

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ  
ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ ΨΑΘΥΡΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ»

ΚΟΥΡΤΗΣ ΜΑΡΙΝΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ

ΔΡ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΚΛΗΣ

ΧΑΝΙΑ, 2013

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

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό στην καθοδήγηση και τις συμβουλές του, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ο Καθηγητής κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία τον οποίο και οφείλω να ευχαριστήσω θερμά

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής για τις πολύτιμες συμβουλές τους και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους, τον Καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο και τον Δρ. κ. Κακλή Κωνσταντίνο.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στα μέλη του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων για το στήσιμο και την διεξαγωγή των πειραμάτων και την συγγραφή της εργασίας Δρ. κ. Κακλή Κωνσταντίνο, τον κ. Μαυριγιαννάκη Στυλιανό και την κα. Σταθογιάννη Φωτεινή.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου και τους πολύτιμους φίλους μου για την συμπαράσταση που μου προσέφεραν αλλά και την υπομονή καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής.

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία εξετάστηκαν οι ακουστικές εκπομπές (ΑΕ) κατά την διάρκεια δοκιμών αντιδιαμετρικής και μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου Διονύσου. Ο στόχος της εργασίας ήταν η εύρεση πιθανής συσχέτισης μεταξύ ακουστικών εκπομπών του πετρώματος και επιπέδου φόρτισης ή και σημείου αστοχίας πετρώματος.

Οι καταγραφές των ΑΕ έγιναν κατά την διάρκεια των μηχανικών δοκιμών με την χρήση ειδικού συστήματος μέτρησης (αισθητήρες, λογισμικό, κλπ). Ο έλεγχος σωστής λειτουργίας του συστήματος ΑΕ έγινε με την μέθοδο Pencil Lead Break.

Από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατασκευάστηκαν διαγράμματα που συνδέουν τις ακουστικές παραμέτρους (απαριθμήσεις, εκλυόμενη ενέργεια, καταγραφές) με τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας) και εξήχθησαν κάποιες πρώτες συσχετίσεις μεταξύ των δύο.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                       | 1  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ .....                     | 2  |
| 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ .....                        | 2  |
| 2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΕ .....                               | 3  |
| 2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΕ .....                    | 5  |
| 2.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΕ .....                          | 7  |
| 2.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΕ .....                                          | 8  |
| 2.6 ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ .....                                 | 11 |
| 2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΥΜΑΤΩΝ ΑΕ .....                                   | 12 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΑΕ .....                      | 15 |
| 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                               | 15 |
| 3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΕ .....                                 | 15 |
| 3.2.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ .....                                           | 16 |
| 3.2.2 ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ .....                                         | 19 |
| 3.2.3 ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ .....                                  | 20 |
| 3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΑΕ .....                           | 21 |
| 3.4 PENCIL LEAD BREAK (PLB) .....                                | 24 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΑΡΜΑΡΟΥ –<br>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ..... | 29 |
| 4.1 ΓΕΝΙΚΑ .....                                                 | 29 |
| 4.1.1 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΩΝ .....                            | 29 |
| 4.2 ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΪΨΗΣ .....                             | 30 |
| 4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                             | 30 |
| 4.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ .....                                 | 32 |

|       |                                     |    |
|-------|-------------------------------------|----|
| 4.3   | ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ..... | 41 |
| 4.3.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                       | 41 |
| 4.3.2 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ .....          | 41 |
|       | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....      | 53 |
| 5.1   | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....                  | 53 |
| 5.2   | ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....                     | 54 |
|       | ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....         | 55 |
|       | ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....       | 55 |
|       | ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΑ .....                    | 57 |
|       | ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ .....            | 57 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των Ακουστικών Εκπομπών είτε με είτε χωρίς την επιβολή φορτίου χρησιμοποιείται από τις αρχές της δεκαετίας του '40 και γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη στις μέρες μας, καθώς όλο και πιο εξειδικευμένες μετρήσεις με συνεχώς ακριβέστερους αισθητήρες πραγματοποιούνται σε εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις στο πεδίο. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη για γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων και κυρίως της αντοχής των υλικών, που πιθανώς είναι το σημαντικότερο κεφάλαιο της μηχανικής στον κλάδο των κατασκευών. Ο χαρακτηρισμός των υλικών οδηγεί σε συμπεράσματα για τη αποτελεσματικότητα και ανθεκτικότητα των κατασκευών και των υλικών έδρασης τους. Οι έρευνες αφορούν κυρίως τον συνδυασμό μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου, όπως είναι η μέθοδος των Ακουστικών Εκπομπών, ή συνδυασμό κάποιας μεθόδου Μη Καταστροφικού Ελέγχου με μεθόδους καταστροφικού ελέγχου, όπως για παράδειγμα την δοκιμή αντοχής σε θλίψη ή σε εφελκυσμό.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός μιας μεθόδου Μη Καταστροφικού Ελέγχου και συγκεκριμένα η τεχνική της Ακουστικής Εκπομπής, σε συνδυασμό με δύο εργαστηριακές δοκιμές καταστροφικού ελέγχου. Στην μία περίπτωση πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μονοαξονικής θλίψης και στη συνέχεια δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης στο χώρο του εργαστηρίου της Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στην αρχή γίνεται μια εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου των Ακουστικών Εκπομπών, απαριθμώντας τα πλεονεκτήματα της εν αντιθέσει με τις άλλες μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Ακολουθεί μια αναφορά των μελετών που είναι σχετικές με τις Ακουστικές Εκπομπές. Ορίζονται οι παράμετροι των Ακουστικών Εκπομπών, η δημιουργία του σήματος και οι ιδιότητες των κυμάτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το σύστημα παρακολούθησης των Ακουστικών Εκπομπών, το οποίο αποτελείται από τους αισθητήρες πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, τους προενισχυτές και την μονάδα επεξεργασίας. Επίσης αναφέρονται οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό παρακολούθησης και επεξεργασίας των Ακουστικών Εκπομπών. Τέλος περιγράφεται η μέθοδος Pencil Lead Break, καθώς και η χρησιμότητά της για την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Ακολουθούν τα κεφάλαια με την εφαρμογή της μεθόδου σε δοκίμια μαρμάρου σε μετρήσεις μονοαξονικής και αντιδιαμετρικής θλίψης, παρουσίαση των αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από το σύνολο των δοκιμών υπό το πρίσμα μιας προσπάθειας πρόγνωσης της επερχόμενης αστοχίας μέσω των δεδομένων των Ακουστικών Εκπομπών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

### 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

Είναι γενικά γνωστό ότι πολλά υλικά εκτός από τα πετρώματα εκπέμπουν ακουστικές εκπομπές / μικροσεισμική (microseismic, MS) δραστηριότητα όταν τους ασκείται τάση και / ή παραμορφώνονται. Το φαινόμενο στην πραγματικότητα παρατηρείται συνήθως στα περισσότερα στερεά όπως μέταλλα, κεραμικά, πέτρες, σκυρόδεμα, γυαλί, ξύλο, πλαστικά, ακόμη και στον πάγο (Hardy, 2003). Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών συγκαταλέγεται στις μη καταστροφικές μεθόδους για τον προσδιορισμό του φυσικού εντατικού πεδίου και την παρακολούθηση των κατασκευών. Εάν η φόρτιση γίνεται σε ένα ψαθυρό υλικό, όπως είναι το μάρμαρο, οδηγεί σε αυξημένη συγκέντρωση τάσεων γύρω από μικροσκοπικές ασυνέχειες οι οποίες προέρχονται από οποιαδήποτε διακοπή της συνέχειας του πετρώματος ή και από την διαταραχή της ομοιογένειας και ισοτροπίας του υλικού όπως είναι τα όρια των κόκκων. Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων, που αποτελεί ένα δείκτη της έντασης που επικρατεί γύρω από μία μικροσκοπική ατέλεια, υπερβεί μία οριακή τιμή, συσσωρευμένη ελαστική ενέργεια απελευθερώνεται απότομα, η οποία εξαρτάται από την ψαθυρότητα του υλικού και το ποσοστό της ελαστικής παραμόρφωσης σε σχέση με την πλαστική, στην περιοχή της αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων. Η ενέργεια που απελευθερώνεται διαδίδεται μέσα στο υλικό με τη μορφή ελαστικών κυμάτων και το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ακουστική εκπομπή (Κατσικογιάννης, κ.α. 2007).

Όπως αναφέρεται σε ορισμό της ASTM, ως Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό κάποιου υλικού (ASTM E1316, 2004). Η δημιουργία των κυμάτων οφείλεται στην αρχή έναρξης της αστοχίας ή στη διάδοση προϋπάρχοντων ασυνεχειών του υλικού. Η δημιουργία αστοχιών στο εσωτερικό του υπό φόρτιση υλικού και η ανάπτυξη των υπάρχοντων δημιουργεί ολίσθηση των κόκκων του παράγουν τα ελαστικά κύματα.

Σύμφωνα με τους Grosse και Ohtsu το 2008, η αστοχία σε ένα υλικό πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη απελευθέρωση αποθηκευμένης ενέργειας, η οποία διοχετεύεται από τις εξωτερικές επιφάνειες πηγών (ρωγμές), και εκπέμπουν ελαστικά κύματα, τα οποία ονομάζονται κύματα Ακουστικών Εκπομπών (AE) (Grosse & Ohtsu, 2008).

Τα κύματα της AE διαδίδονται μέσα στο υλικό και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες AE (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων) σε επαφή με αυτό, οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με τη σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα AE. Η τεχνική αυτή, που σήμερα γνωρίζει σημαντική ανάπτυξη διεθνώς, είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique, AET). Σε αντίθεση με αυτό που δηλώνει το όνομα της, τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15 kHz έως μερικά MHz, δηλ. σε συχνότητες υπερήχων (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Η ΑΕΤ ως εργαστηριακή μέθοδος ανήκει στις μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου (Non-Destructive Testing, NDT) και αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την επιθεώρηση υλικών, τη μελέτη μηχανισμών πλαστικής παραμόρφωσης, θραύσης και διάβρωσης. Παρέχει άμεσες πληροφορίες σχετικές με την απόκριση και τη συμπεριφορά ενός υλικού υπό τάση, που σχετίζονται με την αντοχή του, τη συσσώρευση βλάβης και την έναρξη αστοχίας του. Ακόμα μία εφαρμογή της Ακουστικής Εκπομπής εντοπίζεται στην παρακολούθηση χημικών αντιδράσεων όπως διαδικασία διάβρωσης και μετασχηματισμοί φάσης (<http://www.envirocoustics.gr/>).

## 2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΕ

Η μέθοδος των ΑΕ παρουσιάζει ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά εν συγκρίσει με άλλες μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου, όπως είναι οι Υπέρηχοι, η Ραδιογραφία με ακτίνες Χ και γ, τα Διεισδυτικά Υγρά και ο Οπτικός έλεγχος. Η ΑΕΤ θεωρείται η μοναδική μέθοδος μεταξύ των NDT που πλανάται το ερώτημα κατά πόσον αυτή πρέπει να χαρακτηριστεί ως εντελώς μη καταστρεπτική ή όχι, δεδομένου ότι αστοχίες του υλικού είναι αναγκαίες για τη δοκιμή. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους NDT, η ΑΕΤ εφαρμόζεται συνήθως κατά τη φόρτιση, ενώ οι περισσότερες μέθοδοι εφαρμόζονται πριν ή μετά τη φόρτιση ενός υλικού. Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής θα πρέπει να θεωρείται ότι είναι μια “παθητική” μη καταστρεπτική τεχνική, επειδή τα σήματα ΑΕ παράγονται από το εσωτερικό του υλικού που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή, από τη δημιουργία ή/ και την ανάπτυξη των ασυνεχειών, εν αντιθέσει με άλλες όπως η μέθοδος των υπερήχων που χρησιμοποιεί τεχνητά παραγόμενο σήμα πηγής και ένα δέκτη και καλείται “ενεργητική” μέθοδος.

Η παρακολούθηση και καταγραφή της δοκιμής καθ’ όλη τη διάρκεια της επιβαλλόμενης τάσης, χωρίς οποιαδήποτε στιγμή να σταματήσει η δοκιμή, είναι δύσκολο να επιτευχθεί από όλες τις μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Αυτό λογίζεται ως ένα πλεονέκτημα των δοκιμών ΑΕ. Οι υπερηχητικές τεχνικές ανάλυσης, για παράδειγμα, πρέπει να εφαρμόζονται σε συνδυασμό με τεχνικές σάρωσης για την ανίχνευση των ρωγμών. Αυτά συνήθως απαιτούν τη διακοπή της φόρτωσης ενός υλικού. Αντίθετα, για τις ΑΕ μελέτες απαιτούνται κάτω από ευνοϊκές συνθήκες μόνο ένας αριθμός αισθητήρων για να είναι σε θέση να παρακολουθεί τη δραστηριότητα ΑΕ μιας δομής, εφόσον υπάρχει αρκετά ισχυρό σήμα για να υπερβεί ένα κατώτατο όριο που ονομάζεται επίπεδο ενεργοποίησης. Οι αισθητήρες θα πρέπει να μπορούν να στερεωθούν στην επιφάνεια της δομής για όλη την διάρκεια της δοκιμής και δεν πρέπει να μετακινηθούν για τη σάρωση του συνόλου της δομής, σημείο προς σημείο. Η πρόσβαση και στις δύο πλευρές ενός αντικειμένου, είναι απαραίτητη για όλες τις μεθόδους που χρησιμοποιούν μέσο μετάδοσης, κάτι που δεν απαιτείται για την ΑΕΤ.

Το τασικό πεδίο στο υπό εξέταση δείγμα εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη δύναμη. Όταν σε ένα υλικό ασκείται τάση, οι παραμορφώσεις ελέγχονται από τη στατική συμπεριφορά του υλικού. Για παράδειγμα, ορισμένα από τα υλικά αντιδρούν ως γραμμικά ελαστικά, ενώ άλλα συμπεριφέρονται ως ελαστοπλαστικά. Η ελαστικότητα ενός υλικού ή ενός συστήματος, όταν αυτό παραμορφώνεται υπό την επίδραση εξωτερικής δύναμης ονομάζεται Νόμος του Hooke. Η ΑΕΤ ωστόσο, εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις μη (ελαστικές) παραμορφώσεις σε ένα υλικό. Ως εκ τούτου, ο σχηματισμός νέων ρωγμών και η εξέλιξη των υφιστάμενων ρωγμών ή διαδικασιών τριβής ανιχνεύεται μόνο από αυτή την μέθοδο. Τα φαινόμενα αυτά συνδέονται συχνά με την μηχανική στο εσωτερικό των πετρωμάτων ή τα θερμικά φορτία ή

τις πιέσεις που εφαρμόζονται στα τοιχώματα του δείγματος. Η δοκιμή ΑΕ διεξάγεται υπό συνθήκες φόρτισης με σταθερό φορτίο ή κατά τη διάρκεια μιας μικρής αύξησης του φορτίου. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται η χρησιμότητα της για τον έλεγχο των δομών υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης για την καταγραφή μιας πιθανής διαδικασίας αστοχίας.

Στα σημαντικά πλεονεκτήματα των ΑΕ σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζεται σε μεγάλες κατασκευές, συγκαταλέγεται το γεγονός της μείωσης του χρόνου ελέγχου καθώς δεν απαιτείται σάρωση της επιφάνειας, ούτε πολλαπλές δοκιμές από διαφορετικές θέσεις ελέγχου. Η μείωση του χρόνου επιτυγχάνεται με την εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής μη καταστροφικά και χρησιμοποιώντας μόνο την διαδικασία εφαρμογής φορτίου πάνω σε αυτήν, με αποτέλεσμα την πρόσβαση μόνο στους αισθητήρες και όχι στις ελεγχόμενες περιοχές. Για παράδειγμα στην περίπτωση της δεξαμενής καυσίμου ή αερίου δεν απαιτείται άδειασμα του περιεχομένου ή απομάκρυνση του μονωτικού υλικού (Grosse & Ohtsu, 2008).

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου των ακουστικών εκπομπών προστίθεται η έγκαιρη και ταχεία διάγνωση των ατελειών και ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο. Με χρήση δύο ή περισσότερων αισθητήρων, καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός της θέσης της πηγής της Ακουστικής Εκπομπής επί τόπου και, κατά συνέπεια, της περιοχής της δομικής ατέλειας. Ο εντοπισμός θέσης βασίζεται στις αρχές της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων μέσα στα υλικά και πραγματοποιείται με μέτρηση του χρόνου άφιξης του σήματος σε κάθε αισθητήρα. Έτσι επιτυγχάνεται και ο εντοπισμός της βλάβης του υλικού ή της κατασκευής.

Η μεγαλύτερη ευαισθησία επιτυγχάνεται σε έναν τυπικό αισθητήρα ΑΕ πιεζοηλεκτρικού στοιχείου μετατρέποντας την ελαστική μετατόπιση 1pm (picometer) σε ηλεκτρικό σήμα 1mV.

Στα πλεονεκτήματα της ΑΕΤ λογίζεται η αυξημένη τάση χρησιμοποίησης της τεχνητής νοημοσύνης. Στις Βάσεις Δεδομένων: οι σύγχρονες μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης κατέστησαν δυνατή τη συσσώρευση εμπειρίας πολλαπλών δοκιμών σε έμπειρα συστήματα για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών (<http://www.envirocoustics.gr/>).

Όμως στην ΑΕΤ δεν απαριθμούνται μόνο πλεονεκτήματα εν συγκρίσει με τις άλλες Μη Καταστροφικές μεθόδους. Το γεγονός της μη απόλυτης επαναληψιμότητας μιας συγκεκριμένης δοκιμής λόγω της φύσης της πηγής σήματος συγκαταλέγεται στα μειονεκτήματα των ΑΕΤ, π.χ. η ξαφνική και μερικές φορές τυχαία δημιουργία μιας ρωγμής. Αν και δείγματα του ίδιου σχήματος και με ίδιες ιδιότητες του υλικού αναμένονταν παρόμοιες δραστηριότητες ΑΕ υπό την επιβολή φορτίου, αυτό δεν υφίσταται πάντα. Υλικά με διάσπαρτες ανομοιογένειες μιας συγκεκριμένης διάστασης, όπως το σκυρόδεμα, δεν θα εξάγουν παρόμοια αποτελέσματα ΑΕ σε υλικά με διάσπαρτες ανομοιογένειες μιας συγκεκριμένης διάστασης εάν το μήκος κύματος των σημάτων είναι ένα παρόμοιο μέγεθος με τις ετερογένειες. Από τα παραπάνω φανερώνεται η αναγκαιότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών ακουστικής εκπομπής με άλλες μεθόδους δοκιμών, όπως χρησιμοποιώντας μεθόδους οπτικού ελέγχου επιφανειακών ατελειών ή υπερηχογράφημα, χρήση ακτίνων-x ή ραντάρ.

Ένα άλλο σημείο αναφοράς είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται από μια ακουστική εκπομπή. Συγκρίνοντας τα σήματα των ΑΕ που χρησιμοποιούνται ως πρόδρομοι αστοχίας με

τα σήματα των υπερήχων διαπιστώνεται ότι καταγράφονται αρκετά μικρότερα μεγέθη, γι αυτό απαιτείται η χρήση πολύ πιο ευαίσθητων αισθητήρων και πιο αξιόπιστων ενισχυτών και προενισχυτών. Με την χρήση των παραπάνω ελαχιστοποιούνται προβλήματα όπως η επίδραση του περιβαλλοντικού θορύβου, η εξασθένηση των σημάτων και το πιθανό αποτέλεσμα του χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο. Απαιτούνται εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων για την ανίχνευση των ακουστικών εκπομπών. (Grosse & Ohtsu, 2008).

## 2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΕ

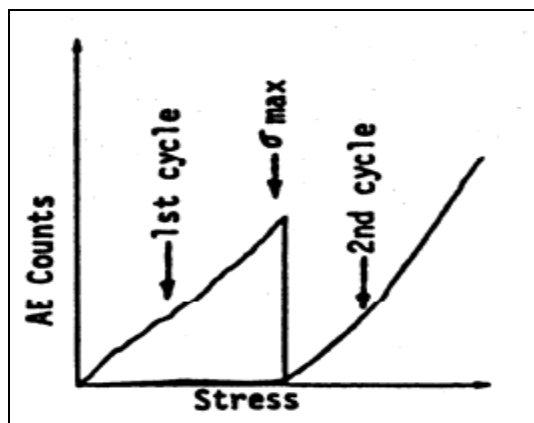
Η τεχνολογία των ακουστικών εκπομπών άρχισε να διερευνάται στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Η πρώτη περιεκτική περίληψη για την ιστορία των ΑΕ δημοσιεύεται από τον Drouillard το 1996.

Σχετικά με το φαινόμενο των ακουστικών εκπομπών το πρώτο επιστημονικά προγραμματισμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε από τον F. Kishinoue στις 21 Νοεμβρίου 1933 σε μια συνεδρίαση του Ινστιτούτου Έρευνας για τους Σεισμούς στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο, με αντικείμενο τη διαδικασία εμφάνισης κραδασμών σε ένα δείγμα ξύλου σε δοκιμή κάμψης.

Στη Γερμανία, πρώτα πειράματα ΑΕ διεξήχθησαν από τους Forster & Scheil (1936), με την μέτρηση εξαιρετικά μικρών μεταβολών του δυναμικού λόγω μεταβολής της αντίστασης και παραγωγή Ακουστικής Εκπομπής λόγω μαρτενσιτικού μετασχηματισμού σε σιδηρο-νικελιούχο δοκίμιο.

Στα τέλη του 1930 οι Obert & Duvall κατά τη διεξαγωγή ηχητικών μελετών σε ορυχείο σχεδόν τυχαία, ανακαλύφθηκε ότι ένα πέτρωμα καθώς βρίσκεται υπό την επιβολή τάσης εκπέμπει χαμηλής συχνότητας ήχους. Αργότερα (1938) σε εργαστηριακές δοκιμές για τη συσχέτιση της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων με το επιβαλλόμενο φορτίο στους στύλους πετρώματος, σε μεταλλείο μολύβδου-ψευδαργύρου, ανακαλύφθηκε η μικροσεισμική μέθοδος. Στις μετρήσεις του συχνά παρεμβάλλονταν σήματα που όλα έδειχναν ότι εκπέμπονταν από το στύλο. Τα επόμενα χρόνια οι Obert και Duvall έδειξαν σε εργαστηριακά και in situ πειράματα ότι η εμφάνιση τέτοιων σημάτων αυξανόταν με την αύξηση του φορτίου.

Μια από τις πιο σημαντικές μελέτες θεωρείται αυτή του Kaiser (1950). Κατά τη διεξαγωγή της διδακτορικής του διατριβής παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια από μεταλλικά υλικά έχουν “μνήμη” καθώς τους ασκείται τάση, γνωστό ως φαινόμενο Kaiser, παρατηρείται απουσία ακουστικής εκπομπής έως ότου το επιβαλλόμενο φορτίο ξεπεράσει τη μέγιστη ( $\sigma_{max}$ ) του πρώτου κύκλου φόρτισης (Σχήμα 2.1). Όπως αναφέρεται από τον Lockner το 1993 στα πετρώματα το φαινόμενο δεν διακρίνεται εύκολα, ειδικότερα σε υψηλές τάσεις κοντά στο όριο θραύσης.

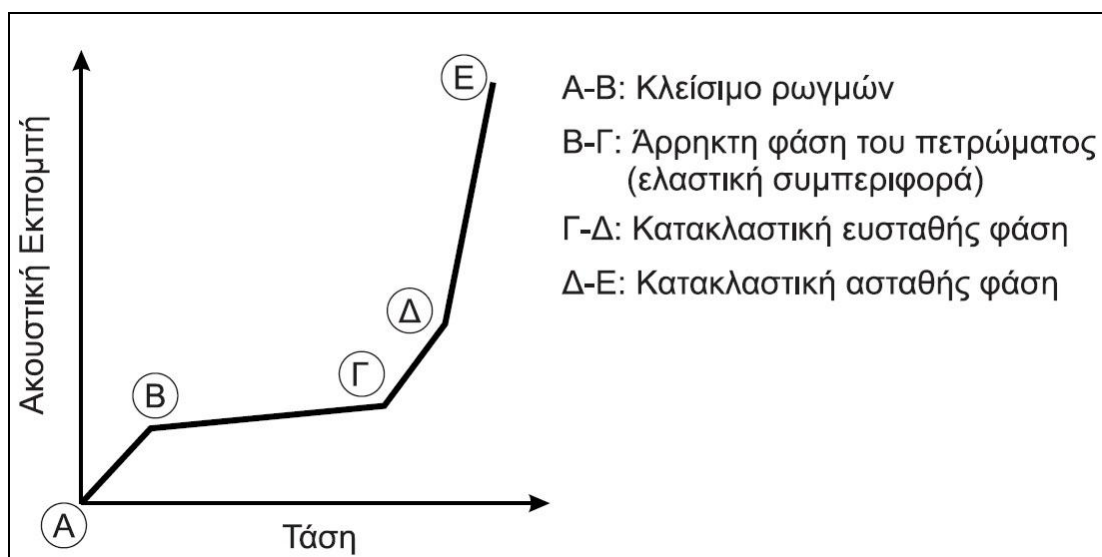


Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστικά αποτελέσματα του φαινομένου Kaiser. (Hardy, 2003)

Το 1961, εμφανίζεται για πρώτη φορά χρήση της ορολογίας Ακουστική Εκπομπή (Schofield, 1961).

Από αυτό το χρονικό σημείο μέχρι σήμερα δημοσιεύονται πληθώρα μελετών ΑΕ. Η εξέλιξη της μεθόδου των ακουστικών εκπομπών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ανάπτυξη των συσκευών μέτρησης και των θεμελιωδών μετρούμενων μεγεθών. Το 1960 από τον L' Hermite παρατηρήθηκε μείωση της ταχύτητας των υπερηχητικών κυμάτων, δημιουργία κυμάτων ΑΕ και αύξηση του λόγου του Poisson όταν το θλιπτικό φορτίο ανεβαίνει πάνω από το 75%. Ακόμα μία μελέτη με το ίδιο αντικείμενο δημοσιεύτηκε από τον Robinson (1965) με σύγκριση των ΑΕ με ακτίνες-Χ.

Σημαντική δουλειά στον τομέα των ακουστικών εκπομπών κατά την επιβολή φορτίου έχει γίνει από το Mogi (1962), ο οποίος δίνει σε διάγραμμα (Σχήμα 2.2) τη γενική μορφή της σχέσης τους για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Στο ίδιο διάγραμμα συνδυάζεται από τους Boyce et al (1981) η ΑΕ με τη διαδικασία καταστροφής του δοκιμίου κατά τις δοκιμές θλίψης (Σοφιανός & Νομικός, 2008).



Σχήμα 2.2 Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής και συσχέτιση της με τη διαδικασία καταστροφής (Σοφιανός & Νομικός, 2008)

Το 1964 ο H. Yokomichi αποπειράθηκε να περιγράψει ότι το επίπεδο της τάσης κατά την έναρξη της δραστηριότητας AE στο 75% του φορτίου θραύσης ήταν στενά συνδεδεμένο με τα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα του σκυροδέματος, όπως η αντοχή σε κόπωση και τη αστοχία σε ερπυσμό (Hardy, 2003), (Grosse & Ohtsu, 2008).

Οι Iannacchione et al. (2000, 2005) αναφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής της AE για την επιτυχή πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστόλιθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα.

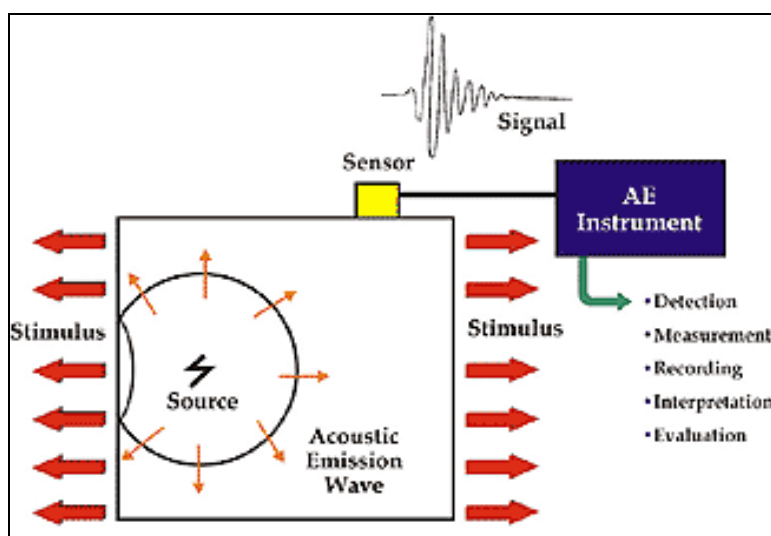
Οι Choudhury et al (2004) αναφέρουν την εφαρμογή της AE για την μελέτη της ευστάθειας προστατευτικού στύλου οροφής σε υπόγειο μεταλλείο χαλκού.

Ο Mukhopadhyay (2001) συσχέτισε την ποιότητα της βραχομάζας με την εξασθένηση των ακουστικών κυμάτων κατά τη κρουστικοπεριστροφική διάτρηση σε μέτωπα υπόγειων στοών εξετάζοντας παράλληλα και την επίδραση της κοχλίωσης.

Άλλες εφαρμογές της AE in situ έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρανή, στη μελέτη της ζώνης διαταραχής στο υπόγειο εργαστήριο UCL του Καναδά, στη μελέτη της ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser (Σοφριανός & Νομικός, 2008).

## 2.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ AE

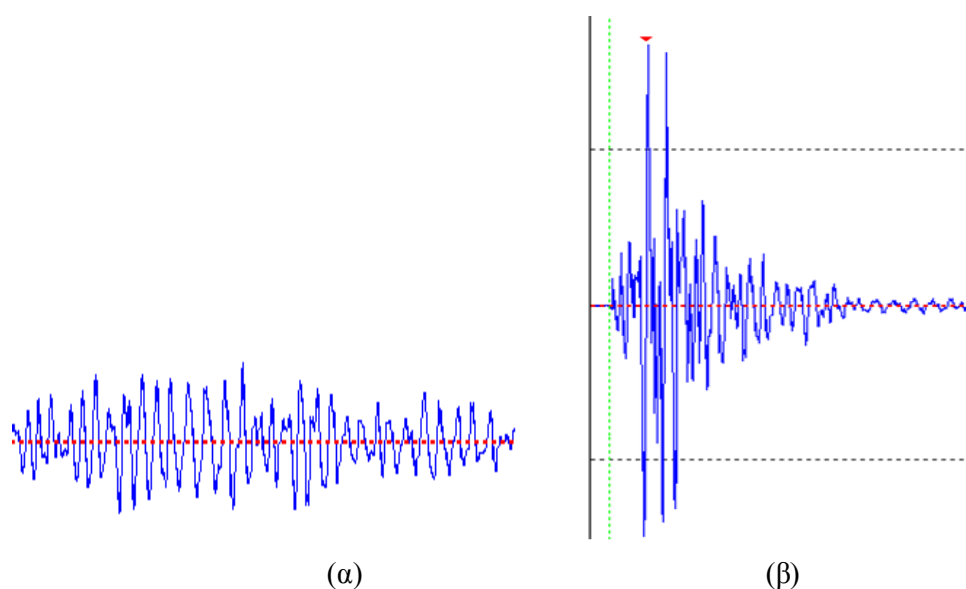
Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης των σημάτων AE. Λόγω επιβολής φορτίου σε δοκίμιο πετρώματος παρατηρείται απελευθέρωση ενέργειας από την πηγή με τη μορφή AE η οποία διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα διαδίδεται μέχρι τα όρια του δοκιμίου και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα AE. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας.



Σχήμα 2.3 Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της AE (<http://www.pacndt.com/>)

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

Τα δύο κύρια σήματα που ανιχνεύονται και επεξεργάζονται από ένα σύστημα παρακολούθησης ακουστικών εκπομπών είναι τα κρουστικά και τα συνεχή (Σχήμα 2.4) (Σοφιανός & Νομικός, 2008).



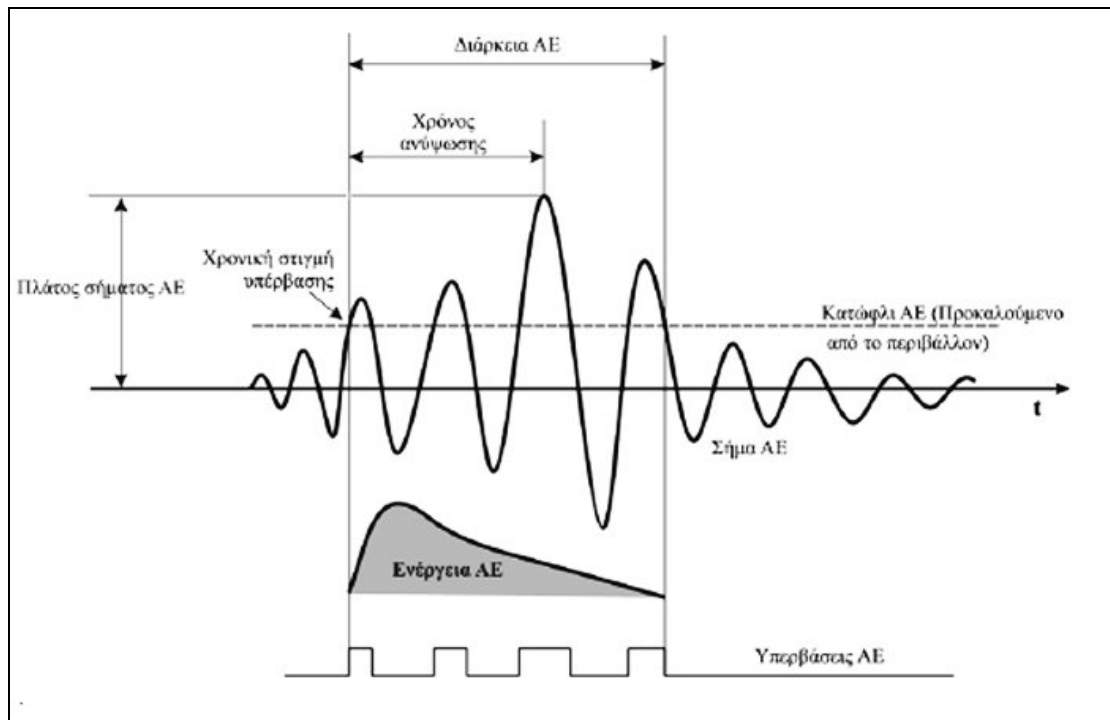
Σχήμα 2.4 Τυπικές μορφές συνεχούς (α) και κρουστικού (β) σήματος ΑΕ. (Σοφιανός & Νομικός, 2008)

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

## 2.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΕ

Σε μια τυπική μελέτη ΑΕ καταγράφονται εκατοντάδες ή και χιλιάδες γεγονότα καθιστώντας την επεξεργασία αρκετά χρονοβόρα. Για τον λόγο αυτό από κάθε κυματομορφή εξάγονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι που καλούνται παράμετροι ΑΕ (Σχήμα 2.5).

Οι κύριες παράμετροι που κάνουν ένα σήμα ΑΕ κρουστικού τύπου να διαφέρει από τα υπόλοιπα είναι το πλάτος του σήματος (amplitude), ο χρόνος ανύψωσης (rise time), η διάρκεια του (duration) και οι "απαριθμήσεις" (counts) (Κατσιογιάννης κ.α., 2007).



Σχήμα 2.5 Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα προκύπτοντα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας (Σοφιανός & Νομικός, 2008)

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

- Κτύπος (Hit): Όταν το σήμα-γεγονός ΑΕ υπερβεί το κατώφλι και προκαλεί σε ένα σύστημα καναλιών να καταγράψει ένα κτύπο, μια κυματομορφή.
- Απαριθμήσεις (Counts): ο αριθμός των φορών που καταγράφεται μια υπέρβαση του κατωφλίου κατά τη διάρκεια ενός σήματος, κτύπου.
- Πλάτος σήματος ΑΕ (Amplitude): η μέγιστη τιμή (peak) κάθε καταγεγραμμένου γεγονότος εκφρασμένη σε decibel (dB). Αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος και ορίζεται από τη σχέση:  $\text{dB} = 20 \log (V_{\text{max}}/1\mu\text{volt})$   
Το πλάτος είναι στενά συνδεδεμένο με το μέγεθος της πηγής.
- Διάρκεια (Duration): ένα χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που προκλήθηκε ένα σήμα ΑΕ (κυματομορφή) και του χρόνου της εξαφάνισής του. Η διάρκεια εκφράζεται σε μικροδευτερόλεπτα ( $\mu\text{s}$ ), η οποία εξαρτάται από το μέγεθος πηγής και το φιλτράρισμα του θορύβου.
- Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time): Ο χρόνος μεταξύ της στιγμής όπου το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μεγίστου πλάτους.
- Ενέργεια ΑΕ (Energy): Γενικά ορίζεται ως το τετράγωνο του πλάτους του γεγονότος. Η ενέργεια προτιμάται για να ερμηνεύσει το μέγεθος της εκδήλωσης πηγής διότι είναι στενά συνδεδεμένη με το πλάτος, καθώς και τη διάρκεια, και εξαρτάται λιγότερο από την τάση κατωφλίου και τις συχνότητες λειτουργίας (Grosse & Ohtsu, 2008).

Άλλες παράμετροι που αξίζει να σημειωθούν είναι:

- Περίοδος (T): Ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών μεγίστων (peaks) του γεγονότος.
- Κατώφλι (Threshold): Όριο τάσης πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα.



- Συμβάν (Event) Τοπική αλλαγή εντός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή
- Τιμή RA (RA Value): Είναι υπολογιζόμενο μέγεθος και προέρχεται από τον λόγο του χρόνου ανύψωσης προς το πλάτος. Μας δείχνει το αντίστροφο της κλίσης στην AE κυματομορφή με μονάδες ( $^{ms}/V$ ).
- Συσσωρευμένη Ενέργεια: Το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου
- Απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο (Counts to peak) : ο αριθμός των απαριθμήσεων σε ένα χτύπο μέχρι να καταγραφεί το μέγιστο πλάτος
- Ρυθμός Ενέργειας (ER): Το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται ανά μονάδα χρόνου
- Ενεργοποίηση (AE) (Activation): Η εκδήλωση AE λόγω εφαρμογής αιτίου (stimulus) όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα κ.λ.π.
- Δραστηριότητα (AE) (Activity): Μέτρηση της ποσότητας εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας, των γεγονότων.
- Event Data Set: Η συλλογή αριθμών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός γεγονότος, σύμφωνα με την επεξεργασία δεδομένων που αναγνωρίζει ότι ένα ξεχωριστό γεγονός μπορεί να παράγει περισσότερους από ένα χτύπους (ASTM E1316, 2004).
- Hit Data Set: Η ανίχνευση/διαδικασία εντοπισμού και μέτρησης ενός σήματος AE σε ένα κανάλι
- Hit Definition Time (HDT): ορίζεται ο μέγιστος χρόνος διάρκειας ενός σήματος ώστε να αποφεύγεται η καταγραφή των ανακλάσεων του.
- Hit Location Time (HLT): είναι ο χρόνος που θα πρέπει να αναμένει το σύστημα μέχρι να ξεκινήσει την καινούργια καταγραφή.
- Peak Definition Time (PDT): καθορίζει το μέγιστο χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του σήματος (USB-AE Node<sup>TM</sup> & AEwin<sup>TM</sup> for USB<sup>TM</sup> Software, 2010).
- Parametric Inputs: Περιβαλλοντικές μεταβλητές (π.χ. φορτίο, πίεση, θερμοκρασία) που μπορούν να μετρηθούν και αποθηκευτούν ως μέρος της περιγραφής των σημάτων AE.
- Συχνότητα (Frequency): Για ένα ταλαντευόμενο σήμα ή διεργασία, ο αριθμός των κύκλων που συμβαίνουν στη μονάδα του χρόνου
- Μέση συχνότητα (Average frequency): μετρούμενο μέγεθος από τον λόγο των “απαριθμήσεων” προς τη διάρκεια και χρησιμοποιείται όταν το σήμα της κυματομορφής είναι πρακτικά δύσκολο να χρησιμοποιηθεί.
- Θόρυβος (Noise): Μη σχετικές ενδείξεις, σήματα παραγόμενα από αιτίες διαφορετικές από αυτές τις AE, ή από πηγές AE που δεν έχουν σχέση με το σκοπό της δοκιμής.
- Σήμα AE(Signal): Το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μορφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας)
- Περιγραφή Σήματος (Signal Description): Το αποτέλεσμα της διαδικασίας: μια ψηφιακή (αριθμητική) περιγραφή του σήματος AE και/ή του περιβαλλοντικού του πλαισίου.
- Χαρακτηριστικά Σήματος (Signal Features): Μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος AE, όπως το πλάτος, ενέργεια σήματος AE, διάρκεια, counts και χρόνος ανύψωσης.

- **Ισχύς Σήματος (Signal Strength):** Η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνεύσιμου σήματος ΑΕ. Επίσης γνωστό ως "σχετική ενέργεια" (relative energy), "MARSE" και "ισχύς σήματος".
- **Φαινόμενο Kaiser (Kaiser effect):** Η απουσία ανιχνεύσιμης ακουστικής εκπομπής σε ένα σταθερό επίπεδο ευαισθησίας, έως ότου γίνει υπέρβαση των προηγούμενων εφαρμοσθέντων επιπέδων φόρτισης.
- **Φαινόμενο Felicity (Felicity effect):** Η παρουσία ανιχνεύσιμων ακουστικών εκπομπών σε ένα σταθερό επίπεδο ευαισθησίας, ενώ το επίπεδο φόρτισης είναι χαμηλότερο από εκείνο που εφαρμοζόταν προηγουμένως.
- **Αναλογία Felicity (Felicity ratio):** η αναλογία της εφαρμοζόμενης τάσης που παρατηρούμε την εμφάνιση του φαινομένου προς την προηγούμενη μέγιστη τάση (ASTM E1316, 2004).

## 2.6 ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ

Για να είναι επιτυχημένος ένας έλεγχος με τη μέθοδο της ΑΕ, η δυνατότητα ανίχνευσης των σημάτων που μας ενδιαφέρουν, που βρίσκονται πάνω από την συχνότητα θορύβου, έχει πρωταρχικό ρόλο. Χρησιμοποιώντας αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχίας της μελέτης. Για να εξαλειφθεί ο θόρυβος, πρέπει να είναι γνωστή η προέλευση του. Υπάρχουν δύο κατηγορίες πηγών θορύβου, ο ηλεκτρομαγνητικός και ο μηχανικός (Κατσιογιάννης κ.α., 2007).

Στην κατηγορία της Ηλεκτρομαγνητικής πηγής θορύβου ανήκει:

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

Στην κατηγορία των πηγών Μηχανικού θορύβου υπάγονται:

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

Ο μηχανικός θόρυβος ελαττώνεται σημαντικά σε συχνότητες άνω των 100kHz, γι αυτό τον λόγο το εύρος συχνοτήτων επιλέγετε συνήθως 100-400kHz.

Άλλοι μέθοδοι για την απαλοιφή του θορύβου είναι:

- η χρήση ειδικών φίλτρων για τις συχνότητες
- κατάλληλη γείωση του συστήματος
- έλεγχος του επιβαλλόμενου φορτίου του συστήματος

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

- Η γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο. Λόγω γεωμετρικής εξάπλωσης το πλάτος φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης.
- Οι απώλειες ενέργειας και η απόσβεση στο μέσο διάδοσης. Αντίστοιχα λόγω απώλειας ενέργειας το πλάτος φθίνει εκθετικά με την απόσταση από την πηγή.

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

## 2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΥΜΑΤΩΝ ΑΕ

Το αρχικό παραγόμενο σήμα από μία πηγή ακουστικής εκπομπής είναι ένας κρουστικός παλμός. Όμως το κύμα που ανιχνεύετε από τους αισθητήρες έχει πολύπλοκη μορφή. Αυτό οφείλεται σε φαινόμενα διάδοσης του κύματος. Τέτοια κυματικά φαινόμενα που συμμετέχει ένας παλμός ΑΕ είναι, η ταχύτητα διάδοσης, η πολυμορφία των ελαστικών κυμάτων, η σκέδαση (stattering), η διασκόρπιση (dispersion), η συμβολή, η ανάκλαση και διάθλαση.

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων εξαρτάται κυρίως από το είδος του κύματος (εάν είναι εγκάρσιο, ή διαμήκες) από τις ελαστικές ιδιότητες του πετρώματος και την πυκνότητα,  $\rho$ . Οι ταχύτητες διάδοσης υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

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

όπου,  
 $V_p$  = ταχύτητα διάδοσης διαμήκους  
 $V_s$  = ταχύτητα διάδοσης διατμητικού  
εγκάρσιου)  
 $E$  = μέτρο ελαστικότητας,  
 $\nu$  = λόγος Poisson  
 $K$  = μέτρο ελαστικής συστολής  
 $G$  = μέτρο διάτμησης

Στον πίνακα 2.1 δίνονται ενδεικτικές τιμές των ταχυτήτων διάδοσης του ήχου σε ορισμένα πετρώματα (Πίνακας 2.1) (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

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

| Πέτρωμα                                  | Πυκνότητα<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | VP [m/s]    | VS [m/s]    |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|
| Ξηρή άμμος, χαλαρή δομή                  | 1.5 -1.7                          | 300 - 1000  | 50 - 400    |
| Ξηρή άμμος                               | 1.6 -1.7                          | 1000 - 1700 | 400 - 900   |
| Υγρή άμμος, χαλαρή δομή                  | 1.8 – 2.2                         | 1500 - 2000 | 50 - 400    |
| Υγής ψαμμίτης                            | 2.0 – 2.65                        | 1800 - 4500 | 1000 - 3000 |
| Ψαμμίτης Berea                           | 2.2                               | 3800 – 4000 | 2300 - 2400 |
| Ασθενής ψαμμίτης                         | 1.7 – 2.0                         | 1000 - 2000 | 600 - 1200  |
| Ψαμμίτης Wildmoor (λεπτόκοκκος, πορώδης) | 2                                 | 1700 – 2000 | 1100 - 1300 |
| Αργίλος                                  | 1.9 – 2.1                         | 1500 - 1600 | 100 - 300   |
| Αργίλος του Λονδίνου                     | 2                                 | 1700 - 1800 | 800 - 1100  |
| Αργιλικός σχιστόλιθος                    | 2.3 - 2.8                         | 1600 - 4500 | 700 - 3000  |
| Weak Shale, North Sea                    | 2.35                              | 2400 – 2600 | 1200 - 1300 |
| Τάλκης, υψηλό πορώδες                    | 1.4 - 1.7                         | 1800 - 2600 | 1000 - 1500 |
| Τάλκης, χαμηλό πορώδες                   | 1.7-2.4                           | 2600 - 5000 | 1500 - 3500 |
| Ασβεστόλιθος                             | 2.4 -2.7                          | 3500-6000   | 2000-3500   |
| Ασβεστόλιθος                             |                                   | 6000-6500   |             |
| Δολομίτης                                |                                   | 6500-7000   |             |
| Βασάλτης                                 | 2.5 -2.9                          | 3500-5500   | 1700-3400   |
| Βασάλτης                                 |                                   | 6500-7000   |             |
| Γάββρος                                  |                                   | 7000        |             |
| Γρανίτης                                 |                                   | 5500-6000   |             |
| Γρανίτης                                 | 2.6 -2.7                          | 5500-6500   | 3000-35     |

Σε γενικές γραμμές μία τυπική πηγή ΑΕ/MS εκπέμπει διαφόρων ειδών κύματα. Αυτά είναι τα εγκάρσια, τα διαμήκη, τα εσωτερικά και τα επιφανείας. Σε κάθε περίπτωση τα διαφορετικά ειδών κύματα μεταφέρονται στο ίδιο μέσο που έχει σαν αποτέλεσμα την συμβολή τους. Συμβολή κυμάτων είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δύο ή περισσότερα κύματα συναντιούνται στο ίδιο σημείο ενός ελαστικού μέσου, προστίθενται γεωμετρικά (διανυσματικά), με αποτέλεσμα τη μεταβολή του πλάτους κύματος. Αυτή η μεταβολή του πλάτους μπορεί να είναι ενισχυτική ή καταστρεπτική (Hardy, 2003).

Τα εσωτερικά κύματα που παράγει μια πηγή διακρίνονται σε Ρ-κύματα (διαμήκη) και S-κύματα (εγκάρσια), τα οποία είναι δευτερεύοντα και διαδίδονται σε ελαστικά μέσα. Τα σεισμικά Ρ- και S-κύματα από σεισμό με μικρό εστιακό βάθος έχουν την τάση φθάνοντας στην επιφάνεια να μετασχηματίζονται σε κύματα που ταξιδεύουν επιφανειακά και η συμβολή τους έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία των Rayleigh και Love.

Τα κύματα Rayleigh είναι κύματα πίεσης και ελαστικής παραμόρφωσης ταυτόχρονα, το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος του μέσου διάδοσης και χαρακτηρίζονται από τη μικρή απόσβεση της ενέργειας που μεταφέρουν. Είναι δύσκολη η διάκριση των κυμάτων S, Ρ, Rayleigh, Love και γίνετε βάση της ταχύτητας τους, με ταχύτερο το Ρ-κύμα, μετά τα S και Love, ενώ τελευταίο καταφθάνει στον αισθητήρα το Rayleigh (Hardy, 2003).

Σε ένα πολυκρυσταλλικό υλικό όπως είναι το πέτρωμα, ένα φαινόμενο γνωστό ως σκέδαση συμβαίνει όταν το μήκος κύματος του τασικού κύματος γίνεται συγκρίσιμο με το μέγεθος κόκκου:

$$d \approx \lambda$$

$$\lambda = C \cdot f$$

όπου,  $d$  είναι η μέση διάμετρος κόκκου

$\lambda$  είναι το μήκος κύματος

$C$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος

$f$  είναι η συχνότητα

Επειδή  $d \approx \lambda$  το κύμα αντιλαμβάνεται τον κόκκο σαν εμπόδιο με αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερευόντων κυμάτων προς διάφορες κατευθύνσεις με μειωμένη ενέργεια. Η σκέδαση σε εργαστηριακού τύπου μελέτες μπορεί να είναι σημαντική για γεγονότα ΑΕ υψηλών συχνοτήτων. Το ποσοστό της ενέργειας που χάνεται κατά την σκέδαση στο ελαστικό μέσο εξαρτάται από τα υλικά και την γεωμετρία του μέσου διάδοσης (Hardy, 2003).

Διασκόρπιση ορίζεται το φαινόμενο που σχετίζει την κυκλική συχνότητα του κύματος με το διάνυσμα διάδοσης του. Αν ο λόγος τους παραμένει σταθερός τότε το μέσο δεν επιβάλλει διασκόρπιση στα ελαστικά κύματα, χωρίς να υφίσταται εξάρτηση της ταχύτητας από την συχνότητα του κύματος. Αν ο λόγος τους δεν είναι σταθερός, που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση, τότε το κύμα αλλάζει μορφή στο χώρο μετά από οποιαδήποτε χρονικό διάστημα. Οι επιδράσεις της διασκόρπισης είναι σημαντικές σε δομές όπως λεπτές πλάκες, σε πλοία με λεπτά τοιχώματα (Hardy, 2003).

Διάθλαση ονομάζεται το φαινόμενο της εκτροπής της ευθύγραμμης τροχιάς διάδοσης του ηχητικού κύματος λόγω διαφοράς της πυκνότητας του ελαστικού μέσου. (<http://el.wikipedia.org/wiki/Διάθλαση>)

Οι ανακλάσεις στα όρια των κόκκων και στις διεπιφάνειες είναι άλλο ένα φαινόμενο που παρατηρείται στα σήματα των ακουστικών εκπομπών καθώς παρεμβάλλονται στην κατεύθυνση των ηχητικών κυμάτων. Μετά τις ανακλάσεις το σήμα φτάνει στους εγκατεστημένους μορφοτροπείς, με το Ρ-κύμα πρώτο και τα ανακλώμενα κύματα αργότερα λόγω μικρότερης ταχύτητας. Ωστόσο υπάρχει η πιθανότητα τα μεταγενέστερα πρωταρχικά σήματα ΑΕ να είναι περισσότερο “μολυσμένα” από δευτερογενείς συνιστώσες σήματος. Αυτές οι συνιστώσες είναι δύσκολο να διαχωριστούν χρησιμοποιώντας τους απλούς μορφοτροπείς (Grosse & Ohtsu, 2008, Hardy, 2003).

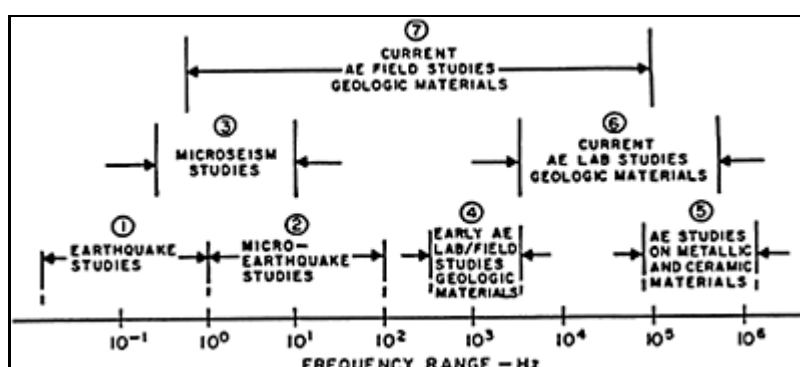
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΑΕ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να υπάρξει σύστημα καταγραφής ακουστικών εκπομπών πρώτα απ' όλα πρέπει να δημιουργηθούν μία ή περισσότερες πηγές ελαστικού (τασικού) κύματος, εν συνεχεία διαχέεται στο μέσο διάδοσης του παλμού. Μετά τη διάχυση του κύματος στο περιβάλλον τα δεδομένα φτάνουν στον αισθητήρα (έναν ή περισσότερους ανάλογα αν είναι σύστημα ενός ή πολλών καναλιών), που γίνεται η μετατροπή του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, στη συνέχεια το σήμα καταγράφεται από το τμήμα επεξεργασίας δεδομένων και τη συσκευή ανάγνωσης (Hardy, 2003). Αυτά είναι τα μέρη ενός συστήματος παρακολούθησης ΑΕ, ανεξάρτητα από το αν η μελέτη γίνεται σε εργαστήριο ή στο πεδίο.

Τα συστήματα καταγραφής των ακουστικών εκπομπών που χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακές δοκιμές καθώς και στο πεδίο δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές αν εξαιρεθεί η κλίμακα παρακολούθησης. Καθώς η συχνότητα, που είναι το βασικό χαρακτηριστικό ενός παρατηρούμενου κύματος ακουστικής εκπομπής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της πηγής και την απόσταση μεταξύ πηγής και αισθητήρα. Σε μεγάλης κλίμακας μετρήσεις έχουν παρατηρηθεί συχνότητες κάτω του 1Hz, ενώ σε εργαστηριακές μελέτες πάνω των 500kHz (Hardy, 2003).

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται το εύρος συχνοτήτων σε διάφορες εφαρμογές των ακουστικών εκπομπών και σεισμικής δραστηριότητας προκειμένου να εκτιμηθεί η ευστάθεια κατασκευών και υλικών. Παρατηρείται ότι το φάσμα συχνοτήτων με γεωυλικά σε εργαστηριακές μελέτες κυμαίνεται από 5kHz έως 700kHz, σε μελέτες πεδίου 1Hz-100kHz, ενώ στις σεισμικές ( $<10^{-1}$  Hz-1Hz) και μικροσεισμικές μελέτες παρατηρείται ότι συνδέονται με χαμηλές συχνότητες. Το αντίθετο συμβαίνει με τα υλικά κεραμικής, μεταλλουργίας με το φάσμα συχνοτήτων να ξεκινάει από 100kHz.



Σχήμα 3.1 Εύρος συχνοτήτων σε μελέτες Ακουστικής Εκπομπής και Μικροσεισμικής δραστηριότητας (Hardy, 2003)

### 3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΕ

Για τη διεξαγωγή των μελετών και τη σωστή εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων, πρέπει η επιλογή του εξοπλισμού να γίνει με βάσει τους στόχους που έχουν τεθεί, όπως την

αξιόπιστη αναγνώριση σημάτων από πραγματικές αστοχίες του υλικού, τη θέση της αστοχίας, την απομόνωση του θορύβου.

Για τους προαναφερθέντες λόγους και πολλούς περισσότερους επιλέχθηκε το κάθε μέρος του συστήματος παρακολούθησης.

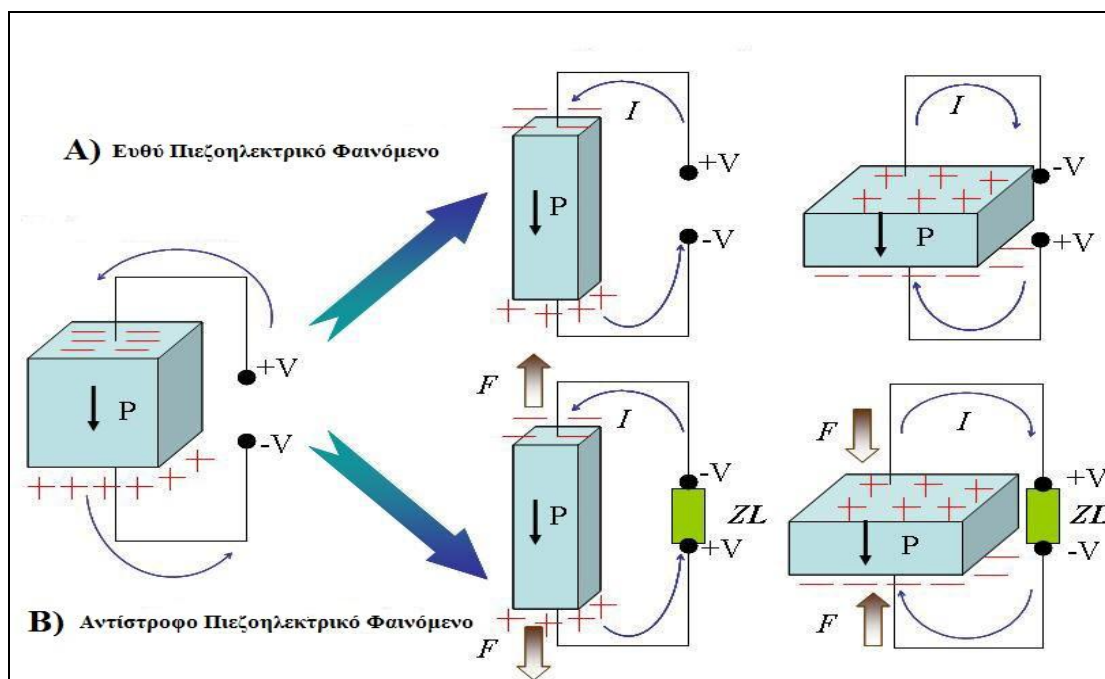
### 3.2.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Τα τασικά κύματα ανιχνεύονται από ειδικό αισθητήρα, που διατίθεται στο εμπόριο. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο αισθητήρας αποτελείται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και το προστατευτικό περίβλημα (Beattie, 1983). Τέτοιοι κρύσταλλοι είναι ο χαλαζίας, ο τουρμαλίνη, τα κεραμικά υλικά (κεραμικό υλικό μολύβδου, ζirkονίου, τιτανίου ή PZT), το συνθετικό πολυμερές (PVDF). Οι αισθητήρες αυτοί έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν πολύ μικρές επιφάνειες παραμόρφωσης (της τάξης των πικομέτρων) σε ηλεκτρικά κύματα τα οποία μπορούν να ενισχυθούν και να καταγραφούν. Ο πιο συνηθισμένος τύπος αισθητήρων για τέτοιες εφαρμογές βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (Grosse & Ohtsu, 2008).

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους αδελφούς Curie το 1880, οι οποίοι παρατήρησαν ότι καθώς υπέβαλλαν σε μηχανική πίεση συγκεκριμένα κρυσταλλικά υλικά, αυτά υπόκεινται σε ηλεκτρική πόλωση και ο βαθμός πόλωσης είναι ανάλογος της εφαρμοσμένης πίεσης.

Πιο συγκεκριμένα πιεζοηλεκτρισμός είναι η γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών συστημάτων σε μη συμμετρικούς κρυστάλλους. Το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να ορισθεί ως το φορτίο της ηλεκτρικής πόλωσης που είναι ανάλογο με την παραμόρφωση (Βλ. Σχήμα 3.2Α). Ένα υλικό ονομάζεται πιεζοηλεκτρικό όταν μια εξωτερική μηχανική τάση αυξάνει την διηλεκτρική μετατόπιση μέσα στο υλικό. Η ηλεκτρική μετατόπιση εμφανίζεται σαν εσωτερική ηλεκτρική πόλωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εξαρτάται σημαντικά από την συμμετρία του κρυστάλλου. Ένας κρύσταλλος με αρκετά χαμηλή συμμετρία εμφανίζει πόλωση κάτω από την επίδραση μηχανικού φορτίου. Οι κρύσταλλοι που έχουν κεντρική συμμετρία δεν μπορούν να εμφανίσουν πιεζοηλεκτρισμό.

Σχετικό είναι επίσης και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται όταν εφαρμοστεί σε αυτόν εξωτερική ηλεκτρική τάση (Σχήμα 3.2Β) (<http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity/>).

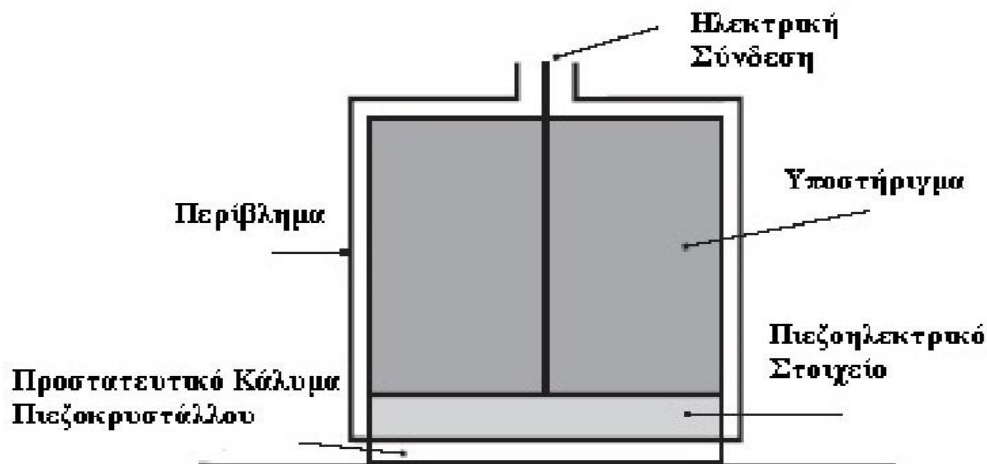


Σχήμα 3.2 Ευθύ (A) και αντίστροφο (B) πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο  
( <http://bme240.eng.uci.edu/students/06s/yuhsianh/Piezoelectric%20effect.htm>)

Η αρχή λειτουργίας ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα είναι απλή. Κατά τη διάρκεια επιβολής τάσης στο μελετώμενο υλικό η μηχανική τάση προκαλεί πιεζοηλεκτρική πόλωση. Το κεραμικό υλικό από το οποίο είναι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο θερμαίνεται με θερμοκρασία ( $T$ ) μεγαλύτερη από  $T$  Curie, έτσι μετατρέπει την μηχανική παραμόρφωση σε ηλεκτρική τάση, ενώ παραμένει σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Στη συνέχεια το σήμα περνάει στον προενισχυτή και στη μονάδα επεξεργασίας. Τα υλικά επιλέγονται λόγω της μονωτικής ιδιότητας, με πολύ χαμηλή αγωγιμότητα και υψηλή διηλεκτρική σταθερά (<http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity/>).

Μια τυπική δομή για έναν αισθητήρα φαίνεται στο σχήμα 3.3. Τα βασικά στοιχεία είναι το περίβλημα του αισθητήρα μέσα στο οποίο βρίσκονται ο πιεζοηλεκτρικός στοιχείο και τα ηλεκτρόδια, η προστατευτική θήκη του πιεζοκρυστάλλου καθώς και το υλικό υποστηρίγματος που παρέχει απόσβεση στο σύστημα. Σημαντικό επίσης για την εφαρμογή του αισθητήρα στο υπό εξέταση υλικό είναι η τοποθέτηση στο σημείο επαφής τους με την κατασκευή κάποιου παχύρρευστου υγρού για την μείωση των απωλειών.





Σχήμα 3.3 PZT αισθητήρας ακουστικών εκπομπών (Καππάτος, 2007)

Σημαντικός παράγοντας για την επιλογή ενός αισθητήρα είναι τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, η συχνότητα λειτουργίας του, η ευαισθησία, τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, δηλαδή τις προδιαγραφές του αισθητήρα. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

- Ευαισθησία

Η ιδιότητα αυτή του πιεζοηλεκτρικού υλικού του αισθητήρα να αποδίδει υψηλή τάση εξόδου σε σχέση με την συχνότητα.

- Διακριτική ικανότητα

Είναι η ικανότητα να μπορεί ένας αισθητήρας να αναγνωρίζει τη μικρότερη μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους. Για παράδειγμα αν η διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα είναι 0.1mbar δεν μπορεί να αξιολογήσει μεταξύ δύο τιμών με διαφορά μικρότερη από 0.1 mbar.

- Ακρίβεια

Η ακρίβεια ισούται με το σφάλμα που εγγενώς περιέχει η τιμή που αποδίδει ο αισθητήρας στην έξοδο, δηλώνει δηλαδή την αβεβαιότητα που υπάρχει στην τιμή εξόδου και εκφράζεται σε απόλυτες τιμές.

- Λειτουργικό εύρος συχνοτήτων

Είναι μια ιδιότητα των αισθητήρων ακουστικής εκπομπής που μας δείχνει το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα, γιατί όπως προαναφέρθηκε το φάσμα συχνοτήτων διαφέρει ανάλογα με τη μελέτη.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις μας είναι οι Pico και τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα (Physical Acoustics Corporation – AE Sensor Catalog)

| Sensor Model                                | PICO            |
|---------------------------------------------|-----------------|
| Dimension (mm) [inch]                       | 5x4 [0.2x0.15]  |
| Weight (gr)                                 | -               |
| Operating temperature (°C)                  | -65 to 177      |
| Shock limit                                 | 500             |
| Case material                               | Stainless steel |
| Face material                               | Ceramic         |
| Peak sensitivity dB ref. 1V/(m/s) [1V/mbar] | 54 [-68]        |
| Operating frequency range (kHz)             | 200-750         |
| Resonant frequency (kHz)                    | 250 [500]       |

Ο αισθητήρας PICO ανήκει στους μικροσκοπικούς αισθητήρες γενικού σκοπού.

Για να δημιουργηθεί ισχυρό σήμα εισόδου στον αισθητήρα AE θα πρέπει να τοποθετηθεί κάποιο ρευστό μέσο στη διεπιφάνεια αισθητήρα-δοκίμιο. Έχει παρατηρηθεί πως εάν τοποθετηθεί μια λεπτή επιφάνεια ρευστού ανάμεσα τους το σήμα είναι πολύ υψηλότερο, αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι το σήμα λαμβάνεται σαν κύμα πίεσης που μεταδίδεται μεταξύ δύο επιφανειών. Η τάση αναλύεται σαν δύναμη προς μονάδα επιφάνειας και μικροσκοπικά οι επιφάνειες του αισθητήρα και του δοκιμίου είναι αρκετά τραχειές, οπότε το ρευστό που χρησιμοποιούμε πληρώνει τα κενά και η πίεση μεταφέρεται ομοιόμορφα σε ολόκληρη την επιφάνεια. Το υλικό θα πρέπει να έχει υψηλό ιξώδες γιατί τα υγρά χαμηλού ιξώδους δεν μεταφέρουν διατμητικά κύματα.

Πολλά προβλήματα έχουν προκύψει από τη λάθος χρήση ενδιάμεσου υλικού. Εάν ένας άκαμπτος δεσμός χρησιμοποιηθεί για να εφάπτεται ο αισθητήρας σε ένα δοκίμιο που παραμορφώνεται ελαστικά κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το σύνηθες αποτέλεσμα είναι σπασμένος δεσμός και φτωχή ή καθόλου ευαισθησία στα ακουστικά κύματα. Ομοίως, σε ένα πείραμα όπου η θερμοκρασία αλλάζει αισθητά, η χρήση ενός άκαμπτου ενδιάμεσου υλικού μπορεί να οδηγήσει σε σπασμένο ενδιάμεσο λόγω διαφορικής θερμικής διαστολής ανάμεσα στον αισθητήρα και στο δοκίμιο.

Το υλικό σύζευξης, πρέπει να επιλέγεται με μεγάλη προσοχή και η κύρια έμφαση πρέπει να δίνεται στη συμβατότητα του υλικού στις εκάστοτε πειραματικές συνθήκες. Συνήθως εάν το ενδιάμεσο κρατά τον αισθητήρα, θα είναι επαρκές μεταδοτικό. Για θλιπτικό κύμα οποιοδήποτε ρευστό θα δρά ως ενδιάμεσο. Το βέλτιστο για μια πειραματική διαδικασία είναι η χρησιμοποίηση ως υλικού σύζευξης μιας όσο το δυνατόν λεπτότερης επιφάνειας οποιουδήποτε ιξώδους ρευστού που υγραίνει και τις δύο επιφάνειες. Για να κρατηθεί στην επιφάνεια ο αισθητήρας ασκείται πίεση από μαγνήτες, λάστιχα, κτλ. Εάν χρησιμοποιείται άκαμπτο ενδιάμεσο πρέπει να μην υπάρχει διαφορική διαστολή ανάμεσα στις δύο επιφάνειες (Paterson & Wong, 2005).

### 3.2.2 ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

Στην ιδανική περίπτωση που ένα σήμα φτάνει στη μονάδα παρακολούθησης απαλλαγμένο από περιβαλλοντικό θόρυβο και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές δεν θα ήταν απαραίτητη η

χρήση προενισχυτή. Στη πράξη αυτό δεν ισχύει και για αυτό οι αισθητήρες και οι προενισχυτές σχεδιάζονται ώστε να απορρίπτουν τις διαταραχές και να ενισχύει το αρχικό σήμα σε υψηλότερη τάση ώστε να είναι κατάλληλο για επεξεργασία. Οι προενισχυτές και ο αισθητήρας παράγουν θόρυβο γι αυτό είναι επιβεβλημένη η χρήση φίλτρων. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ο προενισχυτής τοποθετείται κοντά στον αισθητήρα, μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις ο προενισχυτής ενσωματώνεται στον μετατροπέα, όπως στην περίπτωση του USB AE Node που χρησιμοποιήθηκε για την εργαστηριακή μελέτη (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 USB AE Node

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

### 3.2.3 ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το ενισχυμένο φιλτραρισμένο σήμα οδηγείται σε ηλεκτρονικό σύστημα επεξεργασίας ακουστικών εκπομπών. Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι μονοκάναλα ή πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος ικανούς για καταγραφή σε πραγματικό χρόνο των παραμέτρων του σήματος. Τα κανάλια AE είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε έναν ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής.

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές όπως προαναφέρθηκε είναι το USB Node, αρχικά ένα σύστημα δύο και εν συνεχεία μίας μονάδας και το λογισμικό για την επεξεργασία των δεδομένων στον υπολογιστή το AE-Win.

Το USB Node είναι ένα μονοκάναλο σύστημα επεξεργασίας δεδομένων AE, με παρακολούθηση όλων των καθοριζόμενων χαρακτηριστικών ενός πολυκάναλου συστήματος. Έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- Μικρή φορητή μονάδα για γρήγορη αποτελεσματική δοκιμή στο πεδίο
- Σύνδεση με USB 2.0, για συμβατότητα με όλους τους υπολογιστές
- Πλήρης απόκριση εύρους συχνοτήτων AE 1.0kHz-1.0MHz
- Σύνδεση μέχρι τεσσάρων συσκευών USB Node

- Χρησιμοποιεί πρότυπους χαμηλού κόστους ΑΕ αισθητήρες
- Μετατροπέα A/D 18 bit, με ρυθμό δειγματοληψίας 20MSPS
- Δυνατότητα τοποθέτησης τεσσάρων παραμετρικών αισθητήρων 16 bit A/D, για τον συσχετισμό ΑΕ με αισθητήρες άλλων μετρούμενων μονάδων
- LED ενδείξεις POWER/ HIT/ ALARM.
- Μόνιμη ψηφιακή καταγραφή δεδομένων στο πρότυπο της PAC, με .DTA αρχεία δεδομένων (USB-AE Node™ & AEwin™ for USB™ Software, 2010)

### 3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΑΕ

Για την διεξαγωγή της εργαστηριακής μελέτης αρχικά χρησιμοποιήθηκαν δύο μονάδες επεξεργασίας ΑΕ στη συνέχεια παρατηρήθηκε βλάβη στη μία και η παρακολούθηση των ακουστικών εκπομπών συνεχίστηκε με ένα USB AE Node. Αρχικά συνδέεται το κάθε σύστημα επεξεργασίας με καλώδιο mini USB στον υπολογιστή, για να πάρει ρεύμα και να μπορεί να μεταφέρει τα δεδομένα. Εν συνεχεία τοποθετείτε ένα λεπτό στρώμα από το υλικό σύζευξης στο δοκίμιο και προσαρμόζονται στο σημείο εκείνο οι αισθητήρες PICO. Στην περίπτωση του πολυκάναλου συστήματος επεξεργασίας με καλώδιο δικτύου συνδέονται μεταξύ τους (Σχήμα 3.5, γκρι καλώδιο) από το Line out του καναλιού 1 στο Line in του 2 (Σχήμα 3.5). Λόγω του γεγονότος ότι οι αισθητήρες δεν θα μπορούσαν να είναι προσαρμοσμένοι καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής στο μελετώμενο υλικό χρησιμοποιήθηκε λάστιχο.



Σχήμα 3.5 Σύστημα παρακολούθησης ΑΕ εργαστηριακής μελέτης

- Αισθητήρες

Για την διεξαγωγή της Pencil Lead Break καταγραφής χρησιμοποιήθηκαν 2 αισθητήρες PICO. Όμως λόγω τεχνικού προβλήματος στον δεύτερο καταγραφέα USB Node και καθώς χρειάζεται αρκετός χρόνος επισκευής του, η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε με ένα αισθητήρα, ο οποίος τοποθετήθηκε στο μέσο του κατακόρυφου άξονα του δοκιμίου.

- Σύζευξη – Στερέωση

Παρά του κυλινδρικού σχήματος δοκίμιο δεν αντιμετωπίστηκαν προβλήματα για την στερέωση του αισθητήρα, χρησιμοποιήθηκαν λάστιχα ίσου πάχους με τον αισθητήρα 7mm τα οποία αποδείχτηκαν ικανά για την συγκράτηση του καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Ως υλικό σύζευξης-ενδιάμεσο υλικό, χρησιμοποιήθηκε κοινή βαζελίνη για τις μετρήσεις μονοαξονικής θλίψης (δοκίμια 1-7) και για τις μισές δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (1A – 6A δοκίμια), ενώ για τις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης 1B – 7B χρησιμοποιήθηκε θερμαινόμενη σιλικόνη.

- Ρυθμίσεις καταγραφής

Στο λογισμικό AE-Win επιλέχθηκαν οι παρακάτω ρυθμίσεις (σχήματα 3.6, 3.7, 3.8):

- ✓ Η τάση κατωφλιού (Threshold) διατηρείται σταθερή (Fixed) στα 45 dB
- ✓ Η ενίσχυση του σήματος στον προ-ενισχυτή επιλέγεται 40 dB
- ✓ Στο αναλογικό φίλτρο (Analog Filter) ως κατώτερη τιμή ορίζονται τα 1kHz και ως ανώτερη τα 400kHz.
- ✓ Ο ρυθμός δειγματοληψίας (Sample Rate) ορίζεται 5 MSPS (Mega Samples Per Second) που σημαίνει πως το δείγμα των κυματομορφών λαμβάνεται κάθε 1/5 μs.

AE Hardware Setup: AE USB

AE Channel Setup | AE Timing Parameters | Data Sets/Parameters | Parametric Setup

| AE Channel                            | Threshold |    | Analog Filter |        | Waveform Setup |             |        |
|---------------------------------------|-----------|----|---------------|--------|----------------|-------------|--------|
|                                       | Type      | dB | Lower         | Upper  | Sample Rate    | Pre-Trigger | Length |
| <input type="checkbox"/> 1            | FIXED     | 45 | 1kHz          | 400kHz | 5MSPS          | 20.0000     | 1k     |
| <input checked="" type="checkbox"/> 2 | FIXED     | 45 | 1kHz          | 400kHz | 5MSPS          | 20.0000     | 1k     |
| <input type="checkbox"/> 3            | FIXED     | 45 | 20kHz         | 200kHz | 5MSPS          | 20.0000     | 1k     |
| <input type="checkbox"/> 4            | FIXED     | 45 | 20kHz         | 200kHz | 5MSPS          | 20.0000     | 1k     |

Σχήμα 3.6 Παράμετροι ακουστικής εκπομπής για κάθε κανάλι

- ✓ Οι χρονικοί παράμετροι των ΑΕ καθορίστηκαν σύμφωνα με την εργασία των Kakli et al. (2012). Το χρονικό διάστημα (μs) μεταξύ της πρώτης υπέρβασης του κατωφλιού και του μεγίστου του σήματος ΑΕ (PDT - Peak Definition Time) ρυθμίζεται στα 200 μs, ενώ η χρονική διάρκεια ενός κύπου (HDT - Hit Definition Time) ρυθμίζεται στα 800 μs. Με την ορθή επιλογή του χρόνου HDT κάθε σήμα ΑΕ πρέπει να αντιστοιχεί σε έναν και μόνο κύπο (hit). Ο HLT (Hit Lockout Time) ρυθμίζεται από το λογισμικό και διατηρείται ως έχει στα 1000 μs (Kaklis et al., 2012).

**AE Hardware Setup: AE USB**

AE Channel Setup | AE Timing Parameters | Data Sets/Parametrics | Parametric Setup

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

Σχήμα 3.7 Καθορισμός χρονικών παραμέτρων ΑΕ για όλα τα δοκίμια

**AE Hardware Setup: AE USB**

AE Channel Setup | AE Timing Parameters | Data Sets/Parametrics | Parametric Setup

Hit Data Set:

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

Time Driven Parametrics:

☒ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4

Time Driven Channel Data:

☒ RMS ☒ ASL

☒ Threshold ☒ Absolute Energy

Σχήμα 3.8 Ρύθμιση μετρήσιμων παραμέτρων ΑΕ για όλα τα δοκίμια

Το κανάλι 2 που είναι ενεργοποιημένο είναι αυτόματα αποθηκευμένο από το σύστημα ΑΕ win για το συγκεκριμένο σύστημα USB AE Node.

- Ρυθμίσεις εξαγωγής γραφημάτων

Για να υφίσταται ορθή και συγχρονισμένη εξαγωγή δεδομένων στο ΑΕ win for USB και Δοκιμής MTS, στις ρυθμίσεις των διαγραμμάτων στον άξονα του χρόνου επιλέγεται Bin Axis 200 και Horizontal axis από 0 έως 200 (Σχήμα 3.9 (α, β)).

(α)

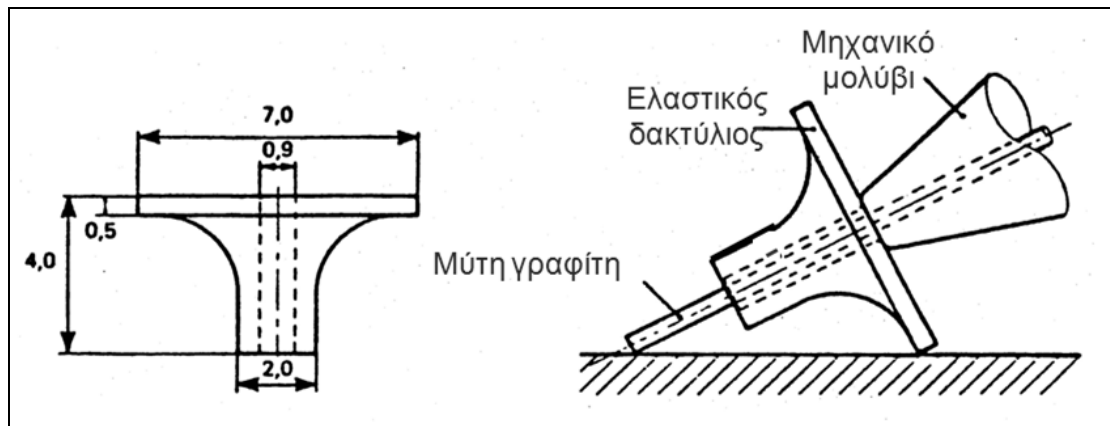
(β)

Σχήμα 3.9 Καθορισμός διαστήματος μελέτης γραφημάτων οριζόντιου (α) και κατακόρυφου άξονα (β)

### 3.4 PENCIL LEAD BREAK (PLB)

Το Pencil Lead Break (PLB) ή αλλιώς μέθοδος Hsu – Nielsen, είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέτρησης της ταχύτητας διάδοσης και της εξασθένισης σε δοκίμια, επίσης με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται βαθμονόμηση των αισθητήρων της δοκιμής. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε μόνο για βαθμονόμηση του συστήματος καταγραφής AE. Με την βοήθεια του PLB διαπιστώθηκε η αστοχία στο USB AE Node.

Η Pencil Lead Break είναι μια εύκολη και αποτελεσματική μέθοδος προσομοίωσης πηγών AE. Οι πηγές προσομοιώνονται με την χρήση ενός μηχανικού μολυβιού με μύτες 2H, πάχους 0.5 mm, την εφαρμογή ελαστικού δακτύλιου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10, ενώ η μύτη προεξέχει για 3mm. Για την σωστή διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιείται ελαστικός δακτύλιος, ώστε να μην ακουμπήσει το μεταλλικό μέρος τα μολυβιού στο δοκίμιο.



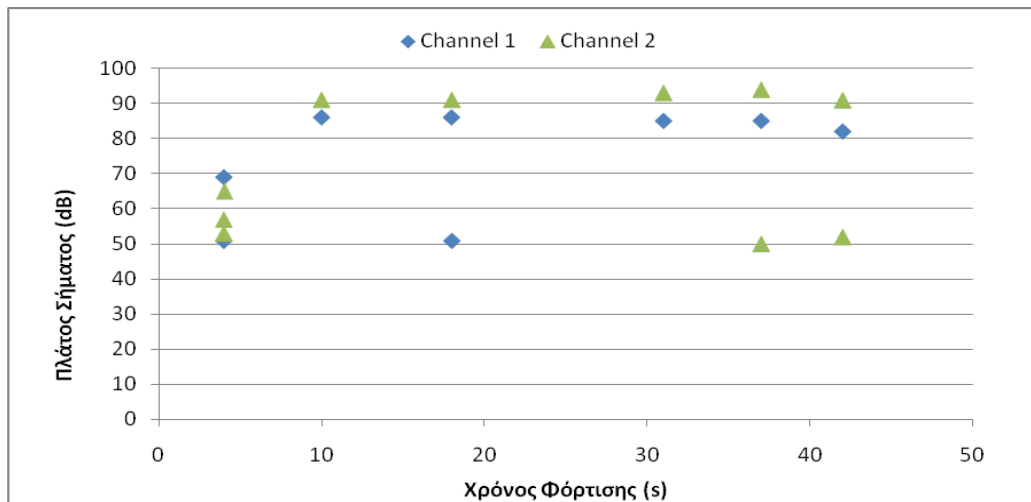
Σχήμα 3.10 Ειδικό προστατευτικό κάλυμμα Hsu-Nielsen προσαρμοσμένο στην άκρη πρότυπου μηχανικού μολυβιού - διαστάσεις σε mm (Hardy, 2003)

Με το σπάσιμο της μύτης από γραφίτη, κοντά στους αισθητήρες και περίπου στο μέσο του δοκιμίου, προσομοιώνονται οι πηγές AE, το σύστημα για να έχει ορθή λειτουργία θα πρέπει να καταγράφει τιμές πλάτους 90 – 100 dB. Εάν οι τιμές dB είναι κάτω από 85 dB, τότε θα πρέπει να τοποθετηθεί καλύτερα ο αισθητήρας στο δοκίμιο. Η μέθοδος PLB για τη βαθμονόμηση της συσκευής παρακολούθησης πραγματοποιήθηκε πριν από κάθε δοκιμή μονοαξονικής ή αντιδιαμετρικής θλίψης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση διεξήχθησαν τεστ με διαφορετικές διατάξεις των δύο αισθητήρων, όπως τοποθέτηση των αισθητήρων αντιδιαμετρικά στον οριζόντιο άξονα, τοποθέτηση των αισθητήρων δίπλα δίπλα στον κατακόρυφο άξονα, προσομοίωση της πηγής AE σε διαφορετικά σημεία στο δοκίμιο και χρήση διαφορετικών δοκιμίων.

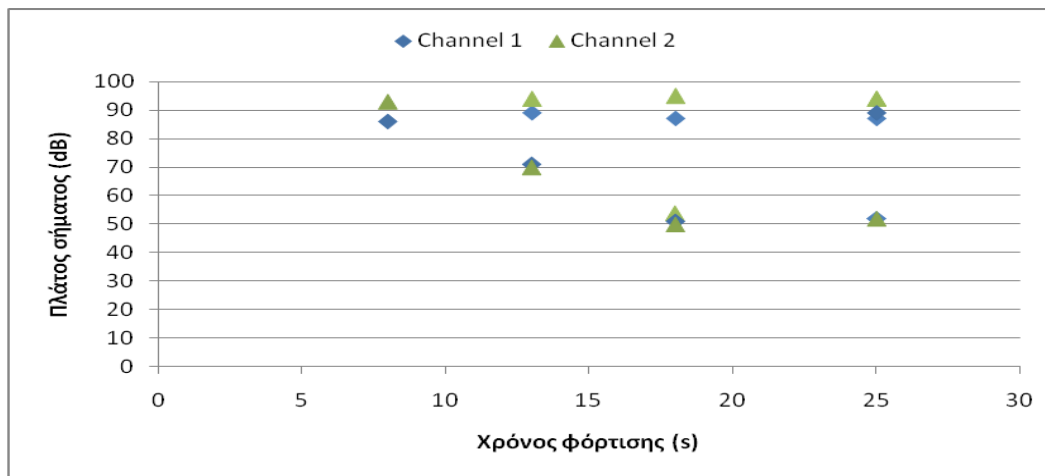
Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι τιμές πλάτους (dB) σε διαφορετικές διατάξεις του συστήματος παρακολούθησης. Παρατηρείται ότι οι τιμές στο κανάλι 1 είναι σταθερά πιο χαμηλές από ότι στο κανάλι 2 αλλά λειτουργεί σωστά.

Στα σχήματα 3.11 και 3.12 χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη αισθητήρων, τοποθετημένους αντιδιαμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα στο μέσο του δοκιμίου, αλλά με αλλαγή στη θέση προσομοίωσης της πηγής. Στο πρώτο τεστ η πηγή ακουστικών εκπομπών προσομοιώθηκε στο κέντρο του πάνω μέρους του κυλινδρικού δοκιμίου (Σχήμα 3.10), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η προσομοίωση της πηγής γίνεται στο ίδιο ύψος με τους αισθητήρες στο μέσο της απόστασης (Σχήμα 3.12).



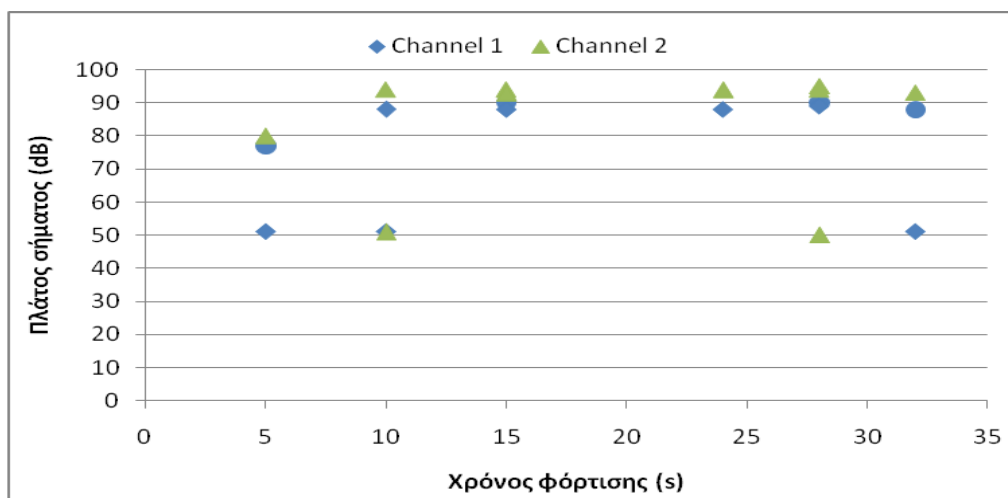


Σχήμα 3.11 Test 6 (8/3)



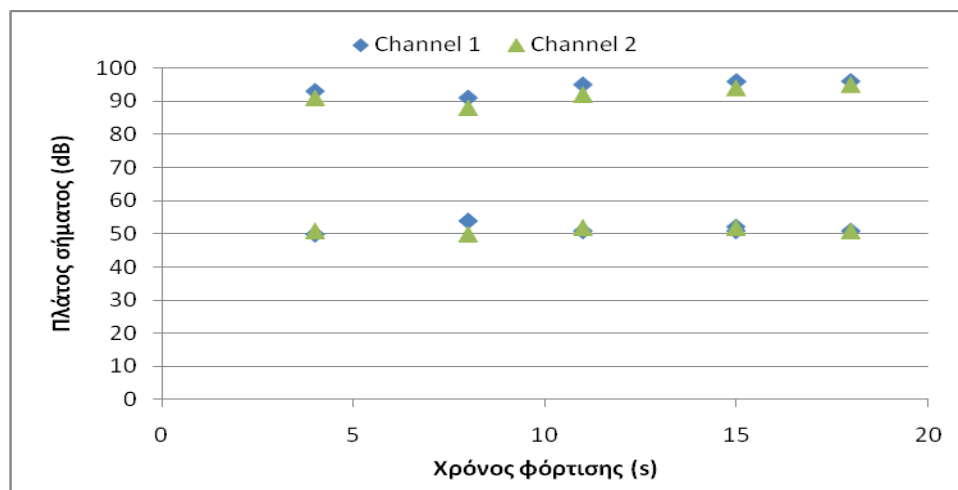
Σχήμα 3.12 Test 7 (8/3)

Στο επόμενο διάγραμμα οι αισθητήρες έχουν τοποθετηθεί στην μία επιφάνεια του κυλινδρικού δοκιμίου αντιδιαμετρικά ως προς το μέσο της και η πηγή ΑΕ είναι στο μέσο της επιφανείας (Σχήμα 3.13).

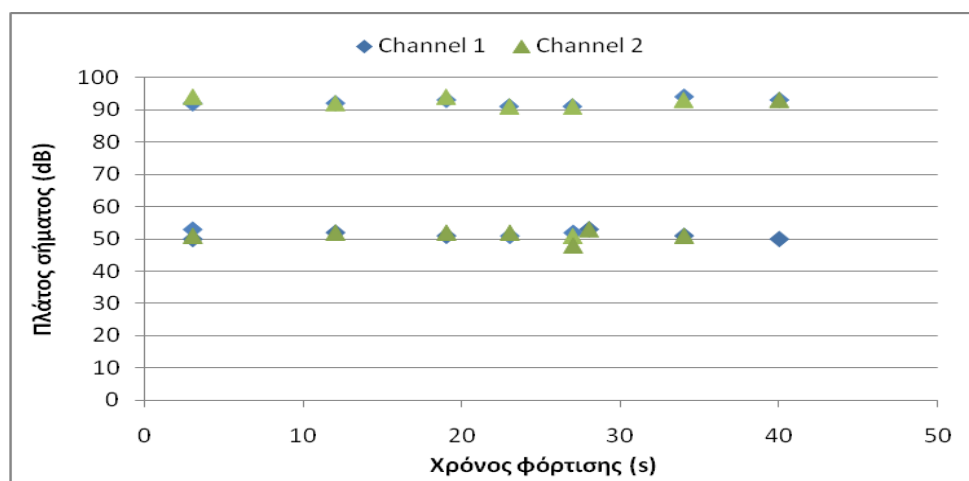


Σχήμα 3.13 Test 9 (8/3)

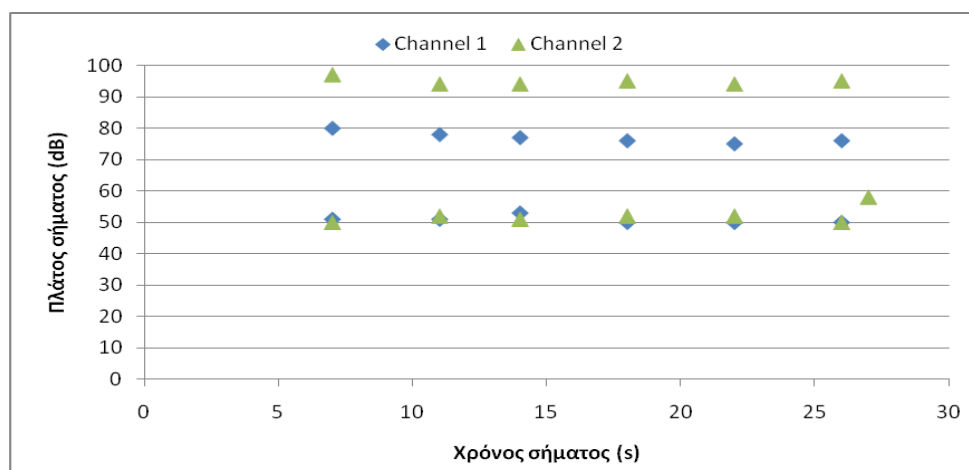
Στα τελευταία διαγράμματα οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε πλάκα μαρμάρου από το ίδιο μητρικό πέτρωμα ορθογωνικού σχήματος για να μπορούν να τοποθετηθούν ο ένας δίπλα στον άλλο, αλλάζοντας κάθε φορά απόσταση της πηγής ΑΕ (Σχήμα 3.14-3.16).



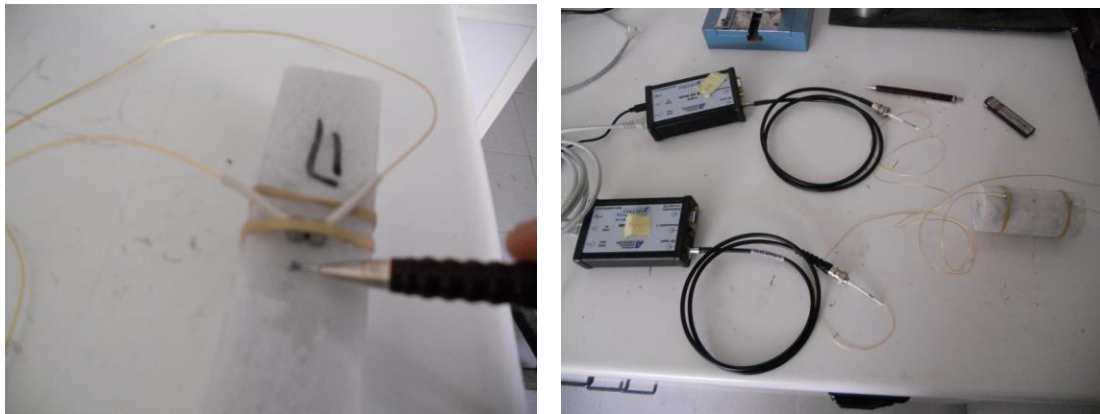
Σχήμα 3.14 Test 13 (8/3)



Σχήμα 3.15 Test 15 (8/3)



Σχήμα 3.16 Test 16 (8/3)



Σχήμα 3.17 Διαφορετικές διατάξεις αισθητήρων για την καταγραφή PLB

Σε όλα τα υπόλοιπα τεστ που πραγματοποιήθηκαν τη συγκεκριμένη στιγμή δεν καταγράφηκαν δεδομένα από το κανάλι 1 αλλάζοντας κάθε φορά τη συνδεσιμότητα των καλωδίων. Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε με το κανάλι 2, καθώς δεν μπορούσε να αντικατασταθεί το USB AE Node που είχε το πρόβλημα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΑΡΜΑΡΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής έχει η δυνατότητα να εντοπίσει και να καταγράφει την έναρξη και ανάπτυξη μικρορωγμών κατά τη φόρτιση υλικών και κατασκευών, όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς δοκιμίων μαρμάρου με τη μέθοδο των Ακουστικών Εκπομπών σε καταστροφικές δοκιμές.

#### 4.1.1 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΩΝ

Ως μάρμαρο (marble) στην γεωλογία ορίζονται τα μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα, που δημιουργήθηκαν από ανακρυστάλλωση ιζηματογενών πετρωμάτων, υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας σε μεγάλα βάθη στο στερεό φλοιό της Γης. Το χρώμα τους κυμαίνεται από λευκό σε τεφρό, ενώ σπάνια συναντώνται ερυθρωποί ή κιτρινωποί τύποι μαρμάρων. Εάν το μητρικό πέτρωμα είναι ο ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ) το μάρμαρο ονομάζεται ασβεστιτικό, ενώ αν είναι ο δολομίτης ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), δολομιτικό. Κατά την παρατήρηση θραυσσιγενούς επιφάνειας οι κρύσταλλοι του μαρμάρου ανακλούν το φως και προκαλούν τη λεγόμενη μαρμαρυγή.

Στο εμπόριο χρησιμοποιείται η ορολογία μάρμαρο για κάθε συμπαγές πέτρωμα με σκληρότητα 3-4, που μπορεί να κοπεί, να στιλβωθεί και να χρησιμοποιηθεί σαν δομικό ή διακοσμητικό πέτρωμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την χρήση του όρου μάρμαρο και για άλλα δομικά υλικά όπως ασβεστόλιθοι, λατυποπαγή (Πολυκρέτη, 1999).

Το μάρμαρο είναι πέτρωμα περιοχικής μεταμόρφωσης ανθρακικών ιζηματογενών πετρωμάτων (ασβεστολίθων, δολομιτών). Αποτελείται αποκλειστικά από ανθρακικά ορυκτά (ασβεστίτη ή δολομίτη). Ο ιστός του είναι λοβοειδής ή πολυγωνικός γρανοβλαστικός και σπάνια εμφανίζουν ατελή φολίδωση ή σχιστότητα. Σε μικρές αναλογίες απαντάται με πυριτικές ή αργιλικές προσμίξεις, όπως χαλαζιάς, μαρμαρυγίες, επίδοτο, τρεμολίτης, σερπεντίνης κ.α. (Θεοδωρίκας, 2002).

Σήμερα σχεδόν σε ολόκληρη την Ελλάδα ο τρόπος εξόρυξης των μαρμαροφόρων κοιτασμάτων είναι επιφανειακός, εκτός από την Πεντέλη που γίνεται με υπόγεια εκμετάλλευση. Η επιφανειακή εξόρυξη χαρακτηρίζεται σε τρεις τύπους ανάλογα με την μορφή και τη θέση εκσκαφής τις ορθές βαθμίδες: τα κατά τη φυσική επιφάνεια μέτωπα και την εξόρυξη με διάνοιξη τάφρων (Αγγελόπουλος, 2000). Η επικρατέστερη μέθοδος για υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρων είναι η θαλάμων και στύλων και ορθών ή ανεστραμμένων βαθμίδων (μάρμαρο Διονύσου Αττικής, Carrara Ιταλία) (Εξαδάκτυλος, 2005).

Μετά την εξόρυξη γίνονται διάφορες εργαστηριακές μετρήσεις για να προσδιορισθούν οι ιδιότητες, οι οποίες επηρεάζουν την χρήση του φυσικού διακοσμητικού πετρώματος, βάση διεθνών προδιαγραφών, όπως ASTM, DIN, UNI για την πιστοποίηση της ταυτότητας και της

χρήσης του υλικού προσδιορίζονται τρεις κατηγορίες ιδιοτήτων, οι φυσικές, οι μηχανικές και οι τεχνικές. Οι φυσικές ιδιότητες είναι το χρώμα, ο ιστός, το ειδικό βάρος και η υδαταπορρόφηση. Οι μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες για το μάρμαρο είναι ανάλογες της περιεκτικότητας του κυρίου ορυκτού, είναι η φαινόμενη πυκνότητα, αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, η ελαστικότητα (Πίνακας 4.1). Στην τρίτη κατηγορία ιδιοτήτων συγκαταλέγονται η αντοχή σε φθορά από τριβή, αντοχή σε πρόσκρουση, η μικροσκληρότητα Knoop και ο συντελεστής θερμικής διαστολής (Πολυκρέτη, 1999, Λασκαρίδης κ.α., 2000).

Πίνακας 4.1 Μηχανικές ιδιότητες μερικών Ελληνικών μαρμάρων (Πολυκρέτη, 1999)

| Τύπος μαρμάρου | Φαινόμενο ειδικό βάρος $\text{kg/m}^3$ | Συντελεστής υδατο Απορρόφησης $\text{Wt}\%$ | Αντοχή σε θλίψη $\text{kg/cm}^2$ | Αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη $\text{kg/cm}^2$ | Αντοχή σε φθορά από τριβή $\text{mm}$ |
|----------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Πεντέλης       | 2710                                   | 0,06                                        | 1091                             | 263                                            | 4,33                                  |
| Θάσου          | 2882                                   | 0,68                                        | 990                              | 189                                            | 5,66                                  |
| Νάξου          | 2710                                   | 0,13                                        | 1080                             | 247                                            | 4,81                                  |
| Πάρου          | 2770                                   | 0,14                                        | 908                              | 178                                            | 6,14                                  |
| Καβάλας        | 2730                                   | 0,05                                        | 733                              | 132                                            | 6,96                                  |
| Τρανοβάλτου    | 2708                                   | 0,08                                        | 926                              | 293                                            | 4,44                                  |
| Αγ. Μαρίνας    | 2710                                   | 0,12                                        | 862                              | 162                                            | 5,58                                  |

## 4.2 ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

### 4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σωστή δειγματοληψία και διαμόρφωση των δοκιμών έχει προηγηθεί της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Η σωστή δειγματοληψία αποτελεί ίσως το σημαντικότερο στάδιο της μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, τόσο στο εργαστήριο όσο και στο φυσικό τους χώρο. Ένα δείγμα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό του πετρώματος από το οποίο προέρχεται, θα πρέπει να αξιολογείται ανάλογα με τον προσανατολισμό του στο φυσικό του χώρο.

Κατά την δειγματοληψία, μεταφορά και αποθήκευση στο εργαστήριο θα πρέπει να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για την διατήρηση των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, όπως η φυσική υγρασία, πορώδες, ασυνέχειες και αλληλεπίδραση τους.

Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι ο προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, η ταξινόμηση και ο χαρακτηρισμός του ακέρατου πετρώματος βάση της αντοχής, χρησιμοποιώντας δοκίμια κανονικής γεωμετρίας (Αγιουτάντης, 2002).

#### • ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Από ορθογωνικό όγκο μαρμάρου Διονύσου έγινε πυρηνοληψία στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αρχικά τοποθετείται στον εργαστηριακό πυρηνολήπτη, όπου γίνεται πυρηνοληψία διαμέτρου 54 mm (NX). Για την διαδικασία αυτή το υλικό τοποθετείται σε κατάλληλη βάση διάτρησης (drill press) (Σχήμα 4.1α). Στη συνέχεια πραγματοποιείται κοπή των πυρήνων σε κυλινδρικά δοκίμια ύψους περίπου 110 mm με τον

εργαστηριακό δισκοπρίονο κοπής με αδαμαντοτροχό (diamond saw) (Σχήμα 4.1β). Ακολουθεί η διαμόρφωση των δοκιμών στον εργαστηριακό λειαντή (grinding machine), που γίνεται διαμόρφωση των βάσεων παράλληλες μεταξύ τους με ανοχή 0.02 mm (Σχήμα 4.1γ). Τέλος πραγματοποιείται μέτρηση των διαστάσεων των επτά δοκιμών με χρήση παχύμετρου τύπου Vernier με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια (0.1 mm) (Αγιουτάνης, 2002).



Σχήμα 4.1α Εργαστηριακός πυρηνολήπτης δοκιμών



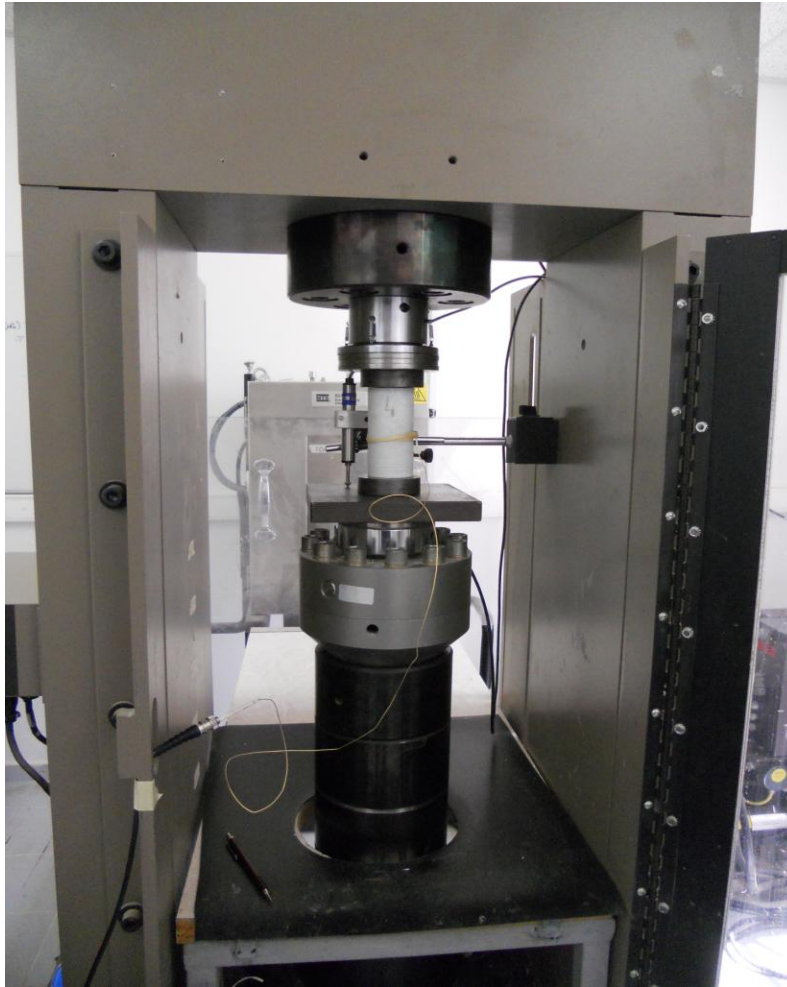
Σχήμα 4.1β Εργαστηριακό δισκοπρίονο δοκιμών



Σχήμα 4.1γ Εργαστηριακός λειαντής δοκιμών

- ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Αφού ολοκληρώθηκε η διαστασιολόγηση των δοκιμών, υποβάλλονται σε δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης με τη χρήση της μηχανής που παρέχεται από το εργαστήριο μηχανικής πετρωμάτων, MTS, ώστε να υπολογιστεί η αντοχή τους σε θλίψη (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2 Συσκευή φόρτισης MTS

Με τον όρο αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη εννοείται η θραύση μετά από φόρτιση ενός δείγματος σε κατάσταση φυσικής υγρασίας, κατά μία μόνο κατεύθυνση (κατακόρυφη), ενώ πλευρικά μπορεί να επεκτείνεται χωρίς κανένα εξωγενή περιορισμό. Με την δοκιμή αυτή μπορεί να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας ενός δοκιμίου, αλλά και άλλες γεωτεχνικές παράμετροι (συνοχή  $c$ , γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$ ) ([http://www.geo.auth.gr/883\\_lab/S5%20UCS\\_files/frame.htm](http://www.geo.auth.gr/883_lab/S5%20UCS_files/frame.htm)).

Το φορτίο που ασκείται στα δοκίμια επιβάλλεται με σταθερό ρυθμό φόρτισης 0.5 – 1.0 MPa/s.

Οι βάσεις των δοκιμίων οι οποίες έρχονται σε επαφή με τις πλάκες φόρτισης, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, λιπαίνονται με βαζελίνη.

Το μέγιστο φορτίο πρέπει να καταγράφεται με ακρίβεια 1% (Αγιουτάντης, 2002).

#### 4.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Έγιναν επτά δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

- Η αξονική τάση δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_c = P / A_0 ,$$

όπου  $\sigma_c$ : τάση αστοχίας (MPa)

P: θλιπτικό φορτίο (kN)

$A_0$ : εμβαδόν βάσης δοκιμίου ( $\text{cm}^2$ )

- Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από:

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon,$$

όπου E: μέτρο ελαστικότητας

$\sigma$ : αξονική τάση

$\varepsilon$ : αξονική παραμόρφωση

- Η παραμόρφωση υπολογίζεται από:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0,$$

όπου  $\varepsilon$ : αξονική παραμόρφωση

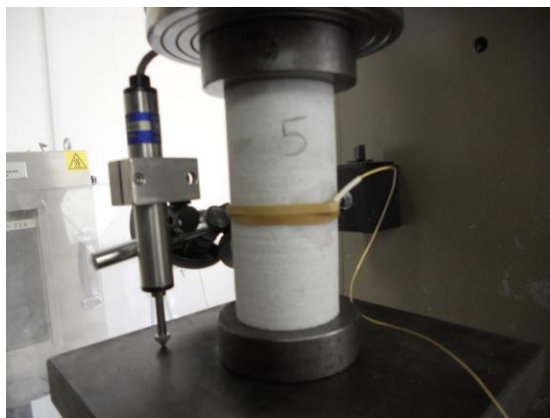
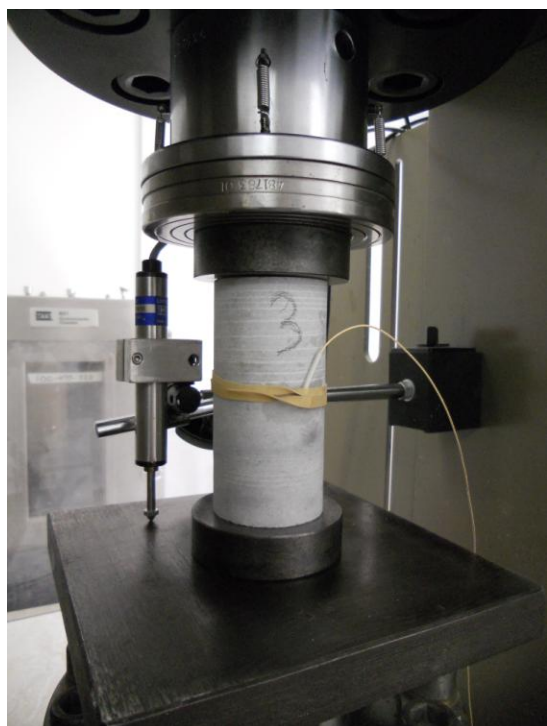
$\Delta l$ : διαφορά μετατόπισης

$l_0$ : αρχικό μήκος

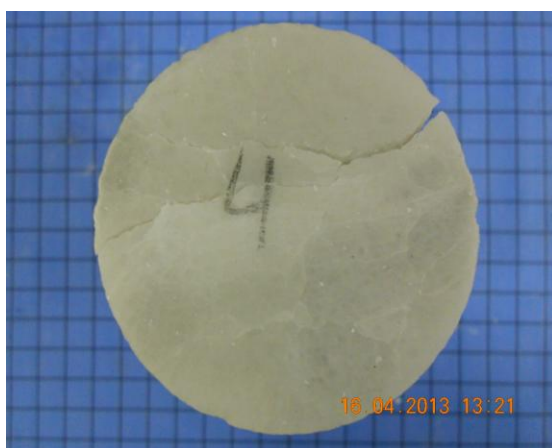
Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

|                  | Ύψος<br>(cm) | Διάμετρος<br>(cm) | Μέτρο<br>ελαστικότητας<br>(GPa) | Αντοχή σε<br>μονοαξονική<br>θλίψη<br>(MPa) | Χρόνος<br>δοκιμής<br>(s) |
|------------------|--------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
| <b>Δοκίμιο 1</b> | 10,603       | 5,212             | 21,9                            | 79,2                                       | 97                       |
| <b>Δοκίμιο 2</b> | 10,750       | 5,200             | 42,2                            | 73,3                                       | 58                       |
| <b>Δοκίμιο 3</b> | 10,798       | 5,205             | 34,3                            | 101,5                                      | 84                       |
| <b>Δοκίμιο 4</b> | 10,785       | 5,210             | 25,6                            | 79,6                                       | 89                       |
| <b>Δοκίμιο 5</b> | 10,808       | 5,195             | 39,6                            | 85,6                                       | 84                       |
| <b>Δοκίμιο 6</b> | 10,798       | 5,205             | 33,3                            | 85,3                                       | 85                       |
| <b>Δοκίμιο 7</b> | 10,405       | 5,201             | 47,3                            | 80,1                                       | 62                       |





Σχήμα 4.3 Πλευρική όψη δοκιμίων



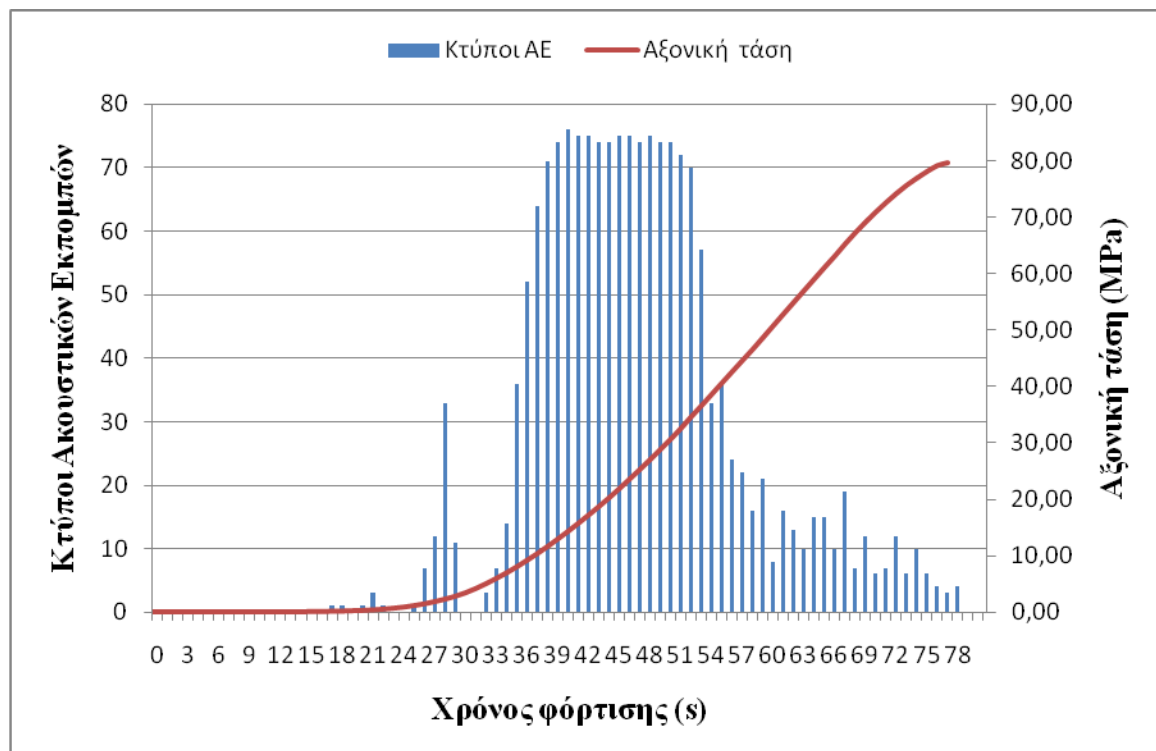
Σχήμα 4.4 Κάτοψη δοκιμίων μετά την καταπόνηση



Σχήμα 4.5 Πλευρική άποψη ρηγματωμένων δοκιμίων

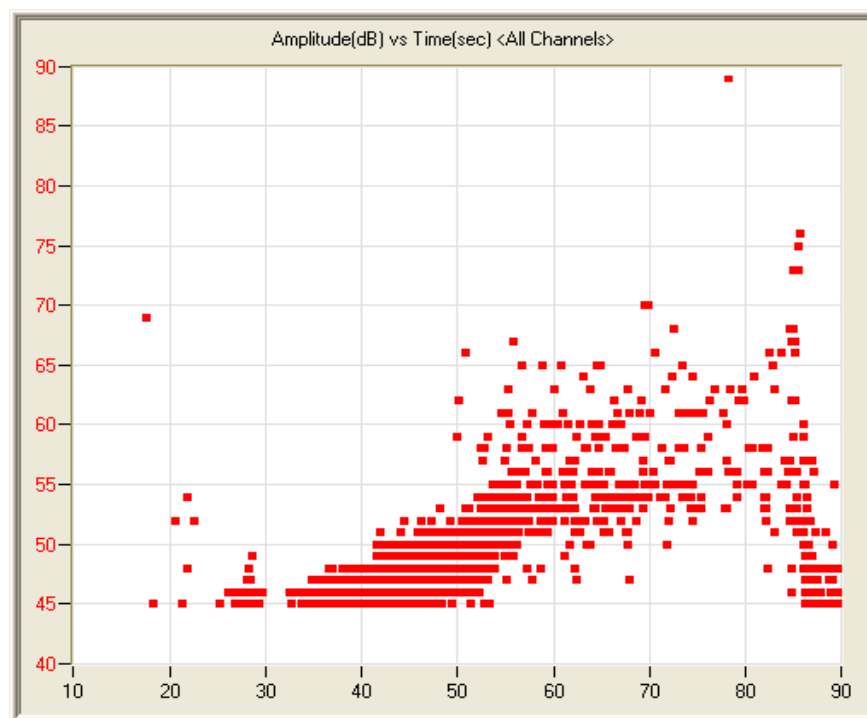
Στις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης λαμβάνεται καταγραφή μεγάλου αριθμού Κτύπων<sup>1</sup> ΑΕ στην αρχή και στο τέλος της δοκιμής, δηλαδή κατά τη διάρκεια του κλεισίματος των ρωγμών και κατά την άρρηκτη φάση του πετρώματος. Αντίθετα στις άλλες δύο φάσεις, ευσταθής και ασταθής κατακλαστική φάση η καταγραφή Κτύπων ΑΕ μειώνεται μέχρι και στη μία καταγραφή το δευτερόλεπτο (Σχήμα 4.6).

<sup>1</sup> Βλέπε κεφάλαιο 2.5 Παράμετροι ΑΕ

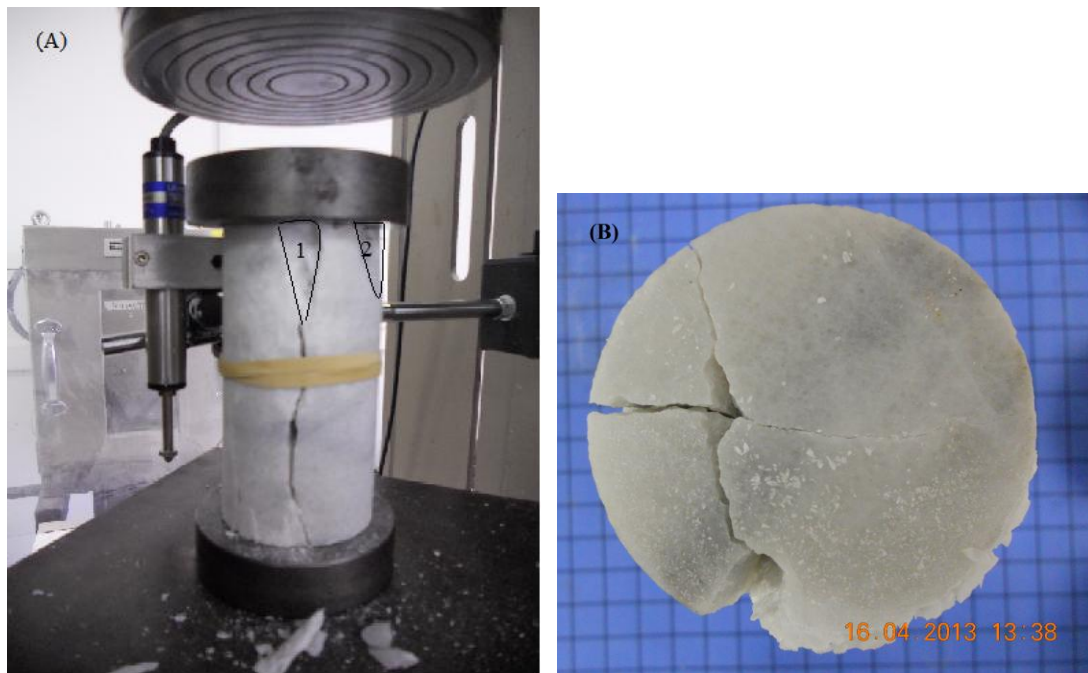


Σχήμα 4.6 Κτύποι ακουστικών εκπομπών – Χρόνος φόρτισης  
Αξονική τάση – Χρόνος φόρτισης

Παρόλο που η καταγραφή Κτύπων Ακουστικών Εκπομπών τείνει στο ένα συμβάν ΑΕ το δευτερόλεπτο παρατηρείται αύξηση του πλάτους των ακουστικών εκπομπών μέχρι τη μέγιστη τιμή του στο σημείο θραύσης, με πλάτος ΑΕ 88dB στα 78s δοκιμής (Σχήμα 4.7).

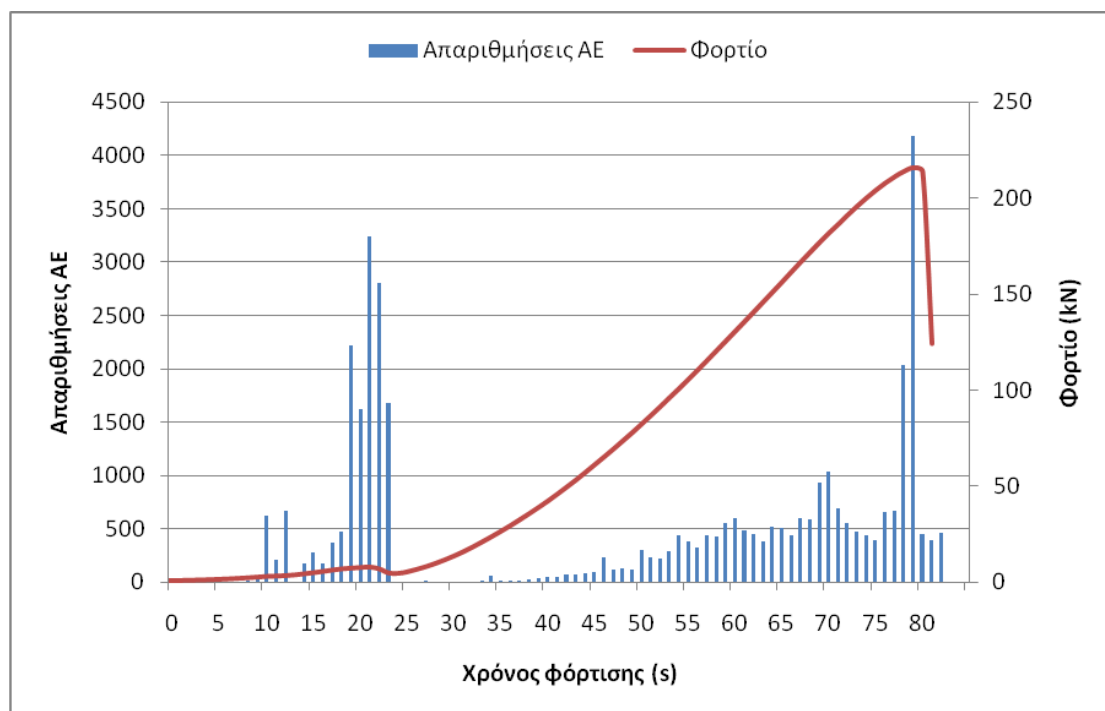


Σχήμα 4.7 Πλάτος ΑΕ – Χρόνος φόρτισης

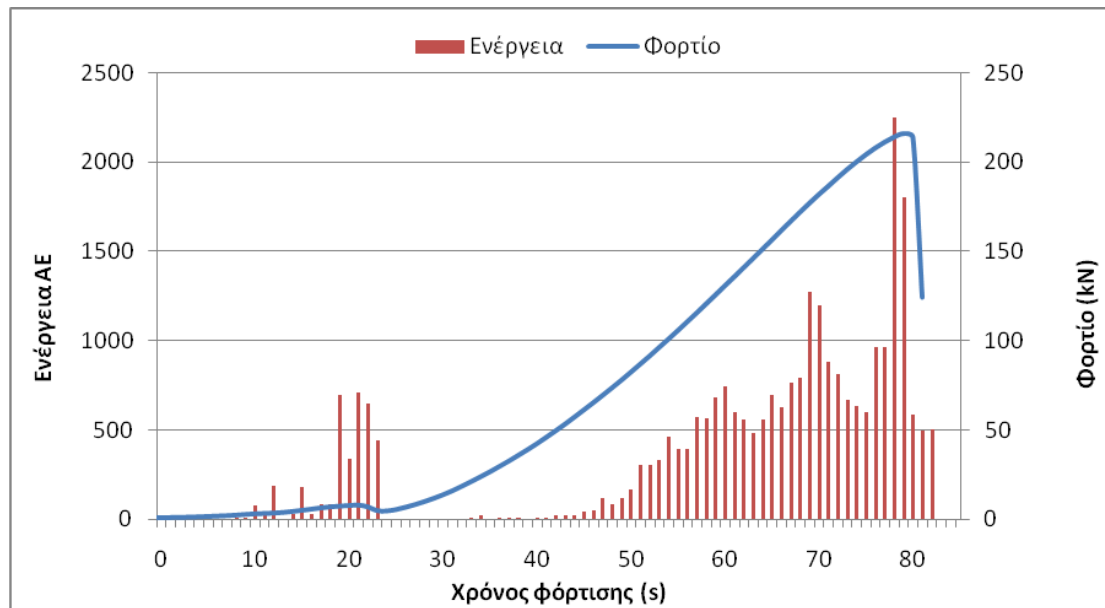


Σχήμα 4.8 Αποκόλληση 1 και 2 (Α) κάτωψη θραυσμένου δοκιμίου

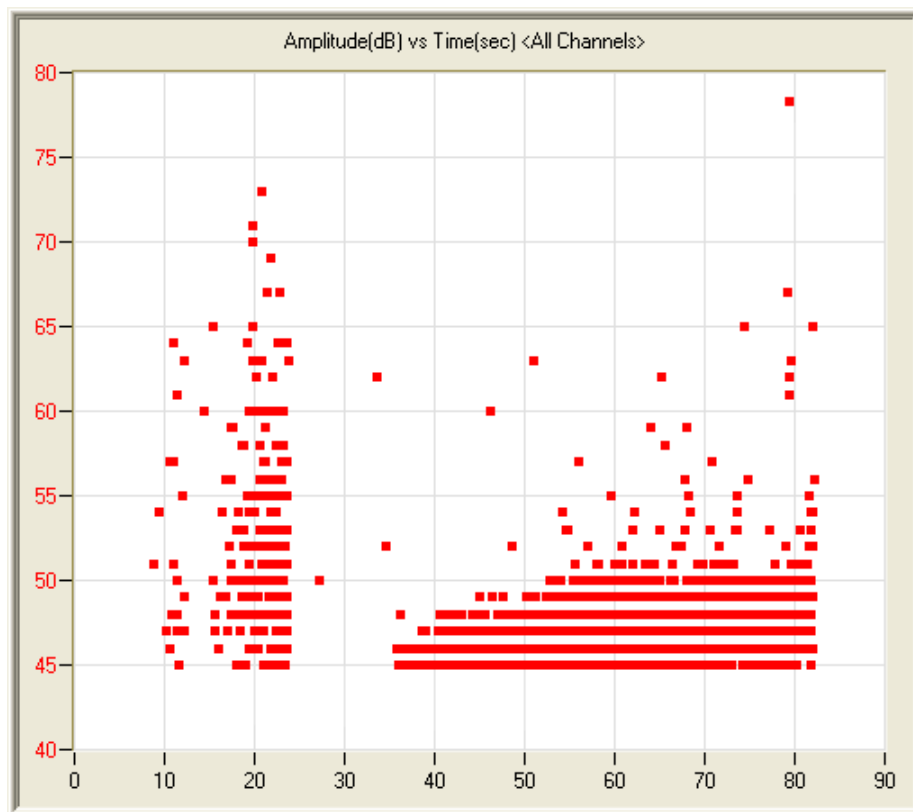
Στα διαγράμματα που ακολουθούν διαπιστώνονται δυο αστοχίες του δοκιμίου η μία στην αρχή της δοκιμής (2, Σχήμα 4.8) με ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας και υπερβάσεων του κατώτατου ορίου ΑΕ και η δεύτερη το σημείο αστοχίας του δοκιμίου.



Σχήμα 4.9 Απαριθμήσεις ΑΕ – Χρόνος φόρτισης – Φορτίο



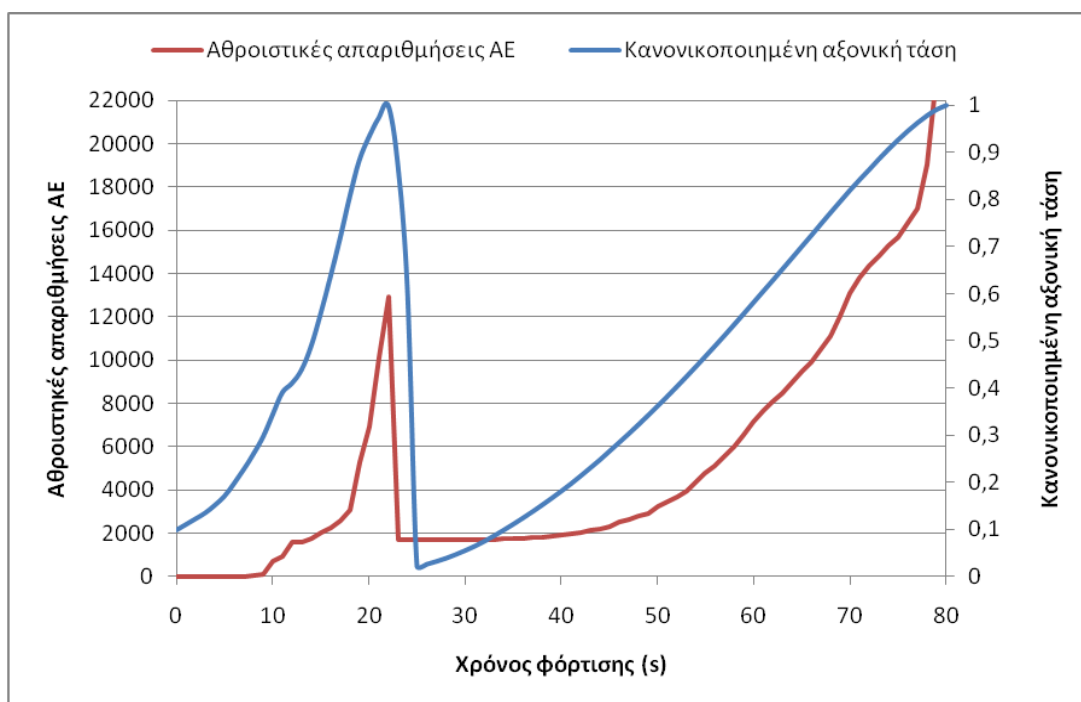
Σχήμα 4.10 Ενέργεια – Χρόνος φόρτισης – Φορτίο



Σχήμα 4.11 Πλάτος σήματος ΑΕ – Χρόνος

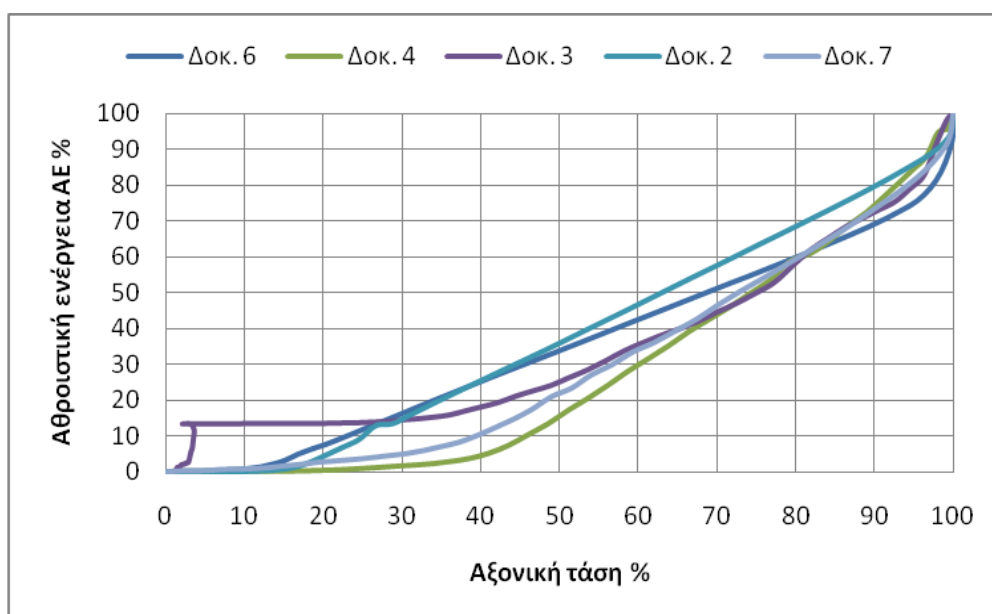
Δίνονται τα διαγράμματα αθροιστικών απαριθμήσεων ακουστικών εκπομπών (κόκκινη γραμμή) και κανονικοποιημένων τιμών αξονικής τάσης (μπλε γραμμή) σε σχέση με το χρόνο, ξεχωρίζοντας την δοκιμή σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις που η δεύτερη ακολουθεί της πρώτης. Παρατηρείται ότι και στις δύο στιγμές αστοχίας αυξάνονται οι απαριθμήσεις ΑΕ. Στην πρώτη περίπτωση καταγράφηκαν 9000 αθροιστικές απαριθμήσεις ΑΕ από το 80% μέχρι την πρώτη αδυναμία. Ενώ στο διάστημα 0.8 μέχρι την αστοχία του υλικού καταγράφηκαν το

35% των αθροιστικών απαριθμήσεων (Σχήμα 4.12). Εν συγκρίσει των σχημάτων 4.12 και 4.11 επισημαίνεται ότι την στιγμή αστοχίας καταγράφεται μέγιστο πλάτος ακουστικών σημάτων 78dB.

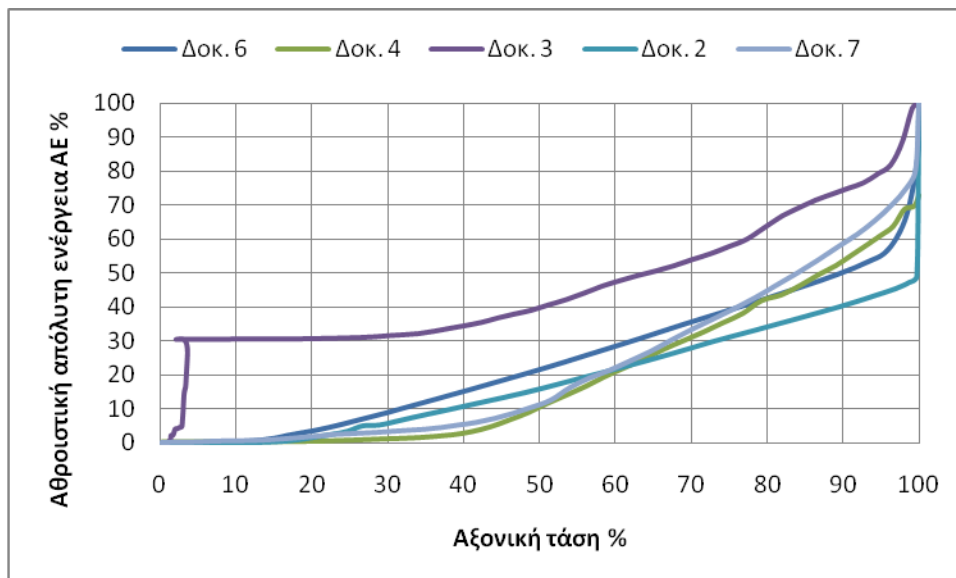


Σχήμα 4.12 Αθροιστικές απαριθμήσεις ΑΕ – Χρόνος φόρτισης – Κανονικοποιημένη αξονική τάση

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την εκδήλωση της αστοχίας κατά τη διαδικασία της φόρτισης μπορεί να καθοριστεί με δύο τρόπους, από ακριβείς ή απλουστευμένες προσεγγίσεις. Το σύστημα καταγραφής παρουσιάζει την μετρούμενη από τους αισθητήρες εκλυόμενη ενέργεια και απόλυτη ενέργεια.

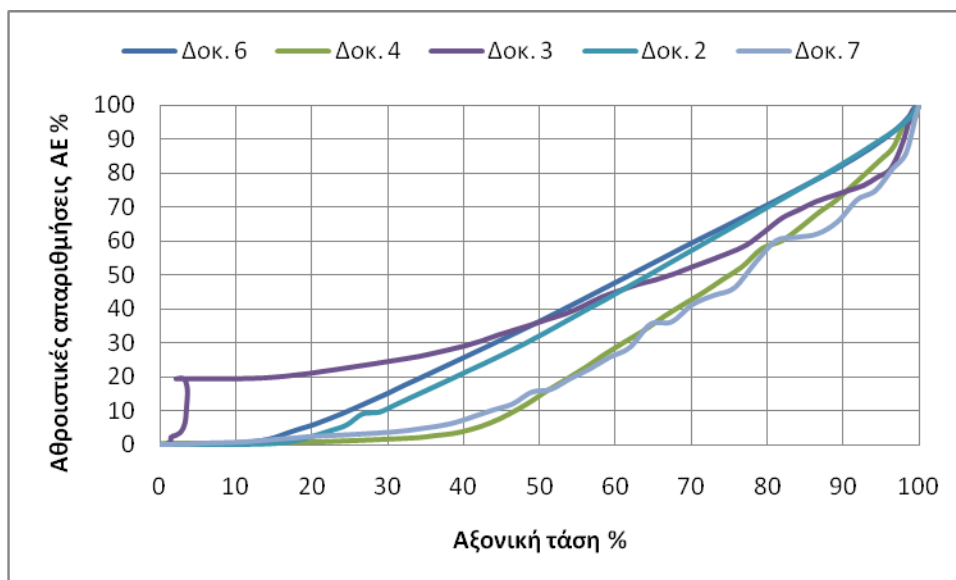


Σχήμα 4.13 Αθροιστική ενέργεια ΑΕ % - Αξονική τάση %



Σχήμα 4.14 Αθροιστική απόλυτη ενέργεια ΑΕ % - Αξονική τάση %

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η εμφάνιση εκλυόμενης ενέργειας στο 20% περίπου της αξονικής επιβαλλόμενης τάσης, με εξαίρεση την δοκιμή που μόλις στο 5% της συνολικής επιβαλλόμενης τάσης παρουσιάστηκε μια αδυναμία του δοκιμίου. Η σχεδόν γραμμική αυξανόμενη τάση των τιμών της απόλυτης ενέργειας καταγράφεται μέχρι το 95% του φορτίου, ενώ μια απότομη αύξηση της κλίσης της καμπύλης παρατηρείται μετά το 98%. Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα ενέργειας (Σχήμα 4.13) η αλλαγή της κλίσης γίνεται στο 90% - 95% και δεν είναι τόσο απότομη.



Σχήμα 4.15 Αθροιστικές απαριθμήσεις ΑΕ % – Αξονική τάση %



## 4.3 ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

### 4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη μηχανική των πετρωμάτων συνήθως αντιμετωπίζονται περίπλοκα πεδία τάσεων, θλιπτικών και εφελκυστικών, όπως στην όρυξη ανοιγμάτων που καθιστά επιθυμητό τον προσδιορισμό της αντοχής του ακέραίου πετρώματος σε εφελκυσμό. Πειραματικά ο προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό επιτυγχάνεται είτε με άμεση δοκιμή σε κυλινδρικό δοκίμιο είτε με έμμεση δοκιμή σε μικρού ύψους κυλινδρικό δοκίμιο.

Μια συνήθης απλοποίηση της δοκιμής είναι η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης, ή δοκιμή Brazilian, η οποία προσφέρει επιθυμητά αποτελέσματα και είναι ευκολότερη. Η δοκιμή βασίζεται στην πειραματική παρατήρηση ότι τα περισσότερα πετρώματα που βρίσκονται σε δισδιάστατα εντατικά πεδία αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι θλιπτική και η δεύτερη κύρια τάση εφελκυστική και μεγαλύτερη από το ένα τρίτο της θλιπτικής (Αγιουτάνης, 2002).

- ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Από το αρχικό κυλινδρικό δοκίμιο που εξάγεται από τον όγκο μαρμάρου κόβονται στο κατάλληλο μήκος τα δοκίμια για την αντιδιαμετρική θλίψη στο δισκοπρίονο. Η μορφή των δοκιμίων είναι μικροί κύλινδροι με διάμετρο ίση με NX, δηλαδή 54 mm και το ύψος τους περίπου ίσο με την ακτίνα τους. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας μόνο καθαρό νερό στα κοπτικά και λειαντικά εργαλεία, με ανοχή στις λείες επιφάνειες 0.025mm (Αγιουτάνης, 2002).

- ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Το φορτίο κατά την διάρκεια της δοκιμής πρέπει να επιβάλλεται με ρυθμό φόρτισης περίπου 200 N/s, χωρίς διακοπές.

Πριν από κάθε δοκιμή επικαλύπτεται το δοκίμιο με χαρτοταινία στην παράπλευρη επιφάνεια του και τοποθετείται στις σιαγόνες με τον επιθυμητό προσανατολισμό ώστε να ταυτίζεται ο άξονας συμμετρίας δοκιμίου και των σιαγόνων (Αγιουτάνης, 2002).

### 4.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στα πειράματα αντιδιαμετρικής θλίψης χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά υλικά σύζευξης. Στην πρώτη ομάδα δοκιμών χρησιμοποιήθηκε κοινή βαζελίνη (1A – 6A) και στη δεύτερη ομάδα θερμαινόμενη σιλικόνη (1B – 7B).

Και στις δύο περιπτώσεις ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στο κέντρο του κυκλικού δίσκου. Στην ομάδα Β χρησιμοποιήθηκε η θερμαινόμενη σιλικόνη με επιτυχία, καθώς σε καμία δοκιμή δεν αποσυγκολλήθηκε ο αισθητήρας. Πάντα πριν από κάθε τεστ κάναμε τη δοκιμή PLB (Σχήμα 4.16).



Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα δοκιμών αντιδιαμετρικής θλίψης

|            | Ύψος (cm) | Διάμετρος (cm) | Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa) | Διάρκεια δοκιμής (s) |
|------------|-----------|----------------|---------------------------|----------------------|
| Δοκίμιο 1A | 2,950     | 5,208          | 4,4                       | 49                   |
| Δοκίμιο 2A | 2,877     | 5,212          | 5,7                       | 74                   |
| Δοκίμιο 3A | 2,845     | 5,200          | 4,9                       | 64                   |
| Δοκίμιο 4A | 2,955     | 5,203          | 4,6                       | 57                   |
| Δοκίμιο 5A | 2,893     | 5,198          | 5,0                       | 74                   |
| Δοκίμιο 6A | 2,880     | 5,190          | 6,1                       | 82                   |
| Δοκίμιο 1B | 2,952     | 5,205          | 6,6                       | 105                  |
| Δοκίμιο 2B | 2,767     | 5,198          | 7,2                       | 86                   |
| Δοκίμιο 3B | 2,742     | 5,197          | 4,7                       | 60                   |
| Δοκίμιο 4B | 2,748     | 5,203          | 6,0                       | 71                   |
| Δοκίμιο 5B | 2,945     | 5,197          | 5,8                       | 83                   |
| Δοκίμιο 6B | 2,942     | 5,195          | 4,4                       | 68                   |
| Δοκίμιο 7B | 2,920     | 5,195          | 5,0                       | 63                   |

Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό εκτιμάται από τον τύπο:

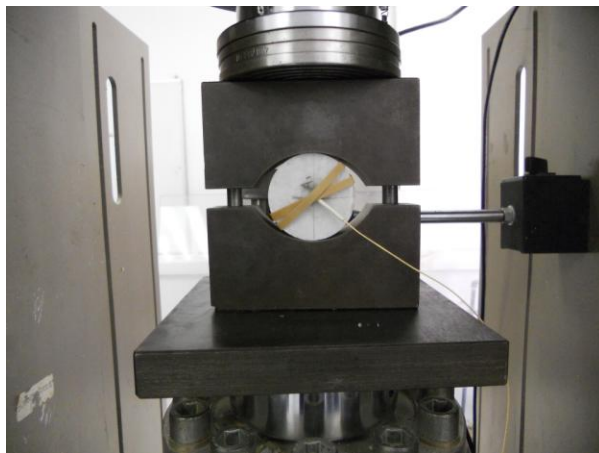
- $\sigma_t = 2P/\pi Dt$ ,

όπου  $\sigma_t$  = αντοχή σε εφελκυσμό, MPa

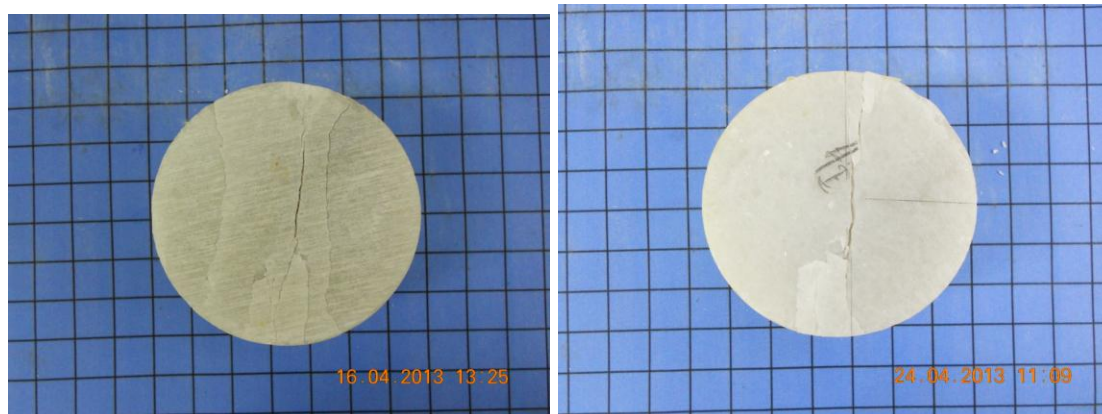
P = μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο που κατέγραψε η μηχανή φόρτισης, N

t = πάχος του δοκιμίου, m

D = διάμετρος του δοκιμίου, m



Σχήμα 4.16 Πειραματική διάταξη για την ομάδα δοκιμίων A και B

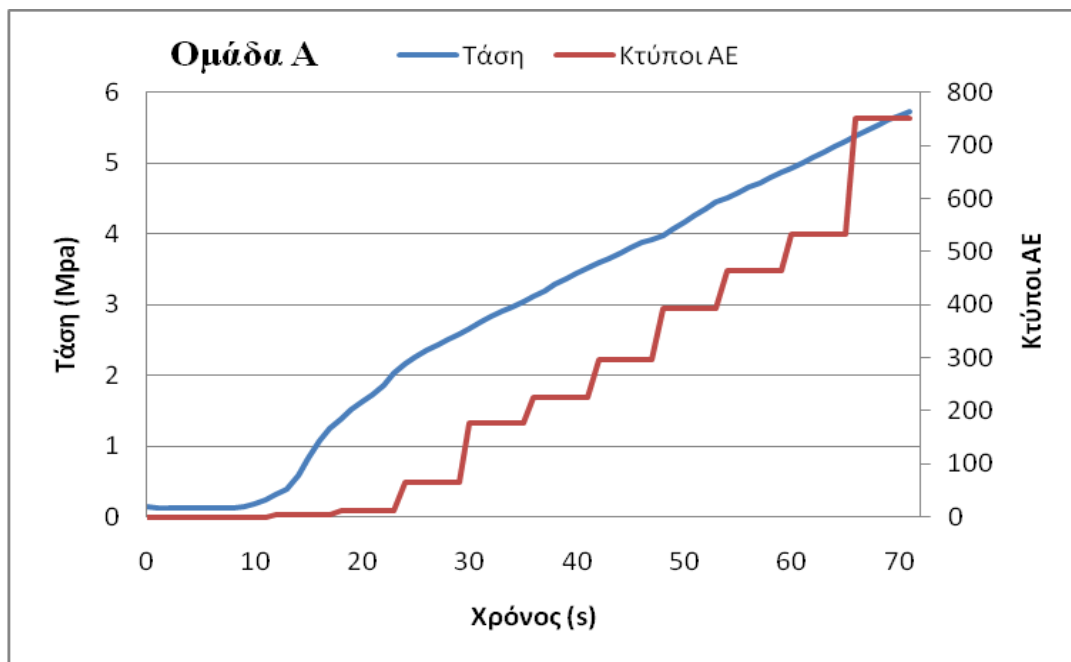


Σχήμα 4.17 Μπροστά και πίσω όψη θραυσμένων δοκιμίων

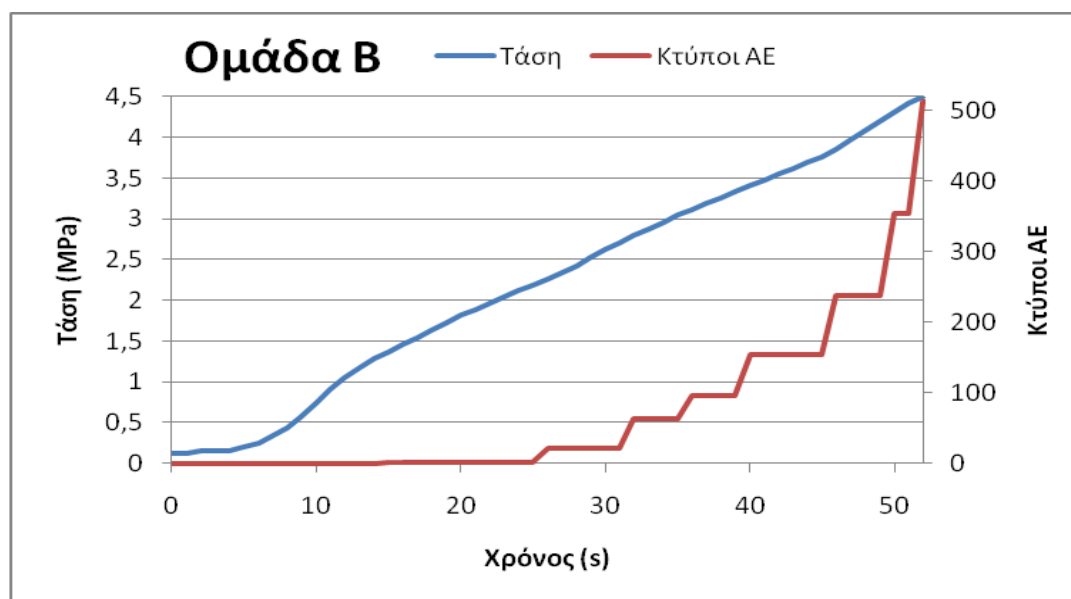


Σχήμα 4.18 Κάτοψη δοκιμίου μετά την δοκιμή

Στα δοκίμια αντισυμμετρική θλίψης διαπιστώθηκε η εμφάνιση μεγαλύτερης ρωγμάτωσης και αποκόλλησης κομματιών στο πίσω μέρος τους (Σχήμα 4.18).

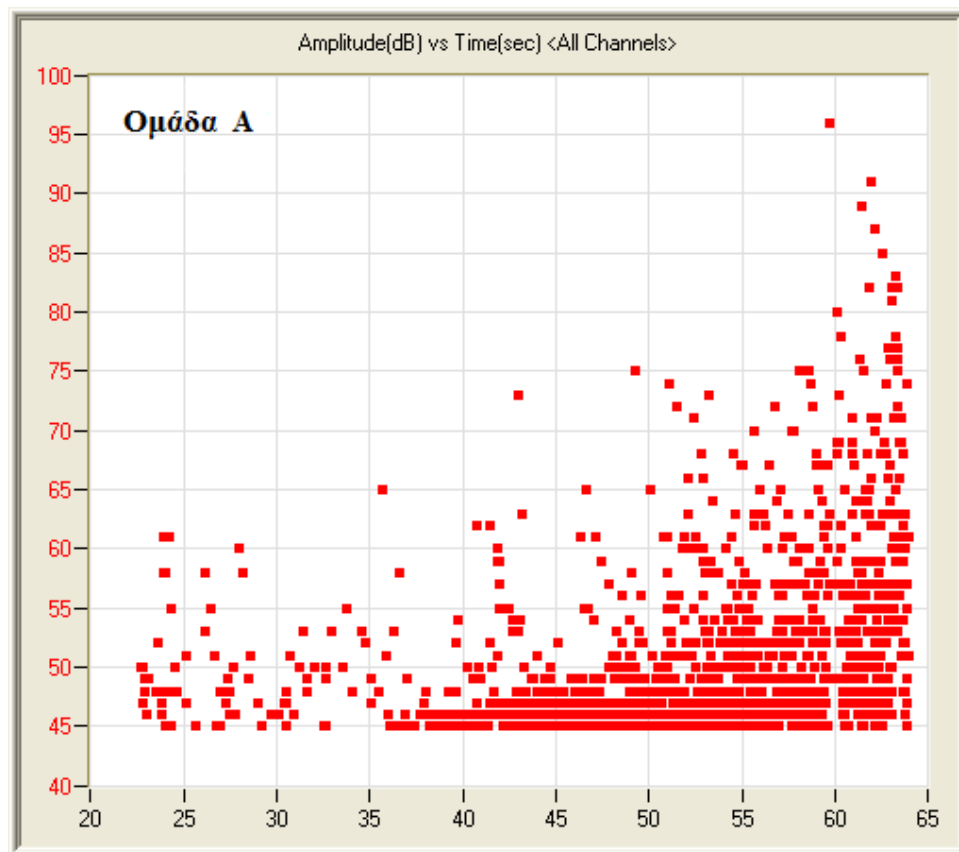


Σχήμα 4.19 Τάση – Χρόνος φόρτισης –Κτύποι ΑΕ

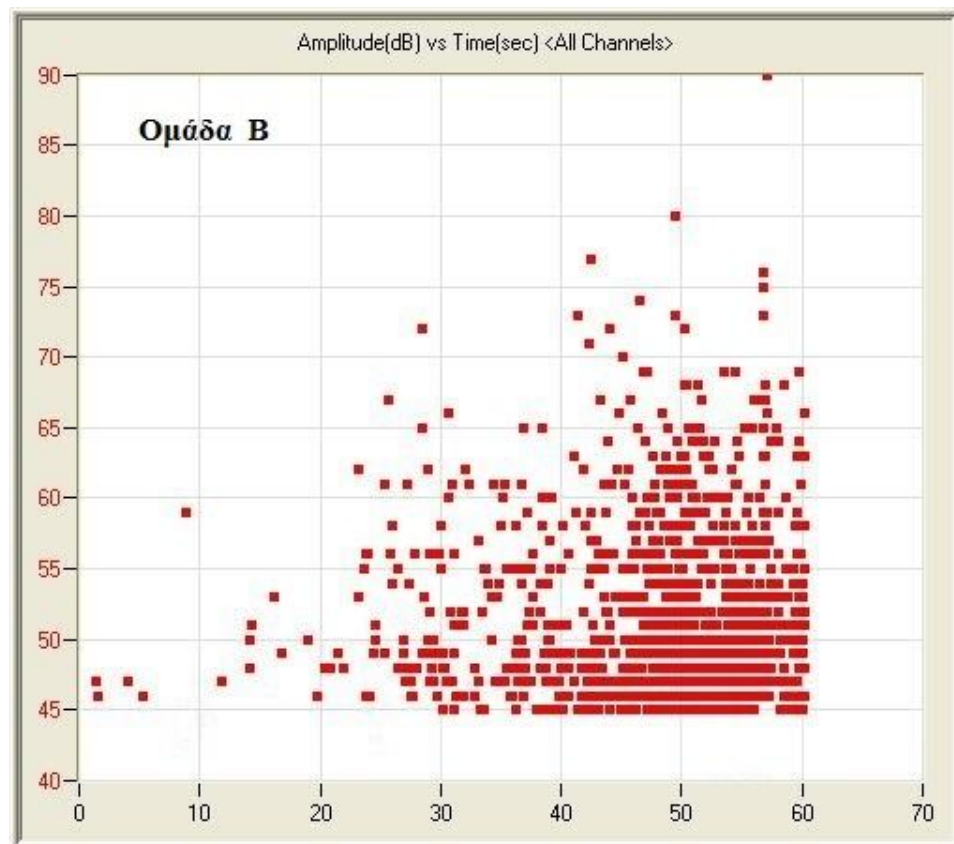


Σχήμα 4.20 Τάση – Χρόνος φόρτισης – Κτύποι ΑΕ

Στα διαγράμματα 4.19 και 4.20 απεικονίζονται οι κτύποι ΑΕ σε σχέση με την τάση μέχρι τη στιγμή αστοχίας των δοκιμών παρατηρείται αύξηση δραστηριότητας εκπομπής τους καθώς η δοκιμή πλησιάζει στο κρίσιμο σημείο, καθώς και αύξηση του πλάτους σήματος στα 96dB και 90dB στις αντίστοιχες ομάδες δοκιμών (Σχήμα 4.19, 4.20, 4.21 και 4.22).

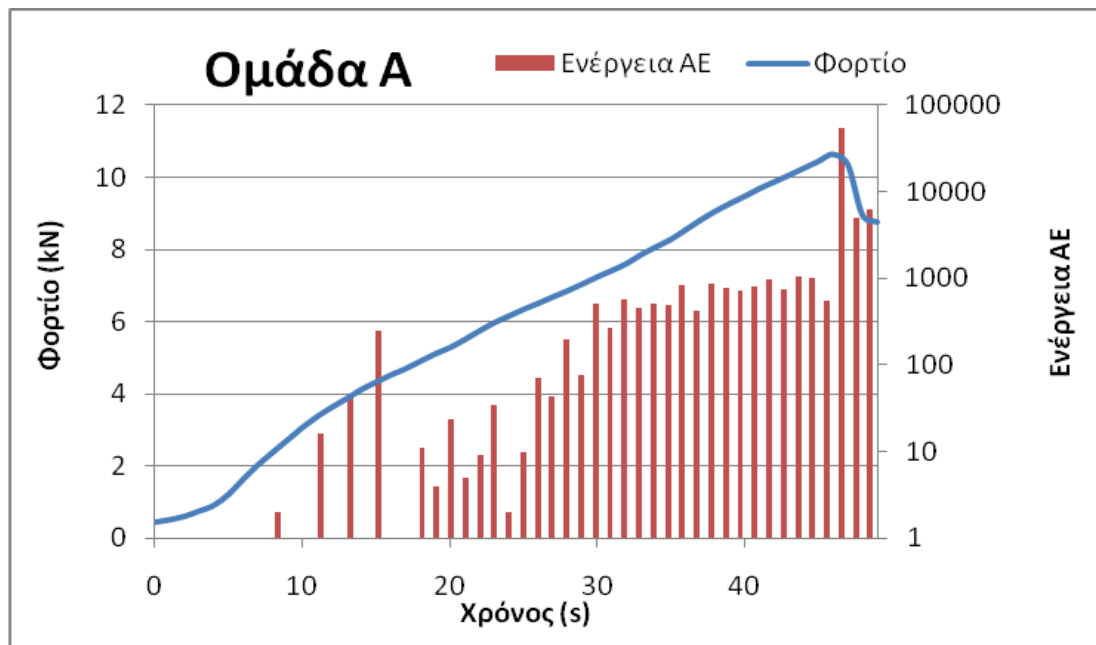


Σχήμα 4.21 Πλάτος σήματος – Χρόνος φόρτισης

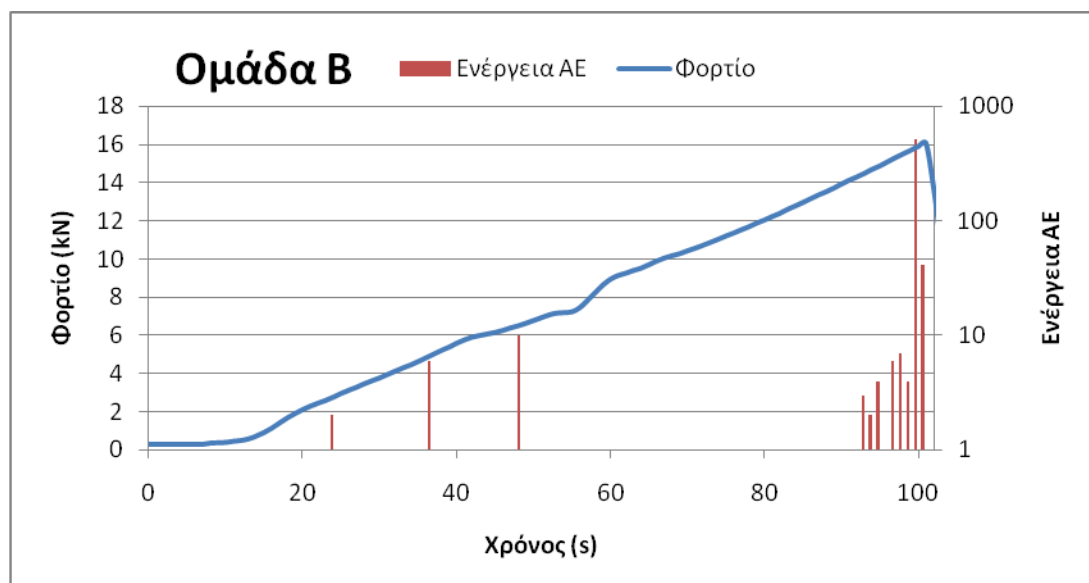


Σχήμα 4.22 Πλάτος σήματος – Χρόνος φόρτισης

Στα διαγράμματα του σχήματος 4.23 και 4.24 απεικονίζεται η εκλυόμενη ενέργεια κατά την διάρκεια φόρτισης στα δοκίμια της ομάδας Α και Β, είναι σε λογαριθμική κλίμακα λόγω της μεγάλης διαφοράς των τιμών κοντά στη περιοχή θραύσης. Αυτή η διαφορά είναι ακόμα μεγαλύτερη στην ομάδα Β καθώς το σύνολο των τιμών καταγράφεται στα τελευταία 10 δευτερόλεπτα.



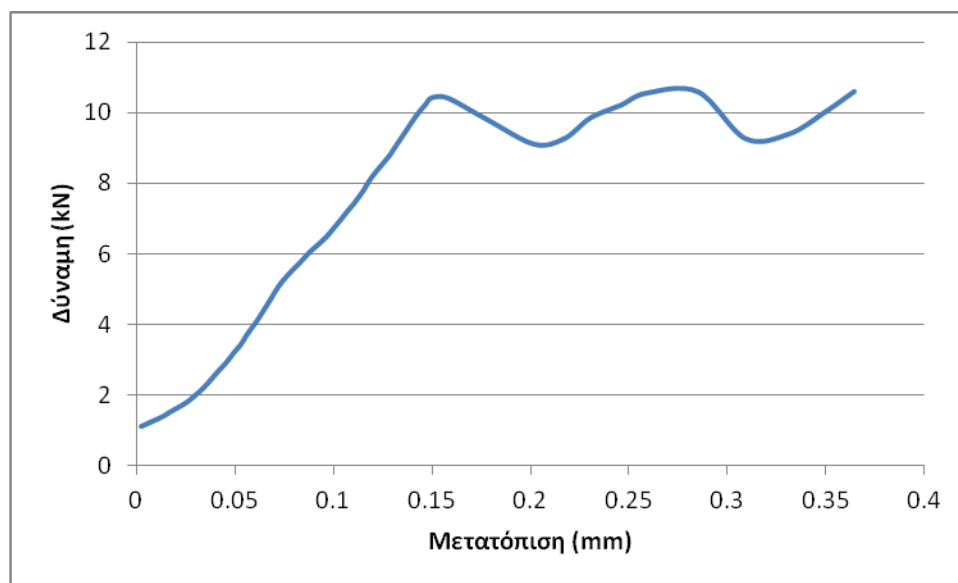
Σχήμα 4.23 Φορτίο – Χρόνος δοκιμής – Ενέργεια



Σχήμα 4.24 Φορτίο – Χρόνος δοκιμής – Ενέργεια

Στα σχήματα 4.26, 4.28, 4.30, 4.32, 4.34 απεικονίζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των δοκιμίων της ομάδας Α και στα σχήματα 4.27, 4.29, 4.31, 4.33, 4.35 τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της ομάδας Β με τα χαρακτηριστικά των ακουστικών εκπομπών σε σχέση με την ποσοστιαία αρελκυστική τάση μέχρι τη στιγμή της αστοχίας.

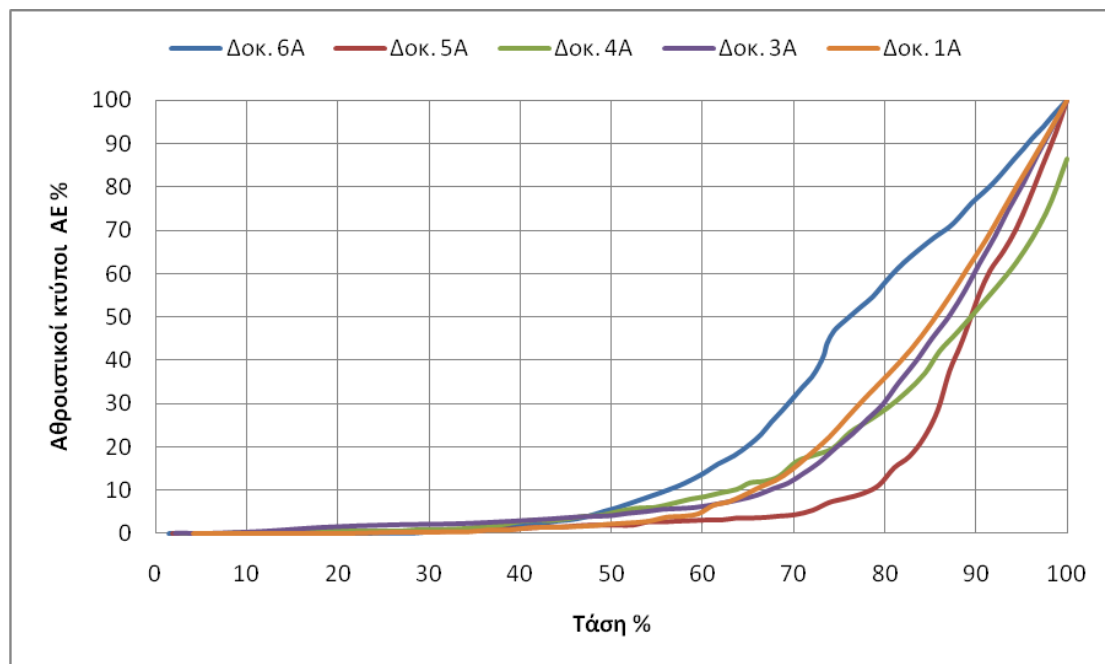
Για την ομάδα Α, που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό σύζευξης η βαζελίνη, παρατηρείται ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων το 30% των καταγραφέντων χαρακτηριστικών των ΑΕ εκλύεται μέχρι το 70% της επιβαλλόμενης τάσης. Επίσης από το 85% της εφελκυστικής τάσης μέχρι τη στιγμή της αστοχίας καταγράφεται το 50% των καταγεγραμμένων Κτύπων ΑΕ και σε ποσοστό 90% - 95% στα διαγράμματα απόλυτης ενέργειας παρατηρείται απότομη αλλαγή της καμπύλης, σημάδι επερχόμενης αστοχίας.



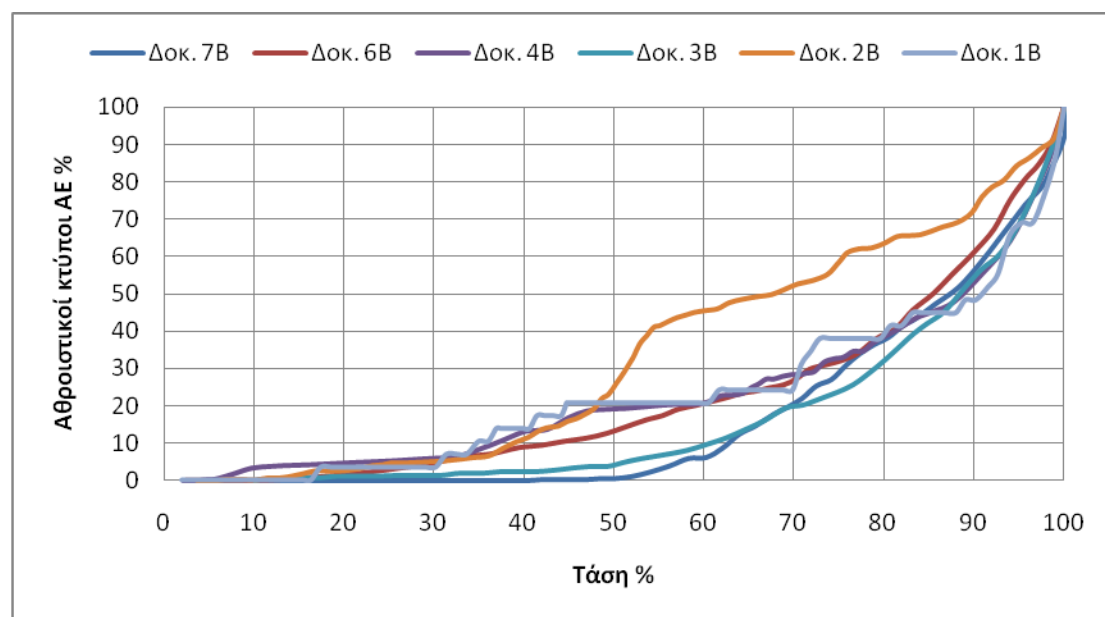
Σχήμα 4.25 Δύναμη – Μετατόπιση

Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης υπάρχει η πιθανότητα το δοκίμιο να συνεχίσει να δέχεται φορτίο, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μεγαλύτερο από το προηγούμενο, ενώ έχει αστοχήσει σε εφελκυσμό και το δοκίμιο καταπονείται σε θλίψη. Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στο σχήμα 4.25 όπου διαπιστώνεται η αστοχία του δοκιμίου στα 10,4 kN και μετατόπιση 0,15 mm. Σε τέτοιες περιπτώσεις απομονώνονται τα δεδομένα μέχρι την αστοχία σε εφελκυσμό καθώς δεν μπορούν να επεξεργαστούν οι καταγραφές που ακολουθούν, αφού δεν δύναται να προσδιορισθεί η γεωμετρία του υλικού.

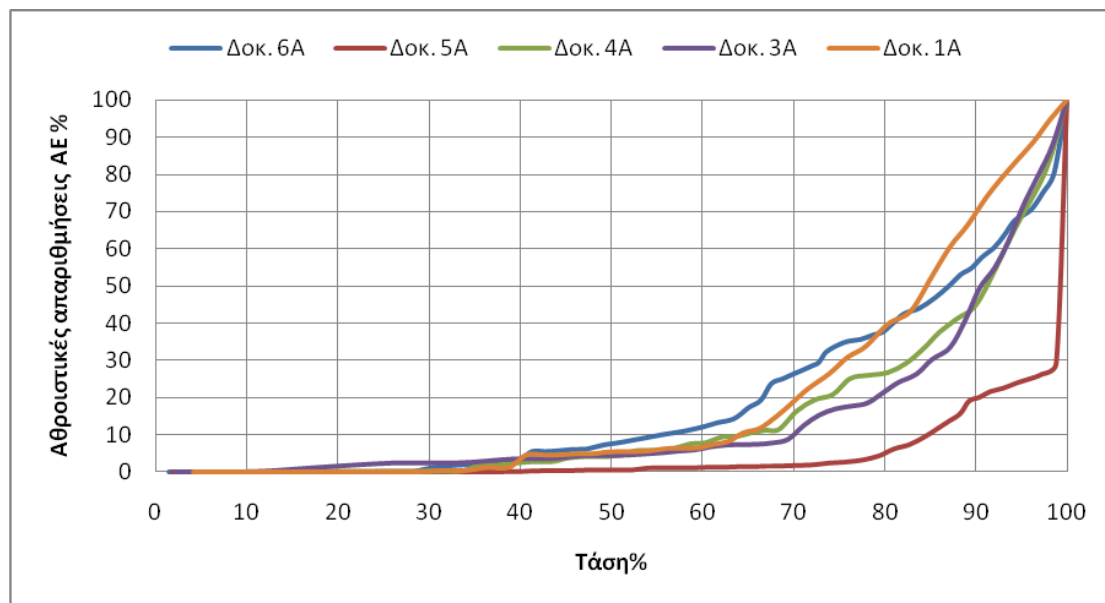
Στις δοκιμές της ομάδας Β κατά μέσο όρο το 40% των κτύπων ΑΕ εκλύεται μέχρι το 80% της αξονικής τάσης και από το 85-90% αλλάζει η κλίση της καμπύλης εκλύοντας το 60% των κτύπων ΑΕ που καταγράφηκαν. Παρόμοια δειγματοληψία παρουσιάζουν και οι υπόλοιπες παράμετροι των ακουστικών εκπομπών, αυξάνοντας τα ποσοστά εκλυόμενης ενέργειας στην επερχόμενη μακροσκοπική αστοχία πάνω από το 70% στο ίδιο διάστημα επιβαλλόμενης τάσης.



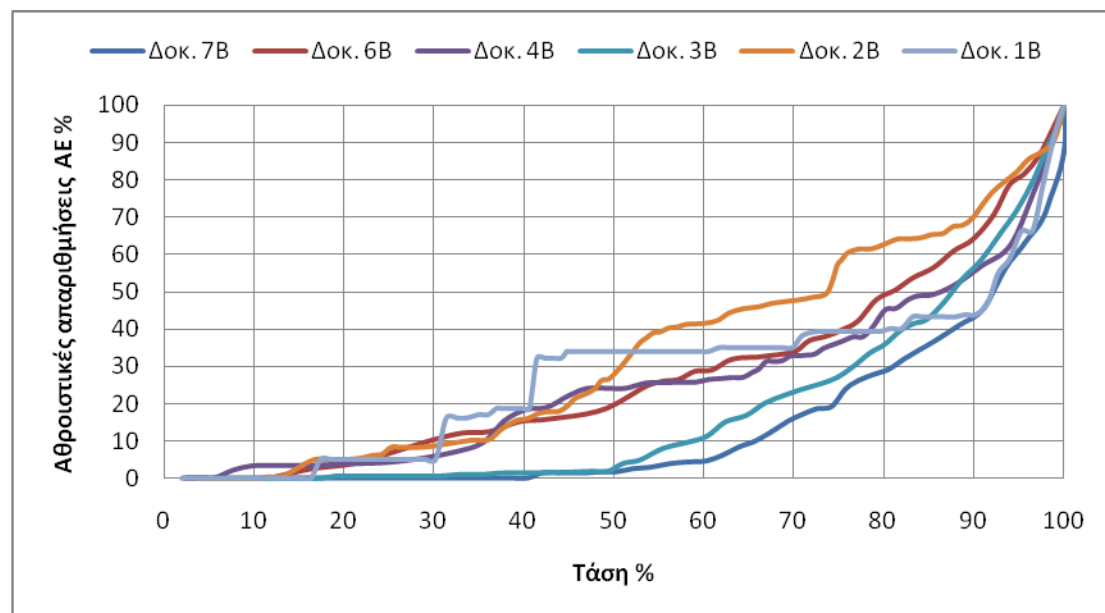
Σχήμα 4.26 Αθροιστικοί κύττοι ΑΕ % - Τάση % (ΟΜΑΔΑ Α)



Σχήμα 4.27 Αθροιστικοί κύττοι ΑΕ % - Τάση % (ΟΜΑΔΑ Β)

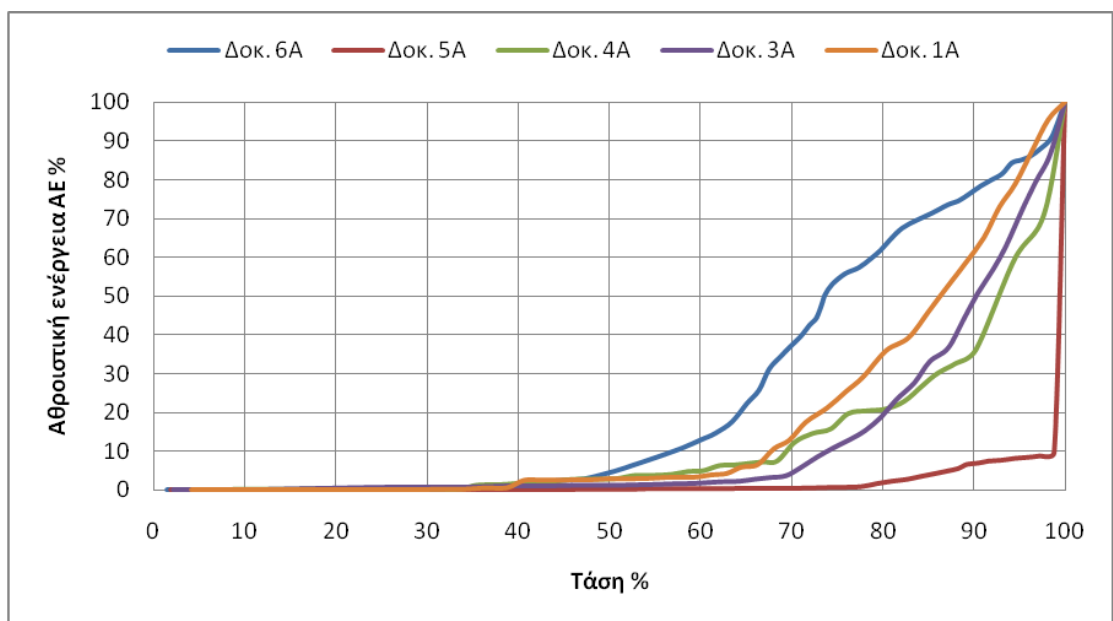


Σχήμα 4.28 Αθροιστικές απαριθμήσεις ΑΕ % - Τάση % (ΟΜΑΔΑ Α)

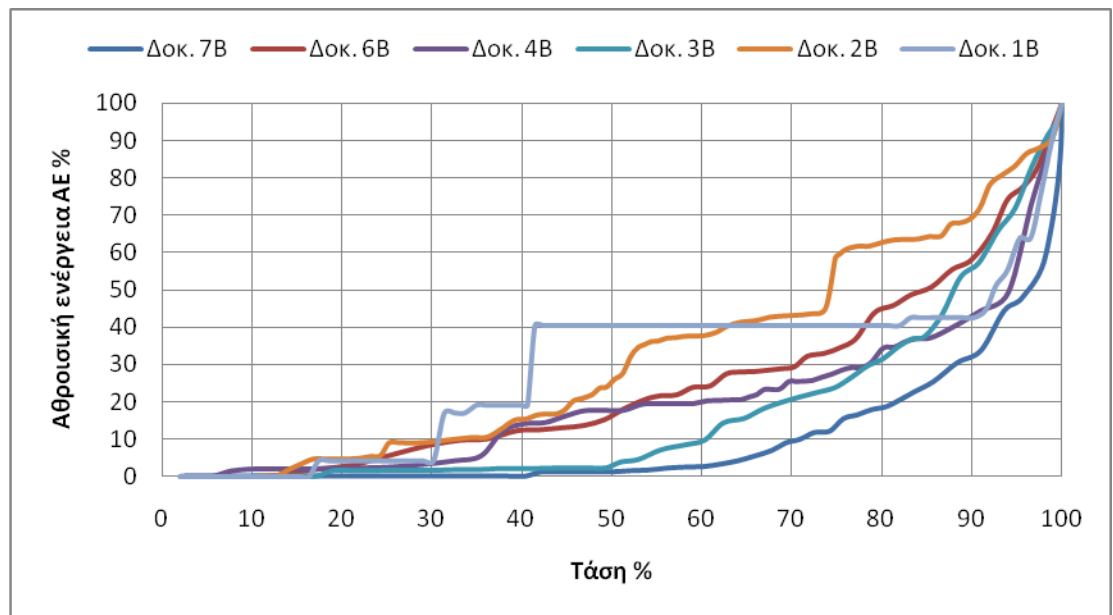


Σχήμα 4.29 Αθροιστικές απαριθμήσεις ΑΕ % - Τάση % (ΟΜΑΔΑ Β)

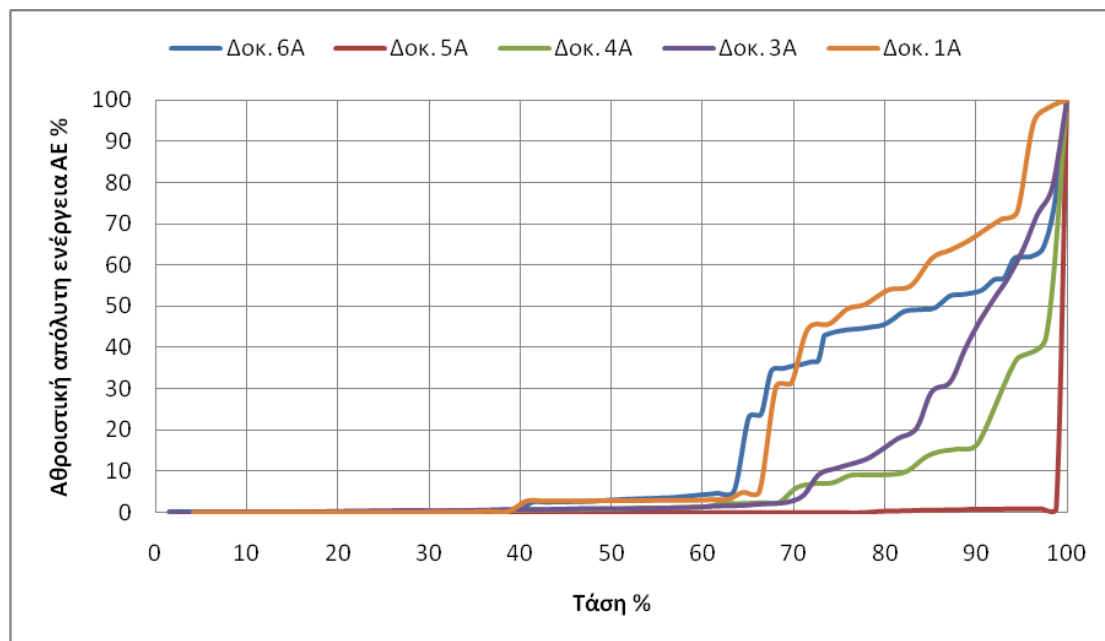




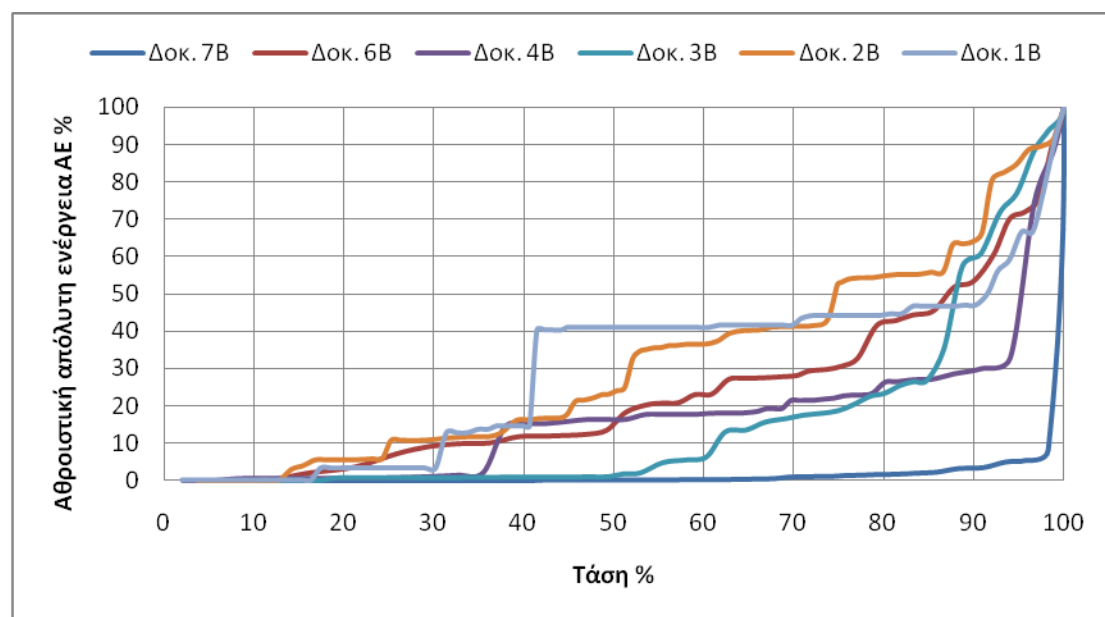
Σχήμα 4.30 Αθροιστική ενέργεια ΑΕ % - Τάση % (ΟΜΑΔΑ Α)



Σχήμα 4.31 Αθροιστική ενέργεια ΑΕ % - Τάση % (ΟΜΑΔΑ Β)



Σχήμα 4.32 Αθροιστική απόλυτη ενέργεια ΑΕ % - Τάση % (ΟΜΑΔΑ Α)



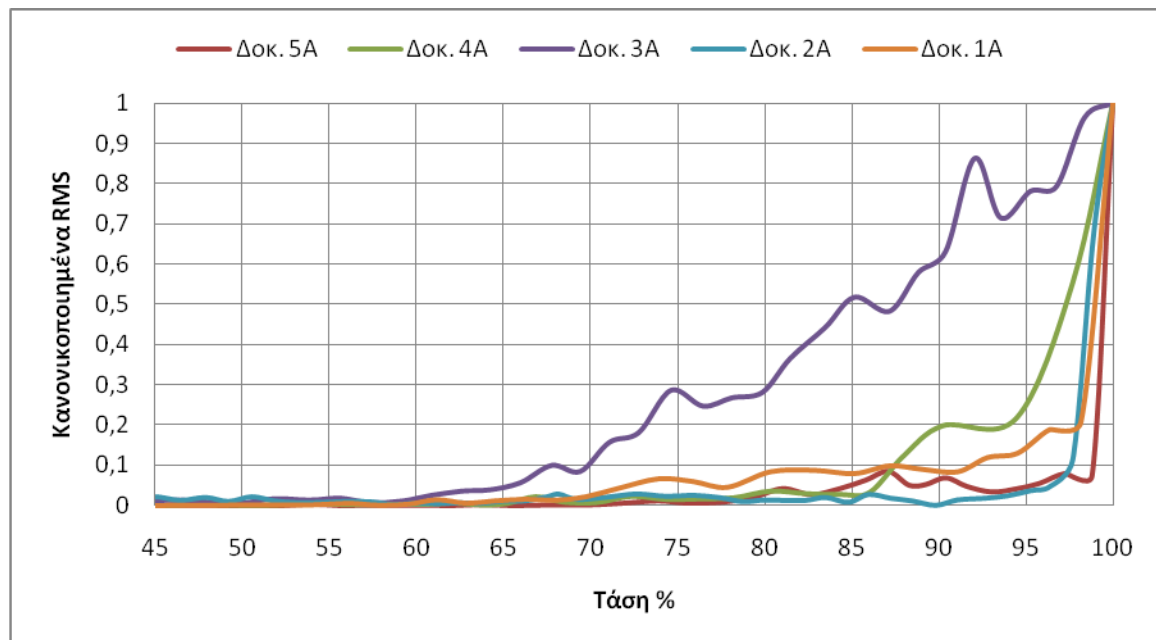
Σχήμα 4.33 Αθροιστική απόλυτη ενέργεια ΑΕ % - Τάση % (ΟΜΑΔΑ Β)

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η ενέργεια που απελευθερώνεται από την εκδήλωση της αστοχίας κατά την διαδικασία φόρτισης μπορεί να καθοριστεί είτε από ακριβείς είτε από απλουστευμένες προσεγγίσεις. Μια απλουστευμένη μέτρηση της ενέργειας που απελευθερώνεται αποτελεί η τιμή RMS.

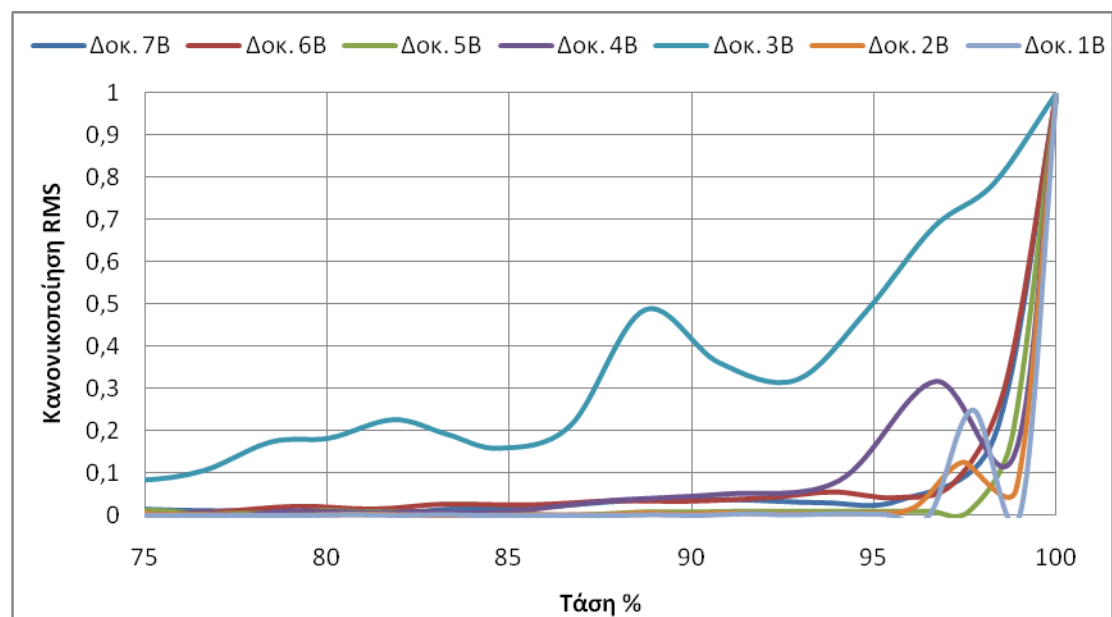
Στα γραφήματα των ανοιγμένων τιμών RMS που ακολουθούν παρατηρείται ότι μέχρι το 95% της τάσης λαμβάνονται τιμές έως 0,2 και απότομη αύξηση της κλίσης της καμπύλης μέχρι την επερχόμενη αστοχία.

Στα δοκίμια και των δύο ομάδων, παρατηρείται ότι το RMS λαμβάνει κανονικοποιημένες τιμές μέχρι 0,1 κοντά στο 95%, στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα μέγιστο που ακολουθείται

από πολύ μικρές τιμές και τέλος απότομη αλλαγή της κλίσης της καμπύλης αμέσως μετά, έως την μέγιστη τιμή στην αστοχία σε εφελκυσμό. Αυτή η παρατήρηση θα μπορούσε να αξιολογηθεί ως ένδειξη επερχόμενης αστοχίας του δοκιμίου.



Σχήμα 4.34 Κανονικοποιημένα RMS – Τάση % (ΟΜΑΔΑ Α)



Σχήμα 4.35 Κανονικοποιημένα RMS – Τάση % (ΟΜΑΔΑ Β)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το θεωρητικό και το πειραματικό μέρος της εφαρμογής της τεχνικής της Ακουστικής Εκπομπής κατά τις δοκιμές αντοχής δοκιμίων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ΑΕ ως Μέθοδος Μη Καταστροφικού Ελέγχου αποτελεί ένα ισχυρό μέσο για τον γρήγορο και αποτελεσματικό απολογισμό της δομικής ακεραιότητας γεωλογικών δομών και κατασκευών σε πραγματικό χρόνο. Συνίσταται για την μελέτη της συμπεριφοράς αστοχίας τους υπό μηχανική καταπόνηση.
- Από τα γραφήματα των κανονικοποιημένων τιμών του RMS με το ποσοστό της αξονικής τάσης γίνεται εμφανής η αυξανόμενη τάση των τιμών RMS, με την απότομη αύξηση των τιμών της παραμέτρου να εμφανίζεται την στιγμή όπου επέρχεται η μακροσκοπική αστοχία, όπου και εμφανίζεται μεγάλη απελευθέρωση ενέργειας.
- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα όσον αφορά το μέγιστο πλάτος σήματος και το πλήθος των κτύπων των Ακουστικών Εκπομπών για την ομάδα Α, που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό σύζευξης η βαζελίνη με την ομάδα Β με υλικό σύζευξης η θερμαινόμενη σιλικόνη παρατηρείται ισχυρότερο σήμα κατά 5-10dB σε κάθε μέτρηση. Επίσης διαπιστώνεται μικρότερη καταγραφή Κτύπων Ακουστικών Εκπομπών στην αρχή των καταγραφών και πιο απότομη αύξησή της κατά τη διάρκεια εκδήλωσης της αστοχίας. Το γεγονός αυτό μας βοηθάει στην έγκαιρη προειδοποίηση της επερχόμενης αστοχίας.
- Από την καταγραφή των τιμών ενέργειας και απόλυτης ενέργειας κατά την διάρκεια εκτέλεσης των δοκιμών αντιδιαμετρικής και μονοαξονικής θλίψης παρατηρήθηκε ότι οι τιμές τους αυξάνονται με το επιβαλλόμενο φορτίο και μάλιστα καθώς επέρχεται η ρωγμάτωση η αύξηση της Ακουστικής Εκπομπής είναι ραγδαία. Επιπλέον, στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης η έκλυση ενέργειας συνεχίζει να αυξάνεται και μετά την εκδήλωση της ρωγμάτωσης, εξαιτίας της διάδοσης των ρωγμών στο υπόλοιπο πέτρωμα. Αντίθετα στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης το δοκίμιο διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια και το πείραμα τερματίζεται.
- Στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης δεν φαίνεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καταγραφή των κτύπων (Hits) ΑΕ για ένδειξη επερχόμενης αστοχίας, καθώς παρατηρείται αυξημένος αριθμός καταγραφών στην αρχή και στο τέλος της δοκιμής. Ενδεχομένως με την χρήση μεγαλύτερου αριθμού αισθητήρων να υπάρχουν επαρκέστερα αποτελέσματα για τον δείκτη των Hits των Ακουστικών Εκπομπών. Αντίθετα στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης γίνεται εμφανής η απότομη αύξηση των καταγραφών των κτύπων την στιγμή της αστοχίας.

## 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής και μονοαξονικής θλίψης που συνεχίστηκαν και μετά την αστοχία του δοκιμίου, παρατηρήθηκε η εμφάνιση μεγάλης απελευθέρωσης ενέργειας. Για τον λόγο αυτό προτείνεται η μελλοντική διερεύνηση για την εμφάνιση του φαινομένου Felicity, δηλαδή η εμφάνιση Ακουστικών Εκπομπών ενώ το επιβαλλόμενο φορτίο είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό που εφαρμόζοταν προηγουμένως, σε ψαθυρά υλικά.

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί μελλοντικά στη δημιουργία ενός δείκτη προειδοποίησης της επερχόμενης αστοχίας σε εργαστηριακά πειράματα μονοαξονικής αντοχής και έμμεσου εφελκυσμού, ο οποίος να υπολογίζεται με τη βοήθεια των δεδομένων που προκύπτουν από τις Ακουστικές Εκπομπές.

Με τη χρήση περισσότερων αισθητήρων και του κατάλληλου λογισμικού θα είναι δυνατή και η χωροθέτηση της έναρξης αστοχίας των δοκιμίων.

Επίσης προτείνεται η χρήση συστήματος αισθητήρων σε λατομεία μαρμάρου. Εάν η λειτουργία του δυσχεραίνεται από την τοποθέτηση και η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος, προτείνεται η χρήση του σε περιοχές υψηλού κινδύνου όπως μεγάλα ανοίγματα, διασταυρώσεις στοών, σε σημεία με οροφή χαμηλής αντοχής.

Τέλος συνίσταται η μελλοντική διερεύνηση του δείκτη απελευθέρωσης ενέργειας RMS ως δείκτη προειδοποίησης της επερχόμενης αστοχίας κατά την επιβολή θλιπτικού και εφελκυστικού φορτίου.

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγγελόπουλος Α., (2000). *Παραγωγή και κατεργασία Μαρμάρων – Προστασία εργαζομένων*, 2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Το Ελληνικό Μάρμαρο, Θεσσαλονίκη, 18 Φεβρουαρίου, σελ. 47-52
2. Αγιουτάντης Ζ., 2002. *Στοιχεία γεωμηχανικής: μηχανική πετρωμάτων*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
3. Εξαδάκτυλος Γ. Ε., 2005. *Σχεδιασμός συστημάτων υπόγειων έργων για την εκμετάλλευση μεταλλευτικών κοιτασμάτων*, Σημειώσεις μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χάνια.
4. Θεοδωρίκας Σ., 2002. *Ορυκτολογία – Πετρολογία*, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Χρυσούλα Σαουλή Ο.Ε. Γραφικές Τέχνες «Μέλισσα», 2<sup>η</sup> Έκδοση.
5. Καππάτος Β. (2007). *Μη καταστροφικός έλεγχος Μεταλλικών κατασκευών με Ψηφιακή Επεξεργασία σημάτων Ακουστικής Εκπομπής*, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Ιανουάριος 2007.
6. Κατσιογιάννης Π., Νομικός Π.Π. και Σοφιανός Α.Ι. (2007). *Ακουστική Εκπομπή στην μηχανική πετρωμάτων*, Ορυκτός Πλούτος, Τεύχος 145/ 2007.
7. Λασκαρίδης Κ., Παπαϊωάννου Ν. και Κουσέρης Ι., (2000). *Επιλογή των διακοσμητικών πετρωμάτων με κριτήριο τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες*, 2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Το Ελληνικό Μάρμαρο, Θεσσαλονίκη, 18 Φεβρουαρίου, σελ. 87-96.
8. Πολυκρέτη Κ., 1999. *Διερεύνηση προέλευσης και αυθεντικότητας αρχαίων μαρμάρινων μνημείων με φασματοσκοπία ηλεκτρονικού παραμαγνητικού συντονισμού και θερμοφωταύγεια*, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών Τμήμα φυσικής, από: <http://phdtheses.ekt.gr/eadd/>
9. Σοφιανός Α.Ι. και Νομικός Π.Π. (2008). *Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δ.Π.Μ.Σ / Σ.Κ.Υ.Ε., Οκτώμβριος 2008.

## ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ASTM (2004). *Standard Terminology for Nondestructive Examinations*. ASTM Designation: E1316.
2. Beatttie A.G., 1983. *Acoustic emission, principles and Instrumentation*. J. Acoustic Emission, 2(1-2): 95-128

3. Boyce GM, McCabe GM, Koerner RM (1981). *Acoustic emission signatures of various rock types in unconfined compression*. Proc Acoustic Emissions in Geotechnical Engineering Practice, ASTM STP 750, pp. 142-154.
4. Choudhury PB, Raina AK, Ramulu M, Chakraborty AK, Bandopadhyay C. (2004). *Crown pillar stability assessment in an underground copper mine using acoustic emission*. Paper 1B 07 – SINOROCK 2004 , Int J Rock Mech Min Sci, 41 (3).
5. Drouillard TF (1996). *A history of acoustic emission*. Journal of AE, 14 (1): 1-34.
6. Förster F, Scheil E (1936). *Akustische Untersuchung der Bildung von Martensitnadeln (Acoustic Study of the Formation of Martensile Needles)*. Zeitschrift für Metallkunde, 28(9): 245-247.
7. Grosse C.U. and Ohtsu M. (2008). *Acoustic Emission Testing, Basics for Research – Applications in Civil Engineering*. Springer, Berlin.
8. Hardy H.R.Jr. (2003). *Acoustic Emission/Microseismic Activity, Principles, Techniques and Geotechnical Application*, Vol. 1, the Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA, A.A. Balkema Publishers.
9. Iannacchione AT, Bajpayee TS, Edwards JL (2005). *Forecasting Roof Falls with Monitoring Technologies - A Look at the Moonee Colliery Experience* Proc 24th Int Conf Ground Control in Mining. Morgantown, West Virginia University, 44-51.
10. Iannacchione, A.T., Prosser, L.J., Grau III, R.H., Oyler, D.C., Dolinar, D.R., Marshall, T.E. and Compton, C.S. (2000). *Roof Monitoring Helps Prevent Injuries in Stone Mines*. *Mining Engineering*. November, 32-37.
11. Kaiser J (1950). *A study of acoustic phenomena in tensile tests*. Dr.-Ing. dissertation, Technical University of Munich.
12. Kaklis K., S. Maurigiannakis and Z. Agioutantis, *Comparison of acoustic signatures of rock specimens under uniaxial compression*, "ICCES'12: International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences", April 30 – May 4, 2012, Crete, Greece.
13. Kishinoue F (1990). *An experiment on the progression of fracture (A preliminary report)*. Jisin 6:24-31(1934) translated and published by Ono K, Journal of AE, 9(3): 177-180.
14. Lockner D. (1993). *The Role of Acoustic Emission in the Study of Rock Fracture*. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 30 (7), 883-899.
15. Mogi K. (1962). *Study of the Elastic Shocks Caused by the Fracture of Heterogeneous Materials and its Relation to Earthquake Phenomena*. Bulletin Earthquake Research Institute, Vol. 40, pp: 125–173.
16. Mukhopadhyay C. (2001). *Investigation of Acoustic Wave Attenuation as an Indication of Rock Mass Quality in Advancing Headings*. MSc Thesis, Dalhousie University, Canada.

17. Obert L (1977). *The microseismic method: Discovery and early history*. Proc. 1<sup>st</sup> Conference on AE/MS. In: Hardy Jr., Leighton F.W. (Eds) Geologic Structures and Materials. Trans Tech Publication, Clausthal, Germany.
18. Paterson M. S. and Wong T. (2005). *Experimental Rock Deformation - the Brittle Field*, Springer, Berlin.
19. Robinson GS (1965). *Methods of detecting the formation and propagation of microcracks in concrete*. Proc. Int. Conf. On the Structure of Concrete and Its Behavior under Load. Cement and Concrete Association, pp 131-145.
20. Schofield BH (1961). *Acoustic emission under applied stress*. Report ARL-150, Lessels and Associates, Boston.
21. Yokomichi H, Ikeda I and Matsuoka K (1964) *Elastic wave propagation due to cracking of concrete*. Cement Concrete Japan 212: 2-6.

## ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΑ

1. Physical Acoustics Corporation (2010). *USB-AE Node<sup>TM</sup> & AEwin<sup>TM</sup> for USB<sup>TM</sup> Software, User's Manual, Rev. 0*, January 2010, Princeton Junction, NJ, USA.
2. Physical Acoustics Corporation (2010). *Complete Line of Standard Acoustic Emission Sensors*, Rev. 15/11/2007, Princeton Junction, NJ, USA, from:  
<http://www.pacndt.com/downloads/Sensors/AE%20Sensor%20Catalog.pdf>

## ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. <http://www.pacndt.com/>.
2. <http://www.envirocoustics.gr/>.
3. <http://el.wikipedia.org/wiki/Διάθλαση>.
4. <http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity/>.
5. [http://www.geo.auth.gr/883\\_lab/S5%20UCS\\_files/frame.htm](http://www.geo.auth.gr/883_lab/S5%20UCS_files/frame.htm).  
βλέπε: Δοκιμή ανεμπόδιστης (μονοαξονικής) θλίψης.
6. <http://bme240.eng.uci.edu/students/06s/yuhsianh/Piezoelectric%20effect.htm>