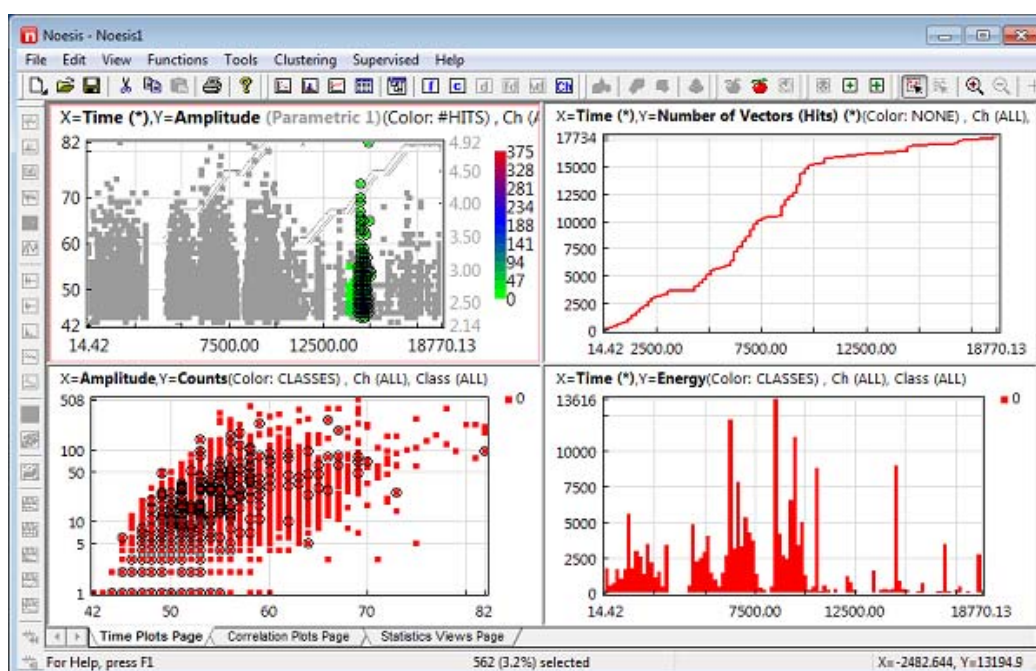




*Η εφαρμογή της τεχνικής μη-καταστροφικού ελέγχου των ακουστικών εκπομπών
(ΑΕ) κατά τη μονο-αξονική μηχανική φόρτιση πετρωμάτων*



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παντελέμων Μπακογεώργος

ΧΑΝΙΑ 2014



Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ – ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

*Η εφαρμογή της τεχνικής μη-καταστροφικού ελέγχου των ακουστικών εκπομπών
(ΑΕ) κατά τη μονο-αξονική μηχανική φόρτιση πετρωμάτων*

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παντελεήμων Μπακογεώργος

Επιβλέπων : *Δρ. Βασίλης Σάλτας*
Επίκουρος Καθηγητής

Επιτροπή Αξιολόγησης : *Δρ. Βασίλης Σάλτας, Επίκ. καθηγητής*
Δρ. Ιωάννης Μακρής, Αναπλ. καθηγητής
Δρ. Ιωάννης Φυτίλης, Επιστ. Συνεργάτης

Ημερομηνία Παρουσίασης : *13 Ιουνίου 2014*

Αύξων Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας :

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο *Εργαστήριο Γεωφυσικής και Σεισμολογίας* του Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, κατά το χρονικό διάστημα Νοέμβριος 2013 – Μάιος 2014, υπό την επίβλεψη του Επικ. Καθηγητή Βασίλη Σάλτα.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου εκτίμηση στον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ Βασίλειο Σάλτα για την καθοδήγηση και ενθάρρυνση του κατά τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας. Ο αμείωτος ενθουσιασμός του καθ' όλο το παραπάνω χρονικό διάστημα, έδιναν όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην εργασία μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Δρ Ι. Μακρή, Αναπληρωτή Καθηγητή και Δρ Ι. Φυτίλη για το χρόνο που αφιέρωσαν στην υπόδειξη των λαθών της παρούσας εργασίας.

Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗ-ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ (ΑΕ) ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ακουστικών εκπομπών (ΑΕ) σε δοκίμια πετρωμάτων που υφίστανται μηχανική φόρτιση μέχρι και τη θραύση τους, προκειμένου να διερευνηθούν και να αξιολογηθούν οι διάφορες παράμετροι των ΑΕ σε σχέση με το όριο θραύσης του υλικού και τα φαινόμενα Kaiser/Felicity που παρουσιάζονται σε αυτό. Χρησιμοποιήθηκε πολυκάναλο σύστημα καταγραφής ΑΕ με χρήση έξι πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων κατάλληλα προσαρμοσμένων σε κυβικά και πρισματικά δοκίμια πωρόλιθου. Μετρήθηκε αρχικά η ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων στο υλικό ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης πίεσης μέχρι και τη θραύση του δοκιμίου, καθώς και η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του. Πραγματοποιήθηκε γραμμική φόρτιση σε δοκίμιο μέχρι τη θραύση του καθώς και κυκλική φόρτιση προκειμένου να εξεταστεί η ύπαρξη φαινομένων μνήμης σε αυτό. Σε κάθε περίπτωση, έγινε εντοπισμός των θέσεων των πηγών ΑΕ και διερευνήθηκαν οι διάφορες παράμετροι ΑΕ και τα φασματικά χαρακτηριστικά των σημάτων που κατέγραψαν οι αισθητήρες.

THE APPLICATION OF THE ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE (AET) DURING THE UNIAXIAL MECHANICAL LOADING OF ROCK SAMPLES

Abstract

In the present thesis acoustic emission measurements were carried out in rock samples subjected to uniaxial loading up to fracture, in order to investigate the correlation of AE parameters with the strength of the material and the Kaiser/Felicity effects. For this purpose, a multichannel AE system was used equipped with 6 piezoelectric sensors properly mounted on cubic and prismatic samples. The wave velocity of the elastic waves was measured as a function of the applied stress up to the fracture, and the stress – strain curve was also recorded. During the linear and the cycling loading of the samples, the AE parameters and the spectral characteristics of the recorded signals were investigated. A 3D location of the AE events was also achieved in each case.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή: Τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου και ακουστική εκπομπή (AE)	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η τεχνική των ακουστικών εκπομπών (AE)	11
2.1 Γενικά περί ακουστικής εκπομπής.....	11
2.2 Φαινόμενα Kaiser και Felicity	14
2.3 Τύποι ακουστικών σημάτων και χαρακτηριστικές παράμετροι AE	15
2.4 Θεωρία ακουστικών κυμάτων	19
2.4.1 Διάδοση κυμάτων	19
2.4.1 Εξασθένιση κυμάτων	23
2.5 Εντοπισμός θέσης πηγών AE	25
2.5.1 Εντοπισμός σε μία διάσταση	25
2.5.2 Εντοπισμός σε δύο διαστάσεις	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Πειραματικό μέρος	28
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	28
3.2 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες.....	32
3.3 Προενισχυτές.....	36
3.4 Λογισμικά συλλογής και ανάλυσης δεδομένων AE	37
3.4.1 Το λογισμικό AEwin – γενική παρουσίαση	37
3.4.2 Παραμετροποίηση του λογισμικού για λήψη δεδομένων	38
3.4.3 Το λογισμικό NOESIS	42
3.5 Μηχανή φόρτισης δοκιμίων	43
3.6 Δοκίμια	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Πειραματικά αποτελέσματα	47
4.1 Δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού	47
4.1.1 Υπολογισμός συντελεστή εξασθένησης σήματος	48
4.1.2 Φασματική ανάλυση των κυματομορφών της ηχητικής πηγής	49
4.2 Υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης ελαστικών κυμάτων	53
4.2.1 Δοκιμή AST (Automatic Sensor Test)	53
4.2.2 Δοκιμή APMG (Acoustic Property Matrix Generator)	55
4.3 Μέτρηση ταχύτητας διάδοσης ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης δύναμης	57
4.4 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (stress – strain)	58
4.5 Ακουστικές εκπομπές από το πρισματικό δοκίμιο	59
4.5.1 Ανάλυση παραμέτρων ΑΕ	59
4.5.2 Ανάλυση κυματομορφών ΑΕ	67
4.5.3 Εντοπισμός σε 3 διαστάσεις των ακουστικών πηγών	70
4.6 Ακουστικές εκπομπές από το κυβικό δοκίμιο κατά τη δοκιμή κυκλικής φόρτισης	73
4.6.1 Ανάλυση παραμέτρων ΑΕ	73
4.6.2 Ανάλυση κυματομορφών	78
4.6.3 Εντοπισμός σε 3 διαστάσεις των ακουστικών πηγών	81
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή: τεχνικές μη-καταστροφικού ελέγχου και ακουστική εκπομπή (ΑΕ)

Ο μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ ή non-destructive test-NDT) είναι μια μεγάλη κατηγορία τεχνικών ανάλυσης υλικών και συστημάτων, που δεν προκαλούν ζημιά στο υλικό ή στο υπό εξέταση σύστημα. Ο ΜΚΕ χρησιμοποιείται στην βιομηχανία και σε διάφορες επιστήμες όπως η ιατρική, η μηχανολογία, η ηλεκτρονική η αεροναυπηγική, κ.ά..

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε γνωστές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, με έμφαση στην τεχνική των ακουστικών εκπομπών (Acoustic Emission Technique, AET) που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας:

Οπτικός έλεγχος (Visual inspection)

Ο οπτικός έλεγχος είναι η παλαιότερη μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου και επίσης ο πιο απλός καθώς δεν χρειάζονται πολύ εξειδικευμένα όργανα. Το μειονέκτημα με αυτή την μέθοδο είναι ότι επειδή βασίζεται στην όραση του ανθρώπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την παρατήρηση επιφανειών. Η ανάπτυξη ωστόσο της τεχνολογίας επιτρέπει με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού (ενδοσκόπια με οπτικές ίνες, ρομποτικά συστήματα) την οπτική παρατήρηση περιοχών διερεύνησης που δεν είναι άμεσα προσβάσιμες (Σχήμα 1.1).

Διεισδυτικά υγρά (Liquid penetrant)

Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ανοιγμάτων στην επιφάνεια ενός υλικού όπου τα ανοίγματα αυτά είναι αρκετά μεγάλα ώστε να μπορέσει να διεισδύσει το υγρό μέσα στο



Σχήμα 1.1 Χρήση ενδοσκοπίου οπτικής ίνας και ρομποτικής ερπυστριοφόρου κάμερας για τον οπτικό έλεγχο μηχανών – αγωγών.

υλικό. Συνήθως τα υγρά αυτά έχουν χρωστικές και στην επιθεώρηση χρησιμοποιείται υπεριώδες φως.

Δινορεύματα (Eddy current)

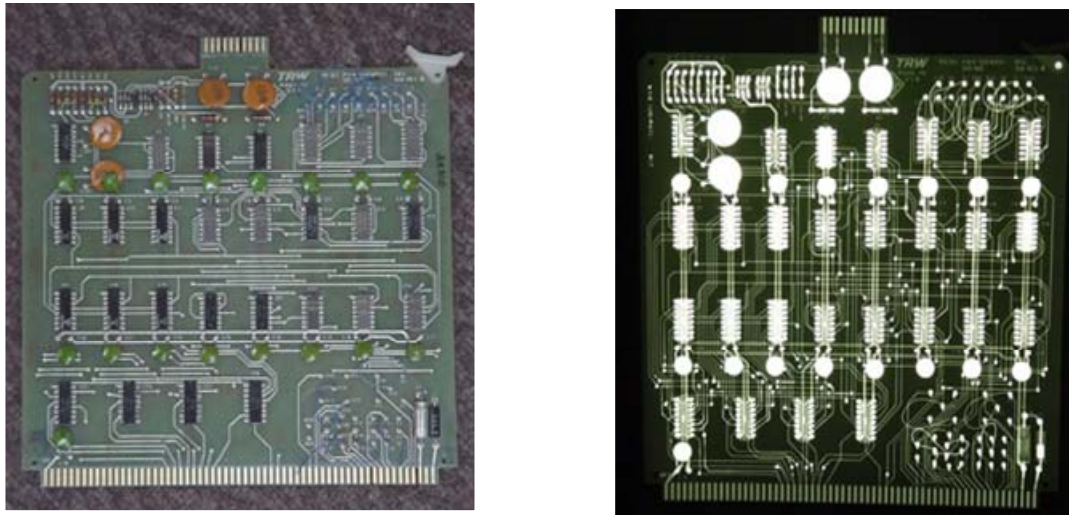
Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ρωγμών σε μέταλλα και στηρίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Ένα πηνίο το οποίο διαρρέεται από ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Βάζοντας το πηνίο πάνω στο μέταλλο επάγεται ρεύμα στην επιφάνεια του μετάλλου. Τα δινορεύματα που παράγονται από τις ατέλειες στην επιφάνεια του μετάλλου αποκτούν μαγνητικό πεδίο το οποίο μετρείται και έτσι ανιχνεύεται η ατέλεια στο μέταλλο.

Ραδιογραφία με ακτίνες X/γ (X/γ-Ray radiography)

Όπως είναι η ακτινογραφία για την ιατρική κάτι αντίστοιχο είναι και η παραπάνω μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου για υλικά, δηλαδή η χρήση ακτινοβολίας για τον εντοπισμό ατελειών. Τα σημεία του υλικού που απορρόφησαν περισσότερη ακτινοβολία εμφανίζονται ανοιχτόχρωμα στο φιλμ και τα σημεία με χαμηλότερη φωτεινότητα στο φιλμ είναι τα σημεία όπου μάλλον έχουμε ρωγμή ή ατέλειες (Σχήμα 1.2).

Υπέρηχοι (Ultrasonic)

Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό επιφανειακών και εσωτερικών ατελειών σε διάφορα υλικά. Με την μέθοδο των υπερήχων υψίσυχνα ηχητικά κύματα στέλνονται στο υπό εξέταση υλικό με την βοήθεια ενός μορφομετατροπέα (transducer). Τα κύματα ταξιδεύουν μέσα στο υλικό και συλλέγονται από τον ίδιο μετατροπέα ή από

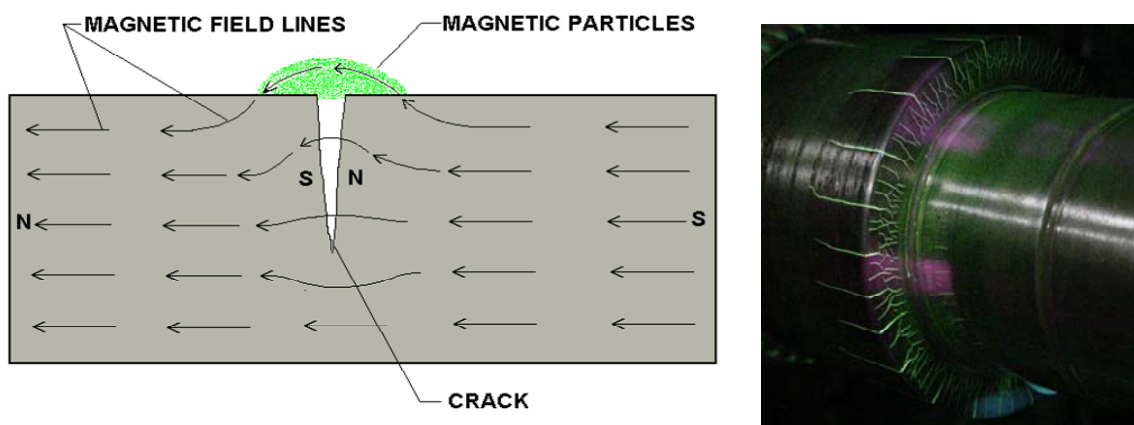


Σχήμα 1.2 Χρήση ραδιογραφίας για τον κατασκευαστικό έλεγχο ηλεκτρονικής πλακέτας

κάποιον άλλο. Το ποσό της ενέργειας που στέλνεται και λαμβάνεται καθώς και ο χρόνος λήψης αναλύονται προκειμένου να εντοπιστεί η παρουσία ατελειών.

Μαγνητικά σωματίδια (magnetic particles inspection)

Με τη χρήση μαγνητικών σωματιδίων μπορούμε να ανιχνεύσουμε επιφανειακές ατέλειες σε σιδηρούχα υλικά. Το υπό διερεύνηση υλικό-κατασκευή μαγνητίζεται και μαγνητικά (σιδηρούχα) σωματίδια σε μορφή σκόνης ή σε υγρή μορφή καλύπτουν την υπό εξέταση επιφάνεια. Οι επιφανειακές ατέλειες του υλικού προκαλούν μεταβολές της μαγνητικής ροής στις περιοχές αυτές όπου και προκαλείται αυξημένη συγκέντρωση των μαγνητικών σωματιδίων. Προκαλείται έτσι υπό κατάλληλες συνθήκες φωτισμού μία ορατή ένδειξη του επιφανειακού ελαττώματος του υλικού.



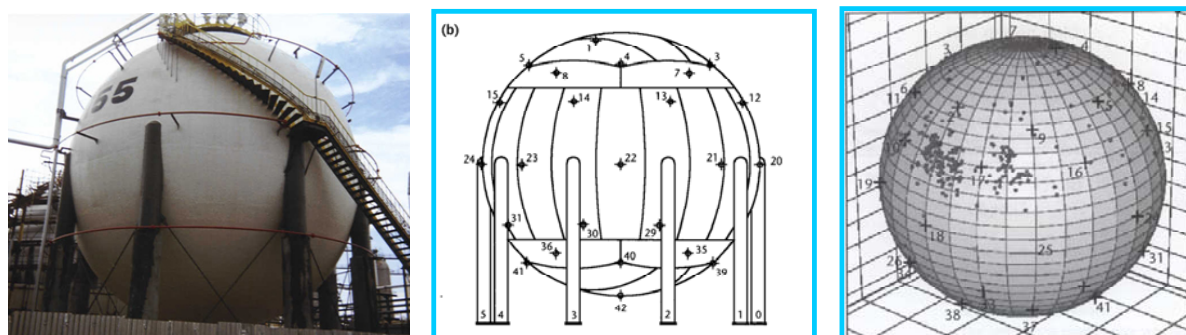
Σχήμα 1.3 Χρήση μαγνητικών σωματιδίων για τον επιφανειακό έλεγχο ατελειών-ασυνεχειών σε κατασκευές από σιδηρούχα υλικά

Ακουστική εκπομπή (Acoustic emission)

Η τεχνική των ακουστικών εκπομπών αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές μη-καταστροφικού ελέγχου στη βιομηχανία, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον επί τόπου έλεγχο ασφάλειας λόγω πιθανής δημιουργίας και εξέλιξης ρωγμών μεγάλων κατασκευών (δεξαμενές, πιεστικά δοχεία, σωληνώσεις, γέφυρες, κλπ.) που βρίσκονται σε συνεχή ένταση (Σχήμα 1.4).

Με βάση τον ορισμό της ASTM (American Society for Testing and Materials), η Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση παροδικών ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με ταχεία απελευθέρωση ενέργειας. Η πηγή αυτών των κυμάτων μπορεί να είναι η ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του υλικού, ή η έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στο υλικό όταν αυτό βρίσκεται υπό μηχανική καταπόνηση. Πηγές Ακουστικής Εκπομπής μπορεί να δημιουργηθούν επίσης κατά την τήξη του υλικού και την αλλαγή φάσεως λόγω θερμικών τάσεων. Οι συχνότητες των εκπεμπόμενων ελαστικών κυμάτων, σε αντίθεση με αυτό που υποδηλώνει η τεχνική, βρίσκονται στο φάσμα των υπέρηχων (συνήθως 15kHz έως μερικά MHz). Οι λεπτομέρειες και η θεωρία αυτής της μεθόδου αναφέρονται αναλυτικότερα στο 2^ο κεφάλαιο.

Κατάλληλοι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες εύρους λειτουργίας 20-1200kHz, τοποθετούνται σε επαφή με την υπό εξέταση κατασκευή, με τη βοήθεια υλικού σύζευξης (couplant). Τα ηλεκτρικά σήματα που παράγονται από την άφιξη των ελαστικών κυμάτων από διάφορες πηγές AE εντός του υλικού ενισχύονται, φιλτράρονται και υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία. Από τις διαφορετικές παραμέτρους που εξάγονται, μπορούμε να πάρουμε πολύτιμες πληροφορίες για το συσχετισμό τους με το εφαρμοζόμενο φορτίο.



Σχήμα 1.4 Έλεγχος πιεστικού δοχείου τύπου “σφαίρας” όπου διακρίνονται σχηματικά οι θέσεις των αισθητήρων και τα αποτελέσματα της ανάλυσης με περιοχές υψηλής ακουστικής εκπομπής. Οι περιοχές αυτές στη συνέχεια επιθεωρούνται λεπτομερέστερα για τον εντοπισμό οποιασδήποτε πιθανής βλάβης – αστοχίας του υλικού.

Οι εφαρμογές της τεχνικής των ΑΕ περιλαμβάνουν από εργαστηριακούς ελέγχους για την επιθεώρηση υλικών σε ότι αφορά τους μηχανισμούς πλαστικής παραμόρφωσης τους, τη διάβρωση ή τη θραύση τους, μέχρι τη βιομηχανική τους χρήση για τον έλεγχο πιεστικών δοχείων, δεξαμενών διαφορετικών γεωμετριών, αεροσκαφών, διαρροών σε υπέργειες ή υπόγειες σωληνώσεις, κ.ά., καθώς και τον ποιοτικό έλεγχο στην παραγωγική διαδικασία.

Η τεχνική των ΑΕ αποτελεί ίσως τη μοναδική μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου που μπορεί να ελέγξει σε μικρό χρονικό διάστημα μεγάλου μεγέθους κατασκευές σε όλη τους την έκταση, χωρίς να απαιτείται η χρονοβόρα σάρωση της επιφάνειας με κάποιον αισθητήρα. Για το λεπτομερέστερο έλεγχο ωστόσο, αφού εντοπιστεί η περιοχή βλάβης της κατασκευής, καταφεύγουμε σε άλλες μεθόδους σάρωσης για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της θέσης και του είδους της βλάβης.

Ο βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή της τεχνικής των ακουστικών εκπομπών στη μελέτη της μηχανικής φόρτισης (γραμμικής και κυκλικής) δοκιμίων πετρωμάτων μέχρι και την τελική τους θραύση, προκειμένου να διερευνηθούν οι μεταβολές των διαφόρων παραμέτρων που καταγράφονται και να συσχετιστούν με τις παραμέτρους φόρτισης του υλικού (γραμμική περιοχή, όριο θραύσης, κλπ). Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση της θεωρίας των ακουστικών εκπομπών, σε ότι αφορά την αρχή λειτουργίας της μεθόδου, τη διάδοση των ελαστικών κυμάτων στα υλικά, την οργανολογία που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση τους και τον εντοπισμό της πηγής προέλευσης τους. Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε και περιλαμβάνει πολυκάναλο σύστημα καταγραφής των παραμέτρων ΑΕ, πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες ευρέως φάσματος με κατάλληλους προενισχυτές και λογισμικό συλλογής και ανάλυσης των δεδομένων. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα ΑΕ που προέκυψαν από τη γραμμική και κυκλική μονοαξονική φόρτιση δειγμάτων πορώδους πετρώματος (πωρόλιθος) σε διαφορετικές αναπαραστάσεις, προκειμένου να προκύψουν ποιοτικά χαρακτηριστικά για την αποτίμηση εφαρμογής της μεθόδου στον εντοπισμό των πηγών ΑΕ σε γεωλικά υπό τάση και των φασματικών χαρακτηριστικών που συνδέονται με αυτές.

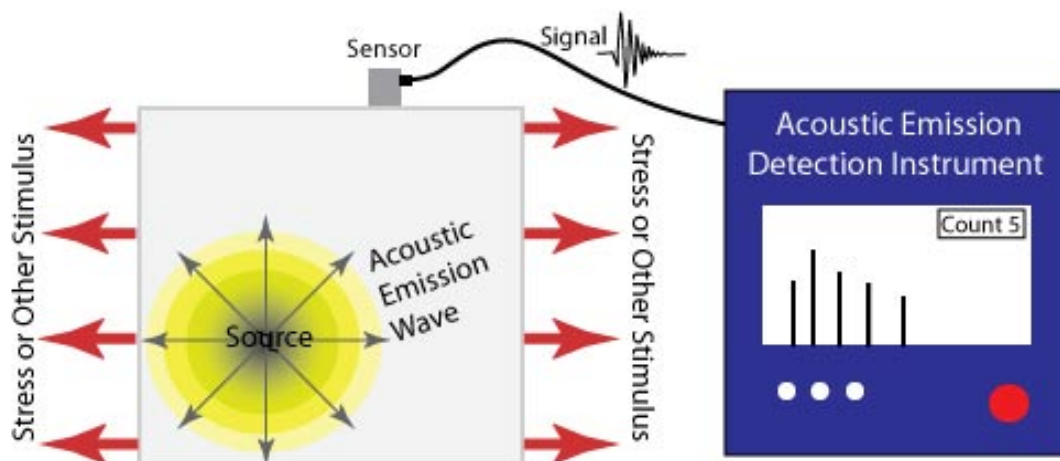
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Η τεχνική των ακουστικών εκπομπών (ΑΕΤ)

2.1 Γενικά περί ακουστικής εκπομπής

Ακουστική εκπομπή είναι το σύνολο των φαινομένων στα οποία ηχητικά κύματα δημιουργούνται από την απότομη απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές σε ένα υλικό όταν ασκείται πάνω του δύναμη από μία εξωτερική πηγή (Σχήμα 2.1). Η Ακουστική Εκπομπή μπορεί να καλύπτει και το ακουστικό φάσμα αλλά κυρίως αναφέρεται σε υπερήχους με συχνότητες από 16 kHz έως 1 MHz. Ένα πέτρωμα που φορτίζεται κοντά στο σημείο αντοχής μπορεί να παράξει συχνότητες αντιληπτές στην ακοή του ανθρώπου, όπως για παράδειγμα σε γρανίτες, αλλά με τη βοήθεια ενισχυτών το πεδίο συχνοτήτων της εκπομπής είναι ευρύτερο. Το γενικότερο πεδίο μελέτης έγκειται στην «μικροσεισμική δραστηριότητα» των πετρωμάτων.

Σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνικής της ακουστικής εκπομπής είναι ότι (α) δεν απαιτείται εξωτερική ενέργεια, αφού η ενέργεια παράγεται από το υλικό το οποίο εξετάζεται και (β) αποτελεί τη μοναδική μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνεχή έλεγχο στην κατασκευή ενός αντικειμένου. Παρέχει άμεσες πληροφορίες σχετικά με την απόκριση του υλικού που βρίσκεται σε εντατικό πεδίο αναφορικά με την αντοχή του, τη συσσώρευση βλάβης και την ενδεχόμενη έναρξη αστοχίας του. Η μέθοδος αυτή βρίσκει επίσης εφαρμογές στην παρακολούθηση χημικών αντιδράσεων που λαμβάνει χώρα διάβρωση ή μετασηματισμοί φάσεων.



Σχήμα 2.1 Εκπομπή ακουστικών κυμάτων από πηγή εντός υλικού.

Η καταγραφή των ελαστικών κυμάτων που δημιουργούνται γίνεται με την χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που εφάπτονται πάνω στο υλικό. Το ποσοστό της απόσβεσης ενός κύματος ακουστικής εκπομπής εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού. Η απόσβεση είναι μεγαλύτερη σε πορώδη υλικά όπως το ξύλο και σε ελαστικά υλικά από ότι σε μεταλλικά. Οι πιο εύκολα ανιχνεύσιμες ακουστικές εκπομπές δημιουργούνται όταν προκαλείται σε ένα υλικό πλαστική παραμόρφωση ή όταν το υλικό φτάνει κοντά στα όρια ελαστικότητας του. Οι παραμορφώσεις αυτές συμβαίνουν και σε ατομικό επίπεδο, όπου από εκεί παράγεται η ενέργεια η οποία μεταδίδεται στο υλικό με την μορφή ελαστικών κυμάτων.

Το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται από την ακουστική εκπομπή και το πλάτος της κυματομορφής της εξαρτάται από την έκταση και την ταχύτητα του γεγονότος. Το πλάτος της εκπομπής είναι ανάλογο της ταχύτητας διάδοσης των ρωγμών αλλά και της επιφάνειας που δημιουργήθηκε. Μεγάλες και ευδιάκριτες ρωγμές παράγουν ισχυρότερα ακουστικά σήματα από ρωγμές οι οποίες δημιουργήθηκαν με αργό ρυθμό, καλύπτοντας την ίδια απόσταση.

Η ανίχνευση και η μετατροπή των ακουστικών σημάτων σε ηλεκτρικά είναι η βάση της μεθόδου ΑΕ. Η ανάλυση αυτών των σημάτων προσφέρει σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά την προέλευση και την σημαντικότητα μιας παραμόρφωσης στο υλικό. Ο ειδικός εξοπλισμός είναι απαραίτητος για τον εντοπισμό των ελαστικών κυμάτων και τον διαχωρισμό των χρήσιμων σημάτων από τα υπόλοιπα.

Η ευαισθησία ενός συστήματος ΑΕ περιορίζεται από τον θόρυβο που μπορεί να υπάρχει. Ο θόρυβος είναι οποιοδήποτε ανεπιθύμητο σήμα που εντοπίζεται από τους αισθητήρες όπως από τριβές και διάφορες δονήσεις πάνω στο υλικό που εξετάζεται. Τρόποι να αποφευχθούν τέτοιοι θόρυβοι είναι μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων μείωσης θορύβου (noise reduction circuits) ή απλά να γίνουν οι μετρήσεις σε ελεγχόμενο περιβάλλον με τις ελάχιστες δυνατές πηγές θορύβου από τον γύρω χώρο.

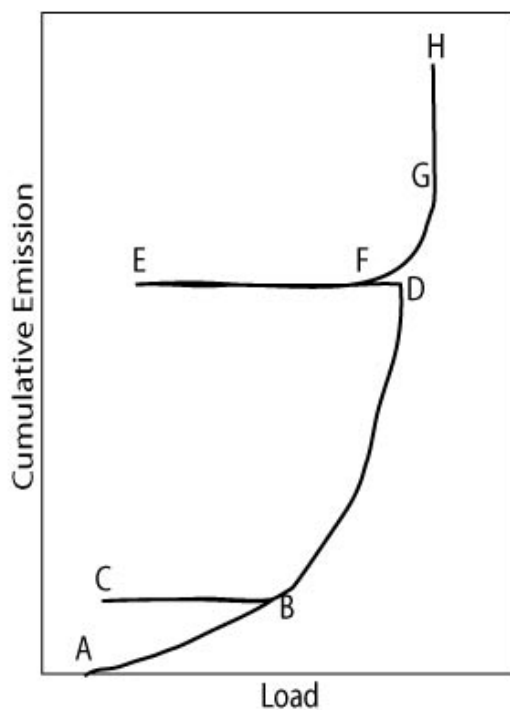
Η τεχνική της ακουστικής εκπομπής προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) καθότι μπορεί να περιορίσει σημαντικά το κόστος ελέγχου. Για παράδειγμα, για τον έλεγχο όλου του όγκου σφαιρικού πιεστικού δοχείου διαμέτρου 16m, απαιτούνται για την πλήρη κάλυψη της επιφάνειάς του, συνολικά 40 περίπου αισθητήρες, χωρίς ωστόσο να απαιτείται σάρωση ολόκληρης της επιφάνειας όπως γίνεται με άλλες συμβατικές μεθόδους. Περιοχές έντονης ακουστικής δραστηριότητας μπορούν στη συνέχεια να ελεγχθούν λεπτομερώς με άλλες μεθόδους ΜΚΕ. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται όχι μόνον σημαντική μείωση του κόστους αλλά και του χρόνου που απαιτείται αφού ελαχιστοποιείται ο χρόνος καθήλωσης για την επιθεώρηση. Δεν υπάρχει άλλη τεχνική ΜΚΕ που να επιτρέπει τον έλεγχο ολόκληρης της κατασκευής για δομικές ατέλειες σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα. Μπορεί επίσης να συνδυαστεί και να εφαρμοστεί ταυτόχρονα με άλλες τυποποιημένες διαδικασίες ελέγχου που χρησιμοποιούνται (π.χ. υδραυλική δοκιμή πιεστικών δοχείων).

Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι σε κατασκευές επικαλυμμένες με μονωτικό υλικό δεν απαιτείται η αφαίρεση της μόνωσης προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος (για παράδειγμα της διάβρωσης κάτω από αυτό) παρά μόνον στα σημεία που θα πρέπει να τοποθετηθούν οι αισθητήρες ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος αλλά και το χρόνο εφαρμογής της μεθόδου. Εφικτός είναι επίσης ο έλεγχος σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών με τη χρήση κατάλληλων κυματοδηγών χωρίς να απαιτείται η διακοπή της λειτουργίας.

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι η τεχνική των ακουστικών εκπομπών (ΑΕΤ) υπερτερεί έναντι άλλων μεθόδων ΜΚΕ αφού παρέχει μεγαλύτερη ευαισθησία, έλεγχο σε πραγματικό χρόνο και μειωμένο κόστος, δυνατότητα εντοπισμού της περιοχής βλάβης με ελάχιστη καταστροφή των εξωτερικών μονώσεων των κατασκευών, παρακολούθηση της κατάστασης (health monitoring) κατασκευών σε πραγματικό χρόνο και σημαντική μείωση του χρόνου ελέγχου.

2.2 Φαινόμενα Kaiser και Felicity

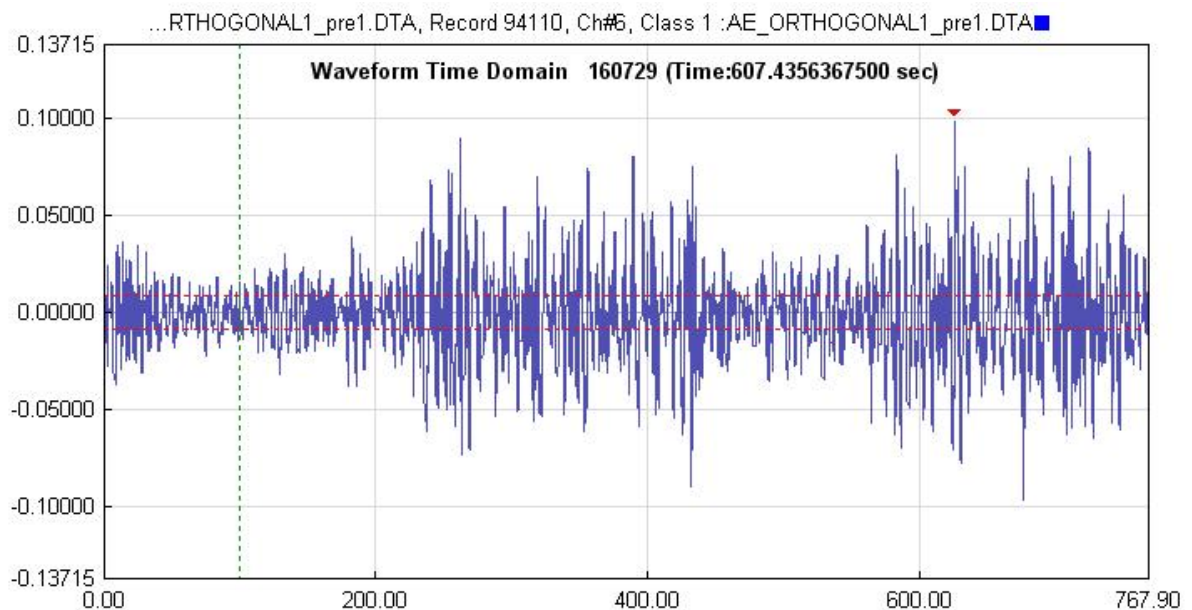
Τα σήματα ΑΕ που παράγονται κάτω από διαφορετικού είδους φόρτιση μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη δομική ακεραιότητα του υλικού. Έχει παρατηρηθεί ότι ασυνέχειες που δημιουργούνται σε ένα υλικό δεν επεκτείνονται ή κινούνται μέχρι να υπάρξει υπέρβαση της προηγούμενης εφαρμοζόμενης τάσης. Δηλαδή αν έχουμε ήδη μια ρωγμή τότε θα πρέπει να ασκηθεί μεγαλύτερη δύναμη πάνω στο υλικό για να παράξει ΑΕ. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο Kaiser. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται γραφικά το φαινόμενο αυτό. Δεδομένου ότι ασκείται δύναμη στο υλικό, οι ακουστικές εκπομπές συσσωρεύονται (τμήμα ΑΒ). Όταν το φορτίο απομακρύνεται (τμήμα ΒC) και εφαρμόζεται πάλι (τμήμα ΒCΒ), δεν έχουμε ακουστικές εκπομπές μέχρι να γίνει υπέρβαση του φορτίου στο σημείο Β. Καθώς το φορτίο που ασκείται στο υλικό αυξηθεί πάλι (ΒD), τότε οι ΑΕ παράγονται και σταματάνε όταν το φορτίο έχει αφαιρεθεί. Ωστόσο, στο σημείο F, το εφαρμοζόμενο φορτίο είναι αρκετά υψηλό για να προκαλέσει σημαντικές εκπομπές, ακόμη και αν οι ακουστικές εκπομπές δεν επιτεύχθηκαν με το προηγούμενο μέγιστο φορτίο (D). Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως Felicity Effect. Τα φαινόμενα Kaiser και Felicity μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρατηρηθούν ήδη υπάρχουσες παραμορφώσεις στο υλικό.



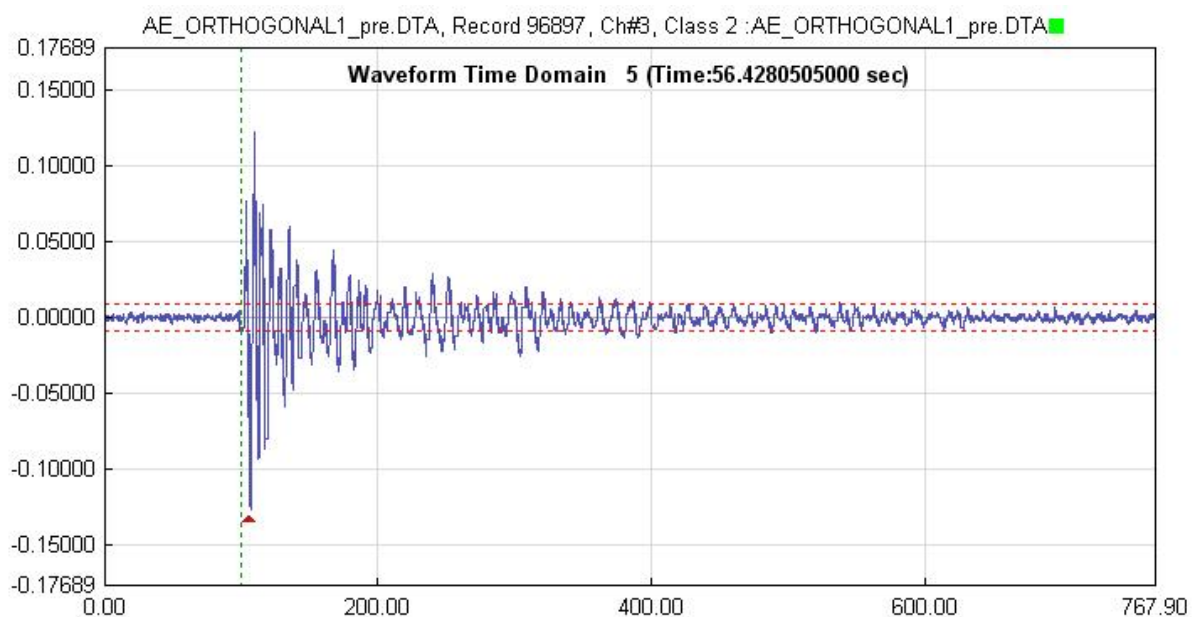
Σχήμα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση των φαινομένων Kaiser (καμπύλη ABCB) και Felicity (καμπύλη DEFG).

2.3 Τύποι ακουστικών σημάτων και χαρακτηριστικές παράμετροι ΑΕ

Τα εκπεμπόμενα κύματα από τις πηγές προέλευσης τους μέσα στο υλικό, διαδίδονται δια μέσου αυτού και ανιχνεύονται από τους αισθητήρες καταγραφής που βρίσκονται τοποθετημένοι στην επιφάνεια του. Το σήμα επομένως που ανιχνεύεται εμπεριέχει όλη την πληροφορία από την πηγή, το μέσο διάδοσης και τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα ανίχνευσης, καθιστώντας περίπλοκη τη μορφή του.



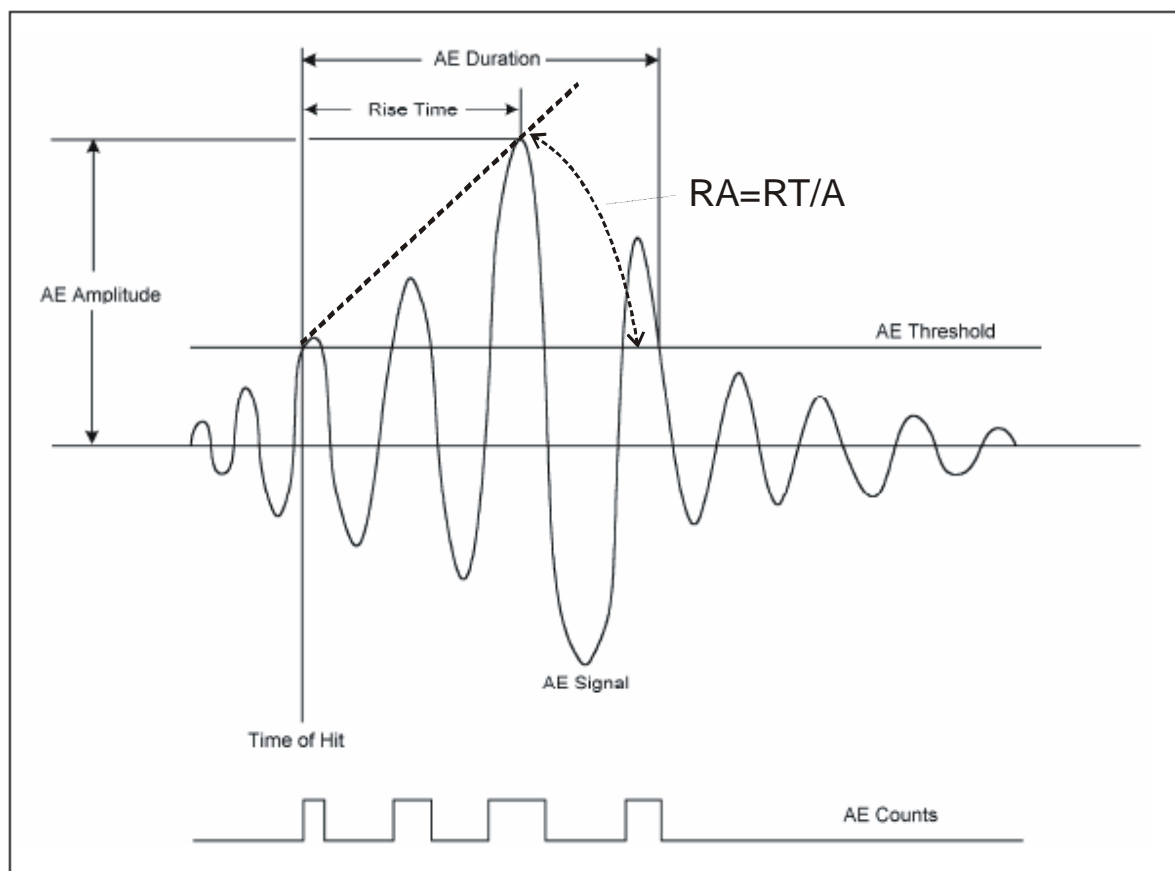
Σχήμα 2.3 (α) Κυματομορφή συνεχούς ακουστικής εκπομπής (continue AE)



Σχήμα 2.3 (β) Κυματομορφή στιγμιαίας ακουστικής εκπομπής κρουστικού σήματος (burst type AE).

Τα λαμβανόμενα από τους αισθητήρες σήματα διακρίνονται σε κρουστικού και συνεχούς τύπου, ανάλογα με την πηγή προέλευσης τους που μπορεί να είναι μία μεμονωμένη έναρξη μικρορωγμής ή καταγραφή επαναλαμβανόμενων και χρονικά επικαλυπτόμενων γεγονότων ή ακόμα και ολίσθηση μεταξύ επιφανειών (Σχήμα 2.3α-β).

Από την έναρξη εφαρμογής της ΑΕΤ στη δεκαετία του '50 όπου τα τεχνολογικά μέσα καταγραφής και ανάλυσης ήταν περιορισμένων δυνατοτήτων, δόθηκε έμφαση στην επιλεκτική αξιοποίηση παραμέτρων της συνολικής κυματομορφής που καταγράφει ο αισθητήρας. Η παρακάτω γραφική παράσταση (Σχήμα 2.4) απεικονίζει μια τυπική κυματομορφή που λαμβάνουμε με τον εργαστηριακό εξοπλισμό μαζί με τις απαραίτητες πληροφορίες που εμπεριέχονται σε ένα σήμα ΑΕ από ένα υλικό. Οι λεπτομέρειες της κάθε πληροφορίας αναλύονται παρακάτω. Με τα σύγχρονα πλέον μέσα συλλογής και ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο (DAQ systems), είναι εφικτό πέρα από τις διαφορετικές παραμέτρους που καταγράφονται και αναλύονται να αποθηκευτεί ολόκληρη η κυματομορφή σε κάθε ένα από τους αισθητήρες καθιστώντας δυνατή την ανάλυση σε μεταγενέστερο χρόνο και τη δημιουργία βάσεων δεδομένων (post-processing analysis).



Σχήμα 2.4 Γραφική παράσταση κυματομορφής ΑΕ

Ακολουθεί λίστα με τις βασικότερες παραμέτρους ΑΕ:

Χρόνος κτυπήματος: (Time of hit)	Είναι η χρονική στιγμή που ανιχνεύεται το σήμα από το σύστημα. Το χτύπημα εντοπίζεται μόλις το πλάτος του σήματος ξεπεράσει το κατώφλι που του έχουμε ορίσει.
Πλάτος: (Amplitude)	Το πλάτος της ακουστικής εκπομπής είναι η μέγιστη τάση του σήματος που λαμβάνεται κατά την διάρκεια ενός χτυπήματος. Το πλάτος σε dB υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο: $\text{dB} = 20 \log (V_{\max} / 1\mu\text{Volt}) - \text{απολαβή προενισχυτή}$
Ενέργεια: (Energy)	Είναι το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της τάσης στην διάρκεια ενός ΑΕ χτυπήματος.
Counts: (υπερβάσεις)	Είναι το πόσες φορές το σήμα ΑΕ έχει ξεπεράσει το κατώφλι μας. Στο συγκεκριμένο σχήμα έχουμε 4 counts.
Διάρκεια: (duration)	Η διάρκεια της ακουστικής εκπομπής είναι ο χρόνος από την πρώτη φορά που το σήμα μας ξεπέρασε το κατώφλι μέχρι την τελευταία καταγραφή άνω του κατωφλίου.
RMS: (Root mean square)	Είναι η ενεργός τιμή της τάσης σε Volt του ΑΕ σήματος.
ASL: (Average Signal Level)	Είναι το μέτρο του συνεχώς μεταβαλλόμενου και υπολογισμένου κατά μέσο όρο πλάτους του σήματος. Η διαφορά του με το RMS είναι ότι το RMS μετριέται σε volt ενώ το ASL μετριέται σε dB. Ο χρόνος μέσα στον οποίο υπολογίζεται, ρυθμίζεται από 0 – 1000 msec
Κατώφλι: (Threshold)	Είναι η τιμή της ελάχιστης τάσης που έχουμε ορίσει. Όταν ξεπεραστεί αυτή η τάση τότε αρχίζει το σύστημα και καταγράφει την ακουστική εκπομπή.
Χρόνος Ανύψωσης: (Rise Time)	Είναι ο χρόνος μεταξύ της έναρξης του σήματος ΑΕ (όταν αυτό υπερβεί το κατώφλι) και της κορυφής που αντιστοιχεί στο μέγιστο πλάτους της τάσης του.

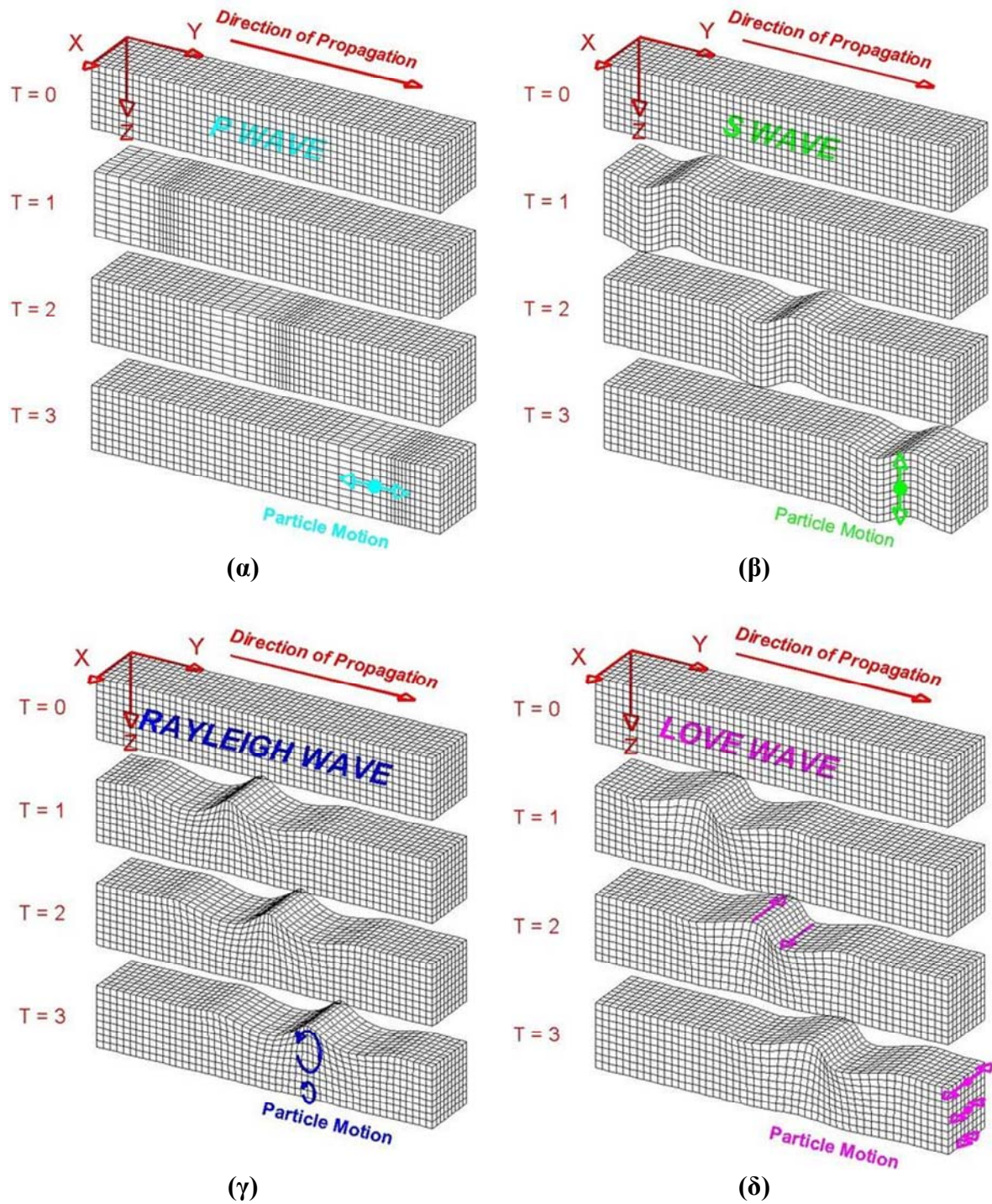
Γωνία Ανύψωσης (Rise Angle):	Είναι ο λόγος του χρόνου ανύψωσης RT προς το μέγιστο πλάτος A (σε $\mu\text{s/V}$).
Counts to Peak:	Είναι τα counts μεταξύ της αρχής των μετρήσεων (από την υπέρβαση του κατωφλίου) μέχρι την κορυφή του μέγιστου πλάτους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση του σχήματος ισούται με 3.
Μέση συχνότητα: (Average Frequency)	Είναι η μέση συχνότητα ολόκληρης της καταγραφής του ΑΕ χτυπήματος. Προκύπτει από άλλα χαρακτηριστικά ΑΕ όπως τα counts και τη διάρκεια, ως ο λόγος $Ae_counts / \text{διάρκεια}$.
Συχνότητα Αντήχησης: (Reverberation Frequency)	Η συχνότητα αντήχησης είναι η μέση συχνότητα που καθορίζεται μετά από την κορυφή της κυματομορφής ΑΕ. Εξαρτάται από άλλες παραμέτρους της κυματομορφής και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο: $(AE_counts - counts_to_peak) / (duration - rise_time)$
Συχνότητα Εκκίνησης: (Initiation Frequency)	Η συγκεκριμένη συχνότητα είναι η μέση συχνότητα της κυματομορφής υπολογισμένη από την αρχική υπέρβαση του κατωφλίου μέχρι και το μέγιστο πλάτος της κυματομορφής. Υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο: $(AE_counts_to_peak) / (rise_time)$
Ένταση Σήματος: (Signal Strength)	Είναι το ολοκλήρωμα της τάσης του ανορθωμένου σήματος καθ' όλη την διάρκεια της κυματομορφής. Έχει εύρος τιμών από 3.05pVs (1 count) έως 13.01mVs.
Απόλυτη Ενέργεια: (Absolute Energy)	Είναι η τιμή της ενέργειας του χτυπήματος ακουστικής εκπομπής και μετριέται σε attoJoule (10^{-18} Joule) Η τιμή της παίρνει τιμές από 0.000931aJ – 1310.25nJ

2.4 Θεωρία Ακουστικών Κυμάτων

Οι ακουστικές συχνότητες διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις μέσα στο υλικό αν και μερικές φορές παρατηρείται μεγαλύτερη κατευθυντικότητα η οποία εξαρτάται από την πηγή. Καθώς τα κύματα αυτά ταξιδεύουν μέσα στο υλικό η μορφή τους αλλάζει σημαντικά. Το σήμα που εντοπίζεται από τους αισθητήρες είναι ένας συνδυασμός από πολλά κομμάτια των κυματομορφών που είχαν αρχικά εκπεμφθεί. Τα ακουστικά σήματα που εκπέμπονται από την πηγή διαρκούν μερικά εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου. Ο χρόνος που το κύμα διαδίδεται στο υλικό μέχρι να εξασθενήσει, κυμαίνεται από 100microsecond μέχρι 10 millisecond ανάλογα το υλικό που εξετάζουμε. Η ένταση του σήματος ΑΕ είναι σημαντικά ασθενέστερη από την ένταση κοντά στην πηγή. Καθώς το σήμα ταξιδεύει μέσα στο υλικό το πλάτος του μειώνεται κατά 30% κάθε φορά που διπλασιάζεται η απόσταση που ταξίδεψε από την πηγή. Σε τρισδιάστατη δομή η εξασθένιση είναι 50% ανά διπλασιασμό της απόστασης από την πηγή. Καθώς το κύμα ΑΕ περνάει μέσα από το υλικό η κινητική του ενέργεια απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα. Ανάλογα με το μηχανισμό παραγωγής των ελαστικών κυμάτων και τις συνοριακές συνθήκες, η ενέργεια μπορεί να διαδίδεται με τη μορφή επίπεδων, κυλινδρικών ή σφαιρικών κυμάτων μέσα στο υλικό. Τόσο σε μελέτες πεδίου όσο και σε εργαστηριακά πειράματα, η κίνηση των υλικών σημείων στον αισθητήρα ανίχνευσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η πηγή, η γεωμετρία της δομής, οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού μέσου και το είδος και πλήθος των ασυνεχειών εντός του υλικού. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν το είδος του διαδιδόμενου κύματος, τις ταχύτητες διάδοσης, την εξασθένιση τους εντός του υλικού καθώς και φαινόμενα ανακλάσεων – διαθλάσεων στα όρια ή/και στις διαχωριστικές επιφάνειες του υλικού.

2.4.1 Διάδοση κυμάτων

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ελαστικών κυμάτων σε ένα υλικό: τα κύματα χώρου (body waves) που διαδίδονται στο εσωτερικό του υλικού και τα κύματα επιφάνειας (surface waves) που διαδίδονται κατά μήκος της επιφάνειας του ή ενός στρώματος εντός αυτού. Στην πρώτη κατηγορία κυμάτων ανήκουν τα διαμήκη κύματα (κύματα πίεσης ή κύματα P) όπου η κίνηση των υλικών σημείων του μέσου διάδοσης είναι κατά τη διεύθυνση διάδοσης (Σχήμα 2.5α) και τα εγκάρσια κύματα (κύματα διάτμησης ή κύματα S) όπου τα υλικά σημεία κινούνται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχήμα 2.5β). Τα τελευταία,



Σχήμα 2.5 Διάφορα είδη κυμάτων όπου διακρίνεται η διεύθυνση διάδοσης και η κίνηση των σημείων του υλικού μέσου (α) κύματα P (β) κύματα S (γ) επιφανειακά κύματα Rayleigh (δ) επιφανειακά κύματα Love

έχουν μικρότερη ταχύτητα διάδοσης, γι αυτό και ονομάζονται και δευτερογενή (secondary waves) σε αντιδιαστολή με τα διαμήκη (primary waves). Οι ταχύτητες εξαρτώνται από τις ιδιότητες του μέσου αλλά γενικά ισχύει: $v_S \approx 0.6 v_P$ (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1 Ταχύτητες διάδοσης P και S κυμάτων σε διάφορα υλικά

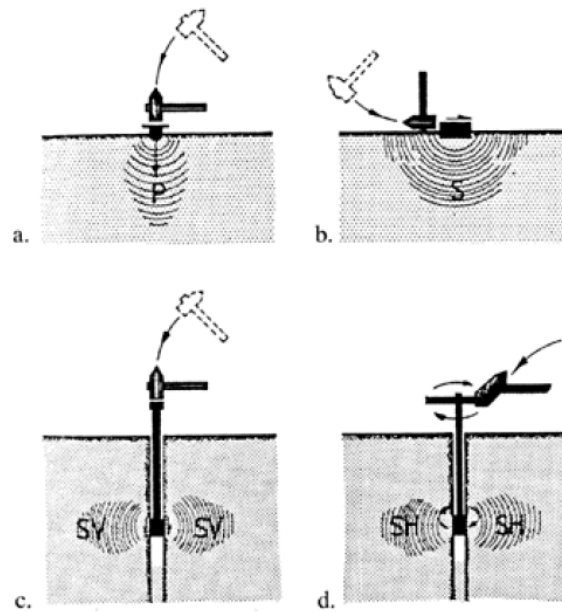
Υλικό	v_p (m/s)	v_s (m/s)
Aluminum	6,100	3,100
Brass	4,300	2,000
Glass	6,800	3,300
Steel	5,800	3,100
Lead	2,200	700
Plexiglass	2,600	1,300
Polystyrene	2,300	1,200
Magnesium	6,400	3,100
Water	1,485	¹
Air	331	¹
Ice	3,200	1,920 ²
Sandstone	2,000	1,200 ²
Limestone	3,200	1,920 ²
Granite	5,000	3,000 ²
Basalt	5,400	3,240 ²
Halite	4,500	2,700 ²
Shale	2,250	1,350 ²
Coal	1,100	660 ²

¹ σε ρευστά δεν έχουμε διάδοση εγκάρσιων κυμάτων

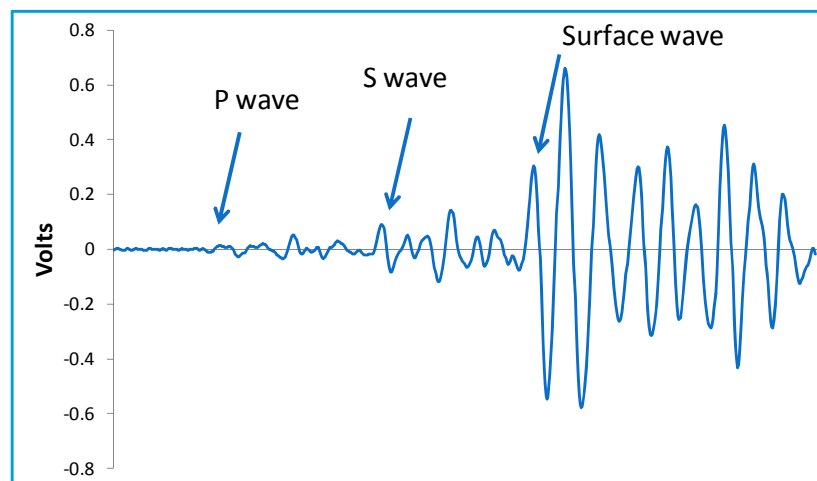
² υπολογισμένες από τη σχέση $v_s/v_p = 0.6$

Στην περίπτωση που η κίνηση των υλικών σημείων του μέσου και η διεύθυνση διάδοσης βρίσκονται στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο, μιλάμε για πολωμένα διατμητικά κύματα SV. Αν η κίνηση των σημείων είναι πολωμένη σε οριζόντια διεύθυνση και κάθετα στη διάδοση του κύματος, τα κύματα αναφέρονται ως πολωμένα SH. Ένας απλός τρόπος παραγωγής τέτοιων κυμάτων στο πεδίο, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6.

Στην κατηγορία των επιφανειακών κυμάτων συμπεριλαμβάνονται τα κύματα Rayleigh και κύματα Love (Σχήμα 2.5γ – δ). Στα κύματα Rayleigh, η κίνηση των υλικών σημείων είναι ελλειπτική και αντίθετη της διεύθυνσης διάδοσης ενώ έχουν κατακόρυφη πόλωση (επιφανειακά SV κύματα). Στα κύματα Love, η κίνηση των υλικών σημείων έχει οριζόντια πόλωση, κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης (επιφανειακά SH κύματα). Τα πλάτη των επιφανειακών κυμάτων εξασθενίζουν λιγότερο από τα κύματα χώρου και επομένως



Σχήμα 2.6 Τρόποι παραγωγής διαφόρων κυμάτων σε μετρήσεις πεδίου



Σχήμα 2.7 Κυματομορφή ελαστικών κυμάτων όπου διακρίνονται τα κύματα P (πρώτη άφιξη) τα κύματα S και τα επιφανειακά κύματα (κύματα Rayleigh) διαφορετικής συχνότητας και πλάτους.

μπορούν να ανιχνευτούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7, εμφανίζουν μεγαλύτερα πλάτη από τα κύματα $-P$ και $-S$ που συσχετίζονται με ένα καθορισμένο γεγονός. Οι ταχύτητες διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων είναι περίπου $0.92v_s$ και επομένως καταγράφονται μετά από τα κύματα S.

Γενικά, για ένα ισοτροπικό ελαστικό μέσο, οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων P και S, δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{και} \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού και λ, μ οι σταθερές Lamé. Το μέτρο ελαστικότητας Young (E) και ο λόγος Poisson (ν) ενός υλικού, συνδέονται με τις σταθερές Lamé, μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad \text{και} \quad \nu = \frac{0.5\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2.2)$$

Έτσι, οι σχέσεις 2.1 μπορούν να τροποποιηθούν ως εξής:

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad \text{και} \quad v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (2.3)$$

και ο λόγος των ταχυτήτων v_p / v_s θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} \quad (2.4)$$

Οι ταχύτητες αυτές ωστόσο, επηρεάζονται από διάφορες παράγοντες όπως, η θερμοκρασία, η πίεση, η σύνθεση του υλικού και η μηχανική του κατάσταση. Σε πετρώματα, οι παραπάνω παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν το κλείσιμο μικρορωγμών και κενών και να αυξήσουν την ελαστικότητα, προκαλώντας αύξηση της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων.

2.4.2 Εξασθένηση κυμάτων

Παράγοντες όπως η γεωμετρική διασπορά, η εσωτερική τριβή, η σκέδαση και η αλλαγή της μορφής των κυμάτων μπορούν να προκαλέσουν ελάττωση της ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας που εκπέμπεται από την πηγή ακουστικού κύματος σε ένα υλικό. Το σήμα επομένως που καταγράφεται από τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα θα παρουσιάσει εξασθένηση.

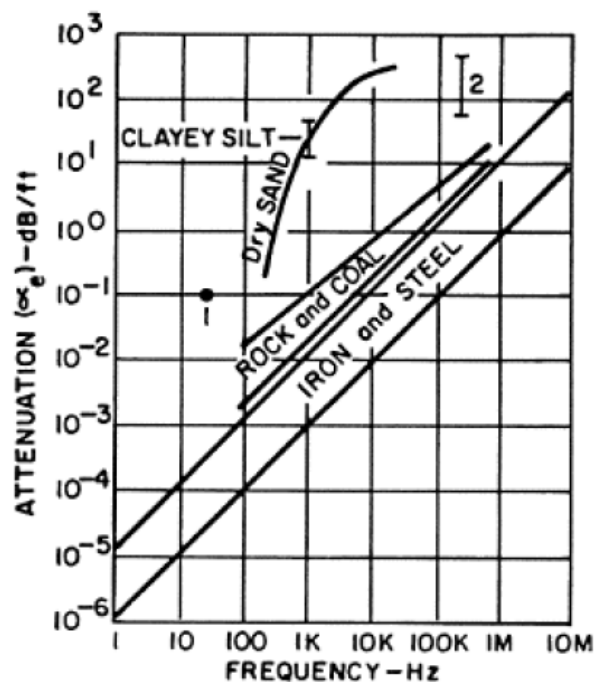
Για ένα σφαιρικό ελαστικό κύμα που διαδίδεται από σημειακή πηγή, το πλάτος του κύματος είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της εκπεμπόμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και επομένως θα ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από την

πηγή, δηλαδή $A = \frac{A_0}{r}$, όπου A_0 το πλάτος του κύματος στην πηγή. Πέρα από τη γεωμετρική εξασθένηση του κύματος, απώλεια ενέργειας υφίσταται και λόγω εσωτερικών τριβών στο ελαστικό μέσο και το πλάτος στην περίπτωση αυτή ακολουθεί εκθετική μείωση, $A = A_0 e^{-\alpha r}$ όπου α ο συντελεστής εξασθένησης. Σε πολυκρυσταλλικά υλικά όπου το μήκος κύματος του ελαστικού κύματος είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος των κόκκων, δευτερογενή ελαστικά κύματα παράγονται κατά την πρόσπτωση του αρχικού ελαστικού κύματος και διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις, (σκέδαση) ελαττώνοντας με τον τρόπο αυτό τη ροή της ενέργειας. Επιπλέον ελάττωση της ενέργειας του κύματος μπορεί να έχουμε λόγω της δημιουργίας ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων σε διαχωριστικές επιφάνειες του υλικού μέσου.

Συνδυασμός της γεωμετρικής εξασθένησης και της εκθετικής λόγω τριβών έχει προταθεί, βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$A = A_0 \frac{e^{-\alpha_e r}}{r} \quad (2.5)$$

όπου α_e ο ισοδύναμος συντελεστής εξασθένησης (equivalent attenuation factor) που εξαρτάται από τη συχνότητα του κύματος (Σχήμα 2.8). Αύξηση της συχνότητας έχει ως



Σχήμα 2.8 Γραφική παράσταση του συντελεστή εξασθένησης ως προς τη συχνότητα για διάφορα υλικά. (από Hardy, 2003).

αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή εξασθένισης όπου για πετρώματα σε συχνότητες 300kHz, είναι της τάξης των 10 – 1000 dB/m.

Ο συντελεστής εξασθένισης μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση δύο αισθητήρων τοποθετημένων πάνω στο υπό μελέτη υλικό και την καταγραφή των πλατών των σημάτων από τεχνητή σημειακή πηγή (π.χ. σπάσιμο μύτης μολυβιού), μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\alpha_e = \frac{20}{d} \log \frac{A_1}{A_2} \quad (\text{σε dB/m}) \quad (2.6)$$

όπου d η απόσταση των δύο αισθητήρων (σε) και A_1 , A_2 τα πλάτη των σημάτων στους αισθητήρες.

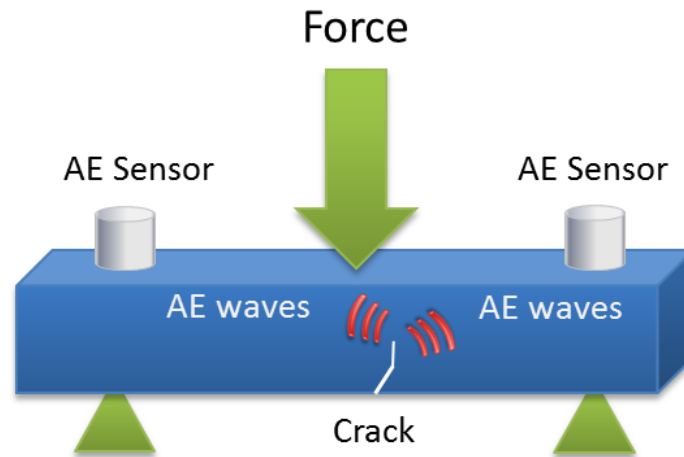
2.5 Εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ

Με τη χρήση δύο ή περισσότερων αισθητήρων είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης της πηγής της Ακουστικής Εκπομπής και κατά συνέπεια, της περιοχής της δομικής ατέλειας. Ο υπολογισμός της θέσης γίνεται από την ταχύτητα του ακουστικού κύματος και από τον χρόνο άφιξης (time of arrival, TOA) στον κάθε αισθητήρα.

Γραμμικός (μονοδιάστατος) εντοπισμός θέσης χρησιμοποιείται σε μεγάλο μήκος κυλίνδρους αερίου, σωληνώσεις και γενικά, σε κατασκευές των οποίων η μία διάσταση είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες δύο. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται τα σήματα δυο αισθητήρων για τον εντοπισμό της ακουστικής πηγής. Επίπεδος (δισδιάστατος) εντοπισμός θέσης πραγματοποιείται σε μεγάλες επιφάνειες, σε μεγάλο πάχος δοχεία και δεξαμενές με τη χρήση τριών τουλάχιστον αισθητήρων, ενώ τρισδιάστατος εντοπισμός θέσης πραγματοποιείται κατά τον έλεγχο μετασχηματιστών και κατασκευών σκυροδέματος (χρήση τεσσάρων αισθητήρων).

2.5.1 Εντοπισμός σε μία διάσταση

Όταν μία από τις διαστάσεις του υλικού που εξετάζουμε είναι πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες τότε μιλάμε για μονοδιάστατο εντοπισμό. Σε αυτή την περίπτωση τοποθετούμε τους 2 αισθητήρες στις 2 άκρες του υλικού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Αν D είναι η απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων, V η ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στο υλικό και ΔT η διαφορά των χρόνων άφιξης του σήματος στους δύο αισθητήρες, η απόσταση d της θέσης της ακουστικής πηγής από τον αισθητήρα που κατέγραψε πρώτος το σήμα, θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

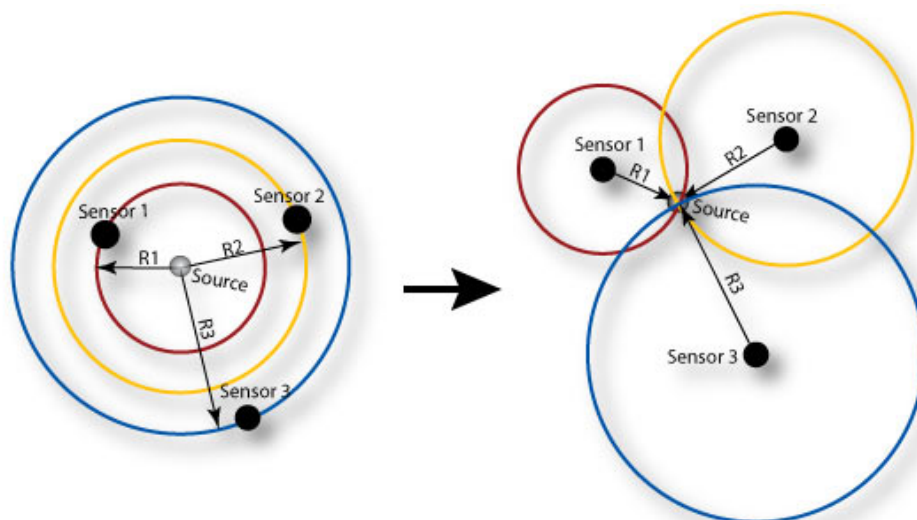


Σχήμα 2.9 Μονοδιάστατος εντοπισμός θέσης πηγής AE κατά τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων σε ορθογώνια ράβδο.

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta T \cdot V) \quad (2.7)$$

2.5.2 Εντοπισμός σε δύο διαστάσεις

Για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής AE σε επίπεδη διάταξη, χρειάζονται τουλάχιστον 3 αισθητήρες (Σχήμα 2.10). Ελαστικό κύμα που παράγεται στη θέση της πηγής (source) διαδίδεται σε ισότροπο υλικό προς κάθε κατεύθυνση και τα κυκλικά μέτωπα κύματος διατρέχουν διαφορετικές αποστάσεις (R1, R2 και R3) μέχρι να ανιχνευτούν από



Σχήμα 2.10 Εντοπισμός θέσης πηγής AE σε δύο διαστάσεις

τους αισθητήρες (S1, S2, S3). Η θέση της πηγής θα βρίσκεται στο σημείο τομής των τριών κύκλων με κέντρα τις θέσεις των αισθητήρων και ακτίνες ίσες με τις αποστάσεις που διέτρεξε το κύμα μέχρι να καταγραφεί από τον κάθε αισθητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

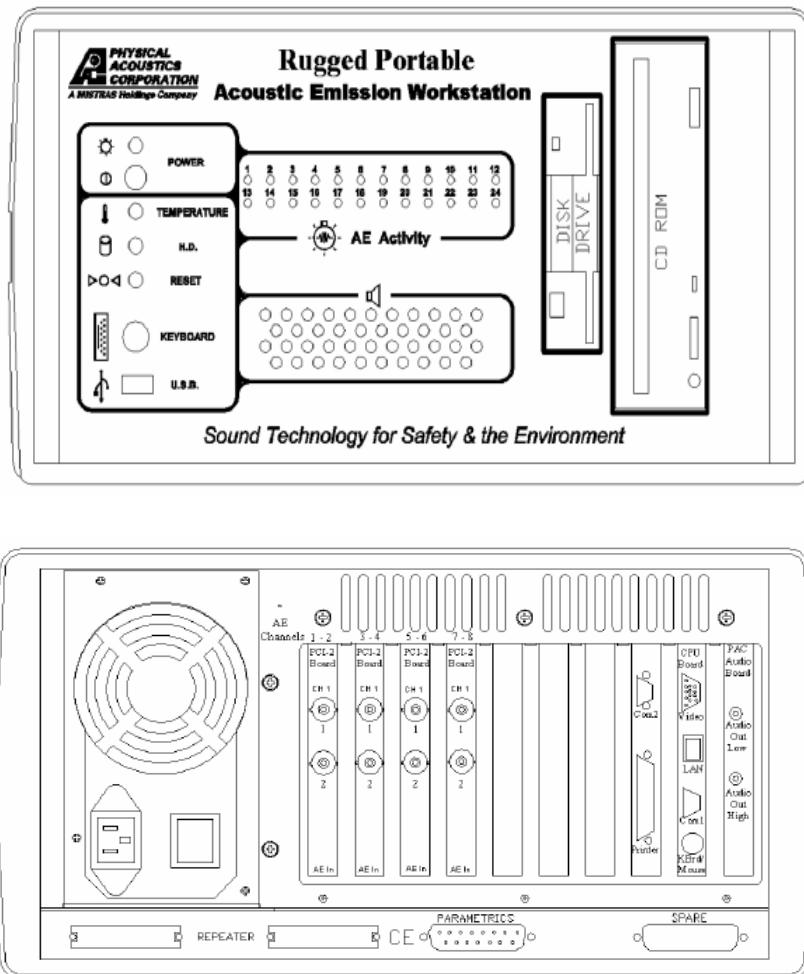
Πειραματικό μέρος

3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Για της μετρήσεις των ακουστικών εκπομπών χρησιμοποιήσαμε το πολυκάναλο σύστημα DiSP (φορητή έκδοση) του οίκου Physical Acoustics Corporation εξοπλισμένο με 3 κάρτες PCI-2 (Σχήμα 3.1 και 3.2). Η κάρτα PCI-2 είναι ένα σύστημα με 2 κανάλια για συλλογή δεδομένων ακουστικών εκπομπών υψηλής δειγματοληψίας και για ψηφιακή επεξεργασία σήματος πάνω σε μία PCI κάρτα. Το μπλοκ διάγραμμα της PCI-2 κάρτας απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3.



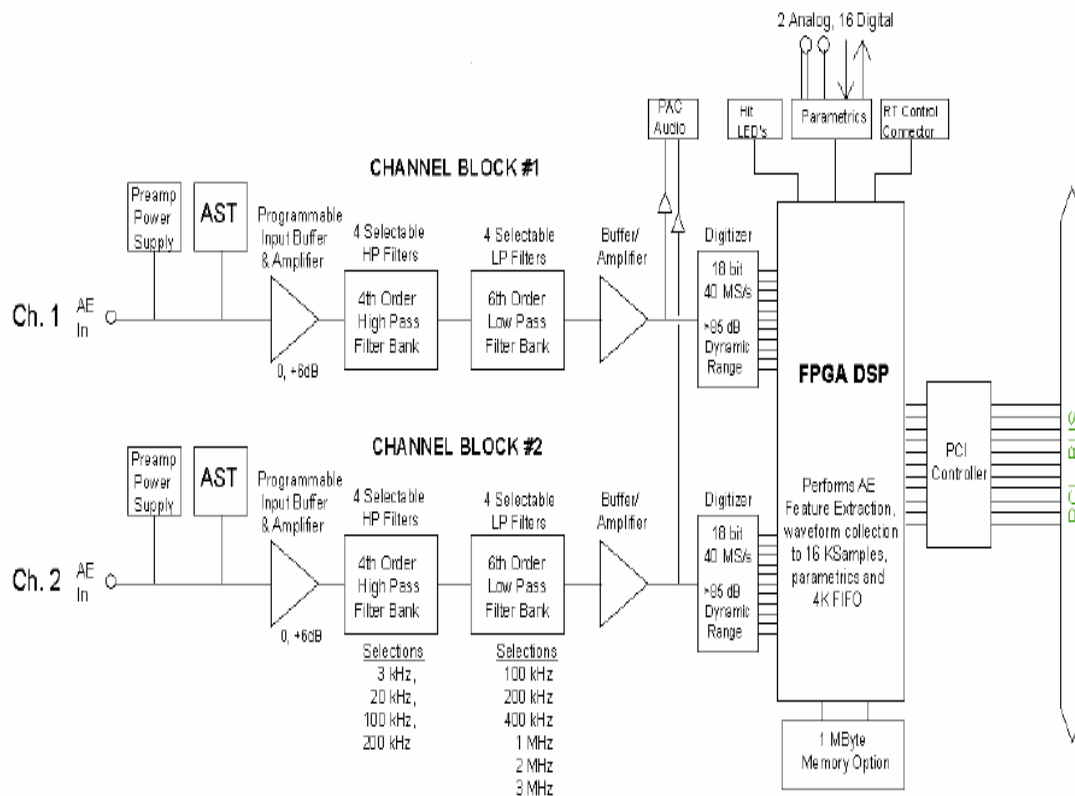
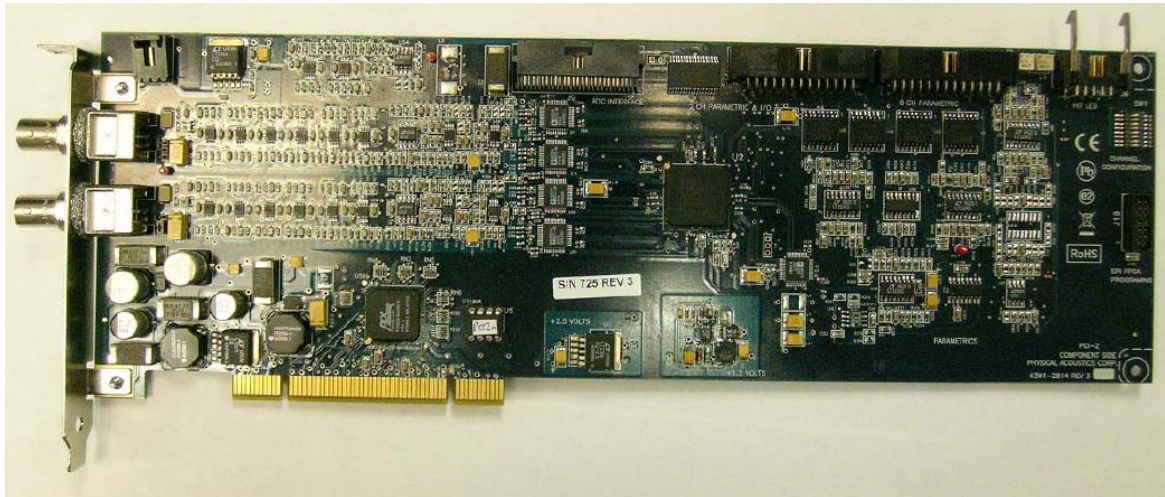
Σχήμα 3.1 Physical Acoustics PCI-2 based AE system



Σχήμα 3.2 Εμπρόσθια και οπίσθια όψη του πολυκάναλου συστήματος DiSP του οίκου APC.

Το εισερχόμενο ακουστικό σήμα περνάει μέσα από τον προγραμματιζόμενο ενισχυτή και το ενδιάμεσο κύκλωμα με επιλογή ενίσχυσης από 0 έως 6db, στην συνέχεια περνάει απο το επιλεγμένο κύκλωμα φίλτρων όπου χρησιμοποιούνται ένα από τα 4 υψηλερατά και ένα από τα 6 βαθυπερατά φίλτρα αναλόγως με το ποια έχουν επιλεχθεί από το χρήστη (οι τιμές που μπορούν να επιλεχθούν απεικονίζονται στο διάγραμμα για τα υψηλερατά και βαθυπερατά φίλτρα). Το φιλτραρισμένο σήμα περνάει ύστερα στον 18bit αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα με ταχύτητα δειγματοληψίας έως 40 MegaSamples ανά δευτερόλεπτο (18bit, A/D converter module, 40MS/sec). Το σήμα μας, σε ψηφιακή μορφή πλέον, πηγαίνει στο DSP based FPGA όπου λαμβάνουν μέρος δειγματοληψίες με πολύ χαμηλό θόρυβο για 18bit επεξεργασία. Η κβαντοποιημένη κυματομορφή στην συνέχεια περνάει από τον εσωτερικό επεξεργαστή εντοπισμού χτυπημάτων (internal hit detection processing). Από εκεί λαμβάνουμε τα χαρακτηριστικά που θέλουμε από το σήμα όπως ο αριθμός των hits και άλλων παραμέτρων των ακουστικών εκπομπών που αναφέρθηκαν αναλυτικά στο 2^ο

κεφάλαιο, όπου μπορούν να επεξεργαστούν περαιτέρω και να αποθηκευτούν. Στο πάνω δεξιά μέρος του σχηματικού διαγράμματος παρατηρούμε τα βύσματα της PCI κάρτας με την κάρτα ήχου και τα led. Όταν έχουμε ένα hit το σήμα περνάει στην κάρτα ήχου και παράγεται ήχος καθώς επίσης αναβοσβήνουν τα led. Επίσης υπάρχουν βύσματα με αναλογικές παραμετρικές εισόδους και 8 ψηφιακές εισοδοι και έξοδοι για αλληλεπικοινωνία. Τα χαρακτηριστικά της PCI-2 κάρτας δίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.3 Σχηματικό διάγραμμα της PCI-2 κάρτας

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά PCI-2 κάρτας

5.2 PCI-2 Board Specifications (subject to change):

PCI-2 board Physical Specifications

Size:	13.4" L x 4.8" H x 0.7" T
Weight:	1.1 lbs.
Power Consumption:	12 Watts
DC Power	+12.0 volts, 0.6 amps -12.0 volts, 0.10 amps + 5.0 volts, 0.8 amps

Electrical Specifications

AE Inputs:	2 channels
Input Impedance:	50 Ω or 1000 Ω, switch selectable
Preamplifier Power:	Jumper selectable 0 volt or 28 VDC, 100 ma current limited (on BNC center conductor for phantom powering of external preamplifiers).
Sensor Testing:	AST built-in
Frequency Response:	1 kHz – 3 MHz (at -3 dB points)

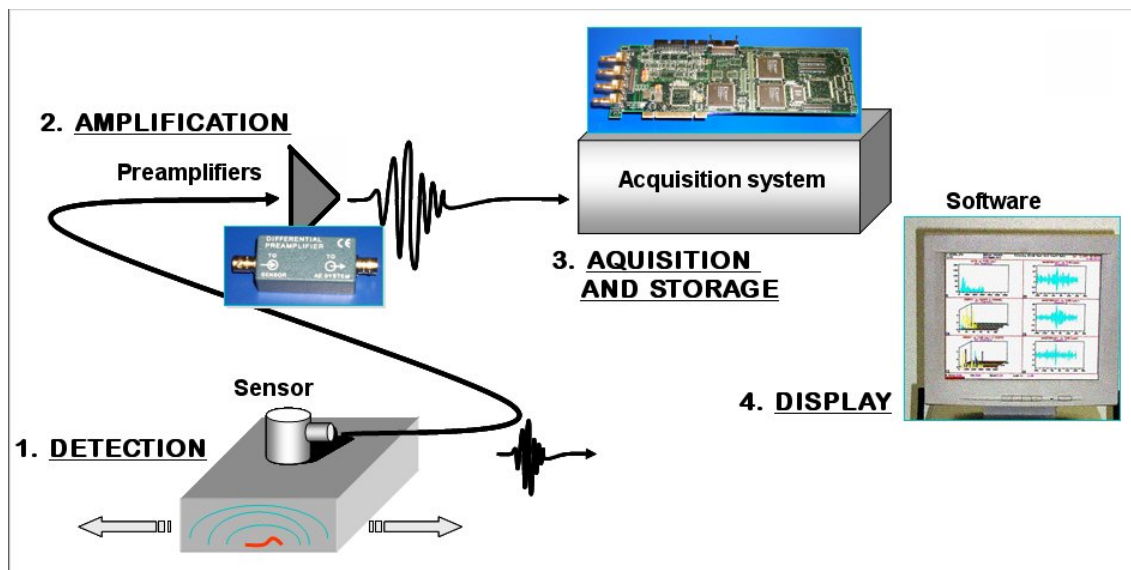
Signal Processing

AE Signal Gain	0, 6dB computer selectable input signal scaling
Filters	4 High Pass Computer selectable filters- 3 kHz, 20 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 4 th order Butterworth 6 Low Pass –Computer selectable filters 100 kHz, 200 kHz, 400 kHz, 1000 kHz, 2000 kHz, & 3000 kHz, 6 th order Butterworth filters. 6 Low Pass –Computer selectable filters (Rev 3 or higher) 100kHz, 200kHz, 400kHz, 1.0MHz, 2.0MHz digital filter & 3.0MHz, 6 th order Butterworth filters. <i>Note: When selecting greater than 10MSPS sampling rate, the 3.0MHz filter must be used.</i>

Noise (wideband): (Filtering can lower noise even more)	<u>Filter</u> <u>ASL (no input)</u> <u>Minimum Threshold</u>
	1kHz – 3MHz 4dB 17dB w/o preamp or sensor 22 dB w 2/4/6 & R15 24 dB with R15I sensor

Maximum Signal Amplitude:	100 dB AE ASL 99 dB
---------------------------	------------------------

ADC Type	18 bit 40 MSPS per channel maximum
Dynamic Range:	> 85 dB
Sample Rate:	Computer selectable 100kS/s, 200kS/s, 500kS/s, 1M-Samples/sec, 2MSPS, 5MSPS, 10MSPS, 20MSPS, 40MSPS. – (40MSPS with 2x averaging, for a 20 MSPS effective sampling rate). - (40MSPS with 4x averaging, for a 10 MSPS effective sampling rate).



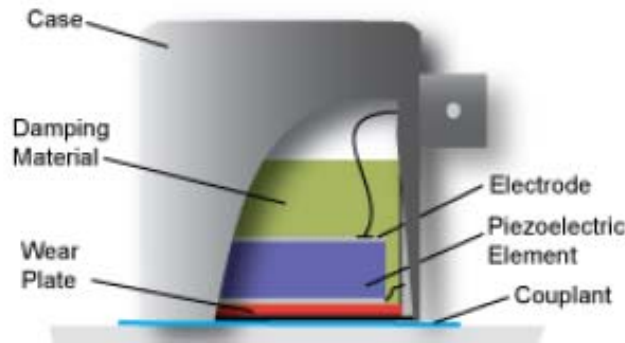
Σχήμα 3.4 Σχηματική απεικόνιση συστήματος συλλογής ακουστικών εκπομπών.

Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής πειραματικής διάταξης για την καταγραφή των ΑΕ δίνεται στο Σχήμα 3.4. Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες προσαρμόζονται με τη χρήση υλικού σύζευξης (couplant) πάνω στην υπό έλεγχο κατασκευή. Σαν υλικό σύζευξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από νερό έως κάποιο γράσο ανάλογα με την περίπτωση ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα ελαστικά κύματα θα διαδοθούν από το υλικό στην επιφάνεια του αισθητήρα και δε θα αποσβεστούν στη διεπιφάνεια επαφής τους. Το σήμα που παράγεται στον αισθητήρα από την ανίχνευση των ελαστικών κυμάτων είναι πολύ μικρό και γι αυτό απαραίτητη είναι η χρήση προενισχυτών, πριν αυτό εισέλθει στο σύστημα καταγραφής και ανάλυσης. Σε πολλούς αισθητήρες, ο προενισχυτής είναι ενσωματωμένος στον αισθητήρα ώστε να διασφαλιστεί υψηλή τιμή σήματος προς θόρυβο. Στη συνέχεια το ενισχυμένο σήμα καταγράφεται από τη μονάδα συλλογής και εξάγονται σε πραγματικό σχεδόν χρόνο οι διάφοροι παράμετροι των ΑΕ ενώ είναι δυνατή η καταγραφή ολόκληρης της κυματομορφής για κάθε έναν από τους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες.

3.2 Πιεζοηλεκτρικοί Αισθητήρες

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα που έχουν κάποια υλικά να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται μηχανική τάση. Η ηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά τους περιγράφεται από τους παρακάτω τύπους:

$D = \epsilon E$, όπου D είναι η ηλεκτρική μετατόπιση, ϵ η διηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 3.5 Δομή πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα

$T = \kappa S$ (νόμος Hooke) όπου T η μηχανική τάση S η παραμόρφωση του και κ η ελαστική του σταθερά.

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται η δομή ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα. Αποτελείται από το περίβλημα του (case), το υλικό απόσβεσης (damping material), το πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο (piezoelectric element) ενωμένο με τα ηλεκτρόδια (electrodes) που στην συνέχεια καταλήγουν στο καλώδιο που πάει στον προενιχυτή και η θήκη στήριξης (wear plate). Στην τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω στο υλικό χρησιμοποιήσαμε σιλικόνη για καλύτερη επαφή με το δοκίμιο.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι PICO HF-1.2 με συχνотική απόκριση 500 – 1850 KHz. Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα δίνονται στον Πίνακα 3.2 και οι καμπύλες της συχνотικής τους απόκρισης δίνονται στα Σχήματα 3.6 και 3.7.

Πίνακας 3.2 Προδιαγραφές πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα

Dynamic

Peak Sensitivity, Ref V/ μ bar	-72 dB
Operating Frequency Range	500 - 1850 kHz
Resonant Frequency	550 kHz
Directionality	+/-1.5

Environmental

Temperature Range	-65 to 177°C
Shock Limit	500 g
Completely enclosed for RFI/EMI immunity	

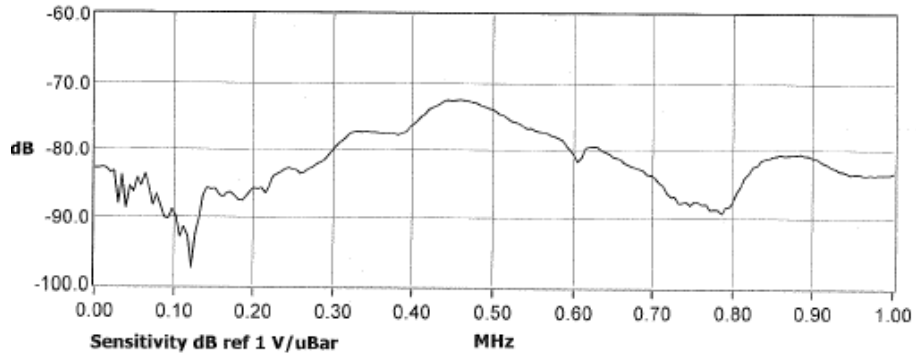
Physical

Dimensions	0.2" diameter x .15" h (5 x 4 mm)
Weight	1 gram (7 grams with cable and connector)
Case Material	Stainless Steel
Face Material	Ceramic
Connector	Integral cable with BNC Connector
Connector Locations ..	Integral Side Cable
Seal	Epoxy
Sensor to Preamp Cable	Integral, 0.033" diameter x 24" length



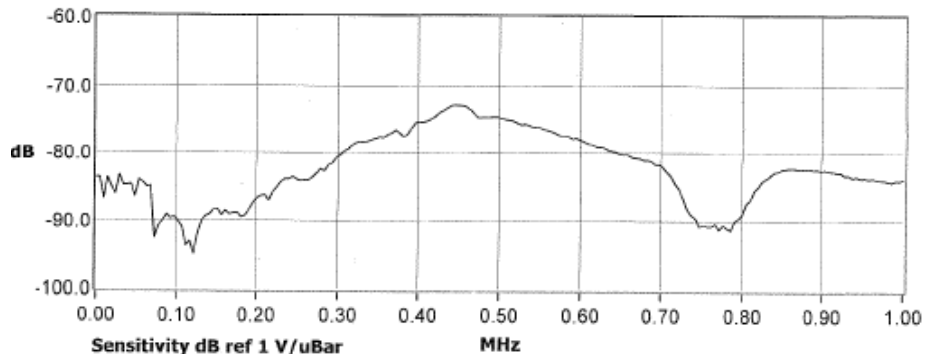
AE SENSOR CALIBRATION CERTIFICATE

Sensor Name: PICO Max. Value (dB): -72.55 Test Date: 11/30/2012
 Sensor S/N: 6222 Peak Freq.(kHz): 458.98 Tested By: J.A.
 Comment: 1 METER CABLE



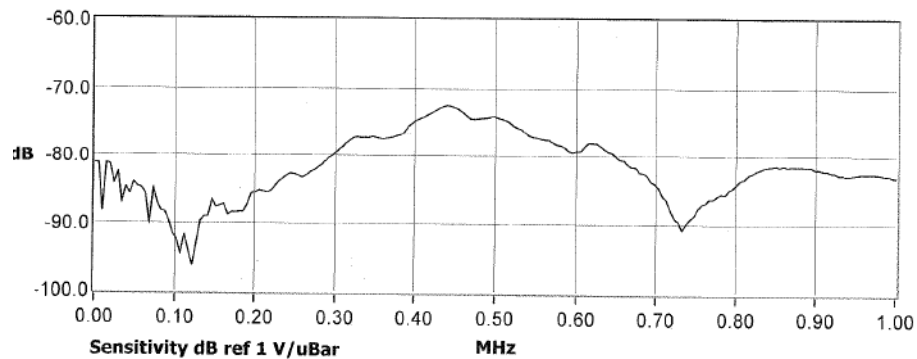
AE SENSOR CALIBRATION CERTIFICATE

Sensor Name: PICO Max. Value (dB): -73.01 Test Date: 11/30/2012
 Sensor S/N: 6223 Peak Freq.(kHz): 444.34 Tested By: J.A.
 Comment: 1 METER CABLE



AE SENSOR CALIBRATION CERTIFICATE

Sensor Name: PICO Max. Value (dB): -72.59 Test Date: 11/30/2012
 Sensor S/N: 6224 Peak Freq.(kHz): 439.45 Tested By: J.A.
 Comment: 1 METER CABLE

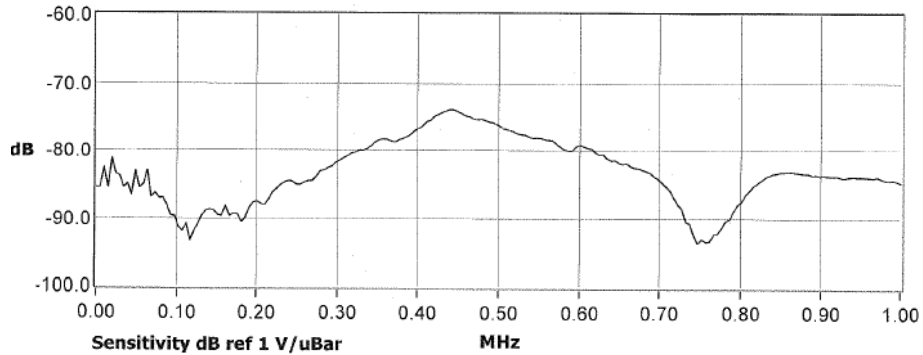


Σχήμα 3.6 Καμπύλες συχνοτικής απόκρισης των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (S/N: 6522 – 6524)



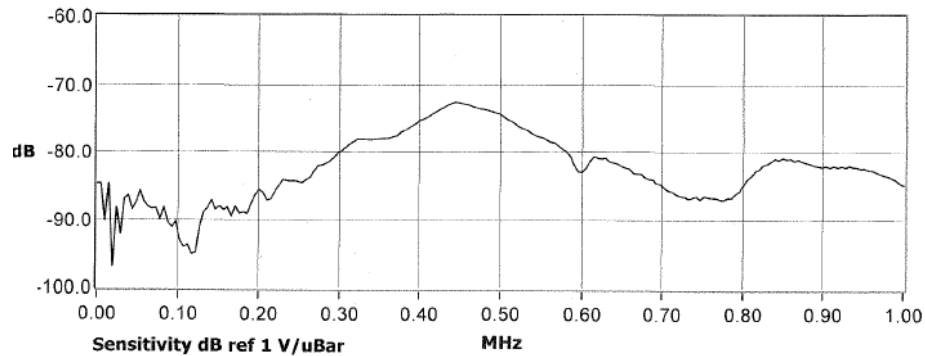
AE SENSOR CALIBRATION CERTIFICATE

Sensor Name: PICO Max. Value (dB): -73.92 Test Date: 11/30/2012
 Sensor S/N: 6225 Peak Freq.(kHz): 439.45 Tested By: J.A.
 Comment: 1 METER CABLE



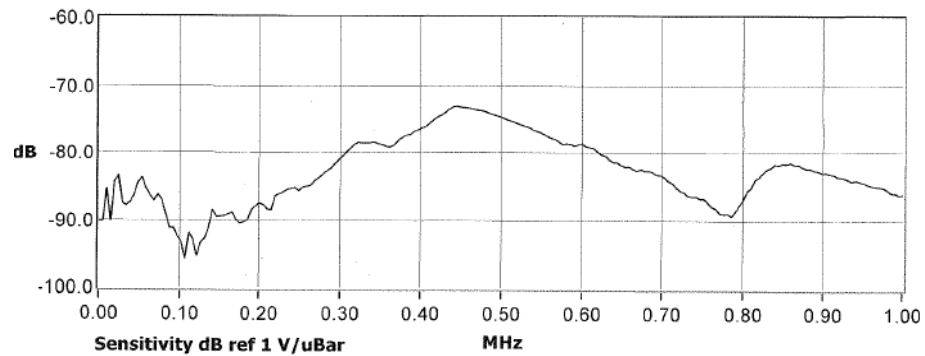
AE SENSOR CALIBRATION CERTIFICATE

Sensor Name: PICO Max. Value (dB): -72.68 Test Date: 11/30/2012
 Sensor S/N: 6250 Peak Freq.(kHz): 444.34 Tested By: J.A.
 Comment: 1 METER CABLE



AE SENSOR CALIBRATION CERTIFICATE

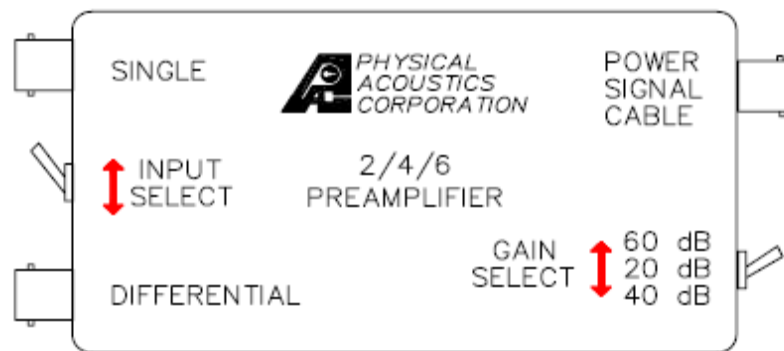
Sensor Name: PICO Max. Value (dB): -73.12 Test Date: 11/30/2012
 Sensor S/N: 6251 Peak Freq.(kHz): 444.34 Tested By: J.A.
 Comment: 1 METER CABLE



Σχήμα 3.7 Καμπύλες συχνοτικής απόκρισης των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (S/N: 6225, 6250 και 6251)

3.3 Προενισχυτές

Οι προενισχυτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι 0/2/4 με εύρος 0dB, 20dB, 40dB και η επιλογή του εύρους γίνεται με διακόπτη πάνω στον προενισχυτή. Οι συγκεκριμένοι προενισχυτές χρησιμοποιούνται όταν δεν είμαστε σίγουροι για την απολαβή που χρειαζόμαστε σε μία εφαρμογή ή για το εύρος συχνοτήτων. Οι προενισχυτές έχουν ενσωματωμένα χαμηλοπερατά, υψηλερατά και ζωνοπερατά φίλτρα και προσφέρουν εύκολη αλλαγή φίλτρων χωρίς να χρειάζεται βαθμονόμηση. Οι προδιαγραφές του συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3



Σχήμα 3.8 Απεικόνιση ενισχυτή 20/40/60

Πίνακας 3.3 Προδιαγραφές προενισχυτή 0/2/4

Επιλογή απολαβής:	0,20,40dB \pm 0,5dB
Σύνθετη αντίσταση εισόδου:	10k Ω // 15pF
Απαιτούμενη τάση λειτουργίας:	18-28Vdc
Ένταση ρεύματος:	30mA (AST installed) / 28 mA (χωρίς AST)
Δυναμική περιοχή:	75dB (με αισθητήρα R15) / 80dB (50 Ω είσοδο)
Θερμοκρασία λειτουργίας:	-40 εως 65 C κελσίου

0/2/4 Gain Related Specifications:

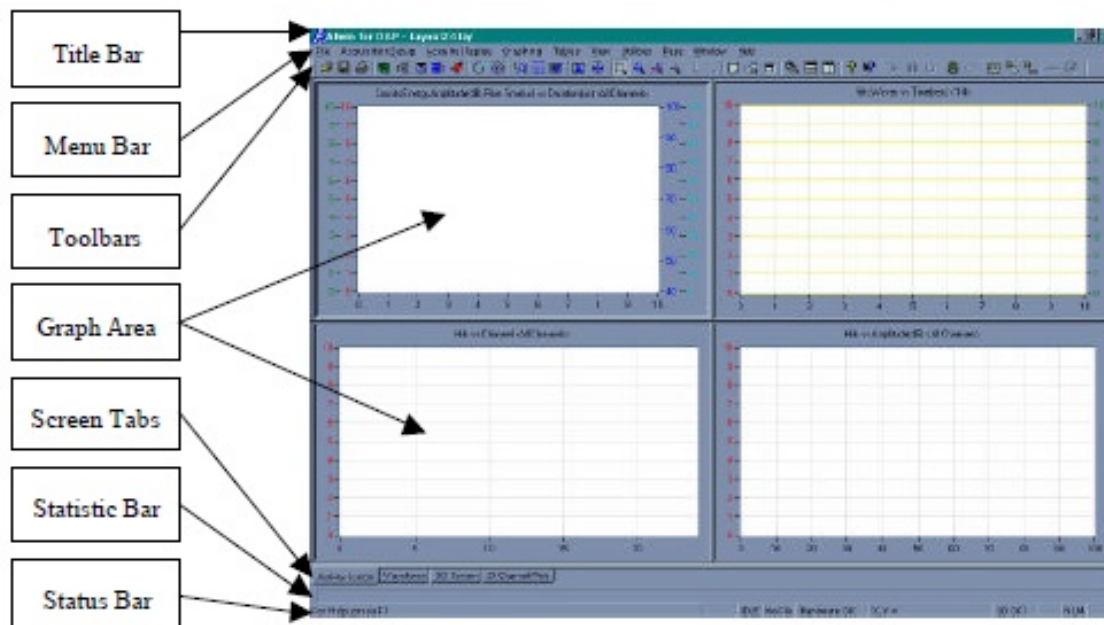
Gain Selection	0dB	20dB	40dB
- Bandwidth (-3dB):	10kHz-2.5MHz	10kHz-25MHz	10kHz-800kHz
- Output Voltage (50 Ω Load):	3Vpp	20Vpp	20Vpp
- CMRR (500kHz):	29dB	29dB	28dB
- Noise(RMS rti):			

Filter Frequency Response Hz	0dB	20dB	40dB	0dB	20dB	40dB
	With R15 Sensor	With R15 Sensor	With R15 Sensor	Input Shorted	Input Shorted	Input Shorted
135k-185k	20 μ V	4.8 μ V	3.5 μ V	20 μ V	4.3 μ V	2.7 μ V
100k-300k \pm	20 μ V	6.2 μ V	5.2 μ V	20 μ V	5.8 μ V	4.5 μ V
10k-2.0M	30 μ V	19.5 μ V	11 μ V	30 μ V	19 μ V	10 μ V

3.4 Λογισμικά συλλογής και ανάλυσης των δεδομένων ΑΕ

3.4.1 Το λογισμικό ΑΕwin – γενική παρουσίαση

Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιείται το εμπορικό λογισμικό ΑΕwin της PAC. Με την εκκίνηση του προγράμματος ΑΕwin εμφανίζεται στην οθόνη του PC η εικόνα του Σχήματος 3.9. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των διαφόρων εικονιδίων του προγράμματος.



Σχήμα 3.9 Η αρχική οθόνη του ΑΕwin

Menu Bar: Η μπάρα με τα text commands όπως File, Acquisition Setup, Acquire/Replay, Graphing, Tables, View, Utilities, Page, Window και Help. Όλα τα παραπάνω έχουν submenu που εμφανίζονται όταν πατήσουμε πάνω τους.

Toolbar Icons: Συντομεύσεις για διάφορες επιλογές του Menu bar και άλλων επιλογών. Πηγαίνοντας το ποντίκι από πάνω, μας εμφανίζει περιγραφή της λειτουργία του κάθε εικονιδίου.

Graph Area: Το συγκεκριμένο κομμάτι είναι και το σημαντικότερο γιατί όλες οι πληροφορίες που επιθυμούμε εμφανίζονται στην γραφική παράσταση που απεικονίζεται στο πεδίο αυτό. Οι περαιτέρω επιλογές για την απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων γίνονται από το Graph setup menu.

Screen page tabs: Το πρόγραμμα ΑΕwin μπορεί να δείξει πολλές γραφικές παραστάσεις σε

διαφορετικές καρτέλες. Οι καρτέλες μπορούν να ονομαστούν από το χρήστη ή να πάρουν το όνομα τους από την γραφική παράσταση που απεικονίζουν πχ. Activity Screen, 3D screen και 24 channel plots. Πατώντας δεξί κλικ μπορούμε να διαγράψουμε, προσθέσουμε και να μετονομάσουμε τις καρτέλες.

Statistics Bar: Εδώ εμφανίζονται πληροφορίες όπως AE counts, Total AE Hits, Total AE Events, Total Waveforms, Cumulative Counts, Cumulative Energy, Time of test κ.ά. Με αυτά τα στοιχεία παίρνουμε ένα πολύ χρήσιμο σετ στατιστικών πληροφοριών.

Status Bar: Περιέχει τις επιλογές που έχουμε ενώ τρέχουμε ένα πείραμα όπως Replay, Abort test, Test paused κτλ. Δίπλα από το text status field εμφανίζεται το όνομα του αρχείου που αποθηκεύεται το αποτέλεσμα του τεστ. Δίπλα από αυτό βρίσκεται το system diagnostics text field.

File Menu:

New Layout: Δημιουργεί νέο Layout με τις default ρυθμίσεις και αφαιρεί όλα τα παλιά layout από την οθόνη.

Open Layout: Ανοίγει layouts από αρχείο

Save Layout/Save Layout as: Αποθηκεύει το Layout

Specify Data Folder: Επιλέγουμε τον φάκελο στο σκληρό δίσκο όπου αποθηκεύονται τα Layouts.

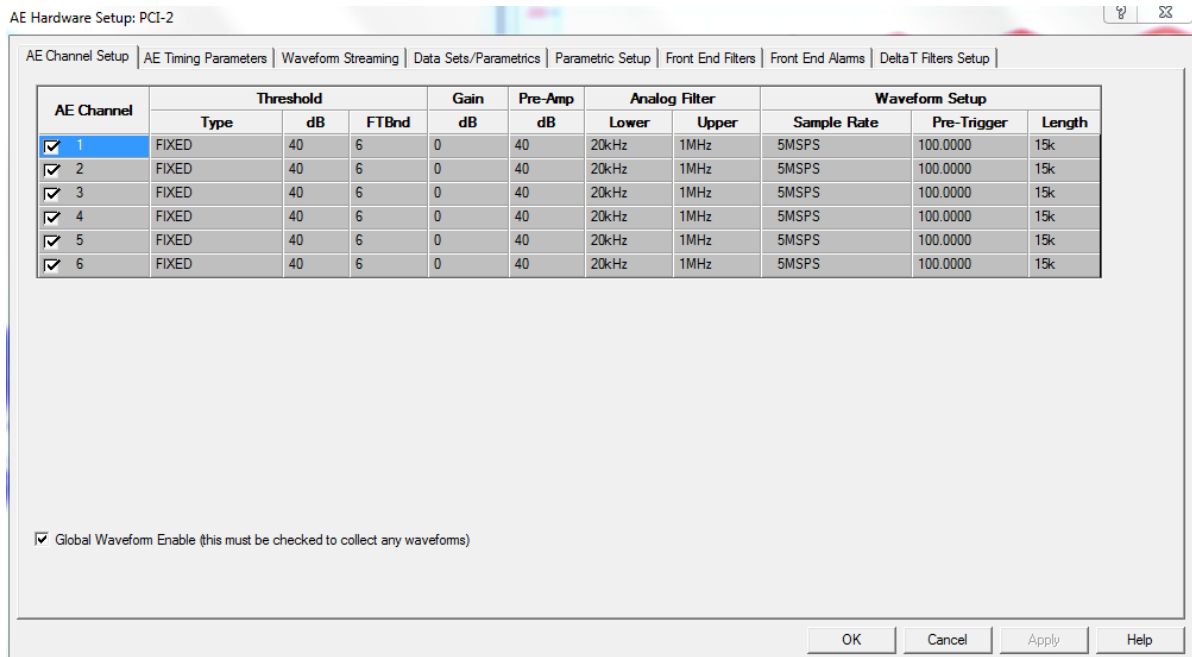
Print Page: Τυπώνει τις γραφικές παραστάσεις του Layout

Export to JPG: Αποθηκεύει το layout σε μορφή εικόνας jpeg

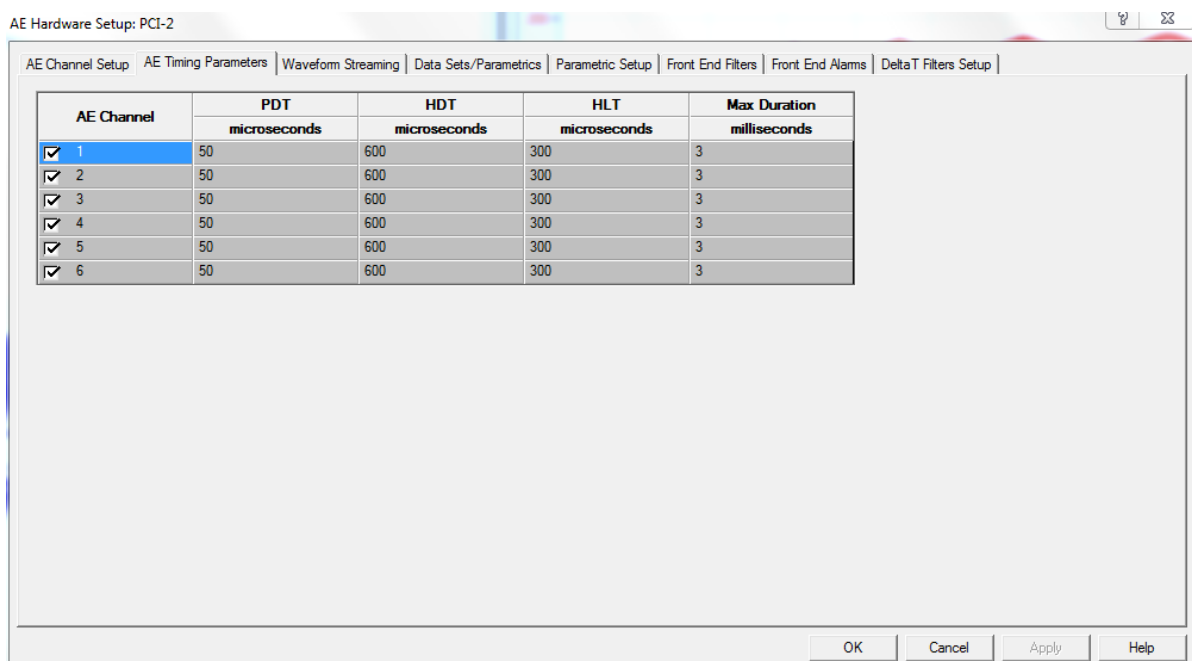
3.4.2 Παραμετροποίηση του λογισμικού για λήψη δεδομένων

Για τη συλλογή και περαιτέρω ανάλυση των μετρήσεων θα πρέπει να γίνει σωστή παραμετροποίηση του συστήματος η οποία επιτυγχάνεται από το Acquisition Setup Menu. Στη συνέχεια περιγράφονται εν συντομία, οι ρυθμίσεις που έγιναν προκειμένου να έχουμε τη βέλτιστη δυνατή απόδοση του συστήματος.

Στην καρτέλα **AE Channel Setup** του AE Hardware Setup της PCI-2 κάρτας (Σχήμα 3.10), επιλέγουμε την ενεργοποίηση των καναλιών (6 συνολικά), την προενίσχυση που αυτά έχουν καθώς και το κατώφλι (threshold) πάνω από το οποίο θα καταγράφουν χτυπήματα (hits). Ρυθμίζουμε επίσης τις τιμές του αναλογικού φίλτρου (20kHz – 1MHz) , το ρυθμό δειγματοληψίας καθώς και το μήκος σε byte (length) ή το χρόνο σε μs πριν την ενεργοποίηση (pre-trigger time) για την καταγραφή των κυματομορφών σε κάθε hit.



Σχήμα 3.10 Επιλογή ρυθμίσεων από την καρτέλα *AE Channel Setup* του *AE Hardware Setup PCI-2*

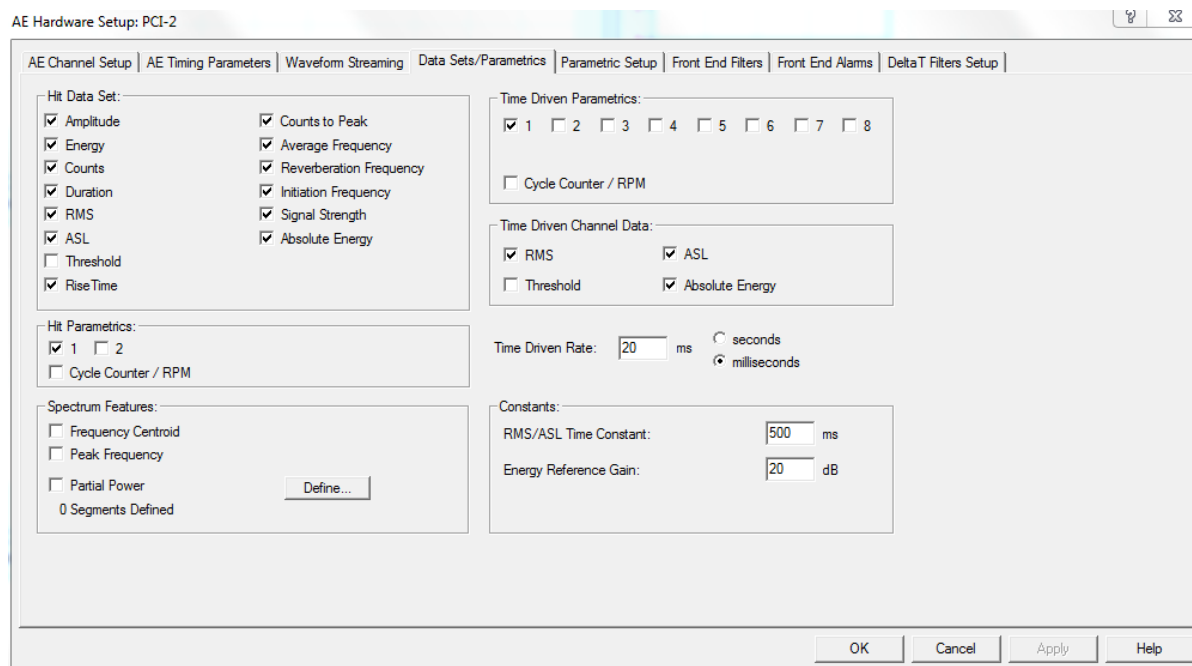


Σχήμα 3.11 Επιλογή ρυθμίσεων από την καρτέλα *AE Timing Parameters Setup* του *AE Hardware Setup PCI-2*

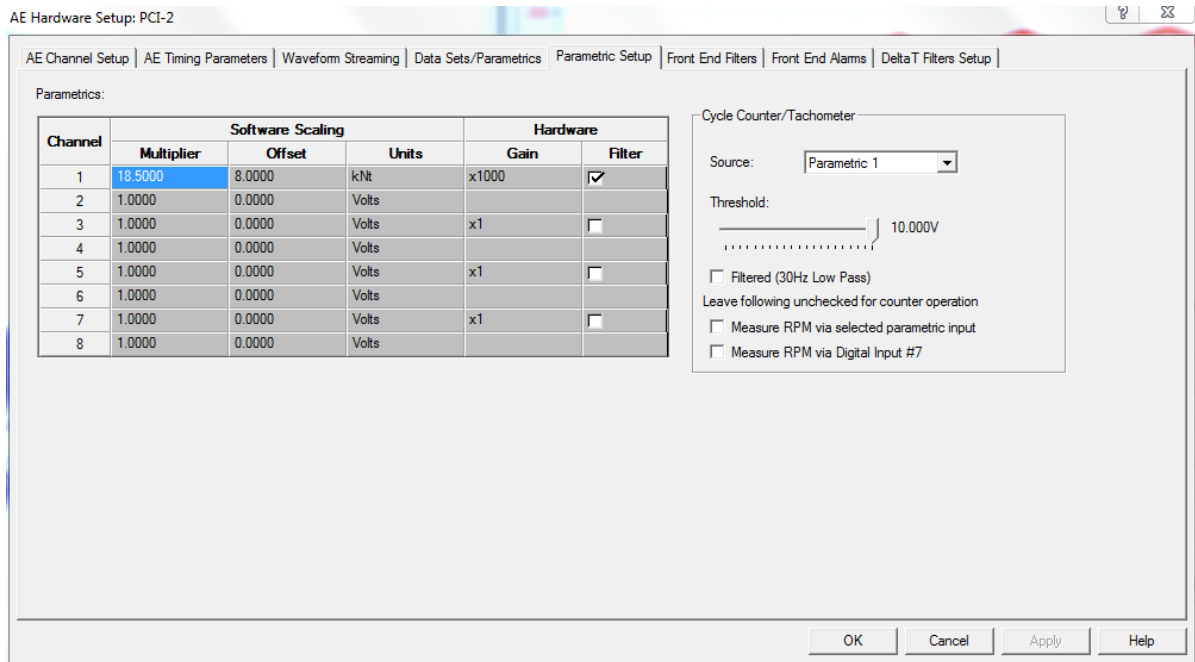
Στην καρτέλα **AE Timing parameters** του AE Hardware Setup της PCI-2 κάρτας (Σχήμα 3.11), μπορούμε να ενεργοποιήσουμε/απενεργοποιήσουμε τα κανάλια και να διαμορφώσουμε τα Peak Definition Time (PDT), Hit Definition Time (HDT) και Hit Lockout Time (HLT). Οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι βασικές ώστε το σύστημα με τη χρήση κυλιόμενων παραθύρων προκαθορισμένης από το χρήστη διάρκειας να μπορεί να εντοπίσει στην κυματομορφή την κορυφή της και το τέλος της χωρίς να λάβει υπόψη πιθανές ανακλάσεις και σκεδάσεις που εμφανίζονται στην ουρά της κυματομορφής.

Στην καρτέλα **Data Sets/Parametrics** του AE Hardware Setup της PCI-2 κάρτας (Σχήμα 3.12), μπορούμε να επιλέξουμε ποιές πληροφορίες του ακουστικού σήματος θέλουμε να λαμβάνουμε από το πρόγραμμα όπως πλάτος, ενέργεια κ.ά. Υπάρχουν δύο σετ δεδομένων, τα δεδομένα που καταγράφονται όταν ανιχνευτεί (βάσει του threshold) ένα hit (hit driven data) και τα δεδομένα που καταγράφονται συνεχώς ανεξάρτητα από το αν έχει γίνει ή όχι ένα hit (time driven data). Η μέγιστη δειγματοληψία στην τελευταία περίπτωση είναι κάθε 1ms ενώ μπορούν να καταγράφονται οι παράμετροι RMS, ASL, threshold και απόλυτη ενέργεια.

Τέλος, στην καρτέλα **Parametric Setup** του AE Hardware Setup της PCI-2 κάρτας (Σχήμα 3.13), μπορούμε να βαθμονομήσουμε τις παραμετρικές εισόδους που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή αναλογικών σημάτων από άλλους αισθητήρες.

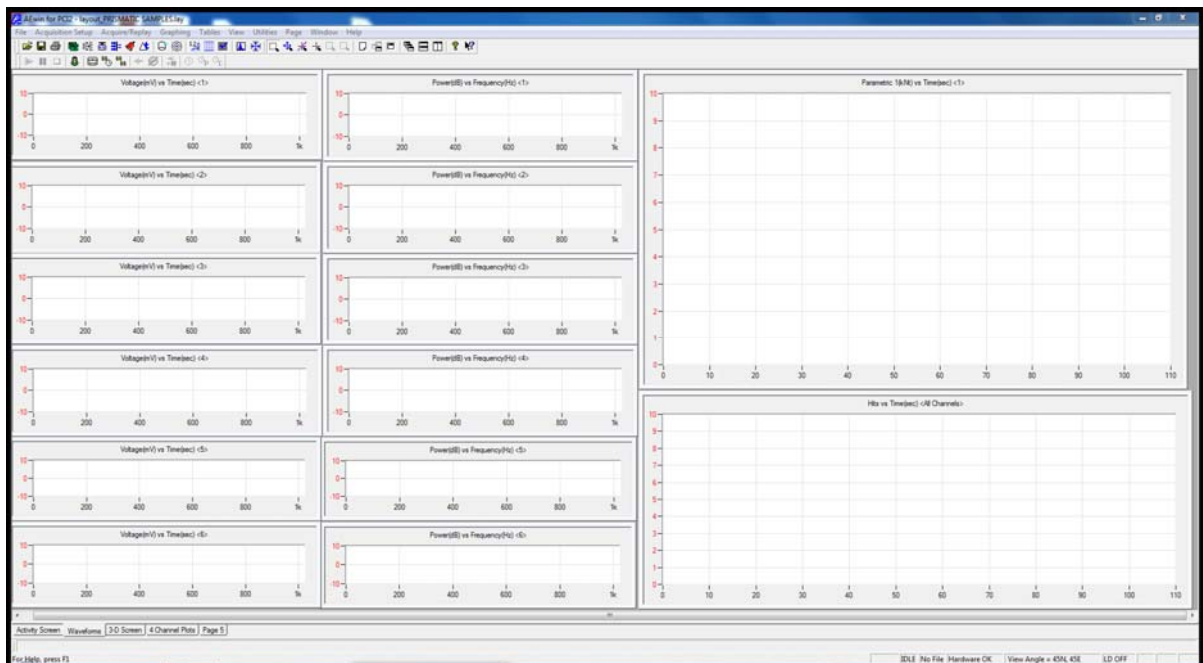


Σχήμα 3.12 Επιλογή ρυθμίσεων από την καρτέλα Data Sets/parametrics του AE Hardware Setup PCI-2

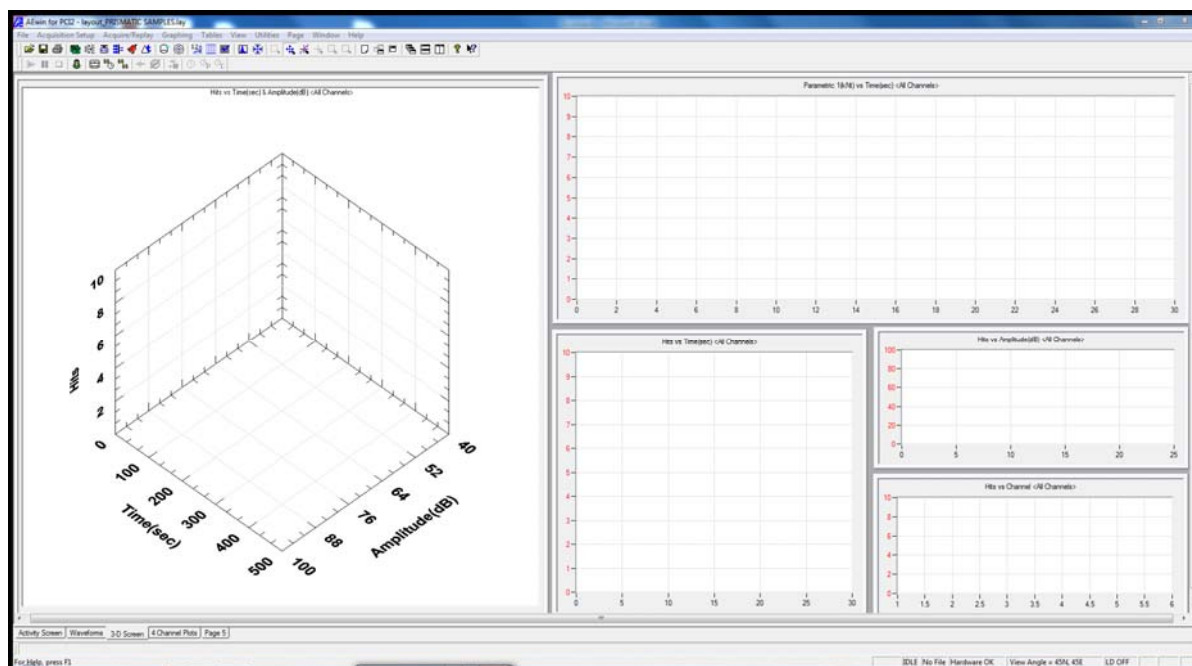


Σχήμα 3.13 Επιλογή ρυθμίσεων από την καρτέλα Parametric Setup του AE Hardware Setup PCI-2

Στα Σχήματα 3.14 και 3.15 απεικονίζονται οι διάφορες καρτέλες του Layout του πειράματος που φτιάχτηκαν για την απεικόνιση των μετρήσεων κατά τη συλλογή τους.



Σχήμα 3.14 Το Layout του πειράματος



Σχήμα 3.15 Το Layout του πειράματος

3.4.3 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.)

Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για την παρουσίαση και ανάλυση των δεδομένων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν και οι διάφορες δυνατότητες του προγράμματος θα φανούν στο επόμενο κεφάλαιο όπου και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα .

3.5 Μηχανή φόρτισης δοκιμίων

Για τη μονοαξονική φόρτιση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική μηχανή ALPHA3-3000 δυναμικότητας 3000kN του γερμανικού οίκου Form+Test (Σχήμα 3.17). Έχει τη δυνατότητα μέσω της μονάδας ελέγχου (DIGIMAXX C20) του επιβαλλόμενου φορτίου να ρυθμίζεται από το χρήστη ο τρόπος φόρτισης του δοκιμίου (γραμμικός, βηματικός, κυκλικός, κλπ). Το αναλογικό σήμα του μετρητή πίεσης χρησιμοποιείται ως είσοδος στο σύστημα καταγραφής των ΑΕ (κανάλι parametrics) ώστε να υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ φορτίου και καταγραφής ακουστικών σημάτων.

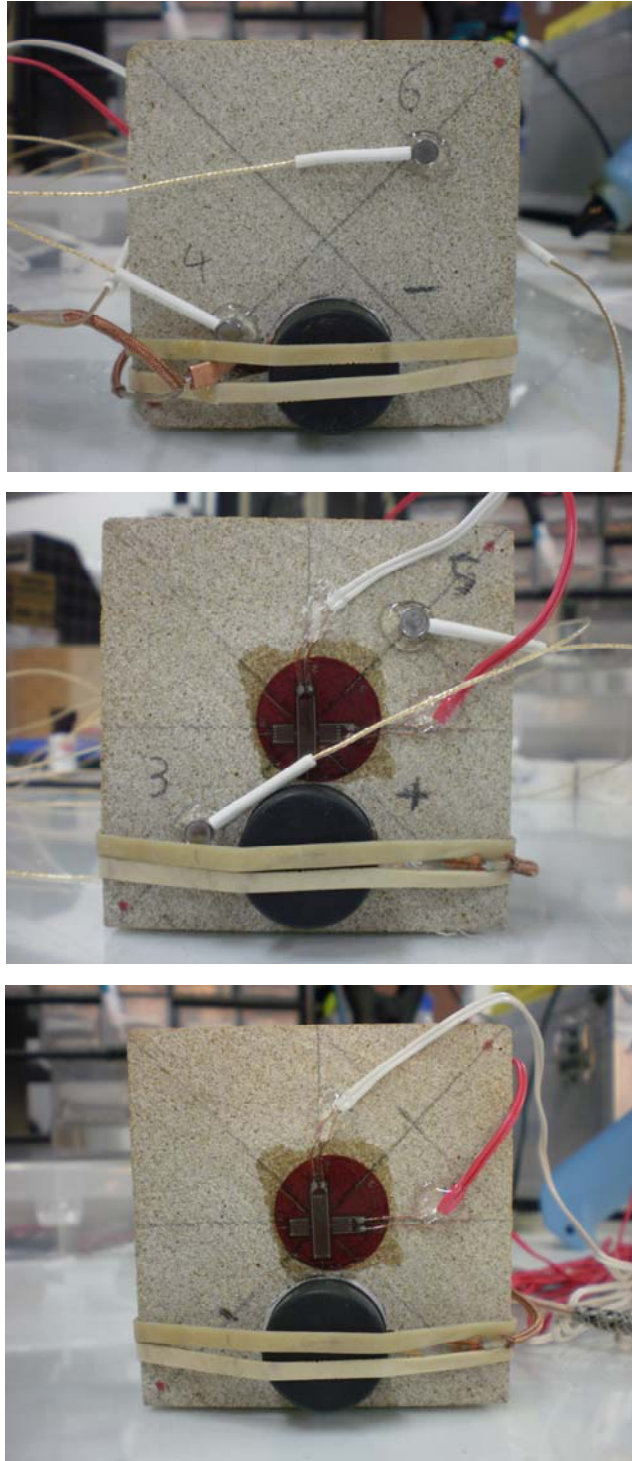
Κυψέλη φορτίου (load cell) τοποθετημένη κάτω από την πλάκα έδρασης των δοκιμίων μπορεί να μετράει ανεξάρτητα το επιβαλλόμενο φορτίο ώστε σε συνδυασμό με αισθητήρα μέτρησης μηχανικής παραμόρφωσης (strain gauge) προσαρμοσμένο πάνω στο δοκίμιο να μπορεί να καταγραφεί ανεξάρτητα η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (stress – strain) του υλικού.



Σχήμα 3.17 Πλαίσιο μονοαξονικής φόρτισης και μονάδα ελέγχου ALPHA3-3000
(Form+Test, 3000kNt)

3.6 Δοκίμια

Για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με γραμμική και κυκλική φόρτιση, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες δοκιμίων παρόλιθου, κυβική και ορθογώνια (Φωτ. 3.2 και 3.3).



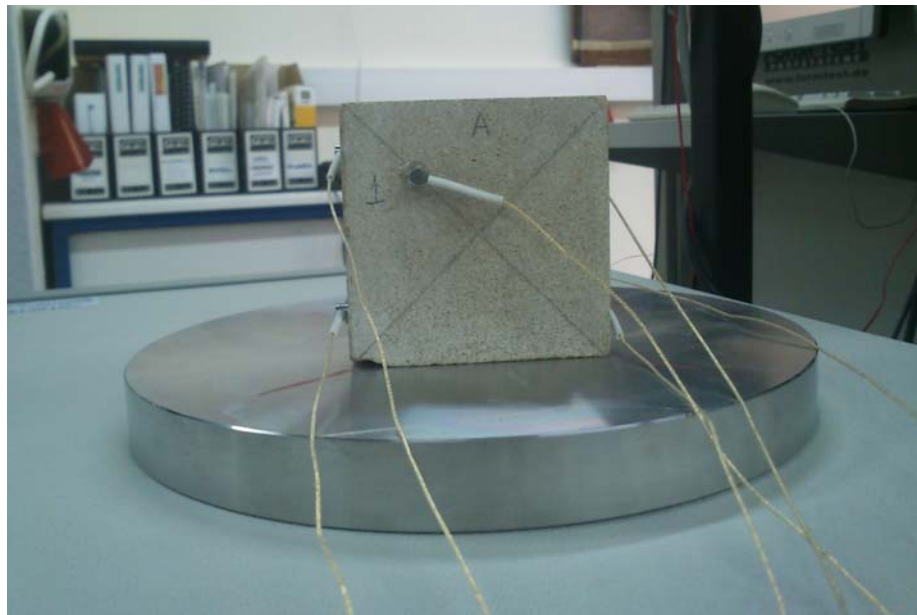
Φωτογραφία 3.1 Το πρισματικό δοκίμιο κατά τη φάση προετοιμασίας-προσαρμογής των αισθητηρίων πάνω σε αυτό.



Φωτογραφία 3.2 Το πρισματικό δοκίμιο τοποθετημένο στη μηχανή φόρτισης. Διακρίνονται οι αισθητήρες AE και τα καλώδια του αισθητήρα strain gauge.

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες τοποθετήθηκαν πάνω στα δείγματα με τη χρήση μικρής ποσότητας κόλλας σιλικόνης (θερμοκόλλα) και εφαρμογή πίεσης πάνω σε αυτά. Η κόλλα έπαιξε το ρόλο του υλικού σύζευξης (couplant) αλλά και του υλικού στερέωσης (bond). Ιδιαίτερη προσοχή χρειαζόταν κατά την τοποθέτηση λόγω του μικρού χρόνου πήξης της κόλλας (2-3 sec). Σε περίπτωση που δεν εξασφαλιζόταν η παραλληλία των επιφανειών αισθητήρα και δοκιμίου, ο αισθητήρας αφαιρούνταν προσεκτικά και επανατοποθετούταν. Οποιοσδήποτε άλλος τρόπος προσαρμογής των αισθητήρων pico πάνω στα δοκίμια απέτυχε λόγω του μικρού μεγέθους δοκιμίου και αισθητήρα που δυσκόλευε τη χρήση ελαστικών ή/και κολλητικών ταινιών .

Στις Φωτογραφίες 3.1 – 3.4 απεικονίζονται τα δείγματα με τοποθετημένους τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες καθώς και τον αισθητήρα strain gauge για τη μέτρηση της παραμόρφωσης του δείγματος (εγκάρσια και αξονική) κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Φωτογραφία 3.3 Το κυβικό δοκίμιο με τους αισθητήρες ΑΕ τοποθετημένους πάνω του.



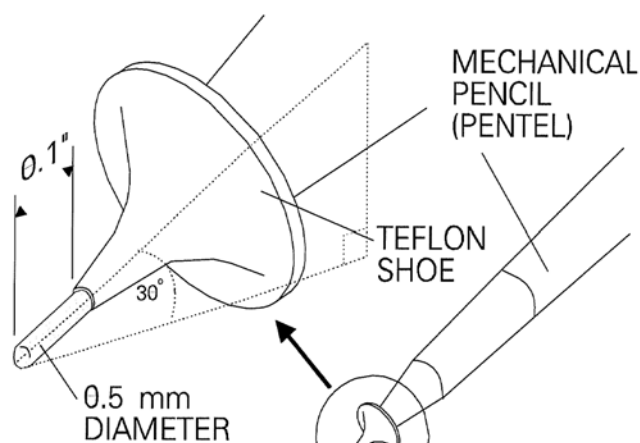
Φωτογραφία 3.4 Το κυβικό δοκίμιο τοποθετημένο στη συσκευή ανεμπόδιστης θλίψης, έτοιμο για τη δοκιμή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

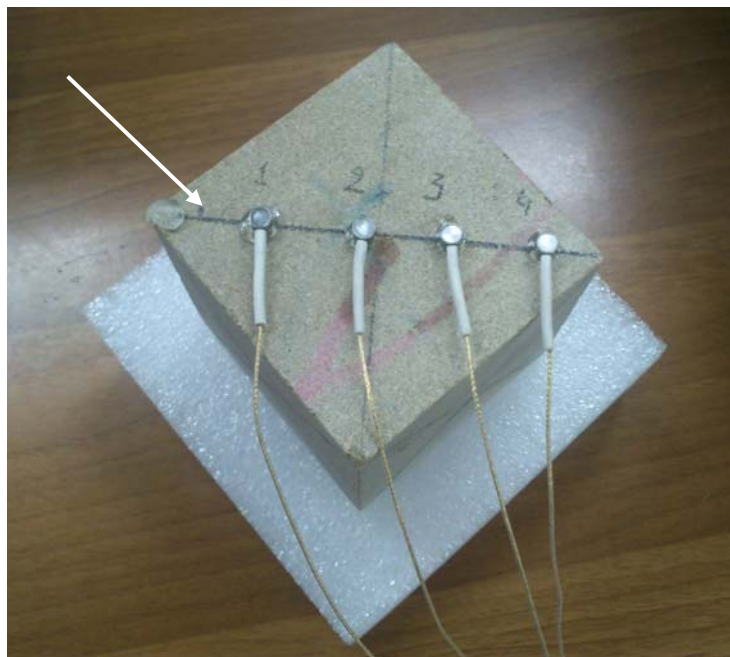
Πειραματικά Αποτελέσματα

4.1 Δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού (lead pencil break test)

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM-E976, πηγές ΑΕ προσομοιώνονται από σπασίματα μύτης μολυβιού στην επιφάνεια των υπό εξέταση δοκιμίων, προκειμένου να διαπιστωθεί ότι οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες είναι σωστά τοποθετημένοι και ανιχνεύουν τα σήματα ΑΕ. Μία τέτοια πηγή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1 και αναφέρεται ως πηγή Hsu – Nielsen. Ο παραγόμενος παλμός στην περίπτωση αυτή έχει μικρή διάρκεια με καλή επαναληψιμότητα και είναι ένας εύκολος και φθηνός τρόπος ελέγχου καλής λειτουργίας και



Σχήμα 4.1 Πηγή ΑΕ Hsu-Nielsen



Φωτογραφία 4.1 Κυβικό δοκίμιο με τοποθετημένους τους 4 αισθητήρες για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένισης με τη δοκιμή του σπασίματος μύτης μολυβιού (με το βέλος σημειώνεται η θέση των σπασιμάτων)

σωστής τοποθέτησης των αισθητήρων. Ο τυποποιημένος αυτός έλεγχος περιλαμβάνει το σπάσιμο μυτών μηχανικού μολυβιού πάχους 0.5mm σκληρότητας 2H και μήκους 3mm στην επιφάνεια των δοκιμίων και ανάμεσα από τους αισθητήρες, προκειμένου να διαπιστωθεί ότι όλοι οι αισθητήρες καταγράφουν τα σήματα των ΑΕ και δεν υπάρχει κάποια περιοχή του υλικού από την οποία δεν λαμβάνονται σήματα. Ειδικό κάλυμμα του μηχανικού μολυβιού (Nielsen shoe) εξασφαλίζει πάντα σταθερή γωνία σπασίματος της μύτης (30°) και διασφαλίζει ότι η μεταλλική άκρη του μολυβιού δε θα ακουμπήσει κατά το σπάσιμο της μύτης στην επιφάνεια του δοκιμίου παράγοντας έτσι επιπλέον ακουστικά σήματα (Σχήμα 4.1).

4.1.1 Υπολογισμός συντελεστή εξασθένισης (attenuation factor, ac)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένισης του παρόλιθου, τοποθετήθηκαν πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου και κατά μήκος της διαγωνίου του, 4 αισθητήρες σε απόσταση 2cm μεταξύ τους (Φωτ. 4.1). Σε μικρή απόσταση και επί της ευθείας που τοποθετήθηκαν, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σπασίματος μύτης μολυβιού και καταγράφηκαν τα πλάτη σε κάθε αισθητήρα καθώς και οι κυματομορφές. Η εξασθένιση που παρατηρήθηκε με την απόσταση ήταν περίπου 5dB ανά 2cm που αντιστοιχεί σε

συντελεστή εξασθένισης 0.25dB/mm. Η εξασθένιση αυτή βρίσκεται μέσα στην περιοχή 1 – 10 dB/cm στην περιοχή συχνοτήτων 100kHz – 1MHz για τα πετρώματα. (Σχήμα 2.8).

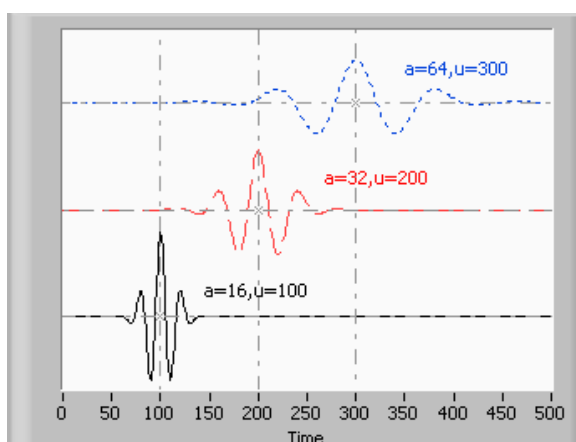
Στις δοκιμές των σπασιμάτων που πραγματοποιήθηκαν, καταγράφηκαν χρόνοι ανόδου (RT) από 10 – 30μs με χρονική διάρκεια των κυματομορφών που έφτανε περίπου τα 2ms.

4.1.2 Φασματική ανάλυση των κυματομορφών της ηχητικής πηγής

Η καταγραφή των κυματομορφών κάθε ακουστικού γεγονότος (AE hit) από τους αισθητήρες, επιτρέπει την μετέπειτα φασματική τους ανάλυση όπου μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της πηγής προέλευσης και πιθανά για το μηχανισμό της ακουστικής εκπομπής (π.χ. θραύση λόγω εφελκυστικών ή/και διατμητικών τάσεων).

Το συχνοτικό περιεχόμενο της κυματομορφής μπορεί να προκύψει από το μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) με τη χρήση του λογισμικού NOESIS. Ωστόσο, από το μετασχηματισμό Fourier δε μας παρέχεται καμία πληροφορία για τη χρονική εμφάνιση των επιμέρους χαρακτηριστικών της κυματομορφής. Η πληροφορία αυτή μπορεί να αποδοθεί από το συνεχή μετασχηματισμό κυματιδίων (Continuous Wavelet Transform, CWT) όπου η κυματομορφή αποσυντίθεται τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων.

Στο μετασχηματισμό κυματιδίων, η κυματομορφή αναλύεται σε άθροισμα μητρικών συναρτήσεων (κυματίδια) που μπορεί να είναι χρονικά μετατοπισμένες και διαφορετικής κλίμακας. Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται ένα κυματίδιο μετατοπισμένο στο χρόνο και υπό διαφορετική κλίμακα.



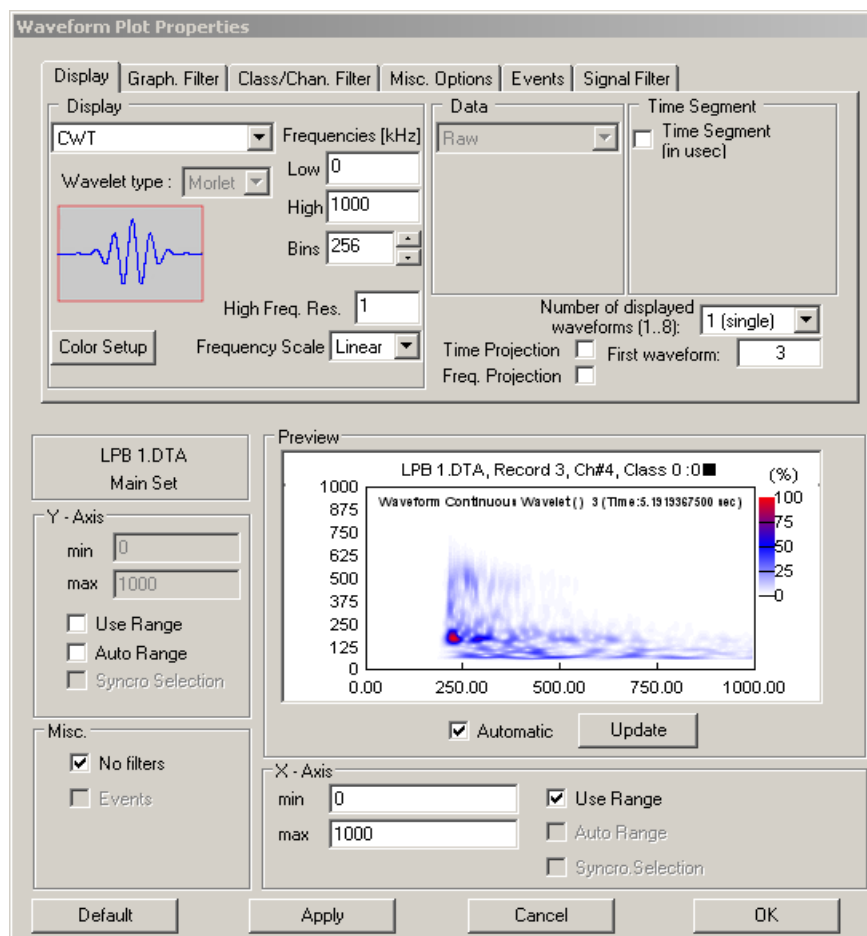
Σχήμα 4.2 Μητρική συνάρτηση κυματιδίου μετατοπισμένη στο χρόνο και υπό διαφορετική κλίμακα

Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου μίας συνάρτησης $x(t)$ ορίζεται ως εξής:

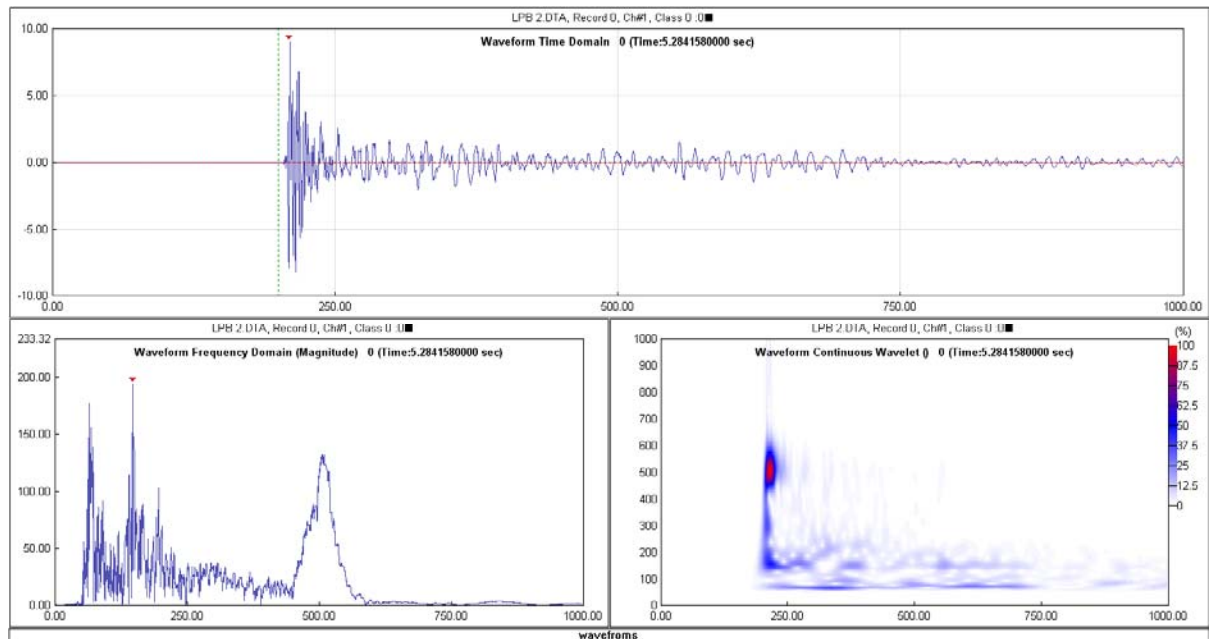
$$\text{CWT}_x^\Psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (4.1)$$

όπου οι παράμετροι τ και s είναι παράμετροι χρονικής μετατόπισης και κλίμακας, αντίστοιχα και Ψ είναι η μητρική συνάρτηση κυματιδίου με την οποία συγκρίνεται κατά τμήματα η $x(t)$ σε διαφορετική κλίμακα και μετατόπιση.

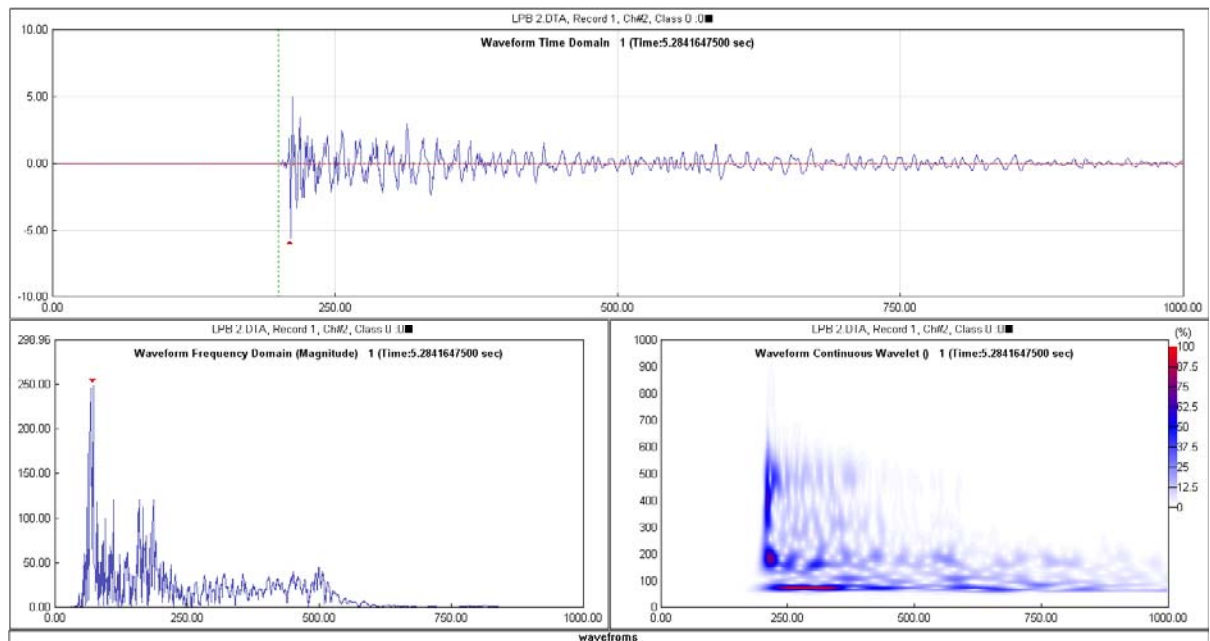
Η φασματική ανάλυση των κυματομορφών (FFT, CWT, κ.ά.) μπορεί να πραγματοποιηθεί με το λογισμικό NOESIS όπου από την αντίστοιχη καρτέλα επιλογών ανάλυσης κυματομορφών (Σχήμα 4.3) μπορούμε να παραμετροποιήσουμε το μετασχηματισμό που μας ενδιαφέρει. Για τις κυματομορφές που καταγράφηκαν από τις δοκιμές σπασίματος μύτης μολυβιού σε κάθε ένα από τους τέσσερις πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, πραγματοποιήθηκε φασματική ανάλυση Fourier και συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου με χρήση του κυματιδίου Morlet (Σχήμα 4.4 – 4.7).



Σχήμα 4.3 Καρτέλα επιλογών ανάλυσης κυματομορφών από το πρόγραμμα NOESIS.

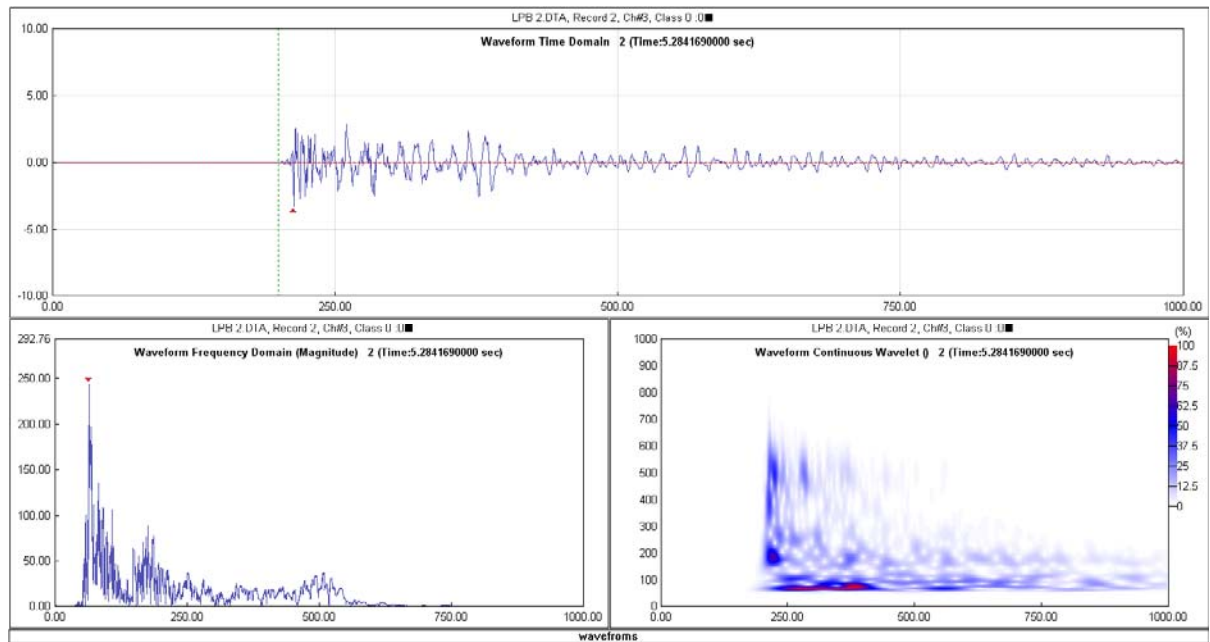


Σχήμα 4.4 Απεικόνιση κυματομορφής από δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού, της φασματικής της ανάλυσης και του συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίων στον 1^ο αισθητήρα.

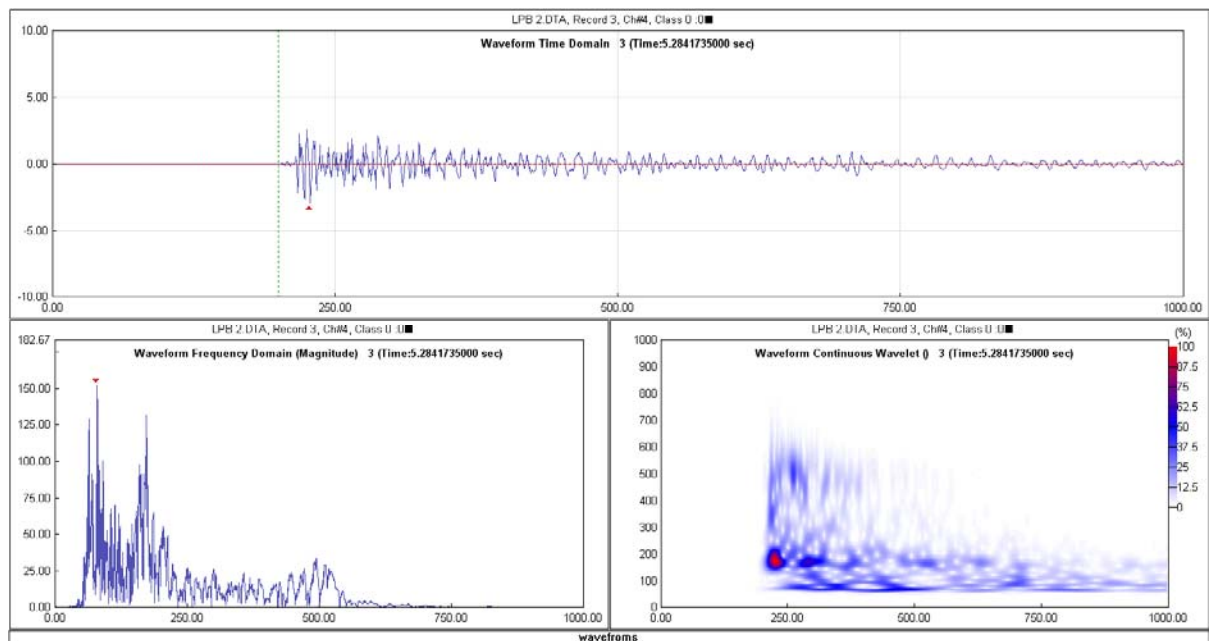


Σχήμα 4.5 Απεικόνιση κυματομορφής από δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού, της φασματικής της ανάλυσης και του συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίων στον 2^ο αισθητήρα.

Στον αισθητήρα που βρίσκεται πλησιέστερα στην πηγή AE (ch#1), εμφανίζεται στο διάγραμμα της φασματικής ανάλυσης μία έντονη κορυφή γύρω από τα 500kHz κατά την



Σχήμα 4.6 Απεικόνιση κυματομορφής από δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού, της φασματικής της ανάλυσης και του συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίων στον 3^ο αισθητήρα.



Σχήμα 4.7 Απεικόνιση κυματομορφής από δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού, της φασματικής της ανάλυσης και του συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίων στον 4^ο αισθητήρα.

άφιξη του κύματος (Σχήμα 4.4). Η ηψίσυχη αυτή κορυφή εξασθενίζει με την απόσταση όπως αυτό προκύπτει από την καταγραφή στους επόμενους αισθητήρες (ch#2 – ch#4) ενώ συνεχίζουν να εμφανίζονται φασματικά χαρακτηριστικά σε χαμηλότερες συχνότητες (γύρω από τα 200kHz και τα 70kHz) καταγεγραμμένα από όλους τους αισθητήρες.

4.2 Υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης κυμάτων

4.2.1 Δοκιμή AST (automatic sensor test)

Το AST (Automatic Sensor Testing) μας επιτρέπει την εκπομπή παλμών από τον αισθητήρα ενώ παράλληλα αυτός λαμβάνει σήμα, δηλαδή μετατρέπει τον αισθητήρα σε πομπό και ταυτόχρονα δέκτη. Με αυτόν τον τρόπο μας επιτρέπει να δούμε αν οι υπόλοιποι αισθητήρες λειτουργούν και λαμβάνουν κανονικά το εκπεμπόμενο ΑΕ σήμα, την ευαισθησία των αισθητήρων από το καταγραφόμενο πλάτος καθώς και τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων μέσα στο δοκίμιο από την διαφορά του χρόνου άφιξης στον καθένα. Στην καρτέλα ρυθμίσεων του προγράμματος συλλογής δεδομένων, AEWin (Σχήμα 4.8) έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε τη διάρκεια του παλμού (τυπικές τιμές 10 – 20 μ s) ώστε να προσομοιάσουμε έναν δέλτα-παλμό, το χρόνο μεταξύ των επαναλαμβανόμενων παλμών (200 μ s) ώστε να αποκλείσουμε την καταγραφή ανακλάσεων σε επόμενους παλμούς καθώς και το πλήθος των παλμών για τον υπολογισμό της μέσης τιμής του ζητούμενου ΔΤ. Η καρτέλα των αποτελεσμάτων της AST δοκιμής για τον υπολογισμό του χρόνου άφιξης των παλμών στους αισθητήρες (και άρα της ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων) απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9.

Η δοκιμή AST που πραγματοποιήθηκε για το κυβικό δοκίμιο (Φωτ. 4.1) με τη διάταξη των αισθητήρων κατά μήκος της πλευρικής διαγωνίου και τον 1^ο αισθητήρα να λειτουργεί ως πομπο-δέκτης, έδωσε ταχύτητα ακουστικών κυμάτων περίπου 2 km/s. Η ταχύτητα αυτή είναι αρκετά μικρή και θα πρέπει να αντιστοιχεί σε επιφανειακά ή/και εγκάρσια κύματα λόγω της θέσης των αισθητήρων στην ίδια επιφάνεια του δείγματος.



Φωτογραφία 4.2 Η πειραματική διάταξη για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ακουστικών κυμάτων.

Σχήμα 4.8 Καρτέλα ρυθμίσεων AST από το πρόγραμμα AEwin

```

*****
****          Auto-Sensor Test          ****
**** Thu May 01 10:39:03 2014          ****
*****

PROGRAM          AEwin for PCI2
THIS FILE        C:\Users\USER\Desktop\MPAKOGEWRGOS_24_Apr -\1 May
2014\ast cubic sandstone.AST

PULSES OUTPUT    10
PULSE WIDTH      20 usec
PULSE INTERVAL   200 msec

PULSER
  1
REC #REC  DeltaT  AMP  ENERGY  DURATION  COUNTS
  1   10     0     99    284     999     203
  2   10    22     77     63     968     164

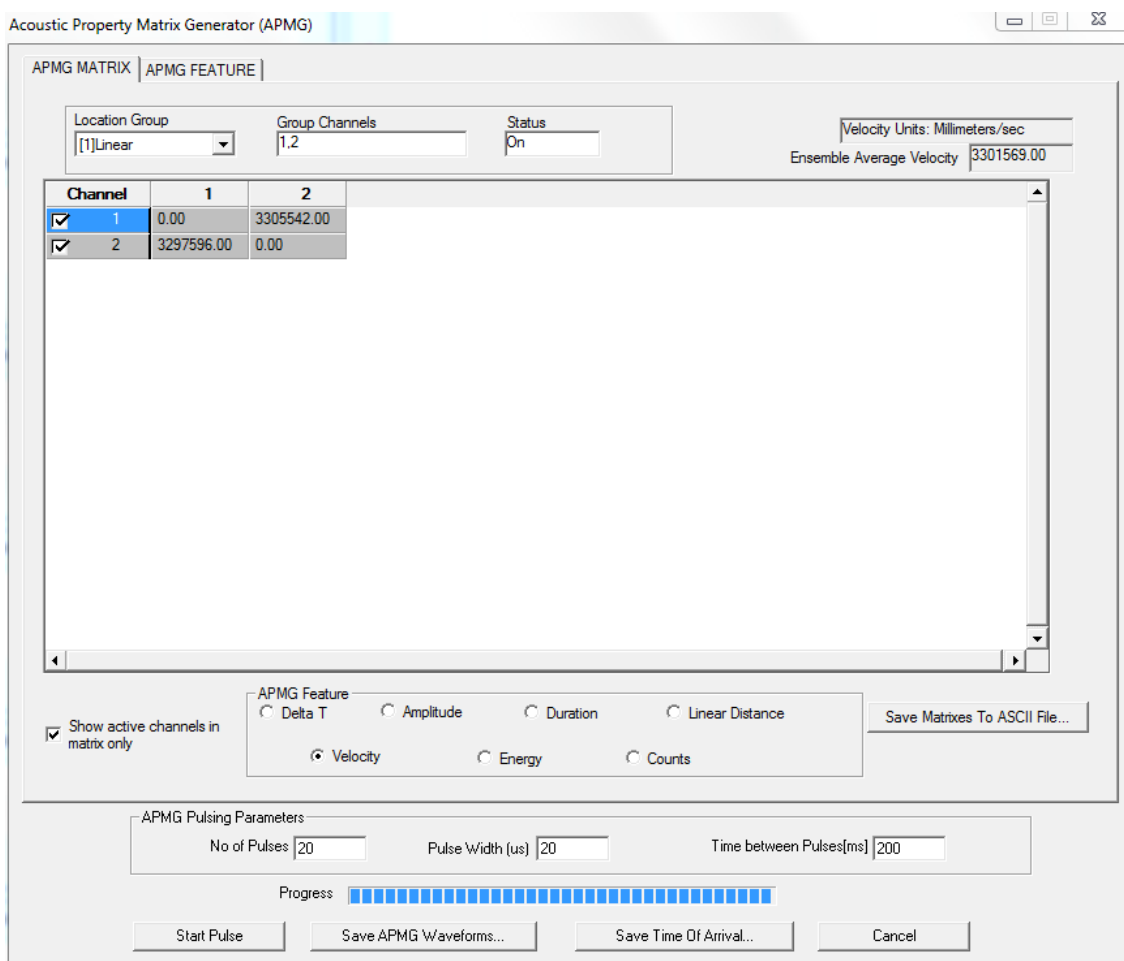
PULSER
  2
REC #REC  DeltaT  AMP  ENERGY  DURATION  COUNTS
  1   10    22     77     67     959     180
  2   10     0     99    261    1000     202

```

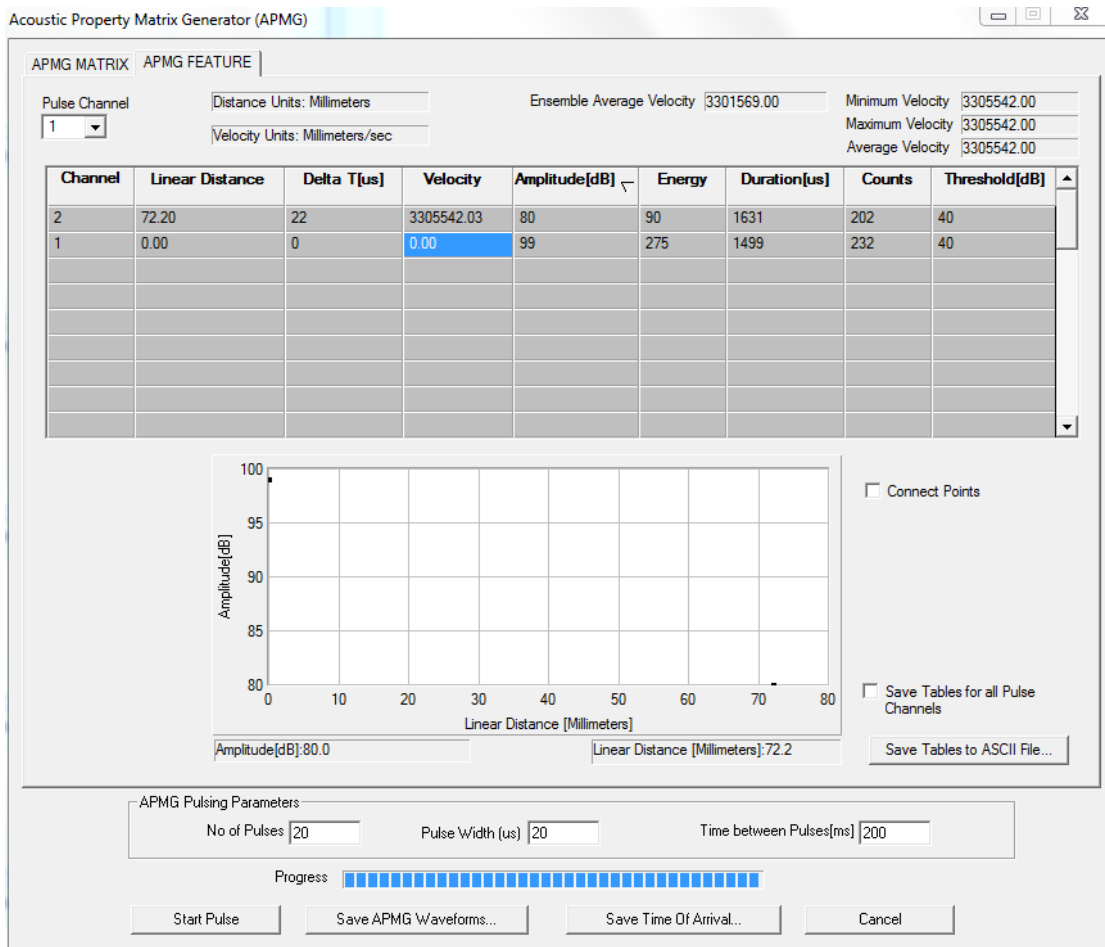
Σχήμα 4.9 Αποτελέσματα της διαδικασίας AST με χρήση 2 αισθητήρων για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κομμάτων στο δοκίμιο.

4.2.2 Δοκιμή APMG (Acoustic Property Matrix Generator)

Η ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων (καθώς και οι υπόλοιπες ακουστικές παράμετροι) μπορούν αν υπολογιστούν με τη δοκιμή APMG (Acoustic Property matrix Generator). Από τις επιλογές της αντίστοιχης καρτέλας, καταχωρούνται οι συντεταγμένες των αισθητήρων πάνω στο δείγμα και από την προκαθορισμένη λειτουργία κάποιων εξ αυτών ως πομπών, υπολογίζεται κατά μέσο όρο η ταχύτητα διάδοσης, μετά από πολλές επαναλήψεις που καθορίζει ο χρήστης (Σχήμα 4.10 και 4.11). Επιπλέον, υπολογίζονται και όλες οι υπόλοιποι παράμετροι των ακουστικών εκπομπών (πλάτος, ενέργεια, διάρκεια, κλπ). Οι τιμές αυτές στη συνέχεια μπορούν να αποθηκευτούν για περαιτέρω χρήση και ανάλυση. Τοποθετώντας 2 αισθητήρες σε παράλληλες πλευρές του δοκιμίου και αντικριστά μεταξύ τους όπου η απόσταση είναι 72.2 mm, η μέση τιμή της ταχύτητας βρέθηκε ότι είναι $v_p=3305$ m/s. Για την τιμή αυτή, η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων, βάσει της σχέσης $v_s=0.6v_p$ προκύπτει ότι είναι 1983m/s, τιμή που είναι σε συμφωνία με την ταχύτητα που υπολογίστηκε προηγουμένως με τη δοκιμή AST.



Σχήμα 4.10 Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης ακουστικού σήματος

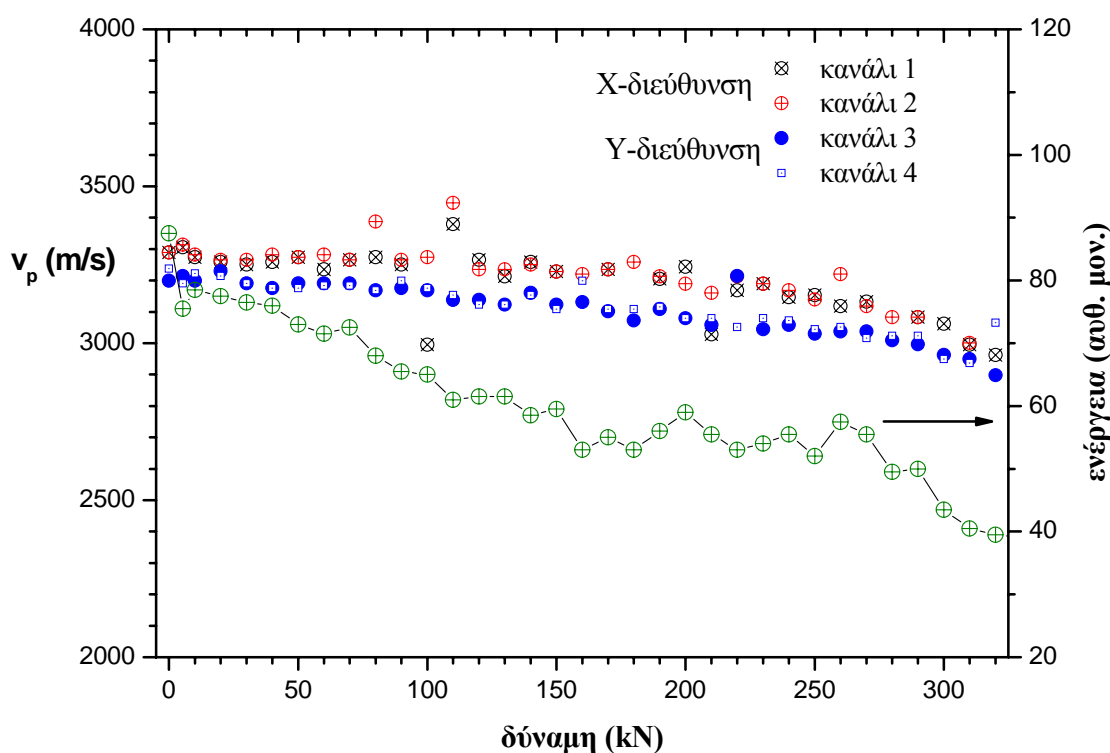


Σχήμα 4.11 Καρτέλα καταχώρησης και υπολογισμού των παραμέτρων κατά την εκπομπή – λήψη ηχητικών παλμών για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων στο υπό μελέτη δοκίμιο.

4.3 Μέτρηση ταχύτητας διάδοσης ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης δύναμης

Επειδή η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων (εγκάρσιων και διαμηκών) είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης πίεσης, ο παράγοντας αυτός θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό της θέσης των πηγών ΑΕ. Τα ελαστικά κύματα δηλαδή που παράγονται κατά τη δημιουργία των μικρορωγμών, θα πρέπει να διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες κατά τις διάφορες φάσεις εξέλιξης του πειράματος που η εφαρμοζόμενη πίεση αλλάζει και ειδικότερα κοντά στο όριο της θραύσης του υλικού. Έτσι, πραγματοποιήθηκε για το σκοπό αυτό ανεξάρτητο πείραμα όπου η πίεση αυξάνονταν σταδιακά με βηματικό τρόπο (10kN κάθε φορά) και εφαρμόστηκε η διαδικασία μέτρησης της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων με τη δοκιμή APMG, τοποθετώντας αντικριστά στις παράπλευρες επιφάνειες του κυβικού δοκιμίου τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Παράλληλα, καταγράφηκαν και οι υπόλοιπες παράμετροι της ΑΕ, προκειμένου να συσχετιστούν με την εφαρμοζόμενη δύναμη και την ταχύτητα που προκύπτει.

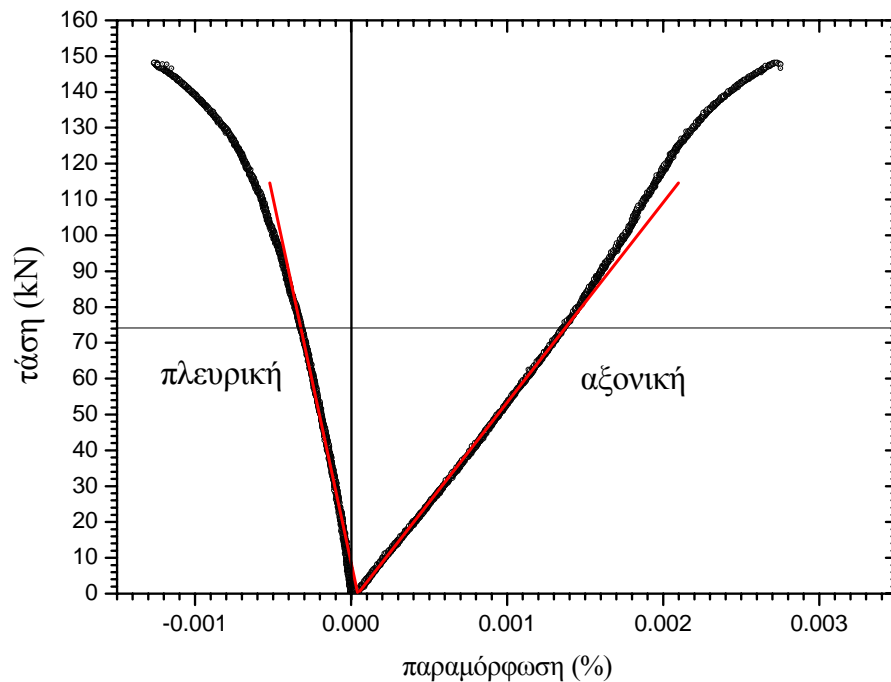
Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται η μεταβολή της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων, v_p για τις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις καθώς και η μεταβολή της ενέργειας. Στο τέλος του πειράματος που το δείγμα εμφανίζει ρωγμές, έχουμε μία ελάττωση της ταχύτητας και στις δύο διευθύνσεις κατά περίπου 10%.



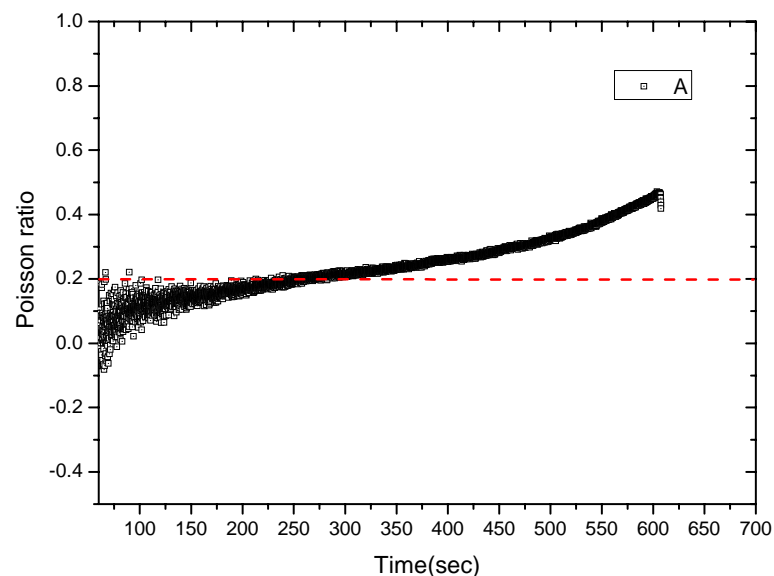
Σχήμα 4.12 Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης κυμάτων κατά τη μηχανική φόρτιση του κυβικού δοκιμίου ως τα 340 kN σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις.

4.4 Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης (stress – strain)

Κατά τη μονοαξονική δοκιμή γραμμική φόρτισης του ορθογώνιου δοκιμίου καταγράφηκε η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσής του κατά τη διεύθυνση της πίεσης (αξονική) και κάθετα σε αυτήν (πλευρική) (Σχήμα 4.13). Ο λόγος της πλευρικής προς την αξονική παραμόρφωση ορίζεται ως ο λόγος Poisson (Σχήμα 4.14) και έχει μία μέση τιμή περίπου 0.3 κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 4.13 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης κατά τη γραμμική φόρτιση του δοκιμίου



Σχήμα 4.14 Μεταβολή του λόγου Poisson κατά τη γραμμική φόρτιση του πρισματικού δοκιμίου

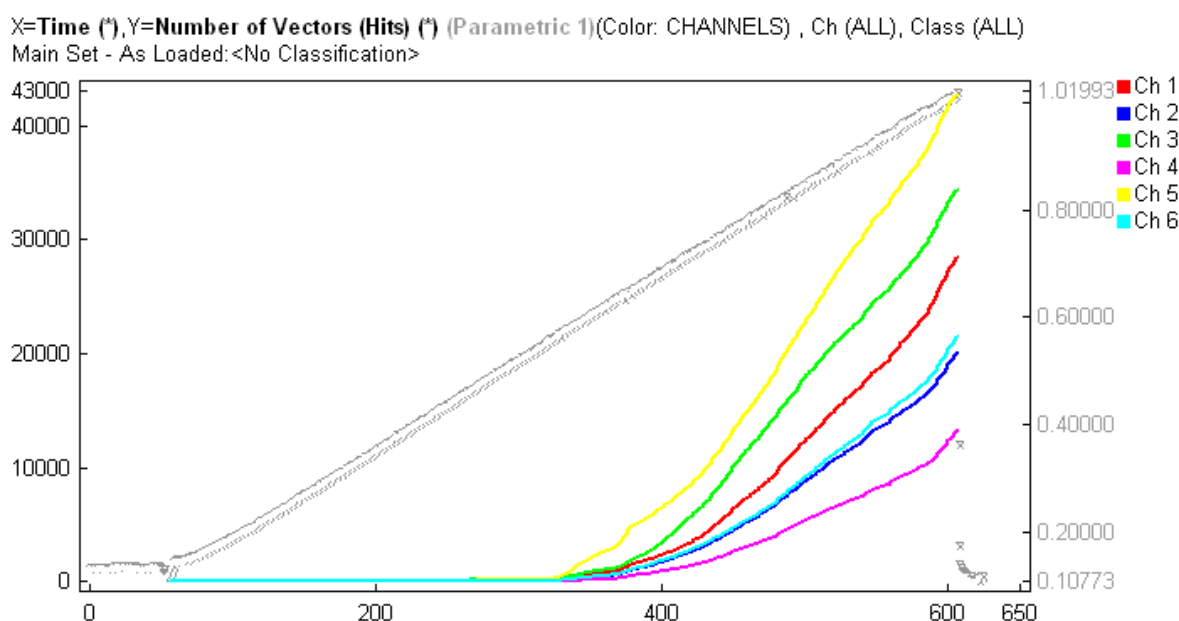
4.5 Ακουστικές εκπομπές από το πρισματικό δοκίμιο

4.5.1 Ανάλυση παραμέτρων ΑΕ

Στην 1^η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, το ορθογώνιο δοκίμιο υποβλήθηκε σε γραμμική συμπίεση με ρυθμό 0.3kN/s μέχρι και τη θραύση του. Καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης του, καταγράφηκαν από τους έξι πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες οι παράμετροι των ακουστικών εκπομπών και τα δεδομένα αναλύθηκαν και παρουσιάζονται στη συνέχεια με τη βοήθεια του λογισμικού ανάλυσης ακουστικών εκπομπών, NOESIS.

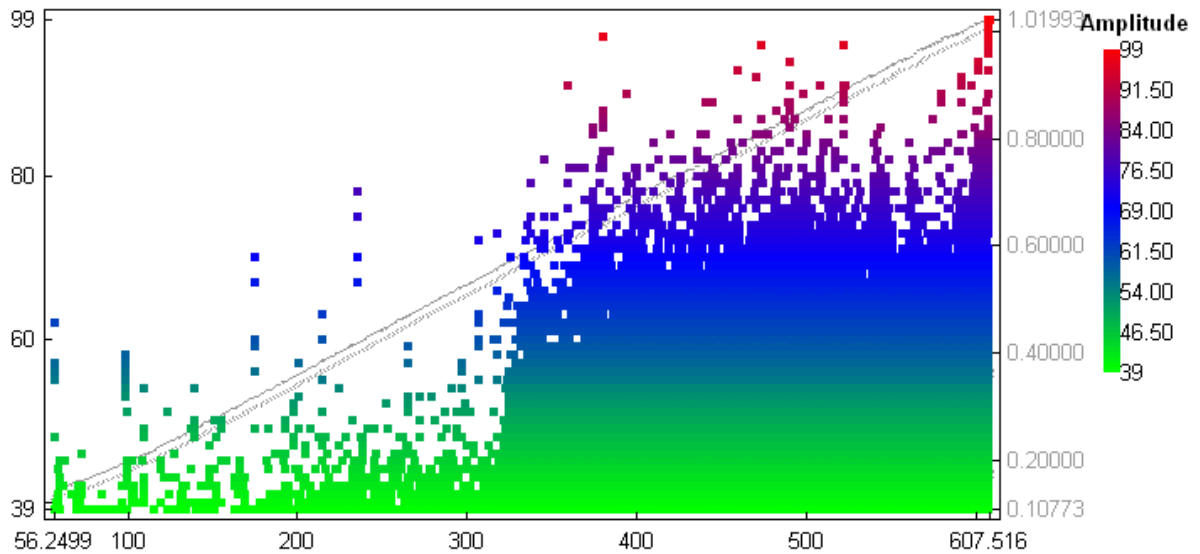
Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η αθροιστική καταγραφή των hits από την έναρξη της φόρτισης μέχρι και την τελική θραύση του δοκιμίου, για κάθε ένα από τα 6 κανάλια καταγραφής των σημάτων ΑΕ. Παρατηρούμε ότι σημαντική ακουστική δραστηριότητα ξεκινάει μετά τα 330s, δηλαδή λίγο μετά τη μέση της δοκιμής που ολοκληρώνεται στα 607s. Τα κανάλια 2 και 6 καταγράφουν σχεδόν ίδιο αριθμό hits, ενώ στα κανάλια 1, 3 και 5 η δραστηριότητα είναι πιο μεγάλη. Τα λιγότερα hits καταγράφει ο αισθητήρας 4.

Η κατανομή των πλατών (amplitudes) για όλα τα κανάλια κατά τη διάρκεια της δοκιμής, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.16. Από το γράφημα αυτό είναι εμφανές ότι η μεγαλύτερη δραστηριότητα εμφανίζεται μετά τα 320 s περίπου με πλάτη που καλύπτουν σχεδόν όλο το εύρος μέτρησης των αισθητήρων. Πριν από τα 320 s, ο αριθμός των γεγονότων είναι αρκετά μικρός (887 hits ή $\approx 0.6\%$ του συνόλου των γεγονότων) και τα στατιστικά στοιχεία των παραμέτρων για την περιοχή αυτή συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.15 Αθροιστική κατανομή των κτύπων (hits) ως προς το χρόνο, για κάθε ένα από τα 6 κανάλια. Στο γράφημα απεικονίζεται επίσης, η μεταβολή της εφαρμοζόμενης πίεσης καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

X=Time (*),Y=Amplitude (Parametric 1)(Color: Amplitude) , Ch (ALL), Class (ALL)
Main Set - As Loaded: <No Classification>



Σχήμα 4.16 Διάγραμμα μεταβολής του πλάτους του σήματος για όλα τα κανάλια κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος (έναρξη εφαρμογής φόρτισης έως τελική θραύση του δοκιμίου).

Πίνακας 4.1 Στατιστικά στοιχεία των παραμέτρων AE για τα πρώτα 320s του πειράματος

#	Feature	Unit	Min	Max	Avg	Sum
1	Time (*)	s	56.2499	319.768	229.222	203320
2	Amplitude	dBae	39	78	43	37929
3	Channel		1	6	4	3120
4	Parametric 1		0.118412	0.553606	0.400943	355.637
5	Risetime	us	0	511	6	5197
6	Counts to Peak		1	21	2	1524
7	Counts		1	284	6	5630
8	Energy	EC#	0	52	1	563
9	Duration	us	0	2960	49	43066
10	Average Frequency	kHz	0.000	1.00e+003	231.	2.05e+005
11	Reverberation Frequency	kHz	0.000	1.00e+003	106.	9.41e+004
12	Initiation Frequency	kHz	3.00	2.00e+003	826.	7.33e+005
13	Signal Strength	pV/sec	0	328092	4741.89	4.20606e+006
14	Absolute Energy	aJ	0.000	4.97e+004	293.	2.60e+005
15	Rise angle		0	12.775	0.132219	117.278
16	Class ID (*)		2	2	2	1774
17	Vector (Hit) # (*)		94105	94991	94548	83864076
18	Unfilt. Vector (Hit) # (*)		96898	97784	97341	86341467
19	Number of Vectors (Hits) (*)		1	1	1	887
20	Channel (*)		1	6	4	3120

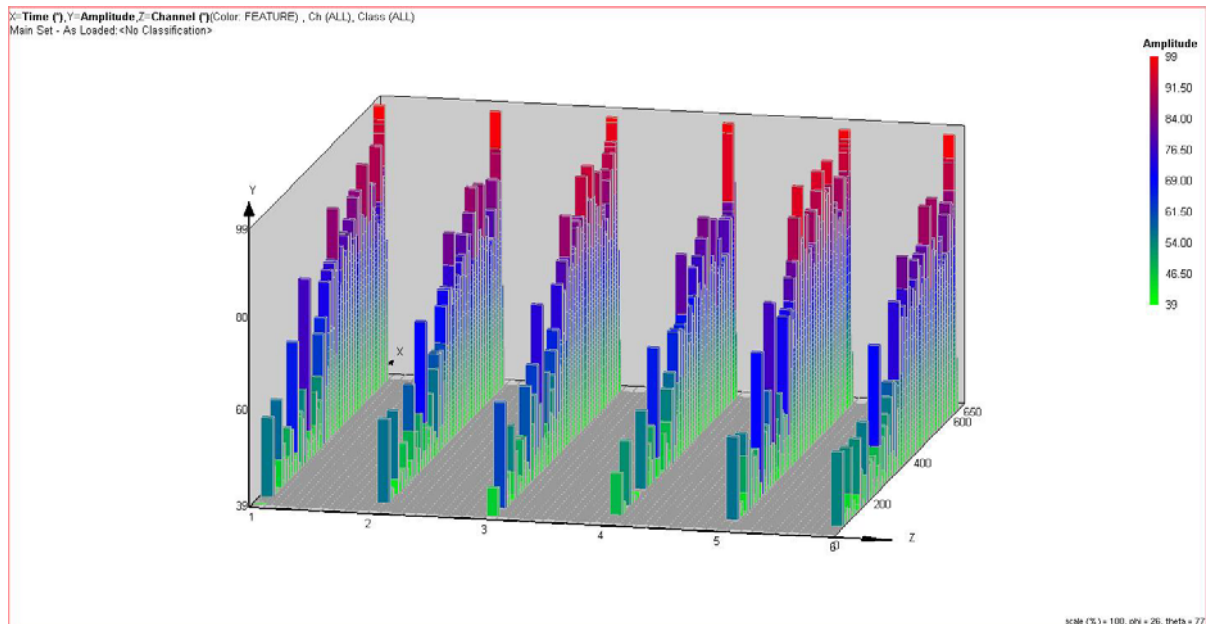
Για το χρονικό διάστημα από τα 320 s έως και την τελική θραύση του δοκιμίου, τα στατιστικά στοιχεία των παραμέτρων ΑΕ συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2. Σημαντική διαφορά (αύξηση) σε σχέση με το προηγούμενο χρονικό διάστημα (έως τα 320 s) παρουσιάζεται στο χρόνο ανόδου RT, στις υπερβάσεις (counts), στην ενέργεια και στη χρονική διάρκεια των hits. Η ακουστική δραστηριότητα επομένως μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα έως και το 50% περίπου της μέγιστης αξονικής δύναμης που αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή απόκρισης του υλικού.

Η αντίστοιχη μεταβολή του πλάτους (σε dB) καθώς και των γεγονότων (hits) για κάθε ένα από τα 6 κανάλια καταγραφής καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής μέχρι και την τελική θραύση του δοκιμίου, απεικονίζεται ξεχωριστά στα Σχήματα 4.17 και 4.18, αντίστοιχα. Είναι εμφανές ότι το κανάλι 5 καταγράφει το μεγαλύτερο πλήθος γεγονότων και με τα μεγαλύτερα πλάτη.

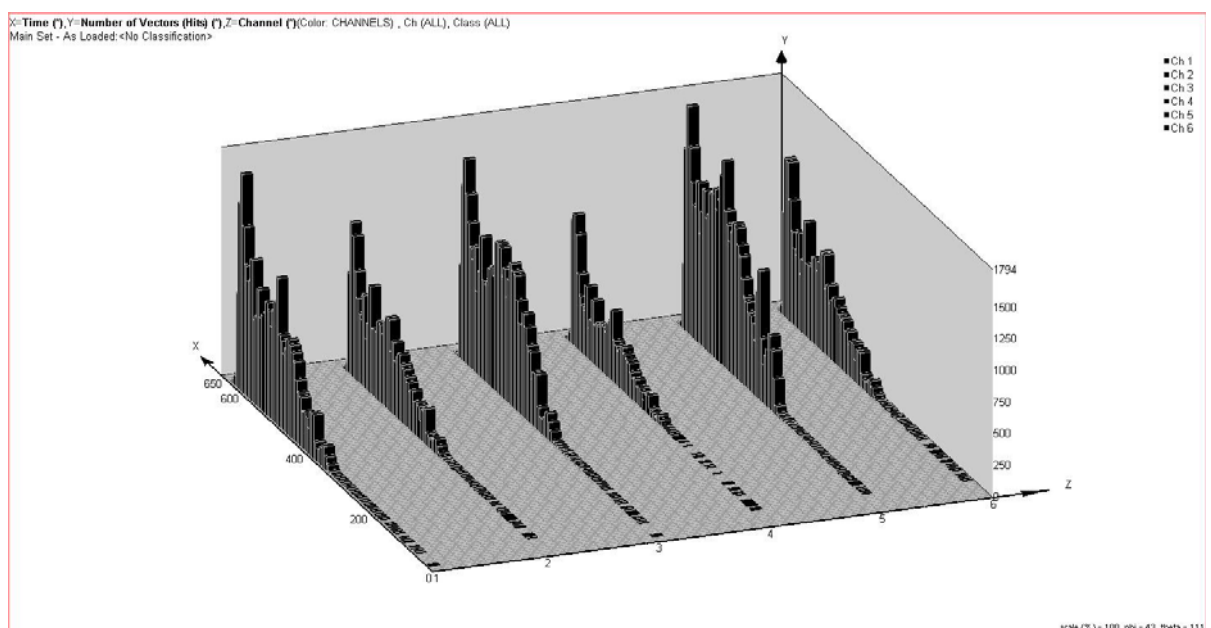
Η κατανομή των χρόνων ανόδου καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος απεικονίζεται στο Σχήμα 4.19 σε λογαριθμική κλίμακα λόγω του μεγάλου εύρους τιμών που παρουσιάζει. Οι μεγάλοι χρόνοι ανόδου που καταγράφονται αντιστοιχούν σε εκπομπή συνεχούς τύπου

Πίνακας 4.2 Στατιστικά στοιχεία των παραμέτρων ΑΕ για το χρονικό διάστημα 320 – 607s του πειράματος.

#	Feature	Unit	Min	Max	Avg	Sum
1	Time (*)	s	319.986	607.335	502.489	8.02068e+007
2	Amplitude	dBae	39	97	46	7279012
3	Channel		1	6	4	564646
4	Parametric 1		0.551469	1.02176	0.847733	135314
5	Risetime	us	0	63867	94	15072119
6	Counts to Peak		1	29314	7	1120768
7	Counts		1	32234	20	3217563
8	Energy	EC#	0	4798	2	370541
9	Duration	us	-503	103942	290	46333133
10	Average Frequency	kHz	0.000	2.00e+003	163.	2.60e+007
11	Reverberation Frequency	kHz	0.000	1.00e+003	105.	1.68e+007
12	Initiation Frequency	kHz	1.00	2.00e+003	580.	9.25e+007
13	Signal Strength	pVsec	0	2.99731e+007	16413.9	2.61996e+009
14	Absolute Energy	aJ	0.000	8.55e+006	1.22e+003	1.95e+008
15	Rise angle		0	808.443	1.75582	280263
16	Class ID (*)		0	3	1	159346
17	Vector (Hit) # (*)		0	160505	80173	12797143689
18	Unfilt. Vector (Hit) # (*)		22	163484	81767	13051516348
19	Number of Vectors (Hits) (*)		1	1	1	159619
20	Channel (*)		1	6	4	564646

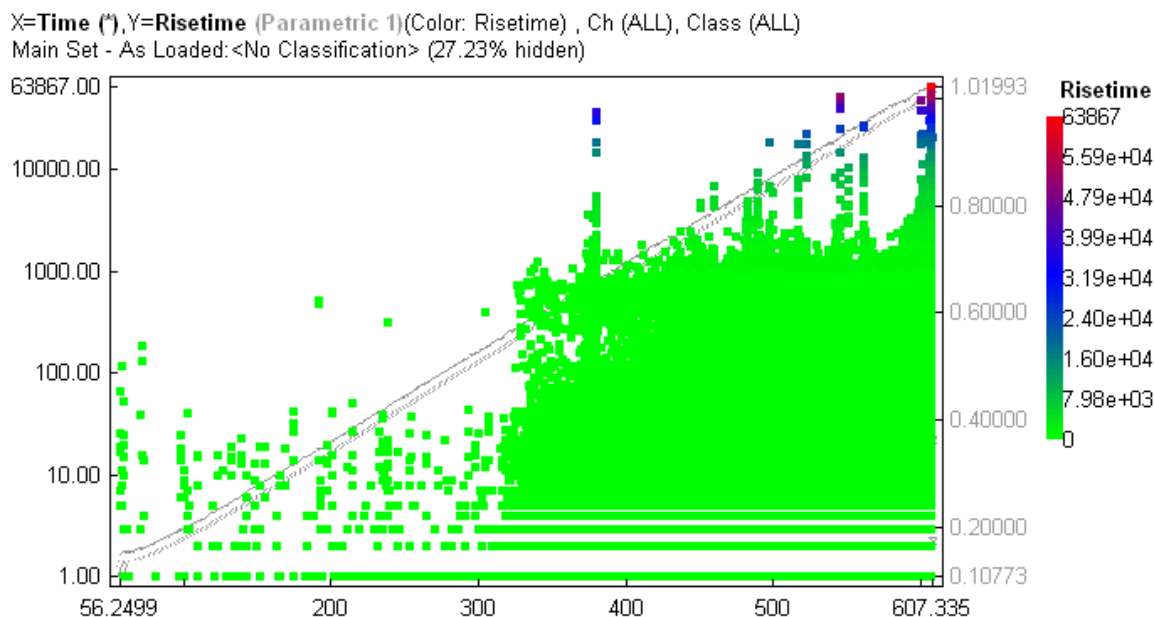


Σχήμα 4.17 Διάγραμμα μεταβολής του πλάτους του σήματος (amplitude) για κάθε ένα από τα 6 κανάλια καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής μονοαξονικής φόρτισης.



Σχήμα 4.18 Διάγραμμα μεταβολής της ακουστικής δραστηριότητας (hits) για κάθε ένα από τα 6 κανάλια καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής μονοαξονικής φόρτισης.

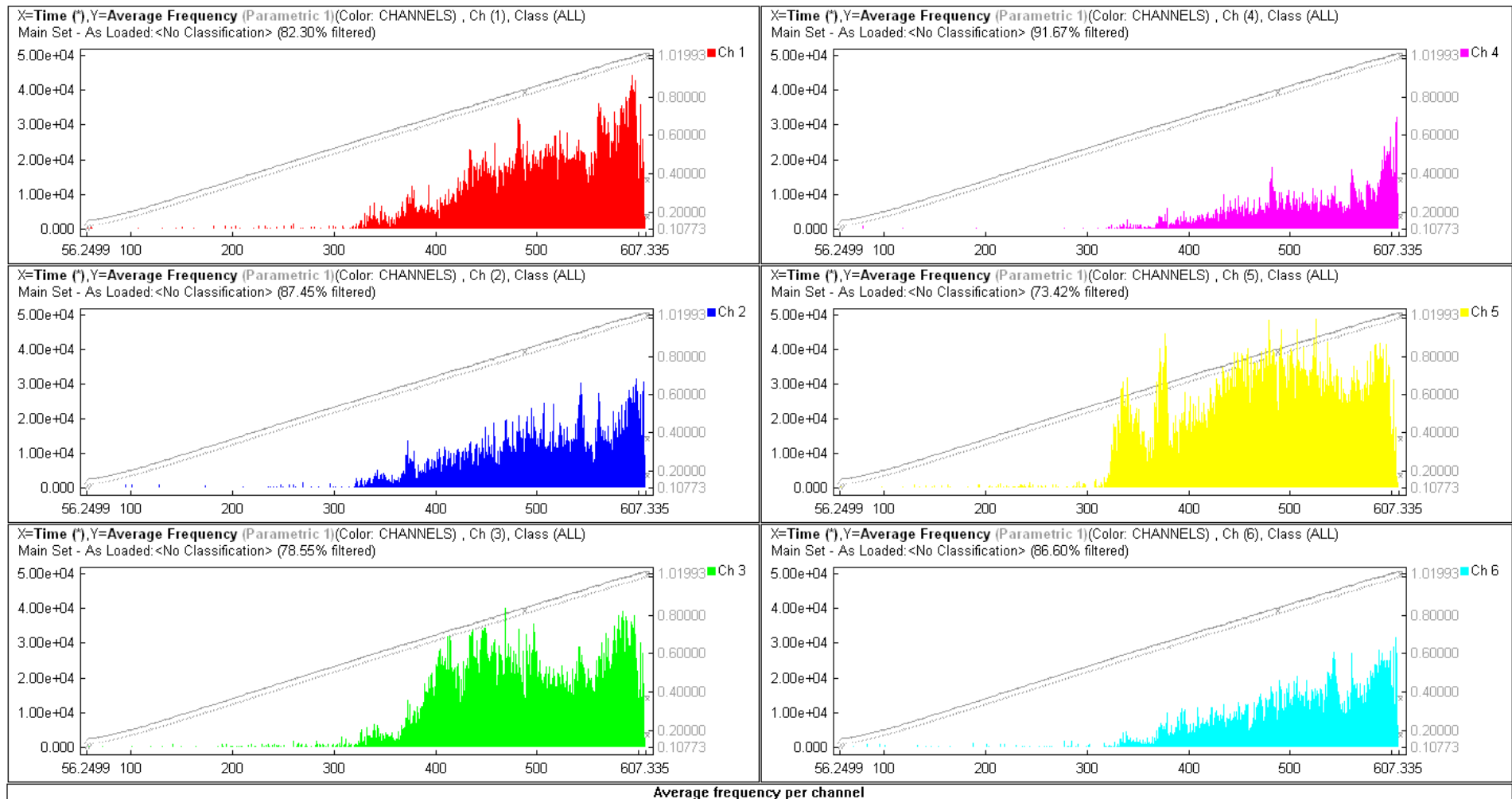
που οφείλεται σε ακουστικές εκπομπές λόγω τριβών μεταξύ επιφανειών ολίσθησης παρά στη δημιουργία και διάδοση μικρορωγμών στο δοκίμιο. Τα σήματα αυτά αναμένεται να έχουν αντίστοιχα μεγάλη χρονική διάρκεια (duration).



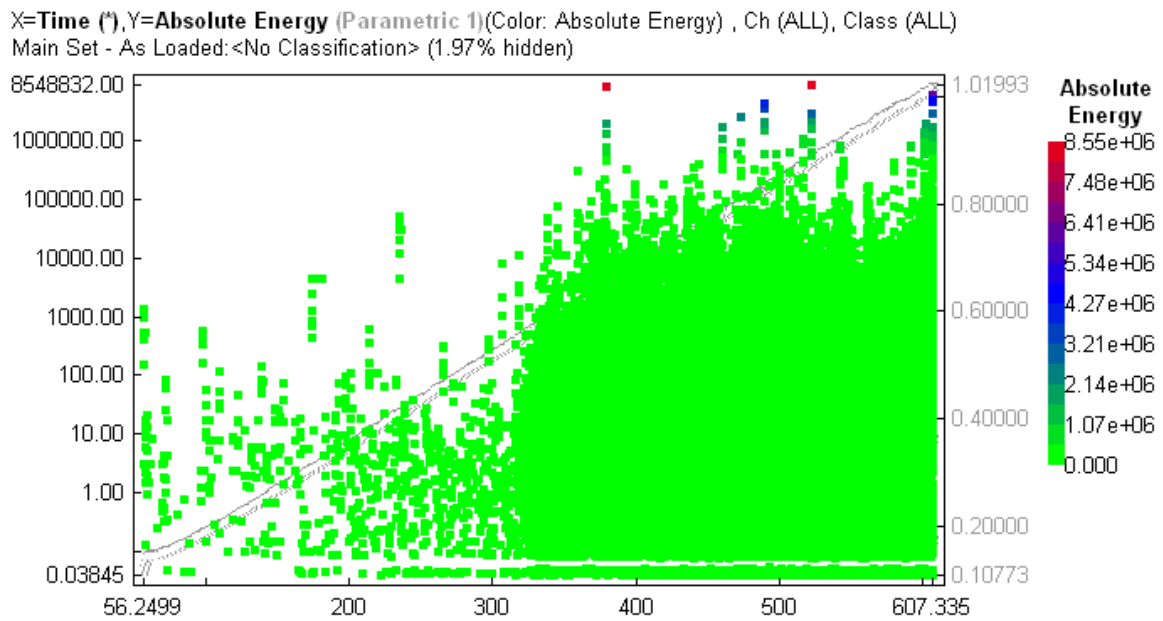
Σχήμα 4.19 Διάγραμμα μεταβολής του χρόνου ανύψωσης RT (λογαριθμική κλίμακα) κατά τη διάρκεια της μονοαξονικής φόρτισης του δοκιμίου.

Η μεταβολή της μέσης συχνότητας (average frequency) κατά τη χρονική εξέλιξη της δοκιμής απεικονίζεται στο Σχήμα 4.20, για κάθε ένα από τα 6 κανάλια καταγραφής των παραμέτρων ΑΕ. Για τα κανάλια 1,2, 4 και 6 παρουσιάζεται μία μέση αύξηση της συχνότητας καθώς το δοκίμιο οδεύει προς την θραύση του. Η μετρούμενη μέση συχνότητα είναι της τάξης των 10^4 Hz για το διάστημα μετά τα 320 s που το δοκίμιο παρουσιάζει σημαντική ακουστική δραστηριότητα. Για τα κανάλια ωστόσο 3 και 5, που παρουσιάζουν όπως προαναφέρθηκε τη μέγιστη καταγραφή ΑΕ (Σχήματα 4.15 και 4.18), η μέση συχνότητα παρουσιάζει αυξομειώσεις μετά την έναρξη της έντονης ακουστικής δραστηριότητας ($t > 320$ s). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι πιθανά κοντά στους αισθητήρες αυτούς (3 και 5) η αυξημένη δραστηριότητα ΑΕ και επομένως και η αυξομειούμενη μέση συχνότητα, οφείλεται στην αποφλοιώση του δοκιμίου στις περιοχές αυτές.

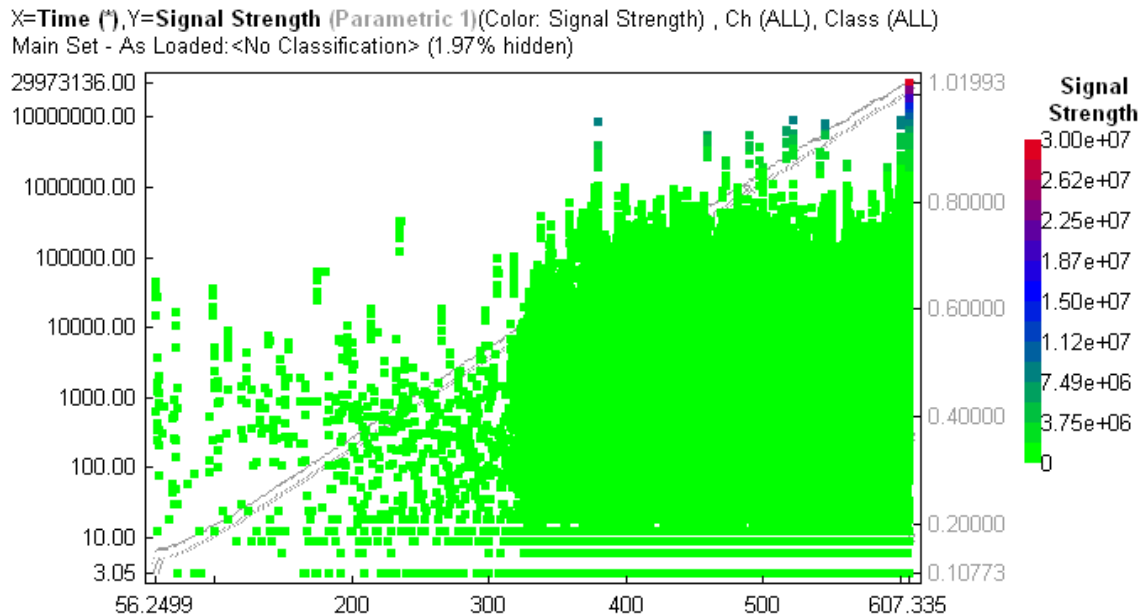
Οι μεταβολές της απόλυτης ενέργειας (σε aJ) και της έντασης του σήματος απεικονίζονται στα Σχήματα 4.21 και 4.22, αντίστοιχα παρουσιάζοντας παρόμοια συμπεριφορά.



Σχήμα 4.20 Διάγραμμα μεταβολής της μέσης συχνότητας (average frequency) για κάθε ένα από τα 6 κανάλια καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής μονοαξονικής φόρτισης.



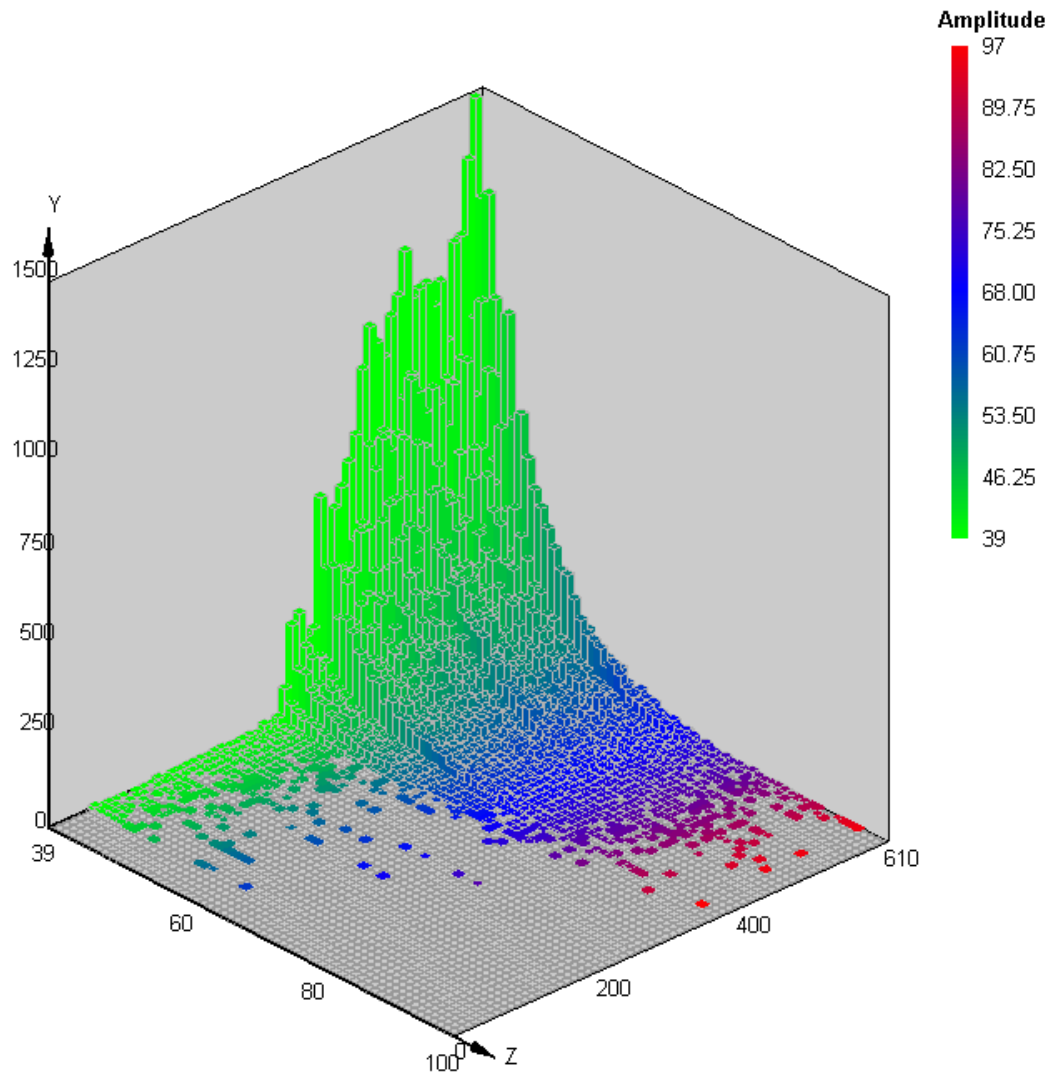
Σχήμα 4.21 Διάγραμμα μεταβολής της απόλυτης ενέργειας (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα κανάλια, κατά τη διάρκεια της μονοαξονικής φόρτισης του πρισματικού δοκιμίου.



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα μεταβολής της έντασης του σήματος (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα κανάλια, κατά τη διάρκεια της μονοαξονικής φόρτισης του πρισματικού δοκιμίου.

Στο Σχήμα 4.23 απεικονίζεται σε διάγραμμα τριών διαστάσεων η κατανομή των hits και των πλατών ως συνάρτηση του χρόνου για όλα τα κανάλια καταγραφής. Όπως και στα άλλα διαγράμματα, εμφανής είναι η έναρξη της ακουστικής δραστηριότητας μετά τα 300s περίπου, ενώ παρατηρούμε ότι ο αριθμός των γεγονότων με μεγάλα πλάτη φθίνει δραστικά.

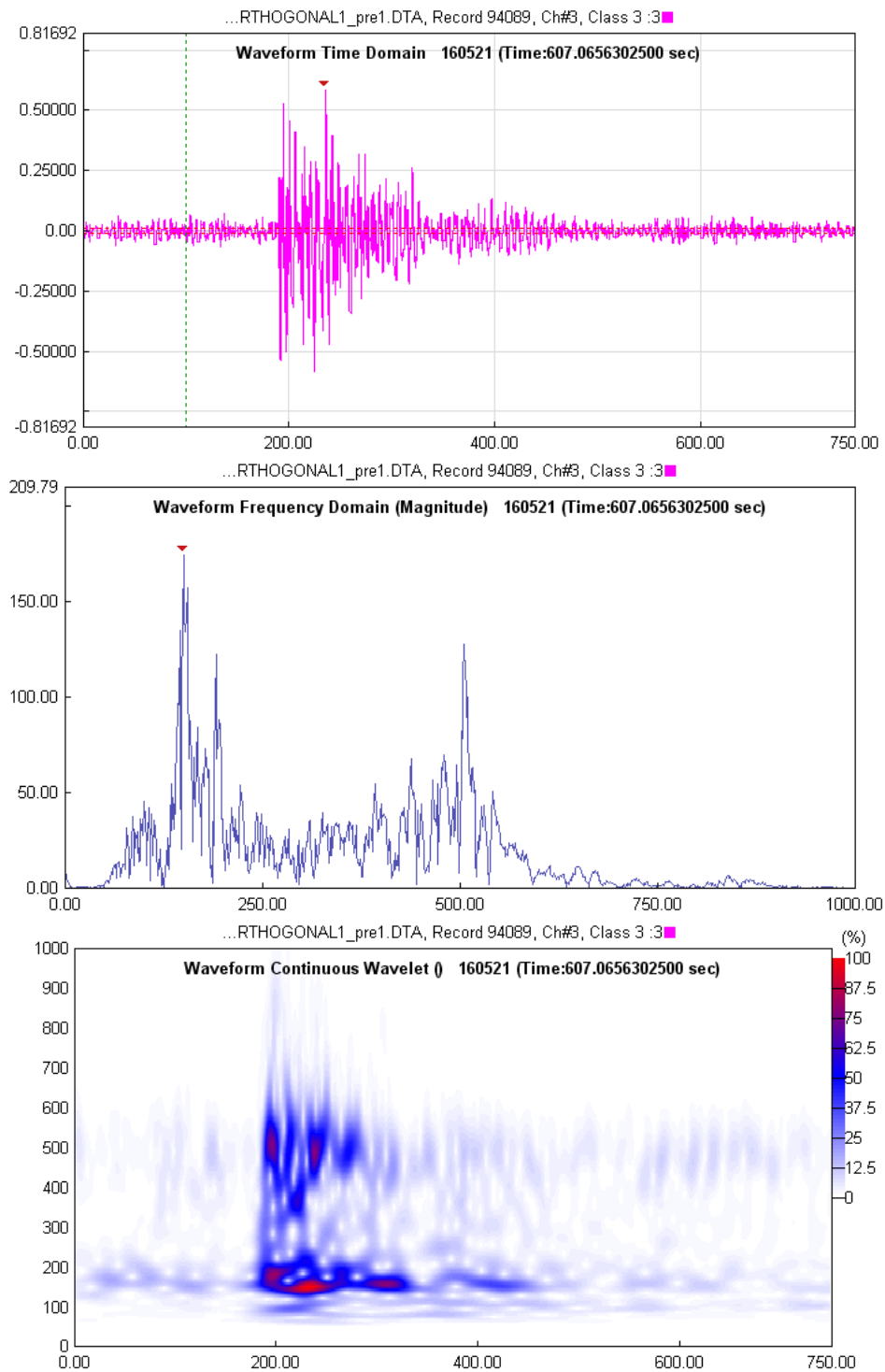
X=Time (s), Y=Number of Vectors (Hits) (s), Z=Amplitude (Color: FEATURE) , Ch (ALL), Class (ALL)



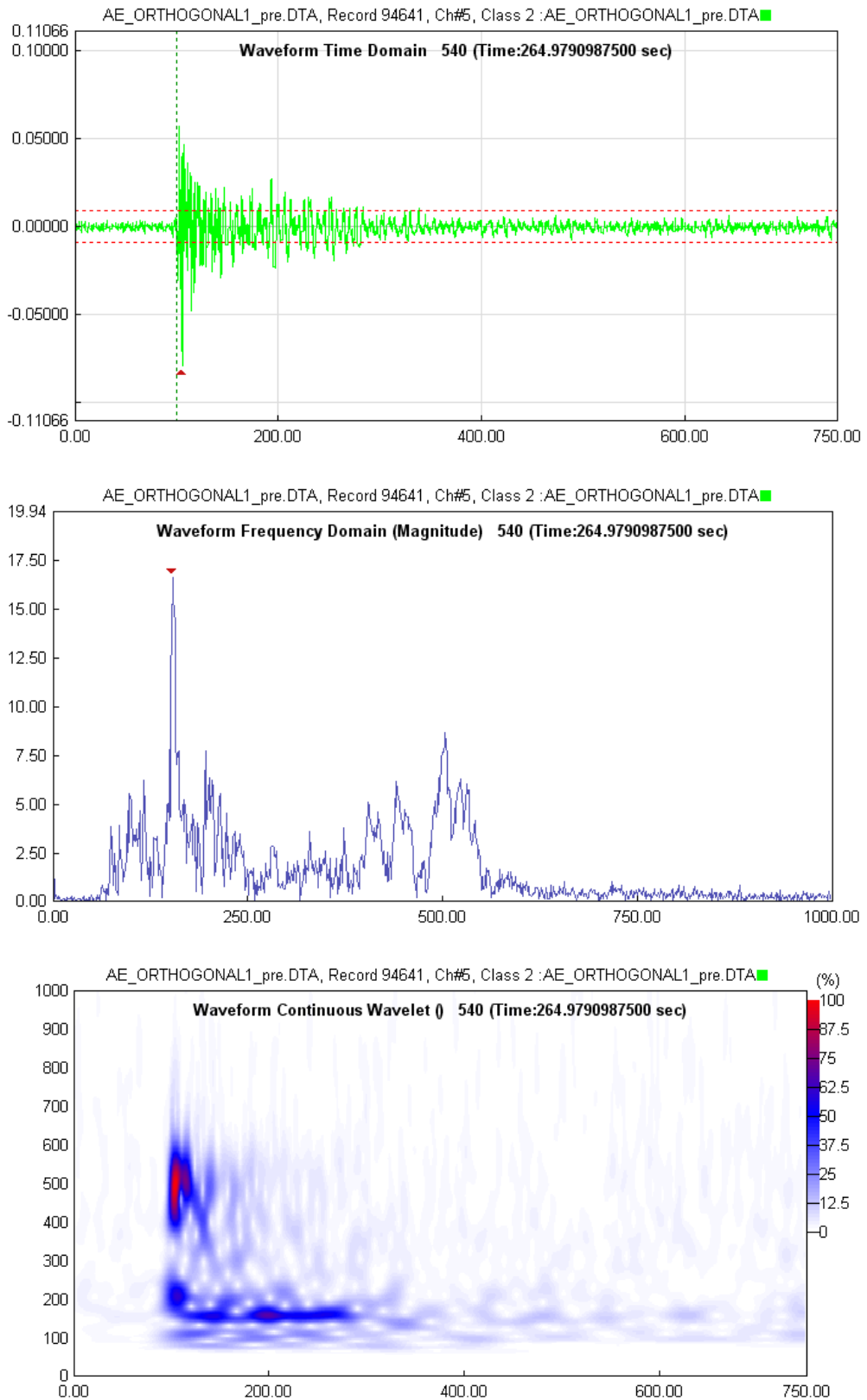
Σχήμα 4.23 3D διάγραμμα της κατανομής των πλατών και των hits κατά τη διάρκεια της μονοαξονικής φόρτισης του πρισματικού δοκιμίου. Χρησιμοποιήθηκαν διαστήματα των 10s.

4.5.2 Ανάλυση κυματομορφών ΑΕ

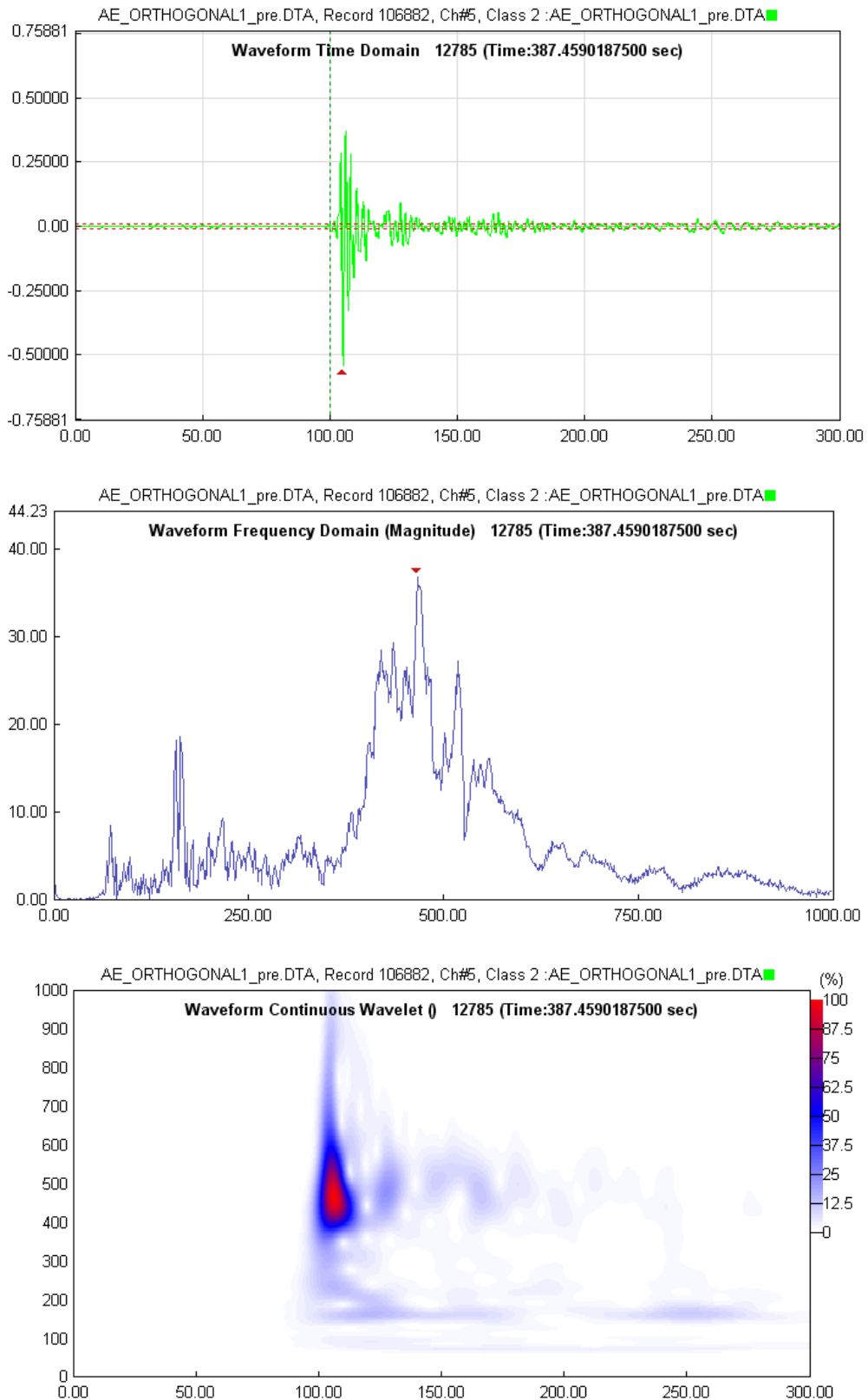
Στα Σχήματα 4.24 – 4.26 παρουσιάζονται οι κυματομορφές και οι αντίστοιχες φασματικές τους αναλύσεις (Fourier και CWT) συγκεκριμένων καταγεγραμμένων γεγονότων κατά τη διάρκεια της δοκιμής ή στο τελικό στάδιο της θραύσης.



Σχήμα 4.24 Χαρακτηριστική κυματομορφή πλάτους 85 dB κατά τη διάρκεια της θραύσης του πρισματικού δοκιμίου ($t=607.065$ s), ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier και ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου με χρήση της συνάρτησης Morlet.



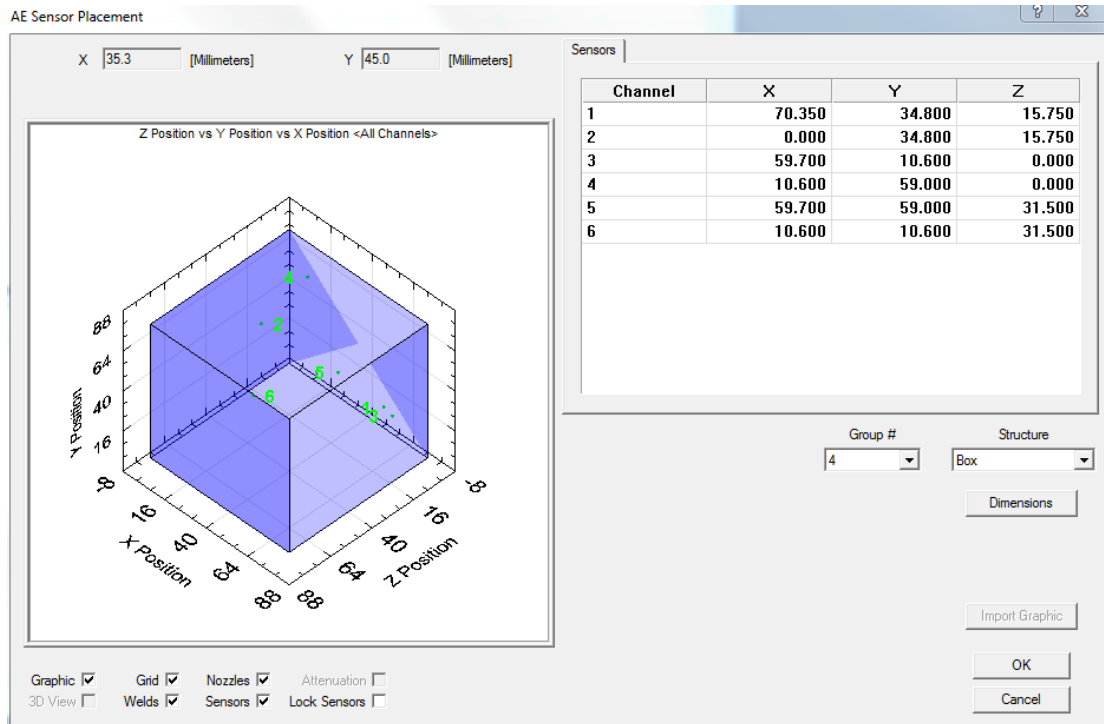
Σχήμα 4.25 Χαρακτηριστική κυματομορφή πλάτους 57dB κατά τα αρχικά στάδια της συμπίεσης του πρισματικού δοκιμίου ($t=264.98$ s), ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier και ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου με χρήση της συνάρτησης Morlet.



Σχήμα 4.26 Χαρακτηριστική κυματομορφή πλάτους 74dB κατά τη συμπίεση του πρισματικού δοκιμίου τη χρονική στιγμή $t=387.46$ s, ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier και ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου με χρήση της συνάρτησης Morlet.

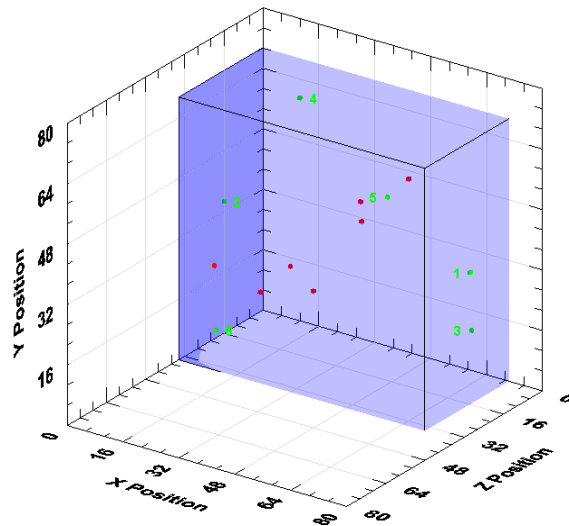
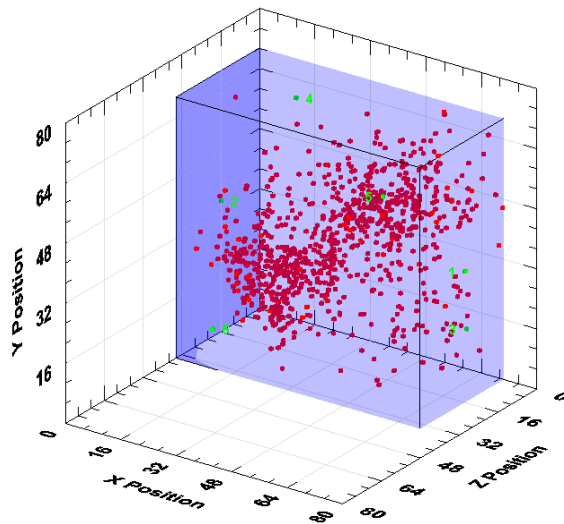
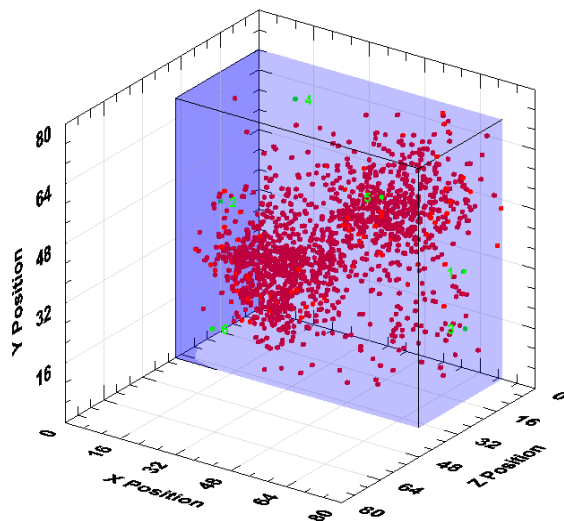
4.5.3 Εντοπισμός σε 3 διαστάσεις των ακουστικών πηγών (3D location)

Για τον εντοπισμό σε τρεις διαστάσεις των πηγών ΑΕ χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3D Location του λογισμικού συλλογής και ανάλυσης δεδομένων ακουστικών εκπομπών, AEWin. Αρχικά τέθηκαν οι ακριβείς συντεταγμένες (σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων) των 6 αισθητήρων στις πλευρές του πρισματικού δοκιμίου καθώς και η ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, $v_p=3305$ m/s (Σχήμα 4.27).



Σχήμα 4.27 Παράθυρο καθορισμού των θέσεων των αισθητήρων σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για τον καθορισμό των πηγών ΑΕ.

Στη συνέχεια επαναφορτώνονται τα δεδομένα της δοκιμής (replay) ώστε να υπολογιστούν αυτή τη φορά οι θέσεις των πηγών ακουστικών εκπομπών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.28 όπου απεικονίζεται η θέση των γεγονότων (events) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της δοκιμής. Το κάθε γεγονός ορίζεται ως η θέση της πηγής ΑΕ που ανιχνεύτηκε από 4 τουλάχιστον αισθητήρες. Στα 340s, όπου το δοκίμιο βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, το πλήθος των γεγονότων είναι αμελητέο (μόλις 7) συγκριτικά με το συνολικό αριθμό που φτάνει τα 1482 στο τέλος της δοκιμής. Το πρισματικό δοκίμιο μετά το τέλος της δοκιμής απεικονίζεται στη Φωτογραφία 4.4.

 $t = 340$ s $t = 540$ s $t = 608$ s

Σχήμα 4.28 Απεικόνιση αποτελεσμάτων τρισδιάστατου εντοπισμού πηγών ΑΕ από το πρισματικό δοκίμιο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της δοκιμής. Με πράσινο σημειώνονται οι θέσεις των αισθητήρων.



Φωτογραφία 4.3 Διαφορετικές όψεις του πρισματικού δοκιμίου μετά το τέλος της δοκιμής όπου διακρίνονται τα διάφορα επίπεδα θραύσης του και οι αποφλοιώσεις του.

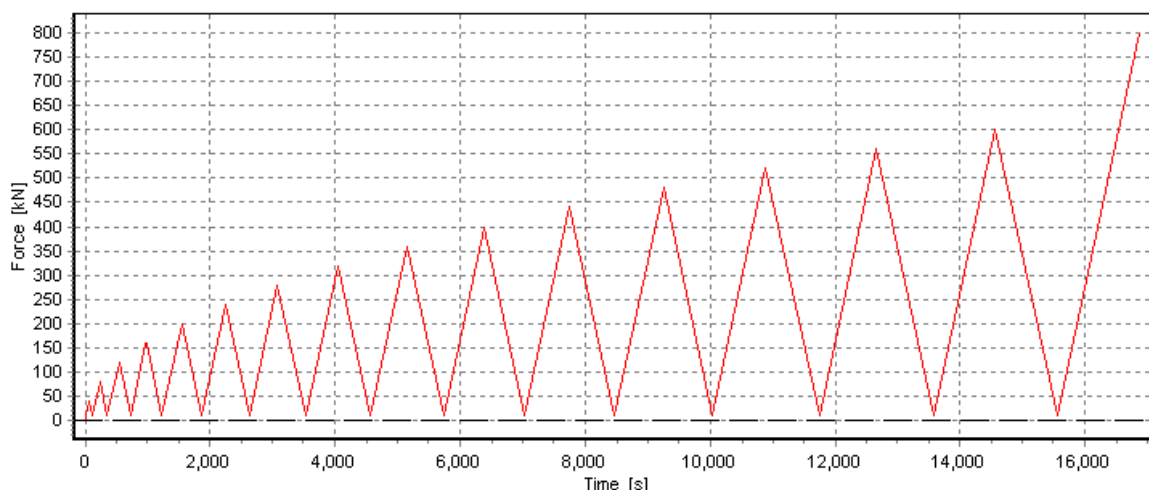
4.6 Ακουστικές εκπομπές από το κυβικό δοκίμιο κατά τη δοκιμή κυκλικής φόρτισης

4.6.1 Ανάλυση παραμέτρων ΑΕ

Κατά τη δοκιμή της κυκλικής φόρτισης το κυβικό δοκίμιο συμπίεζονταν και αποσυμπίεζονταν με τον ίδιο ρυθμό (0.6 kN/s) ενώ σε κάθε διαδοχικό κύκλο συμπίεσης-αποσυμπίεσης, η μέγιστη δύναμη αυξάνονταν κατά 40kN. Στο τέλος κάθε κύκλου διατηρούσαμε μία παραμένουσα δύναμη (10kN) ώστε να εξασφαλίζεται η καλή επαφή του δοκιμίου με τις πλάκες έδρασης του. Η δοκιμή συνεχίστηκε μέχρι και την τελική θραύση του δοκιμίου στα 390 kN. Η συνολική διάρκεια της δοκιμής ήταν 6373 s.

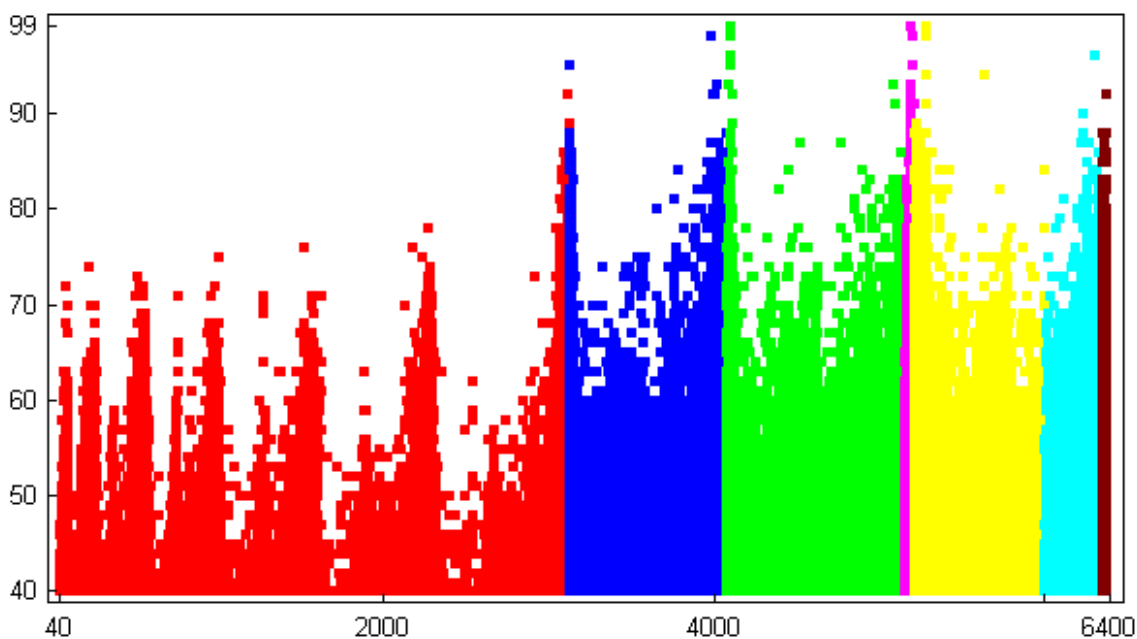
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω κορεσμού του σήματος εισόδου από την κυψέλη φόρτισης (load cell) στην παραμετρική είσοδο των πολυκάναλου συστήματος, η δύναμη δεν έχει καταγραφεί με σωστό τρόπο από τον 4^ο κύκλο φόρτισης και μετά αλλά η απεικόνιση του φορτίου δίνεται μαζί με τα δεδομένα των ΑΕ για λόγους συσχετισμού. Ο έλεγχος της δύναμης πραγματοποιήθηκε από τη μηχανή φόρτισης και διαπιστώθηκε ότι ήταν σωστός (γραμμική συμπίεση και αποσυμπίεση) καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος (Σχήμα 4.27).

Λόγω της μεγάλης διάρκειας του πειράματος και των πολλών κύκλων συμπίεσης – αποσυμπίεσης, τα δεδομένα χωρίστηκαν αυτόματα σε κλάσεις ανάλογα με τον όγκο του αρχείου δεδομένων (προεπιλογή μεγέθους αρχείου 2GB). Έτσι, δημιουργήθηκαν 7 συνολικά αρχεία δεδομένων διαφορετικής χρονικής διάρκειας, ανάλογα με το ρυθμό καταγραφής σημάτων ΑΕ.



Σχήμα 4.27 Μεταβολή της κάθετης δύναμης (σε kN) στο κυβικό δοκίμιο για τη δοκιμή της κυκλικής φόρτισης όπως αυτή προκαθορίστηκε στο setup ελέγχου της πρέσας.

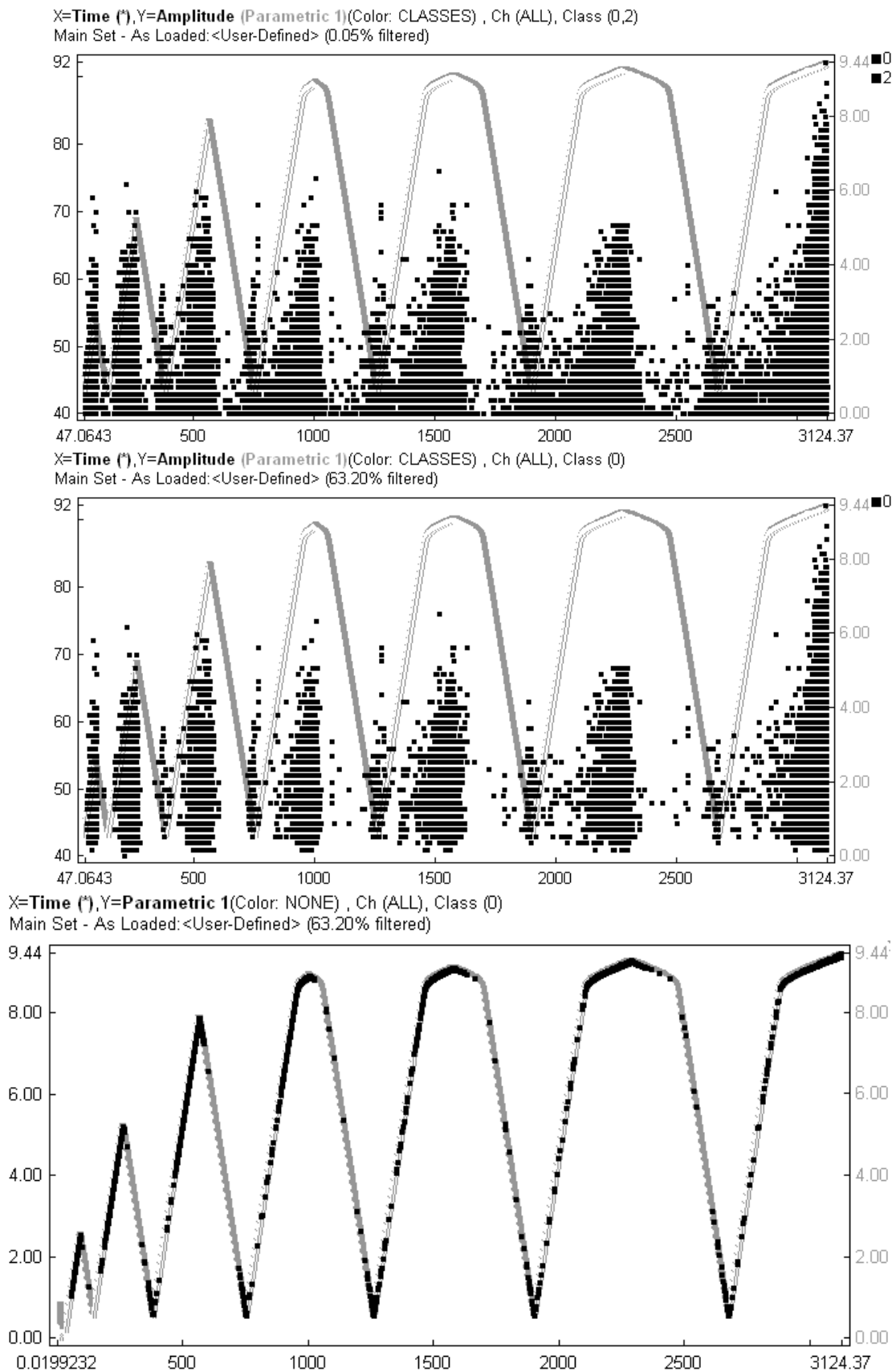
X=Time (*),Y=Amplitude(Color: CLASSES) , Ch (ALL), Class (ALL)
Main Set - As Loaded: <No Classification>



Σχήμα 4.28 Μεταβολή των πλατών των γεγονότων ως προς το χρόνο, για όλα τα κανάλια καταγραφής κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης του πρισματικού δοκιμίου. Διαφορετικός χρωματισμός αντιστοιχεί δε διαφορετική κλάση (αρχείο δεδομένων).

Η συνολική καταγραφή των δεδομένων (χρονική κατανομή των πλατών των σημάτων από όλα τα κανάλια) απεικονίζεται στο Σχήμα 4.28 όπου είναι ευδιάκριτη η αυξομείωση της ακουστικής δραστηριότητας λόγω της κυκλικής εναλλαγής της ασκούμενης δύναμης (πίεση – αποσυμπίεση). Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων που προέκυψαν και της δυσκολίας διαχείρισης αυτών, τα δεδομένα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν μόνον το πρώτο αρχείο (κλάση) δεδομένων (Σχήματα 4.29 – 4.32).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.29, κατά τους αρχικούς επαναλαμβανόμενους κύκλους συμπίεσης-αποσυμπίεσης, παρουσιάζεται ακουστική εκπομπή κατά τη διάρκεια της γραμμικής συμπίεσης και μέχρι τη μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη σε κάθε κύκλο, ενώ κατά τη διάρκεια της ελάττωσης της δύναμης οι ακουστικές εκπομπές ελαττώνονται χωρίς ωστόσο να μηδενίζονται. Σημαντικός είναι ο αριθμός των γεγονότων που αντιστοιχούν σε σχετικά μικρά πλάτη σημάτων. Στο 2^ο γράφημα του Σχήματος 4.29 απεικονίζονται τα ίδια δεδομένα στα οποία ωστόσο έχουν αποκοπεί με φιλτράρισμα τα hits που έχουν μικρό αριθμό υπερβάσεων (counts < 4) και δε θα πρέπει να αντιστοιχούν σε σήματα προερχόμενα από τη δημιουργία μικρορωγμών στο δοκίμιο. Ο αριθμός των σημάτων που αποκόπηκε είναι αρκετά σημαντικός (63.2%) παρέχοντας αρκετά καλύτερη εικόνα των εκπομπών από το δοκίμιο.

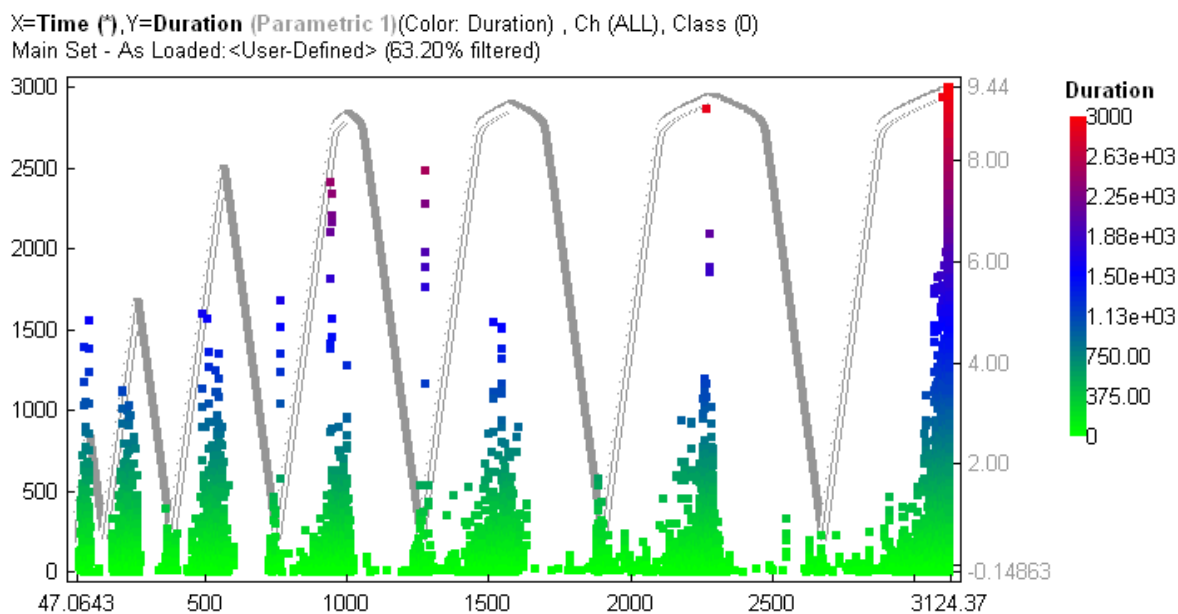


Σχήμα 4.29 Μεταβολή των πλατών των γεγονότων ως προς το χρόνο, για όλα τα κανάλια καταγραφής στην 1^η κλάση δεδομένων που περιλαμβάνει 7 επαναλαμβανόμενες συμπίεσεις - αποσυμπίεσεις. Η συνεχής καμπύλη είναι ενδεικτική της εφαρμοζόμενης δύναμης.

Πληρέστερη εικόνα παρέχεται από το 3^ο γράφημα του Σχήματος 4.29 όπου απεικονίζονται πάνω στην καμπύλη της δύναμης τα γεγονότα που έχουν καταγραφεί από όλα τα κανάλια. Έτσι, στο 2^ο κύκλο συμπίεσης, συνεχής ακουστική εκπομπή εμφανίζεται περίπου στα 2/3 του προηγούμενου μέγιστου φορτίου, υποδηλώνοντας απουσία του φαινομένου Kaiser για το εν λόγω πορώδες υλικό και ύπαρξη του φαινομένου Felicity. Αντίστοιχη περίπτωση είναι η συμπεριφορά και στους υπόλοιπους κύκλους συμπίεσης – αποσυμπίεσης.

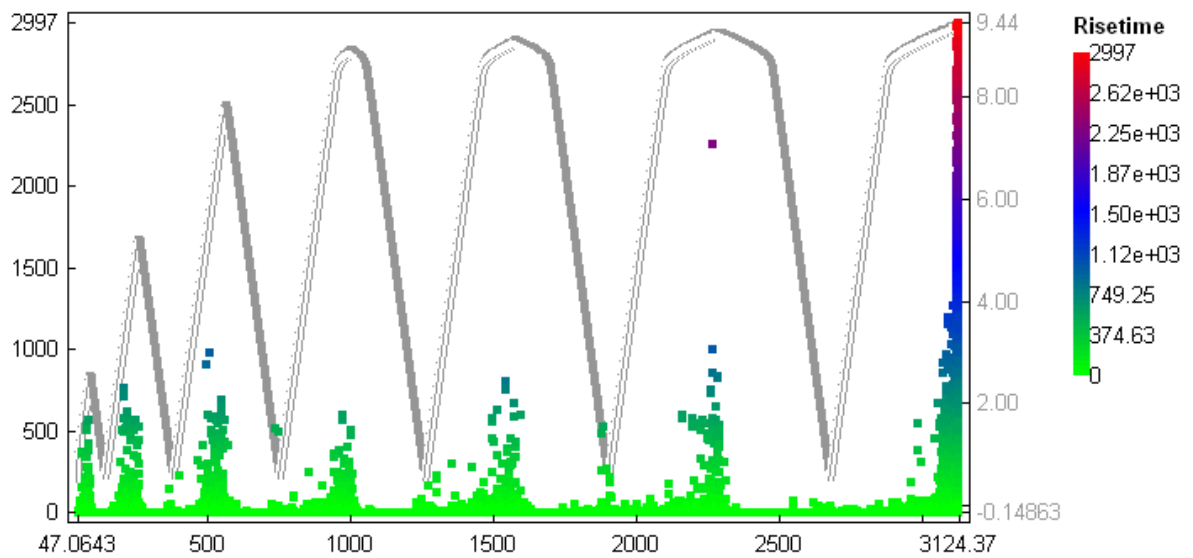
Η ύπαρξη ακουστικής εκπομπής στην εναλλαγή αποσυμπίεσης και συμπίεσης του δοκιμίου σε κάθε κύκλο φόρτισης (3^ο γράφημα του Σχήματος 4.29) δεν μπορεί να δικαιολογηθεί για τόσο μικρά φορτία (της τάξης των 10-20 kN) και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.30 όπου απεικονίζεται η διάρκεια των σημάτων (duration), στις περιοχές αυτές (τέλος αποσυμπίεσης και έναρξη νέας συμπίεσης) εμφανίζονται γεγονότα μεγάλης διάρκειας τα οποία θα πρέπει να οφείλονται σε ακουστικές εκπομπές λόγω τριβών παρά λόγω δημιουργίας μικρορωγμών στο δοκίμιο. Αντίστοιχη είναι και η συμπεριφορά στο χρόνο ανόδου (RT) όπου οι μεγάλες τιμές που καταγράφονται καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής θα πρέπει να οφείλονται σε φαινόμενα συνεχούς εκπομπής από το δοκίμιο.

Η εξασθένιση των πλατών για όλα τα γεγονότα που καταγράφονται στη διάρκεια της δοκιμής απεικονίζεται στο Σχήμα 4.31 όπου και εδώ είναι εμφανής η αυξομείωση της ακουστικής δραστηριότητας λόγω της κυκλικής εναλλαγής της πίεσης στο δοκίμιο.



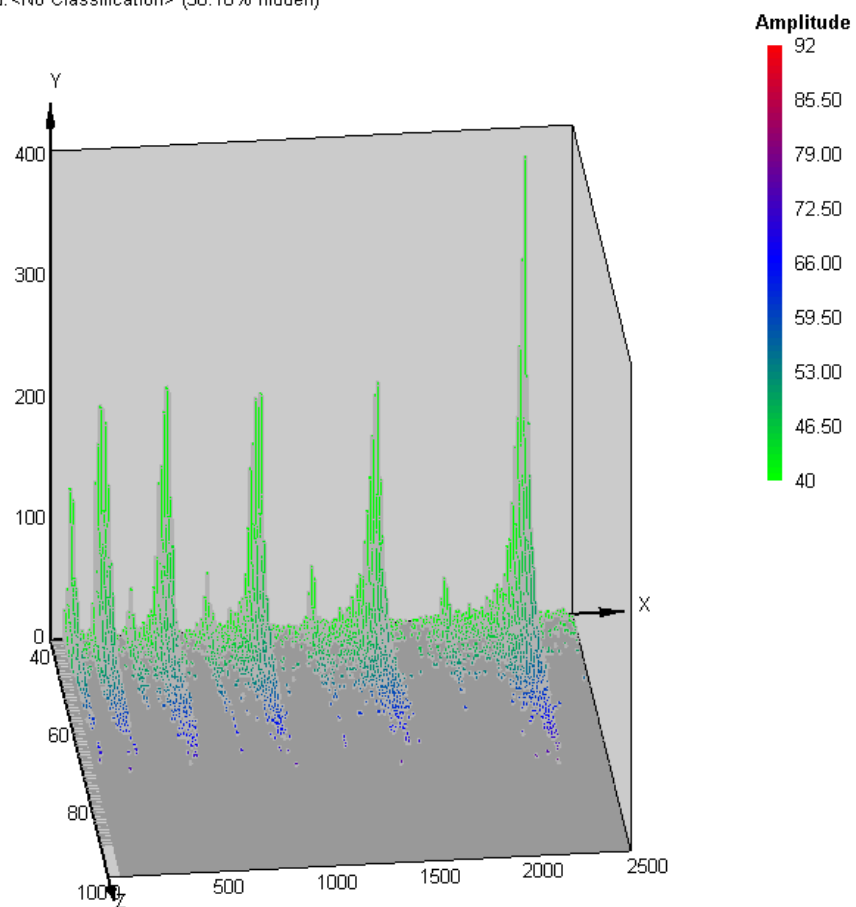
Σχήμα 4.30 Μεταβολή της διάρκειας των σημάτων κατά τη διάρκεια των 7 πρώτων κύκλων συμπίεσης – αποσυμπίεσης του κυβικού δοκιμίου.

X=Time (*),Y=Risetime (Parametric 1)(Color: Risetime) , Ch (ALL), Class (ALL)
Main Set - As Loaded:<No Classification>



Σχήμα 4.31 Μεταβολή του χρόνου ανόδου κατά τη διάρκεια των 7 πρώτων κύκλων συμπίεσης – αποσυμπίεσης του κυβικού δοκιμίου.

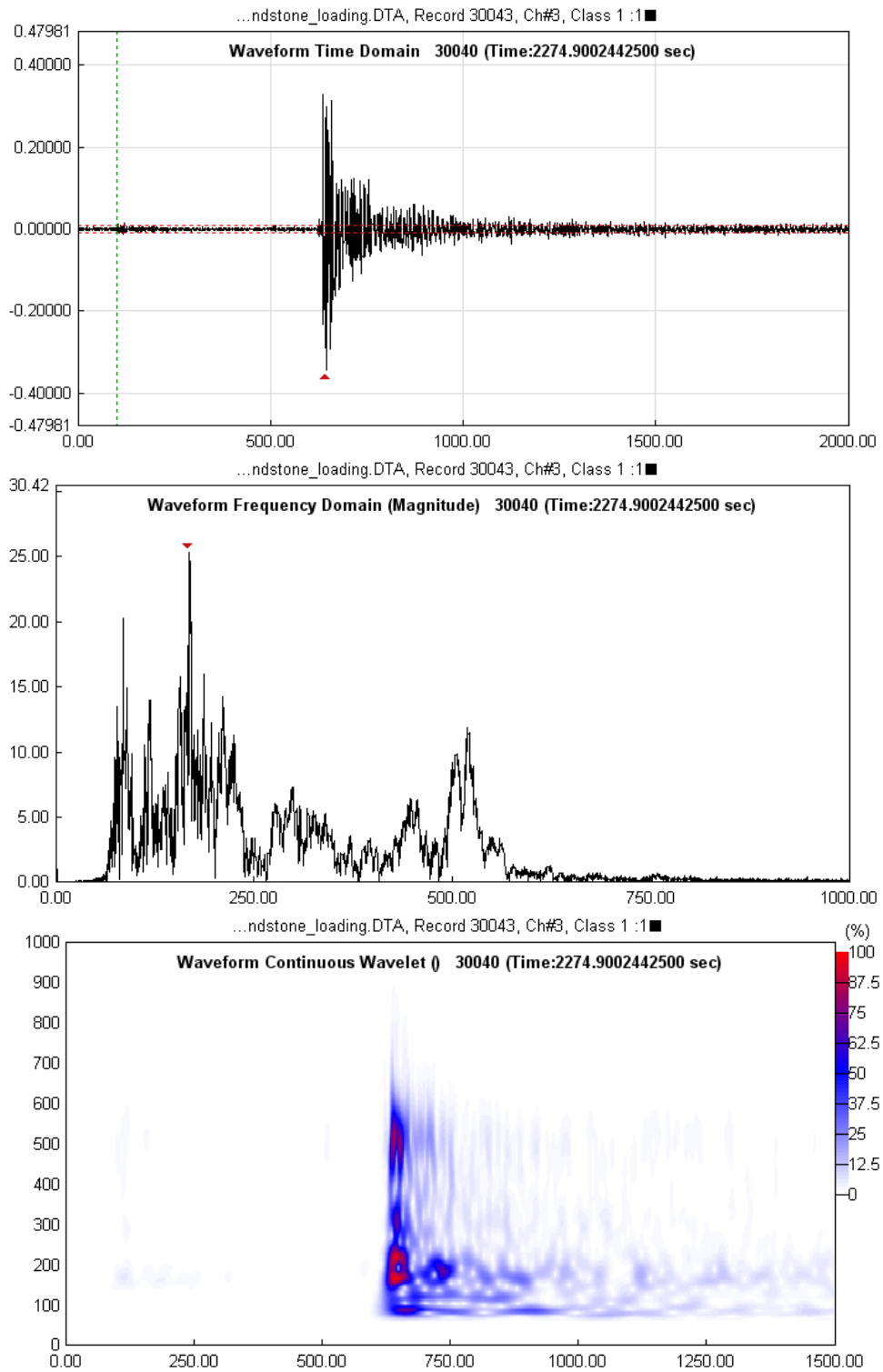
X=Time (*),Y=Number of Vectors (Hits) (*),Z=Amplitude(Color: FEATURE) , Ch (1-6), Class (ALL)
Main Set - As Loaded:<No Classification> (50.18% hidden)



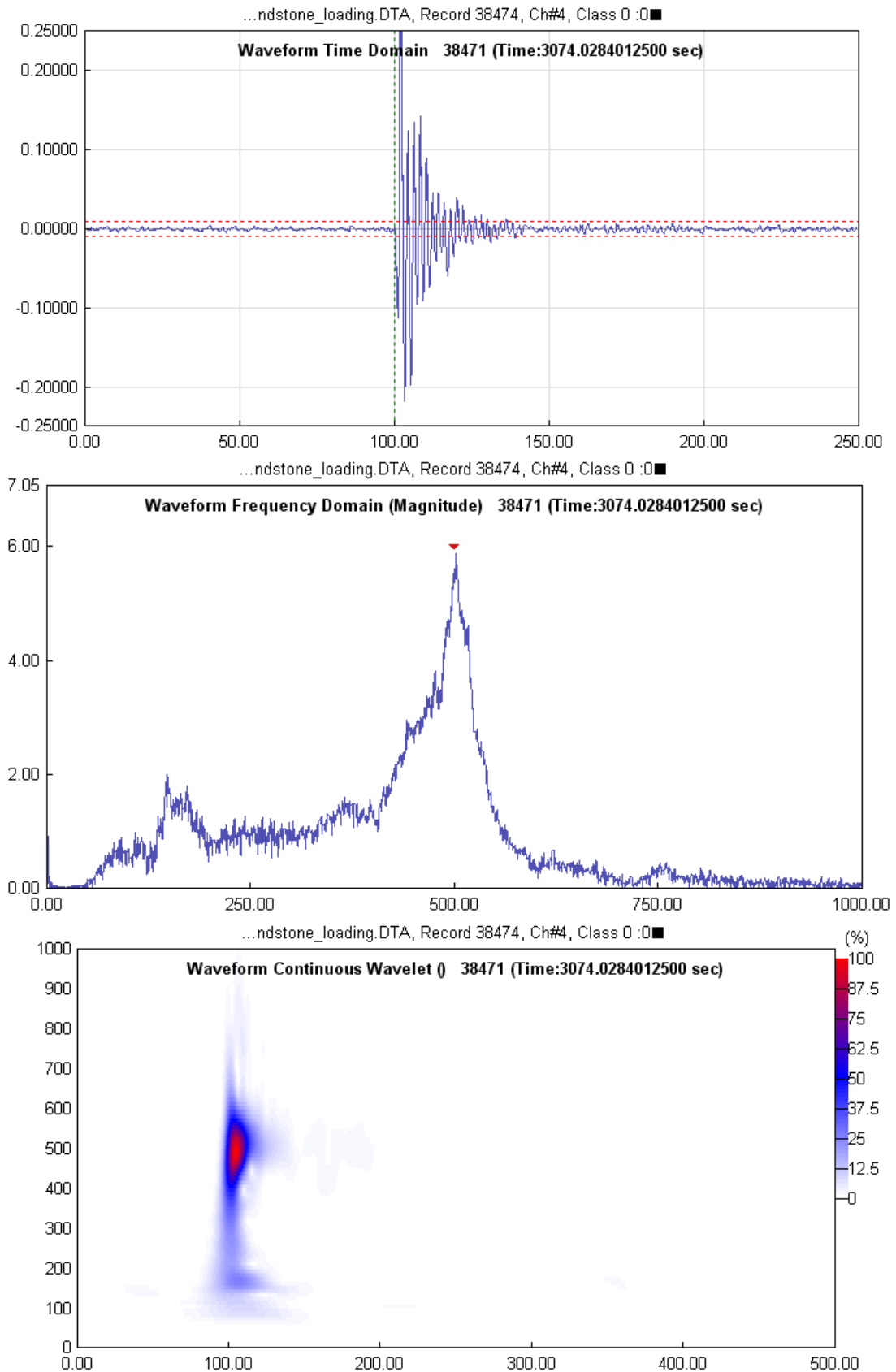
Σχήμα 4.32 3D διάγραμμα της κατανομής των πλατών και των hits κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης του κυβικού δοκιμίου (7 πρώτοι κύκλοι συμπίεσης-αποσυμπίεσης).

4.6.2 Ανάλυση κυματομορφών ΑΕ

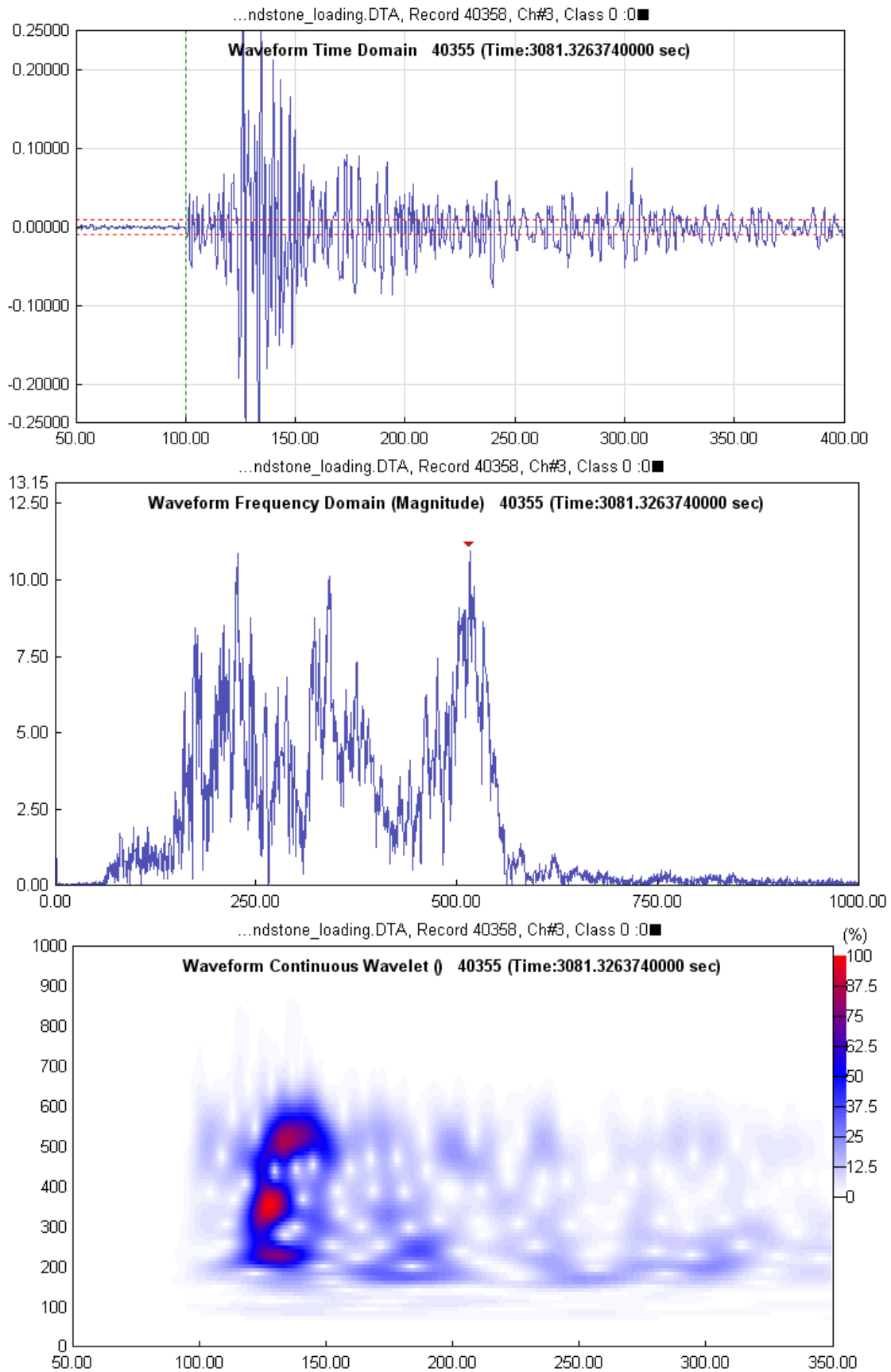
Στα Σχήματα 4.33 – 4.35 παρουσιάζονται οι κυματομορφές και οι αντίστοιχες φασματικές τους αναλύσεις (Fourier και CWT) συγκεκριμένων καταγεγραμμένων γεγονότων κατά τη διάρκεια της κυκλικής δοκιμής.



Σχήμα 4.33 Χαρακτηριστική κυματομορφή κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης του κυβικού δοκιμίου ($t=2274.90$ s), ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier και ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου με χρήση της συνάρτησης Morlet.



Σχήμα 4.34 Χαρακτηριστική κυματομορφή κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης του κυβικού δοκιμίου ($t=3074.03$ s), ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier και ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου με χρήση της συνάρτησης Morlet.

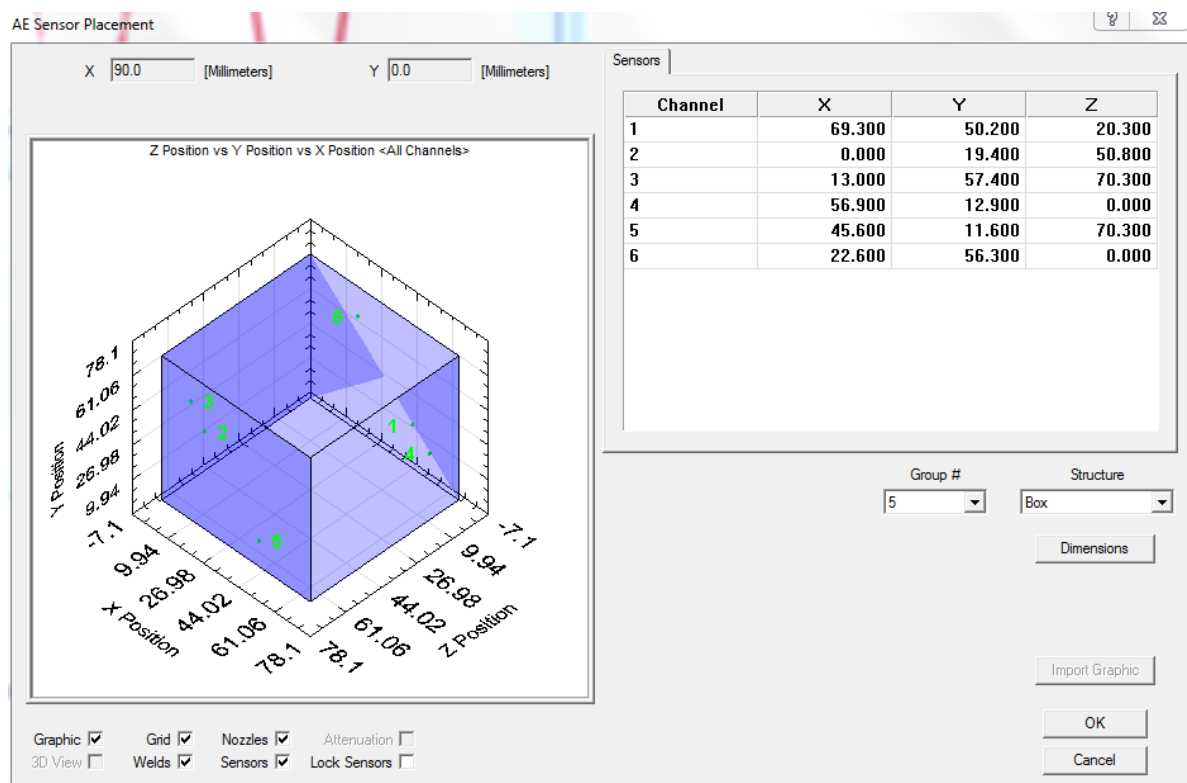


Σχήμα 4.35 Χαρακτηριστική κυματομορφή κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης του κυβικού δοκιμίου ($t=3081.33$ s), ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier και ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου με χρήση της συνάρτησης Morlet.

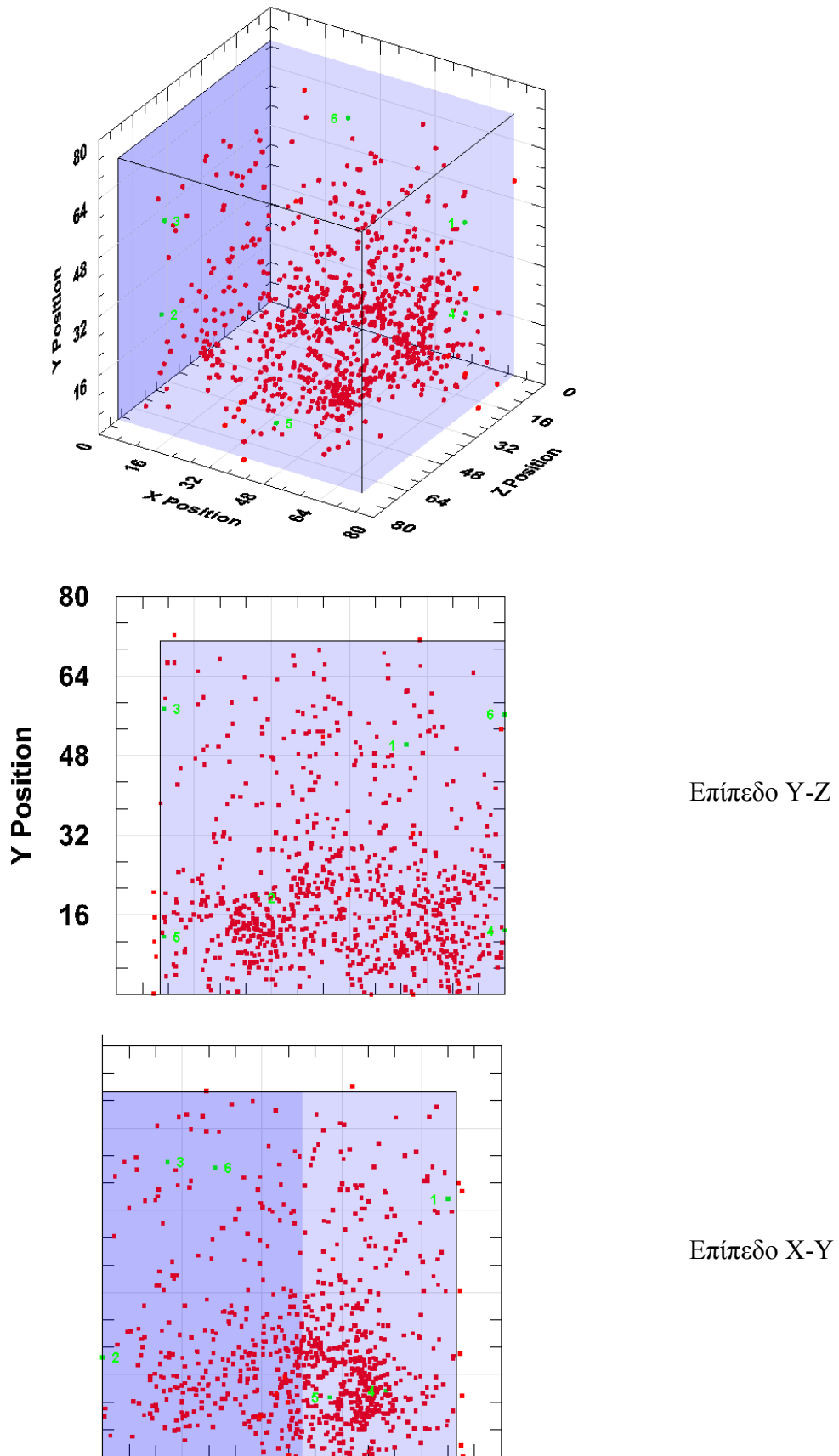
4.6.3 Εντοπισμός σε 3 διαστάσεις των ακουστικών πηγών (3D location)

Όπως και στην περίπτωση του πρισματικού δοκιμίου που φορτίστηκε γραμμικά, έτσι και εδώ καταχωρήθηκαν οι ακριβείς συντεταγμένες των αισθητήρων πάνω στο κυβικό δοκίμιο και η ταχύτητα διάδοσης (Σχήμα 4.36), προκειμένου να γίνει εντοπισμός των πηγών ακουστικών κυμάτων σε αυτό. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, κάθε σήμα ΑΕ θα πρέπει να έχει καταγραφεί από 4 τουλάχιστον αισθητήρες προκειμένου να καταγραφεί ως γεγονός (event).

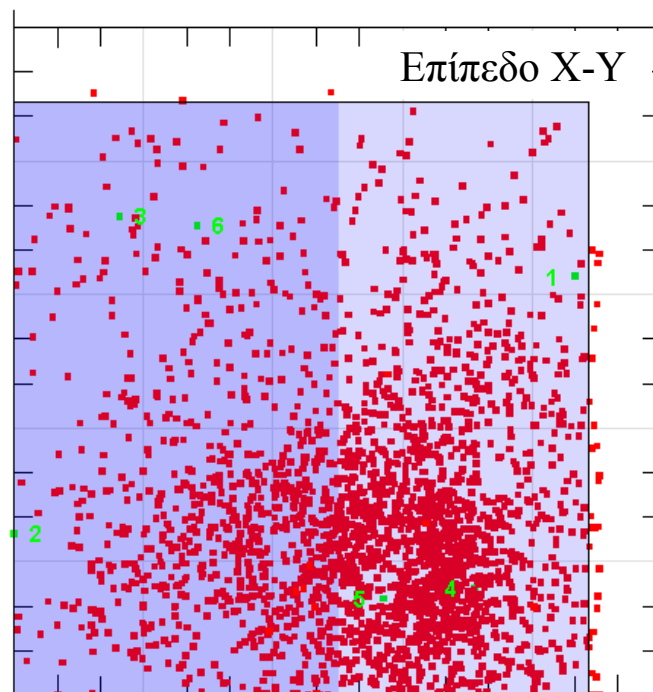
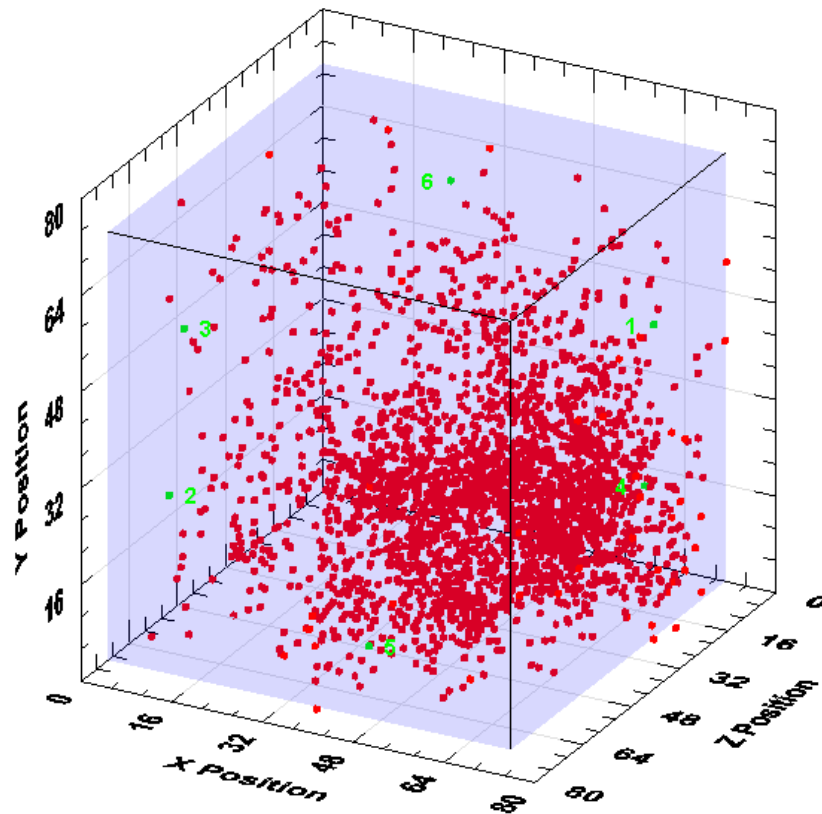
Τα αποτελέσματα για την 1^η κλάση δεδομένων διάρκειας 3123 s, απεικονίζονται στο Σχήμα 4.37 ενώ ύστερα από χρόνο 4112 s δίνονται στο Σχήμα 4.38. Παρατηρούμε ότι μεγάλο πλήθος γεγονότων εμφανίζεται στο κάτω μέρος του δοκιμίου, μεταξύ των αισθητήρων 4 και 5 που βρίσκονται τοποθετημένοι σε απέναντι πλευρές του δοκιμίου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με τις Φωτογραφίες 4.4 και 4.5 όπου το δοκίμιο μετά το τέλος της δοκιμής εμφανίζει στην περιοχή αυτή επίπεδα θραύσης.



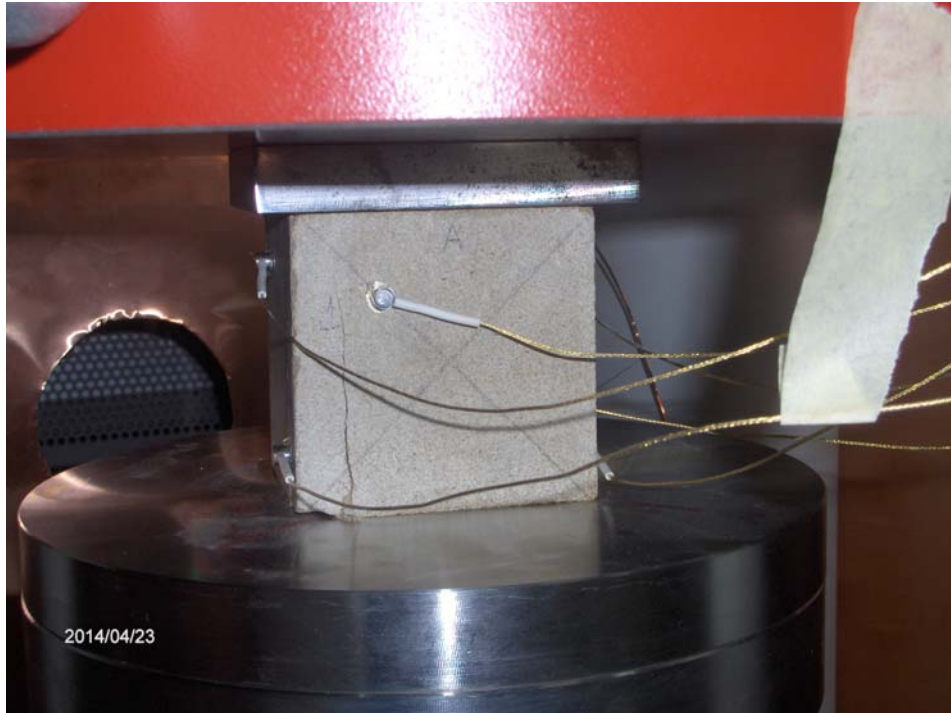
Σχήμα 4.36 Παράθυρο καθορισμού των θέσεων των αισθητήρων σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για τον καθορισμό των πηγών ΑΕ κατά την κυκλική φόρτιση του κυβικού δοκιμίου.



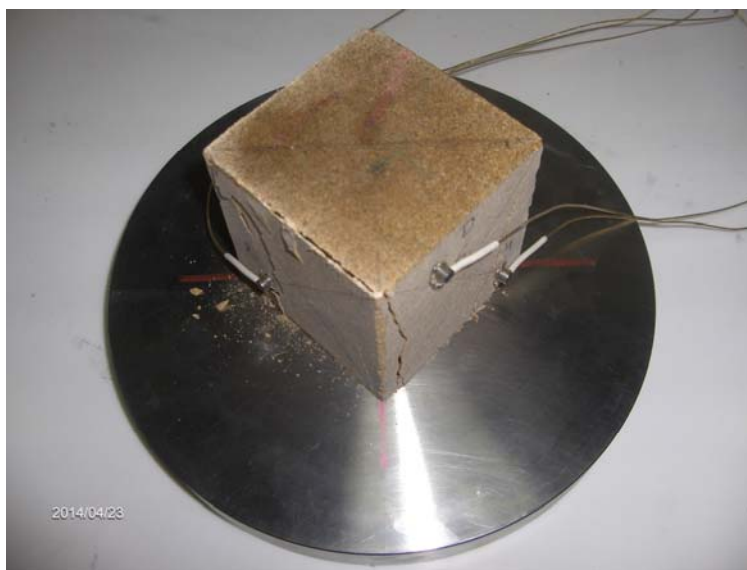
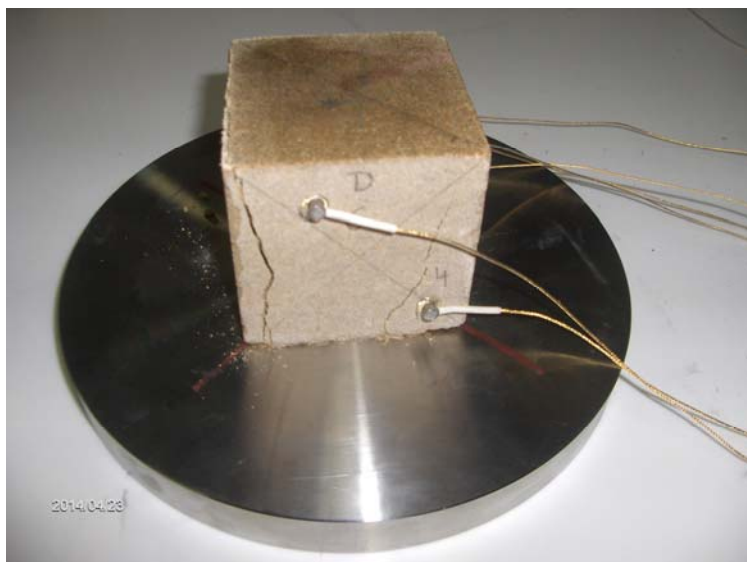
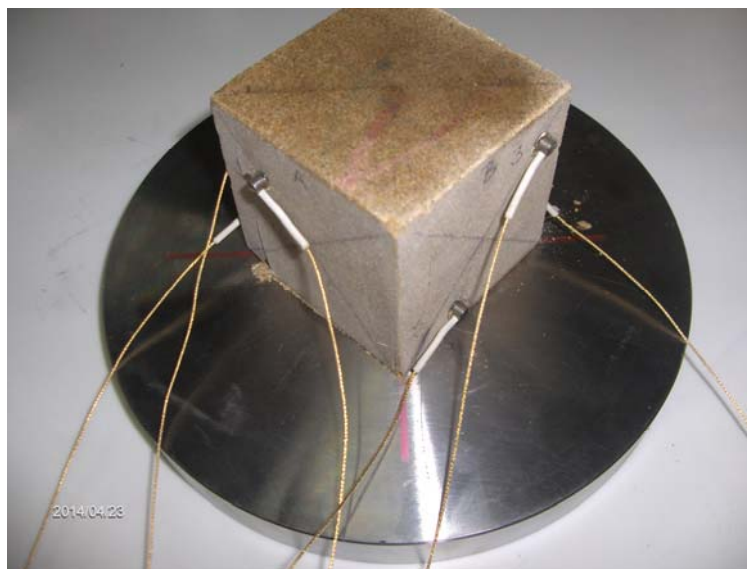
Σχήμα 4.37 Απεικόνιση αποτελεσμάτων τρισδιάστατου εντοπισμού πηγών ΑΕ από το κυβικό δοκίμιο στο τέλος της 1^{ης} κλάσης ($t = 3123$ s).



Σχήμα 4.38 Απεικόνιση αποτελεσμάτων τρισδιάστατου εντοπισμού πηγών ΑΕ από το κυβικό δοκίμιο ύστερα από $t = 4112$ s.



Φωτογραφία 4.4 Το κυβικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής κυκλικής φόρτισης επί της πρέσας.



Φωτογραφία 4.5 Διάφορες όψεις του κυβικού δοκιμίου μετά το τέλος της κυκλικής φόρτισης του.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αφορούσε στην εφαρμογή της τεχνικής των ακουστικών εκπομπών κατά τη μονοαξονική θλίψη πορώδους πετρώματος (γραμμική και κυκλική) προκειμένου να διερευνηθεί η χρησιμότητα των διαφόρων παραμέτρων ΑΕ καθώς και των φασματικών αναλύσεων τους στην αξιολόγηση της καταπόνησης και εν τέλει της θραύσης των υλικών αυτών.

Κατά τη γραμμική φόρτιση του πορώδους δοκιμίου παρατηρούμε ότι η ακουστική εκπομπή ξεκινά όταν το δοκίμιο εξέλθει της ελαστικής του συμπεριφοράς (περίπου στο 50% του ορίου θραύσης του), χωρίς ωστόσο να μας δώσει σαφείς ενδείξεις πριν την τελική του αστοχία. Η χρονική εξέλιξη όλων των παραμέτρων ΑΕ παρουσιάζουν ως επί το πλείστον μία αύξουσα μεταβολή με διακυμάνσεις που δε συνηγορούν σε κάποια έντονη ένδειξη για την επερχόμενη θραύση του δείγματος παρά μόνον κατά τη διάρκεια της τελικής αστοχίας όπου καταγράφονται έντονες αυξήσεις σε διάφορες ακουστικές παραμέτρους (πλάτος, χρόνος ανόδου και διάρκεια, μέση συχνότητα, απόλυτη ενέργεια). Οι κυματομορφές που καταγράφηκαν παρουσιάζουν διαφορετικό φασματικά χαρακτηριστικά χωρίς ωστόσο να μπορούν αυτά να συσχετιστούν με την προέλευση των μικρορωγμών στο υλικό λόγω διατμητικών ή/και εφελκυστικών τάσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση για αυτό αποτελεί ο ακριβής εντοπισμός (σε τρεις διαστάσεις) των πηγών ακουστικών σημάτων ώστε να μπορούν αυτές να συσχετιστούν με την μακροσκοπική εικόνα του δοκιμίου μετά τις δοκιμές.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, ο τρισδιάστατος εντοπισμός των πηγών ΑΕ καθίσταται αρκετά δύσκολος και δε δίνει αποτελέσματα σύμφωνα με τα επίπεδα θραύσης που παρουσιάζει το δείγμα πωρόλιθου στο τέλος της δοκιμής. Πιθανοί παράγοντες που επηρεάζουν τον ακριβή προσδιορισμό των θέσεων των πηγών μπορεί να είναι η σχετικά μεγάλη διάσταση του αισθητήρα συγκριτικά με το μέγεθος του δείγματος και σε σημαντικότερο βαθμό η αλλαγή της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων κατά τη συμπίεση του πετρώματος. Όπως παρουσιάστηκε στα πειραματικά αποτελέσματα, η ταχύτητα διάδοσης ελαττώνεται σταδιακά λόγω δημιουργίας και διάδοσης μικρορωγμών στο δείγμα και λίγο πριν τη θραύση παρουσιάζει μείωση της τάξης του 10%, τιμή που μπορεί να τροποποιήσει σημαντικά τις θέσεις εντοπισμού των πηγών. Θα πρέπει επομένως να εφαρμοστεί διαφορετικό μοντέλο ταχυτήτων σε διαφορετικά χρονικά παράθυρα εκτέλεσης του πειράματος προκειμένου να γίνει με καλύτερη ακρίβεια ο εντοπισμός των ακουστικών πηγών.

Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ύπαρξης διαφορετικών ειδών κυμάτων που διαδίδονται στο υλικό (κύματα εγκάρσια, διαμήκη, επιφανειακά, κ.ά.) με διαφορετικές ταχύτητες το κάθε ένα από αυτά. Ο υπολογισμός των θέσεων των πηγών γίνεται βάσει της μέτρησης του χρόνου άφιξης των Ρ-κυμάτων η ανίχνευση των οποίων ωστόσο μπορεί να επηρεαστεί από το κατώφλι (threshold) που θέτουμε κάθε φορά. Η επιλογή του κατωφλίου μπορεί να κόψει (ειδικά σε σήματα μικρού πλάτους) τα επιθυμητά Ρ-κύματα και να ανιχνεύσει στη θέση τους τα μεταγενέστερα κύματα S με επακόλουθο σφάλμα στον υπολογισμό του χρόνου άφιξης. Προφανώς η διόρθωση των χρόνων άφιξης χειρονακτικά καθίσταται αδύνατη σε τόσο μεγάλο όγκο δεδομένων που προκύπτει από τα εν λόγω πειράματα. Ο επανακαθορισμός του κατωφλίου σε μεγαλύτερες τιμές ώστε να ανιχνεύονται μόνον τα S-κύματα και η χρήση της ταχύτητας των κυμάτων αυτών σε αντικατάσταση της ταχύτητας των Ρ-κυμάτων, θα μπορούσε ίσως να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα στις θέσεις των πηγών και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Κατά την κυκλική φόρτιση του πορώδους δοκιμίου, ο μεγάλος όγκος των δεδομένων λόγω μεγάλης διάρκειας της δοκιμής και μεγάλου ρυθμού παραγωγής ακουστικών σημάτων, καθιστά επίσης αρκετά δύσκολη και επίπονη τη διαχείριση και ανάλυση των δεδομένων και απαιτεί σημαντική υπολογιστή ισχύ. Η εξαίρεση (φιλτράρισμα) γεγονότων με μικρό αριθμό υπερβάσεων (counts) βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα των δεδομένων και μπορούμε με ασφάλεια να συμπεράνουμε ότι τα δοκίμια πωρόλιθου που διερευνήσαμε την ακουστική τους εκπομπή κατά την κυκλική τους μονοαξονική θλίψη δεν παρουσιάζουν φαινόμενο Kaiser. Ο τρισδιάστατος εντοπισμός των πηγών ακουστικών εκπομπών που σχετίζονται με τη δημιουργία και διάδοση των μικρο- και μακρορωγμών δεν έδωσε σαφή αποτελέσματα που να συμφωνούν με τη μακροσκοπική εικόνα του δείγματος στο τέλος της δοκιμής για τους λόγους που έχουν αναφερθεί προηγουμένως. Η φασματική ανάλυση των κυματομορφών παρουσιάζει, όπως και στην περίπτωση της γραμμικής φόρτισης, διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων με μέγιστο πλάτος που θα πρέπει να αντιστοιχούν σε διαφορετικούς μηχανισμούς ακουστικών εκπομπών στο υλικό χωρίς ωστόσο να είναι εφικτή οποιαδήποτε ταυτοποίηση.

Η παρούσα μελέτη θα μπορούσε να επεκταθεί επιπλέον σε μερικώς κορεσμένα (partially saturated) ή πλήρως κορεσμένα (saturated) δείγματα πωρόλιθου όπου μπορούν να διερευνηθούν οι αλλαγές στις διάφορες ακουστικές παραμέτρους αλλά και στις κυματομορφές λόγω της παρουσίας του ρευστού στους πόρους του υλικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

- 1/ Acoustic Emission / Microseismic activity, Vol. 1, Principles, Techniques and Geotechnical Applications, H. Reginald Hardy, 2003.
- 2/ “Έντοπισμός θέσης ακουστικής εκπομπής με συστοιχία πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων”, Διπλωματική εργασία, Ι. Παππούς, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2012.
- 3/ “Έντοπισμός θέσης πηγής ακουστικής εκπομπής”, Διπλωματική εργασία, Ι. Νικολακάκης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2011.
- 4/ “Εργαστηριακές εφαρμογές ακουστικής εκπομπής σε δοκίμια άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος”, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Α. Κυπριωτάκη, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, ΕΜΠ, 2012.
- 5/ “Ακουστική εκπομπή τεχνητών πετρωμάτων υπό θλίψη”, Διπλωματική εργασία, Δ. Παπαδόπουλος, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, ΕΜΠ, 2013.
- 6/ Acoustic Emission Testing, Basics for Research – Applications in Civil Engineering, C. U. Grosse, M. Ohtsu, (Editors), Springer, 2008.
- 7/ Acoustic emission in materials research: a review, K. Ohno, J. Acoustic Emission 29 (2011) 284 - 308.
- 8/ The Kaizer effect in rocks: principles and stress estimation techniques, A. Lavrov, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40 (2003) 151 – 171.
- 9/ NOESIS manual, Mistras Group Hellas ABEE, Athens, 2012.
- 10/ Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, ASTM.
- 11/ http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm
- 12/ http://www.mistrasgroup.gr/index_gr.htm