

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



### Διπλωματική Εργασία:

***«Μελέτη ακουστικών εκπομπών με πολλαπλούς  
αισθητήρες κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε  
δοκίμια μαρμάρου»***

**Τσουμάρας Κ. Νικόλαος**

Εξεταστική επιτροπή:

Αγιουτάντης Ζ., Καθηγητής (Επιβλέπων)

Εξαδάκτυλος Γ., Καθηγητής

Δρ Κακλής Κωνσταντίνος

Χανιά,

Οκτώβριος 2014

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

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

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

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

Τα υπόλοιπα μέλη της επιτροπής τον καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο και τον Δρ κ. Κακλή Κωνσταντίνο για τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις τους.

Τα μέλη του εργαστηρίου της Μηχανικής Πετρωμάτων. Τον Μηχανικό Μεταλλείων κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο και την Μηχανικό Ορυκτών Πόρων κα. Σταθογιάννη Φωτεινή για την μεγάλη και πολύτιμη βοήθειά τους σε όλα τα στάδια της εργασίας.

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

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της αστοχίας κυλινδρικών δοκιμίων σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη. Το μάρμαρο που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από το λατομείο Κομνηνών Νέστου.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής διαμορφώθηκαν δοκίμια και έγιναν πειράματα μονοαξονικής θλίψης με σύγχρονη καταγραφή ακουστικών εκπομπών σε δύο κανάλια στο εργαστήριο της Μηχανικής Πετρωμάτων της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στα αποτελέσματα γίνεται μια προσπάθεια συσχετισμού των καταγεγραμμένων ακουστικών εκπομπών με το φορτίο που δέχονται τα δοκίμια καθώς και με τον χρόνο.

## Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ .....	3
2.1 Εισαγωγή .....	3
2.2 Τύποι δοκιμών .....	4
2.3 Προδιαγραφές δοκιμίου .....	5
2.4 Προδιαγραφές δοκιμής .....	6
2.5 Επεξεργασία δοκιμών μονοαξονικής θλίψης .....	8
2.6 Μηχανισμός αστοχίας .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ .....	14
3.1 Ορισμός της ακουστικής εκπομπής .....	14
3.2 Θεωρία των ακουστικών πηγών .....	15
3.3 Θεωρητική προσέγγιση .....	17
3.4 Η πηγή της ακουστικής εκπομπής .....	18
3.5 Τα ακουστικά κύματα .....	19
3.6 Εξοπλισμός ακουστικών εκπομπών .....	23
3.6.1 Αισθητήρες και προενισχυτές .....	23
3.6.2 Μονάδα επεξεργασίας .....	25
3.7 Παράμετροι ακουστικών εκπομπών .....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	30
4.1 Μέτρηση ακουστικής εκπομπής .....	30
4.2 Pencil Lead Break (PLB) .....	33
4.3 Εξεταζόμενο υλικό .....	34
4.4 Προετοιμασία δοκιμών για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης .....	36
4.5 Πειραματικά αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης .....	39
4.6 Αποτελέσματα δοκιμών .....	44
4.6.1 Φαινόμενο Kaiser .....	44

4.6.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων .....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	56
5.1 Συμπεράσματα .....	56
5.2 Προτάσεις .....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	59
Ελληνική Βιβλιογραφία .....	59
Διεθνής Βιβλιογραφία .....	60
Διαδικτυακές πηγές .....	62
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	63
Δοκίμιο 1.4 .....	63
Δοκίμιο 2.4 .....	68
Δοκίμιο 3.4 .....	73
Δοκίμιο 7.4 .....	78

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πετρώματα καταπονούνται με διαφορετικούς τρόπους όπως θλίψη, έμμεσο ή άμεσο εφελκυσμό, κάμψη, διάτμηση κλπ. Οι αντίστοιχες παράμετροι αντοχής (ή μέγιστες δυνατές φορτίσεις) είναι δυνατόν αν υπολογιστούν από καταστροφικές εργαστηριακές δοκιμές όπου τα δοκίμια φορτίζονται μέχρι την αστοχία. Κατά την φόρτιση των πετρωμάτων δημιουργούνται αρχικά μικρορωγμές στην μικροδομή του υλικού οι οποίες όταν οργανωθούν σε ένα κύριο σύστημα μικρορωγμών, δημιουργούν μεγαλύτερες ρωγμές και τελικά οδηγούν στην αστοχία του υλικού. Αντίστοιχες μικρορωγμές μπορεί να δημιουργηθούν και από άλλα αίτια καταπόνησης όπως θερμοκρασιακές διαφορές, κλπ.

Η ανάπτυξη μικρορωγμών συνδέεται με την δημιουργία ακουστικών σημάτων ή ακουστικών εκπομπών. Το φαινόμενο αυτό που σχετίζεται με τη ψαθυρή δομή των υλικών και είναι δυνατόν να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη διαδικασία αστοχίας τους.

Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών είναι μία ευρύτατα διαδεδομένη μη καταστροφική τεχνική. Είναι μία εύκολα εφαρμόσιμη διαδικασία με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων και μετρητικού εξοπλισμού. Δίνει την εποπτική εικόνα της εξέλιξης πιθανών ρωγμών και ατελειών στο εσωτερικό του υλικού όπου δεν είναι εύκολη η μακροσκοπική διερεύνηση τους.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται και παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε συνδυασμό με τις ακουστικές εκπομπές για τα μάρμαρα Κομνηνών Νέστου. Το μάρμαρο Κομνηνών Νέστου αποτελεί το πιο γνωστό είδος μαρμάρου το οποίο εξάγεται στις αραβικές χώρες στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και στην Ευρώπη. Τα μάρμαρα Κομνηνών Νέστου χαρακτηρίζονται από την ιδιαίτερη λευκότητα τους και την αντοχή τους ενώ επιπλέον, είναι ιδιαίτερα διαυγή και διαφανή ως μάρμαρα. Τα συγκεκριμένα μάρμαρα παράγονται εξορύσσονται στην περιοχή της Καβάλας.

Συγκεκριμένα στη παρούσα εργασία στο δεύτερο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η θεωρία των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης ενώ στο τρίτο θα

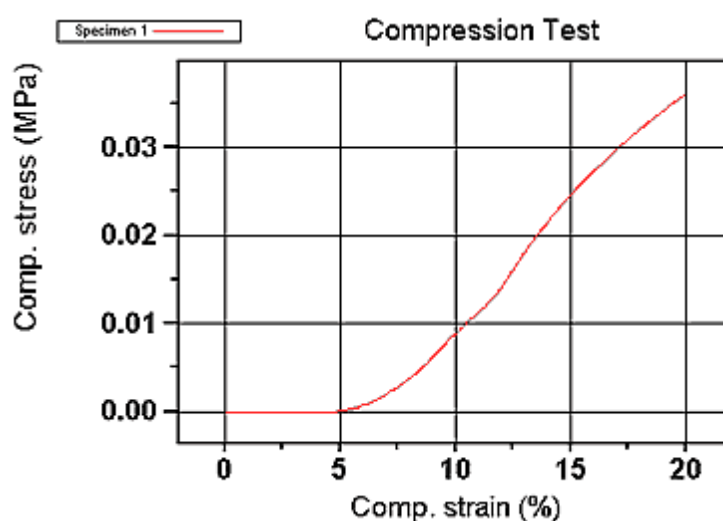
παρουσιαστεί η ιστορία και η θεωρία των ακουστικών εκπομπών. Στο τέταρτο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα μάρμαρα Κομνηνών Νέστου, Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα των πειραματικών μετρήσεων.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Με τις δοκιμές θλίψης μελετάται η συμπεριφορά των υλικών κάτω από θλιπτικά φορτία. Το δείγμα του υλικού θλίβεται και καταγράφεται η παραμόρφωση που υπόκειται σε διάφορα φορτία. Η απεικόνιση των θλιπτικών τάσεων γίνεται στα διαγράμματα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα τάσεων (<http://www.instron.us>)

Για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του πετρώματος κάτω από θλιπτικά εντατικά πεδία, καθώς και για την εκτίμηση της αντοχής του πετρώματος, χρησιμοποιούνται συχνά τα αποτελέσματα εργαστηριακών θλιπτικών δοκιμών σε ακέραιο πέτρωμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως προκύπτει από τη μελέτη του δισδιάστατου εντατικού πεδίου, ένα θλιπτικό σύστημα δυνάμενων είναι δυνατόν να δημιουργήσει διατμητικές ή/και εφελκυστικές τάσεις σε διάφορα επίπεδα κεκλιμένα ως προς τους άξονες επιβολής των φορτίων. Επομένως, οι μηχανισμοί αστοχίας ενός υλικού σε θλιπτική καταπόνηση είναι δυνατόν να αντιστοιχηθούν με άλλους κινηματικούς μηχανισμούς αστοχίας.

Η μονοαξονική θλιπτική καταπόνηση αναφέρεται στη περίπτωση όπου ασκείται μόνο ορθή τάση σε μία πλευρά ενός όγκου πετρώματος. Στη βραχομάζα οι συνθήκες αυτές απαντώνται συνήθως σε στύλους πετρωμάτων που υποστηρίζουν την οροφή υπόγειων εκμεταλλεύσεων, στις παρειές

υπόγειων ανοιγμάτων κλπ. Αντίστοιχα, μία από τις βασικές παραμέτρους για την εκτίμηση της αντοχής ενός πετρώματος στο εργαστήριο είναι η μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε κατάλληλα δοκίμια.

Η αντοχή του δοκιμίου θεωρείται ότι υπολογίζεται σε σημεία μακριά από τα σημεία επιβολής του φορτίου, ώστε (σύμφωνα με την αρχή του Saint Venant) να θεωρείται ότι εφαρμόζεται ομοιόμορφο εντατικό πεδίο στο υλικό. Οι πλευρές του κυλινδρικού δοκιμίου είναι ελεύθερες να παραμορφωθούν (δεν ασκούνται δηλαδή πλευρικές τάσεις που να εμποδίζουν την παραμόρφωση), και έτσι οι συνιστώσες τάσης κατά τις εγκάρσιες διευθύνσεις ( $x, y$ ) είναι ίσες με μηδέν. Η αξονική τάση έτσι όπως εφαρμόζεται από τη μηχανή θλίψης, δεν έχει διατμητικές συνιστώσες και επομένως ταυτίζεται με μία κύρια τάση ( $\sigma_1 = \sigma_z$ ). Οι δύο άλλες κύριες τάσεις είναι από τον ορισμό τους ορθογώνιες μ' αυτήν και άρα ισούνται με μηδέν ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ) (Αγιουτάντης, 2002).

## 2.2 Τύποι δοκιμών

Η σημαντικότερη κατηγορία μηχανικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα πετρώματα αλλά και τα φυσικά υλικά είναι αυτές που αναφέρονται στην αντοχή τους. Η αντοχή ενός υλικού είναι η ικανότητα του να ανθίσταται σε εξωτερικές δυνάμεις (τάσεις) και εκφράζεται σε μονάδες τάσης. Η ικανότητα αυτή των υλικών εξαρτάται άμεσα από τον τύπο καταπόνησης. Στη μηχανική των στερεών σωμάτων διακρίνονται ορισμένοι τρόποι καταπόνησης που μπορεί να δεχθεί ένα υλικό και αντίστοιχες είναι και οι τιμές αντοχής του κάθε υλικού.

Καταπόνηση σε θλίψη, σε εφελκυσμό, σε διάτμηση, σε κάμψη και στρέψη. Τα πετρώματα χαρακτηρίζονται από τιμές αντοχής ανάλογα από με τον τύπο εξωτερικών δυνάμεων που υφίσταται. Έτσι διακρίνεται η αντοχή σε θλίψη με ή χωρίς τη παρουσία πλευρικών τάσεων, η αντοχή σε διάτμηση, η αντοχή σε εφελκυσμό και η αντοχή σε κάμψη. Οι τιμές αντοχής τους είναι δυνατόν να μετρηθούν στο εργαστήριο (σε κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια) ή επί τόπου. Βασικές εργαστηριακές δοκιμές πέρα από την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης που θα εξεταστεί στη παρούσα εργασία είναι η δοκιμή για τον έμμεσο προσδιορισμό αντοχής σε εφελκυσμό (μέθοδος Brazil), η δοκιμή για τον προσδιορισμό της αντοχής σε τριαξονική θλίψη για διάφορες

τιμές πλευρικών τάσεων και η δοκιμή για τον άμεσο προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής (Αγιουτάντης, 2002).

### 2.3 Προδιαγραφές δοκιμίου

Η διεθνής ένωση βραχομηχανικής (ISRM) έχει προτυποποιήσει σχετικές τεχνικές που επιτρέπουν τον καθορισμό της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη και τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης των πετρωμάτων (ISRM, 1979). Η προτυποποιημένη διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα (Αγιουτάντης, 2002):

- Τα δοκίμια έχουν κυλινδρική μορφή με λόγο ύψους προς διάμετρο να παίρνει τιμές μεταξύ 2.5 και 3.



**Σχήμα 2.2:** Κυλινδρικό δοκίμιο για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

- Η διάμετρος του δοκιμίου έχει τυπικό μέγεθος της τάξεως των 54mm ενώ επίσης ορίζεται πως είναι 10 φορές τουλάχιστον μεγαλύτερη από τον κόκκο του πετρώματος που τίθεται σε δοκιμή.

- Οι βάσεις των δοκιμών πρέπει να είναι επίπεδες και παράλληλες με ανοχή 0,02mm και επιπλέον πρέπει να είναι κάθετες στο διαμήκη άξονα συμμετρίας του δοκιμίου.
- Η πλευρική επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να είναι λεία με ανοχή το μέγιστο 0,3mm
- Δεν επιτρέπεται η χρήση πρόσθετων υλικών για ενίσχυση ή κατεργασία των άκρων του δοκιμίου.
- Κατά τη δοκιμή πρέπει να διατηρείται η φυσική υγρασία του πετρώματος για αυτό η μέγιστη διάρκεια λήψης του πετρώματος δεν πρέπει να ξεπερνά τις 30 ημέρες.

## 2.4 Προδιαγραφές δοκιμής

Αρχικά να καταγραφεί ο εξοπλισμός που χρειάζεται για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας ο οποίος πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα όργανα και συσκευές (Αγιουτάντης 2002):

- Η συσκευή δοκιμής πρέπει να μπορεί να επιβάλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο και συγχρόνως να έχει τη δυνατότητα να μετρήσει ή/και να καταγράψει το επιβαλλόμενο φορτίο.
- Οι πλάκες φόρτισης χρησιμεύουν στο να μεταφέρουν το φορτίο στο δοκίμιο και πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους.
- Οι χαλύβδινοι δίσκοι τοποθετούνται ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης και στο δοκίμιο και αποσκοπούν στο να ελαττώσουν την υπερβολική πλευρική παραμόρφωση του δοκιμίου λόγω δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής. Η σκληρότητα των δίσκων (στη κλίμακα Rockwell) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από HRC58 και η διάμετρος τους πρέπει να είναι μεταξύ D και D+2mm, όπου D η διάμετρος του δοκιμίου. Το πάχος των δίσκων πρέπει να είναι τουλάχιστον 15mm ή D/3 και οι παράλληλες επιφάνειες τους πρέπει να έχουν ανοχή μικρότερη από 0.005mm.

- Η σφαιρική κεφαλή έδρασης πρέπει να βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοκιμίου και ο άξονας της πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης.

Οι επιφάνειες μεταξύ του δοκιμίου και των μεταλλικών πλακών πρέπει να είναι τελείως λείες έτσι ώστε οι δυνάμεις να κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια επαφής. Παράλληλα η λείανση πρέπει να υφίσταται οπωσδήποτε έτσι ώστε το δοκίμιο να μπορεί να διογκωθεί και οι επιφάνειες έδρασης να μπορούν να διασταλούν. Αν υπάρχουν φαινόμενα τριβής η διαστολή παρεμποδίζεται και αναπτύσσονται τάσεις που οδηγούν στην πρόωγη αστοχία του δοκιμίου (Hawkes et al, 1969).

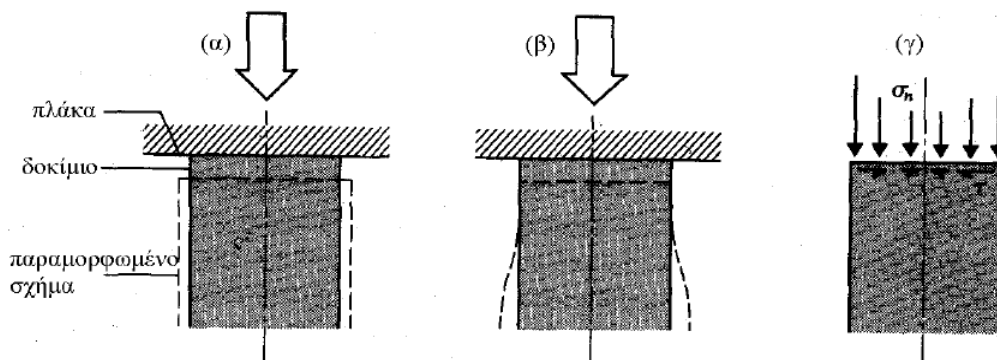
Η διάμετρος του δοκιμίου μετρείται συνολικά έξι φορές με ακρίβεια 0.1mm και υπολογίζεται ο μέσος όρος. Συγκεκριμένα μετρείται κατά δύο διευθύνσεις που σχηματίζουν γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους στο επάνω και κάτω άκρο και στη μέση του δοκιμίου. Η μέση διάμετρος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του εμβαδού της επιφάνειας φόρτισης. Το ύψος του δοκιμίου μετρείται με ακρίβεια 1.0mm.

Ο ελάχιστος αριθμός δοκιμών που απαιτείται για τη δοκιμή εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Συνίσταται η δοκιμή τουλάχιστον 5 δοκιμών.

Το φορτίο κατά τη διάρκεια της δοκιμής πρέπει να επιβάλλεται χωρίς διακοπές με σταθερό ρυθμό φόρτισης μεταξύ 0.5 – 1.0 MPa/s.

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

Το δοκίμιο έχει αναμενόμενη συμπεριφορά όταν υπόκειται σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης η οποία φαίνεται στο Σχήμα 2.3 και η οποία μπορεί να επηρεαστεί από την επιβολή φόρτισης στα άκρα του.



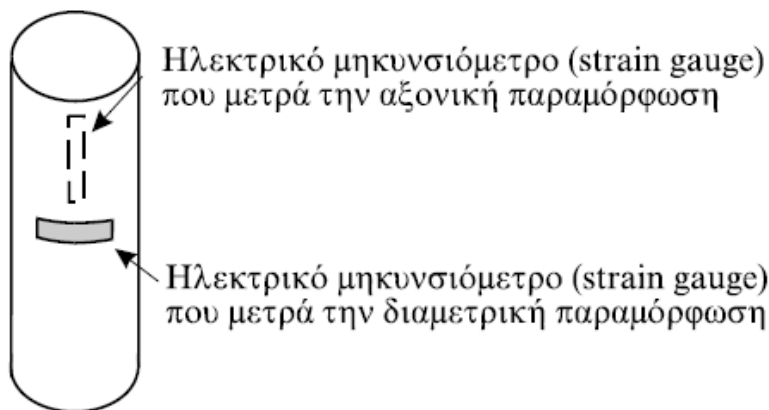
**Σχήμα 2.3:** Επίδραση του καταναγκασμού των άκρων στις τάσεις και παραμορφώσεις του δοκιμίου (Τσουτρέλης κ.α., 2000).

Η λυγρηρότητα επιδρά σε μικρό βαθμό στη θλιπτική φόρτιση του δοκιμίου με πλάκες με ακίδες ενώ όσο μειώνεται ο όγκος του δοκιμίου η μονοαξονική αντοχή μειώνεται.

Η μέτρηση της αντοχής γίνεται με δύσκαμπτες μηχανές φόρτισης αφού οι εύκαμπτες καταστρέφουν το δοκίμιο όταν επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή φόρτισης.

## 2.5 Επεξεργασία δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

Στη συνέχεια δημιουργείται το διάγραμμα ενεργών τάσεων – παραμορφώσεων το οποίο χρησιμεύει για τον προσδιορισμό των μέτρων ελαστικότητας. Εάν έχουν μετρηθεί και εγκάρσιες παραμορφώσεις μπορεί να υπολογιστεί και ο λόγος Poisson ( $\nu$ ) του πετρώματος. Επειδή συνήθως δεν υπάρχει πίεση στο νερό των πόρων η ενεργή τάση ισούται με την ασκούμενη δύναμη διά την επιφάνεια του δοκιμίου. Οι παραμορφώσεις προσδιορίζονται μέσω μετρητών παραμόρφωσης από τους οποίους ο ένας τοποθετείται κάθετα για τον προσδιορισμό της αξονικής παραμόρφωσης και ο άλλος οριζόντια για τον προσδιορισμό της διατμητικής παραμόρφωσης.



**Σχήμα 2.4:** Τοποθέτηση των μετρητών παραμόρφωσης (Τσουτρέλης κ.α., 2000).

Το φορτίο στο δοκίμιο εφαρμόζεται με σταθερό ρυθμό ενώ ανάλογα με την αντοχή του δοκιμίου η θραύση του μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μικρό χρονικό διάστημα.

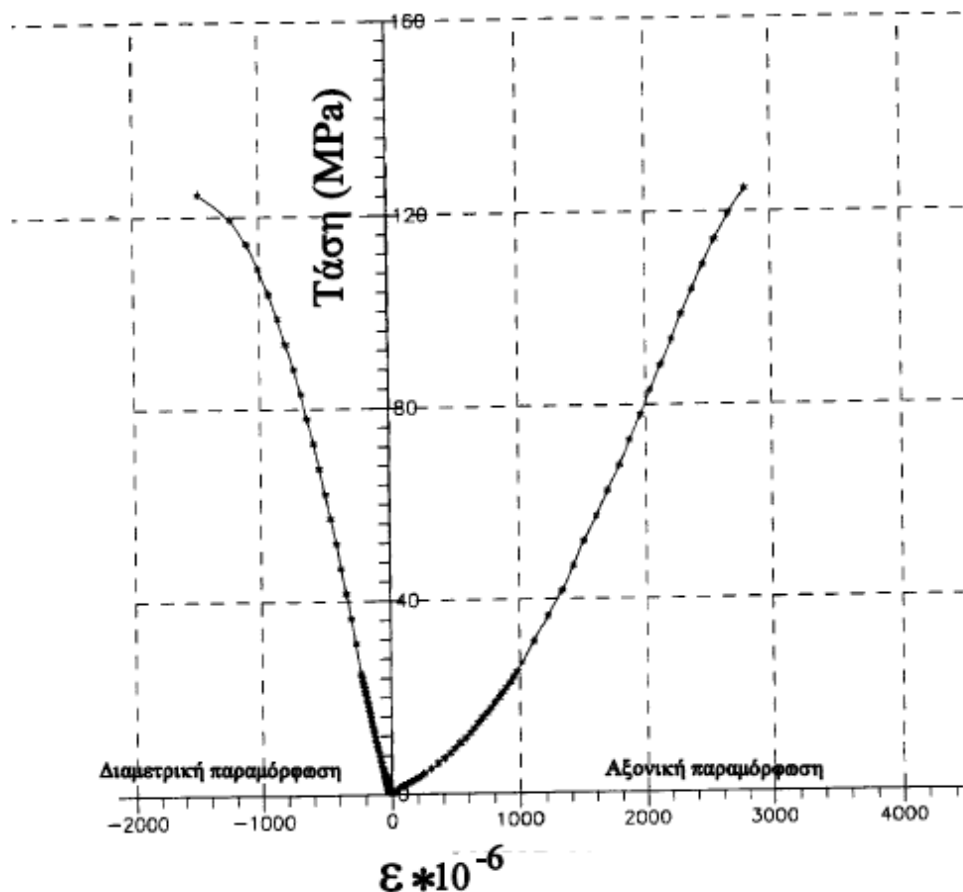
Όπως ήδη αναφέρθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται οι ενδείξεις του φορτίου της θλιπτικής μηχανής και οι ενδείξεις των παραμορφώσεων των δύο ενισχυτών σήματος. Η αξονική και η διαμετρική παραμόρφωση προσδιορίζονται από τις σχέσεις (ISRM, 1979):

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta \ell_x}{\ell_x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta \ell_y}{\ell_y}$$

Όπου με  $\Delta \ell_x$  συμβολίζεται η διαφορά μήκους του μετρητή και με  $\ell$  το μήκος στο οποίο γίνεται η μέτρηση. Όταν τα μκηνσιόμετρα που χρησιμοποιούνται είναι ηλεκτρικά τα μεγέθη  $\varepsilon_x$  και  $\varepsilon_y$  δίνονται από τις ενδείξεις των ενισχυτών τους πολλαπλασιασμένες με τον κατάλληλο συντελεστή. Η θλιπτική τάση προσδιορίζεται από τη σχέση (ISRM, 1979):

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

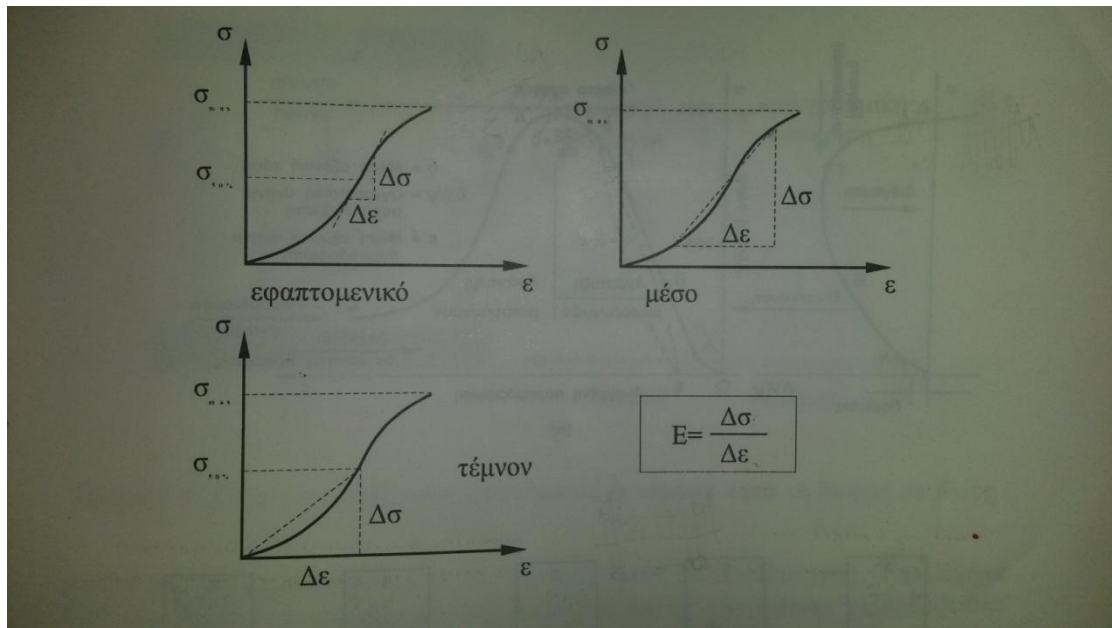
Όπου με  $P$  συμβολίζεται το θλιπτικό φορτίο που μετρείται σε kN και  $A_0$  το εμβαδόν της βάσης του κυλινδρικού δοκιμίου πριν από τη δοκιμή.



**Σχήμα 2.5:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης πετρώματος (ISRM, 1979)

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας ( $E_t$ ) μπορεί να υπολογιστεί από την καμπύλη τάσης αξονικής τροπής ως εξής. Λαμβάνεται ένα σημείο το οποίο αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό μέγιστης τάσης από όπου φέρεται η εφαπτομένη. Η κλίση της συγκεκριμένης ευθείας είναι το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας. Η μέση κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης δίνει το μέσο μέτρο ελαστικότητας (Αγιουτάντης, 2002).





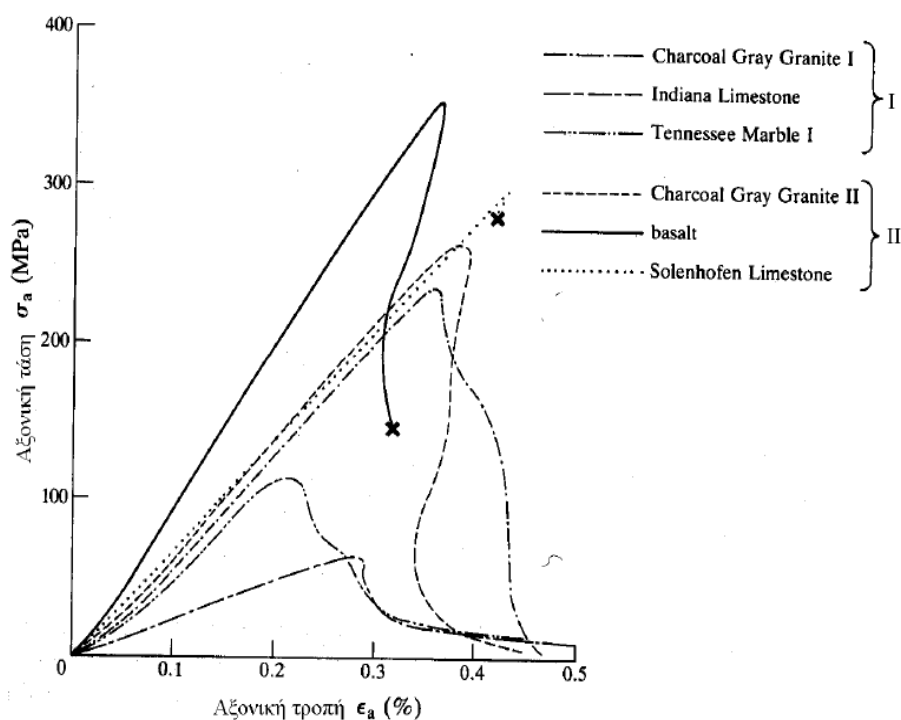
**Σχήμα 2.6:** Διαγράμματα προσδιορισμού των μέτρων ελαστικότητας (Αγιουτάνης, 2002)

Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που χαράσσεται στην ίδια καμπύλη και υπολογίζεται για τιμές τάσεως από 0 έως 50% της μέγιστης τάσης.

Ο λόγος Poisson ορίζεται από το λόγο της εγκάρσιας (-ε<sub>χ</sub>) προς την αξονική (+ε<sub>υ</sub>) ανηγμένη παραμόρφωση σε μονοαξονική καταπόνηση. Ο λόγος του Poisson δίνεται από τη σχέση (Lama et al, 1978).

$$\nu = - \frac{\Delta \sigma / \Delta \varepsilon_a}{\Delta \sigma / \Delta \varepsilon_d}$$

:



**Σχήμα 2.7:** Καμπύλες τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης (Τσουτρέλης κ.α., 2000).

Όταν το δοκίμιο σπάσει τα πετρώματα που δημιουργούνται είναι δύο τύπων. Ο τύπος I μετά τη θραύση πετυχαίνει την αύξηση της παραμόρφωσης καθώς το φορτίο μειώνεται ενώ ο τύπος II όταν το δοκίμιο σπάσει δεν μπορεί να πετύχει σταθερή κατάσταση καθώς αυξάνονται οι παραμορφώσεις.

## 2.6 Μηχανισμός αστοχίας

Η θλίψη ορίζεται ως το αποτέλεσμα του συνδυασμού του εφελκυσμού και της διάτμησης το οποίο επηρεάζεται από τη μικροσκοπική και τη μακροσκοπική δομή όπως επίσης και από τη σύσταση του υλικού. Ο μηχανισμός αστοχίας αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο για το οποίο ορίζονται διάφορες θεωρίες με δεδομένο ότι για όλα τα πετρώματα δεν υπάρχει μόνο ένας μηχανισμός αστοχίας.

Το μέγεθος του δοκιμίου επηρεάζει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή των πετρωμάτων. Η θλιπτική αντοχή αποτελεί το μέτρο σύγκρισης για την αντοχή διαφόρων πετρωμάτων με δοκίμια που έχουν διάμετρο 50 mm και λόγου μήκους προς διάμετρο ίσο με 2. Η εύρεση των δοκιμών αυτών των διαστάσεων δεν είναι εφικτή. Όταν τα δοκίμια είναι μεγάλα απαιτείται η μείωση των διαστάσεων τους γεγονός που αποτελεί εργασία με επιπλέον κόστος.

Γενικά θεωρείται πως με την αύξηση του μεγέθους η θλιπτική αντοχή μειώνεται. Επιπλέον όσο αυξάνεται ο όγκος του δοκιμίου η θλιπτική αντοχή μειώνεται (Wijk, 1979).

Εκτός από το μέγεθος του δοκιμίου ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο. Για το λόγο αυτό στους διάφορους κανονισμούς προτείνεται συγκεκριμένη τιμή του λόγου  $L/D$ . Όταν ο λόγος είναι διάφορος του 2 η διόρθωση της θλιπτικής αντοχής γίνεται με εμπειρικές σχέσεις. Το μέγεθος της επίδρασης του λόγου  $L/D$  στη θλιπτική αντοχή έχει άμεση εξάρτηση από το είδος των μεταλλικών πλακών (Brady, 1985).

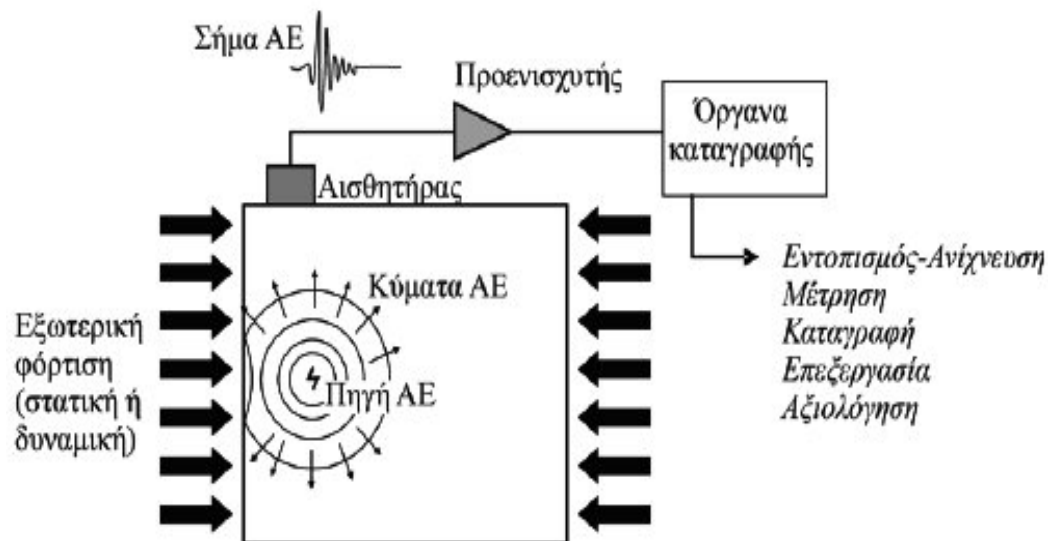
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

### 3.1 Ορισμός της ακουστικής εκπομπής

Το φαινόμενο της ακουστικής εκπομπής παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Με τον όρο ακουστική εκπομπή ορίζεται η παραγωγή κυμάτων χαμηλής ηχητικής πυκνότητας στα στερεά εξαιτίας τάσεων, που σχετίζονται με διάφορους μηχανισμούς όπως μαρτενσιτικούς μετασχηματισμούς. Οι προσπάθειες αντιμετώπισης των ακουστικών εκπομπών προσανατολίζονται κυρίως στη χρήση του φαινομένου για μη καταστροφικές δοκιμές.

Το βασικό χαρακτηριστικό της θεωρίας της ακουστικής εκπομπής είναι πως δεν περιγράφεται αμιγώς από συγκεκριμένες μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν συγκεκριμένα φαινόμενα. Ένα από τα βασικότερα στοιχεία της ακουστικής θεωρίας είναι πως αναφέρεται σε διαφορετικούς μηχανισμούς που λειτουργούν σε διαφορετικές καταστάσεις και δεν περιλαμβάνουν απαραίτητα μετατοπίσεις. Για παράδειγμα στα σύνθετα ινώδη υλικά η αποσύνδεση ή αστοχία των ινών μπορεί να προκαλέσουν ακουστική εκπομπή χωρίς να υπάρχουν μετατοπίσεις. Στα κρυσταλλικά υλικά οι κινήσεις των μετατοπίσεων μπορούν να οδηγήσουν σε παραμορφώσεις ομογενείς ή ανομοιογενείς (Tetelman et al, 1972).

Γενικά μπορεί να αναφερθεί πως οι ακουστικές εκπομπές αποτελούν την ονομασία που χαρακτηρίζει τα μεταβατικά μηχανικά κύματα που δημιουργούνται τυχαία από τις απότομες μεταβολές των τάσεων μέσα σε ένα σώμα. Οι μετακινήσεις στρωμάτων καθώς και η ανάπτυξη ρωγμών είναι οι μηχανισμοί με τους οποίους πραγματοποιούνται οι μεταβολές των τάσεων κατά την ανάπτυξη ρηγμάτων στα υλικά. Είναι χαρακτηριστικό πως ακόμα και πολύ σύντομες ρωγμές ή πολύ μικρή πλαστική παραμόρφωση οδηγεί στη δημιουργία ελαστικών κυμάτων που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακή κίνηση σε ένα σώμα η οποία μερικές φορές έχει ικανοποιητικό πλάτος που της επιτρέπει να ανιχνευθεί από αισθητήρες που εφάπτονται στην επιφάνεια και οι οποίοι μετατρέπουν τη μηχανική διακύμανση σε κυματομορφή δυναμικού-χρόνου (Hsu et al, 1977).



**Σχήμα 3.1:** Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της AE (Σοφιανός, 2008).

### 3.2 Θεωρία των ακουστικών πηγών

Όπως ήδη αναφέρθηκε οι ακουστικές εκπομπές μπορεί να είναι το αποτέλεσμα της έναρξης και της ανάπτυξης ρωγμών στα πετρώματα, της ολίσθησης και της μετακίνησης στρωμάτων ή του μετασχηματισμού φάσεων στα μέταλλα. Σε κάθε περίπτωση οι ακουστικές εκπομπές προέρχονται από την ανάπτυξη τάσεων. Όταν μια τάση αναπτύσσεται σε ένα υλικό αναπτύσσεται παράλληλα μια δύναμη στο υλικό. Ανάλογα με το μέγεθος της τάσης και τις ιδιότητες του υλικού ένα αντικείμενο μπορεί να επιστρέφει στις αρχικές του διαστάσεις ή να παραμορφώνεται μόνιμα μετά την απομάκρυνση της τάσης. Αυτές οι δυο συνθήκες είναι γνωστές ως ελαστική και πλαστική παραμόρφωση αντίστοιχα (<http://www.rdso.indianrailways.gov>).

Οι πιο ανιχνεύσιμες ακουστικές απώλειες πραγματοποιούνται όταν ένα φορτισμένο υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση ή όταν ένα υλικό φορτίζεται κοντά στην οριακή τάση. Σε μακροσκοπικό επίπεδο καθώς ολοκληρώνεται η πλαστική παραμόρφωση τα ατομικά επίπεδα ολισθαίνουν μεταξύ τους μέσω της κίνησης τους. Οι παραμορφώσεις σε ατομική κλίμακα απελευθερώνουν ενέργεια με τη μορφή ελαστικών κυμάτων που μπορούν να θεωρηθούν ως «φυσικά παραγόμενοι υπέρηχοι» που κινούνται μέσα στο αντικείμενο. Όταν σε ένα μέταλλο υπάρχουν ρωγμές τα επίπεδα τάσης

παρουσιάζονται στις μπροστινές άκρες και είναι πολλές φορές μεγαλύτερα από την περιβάλλουσα περιοχή. Κατά συνέπεια η δραστηριότητα των ακουστικών εκπομπών θα παρατηρηθεί επίσης όταν το υλικό που βρίσκεται πάνω από τις άκρες υφίσταται πλαστική παραμόρφωση.

Υπάρχουν επιπλέον δύο πηγές ρωγμών που μπορούν να δημιουργήσουν ακουστικές πηγές. Η πρώτη αφορά στα εκπεμπόμενα σωματίδια στην πηγή της ρωγμής. Τα συγκεκριμένα σωματίδια παρά το γεγονός πως είναι λιγότερο εύτηκτα από το περιβάλλον υλικό τείνουν να σπάνε πιο εύκολα όταν τα μέταλλα δέχονται τάσεις με αποτέλεσμα να δημιουργείται σήμα ακουστικής εκπομπής. Η δεύτερη πηγή ακουστικών εκπομπών στα πετρώματα προέρχεται από την προοδευτική μετακίνηση των στρωμάτων και τους μικρής κλίμακας δεσμούς που δημιουργούνται από τις τριαξονικές τάσεις.

Το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται από την ακουστική εκπομπή και το πλάτος του κύματος σχετίζονται με το μέγεθος και την ταχύτητα της πηγής. Το πλάτος της εκπομπής είναι ανάλογο της ταχύτητας της δημιουργίας της ρωγμής και της επιφάνειας που δημιουργείται. Όσο μεγαλύτερες ρωγμές δημιουργούνται τόσο μεγαλύτερες είναι οι ακουστικές εκπομπές που δημιουργούνται αργά στην ίδια απόσταση (<http://www.rdso.indianrailways.gov>).

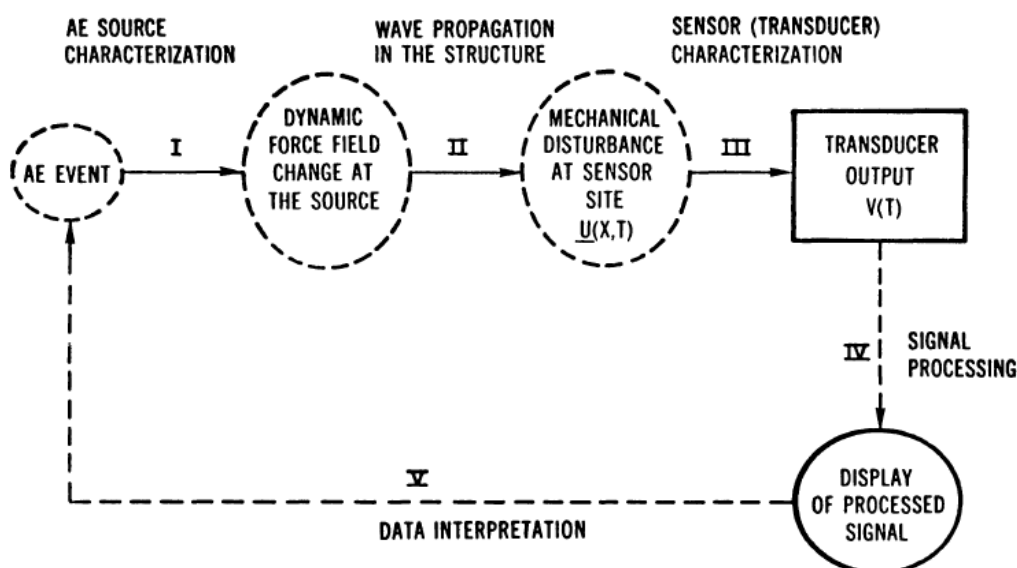
Η ανίχνευση και η μετατροπή αυτών των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα είναι η βάση των δοκιμών ακουστικής εκπομπής που δίνει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και την ανομοιομορφία του υλικού.

Η επιφανειακή κίνηση που προέρχεται από τις πηγές ακουστικής εκπομπής περιέχει πληροφορίες τόσο για την τοποθεσία όσο και για τα χαρακτηριστικά της πηγής. Οι πηγές ακουστικής εκπομπής μπορούν να ανιχνευθούν όμως ο χαρακτηρισμός τους είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία και απαιτεί τη χρήση συστοιχιών μετατροπών και τριγωνικών αλγορίθμων. Παρόλα αυτά πληροφορίες για την πηγή μπορεί να ληφθούν από την επεξεργασία των λαμβανόμενων σημάτων. Η τεχνική των ακουστικών σημάτων προσφέρει τη δυνατότητα πιστοποίησης και παρακολούθησης πηγών όπως η πίεση των δοχείων και οι σωληνώσεις (<http://www.rdso.indianrailways.gov>).

Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών έλυσε μερικά σημαντικά ζητήματα όπως την ανίχνευση διαρροών, τον καθορισμό των περιοχών των δομών που απαιτούν επιπλέον λεπτομερή ανίχνευση και διευκόλυναν την εκτέλεση δοκιμών σε δομές γυάλινων ινών (Proverbio et al, 2007).

### 3.3 Θεωρητική προσέγγιση

Η αλληλουχία των γεγονότων που ανιχνεύει το σήμα ακουστικής εκπομπής φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



**Σχήμα 3.2:** Ταξινόμηση διαδικασιών δοκιμής ακουστικής παραμόρφωσης (Sachse, 1979).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 οι διαδικασίες της ανάλυσης του σήματος ακουστικής παραμόρφωσης περιλαμβάνουν την παραγωγή πηγών την μετατροπή σήματος και την επεξεργασία του σήματος. Κάθε μια από τις διαδικασίες πραγματοποιείται κοντά ή πάνω στην επιφάνεια της δομής.

Στην περίπτωση της δημιουργίας της πηγής ακουστικών εκπομπών προκαλείται μια δυναμική τάση σε μια ειδική θέση. Το πεδίο δυνάμεων μεταβάλλεται ανάλογα με τη μηχανική διακύμανση που αναπτύσσεται μέσα στη δομή. Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί συνήθως έναν πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα σε μια δεδομένη θέση της δομής ο οποίος ανιχνεύει τη

διακύμανση και παράγει μια τάση εξόδου ως σήμα ακουστικής εκπομπής. Στόχος της ανάλυσης σήματος ακουστικής εκπομπής είναι να καθορίζει την επιλογή της κατεργασίας σήματος και της εμφάνισης και τον χαρακτήρα και τη σημασία του γεγονότος.

Η επίτευξη αυτού του στόχου είναι δύσκολη ακόμα και αν η τελική έξοδος του ανιχνευόμενου σήματος μπορεί να καταγραφεί και να υποστεί επεξεργασία γεγονός που οφείλεται στο ότι τα χαρακτηριστικά της πηγής είναι άγνωστα και μπορεί να υποστούν επεξεργασία από τη δομή και τον αισθητήρα. Η ανάπτυξη κύματος στη δομή επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση των ιδιοτήτων των υλικών των ανομοιογενειών και των γεωμετρικών διευθετήσεων των ελεύθερων επιφανειών και των συνθηκών φόρτισης. Η πολυπλοκότητα αυτών των αλληλεπιδράσεων συνήθως δεν επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση. Επιπλέον οι συμβατικοί αισθητήρες κατασκευάζονται από πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά. Παρά το γεγονός πως η διαδικασία ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού είναι μελετημένη ως προς την βασική λειτουργία του ο καθορισμός της συνάρτησης μηχανοηλεκτρικής μεταφοράς των μεμονωμένων μετατροπών δεν είναι εύκολη υπόθεση (Sachse, 1979).

### **3.4 Η πηγή της ακουστικής εκπομπής**

Όταν πρωτοεμφανίστηκαν οι εφαρμογές της ακουστικής εκπομπής στα δοχεία πίεσης υπήρχε πολύ μικρή γνώση σχετικά με την προέλευση των σημάτων ακουστικής εκπομπής. Πολύ αργότερα μέσω πειραματικών δοκιμών αποκαλύφθηκε η αδυναμία αυτών των σημάτων όταν βρέθηκε ότι ο χάλυβας στα δοχεία πίεσης αστοχούν στην ανίχνευση ακουστικών σημάτων και ακόμα υπάρχει σαφής ανάπτυξη ρωγμών. Οι εργαστηριακές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν ότι όταν ο χάλυβας χρησιμοποιείται στα δοχεία πίεσης παράγονται τα ακόλουθα σήματα: (Simmons, 1984) ασθενές σήμα ακουστικής εκπομπής με πλαστική παραμόρφωση, σήματα διαμορφωμένου πλάτους που οφείλονται στην διάσπαση ενώσεων όπως τα σουλφίδια και τα πυριτικά άλατα και τέλος σήματα με ένα διευρυμένο εύρος πλάτους που προέρχονται από την ανάπτυξη ρωγμών στην μικροδομή (Scrubby et al, 1981).

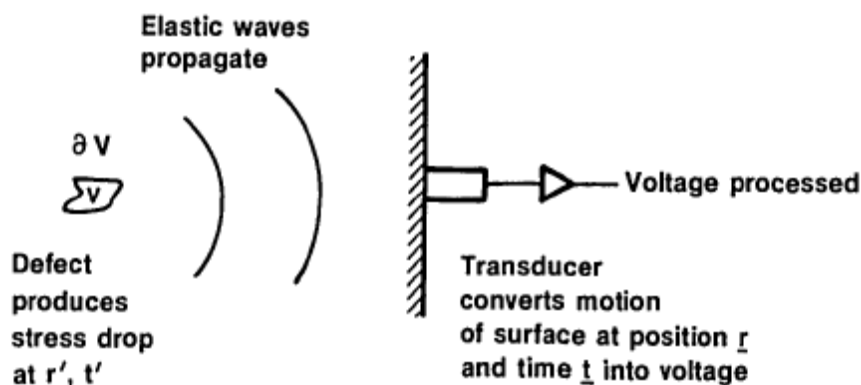


Η μεταβολή τάσης  $\overline{\Delta\sigma}$  που οφείλεται στη μετατόπιση είναι ανάλογη στην απόσταση της κίνησης ( $a$ ) και στη μέση ταχύτητα ( $v$ ). Προκύπτει ότι το πλάτος της ακραίας μετατόπισης  $u$  δίνεται από τη σχέση: (Scruby et al, 1981)

$$u = \frac{kav}{h} \quad (5)$$

Όπου  $k$  είναι σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού και τη γεωμετρία του και  $h$  είναι η απόσταση από την πηγή. Για το χάλυβα η σταθερά αυτή εκτιμάται ίση με  $10^{-14}$ .

Όταν σε ένα δοκίμιο πετρώματος επιβάλλεται φορτίο τότε απελευθερώνεται ενέργεια με τη μορφή της ακουστικής εκπομπής και η οποία διαδίδεται στο πέτρωμα ως ελαστικό κύμα τάσης. Η διάδοση του κύματος γίνεται στα όρια του δοκιμίου και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα της ακουστικής εκπομπής. Ο ρόλος του αισθητήρα είναι να επιτρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις εξαιτίας του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα και να το μεταφέρει σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας.



**Σχήμα 3.3:** Σχηματική παραγωγή ακουστικής εκπομπής και διαδικασία ανίχνευσης (Rienstra et al, 2014).

### 3.5 Τα ακουστικά κύματα

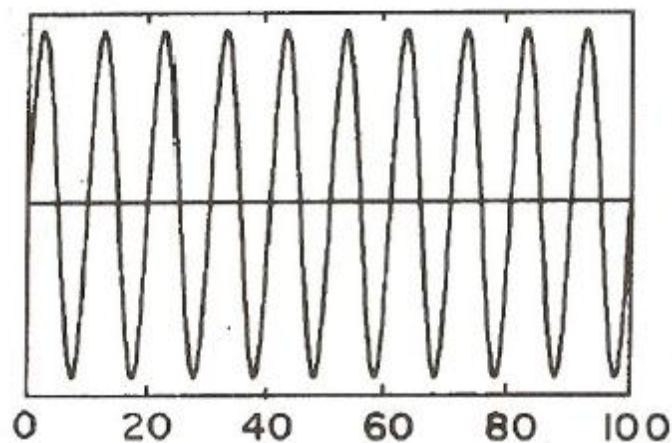
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω οι ακουστικές εκπομπές είναι στην ουσία ακουστικά κύματα που παράγονται από ένα υλικό συνήθως ως απόκριση στην επιβολή τάσης σε αυτό. Από τη στιγμή που θα δημιουργηθούν τα ακουστικά κύματα ακολουθούν τους κανόνες οποιουδήποτε άλλου κύματος. Η κίνηση των ακουστικών κυμάτων αποτελεί τη συνεργατική κίνηση

των ατόμων σε ένα υλικό η οποία υποδηλώνει ότι το μήκος κύματος συγκρίνεται με την απόσταση ανάμεσα στα άτομα. Το μήκος κύματος είναι αντίστροφα ανάλογο με τη συχνότητα του κύματος και αυτός είναι ο λόγος που συνήθως θεωρείται πως ένα ακουστικό κύμα έχει σχετικά μικρή συχνότητα (Rienstra et al, 2014).

Καθώς τα κύματα κινούνται μέσα στο μέσο τα σήματα ακουστικής εκπομπής που παράγονται είναι σύνθετα και η εξήγηση τους απαιτεί τη γνώση των χαρακτηριστικών των κυμάτων. Όπως είναι γνωστό όλα τα υλικά αποτελούνται από άτομα που συνδέονται μεταξύ τους με ελκτικές δυνάμεις ενώ παράλληλα απωθούνται από απωστικές δυνάμεις μικρής εμβέλειας έτσι ώστε να μην πλησιάζουν μεταξύ τους και να συγκρούονται. Η υπέρθεση αυτών των δυνάμεων οδηγεί σε μια κατάσταση ισορροπίας για τα άτομα που βρίσκονται στην χαμηλότερη ενεργειακή τους κατάσταση και κατά συνέπεια στην κρυσταλλική δομή των στερεών υλικών. Στα υγρά η δομή που σχηματίζεται είναι η άμορφη ενώ δεν έχουν συγκεκριμένες θέσεις για τα άτομα όπως συμβαίνει στην κρυσταλλική δομή των στερεών. Η πυκνότητα του υγρού είναι αυτή που καθορίζει αν τα άτομα του υγρού μπορούν να μετακινηθούν. Όταν η πυκνότητα είναι πολύ χαμηλή τότε το υγρό έχει μετατραπεί σε αέριο ενώ όταν η πυκνότητα είναι πολύ υψηλή το υγρό έχει μετατραπεί σε κρύσταλλο. Οι ακουστικές ιδιότητες ενός υλικού καθορίζονται από την πυκνότητα του όπως επίσης και από τις μακροπρόθεσμες συνδέσεις μεταξύ των ατόμων.

Οι μακροπρόθεσμες συσχετίσεις σε ένα ακουστικό κύμα οδηγεί στην αντικατάσταση πολλών ατόμων σε μια περιοχή από τις θέσεις ισορροπίας τους. Η μετατόπιση των ατόμων δημιουργεί μια δυναμική καταπόνηση στον κρύσταλλο και ανάλογα με την κίνηση τους αλλάζει η κατεύθυνση της αναπτυσσόμενης τάσης και το μέγεθος της.

Η συνηθέστερη μορφή κυμάτων είναι η ημιτονοειδής στην οποία το πλάτος ταλαντώνεται μεταξύ θετικών και αρνητικών ορίων σε δεδομένο ρυθμό που ορίζεται ως η συχνότητα του κύματος.



**Σχήμα 3.4:** Απλή ημιτονοειδής μορφή κύματος

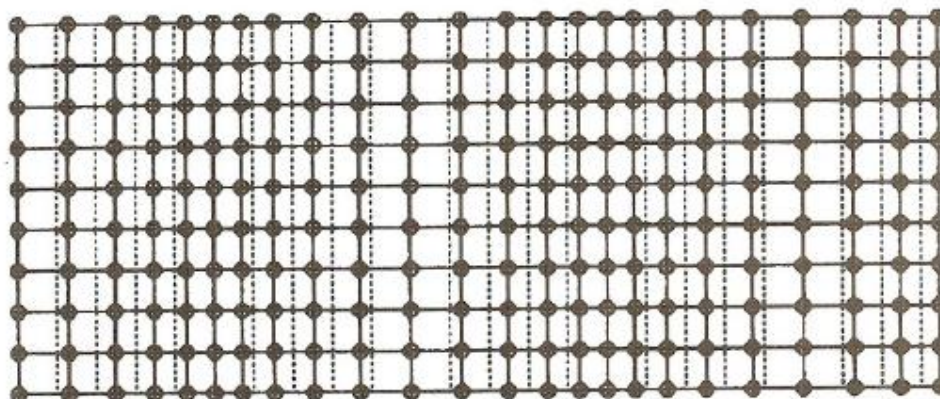
Η ταχύτητα των ακουστικών κυμάτων καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του υλικού στα οποία διαδίδονται. Όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη που αναπτύσσεται ανάμεσα στα γειτονικά άτομα τόσο πιο συντονισμένη είναι η κίνηση τους και ανάλογα όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα των ατόμων τόσο μεγαλύτερη δύναμη πρέπει να εφαρμοστεί για να επιτευχθεί ομοιόμορφη επιτάχυνση. Με δεδομένο ότι ένα κύμα είναι η συντονισμένη κίνηση ενός μεγάλου αριθμού ατόμων η πυκνότητα των υλικών που καθορίζει την κίνηση του κύματος. Κατά συνέπεια, η ταχύτητα του κύματος θα πρέπει να είναι ανάλογη της ατομικής δύναμης ανάκτησης ανάμεσα στα άτομα ή στα μόρια και αντίστροφα ανάλογη προς την πυκνότητα.

Το μονοπάτι που χαράσσεται από ένα σωματίδιο κάτω από την επίδραση του ακουστικού κύματος μπορεί γενικά να αναπαρασταθεί με μια έλλειψη όπου ο ένας άξονας της είναι ο άξονας μετάδοσης της κίνησης. Το είδος του κύματος καθορίζεται από τη σχέση ανάμεσα στην μέση κίνηση των σωματιδίων και τη διεύθυνση μετάδοσης του κύματος. Για υλικά που έχουν όρια οι ακριβείς λεπτομέρειες του κύματος και της κίνησης των σωματιδίων θα καθορίζονται από τις ιδιότητες του υλικού τη φυσική γεωμετρία του δείγματος και τη συχνότητα του κύματος (Beattie, 2013).

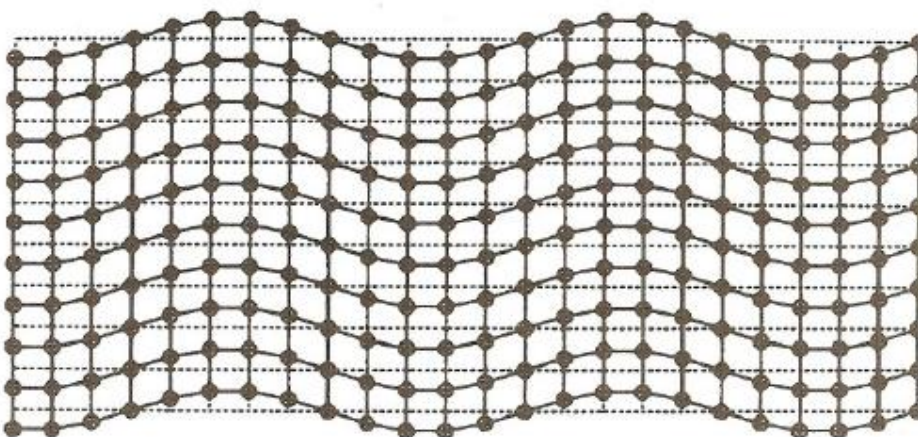
**Πίνακας 3.1:** Ακουστικές ταχύτητες και εμπεδήσεις για διαμήκη διατμητικά και κύματα Rayleigh για διάφορα υλικά (Beattie, 2013).

Material	$V_l$	$V_s$	$V_r$	$\rho$	$Z_l$	$Z_s$	$Z_r$
Units	mm/ $\mu$ sec	mm/ $\mu$ sec	mm/ $\mu$ sec	mg/mm <sup>3</sup>	mg/mm <sup>2</sup> $\mu$ sec	mg/mm <sup>2</sup> $\mu$ sec	mg/mm <sup>2</sup> $\mu$ sec
Aluminum	6.42	3.04	2.87	2.70	17.30	8.20	7.70
Brass	4.70	2.11	1.99	8.60	40.60	18.30	17.10
Steel	5.94	3.25	3.03	7.80	46.50	25.40	23.60
Nylon	2.62	1.07	1.01	1.11	2.86	1.18	1.12
Lucite	2.68	1.10	1.04	1.18	3.16	1.30	1.23
Water	1.50	-	-	1.00	1.50	-	-
Air	0.33	-	-	0.00123	0.0004	-	-

Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα μέσο ονομάζονται κύματα μέσου. Τα δύο βασικά είδη των συγκεκριμένων κυμάτων είναι τα διαμήκη (θλιπτικά) και τα διατμητικά κύματα. Και στα δύο αυτά κύματα ο ελάχιστος άξονας των ελλειπτικών μονοπατιών τείνει στο μηδέν οδηγώντας σε μια κατά προσέγγιση γραμμική ταλαντωτική κίνηση. Για τα διαμήκη κύματα η μέση κίνηση των ατομικών μονοπατιών στην περιοχή του υλικού είναι παράλληλη στην κατεύθυνση μετάδοσης του κύματος και τα διατμητικά κύματα παρουσιάζουν τη μέση κίνηση τους ανάλογη προς την κατεύθυνση μετάδοσης του κύματος.



(a)



(b)

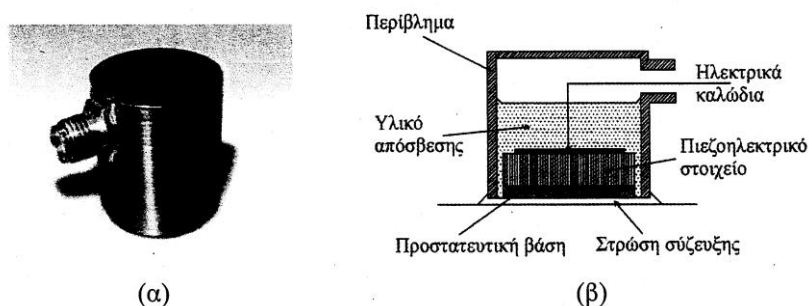
**Σχήμα 3.5:** Μετατόπιση ατόμων στα ακουστικά κύματα α) θλιπτικά κύματα και β) διατμητικά κύματα (Beattie, 2013).

### 3.6 Εξοπλισμός ακουστικών εκπομπών

#### 3.6.1 Αισθητήρες και προενισχυτές

Η επιλογή του αισθητήρα εξαρτάται από την ευαισθησία και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του αισθητήρα σε ένα σύστημα παρακολούθησης ΑΕ. Οι συνηθέστεροι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι πιεζοηλεκτρικοί. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες αποτελούνται από ειδικά κεραμικά υλικά συνήθως μολύβδου-ζirkονίου-πανίου (lead-zirconate-titanate, PZT) που είναι και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και η

μετακίνηση στην επιφάνεια του λόγω του κύματος ακουστικής εκπομπής μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Οι αισθητήρες μετατρέπουν το κύμα της τάσης σε ηλεκτρικό σήμα και αυτός είναι και ο βασικός λόγος που ονομάζονται μορφοτροπείς (transducer).



**Σχήμα 3.6:** Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Κατσικογιάννης κ.α., 2007)

Οι αισθητήρες στα συστήματα ακουστικής εκπομπής έχουν συχνότητες απόκρισης τέτοιες ώστε να είναι αμελητέος ο θόρυβος από το περιβάλλον. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι απλοί ή διαφορικοί, αποτελούνται από έναν κρύσταλλο που είναι ευαίσθητος στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο αν είναι απλοί ενώ οι διαφορικοί αισθητήρες αποτελούνται από δυο κρυστάλλους αντίθετης πολικότητας. Στην περίπτωση των διαφορικών αισθητήρων το κύμα της ακουστικής εκπομπής παράγει δυο ηλεκτρικά σήματα αντίθετης πολικότητας που μεταβαίνουν σε έναν διαφορικό προενισχυτή που ενισχύει το σήμα τους. Η διαφορά των σημάτων αντιστοιχεί στο διπλάσιο της εξόδου ενός μονού κρυστάλλου. Η ευαισθησία του αισθητήρα γίνεται αντιληπτή από το διάγραμμα απόκρισης συναρτήσει της πυκνότητας.

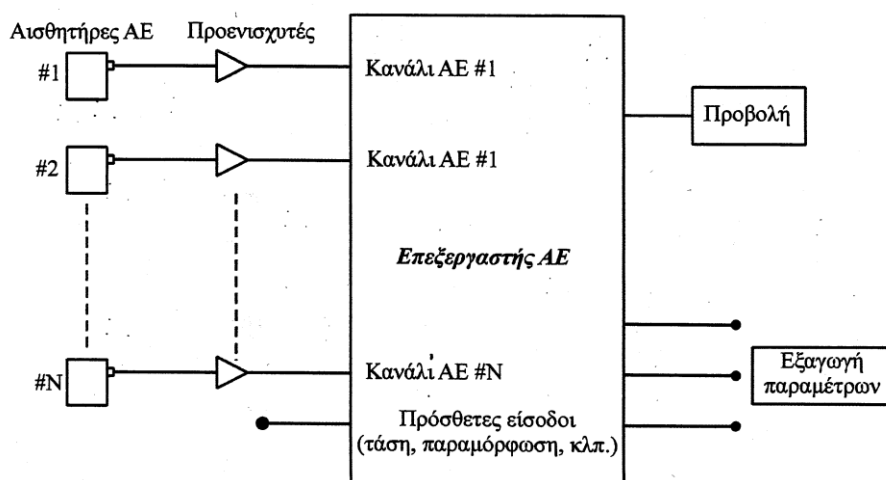
Οι προενισχυτές παράγουν σήμα μεγαλύτερης τάσης το οποίο είναι πιο εύκολο στην περαιτέρω επεξεργασία του. Το πλάτος του σήματος της ακουστικής εκπομπής ενισχύεται σύμφωνα με τη σχέση (Κατσικογιάννης κ.α., 2007):

$$dB=20\log(V_{\max}/1\ \mu V) \quad (6)$$

Τα σημερινά συστήματα παρακολούθησης ακουστικών εκπομπών ανιχνεύουν σήματα ως 4μV στον τυπικό μορφοτροπέα. Το πλάτος του σήματος μιας ακουστικής εκπομπής εκφράζεται σε dB όπου 1μV αντιστοιχεί σε 0dB και τα 100mV σε 100dB.

### 3.6.2 Μονάδα επεξεργασίας

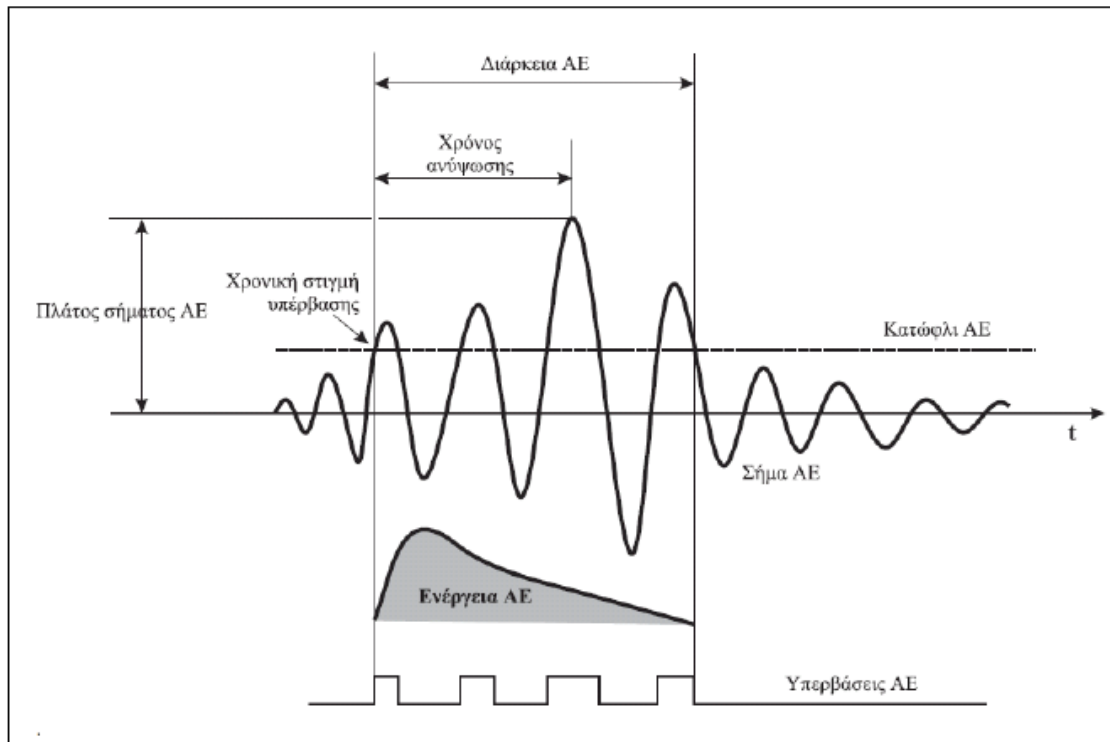
Κάθε αισθητήρας ενός συστήματος ακουστικής εκπομπής δέχεται ένα ελαστικό εντατικό σήμα το οποίο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό και ενισχύεται, φιλτράρεται και επεξεργάζεται από ειδικά συστήματα ακουστικής εκπομπής. Τα ηλεκτρονικά συστήματα ακουστικής εκπομπής είναι πολυκάναλα έχουν δυνατούς επεξεργαστές που αναλύουν το σήμα και καταγράφουν τις παραμέτρους τους σε πραγματικό χρόνο (Αναστασόπουλος, 1998).



**Σχήμα 3.7:** Διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας ακουστικών εκπομπών (Αναστασόπουλος, 1998).

### 3.7 Παράμετροι ακουστικών εκπομπών

Η επεξεργασία των σημάτων ακουστικής εκπομπής είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα δεδομένου πως κατά τη διάρκεια τους καταγράφονται υπερβολικά πολλά γεγονότα. Οι κύριες παράμετροι που κάνουν ένα σήμα ακουστικής εκπομπής να διαφέρει από τα υπόλοιπα είναι το πλάτος του σήματος, ο χρόνος ανύψωσης, η διάρκεια του και οι απαριθμήσεις (Κατσιογιάννης κ.α., 2007).



**Σχήμα 3.8:** Κυματομορφή ακουστικής εκπομπής με καταγεγραμμένες τις βασικές παραμέτρους της (Σοφιανός κ.α., 2008).

Παρακάτω καταγράφονται ορισμένες χαρακτηριστικές παράμετροι των γεγονότων της Ακουστικής Εκπομπής καθώς επίσης και η σχετική ορολογία (Μπακογιάννης, 2011, Κυπριωτάκη, 2012, Κούρτης, 2013, Grosse, 2008):

- **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.



- **Κατανομή πλάτους (Amplitude Distribution):** Ψηφιακή αναπαράσταση του αριθμού των σημάτων ΑΕ σε συγκεκριμένο ή και μεγαλύτερο πλάτος, σχεδιασμένη ως λειτουργία του πλάτους
- **Απόσβεση (Attenuation):** Απώλεια πλάτους με την απόσταση που διανύει το κύμα καθώς ταξιδεύει στην υπό δοκιμή δομή.
- **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 ( $\mu s$ ), 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.
- **Απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο (counts to peak):** Παράμετρος που προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ακουστικής εκπομπής υπερβαίνει το κατώφλι τάσης μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τάση του (πλάτος σήματος)
- **Χρόνος Αφίξης (Arrival Time):** Η χρονική στιγμή που ένα σήμα ακουστικής εκπομπής υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι. Απαραίτητος για τον υπολογισμό της θέσης της πηγής του γεγονότος ΑΕ.
- **Ένταση (Intensity):** Η μέτρηση του μεγέθους των ανιχνευμένων σημάτων εκπομπής, όπως το μέσο πλάτος, η μέση ενέργεια ΑΕ ή ο μέσος όρος counts.

- **Τοποθεσία/Εντοπισμός (Location):** Αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών αισθητήρων ΑΕ για τον προσδιορισμό των σχετικών θέσεων των πηγών ακουστικής εκπομπής.
- **Ακουστική εκπομπή (Acoustic Emission):** Ελαστικά κύματα παραγόμενα από την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από πηγές εντός του υλικού.
- **Αισθητήρας:** Συσκευή που περιέχει ένα μορφοτροπικό στοιχείο, που μετατρέπει τα κινούμενα κύματα ΑΕ σε ηλεκτρική τάση.
- **Κανάλια (Channels):** Αισθητήρες ΑΕ και ο συναφής εξοπλισμός για διαβίβαση, τροποποίηση, εντοπισμό και μέτρηση των σημάτων που έρχονται από αυτά.
- **Guard Sensors:** Αισθητήρες των οποίων η κύρια λειτουργία είναι η εξάλειψη του εξωτερικού θορύβου, βασιζόμενοι στις διαφορές του χρόνου άφιξης.
- **Κατώφλι Τάσης (Threshold):** Όριο τάσης πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα Ακουστικής Εκπομπής.
- **Ανίχνευση ΑΕ:** Αναγνώριση της παρουσίας σήματος (πρακτικώς/τυπικώς επιτυγχάνεται όταν το σήμα διασχίζει το όριο ανίχνευσης).
- **Θόρυβος (Noise):** Σήματα παραγόμενα από αιτίες διαφορετικές από αυτές των ακουστικών εκπομπών ή από πηγές που δεν έχουν σχέση με το σκοπό της δοκιμής.
- **Συμβάν (Event):** Τοπική αλλαγή στο εσωτερικό ενός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή.
- **Δραστηριότητα ΑΕ (Activity):** Μέτρηση της ποσότητας της εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας των γεγονότων.
- **Ενεργοποίηση ΑΕ (Activation):** Η εκδήλωση ακουστικής εκπομπής λόγω εφαρμογής αιτίου, όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα, κλπ.

- **Σήμα ΑΕ:** Το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μορφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας).
- **Χαρακτηριστικά Σήματος (Signal Features):** Μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος ΑΕ, όπως το πλάτος, η ενέργεια σήματος ΑΕ, η διάρκεια, ο χρόνος ανύψωσης και τα counts.
- **Ισχύς Σήματος (Signal Strength):** Η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνευόμενου σήματος ΑΕ. Επίσης γνωστή ως “σχετική ενέργεια” (relative energy) και “Marse”.
- **Πηγή:** Η φυσική προέλευση ενός ή περισσότερων γεγονότων ΑΕ.
- **Ενέργεια πηγής (Source Energy):** Η ολική ενέργεια (όλων των μορφών) που διαχέεται από τις διεργασίες της πηγής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 4.1 Μέτρηση ακουστικής εκπομπής

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο USB AE Node. Το καλώδιο επεξεργασίας συνδέθηκε με ένα mini USB στον υπολογιστή για τη μεταφορά δεδομένων. Οι αισθητήρες (τύπου PICO) προσαρμόζονται με το υλικό σύζευξης πάνω στο δοκίμιο που πρόκειται να μελετηθεί.



**Σχήμα 4.1:** Σύστημα παρακολούθησης ακουστικής εκπομπής

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή τοποθετήθηκαν στα δοκίμια 1.4, 4.4 και 7.4 σε απόσταση 3cm από τις οριζόντιες επιφάνειες πάνω στον κατακόρυφο άξονα του κυλινδρικού δοκιμίου και αντιδιαμετρικά αυτού. Στο δοκίμιο 2.4 τοποθετήθηκαν 2.5cm από τις οριζόντιες επιφάνειες πάνω στο κατακόρυφο άξονα και αντιδιαμετρικά ενώ στο δοκίμιο 3.4 τοποθετήθηκαν με τον ίδιο τρόπο αλλά στα 2cm. Για την καλύτερη απόκριση των αισθητήρων πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο υλικό σύζευξης με αυξημένο ιξώδες για την μεγιστοποίηση της επιφάνειας σύζευξης μεταξύ των αισθητήρων και της επιφάνειας του δοκιμίου. Ξηρή σύζευξη δεν

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

Η καταγραφή των αποτελεσμάτων έγινε στο λογισμικό AE Win το οποίο ρυθμίστηκε ως εξής:

- Η τάση κατωφλιού (threshold) επιλέχθηκε για τα δοκίμια 4.4 και 7.4 στα 42dB και για δοκίμια 1.4, 2.4, 3.4 στα 28dB
- Η ενίσχυση του σήματος στον προενισχυτή ορίστηκε στα 40dB
- Κατώτερη τιμή του αναλογικού φίλτρου τέθηκε το 20kHz και ανώτερη το 1MHz.
- Ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε στα 5MSPS (Mega Samples Per Second).

AE Hardware Setup: AE USB

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

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

**Σχήμα 4.2:** Παράμετροι ακουστικής εκπομπής για κάθε κανάλι για τα δοκίμια 4.4, 7.4.

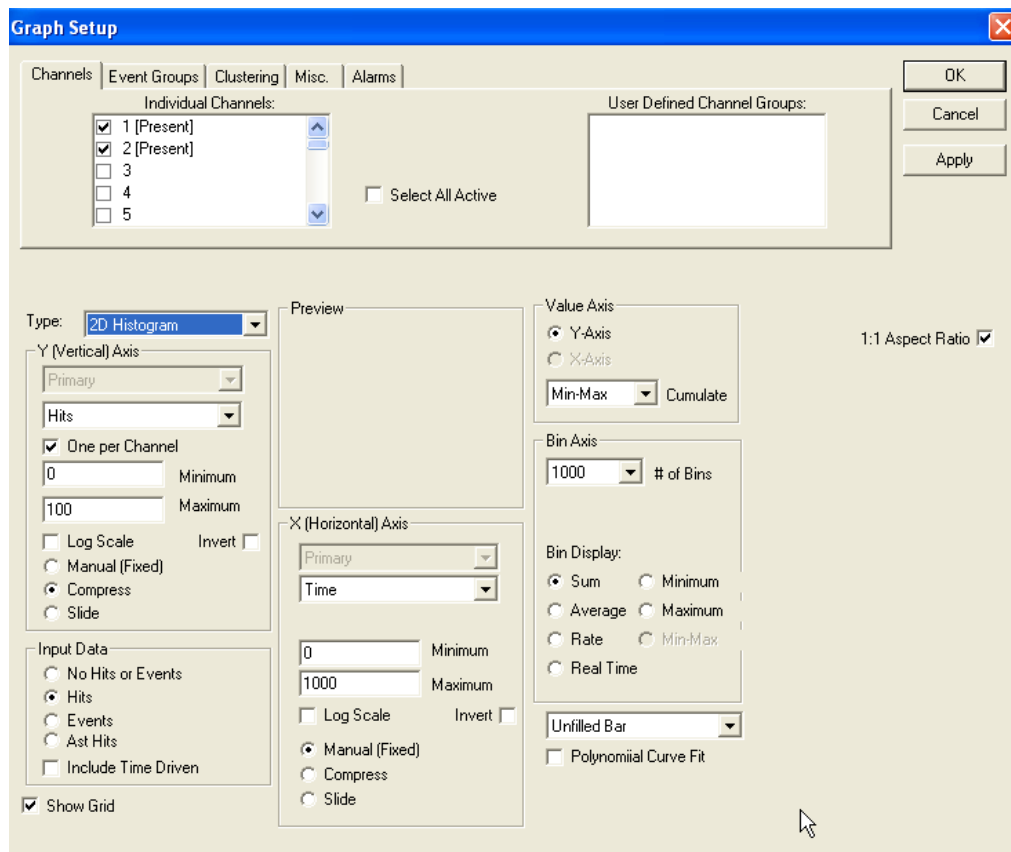
Για την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην πρώτη υπέρβαση του κατωφλιού και του μεγίστου του σήματος της ακουστικής εκπομπής ρυθμίζεται στα 50μs (Peak Definition Time) ενώ η χρονική διάρκεια ενός σήματος ώστε να αποφεύγεται η καταγραφή των ανακλάσεων του ρυθμίστηκε στα 200μs (Hit Definition Time).

Ο χρόνος που ορίστηκε να αναμένει το σύστημα μέχρι να ξεκινήσει την καινούργια καταγραφή (Hit Lockout Time) ρυθμίζεται στα 300μs.

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

**Σχήμα 4.3:** Ορισμός χρονικών παραμέτρων για όλα τα δοκίμια

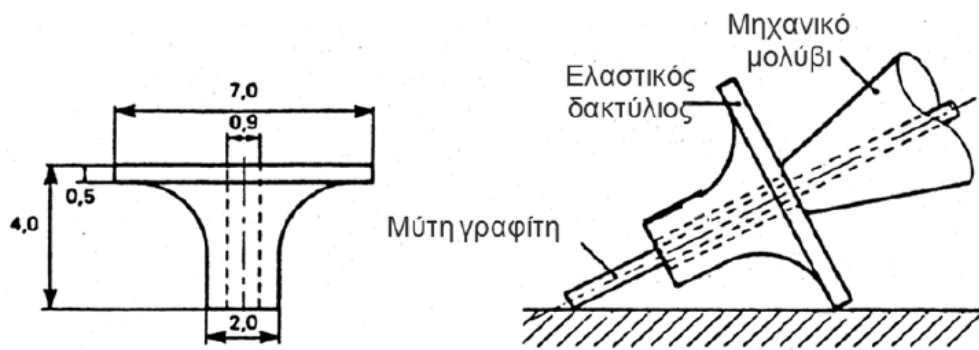
Στο στήσιμο του προγράμματος (layout4.lay) για τα γραφήματα των παραμέτρων των ακουστικών εκπομπών γίνεται η επιλογή (per channel) και επιλέγεται 0-1000. Επιπρόσθετα για την ορθή και συγχρονισμένη εξαγωγή δεδομένων της ακουστικής εκπομπής win για USB και της δοκιμής γίνεται με την κατάλληλη ρύθμιση των αξόνων. Έτσι στον άξονα του χρόνου επιλέγονται στο λογισμικό Bin Axis 1000 και Horizontal Axis 0-1000.



**Σχήμα 4.4:** Καθορισμός διαστήματος μελέτης οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα.

## 4.2 Pencil Lead Break (PLB)

Η Pencil Lead Break (PLB) είναι μια εύκολη και αποτελεσματική μέθοδος προσομοίωσης πηγών ακουστικών εκπομπών (Sause 2001). Οι πηγές αυτές αποτελούνται από μύτες μολυβιού 2H πάχους 0.5mm οι οποίες θραύονται σε κάμψη όντας σε επαφή με άκαμπτη επιφάνεια, ενώ για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιείται ελαστικός δακτύλιος ώστε να μην ακουμπήσει το μεταλλικό μέρος του μολυβιού στο δοκίμιο.



**Σχήμα 4.5:** Ειδικό προστατευτικό κάλυμμα προσαρμοσμένο στην άκρη πρότυπου μηχανικού μολυβιού (Hardy, 2003).

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

### 4.3 Εξεταζόμενο υλικό



**Σχήμα 4.6:** Λατομείο μαρμάρου Κομνηνών Νέστου.



Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν κυλινδρικά δοκίμια μαρμάρου Κομνηνών Νέστου. Τα μάρμαρα είναι υλικά που προέρχονται κατά τους γεωλόγους από την μεταμόρφωση των ανθρακικών πετρωμάτων που βρίσκονται σε μεγάλη πίεση και θερμοκρασία και σε μεγάλο βάθος στο φλοιό της Γης. Τα μάρμαρα είναι συνήθως λευκά υλικά ενώ δεν αποκλείεται να είναι ερυθρωπά ή κιτρινωπά.

Τα μάρμαρα διακρίνονται σε ασβεσπικά ή δολομιτικά με τα πρώτα να έχουν ως κύριο υλικό τον ασβεστίτη και τα δεύτερα το δολομίτη. Από την εμπορική σκοπιά ως μάρμαρο χαρακτηρίζεται κάθε συμπαγές πέτρωμα που μπορεί να κοπεί, να στιλβωθεί και να αποτελέσει διακοσμητικό ή δομικό υλικό. (Πολυκρέτη, 1999)

Σε όλη την Ελλάδα εκτός από την Πεντέλη τα μάρμαρα εξορύσσονται επιφανειακά ενώ στην Πεντέλη η εξόρυξη των μαρμάρων γίνεται με υπόγεια εκμετάλλευση. Η επιφανειακή εξόρυξη χαρακτηρίζεται σε τρεις τύπους ανάλογα με τη μορφή και τη θέση εκσκαφής τις ορθές βαθμίδες, τα κατά την φυσική επιφάνεια μέτωπα και στην εξόρυξη με διάνοιξη τάφρων (Αγγελόπουλος, 2000).

Οι μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου προσδιορίζονται μετά την εξόρυξη του μέσω πρότυπων μετρήσεων που βασίζονται στα διεθνή πρότυπα DIN, ASTM μέσω των οποίων πιστοποιείται η ταυτότητα και η χρήση του υλικού. Οι ιδιότητες που προσδιορίζονται είναι οι φυσικές, μηχανικές και οι τεχνικές. Στις φυσικές ιδιότητες συμπεριλαμβάνεται το χρώμα, ο ιστός, το ειδικό βάρος και η υδατοαπορρόφηση, στις μηχανικές ιδιότητες περιλαμβάνονται η φαινόμενη πυκνότητα, η αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό και η ελαστικότητα ενώ στις τεχνικές ιδιότητες περιλαμβάνονται η αντοχή σε φθορά από τριβή, η αντοχή σε πρόσκρουση η ημισκληρότητα και ο συντελεστής θερμικής διαστολής (Πολυκρέτη, 1999).

Το μάρμαρο Κομνηνών Νέστου εξορύσσεται με υπαίθρια εκμετάλλευση, σε λατομείο που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 35km ανατολικά της Καβάλας προς Ξάνθη. Η συνηθέστερη χρήση είναι ως δομικό υλικό. Το μάρμαρο είναι λευκό με μερικά γκρίζα “νερά” λόγω της ύπαρξης δολομίτη. Η ορυκτολογική σύσταση του κατά βάρος σύμφωνα με την ορυκτολογική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Γενικής και

Τεχνικής ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, είναι ασβεστίτης 93,4%, δολομίτης 6% και χαλαζίας 0,6%. Έχει ειδικό βάρος  $2,67\text{g/cm}^3$  και συντελεστή απορρόφησης κατά βάρος 0,09%. Αποτελεί το πιο γνωστό είδος μαρμάρου το οποίο εξάγεται στις αραβικές χώρες στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και στην Ευρώπη (Κακλής κ.α., 2010).

#### 4.4 Προετοιμασία δοκιμών για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Για την ορθή μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των μαρμάρων που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική απαιτείται η ορθή δειγματοληψία και η διαμόρφωση των δοκιμών. Για τον προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη χρησιμοποιήθηκαν πέντε δοκίμια κανονικής γεωμετρίας.

Από τετραγωνικό όγκο μαρμάρου Κομνηνών Νέστου πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία στο εργαστήριο της Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η πυρηνοληψία πραγματοποιήθηκε σε κατάλληλη βάση διάτρησης (drill press) από την οποία προήλθε η κοπή κυλινδρικών δοκιμών. Η κοπή πραγματοποιήθηκε σε κατάλληλο εργαστηριακό δισκοπρίονο κοπής με αδαμαντοτροχό (diamond saw). Στη συνέχεια τα δοκίμια διαμορφώνονται σε κατάλληλο εργαστηριακό λειαντή (grinding machine) και ακολούθως μετρούνται με τη χρήση παχύμετρου τύπου Vernier με μέγιστη δυνατή ακρίβεια 0,1mm. Οι διαστάσεις των μετρούμενων δοκιμών φαίνονται στον πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4.1:** Διαστάσεις εξεταζόμενων δοκιμών

Δοκίμιο	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hμ (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Dμ (mm)
1.4	103,550	103,550	103,500	<b>103,533</b>	52,300	52,300	52,350	<b>52,317</b>
2.4	105,750	105,900	105,800	<b>105,817</b>	52,300	52,250	52,250	<b>52,267</b>
3.4	101,050	101,000	101,050	<b>101,033</b>	52,200	52,200	52,200	<b>52,200</b>
4.4	105,150	105,200	105,150	<b>105,167</b>	52,300	52,250	52,200	<b>52,250</b>
5.4	105,000	104,950	104,850	<b>104,933</b>	52,200	52,250	52,200	<b>52,217</b>
6.4	106,250	106,250	106,200	<b>106,233</b>	52,250	52,250	52,250	<b>52,250</b>
7.4	104,700	104,750	104,700	<b>104,717</b>	52,250	52,200	52,200	<b>52,217</b>
8.4	106,200	106,150	106,150	<b>106,167</b>	52,200	52,250	52,250	<b>52,233</b>
9.4	102,700	102,700	102,750	<b>102,717</b>	52,300	52,250	52,250	<b>52,267</b>



(α)



(β)

**Σχήμα 4.7:** Όγκος μαρμάρου Κομνηνών Νέστου (α) πριν και (β) μετά την πυρηνοληψία.



**Σχήμα 4.8:** Εργαστηριακός πυρηνολήπτης δοκιμίων κατά τη διαδικασία της διάτρησης του μαρμάρινου όγκου.



**Σχήμα 4.9:** Εργαστηριακός λειαντής δοκιμίων κατά τη διαδικασία της λείανσης.



**Σχήμα 4.10:** Εργαστηριακό δισκοπρίνο με αδαμαντοτροχό κατά την διαδικασία της κοπής του κυλινδρικού δοκιμίου.

#### 4.5 Πειραματικά αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης

Μετά τη διαστασιολόγηση τους στα δοκίμια τοποθετήθηκαν ηλεκτρικά μυκηνοσίμετρα (strain gages) για την μέτρηση πλευρικών και αξονικών ανοιγμένων παραμορφώσεων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τα ηλεκτρικά μηκυνοσίμετρα τοποθετήθηκαν σε δύο από τα πέντε δοκίμια και συγκεκριμένα στα δοκίμια 4.4 και 7.4 όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.11. Το μηκυνοσίμετρο στο δοκίμιο 4.4 βρέθηκε ελαττωματικό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μετρήσεις προς αξιολόγηση να υπάρχουν μόνο από το δοκίμιο 7.4.

Επιπρόσθετα πρέπει να τονιστεί ότι κατά τη διάρκεια των δοκιμών και πριν την πλήρη φόρτιση, στα δοκίμια επιβλήθηκαν τρεις κύκλοι φόρτισης ώστε να υπάρξει πιο σφαιρική εικόνα στην συμπεριφορά των ακουστικών εκπομπών σε σχέση με την καταπόνηση τους, όπως φαίνεται στους πίνακες 4.2 και 4.3. Οι τρεις κύκλοι φόρτισης έγιναν με έλεγχο φορτίου (load control) και η τελευταία φόρτιση ως τη θραύση του δοκιμίου έγινε με έλεγχο μετατόπισης (displacement control). Στα δοκίμια 4.4 και 7.4 η καταπόνηση τους πραγματοποιήθηκε στα επίπεδα φόρτισης και αποφόρτισης που φαίνονται στον πίνακα 4.2 και αντίστοιχα για τα δοκίμια 1.4, 2.4 και 3.4 στον πίνακα 4.3. Η φόρτιση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε με τη συσκευή φόρτισης MTS.

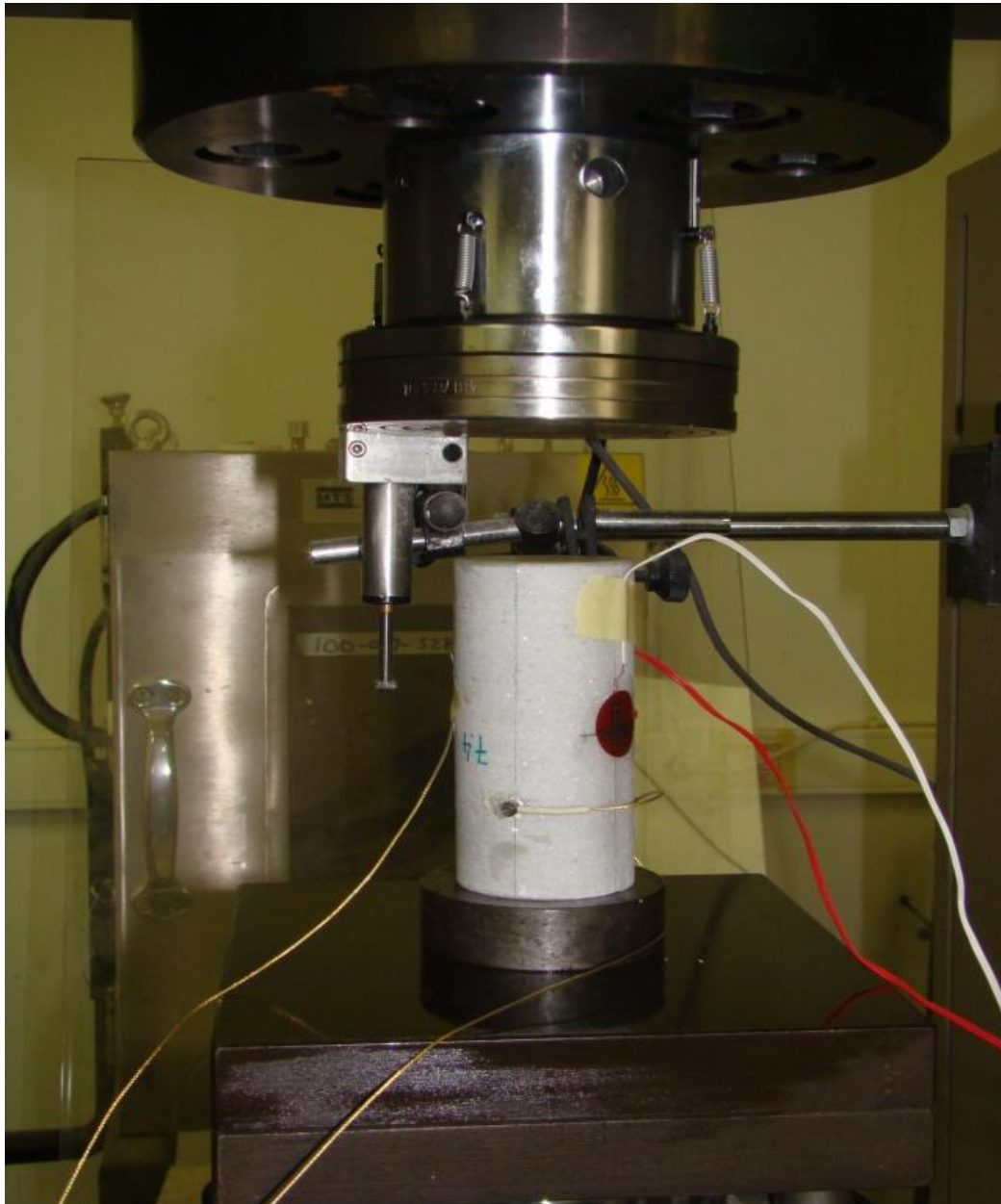
**Πίνακας 4.2:** Συγκεντρωτικός πίνακας για τα επίπεδα φόρτισης και τους ρυθμούς.

Πρόγραμμα Α						
		Ρυθμός (%)	Ρυθμός	Επίπεδο φόρτισης-αποφόρτισης (%)	Επίπεδο φόρτισης (KN)	
1	Φόρτιση	0.0313	0.5 kN/s	5	80	Load control
2	Αποφόρτιση	0.313	5 kN/s	0.625	10	
3	Φόρτιση	0.0313	0.5 kN/s	5.625	90	
4	Αποφόρτιση	0.313	5 kN/s	0.625	10	
5	Φόρτιση	0.0313	0.5 kN/s	6.25	100	
6	Αποφόρτιση	0.313	5 kN/s	0.625	10	
7	Φόρτιση	0.005	0.0025 mm/s	100	1600	Displacement control

**Πίνακας 4.3:** Συγκεντρωτικός πίνακας για τα επίπεδα φόρτισης και τους ρυθμούς.

<b>Πρόγραμμα Β</b>						
		Ρυθμός (%)	Ρυθμός	Επίπεδο φόρτισης-αποφόρτισης (%)	Επίπεδο φόρτισης (kN)	
1	φόρτιση	0.0313	0.5 kN/s	5	80	Load control
2	Αποφόρτιση	0.313	5 kN/s	0.625	0	
3	φόρτιση	0.0313	0.5 kN/s	6.875	110	
4	Αποφόρτιση	0.313	5 kN/s	0.625	0	
5	φόρτιση	0.0313	0.5 kN/s	8.75	140	
6	Αποφόρτιση	0.313	5 kN/s	0.625	0	
7	φόρτιση	0.005	0.0025 mm/s	100	1600	Displacement control





**Σχήμα 4.11:** Συσκευή φόρτισης MTS

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 δίνεται από τη σχέση:

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

όπου  $E$ : μέτρο ελαστικότητας

$\sigma$ : αξονική τάση

$\varepsilon$ : αξονική παραμόρφωση

Η παραμόρφωση υπολογίζεται από:

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

όπου  $\varepsilon$ : αξονική παραμόρφωση

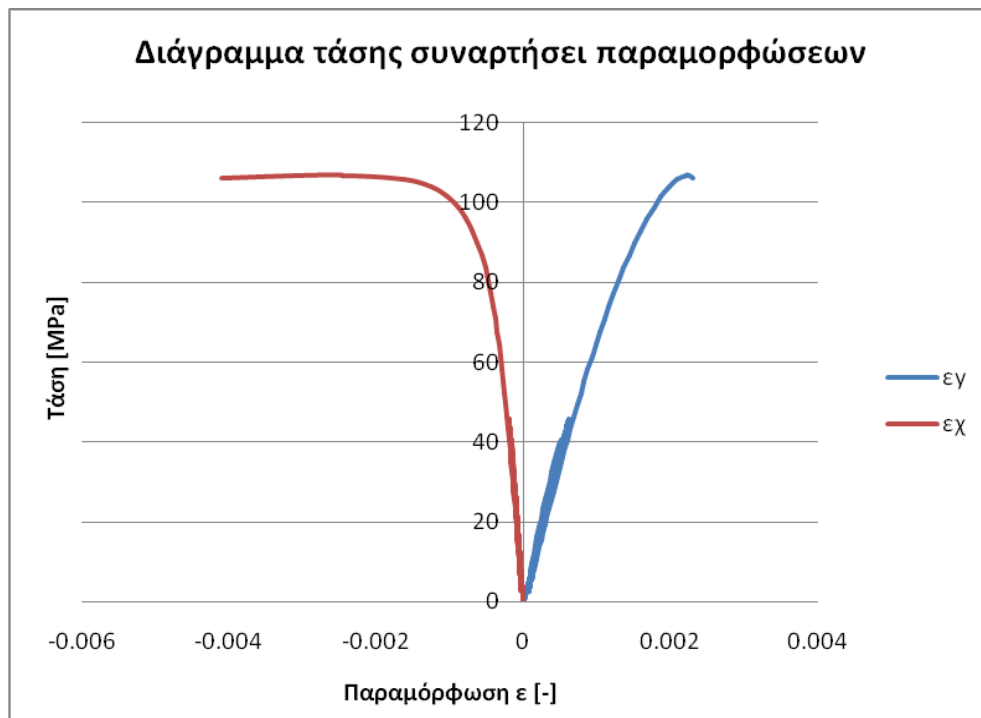
$\Delta l$ : διαφορά μετατόπισης

$l_0$ : αρχικό μήκος



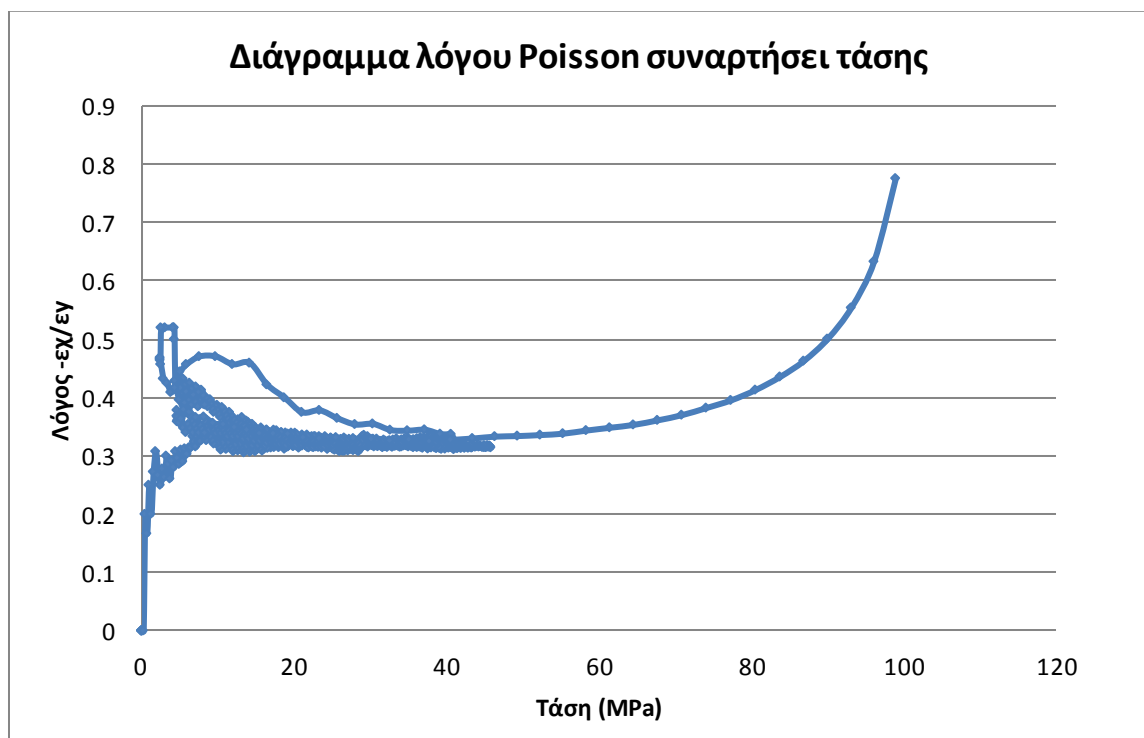
**Σχήμα 4.12:** Το δοκίμιο 7.4 μετά τη θραύση του





**Σχήμα 4.13:** Διάγραμμα τάσης συναρτήσει παραμορφώσεων για το δοκίμιο 7.4

Στο σχήμα 4.13 παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης του δοκιμίου τόσο η αξονική όσο και η εγκάρσια παραμόρφωση αυξάνονται ταυτόχρονα χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το δοκίμιο παραμορφώνεται το ίδιο και προς τους δύο άξονες. Επίσης διακρίνεται και στους δύο άξονες οι κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης.



**Σχήμα 4.14:** Διάγραμμα τάσης συναρτήσει λόγου  $\epsilon_x/\epsilon_y$  για το δοκίμιο 7.4

Σε συνδυασμό με το σχήμα 4.13 και 4.14 παρατηρείται η αύξηση του λόγου αξονικής και εγκάρσιας παραμόρφωσης που οφείλεται κυρίως στην αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης όπως παρατηρείται στο δοκίμιο από την επιβολή της τάσης. Καθώς το δοκίμιο πλησιάζει τη τάση αστοχίας παρατηρείται ότι ο λόγος αυτός παίρνει τιμές μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες για ένα πέτρωμα ( $0 \leq \nu \leq 0,5$ ). Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανόν στην αποκόλληση του μυκηνοσιμέτρου κατά την διάρκεια της δοκιμής και γι' αυτό ο λόγος των παραμορφώσεων θεωρείται ότι δεν αποτελεί τον λόγο Poisson καθώς δεν ευρίσκεται στο άνω εύρος τιμών. Όμως θα μπορούσε να ληφθεί ως αντιπροσωπευτικός λόγος Poisson η τιμή του λόγου παραμορφώσεων που αντιστοιχεί στο 50% του  $\sigma_{max}$ . δηλαδή  $\nu = 0.36$ .

**Πίνακας 4.4:** Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης.

Δοκίμιο	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{max}$ (MPa)	Μέσο μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Τέμνον μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Χρόνος δοκιμής (s)
1.4	103.78	80.61	28.59	83.39	742
2.4	104.52	65.13	8.99	71.50	808
3.4	103.77	67.30	5.89	63.30	756
4.4	101.77	28.36	15.72	28.35	603
7.4	106.80	55.25	105.55	59.70	894

## 4.6 Αποτελέσματα δοκιμών

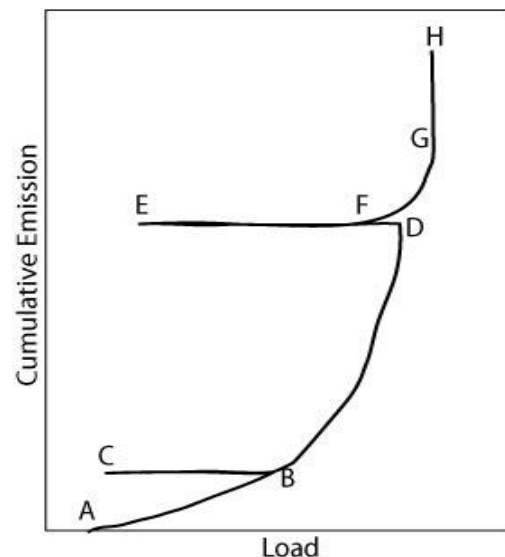
### 4.6.1 Φαινόμενο Kaiser

Πριν την καταγραφή των αποτελεσμάτων θα ήταν σωστό να αναφερθεί το φαινόμενο Kaiser. Έτσι ώστε να γίνει και καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών.

Η εξέταση ενός υλικού σε διαφορετικές τιμές εξωτερικών δυνάμεων και η παραγωγή ποικίλων AE κυματομορφών, μας δίνει πληροφορίες για τη δομική ακεραιότητα του υλικού. Από την μελέτη αυτών των κυματομορφών έχουν παρατηρηθεί δύο φαινόμενα: Kaiser effect και Felicity Effect. Σύμφωνα,

λοιπόν, με το φαινόμενο Kaiser, για την παραγωγή ΑΕ κυματομορφών θα πρέπει η ασκούμενη δύναμη να είναι μεγαλύτερου μεγέθους από την όποια άλλη δύναμη έχει ήδη ασκηθεί στο σώμα στο παρελθόν. Με άλλα λόγια, ήδη υπάρχουσες ασυνέχειες στη δομή ενός υλικού δεν μεγαλώνουν αν η ασκούμενη σε αυτά δύναμη δεν υπερβαίνει σε τιμή την όποια δύναμη έχει ήδη ασκηθεί στο σώμα. Στο σχήμα βλέπουμε ότι καθώς στο σώμα ασκείται δύναμη παράγεται σήμα ακουστικής εκπομπής στο τμήμα ΑΒ. Στο τμήμα ΒCΒ διαπιστώνουμε ότι η δύναμη που ασκείται πλέον στο σώμα είναι μικρότερη από αυτή

που ασκούνταν κατά το ΑΒ και



**Σχήμα 4.15:** Kaiser Effect – Felicity (Κόγια Μ., 2012)

επομένως δεν παράγεται πλέον ακουστικό σήμα. Αντίθετα, στο ΒD παρατηρείται νέα ακουστική εκπομπή που όμως σταματά στο D αφού πιθανότατα η τιμή της δύναμης στο τμήμα DEF είναι μικρότερη από τα προηγούμενα τμήματα. Στο σημείο F όμως παρατηρείται η έναρξη μιας νέας ακουστικής εκπομπής παρότι η δύναμη δεν έχει φτάσει το όριο του σημείου D.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Felicity Effect και για τον υπολογισμό της έντασης αυτού του φαινομένου χρησιμοποιείται το Felicity Ratio που ισοδυναμεί με το πηλίκο της τιμής της δύναμης στο σημείο F προς την τιμή αυτής στο σημείο D ( $F/D$ ).

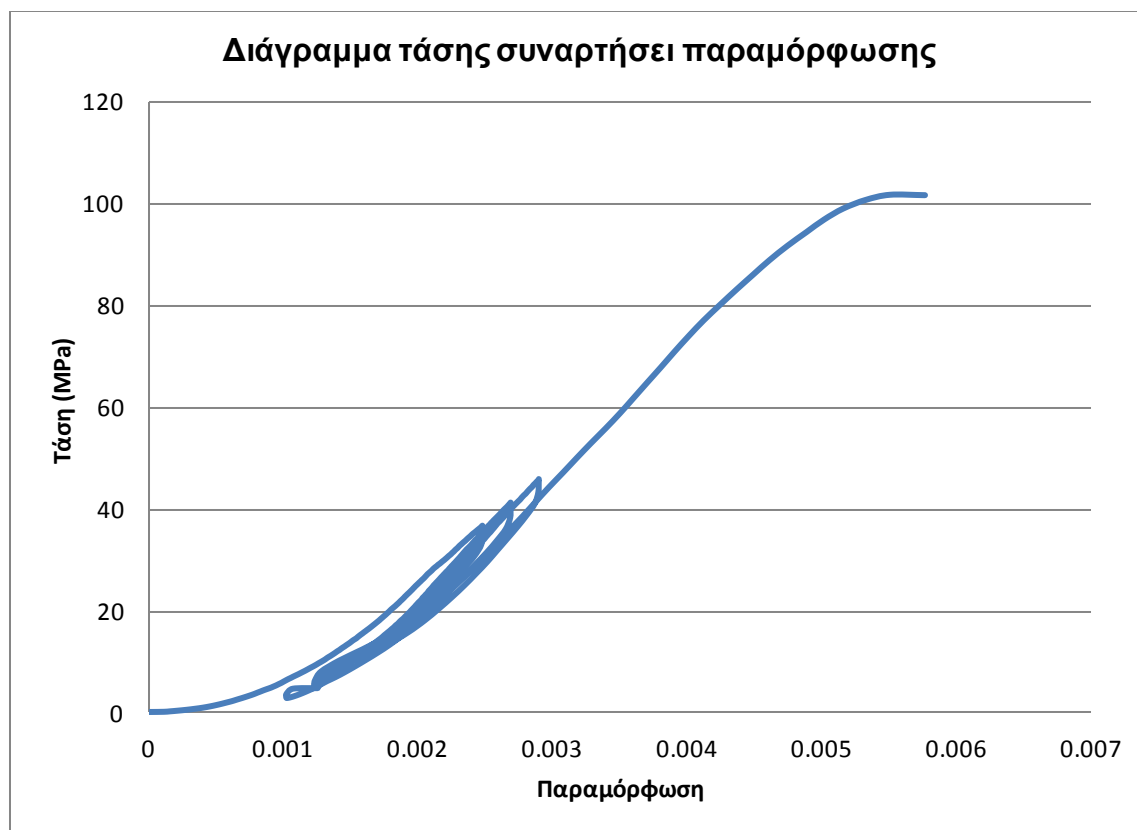
Με την παρατήρηση, λοιπόν και των δύο προηγούμενων φαινομένων μπορεί να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία για την δομική κατάσταση ενός υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται αν ασκηθεί στο σώμα σταθερή δύναμη για κάποιο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια εξακολουθούν να παρατηρούνται ακουστικές εκπομπές, καθόλη τη διάρκεια άσκησης της δύναμης, όπως φαίνεται και στο τμήμα GH του σχήματος. Σε αυτή την περίπτωση πιθανόν κάποια σημαντική παραμόρφωση έχει πραγματοποιηθεί στο υλικό.

Επιπρόσθετα, το υλικό μπορεί να έχει υποστεί κάποιες παραμορφώσεις εάν σε αυτό ασκηθεί πανομοιότυπη δύναμη με αυτή που προκάλεσε αυτές τις αστοχίες και εξακολουθούν να παρατηρούνται ΑΕ κυματομορφές (Κόγια, 2012).

#### **4.6.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων**

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης με ταυτόχρονη παρατήρηση ακουστικών εκπομπών σε δοκίμια μαρμάρου Κομνηνών Νέστου. Στην ενότητα αυτή θα συζητηθούν τα διαγράμματα των ακουστικών παραμέτρων που προέκυψαν από την επεξεργασία στο πρόγραμμα Excel καθώς επίσης θα σχολιαστεί και η συσχέτιση τους με το φορτίο και το χρόνο. Τα διαγράμματα αυτά φανερώνουν πως εξελίσσεται το φαινόμενο των ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς αυξάνεται σταδιακά η φόρτιση στο δοκίμιο.

Στα δοκίμια παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Επιπλέον παρατηρήθηκε και επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα και σε σχέση με τις ακουστικές παραμέτρους. Οπότε κρίθηκε σκόπιμο η παρουσίαση των αποτελεσμάτων ενός μόνο δοκιμίου και ενδεικτικά του δοκιμίου 4.4.

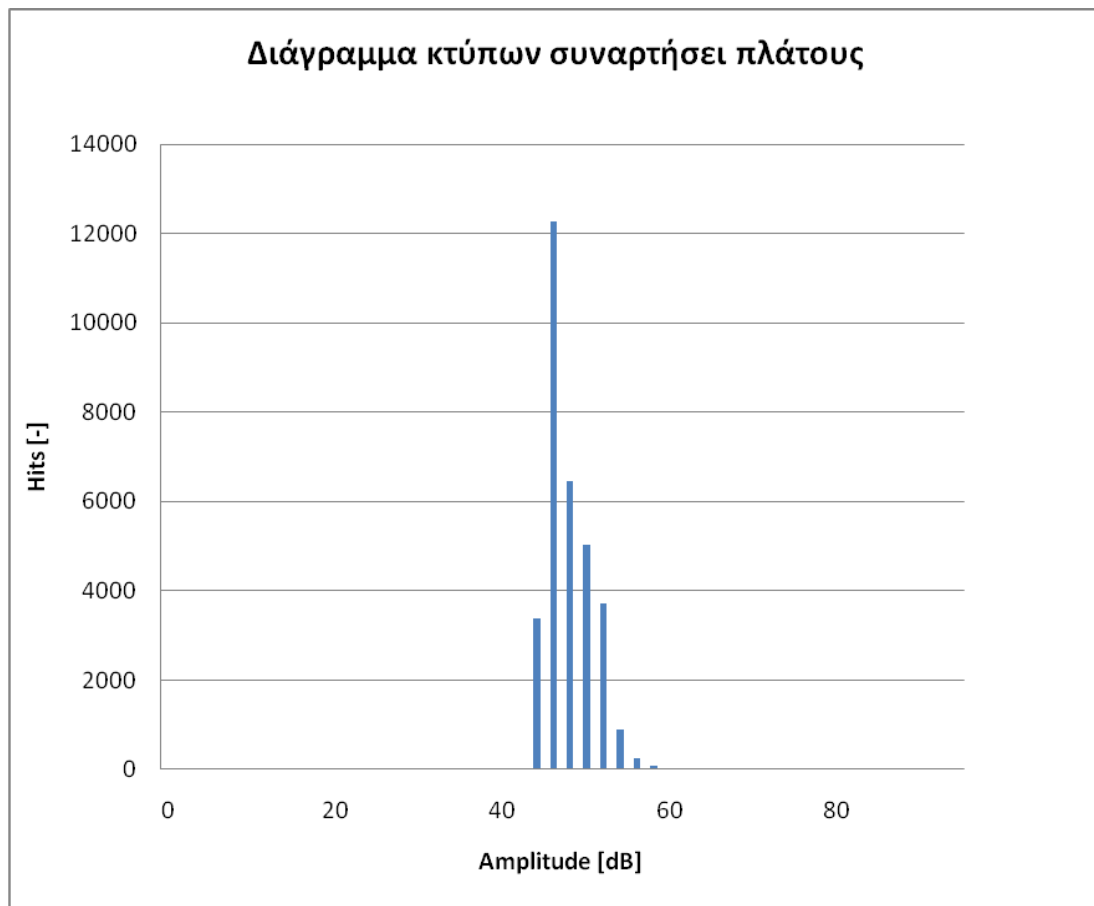


**Σχήμα 4.16:** Διάγραμμα τάσης συναρτήσει παραμόρφωσης

**Πίνακας 4.5:** Στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου

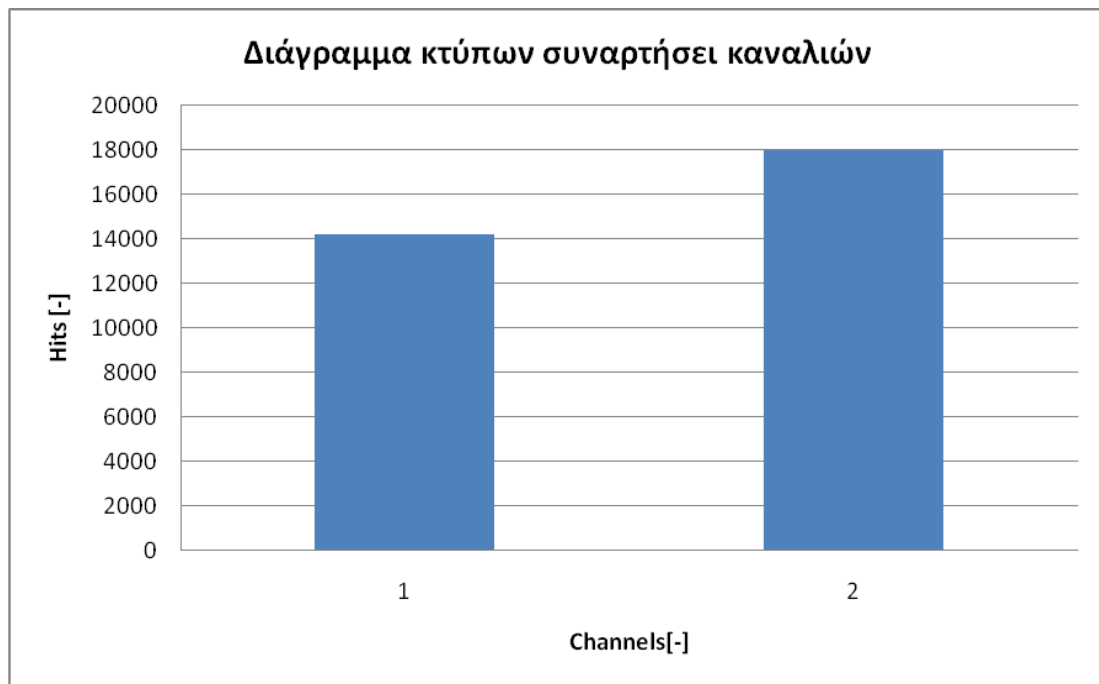
	Τάση (MPa)
1η φόρτιση	36
1η αποφόρτιση	5.46
2η φόρτιση	41.24
2η αποφόρτιση	5.16
3η φόρτιση	45.83
3η αποφόρτιση	2.75
φόρτιση μέχρι αστοχία	101,77

Η αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη είναι 101.77MPa και το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε στα 28.35 GPa.



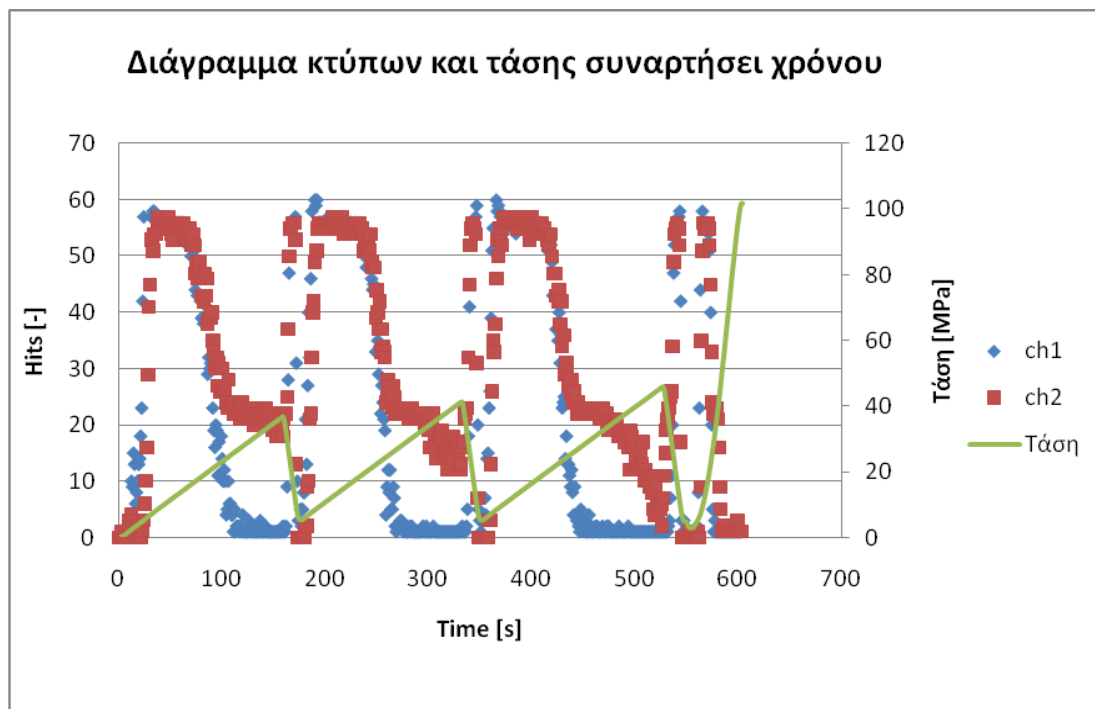
**Σχήμα 4.17:** Χτύποι ακουστικής εκπομπής συναρτήσει πλάτους.

Στο διάγραμμα αυτό σχήμα 4.17 παρατηρούνται πόσοι χτύποι έχουν καταγραφεί σε συγκεκριμένο πλάτος ακουστικών εκπομπών και για τα δυο κανάλια. Η καταγραφή των κτύπων ξεκίνησε μετά τα 42 dB που είχε οριστεί ως κατώφλι για την αποφυγή καταγραφής θορύβου.



**Σχήμα 4.18:** Χτύποι ακουστικής εκπομπής συναρτήσεϊ των καναλιών μέτρησης

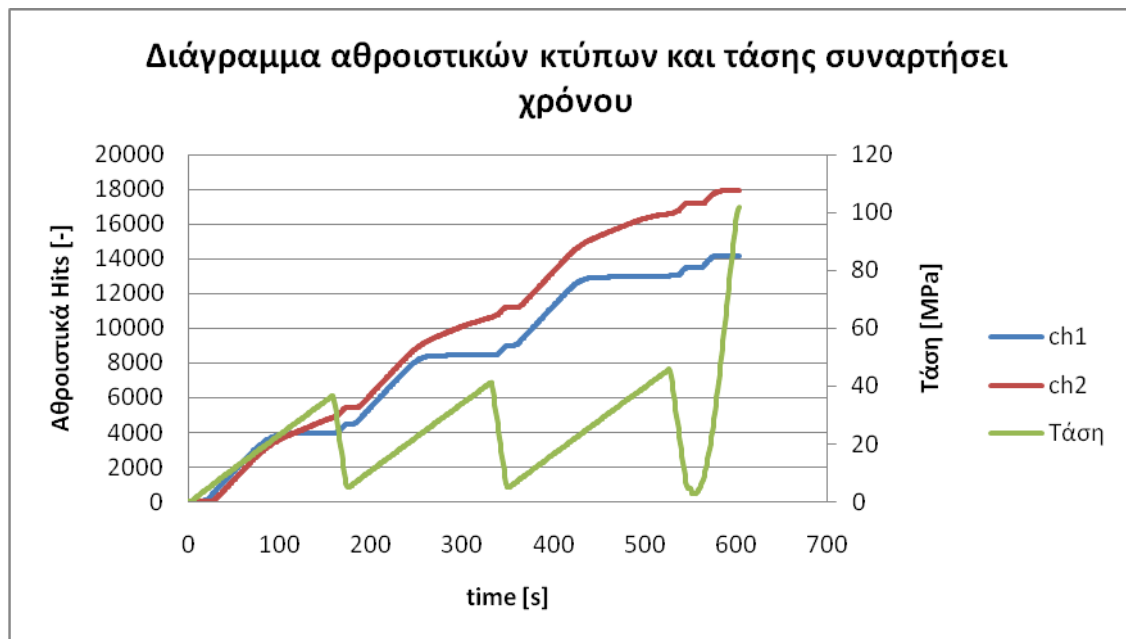
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18 το δεύτερο κανάλι παρουσιάζει περισσότερα κτυπήματα ακουστικής εκπομπής σε σχέση με το πρώτο. Συγκεκριμένα στο δεύτερο κανάλι καταγράφονται κατά 18.7% περισσότεροι κτύποι από το πρώτο κανάλι. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στη διαφορετική απόκριση που είχαν οι αισθητήρες λόγω της διαφορετικής τους θέσης στο δοκίμιο (οι αισθητήρες ήταν τοποθετημένοι 3cm από τις δύο οριζόντιες επιφάνειες και αντιδιαμετρικά)



**Σχήμα 4.19:** Διάγραμμα κτύπων και τάσης συναρτήσει του χρόνου

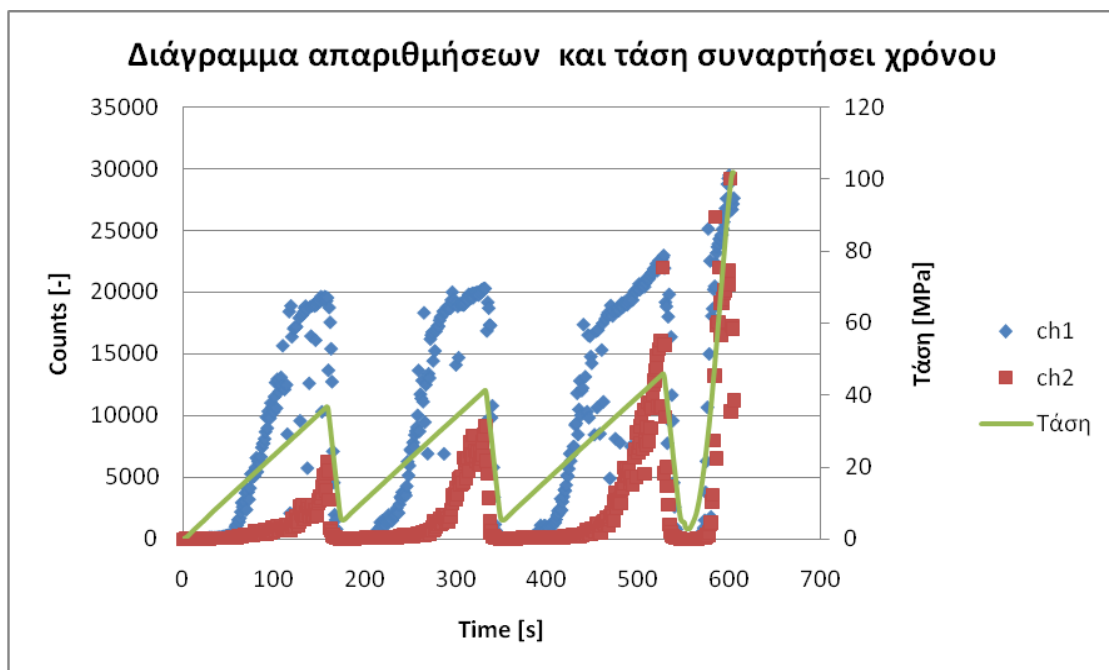
Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.19 με την αυξομείωση του φορτίου παρατηρείται η ίδια καταγραφή κτύπων σε όλα τα στάδια φόρτισης αποφόρτισης ακόμα και στο στάδιο της αστοχίας και από τα δύο κανάλια. Κατά τα στάδια της επαναφόρτισης και αποφόρτισης παρατηρείται η μεγαλύτερη καταγραφή κτύπων. Κάτι το οποίο είναι μη αναμενόμενο. Η μεγαλύτερη καταγραφή αναμενόταν να γίνει κατά τα στάδια της φόρτισης όπου έχει ξεπεραστεί η τιμή της προηγούμενης επιβαλλόμενης τάσης. Αυτό το γεγονός πιθανόν να οφείλεται στον Hit Lockout Time που είναι ο χρόνος που ορίστηκε να αναμένει το σύστημα για καινούργια καταγραφή και ορίστηκε στα 300μs. Δηλαδή ο χρόνος αυτός πιθανόν να ορίστηκε πολύ μικρός διότι στο στάδιο της αποφόρτισης και επαναφόρτισης τα σήματα των ΑΕ ξεπερνούσαν πολύ συχνά το κατώφλι που είχε οριστεί με αποτέλεσμα να ξεκινάει συνεχώς καινούργιες καταγραφές κτύπων. Εν αντιθέσει κατά τη φόρτιση τα σήματα ΑΕ ξεπερνούσαν διαρκώς το κατώφλι και το σύστημα δεν είχε το περιθώριο αναμονής αυτού του χρόνου με αποτέλεσμα να καταγράφονται λιγότεροι κτύποι. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 4.21.





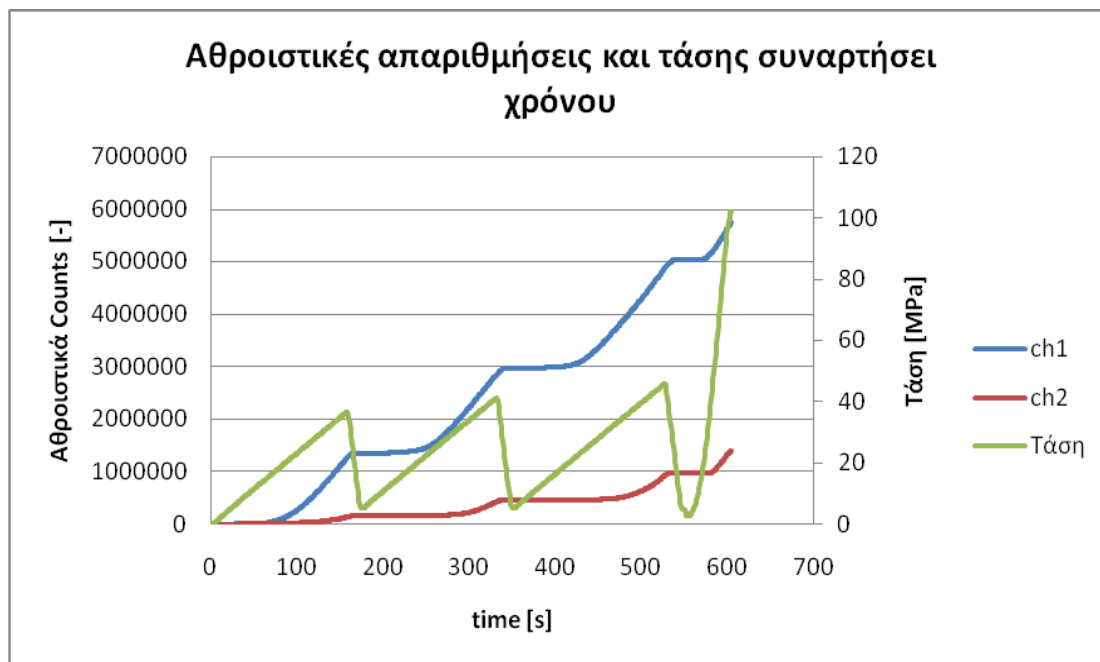
**Σχήμα 4.20:** Διάγραμμα αθροιστικών κτύπων και τάσης συναρτήσει του χρόνου

Γενικά με την πάροδο του χρόνου τα αθροιστικά κτυπήματα αυξάνονται και στα δύο κανάλια. Προς το τέλος της δοκιμής παρατηρείται μία διαφορά της τάξεως των 4000 κτύπων στα δύο κανάλια γεγονός που οφείλεται στη θέση των αισθητήρων. Στη συνέχεια του προηγούμενου σχήματος 4.19 παρατηρείται η αύξηση της καταγραφής των αθροιστικών κτύπων στα στάδια της επαναφόρτισης και της αποφόρτισης.



**Σχήμα 4.21:** Διάγραμμα απεικόνισης και τάσης συναρτήσει του χρόνου

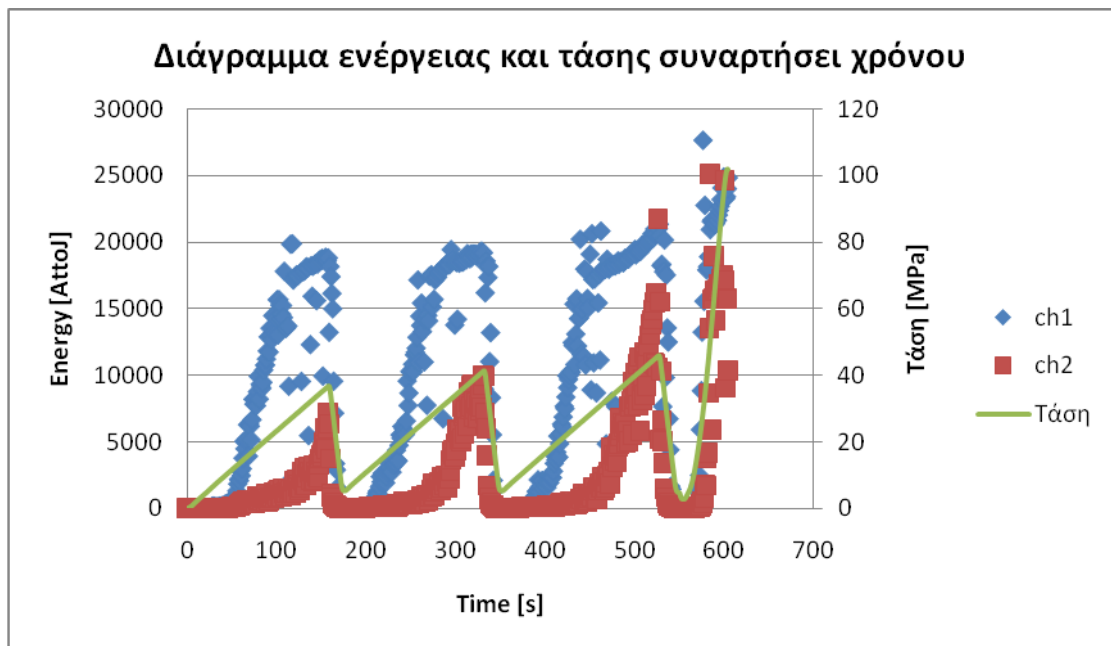
Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.21 η αυξομείωση των απεικόνισεων ακολουθεί την αυξομείωση της τάσης και για τα δύο κανάλια. Αλλά το πρώτο κανάλι έχει μία καταγραφή απεικόνισεων μεγαλύτερη της τάξης των 10.000 από το δεύτερο κανάλι, γεγονός που δηλώνει ότι το κανάλι 1 είναι πιο κοντά στο σημείο αστοχίας. Επίσης από το διάγραμμα παρατηρείται μία μικρή αύξηση των απεικόνισεων σε κάθε κύκλο φόρτισης αποφόρτισης όταν η τάση ξεπερνάει την μεγαλύτερη τάση που είχε ασκηθεί στον προηγούμενο κύκλο.



**Σχήμα 4.22:** Διάγραμμα αθροιστικών απαριθμήσεων και τάσης συναρτήσει χρόνου

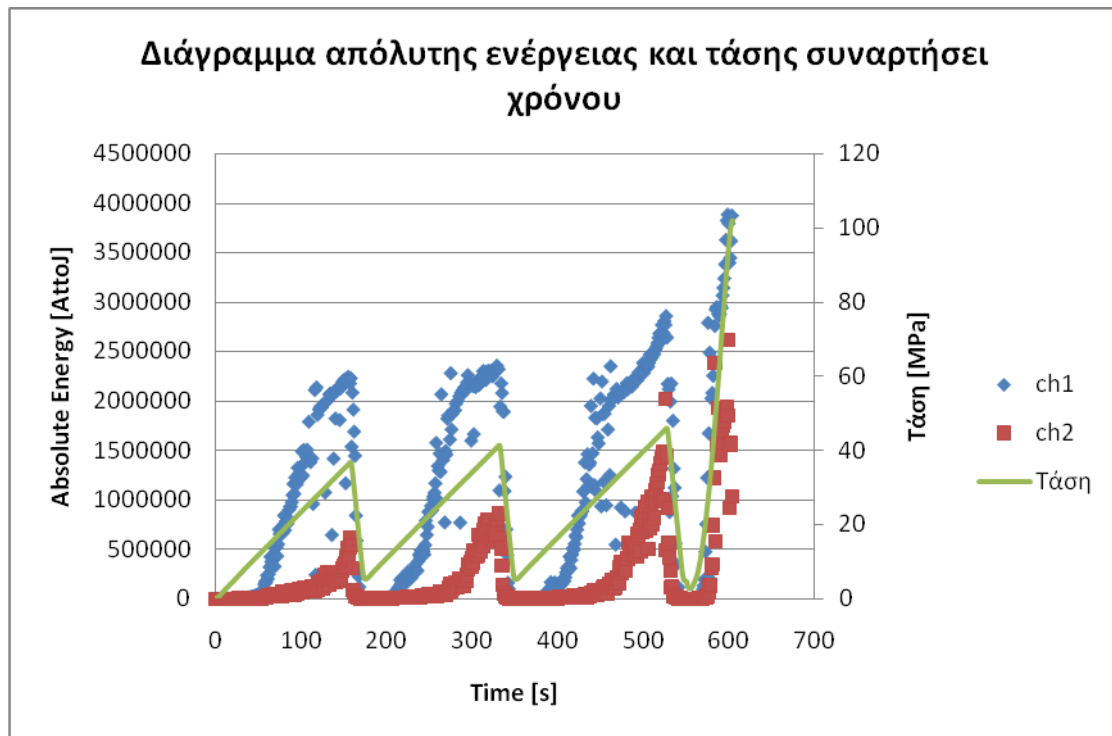
Στο σχήμα 4.22 παρατηρείται ότι τα δύο κανάλια καταγραφής ακολουθούν την αύξηση της τάσης σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Στο κανάλι 1 καταγράφονται περισσότερες αθροιστικές απαριθμήσεις, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω λόγω της θέσης του. Η καταγραφή από το κανάλι 1 των αθροιστικών απαριθμήσεων δείχνει την παρουσία των φαινομένων Kaiser και Felicity. Από την πρώτη αποφόρτιση ως και λίγο πριν την μέγιστη τάση του πρώτου κύκλου φόρτισης αποφόρτισης παρατηρείται ξεκάθαρα το φαινόμενο Kaiser, από το πλάτωμα που σχηματίζει η καμπύλη του. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν παρατηρήθηκε αύξηση των αθροιστικών απαριθμήσεων. Λίγο πριν την μέγιστη τάση του πρώτου κύκλου φόρτισης αποφόρτισης μέχρι την μέγιστη τάση του πρώτου κύκλου κατά τη διάρκεια της δεύτερης φόρτισης παρατηρείται το φαινόμενο Felicity. Δηλαδή μια αύξηση των αθροιστικών απαριθμήσεων πριν ξεπεραστεί το όριο της μέγιστης τάσης του πρώτου κύκλου. Τα ίδια φαινόμενα παρατηρούνται και στους επόμενους κύκλους φόρτισης αποφόρτισης του πρώτου καναλιού.

Στο δεύτερο κανάλι ως επί των πλείστων παρατηρείται και στους τρεις κύκλους φόρτισης το φαινόμενο Kaiser με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.



**Σχήμα 4.23:** Διάγραμμα ενέργειας και τάσης συναρτήσει χρόνου

Στο σχήμα 4.23 περιγράφεται πως εξελίσσεται η ενέργεια των γεγονότων ακουστικής εκπομπής σε σχέση με τη φόρτιση στο δοκίμιο, στη διάρκεια του πειράματος. Η παράμετρος energy των ΑΕ αναφέρεται στην ολική ελαστική ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής. Η ενέργεια ΑΕ μετριέται σε attojoule που ισούται με  $10^{-18}$  Joule. Η ενέργεια που καταγράφουν τα δύο κανάλια συμβαδίζει με την επιβολή της τάσης στο δοκίμιο. Είναι λογικό να απελευθερώνεται περισσότερη ενέργεια κατά τα στάδια της φόρτισης αφού εκεί καταγράφονται τα περισσότερα γεγονότα ΑΕ διότι το δοκίμιο παραμορφώνεται. Και η μεγαλύτερη έκλυση της ενέργειας παρατηρείται τη στιγμή της αστοχίας που έχουν καταγραφεί και τα περισσότερα γεγονότα ΑΕ. Όπως έχει ειπωθεί και παραπάνω επειδή το πρώτο κανάλι βρίσκεται πιο κοντά στη θέση της αστοχίας είναι λογικό να καταγράφει μεγαλύτερη έκλυση ενέργειας.



**Σχήμα 4.24:** Διάγραμμα απόλυτης ενέργειας και τάσης συναρτήσει χρόνου

Στο σχήμα 4.24 παρατηρείται ίδια αυξομείωση της ενέργειας με την τάση απλά το πρώτο κανάλι καταγράφει μεγαλύτερες πιές απόλυτης ενέργειας απ' ότι το δεύτερο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός το κανάλι αυτό είχε μεγαλύτερη καταγραφή απαριθμήσεων. Οι τιμές της απόλυτης ενέργειας είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερες σε σχέση με την ενέργεια που απεικονίζεται στο σχήμα 4.23. Η παρατήρηση αυτή είναι λογική αφού η ενέργεια του σχήματος 4.23 είναι η ενέργεια που εκλύεται από τα γεγονότα ΑΕ από το κατώφλι και πάνω ενώ η απόλυτη ενέργεια του παραπάνω σχήματος είναι η ενέργεια που εκλύεται σε όλη την διάρκεια της καταγραφής ανεξάρτητα από το κατώφλι που έχει οριστεί, δηλαδή όλων των κυματομορφών που καταγράφονται ανεξάρτητα από το εάν θεωρηθούν γεγονότα ΑΕ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 Συμπεράσματα

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας διαμορφώθηκαν δοκίμια από μάρμαρο Νέστου Κομνηνών και διεξήχθησαν πειράματα μονοαξονικής θλίψης με κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης σε συνδυασμό με την καταγραφή των ακουστικών εκπομπών. Στόχος των πειραμάτων ήταν να εξεταστεί η συσχέτιση της παραγωγής ακουστικών εκπομπών με το επιβαλλόμενο φορτίο και τον χρόνο της δοκιμής. Από την επεξεργασία των μετρήσεων των δοκιμών και από την αξιολόγηση και ανάλυση των διαγραμμάτων 4.16 έως 4.24 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ακουστική εκπομπή είναι μια μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου και είναι ένα ισχυρό μέσο για τον γρήγορο και αποτελεσματικό απολογισμό της ακεραιότητας των δομικών δομών και κατασκευών σε πραγματικό χρόνο. Η ακουστική εκπομπή ενδείκνυται για τη μελέτη της συμπεριφοράς αστοχίας τους σε μηχανική καταπόνηση.
- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ακουστικών εκπομπών ήταν αναμενόμενα επειδή η δημιουργία ακουστικών εκπομπών στα πετρώματα προκαλείται από την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος ή με την έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, φαινόμενα που οφείλονται στην φόρτιση του πετρώματος.
- Οι παράμετροι των ακουστικών εκπομπών που εξεετάστηκαν (κτύποι, απαριθμήσεις, ενέργεια και απόλυτη ενέργεια) ακολουθούν την αύξηση της τάσης και παρουσιάζουν τα μέγιστα τους λίγο πριν επέλθει αστοχία.
- Τις ίδιες χρονικές στιγμές παρατηρείται ότι οι απαριθμήσεις ακολουθούν την αύξηση της τάσης ενώ οι κτύποι ακολουθούν αντίθετη πορεία. Αυτό συμβαίνει διότι η καταγραφή των κτύπων κατά την

αύξηση της τάσης εμπεριέχει περισσότερες απαριθμήσεις, που προκύπτουν από την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος με αποτέλεσμα να καταγράφονται λίγοι κτύποι αλλά με μεγάλη χρονική διάρκεια.

- Στην δοκιμή αυτή δεν φαίνεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καταγραφή των κτύπων για ένδειξη αστοχίας, καθώς παρατηρείται αυξανόμενος αριθμός καταγραφών σε όλη την διάρκεια της δοκιμής, γεγονός που οφείλεται στους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης
- Από την αξιολόγηση των διαγραμμάτων των αθροιστικών απαριθμήσεων με την τάση προκύπτει ότι το συγκεκριμένο μάρμαρο παρουσιάζει τα φαινόμενα Kaiser και Felicity. Αυτό έγινε ιδιαίτερα αντιληπτό από τους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης κατά την διάρκεια του πειράματος.
- Όσον αφορά στην εκλυόμενη ενέργεια και την απόλυτη ενέργεια κατά την εκτέλεση των δοκιμών της μονοαξονικής θλίψης φαίνεται ότι αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου. Παρουσιάζεται μια μεγάλη διαφορά μεταξύ των πμών αυτών των δύο ενεργειών γεγονός που οφείλεται στο διαφορετικό υπολογισμό τους λόγω ότι η πρώτη λαμβάνει υπόψη την παράμετρο του κατωφλιού.
- Η διάταξη των αισθητήρων στα δοκίμια επηρεάζει την ανίχνευση-καταγραφή των ακουστικών σημάτων. Τα ακουστικά σήματα που δημιουργούνται παρόλο που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις υπάρχει περίπτωση να μην ανιχνεύονται από όλους τους αισθητήρες.

## 5.2 Προτάσεις

Με την ολοκλήρωση της εργασίας και από την εξαγωγή των συμπερασμάτων προτείνονται τα ακόλουθα για την περαιτέρω διερεύνηση των ακουστικών εκπομπών:

- Την διεξαγωγή πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης με κύκλους φόρτισης χρησιμοποιώντας περισσότερους αισθητήρες για μια πιο αξιόπιστη εικόνα της συμπεριφοράς των ΑΕ στο μάρμαρο.
- Την διεξαγωγή πειραμάτων θλίψης όπου θα αλλάζει η διάταξη των αισθητήρων έτσι ώστε να γίνει αντιληπτό αν υπάρχουν φαινόμενα εξασθένισης και απόσβεσης των καταγραφών.
- Να πραγματοποιηθούν δοκιμές διαφορετικής καταπόνησης με συγκεκριμένο αριθμό αισθητήρων ώστε να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την συμπεριφορά των ΑΕ στο συγκεκριμένο μάρμαρο.
- Να διεξαχθούν πειράματα με περισσότερους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης όπου τα μέγιστα φορτία του κάθε κύκλου να απέχουν περισσότερο μεταξύ τους ώστε να διακρίνονται περισσότερο τα φαινόμενα Kaiser και Felicity.
- Να αξιολογηθούν και οι υπόλοιποι παράμετροι ακουστικών εκπομπών (διάρκεια, χρόνος ανύψωσης, απαριθμήσεις στο μέγιστο και το πλάτος) σε συνδυασμό με αυτές που ήδη έχουν εξετασθεί.
- Να τοποθετηθούν αισθητήρες σε χώρους εκμετάλλευσης μαρμάρου και να συγκριθούν τα εργαστηριακά αποτελέσματα με αυτά του πεδίου.
- Την χρήση του εξοπλισμού ακουστικών εκπομπών σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις όπως μεταλλείο βωξίτη και γενικότερα σε υπόγεια ανοίγματα.
- Να δημιουργηθεί ένα σύστημα προειδοποίησης της επερχόμενης αστοχίας με την βοήθεια των εργαστηριακών πειραμάτων αλλά και των μετρήσεων από τον χώρο εκμετάλλευσης.
- Τέλος την εφαρμογή όλων των παραπάνω και σε άλλου είδους πετρώματα



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγγελόπουλος Α., (2000) Παραγωγή και κατεργασία Μαρμάρων – Προστασία εργαζομένων. 20 Πανελλήνιο Συνέδριο Το Ελληνικό Μάρμαρο, Θεσσαλονίκη, 18 Φεβρουαρίου, **47-52**
2. Αγιουτάντης Ζ., (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής. Μηχανική Πετρωμάτων. Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
3. Αναστασόπουλος, Α., (1998) Εφαρμογές της ακουστικής εκπομπής σε βιομηχανίες και διυλιστήρια 1η ημερίδα ΕΛΕΜΚΕ: p. 68-71
4. Κακλής Κ., Σ Μαυριγιαννάκης, Ζ. Αγιουτάντης και Γ. Μπαζδάνης (2010). Διερεύνηση Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαρμάρου Κομνηνών Νέστου, Τιμητικός Τόμος στη Μνήμη του Καθ. Κωνσταντίνου Καβουρίδη, Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
5. Κατσικογιάννη Π., Π.Π. Νομικός και Α.Ι. Σοφινός (2007). Ακουστική Εκπομπή στην Μηχανική Πετρωμάτων, Ορυκτός Πλούτος, Τεύχος 145/2007
6. Κόγια Μ., (2012). Αναγνώριση συμβάντων ακουστικής εκπομπής και υλοποίηση σε μικρουπολογιστικό σύστημα ειδικού σκοπού, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πάτρας.
7. Κούρτης Μ., (2013). Διερεύνηση των ακουστικών εκπομπών με φόρπιση και αστοχία ψαθυρών πετρωμάτων, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά.
8. Κυπριωτάκη Α., (2012). Εργαστηριακές Εφαρμογές Ακουστικής Εκπομπής σε Δοκίμια Άοπλου και Ινοπλισμένου Σκυροδέματος, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
9. Μπακογιάννης Σ., (2011). Ακουστική Εκπομπή κατά την Καταπόνηση Βωξίτη, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
10. Πολυκρέτη, Κ., (1999) Διερεύνηση προέλευσης και αυθεντικότητας αρχαίων μαρμαρίνων μνημείων με φασματοσκοπία ηλεκτρονικού παραμαγνητικού συντονισμού και θερμοφωταύγεια. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών Τμήμα φυσικής <http://phdtheses.ekt.gr/eadd/>

11. Σοφιανός Α.Ι. και Νομικός Π.Π. (2008). Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ΔΠΜΕ/ΣΚΥΕ, Οκτώβριος 2008
12. Τσουτρέλης, Χ., Γκίκας, Ν., Νομικός. Π., (2000) Εργαστηριακές ασκήσεις Μηχανικής Πετρωμάτων. Σημειώσεις ΕΜΠ

## **Διεθνής Βιβλιογραφία**

1. Beattie, A.G., (2013). Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques. Sandia National Laboratories Report.
2. Brady, B.H.G.a.B., E. T., (1985). International Rock Mechanics for Underground Mining'. Allen and Unwin'', London.
3. Grosse, C.U.a.O., M., (2008). Acoustic Emission Testing, Basics for Research – Applications in Civil Engineering. Springer Editions.
4. Hardy, H.R.J., (2003). Acoustic Emission/Microseismic Activity, Principles, Techniques and Geotechnical Application. Vol. 1, the Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA, A.A. Balkema Publishers.
5. Hawkes, I., Mellor, M., (1969). Uniaxial testing in rock mechanics laboratories. Engineering Geology, **4**: p. 179-285.
6. Hsu, N.S., J. A; Hardy, S., (1977). An approach to acoustic emission signal analysis-Theory and experiment. Matis.Eval. **35**: p. 100-106.
7. ISRM, (1979). Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. Int.Journal Rock Mechanics Min.Science and Geochemical Abstracts. **16**: p. 135-140.

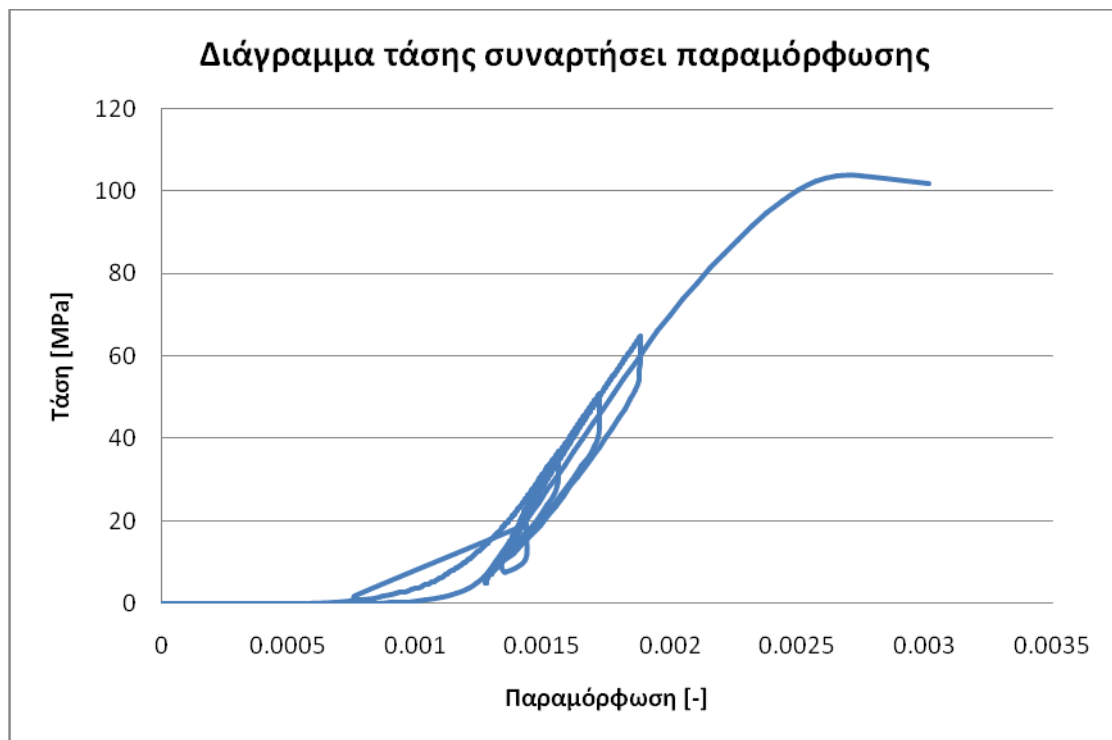
8. Lama, R.D., Vutukuri, V. S., (1978). Handbook on mechanical properties of rocks. Vol. I, II, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
  
9. Proverbio, E., Campanella, G., Venturi, V., (2007). Damage evaluation of post tensioned concrete viaduct by AE during proof loading. Advances in Acoustic emissions Proceeding of the Sixth International Conference of Acoustic Emission. <http://www.sidercem.it/writable/allegati/damage+evaluation+of+post+te nsioned4878.pdf>
  
10. Rienstra, S.W., Hirschberg, A., (2014). An Introduction to Acoustics. <http://www.win.tue.nl/~sjoerdr/papers/boek.pdf>.
  
11. Sachse, W.H., N., (1979). Ultrasonic transducers for materials testing and their characterization. Physical acoustics. 14: p. 277-406.
  
12. Scruby, C.B., Jones, C., Tichmarsh, J.M., Wadley, H.N.G., (1981). Relationship between microstructure and acoustic emission in Mn-Mo-Ni A533B steel. Materials Science. 15: p. 241-261.
  
13. Simmons, J.A.W., H.N.G, (1984). Theory of Acoustic Emission From Phase Transformations. JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards. 89: p. 55-64.
  
14. Tetelman, A.S., Chow, R., (1972). Acoustic Emission. ASTM Spec. Tech. Publ. **505**: p. 30.
  
15. Wijk, G., (1979). Eccentricity in the Uniaxial Strength Test on Rock. Report DS Swedish Detonic Research Foundation, Stocholm.

## Διαδικτυακές πηγές

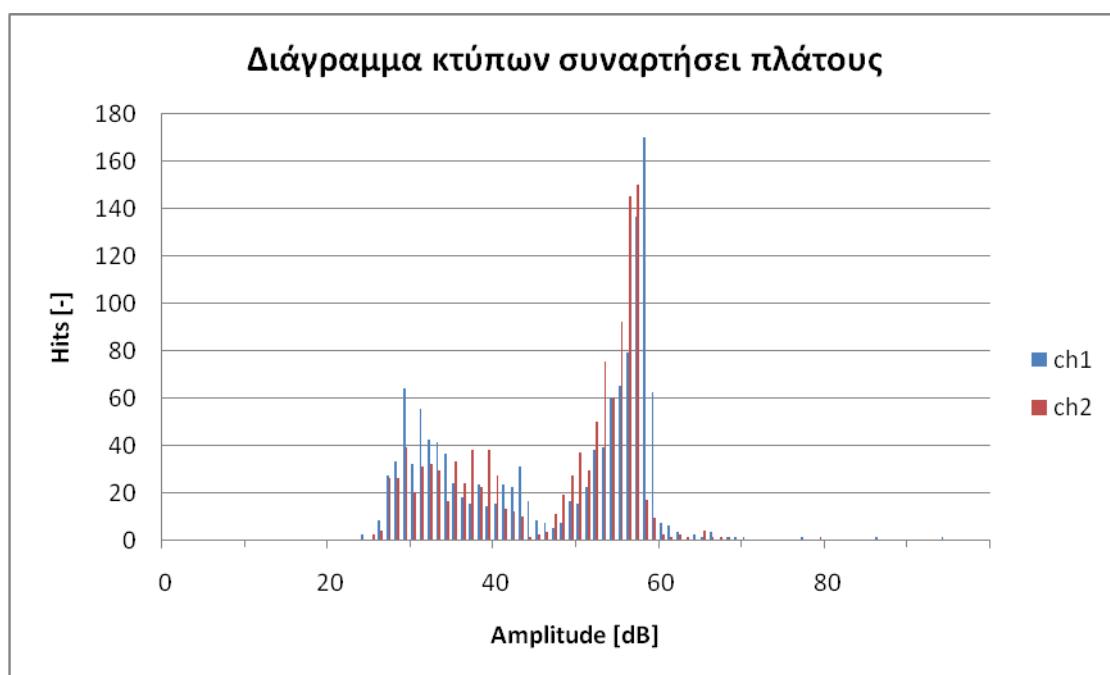
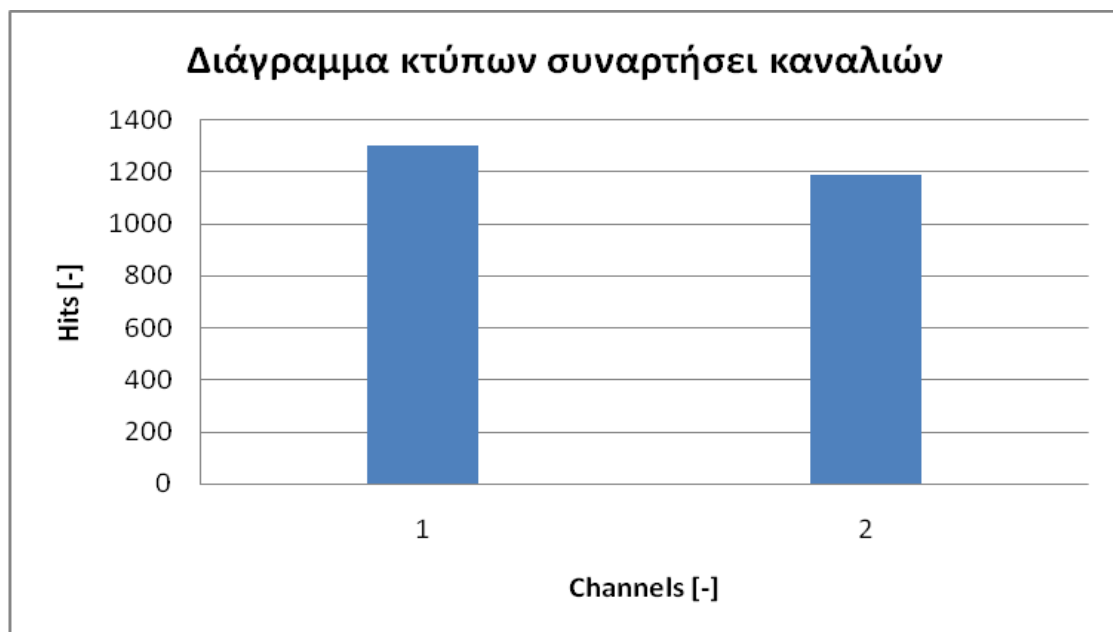
1. INSTRON, *Compression Test*. [http://www.instron.us/wa/applications/test\\_types/compression.aspx](http://www.instron.us/wa/applications/test_types/compression.aspx)
2. *Guidelines on use of acoustic emission technique (aet) on railway bridges*.  
[http://www.rdso.indianrailways.gov.in/uploads/files/1296882731408-bs\\_104.pdf](http://www.rdso.indianrailways.gov.in/uploads/files/1296882731408-bs_104.pdf), 2009.

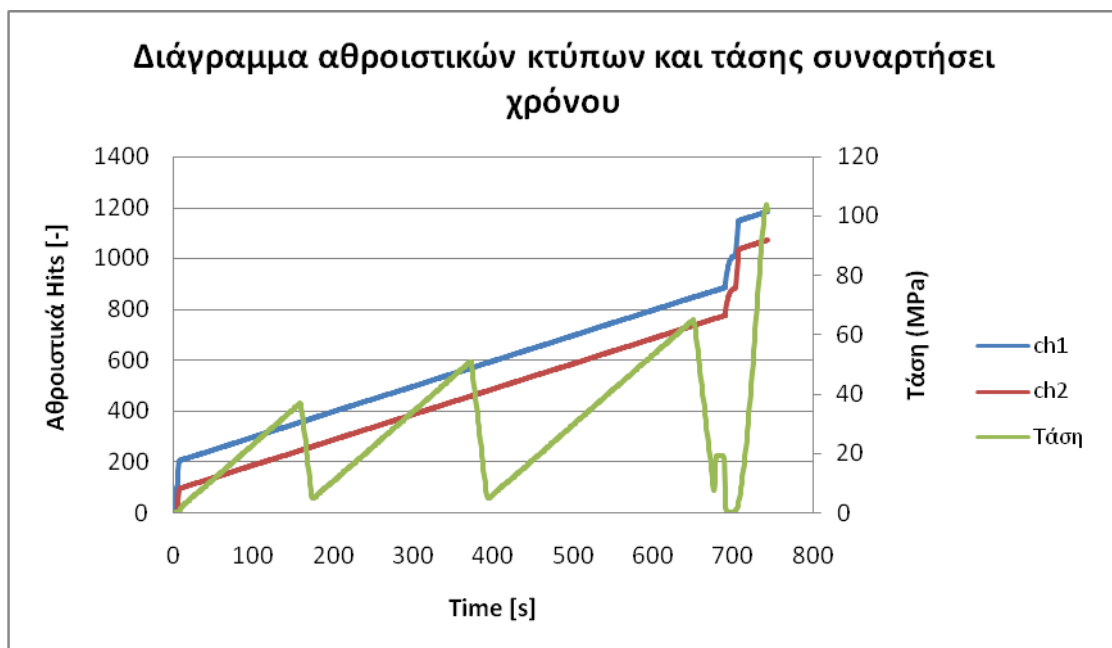
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

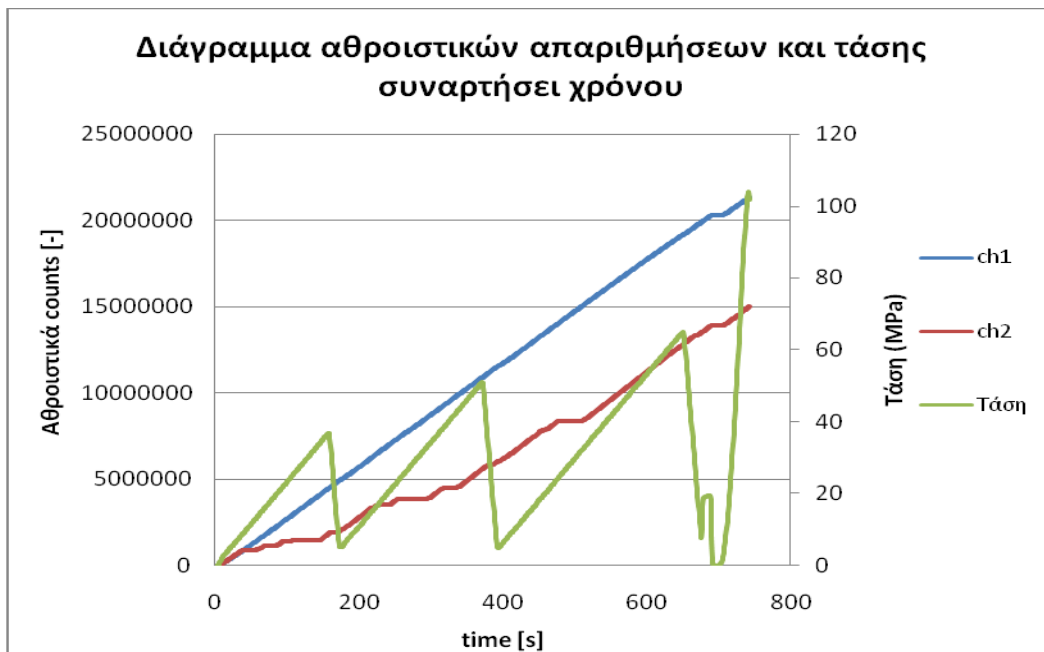
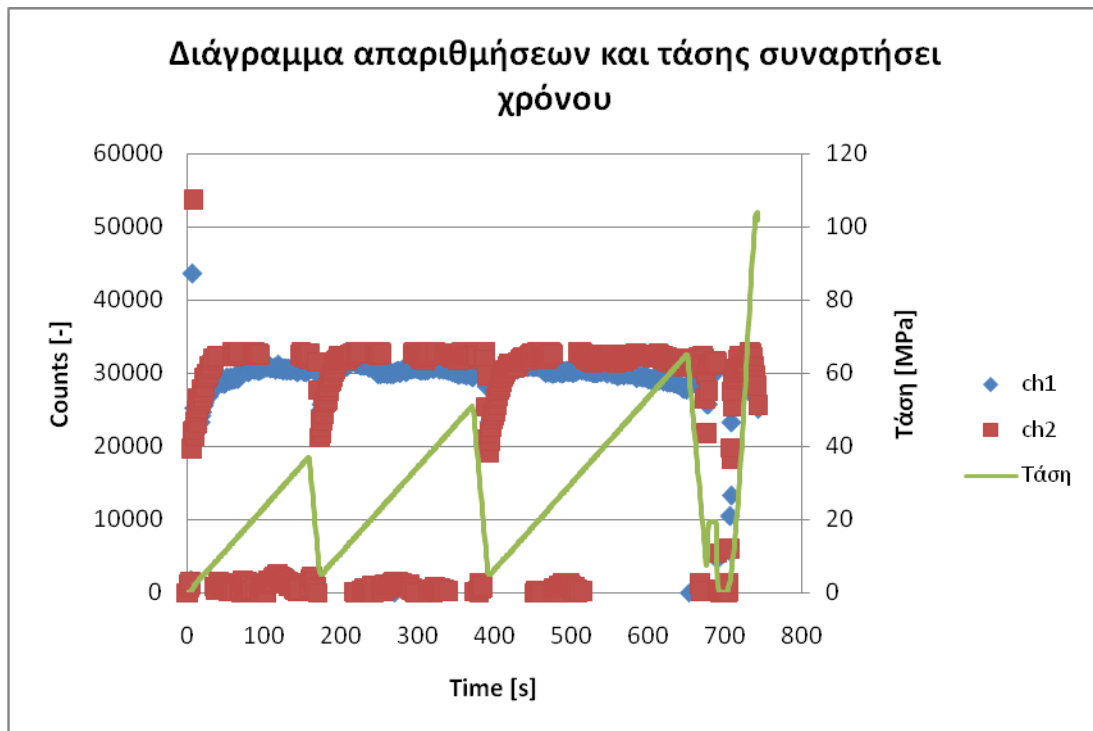
### Δοκίμιο 1.4



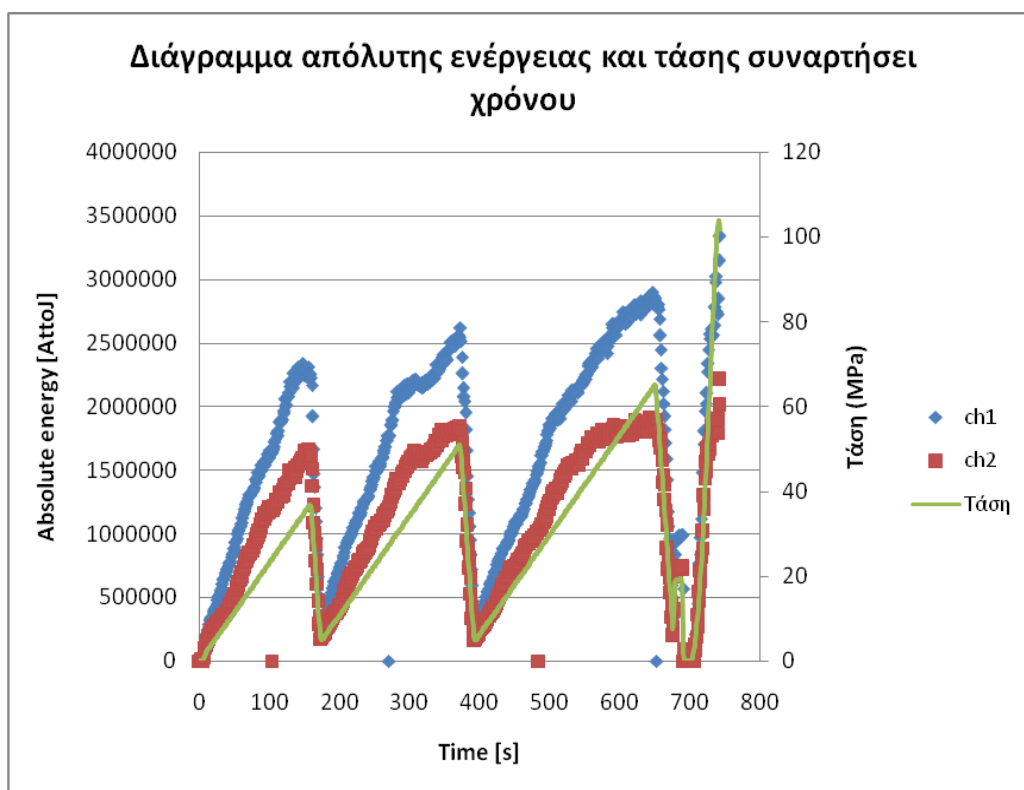
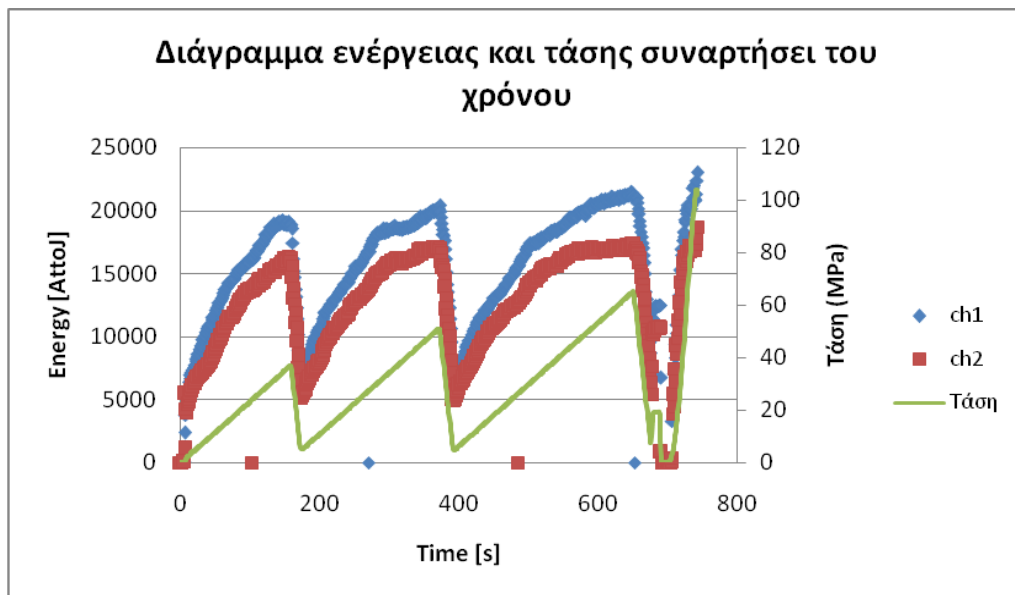
	Τάση (MPa)
1η φόρτιση	36
1η αποφόρτιση	5
2η φόρτιση	50
2η αποφόρτιση	5
3η φόρτιση	65
3η αποφόρτιση	0
φόρτιση μέχρι αστοχία	103,7



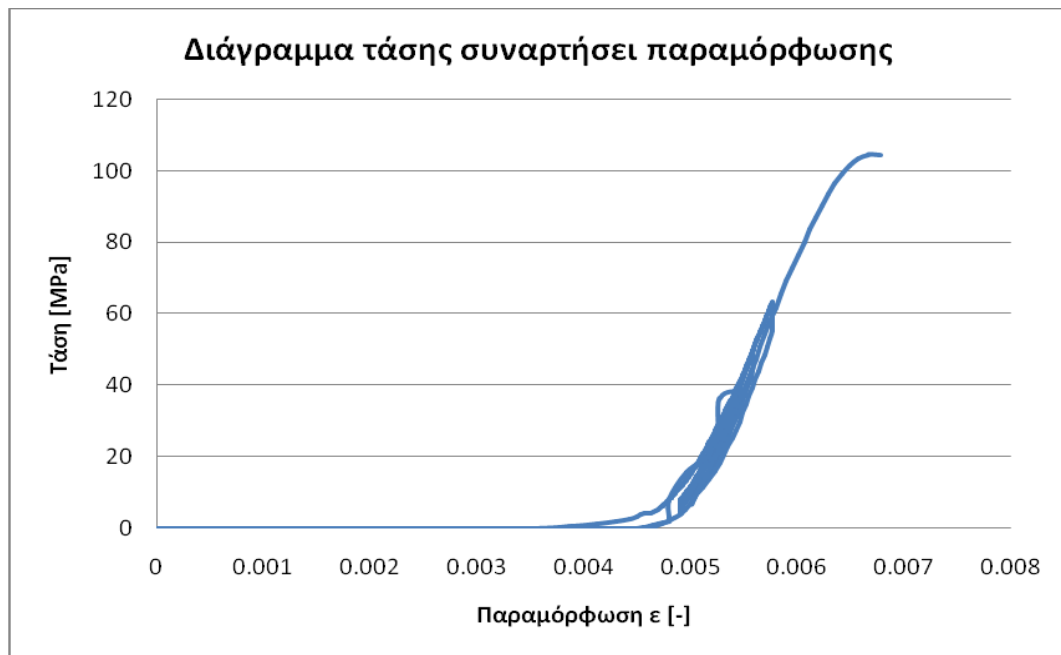




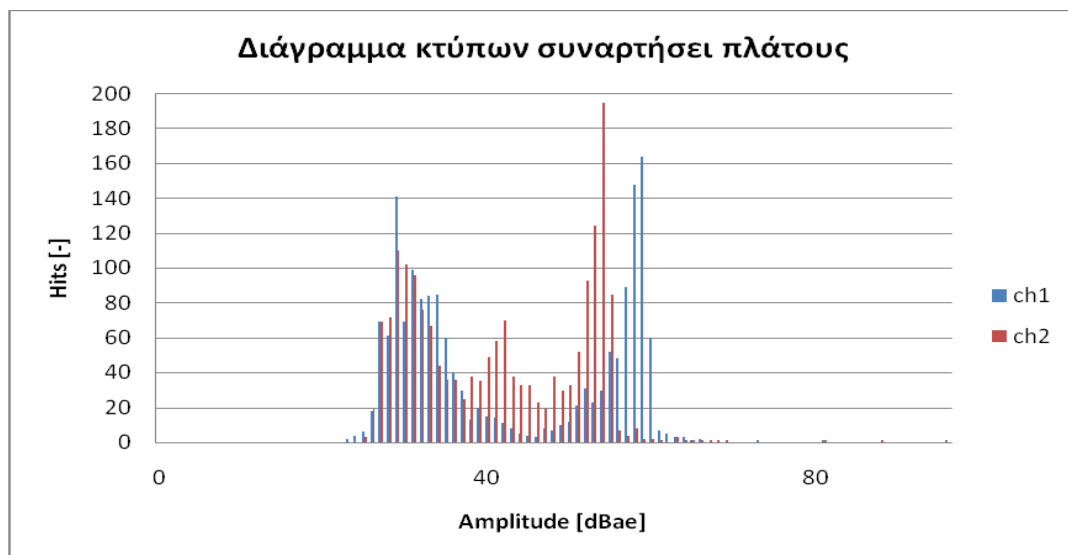
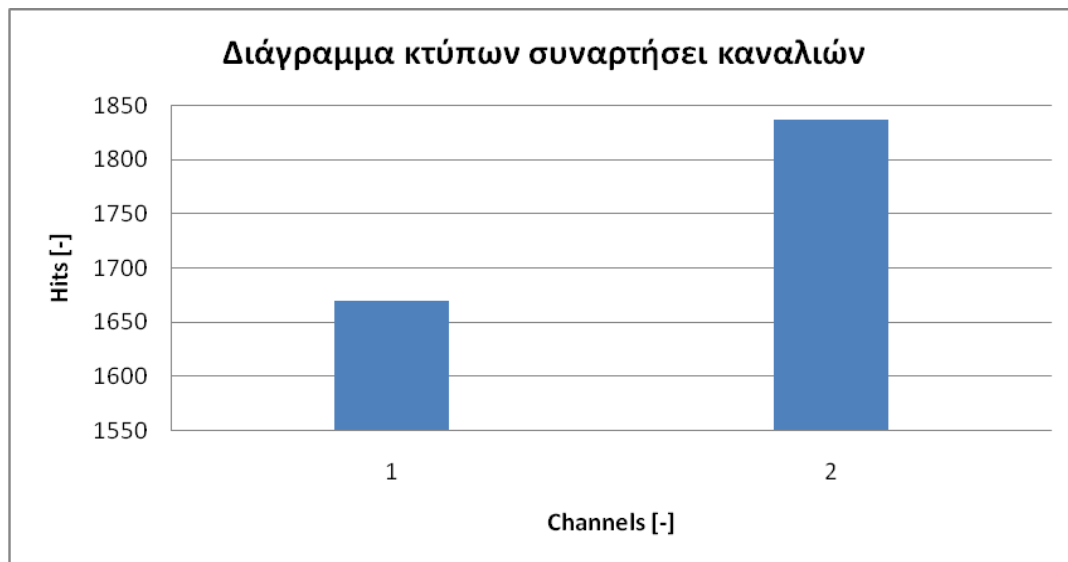


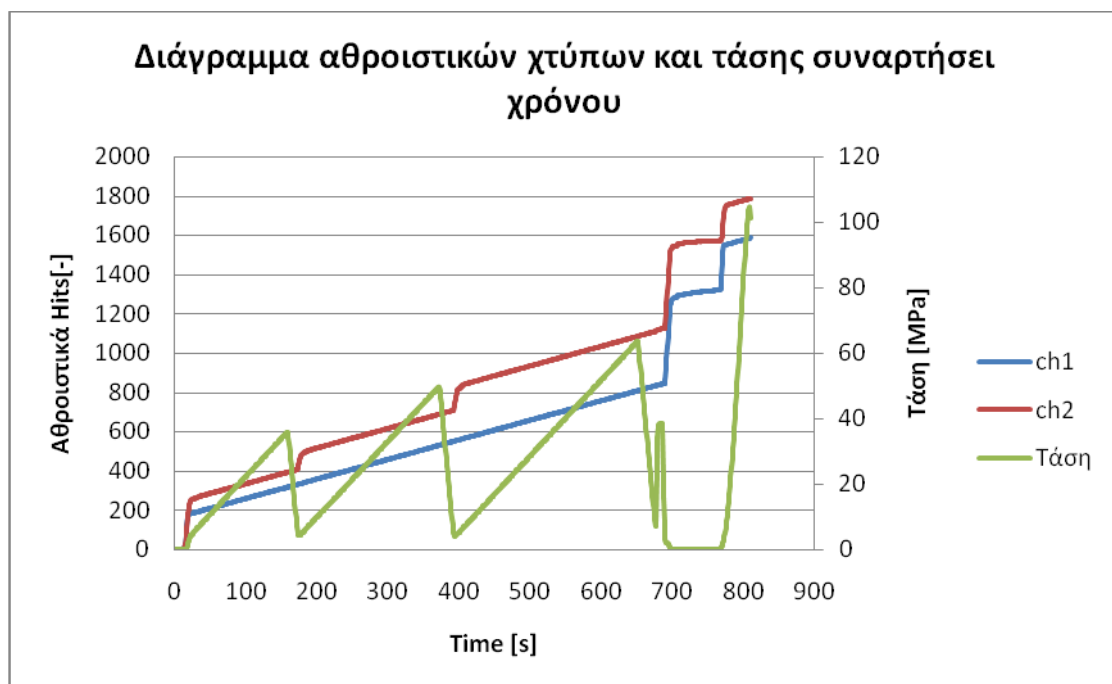
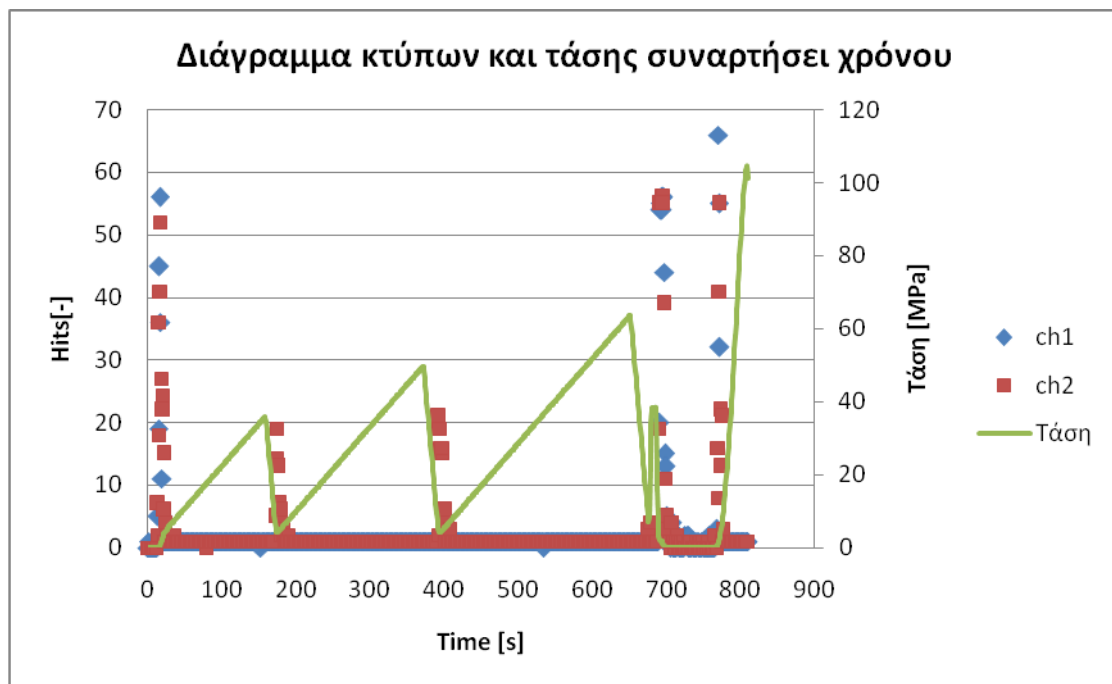


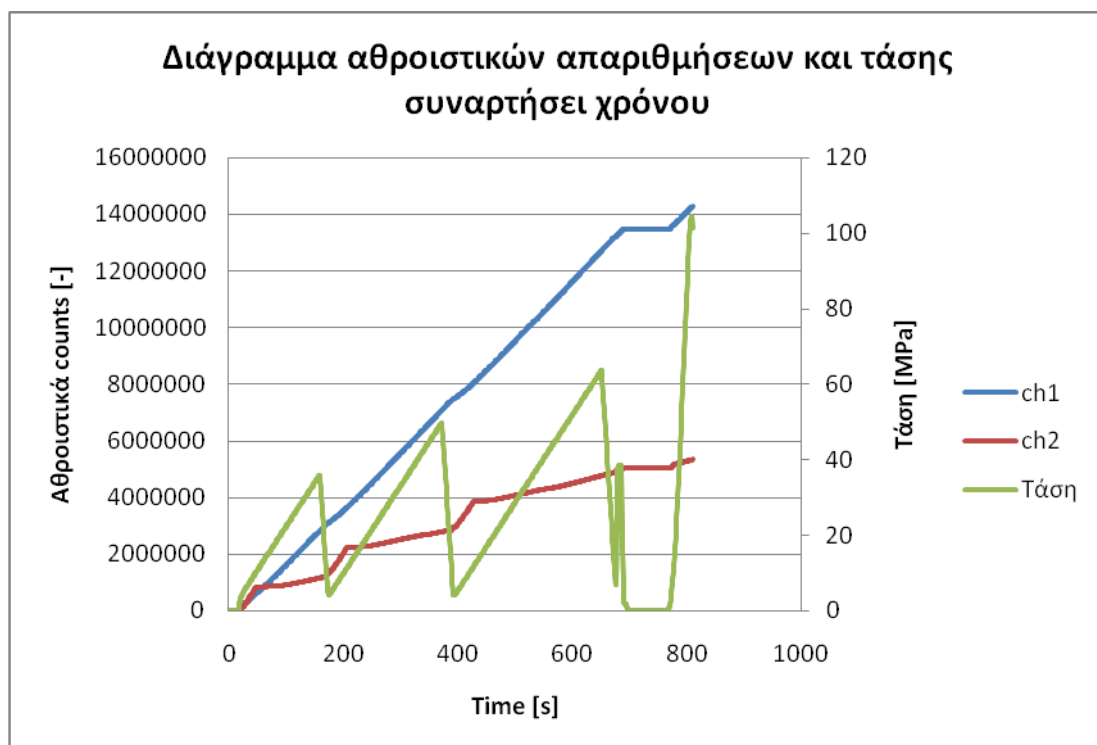
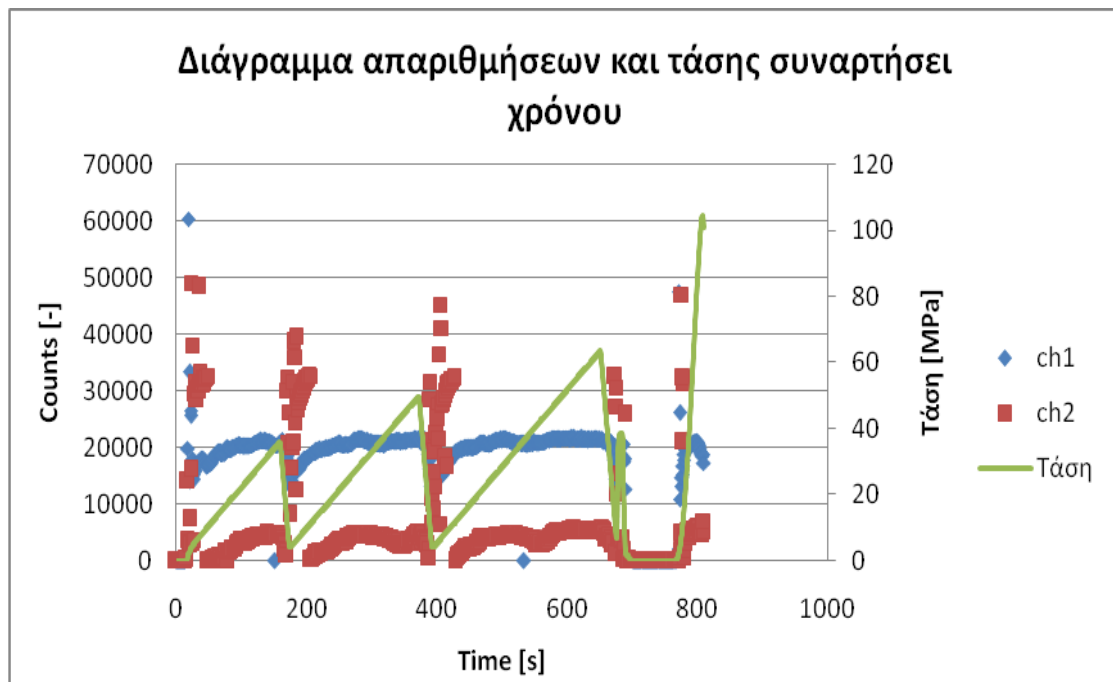
## Δοκίμιο 2.4

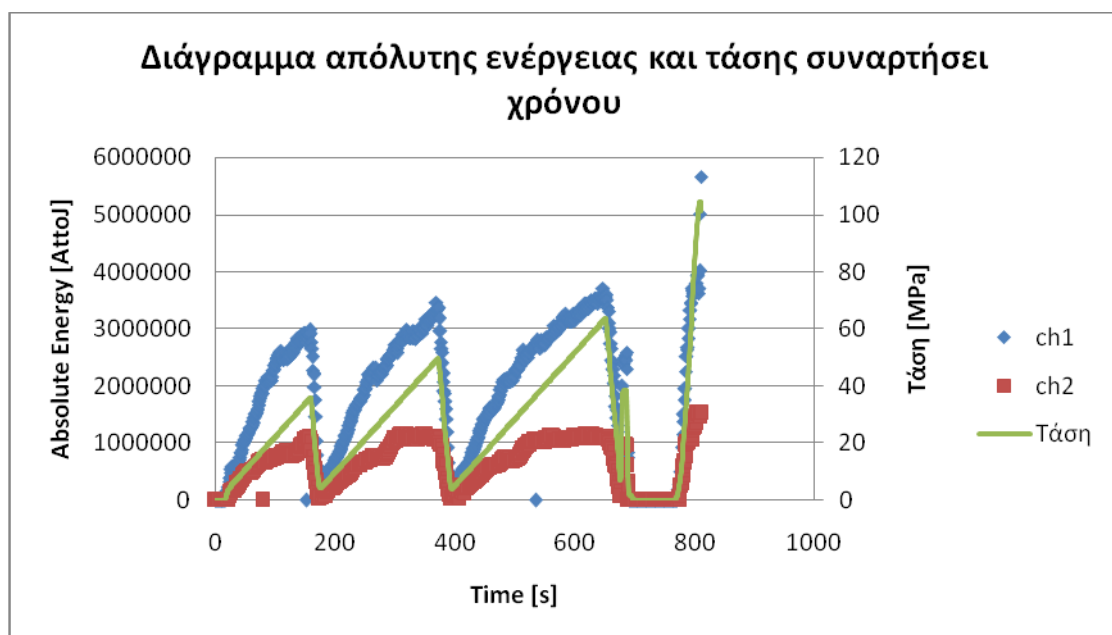
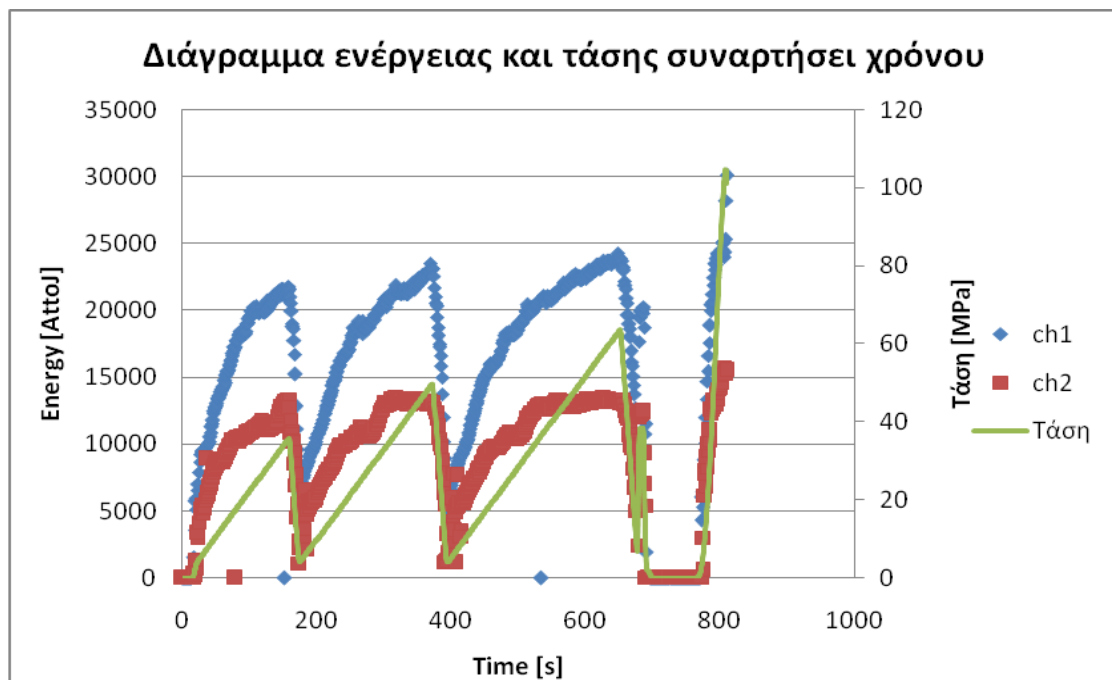


	Τάση (MPa)
1η φόρτιση	35.7
1η αποφόρτιση	4.5
2η φόρτιση	49.6
2η αποφόρτιση	4.1
3η φόρτιση	63.5
3η αποφόρτιση	7
4η φόρτιση	38.4
4η αποφόρτιση	0
φόρτιση μέχρι αστοχία	104.5

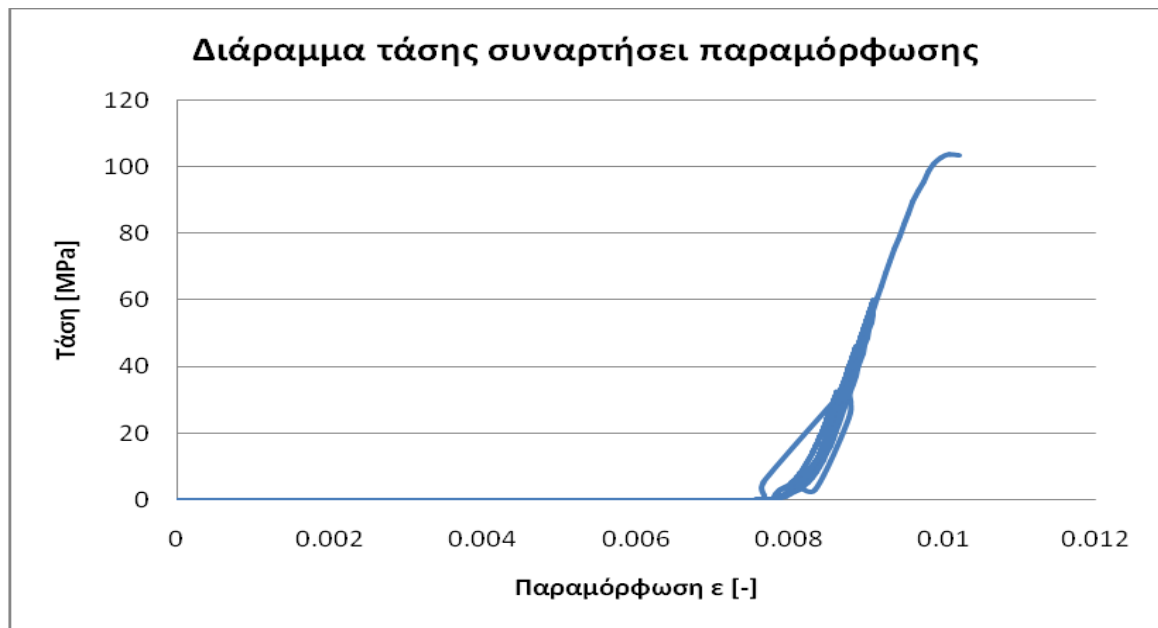




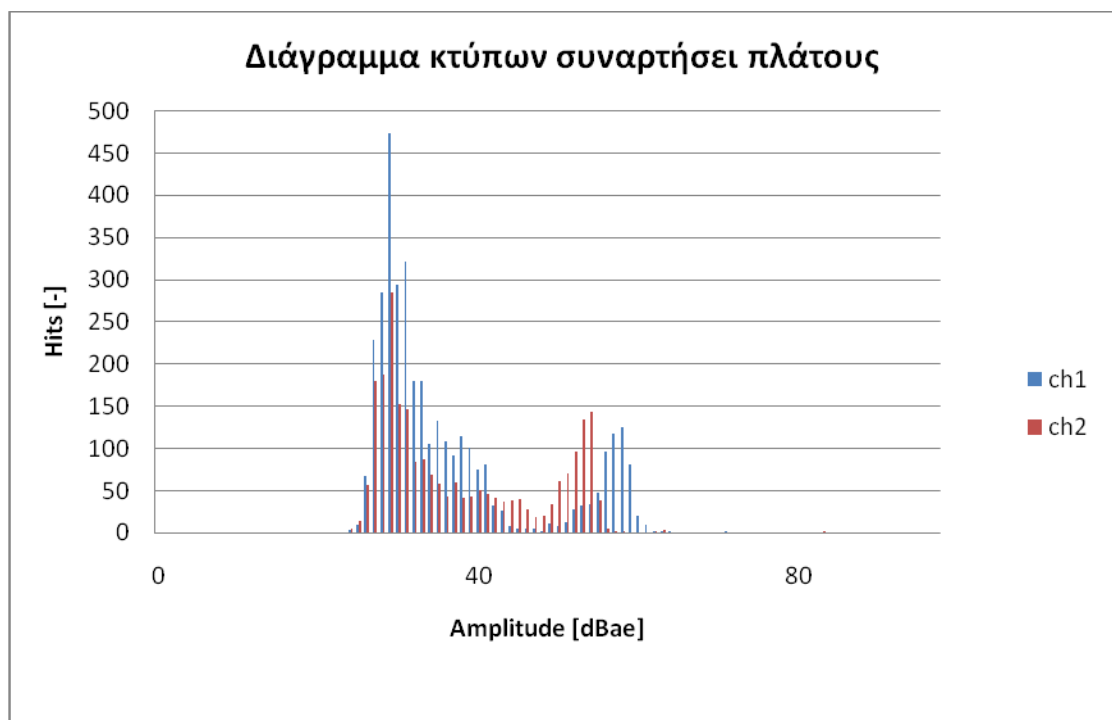
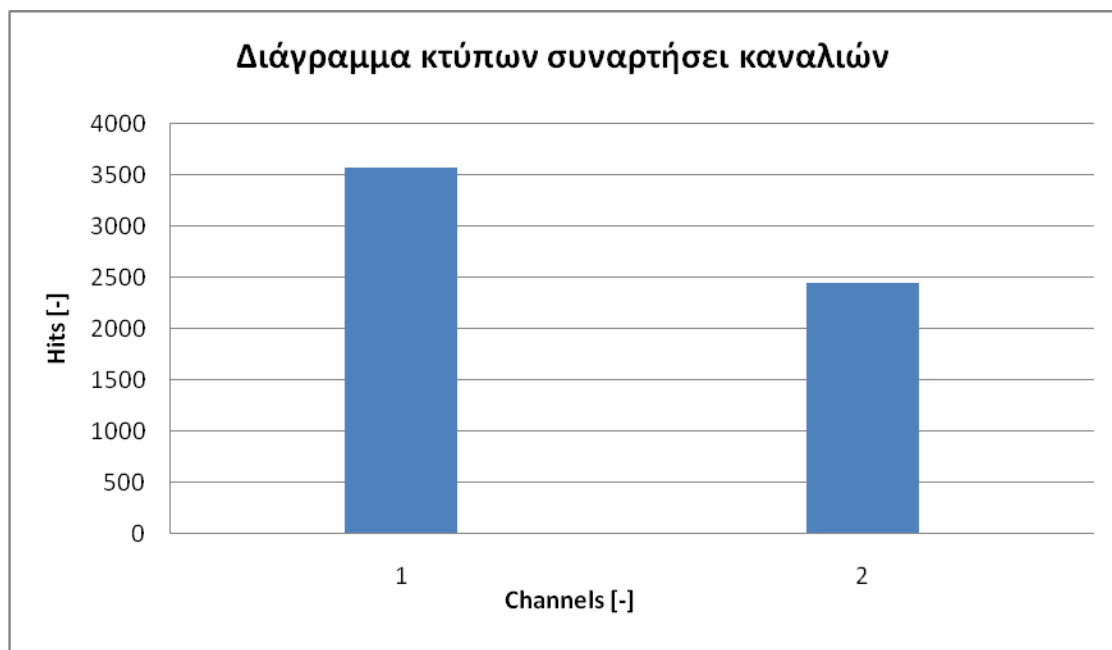




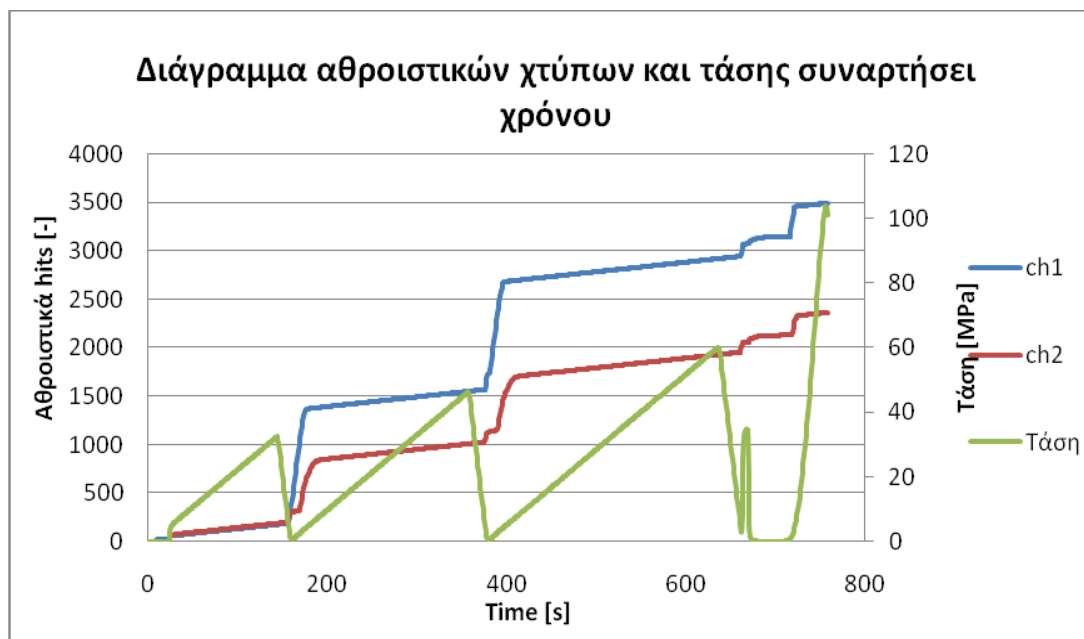
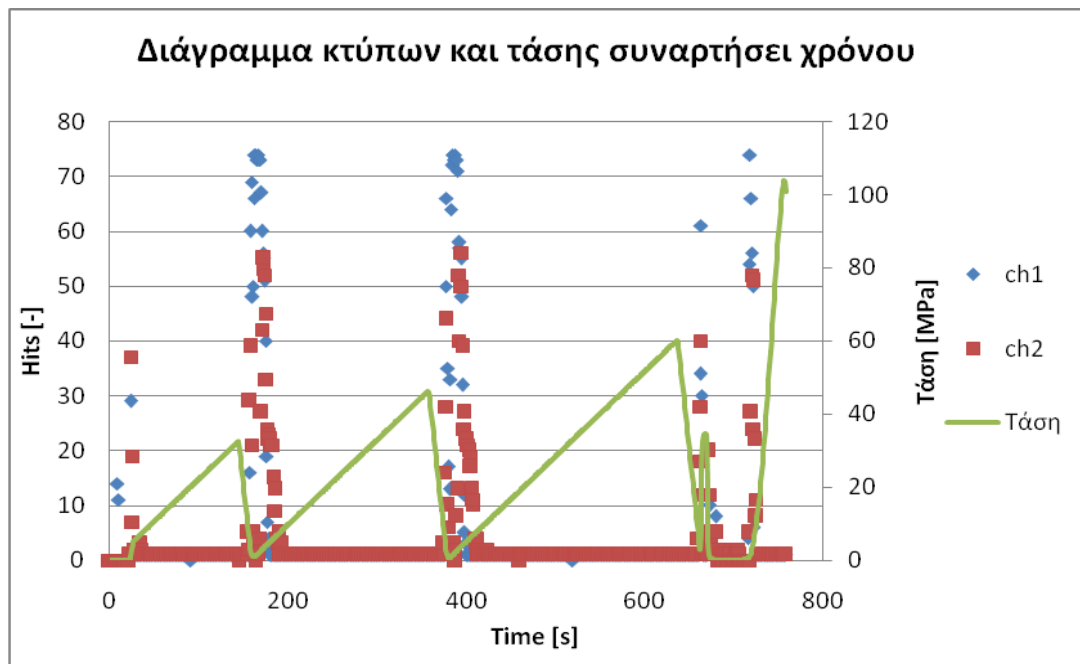
### Δοκίμιο 3.4

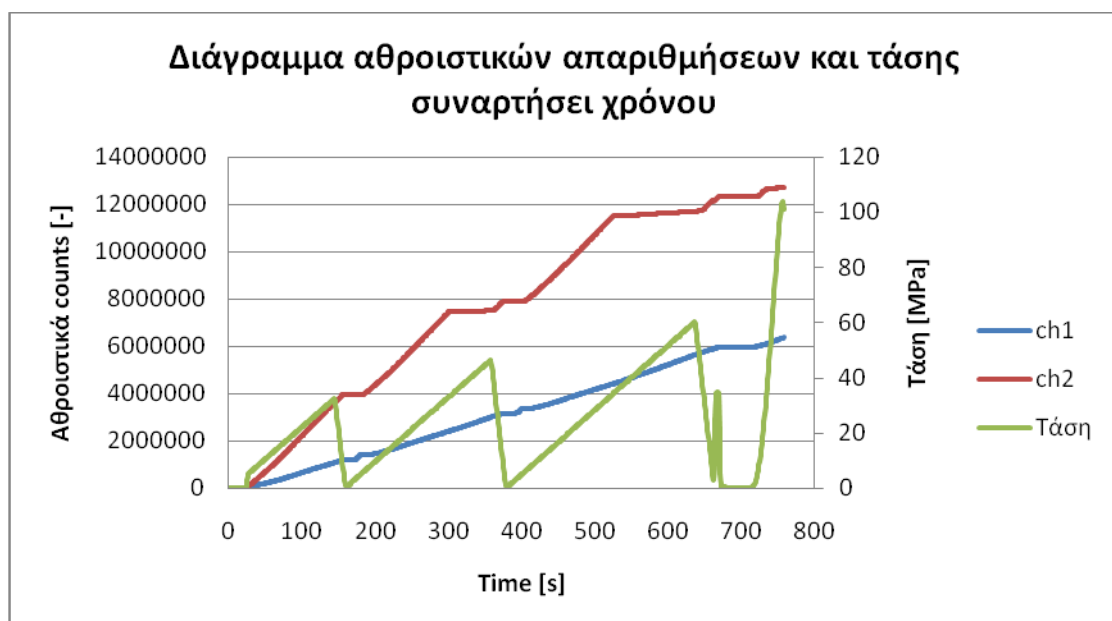
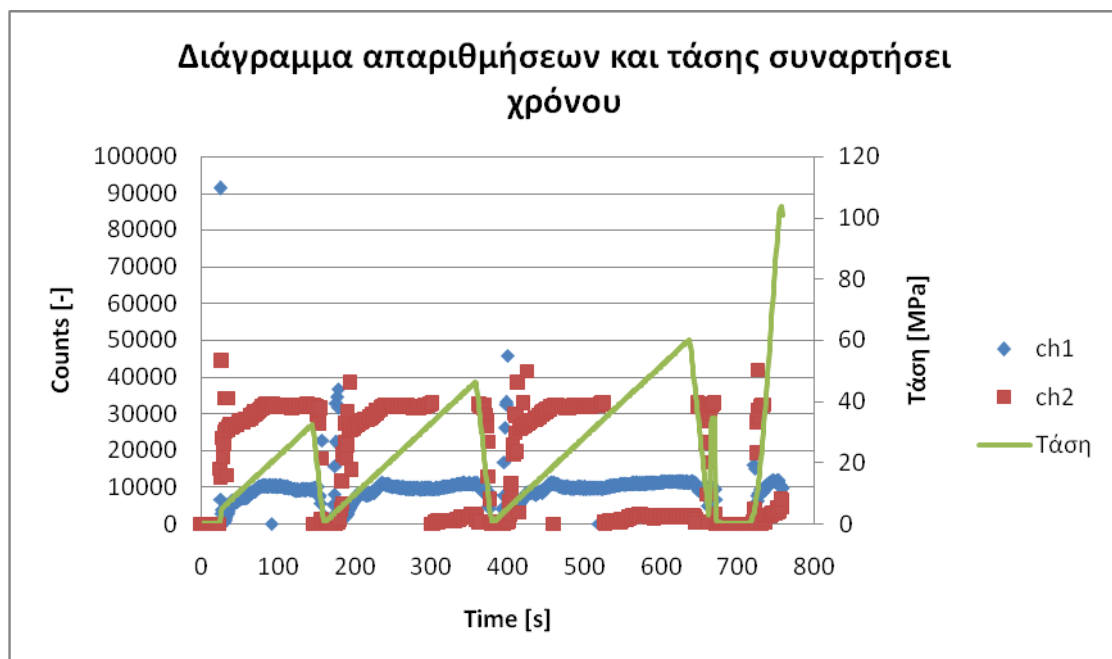


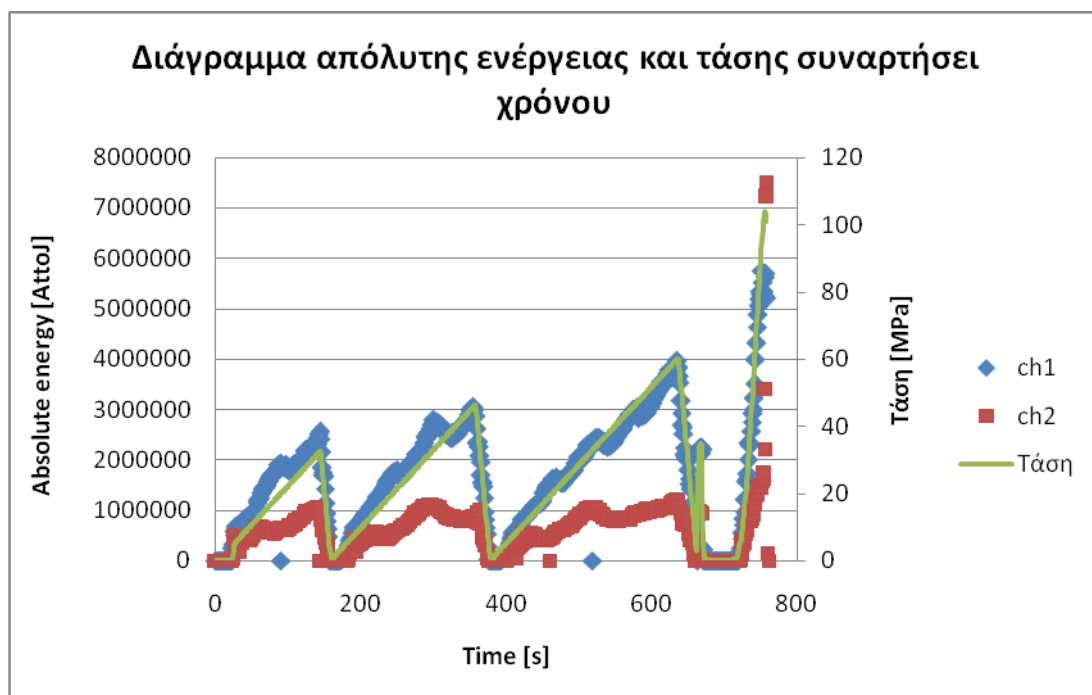
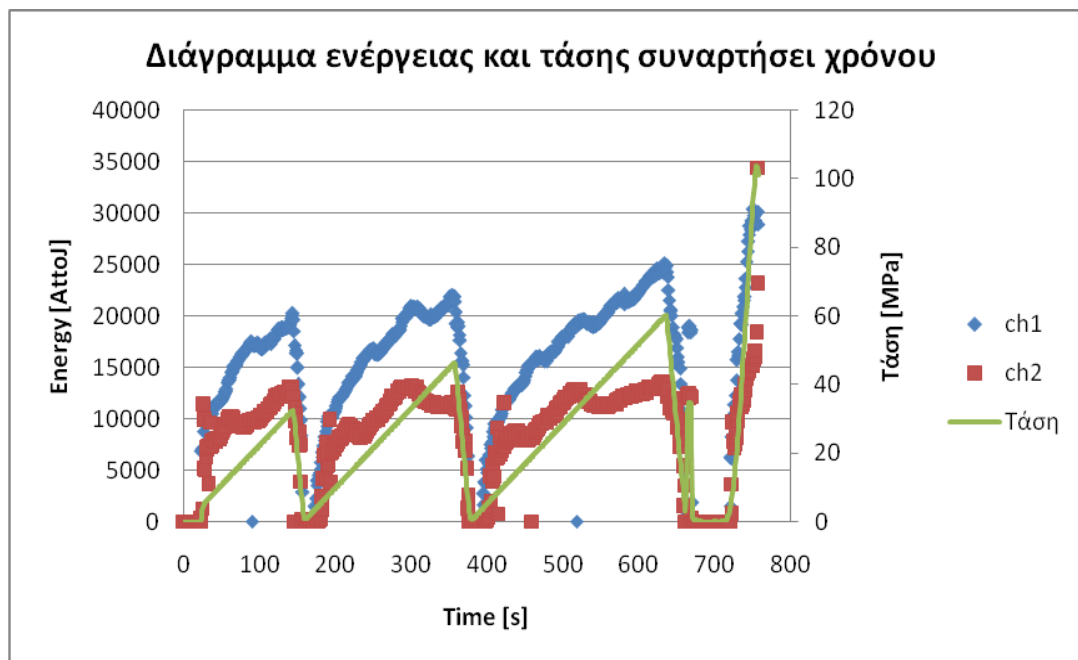
	Τάση (MPa)
1η φόρτιση	32,4
1η αποφόρτιση	0,9
2η φόρτιση	46,3
2η αποφόρτιση	0,78
3η φόρτιση	60
3η αποφόρτιση	0
φόρτιση μέχρι αστοχία	103,7



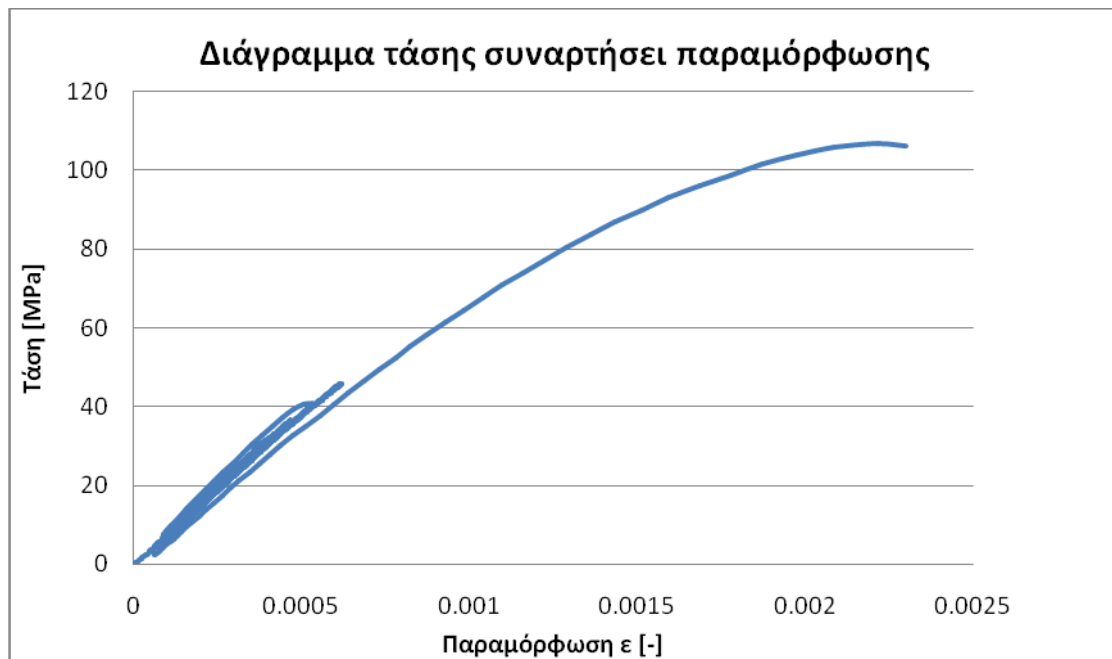








#### Δοκίμιο 7.4



	Τάση (MPa)
1η φόρτιση	36,58
1η αποφόρτιση	4,63
2η φόρτιση	40,7
2η αποφόρτιση	4,72
3η φόρτιση	45,78
3η αποφόρτιση	2,42
φόρτιση μέχρι αστοχία	106,8

