



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Ζέρβας

Επιβλέπων: Πάυλος Νομικός
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Ζέρβας

Επιβλέπων: Παύλος Νομικός

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις .../07/2016:

Π. Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Α. Σοφιανός, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Κ. Λουπασάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Αθήνα, Ιούλιος 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, μου έδωσε τη δυνατότητα να εμβαθύνω σε μια πολύ σημαντική πτυχή της επιστήμης μου, όπως είναι η κατασκευή των υπογείων έργων, καθώς αποτέλεσε πεδίο εφαρμογής όλου το γνωστικού υπόβαθρο που έλαβα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών.

Θεωρώ υποχρέωσή μου να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους ανθρώπους, η συμβολή των οποίων ήταν καθοριστική για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Νομικό Παύλο, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών που δέχτηκε την εποπτεία της με θέρμη και ενδιαφέρον, διαθέτοντας το χρόνο του, καθώς επίσης και για την καθοριστική συμβολή, καθοδήγηση και υποστήριξη κατά τη διάρκεια πραγματοποίησής της. Πέραν του κ. Νομικού θα ήθελα να ευχαριστήσω τα δύο αξιότιμα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής μου, τον κ. Σοφιανό Αλέξανδρο, Καθηγητή Ε.Μ.Π. της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών και τον κ. Λουπασάκη Κωνσταντίνο, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών για την πολύτιμη παρουσία τους στη δημόσια προφορική εξέταση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Λοτίδη Μιχαήλ, υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και ιδιαίτερα για τη συμπαράσταση και τη διάθεση των γνώσεών του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Σαρρή Μαρία για τις πολύτιμες συμβουλές της κατά τη συγγραφή της διπλωματικής μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Παπαντωνόπουλο Γιώργο Δρ. Μηχανικό Μεταλλείων για την πολύτιμη βοήθεια του στη χρήση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων καθώς και την παράθεση στοιχείων, οδηγών και επιστημονικών γνώσεων καθώς επίσης και τον κ. Κοτσάνη Δημήτριο, υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών για την προμήθεια δικού του εργαστηριακού εξοπλισμού αλλά και των πολύτιμων γνώσεών του.

Η υποδειγματική συνεργασία των παραπάνω ατόμων και η διάθεση τους μοιραστούν μαζί μου τις γνώσεις και το χρόνο τους, ήταν καθοριστική στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένεια μου για την υποστήριξη και ενθάρρυνση καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια προπτυχιακών σπουδών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2014-2016 με θέμα «Καταγραφή Ακουστικής Εκπομπής σε Φυσικά Μοντέλα Μηχανικής Πετρωμάτων».

Στην εργασία αυτή μελετάται η δραστηριότητα της ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) που αναπτύσσεται σε φυσικά μοντέλα με οπή (γύψινα και μαρμάρινα) κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Επιπρόσθετα, μέσω φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης (μέθοδος DIC στα φυσικά μοντέλα μαρμάρου) καθώς επίσης και μέσω μακροσκοπικών παρατηρήσεων κατά τη διάρκεια των δοκιμών στα φυσικά μοντέλα από γύψο, εκτιμήθηκαν οι τιμές της τάσης στις οποίες αναπτύχθηκαν οι ρωγμές γύρω από την οπή. Αυτές οι παρατηρήσεις ήταν πολύ σημαντικές καθώς συνέβαλαν στο συσχετισμό των δεδομένων ΑΕ με τη δημιουργία των ρωγμών.

Στο θεωρητικό μέρος της παρούσας εργασίας αναπτύσσονται σημαντικές θεωρίες θραύσης των ψαθυρών υλικών και συγκεκριμένα της ρωγμάτωσης γύρω από κυκλικά ανοίγματα μέσω αντίστοιχης βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια αναπτύσσονται τα βασικά στοιχεία θεωρίας της ΑΕ καθώς επίσης και ο συσχετισμός που έχει γίνει από τους ερευνητές μεταξύ του επιβαλλόμενου φορτίου σε δοκίμια πετρωμάτων και της ανάπτυξης σημάτων ΑΕ.

Το πειραματικό μέρος χωρίζεται σε δύο μέρη:

- A. Πειράματα σε φυσικά μοντέλα με οπή από γύψο. Τα εν λόγω πειράματα πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να εξοικειωθούμε με τη μελέτη της ΑΕ και να αποκτήσουμε μια ποιοτική αλλά και ποσοτική εικόνα για τα φυσικά φαινόμενα που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια αντίστοιχων δοκιμών.
- B. Πειράματα σε φυσικά μοντέλα με οπή από Μάρμαρο Διονύσου. Οι παρούσες δοκιμές ήταν υψίστης σημασίας καθώς μελετήσαμε τα φαινόμενα της ΑΕ των δοκιμίων σε συνθήκες πραγματικές (λόγω της φύσης του υλικού) και όχι σε ιδανικές συνθήκες ομοιογένειας του υλικού όπως είναι η γύψος.

Τέλος αναλύοντας όλα τα δεδομένα από τις δοκιμές εξάγαμε σημαντικά συμπεράσματα για την θραύση των φυσικών μοντέλων με οπή.

ABSTRACT

This Thesis elaborated within undergraduate studies of « School of Mining and Metallurgical Engineering» during academic years 2014-2015 having as a subject the “Acoustic Emission in Physical Models of Rock Mechanics”.

Here, it is studied the acoustic emission (AE) in physical models with cavities (plaster and marble of Dionysous) via uniaxial compression tests. In addition , via high definition photography (DIC method in physical models) as well as macroscopic observation during plaster models tests, the values of stress (MPa), in which the cracks around the cavities were developed, were estimated. These observations were significant since they contributed to correlation between data (AE) and the cracks' creation.

In the theoretical part of this thesis, it is developed an important crushing brittle material theory. That is, the cracking around circular cavities theory which supported via correspond bibliography. After that, there is a development of the basic elements in theory AE and of the correlation between the load in stone testers and the development of the AE signs, which has been realized by the researchers.

The experimental part consists of two parts:

- A. Experiments in physical plaster models with cavity. These experiments were realized in order for us to be familiarized with the AE study and to acquire a quality and a quantity picture about the natural phenomena that happen during similar tests.
- B. Experiments in physical marble models with cavity. These tests were of major importance since we studied the AE phenomena of the tests in real conditions due to the nature of this retrain material and not in homogeneity conditions such as plaster physical models tests.

In the end, taking everything into account, we came to very important conclusion about the failure of physical models with cavity.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	2
Abstract	3
Περιεχόμενα Πινάκων	7
Περιεχόμενα Σχημάτων.....	11
Περιεχόμενα Εικόνων.....	17
1 ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	21
1.1 Γενικά στοιχεία θεωρίας.....	21
1.2 Η θεωρία του Griffith για την ψαθυρή θραύση.....	23
1.3 Μικρομηχανική της ψαθυρής θραύσης	24
1.3.1 Η σχέση της έναρξης, επέκτασης και συνένωσης ρωγμών με τη στάθμη φόρτισης.....	24
1.3.2 Προσομοιώματα μικρομηχανικής για την έναρξη, επέκταση και συνένωση ρωγμών	26
1.4 Ανακατανομή τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλικά ανοίγματα.....	29
1.5 Η ερμηνεία του φαινομένου από ερευνητές	32
1.5.1 Η ερμηνεία του Carter	33
1.5.2 Η ερμηνεία του Lajtai.....	38
1.5.3 Η προσέγγιση των Ganne, Vervoort και Wevers	41
2 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ	45
2.1 Τα μηχανικά κύματα.....	45
2.2 Ακουστική εκπομπή	47
2.2.1 Ορισμός	47
2.2.2 Βασικές αρχές διάδοσης των ελαστικών κυμάτων.....	48
2.2.3 Σήματα ΑΕ	49
2.2.4 Παράμετροι γεγονότων ΑΕ	51
2.2.5 Συστήματα παρακολούθησης ΑΕ.....	55
2.3 Εφαρμογές της ΑΕ.....	58
2.3.1 Επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου στην ΑΕ.....	58
3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	61
3.1 Εξοπλισμός δοκιμών	61
3.1.1 Μηχανή φόρτισης.....	61
3.1.2 Σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας σημάτων ακουστικής εκπομπής.....	62
3.1.3 Αισθητήρες και προενισχυτές.....	63
3.1.4 Συσκευή υπερήχων.....	64
3.1.5 Λογισμικά.....	65

3.2	Προετοιμασία Φυσικών Μοντέλων.....	66
3.2.1	Εισαγωγή.....	66
3.2.2	Παρασκευή δοκιμίων από γύψο.....	66
3.2.3	Παρασκευή δοκιμίων από μίγμα γύψου-τσιμέντου.....	70
3.2.4	Επιλογή βέλτιστης αναλογίας.....	71
3.3	Παρασκευή γύψινων φυσικών μοντέλων με οπές.....	76
4	ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΥΨΟΥ ΜΕ ΟΠΗ.....	80
4.1	Εισαγωγή.....	80
4.2	Ανάλυση δεδομένων ακουστικής εκπομπής μέσω του λογισμικού Noesis.....	81
4.2.1	Ποσοτική ανάλυση των χαρακτηριστικών των σημάτων.....	81
4.2.2	Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους.....	82
4.3	Συσχετισμός ΑΕ με το επιβαλλόμενο φορτίο.....	84
4.3.1	1 ^η πλάκα με οπή (1,5 cm).....	86
4.3.2	2 ^η πλάκα με οπή (1,5 cm).....	86
4.3.3	3 ^η πλάκα με οπή (1,5 cm).....	95
4.3.4	1 ^η πλάκα με οπή (2,1 cm).....	103
4.3.5	2 ^η πλάκα με οπή (2,1 cm).....	111
4.3.6	3 ^η πλάκα με οπή (2,1 cm).....	119
4.3.7	1 ^η πλάκα με οπή (2,8 cm).....	127
4.3.8	2 ^η πλάκα με οπή (2,8 cm).....	135
4.3.9	3 ^η πλάκα με οπή (2,8 cm).....	143
4.3.10	1 ^η πλάκα χωρίς οπή.....	152
4.3.11	2 ^η πλάκα χωρίς οπή.....	154
4.3.12	3 ^η πλάκα χωρίς οπή.....	157
5	ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΜΕ ΟΠΗ.....	159
5.1	Εισαγωγή.....	159
5.2	Χαρακτηρισμός του υλικού.....	160
5.2.1	Μηχανικά χαρακτηριστικά του Μάρμαρου Διονύσου.....	160
5.2.2	Μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων στα δοκίμια.....	161
5.3	Ρυθμίσεις παραμέτρων στο πρόγραμμα ΑΕ win.....	161
5.4	Ανάλυση των δοκιμών.....	162
5.4.1	Ανάλυση της ρωγμάτωσης των δοκιμίων μέσω ψηφιακής ανάλυσης εικόνων (DIC).....	162
5.4.2	Ανάλυση δεδομένων ακουστικής εκπομπής μέσω του λογισμικού Noesis.....	162
5.5	Συσχετισμός ΑΕ με το επιβαλλόμενο φορτίο.....	163
5.5.1	1 ^η πλάκα με οπή (1,5 cm).....	163
5.5.2	2 ^η πλάκα με οπή (1,5 cm).....	168

5.5.3	1 ^η πλάκα με οπή (3 cm)	174
5.5.4	2 ^η πλάκα με οπή (3 cm)	181
5.5.5	1 ^η πλάκα με οπή (4 cm)	187
5.5.6	2 ^η πλάκα με οπή (4 cm)	193
5.5.7	1 ^η πλάκα με οπή (3.4 cm)	197
5.5.8	2 ^η πλάκα με οπή (3.4 cm)	204
5.5.9	3 ^η πλάκα με οπή (3,4 cm)	211
5.5.10	1 ^η πλάκα με οπή (5 cm)	217
5.5.11	2 ^η πλάκα με οπή (5 cm)	223
5.5.12	1 ^η πλάκα χωρίς οπή.....	230
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	232
6.1	Πειράματα θλίψης σε γύψινα φυσικά μοντέλα με οπή.....	232
6.1.1	Επεξήγηση της δραστηριότητας ΑΕ.....	232
6.1.2	Συσχετισμός μεταξύ διαμέτρου οπής και τάσης.....	232
6.2	Πειράματα θλίψης σε φυσικά μοντέλα με οπή από Μάρμαρο Διονύσου	234
6.2.1	Επεξήγηση της δραστηριότητας ΑΕ.....	234
6.2.2	Συσχετισμός μεταξύ διαμέτρου οπής και τάσης.....	235
6.3	Προτάσεις για μελλοντικά πειράματα	237
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	238
7.1	Ελληνική.....	238
7.2	Ξένη.....	238

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

A/A	Τίτλος Πίνακα	Σελίδα
1	Γύψινα δοκίμια 1 ^{ης} Ομάδας	69
2	Γύψινα δοκίμια 2 ^{ης} Ομάδας	69
3	Γύψινα δοκίμια 3 ^{ης} Ομάδας	69
4	Γύψινα δοκίμια 4 ^{ης} Ομάδας	69
5	Δοκίμια από μίγμα γύψου-τσιμέντου 1 ^{ης} Ομάδας	70
6	Δοκίμια από μίγμα γύψου-τσιμέντου 2 ^{ης} Ομάδας	71
7	Μηχανικά χαρακτηριστικά των γύψινων δοκιμίων που προέκυψαν από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης	72
8	Μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων (από μίγμα γύψου-τσιμέντου) που προέκυψαν από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης	73
9	Δοκίμια Brazilian από γύψο και από μίγμα (γύψου-τσιμέντου)	73
10	Αντοχή των γύψινων δοκιμίων σε εφελκυσμό που προέκυψαν από τις δοκιμές Brazilian	75
11	Αντοχή των δοκιμίων (από μίγμα γύψου-τσιμέντου) σε εφελκυσμό που προέκυψαν από τις δοκιμές Brazilian	75
12	Μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των φυσικών μοντέλων με οπή	76
13	Πλάκες με οπή 1 ^{ης} Ομάδας	77
14	Πλάκες με οπή 2 ^{ης} Ομάδας	77
15	Πλάκες με οπή 3 ^{ης} Ομάδας	78
16	Πλάκες με οπή 4 ^{ης} Ομάδας	78
17	Πλάκες με οπή 5 ^{ης} Ομάδας	78
18	Πλάκες με οπή 6 ^{ης} Ομάδας	78
19	Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	88
20	Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	89
21	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	91
22	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	92
23	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	93
24	Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	96
25	Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	98

26	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	99
27	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	100
28	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	101
29	Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	104
30	Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	106
31	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	107
32	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	108
33	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	109
34	Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win [Πλάκα 2 ^η με οπή 2.1 cm]	112
35	Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	114
36	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	115
37	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	116
38	Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win [Πλάκα 3 ^η με οπή 2.1 cm]	120
39	Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	122
40	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	123
41	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	124
42	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	125
43	Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	128
44	Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	130
45	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	131
46	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	132
47	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	133
48	Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	136

49	Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	138
50	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	139
51	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	140
52	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	141
53	Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,8 cm]	145
54	Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,8 cm]	146
55	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,8 cm]	148
56	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,8 cm]	149
57	Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2 ^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,8 cm]	150
58	Μηχανικά Χαρακτηριστικά του Μάρμαρου Διονύσου	160
59	Ταχύτητες διάδοσης διατμητικών (V_s) και διαμήκων κυμάτων (V_p) υπερήχων στην πλάκα (χωρίς οπή) από Μάρμαρο Διονύσου	161
60	Το Layout όλων των δοκιμών από το πρόγραμμα AE win	161
61	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 1,5 cm]	165
62	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	170
63	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3 cm]	176
64	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 3 cm]	183
65	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 4 cm]	189
66	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3,4 cm]	199
67	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 3,4 cm]	206
68	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 3 ^η με οπή 3,4 cm]	213
69	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 1 ^η με οπή 5 cm]	219
70	Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής [Πλάκα 2 ^η με οπή 5 cm]	225

71	Επεξήγηση του υπομνήματος του Σχήματος 167	233
72	Επεξήγηση του υπομνήματος του Σχήματος 168	235

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

A/A	Τίτλος Σχήματος	Σελίδα
1	Η ενέργεια παραμόρφωσης και η πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης	24
2	Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης που δείχνει τα στάδια εξέλιξης των ρωγμών (Martin et al) και σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών επιπέδων τάσης έναρξης, επέκτασης και συνένωσης των ρωγμών	25
3	Διάγραμμα αξονικού φορτίου-παραμόρφωσης. Η επιτάχυνση της επέκτασης της παραμόρφωσης, σηματοδοτεί την έναρξη των απομονωμένων ρωγμών. Η εκτροπή στο σημείο της αρχικής παραμόρφωσης υποδηλώνει ανακούφιση τάσεων και παραμορφώσεων	33
4	Διαγράμματα a) αθροιστικής ενέργειας σε συνάρτηση με το φορτίο και b) παραγώγου αθροιστικής ενέργειας προς το φορτίο σε συνάρτηση με το φορτίο $f_{ae} =$ πρώτο σήμα AE, $c_i =$ Αρχή συστηματικής εξέλιξης ρωγμών, $c_s =$ Αλληλεπίδραση και συνένωση ρωγμών	43
5	Διάγραμμα αθροιστικής ενέργειας σε συνάρτηση με το φορτίο	44
6	Αριστερά: Το κύμα στην πηγή ως ένας εντατικός παλμός τάσης που αντιστοιχεί σε μία μόνιμη ζημία του υλικού Δεξιά: Γωνιακή εξάρτηση της AE που εκπέμπεται από μια επεκτεινόμενη μικρορωγμή. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας κατευθύνεται στις 90ο και 270ο, κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής	48
7	Μεταβολή του ρυθμού AE συναρτήσει με $p/pult$	58
8	Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής AE και (β) συσχέτισή της με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.	59
9	Διάγραμμα συχνότητας συναρτήσει του πλάτους για το γρανίτη Westerly υπό μονοαξονική θλίψη.	60
10	Παράδειγμα των βοηθητικών σημείων στην καμπύλη τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης	84
11	Παράδειγμα γραφήματος με τη χρωματική διαβάθμιση της τάσης και των δεδομένων της ακουστικής εκπομπής	85
12	Παράδειγμα του ρυθμού ανάπτυξης των σημάτων μέσω των ευθύγραμμων τμημάτων	85
13	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	86
14	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	87
15	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	87
16	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	88
17	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	89
18	Σήματα 0 Κλάσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	91
19	Σήματα 1ης Κλάσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	92
20	Σήματα 2ης Κλάσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	93
21	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	95
22	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 3η με οπή 1,5 cm]	95

23	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	96
24	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	97
25	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	97
26	Σήματα 0 Κλάσης [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	99
27	Σήματα 1ης Κλάσης [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	100
28	Σήματα 2ης Κλάσης [Πλάκα 3 ^η με οπή 1,5 cm]	101
29	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	103
30	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	103
31	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	104
32	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	105
33	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	105
34	Σήματα 0 Κλάσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	107
35	Σήματα 1ης Κλάσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	108
36	Σήματα 2ης Κλάσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,1 cm]	109
37	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	111
38	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	111
39	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	112
40	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	113
41	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	113
42	Σήματα 0 Κλάσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	115
43	Σήματα 1ης Κλάσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	116
44	Σήματα 2ης Κλάσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,1 cm]	117
45	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	119
46	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	119
47	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	120
48	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	121
49	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	122
50	Σήματα 0 Κλάσης [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	123
51	Σήματα 1ης Κλάσης [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	124
52	Σήματα 2ης Κλάσης [Πλάκα 3 ^η με οπή 2,1 cm]	125
53	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	127
54	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	127
55	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	128
56	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	129

57	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	129
58	Σήματα 0 Κλάσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	131
59	Σήματα 1ης Κλάσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	132
60	Σήματα 2ης Κλάσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 2,8 cm]	133
61	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	135
62	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	135
63	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	136
64	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	137
65	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	137
66	Σήματα 0 Κλάσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	139
67	Σήματα 1ης Κλάσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	140
68	Σήματα 2ης Κλάσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 2,8 cm]	141
69	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 3η με οπή 2,8 cm]	143
70	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 3η με οπή 2,8 cm]	144
71	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 3η με οπή 2,8 cm]	144
72	Σήματα 0 Κλάσης [Πλάκα 3η με οπή 2,8 cm]	145
73	Σήματα 1ης Κλάσης [Πλάκα 3η με οπή 2,8 cm]	146
74	Σήματα 2ης Κλάσης [Πλάκα 3η με οπή 2,8 cm]	148
75	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 3η με οπή 2,8 cm]	149
76	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 3η με οπή 2,8 cm]	150
77	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου [Πλάκα 1η χωρίς οπή]	152
78	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 1η χωρίς οπή]	152
79	Διάγραμμα ανάπτυξης των σημάτων κατά τη δοκιμή [Πλάκα 1η cm χωρίς οπή]	153
80	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1η χωρίς οπή]	153
81	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου [Πλάκα 2 ^η χωρίς οπή]	154
82	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 2 ^η χωρίς οπή]	155
83	Διάγραμμα ανάπτυξης των σημάτων κατά τη δοκιμή [Πλάκα 2 ^η cm χωρίς οπή]	155
84	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2η χωρίς οπή]	156
85	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου [Πλάκα 3 ^η χωρίς οπή]	157
86	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 3 ^η χωρίς οπή]	157
87	Διάγραμμα ανάπτυξης των σημάτων κατά τη δοκιμή [Πλάκα 3 ^η cm χωρίς οπή]	158
88	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 3 ^η χωρίς οπή]	158
89	Παράδειγμα της καταγεγραμμένης δραστηριότητας ΑΕ μέσω ευθύγραμμων	

	τμημάτων. Διακρίνονται τα κάθετα ευθύγραμμα τμήματα (P_U άνω εφελκυστική ρωγή, P_D κάτω εφελκυστική ρωγή, S_L αποφλοιώσεις αριστερά της οπής, S_R αποφλοιώσεις δεξιά της οπής)	162
90	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 1,5 cm]	163
91	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 1,5 cm]	163
92	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 1,5 cm]	164
93	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 1 ^η με οπή 1,5 cm]	164
94	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 1,5 cm]	165
95	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 1,5 cm]	166
96	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 1,5 cm]	166
97	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	168
98	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	168
99	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	169
100	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	169
101	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	170
102	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	171
103	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 1,5 cm]	172
104	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 3 cm]	174
105	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 3 cm]	174
106	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 3 cm]	175
107	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3 cm]	175
108	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3 cm]	176
109	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3 cm]	177
110	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3 cm]	178
111	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 3 cm]	181
112	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 3 cm]	181
113	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 3 cm]	182
114	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 2 ^η με οπή 3 cm]	182
115	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 3 cm]	183
116	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 3 cm]	184
117	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 3 cm]	185
118	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 4 cm]	187

119	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 4 cm]	187
120	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 4 cm]	188
121	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 1 ^η με οπή 4 cm]	188
122	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 4 cm]	189
123	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 4 cm]	190
124	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 4 cm]	191
125	Εμφάνιση όλων των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 4 cm]	193
126	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής Πλάκα 2 ^η με οπή 4 cm]	193
127	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 4 cm]	194
128	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 3,4 cm]	197
129	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 3,4 cm]	197
130	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 3,4 cm]	198
131	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3,4 cm]	198
132	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3,4 cm]	199
133	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3,4 cm]	201
134	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3,4 cm]	201
135	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 3,4 cm]	204
136	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 3.4 cm]	204
137	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 3,4 cm]	205
138	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 2 ^η με οπή 3.4 cm]	205
139	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 3.4 cm]	206
140	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 3.4 cm]	207
141	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 3.4 cm]	208
142	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 3 ^η με οπή 3.4 cm]	211
143	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 3 ^η με οπή 3.4 cm]	211
144	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 3 ^η με οπή 3,4 cm]	212
145	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 3 ^η με οπή 3.4 cm]	212
146	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 3 ^η με οπή 3.4 cm]	213
147	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 3 ^η με οπή 3.4 cm]	214
148	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 3 ^η με οπή 3.4 cm]	215
149	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 5 cm]	217

150	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 1 ^η με οπή 5 cm]	217
151	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 1 ^η με οπή 5 cm]	218
152	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 1 ^η με οπή 5 cm]	218
153	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 5 cm]	219
154	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 5 cm]	220
155	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 1 ^η με οπή 5 cm]	221
156	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 5 cm]	223
157	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα 2 ^η με οπή 5 cm]	223
158	Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου [Πλάκα 2 ^η με οπή 5 cm]	224
159	Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής [Πλάκα 2 ^η με οπή 5 cm]	224
160	Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 5 cm]	225
161	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 5 cm]	226
162	Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα 2 ^η με οπή 5 cm]	227
163	Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου [Πλάκα χωρίς οπή]	230
164	Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης [Πλάκα χωρίς οπή]	230
165	Διάγραμμα ανάπτυξης των σημάτων κατά τη δοκιμή. Ο άξονας y του παραμετρικού δηλώνει την τάση [Πλάκα χωρίς οπή]	231
166	Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής [Πλάκα χωρίς οπή]	231
167	Συσχετισμός μεταξύ διαμέτρου οπής και τάσης των γύψινων φυσικών μοντέλων με οπή	232
168	Συσχετισμός μεταξύ διαμέτρου οπής και τάσης των μαρμάρινων φυσικών μοντέλων με οπή	234

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

A/A	Τίτλος Εικόνας	Σελίδα
1	Μακροσκοπικοί τύποι θραύσης του πετρώματος που παρατηρούνται σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης: (α) διατμητική θραύση υπό γωνία προς τη διεύθυνση της αξονικής τάσης, (β) αξονικός διαχωρισμός του δοκιμίου	22
2	Μακροσκοπική θραύση δοκιμίου πετρώματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Η θραύση αναπτύχθηκε παράλληλα προς την αξονική θλιπτική τάση	22
3	Έναρξη και διάδοση πλευρικών μικρορωγμών στα άκρα προϋπάρχουσας ολισθαίνουσας μικρορωγμής	26
4	Διάφορα εξιδανικευμένα μοντέλα για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης των μικρορωγμών στο πέτρωμα	28
5	Οι θραύσεις που αναπτύσσονται γύρω από μια κυκλική οπή σε φυσικό μοντέλο πετρώματος κατά την μονοαξονική θλίψη	32
6	Το δοκίμιο γρανίτη με τις θέσεις εγκατάστασης των strain gauges. Αυτά που φαίνονται μέσα στην οπή τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό της τοίχωμα	35
7	Αρχικές	37
8	Απομακρυσμένες	37
9	Θλιπτικές	37
10	Μορφές θραύσης, T1:Πρωτογενείς ρωγμές, NS:κάθετες διατμητικές ρωγμές, IS:Ρωγμές διάτμησης με κλίση, T2:δευτερογενείς εφελκύστηκες ρωγμές	38
11	α) Ρωγμάτωση πριν τη θραύση γύψινου δοκιμίου με χαμηλή πλευρική πίεση όπου οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές έχουν ενωθεί με τις πλάγιες διατμητικές β) Δοκίμιο γύψου που έχει αστοχήσει σε θλίψη με μικρή πλευρική πίεση και χωρίς την ανάπτυξη πλάγιων διατμητικών ρωγμών	40
12	Πειραματικά αποτελέσματα και θεωρητική καμπύλη φορτίου - διαμέτρου σε δοκίμια με κυκλικά ανοίγματα κάτω από μονοαξονική θλίψη	41
13	Γεωμετρία δοκιμίων και θέση τοποθέτησης των αισθητήρων	42
14	Οι δυο διευθύνσεις φόρτισης των δοκιμίων	42
15	Πάνω: Διαμήκη κύματα, Κάτω :Εγκάρσια κύματα	45
16	Τρόπος λειτουργίας του συστήματος ακουστικής εκπομπής)	49
17	Δύο μορφές σήματος ΑΕ α) Κρουστικό σήμα ΑΕ β) Συνεχές σήμα ΑΕ	50
18	Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και οι βασικοί της παράμετροι	51
19	Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της PAC	56
20	Κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου	56
21	Πιστοποιητικό βαθμονόμησης αισθητήρων micro 100S .PAC	56
22	Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ	57
23	Σερβοϋδραυλική μηχανή του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων στο Ε.Μ.Π.	61
24	Πλαίσιο μονοαξονικής θλίψης με έμβολο δυναμικότητας 250 kN	62

25	Αισθητήρας MICRO 100-S	63
26	Διαστάσεις αισθητήρα MICRO 100-S	63
27	Calibration Chart	67
28	Προενισχυτές τύπου PAC 2/4/6 στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων στο Ε.Μ.Π.	64
29	Pundit	65
30	Κυλινδρικό γύψινο δοκίμιο διαστάσεων 12 x 5,5 cm	67
31	Ογκομετρικός σωλήνας γύψου	67
32	Ογκομετρικός σωλήνας νερού	67
33	Πλαστικό μπουκάλι και πλαστικός σωλήνας για την ανάδευση του υλικού	67
34	Έκχυση μίγματος στα καλούπια	68
35	Φούρνος ξήρανσης υλικού	68
36	Κυλινδρικό δοκίμιο από μείγμα γύψου-τσιμέντου διαστάσεων 12 x 5,5 cm	70
37	Διάταξη μονοαξονικής θλίψης	71
38	Τα κυλινδρικά δοκίμια ύστερα απ τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης	72
39	Δοκίμια μορφής δίσκου (Brazilian)	74
40	Δοκιμή Brazilian	74
41	Θραυσμένα δοκίμια μορφής δίσκου (Brazilian)	75
42	Τετραγωνικά καλούπια διαστάσεων 15 x 15 x 4 cm	76
43	Μαρκαδόρος διαμέτρου 1,5 cm	77
44	Κόλλα UHU διαμέτρου 2,1 cm	77
45	Μαρκαδόρος διαμέτρου 2,8 cm	77
46	Γύψινο φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 1,5 cm (x3)	79
47	Γύψινο φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 2,1 cm (x3)	79
48	Γύψινο φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 2,1 cm (x3)	79
49	Γύψινο φυσικό μοντέλο χωρίς οπή (x3)	79
50	Τυπική διάταξη μονοαξονικής θλίψης γύψινου φυσικού μοντέλου με οπή. Το πλαίσιο θλίψης στο οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι δοκιμές ήταν το πλαίσιο με έμβολο δυναμικότητας 250 kN .Στην εικόνα διακρίνονται το εμπρόσθιο βελόμετρο για τη μέτρηση της ανύψωσης της κάτω χαλύβδινης πλάκας καθώς επίσης και οι αισθητήρες της εμπρόσθιας όψης της πλάκας	81
51	Σήματα 0 Κλάσης	83
52	Σήματα 1 ^{ης} Κλάσης	83
53	Σήματα 2 ^{ης} Κλάσης	83
54	Αρχικές ζώνες ρωγμάτωσης [2 ^η γύψινη πλάκα με οπή 1,5 cm]	94
55	Δευτερογενές επίπεδο ρωγμάτωσης της πλάκας [2 ^η γύψινη πλάκα με οπή 1,5 cm]	94
56	Ρωγμάτωση του δοκιμίου [3 ^η γύψινη πλάκα με οπή 1,5 cm]	102
57	Εφελκυστικές και θλιπτικές ζώνες ρωγμάτωσης [1 ^η γύψινη πλάκα με οπή 2,1 cm]	110
58	Εφελκυστικές και θλιπτικές ζώνες ρωγμάτωσης του δοκιμίου [2 ^η γύψινη πλάκα με	

	οπή 2,1 cm]	118
59	Εφελκυστικές και θλιπτικές ζώνες ρωγμάτωσης [3 ^η γύψινη πλάκα με οπή 2,1 cm]	126
60	Επίπεδα ρωγμάτωσης [3 ^η γύψινη πλάκα με οπή 2,1 cm]	126
61	Δημιουργία εφελκυστικών και διατμητικών ρωγμών [1 ^η γύψινη πλάκα με οπή 2,8 cm]	134
62	Επίπεδα θραύσεων του δοκιμίου [1 ^η γύψινη πλάκα με οπή 2,8 cm]	134
63	Εφελκυστικές και θλιπτικές ζώνες ρωγμάτωσης [2 ^η γύψινη πλάκα με οπή 2,8 cm]	142
64	Θραύση του δοκιμίου στη μέση λόγω εφελκυστικής ρωγμής [2 ^η γύψινη πλάκα με οπή 2,8 cm]	142
65	Επιφάνειες θραύσης του δοκιμίου [3 ^η γύψινη πλάκα με οπή 2,8 cm]	151
66	Θραύση της 1 ^{ης} πλάκας χωρίς οπή	154
67	Θραύση της 2 ^{ης} πλάκας χωρίς οπή υπό διάτμηση	156
68	Θραύση της 3 ^{ης} πλάκας χωρίς οπή	158
69	Κάτοψη της κάτω χαλύβδινης πλάκας της μηχανής φόρτισης στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των βελομέτρων	159
70	Τυπική διάταξη μονοαξονικής θλίψης των φυσικών μοντέλων με οπή από μάρμαρο Διονύσου	160
71	Μέτρηση των κυμάτων υπερήχων (V_P και V_S)	161
72	Διατμητική θραύση του δοκιμίου [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 1,5 cm]	167
73	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 1,5 cm]	167
74	Αστοχία του δοκιμίου στα όρια της σχιστότητας [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 1,5 cm]	172
75	Επίπεδα αστοχίας του δοκιμίου [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 1,5 cm]	173
76	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 1,5 cm]	173
77	Εφελκυστικές και θλιπτικές ρωγματώσεις του δοκιμίου [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3 cm]	178
78	Θραύση του δοκιμίου [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3 cm]	179
79	Επίπεδα αστοχίας του δοκιμίου [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3 cm]	180
80	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3 cm]	180
81	Ρωγμάτωση στα όρια της σχιστότητας του μαρμάρου [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3 cm]	185
82	Ρωγμάτωση στα όρια της σχιστότητας του μαρμάρου [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3 cm]	185
83	Ρωγμάτωση στην οπή του δοκιμίου [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3 cm]	186
84	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι	

	ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3 cm]	186
85	Επίπεδα αστοχίας του δοκιμίου [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 4 cm]	192
86	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 4 cm]	192
87	Χαρακτηριστική αποκόλληση της σχιστότητας του μαρμάρου μέσω εφελκυσμού [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 4 cm]	195
88	Επίπεδα αστοχίας εντός της οπής [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 4 cm]	195
89	Αποκόλληση της σχιστότητας μέσω εφελκυσμού [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 4 cm]	196
90	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 4 cm]	196
91	Αστοχία του δοκιμίου στα όρια της σχιστότητας του δοκιμίου [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3,4 cm]	202
92	Ρωγμάτωση εντός της οπής [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3,4 cm]	203
93	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3,4 cm]	203
94	Ρωγμάτωση στα όρια της σχιστότητας [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3,4 cm]	208
95	Αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3,4 cm]	209
96	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3,4 cm]	210
97	Ρωγμάτωση παράλληλα στη σχιστότητα του δοκιμίου [3 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3,4 cm]	215
98	Αστοχία παράλληλα στη σχιστότητα του δοκιμίου [3 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3,4 cm]	216
99	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [3 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 3,4 cm]	216
100	Επίπεδα αστοχίας του δοκιμίου [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 5 cm]	222
101	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [1 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 5 cm]	222
102	Αστοχία στα όρια της σχιστότητας του δοκιμίου [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 5 cm]	228
103	Αστοχία του δοκιμίου σε διάτμηση [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 5 cm]	228
104	Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη [2 ^η μαρμάρινη πλάκα με οπή 5 cm]	229
105	Αστοχία της πλάκας (χωρίς οπή) σε διάτμηση	231

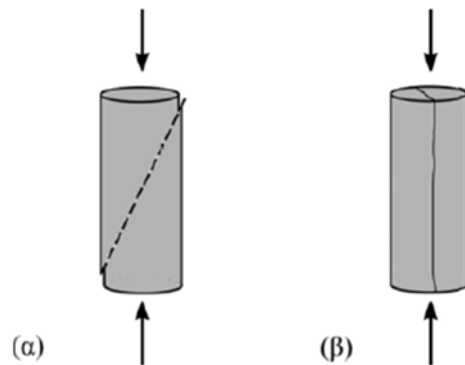
1 ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

Η συμπεριφορά των περισσότερων πετρωμάτων υπό μονοαξονική θλίψη χαρακτηρίζεται κυρίως ως ψαθυρή. Η ψαθυρή θραύση του πετρώματος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα διακριτό φαινόμενο της διαδικασίας καταστροφής του κατά το οποίο λαμβάνει χώρα αστοχία του πετρώματος με θραύση χωρίς να υπάρχει σημαντική παραμόρφωση και χωρίς προηγούμενη προειδοποίηση. Αυτή η θεώρηση είναι φυσικά υπεραπλουστευμένη, καθώς δεν περιλαμβάνει ούτε ερμηνεύει τους φυσικούς μηχανισμούς που οδηγούν το πέτρωμα σε θραύση. Είναι όμως συχνά επαρκής από φαινομενολογική άποψη, και ειδικότερα όταν το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στον τρόπο της θραύσης και στην κορυφαία αντοχή του πετρώματος, η οποία χρησιμοποιείται στην τεχνική μηχανική πετρωμάτων για το σχεδιασμό των μεταλλευτικών και τεχνικών έργων (Paterson & Wong, 2005).

Δύο μορφές θραύσης παρατηρούνται σε εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης: (α) διατμητική θραύση (Εικόνα 1) κατά την οποία η επιφάνεια της θραύσης σχηματίζεται υπό γωνία μικρότερη των 45° ως προς τη θλιπτική αξονική τάση, ενώ η σχετική μετακίνηση είναι παράλληλη στην επιφάνεια της θραύσης, (β) εφελκυστική θραύση (Εικόνα 1), η οποία χαρακτηρίζεται από διαχωρισμό κάθετα στην επιφάνεια θραύσης.

Η διατμητική θραύση είναι ο επικρατέστερος τύπος μακροσκοπικής θραύσης στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Εμφανίζεται συχνά και σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Η γωνία κλίσης της επιφάνειας της θραύσης, ως προς τη θλιπτική αξονική τάση, συσχετίζεται συχνά με τη γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος. Εντούτοις, τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι δεν υπάρχει απόλυτη αντιστοιχία. Έχει δε διατυπωθεί και η άποψη ότι η κλίση της επιφάνειας της θραύσης καθορίζεται από την έφεση της να διατρέξει διαγώνια το δοκίμιο του πετρώματος, υπό την πιθανή επίδραση της ετερογένειας του εντατικού πεδίου, που προκαλείται από την ανάσχεση της διαμετρικής έκτασης στα άκρα του δοκιμίου εξ αιτίας της τριβής (Paterson & Wong, 2005). Το φαινόμενο είναι εντονότερο σε δοκίμια με μικρό λόγο ύψους προς διάμετρο (π.χ. Mogi, 2006).



Εικόνα 1 - Μακροσκοπικοί τύποι θραύσης του πετρώματος που παρατηρούνται σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης: (α) διαμητική θραύση υπό γωνία προς τη διεύθυνση της αξονικής τάσης, (β) αξονικός διαχωρισμός του δοκιμίου (Πηγή: Νομικός, 2016)

Εφελκυστική θραύση παρατηρείται στις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού με διαχωρισμό του δοκιμίου κάθετα στη διεύθυνση της εφελκυστικής τάσης. Εντούτοις, εφελκυστικές θραύσεις παρατηρούνται συχνά και στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, υπό μορφή αξονικού διαχωρισμού (axial splitting) ή αλλιώς αξονικού σχισμού (axial cleavage), παράλληλα προς την αξονική θλιπτική τάση (Εικόνα 2).



Εικόνα 2 - Μακροσκοπική θραύση δοκιμίου πετρώματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Η θραύση αναπτύχθηκε παράλληλα προς την αξονική θλιπτική τάση (Πηγή: Νομικός, 2016)

Το φαινομενικά παράδοξο της εμφάνισης εφελκυστικών θραύσεων απουσία μακροσκοπικής εφελκυστικής τάσης έχει εξηγηθεί από δύο απόψεις. Κατά τη μία άποψη, η θραύση συμβαίνει υπό την υπέρβαση μιας κρίσιμης τιμής, διαφορετικής για κάθε πέτρωμα, της εφελκυστικής διαμετρικής τροπής. Κατά τους Patterson & Wong (2005), η εξήγηση αυτή παρουσιάζει κενά αναφορικά με τη φυσική της υπόσταση, καθώς η εφελκυστική θραύση προϋποθέτει την ύπαρξη τοπικής εφελκυστικής τάσης, ακόμη και εάν αυτή αφορά στη μοριακή κλίμακα. Θεωρούν έτσι ως επικρατέστερη την άποψη ότι η θραύση ξεκινάει από τοπικές εφελκυστικές αστοχίες λόγω τοπικών εφελκυστικών τάσεων στα άκρα προυπάρχουσων μικρορωγμών στην κλίμακα των κόκκων του πετρώματος. Ο αξονικός διαχωρισμός ως μορφή θραύσης των δοκιμίων περιορίζεται παρουσία ακόμη και χαμηλής πλευρικής πίεσης στο δοκίμιο (Νομικός, 2016).

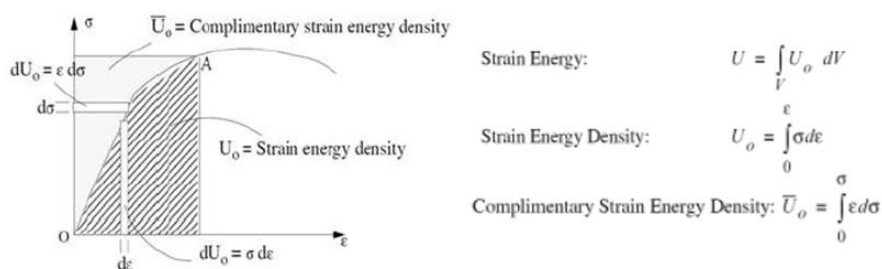
1.2 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ GRIFFITH ΓΙΑ ΤΗΝ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ

Για την ερμηνεία και την ποσοτικοποίηση των φαινομένων κατά τη θραύση των πετρωμάτων, έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διάφορες θεωρίες από τις οποίες αυτή που ξεχωρίζει είναι η θεωρία Griffith ή θεωρία του έργου θραύσης. Ο Griffith το 1920 σε πειράματα σε γυαλί, προσπάθησε να εξηγήσει τη διαφορά ανάμεσα στην θεωρητική και στην πειραματικά παρατηρούμενη αντοχή των υλικών σε θραύση. Σύμφωνα με την θεωρία που ανέπτυξε, κάθε ψαθυρό υλικό περιέχει ένα πλήθος λεπτών ατελειών ή μικρορωγμών, το σχήμα των οποίων προσομοίωσε με έλλειψη και στις οποίες αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις κατά διεύθυνση κάθετη προς το διαμήκη άξονα των ρωγμών αυτών. Επίσης, στις περιοχές των μικρορωγμών, δημιουργείται συγκέντρωση τάσεων, έτσι ώστε οι τάσεις κοντά σε αυτές να ξεπερνούν την θεωρητική αντοχή του υλικού σε θραύση, ενώ μακριά από αυτές οι τάσεις μπορεί να έχουν χαμηλότερες τιμές. Όταν οποιαδήποτε από τις μικρορωγμές προωθείται μέσα στο υλικό, τότε δημιουργούνται δύο νέες ελεύθερες επιφάνειες.

Κάθε ελεύθερη επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ένα ποσό ενέργειας που καλείται επιφανειακή ενέργεια (surface energy), η φυσική προέλευση της οποίας οφείλεται στο γεγονός ότι τα άτομα στις ελεύθερες επιφάνειες έχουν σπασμένους χημικούς δεσμούς και είναι πιο ευκίνητα απ' ό,τι τα άτομα στο εσωτερικό του υλικού. Συνεπώς, με την προώθηση και τη συνεπαγόμενη αύξηση της ελεύθερης επιφάνειας της μικρορωγμής, η συνολική ενέργεια του συστήματος αυξάνεται όσο η επιφανειακή ενέργεια των νέων αυτών ελεύθερων επιφανειών. Κάθε φυσικό σύστημα τείνει αυθόρμητα προς καταστάσεις όπου ελαχιστοποιείται η συνολική του ενέργεια. Έτσι λοιπόν θα αναμέναμε το υλικό μας να μην βοηθάει στην προώθηση των μικρορωγμών.

Το σπάσιμο των χημικών δεσμών που γίνεται κατά την προώθηση της μικρορωγμής, προκαλεί μείωση της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης (elastic strain energy) του υλικού

(<http://www.mie.uth.gr>). Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία, η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σώμα λόγω της παραμόρφωσης που υφίσταται από την φόρτιση, ονομάζεται ενέργεια παραμόρφωσης. Η ενέργεια ανά μονάδα όγκου ονομάζεται πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης και είναι η περιοχή κάτω από την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 που ακολουθεί (V. Madhukar). Είναι προφανές ότι όταν δεν υπάρχουν εξωτερικά φορτία, η ενέργεια αυτή μηδενίζεται. Κατά τον διαχωρισμό του υλικού που προκαλείται από τις μικρορωγμές, τα τμήματα που δημιουργούνται παύουν να καταπονούνται με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης που βρισκόταν αποθηκευμένη εκεί.



Σχήμα 1 - Η ενέργεια παραμόρφωσης και η πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης

(Πηγή: <http://www.mtu.edu/mechanical>)

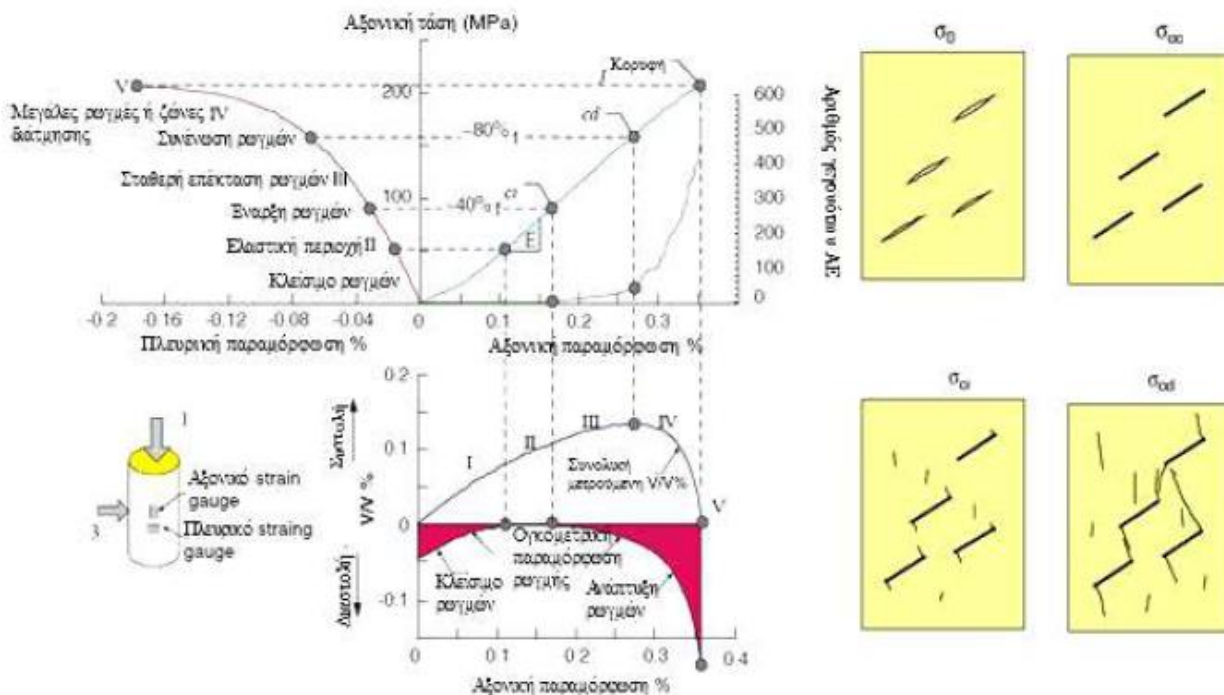
1.3 ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΨΑΘΥΡΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

1.3.1 Η σχέση της έναρξης, επέκτασης και συνένωσης ρωγμών με τη στάθμη φόρτισης

Η αστοχία του πετρώματος, χαρακτηρίζεται από διάφορα διακριτά στάδια παραμόρφωσης που περιλαμβάνουν έναρξη, επέκταση και συνένωση ρωγμών και είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τα επίπεδα φόρτισης που σχετίζονται με το κάθε στάδιο για το σχεδιασμό και την πράξη έργων μηχανικού. Οι Cai et al. (2004) πρότειναν όρια έναρξης ρωγμάτωσης και όρια αστοχίας των πετρωμάτων. Το όριο έναρξης της ρωγμάτωσης ορίζεται από τη σχέση $\sigma_1 - \sigma_3 = A \cdot \sigma_{cm}$ ενώ το όριο θραύσης ορίζεται ως $\sigma_1 - \sigma_3 = B \cdot \sigma_{cm}$ για ρωγματωμένες βραχόμαζες, όπου A, B είναι σταθερές του υλικού και σ_{cm} η μονοαξονική θλιπτική αντοχή της βραχόμαζας. Μετά από πειράματα κατέληξαν στο ότι οι μεταβλητές A, B κυμαίνονται μεταξύ 0,4-0,5 και 0,8-0,9 αντίστοιχα για μέτρια έως καθόλου ρωγματωμένες βραχόμαζες, ενώ για μέτρια έως πολύ ρωγματωμένες βραχόμαζες κυμαίνονται μεταξύ 0,5-0,6 και 0,9-1,0 αντίστοιχα.

Τα πετρώματα έχουν αναπόφευκτα πόρους, ελαττώματα και μικρορωγμές. Για παράδειγμα, ασθενώς συνδεδεμένοι κόκκοι μπορεί να θεωρηθούν σαν πιθανές θέσεις έναρξης μιας μικρορωγμής. Η μικρορωγμή αυτή θα επεκταθεί όταν το πέτρωμα φορτισθεί πέρα από κάποιο όριο. Από πειράματα έχουν βρεθεί αρκετά επίπεδα φόρτισης τα οποία βοηθούν στην κατανόηση της αστοχίας των ψαθυρών πετρωμάτων. Στο Σχήμα 2 που ακολουθεί, φαίνονται τα επίπεδα αυτά της τάσης, όπου σ_{cc} (cc-crack closure) είναι η τάση κλεισίματος των ρωγμών, σ_{ci} (ci- crack initiation) είναι η τάση έναρξης των ρωγμών και σ_{cd} (cd-crack damage) είναι η τάση ζημίας η οποία αντιστοιχεί στην μακροπρόθεσμη αντοχή του πετρώματος. Η ακουστική εκπομπή ξεκινάει στο επίπεδο τάσης σ_{ci} και αυξάνεται απότομα στο επίπεδο σ_{cd} όπου καταγράφονται και τα περισσότερα σήματα ΑΕ. Τα χαρακτηριστικά στάδια ως την αστοχία είναι 4:

1. Έναρξη ρωγμών και γεγονότων ΑΕ σε επίπεδο 0,3-0,5 σ_{cd}
2. Σχηματισμός και επέκταση μικρορωγμών σε διεύθυνση παράλληλη της μέγιστης θλιπτικής τάσης
3. Έναρξη της συνένωσης σε επίπεδα 0,7-0,8 του φορτίου αντοχής
4. Μεγάλες ρωγμές ή ζώνες διάτμησης μετά την μέγιστη αντοχή (Cai et al.2004)



Σχήμα 2 - Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης που δείχνει τα στάδια εξέλιξης των ρωγμών (Martin et al) και σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών επιπέδων τάσης έναρξης, επέκτασης και συνένωσης των ρωγμών (Πηγή: Cai et al.2004)

1.3.2 Προσομοιώματα μικρομηχανικής για την έναρξη, επέκταση και συνένωση ρωγμών

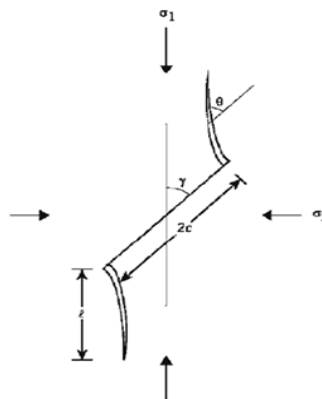
Τα προσομοιώματα μικρομηχανικής της ψαθυρής αστοχίας ενός πετρώματος ερευνούν την τοπική έναρξη, επέκταση, πολλαπλασιασμό και αλληλεπίδραση των μικρορωγμών μεταξύ τους με την αύξηση της φόρτισης. Θεωρητικά, η έναρξη της μικρορωγμάτωσης στα συμπαγή πολυκρυσταλλικά πετρώματα συμβαίνει σε προϋπάρχουσες μικρορωγμές (π.χ. όρια των κόκκων).

Το πιο γνωστό μικρομηχανικό μοντέλο για την έναρξη της μικρορωγμάτωσης είναι αυτό της «ολισθαίνουσας ρωγμής» (sliding crack model) σύμφωνα με το οποίο μια μικρορωγμή μήκους $2c$ σχηματίζει γωνία γ με τη μέγιστη θλιπτική τάση σ_1 . Η ρωγμή κλείνει υπό την επίδραση των θλιπτικών φορτίων και ολισθαίνει υπό την επίδραση των διατμητικών τάσεων στο επίπεδο της. Στα άκρα της ρωγμής συγκεντρώνονται υψηλές εφελκυστικές τάσεις που κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις προκαλούν την έναρξη πλάγιων ρωγμών (Σοφιανός & Νομικός, 2008). Σχηματικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.

Σύμφωνα με τη θεωρία των Cotterell και Rice (1980) οι πλάγιες ρωγμές ξεκινάνε σχηματίζοντας γωνία $\theta=70.5^\circ$ με την προϋπάρχουσα ρωγμή και δημιουργούνται όταν οι τάσεις σ_1 και σ_3 ικανοποιούν τη σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{\sin 2\gamma + \mu(1 + \cos 2\gamma)}{\sin 2\gamma - \mu(1 - \cos 2\gamma)} \sigma_3 + \frac{\sqrt{3}}{\sin 2\gamma - \mu(1 - \cos 2\gamma)} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi c}}$$

Όπου K_{Ic} η δυσθαρυστότητα (fracture toughness) η οποία μπορεί να μετρηθεί πειραματικά (ISRM 1998), έχει μονάδες $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ και εκφράζει την ικανότητα του πετρώματος που περιέχει μια ρωγμή να αντιστέκεται στην θραύση, μ ο συντελεστής τριβής της προϋπάρχουσας ρωγμής και γ, θ οι γωνίες που φαίνονται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3 - Έναρξη και διάδοση πλευρικών μικρορωγμών στα άκρα προϋπάρχουσας ολισθαίνουσας μικρορωγμής (Πηγή: E. Eberhardt et al 1998)

Κατά την αύξηση της φόρτισης, το μήκος l των πλευρικών ρωγμών αυξάνει ενώ η γωνία θ τείνει να γίνει ίση με την γωνία γ , δηλαδή οι πλευρικές ρωγμές τείνουν να γίνουν παράλληλες με τη σ_1 . Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης K_I στα άκρα των πλευρικών ρωγμών μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση των Horii και Nemat-Nasser (1985):

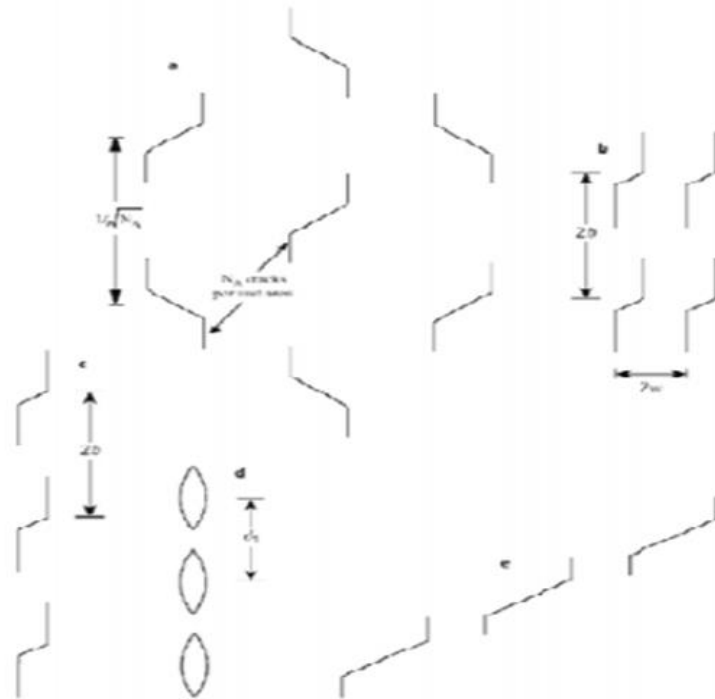
$$\frac{K_I}{\sqrt{\pi c}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)\sqrt{1 + \mu^2} - (\sigma_1 + \sigma_3)\mu}{\pi\sqrt{L/c}} \sin\theta - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\ell}{c}}(\sigma_1 + \sigma_3 - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2(\theta - \gamma))$$

όπου $L = l + 8c/3\pi^2$ το ενεργό μήκος των πλευρικών ρωγμών. Η γωνία με την οποία διαδίδονται οι πλευρικές ρωγμές προκύπτει με μεγιστοποίηση του K_I ως προς θ .

Σύμφωνα με τον Broek (1988) ως συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_I , μπορεί να ορισθεί ο λόγος της τοπικά ασκούμενης τάσης στα άκρα μίας ρωγμής προς την «ονομαστική τάση», που μπορεί να είναι η μέση τάση σε μία διατομή του πετρώματος ή η μέση τάση μακριά από τη ρωγμή ή η κύρια τάση του εντατικού πεδίου μακριά από τη ρωγμή.

Όπως παρατηρείται από την παραπάνω εξίσωση ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης στα άκρα της ρωγμής μειώνεται καθώς αυξάνεται το μήκος της. Η μείωση αυτή οφείλεται αφενός στην απομάκρυνση του άκρου της πλευρικής ρωγμής από τη θέση δημιουργίας εφελκυστικών τάσεων στα άκρα της προϋπάρχουσας μικρορωγμής και αφετέρου στην επίδραση της ορθής δύναμης που δρα στο επίπεδο της πλευρικής ρωγμής και τείνει να εμποδίσει την επέκτασή της.

Η αύξηση του μήκους και του αριθμού των επεκτεινόμενων πλευρικών ρωγμών που προκαλείται από την αύξηση της φόρτισης, έχει ως αποτέλεσμα το εντατικό πεδίο στο περιβάλλον μίας μικρορωγμής να αλληλοεπιδρά με το εντατικό πεδίο των γειτονικών μικρορωγμών. Η αστοχία του πετρώματος θεωρείται ότι επέρχεται λόγω της αλληλεπίδρασης και της συγχώνευσης πολλών πλευρικών μικρορωγμών που ξεκίνησαν από τα άκρα προϋπάρχουσων μικρορωγμών. Το πολύπλοκο αυτό πρόβλημα αντιμετωπίζεται συχνά από τους ερευνητές (π.χ. Ashby και Sammis 1990) μέσω της θεωρίας της μηχανικής της βλάβης των υλικών (damage mechanics). Η βλάβη του πετρώματος αναπαρίσταται από μία παράμετρο που χαρακτηρίζει την πυκνότητα και τη γεωμετρία των μικρορωγμών και των πόρων του ψαθυρού πετρώματος (Σοφιανός & Νομικός 2008).



Εικόνα 4 - Διάφορα εξιδανικευμένα μοντέλα για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης των μικρορωγμών στο πέτρωμα (Πηγή: Σοφιανός & Νομικός, 2008)

Με την έναρξη των πλευρικών μικρορωγμών, μπορούμε να συσχετίσουμε την έναρξη της διόγκωσης του δοκιμίου σε μία δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Αν υποθέσουμε ότι το πέτρωμα περιέχει τυχαία προσανατολισμένες προϋπάρχουσες μικρορωγμές, τότε η έναρξη των πλευρικών μικρορωγμών θα συμβεί πρώτα στα άκρα εκείνων με γωνία $\gamma = (1/2)\tan^{-1}(1/\mu)$ σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{1+\mu^2} + \mu}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \sigma_3 + \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi c}}$$

Η έναρξη μικρορωγμών μπορεί να εντοπισθεί πειραματικά με διάφορους τρόπους:

- από την έναρξη καταγραφής της ακουστικής δραστηριότητας,
- από το σημείο που το διάγραμμα τάσης-τροπής γίνεται μη γραμμικό,
- από την αύξηση του όγκου του δοκιμίου.

1.4 ΑΝΑΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΚΛΙΚΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ

Προ της εκσκαφής ενός υπόγειου ανοίγματος, η εντατική κατάσταση ενός τυχαίου σημείου στην εν λόγω περιοχή σε ένα βάθος z από τη φυσική επιφάνεια του εδάφους, δίνεται από τις κύριες τάσεις, κατακόρυφες και οριζόντιες ως εξής:

$$p_z = \gamma * z, \quad p_x = k * p_z = k * \gamma * z$$

Όπου γ το μοναδιαίο βάρος και k ο συντελεστής πλευρικών τάσεων. Κατά την εκσκαφή ενός ανοίγματος, η εντατική κατάσταση μεταβάλλεται με κύριο χαρακτηριστικό τη σημαντική μεταβολή των κυρίων τάσεων. Η αλλαγή της εντατικής κατάστασης θα μπορούσε να περιγραφεί από τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων δηλαδή το λόγο της νέας τάσης προς την τάση προ της εκσκαφής, όμως αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες:

- Τη μορφή του ανοίγματος
- Τη σχέση των διαστάσεων της διατομής
- Την αρχική εντατική κατάσταση (κυρίως ο συντελεστής k)
- Τη θέση του σημείου
- Τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού/βραχώμαζας
- Τους γεωλογικούς παράγοντες και την κατανομή τους (π.χ. ασυνέχειες) κλπ.

Η επίλυση του προβλήματος αυτού, προϋποθέτει κατάλληλη διατύπωση των παρακάτω βημάτων:

- Των συνοριακών συνθηκών
- Των διαφορικών εξισώσεων ισορροπίας
- Της καταστατικής εξίσωσης συμπεριφοράς της βραχώμαζας
- Των εξισώσεων συμβατού των παραμορφώσεων

Με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και προγραμμάτων Η/Υ (π.χ. με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων), γίνεται εφικτός ο υπολογισμός των τάσεων ακόμα και στις πιο σύνθετες διατομές, τις πιο περίπλοκες συνοριακές συνθήκες και την πιο σύνθετη γεωτεχνική συμπεριφορά της βραχώμαζας.

Η παρουσία μιας γεωμετρικής ασυνέχειας, όπως π.χ. ενός κυκλικού ανοίγματος, όπως προαναφέρθηκε, επιφέρει ανομοιόμορφη κατανομή της εφαπτομενικής τάσης, η οποία ακριβώς στα

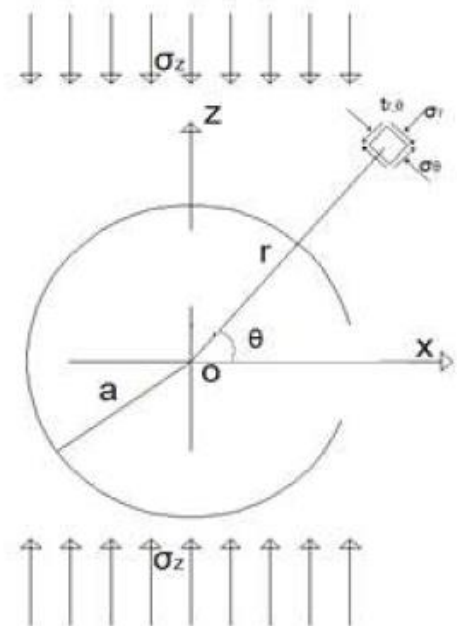
όρια της οπής εμφανίζει ένα μέγιστο σ_{\max} και καθώς απομακρυνόμαστε από την οπή μειώνεται σταδιακά, μέχρις ότου φτάσει στην τιμή $\sigma_{\text{ομοιόμορφη}}$. Εκτός του ότι μία ασυνέχεια δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων κοντά της, μεταβάλλει τοπικά και την εντατική κατάσταση του υλικού. Ακόμη δηλαδή και αν γενικά στο υλικό η εντατική κατάσταση είναι απλός μονοαξονικός εφελκυσμός, κοντά στην ασυνέχεια η εντατική κατάσταση γίνεται σύνθετη (διαξονική ή τριαξονική). Η πρώτη βασική επίλυση του προβλήματος έγινε από τον Kirsch (1898) και σε αυτήν βασίστηκαν πολλοί μεταγενέστεροι ερευνητές. Ο Kirsch έλυσε το πρόβλημα της μονοαξονικής φόρτισης της διατομής κατά τον άξονα Z (κατακόρυφα) με φόρτιση p_z , στη συνέχεια p_x (οριζόντια) και κατόπιν αυτών προέκυψε η τελική εντατική κατάσταση δια της επαλληλίας των επιμέρους επιλύσεων (επαλληλία που είναι αποδεκτή ως απολύτως ακριβής σε προβλήματα γραμμικής ελαστικότητας). Οι βασικές προϋποθέσεις της επίλυσης εντάσσονται στις παραδοχές της θεωρίας γραμμικού ελαστικού ομοιογενούς και ισότροπου μέσου (ως μέσο νοείται το υλικό στο οποίο διανοίγεται η οπή) καθώς και η υπόθεση της απεριόριστης δυνατότητας μετάδοσης θλιπτικών, εφελκυστικών και διατμητικών τάσεων. Το εξωτερικό πεδίο των αρχικών τάσεων δίνεται από τις τάσεις p_z και p_x , οι δε εξ ανακατανομής τάσεις σε σύστημα πολικών συντεταγμένων (r, θ) είναι σ_r , σ_θ και $\tau_{r,\theta}$, ενώ οι μετατοπίσεις (απόλυτες παραμορφώσεις) κατά την ακτινική και εφαπτομενική διεύθυνση είναι u_r u_θ αντίστοιχα (Παπαδόπουλος, 2007).

Για τις τάσεις

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left[(1+K) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-K) \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} \left[(1+K) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-K) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

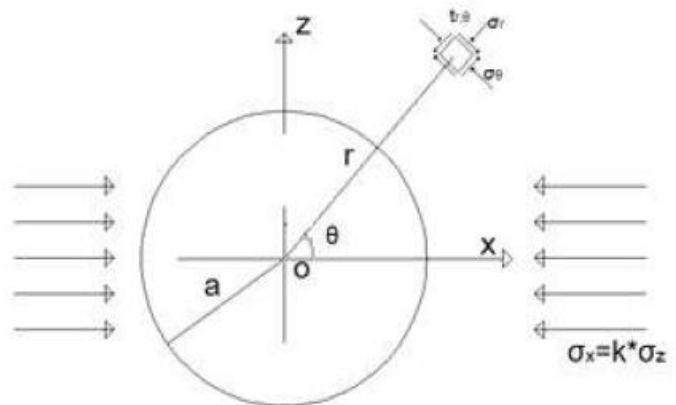
$$\tau_{r,\theta} = \frac{p}{2} \left[(1-K) \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right]$$



Για τις μετατοπίσεις

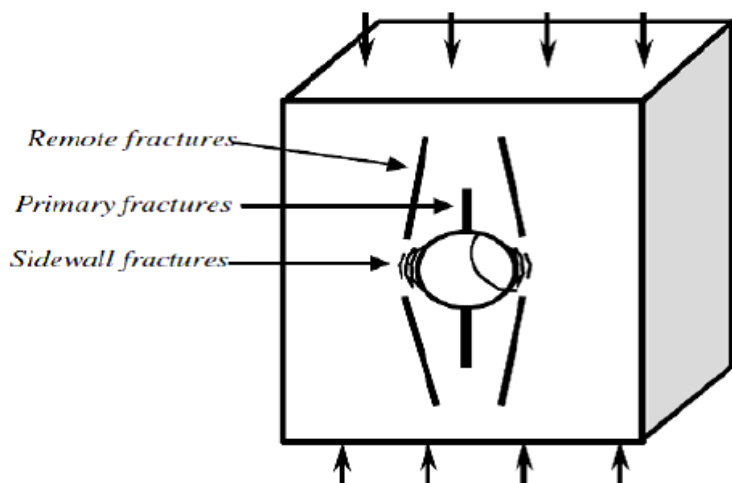
$$u_r = -\frac{p a^2}{4 G r} \left[(1+K) - (1-K) \left\{ 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right]$$

$$u_\theta = -\frac{p a^2}{4 G r} \left[(1-K) \left\{ 2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta \right]$$



Σε μικροσκοπικό επίπεδο, το κύριο χαρακτηριστικό της ρωγμάτωσης είναι η θραύση των ατομικών δεσμών του στερεού υλικού. Σε μακροσκοπικό επίπεδο ως ρωγμάτωση μπορεί να χαρακτηριστεί η θραύση ενός υλικού σε τμήματα, λόγω προώθησης των ρωγμών σε αυτό. Η θραύση του πετρώματος γύρω από υπόγειες εκσκαφές έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μηχανική των πετρωμάτων. Όπου κι αν σχηματίζονται οι ρωγμές (υπόγεια λατομεία, σήραγγες, υπόγειες εκσκαφές, εκσκαφές απόθεσης πυρηνικών αποβλήτων, κλπ) η δημιουργία τους παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η θραύση μπορεί να είναι διαφορετικού βαθμού σοβαρότητας, από αβλαβείς αποφλοιώσεις στη περίμετρο της εκσκαφής έως βίαιες εκτινάξεις πετρώματος γνωστές ως rockbursts. Γενικά παρά το γεγονός ότι τέτοιες αστοχίες είναι συνήθεις, υπάρχουν λίγες πληροφορίες για τη γεωμετρία τους, μηχανισμούς και τις εντατικές καταστάσεις που συμβαίνουν κατά την αστοχία ενός πετρώματος σε μεγάλη κλίμακα. Αντιθέτως σε απλές εργαστηριακές δοκιμές η ανάπτυξη των αστοχιών στα φυσικά μοντέλα με ανοίγματα είναι σχετικά γνωστές. Η ανάπτυξη των ρωγμών γύρω από μία οπή εξετάζεται μέσω φυσικών και αριθμητικών μοντέλων (Carter 1991, 1992). Κατά τη μονοαξονική θλίψη ή την αξονική θλίψη με σχετικά χαμηλή πλευρική πίεση ένα φυσικό μοντέλο με κυκλικό άνοιγμα θα παρουσιάσει γενικά θραύσεις, που εμφανίζονται σταδιακά, και περιλαμβάνουν (Carter, 1991)

1. Αρχικές πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές (Primary fractures, P)
2. Δευτερογενείς ρωγμές ή ρωγμές σε απομονωμένα τμήματα (Remote fractures .R)
3. Αποφλοιώσεις στη θλιβόμενη ζώνη (Slabbing, S)



Εικόνα 5 - Οι θραύσεις που αναπτύσσονται γύρω από μια κυκλική οπή σε φυσικό μοντέλο πετρώματος κατά την μονοαξονική θλίψη (Πηγή Klerk et al. 2004)

1.5 Η ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ

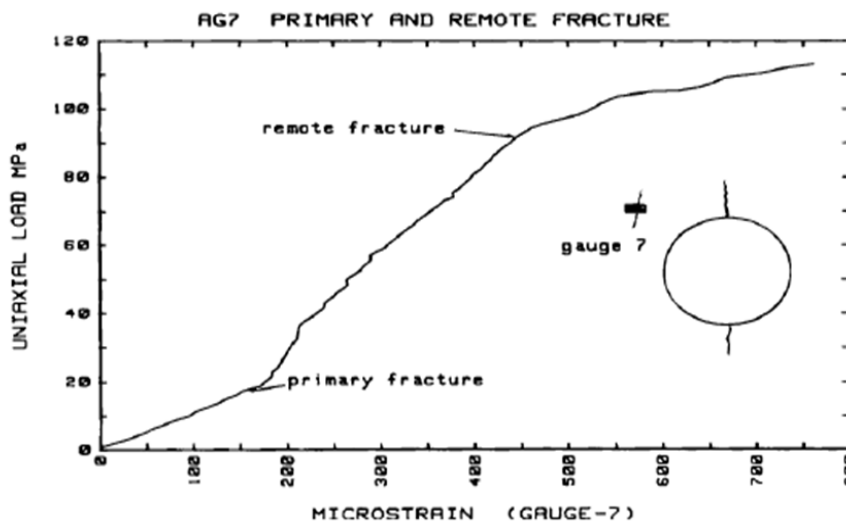
Η έναρξη των ρωγμών από τη συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων και η επέκτασή τους σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση της μέγιστης θλιπτικής τάσης, μπορεί να περιγραφεί σαν κάθετη διατμητική ρωγή. Η έναρξη και η επέκταση των κάθετων διατμητικών ρωγμών συμβαίνουν κάτω από την επίρεια μιας ετερογενούς διάδοσης τάσεων.

Μιας και τα περισσότερα πετρώματα έχουν στοιχεία ψαθυρούς θραύσης, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να περιγραφεί και να ερμηνευτεί ο μηχανισμός της δημιουργίας της. Οι ρωγμές έχουν ερμηνευτεί με διάφορες θεωρίες αστοχίας οι οποίες είναι εμπειρικές και βασίζονται στην εμπειρία που αποκομίζεται κατά τις εργαστηριακές δοκιμές και τις δοκιμές πεδίου. Οι θεωρίες αυτές είναι όλες βασισμένες σε μια ιδέα του Griffith για μικροσκοπικό έλεγχο ρωγμών. Οι θεωρίες του Griffith έχουν βασιστεί σε κάποιες θεμελιώδεις θεωρίες:

1. Η θραύση ξεκινάει από ασυνέχειες-ελαττώματα και η διαδικασία της θραύσης ελέγχεται από το πεδίο των τάσεων γύρω της
2. Το υλικό που περιβάλλει τα ελαττώματα μπορεί να θεωρηθεί σαν συνεχές, δηλαδή η ατομική δομή του υλικού μπορεί να αγνοηθεί
3. Οι μεμονωμένες ατέλειες απέχουν αρκετά μεταξύ τους έτσι ώστε οι ανωμαλίες των τάσεων που σχετίζονται με αυτές να μην επικαλύπτονται

1.5.1 Η ερμηνεία του Carter

Κατά την μονοαξονική θλίψη, η θραύση εξελίσσεται από αρχικές εφελκυστικές ρωγμές (primary fractures), σε ρωγμές σε τμήματα του φυσικού μοντέλου μακριά από την οπή (remote fractures), και στην αποφλοιώση των τοιχωμάτων της οπής στη θλιβόμενη ζώνη (slabbing). Υπάρχει ένα ευρύ διάστημα κατά το οποίο το μόνο γεγονός που συμβαίνει είναι μία σταθερή διάδοση της αρχικής ρωγμής η οποία ξεκινάει από την οπή και επεκτείνεται σχεδόν κάθετα στην μέγιστη θλιπτική τάση. Η άποψη αυτή υποστηρίζεται από εργαστηριακά πειράματα και από αρκετές θεωρητικές γραμμικώς ελαστικές λύσεις θραυστομηχανικής (π.χ. Ashby και Sammis 1986). Καθώς το άνοιγμα γίνεται μεγαλύτερο, η επέκταση των αρχικών ρωγμών χρειάζεται μεγαλύτερο φορτίο για να επεκτείνει την ρωγμή στον ίδιο βαθμό. Επίσης, καθώς το άνοιγμα γίνεται μεγαλύτερο, οι ρωγμές εμφανίζονται σε χαμηλότερο φορτίο. Όταν το μήκος της αρχικής ρωγμής γίνει περίπου ίσο με τη διάμετρο της οπής, η κρίσιμη εντατική κατάσταση μετατοπίζεται εκατέρωθεν της αρχικής ρωγμής, προκαλώντας έτσι την ανάπτυξη των απομονωμένων ρωγμών (Σχήμα 3). Σχεδόν ταυτόχρονα ακολουθεί η θλιπτική αστοχία με αποφλοιώση (Carter 1991). Με την αύξηση της έντασης, οι ρωγμές της απομονωμένης περιοχής αναπτύσσονται κατά μήκος του εντατικού πεδίου και τελικά ενώνονται με τη θλιβόμενη ζώνη. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν εμφανίζεται καμία διατμητική μετατόπιση μέχρι λίγο πριν αστοχήσει το δοκίμιο.

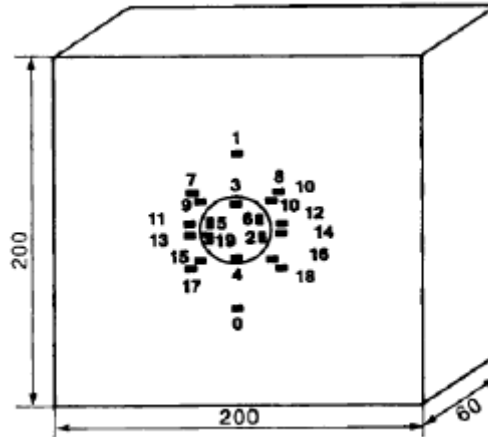


Σχήμα 3 - Διάγραμμα αξονικού φορτίου-παραμόρφωσης. Η επιτάχυνση της επέκτασης της παραμόρφωσης, σηματοδοτεί την έναρξη των απομονωμένων ρωγμών. Η εκτροπή στο σημείο της αρχικής παραμόρφωσης υποδηλώνει ανακούφιση τάσεων και παραμορφώσεων (Πηγή: Carter 1991)

Όσον αφορά την προέλευση των ρωγμών, οι αρχικές ρωγμές είναι αναμενόμενες λόγω προβλεπόμενης εφελκυστικής τάσης. Εμφανίζονται λόγω εφελκυσμού κάτω από υψηλό θλιπτικό φορτίο, προωθούνται πολύ γρήγορα μόλις δημιουργηθούν αλλά τελικά σταθεροποιούνται καθώς επεκτείνονται μακριά από την οπή και τις υψηλές τάσεις που συγκεντρώνονται γύρω από αυτήν. Ομοίως η αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη στην περίμετρο της οπής αναμένεται λόγω υψηλής συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Οι θλιπτικές ρωγμές είναι επεκτεινόμενες και η δημιουργία τους ακολουθείται από μια περίπλοκη διαδικασία κλιμακωτής απόσπασης του υλικού στα άκρα της οπής που ονομάζεται αλλιώς και αποφλοίωση. Αντίθετα, η προέλευση των απομονωμένων ρωγμών δεν είναι τόσο εμφανής. Επειδή αυτές εμφανίζονται μακριά από το άνοιγμα, δε μπορούν να γίνουν αντιληπτές κατά την υπόγεια εκσκαφή. Η ύπαρξή τους έχει γίνει γνωστή από δοκιμές φυσικών μοντέλων από τους Hoek, Lajtai, Gay και Ingraffea. Ο Hoek, χρησιμοποιώντας στις δοκιμές του μια επικάλυψη με φωτοελαστικό υλικό (photoelastic coating technique), εξήγησε την προέλευση των απομακρυσμένων ρωγμών στην συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων που δημιουργούνται μακριά από το άνοιγμα καθώς μεγαλώνει το μήκος των αρχικών εφελκυστικών ρωγμών. Η εφελκυστική τάση στην απομακρυσμένη ζώνη μπορεί να γίνει τόσο μεγάλη ώστε να δημιουργήσει και έπειτα να επεκτείνει μια εφελκυστική ρωγή με σταθερό ελεγχόμενο τρόπο. Ο Ingraffea ανέλυσε τα αποτελέσματα του Hoek χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία και απέδειξε ότι η ένταση που εμφανίζεται στις απομακρυσμένες περιοχές, οδηγεί σε ανάπτυξη ρωγμών. Χρησιμοποιώντας γύψινα δοκίμια, ο Lajtai έδειξε ότι οι απομακρυσμένες ρωγμές συνδέονται με αυτές της θλιβόμενης ζώνης και προκαλούν αστοχία του ανοίγματος (Lajtai, 1975). Σύμφωνα με τον Carter (1992), οι απομακρυσμένες ρωγμές, εμφανίζονται κάτω από το συνδυασμό εφελκυσμού και θλίψης, παρά το γεγονός ότι μπορούν να εμφανιστούν και μόνο σε θλιπτικό πεδίο. Η ανάπτυξη των ρωγμών αυτών, γίνεται παράλληλα στην μέγιστη θλιπτική τάση, ενώ το δοκίμιο υπόκειται σε σχετικά χαμηλές βαθμίδες έντασης (Carter et al., 1991 a).

Η θεωρία σχετικά με τη θραύση γύρω από κυκλικά ανοίγματα που βρίσκονται σε θλίψη είναι γνωστή γι' αυτό και ο Carter (1991) σχεδίασε τα πειράματά του με σκοπό την ποσοτική συλλογή δεδομένων κατά την εξέλιξη των αρχικών, των απομονωμένων και των ρωγμών στη θλιβόμενη ζώνη. Έτσι, έκοψε δοκίμια από γρανίτη διαστάσεων 200x200x60mm με διάμετρο κυκλικού ανοίγματος 36mm στο κέντρο. Στη συνέχεια τοποθέτησε 19 τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges), με μήκος ενεργού στοιχείου μέτρησης 5mm, στην επιφάνεια του δοκίμιου στις θέσεις που αναμενόταν, σύμφωνα με προηγούμενες δοκιμές, η δημιουργία των παραπάνω ρωγμών. Με τα strain gauges συνδεδεμένα με καταγραφικό σύστημα, το φυσικό μοντέλο τοποθετήθηκε σε πλαίσιο δυναμικότητας 2500 kN (600,000lb) με σκοπό να φορτιστεί στα 157 MPa. Η θλιπτική

αντοχή του άρρηκτου γρανίτη Lac du Bonpe που χρησιμοποίησε υπολογίστηκε στα 226 MPa. Η διαδικασία φόρτισης διακόπηκε πριν την αστοχία αφού στα 157 MPa είχαν σχηματιστεί και τα 3 είδη ρωγμών οπότε έκρινε απαραίτητο να σταματήσει τη δοκιμή για να εξετάσει οπτικά το δοκίμιο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το δοκίμιο του γρανίτη με τα strain gauges τοποθετημένα στις αναμενόμενες θέσεις ρωγμάτωσης.



Εικόνα 6 - Το δοκίμιο γρανίτη με τις θέσεις εγκατάστασης των strain gauges. Αυτά που φαίνονται μέσα στην οπή τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό της τοίχου (Πηγή: Carter 1991)

Η θραύση ακολούθησε ένα αναμενόμενο μοτίβο. Οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές σχηματίστηκαν στα 16 MPa, τάση που είναι μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του γρανίτη όπως προκύπτει από δοκιμές Brazilian (μέση τιμή 14MPa με τυπική απόκλιση 1-2MPa). Χρησιμοποιώντας τη λύση του Kirsch και το κριτήριο μέγιστης τάσης, θα έπρεπε να εμφανιστούν στα 14 MPa. Η κατά 2 MPa μεγαλύτερη τάση που χρειάστηκε για να σχηματιστούν οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές, υποδεικνύει την επιρροή της βάρωσης της τάσης στη δοκιμή. Στα 135 MPa οι αρχικές ρωγμές διαδόθηκαν περίπου κατά 43 mm, ενώ επεκτάθηκαν κατά 4 mm ακόμη μέχρι το τέλος του πειράματος (157 MPa). Οι δευτερογενείς ή αλλιώς απομονωμένες ρωγμές εμφανίστηκαν στα 119 MPa και επεκτάθηκαν μακριά και προς την οπή. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των απομονωμένων ρωγμών είναι το γεγονός ότι δεν είναι ενιαίες ρωγμές, αλλά αποτελούν μία ζώνη ρωγμάτωσης με ένα σύνολο παράλληλων ρωγμών. Συγκεκριμένα, μοιάζουν αρκετά με την αξονική κατάκλαση που παρατηρείται στα απλά κυλινδρικά δοκίμια κάτω από τυπική μονοαξονική θλίψη. Η αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη εμφανίστηκε με μορφή αποφλοιώσεων στα 126 MPa. Μιας και υπάρχει συγκέντρωση τάσεων στα τρία παραπάνω σημεία, θα ήταν αναμενόμενο να ξεκινήσει η αστοχία στο 1/3 της θλιπτικής αντοχής, δηλαδή μεταξύ 70-80 MPa. Από το παραπάνω πείραμα παρατηρήθηκε ότι στο τελευταίο στάδιο ανάμεσα στα 140-157 MPa οι απομονωμένες ρωγμές

ενώθηκαν με τις ρωγμές της θλιβόμενης ζώνης. Επίσης παρατηρήθηκαν κάποιες παράξενες οριζόντιες ρωγμές μεταξύ της οπής και των απομονωμένων που αποτελούν δομικές αστοχίες του υλικού.

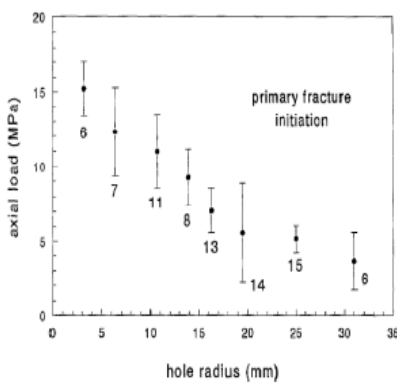
Σε επόμενα πειράματα ο Carter (1992), χρησιμοποίησε δοκίμια δολομιτικού ασβεστολίθου μεγέθους έως και 750*500*100 mm για τη μελέτη της επίδρασης του μεγέθους και της εντατικής βαθμίδας στη θραύση γύρω από κυκλικά ανοίγματα. Η πειραματική παρατήρηση της επίδρασής τους έχει αναφερθεί από ερευνητές στο παρελθόν (π.χ. Hodgson and Cook 1970, Einstein et al. 1970, Lajtai 1972), όπως η θεωρητική τους εξήγηση αποτελεί θέμα αντιπαράθεσης. Η πιο γνωστή θεωρία είναι αυτή του Weibull (1939) που βασίζεται στην στατιστική κατανομή των μεγεθών των ατελειών στη βραχώμαζα, ενώ υπάρχουν θεωρίες που συσχετίζουν την επίδραση του μεγέθους με τη βάθμωση της τάσης (stress gradients) όπως των Durelli και Parks (1962), ενεργειακές θεωρίες θραύσης όπως των Gonano και Brown (1975).

Τα παραπάνω πειράματα έγιναν σε 25 φυσικά μοντέλα με 9 διαφορετικές διαμέτρους οπών από 3,2 mm έως 62 mm. Τα δοκίμια είχαν παραλληλόγραμμο σχήμα και κυκλικό άνοιγμα, ενώ το μέγεθός τους μεταβαλλόταν έτσι ώστε το πλάτος του να είναι τουλάχιστον 5 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο του. Το πάχος των δοκιμίων ήταν από 84 έως 89 mm, διάσταση αρκετή ώστε να αποτρέψει το λυγισμό και την επίδραση των άκρων. Ξανά σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν strain gauges (εκτός του μικρότερου με διάμετρο 3,2 mm) με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν 80 μετρήσεις για τις αρχικές, 81 για τις δευτερογενείς και 38 για τις ρωγμές της θλιβόμενης ζώνης. Η μονοαξονική δοκιμή έγινε σε πλαίσιο δυναμικότητας 5000 kN, ενώ ο ρυθμός φόρτισης μεταβαλλόταν ώστε να γίνεται οπτική εξέταση των φαινομένων.

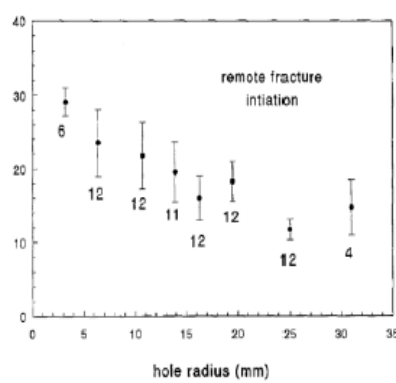
Και σε αυτά τα πειράματα, η έναρξη και εξέλιξη της θραύσης ακολούθησε το αναμενόμενο μοτίβο σύμφωνα με τα προηγούμενα πειράματά του (1991). Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν το ίδιο μοτίβο θραύσης ανεξάρτητα από το μέγεθος της οπής, το οποίο όμως όπως φάνηκε, επηρέασε την τάση έναρξης της ρωγμάτωσης. Παρά το γεγονός ότι οι 3 τύποι ρωγμών είναι σχετικά όμοιοι, εμφανίζονται κάτω από διαφορετικές μακροσκοπικά εντατικές βαθμίδες. Οι τέσσερις απομονωμένες ρωγμές δεν εμφανίστηκαν όλες στο ίδιο φορτίο και γενικά υπήρξαν περιπτώσεις που δεν εμφανίστηκαν και οι τέσσερις. Οι ρωγμές αυτές αναπτύσσονται κατευθυνόμενες προς την οπή όπου εμφανίζονται οι θλιπτικές ρωγμές, με τις οποίες ενώνονται συχνά προκαλώντας τη θραύση του δοκιμίου. Όλες οι ρωγμές είναι εφελκυστικές και δεν συμβαίνει καμία διάτμηση μέχρι λίγο πριν αστοχήσει το δοκίμιο (Carter, 1992).

Η έναρξη των ρωγμών φάνηκε από τις καμπύλες τάσης-τροπής των strain gauges που είχαν τοποθετηθεί στις περιοχές που αναμενόταν να εμφανιστούν οι ρωγμές. Η έναρξη επιβεβαιώθηκε και οπτικά με τη βοήθεια μικροσκοπίου. Στα δοκίμια με τις μικρές διαμέτρους που δεν μπορούσαν να μπουν strain gauges, δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστεί η τάση έναρξης της ρωγμάτωσης. Αντίθετα, στα μεγαλύτερα ανοίγματα όπου μπορούσαν να τοποθετηθούν strain gauges εσωτερικά, αποκαλύπτουν το σημείο έναρξης από την εκτροπή της καμπύλης τάσης-τροπής από την ευθυγραμμία. Λόγω της γραμμικά ελαστικής συμπεριφορά του πετρώματος σε αυτό το εύρος τάσεων, η εκτροπή της καμπύλης θα μπορούσε να προκαλείται μόνο από την ρωγμάτωση του. Γενικά, όλα τα strain gauges που βρίσκονται κοντά στη περιοχή της έναρξης θα δώσουν σημάδια διαταραχής. Όσον αφορά το δοκίμιο οπτικά, μοιάζει με δοκίμιο που έχει αστοχήσει υπό θλιπτική μονοαξονική καταπόνηση με πολλαπλές αξονικές ρωγμές σε όλη την επιφάνειά του.

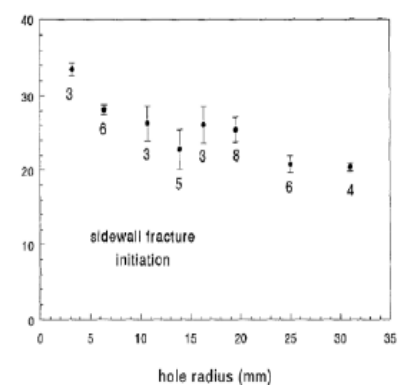
Η τάση έναρξης της ρωγμάτωσης για όλους τους τύπους ρωγμών (αρχικές, δευτερογενείς και θλιπτικές) παρουσιάζει μια φθίνουσα πορεία όσο το μέγεθος της οπής αυξάνεται. Στις Εικόνες 7,8,9 που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του μεγέθους της οπής στις αρχικές, τις απομονωμένες και τις θλιπτικές ρωγμές κατά τη διάρκεια της θλίψης δοκιμίου. Τα σημεία στα διαγράμματα αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές, οι ράβδοι σφάλματος μια τυπική απόκλιση και τα νούμερα κάτω από τις ράβδους δείχνουν τον αριθμό των μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) που παρείχαν τα στοιχεία ρωγμάτωσης (Carter, 1992).



Εικόνα 7 - Αρχικές



Εικόνα 8 - Απομακρυσμένες



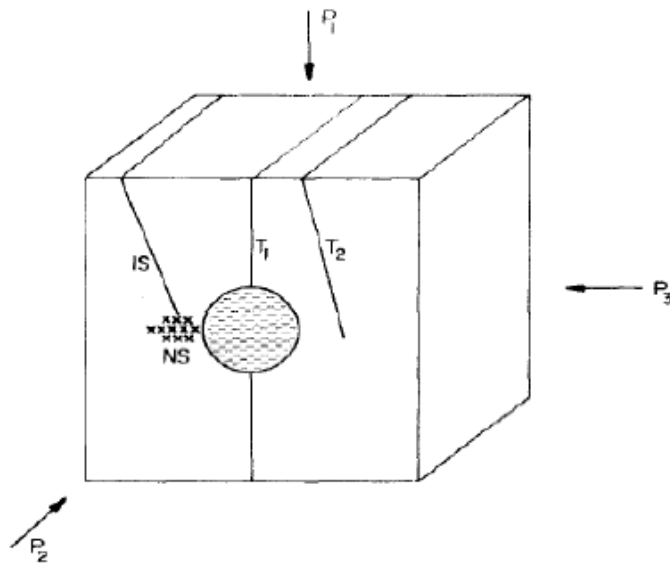
Εικόνα 9 - Θλιπτικές

(Πηγή: Carter, 1992)

1.5.2 Η ερμηνεία του Lajtai

Ο Lajtai, πραγματοποίησε πειράματα πολυαξονικής θλίψης σε δοκίμια, με σκοπό να παρατηρήσει την σειρά των γεγονότων θραύσης που οδηγούν στην αστοχία του δοκιμίου. Αυτή η σειρά μπορεί να περιλαμβάνει αρχικές εφελκυστικές, κάθετες διατμητικές, δευτερογενείς εφελκυστικές και πλάγιες διατμητικές ρωγμές. Με χαμηλή πλευρική πίεση, κυριαρχούν οι εφελκυστικές ρωγμές με την αστοχία να εξελίσσεται ως απότομη εμφάνιση δευτερεύοντων εφελκυστικών ρωγμών που επιφέρουν αστοχία στις περιοχές συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Με υψηλή πλευρική πίεση, ο εφελκυσμός περιορίζεται και η αστοχία γίνεται μετά από μεγάλη παραμόρφωση που περιλαμβάνει προοδευτική κατάκλαση στις περιοχές συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Αυτό μπορεί να γίνει χωρίς την ανάπτυξη εμφανούς επιφάνειας αστοχίας μέχρις ότου η οπή κλείσει εντελώς (πολύ υψηλή πλευρική πίεση). Συχνά εμφανίζεται μια μορφή αστάθειας που περιλαμβάνει επιφάνειες διάτμησης κατά μήκος των οποίων γίνεται ολίσθηση των τμημάτων του υλικού προς την οπή.

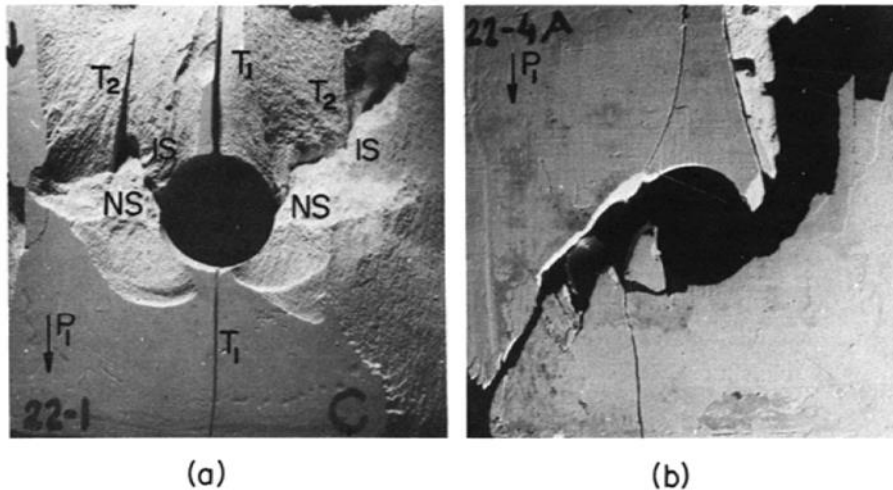
Τα δοκίμια που χρησιμοποίησε ήταν γύψινα με μέγεθος κυρίως 7,5x15x15 cm και ανοίγματα 1,5 ή 2,5 cm αλλά και 25x25x7,5 cm για τον έλεγχο επιρροής της κλίμακας. Η δοκιμή έγινε με τη βοήθεια τριών ορθογωνικά διατεταγμένων υδραυλικών πρεσσών για την πολυαξονική πίεση των δοκιμίων. Η τεχνική φόρτισης που ακολούθησε ήταν να αυξήσει την πίεση των πρεσών σε μια χαμηλή σχετικά τιμή P_3 , μετά να την αυξήσει σε μια ενδιάμεση τιμή P_2 και στη συνέχεια σε μια μέγιστη τιμή φόρτισης P_1 έως την αστοχία του δοκιμίου. Η γενική μορφή θραύσης που παρατήρησε, είναι αυτή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 10 - Μορφές θραύσης, T_1 : Πρωτογενείς ρωγμές, NS : κάθετες διατμητικές ρωγμές, IS : Ρωγμές διάτμησης με κλίση, T_2 : δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές (Πηγή: Lajtai 1975)

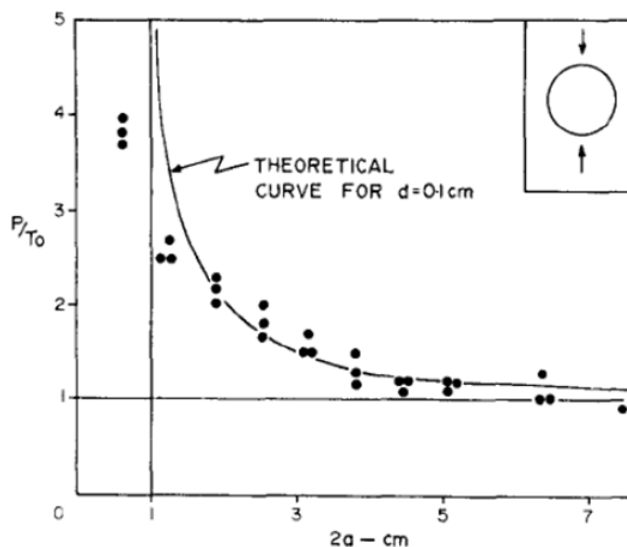
Οι 2 πρώτες (T1 και NS) εμφανίζονται σε σημεία συγκέντρωσης εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων που υπάρχουν γύρω από το άνοιγμα στην άρρηκτη μορφή του. Οι αρχικές εφελκυστικές, είναι επίπεδες επιφάνειες ρωγμάτωσης που σχηματίζονται παράλληλα με τη διεύθυνση της μέγιστης θλιπτικής τάσης. Η κάθετη ρωγμή διάτμησης δεν είναι επίπεδη αλλά αποτελείται από μια ζώνη ρωγμάτωσης με διακριτό πλάτος. Θεωρείται σαν επιφάνεια αστοχίας που σχηματίζεται σε περιοχές όπου η τοπική θλιπτική τάση υπερβαίνει την αντοχή του υλικού σε θλίψη. Αρχικά η επιφάνεια αυτή εξαπλώνεται σε μια στενή περιοχή σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση της μέγιστης θλίψης και στη συνέχεια επεκτείνεται σε πλάτος ώστε να δημιουργήσει μεγαλύτερο όγκο θρυμματισμένου υλικού. Οι πλάγιες ρωγμές διάτμησης και οι δευτερογενείς εφελκυστικές συνδυάζονται ώστε να προκαλέσουν την αστοχία του ανοίγματος. Και οι δύο τύποι ρωγμάτωσης σχετίζονται με την επέκταση της ζώνης κατάκλασης προς την περιοχή συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Οι πλάγιες ρωγμές σχηματίζονται μέσα σε αυτή τη ζώνη αστοχίας και μοιάζουν με την επιφάνεια διάτμησης που παρατηρείται κατά την αστοχία άμμου στην κλασική τριαξονική δοκιμή φόρτισης της εδαφομηχανικής. Οι δευτερογενείς εφελκυστικές, σχηματίζονται κατά μήκος του άρρηκτου υλικού δίπλα στην ζώνη κατάκλασης και ακολουθούν την τροχιά της αρχικής ρωγμάτωσης της μέγιστης τάσης. Η εξέλιξη της θραύσης πέρα από το στάδιο εμφάνισης των αρχικών εφελκυστικών και των κάθετων διατμητικών ρωγμών, είναι υπεύθυνη για την αστοχία του ανοίγματος σε ψαθυρά υλικά.

Στα πειράματα σε γύψο, οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές ενώνονται είτε με τις κάθετες είτε με τις επικλινείς ρωγμές διάτμησης. Είναι ακόμα κατανοητό ότι η ανάπτυξη ενός ζεύγους δευτερεύοντων εφελκυστικών ρωγμών και ο επακόλουθος λυγισμός των τεμαχίων του υλικού μεταξύ τους, μπορεί να γίνει χωρίς την ανάπτυξη μηχανισμού διάτμησης. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της θραύσης κάτω από χαμηλή πλευρική πίεση, φαίνεται να είναι ο έλεγχός της από τις δευτερογενείς αυτές εφελκυστικές ρωγμές. Η εμφάνιση αυτού του γεγονότος συνοδεύεται πάντα από έκλυση μεγάλης ποσότητας ενέργειας που σηματοδοτείται από ισχυρά ακουστικά και σεισμικά σήματα. Αντίθετα, η θραύση κάτω από υψηλή πλευρική πίεση, ελέγχεται από τις επικλινείς ρωγμές διάτμησης, χωρίς όμως να εξαλείφεται τελείως ο ρόλος των δευτερογενών εφελκυστικών. Στην περίπτωση αυτή, ο ρόλος των αρχικών εφελκυστικών περιορίζεται ή εμφανίζεται αργότερα μαζί σχεδόν με τις δευτερογενείς και ο μηχανισμός αστοχίας είναι η κατάκλαση. Η επιφάνεια αστοχίας κατά μήκος της οποίας το δοκίμιο αστοχεί, ποικίλει σε θέση και κλίση ανάλογα με εξωτερικές επιδράσεις. Δύο από αυτές τις επιδράσεις είναι το σχήμα της οπής και τη σύστημα των πλακών φόρτισης. Το σχήμα της οπής επηρεάζει το μοτίβο της αστοχίας και μπορεί να διευκολύνει την πτώση τεμαχίων του υλικού που οριοθετείται από τις δευτερογενείς εφελκυστικές και τις πλάγιες διατμητικές ρωγμές (Lajtai , 1975).



Εικόνα 11 - a) Ρωγμάτωση πριν τη θραύση γύψινου δοκιμίου με χαμηλή πλευρική πίεση όπου οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές έχουν ενωθεί με τις πλάγιες διατμητικές b) Δοκίμιο γύψου που έχει αστοχήσει σε θλίψη με μικρή πλευρική πίεση και χωρίς την ανάπτυξη πλάγιων διατμητικών ρωγμών (Πηγή: Lajtai 1975)

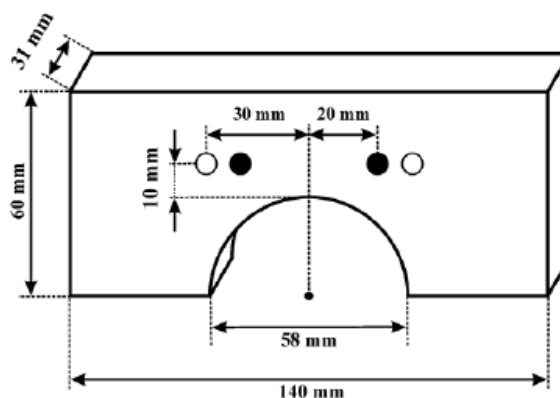
Σε παλαιότερα πειράματά του (1972), ο Lajtai επισήμανε την επιρροή της βάθμωσης της τάσης σε προβλήματα θραυστομηχανικής, καθώς οι περισσότερες θεωρίες θραύσης βασίζονται σε ομοιογενή πεδία τάσεων όμως στην πραγματικότητα το πεδίο είναι ανομοιογενές. Αφού δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, η έναρξη ρωγμών από αυτές τις περιοχές μπορεί να ελέγχεται από τη βάθμωση της τάσης (stress gradient). Το μοντέλο υλικού που χρησιμοποίησε, ήταν αυτό που χρησιμοποιείται σε όλες τις θεωρίες που βασίζονται στον Griffith και περιλαμβάνει ένα μόνο ελάττωμα, την οπή στο κέντρο. Μιας όμως που το υλικό (γύψος) έχει από μόνο του φυσικά ελαττώματα (μικροκενά), τα οποία θα αλληλεπιδρούν με το τεχνητό ελάττωμα (την οπή), η θεωρία θα δώσει λανθασμένες τιμές αντοχής στην ρωγμάτωση. Αν το μέγεθος της οπής είναι σχετικά μεγάλο, τότε θα περιοριστεί η επιρροή των φυσικών ελαττωμάτων του υλικού. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα σε δοκίμια με κυκλικές οπές όπου επιβεβαιώνεται η υπερεκτίμηση της τάσης ρωγμάτωσης σε μικρά ανοίγματα, λόγω του ότι στην θεωρία δεν λαμβάνονται υπόψη τα φυσικά ελαττώματα του υλικού.



Εικόνα 12 - Πειραματικά αποτελέσματα και θεωρητική καμπύλη φορτίου - διαμέτρου σε δοκίμια με κυκλικά ανοίγματα κάτω από μονοαξονική θλίψη (Πηγή: Lajtai, 1971)

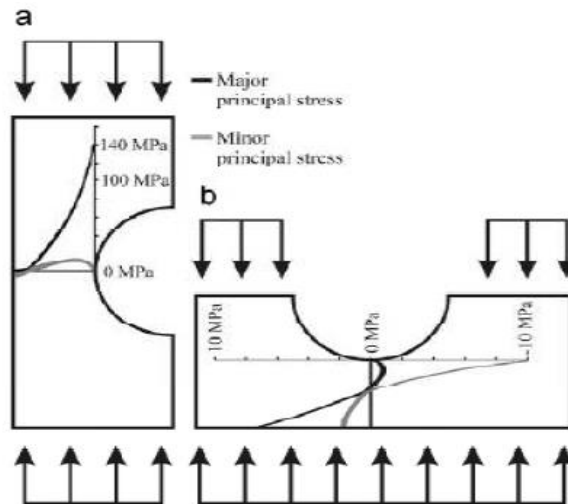
1.5.3 Η προσέγγιση των Ganne, Vervoort και Wevers

Άλλη μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση του προβλήματος προέρχεται από τους ερευνητές P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers (2006), οι οποίοι περιέγραψαν τις φάσεις αστοχίας δοκιμίων ασβεστολίθου σύμφωνα με την καταγραφείσα αθροιστική ενέργεια (cumulative energy) ακουστικής εκπομπής. Η μεθοδολογία τους χρησιμοποιείται για την περιγραφή και έλεγχο της αστοχίας δοκιμίων κάτω από θλιπτικές τάσεις αλλά και κάτω από εφελκυστικές τάσεις (σε μια διεύθυνση). Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, τα δοκίμια ήταν ορθογωνικά, διαστάσεων 31x60x140 mm με οπή διαμέτρου 58 mm στο κέντρο, ενώ καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής, δύο ευρυζωνικοί αισθητήρες με εύρος συχνοτήτων 50kHz – 2MHz, κατέγραφαν τα γεγονότα ακουστικής εκπομπής.



Εικόνα 13 - Γεωμετρία δοκιμίων και θέση τοποθέτησης των αισθητήρων (Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

Η διεύθυνση φόρτισης των δοκιμίων καθορίζει τη διανομή των τάσεων. Αν το εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται στις μικρές πλευρές του ορθογωνίου (60x31mm), έχουμε συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων δίπλα στην οπή, ενώ αν το φορτίο εφαρμόζεται στις μεγάλες πλευρές (140x60mm), οι τάσεις που συγκεντρώνονται στην οπή (ακτινικές και εφαπτομενικές) είναι εφελκυστικές.



Εικόνα 14 - Οι δυο διευθύνσεις φόρτισης των δοκιμίων
(Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

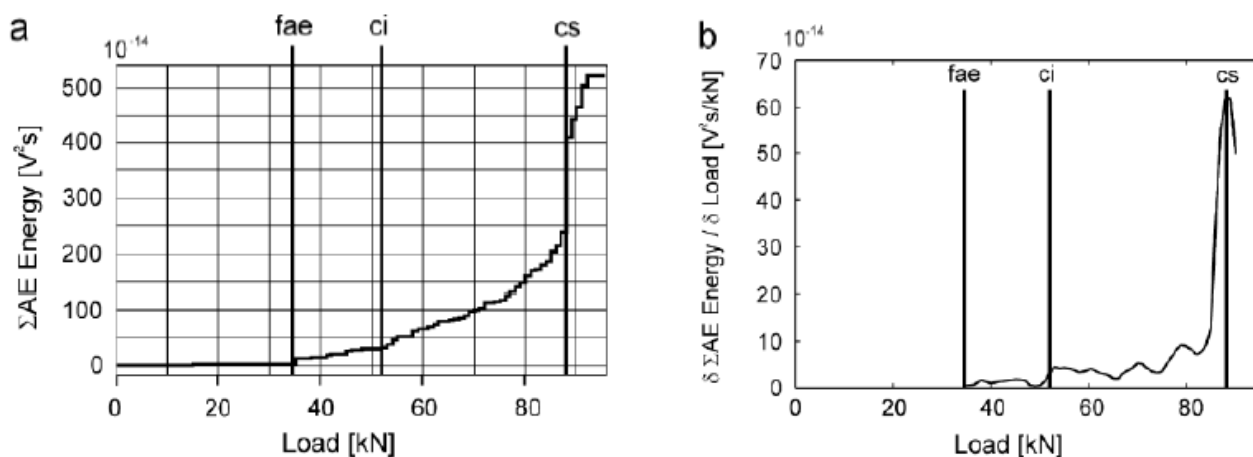
Μεταξύ μηχανής φόρτισης και δοκιμίου τοποθετήθηκε φύλλο τεφλόν για τον περιορισμό των δυνάμεων τριβής. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν με ταινία τεφλόν και εξασφαλίστηκε η σύζευξη τους με το υλικό, μέσω γράσου (vacuum grease). Η προενίσχυση ορίστηκε στα 49dB ενώ το κατώφλι στα 16dB. Η ταχύτητα του διαμήκου ελαστικού κύματος υπολογίστηκε στα 5700m/s. Όλα τα γεγονότα με πλάτη μικρότερα των 22dB παραλείπονται για τη διατήρηση της ακρίβειας του εντοπισμού. Η ενέργεια ενός γεγονότος υπολογίζεται ως ολοκλήρωμα του πλάτους στο τετράγωνο προς το χρόνο (του πρώτου Hit από κάθε event).

Η προέλευση των ρωγμών μπορεί να είναι:

1. Φυσική (προυπάρχουσες ρωγμές)
2. Προερχόμενη από τη φόρτιση ή
3. Προερχόμενη από την προετοιμασία του δείγματος

Αστοχία στη διάταξη θλίψης του δοκιμίου

Βασιζόμενοι στην εξέλιξη της καταγραφόμενης ενέργειας ΑΕ, εντοπίστηκαν 4 φάσεις κατά τη θλίψη:



Σχήμα 4 - Διαγράμματα α)αθροιστικής ενέργειας σε συνάρτηση με το φορτίο και β)παραγώγου αθροιστικής ενέργειας προς το φορτίο σε συνάρτηση με το φορτίο fae=πρώτο σήμα ΑΕ, ci=Αρχή συστηματικής εξέλιξης ρωγμών, cs=Αλληλεπίδραση και συνένωση ρωγμών (Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

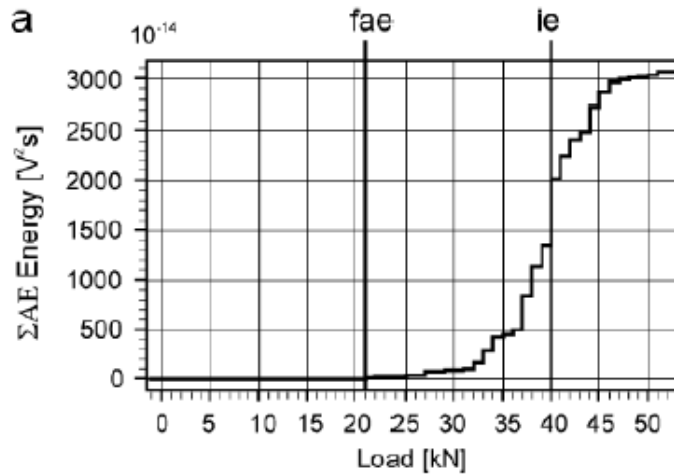
1ο στάδιο - «Κανένα σήμα»: Σε αυτό το στάδιο, δεν καταγράφεται κανένα σήμα ΑΕ. Γίνεται λοιπόν η υπόθεση πως δεν δημιουργείται καμία νέα ρωγμή ούτε μεγαλώνει κάποια ήδη υπάρχουσα. Αυτό φυσικά δεν είναι απόλυτο, καθώς υπάρχουν και ρωγμές που δεν απελευθερώνουν ενέργεια που να μπορεί να καταγραφεί

2ο στάδιο – «Γραμμική αύξηση»: Μετά το πρώτο σήμα ΑΕ (fae) η αθροιστική ενέργεια ΑΕ αυξάνεται γραμμικά σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο φορτίο. Το στάδιο αυτό ξεκινά περίπου στο 23-37% της τάσης αστοχίας. Σύμφωνα με τους μελετητές (P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers), το στάδιο αυτό εξαρτάται από τις ρυθμίσεις, τη θέση, το εύρος συχνοτήτων και το υλικό σύζευξης των αισθητήρων.

3ο στάδιο– «Συστηματική δημιουργία και προώθηση των ρωγμών»: Στο στάδιο αυτό παρατηρούμε ότι αυξάνει η κλίση της αθροιστικής ενέργειας ΑΕ σε συνάρτηση με το φορτίο. Η αρχή του σταδίου αυτού υπολογίζεται στο 56-62% του φορτίου αστοχίας. Οι Cai et al.(2004) παρατήρησαν ότι το στάδιο αυτό ξεκινάει σε φορτίο 40-60% του φορτίου αστοχίας ανάλογα με το είδος του υλικού, ενώ άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η αύξηση της ρωγμάτωσης μπορεί να παρατηρηθεί σε φορτίο μεγαλύτερο του 60% του φορτίου αστοχίας

Αστοχία στη διάταξη εφελκυσμού του δοκιμίου

Βασιζόμενοι στην εξέλιξη της καταγραφόμενης ενέργειας ΑΕ, εντοπίστηκαν 3 φάσεις κατά τη θλίψη του δοκιμίου στην άλλη διεύθυνση όπου οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι εφελκυστικές:



Σχήμα 5 - Διάγραμμα αθροιστικής ενέργειας σε συνάρτηση με το φορτίο
(Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

1ο στάδιο-«Κανένα σήμα»: Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση, υπάρχει και εδώ το στάδιο στο οποίο δεν καταγράφεται κανένα σήμα ΑΕ.

2ο στάδιο-«Αύξηση των γεγονότων»: Μετά το fae, η αθροιστική ενέργεια ΑΕ αυξάνεται σε συνάρτηση του επιβαλλόμενου φορτίου. Το στάδιο αυτό ξεκινά στο 50-70% της δύναμης στην οποία ξεκινάει το επόμενο στάδιο.

3ο στάδιο- «Συστηματική δημιουργία και προώθηση των ρωγμών»: Το στάδιο αυτό έχει σαν χαρακτηριστικό γνώρισμα μια ενδοκρυσταλλική ρωγμή (intergranular crack). Η ρωγμή αυτή έχει κλίση 0ο και εξελίσσεται κατά μήκος των ορίων των κόκκων αλλά και κατά μήκος των επιπέδων διάσπασης των κρυστάλλων. Εάν το φορτίο συνεχίζει να αυξάνεται, συμβαίνει και μια δεύτερη αυξομείωση της αθροιστικής ενέργειας κατά την οποία η παραπάνω ρωγμή επεκτείνεται και σταματάει μετά.

2 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

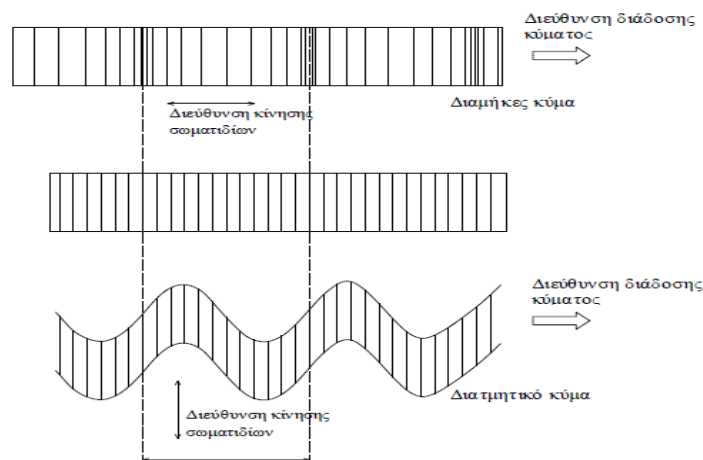
2.1 ΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Ο ήχος είναι η αίσθηση που προκαλείται λόγω της διέγερσης των αισθητηρίων οργάνων της ακοής από μεταβολές πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτές οι μεταβολές διαδίδονται με τη μορφή ηχητικών κυμάτων. Το μηχανικό κύμα είναι ο μηχανισμός διάδοσης μιας ταλάντωσης και γενικότερα μιας διαταραχής σε ένα υλικό μέσο. Με το κύμα μεταφέρεται ενέργεια από την πηγή παραγωγής του αλλά όχι μάζα. Ανάλογα με το μηχανισμό διάδοσης, τα μηχανικά κύματα διακρίνονται σε εγκάρσια και διαμήκη. Το μέσο διάδοσης των κυμάτων μπορεί να είναι οποιοδήποτε στερεό, υγρό, αέριο. Τα χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη με τα οποία περιγράφουμε το κύμα και τα κυματικά φαινόμενα είναι η περίοδος (T), η συχνότητα (f) και το μήκος κύματος (λ). Η σχέση που συνδέει τα μεγέθη αυτά ονομάζεται εξίσωση του κύματος:

$$c = \lambda f$$

όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος

Τα κύματα που διαδίδονται στο χώρο με ορισμένη ταχύτητα λέγονται τρέχοντα ή οδεύοντα ή διαδιδόμενα κύματα σε αντίθεση προς τα στάσιμα κύματα, τα οποία είναι παγιδευμένα σε συγκεκριμένο τμήμα του ελαστικού μέσου (συμβολή δύο κυμάτων ίδιας συχνότητας, ταχύτητας, πλάτους, ίδιας διεύθυνσης διάδοσης αλλά με αντίθετες φορές). Ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζουν η διεύθυνση της ταλάντωσης με τη διεύθυνση διάδοσης της ταλάντωσης έχουμε τα εγκάρσια και τα διαμήκη κύματα. Στα πρώτα η εν λόγω γωνία είναι 90° , ενώ στα δεύτερα είναι 0° . (Εικόνα 15).



Εικόνα 15 - Πάνω: Διαμήκη κύματα, Κάτω: Εγκάρσια κύματα (Πηγή: Σοφινός & Νομικός, 2008)

Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο δια μέσου των στερεών σωμάτων. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται δια μέσου όλων των στερεών, υγρών και αερίων σωμάτων.

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων διαμέσου ενός ελαστικού μέσου εξαρτάται κυρίως από το αν είναι εγκάρσιο ή διαμήκες και από τις ιδιότητες του ελαστικού μέσου, διότι η ενέργεια μεταβιβάζεται από το ένα μόριο στο άλλο, εξ αιτίας της σύζευξης που υπάρχει ανάμεσα τους. Οι ταχύτητες διάδοσης υπολογίζονται από τους τύπους:

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

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2 \cdot (1+\nu)}}$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1-2\nu)}, G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$$

όπου, V_p η ταχύτητα διάδοσης διαμήκους V_s η ταχύτητα διάδοσης διατμητικού (εγκάρσιου) E το μέτρο ελαστικότητας, ν ο λόγος Poisson K το μέτρο ελαστικής συστολής G το μέτρο διάτμησης.

Κάθε πέτρωμα διαθέτει τη χαρακτηριστική του ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων και έτσι είναι δυνατή μια έμμεση εκτίμηση για τις μηχανικές του ιδιότητες. Έχοντας ως μέσο διάδοσης το πέτρωμα, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος εξαρτάται από την πυκνότητα του πετρώματος και τις ελαστικές του ιδιότητες. Τα μηχανικά κύματα κατά τη διάδοσή τους, ανακλώνται σε μικροσκοπικές επιφάνειες με συνέπεια τη μεταβολή της ταχύτητάς τους. Στα πετρώματα οι μέθοδοι που αξιοποιούν τη διάδοση των μηχανικών κυμάτων καταγράφουν υπερήχους. Αφού το μηχανικό κύμα έχει την ανακλαστική ιδιότητα, οι ασυνέχειες της δομής του πετρώματος (γεωλογικά ή τεκτονικά χαρακτηριστικά, κλπ) θα το επηρεάζουν και άρα θα υπάρχει διαφορά ταχύτητας ανάμεσα σε δυο καταστάσεις του πετρώματος, δηλαδή την άρρηκτη και την ρωγματωμένη. Τα δομικά χαρακτηριστικά στα πετρώματα είναι πολύ περισσότερα και σε μεγαλύτερη κλίμακα από αυτά που παρατηρούμε στις εργαστηριακές δοκιμές κι αυτό έχει σημαντική επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά ολόκληρης της μάζας του πετρώματος (Μπακογιάννης Σ. 2011). Από την πλευρά της βραχομηχανικής, οι ασυνέχειες και τα ρήγματα έχουν πολύ μεγάλη σημασία καθώς δημιουργούν συνεχείς, συχνές και σχεδόν λείες επιφάνειες διαχωρισμού, οι οποίες διαχωρίζουν τα άρρηκτα τεμάχια του βράχου που μπορούν να ολισθήσουν το ένα πάνω στο άλλο. Μπορούμε να πούμε ότι η αντοχή του πετρώματος προσδιορίζεται εξ ολοκλήρου από τις ιδιότητες των ασυνεχειών και αυτή η κατάσταση οδηγεί στη διάκριση ανάμεσα στη συμπεριφορά του "πετρώματος" και της "μάζας του πετρώματος" (Jaeger and Cook 2007).

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με τη φόρτιση ενός ψαθυρού υλικού επέρχεται σπάσιμο των δεσμών και δημιουργία νέων επιφανειών που λειτουργούν σαν συγκεντρωτές τάσεων μέχρις ότου η διάδοση τους να οδηγήσει στη θραύση. Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων υπερβεί μια οριακή τιμή, τότε απελευθερώνεται απότομα η συσσωρευμένη ενέργεια η οποία διαδίδεται μέσα στο υλικό με τη μορφή ελαστικών κυμάτων. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως Ακουστική Εκπομπή.

2.2 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ

2.2.1 Ορισμός

Σύμφωνα με ορισμό της ISRM (2002), ως Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό κάποιου υλικού. Η προέλευση της AE στα πετρώματα σχετίζεται με ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος ή με έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, όταν αυτό βρίσκεται υπό ένταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή. Τα κύματα της AE διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες AE (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων) σε επαφή με αυτό, οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με τη σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα AE. Η τεχνική αυτή, που σήμερα γνωρίζει σημαντική ανάπτυξη διεθνώς, είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique, AET). Σε αντίθεση με αυτό που δηλώνει το όνομα της, τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15 kHz έως μερικά MHz, δηλ. σε συχνότητες υπερήχων.

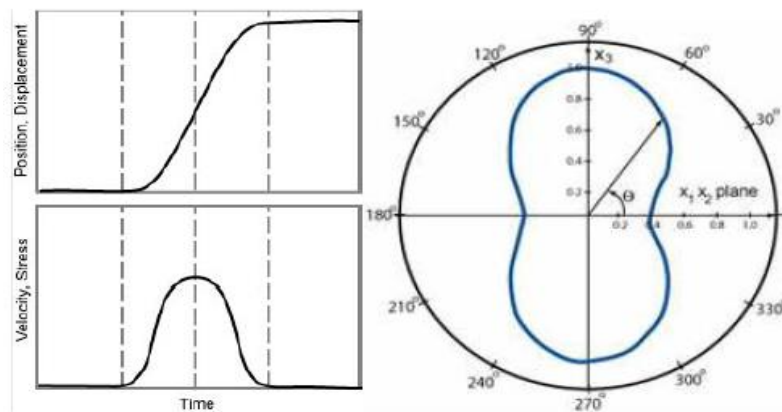
Ιστορικά, οι μελέτες των Obert και Duvall (1942) για την πρόβλεψη των βίαιων εκτινάξεων των πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας του 1930, μπορούν να θεωρηθούν ως η αρχή της εφαρμογής της AET στη μηχανική πετρωμάτων.

Η ανάπτυξη της μεθόδου ευνοήθηκε από την έρευνα και σε άλλα υλικά πλην του πετρώματος. Από τις πιο σημαντικές μελέτες, θεωρούνται αυτές του Kaiser (1950), ο οποίος παρατήρησε ότι τα υλικά έχουν “μνήμη” των εφαρμοσθέντων σε αυτά τάσεων, φαινόμενο γνωστό ως φαινόμενο Kaiser (Lavrion, 2003).

Στη μηχανική πετρωμάτων η AET έχει εφαρμοσθεί σε δύο κυρίως πεδία: α) στη μελέτη του μηχανισμού θραύσης των ψαθυρών πετρωμάτων, με την ανάλυση των παραμέτρων AE και τον εντοπισμό της θέσης της πηγής της AE, και β) στη μελέτη της εντατικής κατάστασης του επί τόπου πετρώματος με χρήση του φαινομένου Kaiser (Σοφιανός και Νομικός, 2008).

2.2.2 Βασικές αρχές διάδοσης των ελαστικών κυμάτων

Ένα πρωτογενές κύμα που απελευθερώνεται από την πηγή ΑΕ φαίνεται στο διάγραμμα θέσης-χρόνου που ακολουθεί. Η κυματομορφή της μετατόπισης είναι μια συνάρτηση βήματος (step function) που αντιστοιχεί στην μόνιμη δομική αλλαγή του υλικού που σχετίζεται με τις διεργασίες στην πηγή. Οι κυματομορφές της ταχύτητας και της τάσης έχουν τη μορφή συναρτήσεων παλμών. Το πλάτος και το ύψος του παλμού εξαρτάται από τη δυναμική της πηγής. Πηγές όπως μικροσκοπικές ρωγμές, ολοκληρώνονται σε χρόνο της τάξης των μερικών μς γι' αυτό και ο παλμός είναι μικρός σε διάρκεια. Το πλάτος και η ενέργεια του παλμού ποικίλουν ανάλογα με το είδος της πηγής (π.χ. από μικροσκοπικές εκτοπίσεις έως μετακινήσεις έως διάδοση ρωγμών).



Σχήμα 6 - Αριστερά: Το κύμα στην πηγή ως ένας εντατικός παλμός τάσης που αντιστοιχεί σε μία μόνιμη ζημία του υλικού. Δεξιά: Γωνιακή εξάρτηση της ΑΕ που εκπέμπεται από μια επεκτεινόμενη μικρορωγμή. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας κατευθύνεται στις 90ο και 270ο, κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής (Πηγή: http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm)

Τα κύματα ξεκινάνε από την πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις έχοντας συχνά μια ισχυρή κατευθυντικότητα ανάλογη της φύσης της πηγής όπως φαίνεται στην επάνω δεξιά εικόνα. Η ταχεία κίνηση είναι απαραίτητη για την εμφάνιση ενός αρκετά μεγάλου ποσοστού της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την παραμόρφωση ως ακουστική εκπομπή. Καθώς το πρωτογενές κύμα διαδίδεται εντός του υλικού η μορφή του μεταβάλλεται σημαντικά. Θεωρίες πηγής και κίνησης των ελαστικών κυμάτων διερευνώνται για την εξακρίβωση της πολύπλοκης σχέσης μεταξύ του παλμού στην πηγή ΑΕ και της συνοδευόμενης κίνησης στη θέση ανίχνευσης.

Το σήμα που ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα είναι συνδυασμός πολλών τμημάτων της αρχικής κυματομορφής. Όπως η ΑΕ φεύγει από την πηγή, το κύμα διαδίδεται σφαιρικά και ανακλάται από τα όρια του αντικειμένου. Τα σήματα που είναι σε φάση μεταξύ τους όπως φτάνουν τον αισθητήρα προκαλούν συμβολή. Η αλληλεπίδραση των κυμάτων με φυσικές και τεχνητές ασυνέχειες στο

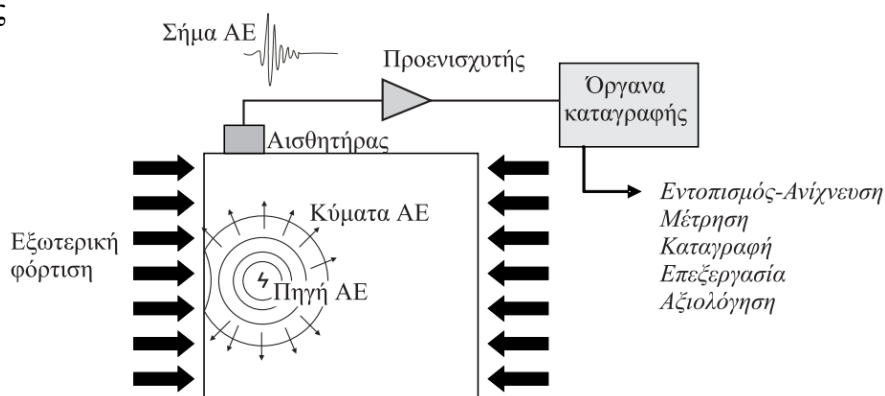
υλικό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση, τη διασκόρπιση, τη σκέδαση και τις πολλαπλές διαδρομές, η γνώση των οποίων είναι πολύ σημαντική στην αναγνώριση και κατανόηση των κυματομορφών (<http://www.ndt-ed.org/>). Στη συνέχεια, αναλύεται η έννοια της εξασθένησης.

Εξασθένηση (attenuation)

Η ένταση ενός σήματος ΑΕ που ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα εξαρτάται από την απόσταση του αισθητήρα από την πηγή. Όσο πιο κοντά είναι στην πηγή ο αισθητήρας, τόσο υψηλότερη ένταση ανιχνεύει. Αυτό οφείλεται στην εξασθένηση. Υπάρχουν τρεις βασικές αιτίες εξασθένησης. Η πρώτη είναι η γεωμετρική εξασθένηση σύμφωνα με την οποία, καθώς ένα κύμα ΑΕ φεύγει από την πηγή, το πλάτος του μειώνεται καθώς μεγαλώνει η απόστασή του από αυτήν. Η εξήγηση είναι απλή και οφείλεται στην διατήρηση της ενέργειας. Η δεύτερη αιτία είναι η απόσβεση λόγω του μέσου διάδοσης σύμφωνα με την οποία το πλάτος μειώνεται εκθετικά με την απόσταση. Καθώς το κύμα ταξιδεύει μέσα σε ένα υλικό, η ελαστική και η κινητική του ενέργεια απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω της παραμόρφωσης του μέσου διάδοσης. Η τρίτη αιτία είναι η σκέδαση των κυμάτων σύμφωνα με την οποία οι γεωμετρικές ατέλειες (π.χ. όρια των κόκκων) και τα κατασκευαστικά όρια του υλικού, ανακλούν μερική από την ενέργεια του κύματος. Η εξασθένηση στα υλικά μπορεί να μετρηθεί με μια πολύ απλή διαδικασία γνωστή ως μέθοδος Hsu-Nielsen (<http://www.ndt-ed.org/>).

2.2.3 Σήματα ΑΕ

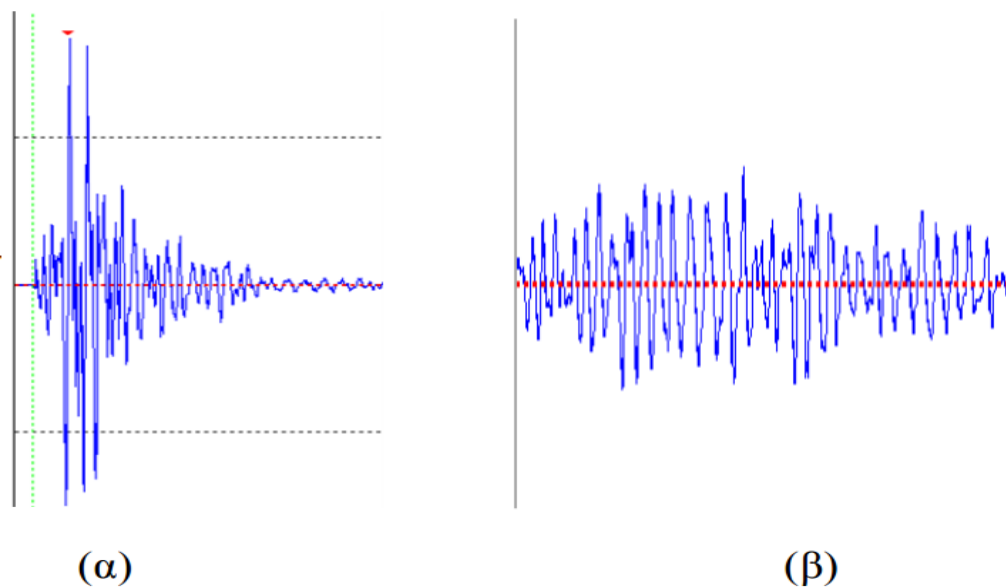
Στην Εικόνα 16 παριστάνεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ. Ένα γεγονός ΑΕ στην πηγή προκαλεί απελευθέρωση ενέργειας η οποία διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα αυτό διαδίδεται μέχρι τα όρια του σώματος και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας



Εικόνα 16 - Τρόπος λειτουργίας του συστήματος ακουστικής εκπομπής (Σοφιανός και Νομικός 2008)

Το κύμα ΑΕ στην πηγή περιέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μερικές δεκάδες kHz έως μερικά MHz. Γενικά, το ανιχνευόμενο σήμα έχει πολύπλοκη μορφή, που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένιση, ανακλάσεις και συμβολές) όσο και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Αυτές οι επιδράσεις διαφοροποιούν τα ανιχνεύσιμα σήματα ΑΕ από αυτά που εκπέμπονται από την πηγή.

Η δραστηριότητα ΑΕ περιγράφεται συνήθως από παραμέτρους συσχετισμένες με το πλήθος και το μέγεθος των γεγονότων ΑΕ. Τα σήματα ΑΕ, που λαμβάνονται από τον αισθητήρα, μπορούν να διακριθούν σε συνεχούς και κρουστικού τύπου ενώ τα δεδομένα τους διακρίνονται αντίστοιχα σε χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα (time driven data) και δεδομένα συσχετισμένα με την κρουστική μορφή ενός σήματος ΑΕ (hit driven data). Ένα κρουστικό σήμα θεωρείται ως προερχόμενο από ένα διακριτό γεγονός. Όταν ο ρυθμός των γεγονότων ΑΕ είναι μεγάλος τα σήματα τους επικαλύπτονται και συνδυάζονται ώστε να σχηματίσουν σήματα συνεχούς μορφής. Στην Εικόνα 17 δείχνεται ένα τυπικό παράδειγμα των δύο τύπων σημάτων ΑΕ.



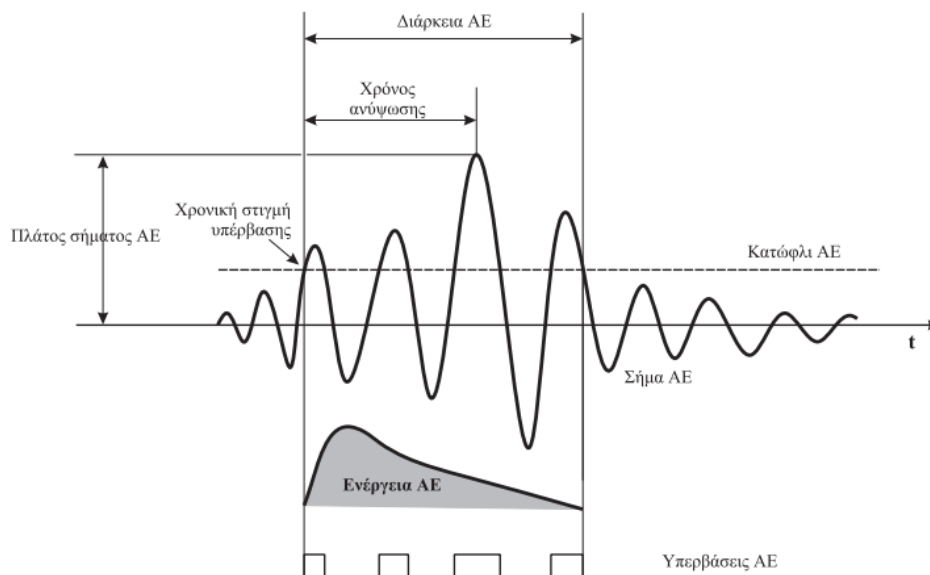
Εικόνα 17 - Δύο μορφές σήματος ΑΕ
α) Κρουστικό σήμα ΑΕ β) Συνεχές σήμα ΑΕ
(Πηγή: Σοφιανός & Νομικός 2008)

Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι τα περισσότερα σήματα ΑΕ/MS περιέχουν συνιστώσες κυμάτων χώρου, δηλαδή κυμάτων P και S. Συνοπτικά αναφέρουμε ότι τα P είναι διαμήκη κύματα που φτάνουν πρώτα από τον παλμό της ενέργειας στην πηγή και τα S είναι εγκάρσια κύματα που φτάνουν μετά τα P, είναι πιο αργά αλλά πιο καταστροφικά.

Τα σήματα συνεχούς μορφής χαρακτηρίζονται συνήθως από τη μέση τετραγωνική ρίζα του πλάτους URMS του καταγραφόμενου σήματος. Για το χαρακτηρισμό ενός κρουστικού τύπου σήματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός μίας τάσης κατώφλιου (threshold) πάνω από το θόρυβο του περιβάλλοντος. Το κατώφλι καθορίζεται μεταξύ άλλων και από το πλάτος των καταγραφόμενων σημάτων ΑΕ και το επιθυμητό μέγεθος καταγραφόμενων δεδομένων. Όταν το σήμα ΑΕ υπερβεί το κατώφλι τότε καταγράφεται ένας κτύπος (hit). Σε μία τυπική μελέτη ΑΕ καταγράφονται εκατοντάδες ή χιλιάδες σήματα καθιστώντας την επεξεργασία και την αξιολόγηση ιδιαίτερα χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό από κάθε κυματομορφή εξάγονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι, που καλούνται παράμετροι ΑΕ. Αυτές διευκολύνουν την ανάλυση και τη σύγκριση μεταξύ των λαμβανομένων σημάτων (Κατσικογιάννη, 2006).

2.2.4 Παράμετροι γεγονότων ΑΕ

Οι κύριες παράμετροι, που χαρακτηρίζουν ένα σήμα ΑΕ κρουστικού τύπου, είναι το πλάτος του σήματος (amplitude), ο χρόνος ανύψωσης (risetime) και η διάρκεια του σήματος (duration). Η παράμετρος “απαριθμήσεις” (counts) προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι, ενώ το πλάτος είναι η μέγιστη τάση της κυματομορφής ΑΕ και αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος. Το διάστημα μεταξύ της χρονικής στιγμής που το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μέγιστου πλάτους ονομάζεται χρόνος ανύψωσης (risetime). Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται γραφικά οι παραπάνω παράμετροι.



Εικόνα 18 - Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και οι βασικοί της παράμετροι (Πηγή: Σοφιανός & Νομικός 2008)

Το κατώφλι της ΑΕ στις δοκιμές το ορίζουμε συνήθως ανάλογα με τους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες και την ένταση του σήματος που αναμένουμε να καταγράψουμε. Μπορούμε επίσης να επιλέξουμε αν το θέλουμε σταθερό (fixed) σε μια τιμή της επιλογής μας, ή κυμαινόμενο (floating) σε περιπτώσεις υψηλού εξωτερικού θορύβου. Όταν ένα σήμα περάσει το κατώφλι, ανοίγει ένα κύκλωμα το οποίο πρέπει να κλείσει μόλις τελειώσει το σήμα και να ανοίξει ξανά μόλις ένα νέο σήμα περάσει το κατώφλι. Για να εξασφαλιστεί αυτό, το πρόγραμμα της ΑΕ μας επιτρέπει τη ρύθμιση κάποιων χρονικών παραμέτρων που είναι:

- **Hit Definition Time (HDT)** - Ο μέγιστος χρόνος διάρκειας ενός σήματος έτσι ώστε να αποφευχθούν τις ανακλάσεις του
- **Hit Lockout Time (HLT)** - Ο χρόνος αναμονής του συστήματος ώσπου να ξεκινήσει νέα καταγραφή
- **Peak Definition Time (PDT)** - Ο μέγιστος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του σήματος

Εμπειρικά έχει βρεθεί ότι πρέπει να ισχύει $HLT > HDT > 2 * PDT$. Το πρόγραμμα **AEWin** της ΑΕ που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία προτείνει:

PDT	HDT	HLT
20-50	100-200	300

Αν το HDT είναι πολύ χαμηλό, τότε το σύστημα μπορεί να μην πιάσει τον κτύπο στο σύνολό του και πιθανόν να δείξει τον ένα κτύπο σαν πολλαπλούς. Αν η παράμετρος HLT είναι πολύ υψηλή, τότε το σύστημα μπορεί να μην καταγράψει το επόμενο σήμα ΑΕ, ενώ αν είναι πολύ χαμηλό τότε μπορεί να καταγράψει ανακλάσεις και αργές συνιστώσες των κτύπων που είναι ανεπιθύμητες. Αν το PDT είναι υψηλό, τότε είναι πιθανόν να καταγραφούν λανθασμένες τιμές του χρόνου ανύψωσης. Γενικά προτείνεται το PDT να είναι όσο πιο χαμηλό γίνεται αλλά πάλι όχι τόσο ώστε να μην αναγνωρίζεται η πραγματική κορυφή (Unntorsson, 2013).

Παρακάτω παραθέεται το «λεξικό» της μεθόδου ΑΕ, με όλους τους όρους και τις παραμέτρους που πρέπει να γνωρίσουμε για την κατανόηση του φαινομένου:

- **Δοκιμή [NDT]** : Δοκιμές οι οποίες δεν βλάπτουν τη μελλοντική χρησιμότητα και λειτουργικότητα προκειμένου να ανιχνεύσουν, εντοπίσουν, μετρήσουν και εκτιμήσουν ατέλειες για την αξιολόγηση της ακεραιότητας, ιδιοτήτων και σύνθεσης; και για τη μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

- **Ακουστική Εκπομπή (AE) [Acoustic Emission]** : Ελαστικά κύματα παραγόμενα από την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από πηγές εντός ενός υλικού
- **Πηγή** : Η φυσική προέλευση ενός ή περισσοτέρων γεγονότων AE.
- **Συμβάν [Event]** : Τοπική αλλαγή εντός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή
- **Ενέργεια Πηγής [Source energy]** : Η ολική ενέργεια (όλων των μορφών) που διαχέεται από τις διεργασίες της πηγής.
- **Ενεργοποίηση (AE) [Activation]** : Η εκδήλωση AE λόγω εφαρμογής αιτίου (stimulus) όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα κ.λ.π.
- **Δραστηριότητα (AE) [Activity]** : Μέτρηση της ποσότητας εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας, των γεγονότων.
- **Ανίχνευση (AE)** : Αναγνώριση της παρουσίας σήματος (πρακτικός/τυπικός επιτυγχάνεται όταν το σήμα διασχίζει το όριο ανίχνευσης)
- **Αισθητήρας** : Μοφοτροπέας που μετατρέπει τα κινούμενα κύματα AE σε ηλεκτρική τάση
- **Κανάλι [Channel]** : Ένας αισθητήρας AE και ο συναφής εξοπλισμός για ανίχνευση και μέτρηση των σημάτων που έρχονται από αυτόν.
- **Σήμα (AE)** : Το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μοφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας)
- **Θόρυβος [Noise]** : Μη σχετικές ενδείξεις; σήματα παραγόμενα από αιτίες διαφορετικές από αυτές τις AE, ή από πηγές AE που δεν έχουν σχέση με το σκοπό της δοκιμής.
- **Guard Sensors** : Αισθητήρες των οποίων η κύρια λειτουργία είναι η εξάλειψη εξωτερικού θορύβου βασιζόμενοι στις διαφορές χρόνου άφιξης.
- **Χτύπος [Hit]** : Η ανίχνευση/διαδικασία εντοπισμού και μέτρησης ενός σήματος AE σε ένα κανάλι.
- **Περιγραφή Σήματος [Signal Description]** : Το αποτέλεσμα της διαδικασίας: μια ψηφιακή (αριθμητική) περιγραφή του σήματος AE και/ή του περιβαλλοντικού του πλαισίου.
- **Χαρακτηριστικά Σήματος [Signal Features]** : Μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος AE, όπως το πλάτος, ενέργεια σήματος AE, διάρκεια, counts και χρόνος ανύψωσης.
- **Hit Data Set**: Το σύνολο των χαρακτηριστικών ενός σήματος
- **Χρόνος Ανύψωσης [Risetime]** : Ο χρόνος στον οποίο ένα σήμα AE φτάνει στο μέγιστο του, αφότου διασχίσει για πρώτη φορά το όριο ανίχνευσης.

- **Πλάτος (AE) [Amplitude]** : Η μεγαλύτερη τιμή ηλεκτρικής τάσης στην κυματομορφή AE, συνήθως εκφρασμένη σε decibels.
- **Κατανομή Πλάτους [Amplitude Distribution]** : Αναπαράσταση του αριθμού των σημάτων AE συγκεκριμένου πλάτους, σχεδιασμένη ως συνάρτηση του πλάτους.
- **Απόσβεση [Attenuation]** : Απώλεια πλάτους με την απόσταση που διανύει το κύμα καθώς ταξιδεύει στην υπό δοκιμή δομή.
- **Counts** : Το πόσες φορές το σήμα AE διασχίζει το όριο ανίχνευσης. Επίσης γνωστό ως "ringdown counts", "threshold crossing counts"
- **Ενέργεια γεγονότος [Event Energy]** : Η ολική ελαστική ενέργεια (στην κυματομορφή) που απελευθερώνεται από ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής.
- **Συχνότητα [Frequency]** : Για ένα ταλαντευόμενο σήμα ή διεργασία, ο αριθμός των κύκλων που συμβαίνουν στη μονάδα του χρόνου.
- **Ένταση [Intensity]** : Μέτρο του μεγέθους των ανιχνευθέντων σημάτων εκπομπής (π.χ. μέσο πλάτος, μέση ενέργεια AE ή μέσος όρος υπερβάσεων).
- **Ισχύς Σήματος [Signal Strength]**: Η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνεύσιμου σήματος AE. Επίσης γνωστό ως "σχετική ενέργεια" (relative energy), "MARSE" και "ισχύς σήματος".
- **Parametric Inputs** : Περιβαλλοντικές μεταβλητές (π.χ. φορτίο, πίεση, θερμοκρασία) που μπορούν να μετρηθούν και αποθηκευτούν ως μέρος της περιγραφής των σημάτων AE.
- **Θέση πηγής [Location]**: Αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών αισθητήρων AE για τον προσδιορισμό των σχετικών θέσεων των πηγών ακουστικής εκπομπής.
- **(Κύρια) Ζώνη [Primary Zone]** : Η περιοχή που περιβάλλει έναν αισθητήρα, από τον οποίο μπορεί να ανιχνευθεί AE, και από όπου η AE θα χτυπήσει τον αισθητήρα πριν χτυπήσει σε οποιοδήποτε άλλο αισθητήρα.
- **Συνεχής εκπομπή [Continuous emission]** : Ποιοτική περιγραφή του συνεχούς σήματος παραγόμενου από ταχέως εκδηλωνόμενα συνεχόμενα γεγονότα ακουστικής εκπομπής.
- **Φαινόμενο Felicity** (Το αντίστροφο του φαινομένου Kaiser) : Η παρουσία AE σε επίπεδα φόρτισης κάτω από την προηγούμενη μέγιστη.
- **Φαινόμενο Kaiser** : Η απουσία ανιχνεύσιμης ακουστικής εκπομπής σε ένα σταθερό επίπεδο ευαισθησίας, έως ότου υπερβούμε τα προηγούμενα εφαρμοσθέντα επίπεδα φόρτισης

- **kHz:** μονάδα μέτρησης (SI) της συχνότητας, 1000 κύκλοι ανά δευτερόλεπτο

Μετρώντας τις αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με το μηχανισμό γένεσης των σημάτων ΑΕ. Όμως αυτά τα συμπεράσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή καθότι η κυματομορφή των σημάτων επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων όπως η φύση του υλικού, η διαδρομή που ακολουθεί μέχρι την ανίχνευση του, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και το καταγραφικό σύστημα. Πρέπει ακόμα να σημειωθεί, ότι η συσσωρευμένη δραστηριότητα (N) και ο ρυθμός γεγονότων (NR) εξαρτώνται από την ευαισθησία του συστήματος παρακολούθησης και από το λόγο του σήματος προς το θόρυβο (SNR). Οι παράμετροι πλάτος (A), ενέργεια (E), συσσωρευμένη ενέργεια (ΣΕ) και ρυθμός ενέργειας (ER) εξαρτώνται από τους προαναφερθέντες παράγοντες και επίσης από την απόκριση συχνότητας του γενικού συστήματος παρακολούθησης (Σοφιανός & Νομικός 2008).

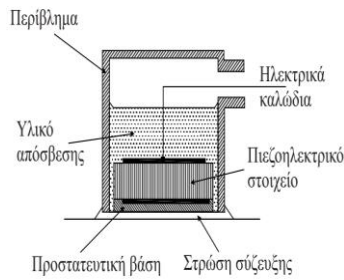
2.2.5 Συστήματα παρακολούθησης ΑΕ

Αισθητήρες και προενισχυτές

Για την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα πρέπει να γνωρίσουμε την ευαισθησία του και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες είναι αυτοί του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Αφορά ένα ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT (lead-zirconate-titanate) το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλεται στη επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες (sensors) μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και μορφοτροπείς (transducers). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας-μορφοτροπέας φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 19 - Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της PAC (Πηγή: Hardy 2003)



Εικόνα 20 - Κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Πηγή: Hardy 2003)



Εικόνα 21 - Πιστοποιητικό βαθμονόμησης αισθητήρων micro 100S .PAC (Πηγή: Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων)

Τα σύγχρονα συστήματα ΑΕ, οι αισθητήρες, τα καλώδια, τα ηλεκτρικά κυκλώματα κτλ. περιλαμβάνουν θωράκιση για προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Οι συχνότητες απόκρισης των αισθητήρων είναι τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται ο θόρυβος από το περιβάλλον. Σχετικά με τα ηλεκτρονικά τους κυκλώματα οι αισθητήρες μπορεί να είναι απλοί ή διαφορικοί. Ένας απλός αισθητήρας περιέχει έναν κρύσταλλο και είναι γενικά ευάλωτος στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Αντίθετα ο διαφορικός αισθητήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να εξαλείφεται ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος. Συνίσταται από δύο κρυστάλλους αντίθετης πολικότητας και συνεπώς το ανιχνευόμενο κύμα ΑΕ παράγει δύο ηλεκτρικά σήματα αντίθετης πολικότητας. Τα σήματα μεταβαίνουν στη συνέχεια σε ένα διαφορικό προενισχυτή όπου ενισχύεται η διαφορά μεταξύ των σημάτων. Λόγω της αντίθετης πολικότητας των σημάτων η διαφορά τους είναι το διπλάσιο της εξόδου ενός μονού κρυστάλλου. Αντίθετα οι EMI των ηλεκτρικών κυκλωμάτων παράγουν σήματα της ίδιας πολικότητας και συνεπώς λαμβάνοντας ως αποτέλεσμα τη διαφορά των δύο σημάτων εξουδετερώνονται στον προενισχυτή. Η ευαισθησία ενός αισθητήρα δείχνεται συνήθως σε διάγραμμα απόκρισης συναρτήσεως της συχνότητας (τάση εξόδου σε σχέση με τη συχνότητα).

Οι **προενισχυτές** έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύχρηστο για περαιτέρω επεξεργασία. Η ενίσχυση του πλάτους του σήματος ΑΕ είναι λογαριθμική σύμφωνα με τη σχέση (Physical Acoustics Corporation PAC, 2005):

$$dB = 20 * \log(V_{max}/1 \mu\text{Volt}) - (\text{Ενίσχυση σήματος από τον ενισχυτή σε dB})$$

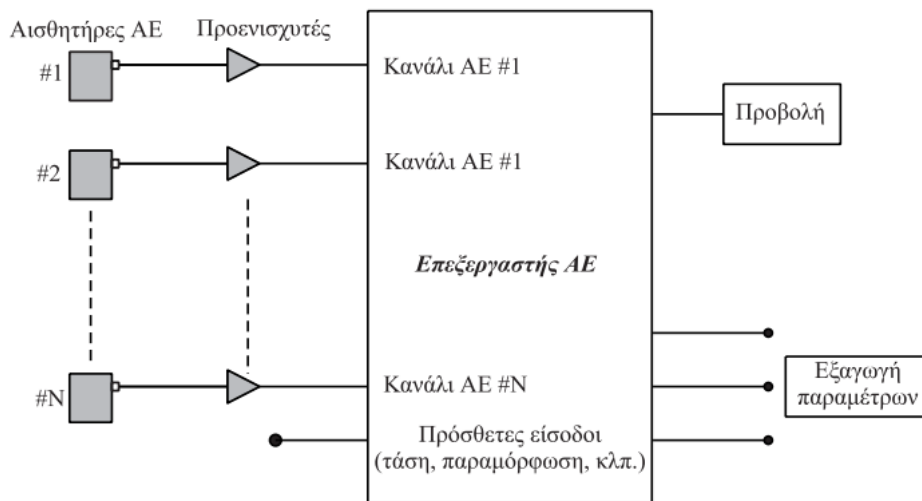
Γενικά, είναι προτιμότερο ο προενισχυτής να τοποθετείται κοντά στον αισθητήρα, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι EMI. Ορισμένες φορές είναι ενσωματωμένος στο περίβλημα του αισθητήρα και τότε περιέχει ένα φίλτρο συχνοτήτων για την απόρριψη του ανεπιθύμητου θορύβου. Εν τούτοις

παράγουν και αυτοί θόρυβο που σε συνδυασμό με τον θόρυβο του αισθητήρα καθορίζει την ακρίβεια λήψης ενός σήματος ΑΕ.

Στα σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης ΑΕ το ελάχιστο σήμα που μπορεί να ανιχνευτεί (πάνω από τον ηλεκτρονικό θόρυβο), είναι της τάξης των 4 μV στην έξοδο ενός τυπικού μορφοτροπέα. Το πλάτος ενός σήματος ΑΕ εκφράζεται συνήθως σε dB, όπου 1 μV αντιστοιχεί σε 0 dB και 100 mV σε 40dB (Σοφιανός & Νομικός 2008).

Μονάδα επεξεργασίας

Το ελαστικό εντατικό κύμα που φθάνει σε κάθε αισθητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα ΑΕ, βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος (Αναστασόπουλος,1998). Απλοποιημένο διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ δίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 22 - Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ (Πηγή:Σοφιανός & Νομικός 2008)

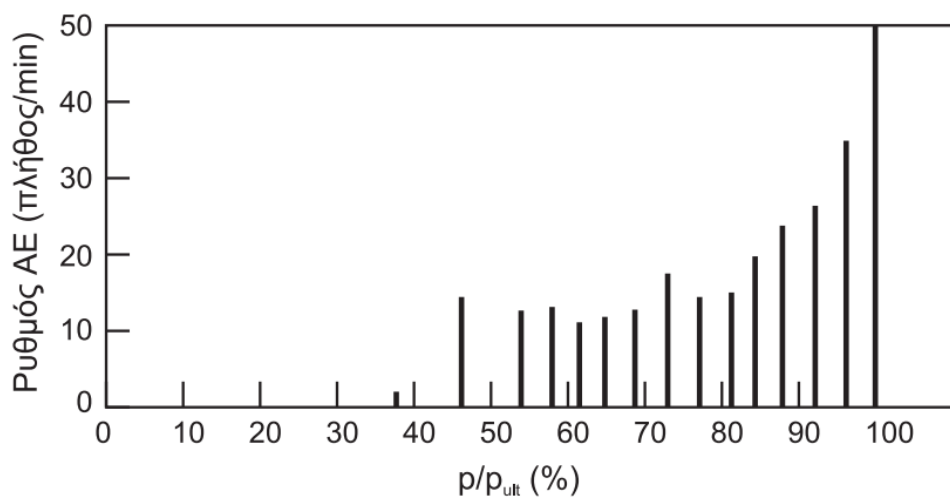
Τα κανάλια ΑΕ είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε δύο ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής. Οι παράμετροι που μπορούν να μετρούνται για κάθε σήμα ΑΕ περιλαμβάνουν το πλάτος (amplitude - dB), τον αριθμό των απαριθμήσεων (counts), το χρόνο ανύψωσης (risetime), τη συνολική διάρκεια (duration) κλπ.

2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΑΕ

Στη μηχανική των πετρωμάτων το φαινόμενο της ΑΕ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της αστοχίας και της παραμόρφωσης των ψαθυρών πετρωμάτων υπό μηχανική καταπόνηση, συνδέοντας τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος με παραμέτρους της ΑΕ όπως το πλήθος, το πλάτος, η ενέργεια των γεγονότων πρόκλησης ΑΕ, η θέση της πηγής τους κλπ. Παράλληλα, η μέθοδος ολοένα και περισσότερο αποδεικνύεται χρήσιμη για επιτόπιες έρευνες, όπως π.χ. για τον εντοπισμό ιδιαίτερα φορτισμένων περιοχών και στη μελέτη των εκτινάξεων βράχων (rockbursts) σε βαθιά μεταλλεία και σήραγγες (Σοφιανός & Σοφιανός, 2008).

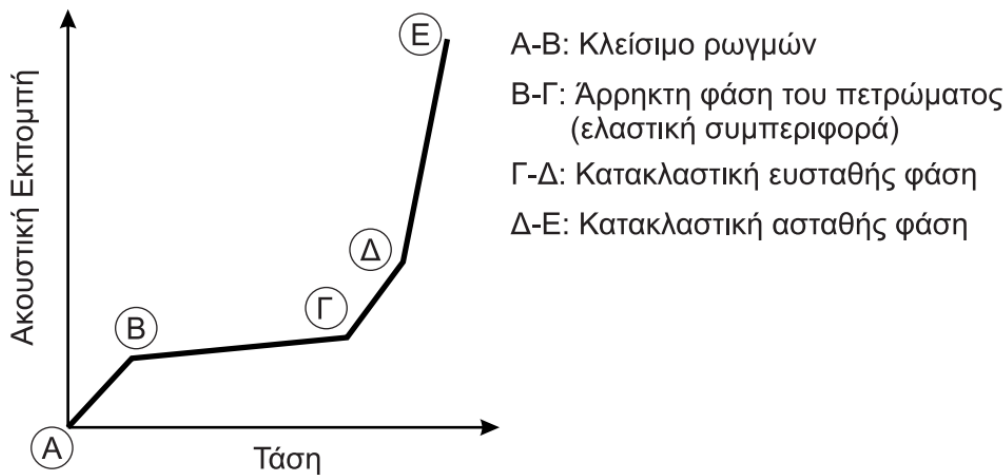
2.3.1 Επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου στην ΑΕ

Από τις πρώτες μελέτες της ΑΕ στα πετρώματα διαπιστώθηκε ότι υπό θλιπτική φόρτιση ο ρυθμός ΑΕ αυξάνεται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χονδρόκοκκο γρανίτη (Νομικός και Σοφιανός 2008).



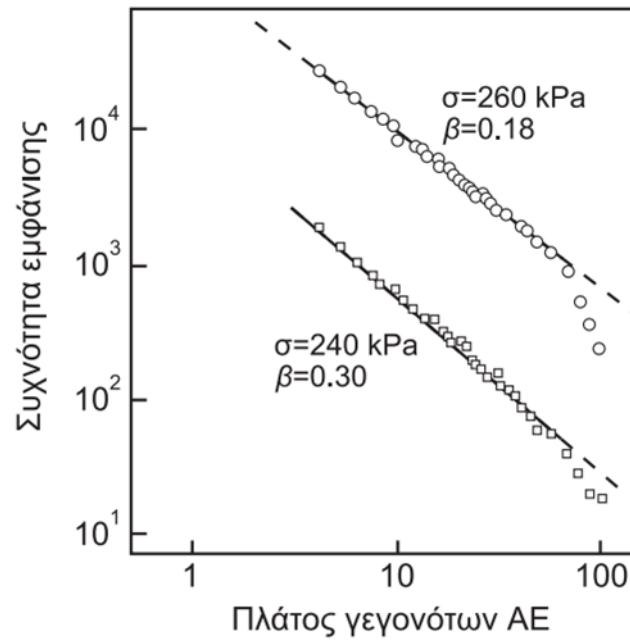
Σχήμα 7 - Μεταβολή του ρυθμού ΑΕ συναρτήσει με p/p_{ult}
(Πηγή: Obert και Duvall 1945)

Σημαντική δουλειά στον τομέα αυτό έχει γίνει από το Mogi (1962), ο οποίος δίνει στο Σχήμα 8 τη γενική μορφή της σχέσης μεταξύ της ΑΕ και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Στο ίδιο διάγραμμα συνδυάζεται από τους Boyce et al (1981) η ΑΕ με τη διαδικασία καταστροφής του δοκιμίου κατά τις δοκιμές θλίψης (Σοφιανός, 2005).



Σχήμα 8 - Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής AE και (β) συσχετίσι της με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. (Boyce et al, 1981)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σχέση του πλάτους των σημάτων AE με τη συχνότητα εμφάνισής τους. Σύμφωνα με πειράματα ερευνητών, που αναφέρονται από τον Hardy (2003) και εικονίζονται στο Σχήμα 9 έδειξαν ότι η σχέση αυτή, όπως προέκυψε από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε γρανίτη, προσομοιώνεται με μία ευθεία σε λογαριθμικούς άξονες πλάτους AE-συχνότητας εμφάνισης. Γεγονότα AE ακραίου πλάτους δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στην ευθεία αυτή. Επιπλέον, για τιμές του φορτίου κοντά στο φορτίο αστοχίας, η σταθερά β , που εκφράζει την κλίση της ευθείας αυτής, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το εφαρμοζόμενο φορτίο και συνεπώς με την αύξηση του φορτίου περισσότερα γεγονότα AE έχουν μεγαλύτερο πλάτος.



Σχήμα 9 - Διάγραμμα συχνότητας συναρτήσει του πλάτους για το γρανίτη Westerly υπό μονοαξονική θλίψη. ((πηγή: Hardy, 2003)

3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.1.1 Μηχανή φόρτισης

Η μηχανή φόρτισης των δοκιμίων είναι σερβοϋδραυλική και έχει την δυνατότητα ελέγχου τεσσάρων πλαισίων φόρτισης με ηλεκτρονική επιλογή του ενεργού πλαισίου. Περιλαμβάνει τον ακόλουθο εξοπλισμό:

- Πλαίσιο θλίψης δυναμικότητας 5000 kN για την εκτέλεση δοκιμών μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης σε πετρώματα και σκυρόδεμα.
- Πλαίσιο θλίψης με δύο έμβολα δυναμικότητας 15 και 250 kN αντίστοιχα, για την εκτέλεση δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χαμηλής αντοχής πετρώματα, δοκιμών κάμψης σε μικρών διαστάσεων δοκούς πετρώματος, δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού.
- Πλαίσιο κάμψης δυναμικότητας φόρτισης 150 kN για την εκτέλεση δοκιμών κάμψης σε δοκούς σκυροδέματος και δυσθραυστότητας σε μικρές πλάκες εκτοξευομένου σκυροδέματος.
- Αυτόματη μονάδα εφαρμογής και ελέγχου πλευρικής πίεσης σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης.
- Αισθητήρες/μορφοτροπείς για την μέτρηση της απόκρισης πετρωμάτων και σκυροδέματος κατά τις δοκιμές.
- Βοηθητικός εξοπλισμός, συσκευές και εξαρτήματα για την προετοιμασία και εκτέλεση των απαιτούμενων δοκιμών και την λήψη των μετρήσεων.



Εικόνα 23 - Σερβοϋδραυλική μηχανή του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων στο Ε.Μ.Π.

Από τον παραπάνω εξοπλισμό αξιοποιήθηκε το πλαίσιο μονοαξονικής θλίψης με έμβολο δυναμικότητας 250 kN (δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και *Brazilian*).



Εικόνα 24 - Πλαίσιο μονοαξονικής θλίψης με έμβολο δυναμικότητας 250 kN

3.1.2 Σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας σημάτων ακουστικής εκπομπής

Για την καταγραφή των ακουστικών σημάτων κατά την διάρκεια της φόρτισης δοκιμίων, το εργαστήριο διαθέτει 2 συστήματα ακουστικής εκπομπής (acoustic emission - AE): το Micro-II PCI-2 και το PCI-8 της εταιρείας PAC. Το PCI-8 είναι ένα προηγμένο ψηφιακό-παραμετρικό σύστημα που λειτουργεί βάση του προγράμματος AE Win for Windows και ενσωματώνει μία κάρτα οχτώ καναλιών της ομώνυμης εταιρείας PAC. Το Micro-II PCI-2 είναι ένα πολυκάναλο σύστημα υποδοχής έως και τεσσάρων καρτών PCI-2 δύο καναλιών AE έκαστη. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές της παρούσας εργασίας για τη καταγραφή των σημάτων AE. Τα χαρακτηριστικά της κάρτας PCI-2 είναι συνοπτικά τα παρακάτω:

- Χαμηλού θορύβου, 2 καναλιών, σύστημα AE σε μια κάρτα με δυνατότητα επεξεργασίας κυματομορφών και κτύπων σε μια 32-bit κάρτα PCI.
- Ενσωματωμένη 18-bit μετατροπή και επεξεργασία A/D για καλύτερη ανάλυση (μικρότερη από 1dB) σε πολύ χαμηλά πλάτη σημάτων και ρυθμίσεις κατωφλιού, παρέχοντας υψηλή απόδοση με χαμηλό θόρυβο.
- 40MHz, 18-bit μετατροπή με δειγματοληψία A/D σε παραγωγικό χρόνο (2x ή 4x) για ενισχυμένη ακρίβεια.

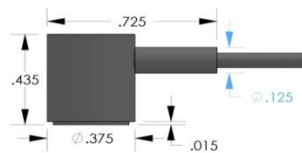
- Εξαγωγή χαρακτηριστικών ΑΕ σε πραγματικό χρόνο και μεταφορά DMA σε κάθε κανάλι για μεγαλύτερη ταχύτητα ανάλυσης προσωρινών δεδομένων σε υψηλά ποσοστά λήψης κτύπων.
- Ενσωματωμένη επεξεργασία κυματομορφής με ανεξάρτητη μεταφορά DMA σε κάθε κανάλι για ταχύτερη μεταφορά και επεξεργασία των κυματομορφών.
- Δυνατότητα συνεχούς καταγραφής κυματομορφών ΑΕ στο σκληρό δίσκο έως και 10MSamples/sec (σε ένα κανάλι, 5MSamples/sec σε 2 κανάλια).
- 4 High pass και low pass φίλτρα για κάθε κανάλι.
- Έως 2 παραμετρικές εισοδοι σε κάθε κάρτα PCI-2 με 16-bit μετατροπέα A/D και συχνότητα καταγραφής >100 αναγνώσεις /δευτερόλεπτο. Το πρώτο παραμετρικό είναι ένα πλήρες όργανο μέτρησης που παρέχει προσαρμογή του σήματος που περιλαμβάνει έλεγχο και επιλογές λήψης, αντιστάθμισης και φιλτραρίσματος για άμεση είσοδο δεδομένων των αισθητήρων (π.χ.τροπόμετρων). Το δεύτερο παραμετρικό παρέχει μία είσοδο +/-10 volt για ρυθμισμένες εξόδους αισθητήρων.
- Διαθέτει οδηγούς ήχου πάνω στην κάρτα PCI-2 που μπορούν να επεξεργαστούν μέσω της κάρτας ήχου PAC PCI-Audio Card.
- Διαθέτει κύκλωμα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος που εξαλείφει ουσιαστικά τις εκτροπές (drift), επιτυγχάνοντας έτσι υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία.

3.1.3 Αισθητήρες και προενισχυτές

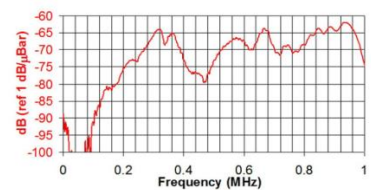
Η ανίχνευση των σημάτων ΑΕ γίνεται με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν οι **MICRO 100-S** της εταιρίας PAC. Οι MICRO 100-S είναι αισθητήρες ακουστικής εκπομπής με εύρος συχνοτήτων **200-950 kHz**.



Εικόνα 25 - Αισθητήρας MICRO 100-S



Εικόνα 26 - Διαστάσεις αισθητήρα MICRO 100-S



Εικόνα 27 - Calibration Chart

(Πηγή: Physical Acoustics Corporation)

Για την ενίσχυση του σήματος ΑΕ χρησιμοποιούνται προενισχυτές τύπου PAC 2/4/6, με δυνατότητα ενίσχυσης της έντασης του σήματος κατά 20/40/60 dB και δυνατότητα σύνδεσης με αισθητήρες μονής εξόδου ή διαφορικούς αισθητήρες. Παρακάτω φαίνονται οι προενισχυτές που χρησιμοποιήθηκαν (Εικόνα 28).



Εικόνα 28 - Προενισχυτές τύπου PAC 2/4/6 στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων στο Ε.Μ.Π.

3.1.4 Συσκευή υπερήχων

Το εργαστήριο διαθέτει την συσκευή PUNDIT 7 (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Tester) για την πραγματοποίηση δοκιμών μέτρησης της ταχύτητας υπερήχων. Η δοκιμή αυτή αποτελεί μια μη καταστροφική ελέγχου της ομοιογένειας και της ποιότητας του υπό εξέταση δοκιμίου. Μπορεί να εφαρμοστεί για παράδειγμα σε δοκίμια σκυροδέματος προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν ασυνέχειες ή κενά. Επίσης η ταχύτητα διάδοσης του υπερηχητικού παλμού μπορεί να συσχετιστεί με τις ελαστικές παραμέτρους και την πυκνότητα του δοκιμίου. Η συσκευή PUNDIT 7 είναι φορητή για δοκιμές στο ύπαιθρο αλλά και στο εργαστήριο. Αποτελείται από την κεντρική μονάδα , 2 μορφοτροπείς 54 kHz , 2 μορφοτροπείς P & S 1MHz και τα απαραίτητα παρελκόμενα όπως καλώδια, υλικό επαφής κ.τ.λ..

Πριν από κάθε δοκιμή, γίνεται έλεγχος ορθής λειτουργίας της συσκευής με ένα υλικό αναφοράς και τοποθετείται στα άκρα αισθητήρων gel για την σύζευξη των αισθητήρων με το δοκίμιο. Με δεδομένη την απόσταση που μετράμε και το χρόνο που καταγράφει η συσκευή , υπολογίζουμε την ταχύτητα του κύματος με την σχέση:

$$v = \frac{x}{t}$$

Όπου v η ταχύτητα που ζητάμε, x η διάσταση του υλικού και t ο χρόνος διάδοσης του κύματος που δίνεται από τη συσκευή των υπερήχων.



Εικόνα 29 Pundit

3.1.5 Λογισμικά

➤ AE Win

Το AE win είναι ένα πρόγραμμα (32-bit windows) συλλογής δεδομένων και ανάγνωσης και επεξεργασίας σημάτων ΑΕ που συνεργάζεται με τα πολυκάναλα συστήματα της PAC (DiSP, SAMOS, PCI-2, MISTRAS και SPARTAN). Αξιοποιώντας πλήρως τους πόρους των Windows, συμπεριλαμβάνει ρύθμιση των Windows για διαθέσιμες αναλύσεις οθόνης, εκτύπωση, δικτύωση, multi-tasking, multi-threading, κ.λ.π. Το πρόγραμμα τρέχει σε λειτουργικά συστήματα WINDOWS 98/2000/ME/XP. Ωστόσο η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται με τη χρήση WINDOWS 2000/XP. Το ΑΕwin είναι πλήρως συμβατό με αρχεία ΑΕ. Το ΑΕwin είναι εύκολο στη χρήση και τη λειτουργία. Το λογισμικό έχει όλες τις δυνατότητες επεξεργασίας, γραφημάτων και ανάλυσης δεδομένων καθώς και πολλά άλλα νέα και βελτιωμένα χαρακτηριστικά που διευκολύνουν την ανάλυση των και την οπτικοποίηση των δεδομένων. Ακόμα μπορεί επίσης να τρέξει πολλαπλά αντίγραφα ΑΕwin ταυτόχρονα.

➤ Noesis

Το Noesis είναι λογισμικό που αναπτύχθηκε από την Envirocoustics SA για την οπτικοποίηση (π.χ. μέσω πολλών διαγραμμάτων) και τον χειρισμό δεδομένων ακουστικής εκπομπής. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μη κατασρευτικές δοκιμές ακουστικής εκπομπής (ΑΕ). Επιπλέον, το Noesis μπορεί να πραγματοποιήσει ταξινόμηση και επεξεργασία δεδομένων κατά τη διάρκεια της

απόκτησης (σε πραγματικό χρόνο, Live-SPR). Εκτός από την προβολή και την επεξεργασία, το πρόγραμμα μπορεί να πραγματοποιήσει Αναγνώριση Προτύπων (Pattern recognition) μέσω πολύ ισχυρών αλγορίθμων διάκρισης των δεδομένων (ουσιαστικά χωρίζει τα παρόμοια δεδομένα σε ομάδες). Το λογισμικό περιλαμβάνει επίσης δυνατότητες επεξεργασίας κυματομορφής (FFT, Power Spectrum, εξαγωγή χαρακτηριστικών, κλπ.) καθώς και άλλα χαρακτηριστικά.

3.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

3.2.1 Εισαγωγή

Το φυσικά μοντέλα πάνω στα οποία θα γίνει η μελέτη της ακουστικής εκπομπής είναι δύο κατηγοριών:

- Φυσικά μοντέλα με οπή από γύψο,
- Φυσικά μοντέλα με οπή από Μάρμαρο Διονύσου.

Τα μοντέλα από γύψο παρασκευάστηκαν με μηχανικά μέσα στο εργαστήριο, γεγονός το οποίο μας έδωσε τη δυνατότητα να έχουμε πολλά δοκίμια στη διάθεση μας χωρίς ιδιαίτερη οικονομική επιβάρυνση. Τα πειράματα που ακολούθησαν στα εν λόγω μοντέλα, μας βοήθησαν να εξοικειωθούμε με τη μελέτη της ακουστικής εκπομπής και να αποκτήσουμε μια ποιοτική αλλά και ποσοτική εικόνα για τα φυσικά φαινόμενα που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια αντίστοιχων δοκιμών.

3.2.2 Παρασκευή δοκιμών από γύψο

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της γύψου παρασκευάσαμε αρχικά 15 κυλινδρικά δοκίμια για δοκιμές θλίψης διαστάσεων 12 x 5,5 cm (μήκος x διάμετρος) σε δύο διαφορετικές αναλογίες (κατ' όγκο) γύψου/νερού με σκοπό να βρεθεί η αναλογία που θα έδινε τα καταλληλότερα αποτελέσματα. Τα δοκίμια αυτά είναι χωρισμένα στις παρακάτω κλάσεις:

- Κλάση Α' Αναλογίας ≈ 1 (δοκίμια 1,2,3,4,5,6,7,8),
- Κλάση Β' Αναλογίας $\approx 1,43$ (δοκίμια 9,10,11,12,13,14,15).



Εικόνα 30 - Κυλινδρικό γύψινο δοκίμιο διαστάσεων 12 x 5,5 cm

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων φαίνεται παρακάτω:

- Συγκεντρώνουμε τις υπολογισμένες ποσότητες των υλικών μας με τη βοήθεια δύο ογκομετρικών σωλήνων (έναν για το νερό και έναν για τη γύψο, βλέπε Εικόνες 31 και 32).
- Ρίχνουμε το νερό σε ένα πλαστικό μπουκάλι (βλέπε Εικόνα 33).
- Βάζουμε σιγά σιγά τη γύψο αναδεύοντας με ένα πλαστικό σωλήνα με σχετικά αργό ρυθμό για περίπου 4 λεπτά.
- Όταν το μίγμα ομογενοποιηθεί και φτάσει στο επιθυμητό ιξώδες το ρίχνουμε στο αντίστοιχο καλούπι.



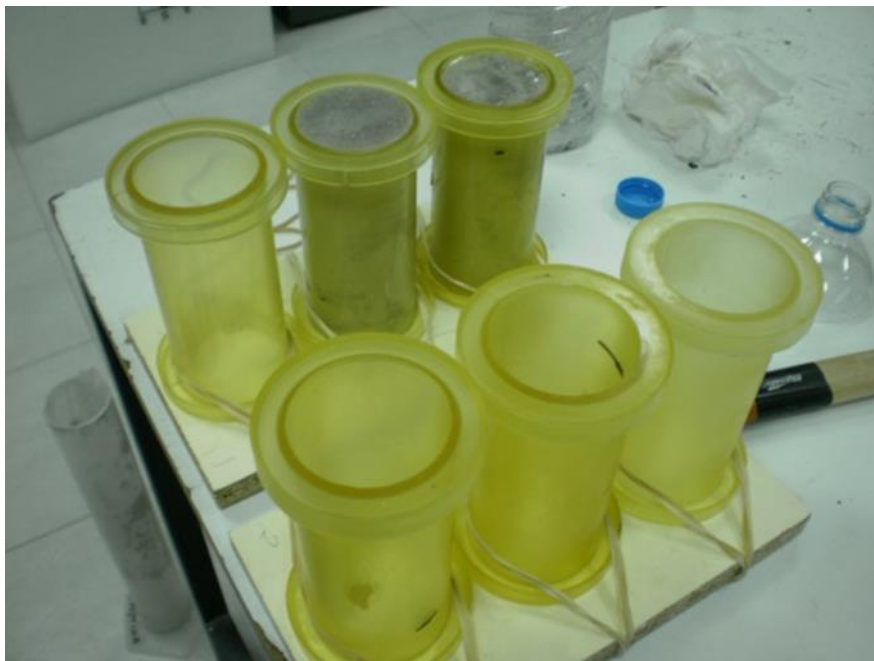
Εικόνα 31 - Ογκομετρικός σωλήνας γύψου



Εικόνα 32 - Ογκομετρικός σωλήνας νερού



Εικόνα 33 - Πλαστικό μπουκάλι και πλαστικός σωλήνας για την ανάδευση του υλικού



Εικόνα 34 - Έκχυση μίγματος στα καλούπια

Λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας του φούρνου (Εικόνα 35), η παρασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε ομάδες. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα οι χρόνοι πήξης και ξήρανσης του υλικού σε κάθε ομάδα να διαφέρουν ελαφρώς. Η θερμοκρασία ξήρανσης των δοκιμίων ήταν οι 42°C . Αναλυτικά οι χρόνοι ξήρανσης και οι τελικές πυκνότητες των δοκιμίων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.



Εικόνα 35 - Φούρνος ξήρανσης υλικού

Πίνακας 1 – Γύψινα δοκίμια 1^{ης} Ομάδας

ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΛΑΣΗΣ Α'	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
1	19Ω & 30Λ	2Ω & 15Λ	4Μ, 1Ω & 45Λ	0,90
2	19Ω & 30Λ	2Ω & 15Λ	4Μ, 1Ω & 45Λ	0,87
3	19Ω & 30Λ	2Ω & 15Λ	4Μ, 1Ω & 45Λ	0,92
4	19Ω & 30Λ	2Ω & 15Λ	4Μ, 1Ω & 45Λ	0,84

Πίνακας 2 – Γύψινα δοκίμια 2^{ης} Ομάδας

ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΛΑΣΗΣ Α'	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
5	7Ω	17Ω & 55Λ	3Μ, 5Ω & 15Λ	0,90
6	7Ω	17Ω & 55Λ	3Μ, 5Ω & 15Λ	0,88
7	7Ω	17Ω & 55Λ	3Μ, 5Ω & 15Λ	0,93
8	7Ω	17Ω & 55Λ	3Μ, 5Ω & 15Λ	0,93

Πίνακας 3 – Γύψινα δοκίμια 3^{ης} Ομάδας

ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΛΑΣΗΣ Β'	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
9	20Ω & 20Λ	2Ω & 25Λ	2Μ, 21Ω & 25Λ	1,28

Πίνακας 4 – Γύψινα δοκίμια 4^{ης} Ομάδας

ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΛΑΣΗΣ Β'	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
10	20Ω & 40Λ	3Ω & 32Λ	3Μ, 22Ω & 15Λ	1,26
11	20Ω & 40Λ	3Ω & 32Λ	3Μ, 22Ω & 15Λ	1,30
12	20Ω & 40Λ	3Ω & 32Λ	3Μ, 22Ω & 15Λ	1,23
13	20Ω & 40Λ	3Ω & 32Λ	3Μ, 22Ω & 15Λ	1,21
14	20Ω & 40Λ	3Ω & 32Λ	3Μ, 22Ω & 15Λ	1,17
15	20Ω & 40Λ	3Ω & 32Λ	3Μ, 22Ω & 15Λ	1,16

3.2.3 Παρασκευή δοκιμών από μίγμα γύψου-τσιμέντου

Εκτός από τα δοκίμια γύψου, επιχειρήσαμε πειραματικά να παρασκευάσουμε και δοκίμια από μίγμα τσιμέντου-γύψου (βλέπε Εικόνα 36) για να παρατηρήσουμε τυχόν αλλαγές στις αντοχές του τελικού υλικού. Σκοπός μας ήταν να πετύχουμε υψηλές τιμές αντοχής του υλικού (τόσο στα καθαρά γύψινα όσο και σε αυτά με το τσιμέντο) για να έχουμε τη δυνατότητα κατά τη διάρκεια της μονοαξονικής θλίψης των αντίστοιχων φυσικών μοντέλων να παρατηρήσουμε καθαρά τα φαινόμενα της ακουστικής εκπομπής.

Όπως και στα δοκίμια από γύψο, έτσι και εδώ παρασκευάσαμε 8 κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 12 x 5,5 cm (δοκιμές θλίψης) σε δύο διαφορετικές αναλογίες (κατ' όγκο) τσιμέντου + γύψου/νερού. Τα δοκίμια αυτά είναι χωρισμένα στις παρακάτω κλάσεις:

- Κλάση Α' Αναλογίας ≈ 1 (δοκίμια T1, T2, T3),
- Κλάση Β' Αναλογίας $\approx 1,43$ (δοκίμια T4, T5, T6, T7, T8).



Εικόνα 36 - Κυλινδρικό δοκίμιο από μείγμα γύψου-τσιμέντου διαστάσεων 12 x 5,5 cm

Αναλυτικά οι χρόνοι ξήρανσης και οι τελικές πυκνότητες των δοκιμίων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5 Δοκίμια από μίγμα γύψου-τσιμέντου 1^{ης} Ομάδας

ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΛΑΣΗΣ Α'	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
T1	7Ω	17Ω & 55Λ	3Μ, 5Ω & 15Λ	0,97
T2	7Ω	17Ω & 55Λ	3Μ, 5Ω & 15Λ	0,96
T3	7Ω	17Ω & 55Λ	3Μ, 5Ω & 15Λ	0,89

Πίνακας 6 - Δοκίμια από μίγμα γύψου-τσιμέντου 2^{ης} Ομάδας

ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΛΑΣΗΣ Β'	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
T4	1Ω	1Μ, 21Ω & 35Λ	2Μ, 2Ω & 25Λ	1,24
T5	1Ω	1Μ, 21Ω & 35Λ	2Μ, 2Ω & 25Λ	1,21
T6	1Ω	1Μ, 21Ω & 35Λ	2Μ, 2Ω & 25Λ	1,23
T7	1Ω	1Μ, 21Ω & 35Λ	2Μ, 2Ω & 25Λ	1,25
T8	1Ω	1Μ, 21Ω & 35Λ	2Μ, 2Ω & 25Λ	1,26

3.2.4 Επιλογή βέλτιστης αναλογίας

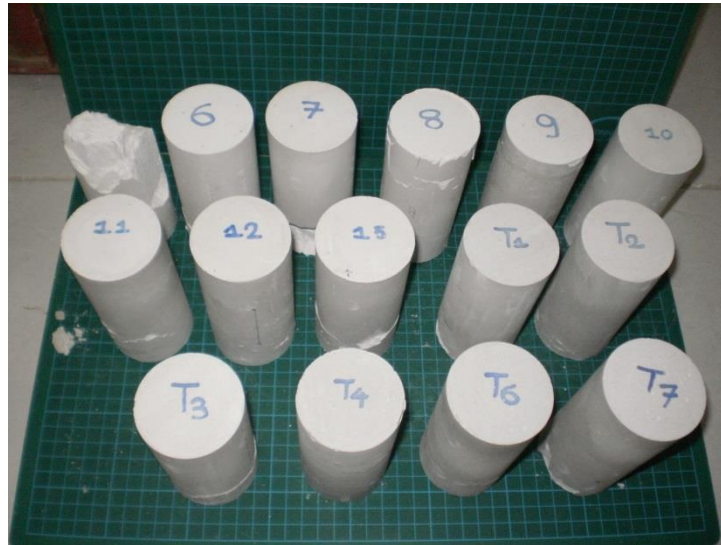
Μετά από την προετοιμασία των δοκιμίων, ακολούθησαν οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης με σκοπό να βρεθεί η αναλογία που θα έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα (τόσο στα καθαρά γύψινα όσο και σ αυτά που είναι αναμειγμένα κατά ¼ με τσιμέντο) .

Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Στα δοκίμια (5,6,7,8,T1,T2,T3,T4,T6,T7) που υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη τοποθετήσαμε αισθητήρες ακουστικής εκπομπής για την καταγραφή των σημάτων που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής καθώς επίσης και ειδικά «δαχτυλίδια» βελομέτρων, ιδιοκατασκευής του Υ.Δ. της Σχολής Μ.Μ.Μ. κ. Δ. Κοτσάνη, για τη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας. Τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής δεν μας βοήθησαν να εξάγουμε κάποιο ιδιαίτερο συμπέρασμα για την πορεία των φαινομένων καθώς τα σήματα ήταν ελάχιστα και χαμηλού πλάτους. Στα δοκίμια (1,2,3,4) απλά καταγράψαμε την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη.



Εικόνα 37 - Διάταξη μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 38 - Τα κυλινδρικά δοκίμια ύστερα απ τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης

Τα αποτελέσματα κατά την ολοκλήρωση όλων των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 7 Μηχανικά χαρακτηριστικά των γύψινων δοκιμών που προέκυψαν από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης

ΓΥΨΙΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ (ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ)							
Ομάδες	Δοκίμια	Αντοχή Σε Θλίψη (MPa)	Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Μέση Αντοχή Σε Θλίψη (MPa) [Ανά Ομάδα]	Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας (GPa) [Ανά Ομάδα]	Μέση Αντοχή Σε Θλίψη (MPa) [Ανά Κλάση]	Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας (GPa) [Ανά κλάση]
Ομάδα 1 ^η (Κλάση A')	2	4,847	-	5,126	-	4,955	2,245
	3	4,633					
	4	5,899					
Ομάδα 2 ^η (Κλάση A')	5	4,299	2,455	4,784	2,245	4,955	2,245
	6	4,634	2,072				
	7	4,871	2,385				
	8	5,333	2,067				
Ομάδα 3 ^η (Κλάση B')	9	9,978	4,443	9,978	4,443	10,793	4,188
Ομάδα 4 ^η (Κλάση B')	10	10,756	4,210	10,996	4,125		
	11	14,817	5,000				
	12	9,696	3,970				
	15	8,718	3,319				

Πίνακας 8 - Μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων (από μίγμα γύψου-τσιμέντου) που προέκυψαν από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης

ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΠΟ ΜΙΓΜΑ ΓΥΨΟΥ-ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ (ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ)					
Ομάδες	Δοκίμια	Αντοχή Σε Θλίψη (MPa)	Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Μέση Αντοχή Σε Θλίψη (MPa) [Ανά Ομάδα]	Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας (GPa) [Ανά Ομάδα]
Ομάδα 1 ^η (Κλάση Α')	T1	4,773	2,317	4,854	2,230
	T2	5,439	-		
	T3	4,351	2,143		
Ομάδα 2 ^η (Κλάση Β')	T4	11,687	3,776	11,252	4,038
	T6	10,948	3,965		
	T7	11,121	4,372		

Από τους παραπάνω πίνακες διαπιστώθηκε πως καλύτερες τιμές αντοχής παρουσίασαν τα δοκίμια Κλάσης Β', δηλαδή αυτά με αναλογία γύψου/νερό περίπου 1,43. Έτσι κρατώντας αυτήν την αναλογία περάσαμε στο επόμενο στάδιο, στην παρασκευή δοκιμίων μορφής δίσκου (Brazilian) (βλέπε Εικόνα 39) για να ελέγξουμε και την εφελκυστική τους αντοχή.

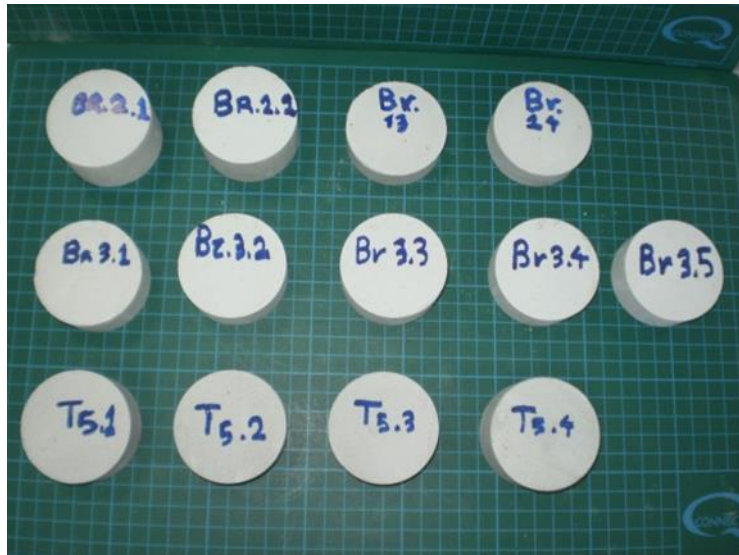
Πίνακας 9 – Δοκίμια Brazilian από γύψο και από μίγμα (γύψου-τσιμέντου)

ΔΟΚΙΜΙΑ BRAZILIAN	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
Br2.1, Br2.2	20Ω & 20Λ	2Ω & 25Λ	2Μ, 21Ω & 25Λ	1,28
Br3.1, Br3.2, Br3.3, Br3.4, Br3.5	30Λ	2Μ, 20Ω & 20Λ	1Μ, 3Ω & 40Λ	1,21
Br13 ¹	20Ω & 40Λ	3Ω & 32Λ	3Μ, 22Ω & 15Λ	1,21
Br14 ²	20Ω & 40Λ	3Ω & 32Λ	3Μ, 22Ω & 15Λ	1,17
T5.1, T5.2, T5.3, T5.4 ³	1Ω	1Μ, 21Ω & 35Λ	2Μ, 2Ω & 25Λ	1,21

¹ Το δοκίμιο Br13 προήλθε από τομή του γύψινου δοκιμίου 13.

² Το δοκίμιο Br14 προήλθε από τομή του γύψινου δοκιμίου 14.

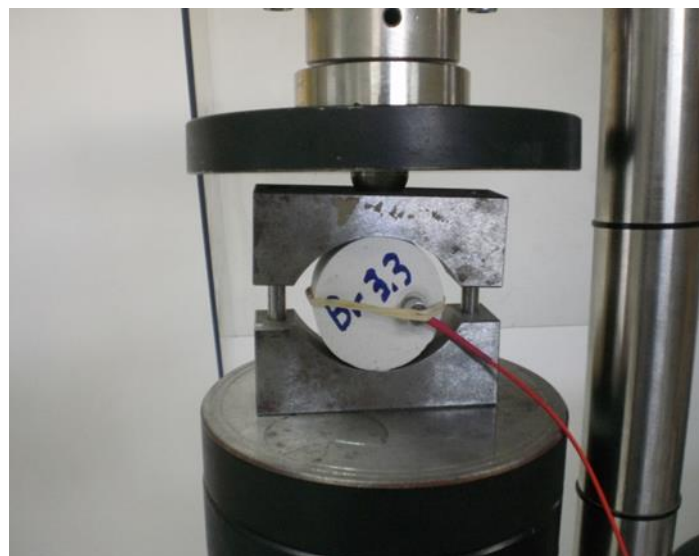
³ Τα δοκίμια T5.1 έως T5.4 προήλθαν από τομή του δοκιμίου T5, μίγματος γύψου-τσιμέντου.



Εικόνα 39 - Δοκίμια μορφής δίσκου (Brazilian)

Δοκιμές *Brazilian*

Όπως στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, έτσι και εδώ τοποθετήσαμε έναν αισθητήρα ακουστικής εκπομπής για να παρακολουθήσαμε τα φυσικά φαινόμενα που συνέβησαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ωστόσο τα σήματα που πήραμε ήταν λίγα και χαμηλού πλάτους με αποτέλεσμα να μην βγάλουμε κάποιο ειδικό συμπέρασμα.



Εικόνα 40 - Δοκιμή *Brazilian*



Εικόνα 41 - Θραυσμένα δοκίμια μορφής δίσκου (Brazilian)

Τα αποτελέσματα κατά την ολοκλήρωση όλων των δοκιμών Brazilian φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 10 - Αντοχή των γύψινων δοκιμών σε εφελκυσμό που προέκυψαν από τις δοκιμές Brazilian

ΓΥΨΙΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ (ΔΟΚΙΜΗ BRAZILIAN)						
Κλάση	Δοκίμια	t (mm)	D (mm)	Αντοχή Σε Εφελκυσμό (MPa)	Μέση Αντοχή Σε εφελκυσμό (MPa) [ανά δοκίμιο]	Μέση Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa) [Κλάση B]
Δοκίμια Κλάσης B'	Br. 2.1	32,923	55,597	-1,546	-1,570	-1,735
	Br. 2.2	31,278	55,665	-1,594		
	Br. 1.3	17,613	55,798	-1,736		
	Br. 1.4	19,785	55,593	-1,731	-1,731	
	Br 3.1	23,117	55,773	-1,984	-1,901	
	Br 3.2	22,432	55,718	-2,106		
	Br 3.3	25,700	55,650	-1,945		
	Br 3.4	21,805	55,800	-1,728		
	Br 3.5	22,425	55,735	-1,743		

Πίνακας 11 - Αντοχή των δοκιμών (από μίγμα γύψου-τσιμέντου) σε εφελκυσμό που προέκυψαν από τις δοκιμές Brazilian

ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΠΟ ΜΙΓΜΑ ΓΥΨΟΥ-ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ(ΔΟΚΙΜΗ BRAZILIAN)					
Κλάση	Δοκίμια	t (mm)	D (mm)	Αντοχή Σε Εφελκυσμό (MPa)	Μέση Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa) [Κλάση B]
Δοκίμια Κλάσης B'	T5.1	23,890	55,647	-2,158	-1,990
	T5.2	22,050	55,632	-1,832	
	T5.3	21,345	55,655	-1,756	
	T5.4	30,135	55,600	-2,215	

Έχοντας πλέον εκτελέσει όλες τις απαραίτητες δοκιμές για να τον χαρακτηρισμό των παραπάνω υλικών καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως η ανάμιξη της γύψου με το τσιμέντο δεν έδωσε αξιοσημείωτες βελτιστοποιήσεις στις τιμές αντοχής, συνεπώς για την παρασκευή των φυσικών μοντέλων με οπή χρησιμοποιήθηκε μίγμα γύψου/νερού αναλογίας 1,43 (βλέπε Πίνακα 12).

Πίνακας 12 - Μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των φυσικών μοντέλων με οπή

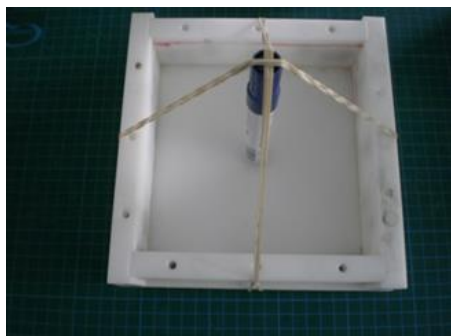
Αναλογία Γύψου/Νερού	Αντοχή Σε Θλίψη (MPa)	Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Αντοχή Σε Εφέλκυσμό (MPa) [Δοκιμή Brazilian]
1.43	10.8	4.18	1.735

3.3 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΓΥΨΙΝΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕ ΟΠΕΣ

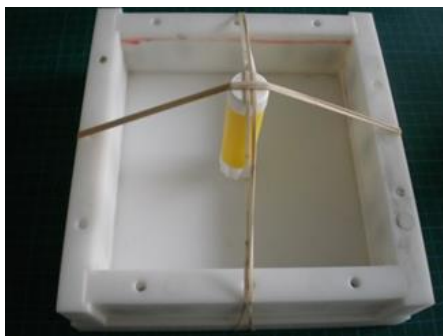
Για την παρασκευή των γύψινων φυσικών μοντέλων με οπές (πλάκες) χρησιμοποιήσαμε τετραγωνικά καλούπια διαστάσεων 15 x 15 x 4 cm (μήκος x πλάτος x ύψος), ιδιοκτησίας του Σακκά Κωνσταντίνου, Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων (βλέπε Εικόνα 42). Για τη δημιουργία των οπών στηρίξαμε στο κέντρο του καλουπιού κυλίνδρους διαφόρων χρήσεων (μαρκαδόρους, κόλλα UHU). Παρακάτω φαίνονται οι τελικές εικόνες των καλουπιών και οι αυτοσχέδιες διατάξεις με τους αντίστοιχους κυλίνδρους (βλέπε Εικόνες 43 έως 45).



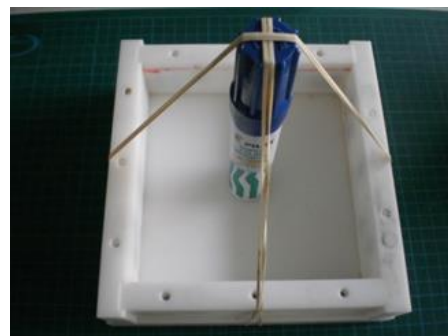
Εικόνα 42 - Τετραγωνικά καλούπια διαστάσεων 15 x 15 x 4 cm



Εικόνα 43 - Μαρκαδόρος διαμέτρου 1,5 cm



Εικόνα 44 - Κόλλα UHU διαμέτρου 2,1 cm



Εικόνα 45 - Μαρκαδόρος διαμέτρου 2,8 cm

Πριν την έκχυση του μίγματος, αλείψαμε εσωτερικά τα καλούπια με ειδικό λάδι έτσι ώστε στο στάδιο του ξεκαλουπώματος της πλάκας, να μην κολλήσει το υλικό στα τοιχώματα του καλουπιού. Η διαδικασία παρασκευής των γύψινων μοντέλων ήταν η ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε και στην παρασκευή των κυλινδρικών δοκιμίων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τους χρόνους ξήρανσης του υλικού και τις τελικές πυκνότητες των πλακών.

Πίνακας 13 - Πλάκες με σπή 1^{ης} Ομάδας

ΠΛΑΚΕΣ	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
2,8-1	2Ω	3Μ, 5Ω & 15Λ	2Ω & 25Λ	1,27
1,5-1	2Ω	3Μ, 5Ω & 15Λ	2Ω & 25Λ	1,24

Πίνακας 14 - Πλάκες με σπή 2^{ης} Ομάδας

ΠΛΑΚΕΣ	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
2,1-1	1Ω	3Μ & 23Ω	0Ω	1,26

Πίνακας 15 - Πλάκες με οπή 3^{ης} Ομάδας

ΠΛΑΚΕΣ	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
1,5-2	45Λ	2Μ, 19Ω & 20Λ	1Μ, 4Ω & 40Λ	1,27
2,1-2	45Λ	2Μ, 19Ω & 20Λ	1Μ, 4Ω & 40Λ	1,28

Πίνακας 16 - Πλάκες με οπή 4^{ης} Ομάδας

ΠΛΑΚΕΣ	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
2,8-2	45Λ	2Μ & 20Ω	1Μ & 4Ω	1,28
1,5-3	45Λ	2Μ & 20Ω	1Μ & 4Ω	1,29

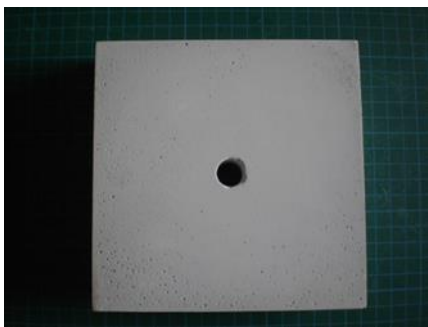
Πίνακας 17 - Πλάκες με οπή 5^{ης} Ομάδας

ΠΛΑΚΕΣ	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
2,8-3	45Λ	1Μ, 22Ω & 45Λ	1Μ, 1Ω & 20Λ	1,28
2,1-3	45Λ	1Μ, 22Ω & 45Λ	1Μ, 1Ω & 20Λ	1,29

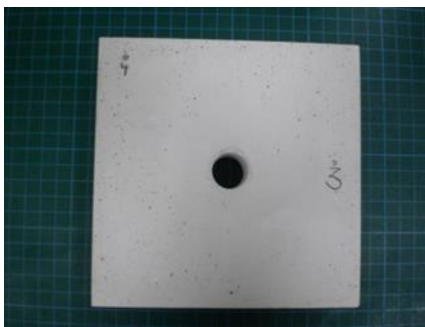
Όταν ολοκληρώθηκαν τα παραπάνω γύψινα φυσικά μοντέλα με οπή κατασκευάσαμε και άλλα τρία φυσικά μοντέλα χωρίς οπή για να εκτιμήσουμε το ποσοστό κατά το οποίο η οπή επηρεάζει τις τιμές αντοχής του μοντέλου. Οι εν λόγω πλάκες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 18 – Πλάκες με οπή 6^{ης} Ομάδας

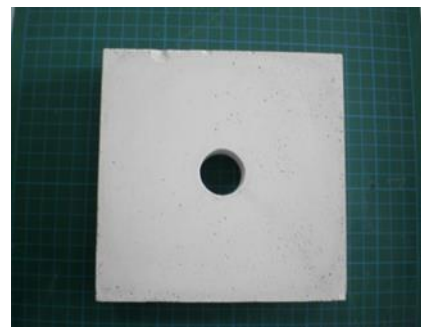
ΠΛΑΚΕΣ (χωρίς οπή)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΚΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΕΝΤΟΣ ΦΟΥΡΝΟΥ)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)
1	45Λ	2Μ, 20Ω & 20Λ	1Μ, 3 Ω & 40Λ	1.25
2	45Λ	2Μ, 20Ω & 20Λ	1Μ, 3 Ω & 40Λ	1.22
3	45Λ	2Μ, 20Ω & 20Λ	1Μ, 3 Ω & 40Λ	1.27



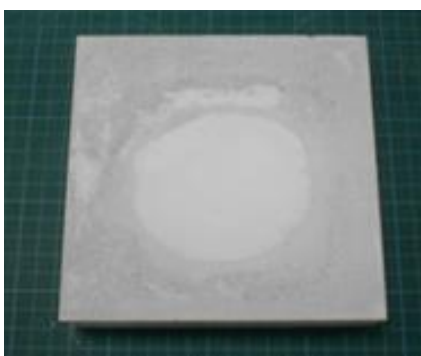
Εικόνα 46 - Γύψινο φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 1,5 cm (x3)



Εικόνα 47 - Γύψινο φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 2,1 cm (x3)



Εικόνα 48 - Γύψινο φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 2,1 cm (x3)



Εικόνα 49 - Γύψινο φυσικό μοντέλο χωρίς οπή (x3)

4 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΥΨΟΥ ΜΕ ΟΠΗ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φυσικά μοντέλα γύψου με οπή που παρασκευάσαμε (βλέπε παράγραφο 3.3) υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη και μέσω των ειδικών αισθητήρων MICRO 100-S καταγράψαμε τα φαινόμενα της ακουστικής εκπομπής που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο μετακίνησης (**displacement control**) του εμβόλου φόρτισης και συγκεκριμένα με ρυθμό (25 $\mu\text{m}/\text{min}$), εκτός από την 3^η πλάκα με οπή 2,1 cm όπου η δοκιμή εκτελέστηκε με ρυθμό μετακίνησης εμβόλου 1462.82 ($\mu\text{m}/\text{min}$) και στην 1^η πλάκα με οπή 2,8 cm με ρυθμό 52.97 ($\mu\text{m}/\text{min}$). Αυτές οι διαφοροποιήσεις στις συνθήκες φόρτισης μας έδωσαν την ευκαιρία να μελετήσουμε την ποσοτική και ποιοτική διαφοροποίηση στα φυσικά φαινόμενα που πραγματοποιήθηκαν. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στην πλάκα σε συγκεκριμένες θέσεις ώστε να παρατηρήσουμε την αλληλεπίδραση των φαινόμενων ΑΕ σε όλη τη μάζα του υλικού. Η στήριξη των αισθητήρων πάνω στην πλάκα έγινε με τη βοήθεια λάστιχων και ειδικού gel υπερήχων. Όσον αφορά τον έλεγχο της αξονικής τροπής της πλάκας τοποθετήσαμε δύο κατάλληλα βελομέτρα (ch 5, ch 7) στην κάτω χαλύβδινη πλάκα της μηχανής φόρτισης με σκοπό να παραμορφώνεται το δοκίμιο με ρυθμό ανάλογο των ρυθμίσεων που είχαν οριστεί. Για την επεξεργασία των δύο τιμών βράχυνσης (σε μm) που κατέγραφαν τα βελομέτρα, ορίστηκε από τις ρυθμίσεις της πρέσας να λαμβάνεται ο μέσος όρος των καναλιών. Η σχέση υπολογισμού της ανηγμένης παραμόρφωσης των δοκιμίων φαίνεται παρακάτω:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L (\mu\text{m})}{L_{\text{αρχ}} (\text{cm})} = \frac{\Delta L * (0.0001)\text{cm}}{15 \text{ cm}}$$

όπου ΔL ο μέσος όρος των βελομέτρων.



Εικόνα 50 - Τυπική διάταξη μονοαξονικής θλίψης γύψινου φυσικού μοντέλου με σπή. Το πλαίσιο θλίψης στο οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι δοκιμές ήταν το πλαίσιο με έμβολο δυναμικότητας 250 kN. Στην εικόνα διακρίνονται το εμπρόσθιο βελόμετρο για τη μέτρηση της ανύψωσης της κάτω χαλύβδινης πλάκας καθώς επίσης και οι αισθητήρες της εμπρόσθιας όψης της πλάκας

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ NOESIS

4.2.1 Ποσοτική ανάλυση των χαρακτηριστικών των σημάτων

Τα δεδομένα ΑΕ που πήραμε από το πρόγραμμα ΑΕ win τα εισάγαμε στο Noesis για να τα επεξεργαστούμε με τη βοήθεια ειδικών γραφημάτων και άλλων επιπρόσθετων βοηθητικών εργαλείων που μας παρείχε το πρόγραμμα. Παρατηρώντας την καμπύλη ανάπτυξης των σημάτων ΑΕ σε όλες τις δοκιμές, συμπεράναμε ότι δεν υπάρχουν στιγμιότυπα έντονης δραστηριότητας σημάτων ΑΕ γεγονός το οποίο κατέστησε την αναγνώριση των φυσικών φαινομένων δύσκολη και χρονοβόρα. Συνεπώς η ανάλυση μας βασίστηκε στη λεπτομερή παρακολούθηση των χαρακτηριστικών των σημάτων (βλέπε παράγραφο 2.2) συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου. Από τα χαρακτηριστικά του σήματος αυτά τα οποία μπορούν να δώσουν μία ποιοτική αλλά και ποσοτική εξήγηση για την προέλευση και το μέγεθος των καταγεγραμμένων σημάτων είναι το πλάτος και η απελευθέρωση της ελαστικής ενέργειας. Ωστόσο η παρουσία της ενέργειας στα πειράματα που ακολούθησαν ήταν αρκετά ασθενής με αποτέλεσμα να μην αποτελεί άμεσο κριτήριο για την αξιολόγηση των φαινομένων ΑΕ. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα στο να επικεντρωθούμε στις μεταβολές του *πλάτους (Amplitude)* που παρουσίασαν τα σήματα κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Για τον εντοπισμό στιγμιότυπων ανάπτυξης σημάτων, ενώσαμε τα δεδομένα μας με μία πολύ λεπτή γραμμή έτσι ώστε να παρατηρήσουμε αλλαγές κλίσης στην αντίστοιχη καμπύλη. Αυτή η τεχνική όπως θα δούμε παρακάτω μας βοήθησε αρκετά στο να φανούν αξιόλογα συμπεράσματα.

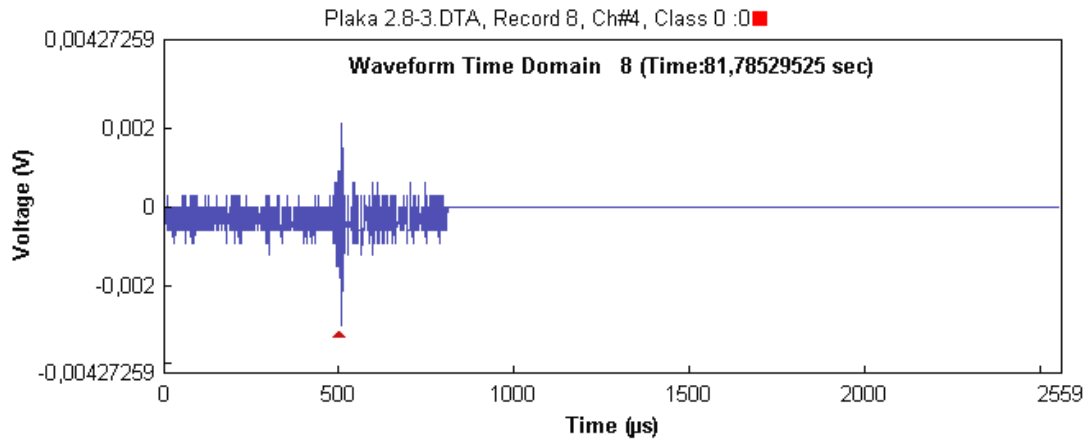
Μία σημαντική δυνατότητα που μας παρείχε το Noesis ήταν η δημιουργία background plot πάνω στο κύριο γράφημα ανάπτυξης των σημάτων. Στην παρούσα ανάλυση το δευτερεύον γράφημα (background plot) ήταν η καμπύλη του φορτίου η οποία ως άξονα y είχε την τιμή του [παραμετρικού] και ο κοινός άξονας ήταν ο x με την καταγραφή του χρόνου. Το παραμετρικό είναι η τιμή που αντιστοιχεί στο φορτίο της πρέσας (κατά τη διάρκεια όλης της δοκιμής) υπό τη μορφή διαφοράς δυναμικού (Volts) Το παραμετρικό μέσω κάποιων παραμέτρων που εισήχθησαν στο Noesis μετατράπηκε σε **Load** (kN) και στη συνέχεια το Load διαιρέθηκε με την επιφάνεια του δοκιμίου για να υπολογιστεί η τάση (**Stress**, MPa). Ωστόσο για να μελετήσουμε καλύτερα τις διακυμάνσεις του πλάτους που παρουσίασαν τα σήματα κατά τη δοκιμή, κρίναμε απαραίτητο να χωρίσουμε την καμπύλη του φορτίου σε 10 τμήματα με κριτήριο την αύξηση της τάσης κατά 10% της μέγιστης τιμής αντοχής. Για το σκοπό αυτό αντιγράψαμε όλα τα δεδομένα από το Noesis στο excel και πραγματοποιήσαμε την παραπάνω τμηματοποίηση μέσω χρωματικής διαβάθμισης της τάσης.

4.2.2 Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους

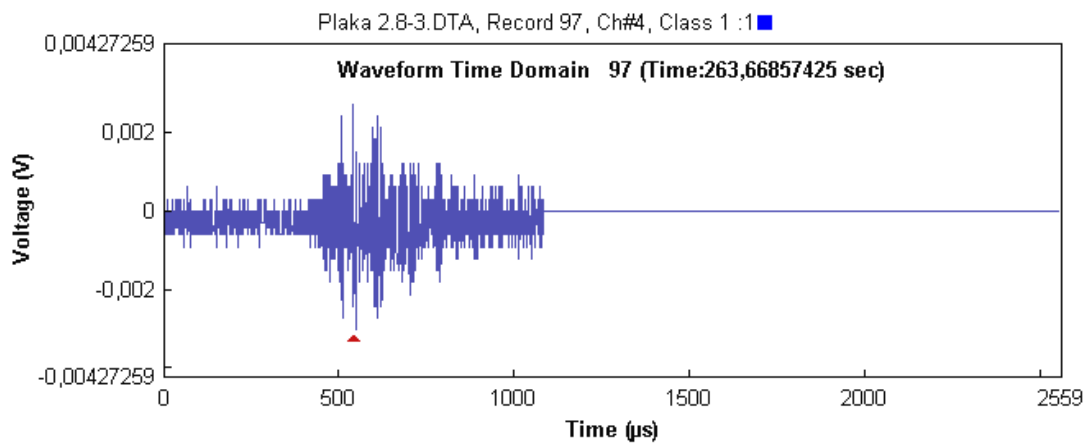
Εξετάζοντας λεπτομερώς στο Noesis τις κυματομορφές των σημάτων που κατεγράφησαν παρατηρήσαμε κάποιες ποιοτικές αλλαγές μεταξύ τους, οι οποίες είναι καθοριστικές για τον χαρακτηρισμό τους σε σήματα:

- Χαμηλής ποιότητας (σήματα 0 Κλάσης)
- Μέτριας ποιότητας (σήματα 1ης Κλάσης)
- Υψηλής ποιότητας (σήματα 2ης Κλάσης)

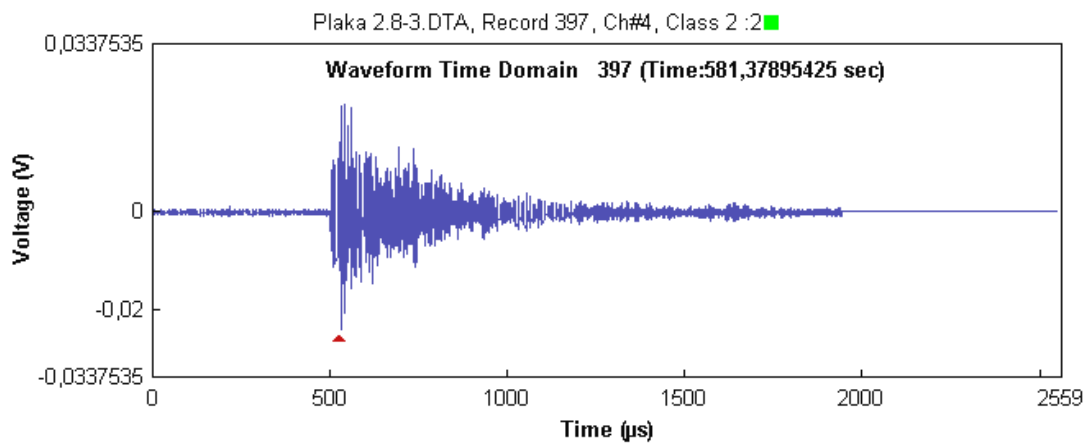
Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ομαδοποίηση βασίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος στην υποκειμενική κρίση του παρατηρητή γι αυτό και δεν μπορεί να εξασφαλιστεί η εξ ολοκλήρου ορθότητα της μεθόδου ανάλυσης. Παρακάτω φαίνονται ενδεικτικά οι κυματομορφές των τριών κλάσεων σημάτων.



Εικόνα 51 - Σήματα 0 Κλάσης



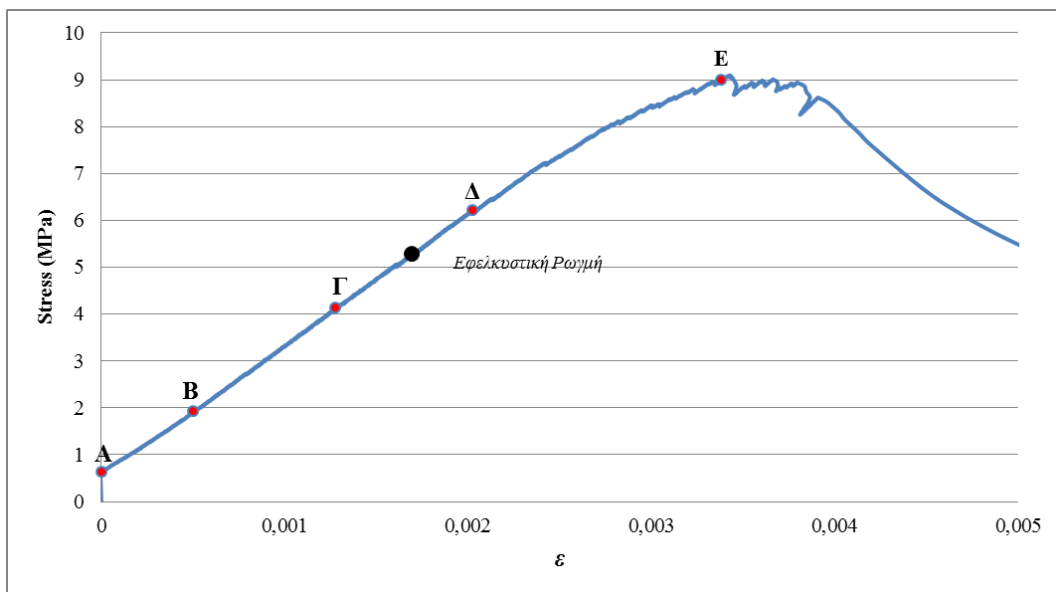
Εικόνα 52 - Σήματα 1^{ης} Κλάσης



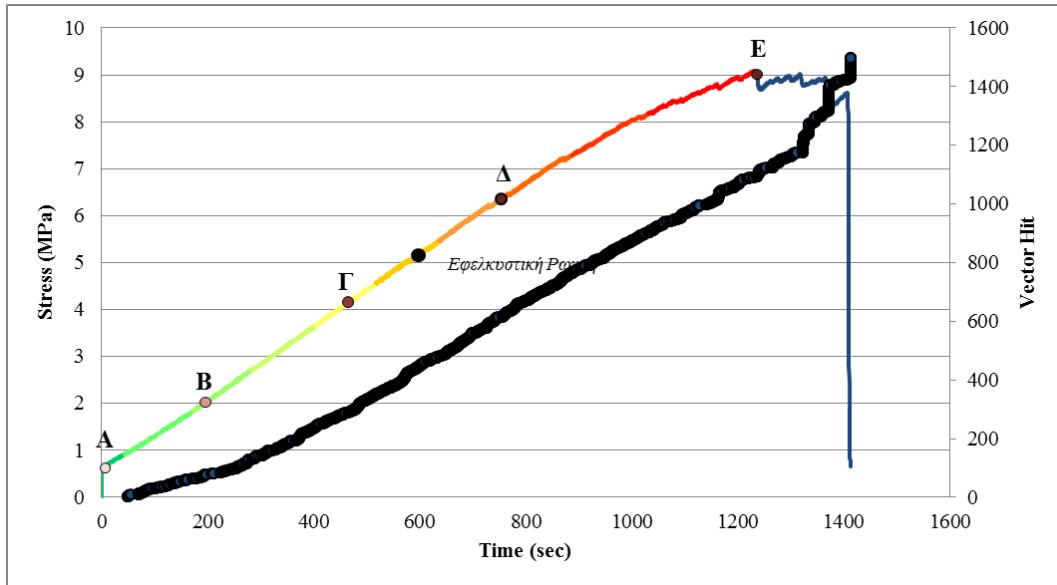
Εικόνα 53 - Σήματα 2^{ης} Κλάσης

4.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΑΕ ΜΕ ΤΟ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ

Εξετάζοντας με προσοχή τις καμπύλες τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, παρατηρήσαμε κάποιες αλλαγές στην κλίση των καμπυλών σε τρία συγκεκριμένα σημεία (**Β,Γ,Δ**). Αυτές οι αλλαγές είναι αξιοσημείωτες καθώς σχετίζονται με τις τάσεις του φορτίου στις οποίες επιταχύνθηκε η σύγκλιση μεταξύ των χαλύβδινων πλακών της πρέσας. Η σύγκλιση αυτή στα πρώτα στάδια της δοκιμής μπορεί να οφείλεται στην καλύτερη σύζευξη μεταξύ των χαλύβδινων πλακών της πρέσας και του δοκιμίου αλλά στη συνέχεια η μετρούμενη βράχυνση οφείλεται κυρίως στην αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου και λιγότερο στη διεπιφάνεια πλάκας φόρτισης-δοκιμίου. Αυτά τα σημεία οριοθέτησαν τις περιοχές **ΑΒ**, **ΒΓ**, **ΓΔ**, **ΔΕ** στις οποίες μελετήσαμε το πλήθος των σημάτων της ΑΕ και το αντίστοιχο μέσο πλάτος τους. Επίσης σε όσες δοκιμές προλάβαμε εγκαίρως να παρατηρήσουμε μακροσκοπικά την εφελκυστική ρωγή, σημειώσαμε πάνω στα γραφήματα την αντίστοιχη τάση παρατήρησης (Βλέπε Σχήμα 10).

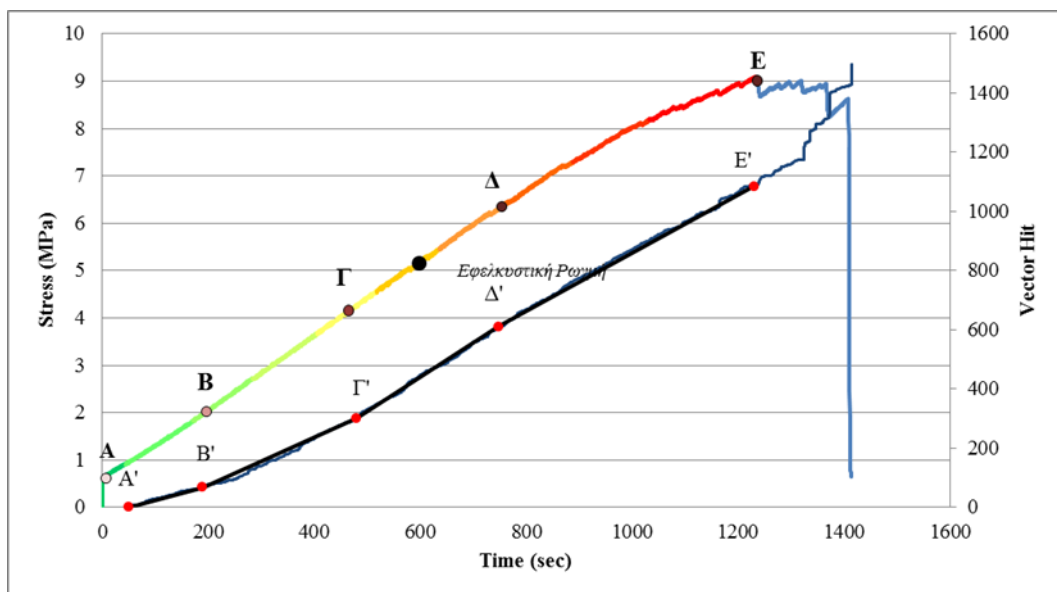


Σχήμα 10 - Παράδειγμα των βοηθητικών σημείων στην καμπύλη τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης



Σχήμα 11 - Παράδειγμα γραφήματος με τη χρωματική διαβάθμιση της τάσης και των δεδομένων της ακουστικής εκπομπής

Στη συνέχεια εισάγοντας τα δεδομένα της ακουστικής εκπομπής στο παραπάνω γράφημα, μελετήσαμε το ρυθμό ανάπτυξης των σημάτων ανά περιοχή, με τη βοήθεια των ευθυγράμμων τμημάτων που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 12 - Παράδειγμα του ρυθμού ανάπτυξης των σημάτων μέσω των ευθύγραμμων τμημάτων

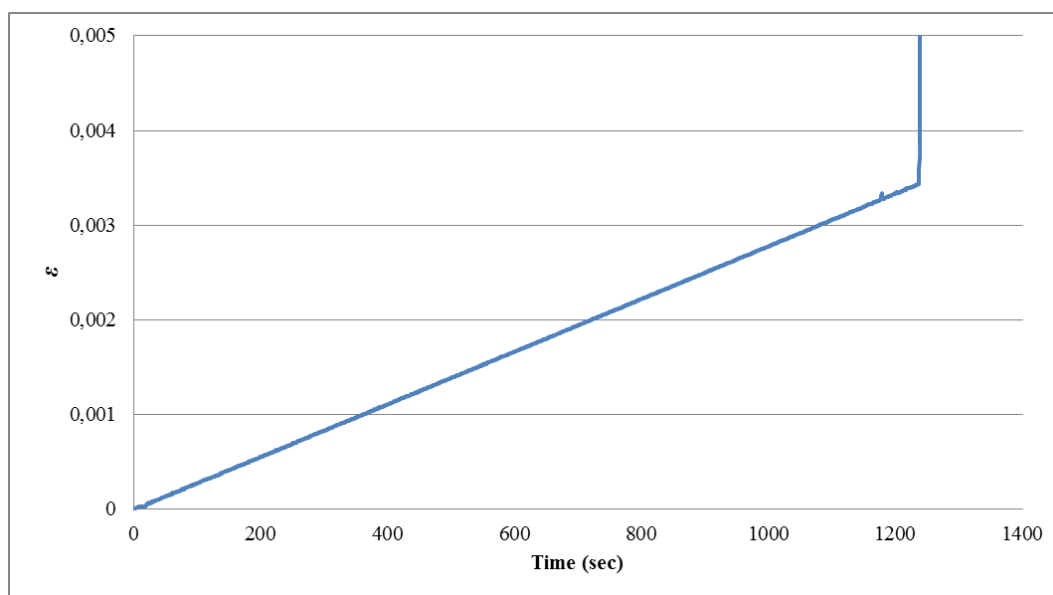
Τα σημεία A', B', Γ', Δ', E' είναι σημεία της καμπύλης ανάπτυξης των σημάτων και βρίσκονται σε αντιστοιχία με τα σημεία A, B, Γ, Δ. Έτσι υπολογίζοντας την κλίση του κάθε ευθύγραμμου τμήματος μπορούσαμε να εκτιμήσουμε τον ρυθμό ανάπτυξης των σημάτων.

4.3.1 1^η πλάκα με οπή (1,5 cm)

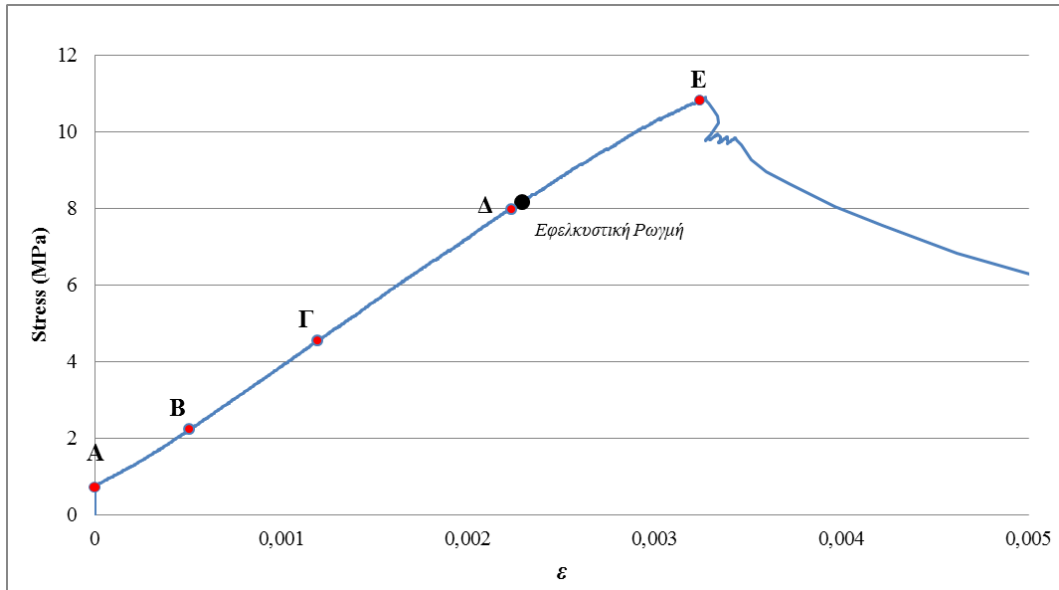
Η δοκιμή αυτής της πλάκας πραγματοποιήθηκε ακαριαία λόγω κάποιου σφάλματος που παρουσίασε η θλιπτική μηχανή, με αποτέλεσμα να μην πάρουμε καλές μετρήσεις του πειράματος.

4.3.2 2^η πλάκα με οπή (1,5 cm)

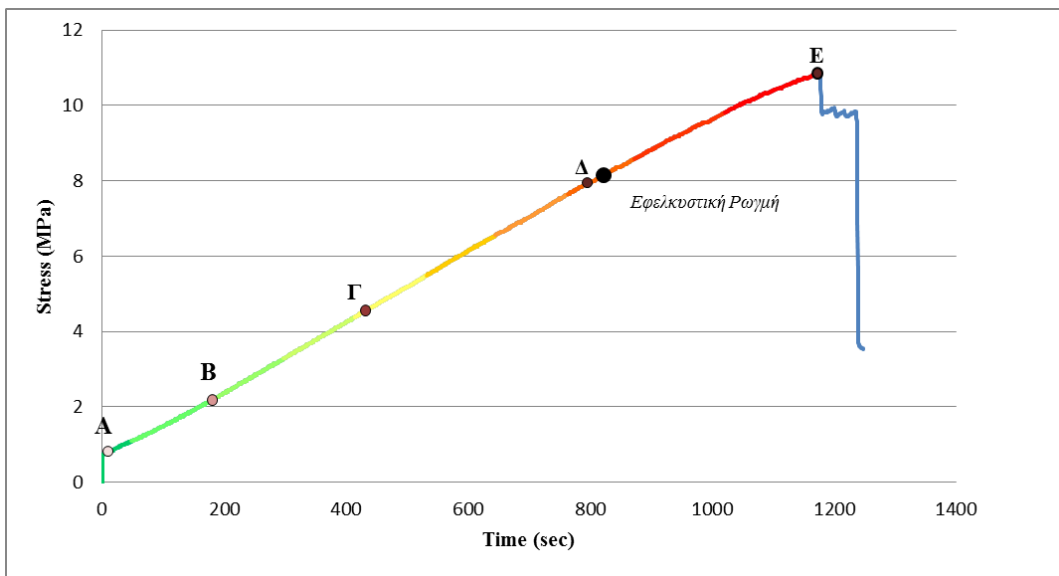
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 25 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 10,9 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 13 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



Σχήμα 14 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 15 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

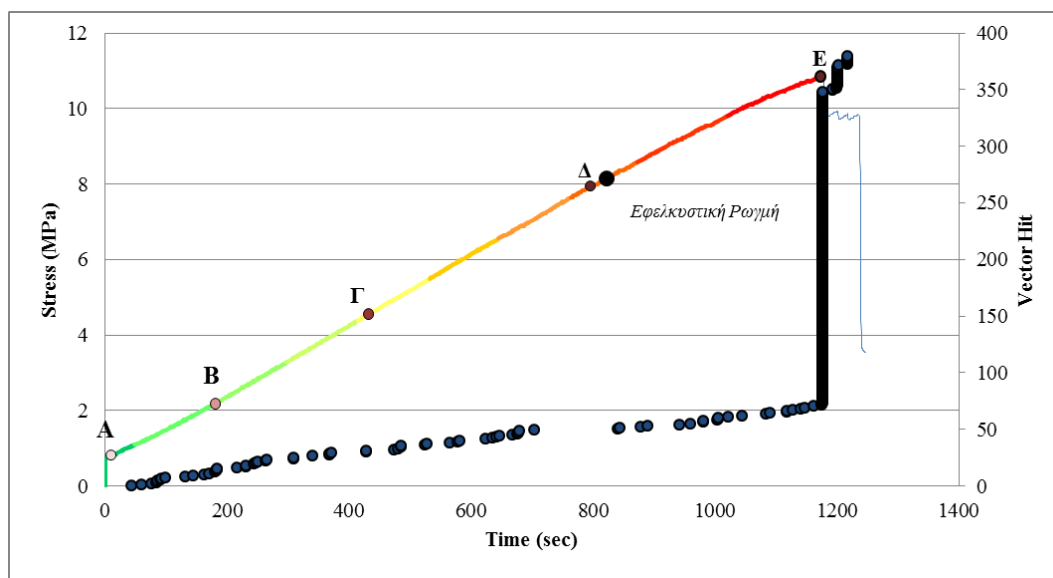
Ρυθμίσεις παραμέτρων στο πρόγραμμα AEwin

Πίνακας 19 - Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win

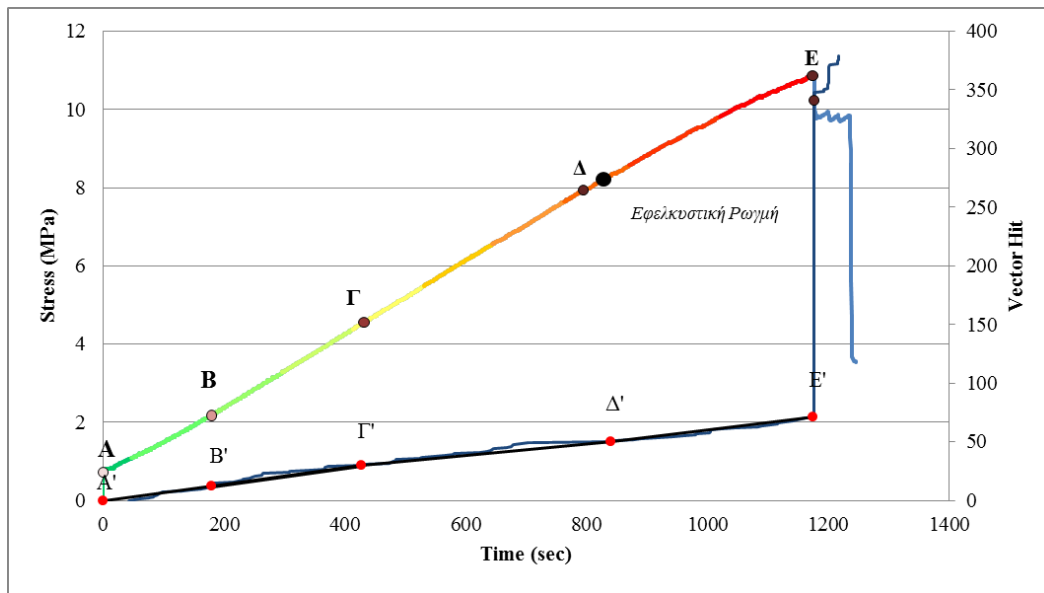
AE Channel	Threshold (dBae)	PDT (microseconds)	HDT (microseconds)	HLT (microseconds)	Max Duration (milliseconds)
1	Εναλλασσόταν μεταξύ 30 dBae και 40 dBae λόγω θορύβου	50	300	200	500
2	«	50	300	200	500
3	«	50	300	200	500
4	«	50	300	200	500
5	«	50	300	200	500
6	«	50	300	200	500
7	«	50	300	200	500
8	«	50	300	200	500

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων

Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 16 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 17 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 20 - Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	30	1
20	33	11
30	34	12
40	34	6
50	35	8
60	34	6
70	31	6
80	33	2
90	31	9
100	33	10

Κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων

Κλίση **AB**: 0,066

Κλίση **BΓ**: 0,072

Κλίση **ΓΔ**: 0,048

Κλίση **ΔE**: 0,062

Συσχετισμός καμπύλης φόρτισης και καμπύλης αριθμού σημάτων.

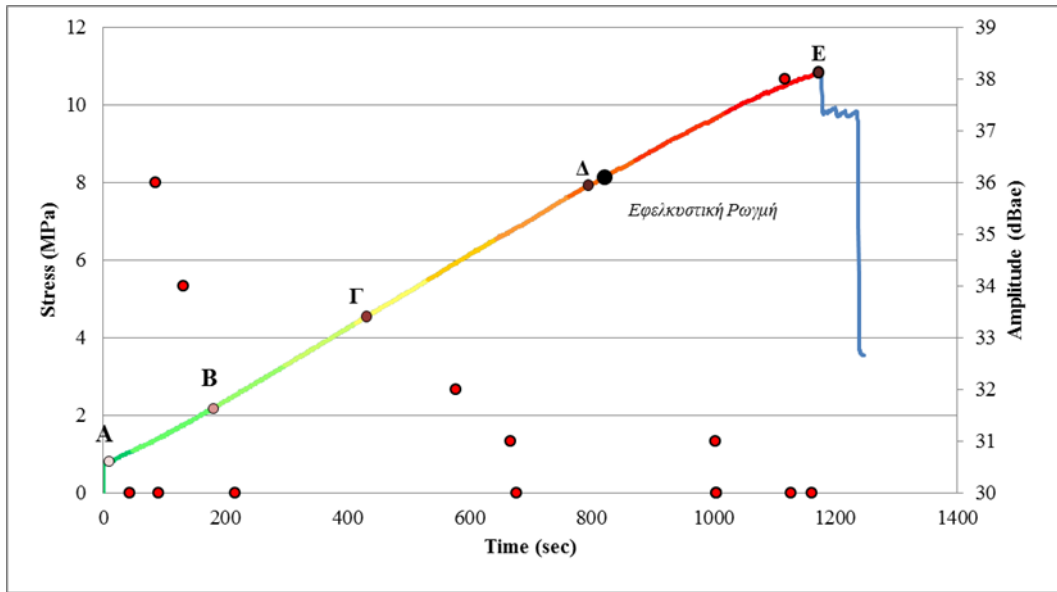
Τμήμα **ΑΒ** (11-20% μ.α.): Εξετάζοντας την κλίση αυτού του ευθύγραμμου τμήματος και τις τιμές του πίνακα 20 παρατηρούμε μία ανάπτυξη σημάτων η οποία ξεκινάει με μέσο πλάτος 30 dBae και φτάνει έως τα 33 dBae .

Τμήμα **ΒΓ** (20-42% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται. Παράλληλα το μέσο πλάτος των σημάτων αυξάνεται στα 34 dBae.

Τμήμα **ΓΔ** (42-74% μ.α.): Σύμφωνα με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων μειώνεται. Εξετάζοντας τον πίνακα βλέπουμε πως μέχρι το 50% μ.α. τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν αρκετά μεγάλο μέσο πλάτος (35 dBae), στη συνέχεια μέχρι το 60% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων μειώνεται στα 34 dBae και τέλος μέχρι το 74% μ.α. το μέσο πλάτος πέφτει απότομα στα 31 dBae.

Τμήμα **ΔΕ** (74%-100% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος , ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται αρκετά και αυτό επιβεβαιώνεται και απ την εφελκυστική ρωγμή η οποία παρατηρήθηκε κοντά στο 76% μ.α. Παρατηρώντας τον πίνακα βλέπουμε ότι μέχρι το 80% μ.α. έχουμε μικρή ανάπτυξη σημάτων με το μέσο πλάτος να έχει αυξηθεί στα 33 dBae. Από το 80% μ.α. και μέχρι το 90% μ.α. τα σήματα αυξάνονται ενώ το μέσο πλάτος πέφτει στα 31 dBae. Στο τελευταίο τμήμα (90-100% μ.α.) έχουμε απότομη ανάπτυξη σημάτων κατά την αστοχία με το μέσο πλάτος να φτάνει τα 33 dBae.

Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους

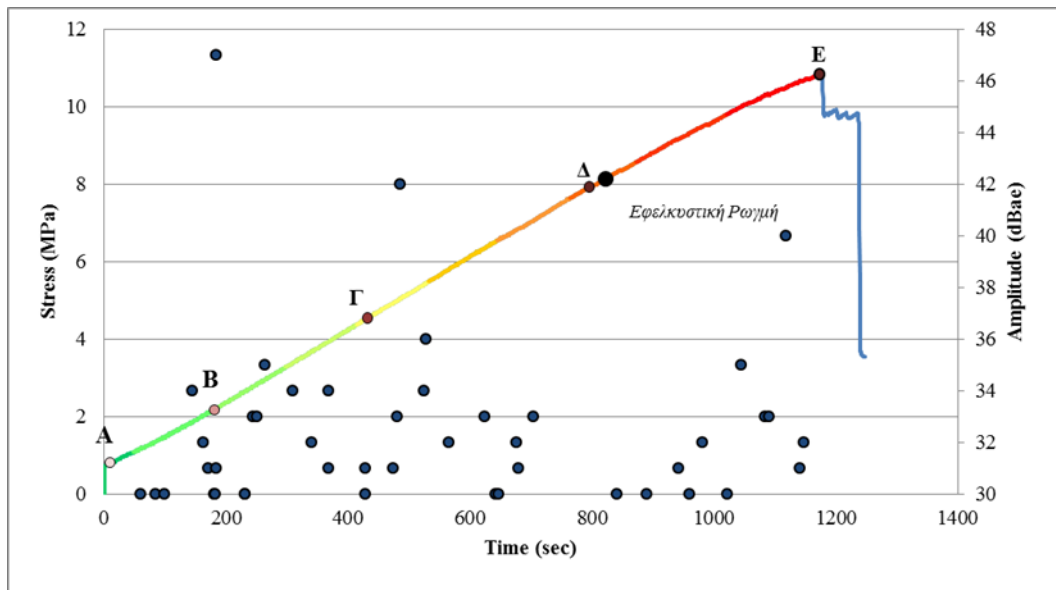


Σχήμα 18 - Σήματα 0 Κλάσης

Πίνακας 21 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	30	1
20	33	3
30	30	1
40	-	0
50	-	0
60	32	1
70	31	2
80	-	0
90	30	3
100	33	3

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (11%-20% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη λίγων σημάτων με μέσο πλάτος 31.5 dBae. Από 20%-42% μ.α. (**BΓ**) εμφανίζεται ένα σήμα πλάτους 30 dBae. Από 42%-74% μ.α. (**ΓΔ**) έχουμε τρία σήματα με μέσο πλάτος τα 32 dBae. Τέλος από 74%-100% μ.α. (**ΔΕ**) το μέσο πλάτος των σημάτων σταδιακά ανεβαίνει (30→33 dBae).

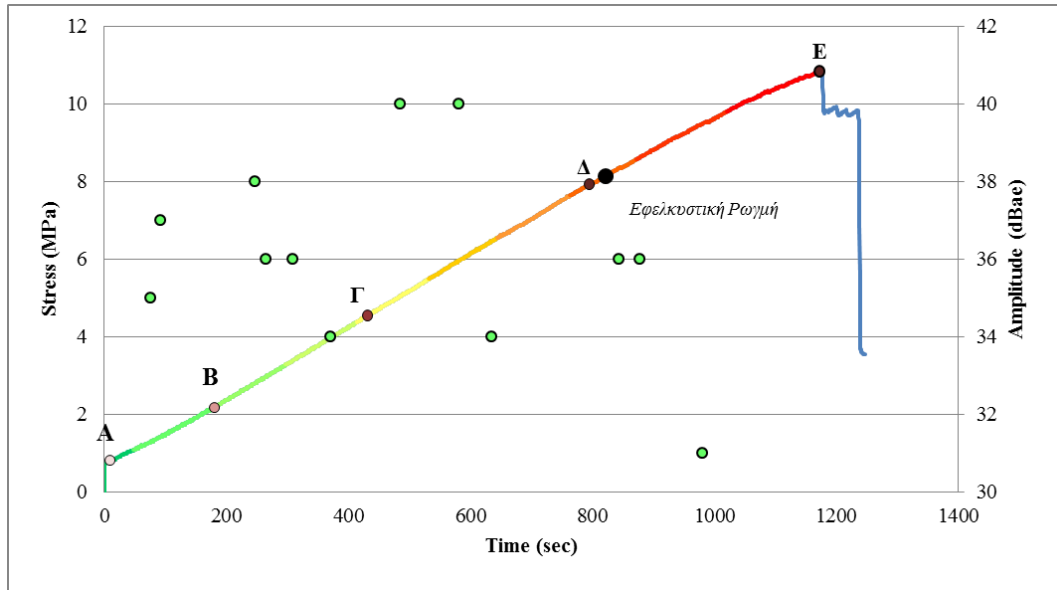


Σχήμα 19 - Σήματα 1^{ης} Κλάσης

Πίνακας 22 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1^{ης} Κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	31	6
30	33	9
40	33	4
50	34	7
60	32	3
70	32	4
80	30	1
90	31	4
100	33	7

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (11%-20% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη λίγων σημάτων με μέσο πλάτος 31 dBae. Από 20%-42% μ.α. (**ΒΓ**) που είμαστε στην γραμμική ελαστική περιοχή το μέσο πλάτος των σημάτων αυξάνεται και διατηρείται σταθερό στα 33 dBae. Από 42%-74% μ.α. έχουμε αύξηση του μέσου πλάτους (34 dBae) μέχρι το 50% μ.α. αλλά από 50% μέχρι 74% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων πέφτει στα 32 dBae. Τέλος από 74%-100% μ.α. (**ΔΕ**) που παρατηρήθηκε η εφελκυστική ρωγμή το μέσο πλάτος των σημάτων σταδιακά ανεβαίνει (30→33 dBae).



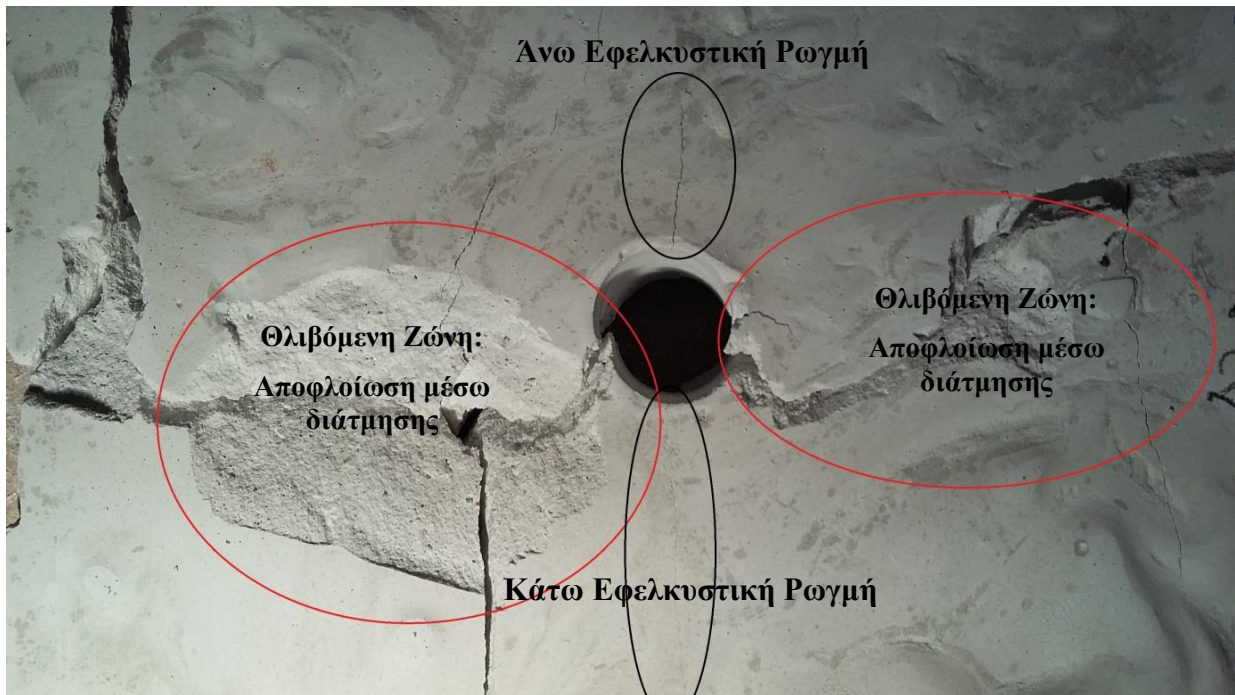
Σχήμα 20 - Σήματα 2^{ης} Κλάσης

Πίνακας 23 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	36	2
30	37	2
40	35	2
50	40	1
60	37	2
70	-	0
80	36	1
90	34	2
100	-	0

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (11%-20% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη δύο σημάτων με αρκετά μεγάλο μέσο πλάτος (36 dBae). Από 20%-42% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων διατηρείται σταθερό στα 36 dBae. Από 42%-74% μ.α. έχουμε ένα χαρακτηριστικό σήμα πλάτους 40 dBae στο 46% μ.α. Πιθανώς σ αυτό το σημείο να έγινε κάποια ρωγμή ωστόσο από 46% -60% μ.α. έχουμε δύο σήματα με χαμηλότερο μέσο πλάτος (37 dBae). Τέλος στο ΔΕ (74%-100% μ.α.) έχουμε κυρίως δραστηριότητα από 80%μ.φ.-90% μ.α. με μέσο πλάτος τα 35 dBae.

Φωτογραφική Τεκμηρίωση



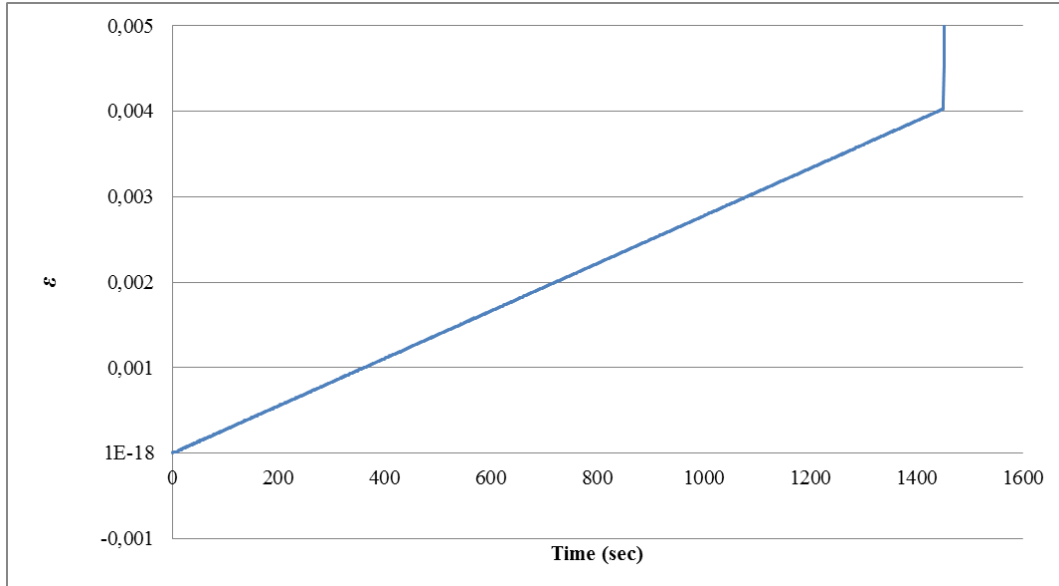
Εικόνα 54 - Αρχικές ζώνες ρωγμάτωσης



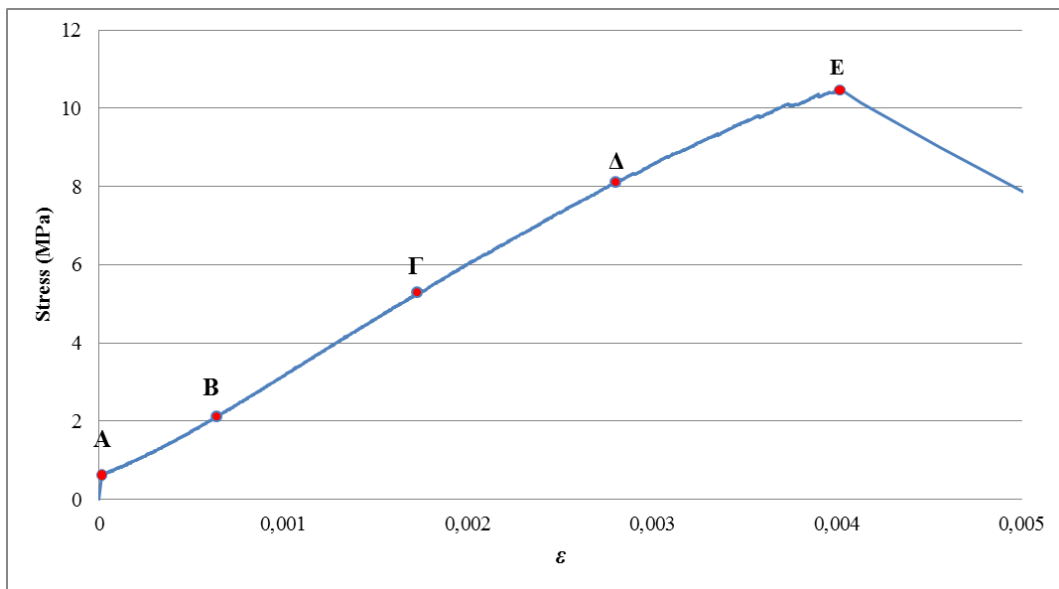
Εικόνα 55 - Δευτερογενές επίπεδο ρωγμάτωσης της πλάκας

4.3.3 3^η πλάκα με οπή (1,5 cm)

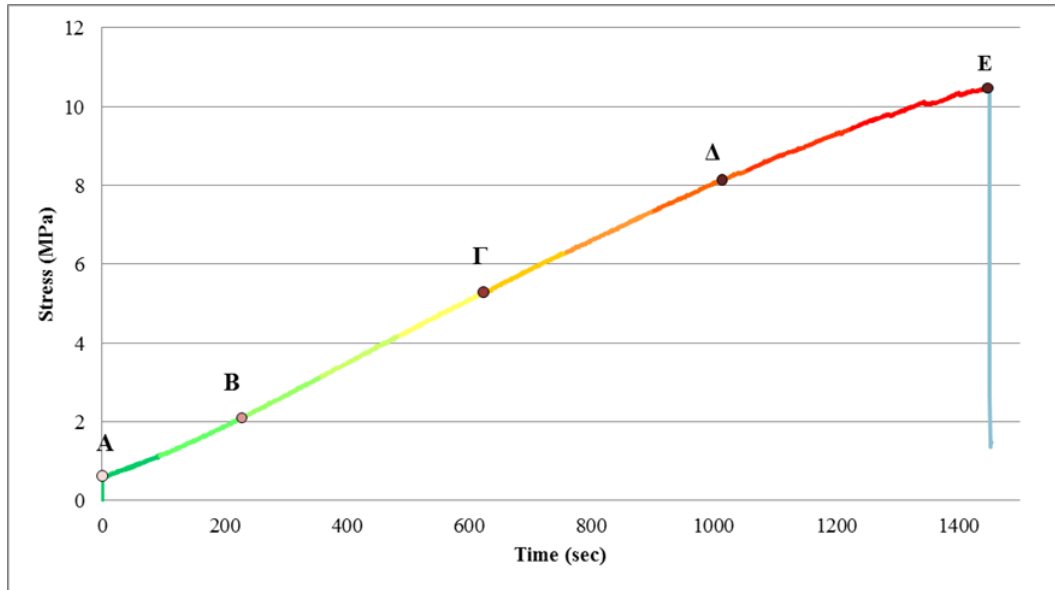
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 25 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 10,49 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 21 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



Σχήμα 22 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 23 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

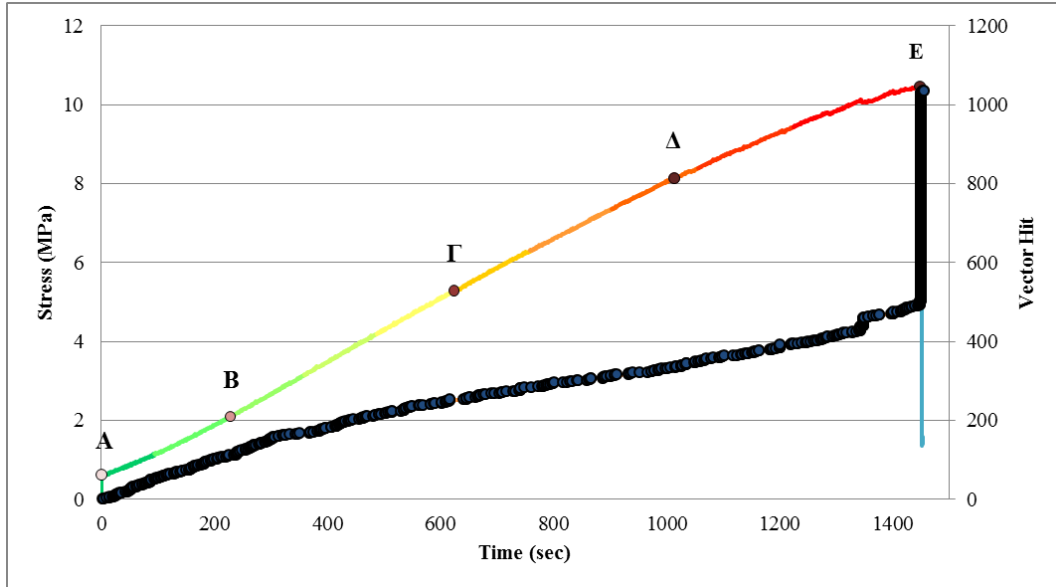
Ρυθμίσεις παραμέτρων στο πρόγραμμα AEwin

Πίνακας 24 - Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win

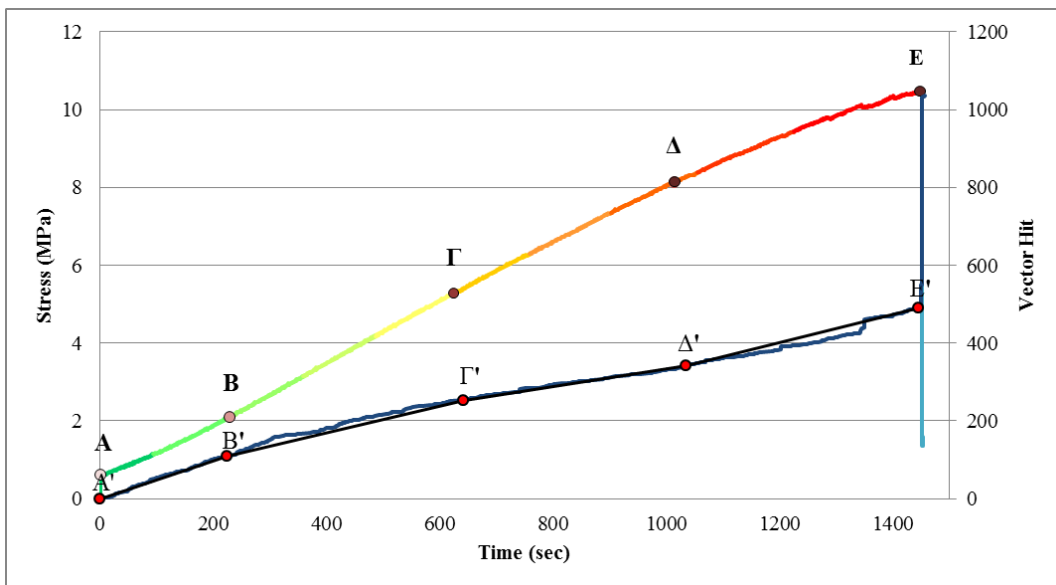
AE Channel	Threshold (dBae)	PDT (microseconds)	HDT (microseconds)	HLT (microseconds)	Max Duration (milliseconds)
1	25	50	300	200	500
2	25	50	300	200	500
3	25	50	300	200	500
4	25	50	300	200	500
5	25	50	300	200	500
6	25	50	300	200	500
7	25	50	300	200	500
8	25	50	300	200	500

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων

Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 24 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 25 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 25 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	27	50
20	27	61
30	27	56
40	26	46
50	26	39
60	26	31
70	27	30
80	27	35
90	26	46
100	26	97

Κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων

Κλίση **AB**: 0,487

Κλίση **ΒΓ**: 0,344

Κλίση **ΓΔ**: 0,224

Κλίση **ΔΕ**: 0,365

Συσχετισμός καμπύλης φόρτισης και καμπύλης αριθμού σημάτων

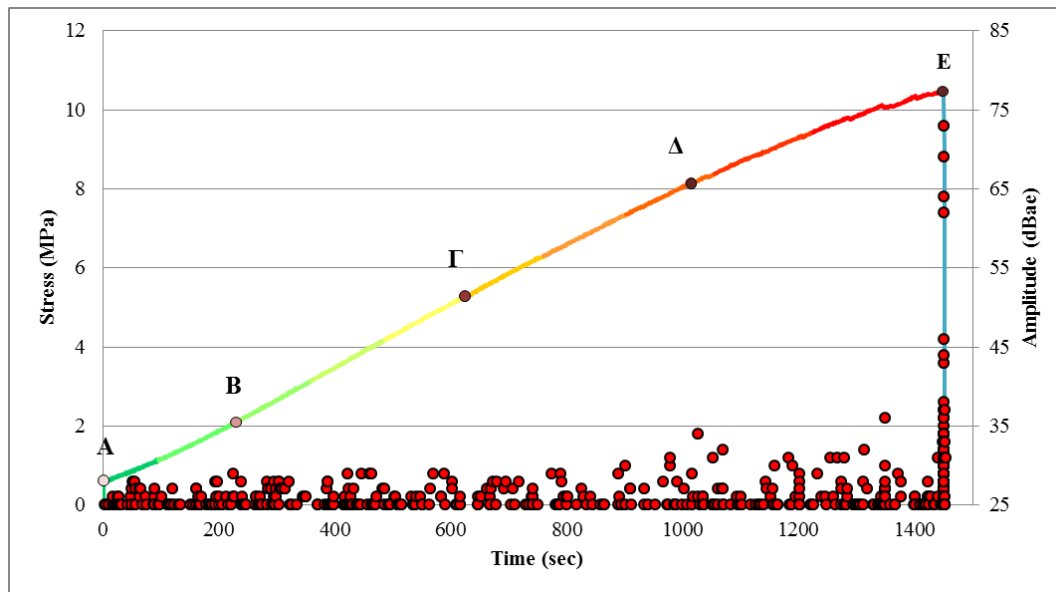
Τμήμα **AB** (0-20% μ.α.): Εξετάζοντας τον πίνακα 25 και την κλίση αυτού του ευθύγραμμου τμήματος παρατηρούμε μία ανάπτυξη σημάτων με μέσο πλάτος τα 27 dBae.

Τμήμα **ΒΓ** (20-50% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων μειώνεται. Σύμφωνα με τον πίνακα 25 παρατηρούμε πως μέχρι το 30% μ.α τα σήματα διατηρούν το ίδιο μέσο πλάτος (27 dBae) αλλά από το 30% μ.α. και μέχρι το 50% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων μειώνεται στα 26 dBae.

Τμήμα **ΓΔ** (50-78% μ.α.): Σύμφωνα με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης μειώνεται αρκετά και εξετάζοντας τον πίνακα βλέπουμε πως τα αναπτυσσόμενα σήματα έχουν μέσο πλάτος 27 dBae.

Τμήμα **ΔΕ** (78%-100% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος, ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται αρκετά. Παρατηρώντας όμως τον πίνακα βλέπουμε ότι το μέσο πλάτος των σημάτων διατηρείται στα 26 dBae.

Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους

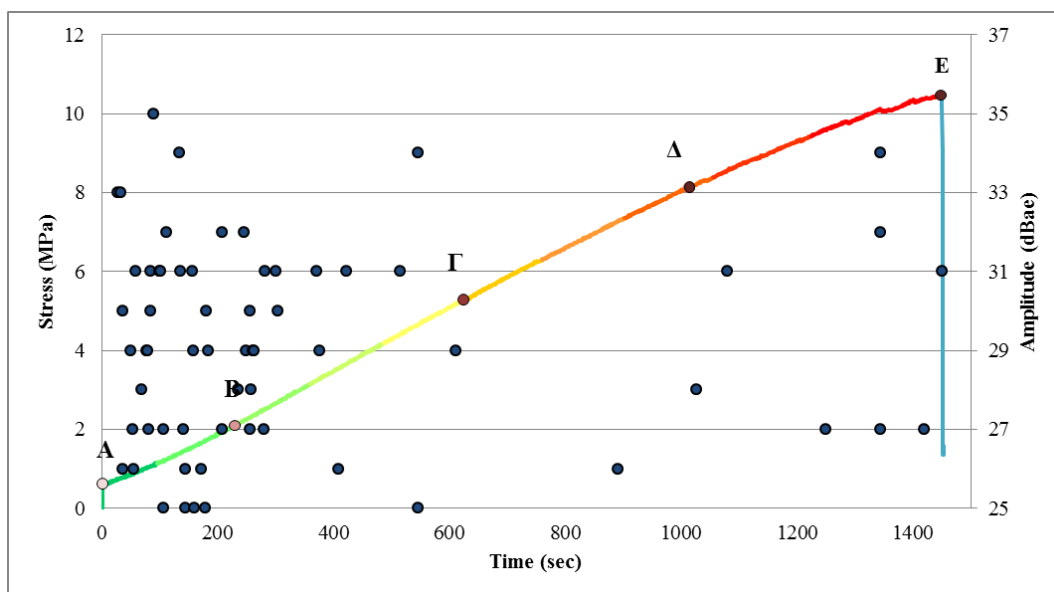


Σχήμα 26 - Σήματα 0 Κλάσης

Πίνακας 26 - Μέσες τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	26	34
20	26	41
30	26	42
40	26	41
50	26	34
60	26	31
70	26	26
80	27	32
90	26	45
100	26	91

Συμπέρασμα: Γενικά σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε μία σταθερή ανάπτυξη σημάτων με ίδιο πλάτος (26 dBae). Πιο αναλυτικά στην περιοχή **AB** (0%-20% μ.α.) έχουμε αρκετά σήματα με μέσο πλάτος τα 26 dBae. Από 20%-50% μ.α. (**BΓ**) μέσο πλάτος των σημάτων διατηρείται σταθερό στα 26 dBae. Από 50%-78% μ.α. (**ΓΔ**) το μέσο πλάτος φτάνει μέχρι τα 27 dBae. Τέλος από 78%-100% (**ΔΕ**) μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων επανέρχεται στα 26 dBae.

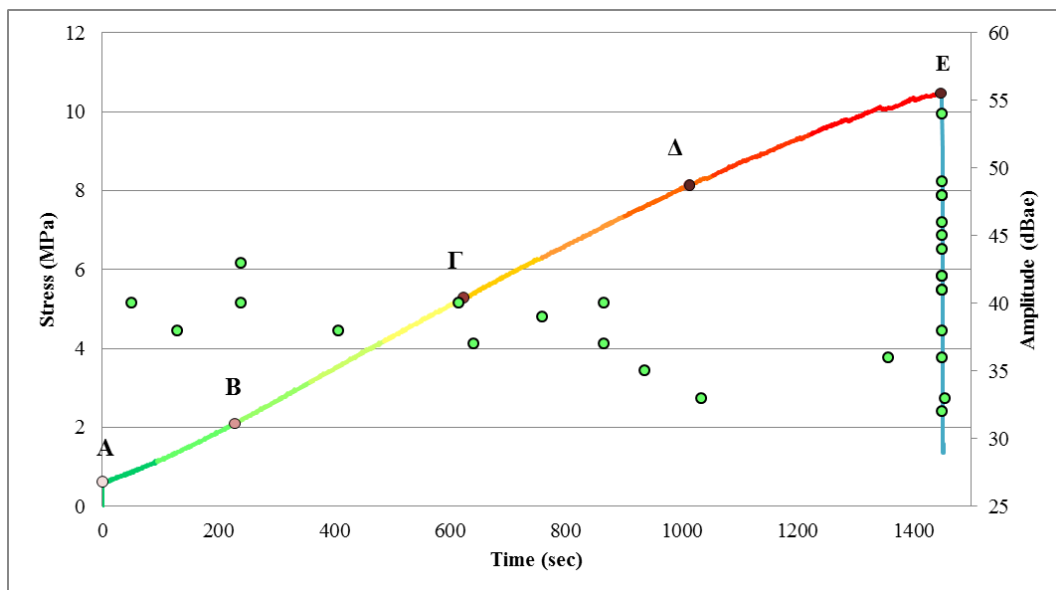


Σχήμα 27 - Σήματα 1^{ης} Κλάσης

Πίνακας 27 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	30	15
20	29	19
30	29	12
40	29	4
50	30	4
60	-	0
70	26	1
80	28	1
90	31	1
100	29	5

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (0%-20% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη αρκετών σημάτων με μέσο πλάτος τα 29,5 dBae. Από 20%-50% μ.α. (**BΓ**) τα σήματα μειώνονται με μέσο πλάτος τα 30 dBae. Από 50%-78% μ.α. (**ΓΔ**) υπάρχει μικρή ανάπτυξη σημάτων των οποίων το μέσο πλάτος μειώνεται. Πιο αναλυτικά μέχρι το 60% μ.α. δεν έχουμε κανένα σήμα, από το 60% μ.α. μέχρι το 70% μ.α. το μέσο πλάτος είναι στα 26 dBae και από το 60% μ.α. μέχρι το 78% το μέσο πλάτος φτάνει στα 28 dBae. Τέλος από 78%-100% μ.α. (**ΔΕ**) έχουμε λίγα σήματα των οποίων το μέσο πλάτος σταδιακά ανεβαίνει (28→30dBae).



Σχήμα 28 - Σήματα 2^{ης} Κλάσης

Πίνακας 28 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	40	1
20	38	1
30	42	2
40	38	1
50	40	1
60	37	1
70	39	3
80	34	2
90	-	0
100	36	1

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (0%-20% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη αρκετών σημάτων με μέσο πλάτος τα 39 dBae. Από 20%-50% μ.α. (**ΒΓ**) τα σήματα μειώνονται με μέσο πλάτος 40 dBae. Από 50%-78% μ.α. (**ΓΔ**), παρατηρούμε με βάση τον πίνακα ακόμα μικρότερη ανάπτυξη σημάτων με το μέσο πλάτος να μειώνεται στα (36,6 dBae). Τέλος από 78%-100% μ.α. (**ΔΕ**) έχουμε ένα σήμα με πλάτος 36 dBae.

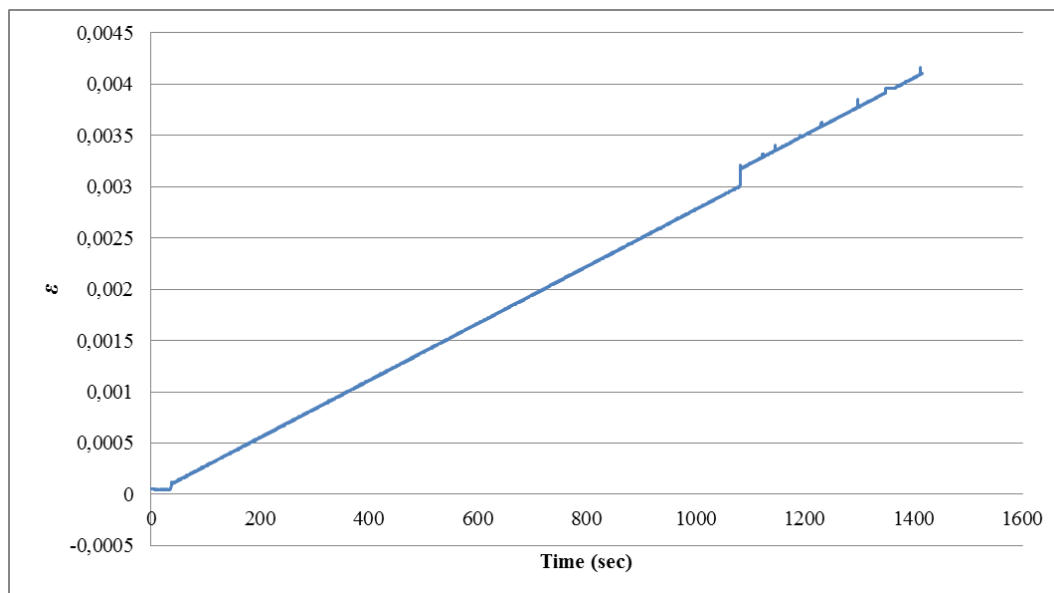
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



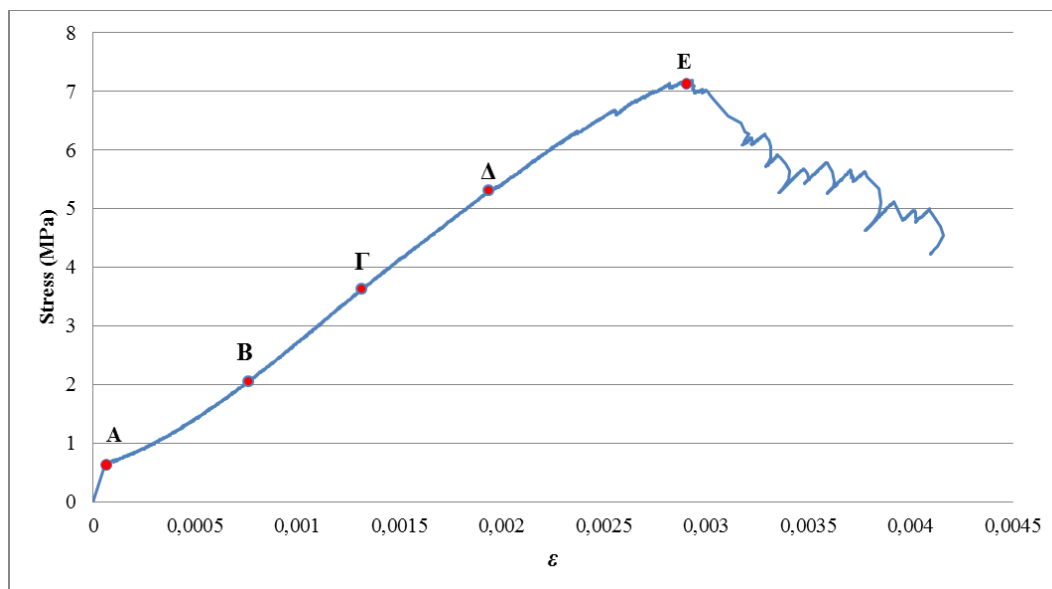
Εικόνα 56 - Ρωγμάτωση του δοκιμίου

4.3.4 1^η πλάκα με οπή (2,1 cm)

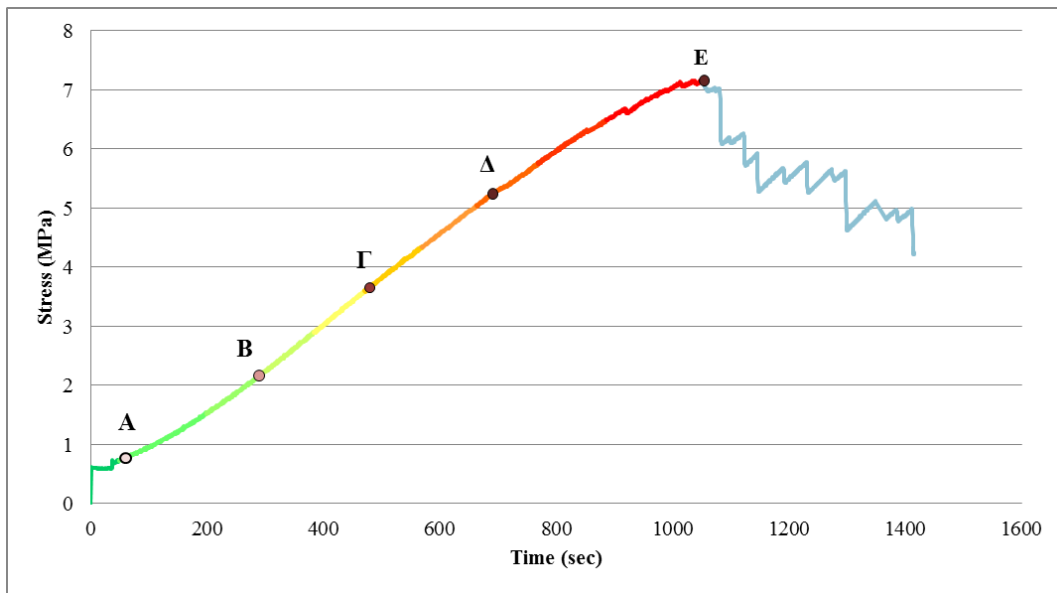
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 25 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 7,2 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας



Σχήμα 29 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



Σχήμα 30 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 31 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

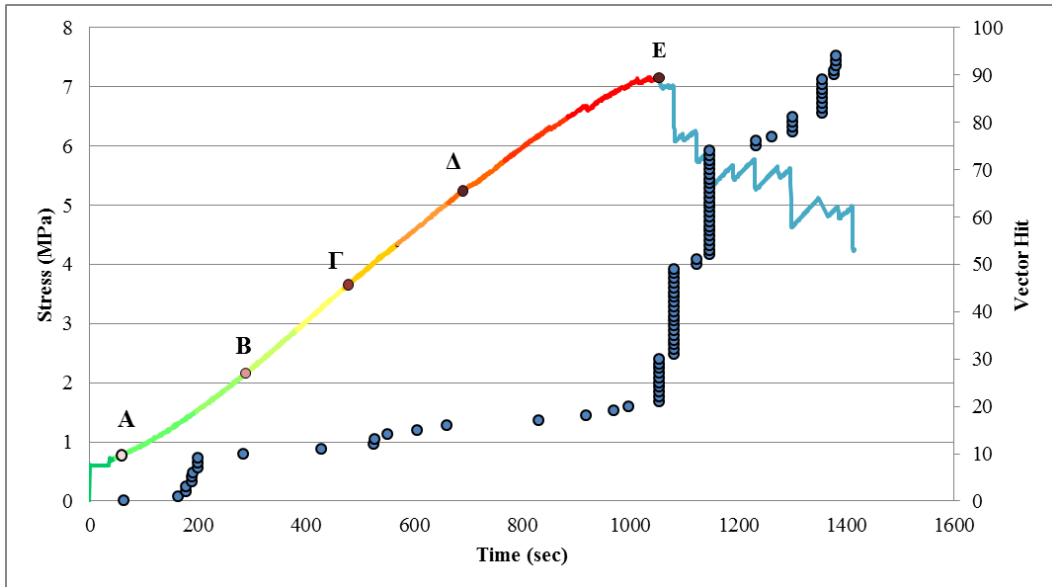
Ρυθμίσεις παραμέτρων στο πρόγραμμα AEwin.

Πίνακας 29 - Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win

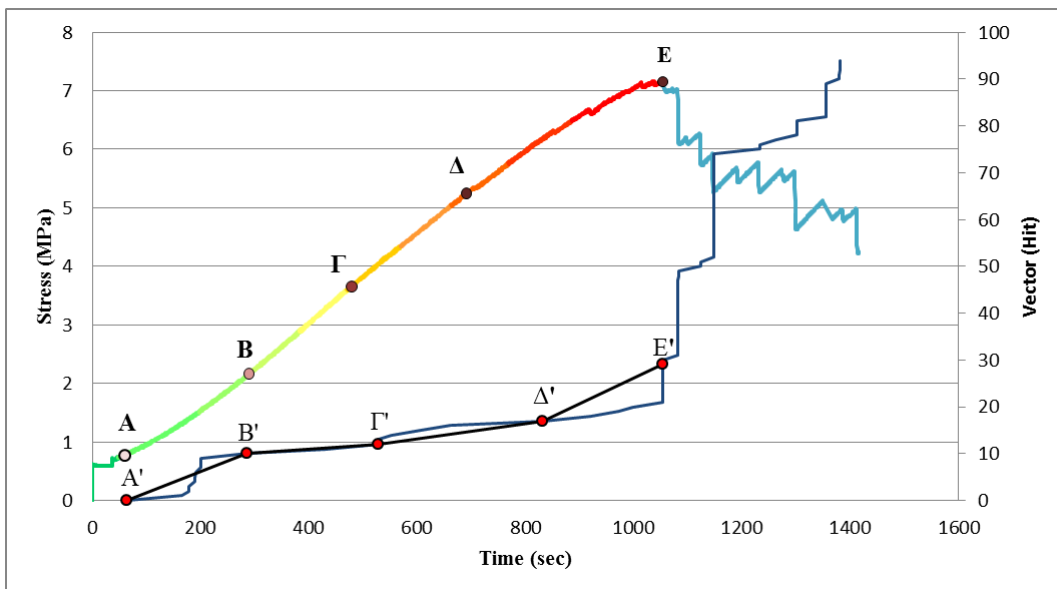
AE Channel	Threshold (dBae)	PDT (microseconds)	HDT (microseconds)	HLT (microseconds)	Max Duration (milliseconds)
1	Εναλλασσόταν μεταξύ 30 dBae και 40 dBae λόγω θορύβου	50	300	200	500
2	«	50	300	200	500
3	«	50	300	200	500
4	«	50	300	200	500
5	«	50	300	200	500
6	«	50	300	200	500
7	«	50	300	200	500
8	«	50	300	200	500

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων

Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 32 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 33 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 30 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	41	7
30	37	4
40	-	0
50	46	1
60	42	3
70	39	2
80	-	0
90	31	1
100	38	3

Κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων

Κλίση **ΑΒ**: 0,042

Κλίση **ΒΓ**: 0,0082

Κλίση **ΓΔ**: 0,01645

Κλίση **ΔΕ**: 0,05389

Συσχετισμός καμπύλης φόρτισης και καμπύλης αριθμού σημάτων

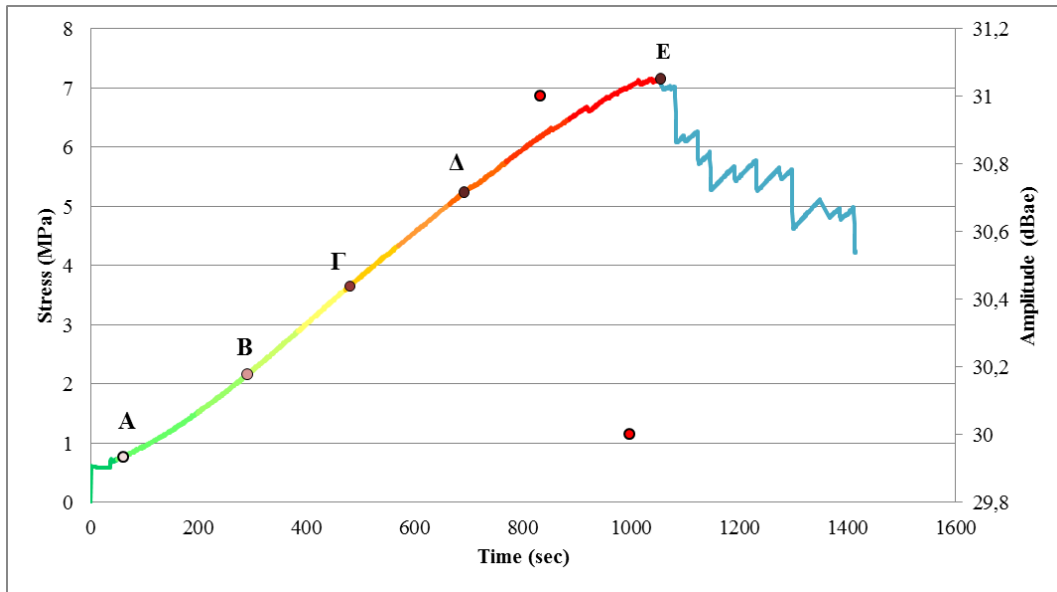
Τμήμα **ΑΒ** (18-30% μ.α.): Εξετάζοντας τον πίνακα 30 και την κλίση αυτού του ευθύγραμμου τμήματος παρατηρούμε μία συνεχή ανάπτυξη σημάτων με μέσο πλάτος τα 49 dBae. Λόγω αυτού του υψηλού μέσου πλάτους ίσως να προέκυψε και κάποια άλλη σημαντική αλλαγή εντός του υλικού, η οποία ωστόσο δεν παρατηρήθηκε μακροσκοπικά.

Τμήμα **ΒΓ** (30-50% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων μειώνεται αρκετά. Πιο αναλυτικά μέχρι το 50% μ.α. εμφανίζεται ένα καθοριστικό σήμα πλάτους 46 dBae το οποίο πιθανώς να σηματοδοτεί την είσοδό μας στην περιοχή ανάπτυξης των ρωγμών.

Τμήμα **ΓΔ** (50-74% μ.α.): Σύμφωνα με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αρχίζει να αυξάνεται λίγο. Εξετάζοντας τον πίνακα 30 βλέπουμε πως μέχρι το 60% μ.α. τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν σχετικά μεγάλο μέσο πλάτος (42 dBae) αλλά από 60%-74% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων πέφτει στα 39 dBae.

Τμήμα ΔΕ (74%-100% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος, ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται αρκετά. Πιο αναλυτικά, παρατηρώντας τον πίνακα 30 βλέπουμε πως από το 80% μ.α. έως το 90% μ.α. αναπτύσσεται ένα σήμα με χαμηλό πλάτος (31 dBae) αλλά προχωρώντας προς τη θραύση του δοκιμίου αναπτύσσονται τρία σήματα με μέσο πλάτος 38 dBae.

Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους

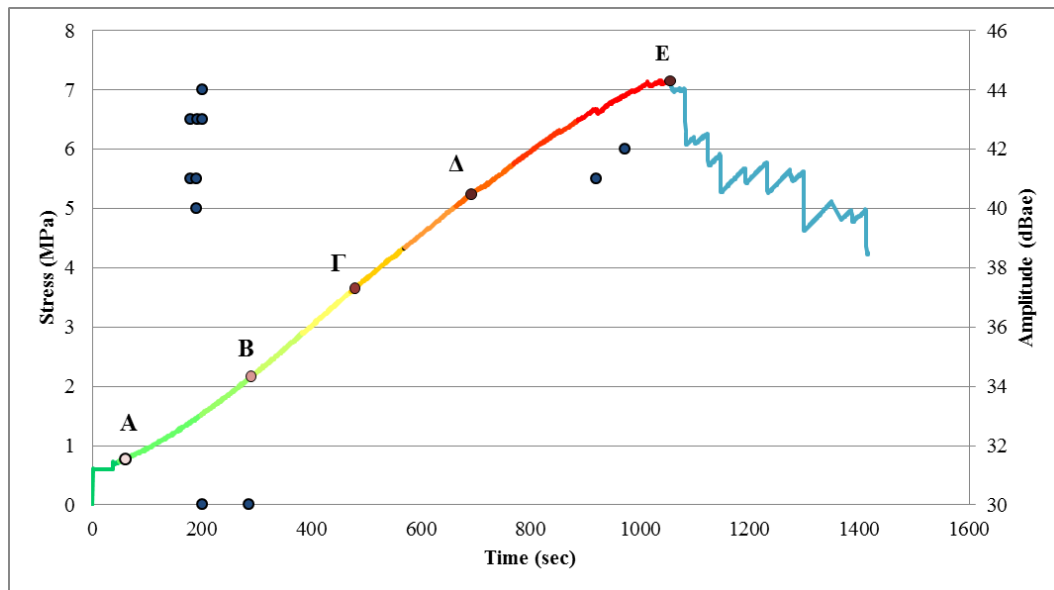


Σχήμα 34 - Σήματα 0 Κλάσης

Πίνακας 31 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	-	0
30	-	0
40	-	0
50	-	0
60	-	0
70	-	0
80	-	0
90	31	1
100	30	1

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση έχουμε ανάπτυξη σημάτων μόνο στην περιοχή ΔΕ με μέσο πλάτος σημάτων τα 30,5 dBae και γι αυτό δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο ιδιαίτερο πόρισμα.

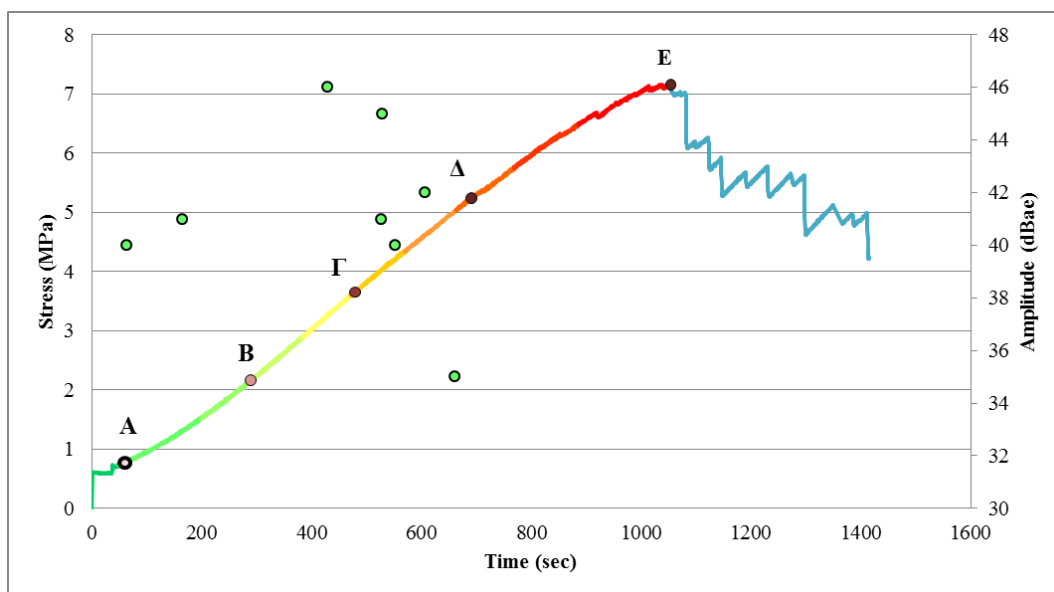


Σχήμα 35 - Σήματα 1^{ης} Κλάσης

Πίνακας 32 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	42	5
30	37	4
40	-	0
50	-	0
60	-	0
70	-	0
80	-	0
90	-	0
100	42	2

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (0%-30% μ.α.) έχουμε την εμφάνιση ενός έντονου peak σημάτων με μέσο πλάτος τα 39,5 dBae. Αυτό το peak μπορεί να αντιστοιχεί σε κάποια αλλαγή του υλικού η οποία ωστόσο δεν έγινε αντιληπτή μακροσκοπικά. Τέλος έχουμε άλλα δύο σήματα με μέσο πλάτος τα 42 dBae στην **ΔΕ** ζώνη.



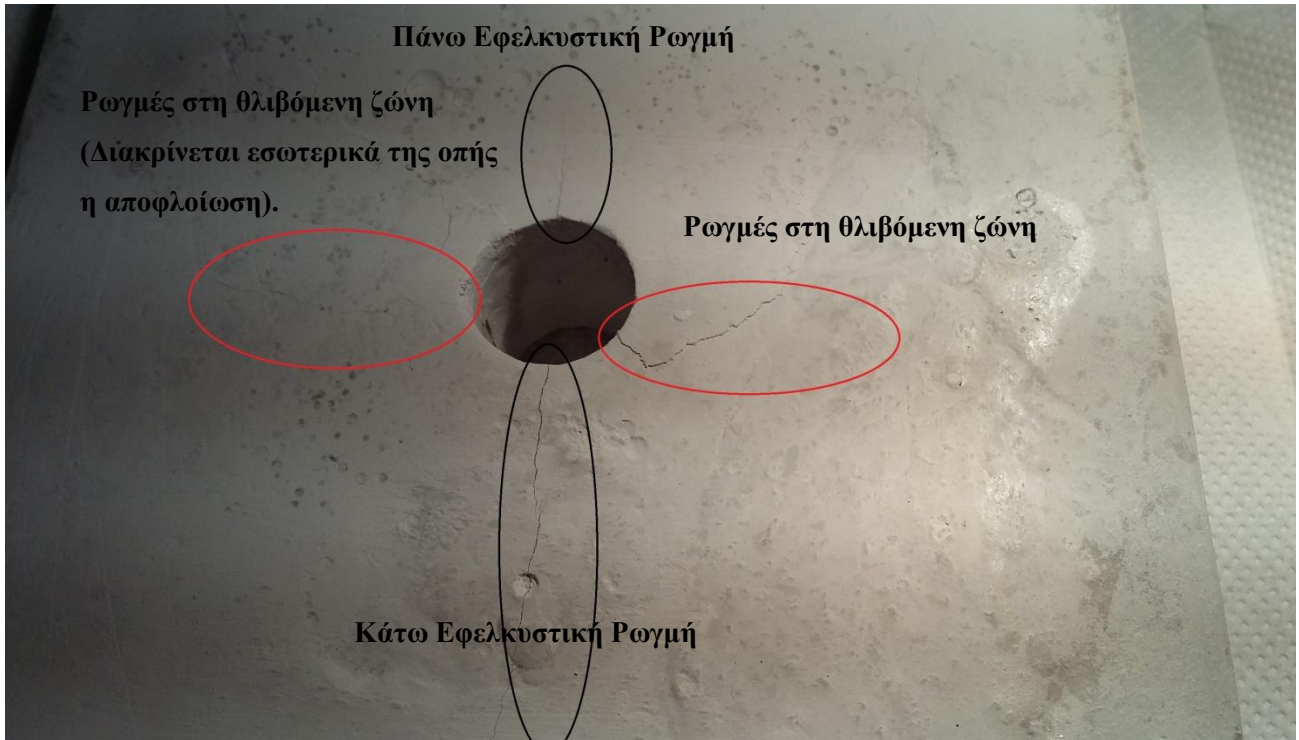
Σχήμα 36 - Σήματα 2^{ης} Κλάσης

Πίνακας 33 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	41	2
30	-	0
40	-	0
50	46	1
60	42	3
70	39	2
80	-	0
90	-	0
100	-	0

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (0%-30% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη δύο σημάτων με μέσο πλάτος τα 41 dBae. Από 30%-50% μ.α. (**BΓ**) έχουμε ένα χαρακτηριστικό σήμα πλάτους 46 dBae το οποίο πιθανώς να σχετίζεται με την είσοδο μας στην περιοχή ανάπτυξης των ρωγμών. Από 50%-74% μ.α. (**ΓΔ**) έχουμε πέντε σήματα των οποίων το μέσο πλάτος ανέρχεται στα 40,5 dBae. Πιθανώς στο τμήμα **ΓΔ** να έχουμε ανάπτυξη ρωγμών. Στη συνέχεια της δοκιμής δεν έχουμε κανένα σήμα.

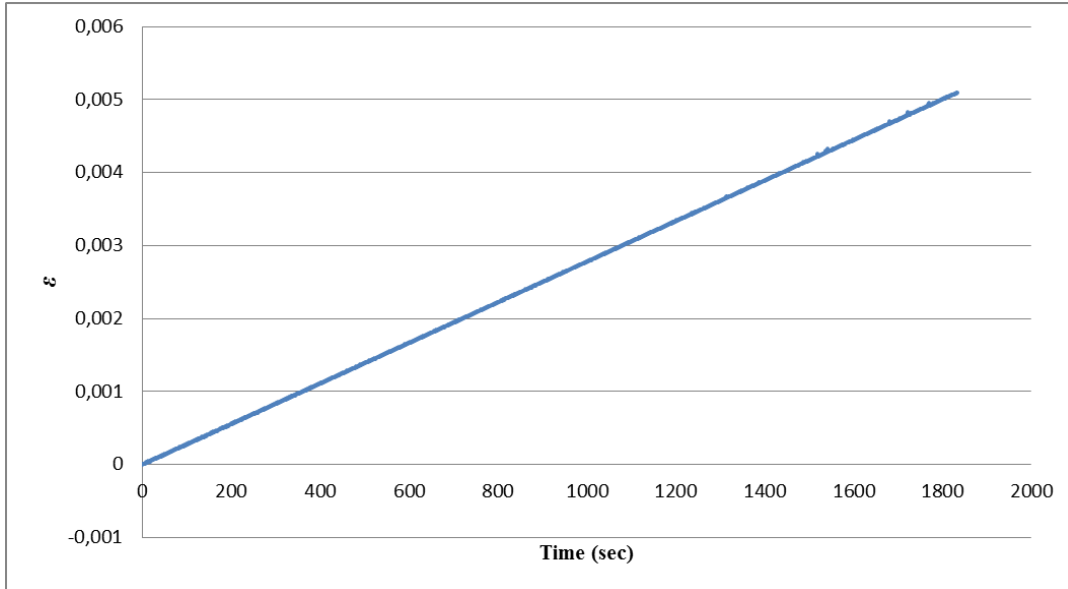
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



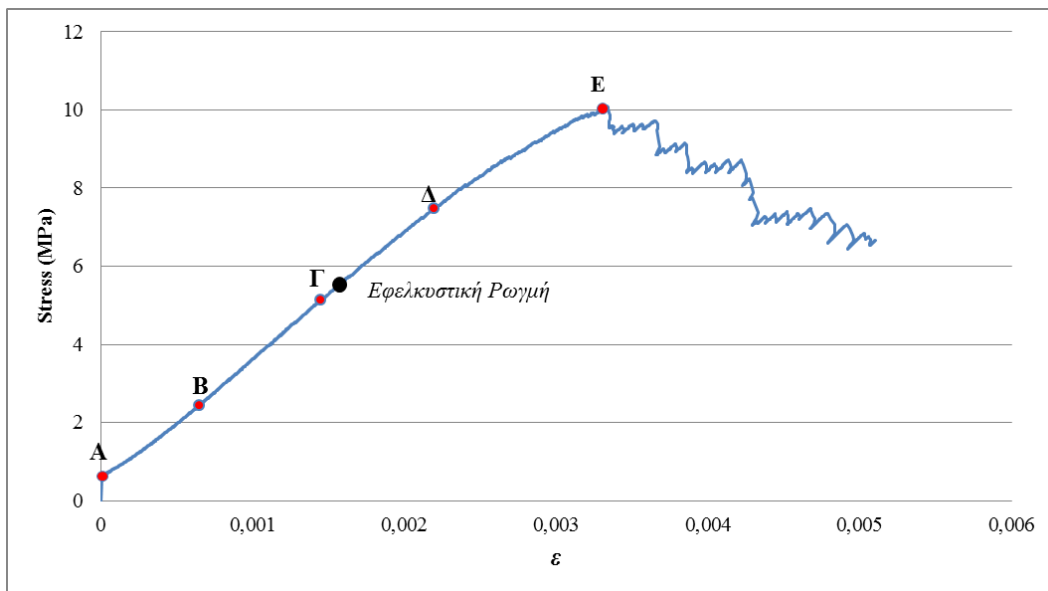
Εικόνα 57 - Εφελκυστικές και θλιπτικές ζώνες ρωγμάτωσης

4.3.5 2^η πλάκα με οπή (2,1 cm)

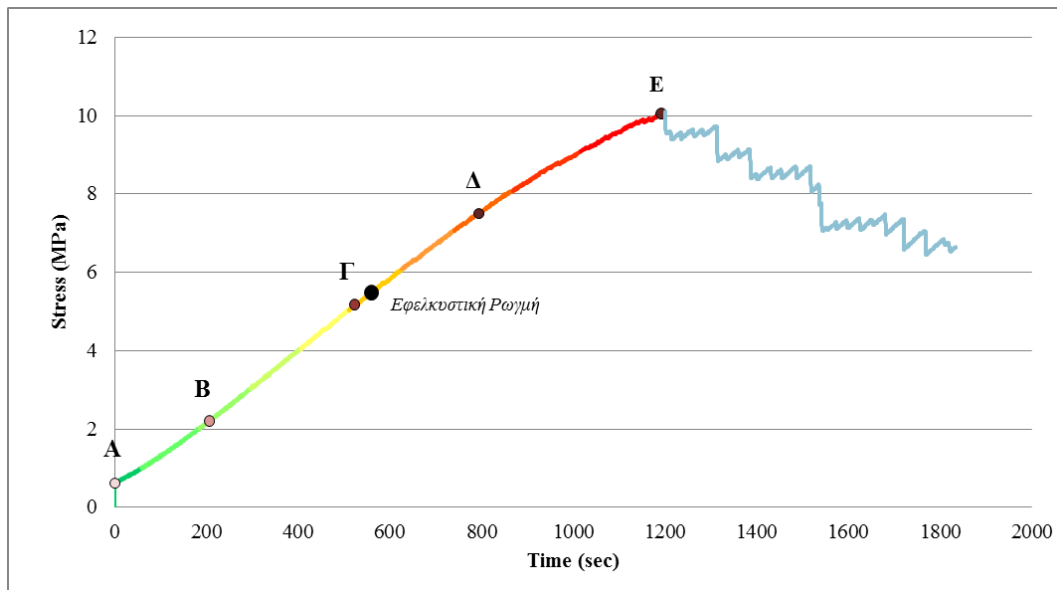
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 25 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 10.097 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 37 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



Σχήμα 38 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 39 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

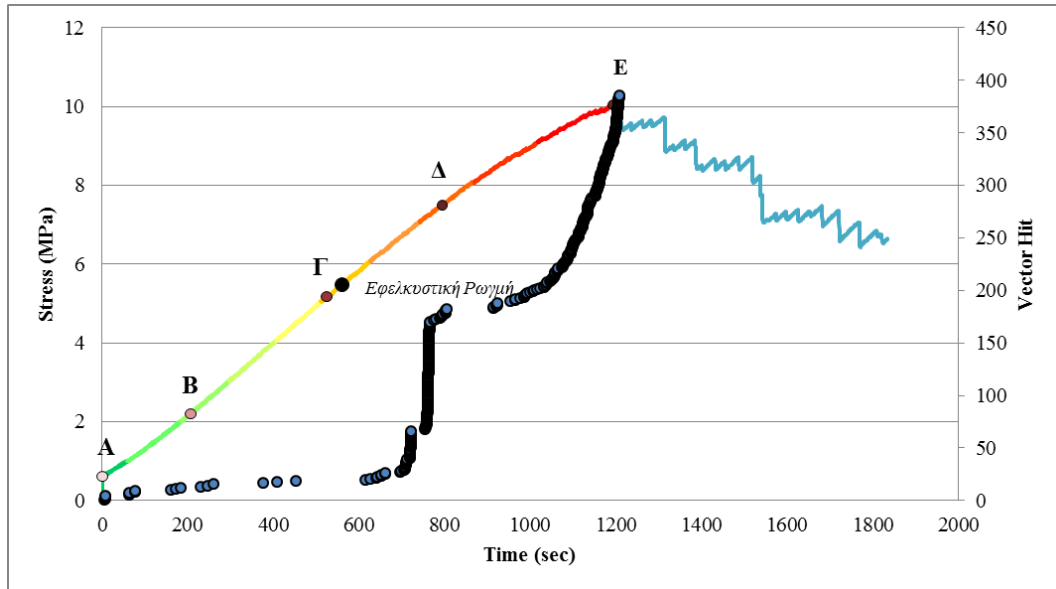
Ρυθμίσεις παραμέτρων στο πρόγραμμα AEwin.

Πίνακας 34 - Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win

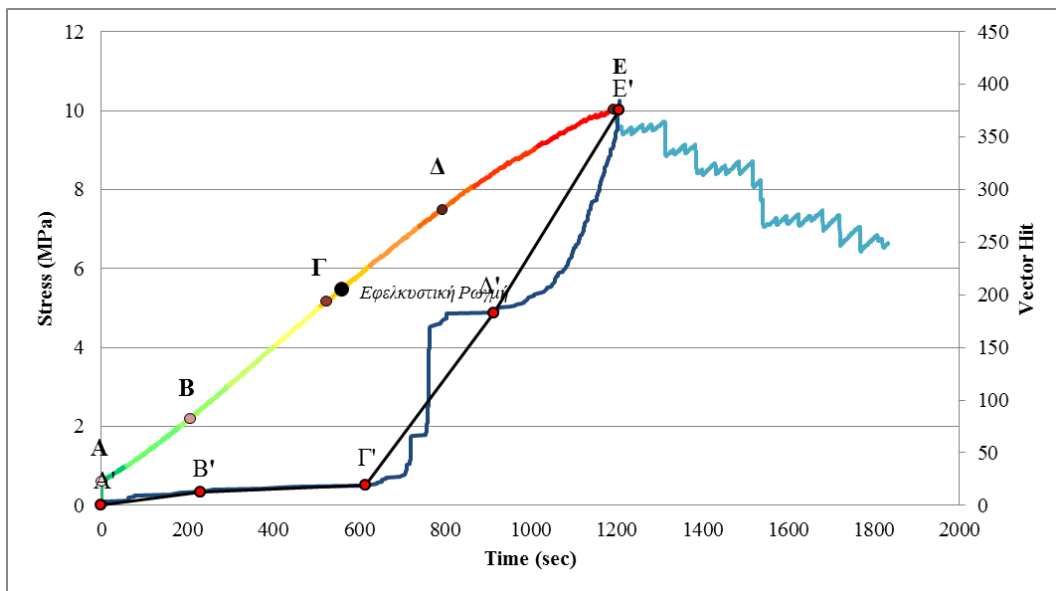
AE Channel	Threshold (dBae)	PDT (microseconds)	HDT (microseconds)	HLT (microseconds)	Max Duration (milliseconds)
1	25	50	300	200	500
2	25	50	300	200	500
3	25	50	300	200	500
4	25	50	300	200	500
5	25	50	300	200	500
6	25	50	300	200	500
7	25	50	300	200	500
8	25	50	300	200	500

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων

Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 40 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 41 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 35 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	26	5
20	29	8
30	28	3
40	26	1
50	31	2
60	32	1
70	26	47
80	25	116
90	25	19
100	25	153

Κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων

Κλίση **ΑΒ**: 0,056

Κλίση **ΒΓ**: 0,0156

Κλίση **ΓΔ**: 0,548

Κλίση **ΔΕ**: 0,66

Συσχετισμός καμπύλης φόρτισης και καμπύλης αριθμού σημάτων

Τμήμα **ΑΒ** (0-23% μ.α.): Εξετάζοντας τον πίνακα 35 και την κλίση αυτού του ευθύγραμμου τμήματος παρατηρούμε μία ανάπτυξη σημάτων με σταδιακή αύξηση του μέσου πλάτους. Συγκεκριμένα μέχρι το 20% μ.α. το μέσο πλάτος αυξάνεται από τα 26 dBae στα 29 dBae και από τα 20%-23% μ.α. όπως φαίνεται και στο πρόγραμμα Noesis αναλυτικά τα σήματα που αναπτύχθηκαν έχουν μειωμένο πλάτος στα 28 dBae.

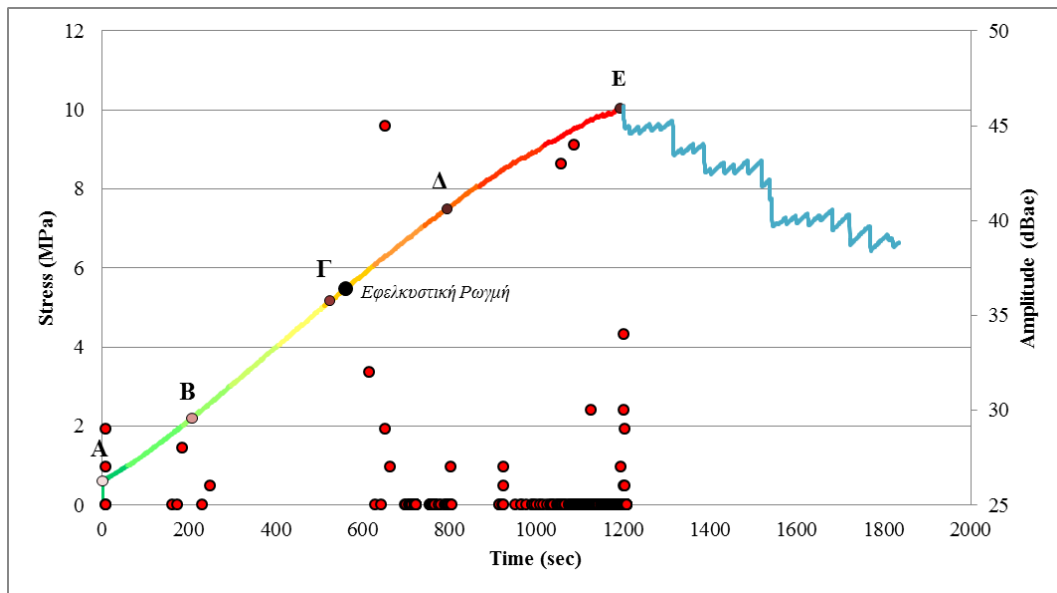
Τμήμα **ΒΓ** (23-53% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων μειώνεται. Όσον αφορά το μέσο πλάτος, μέχρι το 40% μ.α. μειώνεται από τα 28 dBae στα 26 dBae αλλά από το 40% μ.α. μέχρι το 50% μ.α. το μέσο πλάτος αυξάνεται πάλι στα 31 dBae.

Τμήμα **ΓΔ** (53-73% μ.α.): Σύμφωνα με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται απότομα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι παρατηρήθηκε μακροσκοπικά η εφελκυστική ρωγμή κοντά στο 55% μ.α. Σύμφωνα με τον πίνακα

35 μέχρι το 60% μ.α. τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν μέσο πλάτος 31 dBae και από το 60% μ.α. και μέχρι το 73% μ.α. έχουμε το μεγάλο peak σημάτων με το μέσο πλάτος να κυμαίνεται μεταξύ 25 και 26 dBae.

Τμήμα ΔΕ (73%-100% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος, ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων είναι αυξημένος. Ωστόσο παρατηρώντας τον πίνακα βλέπουμε ότι το μέσο πλάτος των σημάτων κυμαίνεται στα 25 dBae.

Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους

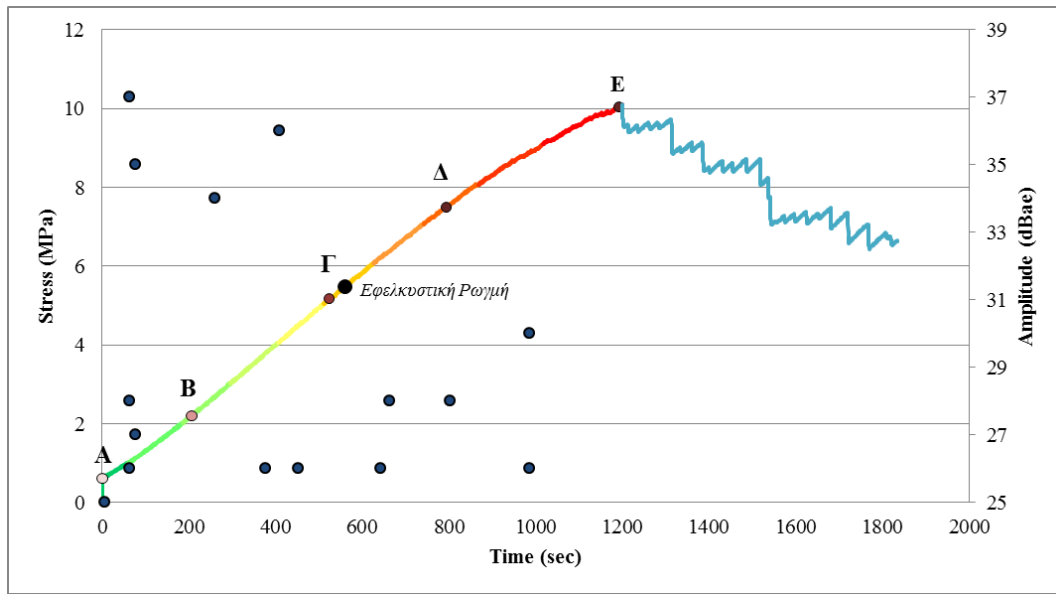


Σχήμα 42 - Σήματα 0 Κλάσης

Πίνακας 36 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	27	4
20	26	3
30	26	2
40	-	0
50	-	0
60	32	1
70	26	45
80	25	116
90	25	17
100	25	153

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **ΑΒ** (0%-23% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη κάποιων σημάτων με μέσο πλάτος τα 26,5 dBae. Από 23%-53% μ.α (**ΒΓ**) παρατηρούμε ανάπτυξη των σημάτων μόνο μέχρι το 28% μ.α. με μέσο πλάτος τα 26 dBae. Από 53%-73% (**ΓΔ**) μ.α. παρατηρούμε ένα ισχυρό σήμα πλάτους 32 dBae κοντά στο 53% μ.α το οποίο πιθανώς να σχετίζεται με την εφελκυστική ρωγμή που παρατηρήθηκε λίγο μετά. Το peak των σημάτων που ακολουθεί έχει μέσο όρο πλάτους κοντά στα 25,5 dBae. Τέλος από 73%-100% μ.α. (**ΔΕ**). Τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν μέσο πλάτος 25 dBae.

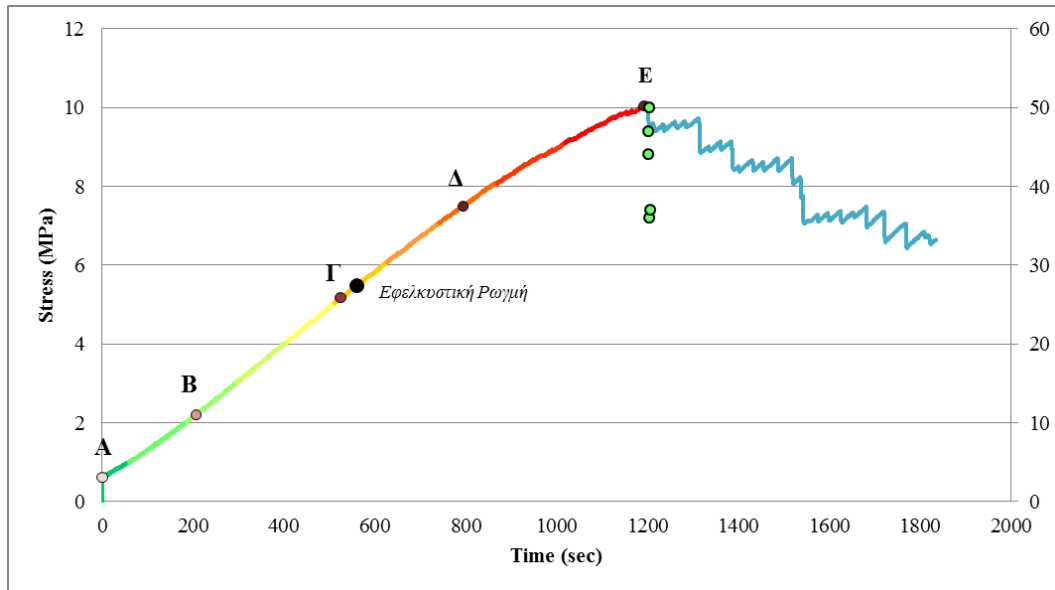


Σχήμα 43 - Σήματα I^{ns} Κλάσης

Πίνακας 37 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων I^{ns} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	25	1
20	31	5
30	34	1
40	26	1
50	31	2
60	-	0
70	27	2
80	28	1
90	28	2
100	-	0

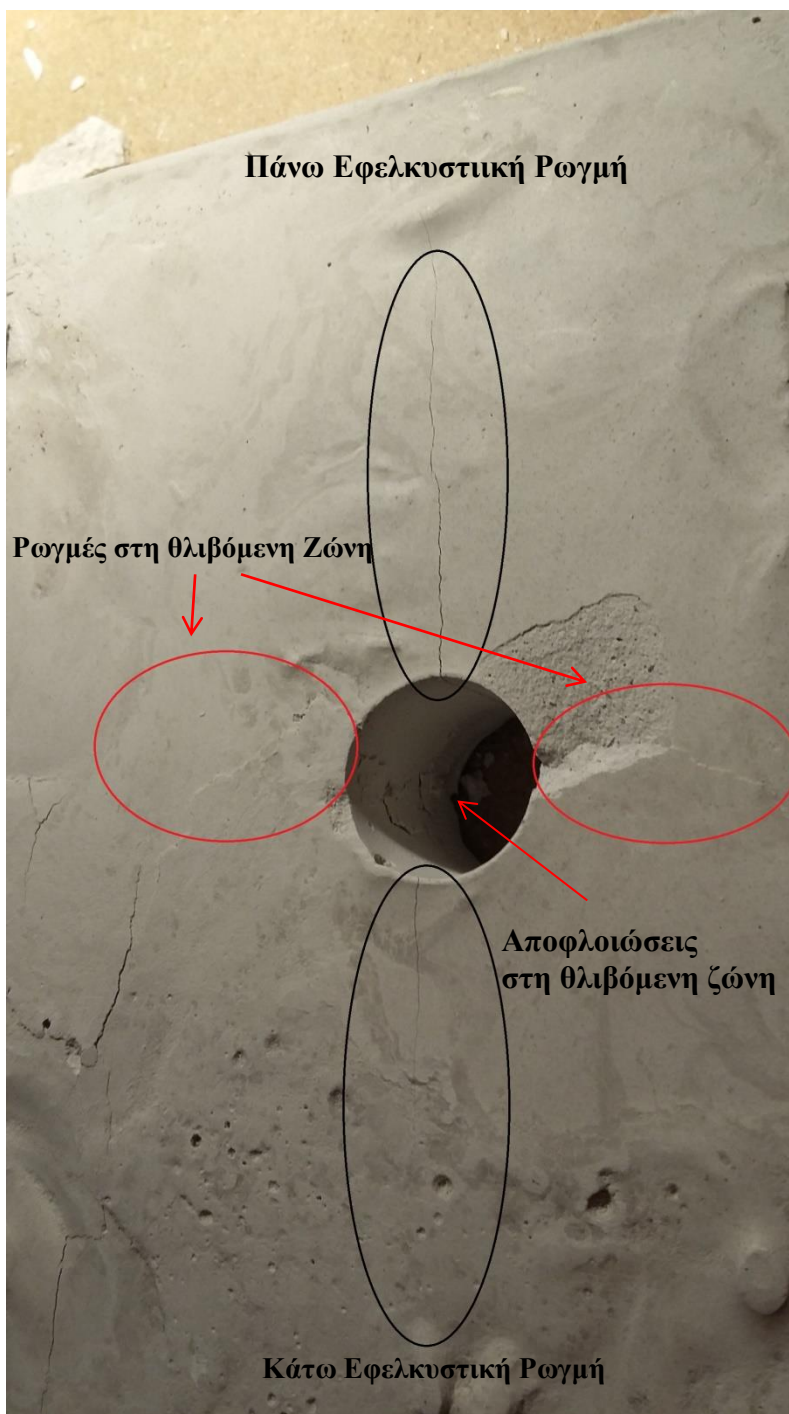
Συμπέρασμα: Στην περιοχή **ΑΒ** (0%-23% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη κάποιων σημάτων με σταδιακή αύξηση του μέσου πλάτους (25dBae→31dBae). Από 23%-53% μ.α. (**ΒΓ**) έχουμε ένα ισχυρό σήμα με πλάτος 34 dBae στο 30% μ.α. Από 30% μ.α. μέχρι 40% μ.α. έχουμε άλλο ένα σήμα πλάτους 26 dBae και στη συνέχεια από 40% μ.α. έως 50% μ.α. αναπτύσσονται δύο σήματα πλάτους 31 dBae. Από 53%-73% μ.α. (**ΓΔ**) παρατηρούμε λίγα σήματα με μικρό πλάτος (27,5 dBae). Τέλος από 73%-100% μ.α. (**ΔΕ**). Τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν μέσο πλάτος 28 dBae.



Σχήμα 44 - Σήματα 2^{ης} Κλάσης

Συμπέρασμα: Δεν καταγράφηκε κανένα σήμα στο διάστημα 0-100% του μέγιστου φορτίου.

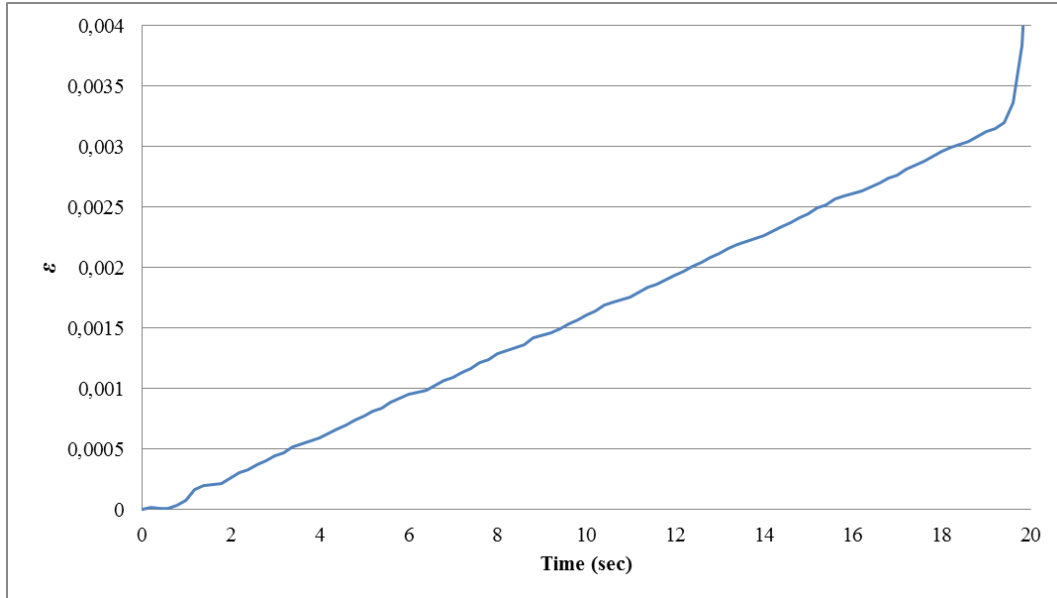
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



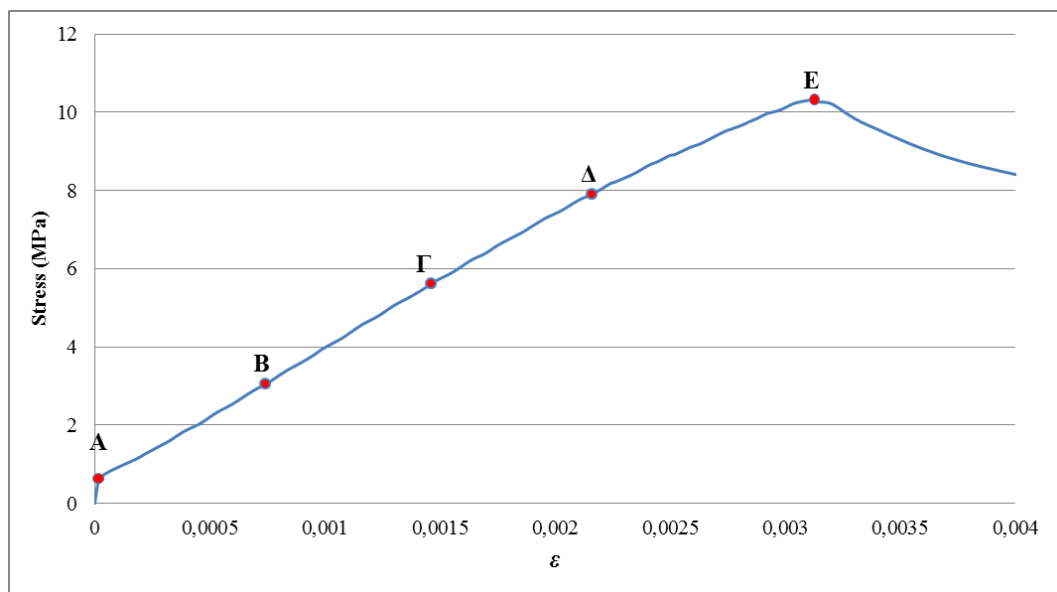
Εικόνα 58 – Εφελκυστικές και θλιπτικές ζώνες ρωγμάτωσης του δοκιμίου

4.3.6 3^η πλάκα με οπή (2,1 cm)

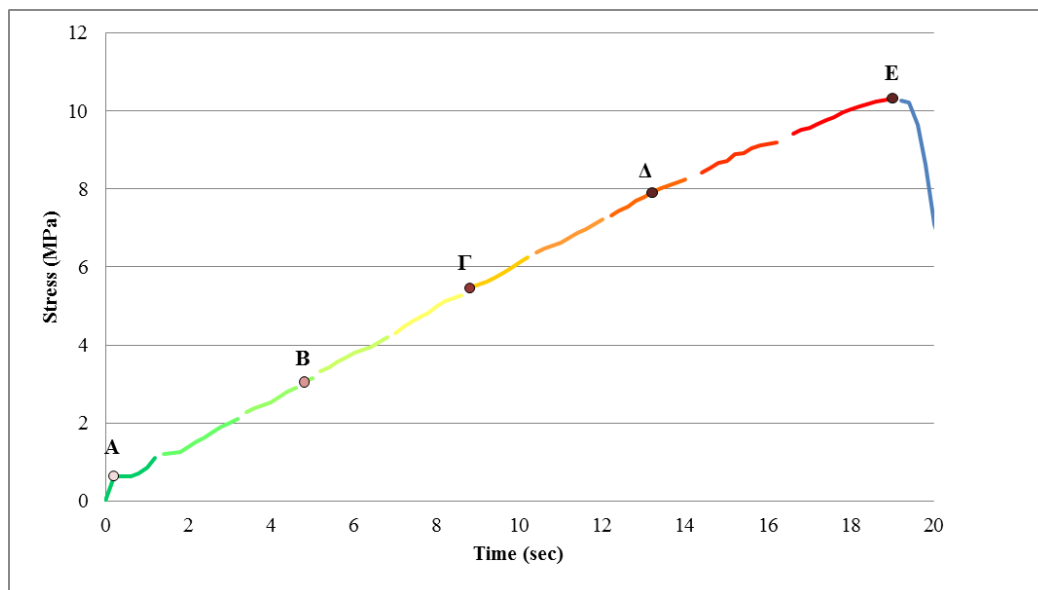
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 1492 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 10,3254 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 45 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



Σχήμα 46 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 47 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

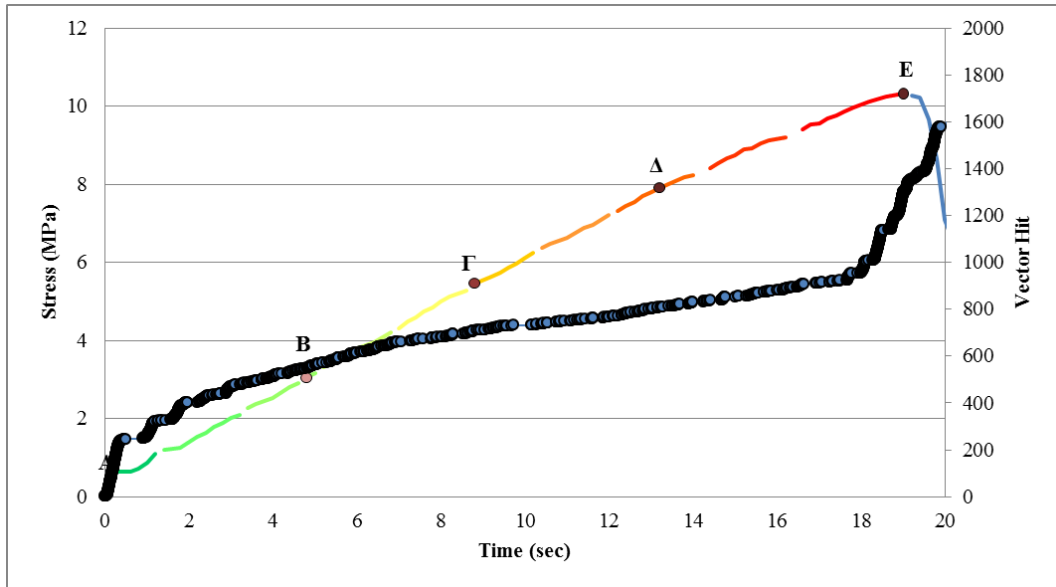
Ρυθμίσεις παραμέτρων στο πρόγραμμα AEwin.

Πίνακας 38 - Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win

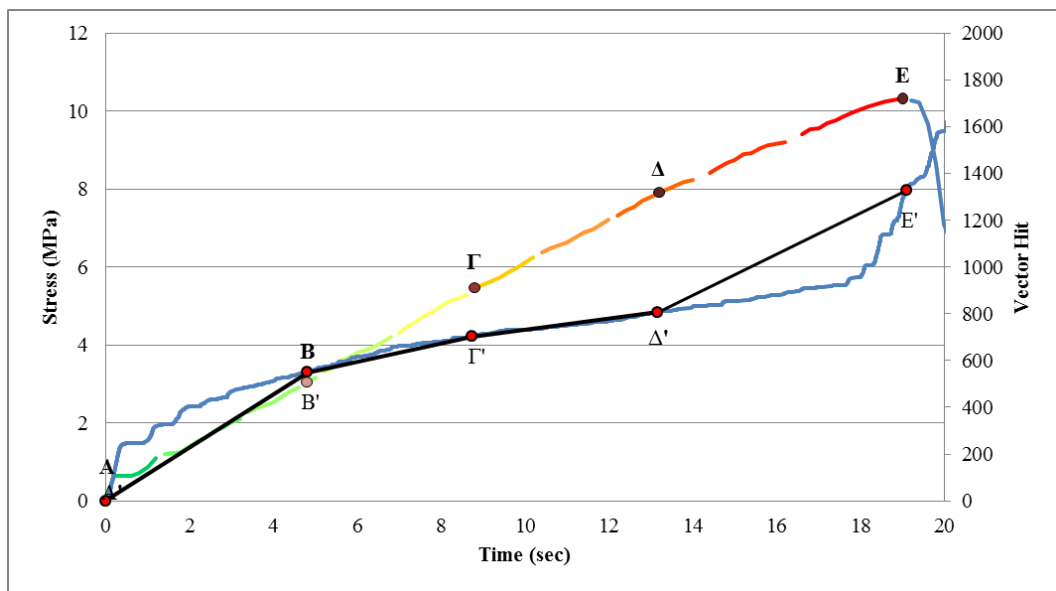
AE Channel	Threshold (dBae)	PDT (microseconds)	HDT (microseconds)	HLT (microseconds)	Max Duration (milliseconds)
1	25	50	300	200	500
2	25	50	300	200	500
3	25	50	300	200	500
4	25	50	300	200	500
5	25	50	300	200	500
6	25	50	300	200	500
7	25	50	300	200	500
8	25	50	300	200	500

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων

Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 48 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 49 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 39 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	27	253
20	27	191
30	27	109
40	28	100
50	26	27
60	27	58
70	26	31
80	27	59
90	27	51
100	26	294

Κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων

Κλίση **ΑΒ**: 114

Κλίση **ΒΓ**: 39,3

Κλίση **ΓΔ**: 23,3

Κλίση **ΔΕ**: 87,32

Συσχετισμός καμπύλης φόρτισης και καμπύλης αριθμού σημάτων

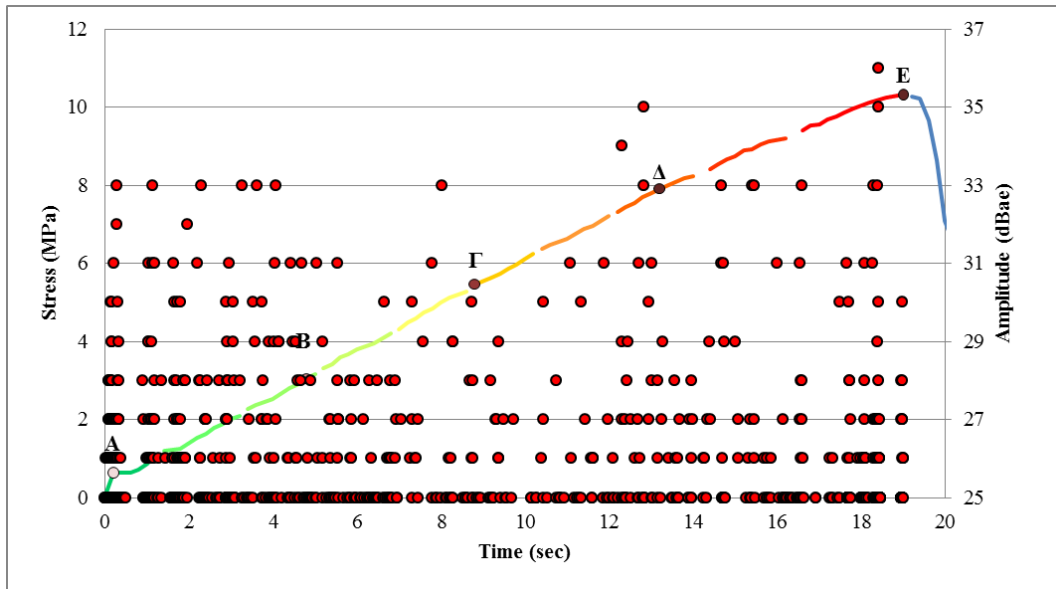
Τμήμα **ΑΒ** (0-30% μ.α.): Εξετάζοντας τον πίνακα 39 και την κλίση αυτού του ευθύγραμμου τμήματος παρατηρούμε μία έντονη ανάπτυξη σημάτων με το μέσο πλάτος τα 27dBae. Δεδομένου ότι η δοκιμή μας πραγματοποιήθηκε πολύ γρήγορα πιθανώς σ αυτό το τμήμα να έχουμε συσσωρευμένα φαινόμενα αστοχίας του υλικού.

Τμήμα **ΒΓ** (30-52% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων μειώνεται ενώ το μέσο πλάτος αυξάνεται ελάχιστα (από 27 dBae στα 28 dBae) στο διάστημα (30%-40% μ.α.) αλλά από 40% μ.α. μέχρι το 53% μ.α. μειώνονται στα 26 dBae.

Τμήμα **ΓΔ** (52-75% μ.α.) : Σύμφωνα με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης μειώνεται. Εξετάζοντας τον πίνακα 39 βλέπουμε πως το μέσο πλάτος των αναπτυσσόμενων σημάτων διακυμαίνεται μεταξύ (26 και 27 dBae).

Τμήμα ΔΕ (75%-100% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος, ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται αρκετά. Παρατηρώντας όμως τον πίνακα βλέπουμε ότι το μέσο πλάτος των σημάτων διακυμαίνεται από 26-27 dBae.

Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους

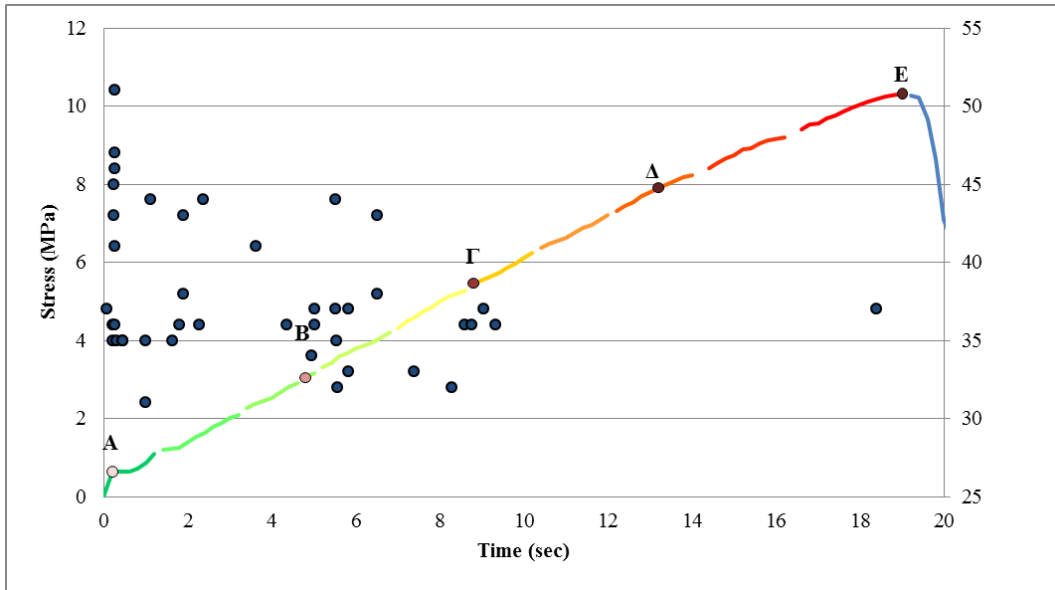


Σχήμα 50 - Σήματα 0 Κλάσης

Πίνακας 40 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	26	228
20	26	176
30	27	103
40	26	76
50	26	25
60	26	48
70	26	29
80	27	58
90	27	46
100	26	227

Συμπέρασμα: Δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο ιδιαίτερο συμπέρασμα καθώς το μέσο πλάτος διατηρείται σταθερό.

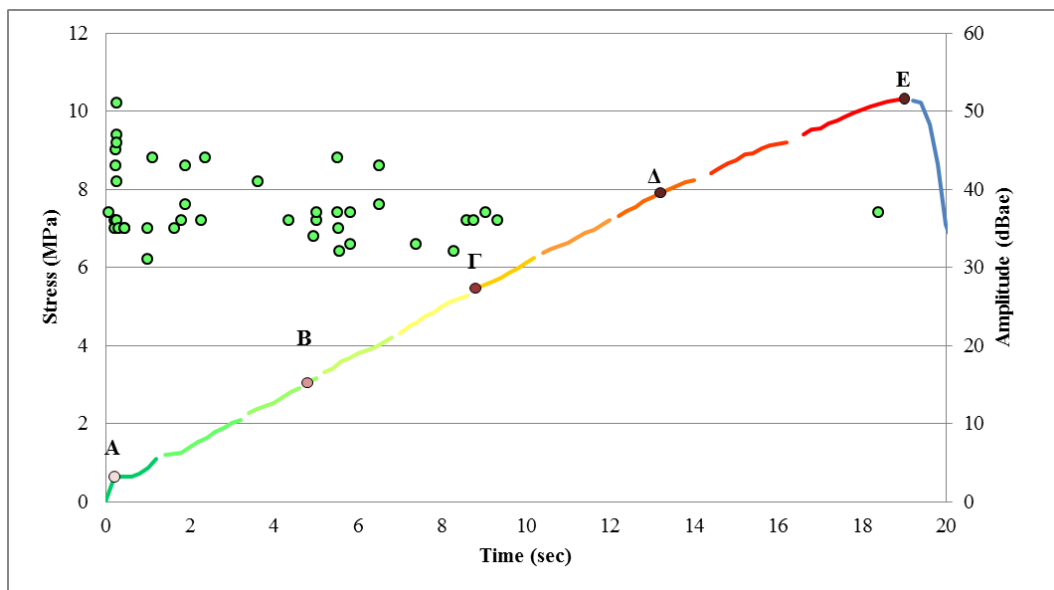


Σχήμα 51 - Σήματα 1^{ης} Κλάσης

Πίνακας 41 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	31	11
20	31	6
30	32	4
40	30	13
50	26	1
60	30	5
70	30	2
80	33	1
90	32	5
100	26	66

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (0%-30% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη κάποιων σημάτων με μέσο πλάτος τα 31.33 dBae. Από 30%-52% μ.α. (**BΓ**) παρατηρούμε ότι μέσο πλάτος των σημάτων μειώνεται σταδιακά (32dBae→26 dBae). Από 52%-75% μ.α. (**ΓΔ**) πλάτος των σημάτων πάλι αυξάνεται (26dBae→33dBae). Πιθανώς εδώ να έχουμε δημιουργία ρωγμών. Τέλος από 75%-100% μ.α. τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν χαμηλό μέσο πλάτος (29 dBae) .



Σχήμα 52 - Σήματα 2^{ης} Κλάσης

Πίνακας 42 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	40	14
20	38	9
30	39	2
40	37	11
50	33	1
60	35	5
70	-	0
80	-	0
90	-	0
100	37	1

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (0%-30% μ.α.) έχουμε έντονη ανάπτυξη σημάτων με μέσο πλάτος τα 39 dBae. Πιθανώς σ αυτήν την περιοχή να πραγματοποιήθηκαν φαινόμενα αστοχίας. Από 30%-52% μ.α. (**BΓ**) που είμαστε στην γραμμική ελαστική περιοχή παρατηρούμε ότι το μέσο πλάτος των σημάτων μειώνεται σταδιακά (39dBae→33 dBae). Από 52%-75% μ.α. (**ΓΔ**) έχουμε πέντε σήματα από 50% μ.α. έως 60% μ.α με μέσο πλάτος τα 35 dBae. Αυτή η αύξηση του μέσου πλάτους ίσως να αντιστοιχεί στη δημιουργία ρωγμών. Τέλος από 75%-100% μ.α. αναπτύσσεται μόνο ένα σήμα πλάτους 37 dBae λίγο πριν το μέγιστο φορτίο.

Φωτογραφική Τεκμηρίωση



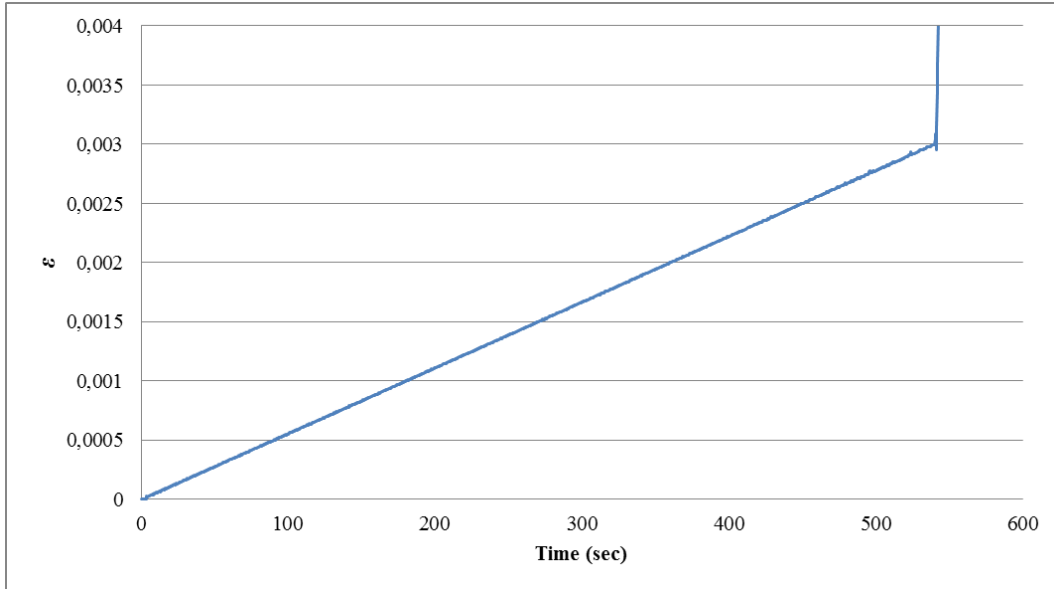
Εικόνα 59 - Εφελκυστικές και θλιπτικές ζώνες ρωγμάτωσης



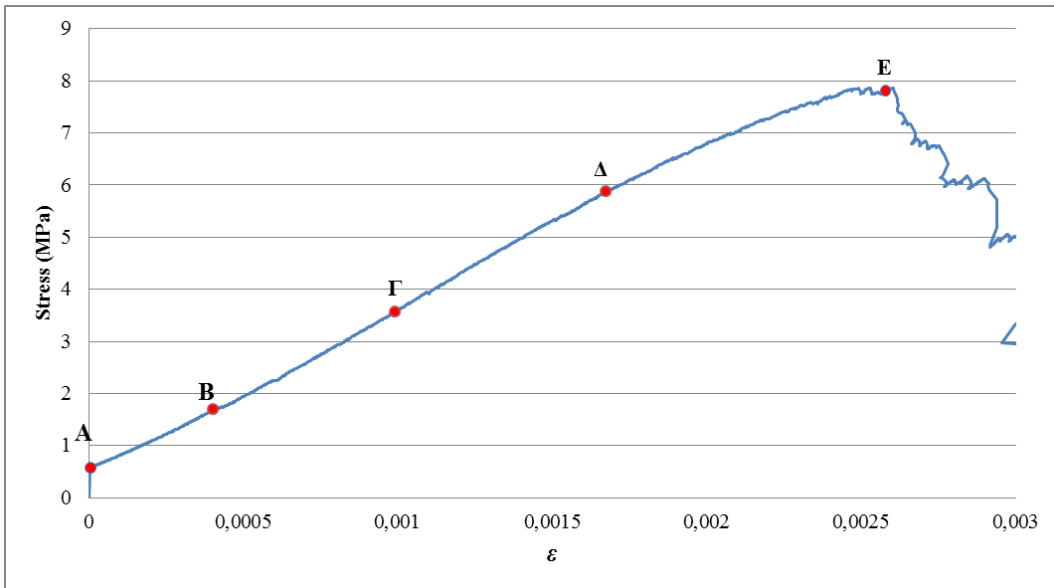
Εικόνα 60 - Επίπεδα ρωγμάτωσης

4.3.7 1^η πλάκα με οπή (2,8 cm)

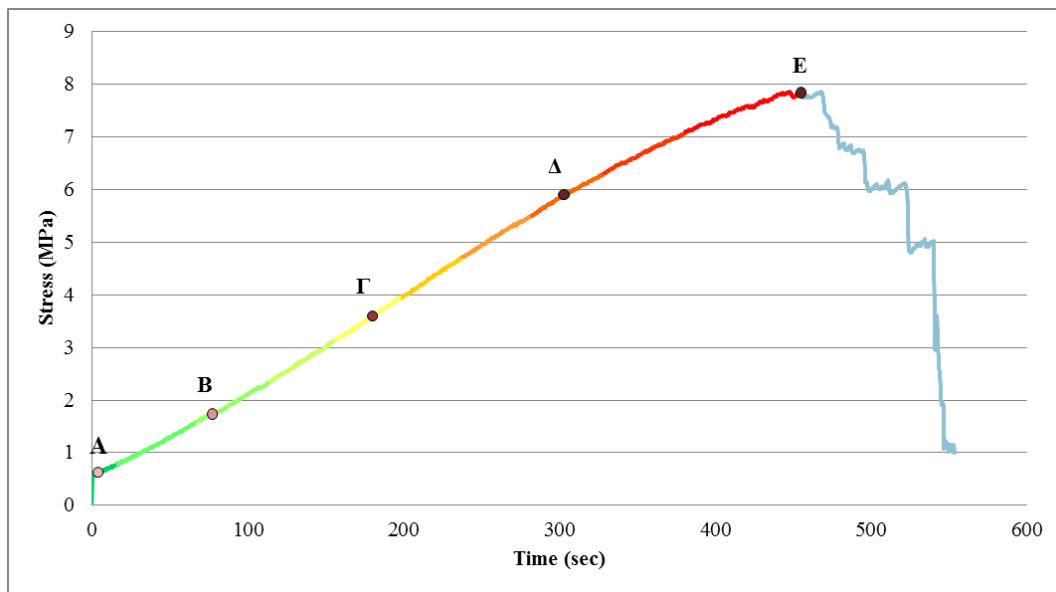
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 54 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 7,8643 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 53 - Διάγραμμα Παραμόρφωσης/Χρόνου



Σχήμα 54 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 55 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

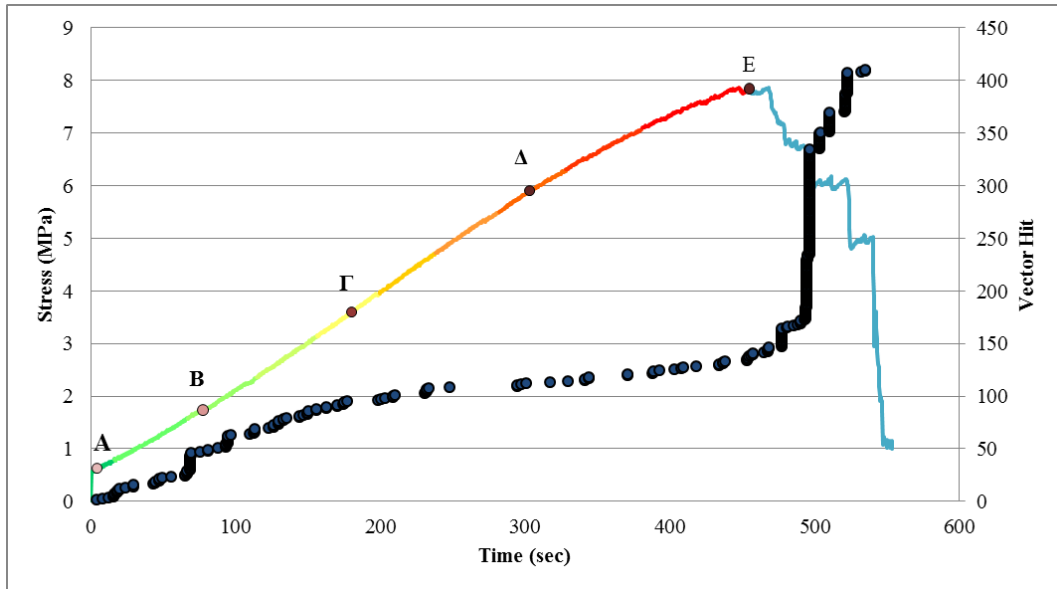
Ρυθμίσεις παραμέτρων στο πρόγραμμα AEwin

Πίνακας 43 - Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win

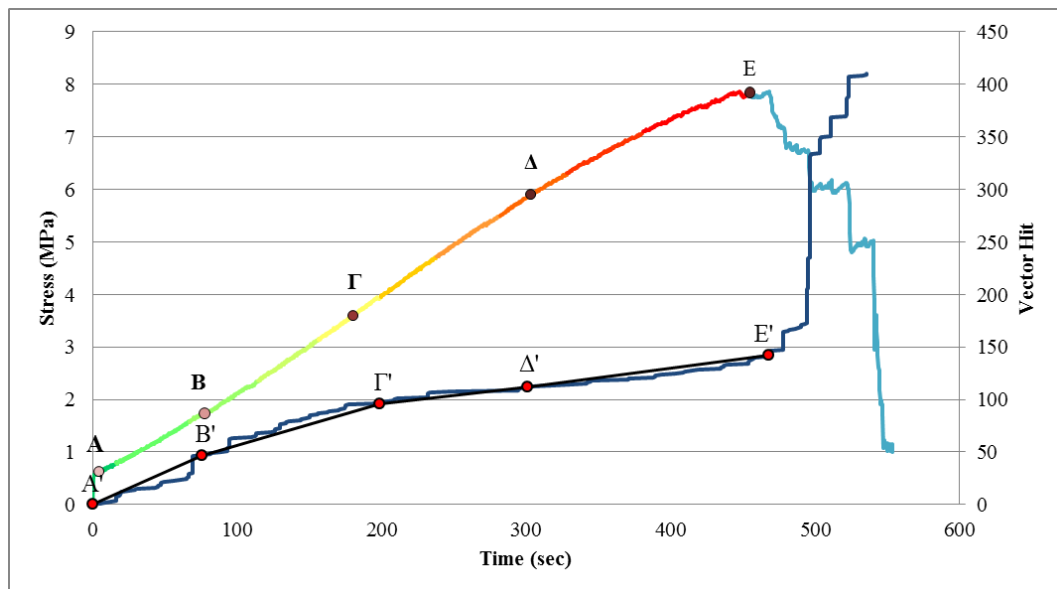
AE Channel	Threshold (dBae)	PDT (microseconds)	HDT (microseconds)	HLT (microseconds)	Max Duration (milliseconds)
1	30	50	300	200	500
2	30	50	300	200	500
3	30	50	300	200	500
4	30	50	300	200	500
5	30	50	300	200	500
6	30	50	300	200	500
7	30	50	300	200	500
8	30	50	300	200	500

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων

Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 56 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 57 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 44 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	32	15
20	32	1
30	36	67
40	36	19
50	32	9
60	32	11
70	30	1
80	33	5
90	36	7
100	35	13

Κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων

Κλίση **ΑΒ**: 0,62

Κλίση **ΒΓ**: 0,4

Κλίση **ΓΔ**: 0,156

Κλίση **ΔΕ**: 0,18

Συσχετισμός καμπύλης φόρτισης και καμπύλης αριθμού σημάτων

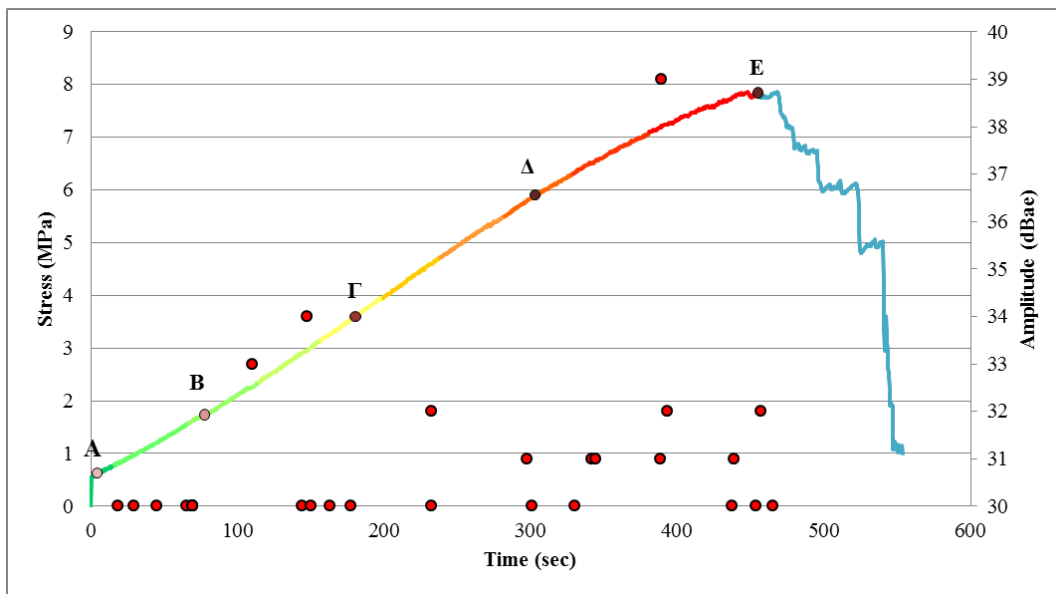
Τμήμα ΑΒ (9-23% μ.α.): Εξετάζοντας τον πίνακα 44 και την κλίση αυτού του ευθύγραμμου τμήματος παρατηρούμε μία απότομη ανάπτυξη σημάτων με σταδιακή αύξηση του μέσου πλάτους (31-33 dBae) και στο 23% που εμφανίζεται αυτό το peak συγκέντρωσης σημάτων βλέπουμε απ το Noesis ότι το μέσο πλάτος αυτών των σημάτων είναι στα 38 dBae. Πιθανώς εδώ να υπήρξε κάποια αλλαγή στο εσωτερικό του υλικού η οποία ωστόσο δεν παρατηρήθηκε μακροσκοπικά.

Τμήμα ΒΓ (23-46% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων μειώνεται. Πιο αναλυτικά μέχρι το 30% μ.α τα σήματα έχουν υψηλό μέσο πλάτος (36 dBae) αλλά από το 30% - 46% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων που αναπτύσσονται αρχίζει σταδιακά να μειώνεται στα 32 dBae.

Τμήμα ΓΔ (46-75% μ.α.): Σύμφωνα με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης μειώνεται αρκετά και από τον πίνακα 44 βλέπουμε ότι το μέσο πλάτος των σημάτων ακολουθεί φθίνουσα πορεία.

Τμήμα ΔΕ (75%-100% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος, ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αρχίζει να αυξάνεται. Από τον πίνακα 44 επίσης παρατηρούμε ότι και το μέσο πλάτος αρχίζει να αυξάνεται. Πιο συγκεκριμένα απ το 75%-90% μ.α. το μέσο πλάτος αυξάνεται από 30 dBae στα 36 dBae αλλά από το 90%-100% μ.α. που έχουμε απότομη ανάπτυξη σημάτων το μέσο πλάτος τους πέφτει στα 35 dBae.

Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους

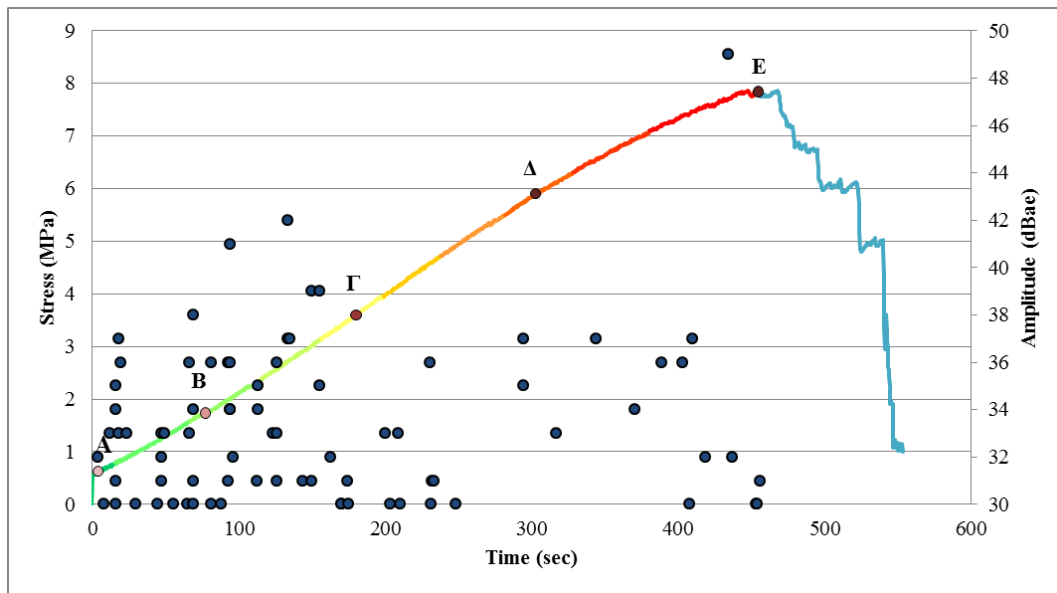


Σχήμα 58 - Σήματα 0 Κλάσης

Πίνακας 45 - Μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών των σημάτων 0 Κλάσης ανά τμήμα τάσης

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	-	0
30	30	10
40	31	3
50	30	2
60	31	2
70	-	0
80	31	2
90	31	3
100	33	5

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο ειδικό συμπέρασμα καθώς έχουμε λίγα σήματα με μέσο πλάτος (30-31 dBae) σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

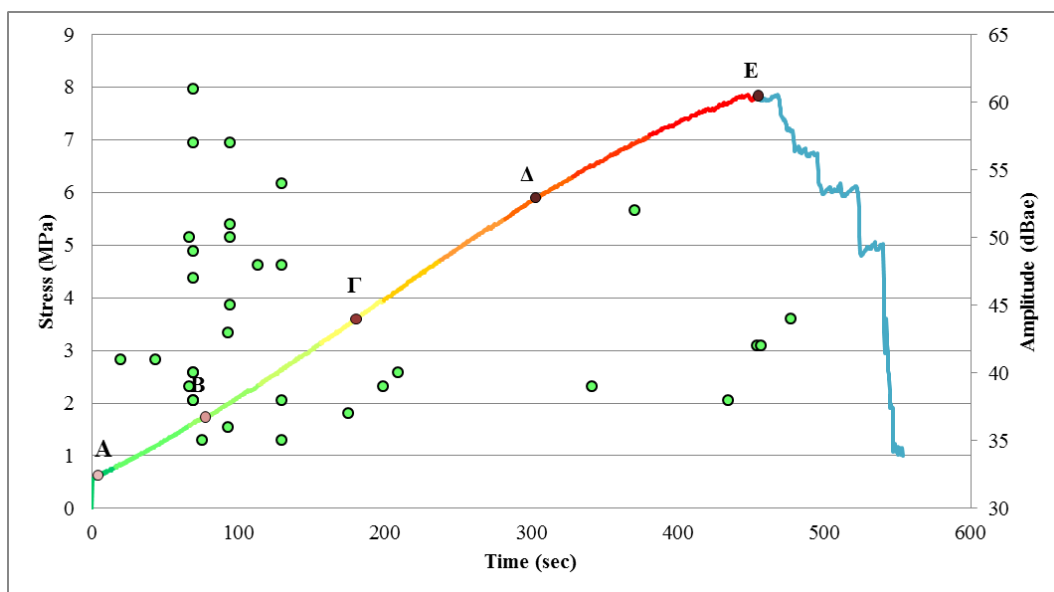


Σχήμα 59 - Σήματα 1^{ης} Κλάσης

Πίνακας 46 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	32	7
20	32	12
30	34	19
40	35	12
50	31	5
60	32	8
70	30	1
80	35	3
90	36	2
100	35	8

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (0%-23% μ.α.) έχουμε ανάπτυξη κάποιων σημάτων του μέσου πλάτους 32 dBae. Στην περιοχή **BΓ** (23%-46% μ.α) παρατηρούμε πως μέχρι το 40% μ.α. τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν υψηλό μέσο πλάτος (34,5 dBae) αλλά από το 40% -46% μ.α. το μέσο πλάτος μειώνεται στα 31 dBae. Από 46%-75% μ.α. (**ΓΔ**) παρατηρούμε μία έντονη ανάπτυξη σημάτων κοντά στο 58% μ.α. με μέσο πλάτος τα 32 dBae. Από 58% μ.α. έως το 75% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων πάλι μειώνεται στα 30 dBae και τέλος από 75%-100% μ.α (**ΔΕ**) τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν μέσο πλάτος (35,33 dBae).



Σχήμα 60 - Σήματα 2^{ης} Κλάσης

Πίνακας 47 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

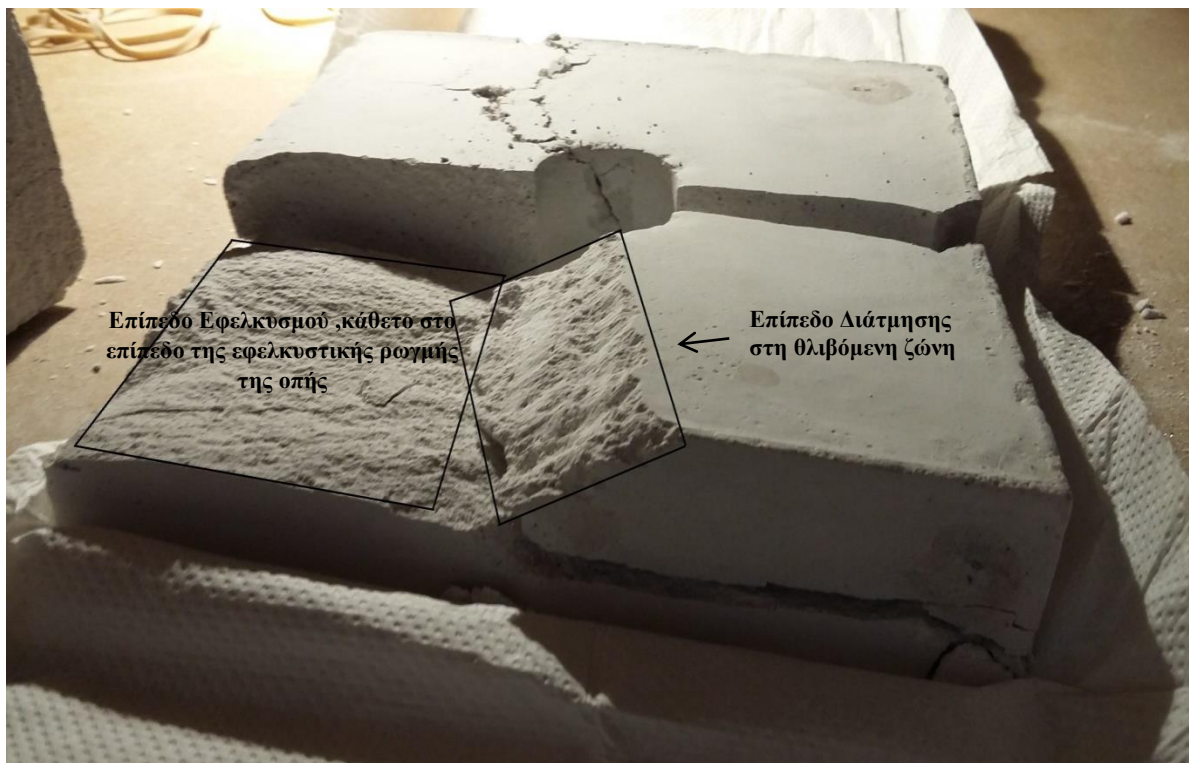
Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	41	2
30	46	18
40	44	4
50	38	2
60	40	1
70	-	0
80	-	0
90	46	2
100	40	2

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **ΑΒ** (0%-23% μ.α.) παρουσιάζονται αρχικά δύο σήματα μέσου πλάτους 41 dBae και στη συνέχεια ένα στιγμιότυπο συγκέντρωσης σημάτων μέσου πλάτους 46 dBae. Αυτό πιθανώς να αναφέρεται σε αστοχία του υλικού. Στη περιοχή **ΒΓ** (23%-46% μ.α.) παρατηρούμε πως το πλάτος των σημάτων σταδιακά μειώνεται (46 dBae→38 dBae). Από 46%-75% μ.α. (**ΓΔ**) παρατηρούμε δύο σήματα μέσου πλάτους 38 dBae και ένα χαρακτηριστικό σήμα μέσου πλάτους 40 dBae και τέλος από 75%-100% μ.α. (**ΔΕ**) τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν μέσο πλάτος 46 dBae στην περιοχή (80%-90% μ.α.) και 40 dBae στην περιοχή 90%-100% μ.α..

Φωτογραφική Τεκμηρίωση



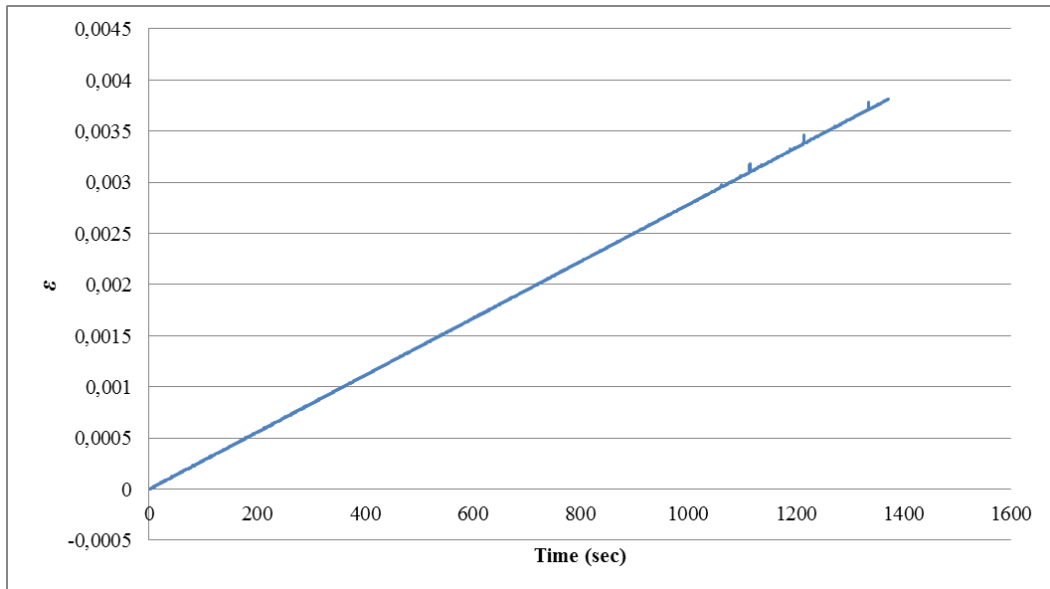
Εικόνα 61 - Δημιουργία εφελκυστικών και διατμητικών ρωγμών



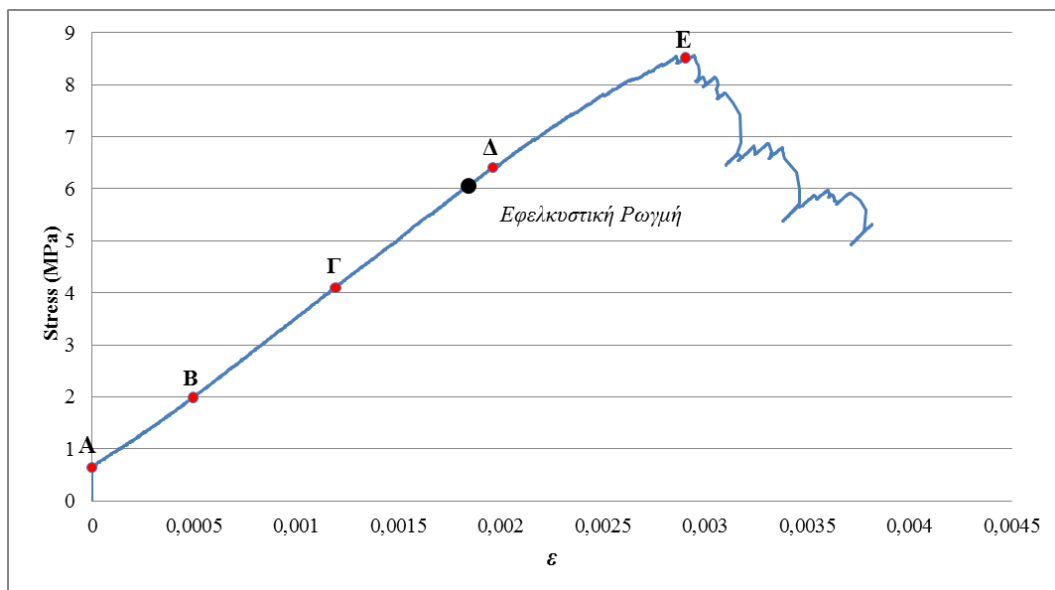
Εικόνα 62 - Επίπεδα θραύσεων του δοκιμίου

4.3.8 2^η πλάκα με οπή (2,8 cm)

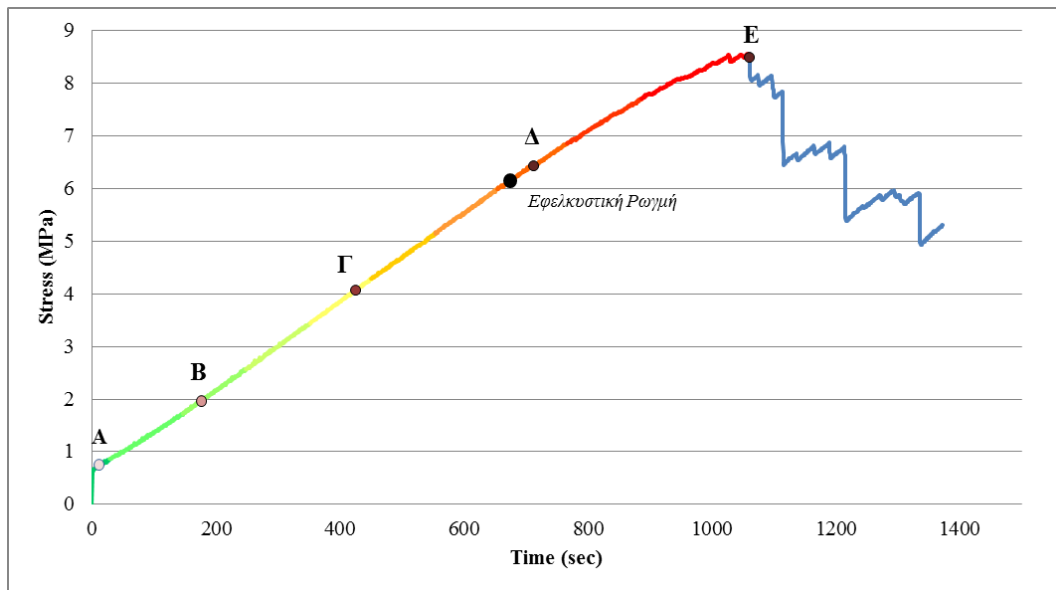
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 25 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 8.5713 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας



Σχήμα 61 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



Σχήμα 62 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 63 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

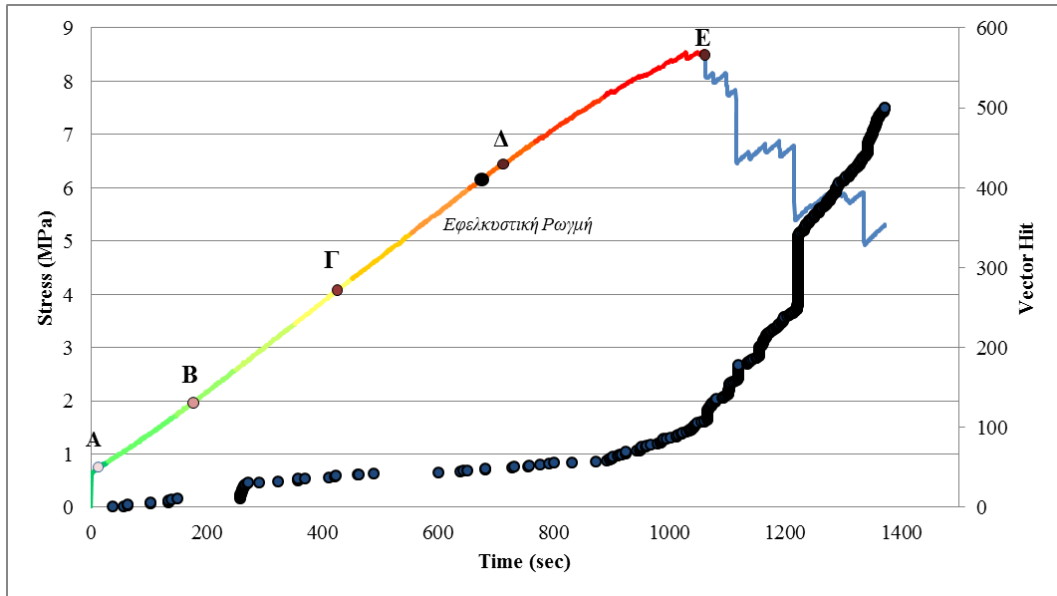
Ρυθμίσεις παραμέτρων στο πρόγραμμα AEwin.

Πίνακας 48 - Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win

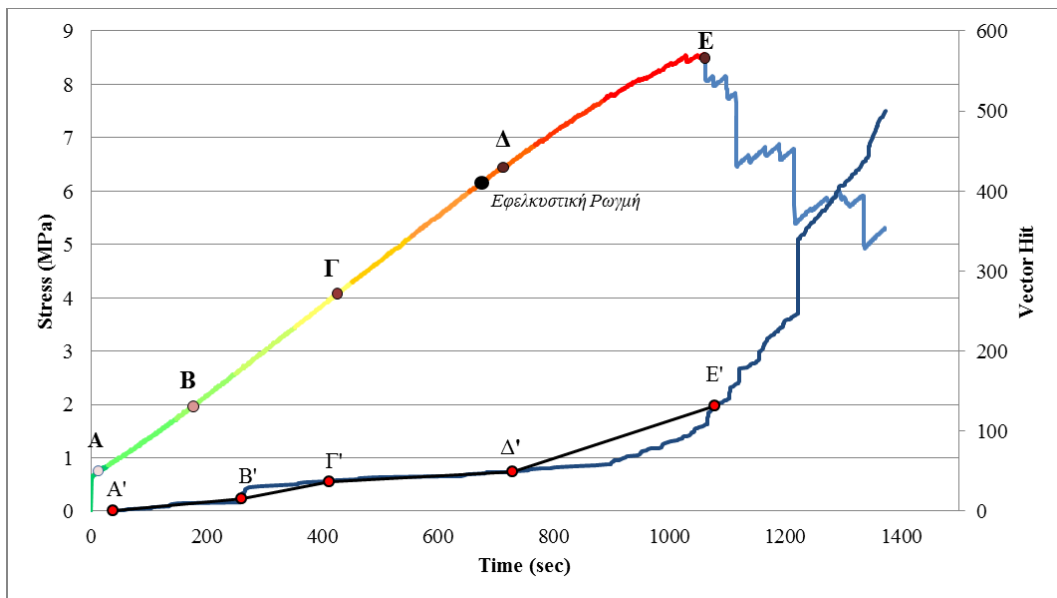
AE Channel	Threshold (dBae)	PDT (microseconds)	HDT (microseconds)	HLT (microseconds)	Max Duration (milliseconds)
1	25	50	300	200	500
2	25	50	300	200	500
3	25	50	300	200	500
4	25	50	300	200	500
5	25	50	300	200	500
6	25	50	300	200	500
7	25	50	300	200	500
8	25	50	300	200	500

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων

Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 64 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 65 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 49 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	33	10
30	26	1
40	30	22
50	30	7
60	40	3
70	28	4
80	30	6
90	25	5
100	26	50

Κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων

Κλίση **ΑΒ**: 0,072

Κλίση **ΒΓ**: 0,14

Κλίση **ΓΔ**: 0,037

Κλίση **ΔΕ**: 0,2344

Συσχετισμός καμπύλης φόρτισης και καμπύλης αριθμού σημάτων

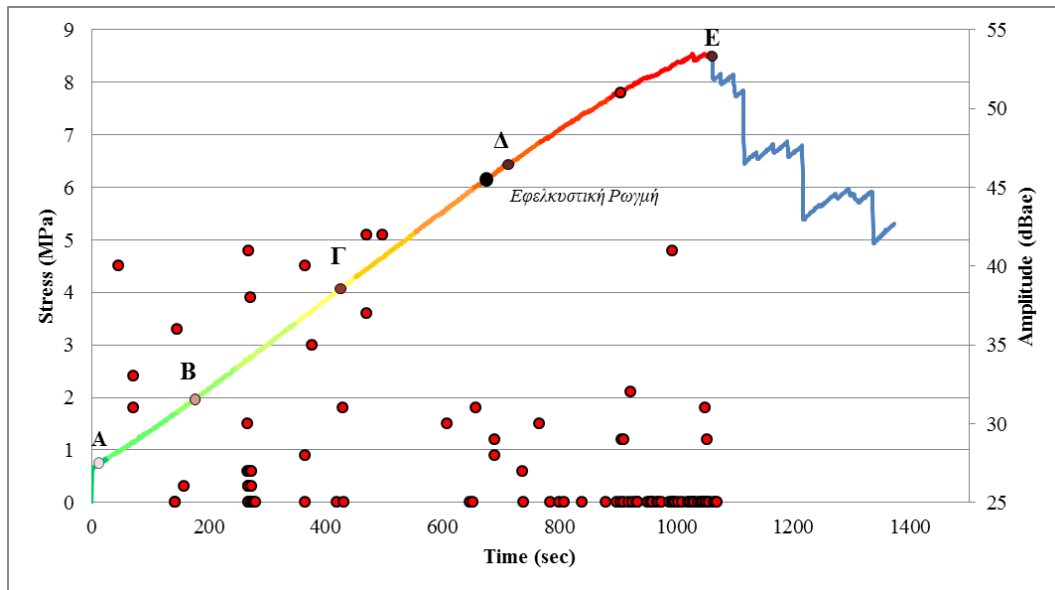
Τμήμα ΑΒ (10-32% μ.α.): Εξετάζοντας την κλίση αυτού του ευθύγραμμου τμήματος παρατηρούμε μία ανάπτυξη σημάτων με απότομη κορύφωση στο 32% μ.α.. Με τη βοήθεια του πίνακα και του Noesis παρατηρούμε ότι μέχρι το 20% μ.α. τα σήματα έχουν μέσο πλάτος 33 dBae , από το 20%-30% μ.α. υπάρχει ένα σήμα με πλάτος 26 dBae και το peak μας στο 32% μ.α. έχει μέσο πλάτος 30 dBae. Εδώ ίσως να υπήρξε κάποια αλλαγή στο εσωτερικό του υλικού.

Τμήμα ΒΓ (32-52% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων μειώνεται με μέσο πλάτος τα 30 dBae.

Τμήμα ΓΔ (52-73% μ.α.): Σύμφωνα με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης μειώνεται αρκετά. Εξετάζοντας προσεκτικά τα σήματα στο Noesis βλέπουμε ότι κοντά στο 52% μ.α. εμφανίζονται 3 σήματα με μέσο πλάτος 40 dBae τα οποία σχετίζονται μάλλον με την ανάπτυξη ρωγμών καθώς σ αυτό το τμήμα παρατηρήθηκε μακροσκοπικά και η εφελκυστική ρωγμή. Από το 52% -73% μ.α. τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν χαμηλό μέσο πλάτος (28 dBae).

Τμήμα ΔΕ (73%-100% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος, ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται αρκετά. Παρατηρώντας τον πίνακα 49 βλέπουμε ότι από το 73% -80% μ.α. τα σήματα έχουν αυξημένο μέσο πλάτος (30 dBae) αλλά από το 73%-100% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων που αναπτύσσονται κυμαίνεται μεταξύ 25 και 26 dBae.

Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους



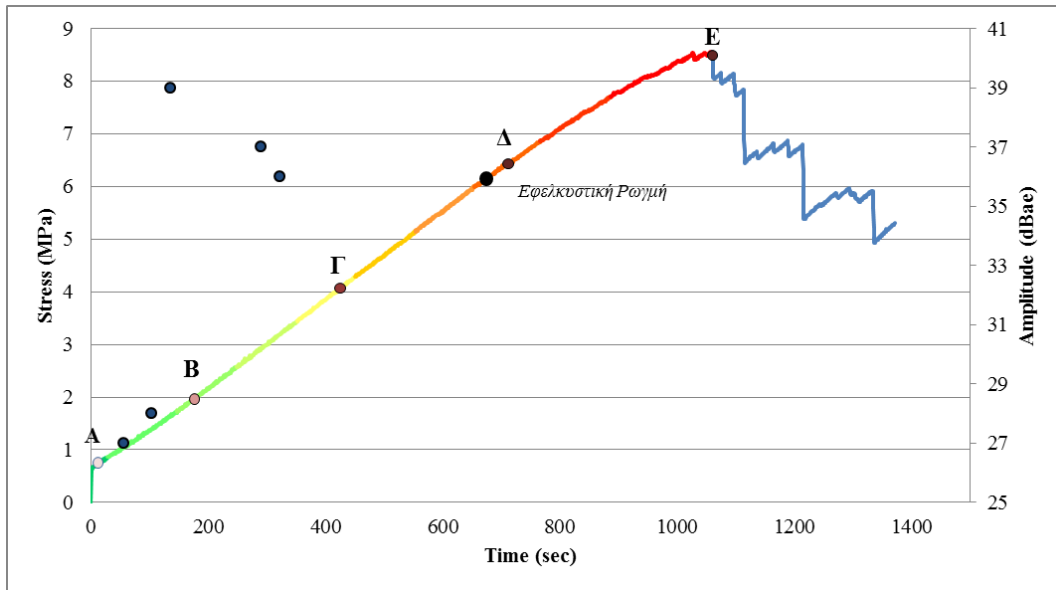
Σχήμα 66 - Σήματα 0 Κλάσης

Πίνακας 50 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	32	6
30	26	1
40	28	17
50	30	7
60	40	3
70	28	4
80	28	5
90	25	5
100	26	50

Συμπέρασμα: Στην περιοχή AB (0%-32% μ.α.) παρατηρούμε πως μέχρι το 20% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων είναι 32 dBae αλλά από το 20% μ.α. έως το 30% μ.α. το μέσο πλάτος πέφτει

στα 26 dBae. Στη γραμμική περιοχή ΒΓ (32%-52% μ.α.) παρατηρούμε πως το πλάτος των σημάτων σταδιακά αυξάνεται (26 dBae→30 dBae). Από το 52%-73% μ.α. (ΓΔ) παρατηρούμε τρία σήματα μέσου πλάτους 40 dBae κοντά στο 53% μ.α.. Πιθανώς αυτά τα σήματα να ήταν υπαίτια για την εμφάνιση της εφελκυστικής ρωγμής κοντά στο 71% μ.α.. Κοντά στο 68% μ.α. εμφανίζονται τέσσερα σήματα μέσου πλάτους 28 dBae. Τέλος από 73%-100% μ.α. (ΔΕ) τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν μειωμένο μέσο πλάτος 26.33 dBae .

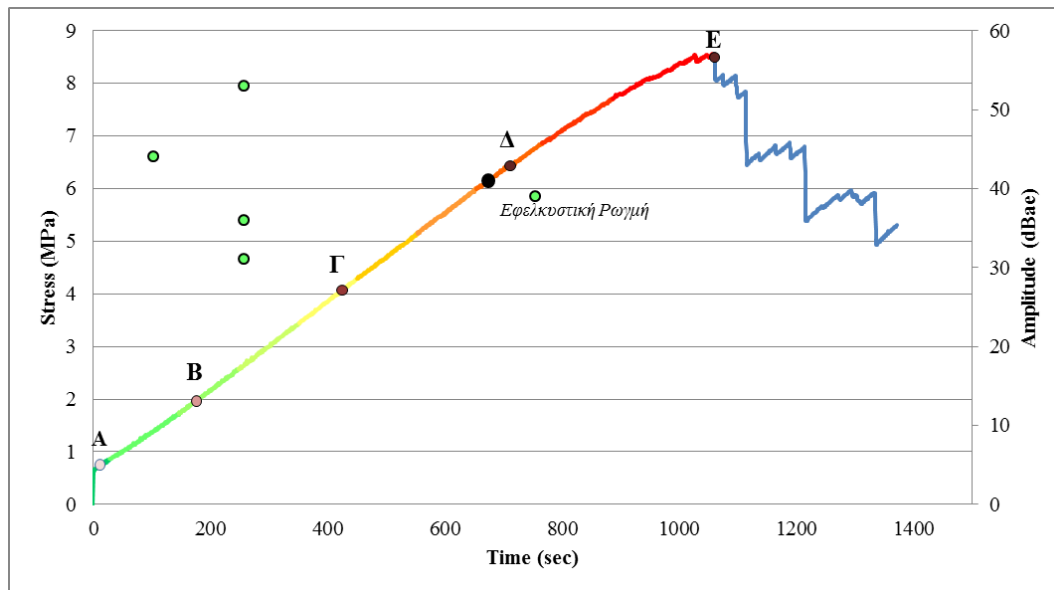


Σχήμα 67 - Σήματα 1^{ης} Κλάσης

Πίνακας 51 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	31	3
30	-	0
40	37	2
50	-	0
60	-	0
70	-	0
80	-	0
90	-	0
100	-	0

Συμπέρασμα: Δεν έχουμε αρκετά στοιχεία για να βγάλουμε κάποιο ειδικό συμπέρασμα.



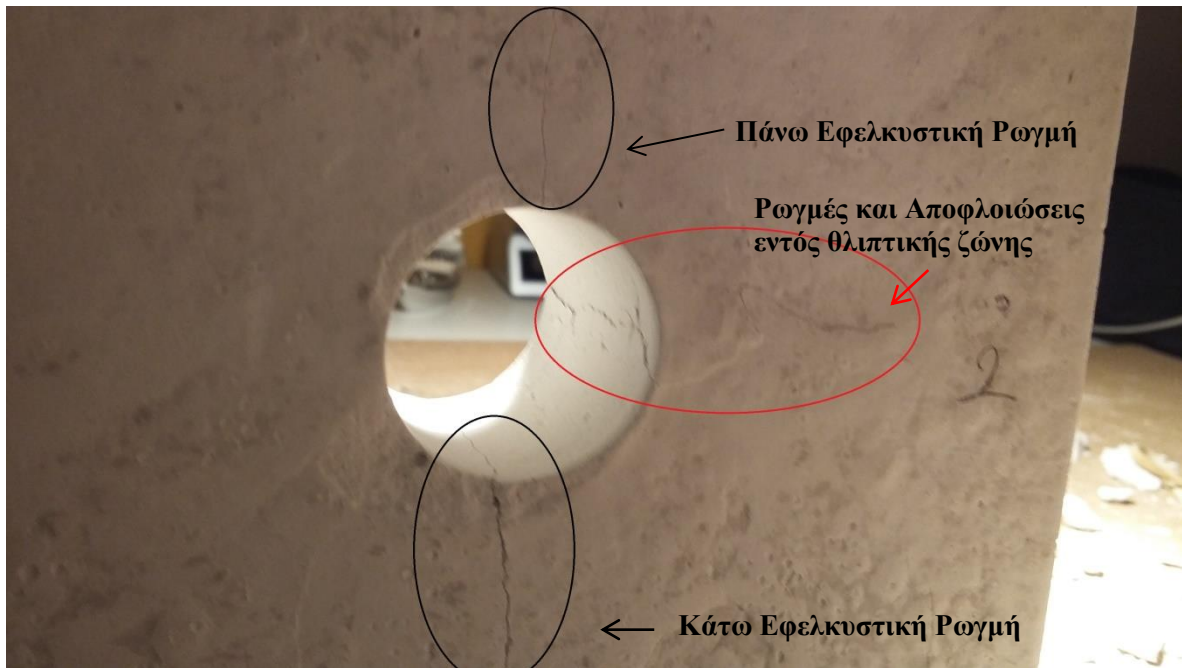
Σχήμα 68 - Σήματα 2^{ης} Κλάσης

Πίνακας 52 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	44	1
30	-	0
40	40	3
50	-	0
60	-	0
70	-	0
80	39	1
90	-	0
100	-	0

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση έχουμε ένα ισχυρό σήμα στην περιοχή **AB** (0%-32% μ.α.). Στη συνέχεια στην περιοχή **ΒΓ** (32%-52% μ.α.) βλέπουμε συσσωρευμένα τρία σήματα με μέσο πλάτος 40 dBae τα οποία θα μπορούσαμε να τα συσχετίσουμε με κάποιο γεγονός αστοχίας του υλικού και τέλος στην περιοχή **ΔΕ** (73%-100% μ.α.) βλέπουμε κοντά στο σημείο που παρατηρήσαμε την εφελκυστική ρωγμή ένα σήμα πλάτους 39 dBae.

Φωτογραφική Τεκμηρίωση



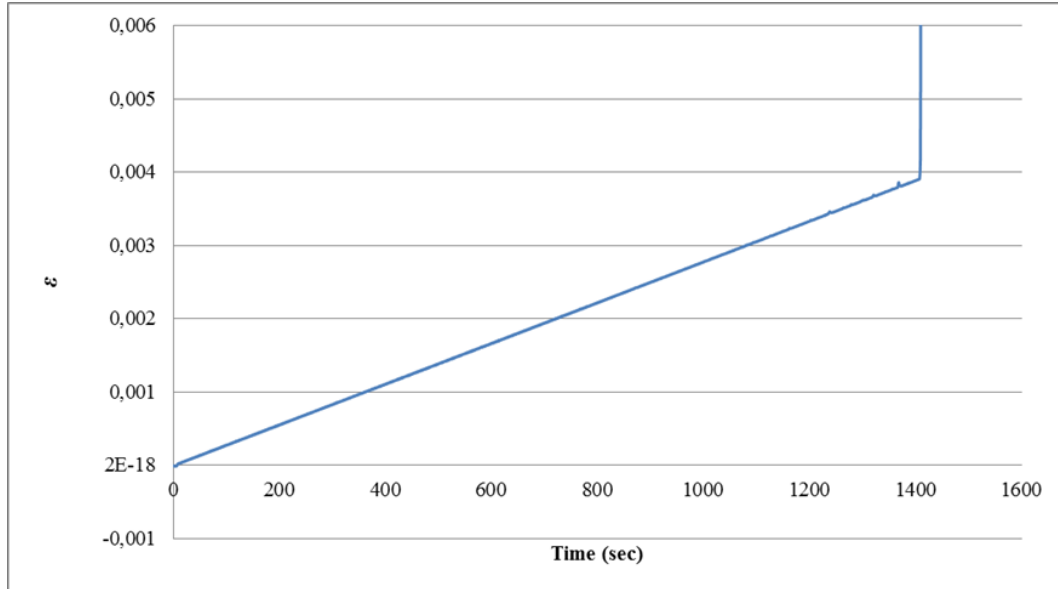
Εικόνα 63 - Εφελκυστικές και θλιπτικές ζώνες ρωγμάτωσης



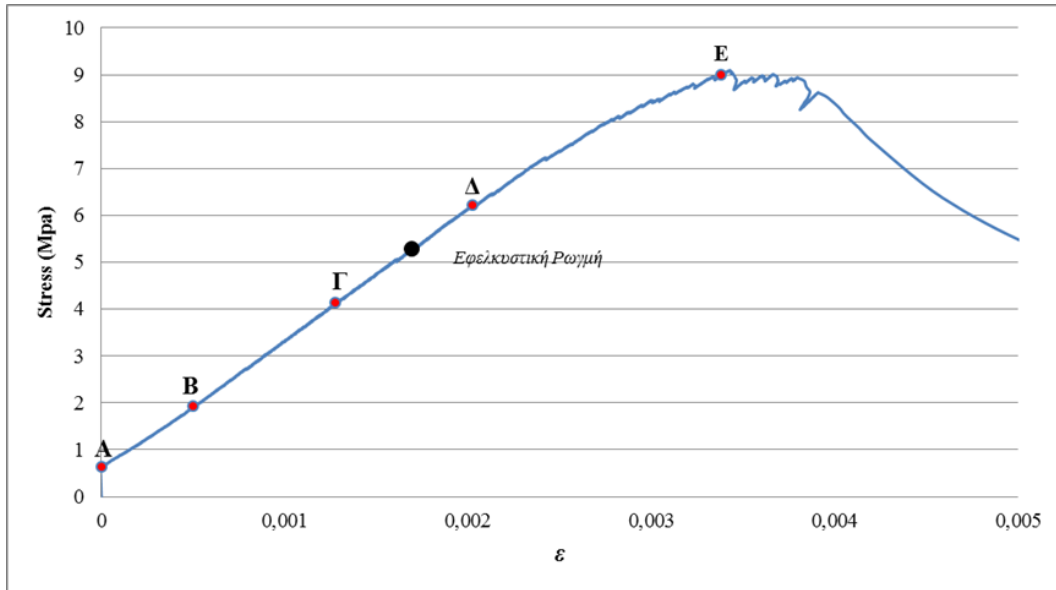
Εικόνα 64 - Θραύση του δοκιμίου στη μέση λόγω εφελκυστικής ρωγμής

4.3.9 3^η πλάκα με οπή (2,8 cm)

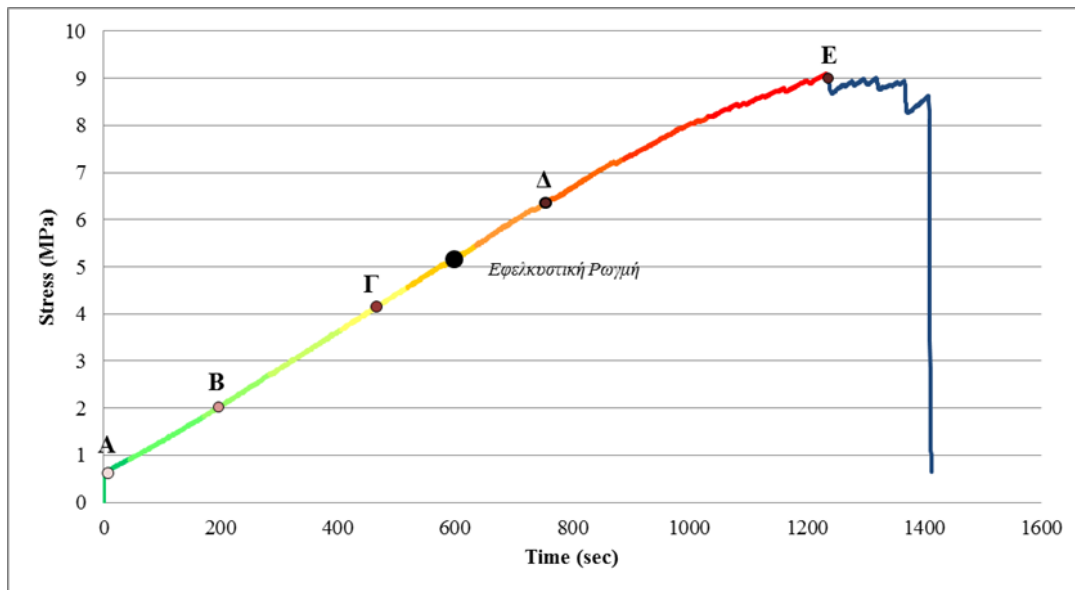
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 25 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 9 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 69 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



Σχήμα 70 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 71 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

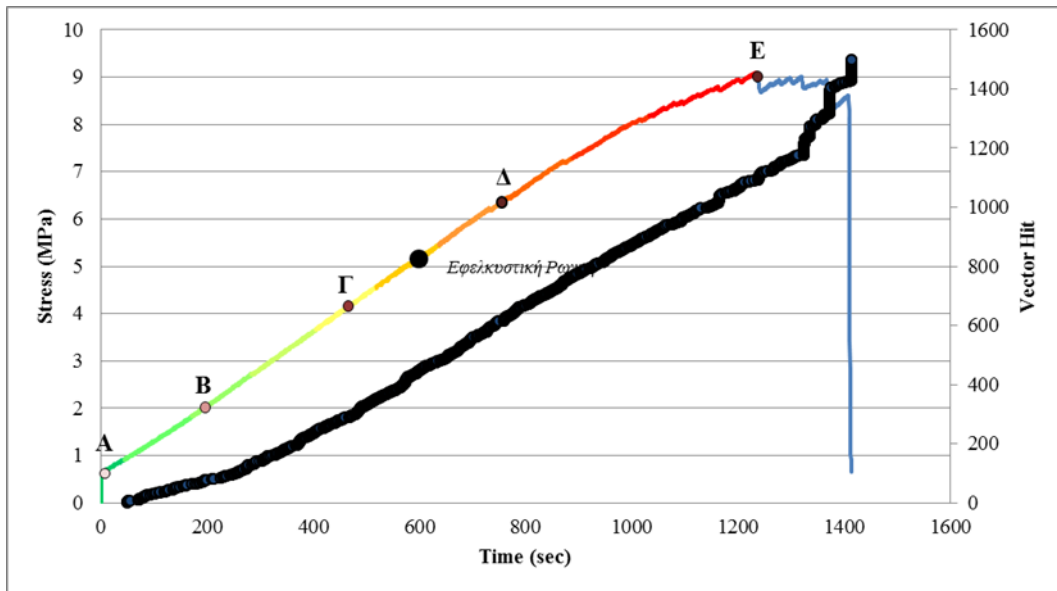
Ρυθμίσεις παραμέτρων στο πρόγραμμα AEwin.

Πίνακας 53 - Το Layout της δοκιμής από το πρόγραμμα AE win

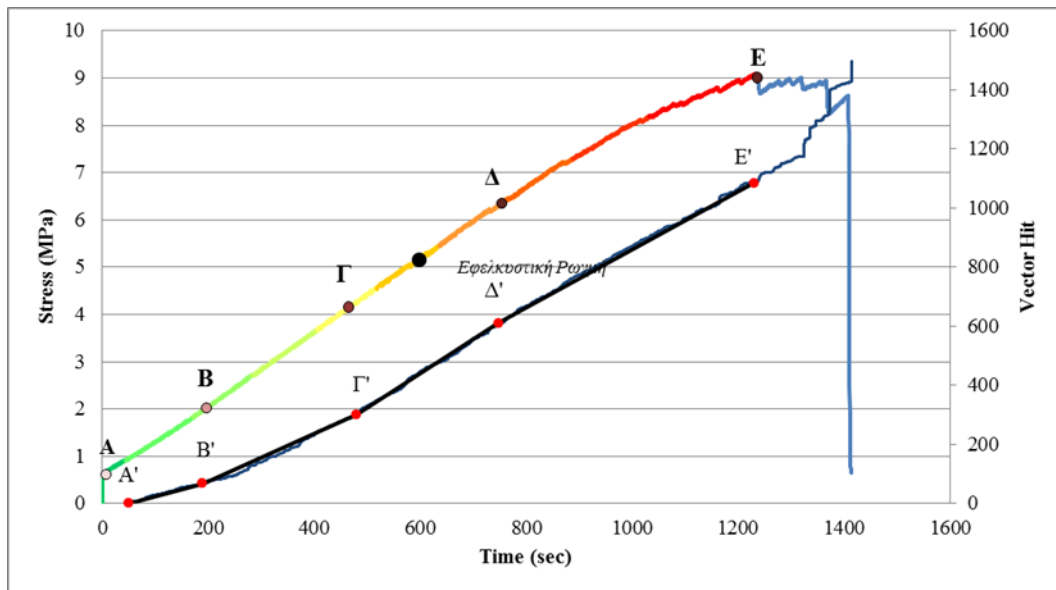
AE Channel	Threshold (dBae)	PDT (microseconds)	HDT (microseconds)	HLT (microseconds)	Max Duration (milliseconds)
1	25	50	300	200	500
2	25	50	300	200	500
3	25	50	300	200	500
4	25	50	300	200	500
5	25	50	300	200	500
6	25	50	300	200	500
7	25	50	300	200	500
8	25	50	300	200	500

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων

Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 72 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 73 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 54 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	28	61
30	28	70
40	29	114
50	30	107
60	30	127
70	31	104
80	31	150
90	31	145
100	30	182

Κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων

Κλίση **AB**: 0,48

Κλίση **ΒΓ**: 0,8

Κλίση **ΓΔ**: 1,15

Κλίση **ΔΕ**: 0,98

Συσχετισμός καμπύλης φόρτισης και καμπύλης αριθμού σημάτων

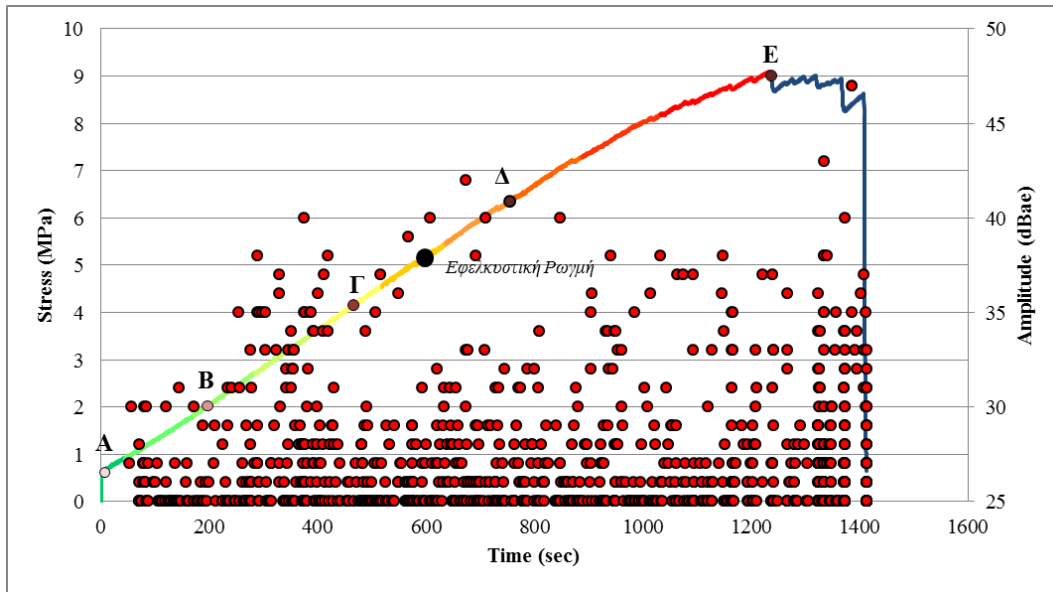
Τμήμα **ΑΒ** (10-20% μ.α.): Εξετάζοντας τον πίνακα και την κλίση αυτού του ευθύγραμμου τμήματος παρατηρούμε μία ανάπτυξη σημάτων με μέσο πλάτος τα 28 dBae.

Τμήμα **ΒΓ** (20-45% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται. Πιο αναλυτικά μέχρι το 45% το μέσο πλάτος των σημάτων αυξάνεται σταδιακά μέχρι τα 30 dBae.

Τμήμα **ΓΔ** (45-69% μ.α.): Σύμφωνα με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται απότομα. Αυτό δικαιολογείται και απ το γεγονός ότι σε αυτήν την περιοχή και συγκεκριμένα στο 58% μ.α. παρατηρήθηκε η εφελκυστική ρωγμή. Εξετάζοντας τον πίνακα βλέπουμε πως μέχρι το 50% μ.α. τα αναπτυσσόμενα σήματα έχουν μέσο πλάτος 30 dBae ενώ απ το 50%-60% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων μειώνεται στα 26 dBae. Τέλος από το 60% μ.α. μέχρι το 100% μ.α. τα σήματα έχουν μέσο πλάτος 30 dBae.

Τμήμα **ΔΕ** (78%-100% μ.α.): Με βάση την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος, ο ρυθμός ανάπτυξης των σημάτων αυξάνεται αρκετά. Παρατηρώντας τον πίνακα βλέπουμε ότι το μέσο πλάτος των σημάτων διακυμαίνεται από 30-31 dBae.

Ποιοτική διάκριση των σημάτων σύμφωνα με την κυματομορφή τους

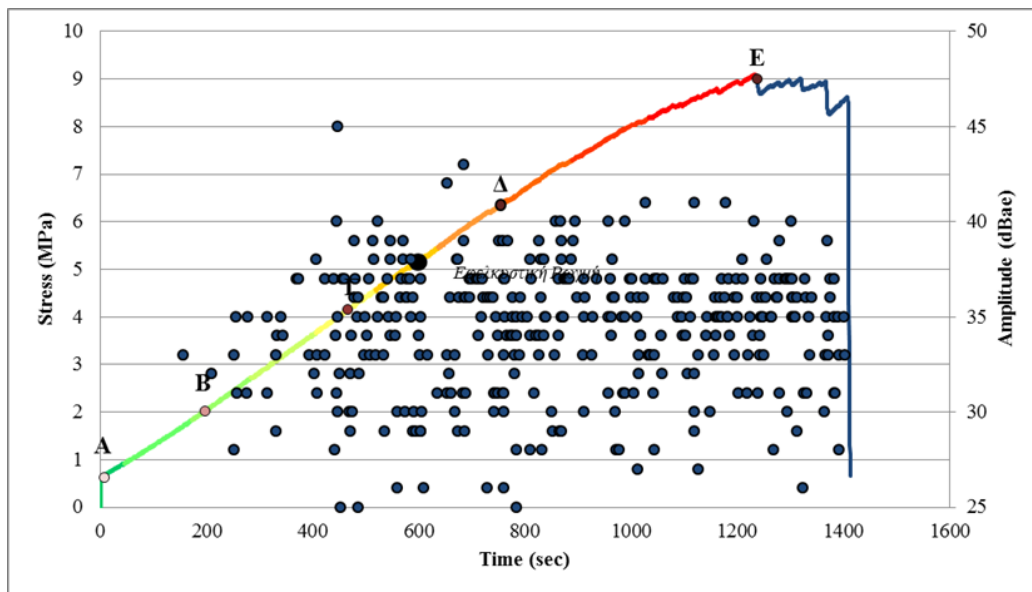


Σχήμα 74 - Σήματα 0 Κλάσης

Πίνακας 55 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 0 κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	26	48
30	27	53
40	29	97
50	27	69
60	27	75
70	27	62
80	27	77
90	28	88
100	27	118

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (0%-20% μ.α.) παρατηρούμε πως μέχρι το 20% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων είναι 26 dBae. Στη γραμμική περιοχή **BΓ** (20%-45% μ.α.) παρατηρούμε πως το πλάτος των σημάτων σταδιακά αυξάνεται (26 dBae→29 dBae). Ενδεχόμενα σε αυτήν την περιοχή να υπήρξαν κάποια cracks ρωγμών. Από 45%-69% μ.α. (**ΓΔ**) που παρατηρήθηκε η εφελκυστική ρωγμή τα σήματα έχουν μέσο πλάτος 27 dBae. Τέλος από 69%-100% μ.α. (**ΔΕ**) τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν μειωμένο μέσο πλάτος 27,5 dBae .



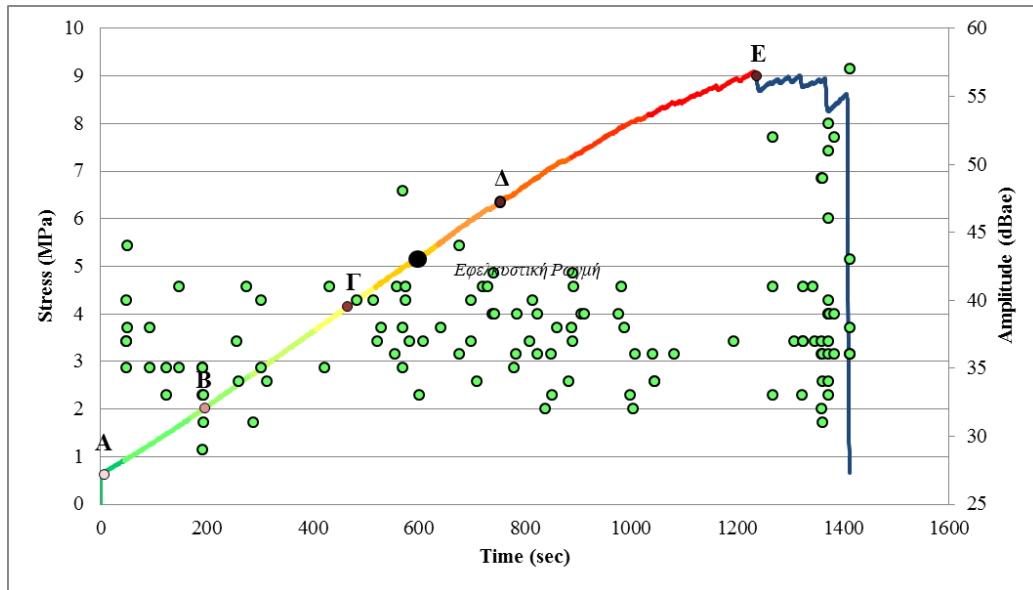
Σχήμα 75 - Σήματα 1^{ης} Κλάσης

Πίνακας 56 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 1^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	33	1
30	32	7
40	34	14
50	34	34
60	34	40
70	35	32
80	34	60
90	35	40
100	35	59

Συμπέρασμα: Στην περιοχή **AB** (0%-20% μ.α.) παρατηρούμε πως μέχρι το 20% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων είναι 33 dBae. Στη γραμμική περιοχή **ΒΓ** (20%-45% μ.α.) παρατηρούμε πως το πλάτος των σημάτων σταδιακά αυξάνεται (33 dBae→34 dBae). Πιθανώς αυτή η αύξηση του μέσου πλάτους να οφείλεται σε cracks ρωγμών. Από 45%-69% μ.α. (**ΓΔ**) που παρατηρήθηκε η εφελκυστική ρωγή βλέπουμε ιδιαίτερη ανάπτυξη σημάτων και με υψηλό μέσο πλάτος (34,33

dBae). Τέλος από 69%-100% μ.α. (ΔΕ) τα σήματα που αναπτύσσονται έχουν μειωμένο μέσο πλάτος 27,5 dBae .



Σχήμα 76 - Σήματα 2^{ης} Κλάσης

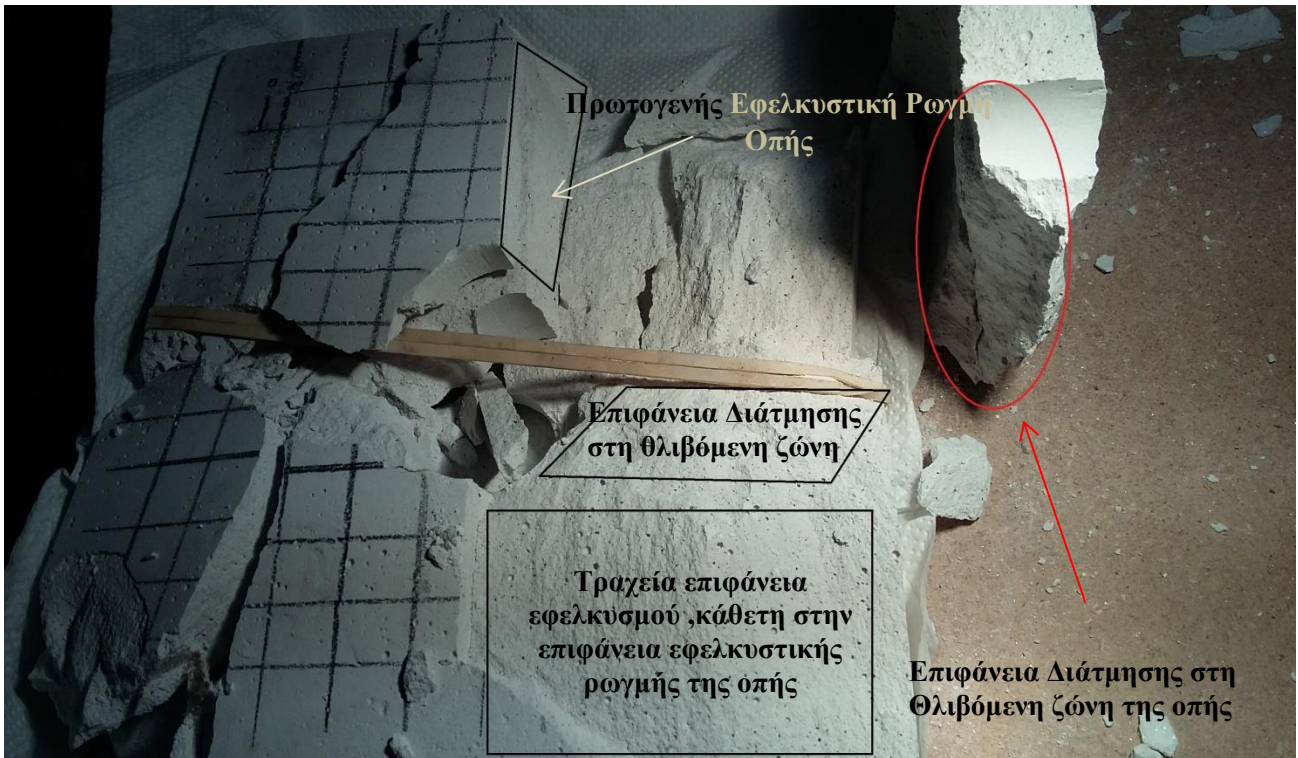
Πίνακας 57 - Μέση τιμή του πλάτους και πλήθος των σημάτων 2^{ης} κλάσης ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων
10	-	0
20	37	12
30	34	10
40	36	3
50	39	4
60	38	12
70	39	10
80	36	13
90	38	11
100	35	5

Συμπέρασμα: Στην περιοχή AB (0 - 20% μ.α.) βλέπουμε να έχουν αναπτυχθεί σήματα μεγάλου σχετικά πλάτους (37 dBae). Ύστερα το μέσο πλάτος των σημάτων που αναπτύσσονται μέχρι το 30% μ.α. είναι μειωμένο αρκετά και απ το 30% μ.α. και μέχρι το 40% μ.α. το μέσο πλάτος ξανανεβαίνει στα 36 dBae. Πιθανώς αυτή η αύξηση του μέσου πλάτους να οφείλεται σε cracks ρωγμών. Από το 50% μ.α. και μέχρι το 70% εμφανίζονται σήματα με μέσο πλάτος τα 39 dBae

γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει την εμφάνιση της εφελκυστικής ρωγμής. Ειδικά στο section του 60% μ.α. που έχουμε και την έναρξη της εφελκυστικής ρωγμής παρατηρούμε ότι έχουμε αρκετά σήματα. Από το 70% μ.α. και μέχρι τη μέγιστη τάση τα σήματα παρουσιάζουν πτώση στο μέσο πλάτος τους.

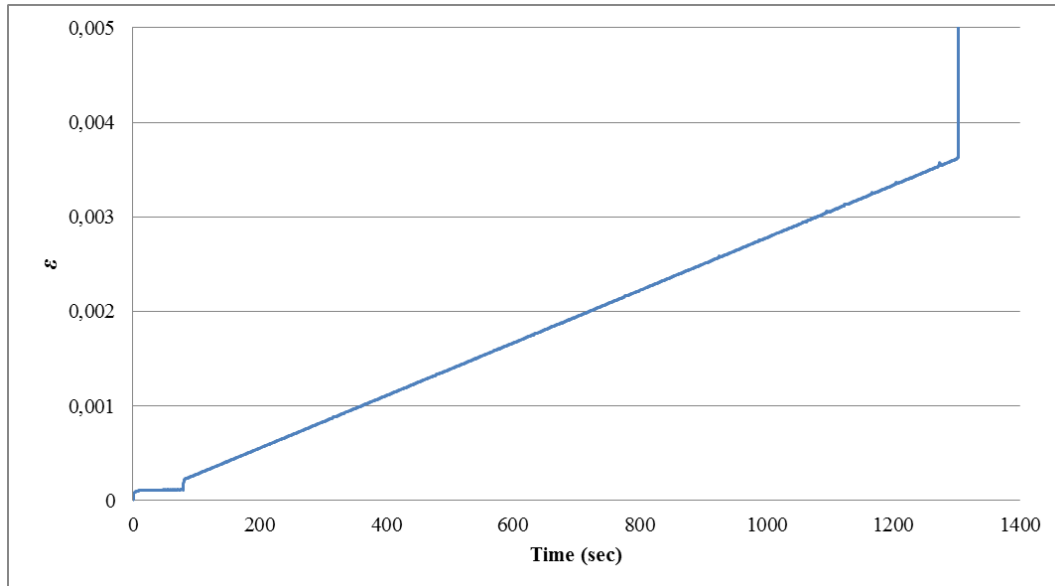
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



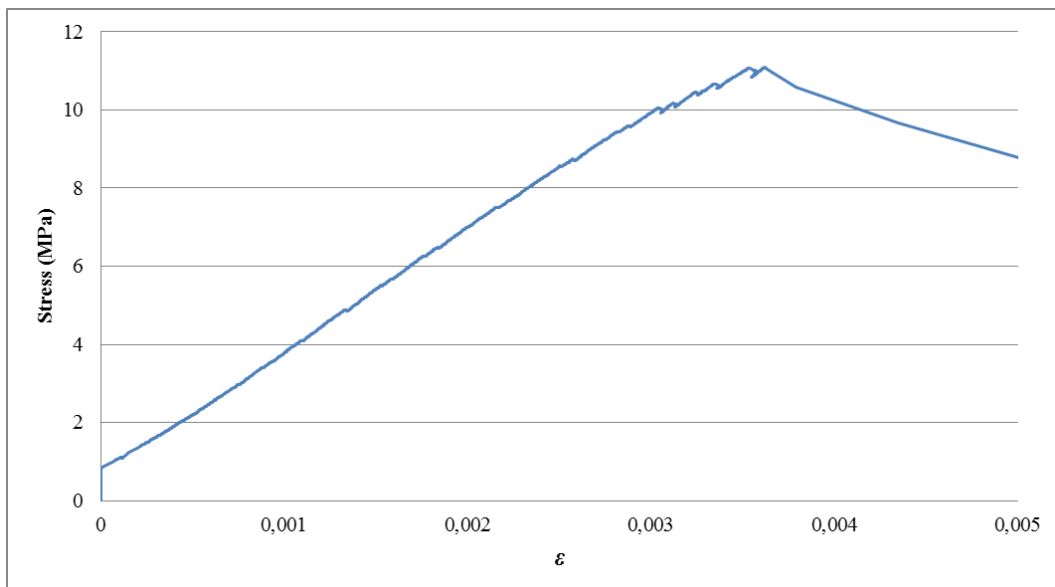
Εικόνα 65 - Επιφάνειες θραύσης του δοκιμίου

4.3.10 1^η πλάκα χωρίς οπή

Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 25 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 11.02 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας



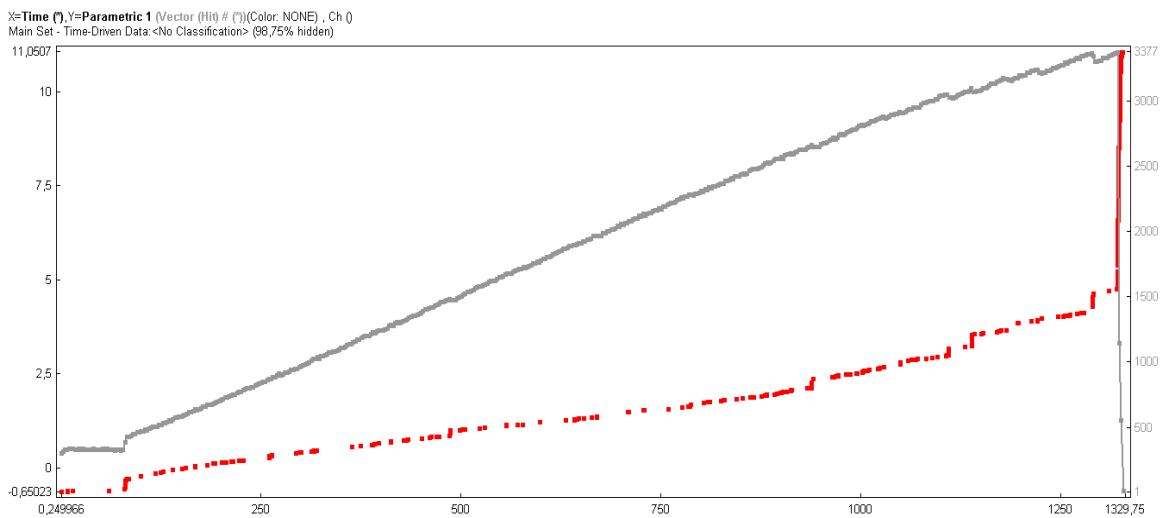
Σχήμα 77 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



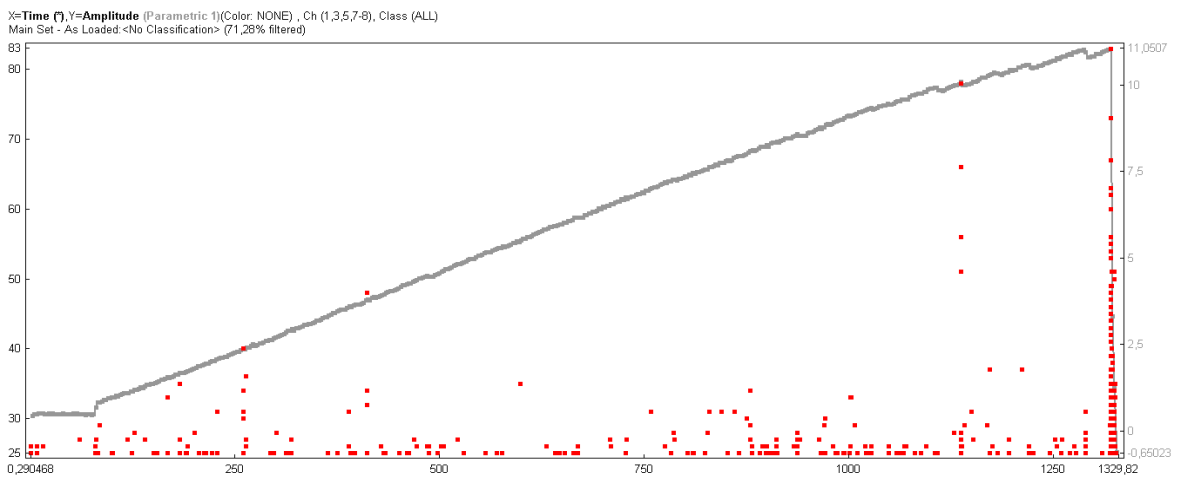
Σχήμα 78 - Διάγραμμα Τάσης /Ανηγμένης Παραμόρφωσης

Μελέτη της ΑΕ

Στις πλάκες χωρίς οπή δεν ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία ανάλυσης με τα πειράματα των πλακών με οπή καθώς το πεδίο ενδιαφέροντος στην παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη δημιουργία της ρωγμάτωσης γύρω από την οπή. Ωστόσο τα πειράματα στις πλάκες χωρίς οπή αποτέλεσαν ένα μέτρο σύγκρισης για το βαθμό στον οποίο επηρεάζει η οπή την τελική αντοχή του δοκιμίου καθώς και τις ποιοτικές και ποσοτικές αλλαγές όσον αφορά την ανάπτυξη των σημάτων και τη διακύμανση του μέσου πλάτους. Οι ρυθμίσεις των παραμέτρων στο πρόγραμμα AE win ήταν οι ίδιες με τις δοκιμές στις πλάκες με οπή, με threshold: 25 dBae.



Σχήμα 79 - Διάγραμμα ανάπτυξης των σημάτων κατά τη δοκιμή. Ο άξονας y του παραμετρικού δηλώνει την τάση



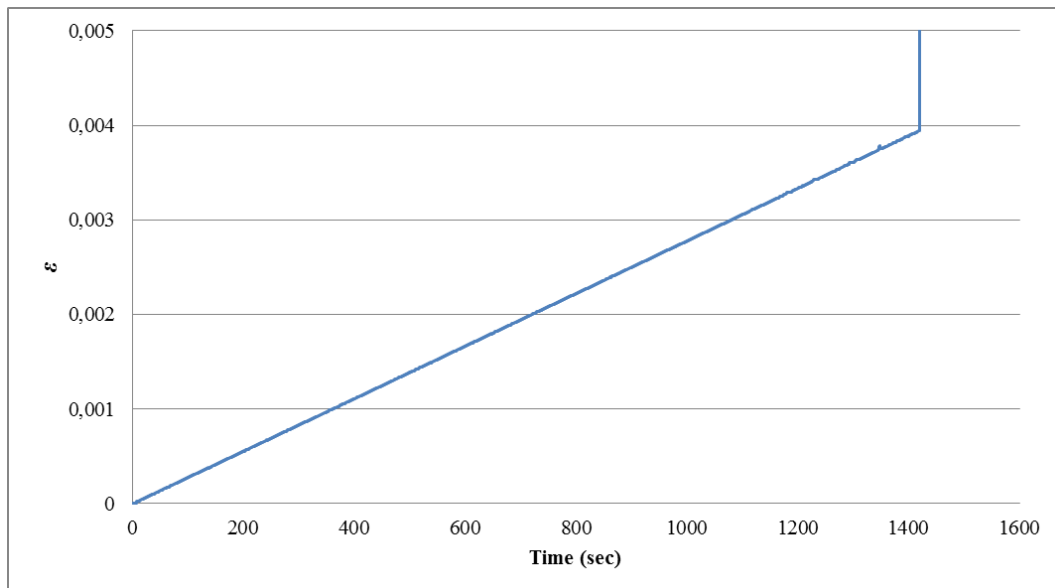
Σχήμα 80 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής



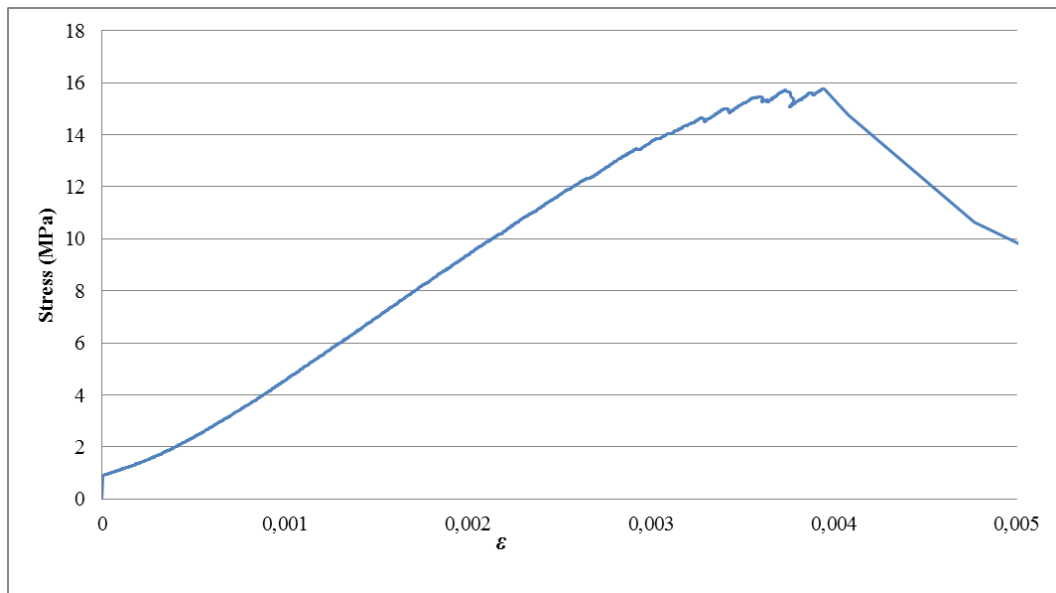
Εικόνα 66 - Θραύση της 1^{ης} πλάκας χωρίς σπή

4.3.11 2^η πλάκα χωρίς σπή

Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 25 ($\mu\text{m}/\text{min}$). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 10,24155 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.

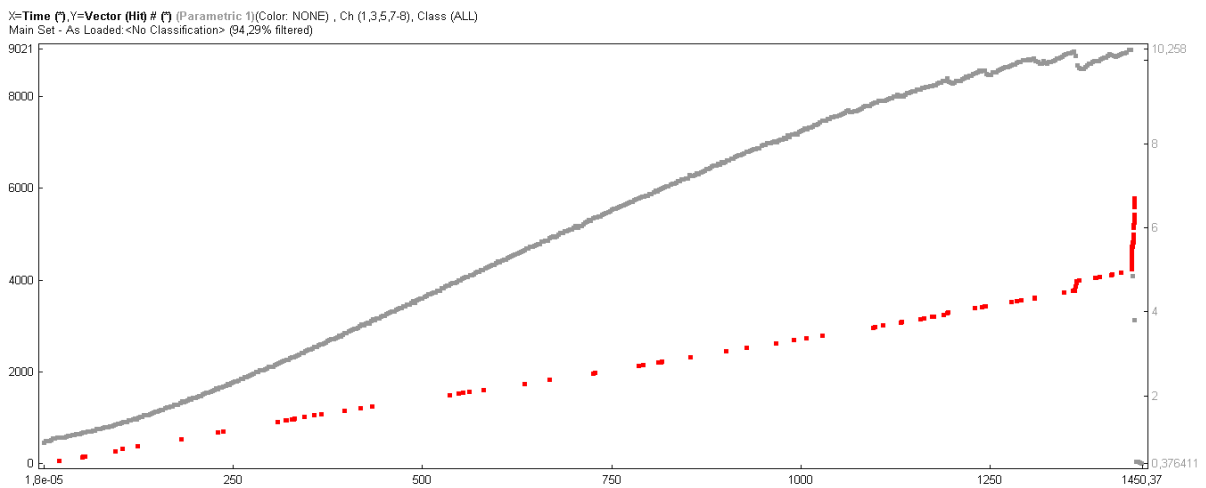


Σχήμα 81 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/ Χρόνου

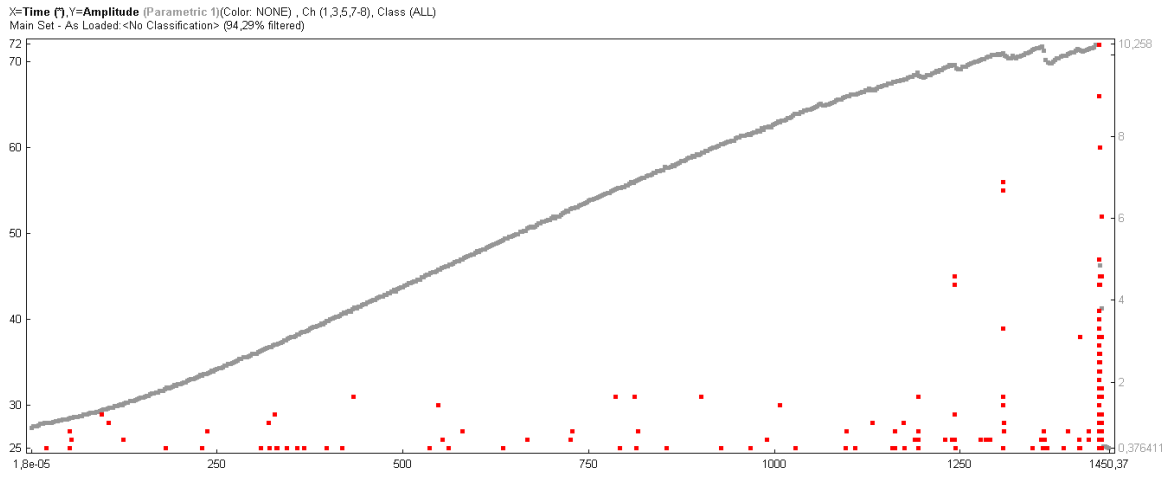


Σχήμα 82 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης

Μελέτη της ΑΕ



Σχήμα 83 - Διάγραμμα ανάπτυξης των σημάτων κατά τη δοκιμή. Ο άξονας y του παραμετρικού δηλώνει την τάση



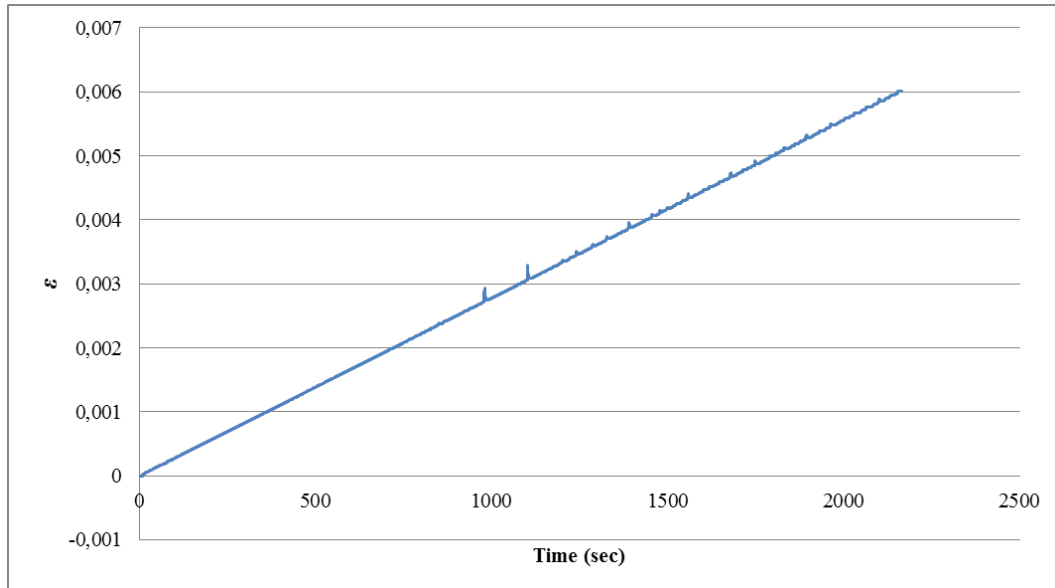
Σχήμα 84 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής



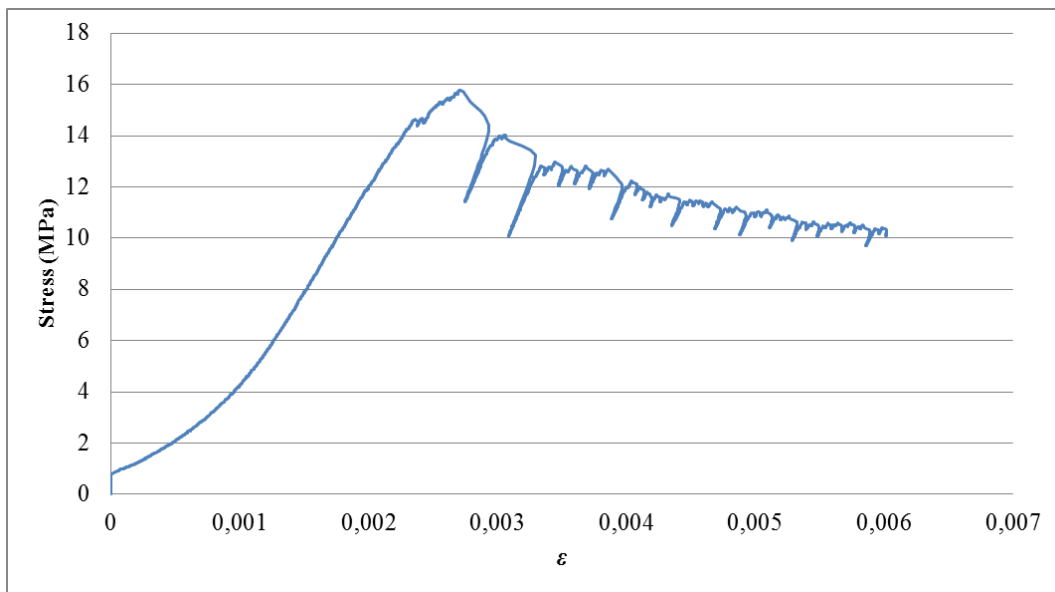
Εικόνα 67 - Θραύση της 2^{ης} πλάκας χωρίς σπή υπό διάτμηση

4.3.12 3^η πλάκα χωρίς οπή

Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 25 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 11,093 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.

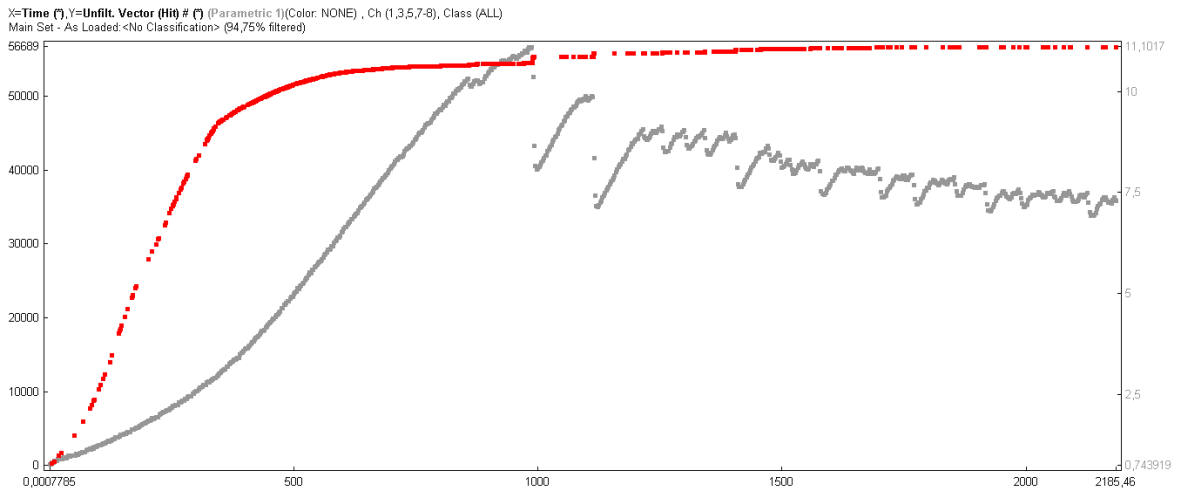


Σχήμα 85 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου

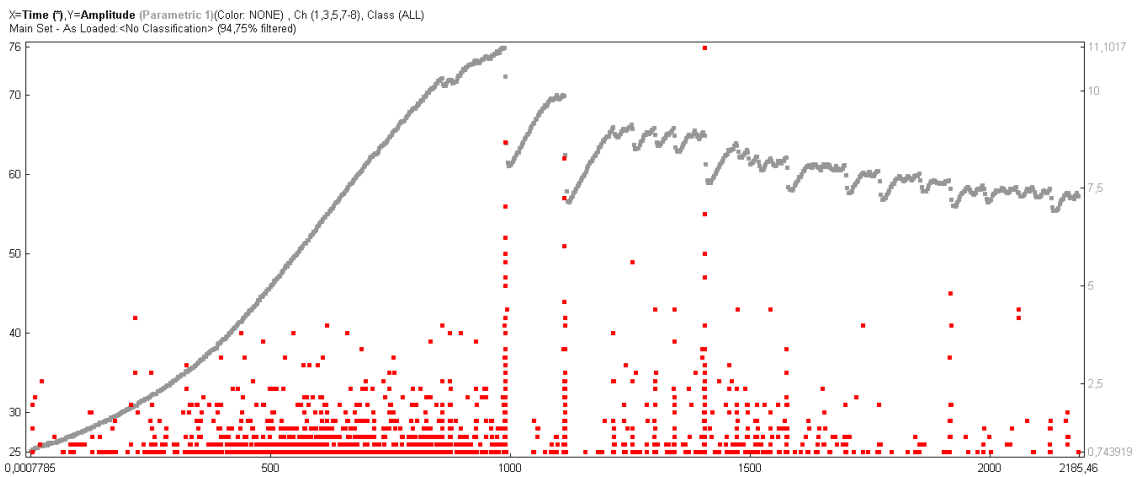


Σχήμα 86 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης

Μελέτη της ΑΕ



Σχήμα 87 - Διάγραμμα ανάπτυξης των σημάτων κατά τη δοκιμή. Ο άξονας y του παραμετρικού δηλώνει την τάση



Σχήμα 88 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής



Εικόνα 68 - Θραύση της 3^{ης} πλάκας χωρίς οπή

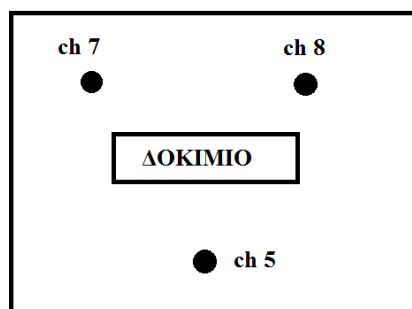
5 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΜΕ ΟΠΗ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης στα φυσικά μοντέλα μαρμάρου με οπή πραγματοποιήθηκαν στη θλιπτική μηχανή δυναμικότητας 5000 kN. Οι συνθήκες ελέγχου της κάθε δοκιμής (έλεγχος φορτίου ή έλεγχος μετατόπισης) ήταν συγκεκριμένες για κάθε δοκίμιο και αναφέρονται αναλυτικά στην Παράγραφο 5.5. Για την παρακολούθηση της αξονικής τροπής του δοκιμίου τοποθετήσαμε τρία βελοόμετρα (ch 5, ch 7, ch 8) σε αποστάσεις όπως φαίνονται στην Εικόνα 69. Όσον αφορά την καταγραφή της ακουστικής εκπομπής τοποθετήσαμε στην πρόσοψη της πλάκας αισθητήρες ΑΕ τύπου R15a (δύο ή τέσσερις, ανάλογα τη δοκιμή) σε τυχαίες θέσεις όπως φαίνονται στην Εικόνα 70. Η ανηγμένη παραμόρφωση του δοκιμίου υπολογίστηκε σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L (\mu m)}{L_{αρχ} (cm)} = \frac{\Delta L * (0.0001) cm}{15 cm}$$

όπου το ΔL (μm) αναφέρεται στο μέσο όρο της καταγεγραμμένης βράχυνσης των τριών βελομέτρων.



Εικόνα 69 - Κάτοψη της κάτω χαλύβδινης πλάκας της μηχανής φόρτισης στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των βελομέτρων



Εικόνα 70 - Τυπική διάταξη μονοαξονικής θλίψης των φυσικών μοντέλων με σπή από μάρμαρο Διονύσου

5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

5.2.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά του Μάρμαρου Διονύσου

Πίνακας 58 – Μηχανικά Χαρακτηριστικά του Μάρμαρου Διονύσου

Αντοχή Σε Θλίψη [MPa]	Αντοχή Σε Εφελκυσμό (Brazilian) [MPa]	Διαστάσεις Δοκιμίου (μήκος x πλάτος x ύψος) [cm]
84,86	7,6	15 x 15 x 5

5.2.2 Μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων στα δοκίμια

Πριν από κάθε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είχε μετρηθεί μέσω της συσκευής υπερήχων PUNDIT η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων (V_P) υπερήχων εντός των δοκιμίων στις δύο κατευθύνσεις (η διεύθυνση φόρτισης του δοκιμίου και η κάθετη σ αυτή διεύθυνση).



Εικόνα 71 - Μέτρηση των κυμάτων υπερήχων (V_P και V_S)

Πίνακας 59 - Ταχύτητες διάδοσης διαμηκτικών (V_S) και διαμήκων κυμάτων (V_P) υπερήχων στην πλάκα (χωρίς οπή) από Μάρμαρο Διονύσου

Χαρακτηριστικά Πλάκας		Διεύθυνση 1-1	Διεύθυνση 2-2
Οπή Πλάκας (cm)	Αριθμός Πλάκας	V_p (m/sec)	V_p (m/sec)
0	1	6470	6120

5.3 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΕ WIN

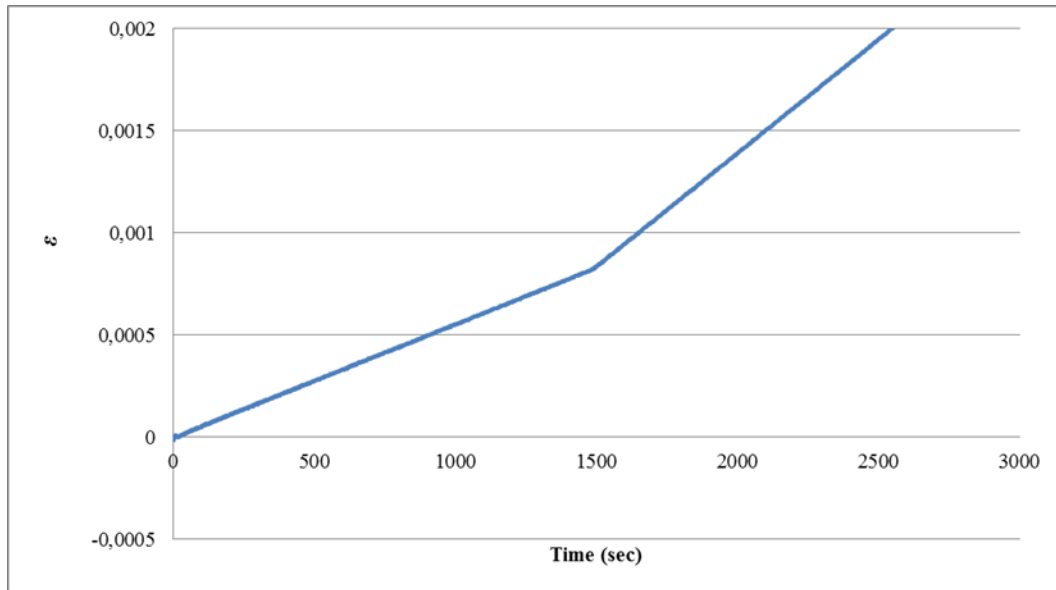
Πίνακας 60 - Το Layout όλων των δοκιμών από το πρόγραμμα AE win

ΑΕ Channel	Threshold (dBae)	PDT (microseconds)	HDT (microseconds)	HLT (microseconds)	Max Duration (milliseconds)
1	35 ή 40 (λόγω θορύβου)	50	300	500	500
5	«	50	300	500	500
6	«	50	300	500	500
8	«	50	300	500	500

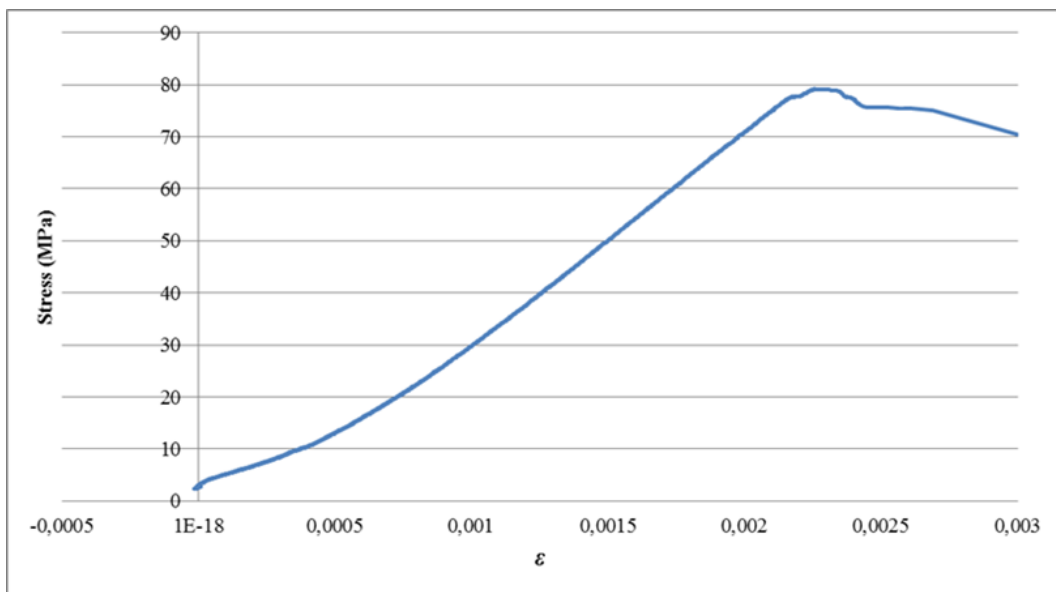
5.5 ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΑΕ ΜΕ ΤΟ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ

5.5.1 1^η πλάκα με οπή (1,5 cm)

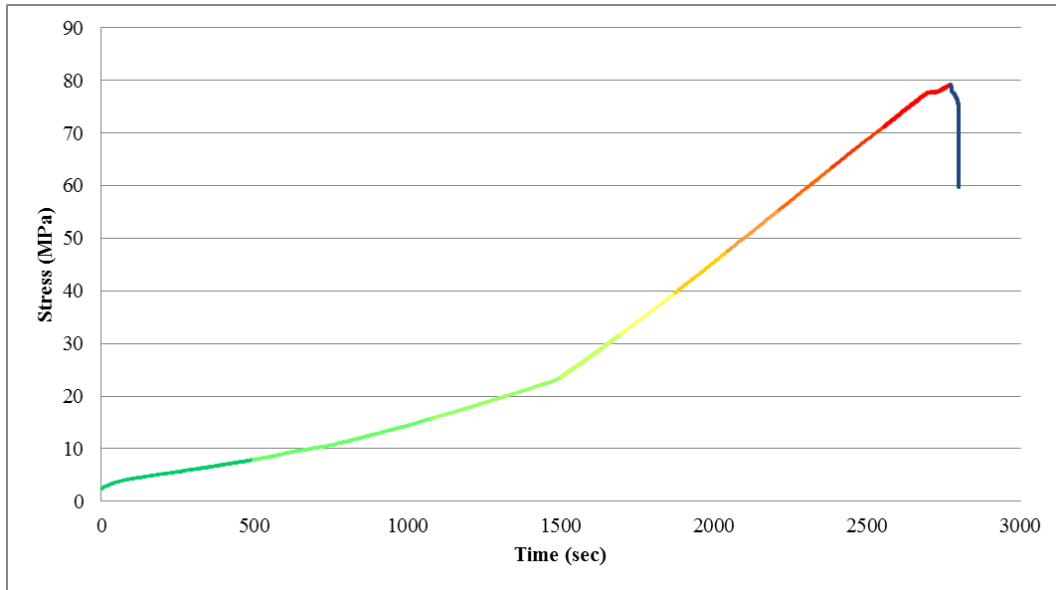
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετακίνησης εμβόλου και συγκεκριμένα με ρυθμό 5 (μm/min) μέχρι το 30% μ.α. (23MPa) και στη συνέχεια ο ρυθμός παραμόρφωσης προσαυξήθηκε στα 10 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 79,2 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 90 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



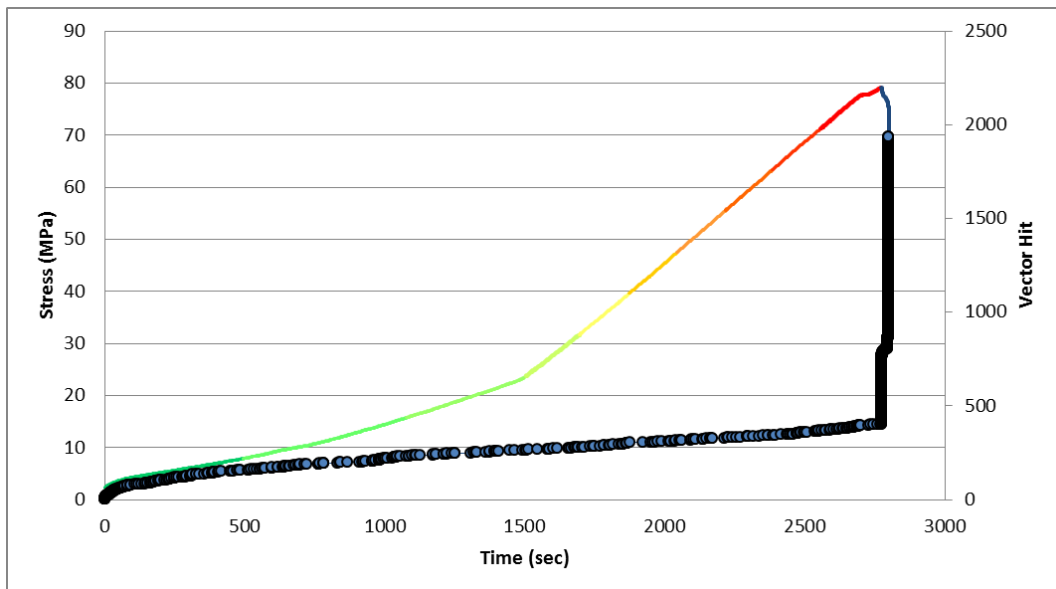
Σχήμα 91 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 92 – Διάγραμμα Τάσης - Χρόνου

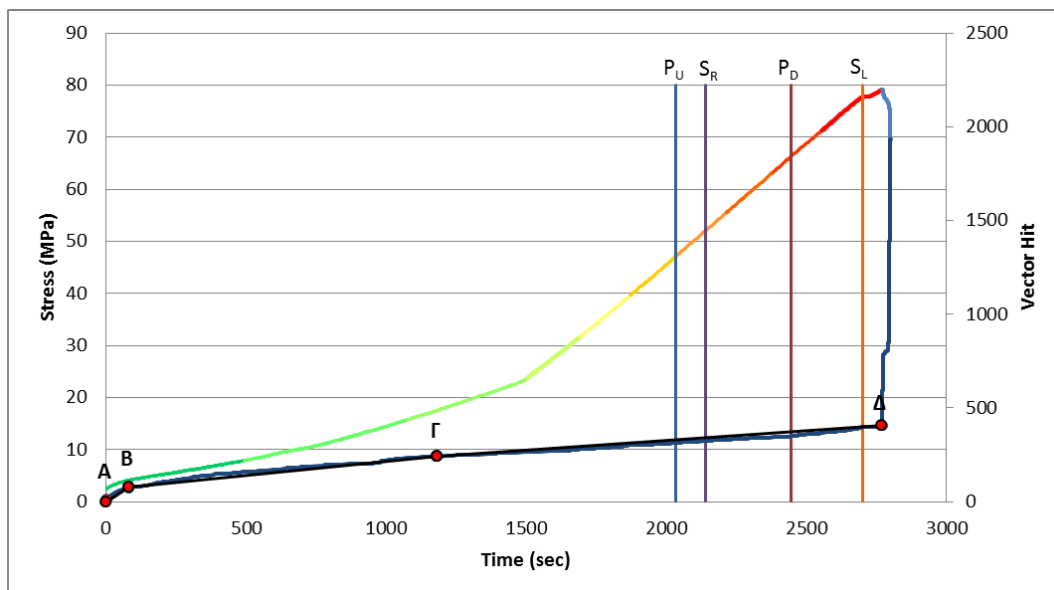
Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 93 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής

Στο παραπάνω γράφημα δεν φαίνονται ευδιάκριτα στιγμιότυπα απότομης αύξησης σημάτων για αυτό το λόγο ενώσαμε τα δεδομένα με μια λεπτή γραμμή για να παρατηρήσουμε με προσοχή τις αλλαγές στην κλίση της καμπύλης.



Σχήμα 94 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 61 - Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	32	160	0
20	32	74	0
30	33	33	0
40	31	15	0
50	34	23	0
60	33	12	0
70	33	15	0
80	34	15	0
90	32	23	0
100	33	54	0

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

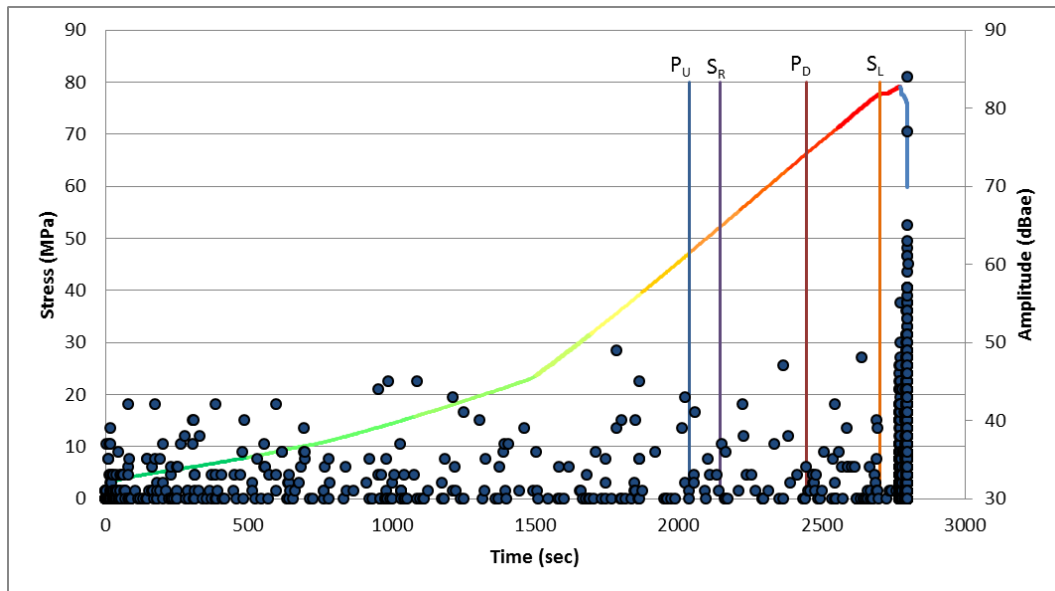
Κλίση AB: 0,916

Κλίση ΒΓ: 0,150

Κλίση ΓΔ: 0,103

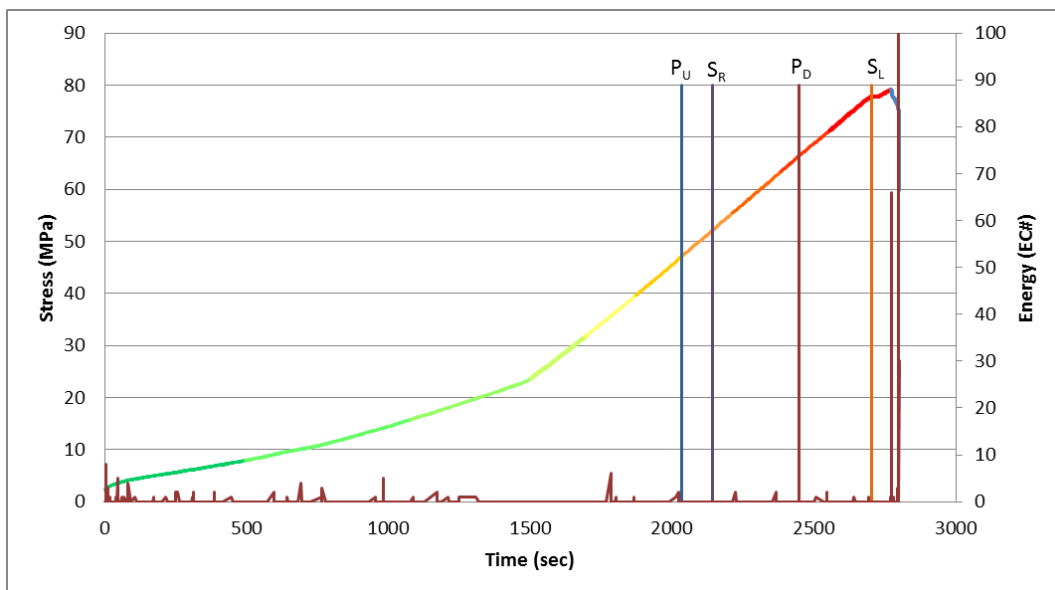
Συμπέρασμα: Εξετάζοντας τις τιμές του μέσου πλάτους ανά τμήμα φορτίου παρατηρούμε μια σημαντική αύξηση του μέσου πλάτους στο τμήμα από 40-50% μ.α. Αυτή η αυξημένη τιμή του μέσου πλάτους θα μπορούσε να συσχετιστεί με την εφελκυστική ρωγμή που παρατηρήθηκε στο

60% μ.α. Όσον αφορά τις κλίσεις των ευθύγραμμων τμημάτων δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη αύξηση στα σήματα που να μπορεί να συσχετιστεί με τις χρονικές στιγμές παρατήρησης των ρωγμών ή τις χρονικές στιγμές που θεωρητικά το υλικό μας έφτασε τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του, δηλαδή τα 7,6 MPa.



Σχήμα 95 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση δεν παρατηρείται κάποια ευδιάκριτη συσσώρευση σημάτων υψηλού πλάτους η οποία να μπορεί να συσχετιστεί με τις οπτικές παρατηρήσεις εμφάνισης των ρωγμών ή τις χρονικές στιγμές στις οποίες το υλικό έφτασε τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του δηλαδή τα 7,6 MPa.



Σχήμα 96 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

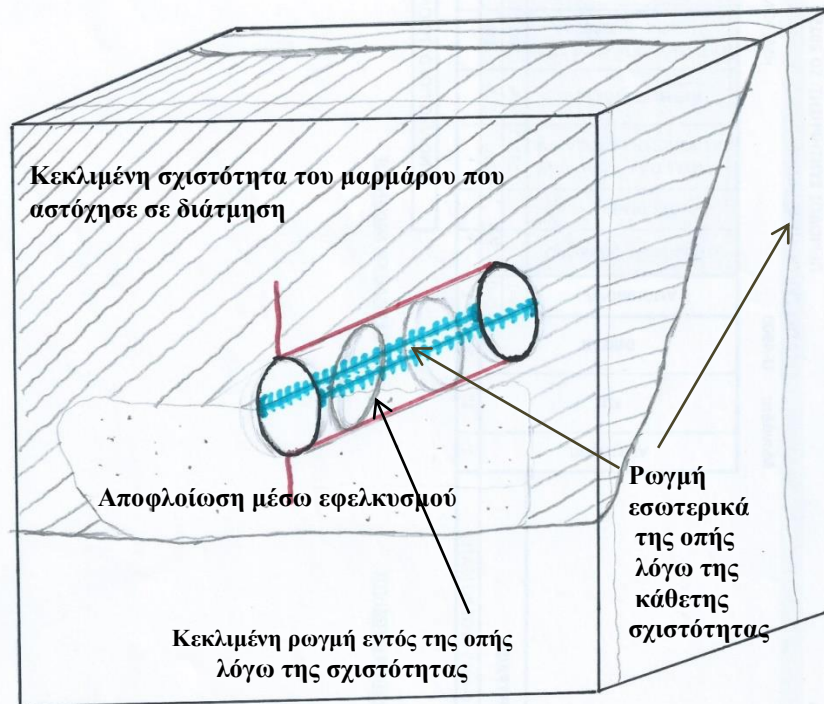
Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε μικρά peaks έκλυσης ενέργειας κυρίως από την αρχή της δοκιμής και μέχρι τα 20 MPa περίπου γεγονός το οποίο θα μπορούσε να συσχετιστεί

με κάποια εσωτερική αλλαγή του υλικού λόγω του ότι η εφελκυστική αντοχή του μαρμάρου είναι στα 7,6 MPa. Στη συνέχεια παρατηρείται άλλο ένα έντονο peak έκλυσης ενέργειας στα 35 MPa το οποίο θα μπορούσαμε να το συσχετίσουμε με την οπτική παρατήρηση της πάνω εφελκυστικής ρωγμής στα 47,18 MPa.

Φωτογραφική Τεκμηρίωση



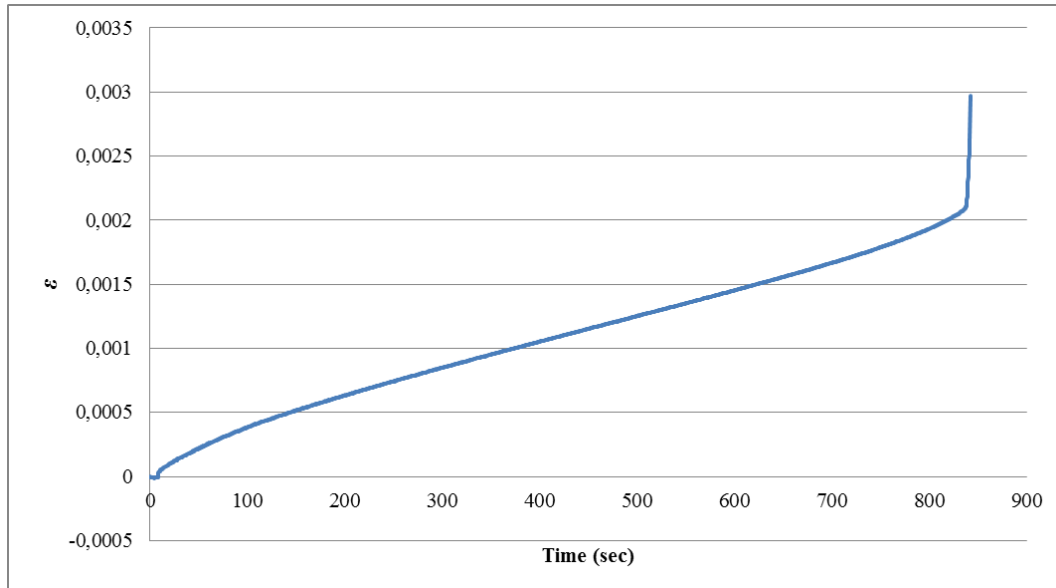
Εικόνα 72 - Διατμητική θραύση του δοκιμίου



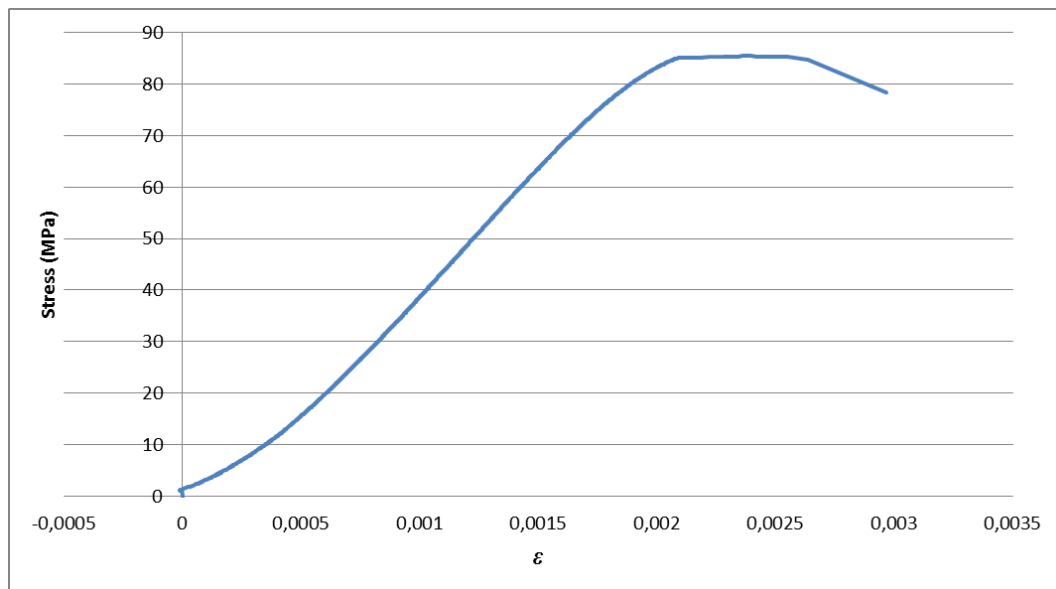
Εικόνα 73 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.2 2^η πλάκα με οπή (1,5 cm)

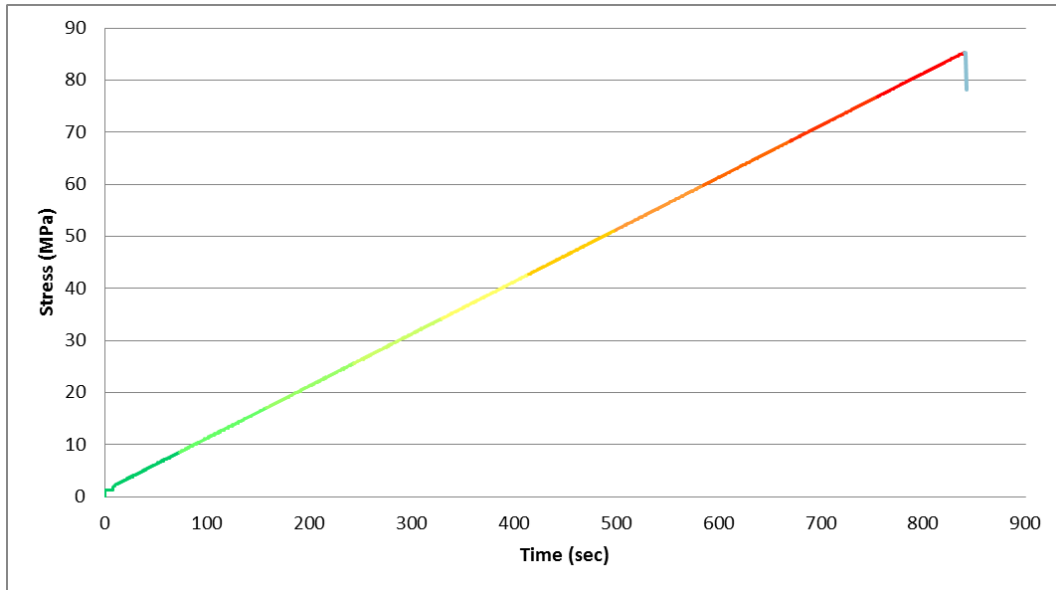
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο φορτίου και συγκεκριμένα με ρυθμό 750 (N/sec). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 85,32 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 97 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



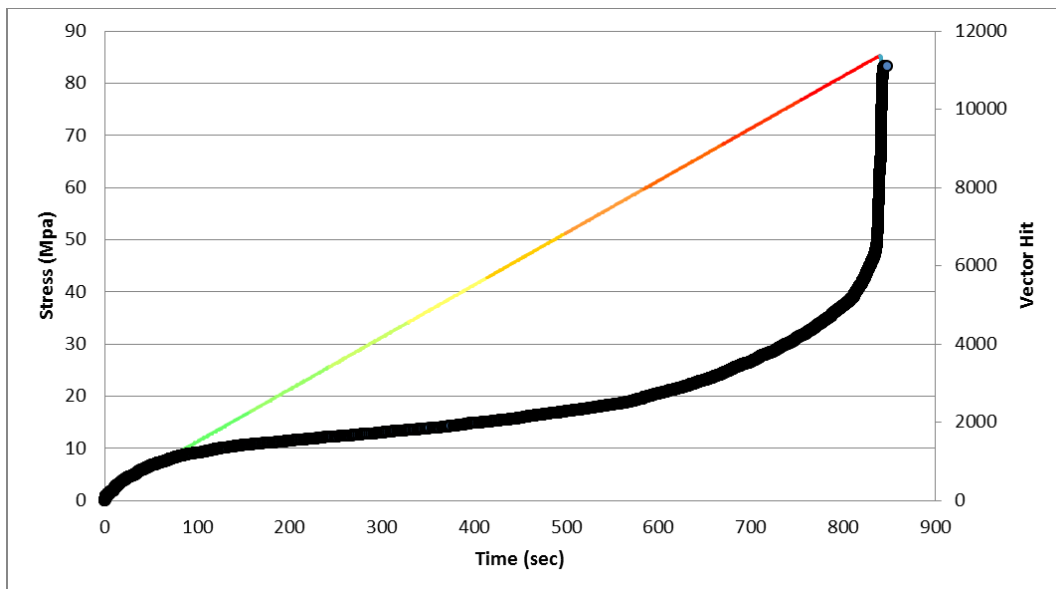
Σχήμα 98 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



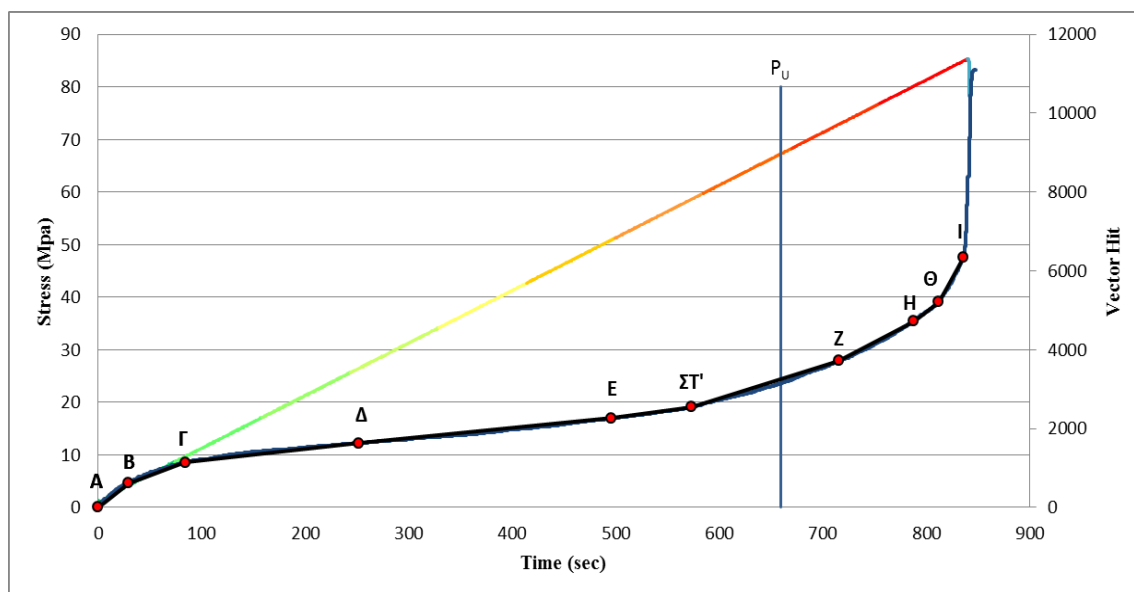
Σχήμα 99 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 100 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 101 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 62 - Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	40	1115	2
20	39	357	0
30	40	191	1
40	38	174	1
50	39	211	1
60	39	266	2
70	38	358	1
80	38	607	0
90	38	970	0
100	39	3407	1

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

Κλίση AB: 20,93

Κλίση ΒΓ: 9,567

Κλίση ΓΔ: 2,929

Κλίση ΔΕ: 2,580

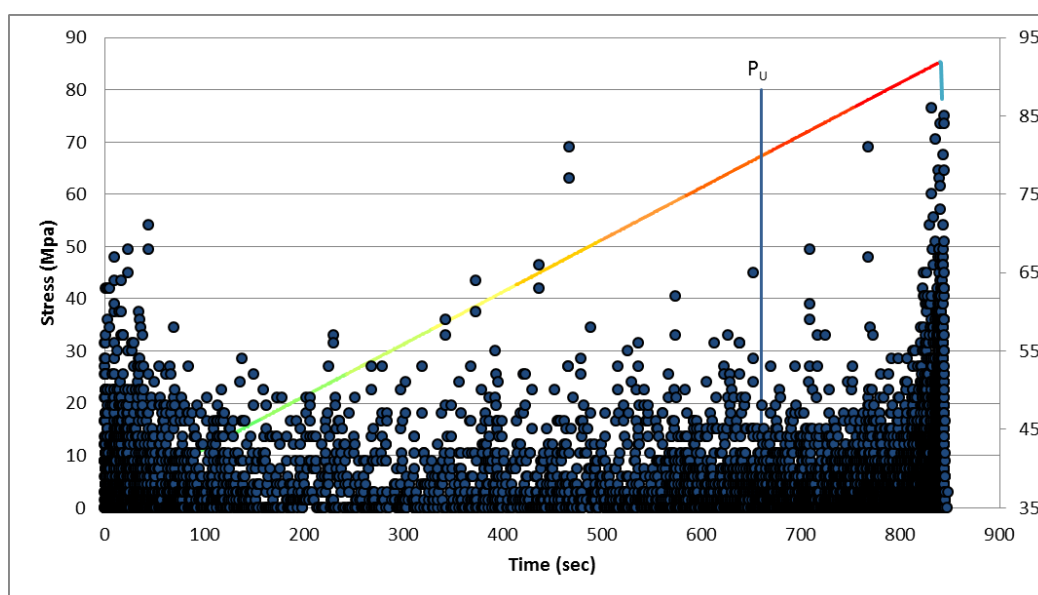
Κλίση ΕΣΤ': 3,688

Κλίση ΣΤ'Ζ: 8,2

Κλίση ΖΗ: 13,8

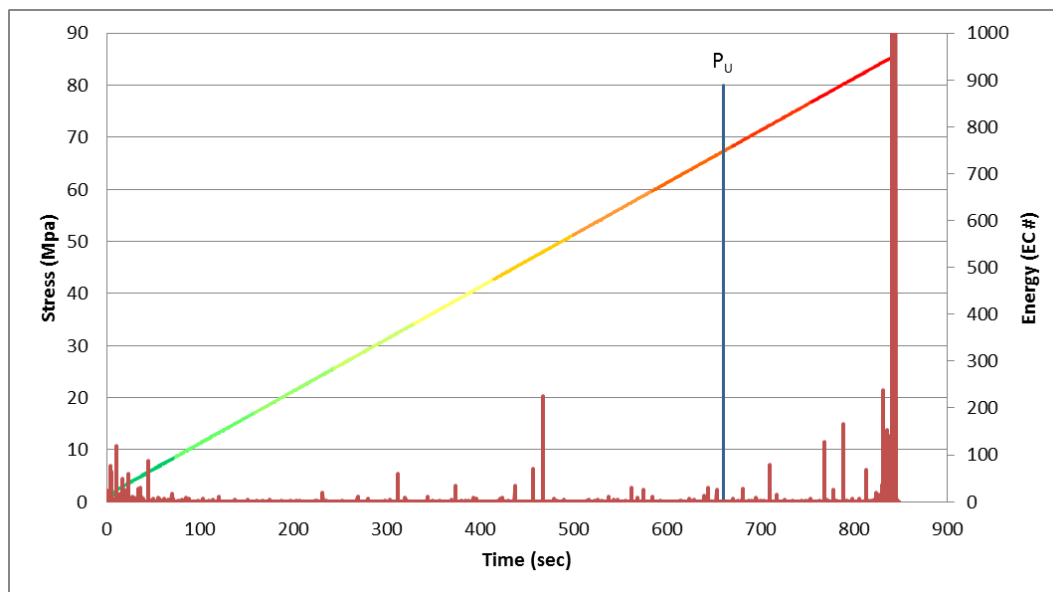
Κλίση **HΘ**: 20,51Κλίση **ΘΙ**: 47,85

Συμπέρασμα: Εξετάζοντας τις τιμές του μέσου πλάτους ανά τμήμα μέγιστης αντοχής δεν παρατηρούμε σημαντικές διαβαθμίσεις γεγονός το οποίο δεν μας οδηγεί σε κάποιο ειδικό πόρισμα. Όσον αφορά τις κλίσεις των παραπάνω τμημάτων παρατηρούμε έντονη αύξηση των σημάτων από την αρχή ης δοκιμής και μέχρι τα 10MPa περίπου. Αυτό το γεγονός μπορεί να σχετίζεται με σήματα που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια που γίνεται η σύζευξη μεταξύ της χαλύβδινης πλάκας της μηχανής φόρτισης κα της πλάκας ή λόγω του ότι ξεπεράστηκε η εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου ($\sigma_t=7,6$ MPa). Στη συνέχεια τα σήματα έχουν σχετικά σταθερό ρυθμό ανάπτυξης, αλλά στο σημείο ΣΤ' (77% μ.α. ,58 MPa) ξεκινάνε να αναπτύσσονται σταδιακά αρκετά σήματα μέχρι το τέλος της δοκιμής. Αυτό το πλήθος σημάτων θα μπορούσαμε να το συσχετίσουμε με την οπτική παρατήρηση της εφελκυστικής ρωγμής στα 67,31 MPa.



Σχήμα 102 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε κάποια σήματα υψηλού πλάτους κοντά στο 68% μ.α. (48 MPa) τα οποία ωστόσο δεν μπορούμε να τα συσχετίσουμε με οπτικές παρατηρήσεις.



Σχήμα 103 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

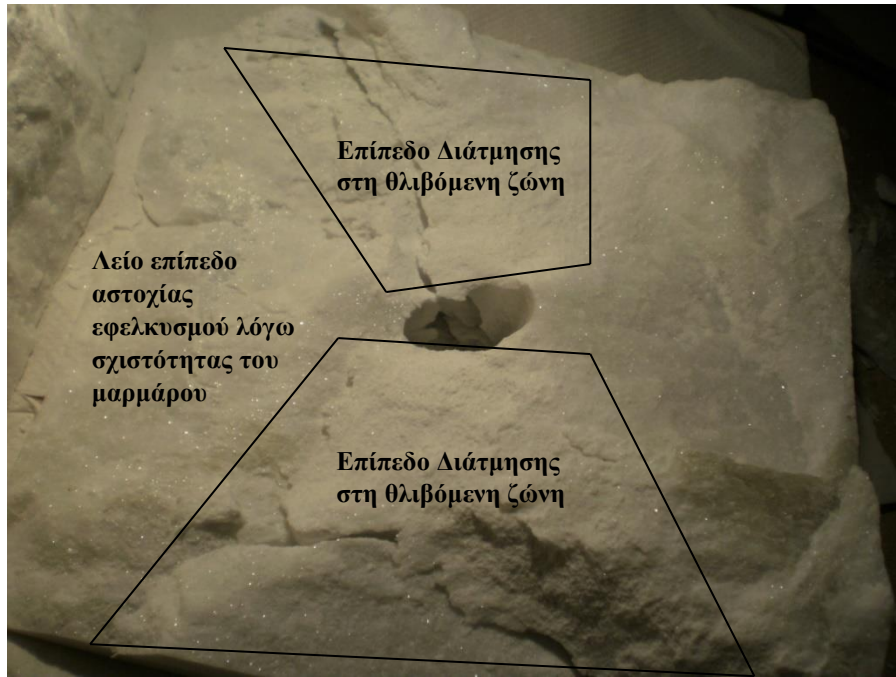
Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε έντονα peaks έκλυσης ενέργειας κυρίως στην αρχή της δοκιμής τα οποία θα μπορούσαμε να τα συσχετίσουμε με τη σύζευξη της χαλύβδινης πλάκας της μηχανής φόρτισης με το δοκίμιο ή με την αστοχία σε εφελκυσμό ($\sigma_{\theta}=7,6$ MPa) και στη συνέχεια έχουμε ένα χαρακτηριστικό peak υψηλής ενέργειας στο 68% μ.α. (48 MPa) το οποίο ωστόσο δεν μπορούμε να το συσχετίσουμε με κάποια οπτική παρατήρηση.

Φωτογραφίες Τεκμηρίωσης

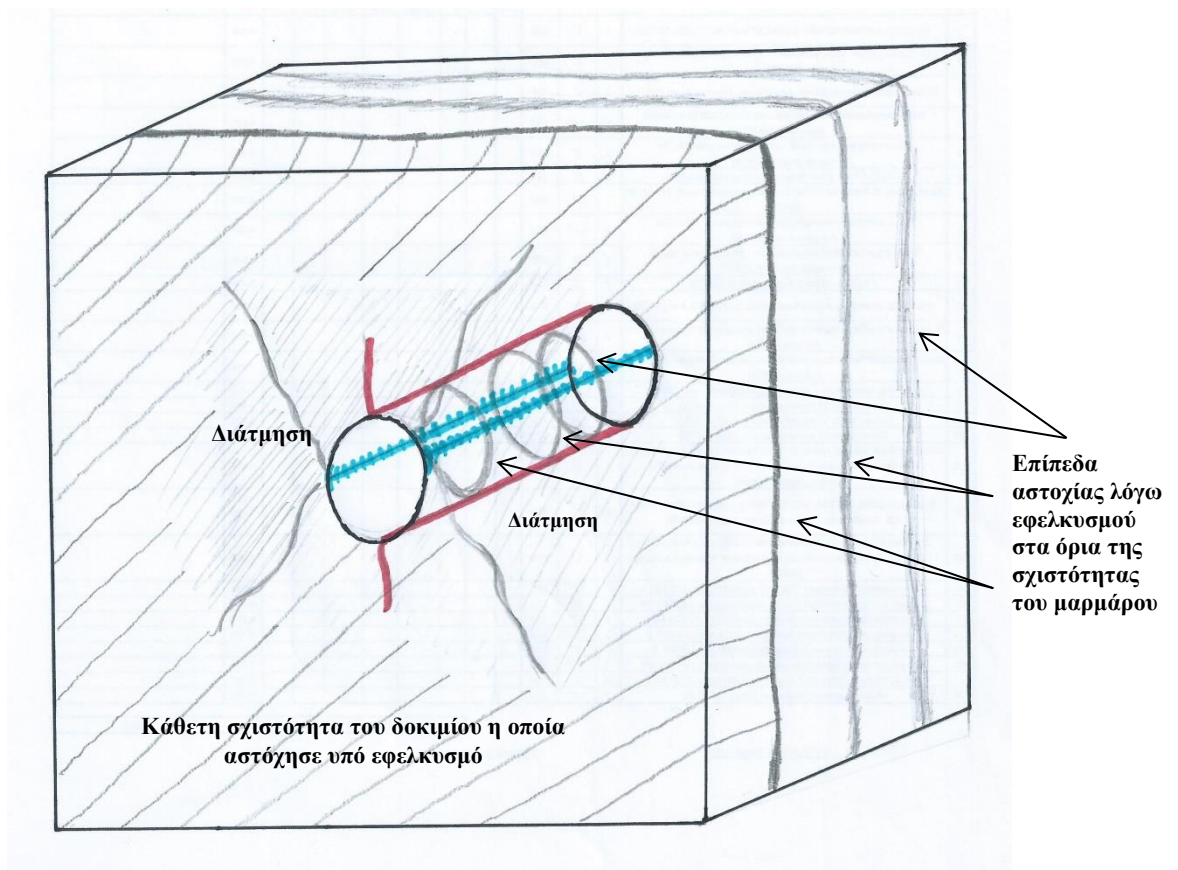


Εικόνα 74 - Αστοχία του δοκιμίου στα όρια της σχιστότητας⁴

⁴ Τα μάρμαρα, αν και ανήκουν στα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα, μπορούν να εμφανίζονται είτε με σχιστότητα, είτε συμπαγή άνευ σχιστότητας (Φραγκόπουλος και Σκουνάκης 1963). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο όρος σχιστότητα για το επίπεδο κύριας ανισοτροπίας του μαρμάρου Διονύσου.



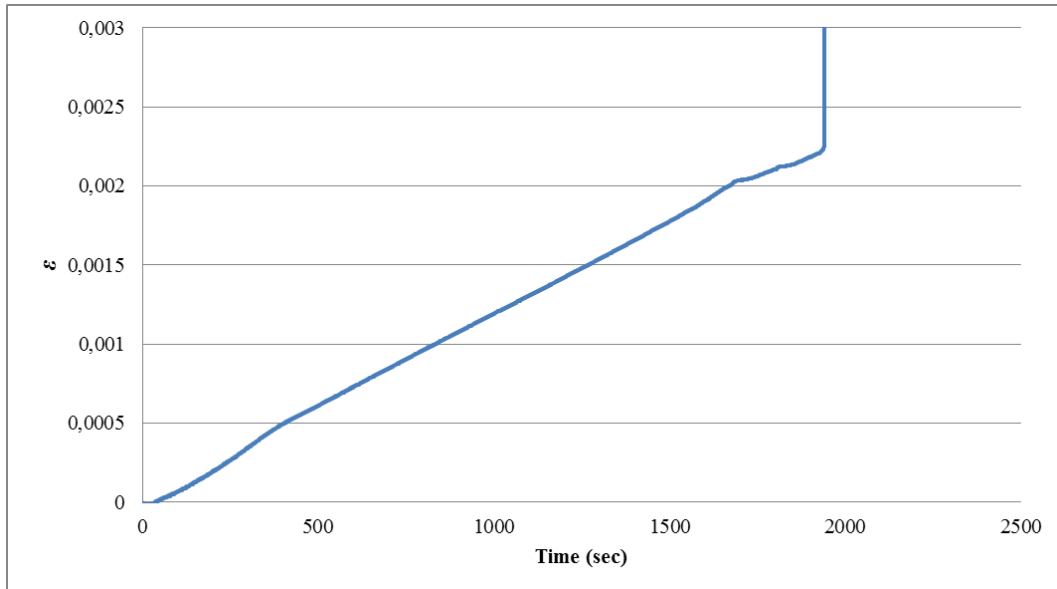
Εικόνα 75 - Επίπεδα αστοχίας του δοκιμίου



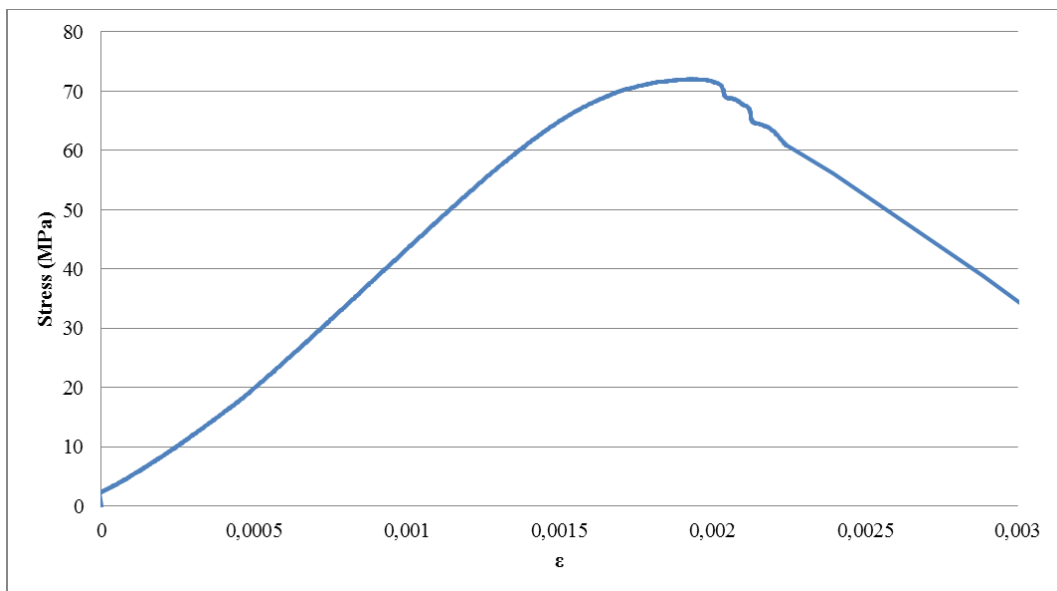
Εικόνα 76 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.3 1^η πλάκα με οπή (3 cm)

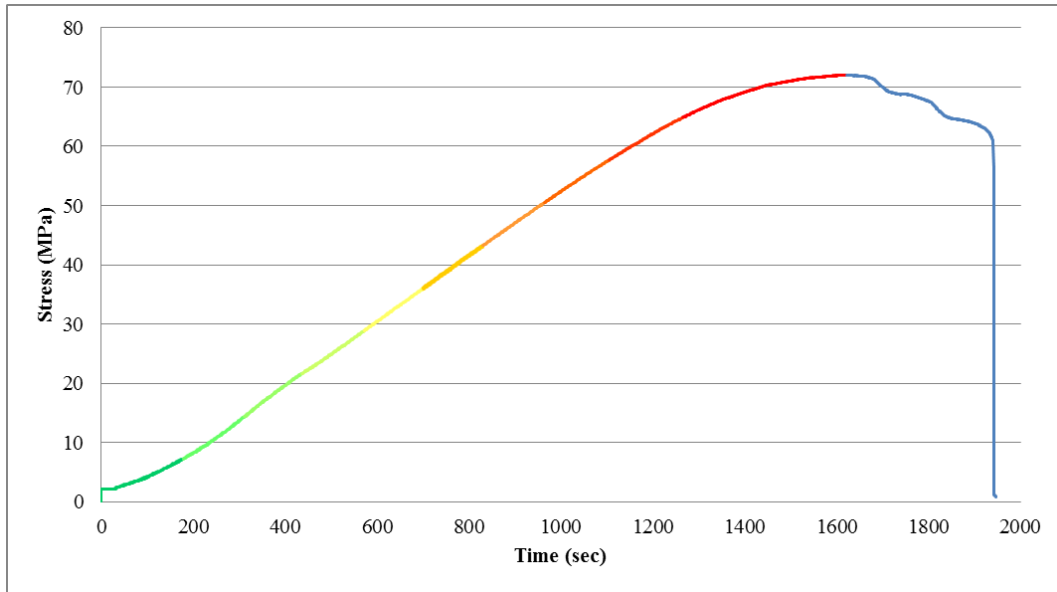
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο παραμόρφωσης και συγκεκριμένα με ρυθμό 10 ($\mu\text{m}/\text{min}$). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 72.05 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 104 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής



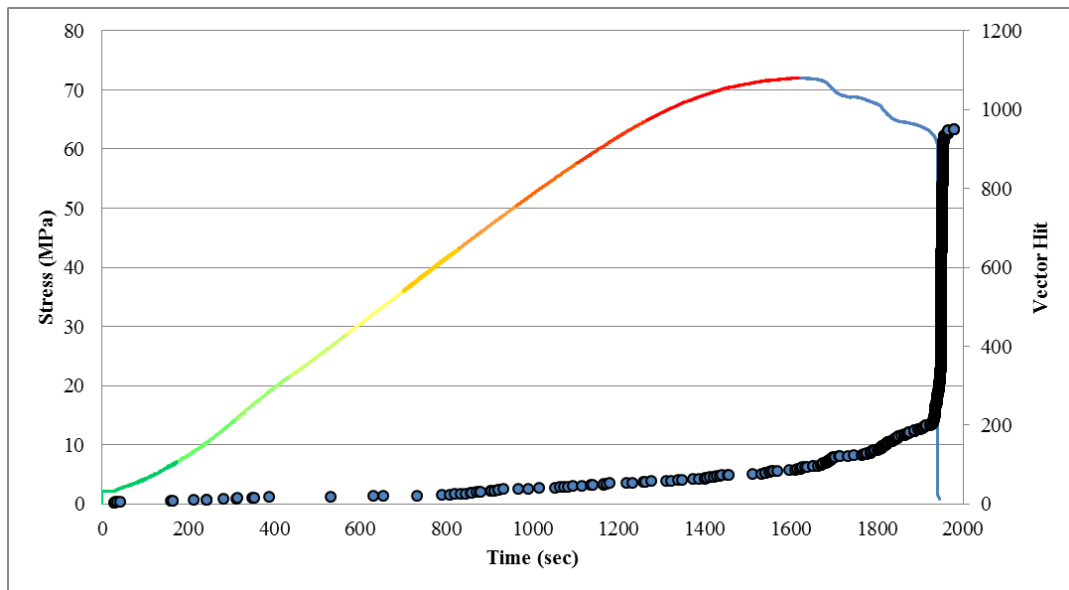
Σχήμα 105 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



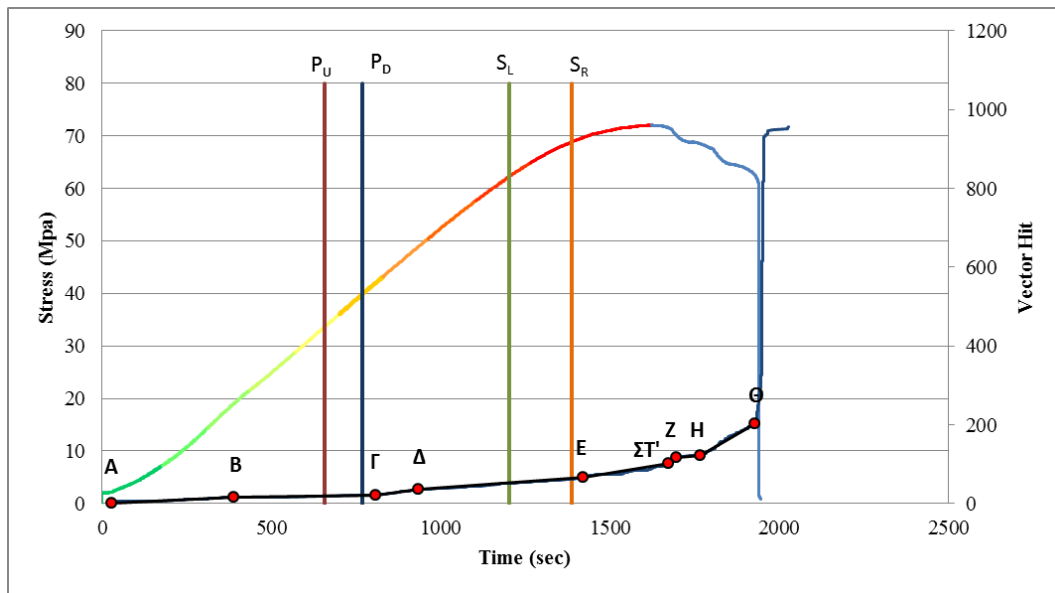
Σχήμα 106 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 107 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 108 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 63 - Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Ανοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	36	7	0
20	37	4	0
30	36	5	0
40	39	1	0
50	37	2	0
60	38	4	0
70	39	13	0
80	37	8	0
90	37	11	0
100	38	32	0

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

Κλίση AB: 0,041

Κλίση ΒΓ: 0,014

Κλίση ΓΔ: 0,11

Κλίση ΔΕ: 0,063

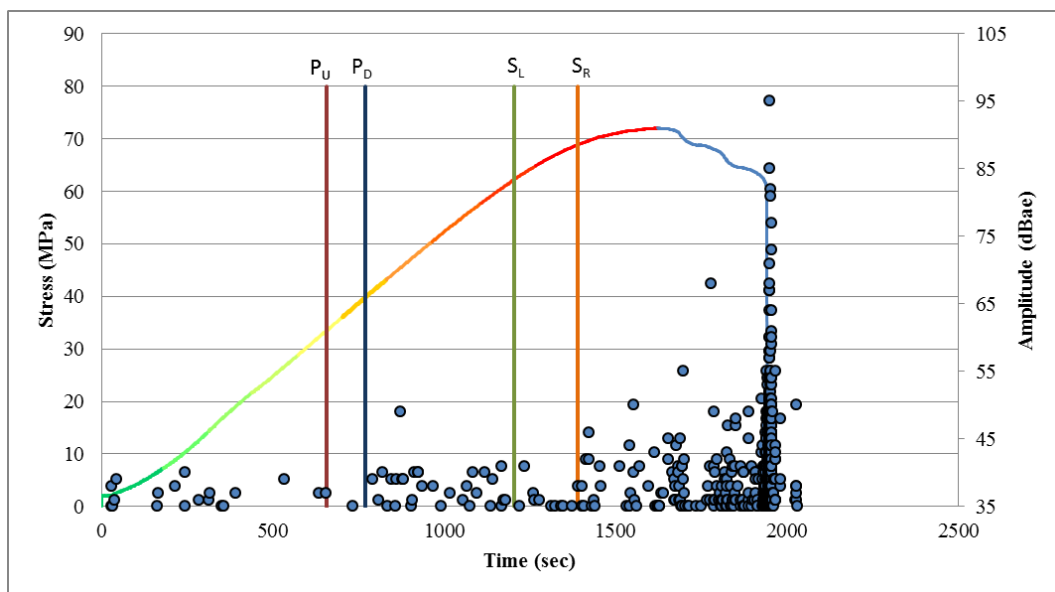
Κλίση ΕΣΤ': 0,134

Κλίση ΣΤΖ: 0,632

Κλίση **ZH**: 0,102

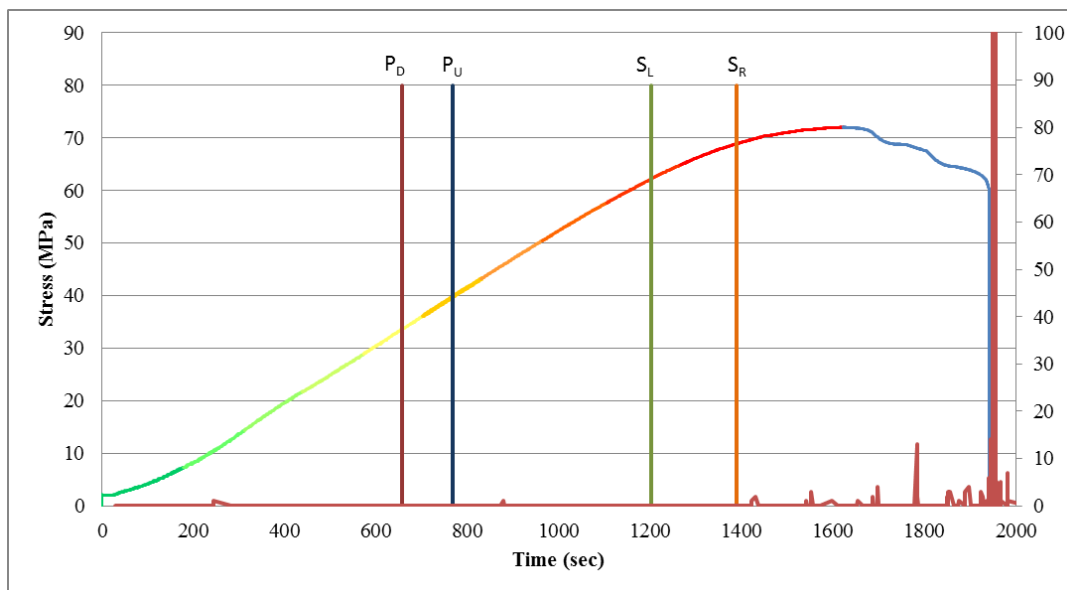
Κλίση **HΘ**: 0,486

Συμπέρασμα: Από τον πίνακα 63 παρατηρούμε πως το μέσο πλάτος των σημάτων αυξάνεται κυρίως στο τμήμα 30-70% μ.α. με μέσο πλάτος τα 38,25 dBae. Ωστόσο μέσα σε αυτό το τμήμα παρατηρήθηκαν οι εφελκυστικές ρωγμές όπως φαίνεται και στο διάγραμμα. Όσον αφορά τις κλίσεις των παραπάνω τμημάτων παρατηρούμε μια μικρή ανάπτυξη σημάτων από το σημείο Δ μέχρι το τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 109 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

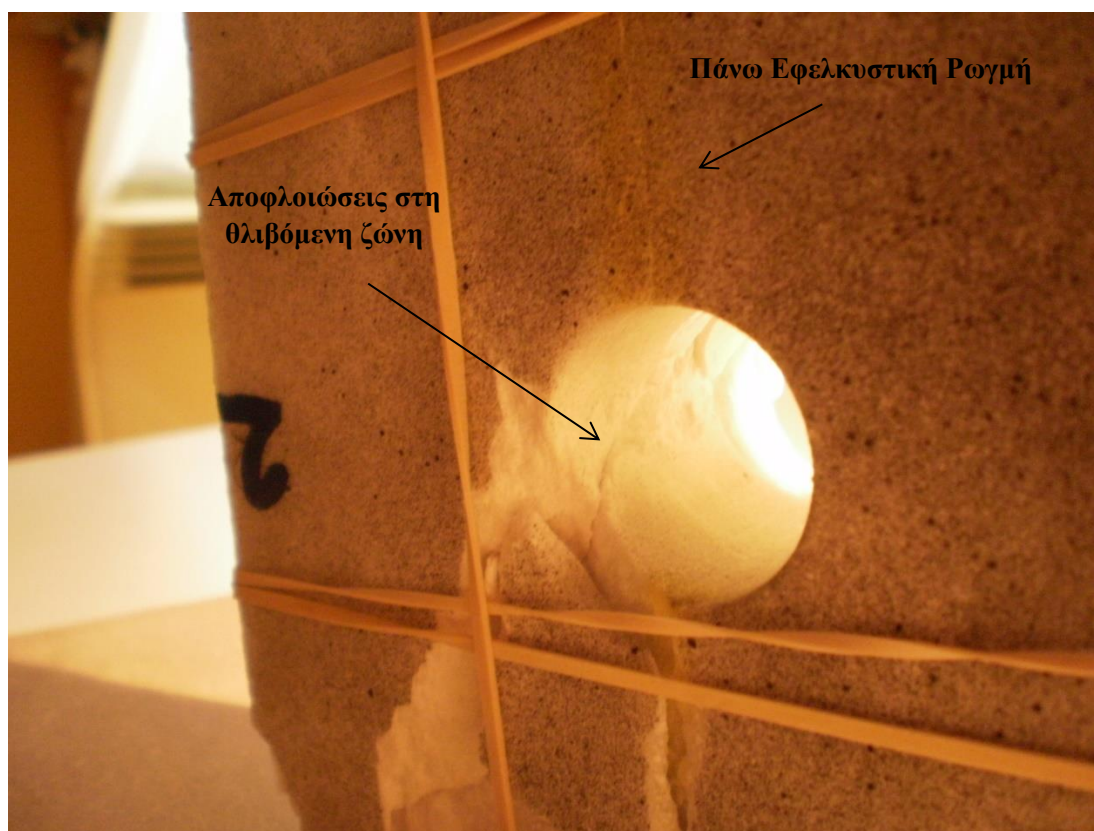
Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε υψηλή συγκέντρωση σημάτων υψηλού μέσου πλάτους αμέσως μετά την παρατήρηση της κάτω εφελκυστικής ρωγμής και μετά την εμφάνιση της δεξιά διατμητικής ρωγμής βλέπουμε να αναπτύσσονται κάποια σήματα με αρκετά μεγαλύτερο πλάτος (45-50 dBae) .



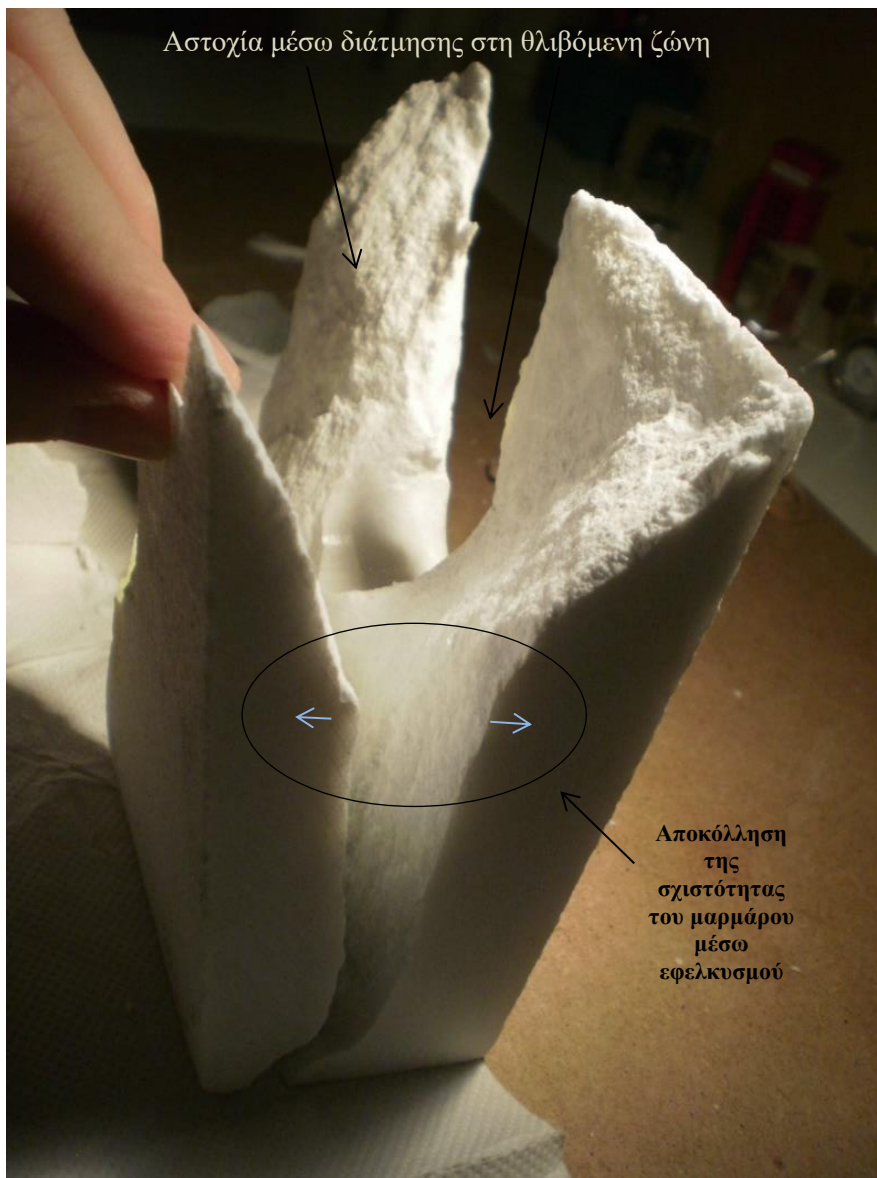
Σχήμα 110 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση δεν παρατηρούμε αρκετά peaks έκλυσης ενέργειας κοντά στα χρονικές στιγμές που παρατηρήθηκαν οι ρωγμές στο δοκίμιο.

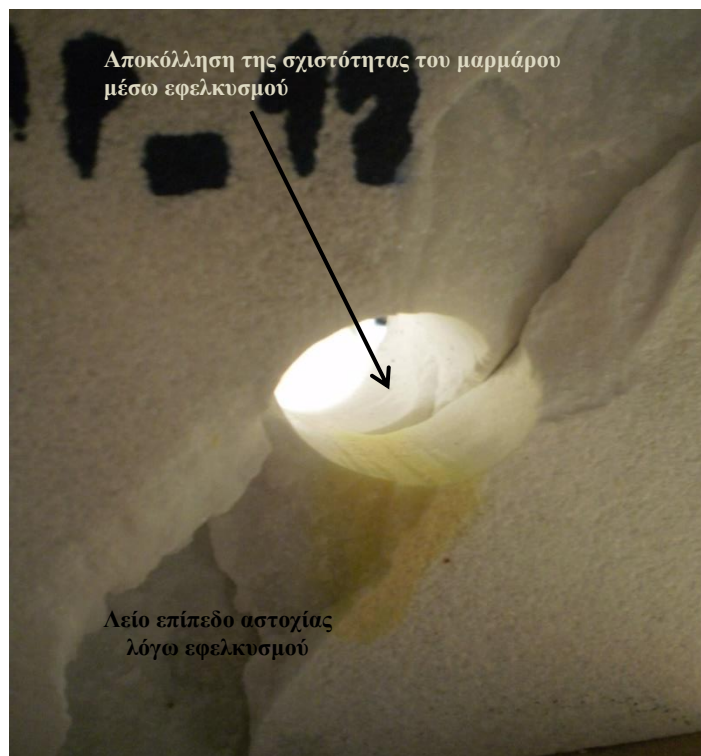
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



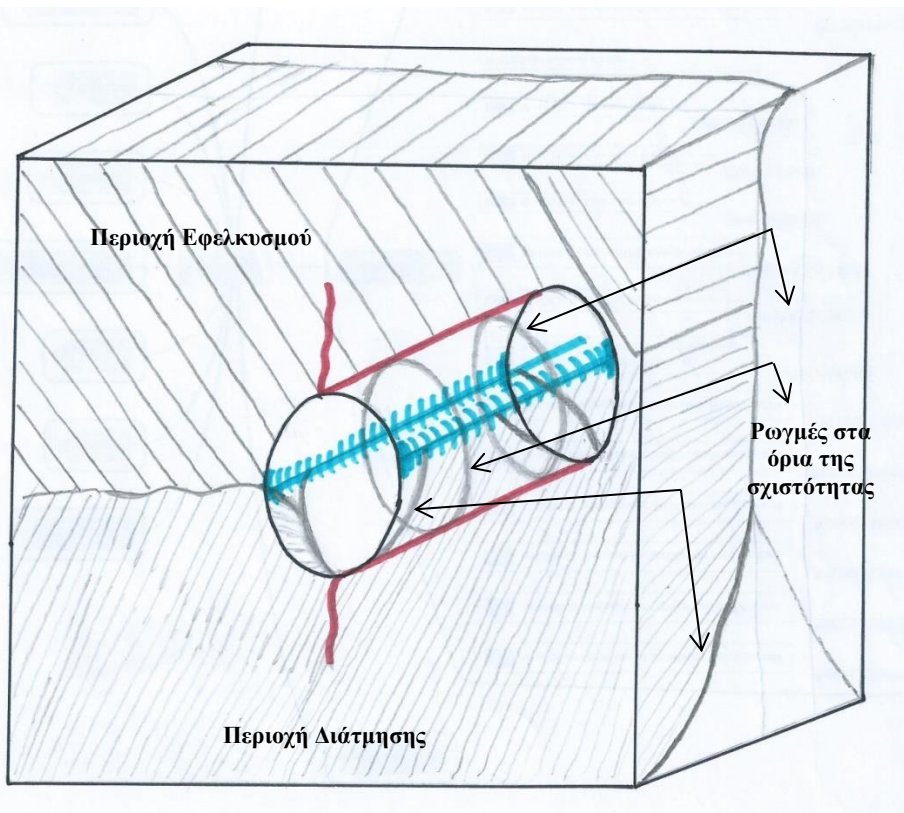
Εικόνα 77 – Εφελκυστικές και θλιπτικές ρωγματώσεις του δοκιμίου



Εικόνα 78 - Θραύση του δοκιμίου



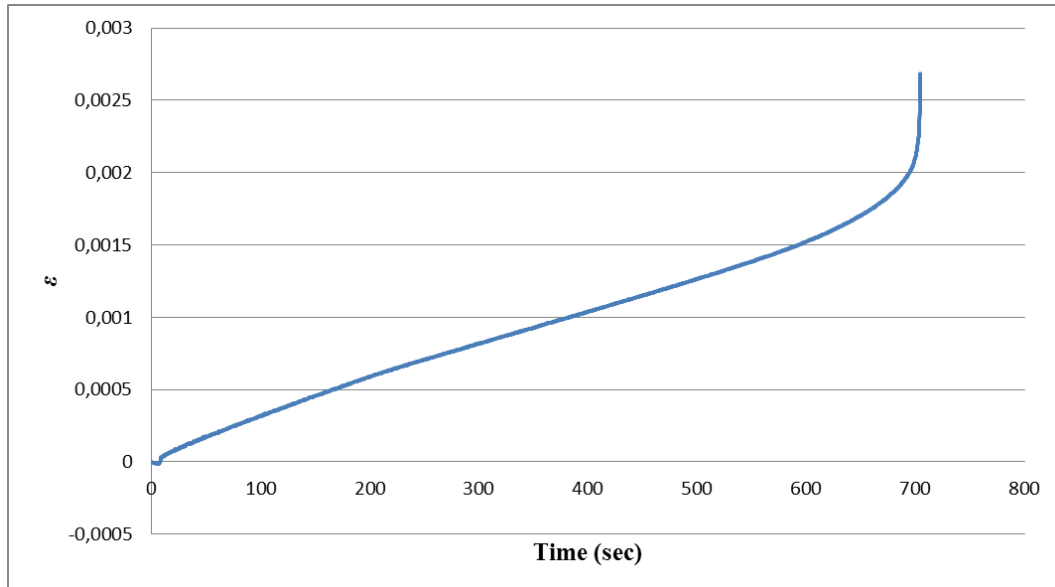
Εικόνα 79 - Επίπεδα αστοχίας του δοκιμίου



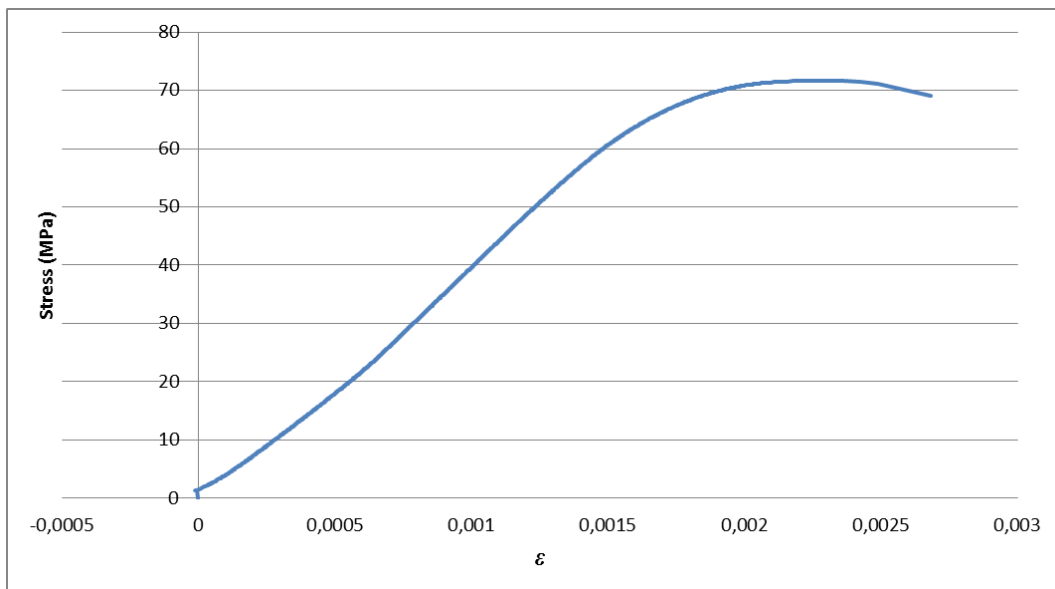
Εικόνα 80 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.4 2^η πλάκα με οπή (3 cm)

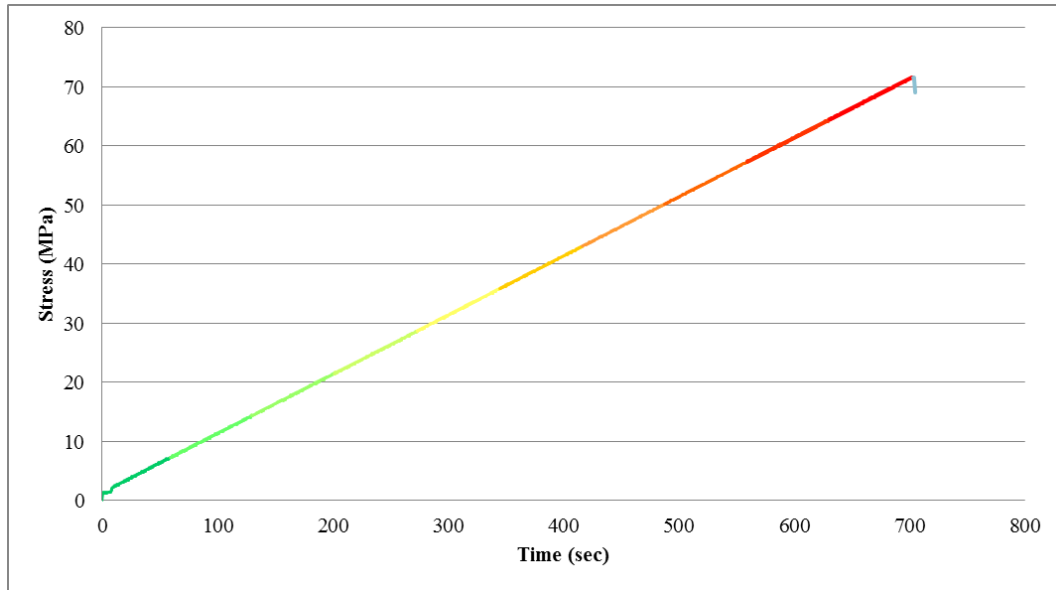
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο φορτίου και συγκεκριμένα με ρυθμό 750 (N/sec). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 79,2 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 111 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



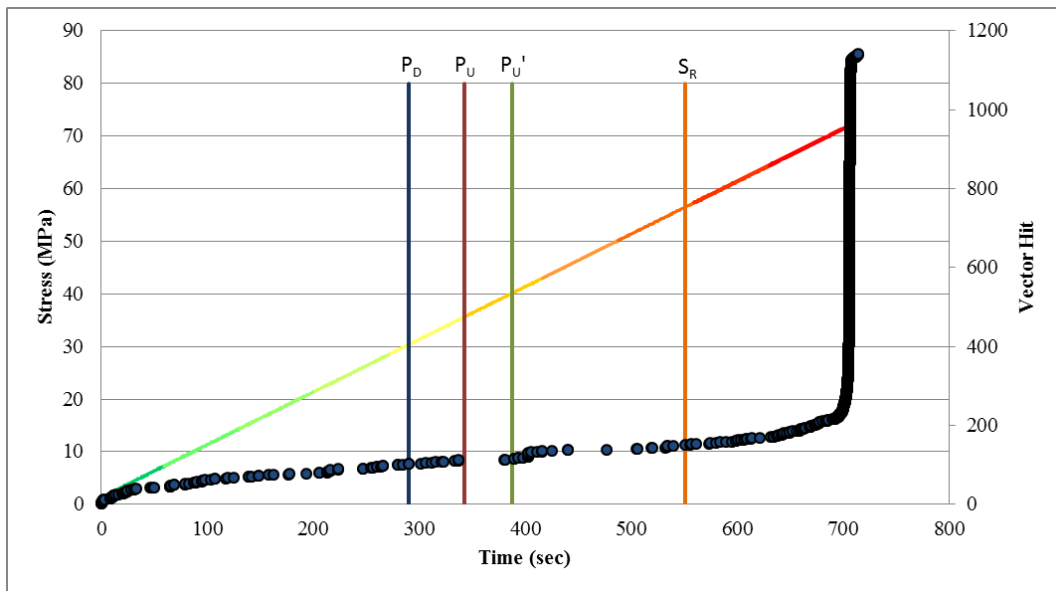
Σχήμα 112 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



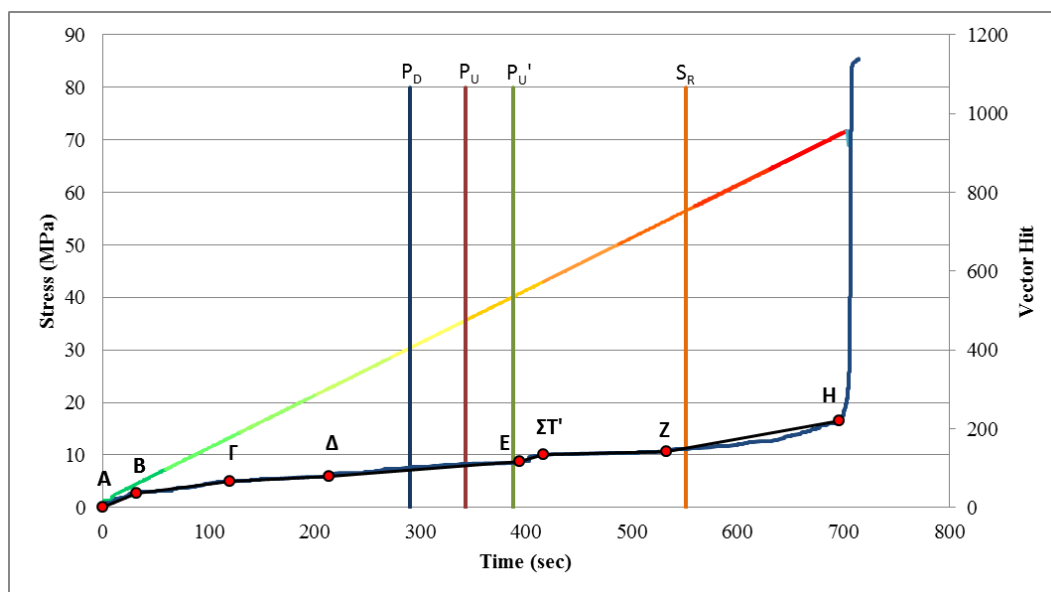
Σχήμα 113 – Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 114 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 115 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 64 - Μέση τιμή του πλάτους ,μέση τιμής της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	39	42	1
20	39	25	0
30	38	10	0
40	38	20	0
50	36	14	0
60	38	21	2
70	44	6	2
80	40	13	0
90	36	17	0
100	38	99	0

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

Κλίση **ΑΒ**: 5,49

Κλίση **ΒΓ**: 0,34

Κλίση **ΓΔ**: 0,138

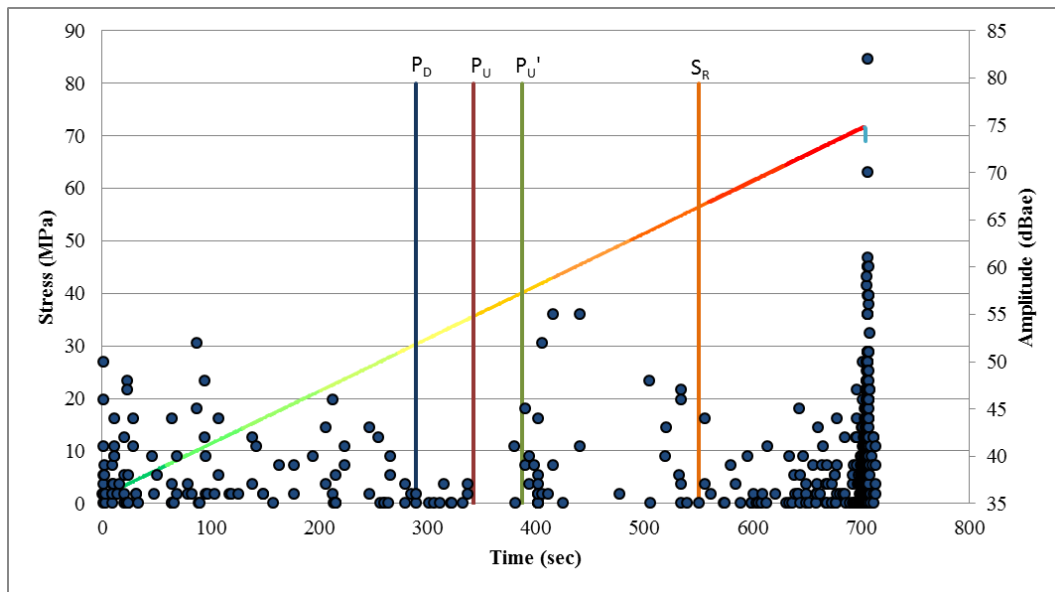
Κλίση **ΔΕ**: 0,199

Κλίση **ΕΣΤ'**: 0,836

Κλίση **ΣΤΖ**: 0,068

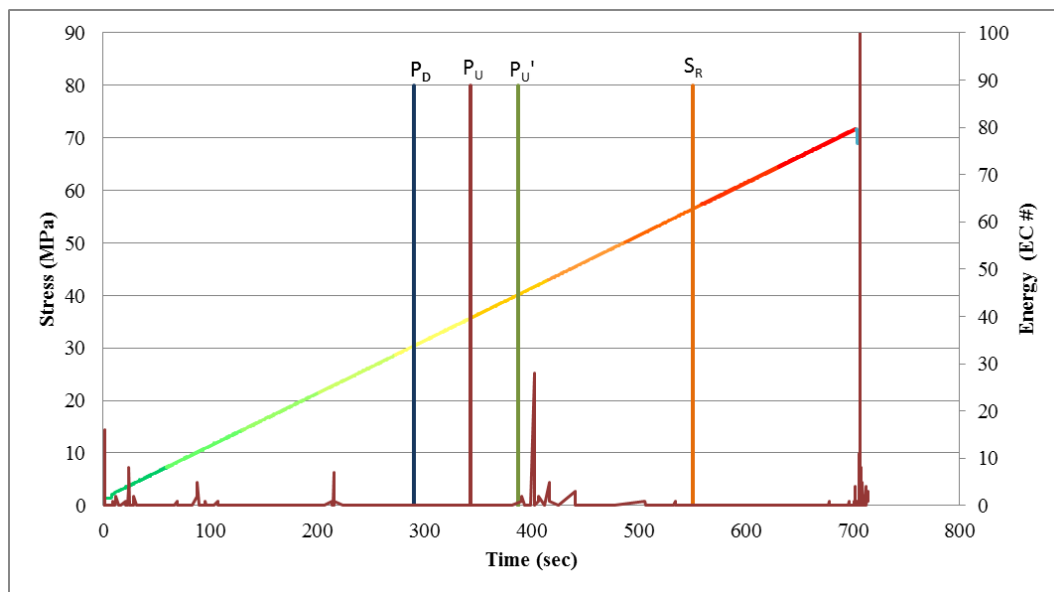
Κλίση **ΖΗ**: 0,472

Συμπέρασμα: Εξετάζοντας τις τιμές του μέσου πλάτους ανά τμήμα μέγιστης αντοχής παρατηρούμε μια σημαντική αύξηση του μέσου πλάτους στο τμήμα από 50-80% μ.α. Σε αυτό το τμήμα παρατηρήθηκαν επίσης και οι ρωγμές (P_U , P_U' , S_R). Όσον αφορά τις κλίσεις των παραπάνω τμημάτων παρατηρούμε πως κοντά στο 68% μ.α. (40,48 MPa) εμφανίζεται μια απότομη αύξηση σημάτων (ΕΣΤ') η οποία χρονικά βρίσκεται αμέσως μετά την παρατήρηση της P_U ρωγμής. Τέλος στο σημείο Z ξεκινάει μια άλλη σταδιακή ανάπτυξη σημάτων η οποία χρονικά συμπίπτει με την παρατήρηση της S_R ρωγμής.



Σχήμα 116 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε πως στη ρωγμή P_U υπάρχει έντονη συγκέντρωση σημάτων με αρκετά μεγάλο πλάτος (35-57 dBae) και τέλος κοντά στη ρωγμή S_R υπάρχει επίσης έντονη ανάπτυξη σημάτων με μεγάλο πλάτος (35-47 dBae).



Σχήμα 117 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε κυρίως κάποια έντονα peaks έκλυσης ενέργειας κοντά στην εμφάνιση της $P_{U'}$ ρωγμής.

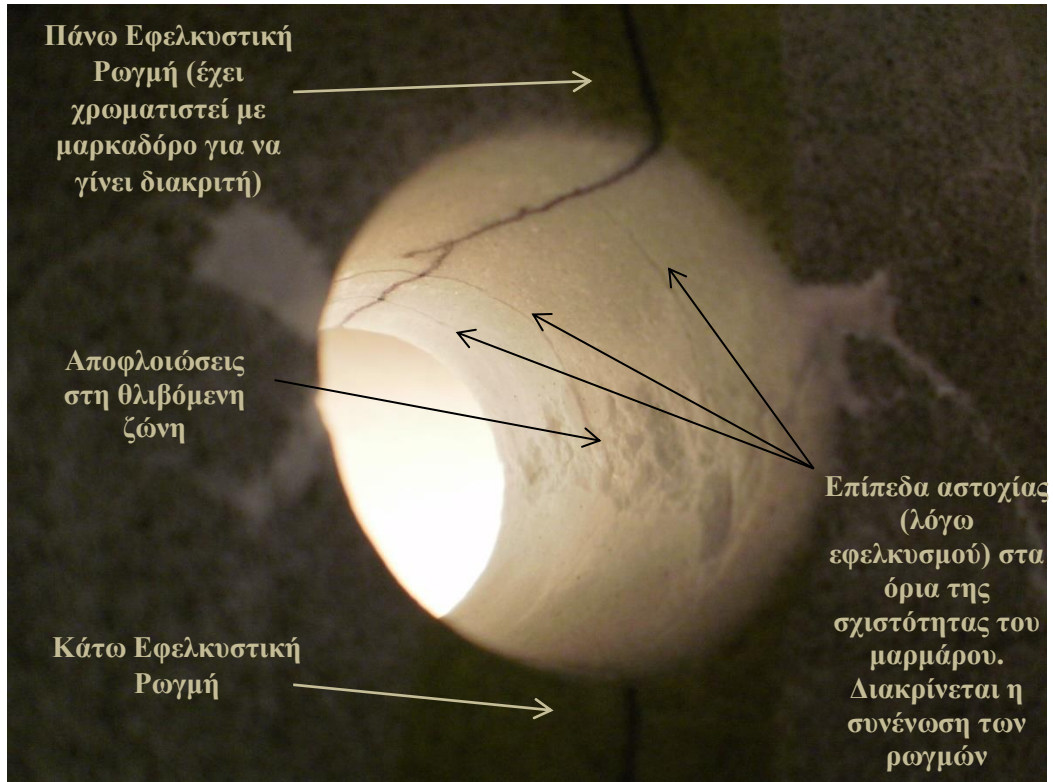
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



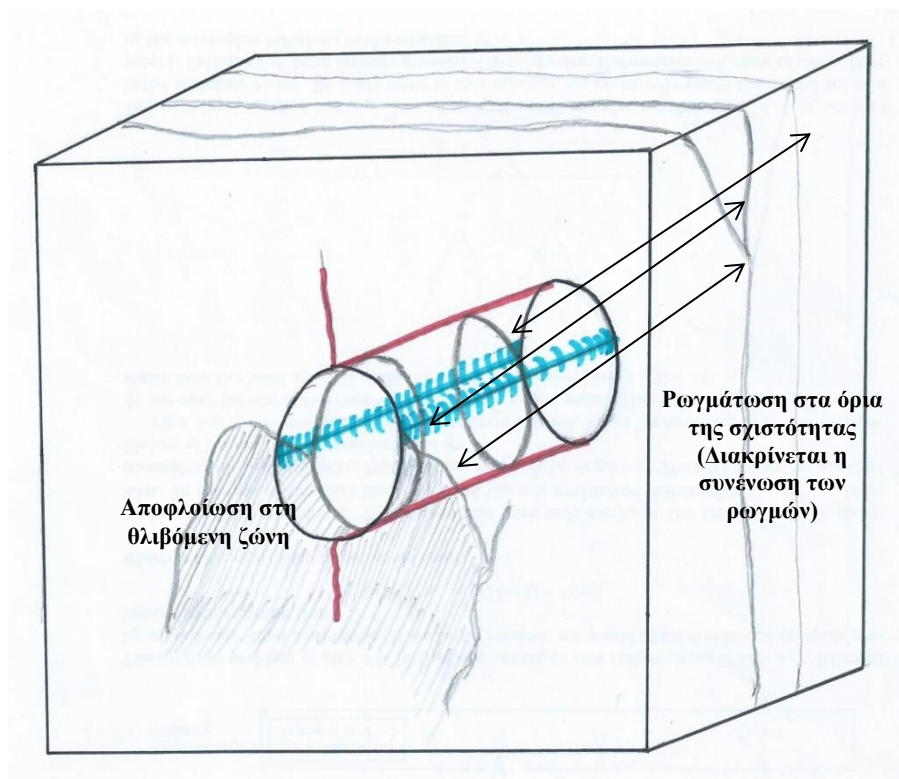
Εικόνα 81 - Ρωγμάτωση στα όρια της σχιστότητας του μαρμάρου



Εικόνα 82 - Ρωγμάτωση στα όρια της σχιστότητας του μαρμάρου



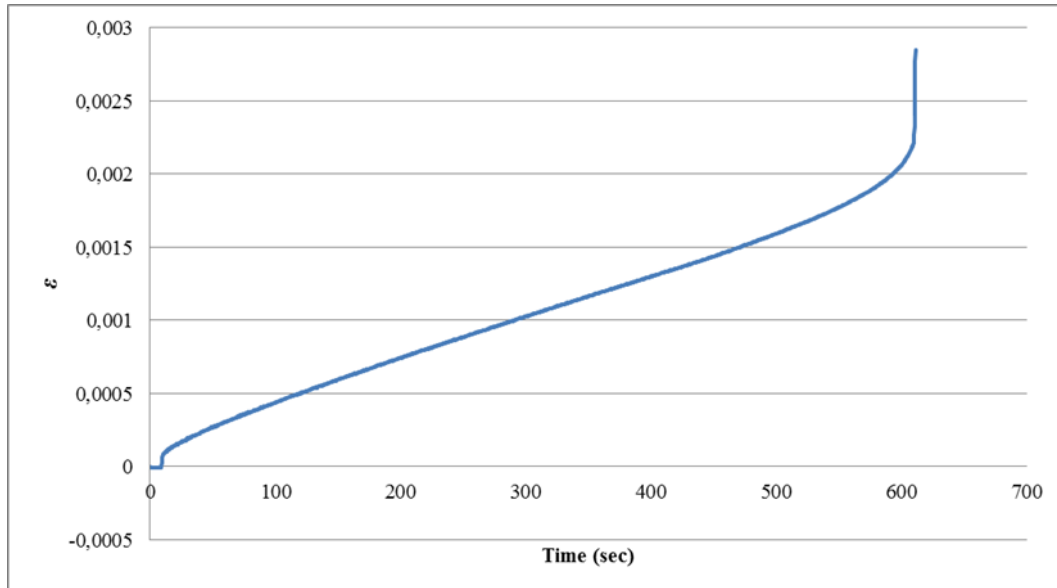
Εικόνα 83 - Ρωγμάτωση στην οπή του δοκιμίου



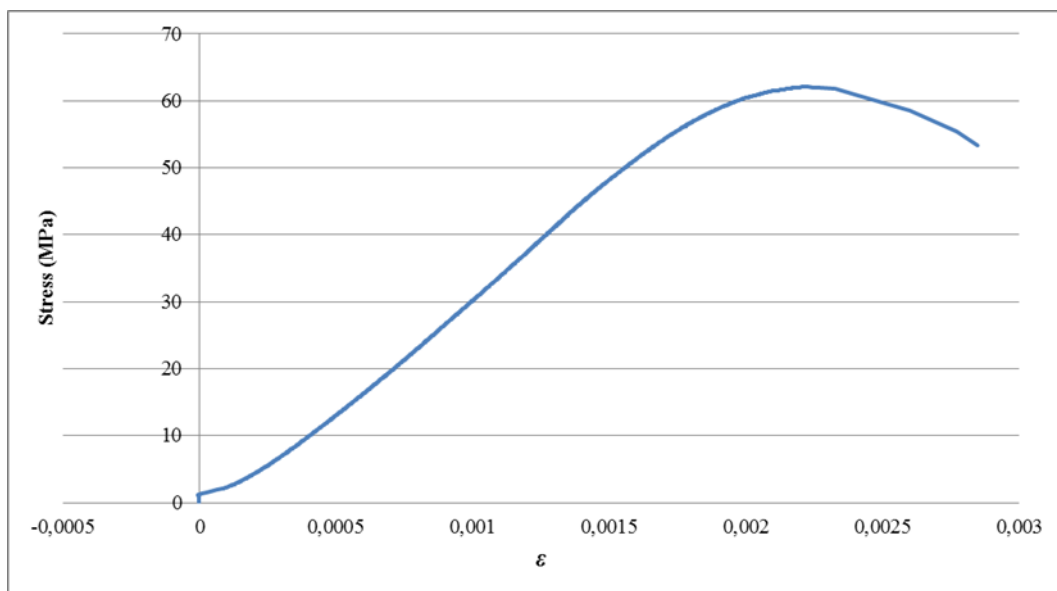
Εικόνα 84 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.5 1^η πλάκα με οπή (4 cm)

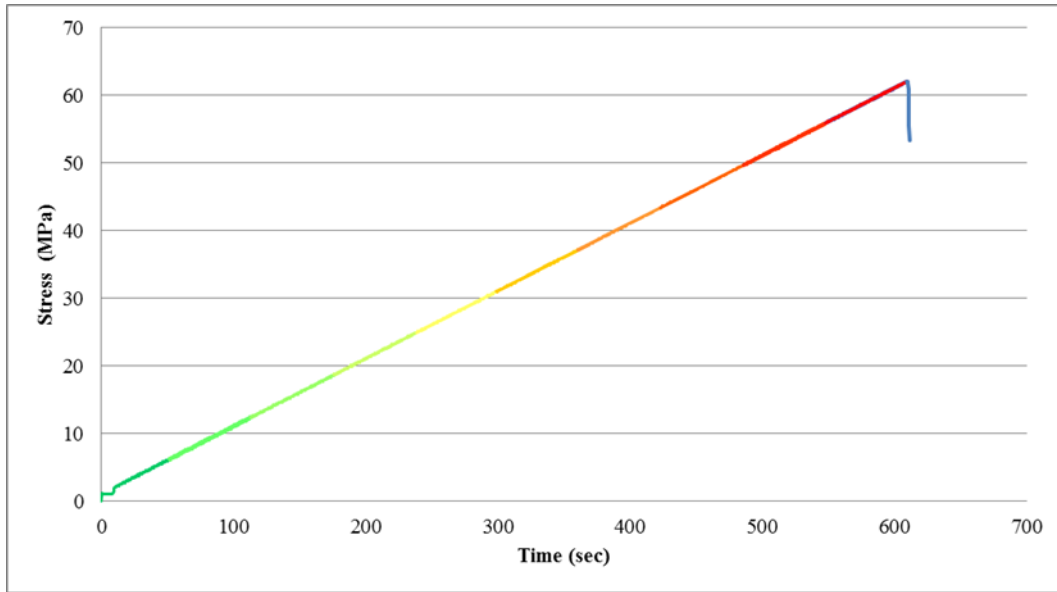
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο φορτίου και συγκεκριμένα με ρυθμό 750 (N/sec). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 62.1 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 118 - Διάγραμμα Ανηγγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



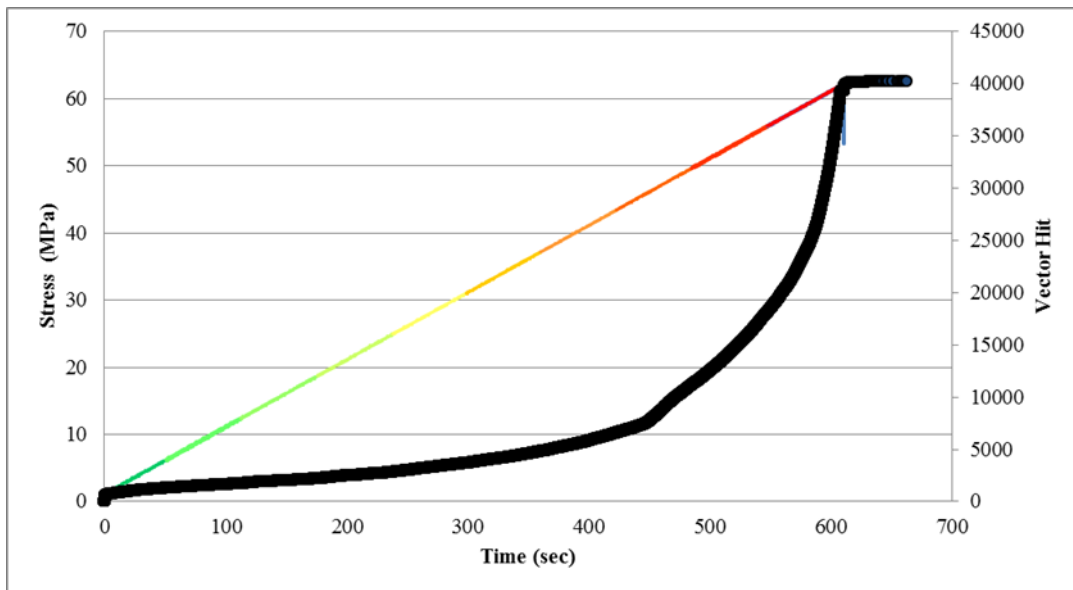
Σχήμα 119 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγγμένης Παραμόρφωσης



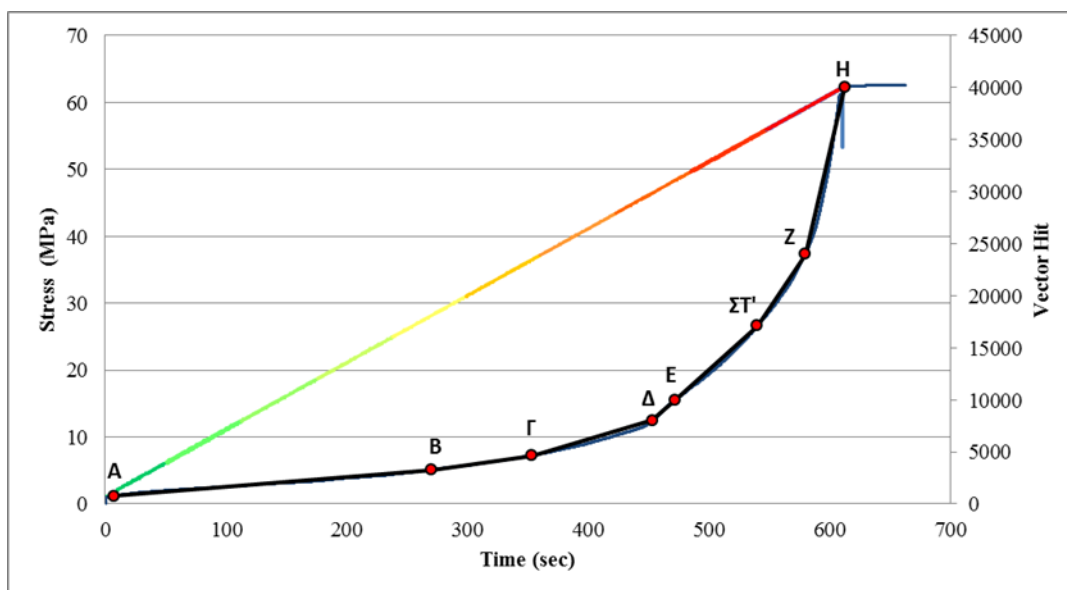
Σχήμα 120 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 121 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 122 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 65 - Μέση τιμή του πλάτους ,μέση τιμής της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	38	1288	2
20	39	510	1
30	39	449	2
40	39	639	1
50	39	866	0
60	39	1119	0
70	38	1766	0
80	39	4544	1
90	39	7002	5
100	39	19563	1

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

Κλίση **AB**: 9,612

Κλίση **ΒΓ**: 16,334

Κλίση **ΓΔ**: 33,80

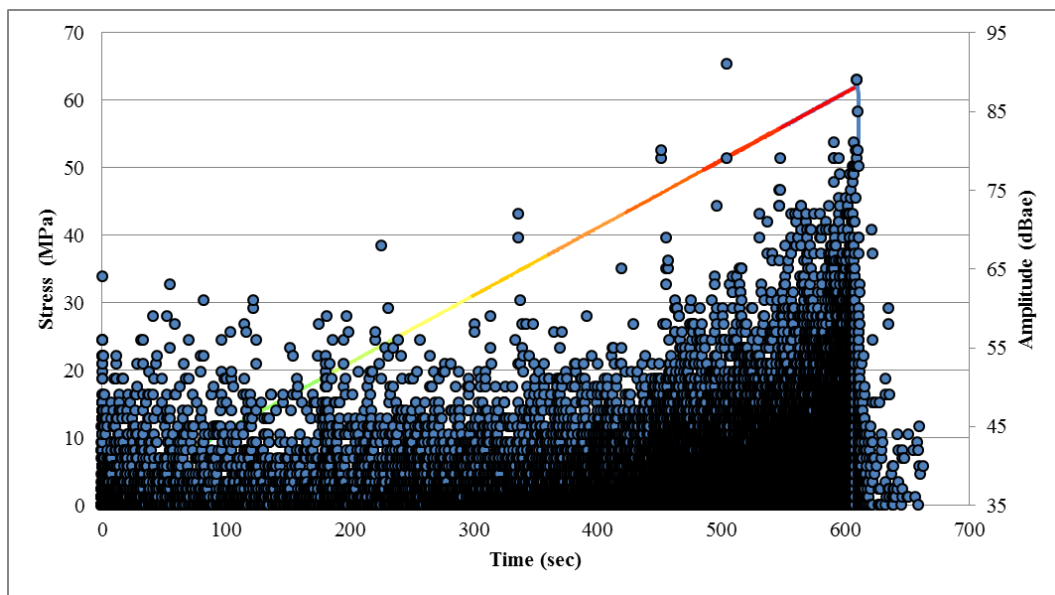
Κλίση **ΔΕ**: 104,54

Κλίση **ΕΣΤ'**: 104,19

Κλίση **ΣΤ'Ζ**: 174,22

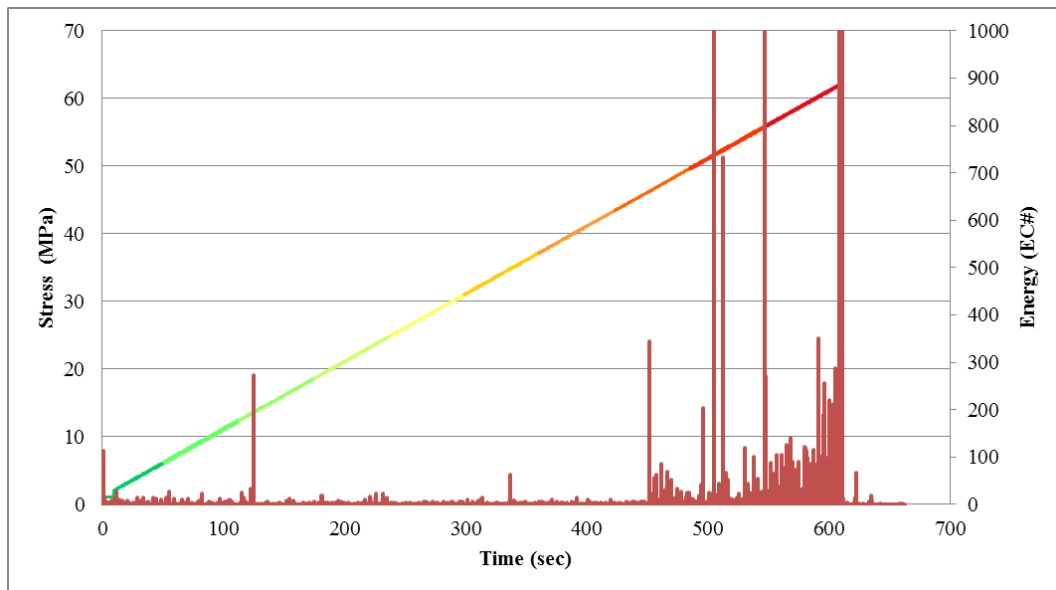
Κλίση **ΖΗ**: 485,29

Συμπέρασμα: Εξετάζοντας τις τιμές του μέσου πλάτους ανά τμήμα φορτίου δεν παρατηρούμε σημαντικές διαβαθμίσεις. Όσον αφορά τις κλίσεις των παραπάνω ευθύγραμμων τμημάτων παρατηρείται σταδιακή ανάπτυξη των σημάτων στο σημείο Γ (58% μ.α. 37,21 MPa) η οποία προοδευτικά αυξάνεται μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Εξετάζοντας τις τιμές της μέσης ενέργειας παρατηρούμε έντονες διαβαθμίσεις απ το 70% μ.φ.-100% μ.α. γεγονός το οποίο πιθανώς σχετίζεται με την έναρξη ρωγμών.



Σχήμα 123 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

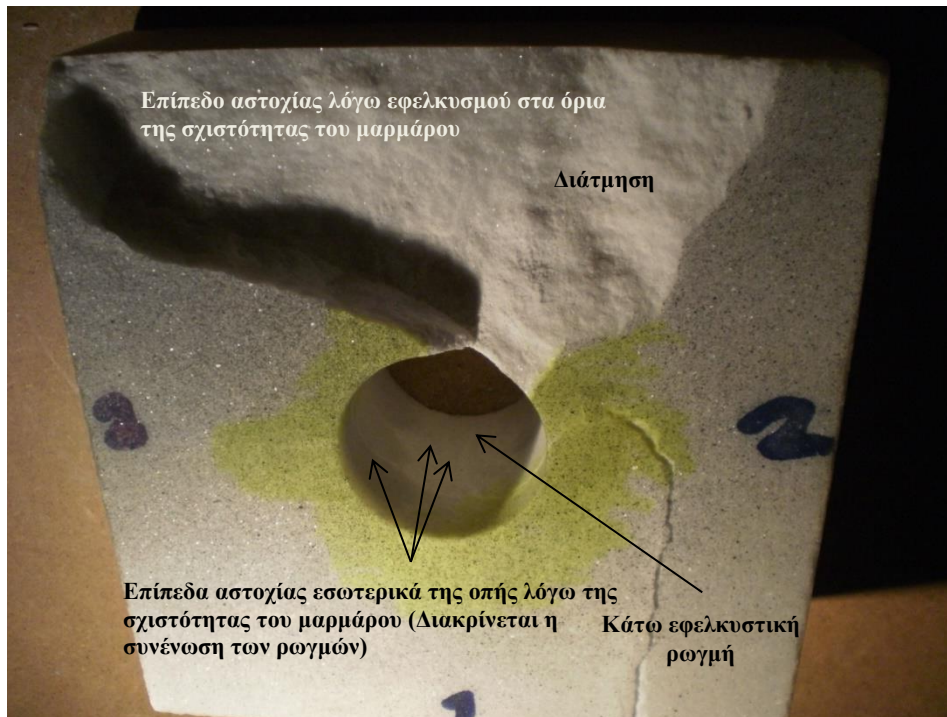
Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε αρκετά σήματα υψηλού πλάτους απ το 60% μ.α. και μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.



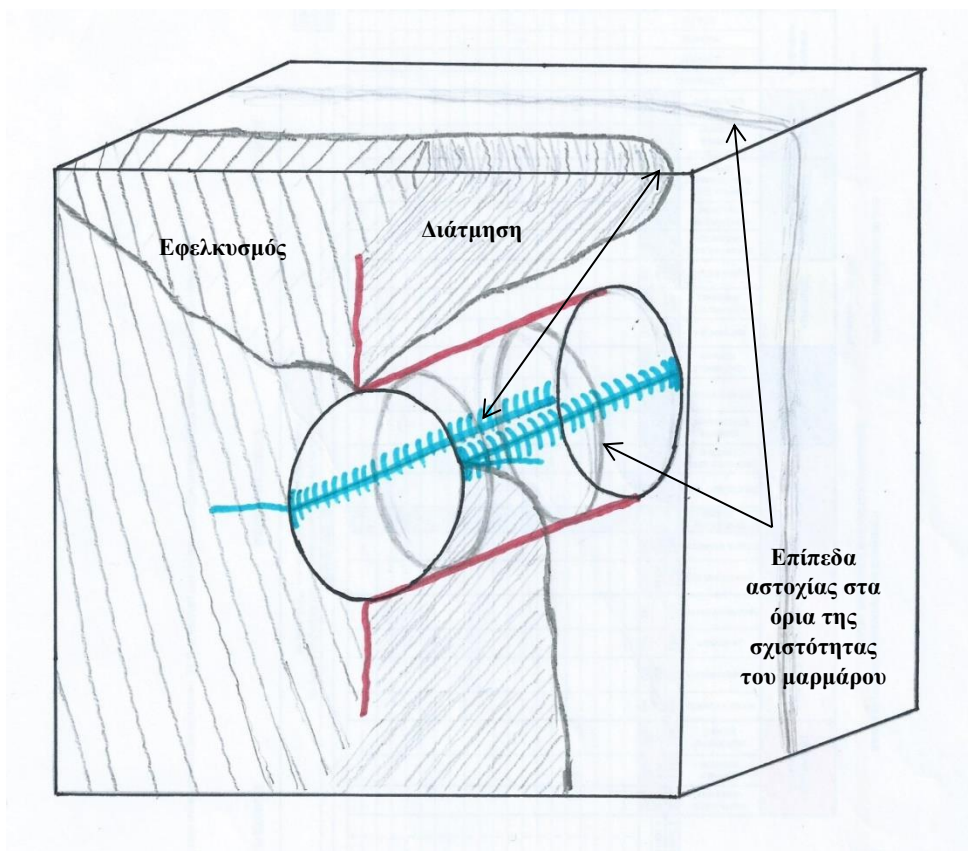
Σχήμα 124 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε ένα έντονο peak έκλυσης ενέργειας στο 23% μ.φ.(15 MPa) και στη συνέχεια παρατηρούμε αρκετά και μεγάλα peaks απ το 74% μ.α. (45,82 MPa) έως τη θραύση του δοκιμίου.

Φωτογραφική Τεκμηρίωση



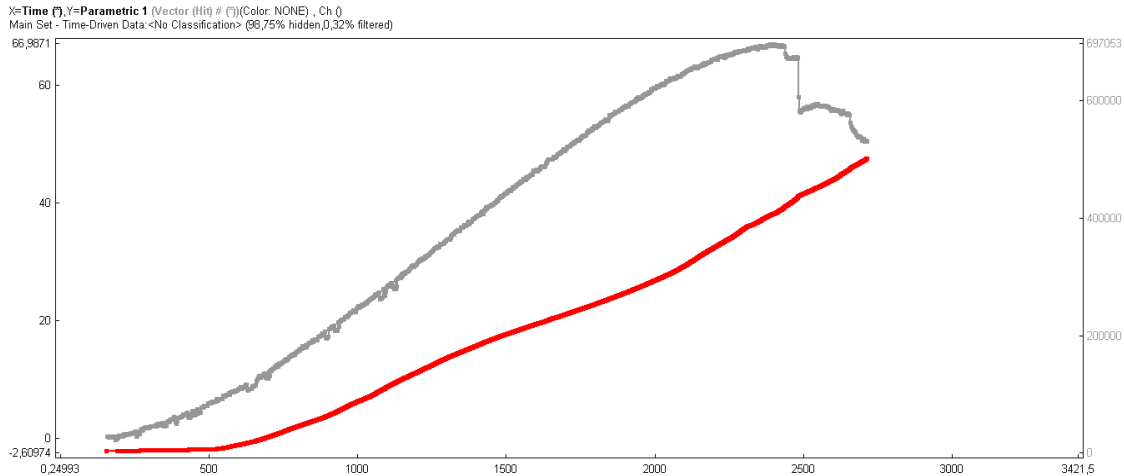
Εικόνα 85 - Επίπεδα αστοχίας του δοκιμίου



Εικόνα 86 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

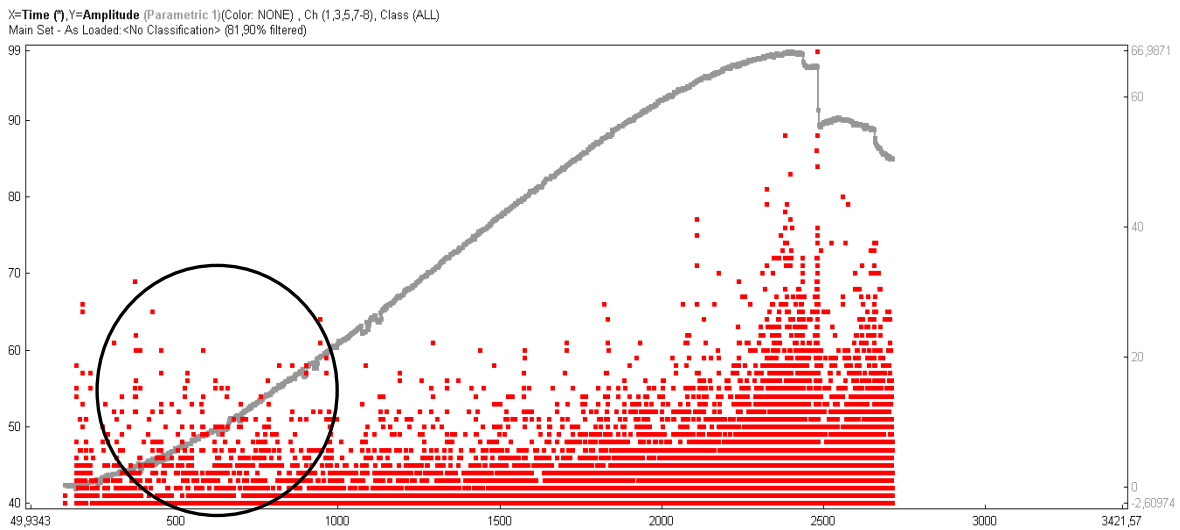
5.5.6 2^η πλάκα με οπή (4 cm)

Η δοκιμή έγινε με έλεγχο μετατόπισης και συγκεκριμένα με ρυθμό 10 (μm/min). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 66.9 MPa. Εξ αιτίας ενός σφάλματος που παρουσιάστηκε κατά την αποθήκευση του αρχείου με τα δεδομένα της πρέσας η παρούσα πλάκα αναλύθηκε μόνο με τα δεδομένα που συλλέξαμε απ το πρόγραμμα AE win. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα απ το πρόγραμμα Noesis.



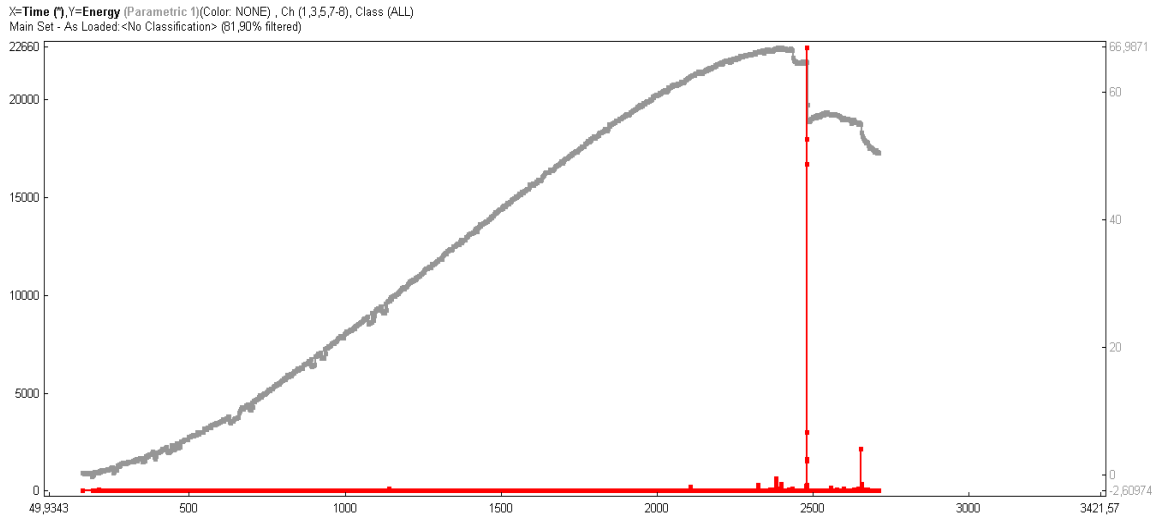
Σχήμα 125 - Εμφάνιση όλων των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Συμπέρασμα: Παρατηρούμε αρχικά αύξηση των σημάτων κυρίως απ τα 6 MPa έως τα 40 MPa. Στα 12 MPa παρατηρήθηκε μέσω DIC η κάτω εφελκυστική ρωγμή και στα 19,26 MPa η πάνω εφελκυστική ρωγμή. Στη συνέχεια ο ρυθμός αύξησης σημάτων μειώνεται λίγο μέχρι τα 58 MPa και έπειτα μέχρι τη μέγιστη αντοχή του δοκιμίου παρουσιάζεται έντονη ανάπτυξη σημάτων.



Σχήμα 126 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Στην περιοχή που αναπτύχθηκαν οι ρωγμές (μαύρος κύκλος) παρατηρούμε πολλά και υψηλού πλάτους σήματα.

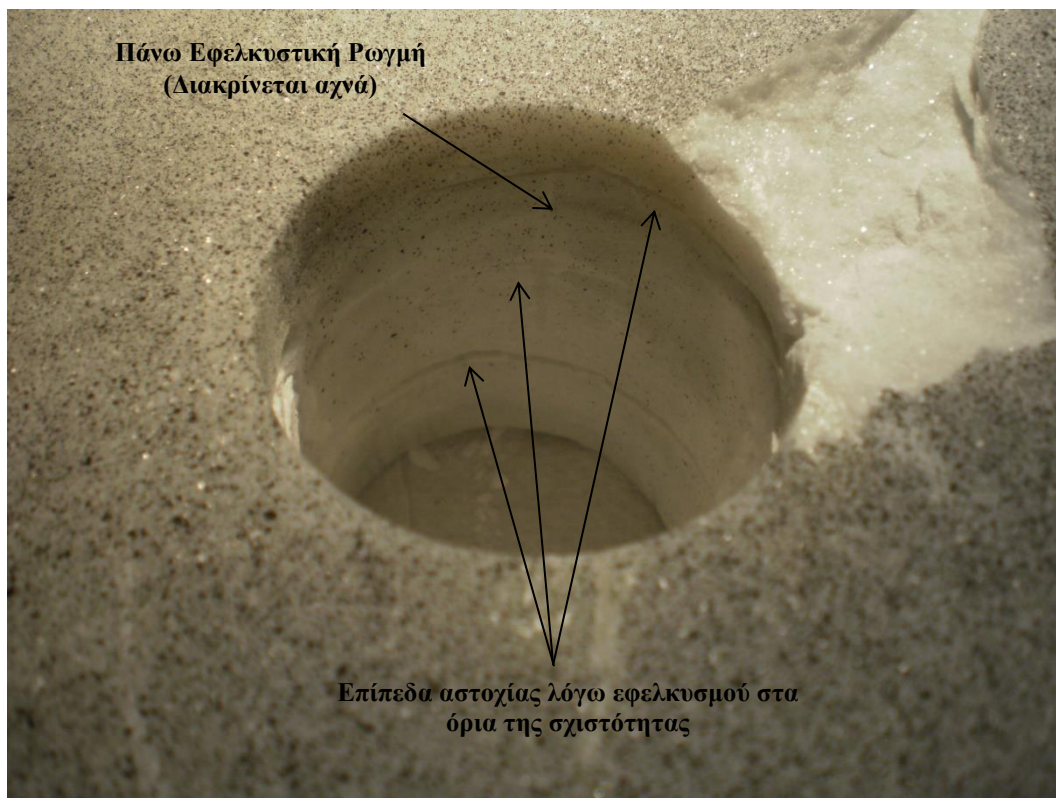


Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση δεν παρατηρούμε έντονα peaks έκλυσης ενέργειας για να μπορέσουμε να τα συσχετίσουμε με τη ρωγμάτωση του υλικού.

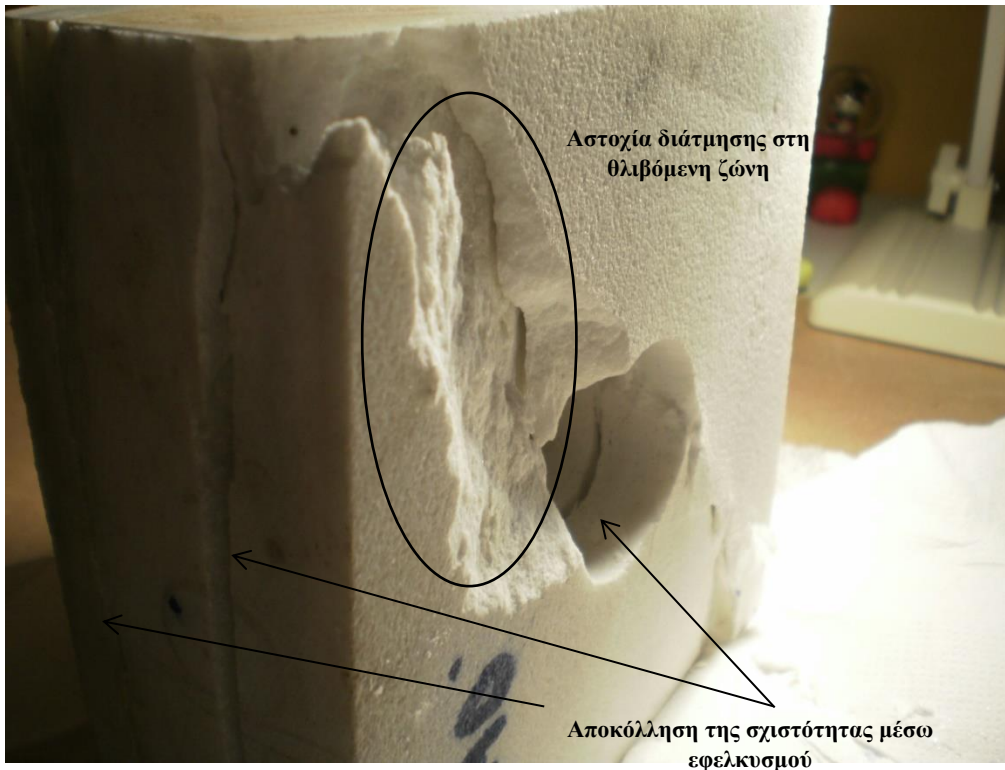
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



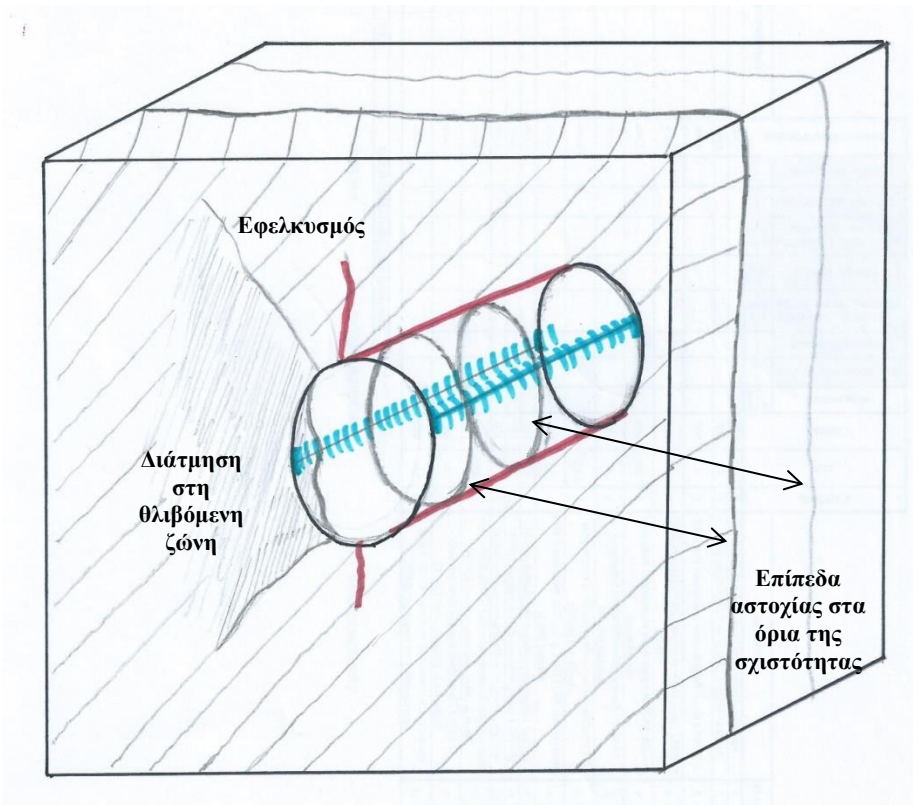
Εικόνα 87 - Χαρακτηριστική αποκόλληση της σχιστότητας του μαρμάρου μέσω εφελκυσμού



Εικόνα 88 - Επίπεδα αστοχίας εντός της οπής



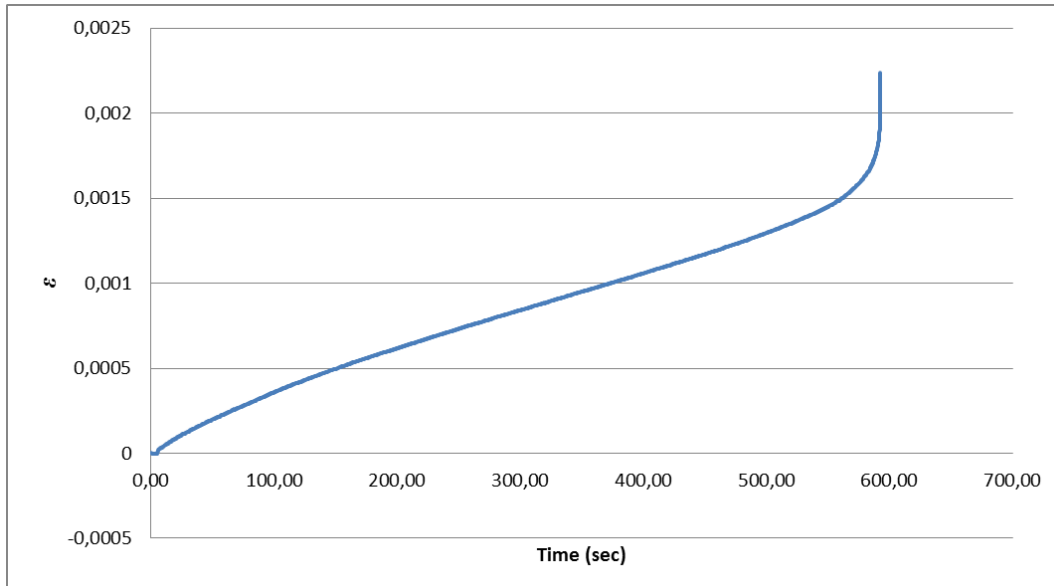
Εικόνα 89 Αποκόλληση της σχιστότητας μέσω εφελκυσμού



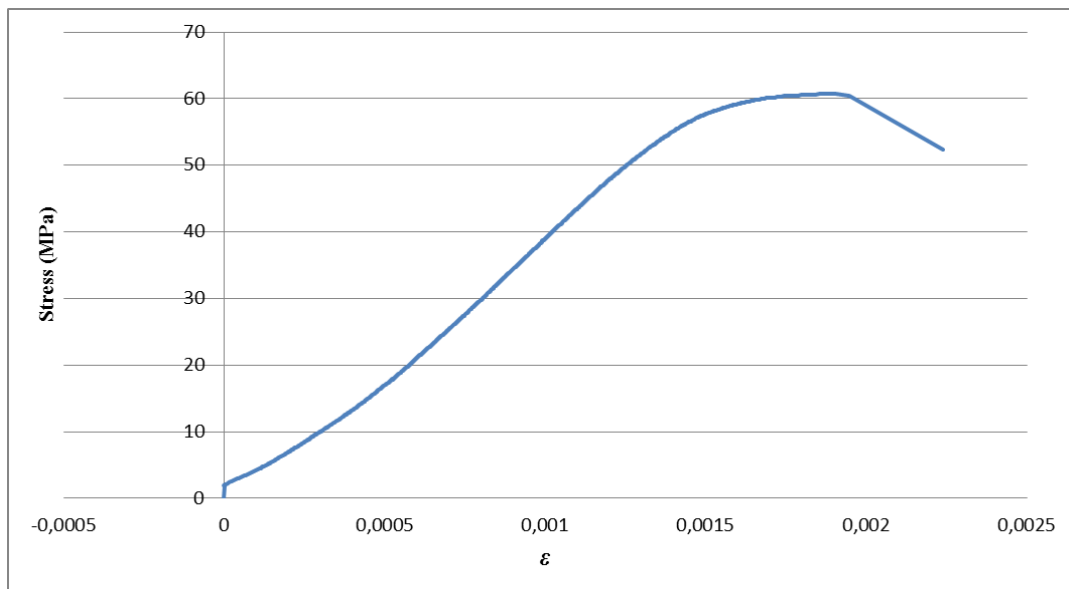
Εικόνα 90 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.7 1^η πλάκα με οπή (3.4 cm)

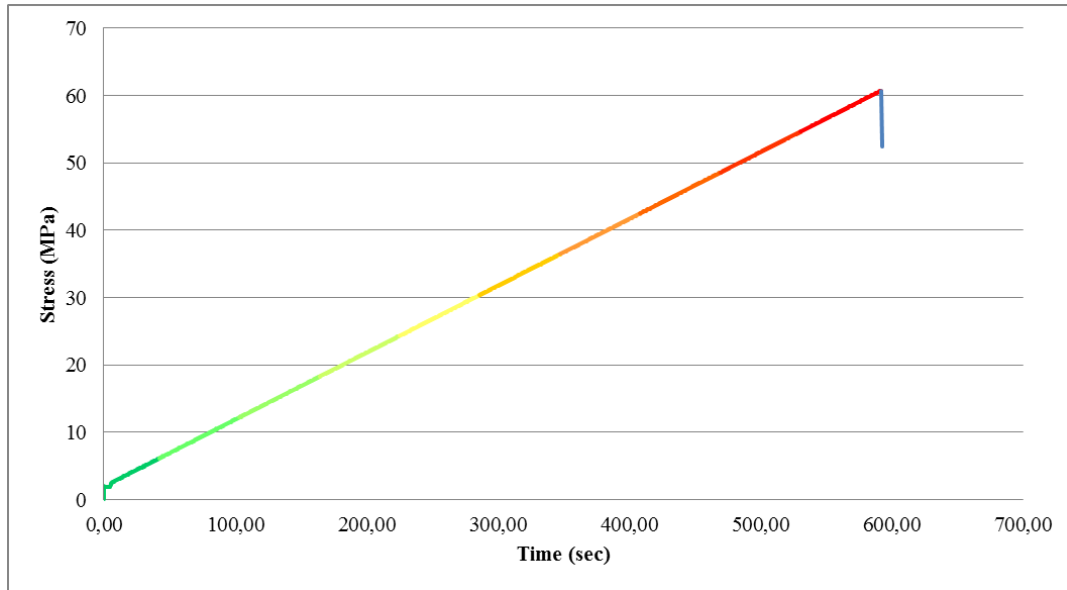
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο φορτίου και συγκεκριμένα με ρυθμό 750 (N/sec). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 60.7 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 128 – Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



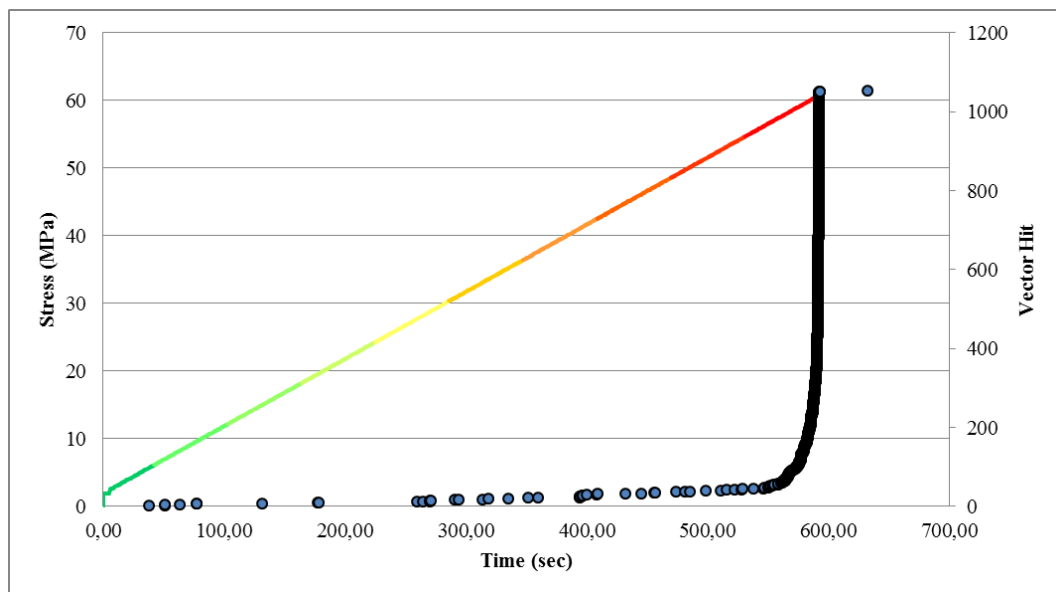
Σχήμα 129 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



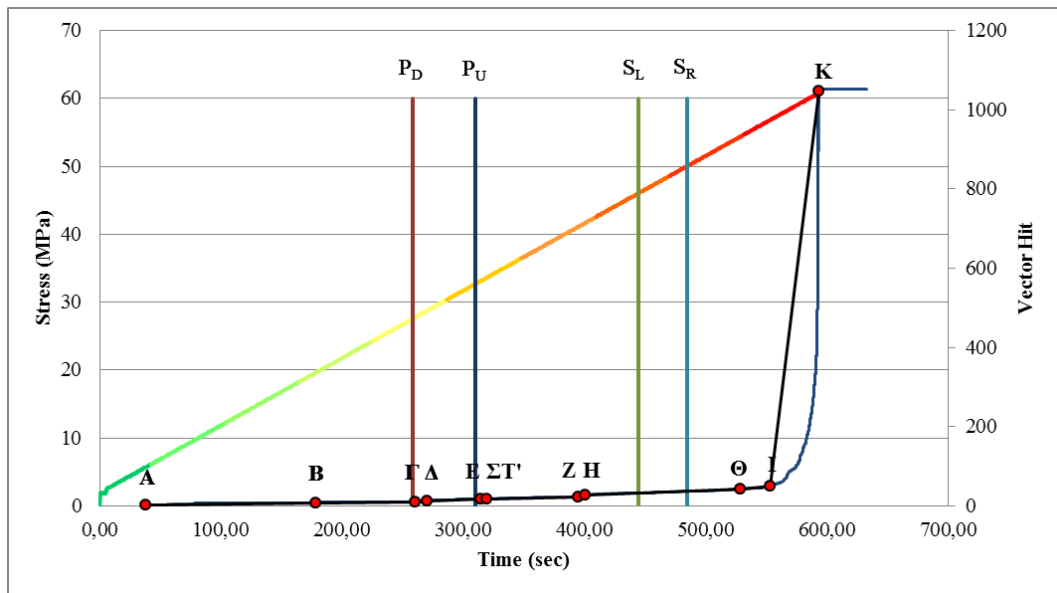
Σχήμα 130 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 131 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 132 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 66 - Μέση τιμή του πλάτους ,μέση τιμής της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	41	1	0
20	42	5	0
30	42	5	0
40	45	2	0
50	42	5	0
60	42	5	0
70	43	9	0
80	42	6	0
90	43	9	0
100	45	440	1

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

Κλίση AB: 0,049

Κλίση ΒΓ: 0,024

Κλίση ΓΔ: 0,2

Κλίση ΔΕ: 0,112

Κλίση ΕΣΤ'Ζ: 0,2

Κλίση ΣΤ'Ζ: 0,066

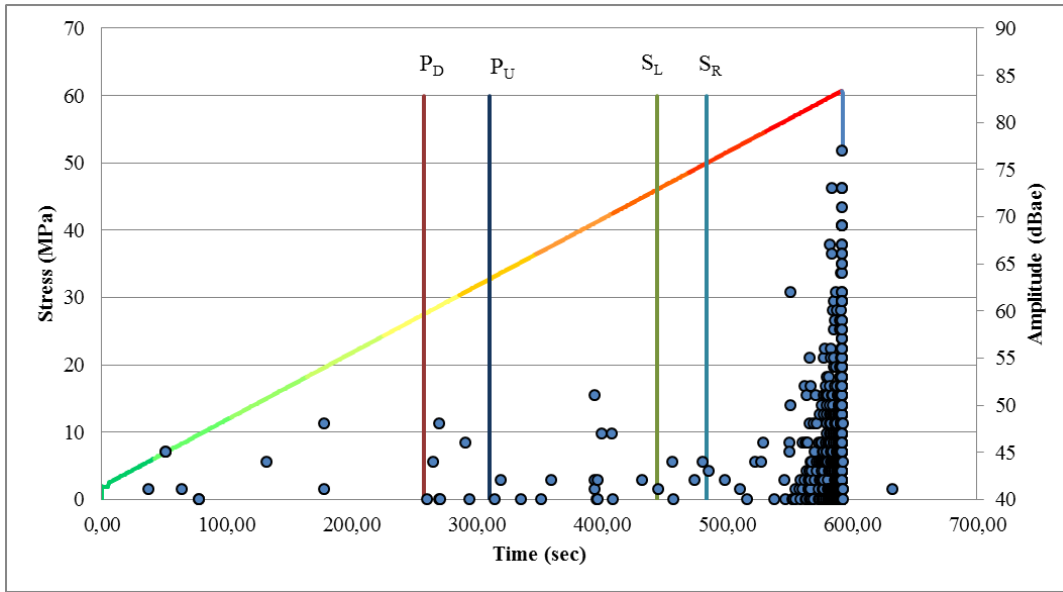
Κλίση **ZH**: 0,938

Κλίση **HΘ**: 0,0109

Κλίση **ΘI**: 0,369

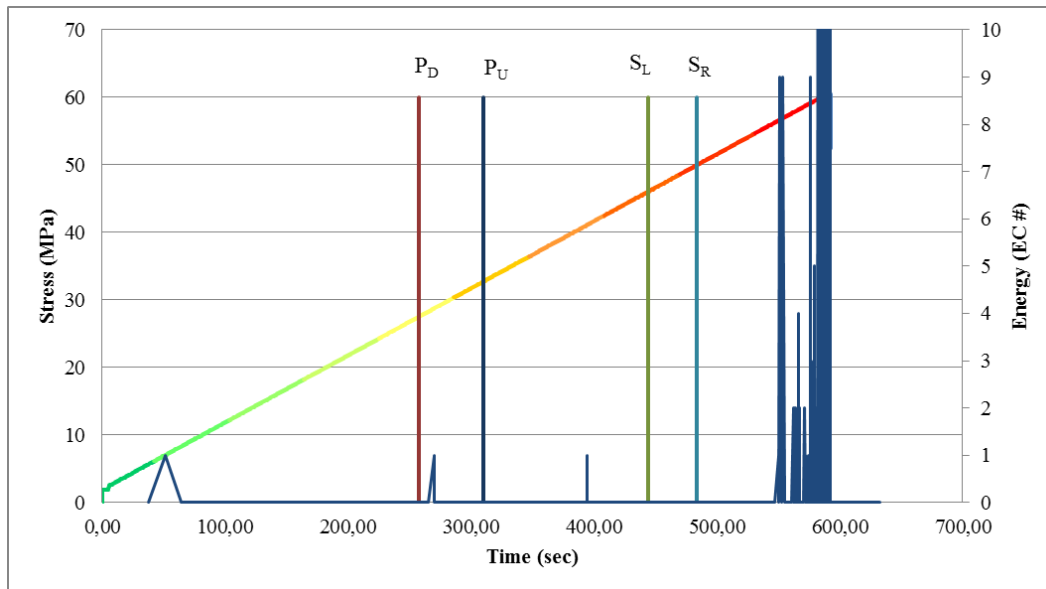
Κλίση **IK**: 24,75

Συμπέρασμα: Εξετάζοντας τις τιμές του μέσου πλάτους ανά τμήμα μέγιστης αντοχής παρατηρούμε μια σημαντική αύξηση του μέσου πλάτους (45 dBae) στο τμήμα από 30-40% μ.α. Ωστόσο αυτή η αύξηση του μέσου πλάτους δεν συνοδεύεται από κάποια οπτική παρατήρηση. Στη συνέχεια από 40-90% μ.α. το μέσο πλάτος παραμένει σχετικά σταθερό (42-43 dBae). Στο τελευταίο τμήμα της τάσης παρουσιάζεται αύξηση του μέσου πλάτους (45 dBae) και αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι βρισκόμαστε στην περιοχή λίγο πριν τη θραύση του δοκιμίου. Όσον αφορά τις κλίσεις των ευθύγραμμων τμημάτων παρατηρείται σημαντική αύξηση των σημάτων στο τμήμα ΓΔ, το οποίο χρονικά συμπίπτει με την οπτική παρατήρηση (DIC) της κάτω εφελκυστικής κάτω ρωγμής. Στη συνέχεια η επόμενη αύξηση των σημάτων παρουσιάζεται στο τμήμα ΕΣΤ' η οποία συμπίπτει χρονικά με την παρατήρηση της πάνω εφελκυστικής ρωγμής. Τέλος το τμήμα ΖΗ που παρουσιάζει μεγάλη κλίση δεν συμπίπτει χρονικά με τις παρατηρήσεις των πλάγιων αποφλοιώσεων της οπής.



Σχήμα 133 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούνται συσπειρώσεις σημάτων αυξημένου πλάτους στις περιοχές παρατήρησης των εφελκυστικών ρωγμών καθώς επίσης και 100 sec περίπου πριν τις πλάγιες αποφλοιώσεις των οπών. Τέλος παρατηρούνται πολλά και αυξημένου πλάτους σήματα κατά τη θραύση του δοκιμίου.



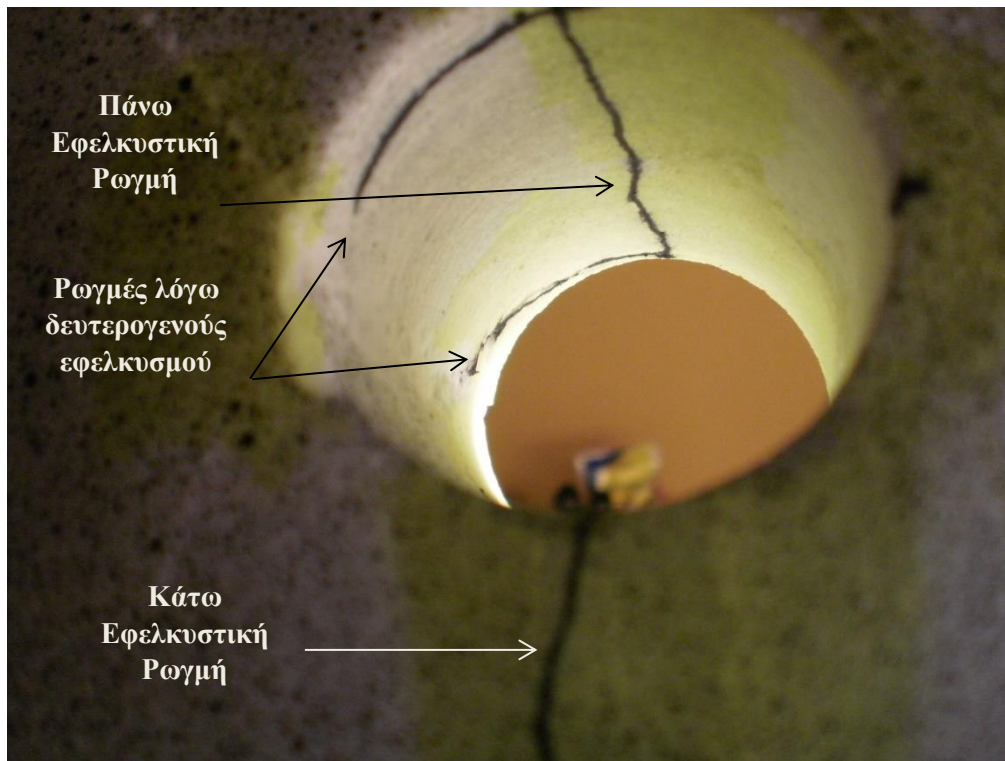
Σχήμα 134 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε αρχικά ένα peak έκλυσης ενέργειας κοντά στα 8 MPa, το οποίο μπορεί να σχετίζεται με τους μηχανισμούς επαφής της πλάκας με τις χαλύβδινες πλάκες της πρέσας, στη συνέχεια ένα άλλο peak ενέργειας κοντά στην παρατήρηση της κάτω εφελκυστικής ρωγμής, καθώς επίσης και ένα peak λίγο πριν την παρατήρηση των αριστερών αποφλοιώσεων της οπής. Τέλος παρατηρούνται αρκετά μεγάλα peaks ενέργειας λίγο πριν τη θράυση του δοκιμίου.

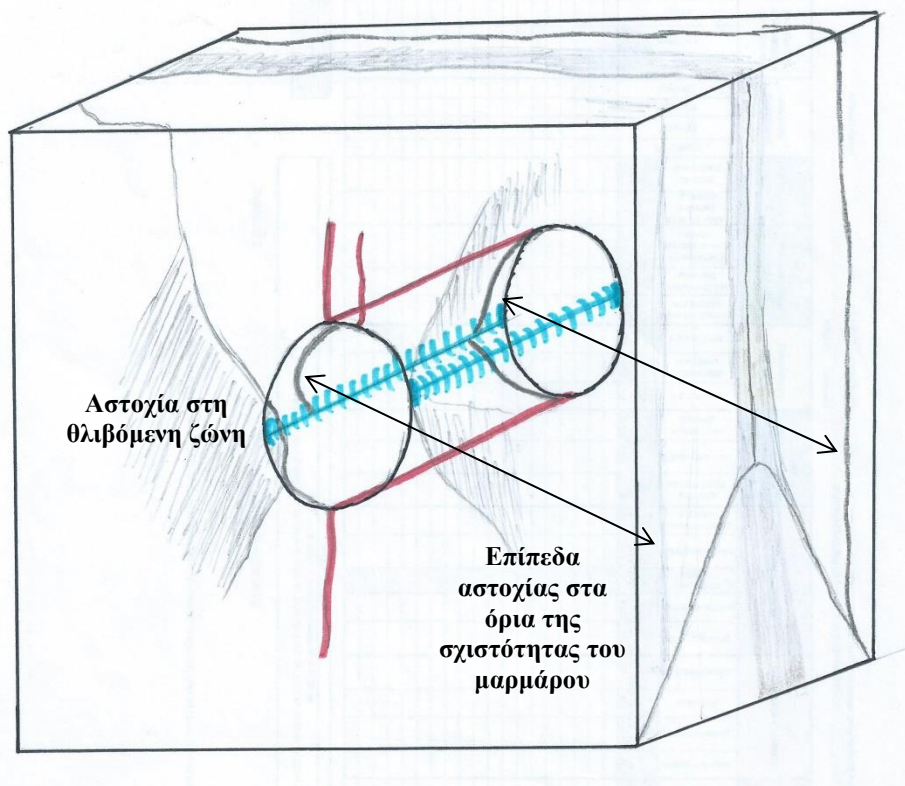
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



Εικόνα 91 - Αστοχία του δοκιμίου στα όρια της σχιστότητας του δοκιμίου



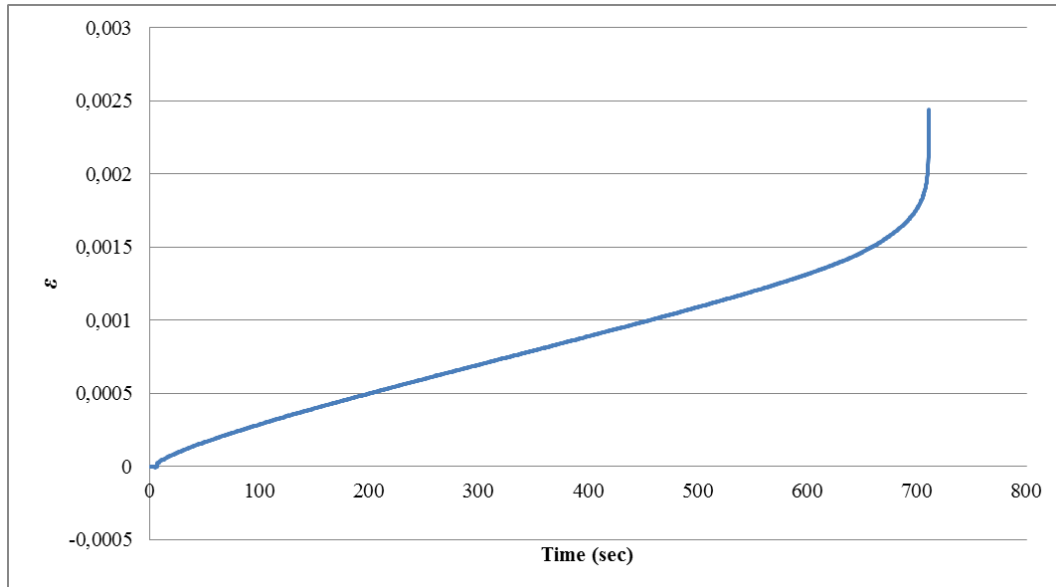
Εικόνα 92 - Ρωγμάτωση εντός της οπής



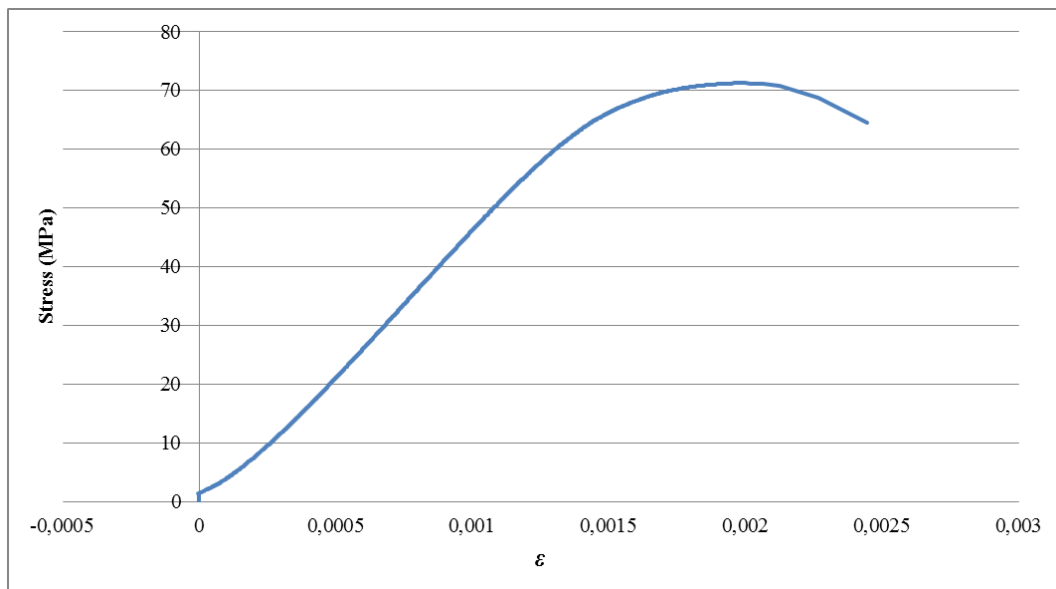
Εικόνα 93 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.8 2^η πλάκα με οπή (3.4 cm)

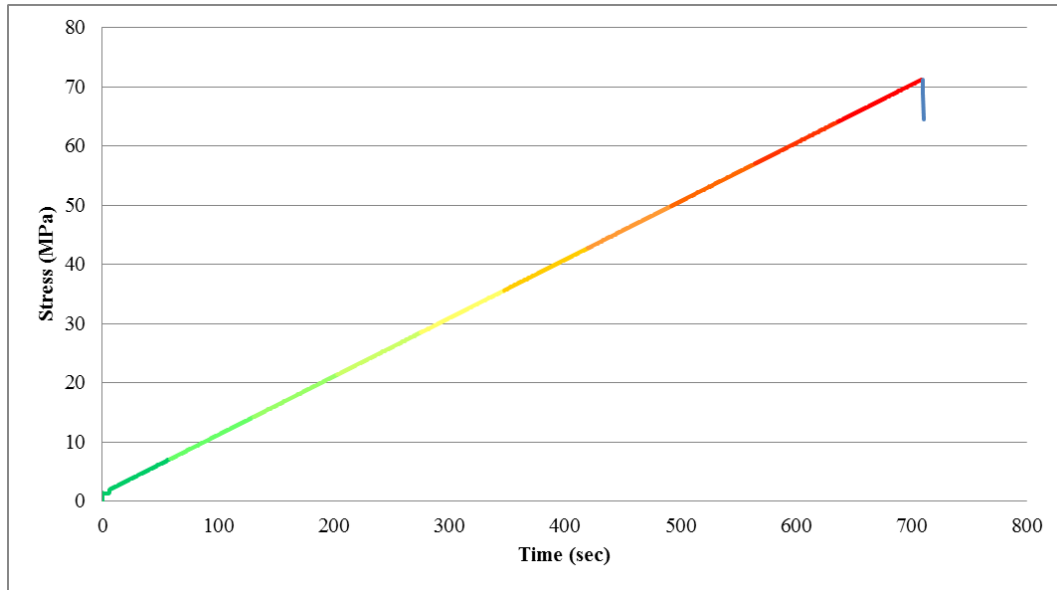
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο φορτίου και συγκεκριμένα με ρυθμό 750 (N/sec). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 71,27 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 135 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



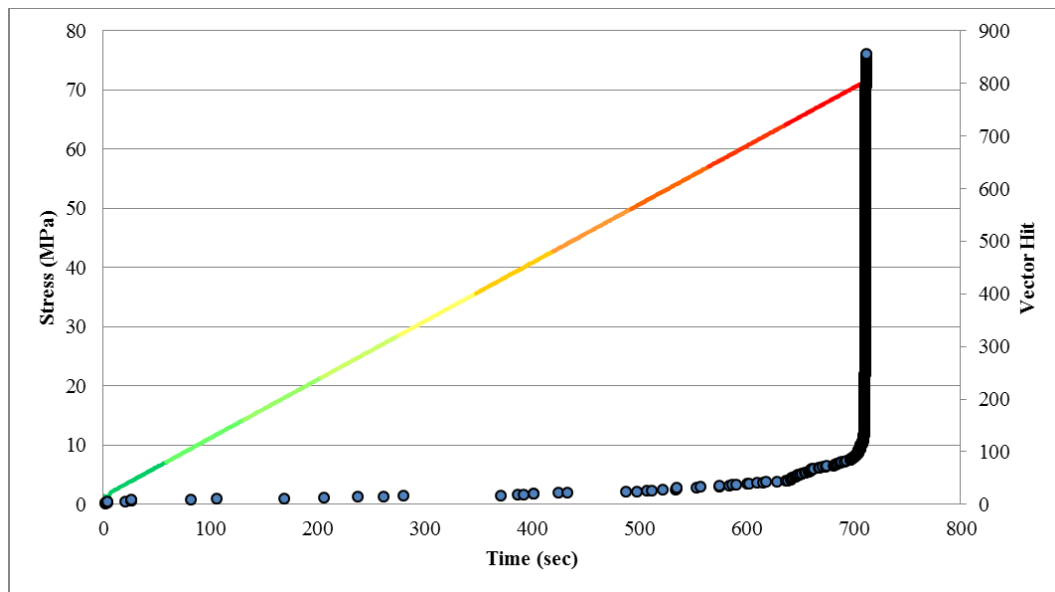
Σχήμα 136 - Διάγραμμα Τάσης / Ανηγμένης Παραμόρφωσης



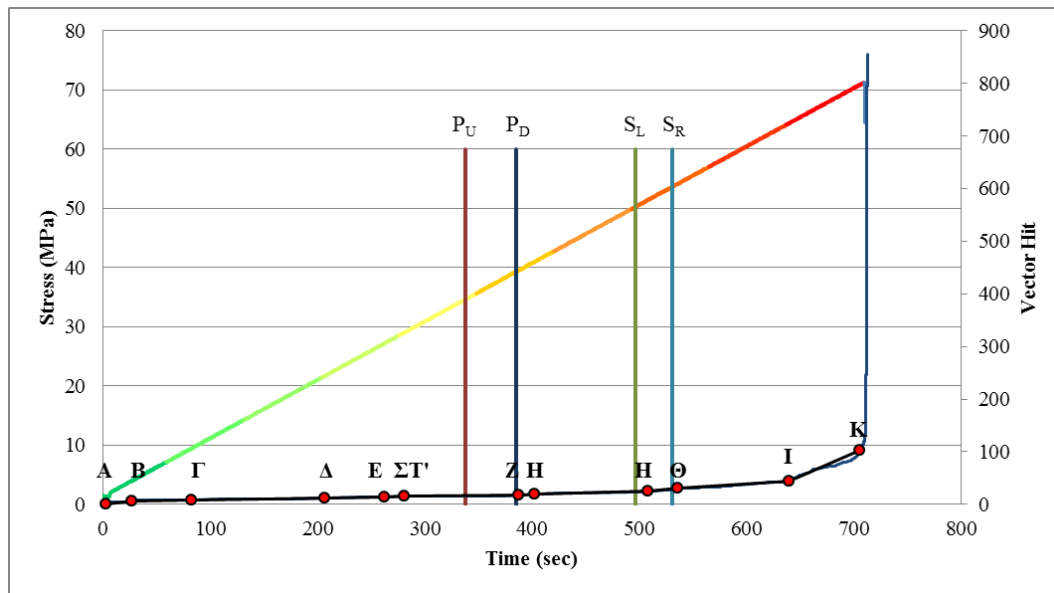
Σχήμα 137 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 138 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 139 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 67 - Μέση τιμή του πλάτους, μέση τιμή της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	44	8	2
20	41	2	0
30	47	1	0
40	40	3	0
50	43	1	0
60	45	5	1
70	42	3	0
80	41	9	0
90	45	11	0
100	43	76	0

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

Κλίση **AB**: 0,249

Κλίση **ΒΓ**: 0,035

Κλίση **ΓΔ**: 0,024

Κλίση **ΔΕ**: 0,036

Κλίση **ΕΣΤ'**: 0,055

Κλίση **ΣΤ'Ζ**: 0,018

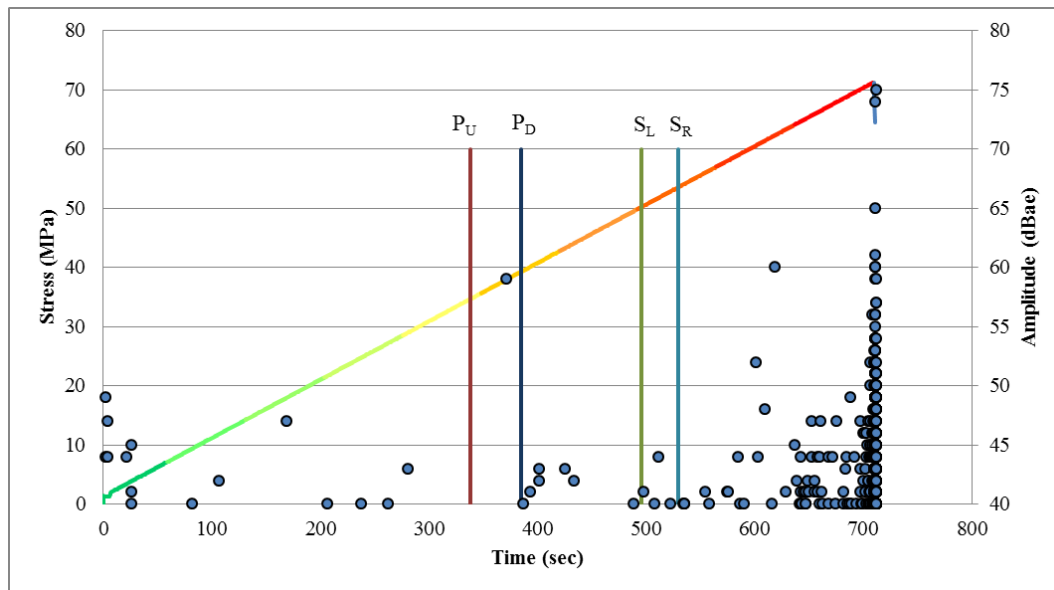
Κλίση **ΖΗ**: 0,138

Κλίση **HΘ**: 0,056

Κλίση **ΘΙ**: 0,18

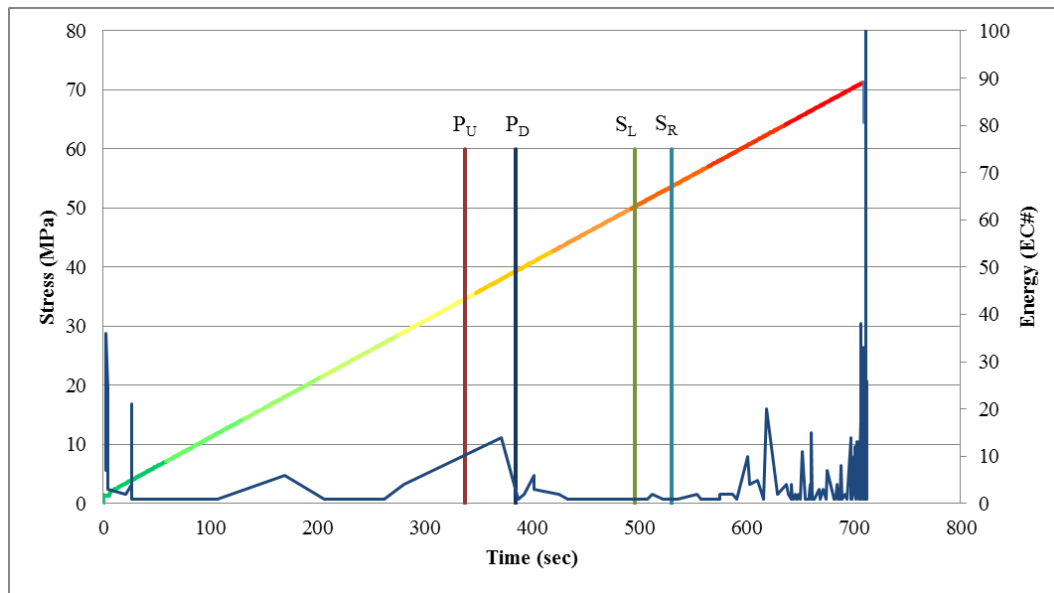
Κλίση **IK**: 0,144

Συμπέρασμα: Εξετάζοντας τις τιμές του μέσου πλάτους ανά τμήμα φορτίου παρατηρούμε ένα σήμα υψηλού πλάτους (47 dBae) κοντά στο 25% μ.α. το οποίο ωστόσο δεν συνοδεύεται από κάποια παρατήρηση. Στο διάστημα από 40-60% μ.α. παρατηρούνται σήματα με αυξημένο μέσο πλάτος (43-45 dBae) γεγονός το οποίο συμπίπτει με τις παρατηρήσεις των εφελκυστικών ρωγμών. Στη συνέχεια από 60-80% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων πέφτει (41-42 dBae) και από το 80-100% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων αυξάνεται (43-45 dBae) λόγω της επερχόμενης θραύσης του δοκιμίου. Όσον αφορά τις κλίσεις των παραπάνω τμημάτων παρατηρούμε σημαντική ανάπτυξη των σημάτων στο τμήμα ΖΗ το οποίο συμπίπτει χρονικά με την κάτω εφελκυστική ρωγμή καθώς επίσης και στο τμήμα ΗΘ το οποίο συμπίπτει χρονικά με τις πλάγιες αποφλοιώσεις της οπής. Τέλος το ΙΚ παρουσιάζει αυξημένη κλίση λόγω της επερχόμενης θραύσης του δοκιμίου.



Σχήμα 140 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρείται έντονη συσπείρωση σημάτων αυξημένου πλάτους κοντά στην κάτω εφελκυστική ρωγμή καθώς επίσης και στην παρατήρηση των πλάγιων αποφλοιώσεων. Τέλος από 80-100 % μ.α. παρατηρούνται πολλά σήματα υψηλού πλάτους λόγω του ότι η δοκιμή βρίσκεται λίγο πριν την θραύση του δοκιμίου.



Σχήμα 141 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε ψηλά peaks έκλυσης ενέργειας στην αρχή της δοκιμής τα οποία πιθανώς να οφείλονται στην σύζευξη μεταξύ επιφάνειας δοκιμίου και χαλύβδινης πλάκας της πρέσας ή στο ότι ξεπεράστηκε η εφελκυστική αντοχή του υλικού ($\sigma_t=7.6$ MPa). Στη συνέχεια παρατηρούμε σημαντικά peaks ενέργειας στην περιοχής παρατήρησης των εφελκυστικών ρωγμών και τέλος από 70-100% μ.α. εμφανίζονται πολυάριθμα υψηλά peaks ενέργειας λόγω της επερχόμενης θραύσης του δοκιμίου.

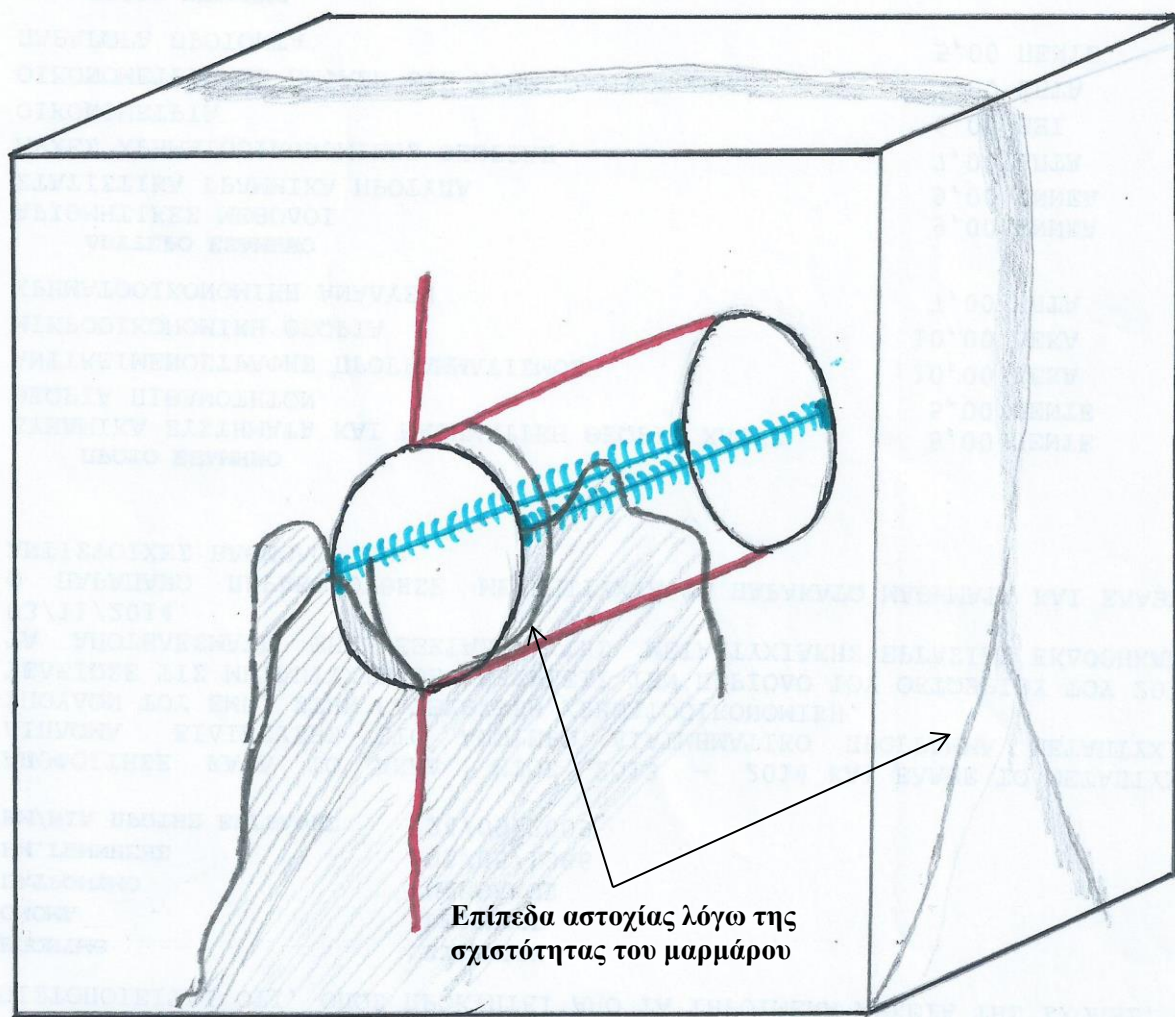
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



Εικόνα 94 - Ρωγμάτωση στα όρια της σχιστότητας



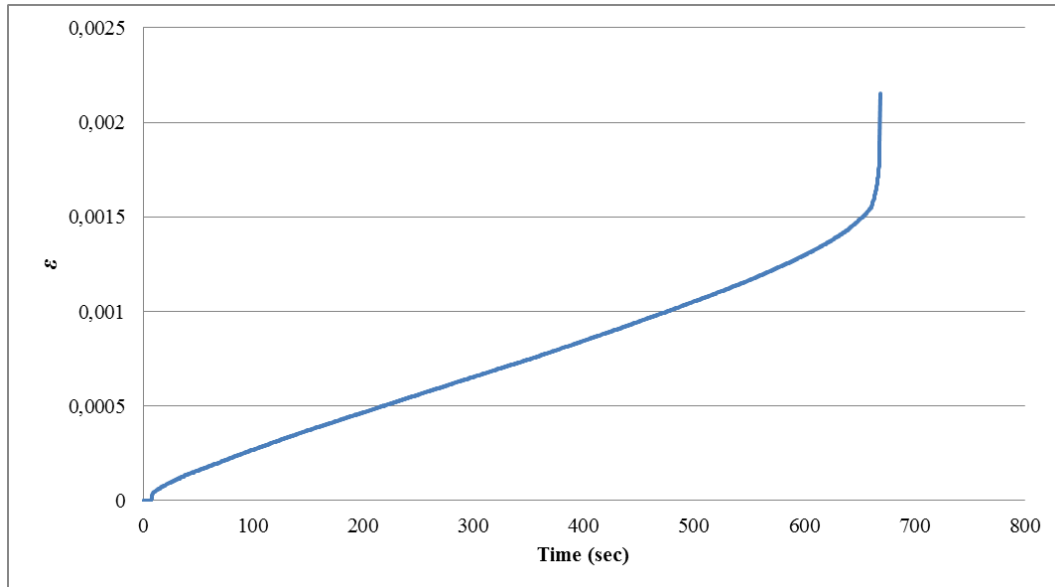
Εικόνα 95 - Αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη



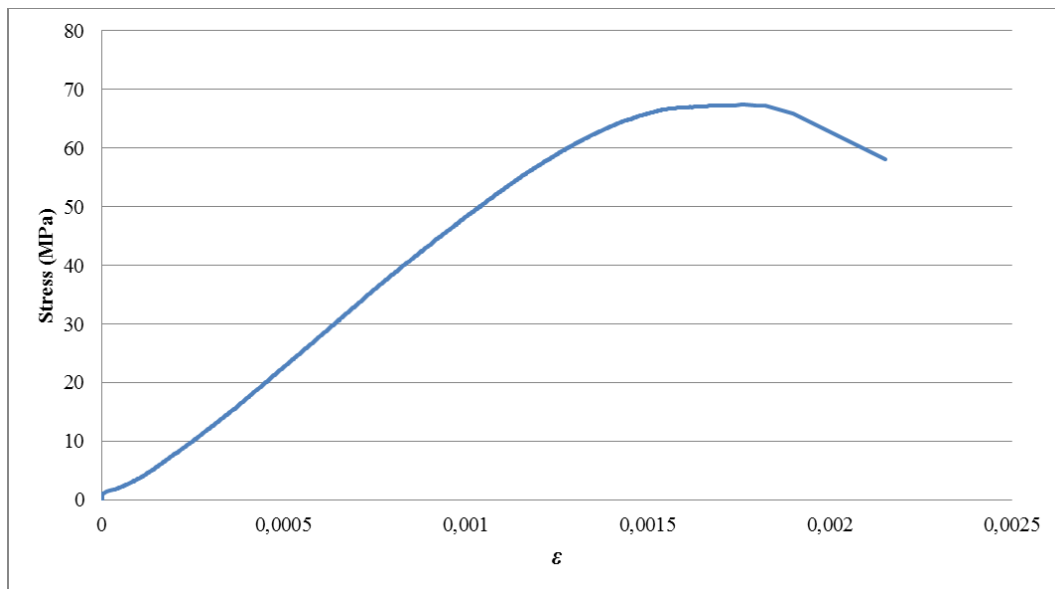
Εικόνα 96 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.9 3^η πλάκα με οπή (3,4 cm)

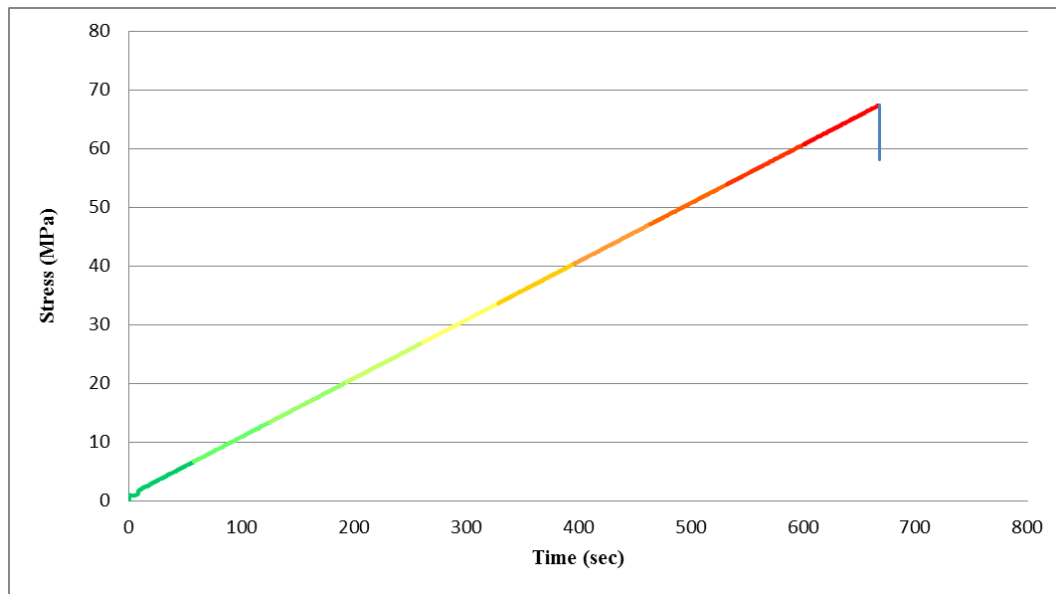
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο φορτίου και συγκεκριμένα με ρυθμό 750 (N/sec). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 67,379 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 142 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



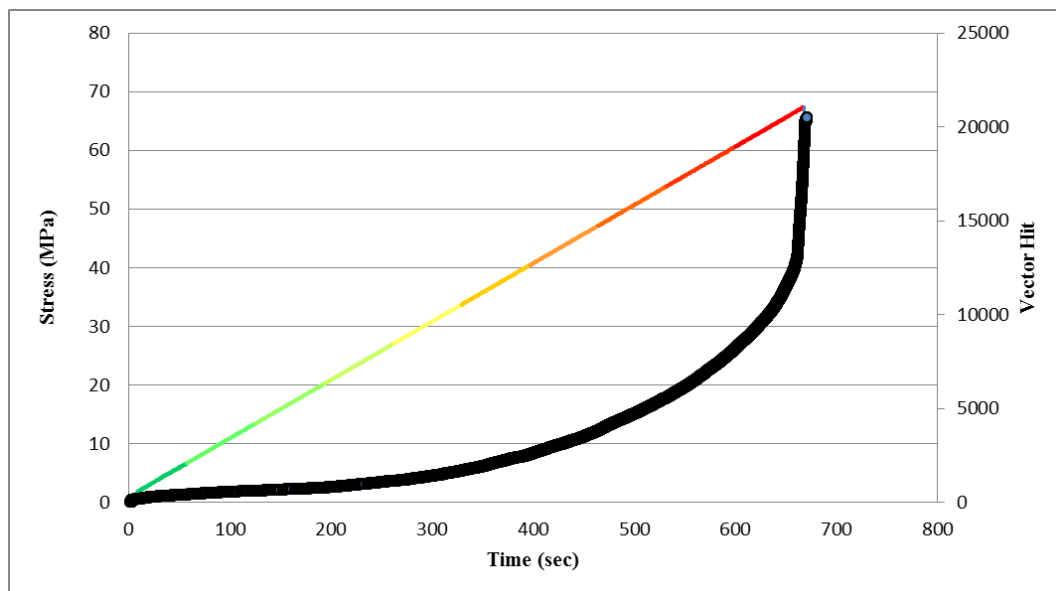
Σχήμα 143 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



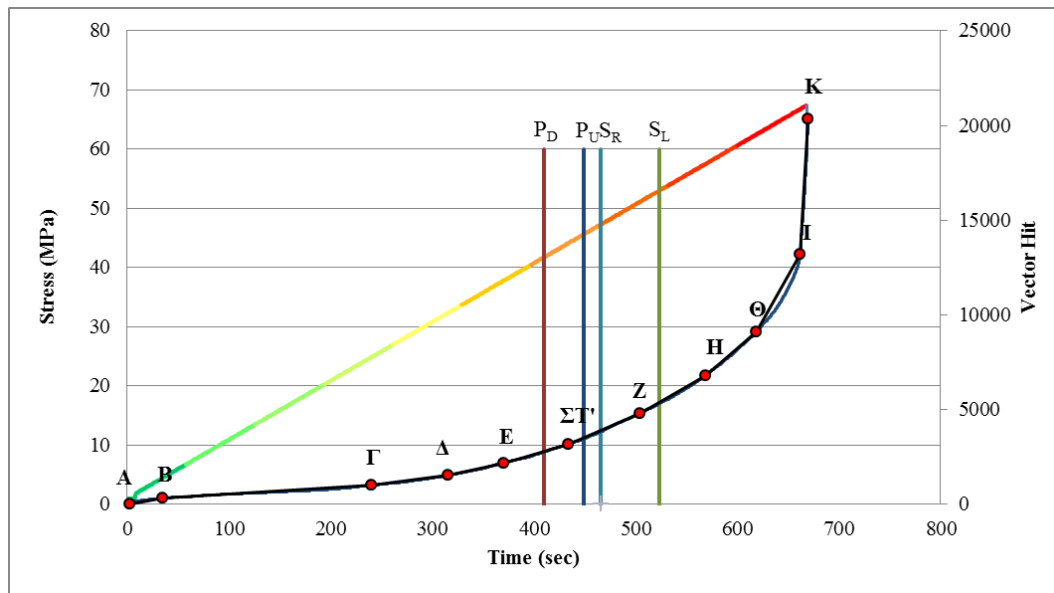
Σχήμα 144 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 145 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 146 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 68 - Μέση τιμή του πλάτους ,μέση τιμές της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	44	396	2
20	44	204	1
30	43	167	0
40	44	358	0
50	44	535	0
60	44	861	0
70	44	1272	0
80	44	1768	0
90	44	2569	0
100	44	9163	1

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

Κλίση AB: 9,35

Κλίση ΒΓ: 3,29

Κλίση ΓΔ: 7,18

Κλίση ΔΕ: 11,76

Κλίση ΕΣΤ': 15,71

Κλίση ΣΤ'Ζ: 22,97

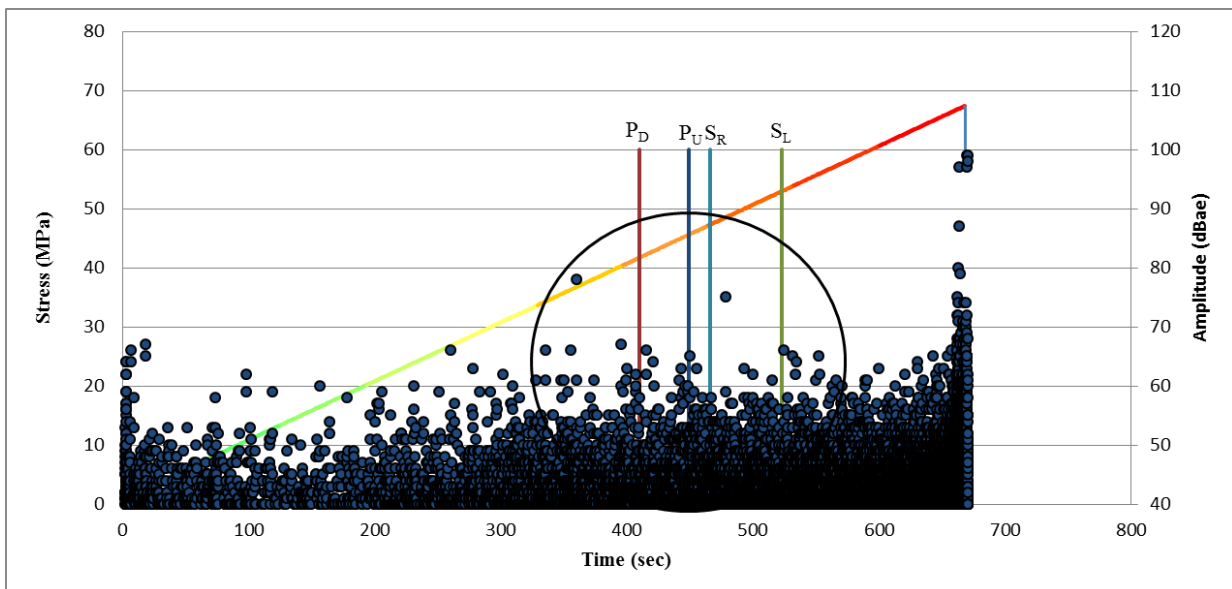
Κλίση **ZH**: 31,28

Κλίση **HΘ**: 45,81

Κλίση **ΘΙ**: 94,49

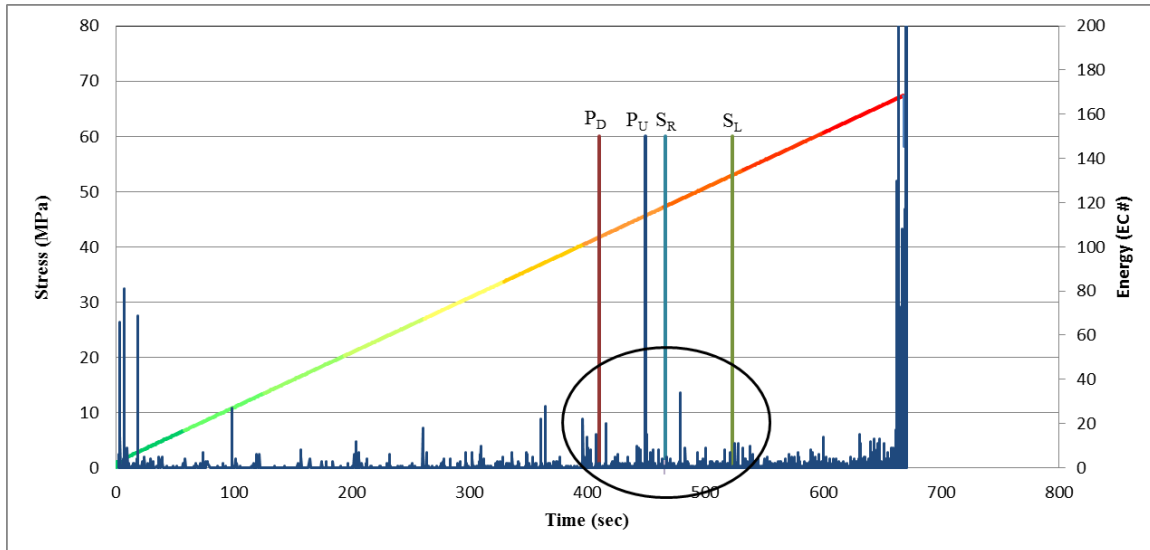
Κλίση **IK**: 903,30

Συμπέρασμα: Εξετάζοντας τις τιμές του μέσου πλάτους ανά τμήμα μέγιστης αντοχής παρατηρούμε πως το μέσο πλάτος παραμένει σχετικά σταθερό (43-44 dBae). Όσον αφορά τις κλίσεις των ευθύγραμμων τμημάτων παρατηρείται σταδιακή αύξηση των σημάτων σε όλη τη δοκιμή. Πιο συγκεκριμένα από το σημείο Δ και μέχρι τη θραύση του δοκιμίου αρχίζουν να αναπτύσσονται αρκετά σήματα και από το γράφημα παρατηρούμε ότι στο τμήμα ΕΗ που παρατηρήθηκαν οι ρωγμές, οι επιμέρους κλίσεις των τμημάτων (ΕΣΤ, ΖΤΖ, ΖΗ) είναι αρκετά αυξημένες.



Σχήμα 147 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρείται έντονη συσπείρωση σημάτων υψηλού πλάτους στην περιοχή (μαύρος κύκλος) που παρατηρήθηκαν οι ρωγμές.



Σχήμα 148 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε έντονα peaks έκλυσης ενέργειας στα πρώτα δευτερόλεπτα της δοκιμής τα οποία σχετίζονται με την σύζευξη της επιφάνειας του δοκιμίου με τη χαλύβδινη πλάκα της πρέσας. Στη συνέχεια παρατηρούμε αρκετά μικρά peaks ενέργειας σ όλη τη διάρκεια της δοκιμής με έμφαση κυρίως κάποια peaks που βρίσκονται στην περιοχή που παρατηρήθηκαν οι ρωγμές (μαύρος κύκλος).

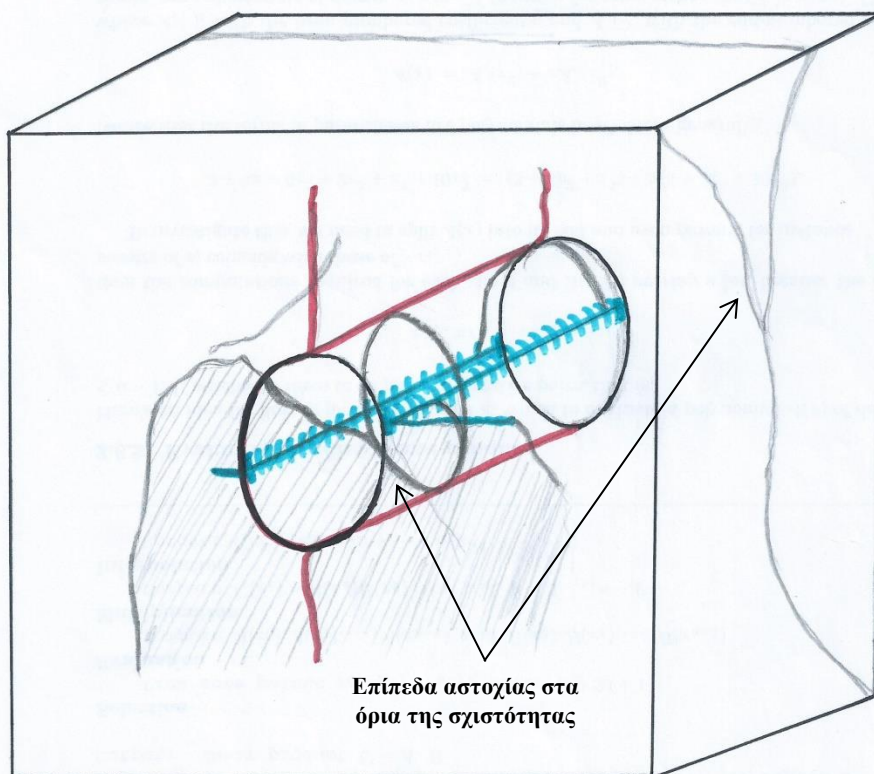
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



Εικόνα 97 - Ρωγμάτωση παράλληλα στη σχιστότητα του δοκιμίου



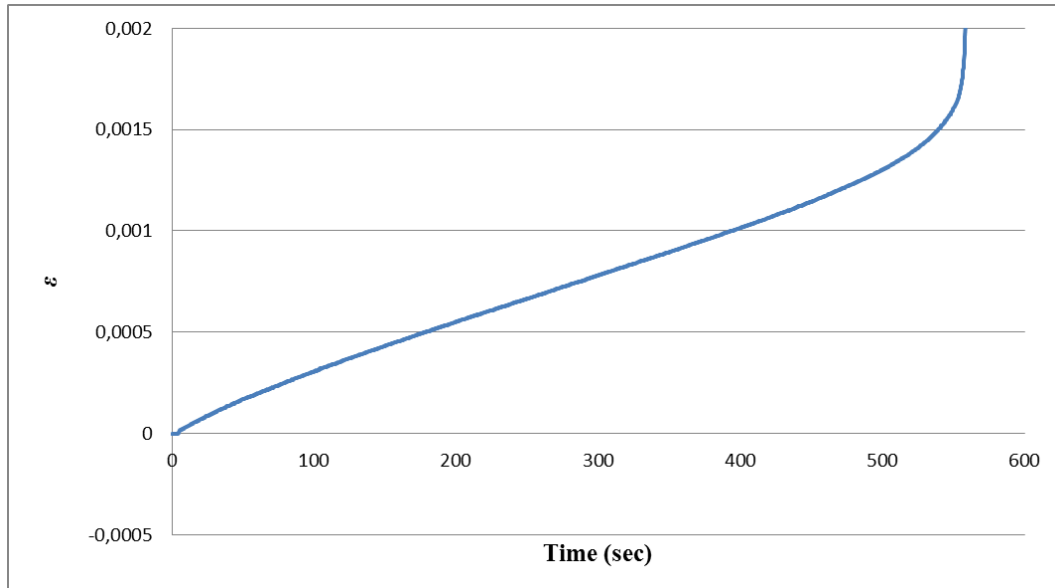
Εικόνα 98 – Αστοχία παράλληλα στη σχιστότητα του δοκιμίου



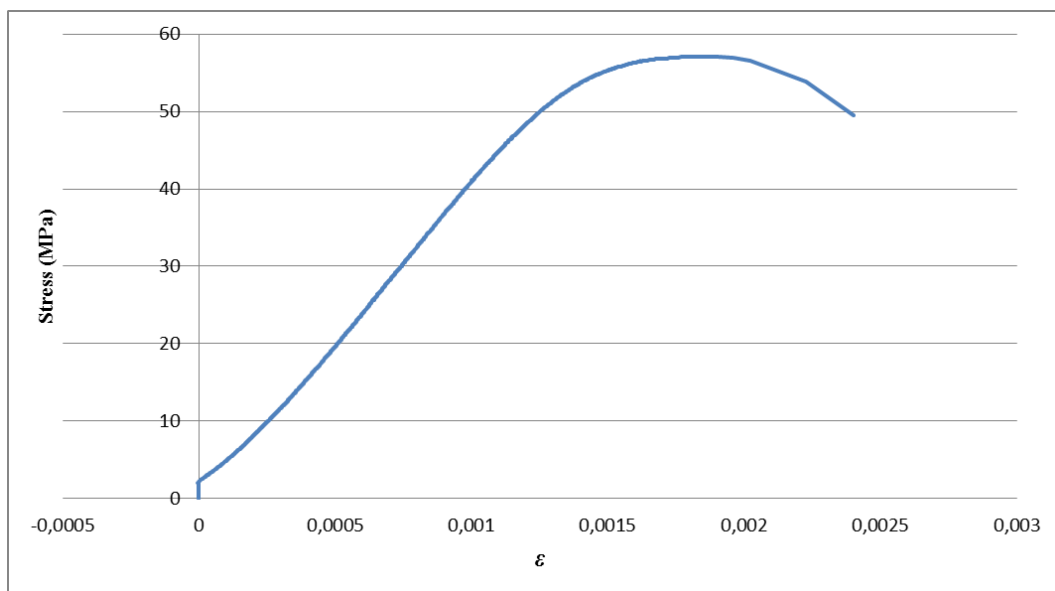
Εικόνα 99 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.10 1^η πλάκα με οπή (5 cm)

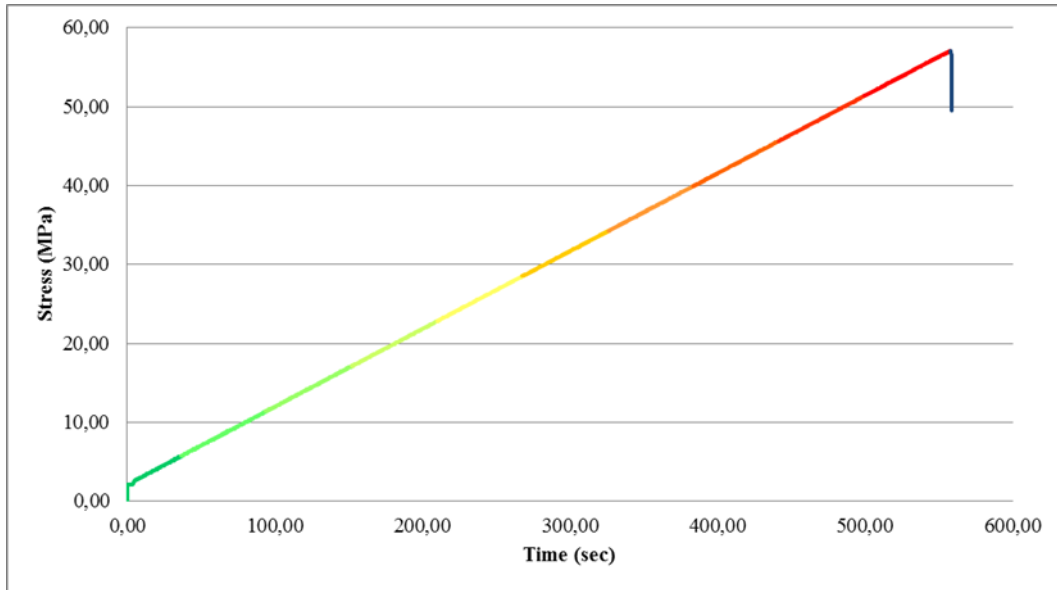
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο φορτίου και συγκεκριμένα με ρυθμό 750 (N/sec). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 57.07 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 149 - Διάγραμμα Ανηγγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



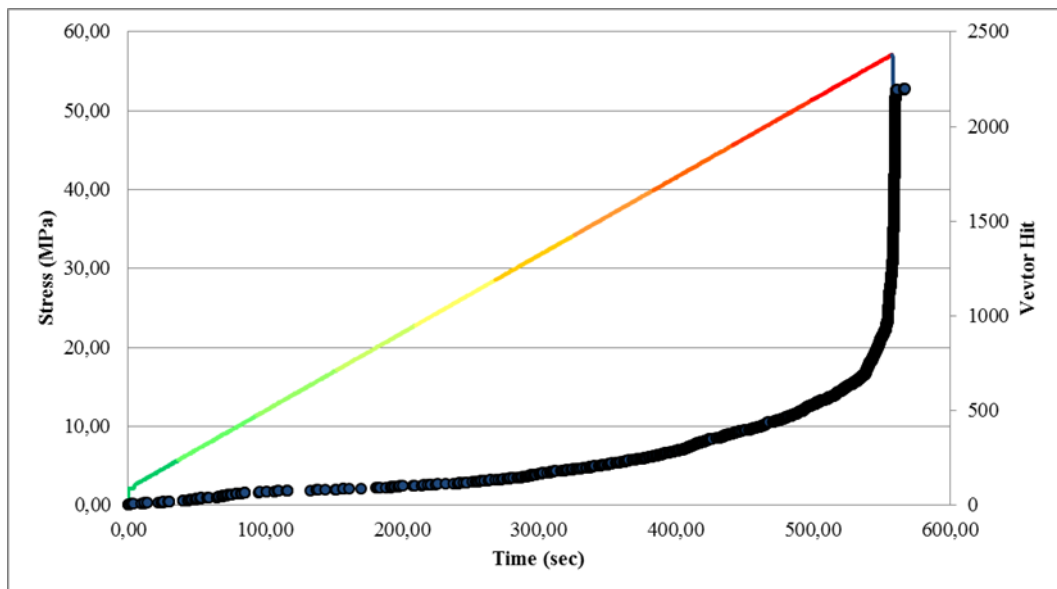
Σχήμα 150 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγγμένης Παραμόρφωσης



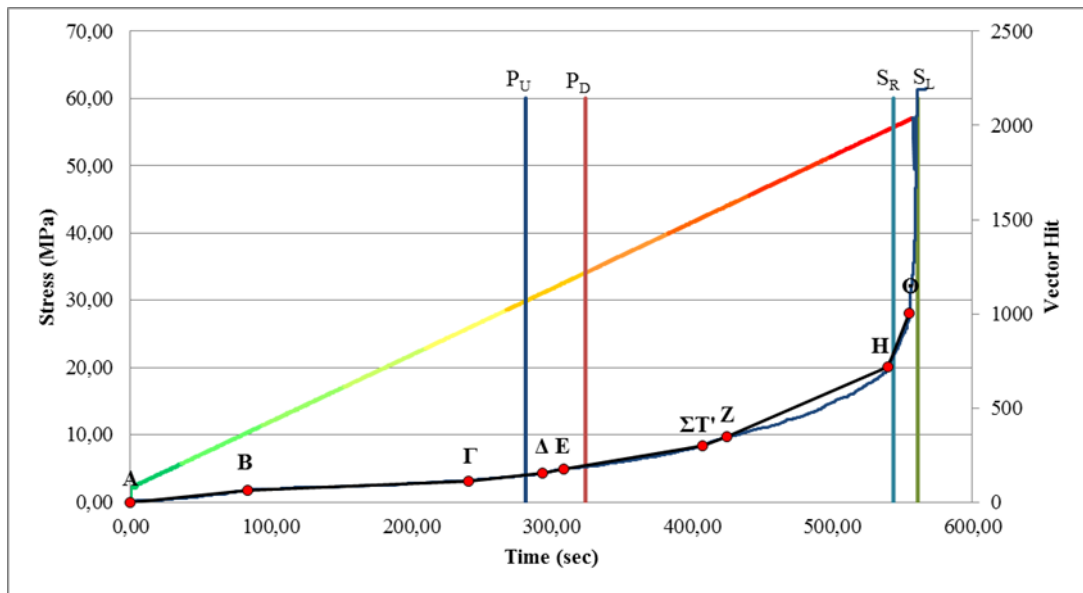
Σχήμα 151 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 152 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 153 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 69 - Μέση τιμή του πλάτους ,μέση τιμής της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	43	20	1
20	45	46	2
30	45	16	2
40	44	21	0
50	43	29	0
60	43	57	0
70	44	66	0
80	43	120	0
90	43	148	0
100	43	620	1

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

Κλίση AB: 0,742

Κλίση BΓ: 0,330

Κλίση ΓΔ: 0,748

Κλίση ΔΕ: 1,382

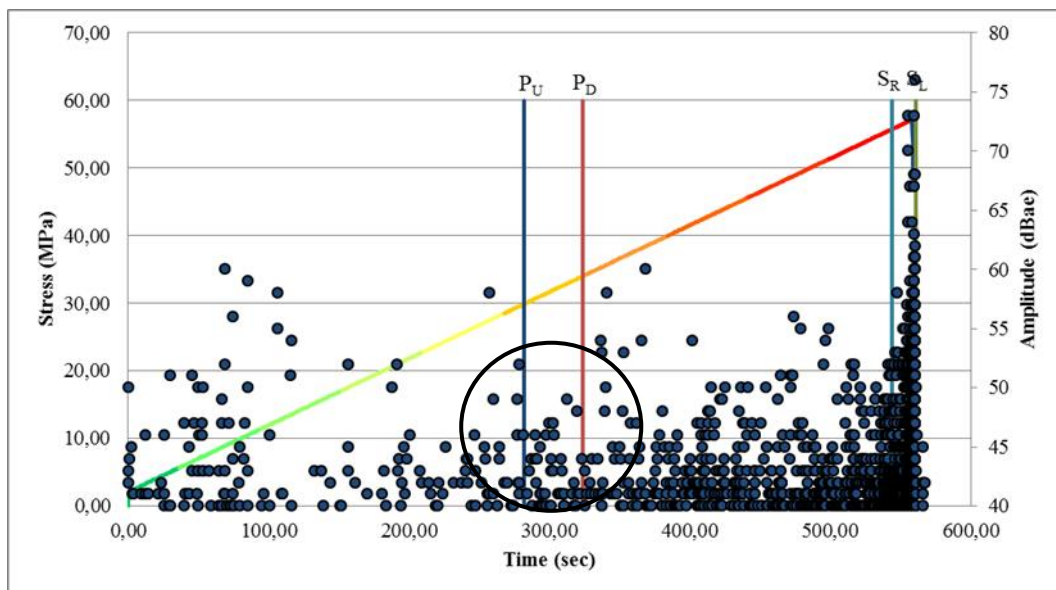
Κλίση ΕΣΤ': 1,263

Κλίση **ΣΤ'Ζ**: 2,879

Κλίση **ZH**: 3,201

Κλίση **HΘ**: 18,352

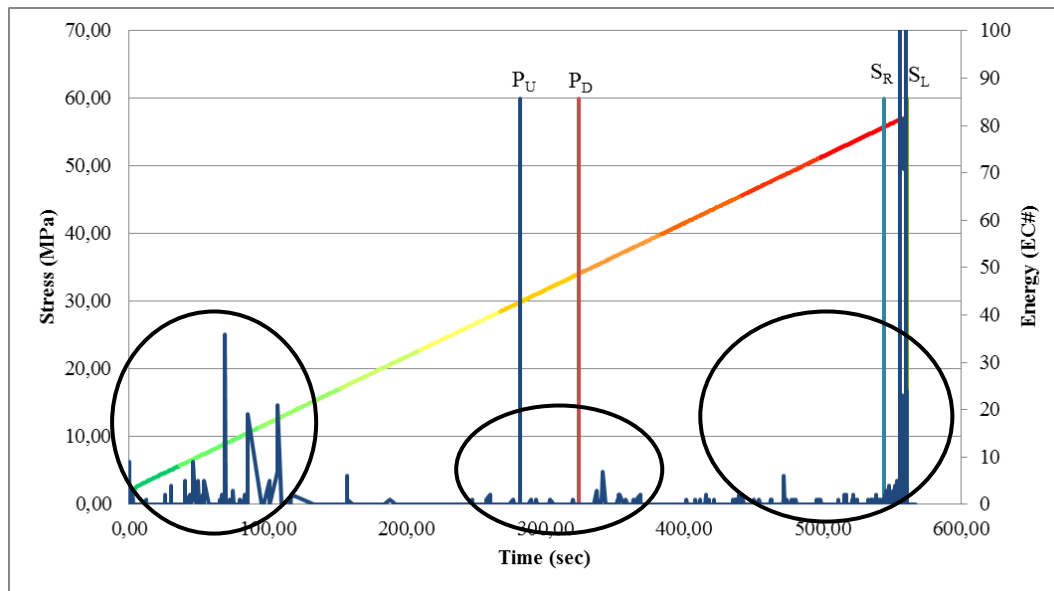
Συμπέρασμα: Εξετάζοντας τις τιμές του μέσου πλάτους ανά τμήμα φορτίου παρατηρούμε σημαντική αύξηση του μέσου πλάτους (43→45 dBae) των σημάτων μέχρι το 30% μ.α.. Η ερμηνεία αυτού του γεγονότος είναι διττή. Πρώτον υπάρχει περίπτωση αυτό το αυξημένο πλάτος να οφείλεται στους μηχανισμούς σύζευξης της επιφάνειας της πλάκας με την χαλύβδινη πλάκα του δοκιμίου και η άλλη περίπτωση να οφείλεται στους μηχανισμούς εφελκυσμού του δοκιμίου ($\sigma_t=7,6$ MPa). Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι το μέσο πλάτος διατηρείται σχετικά σταθερό (43-44 dBae) σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Όσον αφορά τις κλίσεις των τμημάτων παρατηρούμε σημαντική ανάπτυξη σημάτων στο τμήμα AB (0-20 μ.α.) γεγονός το οποίο μπορεί να συσχετιστεί με την προαναφερθείσα ερμηνεία του υψηλού μέσου πλάτους. Στη συνέχεια το τμήμα ΔΕ παρουσιάζει αυξημένη κλίση και χρονικά είναι αρκετά κοντά με τις οπτικές παρατηρήσεις των εφελκυστικών ρωγμών. Από το σημείο Ε και μετά τα σήματα αρχίζουν να αυξάνονται απότομα με ιδιαίτερη έμφαση στο τμήμα ΗΘ κατά το οποίο παρατηρήθηκαν οι πλάγιες αποφλοιώσεις της οπής.



Σχήμα 154 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρείται μια έντονη συσπείρωση σημάτων υψηλού πλάτους στο διάστημα (0-28% μ.α.). Όπως και στην προηγούμενη ανάλυση θα μπορούσαμε να πούμε πως αυτή η έντονη δραστηριότητα πιθανώς να οφείλεται στο «πάτημα» της πλάκας με τη χαλύβδινη πλάκα της πρέσες ή στο γεγονός ότι το δοκίμιο ξεπέρασε την εφελκυστική του αντοχή

($\sigma_t=7,6$ MPa). Στη συνέχεια παρατηρούμε συσπείρωση σημάτων υψηλού πλάτους στην περιοχή όπου παρατηρήθηκαν οι εφελκυστικές ρωγμές (μαύρος κύκλος). Τέλος όσο η δοκιμή πλησιάζει προς το τέλος της παρατηρούνται πολυάριθμα σήματα με αρκετά αυξημένο πλάτος.

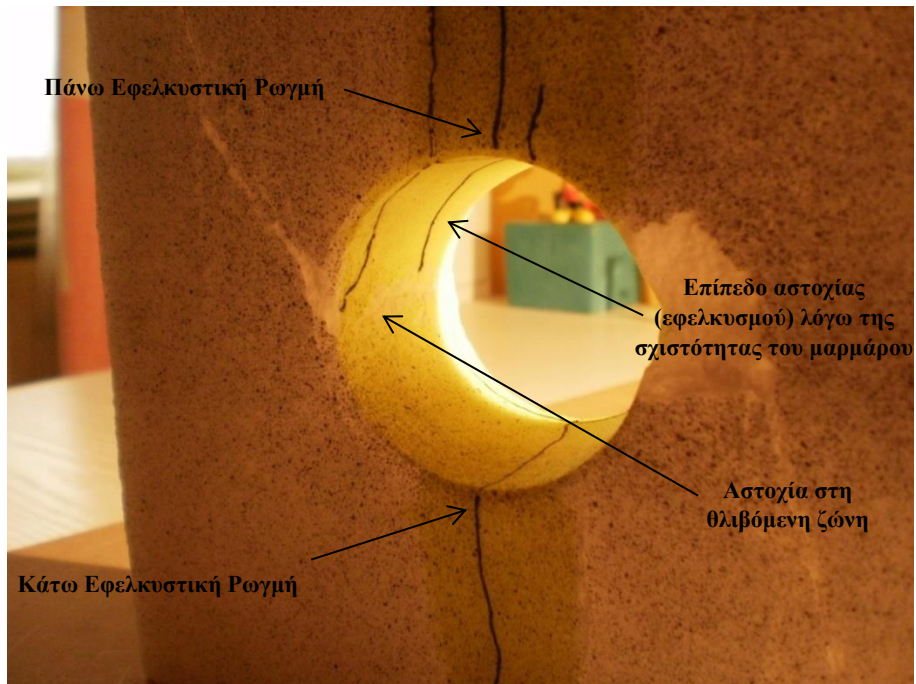


Σχήμα 155 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

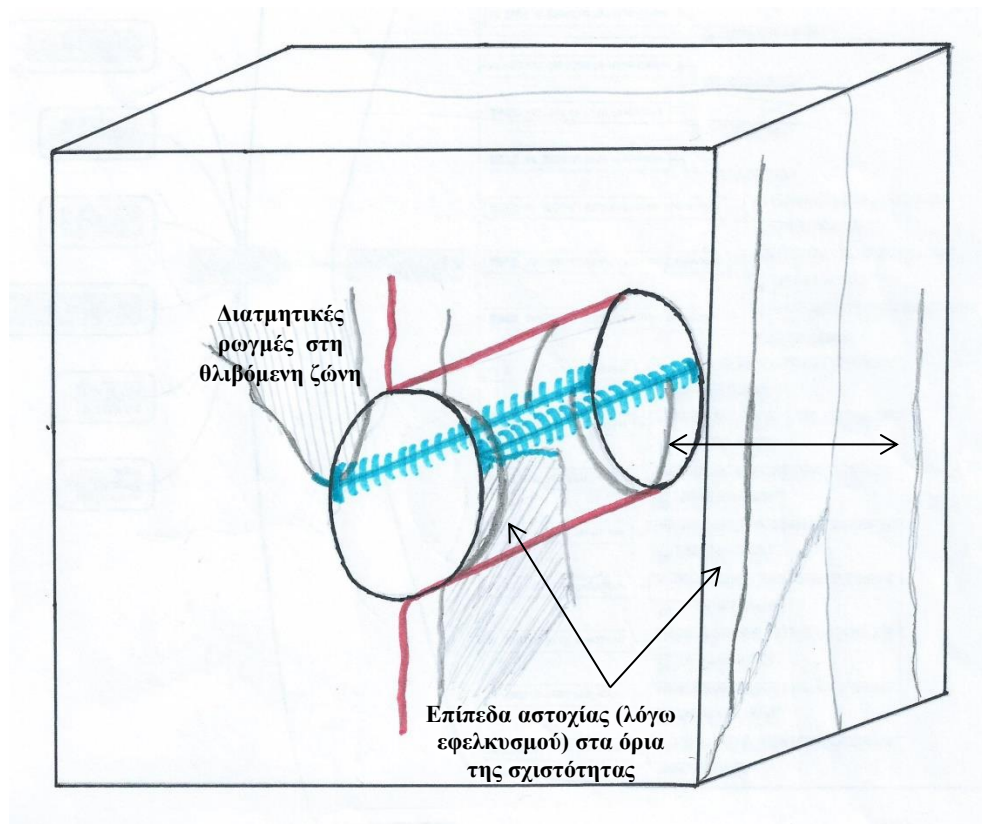
Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση παρατηρούμε τρεις περιοχές (μαύροι κύκλοι) με peaks έκλυσης ενέργειας :

- A) Σε αυτήν την περιοχή η υψηλή έκλυση ενέργειας οφείλεται είτε στο «πάτημα» του δοκιμίου με την χαλύβδινη πλάκα της πρέσας είτε στη δημιουργία της εφελκυστικής ρωγμής ($\sigma_t=7,6$ MPa)
- B) Σ αυτήν την περιοχή η έκλυση ενέργειας συμπίπτει με την παρατήρηση των εφελκυστικών ρωγμών.
- Γ) Τέλος αυτή η περιοχή ανήκει σε υψηλές τιμές τάσης κατά την οποίες τα φαινόμενα ρωγμάτωσης έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται ραγδαία.

Φωτογραφική Τεκμηρίωση



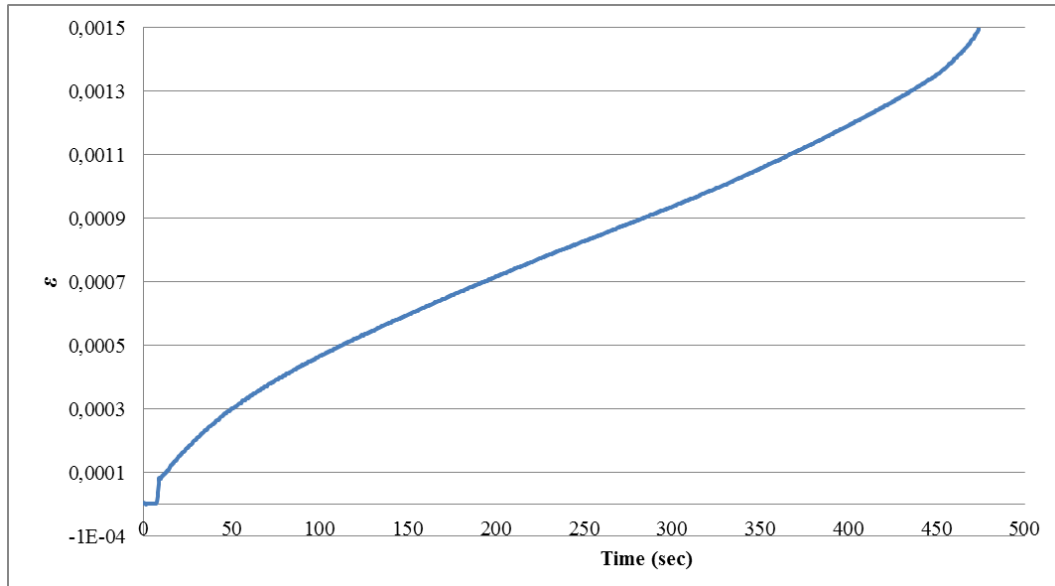
Εικόνα 100 - Επίπεδα αστοχίας του δοκιμίου



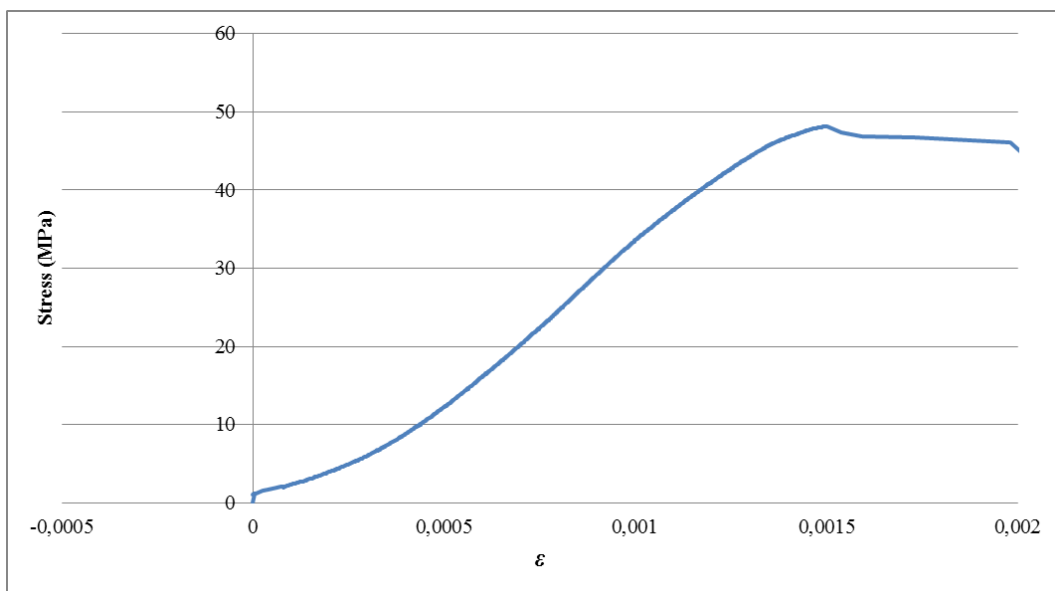
Εικόνα 101 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.11 2^η πλάκα με οπή (5 cm)

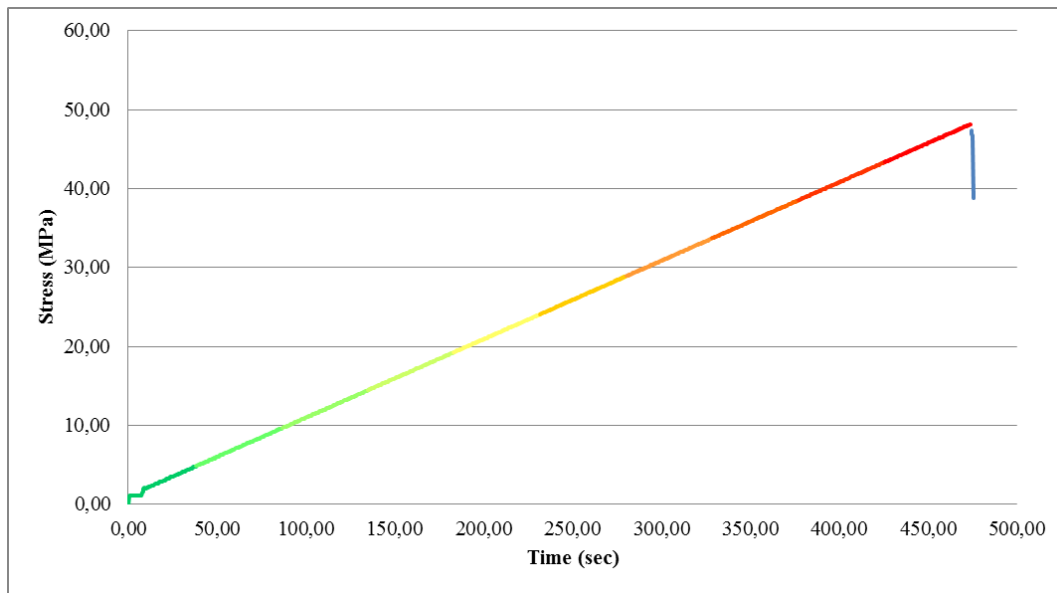
Η δοκιμή έγινε με έλεγχο φορτίου και συγκεκριμένα με ρυθμό 750 (N/sec). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 48.16 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας.



Σχήμα 156 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



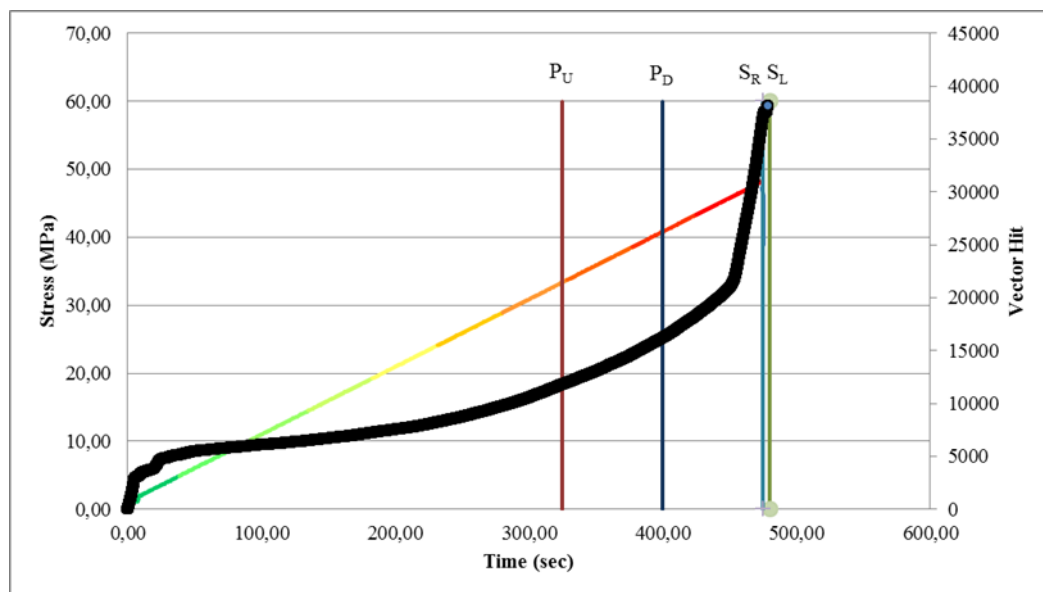
Σχήμα 157 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης



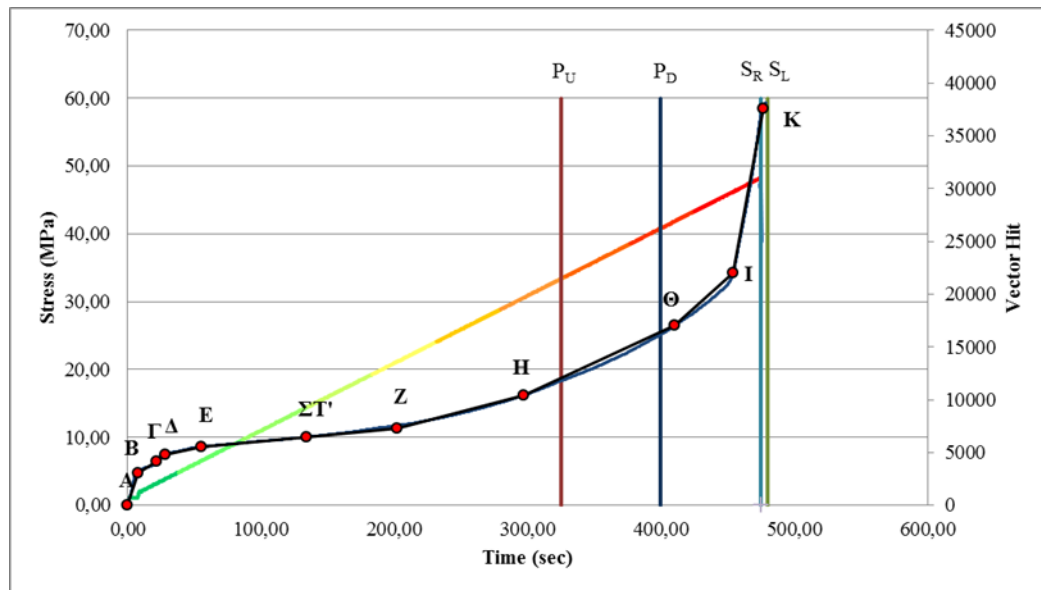
Σχήμα 158 - Διάγραμμα Τάσης/Χρόνου

Μελέτη της ακουστικής εκπομπής

Επεξεργασία και μελέτη των δεδομένων



Σχήμα 159 - Δεδομένα της ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 160 - Εμφάνιση των ευθυγράμμων τμημάτων ανάπτυξης των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Πίνακας 70 - Μέση τιμή του πλάτους ,μέση τιμές της ενέργειας και πλήθος όλων των σημάτων ανά τμήμα μέγιστης αντοχής

Τμήμα Μέγιστης Αντοχής (μ.α.) (%)	Μέσο Πλάτος (dBae)	Πλήθος Σημάτων	Μέση Ενέργεια (EC#)
10	41	5525	1
20	44	793	4
30	44	559	1
40	44	757	1
50	44	981	1
60	45	1506	1
70	44	2227	0
80	44	2619	0
90	44	3730	0
100	45	17037	2

Κλίσεις Ευθυγράμμων Τμημάτων

Κλίση **AB**: 398,581

Κλίση **ΒΓ**: 75,054

Κλίση **ΓΔ**: 98,415

Κλίση **ΔΕ**: 26,960

Κλίση **ΕΣΤ'**: 11,731

Κλίση ΣΤ'Ζ: 11,750

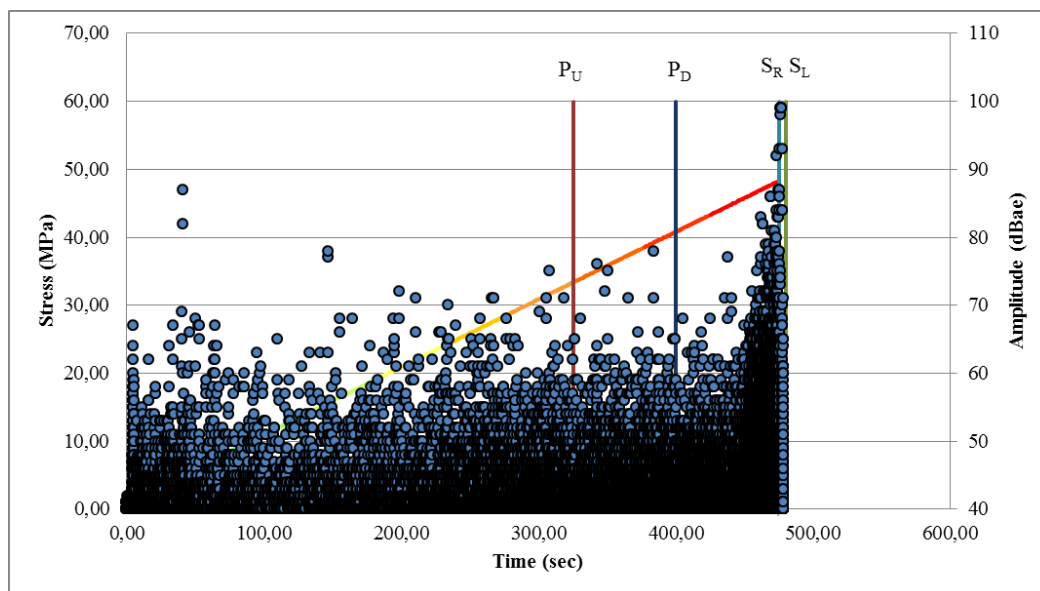
Κλίση ΖΗ: 33,259

Κλίση ΗΘ: 58,168

Κλίση ΘΙ: 113,748

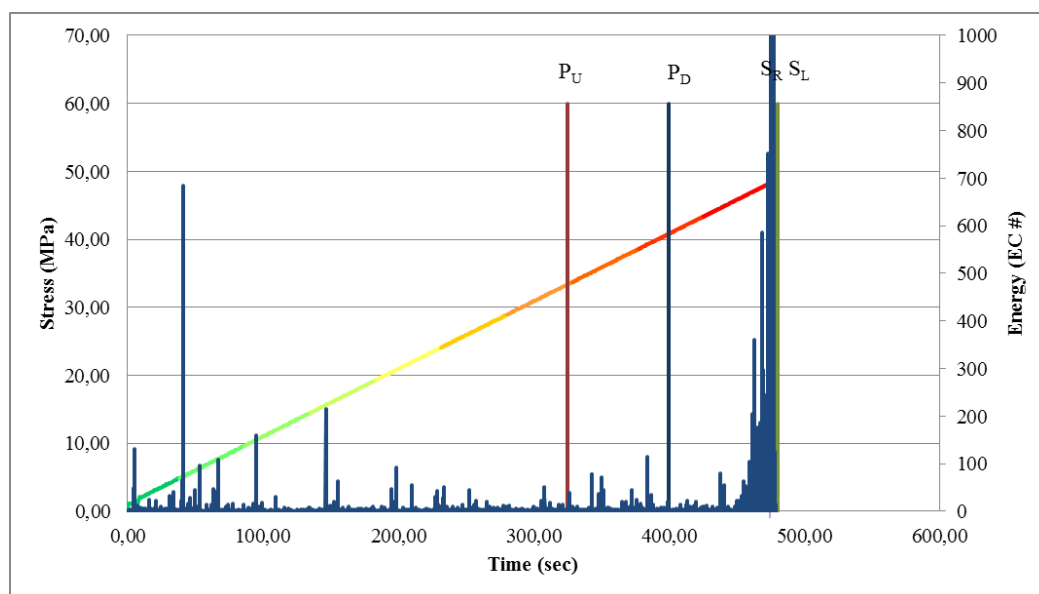
Κλίση ΙΚ: 682,348

Συμπέρασμα: Εξετάζοντας τις τιμές του μέσου πλάτους ανά τμήμα φορτίου παρατηρούμε ότι μέχρι το 10% μ.α. το μέσο πλάτος των σημάτων είναι σχετικά χαμηλό (41 dBae), ενώ απ το 10 % -100% μ.α. το μέσο πλάτος παραμένει σχετικά σταθερό (44-45 dBae). Όσον αφορά τις κλίσεις των παραπάνω τμημάτων παρατηρούμε στο τμήμα ΑΕ μία συνεχή και απότομη αύξηση σημάτων η οποία μπορεί να οφείλεται είτε στο «πάτημα» του δοκιμίου με τη χαλύβδινη πλάκα της πρέσας είτε σε σήματα που αναπτύχθηκαν κατά τη δημιουργία της εφελκυστικής ρωγμής. Στη συνέχεια απ το σημείο Ζ μέχρι το τέλος της δοκιμής ξεκινάνε να αναπτύσσονται σταδιακά αρκετά σήματα και στο τμήμα ΗΘ που παρατηρήθηκαν οι εφελκυστικές ρωγμές βλέπουμε πως η κλίση είναι αρκετά αυξημένη. Τέλος το τμήμα ΙΚ έχει πολύ μεγάλη κλίση καθώς αναφέρεται στο τελικό τμήμα της δοκιμής κατά το οποίο αναπτύχθηκαν πάρα πολλά σήματα αλλά και παρατηρήθηκαν οι ρωγμές των πλάγιων αποφλοιώσεων της οπής.



Σχήμα 161 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση δεν παρατηρείται κάποια ευδιάκριτη συσσώρευση σημάτων. Ωστόσο κοντά στο 12% μ.α. παρατηρούνται δύο σήματα πολύ υψηλού πλάτους (80 και 90 dBae περίπου) τα οποία θα μπορούσαν να συσχετιστούν είτε με το «πάτημα» της πλάκας με τη χαλύβδινη πλάκα της πρέσας είτε με σήματα που αναπτύχθηκαν κατά την εφελκυστική ρωγμή ($\sigma_t=7,6$ MPa).



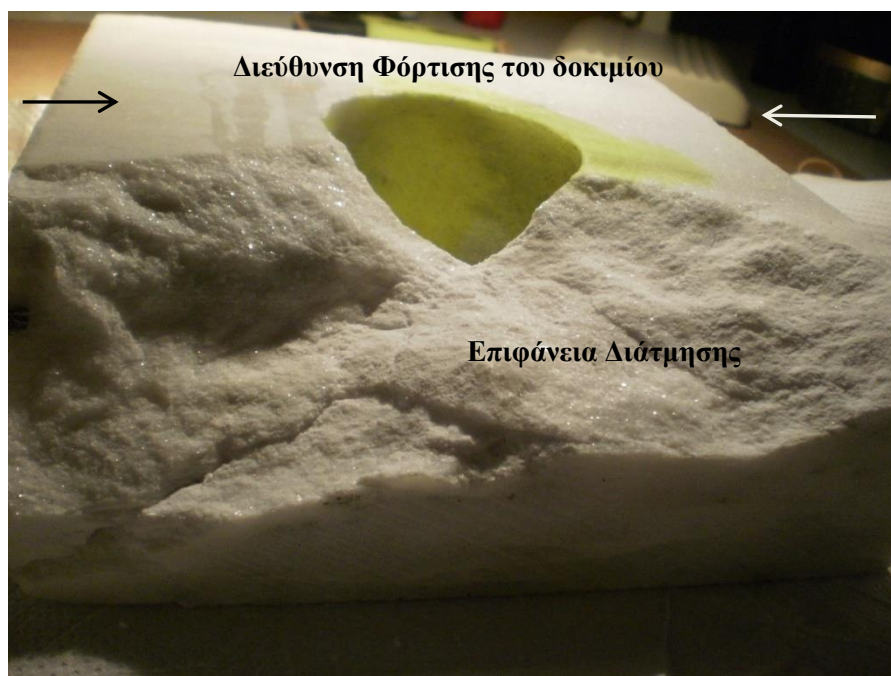
Σχήμα 162 - Εμφάνιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Συμπέρασμα: Σε αυτήν την ανάλυση δεν μπορούμε να διακρίνουμε peaks έκλυσης ενέργειας τα οποία να μπορούν να συσχετιστούν με τις παρατηρήσεις των ρωγμών (εκτός των πλάγιων αποφλοιώσεων της οπής που χρονικά βρίσκονται λίγο πριν τη θραύση του δοκιμίου και η ενέργεια σε αυτό το σημείο είναι αρκετά αυξημένη). Επίσης αξίζει να σημειωθεί το έντονο peak ενέργειας στο 12% μ.α. το οποίο πιθανώς να οφείλεται στους λόγους που έχουν περιγραφεί και στην προηγούμενη ανάλυση.

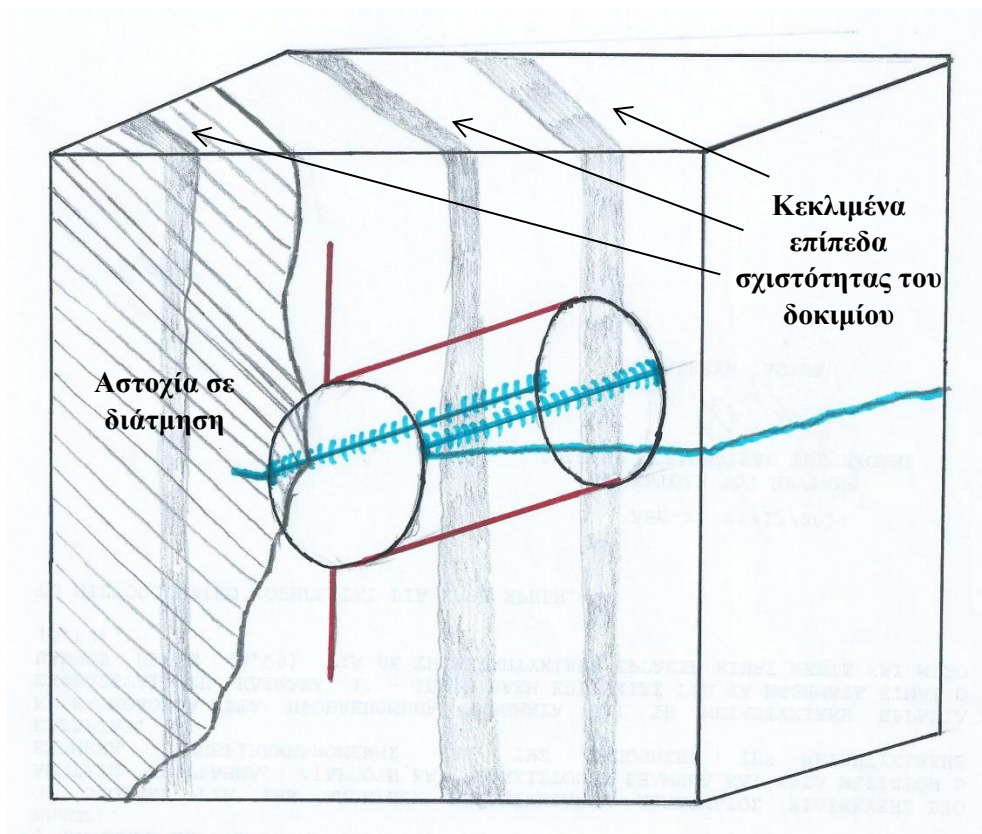
Φωτογραφική Τεκμηρίωση



Εικόνα 102 - Αστοχία στα όρια της σχιστότητας του δοκιμίου



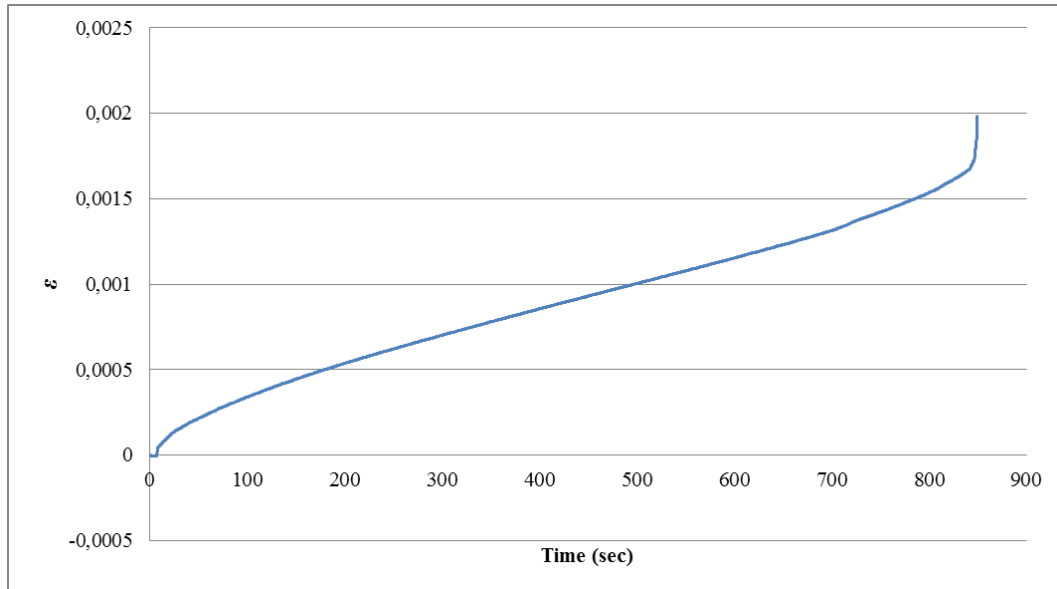
Εικόνα 103 - Αστοχία του δοκιμίου σε διάτμηση



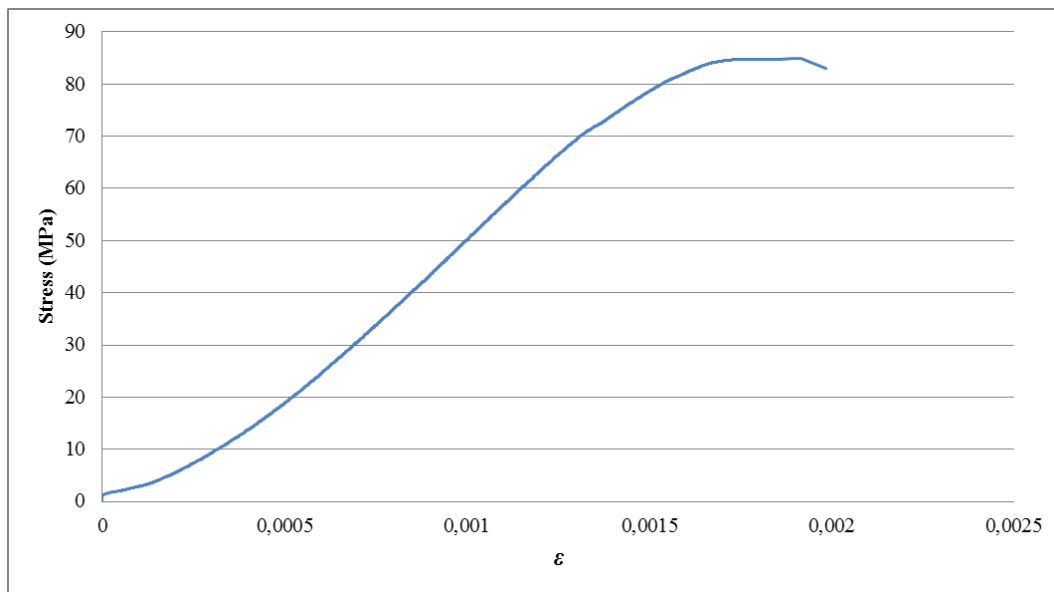
Εικόνα 104 - Σκαρίφημα του δοκιμίου για τη λεπτομερή ανάλυση των επιπέδων αστοχίας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές και με μπλε χρώμα οι ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη

5.5.12 1^η πλάκα χωρίς οπή

Η δοκιμή έγινε με έλεγχο φορτίου και συγκεκριμένα με ρυθμό 750 (N/sec). Η μέγιστη αντοχή της πλάκας έφτασε τα 84.86 MPa. Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα από τα δεδομένα της πρέσας



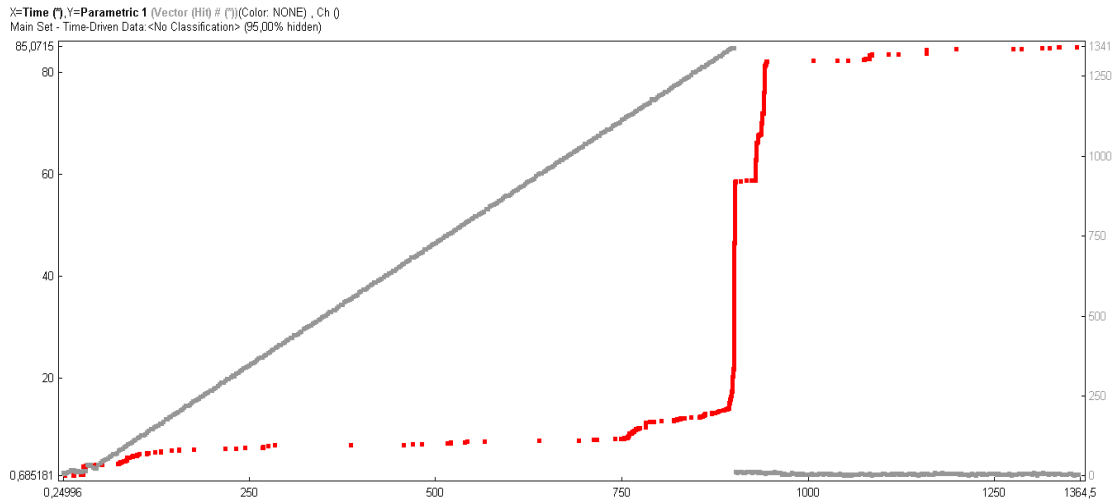
Σχήμα 163 - Διάγραμμα Ανηγμένης Παραμόρφωσης/Χρόνου



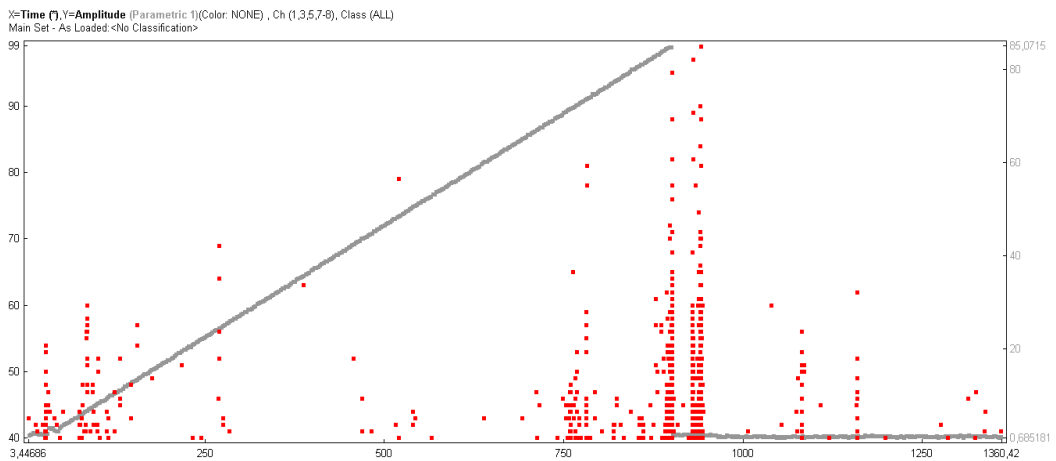
Σχήμα 164 - Διάγραμμα Τάσης/Ανηγμένης Παραμόρφωσης

Μελέτη της ΑΕ

Οι ρυθμίσεις των παραμέτρων του προγράμματος ΑΕ win ήταν ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα των μαρμαρίνων πλακών με σπή. Το threshold ήταν 25 dBae.



Σχήμα 165- Διάγραμμα ανάπτυξης των σημάτων κατά τη δοκιμή. Ο άξονας γ του παραμετρικού δηλώνει την τάση



Σχήμα 166 - Εμφάνιση του πλάτους των σημάτων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής



Εικόνα 105 - Αστοχία της πλάκας (χωρίς σπή) σε διάτμηση

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΣΕ ΓΥΨΙΝΑ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΟΠΗ

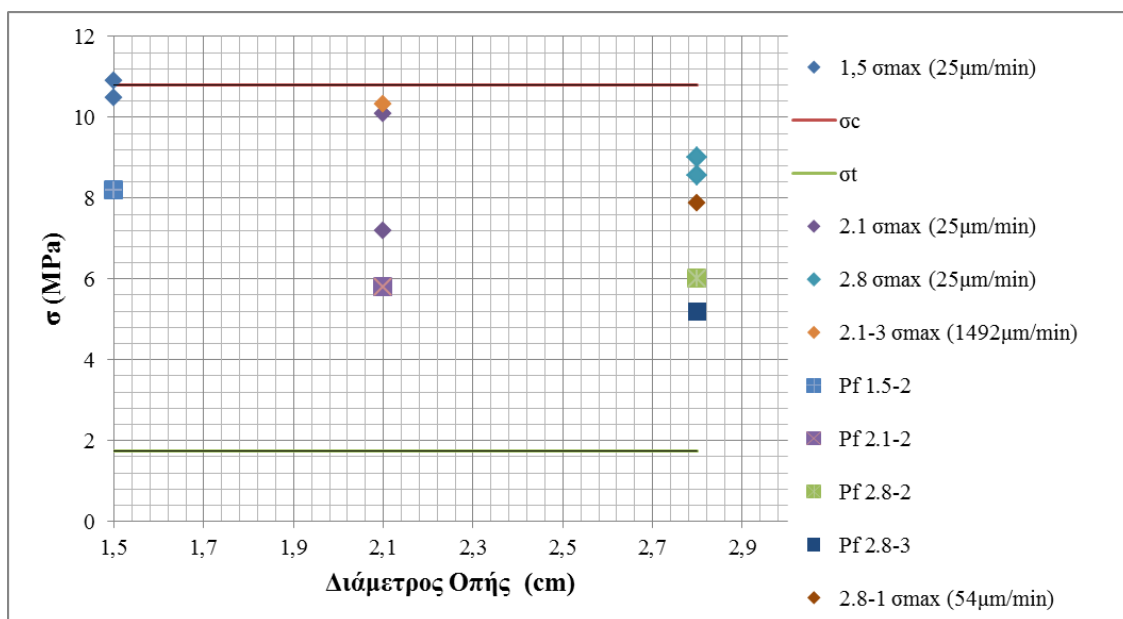
6.1.1 Επεξήγηση της δραστηριότητας ΑΕ

Κατά την ολοκλήρωση όλων των πειραμάτων στα γύψινα φυσικά μοντέλα με οπή καταλήξαμε στο πόρισμα ότι η εμφάνιση της πρώτης εφελκυστικής ρωγμής δεν μπορεί να συσχετιστεί με την καταγραφή σημάτων ΑΕ καθώς σε όλες σχεδόν τις δοκιμές παρατηρείται μια σταθερή διάδοση του φαινομένου χωρίς κάποιο διακριτό στιγμιότυπο συσσώρευσης σημάτων. Η εξήγηση αυτού του φαινομένου αποκτά δύο διαστάσεις.

Σε αντίστοιχα προγενέστερα πειράματα που έχουν εκτελεσθεί στο Εργαστήριο Τεχνολογίες Διάνοιξης Σηράγγων, στα οποία η δοκιμή γινόταν με *έλεγχο φορτίου*, η ΑΕ παρουσίαζε έντονη δραστηριότητα κατά την εμφάνιση της πρώτης εφελκυστικής ρωγμής η οποία μπορούσε να γίνει διακριτή με γυμνό μάτι. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι δοκιμές της παρούσας εργασίας που πραγματοποιήθηκαν με *έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου* (displacement control) δεν έδωσαν σαφή εικόνα της πρωτογενούς ρωγμάτωσης καθώς τα φαινόμενα ΑΕ αναπτύσσονταν με σταθερό ρυθμό και ταυτόχρονα με όλα τα άλλα φαινόμενα της διαδικασίας καταστροφής των δοκιμίων. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η εφελκυστική ρωγμή να δύναται να παρατηρηθεί με γυμνό μάτι μόνο σε υψηλά φορτία.

6.1.2 Συσχετισμός μεταξύ διαμέτρου οπής και τάσης

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα του Σχήματος 167, η κορυφαία αντοχή του δοκιμίου μειώνεται με την αύξηση της διαμέτρου της οπής. Ομοίως, η μακροσκοπική παρατήρησης της εφελκυστικής ρωγμάτωσης πάνω και κάτω από την οπή κατέστη δυνατή σε μικρότερη τάση με την αύξηση του διαμέτρου της οπής. Σε κάθε περίπτωση, η τάση μακροσκοπικής παρατήρησης της εφελκυστικής ρωγμής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του γύψου, όπως μετρείται σε δοκιμές Brazilian.



Σχήμα 167 - Συσχετισμός μεταξύ διαμέτρου οπής και τάσης των γύρινων φυσικών μοντέλων με οπή

Πίνακας 71 - Επεξήγηση του υπομνήματος του Σχήματος 167

Υπόμνημα Excel	Επεξήγηση
σ _c	Αντοχή σε εφελκυσμό
σ _t	Αντοχή σε θλίψη
1,5 σ _{max} (25 μm/min)	Μέγιστη αντοχή των (δύο) πλακών με οπή 1,5 cm των οποίων η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (25 μm/min)
2.1 σ _{max} (25 μm/min)	Μέγιστη αντοχή των (δύο) πλακών με οπή 2,1 cm των οποίων η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (25 μm/min)
2.8 σ _{max} (25 μm/min)	Μέγιστη αντοχή των (δύο) πλακών με οπή 2,8 cm των οποίων η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (25 μm/min)
2.1-3 σ _{max} (1492 μm/min)	Μέγιστη αντοχή της 3 ^{ης} πλάκας με οπή 2,1 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (1492 μm/min)
2.8-1 σ _{max} (54 μm/min)	Μέγιστη αντοχή της 1 ^{ης} πλάκας με οπή 2,8 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (54 μm/min)
Pf 1.5-2	Μακροσκοπική εμφάνιση της εφελκυστικής ρωγμής στην 2 ^η πλάκα με οπή 1,5 cm
Pf 2.1-2	Μακροσκοπική εμφάνιση της εφελκυστικής ρωγμής στην 2 ^η πλάκα με οπή 2.1 cm
Pf 2.8-2	Μακροσκοπική εμφάνιση της εφελκυστικής ρωγμής στην 2 ^η πλάκα με οπή 2.8 cm
Pf 2.8-3	Μακροσκοπική εμφάνιση της εφελκυστικής ρωγμής στην 3 ^η πλάκα με οπή 2.8 cm

6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΟΠΗ ΑΠΟ ΜΑΡΜΑΡΟ ΔΙΟΝΥΣΟΥ

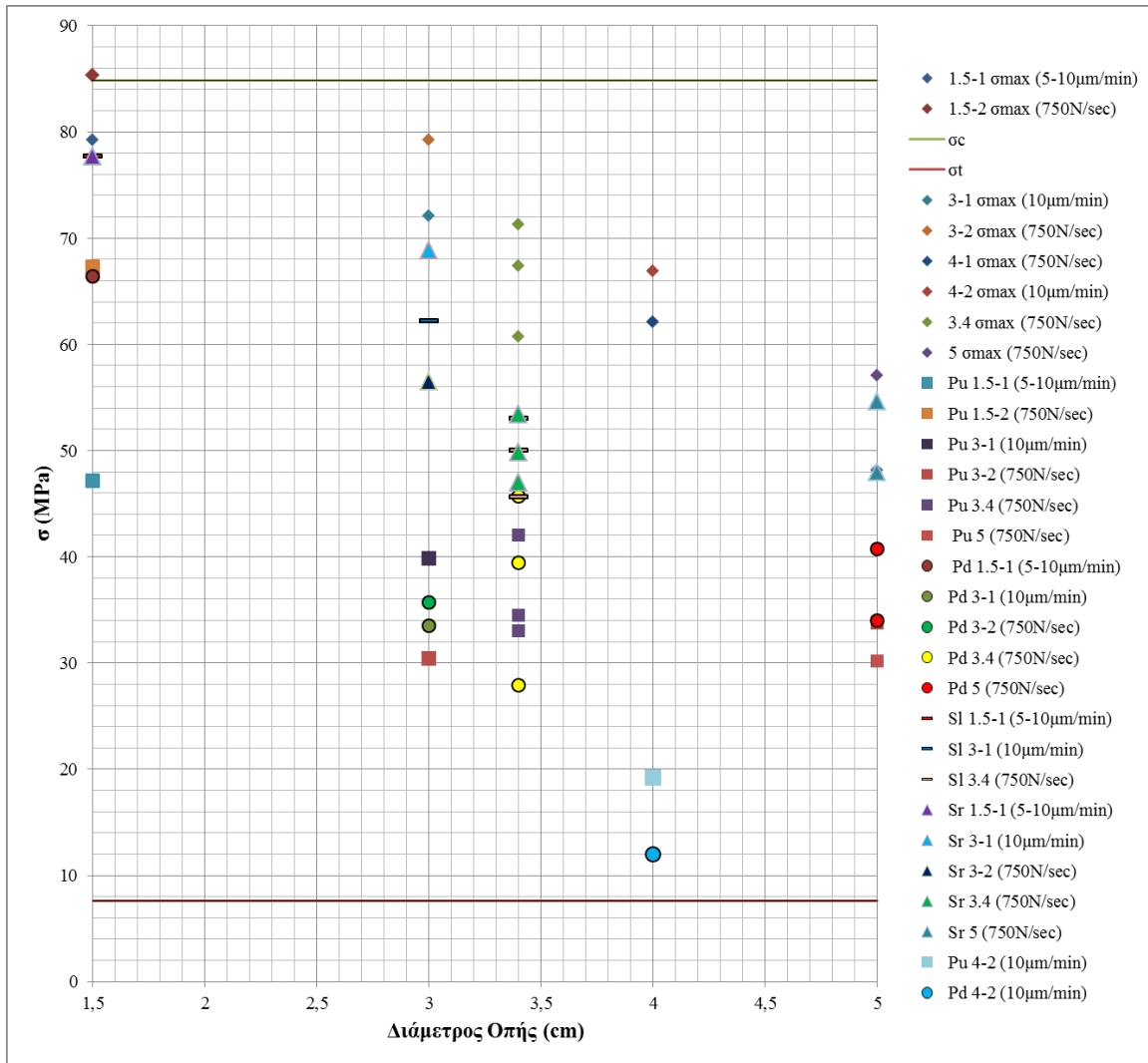
6.2.1 Επεξήγηση της δραστηριότητας ΑΕ

Η εικόνα της ΑΕ στα πειράματα των φυσικών μοντέλων με οπή από μάρμαρο Διονύσου φαίνεται να παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνα των αντίστοιχων γύψινων μοντέλων παρά το γεγονός ότι πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τόσο με έλεγχο της βράχυνσης του δοκιμίου όσο και με έλεγχο φορτίου. Και στην περίπτωση ελέγχου του ρυθμού φόρτισης της δοκιμής η ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών στο πάνω και στο κάτω όριο της οπής, εμφανίσθηκε ως μία σταθερή διεργασία η οποία μπορεί να αποδοθεί στους παρακάτω λόγους:

Όπως αναφέρεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο (βλέπε Κεφάλαιο 5) οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο θλίψης δυναμικότητας 5000 kN. Αυτό το πλαίσιο παρουσιάζει αρκετά μεγάλη δυσκαμψία γεγονός το οποίο δεν επιτρέπει στα φαινόμενα αστοχίας να εκτονωθούν σε τέτοιο βαθμό ώστε να παραχθούν αντίστοιχα σήματα ΑΕ.

Όπως παρουσιάζεται στις φωτογραφίες τεκμηρίωσης των δοκιμών, τα δοκίμια φέρουν σχιστότητα παράλληλα προς την αξονική φόρτιση. Αυτό έχει σαν πιθανό αποτέλεσμα τα σήματα που παράγονται κατά την εφελκυστική αποκόλληση της σχιστότητας να υπερκαλύπτουν τα σήματα της πρωτογενούς ρωγμάτωσης με αποτέλεσμα να απουσιάζουν στιγμιότυπα συσσώρευσης σημάτων. Επίσης εξ αιτίας της σχιστότητας ενδέχεται να διαφοροποιούνται οι μηχανισμοί ανάπτυξης της πρώτης εφελκυστικής ρωγμής η οποία παρατηρείται (μέσω φωτογραφιών) (βλέπε Σχήμα 168) σε αρκετά υψηλά επίπεδα τάσης.

6.2.2 Συσχετισμός μεταξύ διαμέτρου οπής και τάσης



Σχήμα 168 - Συσχετισμός μεταξύ διαμέτρου οπής και τάσης των μαρμάρινων φυσικών μοντέλων με οπή

Πίνακας 72 - Επεξήγηση του υπομνήματος του Σχήματος 168

Υπόμνημα Excel	Επεξήγηση
σc	Αντοχή σε εφελκυσμό
σt	Αντοχή σε θλίψη
1.5-1 σmax (5-10μm/min)	Μέγιστη αντοχή της 1 ^{ης} πλάκας με οπή 1,5 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (5-10 μm/min)
1.5-2 σmax (750N/sec)	Μέγιστη αντοχή της 2 ^{ης} πλάκας με οπή 1,5 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
3-1 σmax (10μm/min)	Μέγιστη αντοχή της 1 ^{ης} πλάκας με οπή 3 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (10 μm/min)

3-2 σ_{max} (750N/sec)	Μέγιστη αντοχή της 2 ^{ης} πλάκας με οπή 3 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750 N/sec)
4-1 σ_{max} (750N/sec)	Μέγιστη αντοχή της 1 ^{ης} πλάκας με οπή 4 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750 N/sec)
4-2 σ_{max} (10 μ m/min)	Μέγιστη αντοχή της 2 ^{ης} πλάκας με οπή 4 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (10 μ m/min)
3.4 σ_{max} (750N/sec)	Μέγιστη αντοχή των πλάκων με οπή 3,4 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750 N/sec)
5 σ_{max} (750N/sec)	Μέγιστη αντοχή των πλάκων με οπή 5 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750 N/sec)
Pu 1.5-1 (5-10 μ m/min)	Άνω εφελκυστική ρωγμή στην 1 ^η πλάκα με οπή 1,5 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (5-10 μ m/min)
Pu 1.5-2 (750N/sec)	Άνω εφελκυστική ρωγμή στην 2 ^η πλάκα με οπή 1,5 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Pu 3-1 (10 μ m/min)	Άνω εφελκυστική ρωγμή στην 1 ^η πλάκα με οπή 3 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (10 μ m/min)
Pu 3-2 (750N/sec)	Άνω εφελκυστική ρωγμή στην 2 ^η πλάκα με οπή 3 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Pu 3.4 (750N/sec)	Άνω εφελκυστική ρωγμή στις πλάκες με οπή 3,4 cm των οποίων η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Pu 5 (750N/sec)	Άνω εφελκυστική ρωγμή στις πλάκες με οπή 5 cm των οποίων η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Pd 1.5-1 (5-10 μ m/min)	Κάτω εφελκυστική ρωγμή στην 1 ^η πλάκα με οπή 1,5 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (5-10 μ m/min)
Pd 3-1 (10 μ m/min)	Κάτω εφελκυστική ρωγμή στην 1 ^η πλάκα με οπή 3 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (10 μ m/min)
Pd 3-2 (750N/sec)	Κάτω εφελκυστική ρωγμή στην 2 ^η πλάκα με οπή 3 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Pd 3.4 (750N/sec)	Κάτω εφελκυστική ρωγμή στις πλάκες με οπή 3,4 cm των οποίων οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Pd 5 (750N/sec)	Κάτω εφελκυστική ρωγμή στις πλάκες με οπή 5 cm των οποίων οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Sl 1.5-1 (5-10 μ m/min)	Αποφλοίωση αριστερά της οπής στην 1 ^η πλάκα με οπή 1,5 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (5-10 μ m/min)
Sl 3-1 (10 μ m/min)	Αποφλοίωση αριστερά της οπής στην 1 ^η πλάκα με οπή 3 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (10 μ m/min)

Sl 3.4 (750N/sec)	Αποφλοίωση αριστερά της οπής στις πλάκες με οπή 3,4 cm των οποίων οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Sr 1.5-1 (5-10μm/min)	Αποφλοίωση δεξιά της οπής στην 1 ^η πλάκα με οπή 1,5 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (5-10μm/min)
Sr 3-1 (10μm/min)	Αποφλοίωση δεξιά της οπής στην 1 ^η πλάκα με οπή 3 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (10μm/min)
Sr 3-2 (750N/sec)	Αποφλοίωση δεξιά της οπής στην 2 ^η πλάκα με οπή 3 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Sr 3.4 (750N/sec)	Αποφλοίωση δεξιά της οπής στις πλάκες με οπή 3,4 cm των οποίων οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Sr 5 (750N/sec)	Αποφλοίωση δεξιά της οπής στις πλάκες με οπή 5cm των οποίων οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (750N/sec)
Pu 4-2 (10μm/min)	Πάνω εφελκυστική ρωγμή στην 2 ^η πλάκα με οπή 4 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (10μm/min)
Pd 4-2 (10μm/min)	Κάτω εφελκυστική ρωγμή στην 2 ^η πλάκα με οπή 4 cm της οποίας η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο μετακίνησης του εμβόλου (10μm/min)

6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Γεγονός του ότι σε δύσκαμπτες μηχανές φόρτισης δεν μπορούμε να διακρίνουμε τα φαινόμενα ανάπτυξης των ρωγμών θα προτεινόταν η αξιολόγηση των ρωγμών να γινόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα της φόρτισης του δοκιμίου μέσω ειδικών τομών του υλικού γύρω από την οπή για την εξέταση τους σε μικροσκόπιο. Μία δεύτερη παρεμφερής πρόταση για την ακριβή οπτική παρατήρηση των αρχικών ρωγμών θα ήταν η εγκατάσταση ειδικού μικροσκοπίου πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου το οποίο να έχει τη δυνατότητα να καταγράφει μέσω εικόνων ή video την εξέλιξη των φαινομένων συναρτήσει της φόρτισης του δοκιμίου.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Κατσιογιάννη Γ.Π., 2006. ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Λοτίδης Μιχαήλ 2016, Υποψήφιος Διδάκτορας (Προσωπική Επικοινωνία).
- Μπακογιάννης Σ., 2011. Διπλωματική εργασία «Ακουστική Εκπομπή κατά την καταπόνηση βωξίτη» Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Νομικός Π.Π, 2016. «Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Αθήνα.
- Παπαδόπουλος Β., 2007. Σημειώσεις μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Σοφιανός Α.Ι., Νομικός Π.Π., 2008. Σημειώσεις μαθήματος «Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων», ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων έργων», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μηχανική συμπεριφορά των υλικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_VII.pdf.
- Φραγκόπουλος Ι, Σκουνάκης Σ (1963). «Εγχειρίδιο Πετρογραφικής Γεωλογίας»

7.2 ΞΕΝΗ

- Paterson M.S, Wong T, 2005, “Experimental Rock Deformation-The Brittle Field”, Second Edition, Springer Berlin Heidelberg New York
- Madhukar Vable, «Intermediate Mechanics of Materials», Chapter 7, Michigan Department of Mechanical Engineering http://www.me.mtu.edu/~mavable/MEEM4405/Energy_slides.pdf
- Cai M, Kaiser P.K., Tasaka Y., Maejima T., Morioka H., Minami M., 2004, «Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations», IntJ RockMech.Min.Sci 2004;41:833–47
- Eberhardt E. et.al 1998, Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock
- Carter B.J., Lajtai E.Z., Petukhov A, 1991, «Primary and remote fracture around underground cavities», International journal for numerical and analytical methods in Geomechanics Vol.15, 21-40,
- Carter B.J., 1992, «Size and Stress Gradient Effects on Fracture Around Cavities», Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer-Verlag

- Lajtai E.Z., Lajtai V. N., 1975, «The collapse of cavities», Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 12, pp. 81-86. Pergamon Press
- Lajtai E.Z., 1971, «Effect of tensile stress gradient on brittle fracture initiation», Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9, pp. 569-578, Pergamon Press
- Ganne, Patrick, Vervoort, André, Wevers, Martine, 2006, "Proc. ECNDT 2006, 9th European Conference on Non-Destructive" p.p. 1-9, IC
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., and Zimmerman R.W., 2007. Fundamentals of Rock Mechanics (Fourth Edition)
- NDT Resource Center, http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm
- Unnþórsson R., 2013, Hit Detection and Determination in AE Bursts, INTECH
- Hardy H.R., 2003, Acoustic Emission/Microseismic Activity, Principles, Techniques and Geotechnical Applications, Volume 1, A.a.Balkema Publishers
- ISRM (2002), Commission on Application of Geophysics to Rock Engineering. Suggested method for in-situ stress measurement from a rock core using the Acoustic Emission technique. 5th Int Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering, pp.61-66