφικά συστήματα ένα για τους 6 αισθητήρες και ένα για τους 2 αισθητήρες. Στο επόμενο κεφάλαιο καθώς και στο παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις καταγραφές των 6 αισθητήρων λόγω ότι παρουσίασαν διαφορές στην καταγραφή με τους άλλους 2 αισθητήρες.

- **Αισθητήρες**

Η διάταξη των αισθητήρων σε κάθε δοκίμιο θα αναλυθεί αργότερα μαζί με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της κάθε δοκιμής. Πριν την έναρξη κάθε δοκιμής πραγματοποιήθηκε καταγραφή της Pencil Lead Break με σκοπό να βαθμονομηθεί η συσκευή παρακολούθησης των ακουστικών εκπομπών. Οι πηγές αυτές αποτελούνται από μύτες μολυβιού 2H πάχους 0,5mm οι οποίες θραύονται σε

κάμψη όντας σε επαφή με άκαμπτη επιφάνεια, ενώ για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιείται ελαστικός δακτύλιος ώστε να μην ακουμπήσει το μεταλλικό μέρος του μολυβιού στο δοκίμιο. Η προσομοίωση των ακουστικών εκπομπών γίνεται με το σπάσιμο της μύτης από γραφίτη η οποία πραγματοποιείται κοντά στους αισθητήρες και το μέσο περίπου του δοκιμίου ενώ ορθή λειτουργία επιτυγχάνεται σε πλάτος 90-100dB. Για μικρότερες τιμές από 85 dB ο αισθητήρας θα πρέπει να τοποθετηθεί καλύτερα στο δοκίμιο.

- Σύζευξη

Ως υλικό σύζευξης (ενδιάμεσο υλικό για την τοποθέτηση των αισθητήρων πάνω στα δοκίμια του μαρμάρου) χρησιμοποιήθηκε θερμαινόμενη σιλικόνη.

- Ρυθμίσεις καταγραφής

Στο λογισμικό AE Win επιλέχθηκαν οι παρακάτω ρυθμίσεις:

- Η τάση κατωφλιού (threshold) επιλέχθηκε στα 42 dB,
- Η ενίσχυση του σήματος στον προενισχυτή ορίστηκε 40 dB,
- Η κατώτερη τιμή του αναλογικού φίλτρου τέθηκε 20 kHz και ανώτερη το 1MHz,
- Ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε 5MSPS (Mega Samples Per Second) που σημαίνει πως το δείγμα των κυματομορφών λαμβάνεται κάθε 1/5 μ s.

Οι χρονικοί παράμετροι καθορίστηκαν ως εξής (Σχήμα 4.7):

- PDT (Peak Definition Time): ο χρόνος μεταξύ 2 διαδοχικών κορυφών του σήματος ορίστηκε 50 μ s.
- HDT (Hit Definition Time): ο μέγιστος χρόνος για την διάρκεια ενός σήματος για την αποφυγή ανακλάσεων του ορίστηκε 200 μ s.
- HLT (Hit Lockout Time): ο χρόνος αναμονής του συστήματος πριν ξεκινήσει καινούρια καταγραφή ορίστηκε 300 μ s.

AE Hardware Setup: AE USB			
<div> <div>AE Channel Setup</div> <div>AE Timing Parameters</div> <div>Data Sets/Parameters</div> <div>Parametric Setup</div> </div>			
AE Channel	PDT	HDT	HLT
	microseconds	microseconds	microseconds
<input checked="" type="checkbox"/> 1	50	200	300
<input checked="" type="checkbox"/> 2	50	200	300
<input type="checkbox"/> 3	200	800	1000
<input type="checkbox"/> 4	200	800	1000

Σχήμα 4.7: Καθορισμός χρονικών παραμέτρων ΑΕ για όλα τα δοκίμια.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα πειραματικής ανάλυσης Βραζιλιανών δίσκων με εγκοπή chevron σε δοκίμια μαρμάρου Νέστου σε συνδυασμό με ΑΕ

5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας των Βραζιλιανών δίσκων με εγκοπή - CCNBD σε συνδυασμό με τις Ακουστικές Εκπομπές. Πραγματοποιήθηκαν 12 δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού, όπου στα 7 δοκίμια η εγκοπή 'chevron' ήταν προσανατολισμένη παράλληλα με τον άξονα φόρτισης και στις υπόλοιπες 5 η εγκοπή CCNBD ήταν προσανατολισμένη στις 45° σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.

Στην ενότητα αυτή θα συζητηθούν τα διαγράμματα των ακουστικών παραμέτρων που προέκυψαν από την επεξεργασία στο πρόγραμμα Excel καθώς επίσης θα σχολιαστεί και η συσχέτιση τους με το φορτίο και το χρόνο. Τα διαγράμματα αυτά φανερώνουν πως εξελίσσεται το φαινόμενο των ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς αυξάνεται σταδιακά η φόρτιση στο δοκίμιο.

Στα δοκίμια παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Επιπλέον παρατηρήθηκε και επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα σε σχέση με τις ακουστικές παραμέτρους. Οπότε κρίθηκε σκόπιμο η παρουσίαση των αποτελεσμάτων δύο δοκιμών, ένα για κάθε προσανατολισμό της εγκοπής chevron και ενδεικτικά των δοκιμών 2.3 και 1.2.

5.2 Άρρηκτα δοκίμια μαρμάρου Κομνηνών Νέστου

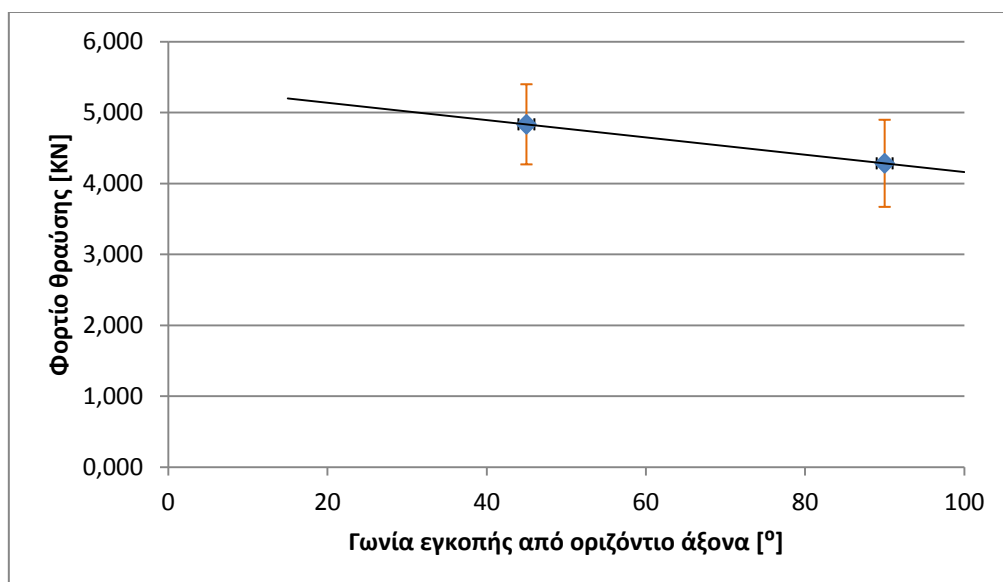
Στον πίνακα 5.1 δίνονται οι διαστάσεις των άρρηκτων δοκιμών Κομνηνού Νέστου και η αντοχή τους σε εφελκυσμό. Τα δοκίμια αυτά έχουν μια μέση αντοχή σε εφελκυσμό της τάξης των 6,50 MPa.

Πίνακας 5.1: Διαστάσεις και αντοχή σε εφελκυσμό άρρηκτων δοκιμών μαρμάρου Κομνηνών Νέστου.

Δοκίμιο	Πάχος B [cm]	Διάμετρος D [cm]	Φορτίο Θραύσης P_{max} [kN]	Αντοχή σε εφελκυσμό σ_t [MPa]
7.1	2,40	5,21	14,75	7,50
7.2	2,52	5,22	17,14	8,30
7.3	2,52	5,22	11,40	5,51
8.1	2,50	5,22	17,65	8,61
8.2	2,56	5,22	11,14	5,31
8.3	2,43	5,23	12,03	6,03
9.1	2,52	5,24	11,98	5,79
9.2	2,43	5,23	10,25	5,15
9.3	2,58	5,22	13,30	6,29
Μέση τιμή			13,29	6,50
Τυπική απόκλιση			2,51	1,23

5.3 Δοκίμια μαρμάρου Κομνηνών Νέστου με εγκοπή CCNBD σε συνδυασμό με τις Ακουστικές Εκπομπές ΑΕ

Στα άρρηκτα δοκίμια μαρμάρου παρατηρήθηκε ένα μέσο φορτίο θραύσης στα 13,29 kN και στο σχήμα 5.1 φαίνεται τόσο η επιρροή της ρωγμάτωσης στο φορτίο θραύσης όσο και η επιρροή που έχει ο προσανατολισμός της εγκοπής σε αυτό.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα φορτίου θραύσης συναρτήσει της γωνίας της εγκοπής από τον οριζόντιο άξονα.

5.3.1 Δοκίμια με εγκοπή chevron παράλληλα στον άξονα φόρτισης

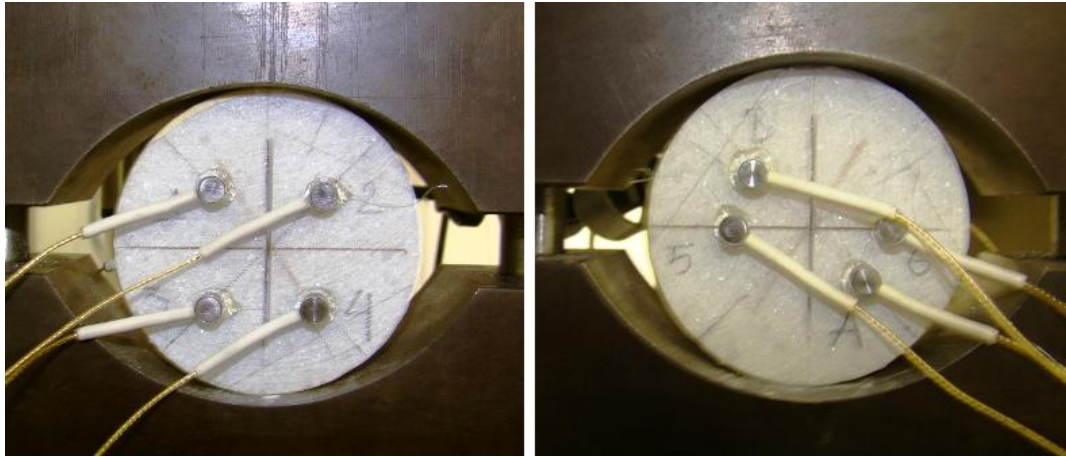
Στον πίνακα 5.2 δίνονται οι διαστάσεις των δοκιμίων, το φορτίο θραύσης που καταγράφηκε κατά την πειραματική διαδικασία και ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων για τα δοκίμια όπου η εγκοπή ήταν προσανατολισμένη παράλληλα με τον άξονα φόρτισης. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο και ο τρόπος που υπολογίζεται ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων (εξισώσεις 4.10 -4.15, πίνακες 4.2-4.4).

Πίνακας 5.2: Διαστάσεις, κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων κατά (ISRM) κατά (Atkinson et al, 1982) των δοκιμίων από μάρμαρο Κομνηνών Νέστου με την εγκοπή chevron παράλληλα στον άξονα φόρτισης.

Δοκίμιο	Πάχος H [cm]	Διάμετρος D [cm]	Μισό μήκος εγκοπής a_0 [-]	Φορτίο Θραύσης P_{max} [KN]	Y'_{min} [-]	(ISRM) K_{IC} [MPa·m ^{1/2}]	NI [-]	(Atkinson et al) K_{IC} [MPa·m ^{1/2}]
2.1	2,100	5,230	0,230	4,35	0,83	0,75	1,39	0,71
2.2	2,075	5,220	0,230	3,63	0,83	0,64		0,60
2.3	2,075	5,220	0,240	4,33	0,83	0,76		0,71
3.2	2,110	5,222	0,300	5,20	0,85	0,92		0,84
3.3	2,080	5,217	0,230	3,72	0,83	0,65		0,61
4.2	2,075	5,217	0,260	4,95	0,84	0,88		0,82
4.3	2,050	5,223	0,300	3,81	0,85	0,69		0,64
Μέση τιμή			0,256	4,28	0,84	0,76		0,70
Τυπική απόκλιση			0,030	0,57	0,01	0,10		0,09

Δοκίμιο 2.3

Το δοκίμιο 2.3 έχει πάχος 2,075 cm και διάμετρο 5,220 cm. Η εγκοπή του δοκιμίου ήταν παράλληλη με τον άξονα της φόρτισης. Στο σχήμα 5.2 παρατηρείται ο προσανατολισμός της εγκοπής σε σχέση με τον άξονα φόρτισης και η τοποθέτηση των αισθητήρων πάνω στο δοκίμιο. Οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε 0° και 45° από τον οριζόντιο άξονα και σε απόσταση το μισό της ακτίνας από το κέντρο του δοκιμίου. Οι δύο πρώτοι αισθητήρες ανήκουν στον εργαστηριακό εξοπλισμό του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης και οι υπόλοιποι έξι στον εργαστηριακό εξοπλισμό του ΤΕΙ Κρήτης.



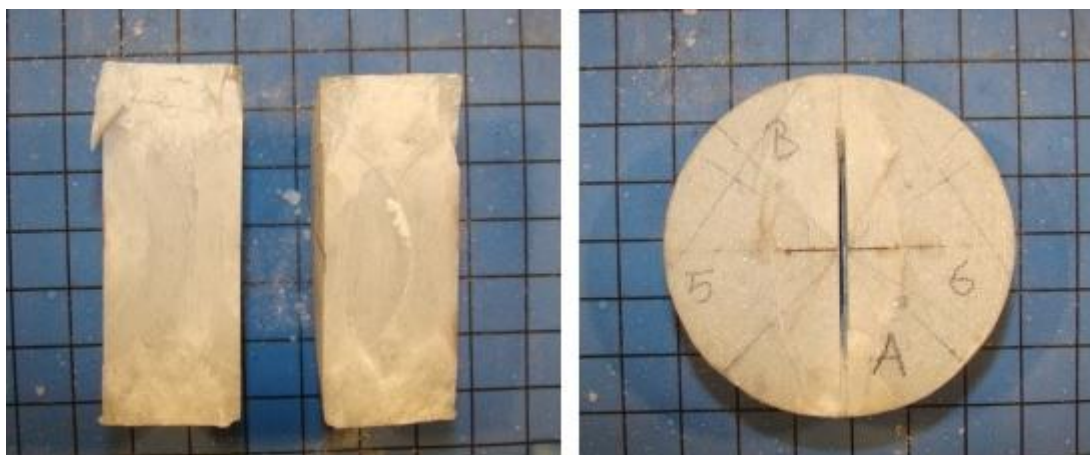
Σχήμα 5.2: Διάταξη αισθητήρων δοκιμίου 2.3 και προσανατολισμός εγκοπής σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.

Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τιμές του κρίσιμου συντελεστή έντασης των τάσεων (δυσθραυστότητα) τόσο η θεωρητική όσο και η πειραματική τιμή της, με μικρή απόκλιση της δεύτερης από την πρώτη.

Πίνακας 5.3: Υπολογισμός θεωρητικής & πειραματικής τιμής δυσθραυστότητας για το δοκίμιο 2.3 με βάση την προσέγγιση της ISRM.

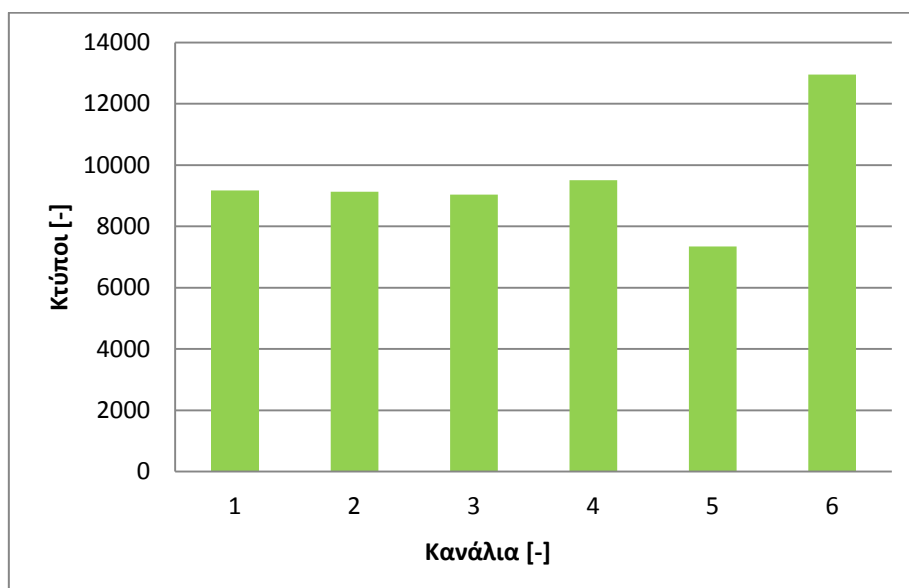
	Θεωρητική	Πειραματική
a_0 [-]	0,264	0,241
u [-]	0,267	0,265
v [-]	1,761	1,760
P_{max} [KN]	4,330	4,330
Y_{min}^* [-]	0,839	0,832
K_{IC} [MPa·m ^{1/2}]	0,766	0,760

Η διαδικασία της φόρτισης μέχρι την θραύση του δοκιμίου διήρκησε 15 sec όπου καταγράφηκε φορτίο θραύσης 4,33 kN όπου παρατηρήθηκε θραύση του δοκιμίου παράλληλα με τον άξονα φόρτισης, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω ότι η διάδοση της ρωγμής είναι τύπου I (Mode I) όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 5.3.

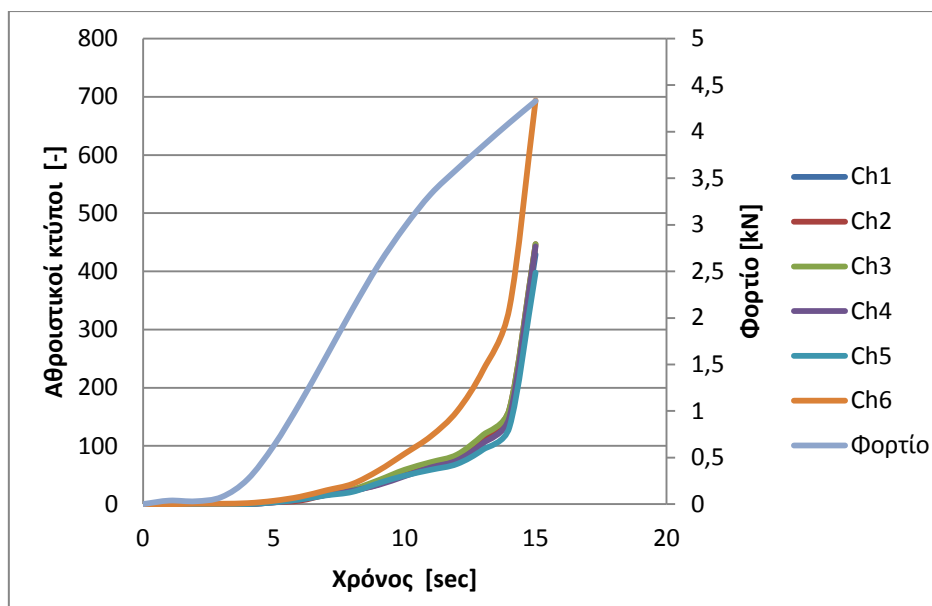


Σχήμα 5.3: Θραύση δοκίμιου 2.3 με την εγκοπή παράλληλα στον άξονα φόρτισης.

Στο σχήμα 5.4 παρατηρείται η καταγραφή των αισθητήρων που είχαν τοποθετηθεί στο δοκίμιο κατά την διάρκεια της φόρτισης. Η καταγραφή των κύπων ξεκίνησε μετά τα 42 dB που είχε οριστεί ως κατώφλι για την αποφυγή καταγραφής θορύβου.



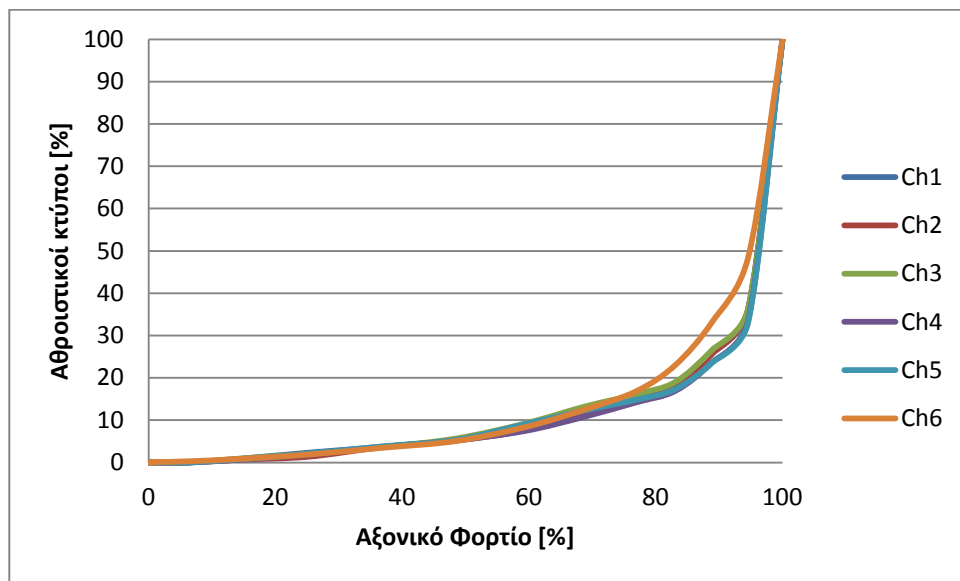
Σχήμα 5.4: Διάγραμμα καταγραφής αισθητήρων σε κύπους για το δοκίμιο 2.3.



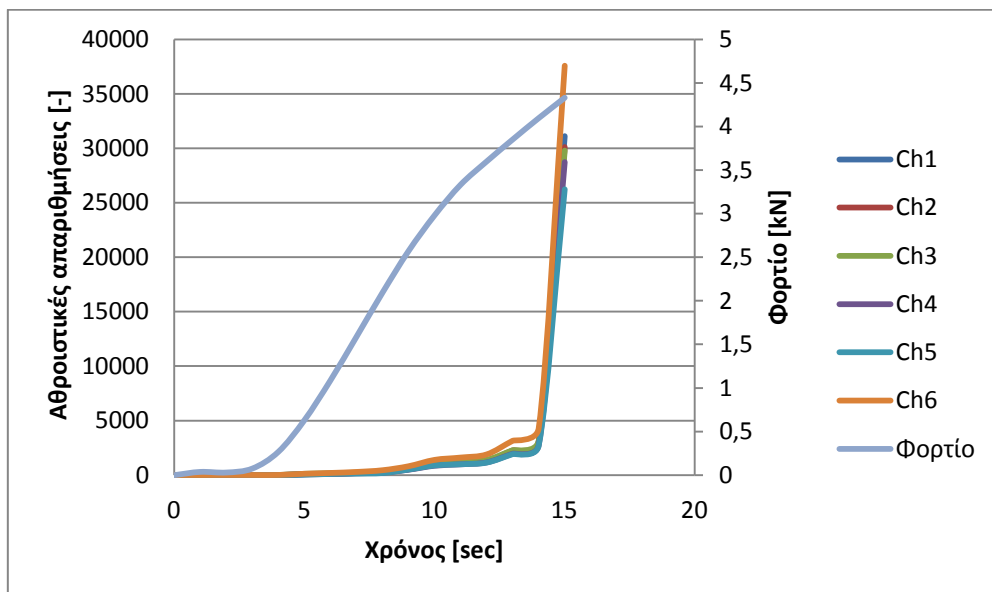
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα φορτίου και καταγραφής αισθητήρων σε αθροιστικούς κύτους συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο 2.3.

Σύμφωνα με το σχήμα 5.5 παρατηρείται η καταγραφή κύπων κατά την διάρκεια της δοκιμής. Όταν το δοκίμιο είναι πολύ κοντά στην αστοχία παρατηρείται μια απότομη αύξηση των κύπων γεγονός που δηλώνει την έντονη (μικρο)ρωγμάτωση του πετρώματος.

Στο σχήμα 5.6 παρατηρείται η ποσοστιαία καταγραφή αθροιστικών κύπων από τους 6 αισθητήρες συναρτήσει του ποσοστιαίου φορτίου. Μετά το 60% του μέγιστου φορτίου παρατηρήθηκε αύξηση των ΑΕ γεγονός που μπορεί να προειδοποιήσει για την επερχόμενη αστοχία του δοκιμίου

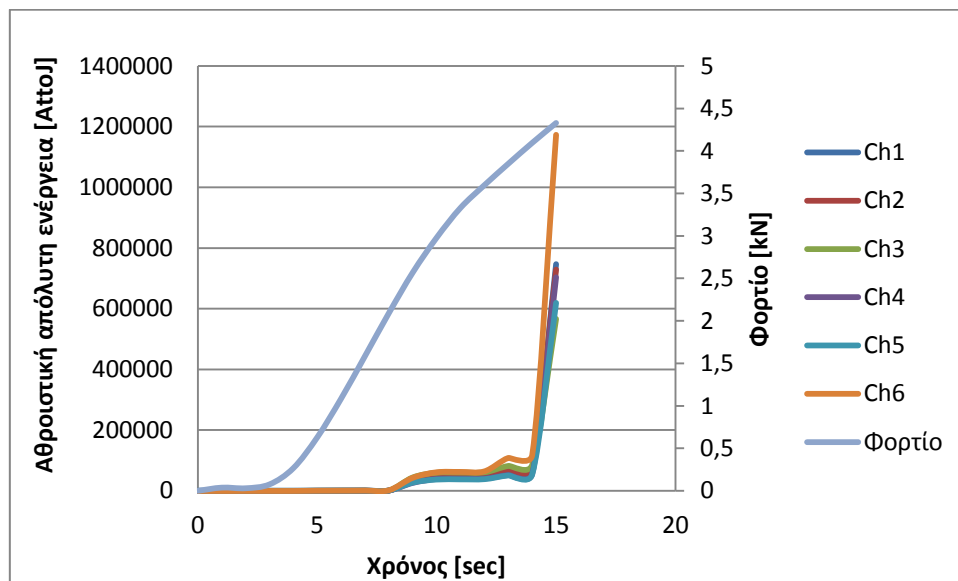


Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ποσοστιαίων αθροιστικών κύκλων συναρτήσει ποσοστιαίου φορτίου για το δοκίμιο 2.3.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα φορτίου και αθροιστικών απαριθμήσεων συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο 2.3.

Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η καταγραφή αθροιστικών απαριθμήσεων κατά την διάρκεια της δοκιμής. Λίγο πριν την αστοχία του δοκιμίου παρατηρείται μια απότομη αύξηση των αθροιστικών απαριθμήσεων κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της διάδοσης της ρωγμής που θα επιφέρει την αστοχία και την παραγωγή περισσότερων γεγονότων ΑΕ.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα φορτίου και αθροιστικής απόλυτης ενέργειας συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο 2.3.

Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η αθροιστική απόλυτη ενέργεια συναρτήσει του φορτίου και του χρόνου όπου περιγράφεται πως εξελίσσεται η ενέργεια των γεγονότων ακουστικής εκπομπής σε σχέση με τη φόρτιση στο δοκίμιο, στη διάρκεια του πειράματος. Η παράμετρος αυτή των ΑΕ αναφέρεται στην ολική ελαστική ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής. Η ενέργεια ΑΕ μετριέται σε AttoJoule που ισούται με 10^{-18} Joule.

Η ενέργεια που καταγράφουν τα κανάλια συμβαδίζει με την επιβολή της δύναμης στο δοκίμιο. Η μεγαλύτερη έκλυση της ενέργειας παρατηρείται τη στιγμή της αστοχίας που έχουν καταγραφεί και τα περισσότερα γεγονότα ΑΕ.

5.3.2 Δοκίμια με εγκοπή chevron στις 45° από τον άξονα φόρτισης

Στον πίνακα 5.4 δίνονται οι διαστάσεις των δοκιμίων, το φορτίο θραύσης που καταγράφηκε κατά την πειραματική διαδικασία και οι κρίσιμοι συντελεστές έντασης των τάσεων για τα δοκίμια όπου η εγκοπή ήταν προσανατολισμένη στις 45° από τον άξονα φόρτισης. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο και ο τρόπος που υπολογίζονται οι συντελεστές αυτοί (εξισώσεις 4.12-4.15 & πίνακες 4.3 και 4.4.).

Πίνακας 5.4: Διαστάσεις και συντελεστής έντασης των τάσεων την στιγμή της θραύσης (Atkinson et al, 1982) των δοκιμίων από μάρμαρο Κομνηνών Νέστου με εγκοπή στις 45° από τον άξονα φόρτισης.

Δοκίμιο	Πάχος B [cm]	Ακτίνα R [cm]	Φορτίο Θραύσης P_{max} [kN]	N_I [-]	N_{II} [-]	K_I στην θραύση [MPa*m ^{1/2}]	K_{II} στην θραύση [MPa*m ^{1/2}]
1.2	2,100	2,616	4,28	-1,78	2,13	-0,90	1,07
3.1	2,025	2,612	4,90			-1,06	1,27
5.1	2,125	2,598	5,55			-1,15	1,38
6.1	2,015	2,611	4,26			-0,93	1,11
6.3	2,100	2,611	5,19			-1,09	1,30
Μέση τιμή			4,83			-1,02	1,22
Τυπική απόκλιση			0,56			0,11	0,13

Δοκίμιο 1.2

Το δοκίμιο 1.2 έχει πάχος 2,10 cm και διάμετρο 5,23 cm. Η εγκοπή του δοκιμίου ήταν στις 45° σε σχέση με τον άξονα της φόρτισης. Στο σχήμα 5.9 παρατηρείται ο προσανατολισμός της εγκοπής σε σχέση με τον άξονα φόρτισης και η τοποθέτηση των αισθητήρων πάνω στο δοκίμιο. Οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε 0° και 90° από τον οριζόντιο άξονα. Οι αισθητήρες 1, 2, 3 και 4 είναι τοποθετημένοι σε απόσταση το μισό της ακτίνας από το κέντρο του δοκιμίου και οι αισθητήρες 5, 6, A και B σε απόσταση (R- 0,5)cm από το κέντρο του δοκιμίου.



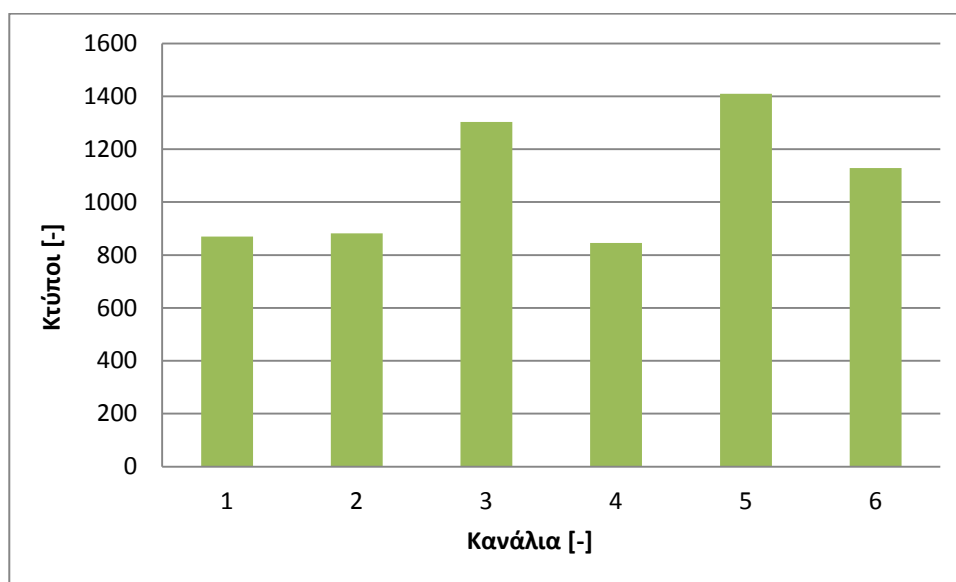
Σχήμα 5.9: Διάταξη αισθητήρων δοκιμίου 1.2 και προσανατολισμός εγκοπής σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.

Η διαδικασία της φόρτισης μέχρι την θραύση του δοκιμίου διήρκησε 11 sec όπου καταγράφηκε μέγιστο φορτίο 4,28 kN όπου παρατηρήθηκε θραύση του δοκιμίου σύμφωνα με το σχήμα 5.10, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω ότι η διάδοση της ρωγμής είναι τύπου I (Mode I) και τύπου II (Mode II).

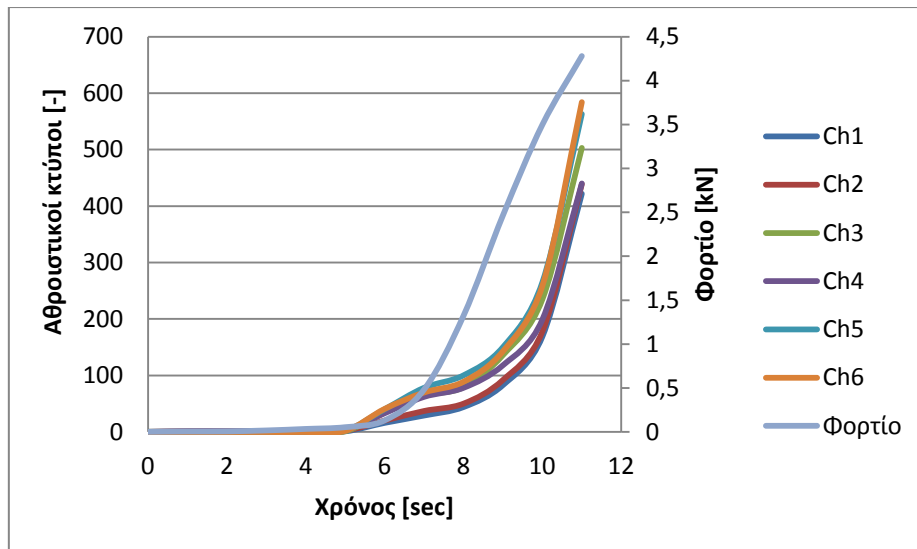


Σχήμα 5.10: Θραύση δοκιμίου 1.2 με την εγκοπή στις 45° από τον άξονα φόρτισης.

Στο σχήμα 5.11 παρατηρείται η καταγραφή των αισθητήρων που είχαν τοποθετηθεί στο δοκίμιο κατά την διάρκεια της φόρτισης. Η καταγραφή των κύπων ξεκίνησε μετά τα 42 dB που είχε οριστεί ως κατώφλι για την αποφυγή καταγραφής θορύβου.



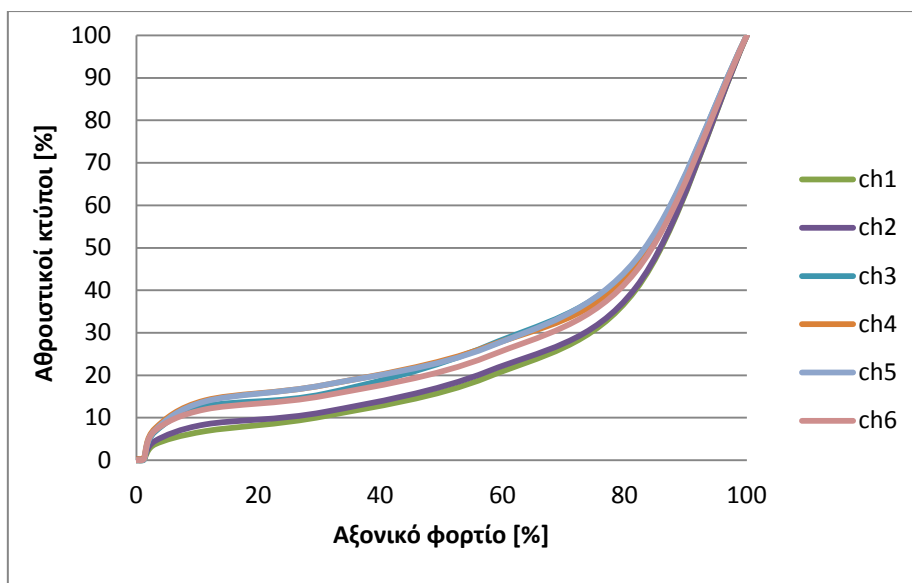
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα καταγραφής αισθητήρων σε κύπους για το δοκίμιο 1.2.



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα φορτίου και καταγραφής αισθητήρων σε αθροιστικούς κτύπους συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο 1.2.

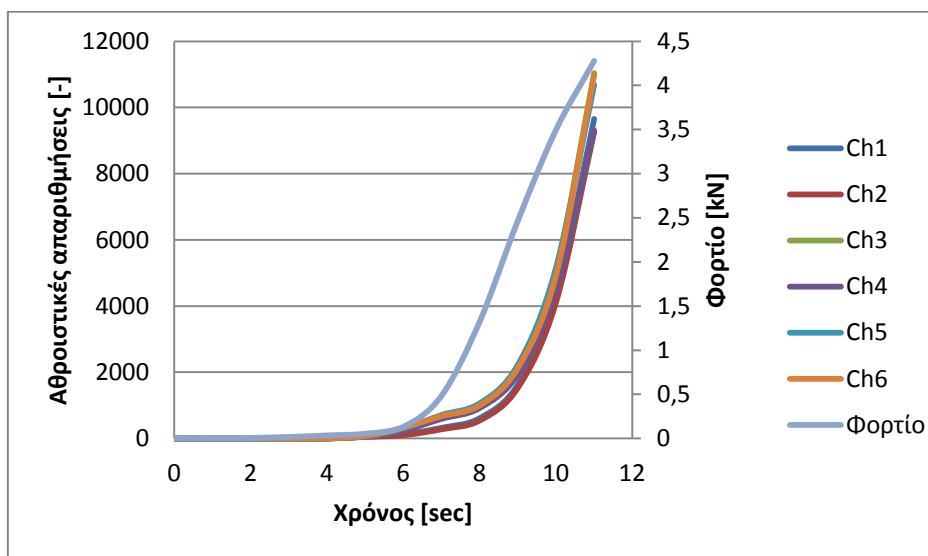
Σύμφωνα με το σχήμα 5.12 παρατηρείται η καταγραφή κτύπων κατά την διάρκεια της δοκιμής. Όταν η φόρτιση πλησιάζει το φορτίο αστοχίας παρατηρείται μια απότομη αύξηση των κτύπων γεγονός που δηλώνει την έντονη (μικρο)ρωγμάτωση του πετρώματος.

Αν συγκριθούν το αντίστοιχο διάγραμμα του δοκιμίου 2.3 (σχήμα 5.5) με αυτά του δοκιμίου 1.2 (σχήμα 5.12) παρατηρείται ότι κατά την επιβολή δύναμης καταγράφηκαν περισσότερα γεγονότα ΑΕ στο πρώτο από ότι στο δεύτερο δοκίμιο που οφείλεται στον προσανατολισμό της εγκοπής σε σχέση με τον άξονα φόρτισης και στον τρόπο διάδοσης της ρωγμής.



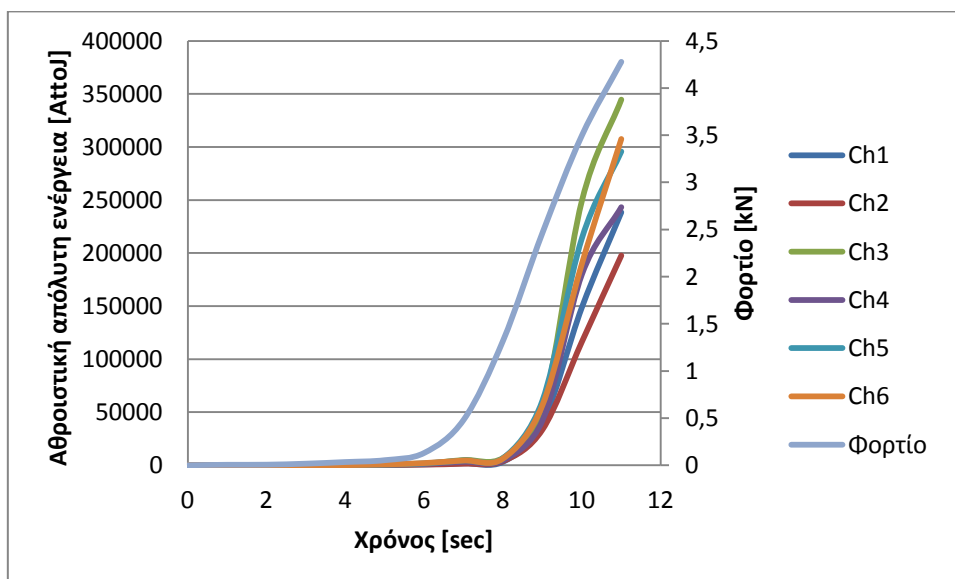
Σχήμα 5.13: Διάγραμμα ποσοστιαίων αθροιστικών κτύπων συναρτήσει ποσοστιαίου φορτίου για το δοκίμιο 1.2.

Στο σχήμα 5.13 παρατηρείται η ποσοστιαία καταγραφή αθροιστικών κτύπων από τους 6 αισθητήρες συναρτήσει του ποσοστιαίου φορτίου. Μετά το 80% του μέγιστου φορτίου παρατηρήθηκε μια απότομη αύξηση των ΑΕ γεγονός που μπορεί να προειδοποιήσει για την επερχόμενη αστοχία του δοκιμίου. Στο δοκίμιο αυτό σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα (σχήμα 5.6) για το δοκίμιο 2.3, όπου η ρωγμή είναι παράλληλα με τον άξονα φόρτισης, παρατηρήθηκε ότι η ποσοστιαία αύξηση των αθροιστικών κτύπων ξεκίνησε νωρίτερα και στο 80% του μέγιστου φορτίου παρατηρήθηκε μεγαλύτερη καταγραφή αθροιστικών κτύπων από ότι στο δοκίμιο 2.3.



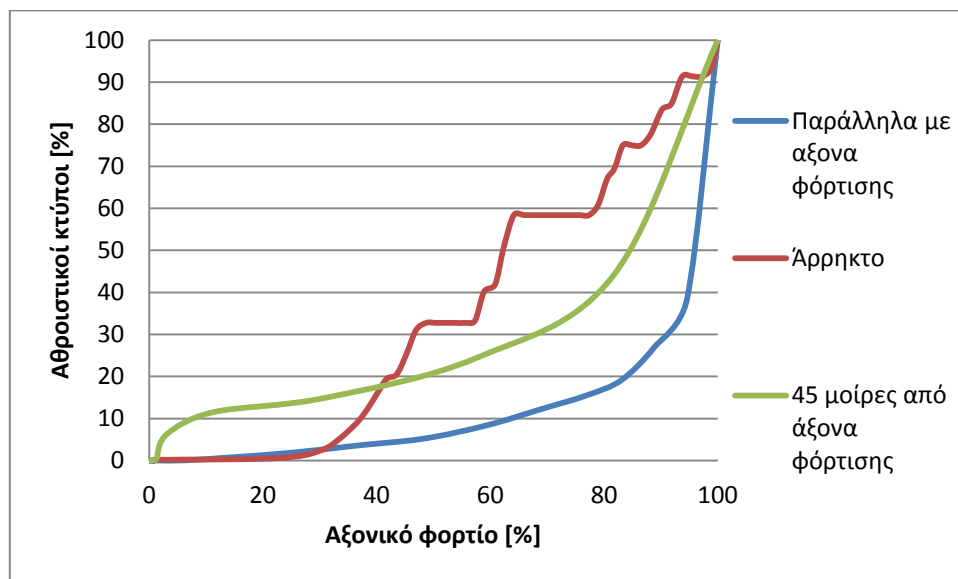
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα φορτίου και αθροιστικών απαριθμήσεων συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο 1.2.

Στο σχήμα 5.14 παρατηρείται η καταγραφή αθροιστικών απαριθμήσεων κατά την διάρκεια της δοκιμής. Λίγο πριν την αστοχία του δοκιμίου παρατηρείται μια απότομη αύξηση των αθροιστικών απαριθμήσεων κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της διάδοσης της ρωγμής που θα επιφέρει την αστοχία και την παραγωγή περισσότερων γεγονότων ΑΕ.



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα φορτίου και αθροιστικής απόλυτης ενέργειας συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο 1.2.

Στο σχήμα 5.15 παρατηρείται η αθροιστική απόλυτη ενέργεια συναρτήσει του φορτίου και του χρόνου. Στο σχήμα αυτό περιγράφεται πως εξελίσσεται η ενέργεια των γεγονότων ακουστικής εκπομπής σε σχέση με τη φόρτιση στο δοκίμιο, στη διάρκεια του πειράματος. Η ενέργεια που καταγράφουν τα κανάλια συμβαδίζει με την επιβολή της δύναμης στο δοκίμιο. Η μεγαλύτερη έκλυση της ενέργειας παρατηρείται τη στιγμή της αστοχίας που έχουν καταγραφεί και τα περισσότερα γεγονότα ΑΕ.



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ποσοστιαίων αθροιστικών κύπων συναρτήσει ποσοστιαίου φορτίου για άρρηκτο δοκίμιο και για δοκίμια με εγκοπή προσανατολισμένη παράλληλα και στις 45° από τον άξονα φόρτισης.

Στο σχήμα 5.16 απεικονίζεται η καταγραφή των ποσοστιαίων αθροιστικών κύπων συναρτήσει του ποσοστιαίου αξονικού φορτίου για άρρηκτο δοκίμιο και για δοκίμια με εγκοπή CCNBD προσανατολισμένη παράλληλα και στις 45° από τον άξονα φόρτισης αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη καταγραφή αθροιστικών κύπων σε σχέση με το φορτίο παρατηρήθηκε στο άρρηκτο δοκίμιο και στα προωγματοωμένα σε εκείνο όπου η εγκοπή είχε προσανατολιστεί στις 45°. Για το άρρηκτο δοκίμιο παρατηρείται μια απότομη αύξηση των αθροιστικών κύπων στο 40% του μέγιστου φορτίου και γενικότερα παρουσιάζει απότομες αυξήσεις σε σχέση με τα προωγματοωμένα. Για τα δυο προωγματοωμένα δοκίμια, παρατηρείται στο δοκίμιο με την εγκοπή παράλληλα μετά το 30% του μέγιστου φορτίου καταγραφή γεγονότων ΑΕ ενώ με την εγκοπή στις 45° από την αρχή της φόρτισης. Και για τα

δυο δοκίμια παρατηρείται μια απότομη αύξηση των γεγονότων ΑΕ μετά το 80% του μέγιστου φορτίου.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα-Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας διαμορφώθηκαν δοκίμια από μάρμαρο Κοιμηνηών Νέστου, στα οποία κατασκευάστηκε εγκοπή τύπου CCNBD σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ISRM και διεξήχθησαν πειράματα αντιδιαμετρικής θλίψης για την διερεύνηση απόκρισης ακουστικών εκπομπών στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Σκοπός των πειραμάτων ήταν να εξετασθεί πως μεταβάλλεται η παραγωγή ακουστικών εκπομπών λόγω δημιουργίας μικρορωγμών στο εσωτερικό των δοκιμίων καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο. Από τα διαγράμματα που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα προκύπτουν τα εξής:

- Τα γεγονότα των ακουστικών εκπομπών αυξάνονται καθώς αυξάνεται η φόρτιση των δοκιμίων. Την στιγμή της θραύσης του δοκιμίου παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση των σημάτων ΑΕ (Hits, Counts κ.ά.).
- Παρόμοια συμπεριφορά επιδεικνύουν όλες οι παράμετροι των ΑΕ (πλάτος, χρόνος ανύψωσης, ενέργεια, απόλυτη ενέργεια κ.τ.λ) οι τιμές των οποίων επηρεάζονται από την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου στο δοκίμιο και την στιγμή της αστοχίας παρατηρείται χαρακτηριστική αύξηση των τιμών των παραμέτρων. Παρατηρήθηκε ότι μετά το 80% του φορτίου θραύσης υπήρξε σημαντική αύξηση των αθροιστικών κτύπων, γεγονός που μπορεί να συμβάλλει πιθανόν στην δημιουργία ενός δείκτη επερχόμενης αστοχίας.
- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ΑΕ ήταν αναμενόμενα επειδή η δημιουργία ακουστικών εκπομπών προκαλείται με την έναρξη και διάδοση των μικρορωγμών στη δομή του, φαινόμενο που οφείλεται στην φόρτιση του πετρώματος.
- Η διάταξη των αισθητήρων στα δοκίμια επηρεάζει την ανίχνευση-καταγραφή των ακουστικών σημάτων. Τα ακουστικά σήματα που δημιουργούνται παρόλο που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις υπάρχει περίπτωση να

μην ανιχνεύονται από όλους τους αισθητήρες και αυτό οφείλεται στην απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και της πηγής του ακουστικού σήματος. Για το λόγο αυτό οι τιμές των ΑΕ που προήλθαν από τους αισθητήρες εμφανίζουν μικρές διαφορές. Επίσης στην συγκεκριμένη δοκιμή η ένταση των καταγραφόμενων σημάτων είναι πιθανόν να εξαρτάται όχι μόνο από την θέση των αισθητήρων αλλά και από την γεωμετρία του δοκιμίου.

- Στα δύο δοκίμια όπου η εγκοπή ήταν προσανατολισμένη παράλληλα και στις 45° από τον άξονα φόρτισης παρατηρήθηκε μικρή διαφορά στην καταγραφή αθροιστικών κτύπων όμως όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που αναλύθηκαν έχουν μεγάλες διαφορές, με τις μεγαλύτερες τιμές να καταγράφονται στην πρώτη περίπτωση. Στο δοκίμιο όπου η εγκοπή ήταν παράλληλα με τον άξονα φόρτισης οι κτύποι είχαν μεγαλύτερη διάρκεια επομένως περισσότερες απαριθμήσεις άρα και μεγαλύτερες καταγραφές στην ενέργεια. Αυτό οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο διάδοσης της ρωγμής.
- Το φορτίο θραύσης επηρεάζεται από τον προσανατολισμό της εγκοπής σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.
- Στο δοκίμιο όπου η εγκοπή ήταν παράλληλα με τον άξονα φόρτισης η φόρτιση είναι τύπου I.
- Στο δοκίμιο όπου η εγκοπή ήταν στις 45° από τον άξονα φόρτισης η φόρτιση είναι μίξη τύπου I-II.
- Όταν η εγκοπή 'chevron' είναι παράλληλα με τον άξονα φόρτισης τότε μπορεί να υπολογιστεί ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων K_{IC} με δύο μεθόδους οι οποίες δίνουν παραπλήσιο αποτέλεσμα όπως φαίνεται παρακάτω:
 - από την μεθοδολογία κατά (ISRM) $K_{IC} = 0,76 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
 - σύμφωνα με τις σχέσεις κατά Atkinson et al (1982) $K_{IC} = 0,70 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
- Όταν η εγκοπή 'chevron' είναι σε γωνία 45° από άξονα φόρτισης τότε σύμφωνα με τις σχέσεις κατά Atkinson et al (1982) μπορούν να υπολογιστούν δύο συντελεστές έντασης των τάσεων χρησιμοποιώντας το μέγιστο φορτίο (κατά την στιγμή της θραύσης). Ο συντελεστής K_I αντιστοιχεί στην θραύση κατά Mode I και ο συντελεστής K_{II} αντιστοιχεί στην θραύση κατά Mode II

- Ο συντελεστής έντασης των τάσεων $K_I = -1,02 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (που σημαίνει ότι η αιχμή της ρωγμής καταπονείται θλιπτικά)
- Ο συντελεστής έντασης των τάσεων $K_{II} = 1,22 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

6.2 Προτάσεις

Για την βελτίωση της παρούσας εργασίας αλλά και την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου των ακουστικών εκπομπών προτείνεται να γίνουν τα ακόλουθα:

- Να ελέγχεται η απόκριση των αισθητήρων κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτισης σε τακτά διαστήματα ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των μετρήσεων.
- Να γίνει προσδιορισμός της θέσης πηγής των ακουστικών εκπομπών με βάση τις θέσεις των αισθητήρων και με την ανάπτυξη αντίστοιχης μεθοδολογίας για γεωμετρία κυκλικού δοκιμίου και οπή εντός του μέσου (location).
- Να γίνει ανάλυση των χρόνων ανάμεσα από τις ακουστικές εκπομπές (inter-event times).
- Να πραγματοποιηθεί συχνοτική ανάλυση των δεδομένων ακουστικών εκπομπών ΑΕ.
- Να πραγματοποιηθεί συσχέτιση των ΑΕ και με άλλες μηχανικές παραμέτρους.
- Να μετρηθούν οι παραμορφώσεις με την χρήση ηλεκτρικών μηκυνσιομέτρων στις επίπεδες επιφάνειες του δοκιμίου και η συσχέτιση τους με τα υπόλοιπα μετρούμενα μεγέθη των πειραμάτων.
- Να πραγματοποιηθούν πειράματα σε περισσότερους προσανατολισμούς της εγκοπής 'chevron' σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

1. Αγιουτάντης Ζ. (2002), "Στοιχεία Γεωμηχανικής και Μηχανική Πετρωμάτων", Εκδόσεις «Ίων», Αθήνα.
2. Δημοπούλου Μ. (2004), Θεωρητική, "Πειραματική και Αριθμητική Διερεύνηση της Αντιδιαμετρικής Φόρτισης Δακτυλίου σε Μάρμαρο Διονύσου", Μεταπτυχιακή Διατριβή, Χανιά.
3. Εξαδάκτυλος Γ., (2006), "Σχεδιασμός Γεωτεχνικών και Λατομικών Έργων", Σημειώσεις Διδασκαλίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
4. Ισάντσο Π.Χ. (2008), "Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς σε κάμψη μαρμάρου Διονύσου", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
5. Κακλής Κ. (2003), "Χαρακτηρισμός ανισοτροπίας και αντοχής των παραμέτρων των πετρωμάτων με τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψεως δίσκου", Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
6. Κακλής Κ., Μαυριγιαννάκης Σ., Αγιουτάντης Ζ., Μπαζδάνης Γ. (2010), "Διερεύνηση μηχανικών ιδιοτήτων μαρμάρου Κομνηνών Νέστου", Τιμητικός Τόμος στη Μνήμη του Καθ. Κωνσταντίνου Καβουρίδη, Εκδόσεις Πολυτεχνείο Κρήτης.
7. Κατσοκογιάννης Π., Νομικός Π.Π. και Σοφιανός Α.Ι. (2007), "Ακουστική Εκπομπή στην μηχανική πετρωμάτων", Ορυκτός Πλούτος, Τεύχος 145/ 2007.
8. Κούρτης Μ. (2013), "Διερεύνηση της συσχέτισης των ακουστικών εκπομπών με φόρτιση και αστοχία ψαθυρών πετρωμάτων", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
9. Κυπριωτάκη Α. (2012). Εργαστηριακές Εφαρμογές Ακουστικής Εκπομπής σε Δοκίμια Άοπλου και Ινοπλισμένου Σκυροδέματος, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
10. Μπακογιάννης Σ. (2011), "Ακουστική εκπομπή κατά την καταπόνηση βωξίτη, Διπλωματική εργασία", Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2011.

11. Σοφιανός Α.Ι. και Νομικός Π.Π. (2008), "Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δ.Π.Μ.Σ / Σ.Κ.Υ.Ε., Οκτώβριος 2008.
12. Τριγγιλίδα Α. (2011), "Μελέτη του κρίσιμου συντελεστή έντασης των τάσεων συναρτήσει του πάχους του δοκιμίου" Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2011.

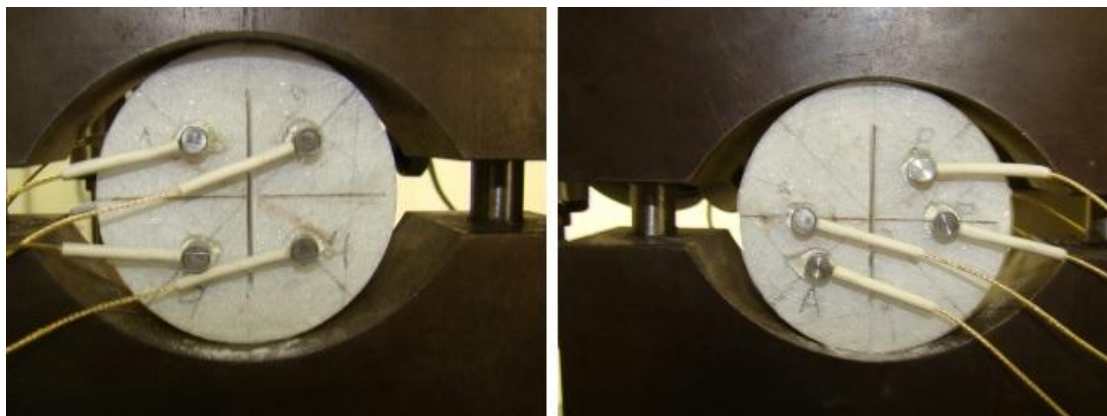
Ξενόγλωσση

1. Addinall E., Hackett P., (1965) "Rock in tension", Colliery Guardian, Jan. Vol.8, pp 53-56.
2. Anderson T.L. (1995), "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications", 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
3. ASTM (2004), "Standard Terminology for Nondestructive Examinations", ASTM Designation: E1316.
4. Atkinson C., Smelser R.E., Sanchez J. (1982), "Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test", International of Fracture, Vol.18, No. 4, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, The Netherlands.
5. Barla G., Innaurato N. (1973), "Indirect Tensile Strength of Anisotropic Rocks", Rock Mechanics, Vol. 5, pp 215-230.
6. Colback PSB (1966), "An analysis of brittle fracture initiation and propagation in the Brazilian test", In: Paper presented at the Proceedings of the first Congress International Society of Rock Mechanics, Lisbon, Portugal.
7. Griffith A.A., (1921), "The phenomenon of rupture and flow in solids", Phil. Trans. R. Soc. London, Series A, pp. 163-198.
8. Griffith A.A., (1924), "Theory of rupture", Proc. 1st Int. Congr. Applied Mech., pp. 55-63.
9. Inglis C.E., (1913), "Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners", Trans. Institute Naval Architects, LV, pp. 219-230.
10. ISRM Commission on Testing Methods (1995), "Suggested method for determining Mode I fracture toughness using cracked Chevron-notched

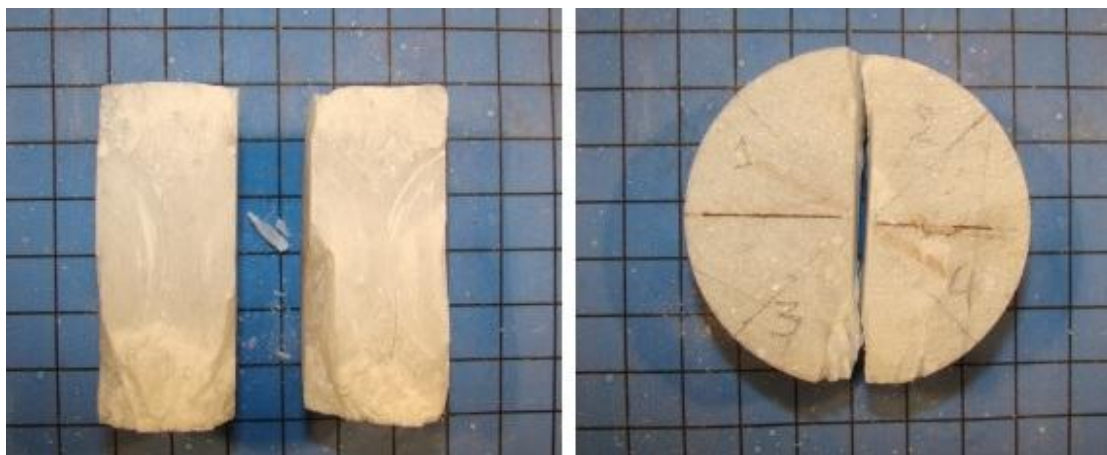
- Brazilian disc (CCNBD) specimens”, R.J. Fowell (coordinator), *Int. J. Rock Mech. And Min. Sci.* 32, 57-64.
11. ISRM, Commission on Application of Geophysics to Rock Engineering, “Suggested method for in-situ stress measurement from a rock core using the Acoustic Emission technique”, 5th Int. Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering, pp 61-66, 2002.
 12. Fairhurst C., (1964), “On the validity of the Brazilian test for brittle materials” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 1, pp 535-546.
 13. Fowell R.J., Xu C. and Dowd P.A. (2006) “An update on the fracture toughness methods related to the cracked Chevron- notched Brazilian disk (CCNBD) specimen” *Pure appl. geophys.* 163, pp. 1047–1057.
 14. Grosse C.U. and Ohtsu M. (2008), “Acoustic Emission Testing, Basics for Research – Applications in Civil Engineering”, Springer, Berlin.
 15. Guo H., Aziz N.I. (1993), “A simple method of measuring rock fracture toughness using the Brazilian test method”, *Proceedings of the 11th International Conference on Ground Control in Mining*, University of Wollongong, NSW, Australia.
 16. Hobbs D.W. (1964), “The Tensile Strength of Rocks”, *Int. J. Rock Mech. Min Sci and Geomech. Abstr.* , 1, pp. 385-396, 1964.
 17. Hondros G. (1959), “The evaluation of Poisson’s ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete”, *Aust. J. Appl. Sci.*, 10, pp 243-264.
 18. McClintock F.A. & Walsh J.B., (1962), “Friction on Griffith cracks in rock under pressure”, *Proc. 4th US Nat. Congr. Appl. Mech.*, Berkeley, pp. 1021-1051.
 19. Mellor M., Hawkes I. (1971), “Measurement of Tensile Strength by Diametral Compression of Discs and Annuli”, *Engineering Geology*, 5, pp. 173-225.
 20. Muskhelishvili N.I., (1963), “Some basic problems of the mathematical theory of elasticity”, Groningen, The Netherlands: P. Noordhoff Ltd.
 21. Obert L. & Duvall W., (1942), “Use of Subaudible Noises for Prediction of Rock Bursts”, Part II, USBM RI 3654.
 22. Wang Q.Z., Jia X.M., Kou S.Q., Zhang Z.X., Lindqvist P.A. (2004), “The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and

- fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41 pp 245-253, 2004.
23. Wells A.A., (1961), "Unstable crack propagation in metals: Cleavage and Fast Fracture", *Proceedings of the crack Propagation Symposium*, Vol.1 Paper 84, Cran field, UK.
24. Whittaker B.N., Singh R.N., Sum G. (1992), *Rock Fracture Mechanics*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands.

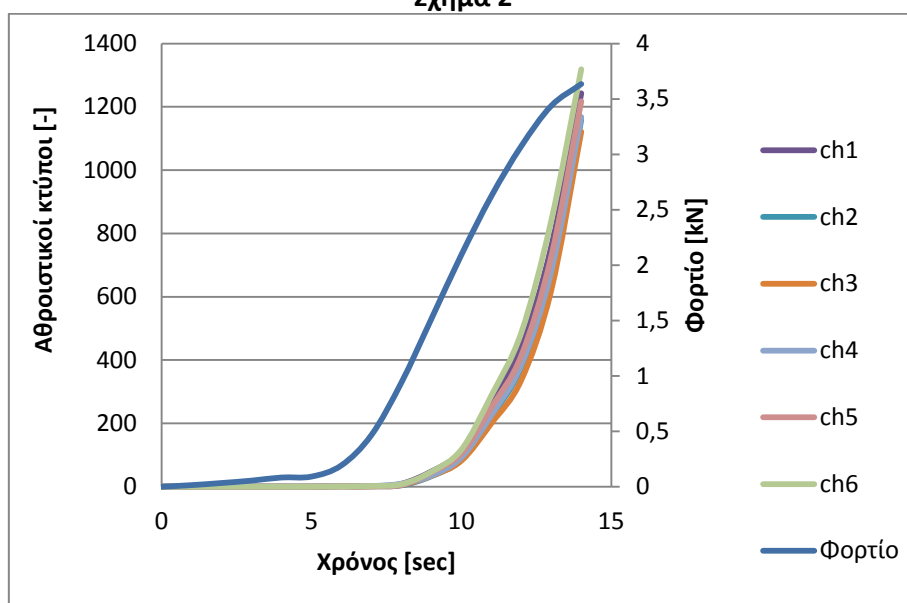
Παράρτημα
Δοκίμιο 2.2



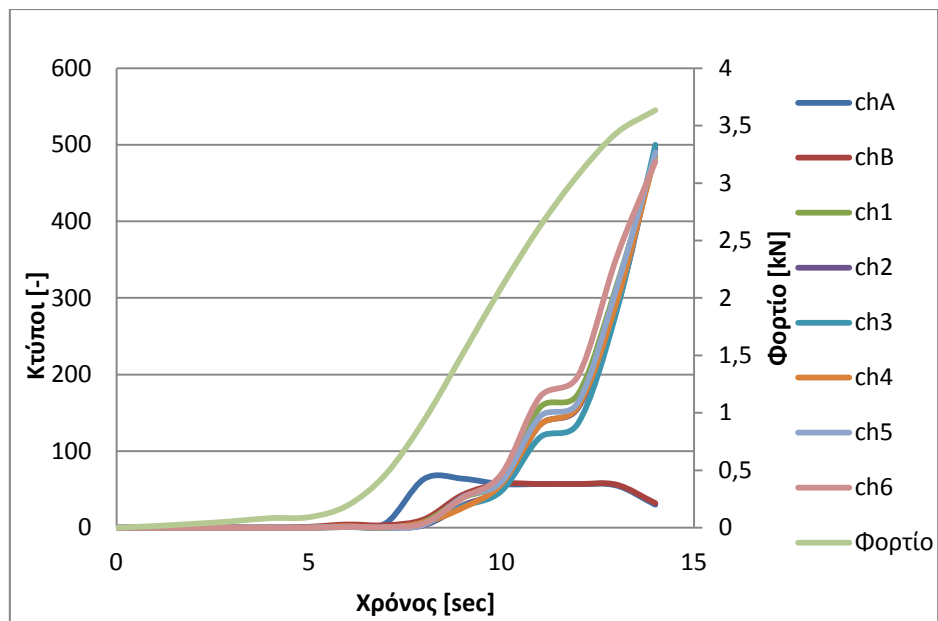
Σχήμα 1



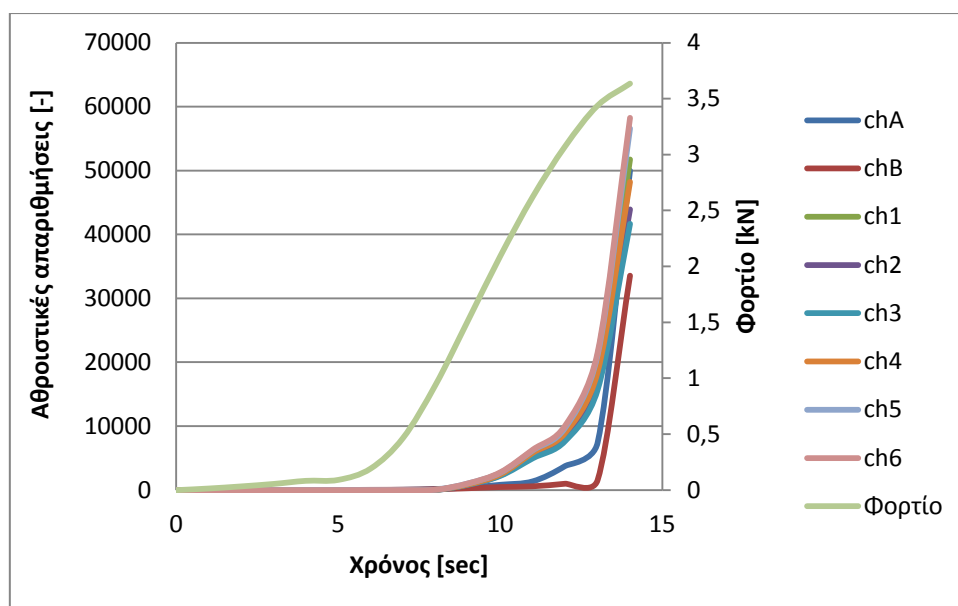
Σχήμα 2



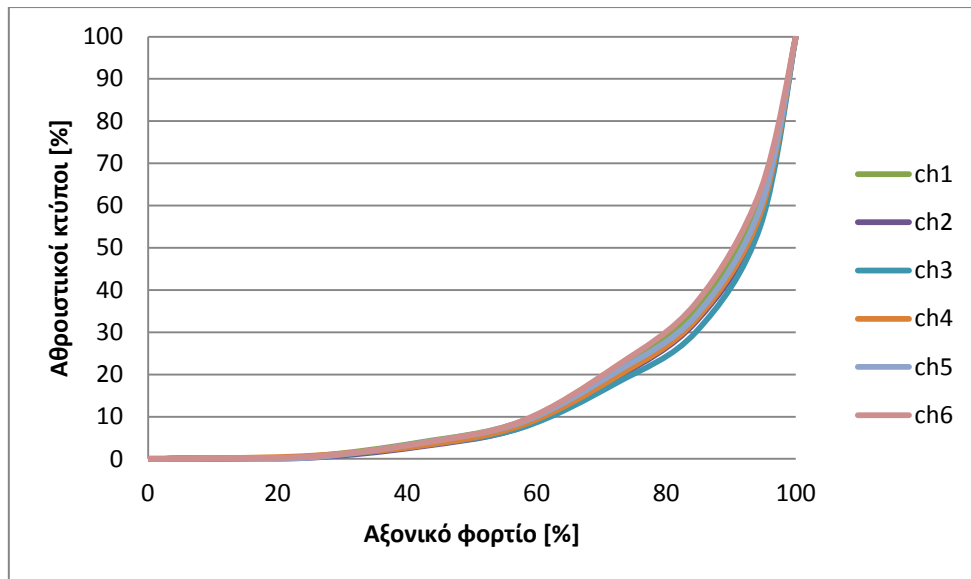
Σχήμα 3



Σχήμα 4

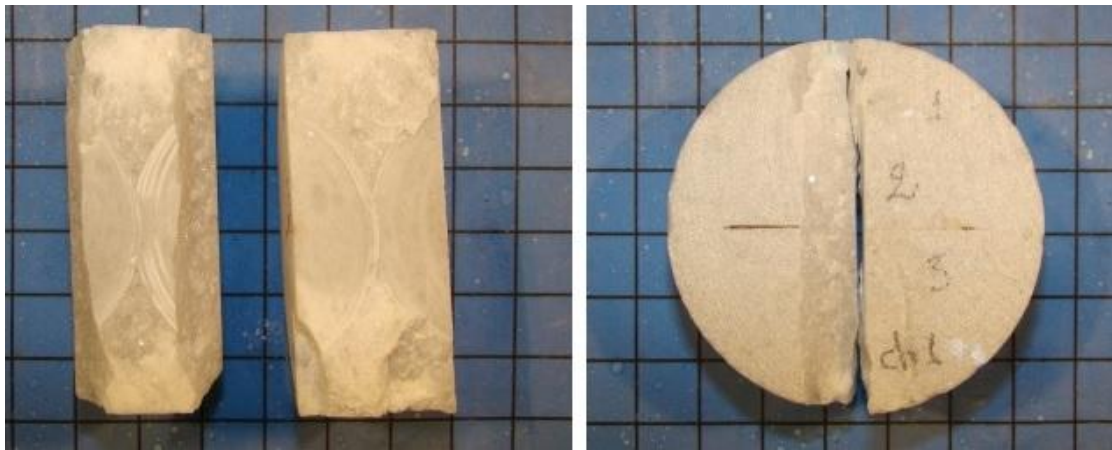


Σχήμα 5



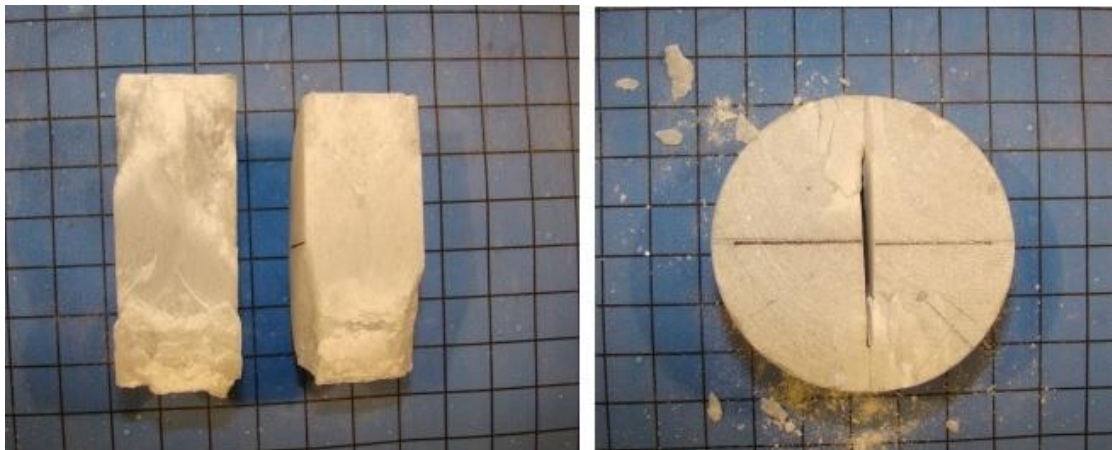
Σχήμα 6

Δοκίμιο 2.1



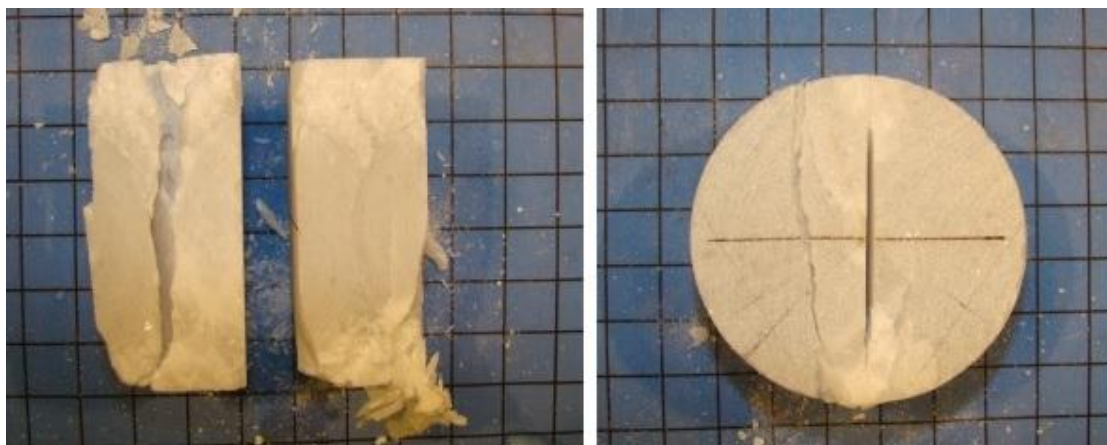
Σχήμα 7

Δοκίμιο 3.2



Σχήμα 8

Δοκίμιο 3.3



Σχήμα 9

Δοκίμιο 4.2



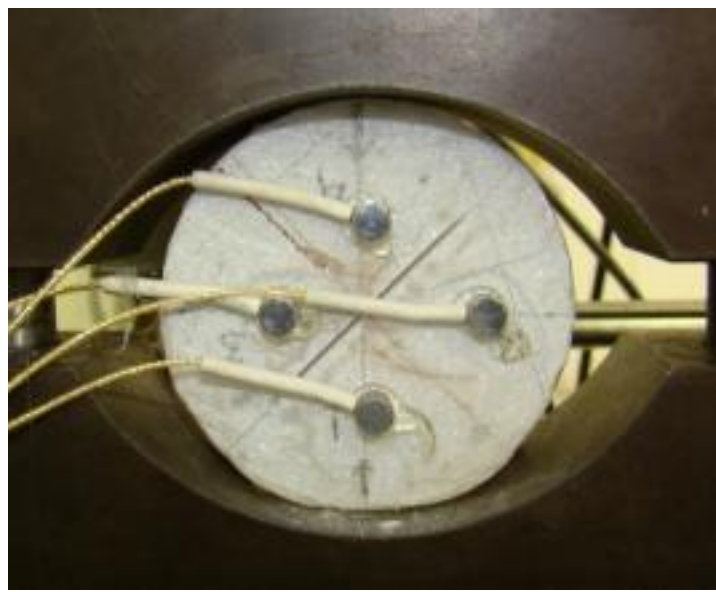
Σχήμα 10

Δοκίμιο 4.3



Σχήμα 11

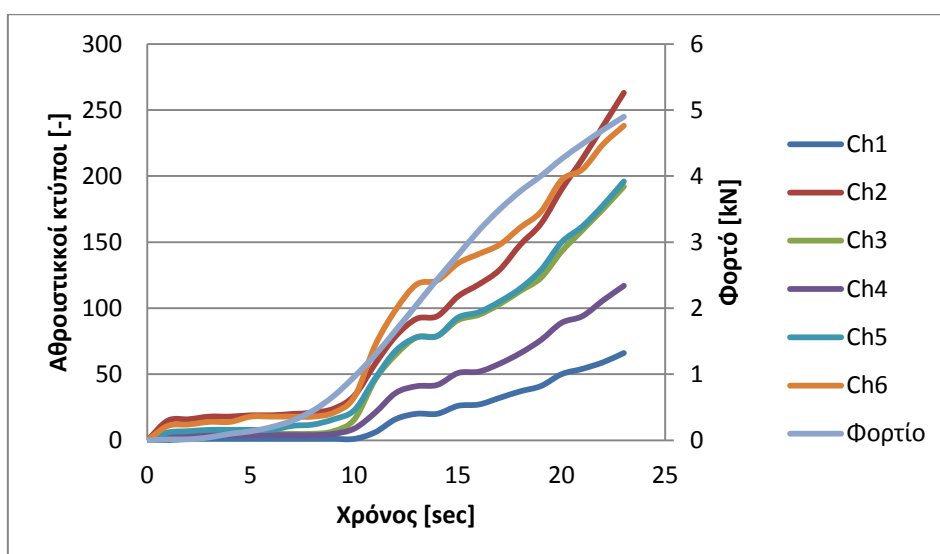
Δοκίμιο 3.1



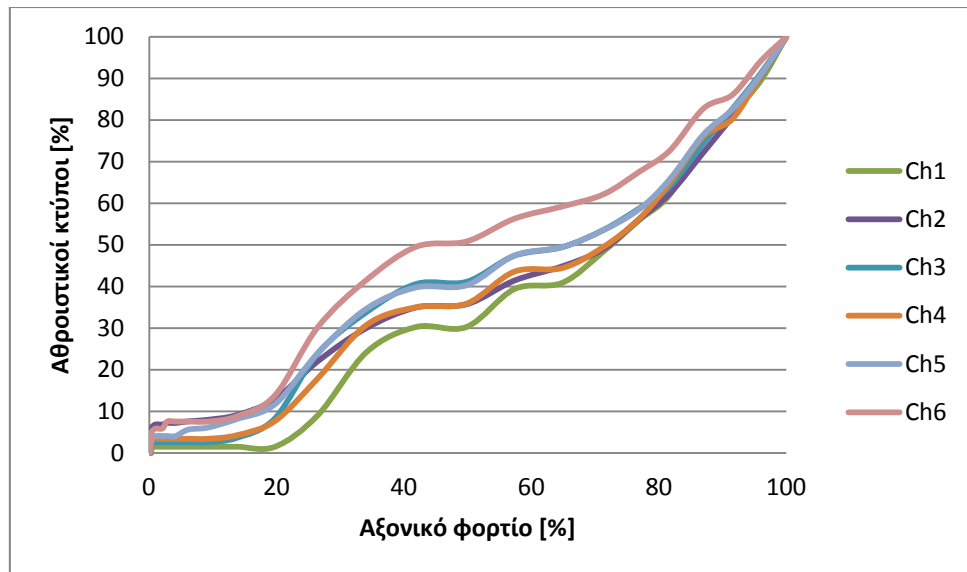
Σχήμα 12



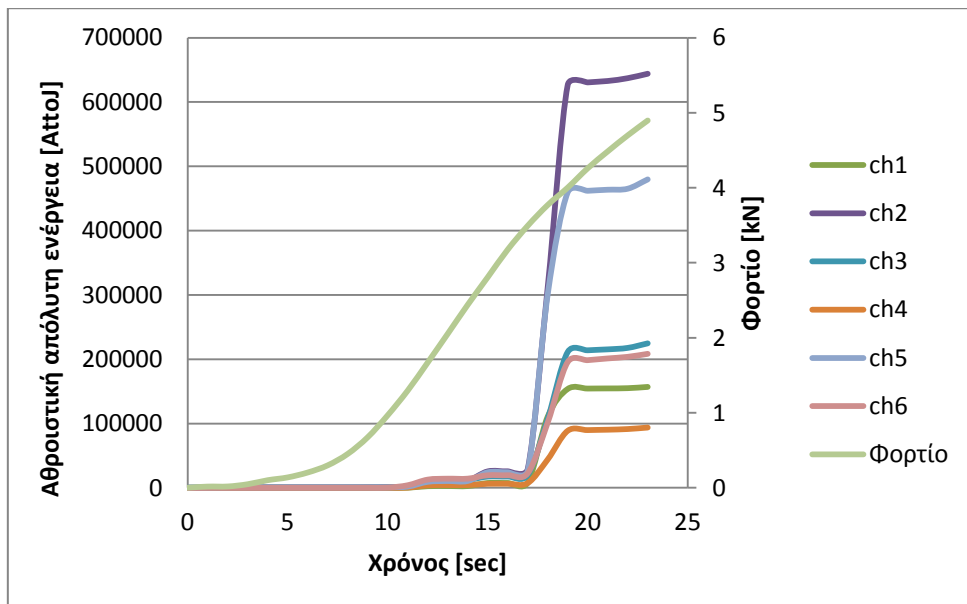
Σχήμα 13



Σχήμα 14

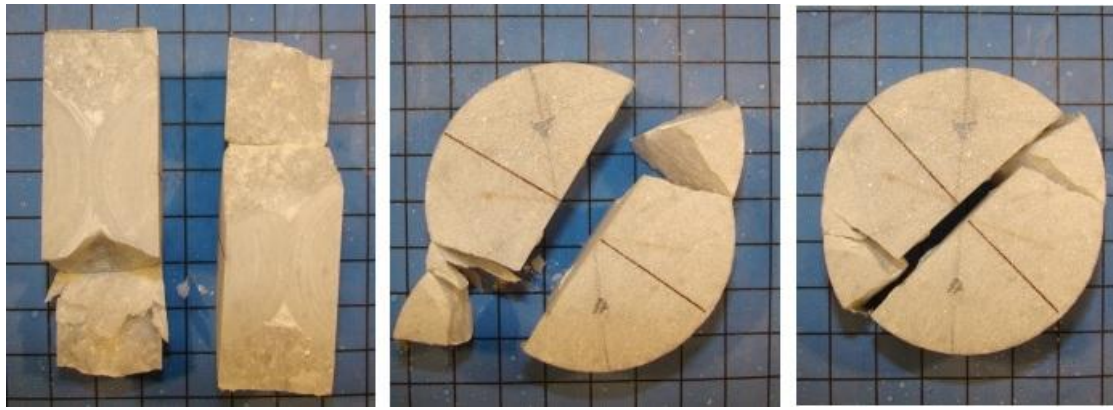


Σχήμα 15



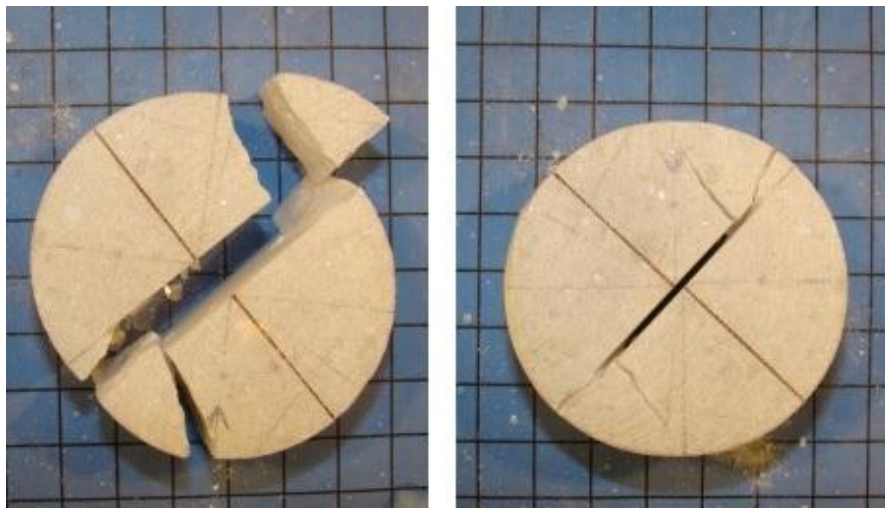
Σχήμα 16

Δοκίμιο 5.1



Σχήμα 17

Δοκίμιο 6.1



Σχήμα 18

Δοκίμιο 6.3



Σχήμα 19