

2015

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

"Γεωτεχνολογία & Περιβάλλον"

*Ανάλυση ακουστικών εκπομπών
κατά τη δοκιμή βραζιλιανού δίσκου
σε δοκίμια μαρμάρου*

Θεοφανοπούλου Άννα



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.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία μπορεί να είναι ατομική διπλωματική εργασία αλλά είναι αποτέλεσμα μιας συλλογικής προσπάθειας. Έτσι φτάνοντας στο τέλος της συγγραφής της θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά ορισμένους που συνέβαλαν στη διεκπεραίωση της.

Πρώτα από όλους τον καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής μου κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου αναθέτοντας μου την εργασία καθώς και για την καθοδήγηση του αλλά και τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του.

Τα υπόλοιπα μέλη της επιτροπής τον καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο και τον καθηγητή του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης κ. Φίλιππο Βαλλιανάτο για τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις τους.

Τον Μηχανικό Μεταλλείων κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο, μέλος του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων, τον επίκουρο καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης κ. Βασίλη Σάλτα και τη μεταπτυχιακή φοιτήτρια Κουμουδέλη Θεοδώρα για την μεγάλη και πολύτιμη βοήθειά τους σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την υλική και ηθική στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια καθώς σε όλους τους φίλους μου που στάθηκαν στο πλευρό μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της αστοχίας κυλινδρικών δοκιμίων σε δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού Brazil). Το υλικό των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκε είναι μάρμαρο που προέρχεται από το λατομείο Κομνηνών Νέστου.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής διαμορφώθηκαν δοκίμια και έγιναν πειράματα έμμεσου εφελκυσμού με σύγχρονη καταγραφή ακουστικών εκπομπών σε οκτώ κανάλια στο εργαστήριο της Μηχανικής Πετρωμάτων της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης σε συνεργασία με το εργαστήριο Γεωφυσικής και Σεισμολογίας του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης.

Παρουσιάζονται αποτελέσματα συσχέτισης των καταγεγραμμένων ακουστικών εκπομπών με το φορτίο που δέχονται τα δοκίμια κατά τη Βραζιλιανή δοκιμή και αναλύεται και διερευνάται διεξοδικά η επίδραση της μικρορωγμάτωσης του υλικού πριν από την αστοχία σε σχέση με τις αυτές.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- Χαρακτηριστικά του μαρμάρου	9
1.1 Γενικά.....	9
1.2 Γένεση.....	10
1.3 Φυσικά χαρακτηριστικά	11
1.4 Μάρμαρο Κομνηνών Νέστου	13
1.5 Παρασκευή δοκιμών	14
1.6 Προδιαγραφές δοκιμών	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazil)	18
2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Σκοπός δοκιμής	19
2.3 Δοκιμή έμμεσου προσδιορισμού αντοχής σε εφελκυσμό (βραζιλιανή δοκιμή)	19
2.4 Εξοπλισμός	23
2.5 Προετοιμασία δοκιμών	23
2.6 Δοκίμια	24
2.7 Μηχανισμός αστοχίας.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ	28
3.1 Περί ηχητικών κυμάτων	28
3.2 Εισαγωγή-Θεωρία ακουστικής εκπομπής.....	31
3.3 Ορισμός	32
3.4 Σήματα ΑΕ.....	33
3.5 Παράμετροι γεγονότων Ακουστικής Εκπομπής	35
3.6 Παράγοντες επιρροής λήψης σήματος Ακουστικής Εκπομπής	39
3.7 Εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ.....	39
3.8 Εξοπλισμός Ακουστικών Εκπομπών	40
3.8.1 Αισθητήρες και προενισχυτές	40
3.8.2 Μονάδα επεξεργασίας.....	43
3.8.3 Λογισμικό Επεξεργασίας	44
3.9 Τυπικές εφαρμογές ακουστικής εκπομπής.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΟΚΙΜΕΣ	47
4.1 Μέτρηση ακουστικής εκπομπής	47

4.2	Ρυθμίσεις καταγραφής Ακουστικής εκπομπής.....	49
4.3	Pencil Lead Break (PLB)	52
4.4	Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμής αντιδιαμετρικής φόρτισης (Brazil).....	54
4.5	Αποτελέσματα μέτρησης ακουστικής εκπομπής.....	62
4.6	Συζήτηση αποτελεσμάτων	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Συμπεράσματα και προτάσεις		103
5.1	Συμπεράσματα	103
5.2	Προτάσεις.....	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Βιβλιογραφία.....		106
6.1	Ελληνική βιβλιογραφία	106
6.2	Ξένη βιβλιογραφία	107
6.3	Ιστοσελίδες.....	108
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά το σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου σε βραχώδεις σχηματισμούς δίνεται έμφαση όχι μόνο στον υπολογισμό των επιβαλλόμενων τάσεων αλλά και στις δυνάμεις που θα προκύψουν από την ανακατανομή των αρχικών τάσεων. Επιπλέον, η βραχομάζα παρουσιάζει πολλούς και διαφορετικούς τρόπους αστοχίας και για το λόγο αυτό ο καθορισμός της αντοχής της απαιτεί όχι μόνο μετρήσεις αλλά και κριτική σκέψη.

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 μπορεί να εκτιμήσει με ποιο τρόπο το πέτρωμα ή η βραχομάζα, ή το σύνολο βραχομάζας και επιδομής (φράγμα, οικοδομή), δηλαδή η αλληλεπίδραση των στοιχείων του συνόλου της κατασκευής, μπορεί να φτάσει στην αστοχία.

Η αντοχή σε εφελκυσμό των πετρωμάτων είναι μια παράμετρος που σχετίζεται έντονα με πολλές από τις μηχανικές τους εφαρμογές (μηχανική συμπεριφορά των ορυκτών, διάτρηση και ανατίναξη των πετρωμάτων, στην αστοχία των πετρωμάτων σε υπόγειες και επιφανειακές εργασίες, όπως επίσης και στις κατασκευές).

Το φαινόμενο της ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη μηχανική πετρωμάτων για τη μελέτη της θεμελιώδους συμπεριφοράς και της αστοχίας των ψαθυρών πετρωμάτων υπό μηχανική καταπόνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- Χαρακτηριστικά του μαρμάρου

1.1 Γενικά

Η προέλευση της λέξης μάρμαρο είναι αρχαιοελληνική. Κατά τους ομηρικούς χρόνους η λέξη μάρμαρος σήμαινε πέτρα. Η αρχαία ελληνική λέξη «μαρμέρω» σημαίνει γυαλίζω την πέτρα. Στην ελληνική και τη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για τη λέξη μάρμαρο ανάλογα με τον τομέα στον οποίο χρησιμοποιείται, χωρίς όμως να αναιρεί ο ένας 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 στιλβωθεί. Για παράδειγμα στην τέχνη των μαρμαρογλυπτών ή των οικοδόμων με τον όρο «μάρμαρο» ονομάζεται κάθε πέτρωμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη γλυπτική, για την κατασκευή έργων τέχνης, στην εσωτερική ή εξωτερική διακόσμηση κτιρίων. Μάρμαρα μπορούν να θεωρηθούν ο ασβεστόλιθος (που επιδεικνύει μικρή κρυσταλλική δομή), ο όνυχας, ο σερπεντίνης και ο τραβερτίνης. Παρόλο που ασβεστόλιθος έχει την ίδια χημική σύσταση με το μάρμαρο διαφέρει στο ότι τα σωματίδια ανθρακικού ασβεστίου ή ανθρακικού μαγνησίου είναι κοκκώδη σε αντίθεση με το μάρμαρο στο οποίο είναι κρυσταλλικά. Οι ασβεστόλιθοι με κάποιο ποσοστό κρυσταλλικής δομής μπορούν να πουληθούν ως μάρμαρα με πολύ καλή στίλβωση.
- ✓ **Εμπορικά**, η λέξη μάρμαρο αναφέρεται σε κάθε πέτρωμα που μπορεί να πουληθεί σε όγκους και πλάκες. Ο ορισμός αυτός συμπεριλαμβάνει τους γρανίτες, τους σχιστόλιθους κ.ά.
- ✓ **Σύμφωνα με την Αμερικάνική Επιτροπή Δοκιμών Υλικών** (American Society of Testing Materials) **ASTM** (C 119) ο ορισμός του μαρμάρου είναι: ανθρακικό πέτρωμα που διακρίνεται από τη κρυσταλλική δομή του εξαιτίας ανακρυστάλλωσης, συνήθως από θέρμανση ή πίεση κατά τη διάρκεια μεταμόρφωσης, το οποίο συνίσταται κυρίως από ανθρακικά ορυκτά, ασβεστίτη ή δολομίτη, αποκλειστικά ή σε συνδυασμό (Εξαδάκτυλος 2006).

Στην Ελλάδα, υπάρχει πληθώρα εμφανίσεων μαρμάρου από τα οποία τα περισσότερα είναι πολύ καλής ποιότητας. Το σημαντικότερο κέντρο εξόρυξης, κοπής και κατεργασίας μαρμάρου βρίσκεται στην περιοχή της Δράμας-Καβάλας-Θάσου, όπου εξορύσσονται περισσότερα από 200.000 m³, τα οποία σε ένα μεγάλο ποσοστό κατεργάζονται σε εργοστάσια της περιοχής. Άλλα σημαντικά κέντρα εξόρυξης είναι η περιοχή της Αττικής (Πεντέλη, κ.α), όπου η εκμετάλλευση πριν από τους απαγορευτικούς νόμους για το περιβάλλον, έφτανε τα 50.000 m³. Επίσης, στις περιοχές Βόλου-Πηλίου, Κοζάνης-Βέροιας, Ιωαννίνων, Αργολίδας, Πάρου, και Νάξου υπάρχουν σημαντικά και αξιολόγα κοιτάσματα μαρμάρου.

1.2 Γένεση

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 ασβεστόλιθων ή δολομιτών. Πολλές ποικιλίες μαρμάρων έχουν δημιουργηθεί από μία διπλής δράσης μεταμόρφωση, δηλαδή πρώτα κατατεμαχίζονται από δυναμικές δράσεις και έπειτα ανασυγκολλούνται με απόθεση ανθρακικού ασβεστίου μέσα στις ρωγμές.

Οι ασβεστόλιθοι προκύπτουν από διαγένεση ασβεστολιθικών ιζημάτων. Τα ασβεστολιθικά ιζήματα προκύπτουν από συσσώρευση σκελετικών υπολειμμάτων διαφόρων απολιθωμάτων, άλλων μη σκελετικών κόκκων, κλαστικό υλικό με ή χωρίς ασβεστολιθική ιλύ (μικριτικό υλικό). Σε πολλές περιπτώσεις το πέτρωμα αποτελείται εξ' ολοκλήρου από μικριτικό υλικό με αποτέλεσμα να έχει μεγάλη σκληρότητα και να εμφανίζει πολύ μικρό πορώδες και κογχοειδή θραυσμό. Το ασβεστολιθικό υλικό μεταφέρεται από τη ξηρά με τη βοήθεια του νερού και αποτίθεται στις θαλάσσιες λεκάνες. Το εδαφικό και ποτάμιο νερό περιέχει ως κύριο διαλυμένο συστατικό το ιόν HCO₃⁻, το οποίο τελικά καταλήγει στη θάλασσα.

Στη συνέχεια το ανθρακικό ασβέστιο το παραλαμβάνουν οι θαλάσσιοι οργανισμοί όπως είναι τα κοράλλια, τα βρυόζωα, τα φύκη και τα διάφορα μαλάκια και το χρησιμοποιούν. Όταν πεθάνουν αποδίδουν το ανθρακικό ασβέστιο με τη μορφή των θρυμματισμένων κελυφών τους. Η καθίζηση χημικού ιζήματος πραγματοποιείται σε βάθη μικρότερα των 5500 μέτρων, καθώς σε μεγαλύτερα βάθη παραμένει διαλυμένο στο θαλασσινό νερό. Στα μάρμαρα τα ίχνη της αρχικής στρώσης ασβεστόλιθου είναι γενικά εμφανή ενώ τα ίχνη απολιθωμάτων είναι σχεδόν αδύνατον να βρεθούν. Τα

ορυκτά που συνυπάρχουν ως δευτερεύοντα είναι γενικά αυθιγενούς προέλευσης και δημιουργούνται από ρευστές προσμίξεις και ανακρυσταλλωμένες σε διάφορες ορυκτολογικές μορφές κατά τη διεργασία της διαγένεσης. Τα πιο συνήθη δευτερεύοντα συστατικά των μαρμάρων είναι ο διοψίδιος, ο χλωρίτης, το πλαγιόκλαστο, ο βιοτίτης, ο χαλαζίας, γρανίτης, ο αλβίτης (άστριος), ο μοσχοβίτης και ο γραφίτης. Είναι συχνό φαινόμενο να εμφανίζονται και μικρές ποσότητες πυριτικών ορυκτών. 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), ή μέσων θερμοκρασιών (μεσοζώνης), ή χαμηλών θερμοκρασιών (επιζώνης). (Ιστάντσο, 2008)

1.3 Φυσικά χαρακτηριστικά

Τα χαρακτηριστικά των μαρμάρων (με την τεχνική έννοια του όρου) που δίνουν σε αυτά την ανάλογη εμπορική τους αξία είναι :

1. Η χρωματική και αισθητική τους εμφάνιση
2. Ο ιστός
3. Η παρουσία ή όχι φλεβιδίων και η διάταξη και το χρώμα αυτών
4. Η παρουσία εγκλεισμάτων, καθώς και η ύπαρξη και η συχνότητα των λεγόμενων «λεκέδων»
5. Οι φυσικές, χημικές, μηχανικές και τεχνικές τους ιδιότητες.

Το χρώμα του μαρμάρου είναι από τις πιο σημαντικές φυσικές ιδιότητες του. Προσδιορίζεται από τη φύση των συστατικών του. Τα μάρμαρα που αποτελούνται από καθαρό ασβεστίτη ή δολομίτη είναι λευκά επειδή τα ορυκτά αυτά έχουν λευκό χρώμα. Ένα σερπεντινικό μάρμαρο έχει πράσινο χρώμα εφόσον το ορυκτό του σερπεντίνη που κυριαρχεί στη σύσταση αυτού του τύπου μαρμάρου είναι πράσινου χρώματος. Οι διάφορες αποχρώσεις ενός λευκού αγνού μαρμάρου οφείλονται στις προσμίξεις διαφόρων ξένων ουσιών. Τέτοιες προσμίξεις μπορεί να κατανέμονται ομοιόμορφα δίδοντας έτσι ομοιόμορφο χρωματισμό, ή μπορεί να εμφανίζονται με ζωνώδη μορφή «μπαλωμάτων» αποδίδοντας στο μάρμαρο μη ομοιόμορφο χρωματισμό.

Η πολυτιμότερη ποικιλία είναι το μάρμαρο που χρησιμοποιείται στη γλυπτική. Είναι λεπτόκοκκο, ολόλευκο, διαφώτιστο, που λαξεύεται τέλεια, αλλά προσβάλλεται

εύκολα από τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Τα περιφημότερα μάρμαρα γλυπτικής προέρχονται από την Πεντέλη, τη νήσο Πάρο και από ορισμένα λατομεία των Απουανών Άλπεων στην Ιταλία. Τα μάρμαρα αυτά ήταν αντικείμενα εκμετάλλευσης από την αρχαιότητα.

Το κοινό μάρμαρο είναι πιο χοντρόκοκκο από το μάρμαρο που προορίζεται για γλυπτική και τείνει ελαφρά προς το γκρι ή το κυανότεφρο, με έντονες φλέβες μερικές φορές. Το μάρμαρο είναι το πιο εύχρηστο ως δομικό υλικό. Όταν οι φλέβες είναι πολύ πυκνές, τότε 11 δημιουργείται το λευκό φλεβώδες μάρμαρο. Από τις έγχρωμες ποικιλίες του συνηθέστερες είναι το κυανότεφρο και ο σιπολίνης. Τα μάρμαρα αυτά, ανάλογα με το είδος των σχεδίων που σχηματίζουν τα πιο βαθύχρωμα τμήματα πάνω στα ανοιχτόχρωμα, μπορούν να χαρακτηριστούν ως ταινιωτά, ζωνώδη, φλεβώδη και ποικιλόχρωμα. Ο σιπολίνης περιέχει αξιόλογη ποσότητα τάλκη, τόσο που η λειασμένη επιφάνειά του να εμφανίζει μια έντονη πράσινη απόχρωση. Τα μάρμαρα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, μεταξύ των οποίων είναι τα δομικά υλικά, η παρασκευή αδρανών υλικών, χημικών προϊόντων (συνθετικού μαγνησίτη, αλκαλίων, ανθρακασβεστίου, λευκαντικών, φωσφορικού ασβεστίου, οργανικών χημικών ενώσεων), υάλου, ως προσθετικό στις ζωοτροφές κ.λ.π. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρασκευή κονιόδους 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. Τέλος, οι χαρακτηριστικές επιφάνειες του μαρμάρου με την ονοματολογία που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία εξόρυξης των ογκομαρμάρων είναι η ακόλουθη (Εξαδάκτυλος, 2006):

- i. Πρόσωπο ή τα «νερά» του μαρμάρου, ορίζεται η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την στρώση (παράλληλου ιστού) του μαρμάρου. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στη θλίψη είναι μικρότερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.
- ii. Μουρέλο ή παρειά, είναι η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την παράταξη του μαρμαροφόρου κοιτάσματος και κάθετη προς το πρόσωπο.
- iii. Κεφάλι, είναι η επιφάνεια που είναι κάθετη στις δύο προηγούμενες. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στη θλίψη είναι μεγαλύτερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.

Τα μάρμαρα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά, για τη παρασκευή αδρανών υλικών, χημικών προϊόντων (συνθετικού μαγνησίτη, αλκαλίων, ανθρακασβεστίου, λευκαντικών, φωσφορικού ασβεστίου, οργανικών χημικών ενώσεων), υάλου, ως προσθετικό στις ζωοτροφές κ.λ.π. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρασκευή κονιόδους 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.

1.4 Μάρμαρο Κομνηνών Νέστου

Το υπό εξέταση μάρμαρο Κομνηνών Νέστου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές αντιδιαμετρικής φόρτισης, εξορύσσεται με υπαίθρια εκμετάλλευση σε λατομείο (εικόνα 3) 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 της ύπαρξης δολομίτη. Η ορυκτολογική σύσταση του 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 συντελεστή απορρόφησης κατά βάρος 0,09% (Κακλής κ.ά., 2010).



Εικόνα 3: Λατομείο μαρμάρου Κομνηνών Νέστου (<http://nestos-marbles.gr/?gallery=%CE%BB%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%F-%CF%87%CF%81%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%AF%CE%B4%CE%B7%CF%82-%CE%BF-%CE%B5>).

1.5 Παρασκευή δοκιμίων

Από το λατομείο Κομνηνών Νέστου παρελήφθη ογκοτεμάχιο (όπως φαίνεται στην εικόνα 4) από το οποίο μορφοποιήθηκαν τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Εικόνα 4: Ογκοτεμάχιο μαρμάρου.

Ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την προπαρασκευή δοκιμίων είναι:

- ✓ Εργαστηριακό γεωτρύπανο (καροταρία).
- ✓ Εργαστηριακό δισκοπρίονο κοπής δοκιμίων πετρωμάτων.

Χρησιμοποιώντας την εργαστηριακή καροταρία του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης, ελήφθησαν πυρήνες από το ογκοτεμάχιο με διάμετρο της τάξεως των 50 mm. Συνολικά ελήφθησαν 12 "καρότα", όπως φαίνεται στην εικόνα 5.

Μετά τη λήψη των δοκιμίων, αυτά μετρήθηκαν κατά προσέγγιση ώστε να κοπούν στο εργαστηριακό δισκοπρίονο (εικόνα 6) στις κατάλληλες διαστάσεις που προβλέπεται από τις διεθνείς προδιαγραφές για τις δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού. Οι προδιαγραφές και οι διαστάσεις των δοκιμίων (βλ. Κεφάλαιο 2.5) αναφέρονται παρακάτω.



Εικόνα 5: Εργαστηριακό γεωτρύπανο (καροταρία).



Εικόνα 6: Εργαστηριακό δισκοπρίνο κοπής δοκιμών πετρώματος.

1.6 Προδιαγραφές δοκιμίων

- Τα δοκίμια θα πρέπει να είναι κυλινδρικά με λόγο ύψους προς διάμετρο 0,5 και διάμετρο κατά προτίμηση όχι μικρότερη από μέγεθος πυρήνα NX, δηλ. 54mm περίπου. Η διάμετρος τους πρέπει να είναι τουλάχιστο 10 φορές μεγαλύτερη από το μέγεθος του μεγαλύτερου κόκκου του πετρώματος.
- Τα άκρα του δοκιμίου θα πρέπει να είναι γενικά ομαλά και επίπεδα. Η απόκλιση του επιπέδου τους από την κάθετο στον άξονα του δείγματος δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.001 ακτίνια (περίπου 3.5 λεπτά της μοίρας) ή 0.05mm στα 50mm.
- Οι πλευρές του δοκιμίου πρέπει είναι λείες, ελεύθερες απότομων ανωμαλιών και ευθείες με ανοχή 0.1mm στο πλήρες μήκος του δοκιμίου.
- Η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να μετρείται με ακρίβεια 0.1mm με τον υπολογισμό του μέσου όρου δύο μετρήσεων της διαμέτρου κάθετα η μια στην άλλη περίπου στο μέσο του δοκιμίου. Η μέση διάμετρος θα πρέπει να χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της διατομής. Το ύψος του δοκιμίου θα πρέπει να καθορίζεται με ακρίβεια 1.0mm.
- Τα δείγματα δεν θα πρέπει να αποθηκεύονται για περισσότερο από 30 ημέρες, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η φυσική περιεκτικότητα σε νερό όσο το δυνατόν περισσότερο, μέχρι το χρόνο της προετοιμασίας των δοκιμίων. Μετά από την προετοιμασία τους, τα δοκίμια θα πρέπει να αποθηκεύονται πριν από τη δοκιμή για 5-6 ημέρες σε θερμοκρασία $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ και υγρασία $50\% \pm 5\%$.
- Η υγρασία του δοκιμίου θα πρέπει να αναφέρεται σύμφωνα με την προτεινόμενη από την ISRM μέθοδο για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε υγρασία δείγματος πετρώματος (Αγιουτάντης,2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazil)

2.1 Εισαγωγή

Τα πετρώματα είναι γενικά αδύναμα σε εφελκυσμό σε αντίθεση με τη σημαντική αντοχή τους σε θλίψη. Θεωρητικά ο λόγος μονοαξονικής θλιπτικής προς εφελκυστική αντοχή είναι 8:1 (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Η εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων έχει μεγάλη σημασία στον προσδιορισμό της απόκρισής τους κατά την υποβολή τους, τόσο σε στατικά φορτία όσο και σε δυναμικά (Roberts, 1977). Συνθήκες που πλησιάζουν τη στατική μονοαξονική εφελκυστική καταπόνηση παρατηρούνται κυρίως στα τοιχώματα υπογείων ανοιγμάτων, όπως σήραγγες, γεωτρήσεις κλπ. Η διάτρηση, η ανατίναξη, και η κοπή των πετρωμάτων με μηχανικά μέσα, δημιουργούν συνθήκες δυναμικής εφελκυστικής καταπόνησης. Παρά τη σημασία της αντοχής σε εφελκυσμό που σχετίζεται με τη δυνατότητα του πετρώματος να ανθίσταται σε δυναμικά ή στατικά φορτία, η τιμή της αντοχής αυτής χρησιμοποιείται ελάχιστα ως παράγοντας σχεδιασμού (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Η δοκιμή Brazil 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) τις αντοχής σε εφελκυσμό πετρωμάτων, καθώς και προϊόντων τσιμέντου.

Ο Hondros (1959), θεωρώντας το υλικό ομογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό, δημιούργησε μία 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 πιο ολοκληρωμένη λύση για συνθήκες επίπεδης τάσης (plane stress) (π.χ. δίσκους) και επίπεδης παραμόρφωσης (plane 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. Στη συνέχεια η δοκιμή αυτή τυποποιήθηκε από την

Αμερικανική Εταιρεία A.S.T.M. για τον προσδιορισμό της αντοχής σε δοκίμια τσιμέντου. Γενικά θεωρείται ότι η δοκιμή Brazil είναι, μία εύκολη και βολική μέθοδος για την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής σε πετρώματα και τσιμέντο.

Το 1993 ο Guo και οι συνεργάτες του 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. Πρόσφατα ο Wang και οι συνεργάτες του βελτίωσαν τη μέθοδο του Guo για τη δοκιμή σκληρότητας θραύσης: έγινε σαφές ότι η αρχική έναρξη της ρηγμάτωσης στην περιοχή του κέντρου του δίσκου Brazil ήταν ένα πρόβλημα κλειδί το οποίο έπρεπε να επιλυθεί κατάλληλα.

Στη μελέτη αυτή προτείνεται μία τροποποίηση του δίσκου Brazil με την εισαγωγή δύο παράλληλων επίπεδων 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 τη φόρτιση σε τόξο, η οποία χρησιμοποιεί ένα σύνθετο σύστημα φόρτισης δοκιμίων (Δημοπούλου, 2004).

2.2 Σκοπός δοκιμής

Το αντικείμενο της μεθοδολογίας είναι ο έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό ενός πετρώματος με τη χρήση δοκιμίων κανονικής γεωμετρίας. Χρησιμοποιείται η μέθοδος Brazil που βασίζεται στην πειραματική παρατήρηση σύμφωνα με την οποία τα περισσότερα πετρώματα που βρίσκονται σε δισδιάστατα εντατικά πεδία αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση είναι θλιπτική με τιμή μικρότερη από το τριπλάσιο της εφελκυστικής τάσης.

2.3 Δοκιμή έμμεσου προσδιορισμού αντοχής σε εφελκυσμό (βραζιλιανή δοκιμή)

Η δοκιμή χρησιμοποιείται για την έμμεση μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή δοκίμιο μορφής δίσκου υποβάλλεται σε

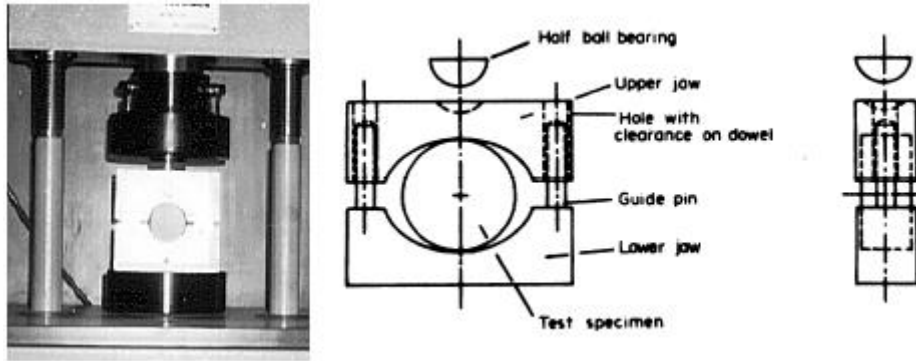
αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι θραύσης. Υπό τις συνθήκες αυτές φόρτισης το δοκίμιο αστοχεί κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό και η εφελκυστική τάση, που προκαλεί την αστοχία αυτή, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

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

Σύμφωνα με τις οδηγίες της ISRM (1978), η δοκιμή πραγματοποιείται σε δοκίμια πετρώματος μορφής δίσκου (Εικόνα 7). Ο προσανατολισμός του δοκιμίου θα πρέπει να είναι γνωστός, ενώ η διάμετρος του δεν πρέπει να είναι μικρότερη από NX (54,7 mm), και το πάχος του ίσο με την ακτίνα του. Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχής και να πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό. Προτεινόμενος ρυθμός φόρτισης είναι 200 N/s (20 kgf/s). Το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι τη στιγμή της αστοχίας του.

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 (Κακλής, 2003).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην μέτρηση του φορτίου αστοχίας, καθόσον υπάρχουν περιπτώσεις όπου το δοκίμιο εξακολουθεί να αναλαμβάνει αυξημένα φορτία ακόμη και ύστερα από την αστοχία του. Σημειώνεται ότι κατά την αρχική αστοχία του δοκιμίου παρατηρείται μια μικρής διάρκειας παύση στην κίνηση του σχετικού δείκτη. Παρά ταύτα, η διαφορά μεταξύ του φορτίου αρχικής θραύσεως και του τελικού φορτίου, που δύναται να αναλάβει το δοκίμιο είναι το πολύ 5 %. Ο αριθμός των απαιτούμενων δοκιμών ανά δείγμα καθορίζεται από τη διαθέσιμη ποσότητα δείγματος. Η ISRM προτείνει 10 δοκιμές ανά δείγμα.



Εικόνα 7: Πειραματική διάταξη δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης.

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

Η εφελκυστική αυτή τάση δίνεται από τη σχέση:

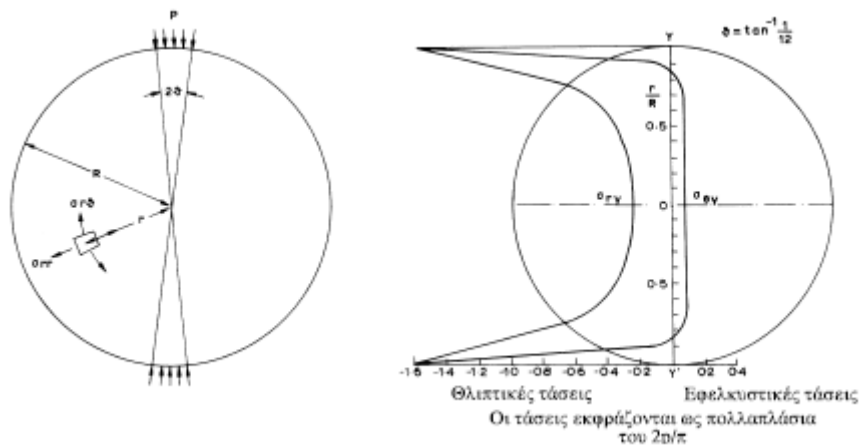
$$\sigma_{\theta} = -\frac{P}{\pi R t} \left\{ \frac{\sin 2\theta}{\theta} - 1 \right\} \quad (1)$$

όπου: P = επιβαλλόμενη δύναμη τη στιγμή της αστοχίας.

R = ακτίνα του μορφής δίσκου δοκιμίου.

t = πάχος του μορφής δίσκου δοκιμίου.

2θ = τόξο γωνίας στο οποίο δρα ομοιόμορφα η δύναμη P επί του δοκιμίου.



Εικόνα 8: Μεταβολή της εφελκυστικής και της θλιπτικής τάσης κατά μήκος της διαμέτρου $Y-Y'$ για φόρτιση υπό γωνία $2\theta=9.5^\circ$ (Fairhurst, 1964).

Η γωνία 2θ λαμβάνεται μεταξύ $10-14^\circ$, ο λόγος $t/D=0.5$ και $t=25-30$ mm. Αύξηση του λόγου t/D οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό του δοκιμίου, ενώ αύξηση του ρυθμού φορτίσεως δίνει γενικά αύξηση της αντοχής.

Η παραπάνω σχέση, για μικρές γωνίες 2θ , δίνεται με ικανοποιητική προσέγγιση από την σχέση:

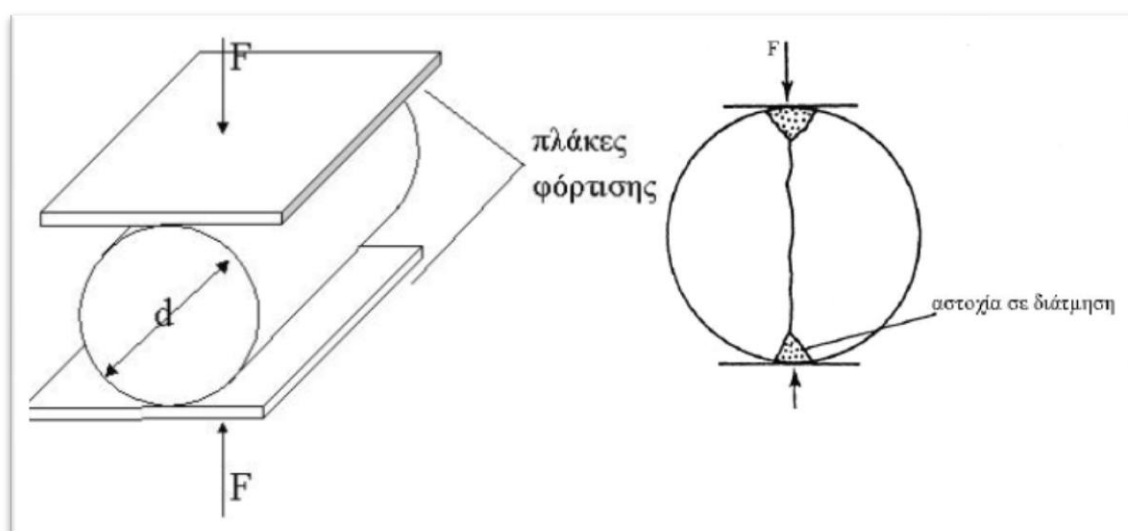
$$\sigma_{\theta} = -\frac{P}{\pi Dt} \quad (2)$$

όπου $D=2R$ =διάμετρος του δοκιμίου.

Από την παραπάνω σχέση, προκύπτει ότι η τιμή της τάσης στο κέντρο είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο φόρτισης (σημειακή φόρτιση ή κατά μήκος τόξου 2θ) και ότι η αστοχία είναι ανεξάρτητη από τις θλιπτικές τάσεις που εμφανίζονται κατά μήκος του άξονα φόρτισης Y και από τις κάθετες τάσεις του επιπέδου XY του δίσκου. Επίσης, η αστοχία είναι κυρίως εφελκυστική.

Οι σχέσεις (1) και (2) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντοχής σε εφελκυσμό του πετρώματος, υπό την προϋπόθεση ότι 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.

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 (Εικόνα 9) (Δημοπούλου, 2004).



Εικόνα 9: Τοπική αστοχία υλικού λόγω διάτμησης (Hobbs, 1964).

Τέλος, παρατηρείται συχνά ότι, μετά την αρχική αστοχία του το δοκίμιο δεν χάνει τη φέρουσα ικανότητα του (δηλαδή την ικανότητα παραλαβής φορτίων) και επομένως

είναι δυνατόν να αστοχήσει σε μία μεγαλύτερη τιμή φορτίου. Συνήθως, η τάση αυτή δεν διαφέρει περισσότερο από 5% από την αρχική τάση αστοχίας.

2.4 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα όργανα και συσκευές (εικόνα 7):

1. Συσκευή δοκιμής: η συσκευή πρέπει να μπορεί να επιβάλλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο και συγχρόνως να έχει τη δυνατότητα να μετρήσει ή/και να καταγράψει το επιβαλλόμενο φορτίο
2. Πλάκες φόρτισης: οι πλάκες φόρτισης χρησιμεύουν στο να μεταφέρουν το φορτίο στο δοκίμιο και πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους.
3. Σιαγόνες φόρτισης: το δοκίμιο πρέπει να φορτισθεί μέσω χαλύβδινων σιαγόνων με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:
 - Ημιελλειπτικό ή ημικυλινδρικό άνοιγμα: το άνοιγμα που σχηματίζουν μεταξύ τους οι δύο σιαγόνες πρέπει να επιτρέπει την έδραση δοκιμίων που έχουν μορφή δίσκου έτσι, ώστε οι σιαγόνες και το δοκίμιο να βρίσκονται σε επαφή κατά τόξο 10° τη στιγμή της αστοχίας. Αυτό επιτυγχάνεται, όταν η ακτίνα του ημικυκλίνδρου είναι 1,5 φορές η ακτίνα του δοκιμίου. Το πλάτος των σιαγόνων πρέπει να είναι 1,1 φορές το πλάτος του δοκιμίου.
 - Πύρροι ευθυγράμμισης: οι πύρροι που συγκρατούν τις δύο σιαγόνες, επιτρέποντας κίνηση μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, πρέπει να είναι κατασκευασμένοι έτσι, ώστε να επιτρέπεται παρέκκλιση από το επίπεδο των σιαγόνων της τάξης των $4 \cdot 10^{-3}$ ακτινίων.
 - Σφαιρική κεφαλή έδρασης: η σφαιρική κεφαλή έδρασης πρέπει να βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοκιμίου και ο άξονας της πρέπει να ευθυγραμμίζεται με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Η πάνω σιαγόνα πρέπει να δέχεται το θλιπτικό φορτίο μέσω σφαιρικής κεφαλής έδρασης, Η κεφαλή πρέπει να λειανθεί με ελαφρό ορυκτέλαιο (Αγιουτάντης, 2001).

2.5 Προετοιμασία δοκιμίων

- ✓ Η διάμετρος των δοκιμίων πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με 54mm περίπου και το πλάτος τους περίπου ίσο με την ακτίνα τους.

- ✓ Τα δοκίμια πρέπει να προετοιμαστούν χρησιμοποιώντας μόνο καθαρό νερό στα κοπτικά και λειαντικά εργαλεία. Οι κυλινδρικές επιφάνειες πρέπει να είναι λείες με ανοχή 0,025mm. Τα άκρα του κυλίνδρου πρέπει να είναι επίπεδα με ανοχή 0,25 mm και παράλληλα με ανοχή 0,25 mm.
- ✓ Για τη σωστά επαφή του δοκιμίου με τις σιαγόνες φόρτισης συνίσταται η παρεμβολή χαρτοταινίας (πάχους 0,2-0,4mm) με πλάτος μεγαλύτερο ή ίσο με το πλάτος του δοκιμίου.

2.6 Δοκίμια

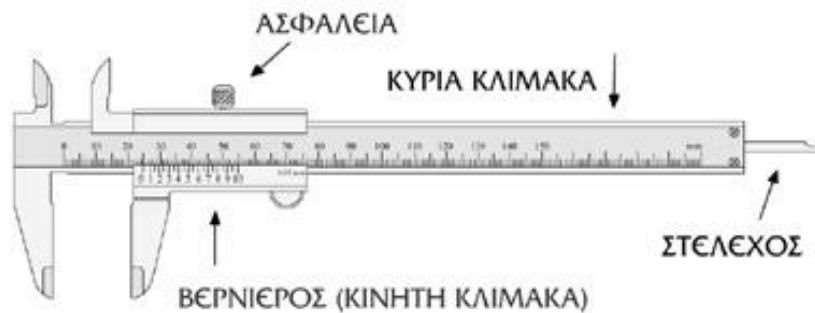
Από τα δύο ογκοτεμάχια που δόθηκαν το λατομείο Κομνηνών Νέστου λήφθησαν 12 "καρότα" από το εργαστηριακό γεωτρύπανο, από τα οποία παρασκευάστηκαν τα δοκίμια. Για τη δοκιμή αντιδιαμετρικής φόρτισης (Brazilian test) δίσκου μαρμάρου χρησιμοποιήθηκαν 9 δοκίμια (όσα πληρούσαν τις προδιαγραφές), οι διαστάσεις των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 1. Η αρίθμηση των δοκιμίων δόθηκε ως εξής: ο πρώτος αριθμός αφορά στο "καρότο" που κόπηκε από το γεωτρύπανο και ο δεύτερος στο δοκίμιο που παρασκευάστηκε από αυτό.

Πίνακας 1: Διαστάσεις δοκιμίων μαρμάρου

Αρίθμηση δοκιμίου	Ύψος (cm)	Διάμετρος (cm)
7.1	2,400	5,210
	2,405	5,215
	2,405	5,215
7.2	2,515	5,220
	2,520	5,225
	2,520	5,220
7.3	2,520	5,220
	2,525	5,225
	2,525	5,220
	2,500	5,225

8.1	2,495	5,225
	2,500	5,220
8.2	2,555	5,220
	2,550	5,225
	2,550	5,225
8.3	2,425	5,225
	2,435	5,225
	2,430	5,225
9.1	2,520	5,235
	2,520	5,235
	2,515	5,235
9.2	2,425	5,225
	2,425	5,225
	2,425	5,225
9.3	2,575	5,225
	2,575	5,220
	2,580	5,225

Οι διαστάσεις των δοκιμών μετρήθηκαν με διαστημόμετρο ή παχύμετρο (Εικόνα 10). Το διαστημόμετρο εφευρέθηκε από τον Γάλλο μηχανικό Pierre Vernier το 1631. Είναι ένα όργανο που μπορεί να μετράει μήκη με ακρίβεια 0,1mm. Αποτελείται από δύο κλίμακες, μια σταθερή η οποία είναι διαιρεμένη σε mm και μια κινούμενη. Οι 10 υποδιαίρεσεις της κινούμενης κλίμακας αντιστοιχούν σε 19 υποδιαίρεσεις της σταθερής κλίμακας. Έτσι η κάθε υποδιαίρεση έχει μήκος 1,9mm. Άρα απέχει από τις δύο υποδιαίρεσεις της κυρίας κλίμακας κατά $2-1,9=0,1\text{mm}$ (http://dide.ker.sch.gr/ekfe/epiloges/3_prot_peiramata/vernieros/vernier.htm).



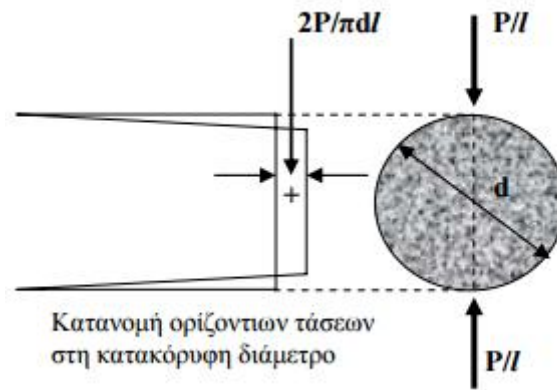
Εικόνα 10: Παχύμετρο.

2.7 Μηχανισμός αστοχίας

Ο μηχανισμός αστοχίας στον έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη επηρεάζεται από τη διαδρομή που ακολουθεί η ρωγμή στη μικροδομή του δοκιμίου σε σχέση με το μέγεθος των κόκκων του υλικού. Η ρωγμή θα ακολουθήσει τη διαδρομή που θα υποδείξει το τασικό πεδίο σε σχέση με τις αδυναμίες του υλικού. Στη περίπτωση του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη η ρωγμή θα αναπτυχθεί κατά μήκος της διαμέτρου λόγω του τασικού πεδίου εφελκυσμού που υπάρχει (http://library.tee.gr/digital/m2173/m2173_perdikaris.pdf). Πιο συγκεκριμένα το κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται σε προοδευτικά αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο P ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενετειρών της παράπλευρης επιφάνειας (εικόνα 11). Τα αντιδιαμετρικά αυτά φορτία προκαλούν οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις σ_h ομοιόμορφα κατανεμημένες στο μεγαλύτερο τμήμα του κατακόρυφου επιπέδου του οριζόμενου από τις αντιδιαμετρικές γενέτειρες, με μέγεθος ίσο με

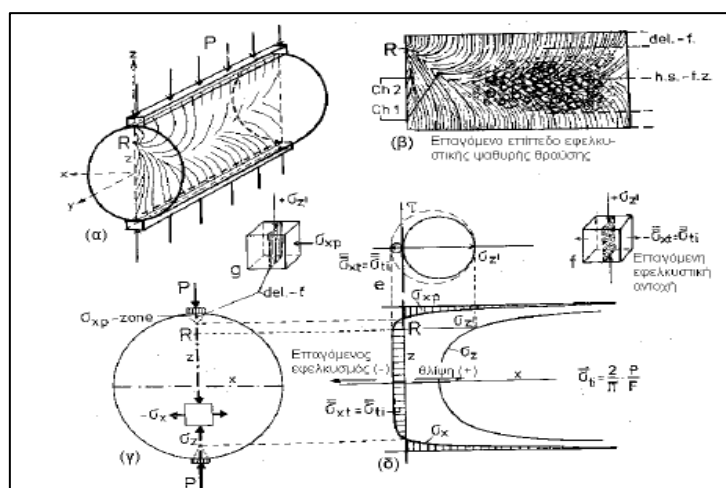
$$\sigma_h = \frac{2P}{\pi dl} \quad (3)$$

Με την αύξηση του θλιπτικού φορτίου οι τάσεις σ_h φθάνουν τη μέγιστη τιμή τους και το δοκίμιο διαχωρίζεται («διαρρηγνύεται») κατά μήκος του επιπέδου αυτού (http://www.metal.ntua.gr/uploads/4239/Kotsovos_KEF_2.pdf).



Εικόνα 11: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη (Brazilian test) (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Στο τέλος της δοκιμής το κυλινδρικό δοκίμιο θραύεται κατά γενέτειρα σε δύο ίσα μισά. Η αιτία της θραύσης είναι ο έμμεσα προκαλούμενος εφελκυσμός που οφείλεται στο θλιπτικό φορτίο. Ο εφελκυσμός επιβεβαιώνεται από τις γραμμώσεις στο επίπεδο θραύσης, με τα χαρακτηριστικά της εφελκυστικής ψαθυρής θραύσης. Η γράμμωση του επιπέδου θραύσης αποτελεί επιβεβαίωση της θεωρίας του Griffith. Άλλωστε, λόγω της συμμετρικής θέσης του επιπέδου θραύσης δεν υφίσταται διατμητική τάση κατά τη διάδοση της ρωγμής. Οι παρατηρήσεις αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αξονική θραύση σχισμού είναι μια εφελκυστική θραύση. Άρα, η εφελκυστική τάση δημιουργείται έμμεσα, με επαγωγή όπως φαίνεται στην εικόνα 12 (Σοφιανός & Νομικός, 2008).



Εικόνα 12: Επαγόμενη εφελκυστική θραύση κατά τη βραζιλιανή δοκιμή (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

3.1 Περί ηχητικών κυμάτων

Ήχος καλείται το αίσθημα που δημιουργείται λόγω μεταβολών πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα ή άλλου μέσου διαδόσεως και λαμβάνεται από τα αντίστοιχα όργανα. Οι μεταβολές αυτές διαδίδονται με τη μορφή *ηχητικών κυμάτων*. Ο ορισμός του κύματος, που μας εξυπηρετεί καλύτερα σε αυτό το πεδίο μελέτης, είναι ο εξής:

Κύμα είναι ένας μηχανισμός διάδοσης μιας κάποιας ελαστικής διαταραχής μέσα σ' ένα ελαστικό μέσο. Κατά τη διάδοση της ελαστικής αυτής διαταραχής επιτυγχάνεται μεταφορά ενέργειας από σημείο σε σημείο του ελαστικού μέσου χωρίς, όμως, μεταφορά 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 εξαφανίζονται ευθύς αμέσως μόλις πάντουν να επενεργούν οι εξωτερικές αιτίες που τις προκαλούν. Ισότροπο ελαστικό μέσο ως προς μία 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 διαδόσεως ενός κύματος είναι η ίδια (έχει το ίδιο μέτρο) προς όλες τις διευθύνσεις, είναι ισότροπο, όσον αφορά στην ταχύτητα διαδόσεως του κύματος.

Η παρακάτω εξίσωση της Κυματικής ισχύει για όλα τα κύματα και για όλα τα ελαστικά μέσα δια των οποίων αυτά διαδίδονται (Μπακογιάννης, 2011).

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ και } \lambda = cT \quad (3)$$

Όπου λ : το μήκος κύματος (η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου) [μονάδες μήκους, συνήθως m]

c : η ταχύτητα του κύματος [m/s]

T : περίοδος (το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών [s])

f : συχνότητα (ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν σε σημείο ανά μονάδα χρόνου [s^{-1}])

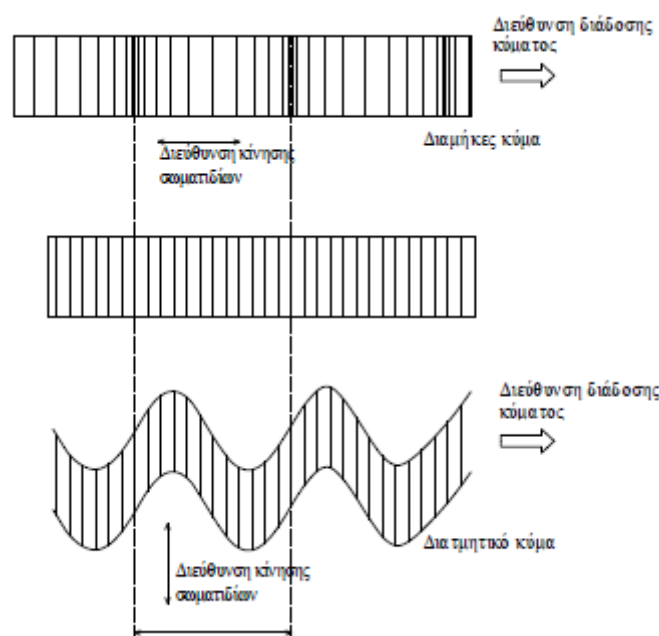
Σημειώνεται ότι η συχνότητα (f) ενός κύματος παραμένει πάντα σταθερή ασχέτως του ελαστικού μέσου στο οποίο διαδίδεται το κύμα. Οπότε το μήκος κύματος (λ)

προκύπτει ότι είναι ανάλογο της ταχύτητας (c) της κυμάνσεως μέσα στο ελαστικό μέσο, στο οποίο διαδίδεται το κύμα.

Είδη κυμάτων

Τα κύματα που διαδίδονται στο χώρο με ορισμένη ταχύτητα λέγονται *τρέχοντα* ή *οδεύοντα* ή *διαδιδόμενα* κύματα σε αντίθεση προς τα στάσιμα κύματα, τα οποία είναι παγιδευμένα σε συγκεκριμένο τμήμα του ελαστικού μέσου.

Ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζουν η διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων με τη διεύθυνση διάδοσης της ταλαντώσεως του κύματος παράγονται τα *εγκάρσια* και τα *διαμήκη* ή *επιμήκη* κύματα. Στα πρώτα η εν λόγω γωνία είναι 90° , ενώ στα δεύτερα είναι 0° (Μπακογιάννης, 2011). Στην εικόνα 13 φαίνεται η κίνηση των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος για τα δύο αυτά είδη κυμάτων.



Εικόνα 13: Κίνηση των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Η ταχύτητα διάδοσης είναι χαρακτηριστική για κάθε πέτρωμα και αποτελεί ένα έμμεσο μέτρο εκτίμησης των ιδιοτήτων του πετρώματος. Οι ασυνέχειες του πετρώματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα διαδόσεως των κυμάτων. Όπως δείχνει ο Πίνακας 2, η ταχύτητα του διαμήκους θλιπτικού κύματος είναι πολύ μεγαλύτερη στο άθικτο πέτρωμα, απ' ό,τι στο ρωγματομένο. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η διαφορά αυτή στην ταχύτητα, είναι μεγαλύτερη για τον ίδιο τύπο πετρώματος με διαφορετική πυκνότητα ασυνεχειών, απ' ό,τι μεταξύ διαφορετικών τύπων πετρωμάτων.

Πίνακας 2 : Ταχύτητες διαδόσεως Ρ-κυμάτων, και S-κυμάτων, για διαφόρους τύπους πετρωμάτων με ύπαρξη ασυνεχειών και χωρίς ασυνέχειες

Τύπος πετρώματος	Θλιπτικό κύμα (P)		Εγκάρσιο κύμα (S)	
	Έντονα ρωγματομένο	Αρρηκτο	Έντονα ρωγματομένο	Αρρηκτο
Ασβεστόλιθος	2000	5900	1000	3100
Μεταμορφωμένα πετρώματα	2100	3500	1000	1700
Βασάλτης	2300	4500	1100	2200
Γρανίτης	2400	5000	1200	2500
Άμμος	500	2000	250	850
Αργίλος	400	1700	200	800

Μονάδα μέτρησης Decibel (dB)

Η μονάδα decibel (dB) που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Ακουστική αποτελεί δάνειο από την Ηλεκτρική Μηχανολογία. Το decibel (με την αυστηρή σημασία του όρου στο χώρο της Τεχνολογίας του Ήχου) αναφέρεται στην στάθμη ισχύος ενός σήματος (PL = Power Level) η οποία ορίζεται ως το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου του λόγου των αριθμητικών τιμών της ισχύος δύο σημάτων, ένα εκ των οποίων εκλαμβάνεται ως σήμα αναφοράς, δηλαδή:

$$PL(dB) = 10 \log \frac{\text{αριθμητική τιμή ισχύος κύματος}}{\text{αριθμ. τιμή ισχύος κύματος αναφοράς}}$$

Τα ηχητικά κύματα κατά τη διάδοση τους ανακλώνται σε μικροσκοπικές επιφάνειες με συνέπεια τη μεταβολή της ταχύτητάς τους. Στα πετρώματα οι μέθοδοι που αξιοποιούν την παρουσία του ήχου, καταγράφουν υπερήχους. Έχοντας ως μέσο διάδοσης το πέτρωμα, το κύμα εξαρτάται από την πυκνότητα του πετρώματος και τις ελαστικές του ιδιότητες.

Εφόσον το ηχητικό κύμα έχει την ανακλαστική ιδιότητα οι ασυνέχειες της δομής του πετρώματος θα το επηρεάζουν. Έτσι θα υπάρχει διαφορά ταχύτητας ανάμεσα σε δυο καταστάσεις του πετρώματος, αρρήκτη - ρωγματομένη. Στα περισσότερα πετρώματα υπάρχουν δομικά χαρακτηριστικά, (π.χ. τεκτονικά, γεωλογικά, κ.α.), σε μια ευρύτερη κλίμακα από ότι στην κλίμακα των εργαστηριακών δοκιμών, και αυτά τα χαρακτηριστικά συχνά, έχουν σημαντική επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά ολόκληρης της μάζας του πετρώματος. Σε ακραία μορφή, η αντοχή του πετρώματος προσδιορίζεται εξ ολοκλήρου από τις ιδιότητες των ασυνεχειών, με τα συμπαγή τεμάχια που ορίζονται από αυτές να συμπεριφέρονται σαν αυτοτελή στοιχεία. Αυτή η κατάσταση οδηγεί στη διάκριση ανάμεσα στη συμπεριφορά του "πετρώματος" και της "μάζας του πετρώματος".

3.2 Εισαγωγή-Θεωρία ακουστικής εκπομπής

Το φαινόμενο της Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην μηχανική των πετρωμάτων για τη μελέτη της θεμελιώδους συμπεριφοράς και της αστοχίας των ψαθυρών πετρωμάτων υπό μηχανική καταπόνηση.

Η φόρτιση ενός ψαθυρού υλικού, όπως είναι το πέτρωμα, οδηγεί σε αυξημένη συγκέντρωση τάσεων γύρω από μικροσκοπικές ρωγμές ή ατέλειες του υλικού, οι οποίες μπορεί να είναι μικρές θραύσεις ή όρια των κόκκων. Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων, οποίος αποτελεί ένα δείκτη της έντασης που επικρατεί από μια μικροσκοπική ατέλεια, υπερβεί μια οριακή τιμή, η συσσωρευμένη ελαστική ενέργεια απελευθερώνεται απότομα, ανάλογα με την ψαθυρότητα του υλικού και το ποσοστό της ελαστικής παραμόρφωσης σε σχέση με την πλαστική περιοχή της αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων. Η απελευθερούμενη ενέργεια διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα με τη μορφή ελαστικών κυμάτων και το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission).

Ιστορικά, οι μελέτες των Obert και Duvall (1942) για την πρόβλεψη των βίαιων ανατινάξεων των πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας 1930, μπορούν να θεωρηθούν ως η αρχή της εφαρμογής της τεχνικής της Ακουστικής Εκπομπής στη μηχανική των πετρωμάτων. Η ανάπτυξη της μεθόδου ευνοήθηκε από την έρευνα και σε άλλα υλικά. Από τις πιο σημαντικές, θεωρούνται αυτές του Kaiser (1950), ο οποίος παρατήρησε ότι τα υλικά έχουν «μνήμη» των εφαρμοσθέντων σε αυτά τάσεων, φαινόμενο γνωστό ως φαινόμενο Kaiser.

Οι πρώτες έρευνες εστιάστηκαν στη μελέτη του μηχανισμού γένεσης και διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στα πετρώματα και στη σχέση των παραμέτρων ΑΕ με τη φόρτιση ή την παραμόρφωση του πετρώματος. Εργαστηριακές μελέτες συσχετίζουν τις παραμέτρους ΑΕ με την επερχόμενη θραύση ενός δοκιμίου πετρώματος, ενώ η ανάπτυξη της θραύσης μέσα στο δοκίμιο εξετάζεται από τον εντοπισμό της πηγής των γεγονότων ΑΕ. Στην προσπάθεια αυτή βρήκαν εφαρμογή μέθοδοι της σεισμολογίας θεωρώντας ότι η γένεση των ακουστικών κυμάτων είναι αντίστοιχη με τη γένεση των σεισμών σε διαφορετική κλίμακα.

Η τεχνική της Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕΤ) είναι δημοφιλής και ως εργαλείο για το μη καταστροφικό έλεγχο (NDT) στη βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται για την επιτόπια ανίχνευση της εξέλιξης των ρωγμών και τον έλεγχο ασφάλειας κατασκευών (κυρίως μεταλλικών). Σημαντικό ρόλο στην αυξανόμενη αποδοχή και χρήση της ΑΕΤ

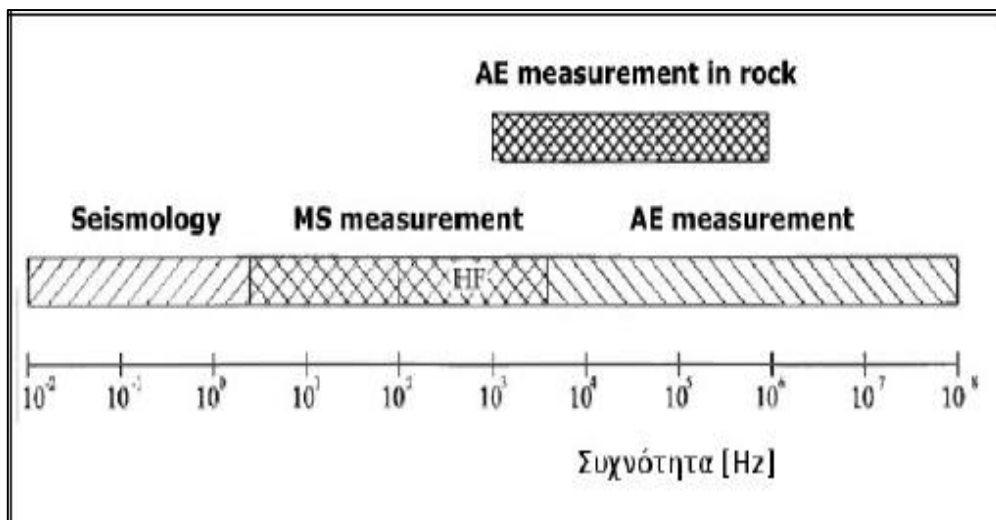
στην έρευνα και βιομηχανία έχει η ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής και των τεχνικών καταγραφής, ανάλυσης και επεξεργασίας με Η/Υ.

Στη μηχανική πετρωμάτων η ΑΕΤ έχει εφαρμοστεί σε δύο κυρίως πεδία: α) στη μελέτη μηχανισμού θραύσης των πετρωμάτων, με την ανάλυση των παραμέτρων ΑΕ και τον εντοπισμό της θέσης της πηγής της ΑΕ, και β) στη μελέτη της εντατικής κατάστασης του επί τόπου πετρώματος με τη χρήση του φαινομένου Kaiser. (Σοφιανός & Νομικός, 2008)

3.3 Ορισμός

Σύμφωνα, λοιπόν, με ορισμός 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 ΑΕ 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.

Τα κύματα της ΑΕ διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν ν' ανιχνευθούν από αισθητήρες ΑΕ (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων) σε επαφή με αυτό, οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με τη σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Η τεχνική αυτή, που σήμερα γνωρίζει σημαντική ανάπτυξη διεθνώς, είναι γνωστή ως *Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique, AET)*. Σε αντίθεση με αυτό που δηλώνει το όνομά της, τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15kHz έως μερικά MHz, δηλαδή σε συχνότητες υπερήχων (Εικόνα 14).



Εικόνα 14: Εύρος συχνοτήτων χρησιμοποιούμενων μεθόδων (Manthei et al. 2000).

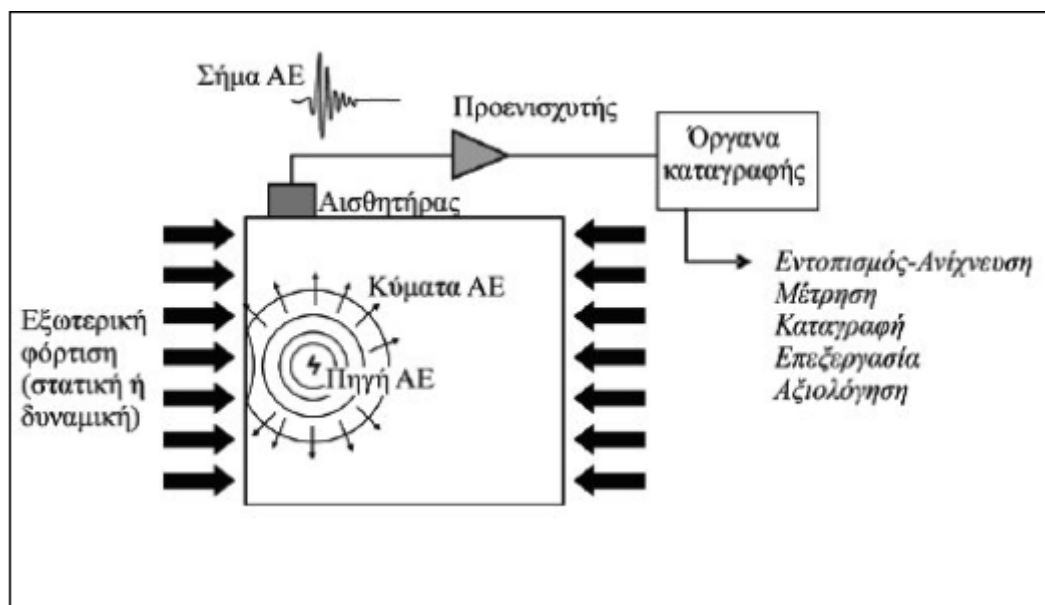
Η Ακουστική Εκπομπή (ΑΕ) σε συμπαγή σώματα είναι αποτέλεσμα τοπικών παραμορφώσεων που εκδηλώνονται σε στιγμιαίο χρόνο ικανές να παράξουν ηχητικό σήμα. Η Ακουστική Εκπομπή από πέτρωμα που φορτίζεται κοντά στο σημείο αντοχής μπορεί να γίνει αντιληπτή με την ακοή από τον άνθρωπο, όπως σε γρανίτες, αλλά με τη βοήθεια ενισχυτών το πεδίο συχνοτήτων της εκπομπής είναι ευρύτερο. Το γενικότερο πεδίο μελέτης έγκειται στην "μικροσεισμική δραστηριότητα" των πετρωμάτων (Μπακογιάννης, 2011).

3.4 Σήματα ΑΕ

Στην εικόνα 15 εικονίζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ. Ένα γεγονός ΑΕ στην πηγή προκαλεί απελευθέρωσης ενέργειας η οποία διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα αυτό διαδίδεται μέχρι τα όρια του σώματος και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας. Το κύμα ΑΕ στην πηγή περιέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μερικές δεκάδες kHz ως μερικά MHz.

Η δραστηριότητα ΑΕ περιγράφεται συνήθως από παραμέτρους συσχετισμένες με το πλήθος και το μέγεθος των γεγονότων ΑΕ. Τα σήματα ΑΕ, που λαμβάνονται αισθητήρα, μπορούν να διακριθούν σε συνεχούς και κρουστικού τύπου ενώ τα δεδομένα τους διακρίνονται αντίστοιχα σε χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα (time

driven data) και δεδομένα συσχετισμένα με την κρουστική μορφή ενός σήματος AE (hit driven data).



Εικόνα 15: Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της AE (Μπακογιάννης, 2011).

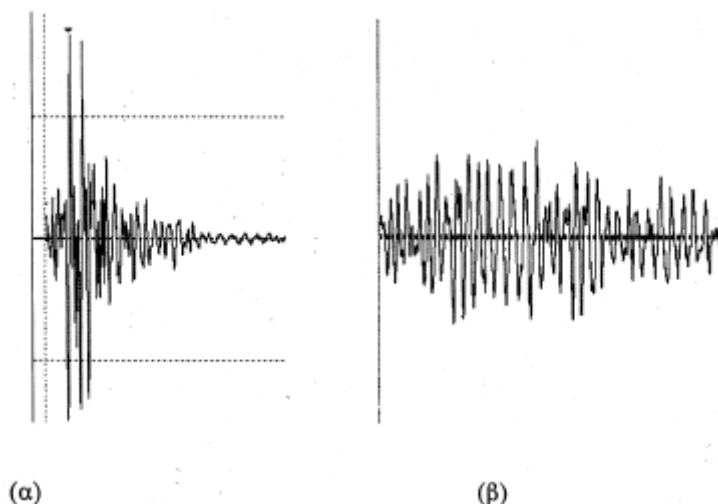
➤ Συνεχή

Τα συνεχή θεωρούνται ως προερχόμενα από διαρροές πίεσης, υδραυλικοί ήχοι και ονομάζονται ως μηχανικός θόρυβος. Τα σήματα συνεχούς μορφής χαρακτηρίζονται συνήθως από τη μέση τετραγωνική ρίζα του πλάτους U_{RMS} του καταγραφόμενου σήματος.

➤ Κρουστικά

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

Όταν ο ρυθμός εκπομπής σημάτων AE είναι μεγάλος τα σήματά τους επικαλύπτονται και σχηματίζονται σήματα συνεχούς μορφής. Στην εικόνα 16 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα των δύο τύπων σημάτων AE.



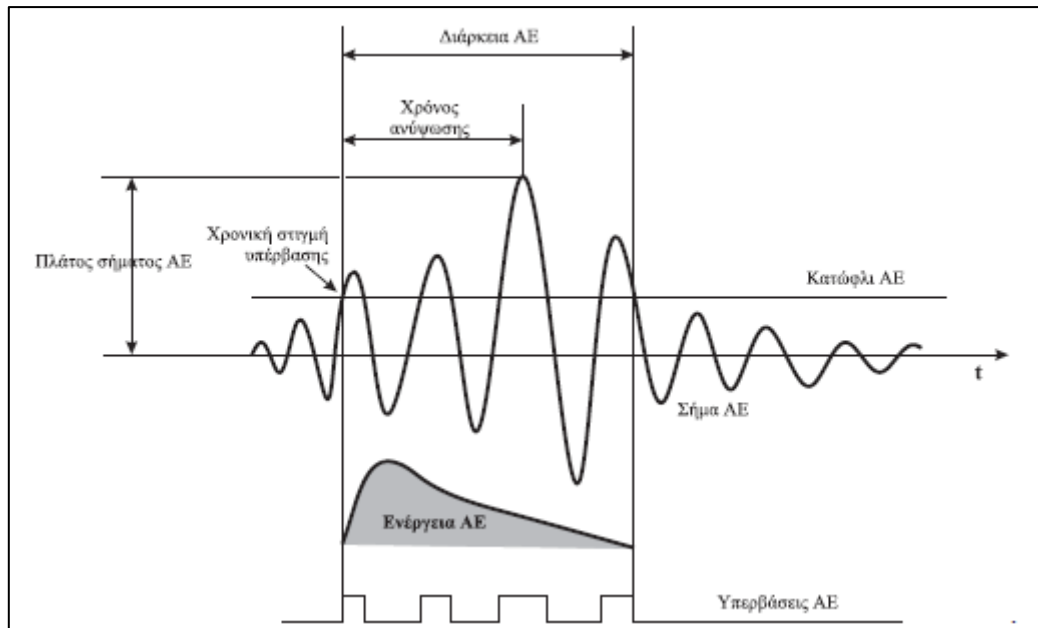
Εικόνα 16: (α) Τυπική μορφή κρουστικού σήματος ΑΕ, (β) Τυπική μορφή συνεχούς σήματος ΑΕ (Νομικός & Σοφιανός, 2008).

Για μια αρχική εξάλειψη του θορύβου και για το χαρακτηρισμό ενός σήματος κρουστικού τύπου απαιτείται ο καθορισμός ενός ορίου (κατώφλι, threshold), μιας τιμής τάσης άνω της οποίας θα λαμβάνονται τα σήματα ως κρουστικά. Ο ορισμός τους κατωφλίου είναι καθαρά θέμα της επιθυμητής καταγραφής. Το κατώφλι καθορίζεται μεταξύ άλλων και από το πλάτος των καταγραφόμενων σημάτων ΑΕ και το επιθυμητό καταγραφόμενων δεδομένων.

Όταν το σήμα ΑΕ υπερβεί το κατώφλι τότε καταγράφεται ένας "κτύπος" (Hit). Σε μια τυπική μελέτη ΑΕ καταγράφονται εκατοντάδες ή χιλιάδες σήματα καθιστώντας την επεξεργασία και αξιολόγηση ιδιαίτερα χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό από κάθε κυματομορφή εξάγονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι, που καλούνται παράμετροι ΑΕ. Αυτές διευκολύνουν την ανάλυση και τη σύγκριση μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων.

3.5 Παράμετροι γεγονότων Ακουστικής Εκπομπής

Οι κυριότερες παράμετροι, που χαρακτηρίζουν ένα σήμα ΑΕ κρουστικού τύπου (Εικόνα 17), είναι το πλάτος του σήματος (Amplitude), ο χρόνος ανύψωσης (Rise time), και η διάρκεια του σήματος (Duration). Η παράμετρος "απαριθμήσεις" (Counts) προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι, ενώ το πλάτος είναι η μέγιστη τάση της κυματομορφής ΑΕ και αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος. Το διάστημα μεταξύ της χρονικής στιγμής που το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μέγιστου πλάτους ονομάζεται χρόνος ανύψωσης (rise time).



Εικόνα 17: Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα προκύπτοντα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι ακουστικής εκπομπής.

- **Ακουστική Εκπομπή (AE) [Acoustic Emission]:** Ελαστικά κύματα παραγόμενα από την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από πηγές εντός ενός υλικού.
- **Πλάτος (AE) [Amplitude]:** η μεγαλύτερη τιμή ηλεκτρικής τάσης στην κυματομορφή, συνήθως εκφρασμένη σε dB (decibels). Με τον όρο **dB (AE)** εννοείται το λογαριθμικό μέτρο μεγέθους του σήματος και ορίζεται από τη σχέση: $dB = 20 \log (V_{max}/1\mu\text{volt})$. Το πλάτος είναι στενά συνδεδεμένο με το μέγεθος της πηγής.
- **Κτύπος (AE) [Hit]:** Όταν το σήμα-γεγονός ΑΕ υπερβεί το κατώφλι και προκαλεί σε ένα σύστημα καναλιών να καταγράψει ένα κτύπο, μια κυματομορφή.
- **Απαριθμήσεις (AE) [Counts]:** Ο αριθμός των φορών που καταγράφεται μια υπέρβαση του κατωφλίου κατά τη διάρκεια ενός σήματος, κτύπου.
- **Διάρκεια (AE) [Duration]:** Ένα χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που προκλήθηκε ένα σήμα ΑΕ (κυματομορφή) και του χρόνου της εξαφάνισής του. Η διάρκεια εκφράζεται σε μικροδευτερόλεπτα (μs), η οποία εξαρτάται από το μέγεθος πηγής και το φιλτράρισμα του θορύβου.

- **Χρόνος Ανύψωσης (AE) [Rise time]:** Ο χρόνος μεταξύ της στιγμής όπου το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μεγίστου πλάτους.
- **Κατανομή πλάτους (AE) [Amplitude distribution]:** Ψηφιακή αναπαράσταση του αριθμού των σημάτων AE σε συγκεκριμένο ή και μεγαλύτερο πλάτος, σχεδιασμένη ως λειτουργία του πλάτους.
- **Ενέργεια (AE) [Energy]:** Η ολική ελαστική ενέργεια (στην κυματομορφή) που απελευθερώνεται από ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής. Εκφράζεται συνήθως σε Joules ή και σε λογαριθμική μορφή (dB).
- **Απόλυτη Ενέργεια (AE) [Absolute energy]:** Η ενέργεια που εκλύεται σε όλη τη διάρκεια της καταγραφής ανεξάρτητα από το κατώφλι που έχει οριστεί. Μετρείται σε atto Joule ($=10^{-18}$ Joule).
- **Απόσβεση (AE) [Attenuation]:** Απώλεια πλάτους με την απόσταση που διανύει το κύμα καθώς ταξιδεύει στην υπό δοκιμή δομή.
- **Ανίχνευση (AE):** Αναγνώριση της παρουσίας σήματος (πρακτικώς/τυπικώς επιτυγχάνεται όταν το σήμα διασχίζει το όριο ανίχνευσης).
- **Κατώφλι Τάσης (AE) [Threshold]:** Όριο τάσης πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα Ακουστικής Εκπομπής.
- **Θόρυβος (AE) [Noise]:** Σήματα παραγόμενα από αιτίες διαφορετικές από αυτές των ακουστικών εκπομπών ή από πηγές που δεν έχουν σχέση με το σκοπό της δοκιμής.
- **Συμβάν (AE) [Event]:** Τοπική αλλαγή στο εσωτερικό ενός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή.
- **Δραστηριότητα (AE) [Activity]:** Μέτρηση της ποσότητας της εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας των γεγονότων.
- **Χρόνος Αφίξης (AE) [Arrival Time]:** Η χρονική στιγμή που ένα σήμα ακουστικής εκπομπής υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι. Απαραίτητος για τον υπολογισμό της θέσης της πηγής του γεγονότος AE.
- **Ένταση (AE) [Intensity]:** Η μέτρηση του μεγέθους των ανιχνευμένων σημάτων εκπομπής, όπως το μέσο πλάτος, η μέση ενέργεια AE ή ο μέσος όρος counts.

- **Απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο (AE) [Counts to peak]:** Παράμετρος που προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ακουστικής εκπομπής υπερβαίνει το κατώφλι τάσης μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τάση του (πλάτος σήματος).
- **Τοποθεσία/Εντοπισμός (AE) [Location]:** Αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών αισθητήρων AE για τον προσδιορισμό των σχετικών θέσεων των πηγών ακουστικής εκπομπής.
- **Αισθητήρας (AE) [Sensor]:** Συσκευή που περιέχει ένα μορφοτροπικό στοιχείο, που μετατρέπει τα κινούμενα κύματα AE σε ηλεκτρική τάση.
- **Κανάλια (AE) [Channels]:** Αισθητήρες AE και ο συναφής εξοπλισμός για διαβίβαση, τροποποίηση, εντοπισμό και μέτρηση των σημάτων που έρχονται από αυτά.
- **Guard Sensors (AE):** Αισθητήρες των οποίων η κύρια λειτουργία είναι η εξάλειψη του εξωτερικού θορύβου, βασιζόμενοι στις διαφορές του χρόνου άφιξης.
- **Ενεργοποίηση (AE) [Activation]:** Η εκδήλωση ακουστικής εκπομπής λόγω εφαρμογής αιτίου, όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα, κλπ.
- **Σήμα (AE) [Signal]:** Το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μορφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας).
- **Χαρακτηριστικά Σήματος (AE) [Signal Features]:** Μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος AE, όπως το πλάτος, η ενέργεια σήματος AE, η διάρκεια, ο χρόνος ανύψωσης και τα counts.
- **Ισχύς Σήματος (AE) [Signal Strength]:** Η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνευόμενου σήματος AE. Επίσης γνωστή ως " σχετική ενέργεια " (relative energy).
- **Πηγή (AE) [Source]:** Η φυσική προέλευση ενός ή περισσότερων γεγονότων AE.
- **Ενέργεια πηγής (AE) [Source Energy]:** Η ολική ενέργεια (όλων των μορφών) που διαχέεται από τις διεργασίες της πηγής.

Μετρώντας αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το μηχανισμό γένεσης των σημάτων AE. Όμως αυτά τα συμπεράσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή καθότι η κυματομορφή των σημάτων επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων όπως η φύση του υλικού, η διαδρομή που

ακολουθεί μέχρι την ανίχνευση του, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και το καταγραφικό σύστημα.

3.6 Παράγοντες επιρροής λήψης σήματος Ακουστικής Εκπομπής

Εκτός των ιδιοτήτων του υλικού που επηρεάζουν τη μορφή του λαμβανομένου σήματος, και άλλοι παράγοντες επιδρούν στη λήψη των σημάτων. Αυτοί είναι:

➤ Εξασθένιση

Αναφέρεται στη μείωση του πλάτους του κύματος κατά τη διάδοση του. Σχετίζεται με τη γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο (το πλάτος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης), την απόσβεση του υλικού διάδοσης, τυχόν απώλειες ενέργειας. Σε δοκίμια εργαστηριακών δοκιμών η εξασθένιση λόγω γεωμετρικής εξάπλωσης και απόσβεσης περιορίζεται σημαντικά από τις μικρές διαστάσεις του δοκιμίου.

➤ Θόρυβος

Οι πηγές του θορύβου εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες, ηλεκτρικές και μηχανικές. Σημαντική πηγή θορύβου στις μελέτες ΑΕ είναι οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference EMI), που δημιουργούνται στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της ΑΕ λόγω ακτινοβολίας ή ηλεκτρικής επαγωγής. Πηγές EMI είναι οι μετασχηματιστές, ισχυρές λάμπες, ηλεκτρικές μηχανές κλπ. Οι πηγές μηχανικού θορύβου προκαλούν κρουστικού τύπου σήματα. Κάθε κίνηση ενός μηχανικού μέρους σε επαφή με το δοκίμιο αποτελεί μία πιθανή πηγή μηχανικού θορύβου. Ο μηχανικός θόρυβος ελαττώνεται σημαντικά σε συχνότητες άνω των 100kHz. Όλα τα εξαρτήματα σε ένα σύστημα παρακολούθησης ΑΕ θωρακίζονται έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

3.7 Εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ

Ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα της ΑΕ ανάλυσης είναι ο εντοπισμός θέσης της πηγής του ακουστικού σήματος. Ένας από τους διάφορους τρόπους που υπάρχουν για τον εντοπισμό της θέσης της αστοχίας του υλικού βασίζεται στη χρήση πολλαπλών αισθητήρων.

Σε αυτά τα συστήματα αυτό που κυρίως χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι η διαφορά χρόνου μεταξύ των στιγμών έλευσης του κύματος στους διάφορους αισθητήρες και την ταχύτητα με την οποία αυτό διαδίδεται στο υλικό. Έτσι, τοποθετώντας τα αισθητήρια όργανα στις κατάλληλες θέσεις μπορεί να

ληφθεί μία πλήρης εποπτεία της δομικής κατάστασης του ελεγχόμενου σώματος με σχετικά μικρό αριθμό αισθητήρων. Όλα τα παραπάνω πραγματοποιούνται με δεδομένο ότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος εντός του υλικού παραμένει σταθερή, γεγονός που δεν εξασφαλίζεται πάντα και που έχει να κάνει με τη γεωμετρία και τις φυσικές ιδιότητες του υλικού.

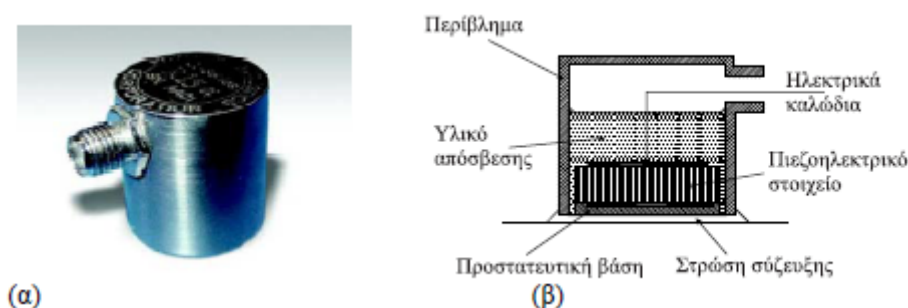
Επομένως, παράγοντες όπως η γεωμετρία του εξεταζόμενου σώματος αλλά και η συχνότητα δειγματοληψίας ή επεξεργασίας του ψηφιακού μας συστήματος είναι δύο πληροφορίες οι οποίες καθορίζουν τον εξοπλισμό και την μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθηθεί για τον ορθό εντοπισμό της πηγής (Κόγια, 2012).

3.8 Εξοπλισμός Ακουστικών Εκπομπών

3.8.1 Αισθητήρες και προενισχυτές

Αισθητήρες

Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες σήμερα είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Πρόκειται για ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT (lead-zirconate-titanate) το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλεται στην επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες (sensors) μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και μορφοτροπέες (transducers). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας-μορφοτροπέας δίνεται στην εικόνα 18. Μετατρέπει ελαστική μετατόπιση 1pm (picometer) σε ηλεκτρικό σήμα 1μV.



Εικόνα 18: (α) Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της PAC, (β) Κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Μπακογιάννης, 2011).

Το ενεργό στοιχείο ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα είναι ένας λεπτός δίσκος πιεζοηλεκτρικού υλικού (υλικό που μπορεί να μετατρέψει τη μηχανική παραμόρφωση σε ηλεκτρική τάση). Ο δίσκος έχει μεταλλική επικάλυψη και από τις δυο μεριές για ηλεκτρική διεπαφή, κατόπι εγκυβωτίζεται σε μεταλλικό κύλινδρο που του παρέχει προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες ΑΕ είναι φτιαγμένα από μικρούς κρυστάλλους τιτανίου (titanates) και zirconates, οι οποίοι αναμειγνύονται με άλλα υλικά, μορφοποιούνται στο επιθυμητό σχήμα, και θερμαίνονται σε κάμινο. Το κεραμικό υλικό μετατρέπεται τότε σε πιεζοηλεκτρικό λόγω πολικότητας, η οποία διαδικασία είναι η θέρμανση του υλικού πάνω από τη θερμοκρασία Curie του ενώ παραμένει σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο.

Για να αξιοποιηθεί η πολύ υψηλή ευαισθησία του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα, πρέπει να εφάπτεται στο υπό παρατήρηση υλικό με τέτοιο τρόπο ώστε η ακουστική ενέργεια να περνά στον αισθητήρα με την ελάχιστη απώλεια στην διεπιφάνεια αισθητήρα - υλικού. Η απαιτούμενη μηχανική επαφή επιτυγχάνεται σε επίπεδες επιφάνειες με μηχανική σύσφιξη χρησιμοποιώντας λεπτές μεμβράνες λιπαντικού, ελαιώδους ή εποξικού συγκολλητικού ανάμεσα στον αισθητήρα και στο υλικό. Γενικά, το πρόβλημα της ένωσης τους είναι πολύ πιο σοβαρό στην παρατήρηση διατμητικών κυμάτων επειδή το συγκολλητικό υλικό πρέπει να είναι ικανοποιητικά ιξώδες ώστε να στηρίζει την διατμητική κίνηση.

Αν και φαίνεται ότι ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας κατάλληλα ενωμένος με το δοκίμιο είναι ο ιδανικός αισθητήρας για την παρατήρηση ακουστικής εκπομπής, υπάρχουν μερικοί σημαντικοί περιορισμοί. Η θεωρία του πιεζοηλεκτρισμού συσχετίζει με ακρίβεια την τάση εξόδου ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού με τη τάση στην ελεύθερη επιφάνεια του, όμως ανακύπτουν επιπλοκές όταν ο αισθητήρας συνδέεται με ένα αληθινό υλικό. Το ισχυρά συνδεδεμένο υλικό αλλάζει τις συνοριακές μηχανικές συνθήκες που υπήρχαν στην μέχρι πρότινος ελεύθερη επιφάνεια του αισθητήρα.

Ως εκ τούτου η παραμόρφωση και η τάση στον αισθητήρα είναι διαφορετικές από τις τιμές που δίνει ο αισθητήρας απουσία υλικού. Η πολύ περίπλοκη αλληλεπίδραση ανάμεσα στον αισθητήρα και σε αυτό που προσπαθεί να μετρήσει, καθιστά δύσκολη τη συσχέτιση της τάσης εξόδου με ότι ακριβώς συμβαίνει μέσα στο δείγμα. Εάν το ακουστικό κύμα δεν είναι επίπεδο κύμα (plane wave), περαιτέρω περιπλοκές προκύπτουν λόγω της διαφοράς φάσης στην επιφάνεια του αισθητήρα. Ενώ αυτά τα

προβλήματα του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα γίνονται ενοχλητικά στη βασική έρευνα που στόχο έχει την αποκάλυψη της φύσης των πηγών ΑΕ, ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας έχει αποδείξει στο χρόνο ότι είναι επαρκέστατος στις περισσότερες μη καταστροφικές δοκιμές.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές είναι MICRO100s (εικόνα 18). Ανήκουν στην κατηγορία "γενικής χρήσης" με περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα και κεραμική επιφάνεια. Η συχνοτική τους απόκριση είναι 200 – 1000 kHz. Η ευαισθησία ενός αισθητήρα εξάγεται βάση της απόκρισης του σε σχέση με τη συχνότητα (τάση εξόδου – συχνότητα). Πόσες ανιχνεύσεις είναι ικανός να πραγματοποιεί στο εύρος συχνοτήτων του. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα ηλεκτρικά τους κυκλώματα, σε απλούς και σε διαφορικούς.

Προενισχυτές

Οι προενισχυτές έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύχρηστο για περαιτέρω επεξεργασία. Όπως δηλώνει και το όνομα του, αναλαμβάνει να ενισχύσει το ανιχνευόμενο σήμα σε υψηλότερη τάση ώστε να είναι κατάλληλο για περαιτέρω επεξεργασία. Για τη μείωση παρεμβολών EMI συνίσταται να τοποθετείται κοντά ή μέσα στο περίβλημα του αισθητήρα. Παράγουν και αυτοί θόρυβο όπως και ο αισθητήρας, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση φίλτρου για ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Για την ενίσχυση του σήματος χρησιμοποιήθηκαν προ-ενισχυτές τύπου PAC 2/4/6, με δυνατότητα ενίσχυσης της έντασης του σήματος ΑΕ κατά 20/40/ dB \pm 0.5% dB. Η επιλογή ενίσχυσης του εισερχόμενου σήματος γίνεται μέσω διακόπτη (Gain Select). Όπως έχει προαναφερθεί το πλάτος του σήματος ΑΕ που καταγράφεται στο σύστημα υπολογίζεται λογαριθμικά σύμφωνα με τη σχέση :

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_{max}}{1\mu Volt} \right) - (\text{ενίσχυση προενισχυτήσε dB}) \quad (4)$$

Όταν η ενίσχυση του σήματος ΑΕ ρυθμίζεται στα 20 dB τότε το συχνοτικό εύρος λειτουργίας κυμαίνεται από 10kHz έως 2.5MHz, όταν ρυθμίζεται στα 40 dB (συνήθης επιλογή) κυμαίνεται από 10kHz-2.0MHz και όταν ρυθμίζεται στα 60 dB κυμαίνεται στα 10-900kHz. Το ρεύμα λειτουργίας είναι 30mA και η σύνθετη αντίσταση 10kΩ. Αυτός ο τύπος προ-ενισχυτών συνδέεται με αισθητήρες μονής εξόδου (απλοί αισθητήρες, single-ended) ή με διαφορικούς αισθητήρες (differential).

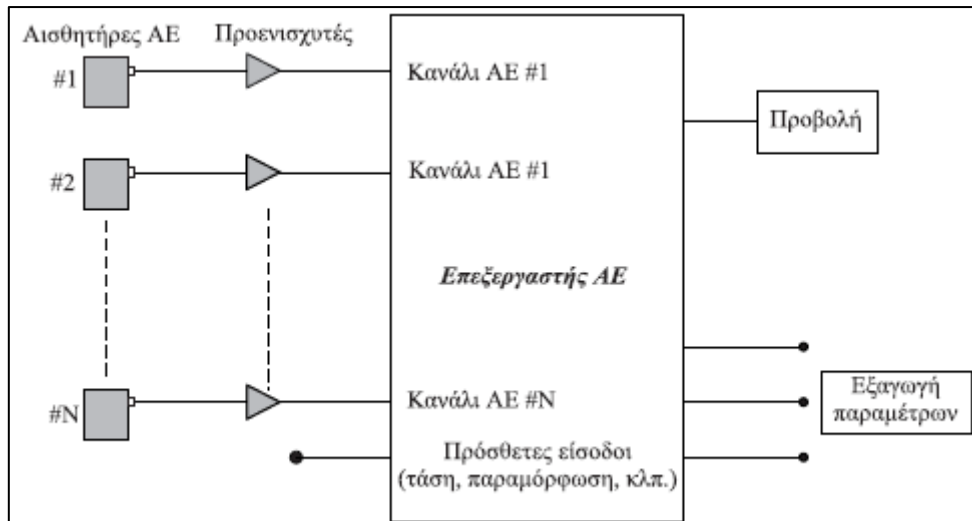
Η σύνδεση φίλτρου δίδει τη δυνατότητα επιλογής του διερχόμενου σήματος (φιλτράρισμα) καθώς και ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων θορύβων. Γενικά υπάρχουν φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass Filter), διαχωρισμού υψηλών συχνοτήτων (Low Pass) και ανοιχτού τύπου (Band Pass).

Άλλοι τύποι αισθητήρων

Έκτος των αισθητήρων πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (PZT) και άλλοι τύποι βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Αισθητήρες laser έχουν χρησιμοποιηθεί, προσφέροντας μέτρηση της ΑΕ χωρίς επαφή του δοκιμίου αλλά είναι λιγότερο ευαίσθητοι από τους PZT, και γενικά χρησιμοποιούνται σε φαινόμενα ΑΕ μεγάλου πλάτους. Οι αισθητήρες PZT έχουν περιορισμούς σε αυξημένες θερμοκρασίες λόγω ότι το στοιχείο PZT έχει σημείο Curie. Αισθητήρες ΑΕ laser χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κεραμικών, στον έλεγχο ρωγμών κατά την θέρμανση στους φούρνους. Επίσης άλλος τύπος που έχει χρησιμοποιηθεί πειραματικά είναι αισθητήρας οπτικών ινών, με πλεονεκτήματα τη μακροχρόνια χρήση του, τη λειτουργία του σε διαβρωτικά περιβάλλοντα καθώς και τον μη επηρεασμό του από ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους.

3.8.2 Μονάδα επεξεργασίας

Το ελαστικό εντατικό κύμα που φθάνει σε κάθε αισθητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται επεξεργάζεται από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα ΑΕ, βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος. Απλοποιημένο διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ δίνεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων AE (Μπακογιάννης, 2011).

Τα κανάλια AE είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε δύο ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής. Οι παράμετροι που μπορούν να μετρούνται για κάθε σήμα AE περιλαμβάνουν το πλάτος (amplitude - dB), τον αριθμό των απαριθμήσεων (counts), το χρόνο ανύψωσης (rise time), τη συνολική διάρκεια (duration) κλπ (Μπακογιάννης, 2011).

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα τα γεγονότα AE μπορούν να φτάσουν χιλιάδες, οπότε η ανάγκη για υπολογιστική δύναμη της μονάδας είναι η μέγιστη δυνατή. Η δυνατότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης των γεγονότων πρέπει είναι ανάλογη του εύρους συχνοτήτων που λαμβάνει ο αισθητήρας. Οι σύγχρονες μονάδες καταγραφής και επεξεργασίας σημάτων AE εντοπίζουν 100 έως 1000 γεγονότα/δευτερόλεπτο.

3.8.3 Λογισμικό Επεξεργασίας

Για την επεξεργασία των κυματομορφών χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά AE-Win και NOESIS 4.0 Light. Οι κυριότερες δυνατότητες των προγραμμάτων συνοψίζονται παρακάτω :

- Ταξινόμηση, προβολή και επεξεργασία στοιχείων σε πραγματικό χρόνο.
- Ομαδοποίηση, σύγκριση γραφημάτων και στατιστική ανάλυση.
- Προχωρημένη προβολή δεδομένων [Histograms (2D, 3D), Scatters (point plots 2D, 3D), Bars κλπ.), αξιοποίηση και φιλτράρισμα.

- Προβολή κυματομορφών, φασματικών αναλύσεων FFT (Fast Fourier Transformation) και συχνοτικού περιεχομένου (Power Spectrum Analysis).
- Εντοπισμός της θέσης προέλευσης των σημάτων σε πραγματικό χρόνο, με γραμμικό εντοπισμό (Linear Location), με διδιάστατο εντοπισμό (2D Planar Location), τρισδιάστατο εντοπισμό (3D Planar Location) και εντοπισμό κατά ζώνες (Zonal Location).

3.9 Τυπικές εφαρμογές ακουστικής εκπομπής

Η ακουστική εκπομπή χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς διάφορων υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά, πετρώματα, σκυρόδεμα κ.α. για τους εξής σκοπούς (Μπακογιάννης, 2011):

- Διάδοση ρωγμών
- Διαρροή
- Γήρανση
- Διάβρωση
- Ερπυσμός

Επίσης, στο μη καταστρεπτικός έλεγχος κατά τη διάρκεια κατασκευής:

- Κατεργασία υλικών
- Αλλαγή φάσης σε μέταλλα και κράματα (μαρτενσιτικός μετασχηματισμός)
- Εντοπισμός ελαττωμάτων όπως πόροι, ρωγμές βαφής, εγκλείσματα, κλπ.
- Παραμορφωτικές κατεργασίες - σφυρηλάτηση, διέλαση
- Συγκολλήσεις

Στην παρακολούθηση κατασκευών:

- Συνεχής παρακολούθηση (μεταλλικές κατασκευές, μεταλλεία, κ.λ.π.)
- Περιοδικός έλεγχος (υδραυλικοί αγωγοί, γέφυρες, καλώδια)
- Εντοπισμός χαλαρών μελών
- Εντοπισμός διαρροών

Και σε άλλες, ειδικές εφαρμογές, όπως:

- Χημικές και πετροχημικές: δεξαμενές αποθήκευσης, δοχεία αντιδράσεων, υπεράκτιες πλατφόρμες, γεωτρήσεις, σωληνώσεις, βαλβίδες.

- Ηλεκτρικές εφαρμογές: δεξαμενές πυρηνικών αντιδραστήρων, παραγωγί ατμού, κεραμικοί μονωτές, μεταλλάκτες.
- Αεροναυπηγική: ρωγμές γήρανσης, διάβρωση, σύνθετες κατασκευές.
- Ηλεκτρονικά: χαλαρά συνδεδεμένα μέρη σε ηλεκτρονικά μέρη, συγκολλήσεις, ρωγμές στο υπόστρωμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΟΚΙΜΕΣ

4.1 Μέτρηση ακουστικής εκπομπής

Για την διεξαγωγή των δοκιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες, που διατίθενται από το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και έξι ακόμα από το Εργαστήριο Γεωφυσικής και Σεισμολογίας του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης (Χανιά).

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το USB AE Node, το οποίο αποτελείται από μία μονάδα επεξεργασίας και το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων στον υπολογιστή ("AE win Physical Acoustics Corporation"). Το USB Node είναι ένα μονοκάναλο σύστημα επεξεργασίας δεδομένων AE, με παρακολούθηση όλων των καθοριζόμενων χαρακτηριστικών ενός πολυκάναλου συστήματος. Έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- ✓ Μικρή φορητή μονάδα για γρήγορη και αποτελεσματική δοκιμή στο πεδίο
- ✓ Σύνδεση με USB 2.0, για συμβατότητα με όλους τους υπολογιστές
- ✓ Πλήρης απόκριση εύρους συχνοτήτων AE 1kHz-1MHz
- ✓ Σύνδεση μέχρι τεσσάρων USB Node
- ✓ Χρησιμοποιεί πρότυπους χαμηλού κόστους AE αισθητήρες
- ✓ Μετατροπέα A/D 18bit, με ρυθμό δειγματοληψίας 20MSPS
- ✓ Δυνατότητα τοποθέτησης τεσσάρων παραμετρικών αισθητήρων 16bit A/D, για το συσχετισμό AE με αισθητήρες άλλων μετρούμενων μονάδων
- ✓ LED ενδείξεις POWER/HIT/ALARM
- ✓ Μόνιμη ψηφιακή καταγραφή δεδομένων από πρότυπο της PAC, με _DTA αρχεία δεδομένων (USB AE NodeTM & AEwinTM for USBTM Software, 2010)

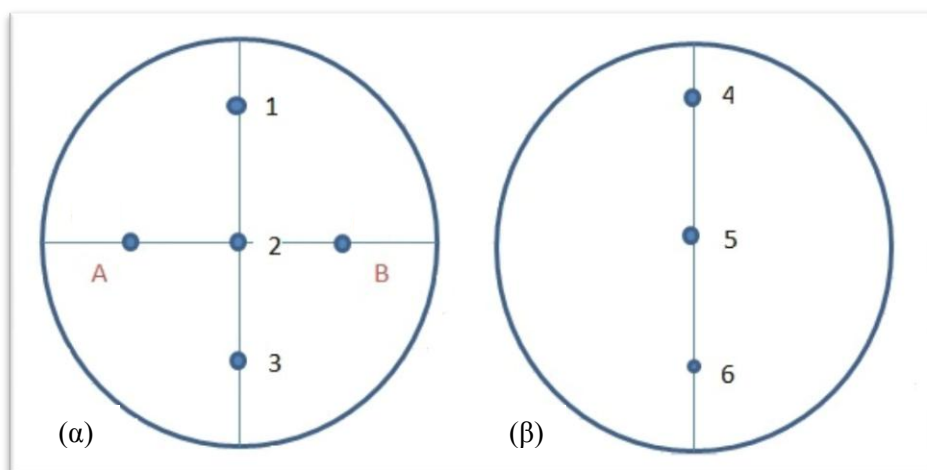
Αρχικά συνδέεται το κάθε σύστημα επεξεργασίας με καλώδιο mini USB στον υπολογιστή, για να πάρει ρεύμα και να μπορεί να μεταφέρει τα δεδομένα. Εν συνεχεία τοποθετείτε ένα λεπτό στρώμα από το υλικό σύζευξης στο δοκίμιο και προσαρμόζονται στο σημείο εκείνο οι αισθητήρες PICO. Στην περίπτωση του πολυκάναλου συστήματος επεξεργασίας με καλώδιο δικτύου συνδέονται μεταξύ τους από το Line out του καναλιού 1 στο Line in του καναλιού 2 (Εικόνα 20).



Εικόνα 20: Σύστημα παρακολούθησης ΑΕ.

Η ίδια συνδεσμολογία ακολουθήθηκε και για τους έξι αισθητήρες σε πρόσθετη φορητή μονάδα επεξεργασίας και λογισμικό καταγραφής που ανταποκρίνεται στις ανάγκες των επιπλέον αισθητήρων.

Οι αισθητήρες (τύπου PICO) που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή τοποθετήθηκαν στα δοκίμια όπως φαίνεται στην εικόνα 21. Με τους αριθμούς από 1 έως 6 αριθμήθηκαν οι αισθητήρες από διατέθηκαν από το Εργαστήριο Γεωφυσικής & Σεισμολογίας, ενώ με τα γράμματα Α και Β ονομάστηκαν οι αισθητήρες που διέθεσε το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων.



Εικόνα 21: Διάταξη αισθητήρων (α) μπροστά όψη και (β) πίσω όψη.

Για την καλύτερη απόκριση των αισθητήρων πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο υλικό σύζευξης με αυξημένο ιξώδες για την μεγιστοποίηση της επιφάνειας σύζευξης μεταξύ

των αισθητήρων και της επιφάνειας του δοκιμίου. Ξηρή σύζευξη δεν συνίσταται διότι μειώνει αισθητά την απόκριση των αισθητήρων. Έτσι λοιπόν ως υλικό σύζευξης χρησιμοποιήθηκε η σιλικόνη. Η σιλικόνη κρατάει σταθερό τον αισθητήρα πάνω στο δοκίμιο και εξασφαλίζει την καλή επαφή μεταξύ των δύο επιφανειών (αισθητήρα-δοκίμιο) ώστε να μην υπάρχουν σημαντικές απώλειες κατά τη μετάδοση των ακουστικών κυμάτων. Έτσι ευνοείται ο εντοπισμός χαμηλού επιπέδου ακουστικών εκπομπών από τους αισθητήρες.

4.2 Ρυθμίσεις καταγραφής Ακουστικής εκπομπής

Στο λογισμικό AE-win επιλέχθηκαν, για όλες τις δοκιμές, οι παρακάτω ρυθμίσεις (Εικόνες 22, 23, 24, 25):

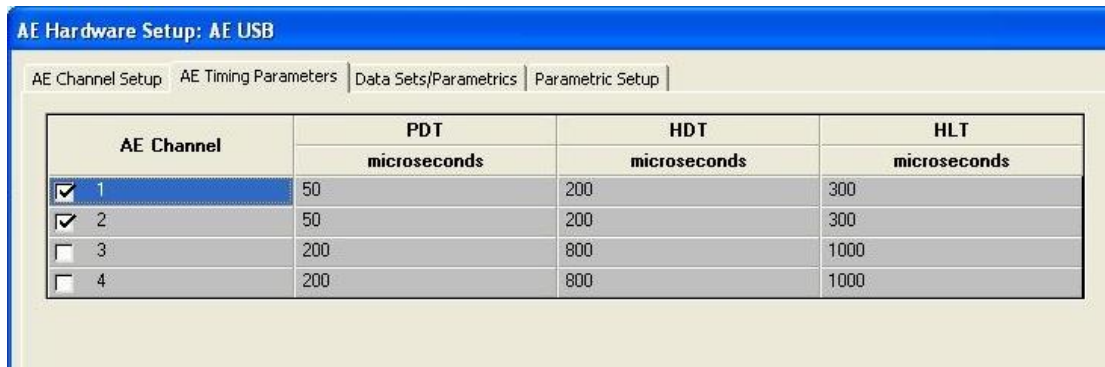
- Η τάση κατωφλιού για τους αισθητήρες A & B διατηρείται σταθερή (Fixed) στα 28dB (Εικόνα 22), ενώ για τους αισθητήρες 1-6 διατηρείται σταθερή στα 38dB.
- Η ενίσχυση του σήματος στον προ-ενισχυτή επιλέγεται στα 40dB.
- Στο αναλογικό φίλτρο (Analog Filter) ως κατώτερη τιμή ορίζονται τα 20kHz και ως ανώτερη το 1MHz.
- Ο ρυθμός δειγματοληψίας (Sample Rate) ορίζεται τα 5 MSPS (Mega Samples Per Second) που σημαίνει πως το δείγμα των κυματομορφών λαμβάνεται κάθε 1/5μs.

AE Hardware Setup: AE USB							
AE Channel Setup AE Timing Parameters Data Sets/Parameters Parametric Setup							
AE Channel	Threshold		Analog Filter		Waveform Setup		
	Type	dB	Lower	Upper	Sample Rate	Pre-Trigger	Length
<input checked="" type="checkbox"/> 1	FIXED	28	20kHz	1MHz	5MSPS	20.0000	1k
<input checked="" type="checkbox"/> 2	FIXED	28	20kHz	1MHz	5MSPS	20.0000	1k
<input type="checkbox"/> 3	FIXED	45	20kHz	200kHz	5MSPS	20.0000	1k
<input type="checkbox"/> 4	FIXED	45	20kHz	200kHz	5MSPS	20.0000	1k

Εικόνα 22: Παράμετροι Ακουστικής εκπομπής για κάθε κανάλι.

- Οι χρονικοί παράμετροι AE που καθορίστηκαν είναι (Εικόνα 23): το χρονικό διάστημα (μs) μεταξύ της πρώτης υπέρβασης του κατωφλιού και του μεγίστου του σήματος AE (PDT-Peak Definition Time) ρυθμίζεται στα 50μs, ενώ η χρονική διάρκεια ενός κτύπου (HDT-Hit Definition Time) ρυθμίζεται στα 200

μs. Με την ορθή επιλογή του χρόνου HDT κάθε σήμα AE πρέπει να αντιστοιχεί σε έναν και μόνο κτύπο (hit). Ο HLT (Hit Lockout Time) ρυθμίζεται από το λογισμικό και διατηρείται ως έχει στα 300μs.

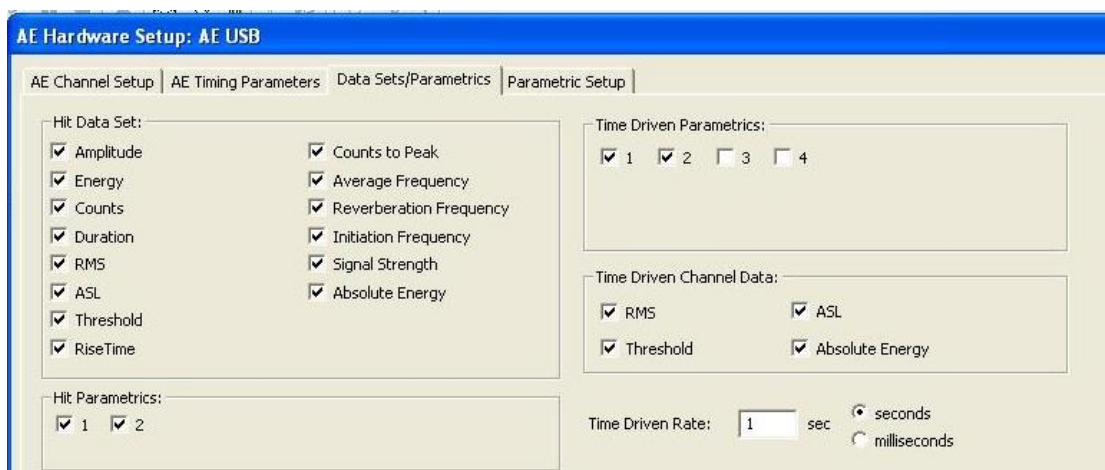


AE Channel	PDT	HDT	HLT
	microseconds	microseconds	microseconds
<input checked="" type="checkbox"/> 1	50	200	300
<input checked="" type="checkbox"/> 2	50	200	300
<input type="checkbox"/> 3	200	800	1000
<input type="checkbox"/> 4	200	800	1000

Εικόνα 23: Καθορισμός χρονικών παραμέτρων για όλες τις δοκιμές.

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι στις εικόνες 22, 23, 24 φαίνονται οι ρυθμίσεις των παραμέτρων του λογισμικού των αισθητήρων A & B. Ανάλογες ρυθμίσεις έγιναν και για τους αισθητήρες 1-6 από το αντίστοιχο λογισμικό.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι ρυθμίσεις εξαγωγής των γραφημάτων από το λογισμικό. Εκεί επιλέγονται οι παράμετροι AE που θα καταγραφούν κατά τη δοκιμή (Εικόνα 24) και θα παριστάνονται στα διαγράμματα του προγράμματος. Για να υφίσταται ορθή και συγχρονισμένη εξαγωγή δεδομένων το AE-win for USB και η μηχανή MTS, στις ρυθμίσεις των διαγραμμάτων στον άξονα του χρόνου επιλέγεται Bin Axis 1000 και Horizontal axis από 0 έως 1000 (Εικόνα 25).



Hit Data Set:

- ☒ Amplitude
- ☒ Energy
- ☒ Counts
- ☒ Duration
- ☒ RMS
- ☒ ASL
- ☒ Threshold
- ☒ RiseTime
- ☒ Counts to Peak
- ☒ Average Frequency
- ☒ Reverberation Frequency
- ☒ Initiation Frequency
- ☒ Signal Strength
- ☒ Absolute Energy

Hit Parameters:

- ☒ 1
- ☒ 2

Time Driven Parameters:

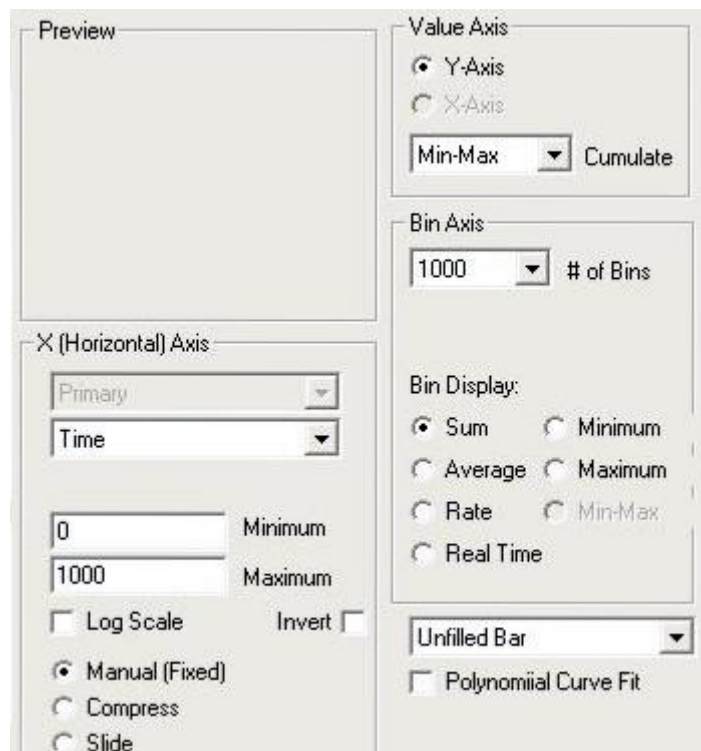
- ☒ 1
- ☒ 2
- ☐ 3
- ☐ 4

Time Driven Channel Data:

- ☒ RMS
- ☒ ASL
- ☒ Threshold
- ☒ Absolute Energy

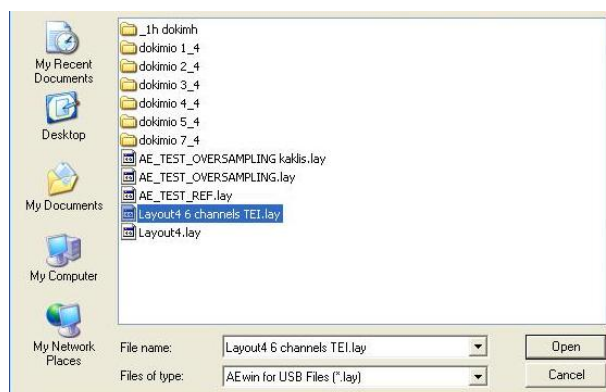
Time Driven Rate: 1 sec ☒ seconds ☐ milliseconds

Εικόνα 24: Ρύθμιση παραμέτρων AE.



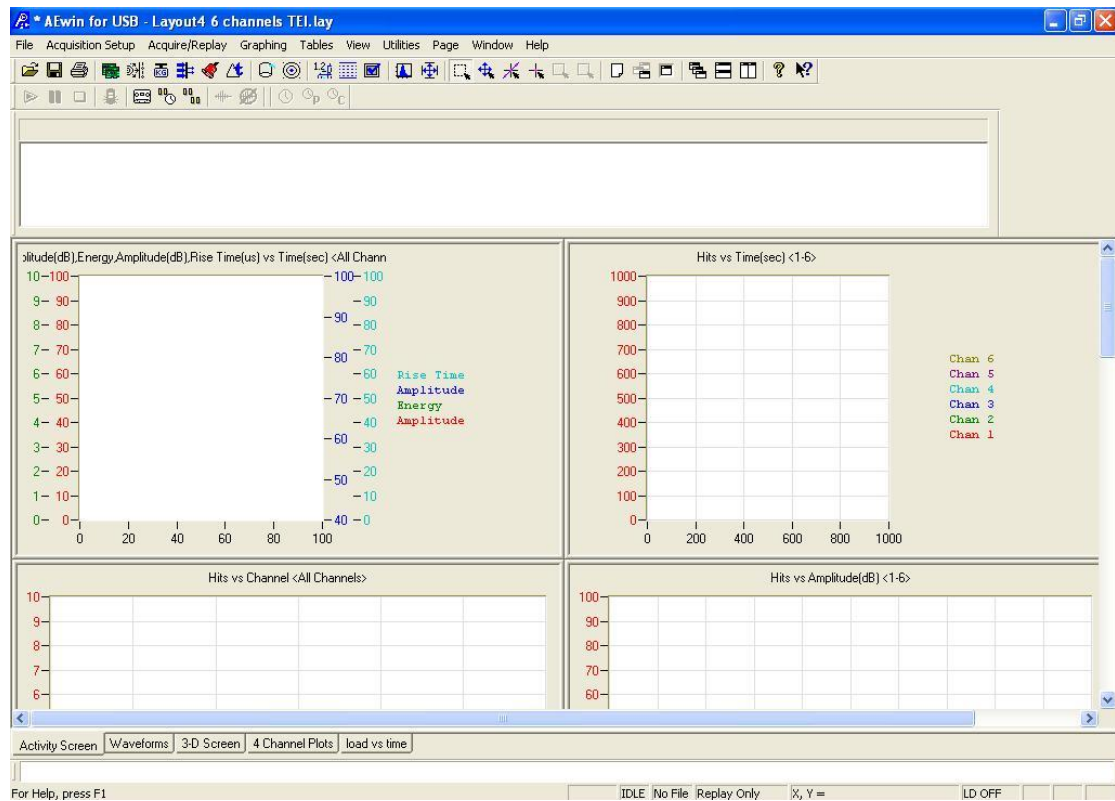
Εικόνα 25: Καθορισμός διαστήματος μελέτης οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα στα γραφήματα.

Μετά τις παραπάνω ρυθμίσεις ακολουθεί η επιλογή του σχεδίου-διάταξης (Layout) που είναι επιθυμητό να απεικονίζεται στο λογισμικό κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Για να είναι συγχρονισμένα τα δεδομένα καταγραφής όλων των αισθητήρων δημιουργείται η διάταξη "Layout4 6channels TEI", όπως φαίνεται στην εικόνα 26. Η διάταξη αυτή είναι σχεδιασμένη για 6 κανάλια (αισθητήρες), αλλά έχει τη δυνατότητα να καταγράφει όσα από τα κανάλια επιλεγούν. Επομένως το λογισμικό είναι σε θέση να καταγράψει ακόμα και μεμονωμένα δεδομένα των αισθητήρων Α & Β στην ίδια διάταξη.



Εικόνα 26: Επιλογή διάταξης καταγραφής δεδομένων.

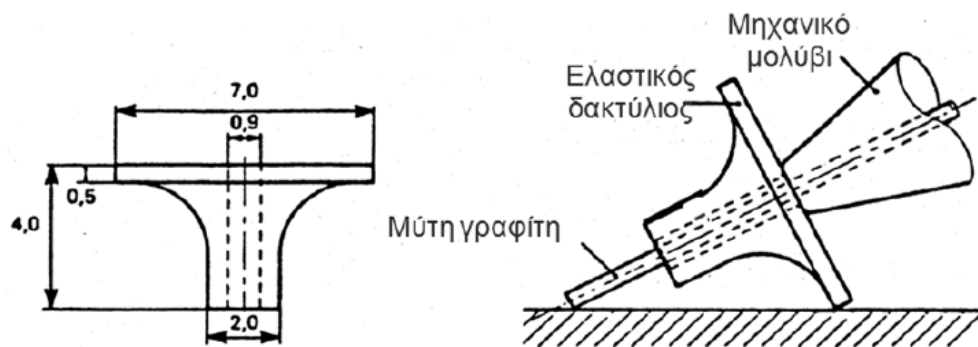
Έτσι, η διάταξη τελικά του λογισμικού που είναι έτοιμο για πραγματοποίηση καταγραφής φαίνεται στην εικόνα 27.



Εικόνα 27: Διάταξη καταγραφής δεδομένων.

4.3 Pencil Lead Break (PLB)

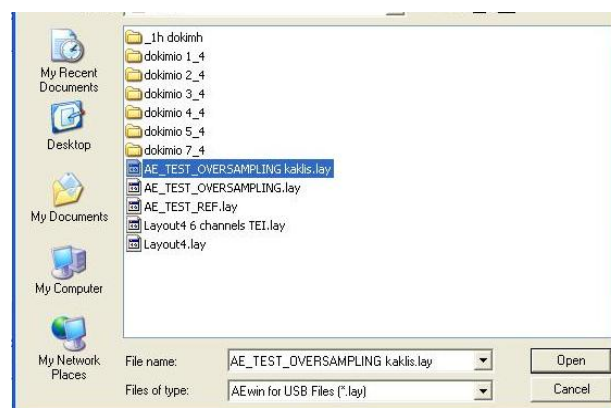
Η Pencil Lead Break (PLB) είναι μια εύκολη και αποτελεσματική μέθοδος προσομοίωσης πηγών ακουστικών εκπομπών (Sause 2011). Οι πηγές αυτές αποτελούνται από μύτες μολυβιού 2H πάχους 0.5mm οι οποίες θραύονται σε κάμψη όντας σε επαφή με άκαμπτη επιφάνεια, ενώ για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιείται ελαστικός δακτύλιος ώστε να μην ακουμπήσει το μεταλλικό μέρος του μολυβιού στο δοκίμιο.



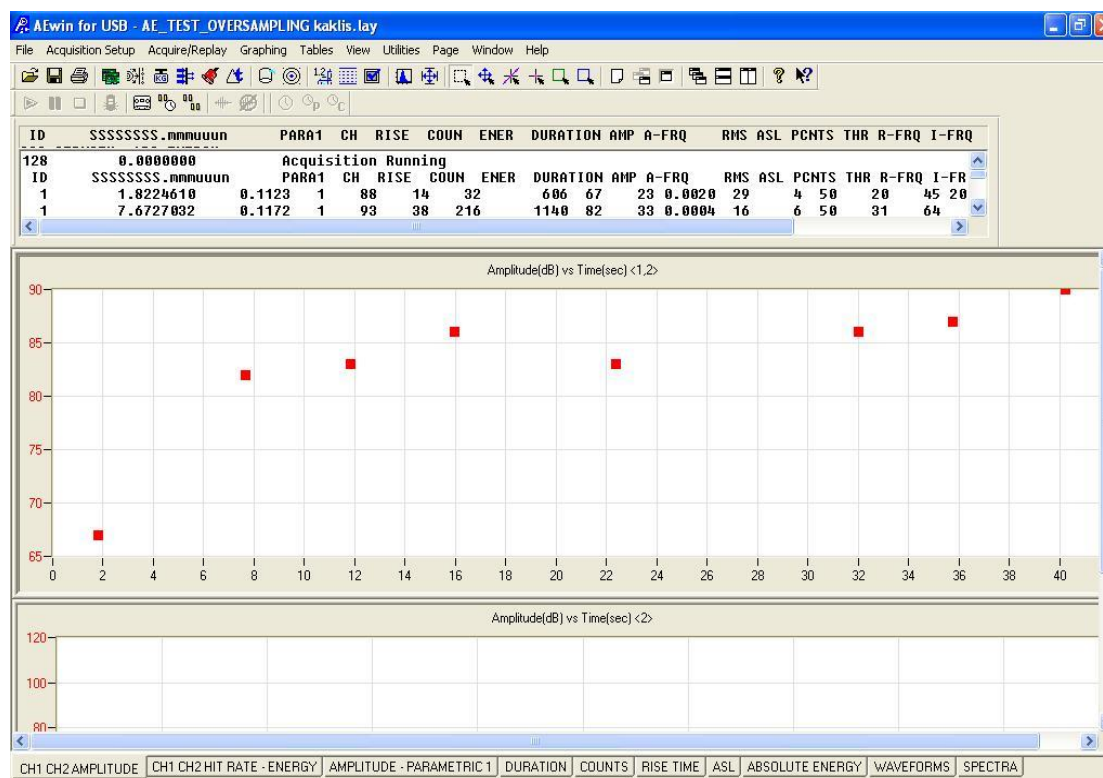
Εικόνα 28: Ειδικό προστατευτικό κάλυμμα προσαρμοσμένο στην άκρη πρότυπου μηχανικού μολυβιού (Hardy, 2003).

Η προσομοίωση των ακουστικών εκπομπών γίνεται με το σπάσιμο της μύτης από γραφίτη η οποία πραγματοποιείται κοντά στους αισθητήρες και στο μέσο περίπου του δοκιμίου ενώ η ορθή λειτουργία επιτυγχάνεται σε πλάτος 90-100dB. Για μικρότερες τιμές από τα 85dB ο αισθητήρας θα πρέπει να τοποθετηθεί καλύτερα στο δοκίμιο. Η μέθοδος PLB χρησιμοποιήθηκε πριν από τις δοκιμές προκειμένου να βαθμονομηθεί η συσκευή παρακολούθησης των ακουστικών εκπομπών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την προσομοίωση με το μολύβι θα χρησιμοποιηθεί άλλη διάταξη από αυτή της καταγραφής των δεδομένων κατά τη διάρκεια των δοκιμών, η οποία δημιουργήθηκε ακριβώς για το σκοπό αυτό (Εικόνα 29 & 30).



Εικόνα 29: Επιλογή διάταξης καταγραφής για τη μέθοδο PLB.



Εικόνα 30: Διάταξη καταγραφής για τη μέθοδο PLB.

4.4 Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμής αντιδιαμετρικής φόρτισης (Brazil)

Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι κατόπιν λεπτομερούς επεξεργασίας των δεδομένων που ελήφθησαν τόσο από τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης όσο και από την ακουστική εκπομπή, κρίθηκαν κατάλληλα προς συζήτηση και περαιτέρω ανάλυση τα δοκίμια 8.2, 9.2 και 9.3. Ο λόγος για τον οποίο απορρίπτονται τα υπόλοιπα δοκίμια είναι το γεγονός ότι λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων των 6 αισθητήρων υπήρξαν κενά στην καταγραφή ακουστικής εκπομπής, επομένως δεν θα μπορούσαν να παρουσιαστούν αντίστοιχα διαγράμματα.

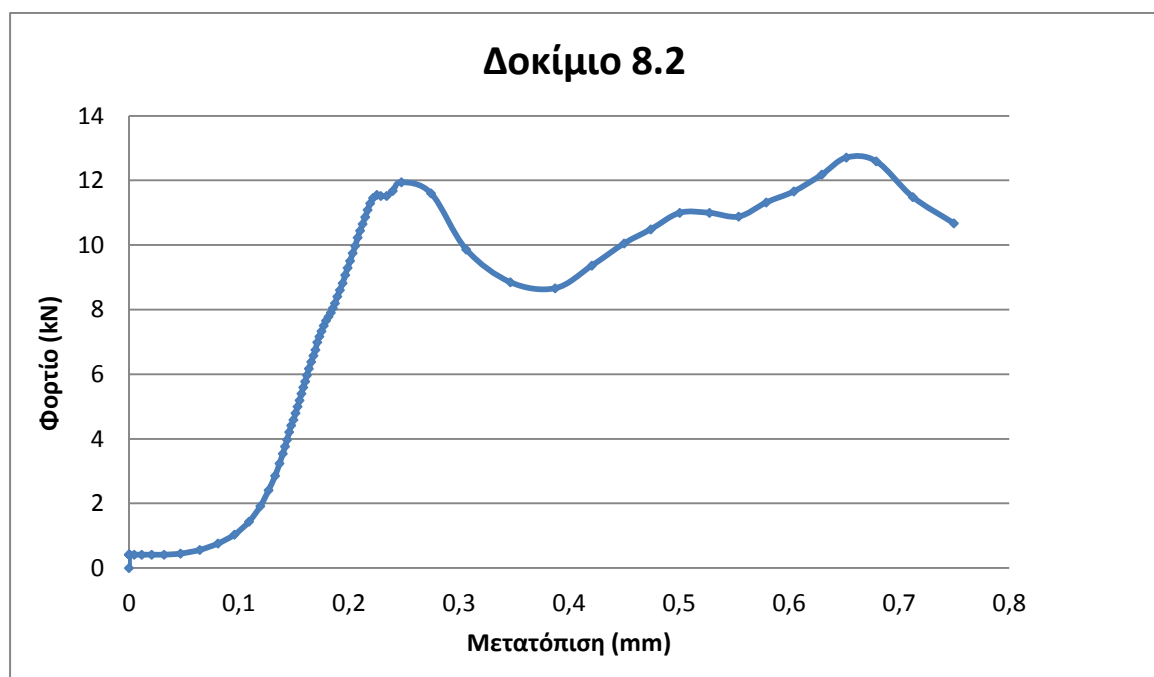
Επίσης δεν χρησιμοποιήθηκαν στον δοκίμιο μετρητές παραμόρφωσης καθότι δεν χωρούσαν στον διαθέσιμη επιφάνεια του δοκιμίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού Brazil των παραπάνω δοκιμίων παρουσιάζονται παρακάτω.

Δοκίμιο 8.2

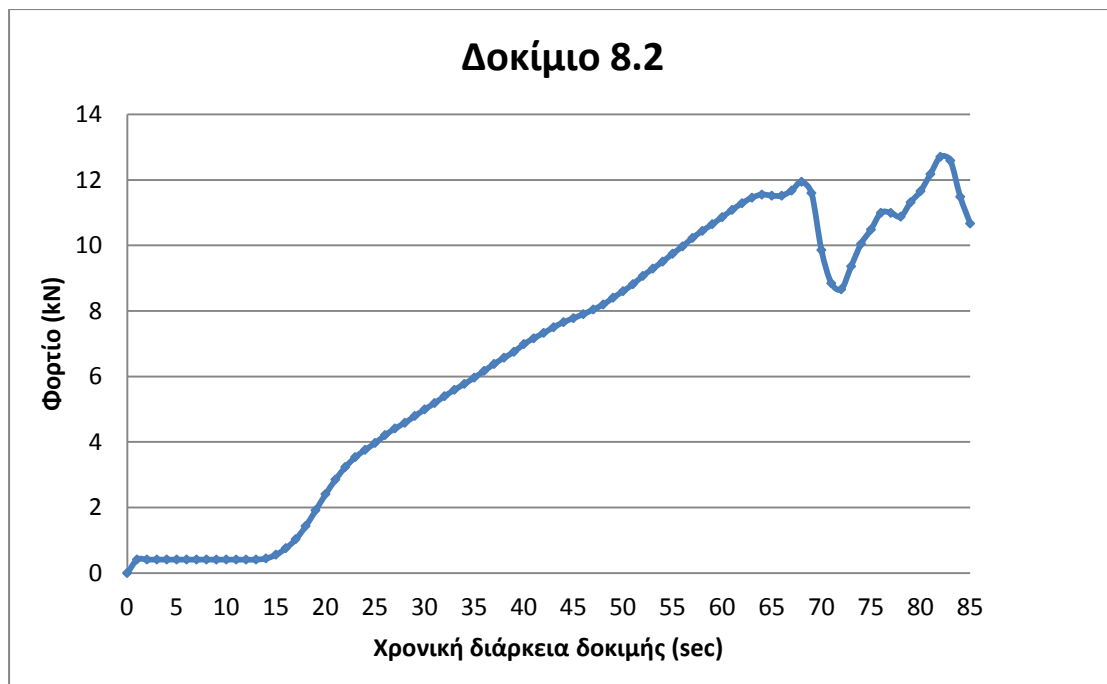
Για το δοκίμιο 8.2 παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3 οι διαστάσεις καθώς και κάποια δεδομένα καταγραφής από τη δοκιμή.

Πίνακας 3: Δεδομένα δοκιμίου 8.2

	Διάμετρος (m)	Ύψος (m)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Εφελκυστική τάση σ (MPa)	Χρονική διάρκεια δοκιμής (sec)	Χρονική στιγμή αστοχίας (sec)
	0,05220	0,02555	11,944	5,704	85	82
	0,05225	0,02550				
	0,05225	0,02550				
Μέση τιμή	0,52233	0,25517	-	-	-	-

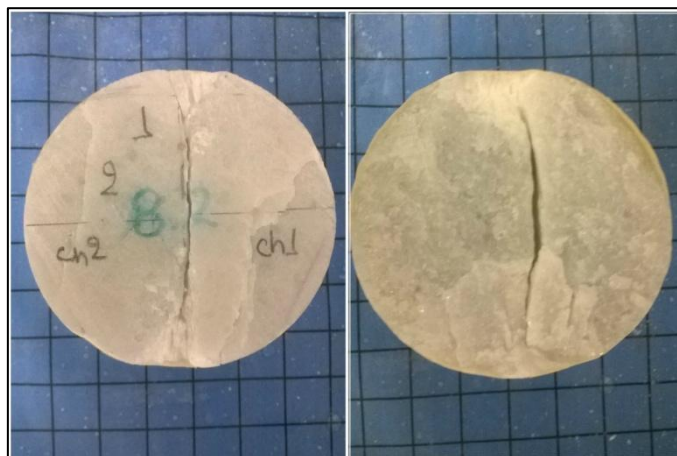


Σχήμα 1: Διάγραμμα φορτίου συναρτήσει της μετατόπισης για το δοκίμιο 8.2.



Σχήμα 2: Διάγραμμα φορτίου συναρτήσει της χρονικής διάρκειας της δοκιμής για το δοκίμιο 8.2.

Από τη χρονική στιγμή που ξεκινά η δοκιμή έως τα 15sec περίπου το δοκίμιο δεν έχει δεχθεί ακόμα φορτία. Παρατηρείται λοιπόν το δοκίμιο να αστοχεί σε φορτίο 11,9kN (στα 68sec, με μετατόπιση 0,247mm) και να συνεχίζει να δέχεται φορτία μεγαλύτερα από αυτό. Το δοκίμιο έχει αστοχήσει σε εφελκυσμό ενώ συνεχίζει και καταπονείται σε θλίψη. Επομένως, η αντοχή του σε εφελκυσμό υπολογίστηκε 5,7MPa. Η τελική θραύση όμως του δοκιμίου είναι στα 12,7kN και σε μετατόπιση 0,652mm. Στο σχήμα 2 φαίνεται η χρονική διάρκεια της δοκιμής Brazil και ο χρόνος που επέρχεται αστοχία, ενώ στην εικόνα 31 φαίνεται η θραύση του δοκιμίου.



Εικόνα 31: Αστοχία δοκιμίου 8.2.

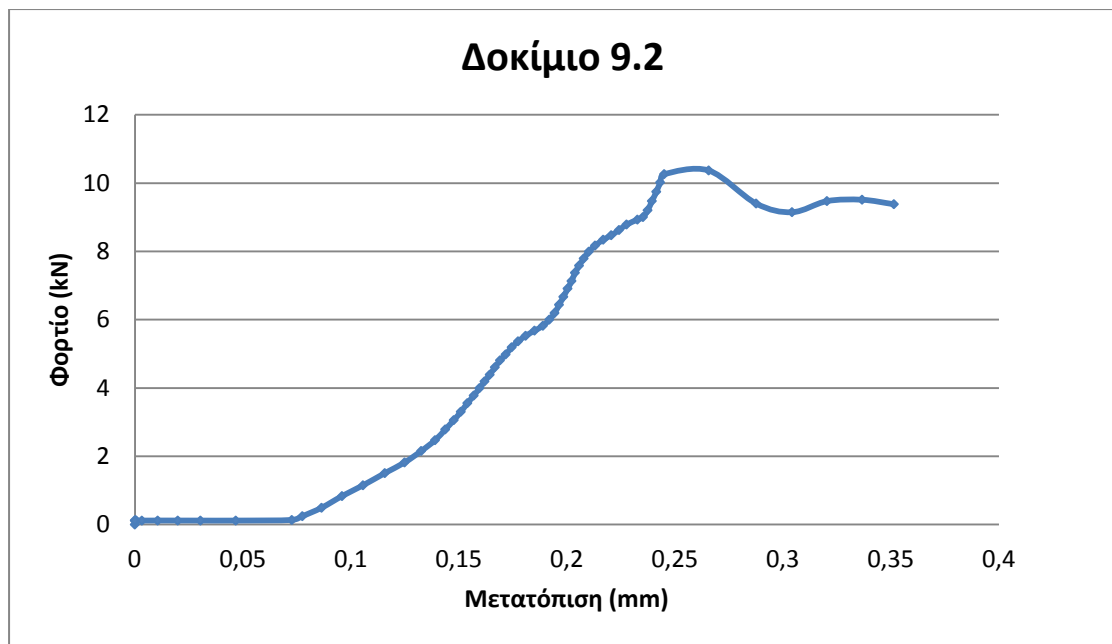
Όπως παρατηρείται, το δοκίμιο θραύεται στο επίπεδο αστοχίας που αναμένεται δηλαδή στον (κατακόρυφο) φόρτισης του. Φαίνεται επίσης και ο σχηματισμός μικρών σφηνών στην άνω και κάτω επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με τις πλάτες φόρτισης κάτι το οποίο αποδεικνύει τον ισχυρισμό ότι όταν η φόρτιση είναι σημειακή, αναπτύσσονται μεγάλες διατμητικές τάσεις οι οποίες προκαλούν τοπικά θρυμματισμό.

Δοκίμιο 9.2

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται συνοπτικά δεδομένα που αφορούν το δοκίμιο 9.2.

Πίνακας 4: Δεδομένα δοκιμίου 9.2

	Διάμετρος (m)	Ύψος (m)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Εφελκυστική τάση σ (MPa)	Χρονική διάρκεια δοκιμής (sec)	Χρονική στιγμή αστοχίας (sec)
	0,05225	0,02425	10,371	5,211	63	58
	0,05225	0,02425				
	0,05225	0,02425				
Μέση τιμή	0,05225	0,02425	-	-	-	-



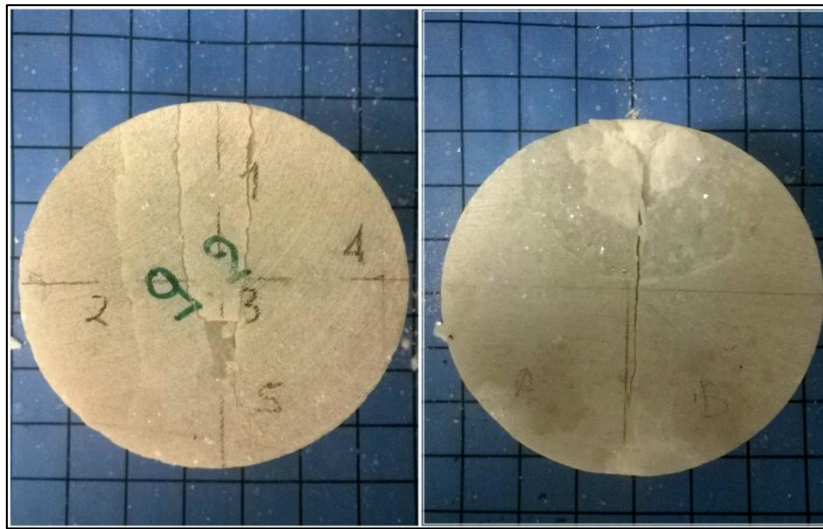
Σχήμα 3: Διάγραμμα φορτίου συναρτήσει της μετατόπισης για το δοκίμιο 9.2.



Σχήμα 4: Διάγραμμα φορτίου συναρτήσει της χρονικής διάρκειας της δοκιμής για το δοκίμιο 9.2.

Ομοίως, από τη στιγμή έναρξης της δοκιμής έως τα 12sec περίπου το δοκίμιο δεν έχει δεχθεί φορτίο. Παρατηρείται λοιπόν να αστοχεί σε εφελκυσμό σε φορτίο 10,4kN (στα 58sec, με μετατόπιση 0,2657mm). Επομένως, η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι 5,2MPa.

Στο σχήμα 4 φαίνεται η χρονική διάρκεια της δοκιμής Brazil και ο χρόνος που επέρχεται αστοχία, ενώ στην εικόνα 32 φαίνεται η θραύση του δοκιμίου.



Εικόνα 32: Αστοχία δοκιμίου 9.2.

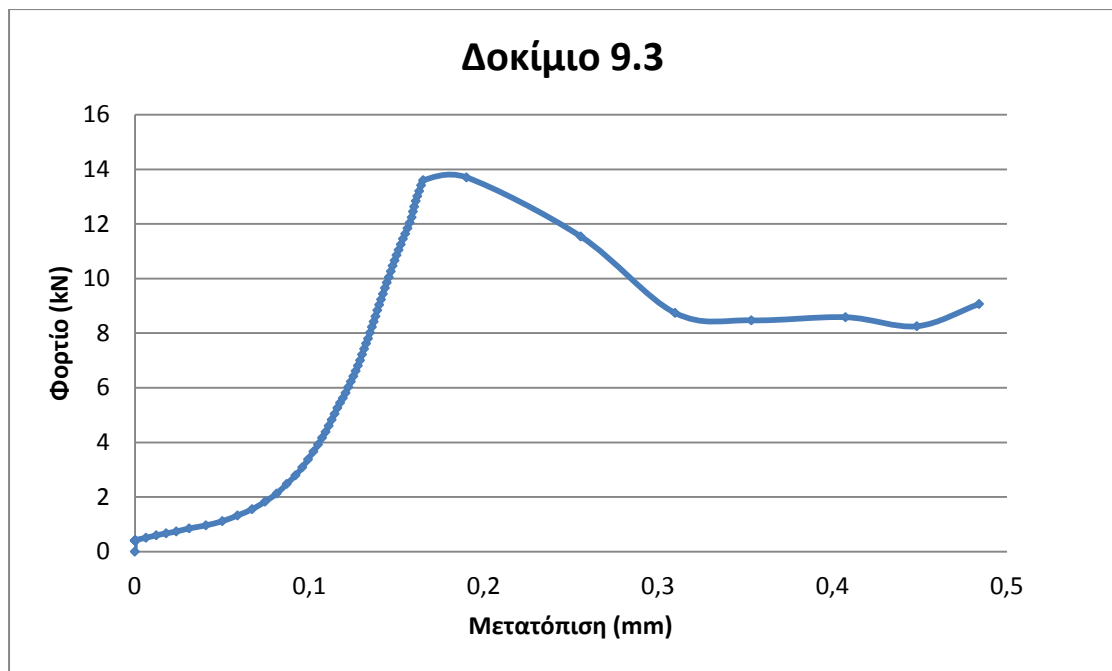
Παρατηρείται η θραύση του δοκιμίου να γίνεται στη διάμετρο που βρίσκεται στον άξονα φόρτισής του, όπως και αναμένεται. Επίσης, φαίνεται ο σχηματισμός μικρών σφηγών στην άνω και κάτω επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με τις πλάτες φόρτισης που οφείλεται στις μεγάλες διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται και προκαλούν τοπικά θρυμματισμό

Δοκίμιο 9.3

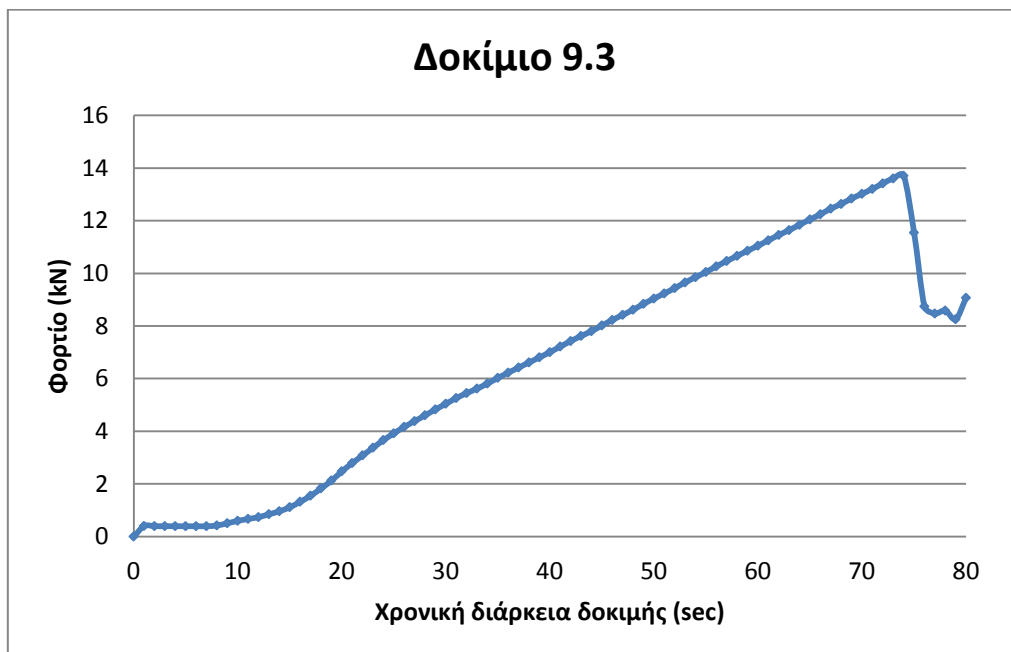
Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται συνοπτικά δεδομένα που αφορούν το δοκίμιο 9.3.

Πίνακας 5: Δεδομένα δοκιμίου 9.3

	Διάμετρος (m)	Ύψος (m)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Εφελκυστική τάση σ (MPa)	Χρονική διάρκεια δοκιμής (sec)	Χρονική στιγμή αστοχίας (sec)
	0,05225	0,02575	13,707	6,484	80	74
	0,05220	0,02575				
	0,05225	0,02580				
Μέση τιμή	0,05223	0,02577	-	-	-	-



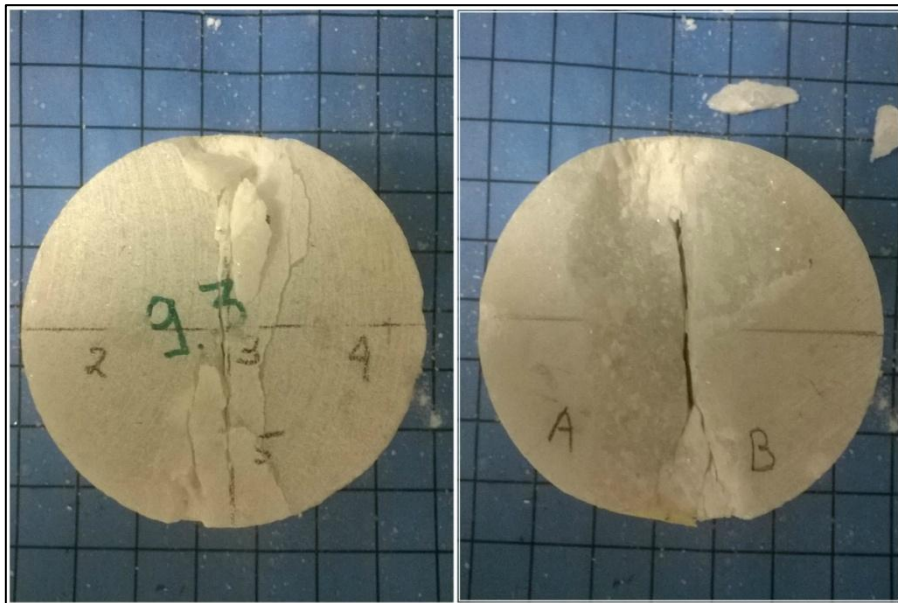
Σχήμα 5: Διάγραμμα φορτίου συναρτήσει της μετατόπισης για το δοκίμιο 9.3.



Σχήμα 6: Διάγραμμα φορτίου συναρτήσει της χρονικής διάρκειας της δοκιμής για το δοκίμιο 9.3.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι το δοκίμιο δέχεται αμέσως φορτία, στο πρώτο δευτερόλεπτο της δοκιμής. Αστοχεί σε εφελκυσμό σε φορτίο 13,7kN (στα 74sec, με μετατόπιση 0,1902mm). Επομένως, η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι

6,5MPa. Στο σχήμα 6 φαίνεται η χρονική διάρκεια της δοκιμής Brazil και ο χρόνος που επέρχεται αστοχία, ενώ στην εικόνα 33 φαίνεται η θραύση του δοκιμίου.



Εικόνα 33: Αστοχία δοκιμίου 9.3.

Το δοκίμιο θραύεται στο επίπεδο αστοχίας, δηλαδή στην κάθετη ρωγμή κατά μήκος του άξονα φόρτισης του. Ομοίως, όπως και στο δοκίμιο 8.2 φαίνεται ο σχηματισμός μικρών σφηνών στην άνω και κάτω επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με τις πλάτες φόρτισης κάτι το οποίο οφείλεται στις μεγάλες διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται και προκαλούν τοπικά θρυμματισμό. Στο επίπεδο θραύσης παρατηρούνται κ πολλές αποφλοιώσεις του υλικού.

4.5 Αποτελέσματα μέτρησης ακουστικής εκπομπής

Κατόπιν λεπτομερούς επεξεργασίας των μετρήσεων που ελήφθησαν δεν παρουσιάζονται αυτές των δύο αισθητήρων που διέθεσε το εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων διότι κρίθηκαν μη συγκρίσιμα με εκείνα των έξι αισθητήρων, αφού οι καταγραφές τους ήταν κατά πολύ μικρότερες.

Τα αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής για τα δοκίμια επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν με το λογισμικό Noesis, λίγα λόγια για το οποίο αναφέρονται στη συνέχεια.

Το λογισμικό Noesis

Το λογισμικό NOESIS αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο παρουσίασης και ανάλυσης δεδομένων ακουστικών εκπομπών με τη δυνατότητα αναγνώρισης προτύπων με χρήση νευρωνικών δικτύων.

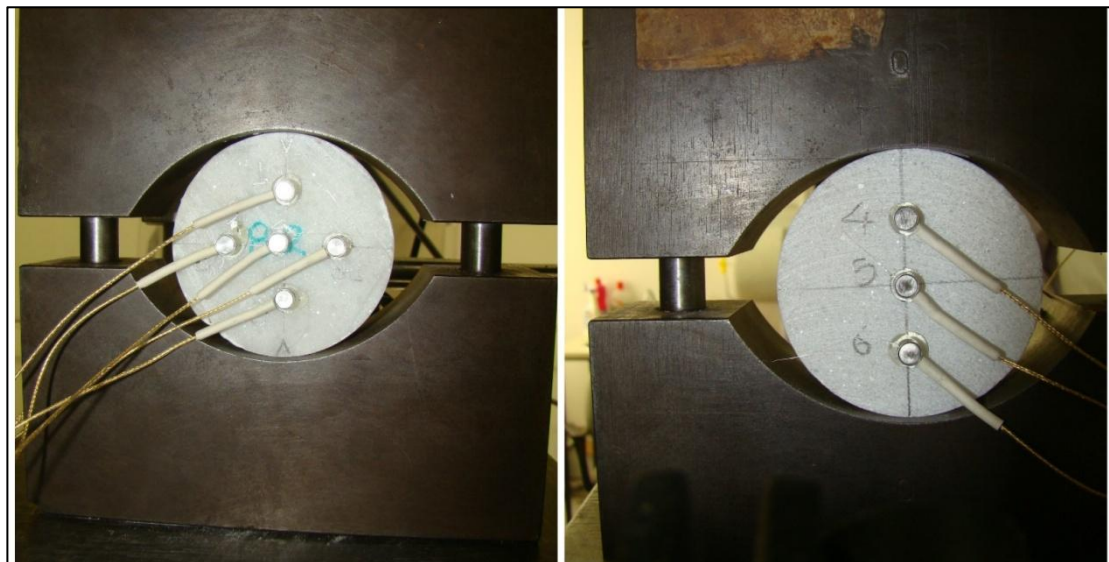
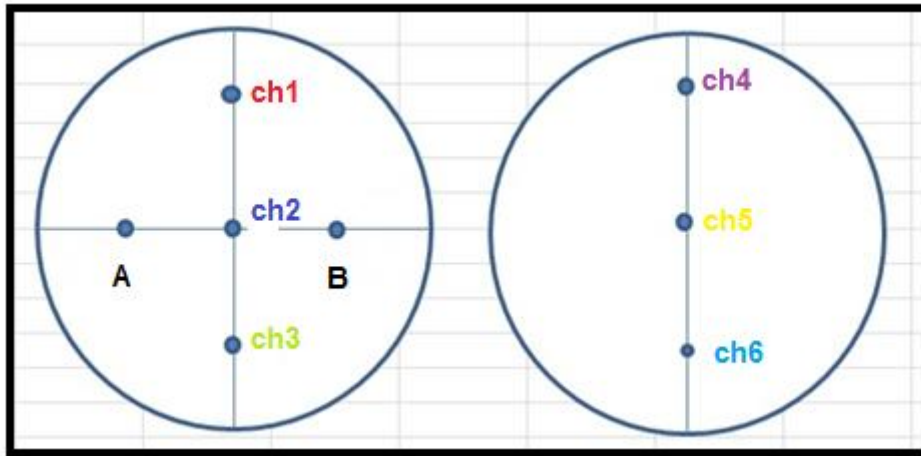
Τα δεδομένα εισάγονται ως αρχεία τύπου **".dta"** (δεδομένα του AEWin) όπου υπάρχει η δυνατότητα φόρτωσης των κυματομορφών που καταγράφονται σε κάθε hit AE. Από εκεί και πέρα, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας μίας πληθώρας γραφημάτων απεικόνισης των "hit based AE data" και των "time driven data" καθώς και γραφημάτων συσχετισμού τους. Η δημιουργία κλάσεων επιτρέπει την επιλεκτική απομόνωση δεδομένων βάσει καθορισμένων κριτηρίων, προκειμένου ο χρήστης να επικεντρωθεί στην ανάλυση (στατιστική, κ.ά.) δεδομένων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (πλάτος, διάρκεια, κλπ). Το NOESIS διαθέτει επίσης εργαλεία φασματικής ανάλυσης των κυματομορφών (FFT, power spectrum, wavelet analysis, κ.ά.).

Ακολουθεί η παρουσίαση των πειραματικών δεδομένων ακουστικής εκπομπής που καταγράφηκαν για τα δοκίμια μελέτης. Να σημειωθεί ότι οι μονάδες μέτρησης ορισμένων από τα εν λόγω μεγέθη είναι οι εξής:

- Χρόνος (Time) σε sec
- Ενέργεια AE (Energy) σε pVsec
- Απόλυτη ενέργεια AE (Absolute energy) σε atto Joule ($=10^{-18}$ Joule)
- Χρόνος ανύψωσης (Rise time) σε msec
- Πλάτος καταγραφής (Amplitude) σε dB_{ae}

Δοκίμιο 8.2

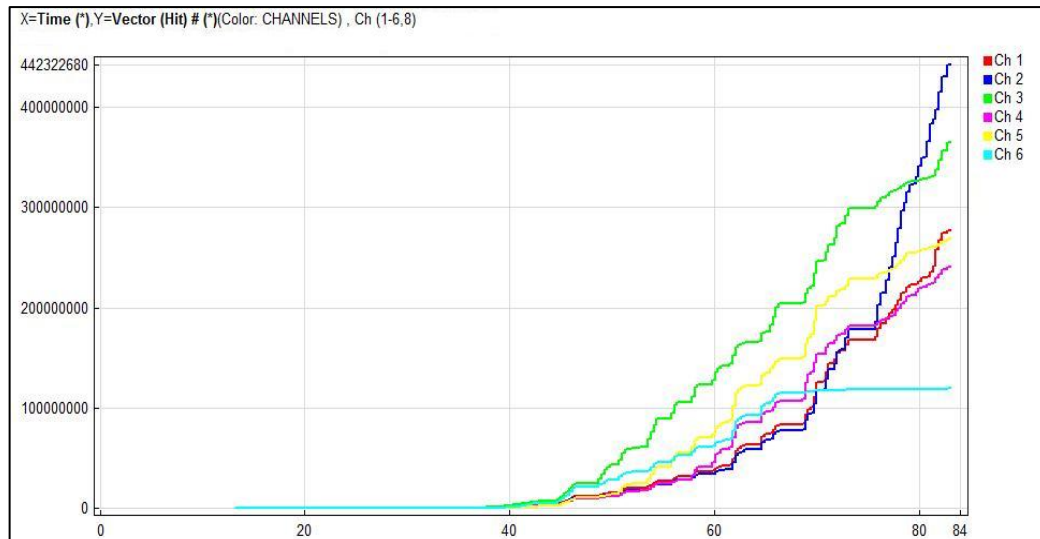
Η θέση των αισθητήρων στο δοκίμιο αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 34: Θέση αισθητήρων δοκιμίου 8.2.

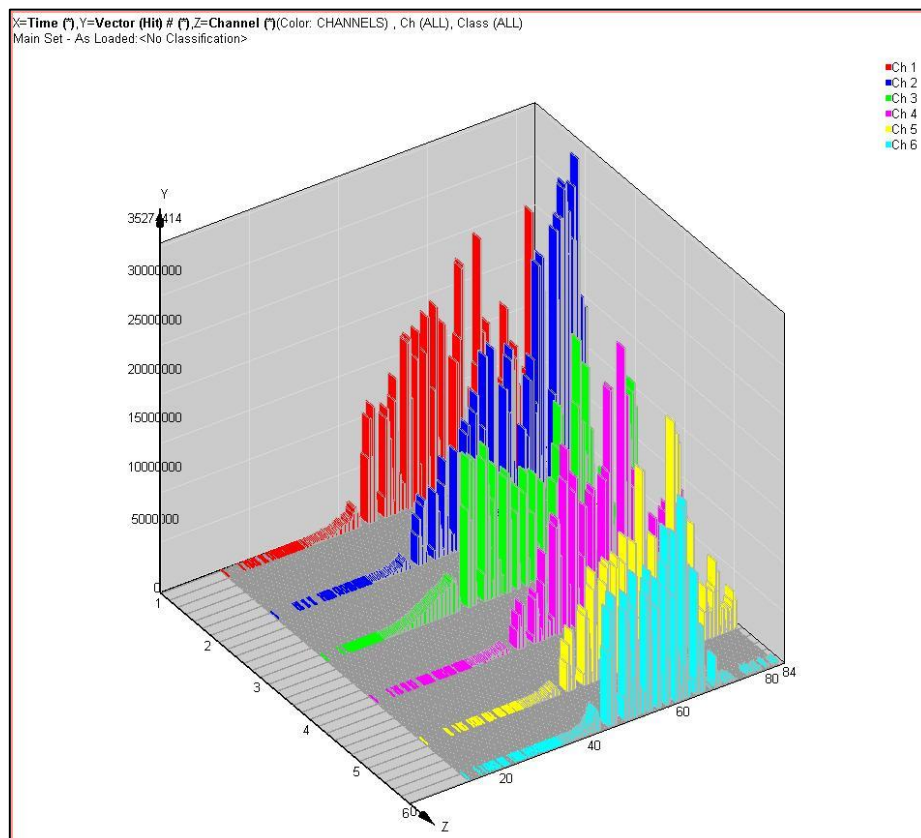
Ιδιαίτερη προσοχή σε αυτό το στάδιο και στην περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων που καταγράφηκαν θέλει η σύζευξη των αισθητήρων με το δοκίμιο για την καλύτερη απόκριση των αισθητήρων ώστε να μην υπάρχουν απώλειες κατά τη μετάδοση των ακουστικών κυμάτων και να ευνοείται ο εντοπισμός χαμηλού επιπέδου ακουστικών εκπομπών από τους αισθητήρες. Σημαντικό ρόλο στην φαίνεται να παίζει επίσης το πόσο λεπτό είναι το στρώμα του υλικού σύζευξης (σιλικόνη) που θα επηρεάσει την καταγραφή των μετρήσεων των παραμέτρων ΑΕ.

Έπονται τα διαγράμματα των παραμέτρων ακουστικής εκπομπής συναρτήσει του χρόνου της δοκιμής, όπως εξάγονται από το λογισμικό Noesis.



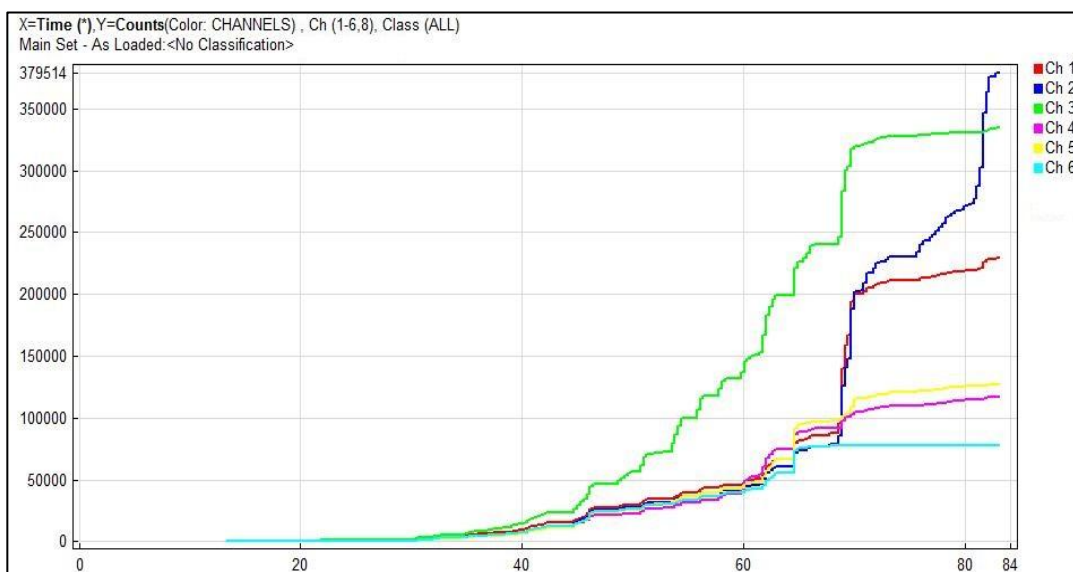
Σχήμα 7: Αθροιστικό διάγραμμα κτύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται το διάγραμμα κτύπων συναρτήσει του χρόνου καταγραφής στο οποίο οι μετρήσεις είναι αθροιστικές, όπως ακριβώς καταγράφονται στη διάρκεια της δοκιμής. Στα πρώτα δευτερόλεπτα δεν έχουν καταγραφεί ακουστικές εκπομπές αφού το δοκίμιο δεν έχει δεχτεί ακόμη φορτία. Φαίνεται πως οι κτύποι αυξάνονται όσο το δοκίμιο φορτίζεται, με μεγαλύτερες καταγραφές στο κανάλι 2 και 3.



Σχήμα 8: Τρισδιάστατο αθροιστικό διάγραμμα κτύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.

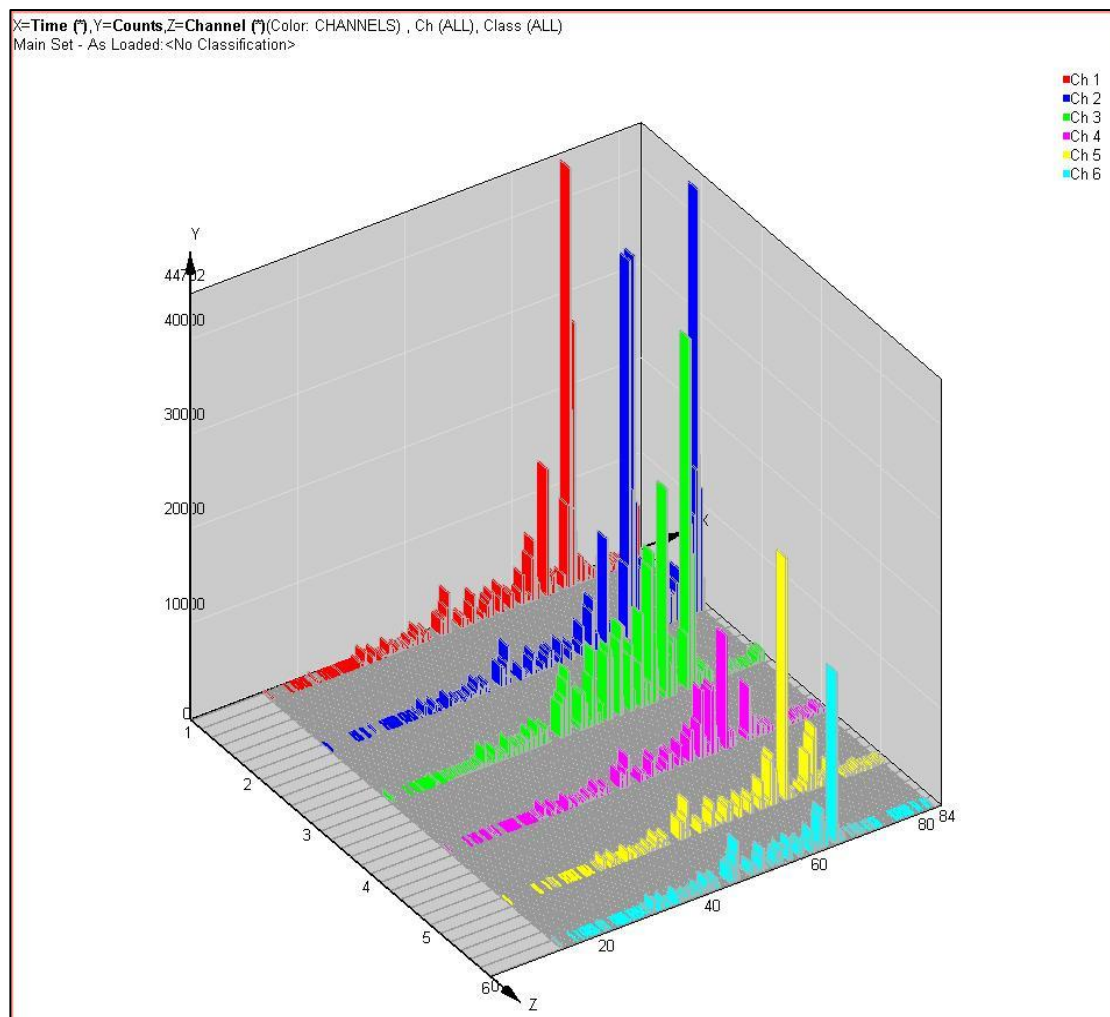
Το σχήμα 8 είναι το αντίστοιχο τρισδιάστατο διάγραμμα του σχήματος 7. Εκεί φαίνονται αθροιστικά οι καταγραφές κτύπων σε κάθε κανάλι, σε τρεις διαστάσεις.



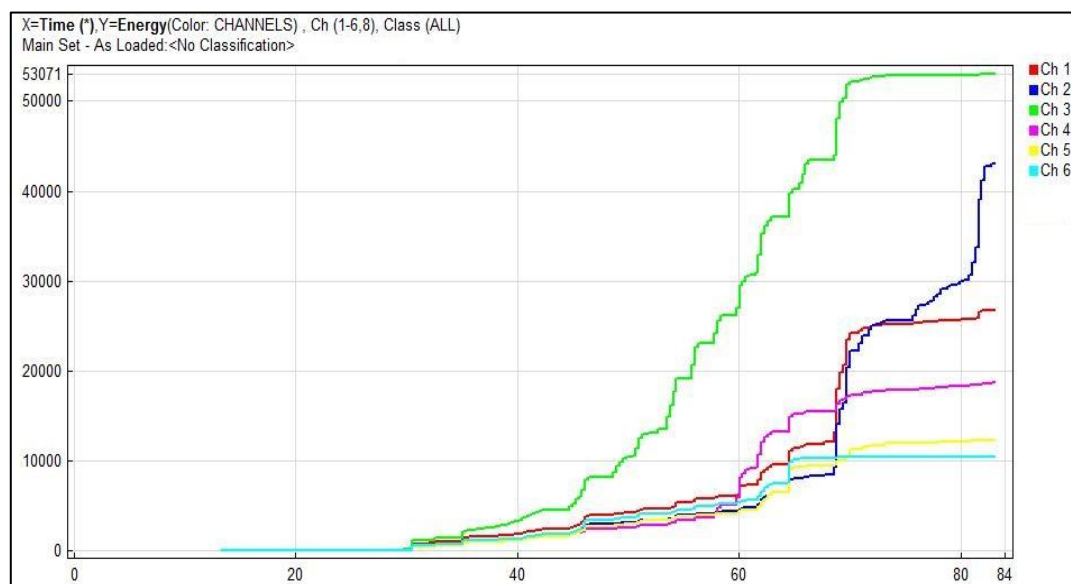
Σχήμα 9: Αθροιστικό διάγραμμα απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.

Στη συνέχεια στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται το διάγραμμα απαριθμήσεων σε σχέση με το χρόνο καταγραφής, όπου οι μετρήσεις ομοίως είναι αθροιστικές. Οι απαριθμήσεις αυξάνονται από τα 12sec περίπου όπου το δοκίμιο δέχεται φορτία. Μεγάλες καταγραφές παρουσιάζουν οι αισθητήρες στα κανάλια 2, 1 και 3. Αυτοί δηλαδή που βρίσκονται στο επίπεδο αστοχίας.

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται το αντίστοιχο τρισδιάστατο διάγραμμα των απαριθμήσεων συναρτήσει του χρόνου.

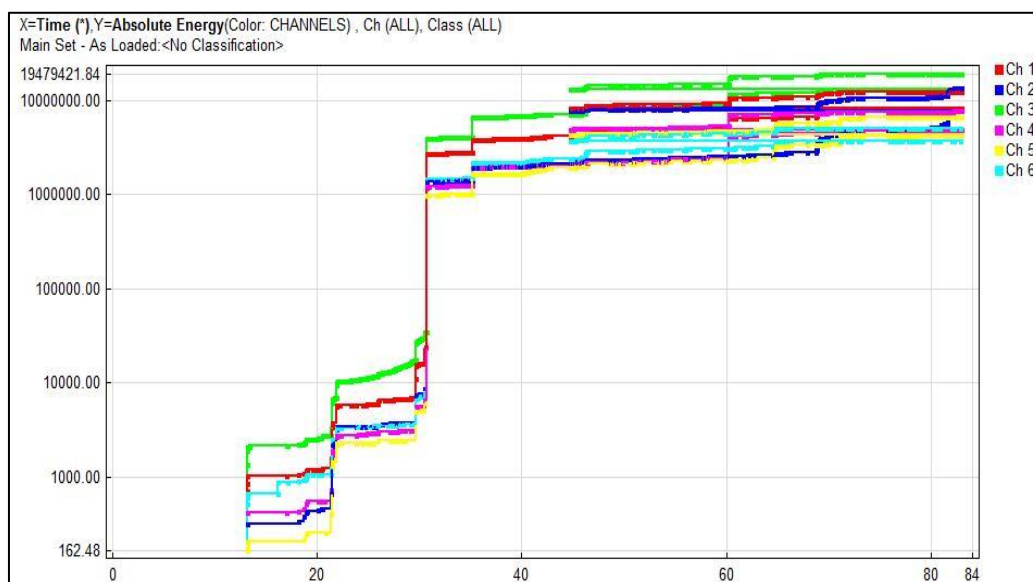


Σχήμα 10: Τρισδιάστατο αθροιστικό διάγραμμα απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.



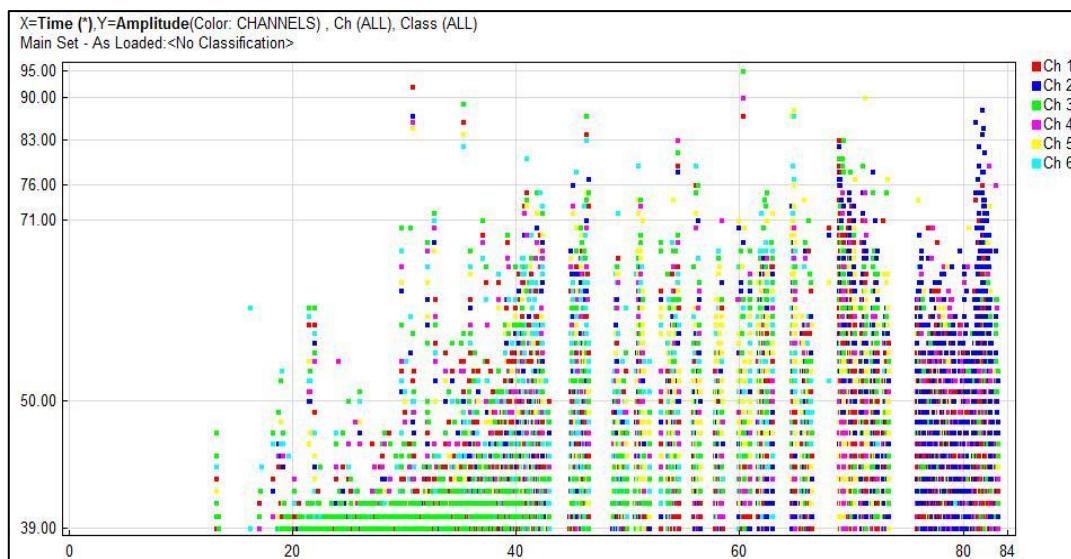
Σχήμα 11: Αθροιστικό διάγραμμα ενέργειας ΑΕ (energy) συναρτήσει του χρόνου.

Το μέγεθος "Energy AE" έχει μονάδες pVsec (ή mVsec) διότι προκύπτει ως το ολοκλήρωμα της κυματομορφής για χρόνο ίσο με τη διάρκεια της (duration). Άρα, επί της ουσίας δεν είναι ενέργεια. Συνεπώς για κανένα από τα παρακάτω δοκίμια δεν παρουσιάζεται αντίστοιχο διάγραμμα ενώ σαν πραγματική ενέργεια λαμβάνεται το μέγεθος "Absolute Energy (AE)" (AEwin Manual, 2010).



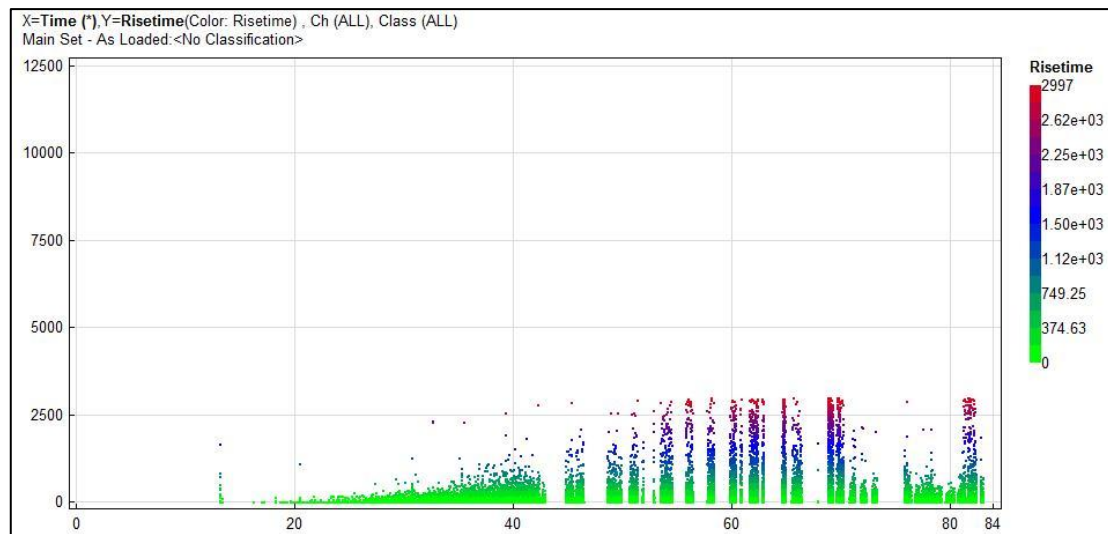
Σχήμα 12: Αθροιστικό διάγραμμα απόλυτης ενέργειας AE (absolute energy) συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 12 παρουσιάζεται το διάγραμμα απόλυτης ενέργειας συναρτήσει του χρόνου. Ενέργεια αρχίζει να απελευθερώνεται τη χρονική στιγμή που ξεκινά η καταγραφή ακουστικών εκπομπών στο δοκίμιο και αυξάνεται κατά το πέρας της δοκιμής, με μέγιστες τιμές της τάξης των 10^9 atto Joule.



Σχήμα 13: Διάγραμμα πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

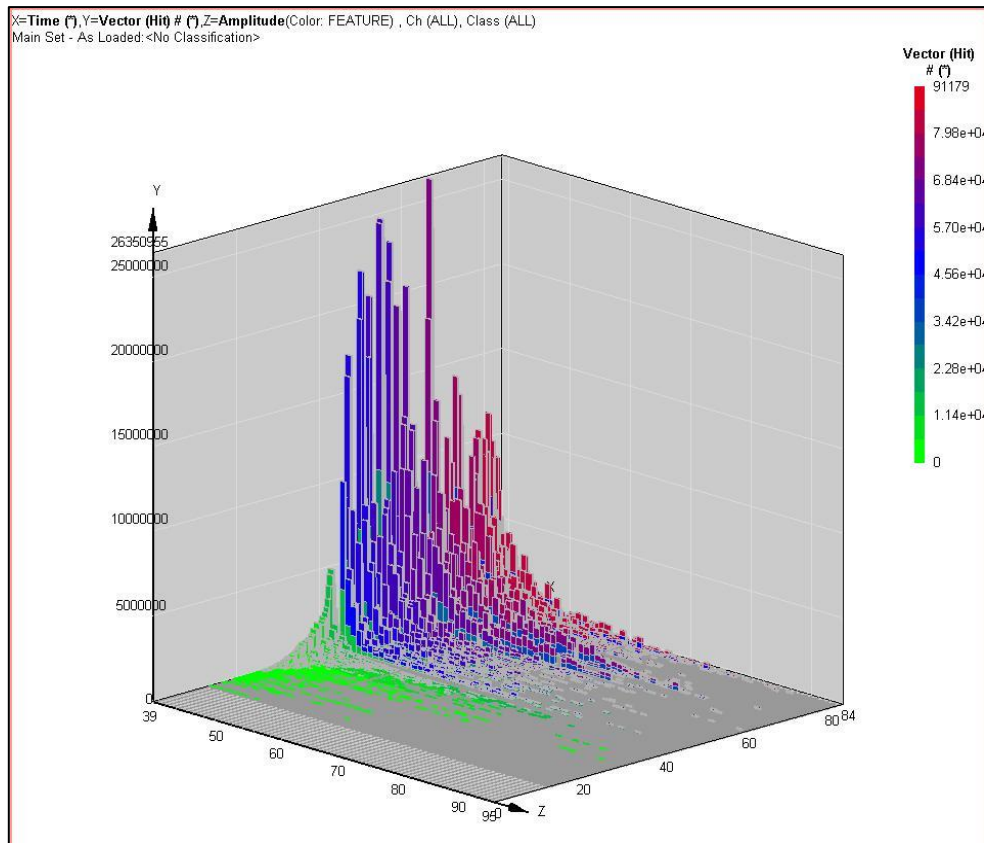
Το πλάτος καταγραφής ακουστικών εκπομπών κυμαίνεται από την τιμή που έχει οριστεί ως κατώφλι μέχρι τα 95dB, αφού το επιτρεπόμενο όριο είναι τα 99dB.



Σχήμα 14: Διάγραμμα χρόνου ανύψωσης (rise time) συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 14 φαίνεται το διάγραμμα διασποράς του χρόνου ανύψωσης σε σχέση με το χρόνο περαίωσης της δοκιμής. Κυμαίνεται σε σχετικά μικρές τιμές της τάξης των $10^3 \mu\text{sec}$.

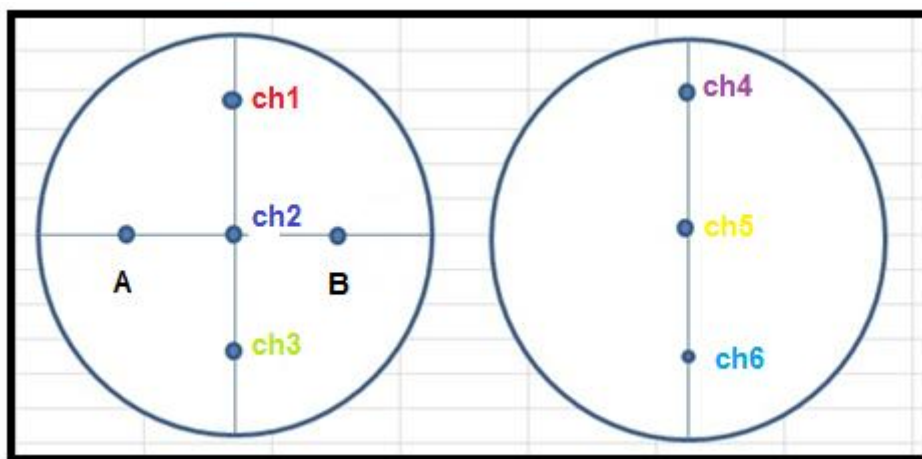
Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται συνδυαστικά οι παράμετροι των κτύπων και του πλάτους καταγραφής σε σχέση με το χρόνο. Φαίνεται δηλαδή πως οι καταγράφονται κτύποι στο εύρος που κυμαίνεται το πλάτος των κυματομορφών ΑΕ.



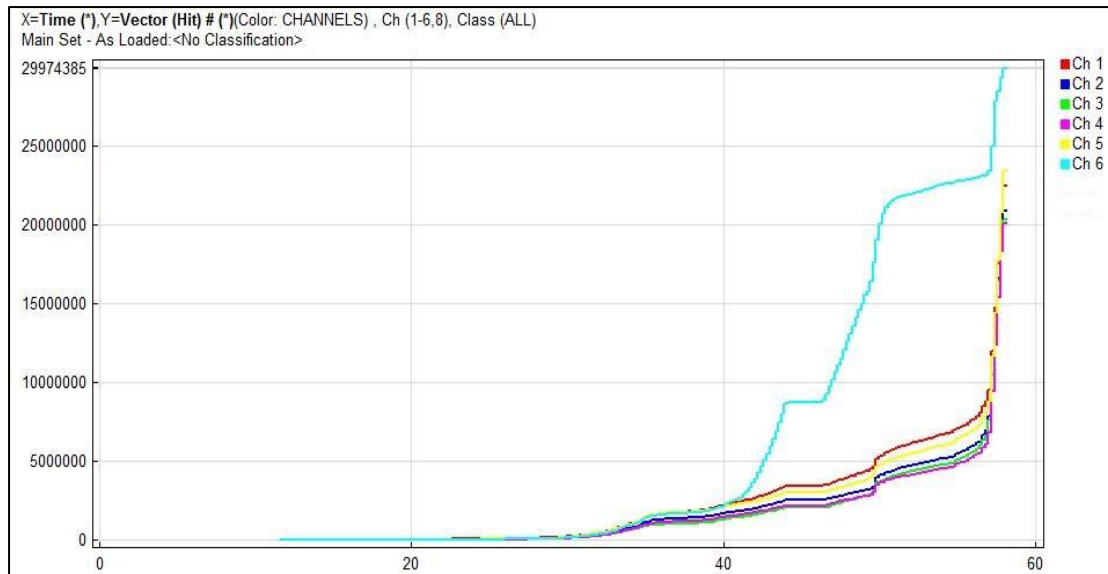
Σχήμα 15: Τρισδιάστατο διάγραμμα κτύπων (hits) και πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

Δοκίμιο 9.2

Η θέση των αισθητήρων στο δοκίμιο αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 35.



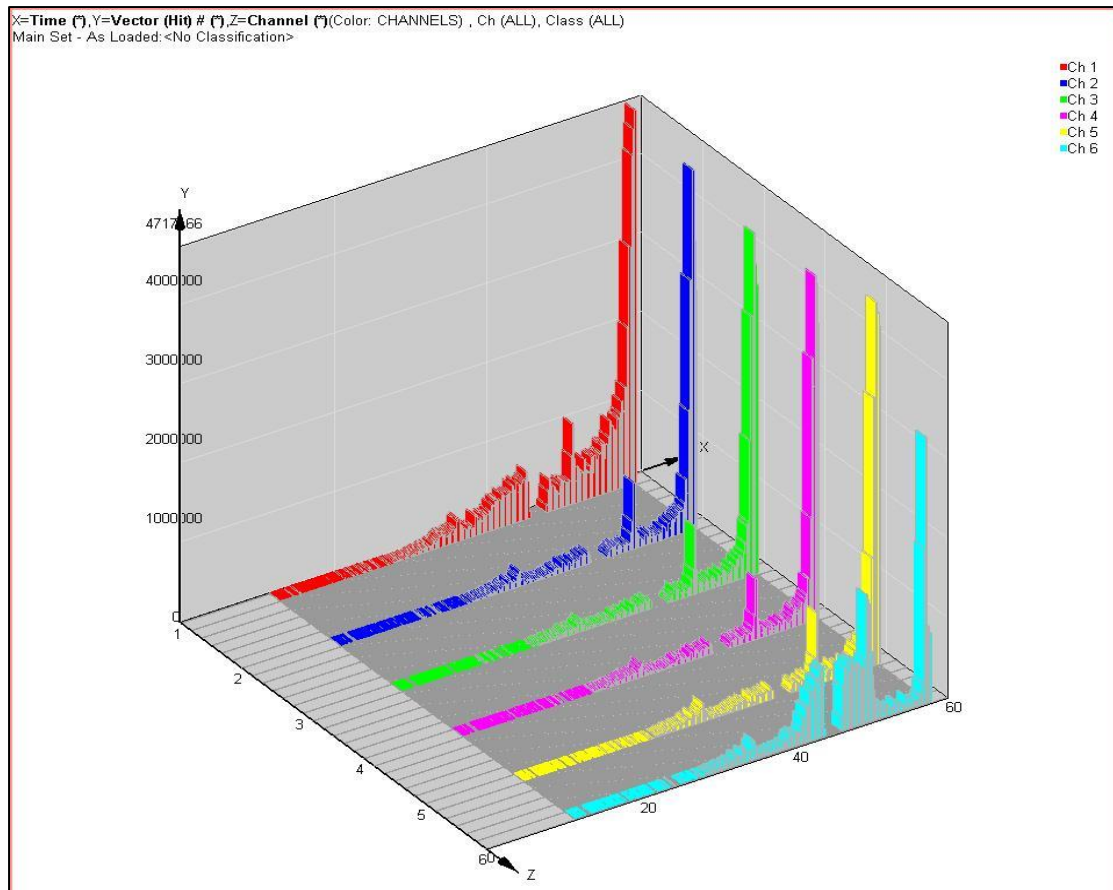
Εικόνα 35: Θέση αισθητήρων δοκιμίου 9.2.



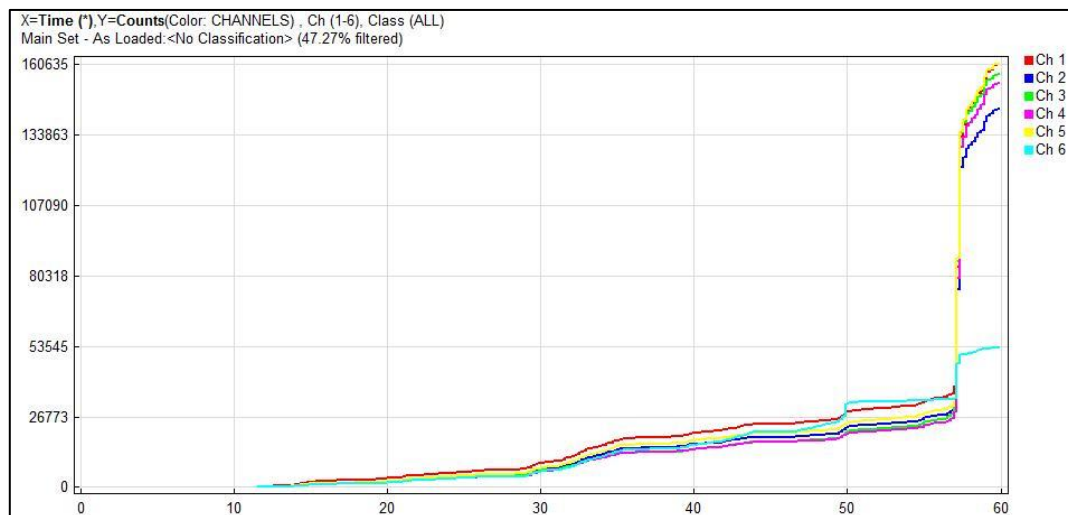
Σχήμα 16: Αθροιστικό διάγραμμα κτύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 16 παρουσιάζεται το διάγραμμα κτύπων συναρτήσει του χρόνου καταγραφής στο οποίο οι μετρήσεις είναι αθροιστικές, όπως ακριβώς καταγράφονται στη διάρκεια της δοκιμής. Στα πρώτα δευτερόλεπτα δεν έχουν καταγραφεί ακουστικές εκπομπές αφού το δοκίμιο δεν έχει δεχτεί ακόμη φορτία. Φαίνεται πως οι κτύποι αυξάνονται όσο το δοκίμιο φορτίζεται, με μεγαλύτερες καταγραφές στο κανάλι 6 και 5, που βρίσκονται στο επίπεδο αστοχίας στην πίσω όψη του δοκιμίου.

Στο σχήμα 17 παρουσιάζεται το αντίστοιχο τρισδιάστατο διάγραμμα κτύπων συναρτήσει του χρόνου της δοκιμής.



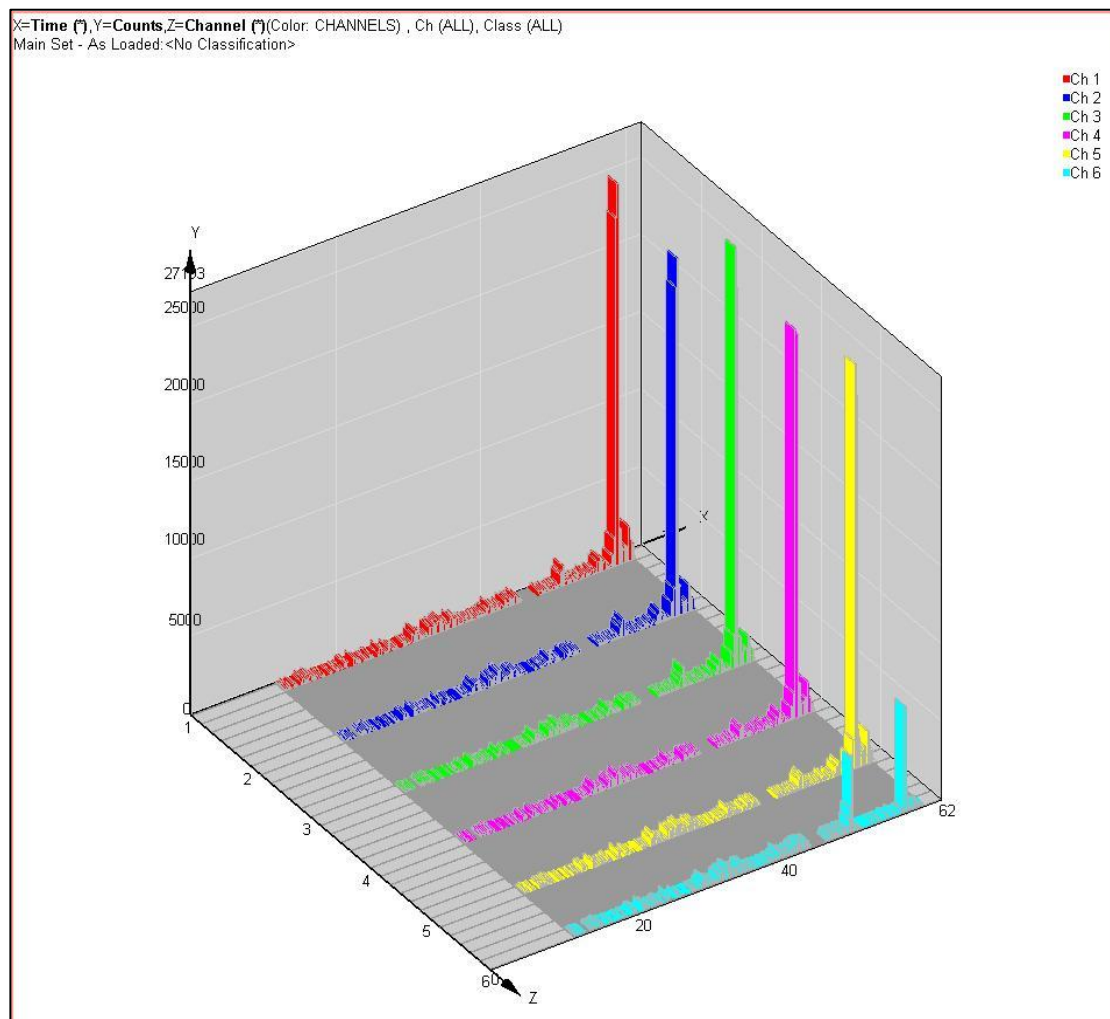
Σχήμα 17: Τρισδιάστατο αθροιστικό διάγραμμα κτύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.



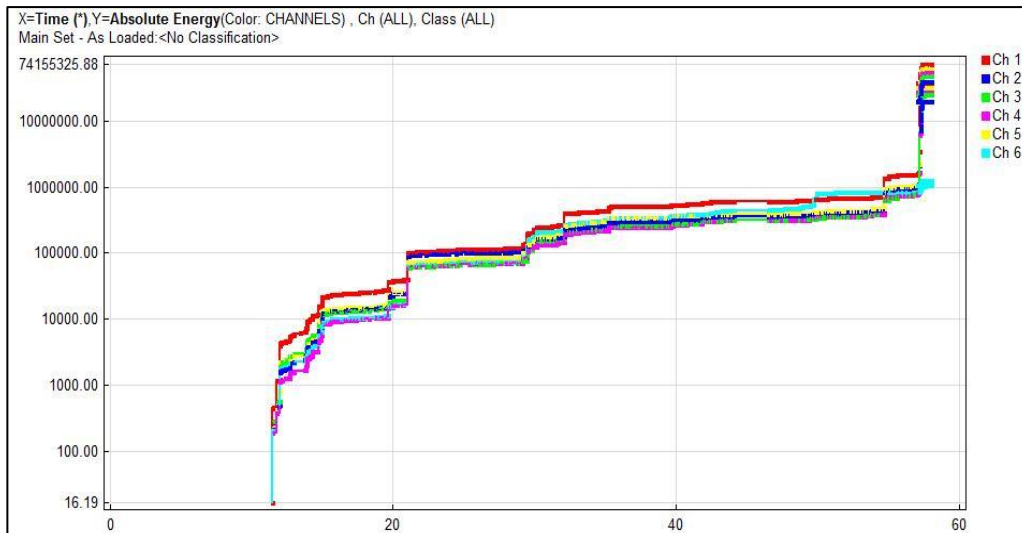
Σχήμα 18: Αθροιστικό διάγραμμα απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.

Στη συνέχεια στο σχήμα 18 παρουσιάζεται το διάγραμμα απαριθμήσεων σε σχέση με το χρόνο καταγραφής, όπου οι μετρήσεις ομοίως είναι αθροιστικές. Οι απαριθμήσεις αυξάνονται από τα 10sec περίπου όπου το δοκίμιο δέχεται φορτία. Μεγάλες καταγραφές παρουσιάζουν οι αισθητήρες στα κανάλια 5, 1 και 3. Αυτοί δηλαδή που βρίσκονται στο επίπεδο αστοχίας στην μπρος και πίσω όψη του δοκιμίου.

Ακολουθεί το σχήμα 19 στο οποίο παρουσιάζεται το αντίστοιχο τρισδιάστατο διάγραμμα των απαριθμήσεων συναρτήσει του χρόνου.

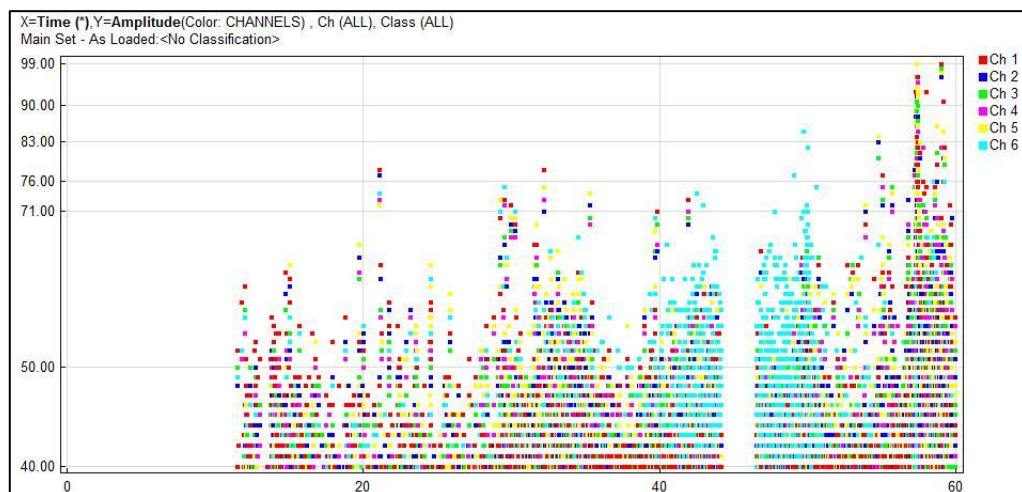


Σχήμα 19: Τρισδιάστατο αθροιστικό διάγραμμα απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.



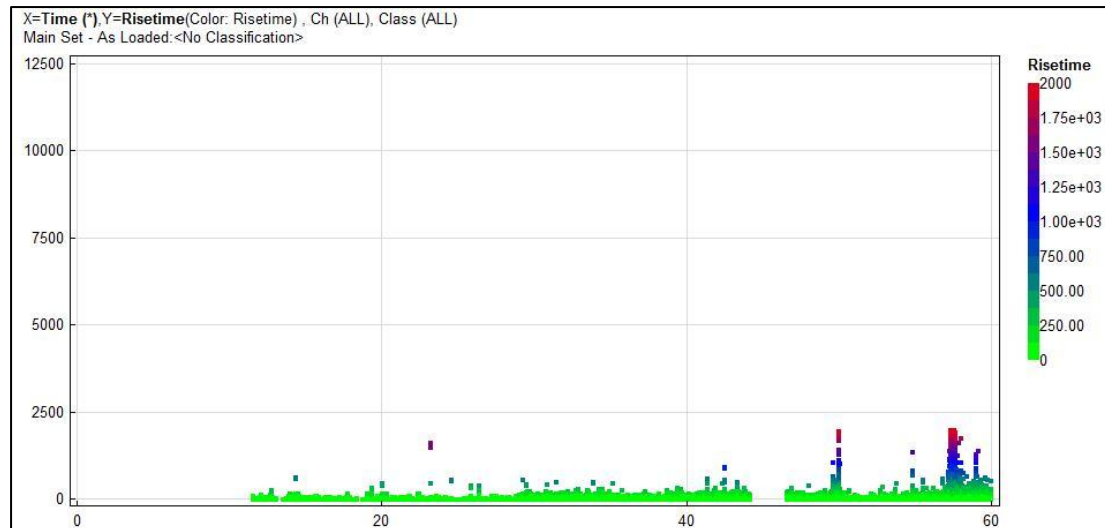
Σχήμα 20: Αθροιστικό διάγραμμα απόλυτης ενέργειας AE (absolute energy) συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 20 παρουσιάζεται το διάγραμμα απόλυτης ενέργειας συναρτήσει του χρόνου. Ενέργεια αρχίζει να απελευθερώνεται τη χρονική στιγμή που ξεκινά η καταγραφή ακουστικών εκπομπών στο δοκίμιο και αυξάνεται κατά το πέρας της δοκιμής, με μέγιστες τιμές της τάξης των 10^9 atto Joule. Τα κανάλια που τις καταγράφουν είναι τα 1, 5 και 3.



Σχήμα 21: Διάγραμμα πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

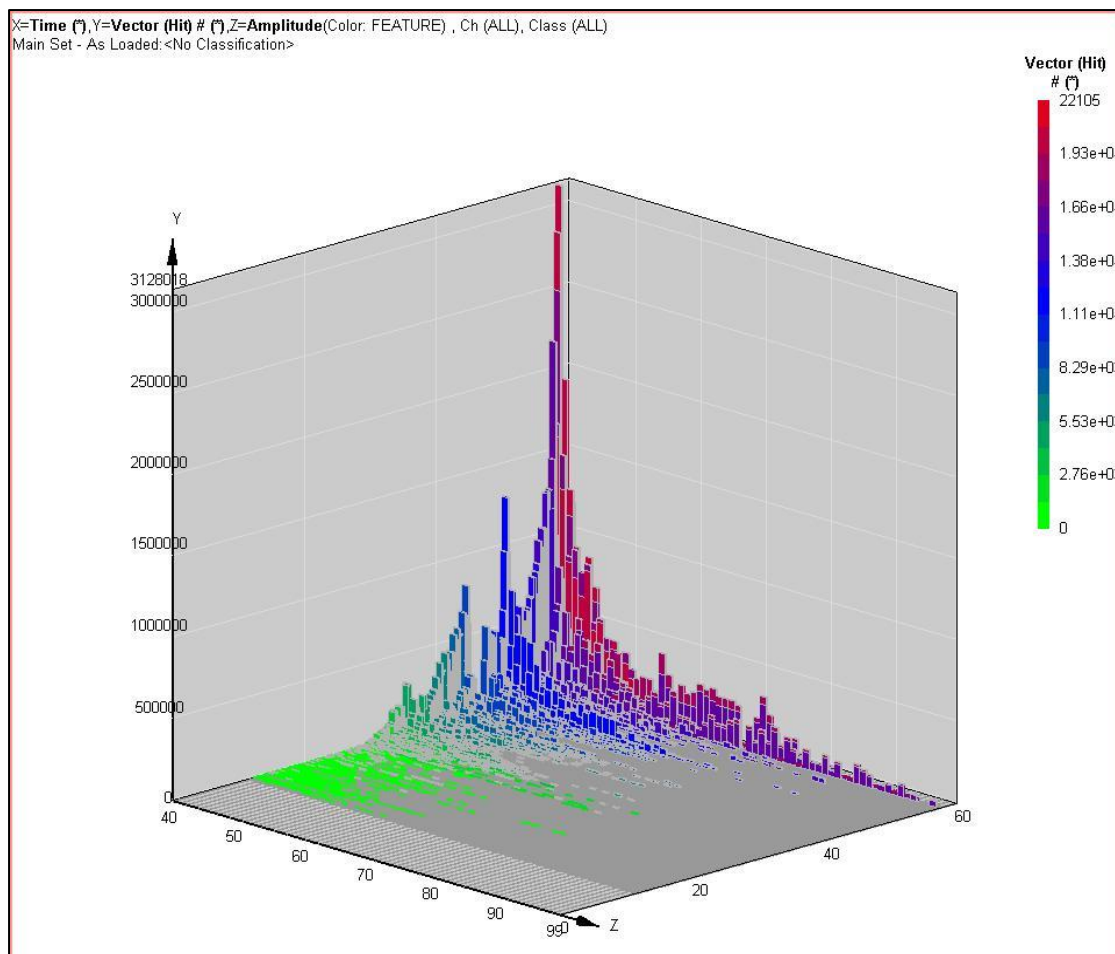
Το πλάτος καταγραφής ακουστικών εκπομπών ομοίως κυμαίνεται από την τιμή που έχει οριστεί ως κατώφλι μέχρι τα 95dB, αφού το επιτρεπόμενο όριο είναι τα 99dB.



Σχήμα 22: Διάγραμμα χρόνου ανύψωσης (rise time) συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 22 φαίνεται το διάγραμμα διασποράς του χρόνου ανύψωσης σε σχέση με το χρόνος περαίωσης της δοκιμής. Κυμαίνεται σε αρκετά μικρές τιμές, με μέγιστα της τάξης των $10^3 \mu\text{sec}$.

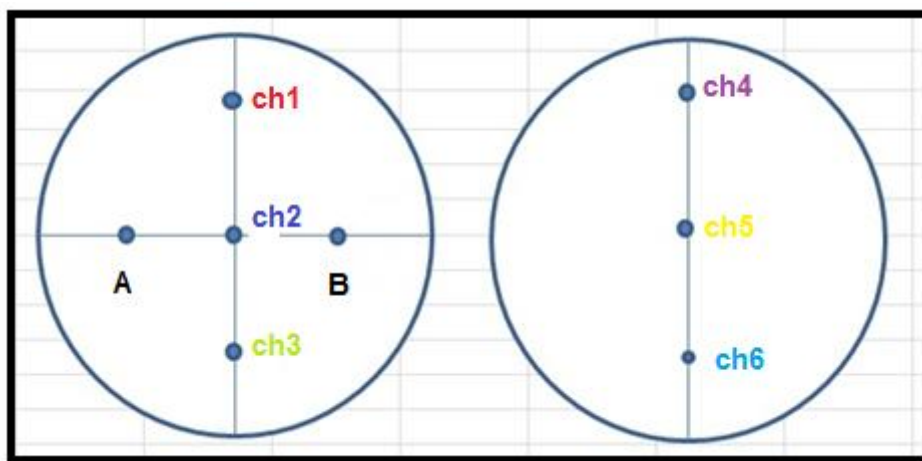
Στο σχήμα 23 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται συνδυαστικά οι παράμετροι των κύπων και του πλάτους καταγραφής σε σχέση με το χρόνο. Φαίνεται δηλαδή πως καταγράφονται οι κύποι στο εύρος που κυμαίνεται το πλάτος των κυματομορφών ΑΕ.



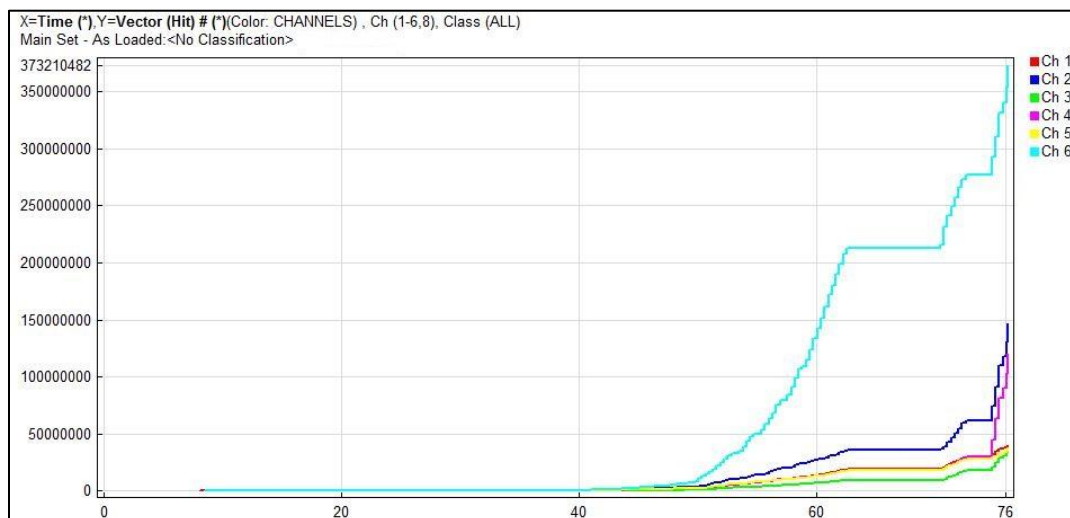
Σχήμα 23: Τρισδιάστατο διάγραμμα κτύπων (hits) και πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

Δοκίμιο 9.3

Η θέση των αισθητήρων στο δοκίμιο αυτό φαίνεται στην εικόνα 36.



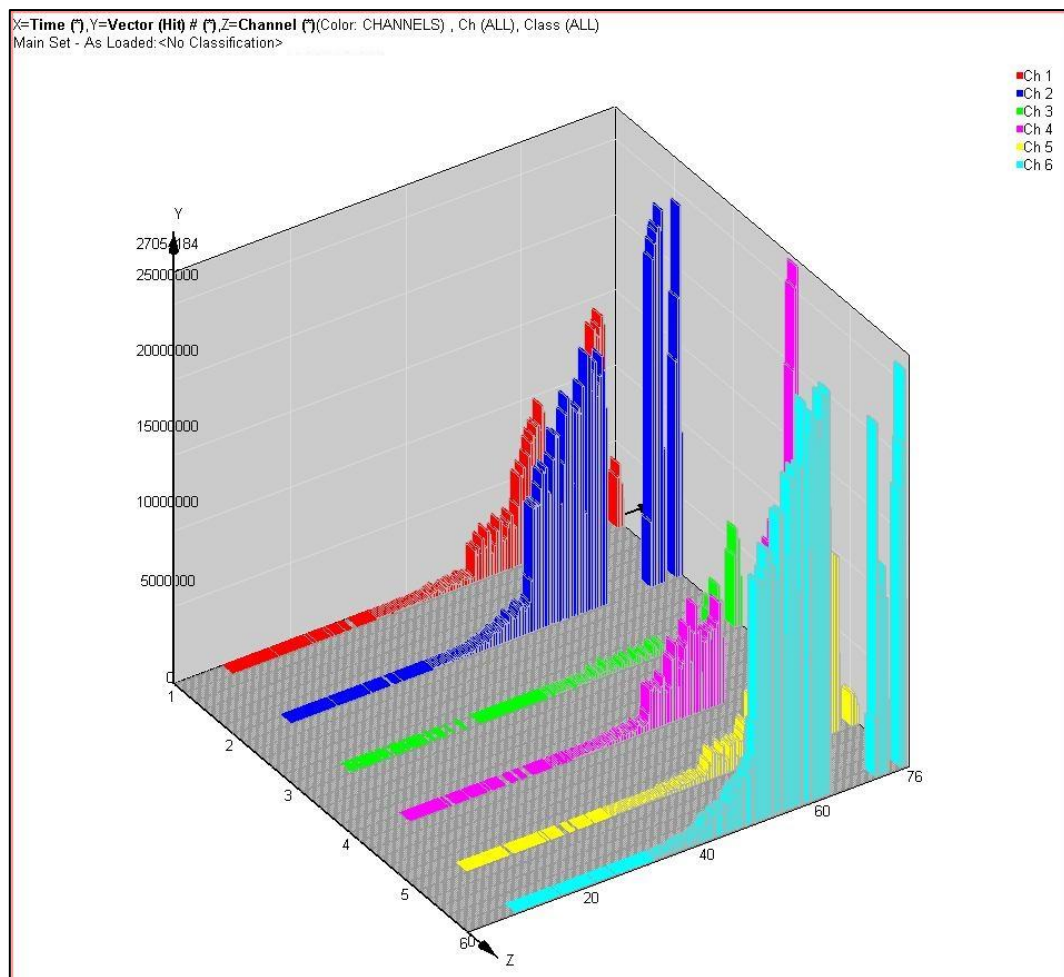
Εικόνα 36: Θέση αισθητήρων δοκιμίου 9.3.



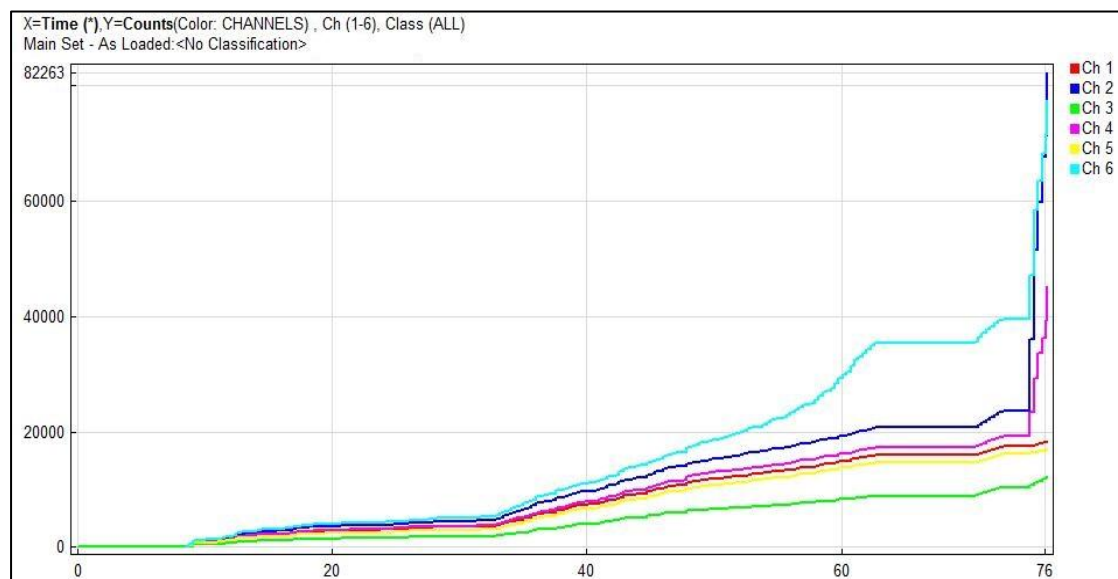
Σχήμα 24: Αθροιστικό διάγραμμα κτύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 24 παρουσιάζεται το διάγραμμα κτύπων συναρτήσει του χρόνου καταγραφής στο οποίο οι μετρήσεις είναι αθροιστικές, όπως ακριβώς καταγράφονται στη διάρκεια της δοκιμής. Στα πρώτα δευτερόλεπτα δεν έχουν καταγραφεί ακουστικές εκπομπές αφού το δοκίμιο δεν έχει δεχτεί ακόμη φορτία. Φαίνεται πως οι κτύποι αυξάνονται όσο το δοκίμιο φορτίζεται, με μεγαλύτερες καταγραφές στο κανάλι 6, που βρίσκονται στο επίπεδο αστοχίας στην πίσω όψη του δοκιμίου. Μικρότερης τάξης μετρήσεων καταγράφονται από τα κανάλια 2 και 4.

Στο σχήμα 25 παρουσιάζεται το αντίστοιχο τρισδιάστατο διάγραμμα κτύπων συναρτήσει του χρόνου της δοκιμής.



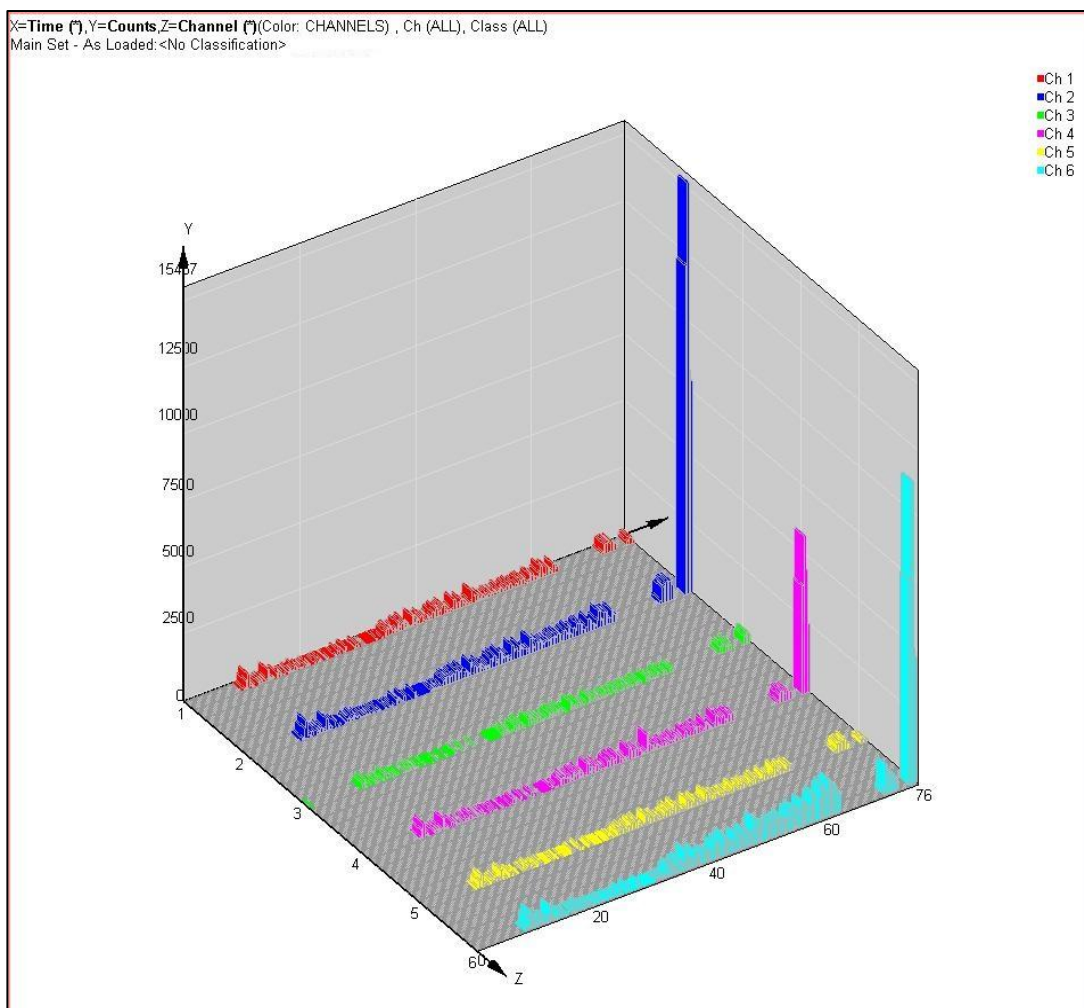
Σχήμα 25: Τρισδιάστατο αθροιστικό διάγραμμα κτύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.



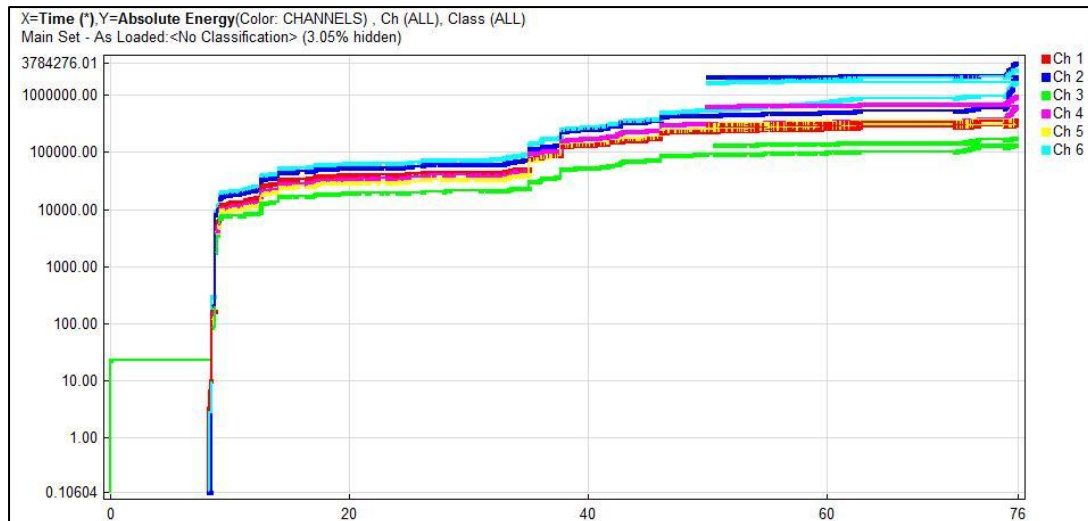
Σχήμα 26: Αθροιστικό διάγραμμα απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 26 παρουσιάζεται το διάγραμμα απαριθμήσεων σε σχέση με το χρόνο καταγραφής, όπου οι μετρήσεις ομοίως είναι αθροιστικές. Οι απαριθμήσεις αυξάνονται από τα πρώτα κιόλας δευτερόλεπτα όπου το δοκίμιο δέχεται φορτία. Μεγάλες καταγραφές παρουσιάζουν οι αισθητήρες στα κανάλια 6, 2 και 4. Αυτοί δηλαδή που βρίσκονται στο επίπεδο αστοχίας στην μπρος και πίσω όψη του δοκιμίου.

Ακολουθεί το σχήμα 27 με το αντίστοιχο τρισδιάστατο διάγραμμα των απαριθμήσεων συναρτήσει του χρόνου.

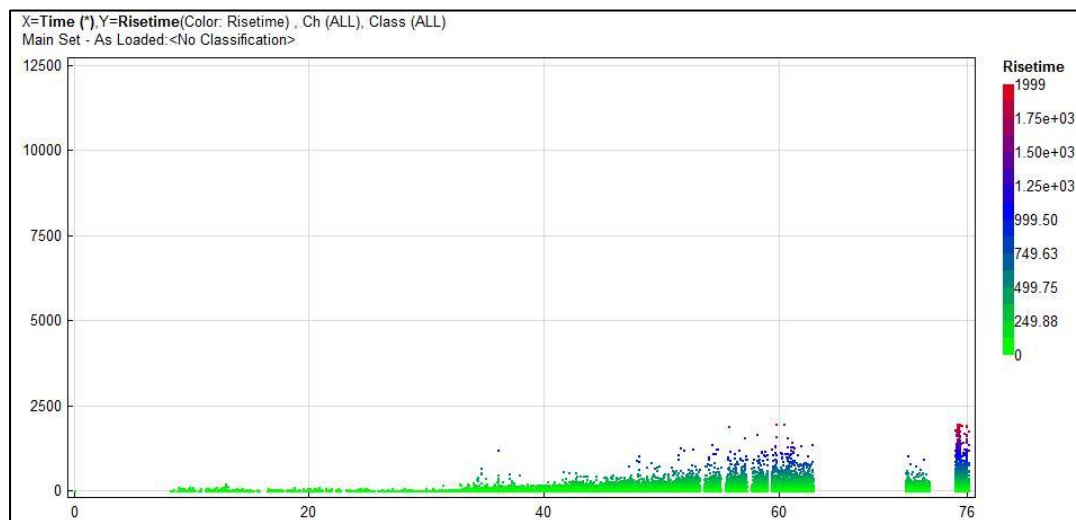


Σχήμα 27: Τρισδιάστατο αθροιστικό διάγραμμα απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.



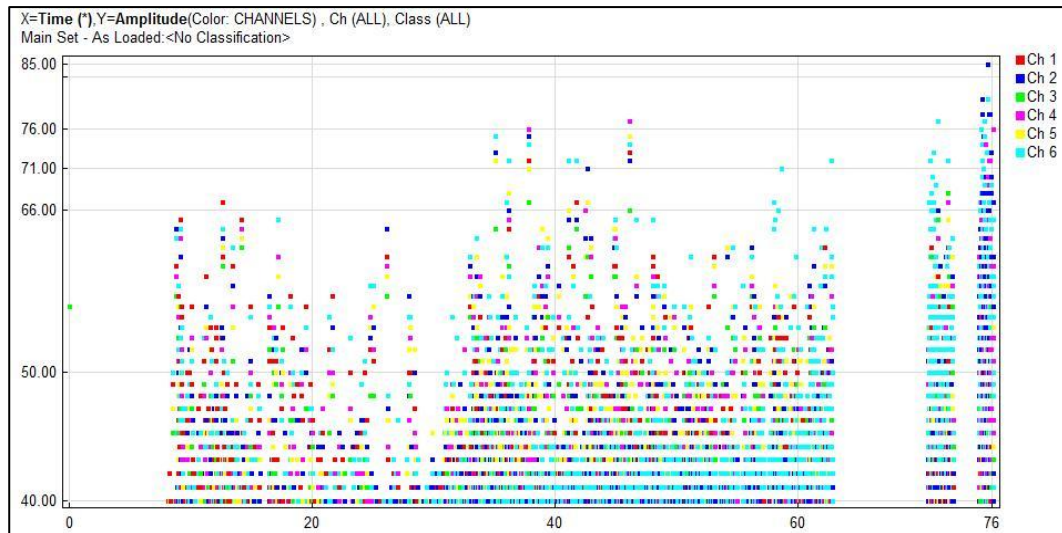
Σχήμα 28: Αθροιστικό διάγραμμα απόλυτης ενέργειας AE (absolute energy) συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 28 παρουσιάζεται το διάγραμμα απόλυτης ενέργειας συναρτήσει του χρόνου. Η ενέργεια αρχίζει να απελευθερώνεται αμέσως και αυξάνεται κατά το πέρας της δοκιμής, με μέγιστες τιμές της τάξης των 10^9 atto Joule. Τα κανάλια που τις καταγράφουν είναι τα 2, 4 και 6.



Σχήμα 29: Διάγραμμα χρόνου ανύψωσης (rise time) συναρτήσει του χρόνου.

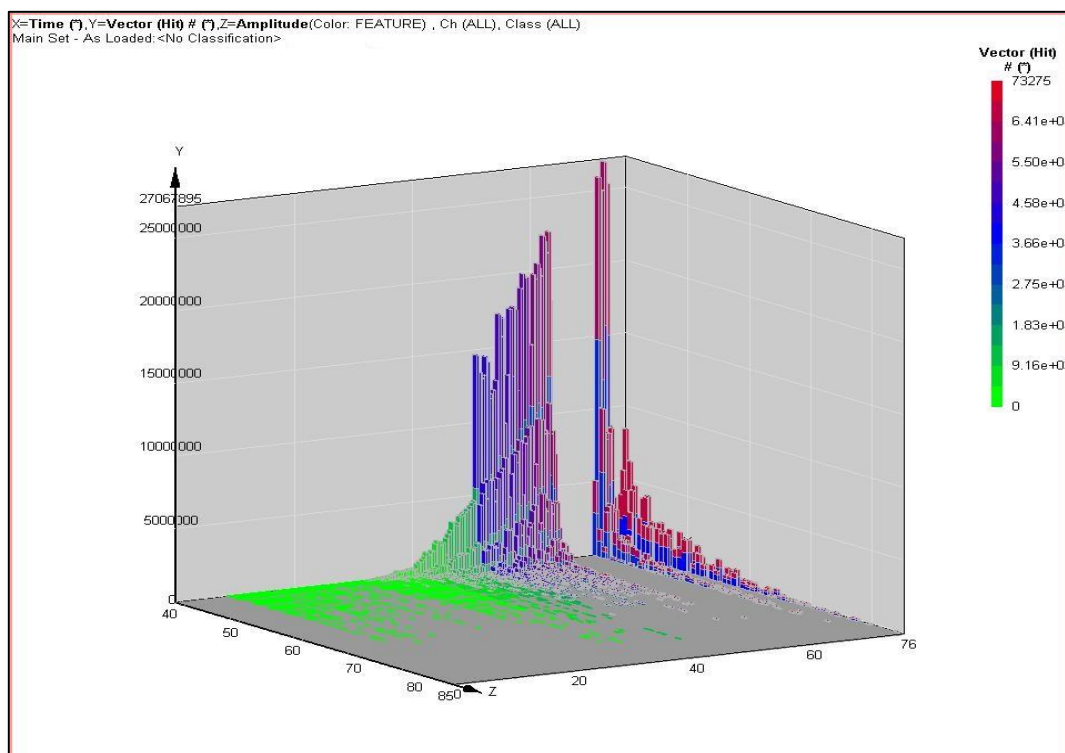
Στο σχήμα 29 φαίνεται το διάγραμμα διασποράς του χρόνου ανύψωσης σε σχέση με το χρόνο περαίωσης της δοκιμής. Κυμαίνεται σε γενικά μικρές τιμές, με μέγιστα της τάξης των 10^3 msec.



Σχήμα 30: Διάγραμμα πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

Το πλάτος καταγραφής ακουστικών εκπομπών ομοίως κυμαίνεται από την τιμή που έχει οριστεί ως κατώφλι μέχρι τα 95dB, αφού το επιτρεπόμενο όριο είναι τα 99dB.

Στο σχήμα 31 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται συνδυαστικά οι παράμετροι των κτύπων και του πλάτους καταγραφής σε σχέση με το χρόνο. Φαίνεται δηλαδή πως καταγράφονται οι κτύποι στο εύρος που κυμαίνεται το πλάτος των κυματομορφών AE.



Σχήμα 31: Τρισδιάστατο διάγραμμα κτύπων (hits) και πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

Σε όλα τα παραπάνω αθροιστικά διαγράμματα παρατηρείται σταδιακή αύξηση των καταγραφών ακουστικής εκπομπής. Εκτενέστερη ανάλυση θα γίνει στο κεφάλαιο 4.6.

Ο λόγος για τον οποίο φαίνονται κενά στην καταγραφή σε αρκετά από τα διαγράμματα θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

4.6 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι στα δοκίμια δεν πραγματοποιήθηκε εντοπισμός θέσης της πηγής ακουστικής εκπομπής λόγω μη κατάλληλης θέσης των αισθητήρων στο δοκίμιο καθώς επίσης και λόγω της γεωμετρίας του.

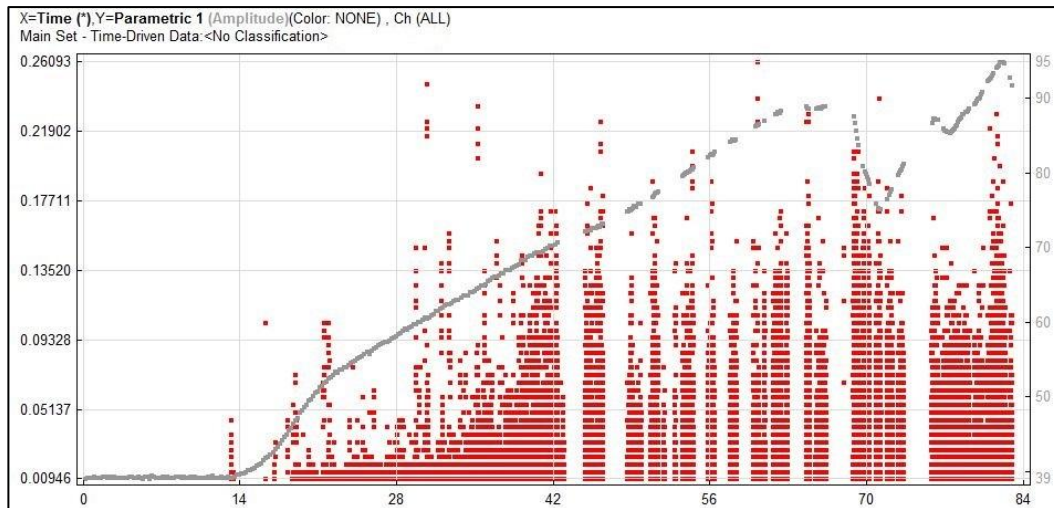
Μια εξήγηση για τα κενά που φαίνονται παρακάτω στα διαγράμματα είναι ότι οφείλονται στον μεγάλο όγκο μετρήσεων και κυματομορφών που καταγράφουν οι αισθητήρες με αποτέλεσμα να "μπλοκάρει" το σύστημα παρακολούθησης και να παρουσιάζει κενά στην καταγραφή. Για τον ίδιο λόγο παρουσιάζονται κενά στις καταγραφές και στα υπόλοιπα δοκίμια. Άλλη μια πιθανή αιτία είναι το φαινόμενο του ερπυσμού (Jee & Jee, 2012).

Τα δοκίμια που παρουσιάζονται είναι αυτά στα οποία παρουσιάστηκαν τα λιγότερα κενά, ενώ απορρίπτονται για περαιτέρω επεξεργασία όλα τα υπόλοιπα στα οποία υπήρχαν πολλά κενά.

Δοκίμιο 8.2

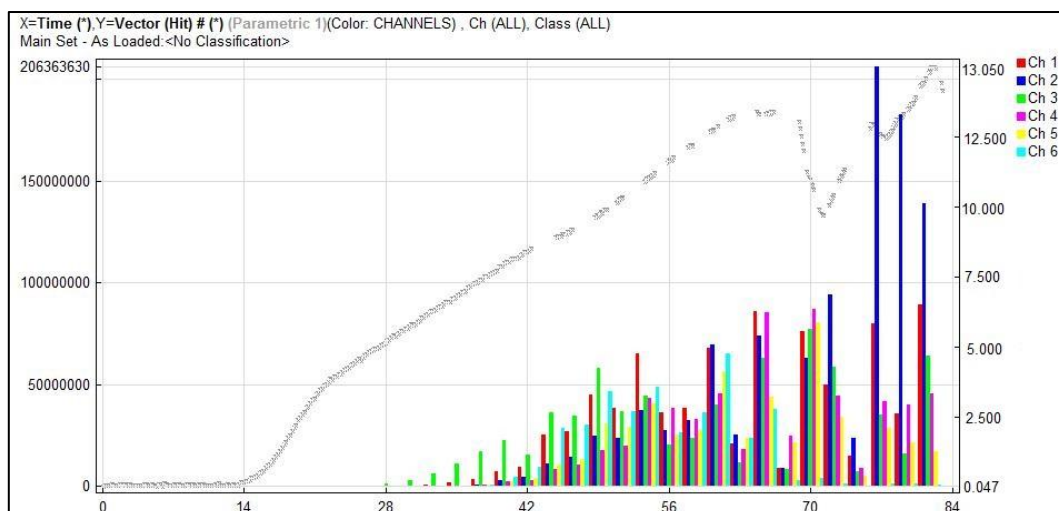
Η θέση των αισθητήρων στο δοκίμιο 8.2 είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 31. Η χρονική διάρκεια της δοκιμής είναι 85sec, με αστοχία σε εφελκυσμό στα 68sec.

Στο Σχήμα 32 δίνεται η παράμετρος του πλάτους καταγραφής ακουστικής εκπομπής με το φορτίο που δέχεται το δοκίμιο συναρτήσει της διάρκειας της δοκιμής. Ενώ στα σχήματα 33 και 34 δίνονται αντίστοιχα οι κτύποι και οι απαριθμήσεις με το φορτίο σε σχέση με το χρόνο.



Σχήμα 32: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

Το πλάτος (amplitude AE) καταγραφής κυμαίνεται από 39-95dB όμως αναμένεται, δηλαδή από την τιμή που έχει οριστεί ως κατώφλι (38 dB) έως τα 99 dB που είναι το επιτρεπόμενο όριο. Στα 30sec περίπου της καταγραφής παρατηρείται μέγιστες τιμές πλάτους καταγραφής των κυματομορφών, όπως επίσης αντίστοιχες καταγραφές παρατηρούνται και πριν την αστοχία στα 60sec περίπου. Μερικά δευτερόλεπτα πριν την θραύση παρατηρούνται πάλι κυματομορφές μεγάλου πλάτους.



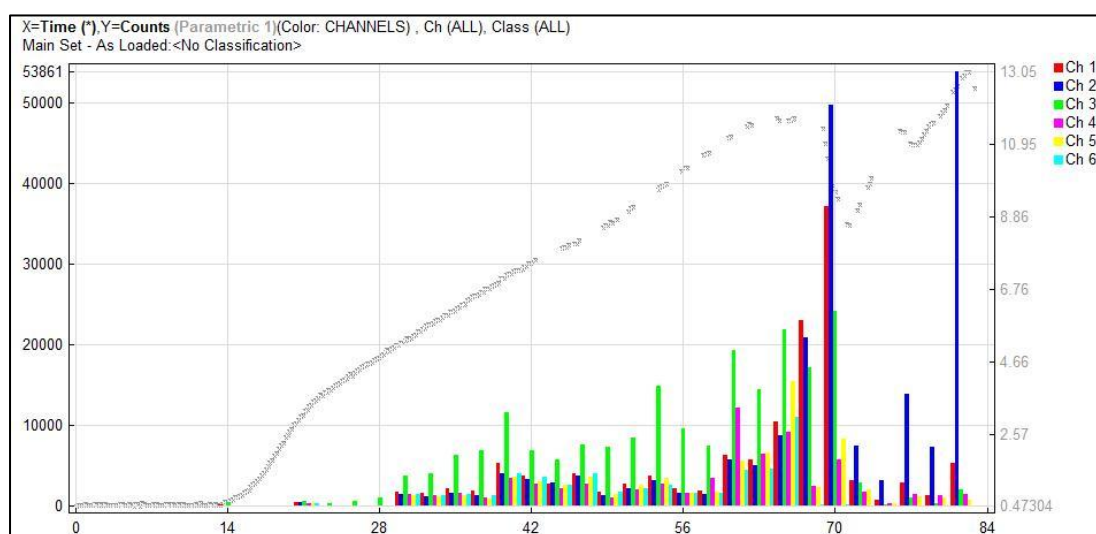
Σχήμα 33: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και κτύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.

Οι "κτύποι" (hits) των ακουστικών εκπομπών, δηλαδή το σήμα που περνά το κατώφλι και προκαλεί στα κανάλια να καταγράψουν μια κυματομορφή. Καθ'όλη τη διάρκεια

της καταγραφής οι κτύποι σταδιακά αυξάνονται, αντίστοιχα σε κάθε κανάλι με μεγαλύτερη εμφάνιση στη μέση της καταγραφής (περίπου στα 30 με 56sec) στο κανάλι 3 και μεγιστοποίηση των κτύπων (της τάξης των 10^9) στο κανάλι 2, σε μια 2^η αστοχία του υλικού στα 76sec (10,9kN).

Λίγο πριν τη θραύση παρατηρούνται πάλι μέγιστη εμφάνιση κτύπων στο κανάλι 2, κάτι που ίσως είναι προειδοποίηση επερχόμενης αστοχίας και ο αισθητήρας να βρίσκεται πολύ κοντά στην πηγή ΑΕ.

Θα περίμενε κανείς να δει μέγιστες τιμές των κτύπων τη στιγμή της αστοχίας, πράγμα το οποίο δεν καταγράφηκε. Ένας λόγος που μπορεί να εξηγήσει το γεγονός είναι το ίδιο το υλικό του δοκιμίου. Δηλαδή να καταγράφονται περισσότεροι κτύποι κατά τη διάδοση των ρωγμών στο υλικό, όχι μόνο κατά την έναρξη τους, ούτε τη στιγμή της αστοχίας που έχουν ήδη δημιουργηθεί και αναπτυχθεί όλες οι ρωγμές. Επίσης εάν το ακουστικό κύμα δεν είναι επίπεδο κύμα (plane wave), περαιτέρω περιπλοκές προκύπτουν λόγω της διαφοράς φάσης στην επιφάνεια του αισθητήρα.



Σχήμα 34: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.

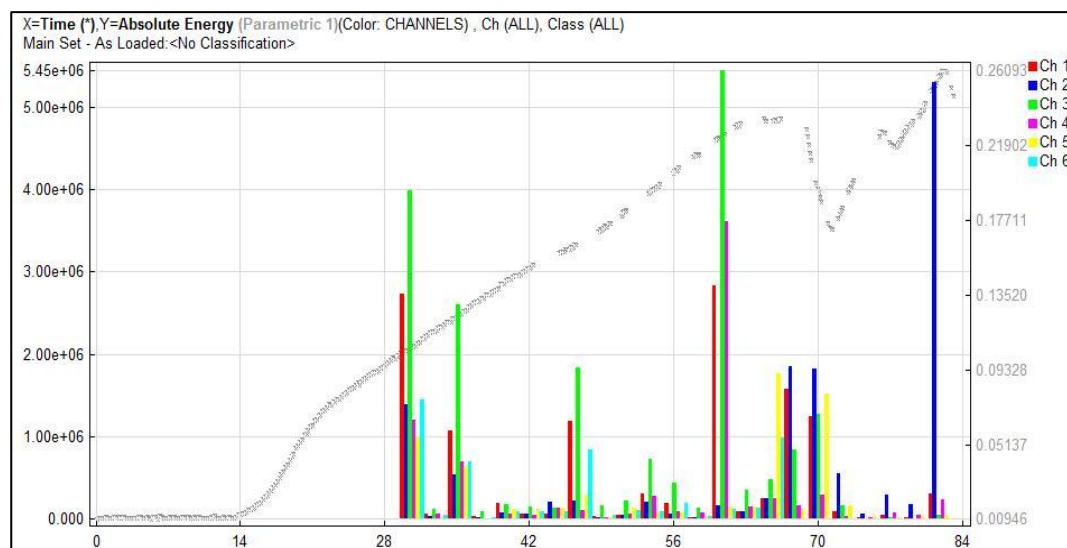
Από τα 0 έως 14sec παρατηρείται ότι το δοκίμιο δεν έχει δεχθεί ακόμα φορτία γι αυτό και δεν έχουν καταγραφεί μετρήσεις ακουστικής εκπομπής. Όσο περνά ο χρόνος και το δοκίμιο δέχεται φορτία η παράμετρος "counts" της ακουστικής εκπομπής αυξάνεται και συγκεκριμένα στο κανάλι 3 παρατηρούνται αυξημένες οι καταγραφές

απαριθμήσεων σε σχέση με τα άλλα κανάλια. Άρα σε αυτό το κανάλι έχει καταγραφεί περισσότερες φορές υπέρβαση του κατωφλιού στη διάρκεια ενός σήματος.

Κοντά στην αστοχία με μέγιστο φορτίο 11,9kN (68sec) παρατηρείται ότι περισσότερες απαριθμήσεις καταγράφονται στο κανάλι 4. Τη στιγμή της θραύσης (12,7kN) στα 82sec παρατηρείται ότι ανιχνεύονται περισσότερες υπερβάσεις του κατωφλιού, με μέγιστο αριθμό 53861, στο κανάλι 2. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ίσως οι αισθητήρες στα κανάλια 3,4 και 2 να βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή των ακουστικών εκπομπών και να ανιχνεύουν πιο έντονα τη θραύση.

Στο σχήμα 34 οι απαριθμήσεις είναι μέγιστες τη στιγμή της αστοχίας ενώ στο σχήμα 33 δε συμβαίνει το ίδιο για τους κτύπους οφείλεται στο γεγονός ότι τη στιγμή της αστοχίας περισσότερες φορές οι κτύποι περνούν το κατώφλι, άρα καταγράφονται περισσότερες απαριθμήσεις. Αργότερα στη θραύση πια του δοκιμίου που είναι έντονα ρωγματομένο το πέτρωμα ομοίως ανιχνεύονται περισσότερες απαριθμήσεις.

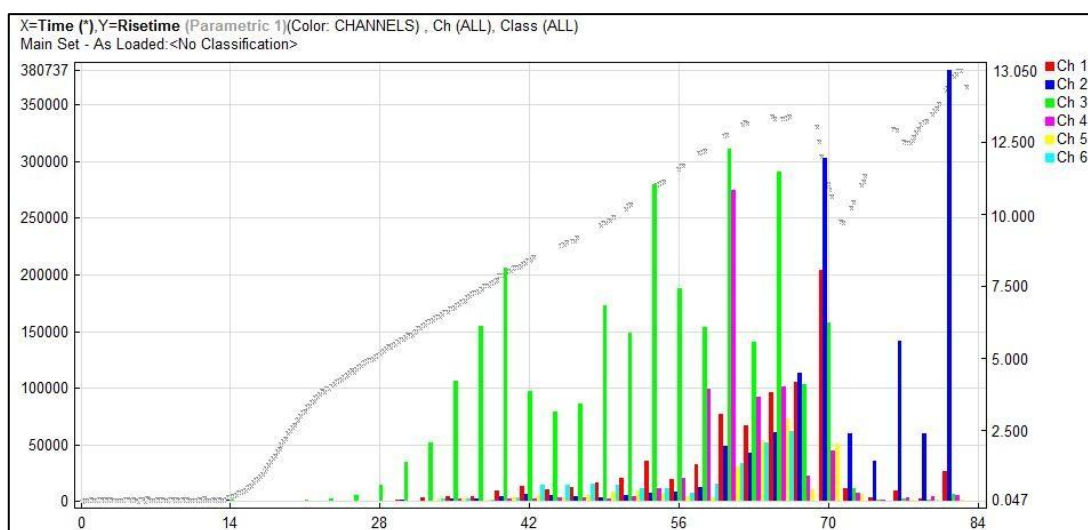
Έπειτα στο Σχήμα 35 παρουσιάζεται η απόλυτη ενέργειας ακουστικής εκπομπής με το φορτίο κατά τη διάρκεια της δοκιμής και στο Σχήμα 36 ο χρόνος ανύψωσης συνδυαστικά με το φορτίο στο χρόνο αυτής.



Σχήμα 35: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και απόλυτης ενέργειας AE (energy) συναρτήσει του χρόνου.

Η απόλυτη ενέργεια (absolute energy) AE μετριέται σε atto Joule και είναι η ολική ενέργεια που εκλύεται σε όλη τη διάρκεια της καταγραφής, ανεξάρτητα από το κατώφλι.

Σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής παρατηρούνται αυξομειώσεις των μετρήσεων στα κανάλια. Μεγαλύτερη καταγραφή ενέργειας παρουσιάζει το κανάλι 3 στα πρώτα κιάλας 30 δευτερόλεπτα μαζί με το κανάλι 1. Το ίδιο συμβαίνει και λίγο πριν την πρώτη αστοχία στα 60sec, ενώ στα 68sec που αστοχεί το υλικό η ολική ενέργεια έχει μειωθεί τουλάχιστον στο μισό της προηγούμενης καταγραφής με μεγαλύτερες τιμές στο κανάλι 1,2 και 5 αυτή τη φορά. Αυτό ίσως συμβαίνει διότι έχει ήδη απελευθερωθεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας πριν την επερχόμενη αστοχία στο "άνοιγμα" των ρωγμών, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί για άλλη μια φορά προειδοποίηση. Τέλος, παρατηρείται ότι μεγάλο ποσό ενέργειας απελευθερώνεται τελικά στη θραύση, στα 82sec, στο κανάλι 2.



Σχήμα 36: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και χρόνου ανύψωσης (rise time) συναρτήσει του χρόνου.

Ο χρόνος μεταξύ της στιγμής όπου το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μεγίστου πλάτους είναι ο χρόνος ανύψωσης, Rise time, μετρούμενος σε msec.

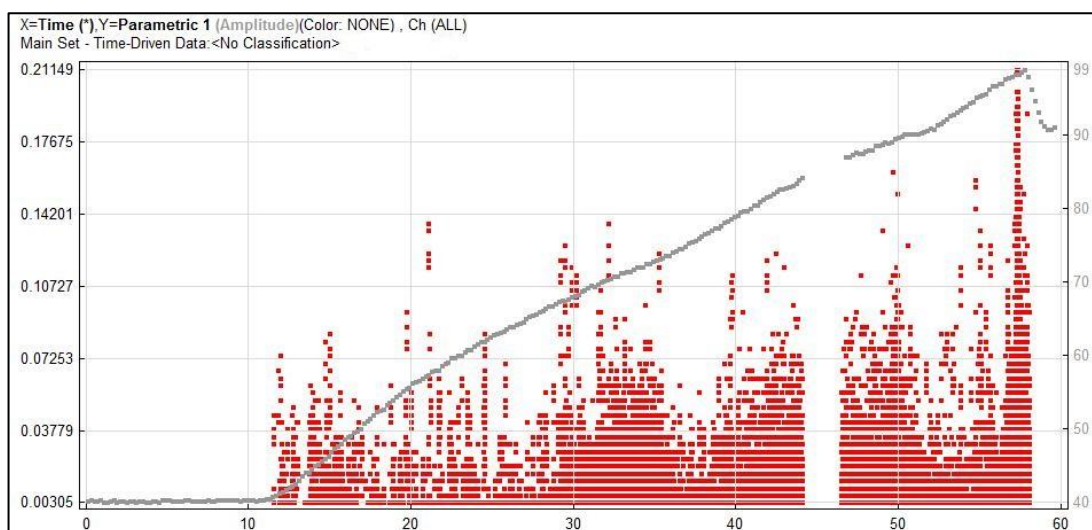
Παρατηρείται ότι μεγάλους χρόνος ανύψωσης έχει το κανάλι 3 σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της καταγραφής. Αυτό σημαίνει ότι πολύ γρήγορα το σήμα σε αυτό το

κανάλι υπερβαίνει το κατώφλι και φτάνει στη στιγμή του μέγιστου πλάτους. Σε αντιδιαστολή στην πρώτη αστοχία οι μεγαλύτεροι χρόνοι είναι στο κανάλι 2, όπως και τη στιγμή της θραύσης, με μέγιστο χρόνο της τάξης $10^5 \mu\text{sec}$.

Φαίνεται τελικά πως ο χρόνος ανύψωσης συνδέεται με τη δημιουργία και ανάπτυξη ρωγμών στη δομή των υλικών. Γι' αυτό καθώς φορτίζεται το δοκίμιο παρατηρείται αύξηση του χρόνου. Όταν λοιπόν το φορτίο έχει φτάσει στο 80-90% της φόρτισης ο χρόνος μπορεί να επηρεαστεί από το σύνθετο μηχανισμό θραύσης, δηλαδή την ανάπτυξη των ήδη δημιουργημένων ρωγμών. Η ανάπτυξη ρωγμών έχει χαμηλότερο χρόνο ανύψωσης από την έναρξη αυτών. Μπορεί ακόμα να επηρεαστεί ο χρόνος που καταγράφεται από κάποιον αισθητήρα και από το σύνθετο μηχανισμό θραύσης σε γειτονική περιοχή του υλικού.

Δοκίμιο 9.2

Η θέση των αισθητήρων στο δοκίμιο 9.2 είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 32. Η χρονική διάρκεια της δοκιμής είναι 63sec, με αστοχία σε εφελκυσμό στα 58sec. Ακολουθεί στο Σχήμα 37 το πλάτος καταγραφής με το φορτίο κατά τη χρονική διάρκεια της δοκιμής.

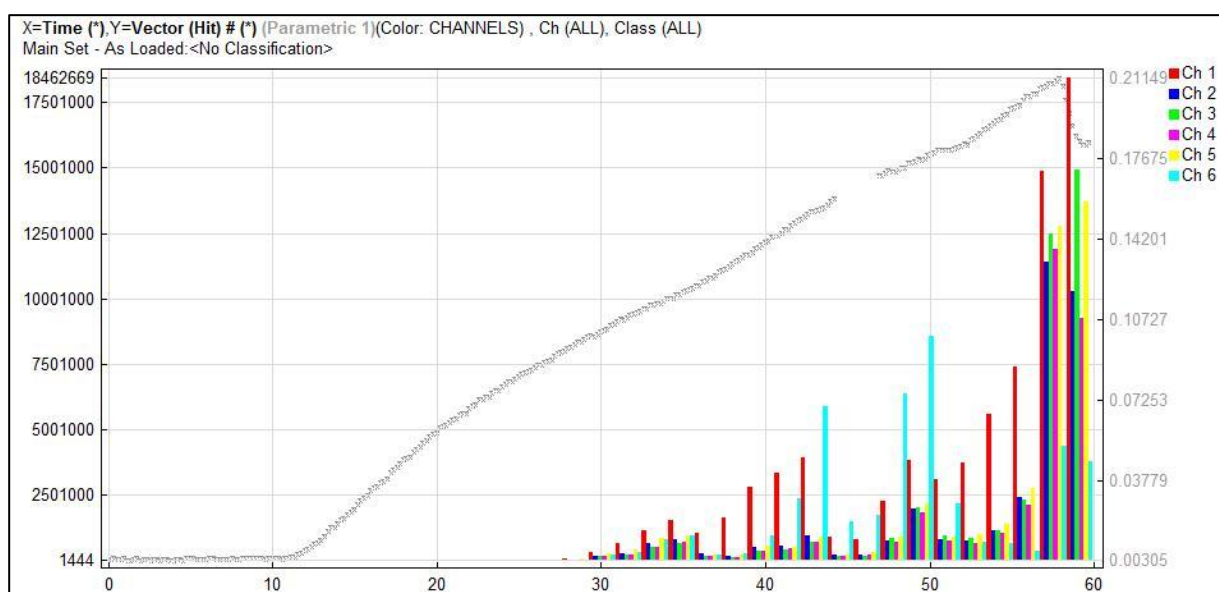


Σχήμα 37: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

Από τα 0 έως 10sec παρατηρείται ότι το δοκίμιο δεν έχει δεχθεί ακόμα φορτία γι αυτό και δεν έχουν καταγραφεί μετρήσεις ακουστικής εκπομπής.

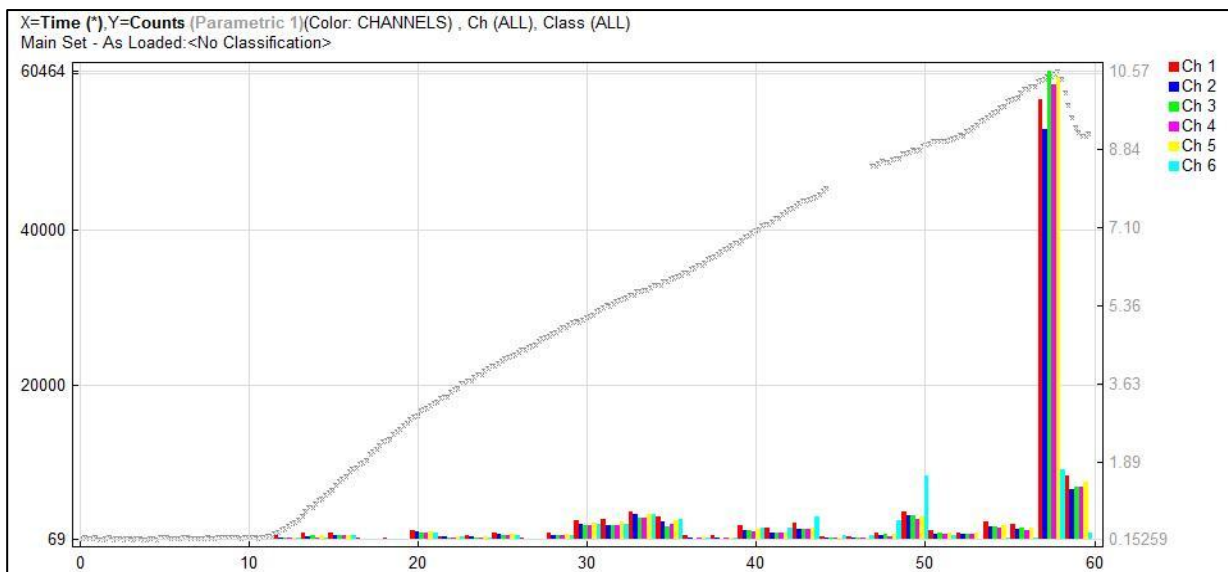
Το πλάτος (amplitude AE) καταγραφής κυμαίνεται από 39-95dB όμως αναμένεται, δηλαδή από την τιμή που έχει οριστεί σαν κατώφλι τα 38 dB έως τα 99 dB που είναι το επιτρεπόμενο όριο. Στα 30sec περίπου καταγράφονται μεγάλες τιμές πλάτους κυματομορφών και πριν την αστοχία στα 50sec περίπου. Μερικά δευτερόλεπτα πριν την θραύση παρατηρούνται κυματομορφές μέγιστου πλάτους.

Στα σχήματα 38 και 39 παρουσιάζονται οι κτύποι και οι απαριθμήσεις συνδυαστικές με το φορτίο που δέχεται το δοκίμιο συναρτήσει του χρόνου της δοκιμής.



Σχήμα 38: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίο και κτύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.

Οι κτύποι σταδιακά αυξάνονται, αντίστοιχα σε κάθε κανάλι με μεγαλύτερη εμφάνιση στη μέση της καταγραφής (περίπου στα 45 με 50sec) στο κανάλι 6 και εμφανίζουν μέγιστο (της τάξης των 10^9) στο κανάλι 1, τη στιγμή της αστοχίας. Μεγάλες τιμές την ίδια χρονική στιγμή εμφανίζονται επίσης στα κανάλια 3 και 5. Κάτι που είναι αναμενόμενο αφού έχει επέλθει θραύση του δοκιμίου.



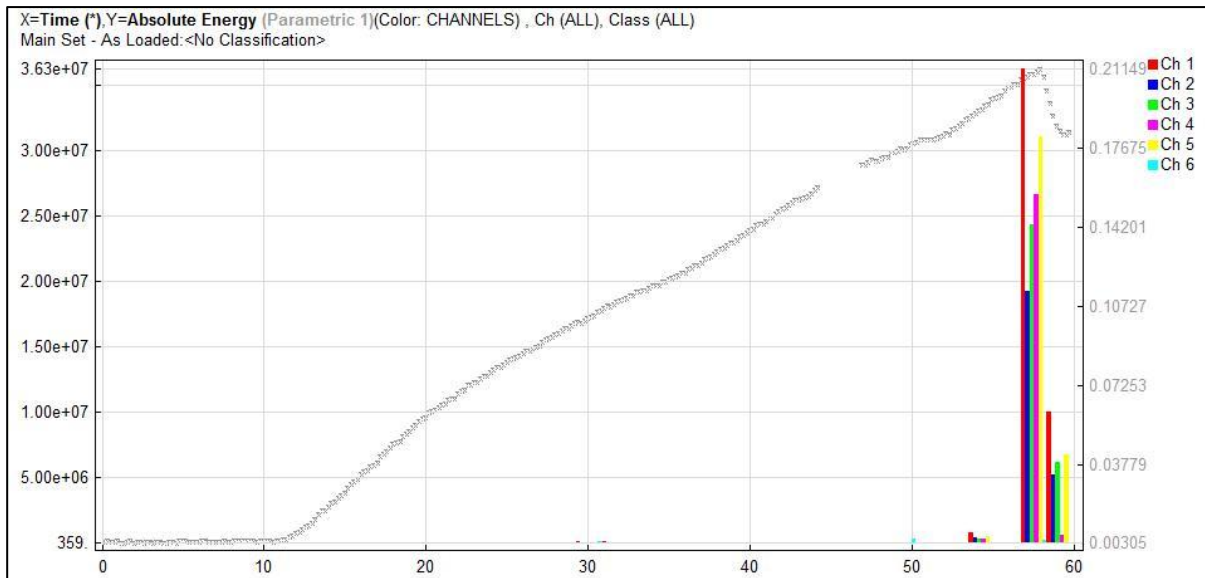
Σχήμα 39: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρείται εμφάνιση ακουστικής εκπομπής (σε counts) στα 10sec μόλις της καταγραφής, την ίδια στιγμή που αρχίζει το δοκίμιο και καταπονείται. Όσο περνά ο χρόνος και το δοκίμιο δέχεται φορτία η παράμετρος "counts" της ακουστικής εκπομπής αυξάνεται, αλλά σε μικρές σχετικά τιμές της τάξης του 10^1 - 10^2 . Συγκεκριμένα στο κανάλι 6 παρατηρούνται αυξημένες οι καταγραφές απαριθμήσεων σε σχέση με τα άλλα κανάλια, ειδικά κάποια δευτερόλεπτα (στα 50") πριν τη θραύση. Άρα σε αυτό το κανάλι έχει καταγραφεί περισσότερες φορές υπέρβαση του κατωφλίου στη διάρκεια ενός σήματος.

Τη στιγμή της θραύσης (10,4kN) στα 58sec ανιχνεύονται περισσότερες υπερβάσεις του κατωφλίου, με μέγιστο αριθμό 60464, στο κανάλι 3, 5 και 1. Από αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι ίσως οι αισθητήρες στα κανάλια 3,5 και 1 να βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή των ακουστικών εκπομπών και να ανιχνεύουν πιο έντονα τη θραύση.

Φαίνεται ότι και στα δύο διαγράμματα του σχήματος 40 και 41 αντίστοιχα οι παράμετροι ακουστικών εκπομπών αυξάνονται σταδιακά, ίσως γιατί οι καταγραφές συμπίπτουν με την έναρξη και διάδοση των ρωγμών μέσα στο υλικό και όχι από την τη διάδοση ήδη δημιουργημένων ρωγμών.

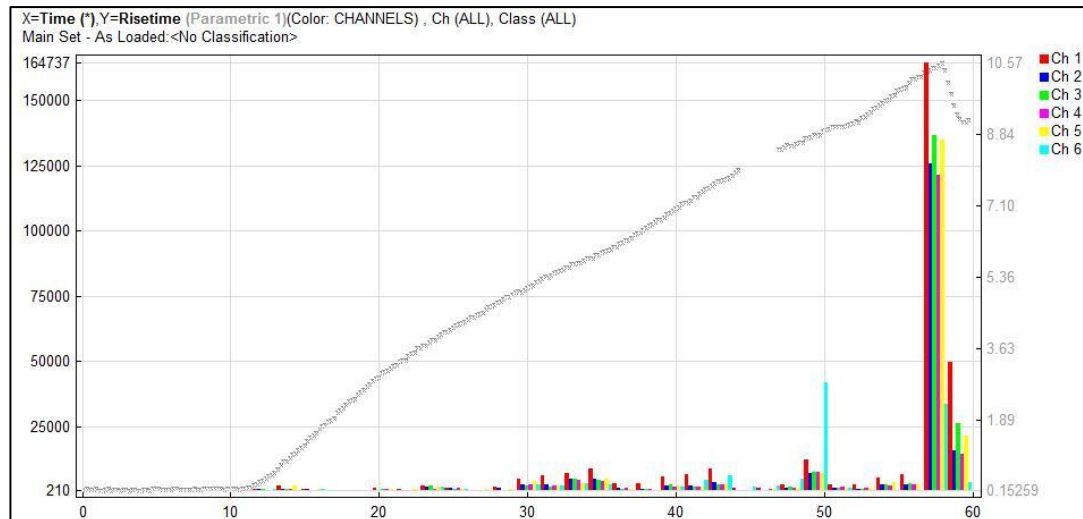
Στα σχήματα αυτά (40 και 41) παρουσιάζονται η απόλυτη ενέργεια και ο χρόνος ανύψωσης συνδυαστικά με το φορτίο της δοκιμής στο χρόνο που διαρκεί.



Σχήμα 40: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και απόλυτης ενέργειας AE (absolute energy) συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρείται ότι μεγαλύτερο ποσό απόλυτης ενέργειας (της τάξης 10^7) απελευθερώνεται 2sec πριν τη θραύση στο κανάλι 1 και στο κανάλι 5 τη στιγμή της θραύσης, στα 58sec. Ομοίως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο αισθητήρας με καταγραφή στο κανάλι 1 ίσως βρίσκεται πολύ κοντά στην πηγή AE, γι αυτό και πολύ κοντά στη θραύση δίνει μέγιστες τιμές αφού απελευθερώνεται μεγάλο ποσό ελαστικής ενέργειας από την ακουστική εκπομπή.

Άρα πιθανόν πρόκειται για μια προειδοποίηση της θραύσης. Το κανάλι 5 επίσης βρίσκεται στο επίπεδο θραύσης, αφού οι τιμές του είναι μέγιστες τη στιγμή αυτή.



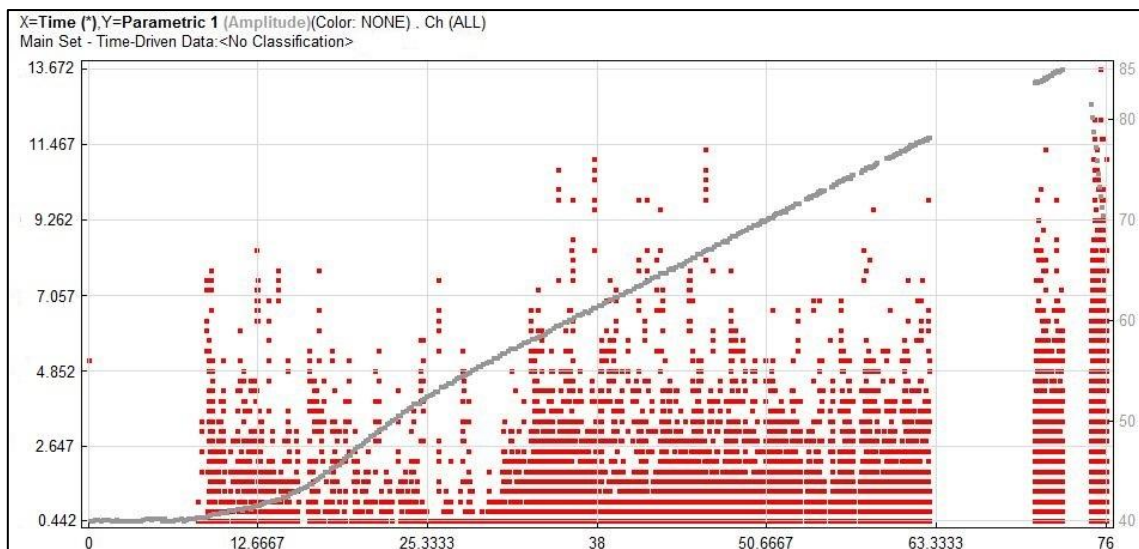
Σχήμα 41: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και χρόνου ανύψωσης (rise time) συναρτήσει του χρόνου.

Μεγάλους χρόνους ανύψωσης έχει το κανάλι 6 στο τέλος περίπου της καταγραφής. Αυτό σημαίνει ότι πολύ γρήγορα το σήμα σε αυτό το κανάλι υπερβαίνει το κατώφλι και φτάνει στη στιγμή του μέγιστου πλάτους του. Λίγο πριν τη θραύση ο μέγιστος χρόνος ανύψωσης, 164737μsec, καταγράφεται από το κανάλι 1. Σε αντιδιαστολή στην αστοχία οι μεγαλύτεροι χρόνοι είναι στο κανάλι 3 και 5 με μέγιστο χρόνο της τάξης 10^5 μsec.

Μια ακόμη παρατήρηση για το χρόνο ανύψωσης είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό ενός φαινομένου ως βίαιου ή όχι. Δηλαδή, αν ο χρόνος είναι μεγάλος σημαίνει ότι γρήγορα το σήμα φτάνει στο μέγιστο του πλάτους του άρα και η καταπόνηση του δοκιμίου είναι πιο απότομη. Επομένως η θραύση θα επέλθει γρηγορότερα οπότε και το φαινόμενο θα είναι περισσότερο βίαιο.

Δοκίμιο 9.3

Η θέση των αισθητήρων στο δοκίμιο 9.3 είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 33. Η χρονική διάρκεια της δοκιμής είναι 80sec, με αστοχία σε εφελκυσμό στα 74sec. Έπεται το Σχήμα 42, στο οποίο φαίνεται το διάγραμμα του πλάτους καταγραφής AE και του φορτίου που δέχεται το δοκίμιο συναρτήσει της χρονικής διάρκειας της δοκιμής.

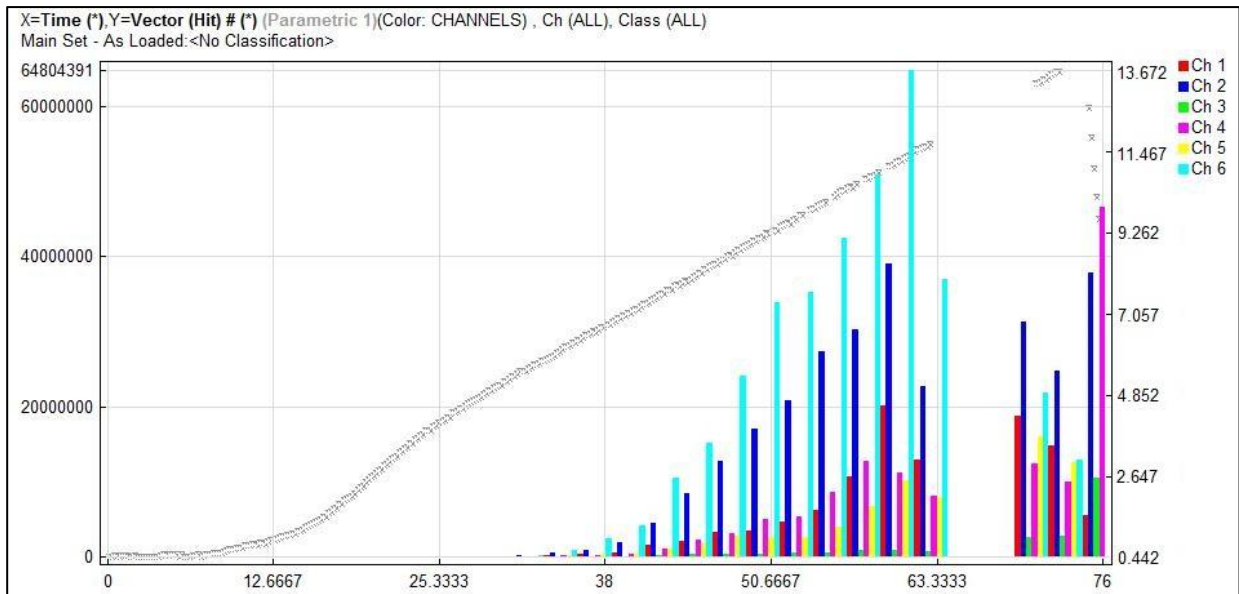


Σχήμα 42: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

Το διάγραμμα πλάτους καταγραφής και φορτίου συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζεται σε διάγραμμα διασποράς, αφού δεν είναι γνωστό από πριν τι μορφή θα είχε. Το πλάτος (amplitude AE) καταγραφής κυμαίνεται από 39-85dB όμως αναμένεται, δηλαδή από την τιμή που έχει οριστεί σαν κατώφλι τα 38 dB έως τα 99 dB που είναι το επιτρεπόμενο όριο.

Ωστόσο παρατηρείται ότι καταγράφονται κυματομορφές με μεγάλος πλάτος στην αρχή της δοκιμής (10sec) καθώς επιβάλλεται το φορτίο, στη μέση περίπου αυξάνεται και πάλι το πλάτος με μέγιστη τιμή τα 85dB τη στιγμή της θραύσης.

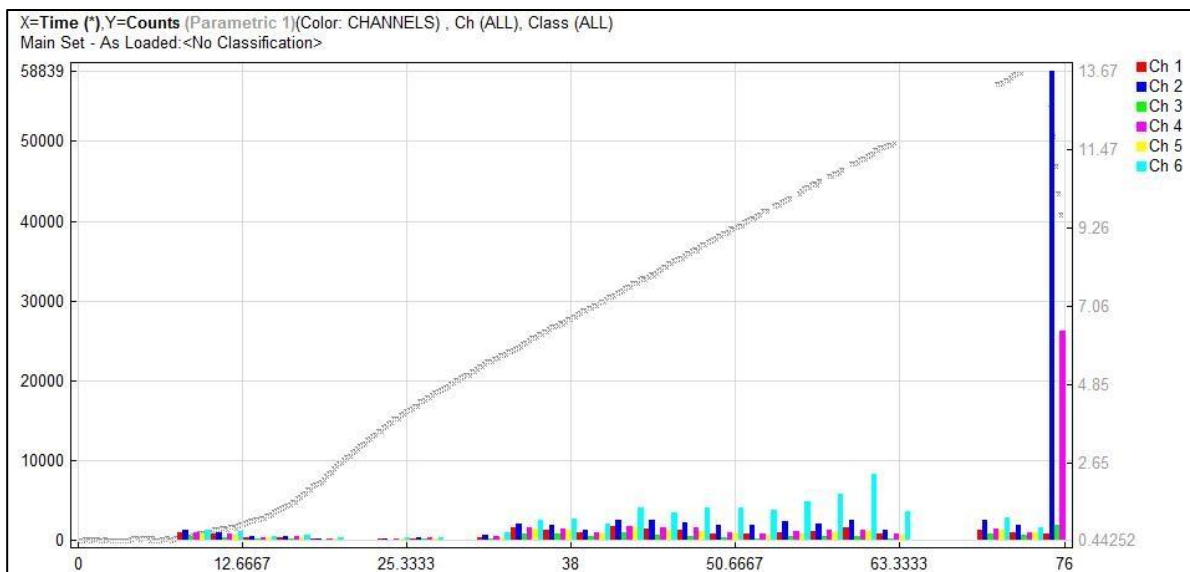
Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 43 το διάγραμμα των κτύπων ακουστικής εκπομπής και του φορτίου συναρτήσει του χρόνου της δοκιμής.



Σχήμα 43: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και κτύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.

Σε όλη τη διάρκεια της καταγραφής οι κτύποι σταδιακά αυξάνονται, αντίστοιχα σε κάθε κανάλι με μεγαλύτερη εμφάνιση στη μέση της καταγραφής (περίπου στα 40 με 53sec) στο κανάλι 6 με μέγιστο της τάξης των 10^9 . Μεγάλες τιμές τις ίδιες χρονικές στιγμές εμφανίζονται επίσης στα κανάλια 2 και 4. Λίγο πριν τη θραύση (στα 72sec περίπου) καταγράφονται μεγάλες τιμές στο κανάλι 2.

Ακολουθεί το Σχήμα 44 στο οποίο παρουσιάζονται οι απαριθμήσεις ακουστικής εκπομπής με το φορτίο σε σχέση με το χρόνο καταγραφής της δοκιμής.

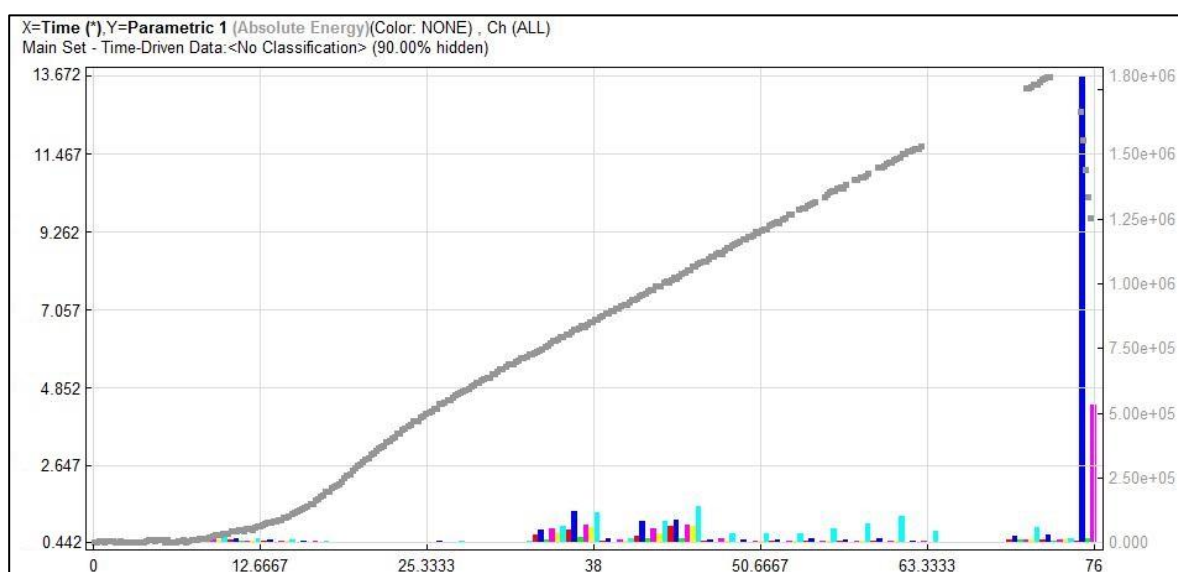


Σχήμα 44: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρείται μια πρώτη εμφάνιση ακουστικής εκπομπής (σε counts) στα 7sec μόλις της καταγραφής, όπου αρχίζει η καταπόνηση του δοκιμίου. Όσο περνά ο χρόνος και το δοκίμιο δέχεται φορτία η παράμετρος "counts" της ακουστικής εκπομπής αυξάνεται, αλλά σε μικρές σχετικά τιμές της τάξης του 10^2 - 10^3 . Συγκεκριμένα στο κανάλι 6 παρατηρούνται αυξημένες οι καταγραφές απαριθμήσεων σε σχέση με τα άλλα κανάλια, ειδικά κάποια δευτερόλεπτα (στα 60sec) πριν τη θραύση. Άρα σε αυτό το κανάλι έχει καταγραφεί περισσότερες φορές υπέρβαση του κατωφλίου στη διάρκεια ενός σήματος.

Τη στιγμή της θραύσης (13,7kN) στα 74sec ανιχνεύονται περισσότερες υπερβάσεις του κατωφλίου, με μέγιστο αριθμό 58839, στο κανάλι 2. Από αυτό συμπεραίνεται ότι ίσως ο αισθητήρας σε αυτό το κανάλι να βρίσκεται πιο κοντά στην πηγή των ακουστικών εκπομπών και να ανιχνεύει πιο έντονα τη θραύση.

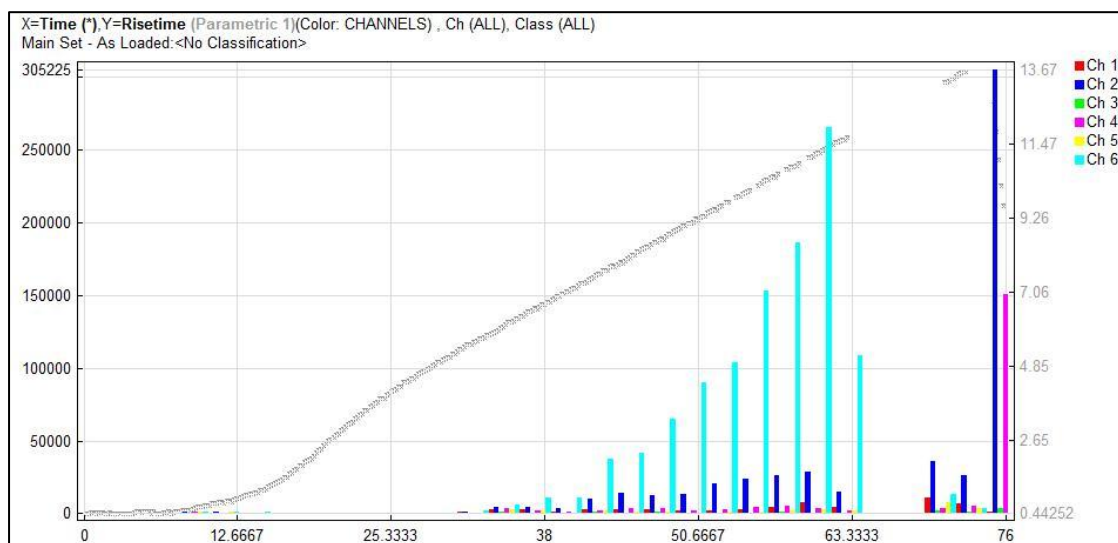
Στην πορεία παρουσιάζονται στα Σχήματα 45 και 46 οι παράμετροι απόλυτη ενέργεια AE και χρόνος ανύψωσης συνδυαστικά με το φορτίο στη χρονική διάρκεια της δοκιμής.



Σχήμα 45: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και απόλυτης ενέργειας AE (absolute energy) συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρείται ότι μεγαλύτερο ποσό απόλυτης ενέργειας (της τάξης 10^6) απελευθερώνεται τη στιγμή της θραύσης στο κανάλι 2. Κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο τη στιγμή της θραύσης αφού εκεί απελευθερώνεται το μέγιστο ποσό ολικής ελαστικής ενέργειας των ακουστικών εκπομπών. Ομοίως, εξάγεται το

συμπέρασμα ότι ο αισθητήρας με καταγραφή στο κανάλι 2 ίσως βρίσκεται πολύ κοντά στην πηγή ΑΕ.



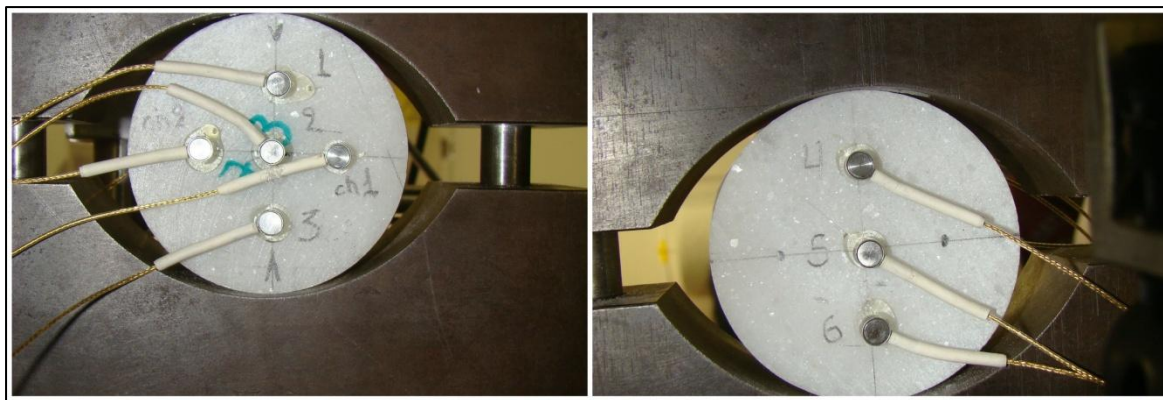
Σχήμα 46: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και χρόνου ανύψωσης (rise time) συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρείται ότι μεγάλους χρόνους ανύψωσης έχει το κανάλι 6 στα 40-63sec της καταγραφής, της τάξης των $10^5 \mu\text{sec}$. Αυτό σημαίνει ότι πολύ γρήγορα το σήμα σε αυτό το κανάλι υπερβαίνει το κατώφλι. Μεγαλύτεροι χρόνοι ανύψωσης επίσης καταγράφονται κατά την ανάπτυξη των ρωγμών στο πέτρωμα. Κατά τη θραύση ο μέγιστος χρόνος ανύψωσης, $305225 \mu\text{sec}$, καταγράφεται από το κανάλι 2.

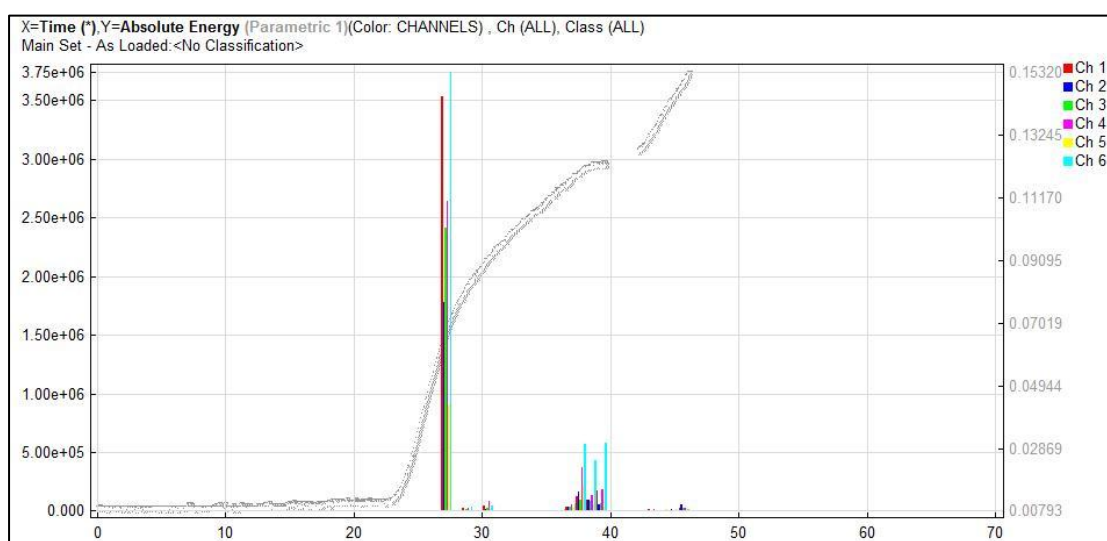
Εν συνεχεία παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα δοκιμών τα οποία απορρίφθηκαν από περαιτέρω επεξεργασία και συζήτηση, καθώς δεν ήταν δυνατό να εξαχθεί κάποια ασφαλές συμπέρασμα.

Δοκίμιο 7.3

Η θέση των αισθητήρων στο δοκίμιο 7.3 είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 37. Η χρονική διάρκεια της δοκιμής είναι 73sec.



Εικόνα 37: Θέση αισθητήρων δοκιμίου 7.3.

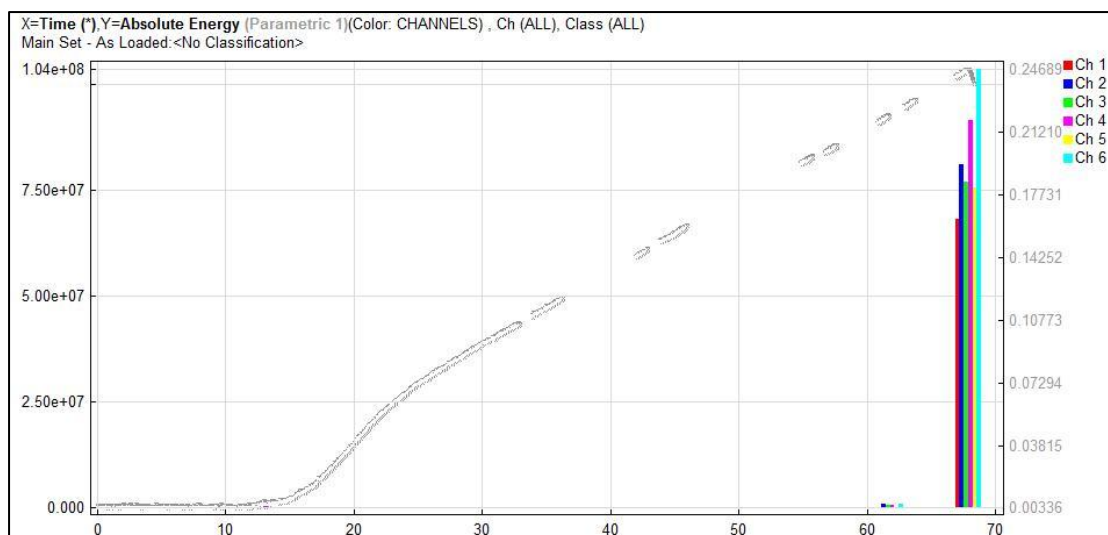


Σχήμα 47: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και απόλυτης ενέργειας AE (absolute energy) συναρτήσει του χρόνου.

Από το Σχήμα 47 παρατηρείται ότι η καταγραφή ακουστικής εκπομπής σταματά στα 45sec περίπου, ενώ η δοκιμή διήρκησε 73 sec. Αυτό πιθανόν να συνέβη λόγω κάποιας αποσύνδεσης της συνδεσμολογίας των αισθητήρων και της μηχανής MTS με το σύστημα καταγραφής.

Δοκίμιο 9.1

Η θέση των αισθητήρων στο δοκίμιο 9.1 είναι ίδια με αυτή των 8.2, 9.2 και 9.3. Η χρονική διάρκεια της δοκιμής είναι 74sec, με αστοχία σε εφελκυσμό στα 68sec.



Σχήμα 48: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και απόλυτης ενέργειας ΑΕ (absolute energy) συναρτήσει του χρόνου.

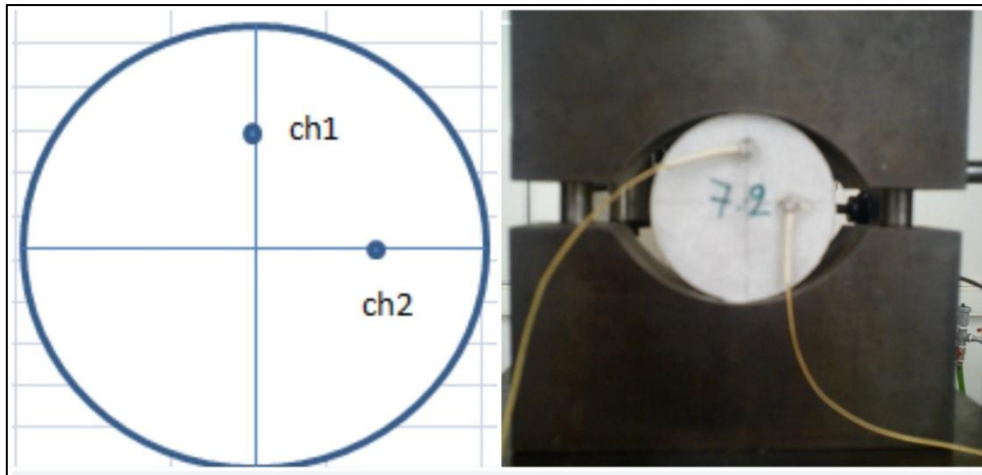
Στο διάγραμμα του σχήματος 48 παρατηρήθηκαν πολλά κενά στην καταγραφή, για το λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω και γι αυτό απορρίφθηκε.

Τέλος, από όλα τα δοκίμια (7.1, 7.2, 7.3, 8.1, 8.2, 8.3, 9.1, 9.2 και 9.3) στα 7.1 και 7.2 τοποθετήθηκαν μόνο 2 αισθητήρες για μια αρχική δοκιμή των ακουστικών εκπομπών. Το δοκίμιο 7.1 κρίθηκε άκυρο καθώς ο ένας αισθητήρες ξεκόλλησε από αυτό και στο δοκίμιο 8.3 δεν έγινε καλή επαφή με τις πλάκες φόρτισης. Για το δοκίμιο 7.2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δυο αισθητήρων.

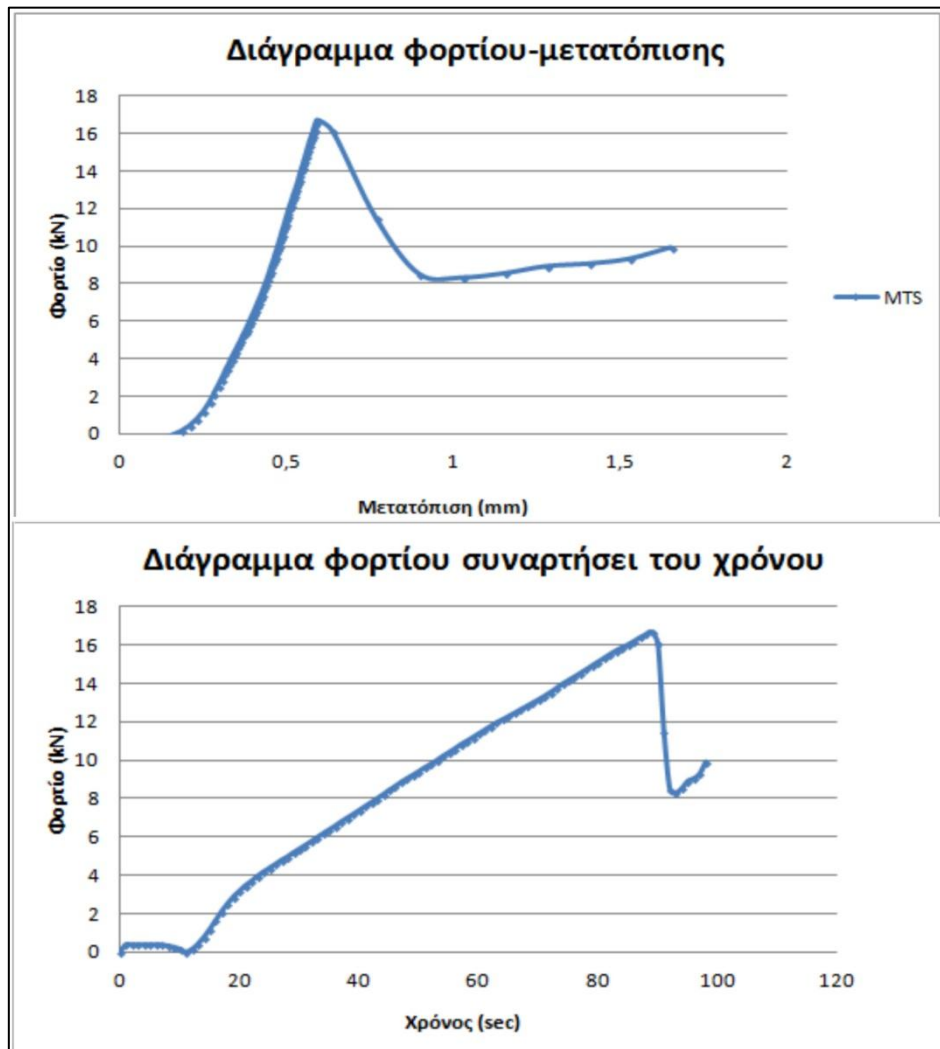
Δοκίμιο 7.2

Η θέση των αισθητήρων στο δοκίμιο 7.2 είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 38. Η χρονική διάρκεια της δοκιμής είναι 98sec, με αστοχία σε εφελκυσμό στα 89sec.

Επιλέχθηκε οι αισθητήρες να βρίσκονται σε τυχαίες θέσεις, ένας στο επίπεδο θραύσης και ο άλλος σε επίπεδο κάθετο στο επίπεδο φόρτισης. Το δοκίμιο σε θραύση παρουσιάζεται στην εικόνα 39. Στα διαγράμματα του σχήματος 49 παρουσιάζονται οι μετρήσεις φορτίου συναρτήσει της μετατόπισης που καταγράφεται στη δοκιμή όπως επίσης και το φορτίο σε σχέση με το χρόνο αυτής.

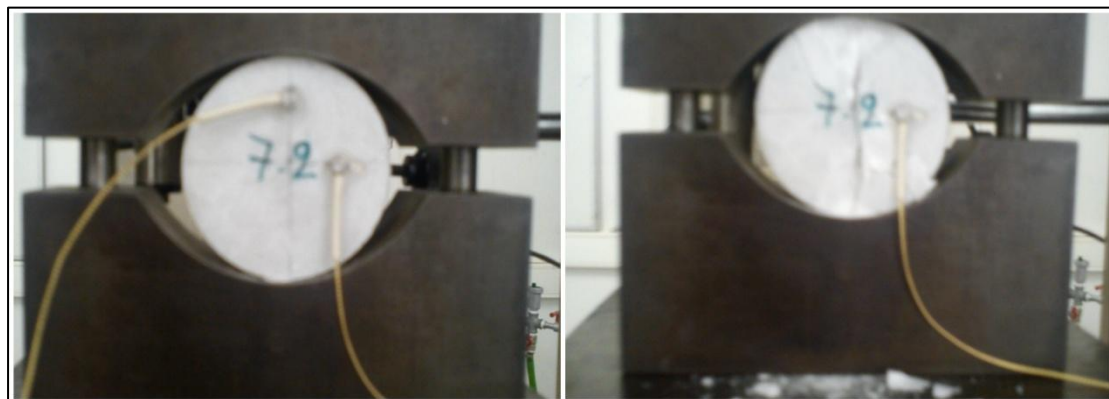


Εικόνα 38: Θέση αισθητήρων δοκιμίου 7.2.



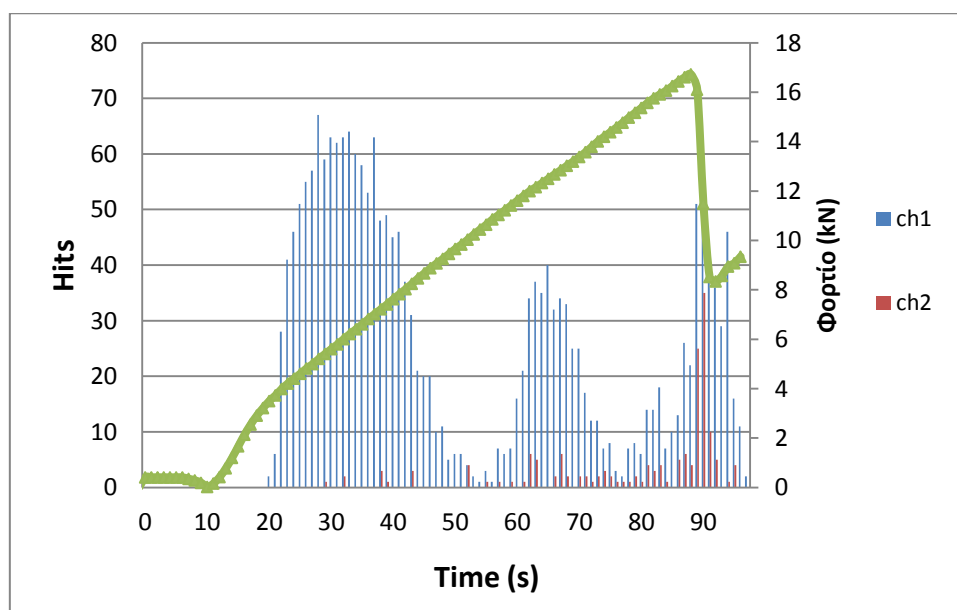
Σχήμα 49: Διαγράμματα μετρήσεων δοκιμής Brazil.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται το δοκίμιο να αρχίζει να δέχεται φορτίο μετά τα 10sec της δοκιμής. Παρατηρείται το δοκίμιο να έχει αστοχήσει σε εφελκυσμό σε φορτίο 14,809kN (στα 89sec, με μετατόπιση 2,605mm). Επομένως, η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι 4,051MPa.



Εικόνα 39: Δοκίμιο 7.2 σε θραύση.

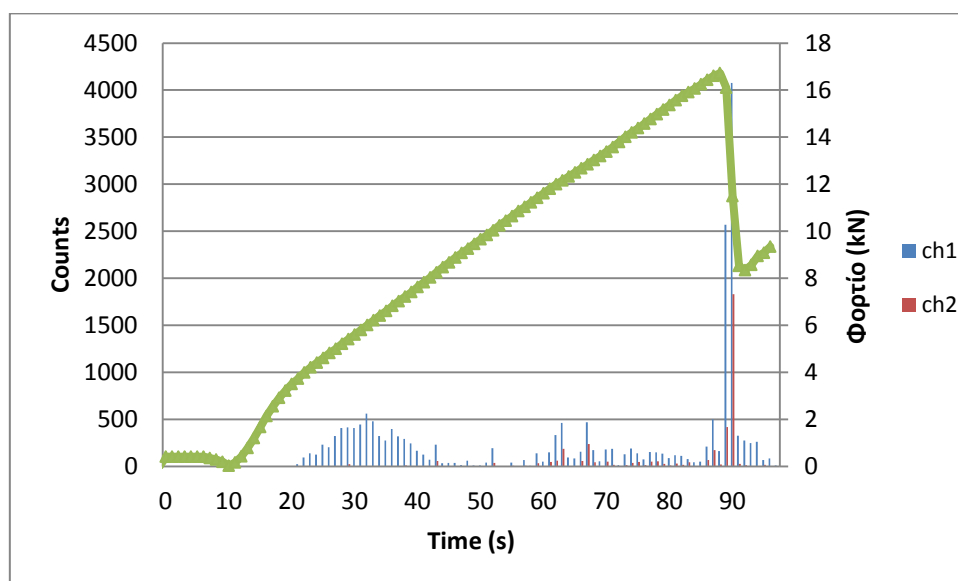
Ακολουθούν τα διαγράμματα των παραμέτρων των ακουστικών εκπομπών σε συνδυασμό με τις μετρήσεις της δοκιμής Brazil.



Σχήμα 50: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και κύπων (hits) συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 50 παρατηρείται μια μεγάλη καταγραφή κύπων, της τάξης των 10^1 , στην αρχή της δοκιμής (20sec περίπου) καθώς αυξάνει το φορτίο που δέχεται το δοκίμιο. Αυτό προφανώς οφείλεται στην έναρξη ρωγμών στο δοκίμιο. Τη στιγμή της αστοχίας εμφανίζονται μεγάλες καταγραφές ομοίως στο κανάλι 1. Το οποίο λόγω διάταξης

είναι πάνω στο επίπεδο θραύσης, για το λόγο αυτό οι καταγραφές του είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από το κανάλι 2. Στο Σχήμα 51 παρουσιάζονται οι απαριθμήσεις ακουστικής εκπομπής και το φορτίο κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

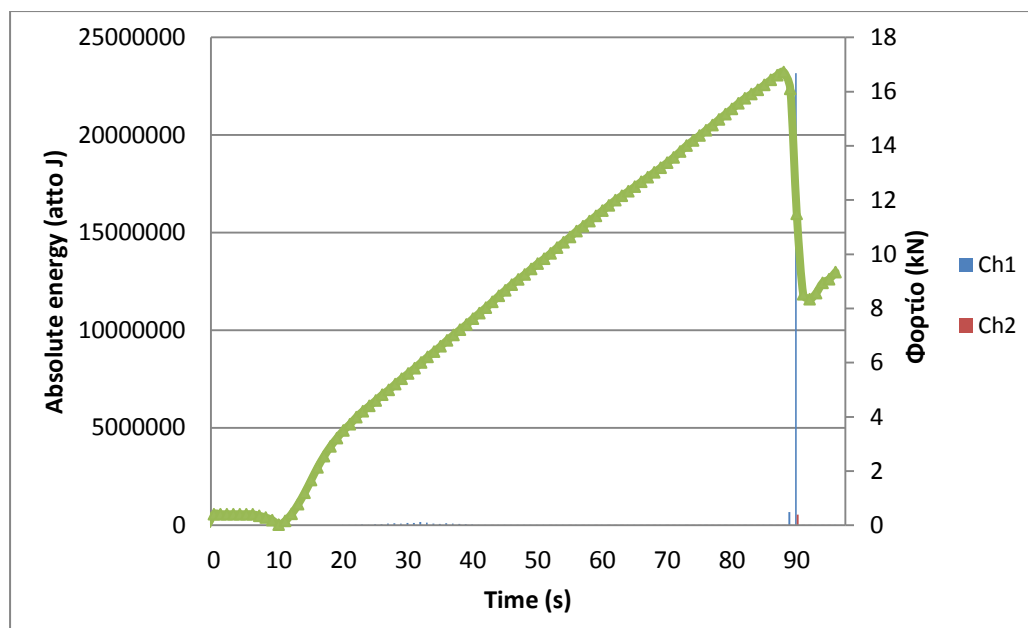


Σχήμα 51: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και απαριθμήσεων (counts) συναρτήσει του χρόνου.

Όσο περνά ο χρόνος και το δοκίμιο δέχεται φορτία η παράμετρος "counts" της ακουστικής εκπομπής αυξάνεται, αλλά σε μικρές σχετικά τιμές της τάξης του 10^2 . Συγκεκριμένα στο κανάλι 1 παρατηρούνται αυξημένες οι καταγραφές απαριθμήσεων σε σχέση με το κανάλι 1. Άρα σε αυτό το κανάλι έχει καταγραφεί περισσότερες φορές υπέρβαση του κατωφλιού στη διάρκεια ενός σήματος.

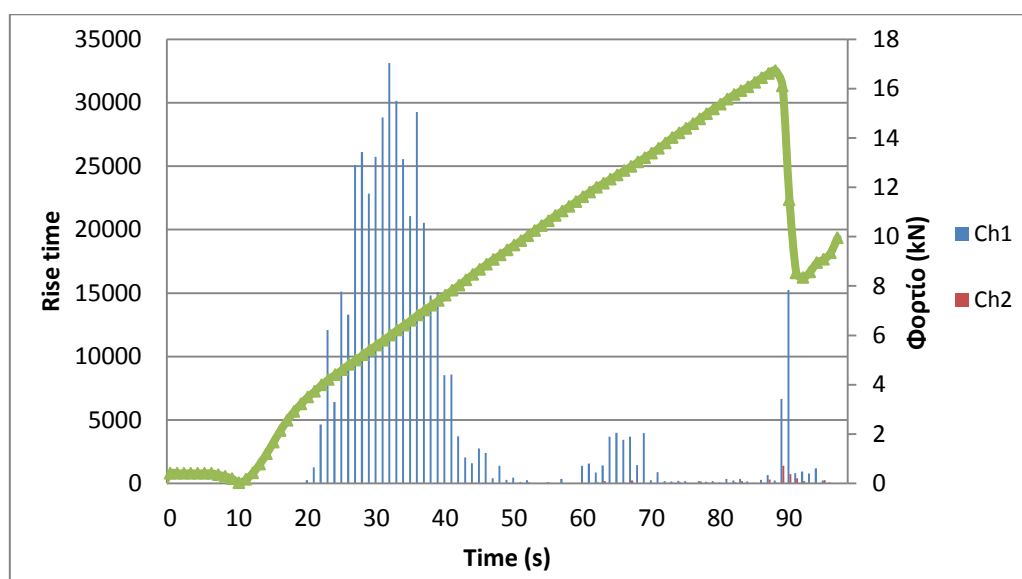
Τη στιγμή της θραύσης (14,8kN) στα 98sec ανιχνεύονται περισσότερες υπερβάσεις του κατωφλιού, με μέγιστο αριθμό 3755, στο κανάλι 1. Κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς ο αισθητήρας σε αυτό το κανάλι βρίσκεται πάνω στο επίπεδο θραύσης.

Παρακάτω στα Σχήματα 52 και 53 θα παρουσιαστούν η απόλυτη ενέργεια ΑΕ και αντίστοιχα ο χρόνος ανύψωσης με το φορτίο συναρτήσει του χρόνου της δοκιμής.



Σχήμα 52: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίο και απόλυτης ενέργειας AE (absolute energy) συναρτήσει του χρόνου.

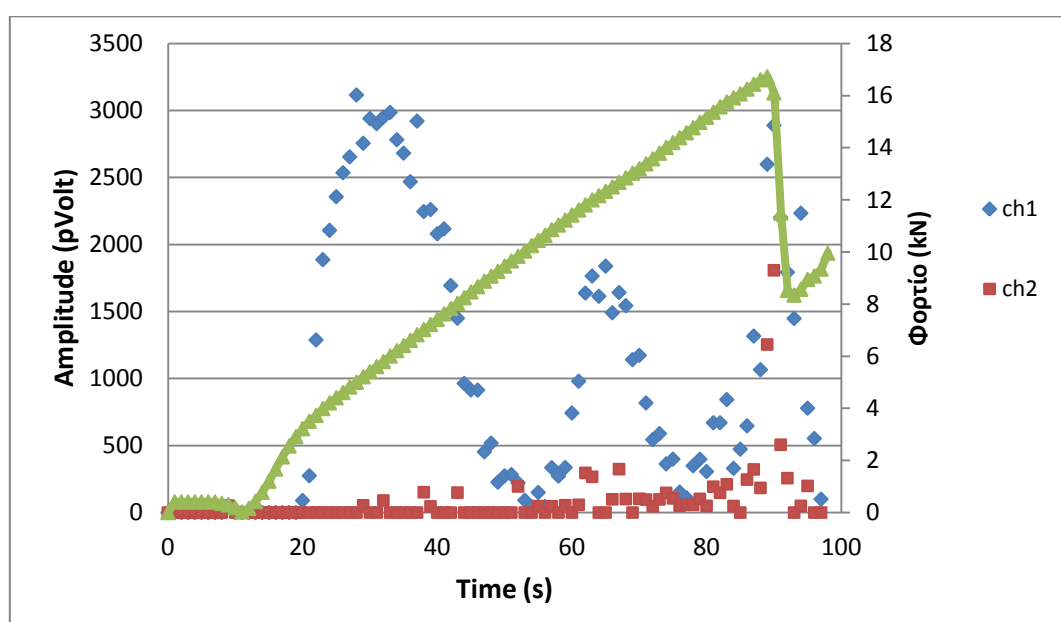
Από το Σχήμα 52 παρατηρείται ότι η καταγραφή της απόλυτης ενέργειας AE παρατηρείται να κυμαίνεται σε επίπεδα της τάξης των 10^2 atto Joule σε όλη τη δοκιμή Brazil με απότομη αύξηση της τη στιγμή της θραύσης, η οποία είναι της τάξης των 10^7 . Προκαλείται δηλαδή απότομη απελευθέρωση ενέργειας, αθροιστικά, στο κανάλι 1 κατά την αστοχία κάτι που αναμένεται να συμβεί. Το κανάλι 2 σχεδόν δεν ανιχνεύει αυτή την αστοχία.



Σχήμα 53: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και χρόνου ανύψωσης (rise time) συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρείται μεγάλος χρόνος ανύψωσης καθώς αρχίζει σταδιακά να αυξάνει η καταγραφή του φορτίου, με μέγιστα της τάξης των $10^3 \mu\text{sec}$, από το κανάλι 1 που βρίσκεται στο επίπεδο θραύσης. Αυτό πιθανό να οφείλεται στην ανάπτυξη ρωγμών που ήδη υπάρχουν στο πέτρωμα. Τη στιγμή της αστοχίας πάλι έχει μεγάλους χρόνους ανύψωσης στο κανάλι 1 σε μικρότερο ποσοστό. Το κανάλι 2 καταγράφει χρόνους μόλις της τάξης των $10^1 \mu\text{sec}$.

Ακολουθεί το Σχήμα 54 στο οποίο φαίνονται συνδυαστικά στο πλάτος καταγραφής και το φορτίο που δέχεται το δοκίμιο συναρτήσει του χρόνου της δοκιμής.



Σχήμα 54: Συνδυαστικό διάγραμμα φορτίου και πλάτους καταγραφής (amplitude) συναρτήσει του χρόνου.

Μεγάλη καταγραφή επίσης του πλάτους σήματος ΑΕ παρατηρείται στην αρχή της φόρτισης του δοκιμίου, περίπου στα 20 πρώτα sec, από το κανάλι 1. Μέγιστες τιμές πλάτους παρουσιάζονται τη στιγμή της θραύσης στο ίδιο κανάλι, της τάξης των 10^3pVolt . Το κανάλι 2 έχει πολύ μικρότερες τιμές καταγραφής.

Από όλη την παραπάνω διεξοδική ανάλυση και συζήτηση των αποτελεσμάτων τόσο από τη δοκιμή φόρτισης έμμεσου εφελκυσμού, όσο και από την καταγραφή των ακουστικών εκπομπών προκύπτει ότι οι μεγαλύτερες καταγραφές που δίνονται στα διάφορα κανάλια οφείλονται στον μηχανισμό θραύσης του δοκιμίου και μάλιστα στις περιοχές που γίνεται αρχικά η έναρξη των ρωγμών ώστε να διαδοθούν στο πέτρωμα

και να προκαλέσουν τελικά τη θραύση του σε εφελκυσμό. Δηλαδή, έχοντας υπόψη την εικόνα 9 αναμένεται έντονη ανίχνευση ακουστικής εκπομπής στην άνω και κάτω επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με τις πλάκες φόρτισης όπου βρίσκονται οι αισθητήρες με αρίθμηση 1, 3, 4 και 6. Ενώ σε μεταγενέστερο χρόνο, καθώς η ρωγμή διαδίδεται κατά μήκος της κατακόρυφης διαμέτρου που φορτίζεται το δοκίμιο, καταγράφουν έντονα οι αισθητήρες 2 και 5 (που βρίσκονται στο κέντρο του δοκιμίου).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Από το θεωρητικό και πειραματικό μέρος της εργασίας που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια προκύπτουν κάποια γενικά και ειδικά συμπεράσματα. Σε γενικές γραμμές:

- ✓ Η ΑΕ ως Μέθοδος Μη Καταστροφικού Ελέγχου αποτελεί ένα ισχυρό μέσο για τον γρήγορο και αποτελεσματικό απολογισμό της δομικής ακεραιότητας γεωλογικών δομών και κατασκευών σε πραγματικό χρόνο. Συνίσταται δε για την μελέτη της συμπεριφοράς αστοχίας τους υπό μηχανική καταπόνηση.
- ✓ Η μηχανική καταπόνηση ψαθυρών υλικών όπως τα πετρώματα δημιουργεί ακουστικές εκπομπές οι οποίες μπορούν να ανιχνευθούν με τον κατάλληλο εξοπλισμό.
- ✓ Οι παράμετροι των ακουστικών εκπομπών που εξετέστηκαν (κτύποι, απარიθμήσεις, απόλυτη ενέργεια, χρόνος ανύψωσης και πλάτος σήματος) ακολουθούν την αύξηση του φορτίου και παρουσιάζουν τα μέγιστα τους λίγο πριν επέλθει αστοχία.

Εκτός από τα ως άνω γενικά συμπεράσματα, αξίζει να αναφερθούν και τα ακόλουθα ειδικά συμπεράσματα.

- ✓ Οι παράμετροι ακουστικών εκπομπών που μετρήθηκαν παρουσίασαν μέγιστες τιμές τις ίδιες περίπου χρονικές τιμές.
- ✓ Από την καταγραφή των τιμών της απόλυτης ενέργειας ΑΕ κατά τη διάρκεια της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης παρατηρείται ότι αυξάνονται με το επιβαλλόμενο φορτίο και πιο συγκεκριμένα καθώς επέρχεται η ρωγμάτωση η αύξηση είναι ραγδαία.
- ✓ Η καταγραφή της απόλυτης ενέργειας ΑΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένδειξη της επερχόμενης αστοχίας.
- ✓ Ο χρόνος ανύψωσης όπως και οι υπόλοιπες παράμετροι ακουστικών εκπομπών φαίνεται να συνδέονται με τη δημιουργία και ανάπτυξη ρωγμών στη δομή των υλικών. Γι' αυτό καθώς φορτίζεται το δοκίμιο παρατηρείται

αύξηση του χρόνου ανύψωσης. Η ανάπτυξη ρωγμών έχει χαμηλότερο χρόνο ανύψωσης από την έναρξη αυτών. Μπορεί ακόμα να επηρεαστεί ο χρόνος που καταγράφεται από κάποιον αισθητήρα και από το σύνθετο μηχανισμό θραύσης σε γειτονική περιοχή του υλικού.

- ✓ Ο χρόνος ανύψωσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στον χαρακτηρισμό ενός φαινομένου ως βίαιο ή όχι, στις δοκιμές μηχανικής καταπόνησης.
- ✓ 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 το ίδιο.
- ✓ Ο τρόπος συγκόλλησης των αισθητήρων στο δοκίμιο είναι σημαντικός για την σωστή ανίχνευση των σημάτων.
- ✓ Οι καταγραφές είναι πολύ ευαίσθητες στα μεγέθη των παραμέτρων που εισάγονται για κάθε δοκιμή όπως κατώφλι θορύβου, κλπ.
- ✓ Κάτω από αδιευκρίνιστες (προς το παρόν) συνθήκες δημιουργούνται κενά καταγραφής ακουστικών εκπομπών. Σημειώνεται ότι αντίστοιχα κενά παρουσιάζονται και σε γραφήματα δημοσιευμένα στη διεθνή βιβλιογραφία.

5.2 Προτάσεις

Με την ολοκλήρωση της εργασίας και από την εξαγωγή των συμπερασμάτων προτείνονται τα ακόλουθα:

- Να αξιολογηθούν περαιτέρω και οι άλλες χαρακτηριστικές παράμετροι ακουστικής εκπομπής που δεν αναφέρθηκαν σε αυτή την εργασία, όπως είναι η διάρκεια (duration), οι απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο (counts to peak) και τα γεγονότα (events).
- Να μελετηθούν και να αναλυθούν επίσης οι κυματομορφές που καταγράφονται από τους αισθητήρες με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Fourier.
- Να συσχετιστούν, αν είναι εφικτό, όλες οι προαναφερθείσες παράμετροι με το φορτίο καταγραφής κατά τη δοκιμή.

- Να συσχετιστούν οι παράμετροι ακουστικής εκπομπής επίσης με τη μετατόπιση ή και τις παραμορφώσεις που δέχεται ένα δοκίμιο κατά τη δοκιμή. Προς τούτο απαιτείται να γίνει χρήση επιμηκυνσιομέτρων.
- Να συσχετιστούν οι ακουστικές εκπομπές και με άλλες μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως το μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson κ.ά.
- Να δοθεί έμφαση στον τρόπο συγκόλλησης (για παράδειγμα με σιλικόνη) του αισθητήρα με το δοκίμιο κάνοντας δοκιμές για την απόκριση του αισθητήρα.
- Να γίνουν δοκιμές με τους αισθητήρες τοποθετημένους σε κατάλληλες θέσεις και με κατάλληλο λογισμικό, ώστε να είναι δυνατή η τεχνική εντοπισμού της πηγής ΑΕ.
- Να τοποθετηθούν αισθητήρες σε χώρους εκμετάλλευσης μαρμάρου και να συγκριθούν τα εργαστηριακά αποτελέσματα με αυτά του πεδίου.
- Να χρησιμοποιείται αντίστοιχος εξοπλισμός παρακολούθησης ακουστικής εκπομπής γενικά σε μεταλλεία.
- Να δημιουργηθεί ένα σύστημα προειδοποίησης της επερχόμενης αστοχίας με την βοήθεια των εργαστηριακών πειραμάτων αλλά και των μετρήσεων από τον χώρο εκμετάλλευσης.
- Να γίνουν αντίστοιχες δοκιμές σε διαφορετικά είδη πετρωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Βιβλιογραφία

6.1 Ελληνική βιβλιογραφία

- Αγιουτάντης Ζ., (2001), "Στοιχεία Γεωμηχανικής Μηχανική Πετρωμάτων", Εκδόσεις Ιων.
- Δημοπούλου Μ., (2004), "Θεωρητική, πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της αντιδιαμετρικής φόρτισης δακτυλίου σε μάρμαρο Διονύσου", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Εξαδάκτυλος Γ, (2006), Σχεδιασμός Γεωτεχνικών και Λατομικών Έργων, Σημειώσεις Διδασκαλίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Ιστάντσο, Π. Χ., (2008), Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς σε Κάμψη Μαρμάρου Διονύσου, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Κακλής Κ., (2003), "Χαρακτηρισμός ανισορροπίας και αντοχής των πετρωμάτων με την δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψεως δίσκου", Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Κακλής Κ., Σ Μαυριγιαννάκης, Ζ. Αγιουτάντης & Γ. Μπαζδάνης (2010), "Διερεύνηση Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαρμάρου Κομνηνών Νέστου", Τιμητικός Τόμος στη Μνήμη του Καθ. Κωνσταντίνου Καβουρίδη, Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
- Κατσικογιάννης Π., Νομικός Π.Π. & Σοφιανός Α.Ι. (2007), "Ακουστική Εκπομπή στην μηχανική πετρωμάτων", Ορυκτός Πλούτος, Τεύχος 145/ 2007.
- Κόγια Μ., (2012), "Αναγνώριση συμβάντων ακουστικής εκπομπής και υλοποίηση σε μικροϋπολογιστικό σύστημα ειδικού σκοπού", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνική Σχολή, Πάτρα.
- Κούρτης Μ. (2013), "Διερεύνηση της συσχέτισης των ακουστικών εκπομπών με φόρτιση και αστοχία ψαθυρών πετρωμάτων", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Μπακογιάννης Σ. (2011), "Ακουστική εκπομπή κατά την καταπόνηση βωξίτη, Διπλωματική εργασία", Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Σοφιανός Α.Ι. και Νομικός Π.Π. (2008), "Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δ.Π.Μ.Σ / Σ.Κ.Υ.Ε.

6.2 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- AE winTM for USBTM Software and USB-AE NodeTM, User's Manual, (2010).
- Fairhurst C., (1964), "On the validity of the Brazilian test for brittle materials", IJRM, 1, 535-546.
- Hardy, H.R.J., (2003), "Acoustic Emission/Microseismic Activity, Principles, Techniques and Geotechnical Application", Vol. 1, the Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA, A.A. Balkema Publishers.
- Hobbs, D.W., (1964), "The tensile strength of rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci and Geomech. Abstr., 1, pp. 385-396.
- ISRM (1978), Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, "Suggested Methods for Determining Sound Velocity", Committee on Laboratory Tests, Document No 4, (1977). Published in Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, No. 2, pp. 53-58.
- Jee H. S. and Jee J. O., (2012), "Acoustic emission of composite vessel", Liscence in Tech, INTECH, Chapter 4, Korea Institute of Materials, South Korea.
- Manthei, G., Eisenblätter, J., S pies, T., (2000), "Acoustic Emission in Rock Mechanics Studies, in: Acoustic Emission – Beyond the Millennium", Eds.: Kishi, T., Ohtsu, M., Yuyama, S., Elsevier, pp. 127-144.
- Obert L. & Duvall W., (1942), "Use of Subaudible noise for Prediction of Rock Bursts ", Part II. U.S. Bureau of Mines, RI 3654.
- Roberts A. (1977), "Geotechnology - An introductory text for students and engineers", Pergamon Press.
- Sause M. G. R., (2011), "Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources", University of Augsburg, Institute for Physics, Experimental Physics II, D-86135 Augsburg, Germany.

6.3 Ιστοσελίδες

- <http://nestosmarbles.gr/?gallery=%CE%BB%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%F-%CF%87%CF%81%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%AF%CE%B4%CE%B7%CF%82-%CE%BF-%CE%B5>
- http://www.metal.ntua.gr/uploads/4239/Kotsovos_KEF_2.pdf
- http://dide.ker.sch.gr/ekfe/epiloges/3_prot_peiramata/vernieros/vernier.htm
- http://library.tee.gr/digital/m2173/m2173_perdikaris.pdf