

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

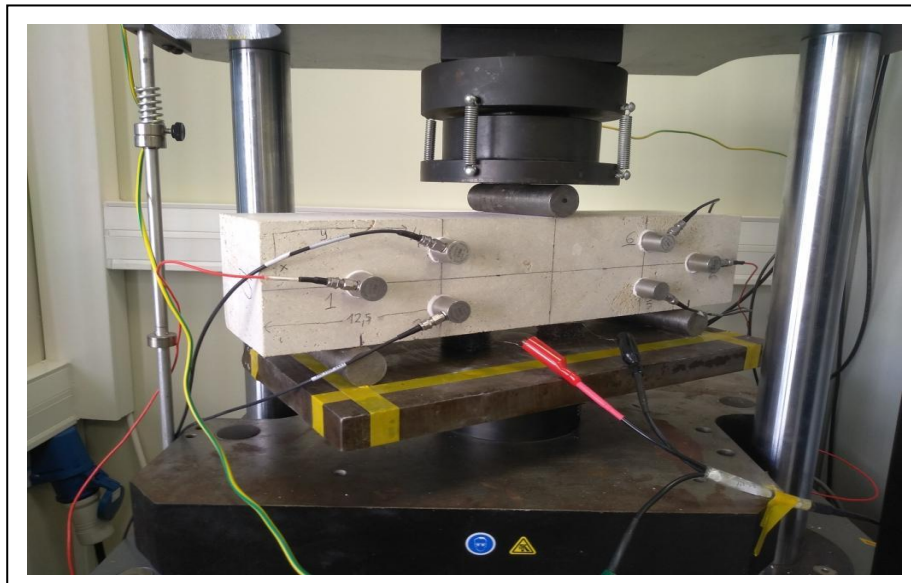
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συσχετισμός ηλεκτρικών σημάτων (PSC) και ακουστικών εκπομπών (AE) σε πειράματα μηχανικής καταπόνησης δοκιμίων Αλφά μέχρι την θραύση τους



Μεταπτυχιακός Φοιτητής : Γεώργιος Αγαλιανός, AM MSCRES-0040
Επιβλέπων : Ηλίας Σταύρακας, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Φεβρουάριος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

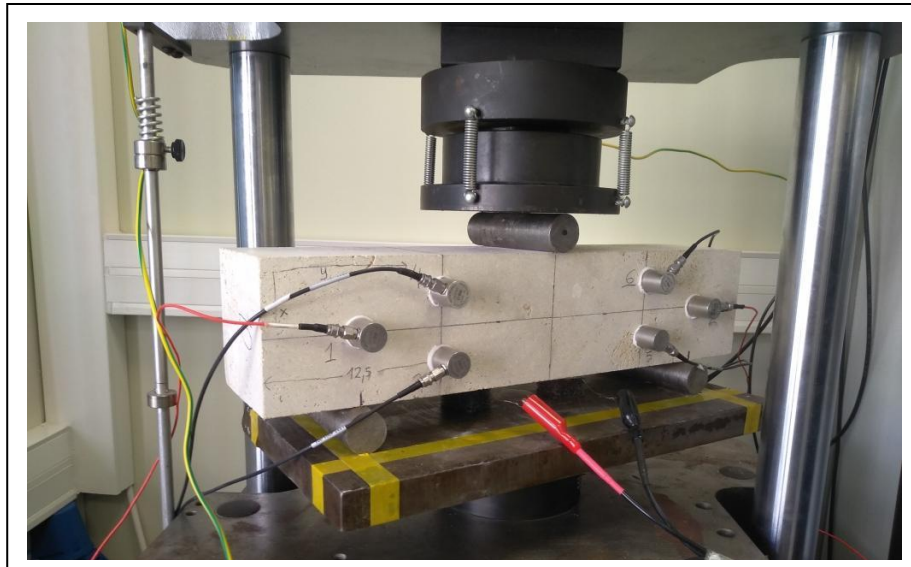
UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

MSc Thesis

Correlation of electrical signals (PSC) and acoustic emissions (AE) in Alphas specimens stress experiments until fracture



Student: Georgios Agalianos, Registration Number 0040

MSc Thesis Supervisor: Ilias Stavrakas, Professor

ATHENS-EGALEO, February 2022



Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Ηλίας Σταύρακας	Παναγιώτης Φωτόπουλος	Σταύρος Καμινάρης
Καθηγητής	Επίκουρος Καθηγητής	Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γεώργιος Αγαλιανός του Διονυσίου, με αριθμό μητρώου MSCRES-0040 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



(Υπογραφή)

(Αγαλιανός Γεώργιος)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Γεώργιος Αγαλιανός,

Φεβρουάριος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διερεύνηση της μηχανικής κατάστασης υλικών όταν αυτά υπόκεινται σε καταστροφικά επίπεδα εξωτερικής μηχανικής καταπόνησης προσελκύει διαχρονικά το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Αρκετές πειραματικές εργασίες που περιλαμβάνουν μεγάλη ποικιλία υλικών είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία, καταδεικνύοντας μια σειρά τεχνικών ικανών να παρέχουν ενδείξεις για την επερχόμενη καταστροφική αποτυχία ενός υλικού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, δείγματα πωρόλιθου Αλφά σε σχήμα δοκού υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων μέχρι τη θραύση, ενώ ταυτόχρονα καταγράφηκαν Ακουστικές Εκπομπές (ΑΕ) και Ρεύματα Διεγείρομενα από Πίεση (PSC).

Ο πωρόλιθος Αλφάς είναι ένας ιζηματογενής πορώδης ασβεστόλιθος που εξορύσσεται στα λατομεία του χωριού Αλφάς στο Ρέθυμνο της Κρήτης και χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο παρελθόν ως οικοδομικό υλικό στην Κρήτη. Σήμερα ο Άλφας χρησιμοποιείται για την αναστήλωση αρκετών μνημείων τόσο στην Κρήτη όσο και σε άλλες περιοχές στην Ελλάδα όπως τα μνημεία της Επιδαύρου.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι καταγραφές και των δύο τεχνικών (ΑΕ και PSC), σχετίζονται έντονα με την έναρξη και τη διάδοση ρωγμών σε εύθραυστα υλικά, η συσχέτισή τους αναμένεται να παράσχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τους μηχανισμούς θραύσης που εμφανίζονται στο μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα τελευταία στάδια πριν από τη θραύση των δειγμάτων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία γίνονται ταυτόχρονα με τις ακουστικές και ηλεκτρικές καταγραφές κατά τη μηχανική καταπόνηση δοκιμίων Αλφά όταν αυτά υπόκεινται σε κάμψη τριών σημείων. Επιπλέον, για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία, διερευνάται η επίδραση των διαφορετικών επιπέδων πορώδους των δειγμάτων στη συνολική καταγεγραμμένη δραστηριότητα ΑΕ και στην ισχύ του σήματος PSC. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν σημαντικές ομοιότητες τουλάχιστον ποιοτικές με αντίστοιχα πειράματα που έγιναν σε άλλα τεχνητά και φυσικά δομικά υλικά όπως δείγματα τσιμέντου και μάρμαρα.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια στα οποία εξετάζονται θέματα σχετικά με την τεχνική της ΑΕ και των PSC ενώ επικεντρώνεται στην διερεύνηση και την αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα:

Στο πρώτο κεφάλαιο, το οποίο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, γίνεται περιγραφή του Σκοπού και του Στόχου της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθεται το απαραίτητο για την πραγματοποίηση των πειραμάτων και την κατανόηση από τον αναγνώστη θεωρητικό υπόβαθρο. Σε αυτό περιλαμβάνονται βασικές έννοιες και ορισμοί της μηχανικής, οι βασικές αρχές της τεχνικής της ΑΕ, η παράμετρος b -value και επεξήγηση της θεωρίας των PSC.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι φυσικές ιδιότητες των προς μελέτη δοκιμίων, η διάταξη εφαρμογής μηχανικού φορτίου καθώς και όλα τα συστήματα καταγραφής και αποτύπωσης τόσο των ΑΕ όσο και των PSC.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία. Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται η προετοιμασία των δοκιμίων, η παραμετροποίηση του συστήματος το κυρίως μέρος της πειραματικής διαδικασίας, ο υπολογισμός του πορώδους και της παραμέτρου Ib-value.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των πειραματικών αποτελεσμάτων συνδυάζοντας και συγκρίνοντας όλες τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Ειδικότερα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο ενδεικτικών πειραμάτων (ένα, για κάθε ως προς το πορώδες, τύπου Αλφά) και υπολογισμός της Ib value.

Τέλος η εργασία ολοκληρώνεται στο έκτο κεφάλαιο με την παρουσίαση των συμπερασμάτων και τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: *Ακουστικές εκπομπές, θραύση, κάμψη τριών σημείων, πωρόλιθος Αλφάς, Ρεύματα διεγερόμενα από πίεση.*

ABSTRACT

The investigation of the mechanical status of materials subjected to destructive levels of external mechanical stress attracts the interest of the scientific community. Several experimental works that involve a wide variety of materials are available in the literature, demonstrate a series of techniques capable of providing indications of the upcoming catastrophic failure of the material. In the present work, beam-shaped Alfas-stone specimens were subjected to three-point bending until fracture, while concurrently Acoustic Emissions (AE) and Pressure Stimulated Currents (PSC) were recorded.

The Alfas stone is a sedimentary porous limestone quarried near the Alfas village in Rethymno area in the island of Crete and was used as a building material in Crete. Nowadays Alfas stone is used for the restoration of several monuments in Crete and other areas in Greece as the Epidaurus monuments.

Considering that the recordings of both techniques (i.e., AEs and PSCs), are strongly related to the crack initiation and propagation in brittle materials, the correlation of these techniques is expected to provide useful information regarding the fracturing mechanisms occurring in the bulk of the specimens. Special attention is paid during the last seconds before the catastrophic fracture of the specimens.

It should be noticed that for the first time in literature acoustic and electrical recordings are made simultaneously during three-point bending on Alfas stone.

Furthermore, for the first time in literature, the impact of the different porosity levels of the specimens on the total recorded AE activity and the PSC signal strength is investigated. The experimental results show significant similarities at least qualitative with corresponding experiments conducted on other artificial and natural building materials like cement products and marbles.

The present work consists of six chapters in which issues related to the technique of AE and PSC are examined, focusing on the investigation and evaluation of experimental results. In more detail:

The first chapter is the introduction and the description that defines the objectives and the aims of the this diplomatic work

The second chapter lists the necessary theoretical background. This includes basic concepts and definitions of engineering, the basic principles of AE technique, the b-value parameter and the PSC theory.

In the third chapter experimental devices and materials used in this work is analysed. There is a detail description of the Static Hydraulic Testing Machine. All the recording systems of both AE and PSC are presented in detail.

The fourth chapter presents the experimental process in detail. This chapter includes the preparation of the specimens, the configuration of the system, the main part of the experimental procedure, and the calculation of the porosity and the Ib-value parameter.

The fifth chapter presents results and discussion combining and comparing all the methods used. In particular, the results of (two different porosity) indicative experiments and calculation of Ib value are presented.

Finally this diplomatic work ends in the sixth chapter presented the final observations and conclusions that emerged from the experimental process.

KEYWORDS: *Acoustic emissions; Alfas stone; Fracture; Pressure Stimulated Currents; Three-point bending.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω μέσα από την κάρδια μου τον κύριο Ηλία Σταύρακα Καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Ο κύριος Σταύρακας πίστεψε σε μένα και με παρότρυνε με το θετικά του λόγια να συμμετάσχω και τελικά να ολοκληρώσω το ΠΜΣ «Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας». Ήταν πάντα δίπλα μου όποια στιγμή τον χρειάστηκα όλο αυτό το διάστημα, διδάσκοντάς με να μην τα βάζω κάτω στα δύσκολα και να επιλύω τα όποια προβλήματα με νηφαλιότητα και σωστή επιστημονική σκέψη. Η γνωριμία μας έρχεται από τα προπτυχιακά μας χρόνια στο Τμήμα Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Αθήνας και ήταν ιδιαίτερη τιμή αλλά και ευχαρίστηση ότι γνώρισα τον Ηλία και ως Δάσκαλο. Δάσκαλε, Ηλία, σε ευχαριστώ για όλα.

Ανάλογες ευχαριστίες αξίζουν στους δύο καινούριους φίλους που έκανα στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Διατάξεων και Υλικών, τον Ανδρόνικο Λουκίδη Ηλεκτρονικό Μηχανικό υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής και τον Δημήτρη Τζαγκαράκη προπτυχιακό φοιτητή Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Ήταν για μένα ταυτόχρονα δάσκαλοι, συνεργάτες, συνοδοιπόροι ερευνητές αλλά κυρίως φίλοι. Χωρίς εσάς τίποτα από όσα έγιναν δεν θα ήταν δυνατό. Είμαι σίγουρος πως μια λαμπρή ακαδημαϊκή καριέρα έρχεται στο άμεσο μέλλον και για τους δυο σας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Σταύρο Κουρκουλή, Καθηγητή του Τομέα Μηχανικής της ΣΕΜΦΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για το ενδιαφέρον και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την κυρία Ερμιόνη Πάσιου, Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια του Τομέα Μηχανικής της ΣΕΜΦΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου καθώς και τον παλιό μου Δάσκαλο στο ΤΕΙ Αθήνας κύριο Δήμο Τριάντη, Ομότιμο καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλον αυτόν τον καιρό.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	13
1.1 Σκοπός.....	13
1.2 Στόχος.....	13
2. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	14
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Βασικές έννοιες μηχανικής – Ορισμοί.....	14
2.3 Ακουστικές Εκπομπές.....	15
2.3.1 Προσδιορισμός σημείου γένεσης (πηγή) της ΑΕ.....	19
2.3.2 Παράμετρος b-value και Improved b-value	21
2.4 Ρεύματα διεγερόμενα από πίεση.....	23
3. Πειραματικές διατάξεις και υλικά.....	26
3.1 Εισαγωγή.....	26
3.2 Διάταξη εφαρμογής φορτίου.....	27
3.3 Διάταξη καταγραφής μέτρησης και απεικόνισης ΑΕ	29
3.3.1 Ακουστικοί αισθητήρες.....	30
3.3.2 Προενισχυτές	31
3.3.3 Κάρτες Συλλογής Ακουστικών Εκπομπών PCI-2.....	32
3.3.4 Λογισμικό καταγραφής Ακουστικών Εκπομπών.....	33
3.4 Διάταξη καταγραφής και μέτρησης PSC	33
3.5 Φυσικές Ιδιότητες Υλικών	35
4. Πειραματική Διαδικασία.....	36
4.1 Εισαγωγή.....	36
4.2 Διαμόρφωση και προετοιμασία δοκιμίων Αλφά.....	36
4.3 Παραμετροποίηση συστήματος	38
4.4 Υπολογισμός πορώδους.....	44
5. Πειραματικά αποτελέσματα.....	46
5.1 Εισαγωγή.....	46
5.2 Πειραματικά αποτελέσματα πειράματος σε δοκίμιο υψηλού πορώδους.....	47
5.3 Πειραματικά αποτελέσματα πειράματος σε δοκίμιο χαμηλού πορώδους.....	51
5.3.1 Υπολογισμός Ib-value.....	55
6. Συμπεράσματα	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	63
Παράρτημα 1.....	63
Χρονικές Καταγραφές Μηχανικού φορτίου,PSC, ΑΕ και Ib-value στα υπόλοιπα πειράματα.....	63
Παράρτημα 2.....	68
Αποτύπωση Ib value για διάφορες τιμές των παραμέτρων του βήματος και της ολίσθησης	68

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022 με θέμα «Συσχετισμός ηλεκτρικών σημάτων (PSC) και ακουστικών εκπομπών (AE) σε πειράματα μηχανικής καταπόνησης δοκιμίων Αλφά μέχρι την θραύση τους». Επιβλέπον είναι ο καθηγητής του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κύριος Ηλίας Σταύρακας. Η διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο δραστηριοτήτων που διενεργούνται στο ερευνητικό Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Διατάξεων και Υλικών του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Η διπλωματική εργασία εντάσσεται στις δραστηριότητες της μονάδας μέτρησης ασθενών μεγεθών, οι στρατηγικοί στόχοι της οποίας καθορίζονται από τον καθηγητή Ηλία Σταύρακα.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει παρουσιαστεί στο παγκόσμιο συνέδριο '37th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics' που διεξήχθη μεταξύ 21 και 24 Σεπτεμβρίου 2021 στην πόλη Linz της Αυστρίας, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας έχουν γίνει δεκτά και παρουσιάστηκαν στο παγκόσμιο συνέδριο "MedFract2 - 2nd Mediterranean Conference on Fracture" που διεξήχθη μεταξύ 14 και 16 Φεβρουαρίου 2022 στην πόλη Κατάνια της Ιταλίας και θα ακολουθήσει δημοσίευση σε επιστημονικό περιοδικό.

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Σήμερα είναι πλέον γενικά αποδεκτό, κατόπιν θεωρητικής τεκμηρίωσης αλλά και πειραματικών αποδείξεων, ότι η επιβολή μηχανικής καταπόνησης σε μη μεταλλικά στερεά υλικά έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών σημάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζεται στην μελέτη της συμπεριφοράς διαφορετικών, αναφορικά με το πορώδες τους, δοκιμίων πωρόλιθου Αλφά όταν αυτά υπόκεινται σε κάμψη τριών σημείων μέχρι τη θραύση. Κατά την διάρκεια της μηχανικής φόρτισης λαμβάνονται ταυτόχρονες μετρήσεις ακουστικών εκπομπών (AE) και ασθενών ηλεκτρικών ρευμάτων διεγερόμενων από πίεση (PSC). Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι καταγραφές και των δύο τεχνικών (AE και PSC), σχετίζονται έντονα με την έναρξη και τη διάδοση ρωγμών σε εύθραυστα υλικά, η συσχέτιση αυτών των τεχνικών αναμένεται να παράσχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τους μηχανισμούς θραύσης που εμφανίζονται στο μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στα τελευταία δευτερόλεπτα πριν τη θραύση.

Σε αυτή την εργασία γίνεται για πρώτη φορά στο συγκεκριμένο υλικό, κατά την διαδικασία κάμψης τριών σημείων, προσπάθεια ταυτόχρονης καταγραφής PSC, εκτός από AE και μελέτη των αποτελεσμάτων σε σχέση με το πορώδες του κάθε δοκιμίου.

Η καταγραφή και επεξεργασία των μετρήσεων αναμένεται να δώσει ακόμα περισσότερες πληροφορίες για την μηχανική συμπεριφορά του υλικού, οι οποίες θα βρουν εφαρμογή στον τομέα της αναστήλωσης αρχαίων μνημείων.

1.2 Στόχος

Η μελέτη των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών τόσο των ηλεκτρικών σημάτων όσο και των Ακουστικών εκπομπών που ελήφθησαν όταν δοκίμια Αλφά υποβλήθηκαν σε μηχανική καταπόνηση με εφαρμογή δύναμης κάμψης τριών σημείων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ανήκαν σε δύο μεγάλες κατηγορίες αναφορικά με το επίπεδο πορώδους μελετήθηκε η επίδραση του πορώδους στα χαρακτηριστικά των σημάτων.

Στο πλαίσιο της ερευνητικής εργασίας εκτιμήθηκε το πορώδες των δοκιμίων με την εφαρμογή της τεχνική απορρόφησης νερού. Επιπλέον υπολογίστηκαν οι πειραματικές αποκλίσεις του πορώδους και τα δοκίμια ταξινομήθηκαν με βάση το πορώδες.

Στόχος ήταν μέσα από τις πειραματικές δοκιμές να μελετηθεί η δυνατότητα χρήσης των πειραματικών τεχνικών των Ακουστικών Εκπομπών (AE) και των Μηχανικά Διεγερόμενων Ηλεκτρικών σημάτων (Pressure Stimulated Currents – PSC) ως αξιόπιστοι και ισχυροί δείκτες της μηχανικής κατάστασης υλικών. Πρέπει να σημειωθεί

ότι το αναφερόμενο υλικό έχει ευρεία χρήση ως φυσικός δομικός λίθος μνημείων πράγμα το οποίο θα ενισχύσει σημαντικά περισσότερο τις δράσεις αποκατάστασης αντίστοιχων πολιτισμικών έργων.

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή

Κατά την μηχανική φόρτιση μέχρι το σημείο θραύσης μη μεταλλικών σωμάτων, έχει παρατηρηθεί εμφάνιση ηλεκτρικών σημάτων και μηχανικών ελαστικών κυμάτων, τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν και να μελετηθούν [1,2]. Στην περίπτωση της φόρτισης ψαθυρών υλικών όπως ο πωρόλιθος Αλφάς, το αποτέλεσμα της φόρτισης είναι η αύξηση της συγκέντρωσης τάσεων γύρω από μικροσκοπικές ρωγμές ή ατέλειες του υλικού. Όταν οι τάσεις ξεπεράσουν μια συγκεκριμένη τιμή η ελαστική ενέργεια που έχει συσσωρευτεί απελευθερώνεται απότομα [3].

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων είναι απαραίτητη η γνώση βασικών εννοιών μηχανικής καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο των ΑΕ και των PSC.

2.2 Βασικές έννοιες μηχανικής – Ορισμοί

Η εργασία αυτή εντάσσεται στο πεδίο μετρήσεων σημάτων με εφαρμογή στην μηχανική αντοχή υλικών. Ανάμεσα στα αντικείμενα του πεδίου αυτού είναι η εύρεση των ορίων μηχανικής φόρτισης υλικών όταν αυτά υπόκεινται σε καταπονήσεις διαφόρων ειδών, ο υπολογισμός των διαστάσεων των μελών διαφόρων κατασκευών ώστε αυτές να είναι ασφαλείς, καθώς και ο προσδιορισμός των μέγιστων φορτίων που μπορούμε να επιβάλουμε σε κατασκευές και υλικά [4].

Μερικές βασικές έννοιες μηχανικής που συναντώνται σε πειράματα μηχανικής καταπόνησης αντίστοιχα με την παρούσα μελέτη είναι:

Μηχανική τάση – stress (P): Η μηχανική τάση δίνεται από το κλάσμα της δύναμης (L) που ασκείται σε μια επιφάνεια προς το εμβαδόν της επιφάνειας (A) αυτής και ως μονάδα μέτρησης έχει το Pascal: $P = \frac{L}{A}$ [5].

Καταπόνηση: Καταπόνηση ονομάζεται η επαναλαμβανόμενη, συνεχής ή διαλείπουσα φόρτιση ενός υλικού. Τα είδη της καταπόνησης είναι ο εφελκυσμός, η θλίψη, η στρέψη, η άμεση διάτμηση, η κάμψη και ο λυγισμός.

- Εφελκυσμός : Όταν σε ράβδο η δοκό επενεργούν δύο δυνάμεις ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς οι οποίες τείνουν να τη διασπάσουν.
- Θλίψη: Όταν σε ράβδο ή δοκό επενεργούν δύο δυνάμεις ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς οι οποίες τείνουν να την συνθλίψουν,

- Στρέψη: Όταν οι δυνάμεις αποτελούν ζεύγος με επίπεδο κάθετο στον άξονα του σώματος το οποίο τείνουν να περιστρέψουν,
- Άμεση διάτμηση: Όταν σε σώμα επενεργούν δυο δυνάμεις ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς κάθετες στον άξονά του, οι οποίες τείνουν να το τμήσουν,
- Κάμψη: Όταν δύναμη ενεργεί κάθετα στον άξονα της δοκού. Αναπτύσσονται ροπές κάμψης και προκαλείται καμπύλωση της δοκού.
- Λυγισμός: Από άποψη δράσης των δυνάμεων μοιάζει με την θλίψη, ενώ από άποψη παραμορφώσεων με την κάμψη. Διαφέρει αρκετά από τις δύο αποτελώντας ιδιαίτερο τρόπο καταπόνησης [5].

Παραμόρφωση (strain) (ϵ): Παραμόρφωση ονομάζουμε τη μεταβολή του σχήματος και των διαστάσεων ενός υλικού μετά από φόρτιση. Υπάρχουν δύο βασική τύποι παραμόρφωσης.

- Πλαστική παραμόρφωση όταν κατά τη φόρτιση η προκαλούμενη παραμόρφωση είναι μόνιμη και μη αντιστρεπτή.
- Ελαστική παραμόρφωση όταν κατά τη φόρτιση η προκαλούμενη παραμόρφωση δεν είναι μόνιμη και το φορτισμένο σώμα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση [5].

2.3 Ακουστικές Εκπομπές

Η ακριβής ημερομηνία στην οποία ο άνθρωπος άρχισε να χρησιμοποιεί τις ακουστικές εκπομπές σαν μέθοδο ελέγχου ποιότητας των υλικών είναι κάτι που δεν μπορεί σαφώς να προσδιοριστεί. Το μόνο σίγουρο είναι ότι από την αρχαιότητα οι κεραμοποιοί κατά την διαδικασία κατασκευής κεραμικών σκευών καταλάβαιναν ανάλογα με τους ήχους που ακούγονταν κατά την διάρκεια ψύξης, αν η κατασκευή τους ήταν ποιοτική ή αν είχε εσωτερικές ατέλειες και ασυνέχειες. Παρόμοιες τακτικές χρησιμοποιήθηκαν και στην εποχή του μετάλλου όταν οι σιδηρουργοί καταλάβαιναν αν οι κατασκευές τους ήταν στιβαρές και αν οι κολλήσεις τους ήταν ορθές ανάλογα με τον ήχο που άκουγαν χτυπώντας τις με μεταλλικά σφυριά και λυγίζοντάς τις.

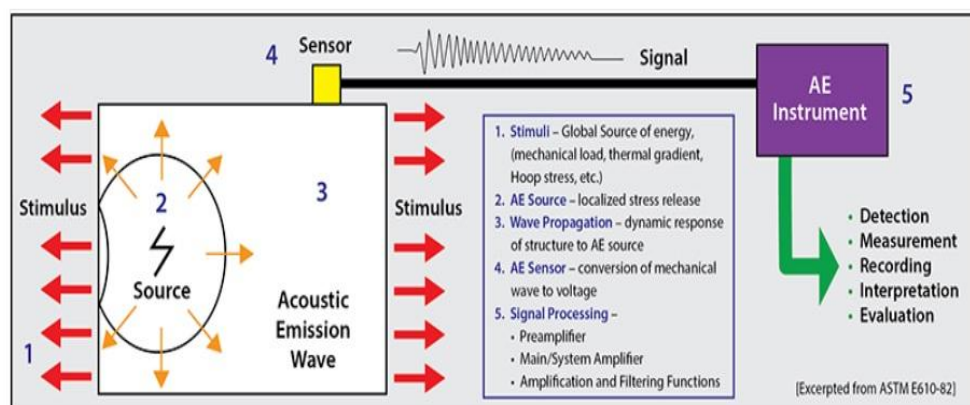
Στην νεότερη ιστορία γίνονται αναφορές για το φαινόμενο αυτό από ανθρακωρύχους οι οποίοι παρατήρησαν πως λίγο πριν την κατάρρευση στις σήραγγες των ορυχείων ακουγόταν ένας βαθύς ήχος τριξίματος που προέρχονταν από τα πετρώματα και τα ξύλινα υποστυλώματα. Στα τα τέλη του 19ου αιώνα γίνονται συχνά αναφορές στους ήχους που παράγονται κατά την διαδικασία επεξεργασίας μεταλλικών υλικών όπως ο σίδηρος και ο κασσίτερος ενώ σημαντική θεωρείται η παρατήρηση του Czochralski ότι κάθε μέταλλο παράγει το δικό του ήχο κατά την διαδικασία επεξεργασίας του. Στις αρχές του 20ου αιώνα πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες σοβαρές μελέτες όσον αφορά την αντοχή των υλικών και το συσχετισμό της με τις ΑΕ όπως η εργασία του Erich Scheil που επικεντρώνεται στην παραγωγή ήχων κατά το σχηματισμό μαρτενσίτη μέσα σε ατσάλι. Σημείο σταθμός θεωρείται η εργασία του Joseph Kaiser “Results and Conclusions from Measurements of Sound in Metallic Materials under Tensile Stress” καθώς αποτελεί την πρώτη ολοκληρωμένη έρευνα στο πεδίο των ΑΕ [6].

Στις μέρες μας, είναι γενικά αποδεκτό και πειραματικά αποδεδειγμένο, ότι σχεδόν σε όλα τα στερεά υλικά κατά τη υποβολή τους σε μηχανική φόρτιση, παρατηρείται εκπομπή ακουστικών σημάτων, τα οποία όσο η μηχανική φόρτιση αυξάνει οδηγώντας το υλικό προς το σημείο απώλειας της συνοχής του ως την θραύση, γίνονται ακόμα πιο ισχυρά. Τα ακουστικά αυτά σήματα ονομάζονται ΑΕ και ουσιαστικά είναι ελαστικά κύματα που παράγονται λόγω της απότομης και μεγάλης έκλυσης ενέργειας από συγκεκριμένα σημεία στο εσωτερικό του υλικού[1].

Ειδικότερα, η φόρτιση ψαθυρών υλικών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση τάσεων γύρω από μικρές ρωγμές και ατέλειες του υλικού που τις περισσότερες φορές προϋπάρχουν καθώς έχουν δημιουργηθεί κατά την διαδικασία γένεσης του υλικού και είναι είτε μικρές θραύσεις είτε ολισθήσεις των κόκκων του που σχετίζονται με την αλλαγή φάσης του υλικού [7,8].

Όταν οι τάσεις που εμφανίζονται γύρω από μια ατέλεια του υλικού υπερβούν μια συγκεκριμένη τιμή τότε η ελαστική ενέργεια που έχει συσσωρευτεί απελευθερώνεται απότομα. Το μέτρο αυτής της ενέργειας είναι συναρτώμενο του δείκτη ψαθυρότητας του υλικού καθώς και του κλάσματος της ελαστικής προς την πλαστική παραμόρφωση στο σημείο της αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων[3]. Η απελευθερούμενη αυτή ενέργεια διαδίδεται μέσα στο υλικό με τη μορφή ελαστικών κυμάτων φαινόμενο γνωστό ως ΑΕ[1].

Κατά τον ορισμό του Παγκόσμιου Οργανισμού Τυποποίησης (ASTM International) η Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emissions –ΑΕ), περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση των ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Η πηγή αυτών των κυμάτων μπορεί να είναι η τοπική μετατόπιση που συνοδεύει την πλαστική παραμόρφωση, ή η έναρξη και διάδοση αστοχίας στο υλικό. Πηγές ΑΕ δημιουργούνται κατά την τήξη του υλικού και κατά την αλλαγή φάσεως, λόγω θερμικών τάσεων [9]. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης μιας ΑΕ σύμφωνα με τον ASTM.

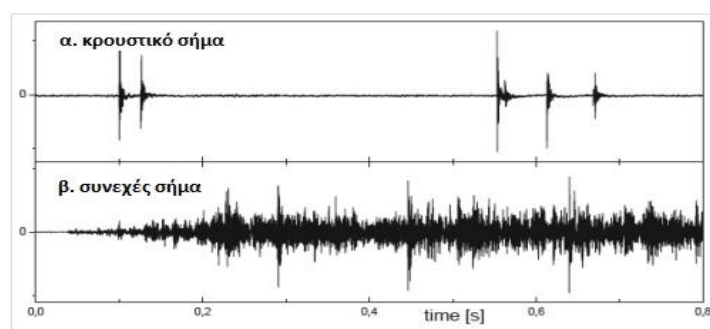


Σχήμα 1: Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης ΑΕ [10].

Το ακουστικό σήμα έχει ως πηγή το υλικό που υφίσταται την φόρτιση και μόνο εφόσον υπάρξει κάποιας μορφής φόρτιση από οπουδήποτε αυτή και αν προέρχεται παρατηρούνται ΑΕ. Όταν το υλικό μας βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας δεν ανιχνεύονται ΑΕ [11].

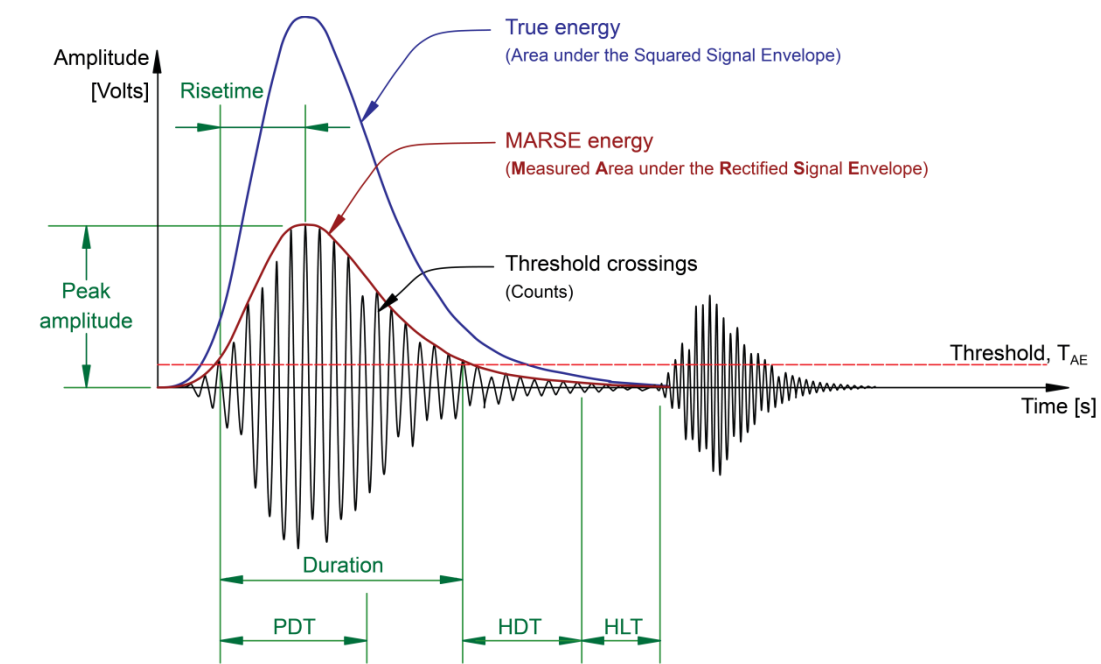
Τα ακουστικά κύματα διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις στο εσωτερικό του υλικού και ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας ειδικούς αισθητήρες οι οποίοι τοποθετούνται με κατάλληλο τρόπο ώστε να βρίσκονται σε άμεση επαφή με το δοκίμιο. Οι αισθητήρες που συνήθως χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ΑΕ είναι πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων με βασική λειτουργία την ανίχνευση ελαστικών κυμάτων και την μετατροπή τους σε ηλεκτρικά σήματα τα οποία στη συνέχεια ενισχύονται, φιλτράρονται και καταγράφονται μέσω ειδικών διατάξεων από κατάλληλα συστήματα. Αυτή η τεχνική καταγραφής που τα τελευταία χρόνια έχει γίνει ευρύτερα αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα ονομάζεται τεχνική Ακουστικών Εκπομπών (Acoustic Emission Technique, AET) και παρά την ονομασία της τα σήματα που εξετάζονται ανήκουν στην κατηγορία των υπερήχων με εύρος συχνοτήτων από 20kHz μέχρι 1200kHz [11]. Οι τιμές των σημάτων που λαμβάνονται εξαρτώνται κυρίως από τα φυσικά χαρακτηριστικά του μέσου μετάδοσης και τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα που χρησιμοποιείται, παράμετροι που παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στο τι τελικά ελαστικά κύματα θα παραχθούν και πόσα από αυτά θα ανιχνευθούν.

Η διάδοση ελαστικών κυμάτων μέσα σε ένα υλικό ιδιαίτερα όταν αυτό είναι ψαθυρό αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία καθώς εξαρτάται από τη γεωμετρία του και τις διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης λόγω της διαφορετικής δομής του υλικού από σημείο σε σημείο. Σημαντικό ρόλο επίσης παίζει το πλήθος των γεγονότων που γεννούν τα ελαστικά κύματα τα οποία πολλές φορές λειτουργούν προσθετικά στο τελικό ανιχνεύσιμο κύμα καθώς και το μέγεθος των γεγονότων που προκαλούν το ελαστικό κύμα [3]. Με βάση αυτά οι ΑΕ διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους ανάλογα με το πως αναγνωρίζεται το ακουστικό γεγονός, τις εκπομπές κρουστικού σήματος και τις εκπομπές συνεχούς σήματος. Όταν το σήμα προέρχεται από ένα μοναδικό γεγονός, ονομάζεται κρουστικό και έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2α. Όταν το σήμα προέρχεται από πολλά διαφορετικά γεγονότα τα οποία αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους σχηματίζουν ένα σήμα συνεχούς μορφής, το σήμα ονομάζεται συνεχές και έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2β [12].



Σχήμα 2: Κυματομορφές ΑΕ α) κρουστικό σήμα, β) συνεχές σήμα [2].

Κατά την διαδικασία ανίχνευσης ΑΕ καταγράφεται πλήθος σημάτων τα οποία πρέπει να επεξεργαστούν και να αξιολογηθούν έτσι ώστε να καταλήξουμε σε ορθά συμπεράσματα. Για το λόγο αυτό σε κάθε σήμα ΑΕ ορίζονται κάποιες χαρακτηριστικές παράμετροι οι οποίες ονομάζονται παράμετροι ΑΕ και χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία και την επεξεργασία των σημάτων που λαμβάνονται [13]. Οι σημαντικότερες παράμετροι ΑΕ όπως παρουσιάζονται και στο Σχήμα 3 είναι οι εξής:



Σχήμα 3: Παράμετροι ΑΕ [13].

Κατώφλι (Threshold): Είναι η ελάχιστη τιμή της ηλεκτρικής τάσης, που ορίζεται, ώστε μόνο σήματα πάνω αυτή να καταγράφονται. Με αυτόν τον τρόπο ξεχωρίζει ο εξωτερικός θόρυβος, από την ΑΕ.

Διάρκεια ΑΕ (Duration): Ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που παρατηρείται μια μεμονωμένη ΑΕ, από την αρχή, έως το τέλος της.

Χτύπος (Hit): Ορίζεται ως το σημείο που το σήμα της ΑΕ περνάει το κατώφλι, τότε καταγράφεται ένας χτύπος.

Πλάτος Α (Peak Amplitude): Είναι η μέγιστη τιμή κάθε σήματος και μετράται σε dB.

Ενέργεια ΑΕ (True Energy): Ορίζεται ως το τετράγωνο του πλάτους Α του σήματος.

Marse Energy: Είναι το εμβαδόν κάτω από τη γραμμική προσέγγιση της γραφικής παράστασης της κυματομορφής της ΑΕ και βοηθά στον υπολογισμό της ενέργειας και της διάρκειας του σήματος.

Πλάτος μεταξύ δύο μεγίστων (A peak to peak): Ορίζεται ως το πλάτος της μέγιστης θετικής και της μέγιστης αρνητικής τιμής της ΑΕ.

Υπερβάσεις (Threshold crossings - counts): Ορίζονται ως το πλήθος των περιπτώσεων που ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι.

Χρόνος ανύψωσης (Rise time): Ορίζεται ως το χρονικό διάστημα, στο οποίο ένα σήμα, από την χρονική στιγμή που υπερβεί για πρώτη φορά το κατώφλι, φτάνει στο μέγιστο πλάτος.

Χρόνος άφιξης (Arrival time): Ορίζεται ως η χρονική στιγμή, στην οποία το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι.

Χρόνος καθορισμού των κτύπων (Hit Definition Time): Ο μέγιστος χρόνος στον οποίο το σήμα είναι κάτω από το κατώφλι.

Χρόνος κλειδώματος των κτύπων (Hit Lockout Time): Ορίζεται ως η χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών κτύπων.

Χρόνος ορισμού Peak (Peak Definition Time): Είναι ο προσδιοριζόμενος επιτρεπόμενος χρόνος, μετά τον εντοπισμό ενός μέχρι το σήμα να φτάσει στη μέγιστη τιμή του.

Χρόνος μεταξύ γεγονότων Δt: Είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαφορετικών γεγονότων (από την αρχή του ενός μέχρι την αρχή του άλλου).

Λόγος πλάτους / θορύβου (signal to noise ratio-SNR): Ορίζεται ως το κλάσμα με αριθμητή το άθροισμα του πλάτους του σήματος και του θορύβου και παρανομαστή το πλάτος του θορύβου.

Δύο ακόμα σημαντικές παράμετροι για τη μελέτη των ΑΕ είναι η εξασθένιση του σήματος και ο θόρυβος [14].

Εξασθένιση είναι η μείωση του πλάτους ενός σήματος κατά την διάρκεια της μετάδοσής του και εξαρτάται από την διάδοση του σήματος στο χώρο και από την απώλεια ενέργειας λόγω απόσβεσης στο μέσο μετάδοσης. Το πλάτος φθίνει εκθετικά με την αύξηση της απόστασης από την πηγή λόγω διάδοσης του ελαστικού κύματος και λόγω απώλειας της ενέργειας του [3].

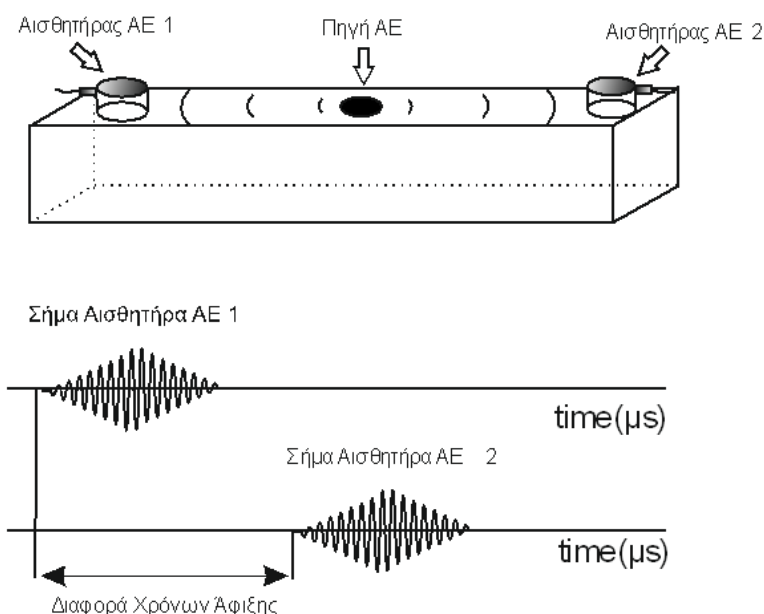
Θόρυβος μπορεί να υπάρξει είτε ηλεκτρικός είτε μηχανικός και έχει τεράστια σημασία για την αποφυγή εσφαλμένων καταγραφών να είναι απολύτως διακριτά τα σήματα ΑΕ από τα σήματα θορύβου. Στην καταγραφή ΑΕ παρατηρείται συχνά το φαινόμενο εμφάνισης θορύβου λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών προερχόμενων από πηγές που βρίσκονται εντός εργαστηρίου όπως συσκευές κινητής τηλεφωνίας, ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές κ.α. Μηχανικός θόρυβος προκαλείται από την ίδια την ηλεκτροδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου μέσω της επαφής με το δοκίμιο που μελετάται.

2.3.1 Προσδιορισμός σημείου γένεσης (πηγή) της ΑΕ

Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα που προκύπτουν μελετώντας τις ΑΕ είναι ο προσδιορισμός με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σαφήνεια του σημείου γένεσης της ΑΕ.

Για να επιτευχθεί αυτό καταγράφονται όλα τα εισερχόμενα hits και γίνεται υπολογισμός του χρόνου άφιξης καθενός από αυτά σε κάθε διαφορετικό αισθητήρα υπολογίζοντας ταυτόχρονα και την ταχύτητα του κύματος.

Ο απλούστερος τρόπος εντοπισμού είναι ο γραμμικός εντοπισμός. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως σε δοκίμια των οποίων η μια διάσταση είναι πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες και απαιτούνται τουλάχιστον δύο αισθητήρες. Οι δύο αισθητήρες τοποθετούνται στις θέσεις x_1 και x_2 όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Εντοπισμός πηγής ΑΕ με χρήση 2 αισθητήρων [15].

Αν ορίσουμε ότι:

- t_1 : ο χρόνος άφιξης στον αισθητήρα 1
- t_h : ο χρόνος γέννησης του σήματος στην πηγή
- x_1 : η θέση του αισθητήρα 1
- x_2 : η θέση του αισθητήρα 2
- x_h : η θέση της πηγής
- U : η Ταχύτητα διάδοσης του σήματος στο συγκεκριμένο υλικό

Εφόσον x_h είναι η θέση της πηγής που προσπαθούμε να εντοπίσουμε, t_h η χρονική στιγμή που παράγεται το σήμα ΑΕ και θεωρώντας ότι η διάδοση του κύματος γίνεται προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια ταχύτητα U , προκύπτει ότι η διαφορά ανάμεσα στους χρόνους άφιξης του σήματος σε κάθε αισθητήρα είναι ανάλογη με την απόσταση του από την πηγή γένεσης της ΑΕ.

Έτσι λοιπόν για την περίπτωση του εντοπισμού της πηγής στο επίπεδο ισχύει ο τύπος :

$$(t_1 - t_h) = \frac{(x_1 - x_h)}{U}$$

Όταν το προς μελέτη υλικό είναι μεγαλύτερου μεγέθους χρησιμοποιούνται περισσότεροι αισθητήρες. Με βάση την ίδια θεώρηση, ότι η διαφορά ανάμεσα στους χρόνους άφιξης

του σήματος σε κάθε αισθητήρα είναι ανάλογη με την απόσταση του από την πηγή γένεσης της ΑΕ, γίνεται ο εντοπισμός της πηγής στο επίπεδο και στο χώρο.

2.3.2 Παράμετρος *b-value* και *Improved b-value*

Η *b-value* ανάλυση είναι μια εμπειρική μέθοδος ανάλυσης γεγονότων που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τους Gutenberg και Richter [16] κατά τη μελέτη της σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή της Καλιφόρνιας. Η ανάλυση τους δίνει την σχέση μεταξύ σεισμών μεγάλου μεγέθους οι οποίοι εμφανίζονται με μικρότερη συχνότητα, σε σχέση με τους σεισμούς μικρότερου μεγέθους οι οποίοι εμφανίζονται πολύ πιο συχνά. Η σχέση στην οποία κατέληξαν και φέρει το όνομά τους είναι :

$$\log_{10} N = a - bM_L \quad (1)$$

Όπου M_L είναι το μέγεθος των σεισμών σε Richter, N είναι το πλήθος των σεισμών με μέγεθος μέσα σε ένα διάστημα $M_L \pm \frac{\Delta M}{2}$ και τα a και b εμπειρικές σταθερές [17].

Καθώς τα σήματα ΑΕ παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τα σεισμικά κύματα [18-21], τα στατιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των σεισμικών κυμάτων θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των ΑΕ που καταγράφονται σε υλικά υπό μηχανικό φορτίο. Η ανάλυση *b-value* είναι μια δημοφιλής μέθοδος για την αξιολόγηση της κατάστασης της θραύσης σε υλικά. Περιγράφει την κλιμάκωση της κατανομής πλάτους ΑΕ μέσω του νόμου Gutenberg και Richter [22-24]. Οι μεγαλύτερες τιμές *b-value* υποδηλώνουν την κυριαρχία των μικρορωγμών στο μεγαλύτερο μέρος του υλικού, ενώ οι μικρότερες τιμές *b-value* δείχνουν την συχνή εμφάνιση μακρορωγμών στο υλικό [25,26]. Έχει παρατηρηθεί ότι η *b-value* μειώνεται συστηματικά με την εξέλιξη της βλάβης [27].

Στην περίπτωση της τεχνικής ΑΕ, η σχέση Gutenberg-Richter μεταξύ της σωρευτικής συχνότητας και του μεγέθους δίνεται από την εξίσωση (2)

$$\log_{10} N(M) = a - b \left(\frac{A}{20} \right) \quad (2)$$

Όπου A είναι το πλάτος της κορυφής, N είναι ο αριθμός των ΑΕ hits με πλάτος μεγαλύτερο της τιμής κατωφλίου (threshold), M είναι το μέγεθος των γεγονότων, a είναι μια εμπειρική παράμετρος και b είναι η *b-value* των ΑΕ [24][28].

Μέχρι σήμερα έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για την καθιέρωση μιας συστηματικής αλλαγής της *b-value* κατά τη διάρκεια των διαφορετικών σταδίων της διαδικασίας θραύσης, με στόχο τη χρήση της *b-value analysis* ως εργαλείου για την εκτίμηση των διαδικασιών εξέλιξης της θραύσης [24, 28-30]. Οι Shiotani et al [24], πρότειναν μια βελτιωμένη έννοια *b-value* (*Ib-value*) για τον υπολογισμό της οποίας χρησιμοποιήθηκαν στατιστικές παράμετροι όπως η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των πλατών ΑΕ.

Η βελτιωμένη τιμή b (Ib-value) είναι μια παράμετρος που προέρχεται από τη στατιστική ανάλυση της κατανομής των πλατών ακουστικών εκπομπών και σχετίζεται με την επικείμενη θραύση καθώς η τιμή της αλλάζει κατά τη διαδικασία αστοχίας [24]. Πρόσθετες παράμετροι ΑΕ που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της διαδικασίας θραύσης είναι η απελευθερωμένη αθροιστική ενέργεια ΑΕ και ο αριθμός των υπερβάσεων μιας ΑΕ. Είναι αποδεκτό ότι η χρονική διακύμανση των τιμών Ib-value παρέχει ενδείξεις σχετικά με την εγγύτητα του συστήματος στο «κρίσιμο στάδιο» του (επικείμενη αστοχία). Η Ib-value υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση: (3)

$$Ib = \frac{\log_{10} N(m-a_1s) - \log_{10} N(m-a_2s)}{(a_1 + a_2)s} \quad (3)$$

Όπου m είναι η μέση τιμή της κατανομής του πλάτους μιας ομάδας συμβάντων s είναι η τυπική απόκλιση μεγέθους της ίδιας ομάδας συμβάντων, το a_1 είναι σταθερά που σχετίζεται με μικρότερο πλάτος και το a_2 είναι σταθερά που σχετίζεται με το επίπεδο θραύσης.

Στην βιβλιογραφία οι σταθερές a_1 και a_2 παίρνουν τιμές από 1 έως 2 και ανάλογα με τις τιμές που τους δίνονται προσδιορίζεται και το εύρος των τιμών που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της Ib-value σε σχέση με τη μέση τιμή της ομάδας του συνόλου των ακουστικών εκπομπών. Αν στις σταθερές a_1 και a_2 δοθεί η ελάχιστη τιμή 1 τότε θα μελετηθεί το 72% του συνόλου των ακουστικών εκπομπών της ομάδας ενώ αν δοθεί η μέγιστη τιμή 2 θα μελετηθεί το 90% του συνόλου των ακουστικών εκπομπών της ομάδας.

Για να χρησιμοποιηθεί το 90% των ακουστικών εκπομπών θα πρέπει να υπάρχει η βεβαιότητα ότι ανάμεσα σε αυτά τα σήματα δεν υπάρχουν παρασιτικά σήματα λάθους, οπότε ο υπολογισμός της Ib-value θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας το σύνολο σχεδόν της ακουστικής δραστηριότητας. Επειδή όμως η ακουστική δραστηριότητα είναι μια αφαιρετική πειραματική και όχι θεωρητική τεχνική και καθώς οι διαστάσεις του δοκιμίου του συγκεκριμένου πειράματος είναι πεπερασμένες, καταγράφεται παράλληλα μεγάλος αριθμός ανακλάσεων, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το 90% των σημάτων και θα χρησιμοποιηθεί το 72%. Για αυτό το λόγο οι παράμετροι a_1 και a_2 ορίζονται ίσοι μεταξύ τους δίνοντάς τους την τιμή 1. Αν το πείραμα γινόταν σε δοκίμιο άπειρων διαστάσεων ή αν υπήρχε τρόπος να αποκλειστούν όλες οι δευτερογενείς εκπομπές και να χρησιμοποιηθούν μόνο τα καθαρά σήματα τότε και μόνο τότε θα μπορούσαν οι σταθερές a_1 και a_2 να πάρουν την τιμή 2.

Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι η b -value και η Ib-value αντίστοιχα δίνουν την αναλογία μικρορωγμών που εμφανίζονται συνήθως στα πρώτα στάδια της καταπόνησης, προς τις μεγάλες ρωγμές που εμφανίζονται όσο πλησιάζουμε προς την θραύση. Υψηλές τιμές συναντώνται όταν συμβαίνουν οι μικρορωγμές στα αρχικά στάδια της καταπόνησης ενώ αν εμφανίζονται μακρορωγμές παρατηρούνται σημαντικά χαμηλότερες τιμές [31].

Από την ανάλυση των ΑΕ παράγονται πολύ σημαντικές πληροφορίες σχετικές με την προέλευση και το μέγεθος μιας ασυνέχειας ή μιας αστοχίας σε ένα υλικό, καθώς και με τον τρόπο που αυτή η ασυνέχεια μπορεί να έχει επίπτωση στη συμπεριφορά του υλικού όταν αυτό δεχτεί καταπόνηση. Έχει πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία και τις κατασκευές ενώ χρησιμοποιείται ευρύτατα και ως ερευνητικό εργαλείο σε διάφορους τομείς όπως η έρευνα για την πρόβλεψη και κατανόηση σεισμικών κυμάτων [32-34].

2.4 Ρεύματα διεγερόμενα από πίεση

Η εμφάνιση ηλεκτρικών σημάτων κατά την διάρκεια μηχανικής καταπόνησης μη μεταλλικών υλικών είναι ένα φαινόμενο που έχει μελετηθεί στο παρελθόν και οφείλεται στη διαδικασία δημιουργίας ρωγμών στο εσωτερικό τους [35-41]. Τα ρεύματα διεγερόμενα από πίεση είναι πολύ ασθενή ηλεκτρικά ρεύματα που μετρώνται με ηλεκτρόμετρα μεγάλης ακρίβειας και ευαισθησίας χρησιμοποιώντας ζεύγος ηλεκτροδίων που εφάπτεται στο υλικό το οποίο καταπονείται [42]. Οι πρώτες αναφορές σχετικά με την καταγραφή τέτοιων ρευμάτων έχουν γίνει στην δεκαετία του 1990 κατά την διεξαγωγή έρευνας που αφορούσε ανίχνευση ηλεκτρικών ρευμάτων ως πρόγονων της εμφάνισης σεισμού σημάτων [43-46]. Τα ρεύματα αυτά είναι γνωστά στη βιβλιογραφία ως Pressure Stimulated Currents (PSC).

Η ύπαρξη των ρευμάτων PSC είναι πλέον αποδεκτή και έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά [47-48]. Για την ερμηνεία αυτών των ρευμάτων έχουν γίνει πολλές προσπάθειες με την χρήση διαφόρων θεωρητικών μοντέλων εκ των οποίων μεγαλύτερη αποδοχή έχει το μοντέλο Moving Charged Dislocations (MCD) [49].

Το μοντέλο Κινούμενων Φορτισμένων Ατελειών - (MCD) που περιγράφεται για πρώτη φορά από τους Βαλλιανάτο και Τζανή το 1999, φαίνεται να εξηγεί την παρατηρούμενη σχέση μεταξύ της τρέχουσας πυκνότητας και του ρυθμού καταπόνησης, μέσω της διάδοσης των συστοιχιών των εξάρσεων φορτισμένων ακμών μέσω του υλικού κατά τη διάρκεια της μικρο-θραύσης που μπορεί να φτάσει μέχρι και την θραύση [49].

Πριν την αστοχία του υλικού, όσο η εξωτερική μηχανική καταπόνηση αυξάνεται τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των μικρορωγμών που δημιουργούνται στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα να εμφανίζεται τελικά μεγάλος αριθμός ρωγμών οι οποίες διαταράσσουν την ηλεκτρική ισορροπία του δοκιμίου. Το σύνολο αυτών των ρωγμών αποτελεί μια μετατόπιση στο εσωτερικό του υλικού η οποία παρατηρείται άμεσα με την έναρξη εφαρμογής της μηχανικής καταπόνησης. Οι μετατοπίσεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία τοπικών ηλεκτρικών πολώσεων άρα και ροής ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του υλικού [2].

Η ποσότητα του ρεύματος έχει άμεση σχέση με την παραμόρφωση που προκαλείται λόγω μηχανικής φόρτισης του δοκιμίου. Όταν όμως το αποτέλεσμα της φόρτισης οδηγεί σε ένα σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης η κίνησή δημιουργεί ανταγωνιστικά

δίπολα και έτσι η πόλωση γίνεται μηδενική. Σε αυτή την περίπτωση δεν αναμένεται εμφάνιση ηλεκτρικού ρεύματος [2].

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι η εμφάνιση ρευμάτων PSC παρατηρείται από τα πρώτα στάδια της καταπόνησης πολύ πριν τα όρια αντοχής του υλικού. Μετρώνται δηλαδή ρεύματα πολύ πριν την εμφάνιση ρωγμών [50].

Το MCD μοντέλο αποτυπώνει τη σχέση των ηλεκτρικών αυτών σημάτων συναρτήσει ενός μηχανικού φορτίου χρονικά μεταβαλλόμενου, $E(t) = k \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$.

Όπου $E(t)$ είναι τα PSCs συναρτήσει του χρόνου, $\varepsilon(t)$ είναι η μηχανική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου και $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου και k ένας συντελεστής που σχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) του υλικού[49].

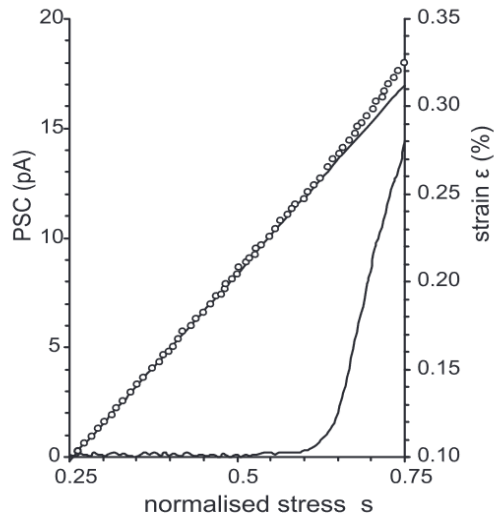
Όσο περισσότερο διαρκεί η μηχανική καταπόνηση του υλικού, τόσο περισσότερες είναι οι μετατοπίσεις και οι παραμορφώσεις που εμφανίζονται στο εσωτερικό του. Το αποτέλεσμα της συνάντησης και ένωσης αυτών των παραμορφώσεων είναι η δημιουργία ρωγμών στο υλικό.

Οι μικρορωγμές εμφανίζονται συνήθως στα σημεία που υπάρχουν ατέλειες και ασυνέχειες στο εσωτερικό του υλικού, αρχικά ανεξάρτητες, αλλά στη συνέχεια και όσο η καταπόνηση συνεχίζεται και το μέγεθός τους μεγαλώνει, αρχίζουν να συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας μεγαλύτερες ρωγμές. Όταν αρκετές ρωγμές ενωθούν οδηγούμαστε στην κατάρρευση του υλικού και την θραύση του.

Ένα υλικό πορώδες όπως αυτό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία έχει πολλές ασυνέχειες και αστοχίες οι οποίες οφείλονται στον τρόπο γέννησης του υλικού. Οι ασυνέχειες αυτές όταν εφαρμοστεί μηχανική φόρτιση στο υλικό μπορούν να κινηθούν προς διάφορες κατευθύνσεις με αποτέλεσμα αυτού την δημιουργία PSC.

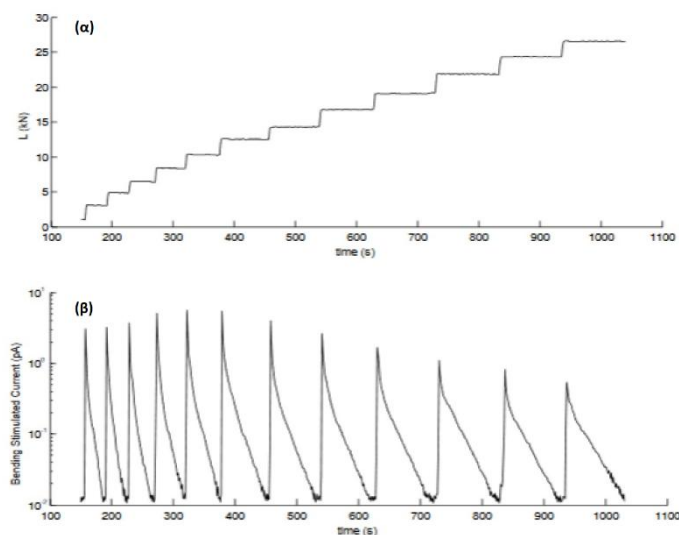
Σε προηγούμενες μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι όσο το υλικό κατά τη διάρκεια της φόρτισης βρίσκεται εντός της ελαστικής περιοχής η σχέση των PSC με το βήμα μεταβολής της καταπόνησης αναμένεται να είναι γραμμική. Όταν εισέρχεται στην πλαστική (ως προς την μηχανική συμπεριφορά του) περιοχή, αναμένεται απότομη αύξηση των ρευμάτων, ενώ λίγο πριν την κατάρρευση και τη θραύση του υλικού η κορύφωση των PSC [47].

Στο Σχήμα 5 αποτυπώνονται τα σήματα PSC σε σχέση με την μεταβολή της παραμόρφωσης ενός δοκιμίου από μάρμαρο Διονύσου υπό μονοαξονική θλίψη ως προς τη μεταβολή της τάσης (stress). Όπως φαίνεται η χαρακτηριστική των PSC αλλάζει απότομα κλίση όταν ξεπεράσουμε το 65% της μέγιστης φόρτισης [47].



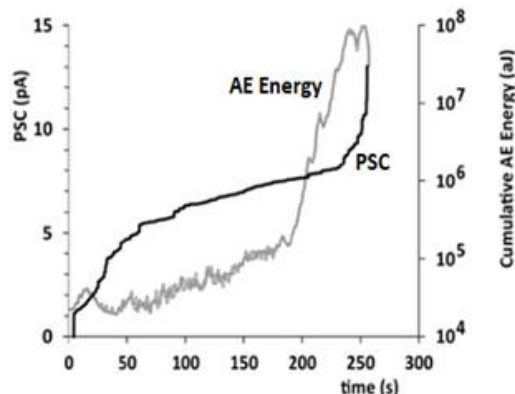
Σχήμα 5: Μεταβολή σημάτων PSC και παραμόρφωσης ως προς την μεταβολής της τάσης (stress) [47].

Εκπομπές PSC έχουν καταγραφεί και μελετηθεί σε εργαστηριακά πειράματα ασκώντας κάμψη τριών σημείων πάνω σε δοκίμια μαρμάρου. Κατά την συγκεκριμένη έρευνα η μηχανική φόρτιση ήταν βηματική με κάθε νέο βήμα να είναι μεγαλύτερου μηχανικού φορτίου από το προηγούμενο ενώ σε κάθε βήμα το μηχανικό φορτίο παρέμενε σταθερό για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό που παρατηρήθηκε όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6 είναι ότι στην αρχή κάθε βήματος υπάρχει αύξηση των PSC όπως αυξάνεται και το μηχανικό φορτίο και μείωση τους όταν το μηχανικό φορτίο παραμένει σταθερό [50].



Σχήμα 6: (α)Μηχανική Φόρτιση μαρμάρου με διαδοχικά βήματα αυξανόμενου μηχανικού φορτίου σε κάμψη 3 σημείων. (β)Μεταβολή PSC συναρτήσεως του χρόνου [50].

Πρόσφατες μελέτες κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι υπάρχει άμεση σχέση της μεταβολής των PSC με την μεταβολή της ακουστικής ενέργειας κατά την εξέλιξη της διαδικασίας κάμψης (Σχήμα 7) [51-53]. Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτά τα πειράματα είναι συμβατές με την διάταξη που χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 7: Χρονική μεταβολή της εκπομπής PSC και αντίστοιχη χρονική μεταβολή της ακουστικής ενέργειας [53].

3. Πειραματικές διατάξεις και υλικά

3.1 Εισαγωγή

Κατά την διάρκεια της μηχανικής φόρτισης πραγματοποιούνται ταυτόχρονες καταγραφές AE, PSC και της μηχανικής φόρτισης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται 3 διαφορετικές διατάξεις ελέγχου και καταγραφής οι οποίες πρέπει να συγχρονιστούν απόλυτα.

Οι διατάξεις αυτές είναι οι:

- I. Ηλεκτροδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου μοντέλο DX 300 της Instron καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό πλήρους καταγραφής και ελέγχου της μηχανής (Bluehill).
- II. Διάταξη καταγραφής AE μέσω των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων, σύστημα PCI-2 της Physical Acoustic Corp και λογισμικό AEWin του ίδιου κατασκευαστή.
- III. Διάταξη καταγραφής ασθενών ηλεκτρικών σημάτων (PSC) χρησιμοποιώντας ηλεκτρόμετρο της εταιρείας Keithley (μοντέλο 6517A) καθώς και λογισμικό το οποίο αναλαμβάνει την διαχείριση της μετρητικής διάταξης των PSC και βασίζεται στο περιβάλλον Vee της Agilent.

Κάθε διάταξη μέτρησης χρησιμοποιεί διαφορετικό πρωτόκολλο επικοινωνίας με τους υπολογιστές καταγραφής των δεδομένων και των αποτελεσμάτων ενώ για τον συγχρονισμό χρησιμοποιείται το μηχανικό φορτίο.

Στον πίνακα 1 που ακολουθεί περιγράφεται ο τρόπος επικοινωνίας των διατάξεων με τα συστήματα καταγραφής.

Πίνακας 1: Τρόπος επικοινωνίας διατάξεων με τα συστήματα καταγραφής

Διάταξη	Επικοινωνία
Ηλεκτροδραυλική μηχανή	Σειριακή επικοινωνία
Ηλεκτρικά σήματα PSC	GPIB – IEEE488
Ακουστικές Εκπομπές	Κάρτες συλλογής ενσωματωμένες στον Η/Υ σε PCI slot

Με βάση τα παραπάνω και με δεδομένο ότι κατά την πειραματική διαδικασία γίνεται καταγραφή σε περισσότερα από ένα υπολογιστικά συστήματα ενώ τα φαινόμενα που καταγράφονται μπορεί να διαρκούν λιγότερο από 1s υπήρξε ανάγκη για συγχρονισμό των μετρήσεων με κάποιο μέγεθος διαφορετικό του χρόνου ο οποίος μπορεί σε κάθε ένα από τα υπολογιστικά συστήματα να είναι διαφορετικός. Επιπλέον, δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη έναρξη καταγραφής δεδομένων αφού κάθε διάταξη ενεργοποιείται με διαφορετικό τρόπο. Για τον λόγο αυτό επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθεί η καταγραφή του μηχανικού φορτίου ως μέγεθος αναφοράς σε όλες τις πειραματικές διατάξεις. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των θυρών εξόδου που έχει η ηλεκτροδραυλική μηχανή φόρτισης και μπορούν να δίνουν ως έξοδο μία ηλεκτρική τάση ανάλογη του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου. Το μέγεθος αυτό καταγράφεται ταυτόχρονα με υψηλή δειγματοληψία (>10 samples/s) από όλες τις διατάξεις που συμμετέχουν στο πείραμα δίνοντας έτσι τη δυνατότητα συγχρονισμού των δεδομένων μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας. Στις επόμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου ακολουθεί αναλυτική περιγραφή κάθε μέρους της πειραματικής διάταξης καθώς και των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν.

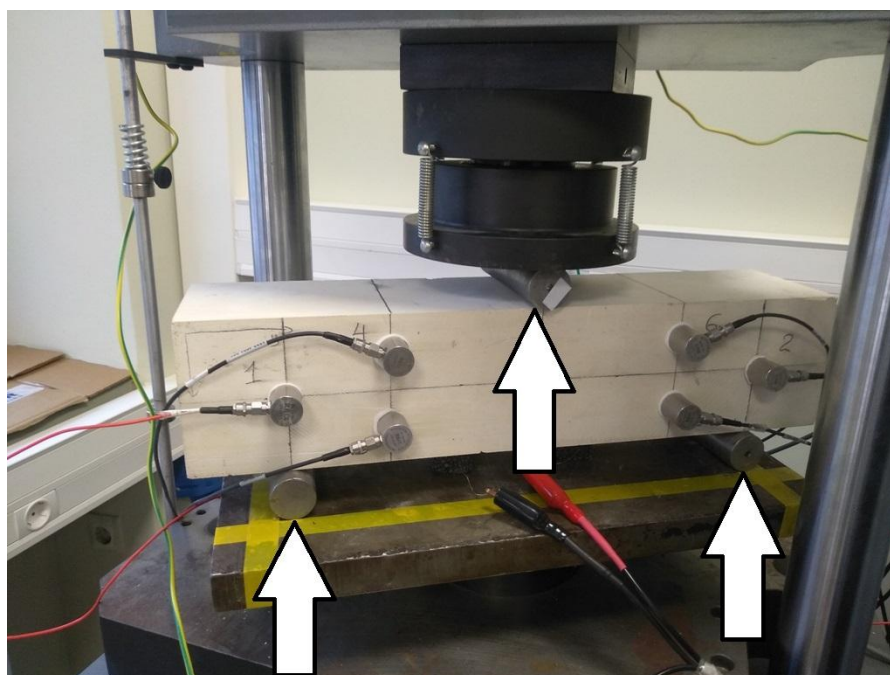
3.2 Διάταξη εφαρμογής φορτίου

Για την εφαρμογή του απαιτούμενου φορτίου με σκοπό την πραγματοποίηση των πειραμάτων κάμψης τριών σημείων χρησιμοποιήθηκε η Ηλεκτροδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου της εταιρείας INSTRON και συγκεκριμένα το μοντέλο 300 DX. (Εικόνα 1). Η συγκεκριμένη μηχανή χρησιμοποιείται ευρέως σε πειράματα θραύσης, κάμψης τριών σημείων καθώς και σε πειράματα εφελκυσμού.



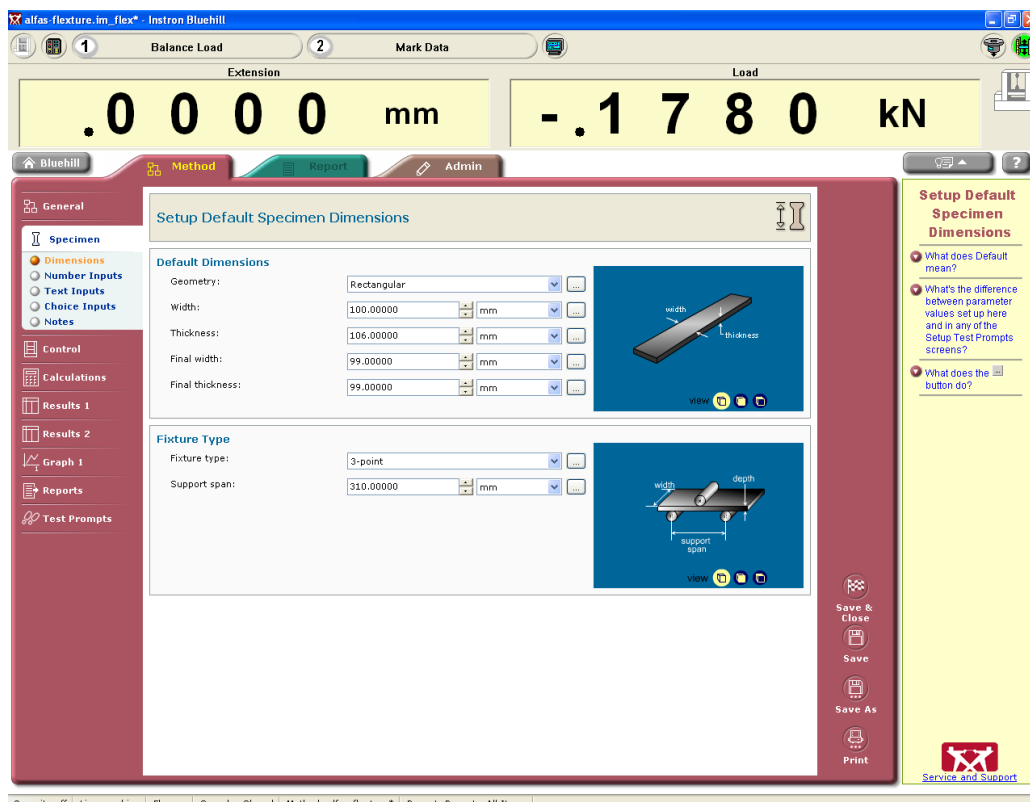
Εικόνα 1: Ηλεκτρουδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου Instron DX 300.

Για την επίτευξη της κάμψης τριών σημείων χρησιμοποιήθηκαν 3 συμπαγείς μεταλλικοί κύλινδροι οι οποίοι τοποθετούνται σε προκαθορισμένες θέσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Το δοκίμιο τοποθετείται πάνω στους δύο μεταλλικούς κυλίνδρους οι οποίοι απέχουν περίπου 160 mm ο καθένας από το κέντρο του δοκιμίου. Το μηχανικό φορτίο εφαρμόζεται μονοτονικά στο πάνω μέρος στο κέντρο του δοκιμίου μέσω του τρίτου μεταλλικού κυλίνδρου μέχρι τη θραύση.



Εικόνα 2: Μεταλλικοί κύλινδροι στήριξης.

Για τον έλεγχο λειτουργίας της ηλεκτροδραυλικής μηχανής εφαρμογής φορτίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Bluehill της εταιρείας Instron (Εικόνα 3). Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα καθορισμού της μεθόδου μηχανικής φόρτισης που θα επιλεγεί, κάμψη τριών σημείων στη συγκεκριμένη μελέτη, τον ρυθμό επιβολής του μηχανικού φορτίου (displacement/min, kN/min και MPa/min) καθώς και των μονάδων στις οποίες θα απεικονίζεται η καταγραφή. Μέσω του λογισμικού ορίζεται η γεωμετρία και οι ακριβείς διαστάσεις του δοκιμίου προς μελέτη καθώς και του μεγέθους προς καταγραφή, π.χ. το φορτίο και ο ρυθμός μετατόπισης του εμβόλου της ηλεκτροδραυλικής μηχανής.



Εικόνα 3: Ενδεικτική εικόνα λογισμικού Bluehill.

3.3 Διάταξη καταγραφής μέτρησης και απεικόνισης ΑΕ

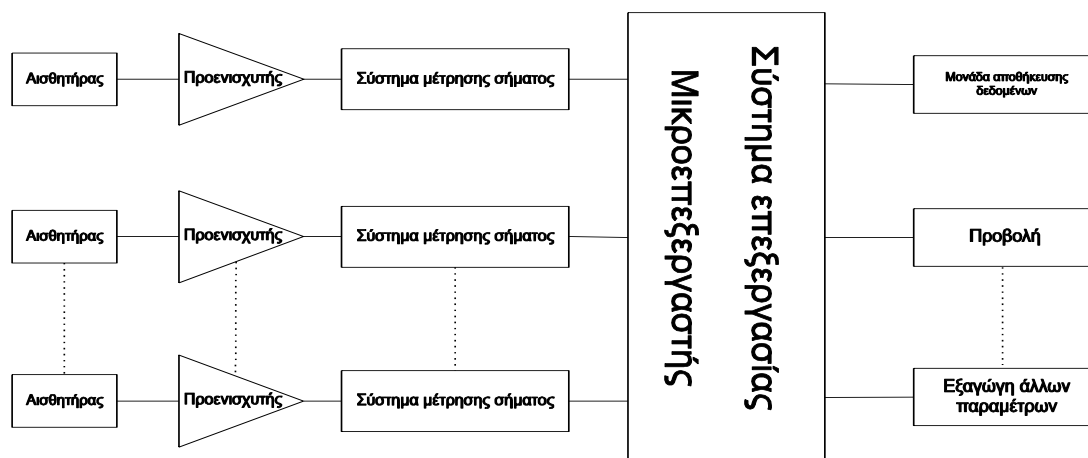
Η διάταξη παρακολούθησης καταγραφής και επεξεργασίας ΑΕ περιλαμβάνει τους ακουστικούς αισθητήρες, το τμήμα επεξεργασίας των ακουστικών σημάτων και το σύστημα ανάγνωσης των σημάτων αυτών. Ανάλογα με τον αριθμό των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται το σύστημα μπορεί να είναι πολυκάναλο όπως στην παρούσα εργασία ή ενός μόνο καναλιού. Η ανάγνωση των σημάτων γίνεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένη η απαραίτητη μονάδα επεξεργασίας

σήματος. Στο Σχήμα 8 απεικονίζεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα συστήματος καταγραφής και ελέγχου ΑΕ.



Σχήμα 8. Block διάγραμμα διάταξης ελέγχου και καταγραφής ΑΕ[15].

Η πηγή ΑΕ παράγει ένα ελαστικό κύμα το οποίο ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ. Ο αισθητήρας μετατρέπει το ελαστικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο οδηγείται στο σύστημα επεξεργασίας σήματος. Εκεί το σήμα φιλτράρεται και ενισχύεται από ειδικά συστήματα επεξεργασίας ΑΕ τα οποία λόγω της πολύ μεγάλης ταχύτητας δειγματοληψίας που απαιτείται (πάνω από 40 Msamples/s) είναι σχεδιασμένα με τη λογική της παράλληλης επεξεργασίας και εφοδιασμένα με ισχυρούς επεξεργαστές. Στο Σχήμα 9 απεικονίζεται μια πλήρης διάταξη ακουστικών εκπομπών.



Σχήμα 9: Block διάγραμμα συστήματος ελέγχου και καταγραφής ΑΕ.

3.3.1 Ακουστικοί αισθητήρες

Οι αισθητήρες αποτελούν το αρχικό και ίσως το βασικότερο μέρος της διάταξης παρακολούθησης ΑΕ. Βασική τους λειτουργία είναι η μετατροπή των ελαστικών κυμάτων που ανιχνεύουν, σε ηλεκτρικά σήματα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην παραμόρφωση που προκαλεί το ελαστικό κύμα σε ένα δίσκο από πιεζοηλεκτρικό

κρύσταλλο με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα άκρα του, μετατρέπεται έτσι η ΑΕ σε ηλεκτρική τάση. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι, έχουν περίβλημα για την προστασία από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και οι συχνότητες απόκρισης τους είναι τέτοιες ώστε να ελαττώνουν την επίδραση θορύβου από το περιβάλλον. Κατά την επιλογή των αισθητήρων αρχικά πρέπει να γίνει σωστή μελέτη ως προς το εύρος συχνοτήτων ΑΕ τις οποίες έχουν την δυνατότητα να ανιχνεύουν καθώς σε κάθε υλικό οι ΑΕ έχουν διαφορετική συχνότητα. Επίσης μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί και στην τοποθέτηση των αισθητήρων στο δοκίμιο. Για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόκριση του αισθητήρα και η ορθή ανίχνευση όλων των ΑΕ πρέπει η επαφή μεταξύ αισθητήρα και δοκιμίου να είναι πολύ καλή. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση διαφόρων υλικών όπως εποξική κόλλα, γράσο λίπος κενού κ.λ.π. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 6 πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες ΑΕ τύπου R6α και για τη σύζευξη με το δοκίμιο λεπτό φιλμ σιλικόνης (Εικόνα 4).

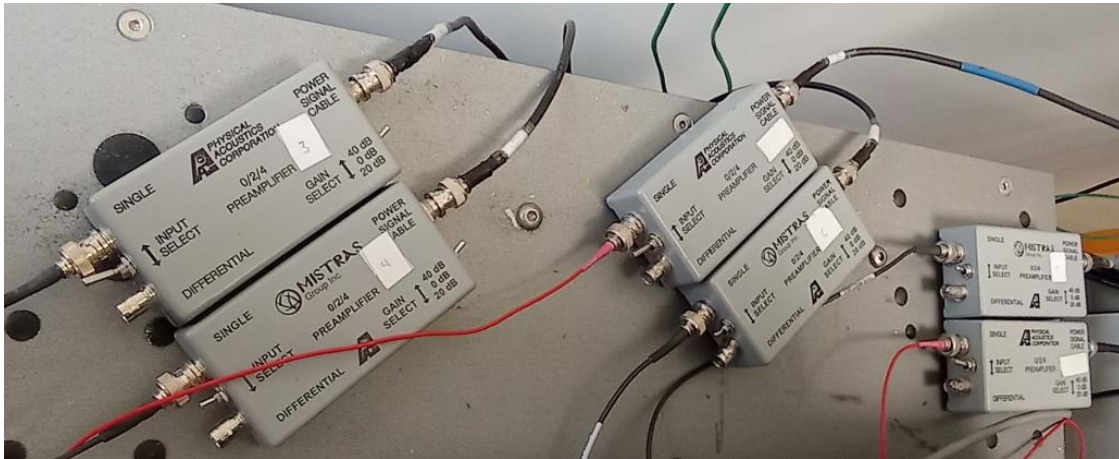


Εικόνα 4: Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες ΑΕ R6α.

3.3.2 Προενισχυτές

Ο σκοπός της χρήσης των προενισχυτών στις διατάξεις παρακολούθησης και καταγραφής ΑΕ είναι η ενίσχυση της τάσης που λαμβάνουν από τους αισθητήρες ΑΕ για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η επεξεργασία του σήματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 6 προενισχυτές ηλεκτρικών σημάτων με κέρδος +40dB (Εικόνα 5) που συνδέονται με τους αισθητήρες ΑΕ με σκοπό την ενίσχυση των ασθενών

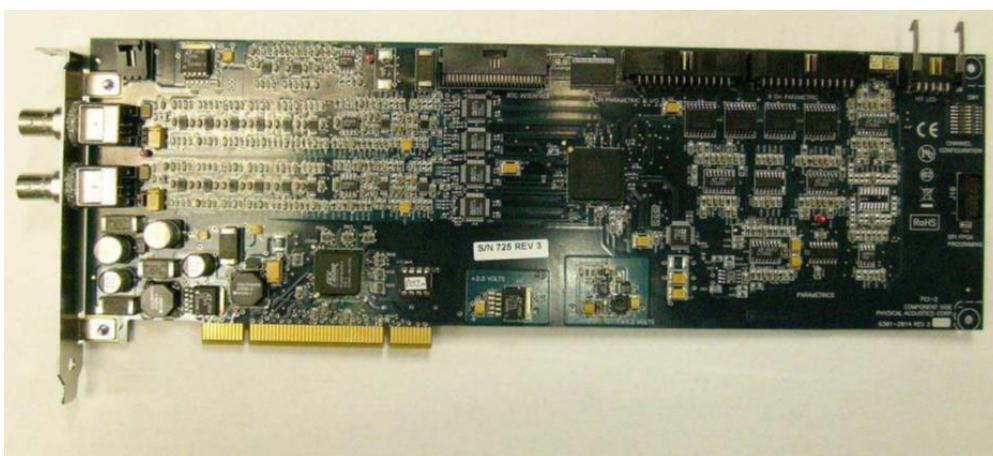
ηλεκτρικών σημάτων ώστε να μπορούν αυτά να επεξεργαστούν από κατάλληλη διάταξη. Οι προενισχυτές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι 0/2/4 της εταιρείας Physical Acoustics Corp με κέρδη 0dB, 20dB και 40dB, αντίσταση εισόδου 10kΩ και ρεύμα λειτουργίας 30mA. Η σύνδεσή τους με τους αισθητήρες ΑΕ γίνεται χρησιμοποιώντας θωρακισμένο καλώδιο χαμηλού θορύβου.



Εικόνα 5: Προενισχυτές ακουστικών σημάτων Physical Acoustics Corporation.

3.3.3 Κάρτες Συλλογής Ακουστικών Εκπομπών PCI-2

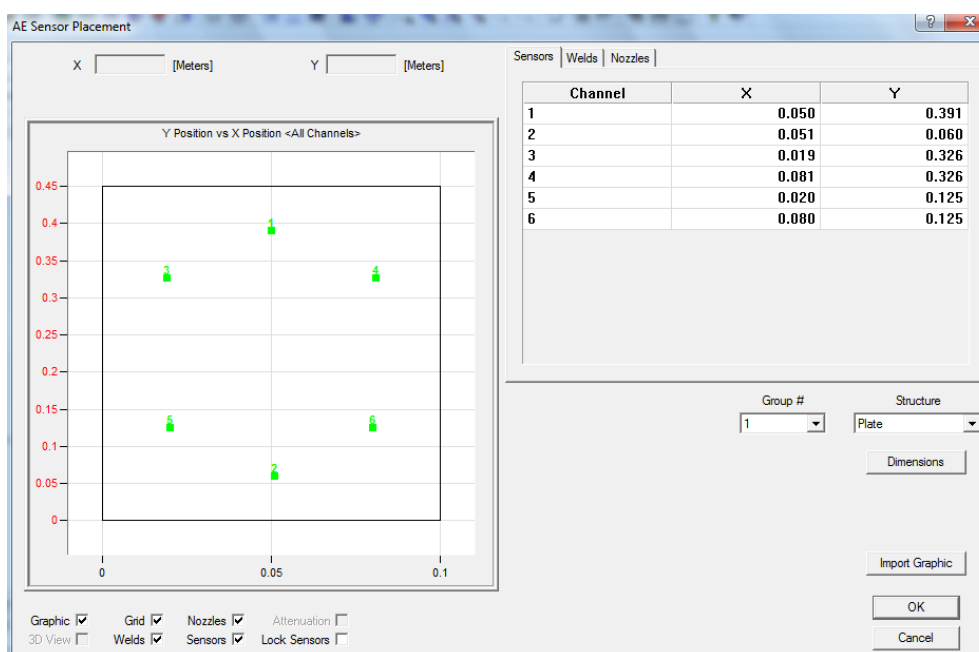
Οι κάρτες ψηφιακής επεξεργασίας ΑΕ PCI-Express (Εικόνα 6) της εταιρείας PAC (Physical Acoustic Corporation) αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής και ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων. Αποτελούνται η κάθε μία από δύο κανάλια, διαθέτουν 18bit A/D converter που εξασφαλίζει χαμηλή απόδοση θορύβου και η συχνότητα δειγματοληψίας τους φτάνει σε ρυθμό τα 40Msamples/sec. Επίσης παρέχουν την δυνατότητα Data Streaming ώστε να γίνεται συνεχής καταγραφή της κυματομορφής της ΑΕ στον υπολογιστή με ταχύτητα 10MSamples/sec καθώς και φίλτρα συχνοτήτων ελεγχόμενα από το κατάλληλο λογισμικό της ΑΕwin. Στην παρούσα εργασία έγινε ταυτόχρονη χρήση 3 τέτοιων καρτών.



Εικόνα 6: Κάρτα 2 καναλιών ψηφιακής επεξεργασίας ΑΕ.

3.3.4 Λογισμικό καταγραφής Ακουστικών Εκπομπών

Το λογισμικό που συνοδεύει τις κάρτες ψηφιακής επεξεργασίας ΑΕ για κατάλληλη επεξεργασία των καταγραφόμενων σημάτων ονομάζεται ΑΕwin. Μέσω του λογισμικού επιτυγχάνεται η πλήρης διαχείριση της κάρτας των προενισχυτών καθώς και των αισθητήρων ΑΕ. Ενώ εκτός από την πλήρη καταγραφή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει και την επεξεργασία αποθηκευμένων δεδομένων από προηγούμενα πειράματα. Η διαδικασία παραμετροποίησης και ευθυγράμμισης του συστήματος αλλά και ο εντοπισμός της θέσης της πηγής της ΑΕ πραγματοποιείται μέσω του ΑΕWin με δυνατότητα απεικόνισης σε 2D και 3D. Ένα ενδεικτικό στιγμιότυπο του ΑΕwin φαίνεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Ενδεικτικό στιγμιότυπο του λογισμικού Αεwin.

3.4 Διάταξη καταγραφής και μέτρησης PSC

Όπως έχει αναφερθεί και στο θεωρητικό μέρος της παρούσας εργασίας η επιβολή μηχανικής καταπόνησης σε μη μη μεταλλικά στερεά υλικά έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών σημάτων και είναι επακόλουθο της διαδικασίας ανάπτυξης μικρορωγμών στο καταπονούμενο υλικό. Για την ανίχνευση αυτών των ρευμάτων χρησιμοποιείται ζεύγος επίχρυσων ηλεκτροδίων τα οποία για το είδος της δοκιμής που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία (κάμψη τριών σημείων) τοποθετούνται στο κάτω μέρος του δοκιμίου. Τα ηλεκτρόδια φαίνονται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Ηλεκτρόδια για την ανίχνευση ηλεκτρικών σημάτων PSC.

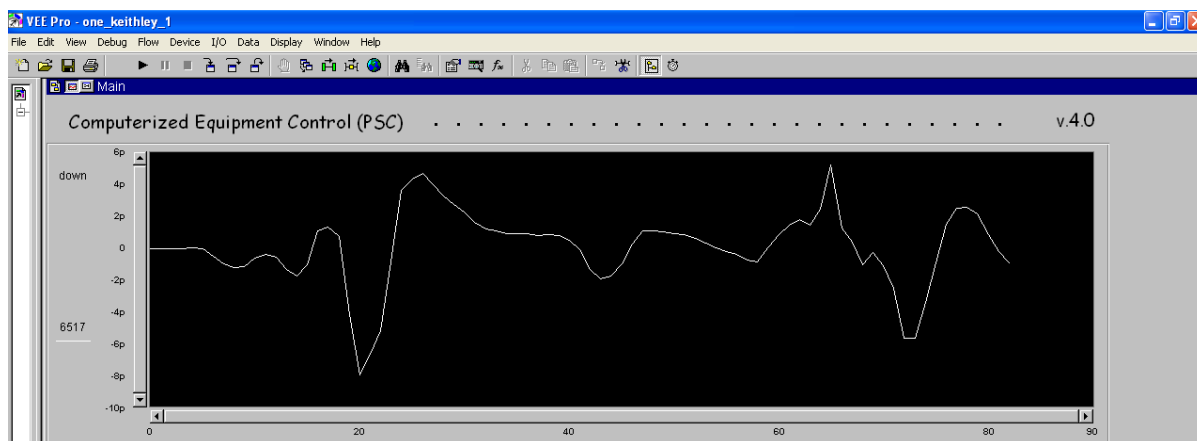
Τα ηλεκτρόδια λόγω του ότι αναμένεται να ανιχνεύσουν ασθενή σήματα και προς αποφυγή παρεμβολών συνδέονται στο ηλεκτρόμετρο μέσω θωρακισμένων καλωδίων χαμηλού θορύβου.

Το ηλεκτρόμετρο που χρησιμοποιείται είναι της εταιρείας KEITHLEY και συγκεκριμένα το μοντέλο 6517 A.(Εικόνα 9). Η κλίμακα μέτρησης φτάνει στην τάξη των fA έχοντας δυνατότητα καταγραφής ρευμάτων από 0,1 fA. Εκτός του ρεύματος μπορεί να μετρήσει τάσεις, αντιστάσεις και χωρητικότητες ενώ διαθέτει και πηγή τάσης ± 1000 Volt.



Εικόνα 9: Ηλεκτρόμετρο Keithley 6517A.

Η επικοινωνία του ηλεκτρομέτρου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή γίνεται μέσω της θύρας GPIB – IEEE488 μέσω κατάλληλου λογισμικού το οποίο αναλαμβάνει την διαχείριση της μετρητικής διάταξης των PSC και βασίζεται στο περιβάλλον Vee της Agilent (Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Ενδεικτικό στιγμιότυπο λογισμικού το οποίο αναλαμβάνει την διαχείριση της μετρητικής διάταξης των PSC και βασίζεται στο περιβάλλον Vee της Agilent.

3.5 Φυσικές Ιδιότητες Υλικών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν δοκιμές σε πρισματικά δοκίμια, διαφορετικών ως προς το πορώδες τους, πωρόλιθου Αλφά. Ο πωρόλιθος Αλφάς είναι ένας φυσικός, ομοιογενής, ιζηματογενής πορώδης ασβεστόλιθος, πολυεπίπεδης δομής, που εξορύσσεται στα λατομεία του χωριού Αλφάς στο Ρέθυμνο της Κρήτης. Όταν εξορύσσεται από το λατομείο έχει την ιδιότητα να είναι ιδιαίτερα μαλακός κάτι που τον κάνει πολύ εύχρηστο για τους τεχνίτες στην επεξεργασία. Στην πορεία και μετά την επαφή του με τον ήλιο και τον αέρα αρχίζει να σκληραίνει αποτελώντας έτσι ένα πολύ καλό κατασκευαστικό υλικό.

Στην Κρήτη συχνά αναφέρεται ως Αλφόπετρα και υπάρχουν δύο διαφορετικές εκδοχές για το πώς πήρε το όνομά του. Σύμφωνα με την πρώτη και πιο πιθανή η ονομασία οφείλεται στο χωριό Αλφάς ενώ σύμφωνα με την δεύτερη εκδοχή ονομάστηκε έτσι λόγω των φυσικών του ιδιοτήτων καθώς οι τεχνίτες μπορούσαν πολύ εύκολα να τον αλφαδιάσουν κατά το κόψιμό. Τα περισσότερα κτίσματα της επαρχίας Μυλοποτάμου έχουν κατασκευασθεί με εμφανή λιθοδομή από πέτρα του Αλφά. Χρησιμοποιείται ευρέως για την αναστήλωση αρχαίων μνημείων της Κρήτης και συγκαταλέγεται στα υλικά που θεωρούν οι επιστήμονες ως πιθανό υποκατάστατο του πωρόλιθου Κεγχρεών για το έργο αποκατάστασης των μνημείων της Επιδαύρου[54].

Το μεγαλύτερο ποσοστό (περίπου 91%) της δομής του καλύπτεται από ασβεστίτη ενώ το υπόλοιπο 7% αποτελείται από αραγωνίτη και το 2% από χαλαζία[55]. Το χρώμα του ποικίλλει από λευκό-γκρι έως γκριζωπό-μπεζ και σπάνια ανοιχτό κίτρινο. Ο συντελεστής ελαστικότητάς του κυμαίνεται μεταξύ 2,5 και 10 GPa, η μονοαξονική αντοχή συμπίεσης μεταξύ 15,0 MPa και 36,8 MPa και ο λόγος Poisson είναι ίσος με περίπου 0,26, ανάλογα με το ακριβές σημείο εξόρυξης [54]. Ο υπολογισμός του πορώδους του κάθε δείγματος θα παρουσιαστεί στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας.

4. Πειραματική Διαδικασία

4.1 Εισαγωγή

Πραγματοποιήθηκαν έξι πειράματα κάμψης τριών σημείων μέχρι τη θραύση χρησιμοποιώντας δοκίμια δύο διαφορετικών ως προς το πορώδες τύπων Αλφά. Η προετοιμασία και η πειραματική διαδικασία ήταν όμοια σε όλα τα πειράματα. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο μετατόπισης ο οποίος ορίστηκε να είναι 0,03mm/min και καθόλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας έγιναν ταυτόχρονες καταγραφές μηχανικού φορτίου, ηλεκτρικού ρεύματος, και ακουστικών εκπομπών.

Η μόνη διαφοροποίηση ρυθμίσεων που έγινε μεταξύ των πειραμάτων αφορούσε στον ορισμό των παραμέτρων που σχετίζονται με το χρονισμό της κυματομορφής της ΑΕ, καθώς η ταχύτητα των ΑΕ όπως προέκυψε κατά την διαδικασία υπολογισμού της με την μέθοδο location scheme method[56], ήταν διαφορετική ανάμεσα στους δύο διαφορετικούς ως προς το πορώδες τύπους δοκιμίων.

Οι επαναλήψεις του πειράματος με ίδιου τύπου δοκίμια έγιναν με σκοπό να επιβεβαιωθεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων καθώς στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν αντίστοιχες καταγραφές για το συγκεκριμένο υλικό.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε πειραματικός υπολογισμός, με τη μέθοδο απορρόφησης νερού, του πορώδους κάθε δοκιμίου ο οποίος επαλήθευσε και τον αρχικό οπτικό χαρακτηρισμό και διαχωρισμό σε δύο τύπους ως προς το πορώδες των δοκιμίων.

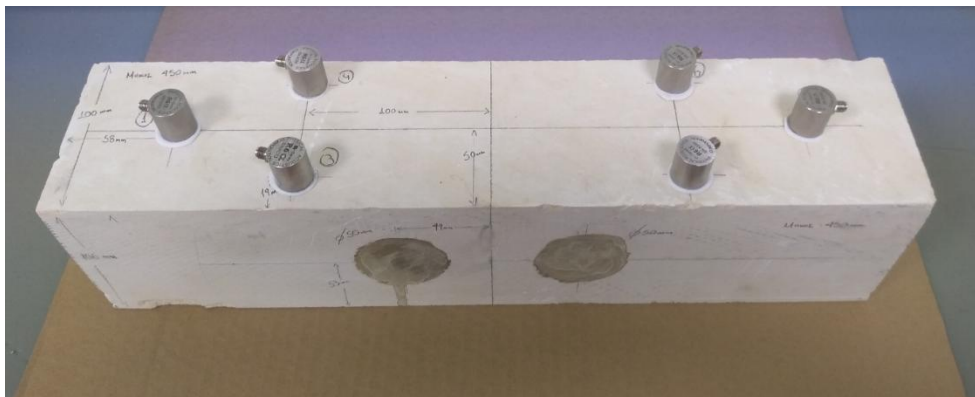
Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά τόσο η προετοιμασία των δοκιμίων όσο και η παραμετροποίηση των συστημάτων καταγραφής.

4.2 Διαμόρφωση και προετοιμασία δοκιμίων Αλφά

Αρχικά μετρήθηκαν και καταγράφηκαν οι διαστάσεις των δοκιμίων πωρόλιθου Αλφά με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης των ακουστικών αισθητήρων των ηλεκτροδίων, και των μεταλλικών κυλίνδρων. Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πρισματικού τύπου διαστάσεων 45mm x 100mm x 100mm.

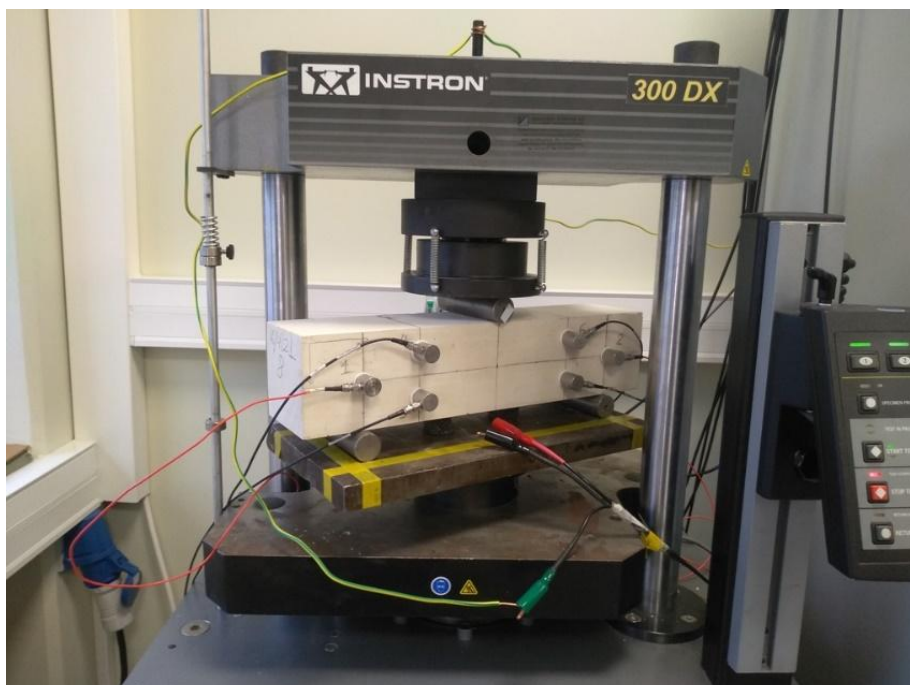
Οι έξι αισθητήρες ΑΕ τοποθετήθηκαν σε όλα τα πειράματα στις θέσεις που επιλέχθηκαν όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. Για την βέλτιστη σύζευξη των αισθητήρων με το δοκίμιο προηγήθηκε εφαρμογή λεπτής στρώσης σιλικόνης ώστε η απόσβεση του ακουστικού κύματος λόγω της διεπαφής να είναι ελάχιστη. [57]. Μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων το δοκίμιο παρέμεινε σε κλειστό χώρο για χρονικό διάστημα 4 ημερών έτσι ώστε να επιτευχθεί καλή επαφή. Δεξιά και αριστερά από τον κεντρικό άξονα του δοκιμίου, όπου και αναμένεται να προκληθεί η ρωγμή θραύσης εξαιτίας του τρόπου φόρτισης και συγκεκριμένα στο κάτω μέρος του δοκιμίου όπου αναμένεται να ξεκινήσει η αστοχία, διαμορφώθηκαν οι επαφές για τη λήψη των ηλεκτρικών σημάτων. Οι επαφές

διαμορφώθηκαν με τη χρήση αγωγίμου αργύρου (Εικόνα 11) και αφού πρώτα σχεδιάστηκαν στη συνέχεια βάφτηκαν και παρέμειναν χωρίς επαφή για δύο μέρες ώστε να στεγνώσουν.



Εικόνα 11: Δοκίμιο με τοποθετημένους τους αισθητήρες ΑΕ και τις διαμορφωμένες τις επαφές για τη λήψη ηλεκτρικών σημάτων.

Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας και αφού τα δοκίμια ελέγχθηκαν και διαπιστώθηκε ότι οι αισθητήρες έχουν κολλήσει σωστά και οι επαργυρωμένες επαφές είναι αγωγίμες το κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε στην Ηλεκτροϋδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 12. Οι μεταλλικοί κύλινδροι τοποθετήθηκαν στα ακριβή σημεία που έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτευχθεί κάμψη τριών σημείων. Ο κύλινδρος στο πάνω μέρος στο κέντρο του δοκιμίου και οι κύλινδροι στο κάτω μέρος σε ίσες αποστάσεις από τα άκρα του δοκιμίου.



Εικόνα 12: Θέση δοκιμίου στην Ηλεκτροϋδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου.

Κάθε ένας από τους έξι αισθητήρες ΑΕ συνδέθηκε με τον αντίστοιχο προενισχυτή του και οι προενισχυτές συνδέονται στο υπολογιστικό σύστημα που χρησιμοποιείται για την καταγραφή ΑΕ.

Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στο κάτω μέρος του δοκιμίου στις προεπιλεγμένες θέσεις, στηρίζοντάς τα ώστε να βρίσκονται σε επαφή με το δοκίμιο, χρησιμοποιώντας διογκωμένη πολυστερίνη όπως φαίνεται στην Εικόνα 13 και στη συνέχεια συνδέονται με το ηλεκτρόμετρο.



Εικόνα 13: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

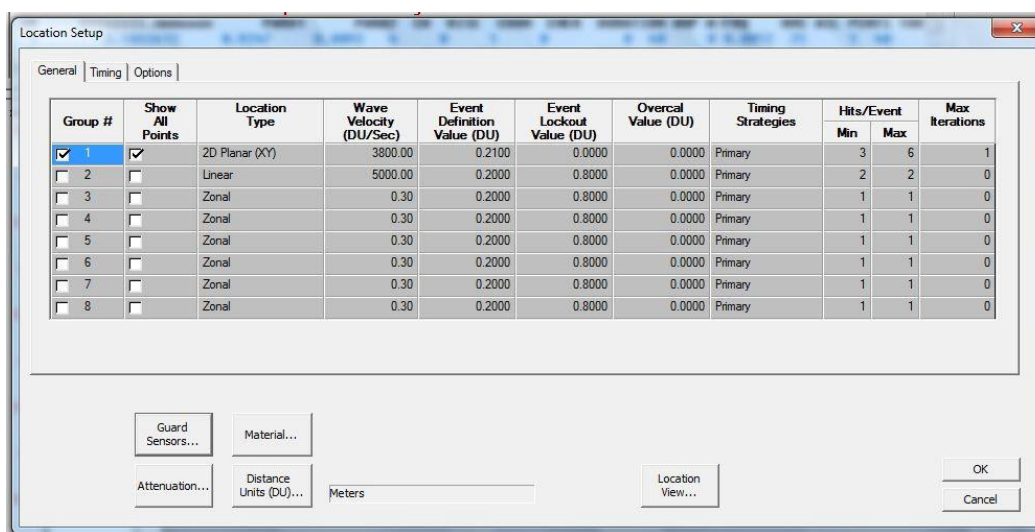
Για τη σύνδεση των ηλεκτροδίων με το ηλεκτρόμετρο χρησιμοποιούνται θωρακισμένα καλώδια τα οποία πριν τη σύνδεση παρέμειναν βραχυκυκλωμένα. Αφού συνδεθούν στο δοκίμιο, παραμένουν συνδεδεμένα μια ώρα πριν ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία ώστε μηδενιστούν τυχόν φορτία που υπάρχουν στο σύστημα. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητο να γίνει διότι τα ρεύματα που αναμένεται να εμφανιστούν είναι της τάξης του μA και οποιαδήποτε ύπαρξη φορτίων θα επηρέαζε τις μετρήσεις. Σημαντικό επίσης είναι να συνδεθεί η γείωση του ηλεκτρομέτρου με την γείωση της ηλεκτροδραυλικής μηχανής εφαρμογής μηχανικού φορτίου.

4.3 Παραμετροποίηση συστήματος

Το πρώτο βήμα πριν την έναρξη της διαδικασίας κάμψης είναι η πραγματοποίηση της παραμετροποίησης του συστήματός. Η παραμετροποίηση περιλαμβάνει 2 σκέλη, το ένα αφορά στην καταγραφή, αν δηλαδή καταγράφεται σωστά μια ΑΕ από τους αισθητήρες και το άλλο, στο οποίο λαμβάνεται υπόψη το σύνολο των αισθητήρων, αφορά τις θέσεις των αισθητήρων πάνω στο δοκίμιο, αν δηλαδή τα σημεία που είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες αποτυπώνονται σωστά στο σύστημα καταγραφής.

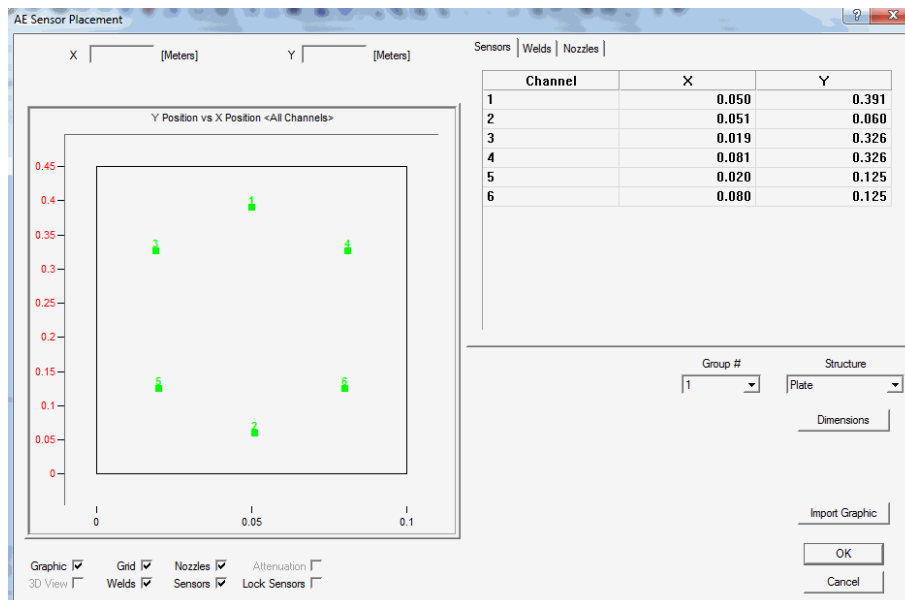
Οι αισθητήρες ΑΕ τοποθετούνται όπως έχει αναφερθεί σε κατάλληλη διάταξη για την καταγραφή γεγονότων σε δύο διαστάσεις. Προκειμένου το λογισμικό να είναι σε θέση

να εντοπίσει ένα συμβάν ΑΕ, απαιτείται ο ορισμός μια σειράς από κανόνες. Αρχικά ορίζονται στο λογισμικό οι διαστάσεις και ο τύπος του δοκιμίου. Στη συνέχεια ορίζεται ο ελάχιστος και μέγιστος αριθμός αισθητήρων ΑΕ που θα πρέπει να ενεργοποιούνται για την αναγνώριση και καταγραφή ενός ακουστικού γεγονότος. Αυτή η παράμετρος είναι ιδιαίτερα σημαντική όσον αφορά τον προσδιορισμό της θέσης της πηγής ενός συμβάντος ΑΕ. Στην παρούσα μελέτη, όπου επιχειρείται μια διδιάστατη απεικόνιση στο επίπεδο, επιλέχθηκε ένα σήμα να χαρακτηρίζεται συμβάν ΑΕ όταν καταγράφεται από 3 τουλάχιστον αισθητήρες ΑΕ, με μέγιστο αριθμό αισθητήρων 6 (Εικόνα 14). Στην περίπτωση δηλαδή που έχουμε καταγραφή από λιγότερους των τριών αισθητήρων κάποιου σήματος αυτό δεν θα θεωρηθεί γεγονός ΑΕ αλλά παρόλα αυτά θα καταγραφούν τα επιμέρους χαρακτηριστικά του (ΑΕ hits).



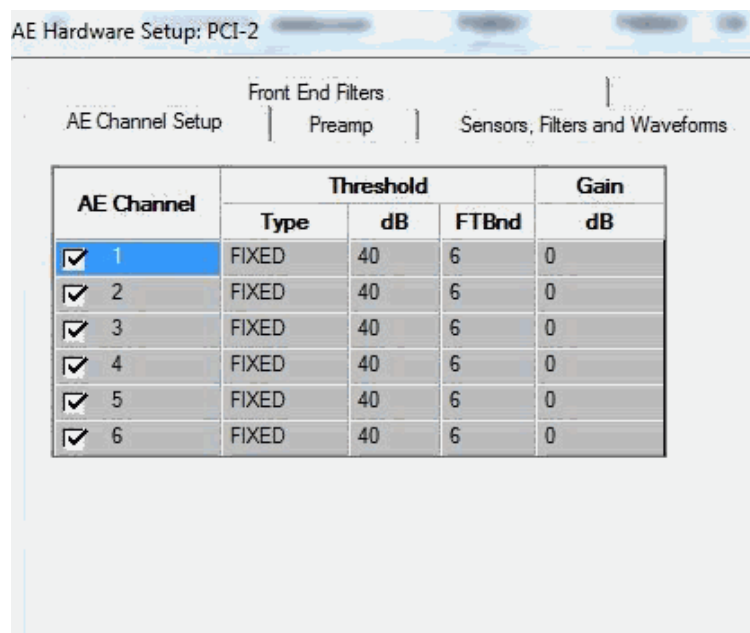
Εικόνα 14: Αρχικές ρυθμίσεις προγράμματος AEWin.

Κατόπιν δόθηκαν στο σύστημα οι θέσεις των αισθητήρων όπως αυτοί είναι τοποθετημένοι στο δοκίμιο ώστε το λογισμικό να μπορεί να υπολογίζει τη σχετική θέση ενός ΑΕ γεγονότος. Για την εκτίμηση της θέσης στο επίπεδο διαμορφώνεται ένα σύστημα αξόνων x-y και η θέση κάθε αισθητήρα ορίζεται σε αυτό το σύστημα. (Εικόνα 15) . Όλες οι συντεταγμένες υπολογίζονται σε σχέση με ένα σημείο (0,0) το οποίο ορίζεται στην αριστερή κάτω πλευρά του δοκιμίου.



Εικόνα 15: Απεικόνιση των θέσεων των αισθητήρων ΑΕ στο ΑΕwin.

Το κατώφλι (threshold) καταγραφής ορίζεται στα +40 dB όπως φαίνεται στην Εικόνα 16. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή είναι κοινά αποδεκτή στη βιβλιογραφία και αποδίδεται ως εμπειρική τιμή από πολλούς ερευνητές.

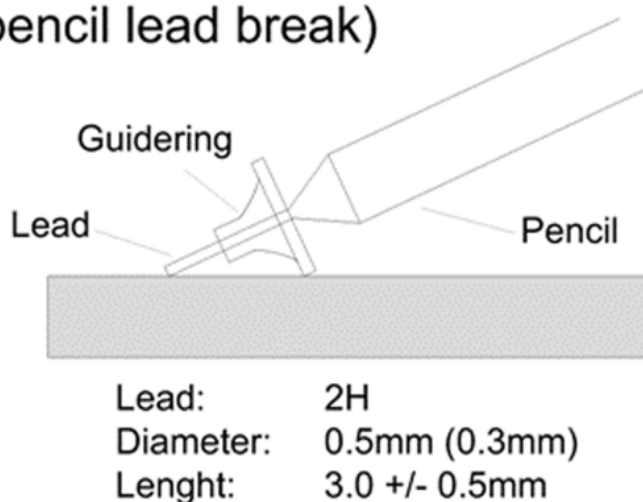


Εικόνα 16: Εισαγωγή threshold +40db στο ΑΕwin και στους 6 αισθητήρες ΑΕ.

Για την πραγματοποίηση της παραμετροποίησης του συστήματος απαιτείται ένα σήμα αναφοράς που να προσομοιώνει ένα συμβάν ΑΕ. Αυτή είναι μια δύσκολη διαδικασία, καθώς τα πραγματικά γεγονότα συμβαίνουν λόγω μαζικών καταστροφών στο δοκίμιο

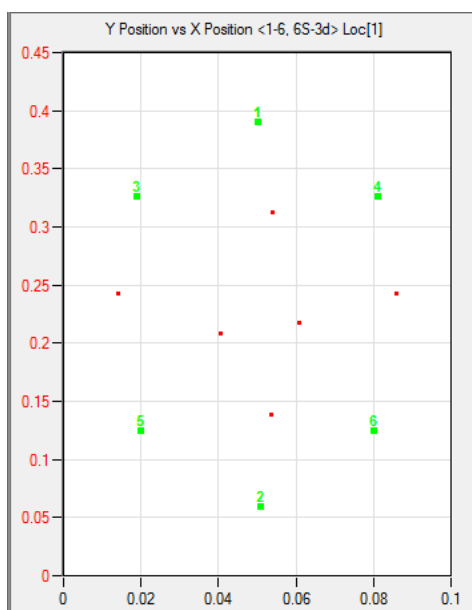
οι οποίες δημιουργούν τα μηχανικά κύματα συγκεκριμένης συχνότητας και επιπέδου ενέργειας. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Hsu & Nielsen [58], γνωστή και ως pencil lead break (PLB). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή από το σπάσιμο της μύτης ενός μηχανικού μολυβιού 2H, πάχους 0,5 mm και μήκους 0,3 cm, στην επιφάνεια του δοκιμίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, προκαλείται τοπική διαταραχή που προκαλεί βραχυπρόθεσμο ακουστικό σήμα αντίστοιχο με αυτό μιας μικρής ρωγμής. Δεδομένου ότι το σήμα γεννιέται από έναν αντίστοιχο μηχανισμό με αυτόν των ΑΕ, είναι παραπλήσιο με τα πραγματικά γεγονότα που συμβαίνουν μέσα σε ένα δοκίμιο λόγω του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου.

Hsu-Nielsen Source (pencil lead break)



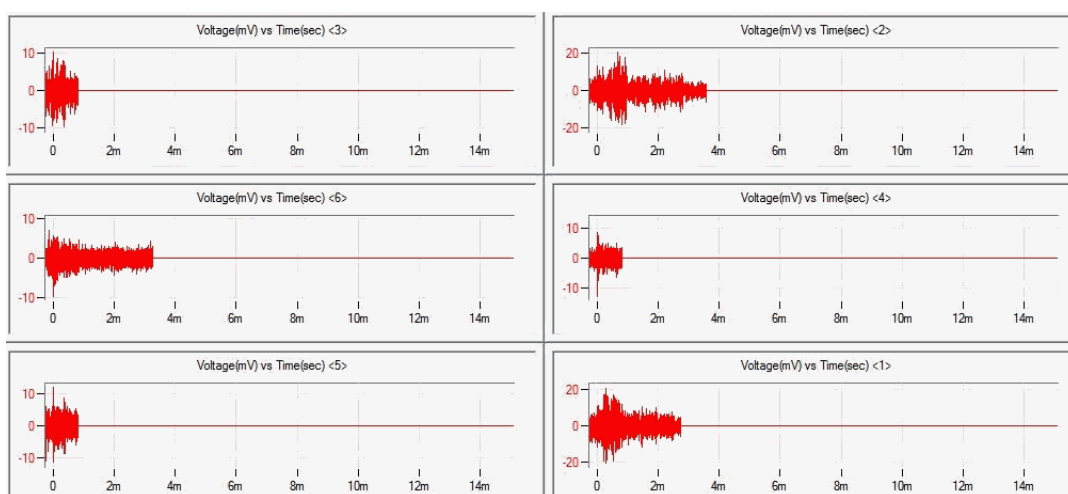
Σχήμα 10: Μέθοδος PLB για την παραγωγή σήματος ΑΕ [43].

Για τον έλεγχο της ακριβούς θέσης των αισθητήρων, η διαδικασία PLB επαναλήφθηκε αρκετές φορές και σε διάφορες θέσεις μεταξύ των αισθητήρων ΑΕ με ενδεικτικά αποτελέσματα να παρουσιάζονται στην Εικόνα 17. Οι κόκκινες κουκκίδες αποτυπώνουν την τοποθεσία που συμβαίνει κάθε σπάσιμο μύτης μολυβιού το οποίο αντιστοιχεί με ένα γεγονός ΑΕ.



Εικόνα 17: Απεικόνιση hits στο ΑΕwin.

Μετά το σπάσιμο της μύτης του μολυβιού πάνω στο δοκίμιο στο ΑΕwin εμφανίζεται η κυματομορφή της καταγεγραμμένης ΑΕ όπως αυτή καταγράφηκε από κάθε έναν από τους 6 αισθητήρες (Εικόνα 18).



Εικόνα 18. Ενδεικτική χρονική καταγραφή ενός ακουστικού γεγονότος όπως αυτό καταγράφεται από τους 6 ακουστικούς αισθητήρες που βρίσκονται τοποθετημένοι πάνω στο δοκίμιο.

Προκειμένου να καταγραφεί σωστά η ΑΕ, υπάρχουν ορισμένες παράμετροι που σχετίζονται κυρίως με το χρονισμό της κυματομορφής της ΑΕ, στις οποίες έγινε αναφορά στο θεωρητικό μέρος, (Σχήμα 3) και πρέπει να υπολογιστούν.

Αυτές οι παράμετροι είναι ο PDT (Peak Definition Time), ο HDT (Hit Definition Time) και ο HLT (Hit Location Time).

Η λειτουργία του PDT είναι να επιτρέπει τον προσδιορισμό του χρόνου στον οποίο εμφανίζεται η μέγιστη κορυφή της κυματομορφής ΑΕ. Η διάταξη καθορισμού του PDT είναι επανατροφοδοτούμενη ώστε να βρίσκει πάντα τη σωστή κορυφή του σήματος. Στόχος είναι να αποφευχθεί η πραγματοποίηση λανθασμένων μετρήσεων ορίζοντας ως μέγιστη κορυφή της κυματομορφής ένα λάθος μέγιστο που θα οφείλεται σε ένα πρόδρομο σήμα χαμηλού πλάτους και υψηλής ταχύτητας. Με βάση αυτό πρέπει ο PDT να οριστεί όσο το δυνατόν μικρότερος γίνεται. Ένας ασφαλής τρόπος υπολογισμού του είναι μέσω του τύπου $PDT = \frac{D}{C}$ όπου D είναι η απόσταση των αισθητήρων και C η ταχύτητα του κύματος.

Ο HDT επιτρέπει στο σύστημα να προσδιορίζει το τέλος ενός hit, να κλείνει τις διαδικασίες μέτρησης και να αποθηκεύει τα μετρούμενα χαρακτηριστικά του σήματος. Η διάταξη του HDT είναι επανατροφοδοτούμενη και ενεργοποιείται από τις διασταυρώσεις του κατώφλιου. Στα περισσότερα συστήματα P.A.C. ο HDT πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιος από τον PDT.

Στόχος είναι ο εντοπισμός και η ρεαλιστική περιγραφή των γεγονότων. Ο HDT πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να εκτείνεται σε διαστήματα στα οποία το προς μέτρηση σήμα πέφτει κάτω από το κατώφλι. Δίνοντας προσοχή σε αυτό ο HDT πρέπει να ρυθμίζεται όσο το δυνατόν πιο μικρός, προκειμένου να επιτραπουν υψηλοί ρυθμοί διεκπεραίωσης δεδομένων και να μειωθεί ο κίνδυνος δύο διαφορετικών events να αντιμετωπίζονται ως ένα hit.

Υπάρχουν δύο τεχνικές υπολογισμού του HDT.

Η πρώτη τεχνική αποτελεί μια απλή προσέγγιση υπολογισμού και χρησιμοποιεί μεγάλο HDT. Περιλαμβάνει στο hit όλα τα αποτελέσματα που προκαλούνται από ένα ακουστικό γεγονός όπως ανακλάσεις, εναλλακτικές διαδρομές κ.λπ. Σε αυτή την τεχνική ο HDT υπολογίζεται από τον τύπο $HDT = \frac{L}{C}$ όπου L είναι το χαρακτηριστικό μήκος της κατασκευής (π.χ. περιφέρεια ενός σκάφους) και C είναι η ταχύτητα ενός τυπικού κύριου κύματος (ας πούμε 3mm/μsec) ή $HDT = \frac{20}{AC}$ όπου A είναι ο μετρημένος συντελεστής εξασθένησης (db/mm) όποιο είναι μικρότερο.

Η δεύτερη τεχνική βασίζεται στην ιδέα ότι η απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί με την απόρριψη άσχετων ανακλάσεων κ.λπ., μετρώντας μόνο το κύριο μέρος του κύματος. Με αυτή το σύστημα μπορεί να καθαρίσει τα buffer και να ετοιμαστεί για ένα δεύτερο χτύπημα ενώ οι ανακλάσεις από το πρώτο hit αποκλείονται κλειδώνονται από το HLT. Έτσι το σύστημα είναι έτοιμο πιο νωρίς για το δεύτερο hit. Σε αυτή την τεχνική ο HLT υπολογίζεται από τη σχέση $HLT = \frac{20}{F}$ όπου F είναι η συχνότητα συντονισμού του αισθητήρα σε MHz.

Η λειτουργία του HLT είναι να εμποδίζει τη μέτρηση των ανακλάσεων και των καθυστερημένων μερών του σήματος ΑΕ, έτσι ώστε τα δεδομένα από τις αφίξεις κυμάτων να μπορούν να λαμβάνονται με ταχύτερο ρυθμό. Η διάταξη του HLT είναι επανατροφοδοτούμενη και επανενεργοποιείται από το χρόνο εξόδου του HDT.

Ο σωστός ορισμός του HLT έχει σημασία μόνο αν κατά τον υπολογισμό του HDT χρησιμοποιείται η δεύτερη τεχνική. Όταν για τον καθορισμό του HDT χρησιμοποιείται η πρώτη τεχνική, ορίζεται ως HLT η χαμηλότερη τιμή που επιτρέπει το σύστημα.

Αν για τον υπολογισμό του HDT χρησιμοποιείται η δεύτερη τεχνική ο HLT θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να καλύπτει πιθανά κενά μεταξύ των διασταυρώσεων κατωφλίου, ιδιαίτερα τα μεγαλύτερα κενά που τείνουν να εμφανίζονται στο άκρο της ουράς των σημάτων από αντηχητικές δομές. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιούνται οι ίδιες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του HDT με την πρώτη τεχνική. Ο ορισμός του HLT μικρότερος από περίπου 300μs δεν έχει νόημα, καθώς τόσος χρόνος απαιτείται για να ολοκληρώσει το ICC τις μετρήσεις δεδομένων και να μεταφέρει τα αποτελέσματα στο buffer εξόδου του.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η θέση της ΑΕ στο επίπεδο πρέπει να υπολογιστεί η ταχύτητά της. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας της ΑΕ, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος location scheme method [56]. Σπάζοντας την μύτη του μηχανικού μολυβιού κοντά στον αισθητήρα 1, ο αισθητήρας αυτός λαμβάνει άμεσα και πρώτος το σήμα τη χρονική στιγμή t_1 . Ο αισθητήρας 2 θα λάβει το σήμα σε χρόνο μεταγενέστερο, την χρονική στιγμή t_2 για την οποία θα ισχύει $t_2 > t_1$. Δεδομένου ότι η απόσταση L μεταξύ των αισθητήρων 1 και 2 είναι γνωστή, η ταχύτητα (V) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο της ταχύτητας $V = \frac{L}{t_2 - t_1}$.

Λόγω του διαφορετικού πορώδους των δοκιμών οι παράμετροι της καταγραφής ακουστικών εκπομπών υπολογίστηκαν για το κάθε δοκίμιο όπως οι ορισμοί των χρόνων του καταγραφόμενου ακουστικού χτύπου (ΑΕ hit) και η ταχύτητα διάδοσης του ακουστικού κύματος. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τους δύο διαφορετικούς ως προς το πορώδες τύπους δοκιμών παρατίθενται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Παράμετροι καταγραφής ακουστικών εκπομπών

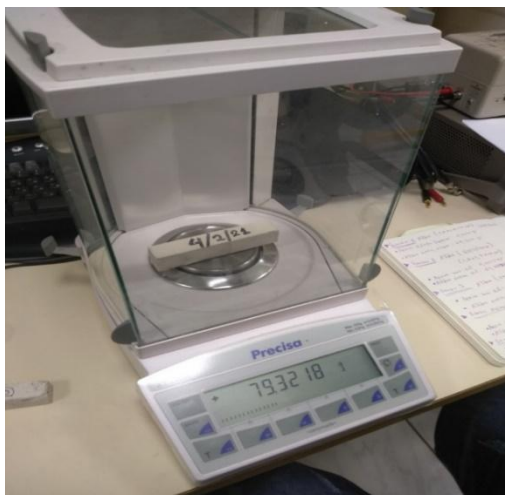
Πορώδες	Max duration(ms)	PDT(μs)	HDT(μs)	HLT(μs)	Ταχύτητα(m/s)
Χαμηλό	10	75	150	300	3500
Υψηλό	100	4060	800	1000	3800

4.4 Υπολογισμός πορώδους

Απαραίτητη πληροφορία για την εξαγωγή συμπερασμάτων κατά την εκτέλεση των μετρήσεων είναι ο πειραματικός υπολογισμός του πορώδους του κάθε δοκιμίου. Για τον υπολογισμό του πορώδους και της πυκνότητας των έξι δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ένα μικρό τμήμα δοκιμίου, όγκου περίπου 35cm^3 από κάθε δείγμα. Η πυκνότητα υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την σχέση $d = \frac{m}{V}$ όπου d είναι πυκνότητα, m η μάζα και V ο όγκος του κάθε δείγματος. Το πορώδες υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την Τεχνική Απορρόφησης Υγρού [59]

Η τεχνική αυτή είναι αρκετά εύκολη στην εφαρμογή της, γρήγορη, οικονομική και αξιόπιστη. Βασίζεται στην ιδέα ότι γεμίζοντας τους πόρους του υλικού με ένα υγρό γνωστής πυκνότητας και μετρώντας στη συνέχεια την αλλαγή μάζας μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ο όγκος των πόρων και εφόσον ο συνολικός όγκος είναι υπολογίσιμος, εύκολα υπολογίζεται και το πορώδες του υλικού.

Αρχικά πάρθηκαν μικρά πρισματικά δείγματα από κάθε δοκίμιο. Αφού τα δείγματα καθαρίστηκαν ώστε να φύγουν πιθανά υπολείμματα από την διαδικασία της κοπής, ογκομετρήθηκαν και στη συνέχεια ζυγίστηκαν χρησιμοποιώντας ζυγό ακριβείας (Εικόνα 19).



Εικόνα 19: Μέτρηση μάζας δοκιμίου με χρήση ζυγού ακριβείας.

Τα 4 δοκίμια υψηλού πορώδους κόπηκαν χρησιμοποιώντας πριόνι χειρός ενώ για τα δύο δοκίμια με το μικρό πορώδες απαιτήθηκε η χρήση ηλεκτρικού τροχού κοπής πετρωμάτων.

Μετά τη διαμόρφωσή τους, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε μικρά πλαστικά δοχεία (Εικόνα 20) τα οποία πληρώθηκαν με νερό και παρέμειναν στο εργαστήριο σε θερμοκρασία περίπου 15°C για 2 ημέρες.



Εικόνα 20: Διαδικασία πλήρωσης των πόρων των δοκιμίων με νερό.

Αυτό που παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια αμέσως μετά την τοποθέτηση τους στο νερό, ήταν η έκλυση μικρών φυσαλίδων, δείγμα ότι το υλικό απορροφούσε νερό στο εσωτερικό του γεμίζοντας έτσι τους πόρους του. Μετά την παρέλευση 2 ημερών τα δείγματα βγήκαν από το νερό και αφού σκουπίστηκαν ελαφρά για να απομακρυνθεί το νερό από την εξωτερική τους επιφάνεια, ζυγίστηκαν εκ νέου έτσι ώστε να καταγραφεί η αλλαγή στη μάζα τους. Γνωρίζοντας την αλλαγή στη μάζα κάθε δείγματος και καθώς η πυκνότητα του νερού στους 15 βαθμούς είναι γνωστή (999 kg/m^3) εύκολα υπολογίζεται ο όγκος του νερού που απορροφήθηκε από τα δείγματα άρα και ο όγκος των πόρων κάθε δείγματος χρησιμοποιώντας τη σχέση $d = \frac{m}{V}$ όπου d η πυκνότητα του νερού και m η μάζα του νερού που απορροφήθηκε, η διαφορά δηλαδή μάζας των δοκιμίων πριν και μετά την απορρόφηση του νερού.

Το πορώδες υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση $\varphi = \frac{V_p}{V_s}$, όπου φ είναι το πορώδες, V_p είναι ο όγκος των πόρων και V_s ο συνολικός όγκος του δείγματος.

Όλες οι σχετικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Μετρήσεις και υπολογισμός πορώδους

Ημερομηνία Πειράματος	No	Αρχική Μάζα (g)	Τελική Μάζα (g)	Όγκος Δείγματος (cm^3)	Όγκος Πόρων (cm^3)	Πορώδες Δείγματος (%)
04.02.2021	1	79.322	89,199	43,2	9,877	22.86
20.03.2021	2	61.890	70,455	34.2	8,565	25.04
24.03.2021	3	76.319	85,868	40	9,549	23.87
07.04.2021	4	69.657	71.552	32.4	1,894	5.85
16.04.2021	5	64.306	73.402	34.2	9,096	26.59
23.04.2021	6	74.234	77.105	32.6	2.868	8.79

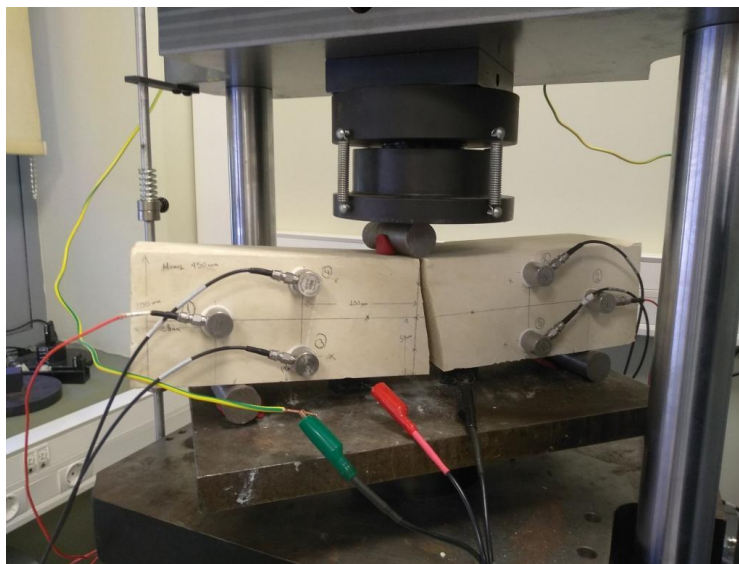
5. Πειραματικά αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Με βάση τον σχεδιασμό και τη μεθοδολογία που περιγράφηκε πραγματοποιήθηκαν έξι πειράματα κάμψης τριών σημείων σε δύο κατηγορίες δειγμάτων, μία με πορώδες 25% περίπου (Κατηγορία Α) και μία με πορώδες 6% περίπου (Κατηγορία Β). Η διακύμανση των PSC και των σημάτων ΑΕ καταγράφηκαν ταυτόχρονα. Σημειώνεται ότι η αντοχή των δειγμάτων Κατηγορίας Α ήταν σε όλα τα πειράματα χαμηλότερη από την αντίστοιχη αντοχή των δειγμάτων Κατηγορίας Β.

Συγκεκριμένα, τα δείγματα κατηγορίας Α αστόχησαν σε επίπεδο φορτίου περίπου 12 kN, ενώ τα δείγματα κατηγορίας Β αστόχησαν περίπου στα 18 kN. Σημειώνεται επίσης

ότι ο αριθμός των καταγεγραμμένων ΑΕ hits είναι σημαντικά μικρότερος για τα δείγματα Κατηγορίας Α σε σχέση με το αντίστοιχο πλήθος των δειγμάτων Κατηγορίας Β. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή του καταγεγραμμένου PSC ήταν χαμηλότερη για την Κατηγορία Α σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του PSC για τα δείγματα Κατηγορίας Β. Όπως ήταν αναμενόμενο, όλα τα δείγματα κατέρρευσαν δημιουργώντας μια ρωγμή στο μέσο επίπεδο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 21.



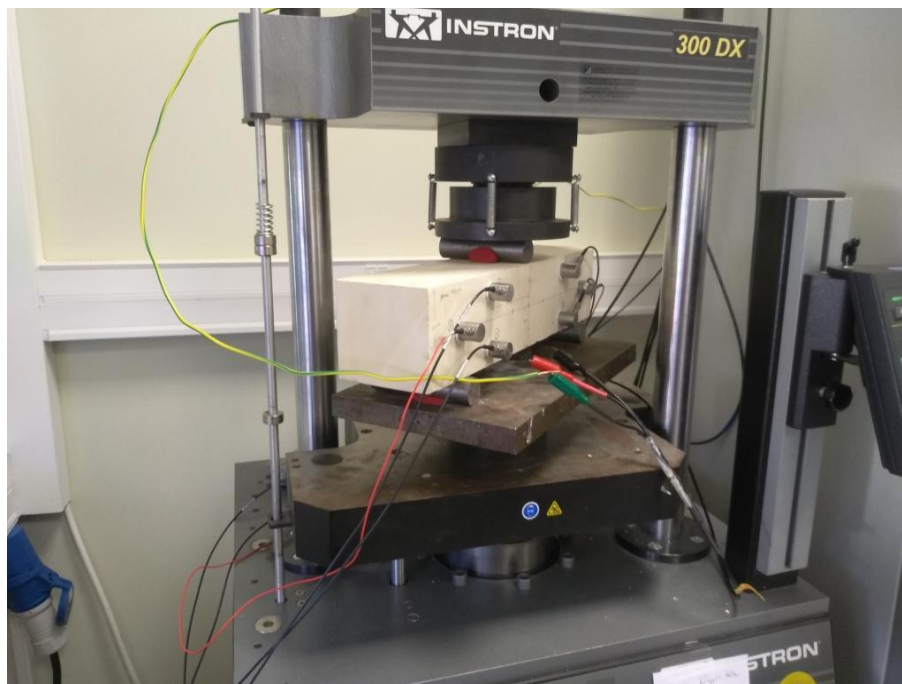
Εικόνα 21: Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας που απεικονίζει το επίπεδο θραύσης, τις θέσεις των 6 αισθητήρων ΑΕ στην επιφάνεια του δείγματος και των 2 ηλεκτροδίων ανίχνευσης PSC που βρίσκονται στην κάτω πλευρά των δειγμάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά ενδεικτικά αποτελέσματα της δοκιμής που πραγματοποιήθηκε σε δοκίμιο κατηγορίας Α με πορώδες 22,86% και της δοκιμής που πραγματοποιήθηκε σε δοκίμιο κατηγορίας Β με πορώδες 5,85%, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα όλων των υπόλοιπων δοκιμών παρατίθενται στο Παράρτημα 1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

5.2 Πειραματικά αποτελέσματα πειράματος σε δοκίμιο υψηλού πορώδους

Το δοκίμιο Αλφά που χρησιμοποιήθηκε ήταν πρισματικού τύπου διαστάσεων 450mm x 100mm x 100mm και το πορώδες του υπολογίστηκε 22.86%. Στην Εικόνα 22 φαίνεται το δοκίμιο τοποθετημένο στην πλάκα έδρασης της ηλεκτροδραυλικής μηχανής λίγο πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας. Η κεφαλή της μηχανής έχει μετακινηθεί ώστε να έρθει σχεδόν σε επαφή με τον μεταλλικό κύλινδρο που βρίσκεται στο επάνω μέρος του δοκιμίου. Οι αισθητήρες των ακουστικών εκπομπών είναι συνδεδεμένοι με τους αντίστοιχους προενισχυτές και τη διάταξη καταγραφής και επεξεργασίας της ακουστικής δραστηριότητας και τα ηλεκτρόδια ανίχνευσης των PSC είναι

προσαρμοσμένα στο κάτω μέρος του δοκιμίου και συνδεδεμένα στο ηλεκτρόμετρο όπως φαίνεται στην εικόνα 23.

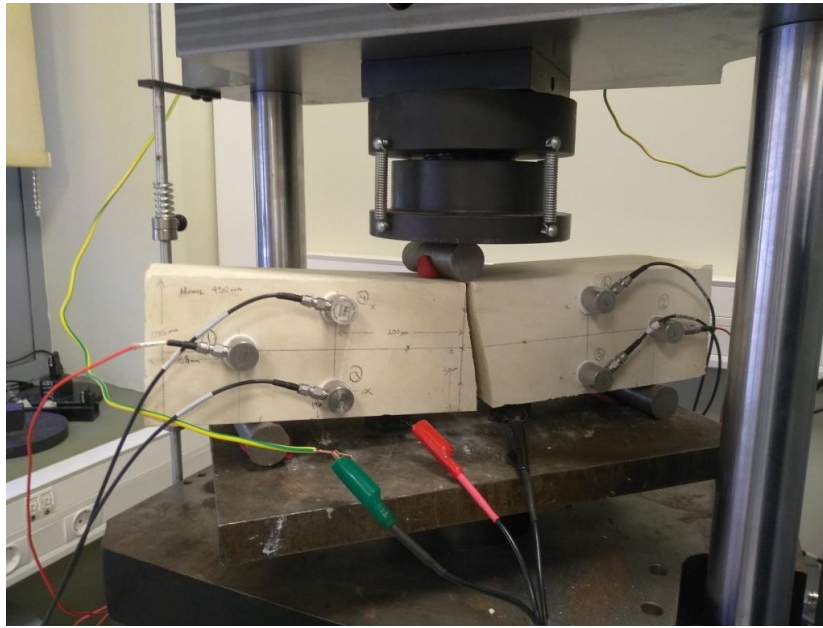


Εικόνα 22: Πειραματική διάταξη κάμψης τριών σημείων σε δοκίμιο υψηλού πορώδους.



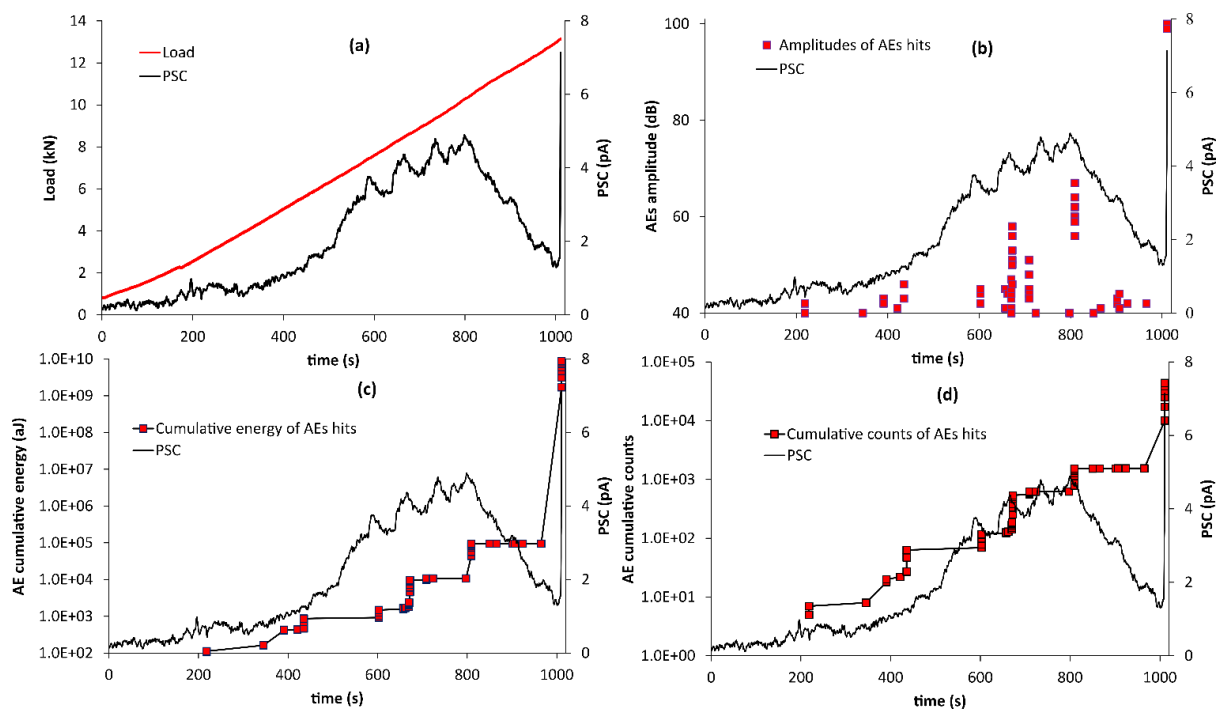
Εικόνα 23: Θέση ηλεκτροδίων ανίχνευσης PSC στην πειραματική διάταξη κάμψης τριών σημείων σε δοκίμιο υψηλού πορώδους.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετατόπισης ο οποίος ορίστηκε στα 0,03mm/min. Η πειραματική διαδικασία εξελίχθηκε ομαλά χωρίς πλευρικές μετακινήσεις των μεταλλικών κυλίνδρων ή του εμβόλου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 24 το δοκίμιο κατέρρευσε δημιουργώντας ρωγή στο κέντρο του όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της φύσης του υλικού και του είδους της καταπόνησης. Συνολικά καταγράφηκαν 58 ακουστικά hits και το δοκίμιο κατέρρευσε σε μηχανικό φορτίο 13,1kN.



Εικόνα 24: Δοκίμιο υψηλού πορώδους μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

Στο Σχήμα 11 αποτυπώνεται η χρονική διακύμανση του PSC σε αντιπαράθεση με εκείνη του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου (a), με τα πλάτη των AE (b), με την συνολική ενέργεια AE (c) και του συνολικού αριθμού των AE Counts (d).



Σχήμα 11. Χρονική διακύμανση του PSC σε αντιπαράθεση με εκείνη του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου (a), των πλατών των AE (b), της συνολικής ενέργεια AE (c) και του συνολικού αριθμού των AE Counts (d).

Στο Σχήμα 11(a) αποτυπώνεται η χρονική διακύμανση του καταγεγραμμένου σήματος PSC σε αντιπαράθεση με το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο. Σημειώνεται ότι το φορτίο θραύσης του δείγματος ήταν ίσο με 13,1 kN περίπου. Το PSC παρουσιάζει σταδιακή αύξηση με κάποιες διακυμάνσεις κατά την πειραματική διαδικασία. Σε αντίστοιχα πειράματα κάμψης τριών σημείων παρόμοια συμπεριφορά έχει αναφερθεί σε δείγματα μαρμάρου [60] και σε υλικά με βάση το τσιμέντο [61]. Η χαρακτηριστική πρόωμη εκπομπή PSC που σχετίζεται με τα σφάλματα κάμψης και τις αρχικές διεργασίες κλεισίματος πόρων φαίνεται επίσης εδώ και εκτείνεται από $t \approx 180$ s έως $t \approx 270$ s περίπου. Γενικά, από την αρχή του πειράματος έως τα $t \approx 600$ s, το PSC παρουσιάζει προοδευτική αύξηση παράλληλα με το εφαρμοσμένο μηχανικό φορτίο. Κατά το χρονικό διάστημα από $t \approx 570$ s έως $t \approx 830$ s παρατηρούνται τέσσερις διαδοχικές βραχύβιες διακυμάνσεις. Η μέγιστη τιμή του σήματος PSC που καταγράφηκε ήταν 4,9 pA και εμφανίστηκε λίγο μετά από τον χρόνο $t \approx 800$ s για αντίστοιχη τιμή μηχανικού φορτίου περίπου 10 kN. Όταν η πίεση αυξάνεται περαιτέρω, το PSC παρουσιάζει συνεχή μείωση, μέχρι λίγο πριν από την εμφάνιση του επιπέδου θραύσης όπου το καταγεγραμμένο σήμα PSC παρουσιάζει μια απότομη αύξηση φθάνοντας μια τιμή κοντά στα 7,14 pA.

Στο Σχήμα 11(b) αποτυπώνεται η χρονική διακύμανση του καταγεγραμμένου σήματος PSC σε αντιπαράθεση με τα αντίστοιχα πλάτη των καταγεγραμμένων AE hits. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, καταγράφηκε ένας μικρός αριθμός (59) AE hits. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο υψηλό πορώδες του δείγματος που εμποδίζει το ακουστικό σήμα να διαδοθεί και προκαλεί αρκετές αντανακλάσεις στις διεπιφάνειες των πόρων και στα κενά που αυτοί δημιουργούν. Συγκεκριμένα, το σύστημα του δείγματος διαμορφώνει ένα δίκτυο σε μορφή πλέγματος μέσα από το οποίο διαδίδονται τα μηχανικά κύματα AE φιλτράροντας με αυτόν τον τρόπο τα ακουστικά γεγονότα χαμηλού πλάτους. Από την άλλη πλευρά, όταν συμβαίνουν σοβαρές βλάβες στο μεγαλύτερο μέρος του δοκιμίου, τα παραγόμενα κύματα AE μπορούν να φτάσουν στους αισθητήρες AE. Σύμφωνα με αυτήν την θεώρηση αποτυπώνεται μια καθαρή και έντονη καταγραφή κατά τη διάρκεια των τεσσάρων έντονων διακυμάνσεων (δηλαδή 570s – 620s, 640s – 710s, 720s – 740s και 760s – 830 s) των PSC που συνοδεύονται από έντονες ακουστικές καταγραφές (AE hits) όπως φαίνεται στο Σχήμα 11(b). Η πλειονότητα των AE hits καθώς και η πιο έντονη ηλεκτρική δραστηριότητα παρατηρείται κατά τα παραπάνω χρονικά διαστήματα εκδηλώνοντας έντονη δραστηριότητα μικρορωγμών. Είναι γνωστό ότι το πλάτος των AE hits σχετίζεται με την επέκταση της βλάβης, την απόσταση των αισθητήρων AE από την πηγή συμβάντος AE, τις ιδιότητες, τις διεπιφάνειες και τον αριθμό των μέσων που διανύει το κύμα AE. Με την προϋπόθεση ότι το δείγμα είναι αρκετά ομοιογενές και ότι οι αισθητήρες AE βρίσκονται σε καλή προσέγγιση στις ίδιες αποστάσεις από την αναμενόμενη πηγή AE (μέσο επίπεδο του δείγματος), μπορούμε να δεχτούμε με ασφάλεια ότι το πλάτος του καταγεγραμμένου σήματος AE σχετίζεται άμεσα με το βαθμό της ζημιάς που δημιουργεί την AE. Με βάση αυτά φαίνεται πως υπάρχει μια σαφής σχέση μεταξύ του καταγεγραμμένου PSC και του πλάτους AE. Αυτό υποστηρίζεται περαιτέρω κατά τη διάρκεια όλης της πειραματικής διαδικασίας.

Συγκεκριμένα, παρατηρώντας τη σταδιακή αύξηση του PSC (300s – 400s) καταγράφηκαν μόνο AE hits χαμηλού πλάτους. Είναι γνωστό ότι κατά τη διάρκεια της κάμψης τριών σημείων το υπό δοκιμή δείγμα αποτυγχάνει ξαφνικά στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Με βάση αυτά, το Σχήμα 11(b) δείχνει επίσης τη γνωστή αλλαγή πολικότητας του καταγεγραμμένου PSC και τη συνοδευόμενη έντονη δραστηριότητα AE πλάτους 99 dB που υποδηλώνει ξεκάθαρα την θραύση.

Τα Σχήματα 11(c) και 11(d) αποτυπώνουν τη χρονική συμπεριφορά των αθροιστικών υπερβάσεων (counts) AE και της αθροιστικής ενέργειας (cumulative energy). Και οι δύο αθροιστικές ποσότητες απεικονίζονται σε ημιλογαριθμικά διαγράμματα. Οι αθροιστικές υπερβάσεις και η ενέργεια αποτελούν βασικές πληροφορίες ειδικά όταν αντιμετωπίζουμε πειράματα με μικρό αριθμό AE hits προκειμένου να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα. Ένα απομονωμένο και μεμονωμένο AE hit κατά τη διάρκεια μιας πειραματικής διαδικασίας που χαρακτηρίζεται από υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο που δεν μπορεί να συσχετιστεί με σοβαρές ζημιές υποδηλώνει ένα πιθανό πειραματικό σφάλμα ή μια περίπτωση που πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω. Από την άλλη, μια αραιή καταγραφή ακουστικής δραστηριότητας χαμηλής ενέργειας είναι μια αποδεκτή πειραματική παρατήρηση. Τέλος, αναμένεται σημαντική αύξηση της σωρευτικής ενέργειας AE όταν πλησιάζει στην θραύση. Στην περίπτωση του παρουσιαζόμενου πειράματος Σχήμα 11(c) για τα δείγματα Κατηγορίας A, η συμπεριφορά της αθροιστικής ενέργειας είναι πλήρως συμβατή με τα παραπάνω σχόλια που δείχνουν σημαντικές αυξήσεις ακριβώς πριν από την θραύση.

Όσον αφορά τα αθροιστικές υπερβάσεις, η συμπεριφορά τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του επιπέδου επικαλυπτόμενων AE hits είτε πολλαπλών διαδρομών των ακουστικών κυμάτων είτε λόγω παράλληλων ακουστικών γεγονότων.

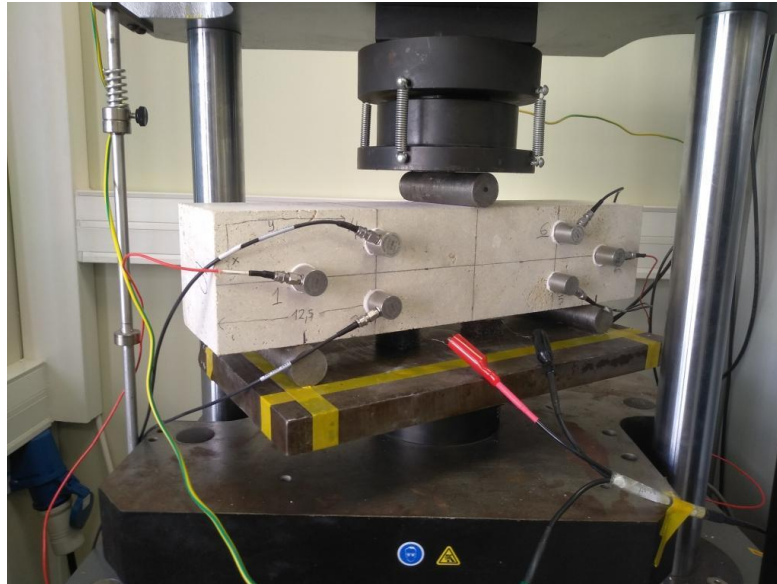
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρατηρώντας το Σχήμα 11(d) μπορεί κανείς να δει τον αθροιστικό αριθμό των υπερβάσεων (γραμμή) και την επίδραση σε αυτόν τον αριθμό κάθε μεμονωμένου AE hit.

Μπορεί εύκολα να φανεί ότι δεν υπάρχει AE hit που να προσθέτει στην καμπύλη μεγάλο αριθμό υπερβάσεων, το οποίο θα μπορούσε να αποδοθεί στην καταγραφή πολλαπλών διαδρομών του ίδιου γεγονότος ή παράλληλων ακουστικών γεγονότων, ειδικά όταν δεν καταγράφεται σημαντική διέγερση PSC ή AE. Γενικά, παρόμοια με τη συμπεριφορά των πλατών AE (Σχήμα 11(b)), φαίνεται να προκύπτει μια ποιοτική εξάρτηση μεταξύ των παραμέτρων που σχετίζονται με την AE (ενέργεια, υπερβάσεις), το σήμα PSC και το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο.

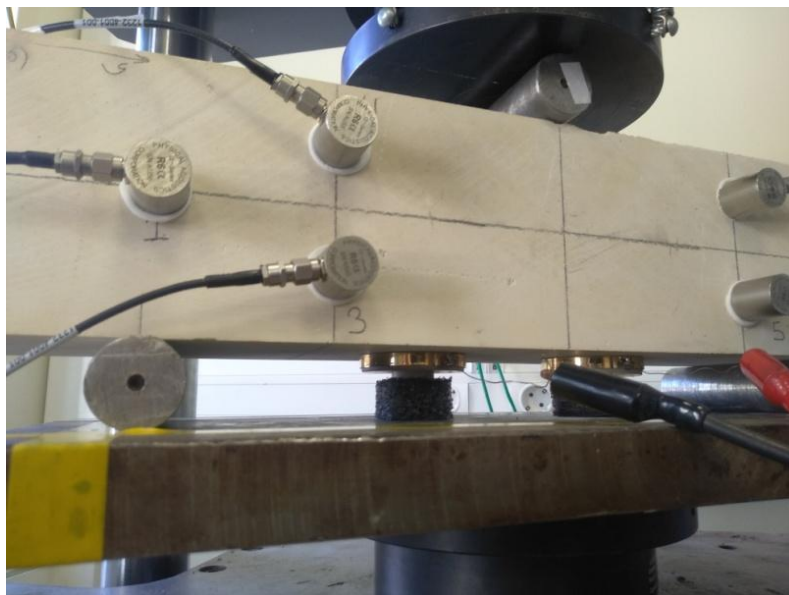
5.3 Πειραματικά αποτελέσματα πειράματος σε δοκίμιο χαμηλού πορώδους

Το δοκίμιο Αλφά που χρησιμοποιήθηκε ήταν πρισματικού τύπου διαστάσεων 450mm x 100mm x 100mm και το πορώδες του υπολογίστηκε 5.85%. Στην Εικόνα 25 φαίνεται το δοκίμιο τοποθετημένο στην πλάκα έδρασης της ηλεκτροδραυλικής μηχανής λίγο πριν

την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας. Η κεφαλή της μηχανής έχει μετακινηθεί ώστε να έρθει σχεδόν σε επαφή με τον μεταλλικό κύλινδρο που βρίσκεται στο επάνω μέρος του δοκιμίου. Οι αισθητήρες των ακουστικών εκπομπών είναι συνδεδεμένοι με τους αντίστοιχους προενισχυτές και τη διάταξη καταγραφής και επεξεργασίας της ακουστικής δραστηριότητας και τα ηλεκτρόδια ανίχνευσης των PSC είναι προσαρμοσμένα στο κάτω μέρος του δοκιμίου και συνδεδεμένα στο ηλεκτρόμετρο όπως φαίνεται στην Εικόνα 26.

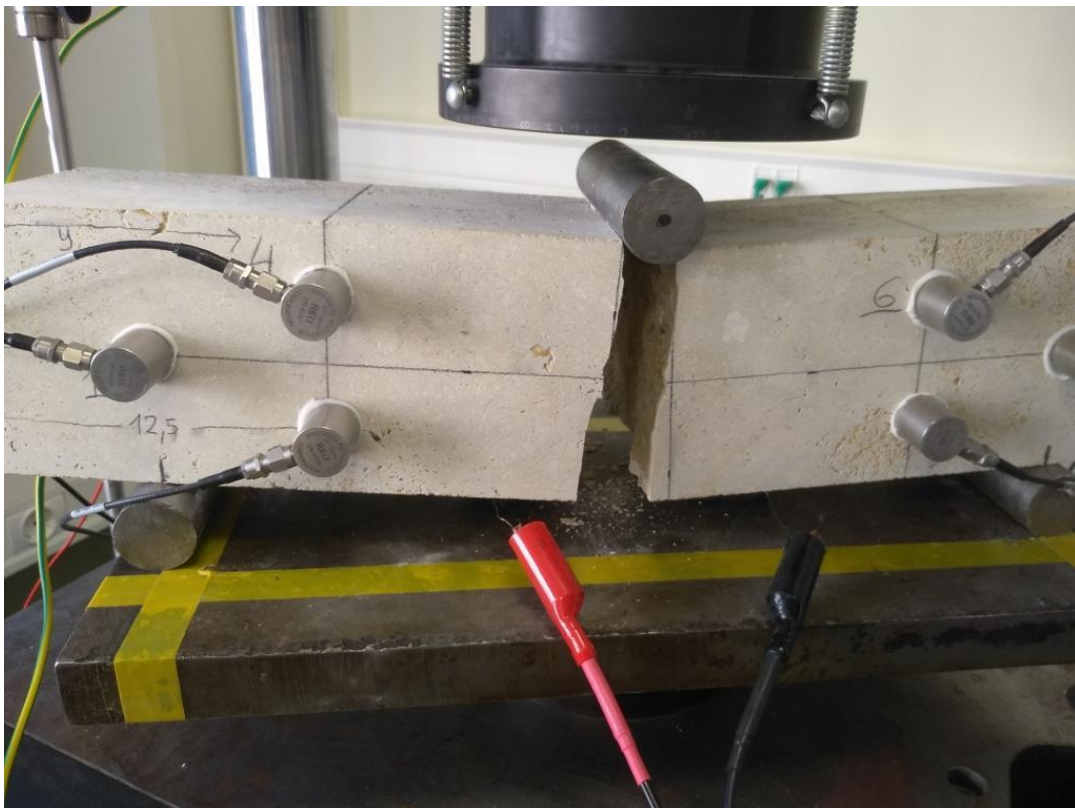


Εικόνα 25: Πειραματική διάταξη κάμψης τριών σημείων σε δοκίμιο χαμηλού πορώδους.



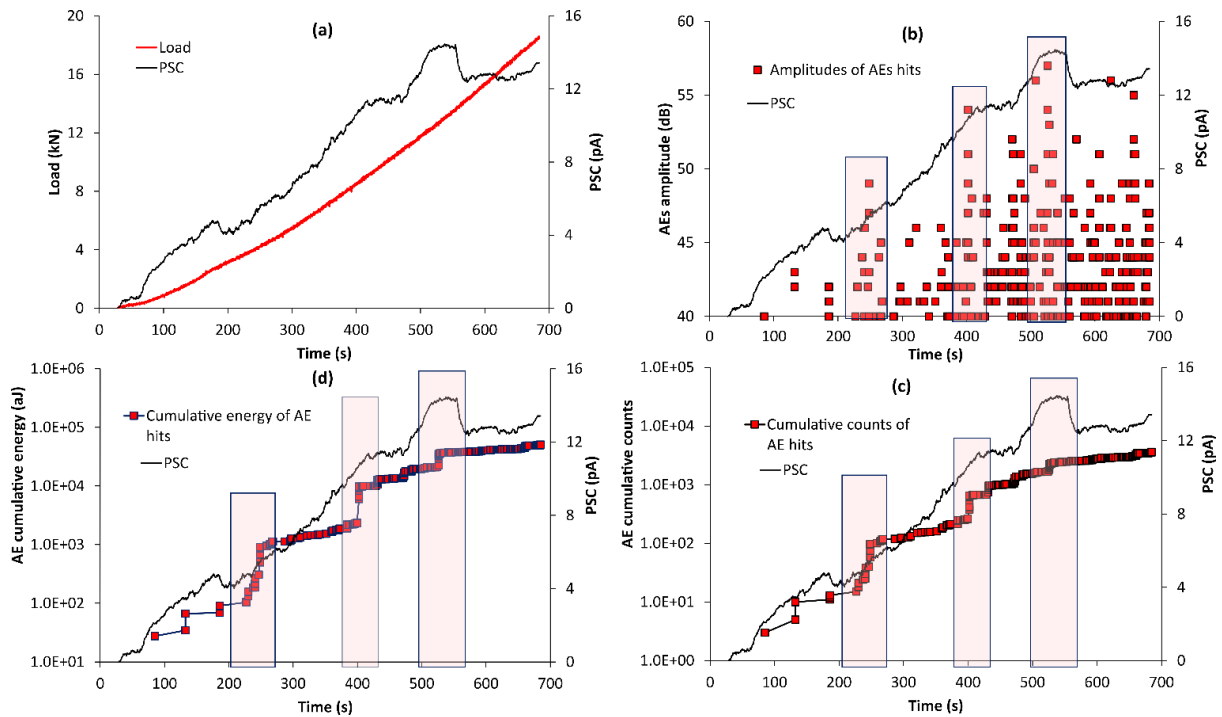
Εικόνα 26: Θέση ηλεκτροδίων ανίχνευσης PSC στην πειραματική διάταξη κάμψης τριών σημείων σε δοκίμιο χαμηλού πορώδους.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετατόπισης ο οποίος ορίστηκε στα 0.03mm/min. Η πειραματική διαδικασία εξελίχθηκε ομαλά χωρίς πλευρικές μετακινήσεις των μεταλλικών κυλίνδρων ή του εμβόλου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 27 το δοκίμιο κατέρρευσε δημιουργώντας ρωγμή στο κέντρο του όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της φύσης του υλικού και του είδους της καταπόνησης. Συνολικά καταγράφηκαν 326 ακουστικά hits και το δοκίμιο κατέρρευσε σε μηχανικό φορτίο 18,8kN. Σημειώνεται ότι για την κατηγορία δειγμάτων χαμηλού πορώδους καταγράφηκαν σημαντικά υψηλότερα επίπεδα PSC συνοδευόμενα από πολλά AE hits. Η απουσία μεγάλων πώρων στο μεγαλύτερο μέρος του δείγματος και η αυξημένη αντοχή φαίνεται να ευνοούν τους μηχανισμούς παραγωγής τόσο των εκπομπών PSC όσο και των ΑΕ.



Εικόνα 27: Δοκίμιο χαμηλού πορώδους μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

Στο Σχήμα 12 αποτυπώνεται η χρονική διακύμανση του PSC σε αντιπαράθεση με εκείνη του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου (a), με τα πλάτη των ΑΕ (b), με την συνολική ενέργεια ΑΕ (c) και του συνολικού αριθμού των ΑΕ Counts (d).



Σχήμα 12. Χρονική διακύμανση του PSC σε αντιπαράθεση με εκείνη του εφαρμοζόμενου φορτίου (a), των πλατών των AE (b), της συνολικής ενέργεια AE (c) και του συνολικού αριθμού των AE Counts (d).

Στο Σχήμα 12(a) αποτυπώνεται η χρονική διακύμανση του καταγεγραμμένου σήματος PSC σε αντιπαράθεση με το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο. Σημειώνεται ότι το φορτίο θραύσης του δείγματος ήταν ίσο με 18,8 kN περίπου. Το PSC παρουσιάζει μια σταδιακή αύξηση που ξεκινά από τα πρώτα επίπεδα φορτίου και εκτείνεται σχεδόν μέχρι τη θραύση. Παρά τη συνολική αυξητική τάση του καταγεγραμμένου σήματος PSC, υπάρχουν ορισμένα τοπικά ελάχιστα καθώς και μικρά χρονικά διαστήματα στα οποία το PSC σταθεροποιείται. Οι απότομες αυξήσεις που καταγράφηκαν στα αρχικά στάδια του πρωτοκόλλου φόρτωσης ήταν αναμενόμενες λόγω σφαλμάτων κάμψης και του κλεισίματος των πόρων του δείγματος. Τη χρονική στιγμή των $t \approx 400$ s με αντίστοιχες τιμές φορτίου περίπου 8 kN, το καταγεγραμμένο σήμα PSC μετά από μια συνεχή αύξηση, δείχνει μια τοπική σταθεροποίηση που διαρκεί από $t \approx 435$ s έως $t \approx 475$ s. Διαδοχικά, το PSC αυξάνεται με υψηλότερο ρυθμό, μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή που καταγράφηκε 14,5 pA, τη χρονική στιγμή $t \approx 530$ s. Μια σημαντική παρατήρηση είναι η απουσία γραμμικής περιοχής σχετικά με την καμπύλη φορτίου/μετατόπισης.

Στο Σχήμα 12(b) αποτυπώνεται η χρονική διακύμανση του καταγεγραμμένου σήματος PSC σε αντιπαράθεση με την αντίστοιχη χρονική διακύμανση των πλατών των καταγεγραμμένων AE hits. Κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφηκαν συνολικά 326 AE hits. Είναι αξιοσημείωτος ο διαφορετικός αριθμός καταγεγραμμένων AE hits μεταξύ δειγμάτων Κατηγορίας A και Κατηγορίας B. Κατά τα πρώτα στάδια της

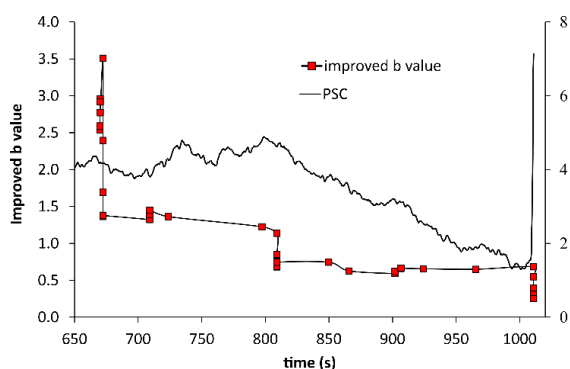
φόρτισης ($t < 200$ s) η ακουστική δραστηριότητα είναι αμελητέα με τα καταγεγραμμένα πλάτη να είναι μικρότερα από 45dB. Η πρώτη έντονη ακουστική δραστηριότητα παρατηρείται τη χρονική στιγμή $t \approx 250$ s (πρώτη χρωματική περιοχή) όπου τα πλάτη των καταγεγραμμένων AE hits φτάνουν έως και τα 49 dB. Η ακουστική δραστηριότητα παρουσιάζει προοδευτική αύξηση παράλληλα με το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο. Τη χρονική στιγμή $t \approx 400$ s τα καταγεγραμμένα πλάτη για πρώτη φορά υπερβαίνουν τα 50 dB φτάνοντας τιμές κοντά στα 54 dB. Το μέγιστο πλάτος AE ήταν 57 dB και καταγράφηκε τη χρονική στιγμή $t \approx 540$ s. Πρέπει να σημειωθεί ότι πολλά AE hits με μικρότερα πλάτη από το χρονικό διάστημα μεταξύ $t=400$ και $t=560$ καταγράφονται μέχρι την θραύση καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας έχει ήδη εξαντληθεί.

Τα Σχήματα 12(c) και 12(d) αποτυπώνουν τη χρονική συμπεριφορά των αθροιστικών υπερβάσεων (counts) AE και της αθροιστικής ενέργειας (cumulative energy). Και οι δύο αθροιστικές ποσότητες απεικονίζονται σε ημιλογαριθμικά διαγράμματα. Είναι αξιοσημείωτο ότι παρά τον σημαντικά υψηλότερο αριθμό των καταγεγραμμένων AE hits, η πλήρως απελευθερωμένη ενέργεια AE ($5.07 \cdot 10^4$ aj) και ο συνολικός αριθμός των υπερβάσεων (3618) είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των δειγμάτων Κατηγορίας A. Λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχει περιορισμένος αριθμός κενών λόγω του μικρού πορώδους στα δείγματα Κατηγορίας B, υπάρχουν λίγες διεπιφάνειες συγκέντρωσης τάσης, γεγονός που περιορίζει τις εκπομπές AE υψηλής ενέργειας και υψηλών υπερβάσεων. Επιπλέον, τα δείγματα χαμηλότερου πορώδους ευνοούν τη μετάδοση των γεγονότων χαμηλού πλάτους, οδηγώντας σε μεγαλύτερο αριθμό AE hits. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν περισσότερα AE hits, αυτά είναι χαμηλής ενέργειας και υπερβάσεων επειδή η απελευθέρωση ελαστικής ενέργειας είναι πιο ομαλή λόγω των προαναφερθέντων ιδιοτήτων. Συγκεκριμένα, λαμβάνουν χώρα διεργασίες μικρορωγμών και μακροσκοπικές διεργασίες που οδηγούν στο σχηματισμό του επιπέδου πυρόλυσης και η καταστροφική αστοχία δεν ακολουθείται από ξαφνική απελευθέρωση υψηλής ελαστικής ενέργειας.

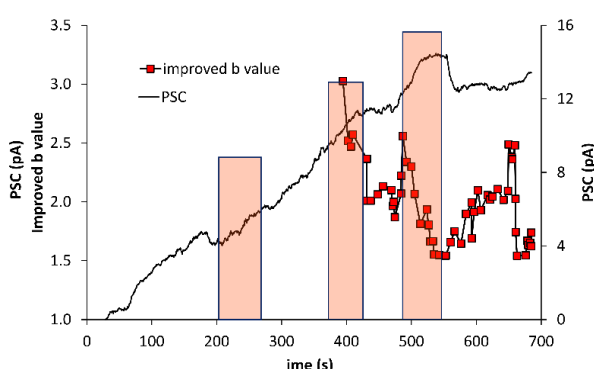
5.3.1 Υπολογισμός *Ib-value*

Για τον υπολογισμό της *Ib-value* επιλέγεται ένας αριθμός διαδοχικών AE hits και στην προκειμένη περίπτωση στα a_1 και a_2 αποδίδεται η τιμή 1. Παρά το γεγονός ότι απαιτείται επαρκής αριθμός AE hits για τον υπολογισμό της *Ib-value*, στην περίπτωση των δειγμάτων κατηγορίας A η *Ib-value* υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον σχετικά χαμηλό αριθμό των 20 AE hits. Για να αυξηθεί η εγκυρότητα της *Ib-value*, κάθε επόμενη τιμή *Ib-value* υπολογίστηκε με μετατόπιση ενός AE hit. Για την περίπτωση των δειγμάτων Κατηγορίας B, ο αριθμός των AE hits που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της *Ib-value* ήταν 50 και κάθε επόμενη ομάδα υπολογίστηκε με μετατόπιση 5 AE hits. Η χρονική στιγμή που συσχετίστηκε με κάθε τιμή *Ib-value*, ήταν αυτή του τελευταίου AE hit κάθε ομάδας. Η χρονική διακύμανση της υπολογιζόμενης *Ib-value* σε

αντιπαράθεση με αυτήν του PSC απεικονίζεται για το δείγμα Κατηγορίας A στο Σχήμα 13 και για το δείγμα κατηγορίας B στο Σχήμα 14. Για το δείγμα κατηγορίας B έγιναν διάφορες δοκιμές υπολογισμού της Ib-value αλλάζοντας το πλήθος των AE hits καθώς και τη μετατόπιση τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο Παράρτημα 2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 13: Χρονική διακύμανση της Ib-value σε αντιπαράθεση με αυτήν του PSC για την περίπτωση του δείγματος Κλάσης A.



Σχήμα 14: Χρονική διακύμανση της Ib-value σε αντιπαράθεση με αυτήν του PSC για την περίπτωση του δείγματος Κλάσης B.

Οι Ib-values υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την τεχνική sliding window. Στα Σχήματα 13 και 14 αποτυπώνεται η χρονική διακύμανση της Ib-value σε αντιπαράθεση με την αντίστοιχη συμπεριφορά του καταγεγραμμένου PSC. Η γραφική παράσταση επικεντρώνεται στις περιοχές όπου καταγράφηκε επαρκής αριθμός ακουστικών γεγονότων όπου ο υπολογισμός μιας αξιόπιστης Ib-value είναι εφικτός. Παρατηρώντας τη διακύμανση της Ib-value γίνεται σαφές ότι χαρακτηριστικές πτώσεις των τιμών της κοντά στην τιμή 1 λαμβάνουν χώρα μόνο όταν και οι εγγραφές AE και PSC υποδηλώνουν τη δημιουργία σοβαρών εσωτερικών βλαβών. Συγκεκριμένα, για τα δείγματα Κατηγορίας A, αυτή η πτώση καταγράφεται στις χρονικές στιγμές των 672s, 810s και λίγο πριν την αστοχία του δείγματος. Όλες οι παραπάνω χρονικές στιγμές όπως αναμενόταν συμπίπτουν με τις κορυφές των PSC και την έντονη ακουστική δραστηριότητα όπως περιγράφεται παραπάνω. Σχετικά με τα δείγματα Κατηγορίας B το Σχήμα 14 δείχνει ξεκάθαρα τη συσχέτιση μεταξύ της χαρακτηριστικής πτώσης της Ib-value και της δραστηριότητας PSC ειδικά στις χρονικές στιγμές 400s, 490s κατά προσέγγιση και κατά τη χρονική στιγμή και γύρω από την αστοχία του δείγματος.

Παρατηρείται λοιπόν ότι στον πωρόλιθο Αλφά όπως και σε άλλα υλικά που έχουν μελετηθεί με παρόμοιο τρόπο όταν υποβάλλονται σε κάμψη τριών σημείων, η εξέλιξη της Ib-value και του PSC παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά [29, 62-63]. Επομένως, η

μελέτη της παραμέτρου Ib-value σε σχέση με το PSC, μπορεί να λειτουργήσει ως έγκαιρη προειδοποίηση πριν από τη θραύση και για τον πωρόλιθο Αλφά.

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε πωρόλιθους Αλφά, διαφορετικούς ως προς το πορώδες τους, ανιχνεύοντας ακουστικές και ηλεκτρικές εκπομπές κατά την διάρκεια πειραμάτων κάμψης τριών σημείων.

Το αρχικό συμπέρασμα που προέκυψε από αυτή την πειραματική εργασία, είναι ότι είναι δυνατή η καταγραφή ηλεκτρικών σημάτων πριν τη θραύση στον πωρόλιθο Αλφά, όταν αυτός υπόκειται σε κάμψη τριών σημείων, κάτι που μελετάται για πρώτη φορά.

Τα ηλεκτρικά και ακουστικά σήματα, που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κάμψης τριών σημείων σε δύο διαφορετικούς ως προς το πορώδες τύπους δοκιμίων πωρόλιθου Αλφά, εξετάστηκαν σε αντιπαράθεση μεταξύ τους και με το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι και τα δύο σήματα εξαρτώνται τουλάχιστον ποιοτικά από την πυκνότητα των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Αυτό φαίνεται να υποστηρίζεται από την καταγεγραμμένη ακουστική και ηλεκτρική δραστηριότητα, η οποία είναι αρκετά ασθενέστερη στην περίπτωση των δειγμάτων υψηλού πορώδους σε σχέση με τα δοκίμια χαμηλού πορώδους. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα υποδεικνύουν μια πιθανή ποιοτική συσχέτιση μεταξύ των ηλεκτρικών και ακουστικών δραστηριοτήτων, με την έννοια ότι η τελευταία είναι πιο έντονη όταν η εξέλιξη του PSC παρουσιάζει τοπικές διαταραχές.

Επιπλέον, η χρονική διακύμανση της b-value μελετήθηκε σε αντιπαράθεση με την αντίστοιχη χρονική διακύμανση του καταγεγραμμένου σήματος PSC και του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου. Από τα πρώτα αυτά πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται να υπάρχει μια ποιοτική συσχέτιση μεταξύ της Ib-value, του καταγεγραμμένου σήματος PSC και του φορτίου που εφαρμόζεται.

Πριν όμως εξαχθούν οριστικά συμπεράσματα για τη συσχέτιση των δύο τεχνικών ανίχνευσης που μελετήθηκαν, χρειάζεται να διεξαχθούν πρόσθετα πειράματα και με άλλους τύπους δειγμάτων και πρωτόκολλα φόρτωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

1. Christian Grosse, Masayasu Ohtsu “Acoustic Emission Testing Basics for Research - Applications in Civil Engineering,” January 2008, 10.1007/978-3-540-69972-9.
2. I. Stavrakas, “Phd Thesis Investigation of pressure stimulated current in rock through laboratory induced stress measurements as a mechanism for electromagnetic emissions and its analysis as a precursor phenomenon of seismic events”, 2004.
3. Κυπριωτάκη Αντωνία “Εργαστηριακές εφαρμογές ακουστικής εκπομπής σε δοκίμια άοπλου & ινοπλισμένου σκυροδέματος,” Αθήνα, Οκτώβριος 2012.
4. Φιλόθεος Γ. Λόκκας “Αρχές και Μέθοδοι στην Αντοχή Υλικών,” Λάρισα, Οκτώβριος 2003.
5. Παναγιώτης Α. Βουθούνης “Αντοχή των υλικών-Μηχανική παραμορφώσιμου στερεού,” Αθήνα, 2017.
6. NDT Resource Center NDE-ED.org.https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other20Methods/AE/AE_Signal20Features.php(accessed Feb. 10, 2021).
7. L. H. Chen, K. C. Huang, and Y. C. Chen, “Acoustic Emission at Wedge Indentation Fracture in Quasi-Brittle Materials,” Journal of Mechanics, vol. 25, no. 2, pp. 213–223, 2009.
8. A. K. Maji, C. Ouyang, and S. P. Shah, “Fracture mechanisms of quasi-brittle materials based on acoustic emission,” Journal of Materials Research, vol. 5, no. 1, pp. 206–217, 1990.
9. Acoustic Emission, Standard Terminology Relating To, ASTM E610-82, 1982.STM E610-82.
10. Stress.com, <https://www.stress.com/acoustic-emission-testing-overview> (accessed Feb. 10, 2021).
11. Θεόδωρος Χ. Λούτας “Μεθοδολογίες επεξεργασίας σημάτων ακουστικής εκπομπής και ακουστουπέρηχου για την παρακολούθηση και την ταυτοποίηση της εξέλιξης της βλάβης σε σύνθετα κεραμικά υλικά,” Πάτρα, 2007.
12. R.K Miller, P. McIntire. “Acoustic emission testing. Nondestructive testing handbook,” American Society for Nondestructive Testing, 1987.
13. R. Unnþórsson, “Hit Detection and Determination in AE Bursts,” In Acoustic Emission - Research and Applications, W. Sikorski ed. Reykjavík, Iceland, InTech, Mar. 2013, ch. Hit Detection and Determination in AE Bursts, 10.5772/54754.
14. Pollock A.A., “Acoustic Emission Inspection, Technical Report” TR-103-96-12/89, (Physical Acoustics Corporation, 1989), p. 282.
15. Γεώργιος Θεόδωρος Π. Μαλλιαρός “Μετρήσεις ασθενών ηλεκτρικών ρευμάτων και ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια εφαρμογής μηχανικής καταπόνησης σε φυσικούς λίθους,” Αθήνα, Ιούνιος 2015.

16. R. Gutenberg and C.F. Richter (1944). Frequency of earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, p. 185-188.
17. P.M. Shearer, (1999), *Introduction to seismology*, Cambridge University Press, Cambridge, England, p. 1–189.
18. M. T. I. Khan, S. Tsurumaru and R. Hidaka. The Influence of B-value Distribution in Damage Evaluation of Structural Material Based on AE Parametric Analysis Graduate School of Science and Engineering, Saga University, 1 Honjo, Saga 840-8502, Japan
19. Alexander Minakov, Viktoriya Yarushina, Elastoplastic source model for microseismicity and acoustic emission, *Geophysical Journal International*, Volume 227, Issue 1, October 2021, Pages 33–53, <https://doi.org/10.1093/gji/ggab207>
20. Zang, A., Wagner, C. F., and Dresen, G. (1996), Acoustic emission, microstructure, and damage model of dry and wet sandstone stressed to failure, *J. Geophys. Res.*, 101(B8), 17507– 17521, doi:10.1029/96JB01189.
21. Jing Yang, Zong-Long Mu, Sheng-Qi Yang, Experimental study of acoustic emission multi-parameter information characterizing rock crack development, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 232, 2020, 107045
22. Main, I.; Meredith, P.; Jones, C. A reinterpretation of the precursory seismic b-value anomaly from fracture mechanics; 1989; Vol. 96, pp. 131-138.
23. Colombo, I.S.; Main, I.G.; Forde, M.C. Assessing Damage of Reinforced Concrete Beam Using "b - value" Analysis of Acoustic Emission Signals. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2003, 15, 280-286, doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:3(280).
24. Shiotani, T.; Yuyama, S.; Li, Z.W.; Ohtsu, M. Application of AE improved b-value to quantitative evaluation of fracture process in concrete materials; 2001; Vol. 19, pp. 118-133.
25. Scholz, C.H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1968, 58, 399-415
26. Weeks, J.; Lockner, D.; Byerlee, J. Change in b-values during movement on cut surfaces in granite. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1978, 68, 333-341.
27. Shiotani, T. Evaluation of progressive failure using AE sources and improved b-value on slope model tests. *Progress in Acoustic Emission VII, JSNDI 1994*, 529-534.
28. Sagasta, F.; Benavent-Climent, A.; Fernández-Quirante, T.; Gallego, A. Modified Gutenberg–Richter Coefficient for Damage Evaluation in Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Simulations on a Shaking Table. *Journal of Nondestructive Evaluation* 2014, 33, 616-631, doi:10.1007/s10921-014-0256-6.

29. Rao, M.V.M.S.; Lakshmi, K.J.P. Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture. *Current Science* 2005, 89, 1577-1582.
30. D. Pasiou, E.; Triantis, D. Correlation between the electric and acoustic signals emitted during compression of brittle materials; 2017; Vol. 11, pp. 41-51.
31. Shiotani, T., Ohtsu, M., and Ikeda, K. (2001), "Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation." *Constr. Build. Mat.*, 15, 5–6, p.235–246.
32. G. Manthei, J. Eisenblatter, T. Spies, "Acoustic emission in rock mechanics studies", *Acoustic Emission Beyond the Millennium*, T. Kishi, M. Ohtsu and S. Yuyama (eds), Elsevier 2000, pp.127-144.
33. J. F. Labuz, F. C. S. Carvalho, "Post-failure micromechanisms in shear banding of rock", *Acoustic Emission Beyond the Millennium*, T. Kishi, M. Ohtsu and S. Yuyama (eds), Elsevier 2000, pp. 145-158.
34. H. Niitsuma, "Acoustic Emission/Microseismic Technique: review of research in the 20th century and future aspects," *Acoustic Emission Beyond the Millennium*, T. Kishi, M. Ohtsu and S. Yuyama (eds), Elsevier 2000, pp. 109-126.
35. J. Enomoto, & H. Hashimoto, "Emission of charged particles from indentation fracture of rocks," *Nature*, 1990, pp 641-643, vol 346, Is 6285, 10.1038/346641a0
36. U. Nitsan, "Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks," *Geophysical Research Letter*, August 1977, 10.1029/GL004i008p00333
37. Ogawa, T., Oike, K. Mirura, T, "Electromagnetic radiations from rocks," *Journal of Geophysical Research*, Jun. 1985, 10.1029/JD090iD04p06245
38. O'Keefe, S.G. and Thiel, D.V, "A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of Brittle materials," *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol 89, Issues 1–2, 1995, pp 127-135, 10.1016/0031-9201(94)02994-M.
39. F. Freund, "Charge generation and propagation in rocks," *Journal of Geodynamics*, Volume 33, Issues 4–5, 2002, pp 543-570, 10.1016/S0264-3707(02)00015-7.
40. D. Eccles, P.R Sammonds, O.C Clint, "Laboratory studies of electrical potential during rock failure," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 42, Issues 7–8, 2005, pp 933-949, 10.1016/j.ijrmms.2005.05.018.
41. Vallianatos F, Tsanis A, "Electric current generation associated with the deformation rate of a solid: Preseismic and coseismic signals," *Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 23, Issues 9–10, 1998, pp 933-938, 10.1016/S0079-1946(98)00122-0.
42. Anastasiadis, C., Triantis, D., Stavrakas. I., Vallianatos, F., "Pressure stimulated currents (PSC) in marble samples after the application of various stress modes before fracture," Feb. 2004, *Annals of geophysics*, vol 47, no 1, 10.4401/ag-3255.
43. S.K. Park, M.J.S. Johnston, T.R. Madden, F.D. Morgan, H.F. Morisson. "Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of

- observations and mechanisms,” May 1993, *Reviews of Geophysics*, vol 31, no 2, pp 117-132 10.1029/93RG00820
44. M.J.S Johnston. “Review of electrical and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity,” *Surveys in Geophysics* vol 18, pp 441–476, 1997. 10.1023/A:1006500408086
 45. A. Tzanis, F. Vallianatos. “A critical review of electric earthquake precursors,” *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*, vol 44, no 2, 2001, 10.4401/ag-3583
 46. F. Vallianatos, D. Triantis, A. Tzanis, C. Anastasiadis, I. Stavrakas “Electric Earthquake Precursors: From Laboratory Results to Field Observations,” *Electric earthquake precursors: from laboratory results to field observations, Physics and Chemistry of the Earth, Volume 29, Issues 4–9, 2004*, pp 339-351, 2004, 10.1016/j.pce.2003.12.003
 47. I. Stavrakas, D. Triantis, Z. Agioutantis, S. Maurigiannakis, V. Saltas, F. Vallianatos, M. Clarke “Pressure stimulated currents in rocks and their correlation with mechanical properties,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 4. Oct. 2004, 10.5194/nhess-4-563-2004.
 48. I. Stavrakas, C. Anastasiadis, D. Triantis, F. Vallianatos “Piezo stimulated currents in marble samples: precursory and concurrent-with-failure signals,” *Natural Hazards and Earth System Sciences Vol 3*, 10.5194/nhess-3-243-2003, May 2003.
 49. Vallianatos, F. and Tzanis. A., "A model for the generation of precursory electric and magnetic fields associated with the deformation rate of the earthquake focus, in M. Hayakawa (ed.)," in *Atmospheric and Ionospheric electromagnetic*, Tokyo, 1999.
 50. P. Kyriazis C. Anastasiadis, I. Stavrakas, D. Triantis, J. Stonham “Modelling of electric signals stimulated by bending of rock beams,” *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, Vol.4 No.1,2009, 10.1504/IJMMP.2009.028429, 2009.
 51. A. Kyriazopoulos, C. Anastasiadis, D. Triantis, J. C. Brown “Non-destructive evaluation of cement-based materials from pressure-stimulated electrical emission - Preliminary results,” *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 4, 2011, 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.053, .
 52. D. Triantis, I. Stavrakas, A. Kyriazopoulos, G. Hloupis, Z. Agioutantis. “Pressure Stimulated Electrical Emissions from cement mortar used as failure predictors,” *International Journal of Fracture*, vol 175, pp 53-61 May 2012, 10.1007/s10704-012-9701-7.
 53. C. Stergiopoulos, I. Stavrakas, G. Hloupis, D. Triantis, F. Vallianatos. “Electrical and acoustic emissions in cement mortar beams subjected to mechanical loading up to fracture,” *Engineering Failure Analysis* vol 35, pp:454-461, Dec. 2013, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.04.015.
 54. S. K. Kourkoulis and I. Dakanali, “Pre-failure indicators detected by Acoustic Emission: Alfas stone, cement-mortar and cement-paste specimens under 3-point

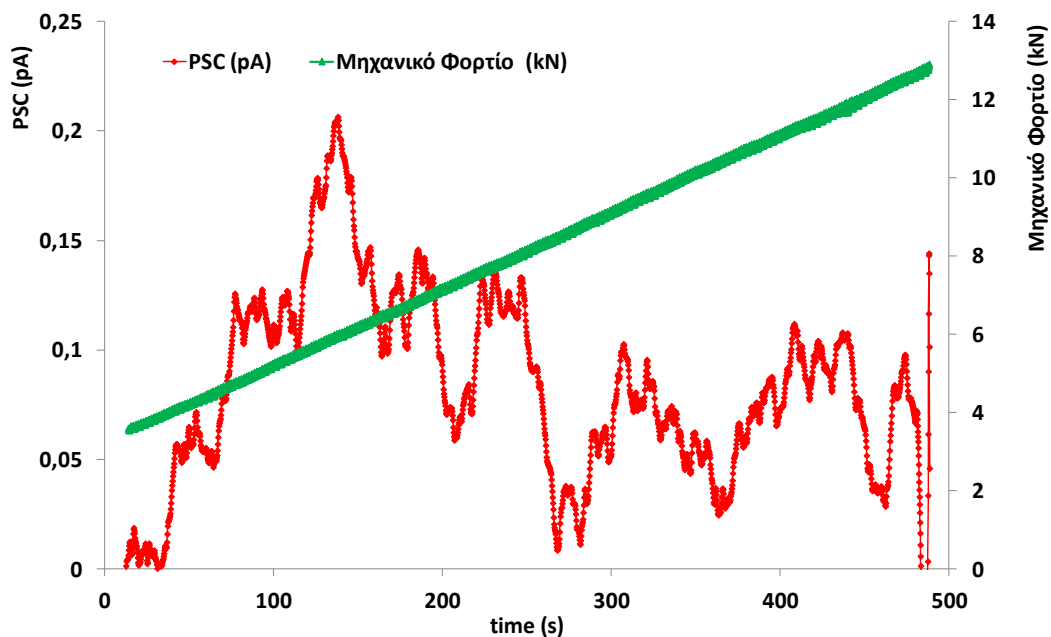
- bending,” *Frat. ed Integ. Strutt.* Vol 11, no 40, pp. 74-84, Jan. 2017, 10.3221/IGF-ESIS.40.07.
55. K. N. Kaklis, S. P. Mavrigiannakis, Z. G. Agioutantis, E. K. Steiakakis and F. K. Stathogianni “Experimental investigation of the mechanical properties of Alfas stone,” *Frat. ed Integ. Strutt.* Vol 40, no 40, Apr. 2017, 10.3221/IGF-ESIS.40.02.
 56. Z. L. Zhou, J. Zhou, L. J. Dong, X. Cai, Y. C. Rui and C. T. Ke “Experimental study on the location of an acoustic emission source considering refraction in different media,” *Scientific Reports*, vol 7, no1, Dec. 2017, 10.1038/s41598-017-07371-w.
 57. ASTM E 976-94, “Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response” 1994.
 58. N. Hsu, “Characterization and calibration of acoustic emission sensors” M. Eval, USA, DA , (1981), pp. 60-68.
 59. M. Stefanidou, “Methods for porosity measurement in lime-based mortars”, *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 12, 2010, Pages 2572-2578,.
 60. E. D. Pasiou, I. Stavrakas, G. Hloupis, S. K. Kourkoulis and D. Triantis, *Electrical and Acoustic Emissions during Three Point Bending Tests of Pre-Notched Marble Specimens. Proceedings of the International Conference “SCience in TEchnology - SCinTE – 2015, vol.1 pp. 86-90.*
 61. C. Stergiopoulos, I. Stavrakas, D. Triantis, G. Hloupis, F. Vallianatos, *The Use of PSC Technique to Estimate the Damage Extension During Three Point Bending Test, Mechanical and Materials Engineering of Modern Structure and Component Design, Volume 70, pp. 363-372, of the series Advanced Structured Materials, © Springer International Publishing Switzerland 2015, ISBN 978-3-319-19442.*
 62. A. Loukidis, I. Stavrakas, D. Triantis, *The relaxation processes of Pressure Stimulated Currents under the concept of Non-extensive statistical physics, Procedia Structural Integrity, Volume 26, 2020, Pages 277-284.*
 63. Dexing Li, Enyuan Wang, Zhonghui Li, Yunqiang Ju, Dongming Wang, Xinyu Wang, *Experimental investigations of pressure stimulated currents from stressed sandstone used as precursors to rock fracture, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 145, 2021, 104841.*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

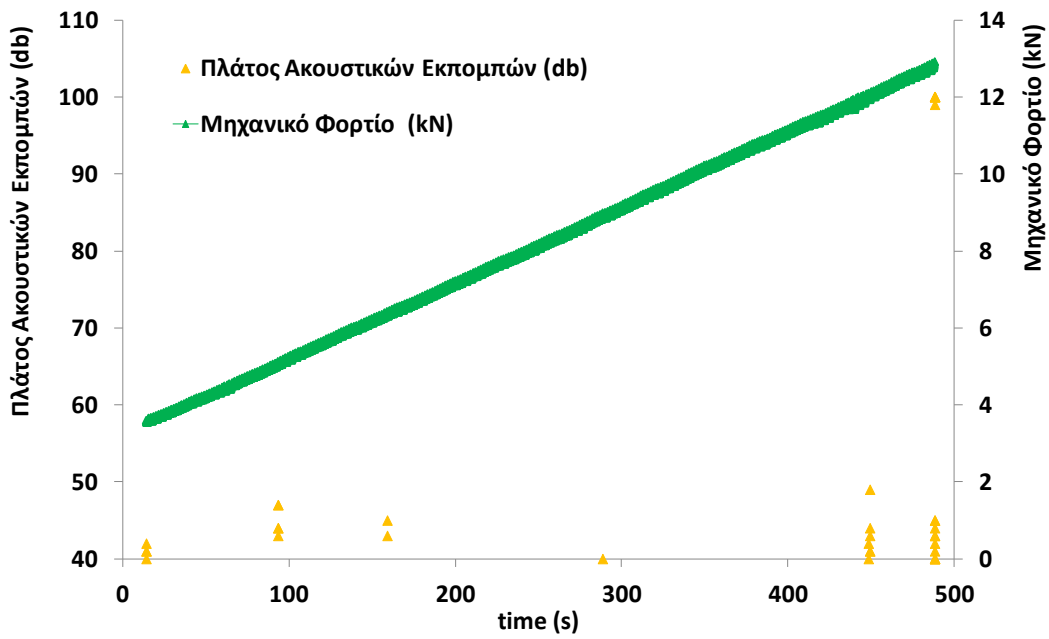
Παράρτημα 1

Χρονικές Καταγραφές Μηχανικού φορτίου, PSC, AE και Ib-value στα υπόλοιπα πειράματα

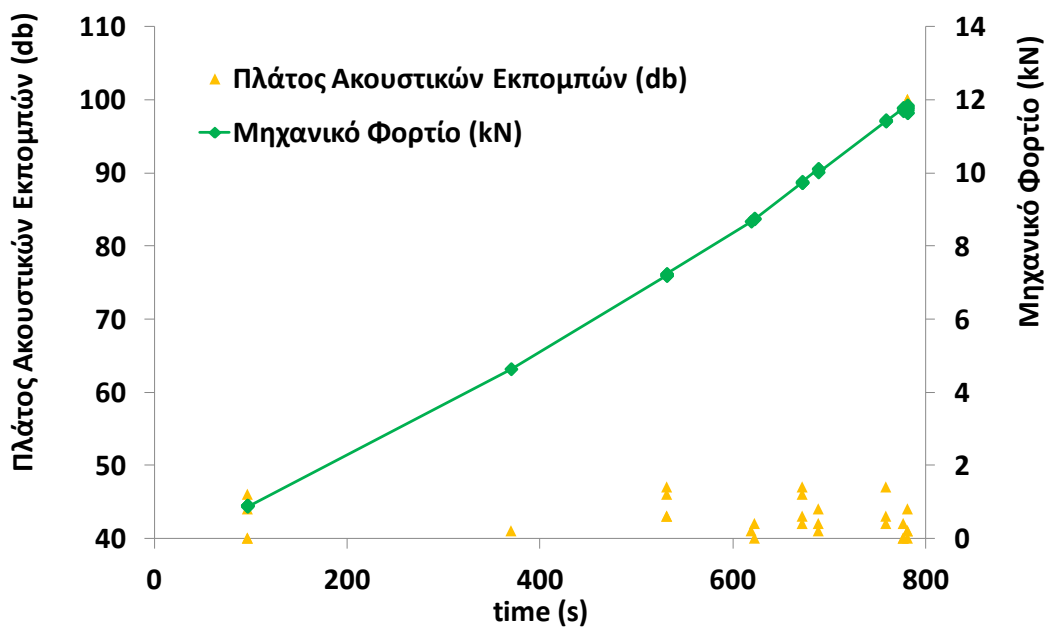
Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι χρονικές καταγραφές του μηχανικού φορτίου του ηλεκτρικού ρεύματος των ακουστικών εκπομπών και της Ib-value (Η Ib-value υπολογίστηκε μόνο για τα πειράματα υψηλού πορώδους (No 4 και No 6) στα οποία υπήρξε ικανός αριθμός ακουστικών καταγραφών ώστε ο υπολογισμός της να είναι αξιόπιστος).



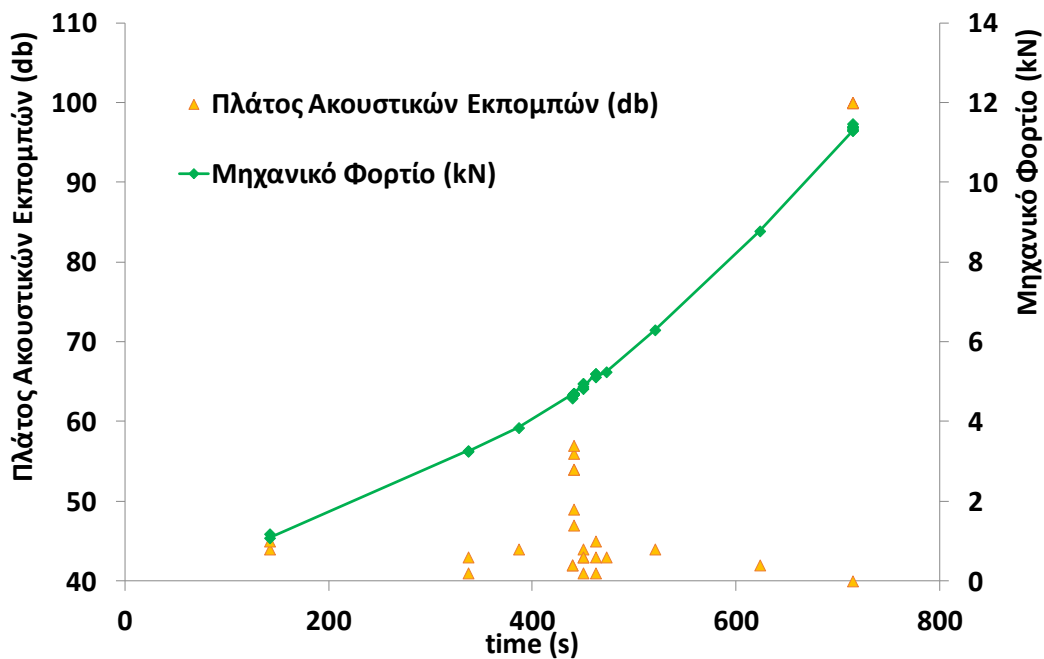
Σχήμα 1: Χρονική καταγραφή του ηλεκτρικού ρεύματος (κόκκινο) και του μηχανικού φορτίου (πράσινο) του πειράματος No 2.



Σχήμα 2: Χρονική καταγραφή του μηχανικού φορτίου (πράσινο), και των ακουστικών εκπομπών (πορτοκαλί) του πειράματος Νο 2.

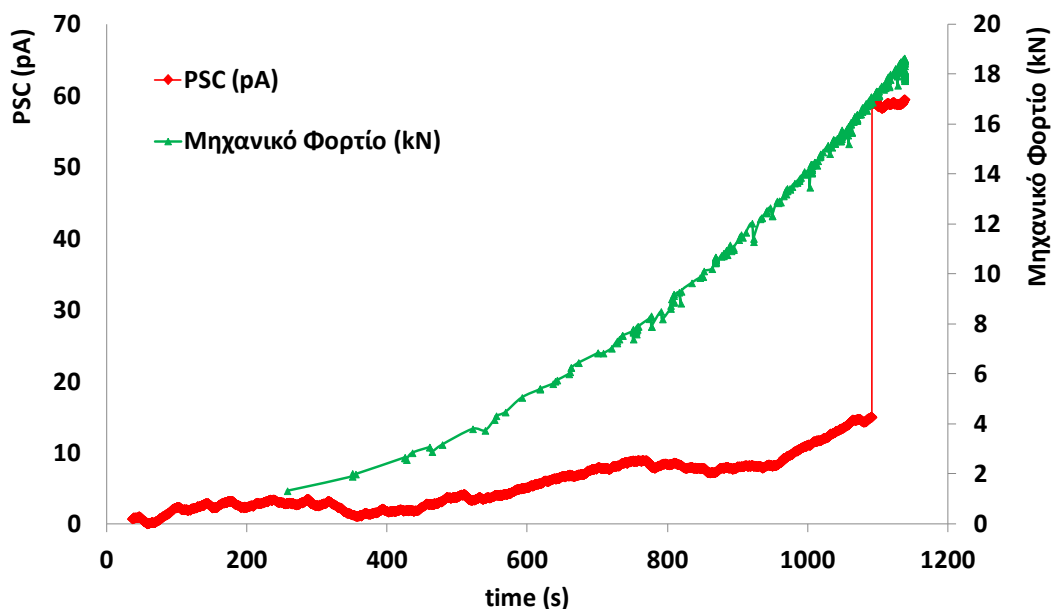


Σχήμα 3: Χρονική καταγραφή μηχανικού φορτίου (πράσινο), και των ακουστικών εκπομπών (πορτοκαλί) του πειράματος Νο 3.

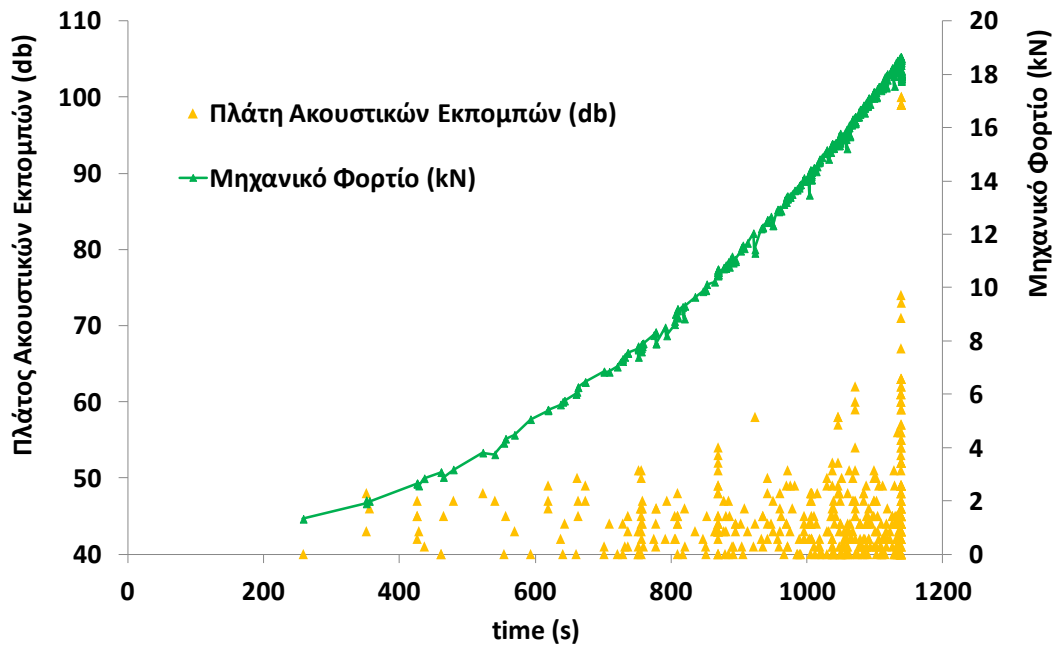


Σχήμα 4: Χρονική καταγραφή μηχανικού φορτίου (πράσινο), και των ακουστικών εκπομπών (πορτοκαλί) του πειράματος Νο 5.

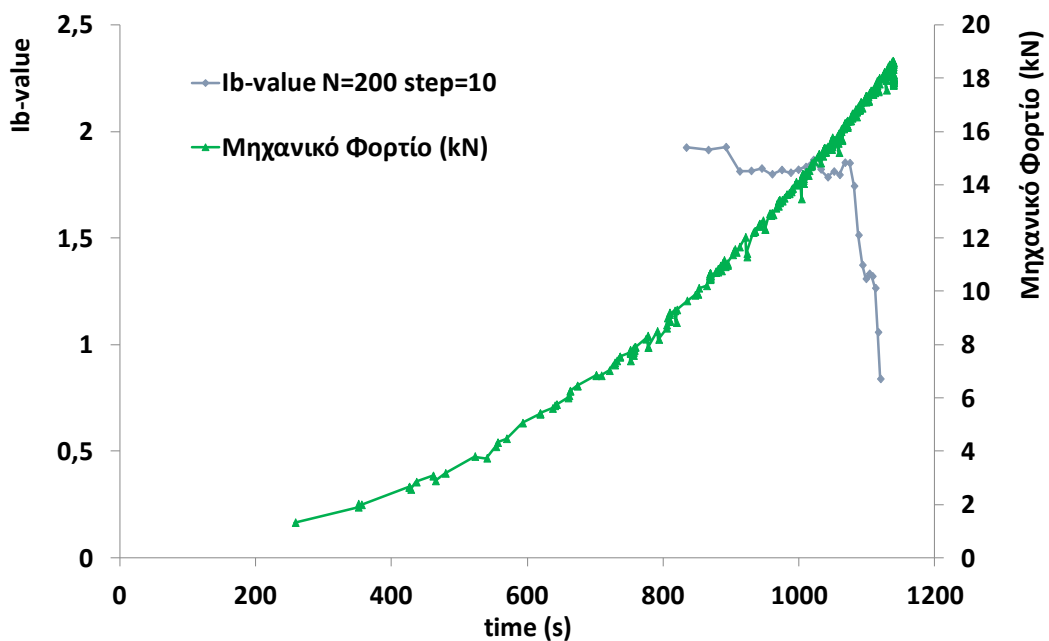
Αυτό που παρατηρείται σε όλα τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε Αλφάς με υψηλότερο πορώδες είναι ότι η κατάρρευση έρχεται κοντά στα 13-14 kN. Το πλήθος των ακουστικών καταγραφών είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τα δοκίμια μικρού πορώδους ενώ και οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος είναι κι αυτές αισθητά χαμηλότερες.



Σχήμα 5: Χρονική καταγραφή ηλεκτρικού ρεύματος (κόκκινο), και μηχανικού φορτίου (πράσινο) του πειράματος Νο 6.



Σχήμα 6: Χρονική καταγραφή του μηχανικού φορτίου (πράσινο) και των ακουστικών εκπομπών (πορτοκαλί) του πειράματος Νο 6.



Σχήμα 7: Χρονική καταγραφή του μηχανικού φορτίου (πράσινο) και της Ib-value με N=200 και step=10 (μπλε) του πειράματος Νο 6.

Το πείραμα Νο 6 αφορά Αλφά με μικρό πορώδες. Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι και σε αυτή την περίπτωση το φορτίο έφτασε μέχρι τα 18kN όπως και στον αντίστοιχο ως

προς το πορώδες πείραμα Νο 4. Αντίστοιχα και οι ακουστικές καταγραφές είναι πολύ περισσότερες και πιο ισχυρές σε σχέση με τα πειράματα σε δοκίμια με μεγάλο πορώδες.

Παρατηρώντας την εξέλιξη του ρεύματος φαίνεται να όμοια με αυτή του αντίστοιχου πειράματος Νο 4 ενώ το ηλεκτρικό ρεύμα φτάνει και σε αυτό το πείραμα σε παρόμοια μέγιστη τιμή (15pA) λίγο πριν τη θραύση.

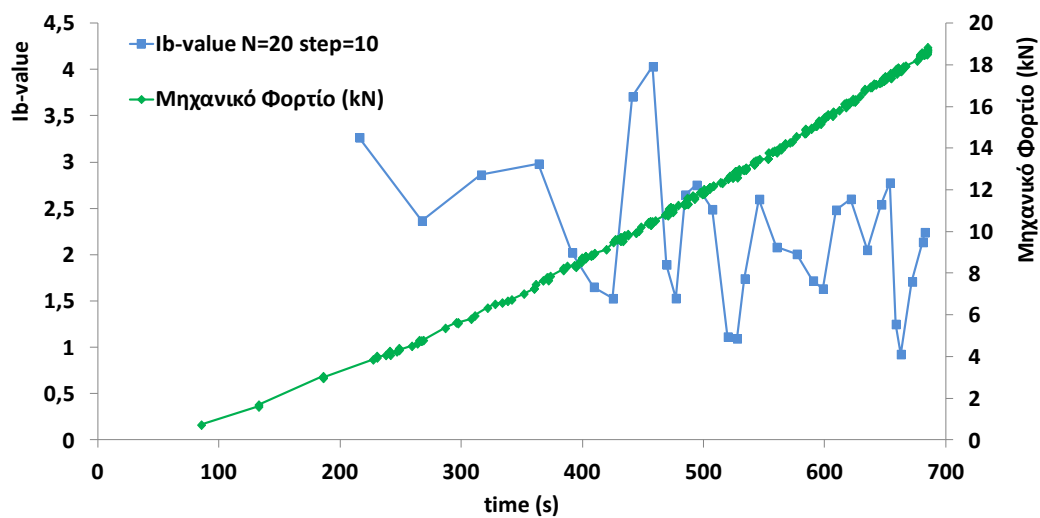
Η ιδιαιτερότητα που εμφανίστηκε σε αυτό το πείραμα ήταν ότι το δοκίμιο κατέρρευσε σε δύο φάσεις. Λίγο δηλαδή πριν την οριστική κατάρρευση με το φορτίο να βρίσκεται στα 17kN συνέβη μια μεγάλη ορατή μακρορωγμή ενώ αμέσως μετά η μακρορωγμή ολοκληρώθηκε με την ολική κατάρρευση του δοκιμίου. Η καταγραφή ηλεκτρικού ρεύματος 60 pA δεν αποτελεί PSC αλλά οφείλεται σε μηχανικό θόρυβο που προκλήθηκε λόγω της πρώτης φάσης κατάρρευσης του δοκιμίου.

Όσον αφορά την I_b -value παρατηρείται και εδώ ότι λίγο πριν την πρώτη μακρορωγμή όσο και πριν την οριστική κατάρρευση του υλικού η τιμή της πέφτει στα χαμηλότερα επίπεδα.

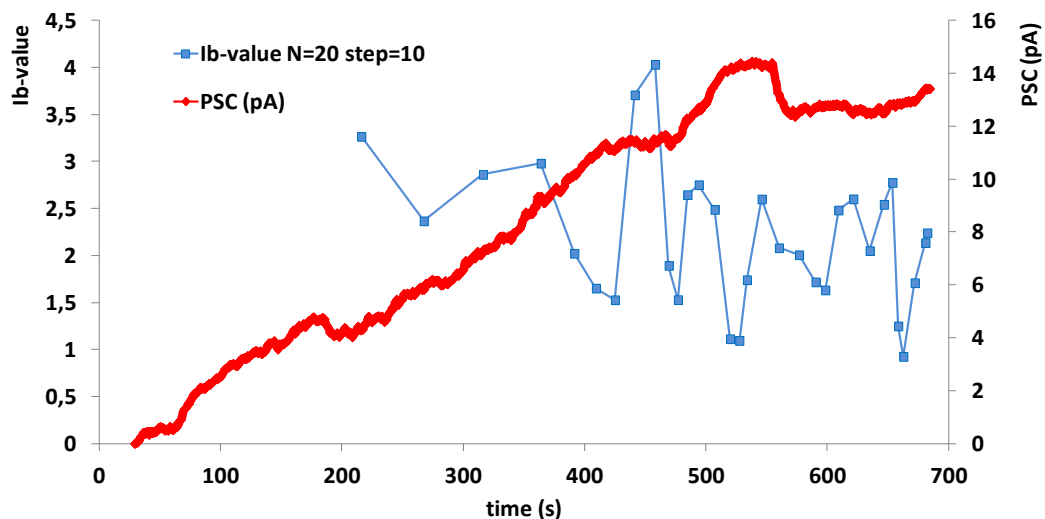
Παράρτημα 2

Αποτύπωση I_b value για διάφορες τιμές των παραμέτρων του βήματος και της ολίσθησης

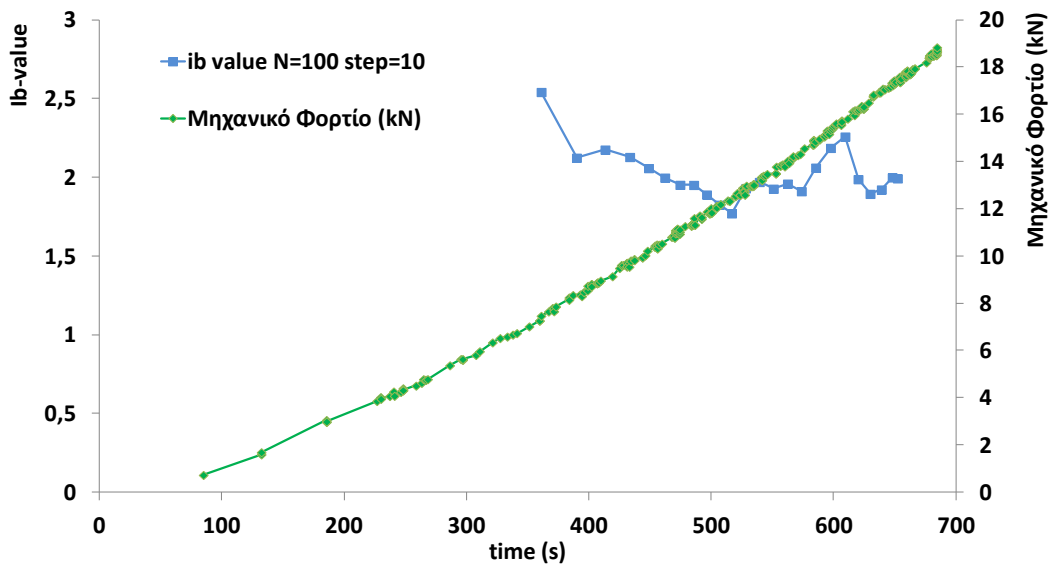
Κατά την μελέτη της I_b -value του πειράματος Νο 4 έγιναν αρκετές δοκιμές ορίζοντας σε διάφορες τιμές τις παραμέτρους του βήματος και της ολίσθησης ώστε να προκύψει ότι καλύτερη απεικόνιση της I_b -value γίνεται όταν οριστεί το πλήθος των γεγονότων $N=200$ και η ολίσθηση $step=10$. Ενδεικτικά στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η χρονική αποτύπωση της I_b -value (μπλε) του μηχανικού φορτίου (πράσινο) και του ηλεκτρικού ρεύματος (κόκκινο) δίνοντας διαφορετικές τιμές στις δύο αυτές παραμέτρους.



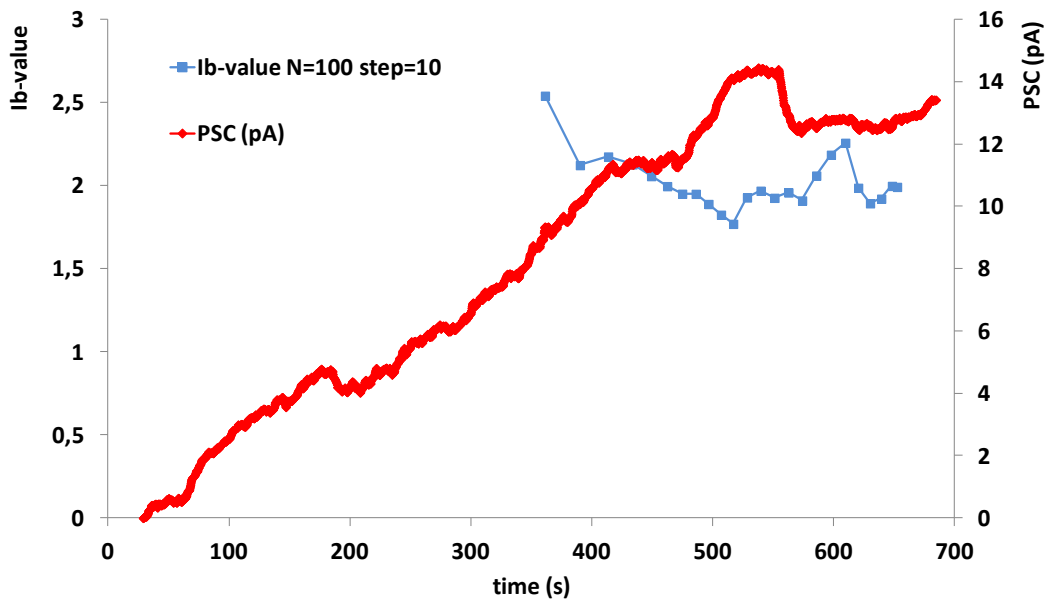
Σχήμα 8: Χρονική καταγραφή μηχανικού φορτίου (πράσινο) και I_b -value (μπλε) με πλήθος $N=20$ και ολίσθηση $step=10$.



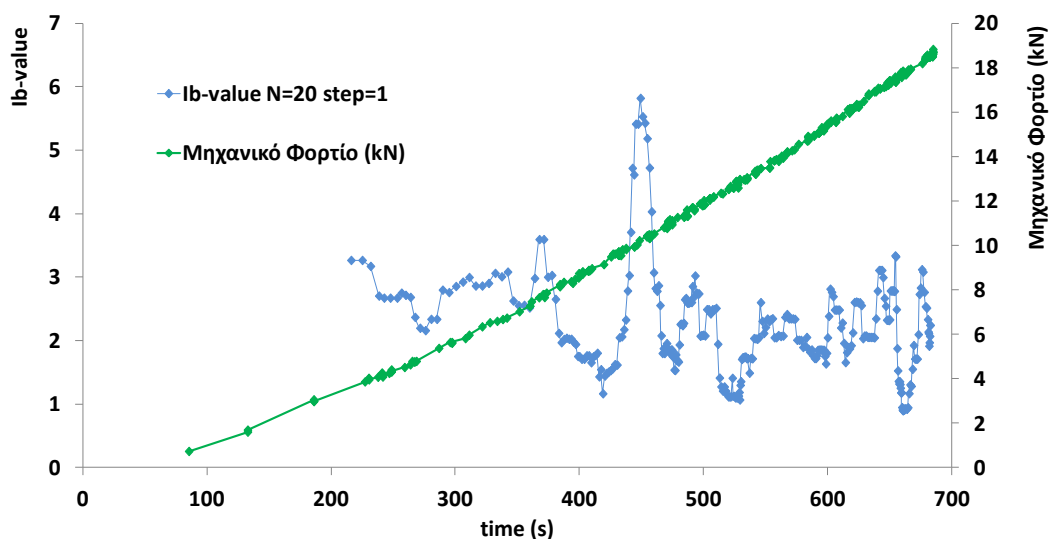
Σχήμα 9: Χρονική καταγραφή ηλεκτρικού ρεύματος (κόκκινο) και I_b -value (μπλε) με πλήθος $N=20$ και ολίσθηση $step=10$.



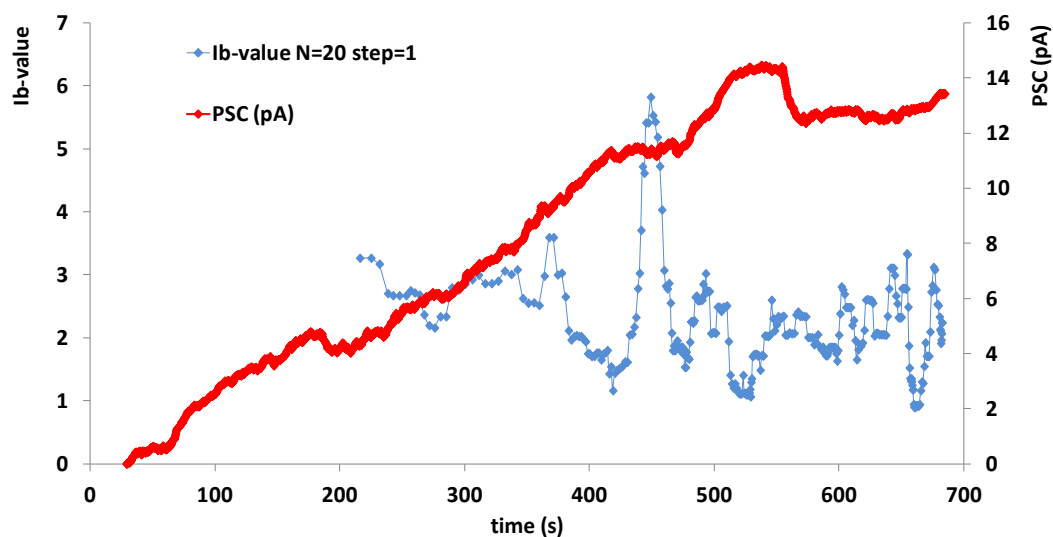
Σχήμα 10: Χρονική καταγραφή μηχανικού φορτίου (πράσινο) και Ib-value (μπλε) με πλήθος $N=100$ και ολίσθηση $step=10$.



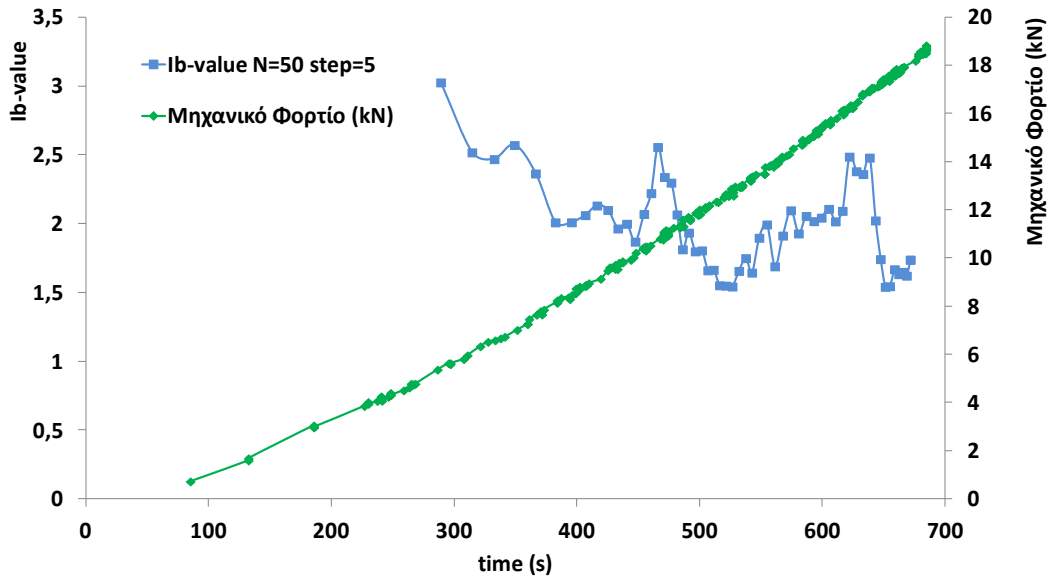
Σχήμα 11: Χρονική καταγραφή ηλεκτρικού ρεύματος (κόκκινο) και Ib-value (μπλε) με πλήθος $N=100$ και ολίσθηση $step=10$.



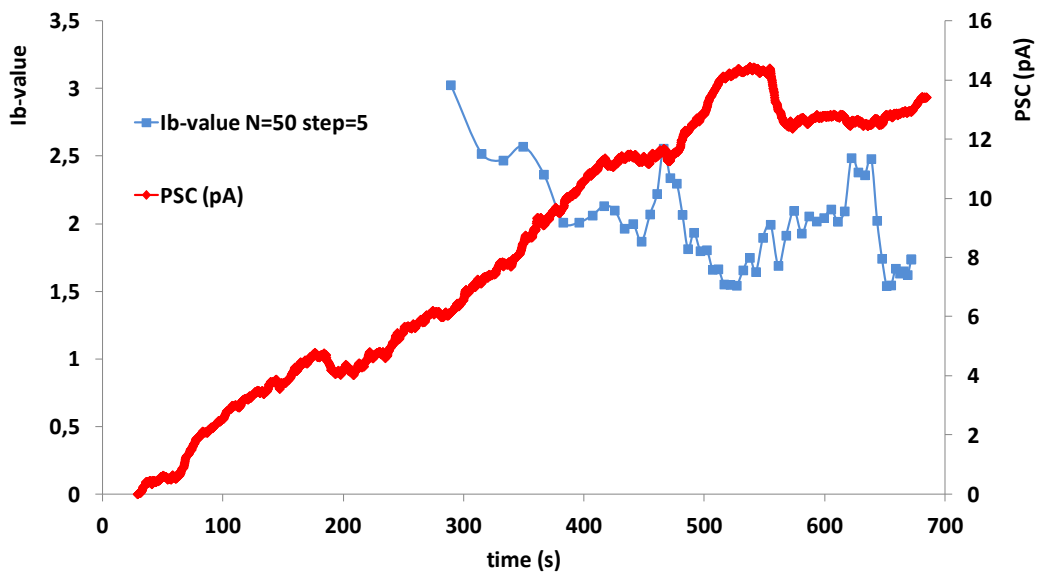
Σχήμα 12: Χρονική καταγραφή μηχανικού φορτίου (πράσινο) και Ib value (μπλε) με πλήθος N=20 και ολίσθηση step=1.



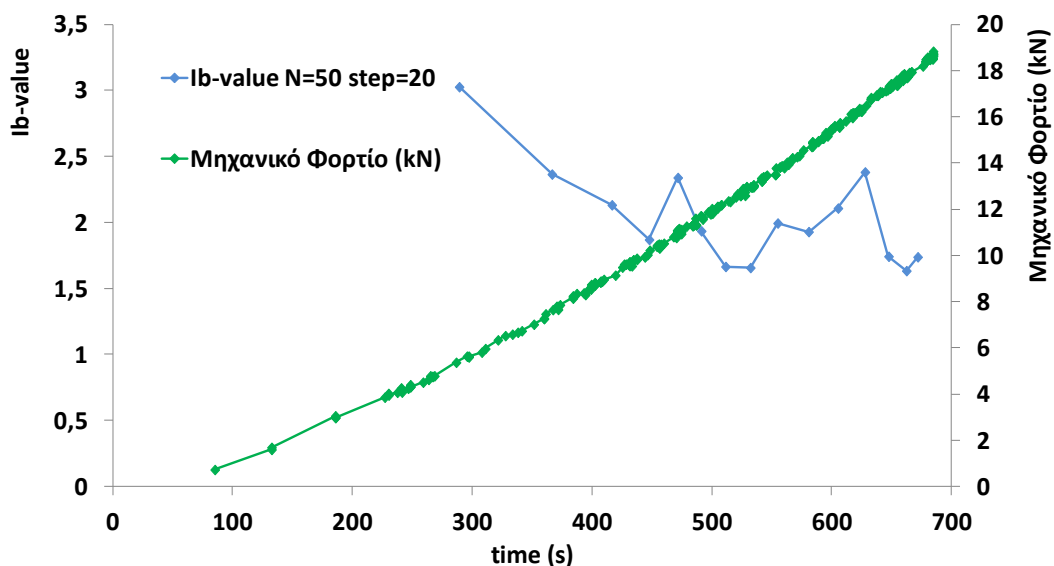
Σχήμα 13: Χρονική καταγραφή ηλεκτρικού ρεύματος (κόκκινο) και Ib value (μπλε) με πλήθος N=20 και ολίσθηση step=1.



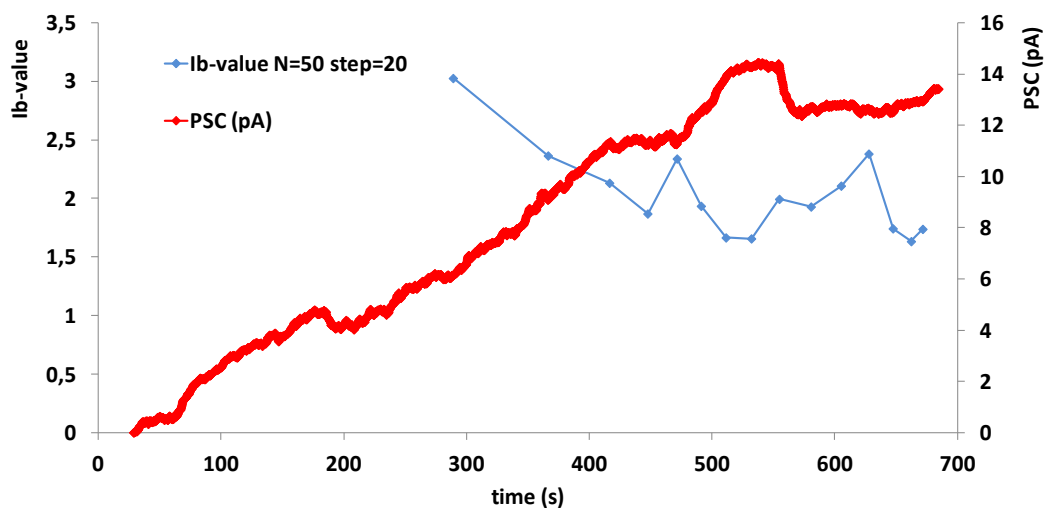
Σχήμα 14: Χρονική καταγραφή μηχανικού φορτίου (πράσινο) και Ib value (μπλε) με πλήθος $N=50$ και ολίσθηση $step=5$.



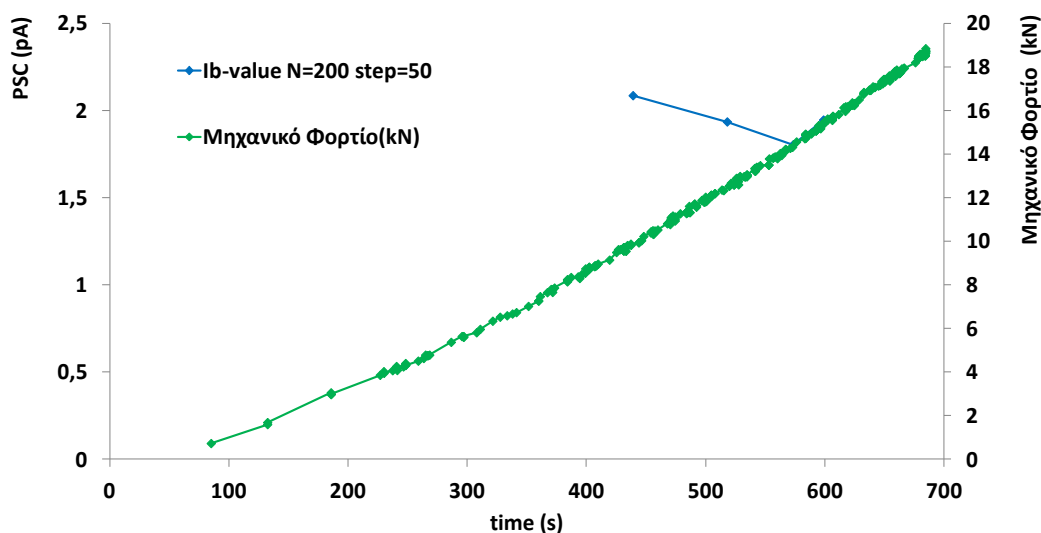
Σχήμα 15: Χρονική καταγραφή ηλεκτρικού ρεύματος (κόκκινο) και Ib value (μπλε) με πλήθος $N=50$ και ολίσθηση $step=5$.



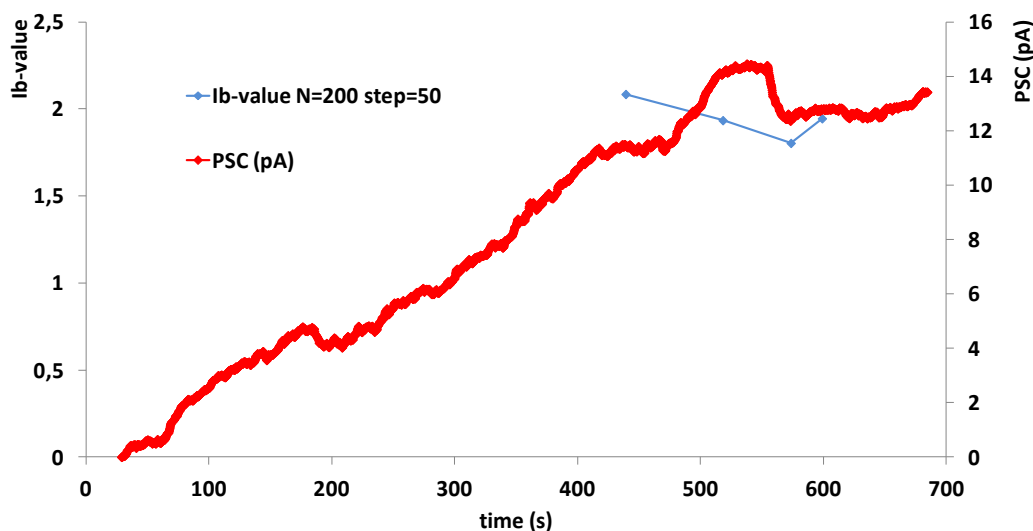
Σχήμα 16: Χρονική καταγραφή μηχανικού φορτίου (πράσινο) και Ib value (μπλε) με πλήθος N=50 και ολίσθηση step=20.



Σχήμα 17: Χρονική καταγραφή ηλεκτρικού ρεύματος (κόκκινο) και Ib value (μπλε) με πλήθος N=50 και ολίσθηση step=20.



Σχήμα 18: Χρονική καταγραφή μηχανικού φορτίου (πράσινο) και Ib value (μπλε) με πλήθος $N=200$ και ολίσθηση $step=50$.



Σχήμα 19: Χρονική καταγραφή ηλεκτρικού ρεύματος (κόκκινο) και Ib value (μπλε) με πλήθος $N=200$ και ολίσθηση $step=50$.

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω Σχήματα εάν η ομάδα των ακουστικών γεγονότων που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η τιμή της Ib-value είναι αρκετά μικρή τότε η συμπεριφορά της δεν μπορεί με σαφήνεια να δείξει έντονα χαρακτηριστικά. Όταν η ομάδα είναι μεγάλη χάνουμε τις τιμές της στα αρχικά στάδια λόγω του μικρού πλήθους ΑΕ σε όλα τα πειράματα κατά το αρχικό στάδιο της πειραματικής διαδικασίας.

Όσον αφορά την ολίσθηση, αν οριστεί πολύ μικρή γίνεται πιο ευαίσθητη στις μικρές μεταβολές. Με αυτό τον τρόπο αναδεικνύονται περισσότερες μικρές μεταβολές και έτσι δίνεται η δυνατότητα στην Ib-value να μπορεί να ανιχνεύει και μικρές τάσεις θραύσης στο εσωτερικό του δοκιμίου μελετώντας την ουσιαστικά σε κάθε της βήμα, για κάθε μια ακουστική εκπομπή ξεχωριστά.

Με πολύ μικρή ολίσθηση δηλαδή κάθε φορά που καταγράφεται μια καινούρια ακουστική εκπομπή γίνεται επανυπολογισμός της Ib-value.

Αν η ολίσθηση οριστεί αρκετά μεγάλη χάνονται αρκετές από τις διακυμάνσεις της Ib-value.
