



# 2017

Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Τ.Ε.

Περάκη Δέσποινα

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### ***Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΙΟΓΚΩΤΙΚΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ***

Περάκη Δέσποινα



**ΧΑΝΙΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΙΟΓΚΩΤΙΚΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ**

**Περάκη Δέσποινα**

Επιβλέπων : Καθηγητής Δρ. Φ. Βαλλιανάτος

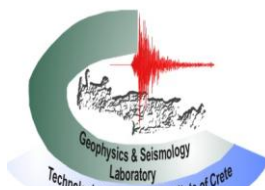
Επιτροπή Αξιολόγησης : Δρ. Φ. Βαλλιανάτος, Καθηγητής

Δρ Β. Σάλτας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Δρ. Ι.Μακρής, Καθηγητής

Ημερομηνία Παρουσίασης : 21 Φεβρουαρίου 2017

Αύξων Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας :



**UNESCO Chair**  
***SOLID EARTH PHYSICS and GEOHAZARDS RISK REDUCTION***  
**Technological Educational Institute of Crete, Greece**  
***Head of the Chair, Dr. Filippas Vallianatos***  
***Professor of Geophysics & Seismology***

## Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Γεωφυσικής και Σεισμολογίας του Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, κατά την χρονική περίοδο, Μάρτιος 2016- Δεκέμβριος 2016, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Φ. Βαλλιανάτου.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν να τη φέρω εις πέρας. Καταρχήν, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Φ. Βαλλιανάτο για την καθοδήγησή του, το αμείωτο ενδιαφέρον του για την εξέλιξη της εργασίας, την ενθάρρυνση του και γενικότερα για την άριστη συνεργασία. Στη συνέχεια, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή Δρ. Β. Σάλτα που από την αρχή μέχρι το τέλος μου μετέδωσε τις γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο και μου έλυσε τις όποιες απορίες μου για την καλύτερη δυνατή κατανόηση ορισμένων εννοιών και προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, ευχαριστώ πολύ την μεταπτυχιακή φοιτήτρια του Μ.Π.Σ. “Γεωπεριβαλλοντικοί Πόροι και Κίνδυνοι”, Νόρα Κουμουδέλη που με βοήθησε να προσαρμοστώ στον χώρο του εργαστηρίου και μου μεταλαμπάδευσε με ζήλο ότι είχε διδαχθεί ως τότε.

## Περιεχόμενα

.....	3
Ευχαριστίες.....	4
Abstract .....	7
Περίληψη.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	9
Εισαγωγή: Γενικά περί της μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου των ακουστικών εκπομπών και του διασταλτικού κονιάματος (ορισμός, εφαρμογές κτλ).....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	16
Η τεχνική των ακουστικών εκπομπών (ΑΕ).....	16
2.2 Ακουστικές Πηγές.....	18
2.3 Ακουστικά σήματα και χαρακτηριστικές παράμετροι ΑΕ.....	19
2.4 Θεωρία Ακουστικών Κυμάτων .....	23
2.4.1 Διάδοση κυμάτων .....	23
2.5 Εντοπισμός Θέσης Πηγής ΑΕ .....	28
2.5.1 Εντοπισμός σε μία διάσταση .....	28
2.5.2 Εντοπισμός σε δύο διαστάσεις .....	29
2.5.3 Εντοπισμός σε τρεις διαστάσεις .....	29
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> .....	30
Πειραματικό Μέρος .....	30
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης .....	30
3.2 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες .....	34
3.3 Προενισχυτές.....	35
3.4 Λογισμικά συλλογής και ανάλυσης δεδομένων ΑΕ .....	36
3.4.1 Λογισμικό ΑΕwin .....	36

3.4.2 Παραμετροποίηση λογισμικού για λήψη δεδομένων .....	37
3.4.3 Λογισμικό NOESIS.....	40
3.5 Δοκιμή Σπασίματος Μύτης Μολυβιού (LeadPencilBreakTest) .....	41
3.6 Υπολογισμός συντελεστή εξασθένισης.....	41
3.7 Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης κυμάτων .....	42
Δοκιμή AST (AutomaticSensorTest) .....	42
3.8 Δοκίμια .....	43
3.8.1 Πείραμα 1 <sup>ο</sup> Φυσική Πέτρα (NaturalStone).....	43
3.8.2 Πείραμα 2 <sup>ο</sup> Τσιμεντόλιθος (Concrete).....	45
3.8.3 Πείραμα 3 <sup>ο</sup> Τσιμεντόλιθος (Concrete).....	46
3.8.4 Πείραμα 4 <sup>ο</sup> Τραβερνίτης (Marble) .....	49
3.8.5 Πείραμα 5 <sup>ο</sup> Ασβεστόλιθος (Limestone).....	51
3.8.6 Πείραμα 6 <sup>ο</sup> Φυσική Πέτρα (NaturalStone) .....	53
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> .....	55
Πειραματικά Αποτελέσματα .....	55
Συμπεράσματα .....	73
Βιβλιογραφία .....	75

## **Abstract**

The subject of the present thesis is the investigation of rock fracturing with the use of a swelling material (DEXRAN) as part of the method of non-destructive acoustic emissions(AE) testing. The aim of this thesis is the observation and discovery of cracks on the specimens, which were constructed using various materials, by using the AE method.

Initially, the definitions and some applications of non-destructive testing, acoustic emissions, and swelling material (DEXPAN) are presented. Throughout the experimental part of the current thesis, tests were performed on specimens filled with the swelling material to investigate and evaluate the various parameters of AE. A multi-channel record system was used for the acoustic emissions with piezoelectric sensors adequately adjusted to each specimen.

In addition, the various types of acoustic waves are presented along with their propagation and attenuation. In all cases, the location of the AE source (in 1D and 2D) preceded the examination of the signal's spectral characteristics recorded by the sensors.

Subsequently, the types of software used during the experimental procedure, for the collection (AEwin) and the analysis (NOESIS) of the AE data are presented. A pencil tip fracturing test (LBPT) was employed to quantify the attenuation coefficient of the signal, while an automatic sensor test (AST) was used to calculate the propagation speed of the elastic waves.

Finally, some general conclusions on the method, particularly in combination with the swelling material, and the references cited in the current thesis are listed.

## Περίληψη

Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι η παρακολούθηση της θραύσης πετρωμάτων με τη χρήση διογκωτικού υλικού (εμπορική ονομασία, DEXPAN) στα πλαίσια της μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) των ακουστικών εκπομπών (ΑΕ). Σκοπός της ήταν η παρακολούθηση και ο εντοπισμός των ρωγμών δοκιμίων διαφορετικού υλικού με τη χρήση της τεχνικής ΑΕ.

Αρχικά, δίνεται ο ορισμός της έννοιας της μεθόδου του μη καταστροφικού ελέγχου, της ακουστικής εκπομπής και του διογκωτικού υλικού DEXPAN και επιπρόσθετα παρουσιάζονται κάποιες εφαρμογές των παραπάνω. Καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δοκίμια που είχαν πληρωθεί με το διογκωτικό υλικό προκειμένου να διερευνηθούν και να αξιολογηθούν οι διάφοροι παράμετροι των ΑΕ. Χρησιμοποιήθηκε πολυκάναλο σύστημα καταγραφής ΑΕ με χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων κατάλληλα προσαρμοσμένων στα εκάστοτε δοκίμια.

Επιπλέον, αναφέρονται οι διάφοροι τύποι των ακουστικών κυμάτων, η διάδοση τους καθώς και η εξασθένισή τους. Έγινε εντοπισμός των θέσεων των πηγών ΑΕ (σε μία διάσταση, σε δύο διαστάσεις και σε τρεις διαστάσεις) σε κάθε περίπτωση και έπειτα διερευνήθηκαν τα φασματικά χαρακτηριστικά των σημάτων που κατέγραψαν οι αισθητήρες.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα λογισμικά συλλογής (AEwin) και ανάλυσης (NOESIS) δεδομένων ΑΕ που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία όπως επίσης η δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού (LBPT) για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένισης σήματος και η δοκιμή AST (Automatic Sensor Test) για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων.

Τέλος, παρατίθενται κάποια γενικά συμπεράσματα για τη μέθοδο αυτή και πιο συγκεκριμένα σε συνδυασμό με το διογκωτικό υλικό καθώς και η βιβλιογραφία που βοήθησε σε μεγάλο ποσοστό στην υλοποίηση της εργασίας αυτής.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

**Εισαγωγή:** Γενικά περί της μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου των ακουστικών εκπομπών και του διασταλτικού κονιάματος (ορισμός, εφαρμογές κτλ)

### **Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) και τεχνική ακουστικών εκπομπών (ΑΕ)**

Ο Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) είναι μία μέθοδος κατά την οποία το υλικό αντικείμενο ή σύστημα δεν δέχεται καμία εξωτερική επέμβαση, είναι δηλαδή μία τεχνική εξέτασης της κατάστασης των συστημάτων η οποία επιτρέπει την ακεραιότητα του υλικού χωρίς όμως να προκαλεί οποιουδήποτε είδους αλλαγή σε αυτό. Η χρησιμότητα των μη καταστροφικών τεχνικών βασίζεται κυρίως στη μέτρηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών καθώς και στον εντοπισμό ελαττωμάτων (πχ εσωτερικές ρωγμές) σε κάποιο σύστημα χωρίς όμως να επηρεάζουν ούτε να καταστρέφουν την λειτουργικότητά του.

Η μέθοδος του ΜΚΕ είναι πολύ ουσιαστική για τον σχεδιασμό κατασκευών εφόσον μπορεί να ελέγξει πιθανές βλάβες των υλικών με αποτέλεσμα να αποφεύγονται ατέλειες που απειλούν τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής και προπάντων να εξασφαλίζεται η ανθρώπινη ασφάλεια.

Η τεχνική των ακουστικών εκπομπών (ΑΕ) έγκειται στις μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) και μάλιστα αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές καθώς έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για επί τόπου έλεγχο ασφάλειας σε περίπτωση δημιουργίας και εξέλιξης ρωγμών σε μεγάλες κατασκευές (δεξαμενές, γέφυρες, κτλ).

Ακουστική εκπομπή καλούμε το φαινόμενο κατά το οποίο όταν ένα στερεό φορτίζεται με αρκετά υψηλές τάσεις, τότε το υλικό παράγει ήχους με τη μορφή διακριτών παλμών (hits). Σύμφωνα με τον ορισμό της ASTM (American Society for Testing and Materials) η ακουστική εκπομπή (Acoustic Emission, AE) περιλαμβάνει όλα τα φαινόμενα που αφορούν στη δημιουργία και μετάδοση περιορισμένης διάρκειας ελαστικών κυμάτων μέσα σε ένα υλικό λόγω απότομης απελευθέρωσης ενέργειας η οποία παράγεται από το ίδιο το αντικείμενο, επομένως δεν απαιτείται εξωτερική ενέργεια.

Η πηγή αυτών των κυμάτων μπορεί να είναι η έναρξη και μετάδοση αστοχίας στο υλικό, είτε η τοπική μετατόπιση έπειτα από πλαστική παραμόρφωση. Πηγές ακουστικής εκπομπής μπορεί επίσης να δημιουργηθούν κατά την τήξη του υλικού και την αλλαγή φάσεως, λόγω θερμικών τάσεων.

Η ΑΕ, ως μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) βασίζεται στη μετατροπή των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κατάλληλους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες με εύρος συχνοτήτων λειτουργίας 20-1200kHz. Οι αισθητήρες αυτοί εφαρμόζονται στην επιφάνεια της υπό εξέταση κατασκευής, τοποθετώντας στο σημείο επαφής τους με το υλικό κάποιο παχύρρευστο υγρό για τη σύζευξη των δύο υλικών (couplant). Στη συνέχεια το ηλεκτρικό σήμα κάθε αισθητήρα ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία από κατάλληλο ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Ο έλεγχος με ακουστική εκπομπή είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται εκτενώς σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως για παράδειγμα στην επιθεώρηση και τον έλεγχο σωληνώσεων πιεστικών δοχείων, δεξαμενών, γεφυρών, αεροσκαφών καθώς επίσης σε κεραμικά και σύνθετα υλικά.

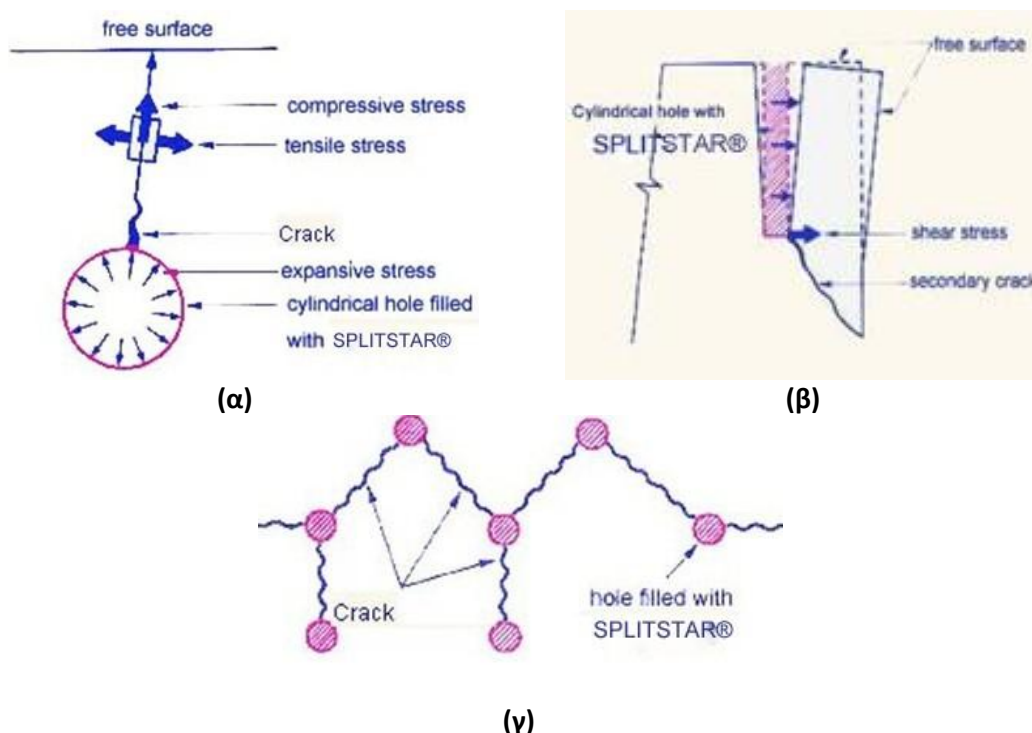
Άλλες Εφαρμογές της τεχνικής των ΑΕ:

- ✓ Εργαστηριακή ή Βιομηχανική χρήση
- ✓ Εντοπισμός διάβρωσης
- ✓ Δοκιμές μερικής αποφόρτισης μετασχηματιστών
- ✓ Ποιοτικός έλεγχος παραγωγικής διαδικασίας
- ✓ Αξιολόγηση γήρανσης αεροσκαφών
- ✓ Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας εγκαταστάσεων & κατασκευών
- ✓ Δοκιμές σε βυτιοφόρα βαγόνια & κυλινδρικά δοχεία αερίου
- ✓ Έλεγχος πυθμένα δεξαμενών
- ✓ Έλεγχοι προηγμένων υλικών, κεραμικών & συνθέτων
- ✓ Έλεγχοι πιεστικών δοχείων, σφαιρικών ή κυλινδρικών δεξαμενών
- ✓ Έλεγχοι διαρροών σε υπέργειες & υπόγειες σωληνώσεις, σε σωλήνες αερίου ή ατμού υψηλής πίεσης

Περισσότερες λεπτομέρειες για τη θεωρία των ακουστικών κυμάτων, τους τύπους ακουστικών σημάτων και τον εντοπισμό της θέσης των πηγών δίδονται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

## Διογκωτικό κονίαμα

Το διογκωτικό κονίαμα (expansivegrout) αποτελεί ένα μη εκρηκτικό μέσο κατεδάφισης. Παρέχεται σε μορφή κόνεως η οποία όταν αναμιγνύεται με κατάλληλη αναλογία νερού έχει την ιδιότητα να διαστέλλεται προκαλώντας συμπιεστικές τάσεις στα εσωτερικά τοιχώματα του υπό εξέταση υλικού που μπορεί να φτάσουν τα 50 MPa μετά από μερικές ώρες. Ως αποτέλεσμα, έχουμε δημιουργία ρωγμών, τη διάδοσή τους και την αύξηση του πλάτους τους, και τελικά την θραύση του υλικού (Εικόνα 1.1). Η χρήση του DEXPAN είναι πολύ απλή και δεν απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις αλλά ούτε εξεζητημένο εξοπλισμό. Αρχικά, ανοίγεται με ένα τρυπάνι μη διαμπερές διάτρημα στο προς θραύση υλικό και έπειτα καθαρίζεται με πεπιεσμένο αέρα. Εν συνεχεία, γίνεται η παρασκευή του κονιάματος σύμφωνα με την ποσότητα που επιθυμούμε (ανάλογα με το υλικό και τον όγκο του) και αντί εκρηκτικά που τοποθετούνται παραδοσιακά, εγχέεται αυτό το μείγμα στην οπή που ανοίχτηκε. Αφήνεται κάποιες ώρες ή και μέρες αν χρειαστεί, ώστε το κονίαμα να αρχίσει να στεγνώνει μέσα στο διάτρημα και να γίνει η έναρξη των διασταλτικών του ιδιοτήτων με σκοπό την θραύση του αντικειμένου.



Εικόνα 1.1 (α) Ο μηχανισμός θραύσης του υλικού που έχει πληρωθεί με διογκωτικό κονίαμα (β) Δημιουργία ρωγμής σε μάζα υλικού με 2 ελεύθερες επιφάνειες (γ) Στην περίπτωση πολλών διατρημάτων, οι ρωγμές από κάθε οπή διαδίδονται προς τις υπόλοιπες και τελικά ενώνονται.

Στη συνέχεια παρατίθενται εφαρμογές του διογκωτικού κονιάματος (Εικόνα 1.2).

- 1) Οπλισμένο σκυρόδεμα κατεδάφισης, σκυρόδεμα σπασίματος & απομάκρυνση σκυροδέματος
  - Κατεδάφιση της μάζας οπλισμένου σκυροδέματος, θεμέλια σκυροδέματος για μηχανήματα, προβλήτες, κολώνες, δοκάρια, γέφυρες
  - Μερική επιλεκτική κατεδάφιση, αφαίρεση σκυροδέματος, ελεγχόμενη κατεδάφιση διαφόρων κατασκευών από σκυρόδεμα
  - Κατεδάφιση όταν δεν μπορεί να γίνει χρήση εκρηκτικών υλών (TNT, δυναμίτη, Nonex) λόγω έλλειψης αδειών για ανατινάξεις
- 2) Σπάσιμο πέτρας, ανατίναξη πέτρας, υπόγεια εκσκαφή πέτρας
  - Ανασκαφή υπόγειων πετρωμάτων (ασβεστόλιθος, γρανίτης, μάρμαρο)
  - Ισοπέδωση βραχώδους γης, ανασκαφή βράχων
  - Διάσπαση ογκολίθων και ανατινάξεις βράχων
  - Κατεδαφίσεις για επέκταση δρόμου
  - Κατεδαφίσεις για οικιστική ανάπτυξη
  - Εκσκαφές συνδεόμενες με διάνοιξη σηράγγων, ορυγμάτων στο βράχο
- 3) Ορυχεία και λατομεία φυσικής πέτρας
  - Μη εκρηκτική μέθοδος ανατίναξης φυσικής πέτρας, ασβεστόλιθου, όνυχα, γρανίτη, μαρμάρου
  - Ελεγχόμενη επέκταση ρωγμών προς αποφυγή σπατάλης πολύτιμων λίθων
- 4) Υποβρύχια κατεδάφιση σκυροδέματος και σπάσιμο πέτρας με τη χρήση πλαστικού σωλήνα

Ακολουθούν διάφορα πλεονεκτήματα χρήσης του διογκωτικού κονιάματος σε σχέση με παραδοσιακές μεθόδους

- Αποφεύγεται ο θόρυβος
- Δεν υφίστανται δονήσεις του εδάφους και εκρήξεις αέρα με αποτέλεσμα να μην δημιουργούνται νέφη σκόνης
- Δεν απαιτούνται άδειες και πιστοποιήσεις ανατινάξεων
- Αποφεύγεται η σπατάλη πολύτιμων λίθων
- Το κόστος του εξοπλισμού είναι χαμηλότερο
- Αυξημένη ασφάλεια
- Αυξημένη παραγωγή πέτρας
- Εύκολη συντήρηση εξοπλισμού
- Δεν απαιτείται νερό ψύξης και τροφοδοτικά υψηλής τάσης

Προϋποθέσεις σωστής χρήσης για καλύτερα αποτελέσματα:

- 1) Συνιστάται να ανοίγεται οπή διαμέτρου ,περίπου 1-1/2 ίντσες (εξαρτάται από το μέγεθος του υλικού)
- 2) Αν ανοιχτούν παραπάνω από μία οπές πρέπει να δοθεί προσοχή στην μεταξύ τους απόσταση (ανάλογα με την πυκνότητα του υλικού και το μέγεθος των οπών)
- 3) Προσδιορισμός τύπουDEXPANπου θα χρησιμοποιηθεί σύμφωνα με τη θερμοκρασία (23°-50°F, 50°-77°F, 77°-104°F)
- 4) Συνιστάται να εφαρμόζεται νωρίς το πρωί ή αργά το απόγευμα
- 5) Η οπή δεν πρέπει να πληρώνεται εντελώς, καλό είναι το κονίαμα να απέχει λίγα χιλιοστά από την κορυφή.

Η απόδοση του διογκωτικού κονιάματος αναφορικά με το επιτυχές αποτέλεσμα και το χρόνο δράσης του, επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- 1) ο λόγος ανάμιξης του κονιάματος με νερό. Μεγαλύτερη ποσότητα νερού από την προβλεπόμενη μπορεί να ελαττώσει τη μέγιστη τάση που αναπτύσσεται αλλά και το χρόνο που απαιτείται γι αυτό, καθυστερώντας αρκετά τη δράση του (Εικόνα 1.3α).
- 2) η θερμοκρασία. Χρήση σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, προκαλούν την εμφάνιση μεγαλύτερων τάσεων στο εσωτερικό της οπής και σε μικρότερο χρονικό διάστημα.
- 3) Η διάμετρος του διατρήματος. Διατρήματα με μεγαλύτερες διαμέτρους έχουν αρνητικά αποτελέσματα.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το διογκωτικό κονίαμα Dexpan που παρουσιάζει χρόνο δράσης μερικών ωρών.



(α)

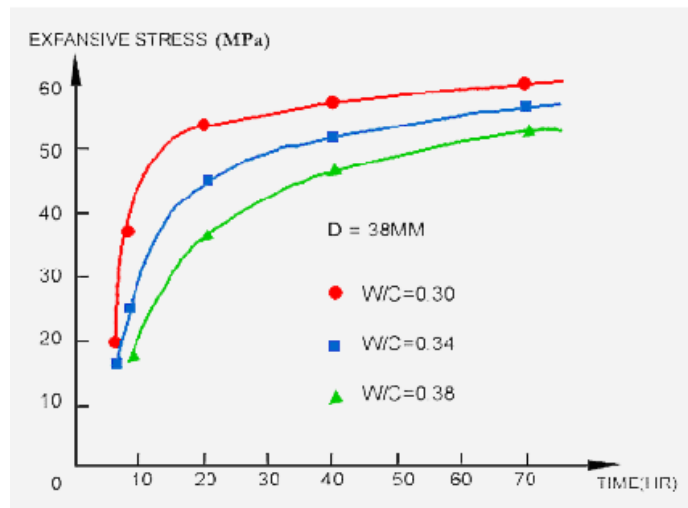


(β)

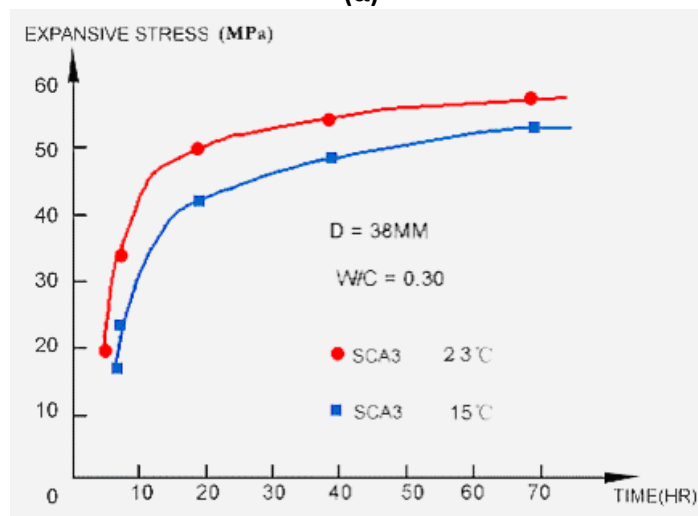


(γ)

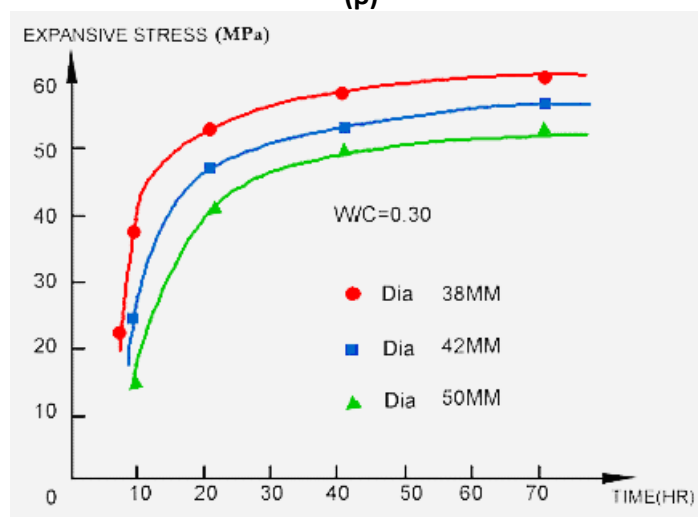
Εικόνα 1.2 Εφαρμογές του διογκωτικού κονιάματος (α) για τη θραύση και απομάκρυνση μεγάλου όγκου πετρώματος για κατασκευή πισίνας (ΗΠΑ, 2004), (β) σε λατομείο ασβεστόλιθου (Missouri, US, 2004) και (γ) σε λατομείο γρανίτη (Idaho, US, 2004) Πηγή, [www.Dexpan.com](http://www.Dexpan.com).



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του διογκωτικού κονιάματος. Επίδραση (α) της αναλογίας νερού/κονιάματος (β) της θερμοκρασίας και (γ) της διαμέτρου του διατρήματος στην πίεση που αναπτύσσεται λόγω της διαστολής του.

(Πηγή, [http://www.quarryingtools.com/products\\_detail/productId=27.html](http://www.quarryingtools.com/products_detail/productId=27.html))



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### Η τεχνική των ακουστικών εκπομπών (ΑΕ)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ακουστική εκπομπή είναι το σύνολο των φαινομένων στα οποία ηχητικά κύματα δημιουργούνται από την απότομη απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές σε ένα υλικό. Έχει τη δυνατότητα να καλύπτει και το ακουστικό φάσμα αλλά κατά κύριο λόγο αναφέρεται σε υπερήχους με συχνότητες 1kHz έως 1MHz.

Αποτελεί ένα πλέον συνηθισμένο φαινόμενο στην καθημερινότητά μας, από το πιο απλό, όπως για παράδειγμα ο ήχος που παράγεται όταν ένα μολύβι που σπάει μέχρι κάτι πιο σύνθετο όπως είναι ένας σεισμός. Η ένταση της ακουστικής εκπομπής διαφέρει ανάλογα με το φαινόμενο, στην περίπτωση του μολυβιού η ένταση είναι μικρής κλίμακας σε αντίθεση με την περίπτωση του σεισμού όπου η ακουστική εκπομπή είναι μεγάλης κλίμακας. Σε κάθε περίπτωση όμως ο μηχανισμός παραγωγής της ακουστικής εκπομπής είναι ο ίδιος είτε αναφέρεται σε ρωγμή που προκλήθηκε σε κάποιο υλικό είτε αναφέρεται σε ρωγμή που προκλήθηκε στο υπέδαφος.

Ειδικοί πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες που εφάπτονται πάνω στο υλικό χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των ελαστικών κυμάτων που δημιουργούνται. Οι ιδιότητες του υλικού είναι αυτές που καθορίζουν το ποσό της απόσβεσης ενός κύματος ακουστικής εκπομπής στο εσωτερικό του. Είναι λογικό ότι η απόσβεση σε μεταλλικά υλικά είναι σαφώς μικρότερη από αυτήν σε πορώδη υλικά όπως το ξύλο, ο ψαμμίτης κτλ. Επομένως η καταγραφή των ελαστικών κυμάτων που δημιουργούνται από αστοχίες του υλικού από αισθητήρες οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δοκιμίου, αποτελεί τη βασική αρχή της μεθόδου ΑΕ για τον έλεγχο κατασκευών.

Η τεχνική της ακουστικής εκπομπής υπερισχύει σε σχέση με άλλες τεχνικές καθώς δεν απαιτεί εξωτερική ενέργεια εφόσον η απαιτούμενη αυτή ενέργεια παράγεται από το ίδιο το υπό εξέταση αντικείμενο. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις άλλες τεχνικές, η ΑΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνεχή έλεγχο κατά τη διάρκεια κατασκευής ενός αντικειμένου. Η μέθοδος αυτή βρίσκει επίσης εφαρμογές στη συνεχή επιθεώρηση εξαρτημάτων και συστημάτων καθ' όλο το χρονικό διάστημα κατασκευής τους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως για τον εντοπισμό της θέσης διαρροών, τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων και τον έλεγχο πιεστικών δοχείων. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι παρέχει πληροφορίες σχετικά με την απόκριση του υλικού που βρίσκεται σε εντατικό πεδίο αναφορικά με την αντοχή του, τη



συσσώρευση βλάβης και την πιθανή έναρξη αστοχίας του. Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής μπορεί να εφαρμοστεί στην παρακολούθηση χημικών αντιδράσεων που δημιουργείται διάβρωση ή μετασχηματισμοί φάσεων.

Όταν ένα υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση ή φτάνει κοντά στα όρια ελαστικότητάς του οι ακουστικές εκπομπές που δημιουργούνται καθίστανται πιο εύκολες στην ανίχνευσή τους. Στην περίπτωση που οι παραμορφώσεις αυτές γίνονται σε ατομικό επίπεδο παράγεται ενέργεια η οποία με τη μορφή ελαστικών κυμάτων μεταδίδεται στο υλικό.

Το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται από την ακουστική εκπομπή και το πλάτος της κυματομορφής είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την έκταση και την ταχύτητα του γεγονότος, εφόσον εξαρτώνται από αυτές (την έκταση δηλαδή και την ταχύτητα). Το πλάτος της εκπομπής είναι ανάλογο της ταχύτητας διάδοσης των ρωγμών όπως επίσης και της επιφάνειας που δημιουργήθηκαν. Προφανώς οι μεγαλύτερες και οι πιο ευδιάκριτες ρωγμές έχουν την δυνατότητα να παράγουν ισχυρότερα ακουστικά σήματα σε σχέση με τις ρωγμές οι οποίες δημιουργήθηκαν με πιο αργό ρυθμό καλύπτοντας την ίδια απόσταση.

Άλλο βασικό στοιχείο της μεθόδου ΑΕ είναι η ανίχνευση και η μετατροπή των ακουστικών σημάτων σε ηλεκτρικά. Με την ανάλυση αυτών των σημάτων μπορούν να αποκομισθούν ουσιώδης πληροφορίες που αφορούν την προέλευση και τη σημαντικότητα μίας παραμόρφωσης στο υλικό. Με ειδικό εξοπλισμό γίνεται ο εντοπισμός των ελαστικών κυμάτων καθώς και ο διαχωρισμός των χρήσιμων σημάτων από τα υπόλοιπα.

Ο θόρυβος που πιθανότατα μπορεί να υπάρχει περιορίζει την ευαισθησία ενός συστήματος. Θόρυβος θεωρείται οποιοδήποτε ανεπιθύμητο σήμα που ανιχνεύεται από τους αισθητήρες όπως για παράδειγμα τριβές ή δονήσεις πάνω στο εξεταζόμενο υλικό. Είναι δυνατό να αποφευχθεί μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων μείωσης θορύβου ή απλά το αντικείμενο να βρίσκεται σε ελεγχόμενο χώρο με τις ελάχιστες δυνατές πηγές θορύβου από το γύρω περιβάλλον ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία των μετρήσεων.

Παρακάτω παραθέτονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου ΜΚΕ ακουστικής εκπομπής.

#### Πλεονεκτήματα

- Είναι δυνατός ο καθορισμός της θέσης ανάπτυξης ρωγμών. Μπορεί να καθοριστεί η πηγή της ακουστικής εκπομπής από την καθυστέρηση των σημάτων που λαμβάνουν διαφορετικοί αισθητήρες.

- Η δυναμική των υλικών μπορεί να παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο.
- Μπορεί να γίνει έλεγχος ολόκληρης της κατασκευής.
- Η κατηγοριοποίηση και η διεύθυνση των ρωγμών μπορούν να καθοριστούν με ανάλυση κυματομορφών.
- Είναι δυνατός ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο.
- Δεν είναι απαραίτητη η διακοπή λειτουργίας των διεργασιών ακόμα και σε περιπτώσεις υψηλής θερμοκρασίας.
- Είναι εφικτός ο έλεγχος σε κατασκευές επικαλυμμένες με μονωτικό υλικό χωρίς να απαιτείται η αφαίρεση του υλικού εκτός των σημείων που θα τοποθετηθούν αισθητήρες.

### Μειονεκτήματα

- Είναι δύσκολη η διάκριση μεταξύ των πραγματικών σημάτων ακουστικής εκπομπής και του θορύβου.
- Για ορισμένα υλικά τα σήματα ΑΕ αναπτύσσονται μόνο όταν η φόρτιση φτάσει στο όριο παραμόρφωσης.
- Ορισμένα υλικά, όπως για παράδειγμα το ξύλο, μειώνουν κατά πολύ το πλάτος των σημάτων και καθιστούν δύσκολο τον εντοπισμό τους στους αισθητήρες.
- Είναι δύσκολος ο υπολογισμός της θέσης ΑΕ σε περίπτωση μη ομογενών υλικών όπου οι ταχύτητες διάδοσης είναι διαφορετικές στις διάφορες διευθύνσεις.

## 2.2 Ακουστικές Πηγές

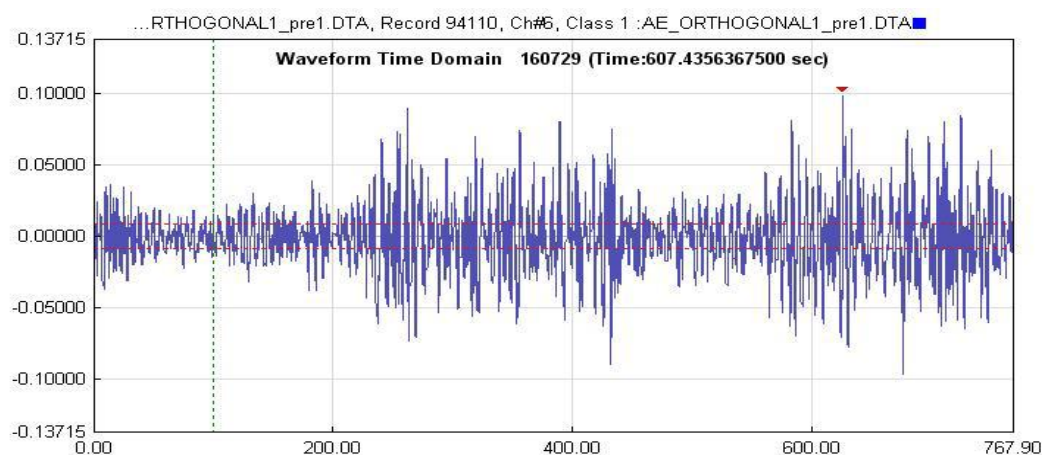
Η εκπομπή των ακουστικών κυμάτων λαμβάνει χώρα όταν οι τοπικές τάσεις είναι αρκετά υψηλές ώστε να δημιουργήσουν εκ νέου πλαστικές παραμορφώσεις. Αυτό αποτελεί συχνό φαινόμενο στις περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, όπου η τάση αυξάνει λόγω της τοπικής γεωμετρίας. Συγκεντρώσεις τάσεων εμφανίζονται γύρω από σπασίματα, ρωγμές, σε συγκολλήσεις και γενικότερα σε δομικές ασυνέχειες.

Από τη στιγμή που το υλικό βρίσκεται σε φόρτιση η μορφή του αλλάζει (επιμήκυνση, συμπίεση, διάτμηση), με λίγα λόγια «παραμορφώνεται». Η παραμόρφωση αυτή απαρτίζεται από δύο μέρη, την ελαστική ή γραμμική παραμόρφωση η οποία είναι αντιστρεπτή (δηλαδή μηδενίζεται όταν αποφορτιστεί το υλικό) και από την πλαστική η οποία είναι μόνιμη και κάνει την εμφάνιση της όταν η τάση είναι αρκετά υψηλή.

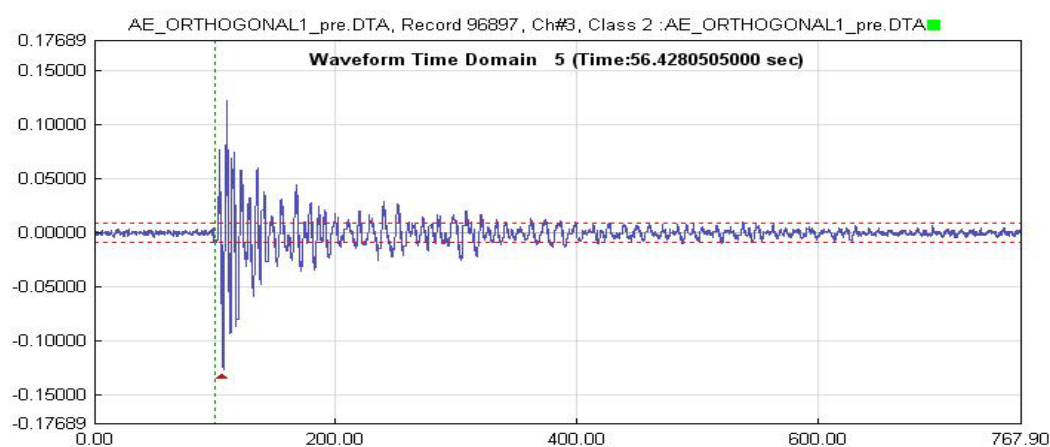
Η ελαστική παραμόρφωση συμβαίνει μετά την εφαρμογή του φορτίου ενώ το πεδίο τάσεων και παραμορφώσεων ανακατανέμεται στο υλικό προκειμένου να επέλθει ισορροπία. Αυτή η ανακατανομή λαμβάνει χώρα με την ταχύτητα του ήχου μέσω ελαστικών κυμάτων. Η πλαστική παραμόρφωση μπορεί να εμφανιστεί με κάποια καθυστέρηση, κάτι που γίνεται αρκετά συχνά σε μη μεταλλικά υλικά.

## 2.3 Ακουστικά σήματα και χαρακτηριστικές παράμετροι AE

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



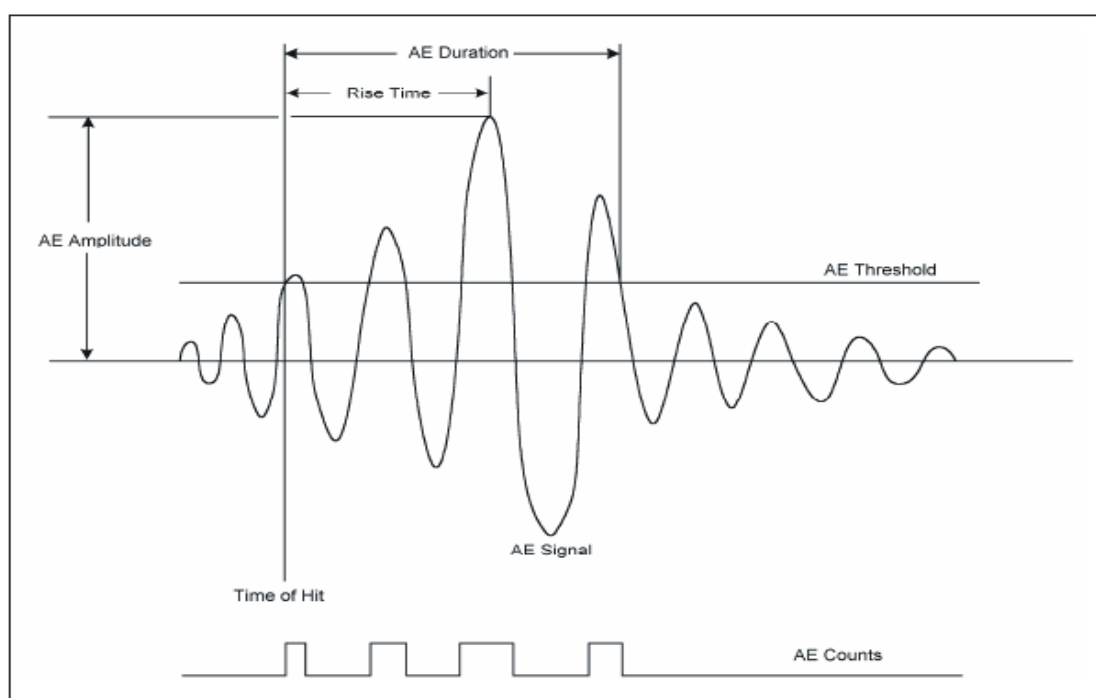
Εικόνα 2.3 i) Κυματομορφή συνεχούς ακουστικής εκπομπής (continueAE)



Εικόνα 2.3 ii) Κυματομορφή στιγμιαίας ακουστικής εκπομπής κρουστικού σήματος (bursttypeAE)

Τα σήματα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες διακρίνονται σε κρουστικά και συνεχή, ανάλογα με την πηγή προέλευσης τους η οποία μπορεί να είναι μία μεμονωμένη έναρξη μικρορωγμής ή καταγραφή επαναλαμβανόμενων και χρονικά επικαλυπτόμενων γεγονότων ή και ολίσθηση μεταξύ επιφανειών(Εικόνα 2.3 i&ii).

Ήδη από την έναρξη εφαρμογής της ΑΕΤ είχε δοθεί έμφαση στην επιλεκτική αξιοποίηση παραμέτρων της συνολικής κυματομορφής που καταγράφεται από τον αισθητήρα. Στην γραφική παράσταση (Εικόνα 2.4) που ακολουθεί παρακάτω απεικονίζεται μία τυπική κυματομορφή η οποία λαμβάνεται με την βοήθεια κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού σε συνδυασμό με τις απαραίτητες πληροφορίες που περιέχει ένα σήμα ΑΕ από ένα υλικό. Οι παράμετροι της κυματομορφής αναφέρονται και ορίζονται παρακάτω. Λόγω των σύγχρονων μέσων συλλογής και ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, καθίσταται πλέον εφικτό, πέραν των διαφορετικών παραμέτρων που καταγράφονται και αναλύονται, να αποθηκευτεί η πλήρης κυματομορφή σε καθένα από τους αισθητήρες δίνοντας με αυτόν τον τρόπο την δυνατότητα ανάλυσης σε μεταγενέστερο χρόνο και τη δημιουργία βάσεων δεδομένων (post-processinganalysis).



Εικόνα 2.4 Γραφική παράσταση κυματομορφής ΑΕ

## Λίστα βασικότερων παραμέτρων ΑΕ

- **Κατώφλι (Threshold):** Η τιμή της ελάχιστης τάσης που έχει οριστεί. Τη στιγμή που ξεπεραστεί αυτή η τάση τότε αρχίζει το σύστημα να καταγράφει την ακουστική εκπομπή.
- **Χρόνος κτυπήματος (timeofhit):** Η χρονική στιγμή που ανιχνεύεται το σήμα από το σύστημα, δηλαδή μόλις το πλάτος του σήματος ξεπεράσει το κατώφλι που έχει οριστεί.
- **Πλάτος (Amplitude):** Η μέγιστη τάση του σήματος που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια ενός χτυπήματος. Μετριέται σε dB και υπολογίζεται από τον τύπο,  $A(dB) = 20\log(V_{max}/1mV)$  dB-απολαβή προενισχυτή.
- **Ενέργεια (Energy):** Το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της τάσης κατά τη διάρκεια ενός ΑΕ χτυπήματος.
- **Υπερβάσεις (Counts):** Ο αριθμός των φορών που το σήμα ΑΕ έχει ξεπεράσει το ορισμένο κατώφλι.
- **Διάρκεια (Duration, D):** Ο χρόνος από την πρώτη φορά που το σήμα ξεπέρασε το κατώφλι μέχρι την τελευταία καταγραφή άνω του κατωφλίου.
- **RMS(RootMeanSquare):** Η ενεργό τιμή της τάσης σε Volt του ΑΕ σήματος.
- **ASL(AverageSignalLevel):** Το μέτρο του συνεχώς μεταβαλλόμενου και υπολογισμένου κατά μέσο όρο πλάτους του σήματος. Μετριέται σε dB και υπολογίζεται σε χρόνο από 0-1000msec
- **Χρόνος ανύψωσης(RiseTime, RT):** Ο χρόνος μεταξύ της έναρξης του σήματος ΑΕ (όταν αυτό υπερβεί το κατώφλι) και στην κορυφή που αντιστοιχεί στο μέγιστο πλάτος της τάσης του.
- **Γωνία ανύψωσης(RiseAngle):** Ο λόγος του χρόνου ανύψωσης RT προς το μέγιστο πλάτος A(σε ms/V).

- **CountstoPeak:** Τα counts μεταξύ της αρχής των μετρήσεων (από την υπέρβαση του κατωφλίου) μέχρι την κορυφή του μέγιστου πλάτους.
- **Μέση συχνότητα (Average Frequency):** Η μέση συχνότητα ολόκληρης της καταγραφής του ΑΕ χτυπήματος. Προκύπτει από τον λόγο  $AE\_counts/διδάρκεια$ .
- **Συχνότητα Αντήχησης (Reverberation Frequency):** Η μέση συχνότητα που καθορίζεται μετά από την κορυφή της κυματομορφής ΑΕ και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:  $(AE\_counts - counts\_to\_peak)/(D - RT)$ .
- **Συχνότητα εκκίνησης (Initiation Frequency):** Η μέση συχνότητα της κυματομορφής, υπολογισμένη από την αρχική υπέρβαση του κατωφλίου μέχρι και το μέγιστο πλάτος της κυματομορφής. Υπολογίζεται από τον τύπο,  $(AE\_counts\_to\_peak)/RT$ .
- **Ένταση σήματος (Signal Strength):** 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):** Η τιμή της ενέργειας του χτυπήματος ακουστικής εκπομπής, μετριέται σε attoJoule ( $10^{-18}$  Joule) και παίρνει τιμές από 0.000931aJ-1310.25nJ

## 2.4 Θεωρία Ακουστικών Κυμάτων

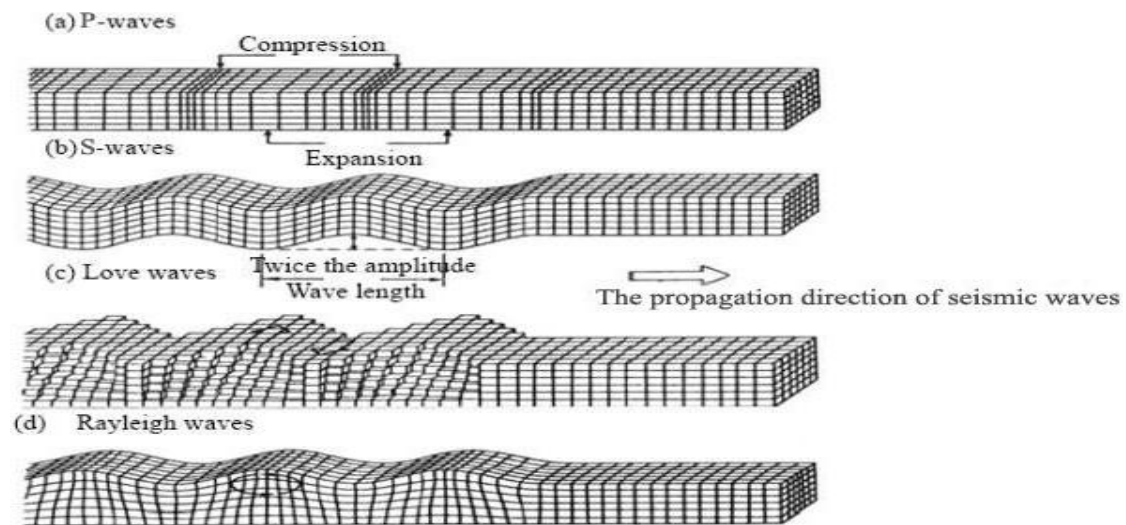
Οι ακουστικές συχνότητες διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις μέσα στο υλικό, όμως μερικές φορές παρατηρείται μεγαλύτερη κατευθυντικότητα η οποία εξαρτάται από την πηγή. Η μορφή των κυμάτων καθώς αυτά κινούνται μέσα στο υλικό αλλάζει σημαντικά. Το εντοπιζόμενο από τους αισθητήρες σήμα αποτελείται από πολλά κομμάτια των κυματομορφών που είχαν εκπνευστεί. Τα ακουστικά σήματα που εκπέμπει η πηγή διαρκούν μερικά εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου ( $\mu s$ ). Ο χρόνος του διαδιδόμενου κύματος μέχρι την εξασθένηση του κυμαίνεται από  $100\mu s$  μέχρι  $10 ms$ , ανάλογα το εξεταζόμενο υλικό. Η ένταση του διαδιδόμενου σήματος ΑΕ είναι ασθενέστερη από την ένταση κοντά στην πηγή. Κατά τη διάρκεια που το σήμα ταξιδεύει μέσα στο υλικό, το πλάτος του μειώνεται περίπου κατά 30% κάθε φορά που διπλασιάζεται η απόσταση που διένυσε από την πηγή. Σε 3D δομή η εξασθένηση είναι 50% ανά διπλασιασμό της απόστασης από την πηγή. Καθώς το κύμα ΑΕ κυκλοφορεί μέσα στο υλικό η κινητική του ενέργεια απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα.

Η ενέργεια μπορεί να διαδίδεται με τη μορφή επίπεδων, κυλινδρικών ή σφαιρικών κυμάτων μέσα στο υλικό, ανάλογα με τον μηχανισμό παραγωγής ελαστικών κυμάτων και τις συνοριακές συνθήκες. Η κίνηση των υλικών σημείων στον αισθητήρα ανίχνευσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η πηγή, η γεωμετρία της δομής, οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, το είδος και πλήθος των ασυνεχειών μέσα στο υλικό. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν το είδος του διαδιδόμενου κύματος, τις ταχύτητες διάδοσης, την εξασθένηση τους όπως και τα φαινόμενα ανακλάσεων-διαθλάσεων στα όρια ή στις διαχωριστικές επιφάνειες του υλικού.

### 2.4.1 Διάδοση κυμάτων

Τα ελαστικά κύματα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα κύματα χώρου (bodywaves), τα οποία διαδίδονται στο εσωτερικό του υλικού και τα κύματα επιφάνειας (surfacewaves), τα οποία διαδίδονται κατά μήκος της επιφάνειάς του ή ενός στρώματος, εντός του υλικού. Τα διαμήκη κύματα (κύματα πίεσης ή κύματα P) ανήκουν στην πρώτη κατηγορία όπου η κίνηση των υλικών σημείων του μέσου διάδοσης είναι κατά τη διεύθυνση διάδοσης (Εικόνα 2.4.1a) και τα εγκάρσια κύματα (κύματα διάτμησης ή κύματα S) όπου τα υλικά σημεία κινούνται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Εικόνα 2.4.1b). Τα εγκάρσια έχουν μικρότερη ταχύτητα διάδοσης γι αυτό ονομάζονται και δευτερογενή (secondarywaves) σε αντίθεση με τα διαμήκη

(primary waves). Οι ταχύτητες εξαρτώνται από τις ιδιότητες του μέσου αλλά γενικά ισχύει:  $u_s \approx 0.6 u_p$  (Πίνακας 2.4.1).



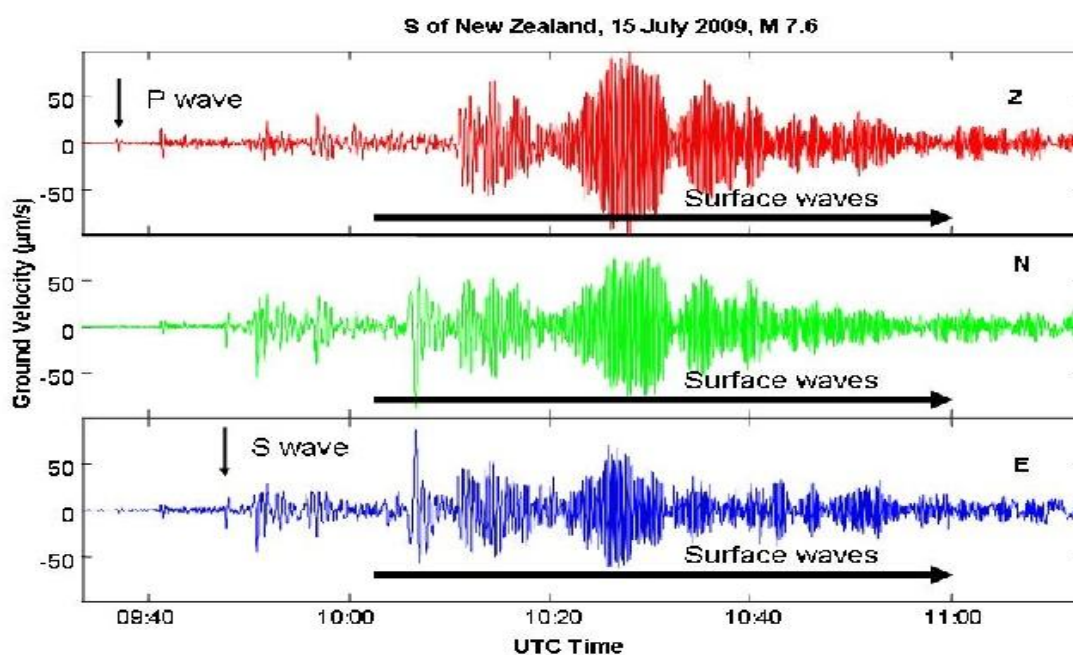
Εικόνα 2.4.1 Διεύθυνση διάδοσης και κίνηση των σημείων του υλικού μέσου (α) κύματα P (β) κύματα S (γ) επιφανειακά κύματα Love (δ) επιφανειακά κύματα Rayleigh

Υλικό	$U_p$ (m/s)	$U_s$ (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	<sup>1</sup>
Air	331	<sup>1</sup>
Ice	3,200	1,920 <sup>2</sup>
Sandstone	2,000	1,200 <sup>2</sup>
Limestone	3,200	1,920 <sup>2</sup>
Granite	5,000	3,000 <sup>2</sup>
Basalt	5,400	3,240 <sup>2</sup>
Halite	4,500	2,700 <sup>2</sup>
Shale	2,250	1,350 <sup>2</sup>
Coal	1,100	660 <sup>2</sup>

Πίνακας 2.4.1 Ταχύτητες διάδοσης P&S κυμάτων σε διαφορετικά υλικά



Όταν η κίνηση των υλικών σημείων του μέσου καθώς και η διεύθυνση διάδοσης βρίσκονται στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο, τα διατμητικά κύματα (κύματα SV) είναι πολωμένα. Αν η κίνηση των σημείων είναι πολωμένη σε οριζόντια διεύθυνση και κάθετα στη διάδοση του κύματος μιλάμε για πολωμένα κύματα SH. Τα κύματα Love και Rayleigh συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία των επιφανειακών κυμάτων (Εικόνα 2.4.1 c&d). 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 (SH επιφανειακά κύματα).



Σχήμα 2.4.1 Κυματομορφή ελαστικών κυμάτων, P(primary), S(secondary) και επιφανειακών κυμάτων (κύματα Rayleigh), διαφορετικής συχνότητας και πλάτους.

Τα πλάτη των επιφανειακών κυμάτων εξασθενούν λιγότερο σε σχέση με τα κύματα χώρου επομένως είναι ανιχνεύσιμα σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (2.4.1) έχουν μεγαλύτερα πλάτη από τα κύματα P και S τα οποία συσχετίζονται με ένα καθορισμένο γεγονός. Τα επιφανειακά κύματα καταγράφονται μετά από τα S κύματα καθώς οι ταχύτητες διάδοσης τους είναι περίπου  $0.92v_s$ . Οι ταχύτητες των P και S κυμάτων επηρεάζονται από παράγοντες όπως, η θερμοκρασία, η πίεση, η σύνθεση του υλικού και η μηχανική του κατάσταση.

## 2.4.2 Εξασθένιση Κυμάτων

Η ελάττωση της ενέργειας που εκπέμπεται από την πηγή του ακουστικού κύματος σε ένα υλικό με αποτέλεσμα την εξασθένιση του σήματος που καταγράφεται από τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα οφείλεται σε ένα σύνολο από παράγοντες όπως:

- Γεωμετρική διασπορά (μείωση ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και επομένως του πλάτους του σήματος)
- Εσωτερική τριβή (οποιοδήποτε μη ελαστικό χαρακτηριστικό του υλικού θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ή απορρόφηση ενέργειας)
- Σκέδαση (δημιουργία δευτερευόντων κυμάτων σε διάφορες διευθύνσεις)
- Αλλαγή ιδιομορφής (ανακλάσεις στα σύνορα της κατασκευής)

Το πλάτος ενός σφαιρικού ελαστικού κύματος είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της εκπεμπόμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, επομένως θα μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από την πηγή και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A(r) = A_0/r \quad (1)$$

όπου  $A_0$  είναι το μέγιστο πλάτος του σήματος στη θέση της πηγής (χωρίς εξασθένιση) και  $r$  είναι η απόσταση από την πηγή.

Λόγω εσωτερικών τριβών στο ελαστικό μέσο, απώλεια ενέργειας υφίσταται και το πλάτος, το οποίο μειώνεται εκθετικά:

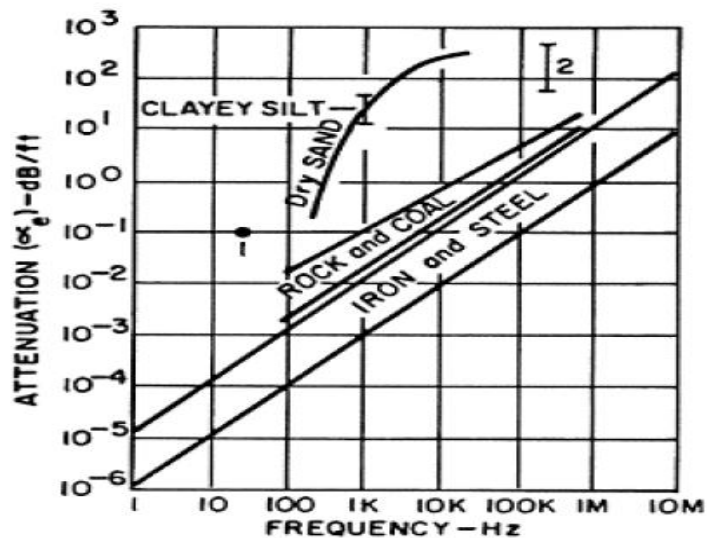
$$A(r) = A_0 e^{-\alpha r} \quad (2)$$

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής εξασθένισης του υλικού.

Η γεωμετρική εξασθένιση σε συνδυασμό με την εξασθένιση λόγω τριβών, δίνουν την ακόλουθη σχέση:

$$A = A_0 (e^{-\alpha_e r})/r \quad (3)$$

όπου  $\alpha_e$  είναι ο ισοδύναμος συντελεστής εξασθένισης που εξαρτάται από τη συχνότητα του κύματος (Σχήμα 2.4.2). Αύξηση της συχνότητας σημαίνει αύξηση του συντελεστή εξασθένισης.



Σχήμα 2.4.2 Γραφική παράσταση συντελεστή εξασθένισης ως προς συχνότητα, για διαφορετικά υλικά.

Χρησιμοποιώντας δύο αισθητήρες τοποθετημένους στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού και με την καταγραφή των πλατών των σημάτων από τεχνητή σημειακή πηγή (για παράδειγμα σπάσιμο μύτης μολυβιού, LBPT), μπορεί να υπολογισθεί ο συντελεστής εξασθένισης (σε dB/m) μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\alpha_e = \frac{20}{d} \log \frac{A_1}{A_2} \quad (4)$$

όπου

d: η απόσταση των δύο αισθητήρων και

A<sub>1</sub> , A<sub>2</sub>: τα πλάτη των σημάτων στους αισθητήρες

## 2.5 Εντοπισμός Θέσης Πηγής ΑΕ

Χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερους αισθητήρες καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός της θέσης της πηγής της ακουστικής εκπομπής επομένως και της περιοχής της δομικής αστοχίας. Από την ταχύτητα του ακουστικού κύματος και από τον χρόνο άφιξης στον εκάστοτε αισθητήρα γίνεται ο υπολογισμός της θέσης.

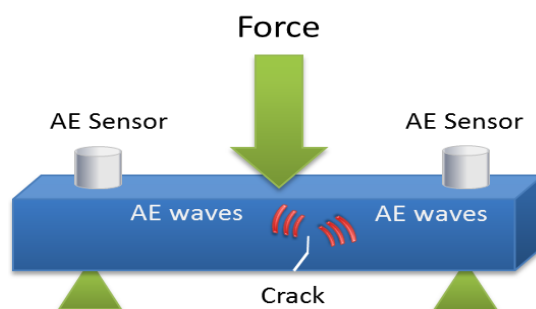
Γραμμικός ή μονοδιάστατος εντοπισμός θέσης εφαρμόζεται σε κυλίνδρους αερίου μεγάλου μήκους, σωληνώσεις και γενικότερα σε κατασκευές όπου η μία διάσταση είναι μεγαλύτερη εκ των άλλων δύο. Σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τα σήματα από δύο αισθητήρες για τον εντοπισμό της ακουστικής πηγής.

Επίπεδος ή δισδιάστατος εντοπισμός θέσης εφαρμόζεται σε μεγάλες επιφάνειες, σε δοχεία και δεξαμενές μεγάλου πάχους, χρησιμοποιώντας τα σήματα από τουλάχιστον τρεις αισθητήρες.

### 2.5.1 Εντοπισμός σε μία διάσταση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μονοδιάστατο εντοπισμό έχουμε όταν μία από τις διαστάσεις του υπό εξέταση υλικού είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες. Σε αυτήν την περίπτωση λοιπόν, εφαρμόζονται δύο αισθητήρες στις δύο άκρες του αντικειμένου (βλ Σχήμα 2.5.1). Έστω  $D$  η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων,  $V$  η ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στο υλικό και  $\Delta T$  η διαφορά των χρόνων άφιξης του σήματος στους δύο αισθητήρες. Η απόσταση της θέσης της ακουστικής πηγής από τον αισθητήρα που κατέγραψε πρώτος το σήμα δίνεται από τη σχέση:

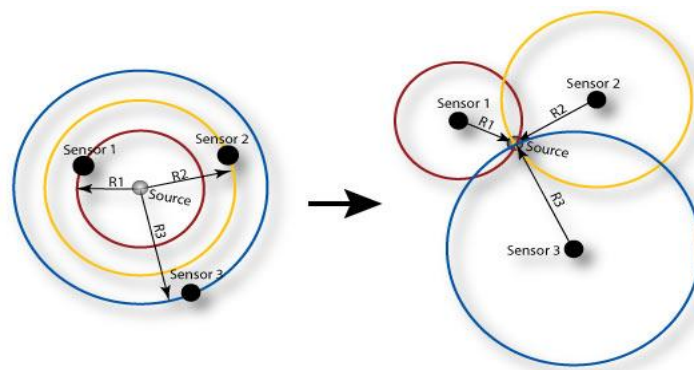
$$d = 1/2(D - \Delta TV) \quad (1)$$



Σχήμα 2.5. 1 Μονοδιάστατος εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ

### 2.5.2 Εντοπισμός σε δύο διαστάσεις

Στην περίπτωση της επίπεδης διάταξης για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής ΑΕ χρησιμοποιούνται τουλάχιστον τρεις αισθητήρες (Σχήμα 2.5.2). Το ελαστικό κύμα που παράγεται στη θέση πηγής διαδίδεται προς κάθε κατεύθυνση και τα κυκλικά μέτωπα κύματος διατρέχουν διαφορετικές αποστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  ωςότου ανιχνευθούν από τους αισθητήρες  $S_1$ ,  $S_2$  και  $S_3$ . Η θέση της πηγής θα βρίσκεται στο σημείο τομής των τριών κύκλων έχοντας σαν κέντρα τις θέσεις των αισθητήρων και ακτίνες ίσες με τις αποστάσεις που διέτρεξε το κύμα μέχρι να ανιχνευθεί από τον εκάστοτε αισθητήρα.



Σχήμα 2.5. 2 Εντοπισμός θέσης πηγής σε δύο διαστάσεις

### 2.5.3 Εντοπισμός σε τρεις διαστάσεις

Για τον εντοπισμό σε τρεις διαστάσεις των πηγών ΑΕ χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3D Location του λογισμικού συλλογής και ανάλυσης δεδομένων ακουστικών εκπομπών, AEwin. Αρχικά ορίστηκαν οι ακριβείς συντεταγμένες (σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων) των αισθητήρων στις πλευρές του δοκιμίου όπως επίσης και η ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων,  $u_r=3305$  m/s. Έπειτα, επαναφορτώθηκαν τα δεδομένα της δοκιμής (λειτουργία replay) με σκοπό να υπολογιστούν οι θέσεις των πηγών των ακουστικών εκπομπών. Το κάθε γεγονός ορίζεται ως η θέση της πηγής ΑΕ που ανιχνεύτηκε από 4 τουλάχιστον αισθητήρες. Συνήθως μεγαλύτερο πλήθος γεγονότων εντοπίζεται μεταξύ των αισθητήρων που βρίσκονται τοποθετημένοι σε απέναντι πλευρές του δοκιμίου.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Πειραματικό Μέρος

#### 3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

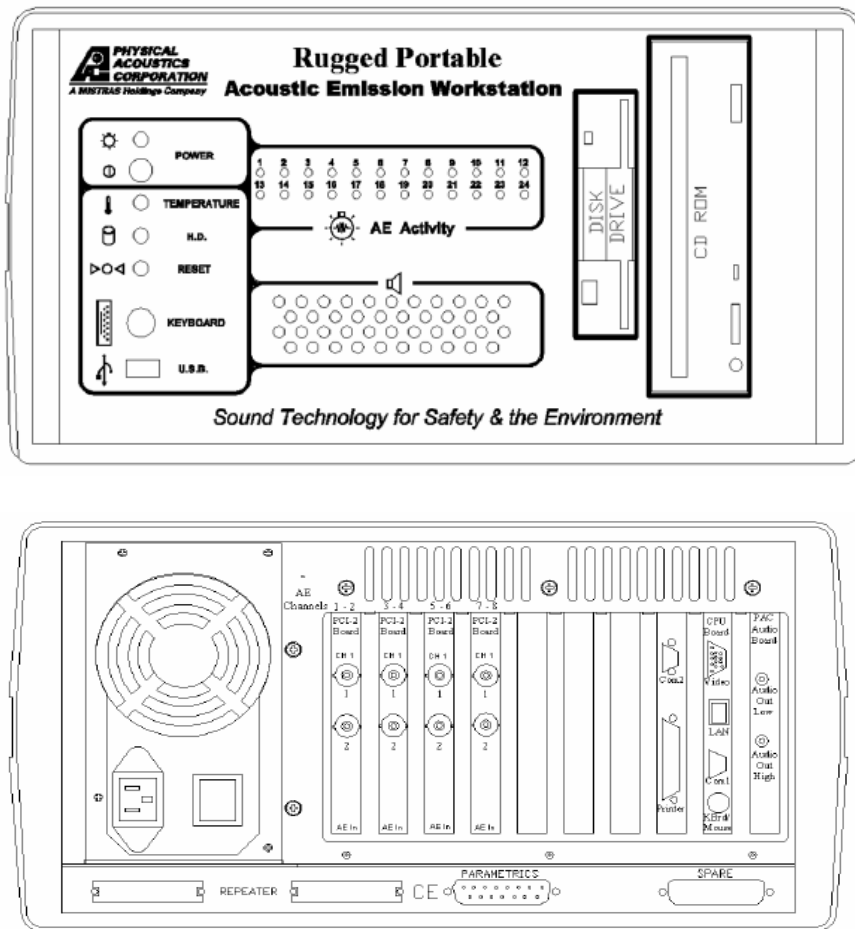
Για τις μετρήσεις των ακουστικών εκπομπών ΑΕ χρησιμοποιήθηκε πολυκάναλο φορητό σύστημα (DiSP) του οίκου PhysicalAcousticsCorporation, το οποίο είναι εξοπλισμένο με τρεις κάρτες PCI-2 (Εικόνα 3.1.1 και 3.1.2). Η κάρτα PCI-2 αποτελείται από δύο κανάλια για τη συλλογή δεδομένων ακουστικών εκπομπών υψηλής δειγματοληψίας (έως 40 Msamples/s) και για ψηφιακή επεξεργασία σήματος πάνω σε μία PCI κάρτα.



Εικόνα 3.1. 1Το φορητό σύστημα ΑΕ, PhysicalAcousticsPCI-2

Το ηλεκτρικό σήμα του αισθητήρα, περνάει μέσα από τον ενισχυτή και το ενδιάμεσο κύκλωμα (επιλογή ενίσχυσης 0-6dB) και έπειτα περνάει από το κύκλωμα φίλτρων. Χρησιμοποιούνται ένα από τα τέσσερα υπερηχητικά και ένα από τα έξι βαθυπερατά φίλτρα, ανάλογα με το ποια έχουν επιλεγεί από τον χρήστη.

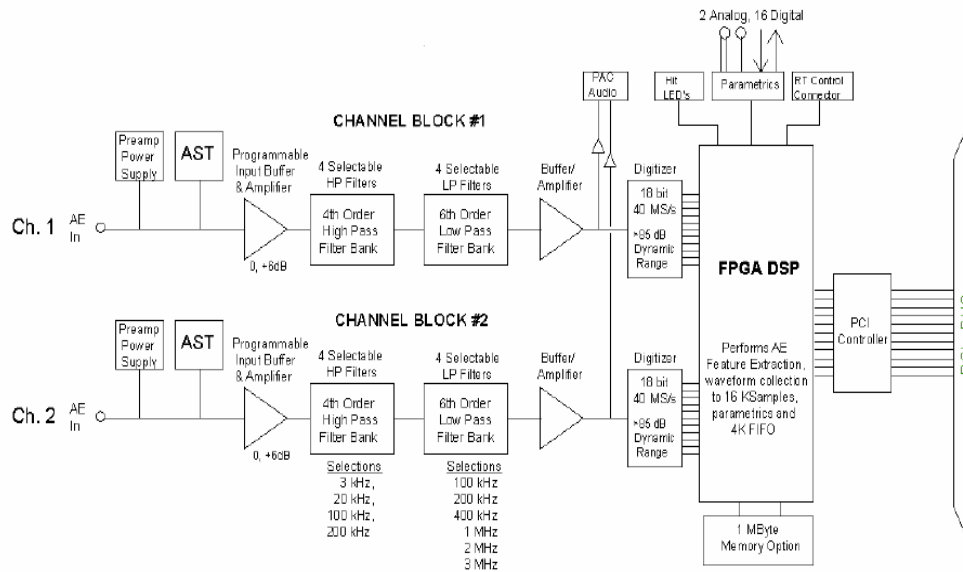
Στη συνέχεια, το φιλτραρισμένο σήμα περνάει στον 18bit αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα με ταχύτητα έως 40 MegaSamples/second. Έχοντας πλέον γίνει η μετατροπή του σήματος σε ψηφιακό, εισέρχεται στο DSPbasedFPGA όπου γίνονται δειγματοληψίες με πολύ χαμηλό θόρυβο προς 18bit επεξεργασία.



Εικόνα 3.1. 2 Οι δύο όψεις του πολυκάναλου συστήματος DiSP

Η διακριτοποιημένη κυματομορφή περνάει από εσωτερικό επεξεργαστή χτυπημάτων, απ' όπου λαμβάνονται κάποια χαρακτηριστικά του σήματος όπως για παράδειγμα ο αριθμός των hits καθώς και άλλοι παράμετροι, όπου μπορούν να επεξεργαστούν και να αποθηκευτούν.

Πάνω δεξιά στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα(3.1.3) παρατηρούνται τα βύσματα της PCI κάρτας, η κάρτα ήχου απ' όπου περνάει το σήμα όταν έχουμε ένα hit και τα led τα οποία αναβοσβήνουν.



Σχήμα 3.1.3 Σχηματικό διάγραμμα 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 $\Omega$ or 1000 $\Omega$ , 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 <sup>th</sup> order Butterworth  6 Low Pass –Computer selectable filters 100 kHz, 200 kHz, 400 kHz, 1000 kHz, 2000 kHz, & 3000 kHz, 6 <sup>th</sup> 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 <sup>th</sup> order Butterworth filters. <i>Note: When selecting greater than 10MSPS sampling rate, the 3.0MHz filter must be used.</i>

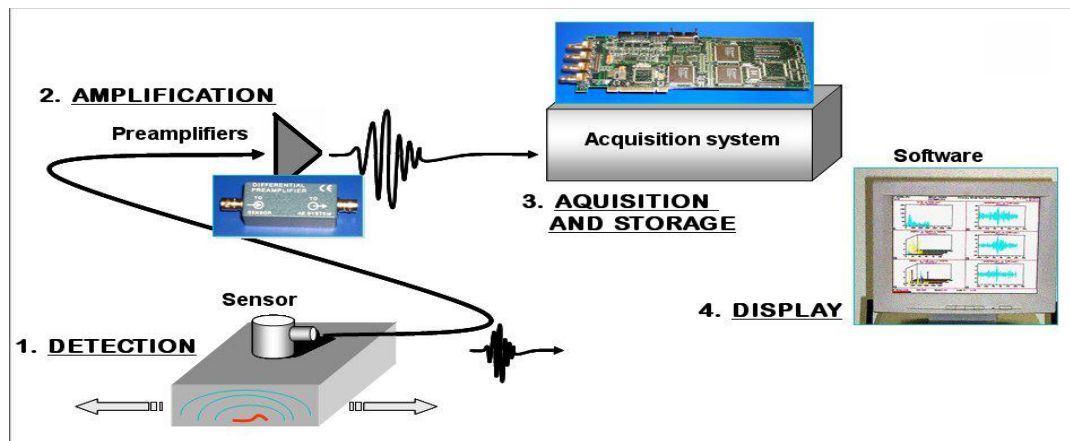
Noise (wideband): (Filtering can lower noise even more)	Filter	ASL (no input)	Minimum Threshold
	1kHz – 3MHz	4dB	17dB w/o preamp or sensor 22 dB w 2/4/6 & R15 24 dB with R15I sensor

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).

Πίνακας 3.1.4 Χαρακτηριστικά PCI-2 κάρτας





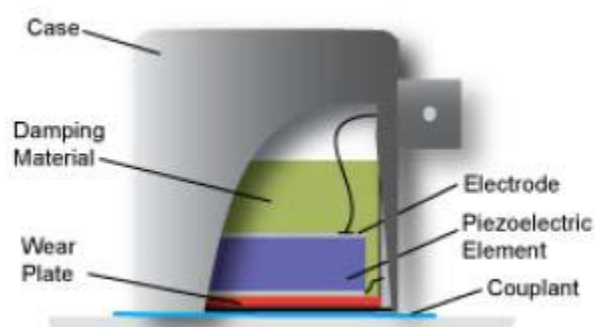
Σχήμα 3.1.5 Σχηματική απεικόνιση συστήματος συλλογής ακουστικών εκπομπών

Στο παραπάνω σχήμα δίδεται η σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής πειραματικής διάταξης για την καταγραφή των ακουστικών εκπομπών ΑΕ. Με τη χρήση υλικού σύζευξης (couplant) εφαρμόζονται πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού. Σαν υλικό σύζευξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από νερό μέχρι γράσο (στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε κόλλα σιλικόνης) ώστε να είναι εξασφαλισμένο ότι τα ελαστικά κύματα θα διαδοθούν από το υλικό στην επιφάνεια του αισθητήρα και δεν θα υπάρξει απόσβεση στη διεπιφάνεια επαφής τους.

Δεδομένου ότι το σήμα που παράγεται στον αισθητήρα από την ανίχνευση των ελαστικών κυμάτων είναι σημαντικά μικρό, είναι απαραίτητη η χρήση προενισχυτών πριν αυτό εισέλθει στο σύστημα καταγραφής και ανάλυσης. Αρκετές φορές οι προενισχυτές είναι ενσωματωμένοι στον αισθητήρα με σκοπό να διασφαλιστεί υψηλή τιμή σήματος προς θόρυβο. Έπειτα, το ενισχυμένο σήμα καταγράφεται από την μονάδα συλλογής και σχεδόν σε πραγματικό χρόνο εξάγονται οι παράμετροι των ΑΕ ενώ ταυτόχρονα είναι δυνατή η καταγραφή ολόκληρης της κυματομορφής για κάθε έναν από τους αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν.

### 3.2 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες

Πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται μηχανική τάση. Η δομή του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα όπως απεικονίζεται παρακάτω (εικόνα 3.2.1) αποτελείται από το περίβλημα του (case), το υλικό απόσβεσης (damping material), τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο (piezoelectric element) συνδεδεμένο με τα ηλεκτρόδια (electrodes) που μέσω καλωδίου καταλήγουν στον προενισχυτή και τέλος η θήκη στήριξης (wear plate). Για καλύτερη επαφή με το δοκίμιο χρησιμοποιείται σιλικόνη στην τοποθέτηση του αισθητήρα στην επιφάνεια του υλικού.



Εικόνα 3.2. 1 Δομή πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες PICOHF-1.2 με 500-1850kHz συχνοτική απόκριση. Παρακάτω στον πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

#### Πίνακας 3.2.2 Προδιαγραφές πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα

##### Dynamic

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

##### Environmental

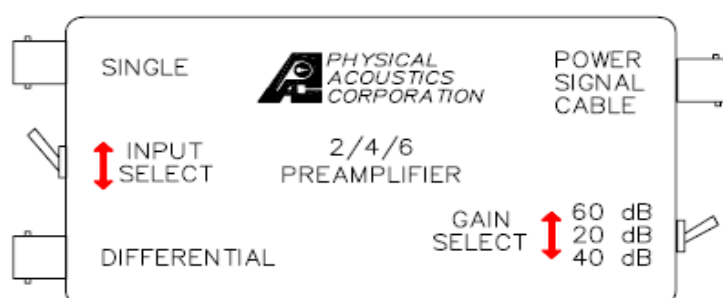
Temperature Range: -65 to 177°C  
Shock Limit : 500 g  
Completely enclosed for RFI/EMI immunity

##### 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

### 3.3 Προενισχυτές

Οι προενισχυτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι 0/2/4 της PAC, εύρους 0dB, 20dB, 40dB(το εύρος επιλέγεται από τον διακόπτη πάνω στον προενισχυτή). Αυτοί οι προενισχυτές χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει αμφιβολία για την απολαβή που χρειάζεται σε μία εφαρμογή ή για το εύρος συχνοτήτων. Έχουν ενσωματωμένα χαμηλοπερατά, υψηλερατά και ζωνοπερατά φίλτρα και προσφέρουν εύκολη αλλαγή φίλτρων χωρίς να χρειάζεται βαθμονόμηση.



Σχήμα 3.3. 1 Ενισχυτής 20/40/60

Επιλογή απολαβής: 0,20,40dB  $\pm 0,5$ dB

Σύνθετη αντίσταση εισόδου: 10k $\Omega$  // 15pF

Απαιτούμενη τάση λειτουργίας: 18-28Vdc

Ένταση ρεύματος: 30mA (AST installed) / 28 mA (χωρίς AST)

Δυναμική περιοχή: 75dB (με αισθητήρα R15) / 80dB (50 $\Omega$  είσοδο)

Θερμοκρασία λειτουργίας: -40 έως 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 $\Omega$ Load):	3Vpp	20Vpp	20Vpp
- CMRR (500kHz):	29dB	29dB	28dB
- Noise(RMS rti):			

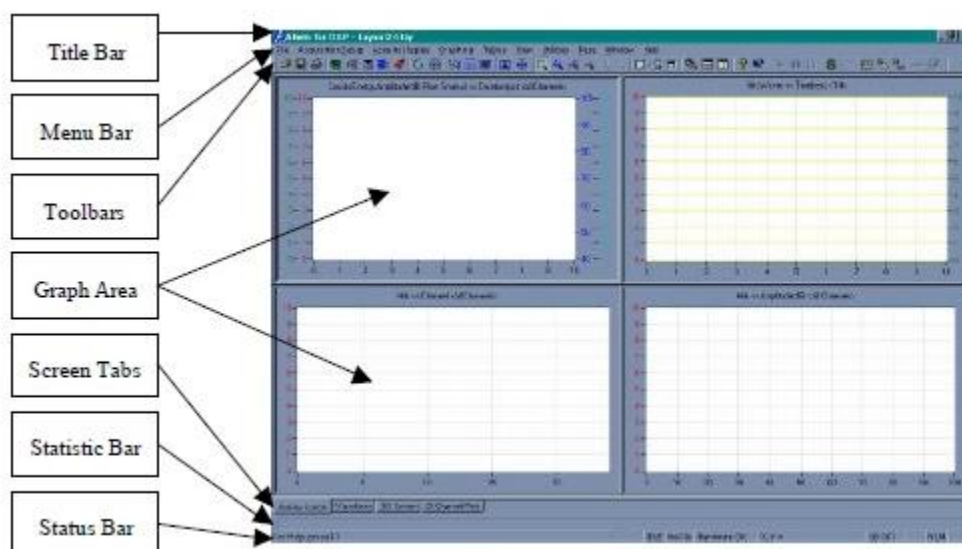
Filter Frequency Response Hz	0dB With R15 Sensor	20dB With R15 Sensor	40dB With R15 Sensor	0dB Input Shorted	20dB Input Shorted	40dB Input Shorted
135k-185k	20 $\mu$ V	4.8 $\mu$ V	3.5 $\mu$ V	20 $\mu$ V	4.3 $\mu$ V	2.7 $\mu$ V
100k-300k*	20 $\mu$ V	6.2 $\mu$ V	5.2 $\mu$ V	20 $\mu$ V	5.8 $\mu$ V	4.5 $\mu$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

Πίνακας 3.3. 1 Προδιαγραφές ενισχυτή 0/2/4

### 3.4 Λογισμικά συλλογής και ανάλυσης δεδομένων ΑΕ

#### 3.4.1 Λογισμικό ΑEwin

Το λογισμικό ΑEwin της PAC χρησιμοποιείται για τη συλλογή των δεδομένων. Με την εκκίνηση του προγράμματος εμφανίζεται στην οθόνη η εικόνα του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 3.4. 1 Αρχική οθόνη ΑEwin

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των εικονιδίων του προγράμματος.

**MenuBar:** Μπάρα με text commands όπως File, Acquisition Setup, Acquire/Replay, Graphing, Tables, View, Utilities, Page, Window και Help. (όλα έχουν submenu που εμφανίζεται όταν πατήσουμε πάνω τους)

**Toolbar icons:** Συντομεύσεις για διάφορες επιλογές του Menubar και άλλων επιλογών. Αφήνοντας το ποντίκι πάνω εμφανίζεται περιγραφή της λειτουργίας του κάθε εικονιδίου.

**GraphArea:** όλες οι επιθυμητές πληροφορίες εμφανίζονται στην γραφική παράσταση που απεικονίζεται σε αυτό το πεδίο. Περαιτέρω επιλογές απεικόνισης των γραφικών παραστάσεων γίνονται από το Graph Setup menu.

**Screen pagetabs:** Υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης πολλών γραφικών παραστάσεων σε διαφορετικές καρτέλες. Οι καρτέλες μπορούν να πάρουν το όνομα τους από την γραφική παράσταση που απεικονίζουν ή μπορούν να

ονομαστούν από τον χρήστη. Πατώντας δεξί κλικ μπορούμε να διαγράψουμε, προσθέσουμε και να μετονομάσουμε τις καρτέλες.

**StatisticsBar:** Εμφανίζονται πληροφορίες όπως AEcounts, TotalAEHits, Total AE Events, Total Waveforms, Cumulative Counts, Cumulative Energy, Time of test κτλ. Με όλα τα προαναφερθέντα παίρνουμε ένα αρκετά χρήσιμο σετ στατιστικών πληροφοριών.

**StatusBar:** Περιέχει τις επιλογές που χρειάζονται κατά την εξέλιξη ενός πειράματος όπως Replay, Aborttest, Testpaused κτλ. Δίπλα από το textstatusfield εμφανίζεται το όνομα του αρχείου που αποθηκεύεται το αποτέλεσμα του τεστ. Δίπλα από αυτό βρίσκεται το system diagnostics text field.

### File Menu

- **NewLayout:** Δημιουργεί νέο Layout με τις default ρυθμίσεις και αφαιρεί όλα τα προηγούμενα layouts από την οθόνη.
- **Open Layout:** Ανοίγει layout από αρχείο.
- **Save Layout/Save Layout as:** Αποθηκεύει το layout.
- **SpecifyDataFolder:** Επιλέγουμε τον φάκελο στον σκληρό δίσκο όπου αποθηκεύονται τα layouts.
- **PrintPage:** Τυπώνει τις γραφικές παραστάσεις του layout.
- **Export to JPG:** Αποθηκεύει το layout με τη μορφή εικόνας jpg.

### 3.4.2 Παραμετροποίηση λογισμικού για λήψη δεδομένων

Για τη συλλογή και ανάλυση των μετρήσεων χρειάζεται να γίνει ορθή παραμετροποίηση του συστήματος η οποία επιτυγχάνεται από την επιλογή AcquisitionSetupMenu. Εν συνεχεία αναφέρονται οι ρυθμίσεις που έγιναν ώστε να έχουμε τη βέλτιστη δυνατή απόδοση του συστήματος.

Στην καρτέλα AEChannelSetup του AE HardwareSetup της PCI-2 κάρτας (Σχήμα 3.4.2i) επιλέγουμε την ενεργοποίηση των καναλιών, την προενίσχυση που θα έχουν και το κατώφλι (threshold) πάνω από το οποίο θα καταγραφούν τα hits. Επιπλέον ρυθμίζουμε τις τιμές του αναλογικού φίλτρου (20kHz-1MHz), το ρυθμό δειγματοληψίας όπως επίσης και το μήκος σε byte (ή το χρόνο σε ms) πριν την ενεργοποίηση για την καταγραφή των κυματομορφών σε κάθε hit.

AE Hardware Setup: PCI-2

AE Channel Setup | AE Timing Parameters | Waveform Streaming | Data Sets/Parameters | Parametric Setup | Front End Filters | Front End Alarms | Delta T Filters Setup

AE Channel	Threshold			Gain dB	Pre-Amp dB	Analog Filter		Waveform Setup		
	Type	dB	FTBnd			Lower	Upper	Sample Rate	Pre-Trigger	Length
<input checked="" type="checkbox"/> 1	FIXED	40	6	0	40	20kHz	1MHz	5MSPS	100.0000	15k
<input checked="" type="checkbox"/> 2	FIXED	40	6	0	40	20kHz	1MHz	5MSPS	100.0000	15k
<input checked="" type="checkbox"/> 3	FIXED	40	6	0	40	20kHz	1MHz	5MSPS	100.0000	15k
<input checked="" type="checkbox"/> 4	FIXED	40	6	0	40	20kHz	1MHz	5MSPS	100.0000	15k
<input checked="" type="checkbox"/> 5	FIXED	40	6	0	40	20kHz	1MHz	5MSPS	100.0000	15k
<input checked="" type="checkbox"/> 6	FIXED	40	6	0	40	20kHz	1MHz	5MSPS	100.0000	15k

☒ Global Waveform Enable (this must be checked to collect any waveforms)

OK Cancel Apply Help

Σχήμα 3.4.2. i) Επιλογή ρυθμίσεων από την καρτέλα AEChannelSetupAEHardware του SetupPCI-2

AE Hardware Setup: PCI-2

AE Channel Setup | AE Timing Parameters | Waveform Streaming | Data Sets/Parameters | Parametric Setup | Front End Filters | Front End Alarms | Delta T Filters Setup

AE Channel	PDT	HDT	HLT	Max Duration
	microseconds	microseconds	microseconds	milliseconds
<input checked="" type="checkbox"/> 1	50	600	300	3
<input checked="" type="checkbox"/> 2	50	600	300	3
<input checked="" type="checkbox"/> 3	50	600	300	3
<input checked="" type="checkbox"/> 4	50	600	300	3
<input checked="" type="checkbox"/> 5	50	600	300	3
<input checked="" type="checkbox"/> 6	50	600	300	3

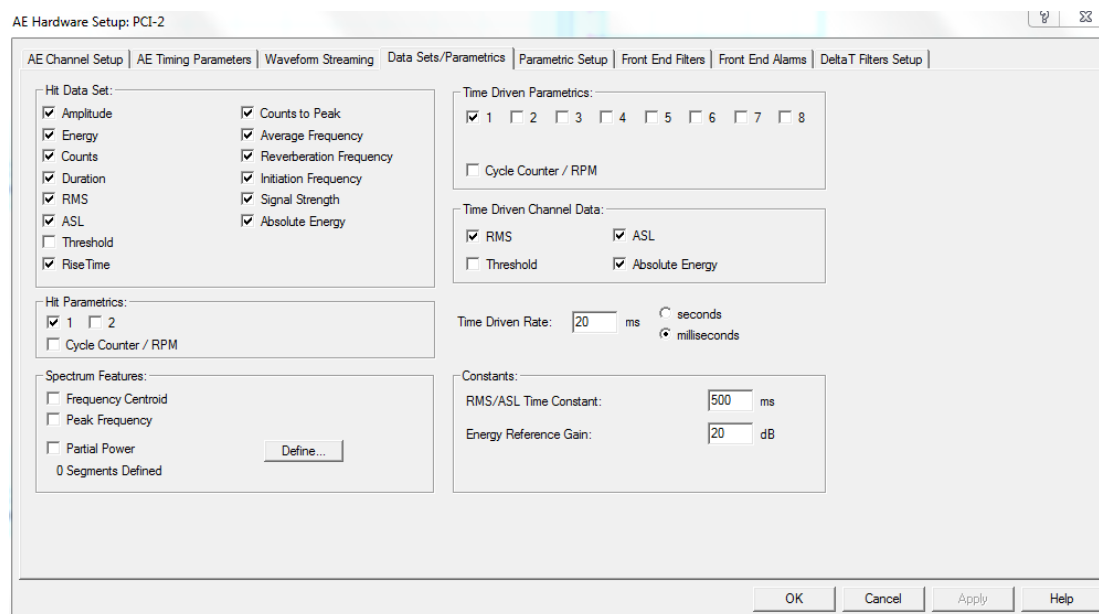
OK Cancel Apply Help

Σχήμα 3.4.2. ii) Επιλογή ρυθμίσεων από την καρτέλα AETimingParameters του AEHardwareSetupPCI-2

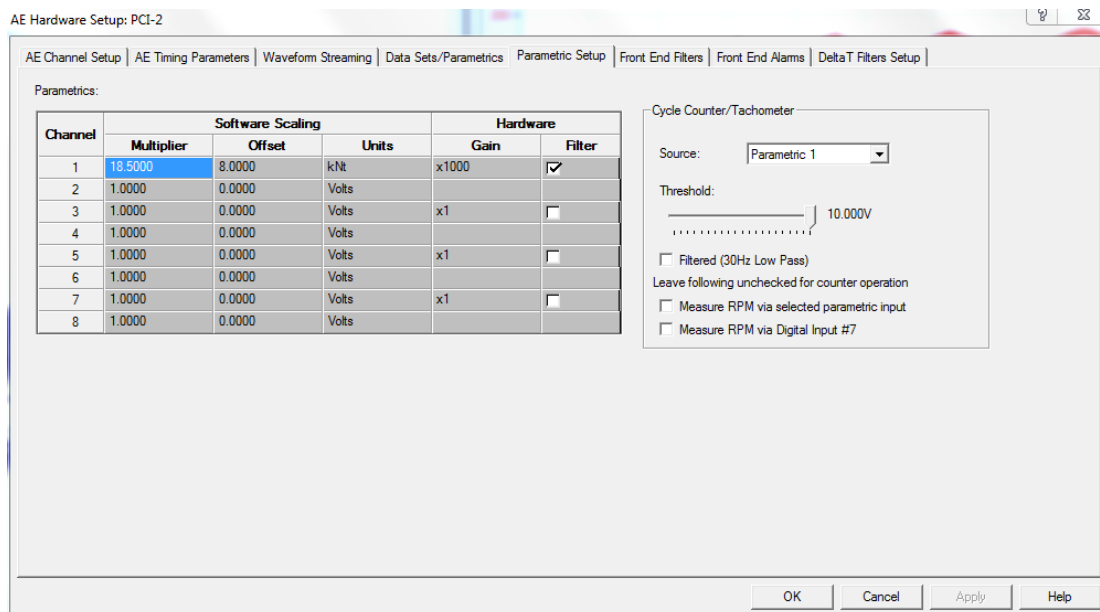
Στην καρτέλα AETimingparameterstou AEHardwareSetup της PCI-2 κάρτας (Σχήμα 3.4.2 ii), μπορούμε να ενεργοποιήσουμε ή να απενεργοποιήσουμε τα κανάλια και να διαμορφώσουμε τα PeakDefinitionTime (PDT), HitDefinitionTime (HDT) και HitLockout Time (HLT). Οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι βασικές ώστε το 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 λαμβάνει υπόψη πιθανές ανακλάσεις και σκεδάσεις που εμφανίζονται στην κυματομορφή.

Στην καρτέλα **Data Sets/Parametrics** του AE Hardware Setup της PCI-2 κάρτας (Σχήμα 3.4.2 iii), έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε ποιές πληροφορίες του ακουστικού σήματος επιθυμούμε να λαμβάνουμε από το πρόγραμμα όπως για παράδειγμα πλάτος, ενέργεια κτλ. Υπάρχουν δύο σετ δεδομένων, τα δεδομένα τα οποία 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 (timedrivendata). Η μέγιστη δειγματοληψία στην δεύτερη περίπτωση είναι κάθε 1ms ενώ μπορούν να καταγράφονται οι παράμετροι RMS, ASL, threshold και απόλυτη ενέργεια.

Εν κατακλείδι, στην καρτέλα **Parametric Setup** του AE Hardware Setup της PCI-2 κάρτας (Σχήμα 3.4.2 iv), μπορούμε να βαθμονομήσουμε τις παραμετρικές εισόδους που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή αναλογικών σημάτων από άλλους αισθητήρες για τη μέτρηση του μηχανικού φορτίου, της παραμόρφωσης (straingauges), κ.ά.



Σχήμα 3.4.2 iii Επιλογή ρυθμίσεων από την καρτέλα DataSets/Parameters του EHardwareSetupPCI-2



Σχήμα 3.4.2. iv Επιλογή ρυθμίσεων από την καρτέλα ParametricSetup του AEHardwareSetupPCI-2

### 3.4.3 Λογισμικό NOESIS

Το λογισμικό NOESIS αποτελεί ένα αρκετά ισχυρό εργαλείο παρουσίασης και ανάλυσης δεδομένων ακουστικών εκπομπών διαθέτοντας δυνατότητα αναγνώρισης προτύπων με χρήση νευρωνικών δικτύων. Τα δεδομένα (δεδομένα του AEWin) εισάγονται ως αρχεία με κατάληξη **.dta** όπου μπορεί να γίνει η φόρτωση των κυματομορφών που καταγράφονται σε κάθε κτύπο ΑΕ, εφόσον βέβαια είχε επιλεγεί αυτή η δυνατότητα κατά τη συλλογή των δεδομένων. Έπειτα, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας μεγάλης ποικιλίας 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 δεδομένων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (πλάτος, διάρκεια, κλπ).

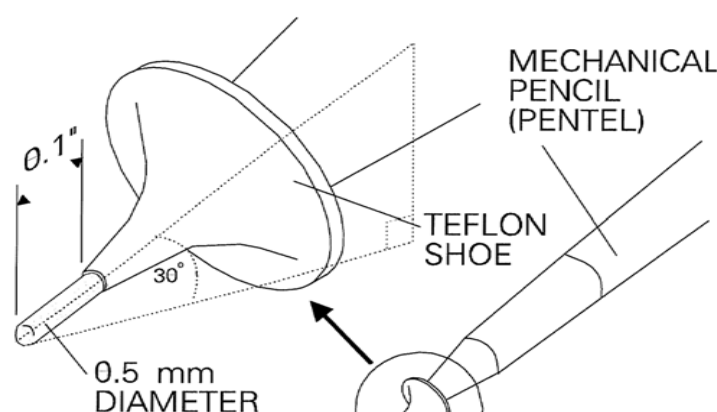
Το NOESIS διαθέτει ακόμη εργαλεία φασματικής ανάλυσης των κυματομορφών (FFT, power spectrum, wavelet analysis, κτλ.). Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για την παρουσίαση και ανάλυση των δεδομένων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν. Ακολουθεί λίστα με κάποιες βασικές εντολές για την χρήση του προγράμματος.

- File → New Analysis → Advanced: Για να προστεθούν αρχεία.
- View → Load Workspace: Για να φορτώσει την επιφάνεια εργασίας που έχουμε δημιουργήσει.
- Properties με δεξί κλικ σε διάγραμμα: για τη ρύθμιση των παραμέτρων του διαγράμματος (στην καρτέλα Misc μαρκάρω τα units).
- Δεξί κλικ στην καρτέλα 3D → Add: για τη δημιουργία 3D απεικόνισης του δοκιμίου συναρτήσει των ανάλογων παραμέτρων.
- Δεξί κλικ → export (J.peg): για την αποθήκευση σε μορφή εικόνας των διαγραμμάτων.
- Δεξί κλικ → copy → graph settings: για την αντιγραφή ενός διαγράμματος από μία καρτέλα σε μία άλλη.



### 3.5 Δοκιμή Σπασίματος Μύτης Μολυβιού (LeadPencilBreakTest)

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM-E976, πηγές ΑΕ προσομοιώνονται από σπασίματα μύτης μολυβιού στην επιφάνεια των υπό εξέταση δοκιμίων, με σκοπό να εξετασθεί αν οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες είναι σωστά τοποθετημένοι και ανιχνεύουν τα ακουστικά σήματα. Μία τέτοια πηγή απεικονίζεται στην Εικόνα (3.6) και είναι γνωστή ως δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού, ή πηγή Hsu – Nielsen. Ο παλμός που παράγεται στην περίπτωση αυτή έχει μικρή διάρκεια με καλή επαναληψιμότητα και είναι ένας εύκολος και φθηνός τρόπος ελέγχου καλής λειτουργίας και σωστής τοποθέτησης των αισθητήρων.



Εικόνα 3.6 Πηγή Hsu-Nielsen

Η διαδικασία του ελέγχου αυτού περιλαμβάνει το σπάσιμο μυτών μηχανικού μολυβιού πάχους 0.5mm σκληρότητας 2H και μήκους 3mm στην επιφάνεια των δοκιμίων και κοντά στους αισθητήρες, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι όλοι οι αισθητήρες καταγράφουν τα ακουστικά σήματα των ΑΕ και δεν υπάρχουν κάποια περιοχή του υλικού από την οποία μπορεί να μην λαμβάνονται σήματα. Χρησιμοποιείται ειδικό κάλυμμα του μηχανικού μολυβιού ώστε να εξασφαλίζει πάντα σταθερή γωνία σπασίματος της μύτης (30°) και να διασφαλιστεί ότι η μεταλλική άκρη του μολυβιού δε θα ακουμπήσει κατά το σπάσιμο της μύτης στην επιφάνεια του δοκιμίου παράγοντας έτσι επιπλέον ακουστικά σήματα οποία είναι ανεπιθύμητα.

### 3.6 Υπολογισμός συντελεστή εξασθένισης

Για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένισης, τοποθετήθηκαν πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου και κατά μήκος της διαγωνίου του, 4 αισθητήρες με απόσταση 2cm μεταξύ τους. Σε μικρή απόσταση και στην ευθεία που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες, έγιναν δοκιμές σπασίματος μύτης μολυβιού, καταγράφηκαν τα πλάτη σε κάθε αισθητήρα καθώς και οι

κυματομορφές. Η εξασθένηση που παρατηρήθηκε με την απόσταση ήταν περίπου 5dB ανά 2cm που αντιστοιχεί σε συντελεστή εξασθένησης 0.25dB/mm. Η εξασθένηση αυτή βρίσκεται μέσα στην περιοχή 1-10 dB/cm στην περιοχή συχνοτήτων 100kHz-1MHz για τα πετρώματα. Στις δοκιμές των σπασιμάτων που πραγματοποιήθηκαν, καταγράφηκαν χρόνιοι ανόδοι (RT) από 10-30μs με χρονική διάρκεια των κυματομορφών που έφτανε περίπου τα 2ms.

### 3.7 Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης κυμάτων

#### Δοκιμή AST (Automatic Sensor Test)

Η δοκιμή AST λειτουργεί με 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 δίνεται η δυνατότητα να ελέγξουμε αν οι υπόλοιποι αισθητήρες λειτουργούν και ανιχνεύουν κανονικά το εκπεμπόμενο ακουστικό σήμα, την ευαισθησία των αισθητήρων από το καταγραμμένο 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 έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε τη διάρκεια του παλμού (10-20 μs) ώστε να προσομοιάσουμε έναν δέλτα-παλμό, το χρόνο μεταξύ των επαναλαμβανόμενων παλμών (200μs) έτσι ώστε να αποφύγουμε την καταγραφή ανακλάσεων επόμενους παλμούς καθώς και το πλήθος των παλμών για τον υπολογισμό της μέσης τιμής του ζητούμενου ΔΤ

Η δοκιμή AST που πραγματοποιήθηκε για το δοκίμιο με τη διάταξη των αισθητήρων κατά μήκος της πλευρικής διαγωνίου και τον 1ο αισθητήρα να λειτουργεί ως πομπό-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.

## 3.8 Δοκίμια

### 3.8.1 Πείραμα 1<sup>ο</sup> Φυσική Πέτρα(Natural Stone)

**Προετοιμασία δοκιμίου:** Κόψαμε με δισκοπρίονο τις δύο πλευρές(αριστερά και δεξιά) ώστε να είναι λείες οι επιφάνειες τους και στη συνέχεια τοποθετήσαμε τους δύο αισθητήρες(1,2), (αφού είχαν καθαριστεί με ακετόνη), χρησιμοποιώντας κόλλα σιλικόνης. Στο κέντρο της πέτρας ανοίξαμε οπή με διαστάσεις  $h=93.7\text{mm}$  και  $d=10\text{mm}$  στην οποία αργότερα ρίξαμε το κονίαμα με αναλογία 3g νερό σε 10g σκόνη. Η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων μετρήθηκε και ήταν 150mm. Το κατώφλι ορίστηκε στα 38dB.



Εικόνα 3.8. 1i) Το δοκίμιο με προσαρμοσμένους τους αισθητήρες 1&2



Εικόνα 3.8.1 ii) Η σπή του δοκιμίου πριν την πλήρωση της με το κονίαμα

Έγινε επανάληψη του πειράματος στο ίδιο δείγμα με τα ίδια δεδομένα, δηλαδή ίδιες θέσεις αισθητήρων, αριθμός αισθητήρων και κατώφλι.

### 3.8.2 Πείραμα 2<sup>ο</sup> Τσιμεντόλιθος (Concrete)

**Προετοιμασία δοκιμίου:** Καθαρίσαμε δύο αισθητήρες (3,4) με ακετόνη και τους τοποθετήσαμε σε αντικριστές πλευρές του δοκιμίου με διαστάσεις,  $x=163\text{mm}$ ,  $y=86\text{mm}$  και  $z=66\text{mm}$ . Στη συνέχεια ανοίξαμε την όπη (διαστάσεις:  $d=10\text{mm}$ ,  $h=68\text{mm}$  και θέση:  $x=104\text{mm}$ ,  $y=86\text{mm}$ ,  $z=32\text{mm}$ ) στην οποία ρίξαμε το κονίαμα με αναλογία 3γνερό σε 10gσκόνη. Το κατώφλι μετρήσεων ορίστηκε στα 38dB.

Θέσεις αισθητήρων

sensors	x(mm)	y(mm)	z(mm)
3	163	47	29,3
4	0	45,3	29



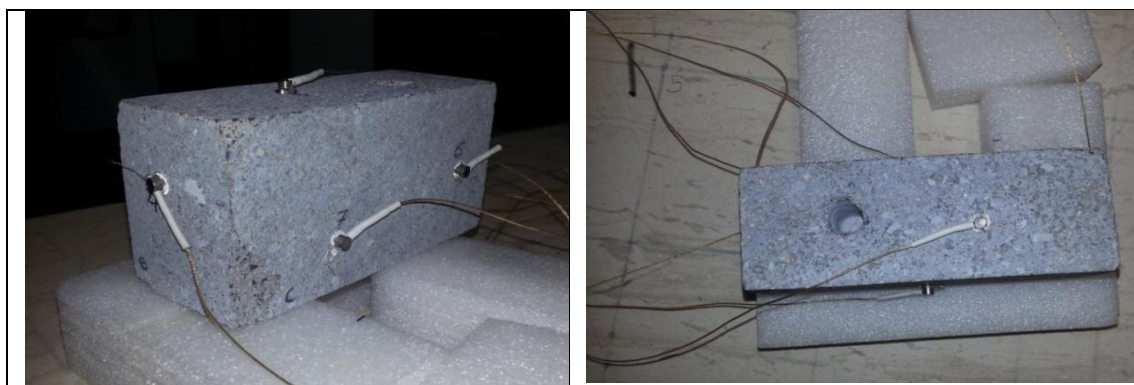
Εικόνα 3.8. 2 ι) Όψεις του δοκιμίου μετά τη θραύση του

### 3.8.3 Πείραμα 3<sup>ο</sup> Τσιμεντόλιθος (Concrete)

**Προετοιμασία δοκιμίου:** Καθαρίσαμε επτά αισθητήρες και τους εφαρμόσαμε σε απέναντι πλευρές (1-2, 3-4 και 5,6-7) του δοκιμίου με διαστάσεις:  $x=135.2\text{mm}$ ,  $y=51,7\text{mm}$  και  $z=65.1\text{mm}$ . Έπειτα ανοίξαμε οπή με θέση:  $x=31,9\text{mm}$ ,  $y=23,1\text{mm}$ ,  $z=65,1\text{mm}$  και διαστάσεις:  $d=11,7\text{mm}$ ,  $h=49\text{mm}$ . Κάναμε καταγραφή του θορύβου(χωρίς κονίαμα) διάρκειας περίπου μίας ώρας. Στη συνέχεια παρασκευάσαμε και εκχύσαμε το κονίαμα(3g νερό+10g σκόνη) στην οπή. Ορίσαμε το κατώφλι στα 39dB.

Θέσεις αισθητήρων

sensors	x(mm)	y(mm)	z(mm)	πλευρά
1	85,9	23	65,1	E
2	70,85	35,6	0	F
3	0	22,2	33,7	D
4	135,2	20,8	42,8	B
5	67,7	0	23,5	A
6	23	51,7	31,9	C
7	92,9	51,7	20,6	C

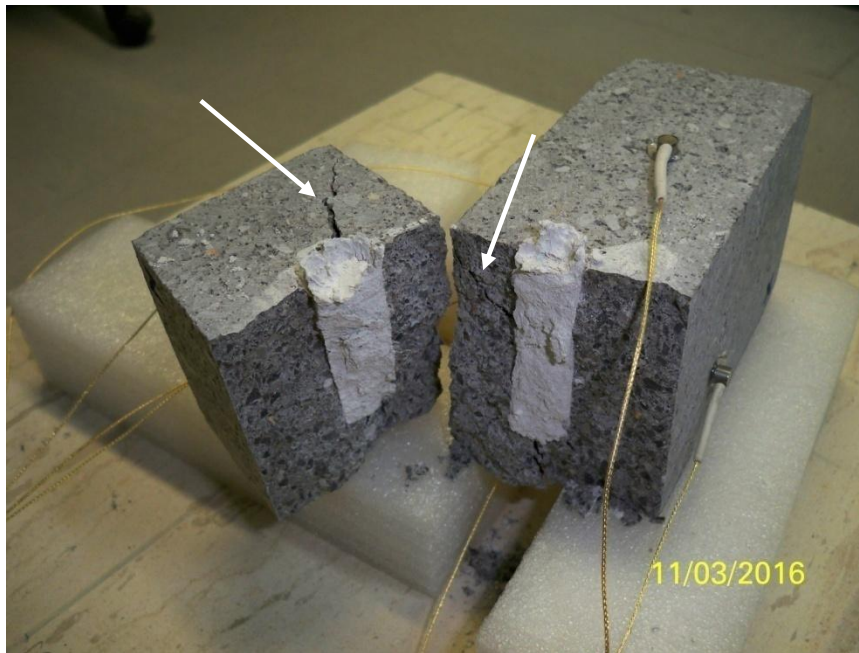
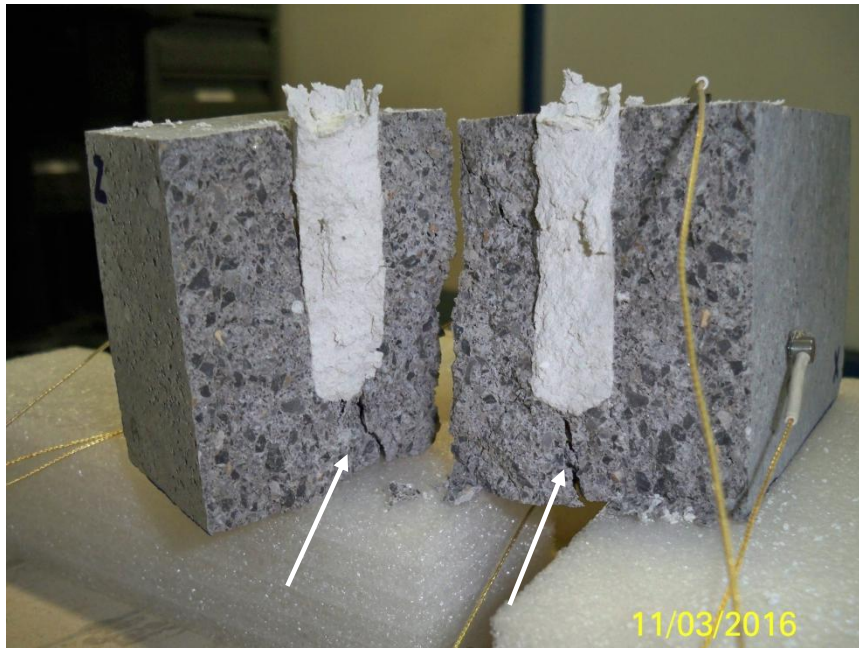


Εικόνα 3.8.3i) Το δοκίμιο με τους εφαρμοσμένους αισθητήρες πριν την πλήρωση της οπής με κονίαμα





Εικόνα 3.8.3 ii) Το δοκίμιο μετά την πλήρωση με κονίαμα και τη θραύση του



Εικόνα 3.8.4 Το δοκίμιο μετά τη θραύση του, όπου διακρίνονται οι εκτεταμένες ρωγμές που υπέστη κατά τη διεύθυνση του διατρήματος αλλά και εγκάρσια στις δύο παράπλευρες έδρες του.



### 3.8.4 Πείραμα 4<sup>ο</sup>Τραβερνίτης (Marble)

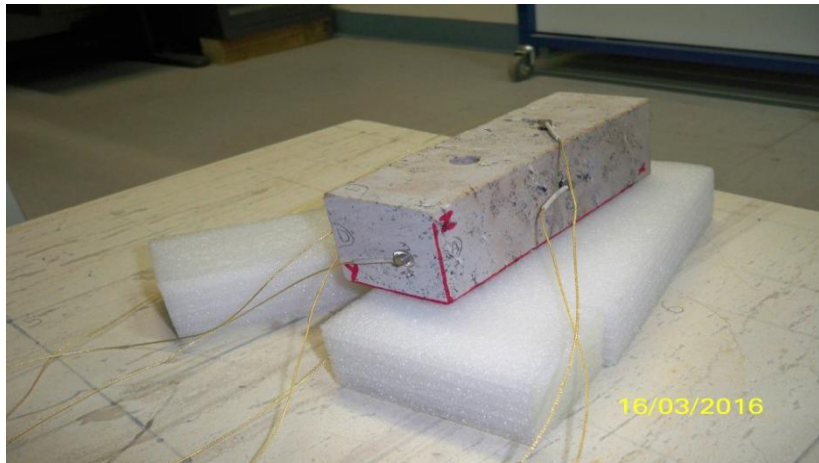
**Προετοιμασία δοκιμίου:** Στοδοκίμιο με διαστάσεις:  $x=161.3\text{mm}$ ,  $y=48.7\text{mm}$ ,  $z=49.1\text{mm}$ , ανοίξαμε διάτρημα με διαστάσεις οπής:  $d=11.2\text{mm}$   $h=32.45\text{mm}$  και θέση οπής:  $x=46.8\text{mm}$   $y=18.3\text{mm}$   $z=49.1\text{mm}$ . Τοποθετήθηκε στον φούρνο για μία ώρα στους  $76\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Έπειτα κολλήσαμε επτά αισθητήρες, παρασκευάσαμε το κονίαμα (10g σκόνη+ 3g νερό) και το ρίξαμε στο διάτρημα. Ορίστηκε κατώφλι στα 39 dB.

#### Θέσεις αισθητήρων

sensors	x(mm)	y(mm)	z(mm)	πλευρά
1	99,75	18.3	49.1	E
2	51.3	27.2	0	F
3	0	15	23.8	D
4	161.3	30.7	28.65	B
5	79.7	0	27.4	A
6	30.2	48.7	22.8	C
7	108.7	48.7	35.1	C

Έγινε δύο φορές επανάληψη του πειράματος στο ίδιο δείγμα με ίδια δεδομένα (θέση αισθητήρων και threshold) αφού καθαρίστηκε το διάτρημα και τρυπήθηκε βαθύτερα (νέο βάθος, 3,85cm).





Εικόνα 3.8.5i) Το δοκίμιο με εφαρμοσμένους τους αισθητήρες πριν την πλήρωση με κονίαμα



Εικόνα 3.8.5ii) Το δοκίμιο μετά την πλήρωση της οπής

### 3.8.5 Πείραμα 5<sup>ο</sup> Ασβεστόλιθος (Limestone)

**Προετοιμασία δοκιμίου:** Σε διαμορφωμένο δοκίμιο ασβεστόλιθου με διαστάσεις:  $x=100.5\text{mm}$ ,  $y=101.1\text{mm}$ ,  $z=86\text{mm}$ , **ανοίξαμε** διάτρημα με διαστάσεις οπής:  $d=13.5\text{mm}$   $h=94\text{mm}$  και θέση οπής:  $x=40\text{mm}$ ,  $z=40\text{mm}$ . Τοποθετήθηκε στο φούρνο για δύο μέρες στους  $105^{\circ}\text{C}$ . Έπειτα κολλήσαμε 7 αισθητήρες, φτιάξαμε το κονίαμα (10g σκόνη+ 3g νερό) και το ρίξαμε στο διάτρημα. Ορίστηκε κατώφλι στα 39 dB.

Θέσεις αισθητήρων

sensors	x(mm)	y(mm)	z(mm)	πλευρά
1	17.2	19.15	0	A
2	59.5	53.25	0	A
3	100.5	22.7	40.2	B
4	69.7	26.6	86	C
5	21	72.6	86	C
6	0	74.4	52.75	D
7	55.65	0	38.25	E



Εικόνα 3.8.6 Το δοκίμιο ασβεστόλιθου με τους αισθητήρες προσαρμοσμένους στις πλευρές του.

Έγινε επανάληψη του πειράματος με διπλάσια αναλογία κονιάματος (20g σκόνη + 6g νερό) και κλείσιμο οπής, μετά την πλήρωση της, με κόλλα σιλικόνης προς αύξηση των τάσεων στα τοιχώματα του διατρήματος.

Το δοκίμιο αφού καθαρίστηκε από το κονίαμα, τοποθετήθηκε ξανά στον φούρνο στους 105 βαθμούς Κελσίου και έγινε ακόμα μία επανάληψη με τα ίδια δεδομένα αλλά νέες διαστάσεις διατρήματος:  $h=79.25\text{mm}$  και  $d=14.45\text{mm}$ .

Μία τελευταία επανάληψη έγινε με διαφορετική αναλογία κονιάματος (14g σκόνη+6g νερό) αλλά ίδια τα υπόλοιπα δεδομένα(διαστάσεις δοκιμίου, θέσεις αισθητήρων, κατώφλι, αριθμός αισθητήρων).

### 3.8.6 Πείραμα 6<sup>ο</sup> Φυσική Πέτρα (NaturalStone)

**Προετοιμασία δοκιμίου:** Κόψαμε την πέτρα και της δώσαμε το επιθυμητό παραλληλεπίπεδο σχήμα, στη συνέχεια ανοίξαμε δύο οπές και την τοποθετήσαμε στον φούρνο στους 70 βαθμούς Κελσίου για περίπου είκοσι λεπτά. Καθαρίσαμε τους οχτώ αισθητήρες και του εφαρμόσαμε με κόλλα σιλικόνης στις επιφάνειες του δοκιμίου. Στη συνέχεια, παρασκευάσαμε και εκχύσαμε το κονίαμα στην οπή. Τέλος ορίσαμε το κατώφλι στα 39dB.

Θέσεις αισθητήρων

sensors	x(mm)	y(mm)	z(mm)	πλευρά
1	35.05	0	104.15	E
2	55.40	0	46.10	E
3	0	36.75	43.8	D
4	63.50	31.55	0	C
5	38.30	61.55	36.10	F
6	48	37	132.80	A
7	23,20	61.55	106.60	F
8	90.75	26.85	42.20	B

Διαστάσεις δοκιμίου:  $x=90.75\text{mm}$ ,  $y=61.55\text{mm}$ ,  $z=132.80\text{mm}$

Θέση οπής 1:  $x_1=55.50\text{mm}$ ,  $z_1=60.10\text{mm}$

Διαστάσεις οπής 1:  $h_1=51.50\text{mm}$ ,  $d_1=13.35\text{mm}$

Θέση οπής 2:  $x_2=31.10\text{mm}$ ,  $z_2=63.60\text{mm}$

Διαστάσεις οπής 2:  $h_2=52.15\text{mm}$ ,  $z_2=13.20\text{mm}$



Εικόνα3.8.6 Το δοκίμιο με εμφανείς τους άξονες, τις δύο οπές και το πολυκάναλο σύστημα καταγραφής ΑΕ αντίστοιχα

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Πειραματικά Αποτελέσματα

Σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, οι ρυθμίσεις των παραμέτρων στο πρόγραμμα συλλογής δεδομένων AEWin, είναι οι εξής:

- PDT=50μs
- HDT=200μs
- HLT=300μs
- filter=20KHz-1MHz
- Sample rate=5MSPS
- Pre-trigger=100
- Length= 15K

Μετά τη λήψη των δεδομένων, τα αρχεία (\*.dta) των ακουστικών εκπομπών φορτώθηκαν και αναλύθηκαν με το πρόγραμμα ανάλυσης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων NOESIS.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα με τη μορφή διαφόρων γραφημάτων παρουσίασης των ακουστικών παραμέτρων και των μεταξύ τους συσχετισμών.

Αρχικά δίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από το 3<sup>ο</sup> πείραμα όπου χρησιμοποιήθηκε διαμορφωμένος κυβόλιθος, ο οποίος έσπασε κατά τη διάρκεια της 24ωρης παρακολούθησής του.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα από το 5<sup>ο</sup> πείραμα με το διαμορφωμένο δοκίμιο του ασβεστόλιθου. Παρόλο που το δοκίμιο δεν έσπασε, ήταν δυνατός ο ακριβής εντοπισμός των θέσεων των γεγονότων που καταγράφηκαν, λόγω των εσωτερικών τριβών-μικρορωγμών κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης και διόγκωσης του κονιάματος στο εσωτερικό του διατρήματος.

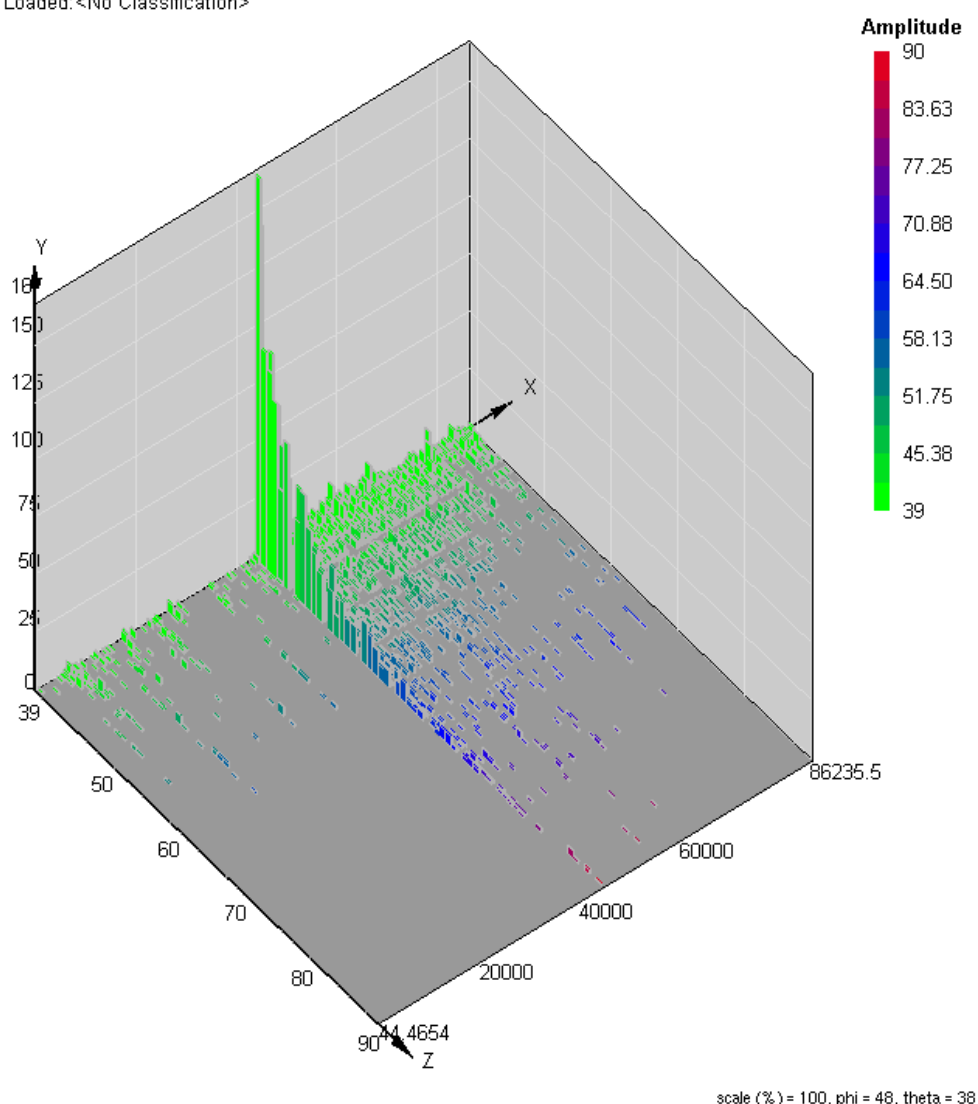
Τα υπόλοιπα αποτελέσματα παρέχονται στο Παράρτημα.



### Πείραμα 3<sup>ο</sup> Τσιμεντόλιθος (Concrete)

Η καταγραφή της δραστηριότητας των ΑΕ από το δοκίμιο του κυβόλιθου διήρκεσε περίπου 24 haπό τη στιγμή που τοποθετήθηκε το διογκωτικό κονίαμα σε αυτό. Έντονη δραστηριότητα ΑΕ παρατηρήθηκε 12 ώρες περίπου μετά την έναρξη της καταγραφής (χρονική στιγμή, 43438 s), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.1. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην έναρξη της θραύσης του δοκιμίου και η δραστηριότητα ήταν συνεχής μέχρι τη λήξη της

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

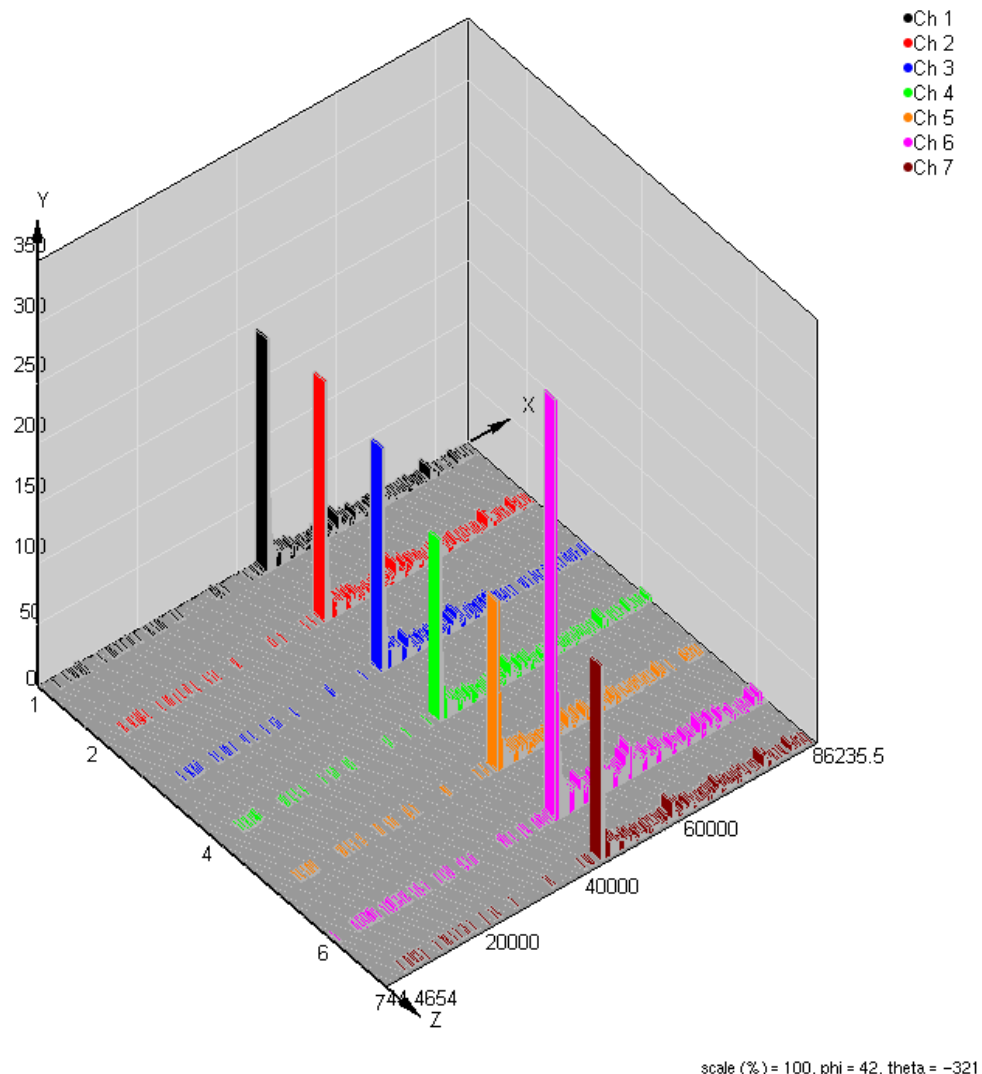


**Σχήμα 4.2.1** Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής των κύπνων (hits) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) αθροιστικά, κατά τη χρονική εξέλιξη παρακολούθησης της θραύσης του δοκιμίου διαμορφωμένου κυβόλιθου. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τα πλάτη των κύπνων (σε dB).



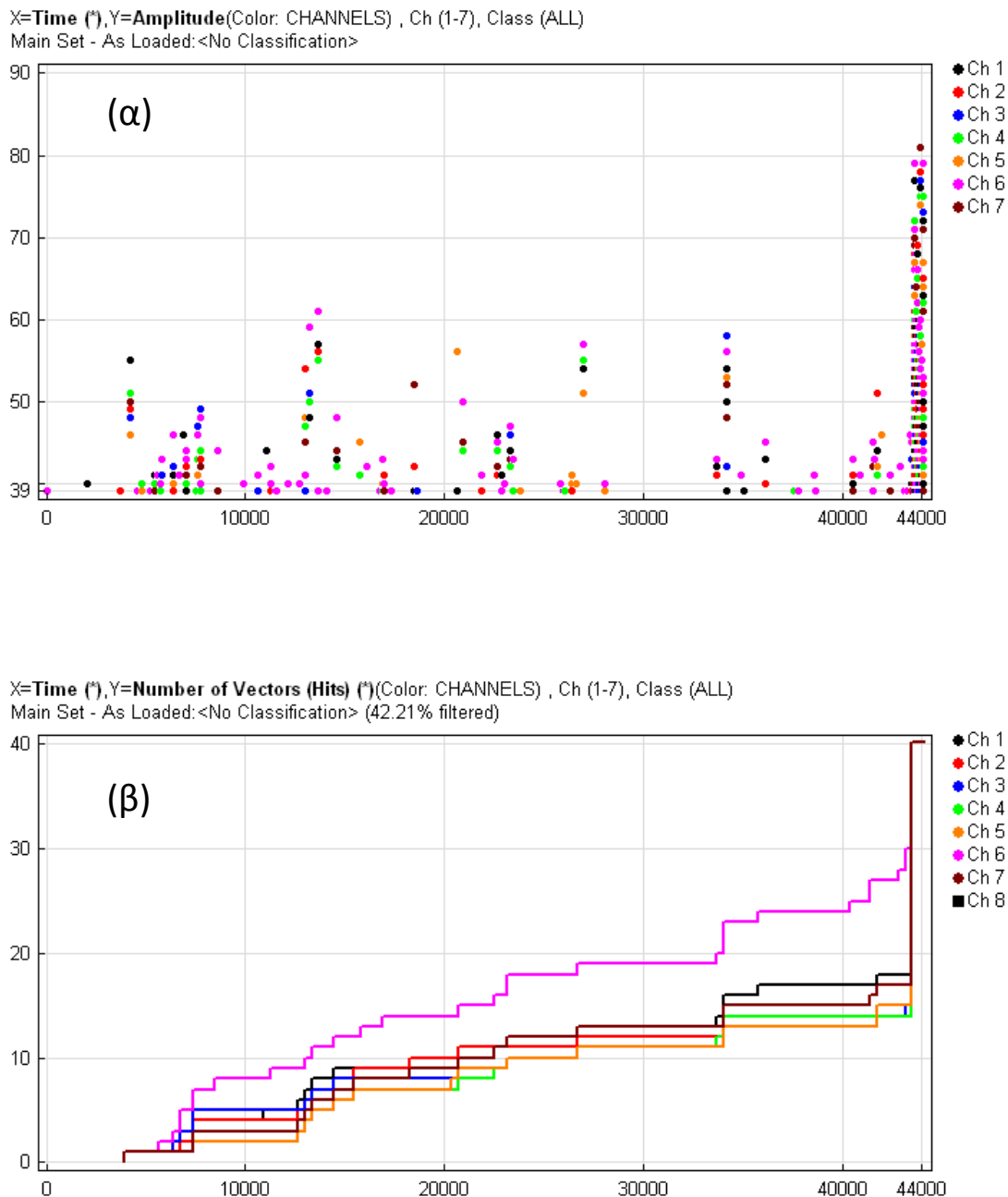
καταγραφής, δηλ., 12 h περίπου μετά. Μέγιστα πλάτη, έως και 90 dB, παρατηρούνται αρχικά κατά την εκδήλωση της θραύσης, ενώ μεγάλα πλάτη καταγράφονται σποραδικά έως τη λήξη του πειράματος, όπου πλέον το δοκίμιο είχε διαχωριστεί σε δύο όγκους (Σχήμα 3.8.3). Η καταγραφή των χτύπων από κάθε κανάλι ξεχωριστά απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.2. Η μέγιστη καταγραφή παρατηρείται στο κανάλι 6, το οποίο βρίσκεται πλησιέστερα του διατρήματος, με αποτέλεσμα να λαμβάνει περισσότερα ακουστικά σήματα, συγκριτικά με τα υπόλοιπα κανάλια. Εύλογα, οι λιγότερες καταγραφές παρατηρούνται στο πιο απομακρυσμένο κανάλι, δηλαδή το κανάλι 4 που ήταν τοποθετημένο στη μικρή έδρα του διαμορφωμένου δοκιμίου, όπως ορθά απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.2.

X=Time (s), Y=Number of Vectors (Hits) (s), Z=Channel (s)(Color: CHANNELS) , Ch (ALL), Class (ALL)  
Main Set - As Loaded: <No Classification>



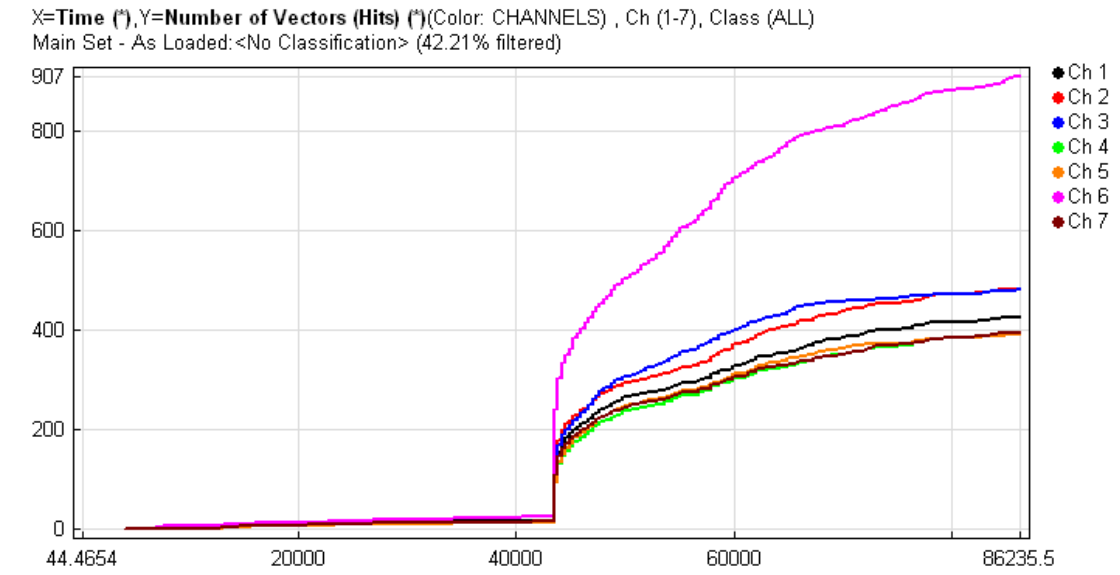
**Σχήμα 4.2.2** Τρισδιάστατο γράφημα της χρονικής εξέλιξης της δραστηριότητας των AE (χτύποι) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) κατά την παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου κυβόλιθου. Η εντονότερη δραστηριότητα παρατηρείται στον αισθητήρα 6 που βρίσκεται πλησιέστερα του διατρήματος.

Η εμφάνιση έντονης ακουστικής δραστηριότητας που συνδέεται με την έναρξη της θραύσης του δοκιμίου παρουσιάζεται απότομα, χωρίς καμία εμφανή εκδήλωση προγενέστερης αυξημένης δραστηριότητας. Πράγματι, όπως απεικονίζεται στη Σχήμα 4.2.3, όπου φαίνεται λεπτομερέστερα η ακουστική δραστηριότητα πριν την έναρξη της θραύσης ( $t < 44000$  s), ακουστικές εκπομπές έως και 60 dB καταγράφονται σχεδόν από την έναρξη παρατήρησης, οι οποίες ωστόσο δεν υπερβαίνουν τους 20-30 κτύπους ανά αισθητήρα, μέχρι την έναρξη της θραύσης. Αντίθετα, μετά την έναρξη της



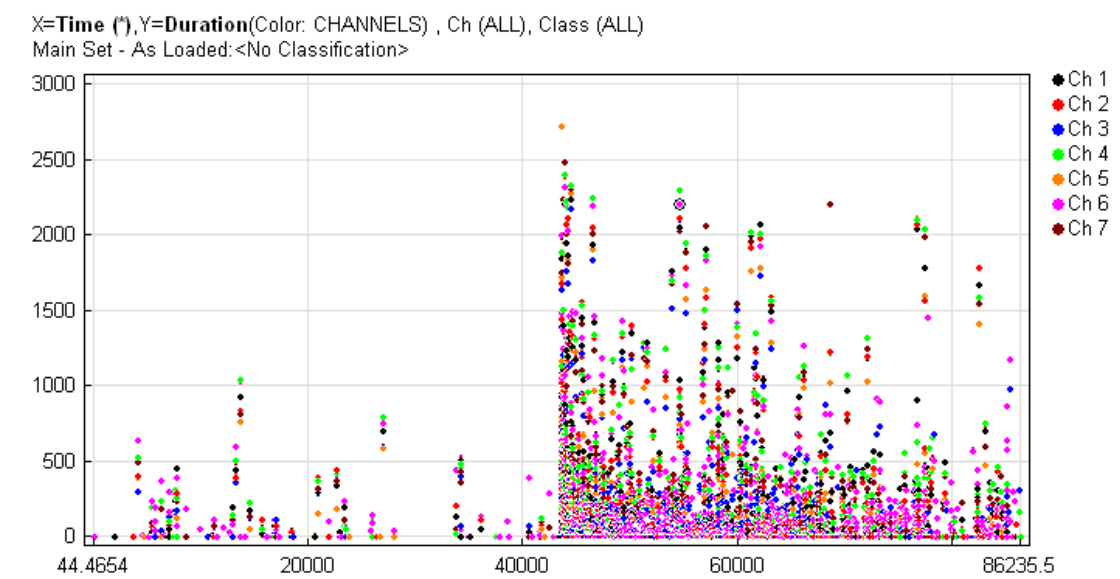
**Σχήμα 4.2.3** Χρονική εξέλιξη (α) των πλατών και (β) των κτύπων (αθροιστικά) μέχρι την έναρξη εμφάνισης αυξημένης δραστηριότητας λίγο πριν τα 44000 s, για κάθε ένα από τα 7 κανάλια καταγραφής.

θραύσης, ο αριθμός των κτύπων σε όλα τα κανάλια είναι μεγάλος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.4, και ιδιαίτερα στο κανάλι 6 που όπως αναφέρθηκε, βρίσκεται πιο κοντά στην περιοχή των προκαλούμενων θραύσεων.



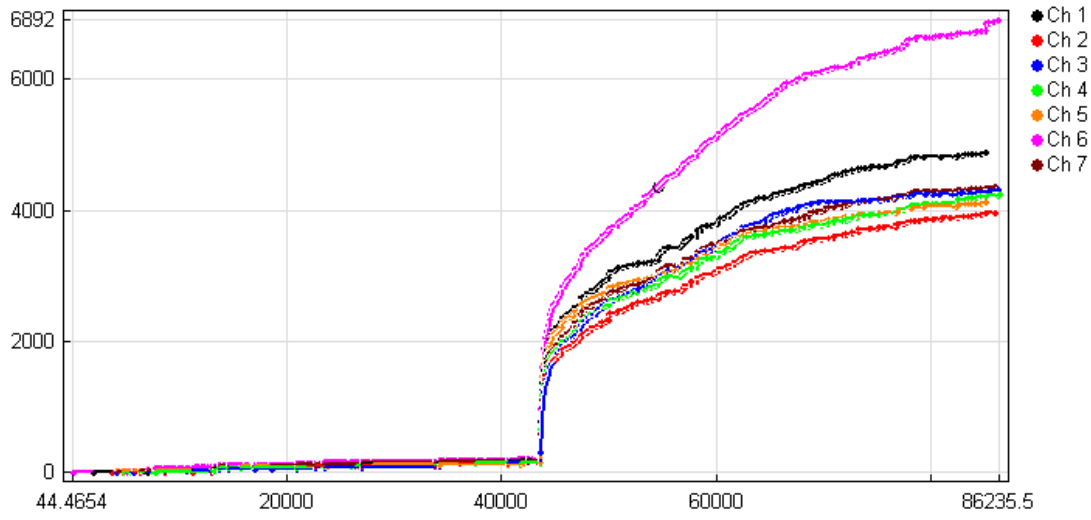
**Σχήμα 4.2.4** Χρονική εξέλιξη της εμφάνισης γεγονότων σε όλα τα κανάλια (αθροιστικά), καθόλη τη διάρκεια παρακολούθησης του πειράματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα, οι μεταβολές των διαφόρων ακουστικών παραμέτρων, κατά την 24ωρη διάρκεια καταγραφής του πειράματος σε όλα τα κανάλια.



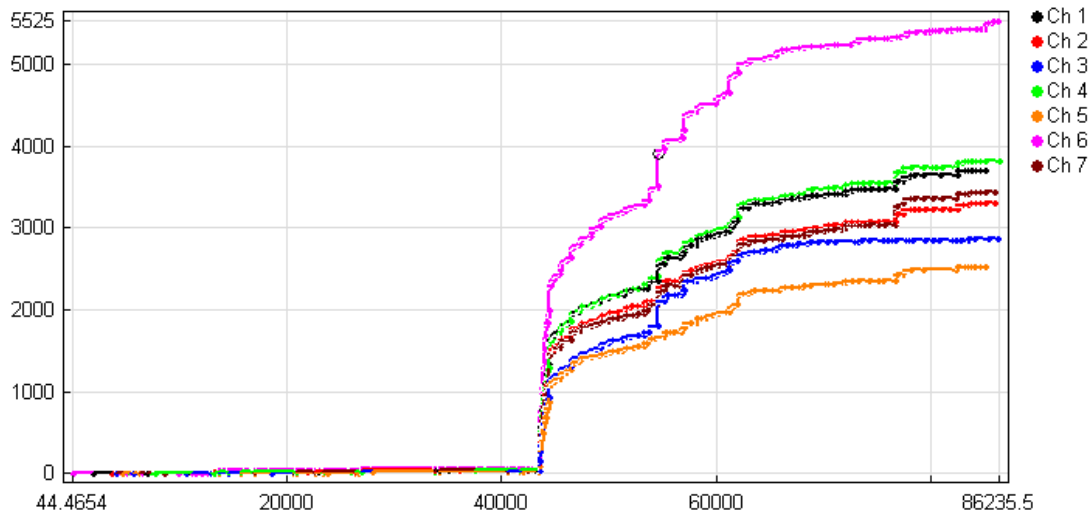
**Σχήμα 4.2.5** Χρονική εξέλιξη της διάρκειας των καταγραφών (κτύπων) σε  $\mu s$ , για κάθε κανάλι.

X=Time (\*),Y=Counts to Peak(Color: CHANNELS) , Ch (ALL), Class (ALL)  
Main Set - As Loaded:<No Classification>

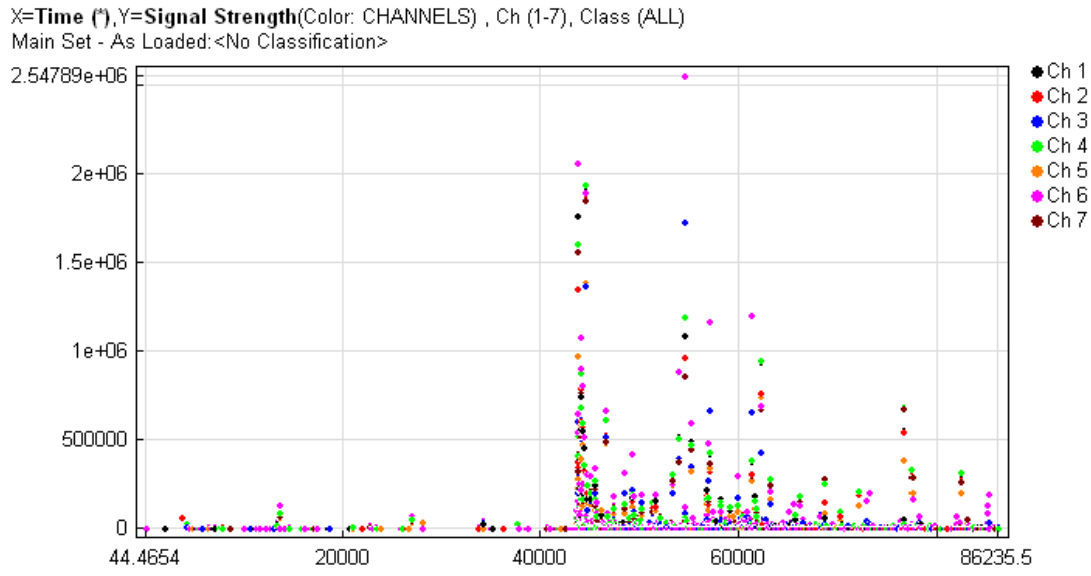


**Σχήμα 4.2.6**Χρονική εξέλιξη των υπερβάσεων για κάθε κανάλι(αθροιστικά), καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Οι υψηλότερες τιμές αφορούν στο 6<sup>ο</sup> κανάλι που βρίσκεται πλησιέστερα στο διάτρημα.

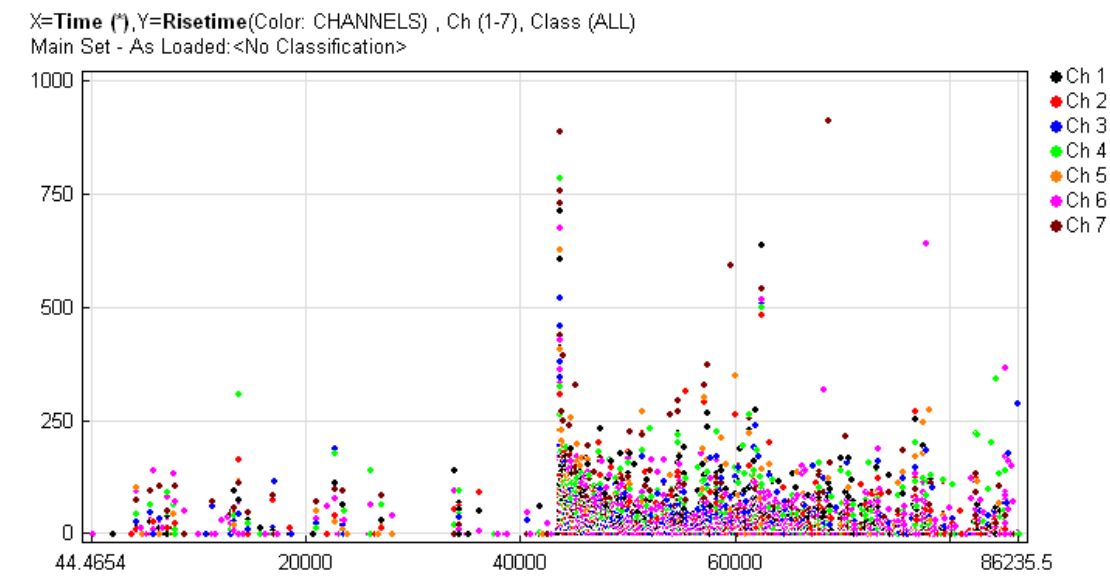
X=Time (\*),Y=Energy(Color: CHANNELS) , Ch (ALL), Class (ALL)  
Main Set - As Loaded:<No Classification>



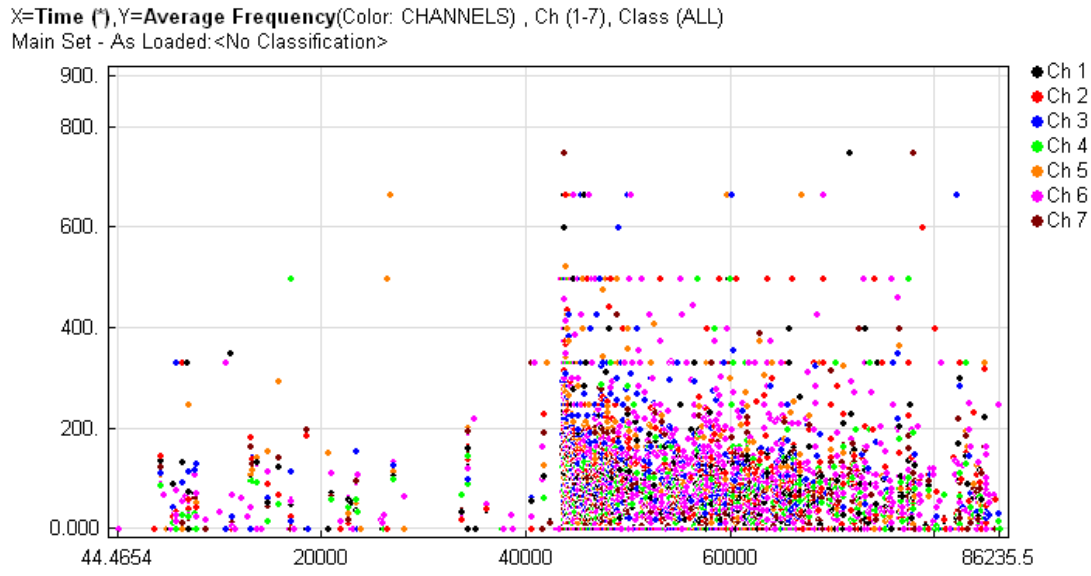
**Σχήμα 4.2.7**Χρονική εξέλιξη της ενέργειας για κάθε κανάλι. Οι μεγαλύτερες τιμές αντιστοιχούν στο 6<sup>ο</sup> κανάλι.



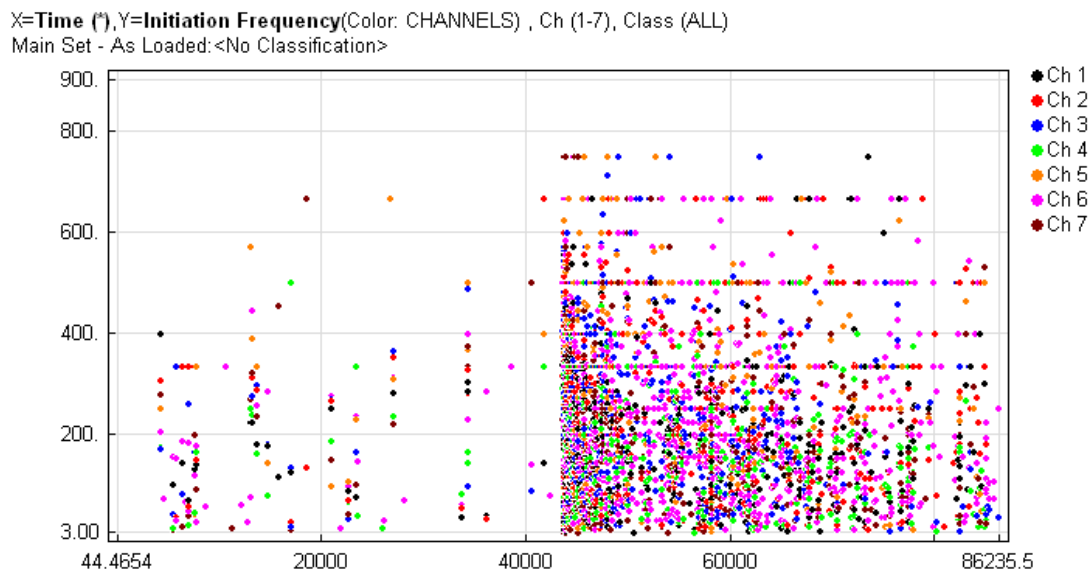
**Σχήμα 4.2.7**Χρονική εξέλιξη της έντασης σήματος, για κάθε κανάλι. Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται στην έναρξη της θραύσης, στα 43438 s.



**Σχήμα 4.2.8**Χρονική εξέλιξη του χρόνου ανόδου(σε  $\mu s$ ) για κάθε κανάλι. Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται κατά την έναρξη της θραύσης και φτάνουν ως και τα 1000  $\mu s$ .Γεγονότα με μεγάλους χρόνους ανόδου αντιστοιχούν στη δημιουργία μικρορωγμών λόγω διατμητικών τάσεων που εμφανίζονται στην περιοχή της διεπιφάνειας διογκωτικού-κυβόλιθου.



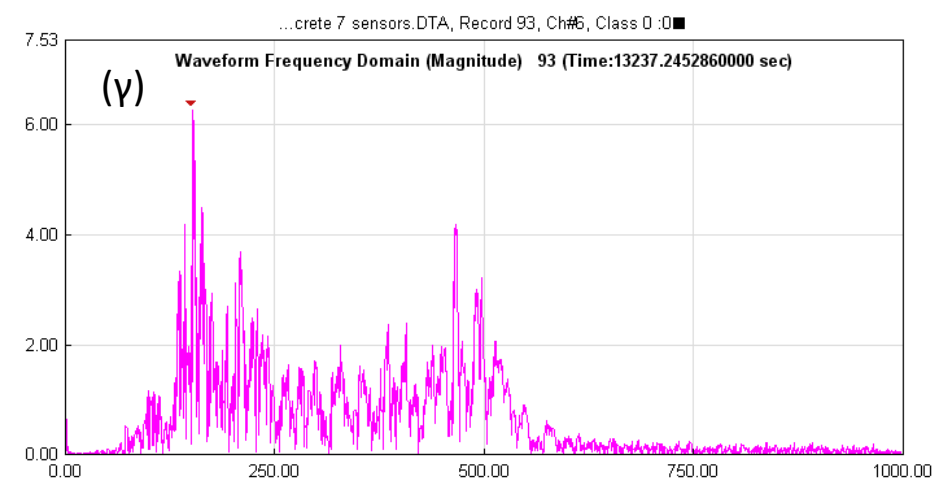
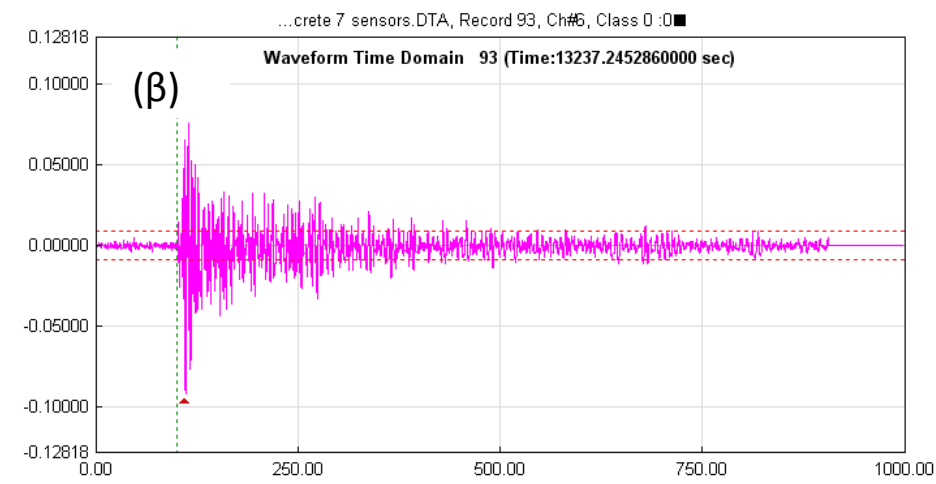
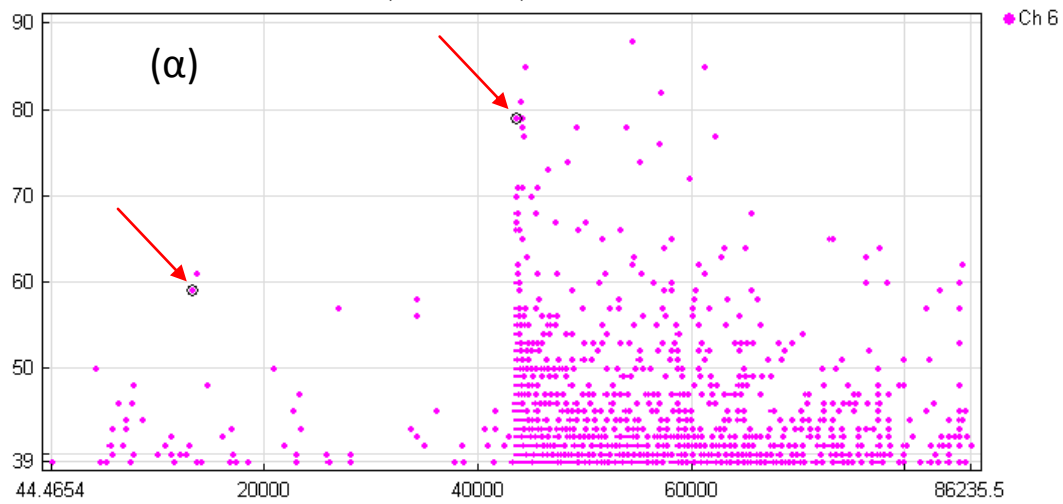
**Σχήμα 4.2.9**Χρονική εξέλιξη της μέσης συχνότητας (σε Hz).



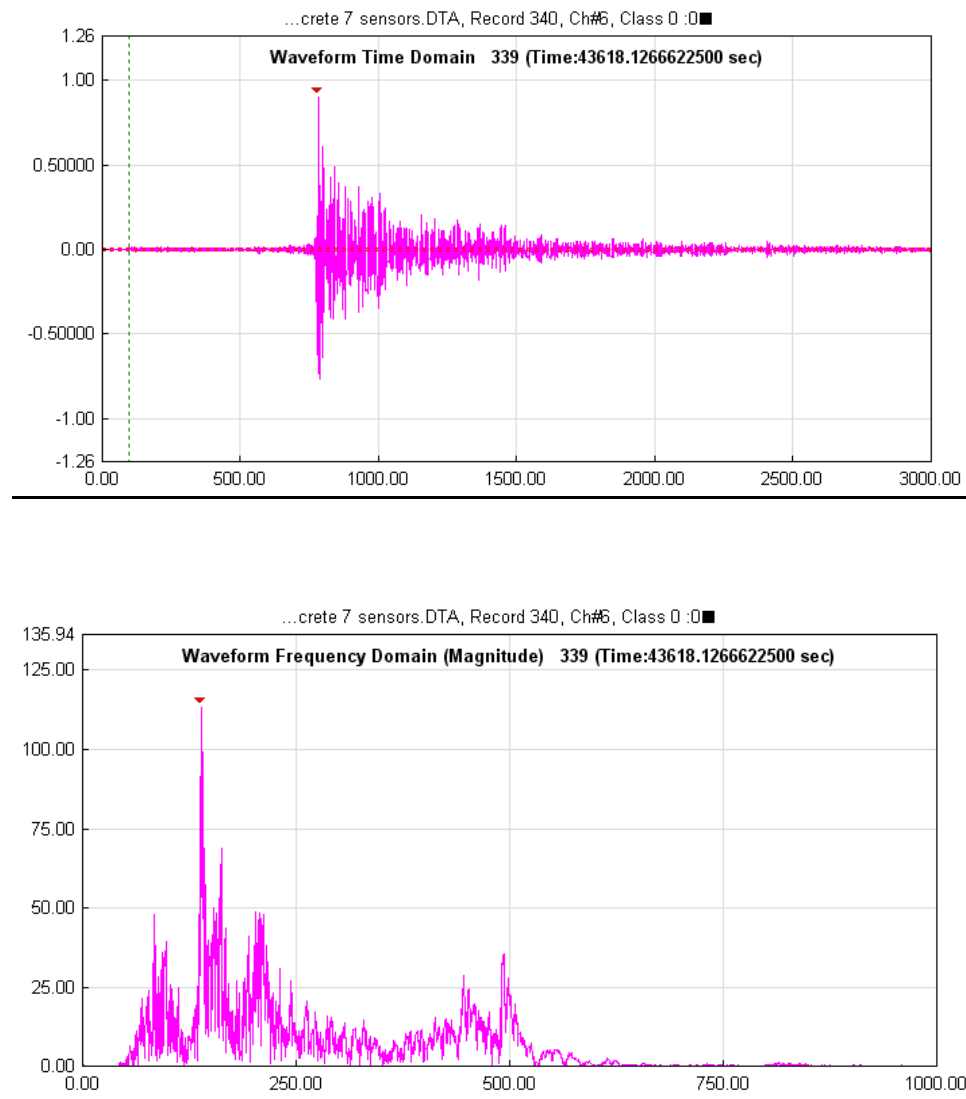
**Σχήμα 4.2.10**Χρονική εξέλιξη της συχνότητας έναρξης (σε Hz).

Χαρακτηριστικές κυματομορφές που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, απεικονίζονται στα Σχήματα 4.2.11 και 4.2.12. Συγκεκριμένα, 2 αντιπροσωπευτικές κυματομορφές που καταγράφηκαν στο 6<sup>ο</sup> κανάλι (Σχήμα 4.2.11 (α)), απεικονίζονται στα Σχήματα 4.2.11 β,γ και 4.2.12, μαζί με τη φασματική τους ανάλυση.

X=Time (\*), Y=Amplitude (Color: CHANNELS) , Ch (6), Class (ALL)  
Main Set - As Loaded: <No Classification> (72.52% filtered)



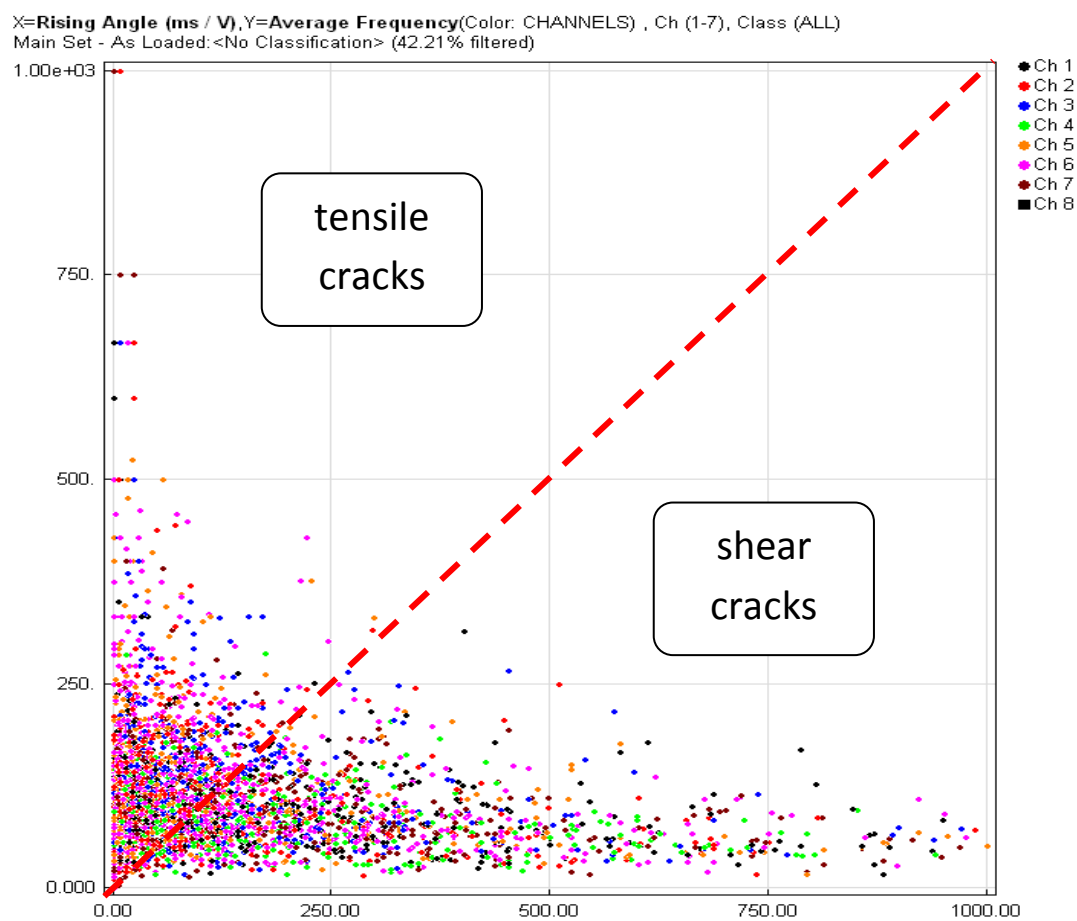
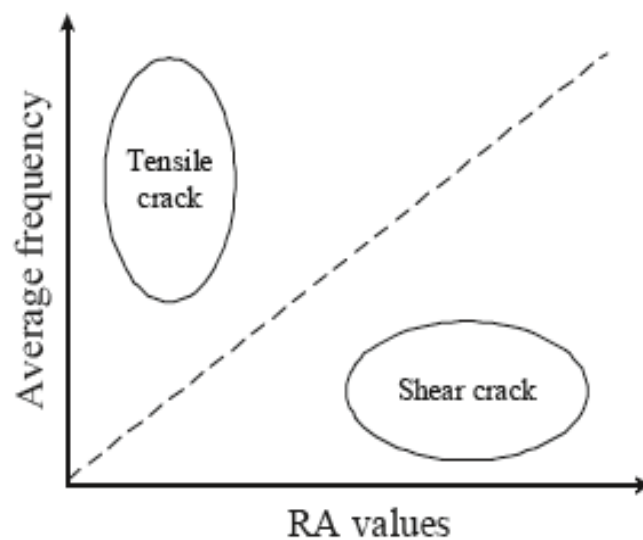
**Σχήμα 4.2.11**(α) Για το 1<sup>ο</sup> επιλεγμένο γεγονός ( $t=13237.245$  s) στο 6<sup>ο</sup> κανάλι, η κυματομορφή και η φασματική της ανάλυση απεικονίζονται στο (β) και (γ), αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.2.12** Η κυματομορφή και η φασματική της ανάλυση για το 2<sup>ο</sup> επιλεγμένο γεγονός του

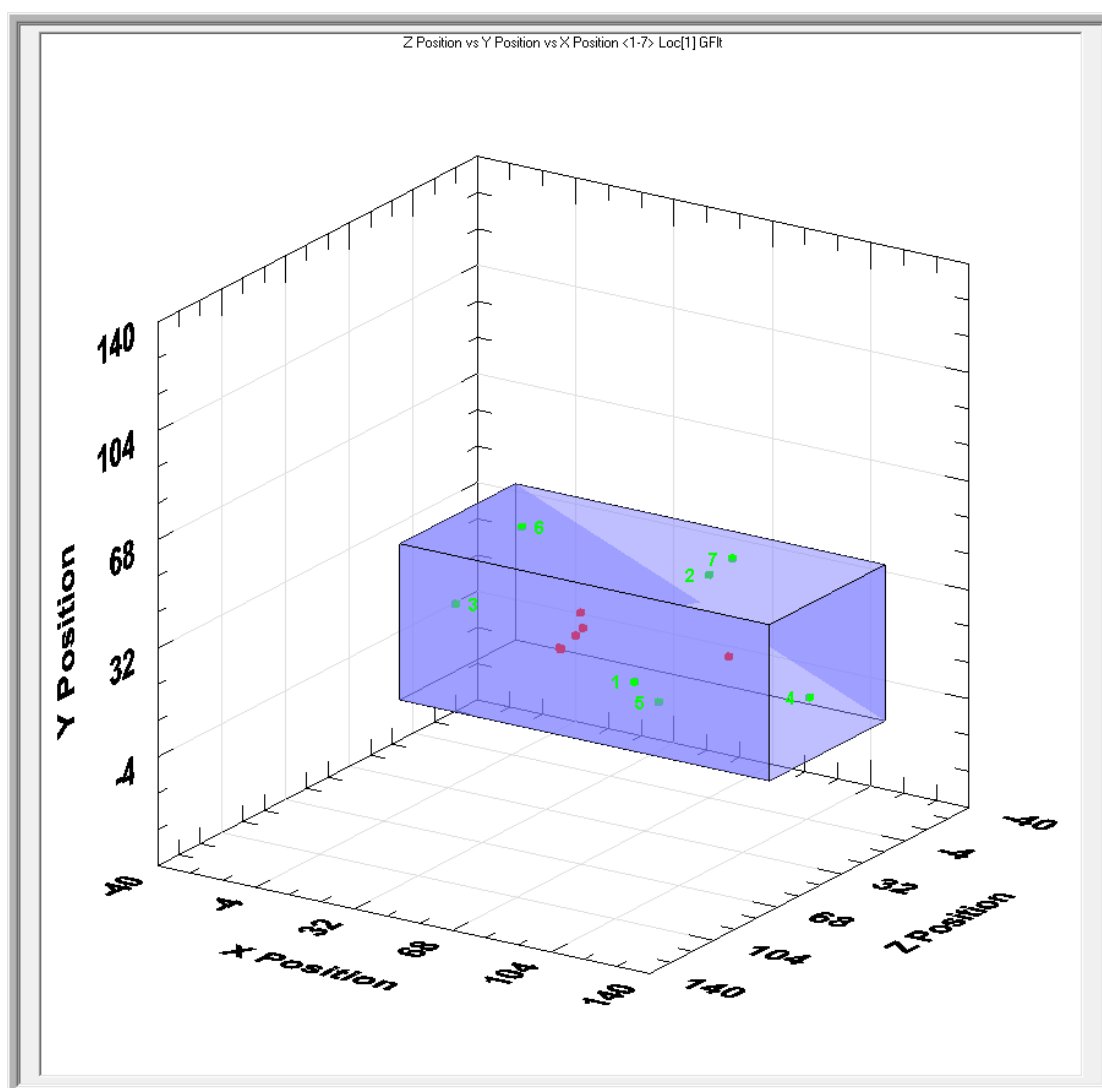
Οι συσχετισμοί των διαφόρων ακουστικών παραμέτρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές φορές για το διαχωρισμό του είδους των ρωγμών (διατμητικές ή εφελκυστικές-θλιπτικές) που δημιουργούνται στα υλικά λόγω του εντατικού πεδίου στο οποίο βρίσκονται. Συγκεκριμένα, σε υλικά από τσιμέντο, ο διαχωρισμός που έχει προταθεί αφορά το συσχετισμό της μέσης συχνότητας και της παραμέτρου που αναφέρεται ως γωνία ανύψωσης (rising angle, RA) και ορίζεται ως ο χρόνος ανύψωσης δια του πλάτους (σε V), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στην περίπτωση του πειράματος μας, ο συσχετισμός των δύο αυτών ακουστικών παραμέτρων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.13.



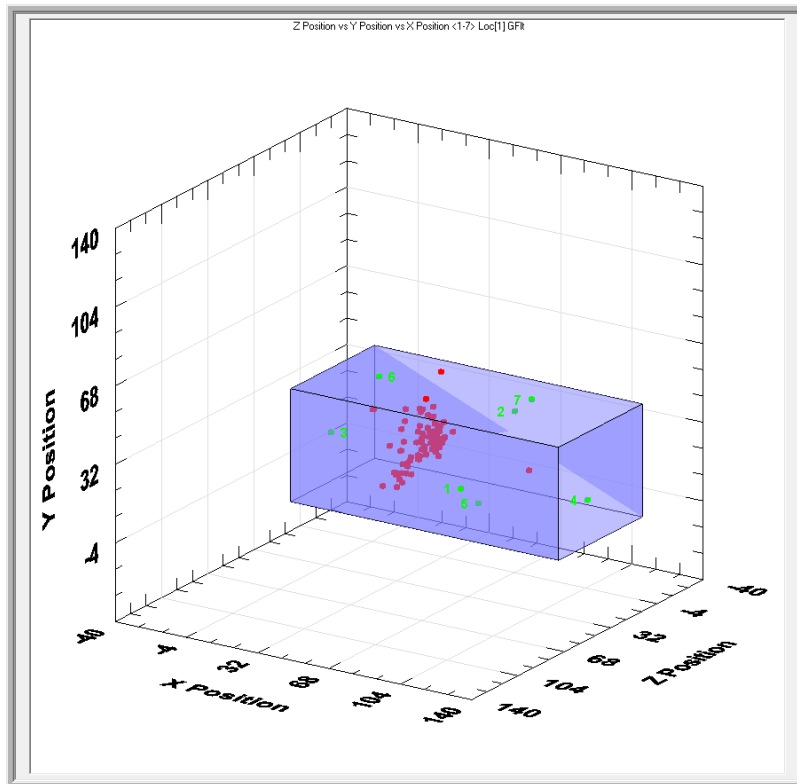


**Σχήμα 4.2.13** Η γωνία ανύψωσης συναρτήσεως της μέσης συχνότητας για όλα τα κανάλια. Η διαγώνιος διαχωρίζει τους δύο διαφορετικούς τρόπους ρωγμών (διατμητικές και εφελκυστικές).

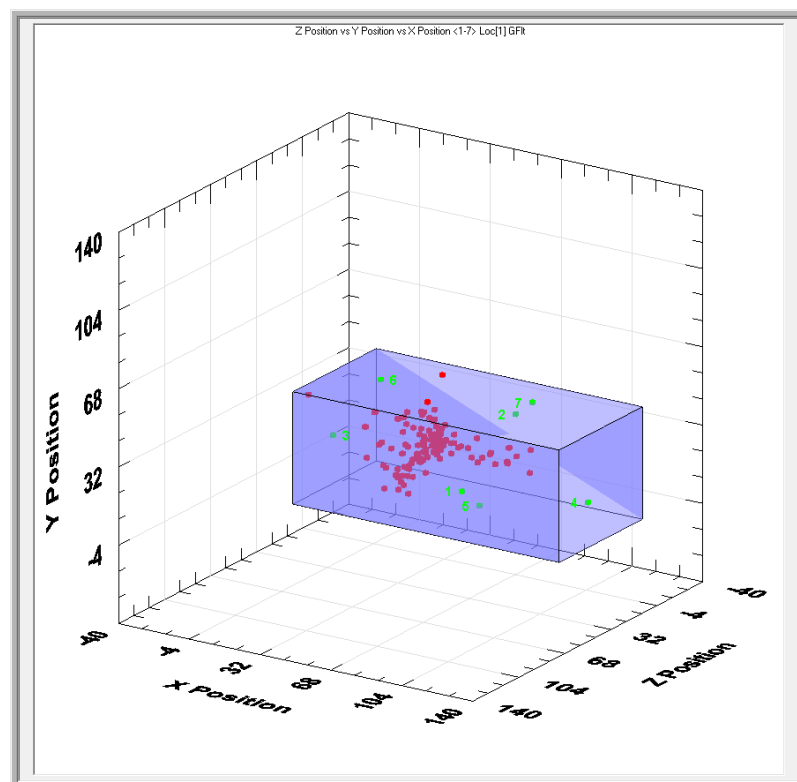
Ο εντοπισμός των θέσεων των πηγών ΑΕ κατά τη διάρκεια του πειράματος, απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα. Στο Σχήμα 4.2.14 απεικονίζονται οι θέσεις των 7 αισθητήρων πάνω στο δοκίμιο και τα γεγονότα (events) που προέκυψαν έως τις 12 πρώτες ώρες παρακολούθησης, πριν δηλαδή την έναρξη της θραύσης του δοκιμίου. Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό των θέσεων, φιλτραρίστηκαν ώστε να χρησιμοποιηθούν καταγραφές με πλάτη μεγαλύτερα από 52 dB. Με τον τρόπο αυτό, αποκλείονται γεγονότα μικρού πλάτους που οδηγούν σε μεγάλη αβεβαιότητα στον εντοπισμό των θέσεων. Ο τρισδιάστατος εντοπισμός των θέσεων έως την ώρα 13:26:00 και 18:04:00 της δοκιμής, απεικονίζονται στα Σχήματα 4.2.15 και 4.2.16, αντίστοιχα. Δεδομένου ότι το διάτρημα βρίσκεται κατά την Z-διεύθυνση (κάθετα στο x-y επίπεδο), η συμφωνία των θέσεων των γεγονότων με τη θέση του διατρήματος, είναι πολύ καλή.



**Σχήμα 4.2.14** Τρισδιάστατος εντοπισμός των θέσεων των γεγονότων στο δοκίμιο κυβόλιθου, στο 1<sup>ο</sup> 12ωρο της καταγραφής, πριν την έναρξη της θραύσης του.



**Σχήμα 4.2.15** Τρισδιάστατος εντοπισμός των θέσεων στο δοκίμιο κυβόλιθου έως τη χρονική στιγμή, 13:26:00 της δοκιμής.

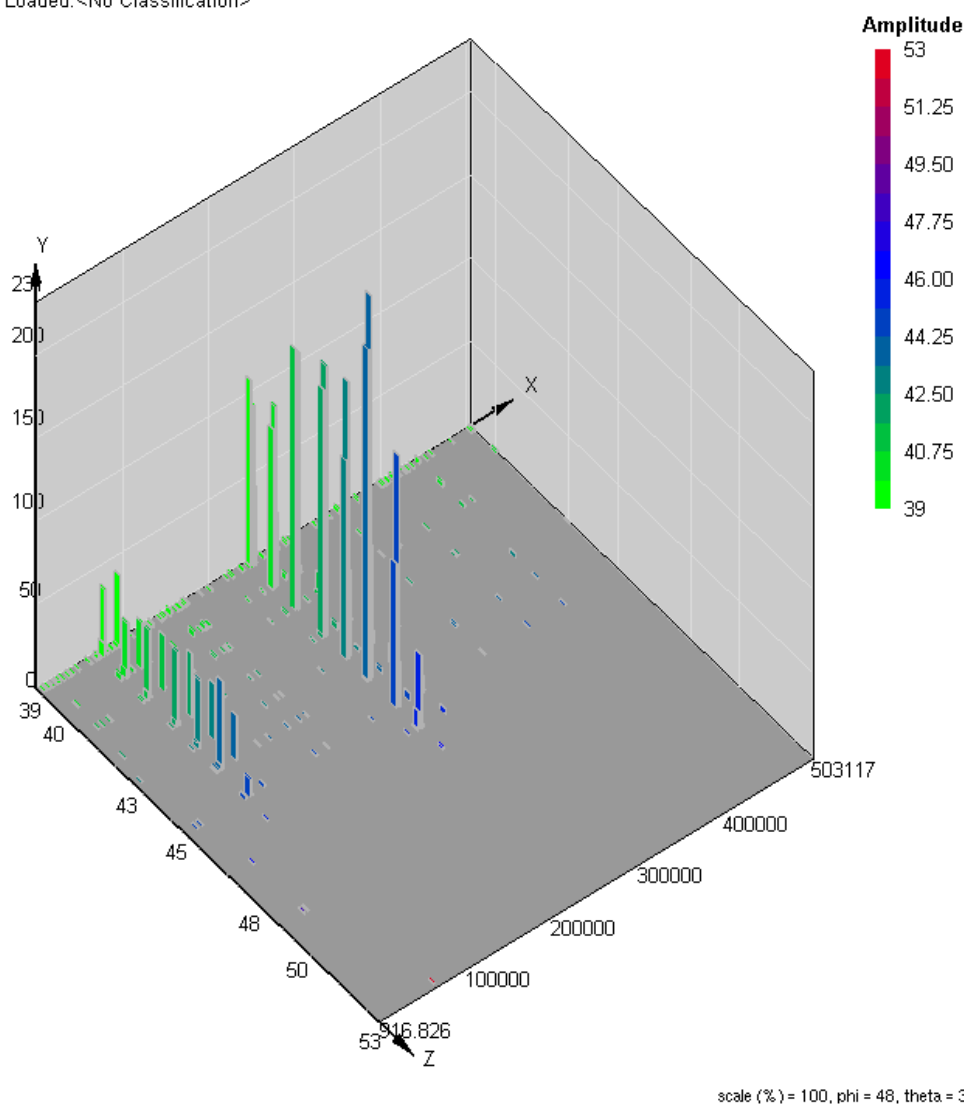


**Σχήμα 4.2.15** Τρισδιάστατος εντοπισμός έως τη χρονική στιγμή 18:04:00 της δοκιμής.

### Πείραμα 5<sup>ο</sup> Ασβεστόλιθος (Limestone)

Δεδομένου ότι στο δοκίμιο του κυβόλιθου η έναρξη των ρωγμών άρχισε περίπου 12 h μετά την τοποθέτηση του κονιάματος, δηλαδή, αρκετά αργότερα από ότι προβλέπει ο κατασκευαστής, το δοκίμιο του ασβεστόλιθου που παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή παρέμεινε υπό παρακολούθηση με το σύστημα των ΑΕ για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (συνολικά 6 ημέρες). Η καταγραφή των κτύπων (hits) και η κατανομή των πλάτων τους για ολόκληρο το διάστημα παρακολούθησης, απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.16. Αισθητή δραστηριότητα παρατηρείται στις περίπου 20 ώρες καθώς και αρκετά αργότερα, δηλαδή στις 67 ώρες, η οποία μάλιστα είναι πιο έντονη.

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

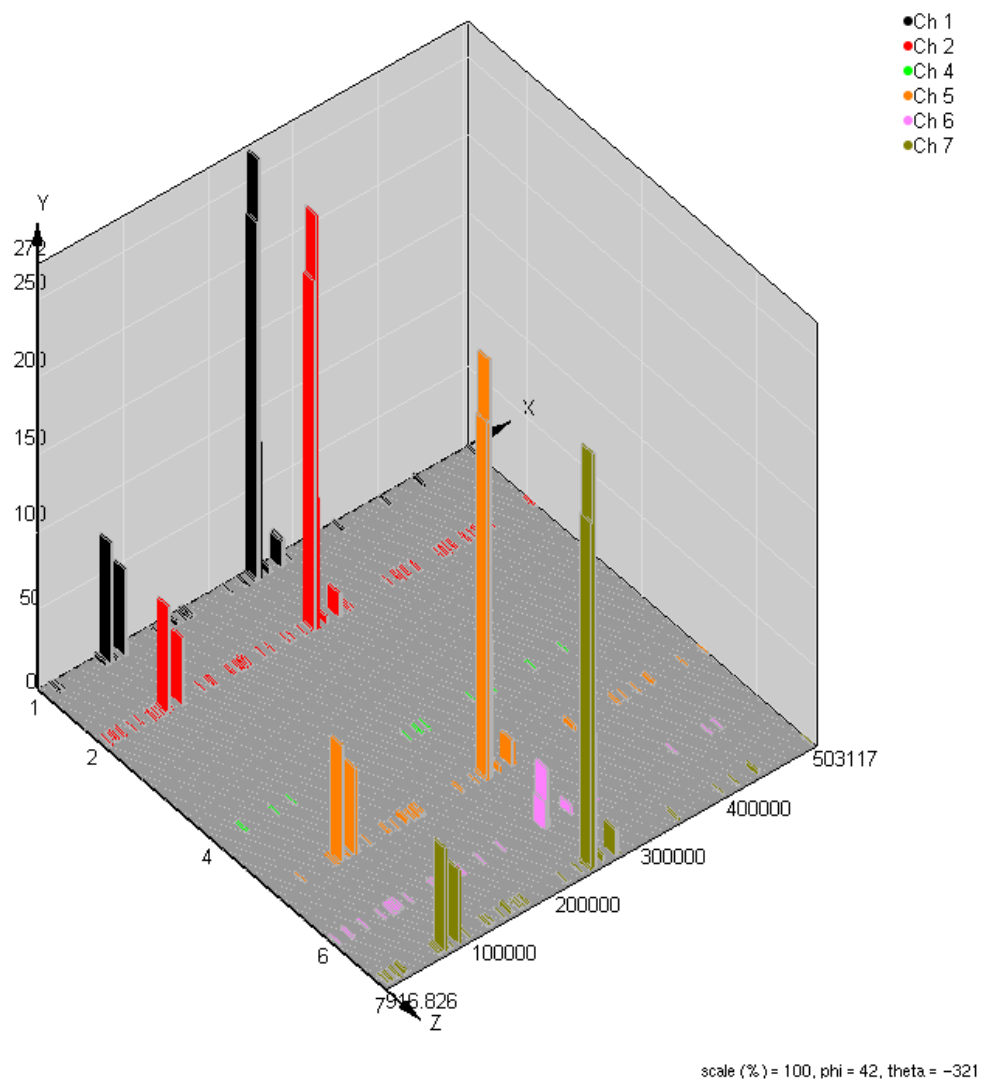


**Σχήμα 4.2.16** Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής των κτύπων (hits) από όλα τα κανάλια (6 συνολικά) αθροιστικά, κατά τη χρονική εξέλιξη παρακολούθησης της θραύσης του δοκιμίου ασβεστόλιθου. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τα πλάτη των κτύπων (σε dB).

Η καταγραφή της ακουστικής δραστηριότητας σε κάθε ένα από τα κανάλια (το 3<sup>ο</sup> κανάλι δεν κατέγραψε δραστηριότητα) απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.17. Παρατηρήθηκε εντονότερη δραστηριότητα στα κανάλια 1, 2, 5 και 7, ενώ η δραστηριότητα στα κανάλια 2 και 6 ήταν αρκετά μικρή.

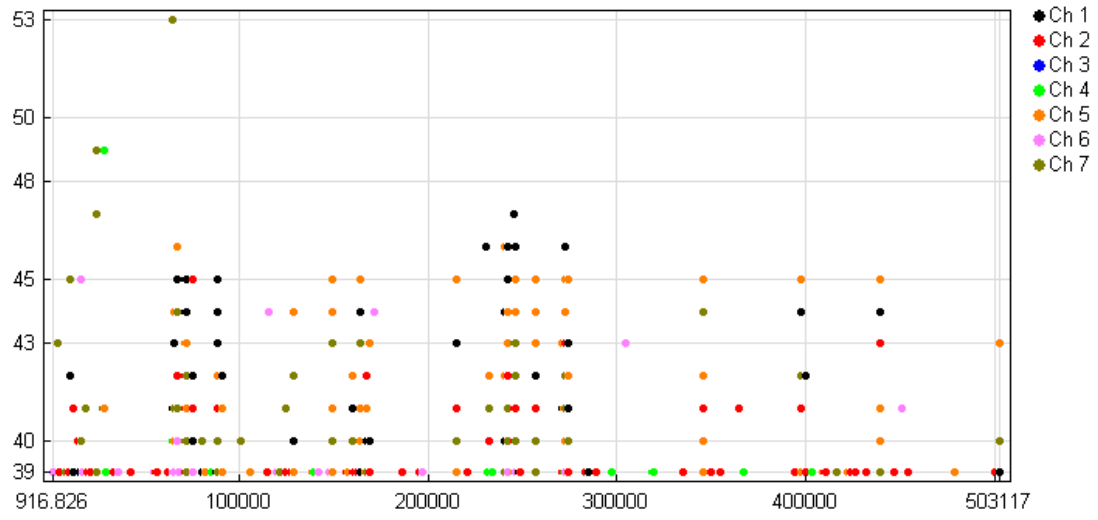
Η χρονική εξέλιξη των διαφόρων παραμέτρων ΑΕ, απεικονίζεται στα Σχήματα 4.2.18 - 21. Τόσο η διάρκεια, όσο και ο χρόνος ανόδου δίνουν σαφείς ενδείξεις της έντονης δραστηριότητας που παρατηρήθηκε στην 67h παρατήρησης του πειράματος.

X=Time (s), Y=Number of Vectors (Hits) (s), Z=Channel (s) (Color: CHANNELS) , Ch (ALL), Class (ALL)  
Main Set - As Loaded: <No Classification>



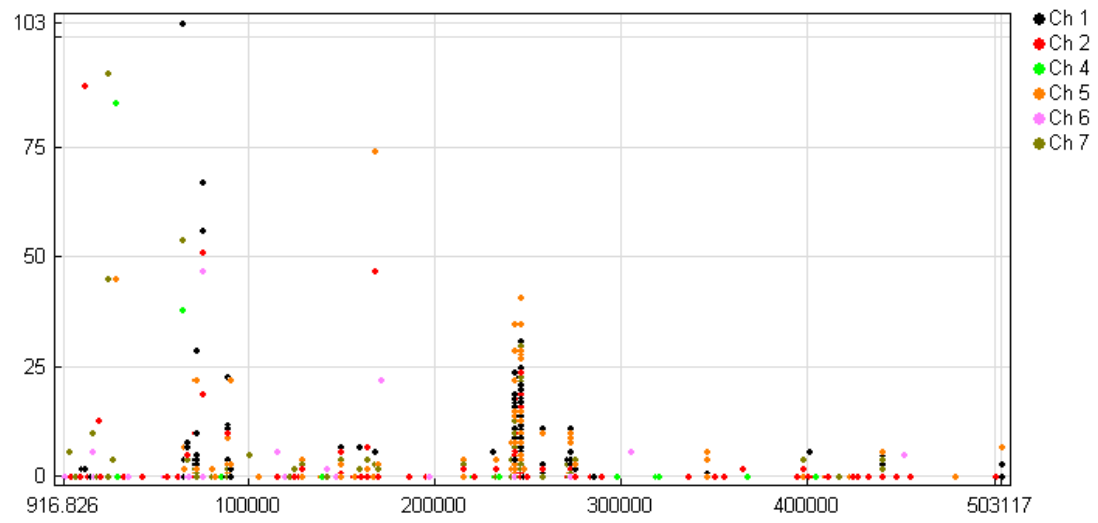
**Σχήμα 4.2.17** Τρισδιάστατο γράφημα της χρονικής εξέλιξης της δραστηριότητας των ΑΕ (χτύποι) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) κατά την παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου ασβεστόλιθου. Η εντονότερη δραστηριότητα καταγράφεται στους αισθητήρες 1, 2, 5 και 7.

X=Time (\*),Y=Amplitude(Color: CHANNELS) , Ch (1-2,4-7), Class (ALL)  
Main Set - As Loaded: <No Classification>

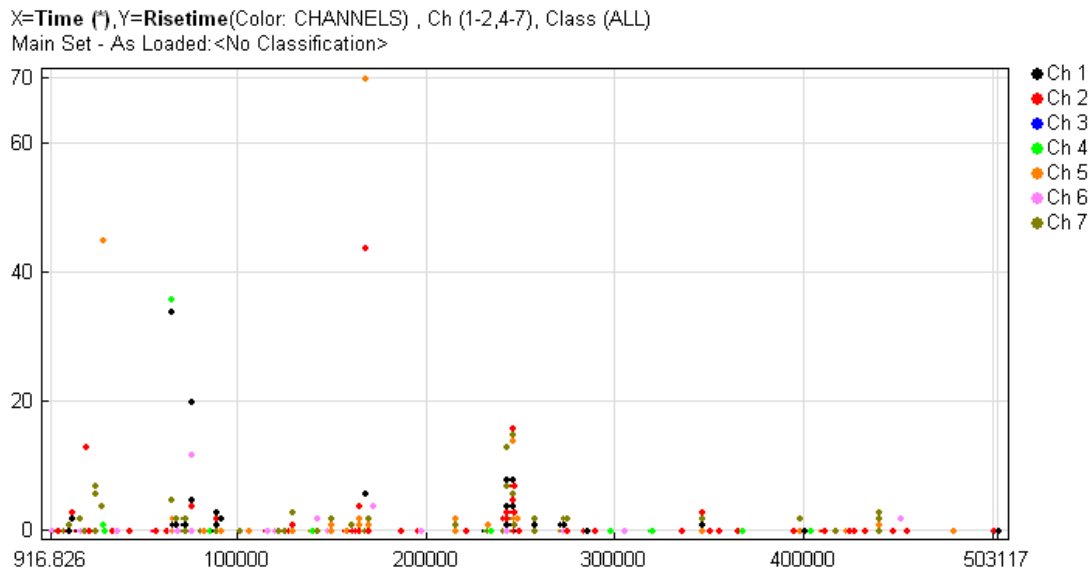


**Σχήμα 4.2.18** Χρονική εξέλιξη των πλατών (σε dB) των σημάτων που καταγράφηκαν στους 7 αισθητήρες.

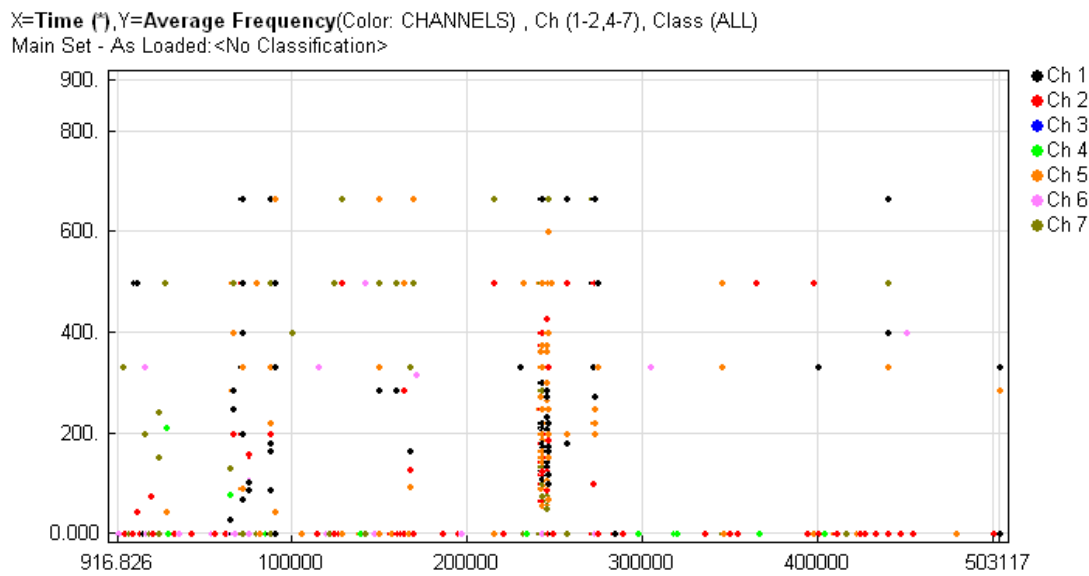
X=Time (\*),Y=Duration(Color: CHANNELS) , Ch (ALL), Class (ALL)  
Main Set - As Loaded: <No Classification>



**Σχήμα 4.2.19** Χρονική εξέλιξη της διάρκειας των καταγραφών (κτύπων) σε  $\mu s$ , για κάθε κανάλι.

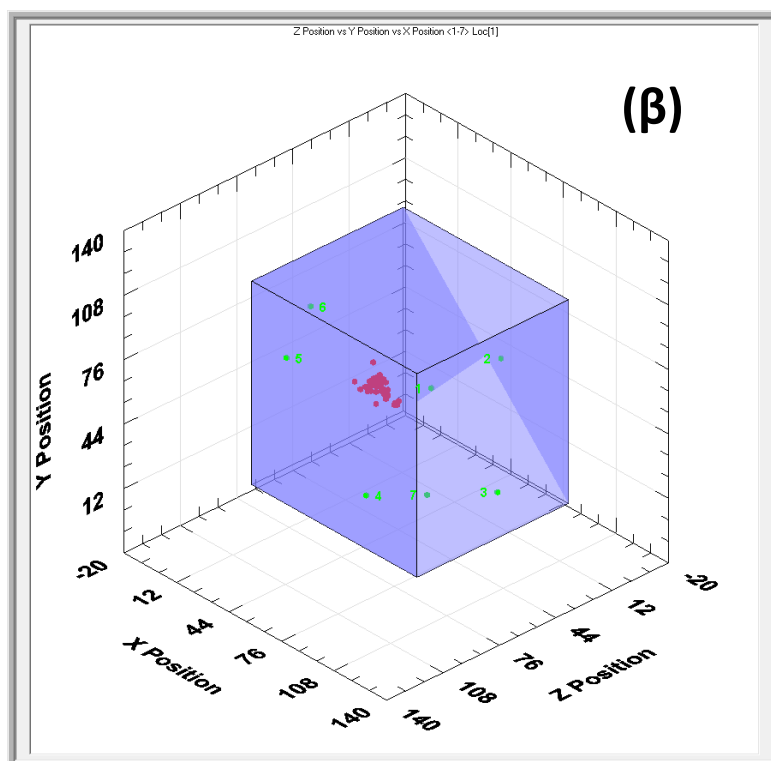
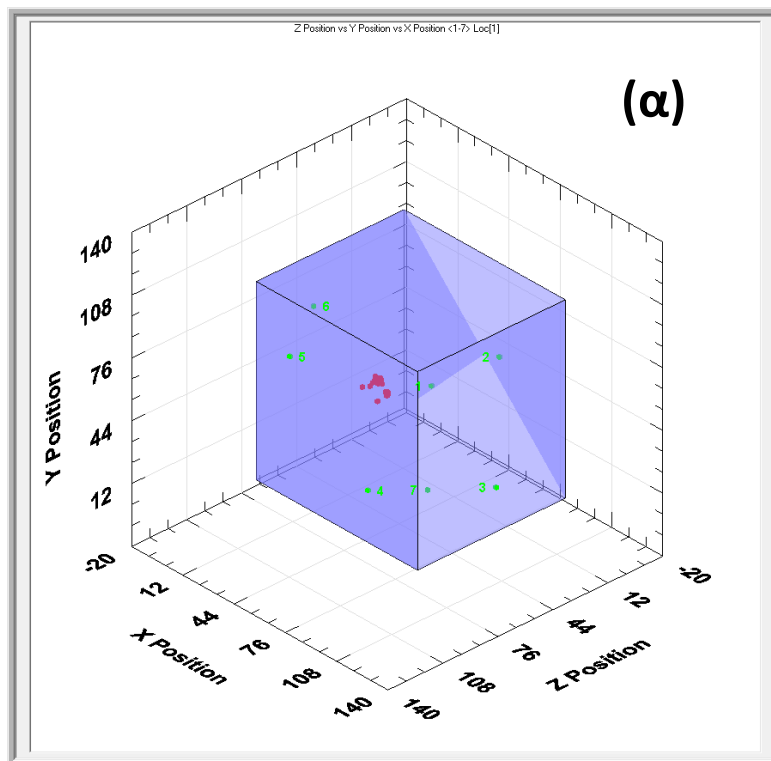


**Σχήμα 4.2.20**Χρονική εξέλιξη του χρόνου ανόδου, καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.



**Σχήμα 4.2.21**Χρονική εξέλιξη της μέσης συχνότητας των καταγραφών από τα 7 κανάλια καταγραφής.

Παρόλο που δεν υπήρχε εμφανής μακροσκοπική θραύση του δοκιμίου, εντούτοις παρατηρήθηκε σημαντικός αριθμός γεγονότων που πιθανά οφείλεται σε ρωγμές και τριβές στο εσωτερικό του κονιάματος κατά τη διαδικασία σκλήρυνσης του. Τα γεγονότα που καταγράφηκαν, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.21α,β.



**Σχήμα 4.2.21** Τρισδιάστατος εντοπισμός των γεγονότων (events) κατά τη διάρκεια του πειράματος (α) στο χρονικό διάστημα 18:18:00 – 20:41:00 h και (β) 2d και 22:00:00 μετά την έναρξη της καταγραφής. Η ταχύτητα που χρησιμοποιήθηκε ήταν 2.87 km/s.



## Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, αφορούσε στην εφαρμογή της τεχνικής των ακουστικών εκπομπών (ΑΕ) στην παρακολούθηση της θραύσης πετρωμάτων με τη χρήση διογκωτικού κονιάματος με σκοπό την παρακολούθηση και τον εντοπισμό των ρωγμών σε διαφορετικού τύπου δοκίμια.

Με την τεχνική των ακουστικών εκπομπών καθίσταται δυνατός ο καθορισμός της θέσης ανάπτυξης ρωγμών, μπορεί δηλαδή να καθοριστεί η πηγή της ακουστικής εκπομπής από την καθυστέρηση των σημάτων που λαμβάνουν διαφορετικοί αισθητήρες. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι με τη χρήση συστοιχίας αισθητήρων ΑΕ χωροθετημένων κατάλληλα στην επιφάνεια των δοκιμίων, είναι εφικτή η παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας, σε όλη τη διάρκεια δράσης του διογκωτικού κονιάματος σε κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια φυσικών πετρωμάτων ή τεχνητά παρασκευασμένων (κυβόλιθοι).

Το διογκωτικό κονίαμα υπερτερεί σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους θραύσης-κοπής καθώς αποφεύγεται ο θόρυβος, ενώ δεν απαιτούνται άδειες-πιστοποιήσεις ανατινάξεων. Επιπλέον, το κόστος του εξοπλισμού είναι χαμηλότερο, η συντήρηση του ευκολότερη και εξασφαλίζεται η ασφάλεια. Σε εργαστηριακή ωστόσο κλίμακα με τη χρήση δοκιμίων μικρών διαστάσεων υπήρξαν δυσκολίες στην εφαρμογή και τοποθέτησή του ρευστοκονιάματος και τα αποτελέσματα αναφορικά με τη θραύση είναι διαφορετικά σε σχέση με τις εφαρμογές σε μεγάλους όγκους υλικού.

Στο δοκίμιο τσιμεντόλιθου που επήλθε τελική θραύση, παρατηρήθηκε ανάπτυξη εφελκυστικών και διατμητικών τάσεων, μέσω των καταγραφών ΑΕ. Η θραύση του υλικού επήλθε ύστερα από περίπου 11 ώρες δράσης του διογκωτικού, με καταγραμμένη ακουστική δραστηριότητα σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Η θραύση που παρατηρήθηκε, εκδηλώθηκε με μεγάλη και έντονη εκπομπή ΑΕ. Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε κάποια προγενέστερη ΑΕ δραστηριότητα που να προμηνύει την επερχόμενη θραύση.

Από την πειραματική διαδικασία συμπεραίνεται ότι στη φυσική πέτρα (ασβεστόλιθος και τραβερνίτης) δεν λειτούργησαν αποτελεσματικά οι διασταλτικές ικανότητες του κονιάματος, ώστε να δημιουργηθούν ρωγμές και να επέλθει η θραύση, όσες προσπάθειες και αν έγιναν (μεγαλύτερο βάθος διατρήματος, κλείσιμο οπής προς αύξηση των τάσεων στα τοιχώματα, άνοιγμα δύο οπών, μεγαλύτερη αναλογία κονιάματος). Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, καταγράφηκε ακουστική δραστηριότητα που μπορεί να προήλθε από τη δημιουργία μικρορωγμών είτε στο υλικό ή λόγω εσωτερικών τριβών κατά τη διόγκωση του κονιάματος.

Αν και έγινε προσπάθεια να τηρηθεί η βέλτιστη αναλογία διαμέτρου διατρημάτων προς μέγεθος δείγματος, όπως αυτή χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πεδίου, αυτό δεν ήταν εφικτό γιατί, δεδομένης της αναλογίας ανάμιξης νερού/κονιάματος, το ρευστοκονίαμα δεν ήταν αρκετά ρευστό ώστε να ρέει αβίαστα μέσα στο διάτρημα και απαιτήθηκε στις περισσότερες φορές η συμπίεση του. Αυτό εγκυμονούσε τον κίνδυνο να δημιουργηθούν θύλακες αέρα μέσα στο διάτρημα, γεγονός που θα καταργούσε τη δράση του υλικού. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερη ποσότητα νερού από την προβλεπόμενη, το ρευστοκονίαμα εισήλθε εύκολα στο διάτρημα αλλά η δράση του ήταν πολύ μικρή, όπως αυτή καταγράφηκε στις ΑΕ.

Ωστόσο, η χρήση του κονιάματος αυτού τοποθετημένου στο εσωτερικό κάποιου υλικού, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως τεχνητή πηγή ακουστικών σημάτων για τη μελέτη της διάδοσης των κυμάτων σε οποιοδήποτε υλικό. Σε καλή προσέγγιση θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μονοδιάστατη πηγή ΑΕ (ή σημειακή σε περίπτωση που η ποσότητα του είναι μικρή), ώστε να διερευνηθούν

## Βιβλιογραφία

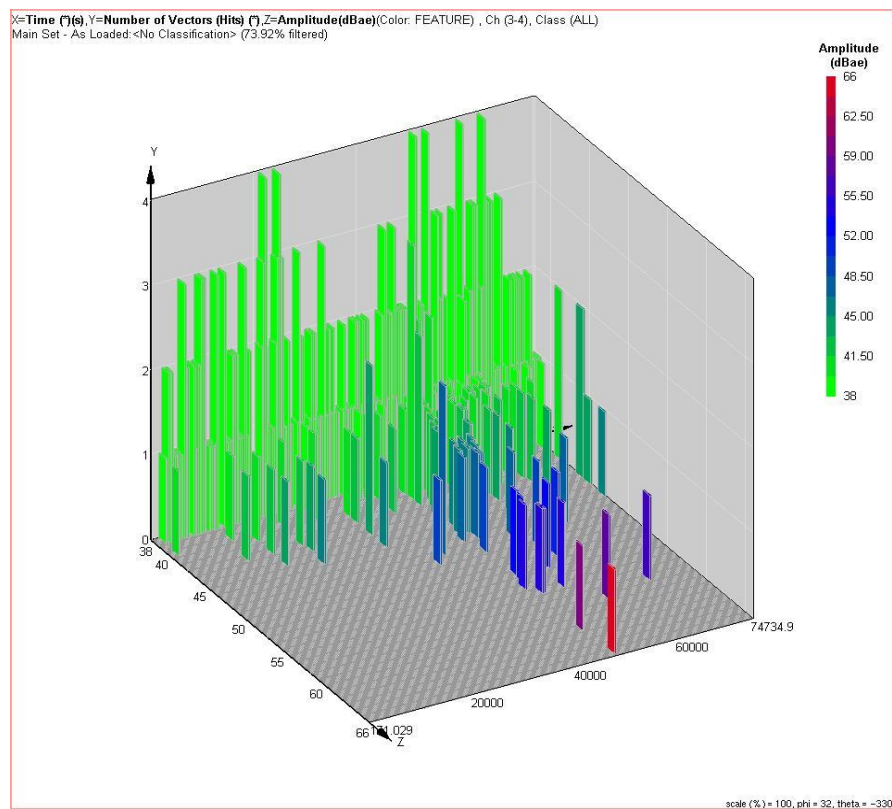
- Acoustic Emission / Microseismic activity, Vol. 1, Principles, Techniques and Geotechnical Applications, H. Reginald Hardy, 2003.
- Acoustic Emission - Standards and Technology Update, Ed. S. Vahaviolos, (ASTM Special Technical Publication, 1353) 1999.
- “Έντοπισμός θέσης ακουστικής εκπομπής με συστοιχία πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων”, Διπλωματική εργασία, Ι. Παππούς, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2012.
- Acoustic Emission Testing, Basics for Research – Applications in Civil Engineering, C. U. Grosse, M. Ohtsu, (Editors), Springer, 2008.
- PCI-2 based AE system user’s manual, Rev. 3, Physical Acoustic Corporation, 2007.
- NOESIS manual, Mistras Group Hellas ABEE, Athens, 2012.
- “Η εφαρμογή της τεχνικής μη-καταστροφικού ελέγχου των ακουστικών εκπομπών (AE) κατά τη μονο-αξονική μηχανική φόρτιση πετρωμάτων”, Πτυχιακή εργασία, Π.Μπακογεώργος, Τ.Ε.Ι Κρήτης Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΤΕ, 2014.

## Σύνδεσμοι

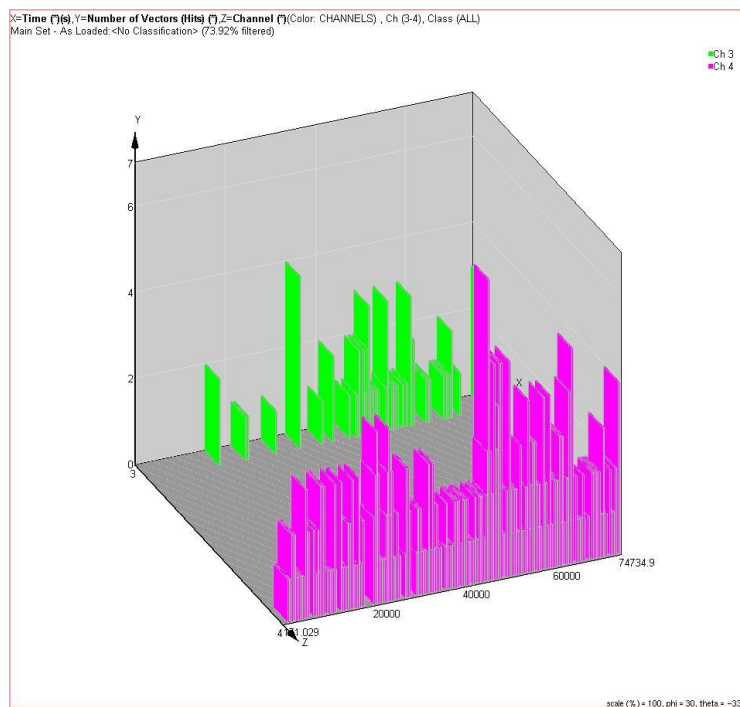
- <http://www.dexpan.com/dexpan-faqs-controlled-concrete-demolition-rock-breaking-excavating-mining.aspx>
- <https://www.youtube.com/watch?v=VNUZLLWbhv0>
- [http://www.quarryingtools.com/products\\_detail/productId=27.html](http://www.quarryingtools.com/products_detail/productId=27.html)
- [http://www.concreteconstruction.net/how-to/repair/alternative-concrete-demolition-techniques\\_o](http://www.concreteconstruction.net/how-to/repair/alternative-concrete-demolition-techniques_o)
- [http://www.mistrasgroup.gr/acoustic\\_emission\\_theory\\_gr.htm](http://www.mistrasgroup.gr/acoustic_emission_theory_gr.htm)
- <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/306AcousticesM.html>
- [http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage\\_testing\\_prevention\\_and\\_detection\\_in\\_aeronautics/PDF/acoustic-emission.pdf](http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage_testing_prevention_and_detection_in_aeronautics/PDF/acoustic-emission.pdf)
- [https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Intro.php](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Intro.php)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

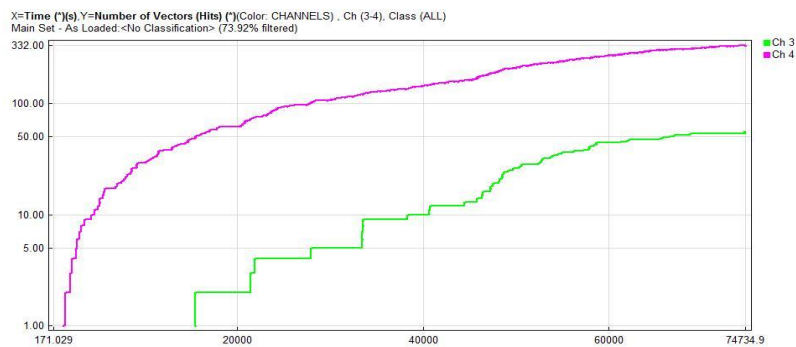
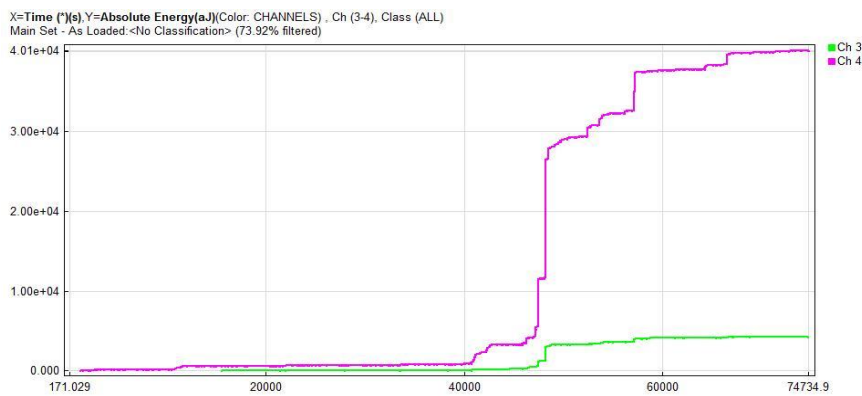
### Πείραμα 2<sup>ο</sup> Τσιμεντόλιθος (Concrete):



Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής των κύτπων (hits) από όλα τα κανάλια (2 συνολικά) αθροιστικά, κατά τη χρονική εξέλιξη παρακολούθησης της θραύσης του δοκιμίου τσιμεντόλιθου. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τα πλάτη των κύτπων (σε dB).

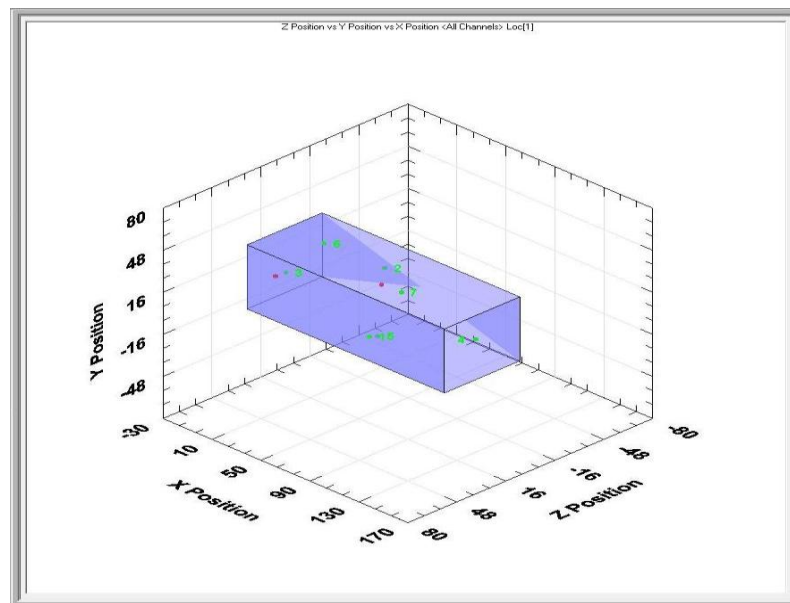


Τρισδιάστατο γράφημα της χρονικής εξέλιξης της δραστηριότητας των ΑΕ (χτύποι) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) κατά την παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου ασβεστόλιθου.

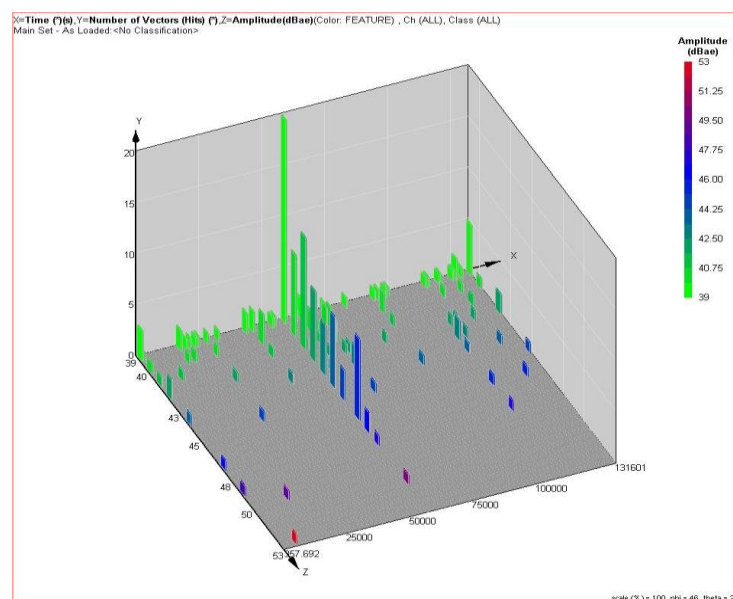


Διάγραμμα των παραμέτρων numberofhitsvstime

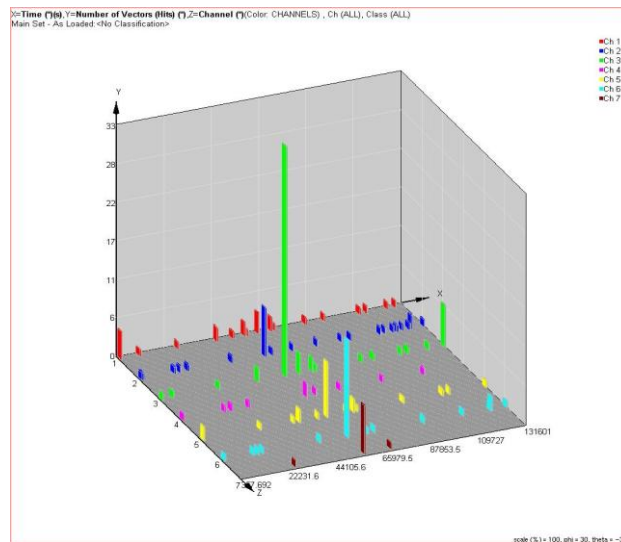
## Πείραμα 4<sup>ο</sup> Τραβερνίτης (Marble):



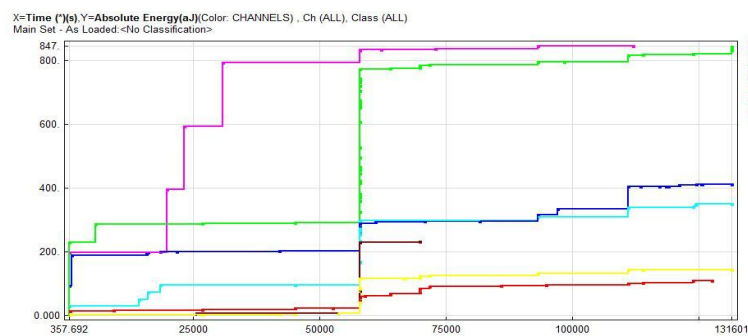
Τρισδιάστατος εντοπισμός των γεγονότων (events) κατά τη διάρκεια του πειράματος



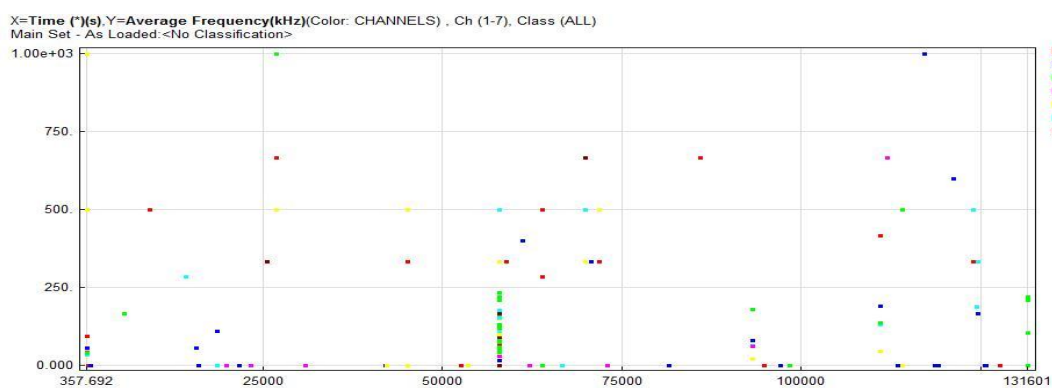
Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής των κτύπων (hits) από όλα τα κανάλια (7συνολικά) αθροιστικά, κατά τη χρονική εξέλιξη παρακολούθησης της θραύσης του δοκιμίου τραβερνίτη. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τα πλάτη των κτύπων (σε dB).



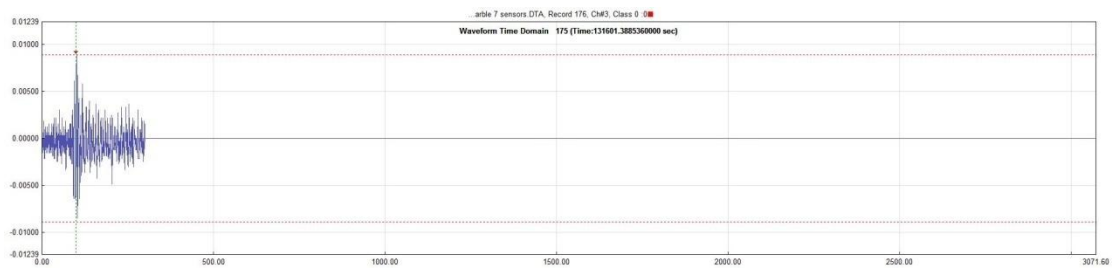
Τρισδιάστατο γράφημα της χρονικής εξέλιξης της δραστηριότητας των ΑΕ (χτύποι) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) κατά την παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου τραβερνίτη.



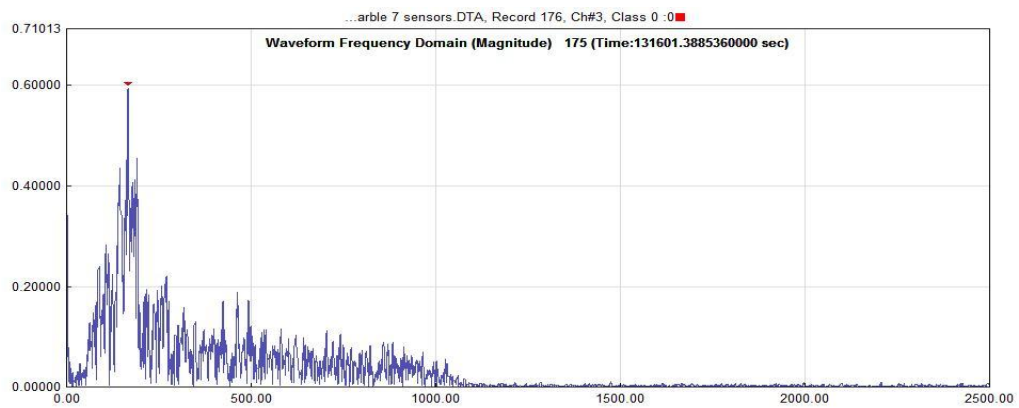
Σχήμα 4.4. 1 Απεικονίζεται το διάγραμμα των παραμέτρων absoluteenergyperchannel



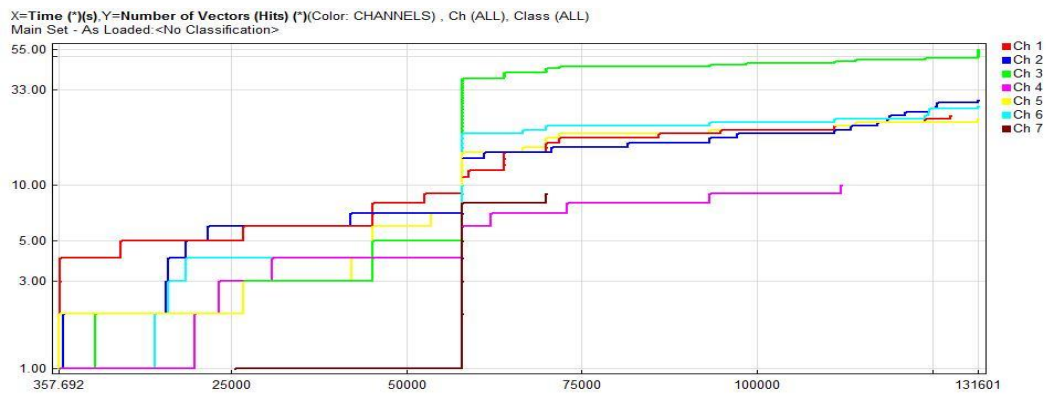
Χρονική εξέλιξη της μέσης συχνότητας των καταγραφών από τα 7 κανάλια καταγραφής.



Διάγραμμα της κυματομορφής (waveformtimedomain)



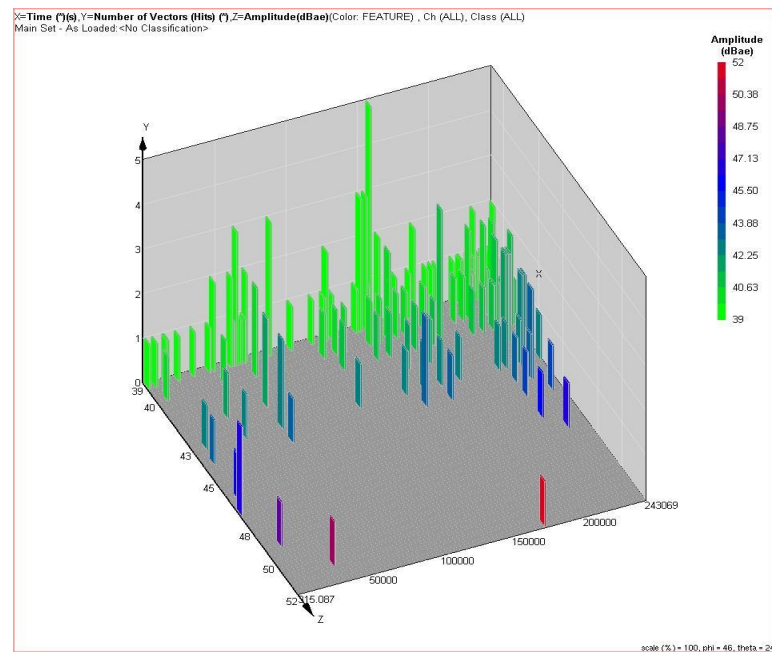
Διάγραμμα της κυματομορφής στο πεδίο των συχνοτήτων (waveformfrequency)



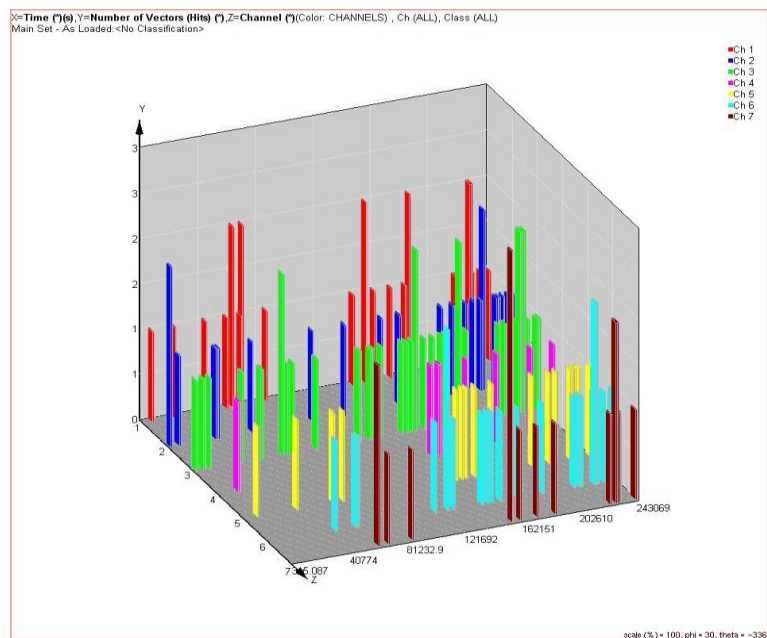
Διάγραμμα των παραμέτρων number of hits vs time per channel



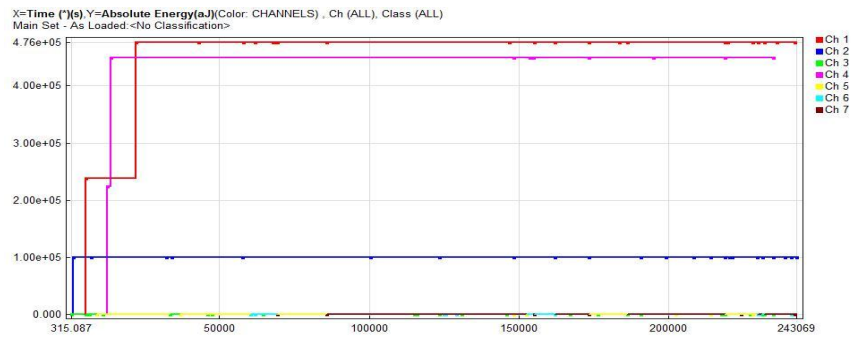
## 1<sup>η</sup> Επανάληψη πειράματος 4:



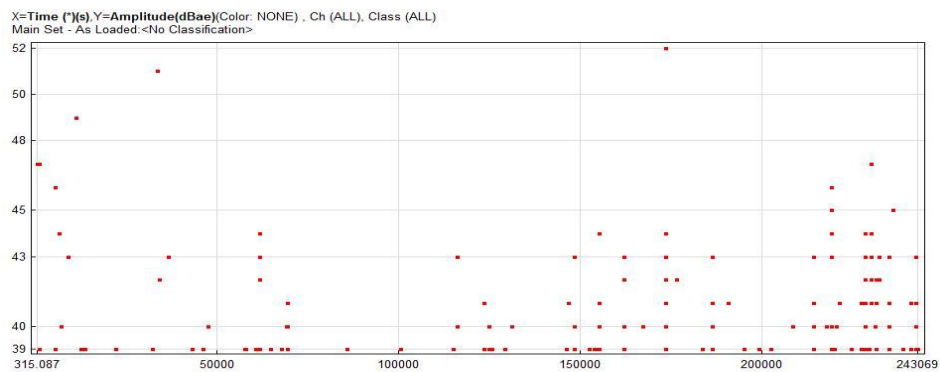
Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής των κτύπων (hits) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) αθροιστικά, κατά τη χρονική εξέλιξη παρακολούθησης της θραύσης του δοκιμίου τραβερνίτη. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τα πλάτη των κτύπων (σε dB).



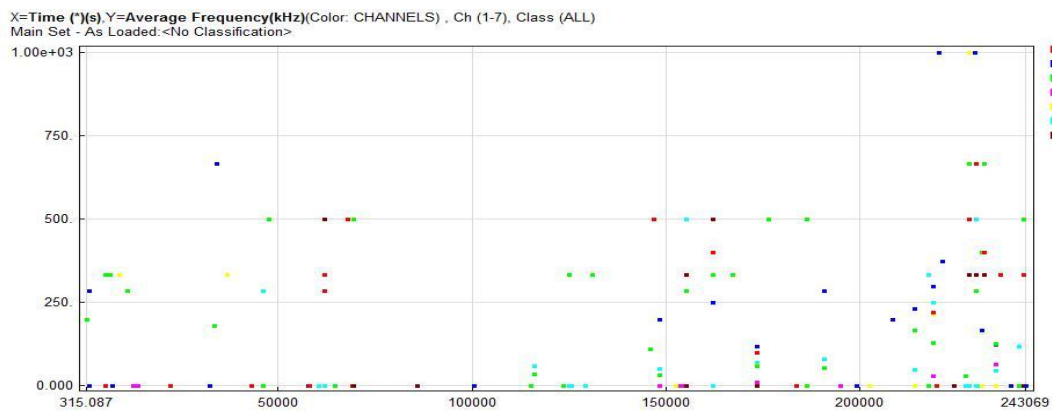
Τρισδιάστατο γράφημα της χρονικής εξέλιξης της δραστηριότητας των ΑΕ (χτύποι) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) κατά την παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου τραβερνίτη.



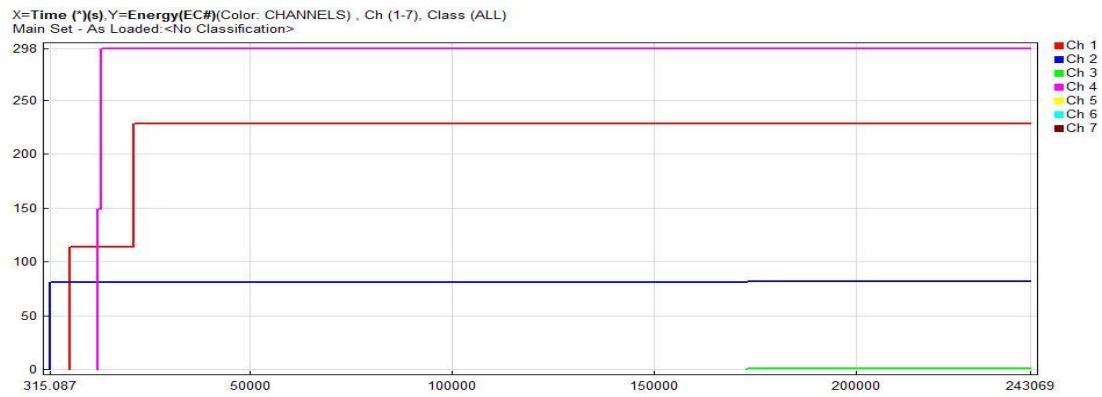
Διάγραμμα των παραμέτρων absolute energy vs time per channel



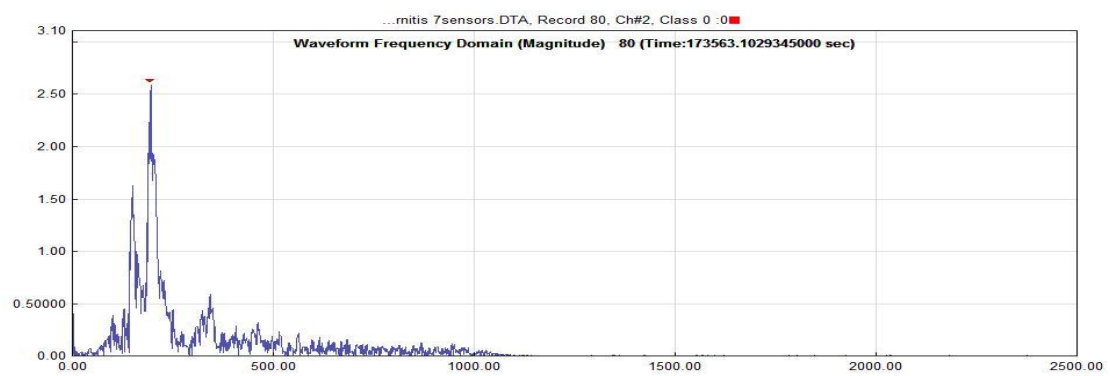
Διάγραμμα των παραμέτρων amplitude vs time



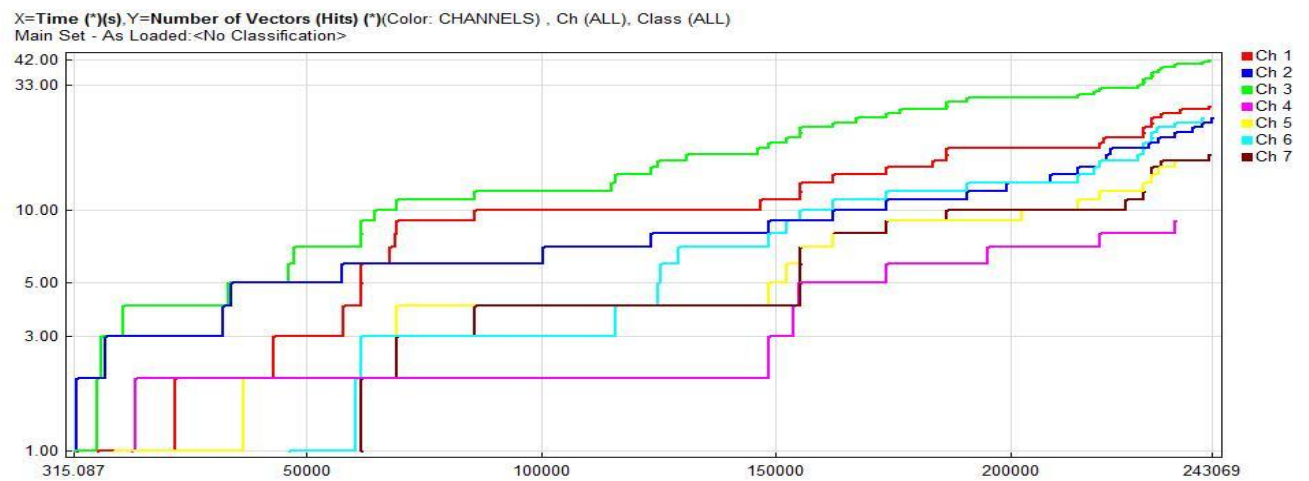
Χρονική εξέλιξη της μέσης συχνότητας των καταγραφών από τα 7 κανάλια καταγραφής.



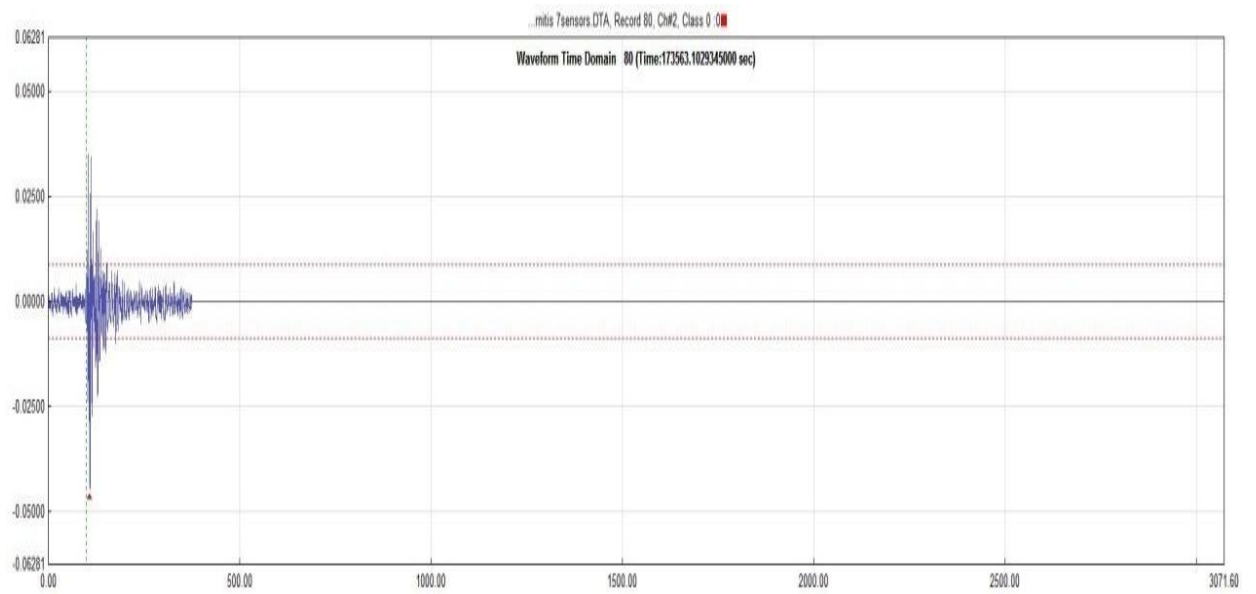
Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της ενέργειας των καταγραφών από τα 7 κανάλια καταγραφής.



Διάγραμμα της κυματομορφής (waveformfrequency)

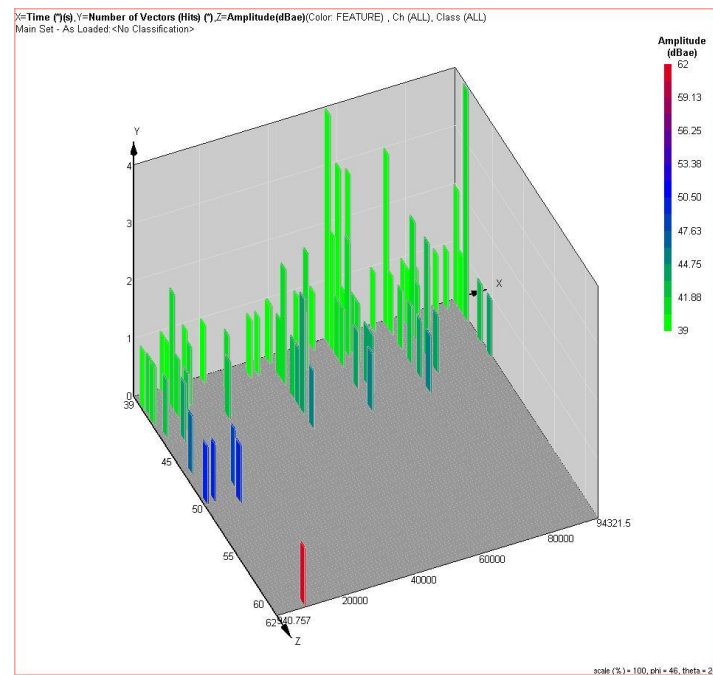


Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης κτύπων από τα 7 κανάλια καταγραφής.

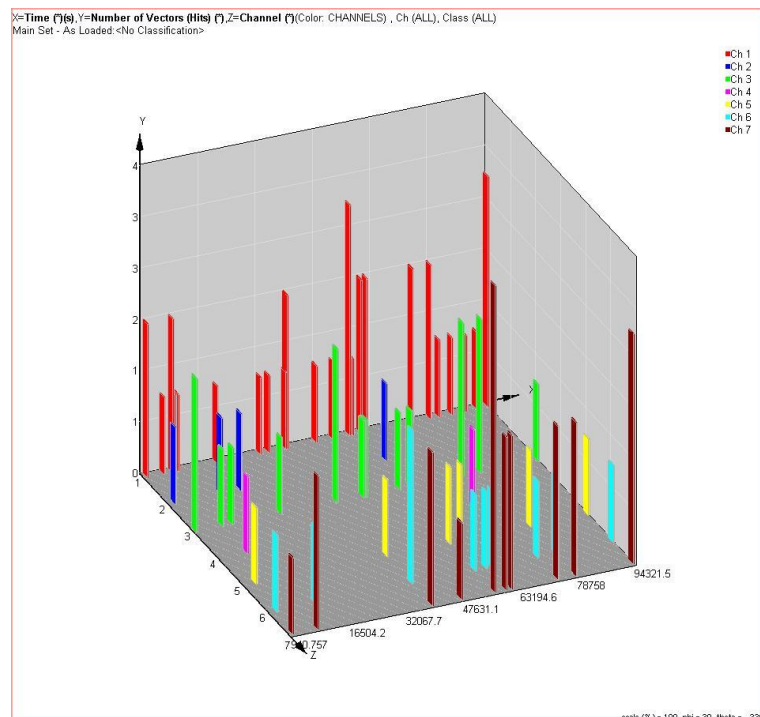


Διάγραμμα της κυματομορφής (waveformtimedomain)

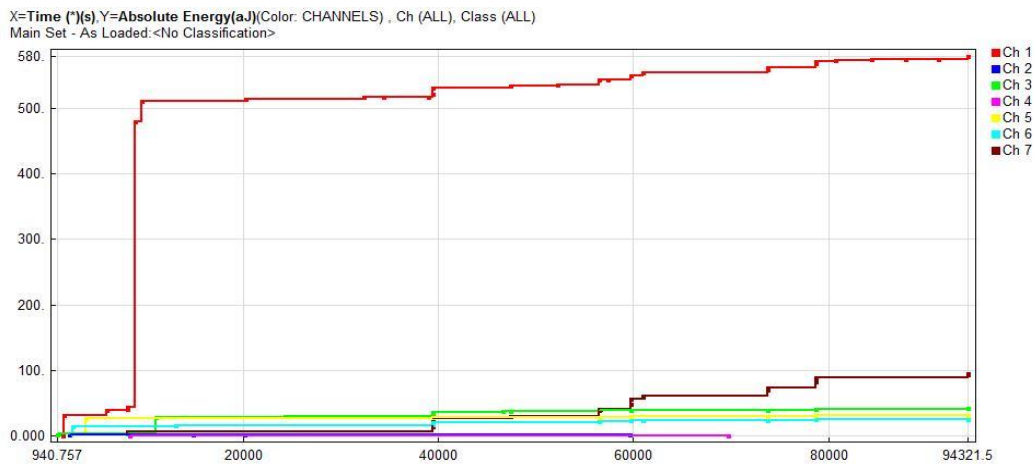
## 2<sup>η</sup>Επανάληψη πειράματος 4:



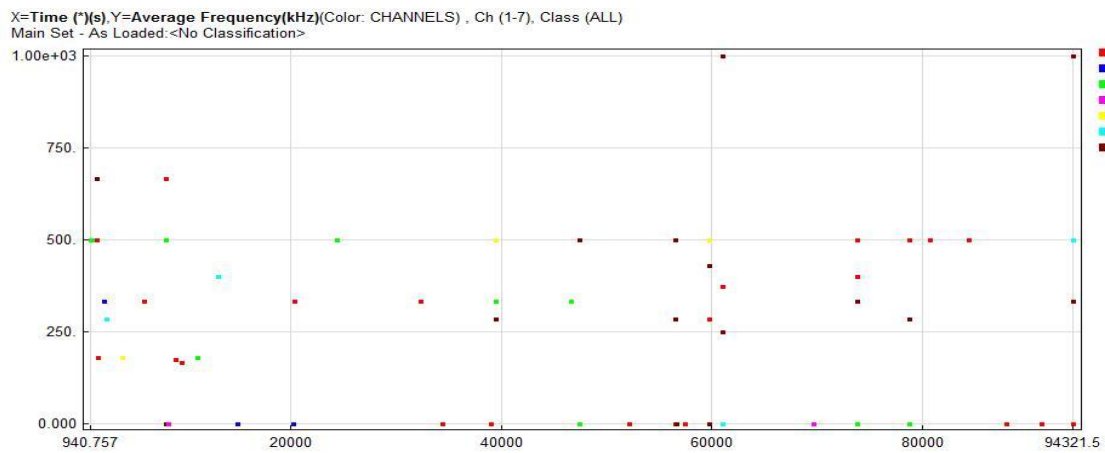
Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής των κτύπων (hits) από όλα τα κανάλια (7συνολικά) αθροιστικά, κατά τη χρονική εξέλιξη παρακολούθησης της θραύσης του δοκιμίου τραβερνίτη. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τα πλάτη των κτύπων (σε dB).



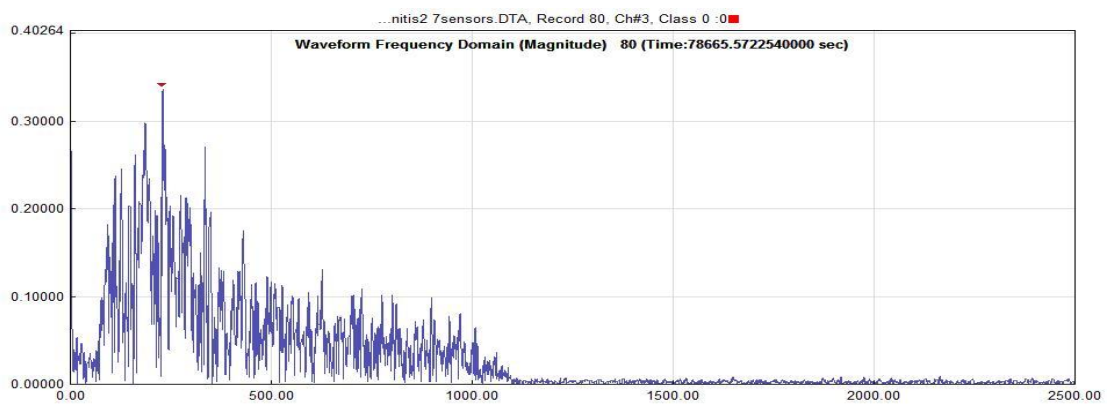
Τρισδιάστατο γράφημα της χρονικής εξέλιξης της δραστηριότητας των ΑΕ (χτύποι) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) κατά την παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου τραβερνίτη.



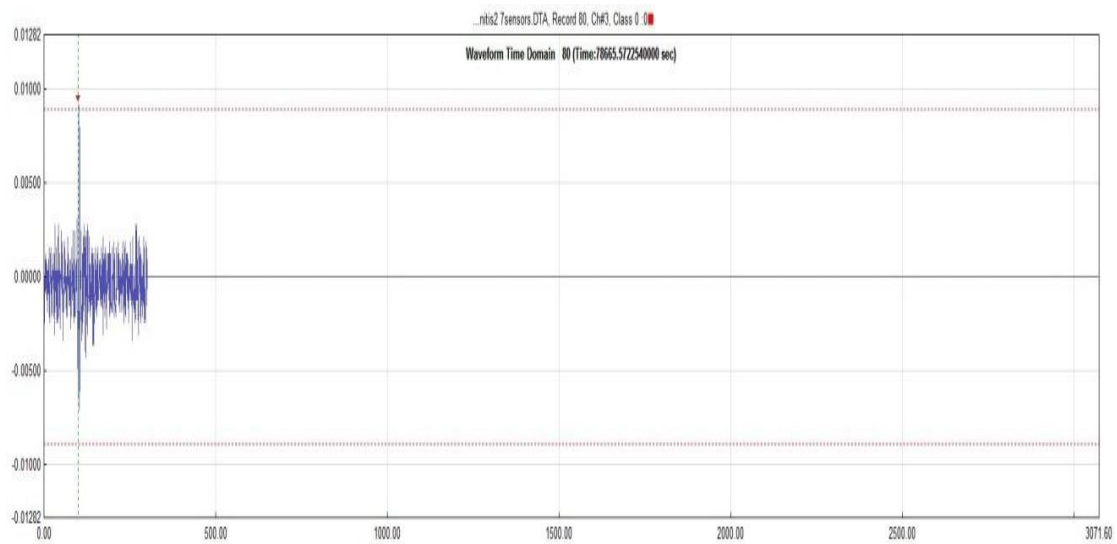
Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της απόλυτης ενέργειας των καταγραφών από τα 7 κανάλια καταγραφής.



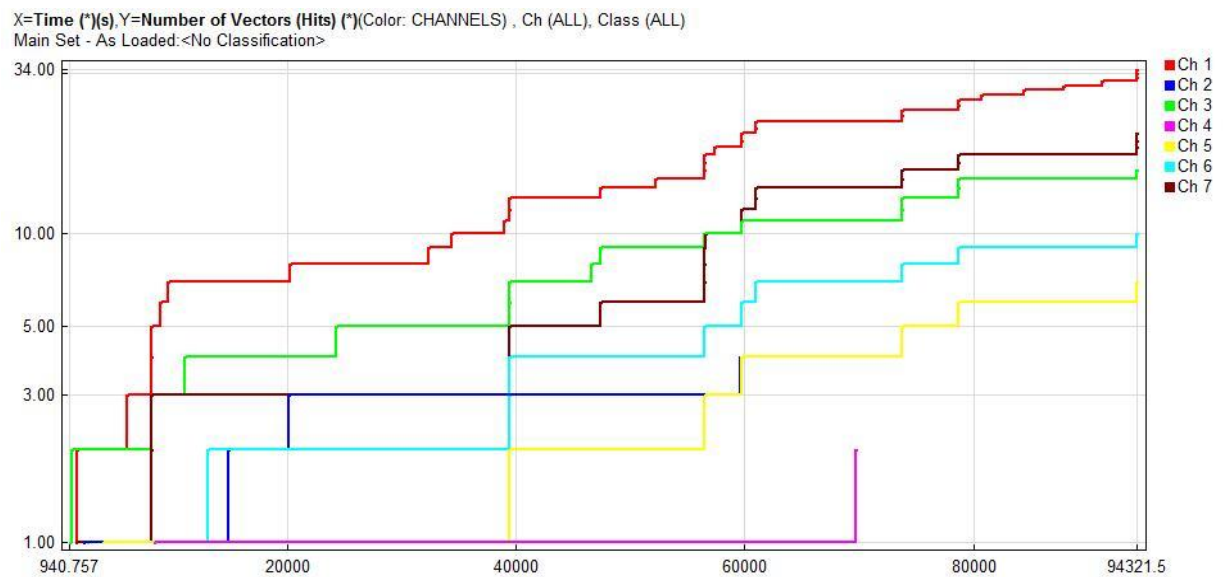
Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της μέσης συχνότητας των καταγραφών από τα 7 κανάλια καταγραφής.



Διάγραμμα της κυματομορφής (waveformfrequencydomain)

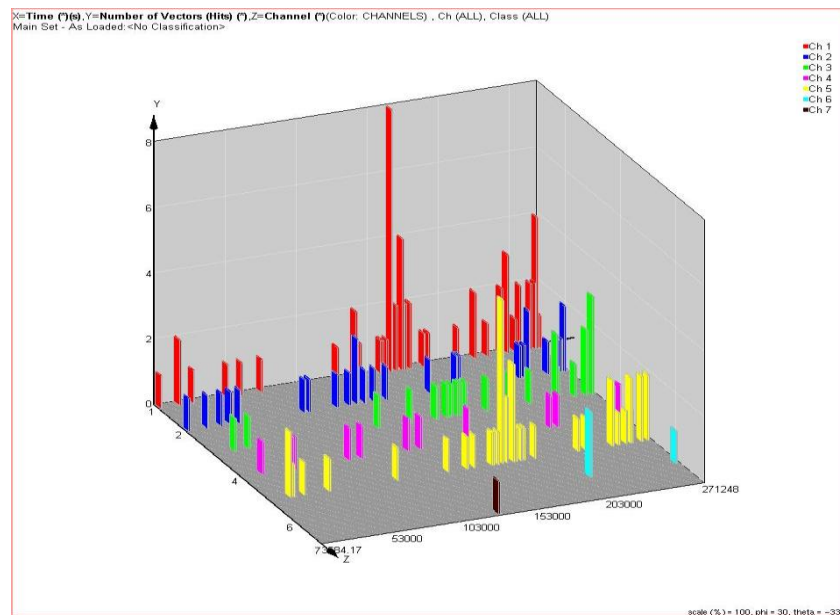


Διάγραμμα της κυματομορφής (waveform time domain)

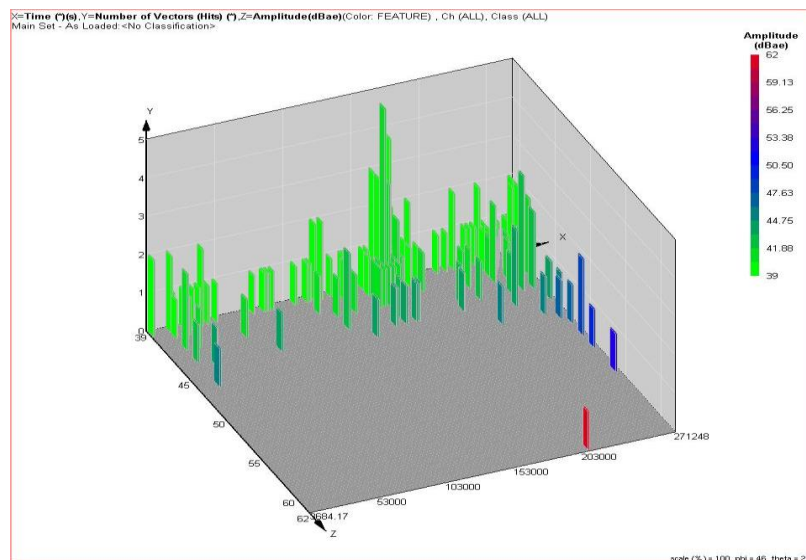


Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης των κτύπων από τα 7 κανάλια καταγραφής.

## 1<sup>η</sup> Επανάληψη πειράματος 5 (ασβεστόλιθος):

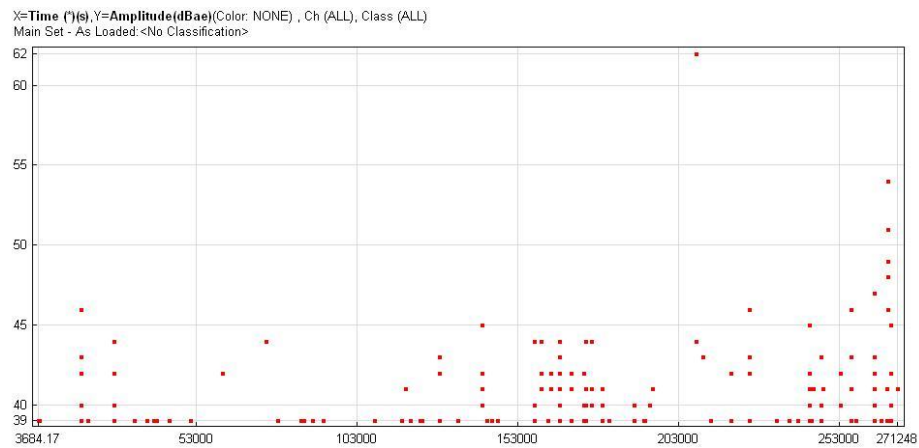


Τρισδιάστατο γράφημα της χρονικής εξέλιξης της δραστηριότητας των ΑΕ (χτύποι) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) κατά την παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου ασβεστόλιθου.

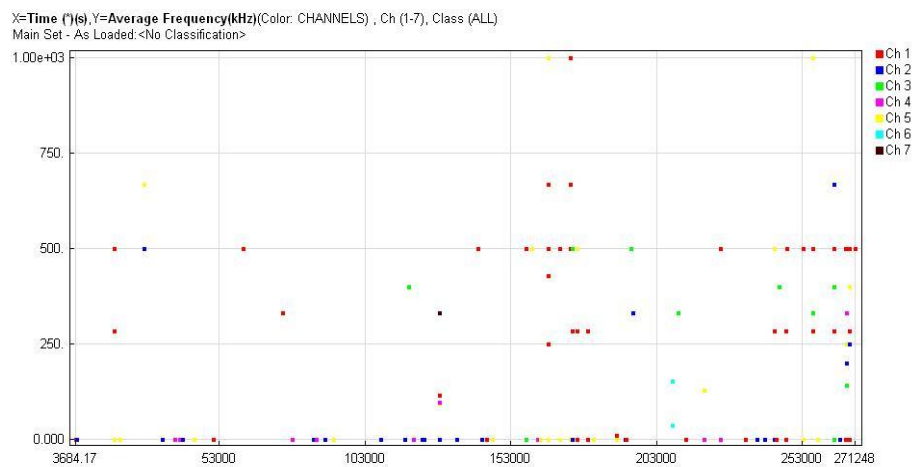


Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής των κύτπων (hits) από όλα τα κανάλια (7συνολικά) αθροιστικά, κατά τη χρονική εξέλιξη παρακολούθησης της θραύσης του δοκιμίου ασβεστόλιθου. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τα πλάτη των κύτπων (σε dB).

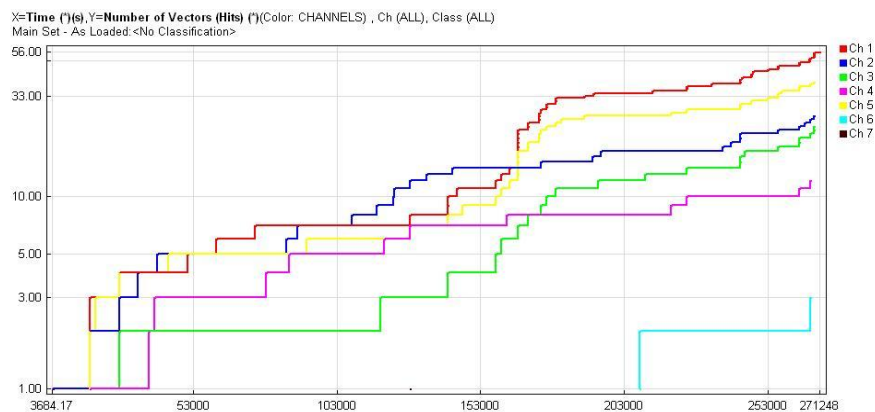




Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης του πλάτους των καταγραφών.

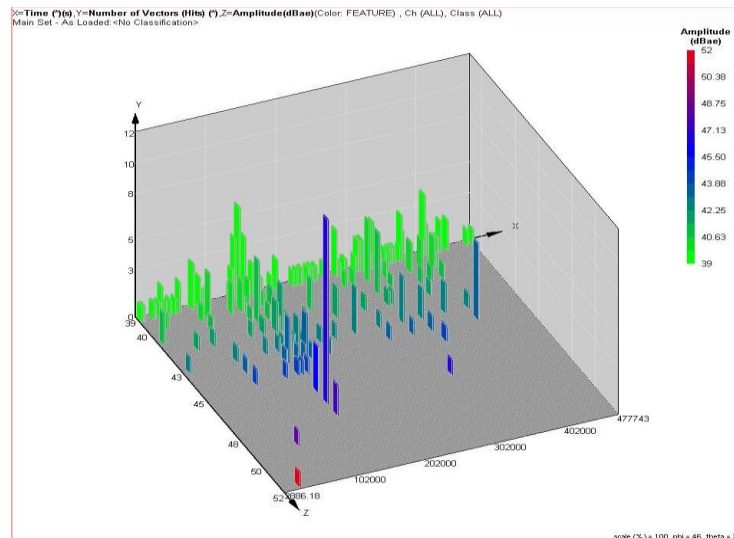


Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της μέσης συχνότητας των καταγραφών από τα 7 κανάλια καταγραφής.

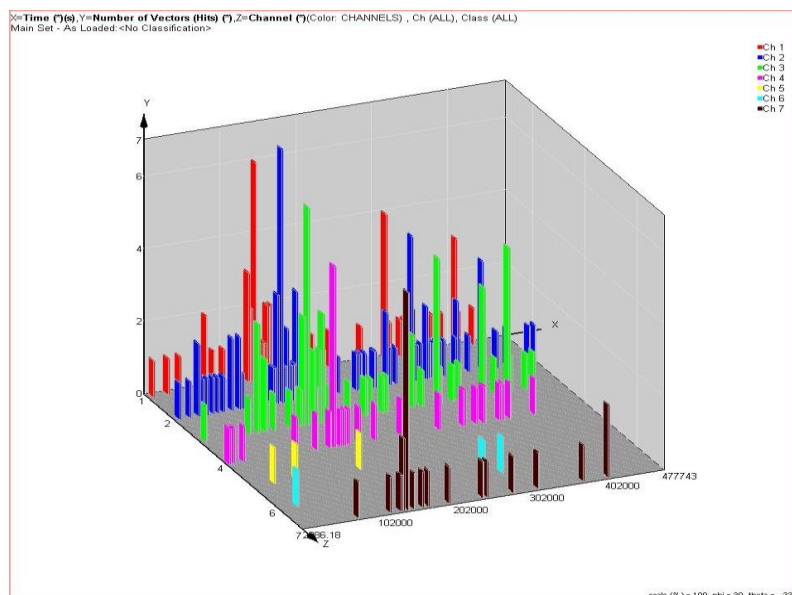


Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης των κτύπων από τα 7 κανάλια καταγραφής.

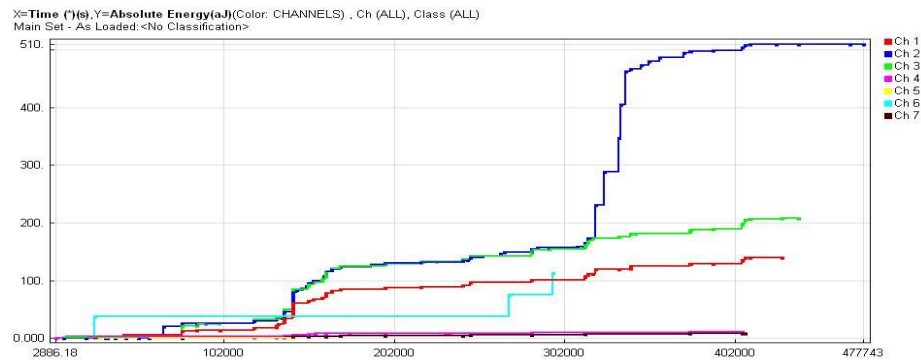
## 2<sup>η</sup> Επανάληψη πειράματος 5:



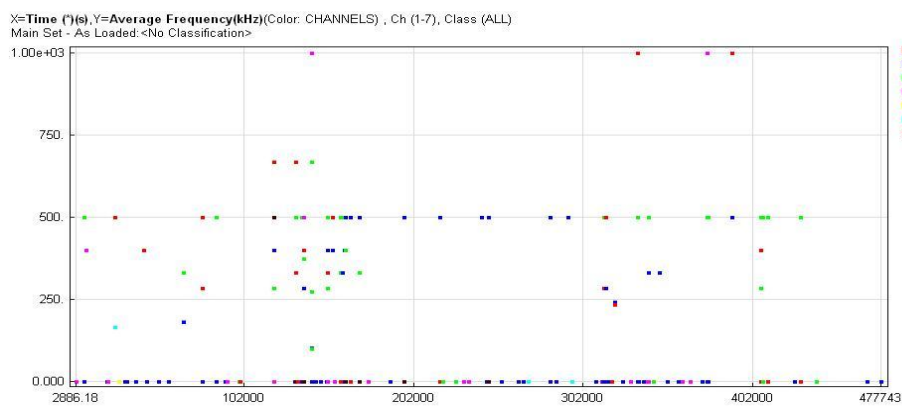
Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής των κύτπων (hits) από όλα τα κανάλια (7συνολικά) αθροιστικά, κατά τη χρονική εξέλιξη παρακολούθησης της θραύσης του δοκιμίου ασβεστόλιθου. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τα πλάτη των κύτπων (σε dB).



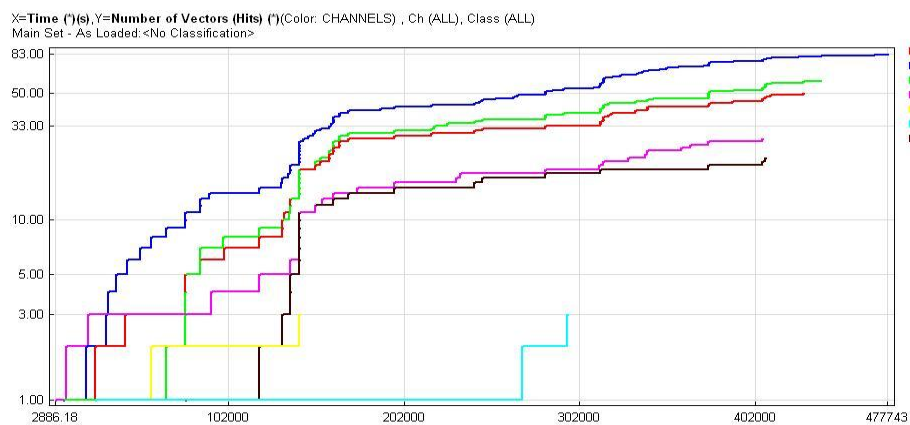
Τρισδιάστατο γράφημα της χρονικής εξέλιξης της δραστηριότητας των ΑΕ (χτύποι) από όλα τα κανάλια (7 συνολικά) κατά την παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου ασβεστόλιθου.



Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της απόλυτης ενέργειας των καταγραφών από τα 7 κανάλια καταγραφής.

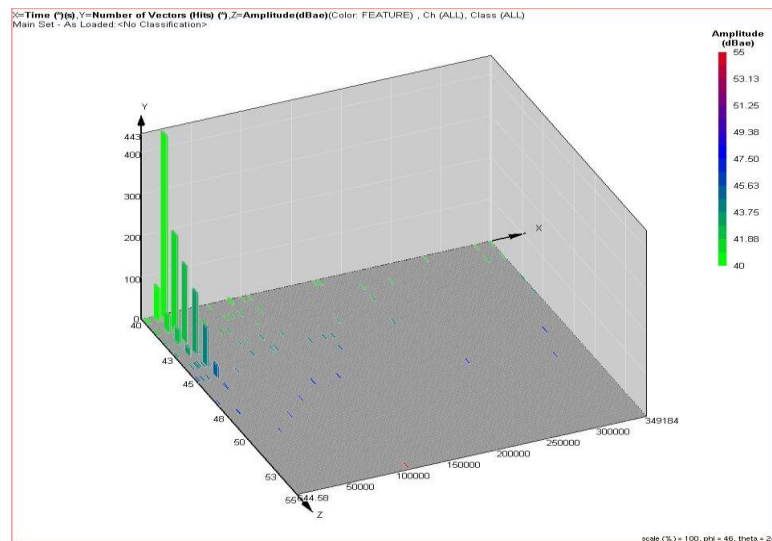


Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της μέσης συχνότητας των καταγραφών από τα 7 κανάλια καταγραφής.

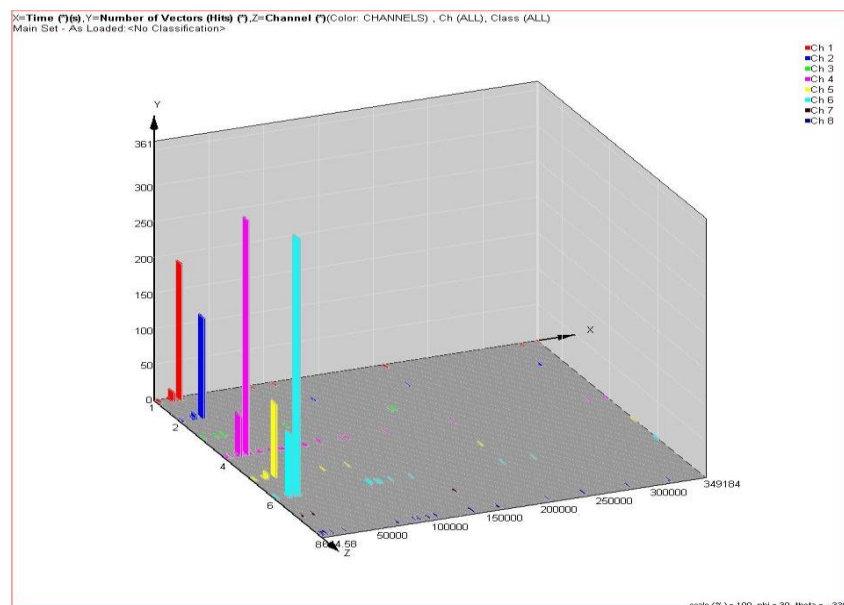


Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης των κτύπων από τα 7 κανάλια καταγραφής.

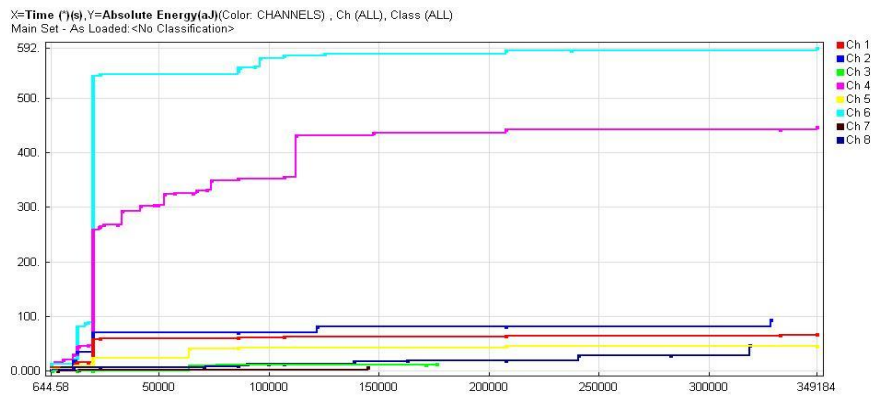
## Πείραμα 6<sup>ο</sup> Φυσική Πέτρα (NaturalStone):



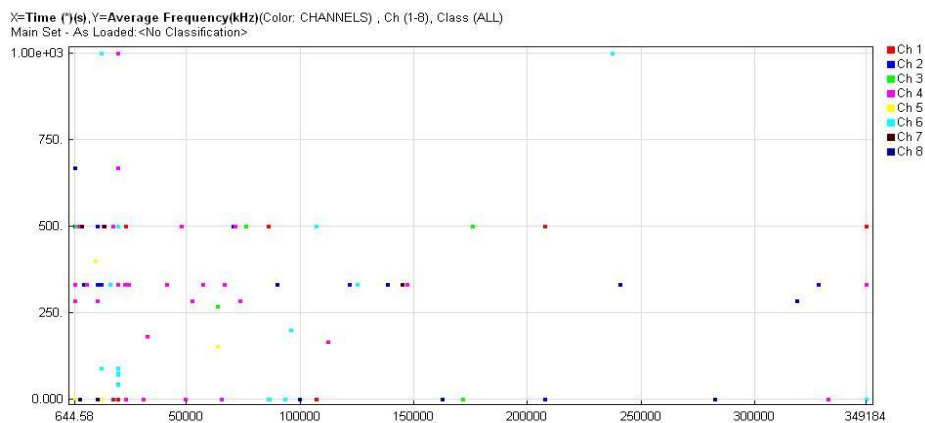
Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής των κτύπων (hits) από όλα τα κανάλια (7συνολικά) αθροιστικά, κατά τη χρονική εξέλιξη παρακολούθησης της θραύσης του δοκιμίου φυσικής πέτρας. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τα πλάτη των κτύπων (σε dB).



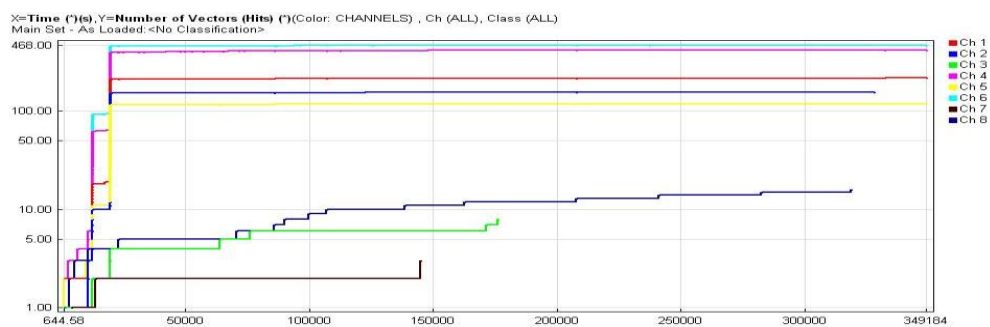
Τρισδιάστατο γράφημα της χρονικής εξέλιξης της δραστηριότητας των ΑΕ (χτύποι) από όλα τα κανάλια (8 συνολικά) κατά την παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου φυσικής πέτρας.



Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της απόλυτης ενέργειας των καταγραφών από τα 8 κανάλια καταγραφής.



Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της μέσης συχνότητας των καταγραφών από τα 8 κανάλια καταγραφής.



Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης των κτύπων από τα 8 κανάλια καταγραφής.