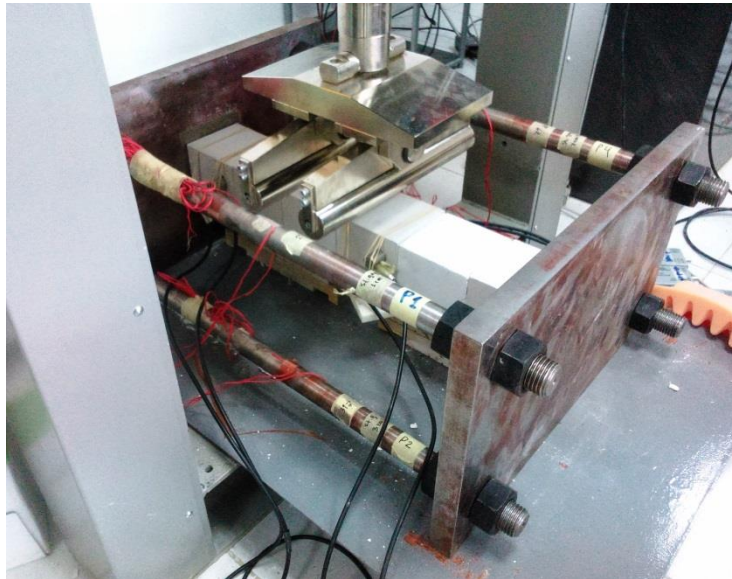




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς ρωγματωμένων δοκών πετρώματος



Διπλωματική εργασία

του

Θεοχάρη Μηνά

**Επιβλέπων Καθηγητής: Παύλος Π.Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς ρωγματωμένων δοκών πετρώματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΘΕΟΧΑΡΗ ΜΗΝΑ

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Π.Νομικός

.....
Α.Σοφιανός

.....
Α.Μπενάρδος

Αθήνα, 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ειδικά θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής κ.Παύλο Νομικό, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών. Ο χρόνος που διέθεσε, η καθοδήγηση και οι σημαντικές γνώσεις που μου προσέφερε ήταν πολύ σημαντικές για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής. Υπήρξε καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας της συγγραφής διαθέσιμος να μου προσφέρει λύσεις και βοήθεια για οποιαδήποτε απορία και πρόβλημα που δημιουργήθηκαν στα στάδια της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Γιώργο Παπαντωνόπουλο Δρ. Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργό, για την πολύτιμη βοήθεια του σε θέματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής, όπως και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Δημήτριο Κοτσάνη, που με βοήθησε με τις δοκιμές χαρακτηρισμού προσφέροντας τις γνώσεις του και την πρότυπη πειραματική διάταξη που έφτιαξε ο ίδιος. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Τεχνολογίας Διανοίξεως Σηράγγων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, που ήταν πρόθυμοι να λύσουν την οποιαδήποτε απορία.

Βέβαια το πιο μεγάλο και θερμό ευχαριστώ, το οφείλω στην οικογένεια μου, και ιδιαίτερα στον αδερφό μου Γιώργο, και στους φίλους μου, που πάντα πίστευαν ακράδαντα στις ικανότητές μου, πιέζοντάς με να θέτω στόχους και να τους πετυχαίνω.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η μηχανική συμπεριφορά εγκάρσιων ρωγματομένων δοκών πετρώματος, με την πραγματοποίηση δοκιμών κάμψης με τη βοήθεια ειδικής πειραματικής διάταξης τοποθετημένης στο πλαίσιο φόρτισης. Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά υλικά από τα οποία αποτελούνταν η δοκός. Τα υλικά ήταν γύψος, τσιμεντοκονίαμα και μάρμαρο (Διονύσου και Βόλακα). Συνολικά υποβλήθηκαν σε κάμψη 4 δοκοί γύψου μήκους 60 cm (Αποτελείται η κάθε δοκός από 6 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 10cm x 10cm x 10 cm), 2 δοκοί τσιμεντοκονίαματος μήκους 60 cm (Αποτελείται η κάθε δοκός από 6 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 10cm x 10cm x 10 cm), μία δοκός μαρμάρου Διονύσου μήκους 60 cm (Αποτελείται από 12 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5cm x 5cm x 5cm) και μία δοκός μαρμάρου Βόλακα μήκους 60 cm (Αποτελείται από 12 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5cm x 5cm x 5cm).

Σε συνδυασμό με την δοκιμή κάμψης, πραγματοποιήθηκε και καταγραφή της ακουστικής εκπομπής των δοκών, για την συσχέτιση της μηχανικής απόκρισης του πετρώματος με τα γεγονότα της ακουστικής εκπομπής. Για την επεξεργασία των δεδομένων της ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο Noesis, που διαθέτει το εργαστήριο Τεχνολογίας Διανοίξεως Σηράγγων.

Ακόμη πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές χαρακτηρισμού κυλινδρικών δοκιμίων γύψου και τσιμέντου και συγκεκριμένα δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για να μετρηθεί η αντοχή του υλικού σε μονοαξονική θλίψη σ_c , το μέτρο ελαστικότητας E, όπως επίσης και δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian Test), για την μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής του υλικού.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε για όλες τις περιπτώσεις αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκών, χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο Phase² version 9.0, της εταιρείας Rocscience.

Οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής ήταν:

- Η παρακολούθηση της εκάστοτε μορφής αστοχίας.
- Η μέτρηση της αξονικής δύναμης που αναπτύχθηκε στις δοκούς κατά την κάμψη.
- Η συσχέτιση της ακουστικής εκπομπής με την μηχανική απόκριση των δοκών πετρώματος.
- Η αριθμητική προσομοίωση των δοκών.

ABSTRACT

This thesis studied the mechanical behavior of transverse jointed rock beams, by performing bending tests using an experimental device, which was placed under the bending machine. We have used three different materials, of which the rock beams were comprised. The materials were gypsum, cement and marble (Dionysos and Bolakas marble). Totally we used four gypsum beams, with 60cm length each (Each beam consists of 6 cubic pieces – The dimension of each cubic piece is 10cm x 10cm x 10cm), two cement beams, with 60cm length each (Each beam consists of 6 cubic pieces – The dimension of each cubic piece is 10cm x 10cm x 10cm), one Dionysos marble beam, with 60 cm length (The beam consists of 12 cubic pieces – The dimension of each cubic piece is 5cm x 5cm x 5cm) and one Bolakas marble beam, with 60cm length (The beam consists of 12 cubic pieces – The dimension of each cubic piece is 5cm x 5cm x 5cm).

Simultaneously with the bending test we used in each beam acoustic emission, for the correlation of the mechanical response of the rock with the events of acoustic emission. For the processing of the data of acoustic emission, we have used the software package Noesis, provided by the Tunnelling Laboratory.

We have performed also characterization tests in cylindrical gypsum and cement pieces, and specifically uniaxial compressive tests to measure the uniaxial compressive strength σ_c of the materials, the elastic modulus E , as well as Brazilian tests, to measure the tensile strength of the materials.

Finally, we performed for all the different material beams numerical simulations of the mechanical behavior of the beams using the software package Phase2 version 9.0, by Rocscience.

The objectives of this thesis were:

- Monitoring each form of failure.
- Measurement of the axial force developed in the beams during bending.
- Acoustic emission correlation with the mechanical response of rock beams.
- Numerical simulation of rock beams.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	[1]
Ευχαριστίες	[1]
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	[3]
ABSTRACT.....	[5]
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
Κάμψη δοκού	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Στατική κάμψη δοκών	1
1.3 Εσωτερικές τάσεις	2
1.4 Θεωρία κάμψης Euler – Bernoulli	3
1.4.1 Ουδέτερος άξονας	4
1.4.2 Ελαστική γραμμή	6
1.5 Επεκτάσεις της θεωρίας κάμψης Euler – Bernoulli.....	7
1.5.1 Πλαστική ανάλυση.....	7
1.5.2 Ελαστοπλαστική ανάλυση.....	7
1.5.3 Σύνθετη ή μη-συμμετρική κάμψη.....	8
1.5.4 Ευρεία παραμόρφωση κάμψης.....	8
1.6 Θεωρία κάμψης Timoshenko	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	12
Μηχανική συμπεριφορά εγκάρσια ρωγματωμένων δοκών	12
2.1 Εισαγωγή	12
2.2 Ιστορική αναδρομή	12
2.3 Θεωρητική ανάλυση των δοκών οροφής	17
2.3.1 Γενικά στοιχεία	17
2.3.2 Μετάβαση από το τόξο voussoir στην αντίστοιχη δοκό.....	20
2.4 Τρόποι αστοχίας της ρωγματωμένης δοκού	27
2.4.1 Ελαστικός λυγισμός της δοκού – Μηχανική αστάθεια της δοκού (Elastic buckling of the voussoir beam)	27
2.4.1.1 Νεώτερη θεώρηση για την μηχανική αστοχία της δοκού.....	31
2.4.2 Αστοχία από σύνθλιψη στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων (Failure by crushing at high stress areas).....	31
2.4.2.1 Μοχλοβραχίονας Z.....	32
2.4.2.2 Αξονική δύναμη T	33

2.4.2.3 Μήκος κεντροειδούς αξονικής δύναμης	33
2.4.2.4 Κατανομή των τάσεων στις ασυνέχειες.....	34
2.4.2.5 Αντοχή σύνθλιψης	35
2.4.2.6 Νεώτερη θεώρηση	35
2.4.3 Αστοχία της δοκού σε ολίσθηση στις πλευρικές ασυνέχειες (Shear Sliding)	36
2.4.3.1 Νεώτερη θεώρηση	37
2.4.4 Διαγώνια ρωγμάτωση.....	37
2.4.5 Συμπεράσματα για τους τρόπους αστοχίας	37
2.5 Το μοντέλο ρωγματωμένης δοκού του Evans	38
2.6 Θεωρία γραμμικού τόξου (Linear arch technique)	41
2.7 Θεωρία παραβολικής καμπύλης πιέσεων	45
2.7.1 Αναλυτική επίλυση στην ελαστική περιοχή	45
2.7.2 Μηχανική αστάθεια και αστοχία λόγω κάμψης.....	49
2.7.3 Σύνθλιψη του πετρώματος.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	54
Ακουστική εκπομπή του πετρώματος.....	54
3.1 Ορισμός και προέλευση της ακουστικής εκπομπής	54
3.2 Πλεονεκτήματα μεθόδου ακουστικής εκπομπής	56
3.3 Μειονεκτήματα της ακουστικής εκπομπής.....	57
3.4 Σήματα ακουστικής εκπομπής	58
3.5 Παράμετροι ακουστικής εκπομπής	60
3.6 Θόρυβος και εξασθένιση	62
3.7 Ιδιότητες κυμάτων ακουστικής εκπομπής	64
3.8 Συστήματα παρακολούθησης ακουστικής εκπομπής.....	67
3.8.1 Αισθητήρες και προενισχυτές.....	67
3.8.2 Μονάδα επεξεργασίας.....	69
3.9 Εφαρμογές ακουστικής εκπομπής στη μηχανική πετρωμάτων	72
3.10 Φαινόμενο Kaiser	76
3.11 Ακουστική εκπομπή πετρώματος κατά τη μονοαξονική θλίψη	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	79
Ηλεκτρικά στοιχεία πειραματικής διάταξης – Συνδεσμολογία	79
4.1 Μεταλλικά strain gages	79
4.2 Γέφυρα Wheatstone	82

4.3 Συνδεσμολογία strain gauges – Wheatston bridge - Η επίδραση της αντίστασης των αγωγών (Lead resistance).....	84
4.3.1 Συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ (Simple quarter bridge circuit)	84
4.3.2 Συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ σε κύκλωμα τριών καλωδίων (Quarter bridge in a three-wire circuit).....	86
4.3.3 Συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ με αντισταθμιστικά strain gages (Quarter bridge with compensating strain gage)	87
4.3.4 Συνδεσμολογία $\frac{2}{4}$ ή διαγώνιας γέφυρας (Double quarter or diagonal bridge).....	87
4.3.5 Συνδεσμολογία $\frac{1}{2}$ ή μισής γέφυρας (Half bridge circuit)	88
4.3.6 Συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (Full bridge circuit)	89
4.4 Μετρήσεις παραμορφώσεων σε καμπτόμενη δοκό.....	89
4.5 Συμμετρικές διατομές δοκού, φορτισμένες με αξονική δύναμη και καμπτική ροπή.....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	93
Δοκιμές χαρακτηρισμού	93
5.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	93
5.1.1 Εισαγωγή.....	93
5.1.2 Διαμόρφωση και προετοιμασία των δοκιμών στο εργαστήριο	94
5.1.3 Τυπική πειραματική διαδικασία.....	95
5.1.4 Προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών ισότροπου πετρώματος.....	97
5.1.5 Μικρορωγμάτωση και παραμόρφωση του πετρώματος	100
5.1.6 Εντατικό πεδίο στο δοκίμιο και επίδραση του λόγου ύψους προς διάμετρο .	103
5.1.7 Επίδραση της προετοιμασίας των δοκιμών	106
5.1.8 Επίδραση του μεγέθους των δοκιμών	106
5.1.9 Επίδραση του ρυθμού φόρτισης	107
5.1.10 Συμπεριφορά μετά τη μέγιστη αντοχή.....	107
5.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	110
5.2.1 Εντατική κατάσταση του δοκιμίου και υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής	111
5.2.2 Πρότυπη πειραματική διαδικασία.....	113
5.2.3 Επίδραση της ανομοιογένειας και ανισοτροπίας του πετρώματος	114
5.2.4 Αξιολόγηση της δοκιμής.....	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	116
Προετοιμασία δοκιμών και χαρακτηρισμός υλικών.....	116
6.1 Δοκίμια γύψου	116
6.1.1 Η γύψος ως υλικό	116

6.1.2 Παρασκευή δοκιμών γύψου.....	117
6.1.3 Δοκιμές χαρακτηρισμού σε δοκίμια γύψου	119
6.1.3.1 Δοκιμή μοναξονικής θλίψης δοκιμών γύψου.....	119
6.1.3.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης δοκιμών γύψου (Brazilian Test).....	122
6.2 Δοκίμια τσιμέντου	126
6.2.1 Παρασκευή δοκιμών τσιμέντου.....	126
6.2.2 Δοκιμές χαρακτηρισμού σε δοκίμια τσιμέντου.....	129
6.2.2.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης δοκιμών τσιμέντου.....	129
6.2.2.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης δοκιμών τσιμέντου (Brazilian Test).....	132
6.3 Δοκίμια μαρμάρου Διονύσου	136
6.3.1 Το μάρμαρο Διονύσου ως υλικό	136
6.3.2 Δοκιμές χαρακτηρισμού δοκιμών μαρμάρου.....	137
6.4 Δοκίμια μαρμάρου Βώλακα.....	138
6.4.1 Το μάρμαρο Βώλακα ως υλικό	138
6.4.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά μαρμάρου Βώλακα	139
6.5 Πίνακες μηχανικών χαρακτηριστικών.....	139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	141
Εργαστηριακές δοκιμές.....	141
7.1 Εισαγωγή	141
7.1.1 Σκοπός πειραματικής διαδικασίας	141
7.1.2 Ειδική πειραματική διάταξη για την εκτέλεση δοκιμών κάμψης ρωγματομένων δοκών πετρώματος	141
7.1.3 Σύνοψη εργαστηριακών δοκιμών.....	144
7.1.4 Πλαίσια φόρτισης και μονάδα ελέγχου υδραυλικού κυκλώματος.....	145
7.2 Εργαστηριακές δοκιμές σε δοκούς γύψου.....	145
7.2.1 Δοκιμαστική εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό γύψου (Δοκός 1).....	145
7.2.1.1 Αποτελέσματα φόρτισης.....	147
7.2.1.2 Παρατηρήσεις.....	147
7.2.1.3 Βέλος κάμψης.....	149
7.2.1.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	150
7.3 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό γύψου (Δοκός 2)	153
7.3.1 Αποτελέσματα φόρτισης.....	157
7.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	158

7.3.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής.....	159
7.3.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής.....	162
7.4 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό γύψου (Δοκός 3) – Επίδραση της ανομοιογένειας	162
7.4.1 Αποτελέσματα φόρτισης.....	164
7.4.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	168
7.4.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής.....	170
7.4.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής.....	175
7.5 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό γύψου (Δοκός 4)	176
7.5.1 Αποτελέσματα φόρτισης.....	177
7.5.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	181
7.5.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής.....	183
7.5.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής.....	186
7.6 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό τσιμέντου (Δοκός 5)	187
7.6.1 Αποτελέσματα φόρτισης.....	188
7.6.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	192
7.6.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής.....	195
7.6.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής.....	198
7.7 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό τσιμέντου (Δοκός 6)	199
7.7.1 Αποτελέσματα φόρτισης.....	200
7.7.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	203
7.7.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής.....	205
7.7.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής.....	209
7.8 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό μαρμάρου Διονύσου (Δοκός 7).....	209
7.8.1 Αποτελέσματα φόρτισης.....	210
7.8.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	213
7.8.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής.....	215
7.8.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής.....	219
7.9 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό μαρμάρου Βώλακα (Δοκός 8)	219
7.9.1 Αποτελέσματα φόρτισης.....	220
7.9.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	223
7.9.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής.....	226
7.9.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής.....	229
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	231

Αριθμητική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς εγκάρσιας ρωγματωμένης δοκού	231
8.1 Εισαγωγή	231
8.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	231
8.3 Αριθμητική προσομοίωση δοκού γύψου (Δοκός 4)	233
8.4 Αριθμητική προσομοίωση δοκού τσιμέντου (Δοκός 6)	243
8.5 Αριθμητική προσομοίωση δοκού μαρμάρου Διονύσου (Δοκός 7).....	248
8.6 Αριθμητική προσομοίωση δοκού μαρμάρου Βώλακα	255
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	262
Συμπεράσματα	262
Βιβλιογραφία	274

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Μία στατικά ορισμένη (αμφιέριστη) δοκός, που κάμπτεται κάτω από ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 1.2 Τμήμα δοκού σε κάμψη: Οι ίνες σχηματίζουν ομόκεντρα τόξα, οι πάνω ίνες συμπιέζονται, και οι κάτω ίνες εφελκύνονται	2
Σχήμα 1.3 Οι καμπτικές ροπές στην δοκό.....	2
Σχήμα 1.4 Κάμψη μιας δοκού Euler – Bernoulli.Κάθε διατομή της δοκού είναι κάθετη στον ουδέτερο άξονα	3
Σχήμα 1.5 Συμμετρική κάμψη μιάς δοκού και η αρχή της υπέρθεσης.....	5
Σχήμα 1.6 Παραμόρφωση λόγω κάμψης.Η μέγιστη υποχώρηση ή αλλιώς το μέγιστο βέλος κάμψης εμφανίζεται στο ελεύθερο (δεξιό) άκρο.....	6
Σχήμα 1.7 Παραμόρφωση και τάση στην διατομή	7
Σχήμα 1.8 Πραγματική και απλοποιημένη καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης όλκιμου υλικού	8
Σχήμα 1.9 Δοκός σε κάμψη όπου διακρίνεται η ακτίνα καμπυλότητας ρ	9
Σχήμα 1.10 Παραμόρφωση μιάς δοκού Timoshenko.Η κάθετος στρέφεται κατά μία γωνία θ , που δεν ισούται με dw/dx	10
Σχήμα 2.1 Στρωσιγενές πέτρωμα	12
Σχήμα 2.2 Συνέπειες της ολίσθησης και του διαχωρισμού, στη διεπιφάνεια των στρώσεων, στη μηχανική συμπεριφορά του περιβάλλοντος πετρώματος	13
Σχήμα 2.3 Ζώνη χαλαρώσεως, γύρω από υπόγεια εκσκαφή (θόλος Fayol)	13
Σχήμα 2.4 Τόξο voussoir σε αψιδωτή κατασκευή	18

Σχήμα 2.5 Αστοχία τόξου voussoir με μηχανική αστάθεια του φορέα του	18
Σχήμα 2.6 Εντατική κατάσταση στη διεπιφάνεια των τεμαχίων voussoir	19
Σχήμα 2.7 Καμπύλη πιέσεων στο τόξο voussoir με κατασκευή σχοινοπολυγώνου	19
Σχήμα 2.8 Η μετάβαση από το τόξο voussoir στη δοκό voussoir	21
Σχήμα 2.9 Ελαστική δοκός στηριζόμενη (α) σε πακτωμένα άκρα και (β) με απλή έδραση	21
Σχήμα 2.10 Φυσικό ομοίωμα παρατήρησης της διαδικασίας αστοχίας στρωσιγενούς οροφής.....	22
Σχήμα 2.11 Πειραματική συσκευή κατακόρυφης φόρτισης δοκιμίων με πλευρική παρεμπόδιση της παραμόρφωσης	24
Σχήμα 2.12 Μεταβολή του βέλους και της πλευρικής ορθής δύναμης με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου	24
Σχήμα 2.13 Εξιδανίκευση της τεχνικής του γραμμικού τόξου.....	25
Σχήμα 2.14 Δοκός voussoir	26
Σχήμα 2.15 Διάγραμμα αξονικής δύναμης – κατακόρυφου φορτίου	26
Σχήμα 2.16 Πιθανές μορφές αστοχίας της δοκού voussoir: (α) μηχανική αστάθεια της δοκού, (β) σύνθλιψη του πετρώματος στο μέσο και στις στηρίξεις της δοκού, (γ) ολίσθηση στις στηρίξεις, (δ) διαγώνια ρωγμάτωση.....	27
Σχήμα 2.17 Διάγραμμα αξονικής δύναμης T, συναρτήσει του εγκάρσιου φορτίου για διαφορετικές τιμές του m	29
Σχήμα 2.18 Αριστερά: Κατανομή τάσεων για την μεσαία ασυνέχεια και , δεξιά: Κατανομή τάσεων για τις πλευρικές ασυνέχειες	34
Σχήμα 2.19 Θεωρητικό μοντέλο της δοκού voussoir με τρεις ασυνέχειες, μία στο μέσο και δύο στις στηρίξεις της.....	38
Σχήμα 2.20 Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στο μέσο της δοκού.....	40
Σχήμα 2.21 Διάγραμμα δυνάμεων του μισού σώματος της δοκού.....	42
Σχήμα 2.22 Διάγραμμα μετατοπίσεων του μισού σώματος της δοκού.....	43
Σχήμα 2.23 Θεωρητικό ομοίωμα παραμόρφωσης της δοκού voussoir με ασυνέχειες στα άκρα και στις στηρίξεις	45
Σχήμα 2.24 Διάγραμμα σχεδιασμού δοκών οροφής για έλεγχο έναντι αστοχίας μορφής μηχανισμού σύνθλιψης πετρώματος, λόγω υπέρβασης της επιτρεπόμενης τροπής και διατμητικής ολίσθησης στις στηρίξεις της δοκού	53
Σχήμα 2.25 Βέλος κάμψης, ροπή και μέγιστη αξονική παραμόρφωση για ελαστικές δοκούς με διάφορες συνθήκες στήριξης και για τη δοκό voussoir	53
Σχήμα 3.1 Α) Ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και Β) Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	54
Σχήμα 3.2 Φάσμα ηχητικών συχνοτήτων	55

Σχήμα 3.3 Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ	58
Σχήμα 3.4 (α) Τυπική μορφή κρουστικού σήματος ΑΕ, (β) τυπική μορφή συνεχούς σήματος ΑΕ.....	59
Σχήμα 3.5 Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα προκύπτοντα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας	60
Σχήμα 3.6 Ενδεικτικές τιμές των ταχυτήτων διάδοσης του ήχου σε διάφορα πετρώματα	65
Σχήμα 3.7 (α) Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της ΡΑC, (β) κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.....	67
Σχήμα 3.8 (α) Ένας εκ των αισθητήρων micro 100s, που διαθέτει το εργαστήριο Τεχνολογίας Διανοίξεως Σηράγγων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές και (β) Διάγραμμα απόκρισης (dB/συχνότητα) του συγκεκριμένου αισθητήρα	68
Σχήμα 3.9 Ένας εκ των προενισχυτών 2/4/6 που διαθέτει το εργαστήριο Τεχνολογίας Διανοίξεως Σηράγγων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές.....	69
Σχήμα 3.10 Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ.....	69
Σχήμα 3.11 Ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ οκτώ (8) καναλιών PCI-8, διαθέσιμο στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων.....	70
Σχήμα 3.12 Ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ δύο (2) καναλιών PCI-2, διαθέσιμο στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων.....	71
Σχήμα 3.13 Μεταβολή του ρυθμού ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου p (ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας p_{ult}) σε χονδρόκοκκο γρανίτη	72
Σχήμα 3.14 (α) Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής ΑΕ και (β) συσχέτιση της με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης .	73
Σχήμα 3.15 Διάγραμμα συχνότητας συναρτήσει του πλάτους για τον γρανίτη Westerly υπό μονοαξονική θλίψη.....	74
Σχήμα 3.16 Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης ΑΕ σε δοκίμιο γρανίτη Westerly διαμέτρου 76,2 mm υπό τριαξονική θλίψη με πλευρική πίεση $\sigma_3 = 50\text{MPa}$ και ελεγχόμενο ρυθμό εκπομπής ΑΕ	75
Σχήμα 3.17 Απλοποιημένη εργαστηριακή διάταξη (α) και χαρακτηριστικά αποτελέσματα του φαινομένου Kaiser (β).....	76
Σχήμα 3.18 Τυπικό διάγραμμα τάσης – τροπής για ένα ψαθυρό πέτρωμα σε θλίψη ...	78
Σχήμα 3.19 Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής του πετρώματος και συσχέτισή της με τη διαδικασία καταστροφής κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Στη μηχανική των πετρωμάτων το φαινόμενο της ΑΕ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον	78
Σχήμα 4.1 Τυπική μορφή ενός μεταλλικού strain gauge. Το strain gauge είναι πολύ πιο ευαίσθητο στην κατακόρυφη διεύθυνση από ότι στην οριζόντια. Τα σημάδια μακριά	

από την ενεργό περιοχή βοηθούν στην ευθυγράμμιση του κατά την διάρκεια της εγκατάστασης.....	79
Σχήμα 4.2 Οπτικοποίηση του μηχανισμού λειτουργίας σε ένα strain gage, τοποθετημένο σε μία δοκό κάτω από κάμψη	81
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα κυκλώματος Wheatstone	83
Σχήμα 4.4 Η επίδραση των αντιστάσεων των αγωγών για συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$	84
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα για τον προσδιορισμό της απομένουσας ένδειξης και του λάθους στο μετρούμενο σήμα ως αποτέλεσμα των αντιστάσεων των καλωδίων	85
Σχήμα 4.6 Επίδραση της αντίστασης καλωδίου για συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ σε κύκλωμα τριών καλωδίων	86
Σχήμα 4.7 Συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ με αντισταθμιστικά strain gages.....	87
Σχήμα 4.8 Συνδεσμολογία δύο τετάρτων ή διαγώνιας γέφυρας.....	87
Σχήμα 4.9 Συνδεσμολογία $\frac{1}{2}$	88
Σχήμα 4.10 Συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας.....	89
Σχήμα 4.11 Διάταξη των strain gages στην καμπτόμενη δοκό και στο κύκλωμα της γέφυρας	90
Σχήμα 4.12 Κυκλώματα που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε καμπτόμενη δοκό με αντιδιαμετρικά τοποθετημένα strain gages	90
Σχήμα 4.13 Τιμή παραμέτρου S, για τετράγωνες διατομές	91
Σχήμα 4.14 Παραδείγματα της κατανομής των τάσεων σε μία δοκό με υπερθετικά αξονικά και καμπτικά φορτία	92
Σχήμα 5.1 (α) Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr της θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου	93
Σχήμα 5.2 Κυλινδρικό δοκίμιο γύψου που θα χρησιμοποιηθεί για την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	96
Σχήμα 5.3 Χαλύβδινες πλάκες για την φόρτιση κυλινδρικών δοκιμίων πετρώματος....	97
Σχήμα 5.4 (α) Θέσεις και προσανατολισμός τροπόμετρων σε κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος, (β) εικόνα δοκιμίου πετρώματος με κολλημένα τροπόμετρα στην επιφάνειά του	98
Σχήμα 5.5 Διαγράμματα τάσης – τροπής δοκιμίου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη	98
Σχήμα 5.6 Γραφικός προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	100
Σχήμα 5.7 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	100
Σχήμα 5.8 Μακροσκοπική θραύση δοκιμίου πετρώματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Η θραύση αναπτύχθηκε παράλληλα ως προς την αξονική θλιπτική τάση.....	101

Σχήμα 5.9 Εξέλιξη της παραμόρφωσης και της μικρορωγμάτωσης πετρώματος κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	102
Σχήμα 5.10 Επίδραση του περιορισμού στα άκρα στην παραμόρφωση του δοκιμίου: (α) μερική ανάσχεση της πλευρικής διαστολής στα άκρα λόγω περιορισμού, (β) ενδεικτικές καμπύλες ίσων τιμών της μέγιστης κύριας τάσης στο εσωτερικό του δοκιμίου	103
Σχήμα 5.11 Επίδραση της λυγηρότητας στις καμπύλες σ-ε για φόρτιση μέσω συμπαγών χαλύβδινων πλακών	104
Σχήμα 5.12 Σχέση λόγου H/D και μετρούμενης αντοχής για έναν δολομίτη, έναν γρανίτη και έναν τραχείτη, σύμφωνα με τα πειράματα του Mogi (2006).....	105
Σχήμα 5.13 (α) Πλάκες φόρτισης με ακίδες, (β) επίδραση της λυγηρότητας του δοκιμίου στις καμπύλες σ-ε για φόρτιση μέσω χαλύβδινων πλακών με ακίδες.....	105
Σχήμα 5.14 Επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή.....	107
Σχήμα 5.15 Πλήρες διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίου πετρώματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	108
Σχήμα 5.16 Συμπεριφορά του δοκιμίου μετά την κορυφαία αντοχή	109
Σχήμα 5.17 Έλεγχος της περιμετρικής τροπής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με εκτασιόμετρο τύπου αλυσίδας.....	109
Σχήμα 5.18 (α) Δίσκος πετρώματος που φορτίζεται αντιδιαμετρικά σε θλίψη, (β) Σκαρίφημα της θραύσης, (γ) Εφελκυστική θραύση δίσκου πετρώματος κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης σε δοκιμή Brazilian	110
Σχήμα 5.19 Τυπικές διατάξεις φόρτισης: (α) επίπεδες πλάκες, (β) χαλύβδινα τόξα, (γ) καμπύλες χαλύβδινες σιαγόνες.....	111
Σχήμα 5.20 (α) Σχηματική αναπαράσταση των συνθηκών φόρτισης στη βραζιλιανή δοκιμή, (β) Ελαστική κατανομή των ορθών τάσεων κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης για γωνία $2^\alpha = 10^\circ$	111
Σχήμα 5.21 Επίδραση της γωνίας 2α	112
Σχήμα 5.22 Προτεινόμενη από την ISRM πειραματική διάταξη δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης, 1-δοκίμιο πετρώματος, 2-άνω σιαγόνα, 3-κάτω σιαγόνα, 4- ημισφαιρικό ρουλεμάν, 5-πείρος	113
Σχήμα 5.23 Αριθμητικά παραγόμενα περιγράμματα της μέγιστης διατμητικής τάσης σε αντιδιαμετρικά φορτιζόμενα δοκίμια δίσκου: (α) σε ομοιογενές υλικό, (β) σε ετερογενές υλικό. Η προσομοίωση έγινε με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC	114
Σχήμα 6.1 Το καλούπι που χρησιμοποιήθηκε για την Παρασκευή των δοκιμίων γύψου και τσιμέντου.....	117
Σχήμα 6.2 Οι δύο δοκοί γύψου που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα	117
Σχήμα 6.3 τρία κυλινδρικά δοκίμια γύψου στο βάθος για δοκιμή χαρακτηρισμού μονοαξονικής θλίψης και 3 κυλινδρικά δοκίμια γύψου (μπροστά) για Brazilian test.	117

Σχήμα 6.4 (α) Αριστερά, το πλαίσιο φόρτισης για την εκτέλεση της δοκιμής, (β) η ειδική διάταξη σχεδιασμένη από τον κ.Κοτσάνη Δημήτριο.....	119
Σχήμα 6.5 Τα 3 βελόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της αξονικής τροπής	120
Σχήμα 6.6 Τα 3 κυλινδρικά δοκίμια γύψου μετά το πέρας της δοκιμής και την αστοχία τους.....	122
Σχήμα 6.7 Αριστερά το πλαίσιο φόρτισης και δεξιά διακρίνονται οι σιαγόνες φόρτισης που συγκρατούν το δοκίμιο	123
Σχήμα 6.8 Τα δοκίμια γύψου μετά την αστοχία τους.....	126
Σχήμα 6.9 Οι δύο δοκοί τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθούν για το πείραμα.....	126
Σχήμα 6.10 Διακρίνεται το ίδιο καλούπι, από το οποίο παρασκευάσαμε τα δοκίμια γύψου, να χρησιμοποιείται για παρασκευή δοκιμών τσιμέντου	126
Σχήμα 6.11 Διακρίνονται πίσω τα 3 μεγάλα κυλινδρικά δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν για δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και μπροστά τα 3 δοκίμια για δοκιμή Brazilian	127
Σχήμα 6.12 (α) Διακρίνεται η μικρή δεξαμενή που διαθέτει το εργαστήριο, για την τοποθέτηση δοκιμών τσιμέντου, για την απόκτηση της τελικής τους αντοχής, (β) Η μεγάλη δεξαμενή τοποθέτησης δοκιμών τσιμέντου.....	128
Σχήμα 6.13 (α) Αριστερά, το πλαίσιο φόρτισης για την εκτέλεση της δοκιμής, (β) Η ειδική διάταξη σχεδιασμένη από τον κ.Κοτσάνη Δημήτριο	129
Σχήμα 6.14 Τα 3 βελόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της αξονικής τροπής.....	130
Σχήμα 6.15 Τα 3 κυλινδρικά δοκίμια τσιμέντου μετά το πέρας της δοκιμής και της αστοχίας τους	132
Σχήμα 6.16 Αριστερά το πλαίσιο φόρτισης και δεξιά διακρίνονται οι σιαγόνες φόρτισης που συγκρατούν το δοκίμιο	133
Σχήμα 6.17 Τα δοκίμια τσιμέντου μετά την αστοχία τους.....	135
Σχήμα 6.18 Η δοκός μαρμάρου Διονύσου που θα χρησιμοποιηθεί για την δοκιμή	138
Σχήμα 6.19 Η δοκός μαρμάρου Βώλακα που θα χρησιμοποιηθεί στην δοκιμή και αποτελείται από 12 άρρηκτα κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5cm x 5cm x 5cm.....	138
Σχήμα 7.1 Πειραματική διάταξη για την πλευρική συγκράτηση εγκάρσια ρωγματομένων δοκών πετρώματος: (1) Πλάκες συγκράτησης διαστάσεων 30x50 cm και πάχους 2,60 cm, (2) Τέσσερις ράβδοι μήκους 76 cm, (3) Περικόχλια M33.....	141
Σχήμα 7.2 Η ρωγματομένη δοκός που αποτελείται από 6 ογκοτεμάχια voussoir τοποθετημένη στην πειραματική διάταξη	142
Σχήμα 7.3 Strain gauge αλουμινίου της εταιρείας Tokyo Sokki Kenkyujo, που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της καμπτικής καταπόνησης και στις 4 μεταλλικές ράβδους της πειραματικής διάταξης	144
Σχήμα 7.4 Δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων.....	144

Σχήμα 7.5 (1) Πλαίσιο κάμψης της CONTROLS, (2) Κελί φορτίου συσκευής κάμψης, (3) Κύλιστρα φόρτισης, (4) Πλαίσιο φόρτισης για δοκιμές χαρακτηρισμού μονοαξονικής θλίψης και αντιδιαμετρικής θλίψης, (5) Κεντρική μονάδα ελέγχου	145
Σχήμα 7.6 Διακρίνεται η ρωγματωμένη δοκός γύψου, τοποθετημένη ανάμεσα στις πλευρικές πλάκες συγκράτησης	146
Σχήμα 7.7 Απεικονίζονται οι δύο γέφυρες Wheatstone αριστερά και πάνω στο καταγραφικό (Datalogger) της CONTROLS	146
Σχήμα 7.8 Το βελόμετρο (LVDT) που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα.....	147
Σχήμα 7.9 Η δοκός μετά το πέρας του πειράματος όπου φαίνονται οι περιοχές αστοχίας, στο πάνω μέρος της κεντρικής ασυνέχειας και στο κάτω μέρος των άκρων.....	147
Σχήμα 7.10 Ογκοτεμάχιο γύψου 1	148
Σχήμα 7.11 Ογκοτεμάχιο γύψου 2	148
Σχήμα 7.12 Ογκοτεμάχιο γύψου 3, αριστερά της κεντρικής ασυνέχειας	148
Σχήμα 7.13 Ογκοτεμάχιο γύψου 4, δεξιά της κεντρικής ασυνέχειας	148
Σχήμα 7.14 Ογκοτεμάχιο γύψου 5	149
Σχήμα 7.15 Ογκοτεμάχιο γύψου 6	149
Σχήμα 7.16 Διακρίνονται τα βέλη κάμψης των τεμαχίων της δοκού voussoir	149
Σχήμα 7.17 Τετρακάναλη γέφυρα της CONTROLS	153
Σχήμα 7.18 Το οκτακάναλο καταγραφικό (Datalogger) της εταιρείας CONTROLS.....	153
Σχήμα 7.19 Κεντρική μονάδα ελέγχου της μηχανής κάμψης.....	153
Σχήμα 7.20 (α) Αριστερά διακρίνεται ο αισθητήρας ακουστικής εκπομπής R15-α, και δεξιά (β) ο αισθητήρας R15, και οι δύο της εταιρείας Physical Acoustics Corporation	154
Σχήμα 7.21 (α) Αριστερά διακρίνεται το αριστερό ογκοτεμάχιο με τοποθετημένους τους αισθητήρες ακουστικής εκπομπής και (β) δεξιά διακρίνονται οι άλλοι δύο αισθητήρες τοποθετημένοι από την αντίθετη πλευρά του ακριανού ογκοτεμαχίου.....	155
Σχήμα 7.22 Ο προενισχυτής στον οποίο συνδέεται ο αισθητήρας ακουστικής εκπομπής	155
Σχήμα 7.23 Το καταγραφικό Micro – II, που χρησιμοποιείται για την συλλογή των δεδομένων ακουστικής εκπομπής	156
Σχήμα 7.24 Η ρωγματωμένη δοκός τοποθετημένη στην πειραματική διάταξη μαζί με τους αισθητήρες	156
Σχήμα 7.25 Διακρίνεται η αστοχία στα ογκοτεμάχια γύψου 1,2 και 3.....	157
Σχήμα 7.26 Τελική μορφή αστοχίας της δοκού.....	158
Σχήμα 7.27 Το μεσαίο ογκοτεμάχιο στο σχήμα, που παρουσιάζεται ανομοιογενή σε σχέση με τα υπόλοιπα ογκοτεμάχια	163
Σχήμα 7.28 Διακρίνεται η ρωγματωμένη δοκός στην πειραματική διάταξη	164

Σχήμα 7.29 Αρχίζει να αναπτύσσεται η εφελκυστική ρωγμή στο ογκοτεμάχιο 5 λόγω θλίψης και παρατηρούνται αποφλοιώσεις στο πάνω μέρος	164
Σχήμα 7.30 Παρατηρούνται οι πλευρικές αποφλοιώσεις και η περαιτέρω διάδοση της ρωγμής.....	164
Σχήμα 7.31 Επέκταση των 2 ρωγμών και στην πίσω πλευρά και απόσπαση 2 κομματιών	165
Σχήμα 7.32 Δημιουργία ρωγμής στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 5	165
Σχήμα 7.33 Αποκόλληση κομματιού από την πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 5.....	165
Σχήμα 7.34 Αποκόλληση κομματιού από το πάνω μέρος, δημιουργία σκαλοπατιού και περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών	166
Σχήμα 7.35 Αποκόλληση κομματιού από την πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 5.....	166
Σχήμα 7.36 Αποκόλληση κομματιού από την πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 5.....	166
Σχήμα 7.37 Παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα των ρωγμών, σύνθλιψη του ογκοτεμαχίου 5 και αποκόλληση κομματιού στο πάνω μέρος.....	167
Σχήμα 7.38 Περαιτέρω άνοιγμα των ρωγμών και σύνθλιψη του ογκοτεμαχίου 5	167
Σχήμα 7.39 (α) Τελική κατάσταση της δοκού μετά την κατάρρευση, (β) Διακρίνεται η επιφάνεια ολίσθησης του πάνω τεμαχίου, που διέρρευσε πλαστικά για την δημιουργία σκαλοπατιού	167
Σχήμα 7.40 Διακρίνεται η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 6.....	177
Σχήμα 7.41 Διακρίνεται η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1	177
Σχήμα 7.42 Δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 4 και δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 4	177
Σχήμα 7.43 Επέκταση της εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 3, από το ογκοτεμάχιο 4.....	178
Σχήμα 7.44 Περαιτέρω επέκταση των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 3 και 4, με ένωση τους και πλευρική αποφλοιώση στο ογκοτεμάχιο 4	178
Σχήμα 7.45 Δημιουργία δεύτερης ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 6, και επέκταση ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 5, με αντίστοιχη επέκταση και διάδοση προϋπαρχουσών ρωγμών.....	178
Σχήμα 7.46 Δημιουργία δεύτερης ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 5, και επέκταση της στο ογκοτεμάχιο 4.....	179
Σχήμα 7.47 Περαιτέρω άνοιγμα και επέκταση των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, και δημιουργία νέων στα ογκοτεμάχια 1 και 4	179
Σχήμα 7.48 Περαιτέρω άνοιγμα ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, επέκταση ρωγμών και αποκόλληση τεμαχίου από ογκοτεμάχιο 4	179
Σχήμα 7.49 Κατάπτωση του κάτω μέρους στα ογκοτεμάχια 5 και 6.....	180
Σχήμα 7.50 Τελική μορφή αστοχίας της δοκού.....	180

Σχήμα 7.51 Η μορφή της αστοχίας της δοκού στα ογκοτεμάχια 4,5 και 6 από την πίσω πλευρά	180
Σχήμα 7.52 Δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1	188
Σχήμα 7.53 Δημιουργία σκαλοπατιού, αποκόλληση κάτω τεμάχους ογκοτεμαχίου 1 και αποφλοιώση στο ογκοτεμάχιο 2 στην κάτω αριστερή γωνία	188
Σχήμα 7.54 Έναρξη εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 2	188
Σχήμα 7.55 Περαιτέρω άνοιγμα της προϋπάρχουσας ρωγμής και συνεπακόλουθη αποκόλληση του πάνω τεμάχους του ογκοτεμαχίου 2	189
Σχήμα 7.56 Δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1	189
Σχήμα 7.57 Επέκταση της προϋπάρχουσας ρωγμής	189
Σχήμα 7.58 Δημιουργία ρωγμής στο κάτω τέμαχος του ογκοτεμαχίου 1 και περαιτέρω άνοιγμα της προϋπάρχουσας ρωγμής του σχήματος 7.57	190
Σχήμα 7.59 Δημιουργία ρωγμής στο κάτω τέμαχος του ογκοτεμαχίου 1 και περαιτέρω μετατόπισή του	190
Σχήμα 7.60 Δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 2 και σύνθλιψη στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 3	190
Σχήμα 7.61 Επέκταση της ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1 από το ογκοτεμάχιο 2	191
Σχήμα 7.62 Πλήρης αποκόλληση των κάτω τεμαχίων των ογκοτεμαχίων 1 και 2 και σπάσιμο τεμαχίων στο πάνω μέρος των ογκοτεμαχίων 2 και 3	191
Σχήμα 7.63 Η τελική μορφή της δοκού μετά την αστοχία	191
Σχήμα 7.64 Διακρίνεται το πάνω μέρος της δοκού και τα ογκοτεμάχια 3,2 και 1 από αριστερά προς δεξιά	192
Σχήμα 7.65 Διακρίνεται η πίσω πλευρά της δοκού μετά την τελική αστοχία.....	192
Σχήμα 7.66 Αρχίζουν να δημιουργούνται εφελκυστικές ρωγμές στα ογκοτεμάχια 5 και 6	200
Σχήμα 7.67 Διάδοση και άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, με δημιουργία σκαλοπατιού στο πάνω μέρος.....	200
Σχήμα 7.68 Πλευρικές αποφλοιώσεις στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 4 και περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6	201
Σχήμα 7.69 Δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 4 πάνω από τον αισθητήρα και περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6	201
Σχήμα 7.70 Περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών και σπάσιμο κομματιών στο πάνω μέρος των ογκοτεμαχίων 3 και 4, λόγω της πίεσης των κυλίστρων φόρτισης	201
Σχήμα 7.71 Περαιτέρω μετατόπιση της δοκού με άνοιγμα των ρωγμών.....	202
Σχήμα 7.72 Τελική μορφή αστοχίας της δοκού.....	202
Σχήμα 7.73 Το πάνω μέρος της δοκού μετά την αστοχία	202

Σχήμα 7.74 Η πίσω πλευρά των ογκοτεμαχίων 4,5 και 6	202
Σχήμα 7.75 Η πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 1	203
Σχήμα 7.76 Η ρωγματωμένη δοκός μαρμάρου Διονύσου που σχηματίζεται από 12 κυβικά άρρηκτα ογκοτεμάχια, τοποθετημένη στην πειραματική διάταξη	210
Σχήμα 7.77 Διακρίνονται τα 2 κυβικά ογκοτεμάχια κάτω από τα κύλιστρα φόρτισης	211
Σχήμα 7.78 Η τελική εικόνα της δοκού μετά την κατάρρευση.....	211
Σχήμα 7.79 Διακρίνονται τα ογκοτεμάχια 11 και 12. Το 12 έσπασε σε τρία κομμάτια και στο 11 αποκολλήθηκε ένα πολύ μικρό κομμάτι στο κάτω μέρος.....	212
Σχήμα 7.80 Σπάσιμο του κάτω μέρους του ογκοτεμαχίου 1.....	212
Σχήμα 7.81 Διακρίνονται τα μεσαία ογκοτεμάχια 6 και 7, από την μπροστινή πλευρά	212
Σχήμα 7.82 Διακρίνονται τα ογκοτεμάχια 6 και 7 από την πίσω πλευρά τους.....	213
Σχήμα 7.83 Διακρίνεται το βέλος κάμψης της δοκού 5 sec, πριν την αστοχία	213
Σχήμα 7.84 Η ρωγματωμένη δοκός μαρμάρου Βώλακα που σχηματίζεται από 12 κυβικά άρρηκτα ογκοτεμάχια, τοποθετημένη στην πειραματική διάταξη.....	219
Σχήμα 7.85 Η τελική εικόνα της δοκού μετά την κατάρρευση.....	220
Σχήμα 7.86 Διακρίνεται το σπάσιμο στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 12	221
Σχήμα 7.87 Διακρίνεται το ογκοτεμάχιο 12 πάνω στην δοκό μετά την αστοχία	221
Σχήμα 7.88 Διακρίνεται το αριστερό ακριανό ογκοτεμάχιο 1, όπου παρατηρείται το σπάσιμο και αποκόλληση γωνιακού τεμάχους στο κάτω μέρος	221
Σχήμα 7.89 Διακρίνονται τα μεσαία ογκοτεμάχια 6 και 7, από την μπροστινή πλευρά	222
Σχήμα 7.90 Διακρίνονται τα ογκοτεμάχια 6 και 7 από την πίσω πλευρά τους.....	222
Σχήμα 7.91 Σταδιακή σύνθλιψη στο πάνω μέρος των μεσαίων ογκοτεμαχίων 6 και 7	223
Σχήμα 7.92 Περαιτέρω σύνθλιψη στο πάνω μέρος των μεσαίων ογκοτεμαχίων 6 και 7	223
Σχήμα 8.1 Διαίρεση πεδίου	232
Σχήμα 8.2 Το αρχικό μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού στην προσομοίωση	241
Σχήμα 8.3 Το μοντέλο της γύψου στο στάδιο 5	242
Σχήμα 8.4 Το τελικό μοντέλο της δοκού στο στάδιο 20.....	242
Σχήμα 8.5 Το αρχικό μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού τσιμέντου	247
Σχήμα 8.6 Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 5	247
Σχήμα 8.7 Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 20	248
Σχήμα 8.8 Το αρχικό μοντέλο της δοκού μαρμάρου Διονύσου	253
Σχήμα 8.9 Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 5	254

Σχήμα 8.10 Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 20	254
Σχήμα 8.11 Το μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού μαρμάρου Βύλακα.....	260
Σχήμα 8.12 Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 5	261
Σχήμα 8.13 Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 20	261

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 6.1 Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο γύψου 1 .	120
Διάγραμμα 6.2 Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο γύψου 2 .	121
Διάγραμμα 6.3 Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο γύψου 3 .	122
Διάγραμμα 6.4 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο γύψου 1.....	123
Διάγραμμα 6.5 Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – χρόνου για δοκίμιο γύψου 1.....	124
Διάγραμμα 6.6 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο γύψου 2.....	124
Διάγραμμα 6.7 Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – χρόνου για δοκίμιο γύψου 2.....	124
Διάγραμμα 6.8 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο γύψου 3.....	125
Διάγραμμα 6.9 Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – χρόνου για δοκίμιο γύψου 3.....	125
Διάγραμμα 6.10 Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο τσιμέντου 1	130
Διάγραμμα 6.11 Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο τσιμέντου 2	131
Διάγραμμα 6.12 Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο τσιμέντου 3	132
Διάγραμμα 6.13 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 1.....	133
Διάγραμμα 6.14 Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 1.	133
Διάγραμμα 6.15 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 2.....	134
Διάγραμμα 6.16 Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 2.	134
Διάγραμμα 6.17 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 3.....	135
Διάγραμμα 6.18 Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 3.	135
Διάγραμμα 7.1 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου	150
Διάγραμμα 7.2 Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.....	150
Διάγραμμα 7.3 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.....	151
Διάγραμμα 7.4 Διάγραμμα χρόνου – αξονικής δύναμης	152
Διάγραμμα 7.5 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου	158
Διάγραμμα 7.6 Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.....	158
Διάγραμμα 7.7 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.....	159

Διάγραμμα 7.9 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Hit Driven Data)	160
Διάγραμμα 7.10 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Time Driven Data).....	160
Διάγραμμα 7.11 Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου	161
Διάγραμμα 7.12 Διάγραμμα αριθμών κτύπων ακουστικής εκπομπής (hits) – χρόνου	161
Διάγραμμα 7.13 Διάγραμμα Risetime – χρόνου	161
Διάγραμμα 7.14 Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου	161
Διάγραμμα 7.15 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου	168
Διάγραμμα 7.16 Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου	169
Διάγραμμα 7.17 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης	169
Διάγραμμα 7.18 Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου	170
Διάγραμμα 7.19 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Time Driven Data).....	171
Διάγραμμα 7.20 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Hit Driven Data).....	171
Διάγραμμα 7.21 Διάγραμμα πλάτους σήματος ακουστικής εκπομπής – χρόνου.....	171
Διάγραμμα 7.22 Διάγραμμα κτύπων (hits)- χρόνου	172
Διάγραμμα 7.23 Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου	172
Διάγραμμα 7.24 Διάγραμμα ASL – χρόνου.....	172
Διάγραμμα 7.25 Διάγραμμα RMS – χρόνου	173
Διάγραμμα 7.26 Διάγραμμα Duration (Διάρκειας) – χρόνου	173
Διάγραμμα 7.27 Διάγραμμα Risetime – χρόνου	174
Διάγραμμα 7.28 Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου	174
Διάγραμμα 7.29 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου	181
Διάγραμμα 7.30 Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου	181
Διάγραμμα 7.31 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης	182
Διάγραμμα 7.32 Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου	182
Διάγραμμα 7.33 Διάγραμμα πλάτους – χρόνου	183
Διάγραμμα 7.34 Διάγραμμα ASL – χρόνου.....	183
Διάγραμμα 7.35 Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου	184
Διάγραμμα 7.36 Διάγραμμα Risetime – χρόνου	184
Διάγραμμα 7.37 Διάγραμμα RMS – χρόνου	184
Διάγραμμα 7.38 Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου	185
Διάγραμμα 7.39 Διάγραμμα Duration – χρόνου.....	185
Διάγραμμα 7.40 Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου	185
Διάγραμμα 7.41 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου	192
Διάγραμμα 7.42 Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.....	193

Διάγραμμα 7.43 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης	194
Διάγραμμα 7.44 Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου	194
Διάγραμμα 7.45 Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου.....	195
Διάγραμμα 7.46 Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου.....	195
Διάγραμμα 7.47 Διάγραμμα πλάτους – χρόνου	195
Διάγραμμα 7.48 Διάγραμμα ASL – χρόνου.....	196
Διάγραμμα 7.49 Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου	196
Διάγραμμα 7.50 Διάγραμμα Risetime – χρόνου	196
Διάγραμμα 7.51 Διάγραμμα RMS – χρόνου	197
Διάγραμμα 7.52 Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου.....	197
Διάγραμμα 7.53 Διάγραμμα Duration – χρόνου.....	197
Διάγραμμα 7.54 Διάγραμμα b παραμέτρου – χρόνου	198
Διάγραμμα 7.55 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου	203
Διάγραμμα 7.56 Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.....	204
Διάγραμμα 7.57 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης	204
Διάγραμμα 7.58 Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου	205
Διάγραμμα 7.59 Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου.....	205
Διάγραμμα 7.60 Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου.....	206
Διάγραμμα 7.61 Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου	206
Διάγραμμα 7.62 Διάγραμμα ASL – χρόνου.....	206
Διάγραμμα 7.63 Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου	207
Διάγραμμα 7.64 Διάγραμμα Risetime – χρόνου	207
Διάγραμμα 7.65 Διάγραμμα RMS – χρόνου	207
Διάγραμμα 7.66 Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου.....	208
Διάγραμμα 7.67 Διάγραμμα Duration – χρόνου.....	208
Διάγραμμα 7.68 Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου	208
Διάγραμμα 7.69 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου	213
Διάγραμμα 7.70 Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.....	214
Διάγραμμα 7.71 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.....	214
Διάγραμμα 7.72 Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου	215
Διάγραμμα 7.73 Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου.....	215
Διάγραμμα 7.74 Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου.....	216
Διάγραμμα 7.75 Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου	216
Διάγραμμα 7.76 Διάγραμμα ASL – χρόνου.....	216

Διάγραμμα 7.77 Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου	217
Διάγραμμα 7.78 Διάγραμμα Risetime – χρόνου	217
Διάγραμμα 7.79 Διάγραμμα RMS – χρόνου	217
Διάγραμμα 7.80 Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου	218
Διάγραμμα 7.81 Διάγραμμα Duration – χρόνου.....	218
Διάγραμμα 7.82 Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου	218
Διάγραμμα 7.83 Διάγραμμα φορτίου – χρόνου	223
Διάγραμμα 7.84 Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.....	224
Διάγραμμα 7.85 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.....	225
Διάγραμμα 7.86 Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου	225
Διάγραμμα 7.87 Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου.....	226
Διάγραμμα 7.88 Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου.....	226
Διάγραμμα 7.89 Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου	226
Διάγραμμα 7.90 Διάγραμμα ASL – χρόνου.....	227
Διάγραμμα 7.91 Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου	227
Διάγραμμα 7.92 Διάγραμμα Risetime – χρόνου	227
Διάγραμμα 7.93 Διάγραμμα RMS – χρόνου	228
Διάγραμμα 7.94 Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου.....	228
Διάγραμμα 7.95 Διάγραμμα Duration – χρόνου.....	228
Διάγραμμα 7.96 Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου	229
Διάγραμμα 8.1	234
Διάγραμμα 8.2.....	234
Διάγραμμα 8.3.....	235
Διάγραμμα 8.4.....	235
Διάγραμμα 8.5.....	236
Διάγραμμα 8.6.....	236
Διάγραμμα 8.7.....	237
Διάγραμμα 8.8.....	237
Διάγραμμα 8.9.....	238
Διάγραμμα 8.10.....	238
Διάγραμμα 8.11	239
Διάγραμμα 8.12	239
Διάγραμμα 8.13	240
Διάγραμμα 8.14	240

Διάγραμμα 8.15	241
Διάγραμμα 8.16	244
Διάγραμμα 8.17	244
Διάγραμμα 8.18	245
Διάγραμμα 8.19	245
Διάγραμμα 8.20	246
Διάγραμμα 8.21	246
Διάγραμμα 8.22	249
Διάγραμμα 8.23	249
Διάγραμμα 8.24	250
Διάγραμμα 8.25	250
Διάγραμμα 8.26	251
Διάγραμμα 8.27	251
Διάγραμμα 8.28	252
Διάγραμμα 8.29	252
Διάγραμμα 8.30	253
Διάγραμμα 8.31	256
Διάγραμμα 8.32	256
Διάγραμμα 8.33	257
Διάγραμμα 8.34	257
Διάγραμμα 8.35	258
Διάγραμμα 8.36	258
Διάγραμμα 8.37	259
Διάγραμμα 8.38	259
Διάγραμμα 8.39	260

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 6.1 Παρουσιάζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το μέσο μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson, και για τα τρία κυβικά δοκίμια	138
Πίνακας 6.2 Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών γύψου και τσιμέντου	139
Πίνακας 6.3 Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών μαρμάρου Διονύσου	140
Πίνακας 6.4 Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών μαρμάρου Βώλακα	140

Πίνακας 7.1 Συνδεσμολογία strain gauges – γεφυρών – πρέσσας και καταγραφικού	154
Πίνακας 7.2 Η συνδεσμολογία των strain gages με τις αντίστοιχες γέφυρες Wheatstone και αντίστοιχα με την μηχανή κάμψης και το Datalogger	163
Πίνακας 7.3 Συνδεσμολογία των strain gages, με το καταγραφικό, την γέφυρα και το πλαίσιο φόρτισης	176
Πίνακας 9.1.....	271
Πίνακας 9.2.....	271

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

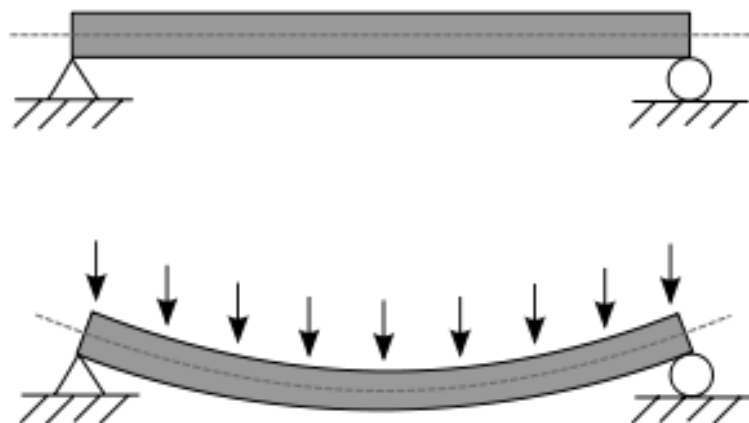
Κάμψη δοκού

1.1 Εισαγωγή

Στην εφαρμοσμένη μηχανική, **κάμψη** ορίζεται ως η μηχανική συμπεριφορά ενός λεπτού δομικού στοιχείου, όταν υποβάλλεται σε ένα εξωτερικό φορτίο, που εφαρμόζεται κάθετα στον επιμήκη άξονα του στοιχείου. Επίσης ονομάζεται η καταπόνηση κατά την οποία το διάνυσμα της αναπτυσσόμενης ροπής είναι κάθετο στον επιμήκη άξονα του δομικού στοιχείου (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

Η καμπτική καταπόνηση μπορεί να δημιουργηθεί είτε από συγκεντρωμένο φορτίο σε κάποια θέση κατά μήκος του δομικού στοιχείου είτε από ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία.

Το δομικό στοιχείο πρέπει να είναι τέτοιο έτσι ώστε, τουλάχιστον μία από τις διαστάσεις του, να είναι τυπικά το 1/10 ή λιγότερο των άλλων δύο διαστάσεων του στοιχείου. Όταν το μήκος είναι αρκετά μεγαλύτερο από το πλάτος και το πάχος τότε το δομικό στοιχείο καλείται **δοκός**, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.

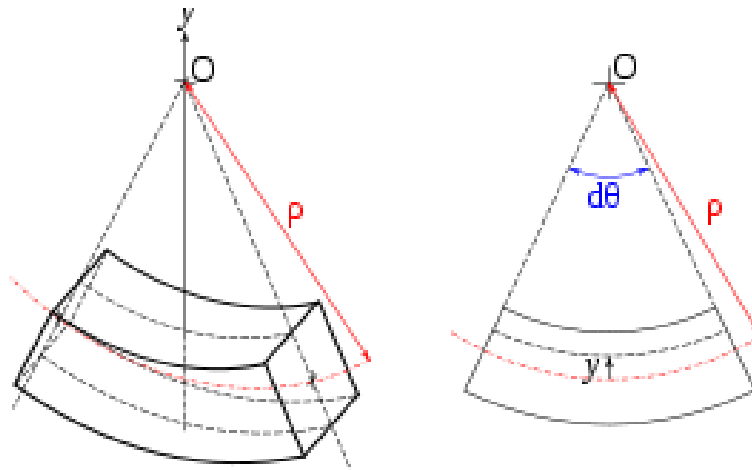


Σχήμα 1.1. Μία στατικά ορισμένη (αμφιέριστη) δοκός, που κάμπτεται κάτω από ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

1.2 Στατική κάμψη δοκών

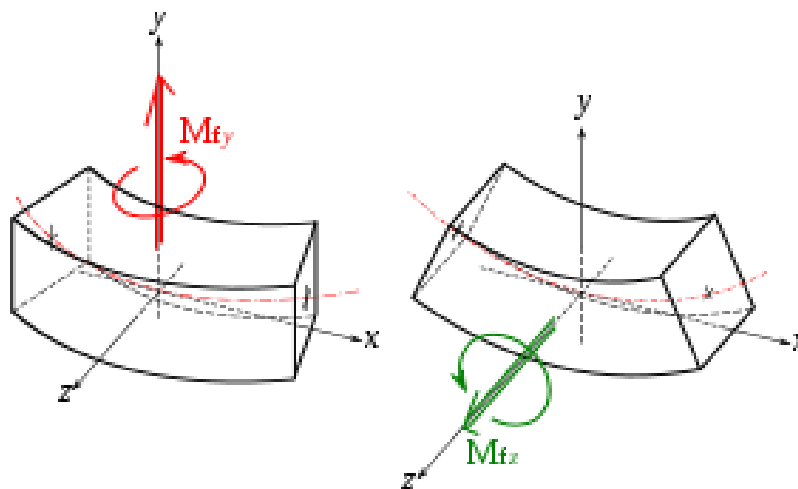
Μία δοκός σε κάμψη παραμορφώνεται και δημιουργούνται τάσεις, όταν εγκάρσιο φορτίο ασκείται επ'αυτής. Στη στατική θεώρηση της κάμψης, το μέγεθος του βέλους κάμψης και οι τάσεις που αναπτύσσονται, δεν αλλάζουν με τον χρόνο.

Σε μία οριζόντια δοκό, που στηρίζεται στα δύο της άκρα και φορτίζεται στο κέντρο προς τα κάτω, το υλικό στο πάνω μέρος της δοκού **συμπιέζεται**, ενώ το κάτω μέρος της δοκού **εφελκύεται**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2. Τμήμα δοκού σε κάμψη: Οι ίνες σχηματίζουν ομόκεντρα τόξα, οι πάνω ίνες συμπιέζονται, και οι κάτω ίνες εφελκύνονται (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται, οι καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται σε μία δοκό:



Σχήμα 1.3. Οι καμπτικές ροπές στην δοκό (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

1.3 Εσωτερικές τάσεις

Υπάρχουν δύο είδη εσωτερικών τάσεων, που προκαλούνται από τα πλευρικά φορτία:

- **Διατμητική τάση**, παράλληλη προς την πλευρική φόρτιση συν συμπληρωματική διατμητική τάση κάθετα προς την κατεύθυνση του φορτίου.
- **Θλιπτικές τάσεις** στο πάνω μέρος της δοκού, και **εφελκυστικές τάσεις** στο κάτω μέρος της δοκού.

Οι θλιπτικές και οι εφελκυστικές τάσεις σχηματίζουν ένα ζεύγος δυνάμεων, αφού είναι ίσες στο μέτρο και αντίθετης κατεύθυνσης. Η καμπτική ροπή που δημιουργείται αντιστέκεται στην χαρακτηριστική παραμόρφωση της δοκού που κάμπτεται. Η κατανομή των τάσεων στην δοκό μπορεί να προβλεφθεί με αρκετή ακρίβεια, όταν γίνουν κάποιες υποθέσεις.

1.4 Θεωρία κάμψης Euler-Bernoulli

Στην θεωρία κάμψης Euler-Bernoulli, λεπτών δοκών, μια σημαντική υπόθεση είναι ότι τα επίπεδα τμήματα παραμένουν επίπεδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Με άλλα λόγια, κάθε παραμόρφωση λόγω διάτμησης κατά μήκος μιας επίπεδης διατομής, δεν υπολογίζεται (όχι διατμητική παραμόρφωση).

Επίσης, αυτή η κατανομή τάσεων εφαρμόζεται μόνο αν η μέγιστη τάση είναι μικρότερη από την τάση διαρροής του υλικού. Για τάσεις που υπερβαίνουν την τάση διαρροής έχουμε το φαινόμενο της **πλαστικής κάμψης**.

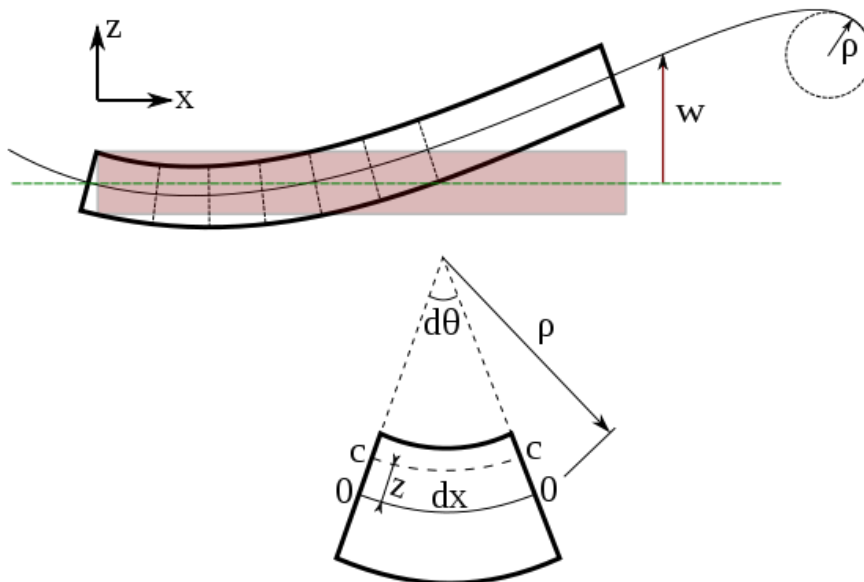
Οι υποθέσεις που έχουν γίνει από την θεωρία είναι οι ακόλουθες:

- Η δοκός είναι αρχικά ευθύγραμμη και λεπτή.
- Το υλικό της δοκού είναι ισότροπο, γραμμικά ελαστικό και ομοιογενές κατά μήκος κάθε διατομής (αλλά όχι απαραίτητα κατά το μήκος της δοκού).
- Μόνο μικρές μετατοπίσεις λαμβάνονται υπόψη.

Σε αυτή την περίπτωση, η εξίσωση που περιγράφει το **βέλος κάμψης (w)**, δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{d^2w(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{E(x)I(x)} \quad (1.1)$$

Όπου, η δεύτερη παράγωγος του βέλους κάμψης είναι η **καμπυλότητα**, E είναι το μέτρο ελαστικότητας, I είναι η ροπή αδρανείας και M είναι η εσωτερική ροπή κάμψης της δοκού.



Σχήμα 1.4. Κάμψη μιας δοκού Euler-Bernoulli. Κάθε διατομή της δοκού είναι κάθετη στον ουδέτερο άξονα (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

Αν επιπροσθέτως, η δοκός είναι ομοιογενής σε όλο το μήκος της, και κάμπτεται κάτω από εγκάρσιο φορτίο $q(x)$, τότε το **εγκάρσιο φορτίο** δίνεται από την σχέση:

$$q(x) = EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} \quad (1.2)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί και την **εξίσωση κάμψης Euler-Bernoulli**.

Αφού έχει βρεθεί η μετατόπιση, η ροπή κάμψης M και η διατμητική δύναμη Q , υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$M(x) = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (1.3)$$

$$Q(x) = \frac{dM}{dx} \quad (1.4)$$

Η απλή κάμψη δοκού συχνά αναλύεται με την εξίσωση κάμψης Euler-Bernoulli. Οι προϋποθέσεις για την χρήση της απλής θεωρίας κάμψης είναι:

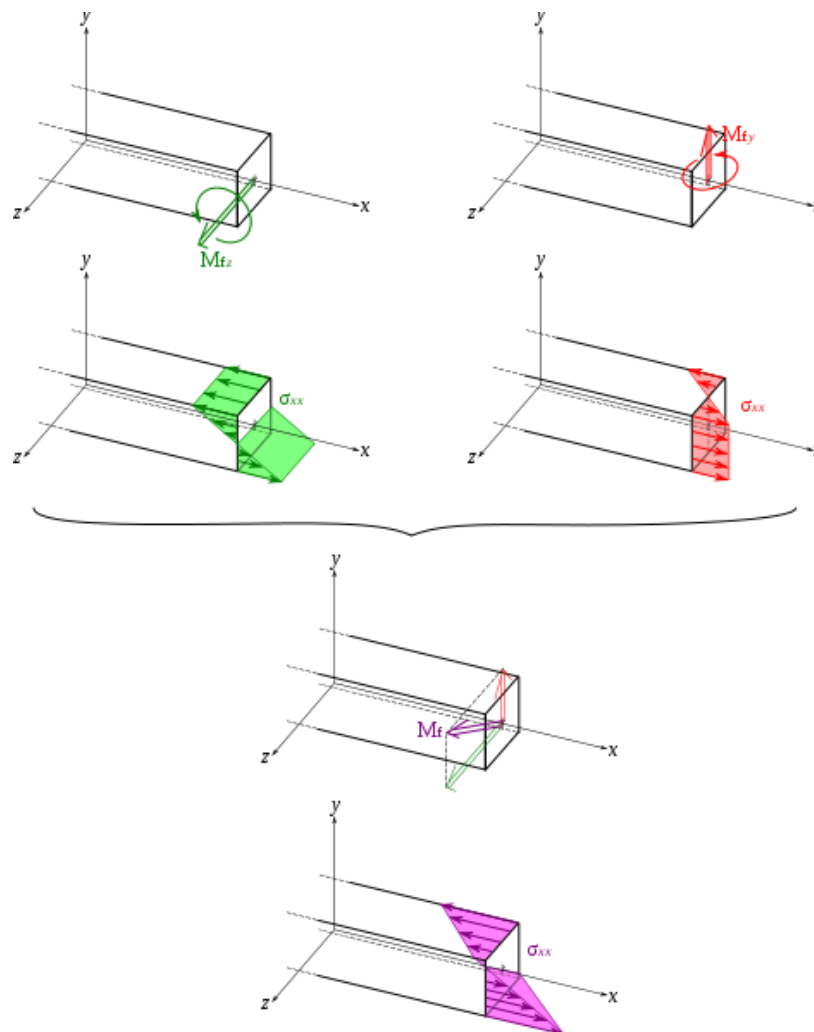
1. Η δοκός υπόκειται σε **καθαρή κάμψη**. Αυτό σημαίνει ότι η *διατμητική δύναμη είναι μηδέν, και ότι δεν υπάρχουν στρεπτικά ή αξονικά φορτία*.
2. Το υλικό της δοκού είναι *ισότροπο και ομοιογενές*.
3. Το υλικό υπακούει τον νόμο του Hooke (είναι γραμμικά ελαστικό και δεν παραμορφώνεται πλαστικά).
4. Η δοκός είναι αρχικά ευθύγραμμη με την κάθετη διατομή της να είναι σταθερή καθ'όλο το μήκος της.
5. Η δοκός έχει έναν άξονα συμμετρίας στο επίπεδο κάμψης.
6. Οι διαστάσεις της δοκού είναι τέτοιες, έτσι ώστε να αστοχήσει σε κάμψη, παρά σε σύνθλιψη ή πλάγια κύρτωση.
7. Οι διατομές της δοκού παραμένουν επίπεδες κατά την διάρκεια της κάμψης.

1.4.1. Ουδέτερος άξονας

Οι θλιπτικές και οι εφελκυστικές δυνάμεις αναπτύσσονται στην κατεύθυνση του άξονα της δοκού κάτω από τα φορτία κάμψης. Αυτές οι δυνάμεις όπως προαναφέρθηκε επάγουν τάσεις στην δοκό.

Η μέγιστη θλιπτική τάση βρίσκεται στο ανώτατο άκρο της δοκού, ενώ η μέγιστη τάση εφελκυσμού βρίσκεται στο κατώτατο άκρο της δοκού. *Δεδομένου ότι οι καταπονήσεις μεταξύ των δύο αυτών μεγίστων μεταβάλλονται γραμμικά, υπάρχει ένα σημείο επί της γραμμικής διαδρομής μεταξύ τους, όπου δεν υπάρχει κάμψη*. Ο γεωμετρικός τόπος αυτών των σημείων καλείται **ουδέτερος άξονας**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Λόγω αυτής της περιοχής και των παρακείμενων περιοχών με χαμηλές τάσεις, χρησιμοποιώντας δοκούς ομοιόμορφων διατομών στην κάμψη δεν είναι ένα αποτελεσματικό μέσο για την στήριξη ενός φορτίου, δεδομένου ότι δεν

χρησιμοποιείται η πλήρης χωρητικότητα της δοκού μέχρι αυτή να φτάσει στο σημείο της αστοχίας.



Σχήμα 1.5. Συμμετρική κάμψη μιάς δοκού και η αρχή της υπέρθεσης (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

Η εξίσωση με την οποία προσδιορίζεται η ορθή τάση σε μια δοκό κάτω από απλή κάμψη είναι:

$$\sigma = \frac{My}{I_x} \quad (1.5)$$

Όπου σ είναι η ορθή τάση στην κάμψη, M η ροπή σε σχέση με τον ουδέτερο άξονα, y η κάθετη απόσταση από τον ουδέτερο άξονα και I_x η ροπή αδρανείας.

Η μέγιστη ορθή τάση δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}y_{max}}{I_x} \quad (1.6)$$

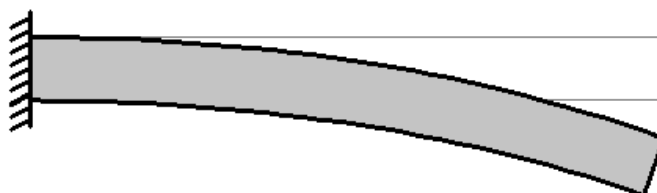
Η σ_{\max} , δεν μπορεί να ξεπερνά μια τιμή που είναι χαρακτηριστική για το υλικό. Στα ψαθυρά υλικά μιλάμε για τη θλιπτική ή εφελκυστική αντοχή του ενώ στα όλκιμα υλικά για το όριο διαρροής. Από αυτόν τον περιορισμό προκύπτει η μέγιστη ελαστική ροπή στο στοιχείο.

Κατά το σχεδιασμό στοιχείων με επιτρεπόμενες τάσεις η χαρακτηριστική τάση του υλικού μειώνεται σε κάποιο ποσοστό που δίνεται από τον συντελεστή ασφαλείας. Στόχος είναι να καλυφθεί η αβεβαιότητα της πραγματικής αντοχής και να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας.

1.4.2. Ελαστική γραμμή

Κατά την κάμψη το σχήμα του σώματος είναι διαφορετικό από το αρχικό λόγω της παραμόρφωσης. Σε κάθε σημείο του σώματος αντιστοιχεί και μία μετατόπιση από την αρχική του θέση που ονομάζεται **βέλος κάμψης**.

Το Σχήμα του παραμορφωμένου άξονα του σώματος ονομάζεται **ελαστική γραμμή** (Σχήμα 1.6) και η συνάρτηση που δίνει τα βέλη κάμψης, δηλαδή την κατακόρυφη μετατόπιση ενός σημείου του άξονα σε σχέση με την αρχική θέση, ονομάζεται **εξίσωση της ελαστικής γραμμής**. Ο υπολογισμός της ελαστικής γραμμής έχει μεγάλη σημασία στις τεχνικές κατασκευές. Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι τα βέλη κάμψης δε δημιουργούν πρόβλημα ασφαλείας, λειτουργικότητας ή αισθητικής.



Σχήμα 1.6. Παραμόρφωση λόγω κάμψης. Η μέγιστη υποχώρηση ή αλλιώς το μέγιστο βέλος κάμψης εμφανίζεται στο ελεύθερο (δεξιό) άκρο (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

Η συνάρτηση της κλίσης φ του παραμορφωμένου στοιχείου σε κάθε θέση x είναι:

$$\varphi(x) = \frac{1}{EI_z} \int -M(x) dx + c_1 \quad (1.7)$$

Η εξίσωση της ελαστικής γραμμής είναι:

$$w(x) = \frac{1}{EI_z} \iint -M(x) dx dy + c_1 x + c_2 \quad \text{ή} \quad w(x) = \int \varphi(x) dx + c_2 \quad (1.8)$$

Όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, I_z η ροπή αδρανείας, $M(x)$ η ροπή κάμψης σε συνάρτηση με την απόσταση x , c_1 και c_2 σταθερές ολοκλήρωσης που προκύπτουν από τις συνθήκες στήριξης. Θα πρέπει οι $w(x)$ και $\varphi(x)$ να μηδενισθούν στις θέσεις που υπάρχει εμπόδιο κατακόρυφης μετατόπισης και στροφής αντίστοιχα.

1.5 Επέκτασεις της θεωρίας κάμψης Euler-Bernoulli

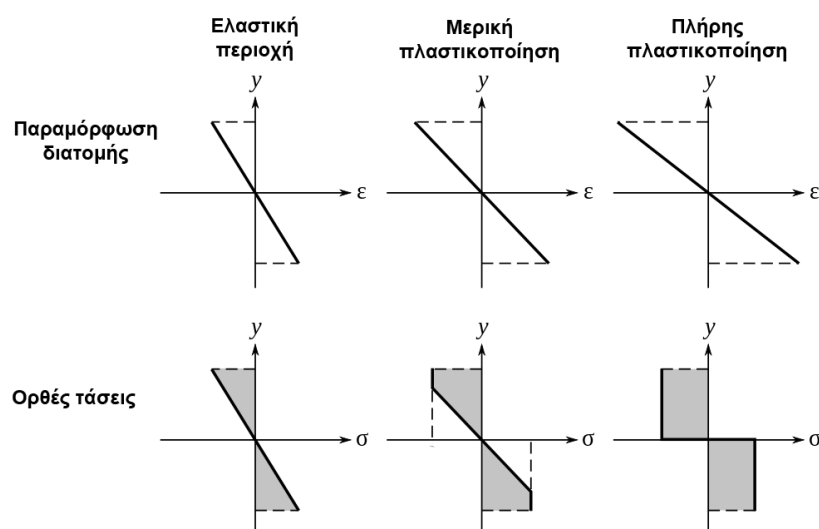
1.5.1. Πλαστική ανάλυση

Η εξίσωση (1.5) ισχύει μόνο όταν η τάση στην ακραία ίνα (δηλαδή το τμήμα της δοκού που απέχει την μεγαλύτερη απόσταση από τον ουδέτερο άξονα) είναι κάτω από τη τάση διαρροής του υλικού.

Σε υψηλότερες φορτίσεις η κατανομή των τάσεων γίνεται μη-γραμμική και όλκιμα υλικά θα εισέλθουν στην πλαστική κατάσταση όπου το μέγεθος της τάσης είναι ίσο με την τάση διαρροής παντού στην δοκό στον ουδέτερο άξονα όπου οι τάσεις από εφελκυστικές αλλάζουν σε θλιπτικές.

1.5.2. Ελαστοπλαστική ανάλυση

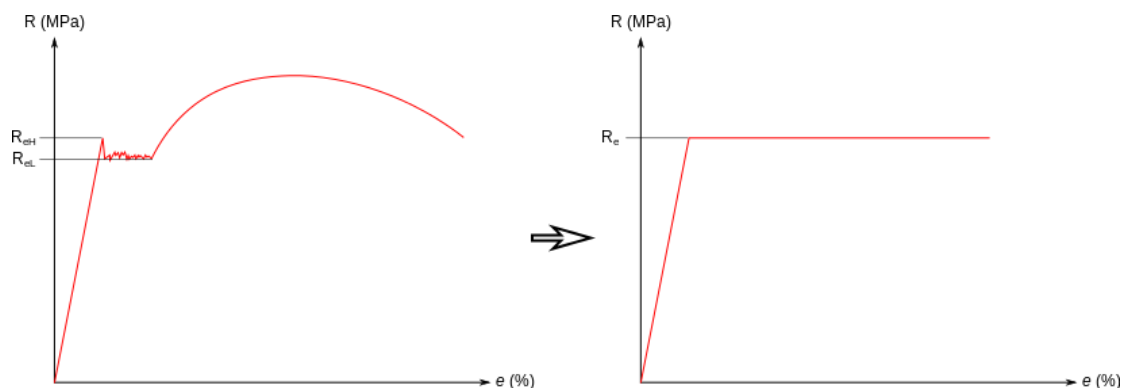
Ροπή μεγαλύτερη από την μέγιστη ελαστική προκαλεί θραύση στα ψαθυρά υλικά. Στα όλκιμα υλικά όμως το όριο διαρροής δεν ταυτίζεται με το όριο θραύσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7 σε μεγαλύτερη φόρτιση τα πιο απομακρυσμένα τμήματα της διατομής εμφανίζουν πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ το κέντρο της διατομής παραμένει στην ελαστική περιοχή.



Σχήμα 1.7. Παραμόρφωση και τάση στην διατομή (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

Το εύρος του ελαστικού πυρήνα μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της φόρτισης έως την πλήρη πλαστικοποίηση όλης της διατομής. Στην ελαστοπλαστική ανάλυση κατά προσέγγιση θεωρείται ότι το υλικό υπακούει στο νόμο του Hooke μέχρι το όριο

διαρροής του αλλά για επιπλέον παραμόρφωση η τάση παραμένει σταθερή (Σχήμα 1.8 απλοποιημένη καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων). Μετά την πλήρη πλαστικοποίηση οι παραμορφώσεις γίνονται πολύ μεγάλες και σχηματίζεται πλαστική άρθρωση.



Σχήμα 1.8. Πραγματική και απλοποιημένη καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης όλκιμου υλικού (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

1.5.3. Σύνθετη ή μη-συμμετρική κάμψη

Η εξίσωση (1.5) ισχύει μόνο όταν οι διατομές της δοκού είναι συμμετρικές. Για ομοιογενείς δοκούς με μη-συμμετρικές διατομές κατά μήκος τους, η αξονική τάση δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_x(y, z) = -\frac{(M_z I_y + M_y I_{yz})}{I_y I_z - I_{yz}^2} y + \frac{(M_y I_z + M_z I_{yz})}{I_y I_z - I_{yz}^2} z \quad (1.9)$$

Όπου y, z είναι οι συντεταγμένες ενός σημείου της διατομής, M_y και M_z είναι οι ροπές περί του άξονα y και z αντίστοιχα, I_y και I_z είναι οι ροπές αδρανείας περί των αξόνων y και z και I_{yz} είναι η συνισταμένη ροπή αδρανείας των αξόνων y και z .

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1.9) είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τάση σε οποιοδήποτε σημείο μιας διατομής της δοκού, ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό της ροπής ή του σχήματος της διατομής. Να τονισθεί ότι τα μεγέθη M_y , M_z , I_y , I_z και I_{yz} δεν αλλάζουν από το ένα σημείο στο άλλο στην διατομή.

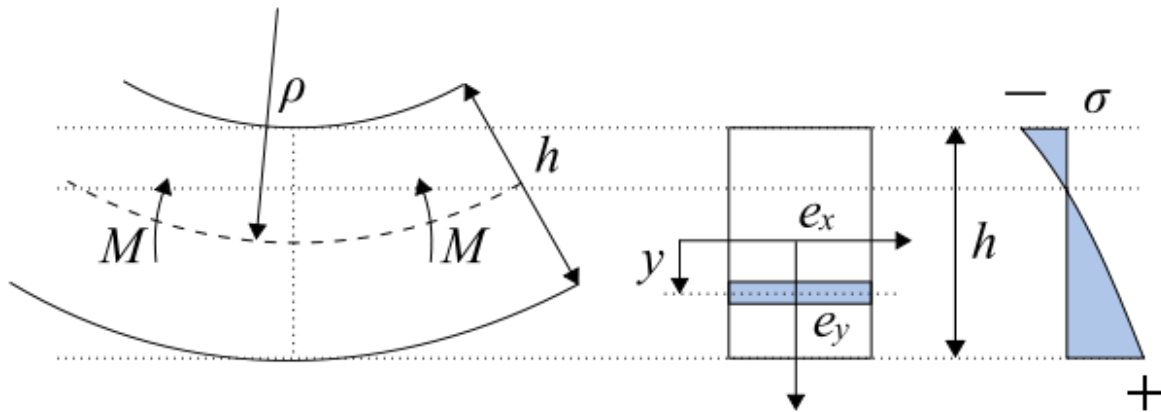
1.5.4 Ευρεία παραμόρφωση κάμψης

Για μεγάλες παραμορφώσεις της δοκού, οι τάσεις σε οποιαδήποτε διατομή υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη εκδοχή της παραπάνω εξίσωσης. Πρώτα πρέπει να γίνουν οι εξής παραδοχές:

- ❖ Η παραδοχή των επίπεδων διατομών - πριν και μετά την παραμόρφωση μία συγκεκριμένη διατομή παραμένει επίπεδη (π.χ. δεν στρέφεται).
- ❖ Οι διατμητικές και ορθές τάσεις σε αυτή την διατομή που είναι κάθετες προς το κάθετο διάνυσμα της διατομής, δεν έχουν καμία επίδραση στις ορθές τάσεις που είναι παράλληλες στο κάθετο διάνυσμα.

Μεγάλες παραμορφώσεις κάμψης πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν η ακτίνα καμπυλότητας ρ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.9, να είναι μικρότερη από 10 φορές το ύψος της διατομής h , δηλαδή:

$$\rho < 10h \quad (1.10)$$



Σχήμα 1.9. Δοκός σε κάμψη όπου διακρίνεται η ακτίνα καμπυλότητας ρ (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

Με αυτές τις υποθέσεις η τάση στην κάμψη δοκού μεγάλου μήκους, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{M}{\rho A} + \frac{M}{I'_x} y \frac{\rho}{\rho + y} \quad (1.11)$$

Όπου, F είναι η κάθετη δύναμη, A είναι το εμβαδόν της διατομής, M η καμπτική ροπή, ρ είναι η τοπική ακτίνα καμπυλότητας (ακτίνα καμπυλότητας της συγκεκριμένης διατομής που εξετάζεται), I'_x η ροπή αδρανείας και y είναι η θέση του σημείου στον άξονα y της διατομής που μετρούμε την τάση σ .

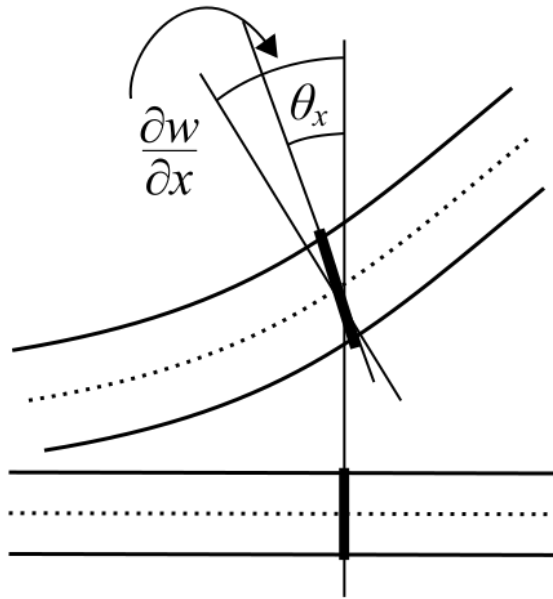
Όταν η ακτίνα καμπυλότητας ρ πλησιάζει το άπειρο και $y \ll \rho$, η εξίσωση (1.11) τροποποιείται ως εξής:

$$\sigma = \frac{F}{A} \pm \frac{M_y}{I} \quad (1.12)$$

1.6 Θεωρία κάμψης Timoshenko

Το 1921, ο Timoshenko, βελτίωσε την θεωρία κάμψης του Euler-Bernoulli, προσθέτοντας το φαινόμενο της διάτμησης στις εξισώσεις κάμψης. Οι κινηματικές παραδοχές της θεωρίας του ήταν:

- Τα κάθετα μεγέθη στον άξονα της δοκού παραμένουν επίπεδα μετά την παραμόρφωση, όχι όμως και κάθετα στον ουδέτερο άξονα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10.
- Δεν υπάρχει αλλαγή στο πάχος της δοκού μετά την παραμόρφωση.



Σχήμα 1.10. Παραμόρφωση μιας δοκού Timoshenko. Η κάθετος στρέφεται κατά μία γωνία θ , που δεν ισούται με dw/dx (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>).

Η εξίσωση της στατικής κάμψης μίας γραμμικά ελαστικής, ισότροπης και ομοιογενούς δοκού με στερεή διατομή κάτω από αυτές τις παραδοχές είναι:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q(x) - \frac{EI}{kAG} \frac{d^2 q}{dx^2} \quad (1.13)$$

όπου I είναι η ροπή αδρανείας της διατομής, A είναι το εμβαδόν της διατομής, G το μέτρο διάτμησης, k ο συντελεστής διατμητικής διόρθωσης και $q(x)$ είναι το εφαρμοζόμενο κάθετο φορτίο. Για υλικά με λόγο Poisson (ν) κοντά στο 0.3, ο συντελεστής διατμητικής διόρθωσης για μια ορθογωνική διατομή είναι περίπου:

$$k = \frac{5 + 5\nu}{6 + 5\nu} \quad (1.14)$$

Η στροφή σε σχέση με την κάθετο $\varphi(x)$ δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{q(x)}{kAG} \quad (1.15)$$

Τέλος η καμπτική ροπή M και η διατμητική δύναμη Q προκύπτουν:

$$M(x) = -EI \frac{d\varphi}{dx} \text{ και } Q(x) = kAG \left(\frac{dw}{dx} - \varphi \right) = -EI \frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{dM}{dx} \quad (1.16)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μηχανική συμπεριφορά εγκάρσια ρωγματομένων δοκών

2.1 Εισαγωγή

Παράλληλες γεωλογικές στρώσεις με δεσπόζουσα σημασία στην συμπεριφορά του πετρώματος συναντώνται συχνά σε διάφορα περιβάλλοντα των υπόγειων εκσκαφών. Οι στρώσεις αυτές μπορεί να είναι το αποτέλεσμα ιζηματογενούς απόθεσης, διακλάσεων εφελκυσμού, υφής δημιουργημένης από διαδικασίες μεταμόρφωσης ή ροής λάβας, ή επαγόμενης θράυσης συμπαγούς πετρώματος σε θλίψη παράλληλα με την επιφάνεια της οροφής. Η στρωσιγενής αυτή δομή του πετρώματος αποτελεί κυρίαρχο παράγοντα, που ελέγχει την ασφάλεια των οροφών σε υπόγεια τεχνικά έργα, σε ανθρακορυχεία και σε άλλα υπόγεια οριζόντια ή κεκλιμένα μέτωπα (Σοφιανός,2013). Χαρακτηριστική εικόνα στρωσιγενούς δομής φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



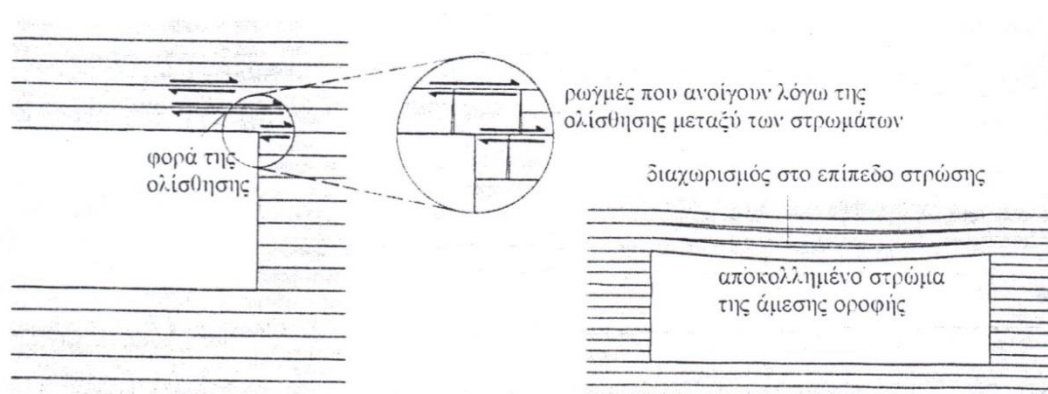
Σχήμα 2.1. Στρωσιγενές πέτρωμα.

2.2 Ιστορική αναδρομή

Πρώτος ο Fayol (1885) παρατήρησε ότι τα στρώματα των υπόγειων οροφών διαχωρίζονται κατά την κάμψη τους (Σχήμα 2.2), έτσι ώστε κάθε ένα από αυτά να μεταφέρει ως δοκός στα στηρίγματα το ίδιο βάρος του μόνο, χωρίς να φορτίζει ή να φορτίζεται από τα γειτονικά του στρώματα. *Επομένως, η ευστάθεια καθορίζεται από τη φέρουσα ικανότητα του στρώματος φορτιζόμενου από το ίδιο του βάρος* (Σοφιανός,2013).

Σύμφωνα με τον Sterling (1977) τα πρώτα πειράματα του Fayol περιελάμβαναν τη μέτρηση του βέλους κάμψης μίας δοκού πακτωμένης στα δύο της άκρα. Όταν το πείραμα επαναλήφθηκε με δεύτερη όμοια δοκό επάνω από την πρώτη, το βέλος

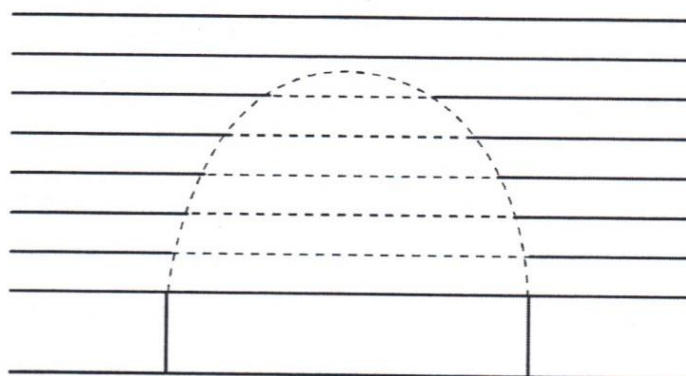
κάμψης της κάτω δοκού ήταν μεγαλύτερο από εκείνο της μίας μόνο δοκού, της δε δεύτερης μικρότερο εκείνου της πρώτης. Όσο ο αριθμός των δοκών μεγάλωνε το βέλος κάμψης της κατώτερης δοκού συνέχιζε να αυξάνεται μέχρι κάποιου σημείου, πέραν του οποίου περαιτέρω προσθήκη δοκών επάνω στη σειρά δεν το επηρέαζε πλέον, ενώ οι ανώτερες δοκοί της σειράς δεν κάμπτονταν καθόλου (Σοφιανός,2013).



Σχήμα 2.2. Συνέπειες της ολίσθησης και του διαχωρισμού, στη διεπιφάνεια των στρώσεων, στη μηχανική συμπεριφορά του περιβάλλοντος πετρώματος (Σοφιανός,2013).

Επεκτείνοντας τις παρατηρήσεις του από τις πειραματικές μετρήσεις στην συμπεριφορά της άμεσου οροφής των υπογείων εκσκαφών συνήγαγε το συμπέρασμα ότι η κάμψη των στρωμάτων αυτής προκαλεί την μερική αποχώρησή τους από τα υπερκείμενα στρώματα, με αποτέλεσμα τα κατακόρυφα φορτία λόγω των υπερκειμένων να μεταβιβάζονται προς τα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής και όχι απ'ευθείας επάνω στο κατώτερο μέλος της σειράς (Νομικός,2004).

Επιπλέον, διατύπωσε την άποψη ότι η κάμψη αυτή των στρωμάτων ενεργοποιεί την τριβή μεταξύ των διεπιφανειών τους, η οποία συμβάλλει στην μεταφορά των δυνάμεων τους προς τα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής, με αποτέλεσμα να δημιουργείται στην οροφή του ανοίγματος μία ζώνη χαλαρώσεως, το όριο της οποίας λαμβάνει τη μορφή θόλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, γνωστός και ως **θόλος Fayol** (Νομικός,2004).



Σχήμα 2.3. Ζώνη χαλαρώσεως γύρω από υπόγεια εκσκαφή (θόλος Fayol) (Νομικός,2004).

Παρόμοια μορφή με αυτή του θόλου προέβλεψε και για την περίπτωση, που το σύνολο της οροφής επάνω από την εκσκαφή θα αστοχήσει.

Αν και ο Fayol εφάρμοσε τις παρατηρήσεις του κυρίως για τον υπολογισμό επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης υπογείων στοών, η θεωρία του έδωσε ώθηση σε άλλους μελετητές να διερευνήσουν περαιτέρω τη συμπεριφορά και την αστοχία της οροφής υπογείων ανοιγμάτων, όπως για παράδειγμα των Jones και Davis (1928), η εργασία των οποίων αναφέρεται κατά τη συζήτηση μεταγενέστερου άρθρου του Evans (1941) και για το οποίο γίνεται εκτενής αναφορά στη συνέχεια. Σύμφωνα με τους Jones και Davis επί τόπου παρατηρήσεις αστοχιών οροφής σε ανθρακορυχείο με υπερκείμενα από ψαμμίτη καθώς και παρατηρήσεις επί φυσικών μοντέλων από ξύλινα τεμάχια, ως μία προσπάθεια προσέγγισης με αυτά των ογκοτεμαχίων του πετρώματος, δείχνουν ότι το όριο της αστοχίας της οροφής τείνει να λάβει την μορφή σφήνας, έναντι της μορφής θόλου, που θεώρησε ο Fayol

Ο Bucky (1934) διερευνώντας την επίδραση της απόστασης και του υλικού πληρώσεως κατακόρυφων ασυνχειών, που διασχίζουν μία δοκό, παρατήρησε, μέσω πειραματικής φόρτισης μοντέλων δοκών σε φυγοκεντριστή, ότι η αντοχή της δοκού δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό και τη θέση των ασυνχειών της όταν το άνοιγμα μεταξύ των τοιχωμάτων τους είναι αμελητέο (μείωση της αντοχής της δοκού λιγότερο από 15%). Επηρεάζεται όμως από το μέγεθος του ανοίγματος των ασυνχειών και από το υλικό πλήρωσής τους. Παρατήρησε ακόμη ότι η αντοχή της δοκού παρουσιάζόταν σημαντικά αυξημένη, όταν το υλικό πληρώσεως που χρησιμοποιούταν περιείχε σε κάποιο ποσοστό τσιμέντο (Νομικός,2004).

Σε μεταγενέστερη εργασία των Bucky και Tadorelli (1938), η οποία περιγράφεται από τον Sterling (1977), πραγματοποίησαν λεπτομερέστατη εξέταση της συμπεριφοράς των στρώματων οροφής υπογείων εκσκαφών σε στρωσιγενή πετρώματα χρησιμοποιώντας την ίδια με προηγούμενως συσκευή και προσομοιώνοντας 5 διαδοχικά στρώματα οροφής με διάφορα πάχη και διευρύνοντας σταδιακά το μέγεθος του ανοίγματος σε μία προσπάθεια να προσομοιώσουν την εξορυκτική διαδικασία σε επιμήκη ευθύγραμμο υπόγεια μέτωπα (Νομικός,2004).

Σύμφωνα με τα πειράματα των Bucky και Tadorelli η πρώτη αστοχία, συνοδευόμενη από τη δημιουργία ρωγμής εμφανιζόταν στο μέσο του κατώτερου στρώματος, η ρωγμή όμως αυτή δεν επιδρούσε σημαντικά στην ευστάθεια του ανοίγματος καθώς το μέσον του μεταφερόταν ύστερα από την προχώρηση του υποθετικού μετώπου. Σε δύο από τα πειράματα μία νέα ρωγμή σχηματιζόταν στη νέα θέση του μέσου, ενώ η προηγούμενη έτεινε να κλείσει (Νομικός,2004).

Το 1941 ο Evans παρουσίασε την πρωτοποριακή για εκείνη την εποχή εργασία του με τίτλο *'The strength of undermined strata'*. Στην εργασία αυτή μελέτησε τις δοκούς οροφής υπογείων ανοιγμάτων ως ασυνχειές δοκούς μορφής voussoir, κατ'αντιστοιχία με την τεχνική γεφύρωσης ανοιγμάτων των τόξων voussoir, που χρησιμοποιείται στη γεφυροποιία και στην οικοδομική από αρχαιοτάτων χρόνων. Τα

σχόλια, που ακολούθησαν την παρουσίαση της εργασίας, ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακά και ζωηρά. Οι περισσότεροι από τους ακροατές εξήραν την εργασία του Evans και αναγνώρισαν ότι κατάφερε κατά κάποιο τρόπο να εξηγήσει την υψηλή αντοχή που ενίοτε παρουσίαζαν τα στρώματα της αμέσου οροφής των υπογείων ανοιγμάτων. Υπήρξαν πάντως και αρκετές διαφωνίες με τα συμπεράσματα που διατύπωσε στην εργασία του (Νομικός,2004).

Μεταξύ του 1940 και του 1960 ένα πλήθος ερευνητών μελέτησε την συμπεριφορά των δοκών οροφής των υπογείων ανοιγμάτων. Οι περισσότερες εργασίες επικεντρώνονταν είτε στην ελαστική ανάλυση των δοκών είτε σε πειραματικές μετρήσεις (Νομικός,2004).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 οι Wright και Bucky (1949) εκτέλεσαν σειρά πειραματικών δοκιμών εξετάζοντας την ευστάθεια της οροφής θαλάμων σε σχιστολιθικά πετρώματα συναρτήσει του πάχους του κατώτερου στρώματος της οροφής (Νομικός,2004).

Το 1954 το U.S.B.M. δημοσίευσε μελέτη του Merrill (1954), η οποία αναφέρεται από τους Obert et al. (1960) και περιγράφεται από τον Sterling (1977). Σε αυτήν, ο Merrill συγκέντρωσε τα συμπεράσματα έρευνας της ευστάθειας της οροφής σχιστολιθικών πετρωμάτων στο μεταλλείο Rifle του Colorado των Η.Π.Α. Στα πλαίσια της έρευνας αυτής διανοίχτηκε πειραματικός θάλαμος διαστάσεων 80x200 ft, στον οποίο τοποθετήθηκαν όργανα παρακολούθησης για τη μέτρηση της σύγκλισης των στρωμάτων της αμέσου οροφής καθώς και όργανα καταγραφής της μικροσεισμικής δραστηριότητας των περιβαλλόντων πετρωμάτων (Νομικός,2004).

Αναφορικά με την συμπεριφορά του πειραματικού θαλάμου περιγράφεται η εμφάνιση τριχοειδών επιφανειακών ρωγμών της οροφής, όταν ο θάλαμος έλαβε τις τελικές του διαστάσεις, ενώ το βέλος κάμψης μετρήθηκε στις 0.235 in (η ελαστική θεωρία κάμψης πλακών προβλέπει 0.086 in για τις συγκεκριμένες διαστάσεις θαλάμου). Δύο μήνες αργότερα μία πλάκα πετρώματος πάχους 20 in κατέπεσε από την οροφή εκατέρωθεν προϋπάρχουσας ασυνέχειας, ενώ ακολούθησε πτώση και άλλου τμήματος της ίδιας πλάκας (Νομικός,2004).

Η θεωρία του Evans (1941) χρησιμοποιείται για πρώτη φορά από τον Corlett (1956), ο οποίος συσχέτισε τη θεωρία της δοκού voussoir με την αποτελεσματικότητα της κοχλίωσης της οροφής, δείχνοντας ότι ο σχηματισμός ενός τόξου μεταφοράς δυνάμεων στην οροφή καθιστούσε ανενεργούς τους κοχλίες, που το μήκος τους ήταν μικρότερο από το ύψος του τόξου. Αργότερα οι Corlett και Emery (1959) χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο δοκού από τούβλα έδειξαν ότι εάν η πλευρική πίεση δεν επαρκεί, ώστε να αποτρέψει το άνοιγμα των διεπιφανειών, τότε η δοκός αρχίζει να συμπεριφέρεται ως δοκός voussoir (Νομικός,2004).

Το 1956 ο Mohr (Mohr,1956) παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα δοκιμών παρόμοιων με εκείνων του Evans έδειξε ότι μία μεγάλου πάχους δοκός αποτελούμενη από ασύνδετα τεμάχια κάμπτεται περισσότερο από μία αντίστοιχη δοκό μικρότερου

πάχους (σε αντίθεση με τη συμπεριφορά ελαστικών δοκών). Επίσης ο περιορισμός του βέλους κάμψης της δοκού απαιτεί πολύ μεγαλύτερη δύναμη για την μικρού πάχους δοκό από ότι για την μεγάλη πάχους. Όπως αποδείχτηκε στη συνέχεια από άλλους ερευνητές (Sterling, 1977) το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο ενώ δεν είναι πάντοτε αληθές (Νομικός,2004).

Μεταξύ του 1956 και του 1962, ο Panek (Panek 1956a, 1956b, 1956c, 1962a, 1962b) δημοσίευσε τις γνωστές εργασίες του για την κοχλίωση της οροφής σε μία σειρά μελετών του U.S.B.M. στις οποίες όμως η θεωρητική και πειραματική δουλειά του περιορίστηκε σε συνεχείς ελαστικές δοκούς κυρίως στην ελαστική περιοχή. Παράλληλα ο Lang (1961) επικεντρώθηκε στην συνεισφορά της κοχλίωσης της οροφής σε θραυσμένο πέτρωμα και έδειξε το σχηματισμό ενός τόξου μεταφοράς δυνάμεων στην ογκοτεμαχισμένη οροφή. Λίγα χρόνια αργότερα, ο Trollope (1966) μελετώντας τη συμπεριφορά ανυποστήρικτων ανοιγμάτων έδειξε ότι αυτά μπορούν να παραμείνουν ευσταθή με το σχηματισμό ενός τόξου μεταφοράς δυνάμεων στην άμεσο οροφή. Όταν όμως τα πειραματικά μοντέλα υφίσταντο κάποια δόνηση, η ολίσθηση των διεπιφανειών των ασυνεχειών οδηγούσε σε κατάρρευση της οροφής με το σχηματισμό τριγωνικού ορίου (Νομικός,2004).

Το 1972 ο Wright με την εργασία του *'Arching action in cracked roof beams'*, ανέλυσε την δοκό voussoir, διεξάγοντας μία γραμμική ανάλυση μέσω της μεθόδου των διακριτών στοιχείων. Έπειτα οι Brady και Brown (1985), ανέλυσαν την δοκό voussoir και υποστήριξαν ότι ο μηχανισμός της δοκού voussoir θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό υπογείων ανοιγμάτων στρωσιγενών πετρωμάτων, σε αντίθεση με την παραδοσιακή θεωρία της συνεχούς δοκού (Νομικός,2004).

Οι Mohr (1965), Sterling και Nelson (1978) και Potts et al. (1979), εξέτασαν πειραματικά με αντίστοιχες διατάξεις την δοκό voussoir. Μετέπειτα οι Beer και Meek (1982) τροποποίησαν την εξίσωση που προτάθηκε από τον Evans και ανέπτυξαν μιας τετάρτης τάξεως εξίσωση. Από μία διαφορετική οπτική γωνία ο Chugh (1977), μελέτησε την σταθερότητα μιας ρωγματομένης δοκού, χρησιμοποιώντας μητρώο ακαμψίας για τα τμήματα της δοκού. Με την τροποποίηση και επέκταση της εξισώσεως των Beer και Meek, οι Brady και Brown (1985) πρότειναν μια μέθοδο επανάληψης για την ανάλυση της δοκού. Δυστυχώς, η μετατόπιση της δοκού – η αναγκαία συνθήκη της λειτουργίας τόξου μιας δοκού voussoir, στην πραγματικότητα αγνοήθηκε και από τις δύο αναλύσεις (Νομικός,2004).

Τα τελευταία 30 χρόνια συνεχίζεται το έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον περί της συμπεριφοράς των δοκών πετρώματος της άμεσου οροφής υπογείων ανοιγμάτων.

2.3 Θεωρητική ανάλυση των δοκών οροφής

2.3.1 Γενικά στοιχεία

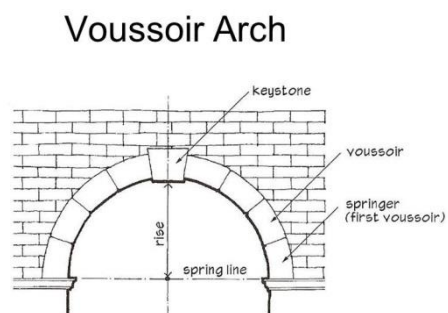
Η σταθερότητα της οροφής σε ένα άνοιγμα ενός υπόγειου μεταλλείου, έχει άμεσες συνέπειες στην επιλογή των μεθόδων υποστήριξης, στις διαστάσεις του ανοίγματος, και το πιο σημαντικό στην ασφάλεια των εργαζομένων. Η πρόβλεψη της σταθερότητας της οροφής, είναι πολύ σημαντική όσον αφορά την επιλογή μεθόδου εκμεταλλεύσεως στις μεταλλευτικές επιχειρήσεις.

Η ρωγματομένη δοκός σε ανοίγματα μεταλλευτικά, σε στρωσιγενή πετρώματα, μπορεί να είναι σταθερή κατώ από ένα εγκάρσιο φορτίο, αλλά αυτό εξαρτάται από την γεωμετρία της οροφής και τις ιδιότητες του υλικού της οροφής και των ασυνεχειών. Οι πρώτες προσπάθειες για την θεωρητική αντιμετώπιση του προβλήματος των δοκών οροφής υπογείων ανοιγμάτων ελάμβαναν αυτή ως μία ελαστική δοκό ή πλάκα, η οποία αστοχεί όταν οι εφελκυστικές τάσεις, που αναπτύσσονται σε αυτή υπερβαίνουν την αντοχή της σε εφελκυσμό. Τέτοιες δοκοί θα μπορούσαν να παραμείνουν ευσταθείς ακόμη και σε πολύ μεγάλα ανοίγματα. Παρα ταύτα, ο Dinsdale (1937) παρατήρησε ότι τέτοιας μορφής δοκοί παρουσιάζουν ψαθυρή συμπεριφορά κατά την κάμψη τους και συνεπώς η μέγιστη επιτρεπόμενη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται πριν από την πλήρη εξέλιξη της καμπτικής τους παραμόρφωσης (Νομικός, 2004).

Η παρατήρηση του Dinsdale σημαίνει πρακτικά ότι η δοκός δεν αστοχεί αμέσως μετά την ρωγμάτωσή της λόγω εφελκυσμού, αλλά διατηρεί τη φέρουσα ικανότητά της, η οποία πιθανόν και να αυξάνεται. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Briggs (1929) δοκός οροφής πάχους 21m και πλάτους 40m παρέμενε ευσταθής χωρίς να παρουσιάζει τάσεις κατάρρευσης αν και οι εφελκυστικές τάσεις στη δοκό υπερέβαιναν κατά μεγάλο ποσοστό την εφελκυστική της αντοχή (Νομικός, 2004).

Η σταθερότητα αυτής της δοκού της οροφής μπορεί να αναλυθεί, αν θεωρήσουμε την δοκό αυτή ως **δοκό voussoir**, η οποία κατά τη στιγμή της αστοχίας της δεν λειτουργεί ως απλή ελαστική δοκός. Το παραπάνω μπορεί απλά να αιτιολογηθεί με την παρατήρηση ότι η ύπαρξη των ασυνεχειών στο σώμα της δοκού σχηματίζει μια ασυνεχή δομή, που συντίθεται από ξεχωριστά ογκοτεμάχια πετρώματος. Τα τεμάχια πετρώματος, που συνθέτουν την δοκό, ονομάζονται τεμάχια voussoir. Ο όρος voussoir χρησιμοποιείται κατ'αντιστοιχία με τα τόξα και τις αψίδες voussoir, που συνιστά μία τεχνική γεφύρωσης ανοιγμάτων με ευρεία χρήση από αρχαιοτάτων χρόνων (κυρίως τα χρόνια της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας), όπως χαρακτηριστικά παρατηρείται σε μνημεία διαφορετικών περιοχών και εποχών (Harvey, 1999) (Σχήμα 2.4) (Νομικός, 2004).

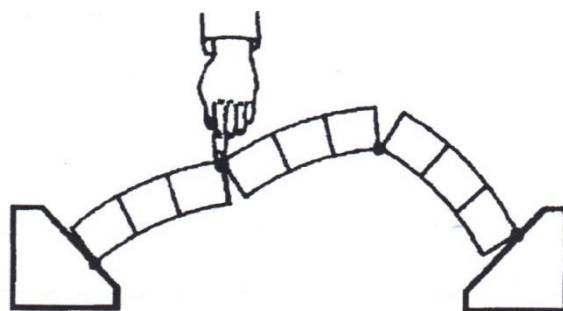
Να τονισθεί για λόγους οικονομίας ότι όπου αναφέρεται δοκός θα εννοείται ότι είναι δοκός voussoir.



Σχήμα 2.4. Τόξο voussoir σε αψιδωτή κατασκευή.

Η αντοχή των τόξων voussoir οφείλεται ως επί το πλείστον στο γεωμετρικό σχήμα και το πάχος της διατομής τους, σχηματίζοντας φορέα, που μεταβιβάζει τα ασκούμενα σε αυτόν φορτία στις στηρίξεις του, μέσω των τεμαχίων voussoir, που το απαρτίζουν (Νομικός, 2004).

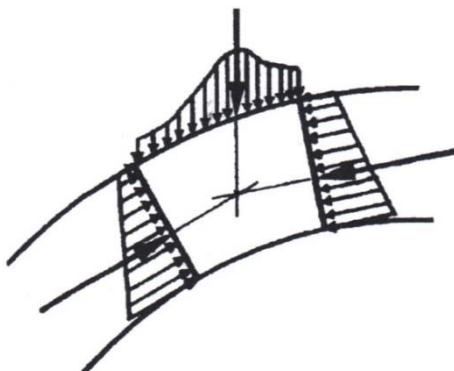
Συνήθως η αστοχία των τόξων αυτών οφείλεται σε μηχανική αστάθεια του φορέα (Koocharian 1952, Βαρκαράκης 1988, O'Dwyer 1998), η οποία μπορεί να προκληθεί με μικρότερη φόρτιση από εκείνη που θα προκαλέσει αστοχία του υλικού του. Για παράδειγμα ένα ομοίωμα τόξου voussoir, όπως αυτό του σχήματος 2.5, θα μπορούσε να αστοχήσει υπό την πίεση του δακτύλου και μόνο, η οποία για ένα υλικό με ικανή αντοχή, π.χ. ξύλο, δεν μπορεί να προκαλέσει αστοχία του υλικού (O'Dwyer, 1998).



Σχήμα 2.5. Αστοχία τόξου voussoir με μηχανική αστάθεια του φορέα του (O'Dwyer, 1998).

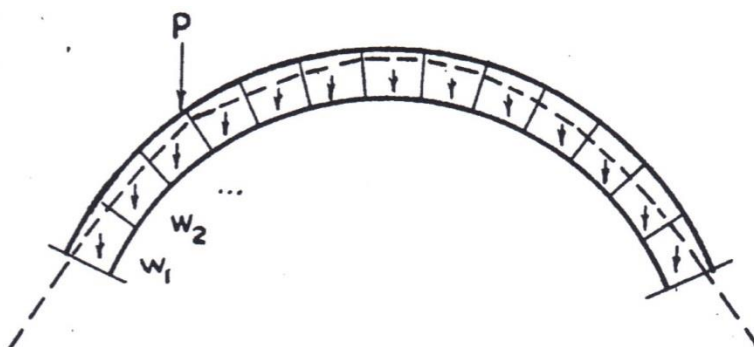
Το μέγεθος του φορτίου που απαιτείται για να προκληθεί μηχανική αστοχία σε ένα τόξο voussoir είναι ανεξάρτητο από την αντοχή του υλικού των τεμαχίων του, αλλά εξαρτάται μόνο από το σχήμα του, το ίδιο βάρος του, τη θέση και το μέγεθος της εξωτερικής φόρτισης. Η εξάρτηση της αντοχής του τόξου από το σχήμα του αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματα των φορέων αυτής της μορφής, μιας και η αστοχία τους μπορεί να μελετηθεί με μικρής κλίμακας φυσικά μοντέλα του φορέα. Εάν το φυσικό μοντέλο αποδεικνύεται ευσταθές, τότε και η πραγματική κατασκευή θα είναι ευσταθής, όταν οι ασκούμενες πιέσεις δεν υπερβαίνουν την αντοχή του υλικού (Νομικός, 2004).

Η μεταφορά των εξωτερικών φορτίσεων στο τόξο voussoir πραγματοποιείται δια μέσω των τεμαχίων voussoir προς τις στηρίξεις, οι δε τάσεις που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες των τεμαχίων αυτών αναπαρίστανται από την συνισταμένη δύναμη, που ασκείται στη διεπιφάνεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6. Εντατική κατάσταση στη διεπιφάνεια των τεμαχίων voussoir (O'Dwyer, 1998).

Συνεπώς η εντατική κατάσταση σε όλες τις διατομές του τόξου μπορεί να παρασταθεί από μία καμπύλη πιέσεων, η οποία θα διέρχεται από τα σημεία εφαρμογής των συνισταμένων δυνάμεων σε κάθε διατομή του τόξου. Το σχήμα της καμπύλης πιέσεων μέσα στο τόξο μπορεί να βρεθεί εάν κατασκευασθεί το σχοινοπολύγωνο των δυνάμεων που ασκούνται στο τόξο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7 (Νομικός,2004).



Σχήμα 2.7. Καμπύλη πιέσεων στο τόξο voussoir με κατασκευή σχοινοπολυγώνου (Koochian, 1952).

Για ένα τόξο, που φορτίζεται υπό το ίδιο βάρος του μόνο, η ευστάθεια του διατηρείται όταν η καμπύλη πιέσεων του τόξου δρα στο εσωτερικό του. Εάν στο τόξο ασκηθούν επιπρόσθετα εξωτερικά φορτία, τότε η εντατική κατάσταση σε αυτό μεταβάλλεται, όπως μεταβάλλεται και η θέση της καμπύλης πίεσεως. Η ευστάθεια του τόξου και πάλι θα εξαρτάται από το αν στη νέα της θέση η καμπύλη πιέσεων εξακολουθεί να δρά στο εσωτερικό του τόξου (O'Dwyer, 1998) (Νομικός,2004).

Η εύρεση της ακριβούς θέσης της καμπύλης πιέσεων για δεδομένη φόρτιση του τόξου είναι ένα στατικά αόριστο πρόβλημα. Η τυχαία επιλογή του πόλου με τον οποίο θα κατασκευασθεί το σχοινοπολύγωνο πρακτικά σημαίνει ότι για κάθε τόξο

υπάρχει ένας άπειρος αριθμός πιθανών θέσεων της καμπύλης πιέσεων και συνεπώς για να σχεδιαστεί η πραγματική καμπύλη θα πρέπει να είναι γνωστές οι αντιδράσεις στις στηρίξεις του τόξου κατά μέγεθος και κατά θέση (Koocharian, 1952) (Νομικός,2004).

Ο έλεγχος λοιπόν της ευστάθειας των τόξων voussoir δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλή στατική θεώρηση του φορέα τους. Ο έλεγχος αυτός συνήθως πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τα δύο θεωρήματα οριακής ανάλυσης της θεωρίας της πλαστικότητας (Βαρκαράκης, 1998), τα οποία στην περίπτωση του τόξου voussoir διατυπώνονται ως εξής (Koocharian, 1952):

- **Θεώρημα κάτω ορίου:** Το τόξο παραμένει ευσταθές υπό κάποια φόρτιση, εάν για αυτή την φόρτιση μπορεί να σχεδιασθεί έστω και μία καμπύλη πιέσεων, που να περιέχεται εντός του εσωτερικού του τόξου.
- **Θεώρημα άνω ορίου:** Το τόξο είναι ασταθές υπό δεδομένη φόρτιση εάν για αυτή τη φόρτιση μπορεί να βρεθεί ένας κινηματικά αποδεκτός μηχανισμός αστοχίας με τη θεωρία της πλαστικότητας. Ως κινηματικά αποδεκτός μηχανισμός αστοχίας θεωρείται αυτός στον οποίο το έργο που παράγεται από τα εξωτερικά φορτία του φορέα είναι τουλάχιστον ίσο ή μεγαλύτερο από το έργο των εσωτερικών δυνάμεων των μελών του φορέα (Koocharian, 1952).

Με βάση τα δύο αυτά θεωρήματα γίνεται η ανάλυση ευστάθειας των τόξων voussoir. Η μέθοδος όμως αυτή είναι κατάλληλη μόνο όταν το υλικό των τεμαχίων voussoir θεωρηθεί ότι έχει την απαραίτητη αντοχή, ώστε να μεταφέρει με ασφάλεια τα φορτία που ασκούνται στο τόξο.

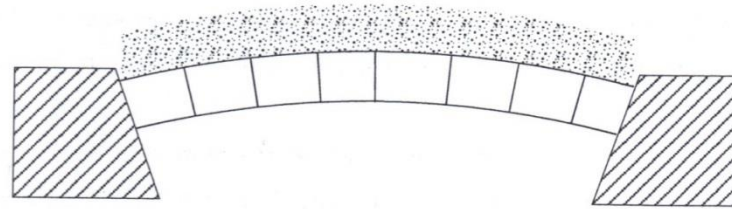
2.3.2 Μετάβαση από το τόξο voussoir στην αντίστοιχη δοκό

Η μετάβαση από το τόξο voussoir στη δοκό voussoir, και συνεπώς και η αιτιολόγηση του όρου αυτού, που συναντάται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία, μπορεί να περιγραφεί με βάση την θεώρηση του Evans (1941) όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 2.8 (Νομικός,2004).

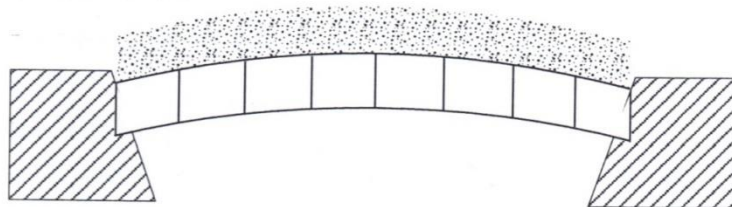
Στο σχήμα 2.8α φαίνεται ένα κλασσικό τόξο voussoir στο οποίο τα ασκούμενα φορτία προκύπτουν από το ίδιο βάρος και μία χαμηλή κάλυψη υπερκειμένων. Το ενδιαμέσο στάδιο προς τη δοκό voussoir είναι αυτό, που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8β, στο οποίο η δομή του τόξου παραμένει αλλά τώρα τα τεμάχια voussoir έχουν τις πλευρές, μέσω των οποίων εφάπτονται μεταξύ τους κατακόρυφες. Τελικώς, στο σχήμα 2.8γ η δομή του τόξου έχει δώσει τη θέση της σε μία δοκό, τέτοιου πάχους ώστε αφενός να διατηρείται το συνολικό φορτίο σταθερό και αφ'ετέρου να περιλαμβάνει το προηγούμενο τόξο εξ ολοκλήρου στο εσωτερικό του σχήματός της (Νομικός,2004).

Η περιγραφή του Evans είναι κατάλληλη για την αιτιολόγηση της μετάβασης μίας δοκού πετρώματος, που περιέχει ασυνέχειες στη δομή της, σε δοκό voussoir. Ακόμη όμως και στην περίπτωση που η δοκός δεν περιέχει ασυνέχειες στη δομή της η

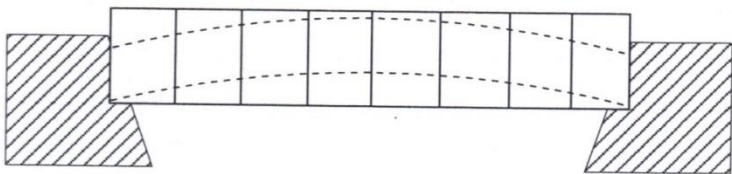
θεώρηση της δοκού voussoir θα μπορούσε να είναι ορθή. Ας θεωρηθεί για παράδειγμα η ελαστική δοκός του σχήματος 2.9α, της οποίας τα άκρα στήριξης είναι πακτωμένα. Προκειμένου για δοκούς πετρώματος στην οροφή υπογείων ανοιγμάτων, η θεώρηση των πακτωμένων αρχικά στηρίξεων της δοκού είναι λογική, εάν ληφθεί υπόψη ότι αυτές ευρίσκονται υπό κατακόρυφο και οριζόντιο περιορισμό λόγω των περιβαλλόντων πετρωμάτων (Νομικός,2004).



(α) τόξο Voussoir με χαμηλή κάλυψη υπερκειμένων

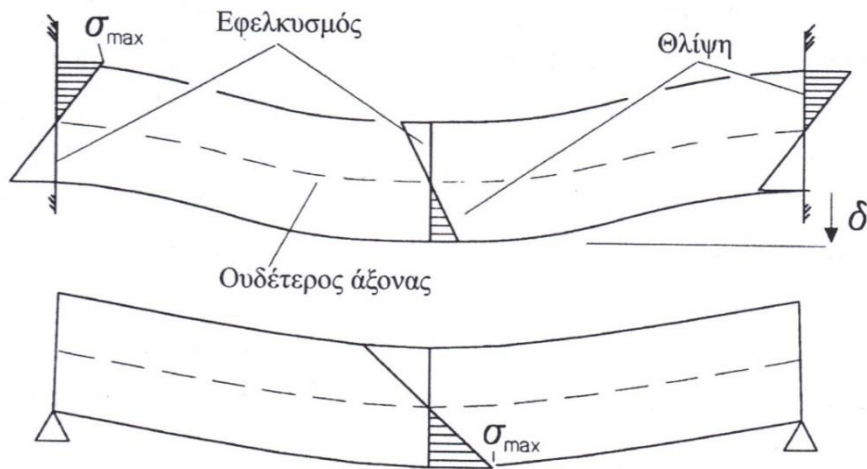


(β) παρόμοια περίπτωση με την (α), αλλά οι πλευρές των τεμαχίων Voussoir είναι κατακόρυφες



(γ) παρόμοια περίπτωση με την (β), με το ίδιο ασκούμενο φορτίο, όμως τώρα πρόκειται για δοκό που εμπεριέχει το τόξο.

Σχήμα 2.8. Η μετάβαση από το τόξο voussoir στη δοκό voussoir (Evans, 1941).



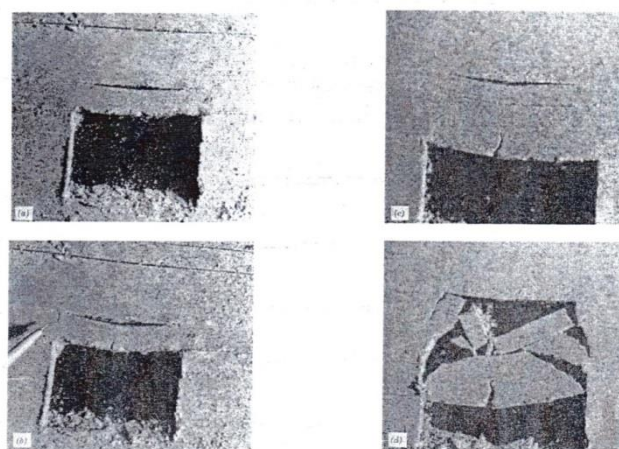
Σχήμα 2.9. Ελαστική δοκός στηριζόμενη (α) σε πακτωμένα άκρα και (β) με απλή έδραση (Νομικός,2004).

Σε μία αμφίπακτη συνεχή ελαστική δοκό σταθερής διατομής υπό ομοιόμορφη κατανεμημένη φόρτιση η ένταση λόγω κάμψης, που αναπτύσσεται στις διατομές της δοκού, προκαλεί εφελκυσμό του άνω τμήματος της διατομής στις στηρίξεις και του κάτω τμήματος της διατομής στο μέσο της δοκού. Η μέγιστη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται στην ακραία ίνα της διατομής των στηρίξεων και είναι περίπου διπλάσια από την μέγιστη εφελκυστική τάση στο μέσο της δοκού. Συνεπώς για μία τέτοια δοκό η πρώτη αστοχία σε εφελκυσμό θα εμφανισθεί στις στηρίξεις, όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση υπερβεί την αντοχή σε εφελκυσμό του πετρώματος, με αποτέλεσμα την διακοπή της συνέχειας των στηρίξεων και τη δημιουργία ρωγμών (Νομικός,2004).

Η δοκός παύει πλέον να είναι αμφίπακτη και η στατική της λειτουργία μπορεί να περιγραφεί από αυτή της αμφιέρειστης δοκού του σχήματος 2.9β, δεχόμενοι ότι δεν συμβαίνει ολίσθηση στις στηρίξεις. Η μέγιστη ένταση στην αμφιέρειστη δοκό αναπτύσσεται στη μεσαία διατομή της, στην ακραία ίνα της οποίας εμφανίζεται μέγιστη εφελκυστική τάση μεγαλύτερη από την εφελκυστική τάση των στηρίξεων της αμφίπακτης δοκού (υποθέτοντας την ίδια γεωμετρία και φόρτιση). Συνεπώς η δοκός αστοχεί σε εφελκυσμό στη μεσαία διατομή της (Νομικός,2004).

Να τονισθεί ότι ως **αμφιέρειστη δοκός**, χαρακτηρίζεται *το τμήμα κάθε οριζόντιου φορέα που εκτείνεται μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων μηδενικής ροπής (απλών στηρίξεων ή σημείων καμπής)* (http://www.metal.ntua.gr/uploads/4240/Kotsovos_KEF_3.pdf).

Στη διαδοχική αυτή θραύση των διατομών στήριξης και μέσου της δοκού μπορεί να αποδοθεί η μετάβαση μίας δοκού πετρώματος στην οροφή ενός υπόγειου ανοίγματος σε δοκό voussoir, αφού είναι γενικώς παραδεκτό ότι για μεγάλα πλάτη εκσκαφών τα στρώματα της αμέσου οροφής συχνά ρωγματώνονται λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του άρρηκτου πετρώματος στο μέσο και στις στηρίξεις (Diederichs και Kaiser, 1999). Αυτό άλλωστε επιβεβαιώνεται και από πειραματικές παρατηρήσεις όπως είναι αυτές του Goodman (1989), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10. Φυσικό ομοίωμα παρατήρησης της διαδικασίας αστοχίας στρωσιγενούς οροφής (Σοφιανός,2013).

Η θεωρητική μελέτη των δοκών *voussoir*, όπως επιχειρήθηκε από ένα πλήθος ερευνητών με απαρχή τις μελέτες του Evans, βασίζεται στα εξής (Νομικός,2004):

- a) Στην παραδοχή ότι η παρουσία των ασυνεχειών στην δοκό, είτε λόγω της δομής του πετρώματος είτε λόγω εφελκυστικής αστοχίας της δοκού, δεν επιτρέπει την μετάδοση εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος της δοκού και,
- b) Στην υπόθεση ότι η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών της είναι αρκετή, ώστε να αποτρέπει τη διατμητική ολίσθηση κατά μήκος των επιπέδων τους.

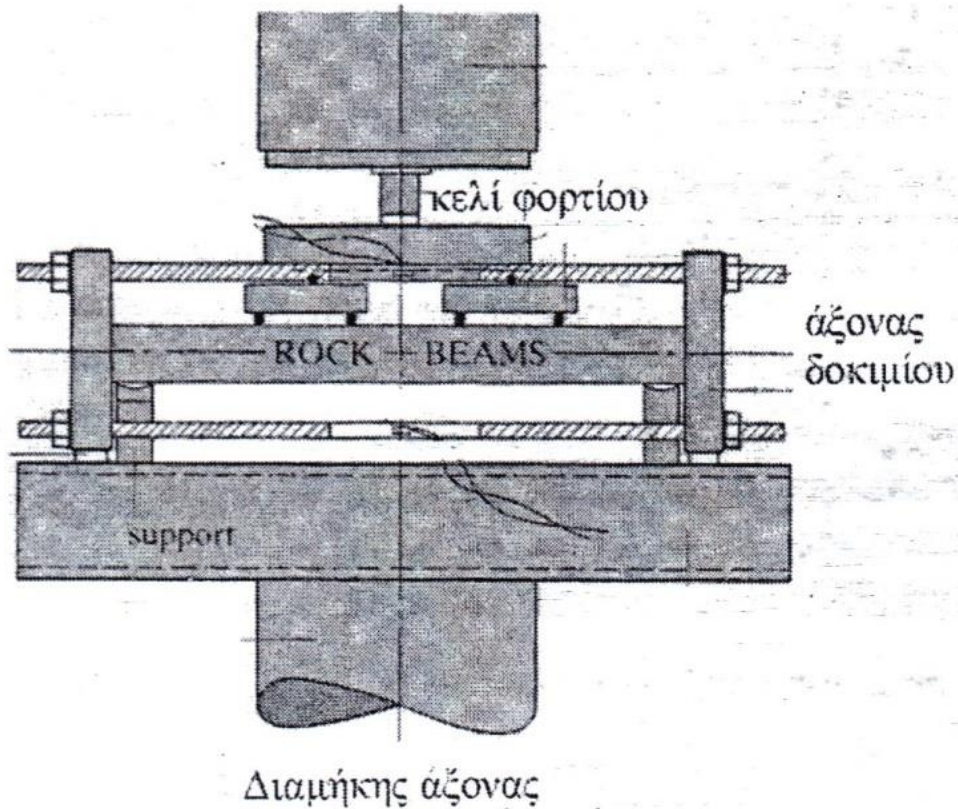
Η ανάλυση συνεχίζεται με την παραδοχή μίας περιοχής της δοκού, η οποία θα φέρει το σύνολο των φορτίων, ενώ η υπόλοιπη δοκός θα παραμείνει αφόρτιστη, ενώ οι απόψεις των ερευνητών για το σχήμα και το μέγεθος της περιοχής αυτής της δοκού διαφέρουν. *Ο Evans θεώρησε ότι η περιοχή αυτή έχει μορφή παραβολής και ότι το πάχος της παραμένει σταθερό κατά μήκος της δοκού και ίσο με το μισό του πάχους της* (Νομικός,2004).

Το πέτρωμα της δοκού θεωρείται ελαστικό μέχρι την αστοχία, η οποία συμβαίνει είτε λόγω σύνθλιψης του πετρώματος, είτε λόγω αδυναμίας της δοκού να μεταφέρει τα επιβαλλόμενα φορτία που εκδηλώνεται με μηχανική αστάθεια κατά την κάμψη της (Νομικός,2004).

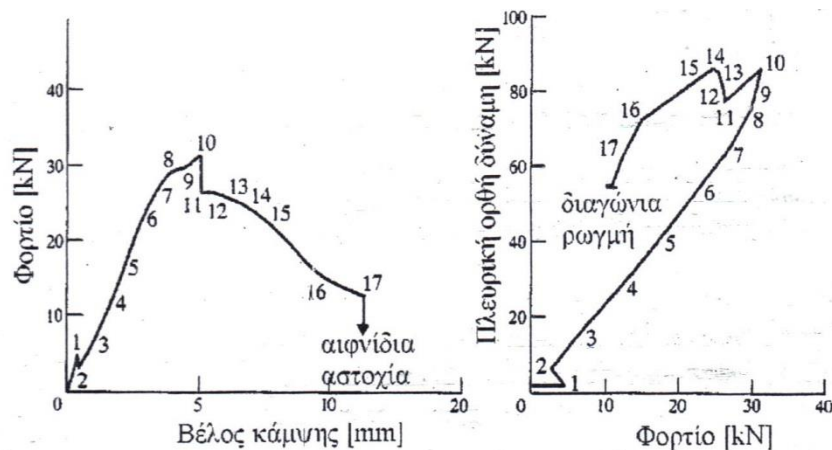
Η θεωρία του Evans ήταν πρωτοποριακή και έδωσε την ώθηση σε πολλούς ερευνητές να ασχοληθούν με το θέμα των δοκών *voussoir*. Πάντως, ένα λάθος στη στατική θεώρηση του προβλήματος, το οποίο στη διεθνή βιβλιογραφία πρώτη φορά αναφέρεται από τον Sterling (1977), καθώς και η παραδοχή του μεγέθους της θλιβόμενης περιοχής της δοκού καθιστούν τα αποτελέσματα του Evans μη εφαρμόσιμα για πρακτικό σχεδιασμό (Νομικός,2004).

Η άποψη αυτή ενισχύεται από τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων με την τεχνική της φωτοελαστικότητας των Wright και Mirza (1963) και αριθμητικών προσομοιώσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων των Wright και Kelly (1970). Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις τους το ύψος της θλιβόμενης περιοχής κατά μήκος των ασυνεχειών στήριξης και μέσου της δοκού είναι αρκετά μικρότερο από το μισό του πάχους της δοκού, γεγονός που αποδεικνύει ότι η αρχική παραδοχή του Evans ήταν εσφαλμένη. Επιπλέον, το μέγεθος της μέγιστης αξονικής θλιπτικής τάσης, που αναπτύσσεται στη δοκό, είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από εκείνο, που προέβλεπε η θεωρία του Evans. Στη συνέχεια ο Wright (1972), βασιζόμενος στον μεγάλο αριθμό αριθμητικών αναλύσεων και εργαστηριακών δοκιμών, ανέπτυξε μία νέα μεθοδολογία σχεδιασμού της οροφής υπογείων ανοιγμάτων σε στρωσιγενή πετρώματα (Wright, 1972) (Νομικός,2004).

Το 1977, ο Sterling, στην εργασία του 'The ultimate load behavior of laterally constrained rock beams', βασιζόμενος στις θεωρητικές αναλύσεις προγενέστερων ερευνητών, πραγματοποίησε εκτεταμένα πειράματα φόρτισης δοκών voussoir στο εργαστήριο. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε παρουσιάζεται στο σχήμα 2.11, ενώ στο σχήμα 2.12, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την πειραματική διάταξη.

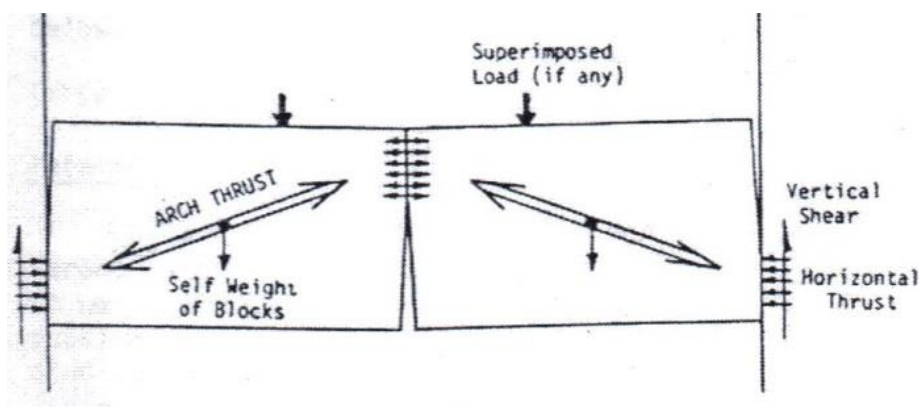


Σχήμα 2.11. Πειραματική συσκευή κατακόρυφης φόρτισης δοκιμών με πλευρική παρεμπόδιση της παραμόρφωσης (Sterling, 1977).



Σχήμα 2.12. Μεταβολή του βέλους και της πλευρικής ορθής δύναμης με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου (Sterling, 1977).

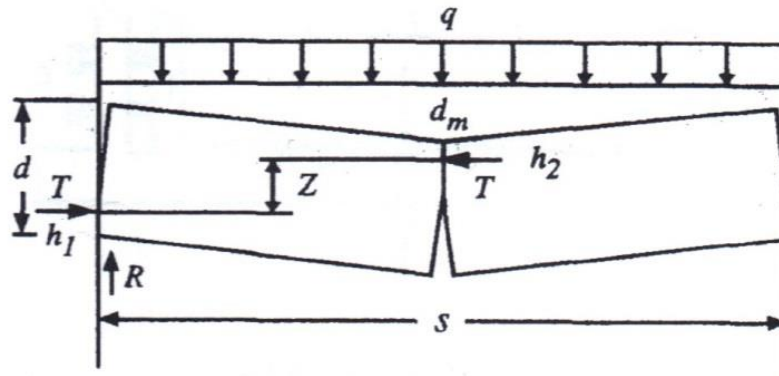
Η εργασία του Sterling, επιβεβαίωσε αρχικά τα αποτελέσματα του Wright και βοήθησε στην περαιτέρω κατανόηση της συμπεριφοράς των δοκών voussoir. Στην συνέχεια σε συνεργασία με άλλους ερευνητές (Sterling και Nelson 1978, Sterling 1980, Nelson και Peterson, 1995), διατύπωσε τη θεωρία της **τεχνικής του γραμμικού τόξου** (linear arch technique) ως μία μεθοδολογία για το σχεδιασμό δοκών voussoir, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13 (Νομικός,2004).



Σχήμα 2.13. Εξειδίκευση της τεχνικής του γραμμικού τόξου (Νομικός,2004).

Οι νεώτερες απόψεις περί της συμπεριφοράς των δοκών voussoir βρίσκουν τους ερευνητές διχασμένους όσο αφορά το μέγεθος της θλιβόμενης περιοχής της δοκού. Οι Beer και Meek (1982) παρουσίασαν μία σειρά καμπυλών σχεδιασμού δοκών οροφής ως δοκούς voussoir ενώ οι Brady και Brown (1993) χρησιμοποίησαν έναν επαναληπτικό αλγόριθμο για την επίλυση του προβλήματος της δοκού voussoir. Ο Sofianos (1996) πέτυχε την αναλυτική επίλυση του προβλήματος της δοκού voussoir με ασυνέχειες στις στηρίξεις και στο μέσο της προσαρμόζοντας τις αναλυτικές εξισώσεις στα αριθμητικά δεδομένα του Wright, ενώ οι Sofianos και Karpelis (1998) βελτίωσαν την αναλυτική λύση με βάση τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων (Cundall, 1971). Οι Hatzor και Benary (1998) εξέτασαν την ευστάθεια της δοκού voussoir χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ασυνεχούς παραμόρφωσης (Discontinuum Deformation Analysis, DDA) ενώ οι Diderichs και Kaiser (1999) επανέρχονται στην επαναληπτική διαδικασία των Brady και Brown προτείνοντας μία βελτιωμένη επίλυση. Τέλος, οι Nomikos et al. (2002) εξέτασαν το πρόβλημα της ασυνεχούς δοκού voussoir με κατακόρυφες ασυνέχειες σε κανονικές μεταξύ τους αποστάσεις με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά των δοκών αυτών καθώς και διαγράμματα υπολογισμού των σημαντικότερων μεγεθών για την ανάλυση της ευστάθειάς τους (Νομικός,2004).

Μια τυπική δοκός voussoir φαίνεται στο σχήμα 2.14. Η δοκός αποτελείται από δύο ίδια συμπαγή τεμάχια πετρώματος και υποστηρίζεται από άκαμπτες στηρίξεις. Υπάρχουν τρεις ασυνέχειες, μία στο κέντρο και δύο στις άκρες (Mottahed, Passaris, Ran, 1993).



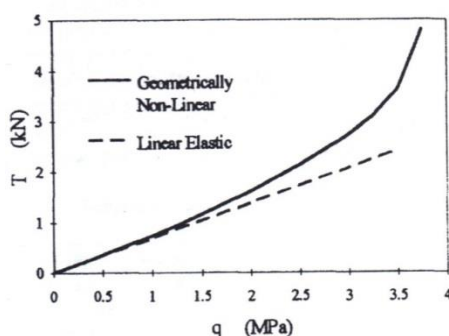
Σχήμα 2.14. Δοκός voussoir (Mottahed, Passaris, Ran, 1993).

Κάτω από εγκάρσιο φορτίο, q , η δοκός κάμπτεται με το μέγιστο βέλος κάμψης, d_m , στο μέσο της, ενώ το άνω τμήμα των ακραίων ασυνεχειών στις στηρίξεις και το κάτω τμήμα στην μεσαία ασυνέχεια ανοίγουν. Η αξονική δύναμη T και η αντίσταση ολίσθησης R αναπτύσσονται ώστε η δοκός να ισορροπεί κάτω από εγκάρσιο φορτίο, δεδομένου ότι δεν υπάρχει ολίσθηση στις στηρίξεις (Mottahed, Passaris, Ran, 1993).

Η σχέση μεταξύ της αξονικής δύναμης T και του φορτίου q μπορεί να ποσοτικοποιηθεί κατά την διάρκεια της στιγμιαίας ισορροπίας ενός εκ των δύο τεμαχίων. Στο σχήμα το μήκος του κεντροειδούς της αξονικής δύναμης στην αριστερή στήριξη είναι h_1 , ενώ το μήκος του κεντροειδούς της αξονικής δύναμης στην πάνω μεσαία διατομή είναι h_2 . Ο μοχλοβραχίονας Z , τότε την στιγμή της ισορροπίας λαμβάνοντας υπόψη το αριστερό ογκοτεμάχιο δίνεται από την σχέση της αξονικής δύναμης T (Mottahed, Passaris, Ran, 1993):

$$T = \frac{qs^2}{8Z} \quad (2.1)$$

Όμως, ο μοχλοβραχίονας Z , δεν μπορεί να εκτιμηθεί κατά την διάρκεια της παραμόρφωσης της δοκού, επειδή η διανομή των τάσεων στις ασυνέχειες και το βέλος κάμψης είναι άγνωστα. Επομένως η αξονική δύναμη T δεν μπορεί να υπολογιστεί από την παραπάνω σχέση και η δοκός είναι θεωρητικά στατικά αόριστη. Σύμφωνα με το σχήμα 2.15 παρατηρούμε ότι για μεγάλα εγκάρσια φορτία, η θεωρία της ελαστικής ανάλυσης είναι ανεπαρκής να περιγράψει την μηχανική συμπεριφορά της δοκού, λόγω των μεγάλων μετατοπίσεων και της στροφής των ανεξάρτητων ογκοτεμαχίων (Mottahed, Passaris, Ran, 1993).

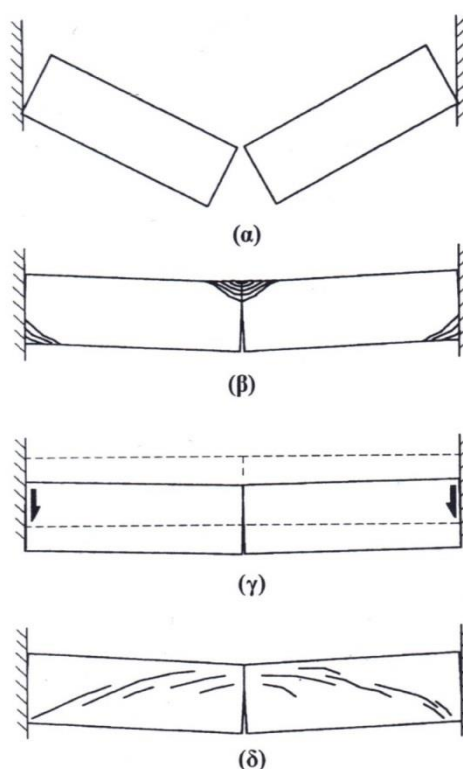


Σχήμα 2.15. Διάγραμμα αξονικής δύναμης-κατακόρυφου φορτίου (Mottahed, Passaris, Ran, 1993).

2.4 Τρόποι αστοχίας της ρωγματομένης δοκού

Η αρχική ανάλυση του Evans εξέταζε δύο πιθανές αιτίες αστοχίας της δοκού voussoir: σύνθλιψη του πετρώματος λόγω υπέρβασης της θλιπτικής του αντοχής και μηχανική αστάθεια της δοκού κατά την κάμψη της (Νομικός,2004).

Μετέπειτα, ο Wright το 1972, προσέθεσε και την αστοχία λόγω ολίσθησης στις πλευρικές ασυνέχειες. Όπως χαρακτηριστικά παρατηρείται από διάφορους ερευνητές (Σοφιανός και Καπένης 1999, Diederichs και Kaiser 1999) η δοκός voussoir μπορεί να αστοχήσει με έναν από τους τέσσερις τρόπους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.16) (Νομικός,2004):



Σχήμα 2.16. Πιθανές μορφές αστοχίας της δοκού voussoir: (α) μηχανική αστάθεια της δοκού, (β) σύνθλιψη του πετρώματος στο μέσο και στις στηρίξεις της δοκού, (γ) ολίσθηση στις στηρίξεις (δ) διαγώνια ρωγμάτωση (Diederichs και Kaiser, 1999).

2.4.1 Ελαστικός λυγισμός της δοκού – Μηχανική αστάθεια της δοκού (Elastic buckling of the voussoir beam)

Στην γραμμική ανάλυση η αξονική δύναμη και το μέγιστο βέλος κάμψης αυξάνουν σχεδόν γραμμικά με την εφαρμογή αυξανόμενου εγκάρσιου φορτίου και ο μοχλοβραχίονας παραμένει σταθερός. Σύμφωνα με το σχήμα 2.14 το άθροισμα h των μηκών h_1 και h_2 , υπολογίζεται από την σχέση (Mottahed,Passaris,Ran,1993):

$$h = h_1 + h_2 = d - Z - d_m \quad (2.2)$$

Στην παραπάνω εξίσωση αν ο μοχλοβραχίονας είναι σταθερός και το μέγιστο βέλος κάμψης αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση του εγκάρσιου φορτίου, το h θα γίνει αρνητικό για να διατηρηθεί η ισορροπία. Αυτό το παράλογο αποτέλεσμα αποδεικνύει ότι σε μεγάλες τιμές εγκάρσιου φορτίου, δεν επαρκεί η ελαστική ανάλυση της δοκού (Mottahed, Passaris, Ran, 1993).

Εξετάζοντας την δοκό με όρους μη γραμμικής γεωμετρικής ανάλυσης η αξονική δύναμη και το μέγιστο βέλος κάμψης αυξάνεται μη-γραμμικά με την αύξηση του εγκάρσιου φορτίου. Αν η αντοχή της δοκού είναι αρκετά υψηλή, η δοκός θα καμφθεί και η αξονική δύναμη και το βέλος κάμψης θα συνεχίσουν να αυξάνονται μη γραμμικά με την αύξηση του φορτίου. Σε κάποιο σημείο η δοκός καταρρέει, χωρίς όμως να έχει υπερβεί την μέγιστη αντοχή του άρρηκτου υλικού. Αυτού του είδους η αστοχία ονομάζεται ελαστικός λυγισμός και το εγκάρσιο φορτίο κατά το οποίο το βέλος κάμψης και η αξονική δύναμη απειρίζονται ονομάζεται αντοχή της δοκού σε ελαστικό λυγισμό (Mottahed, Passaris, Ran, 1993).

Η αντοχή σε ελαστικό λυγισμό υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Mottahed, Passaris, Ran, 1993):

$$q_e = \frac{1.1E}{r^4} \mu e r = \frac{s}{d} \quad (2.3)$$

Ο μοχλοβραχίονας δεν είναι σταθερός αλλά μειώνεται με την αύξηση του εγκάρσιου φορτίου. Κατά τους Mottahed et al. την στιγμή του ελαστικού λυγισμού της δοκού ο μοχλοβραχίονας πλησιάζει στο μηδέν. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι στην αρχή της φόρτισης, ο μοχλοβραχίονας περνάει απο μια διαδικασία αύξησης και μετέπειτα μείωσης (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Σύμφωνα με τη μελέτη τους, παρατήρησαν ότι ο μοχλοβραχίονας είναι περίπου $\frac{2}{3}$ του ύψους της δοκού d στο μικρότερο εγκάρσιο φορτίο, ενώ μετέπειτα αυξάνει, μέχρι την μέγιστη τιμή του και στην συνέχεια μειώνεται. Στην μικρότερη δυνατή φόρτιση οι θλιπτικές τάσεις κατανέμονται σχεδόν γραμμικά στο πάνω μέρος της μεσαίας ασυνέχειας, και στο κάτω μέρος των ακριανών ασυνεχειών στις στηρίξεις, ενώ το μέγιστο βέλος κάμψης είναι αμελητέο. Επομένως το αθροιστικό μήκος h είναι το $\frac{1}{3}$ του ύψους της δοκού έτσι ώστε ο μοχλοβραχίονας να είναι περίπου τα $\frac{2}{3}$ του ύψους d . Άρα για το μικρότερο εγκάρσιο φορτίο ισχύει (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$\frac{h}{d} = \frac{1}{3} \text{ και } \frac{Z}{d} = \frac{2}{3} \quad (2.4)$$

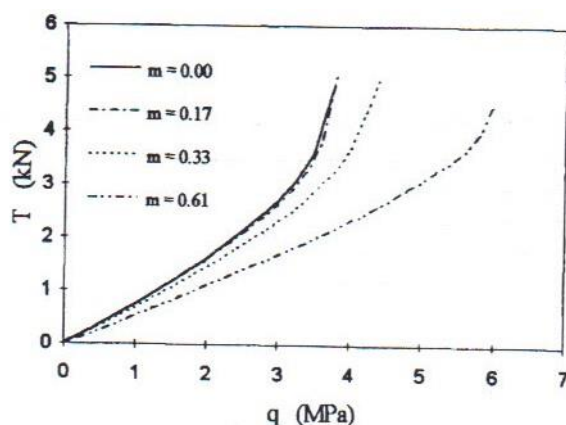
Ο μέγιστος μοχλοβραχίονας είναι μεγαλύτερος για δοκό με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας E . Αφού πάρει την μέγιστη τιμή, ο μοχλοβραχίονας αρχίζει να μειώνεται μέχρι η δοκός να φτάσει την αντοχή σε λυγισμό (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Η μηχανική συμπεριφορά της δοκού επηρεάζεται άμεσα από την γεωμετρία της δοκού και από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της δοκού. Συμφωνα με τους Mottahed et al. (1993):

- Οι δοκοί με μεγάλες τιμές μήκους/ύψους (span to depth ratio, s/d), παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξονική δύναμη και βέλος κάμψης, από τις δοκούς με μικρές τιμές μήκους/ύψους.
- Δοκοί με μεγάλες τιμές μέτρου ελαστικότητας E (Young's modulus), άρα πιο άκαμπτοι, παρουσιάζουν μικρότερη αξονική δύναμη, σε σχέση με τις δοκούς με μικρές τιμές μέτρου ελαστικότητας, εξαιτίας του μακρύτερου μοχλοβραχίονα. Επίσης παρουσιάζουν μεγαλύτερο βέλος κάμψης.
- Η αντοχή σε ελαστικό λυγισμό είναι μεγαλύτερη για δοκούς με μεγάλο E και μικρο λόγο s/d .

Αν η δοκός περιέχει περισσότερες κάθετες ασυνέχειες, μπορεί να προσομοιαστεί ως δοκός με πολλαπλές κεντρικές ασυνέχειες, με μεσαία ογκοτεμάχια διαστασης m που ορίζεται ως ο λόγος του μήκους του ογκοτεμαχίου προς το συνολικό μήκος της δοκού (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Η αξονική δύναμη T για δοκούς με διαφορετικές τιμές του m παρουσιάζεται στο σχήμα 2.17, όπου παρατηρείται ότι η αξονική δύναμη αυξάνεται μη-γραμμικά με το εγκάρσιο φορτίο μέχρι η δοκός να αστοχήσει μηχανικά (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).



Σχήμα 2.17. Διάγραμμα αξονικής δύναμης T , συναρτήσει του εγκάρσιου φορτίου, για διαφορετικές τιμές του m (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί από το σχήμα 2.17 ότι η αξονική δύναμη μειώνεται όσο η αντοχή σε ελαστικό λυγισμό αυξάνει με το m . Υιοθετώντας τους ορισμούς που χρησιμοποιήθηκαν για δοκό με μία μεσαία ασυνέχεια, για δοκό με πολλαπλές ασυνέχειες, η αντοχή σε ελαστικό λυγισμό q_{ej} δίνεται από την σχέση (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$q_{ej} = c_j q_e \quad (2.5)$$

Όπου ο συντελεστής c_j , δίνεται συναρτήσει του m από τον παρακάτω τύπο (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$c_j = 1.0 + 0.95m^{2.2} \quad (2.6)$$

Η αξονική δύναμη T σε αυτή την περίπτωση και ο μοχλοβραχίονας Z δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$T = \frac{r^2 E}{8\alpha E c_j - 4.16r^{3.17} q} q d \quad (2.7)$$

$$Z = (1 - m^2) c_j \left[\alpha - \frac{0.52r^{3.17}}{E} q \right] d \quad (2.8)$$

Σύμφωνα με τους Mottahed et al. (1993), όταν $m < 0.2$, η κατανομή των τάσεων και ο τρόπος αστοχίας της δοκού με πολλαπλές μεσαίες ασυνέχειες, είναι παρόμοια για δοκό με μία κεντρική ασυνέχεια. Κανονικά η δοκός θα αστοχήσει σε σύνθλιψη στις στηρίξεις ή στην πάνω επιφάνεια της μεσαίας διατομής.

Όταν το $m > 0.2$ και το υλικό της δοκού έχει μικρή εφελκυστική αντοχή, το πρώτο σημάδι της αστοχίας είναι η ανάπτυξη εφελκυστικής ρωγμής στο μεσαίο ογκοτεμάχιο. Αφότου αναπτυχθεί η μεσαία εφελκυστική ρωγή, τότε η δοκός συμπεριφέρεται μηχανικά σαν δοκό με μία κεντρική ασυνέχεια (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Όταν το υλικό της δοκού έχει μεγάλη εφελκυστική αντοχή, αναμένεται μεγαλύτερη αντοχή, και μπορεί να προσδιοριστεί εκτιμώντας τις μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις στο μεσαίο ογκοτεμάχιο, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις για δοκό με πολλαπλές μεσαίες ασυνέχειες (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Ο Wright (1972), στην μελέτη του (Arching action in cracked roof beams), σύγκρινε δύο δοκούς, μία δοκό με μία κεντρική ασυνέχεια και μία άλλη με 19 ασυνέχειες και έβγαλε το συμπέρασμα ότι η δοκός με μία κεντρική ασυνέχεια είναι χειρότερη περίπτωση από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Όμως σύμφωνα με τους Mottahed et al. (1993), αυτό δεν συμβαίνει, γιατί για δοκούς με πολλαπλές ασυνέχειες η αντοχή τους θα είναι μικρότερη από ότι της δοκού με μία ασυνέχεια. *Μια λογική εξήγηση του γιατί μειώνεται η αντοχή όσο αυξάνονται οι ασυνέχειες είναι ότι όσο αυξάνονται οι ασυνέχειες έχουμε περισσότερα ογκοτεμάχια, και η πιθανότητα του ενός ογκοτεμαχίου να είναι ασθενέστερο μηχανικά από το διπλανό του ή σε μια ασυνέχεια να μην γίνεται καλή επαφή μεταξύ των ογκοτεμαχίων είναι αυξημένη, προκαλώντας έτσι την αστοχία ενός ογκοτεμαχίου και συνεπώς την κατάρρευση όλης της δοκού* (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Συμπερασματικά, για να εκτιμηθεί η μηχανική συμπεριφορά μιας εγκάρσιας ρωγματωμένης δοκού, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εξής παράγοντες (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

- Η γεωμετρία της ρωγματωμένης δοκού.
- Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού της δοκού.
- Οι μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών.
- Ο αριθμός των ασυνεχειών.
- Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών.

2.4.1.1 Νεώτερη θεώρηση για την μηχανική αστοχία της δοκού

Συμβαίνει όταν η ροπή του ζεύγους των οριζόντιων δυνάμεων H είναι μικρότερη από την ροπή ανατροπής στη στήριξη της δοκού, σύμφωνα με την ανισότητα (Νομικός,2004):

$$\text{Συνισταμένη ροπή ανατροπής } (= M_A) > \text{Συνισταμένη ροπή ευστάθειας } (= M_R) \quad (2.9)$$

Η ροπή ανατροπής προκαλείται λόγω ιδίου βάρους της δοκού και τυχούσας εξωτερικής φόρτισης από υπερκείμενες δοκούς.

Εάν k_q είναι ο λόγος του συνολικού φορτίου, που ασκείται στη δοκό ως προς το ίδιο βάρος της, τότε η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση (Νομικός,2004):

$$M_A = k_q \frac{\gamma t s^2}{8} \quad (2.10)$$

Η ροπή ευστάθειας M_R είναι (Νομικός,2004):

$$M_R = Hd \quad (2.11)$$

Όπου d ο μοχλοβραχίονας του ζεύγους των οριζόντιων δυνάμεων H . Συνεπώς η ανισότητα (2.9), γράφεται (Νομικός,2004):

$$k_q \frac{\gamma t s^2}{8} > Hd \quad (2.12)$$

2.4.2 Αστοχία από σύνθλιψη στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων (Failure by crushing at high stress areas)

Αυτή η αστοχία προκαλείται από την αστοχία του υλικού της δοκού στις περιοχές υψηλών θλιπτικών τάσεων. Το εγκάρσιο φορτίο στο οποίο αρχίζει η αστοχία του υλικού της δοκού στις στηρίξεις και στο μέσο αυτής, ορίζεται ως η αντοχή σύνθλιψης της δοκού. Η αντοχή σύνθλιψης της δοκού είναι πάντα μικρότερη ή ίση της αντοχής σε ελαστικό λυγισμό (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Με την αύξηση του εγκάρσιου φορτίου, το πάνω μέρος των ακριανών ασυνεχειών και το κάτω μέρος της μεσαίας ασυνέχειας ανοίγουν αφήνοντας το κάτω μέρος των

ακριανών ασυνεχειών και το πάνω μέρος της μεσαίας ασυνέχειας σε συγκεντρωμένη συμπίεση, όπου σε αυτές τις περιοχές παρουσιάζονται οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Όταν οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις φτάνουν την θλιπτική αντοχή του υλικού της δοκού ανάλογα με τις οριακές συνθήκες της δοκού, αρχίζει η διατμητική αστοχία. Ο μοχλοβραχίονας μικραίνει, ενώ η αξονική δύναμη και το βέλος κάμψης αυξάνονται απότομα, προσπαθώντας να διατηρήσουν την ισορροπία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην διατμητική αστοχία να επεκταθεί περαιτέρω οδηγώντας στην σύνθλιψη της δοκού στις περιοχές υψηλών θλιπτικών τάσεων. Τα ογκοτεμάχια τελικά στρίβουν προς τα κάτω και η δοκός αστοχεί. Στην πραγματικότητα η διαδικασία της σύνθλιψης είναι σύντομη και η κατάσταση ευσταθούς ισορροπίας τελειώνει όταν συμβαίνει η διατμητική αστοχία. Στις περιοχές της τριγωνικής κατανομής των τάσεων, στρώματα του υλικού της δοκού αποκολλούνται (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι δοκοί με $s/d < 4$, είναι πιθανότερο να αστοχήσουν διατμητικά διαγωνίως και να συμπεριφερθούν ως υψίκορφες δοκοί (deep beams) (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

2.4.2.1 Μοχλοβραχίονας Z

Ο μοχλοβραχίονας Z, μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά, από μια γραμμική συνάρτηση μεταξύ του ύψους της δοκού d και του εγκάρσιου φορτίου q, με την παρακάτω εξίσωση (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$Z = \alpha d - kq \quad (2.13)$$

Όπου α είναι μια σταθερά που κυμαίνεται μεταξύ 0.82-0.85. Για δοκούς με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας διαλέγονται μεγάλες τιμές για το α, ενώ για μικρές τιμές μέτρου ελαστικότητας, μικρότερες τιμές για το α (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Ο συντελεστής k μπορεί να δοθεί από την σχέση (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$k = \frac{\beta d}{q_e} \quad (2.14)$$

Όπου q_e είναι η αντοχή της δοκού σε ελαστικό λυγισμό όπως ορίστηκε από την σχέση (2.3) και το β ορίζεται με την παρακάτω σχέση (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$\beta = \frac{0.57}{r^{0.83}} \quad (2.15)$$

Όπου $r=s/d$ (span to depth ratio)

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2.15) και (2.3) στην σχέση (2.14) και μετέπειτα στην σχέση (2.13) προκύπτει για τον μοχλοβραχίονα (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$Z = \left(\alpha - \frac{0.52r^{3.17}}{E} q \right) d \quad (2.16)$$

2.4.2.2 Αξονική δύναμη T

Όταν ο μοχλοβραχίονας Z είναι γνωστός, η αξονική δύναμη T, μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί αντικαθιστώντας την (2.16) στην (2.1), οπότε προκύπτει (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$T = \frac{r^2 E}{8\alpha E - 4.16r^{3.17}q} qd \quad (2.17)$$

Η παραπάνω εξίσωση συνδέει την αξονική δύναμη με την γεωμετρία της δοκού και το μέτρο ελαστικότητάς της, όπου η αξονική δύναμη αυξάνει μη-γραμμικά με το εγκάρσιο φορτίο και τον λόγο s/d και μειώνεται με το μέτρο ελαστικότητας. Να τονισθεί ότι η εξίσωση είναι έγκυρη για εγκάρσιο φορτίο μικρότερο της αντοχής της δοκού σε ελαστικό λυγισμό (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993)

Η εξίσωση (2.17) μπορεί να γραφτεί με την μορφή (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$T = \frac{r^2 q d}{8\alpha - \frac{4.16r^{3.17}q}{E}} \quad (2.18)$$

Κάτω από μικρό εγκάρσιο φορτίο, μικρό λόγο s/d και μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, ο δεύτερος όρος του παρονομαστή είναι πολύ μικρός, οπότε αμελητέος. Σε αυτήν την περίπτωση η αξονική δύναμη T, μπορεί να προσεγγιστεί από την συνάρτηση, που πρότειναν οι Potts et al. (1979).

2.4.2.3 Μήκος Κεντροειδούς αξονικής δύναμης

Η εξίσωση (2.2) παρουσιάζει την σχέση μεταξύ του αθροίσματος h των μηκών των δύο κεντροειδών της αξονικής δύναμης, του ύψους της δοκού, του μοχλοβραχίονα και του βέλους κάμψης. Επειδή το μέγιστο βέλος κάμψης είναι άγνωστο το h δεν μπορεί να καθορισθεί από την εξίσωση (2.2). Αλλά όταν η δοκός αστοχεί μηχανικά τότε το άθροισμα των h₁ και h₂ θα ισούται με h_e, το οποίο δίνεται από την παρακάτω σχέση (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993) :

$$h_e = (1 - \alpha)d - \left(0.15 - \frac{0.57}{r^{0.83}} \right) d \quad (2.19)$$

Όταν s/d > 5 τότε h_e = h_{min}, πριν η δοκός φτάσει την αντοχή της σε λυγισμό και μειώνεται με το s/d. Μικρότερες τιμές του h υποδεικνύουν μικρότερες περιοχές

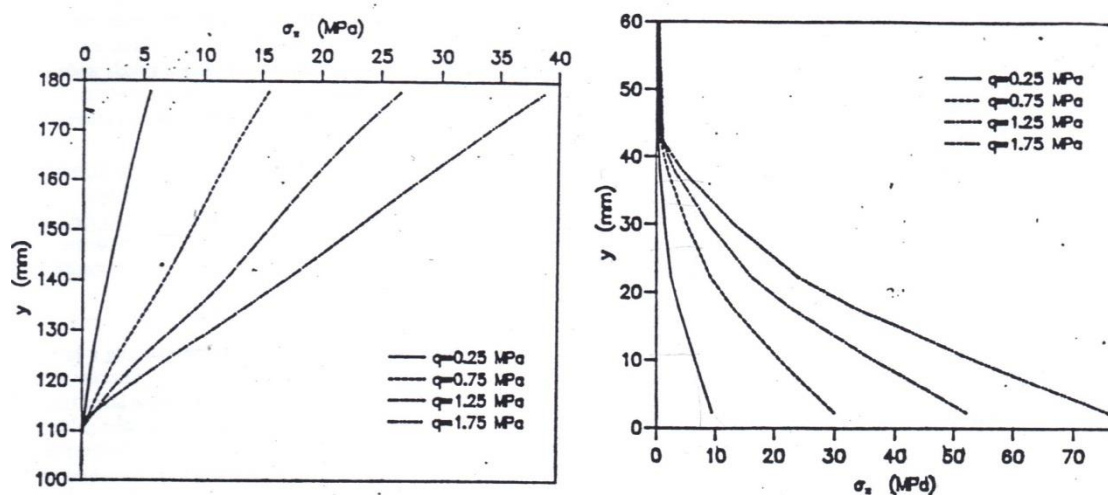
συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων στην μεσαία ασυνέχεια και στις ακραίες ασυνέχειες (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Επομένως αν χρησιμοποιήσουμε το h_e στην εκτίμηση της αντοχής του λυγισμού τότε η πρόβλεψη της σταθερότητας της οροφής ή του σχεδίου εκμετάλλευσης θα είναι προς την ασφαλή πλευρά (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Μολονότι το h_e δεν είναι η ελάχιστη τιμή του h όταν το $r=s/d=4$, η διαφορά μεταξύ h_e και h είναι μικρή. Έτσι το h_e μπορεί προσεγγιστικά να χρησιμοποιείται ως η ελάχιστη τιμή του h (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

2.4.2.4 Κατανομή των τάσεων στις ασυνέχειες

Τυπικές κατανομές των θλιπτικών αξονικών τάσεων κατά μήκος των ασυνεχειών της δοκού παρουσιάζονται στο σχήμα 2.18 (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):



Σχήμα 2.18. Αριστερά:Κατανομή τάσεων για την μεσαία ασυνέχεια και δεξιά: Κατανομή τάσεων για τις πλευρικές ασυνέχειες (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.18 η κατανομή των τάσεων για την μεσαία ασυνέχεια πλησιάζει πολύ την τριγωνική κατανομή και το μήκος της κατανομής είναι σχεδόν σταθερό σε αντίθεση με το σχήμα που αφορά την κατανομή στις ακραίες ασυνέχειες που είναι μη-γραμμική (Mottahed et al. 1993).

Για απλούστευση θεωρούμε συνήθως τριγωνική κατανομή τάσεων, όπως προτάθηκε και από τον Wright (1972).

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα παρατηρούμε ότι το μήκος της κατανομής της τάσης για τις ακριανές ασυνέχειες είναι το μισό του μήκους της κατανομής της μεσαίας ασυνέχειας, όπως επίσης και η μέγιστη τάση είναι δύο φορές η μέγιστη τάση στην μεσαία ασυνέχεια, το οποίο είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα του Wright.

2.4.2.5 Αντοχή σύνθλιψης

Να τονισθεί ότι λόγω της απροσδιοριστίας της κατάστασης της δοκού και της πολυπλοκότητας της κατανομής των τάσεων, είναι δύσκολο να αναπτυχθεί μια εξίσωση για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η αντοχή σύνθλιψης της δοκού, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Κάνοντας υπόθεση ότι οι θλιπτικές τάσεις ακολουθούν τριγωνική κατανομή κατά μήκος των ασυνεχειών και σύμφωνα με το γεγονός ότι το μήκος της κατανομής για την μεσαία ασυνέχεια είναι διπλάσιο της κατανομής των ακριανών ασυνεχειών, μπορούμε να υπολογίσουμε την αντοχή σύνθλιψης της δοκού (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις, f_m και f_e αντίστοιχα για την μεσαία και τις ακριανές ασυνέχειες, είναι (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$f_m = \frac{T}{h_e} \text{ και } f_e = \frac{2T}{h_e} \quad (2.20)$$

Για δοκό, χωρίς κατακόρυφες στηρίξεις στα άκρα, η αντοχή σύνθλιψης λαμβάνεται όταν η f_e ισούται με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος, σ_c . Η αντοχή της δοκού σε σύνθλιψη q_c , μπορεί να εκτιμηθεί από τον παρακάτω τύπο (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$q_c = Z \frac{4\alpha\sigma_c E h_e}{2.08\sigma_c h_e r^{3.16} + r^2 E d} \quad (2.21)$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει μόνο όταν το εγκάρσιο φορτίο είναι ίσο ή λιγότερο της αντοχής της δοκού σε ελαστικό λυγισμό. Αν ισχύει $q_c > q_e$, τότε η δοκός θα αστοχήσει σε μηχανική αστάθεια και όχι σε σύνθλιψη (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Αν η δοκός τώρα εδράζεται σε κατακόρυφες στηρίξεις στα άκρα τότε, το πάνω μέρος της μεσαίας διατομής και το κάτω μέρος των ακριανών ασυνεχειών, είναι σε απροσδιόριστη κατανομή τάσεων. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλο κριτήριο αντοχής για το υλικό της δοκού, και η αντοχή της δοκού σε σύνθλιψη πρέπει να είναι το ελάχιστο από τις υπολογισμένες παραμέτρους f_m και f_e (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Η αντοχή σύνθλιψης ελαττώνεται δραστικά με την αύξηση του λόγου s/d και αυξάνεται όσο αυξάνεται η θλιπτική αντοχή του υλικού της δοκού (Mottahed et al. 1993) (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

2.4.2.6 Νεώτερη θεώρηση

Αστοχία του πετρώματος συμβαίνει όταν η αξονική ανηγμένη παραμόρφωση της κάτω ακραίας ίνας της διατομής στήριξης της δοκού υπερβαίνει την μέγιστη

επιτρεπόμενη αξονική παραμόρφωση, που μπορεί να αναλάβει το πέτρωμα, όταν δηλαδή (Νομικός,2004):

$$\varepsilon_{ax} > \varepsilon_{all} \quad (2.22)$$

2.4.3 Αστοχία της δοκού σε ολίσθηση στις πλευρικές ασυνέχειες (Shear Sliding)

Σύμφωνα με τους Saeb et al. (1990), η μη γραμμική σχέση μεταξύ της ορθής μετατόπισης και της ορθής θλιπτικής τάσης στις ασυνέχειες δίνεται από τον παρακάτω τύπο (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$V = \frac{V_m \sigma_n}{K_{ni} V_m - \sigma_n} - V_o \quad (2.23)$$

$$K_{nn} = K_{ni} \left(\frac{K_{ni} V_m - \sigma_n}{K_{ni} V_m} \right)^2 \quad (2.24)$$

Όταν η διατμητική αντίσταση R, και στις δύο πλευρικές ασυνέχειες δεν είναι επαρκής, τότε η δοκός θα αστοχήσει σε ολίσθηση. Αν η δοκός αστοχήσει σε ολίσθηση μπορεί να προβλεφθεί, εξετάζοντας αν η μέση διατμητική τάση κατά μήκος των πλευρικών ασυνεχειών υπερβαίνει την διατμητική αντοχή της ασυνέχειας (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

Η μέση διατμητική τάση, τ_a , δίνεται από την παρακάτω σχέση (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$\tau_a = \frac{q_s}{2h_e} \quad (2.25)$$

Η μέση ορθή θλιπτική τάση, σ_a , δίνεται από την παρακάτω σχέση (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$\sigma_a = \frac{T}{h_e} \quad (2.26)$$

Η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας, $[\tau]$ στην ορθή θλιπτική τάση, σ_a , δίνεται από τον παρακάτω τύπο (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$[\tau] = \mu \sigma_a \quad (2.27)$$

Όπου μ = συντελεστής τριβής

Όταν $\tau_a > [\tau]$, τότε η δοκός θα αστοχήσει σε ολίσθηση. Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2.17) και (2.19) στις εξισώσεις (2.25) και (2.26), τότε η δοκός δεν θα αστοχήσει σε ολίσθηση αν ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993):

$$\mu \geq \frac{4\alpha}{r} \quad (2.28)$$

Αυτή η σχέση υποδεικνύει ότι δοκοί με μικρό λόγο $r=s/d$, είναι πιθανότερο να αστοχήσουν σε ολίσθηση στις πλευρικές ασυνέχειες (P.Mottahed, E.K.S.Passaris, J.Q.Ran, 1993).

2.4.3.1 Νεώτερη θεώρηση

Η συνθήκη για διατμητική ολίσθηση στα επίπεδα ασυνέχειας της δοκού δίνεται από την σχέση (Νομικός,2004):

$$\frac{\gamma ts}{2} > H \tan \varphi_j \quad (2.29)$$

Όπου φ_j η γωνία τριβής του επιπέδου της ασυνέχειας.

2.4.4 Διαγώνια ρωγμάτωση

Η τελευταία μορφή αστοχίας, προκαλείται λόγω λοξού εφελκυσμού κυρίως κοντά στην περιοχή των στηρίξεων της δοκού και συμβαίνει όταν οι λοξές εφελκυστικές δυνάμεις, που δρουν κάθετα προς την καμπύλη πιέσεων της δοκού, υπερβούν την αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό. Μια τέτοιας μορφής αστοχία προϋποθέτει είτε πολύ μικρή εφελκυστική αντοχή του πετρώματος είτε σημαντική εξωτερική φόρτιση της δοκού (Νομικός,2004).

Η αστοχία λόγω διαγώνιας ρωγμάτωσης θεωρείται δευτερεύουσα μορφή αστοχίας της δοκού voussoir και εξετάζεται ελάχιστα στη διεθνή βιβλιογραφία. Σημειώνεται πάντως ότι η αντιμετώπισή της είναι εύκολη με την εφαρμογή κοχλίωσης, όπου οι κοχλίες θα αναλάβουν τις εφελκυστικές δυνάμεις στο εσωτερικό της δοκού (Νομικός,2004).

2.4.5 Συμπεράσματα για τους τρόπους αστοχίας

1. Υπολογίζεται η αντοχή της δοκού σε λυγισμό q_e . Αν το εγκάρσιο φορτίο, υπερβαίνει την q_e , τότε η δοκός θα αστοχήσει μηχανικά.
2. Αν $\mu < 4a/r$, τότε η δοκός θα αστοχήσει σε ολίσθηση και στις δύο πλευρές.
3. Υπολογίζεται η q_c και συγκρίνεται με το εγκάρσιο φορτίο. Αν το εγκάρσιο φορτίο είναι μεγαλύτερο από την q_c , τότε η δοκός θα αστοχήσει σε σύνθλιψη στις περιοχές συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων, ειδάλως θα παραμείνει σταθερή.

Γενικά, λόγω των μεγάλων κάθετων μετατοπίσεων και της στροφής των ογκοτεμαχίων της δοκού, κατά την διάρκεια της κάμψης και συνεπώς της παραμόρφωσης, η ελαστική ανάλυση δεν επαρκεί. Αν η δοκός δεν ολισθήσει στις πλευρικές ασυνέχειες, τότε θα εκτραπεί μη γραμμικά με το εγκάρσιο φορτίο, μέχρι να

αστοχήσει μηχανικά ή λόγω σύνθλιψης, ενώ κατά την διάρκεια της κάμψης, η αξονική δύναμη αυξάνεται και ο μοχλοβραχίονας μειώνεται (Νομικός,2004).

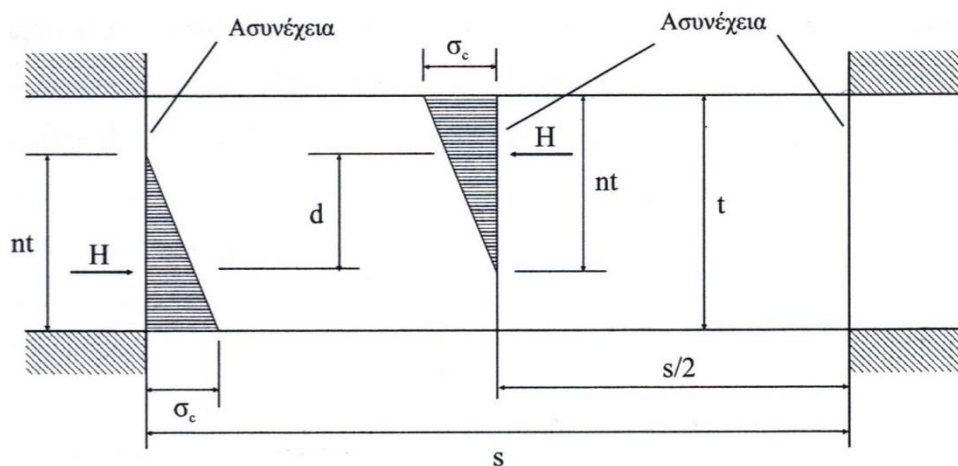
2.5 Το μοντέλο ρωγματομένης δοκού του Evans

Τις βασικές αρχές για την ανάλυση δοκών οροφής υπογείων εκσκαφών ως δοκούς voussoir έθεσε πρώτος ο Evans (1941) με την κλασική εργασία του «*The strength of undermined strata*», στην οποία διατυπώνει την άποψη ότι η αντοχή των δοκών οροφής των υπογείων εκσκαφών δεν θα πρέπει να αποδίδεται σε αδικαιολόγητα υψηλή καμπτική αντοχή των στρωμάτων αυτών, αλλά στον μηχανισμό που ελέγχει τη μηχανική συμπεριφορά τους και είναι παρόμοιος με εκείνο των τόξων voussoir (Νομικός,2004).

Ο Evans, αφού αιτιολόγησε τη ανάλυση μίας δοκού οροφής ως δοκό voussoir σύμφωνα με το Σχήμα 2.16, προχώρησε περαιτέρω στη θεωρητική ανάλυση της δοκού του Σχήματος 2.16γ, δεχόμενος ότι (Νομικός,2004):

1. Το πέτρωμα συμπεριφέρεται ελαστικά υπό θλιπτική ένταση μέχρι την αστοχία.
2. Η παρουσία των ασυνεχειών στη δοκό δεν επιτρέπει τη μεταφορά εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος της.
3. Η διατμητική αντοχή κατά μήκος των διεπιφανειών των τεμαχίων voussoir, η οποία αναπτύσσεται υπό την επίδραση των οριζόντιων πιέσεων, ισορροπεί την κατακόρυφη δύναμη λόγω ίδιου βάρους ή/και εξωτερικής φόρτισης της δοκού, που ασκείται στις στηρίξεις.
4. Οι στηρίξεις της δοκού είναι άκαμπτες, ώστε η παραμόρφωσή τους να μπορεί να αγνοηθεί.
5. Καμία εξωτερική φόρτιση δεν δρά στη δοκό.

Με βάση τη θεωρητική σύλληψη της δοκού voussoir και τις παραπάνω παραδοχές, ο Evans κατέληξε στο θεωρητικό μοντέλο δοκού του Σχήματος 2.19, στο οποίο τρεις μόνο ασυνέχειες ελέγχουν τη συμπεριφορά της, δύο στις στηρίξεις και μία στο μέσο της δοκού (Νομικός,2004).



Σχήμα 2.19.Θεωρητικό μοντέλο της δοκού Voussoir με τρεις ασυνέχειες, μία στο μέσο και δύο στις στηρίξεις της.(Evans, 1941)

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.19, η φόρτιση της δοκού, λόγω κατακόρυφων φορτίων, μεταβιβάζεται στις στηρίξεις της, στις διατομές των οποίων αναπτύσσεται θλιπτική ένταση με τριγωνική κατανομή των τάσεων σε ένα μήκος $n \cdot t$ της διατομής, που έχει ως συνισταμένη οριζόντια δύναμη H , ασκούμενη σε απόσταση $n \cdot t/3$ από την κάτω ακραία ίνα της διατομής. Ίδιας μορφής, σε μέγεθος και σχήμα ένταση αναπτύσσεται στη μεσαία διατομή της δοκού, όμως τώρα στο άνω τμήμα της διατομής στη θέση αυτή (Νομικός,2004).

Οι δύο οριζόντιες δυνάμεις H , στη στήριξη και στο μέσο της δοκού, σχηματίζουν ζεύγος δυνάμεων και εάν η απόσταση μεταξύ των αξόνων ενεργείας τους είναι d η ροπή M_R του ζεύγους των H υπολογίζεται από τη σχέση (Νομικός,2004):

$$M_R = H \cdot d \quad (2.30)$$

Με την παραδοχή της γραμμικής κατανομής των τάσεων στη στήριξη και στο μέσο της δοκού η οριζόντια δύναμη H είναι (Νομικός,2004):

$$H = \frac{1}{2} \sigma_c n t \quad (2.31)$$

Όπου σ_c η μέγιστη θλιπτική τάση, που ασκείται στην ακραία ίνα της διατομής, ενώ ο μοχλοβραχίονας του ζεύγους των H παρέχεται από τη σχέση (Νομικός,2004):

$$d = t - 2 \frac{nt}{3} = \left(1 - \frac{2n}{3}\right) t \quad (2.32)$$

Συνεπώς θα είναι:

$$M_R = \sigma_c t^2 \left(\frac{n}{2} - \frac{n^2}{3}\right) \quad (2.33)$$

Στο σημείο αυτό ο Evans λόγω λάθους στη στατική θεώρηση της δοκού, προσέθεσε έναν επιπλέον όρο στη ροπή του ζεύγους των δυνάμεων H , που υπέθεσε ότι προκαλείται λόγω εκκεντρότητας του φορέα ενέργειας τους ως προς το μέσο του μήκους επαφής, ίσο με:

$$H \left(\frac{nt}{2} - \frac{nt}{2}\right) = H \frac{nt}{6} \quad (2.34)$$

Ο όρος αυτός δεν υπάρχει στην πραγματικότητα, αφού πρόκειται για ζεύγος δυνάμεων και όχι για μεμονωμένη δύναμη H . Το λάθος αυτό στη στατική θεώρηση μεταφέρθηκε σε αρκετούς επόμενους ερευνητές, ενώ πρώτη φορά γίνεται λόγος για αυτό, και διορθώνεται από τον Sterling (1977).

Τελικώς, η ροπή M_R , που υπολόγισε ο Evans είναι:

$$M_R = \sigma_c t^2 \left(\frac{n}{2} - \frac{n^2}{3} \right) + 2 \frac{\sigma_c n t n t}{2 \cdot 6} = \sigma_c t^2 \left(\frac{n}{2} - \frac{n^2}{3} + \frac{nt}{6} \right) \Rightarrow M_R = \sigma_c t^2 \left(\frac{n}{2} - \frac{n^2}{6} \right) \quad (2.35)$$

Η ευστάθεια της δοκού απαιτεί η ροπή M_R να ισούται με τη ροπή ανατροπής M_A , που ασκείται στη στήριξη λόγω του βάρους της δοκού και υπολογίζεται από τη σχέση (Νομικός,2004):

$$M_A = \frac{\gamma s^2 t}{8} \quad (2.36)$$

Όπου γ το ειδικό βάρος του πετρώματος της δοκού. Εξισώνοντας τις ροπές M_R και M_A προκύπτει:

$$\sigma_c t^2 \left(\frac{n}{2} - \frac{n^2}{6} \right) = \frac{\gamma s^2 t}{8} \quad (2.37)$$

Από την παραπάνω σχέση 2.37 μπορεί να υπολογισθεί το μέγιστο ασφαλές άνοιγμα της οροφής για δεδομένο πάχος δοκού ή η συνολική φόρτιση, που μπορεί να φέρει με ασφάλεια μία δοκός με συγκεκριμένο μήκος s και πάχος t .

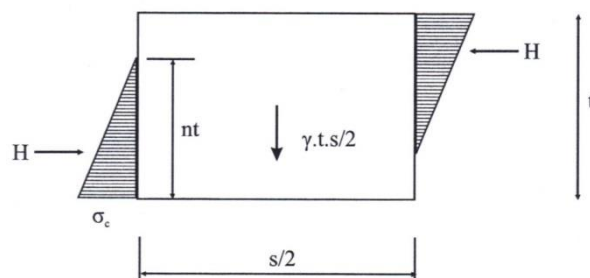
Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, εξαιτίας της εσφαλμένης στατικής θεώρησης του Evans, η σχέση 2.37 είναι επίσης εσφαλμένη. Με βάση το Σχήμα 2.20, όπου φαίνεται το διάγραμμα δυνάμεων του μισού σώματος της δοκού, από την ισορροπία ροπών ως προς το σημείο A της ακραίας ίνας της διατομής της στήριξης της δοκού, προκύπτει (Νομικός,2004):

$$H \frac{nt}{3} + \frac{\gamma s t s}{2 \cdot 4} - H \left(t - \frac{nt}{3} \right) = 0 \Rightarrow H \left(1 - \frac{2n}{3} \right) t = \frac{\gamma s^2 t}{8} \quad (2.38)$$

Και αντικαθιστώντας την τιμή της H από τη σχέση 2.31 έχουμε:

$$\sigma_c t^2 \left(\frac{n}{2} - \frac{n^2}{3} \right) = \frac{\gamma s^2 t}{8} \quad (2.39)$$

Η σχέση 2.39 διαφέρει από την 2.37 κατά έναν όρο $\sigma_c \cdot t^2 \cdot (n^2/6)$ στο αριστερό μέλος των εξισώσεων, που οφείλεται στην εσφαλμένη στατική θεώρηση του Evans.



Σχήμα 2.20. Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στο μισό της δοκού (Νομικός,2004).

Στη συνέχεια ο Evans λαμβάνει ως μία λογική τιμή για το ύψος της θλιβόμενης περιοχής της δοκού ίση με το μισό του πάχους της δοκού, δηλαδή $n=0.5$. Εισάγοντας την τιμή αυτή στη σχέση 2.37 προκύπτει (Νομικός,2004):

$$s^2 = \frac{5\sigma_c t}{3\gamma} \quad (2.40)$$

Εάν αντί της σχέσης 2.37 χρησιμοποιηθεί η διορθωμένη σχέση 2.39 τότε προκύπτει η σχέση:

$$s^2 = \frac{4\sigma_c t}{3\gamma} \quad (2.41)$$

Έχοντας ο Evans αναλύσει την δοκό χωρίς να λάβει υπόψη την κάμψη της, εκτιμάει την επίδραση του βέλους κάμψης της δοκού και την επακόλουθη μείωση του μοχλοβραχίονα των δυνάμεων H . Κάνοντας λογικές παραδοχές, καταλήγει στις ακόλουθες εξισώσεις, που μπορούν να εφαρμοσθούν με μία επαναληπτική διαδικασία (Νομικός,2004):

- Μήκος της καμπύλης πιέσεων στη δοκό: $L = s + \frac{8d^2}{3s}$ (2.42)
- Μείωση του μήκους της καμπύλης πιέσεων λόγω θλίψης: $\Delta L = \left(s + \frac{8d^2}{3s} \right) \frac{11\sigma_c}{24E}$ (2.43)
- Νέο μήκος της καμπύλης πιέσεων: $L' = L - \Delta L$ (2.44)
- Νέος μοχλοβραχίονας των δυνάμεων H : $d' = \sqrt{\frac{3s}{8}(L' - s)}$ (2.45)
- Νέα μέγιστη τάση σ_c : $\sigma'_c = \sigma_c \frac{d}{d_1}$ (2.46)

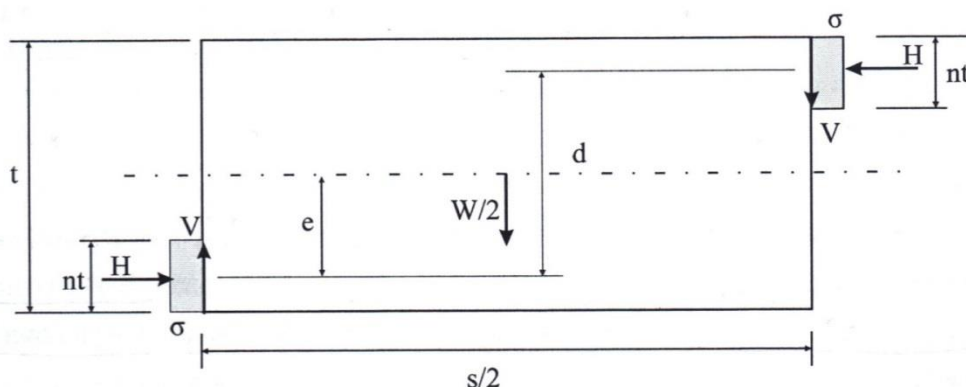
Τέλος, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι σε μεγάλου πάχους δοκούς το μέγιστο ασφαλές άνοιγμα εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη τάση στις διατομές της δοκού, σε δε δοκούς μικρού πάχους, η αστοχία θα οφείλεται σε μηχανική αστάθεια κατά την κάμψη της (Νομικός,2004).

2.6 Θεωρία γραμμικού τόξου (Linear arch technique)

Η θεωρία του γραμμικού τόξου (Linear arch technique) αναπτύχθηκε αρχικά από τον Sterling (1977, 1980), ενώ εργαστηριακές και μεγάλης κλίμακας πειραματικές δοκιμές από τους Sterling και Nelson (1978) οδήγησαν στη βελτίωση της μεθόδου, η οποία έχει τύχει και επί τόπου εφαρμογής (Νομικός,2004).

Η νεώτερη μορφή της μεθόδου παρουσιάστηκε από τους Sterling et al. (1995). Σύμφωνα με αυτούς η θεωρία γραμμικού τόξου βασίζεται στη λειτουργία της δοκού ως τοξωτού φορέα δυνάμεων στο εσωτερικό της, καθώς και στον περιορισμό των άκρων της έναντι πλευρικών μετατοπίσεων. Η καμπύλη πιέσεων στο εσωτερικό της δοκού

θεωρείται ευθεία. Η στατική ισορροπία της δοκού εξασφαλίζεται μέσω ορθογώνιας κατανομής των τάσεων σε τμήμα του κάτω μέρους της διατομής στήριξης και του άνω τμήματος της μεσαίας διατομής της δοκού, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.21:



Σχήμα 2.21. Διάγραμμα δυνάμεων του μισού σώματος της δοκού (Sterling et al., 1995).

Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι ο Evans θεώρησε τριγωνική κατανομή των τάσεων στις κρίσιμες διατομές της δοκού και μήκος επαφής ίσο με το μισό του πάχους της δοκού. Η ορθογωνική κατανομή που προτείνει ο Sterling, προέκυψε από αντίστροφες αναλύσεις ενός μεγάλου αριθμού πειραματικών δοκιμών φορτίσεων δοκών έως το μέγιστο φορτίο τους (Νομικός,2004).

Το αδιάστατο μήκος επαφής (n) στις κρίσιμες διατομές ευρίσκεται, σύμφωνα με τον Sterling, στην περιοχή των τιμών $n=0.21$ έως 0.32 . Προτείνει συνεπώς ως μία αποδεκτή τιμή του n ίση με 0.25 , δηλαδή το μήκος επαφής λαμβάνεται ίσο με το ένα τέταρτο του πάχους της δοκού (Νομικός,2004).

Η ανάλυση της δοκού πραγματοποιείται λαμβάνοντας τις ισορροπίες δυνάμεων ως προς την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση και την ισορροπία ροπών ως προς την ακραία ίνα της διατομής της στήριξης (Νομικός,2004).

Εάν η παραμόρφωση της δοκού πριν από την αστοχία θεωρηθεί αρκετά μικρή ώστε να μην μεταβάλλει σημαντικά τον μοχλοβραχίονα του ζεύγους των οριζοντίων δυνάμεων, που ασκούνται στη στήριξη και στο μέσο της δοκού, η ασφάλεια της δοκού έναντι θλίψης για φόρτιση λόγω ιδίου βάρους μόνο, εξασφαλίζεται όταν το πάχος της δοκού ικανοποιεί την σχέση (Νομικός,2004):

$$t \geq \frac{2\gamma s^2}{3\sigma_c} \quad (2.47)$$

Όπου σ_c η αντοχή της δοκού σε μονοαξονική θλίψη.

Η ασφάλεια της δοκού έναντι διατμητικής αστοχίας στις στηρίξεις απαιτεί:

$$t \leq \frac{stan\phi}{3} \quad (2.48)$$

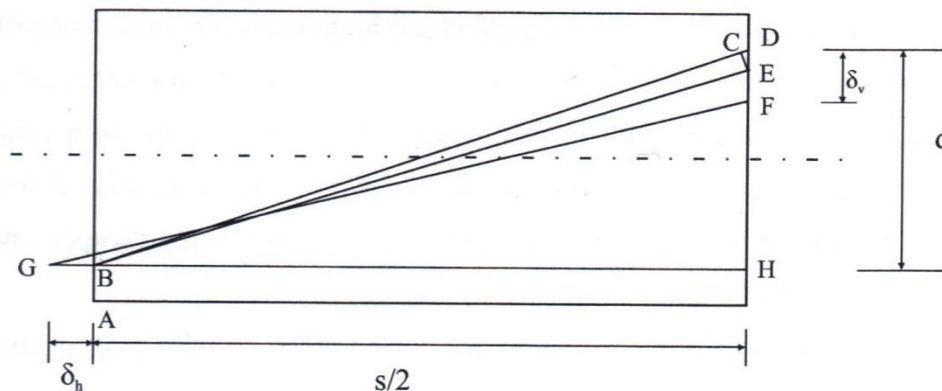
Συνεπώς το εύρος των τιμών του πάχους της δοκού για το οποίο η δοκός παραμένει ευσταθής έναντι θλίψης και διάτμησης περιορίζεται σε:

$$\frac{2\gamma s^2}{3\sigma_c} \leq t \leq \frac{stan\varphi}{3} \quad (2.49)$$

Όταν η κάμψη της δοκού είναι σημαντική, ώστε το βέλος κάμψης να μην μπορεί να αγνοηθεί, τότε ο μοχλοβραχίονας d του ζεύγους των οριζοντίων δυνάμεων μεταβάλλεται καθώς η δοκός παραμορφώνεται. Σύμφωνα με την θεωρία της γραμμικής καμπύλης πιέσεων η μείωση του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων και συνεπώς η κατακόρυφη μετατόπιση του μέσου της δοκού μπορεί να αποδοθεί σε τρεις κυρίως αιτίες (Νομικός,2004):

- Στην θλιπτική παραμόρφωση της δοκού κατά μήκος της καμπύλης πιέσεων.
- Σε τυχόν υποχώρηση της στήριξης υπό την επίδραση των οριζοντίων πιέσεων.
- Στο άνοιγμα των ασυνεχειών της στήριξης και του μέσου της δοκού, που προκαλεί επιπλέον στροφή των διατομών της.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα της επίδρασης της θλιπτικής παραμόρφωσης της δοκού και της υποχώρησης της στήριξης δίνεται στο σχήμα 2.22:



CD = μείωση του μήκους της καμπύλης πιέσεων λόγω θλίψης

DE = κατακόρυφη μετατόπιση της δοκού λόγω της παραμόρφωσης CD

GB = οριζόντια μετακίνηση σημείου B λόγω παραμόρφωσης της στήριξης και ανοίγματος των ασυνεχειών

Σχήμα 2.22. Διάγραμμα μετατοπίσεων του μισού σώματος της δοκού (Sterling et al., 1995).

Η κατακόρυφη μετατόπιση δ_v στο μέσο της δοκού υπολογίζεται από τη σχέση (Νομικός,2004):

$$\delta_v = d - \sqrt{(1 - \varepsilon_d)^2 \left(\left(\frac{s}{2} \right)^2 + d^2 \right) - \left(\delta_h + \frac{s}{2} \right)^2} \quad (2.50)$$

Όπου δ_h η οριζόντια μετατόπιση του σημείου B και ε_d η διαγώνια ανηγμένη παραμόρφωση (ίση με CD/BD), για τον υπολογισμό της οποίας ο Sterling (1977) προτείνει τη σχέση:

$$\varepsilon_d = \left(0.2 + 0.3 \frac{\sigma}{\sigma_c}\right) \frac{\sigma}{E} \quad (2.51)$$

Όπου σ η τιμή της τάσης στη στήριξη και στο μέσο της δοκού (θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή).

Η ροπή ευστάθειας της δοκού, προερχόμενη από το ζεύγος των οριζόντιων δυνάμεων, υπολογίζεται από την σχέση (Νομικός,2004):

$$M_R = 0.25\sigma t \sqrt{(1 - \varepsilon_d)^2 \left(\left(\frac{s}{2}\right)^2 + d^2\right) - \left(\delta_h + \frac{s}{2}\right)^2} \quad (2.52)$$

Ο έλεγχος της δοκού έναντι μηχανικής αστάθειας ικανοποιείται όταν:

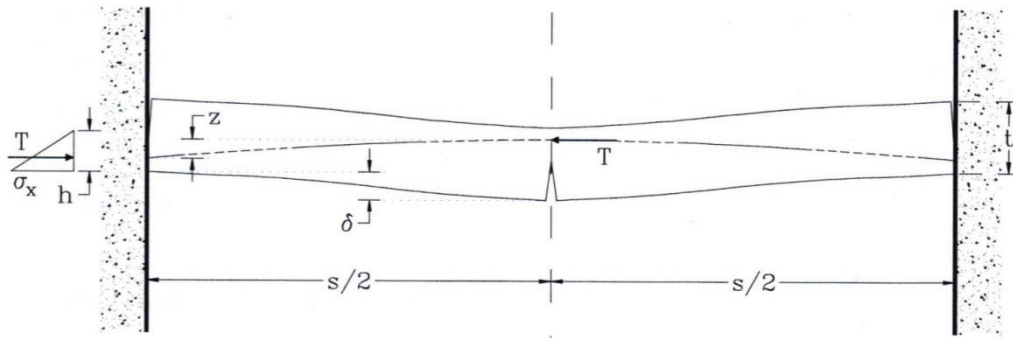
$$M_A < M_R \quad (2.53)$$

Όπου M_A η ροπή ανατροπής, που ισούται με τη ροπή λόγω ιδίου βάρους της δοκού στην διατομή της στήριξης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_A = \frac{\gamma t s^2}{8} \quad (2.54)$$

Όπου M_R , η ροπή αντίστασης της δοκού υπολογιζόμενη για τιμή της τάσεως λίγο μικρότερη από την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (Νομικός,2004).

Όπως αποδείχθηκε μεταγενέστερα (Sofianos, 1996), η καμπύλη πιέσεων στο εσωτερικό της δοκού δεν είναι ευθεία, αλλά έχει τη μορφή παραβολής (Σχήμα 2.23), που είχε θεωρήσει αρχικά ο Evans, και έτσι η θεωρία του γραμμικού τόξου μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστική. Το σημαντικότερο στοιχείο αυτής της θεωρίας είναι ότι, λαμβάνει πρόνοια της τυχόν υποχώρησης των στηρίξεων της δοκού υπό την επίδραση των θλιπτικών φορτίων και της περαιτέρω αύξησης της κατακόρυφης μετατόπισης λόγω στροφής των ογκοτεμαχίων της δοκού *voussoir*. Επιπλέον, η παραδοχή κατανομής των τάσεων σε μήκος ίσο με το ένα τέταρτο του πάχους της δοκού, δικαιολογείται τόσο από τα πειράματα του Sterling, όσο και από μεταγενέστερες εργασίες στο θέμα αυτό (Νομικός,2004).



Σχήμα 2.23. Θεωρητικό ομοίωμα παραμόρφωσης της δοκού voussoir με ασυνέχειες στα άκρα και στις στηρίξεις (Sofianos, 1996, Sofianos et al., 1998).

2.7 Θεωρία παραβολικής καμπύλης πιέσεων

2.7.1 Αναλυτική επίλυση στην ελαστική περιοχή

Η αναλυτική επίλυση της δοκού voussoir, για δοκό με ασυνέχειες στο μέσο και στις στηρίξεις της, δίνεται για παραβολική καμπύλη πιέσεων από τον Sofianos (1996) και Sofianos et al. (1998).

Η ανάλυση βασίζεται στο θεωρητικό ομοίωμα παραμόρφωσης και ισορροπίας της δοκού του παραπάνω σχήματος 2.23.

Σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο του σχήματος 2.23, η κάμψη της δοκού προκαλεί την κατακόρυφη μετατόπιση της μεσαίας διατομής της κατά δ και την ανάπτυξη οριζόντιας δύναμης T στις διατομές της στήριξης και του μέσου. Λόγω της ύπαρξης των ασυνεχειών στις στηρίξεις και στο μέσο της δοκού και της αδυναμίας τους να μεταφέρουν εφελκυστικές δυνάμεις, η ένταση που αναπτύσσεται στις διατομές αυτές δεν παραλαμβάνεται από ολόκληρο το ύψος της διατομής αλλά και από τμήμα αυτής (Νομικός, 2004).

Στα άκρα και στο μέσο της δοκού η κατανομή των τάσεων θεωρείται τριγωνική με μέγιστη τιμή σ_x στην κάτω ακραία ίνα της διατομής στήριξης της δοκού και στην άνω ακραία ίνα της μεσαίας διατομής. Οι τάσεις αυτές ασκούνται σε ένα μήκος h , το οποίο καλείται μήκος επαφής. Ο λόγος $n=h/t$, όπου t το πάχος της δοκού, είναι το ανηγμένο μήκος επαφής της διατομής (Νομικός, 2004).

Η φόρτιση της δοκού προκαλείται λόγω ιδίου βάρους γ και οποιασδήποτε εξωτερικής φόρτισης, που μπορεί να ασκείται στη δοκό. Το συνολικό φορτίο για φόρτιση μόνο λόγω ιδίου βάρους είναι:

$$Q = \gamma st \quad (2.55)$$

Το ανηγμένο ολικό φορτίο, που ασκείται στη δοκό, μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$Q_n = k_q \frac{Q}{Et} = k_q \frac{\gamma st}{Et} = k_q \frac{\gamma s}{E} \quad (2.56)$$

Όπου k_q ο λόγος του ανηγμένου συνολικού φορτίου προς το ανηγμένο φορτίο λόγω ιδίου βάρους.

Η συνισταμένη των οριζοντίων δυνάμεων, που ασκούνται στη στήριξη της δοκού, είναι μία δύναμη T με σημείο εφαρμογής ευρισκόμενο σε απόσταση $h/3 = nt/3$ από την ακραία ίνα της διατομής. Ίση σε μέγεθος και αντίθετης φοράς δύναμη T αναπτύσσεται και στη μεσαία διατομή της δοκού σχηματίζοντας έτσι ένα ζεύγος οριζοντίων δυνάμεων στις οποίες οφείλεται και η αντοχή της δοκού έναντι μηχανικής αστάθειας (Νομικός, 2004).

Για την εύρεση της αναλυτικής λύσης (Sofianos, 1996, Sofianos et. al. 1998), γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- 1 Η δοκός αναλαμβάνει όλα τα φορτία δια μέσου ενός τόξου, που δημιουργείται στο εσωτερικό του σώματός της, ενώ το υπόλοιπο τμήμα της παραμένει αφόρτιστο.
- 2 Το εύρος του τόξου στη μεσαία διατομή και στις στηρίξεις της δοκού είναι το ίδιο. Η παραδοχή αυτή, δεν είναι ακριβής, σύμφωνα με τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Wright, 1974) και με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων (Sofianos και Karpenis, 1998). Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι το μέγεθος του τόξου στη μεσαία διατομή της δοκού είναι μεγαλύτερο από αυτό στις στηρίξεις ενώ οι τάσεις και οι παραμορφώσεις της ακραίας ίνας της διατομής των στηρίξεων υπερβαίνουν αυτές της μεσαίας διατομής. Για την επίτευξη λοιπόν αναλυτικής λύσης απαιτείται η χρησιμοποίηση των μέσων τιμών των μεγεθών τάσεων και παραμορφώσεων καθώς και του εύρους του υπό ένταση τόξου. Το μέσο ανηγμένο μήκος επαφής n ορίζεται τότε από τη σχέση:

$$n = \frac{h}{t} \quad (2.57)$$

και το αντίστοιχο μέγεθος στη στήριξη είναι:

$$n_\alpha = \frac{h_\alpha}{t} = \lambda n \quad (2.58)$$

- 3 Η κατανομή των τάσεων στις στηρίξεις και στο μέσο της δοκού είναι τριγωνική (Evans 1941, Sofianos 1996, Sofianos και Karpenis, 1998, Diederichs και Kaiser 1999α), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.23. Συνεπώς οι μοχλοβραχίονες z_o και z του ζεύγους των οριζοντίων δυνάμεων T στην αρχική και στην παραμορφωμένη κατάσταση της δοκού αντίστοιχα καθώς και η ροπή αντίστασης M_R υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$z_{on} = 1 - \frac{2}{3}n, \quad z_{on} = \frac{z_o}{t} \quad (2.59)$$

$$z_n = \frac{z}{t} = z_{on} - \delta_n, \quad \delta_n = \frac{\delta}{t} \quad (2.60)$$

$$M_R = \frac{\sigma_x}{2} n t^2 z_n \quad (2.61)$$

- 4 Η καμπύλη πιέσεων στο εσωτερικό της δοκού είναι μορφής παραβολής (Evans 1941, Sofianos 1996). Συνεπώς τα μήκη L_o και L στην αρχική και στην παραμορφωμένη κατάσταση της δοκού αντίστοιχα, καθώς και η μεταβολή $\Delta L = L_o - L$ του μήκους της παραβολής λόγω της παραμόρφωσης της δοκού υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$L_o = s + k_1 \frac{z_o^2}{s} \quad (2.62)$$

$$L = s + k_1 \frac{z^2}{s} \quad (2.63)$$

Η παράμετρος k_1 λαμβάνει τιμές ανάλογα με την παραδοχή που γίνεται για τη μορφή της καμπύλης πιέσεων. Εάν θεωρηθεί ότι η καμπύλη πιέσεων είναι παραβολή δευτέρου βαθμού τότε $k_1 \approx 8/3$ (Evans 1941, Beer και Meek 1982), ενώ για παραβολή μεγαλύτερου βαθμού $k_1 \approx 16/3$ (Brady και Brown 1993). Χρησιμοποιώντας την τιμή για παραβολή βαθμού μεγαλύτερου του 2 έχουμε:

$$\Delta L = L_o - L = \varepsilon_m L_o \quad (2.64)$$

$$z = \sqrt{z_o^2 - \frac{3s}{16} \Delta L} \quad (2.65)$$

- 5 Η μέση ανηγμένη παραμόρφωση ε_m στο τόξο μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης της ακραίας ίνας ως εξής:

$$r = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_m} = \frac{2\chi}{n} \quad (2.66)$$

Όπου χ είναι το μέσο πάχος του τόξου και r ο συντελεστής που εκφράζει την συγκέντρωση παραμόρφωσης στη στήριξη.

Οι κινηματικές συνθήκες, που περιγράφηκαν παραπάνω, μπορούν να συνοπισθούν στην εξίσωση:

$$z_n = z_{on} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_x}{r} \left[\frac{3}{16} s_z^2 + 1 \right]} \quad (2.67)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις των σχέσεων (2.64) έως (2.67), το βέλος κάμψης στο μέσο της δοκού υπολογίζεται από την σχέση:

$$\delta_z = \frac{\delta_n}{z_{on}} = \frac{\varepsilon_x \left[\frac{3}{16} s_z^2 + 1 \right]}{2r \left(1 - \frac{\delta_z}{2} \right)} = 1 - \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_x}{r} \left[\frac{3}{16} s_z^2 + 1 \right]} \quad (2.68)$$

- 6 Η μεταβολή του μήκους του τόξου πριν από την αστοχία οφείλεται αποκλειστικά στις ελαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες υπολογίζονται θεωρώντας γραμμική σχέση τάσεως-παραμορφώσεως, δηλαδή:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}, \varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E} \quad (2.69)$$

Για να έχουμε ισορροπία της δοκού πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση:

$$M_A = M_R \text{ οπότε } \sigma_x = \frac{1}{4} \frac{k_q \gamma S^2}{nz} \quad (2.70)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση καταστατικής συμπεριφοράς στην στατική εξίσωση αυτή γίνεται:

$$\varepsilon_x = \frac{Q_n s_z}{4n(1 - \delta_z)} = \frac{q_n s_n^2}{4nz_{on}(1 - \delta_z)} \quad (2.71)$$

Όπου,

$$Q_n = q_n s_n = k_q \frac{\gamma S}{E}, s_z = \frac{s}{z_o} = \frac{s_n}{z_{on}}, \delta_z = \frac{\delta}{z_o} = \frac{\delta_n}{z_{on}} \quad (2.72)$$

Συνδυάζοντας την σχέση (2.68) υπολογισμού του βέλους κάμψης με τη σχέση (2.71) υπολογισμού των παραμορφώσεων, προκύπτει:

$$\delta_z = \frac{Q_n s_z}{8nr} \frac{\left[\frac{3}{16} s_z^2 + 1 \right]}{\left(1 - \frac{\delta_z}{2}\right)(1 - \delta_z)} = \frac{q_n s_z z_{on}}{8nr} \frac{\left[\frac{3}{16} s_z^2 + 1 \right]}{\left(1 - \frac{\delta_z}{2}\right)(1 - \delta_z)} \quad (2.73)$$

Ενώ αν θεωρηθεί ότι το σχήμα της καμπύλης πιέσεων δεν είναι γνωστό αλλά εκφράζεται συνερτήσεως του συντελεστή k_1 , τότε η σχέση (2.73) γίνεται (Sofianos et al., 1998):

$$\delta_z \left(1 - \frac{\delta_z}{2}\right)(1 - \delta_z) = \delta_{zo} = \frac{Q_n s_z}{16k_1 \chi} [s_z^2 + k_1] \quad (2.74)$$

Η σχέση (2.74) μπορεί περαιτέρω να επιλυθεί ως προς δ_z συναρτήσεως του δ_{zo} ως εξής:

$$\delta_z = 1 - \frac{\cos \omega}{\sqrt{3}} - \sin \omega \quad (2.75)$$

Όπου

$$\omega = \frac{1}{3} \arctan \left(\frac{\sqrt{\frac{1}{27} - \delta_{zo}^2}}{\delta_{zo}} \right) \quad (2.76)$$

Με

$$\omega \in \left[\frac{\pi}{6}, 0 \right], \delta_{zo} \in \left[0, \frac{1}{\sqrt{27}} \right], \delta_z \in \left[0, \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{3}} \right] \quad (2.77)$$

Οι παράμετροι χ και n υπολογίσθηκαν από τον Sofianos (1996) με την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων άλλων ερευνητών (Wright, 1974) ως εξής:

$$n = \frac{1}{0.22s_n + 2.7} \text{ και } k_1\chi = 1 \quad (2.78)$$

Όπου:

$$s_n = \frac{S}{t} \quad (2.79)$$

Οπότε η σχέση (2.73) γράφεται ως:

$$\delta_{zo} = \frac{Q_n s_z}{16} [s_z^2 + k_1] \approx \frac{Q_n s_z^3}{16} \quad (2.80)$$

2.7.2 Μηχανική αστάθεια και αστοχία λόγω κάμψης

Όπως προκύπτει από την σχέση (2.73) το βέλος κάμψης της δοκού στο μέσο της είναι αύξουσα συνάρτηση της φόρτισης της δοκού, ενώ αντίθετα ο μοχλοβραχίονας του ζεύγους των οριζοντίων δυνάμεων στήριξης και μέσου της δοκού είναι φθίνουσα συνάρτηση της φόρτισης. Συνεπώς τη στιγμή της αστοχίας λόγω κάμψης το βέλος κάμψης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, ενώ ο μοχλοβραχίονας των οριζοντίων δυνάμεων την ελάχιστη. Οι τιμές αυτές δίνονται από τις σχέσεις (Νομικός, 2004):

$$\max \delta_n = \delta_n^b = \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{3}} z_{on} \approx 0.42 z_{on} \quad (2.81)$$

$$\min z_n = z_n^b = \frac{z_{on}}{\sqrt{3}} \quad (2.82)$$

Ενώ το φορτίο αστοχίας συναρτήσει της γεωμετρίας της δοκού παρέχεται από την σχέση:

$$Q_n^b = \frac{3.1}{s_z(s_z^2 + k_1)} \approx \frac{3}{s_z^3} \quad (2.83)$$

Και η αξονική τροπή εκφράζεται συναρτήσει της γεωμετρίας και της φόρτισης της δοκού και της οριζόντιας δύναμης στη στήριξη με τις σχέσεις:

$$\varepsilon_x^b = \frac{4}{3n} \frac{1}{s_z^2 + k_1} \approx \frac{4}{3ns_z^2} \quad (2.84)$$

$$T_n^b = \frac{T_n^b}{Et} = \frac{1}{2} n \varepsilon_x^b = \frac{2}{3} \frac{1}{s_z^2 + k_1} \approx \frac{2}{3ns_z^2} \quad (2.85)$$

Ο έλεγχος των παραπάνω εξισώσεων με αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων (Itasca, 1998) από τους Sofianos et al (1998), έδειξαν ότι το μήκος επαφής n κατά την αστοχία της δοκού λόγω κάμψης ευρίσκεται στην περιοχή τιμών 0.10 έως 0.15, ενώ η σταθερή τιμή:

$$n^b = 0.11 \quad (2.86)$$

δείχνει να προσαρμόζεται καλά στα αριθμητικά αποτελέσματα.

Η σχέση (2.81) αποτελεί ένα άνω όριο για το βέλος κάμψης της δοκού ενώ η σχέση (2.82) ένα κάτω όριο για το μοχλοβραχίονα των οριζοντίων δυνάμεων, ανεξάρτητα από τη σχέση, που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του n [σχέση (2.78) ή σχέση (2.86)].

Η οριζόντια δύναμη, που αναπτύσσεται στη στήριξη της δοκού όπως υπολογίζεται από τη σχέση (2.85), είναι ένα άνω όριο των τιμών που μετρούνται από τις αριθμητικές αναλύσεις.

Το φορτίο αστοχίας Q_n όπως υπολογίζεται από τη σχέση (2.83), προσεγγίζει πολύ καλά τις αντίστοιχες τιμές που λαμβάνονται από τις αριθμητικές αναλύσεις ανεξάρτητα από τη σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του n .

Τέλος, η σύγκριση των τιμών της μέγιστης αξονικής τροπής, που υπολογίζονται από τη σχέση (2.84) δείχνουν ότι η τιμή αυτή εξαρτάται από τη σωστή επιλογή της τιμής του μήκους επαφής. Εάν χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.86) για το μήκος επαφής τότε η σχέση (2.84) αποτελεί ένα άνω όριο των τιμών της μέγιστης αξονικής τροπής, που μετρούνται από τις αριθμητικές αναλύσεις (Νομικός, 2004).

2.7.3 Σύνθλιψη του πετρώματος

Ο δεύτερος μηχανισμός αστοχίας αφορά τη σύνθλιψη του πετρώματος της δοκού λόγω υπέρβασης της επιτρεπόμενης αξονικής τροπής ε_{all} του πετρώματος. Η μέγιστη αξονική τροπή στη δοκό αναπτύσσεται στην ακραία ίνα της διατομής της στήριξης και στην άνω ακραία ίνα της διατομής του μέσου της δοκού. Η εξέταση της

αναπτυσσόμενης τροπής στις θέσεις αυτές με αριθμητικές αναλύσεις (Sofianos et al, 1998) έδειξε ότι:

1. Το μήκος επαφής μπορεί να συσχετισθεί με τη φόρτιση και τη γεωμετρία της δοκού σύμφωνα με τη σχέση:

$$n = 0.3 - 0.14s_n \sqrt[3]{Q_n} \quad (2.87)$$

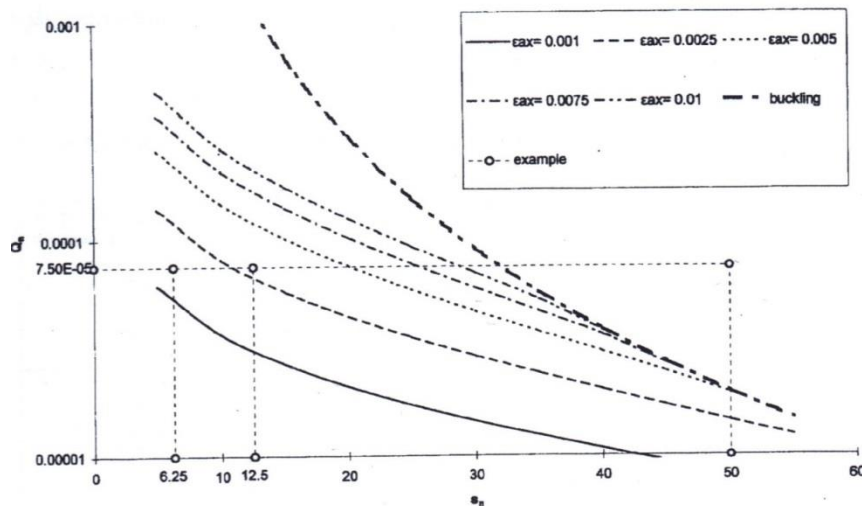
2. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.75) και (2.80) το βέλος κάμψης της δοκού δ μπορεί να υπολογιστεί για γνωστή την τιμή του μήκους επαφής n . Το σφάλμα, που προκύπτει κατά τον υπολογισμό του δ σε σχέση με τις τιμές που λαμβάνονται από αριθμητικά δεδομένα, είναι της τάξεως του $\pm 3\%$.
3. Η αξονική τροπή υπολογιζόμενη συναρτήσει της φόρτισης και της γεωμετρίας της δοκού (χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.87) για τον υπολογισμό του n) δίνει τιμές με απόκλιση περίπου 10% από αυτές, που μετρούνται από τις αριθμητικές αναλύσεις. Για τον έλεγχο της δοκού έναντι σύνθλιψης του πετρώματος είναι αναγκαίος ο υπολογισμός των τιμών της αξονικής τροπής στη στήριξη της δοκού (ε_{ax}), διότι όπως προκύπτει από τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι πάντα μεγαλύτερη από εκείνη στο μέσο της δοκού (ε_{mx}). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο λόγος:

$$\lambda^{nl} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{ax}} \quad (2.88)$$

Όπου

$$\lambda^{nl} = 0.2 + 0.06\sqrt{s_n} + 0.0005\sqrt{Q_n} \quad (2.89)$$

Τα θεωρητικά αποτελέσματα, που προκύπτουν από την αναλυτική επίλυση της δοκού, συμβαδίζουν περαιτέρω με περιορισμένο αριθμό επί τόπου παρατηρήσεων σε αστοχίες δοκών οροφής που σημειώθηκαν στα υπόγεια μεταλλεία της εταιρείας Βωξίτες Ελικώνος (Sofianos και Karenis 1998). Οι περιπτώσεις, που μελετήθηκαν συγκρίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 2.24 στις αντίστοιχες περιοχές ανάλογα με το εάν η περίπτωση αφορούσε ευστάθεια ή αστάθεια της οροφής.



Σχήμα 2.24. Διάγραμμα σχεδιασμού δοκών οροφής για έλεγχο έναντι αστοχίας μορφής μηχανισμού, σύνθλιψης πετρώματος λόγω υπέρβασης της επιτρεπόμενης τροπής και διατμητικής ολίσθησης στις στηρίξεις της δοκού (Sofianos et al, 1998).

Η ανωτέρω αναλυτική επίλυση ισχύει υπό την παραδοχή άκαμπτων στηρίξεων. Στην πραγματικότητα οι στηρίξεις των δοκών στην οροφή των υπογείων ανοιγμάτων είναι ελαστικές, και συνεπώς υπό την επίδραση των οριζοντίων πιέσεων υποχωρούν. Στην περίπτωση, που η παραδοχή άκαμπτων στηρίξεων για τη δοκό δεν ισχύει, τότε προκύπτει (Sofianos και Karpénis, 1996) ότι το βέλος κάμψης της δοκού αυξάνεται ενώ ο συντελεστής ασφαλείας της δοκού έναντι ελαστικής αστάθειας μειώνεται. Η μέγιστη μείωση του συντελεστή ασφαλείας είναι μικρότερη του 10%.

Τέλος, στις στήλες 1 έως 3 του πίνακα (Σχήμα 2.25), δίνονται για ελαστικές δοκούς με διάφορες συνθήκες στήριξης οι εξισώσεις υπολογισμού του βέλους κάμψης στο μέσο της δοκού, η μέγιστη ροπή κάμψης $M (=M_n E t^2)$ και η μέγιστη αξονική παραμόρφωση της ακραίας ίνας της δοκού (Sofianos et al., 2000). Επιπλέον στη στήλη 4 του ίδιου Πίνακα δίνονται οι αντίστοιχες εξισώσεις υπολογισμού των ανωτέρων μεγεθών για τη δοκό voussoir με ασυνέχειες στα άκρα και στο μέσο της. Σημειώνεται ότι για την περίπτωση της δοκού voussoir η ροπή που υπολογίζεται είναι η ροπή που προκαλείται από το ίδιο βάρος της δοκού στη διατομή της στήριξης (ροπή ανατροπής). Επίσης, για το βέλος κάμψης και τη μέγιστη αξονική παραμόρφωση δίνονται εύρη τιμών αφού εξαρτώνται από τις τιμές των συντελεστών απροσδιοριστίας.

	Πακτωμένα και τα δύο άκρα της δοκού	Πακτώσεις στις στηρίξεις και πλαστική άρθρωση στο μέσο της δοκού	Απλή αμφίεραστη δοκός	Δοκός voussoir με ασυνέχειες στα άκρα και στις στηρίξεις
$\frac{\delta_n}{Q_n \cdot s_n^3} =$	1/32	3/32	5/32	$\sim(2.4 \div 3.1)/32$
$\frac{M_n}{Q_n \cdot s_n} =$	1/12	1/8	1/8	(1/8)* * Ροπή ανατροπής
$\frac{\epsilon_x}{Q_n \cdot s_n} =$	6/12	6/8	6/8	6/(2.4 ÷ 6)

Σχήμα 2.25. Βέλος κάμψης, ροπή και μέγιστη αξονική παραμόρφωση για ελαστικές δοκούς με διάφορες συνθήκες στήριξης και για τη δοκό voussoir (Sofianos et al., 2000).

Τα συμπεράσματα των παραγράφων 2.7.1 έως 2.7.3 μπορούν να εφαρμοσθούν για τον σχεδιασμό δοκών οροφής στην πράξη. Οι εξισώσεις των παραγράφων 2.7.1 και 2.7.2 για τον έλεγχο της ευστάθειας ή αστάθειας της δοκού έναντι αστοχίας λόγω κάμψης ή σύνθλιψης του πετρώματος, συνοψίζονται από τους Sofianos et al (1998) στο διάγραμμα του σχήματος 2.24, στο οποίο έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες της ίσης αξονικής τροπής στη στήριξη της δοκού συναρτήσει της γεωμετρίας και της φόρτισής της. Στο ίδιο διάγραμμα έχει σχεδιαστεί η καμπύλη, που συνδέει το φορτίο αστοχίας σε κάμψη με τη γεωμετρία της δοκού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ακουστική εκπομπή του πετρώματος

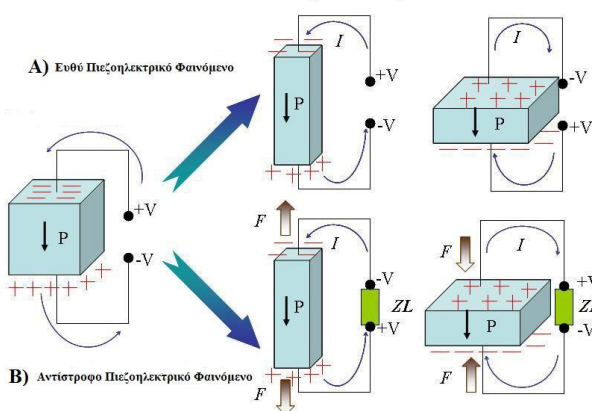
3.1 Ορισμός και προέλευση της Ακουστικής Εκπομπής

Η φόρτιση ενός ψαθυρού υλικού, όπως είναι το πέτρωμα, οδηγεί σε αυξημένη συγκέντρωση τάσεων γύρω από μικροσκοπικές ρωγμές ή ατέλειες του υλικού, οι οποίες μπορεί να είναι μικρές θραύσεις ή όρια των κόκκων. Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων, που αποτελεί ένα δείκτη της έντασης που επικρατεί γύρω από μία μικροσκοπική ατέλεια, υπερβεί μία οριακή τιμή, η συσσωρευμένη ελαστική ενέργεια απελευθερώνεται απότομα, ανάλογα με την ψαθυρότητα του υλικού και το ποσοστό της ελαστικής παραμόρφωσης σε σχέση με την πλαστική στην περιοχή της αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων. Η απελευθερούμενη ενέργεια διαδίδεται στο πέτρωμα με την μορφή ελαστικών κυμάτων και το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως *Ακουστική Εκπομπή* (Κουρτής, 2013).

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 (Κουρτής, 2013).

Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα, ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή.

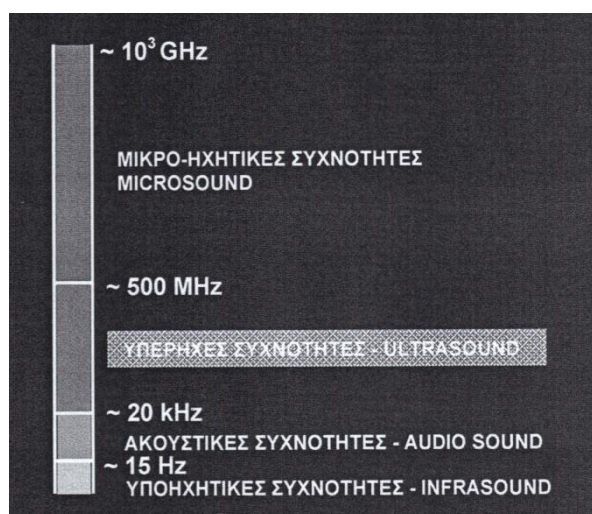
Τα κύματα της AE διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες AE (συνήθως **πιεζοηλεκτρικών** κρυστάλλων- Σχήμα 3.1) σε επαφή με αυτό, οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με τη σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα AE (Κουρτής, 2013).



Σχήμα 3.1. Α) Ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και Β) Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (Κουρτής,2013).

Η τεχνική αυτή, που σήμερα γνωρίζεται σημαντική ανάπτυξη διεθνώς, είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique, AET). Σε αντίθεση με αυτό που δηλώνει το όνομά της, τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15kHz έως μερικά MHz, δηλαδή σε συχνότητες υπερήχων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 (Κουρτής, 2013).

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 πλύν του πετρώματος (Κουρτής, 2013).



Σχήμα 3.2. Φάσμα ηχητικών συχνοτήτων («ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΜΨΗ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΔΟΚΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ», ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.), Μάιος 2012).

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** (Lavrton, 2003).

Οι πρώτες έρευνες εστιάστηκαν στη μελέτη του μηχανισμού γένεσης και διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στα πετρώματα και στη σχέση των παραμέτρων ΑΕ με τη φόρτιση ή με την παραμόρφωση του πετρώματος (Κουρτής, 2013).

Εργαστηριακές μελέτες (Lockner, 1993) συσχετίζουν τις παραμέτρους ΑΕ με την επερχόμενη θραύση ενός δοκιμίου πετρώματος, ενώ η ανάπτυξη της θραύσης μέσα στο δοκίμιο εξετάζεται με τον εντοπισμό της θέσης της πηγής των γεγονότων ΑΕ. Στην προσπάθεια αυτή βρήκαν εφαρμογή μέθοδοι της σεισμολογίας θεωρώντας ότι η γένεση των ακουστικών κυμάτων είναι αντίστοιχη με την γένεση των σεισμών σε διαφορετική κλίμακα.

Η ΑΕΤ είναι δημοφιλής και ως εργαλείο για το μη καταστρεπτικό έλεγχο (NDT) στη βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται για την επιτόπια ανίχνευση της εξέλιξης των ρωγμών και τον έλεγχο ασφαλείας κατασκευών (κυρίως μεταλλικών). Σημαντικό ρόλο στην αυξανόμενη αποδοχή και χρήση της ΑΕΤ στην έρευνα και στη βιομηχανία

έχει η ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής και των τεχνικών καταγραφής, ανάλυσης και επεξεργασίας με H/Y (Κουρτής, 2013).

Στη μηχανική πετρωμάτων η ΑΕΤ έχει εφαρμοσθεί σε δύο κυρίως πεδία:

- Στη μελέτη του μηχανισμού θραύσης των πετρωμάτων, με την ανάλυση των παραμέτρων ΑΕ και τον εντοπισμό της πηγής της ΑΕ, και
- Στην μελέτη της εντατικής κατάστασης του επί τόπου πετρώματος με χρήση του φαινομένου Kaiser.

3.2 Πλεονεκτήματα μεθόδου ακουστικής εκπομπής

Η μέθοδος της ΑΕ παρουσιάζει ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά εν συγκρίσει με άλλες μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου, όπως είναι οι Υπέρηχοι, η Ραδιογραφία με ακτίνες Χ και γ, τα διεισδυτικά υγρά και ο οπτικός έλεγχος. Η ΑΕΤ θεωρείται η μοναδική μέθοδος μεταξύ των NDT που πλανάται το ερώτημα κατά πόσον αυτή πρέπει να χαρακτηριστεί ως εντελώς μη καταστρεπτική ή όχι, δεδομένου ότι αστοχίες του υλικού είναι αναγκαίες για τη δοκιμή. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους NDT, η ΑΕΤ εφαρμόζεται συνήθως κατά τη φόρτιση, ενώ οι περισσότερες μέθοδοι εφαρμόζονται πριν ή μετά τη φόρτιση ενός υλικού. Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής θα πρέπει να θεωρείται ότι είναι μία 'παθητική' μη καταστρεπτική τεχνική, επειδή τα σήματα ΑΕ παράγονται από το εσωτερικό του υλικού που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή, από τη δημιουργία ή/και την ανάπτυξη των ασυνεχειών, εν αντιθέσει με άλλες μεθόδους όπως η μέθοδος των υπερήχων που χρησιμοποιεί τεχνητά παραγόμενο σήμα πηγής και ένα δέκτη και καλείται 'ενεργητική' μέθοδος (Κουρτής, 2013).

Η παρακολούθηση και καταγραφή της δοκιμής καθ'όλη τη διάρκεια της επιβαλλόμενης τάσης, χωρίς οποιαδήποτε στιγμή να σταματήσει η δοκιμή, είναι δύσκολο να επιτευχθεί από όλες τις μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Αυτό λογίζεται ως ένα πλεονέκτημα των δοκιμών ΑΕ. Οι υπερηχητικές τεχνικές ανάλυσης, για παράδειγμα, πρέπει να εφαρμόζονται σε συνδυασμό με τεχνικές σάρωσης για την ανίχνευση των ρωγμών. Αυτά συνήθως απαιτούν τη διακοπή της φόρτισης ενός υλικού. Αντίθετα, για τις ΑΕ μελέτες απαιτούνται κάτω από ευνοϊκές συνθήκες μόνο ένας αριθμός αισθητήρων για να είναι σε θέση να παρακολουθεί τη δραστηριότητα ΑΕ μίας δομής, εφόσον υπάρχει αρκετά ισχυρό σήμα για να υπερβεί ένα κατώτατο όριο που ονομάζεται επίπεδο ενεργοποίησης. Οι αισθητήρες θα πρέπει να μπορούν να στερεωθούν στην επιφάνεια της δομής για όλη την διάρκεια της δοκιμής και δεν πρέπει να μετακινηθούν για τη σάρωση του συνόλου της δομής, σημείο προς σημείο. Η πρόσβαση και στις δύο πλευρές ενός αντικειμένου, είναι απαραίτητη για όλες τις μεθόδους, που χρησιμοποιούν μέσο μετάδοσης, κάτι που δεν απαιτείται για την ΑΕΤ (Κουρτής, 2013).

Το τασικό πεδίο στο υπό εξέταση δείγμα εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη δύναμη. Όταν σε ένα υλικό ασκείται τάση, οι παραμορφώσεις ελέγχονται από τη

στατική συμπεριφορά του υλικού. Για παράδειγμα, ορισμένα από τα υλικά αντιδρούν ως γραμμικά ελαστικά, ενώ άλλα συμπεριφέρονται ως ελαστοπλαστικά. Η ελαστικότητα ενός υλικού ή ενός συστήματος, όταν αυτό παραμορφώνεται υπό την επίδραση εξωτερικής δύναμης ονομάζεται Νόμος του Hooke. Η AET ωστόσο, εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις μη (ελαστικές) παραμορφώσεις σε ένα υλικό. Ως εκ τούτου, ο σχηματισμός νέων ρωγμών και η εξέλιξη των υφιστάμενων ρωγμών ή διαδικασιών τριβής ανιχνεύεται μόνο από αυτή την μέθοδο. Τα φαινόμενα αυτά συνδέονται συχνά με την μηχανική στο εσωτερικό των πετρωμάτων ή τα θερμικά φορτία ή τις πιέσεις που εφαρμόζονται στα τοιχώματα του δείγματος. Η δοκιμή AE διεξάγεται υπό συνθήκες φόρτισης με σταθερό φορτίο ή κατά τη διάρκεια μίας μικρής αύξησης του φορτίου. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται η χρησιμότητα της για τον έλεγχο των δομών υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης για την καταγραφή μίας πιθανής διαδικασίας αστοχίας (Κουρτής, 2013).

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

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου των ακουστικών εκπομπών προστίθεται η έγκαιρη και ταχεία διάγνωση των ατελειών και ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο. Με χρήση δύο ή περισσότερων αισθητήρων, καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός της θέσης της πηγής της ακουστικής εκπομπής επί τόπου και κατά συνέπεια, της περιοχής της δομικής ατέλειας. Ο εντοπισμός θέσης βασίζεται στις αρχές της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων μέσα στα υλικά και πραγματοποιείται με μέτρηση του χρόνου άφιξης του σήματος σε κάθε αισθητήρα. Έτσι επιτυγχάνεται και ο εντοπισμός της βλάβης του υλικού ή της κατασκευής (Κουρτής, 2013).

Στα πλεονεκτήματα της AET λογίζεται η αυξημένη τάση χρησιμοποίησης της τεχνητής νοημοσύνης. Στις βάσεις δεδομένων, οι σύγχρονες μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης κατέστησαν δυνατή τη συσσώρευση εμπειρίας πολλαπλών δοκιμών σε έμπειρα συστήματα για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών (Κουρτής, 2013).

3.3 Μειονεκτήματα της ακουστικής εκπομπής

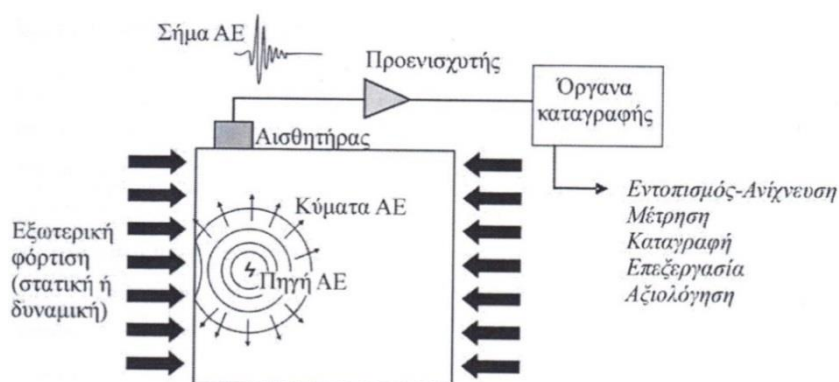
Όμως στην AET δεν απαριθμούνται μόνο πλεονεκτήματα εν συγκρίσει με τις άλλες μη καταστροφικές μεθόδους. Το γεγονός της μη απόλυτης επαναληψιμότητας μιας συγκεκριμένης δοκιμής λόγω της φύσης της πηγής σήματος συγκαταλέγεται στα

μειονεκτήματα των ΑΕΤ, π.χ. η ξαφνική και μερικές φορές τυχαία δημιουργία μίας ρωγμής. Αν και για δείγματα του ίδιου σχήματος και με ίδιες ιδιότητες του υλικού αναμένονταν παρόμοιες δραστηριότητες ΑΕ υπό την επιβολή φορτίου, αυτό δεν υφίσταται πάντα. Υλικά με διάσπαρτες ανομοιογένειες μίας συγκεκριμένης διάστασης, όπως το σκυρόδεμα, δεν θα εξάγουν παρόμοια αποτελέσματα ΑΕ σε υλικά με διάσπαρτες ανομοιογένειες μιας συγκεκριμένης διάστασης εάν το μήκος κύματος των σημάτων είναι ένα παρόμοιο μέγεθος με τις ετερογένειες. Από τα παραπάνω φανερώνεται η αναγκαιότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών ακουστικής εκπομπής με άλλες μεθόδους δοκιμών, όπως χρησιμοποιώντας μεθόδους οπτικού ελέγχου επιφανειακών ατελειών ή υπερηχογράφημα, χρήση ακτίνων-X ή ραντάρ (Κουρτής, 2013).

Ένα άλλο σημείο αναφοράς είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται από μία ακουστική εκπομπή. Συγκρίνοντας τα σήματα των ΑΕ που χρησιμοποιούνται ως πρόδρομοι αστοχίας με τα σήματα των υπερήχων διαπιστώνεται ότι καταγράφονται αρκετά μικρότερα μεγέθη, γι' αυτό απαιτείται η χρήση πολύ πιο ευαίσθητων αισθητήρων και πιο αξιόπιστων ενισχυτών και προενισχυτών. Με την χρήση των παραπάνω ελαχιστοποιούνται προβλήματα όπως η επίδραση του περιβαλλοντικού θορύβου, η εξασθένηση των σημάτων και το πιθανό αποτέλεσμα του χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο. Απαιτούνται εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων για την ανίχνευση των ακουστικών εκπομπών (Κουρτής, 2013).

3.4 Σήματα ακουστικής εκπομπής

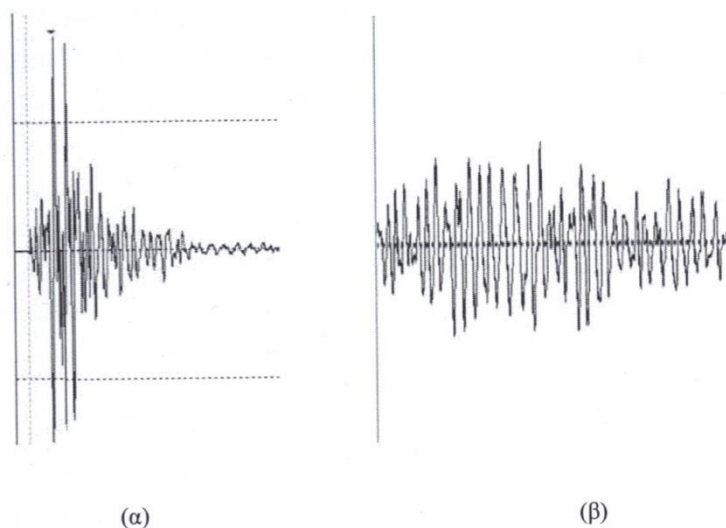
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.3) εικονίζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ. Ένα γεγονός ΑΕ στην πηγή προκαλεί απελευθέρωση ενέργειας η οποία διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα αυτό διαδίδεται μέχρι τα όρια του σώματος και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).



Σχήμα 3.3. Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

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, εξασθένηση, 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 («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

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 σήματά τους επικαλύπτονται και συνδυάζονται ώστε να σχηματίσουν σήματα συνεχούς μορφής. Το σχήμα 3.4 δίνει ένα τυπικό παράδειγμα των δύο τύπων σημάτων ΑΕ («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).



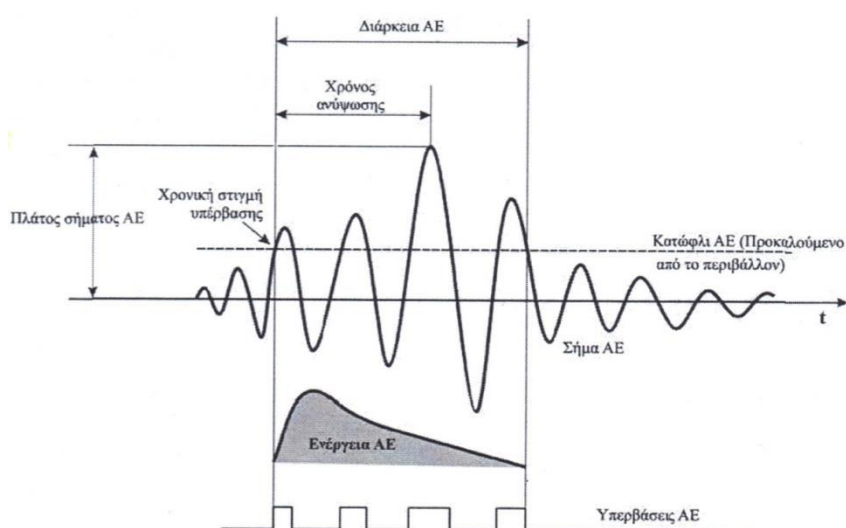
Σχήμα 3.4. (α) Τυπική μορφή κρουστικού σήματος ΑΕ, (β) Τυπική μορφή συνεχούς σήματος ΑΕ («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

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) («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

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 («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

3.5 Παράμετροι ακουστικής εκπομπής

Οι κύριες παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα σήμα ΑΕ κρουστικού τύπου (Σχήμα 3.5), είναι το πλάτος του σήματος (amplitude), ο χρόνος ανύψωσης (rise time) και η διάρκεια του σήματος (duration). Η χρονική στιγμή όπου το σήμα ΑΕ υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι ονομάζεται χρόνος άφιξης (arrival time) και απαιτείται για τον υπολογισμό της θέσης της πηγής του γεγονότος ΑΕ. 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 χρόνου άφιξης έως τη χρονική στιγμή μέγιστου πλάτους ονομάζεται χρόνος ανύψωσης (rise time) («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).



Σχήμα 3.5. Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα προκύπτοντα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Σύμφωνα με τους Grosse και Ohtsu η ερμηνεία των σημαντικότερων παραμέτρων μίας ακουστικής εκπομπής είναι η εξής:

- **Κτύπος (Hit):** Όταν το σήμα – γεγονός ΑΕ υπερβεί το κατώφλι και προκαλεί σε ένα σύστημα καναλιών να καταγράψει ένα κτύπο, μία κυματομορφή.
- **Απαριθμήσεις (Counts):** Ο αριθμός των φορών που καταγράφεται μία υπέρβαση του κατωφλίου κατά τη διάρκεια ενός σήματος, κτύπου.

- **Πλάτος σήματος AE (Amplitude):** Η μέγιστη τιμή (peak) κάθε καταγεγραμμένου γεγονότος εκφρασμένη σε decibel (dB). Το πλάτος είναι στενά συνδεδεμένο με το μέγεθος της πηγής.
- **Διάρκεια (Duration):** Ένα χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που προκλήθηκε ένα σήμα AE (κυματομορφή) και του χρόνου της εξαφάνισής του. Η διάρκεια εκφράζεται σε ms, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της πηγής και το φιλτράρισμα του θορύβου.
- **Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time):** Ο χρόνος μεταξύ της στιγμής όπου το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μέγιστου πλάτους.
- **Ενέργεια AE (Energy):** Γενικά ορίζεται ως το τετράγωνο του πλάτους του γεγονότος. Η ενέργεια προτιμάται για να ερμηνεύσει το μέγεθος της εκδήλωσης πηγής διότι είναι στενά συνδεδεμένη με το πλάτος, καθώς και τη διάρκεια, και εξαρτάται λιγότερο από την τάση κατωφλίου και τις συχνότητες λειτουργίας (Grosse and Ohtsu, 2008).

Άλλες παράμετροι που αξίζει να σημειωθούν είναι (Κουρτής,2013):

- **Περίοδος (T):** Ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών μεγίστων (peaks) του γεγονότος.
- **Κατώφλι (Threshold):** Όριο τάσης πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα.
- **Συμβάν (Event):** Τοπική αλλαγή εντός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή.
- **Τιμή RA (RA Value):** Είναι υπολογιζόμενο μέγεθος και προέρχεται από τον λόγο του χρόνου ανύψωσης προς το πλάτος. Μας δείχνει το αντίστροφο της κλίσης στην AE κυματομορφή με μονάδες (ms/V).
- **Συσσωρευμένη ενέργεια:** Το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.
- **Απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο (Counts to peak):** Ο αριθμός των απαριθμήσεων σε ένα κτύπο μέχρι να καταγραφεί το μέγιστο πλάτος.
- **Ρυθμός ενέργειας (ER):** Το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται ανά μονάδα χρόνου.
- **Ενεργοποίηση (AE) (Activation):** Η εκδήλωση AE λόγω εφαρμογής αιτίου (Stimulus) όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα κ.λ.π.
- **Δραστηριότητα (AE) (Activity):** Μέτρηση της ποσότητας εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας, των γεγονότων.
- **Event Data Set:** Η συλλογή αριθμών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός γεγονότος, σύμφωνα με την επεξεργασία δεδομένων που αναγνωρίζει ότι ένα ξεχωριστό γεγονός μπορεί να παράγει περισσότερους από ένα χτύπους.
- **Hit Data Set:** Η ανίχνευση/διαδικασία εντοπισμού και μέτρησης ενός σήματος AE σε ένα κανάλι.

- **Hit Definition Time (HDT):** Ορίζεται ο μέγιστος χρόνος διάρκειας ενός σήματος ώστε να αποφεύγεται η καταγραφή των ανακλάσεων του.
- **Hit Location Time (HLT):** Είναι ο χρόνος που θα πρέπει να αναμένει το σύστημα μέχρι να ξεκινήσει την καινούργια καταγραφή.
- **Peak Definition Time (PDT):** Καθορίζει το μέγιστο χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του σήματος.
- **Parametric Inputs:** Περιβαλλοντικές μεταβλητές (π.χ. φορτίο, πίεση, θερμοκρασία) που μπορούν να μετρηθούν και να αποθηκευτούν ως μέρος της περιγραφής των σημάτων AE.
- **Συχνότητα (Frequency):** Για ένα ταλαντευόμενο σήμα ή διεργασία, ο αριθμός των κύκλων που συμβαίνουν στην μονάδα του χρόνου.
- **Μέση συχνότητα (Average frequency):** Μετρούμενο μέγεθος από τον λόγο των 'απαριθμήσεων' προς τη διάρκεια και χρησιμοποιείται όταν το σήμα της κυματομορφής είναι πρακτικά δύσκολο να χρησιμοποιηθεί.
- **Θόρυβος (Noise):** Μη σχετικές ενδείξεις, σήματα παραγόμενα από αιτίες διαφορετικές από αυτές τις AE, ή από πηγές AE που δεν έχουν σχέση με το σκοπό της δοκιμής.
- **Σήμα AE (Signal):** Το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μορφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας).
- **Περιγραφή σήματος (Signal Description):** Το αποτέλεσμα της διαδικασίας (μία ψηφιακή αριθμητική περιγραφή του σήματος AE ή/και του περιβαλλοντικού του πλαισίου).
- **Χαρακτηριστικά σήματος (Signal features):** Μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος AE, όπως το πλάτος, ενέργεια σήματος AE, διάρκεια, counts και χρόνος ανύψωσης.
- **Ισχύς σήματος (Signal strength):** Η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνεύσιμου σήματος AE. Επίσης γνωστό ως σχετική ενέργεια (relative energy), MARSE και ισχύς σήματος.
- **Φαινόμενο Kaiser (Kaiser effect):** Η απουσία ανιχνεύσιμης ακουστικής εκπομπής σε ένα σταθερό επίπεδο ευαισθησίας, έως ότου γίνει υπέρβαση των προηγούμενα εφαρμοσθέντων επιπέδων φόρτισης.
- **Φαινόμενο Felicity (Felicity effect):** Η παρουσία ανιχνεύσιμων ακουστικών εκπομπών σε ένα σταθερό επίπεδο ευαισθησίας, ενώ το επίπεδο φόρτισης είναι χαμηλότερο από εκείνο που εφαρμοζόταν προηγουμένως.
- **Αναλογία Felicity (Felicity ratio):** Η αναλογία της εφαρμοζόμενης τάσης που παρατηρούμε την εμφάνιση του φαινομένου προς την προηγούμενη μέγιστη τάση.

3.6 Θόρυβος και εξασθένιση

Για να είναι επιτυχημένος ένας έλεγχος με τη μέθοδο της AE, η δυνατότητα ανίχνευσης των σημάτων που μας ενδιαφέρουν, που βρίσκονται πάνω από την συχνότητα θορύβου, έχει πρωταρχικό ρόλο. Χρησιμοποιώντας αισθητήρες υψηλής

ευαισθησίας αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχίας της μελέτης. Για να εξαλειφθεί ο θόρυβος, πρέπει να είναι γνωστή η προέλευση του. Υπάρχουν δύο κατηγορίες πηγών θορύβου, ο ηλεκτρομαγνητικός και ο μηχανικός (Κουρτής,2013).

Στην κατηγορία της ηλεκτρομαγνητικής πηγής θορύβου ανήκει:

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

Στην κατηγορία των πηγών μηχανικού θορύβου υπάγονται:

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

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

Άλλοι μέθοδοι για την απαλοιφή του θορύβου είναι:

- Η χρήση ειδικών φίλτρων για τις συχνότητες.
- Κατάλληλη γείωση του συστήματος.
- Έλεγχος του επιβαλλόμενου φορτίου του συστήματος.

Εκτός από τον θόρυβο, η ανιχνευσιμότητα ενός σήματος επηρεάζεται από την εξασθένηση του κύματος κατά τη διάδοσή του. Η εξασθένηση αναφέρεται στην μείωση του πλάτους του κύματος κατά τη διάδοσή του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δυσκολότερη ανίχνευση των πηγών σήματος ΑΕ.

Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί που επηρεάζουν την εξασθένηση είναι:

- ❖ Η γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο. Λόγω γεωμετρικής εξάπλωσης το πλάτος φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης.

- ❖ Οι απώλειες ενέργειας και η απόσβεση στο μέσο διάδοσης. Αντίστοιχα λόγω απώλειας ενέργειας το πλάτος φθίνει εκθετικά με την απόσταση από την πηγή.

Στις εργαστηριακές δοκιμές η εξασθένηση λόγω απόσβεσης και γεωμετρικής εξάπλωσης δεν περιορίζει σημαντικά την ανιχνευσιμότητα των σημάτων ΑΕ λόγω των περιορισμένων διαστάσεων των δοκιμίων.

3.7 Ιδιότητες κυμάτων ακουστικής εκπομπής

Το αρχικό παραγόμενο σήμα από μία πηγή ακουστικής εκπομπής είναι ένας κρουστικός παλμός. Όμως το κύμα που ανιχνεύεται από τους αισθητήρες έχει πολύπλοκη μορφή. Αυτό οφείλεται σε φαινόμενα διάδοσης του κύματος. Τέτοια κυματικά φαινόμενα που συμμετέχει ένας παλμός ΑΕ είναι (Κουρτής,2013):

- Η ταχύτητα διάδοσης.
- Η πολυμορφία των ελαστικών κυμάτων.
- Η σκέδαση (Scattering).
- Η διασκόρπιση (dispersion).
- Η συμβολή.
- Η ανάκλαση και η διάθλαση.

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων εξαρτάται κυρίως από το είδος του κύματος (π.χ. εάν είναι εγκάρσιο ή διαμήκες) από τις ελαστικές ιδιότητες του πετρώματος και την πυκνότητα, ρ . Οι ταχύτητες διάδοσης υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους (Κουρτής,2013):

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (3.1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (3.2)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.3)$$

Όπου V_P = ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος, V_S = ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιου κύματος, E =μέτρο ελαστικότητας, ν =λόγος Poisson, K =μέτρο ελαστικής συστολής, G =μέτρο διάτμησης.

Στον παρακάτω πίνακα (Σχήμα 3.6), δίνονται ενδεικτικές τιμές των ταχυτήτων διάδοσης του ήχου σε ορισμένα πετρώματα:

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

Σχήμα 3.6. Ενδεικτικές τιμές των ταχυτήτων διάδοσης του ήχου σε διάφορα πετρώματα.

Σε γενικές γραμμές μία τυπική πηγή AE/MS εκπέμπει διαφόρων ειδών κύματα. Αυτά είναι τα εγκάρσια, τα διαμήκη, τα εσωτερικά και τα επιφανειακά. Σε κάθε περίπτωση τα διαφορετικά ειδών κύματα μεταφέρονται στο ίδιο μέσο και έχει σαν αποτέλεσμα την συμβολή τους (Κουρτής, 2013).

Συμβολή κυμάτων είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δύο ή περισσότερα κύματα συναντιούνται στο ίδιο σημείο ενός ελαστικού μέσου, προστίθενται γεωμετρικά (διανυσματικά), με αποτέλεσμα τη μεταβολή του πλάτους κύματος. Αυτή η μεταβολή του πλάτους μπορεί να είναι ενισχυτική ή καταστρεπτική (Hardy, 2003).

Τα εσωτερικά κύματα που παράγει μία πηγή διακρίνονται σε P-κύματα (διαμήκη-Primary) και σε S-κύματα (εγκάρσια-Secondary), τα οποία είναι δευτερεύοντα και διαδίδονται σε ελαστικά μέσα. Τα σεισμικά P και S κύματα από σεισμό με μικρό εστιακό βάθος έχουν την τάση φθάνοντας στην επιφάνεια να μετασχηματίζονται σε κύματα που ταξιδεύουν επιφανειακά και η συμβολή τους έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία των Rayleigh και Love (Κουρτής, 2013).

Τα κύματα Rayleigh είναι κύματα πίεσης και ελαστικής παραμόρφωσης ταυτόχρονα, το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος του μέσου διάδοσης και

χαρακτηρίζονται από τη μικρή απόσβεση της ενέργειας που μεταφέρουν. Είναι δύσκολη η διάκριση των κυμάτων S, P, Rayleigh, Love και γίνεται βάσει της ταχύτητάς τους, με ταχύτερο το P-κύμα, μετά τα S και Love, ενώ τελευταία καταφθάνουν στον αισθητήρα τα κύματα Rayleigh (Κουρτής,2013).

Σε ένα πολυκρυσταλλικό υλικό όπως είναι το πέτρωμα, ένα φαινόμενο γνωστό ως **σκέδαση**, συμβαίνει όταν το μήκος κυμάτος του τασικού κύματος γίνεται συγκρίσιμο με το μέγεθος κόκκου (Κουρτής,2013):

$$d \approx \lambda \text{ με } \lambda = cf \text{ (3.4)}$$

Όπου, d η μέση διάμετρος κόκκου, λ είναι το μήκος κύματος, c είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος και f η συχνότητα.

Επειδή $d \approx \lambda$ ο κόκκος παρουσιάζεται ως εμπόδιο στο ελαστικό κύμα, με αποτέλεσμα την παραγωγή κυμάτων προς διάφορες κατευθύνσεις με μειωμένη ενέργεια. Η σκέδαση σε εργαστηριακού τύπου μελέτες μπορεί να είναι σημαντική για γεγονότα ΑΕ υψηλών συχνότητων. Το ποσοστό ενέργειας που χάνεται κατά τη σκέδαση στο ελαστικό μέσο εξαρτάται από τα υλικά και την γεωμετρία του μέσου διάδοσης (Κουρτής,2013).

Διασκόρπιση ορίζεται το φαινόμενο που σχετίζει την κυκλική συχνότητα του κύματος με το διάνυσμα διάδοσής του. Αν ο λόγος τους παραμένει σταθερός τότε το μέσο δεν επιβάλλει διασκόρπιση στα ελαστικά κύματα, χωρίς να υφίσταται εξάρτηση της ταχύτητας από την συχνότητα του κύματος. Αν ο λόγος τους δεν είναι σταθερός, που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση, τότε το κύμα αλλάζει μορφή στο χώρο μετά από οποιαδήποτε χρονικό διάστημα. Οι επιδράσεις της διασκόρπισης είναι σημαντικές σε δομές όπως λεπτές πλάκες, σε πλοία με λεπτά τοιχώματα (Κουρτής,2013).

Διάθλαση ονομάζεται το φαινόμενο της εκτροπής της ευθύγραμμης τροχιάς διάδοσης του ελαστικού κύματος λόγω διαφοράς της πυκνότητας του ελαστικού μέσου (Κουρτής,2013).

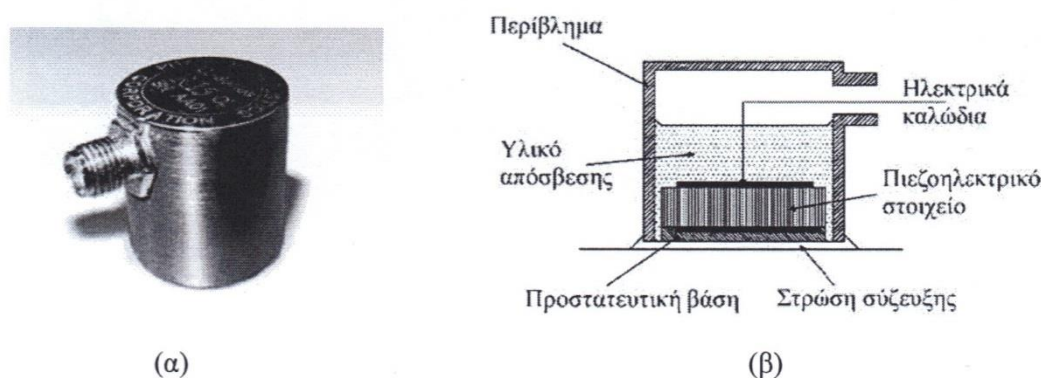
Οι ανακλάσεις στα όρια των κόκκων και στις διεπιφάνειες είναι ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται στα σήματα των ακουστικών εκπομπών καθώς παρεμβάλλονται στην κατεύθυνση των ηχητικών κυμάτων. Μετά τις ανακλάσεις το σήμα φτάνει στους εγκατεστημένους μορφοτροπείς, με το P-κύμα πρώτο και τα ανακλώμενα κύματα αργότερα λόγω μικρότερης ταχύτητας. Ωστόσο υπάρχει η πιθανότητα τα μεταγενέστερα πρωταρχικά σήματα ΑΕ να είναι περισσότερο μολυσμένα από δευτερογενείς συνιστώσες σήματος. Αυτές οι συνιστώσες είναι δύσκολο να διαχωριστούν χρησιμοποιώντας τους απλούς μορφοτροπείς (Κουρτής,2013).

3.8 Συστήματα παρακολούθησης ακουστικής εκπομπής

3.8.1 Αισθητήρες και προενισχυτές

Η ευαισθησία και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του αισθητήρα είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου κατά περίπτωση αισθητήρα σε ένα σύστημα παρακολούθησης ΑΕ. Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες σήμερα είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Πρόκειται για 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 στην 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 δίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7. (α) Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της PAC, (β) κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Hardy, 2003).

Τα σύγχρονα συστήματα ΑΕ, οι αισθητήρες, τα καλώδια, τα ηλεκτρικά κυκλώματα κτλ. περιλαμβάνουν θωράκιση για προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

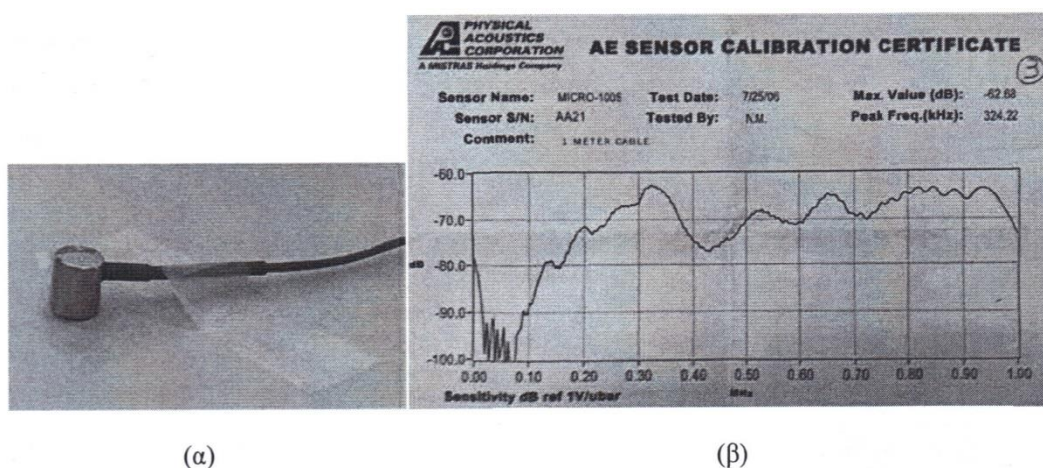
Οι συχνότητες απόκρισης των αισθητήρων είναι τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται ο θόρυβος από το περιβάλλον. Σχετικά με τα ηλεκτρονικά τους κυκλώματα οι αισθητήρες μπορεί να είναι απλοί ή διαφορικοί. Ένας απλός αισθητήρας περιέχει ένα κρύσταλλο και είναι γενικά ευάλωτος στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Αντίθετα, ο διαφορικός αισθητήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να εξαλείφεται ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος. Συνίσταται από δύο κρυστάλλους αντίθετης πολικότητας και συνεπώς το ανιχνεύόμενο κύμα ΑΕ παράγει δύο ηλεκτρικά σήματα

αντίθετης πολικότητας («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

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, η EMI των ηλεκτρικών κυκλωμάτων παράγουν σήματα της ίδιας πολικότητας και συνεπώς, λαμβάνοντας ως αποτέλεσμα τη διαφορά των δύο σημάτων, εξουδετερώνονται στον προενισχυτή («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα δείχνεται συνήθως σε διάγραμμα απόκρισης (Σχήμα 3.8) συναρτήσει της συχνότητας (τάση εξόδου σε σχέση με την συχνότητα).



Σχήμα 3.8. (α) Ένας εκ των αισθητήρων micro 100s που διαθέτει το εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές και (β) Διάγραμμα απόκρισης (dB/συχνότητα) του συγκεκριμένου αισθητήρα («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Οι προενισχυτές (σχήμα 3.9) έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύρηστο για περαιτέρω επεξεργασία. Η ενίσχυση του πλάτους του σήματος AE είναι λογαριθμική σύμφωνα με την σχέση (Physical Acoustics Corporation PAC,2005):

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_{max}}{1 \mu\text{Volt}} \right) - (\text{Ενίσχυση σήματος από τον ενισχυτή σε dB}) \quad (3.5)$$

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 το θόρυβο του αισθητήρα καθορίζει την ακρίβεια λήψης ενός σήματος AE («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Στα σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης AE το ελάχιστο σήμα που μπορεί να ανιχνευτεί (πάνω από τον ηλεκτρονικό θόρυβο), είναι της τάξης των 4μV στην έξοδο

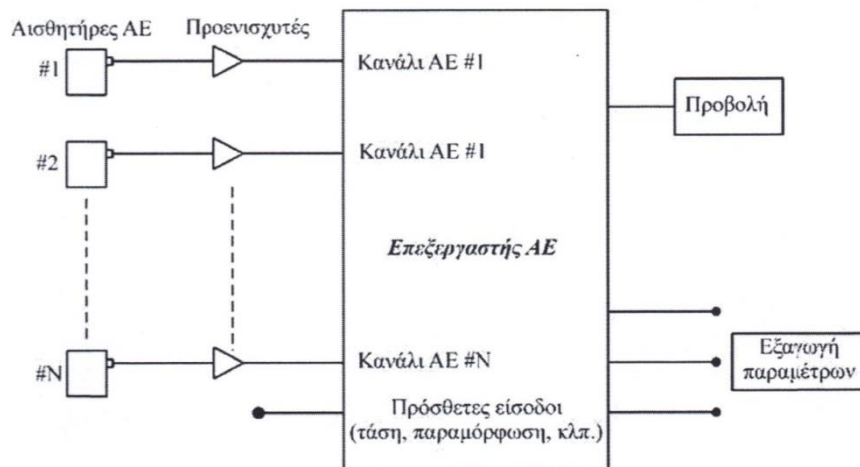
ενός τυπικού μορφοτροπέα. Το πλάτος ενός σήματος ΑΕ εκφράζεται συνήθως σε dB, όπου 1μV αντιστοιχεί σε 0dB και 100mV σε 100dB.



Σχήμα 3.9. Ένας εκ των προενισχυτών 2/4/6 που διαθέτει το εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

3.8.2 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 στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10. Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

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 απεριθμήσεων (counts), το χρόνο ανύψωσης (rise time), τη συνολική διάρκεια (duration) κλπ.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.11) παρουσιάζεται μία κάρτα οκτώ (8) καναλιών PCI-8 καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων ΑΕ της PAC (Physical Acoustics Corporation).



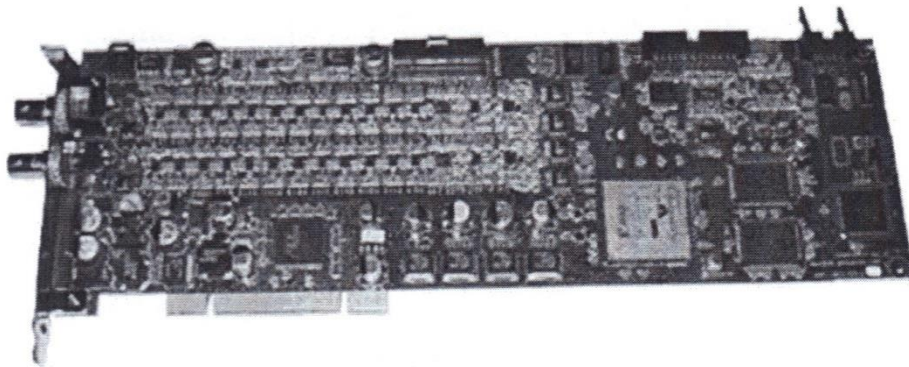
Σχήμα 3.11. Ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ οκτώ (8) καναλιών PCI-8, διαθέσιμο στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.»), Μάϊος 2012).

Τα δεδομένα ανιχνεύονται και καταγράφονται σε ένα προηγμένο ψηφιακό-παραμετρικό σύστημα παρακολούθησης. Τα 8 κανάλια ΑΕ είναι υψηλής ταχύτητας απόκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 132 MegaBytes/sec) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανύψωσης, υπερβάσεις κατωφλιού, συνολικές υπερβάσεις κατωφλιού, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κλπ.), ενώ το συνοδευτικό λογισμικό έχει τη δυνατότητα προβολής παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τα 8 κανάλια ΑΕ το σύστημα διαθέτει δύο επιπλέον εισόδους (παραμετρικές εισοδοί) για την περίπτωση εισαγωγής σήματος από εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα από ένα κελί φορτίου. Αυτές οι παραμετρικές εισοδοί, που καταγράφονται ταυτόχρονα με την καταγραφή των δεδομένων ΑΕ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση των παραμέτρων ΑΕ με άλλες παραμέτρους, όπως π.χ. η εφαρμοζόμενη τάση σε ένα δοκίμιο ή η παραμόρφωση του. Ακολούθως παρατίθενται οι προδιαγραφές του συστήματος παρακολούθησης PCI-8 («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.»), Μάϊος 2012):

- Ψηφιακή κάρτα (Digital Signal Processing) υψηλής απόδοσης.
- Σύνθετη αντίσταση (impedance) 50Ω.
- Ενσωματωμένο σύστημα αυτόματου ελέγχου των αισθητήρων AST (Auto Sensor Test).
- Απόκριση συχνότητας 1kHz-400kHz.
- Όταν η ενίσχυση (gain) της κύριας μονάδας ρυθμίζεται στα 0dB, 6dB, 12dB τότε η ελάχιστη τάση κατωφλιού επιλέγεται αντίστοιχα στα 26dB, 20dB, 16dB.

- Μέγιστο πλάτος καταγεγραμμένου σήματος 100dB.
- Οχτώ (8) κανάλια ΑΕ υψηλής πιστότητας εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανόδου, υπερβάσεις κατωφλιού, συνολικές υπερβάσεις κατωφλιού, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κτλ.), προβολή παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο.
- Τέσσερα (4) φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass) (1kHz, 5kHz, 20kHz, 100kHz) και 4 φίλτρα διαχωρισμού υψηλών συχνοτήτων (Low Pass) (10kHz, 40kHz, 100kHz, 400kHz) για κάθε κανάλι, ελεγχόμενα από το software.
- Μετατροπέας A/D 16 bit (Digital Analog Converter – DAC), με μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 1 MSPS ανά κανάλι.
- Έως δύο (2) αναλογικά παραμετρικά κανάλια τα οποία μπορούν να αξιολογήσουν επιπλέον παραμετρικά στοιχεία όπως η παραμόρφωση, το φορτίο, η θερμοκρασία κτλ.

Αντίστοιχο ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ είναι και το PCI-2 (σχήμα 3.12), οι προδιαγραφές του οποίου είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 3.12. Ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ δύο (2) καναλιών PCI-2, διαθέσιμο στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.»), Μάϊος 2012).

- Ψηφιακή κάρτα (Digital Signal Processing) υψηλής απόδοσης.
- Σύνθετη αντίσταση (impedance) 50 ή 1000Ω (jumper selectable).
- Ενσωματωμένο σύστημα αυτόματου ελέγχου των αισθητήρων AST (Auto Sensor Test).
- Απόκριση συχνότητας 3kHz-3MHz.
- Ενίσχυση (gain) της κύριας μονάδας, η οποία ρυθμίζεται στα 0dB και 6dB.
- Μέγιστο πλάτος καταγεγραμμένου σήματος 100dB.
- Δύο κανάλια ΑΕ υψηλής ταχύτητας ανάκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 10 MSPS) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων.
- Τέσσερα (4) φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass) (1kHz, 20kHz, 100kHz, 200kHz) και 6 φίλτρα διαχωρισμού υψηλών συχνοτήτων

(Low Pass) (100kHz, 200kHz, 400kHz, 1MHz, 2MHz, 3MHz) για κάθε κανάλι, ελεγχόμενα από το software.

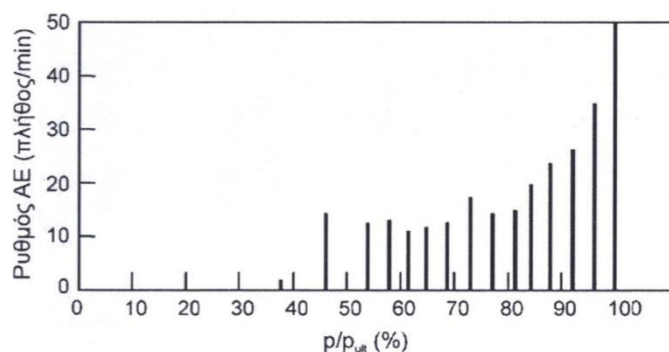
- Μετατροπέας A/D 18 bit (Digital Analog Converter – DAC), με μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 40 MSPS ανά κανάλι.
- Έως δύο (2) αναλογικά παραμετρικά κανάλια τα οποία μπορούν να αξιολογήσουν επιπλέον παραμετρικά στοιχεία όπως η παραμόρφωση, το φορτίο, η θερμοκρασία κτλ.

3.9 Εφαρμογές ακουστικής εκπομπής στη μηχανική πετρωμάτων

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 και το συχνοτικό περιεχόμενο των σημάτων ΑΕ («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

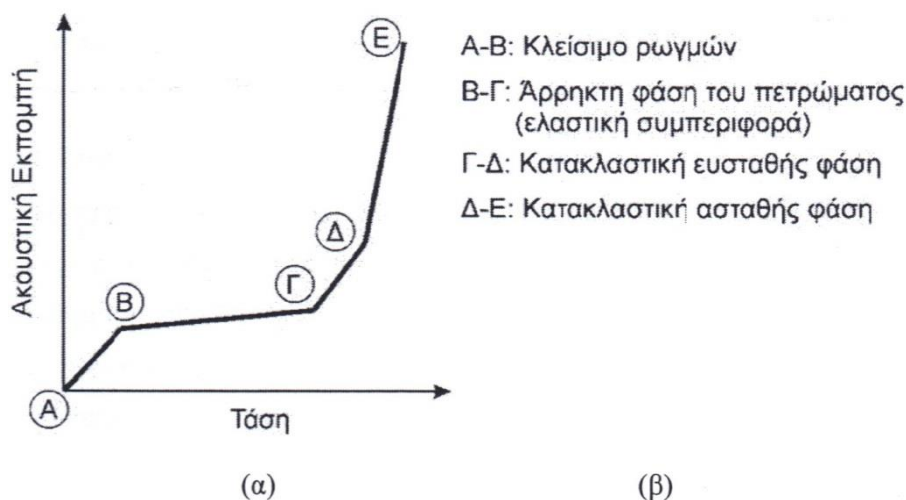
Παράλληλα, η μέθοδος είναι ελκυστική και για επιτόπιες έρευνες, όπως π.χ. για την εκτίμηση της ποιότητας της βραχομάζας ή την πρόβλεψη μίας επικείμενης αστοχίας, για τον εντοπισμό ιδιαίτερα φορτισμένων περιοχών όπως επίσης και στη μελέτη των εκτινάξεων βράχων (rockbursts) σε βαθιά μεταλλεία και σήραγγες («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Από τις πρώτες μελέτες της ΑΕ στα πετρώματα έγινε προσπάθεια να προσδιορισθούν εμπειρικές σχέσεις μεταξύ της παρατηρηθείσας δραστηριότητας ΑΕ και των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Οι Obert και Duvall (1945) διεξάγοντας δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε διάφορα πετρώματα (νεφρίτη, ασβεστόλιθο, γρανίτη, κερατόλιθο, σχιστόλιθο, ψαμμίτη, επιδοτίτη και δολομίτη) έδειξαν ότι υπό θλιπτική φόρτιση ο ρυθμός ΑΕ αυξάνεται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.13) παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χονδρόκοκκο γρανίτη («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).



Σχήμα 3.13. Μεταβολή του ρυθμού ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου p (ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας p_{ult}) σε χονδρόκοκκο γρανίτη (Obert και Duvall, 1945) («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Σημαντική δουλειά στον τομέα αυτό έχει γίνει από τον Mogi, ο οποίος δίνει το διάγραμμα στο παρακάτω σχήμα 3.14 ως 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 («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

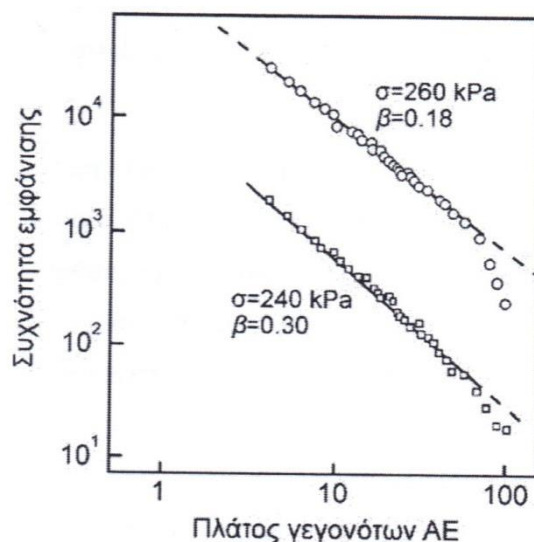


Σχήμα 3.14. (α) Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής ΑΕ και (β) συσχέτισή της με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Boyce et al., 1981) («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

Πειράματα των Boyce et al. σε διάφορους τύπους πετρωμάτων έδειξαν ότι αν και ισχύει η γενική σχέση του διαγράμματος αυτού, εντούτοις διακρίνονται τέσσερις επί μέρους τύποι απόκρισης στους οποίους οι φάσεις Α-Β, Β-Γ, Γ-Δ και Δ-Ε είναι λιγότερο ή περισσότερο εμφανείς. Νεώτερες έρευνες (Eberhart 1998, Eberhart et al. 1999, Rudajev et al. 2000 κλπ.) επιβεβαιώνουν αυτές τις παρατηρήσεις.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σχέση του πλάτους των σημάτων ΑΕ με τη συχνότητα εμφάνισής τους. Σύμφωνα με πειράματα ερευνητών, που αναφέρονται από τον Hardy (2003) και εικονίζονται στο σχήμα 3.15, έδειξαν ότι η σχέση αυτή, όπως προέκυψε από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε γρανίτη, προσομοιώνεται με μία ευθεία σε λογαριθμικούς άξονες πλάτους ΑΕ-συχνότητας εμφάνισης.

Γεγονότα ΑΕ 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 ΑΕ έχουν μεγαλύτερο πλάτος («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).



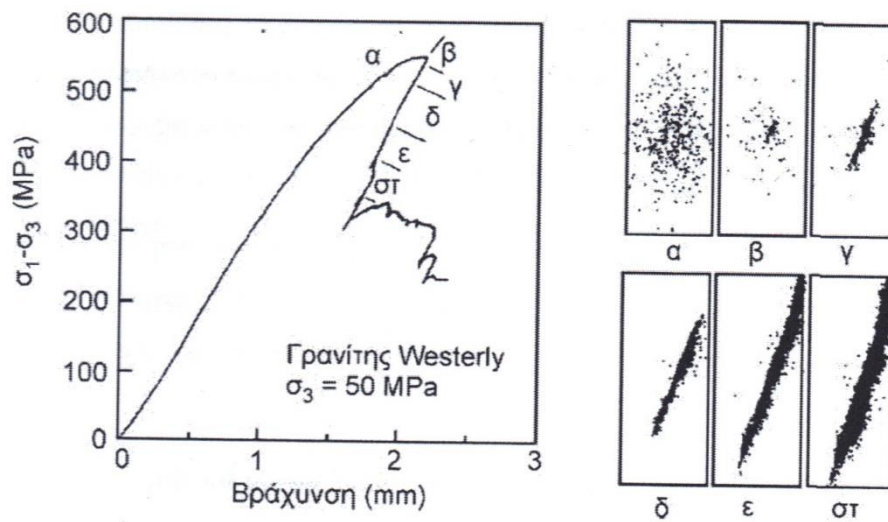
Σχήμα 3.15. Διάγραμμα συχνότητας συναρτήσει του πλάτους για το γρανίτη Westerly υπό μονοαξονική θλίψη (Hardy, 2003) («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Η δραστηριότητα ΑΕ έχει επίσης συσχετισθεί με τη χρονικά μεταβαλλόμενη ανελαστική παραμόρφωση (ερπυσμό) του πετρώματος (Hardy 2003), όπου διαπιστώθηκε μία σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της ερπυστικής παραμόρφωσης και της ΑΕ.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, με τη χρήση περισσότερων του ενός αισθητήρων προσαρμοσμένων σε ένα δοκίμιο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης της πηγής των σημάτων ΑΕ. Εντοπισμός των γεγονότων ΑΕ κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης δοκιμίων πετρωμάτων από τα πρώτα στάδια της φόρτισης έως την αστοχία αναφέρεται σε σημαντικό αριθμό δημοσιεύσεων στη διεθνή βιβλιογραφία (Lockner, 1993).

Τα πρώτα πειράματα στα τέλη της δεκαετίας του 1960 περιελάμβαναν την επιλεκτική καταγραφή και επεξεργασία σημάτων για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Ο σύγχρονος εξοπλισμός καταγραφής και επεξεργασίας ΑΕ επιτρέπει τον εντοπισμό μεγάλου πλήθους γεγονότων ΑΕ σε ρυθμούς από 100 έως 1000 γεγονότα ανά δευτερόλεπτο.

Επειδή η ΑΕ συνδέεται άμεσα με το σχηματισμό και τη διάδοση μικρορωγμών στα πετρώματα παρέχει μία ιδανική μέθοδο για την μελέτη της αστοχίας τους. Η ψαθυρή θραύση των κρυσταλλικών πετρωμάτων συνοδεύεται από απότομη απώλεια της αντοχής τους, με αποτέλεσμα σε εύκαμπτες συσκευές φόρτισης να παρατηρείται ασταθής και βίαιη θραύση. Έτσι, ο ρυθμός της ΑΕ στη φάση της αστοχίας του δοκιμίου είναι τόσο υψηλός, ώστε είναι σχεδόν αδύνατη η παρακολούθηση και ο εντοπισμός των ανεξάρτητων γεγονότων ΑΕ. Για την παρακολούθηση της αστοχίας στη φάση αυτή είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός ελεγχόμενου συστήματος φόρτισης στο οποίο ο ρυθμός της ΑΕ να διατηρείται σταθερός κατά τη φόρτιση (Lockner, 1993). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ανιχνευθεί η ανάπτυξη της αστοχίας κατά τη φόρτιση και να συσχετισθεί με τον εντοπισμό των γεγονότων ΑΕ. Σχετικά πειράματα του Lockner έδωσαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16. Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης ΑΕ σε δοκίμιο γρανίτη Westerly διαμέτρου 76,2 mm υπό τριαξονική θλίψη με πλευρική πίεση $\sigma_3=50\text{MPa}$ και ελεγχόμενο ρυθμό εκπομπής ΑΕ (Lockner, 1993) («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Οι Zietlow και Labuz (1998), εξάλλου, αναφέρουν πειράματα κάμψης σε δοκίμια γρανίτη, ψαμμίτη και χαλαζίτη, όπου εφαρμόστηκε εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ για τον προσδιορισμό των περιοχών μικρορωγμάτωσης κατά την δοκιμή. Τα γεγονότα ΑΕ εντοπίστηκαν σε ποσοστό του φορτίου αστοχίας μεγαλύτερου του 50% (ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος), ενώ η συγκέντρωση των γεγονότων ΑΕ σε ακραία φορτία ήταν ενδεικτική της αστοχίας.

Σημαντικό πεδίο εφαρμογής της ΑΕ επί τόπου αποτελούν τα υπόγεια μεταλλεία μεγάλου βάθους, όπου υφίσταται ο κίνδυνος της βίαιης εκτίναξης των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Σε αυτό το πρόβλημα εστιάστηκαν και οι πρώτες έρευνες των Obert και Duvall, όπως προαναφέρθηκε («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

Επιπλέον στα υπόγεια μεταλλεία υπάρχει η διαρκής ανάγκη της πρόβλεψης ενδεχόμενων αστοχιών της οροφής έτσι ώστε η έκθεση των εργαζομένων και του εξοπλισμού στον κίνδυνο να ελαχιστοποιείται. Για τον σκοπό αυτό έχουν υιοθετηθεί διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης της συμπεριφοράς του πετρώματος, με πιο συνήθη μέθοδο αυτή της μέτρησης της κάμψης της οροφής.

Η εφαρμογή της ΑΕ ως μέσου πρόβλεψης καταπτώσεων της οροφής των υπόγειων μεταλλευτικών εκσκαφών ερευνάται σήμερα με ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι Iannacchione et al. (2000,2005) αναφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής της ΑΕ για την επιτυχή πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστολίθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακορυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάιος 2012).

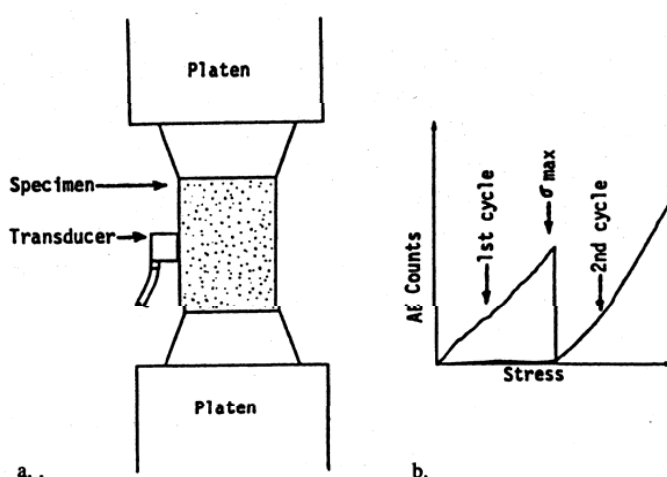
Σε όλες τις περιπτώσεις η ακουστική δραστηριότητα αυξήθηκε πριν από την επικείμενη αστοχία. Καθοριστικός παράγοντας στην επιτυχή πρόβλεψη είναι η μορφή της αστοχίας (προοδευτική ή επεισοδιακή) και το εάν δίνει πρόδρομα φαινόμενα ή όχι. Οι Choudhury et al. (2004) αναφέρουν την εφαρμογή της ΑΕ για την μελέτη της ευστάθειας προστατευτικού στύλου οροφής σε υπόγειο μεταλλείο χαλκού.

Ο Mukhopadhyay (2001) συσχέτισε την ποιότητα της βραχομάζας με την εξασθένιση των ακουστικών κυμάτων κατά τη κρουστικοπεριστροφική διάτρηση σε μέτωπα υπογείων στοών εξετάζοντας παράλληλα και την επίδραση της κοχλίωσης. Άλλες αναφορές επί του θέματος δίνονται από τον Hardy (2003).

Άλλες αναφορές της AE in situ έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρηνή, στη μελέτη της ζώνης διαταραχής στο υπόγειο εργαστήριο UCL του Καναδά, στη μελέτη της ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

3.10 Φαινόμενο Kaiser

Στο σχήμα 3.17α ένα δοκίμιο πετρώματος υποβάλλεται σε δύο κύκλους φόρτισης. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης η τάση εφαρμόζεται με σταθερό ρυθμό μέχρι μια τιμή σ_{max} και στη συνέχεια μηδενίζεται. Στον δεύτερο κύκλο, η τάση αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό μέχρι μία τιμή $\sigma'_{max} > \sigma_{max}$. Κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου, παρακολουθείται η δραστηριότητα AE και καταγράφονται οι υπερβάσεις (ή τα γεγονότα) συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης. Στο σχήμα 3.17β παρουσιάζονται οι συνολικές υπερβάσεις κατά την διάρκεια των δύο κύκλων φόρτισης. Είναι εμφανές ότι καταγράφεται δραστηριότητα AE καθόλη την διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου φόρτισης δεν παρατηρείται καμία δραστηριότητα έως ότου το επιβαλλόμενο φορτίο ξεπεράσει τη μέγιστη τάση (σ_{max}) του πρώτου κύκλου φόρτισης. Κατά συνέπεια, το φαινόμενο Kaiser μπορεί να οριστεί ως η απουσία ανιχνεύσιμης AE μέχρι την υπέρβαση του μέγιστου εντατικού επιπέδου της προηγούμενης διαδρομής φόρτισης του υλικού (http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/uploads/4/3/A03_Seismic_Signals.pdf).



Σχήμα 3.17. Απλοποιημένη εργαστηριακή διάταξη (α) και χαρακτηριστικά αποτελέσματα του φαινομένου Kaiser (β) (Hardy, 2003) (http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/uploads/4/3/A03_Seismic_Signals.pdf).

3.11 Ακουστική εκπομπή πετρώματος κατά τη μονοαξονική θλίψη

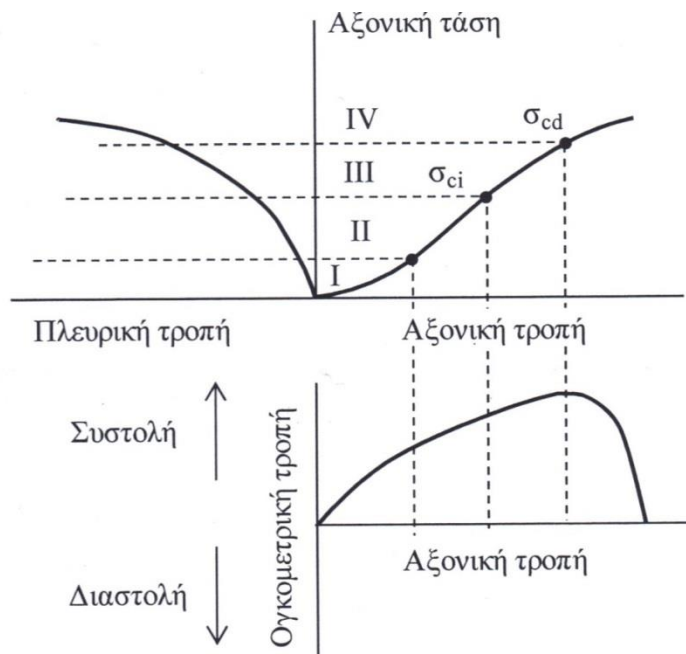
Στην κλασική δοκιμή μονοαξονικής θλίψης το φορτίο αυξάνει μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Κατά τη φόρτιση μετρούνται οι παραμορφώσεις του δοκιμίου και σχεδιάζεται το διάγραμμα τάσης-τροπής, ενώ συγχρόνως δύνανται να μετρώνται οι ακουστικές εκπομπές για την παρακολούθηση της δημιουργίας και εξέλιξης των ρωγματώσεων. Στο σχήμα 3.18, δίνεται το τυπικό διάγραμμα τάσης-τροπής ενός ψαθυρού πετρώματος σε θλίψη, στο οποίο διακρίνονται γενικά τέσσερα στάδια («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012):

- (I) Κλείσιμο των πόρων και των προϋπάρχουσων μικρορωγμών του πετρώματος,
- (II) γραμμικά ελαστική συμπεριφορά
- (III) κατακλαστική ευσταθής φάση
- (IV) Κατακλαστική ασταθής φάση

Τα στάδια I και II αποτελούν την άρρηκτη φάση του πετρώματος και αποτελούν συνήθως το 30 έως 70% της διαδρομής της φόρτισης. Σε χαμηλού πορώδους πετρώματα το στάδιο I είναι πολύ μικρό και συχνά δεν διακρίνεται στις καμπύλες τάσης-τροπής («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

Η έναρξη της κατακλαστικής ευσταθούς φάσης (Στάδιο III) συμβαίνει όταν επιτευχθεί η τάση έναρξης ρωγμάτωσης σ_{ci} . Στο στάδιο αυτό η καμπύλη τάσης-τροπής αποκλίνει από τη γραμμικά ελαστική συμπεριφορά δεικνύοντας ανάπτυξη εσωτερικής μικρορωγμάτωσης. Η ανάπτυξη της μικρορωγμάτωσης στο στάδιο αυτό είναι ευσταθής, εφόσον οποιαδήποτε επέκταση ή δημιουργία νέας ρωγμής απαιτεί την αύξηση της επιβαλλόμενης φόρτισης. Επιπλέον δεν παρατηρείται χρονικά εξαρτώμενη ανάπτυξη μικρορωγμών («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

Το σημείο της διαδρομής φόρτισης όπου παρατηρείται μείωση της ογκομετρικής τροπής σηματοδοτεί την έναρξη του σταδίου IV. Στο στάδιο αυτό η διασταλτική συμπεριφορά του πετρώματος λόγω σχηματισμού και ανάπτυξης μικρορωγμών υπερσχύει της ελαστικής συμπίεσης λόγω της αυξανόμενης φόρτισης. Η τάση στην οποία ξεκινάει το στάδιο IV αναφέρεται ως τάση ζημίας ρωγμάτωσης σ_{cd} . Φόρτιση του πετρώματος πέραν της σ_{cd} προκαλεί χρονικά εξαρτώμενη αύξηση της ζημίας στο πέτρωμα, και οδηγεί το δοκίμιο σε αστοχία ακόμη και υπό σταθερή φόρτιση. Το στάδιο IV ακολουθείται από τη φάση αστοχίας του πετρώματος, που καλύπτει μόνο ένα πολύ μικρό διάστημα της διαδρομής της φόρτισης («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).



Σχήμα 3.18. Τυπικό διάγραμμα τάσης-τροπής για ένα ψαθυρό πέτρωμα σε θλίψη («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

Στο σχήμα 3.19 δίνεται το διάγραμμα συσχέτισης της ακουστικής εκπομπής του πετρώματος και των σταδίων I-IV της διαδρομής φόρτισης κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Στο διάγραμμα αυτό σχεδιάζεται η αθροιστική καμπύλη ΑΕ του πετρώματος συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης. Η ακουστική δραστηριότητα στο τμήμα ΑΒ, που αντιστοιχεί στο στάδιο I της διαδρομής φόρτισης, οφείλεται τόσο στις εσωτερικές διεργασίες που συμβαίνουν εντός του δοκιμίου, όσο και στη θραύση τυχόν μικρών ανωμαλιών της επιφάνειας του δοκιμίου κατά την αρχική εφαρμογή του θλιπτικού φορτίου. Στο τμήμα ΒΓ (στάδιο II) η μη ελαστική παραμόρφωση εντός του δοκιμίου σχεδόν απουσιάζει και συνεπώς η συχνότητα των ακουστικών γεγονότων είναι μικρή καθώς αυτά συμβαίνουν σποραδικά. Στο τμήμα ΓΔ (στάδιο III), η ακουστική εκπομπή είναι αξιοσημείωτη και η συχνότητα των ακουστικών γεγονότων αυξάνεται με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Τέλος στο τμήμα ΔΕ, πριν τη θράυση του δοκιμίου, η συχνότητα των ακουστικών εκπομπών αυξάνεται ραγδαία («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).



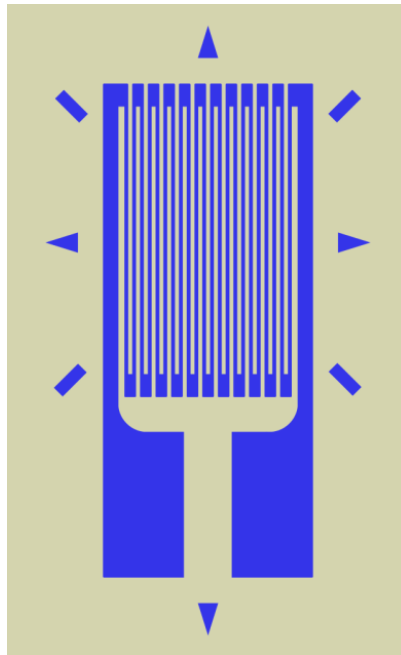
Σχήμα 3.19. Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής του πετρώματος και συσχέτισή της με τη διαδικασία καταστροφής κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Στη μηχανική των πετρωμάτων το φαινόμενο της ΑΕ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ηλεκτρικά στοιχεία πειραματικής διάταξης – Συνδεσμολογία

4.1 Μεταλλικά Strain gages

Ένα strain gauge (ή strain gage) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για να μετρήσει παραμορφώσεις σε ένα αντικείμενο. Επινοήθηκε από τους Edward E. Simmons και Arthur C. Ruge το 1938. Ο πιο κοινός τύπος ενός strain gauge είναι αυτό που αποτελείται από ένα εύκαμπτο μονωτικό υπόστρωμα που υποστηρίζει ένα συγκεκριμένο μοτίβο μεταλλικού φύλλου, συνήθως χαλκού, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).



Σχήμα 4.1.Τυπική μορφή ενός μεταλλικού strain gauge.Το strain gauge είναι πολύ πιο ευαίσθητο στην κατακόρυφη διεύθυνση από ότι στην οριζόντια.Τα σημάδια μακριά από την ενεργό περιοχή βοηθούν στην ευθυγράμμιση του κατά την διάρκεια της εγκατάστασης (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Όταν το αντικείμενο παραμορφώνεται, το φύλλο χαλκού επίσης παραμορφώνεται, με αποτέλεσμα την αλλαγή της ηλεκτρικής του αντίστασης. Η αντίσταση αυτή μετράται χρησιμοποιώντας μια γέφυρα Wheatstone, και σχετίζεται με την παραμόρφωση με μια ποσότητα που είναι γνωστή ως **συντελεστής μέτρησης (gauge factor - GF)** (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Ο συντελεστής **GF** ορίζεται ως (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge):

$$GF = \frac{\Delta R/R_G}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

Όπου:

ΔR = η αλλαγή στην αντίσταση του τροπόμετρου, λόγω της παραμόρφωσης,

R_G = η αντίσταση του (μη-παραμορφωμένου) τροπόμετρου, και

ε = η παραμόρφωση που υφίσταται το τροπόμετρο.

Για τα μεταλλικά τροπόμετρα, ο παράγοντας αυτός είναι περίπου 2.

Για μόνο ένα ενεργό τροπόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης και τρεις αντιστάσεις σε μία γέφυρα Wheatstone, η τάση εξόδου της γέφυρας προκύπτει ως (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge):

$$V = \frac{BV \cdot GF \cdot \varepsilon}{4} \quad (4.2)$$

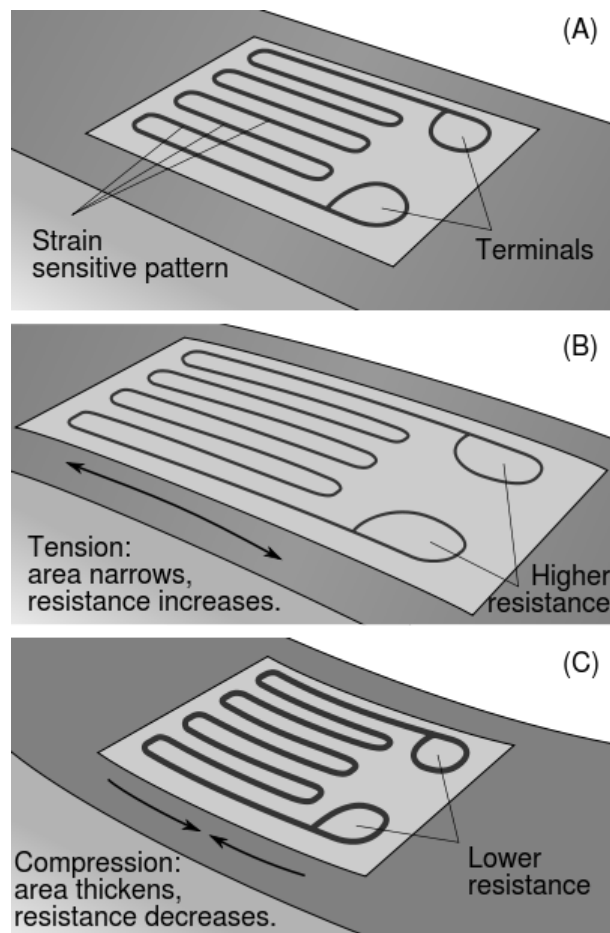
Όπου BV (Bridge Voltage), είναι η τάση της γέφυρας.

Τα μεταλλικά τροπόμετρα έχουν ενεργή επιφάνεια 2-10 mm². Με προσεκτική τοποθέτηση, το κατάλληλο τροπόμετρο και την κατάλληλη κόλλα, μπορούν να μετρηθούν και παραμορφώσεις τουλάχιστον έως 10% (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Ένα strain gauge χρησιμοποιεί την φυσική λειτουργία της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της εξάρτησής της με την γεωμετρία του αγωγού. Όταν ένας αγωγός παραμορφώνεται μέσα στα όρια της ελαστικότητας, έτσι ώστε να μην σπάει ή να παραμορφώνεται μόνιμα, θα γίνει στενότερος και μακρύτερος, αλλαγές που αυξάνουν την ηλεκτρική του αντίσταση από άκρη σε άκρη (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Αντιστρόφως, όταν ένας αγωγός συμπιέζεται, έτσι ώστε να μην λυγίζει, θα διευρυνθεί και θα βραχυνθεί, αλλαγές που επιφέρουν μείωση της αντίστασης από άκρη σε άκρη. Από την μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση του strain gauge, η ποσότητα της εφαρμοζόμενης τάσης, μπορεί να υπολογιστεί (σχήμα 4.2) (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Ένα τυπικό strain gauge αποτελείται από ένα μακρύ, λεπτό αγωγίμο φύλλο χαλκού διατεταγμένο σε ένα μοτίβο ζιγκ-ζαγκ παράλληλων γραμμών, έτσι ώστε μία μικρή εφαρμογή τάσης στην κατεύθυνση του προσανατολισμού των παράλληλων γραμμών να έχει ως αποτέλεσμα σε μια αύξηση πολλαπλασιαστικά της μετρούμενης παραμόρφωσης, σε σχέση με το ωφέλιμο μήκος της αγωγίμης επιφάνειας στη συστοιχία των αγωγίμων γραμμών (άρα μία αύξηση πολλαπλασιαστικά στην αντίσταση), που θα παρατηρούνταν με ένα μονό ευθύγραμμο μεταλλικό αγωγό (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).



Σχήμα 4.2. Οπτικοποίηση του μηχανισμού λειτουργίας σε ένα strain gauge, τοποθετημένο σε μία δοκό κάτω από κάμψη (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Μία τάση εφαρμόζεται στις εισόδους του δικτύου των strain gauges, και μια τάση διαβάζεται από τις αντίστοιχες εξόδους. Τυπικές τιμές τάσης εισόδου είναι 5V ή 12V και η τάση εξόδου μετράται σε millivolts (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Τα μεταλλικά strain gauges χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις. Διαφορετικές εφαρμογές απαιτούν διαφορετικές προϋποθέσεις για το strain gauge. Στις περισσότερες των περιπτώσεων αυτό που έχει σημασία είναι ο προσανατολισμός του (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Τα τροπόμετρα που είναι τοποθετημένα σε ένα κελί φόρτισης, θα έπρεπε να παραμείνουν σταθερά για χρόνια, αν όχι για δεκαετίες, ενώ αυτά που χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν απόκριση σε ένα δυναμικό πείραμα, πρέπει να μείνουν τοποθετημένα στο αντικείμενο για μερικές μέρες, να ενεργοποιούνται για μερικές ώρες και να λειτουργούν για μερικά δευτερόλεπτα (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Τα τροπόμετρα είναι τοποθετημένα στο υπόστρωμα με την βοήθεια μιας ειδικής κόλλας. Ο τύπος της κόλλας εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο ζωής του μετρούμενου συστήματος (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Για βραχυπρόθεσμες μετρήσεις (μέχρι και μερικές εβδομάδες) η κυανοακρυλική κόλλα είναι η κατάλληλη, ενώ για μακροπρόθεσμες μετρήσεις χρησιμοποιείται εποξική κόλλα (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Συνήθως η εποξική κόλλα απαιτεί ωρίμανση σε υψηλή θερμοκρασία (στους 80-100° C). Η προετοιμασία επίσης της επιφάνειας που θα τοποθετηθεί το τροπόμετρο είναι μέγιστης σημασίας. Η επιφάνεια πρέπει να είναι ομαλή, λεία (χρησιμοποιείται γυαλόχαρτο), να μην περιέχει λάδι (χρησιμοποιούνται ειδικά διαλύματα), ενώ τα ίχνη των διαλυμάτων πρέπει να αφαιρούνται και το τροπόμετρο να κολλάται αμέσως για να αποφευχθεί οξείδωση της επιφάνειας τοποθέτησης. Αν αυτά τα βήματα δεν προηγηθούν το τροπόμετρο δεν θα δώσει αξιόπιστες μετρήσεις (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Η βασική αρχή λειτουργίας του strain gage, βασίζεται στην σχέση μεταξύ παραμόρφωσης και αντίστασης ηλεκτρικών αγωγών, που ανακαλύφθηκε από τους Wheatstone και Thomson (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Κάθε ηλεκτρικός αγωγός αλλάζει την αντίστασή του με την άσκηση επ'αυτού μηχανικού φορτίου, π.χ. μέσω εφελκυστικών ή θλιπτικών δυνάμεων. Η αλλαγή στην αντίσταση οφείλεται εν μέρει στην παραμόρφωση του αγωγού και εν μέρει στην αλλαγή της αντίστασης Q του αγωγίμου υλικού, ως αποτέλεσμα στην αλλαγή της μικροδομής (https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge).

Αυτή η διαδικασία περιγράφεται από την σχέση

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{dQ}{Q} \quad (4.4)$$

Όπου:

R = η ηλεκτρική αντίσταση,

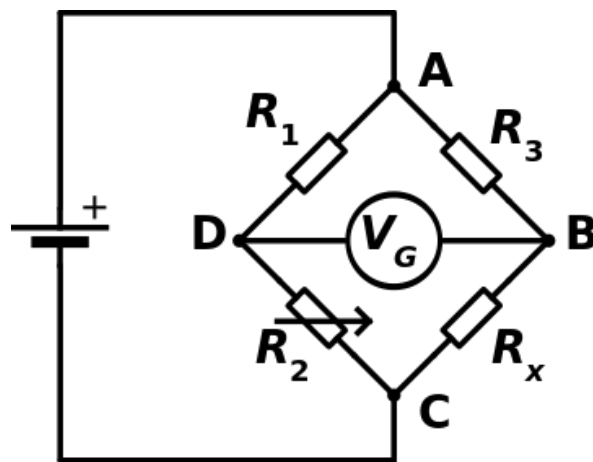
ε = η παραμόρφωση,

ν = ο λόγος του Poisson,

Q = η αντίσταση

4.2 Γέφυρα Wheatstone

Μία γέφυρα Wheatstone είναι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί μια άγνωστη ηλεκτρική αντίσταση, εξισορροπώντας δύο βρόχους του κυκλώματος, ο ένας εκ των οποίων περιέχει την άγνωστη αντίσταση R_x , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.3 (https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge)



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα κυκλώματος γέφυρας Wheatstone (https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge).

Το κύριο πλεονέκτημα της γέφυρας Wheatstone είναι η ικανότητά της να παρέχει εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις (σε αντίθεση με έναν διαιρέτη τάσης). Η λειτουργία της είναι παρόμοια με το ποτενσιόμετρο. Επινοήθηκε από τον Samuel Hunter Christie το 1833 και βελτιώθηκε από τον Sir Charles Wheatstone το 1843. Ο αρχικός σκοπός της γέφυρας ήταν για να γίνουν εδαφικές αναλύσεις και μετέπειτα σύγκριση τους (https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge).

Στο παραπάνω διάγραμμα, R_x είναι η άγνωστη αντίσταση που θέλουμε να μετρήσουμε, R_1 , R_2 και R_3 είναι αντιστάσεις γνωστής αντίστασης και η αντίσταση R_2 είναι ρυθμιζόμενη. Αν το πηλίκο των δύο αντιστάσεων στον βρόχο με τις γνωστές αντιστάσεις (R_2/R_1) ισούται με το πηλίκο των άλλων δύο στον βρόχο που περιέχει την άγνωστη αντίσταση (R_x/R_3), τότε η τάση μεταξύ των κόμβων (B και D) θα είναι μηδέν και δεν θα διαρρεύσει ρεύμα μέσω του γαλβανόμετρου V_g . Αν η γέφυρα είναι μη ισορροπημένη, η φορά του ρεύματος υποδεικνύει αν η R_2 είναι πολύ υψηλή ή χαμηλή. Η R_2 αλλάζει μέχρι να μην διαρρέει ρεύμα διαμέσου του γαλβανόμετρου, οπότε είναι μηδέν (https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge).

Η ανίχνευση μηδενικού ρεύματος με το γαλβανόμετρο μπορεί να γίνει με εξαιρετική ακρίβεια. Οπότε, αν τις αντιστάσεις R_1, R_2, R_3 τις γνωρίζουμε τότε θα ξέρουμε με εξαιρετική ακρίβεια την αντίσταση R_x . Πολύ μικρές αλλαγές στην R_x διακόπτουν την ισορροπία και είναι εύκολα ανιχνεύσιμες (https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge).

Στο σημείο της ισορροπίας ισχύει:

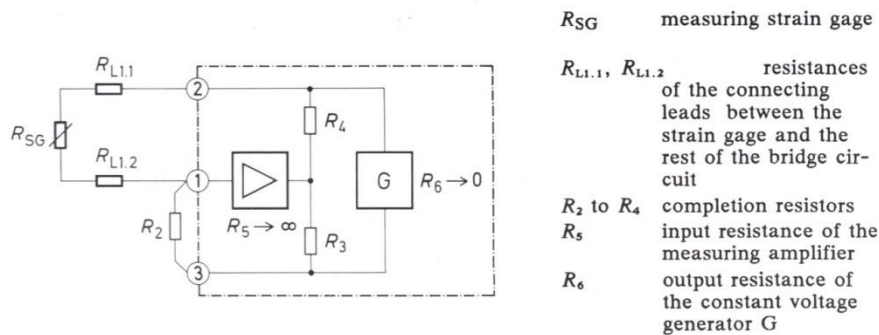
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_x}{R_3} \Rightarrow R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3 \quad (4.5)$$

Εναλλακτικά, εάν R_1, R_2 και R_3 είναι γνωστές, αλλά η R_2 δεν είναι ρυθμιζόμενη, τότε η διαφορά τάσης ή η ροή του ρεύματος διαμέσου του γαλβανόμετρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η αντίσταση R_x , χρησιμοποιώντας τους κανόνες του Kirchhoff. Όπως προαναφέρθηκε αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται ευρέως σε σύνδεση με τα τροπόμετρα, επειδή είναι γρηγορότερο να διαβαστεί η τιμή της τάσης από ένα DataLogger, παρά να ρυθμίζεται συνεχώς η αντίσταση μέχρι να μηδενιστεί η τάση (https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge).

4.3 Συνδεσμολογία strain gauges – Wheatston bridge/Η επίδραση της αντίστασης των αγωγών (Lead resistance)

4.3.1 Συνδεσμολογία ¼ (Simple quarter bridge circuit)

Ο τρόπος με τον οποίο η εσωτερική αντίσταση των αγωγών μειώνει το σήμα του strain gage εξηγείται σύμφωνα με το σχήμα 4.4. Μαζί με τους αγωγούς που το συνδέουν με τη γέφυρα το strain gage σχηματίζει τον βρόχο 1 της γέφυρας, ενώ οι σταθερές αντιστάσεις R_2 , R_3 , και R_4 , ολοκληρώνουν το κύκλωμα της γέφυρας (Hoffmann,1989).



Σχήμα 4.4. Η επίδραση των αντιστάσεων των αγωγών για συνδεσμολογία ¼ (Hoffmann,1989).

Η αντίσταση του βρόχου 1 της γέφυρας σχηματίζεται από τις ανεξάρτητες αντιστάσεις του strain gage R_{SG} , την αντίσταση εξόδου του αγωγού $R_{L1.1}$ και την αντίσταση εισόδου $R_{L1.2}$ (Hoffmann,1989).

Για μετρήσεις παραμορφώσεων με strain gage υποτίθεται ότι η μη ισορροπία της γέφυρας είναι ένα μέτρο της παραμορφώσεως όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο (Hoffmann,1989):

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{SG} \quad (4.6)$$

Η σχετική αλλαγή της αντίστασης ενός strain gage είναι ανάλογη με την παραμόρφωση (Hoffmann,1989):

$$\frac{\Delta R_{SG}}{R_{SG}} = \epsilon k \quad (4.7)$$

Στην περίπτωση του σχήματος 4.4 το κύκλωμα της γέφυρας βλέπει την αλλαγή της αντίστασης ΔR του strain gage σχετικά με την ολική αντίσταση του βρόχου 1 της γέφυρας, π.χ. μία μικρότερη σχετικά αλλαγή της αντίστασης (Hoffmann,1989):

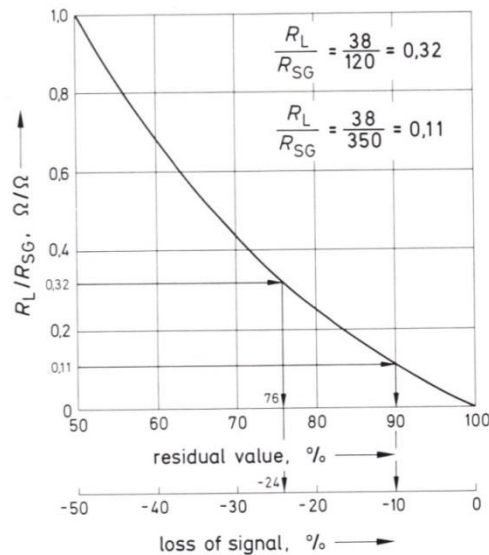
$$\frac{\Delta R_{SG}}{R_{L1.1} + R_{SG} + R_{L1.2}} < \epsilon k \quad (4.8)$$

Επομένως το μετρούμενο σήμα είναι πολύ μικρό.

Η διόρθωση του λάθους μπορεί εύκολα να διορθωθεί με την βοήθεια του διαγράμματος του σχήματος 4.5, σύμφωνα με την εξίσωση (Hoffmann,1989):

$$\varepsilon = \varepsilon_i \frac{100\%}{res. indication \%} \quad (4.9)$$

Όπου ε είναι η σωστή τιμή και ε_i είναι η υποδεικνυόμενη αρχική (λάθος) τιμή. Το ποσοστό της απομένουσας ένδειξης ή το λάθος στο σήμα μπορεί να παρθεί από το διάγραμμα του σχήματος 4.5 (Hoffmann,1989):



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα για τον προσδιορισμό της απομένουσας ένδειξης και του λάθους στο μετρούμενο σήμα, ως αποτέλεσμα των αντιστάσεων των καλωδίων (Hoffmann,1989).

Αρχικά, ο λόγος R_L/R_{SG} , σχηματίζεται και βρίσκεται στο διάγραμμα στον άξονα y. Μετέπειτα από αυτό το σημείο χαράσσεται οριζοντίως γραμμή μέχρι να τμήσει την καμπύλη, ενώ μετά χαράσσεται από αυτό το σημείο κάθετη γραμμή προς τον άξονα x μέχρι να βρούμε την εναπομείνουσα τιμή και το ποσοστό του λάθους του σήματος. Το ποσοστό της εναπομείνουσας ένδειξης μπορεί να διαβαστεί και να τοποθετηθεί στον παρονομαστή της εξίσωσης (Hoffmann,1989).

Η ενδεικνυόμενη μη διορθωμένη τιμή της μέτρησης πάντα είναι η ε_i και για την R_L η ολική αντίσταση καλωδίων σε σειρά με strain gage μέσω του βρόχου της γέφυρας. Η ακρίβεια της διόρθωσης εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια με την οποία οι αντιστάσεις των αγωγών μετρούνται (Hoffmann,1989).

Με μακρύτερα μήκη καλωδίων είναι πιθανόν ότι η ολική αντίσταση $R_{SG} + R_{L1.1} + R_{L1.2}$ του βρόχου 1 της γέφυρας να προκύψει τόσο μεγάλη ούτως ώστε η προσαρμογή που θα γίνει από τον μετρούμενο ενισχυτή να μην είναι επαρκής για την αντιστάθμιση της ισορροπίας. Η αντίσταση R_2 πρέπει τότε να ταιριάζει. Αυξάνοντας την R_2 στην ολική αντίσταση R_1 δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτα αποτελέσματα στην τελική μέτρηση (Hoffmann,1989).

Είναι επίσης δυνατόν να διορθωθεί η μετρούμενη τιμή ε_i με υπολογιστή. Για κύκλωμα $\frac{1}{4}$ ισχύει η παρακάτω εξίσωση (Hoffmann,1989):

$$\varepsilon = \varepsilon_i \frac{R_{L1.1} + R_{SG} + R_{L1.2}}{R_{SG}} \quad (4.10)$$

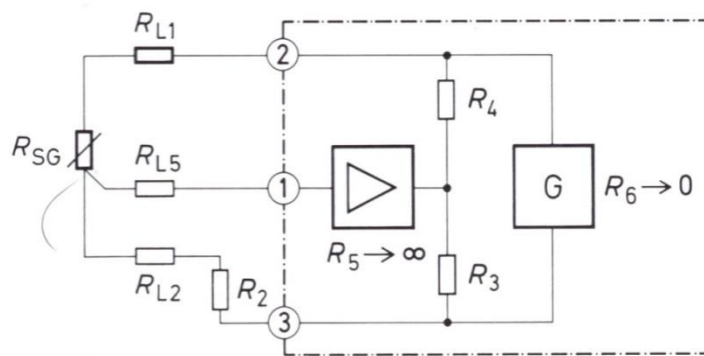
Στο σχήμα 4.5 οι αντιστάσεις που πρέπει να συμπεριληφθούν στην διόρθωση εμφανίζονται σε πυκνή δομή (heavy type). Και για τις δύο παραπάνω μεθόδους διόρθωσης οι τιμές των αντιστάσεων των αγωγών και του strain gage πρέπει να είναι γνωστές, με τις πρώτες να λαμβάνονται από μέτρηση και του strain gage από τον κατασκευαστή (Hoffmann,1989).

4.3.2 Συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ σε κύκλωμα τριών καλωδίων (Quarter bridge in a three-wire circuit)

Η συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ σε κύκλωμα τριών καλωδίων φαίνεται στο σχήμα 4.6, όπου μόνο η αντίσταση εξόδου του αγωγού είναι σε σειρά με το strain gage. Επομένως μόνο η αντίσταση R_{L1} επηρεάζει το μετρούμενο σήμα του strain gage. Η εξίσωση διόρθωσης τότε είναι (Hoffmann,1989):

$$\varepsilon = \varepsilon_i \frac{R_{SG} + R_{L1}}{R_{SG}} \quad (4.11)$$

Οι τιμές των αντιστάσεων, που φαίνονται στο σχήμα 4.6 πρέπει να υποκατασταθούν στην εξίσωση διόρθωσης (Hoffmann,1989).



Σχήμα 4.6. Επίδραση της αντίστασης καλωδίων για συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ σε κύκλωμα τριών καλωδίων (Hoffmann,1989).

Η αντίσταση του αγωγού R_{L2} βρίσκεται στον βρόχο της παθητικής γέφυρας R_2 και επομένως δεν έχει επίδραση στο μετρούμενο αποτέλεσμα (Hoffmann,1989).

Η αντίσταση R_{L5} του αγωγού σήματος μπορεί να αμεληθεί εάν η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή R_5 είναι τουλάχιστον ένα εκατομμύριο φορές η αντίσταση του strain gage. Οι σύγχρονοι ενισχυτές επιτυγχάνουν αυτό το αποτέλεσμα (Hoffmann,1989).

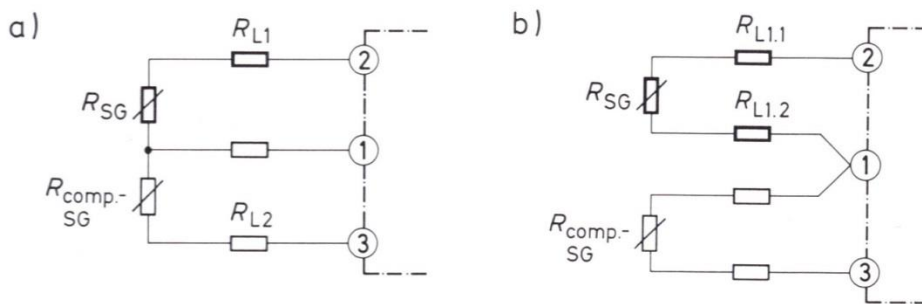
Η διόρθωση του λάθους μπορεί να γίνει και με την βοήθεια του διαγράμματος του σήματος.

4.3.3 Συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ με αντισταθμιστικά strain gages (Quarter bridge with compensating strain gage)

Το παρακάτω σχήμα 4.7 δείχνει δύο παραλλαγές της γέφυρας ενός τετάρτου με αντισταθμιστικά strain gages (Hoffmann,1989):

A) Το μετρούμενο strain gage και το αντισταθμιστικό strain gage σε κλειστή διάταξη. Η προκύπτουσα εξίσωση διόρθωσης είναι η σχέση (4.11).

B) Το μετρούμενο strain gage και το αντισταθμιστικό strain gage σε ξεχωριστή διάταξη. Η προκύπτουσα εξίσωση διόρθωσης είναι η σχέση (4.10).



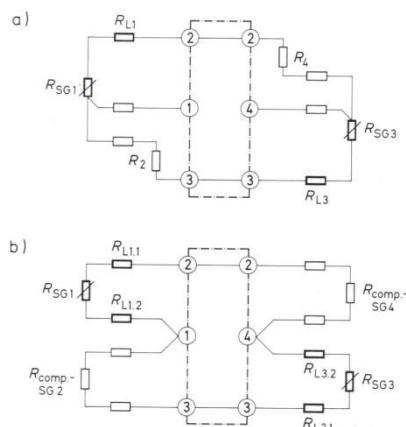
Σχήμα 4.7. Συνδεσμολογία $\frac{1}{4}$ με αντισταθμιστικά strain gages (Hoffmann,1989).

Το κύκλωμα α) χρησιμοποιείται αν το αντισταθμιστικό strain gage είναι τοποθετημένο σε κοντινή απόσταση με το μετρούμενο strain gage. Το κύκλωμα β) χρησιμοποιείται αν μεγαλύτερη απόσταση διαχωρίζει τα δύο strain gages. Επίσης χρησιμοποιείται γενικά σε εξοπλισμό πολλαπλών εισόδων αν το αντισταθμιστικό strain gage χρησιμοποιείται για πολλά μετρούμενα strain gages.

Και για τα δύο κυκλώματα η διόρθωση του λάθους μπορεί να γίνει μέσω του σχήματος 4.5 (Hoffmann,1989).

4.3.4 Συνδεσμολογία $\frac{2}{4}$ ή διαγώνιας γέφυρας (Double quarter or diagonal bridge)

Δύο παραλλαγές της γέφυρας $\frac{2}{4}$ φαίνεται στο σχήμα 4.8:



Σχήμα 4.8. Συνδεσμολογία δύο τετάρτων ή διαγώνιας γέφυρας (Hoffmann,1989).

α) Γέφυρα δύο τετάρτων με τα μετρούμενα strain gages S_{G1} και S_{G3} το καθένα σε κύκλωμα τριών καλωδίων με τις αντισταθμιστικές αντιστάσεις R_2 και R_4 . Η εξίσωση διόρθωσης είναι:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_i \frac{R_{L1} + R_{SG1} + R_{SG3} + R_{L3}}{R_{SG1} + R_{SG3}} \quad (4.12)$$

Αν τα αντισταθμιστικά strain gages σε μια διάταξη χρησιμοποιούνται στην θέση των σταθερών αντιστάσεων (παρόμοιο με το σχήμα 4.7α), τότε η ίδια εξίσωση διόρθωσης χρησιμοποιείται (Hoffmann,1989).

β) Αν τα αντισταθμιστικά strain gages χρησιμοποιούνται σε ξεχωριστή διάταξη όπως στο σχήμα 4.7β, τότε η εξίσωση διόρθωσης είναι:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_i \frac{R_{L1.1} + R_{SG1} + R_{L1.2} + R_{L3.1} + R_{SG3} + R_{L3.2}}{R_{SG1} + R_{SG3}} \quad (4.13)$$

4.3.5 Συνδεσμολογία ½ ή μισής γέφυρας (Half bridge circuit)

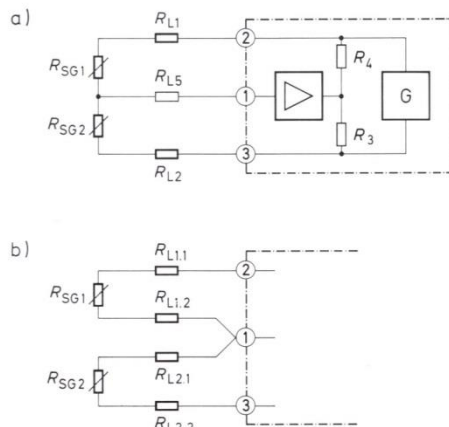
Η συνδεσμολογία ½ χρησιμοποιείται όταν το κύκλωμα περιέχει 2 strain gages υπό μέτρηση, γι'αυτό και διαφέρει με την συνδεσμολογία ¼ που περιέχει 1 strain gage υπό μέτρηση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.9 (Hoffmann,1989).

Δύο παραλλαγές έχουμε στο κύκλωμα ½. Το κύκλωμα α) χρησιμοποιείται όταν τα 2 strain gages υπό μέτρηση είναι σε κοντινή απόσταση τοποθετημένα. Η προκύπτουσα εξίσωση διόρθωσης είναι (Hoffmann,1989):

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = \varepsilon_i \frac{R_{L1} + R_{SG1} + R_{SG2} + R_{L2}}{R_{SG1} + R_{SG2}} \quad (4.14)$$

Το κύκλωμα β) χρησιμοποιείται όταν τα δύο strain gages υπό μέτρηση είναι τοποθετημένα σε μακρινή απόσταση μεταξύ τους. Η προκύπτουσα εξίσωση διόρθωσης είναι (Hoffmann,1989):

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = \varepsilon_i \frac{R_{L1.1} + R_{SG1} + R_{L1.2} + R_{L2.1} + R_{SG2} + R_{L2.2}}{R_{SG1} + R_{SG2}} \quad (4.15)$$

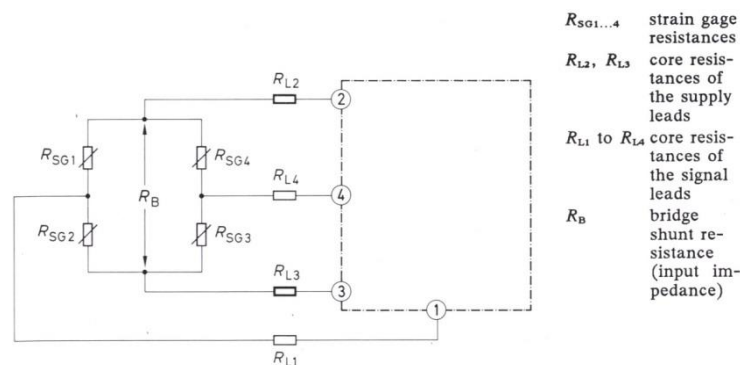


Σχήμα 4.9. Συνδεσμολογία ½ (Hoffmann,1989).

4.3.6 Συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (Full bridge circuit)

Λόγω των ευνοικών χαρακτηριστικών της – μεγάλο σήμα μέτρησης, αυτόματη αντιστάθμιση των φαινομένων παρεμβολών – η συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας είναι η διάταξη που προτιμάται για χρησιμοποίηση με μετατροπέα. Τα πλεονεκτήματά της φέρνουν ειδικά προνόμια εάν η καλωδίωση της εσωτερικής γέφυρας είναι μικρή και συμμετρική (Hoffmann,1989).

Σε αυτήν την περίπτωση, η αντίσταση των συνδεδεμένων καλωδίων είναι τόσο μικρή που είναι αμελητέα, και άρα δεν απαιτείται ειδική μεταχείριση. Αντίθετα η αντίσταση του καλωδίου μεταξύ του ενισχυτή και του μετατροπέα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, π.χ. οι δύο πυρήνες για την παροχή της γέφυρας με τις αντιστάσεις τους R_{L2} και R_{L3} , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.10) (Hoffmann,1989):



Σχήμα 4.10. Συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (Hoffmann,1989).

Η εξίσωση διόρθωσης είναι:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_i \frac{R_{L2} + R_B + R_{L3}}{R_B} \quad (4.16)$$

R_B είναι η αντίσταση διακλάδωσης της γέφυρας (αντίσταση εισόδου) (Hoffmann,1989):

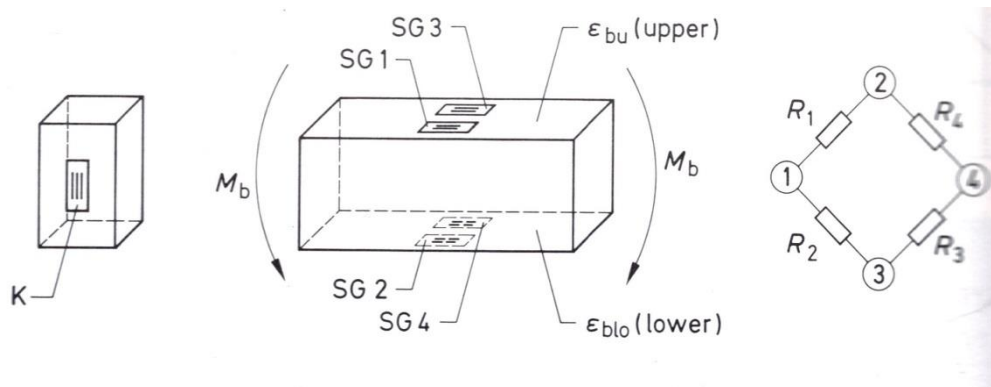
$$R_B = \frac{(R_{SG1} + R_{SG2}) \cdot (R_{SG3} + R_{SG4})}{R_{SG1} + R_{SG2} + R_{SG3} + R_{SG4}} \quad (4.17)$$

Αν όλες οι αντιστάσεις των strain gages είναι οι ίδιες, το οποίο συνήθως συμβαίνει, τότε η αντίσταση διακλάδωσης της γέφυρας είναι η ίδια με την αντίσταση του strain gage (Hoffmann,1989).

4.4 Μετρήσεις παραμορφώσεων σε καμπτόμενη δοκό

Η κάμψη παράγει μια θετική παραμόρφωση στην μία πλευρά της καμπτόμενης δοκού και μία αρνητική παραμόρφωση στην αντίθετη πλευρά της δοκού. Αν τα strain gages τοποθετηθούν αντιδιαμετρικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11, τότε οι θετικές και αρνητικές παραμορφώσεις, έχουν το ίδιο μέγεθος. Συνεπώς είναι πιθανόν να

χρησιμοποιηθούν οι ιδιότητες της γέφυρας Wheatstone για την μέτρηση των σημάτων των επιπέδων παραμορφώσεων, ή για την αντιστάθμιση των διαταραχών, όπου ως διαταραχές θεωρούνται η κανονική φόρτιση, η στρέψη και η θερμική παραμόρφωση (Hoffmann,1989).



Σχήμα 4.11. Διάταξη των strain gages στην καμπτόμενη δοκό και στο κύκλωμα της γέφυρας (Hoffmann,1989).

Όσον αφορά με την μπάρα εφελκυσμού, και οι τέσσερις βρόχοι της γέφυρας χρειάζεται να μην καταλαμβάνονται με strain gages. Τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυκλωμάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα του σχήματος 4.12.

Bridge arm	R_1	R_2	R_3	R_4	Result	Notes
Bridge equation	$\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = \epsilon_i$					1
Simple quarter bridge	SG1	R_C	R_C	R_C	$\epsilon_i = \epsilon_{bu}$	2
	SG2	R_C	R_C	R_C	$\epsilon_i = \epsilon_{blo}$	
Quarter bridge with comp. strain gage	SG1	K	R_C	R_C	$\epsilon_i = \epsilon_{bu}$	3
	SG2	K	R_C	R_C	$\epsilon_i = \epsilon_{blo}$	
Half bridge	SG1	SG2	R_C	R_C	$\epsilon_i = 2 \epsilon_b$	4
Diagonal bridge	SG1	R_C	SG3	R_C	$\epsilon_i = 2 \epsilon_{bu}$	5
	SG2	R_C	SG4	R_C	$\epsilon_i = 2 \epsilon_{blo}$	
Diagonal bridge with 2 comp. strain gages	SG1	K	SG3	K	$\epsilon_i = 2 \epsilon_{bu}$	6
	SG2	K	SG4	K	$\epsilon_i = 2 \epsilon_{blo}$	
Full bridge	SG1	SG2	SG3	SG4	$\epsilon_i = 4 \epsilon_b$	7

Σχήμα 4.12. Κυκλώματα που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε καμπτόμενη δοκό με αντιδιαμετρικά τοποθετημένα strain gages (Hoffmann,1989).

Τα strain gages πρέπει να προσανατολίζονται στην κύρια κατεύθυνση των τάσεων. Αν οι κύριες διευθύνσεις των τάσεων είναι άγνωστες (π.χ. στην υπερθετική στρέψη), τότε πρέπει να προσδιορισθούν οι κύριες τάσεις.

Παρατηρήσεις επί του πίνακα (Hoffmann,1989):

1. Πρέπει να δίνεται προσοχή στην αλλαγή προσήμου στις εξισώσεις και στο πρόσημο των παραμορφώσεων.

2. Οι υπερθετικές καμπτικές παραμορφώσεις συμβαίνουν στο αποτέλεσμα. Θερμικές παραμορφώσεις πρέπει να εξαλειφθούν με χρησιμοποίηση strain gages θερμικής αντιστάθμισης, ειδάλως εμφανίζονται ως λάθος στις μετρήσεις. Χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος για την καμπτική παραμόρφωση:

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_n = \varepsilon_i E \quad (4.18)$$

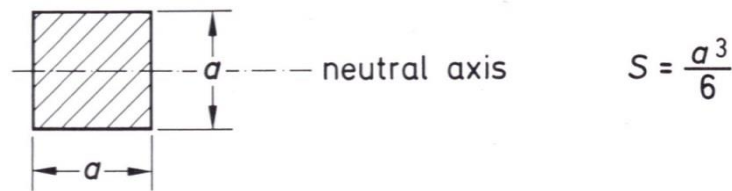
3. Η αντιστάθμιση των θερμικών παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας αντισταθμιστικά strain gages, λαμβάνεται επίσης υπόψη αν ο συντελεστής θερμικής διαστολής του υλικού διαφοροποιείται από την τυπική τιμή διαστολής του θερμικά αντισταθμιστικού strain gage, ή όταν υπερβεί το εύρος αντιστάθμισης του strain gage.
4. Οι υπερθετικές ορθές παραμορφώσεις αντισταθμίζονται. Οι θερμικές παραμορφώσεις αντισταθμίζονται στον μεγαλύτερο βαθμό. Χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος για την καμπτική τάση:

$$\sigma_b = \frac{1}{2} \varepsilon_i E \quad (4.19)$$

Η ενεργός καμπτική ροπή M_b , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$M_b = \sigma_b S \quad (4.20)$$

Όπου $S = a^3/6$, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13



Σχήμα 4.13. Τιμή παραμέτρου S , για τετράγωνες διατομές (Hoffmann,1989).

5. Οι υπερθετικές ορθές παραμορφώσεις συμβαίνουν στο αποτέλεσμα. Οι θερμικές παραμορφώσεις εξαλείφονται με τα strain gages θερμικής αντιστάθμισης, ειδάλως λαμβάνονται ως λάθη στις μετρήσεις, τότε η τάση λαμβάνεται από τον τύπο:

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_n = \frac{1}{2} \varepsilon_i E \quad (4.21)$$

6. Η αντιστάθμιση της θερμικής παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας strain gage θερμικής αντιστάθμισης λαμβάνεται εάν δεν είναι διαθέσιμο ένα κατάλληλο

strain gage θερμικής αντιστάθμισης, ή το αντισταθμιστικό του εύρος είναι ανεπαρκές.

7. Για περιπτώσεις όπως αυτή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική (με αντιδιαμετρικά τοποθετημένα strain gages), οι ορθές τάσεις αντισταθμίζονται. Οι θερμικές παραμορφώσεις αντισταθμίζονται στον μεγαλύτερο βαθμό και ο ηλεκτρονικός θόρυβος διαμέσου των εσωτερικών συνδέσεων της γέφυρας, καταστέλλονται σε μεγάλο βαθμό. Αυτό είναι κατάλληλο για την μέτρηση των καμπτικών ροπών και δυνάμεων όταν το μήκος του μοχλοβραχίονα είναι γνωστό. Χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

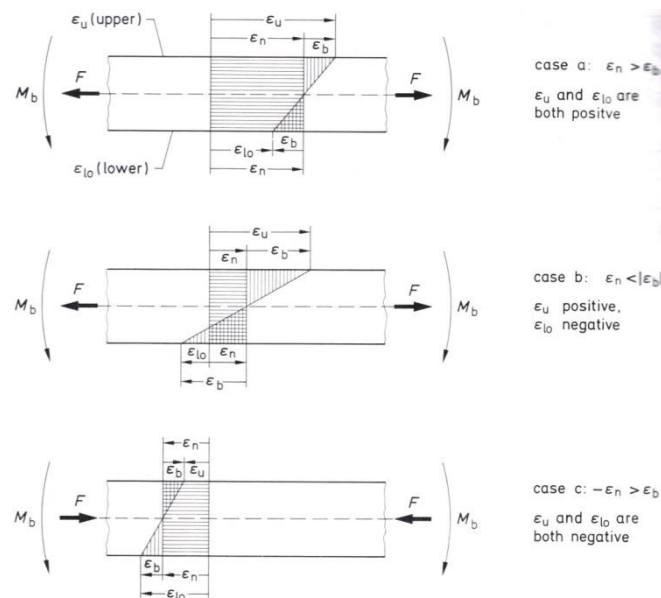
$$\sigma_b = \frac{1}{4} \varepsilon_i E \quad (4.22)$$

Ενώ η καμπτική ροπή υπολογίζεται παλι από την εξίσωση (4.20).

4.5 Συμμετρικές διατομές δοκού, φορτισμένες με αξονική δύναμη και καμπτική ροπή

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.14) παρουσιάζεται η κατανομή των παραμορφώσεων σε ένα αντικείμενο με υπερθετικά αξονικά και καμπτικά φορτία (Hoffmann,1989).

Στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε, εφαρμόζεται η περίπτωση α του σχήματος 4.14.



Σχήμα 4.14. Παραδείγματα της κατανομής των τάσεων σε μία δοκό με υπερθετικά αξονικά και καμπτικά φορτία (Hoffmann,1989).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Δοκιμές χαρακτηρισμού

Για τον χαρακτηρισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων γύψου και τσιμέντου χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκιμές χαρακτηρισμού:

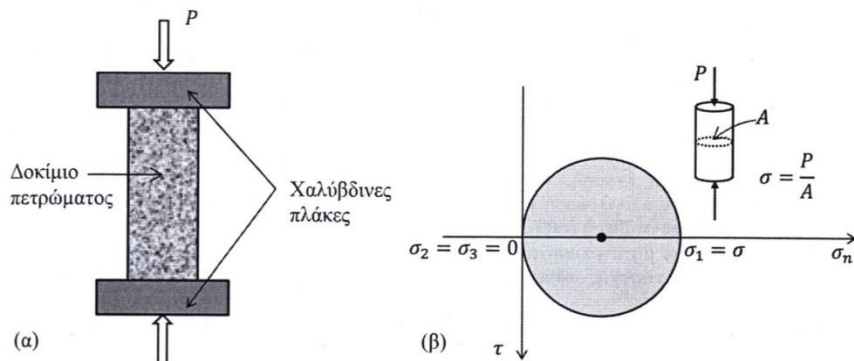
- Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης άρρηκτου πετρώματος.
- Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης δίσκων (Brazilian Test).

Για τα δοκίμια μαρμάρου Διονύσου και Βώλακα, είχαμε τα αντίστοιχα δεδομένα από τις δοκιμές χαρακτηρισμού από προηγούμενα πειράματα.

5.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

5.1.1 Εισαγωγή

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (uniaxial compression test), στην οποία ένας ορθός κυκλικός κύλινδρος συμπιέζεται μεταξύ δύο παράλληλων χαλύβδινων πλακών (Σχήμα 5.1α), είναι η παλαιότερη και συνηθέστερα εκτελούμενη εργαστηριακή δοκιμή στα πετρώματα. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής ή ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (uniaxial compressive strength, UCS), του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson του άρρηκτου πετρώματος (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.1 (α) Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr της θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου (Νομικός,2015).

Με τη δοκιμή επιδιώκεται η επιβολή μονοαξονικής εντατικής κατάστασης στο δοκίμιο (Σχήμα 5.1β), δηλαδή $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=\tau_{xy}=\tau_{xz}=\tau_{yz}=0$, $\sigma_{zz}=\sigma$, ή αλλιώς $\sigma_2=\sigma_3=0$, $\sigma_1=\sigma$. Το φορτίο ασκείται συνεχώς στο δοκίμιο, παράλληλα με τον άξονα αυτού, και αυξάνεται βαθμιαία με σταθερό ρυθμό μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η αξονική τάση στο δοκίμιο θεωρείται ομοιόμορφη και υπολογίζεται από τον λόγο του ασκούμενου φορτίου προς τη διατομή του κυλινδρικού δοκιμίου. Η αξονική τάση στην οποία το πέτρωμα αστοχεί είναι γνωστή ως ανεμπόδιστη ή μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος (Jeager et al. 2007).

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης βασίζεται σε απλές αρχές και απαιτεί ελάχιστη πολυπλοκότητα του εξοπλισμού εκτέλεσης. Επιπλέον, επιτρέπει (πιο εύκολα από άλλες δοκιμές θλίψης) τη διεξαγωγή βοηθητικών μετρήσεων, όπως της αξονικής και πλευρικής τροπής, της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων και της ακουστικής εκπομπής του πετρώματος. Εντούτοις, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της δοκιμής παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες, καθώς αυτά διαφοροποιούνται ανάλογα με τις συνθήκες εκτέλεσης της δοκιμής. Επιπλέον, όπως σημειώνουν οι Brady & Brown (2006), η απόκριση του πετρώματος θα εξαρτάται τόσο από τη φύση του και την ορυκτολογική του σύσταση όσο και από την κατάσταση των δοκιμίων. Για παρόμοια ορυκτολογική σύσταση, η μετρούμενη αντοχή του πετρώματος θα μειώνεται με την αύξηση του πορώδους, του βαθμού αποσάρθρωσης, της προϋπάρχουσας μικρορωγμάτωσης και της περιεχόμενης υγρασίας του δοκιμίου (Τσουτρέλης, 1985).

5.1.2 Διαμόρφωση και προετοιμασία των δοκιμίων στο εργαστήριο

Για την λήψη έγκυρων αποτελεσμάτων από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης απαιτείται προσεκτική διαμόρφωση και ακριβής προετοιμασία των δοκιμίων. Κυλινδρικά δοκίμια που προορίζονται για δοκιμή πρέπει να έχουν ευθεία γενέτειρα, σταθερή διάμετρο σε όλο το ύψος τους, και βάσεις επίπεδες, παράλληλες και κάθετες προς τον διαμήκη άξονα του κυλίνδρου (Νομικός, 2015).

Τα δοκίμια διαμορφώνονται με κοπή ή/και πυρηνοληψία από κατάλληλα επιλεγμένα δείγματα πετρώματος, τα οποία συλλέγονται συνήθως με τη μορφή ακανόνιστων τεμαχών ή πυρήνων γεωτρήσεων δειγματοληψίας. Η υγρασία των δειγμάτων θα πρέπει να διατηρείται κατά τη μεταφορά και την αποθήκευσή τους στο εργαστήριο. Τα δείγματα πρέπει να προστατεύονται από υπερβολικές αλλαγές στις συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας, ενώ απαιτείται και προσεκτικός χειρισμός τους για την αποφυγή πρόκλησης ανεπιθύμητης ζημιάς σε αυτά. Επίσης, συνίσταται γενικά η αποφυγή της χρήσης βιοδιασπώμενων ελαίων για την ψύξη του εξοπλισμού διαμόρφωσης δοκιμίων, καθώς κατά την επαφή τους με το δοκίμιο μπορούν να προσβάλουν τους πόρους και τις μικρορωγμές του πετρώματος μεταβάλλοντας τις ιδιότητες των δοκιμίων και μειώνοντας τη μετρούμενη αντοχή (Hawkes & Mellor 1970).

Προκειμένου για δείγματα πετρώματος μορφής ακανόνιστων τεμαχών, το μέγεθός τους μπορεί να μειωθεί αρχικά με κοπή με υδρόψυκτο τροχό μεγάλης διαμέτρου. Για τη λήψη κυλινδρικών δοκιμίων πραγματοποιείται πυρηνοληψία με εργαστηριακό περιστροφικό γεωτρώπανο, που φέρει αδαμαντοκοπτικό μορφής κοίλου σωλήνα προσαρμοζόμενο σε σωληνωτό στέλεχος. Η μονάδα πρέπει να είναι εφοδιασμένη με στέρεα βάση συγκράτησης των τεμαχών του πετρώματος, και να εξασφαλίζει την απαιτούμενη ροπή περιστροφής του κοπτικού άκρου. Επίσης, να έχει δυνατότητα ρύθμισης των στροφών προώθησης του κοπτικού στο απαιτούμενο βάθος

πυρηνοληψίας (τουλάχιστο 15 cm και κατά προτίμηση μεγαλύτερο από 20 cm) και ανάσυρσης του κοπτικού χωρίς τη διατάραξη του πυρήνα πετρώματος. Ο εξοπλισμός ψύχεται με νερό, το οποίο ταυτόχρονα απομακρύνει τα προϊόντα κοπής (Νομικός,2015).

Για την ακριβή κοπή των πυρήνων στο επιθυμητό μήκος απαιτείται ειδική συσκευή κοπής με υδρόψυκτο αδαμοντοτροχό διαμέτρου 15-20 cm. Ο πυρήνας πρέπει να στηρίζεται σε μεταλλική βάση με σφηνοειδή εγκοπή, κατά προτίμηση εκατέρωθεν του επιπέδου κοπής, ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατόν η αποφλοιώση του κατά το τελείωμα της κοπής. Η ταχύτητα περιστροφής του αδαμαντοτροχού είναι συνήθως σταθερή (800-3000 rpm), ενώ η ταχύτητα προώθησης του πυρήνα μπορεί να ελέγχεται είτε χειροκίνητα είτε μηχανοκίνητα. Το ψυκτικό υγρό είναι συνήθως καθαρό νερό, προερχόμενο είτε από κεντρικό σύστημα παροχής ύδρευσης είτε από διάταξη καθαρισμού και ανατροφοδότησης ενσωματωμένη στη συσκευή κοπής (Νομικός,2015).

Η τελική προετοιμασία των δοκιμίων πραγματοποιείται με τη λείανση της επιφάνειάς τους, και ειδικότερα των βάσεων, για την εξάλειψη των ανωμαλιών που προκαλούνται κατά την κοπή του δοκιμίου. Η λείανση διαχωρίζεται συνήθως σε αρχική και τελική. Στην αρχική λείανση επιχειρείται η δημιουργία απόλυτα επίπεδων βάσεων και ευθύγραμμης γενέτειρας. Στην τελική λείανση λαμβάνεται μια ομαλή επιφάνεια κατάλληλη για την εκτέλεση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Νομικός,2015).

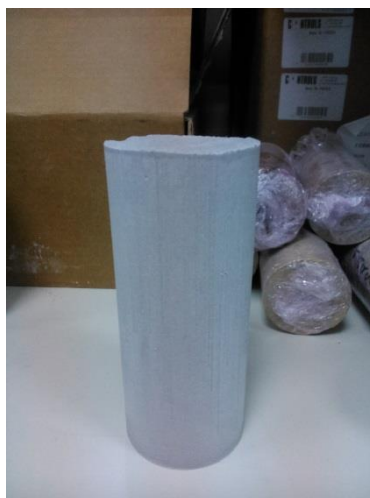
Οι διαστάσεις των δοκιμίων μετά τη διαμόρφωσή τους μετρούνται με παχύμετρο, ενώ οι ανοχές ελέγχονται σε ειδική συσκευή εφοδιασμένη με μικρόμετρα υψηλής διακριτικής ικανότητας (Νομικός,2015).

5.1.3 Τυπική πειραματική διαδικασία

Προτεινόμενες μέθοδοι για την εκτέλεση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε άρρηκτα δοκίμια πετρώματος δίνονται από την Επιτροπή προτυποποίησης εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών της ISRM (1979), καθώς και από την προδιαγραφή D7012-2010 της ASTM (2010). Με αυτές συμβαδίζει γενικά και η σχετική ελληνική τεχνική προδιαγραφή E103-84 για τον προσδιορισμό της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη δοκιμίων πετρώματος (ΦΕΚ υπ' αριθ.70, τ.Β, 8-2-1985).

Σύμφωνα με την τεχνική προδιαγραφή E103-84 τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια πρέπει να έχουν σχήμα ορθού κυκλικού κυλίνδρου (Σχήμα 5.2). Ο λόγος ύψους H προς διάμετρο D πρέπει να είναι μεταξύ 2.5 και 3.0, ενώ η διάμετρος τουλάχιστον ίση με το μέγεθος πυρήνα NX (περίπου 54 mm). Οποσδήποτε η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να είναι 10πλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών, που συμμετέχουν στη δομή του πετρώματος. Τα άκρα του δοκιμίου πρέπει να είναι

λεία και επίπεδα με μέγιστη απόκλιση 0.02mm και να κόπτονται παράλληλα μεταξύ τους, ώστε να μην αποκλίνουν από την κάθετο προς τον άξονα του δοκιμίου περισσότερο από 0.001 rad (Νομικός,2015).

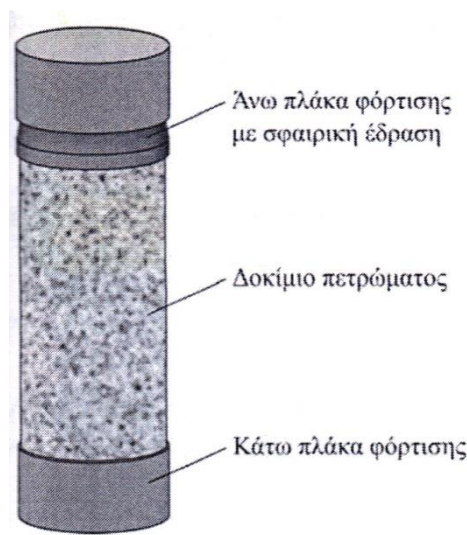


Σχήμα 5.2. Κυλινδρικό δοκίμιο γύψου που θα χρησιμοποιηθεί για την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Η διάμετρος του δοκιμίου πρέπει να μετράται με ακρίβεια 0.1mm, με τη λήψη του μέσου όρου δύο μετρήσεων της διαμέτρου, σε ορθή γωνία μεταξύ τους, στο μέσον του δοκιμίου καθώς και στο άνω και κάτω άκρο αυτού. Ο μέσος όρος των έξι μετρήσεων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου. Το ύψος του δοκιμίου μετράται με ακρίβεια 1.0 mm (Νομικός,2015).

Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές επιτόπου συνθήκες. Είναι δυνατόν όμως οι συνθήκες υγρασίας να είναι διαφορετικές ή τα δοκίμια να είναι σε ξηρά κατάσταση, οπότε οι συνθήκες αυτές της δοκιμής θα πρέπει να αναφέρονται στο δελτίο αποτελεσμάτων. Τα δοκίμια που εξετάζονται σε ξηρά κατάσταση πρέπει να τοποθετούνται σε φούρνο σε θερμοκρασία $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ για 24 ώρες (Νομικός,2015).

Στα άκρα του δοκιμίου πρέπει να προσαρμόζονται δύο χαλύβδινες πλάκες κυκλικού σχήματος και σκληρότητας κατά Rockwell όχι μικρότερης από HRC 58. Η μία από τις πλάκες πρέπει να έχει σφαιρική έδραση και η άλλη να είναι άκαμπτη και επίπεδη (Σχήμα 5.3). Οι πλάκες αυτές θα πρέπει να έχουν πάχος μεγαλύτερο των 15mm και οι επιφάνειες τους δεν θα πρέπει να αποκλίνουν του επιπέδου περισσότερο από 0.005mm. Το δοκίμιο, οι χαλύβδινες πλάκες και η σφαιρική έδραση θα πρέπει να είναι κεντραρισμένα σε σχέση με τον άξονα της φόρτισης (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.3. Χαλύβδινες πλάκες για τη φόρτιση κυλινδρικών δοκιμίων πετρώματος (Νομικός,2015).

Το φορτίο εφαρμόζεται στο δοκίμιο συνεχώς και αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, ώστε η αστοχία να συμβεί σε χρονικό διάστημα 5 έως 10 min. Εναλλακτικά ο ρυθμός φόρτισης πρέπει να είναι 0.5-1.0 MPa/s. Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε στο δοκίμιο πρέπει να αναγράφεται σε Newtons (ή kN ή MN) με ακρίβεια 1%. Ο αριθμός των δοκιμίων που υποβάλλονται σε θράυση εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος και του διαθέσιμου δείγματος. Συνιστάται πάντως τα δοκίμια να είναι περισσότερα από πέντε, για κάθε δείγμα πετρώματος (Νομικός,2015).

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη C_0 του δοκιμίου του πετρώματος υπολογίζεται διαιρώντας το μέγιστο αξονικό θλιπτικό φορτίο P_{max} που φέρει το δοκίμιο προς την αρχική διατομή A_0 του δοκιμίου (Νομικός,2015):

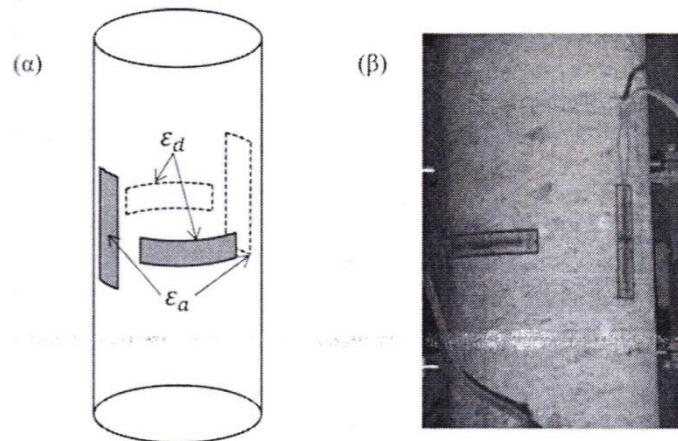
$$C_0 = \frac{P}{A_0} \quad (5.1)$$

5.1.4 Προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών ισότροπου πετρώματος

Για τον προσδιορισμό των διαγραμμάτων τάσης-τροπής, του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson δοκιμίου ισότροπου πετρώματος, τόσο το ασκούμενο αξονικό φορτίο όσο η παραμόρφωση του δοκιμίου μετρώνται και καταγράφονται καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής (Νομικός,2015).

Η μέτρηση της παραμόρφωσης πραγματοποιείται συνήθως με τη συγκόλληση τροπόμετρων (strain gauges, SG) στην επιφάνεια του δοκιμίου (Σχήμα 5.4). Δύο κατακόρυφα και δύο οριζόντια τροπόμετρα απαιτούνται σύμφωνα με την προτεινόμενη πειραματική διαδικασία της ISRM. Από τα κατακόρυφα υπολογίζεται η αξονική τροπή ϵ_a ως ο μέσος όρος των δύο μετρήσεων, ενώ από τα οριζόντια η περιμετρική τροπή $\epsilon_c = (\Delta C/C)$. Το μήκος, στο οποίο μετράει το τροπόμετρο, πρέπει να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσιο από το μέγιστο μέγεθος κόκκου του υπό δοκιμή

πετρώματος. Επίσης, το τροπόμετρο δεν θα πρέπει να εισέρχεται στην περιοχή των άκρων του δοκιμίου σε απόσταση λιγότερο από $D/2$ (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.4.(α) Θέσεις και προσανατολισμός τροπόμετρων σε κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος, (β) εικόνα δοκιμίου πετρώματος με κολλημένα τροπόμετρα στην επιφάνειά του (Νομικός,2015).

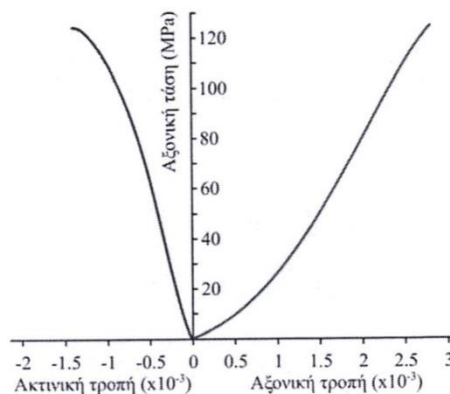
Επειδή η περίμετρος Π σχετίζεται με τη διάμετρο ($\Pi=\pi D$), η διαμετρική τροπή ε_d ισούται με την περιμετρική τροπή ε_π (Νομικός,2015):

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta D}{D} = \frac{\pi \Delta D}{\pi D} = \frac{\Delta \Pi}{\Pi} = \varepsilon_\pi \quad (5.2)$$

Εάν αντί των τροπών μετρούνται (π.χ. με αναλογικά βελόμετρα ή LVDTs) οι μεταβολές ΔH και ΔD του ύψους και της διαμέτρου του δοκιμίου αντίστοιχα, τότε η αξονική και διαμετρική τροπή υπολογίζονται ως (Νομικός,2015):

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\Delta H}{D} ; \varepsilon_d = \frac{\Delta D}{D} \quad (5.3)$$

Στο σχήμα 5.5 δίνονται τυπικά διαγράμματα τάσης-τροπής δοκιμίου πετρώματος μέχρι τη μέγιστη αντοχή. Από αυτά μπορούν να υπολογιστούν το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson του πετρώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.5 Διαγράμματα τάσης-τροπής δοκιμίου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (Νομικός,2015).

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t υπολογίζεται από την κλίση της εφαπτομένης στην καμπύλη αξονικής τάσης-αξονικής τροπής σε σημείο που αντιστοιχεί σε ποσοστό 50% της μέγιστης τάσης (Σχήμα 5.6α). Το μέσο μέτρο ελαστικότητας E_{av} υπολογίζεται από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της ίδιας καμπύλης (Σχήμα 5.6β). Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας E_s υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που χαράσσεται στην ίδια καμπύλη, για τιμές τάσης μεταξύ 0 και 50% της μέγιστης τάσης (Σχήμα 5.6γ) (Νομικός,2015).

Για την καμπύλη τάσης-τροπής στο Σχήμα 5.6, το μέσο μέτρο ελαστικότητας προκύπτει ως (Νομικός,2015):

$$E_{av} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{(78 - 41)MPa}{1.96 \cdot 10^{-3} - 1.34 \cdot 10^{-3}} = 58.73GPa \quad (5.4)$$

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση της εφαπτομένης σε τάση $\sigma_{50\%}=62.2MPa$ και προκύπτει ως (Νομικός,2015):

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{(100 - 20)MPa}{2.4 \cdot 10^{-3} - 1.0 \cdot 10^{-3}} = 57.14GPa \quad (5.5)$$

Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως:

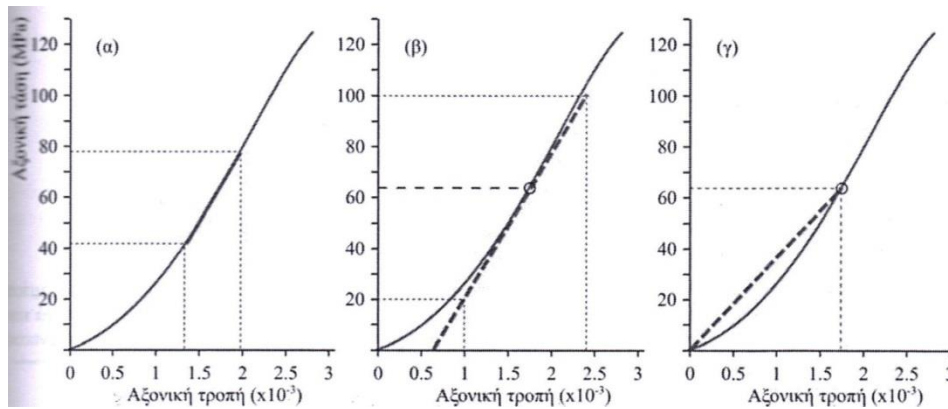
$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{62.2MPa}{1.71 \cdot 10^{-3}} = 36.37GPa \quad (5.6)$$

Ο λόγος Poisson υπολογίζεται ως ο λόγος της κλίσης της καμπύλης αξονικής τάσης-αξονικής τροπής προς την κλίση της καμπύλης αξονικής τάσης-διαμετρικής τροπής. Η κλίση της καμπύλης αξονικής τάσης-διαμετρικής τροπής υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας. Ο λόγος Poisson υπολογίζεται από την εξίσωση (Νομικός,2015):

$$\nu = - \frac{E}{\text{κλίση της καμπύλης } \sigma - \varepsilon_d} \quad (5.7)$$

Η ογκομετρική τροπή ε_v , υπολογίζεται από την εξίσωση (Νομικός,2015):

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_d \quad (5.8)$$



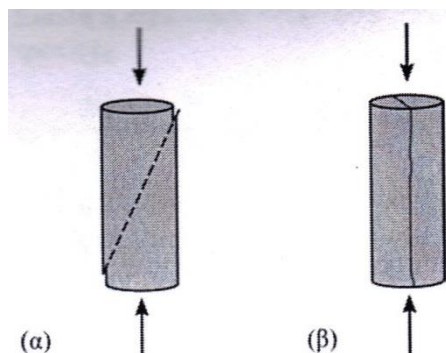
Σχήμα 5.6. Γραφικός προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Νομικός,2015).

5.1.5 Μικρορωγμάτωση και παραμόρφωση του πετρώματος

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 έχει 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 και φαινομενολογική άποψη, και ειδικότερα όταν το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στον τρόπο θράυσης και στην κορυφαία αντοχή του πετρώματος, η οποία χρησιμοποιείται στην τεχνική μηχανική πετρωμάτων για τον σχεδιασμό των μεταλλευτικών και τεχνικών έργων (Paterson & Wong 2005).

Δύο μορφές ψαθυρής θραύσης παρατηρούνται σε εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Νομικός,2015):

- ✓ Διατμητική θραύση (Σχήμα 5.7α), κατά την οποία η επιφάνεια θραύσης σχηματίζεται υπό γωνία μικρότερη των 45° ως προς τη θλιπτική αξονική τάση, ενώ η σχετική μετακίνηση είναι παράλληλη στην επιφάνεια της θραύσης.
- ✓ Εφελκυστική θραύση (Σχήμα 5.7β), η οποία χαρακτηρίζεται από διαχωρισμό κάθετα στην επιφάνεια θραύσης.



Σχήμα 5.7. 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 (Νομικός,2015).

Η διατμητική θραύση είναι ο επικρατέστερος τύπος μακροσκοπικής θράυσης στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Εμφανίζεται όμως 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 έφεσή 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 δοκίμιου εξαιτίας της τριβής (Paterson & Wong 2005). Το φαινόμενο είναι εντονότερο σε δοκίμια με μικρό λόγο ύψους προς διάμετρο (π.χ. Mogi, 2006).

Εφελκυστική θραύση παρατηρείται στις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού με διαχωρισμό του δοκίμιου 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 (Σχήμα 5.8) (Νομικός,2015).



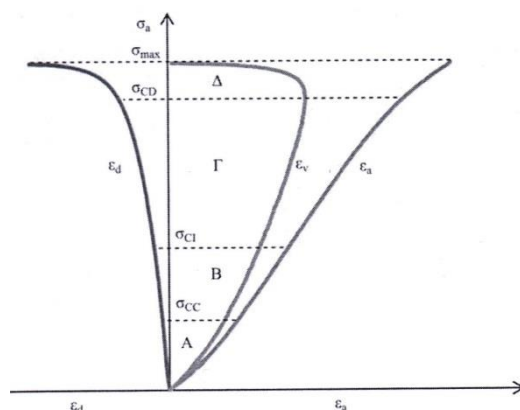
Σχήμα 5.8. Μακροσκοπική θραύση δοκίμιου πετρώματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Η θραύση αναπτύχθηκε παράλληλα ως προς την αξονική θλιπτική τάση (Νομικός,2015).

Το φαινομενικά παράδοξο της εμφάνισης εφελκυστικών θράυσεων απουσία μακροσκοπικής εφελκυστικής τάσης έχει εξηγηθεί από δύο απόψεις. Κατά τη μία άποψη, η θραύση συμβαίνει υπό την υπέρβαση μίας 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 προϋπάρχουσων μικρορωγμών στην κλίμακα των κόκκων του πετρώματος. Ο αξονικός διαχωρισμός ως μορφή θραύσης των δοκίμιων

περιορίζεται παρουσία ακόμη και χαμηλής πλευρικής πίεσης στο δοκίμιο (Νομικός,2015).

Σύμφωνα με την επικρατέστερη σήμερα άποψη, η εξέλιξη της παραμόρφωσης και της μικρορωγμάτωσης, από την έναρξη της μέχρι και τη μακροσκοπική θραύση του πετρώματος, ακολουθεί τέσσερα στάδια ή φάσεις, που δείχνονται ως περιοχές Α ως Δ στο Σχήμα 5.9 (Bieniawski 1967, Wawersik & Fairhurst 1970, Hallbauer et al. 1973, Martin & Chandler 1994, Brace et al. 1996, Martin 1997, Hudson & Harrison 1997, Brady & Brown 2006, Tang & Hudson 2010, κ.α.).

Αρχικά, η καμπύλη αξονικής τάσης-αξονικής τροπής έχει στραμμένα τα κοίλα προς τα άνω (περιοχή Α στο Σχήμα 5.9), καθώς ορισμένοι πόροι και προϋπάρχουσες μικρορωγμές του πετρώματος κλείνουν. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι αναστρέψιμη και συνεπώς η συμπεριφορά να είναι μη-γραμμικά ελαστική, ή μερικώς ανελαστική. Σε ορισμένες περιπτώσεις ατέλειες των βάσεων του κυλινδρικού δοκιμίου, είτε λόγω ελλιπούς προετοιμασίας είτε λόγω της φύσης του πετρώματος, συμβάλλουν στη μορφή της καμπύλης. Το πέρας αυτού του σταδίου αντιστοιχεί σε τάση σ_{CC} , η οποία αναφέρεται ως τάση κλεισίματος μικρορωγμών. Τα στάδια Α και Β αποτελούν την άρρηκτη φάση του πετρώματος και είναι συνήθως το 30 έως 70% της διαδρομής της φόρτισης. Σε χαμηλού πορώδους πετρώματα το στάδιο Ι είναι πολύ μικρό και συχνά δεν διακρίνεται στις καμπύλες τάσης-τροπής (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.9. Εξέλιξη της παραμόρφωσης και της μικρορωγμάτωσης πετρώματος κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Νομικός,2015).

Η έναρξη της εσωτερικής μικρορωγμάτωσης του πετρώματος σηματοδοτεί την έναρξη της κατακλαστικής ευσταθούς φάσης (περιοχή Γ στο Σχήμα 5.9), όταν επιτευχθεί η τάση έναρξης ρωγμάτωσης (crack initiation stress) σ_{CI} . Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι ο ρυθμός αύξησης της διαμετρικής τροπής γίνεται μεγαλύτερος εκείνου της αξονικής, καθώς επεκτείνονται οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές και σχηματίζονται νέες στις πιο κρίσιμα φορτισμένες περιοχές του πετρώματος. Η ανάπτυξη της μικρορωγμάτωσης στο στάδιο αυτό θεωρείται ευσταθής, εφόσον οποιαδήποτε επέκταση ή δημιουργία νέας ρωγμής απαιτεί την αύξηση της επιβαλλόμενης φόρτισης (Νομικός,2015).

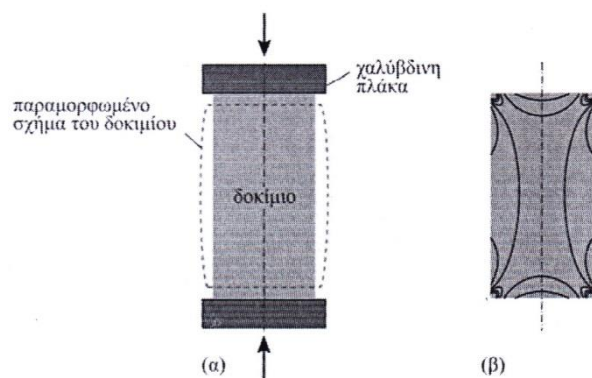
Το σημείο όπου παρατηρείται μείωση της ογκομετρικής τροπής σηματοδοτεί την έναρξη της κατακλαστικής ασταθούς φάσης (περιοχή Δ στο σχήμα 5.9) σε τάση σ_{CD} , η οποία καλείται συχνά ως όριο ζημίας ρωγμάτωσης (crack damage threshold). Η παρατηρούμενη αύξηση του όγκου του δοκιμίου λόγω της ρωγμάτωσης αναφέρεται ως διασταλτικότητα του πετρώματος. Στο στάδιο αυτό η διασταλτική συμπεριφορά του πετρώματος, λόγω σχηματισμού και ανάπτυξης μικρορωγμών, υπερισχύει της συμπίεσης λόγω της αυξανόμενης φόρτισης. Οι σχηματιζόμενες μικρορωγμές επεκτείνονται αναπτύσσοντας ένα σύστημα τεμνόμενων και συνεννοούμενων μικρορωγμών που τελικά σχηματίζουν μία συνεχή (ή ημι-συνεχή) διάρρηξη στο πέτρωμα. Φόρτιση του πετρώματος πέραν της σ_{CD} προκαλεί χρονικά εξαρτώμενη αύξηση της ζημίας στο πέτρωμα, και οδηγεί το δοκίμιο σε αστοχία ακόμη και υπό σταθερή φόρτιση (Νομικός,2015).

Το στάδιο Δ ακολουθείται από τη φάση αστοχίας του πετρώματος, όπου επιτυγχάνεται το μέγιστο φορτίο. Το δοκίμιο είναι δυνατόν να εξακολουθήσει να βραχύνεται αξονικά με ταυτόχρονη όμως μείωση του εφαρμοζόμενου φορτίου (Νομικός,2015).

Παρόλο που η αστοχία του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη μελετάται για τουλάχιστον 5 δεκαετίες, οι λεπτομέρειες των μηχανισμών που συμμετέχουν στην εξέλιξη της καταστροφής του δοκιμίου (η έναρξη και διάδοση της μικρορωγμάτωσης, η αλληλεπίδραση και η συνένωση των μικρορωγμών, η δημιουργία του αξονικού διαχωρισμού, η διατμητική θραύση, η πλαστική παραμόρφωση των κρυστάλλων των ορυκτών ορισμένων πετρωμάτων κ.ά.) εξακολουθούν να αποτελούν αντικείμενο διεθνούς έρευνας και να παραμένουν σημαντικού επιστημονικού ενδιαφέροντος (Tang & Hudson, 2010).

5.1.6 Εντατικό πεδίο στο δοκίμιο και επίδραση του λόγου ύψους προς διάμετρο

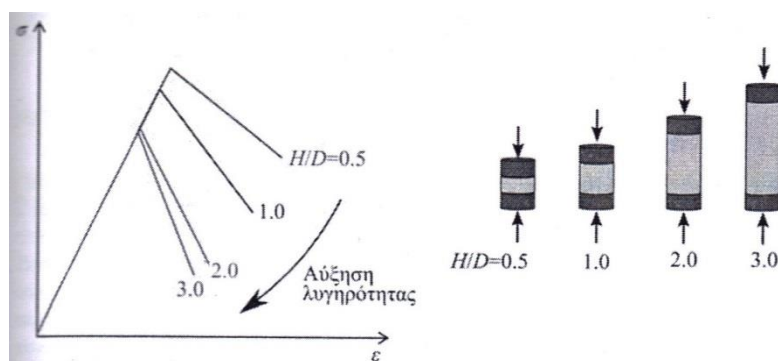
Εάν η εντατική κατάσταση του κυλινδρικού δοκιμίου στο Σχήμα 5.1α είναι ομοιόμορφη και μονοαξονική, το δοκίμιο θα διαστέλλεται πλευρικά και ομοιόμορφα καθ'όλο το ύψος του, σύμφωνα με το φαινόμενο Poisson.



Σχήμα 5.10. Επίδραση του περιορισμού στα άκρα στην παραμόρφωση του δοκιμίου: (α) μερική ανάσχεση της πλευρικής διαστολής στα άκρα λόγω περιορισμού, (β) ενδεικτικές καμπύλες ίσων τιμών της μέγιστης κύριας τάσης στο εσωτερικό του δοκιμίου (Νομικός,2015).

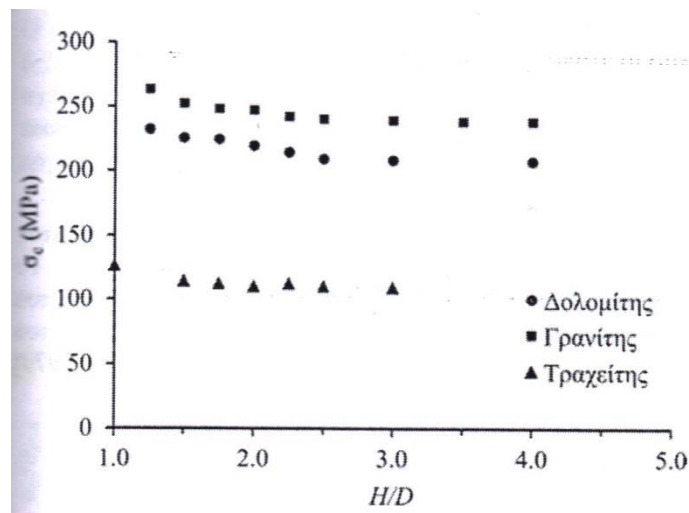
Στην πραγματικότητα, με τη συνήθη διάταξη της δοκιμής, λόγω τριβής και διαφορετικών ελαστικών ιδιοτήτων πετρώματος και χάλυβα, αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια του δοκιμίου με την πλάκα φόρτισης, οι οποίες δρούν προς τα έσω και έτσι προκαλούν την ανάσχεση της πλευρικής διαστολής των άκρων του δοκιμίου. Στο Σχήμα 5.10α παρατηρείται η παρουσιαζόμενη παραμόρφωση του δοκιμίου λόγω της μερικής ανάσχεσης της πλευρικής διαστολής στα άκρα του. Η πραγματική εντατική κατάσταση του δοκιμίου αποκλίνει από την ιδανική, όπως φαίνεται από τις ενδεικτικές καμπύλες ίσων τιμών της μέγιστης κύριας τάσης στο δοκίμιο στο Σχήμα 5.10β. Κατά τον Mogi (2006), αφενός ο περιορισμός της διαστολής των άκρων τείνει να αυξήσει τη μετρούμενη αντοχή, αφετέρου η συγκέντρωση τάσης, που προκύπτει λόγω της απότομης μεταβολής της διατμητικής τάσης στην άκρη της διεπιφάνειας χάλυβα-πετρώματος, τείνει να την αυξήσει (Νομικός,2015).

Ως αποτέλεσμα του καταναγκασμού των άκρων, η μετρούμενη αντοχή σε κοντά δοκίμια προκύπτει μεγαλύτερη. Καθώς αυξάνεται η λυγηρότητα H/D του δοκιμίου, ένα μεγαλύτερο ποσοστό του όγκου του υποβάλλεται κατά προσέγγιση σε ομοιόμορφη μονοαξονική εντατική κατάσταση. Συνεπώς η επίδραση του καταναγκασμού θα πρέπει να μειώνεται σταδιακά και, πέρα από μία τιμή της λυγηρότητας, η αντοχή θα παραμένει σταθερή και θα αντιπροσωπεύει την πραγματική αντοχή υπό ομοιόμορφη μονοαξονική θλίψη. Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται ποιοτικά η μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων πετρώματος, καθώς αυξάνεται η λυγηρότητά τους (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.11. Επίδραση της λυγηρότητας στις καμπύλες σ - ϵ για φόρτιση μέσω συμπαγών χαλύβδινων πλακών (Νομικός,2015).

Τα πειραματικά δεδομένα στο Σχήμα 5.12 για έναν γρανίτη, έναν δολομίτη και έναν τραχείτη (Mogi 2006) δείχνουν ότι η αντοχή σταθεροποιείται για $H/D > 2.5$. Η ISRM (1979) συνιστά τη χρήση δοκιμίων λυγηρότητας 2.5-3.0 στις εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης του πετρώματος (Νομικός,2015).

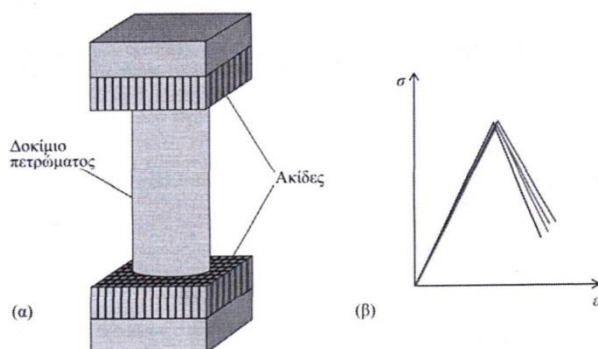


Σχήμα 5.12. Σχέση λόγου H/D και μετρούμενης αντοχής για έναν δολομίτη, έναν γρανίτη και έναν τραχείτη, σύμφωνα με τα πειράματα του Mogi (2006) (Νομικός,2015).

Για την αποτροπή της παρεμπόδισης των άκρων έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, μεταξύ των οποίων και η χρήση πλακών φόρτισης με ακίδες (brush platens). Οι πλάκες αυτές αποτελούνται από σειρές μικρών χαλύβδινων ράβδων τετραγωνικής διατομής (π.χ. 3mm x 3mm), με μικρό διάκενο μεταξύ τους (π.χ. 0.2 mm), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13α. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάθε ακίδα λειτουργεί ανεξάρτητα λόγω της παρουσίας του διάκενου. Η διατομή των ακίδων θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μπορούν να εφαρμόσουν το απαιτούμενο φορτίο στο δοκίμιο. Ταυτόχρονα όμως οι ακίδες θα πρέπει να κάμπτονται εύκολα κατά την ανάπτυξη διατμητικών δράσεων στη διεπιφάνεια ακίδας-πετρώματος, ώστε να παρακολουθούν την πλευρική έκταση του δοκιμίου. Υπάρχει συνεπώς μία σχέση μεταξύ της ροπής αδρανείας της διατομής των ακίδων και του μήκους τους. Κατά τον σχεδιασμό των ακίδων θα πρέπει να ικανοποιείται ο έλεγχος έναντι λυγισμού υπό το αναμενόμενο μέγιστο φορτίο (Νομικός,2015).

Η ελαχιστοποίηση των διατμητικών δράσεων στα άκρα του δοκιμίου οδηγεί σε περισσότερο ομοιόμορφη εντατική κατανομή στο δοκίμιο. Έτσι, στο διάγραμμα στο Σχήμα 5.13β παρατηρείται η μικρή επίδραση της λυγηρότητας στην απόκριση του δοκιμίου σε θλίψη, όταν αυτό φορτίζεται μέσω τέτοιων πλακών. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι αυτές ήταν πολύ δύσκολο να παρασκευαστούν και να διατηρηθούν για χρήση σε δοκιμές ρουτίνας (Brady & Brown 2006).

Ο συντελεστής τριβής της διεπιφάνειας δοκιμίου-χαλύβδινης πλάκας μπορεί να μειωθεί με την εφαρμογή κάποιου λιπαντικού (π.χ. διθειούχο μολυβδαίνιο, μίγμα στεαρικού οξέος και βαζελίνης κ.ά.) ή με την παρεμβολή ενός λεπτού φύλλου τεφλόν (συντελεστής τριβής χάλυβα τεφλόν ~ 0.1) ή άλλου υλικού, όπως π.χ. λεπτό φύλλο μολύβδου.



Σχήμα 5.13 (α) Πλάκες φόρτισης με ακίδες, (β) επίδραση της λυγηρότητας του δοκιμίου στις καμπύλες σ-ε για φόρτιση μέσω χαλύβδινων πλακών με ακίδες (Νομικός,2015).

Τέτοιες μέθοδοι περιγράφονται από τους Labuz & Bridell (1993). Η αποτελεσματικότητα τους αμφισβητείται, καθώς έχει παρατηρηθεί η ανάπτυξη κατακόρυφων ρωγμών στο δοκίμιο οι οποίες εκκινούν από τα άκρα. Το φαινόμενο αποδίδεται σε πλευρικές εφελκυστικές τάσεις πλησίον των άκρων, είτε λόγω διείσδυσης του λιπαντικού στις ατέλειες του δοκιμίου εκεί (Brady & Brown 2006, Mogi 2006), είτε λόγω εξώθησης του μαλακού ενθέματος (Hawkes & Mellor 1970). Εξάλλου, κατά την πρότυπη διαδικασία της ISRM (1979) επιτρέπεται μόνο μηχανική κατεργασία των άκρων του δοκιμίου (Νομικός,2015).

5.1.7 Επίδραση της προετοιμασίας των δοκιμίων

Σημαντική επίδραση στη μετρούμενη αντοχή, στη μορφή της καμπύλης σ-ε και στην επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων ασκεί η επιπεδότητα και η παραλληλότητα των άκρων του δοκιμίου. Η προτεινόμενη διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής από την ISRM (1979) προβλέπει ότι οι βάσεις ενός κυλινδρικού δοκιμίου θα πρέπει να είναι επίπεδες και κάθετες στον άξονα του δοκιμίου με ανοχή 0.02 mm και 0.001 rad αντίστοιχα. Κατά τους Brady & Brown (2006) μία τέτοια απόκλιση από την καθετότητα είναι δυνατόν να έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της δοκιμής. Για τον λόγο αυτό προτείνουν, όταν οι δοκιμές προορίζονται για ερευνητικούς σκοπούς, οι βάσεις των δοκιμίων να είναι λείες και επίπεδες με μέγιστη ανοχή 0.01 mm (Νομικός,2015).

5.1.8 Επίδραση του μεγέθους των δοκιμίων

Έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι για παρόμοιο σχήμα του δοκιμίου, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή και η ψαθυρότητά του μειώνονται με την αύξηση του όγκου του. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται συνήθως (π.χ. Hudson & Harrison 1997) στις προϋπάρχουσες μικρορωγμές του πετρώματος: ένα μεγαλύτερο δοκίμιο θα περιέχει περισσότερες μικρορωγμές και στατιστικά αυξάνεται η πιθανότητα παρουσίας μίας ασθενέστερης μικρορωγμής που να προκαλέσει εκκίνηση της αστοχίας του δοκιμίου νωρίτερα. Ωστόσο, όπως σημειώνουν οι Tang & Hudson (2010), η ακριβής φύση αυτής της εξάρτησης, στην πράξη, δεν είναι καλά γνωστή. Για την εξήγηση του φαινομένου έχουν προταθεί πολλές θεωρίες, χωρίς όμως γενική αποδοχή (Brady & Brown, 2006).

Οι Hoek & Brown (1980), με βάση τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια διαμέτρου από 10mm έως 200mm, δίνουν την παρακάτω προσεγγιστική σχέση για την επίδραση του όγκου στη μετρούμενη αντοχή (Νομικός,2015):

$$\sigma_c = \sigma_{c50} \left(\frac{50}{D} \right)^{0.18} \quad (5.9)$$

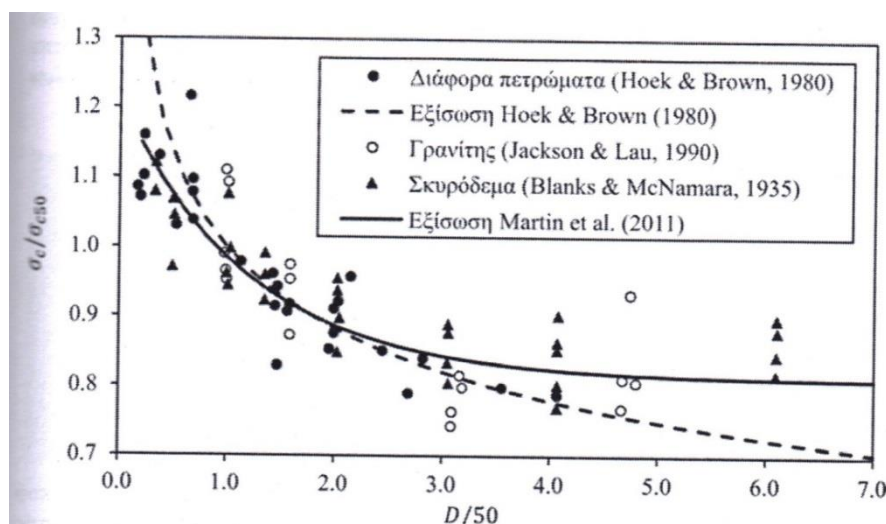
όπου D η διάμετρος σε mm, και σ_{c50} η μονοαξονική θλιπτική αντοχή δοκιμίου διαμέτρου 50mm.

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, η αντοχή δοκιμίου 350mm θα είναι κατά 70% μειωμένη σε σχέση με την αντοχή δοκιμίου διαμέτρου 50 mm. Οι Martin et al. (2011), λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα των Hoek & Brown (1980), δοκιμές σε γρανίτη με διάμετρο δοκιμίων έως 294 mm (Jackson & Lau 1990), και δοκιμές σε

σκυρόδεμα με δοκίμια διαμέτρου έως 914mm και λόγο ύψους προς διάμετρο 2 (Blanks & McNamara 1935), συμπεραίνουν ότι η επίδραση του μεγέθους του άρρηκτου πετρώματος στην αντοχή περιορίζεται στο 80% της τυποποιημένης εργαστηριακής μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη. Προτείνουν έτσι την επόμενη σχέση για την εκτίμηση της επίδρασης του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή (Νομικός,2015):

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c50}} = 0.81 + \frac{0.4}{\exp\left(\frac{D}{60.5}\right)} \quad (5.10)$$

Η παραπάνω σχέση δίνεται σε διάγραμμα στο σχήμα 5.14. Στο ίδιο διάγραμμα δίνονται και τα πειραματικά δεδομένα των Hoek & Brown (1980), των Jackson & Lau (1990) και των Blanks & McNamara (1935). Η σχέση (5.10) προϋποθέτει ότι το άρρηκτο πέτρωμα είναι ομοιογενές. Εάν το πέτρωμα παρουσιάζει υψηλή ετερογένεια ή περιέχει μικροελαττώματα, η αντοχή του μπορεί να μειωθεί περισσότερο από το 80% της εργαστηριακά προσδιοριζόμενης σε δοκίμια διαμέτρου 50 mm (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.14. Επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή (Νομικός,2015).

5.1.9 Επίδραση του ρυθμού φόρτισης

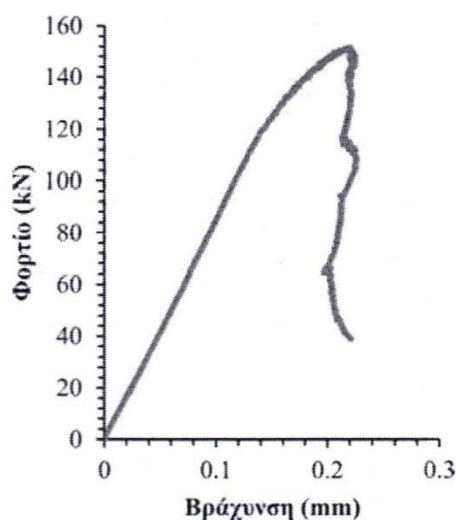
Με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης αυξάνεται και η αντοχή του δοκιμίου. Για πολύ υψηλούς ή πολύ χαμηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης οι διαφορές που παρατηρούνται στην καμπύλη τάσης-τροπής μπορεί να είναι σημαντικές. Εντούτοις, η μεταβολή του ρυθμού τροπής από $10^{-8}/s$ σε $10^2/s$ διπλασιάζει μόνο τη μετρούμενη αντοχή. Γενικά, η συμπεριφορά του πετρώματος δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον ρυθμό παραμόρφωσης, όταν αυτός ευρίσκεται εντός του συνήθους εύρους εκτέλεσης των οιονεί στατικών εργαστηριακών δοκιμών (Νομικός,2015).

5.1.10 Συμπεριφορά μετά τη μέγιστη αντοχή

Η πραγματοποίηση της δοκιμής με σταθερό ρυθμό φόρτισης οδηγεί σε ανεξέλεγκτη θραύση του δοκιμίου με την επίτευξη της αντοχής σε θλίψη, καθώς η

μηχανή φόρτισης προσπαθεί να επιβάλει μεγαλύτερο φορτίο από αυτό που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο. Με τον έλεγχο της αξονικής βράχυνσης ή της διαμετρικής έκτασης του δοκιμίου είναι δυνατή η περαιτέρω παραμόρφωση του πετρώματος με σταδιακά μειούμενο φορτίο, λαμβάνοντας έτσι το πλήρες διάγραμμα φορτίου-βράχυνσης του πετρώματος. Διαιρώντας το αξονικό φορτίο με την αρχική διατομή του δοκιμίου υπολογίζεται η ονομαστική αξονική τάση, ενώ η ονομαστική αξονική και διαμετρική τροπή υπολογίζονται διαιρώντας τη βράχυνση του ύψους προς το αρχικό ύψος και τη διαμετρική έκταση με την αρχική διάμετρο του δοκιμίου. Λαμβάνεται έτσι το πλήρες διάγραμμα τάσης-τροπής του πετρώματος, το οποίο μπορεί να συμβάλει στην κατανόηση της διαδικασίας παραμόρφωσης, ρωγμάτωσης και αποσύνθεσης του άρρηκτου πετρώματος και της δυνητικής συμπεριφοράς ενός παρόμοιου ογκοτεμαχίου πετρώματος in situ (Νομικός,2015).

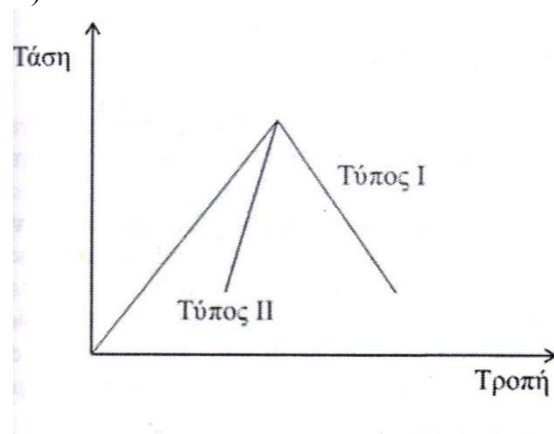
Ο έλεγχος της παραμόρφωσης του πετρώματος μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής απαιτεί τη χρήση δύσκαμπτων πλαισίων φόρτισης, καθώς τα εύκαμπτα πλαίσια καταστρέφουν το δοκίμιο κατά την επίτευξη της κορυφαίας αντοχής. Επίσης, απαιτεί τη χρήση σερβο-υδραυλικών μηχανών φόρτισης κλειστού βρόχου με δυνατότητα ελέγχου τόσο του αξονικού φορτίου, όσο και της αξονικής βράχυνσης και διαμετρικής έκτασης του δοκιμίου. Στο Σχήμα 5.15 δίνεται ένα πλήρες διάγραμμα φορτίου βράχυνσης του πετρώματος από δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο της διαμετρικής τροπής (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.15. Πλήρες διάγραμμα φορτίου-βράχυνσης δοκιμίου πετρώματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Νομικός,2015).

Η σημασία της δυσκαμψίας του πλαισίου της μηχανής φόρτισης και η χρησιμότητα του σερβο-υδραυλικού ελέγχου περιγράφεται λεπτομερώς από τους Hudson & Harrison (1997), Brady & Brown (2006), Αγιουτάντης (2002). Το πλαίσιο φόρτισης και το δοκίμιο παραμορφώνονται ανάλογα με τη δυσκαμψία τους. Μετά τη μέγιστη αντοχή το δοκίμιο παραμορφώνεται αναλαμβάνοντας μειωμένο φορτίο και ταυτόχρονα το πλαίσιο αποφορτίζεται ελαστικά. Το έργο που παράγεται από ένα εύκαμπτο πλαίσιο για δεδομένη βράχυνση του δοκιμίου είναι μεγαλύτερο από το έργο που μπορεί να απορροφήσει το δοκίμιο. Αυτή η περίσσεια ενέργειας εκτονώνεται σπάζοντας το δοκίμιο. Αντίθετα, για την ίδια βράχυνση ένα δύσκαμπτο πλαίσιο παράγει έργο, το οποίο είναι μικρότερο από το έργο που καταλανώνει το δοκίμιο για την επίτευξη της βράχυνσης αυτής (Νομικός,2015).

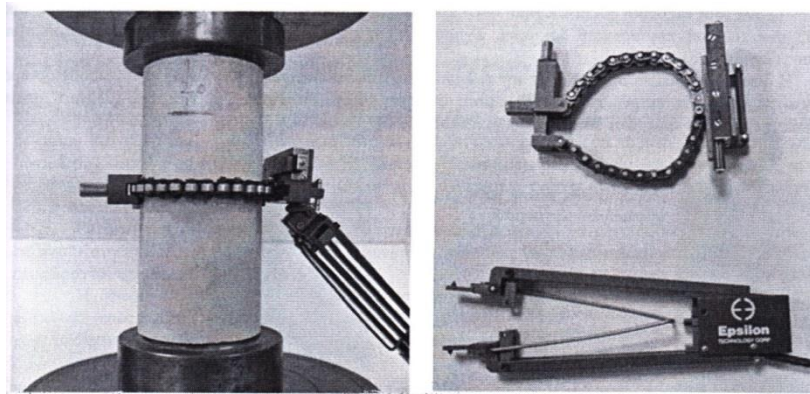
Η συμπεριφορά του δοκιμίου μετά την κορυφαία αντοχή διακρίνει τα πετρώματα σε δύο τύπους, όπως φαίνεται απλουστευμένα στο Σχήμα 5.16. Ο τύπος I επιτυγχάνει αύξηση της αξονικής βράχυνσης με τη μείωση του φορτίου, ενώ ο τύπος II δεν επιτυγχάνει. Τα πετρώματα που εμφανίζουν συμπεριφορά τύπου I είναι κάπως όλκιμα στη φύση τους, ενώ εκείνα που εμφανίζουν συμπεριφορά τύπου II είναι περισσότερο ψαθυρά (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.16.Συμπεριφορά του δοκιμίου μετά την κορυφαία αντοχή (Νομικός,2015).

Η εκτέλεση της δοκιμής με έλεγχο της αξονικής βράχυνσης είναι γενικά επαρκής για να ληφθεί η πλήρης καμπύλη τάσης-τροπής σε πετρώματα συμπεριφοράς τύπου I. Αντίθετα, προκειμένου για πετρώματα συμπεριφοράς τύπου II απαιτούνται εναλλακτικές τεχνικές ελέγχου της εκτέλεσης της δοκιμής, καθώς η καμπύλη δεν παρουσιάζει μονότονη αύξηση των αξονικών τροπών. Αυτό, διότι ακόμη και ένα τελείως άκαμπτο πλαίσιο θα παρείχε περίσσεια ενέργειας (κατακόρυφη αποφόρτιση πλαισίου), η οποία οδηγεί σε ανεξέλεγκτη αστοχία του δοκιμίου. Αυτές οι περιπτώσεις μπορούν συνήθως να αντιμετωπίζονται ελέγχοντας κατά τη δοκιμή τη διαμετρική έκταση του δοκιμίου (Νομικός,2015).

Αυτές οι περιπτώσεις μπορούν συνήθως να αντιμετωπίζονται ελέγχοντας κατά τη δοκιμή τη διαμετρική έκταση του δοκιμίου. Επειδή η διαμετρική τροπή ισούται με την περιμετρική τροπή, συχνά, αντί της διαμετρικής έκτασης ελέγχεται η αύξηση της περιμέτρου του δοκιμίου, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση εκτασιόμετρων τύπου αλυσίδας. Στο Σχήμα 5.17 φαίνεται εκτασιόμετρο αυτού του τύπου προσαρμοσμένο σε κυλινδρικό δοκίμιο για τον έλεγχο της διαμετρικής τροπής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Νομικός,2015).



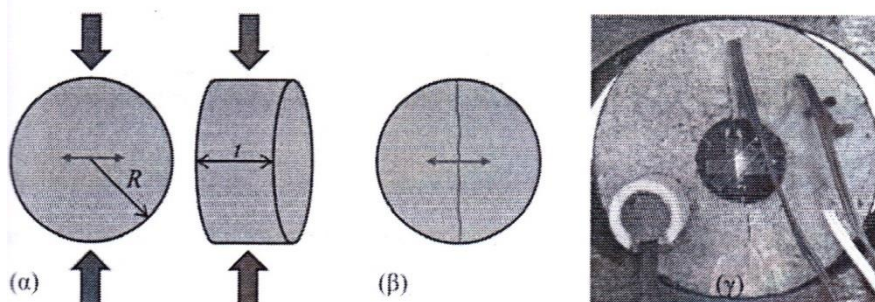
Σχήμα 5.17. Έλεγχος της περιμετρικής τροπής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με εκτασιόμετρο τύπου αλυσίδας (Νομικός,2015).

Κατά την προτεινόμενη διαδικασία της ISRM (Fairhurst & Hudson 1999) για τον προσδιορισμό της πλήρους καμπύλης τάσης-τροπής του πετρώματος, η δοκιμή πρέπει να εκτελείται με ρυθμό αύξησης της αξονικής τροπής 10^{-3} mm/mm/s μέχρι την επίτευξη του 70% της αναμενόμενης κορυφαίας αντοχής. Στη συνέχεια, και προκειμένου για πετρώματα με συμπεριφορά τύπου I, ο ρυθμός αύξησης της αξονικής τροπής πρέπει να μειώνεται σε 10^{-6} mm/mm/s μέχρι και μετά την κορυφαία αντοχή, έως ότου το φορτίο μειωθεί στο 50% του μέγιστου. Η δοκιμή μπορεί να συνεχιστεί με ρυθμό αύξησης της αξονικής τροπής 10^{-3} mm/mm/s μέχρι να ληφθεί η πλήρης καμπύλη φορτίου-βράχυνσης ή μέχρι το φορτίο να πέσει στο 30-40% του μέγιστου, οπότε η δοκιμή θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί. Για πετρώματα με συμπεριφορά τύπου II, η δοκιμή εκτελείται με έλεγχο της διαμετρικής τροπής μετά το 70% της αναμενόμενης κορυφαίας αντοχής, με ρυθμό 10^{-4} mm/mm/s, μέχρι το φορτίο να μειωθεί στο 50% του μέγιστου. Στη συνέχεια εκτελείται όπως και για πετρώματα συμπεριφοράς τύπου I (Νομικός,2015).

5.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

Οι δυσκολίες που συνδέονται με την εκτέλεση της άμεσης δοκιμής μονοαξονικού εφελκυσμού έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη έμμεσων μεθόδων για την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής των πετρωμάτων. Οι μέθοδοι αυτές ονομάζονται έμμεσες, διότι δεν στοχεύουν στην ανάπτυξη ενός ομοιόμορφου εφελκυστικού εντατικού πεδίου, αλλά περιλαμβάνουν πειραματικές διατάξεις που οδηγούν σε ανομοιόμορφες εφελκυστικές τάσεις σε ορισμένες περιοχές του δοκιμίου. Η ακριβής τιμή της εφελκυστικής τάσης στο σημείο όπου εκκινεί η αστοχία πρέπει να βρεθεί από την επίλυση των εξισώσεων της ελαστικότητας (Νομικός,2015).

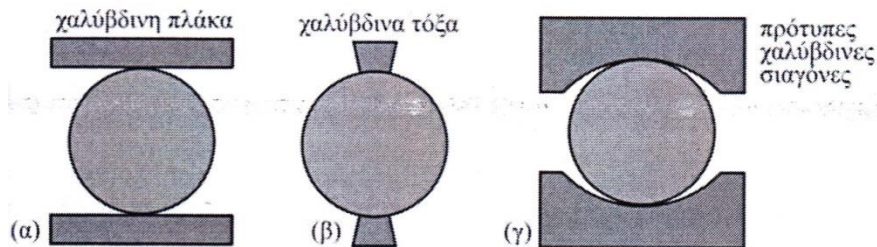
Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη από αυτές τις δοκιμές είναι η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης, γνωστή ως δοκιμή Brazilian, κατά την οποία δοκίμιο μορφής δίσκου υποβάλλεται σε αντιδιαμετρική θλίψη, παράγοντας έτσι μία εφελκυστική τάση κάθετα στη διάμετρο φόρτισης. Υπό τις συνθήκες αυτές, το δοκίμιο θραύεται κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό. Η εφελκυστική τάση, που προκαλεί την εφελκυστική θραύση του δοκιμίου, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.18 (α) Δίσκος πετρώματος που φορτίζεται αντιδιαμετρικά σε θλίψη. (β) Σκαρίφημα της θραύσης. (γ) Εφελκυστική θραύση δίσκου πετρώματος κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης σε δοκιμή Brazilian (Νομικός,2015).

Τυπικές διατάξεις εφαρμογής του αντιδιαμετρικού φορτίου στο δίσκο δίνονται στο Σχήμα 5.19. Αποδεικνύεται θεωρητικά (Colback 1967) και επιβεβαιώνεται και πειραματικά (Colback 1967, Hudson et al 1972) ότι η διάταξη στο Σχήμα 5.19α (και

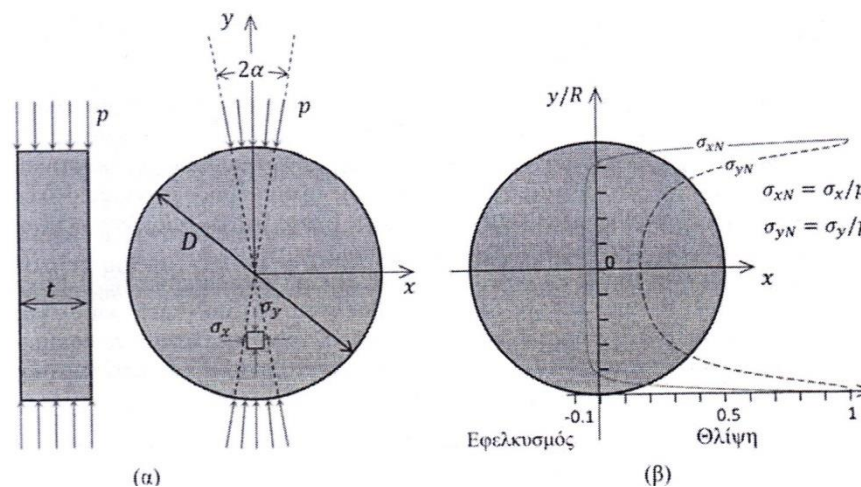
οι παρόμοιες με αυτήν), που εισάγουν σημειακά το φορτίο, οδηγούν το δοκίμιο σε αστοχία που ξεκινάει ακριβώς στα σημεία φόρτισης λόγω θλιπτικών τάσεων. Για τον λόγο αυτό έχουν επικρατήσει οι διατάξεις (β) και (γ), όπου το φορτίο κατανέμεται σε ένα μικρού μήκους τόξο στην περιφέρεια του δίσκου. Εξάλλου, κατά την πρότυπη πειραματική διαδικασία της ISRM (1978), μόνον η διάταξη (δ) με κατάλληλη ακτίνα καμπυλότητας των σιαγόνων φόρτισης είναι αποδεκτή, όπως αναπτύσσεται στη συνέχεια (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.19.Τυπικές διατάξεις φόρτισης: (α) επίπεδες πλάκες, (β) χαλύβδινα τόξα (γ) καμπύλες χαλύβδινες σιαγόνες (Νομικός,2015).

5.2.1. Εντατική κατάσταση του δοκιμίου και υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής

Στο σχήμα 5.20α ένας δίσκος ακτίνας R και πάχους t, από ισότροπο, ομοιογενές και γραμμικά ελαστικό υλικό, φορτίζεται αντιδιαμετρικά με ομοιόμορφη ακτινική πίεση p σε μήκος τόξου 2αR στην περιφέρεια του (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.20 (α) Σχηματική αναπαράσταση των συνθηκών φόρτισης στη βραζιλιανή δοκιμή. (β) Ελαστική κατανομή των ορθών τάσεων κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης για γωνία 2α=10° (Νομικός,2015).

Υπό αυτές τις συνθήκες οι ορθές τάσεις κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης δίνονται σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικότητας από τις σχέσεις (Hondros 1959):

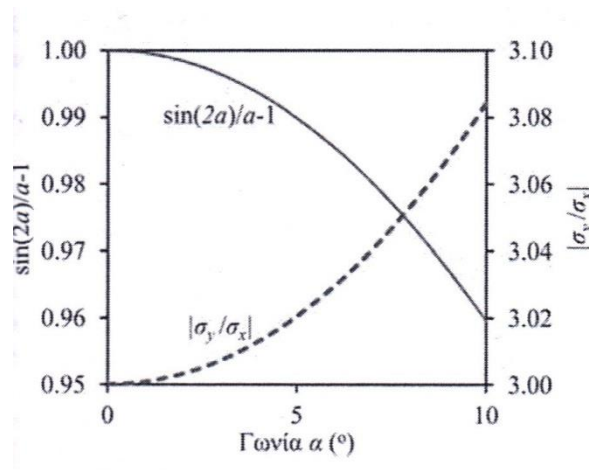
$$\sigma_x = -\frac{2p}{\pi} \left[\frac{(1 - \rho^2) \sin 2\alpha}{1 - 2\rho^2 \cos 2\alpha + \rho^4} - \tan^{-1} \left(\frac{1 + \rho^2}{1 - \rho^2} \tan \alpha \right) \right] \quad (5.11)$$

$$\sigma_y = \frac{2p}{\pi} \left[\frac{(1 - \rho^2) \sin 2\alpha}{1 - 2\rho^2 \cos 2\alpha + \rho^4} + \tan^{-1} \left(\frac{1 + \rho^2}{1 - \rho^2} \tan \alpha \right) \right] \quad (5.12)$$

$\rho=y/R$ και y είναι κατακόρυφη συντεταγμένη ενός σημείου από το κέντρο του δίσκου. Λόγω συμμετρίας, $\tau_{xy}=0$ και οι σ_{xx} και σ_{yy} είναι κύριες τάσεις. Στο Σχήμα 5.20β δίνεται η κατανομή των ορθών τάσεων σ_{xx} και σ_{yy} , ανηγμένων ως προς τη πίεση p , κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης, για γωνία $2\alpha=10^\circ$. Η ελάχιστη κύρια τάση σ_{xx} είναι ομοιόμορφη στο 70% περίπου του μήκους της διαμέτρου και εφελκυστική εκτός των περιοχών πλησίον της περιφέρειας, όπου είναι θλιπτική με μέγιστη τιμή $\sigma_{xx}=p$ για $y/R=\pm 1$. Η μέγιστη κύρια τάση σ_{yy} είναι θλιπτική και ίση με $\sigma_{yy}=p$ στην περιφέρεια, αλλά μεταβάλλεται λίγο κοντά στο κέντρο του δίσκου. Στο κέντρο του δίσκου ($y/R=0$), οι δύο κύριες τάσεις και ο λόγος τους γίνονται (Νομικός,2015):

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi Dt} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right); \sigma_y = \frac{2P}{\pi Dt} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right); \left| \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right| = \frac{\sin 2\alpha + \alpha}{\sin 2\alpha - \alpha} \quad (5.13)$$

$P=p2\alpha Rt$ είναι το συνολικό εξωτερικό φορτίο στο δίσκο, και $D=2R$ η διάμετρος του δοκιμίου. Σύμφωνα με την παραπάνω λύση, η ελάχιστη κύρια τάση σ_{xx} στο κέντρο του δίσκου είναι εφελκυστική κατά τη διεύθυνση x , ενώ η μέγιστη κύρια τάση σ_{yy} είναι θλιπτική κατά τη διεύθυνση y . Για μικρή γωνία 2α η σ_{yy} είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από τη σ_{xx} (Σχήμα 5.21) (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.21. Επίδραση της γωνίας 2α (Νομικός,2015).

Δεδομένου ότι ο λόγος μεταξύ της αντοχής των πετρωμάτων σε θλίψη και σε εφελκυσμό είναι συνήθως μεγαλύτερος από τρία, το δοκίμιο σε μία δοκιμή Brazilian αναμένεται να αστοχεί πάντα σε εφελκυσμό. Καθώς ο δίσκος θεωρείται σε κατάσταση επίπεδης τάσης, η τρίτη κύρια τάση, κάθετα στο επίπεδο του δίσκου, είναι μηδέν, και γίνεται η παραδοχή ότι δεν επηρεάζει τη θραύση του δίσκου. Επιπλέον, αγνοούνται τυχόν διατμητικές τάσεις λόγω τριβής στη διεπιφάνεια σιαγόνων φόρτισης-δοκιμίου (Νομικός,2015).

Υπό την προϋπόθεση ότι κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρείται έναρξη αστοχίας του δοκιμίου κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισεως, η εφελκυστική αντοχή, σ_t , δύναται να υπολογισθεί ως (Νομικός,2015):

$$\sigma_t = -\sigma_x \left(\frac{y}{R} = 0 \right) = \frac{2P}{\pi Dt} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right) \quad (5.14)$$

Προκειμένου για μικρή γωνία α , προκύπτει ότι (Νομικός,2015):

$$\left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1\right) \approx 1 \quad (5.15)$$

Και η προηγούμενη σχέση μπορεί να απλοποιηθεί προσεγγιστικά ως (Νομικός,2015):

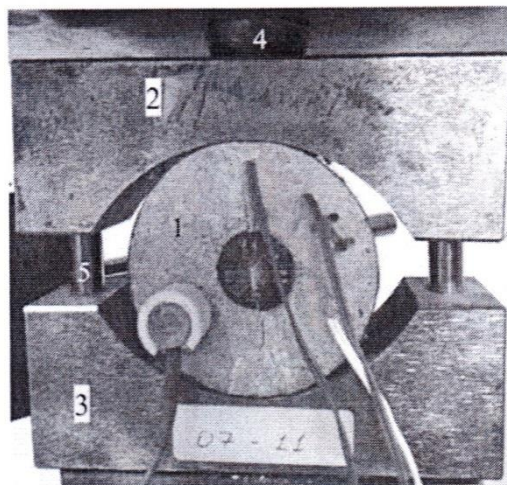
$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} = 0.636 \frac{P}{Dt} \quad (5.16)$$

5.2.2. Πρότυπη πειραματική διαδικασία

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο της ISRM (1978) η δοκιμή εκτελείται σε δοκίμια μορφής δίσκου με διάμετρο τουλάχιστον 54mm και πάχος ίσο με την ακτίνα του. Ο προσανατολισμός του δοκιμίου, σε σχέση με τυχόν επίπεδα ανισοτροπίας του πετρώματος, πρέπει να είναι γνωστός (Νομικός,2015).

Για την επιβολή του φορτίου στο δοκίμιο θα πρέπει να χρησιμοποιούνται χαλύβδινες σιαγόνες φόρτισης, σχεδιασμένες ώστε να έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο σε αντιδιαμετρικές επιφάνειες για τόξο επαφής περίπου 10° κατά την αστοχία. Η προτεινόμενη διάταξη της ISRM για την επίτευξη αυτού απεικονίζονται στο Σχήμα 5.22. Η άνω σιαγόνα περιλαμβάνει μία σφαιρική έδραση κατάλληλα σχηματιζόμενη από ημισφαιρικό χαλύβδινο ρουλεμάν (μισόμπαλα) διαμέτρου 25 mm (στοιχείο υπ' αριθμ.4 στο σχήμα 5.22).

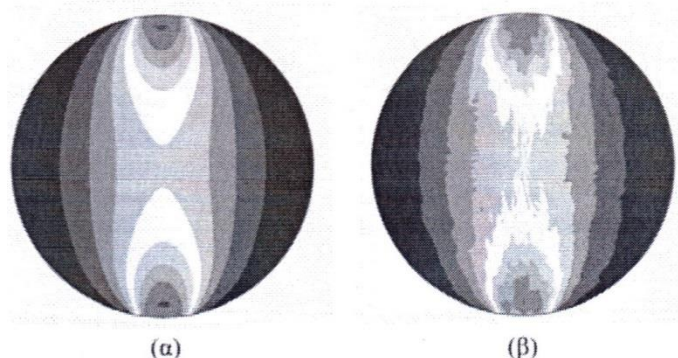
Για την καλύτερη κατανομή του φορτίου στο δοκίμιο, η περιφέρεια του δοκιμίου θα πρέπει να καλύπτεται με ταινία. Το δοκίμιο τοποθετείται στη συσκευή φόρτισης, έτσι ώστε οι καμπύλες σιαγόνες να το φορτίζουν διαμετρικά. Το φορτίο θα πρέπει να εφαρμόζεται συνεχώς με σταθερό ρυθμό, έτσι ώστε η αστοχία στα ασθενέστερα πετρώματα να συμβαίνει μέσα σε 15-30sec. Συνιστάται από την ISRM η διατήρηση ρυθμού φόρτισης 200N/s. Η αντοχή σε εφέλκυσμό του δοκιμίου σ_t θα πρέπει να υπολογίζεται από τη σχέση (5.16) (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.22. Προτεινόμενη από την ISRM πειραματική διάταξη δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης. 1-δοκίμιο πετρώματος, 2-άνω σιαγόνα, 3-κάτω σιαγόνα, 4-ημισφαιρικό ρουλεμάν, 5-πέριος (Νομικός,2015).

5.2.3. Επίδραση της ανομοιογένειας και ανισοτροπίας του πετρώματος

Η αναλυτική λύση του Hondros (1959) έχει ισχύ για ομοιογενές ισότροπο και γραμμικά ελαστικό υλικό έως τη θραύση του. Για ανομοιογενή πετρώματα δεν υπάρχει διαθέσιμη κλειστή λύση. Στο Σχήμα 5.23 δίνονται περιγράμματα της μέγιστης διατμητικής τάσης σε αντιδιαμετρικά φορτιζόμενα δοκίμια δίσκου από ομοιογενές (αριστερά) και ετερογενές (δεξιά) υλικό, που παρήχθησαν με αριθμητική προσομοίωση με κώδικα πεπερασμένων διαφορών. Όπως παρατηρείται, η ετερογένεια του πετρώματος έχει ισχυρή επίδραση στο τοπικό εντατικό πεδίο εντός των δίσκων. Παρόμοια αποτελέσματα δίνουν και οι Tang & Hudson (2011) (Νομικός,2015).



Σχήμα 5.23. Αριθμητικά παραγόμενα περιγράμματα της μέγιστης διατμητικής τάσης σε αντιδιαμετρικά φορτιζόμενα δοκίμια δίσκου: (α) σε ομοιογενές υλικό, (β) σε ετερογενές υλικό. Η προσομοίωση έγινε με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC (Νομικός,2015).

Προκειμένου για ανισότροπα πετρώματα με ένα επίπεδο συμμετρίας (εγκαρσίως ισότροπα), όπως πολλά στρωσιγενή και σχιστώδη πετρώματα, οι ορθές τάσεις κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης δεν είναι και κύριες τάσεις. Σύμφωνα με υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις (π.χ. Amadei 1996, Exadaktylos & Kaklis 2001), για μικρή γωνία 2α η εντατική κατάσταση στο κέντρο του δίσκου δίνεται από τις σχέσεις (Νομικός,2015):

$$\sigma_x = q_{xx} \frac{P}{\pi Dt} ; \sigma_y = q_{yy} \frac{P}{\pi Dt} ; \tau_{xy} = q_{xy} \frac{P}{\pi Dt} \quad (5.17)$$

Οι συντελεστές q_{xx} , q_{yy} και q_{xy} εξαρτώνται από τις ελαστικές σταθερές πετρώματος και τον προσανατολισμό του επιπέδου ανισοτροπίας ως προς τον άξονα της φόρτισης (για ισότροπο πέτρωμα $q_{xx}=-2$, $q_{yy}=6$, $q_{xy}=0$) (Νομικός,2015).

5.2.4. Αξιολόγηση της δοκιμής

Η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης είναι σχετικά εύκολη ως μέθοδος για τη μέτρηση της αντοχής σε εφελκυσμό του πετρώματος. Τα δείγματα λαμβάνονται συνήθως με τη μορφή πυρήνων γεωτρήσεων και με την κοπή ενός πυρήνα σε δίσκους, τα δοκίμια είναι άμεσα διαθέσιμα. Με την μεταβολή του προσανατολισμού των δίσκων μπορεί να μετρηθεί και η ανισοτροπία της αντοχής σε διάφορες διευθύνσεις κάθετα στον άξονα του δοκιμίου. Έτσι, μπορεί να μετρηθεί η

εφελκυστική αντοχή με ελάχιστη προετοιμασία δοκιμίων και χωρίς τα πειραματικά προβλήματα που συνδέονται με τη δοκιμή άμεσου εφελκυσμού (Νομικός,2015).

Η δοκιμή είναι θεωρητικά σωστή μόνο υπό την προϋπόθεση ότι κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρείται έναρξη αστοχίας του δοκιμίου από το κέντρο που διαδίδεται προς τα άκρα κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης (π.χ. Fairhurst 1964). Κατά τον Colback (1966), όταν το φορτίο διανέμεται κατάλληλα στην περιφέρεια του δίσκου, η μακροσκοπική ρωγμάτωση του δοκιμίου ξεκινάει με μία αρχική εφελκυστική ρωγμή στο επίπεδο της φορτιζόμενης διαμέτρου, και ακολουθείται από δευτερογενείς ρωγμές (συνήθως σχήματος κλειψύδρας) που εκκινούν από την περιφέρεια του δοκιμίου κοντά στις φορτιζόμενες περιοχές. Αυτές οι δευτερογενείς ρωγμές σχετίζονται με την αστοχία των τεμαχίων του διαχωρισμένου λόγω της αρχικής θραύσης δοκιμίου. Συχνά μπορεί να παρατηρηθούν τριτογενείς ρωγμές που δίνουν ένα σφηνοειδές σχήμα ρωγμάτωσης κοντά στις φορτιζόμενες περιοχές (Νομικός,2015).

Η έναρξη και η διάδοση της θραύσης του πετρώματος στη δοκιμή Brazilian εξαρτάται τόσο από τις συνθήκες φόρτισης όσο και από το είδος του πετρώματος. Σκληρά λεπτοκρυσταλλικά πετρώματα συμπεριφέρονται με πιο σταθερό και προβλέψιμο τρόπο, ενώ χονδροκοκκώδη πετρώματα έχουν λιγότερο προβλέψιμη συμπεριφορά. Είναι συνεπώς σημαντικό να επιλέγεται το μέγεθος του δοκιμίου σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του πετρώματος. Ωστόσο, οι Hudson et al. (1972) υποστηρίζουν ότι η αστοχία συμβαίνει πάντα στην περιοχή ακριβώς κάτω από τα σημεία φόρτισης ακόμη και όταν το φορτίο κατανέμεται σε ένα τόξο 10° στην περιφέρεια του δίσκου. Ως εκ τούτου, δεν συνιστούν τη δοκιμή για τη μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε εφελκυσμό, ως ιδιότητας του πετρώματος, παρά μόνο ως δείκτη ποιότητας ή για τη μέτρηση της εφελκυστικής τάσης κατά την αρχική ρωγμάτωση του δοκιμίου (Νομικός,2015).

Μία εναλλακτική δοκιμή για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής είναι η αντιδιαμετρική θλίψη ενός δίσκου πετρώματος με μία μικρή κεντρική οπή (Hobbs 1964, 1965). Η δοκιμή αυτή είναι γνωστή ως δοκιμή δακτυλίου (ring test). Η παρουσία της οπής στο κέντρο του δείγματος αναγκάζει τη θραύση να αναπτυχθεί στη θέση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης, αντιμετωπίζοντας έτσι το θέμα της θέσης έναρξης της θραύσης του δοκιμίου. Ωστόσο, η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος υπερεκτιμάται σε μεγάλο βαθμό και επιπλέον εξαρτάται από τον λόγο της διαμέτρου της οπής προς τη διάμετρο του δίσκου (Hudson, 1969).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Προετοιμασία δοκιμίων και χαρακτηρισμός υλικών

6.1 Δοκίμια γύψου

6.1.1 Η γύψος ως υλικό

Η γύψος σαν υλικό ή διυδρίτης του θειικού ασβεστίου είναι μέλος της ομάδας των θειικών ορυκτών με χημικό τύπο $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Οι κρύσταλλοι της γύψου εμφανίζονται ως πρισματικοί, πλακώδεις, φυλλώδεις ή βελονοειδείς (<http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/57-gupsos>).

Σε ερημικές περιοχές, η γύψος σχηματίζει ρόδακες από αδιαφανείς κρυστάλλους που περιέχουν και κόκκους άμμου, μορφή γνωστή ως ρόδο της ερήμου. Πολλοί κρύσταλλοι εισχωρούν ο ένας μέσα στον άλλο (διδυμία) και αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ένα ξεχωριστό φαινόμενο που ονομάζεται «ουρά χελιδονιού». Απαντά επίσης σε ινώδη συσσωματώματα με μεταξώδη λάμψη και στιφρή ή κοκκώδη υφή. Η διαφανής άχρωμη ποικιλία με μαργαριταρώδη λάμψη, γνωστή και ως λάμψη του σεληνόφωτος, είναι γνωστή με τον όρο σεληνίτης. Η λεπτοκρυσταλλική συμπαγής λευκή ποικιλία της γύψου είναι γνωστή ως αλάβαστρο (<http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/57-gupsos>).

Οι κρύσταλλοι της γύψου χαρακτηρίζονται από υαλώδη έως μαργαριτωδή λάμψη, ανώμαλο θραυσμό και σχισμό τελειότατο παράλληλα προς το επίπεδο (010) και τέλειο παράλληλα προς δύο άλλα επίπεδα. Λόγω του σχισμού προκύπτουν εύκολα πλακίδια και φύλλα, τα οποία όμως δεν παρουσιάζουν ελαστικότητα (ευκαμπτότητα) και θραύονται εύκολα (<http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/57-gupsos>).

Η γύψος είναι συνήθως άχρωμη ή λευκή, αλλά μερικές φορές εμφανίζεται και σε αποχρώσεις του κίτρινου, του καστανού, του κόκκινου και του γκρι χρώματος. Παρουσιάζει σκληρότητα 2 της κλίμακας Mohs. Έχει ειδικό βάρος 2.79 gr/cm^3 και είναι εύθρυπτη. Όταν η γύψος τεθεί κάτω από λυχνία υπεριώδους ακτινοβολίας εκπέμπει χαρακτηριστικό πράσινο φώς (φωταύγεια) (<http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/57-gupsos>).

Με θέρμανση υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, η γύψος αρχίζει στους 80-90 °C να χάνει το νερό της και στους 107-110 °C μετατρέπεται σε ημιένυδρο άλας ή ημιυδρίτη $\text{CaSO}_4 \cdot (1/2)\text{H}_2\text{O}$ (ή $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), χάνοντας τα $3/4$ του κρυσταλλικού νερού. Στους 120-140° C έχει μετατραπεί εξ'ολοκλήρου στο ημιένυδρο αυτό άλας, το οποίο αποτελεί την πλαστική γύψο ή γυψάλευρο ή γύψο ταχείας πήξεως. Όταν η πλαστική γύψος αναμιγνύεται με νερό δίνει ένα μίγμα το οποίο σκληρύνεται πολύ γρήγορα μεταπίπτοντας πάλι σε γύψο. Στην ιδιότητα αυτή στηρίζεται η χρήση στην οικοδομική υπό μορφή γυψοκονιάματος (γυψοκορνίζες, γυψοσανίδες κλπ.) και στην

ιατρική (αποκατάσταση καταγμάτων κλπ.) (<http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/57-gupsos>).

Κατά την μετατροπή της γυψάλευρου ($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) σε γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) συμβαίνει ελαφρά αύξηση του όγκου και για το λόγο αυτό η πλαστική γύψος χρησιμοποιείται για την κατασκευή χυτών αντικειμένων στη διακοσμητική και στην καλλιτεχνία (<http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/57-gupsos>).

Με πύρωση σε θερμοκρασίες υψηλότερες των $175\text{ }^\circ\text{C}$ η γύψος χάνει περισσότερο νερό και τότε υπό μορφή κονιάματος σκληρύνεται βραδύτερα. Σε θερμοκρασίες $200\text{-}300\text{ }^\circ\text{C}$ προκύπτει ο ανυδρίτης Ι ή βιομηχανική γύψος, η οποία έχει αποβάλει τελείως το νερό της, έχει όμως τη δυνατότητα ανάκτησης των δύο μορίων νερού που έχασε (επαναπόσληψη νερού). Πήζει αρκετά γρήγορα και χρησιμοποιείται στην τοιχοποιία. Σε θερμοκρασία $300\text{-}500\text{ }^\circ\text{C}$ σχηματίζεται η υδραυλική γύψος, με πιο αργή πήξη. Η γύψος αυτή είναι ανθεκτική και πλάθεται με ίσο όγκο νερού. Σε θερμοκρασία άνω των $500\text{ }^\circ\text{C}$ προκύπτει η νεκρή γύψος, η οποία έχει χάσει τη δυνατότητα να προσλάβει πλέον νερό και χρησιμοποιείται σε μαρμαροκονιάματα και τσιμέντα (<http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/57-gupsos>).

6.1.2 Παρασκευή δοκιμίων γύψου

Για την παρασκευή των δοκιμίων γύψου που χρησιμοποιήσαμε στην δοκιμή 2 (Δοκός 2) όπως και των δοκιμίων τσιμέντου χρησιμοποιήθηκε το καλούπι που φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1. Το καλούπι που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων γύψου και τσιμέντου.

Σε αυτό το καλούπι παρασκευάζονται ταυτόχρονα 6 κυβικά δοκίμια διαστάσεων $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$, δηλαδή μία ολόκληρη δοκός που θα υποστεί καμπτική καταπόνηση στην πειραματική διάταξη. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάστηκαν 2 δοκοί γύψου (Σχήμα 6.2) και 2 δοκοί τσιμέντου.



Σχήμα 6.2. Οι δύο δοκοί γύψου που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα.

Επίσης παρασκευάστηκαν και 3 κυλινδρικά δοκίμια γύψου (13 cm ύψος και 5.50 cm διάμετρος με εμβαδόν $A = 23,75 \text{ cm}^2$), όπως και τσιμέντου για την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, όπως επίσης και 3 κυλινδρικά δοκίμια γύψου (3 cm ύψος και 5.50 cm διάμετρος), για την δοκιμή Brazilian (Σχήμα 6.3)



Σχήμα 6.3.3 Κυλινδρικά δοκίμια γύψου στο βάθος για δοκιμή χαρακτηρισμού μονοαξονικής θλίψης και 3 κυλινδρικά δοκίμια γύψου (μπροστά) για Brazilian test.

Για την παρασκευή των δοκιμίων γύψου χρησιμοποιήθηκε οικοδομική γύψος της εταιρείας BIOGYPS KARVELIS S.A., η οποία είναι καθαρισμένη, ημιένυδρη γύψος, χωρίς πρόσθετα και χημικά. Η αναλογία παρασκευής είναι 10 μέρη γύψου προς 7 μέρη νερού περίπου, με τον χρόνο επεξεργασίας του μείγματος να κυμαίνεται από 7 μέχρι 25 λεπτά. Παράγοντες που θα μπορούσαν να διαφοροποιήσουν τον χρόνο επεξεργασίας είναι ο τρόπος ανάμειξης, η ποσότητα και ποιότητα του νερού και οι περιβαντολλογικές συνθήκες. Η γύψος αυτή έχει πυκνότητα $2,3 \text{ gr/cm}^3$.

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης γύψου είναι το γρήγορο και σταθερό αποτέλεσμα, είναι εύκολο στην εφαρμογή του και είναι ιδανική για ανάμειξη με άλλα δομικά υλικά. Πρέπει όμως να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, γιατί δεν πρέπει να έρχεται σε επαφή με οξέα, ενώ η ανάμιξή της με άλλα υλικά αλλοιώνει τις ιδιότητές της.

Το μίγμα που χρησιμοποιήθηκε για τον γύψο υπολογίστηκε και για τα 6 κυβικά δοκίμια (6 lt, αφού 1 κύβος $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 1000 \text{ cm}^3 = 1 \text{ lt}$), συν ένα 10% παραπάνω ποσοστό υλικού ασφαλείας, λόγω του ότι μπορεί κατά την έγχυση να

χαθεί υλικό στα εξωτερικά τοιχώματα του καλουπιού, ή να κολλήσει υλικό στα τοιχώματα του κουβά ανάμιξης. Έτσι το μίγμα αποτελείται από:

- **Μάζα γύψου:** $m_{\gamma\psi\sigma\upsilon} = 1353 \text{ gr}$, και τελικώς για τα 6 lt έχω 8929,3 gr.
- **Μάζα νερού:** $m_{\nu\epsilon\rho\omicron\upsilon} = 411,76 \text{ gr}$, και τελικώς για τα 6 lt έχω 2717,6 gr.

Για την παρασκευή των κυλινδρικών δοκιμίων για την δοκιμή χαρακτηρισμού μονοαξονικής θλίψης και για την δοκιμή Brazilian, χρησιμοποιήθηκε μίγμα:

- **Μάζα γύψου (Μεγάλο κυλινδρικό δοκίμιο – 13 cm ύψος):** $m_{\gamma\psi\sigma\upsilon} = 432,93\text{gr}$.
- **Μάζα νερού (Μεγάλο κυλινδρικό δοκίμιο – 13 cm ύψος):** $m_{\nu\epsilon\rho\omicron\upsilon} = 131,76 \text{ gr}$.
 - **Μάζα γύψου (Brazilian):** $m_{\gamma\psi\sigma\upsilon} = 98,76 \text{ gr}$.
 - **Μάζα νερού (Brazilian):** $m_{\nu\epsilon\rho\omicron\upsilon} = 30 \text{ gr}$.

6.1.3 Δοκιμές χαρακτηρισμού σε δοκίμια γύψου

6.1.3.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης δοκιμίων γύψου

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκε στο δεξιό πλαίσιο φόρτισης (C250kN), όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.4(α). Τα κυλινδρικά δοκίμια γύψου τοποθετήθηκαν στο πλαίσιο φόρτισης με μια ειδική διάταξη (Παραμορφωτικοί δακτύλιοι), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4(β), η οποία διάταξη, έχει σχεδιαστεί από τον κ.Κοτσάνη Δημήτριο, υποψήφιο διδάκτορα, στα πλαίσια εκπόνησης της διδακτορικής του διατριβής, στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 6.4. (α) Αριστερά, το πλαίσιο φόρτισης για την εκτέλεση της δοκιμής, (β) Η ειδική διάταξη σχεδιασμένη από τον κ.Κοτσάνη Δημήτριο.

Και για τα τρία δοκίμια ο ρυθμός φόρτισης διαμορφώθηκε στα 200N/sec. Να τονιστεί επίσης ότι η παραμόρφωση στα δοκίμια μετρήθηκε με 3 βελόμετρα (Σχήμα

6.5) της εταιρείας CONTROLS, στα οποία η πάνω άκρη τους έχει έμβολο το οποίο συμπιεζόμενο μετράει την μετατόπιση, το πόσο δηλαδή κατέβηκε το πάνω μέρος της ειδικής διάταξης κατά την διάρκεια της δοκιμής, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 6.4(β). Τα 3 βελόμετρα συνδέθηκαν στην μονάδα ελέγχου της πρέσσας στα κανάλια 5, 7 και 8, ενώ αρχικά μετρήθηκε και η απόσταση μεταξύ των δύο κυκλικών μεταλλικών πλαισίων (παραμορφωτικών δακτυλίων) που συγκρατούν το δοκίμιο μαζί με τα βελόμετρα. Τέλος να τονιστεί ότι ο ρυθμός προφόρτισης των βελομέτρων διαμορφώθηκε στα 5000 μm , γιατί σε αυτή την προφόρτιση παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ευαισθησία.



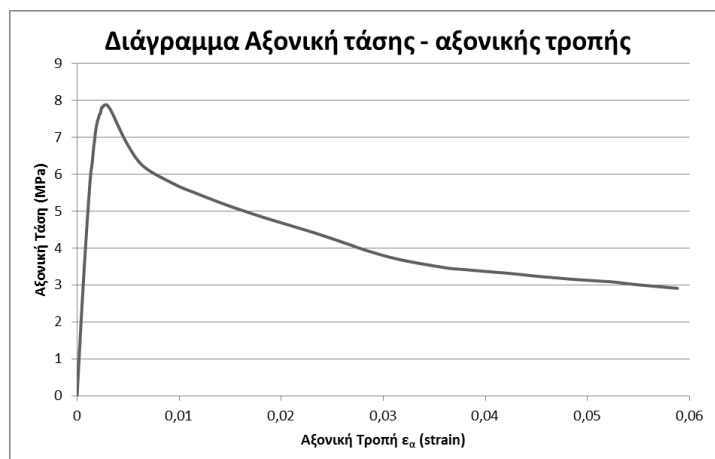
Σχήμα 6.5. Τα 3 βελόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της αξονικής τροπής.

Δοκίμιο γύψου 1

Οι αποστάσεις των παραμορφωτικών δακτυλίων της ειδικής διάταξης μετρήθηκαν:

- Βελόμετρο (Channel 5): 50 mm
- Βελόμετρο (Channel 7): 49,63 mm
- Βελόμετρο (Channel 8): 49,21 mm
- Μέσος όρος αποστάσεων: 49,613 mm

Με βάση τα δεδομένα της πρέσσας σχηματίστηκε το παρακάτω διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής:



Διάγραμμα 6.1. Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο γύψου 1.

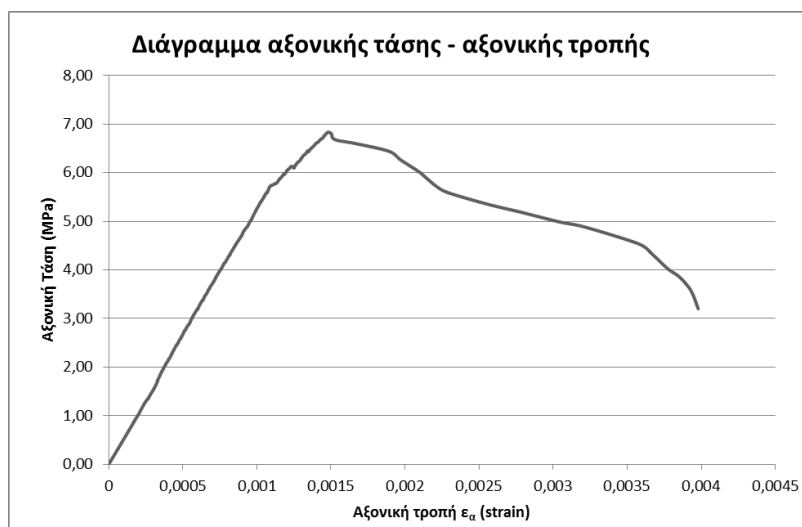
Από αυτό το διάγραμμα μετρήθηκε το μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος, στην περιοχή δηλαδή αριστερά του διαγράμματος, στην ευθεία. Η εξίσωση της ευθείας είναι $y=4644,8x + 0,1786$ με $R^2=0,9982$, άρα το μέτρο ελαστικότητας είναι **$E= 4644,8 \text{ MPa} = 4,6 \text{ GPa}$** . Τέλος να σημειωθεί ότι η αντοχή του γύψου σε μονοαξονική θλίψη είναι **$\sigma_c = 7,88 \text{ MPa}$** .

Δοκίμιο γύψου 2

Οι αποστάσεις των παραμορφωτικών δακτυλίων της ειδικής διάταξης μετρήθηκαν:

- Βελόμετρο (Channel 5): 49,9 mm
- Βελόμετρο (Channel 7): 49,48 mm
- Βελόμετρο (Channel 8): 49,41 mm
- Μέσος όρος μετρήσεων: 49,596 mm

Με βάση τα δεδομένα της πρέσσας σχηματίστηκε το παρακάτω διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής:



Διάγραμμα 6.2. Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο γύψου 2

Από αυτό το διάγραμμα μετρήθηκε το μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος, στην περιοχή δηλαδή αριστερά του διαγράμματος, στην ευθεία. Η εξίσωση της ευθείας είναι $y=5322,9x + 0,0134$ με $R^2= 0,9995$, άρα το μέτρο ελαστικότητας είναι **$E= 5322,9 \text{ MPa} = 5,3 \text{ GPa}$** . Τέλος να σημειωθεί ότι η αντοχή του γύψου σε μονοαξονική θλίψη είναι **$\sigma_c = 6,83 \text{ MPa}$** .

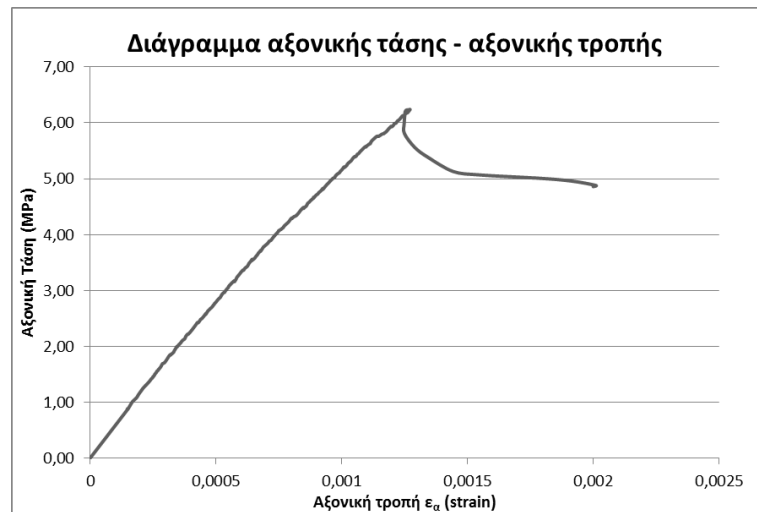
Δοκίμιο γύψου 3

Οι αποστάσεις των παραμορφωτικών δακτυλίων της ειδικής διάταξης μετρήθηκαν:

- Βελόμετρο (Channel 5): 50 mm
- Βελόμετρο (Channel 7): 49,52 mm
- Βελόμετρο (Channel 8): 49,81 mm

- Μέσος όρος αποστάσεων: 49,776 mm

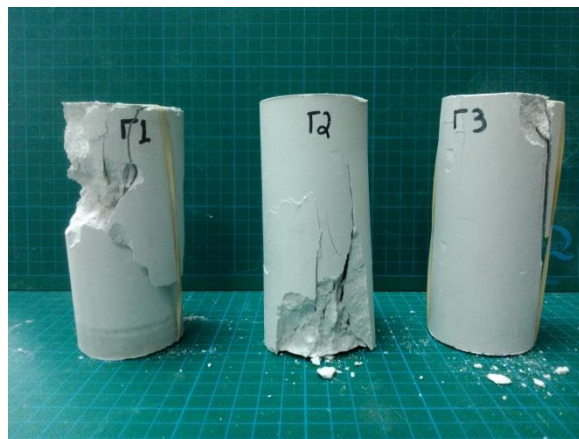
Με βάση τα δεδομένα της πρέσσας σχηματίστηκε το παρακάτω διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής:



Διάγραμμα 6.3. Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο γύψου 3.

Από αυτό το διάγραμμα μετρήθηκε το μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος, στην περιοχή δηλαδή αριστερά του διαγράμματος, στην ευθεία. Η εξίσωση της ευθείας είναι $y = 5876,8x + 0,0001$ με $R^2 = 0,9998$, άρα το μέτρο ελαστικότητας είναι $E = 5876,8 \text{ MPa} = 5,88 \text{ GPa}$. Τέλος να σημειωθεί ότι η αντοχή του γύψου σε μονοαξονική θλίψη είναι $\sigma_C = 6,24 \text{ MPa}$.

Τα δοκίμια μετά το πέρας της δοκιμής και την αστοχία τους, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.6.

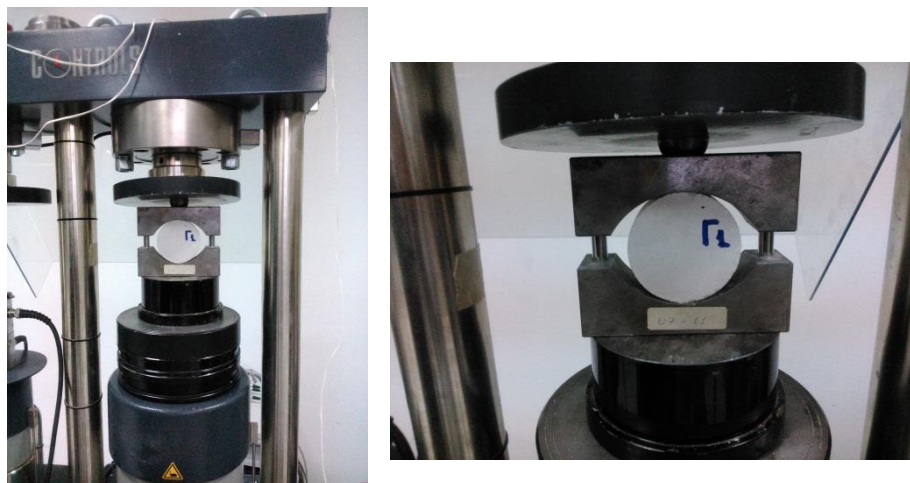


Σχήμα 6.6. Τα 3 κυλινδρικά δοκίμια γύψου μετά το πέρας της δοκιμής και την αστοχία τους.

6.1.3.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης δοκιμίων γύψου (Brazilian Test)

Σε αυτή την δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις μικροί μπροστινοί κύλινδροι του Σχήματος 6.3. Όπως και οι μεγάλοι κύλινδροι έχουν την ίδια διάμετρο 5,50 cm, αλλά

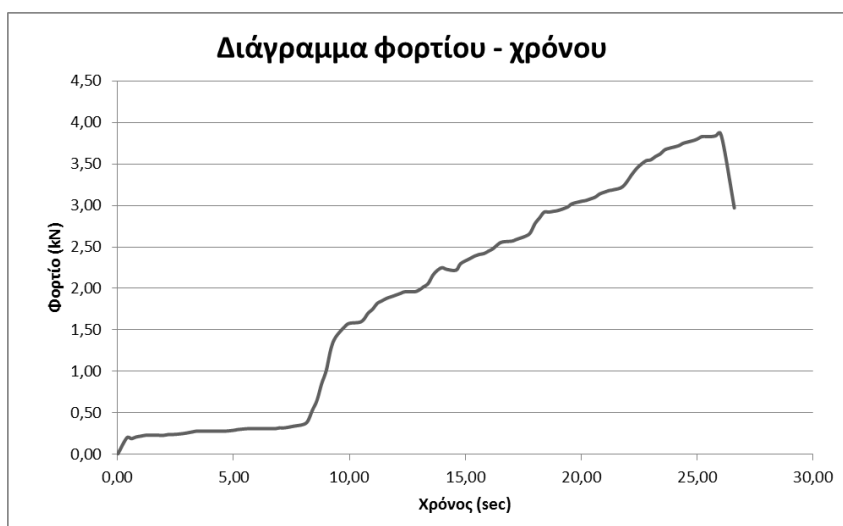
το πάχος τους διαφέρει. Για αυτή την δοκιμή χρησιμοποιήθηκε το ίδιο πλαίσιο φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε και για την μονοαξονική θλίψη, αλλά με άλλη διάταξη για να μπορέσουν να προσαρμοστούν οι σιαγόνες της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης (Σχήμα 6.7). Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με ρυθμό φόρτισης 150N/sec.



Σχήμα 6.7.Αριστερά το πλαίσιο φόρτισης και δεξιά διακρίνονται οι σιαγόνες φόρτισης που συγκρατούν το δοκίμιο.

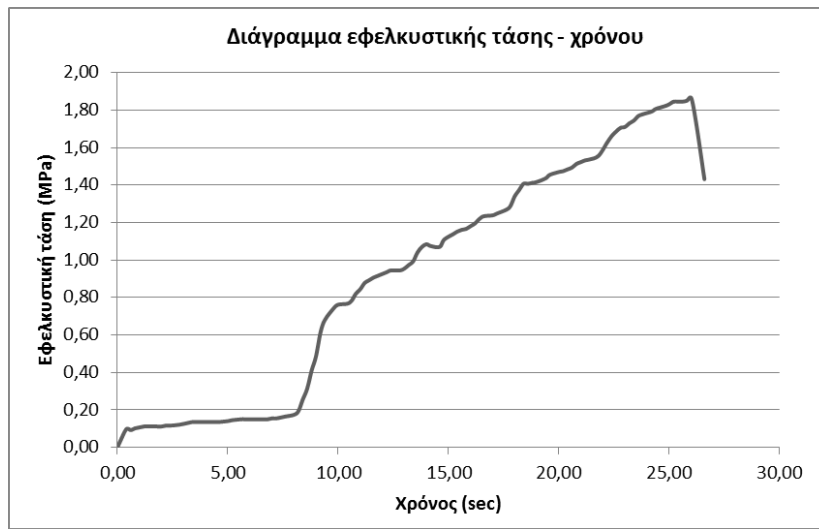
Δοκίμιο Γύψου 1

Το πάχος t του δοκιμίου είναι $24,21 \text{ mm} = 2,4 \text{ cm}$, ενώ το μέγιστο φορτίο όπως φαίνεται και από το διάγραμμα διαμορφώθηκε στα $P = 3,87 \text{ kN}$.



Διάγραμμα 6.4.Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο γύψου 1.

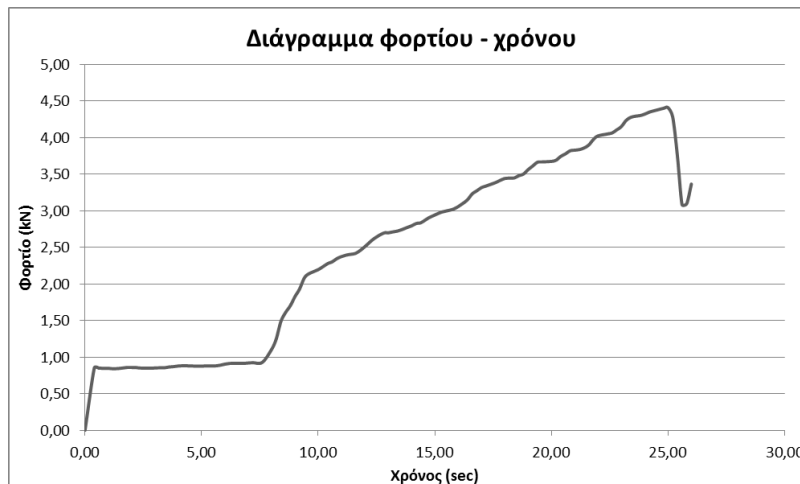
Σύμφωνα με τον τύπο (5.16 – $[\sigma_t = (2P)/(\pi Dt) = (0,636 \cdot P)/(Dt)]$), η αντοχή του δοκιμίου γύψου 1 σε εφελκυσμό είναι $\sigma_t = 1,86 \text{ MPa}$ (Διάγραμμα 6.5).



Διάγραμμα 6.5. Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – χρόνου για δοκίμιο γύψου 1.

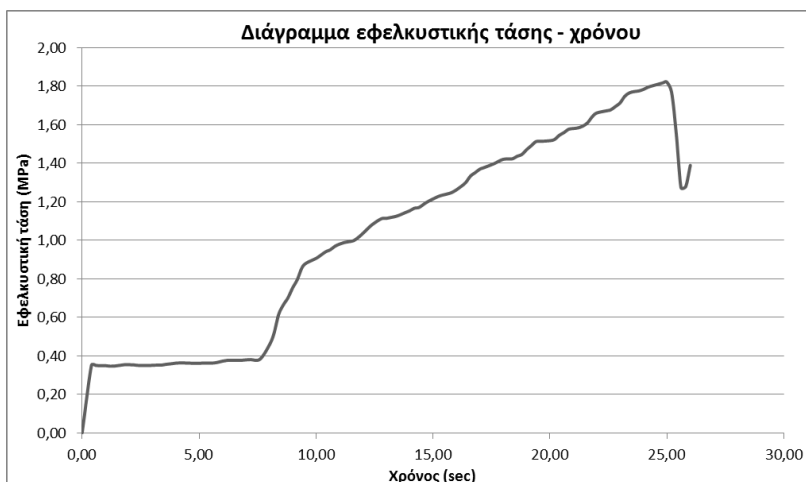
Δοκίμιο Γύψου 2

Το πάχος t του δοκιμίου είναι $28,22 \text{ mm} = 2,8 \text{ cm}$, ενώ το μέγιστο φορτίο όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 6.6 διαμορφώθηκε στα $P = 4,41 \text{ kN}$.



Διάγραμμα 6.6. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο γύψου 2.

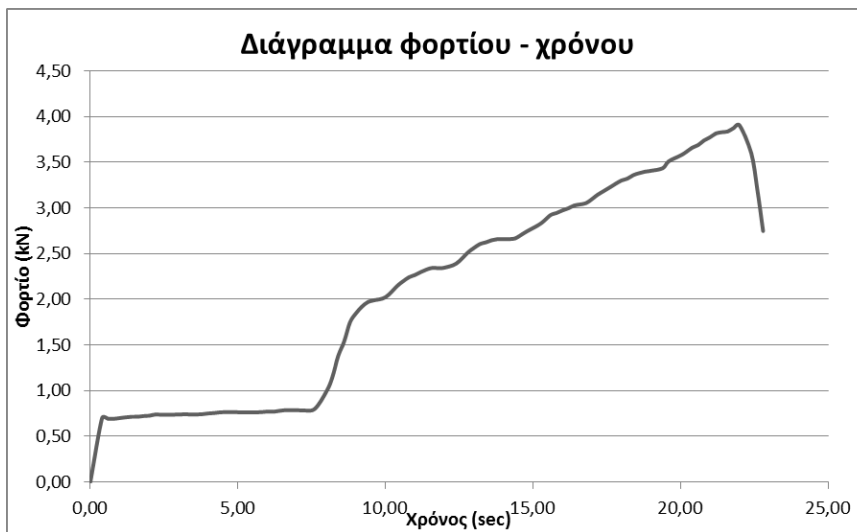
Σύμφωνα με τον τύπο (5.16 – $[\sigma_t = (2P)/(\pi Dt) = (0,636 \cdot P)/(Dt)]$), η αντοχή του δοκιμίου γύψου 2 σε εφελκυσμό είναι $\sigma_t = 1,82 \text{ MPa}$.



Διάγραμμα 6.7. Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – χρόνου για δοκίμιο γύψου 2.

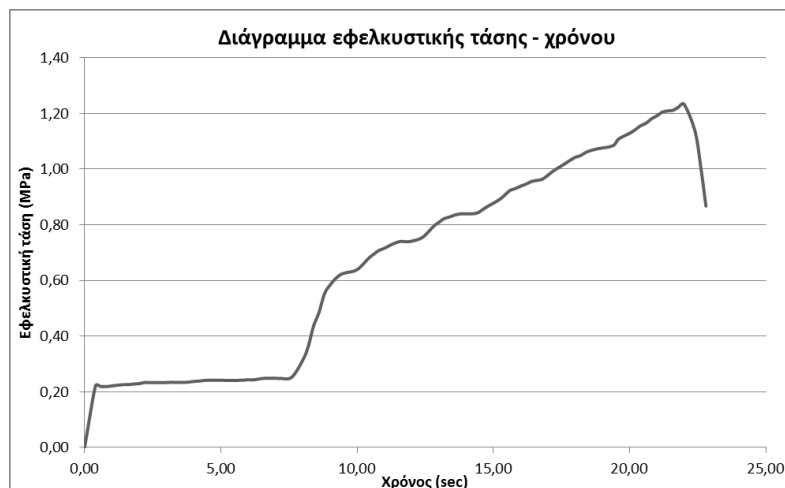
Δοκίμιο Γύψου 3

Το πάχος t του δοκιμίου 3 είναι $36,63 \text{ mm} = 3,66 \text{ cm}$, ενώ το μέγιστο φορτίο όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 6.8 διαμορφώθηκε στα $P = 3,90 \text{ kN}$.



Διάγραμμα 6.8. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο γύψου 3.

Σύμφωνα με τον τύπο (5.16 – $[\sigma_t = (2P)/(\pi Dt) = (0,636 \cdot P)/(Dt)]$), η αντοχή του δοκιμίου γύψου 3 σε εφελκυσμό είναι $\sigma_t = 1,23 \text{ MPa}$.



Διάγραμμα 6.9. Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – χρόνου για δοκίμιο γύψου 3.

Τα δοκίμια μετά την θραύση παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.8



Σχήμα 6.8.Τα δοκίμια γύψου μετά την αστοχία τους.

6.2 Δοκίμια τσιμεντοκονιάματος

6.2.1 Παρασκευή δοκιμών τσιμεντοκονιάματος

Για τον σκοπό του πειράματος κατασκευάστηκαν 2 δοκοί τσιμέντου (Σχήμα 6.9) που αποτελούνται επίσης από 6 κυβικά άρρηκτα ογκοτεμάχια διαστάσεων 10cm x 10cm x 10cm, τα οποία παρασκευάστηκαν και αυτά στο ίδιο καλούπι που παρασκευάστηκαν και τα δοκίμια γύψου (Σχήμα 6.10).



Σχήμα 6.9.Οι δύο δοκοί τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθούν για το πείραμα.



Σχήμα 6.10.Διακρίνεται το ίδιο καλούπι, από το οποίο παρασκευάσαμε τα δοκίμια γύψου,να χρησιμοποιείται για παρασκευή δοκιμών τσιμέντου.

Επίσης παρασκευάστηκαν και 3 κυλινδρικά δοκίμια τσιμέντου ύψους 13 cm και διαμέτρου 5.5 cm για δοκιμή χαρακτηρισμού μονοαξονικής θλίψης, όπως επίσης και 3 κυλινδρικά δοκίμια τσιμέντου ύψους 3 cm και διαμέτρου 5.5 cm, για δοκιμή χαρακτηρισμού αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian test) (Σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11. Διακρίνονται πίσω τα 3 μεγάλα κυλινδρικά δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν για δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και μπροστά τα 3 δοκίμια για δοκιμή Brazilian.

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε είναι το SikaGrout-212 της εταιρείας Sika, το οποίο είναι ένα τσιμεντοειδές κονίαμα για μη συρρικνούμενες χυτεύσεις. Είναι ενός συστατικού, έτοιμο προς χρήση, τσιμεντοειδούς βάσης κονίαμα, όπου με απλή ανάμιξη νερού σχηματίζεται ένα διογκούμενο ρευστό και ομοιογενές χυτό κονίαμα που παρουσιάζει υψηλές μηχανικές αντοχές, μετά από σύντομο χρόνο ωρίμανσης. Η συνεκτικότητα του κονιάματος (πλαστικό ρευστό, υπέρ-ρευστό) διαφοροποιείται ανάλογα με την τροποποίηση της προστιθέμενης ποσότητας του νερού.

Τα χαρακτηριστικά του συσκευασμένου τσιμέντου είναι τα εξής:

- Έχει εξαιρετική ρευστότητα.
- Δεν συρρικνώνεται.
- Παρουσιάζει υψηλές πρώιμες και τελικές αντοχές.
- Είναι συμβατό με ρευστοποιητές της Sika ώστε να επιτευχθεί-κάτω από ειδικές συνθήκες λειτουργίας-ο απαιτούμενος βαθμός ρευστότητας χωρίς να υπερβαίνεται η μέγιστη συνιστώμενη ποσότητα νερού ανάμιξης.
- Μπορεί να αναμιγνύεται με επιπρόσθετες ποσότητες αδρανών σε περιπτώσεις μεγάλων όγκων.

Η πυκνότητα του φρέσκου κονιάματος είναι 2,25 kg/lit, με μέγιστη κοκκομετρία $D_{max}=2$ mm. Η αναλογία που προτείνεται είναι 3 lit για 25 kg σκόνη.

Το μίγμα που χρησιμοποιήθηκε για το τσιμέντο υπολογίστηκε και για τα 6 κυβικά δοκίμια (6 lit, αφού 1 κύβος 10 cm x 10 cm x 10 cm = 1000 cm³ = 1 lit), συν ένα 10% παραπάνω ποσοστό υλικού ασφαλείας, λόγω του ότι μπορεί κατά την έγχυση να χαθεί υλικό στα εξωτερικά τοιχώματα του καλουπιού, ή να κολλήσει υλικό στα τοιχώματα του κουβά ανάμιξης. Έτσι το μίγμα αποτελείται από:

- **Μάζα τσιμέντου:** $m_{\text{τσιμέντου}} = 1749,825 \text{ gr}$, και τελικώς για τα 6 lt έχω 11548,845 gr.
- **Μάζα νερού:** $m_{\text{νερού}} = 212,766 \text{ gr}$, και τελικώς για τα 6 lt έχω 1404,26 gr.

Για την παρασκευή των κυλινδρικών δοκιμίων για την δοκιμή χαρακτηρισμού μονοαξονικής θλίψης και για την δοκιμή Brazilian, χρησιμοποιήθηκε μίγμα:

- **Μάζα τσιμέντου (Μεγάλο κυλινδρικό δοκίμιο – 13 cm ύψος):** $m_{\text{τσιμέντου}} = 559,944 \text{ gr}$.
- **Μάζα νερού (Μεγάλο κυλινδρικό δοκίμιο – 13 cm ύψος):** $m_{\text{νερού}} = 68 \text{ gr}$.
 - **Μάζα τσιμέντου (Brazilian):** $m_{\text{τσιμέντου}} = 127,737 \text{ gr}$.
 - **Μάζα νερού (Brazilian):** $m_{\text{νερού}} = 15,532 \text{ gr}$.

Τέλος να τονιστεί ότι τα κυβικά δοκίμια αφέθηκαν στο καλούπι για μία ημέρα, ενώ την επόμενη ξεκαλουπώθηκαν και τοποθετήθηκαν στην μεγάλη δεξαμενή νερού, που διαθέτει το εργαστήριο, στην οποία παρέμειναν για 28 ημέρες με σκοπό το τσιμέντο να αποκτήσει την τελική του αντοχή (Σχήμα 6.12(β)). Επίσης το εργαστήριο διαθέτει και μικρή δεξαμενή νερού για την τοποθέτηση δοκιμίων τσιμέντου (Σχήμα 6.12(α)).



Σχήμα 6.12.(α) Διακρίνεται η μικρή δεξαμενή που διαθέτει το εργαστήριο, για την τοποθέτηση δοκιμίων τσιμέντου, για την απόκτηση της τελικής τους αντοχής.(β) Η μεγάλη δεξαμενή τοποθέτησης δοκιμίων τσιμέντου.

6.2.2 Δοκιμές χαρακτηρισμού σε δοκίμια τσιμέντου

6.2.2.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης δοκιμίων τσιμέντου

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκε στο δεξιό πλαίσιο φόρτισης (C250kN), όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.13(α). Τα κυλινδρικά δοκίμια τσιμέντου τοποθετήθηκαν στο πλαίσιο φόρτισης με μια ειδική διάταξη (Παραμορφωτικοί δακτύλιοι), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13(β), η οποία διάταξη, έχει σχεδιαστεί από τον κ.Κοτσάνη Δημήτριο, υποψήφιο διδάκτορα, στα πλαίσια εκπόνησης της διδακτορικής του διατριβής, στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 6.13.(α) Αριστερά, το πλαίσιο φόρτισης για την εκτέλεση της δοκιμής, (β) Η ειδική διάταξη σχεδιασμένη από τον κ.Κοτσάνη Δημήτριο.

Και για τα τρία δοκίμια ο ρυθμός φόρτισης διαμορφώθηκε στα 500 N/sec. Να τονιστεί επίσης ότι η παραμόρφωση στα δοκίμια μετρήθηκε με 3 βελόμετρα (Σχήμα 6.14) της εταιρείας CONTROLS, στα οποία η πάνω άκρη τους έχει έμβολο το οποίο συμπιεζόμενο μετράει την μετατόπιση, το πόσο δηλαδή κατέβηκε το πάνω μέρος της ειδικής διάταξης κατά την διάρκεια της δοκιμής, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 6.13(β). Τα 3 βελόμετρα συνδέθηκαν στην μονάδα ελέγχου της πρέσσας στα κανάλια 5, 7 και 8, ενώ αρχικά μετρήθηκε και η απόσταση μεταξύ των δύο κυκλικών μεταλλικών πλαισίων (παραμορφωτικών δακτυλίων) που συγκρατούν το δοκίμιο μαζί με τα βελόμετρα. Τέλος να τονιστεί ότι ο ρυθμός προφόρτισης των βελομέτρων διαμορφώθηκε στα 5000μm, γιατί σε αυτή την προφόρτιση παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ευαισθησία.



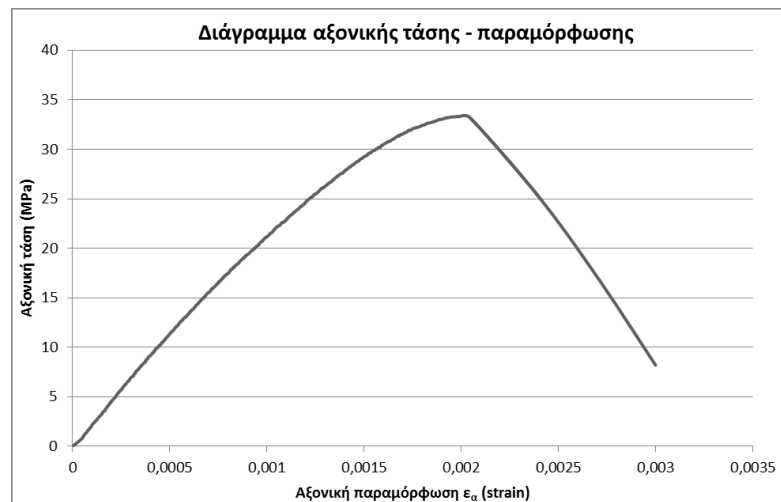
Σχήμα 6.14. Τα 3 βελόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της αξονικής τροπής.

Δοκίμιο τσιμέντου 1

Οι αποστάσεις των παραμορφωτικών δακτυλίων της ειδικής διάταξης μετρήθηκαν:

- Βελόμετρο (Channel 5): 39,21 mm
- Βελόμετρο (Channel 7): 39,59 mm
- Βελόμετρο (Channel 8): 40,02 mm
- Μέσος όρος αποστάσεων: 39,60 mm

Με βάση τα δεδομένα της πρέσσας σχηματίστηκε το παρακάτω διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής:



Διάγραμμα 6.10. Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο τσιμέντου 1.

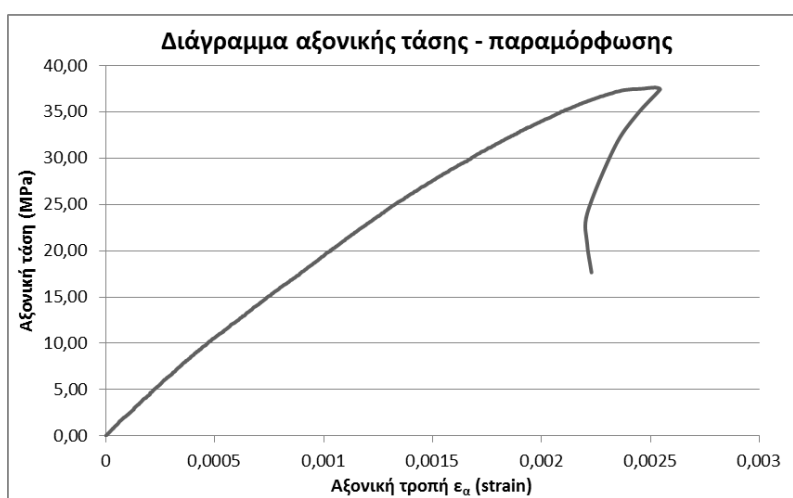
Από αυτό το διάγραμμα μετρήθηκε το μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος, στην περιοχή δηλαδή αριστερά του διαγράμματος, στην ευθεία. Η εξίσωση της ευθείας είναι $y=23118x - 0,1303$ με $R^2=0,993$, άρα το μέτρο ελαστικότητας είναι $E= 23118 \text{ MPa} = 23,12 \text{ GPa}$. Τέλος να σημειωθεί ότι η αντοχή του δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος σε μονοαξονική θλίψη είναι $\sigma_c = 33,31 \text{ MPa}$.

Δοκίμιο τσιμέντου 2

Οι αποστάσεις των παραμορφωτικών δακτυλίων της ειδικής διάταξης μετρήθηκαν:

- Βελόμετρο (Channel 5): 39,98 mm
- Βελόμετρο (Channel 7): 39,67 mm
- Βελόμετρο (Channel 8): 39,51 mm
- Μέσος όρος μετρήσεων: 39,72 mm

Με βάση τα δεδομένα της πρέσσας σχηματίστηκε το παρακάτω διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής:



Διάγραμμα 6.11. Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο τσιμέντου 2

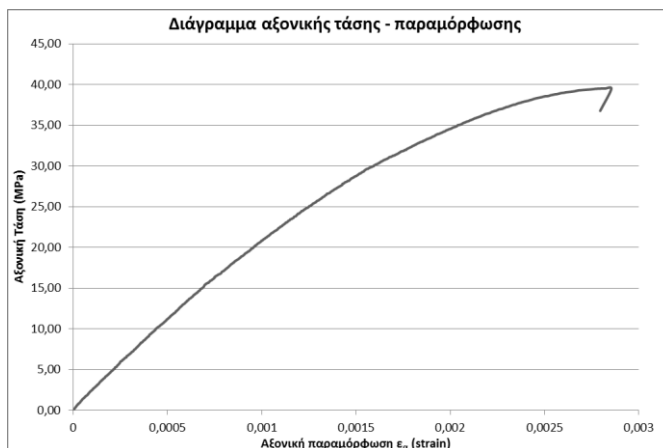
Από αυτό το διάγραμμα μετρήθηκε το μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος, στην περιοχή δηλαδή αριστερά του διαγράμματος, στην ευθεία. Η εξίσωση της ευθείας είναι $y=24544x - 0,0153$ με $R^2= 0,9972$, άρα το μέτρο ελαστικότητας είναι $E= 24544 \text{ MPa} = 24,54 \text{ GPa}$. Τέλος να σημειωθεί ότι η αντοχή του δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος σε μονοαξονική θλίψη είναι $\sigma_c = 37,63 \text{ MPa}$.

Δοκίμιο τσιμέντου 3

Οι αποστάσεις των παραμορφωτικών δακτυλίων της ειδικής διάταξης μετρήθηκαν:

- Βελόμετρο (Channel 5): 39,38 mm
- Βελόμετρο (Channel 7): 39,59 mm
- Βελόμετρο (Channel 8): 39,50 mm
- Μέσος όρος αποστάσεων: 39,49 mm

Με βάση τα δεδομένα της πρέσσας σχηματίστηκε το παρακάτω διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής:



Διάγραμμα 6.12. Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για δοκίμιο τσιμέντου 3.

Από αυτό το διάγραμμα μετρήθηκε το μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος, στην περιοχή δηλαδή αριστερά του διαγράμματος, στην ευθεία. Η εξίσωση της ευθείας είναι $y = 23145x + 0,1596$ με $R^2 = 0,9991$, άρα το μέτρο ελαστικότητας είναι $E = 23145 \text{ MPa} = 23,14 \text{ GPa}$. Τέλος να σημειωθεί ότι η αντοχή του δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος σε μονοαξονική θλίψη είναι $\sigma_C = 39,53 \text{ MPa}$.

Τα δοκίμια μετά το πέρας της δοκιμής και την αστοχία τους, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.15.



Σχήμα 6.15. Τα 3 κυλινδρικά δοκίμια τσιμέντου μετά το πέρας της δοκιμής και την αστοχία τους.

6.2.2.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης δοκιμίων τσιμέντου (Brazilian Test)

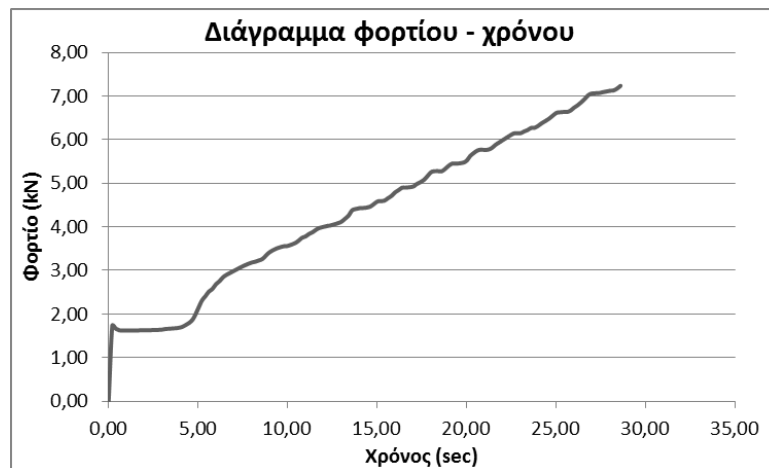
Σε αυτή την δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις μικροί μπροστινοί κύλινδροι του Σχήματος 6.11. Όπως και οι μεγάλοι κύλινδροι έχουν την ίδια διάμετρο 5,50 cm, αλλά το πάχος τους διαφέρει. Για αυτή την δοκιμή χρησιμοποιήθηκε το ίδιο πλαίσιο φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε και για την μονοαξονική θλίψη, αλλά με άλλη διάταξη για να μπορέσουν να προσαρμοστούν οι σιαγόνες της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης (Σχήμα 6.16). Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με ρυθμό φόρτισης 200 N/sec.



Σχήμα 6.16.Αριστερά το πλαίσιο φόρτισης και δεξιά διακρίνονται οι σιαγόνες φόρτισης που συγκρατούν το δοκίμιο.

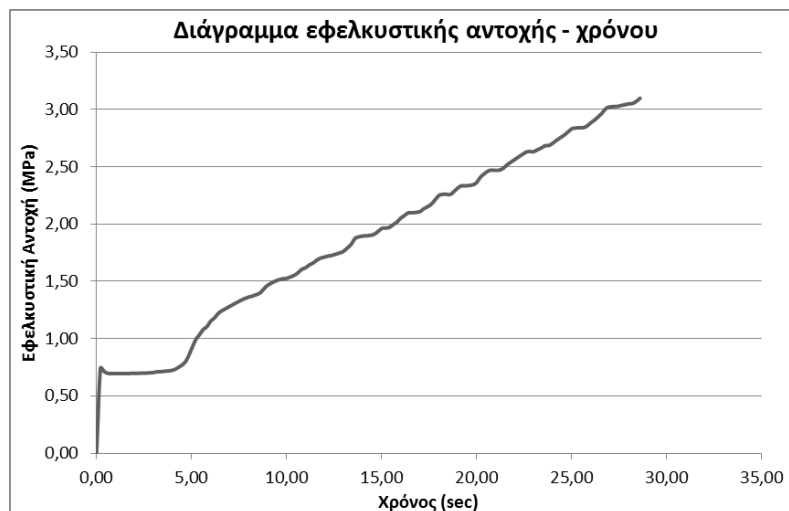
Δοκίμιο τσιμέντου 1

Το πάχος t του δοκιμίου είναι $27,00 \text{ mm} = 2,7 \text{ cm}$, ενώ το μέγιστο φορτίο όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 6.13 διαμορφώθηκε στα $P = 7,24 \text{ kN}$.



Διάγραμμα 6.13.Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 1.

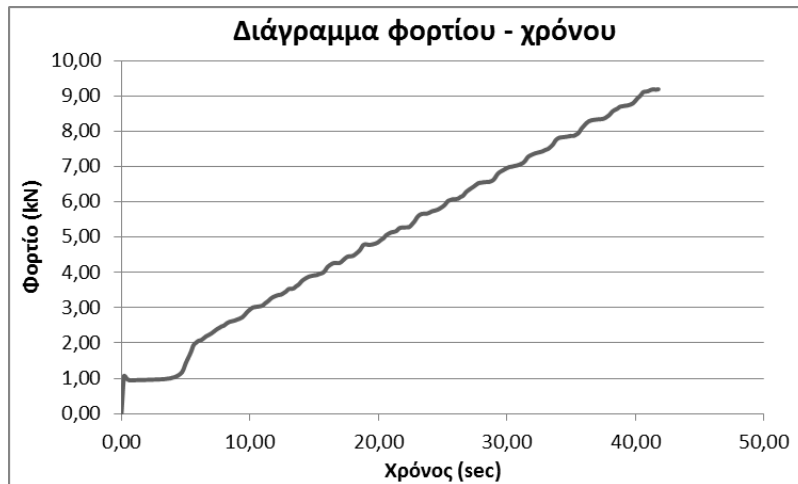
Σύμφωνα με τον τύπο ($5.16 - [\sigma_t = (2P)/(\pi Dt) = (0,636 \cdot P)/(Dt)]$), η αντοχή του δοκιμίου τσιμέντου 1 σε εφελκυσμό είναι $\sigma_t = 3,10 \text{ MPa}$ (Διάγραμμα 6.14).



Διάγραμμα 6.14.Διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 1.

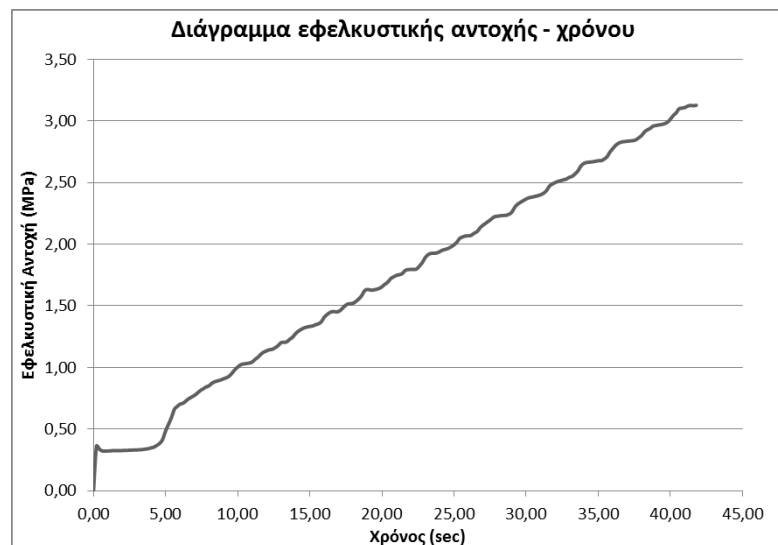
Δοκίμιο τσιμέντου 2

Το πάχος t του δοκιμίου είναι $34 \text{ mm} = 3,4 \text{ cm}$, ενώ το μέγιστο φορτίο όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 6.15 διαμορφώθηκε στα $P = 9,20 \text{ kN}$.



Διάγραμμα 6.15. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 2.

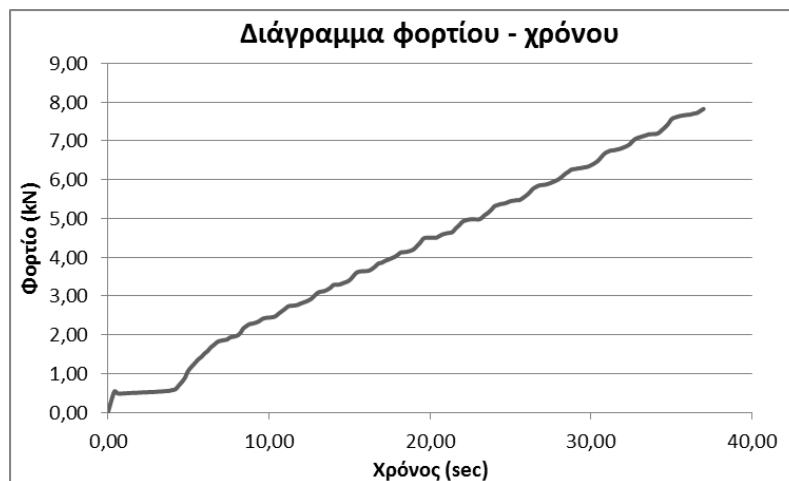
Σύμφωνα με τον τύπο (5.16 – $[\sigma_t = (2P)/(\pi Dt) = (0,636 \cdot P)/(Dt)]$), η αντοχή του δοκιμίου τσιμέντου 2 σε εφελκυσμό είναι $\sigma_t = 3,13 \text{ MPa}$.



Διάγραμμα 6.16. Διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 2.

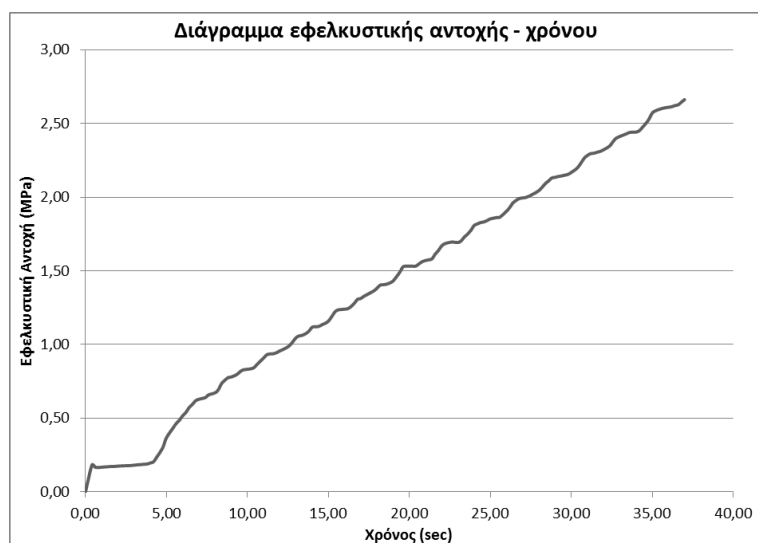
Δοκίμιο τσιμέντου 3

Το πάχος t του δοκιμίου 3 είναι $34 \text{ mm} = 3,4 \text{ cm}$, ενώ το μέγιστο φορτίο όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 6.17 διαμορφώθηκε στα $P = 7,83 \text{ kN}$.



Διάγραμμα 6.17. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 3.

Σύμφωνα με τον τύπο (5.16 – $[\sigma_t = (2P)/(\pi Dt) = (0,636 \cdot P)/(Dt)]$), η αντοχή του δοκιμίου τσιμέντου 3 σε εφελκυσμό είναι $\sigma_t = 2,66 \text{ MPa}$.



Διάγραμμα 6.18. Διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής – χρόνου για δοκίμιο τσιμέντου 3.

Τα δοκίμια μετά την θραύση παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.17.



Σχήμα 6.17. Τα δοκίμια τσιμέντου μετά την αστοχία τους.

6.3 Δοκίμια μαρμάρου Διονύσου

6.3.1 Το μάρμαρο Διονύσου ως υλικό

Ως πέτρωμα που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το πείραμα επιλέχθηκε το μάρμαρο Διονύσου. Το πέτρωμα αυτό επιλέχθηκε τόσο λόγω των ιδιοτήτων του όσο και λόγω της πλούσιας βιβλιογραφίας σχετικά με αυτές. Από μία κριτική βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπιστώνεται ότι το μάρμαρο Διονύσου είναι ίσως το μοναδικό πέτρωμα στον ελληνικό χώρο όπου έχει μελετηθεί τόσο πολύ στα πλαίσια ελληνικών και ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

Το μάρμαρο Διονύσου εξορύσσεται στο λατομείο της εταιρείας Α.Ε.Β.Ε. Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης στο Διόνυσο Αττικής στη θέση Διονυσοβούνι. Το μάρμαρο αυτό έχει παρόμοια σύσταση, υφή και μηχανικές ιδιότητες με το πεντελικό μάρμαρο, που έχει χρησιμοποιηθεί σε ξεχωριστά μνημεία της αρχαίας Ελληνικής ιστορίας. Η συνηθέστερη χρωματική παραλλαγή τους είναι εκείνη που παρουσιάζει λευκό χρώμα με παράλληλες ζώνες κυανότεφρου και σμαραγδοπράσινου χρώματος («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

Γεωλογικά το μάρμαρο είναι πέτρωμα που προέρχεται από ασβεστόλιθο με ανακρυστάλλωση του κύριου ορυκτού του πετρώματος, δηλαδή τον ασβεστίτη. Ο ασβεστόλιθος είναι ιζηματογενές πέτρωμα, που σχηματίζεται σε θαλάσσιο ή λιμναίο περιβάλλον με τη διαδικασία της διαγένεσης (διαδικασία σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων, κατά την οποία ένα χαλαρό ίζημα μετατρέπεται σε συμπαγές πέτρωμα, με τη βοήθεια της πίεσης των υπερκείμενων στρωμάτων και της φυσικής συνδετικής ύλης). Όταν ο ασβεστόλιθος βρεθεί σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας μεταμορφώνεται σε μάρμαρο, όπου οι αρχικοί κρύσταλλοι του ασβεστίτη με τη διεργασία της ανακρυστάλλωσης, συνενώνονται προς μεγαλύτερους κρυστάλλους ενίοτε ορατά ακόμη και με γυμνό μάτι («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

Τα λευκά μάρμαρα Διονύσου, αντιπροσωπεύουν ορίζοντα του «κατώτερου μαρμάρου» σύμφωνα με την κλασική γεωλογική μελέτη του Lepsius (1893), ο οποίος χώρισε το κρυσταλλοσχιστώδες της Αττικής σε Ανώτερο Μάρμαρο, Σχιστόλιθους Καισαριανής, Κατώτερο Μάρμαρο, Δολομίτες Πιρναρής και σχιστόλιθους Βάρης. Ο ίδιος ερευνητής αναφέρει ότι το μεταμορφωμένο αυτό σύστημα έχει υποστεί τρεις πτυχωσιγενείς φάσεις με άξονες ΒΑ-ΝΔ, ΒΔ-ΝΑ και Β-Ν. Από τους νεώτερους ερευνητές οι Μαριολάκος και Παπανικολάου (1973) συμφωνούν σε γενικές γραμμές με τον Lepsius και αναφέρουν τους ίδιους σε διεύθυνση και ηλικία άξονες πτυχώσεων. Σύμφωνα με επιτόπιες παρατηρήσεις στα λατομεία της εταιρείας, τα λευκά μάρμαρα αποτελούν τα ανώτερα μέλη του κατώτερου μαρμάρου και βρίσκονται σε συμφωνία με τους υπερκείμενους σχιστόλιθους. Τα μάρμαρα αυτά είναι αντίστοιχα με τα γνωστά μάρμαρα του Πεντελικού, τα οποία έχουν υποστεί

κατακόρυφη μετατόπιση λόγω ενός μεγάλου κανονικού ρήγματος με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ που βαίνει παράλληλα με το ΒΑ όριο του βουνού. Τα μάρμαρα είναι παχυστρωματώδη και η στρώση τους αναγνωρίζεται δύσκολα, με τη βοήθεια των λεπτών σκουρόχρωμων διαστρώσεων που παρουσιάζει, ενώ οι πολλαπλές διακλάσεις και μικρομετακινήσεις των πάγκων δυσκολεύουν ακόμα περισσότερο τη διαμόρφωση σαφούς εικόνας για τη διεύθυνση και τη κλίση τους («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

Τα μάρμαρα Διονύσου προέρχονται από μεταμόρφωση καθαρών ασβεστόλιθων νηριτικής φάσης, με πολύ μικρή συμμετοχή μαγνησιούχων και αργιλοπυριτικών ουσιών. Πρόκειται για μεσόκοκκα μάρμαρα τα οποία διαθέτουν δύο κύριες κοκκομετρίες (Τσουτρέλης κ.ά., 1997). Αυτή που επικρατεί είναι περίπου 0.45 mm και η άλλη που είναι μικρότερη είναι περίπου 0.15 mm. Και τα δύο μεγέθη κρυστάλλων βρίσκονται σε ανάμειξη μεταξύ τους. Στο πέτρωμα περιέχονται ακόμη σε επουσιώδη ποσότητα μεταλλικοί αδιαφανείς κόκκοι (μέγεθος μέχρι 0.11 mm) που είναι διάσπαρτοι, και λίγοι μεμονωμένοι ή σε συσσωματώματα κόκκοι χαλαζία (μέγεθος κόκκων 0.28 mm, μέγεθος συσσωματωμάτων μέχρι 0.8 mm), καθώς επίσης και φυλλάρια μοσχοβίτη που συγκεντρώνονται σε μικροδιακλάσεις μαζί με ασβεστιτικό και λίγο δολομιτικό υλικό. Εκτός από τον ασβεστίτη το μάρμαρο μπορεί να περιέχει σε μικρό ποσοστό και το ορυκτό δολομίτη που μοιάζει κρυσταλλογραφικά με τον ασβεστίτη, αλλά έχει αυξημένη σκληρότητα. Ορυκτολογικά το μάρμαρο Διονύσου συνίσταται από 94-97% ασβεστίτη, 2-3% χαλαζία και 0-4% δολομίτη («Πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε.-Ε.Μ.Π.», Μάϊος 2012).

Λόγω της ανισοτροπίας του μαρμάρου Διονύσου οι μηχανικές του ιδιότητες μεταβάλλονται ανάλογα με τη διεύθυνση της φόρτισης σε σχέση με τα επίπεδα ανισοτροπίας του πετρώματος. Η αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη, μετρούμενη σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία της κυμαίνεται από 70 έως 80 MPa, με μέσο μέτρο ελαστικότητας 40-50 GPa (Τσουτρέλης κ.ά., 2000). Εντούτοις, σε βιβλιογραφικές αναφορές έχουν μετρηθεί τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη μεγαλύτερες από 80 MPa, ενώ οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του πετρώματος δίνονται ως συνοχή $c=24.10$ MPa και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=36.19^\circ$ (C.N.R.-FIRGET, 2002).

6.3.2 Δοκιμές χαρακτηρισμού δοκιμίων μαρμάρου

Κυβικά δοκίμια μαρμάρου Διονύσου ύψους 5 cm και διατομής 5 cm x 5 cm, χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία (Σχήμα 6.18). Σε παλιότερες έρευνες στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων πρισματικά δοκίμια μαρμάρου Διονύσου ύψους 10 cm και διατομής 5x5 cm είχαν υποβληθεί σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης μέχρι θραύσης. Να τονιστεί ότι και τα κυβικά και τα πρισματικά δοκίμια προέρχονται από την ίδια θέση δειγματοληψίας.



Σχήμα 6.18. Η δοκός μαρμάρου Διονύσου που θα χρησιμοποιηθεί για την δοκιμή.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με σταθερό ρυθμό φόρτισης 300 N/s, ενώ πραγματοποιήθηκε η δοκιμή για πέντε πρισματικά δοκίμια μαρμάρου. Από την δοκιμή μετρήθηκαν τρεις παράμετροι, η αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.1) παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα και για τα πέντε δοκίμια:

	Μονοαξονική θλίψη $\sigma_{c,prism}$ (MPa)	Μέσο μέτρο ελαστικότητας E_{av} (GPa)	Λόγος Poisson ν	Εφελκυστική αντοχή σ_t (MPa)
Πρισματικό δοκίμιο 1	73,4	73,24	0,18	8,5 MPa από παλαιότερες δοκιμές Brazilian
Πρισματικό δοκίμιο 2	72,6	74,57	0,18	
Πρισματικό δοκίμιο 3	76,4	-	-	
Πρισματικό δοκίμιο 4	72,6	60	0,29	
Πρισματικό δοκίμιο 5	65,67	79,24	0,17	
M.O.	72,134	71,7625	0,205	

Πίνακας 6.1. Παρουσιάζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το μέσο μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson, και για τα τρία κυβικά δοκίμια.

6.4 Δοκίμια μαρμάρου Βόλακα

6.4.1 Το μάρμαρο Βόλακα ως υλικό

Το μάρμαρο Βόλακα εξορύσσεται στις πλαγιές του βουνού Φαλακρό στην Δράμα. Είναι δολομιτικό μάρμαρο με λευκό φόντο και όμορφες γκρι ή καφέ φλέβες. Η ορυκτολογική του σύνθεση αποτελείται από 92% δολομίτη και 8% ασβεστίτη, ενώ θεωρείται το ελληνικό αντίστοιχο του μαρμάρου Carrara λόγω της όψης του (Σχήμα 6.19). Το πέτρωμα διαθέτει ένα γρανοβλαστικό ιστό με μέσο μέγεθος 0,30 mm. Μπορούμε να χαρακτηρίσουμε το υπόψη μάρμαρο, σαν ισόκοκκο, λεπτόκοκκο δολομιτικό μάρμαρο (<http://www.fhl.gr/2/wp-content/uploads/2015/05/Tech.-Data-Volakas.pdf>).



Σχήμα 6.19. Η δοκός μαρμάρου Βόλακα που θα χρησιμοποιηθεί στην δοκιμή και αποτελείται από 12 άρρηκτα κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5cm x 5 cm 5 cm.

6.4.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά μαρμάρου Βόλακα

Σύμφωνα με το Ι.Γ.Μ.Ε. που έχει διεξάγει δοκιμές χαρακτηρισμού σε δοκίμια μαρμάρου Βόλακα, προκύπτουν οι παρακάτω μηχανικές ιδιότητες (<http://www.fhl.gr/2/wp-content/uploads/2015/05/Tech.-Data-Volakas.pdf>):

- Φαινομενική ειδική πυκνότητα (DIN 52 102): 2825 kg/m³
- Φυσική υγρασία (DIN 52 103): 0,19%
- Πορώδες (DIN 52 102): 0,54%
- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c (Ξηρές συνθήκες) (DIN 52 105): 138,6 MPa
- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c (Υγρές συνθήκες) (DIN 52 105): 145,9 MPa
- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c (Υστερα από ψύξη) (DIN 52 104 & 52 105): 102,6 MPa
- Αντοχή σε κάμψη (Ξηρές συνθήκες) (DIN 52 112): 9,90 MPa
- Αντοχή σε κάμψη (Υγρές συνθήκες) (DIN 52 112): 10,76 MPa
- Μέτρο ελαστικότητας (DIN 1048/1991): 35 GPa
- Φθορά μετά από τριβή: 2,20mm

Από προηγούμενη πειραματική εργασία στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών προέκυψαν τα εξής μηχανικά χαρακτηριστικά για το μάρμαρο Βόλακα (Αριθμός δοκιμίου: VS1 – Επίπεδο φόρτισης: Πρόσωπο):

- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa): 124,43
- Μέτρο Ελαστικότητας (GPa): 59
- Συντελεστής Poisson: 0,37

6.5 Πίνακες μηχανικών ιδιοτήτων

Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά οι πίνακες με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών γύψου, τσιμέντου και μαρμάρου Διονύσου και Βόλακα.

	Γύψος		
	Μονοαξονική θλίψη σ_c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	Εφελκυστική αντοχή σ_t (MPa)
Δοκίμιο 1	7,88	4,6	1,86
Δοκίμιο 2	6,83	5,3	1,82
Δοκίμιο 3	6,24	5,88	1,23
Μ.Ο.	6,983	5,26	1,636
	Τσιμέντο		
Δοκίμιο 1	33,31	23,12	3,1
Δοκίμιο 2	37,63	24,54	3,13
Δοκίμιο 3	39,53	23,14	2,66
Μ.Ο.	36,82	23,6	2,96

Πίνακας 6.2. Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών γύψου και τσιμέντου.

	Μάρμαρο Διονύσου			
	Μονοαξονική θλίψη $\sigma_{c,prism}$ (MPa)	Μέσο μέτρο ελαστικότητας E_{av} (GPa)	Λόγος Poisson ν	Εφελκυστική αντοχή σ_t (MPa)
Πρισματικό δοκίμιο 1	73,4	73,24	0,18	8,5 MPa από παλαιότερες δοκιμές Brazilian
Πρισματικό δοκίμιο 2	72,6	74,57	0,18	
Πρισματικό δοκίμιο 3	76,4	-	-	
Πρισματικό δοκίμιο 4	72,6	60	0,29	
Πρισματικό δοκίμιο 5	65,67	79,24	0,17	
Μ.Ο.	72,134	71,7625	0,205	

Πίνακας 6.3. Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών μαρμάρου Διονύσου.

	Μάρμαρο Βώλακα			
	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	Λόγος Poisson ν	Εφελκυστική αντοχή σ_t (MPa)
Ι.Γ.Μ.Ε.	138,6	35	0,33	8,47 MPa από παλαιότερες δοκιμές Brazilian
Παλαιότερη πειραματική διαδικασία	124,43	59		
Μ.Ο.	131,515	47		

Πίνακας 6.4. Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών μαρμάρου Βώλακα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Εργαστηριακές δοκιμές

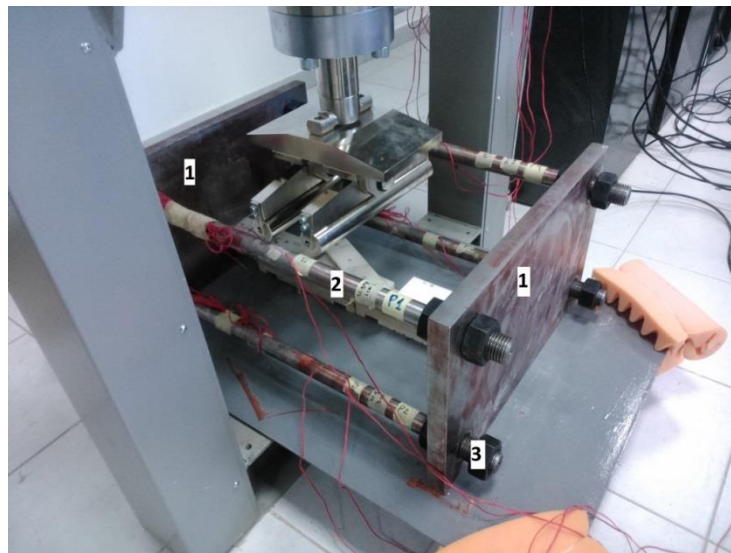
7.1 Εισαγωγή

7.1.1 Σκοπός πειραματικής διαδικασίας

Αντικείμενο της πειραματικής διαδικασίας είναι η παρακολούθηση των μηχανισμών που συμμετέχουν στην καταστροφή εγκάρσια ρωγματομένων δοκών πετρώματος κατά την κάμψη τους, ταυτόχρονα με την ανίχνευση, καταγραφή, επεξεργασία και αξιολόγηση της ακουστικής εκπομπής (AE) του πετρώματος, που εκλύεται καθώς το δοκίμιο φορτίζεται μηχανικά μέχρι την αστοχία του. Επίσης η τρίτη παράμετρος που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική είναι η μέτρηση της αξονικής δύναμης που παρουσιάζεται στην δοκό κατά την κάμψη, η οποία μετράται μέσω των strain gages, που είναι τοποθετημένα ανά δύο αντιδιαμετρικά και στις τέσσερις χαλύβδινες ράβδους της πειραματικής διάταξης.

7.1.2 Ειδική πειραματική διάταξη για την εκτέλεση δοκιμών κάμψης ρωγματομένων δοκών πετρώματος

Η ειδική πειραματική διάταξη απαιτείται για την πλευρική συγκράτηση των ρωγματομένων δοκών πετρώματος κατά τις δοκιμές κάμψης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.1



Σχήμα 7.1 Πειραματική διάταξη για την πλευρική συγκράτηση εγκάρσια ρωγματομένων δοκών πετρώματος: (1) Πλάκες συγκράτησης διαστάσεων 30x50 cm και πάχους 2.60 cm, (2) Τέσσερις ράβδοι μήκους 76 cm, (3) Περικόχλια M33.

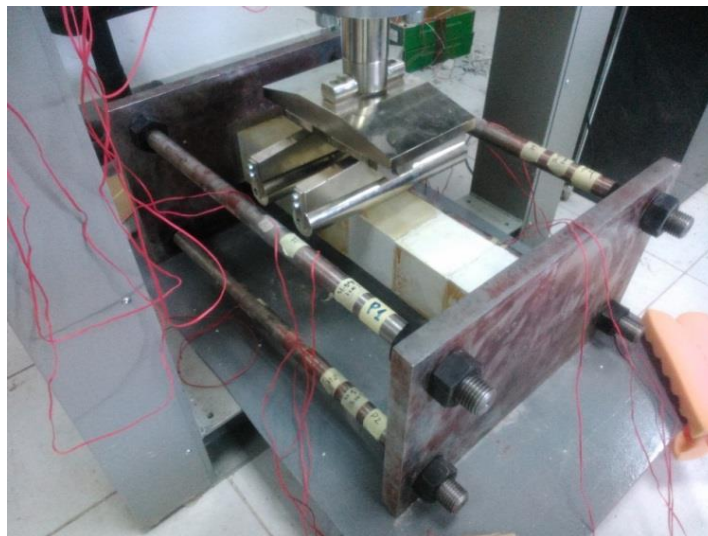
Οι κυριότερες απαιτήσεις που έπρεπε να ικανοποιεί η ειδική πειραματική διάταξη για τον πλευρικό περιορισμό των δοκιμίων κατά τις δοκιμές κάμψης συνοψίζονται ως εξής:

- ✓ Η δυνατότητα να περιορίζεται πλευρικά η δοκός και να μετράται παράλληλα η πλευρική ώθηση σε οποιοδήποτε στάδιο του πειράματος χωρίς να προκαθορίζεται η θέση ώθησης στα άκρα της δοκού.
- ✓ Η δυνατότητα να ακολουθείται ο φθίνοντας κλάδος της καμπύλης φορτίου/βέλος κάμψης της ρωγματωμένης δοκού με ταυτόχρονη μέτρηση και καταγραφή της πλευρικής ώθησης.
- ✓ Η δυνατότητα δοκιμής ρωγματωμένων δοκών με διαφορετικό αριθμό άρρηκτων τεμαχίων πετρώματος που μπορεί να έχουν διαφορετικές διαστάσεις (π.χ. κύβοι ακμής 10cm, ή κύβοι ακμής 5cm).
- ✓ Η διάταξη να προσαρμόζεται στο πλαίσιο φόρτισης της υπάρχουσας συσκευής κάμψης για την εκτέλεση των δοκιμών.

Από τις δύο τελευταίες απαιτήσεις προκύπτει ότι ο μηχανισμός συναρμολόγησης της διάταξης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο εύκολος στην εφαρμογή και όσο το δυνατόν πιο προσαρμόσιμος.

Σύμφωνα και με το Σχήμα 7.1, η ειδική πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε σε προγενέστερη ερευνητική εργασία από το Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων για τον πλευρικό περιορισμό των ρωγματωμένων δοκών συνίσταται από:

- 2 χαλύβδινες πλάκες διαστάσεων 50 cm μήκος x 30 cm ύψος και πάχους 2.60 cm με εσοχή στήριξης των δοκιμών διαστάσεων 12 cm x 12 cm, με σκοπό να ακουμπάνε τα πλευρικά ογκοτεμάχια της δοκού.
- 4 χαλύβδινες ράβδοι μήκους 76 cm και διαμέτρου 3.20 cm, μέσω των οποίων με την σύσφιξη στα περικόχλια των άκρων τους επιτυγχάνεται μία σταθερή πλευρική φόρτιση, ενώ έτσι συγκρατούνται μεταξύ τους στο ίδιο ύψος τα έξι ογκοτεμάχια, (Σχήμα 7.2), όπως επίσης υπολογίζεται και η αρχική αξονική δύναμη και παραμόρφωση με την οποία ξεκινάει η πειραματική διαδικασία.
- 16 περικόχλια M33.



Σχήμα 7.2. Η ρωγματωμένη δοκός που αποτελείται από 6 ογκοτεμάχια voussoir τοποθετημένη στην πειραματική διάταξη.

Οι ράβδοι κοχλιώνονται με τις πλάκες με την βοήθεια των περικοχλίων M33 σχηματίζοντας ένα πλαίσιο συγκράτησης των ρωγματωμένων δοκιμίων για τις δοκιμές κάμψης. Στο πλαίσιο αυτό μπορούν να τοποθετηθούν για παράδειγμα 6 έως 8 κυβικά δοκίμια πετρώματος ακμής 10cm συγκρατημένα από τις δύο πλάκες και τα ακριανά δοκίμια να εισχωρούν μέσα στην εσοχή των πλακών (Σχήμα 7.2).

Σχετικά με τη λειτουργία της ειδικής διάταξης περιορισμού σημειώνονται τα εξής:

- Οι περιοριστικές πλευρικές πλάκες περιορίζουν πλευρικά τη ρωγματωμένη δοκό ενώ λόγω του αυξημένου πάχους τους (2.60 cm) δεν κάμπτονται και μεταφέρουν τα φορτία της στήριξης της δοκού στις διαμήκεις ράβδους. Οι πλάκες φέρουν εσοχές, στις οποίες εισέρχονται τα ακριανά τεμάχια της ρωγματωμένης δοκού και συγκρατούνται από αυτές μέχρι την ανάπτυξη πλευρικών ωθήσεων, λόγω της κάμψης της δοκού.
- Οι διαμήκεις περιοριστικές ράβδοι, τέσσερις στον αριθμό σε κάθε πείραμα, συγκρατούνται στις πλάκες με περικόχλια τα οποία προσαρμόζονται σε κατάλληλα διαμορφωμένα σπειρώματα. Το μήκος των ράβδων επιτρέπει την εκτέλεση δοκιμών με μήκος ρωγματωμένης δοκού από 60 cm έως 80 cm. Η διατομή τους είναι τέτοια ώστε τα φορτία που μεταφέρονται από τις πλάκες να αναλαμβάνονται κυρίως αξονικά (χωρίς όμως να αποκλείεται και η καμπτική λειτουργία). Με την συγκόλληση στο μέσον του μήκους τους ηλεκτρικών παραμορφωσιμέτρων (strain gages) είναι δυνατόν να υπολογίζονται οι αξονικές δυνάμεις που αναλαμβάνουν και κατά συνέπεια να προσδιορίζεται έμμεσα η αξονική δύναμη στο άκρο της ρωγματωμένης δοκού. Επίσης, λόγω της παρουσίας του σπειρώματος οι ράβδοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν με στόχο την εφαρμογή κάποιας αρχικής πλευρικής δύναμης στη δοκό, απλά συσφίγγοντας τα περικόχλια.

Επίσης να τονιστεί ότι για τις πειραματικές διαδικασίες χρησιμοποιήθηκαν strain gauges της εταιρείας Tokyo Sokki Kenkyujo Co.,Ltd (Σχήμα 7.3), με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τύπος: PFL-10-11-3L
- Lot No.: A515311
- Gauge Length: 10mm
- Gauge Factor: $2.12 \pm 1\%$
- Gauge Resistance: $120.4 \pm 0.5 \ \Omega$
- Temperature Compensation for: $11 \cdot 10^{-6}/C^{\circ}$
- Transverse Sensitivity: -0.5%
- Lead Wires: 10/0.12 3m



Σχήμα 7.3. Strain gauge αλουμινίου της εταιρείας Tokyo Sokki Kenkyujo, που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της καμπτικής καταπόνησης και στις 4 μεταλλικές ράβδους της πειραματικής διάταξης.

7.1.3 Σύνοψη εργαστηριακών δοκιμών

Δοκιμές χαρακτηρισμού

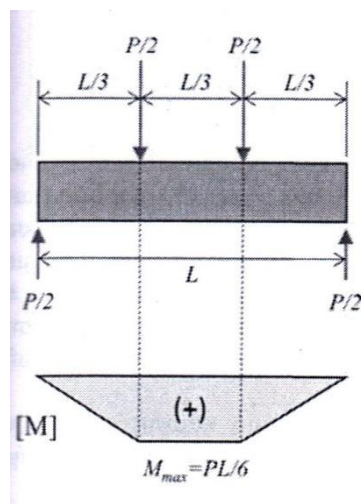
A) Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια γύψου και τσιμέντου. Από τις δοκιμές αυτές υπολογίστηκαν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c και το μέτρο ελαστικότητας E .

B) Δοκιμές έμμεσης εκτίμησης εφελκυστικής αντοχής (Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης - Brazilian Test) σε δοκίμια γύψου και τσιμέντου. Από τις δοκιμές αυτές μετρήθηκε η εφελκυστική αντοχή σ_t .

Γενικά για την δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων

Η δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων πραγματοποιήθηκε στη ρωγματωμένη δοκό του πετρώματος που αποτελείται από 6 ογκοτεμάχια. Γενικά κατά τη δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων η δοκός φορτίζεται με δύο συγκεντρωμένα φορτία $P/2$, τα οποία ασκούνται στα τρίτα του μήκους της (Σχήμα 7.4). Το συνολικό φορτίο που ασκείται στη δοκό είναι P . Προκειμένου για συνεχή δοκό το διάγραμμα κατανομής των ροπών κάμψης κατά μήκος της δοκού είναι τραπεζιοειδές, ενώ μεταξύ των φορτίων η ροπή κάμψης παραμένει σταθερή και ίση με $M_{max}=PL/6$. Επίσης η μέγιστη εφελκυστική τάση ασκείται στην κάτω ακραία ίνα του τμήματος αυτού της δοκού και δίνεται από τη σχέση (Νομικός, 2015):

$$\sigma_{t,max} = -\frac{M_{max}}{I} \frac{h}{2} = \frac{PL}{bh^2} \quad (7.1)$$



Σχήμα 7.4. Δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων (Νομικός, 2015).

7.1.4 Πλαίσια φόρτισης και μονάδα ελέγχου υδραυλικού κυκλώματος

Για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η σερβοϋδραυλική μηχανή φόρτισης δοκιμίων του εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π. Η κεντρική μονάδα ελέγχου του υδραυλικού κυκλώματος έχει την δυνατότητα ελέγχου τεσσάρων πλαισίων φόρτισης με ηλεκτρονική επιλογή του ενεργού πλαισίου. Τα πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- ❖ Πλαίσιο θλίψης, με δύο έμβολα δυναμικότητας 15 και 250 kN αντίστοιχα, για την εκτέλεση των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και αντιδιαμετρικής θλίψης (Σχήμα 7.5).
- ❖ Πλαίσιο κάμψης δυναμικότητας φόρτισης 150 kN για την εκτέλεση δοκιμών κάμψης σε εγκάρσια ρωγματωμένες δοκούς πετρώματος (Σχήμα 7.5).

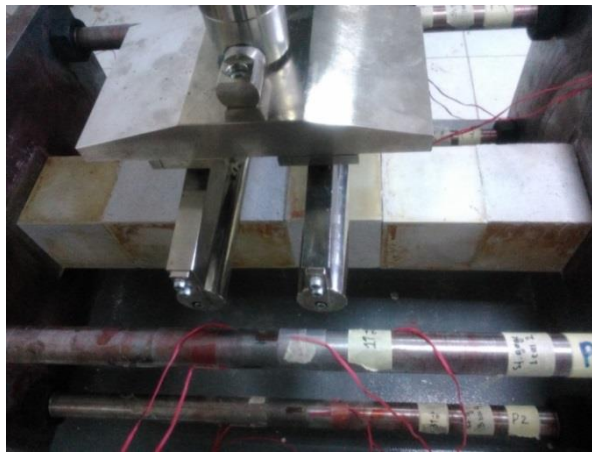


Σχήμα 7.5: (1) Πλαίσιο κάμψης της CONTROLS, (2) Κελί φορτίου συσκευής κάμψης, (3) Κύλιστρα φόρτισης, (4) Πλαίσιο φόρτισης για δοκιμές χαρακτηρισμού μονοαξονικής θλίψης και δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης, (5) Κεντρική μονάδα ελέγχου.

7.2 Εργαστηριακές δοκιμές σε δοκούς γύψου

7.2.1 Δοκιμαστική εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό γύψου (Δοκός 1)

Αρχικά χρησιμοποιήσαμε κυβικά δοκίμια γύψου διαστάσεων 10cm x 10cm x 10cm, τα οποία υπήρχαν έτοιμα από προηγούμενο πείραμα. Η ρωγματωμένη δοκός σχηματίστηκε από έξι κύβους άρρηκτου (μακροσκοπικά) γύψου τοποθετημένους σε σειρά ώστε να σχηματίζεται δοκός με κατακόρυφες ασυνέχειες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6. Να τονιστεί ότι για την δοκιμή 1 δεν χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες ακουστικής εκπομπής.



Σχήμα 7.6. Διακρίνεται η ρωγματωμένη δοκός γύψου, τοποθετημένη ανάμεσα στις πλευρικές πλάκες συγκράτησης.

Στην κάθε ράβδο της διάταξης έχουν τοποθετηθεί δύο strain gages αντιδιαμετρικά (συνολικά 8 strain gages) στο μέσο της κάθε ράβδου με σκοπό να ληφθούν οι καμπτικές καταπονήσεις των ράβδων κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

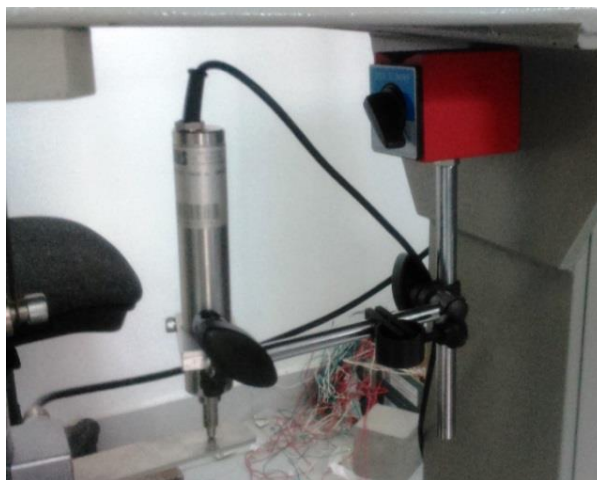
Τα strain gages αυτά συνδέθηκαν έπειτα με 2 τετρακάναλες γέφυρες Wheatstone της CONTROLS (Μοντέλο 82-P0398) σε συνδεσμολογία γέφυρας $\frac{1}{4}$ και στην συνέχεια με Datalogger (καταγραφικό σύστημα) 8 καναλιών πάλι της ίδιας εταιρείας (CONTROLS- Μοντέλο 82-P0908/B)(Σχήμα 7.7).



Σχήμα 7.7. Απεικονίζονται οι δύο γέφυρες Wheatstone αριστερά και πάνω στο καταγραφικό (Datalogger) της CONTROLS.

Η ρωγματωμένη δοκός στη συνέχεια υποβλήθηκε σε **κάμψη τεσσάρων σημείων**, στηριζόμενη όπως προαναφέρθηκε πλευρικά σε αμετακίνητα τοιχώματα από μεταλλικές πλάκες, με τα δύο έμβολα να απέχουν μεταξύ τους 10 cm, ενώ η φόρτιση εξασκείται 5cm αριστερά και δεξιά της κεντρικής ασυνέχειας. Κατά την διάρκεια του πειράματος καταγράφηκε το εφαρμοζόμενο φορτίο, οι καμπτικές καταπονήσεις στο μέσο των ράβδων και το βέλος κάμψης της δοκού στο μέσο της.

Για το βέλος κάμψης χρησιμοποιήθηκε στο μέσο της δοκού LVDT (βελόμετρο), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 7.8):



Σχήμα 7.8. Το βελόμετρο (LVDT) που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα.

7.2.1.1 Αποτελέσματα φόρτισης

Η δοκός αστόχησε λόγω σύνθλιψης στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων. Με την αύξηση του εγκάρσιου φορτίου, το πάνω μέρος των ακριανών ασυνεχειών και το κάτω μέρος της κεντρικής ασυνέχειας ανοίγουν αφήνοντας το κάτω μέρος των ακριανών ασυνεχειών και το πάνω μέρος της κεντρικής ασυνέχειας σε συγκεντρωμένη συμπίεση, όπου σε αυτές τις περιοχές παρουσιάζονται οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.9.



Σχήμα 7.9. Η δοκός μετά το πέρας του πειράματος όπου φαίνονται οι περιοχές αστοχίας, στο πάνω μέρος της κεντρικής ασυνέχειας και στο κάτω μέρος των άκρων.

7.2.1.2 Παρατηρήσεις

Στο ογκοτεμάχιο 1 που βρίσκεται στην αριστερή πλάκα στήριξης, μετά την αστοχία, παρατηρήθηκε αποκόλληση τεμάχους στο κάτω μέρος, λόγω των υψηλών θλιπτικών τάσεων που επικρατούσαν στην περιοχή ως συνέπεια της υπέρβασης της διατμητικής αντοχής της γύψου στο σημείο αυτό, ενώ στο πάνω μέρος παρατηρήθηκε η δημιουργία μιας εφελκυστικής ρωγμής (axial splitting). Η απόσταση ανοίγματος της ασυνέχειας στο πάνω μέρος μετρήθηκε 1 cm (σχήμα 7.10).



Σχήμα 7.10.Ογκοτεμάχιο γύψου 1.

Στο ογκοτεμάχιο 2 παρατηρείται επίσης στο κάτω μέρος αποκόλληση τεμάχους, λόγω θλιπτικών τάσεων στο σημείο αυτό (Σχήμα 7.11).



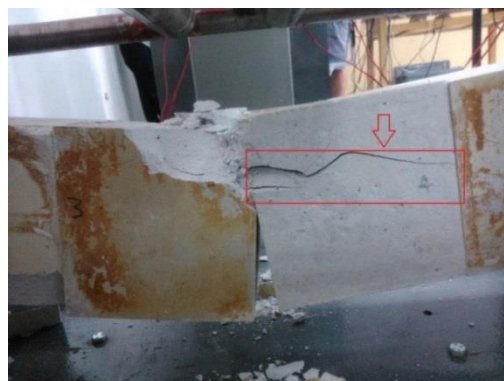
Σχήμα 7.11.Ογκοτεμάχιο γύψου 2.

Στο ογκοτεμάχιο 3 το πάνω δεξιά μέρος αστόχησε σε θλίψη, και επακολούθησε δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο πάνω αριστερό μέρος. Το άνοιγμα της κεντρικής ασυνέχειας στο κάτω μέρος υπολογίστηκε 1,5cm (Σχήμα 7.12).



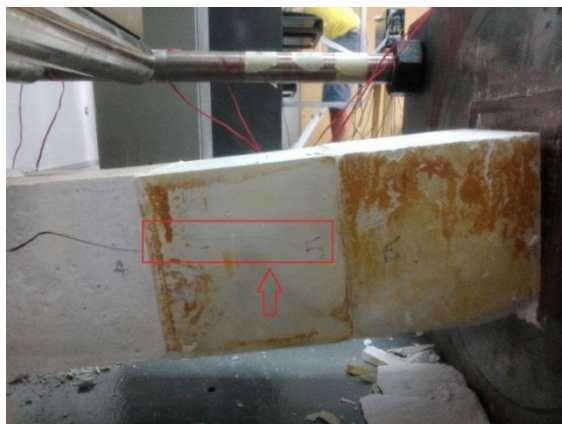
Σχήμα 7.12.Ογκοτεμάχιο γύψου 3, αριστερά της κεντρικής ασυνέχειας.

Στο ογκοτεμάχιο 4 λόγω σύνθλιψης στο πάνω αριστερό μέρος δημιουργήθηκε μία εφελκυστική ρωγμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.13.



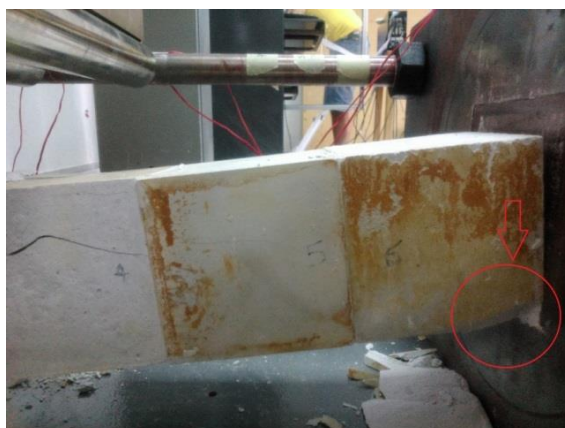
Σχήμα 7.13.Ογκοτεμάχιο γύψου 4, δεξιά της κεντρικής ασυνέχειας.

Στο ογκοτεμάχιο 5, παρατηρείται συνέχεια της εφελκυστικής ρωγμής, από το ογκοτεμάχιο 4 (Σχήμα 7.14).



Σχήμα 7.14.Ογκοτεμάχιο γύψου 5.

Τέλος στο ογκοτεμάχιο 6 που βρίσκεται σε επαφή με την δεξιά πλάκα στήριξης παρατηρείται όπως ήταν αναμενόμενο αποκόλληση τεμάχους από το κάτω δεξιό μέρος στην στήριξη λόγω θλίψης.Το άνοιγμα της ασυνέχειας στο πάνω μέρος υπολογίστηκε 0,90cm (Σχήμα 7.15).



Σχήμα 7.15.Ογκοτεμάχιο γύψου 6.

7.2.1.3 Βέλος κάμψης

Τα βέλη κάμψης μετρήθηκαν μετά το πέρας του πειράματος και παρουσιάζονται πάνω στα ογκοτεμάχια της δοκού 1 και έχουν μετρηθεί στις άκρες και στο μέσον του κάθε ογκοτεμαχίου (Σχήμα 7.16).

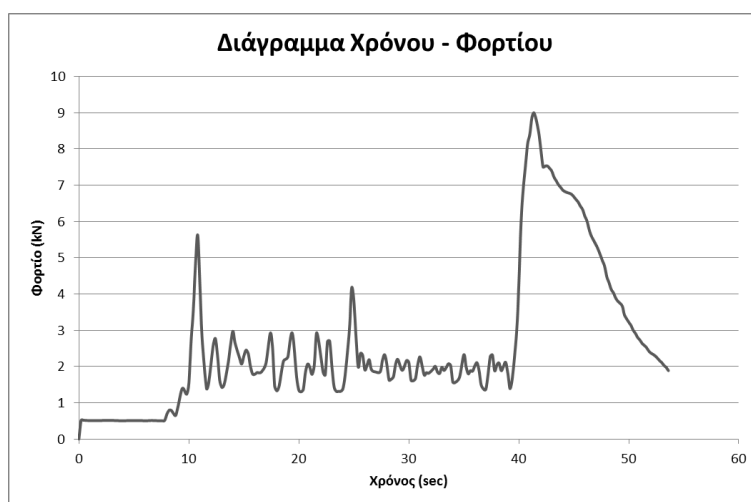


Σχήμα 7.16.Διακρίνονται τα βέλη κάμψης των τεμαχίων της δοκού voussoir.

7.2.1.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Το πείραμα διήρκησε 53,6 sec με τον ρυθμό φόρτισης να διαμορφώνεται στα 250 μm το λεπτό. Από την μονάδα ελέγχου του πλαισίου φόρτισης της CONTROLS, στο κανάλι 4 μετρήσαμε την φόρτιση, στο κανάλι 6 μετρήθηκε η μετατόπιση, δηλαδή το βέλος κάμψης στο μέσο της δοκού από το συνδεδεμένο σε αυτό το κανάλι βελοόμετρο LVDT. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Διάγραμμα Φορτίου-Χρόνου

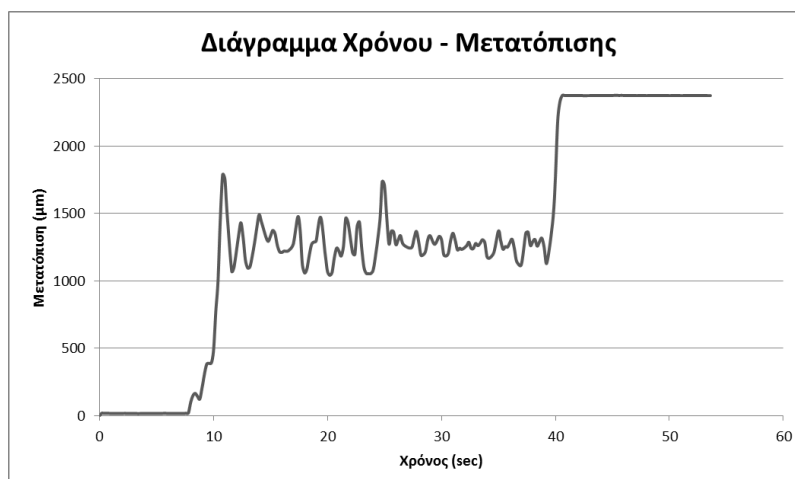


Διάγραμμα 7.1. Διάγραμμα φορτίου-χρόνου.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, φτάσαμε σε 3 διαδοχικά peaks, κατά την διάρκεια του πειράματος, επειδή δεν προηγήθηκε προφόρτιση - αποφόρτιση της δοκού, αλλά το φορτίο ασκήθηκε αμέσως την στιγμή που ακούμπησαν τα κύλινδρα φόρτισης στην δοκό, με συνέπεια η δοκός να ταλαντεύεται, εξ'ού και οι 3 διαφορετικές κορυφές:

- **1^η κορυφή:** Χρόνος 10,8 sec - Φορτίο 5,627 kN.
- **2^η κορυφή:** Χρόνος 24,8 sec - Φορτίο 4,17 kN.
- **3^η κορυφή:** Το μέγιστο φορτίο διαμορφώθηκε στα 8,99 kN σε χρόνο 41,4 sec.

Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου



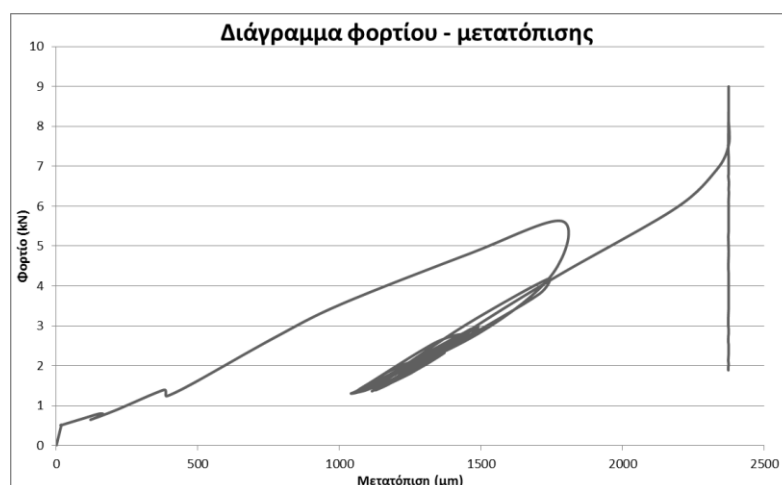
Διάγραμμα 7.2. Διάγραμμα Μετατόπισης-Χρόνου.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, φτάσαμε σε 3 διαδοχικά peaks, κατά την διάρκεια του πειράματος, επειδή δεν προηγήθηκε προφόρτιση - αποφόρτιση της δοκού, αλλά το φορτίο ασκήθηκε αμέσως την στιγμή που ακούμπησαν τα κύλινδρα φόρτισης στην δοκό, με συνέπεια η δοκός να ταλαντεύεται, εξ'ού και οι 3 διαφορετικές κορυφές:

- **1^η κορυφή:** Χρόνος 11 sec - Μετατόπιση 1,753 mm
- **2^η κορυφή:** Χρόνος 25 sec - Μετατόπιση 1,709 mm
- **3^η κορυφή:** Χρόνος 41 sec - Μέγιστη μετατόπιση 2,375 mm

Στα 41 sec από ότι φαίνεται και από το διάγραμμα 7.1, όπου και αναπτύχθηκε στην δοκό και το μέγιστο φορτίο, η δοκός αστόχησε πλήρως λόγω των θλιπτικών τάσεων που αναπτύχθηκαν κατά την κάμψη στα ακριανά ογκοτεμάχια και στα δύο μεσαία ογκοτεμάχια.

Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης



Διάγραμμα 7.3. Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται στο κέντρο η ταλάντωση της δοκού με την δημιουργία των τριών κορυφών, ενώ στην αρχή και στο τέλος η ομαλή συσχέτιση του φορτίου με το βέλος κάμψης (Όσο αυξάνεται το φορτίο, αυξάνεται και η μετατόπιση), μέχρι την αστοχία της δοκού, που παρουσιάζεται με την κατακόρυφη ευθεία στο τέλος.

Διάγραμμα Χρόνου – Αξονικής Δύναμης



Διάγραμμα 7.4. Διάγραμμα χρόνου-αξονικής δύναμης.

Για να κατασκευαστεί το παραπάνω διάγραμμα ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία, και έγιναν και οι εξής παραδοχές:

- **Βήμα 1^ο** : Το Datalogger κατέγραψε τις παραμορφώσεις και από τα 6 strain gages που ενώσαμε μαζί και βρίσκονται στις ράβδους 1,2 και 4 της πειραματικής διάταξης. Από την ράβδο 3 δεν πήραμε μετρήσεις γιατί το strain gage 5 ήταν κομμένο και δεν μπορούσαμε να πάρουμε μετρήσεις, άρα αποκλείσαμε από τους υπολογισμούς την ράβδο 3, δηλαδή τις μετρήσεις από τα strain gages 5 και 6. Επίσης αποκλείεται από τις μετρήσεις και η ράβδος 4 (Strain gages 7 και 8). Όμως και από το strain gage 1 τελικά δεν πήραμε μετρήσεις, έτσι αποκλείεται και η ράβδος 2, τελικά πήραμε τις μετρήσεις από το strain gauge 3,4 (Δηλαδή από την ράβδο 2).
- **Βήμα 2^ο** : Για να υπολογίσουμε την τάση χρησιμοποιήσαμε τον τύπο του Hoffmann για την τάση που μετράνε τα strain gages

$$\sigma_b = \left(\frac{1}{2}\right) \varepsilon_i E \quad (7.2)$$

Όπου ε_i είναι η παραμόρφωση των strain gauges 3,4 και E το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα που είναι 210.000 MPa. Η συνολική τάση μετρήθηκε με την παραδοχή της συμμετρίας, δηλαδή τις μετρήσεις της ράβδου 2 τις διπλασιάσαμε.

- **Βήμα 3^ο** : Έπειτα για να μετρηθεί η αξονική δύναμη που αναπτύχθηκε στην δοκό κατά την κάμψη, χρησιμοποιήσαμε τον τύπο:

$$F = \sigma_b A \quad (7.3)$$

Όπου A το εμβαδόν της χαλύβδινης ράβδου διαμέτρου 3.20cm, που προκύπτει 0.000804 m². Η μέγιστη αξονική δύναμη σε μέτρο παρατηρήθηκε στα 5,3 sec και ήταν 6,75 kN.

7.3 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό γύψου (Δοκός 2)

Η δοκός σχηματίστηκε από 6 άρρηκτα κυβικά δοκίμια γύψου (διαστάσεων 10cm x 10cm x 10cm), τα οποία παρασκευάστηκαν με την διαδικασία που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6. Αρχικά συνδέθηκαν τα 7 strain gages με τις 2 τετρακάναλες γέφυρες Wheatstone της CONTROLS σε συνδεσμολογία strain gage – γέφυρας ¼ (Σχήμα 7.17).



Σχήμα 7.17.Τετρακάναλη γέφυρα της Controls.

Από την γέφυρα 1, όπως φαίνεται και από το παραπάνω Σχήμα 7.17, χρησιμοποιήσαμε και τα τέσσερα κανάλια, ενώ από την γέφυρα 2, χρησιμοποιήσαμε 3 κανάλια, για την σύνδεση με το καταγραφικό (Datalogger-Σχήμα 7.18), επειδή το 8^ο κανάλι του Datalogger χρησιμοποιείται για μέτρηση φορτίου. Έτσι το 8^ο strain gage το συνδέσαμε κατευθείαν στην μονάδα ελέγχου της πρέσσας/μηχανής κάμψης (Σχήμα 7.19).



Σχήμα 7.18.Το οκτακάναλο καταγραφικό (Datalogger) της εταιρείας CONTROLS.



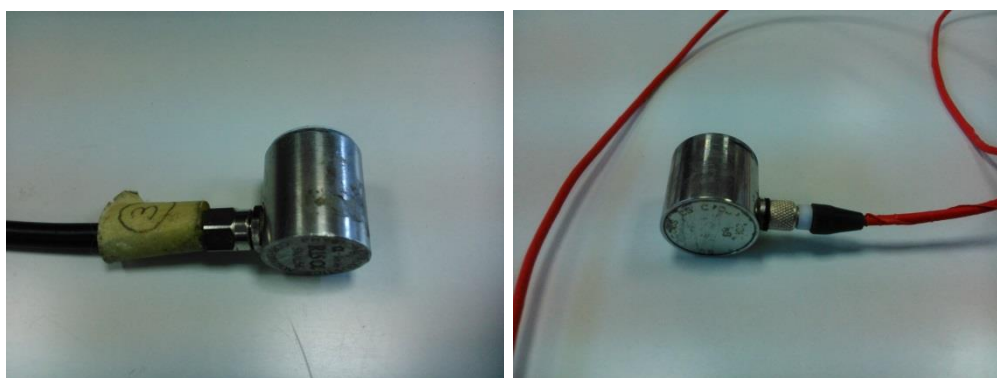
Σχήμα 7.19.Κεντρική μονάδα ελέγχου της μηχανής κάμψης.

Έπειτα μηδενίσαμε την μνήμη του καταγραφικού, όπως επίσης και τις ενδείξεις των strain gages. Η συνδεσμολογία των strain gages με την γέφυρα και το καταγραφικό παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.1):

Datalogger	Γέφυρα 1	Γέφυρα 2	Μηχανή Κάμψης/Πρέσσα	Strain Gage
Channel 1	Channel D			2
Channel 2	Channel C			1
Channel 3	Channel B			4
Channel 4	Channel A			3
Channel 5		Channel D		5
Channel 6		Channel A		6
Channel 7		Channel B		7
		Channel C	Channel 5	8

Πίνακας 7.1.Συνδεσμολογία strain gages – γεφυρών – πρέσσας και καταγραφικού.

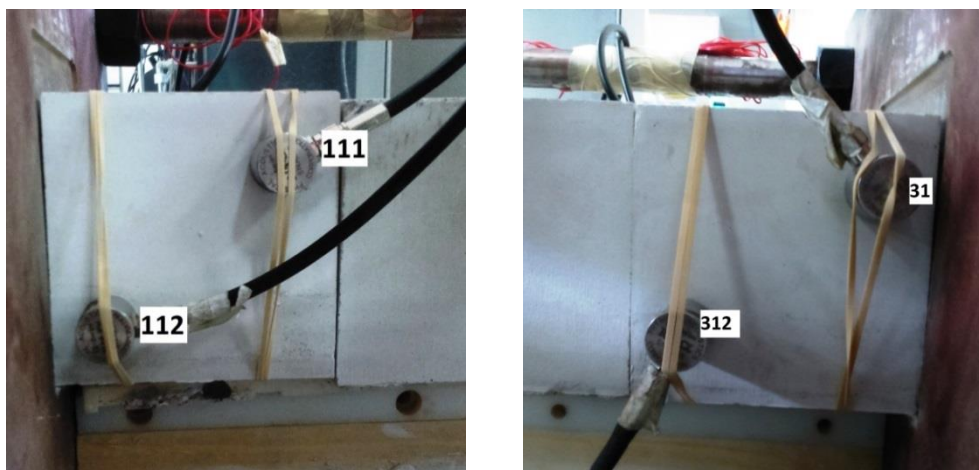
Για αυτή την δοκιμή χρησιμοποιήσαμε και αισθητήρες ακουστικής εκπομπής. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 8 αισθητήρες της εταιρείας Physical Acoustics Corporation, και συγκεκριμένα 6 αισθητήρες τύπου R15-α (α-Series/SN AL 56)(Σχήμα 7.20(α)) και 2 αισθητήρες R15 (Σχήμα 7.20(β)).



Σχήμα 7.20.(α)Αριστερά διακρίνεται ο αισθητήρας ακουστικής εκπομπής R15-α,και δεξιά (β) ο αισθητήρας R15, και οι δύο της εταιρείας Physical Acoustics Corporation.

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν 4 στο αριστερό ακριανό ογκοτεμάχιο της δοκού, με το καθένα να απέχει από την κοντινότερη ακμή του κύβου 2,5cm. Τοποθετήθηκαν τα 2 από την μία πλευρά διαγώνια, ενώ τα άλλα 2 από την απέναντι ακριβώς κάθετη πλευρά με αντίθετη κατεύθυνση διαγωνίου, στραμμένη κατά 90° από την αρχική διαγώνιο, με την εξής διάταξη:

- Αισθητήρας (112) κάτω αριστερό άκρο (Σχήμα 7.21(α)).
- Αισθητήρας (111) πάνω δεξί άκρο (Σχήμα 7.21(α)).
- Αισθητήρας (31) πάνω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά (Σχήμα 7.21(β)).
- Αισθητήρας (312) κάτω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά (Σχήμα 7.21(β)).



Σχήμα 7.21.(α)Αριστερά διακρίνεται το αριστερό ογκοτεμάχιο με τοποθετημένους τους αισθητήρες ακουστικής εκπομπής και (β) δεξιά διακρίνονται οι άλλοι δύο αισθητήρες τοποθετημένοι από την αντίθετη πλευρά του ακριανού ογκοτεμαχίου.

Επίσης με τον ίδια διάταξη τοποθετήθηκαν και οι άλλοι 4 αισθητήρες στο μεσαίο ογκοτεμάχιο δεξιά της κεντρικής ασυνέχειας. Οι θέσεις τους προέκυψαν:

- Αισθητήρας (51) στο αριστερό κάτω άκρο.
- Αισθητήρας (512) στο πάνω δεξί άκρο.
- Αισθητήρας (012) στο πάνω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.
- Αισθητήρας (01) στο κάτω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.

Να τονιστεί ότι για να έχουν καλή επαφή οι αισθητήρες με την επιφάνεια του γύψου, αφού στην αρχή καθαρίστηκε με ένα πανί η επιφάνεια τους, τοποθετήθηκε πάνω στην επιφάνεια ένα στρώμα από gel υπερήχων (Ultrasound transmission gel), και έπειτα τοποθετήθηκαν πάνω στα ογκοτεμάχια γύψου, ενώ για πρόσθετη ασφάλεια δέθηκαν και με λαστιχάκια για την αποφυγή του κινδύνου της πτώσης κατά την διάρκεια του πειράματος.

Οι αισθητήρες μετέπειτα συνδεόνται ο καθένας με προενισχυτές (2/4/6 pre-amplifier) (Σχήμα 7.22). Οι ενισχυτές αυτοί είναι της εταιρείας Physical Acoustics Corporation.



Σχήμα 7.22.Ο προενισχυτής στον οποίο συνδέεται ο αισθητήρας ακουστικής εκπομπής.

Χρησιμοποιείται απλή είσοδος (Single input Select) και ρυθμίζεται η προενίσχυση στα 40 dB (Gain Select). Όλοι οι προενισχυτές ενώνονται έπειτα στην οκτακάναλη καταγραφική μονάδα Micro-II PCI-2 (Σχήμα 7.23) της εταιρείας Physical Acoustics Corporation, για επεξεργασία των δεδομένων της ακουστικής εκπομπής με το λογισμικό Noesis.



Σχήμα 7.23. Το καταγραφικό Micro-II, που χρησιμοποιείται για την συλλογή των δεδομένων ακουστικής εκπομπής.

Η πειραματική διάταξη μαζί με την δοκό γύψου και τους αισθητήρες ακουστικής εκπομπής, φαίνεται στο Σχήμα 7.24.



Σχήμα 7.24. Η ρωγματοωμένη δοκός τοποθετημένη στην πειραματική διάταξη μαζί με τους αισθητήρες.

Τέλος να τονιστεί ότι χρησιμοποιήθηκε η κάμερα Nikon 1 J1 της εταιρείας Nikon, η οποία ρυθμίστηκε να παίρνει φωτογραφίες σε όλο το μήκος της δοκού ανά 5 sec, και η λήψη των οποίων άρχισε ταυτόχρονα με την έναρξη της καταγραφής των σημάτων από τους αισθητήρες, για να μπορέσουμε να συσχετίσουμε τα φαινόμενα θραύσης με την έκλυση γεγονότων ακουστικής εκπομπής.

Η περαιτέρω ανάλυση των καταγραφέντων σημάτων AE πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό πακέτο Noesis το οποίο παρέχει:

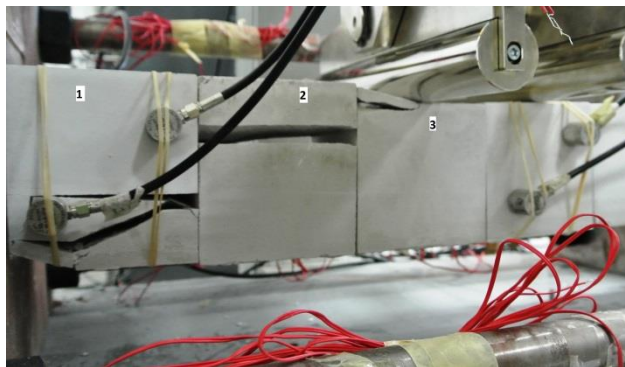
- Ταξινόμηση, προβολή και επεξεργασία στοιχείων σε πραγματικό χρόνο.
- Ομαδοποίηση, σύγκριση γραφημάτων και στατιστική ανάλυση.

- Προχωρημένη προβολή δεδομένων [π.χ. Histograms (2D, 3D), Scatters (point plots 2D, 3D), Bars κλπ.), αξιοποίηση και φιλτράρισμα.
- Προβολή κυματομορφών, φασματικών αναλύσεων FFT (Fast Fourier Transformation) και συχνοτικού περιεχομένου (Power Spectrum Analysis).
- Εντοπισμός της θέσης προέλευσης των σημάτων σε πραγματικό χρόνο, με γραμμικό εντοπισμό (Linear Location), με διδιάστατο εντοπισμό (2D Planar Location), τρισδιάστατο εντοπισμό (3D Planar Location) και εντοπισμό κατά ζώνες (Zonal Location).

7.3.1 Αποτελέσματα φόρτισης

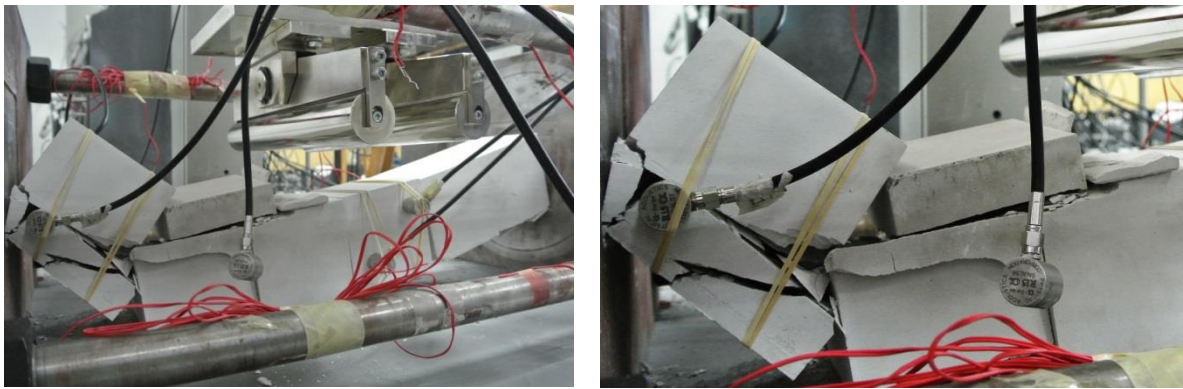
Το πείραμα δεν διήρκεσε αρκετά (32,8 sec), ούτε παρουσιάστηκε η συνηθισμένη αστοχία της δοκού voussoir, κάτω από κάμψη, γιατί στο ογκοτεμάχιο 2 συνέβη διαχωρισμός σε 2 επίπεδα παράλληλα με τον άξονα της δοκού (Σχήμα 7.25), ενδεχομένως λόγω εφελκυστικών τάσεων. Δύο πιθανοί λόγοι που συνέβηκε αυτό είναι:

- Ύπαρξη εξογκώματος στην παρακείμενη πλευρική ασυνέχεια με το ογκοτεμάχιο 1 (διεπιφάνεια τεμαχίων 1 και 2).
- Παραπάνω πλευρική σύσφιξη των περικοχλίων, που οδήγησε σε προφόρτιση της δοκού και συνεπώς σε αξονική δύναμη που μπορεί να προκάλεσε αξονική θράυση στο τεμάχιο 1.



Σχήμα 7.25. Διακρίνεται η αστοχία στα ογκοτεμάχια γύψου 1,2 και 3.

Επίσης όπως φαίνεται και από το Σχήμα 7.25, δημιουργήθηκαν και 2 εφελκυστικές ρωγμές στο ογκοτεμάχιο 1 με συνέπεια το τεμάχιο αυτό να σπάσει σε 3 κομμάτια. Τέλος παρατηρήθηκε αποκόλληση τεμαχίου στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 3. Η δοκός μετά το πέρας της δοκιμής φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 7.26. Η δοκός κατέρρευσε λόγω μηχανικής αστάθειας των ογκοτεμαχίων 1 και 2.



Σχήμα 7.26.Τελική μορφή αστοχίας της δοκού.

7.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου



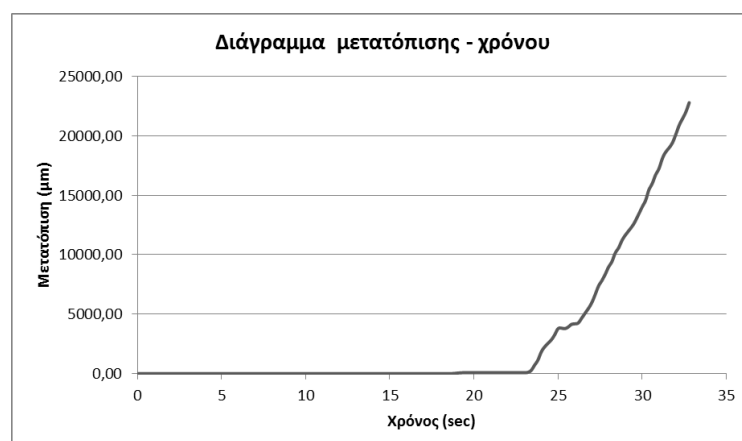
Διάγραμμα 7.5.Διάγραμμα φορτίου – χρόνου.

Το μέγιστο φορτίο που αναπτύχθηκε ήταν 7,162 kN στα 26,6 sec ενώ η μετατόπιση υπολογίστηκε 5067 μm = 0,5 cm, ενώ παρατηρήθηκαν και 4 τοπικά μέγιστα:

- 5,811 kN στα 25 sec
- 5,899 kN στα 26 sec
- 1,081 kN στα 28 sec
- 1,766 kN στα 29,6 sec

Παρατηρείται ότι μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου των 7,16 kN, το φορτίο μειώνεται απότομα λόγω σπασίματος των ογκοτεμαχίων 1 και 2 (Σχήμα 7.26).

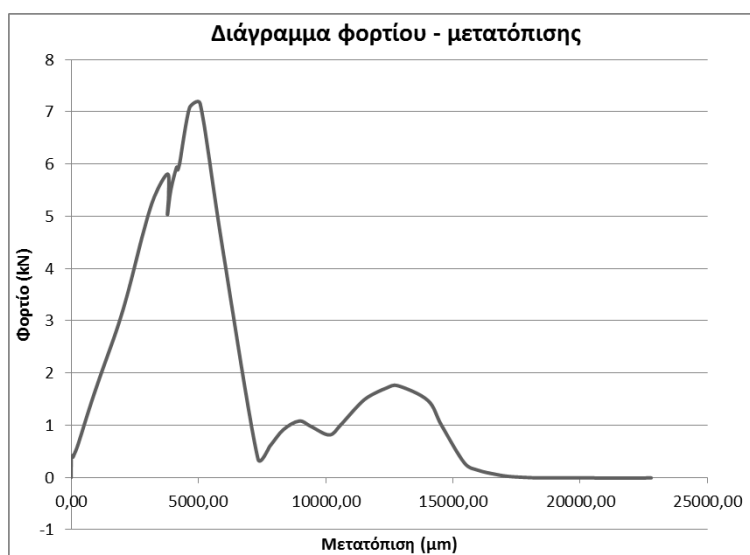
Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου



Διάγραμμα 7.6.Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.

Παρατηρείται ότι μέχρι τα 23,4 sec η μετατόπιση είναι αμελητέα, ενώ αυξάνεται απότομα μετά τα 23,4 sec, λόγω της αύξησης του φορτίου. Στο μέγιστο φορτίο των 7,16 kN η μετατόπιση μετρήθηκε 5067 μm = 5mm, στα 26,6 sec, ενώ μετά από αυτό αρχίζει ξανά να αυξάνεται απότομα η μετατόπιση μετά από μία μικρή σταθεροποίηση στο χρονικό διάστημα από τα 25 sec μέχρι τα 26 sec. Η μέγιστη μετατόπιση μετρήθηκε 2,2 cm.

Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης



Διάγραμμα 7.7. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

Από το παραπάνω διάγραμμα διακρίνεται ότι μετά τα 0,5 kN, η μετατόπιση δεν αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με το φορτίο, και αυτό λόγω του γεγονότος του απότομου σπασίματος του ογκοτεμαχίου 2.

Διάγραμμα αξονικής δύναμης - χρόνου

Για την δοκό 2 δεν μπορέσαμε λόγω και του γεγονότος ότι το πείραμα τέλειωσε σχεδόν απότομα, να εξάγουμε μετρήσιμες τιμές από τα strain gages και των 4 ράβδων, και να υπολογίσουμε την αξονική δύναμη.

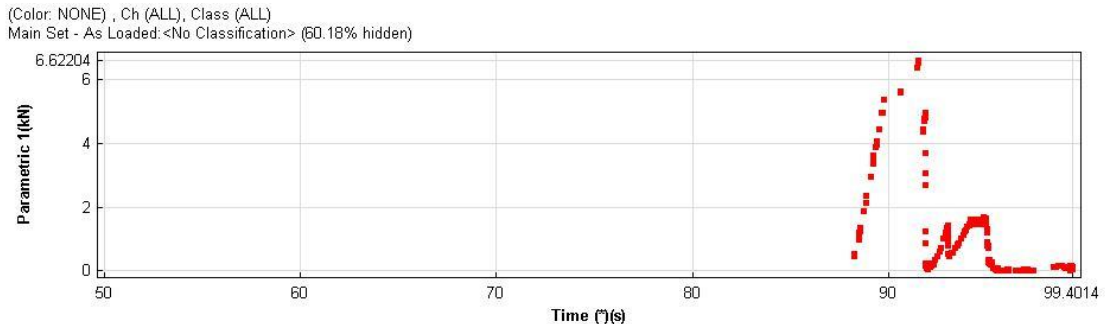
7.3.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής

Οι παράμετροι ακουστικής εκπομπής που ρυθμίσαμε στην μονάδα του καταγραφικού Micro-II είναι οι εξής:

- Threshold Level: 40dB
- Pre-Amplifier: 40 dB
- Analog Filter: Low 20 kHz – High 1000 kHz
- Gain: 0 dB
- Sample Rate: 1000 kHz

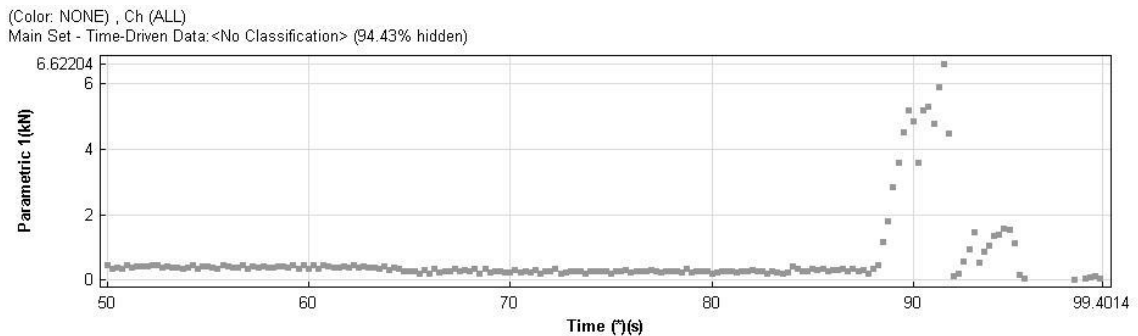
- Samples: 1024
- Pre-Trigger: 256 μ sec
- Length: 1024 Samples
- Peak Detection Time: 200 μ sec
- Hit Detection Time: 800 μ sec
- Hit Lockout Time: 1000 μ sec
- Max Duration:100 msec

Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Hit Driven Data)



Διάγραμμα 7.9.Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Hit Driven Data).

Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Time Driven Data)



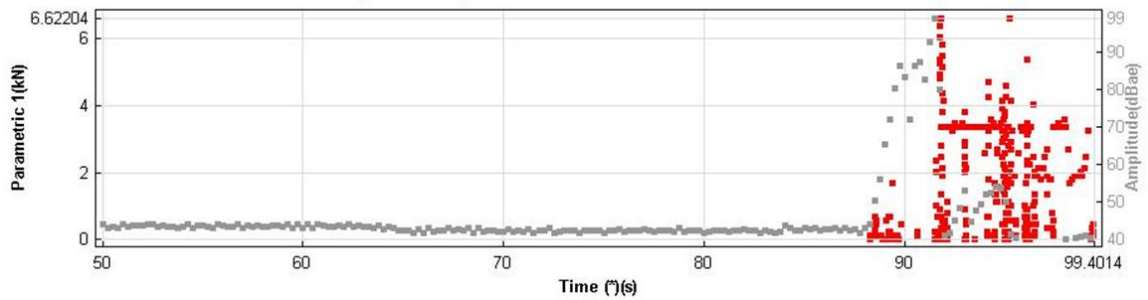
Διάγραμμα 7.10.Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Time Driven Data).

Τα παραπάνω δύο διαγράμματα συσχετίζουν το φορτίο που εξάγεται από την μηχανή κάμψης σαν διαφορά δυναμικού προς το καταγραφικό Micro-II της ακουστικής εκπομπής, από το οποίο καταγραφικό με κατάλληλη επεξεργασία η διαφορά δυναμικού μετατρέπεται σε φορτίο. Το φορτίο έτσι συσχετίζεται με τα γεγονότα της ακουστικής εκπομπής. Το πρώτο διάγραμμα απεικονίζει το φορτίο με βάση τους κτύπους (hits) που κατεγράφησαν, ενώ το δεύτερο διάγραμμα είναι συνεχές και απεικονίζει το φορτίο με βάση τον χρόνο.

Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (94.43% hidden)

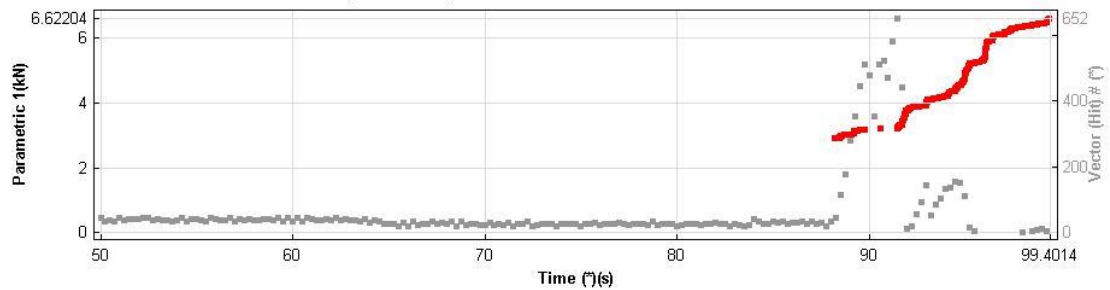


Διάγραμμα 7.11. Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου.

Διάγραμμα αριθμού κτύπων ακουστικής εκπομπής/γεγονότων (hits) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (94.43% hidden)

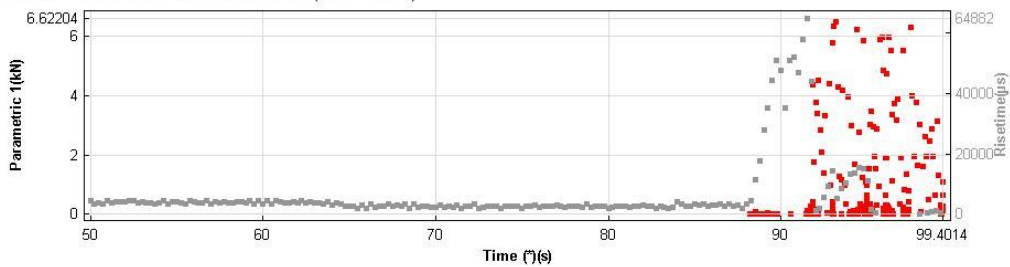


Διάγραμμα 7.12. Διάγραμμα αριθμού κτύπων ακουστικής εκπομπής (hits) – χρόνου.

Διάγραμμα Risetime – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (94.43% hidden)

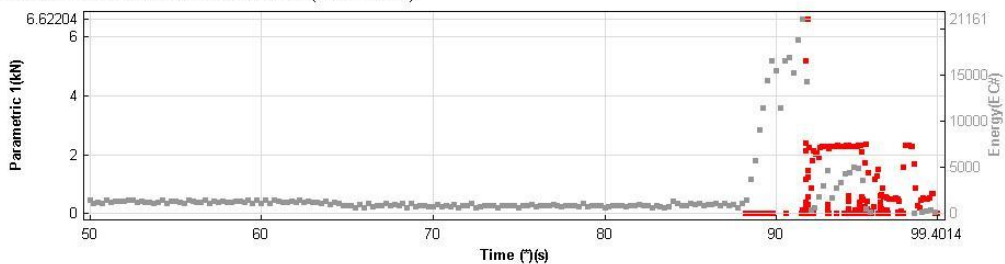


Διάγραμμα 7.13. Διάγραμμα Risetime – χρόνου.

Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (94.43% hidden)



Διάγραμμα 7.14. Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου.

7.3.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής

Να τονιστεί ότι η καταγραφή του φορτίου ξεκίνησε 64,93 sec, δηλαδή περίπου 1 min μετά το ξεκίνημα της καταγραφής των γεγονότων της ακουστικής εκπομπής, άρα γίνεται η αντίστοιχη διόρθωση των τιμών του χρόνου των διαγραμμάτων της ακουστικής εκπομπής με την αφαίρεση των 64,93 sec, για να είναι σωστός ο συγχρονισμός με τον χρόνο του πειράματος 32,8 sec.

Παρατηρούμε ότι μέχρι τα 23,29 (88,22 sec, στα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής) δεν παρατηρούνται γεγονότα ακουστικής εκπομπής όπως ήταν αναμενόμενο και φαίνεται και από το διάγραμμα 7.9.

Στα 89,78 sec (24,85 sec χρόνος πειράματος), είχαμε την πρώτη κορυφή στο διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Διάγραμμα 7.9), το φορτίο διαμορφώθηκε στα 5,39 kN. Το πλάτος διαμορφώθηκε στα 44 dB, με τον χρόνο να φτάσει σε αυτό το πλάτος 365 μsec. Τα γεγονότα ακουστικής εκπομπής δεν αυξήθηκαν σημαντικά (319 hits), επίσης και η ενέργεια δεν αυξήθηκε σημαντικά.

Στα 91,53 sec (26,6 sec πειράματος), επιτεύχθηκε το μέγιστο φορτίο 7,162 kN, με το πλάτος να διαμορφώνεται στο μέγιστο 99 dB. Σε αυτό το φορτίο έσπασαν απότομα και τα ογκοτεμάχια 1 και 2 (Σχήμα 7.25). Παρατηρείται ότι και τα hits άρχισαν να αυξάνονται απότομα, όπως επίσης και η ενέργεια έφτασε στο μέγιστο (Διάγραμμα 7.14).

Στα 92,99 sec (28,06 sec πειράματος) το φορτίο διαμορφώθηκε στα 1,081 kN (δεύτερο τοπικό μέγιστο στο διάγραμμα 7.5). Είχαμε μικρή αύξηση στα γεγονότα ακουστικής εκπομπής (396 hits), η ενέργεια δεν αυξήθηκε σημαντικά, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 48 dB.

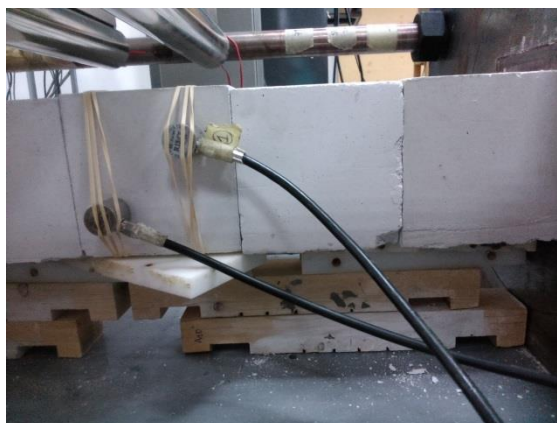
Στα 94,81 sec (29,88 sec πειράματος), το φορτίο διαμορφώθηκε στα 1,74 kN, το πλάτος διαμορφώθηκε στα 69 dB, η ενέργεια δεν αυξήθηκε σημαντικά, ενώ τα hits αυξήθηκαν απότομα (454 hits).

Συμπερασματικά παρατηρήθηκε τέλεια συσχέτιση μεταξύ φορτίου και γεγονότων ακουστικής εκπομπής.

7.4 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό γύψου (Δοκός 3) – Επίδραση της ανομοιογένειας

Η δοκός και πάλι αποτελείται από 6 άρρηκτα κυβικά δοκίμια γύψου (διαστάσεων 10 cm x 10 cm x 10 cm), που παρασκευάστηκαν όπως και τα δοκίμια της δοκού 2, με την διαφορά ότι το ογκοτεμάχιο 5 της δοκού παρουσιάζεται ανομοιογενές σε σχέση με την υπόλοιπη δοκό (Σχήμα 7.27 – Το πιο λευκό ογκοτεμάχιο σε σχέση με τα υπόλοιπα). Όπως θα δούμε και παρακάτω το συγκεκριμένο ογκοτεμάχιο έπαιξε

σημαντικό ρόλο στην μηχανική συμπεριφορά ολόκληρης της δοκού, γιατί στην ουσία μόνο αυτό παραμορφώθηκε έντονα υπό τα φορτία της δοκού, μέχρι την μέγιστη αντοχή της δοκού και την επακολουθείσα κατάρρευση.



Σχήμα 7.27. Το μεσαίο ογκοτεμάχιο στο σχήμα, που παρουσιάζεται ανομοιογενές σε σχέση με τα υπόλοιπα ογκοτεμάχια.

Η αντίστοιχη συνδεσμολογία των strain gages για αυτή την διάταξη, φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 7.2:

Datalogger	Γέφυρα 1	Γέφυρα 2	Μηχανή Κάμψης/Πρέσσα	Strain Gage
Channel 1	Channel A			1
Channel 2	Channel B			2
Channel 3	Channel C			3
Channel 4	Channel D			4
Channel 5		Channel A		5
Channel 6		Channel B		6
Channel 7		Channel D		7
		Channel C	Channel 5	8

Πίνακας 7.2. Η συνδεσμολογία των strain gages με τις αντίστοιχες γέφυρες Wheatstone και αντίστοιχα με την μηχανή κάμψης και το Datalogger.

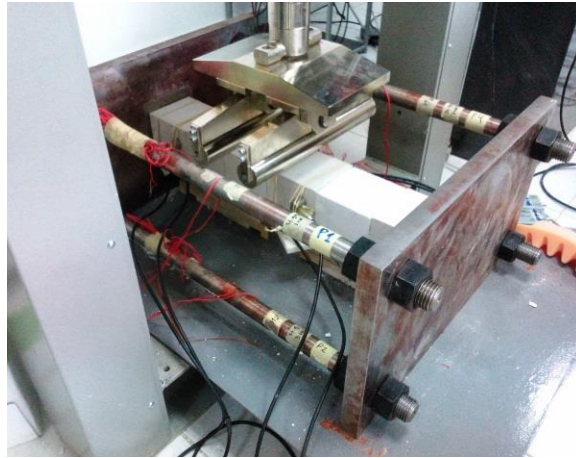
Η διάταξη των αισθητήρων στο ακριανό ογκοτεμάχιο είναι:

- Αισθητήρας (31) στο κάτω αριστερό άκρο.
- Αισθητήρας (312) στο πάνω δεξί άκρο.
- Αισθητήρας (112) στο πάνω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.
- Αισθητήρας (11) στο κάτω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.

Επίσης με τον ίδια διάταξη τοποθετήθηκαν και οι άλλοι 4 αισθητήρες στο μεσαίο ογκοτεμάχιο δεξιά της κεντρικής ασυνέχειας. Οι θέσεις τους προέκυψαν:

- Αισθητήρας (51) στο αριστερό κάτω άκρο.
- Αισθητήρας (512) στο πάνω δεξί άκρο.
- Αισθητήρας (01) στο πάνω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.
- Αισθητήρας (012) στο κάτω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.

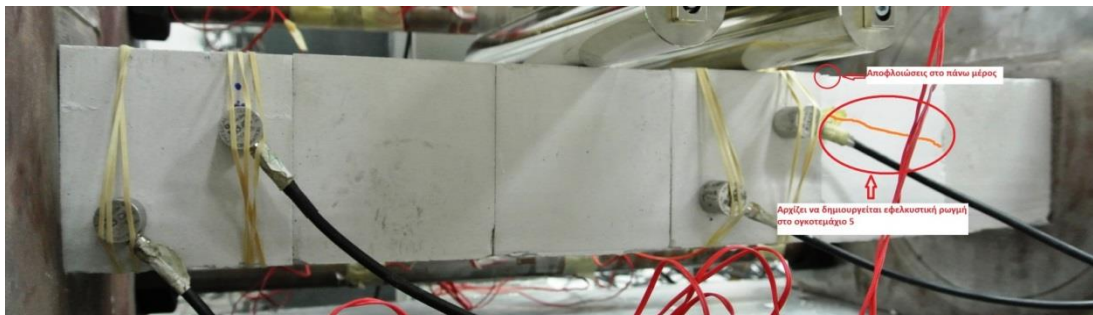
Η τελική πειραματική διάταξη με τοποθετημένη την ρωγματωμένη δοκό και τους αισθητήρες φαίνεται στο Σχήμα 7.28.



Σχήμα 7.28. Διακρίνεται η ρωγματωμένη δοκός στην πειραματική διάταξη.

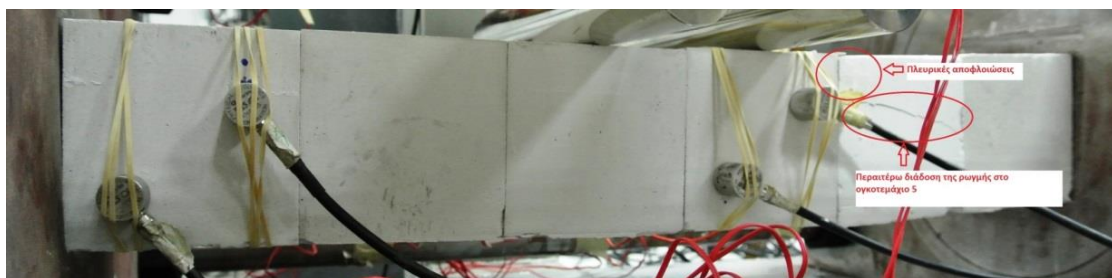
7.4.1 Αποτελέσματα φόρτισης

Το πείραμα διήρκησε συνολικά 4103,6 sec. Στα 1413,42 sec (Σχήμα 7.29) του πειράματος παρατηρήθηκε στο ογκοτεμάχιο 5 να σχηματίζεται εφελκυστική ρωγμή λόγω θλίψης, ενώ στην πάνω ακμή του κύβου παρατηρήθηκε μία ανεπαίσθητη αποφλοιώση.



Σχήμα 7.29. Αρχίζει να αναπτύσσεται η εφελκυστική ρωγμή στο ογκοτεμάχιο 5 λόγω θλίψης και παρατηρούνται αποφλοιώσεις στο πάνω μέρος.

Στα 2333,42 sec (Σχήμα 7.30), παρατηρήθηκε επέκταση της ήδη υπάρχουσας ρωγμής μέχρι την δεξιά ασυνέχεια του ογκοτεμαχίου 5, ενώ υπήρξαν και πλευρικές αποφλοιώσεις στο πάνω αριστερό μέρος.



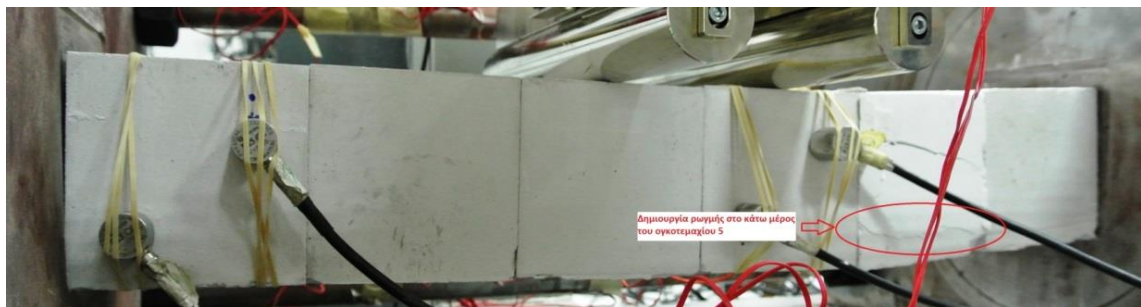
Σχήμα 7.30. Παρατηρούνται οι πλευρικές αποφλοιώσεις και η περαιτέρω διάδοση της ρωγμής.

Στα 2528,42 sec (Σχήμα 7.31), παρατηρήσαμε απόσπαση 2 κομματιών από την πίσω πλευρά του τεμαχίου, χωρίς όμως αυτό το γεγονός να δώσει σημαντική ακουστική εκπομπή όπως θα φανεί και στα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής.



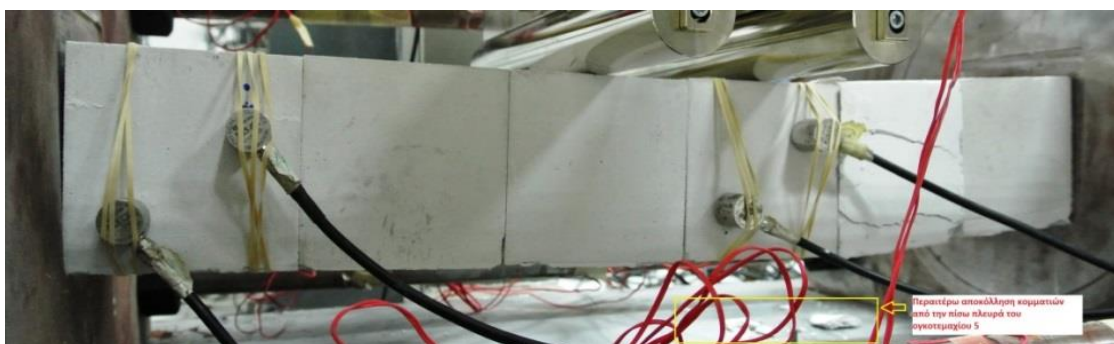
Σχήμα 7.31. Επέκταση των 2 ρωγμών και στην πίσω πλευρά και απόσπαση 2 κομματιών.

Στα 2623,42 sec (Σχήμα 7.32), παρατηρείται δημιουργία ρωγμής στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 5.



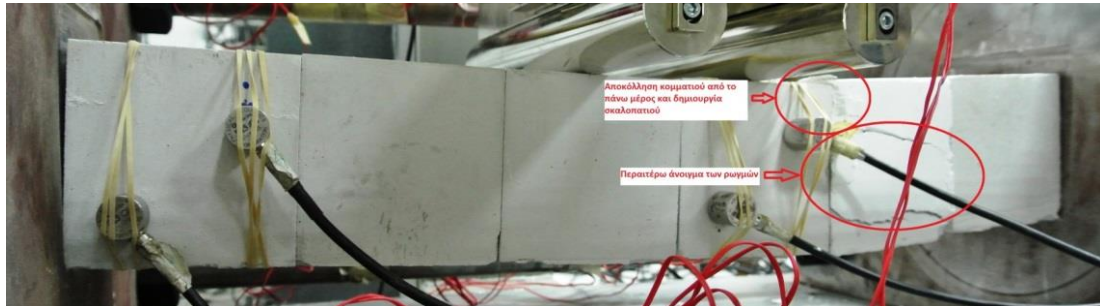
Σχήμα 7.32. Δημιουργία ρωγμής στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 5.

Στα 2887 sec (Σχήμα 7.33), παρατηρήθηκε περαιτέρω αποκόλληση κομματιού από την πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 5, όπως επίσης και περισσότερη σύνθλιψη του.



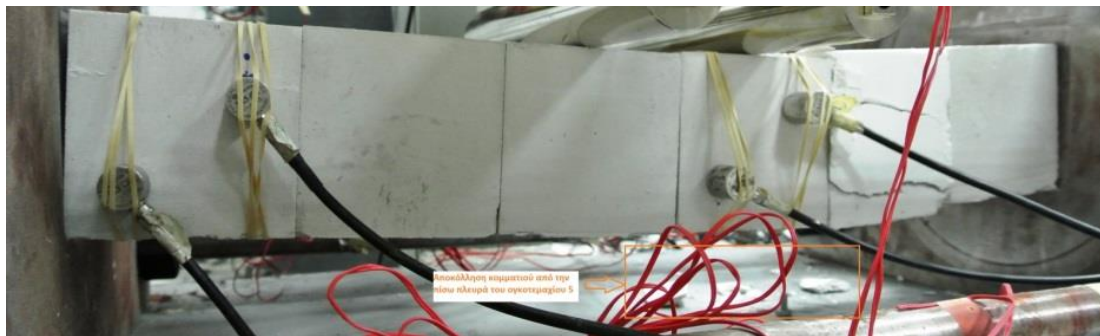
Σχήμα 7.33. Αποκόλληση κομματιού από την πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 5.

Στα 3008,42 sec (Σχήμα 7.34), παρατηρείται αποκόλληση κομματιού από το πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 5, περαιτέρω άνοιγμα των ρωγμών και σταδιακή δημιουργία σκαλοπατιού.



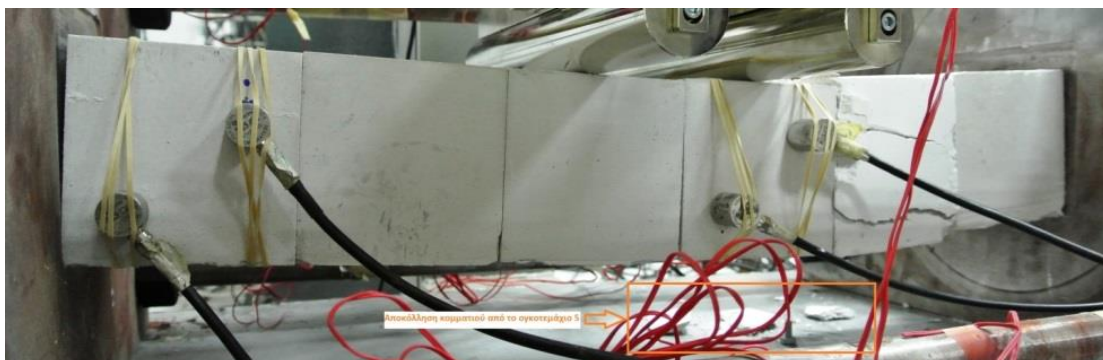
Σχήμα 7.34.Αποκόλληση κομματιού από το πάνω μέρος, δημιουργία σκαλοπατιού και περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών.

Στα 3183,42 sec (Σχήμα 7.35), είχαμε περαιτέρω αποκόλληση τεμάχους από την πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 5.



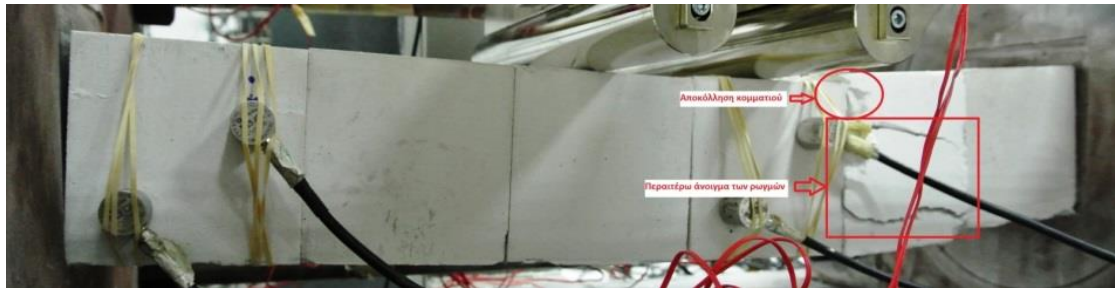
Σχήμα 7.35.Αποκόλληση κομματιού από την πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 5.

Στα 3243,42 sec (Σχήμα 7.36), παρατηρείται αποκόλληση κομματιού από την πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 5.



Σχήμα 7.36.Αποκόλληση κομματιού από την πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 5.

Στα 3278,42 sec (Σχήμα 7.37), παρατηρήθηκε περαιτέρω άνοιγμα των ρωγμών, σύνθλιψη του ογκοτεμαχίου 5 και αποκόλληση κομματιού.



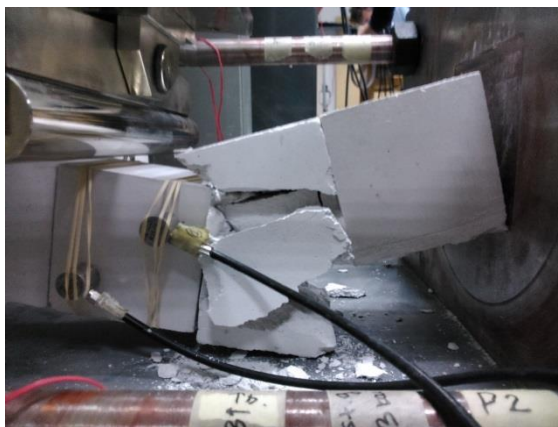
Σχήμα 7.37. Παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα των ρωγμών, σύνθλιψη του ογκοτεμαχίου 5 και αποκόλληση κομματιού στο πάνω μέρος.

Στα 3638,42 sec (Σχήμα 7.38), παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα των ρωγμών, αποκόλληση κομματιών και σύνθλιψη του ογκοτεμαχίου 5 από το ογκοτεμάχιο 4.



Σχήμα 7.38. Περαιτέρω άνοιγμα ρωγμών και σύνθλιψη του ογκοτεμαχίου 5.

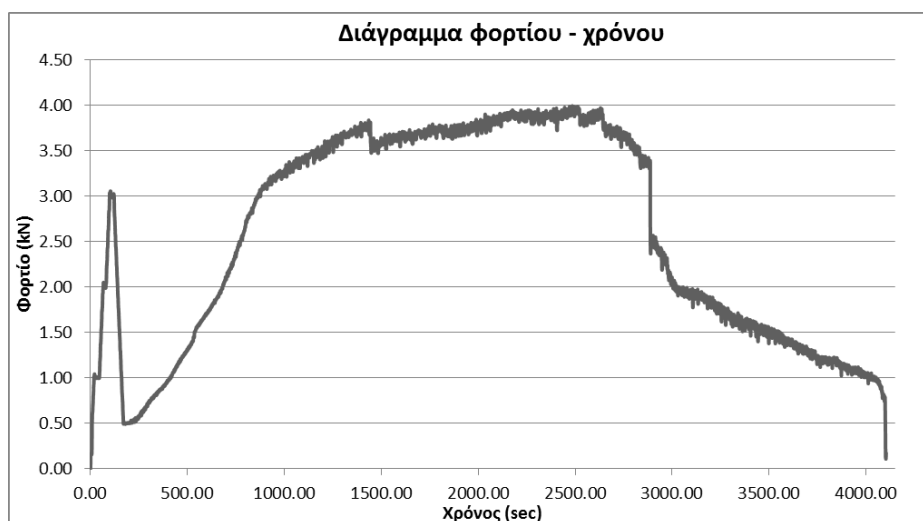
Στα 4103,6 sec (Σχήμα 7.39), κατέρρευσε η δοκός, επειδή αστόχησε το ογκοτεμάχιο 5, και κατέπεσε λόγω ιδίου βάρους (Σχήμα 7.39(α)). Το ογκοτεμάχιο 5 παρουσιάζοταν ανομοιογενές σε σχέση με τα υπόλοιπα ογκοτεμάχια της δοκού. Το ογκοτεμάχιο τελικά έσπασε σε 4 κομμάτια, ενώ επίσης παρουσίασε πλαστική συμπεριφορά στο πάνω μέρος. Το πάνω κομμάτι διέρρευσε πλαστικά από την πίεση που του ασκήθηκε από το διπλανό ογκοτεμάχιο 4, ενώ στο Σχήμα 7.39(β) παρατηρείται η επιφάνεια ολίσθησης.



Σχήμα 7.39(α) Τελική κατάσταση της δοκού μετά την κατάρρευση, (β) Διακρίνεται η επιφάνεια ολίσθησης του πάνω τεμαχίου, που διέρρευσε πλαστικά για την δημιουργία σκαλοπατιού.

7.4.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Διάγραμμα φορτίου - χρόνου



Διάγραμμα 7.15. Διάγραμμα φορτίου - χρόνου.

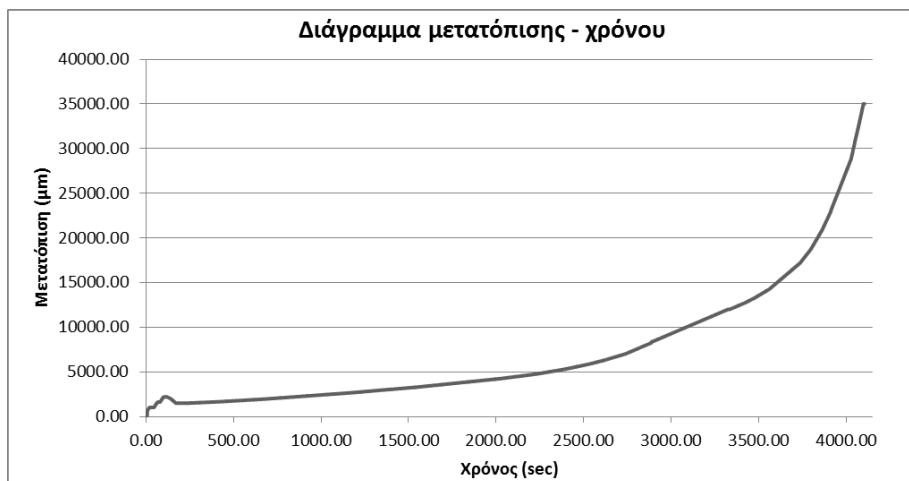
Το μέγιστο φορτίο διαμορφώθηκε στα 3,993 kN σε χρόνο 2470,2 sec = 41,17 min. Όπως φαίνεται και στο αριστερό μέρος του διαγράμματος, πραγματοποιήθηκαν 3 βήματα προ-φόρτισης της δοκού:

- Φόρτιση μέχρι τα 1 kN, με μετατόπιση στο μέσο της δοκού 0,9mm
- Φόρτιση μέχρι τα 2 kN, με μετατόπιση στο μέσο της δοκού 1,5 mm
- Φόρτιση μέχρι τα 3 kN, με μετατόπιση στο μέσο της δοκού 2,1 mm

Μετέπειτα όπως φαίνεται και στο διάγραμμα έγινε αποφόρτιση στα 0,5 kN, και από αυτό το σημείο και έπειτα η δοκός άρχισε να φορτίζεται με όλο και αυξανόμενο ρυθμό φόρτισης μέχρι το μέγιστο φορτίο.

Παρατηρούμε επίσης από το διάγραμμα ότι στα 1434,4 sec είχαμε την δημιουργία σκαλοπατιού με το φορτίο να διαμορφώνεται στα 3,50 kN, ενώ στα 2887,8 sec (Σχήμα 7.33) με φορτίο 3,41 kN, είχαμε απότομη μείωση του φορτίου λόγω εισχώρησης του ογκοτεμαχίου 4 στο ογκοτεμάχιο 5.

Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου

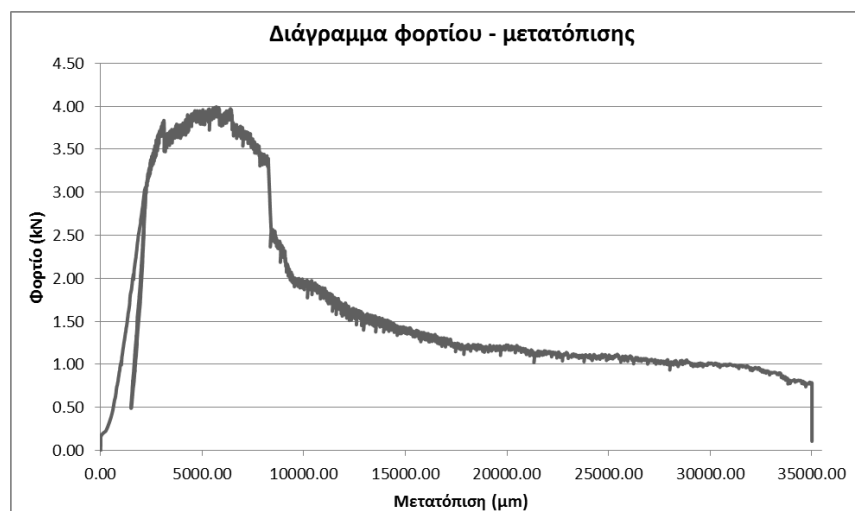


Διάγραμμα 7.16. Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.

Η μέγιστη μετατόπιση στην μεσαία ασυνέχεια της δοκού μετά το πέρας του πειράματος μετρήθηκε 35013 μm = 3,5 cm, ενώ το αριστερό πάνω άκρο της αριστερής ασυνέχειας του ακριανού ογκοτεμαχίου άνοιξε κατά 1,8cm, ενώ το δεξί άκρο της δεξιάς ακριανής ασυνέχειας άνοιξε 2,30 cm.

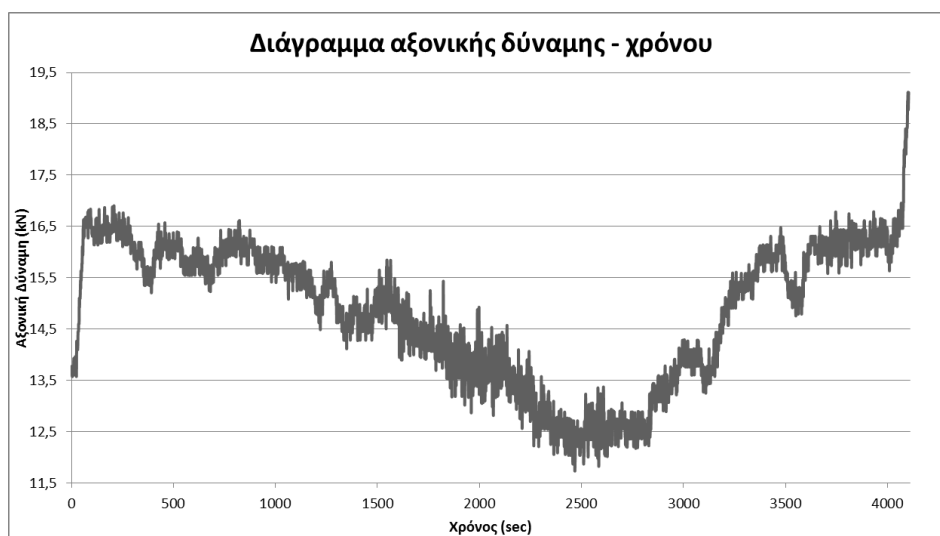
Παρατηρούμε ότι ενώ η μετατόπιση αυξάνεται βαθμιαία μέχρι τα 3085 sec, μετά από αυτό το χρόνο έχουμε μία απότομη αύξηση στην μετατόπιση, μέχρι την αστοχία της δοκού.

Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης



Διάγραμμα 7.17. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου



Διάγραμμα 7.18. Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου.

Για να κατασκευαστεί το παραπάνω διάγραμμα, πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gauges 3,4,7 και 8 (Ράβδοι 2 και 4). Η συνολική καμπτική τάση μετρήθηκε με την παραδοχή της συμμετρίας, δηλαδή τις μετρήσεις της ράβδου 2 τις διπλασιάσαμε όπως επίσης και τις μετρήσεις της ράβδου 4 και έπειτα τις προσθέσαμε.

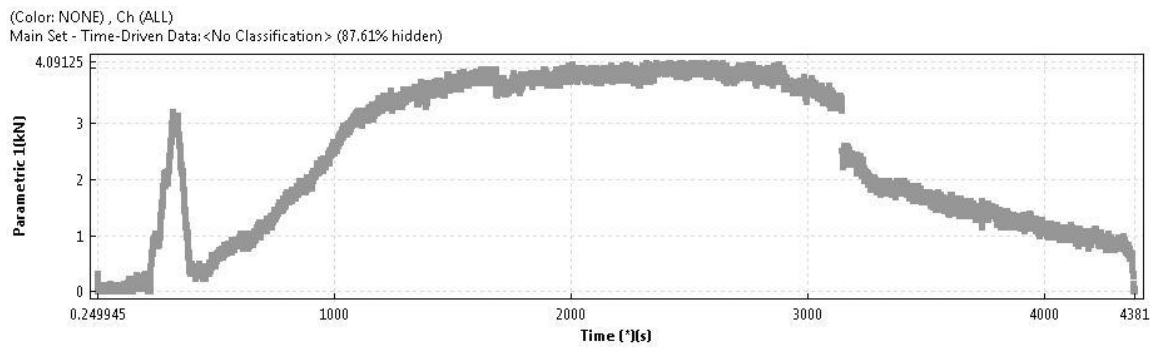
Η μέγιστη αξονική δύναμη διαμορφώθηκε στα 19,11 kN στα 4100,6 sec, ενώ στο αριστερό μέρος του διαγράμματος παρατηρείται η μεταβολή της αξονικής δύναμης λόγω των τριών σταδίων της προφόρτισης της δοκού. Να τονιστεί ότι αρχίσαμε με μία αρχική αξονική δύναμη λόγω των προφορτίσεων 13,62 kN.

7.4.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής

Οι παράμετροι ακουστικής εκπομπής που ρυθμίσαμε στην μονάδα του καταγραφικού Micro-II είναι οι εξής:

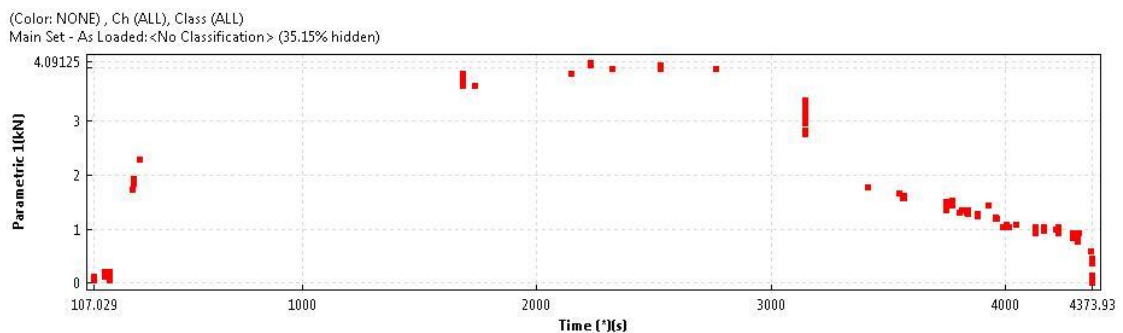
- Threshold Level: 40dB
- Pre-Amplifier: 40 dB
- Analog Filter: Low 20 kHz – High 400 kHz
- Sample Rate: 1000 kHz
- Pre-Trigger: 256 μsec
- Length: 1024 Samples
- Peak Detection Time: 200μsec
- Hit Detection Time: 800 μsec
- Hit Lockout Time: 1000 μsec
- Max Duration: 100 msec

Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Time Driven Data)



Διάγραμμα 7.19. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Time Driven Data).

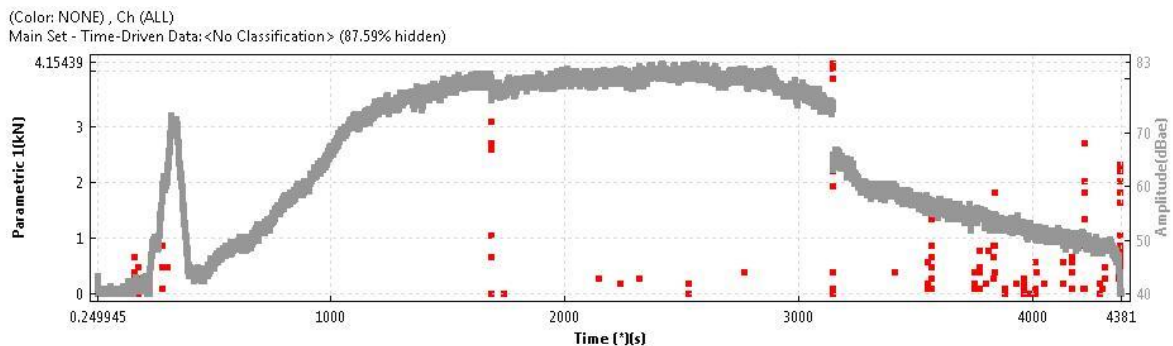
Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Hit Driven Data)



Διάγραμμα 7.20. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου (Hit Driven Data).

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η αντιστοιχία του φορτίου του πλαισίου φόρτισης με τα φαινόμενα ακουστικής εκπομπής, σε συνάρτηση με το χρόνο. Είναι το συνεχές διάγραμμα με Time Driven Data (Διάγραμμα 7.19), ενώ το διάγραμμα 7.20 είναι το αντίστοιχο διάγραμμα με Hit Driven Data, δηλαδή μόνο με τους κτύπους, δηλαδή τα hits (κτύποι) που κατεγράφησαν σαν γεγονότα ακουστικής εκπομπής (Τα σήματα που πέρασαν το κατώφλι των 40 dB).

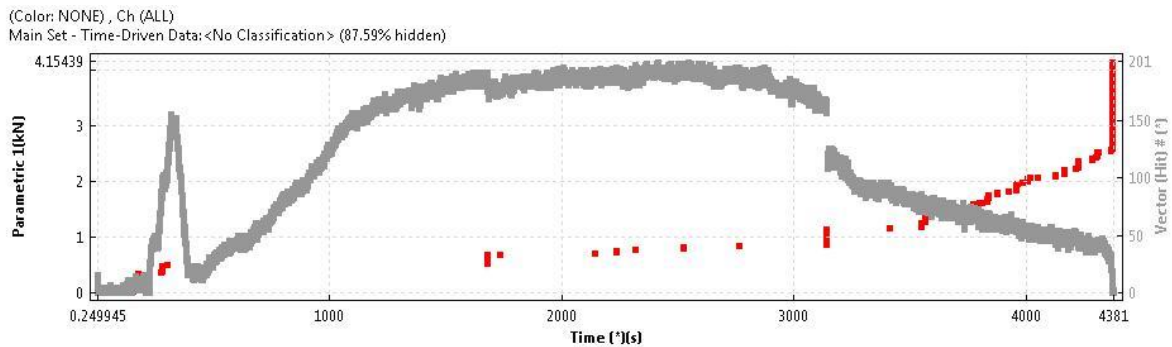
Διάγραμμα πλάτους σήματος ακουστικής εκπομπής – χρόνου



Διάγραμμα 7.21. Διάγραμμα πλάτους σήματος ακουστικής εκπομπής – χρόνου.

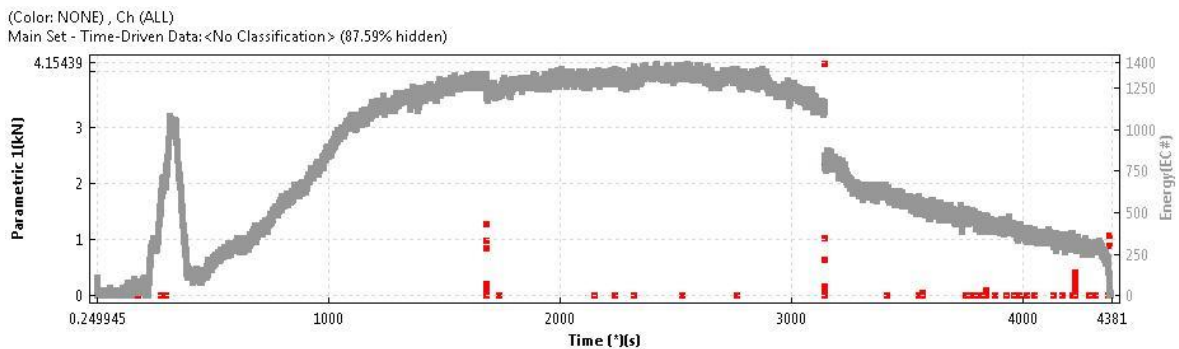
Τα πλάτη μετρώνται σε $\text{dBae} = 20\log V_p$, όπου V_p είναι η μέγιστη τάση του σήματος σε μVolts , που αναφέρεται στο input του προενισχυτή.

Διάγραμμα κτύπων (Hits) – χρόνου



Διάγραμμα 7.22. Διάγραμμα κτύπων (hits) – χρόνου.

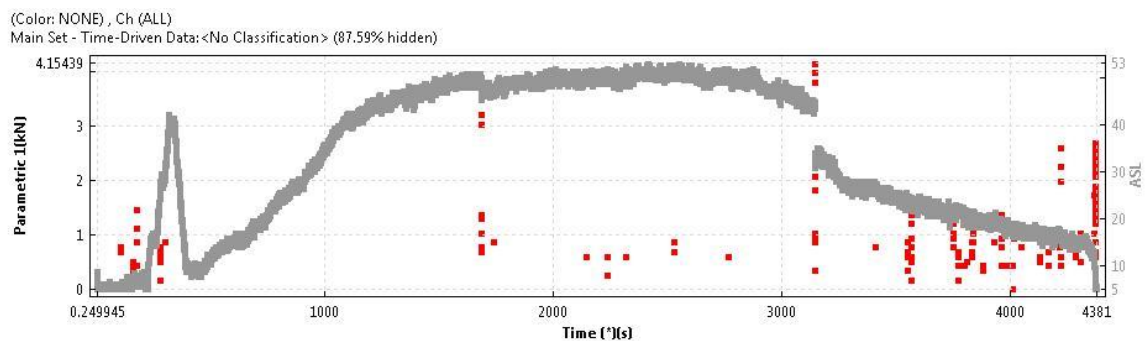
Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου



Διάγραμμα 7.23. Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου.

Η ενέργεια προτιμάται για να ερμηνεύσει το μέγεθος της εκδήλωσης πηγής διότι είναι στενά συνδεδεμένη με το πλάτος, καθώς και τη διάρκεια, και εξαρτάται λιγότερο από την τάση κατωφλίου και τις συχνότητες λειτουργίας.

Διάγραμμα ASL (Average Signal Level) – χρόνου

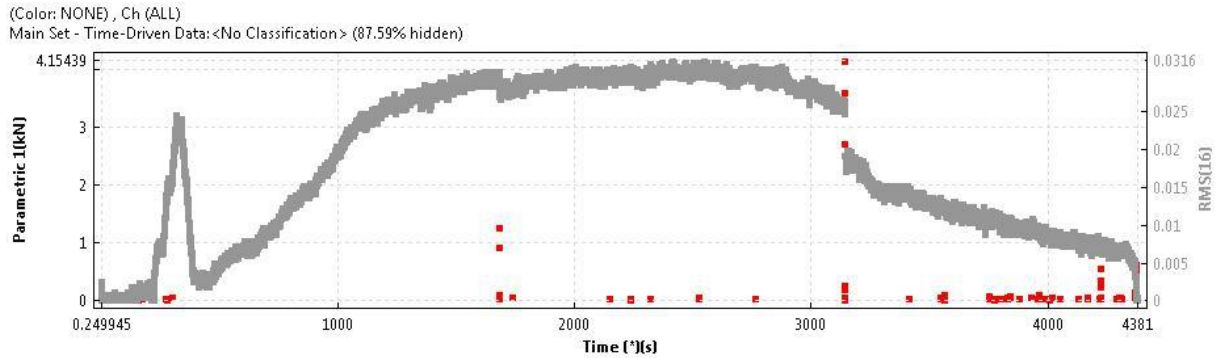


Διάγραμμα 7.24. Διάγραμμα ASL-χρόνου.

Το μέγεθος ASL (Average Signal Level) είναι ένα μέτρο της συνεχόμενης διακύμανσης και του μέσου πλάτους των σημάτων της ακουστικής εκπομπής. Αυτή η

μέτρηση είναι παρόμοια με αυτή του διαγράμματος RMS, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, λόγω του γεγονότος ότι είναι μια μέτρηση κατά μέσο όρο. Η διαφορά τους βρίσκεται στο ότι το RMS ακολουθεί την μέση τετραγωνική τιμή και μετρείται σε Volts, ενώ το μέγεθος μέσου σήματος ASL ακολουθεί την κατανομή του πλάτους και μετρείται σε dB.

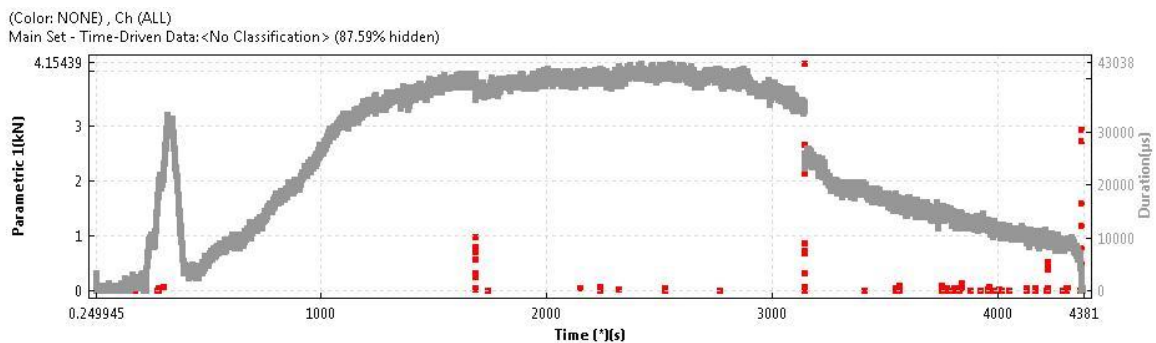
Διάγραμμα RMS (Root Mean Square) – χρόνου



Διάγραμμα 7.25. Διάγραμμα RMS – χρόνου.

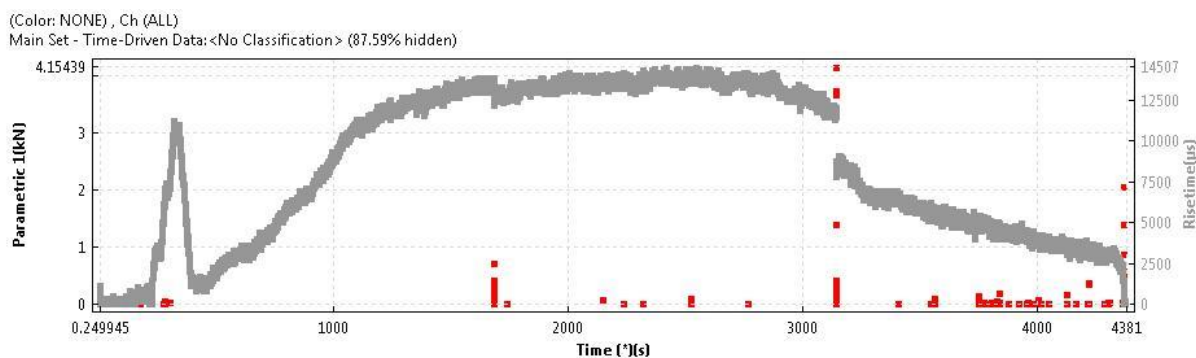
Το RMS (Root Mean Square) είναι ένα μέτρο της συνεχόμενης διακύμανσης της τάσης των γεγονότων της ακουστικής εκπομπής, που εισέρχεται ως δεδομένο στο καταγραφικό. Το RMS είναι ένας όρος της ηλεκτρονικής τεχνολογίας-ηλεκτροτεχνίας, που ορίζεται ως το διορθωμένο κατά μέσο όρο χρονικά σήμα της ακουστικής εκπομπής, μετρούμενο σε γραμμική κλίμακα με μονάδες Volts.

Διάγραμμα Duration (Διάρκειας) – χρόνου



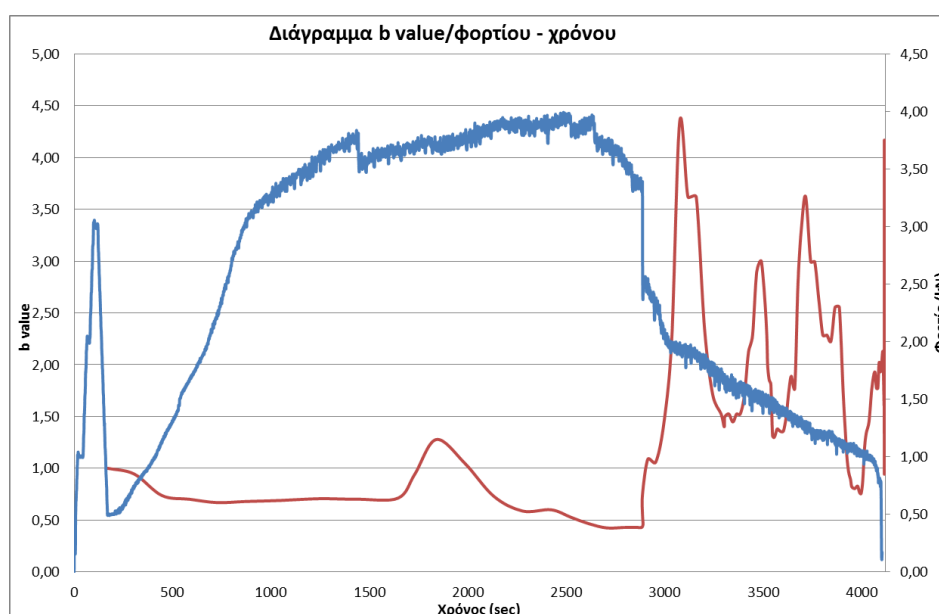
Διάγραμμα 7.26. Διάγραμμα Duration (Διάρκειας) – χρόνου.

Διάγραμμα Risetime – χρόνου



Διάγραμμα 7.27. Διάγραμμα Risetime – χρόνου.

Διάγραμμα b value - χρόνου



Διάγραμμα 7.28. Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου.

Η παράμετρος b είναι γνωστή από την σεισμολογία και είναι η παράμετρος της κατανομής συχνότητας – πλάτους των σημάτων. Χρησιμοποιείται συχνά για την αξιολόγηση της ακουστικής εκπομπής πειραμάτων βραχομηχανικής. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Aki (1965), σύμφωνα με την οποία η παράμετρος b υπολογίζεται από την σχέση:

$$b = \frac{\log e}{m_{av} - m_o} \quad (7.4)$$

Όπου m_{av} είναι το μέσο μέγεθος των σεισμικών γεγονότων και m_o το ελάχιστο μέγεθος που έχει καταγραφεί σε μια περιοχή και για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η παραπάνω σχέση μπορεί να εφαρμοσθεί και σε δεδομένα ΑΕ χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή διόρθωσης για τα πλάτη των σημάτων ΑΕ. Σε αυτή την περίπτωση η σεισμική παράμετρος b για ΑΕ δίνεται από την σχέση:

$$b = \frac{20 \log e}{\alpha_{av} - \alpha_o} \quad (7.5)$$

Όπου α_{av} είναι το μέσο πλάτος (σε dB) των σημάτων ΑΕ και α_o το πλάτος κατωφλίου (σε dB). Από τα παραπάνω και σύμφωνα με το διάγραμμα 7.28 παρατηρούμε ότι πριν τα 3000 sec η σεισμική παράμετρος b ελαχιστοποιείται και λαμβάνει τιμή 0,5, γιατί σε αυτό τον χρόνο αρχίζει να εισχωρεί σταδιακά το ογκοτεμάχιο 4 στο ογκοτεμάχιο 5 και εμφανίζονται τα μεγαλύτερα πλάτη ακουστικής εκπομπής (Όσο αυξάνεται η διαφορά $\alpha_{av} - \alpha_o$, τόσο μειώνεται η σεισμική παράμετρος και αντίστροφα). Το μέγιστο της σεισμικής παραμέτρου φτάνει σε χρόνο 3075,33 sec, όπου μετά από αυτό τον χρόνο είχαμε και την εμφάνιση του μικρότερου πλάτους (42,10 dB), με το φορτίο να διαμορφώνεται στα 1,96 kN. Η γενική τάση της καμπύλης της σεισμικής παραμέτρου είναι να μειώνεται κατά την διάρκεια της δοκιμής, λόγω της προοδευτικής αποδόμησης του πετρώματος και να προσεγγίζει την τιμή 1 όπως παρατηρείται και στην επιστήμη της Σεισμολογίας. Πράγματι όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 7.28, στο τέλος του πειράματος (4103,6 sec), η παράμετρος b , γίνεται 1.

7.4.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής

Να τονιστεί ότι για να γίνει συσχετισμός δεδομένων φορτίου της πρέσας με τα γεγονότα ακουστικής εκπομπής αφαιρούνται από τον χρόνο των διαγραμμάτων ακουστικής εκπομπής 269,4 sec. Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα ακουστικής εκπομπής:

- **(1682,82 sec (1413,42 sec πειράματος)/Σχήμα 7.29):** Αρχίζει να αναπτύσσεται η εφελκυστική ρωγμή, όπου στο τέλος του πειράματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.39(β), συνεχίστηκε και αποκόλλησε το πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 5. Το πλάτος διαμορφώθηκε στα 72 dB.
- **(3144 sec (2887 sec πειράματος)/Σχήμα 7.33):** Επέκταση της ήδη υπάρχουσας ρωγμής, επέκταση ρωγμής στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 5, η οποία αποκόλλησε προς το τέλος το κάτω κομμάτι, όπως επίσης δημιουργία πλευρικών αποφλοιώσεων και σκαλοπατιού στο πάνω μέρος. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα κτύπων (Hits) – χρόνου και Ενέργειας – χρόνου, αυτό το γεγονός δημιούργησε την μεγαλύτερη έκλυση ενέργειας.

Όπως παρατηρούμε και από το διάγραμμα 7.23 το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας εκλύθηκε στα 3144 sec, όπου είχαμε και το μεγαλύτερο πλάτος της ακουστικής εκπομπής (83 dB), όπου τα πλάτη είναι στενά συνδεδεμένα με το μέγεθος της πηγής. Σε αυτό τον χρόνο είχαμε επέκταση της ήδη υπάρχουσας ρωγμής, επέκταση ρωγμής στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 5, η οποία αποκόλλησε προς το τέλος το κάτω κομμάτι, όπως επίσης δημιουργία πλευρικών αποφλοιώσεων και σκαλοπατιού στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου.

7.5 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό γύψου (Δοκός 4)

Για την πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής, και την μέτρηση της αξονικής δύναμης έγιναν κάποιες αλλαγές. Χρησιμοποιήσαμε 4 συνολικά strain gauges, τα strain gauges 2 (Ράβδος 1), 4 (Ράβδος 2), 6 (Ράβδος 3) και 8 (Ράβδος 4), αλλά με άλλη διάταξη. Τα strain gages στράφηκαν κατά 90° από την προηγούμενη θέση τους, η οποία ήταν στο πάνω μέρος της κάθε ράβδου, για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την μέγιστη παραμόρφωση, πάνω στη μέση τάση της κατανομής των τάσεων. Τα strain gages 4,6 και 8, τα συνδέσαμε στο πλαίσιο φόρτισης, για να μπορέσουμε να έχουμε πλήρη συγχρονισμό του χρόνου της πρέσσας και των παραμορφώσεων, ενώ το strain gage 2 ενώθηκε με το Datalogger της CONTROLS. Η παραπάνω συνδεσμολογία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.3):

Γέφυρα	Πλαίσιο φόρτισης	Καταγραφικό	Strain gage
Channel A	-	channel 1	2
Channel B	channel 5	-	4
Channel C	channel 7	-	6
Channel D	channel 8	-	8

Πίνακας 7.3. Συνδεσμολογία των strain gages, με το καταγραφικό, την γέφυρα και το πλαίσιο φόρτισης.

Η διάταξη των αισθητήρων ακουστικής εκπομπής στο ακριανό ογκοτεμάχιο είναι:

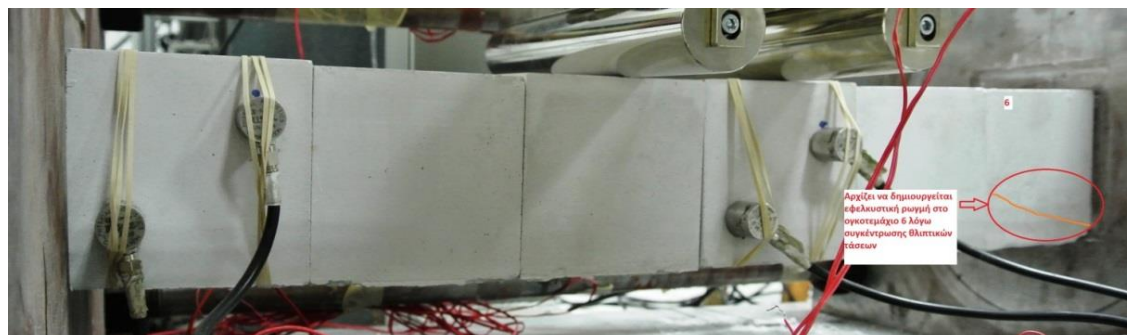
- Αισθητήρας (51 – Κανάλι 5 του καταγραφικού) στο κάτω αριστερό άκρο.
- Αισθητήρας (512 – Κανάλι 6 του καταγραφικού) στο πάνω δεξί άκρο.
- Αισθητήρας (012 – Κανάλι 8 του καταγραφικού) στο πάνω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.
- Αισθητήρας (01 – Κανάλι 7 του καταγραφικού) στο κάτω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.

Επίσης με την ίδια διάταξη τοποθετήθηκαν και οι άλλοι 4 αισθητήρες στο μεσαίο ογκοτεμάχιο δεξιά της κεντρικής ασυνέχειας. Οι θέσεις τους προέκυψαν:

- Αισθητήρας (31 – Κανάλι 3 του καταγραφικού) στο αριστερό κάτω άκρο.
- Αισθητήρας (312 – Κανάλι 4 του καταγραφικού) στο πάνω δεξί άκρο.
- Αισθητήρας (112 – Κανάλι 2 του καταγραφικού) στο πάνω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.
- Αισθητήρας (12 – Κανάλι 1 του καταγραφικού) στο κάτω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.

7.5.1 Αποτελέσματα φόρτισης

Το πείραμα διήρκεσε 4074 sec = 67,9 min. Στα 2037 sec, άρχισε η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο δεξί ακριανό ογκοτεμάχιο 6 στο κάτω μέρος (Σχήμα 7.40):



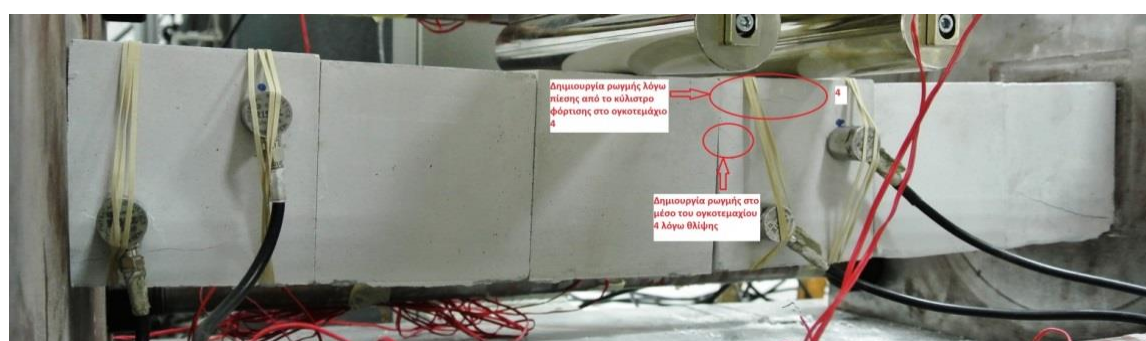
Σχήμα 7.40. Διακρίνεται η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 6.

Στα 2337 sec, άρχισε να αναπτύσσεται εφελκυστική ρωγμή στο αριστερό ακριανό ογκοτεμάχιο 1 στο κάτω μέρος, λόγω θλιπτικών τάσεων (Σχήμα 7.41):



Σχήμα 7.41. Διακρίνεται η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1.

Στα 2442 sec, δημιουργείται εφελκυστική ρωγμή στο ογκοτεμάχιο 4 και αρχίζει να δημιουργείται ογκοτεμάχιο 4 τοπική σύνθλιψη κάτω από το κύλιτρο φόρτισης λόγω πίεσης του κυλίστρου και εφελκυστικές ρωγμές λόγω επαγόμενου εφελκυσμού εξαιτίας της θλιπτικής συγκέντρωσης τάσεων στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου (Σχήμα 7.42):



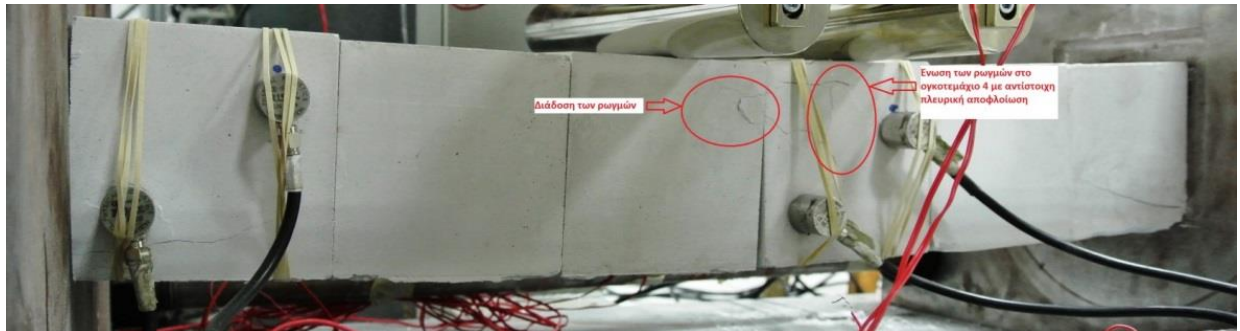
Σχήμα 7.42. Δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 4 και δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 4.

Στα 2487 sec, παρατηρείται η επέκταση της ρωγμής από το ογκοτεμάχιο 4 στο ογκοτεμάχιο 3 (Σχήμα 7.43) λόγω επικράτησης θλιπτικών τάσεων στο πάνω μέρος της μεσαίας ασυνέχειας:



Σχήμα 7.43.Επέκταση της εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 3, από το ογκοτεμάχιο 4.

Στα 2617 sec, παρατηρείται το φαινόμενο της συνεχιζόμενης επέκτασης των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 3 και 4 λόγω θλιπτικών τάσεων, και ενώνονται οι ρωγμές στο ογκοτεμάχιο 4, με πλευρική αποφλοιώση (Σχήμα 7.44):



Σχήμα 7.44.Περαιτέρω επέκταση των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 3 και 4, με ένωση τους και πλευρική αποφλοιώση στο ογκοτεμάχιο 4.

Στα 2677 sec, παρατηρήσαμε δημιουργία δεύτερης ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 6 στο πάνω μέρος και επέκταση της ρωγμής του 6 στο ογκοτεμάχιο 5, όπως επίσης και διάδοση και επέκταση της προϋπάρχουσας ρωγμής από το ογκοτεμάχιο 6 στο 5 (Σχήμα 7.45):



Σχήμα 7.45.Δημιουργία δεύτερης ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 6, και επέκταση ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 5, με αντίστοιχη επέκταση και διάδοση προϋπαρχουσών ρωγμών.

Στα 2787 sec, παρατηρείται δημιουργία δεύτερης εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 5 και επέκτασή της στο ογκοτεμάχιο 4 (Σχήμα 7.46):



Σχήμα 7.46. Δημιουργία δεύτερης ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 5, και επέκτασή της στο ογκοτεμάχιο 4.

Στα 3067 sec, έχουμε περαιτέρω άνοιγμα και επέκταση των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1 και στο ογκοτεμάχιο 4 κάτω από τον αισθητήρα (Σχήμα 7.47):



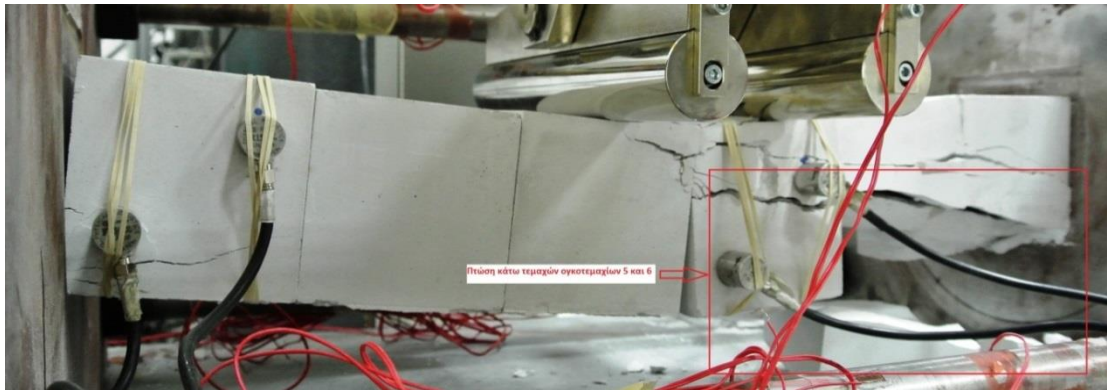
Σχήμα 7.47. Περαιτέρω άνοιγμα και επέκταση των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, και δημιουργία νέων στα ογκοτεμάχια 1 και 4.

Στα 3292 sec, παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, επέκταση των ρωγμών στο ογκοτεμάχιο 4, όπως επίσης και αποκόλληση τεμάχους από το ογκοτεμάχιο 4 (Σχήμα 7.48):



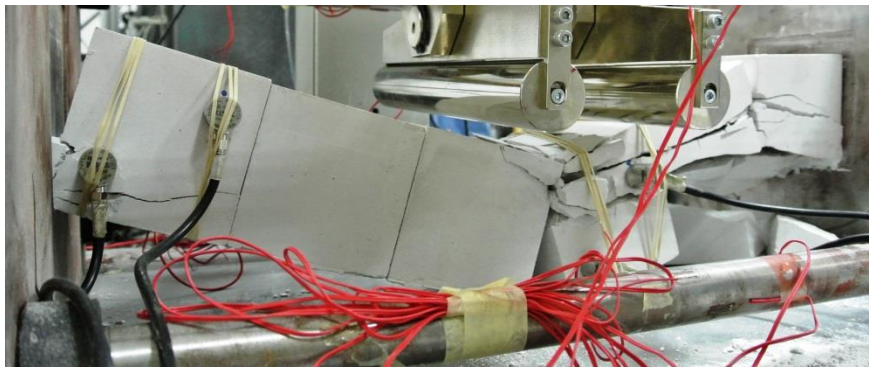
Σχήμα 7.48. Περαιτέρω άνοιγμα ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, επέκταση ρωγμών και αποκόλληση τεμάχους από ογκοτεμάχιο 4.

Στα 3732 sec, έπεσε το κάτω μέρος των ογκοτεμαχίων 5 και 6 (Σχήμα 7.49):



Σχήμα 7.49. Κατάπτωση του κάτω μέρους στα ογκοτεμάχια 5 και 6.

Η τελική εικόνα της αστοχίας φαίνεται στο Σχήμα 7.50:



Σχήμα 7.50. Τελική μορφή αστοχίας της δοκού.

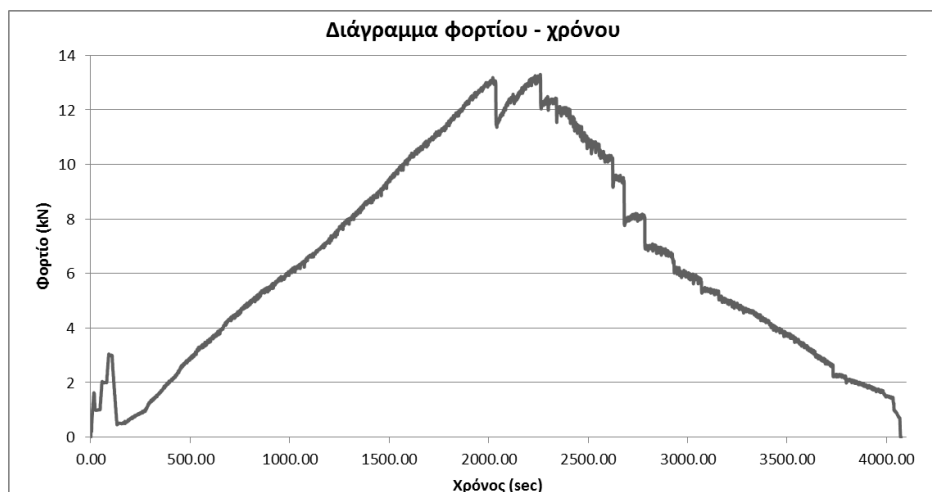
Στο σχήμα 7.51, παρατηρείται αντίστοιχα η μορφή της αστοχίας της δοκού στα ογκοτεμάχια 4,5 και 6 από την πίσω πλευρά τους.



Σχήμα 7.51. Η μορφή της αστοχίας της δοκού στα ογκοτεμάχια 4,5 και 6 από την πίσω πλευρά.

7.5.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Διάγραμμα φορτίου – χρόνου



Διάγραμμα 7.29. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου.

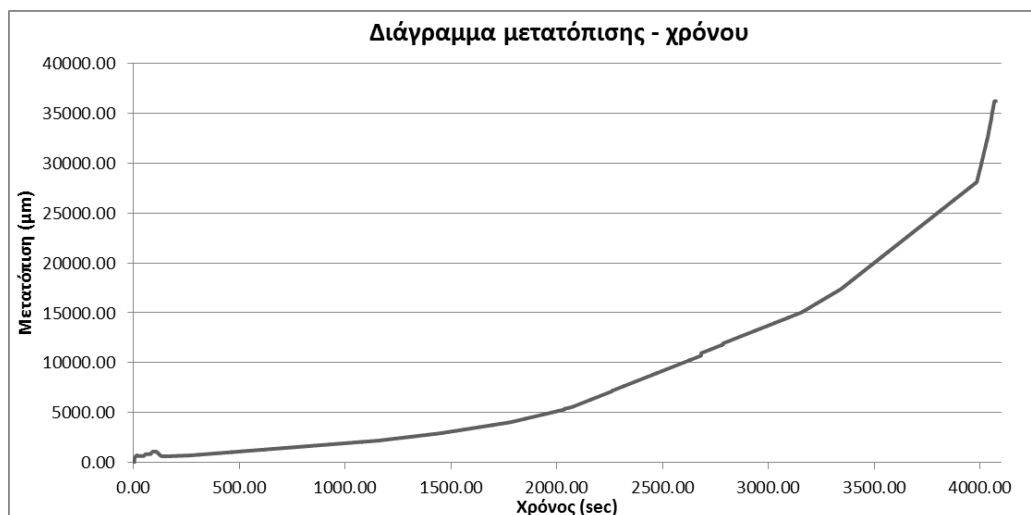
Όπως παρατηρούμε και από το παραπάνω διάγραμμα, πραγματοποιήθηκαν τρία στάδια προφόρτισης:

- Προφόρτιση 1kN στα 8,80 sec.
- Προφόρτιση 2kN στα 56,60 sec.
- Προφόρτιση 3kN στα 89,80 sec.
- Αποφόρτιση στα 0,5kN στα 137,40 sec.

Έπειτα το φορτίο όπως ήταν αναμενόμενο άρχισε να αυξάνει μέχρι να επιτύχει το μέγιστο 13,30 kN στα 2259,80 sec. Όμως παρατηρήθηκαν και τέσσερις απότομες πτώσεις στο διάγραμμα:

- Στα 2021 sec το φορτίο έφτασε στα 13,189 kN.
- Στα 2617 sec το φορτίο έφτασε στα 10,338 kN.
- Στα 2677 sec το φορτίο έφτασε στα 9,321 kN.
- Στα 2787 sec το φορτίο έφτασε στα 7,417 kN.

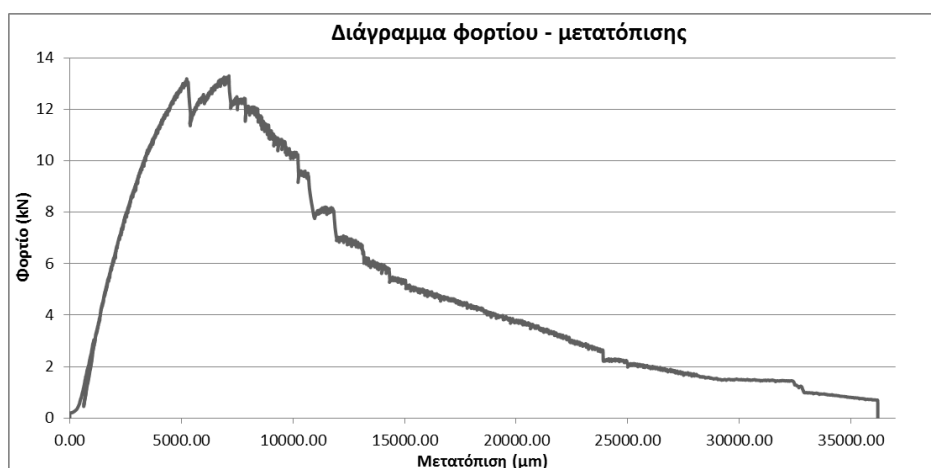
Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου



Διάγραμμα 7.30. Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.

Η μέγιστη μετατόπιση έφτασε μετά το πέρας του πειράματος στα 36208 μm = 3,6 cm στην μεσαία ασυνέχεια, ενώ το πάνω δεξί άκρο στο ογκοτεμάχιο 1 άνοιξε 1,50 cm και το αριστερό άκρο 2,50 cm στο ογκοτεμάχιο 5.

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Διάγραμμα 7.31. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου



Διάγραμμα 7.32. Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου.

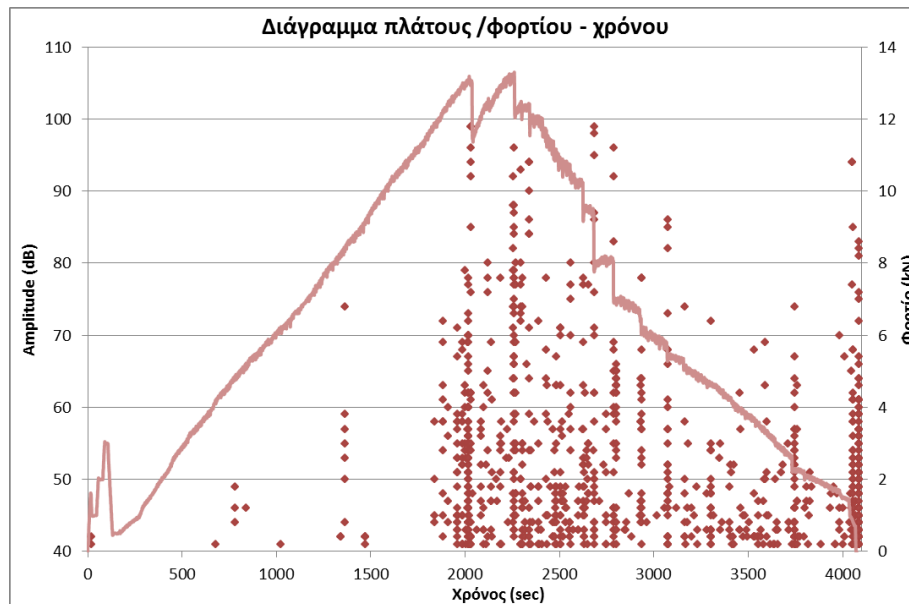
Για να κατασκευαστεί το παραπάνω διάγραμμα (7.32) πήραμε τις μετρήσεις (παραμορφώσεις) από τα strain gages 6 και 8, τις προσθέσαμε και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2.

Από το διάγραμμα 7.32, παρατηρείται ότι η μέγιστη αξονική δύναμη διαμορφώθηκε στα 41,33 kN στα 37 min σχεδόν ταυτόχρονα δηλαδή με την επίτευξη του μέγιστου φορτίου. Επίσης τις τέσσερις απότομες πτώσεις του φορτίου, τις ακολούθησε και η αξονική δύναμη, ενώ τέλος να τονιστεί ότι μετά την αποφόρτιση η

αξονική δύναμη άρχισε να αυξάνεται με αρχική αξονική δύναμη μετά τις προφορτίσεις 24,08 kN.

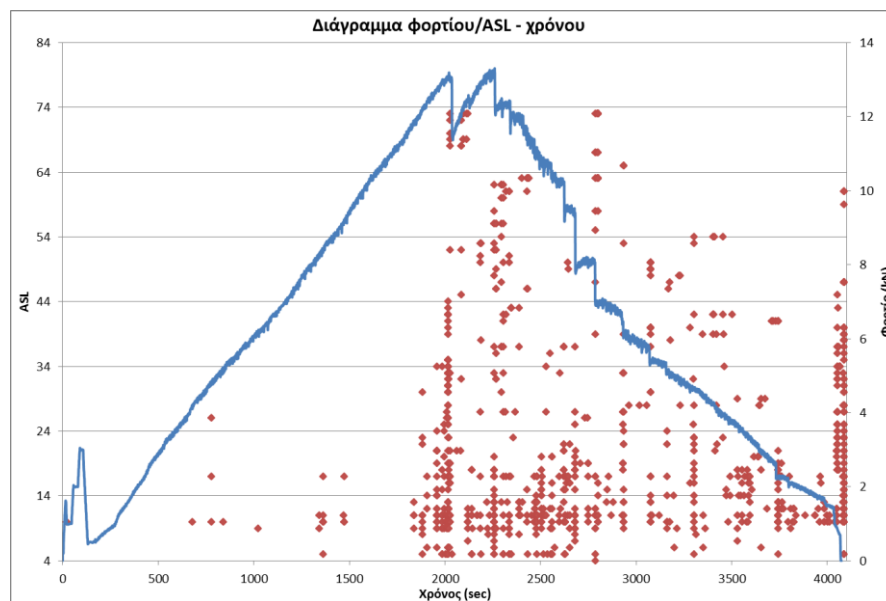
7.5.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής

Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου



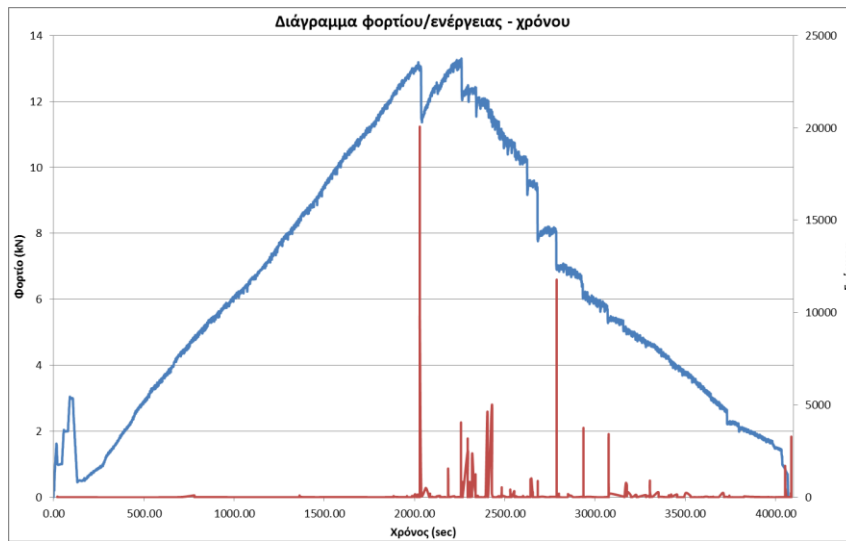
Διάγραμμα 7.33. Διάγραμμα πλάτους – χρόνου.

Διάγραμμα ASL (Average Signal Level) – χρόνου



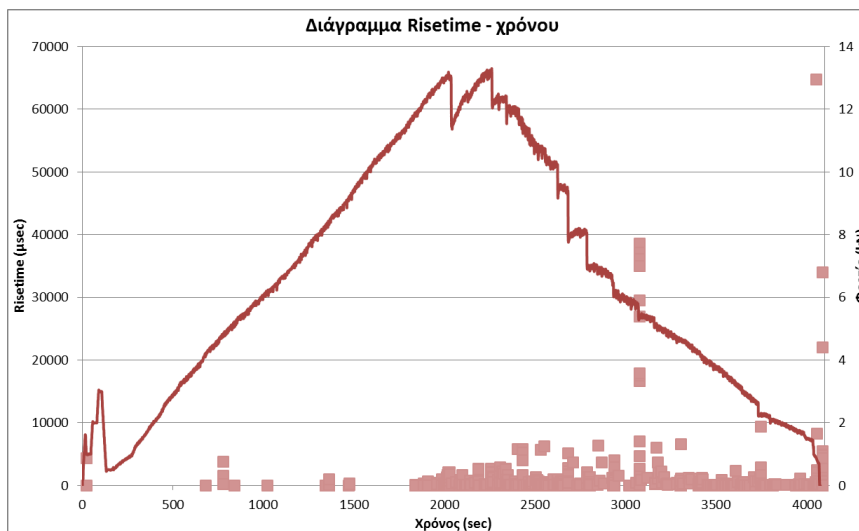
Διάγραμμα 7.34. Διάγραμμα ASL – χρόνου.

Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου



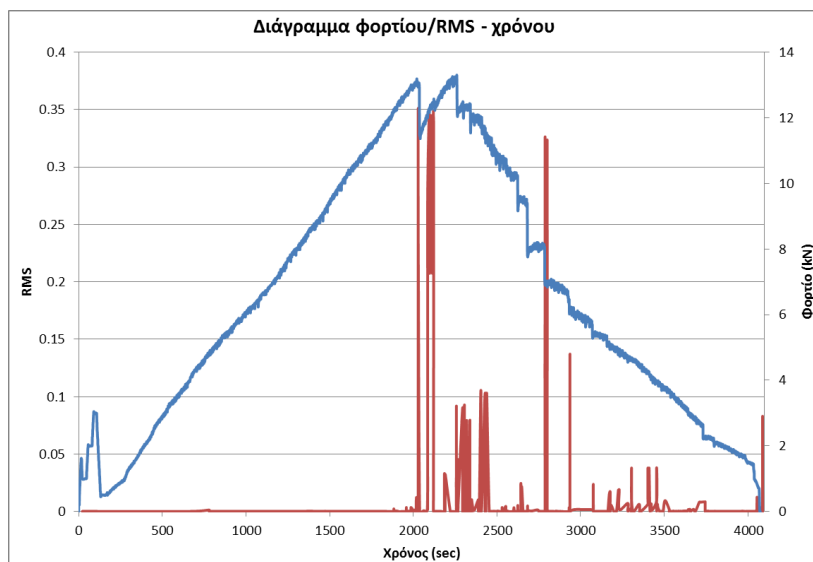
Διάγραμμα 7.35. Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου.

Διάγραμμα Risetime – χρόνου



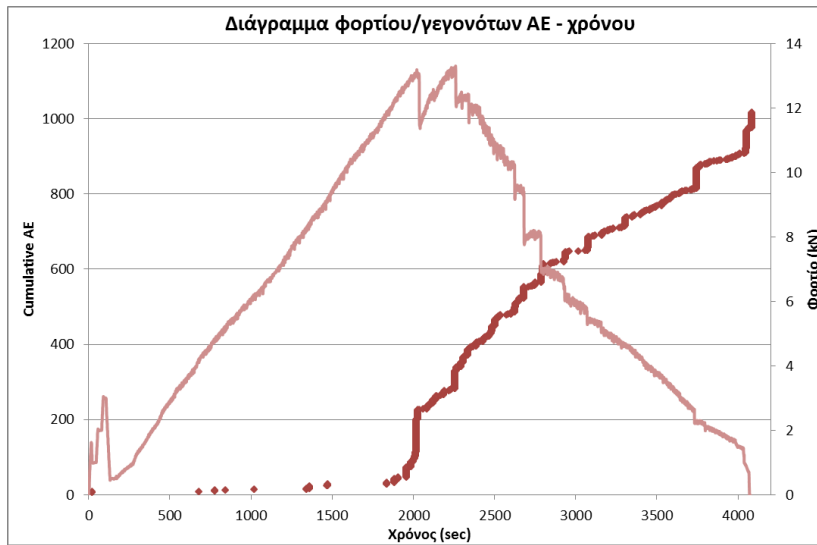
Διάγραμμα 7.36. Διάγραμμα Risetime – χρόνου.

Διάγραμμα RMS (Root Mean Square) – χρόνου



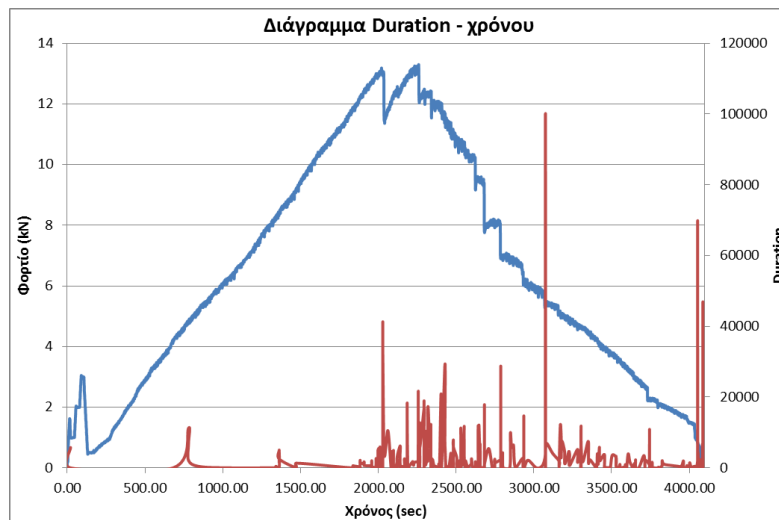
Διάγραμμα 7.37. Διάγραμμα RMS – χρόνου.

Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου



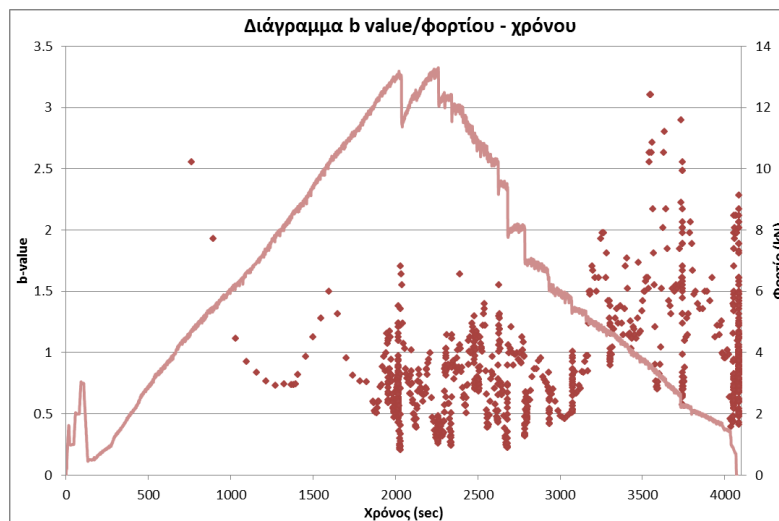
Διάγραμμα 7.38. Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου.

Διάγραμμα Duration - χρόνου



Διάγραμμα 7.39. Διάγραμμα Duration – Χρόνου.

Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου



Διάγραμμα 7.40. Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου.

7.5.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής

Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα:

- Στα **2037 sec (Σχήμα 7.40 – Σε όλα τα διαγράμματα της ακουστικής εκπομπής ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί στο πρώτο σκαλοπάτι)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 11,794 kN. Το πλάτος έφτασε στα 99 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 226, με **σημαντική έκλυση ενέργειας** και RMS 0,35. Το b value μετρήθηκε 0,75. Στα 2037 sec, άρχισε η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο δεξί ακριανό ογκοτεμάχιο 6 στο κάτω μέρος.
- Στα **2337 sec (Σχήμα 7.41)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 12,372 kN. Το πλάτος έφτασε στα 71 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 371, με **σημαντική έκλυση ενέργειας**. Το b value μετρήθηκε 0,24. Στα 2337 sec, άρχισε να αναπτύσσεται εφελκυστική ρωγμή στο αριστερό ακριανό ογκοτεμάχιο 1 στο κάτω μέρος, λόγω θλιπτικών τάσεων.
- Στα **2442 sec (Σχήμα 7.42)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 11,426 kN. Το πλάτος έφτασε στα 46 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 419. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 1,20. Στα 2442 sec, δημιουργείται εφελκυστική ρωγμή στο ογκοτεμάχιο 4 και αρχίζουν να δημιουργούνται λόγω της πίεσης του κυλίστρου στο ογκοτεμάχιο 4 και λόγω συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων εφελκυστικές ρωγμές.
- Στα **2487 sec (Σχήμα 7.43)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 11,077 kN. Το πλάτος έφτασε στα 52 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 447. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 0,79. Στα 2487 sec, παρατηρείται η επέκταση της ρωγμής από το ογκοτεμάχιο 4 στο ογκοτεμάχιο 3 λόγω επικράτησης θλιπτικών τάσεων στο πάνω μέρος της μεσαίας ασυνέχειας.
- Στα **2617 sec (Σχήμα 7.44 – Τρίτο σκαλοπάτι στα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 10,175 kN. Το πλάτος έφτασε στα 53 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 484. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 0,42. Στα 2617 sec, παρατηρείται το φαινόμενο της συνεχιζόμενης επέκτασης των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 3 και 4 λόγω θλιπτικών τάσεων, και ενώνονται οι ρωγμές στο ογκοτεμάχιο 4, με πλευρική αποφλοίωση.
- Στα **2677 sec (Σχήμα 7.45 – Τέταρτο σκαλοπάτι στα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 9,511 kN. Το πλάτος έφτασε στα 51 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 522. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 0,22. Στα 2677 sec, παρατηρήσαμε δημιουργία δεύτερης ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 6 στο πάνω μέρος και επέκταση της ρωγμής του 6 στο ογκοτεμάχιο 5, όπως επίσης και διάδοση και επέκταση της προϋπάρχουσας ρωγμής από το ογκοτεμάχιο 6 στο 5.
- Στα **2787 sec (Σχήμα 7.46 – Σε όλα τα διαγράμματα της ακουστικής εκπομπής ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί στο πέμπτο σκαλοπάτι)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 6,911 kN. Το πλάτος έφτασε στα 99 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 565, με **σημαντική έκλυση ενέργειας** και RMS 0,3. Το b value μετρήθηκε 0,53. Στα 2787

sec, παρατηρείται δημιουργία δεύτερης εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 5 και επέκτασή της στο ογκοτεμάχιο 4.

- Στα **3067 sec (Σχήμα 7.47)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 5,803 kN. Το πλάτος έφτασε στα 49 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 650. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 0,51. Στα 3067 sec, έχουμε περαιτέρω άνοιγμα και επέκταση των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1 και στο ογκοτεμάχιο 4 κάτω από τον αισθητήρα.

7.6 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό τσιμέντου (Δοκός 5)

Για την πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής, και την μέτρηση της αξονικής δύναμης χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη των strain gages με την δοκό 4, αλλά αφαιρέσαμε το strain gage 2. Χρησιμοποιήσαμε 3 συνολικά strain gauges, τα strain gauges 4 (Ράβδος 2 – Κανάλι 5 του πλαισίου φόρτισης), 6 (Ράβδος 3 – Κανάλι 7 του πλαισίου φόρτισης) και 8 (Ράβδος 4 – Κανάλι 8 του πλαισίου φόρτισης). Τα strain gages στράφηκαν κατά 90° από την προηγούμενη θέση τους, η οποία ήταν στο πάνω μέρος της κάθε ράβδου, για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την μέγιστη παραμόρφωση, πάνω στη μέση τάση της κατανομής των τάσεων. Τα strain gages 4,6 και 8, τα συνδέσαμε στο πλαίσιο φόρτισης, για να μπορέσουμε να έχουμε πλήρη συγχρονισμό του χρόνου της πρέσσας και των παραμορφώσεων. Η δοκός και πάλι σχηματίστηκε από 6 κυβικά άρρηκτα ογκοτεμάχια τσιμέντου διαστάσεων 10cm x 10cm x 10cm.

Η διάταξη των αισθητήρων ακουστικής εκπομπής στο ακριανό ογκοτεμάχιο είναι:

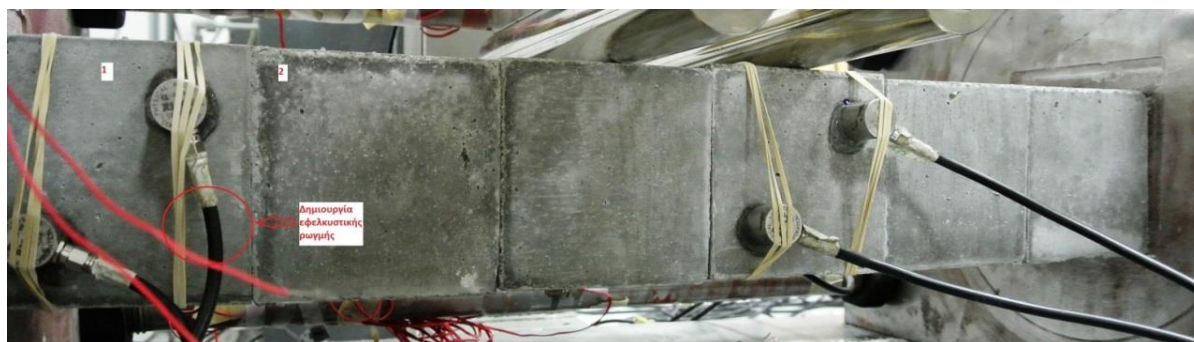
- Αισθητήρας (51 – Κανάλι 5 του καταγραφικού) στο κάτω αριστερό άκρο.
- Αισθητήρας (512 – Κανάλι 6 του καταγραφικού) στο πάνω δεξί άκρο.
- Αισθητήρας (012 – Κανάλι 8 του καταγραφικού) στο πάνω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.
- Αισθητήρας (01 – Κανάλι 7 του καταγραφικού) στο κάτω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.

Επίσης με τον ίδια διάταξη τοποθετήθηκαν και οι άλλοι 4 αισθητήρες στο μεσαίο ογκοτεμάχιο δεξιά της κεντρικής ασυνέχειας. Οι θέσεις τους προέκυψαν:

- Αισθητήρας (31 – Κανάλι 3 του καταγραφικού) στο αριστερό κάτω άκρο.
- Αισθητήρας (312 – Κανάλι 4 του καταγραφικού) στο πάνω δεξί άκρο.
- Αισθητήρας (112 – Κανάλι 2 του καταγραφικού) στο πάνω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.
- Αισθητήρας (12 – Κανάλι 1 του καταγραφικού) στο κάτω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.

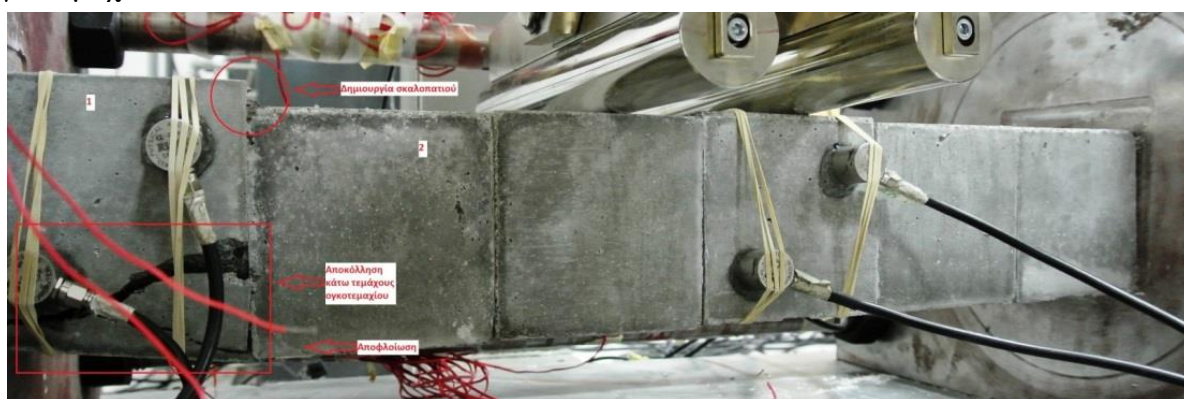
7.6.1 Αποτελέσματα φόρτισης

Το πείραμα διήρκεσε 2586 sec = 43,1 min. Στα 732 sec (Σχήμα 7.52), αρχίζει να δημιουργείται μία εφελκυστική ρωγμή στο ογκοτεμάχιο 1.



Σχήμα 7.52. Δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1.

Στα 747 sec (Σχήμα 7.53), παρατηρήθηκαν τρία γεγονότα: 1) Δημιουργία σκαλοπατιού στο πάνω μέρος μεταξύ του ογκοτεμαχίου 1 και 2, 2) Αποκόλληση κάτω τμήματος ογκοτεμαχίου 1 και 3) Αποφλοίωση στην κάτω γωνία του ογκοτεμαχίου 2.



Σχήμα 7.53. Δημιουργία σκαλοπατιού, αποκόλληση κάτω τμήματος ογκοτεμαχίου 1 και αποφλοίωση στο ογκοτεμάχιο 2 στην κάτω αριστερή γωνία.

Στα 1182 sec (Σχήμ 7.54), παρατηρείται η έναρξη εφελκυστικής ρωγμής στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 2, λόγω ολίσθησης και παρουσίας θλιπτικών τάσεων.



Σχήμα 7.54. Έναρξη εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 2.

Στα 1531,80 sec (Σχήμα 7.55), παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα της ρωγμής και αποκόλληση πάνω τεμάχους στο ογκοτεμάχιο 2.



Σχήμα 7.55.Περαιτέρω άνοιγμα της προϋπάρχουσας ρωγμής και συνεπακόλουθη αποκόλληση του πάνω τεμάχους του ογκοτεμαχίου 2.

Στα 1562 sec (Σχήμα 7.56), δημιουργείται ρωγμή στο μέσο του ογκοτεμαχίου 1.



Σχήμα 7.56.Δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1.

Στα 1572 sec (Σχήμα 7.57), είχαμε επέκταση της προϋπάρχουσας ρωγμής.



Σχήμα 7.57.Επέκταση της προϋπάρχουσας ρωγμής

Στα 2028 sec (Σχήμα 7.58), είχαμε δημιουργία ρωγμής στο κάτω τμήμα του ογκοτεμαχίου 1 και περαιτέρω άνοιγμα της προηγούμενης ρωγμής.



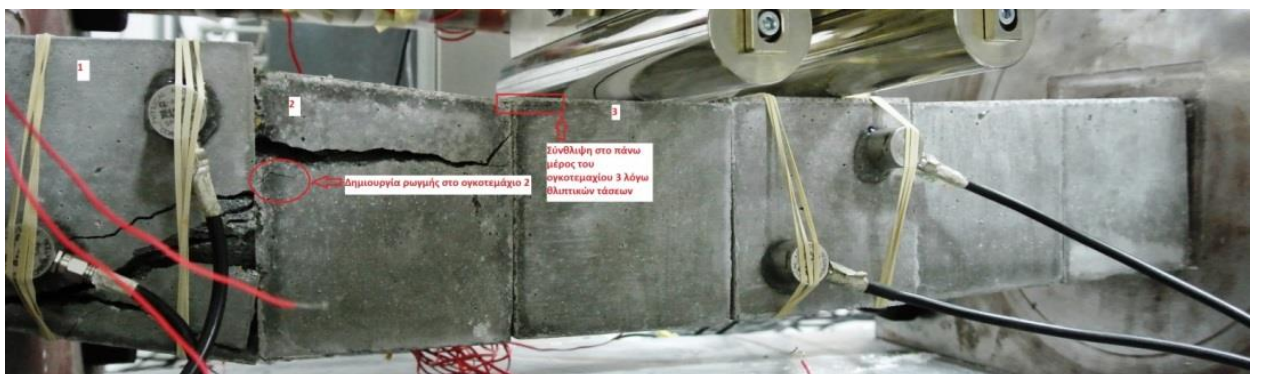
Σχήμα 7.58. Δημιουργία ρωγμής στο κάτω τμήμας του ογκοτεμαχίου 1 και περαιτέρω άνοιγμα της προηγούμενης ρωγμής του σχήματος 7.57.

Στα 2267 sec (Σχήμα 7.59), είχαμε δημιουργία ρωγμής στο κάτω τμήμας του ογκοτεμαχίου 1 και περαιτέρω μετατόπιση.



Σχήμα 7.59. Δημιουργία ρωγμής στο κάτω τμήμας του ογκοτεμαχίου 1 και περαιτέρω μετατόπιση του.

Στα 2429,80 sec (Σχήμα 7.60), είχαμε δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 2, και σύνθλιψη στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 3 λόγω θλιπτικών τάσεων.



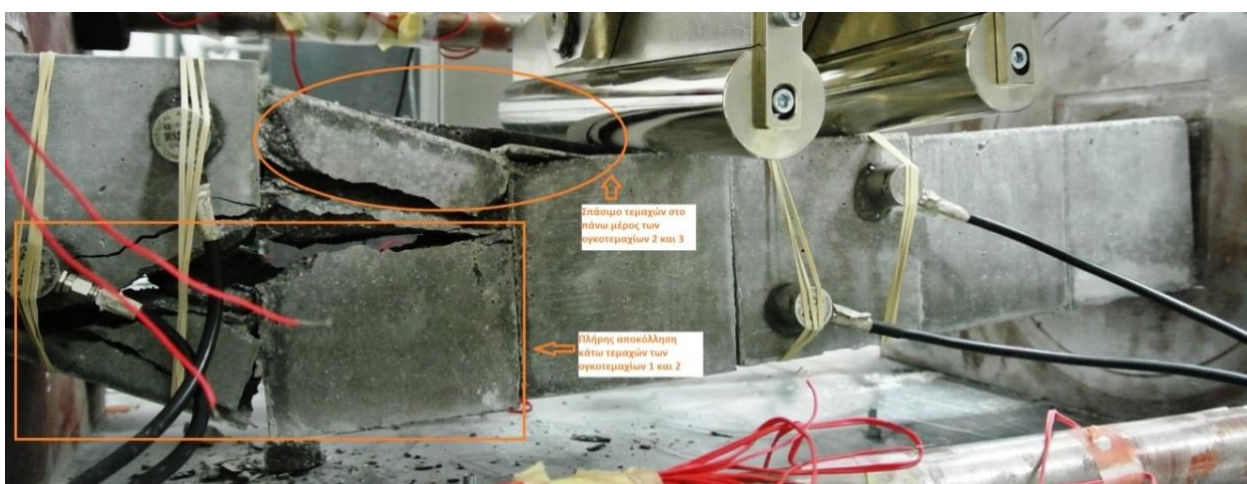
Σχήμα 7.60. Δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 2 και σύνθλιψη στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 3.

Στα 2457 sec (Σχήμα 7.61), είχαμε και επέκταση της ρωγμής και στο ογκοτεμάχιο 1 από το ογκοτεμάχιο 2.



Σχήμα 7.61.Επέκταση της ρωγμής και στο ογκοτεμάχιο 1 από το ογκοτεμάχιο 2.

Στα 2576 sec (Σχήμα 7.62), είχαμε πλήρη αποκόλληση των κάτω τμημάτων των ογκοτεμαχίων 1 και 2 και σπάσιμο τεμαχίων στο πάνω μέρος των ογκοτεμαχίων 2 και 3.



Σχήμα 7.62.Πλήρης αποκόλληση των κάτω τμημάτων των ογκοτεμαχίων 1 και 2 και σπάσιμο τεμαχίων στο πάνω μέρος των ογκοτεμαχίων 2 και 3.

Στα 2586 sec (Σχήμα 7.63), η δοκός κατέρρευσε λόγω της αστοχίας των ογκοτεμαχίων 1 και 2, από την υπέρβαση της θλιπτικής τους αντοχής κατά την δοκιμή κάμψης. Πρέπει να τονιστεί ότι τα ογκοτεμάχια 1,2 και 3 αστόχησαν κατά την διάρκεια του πειράματος, ενώ τα ογκοτεμάχια 4,5 και 6 (τα τρία ογκοτεμάχια δεξιά της μεσαίας ασυνέχειας, παρέμειναν άθικτα).



Σχήμα 7.63.Η τελική μορφή της δοκού μετά την αστοχία.

Στα σχήματα 7.64 και 7.65 φαίνονται αντίστοιχα μετά το πέρας του πειράματος το πάνω μέρος των ογκοτεμαχίων 1,2 και 3 της δοκού και το πίσω μέρος των ογκοτεμαχίων.



Σχήμα 7.64. Διακρίνεται το πάνω μέρος της δοκού και τα ογκοτεμάχια 3,2 και 1 από αριστερά προς δεξιά.



Σχήμα 7.65. Διακρίνεται η πίσω πλευρά της δοκού μετά την τελική αστοχία.

7.6.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Διάγραμμα φορτίου – χρόνου

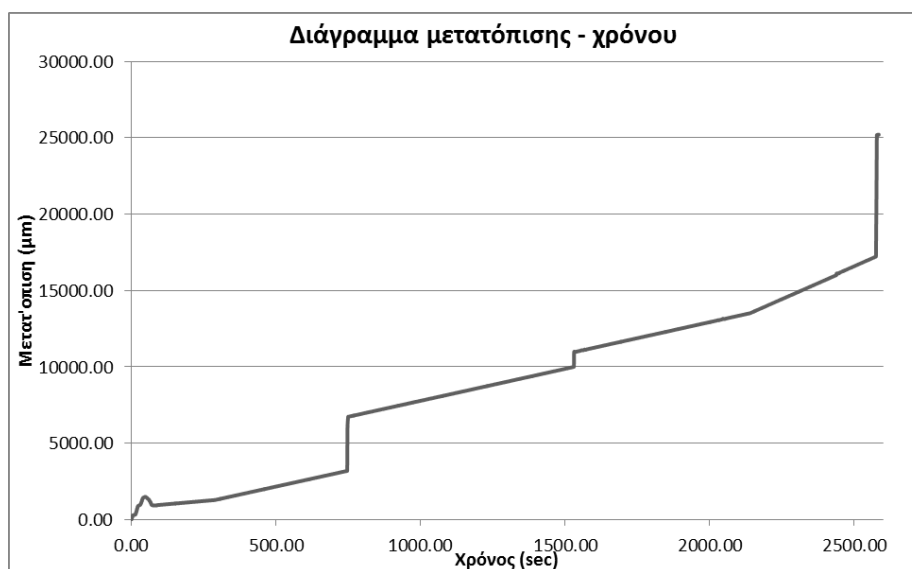


Διάγραμμα 7.41. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου.

Το μέγιστο φορτίο διαμορφώθηκε στα 17,32 kN σε χρόνο 2429,80 sec. Στην αρχή πραγματοποιήθηκαν και πάλι τρεις προφορτίσεις στα 1,2 και 3 kN, με αποφόρτιση στα 0.5 kN. Παρατηρήθηκαν πέντε απότομες πτώσεις του φορτίου:

- Στα 747 sec το φορτίο έφτασε στα 7.51 kN (Σχήμα 7.53). Κατά την στιγμή αυτή που επιτεύχθηκε το τοπικό μέγιστο στο φορτίο, παρατηρήθηκε η αποκόλληση του τμήματος του ογκοτεμαχίου 1.
- Στα 1531,8 sec το φορτίο έφτασε στα 15 kN (Σχήμα 7.55).
- Στα 2028 sec το φορτίο έφτασε στα 13 kN (Σχήμα 7.58).
- Στα 2429,8 sec (Μέγιστο) το φορτίο έφτασε στα 17.31 kN (Σχήμα 7.60).
- Στα 2576 sec το φορτίο έφτασε στα 15.65 kN (Σχήμα 7.62).

Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου

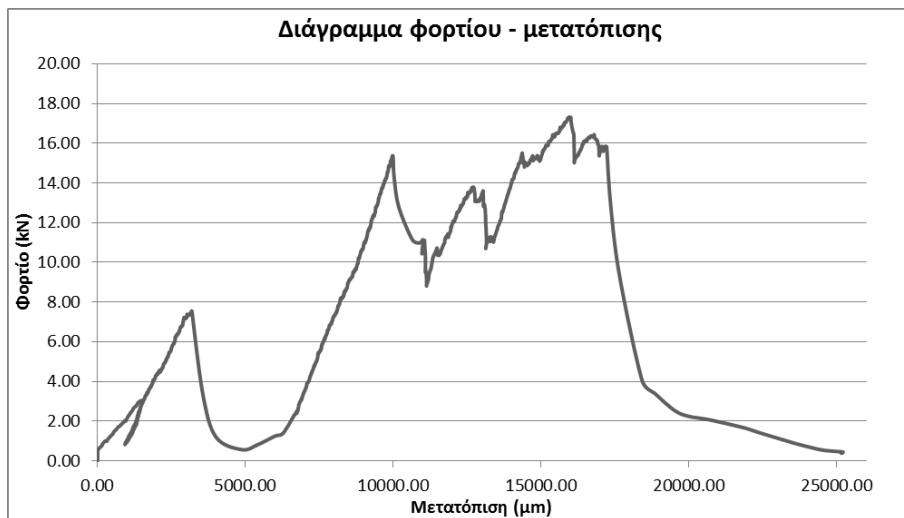


Διάγραμμα 7.42. Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.

Παρατηρήθηκαν τρεις μεγάλες μετατοπίσεις:

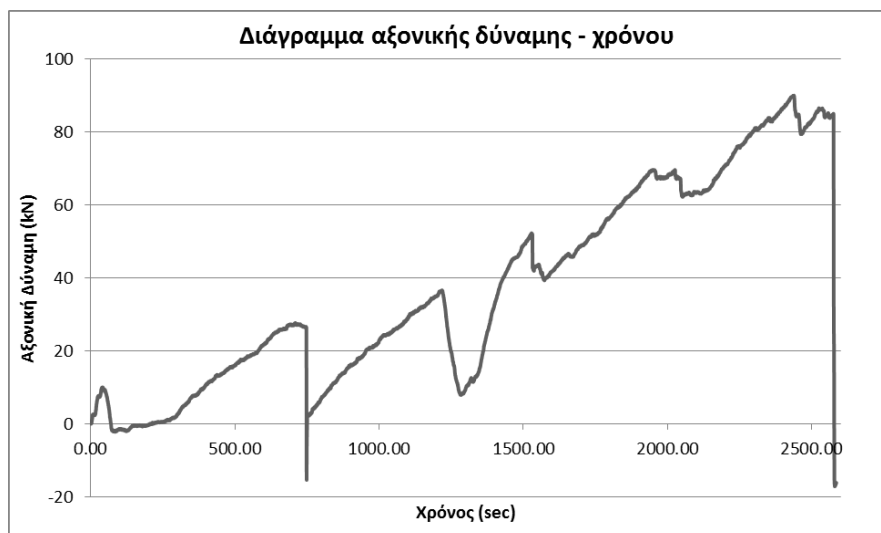
- Στα 747 sec (Σχήμα 7.53), παρατηρήθηκε σκαλοπάτι μεταξύ των ογκοτεμαχίων 1 και 2, και η μετατόπιση αυξήθηκε απότομα από 3191 μm στα 3557 μm.
- Στα 1531,80 sec (Βλέπε και σχήμα 7.55), αυξήθηκε απότομα η μετατόπιση από τα 10031 μm στα 10184 μm.
- Στα 2576,8 sec (Βλέπε και σχήμα 7.62), αυξήθηκε απότομα η μετατόπιση από τα 17659 μm στα 18419 μm.

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Διάγραμμα 7.43. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου



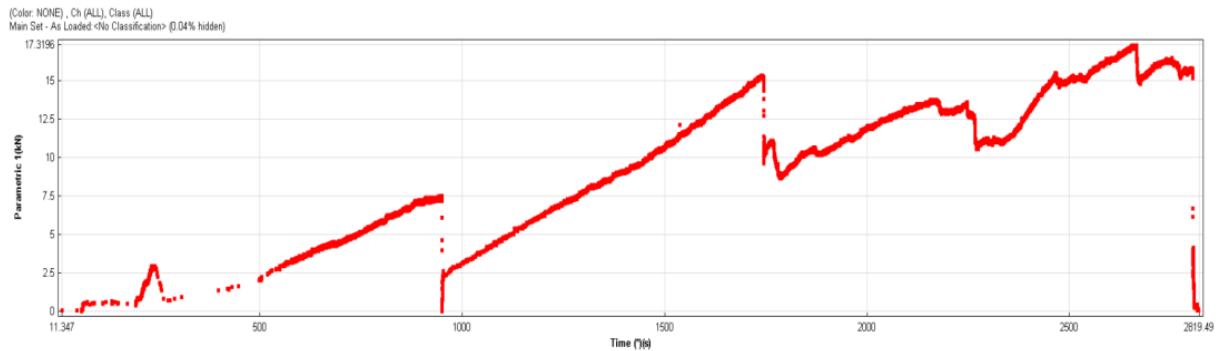
Διάγραμμα 7.44. Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου.

Για να κατασκευαστεί το παραπάνω διάγραμμα, πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gages 6 (Ράβδος 3) και 8 (Ράβδος 4), προσθέσαμε τις παραμορφώσεις και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2. Παρατηρήθηκαν τα εξής μέγιστα:

- Στα 747,6 sec (Σχήμα 7.53) η αξονική έφτασε στα 26,30 kN.
- Στα 1217,80 sec η αξονική έφτασε στα 36,6 kN.
- Στα 1528,6 sec η αξονική έφτασε στα 52,27 kN.
- Στα 2026 sec η αξονική έφτασε στα 69,59 kN.
- Στα 2436 sec η αξονική έφτασε στο μέγιστο που διαμορφώθηκε στα 89,95 kN.
- Τέλος στα 2576,4 sec η αξονική έφτασε στα 84,58 kN.

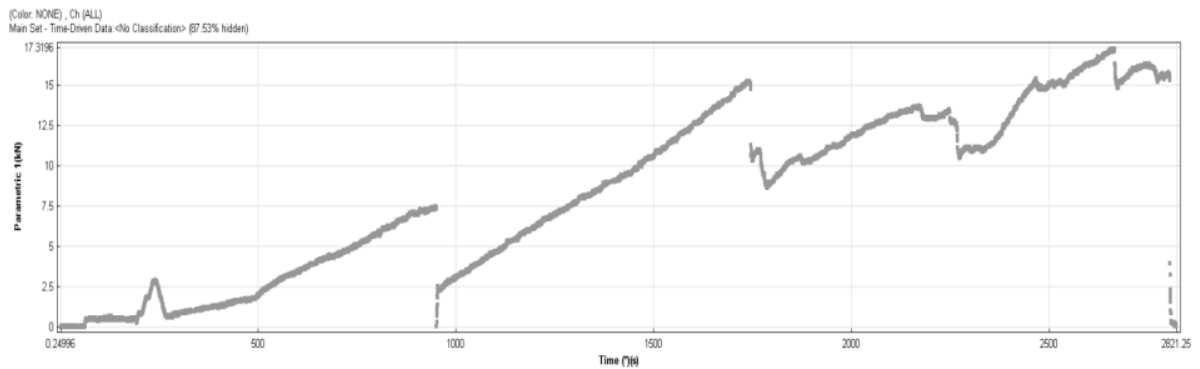
7.6.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής

Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου



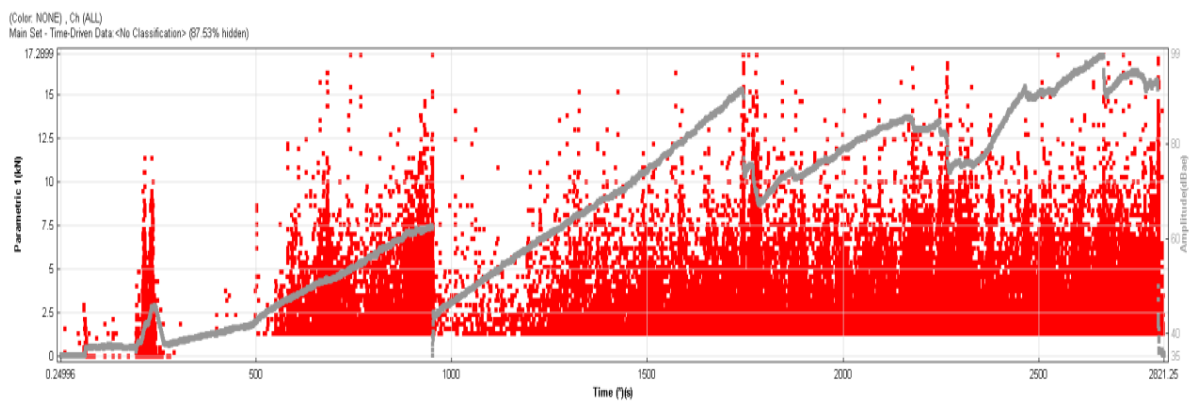
Διάγραμμα 7.45. Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου.

Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου



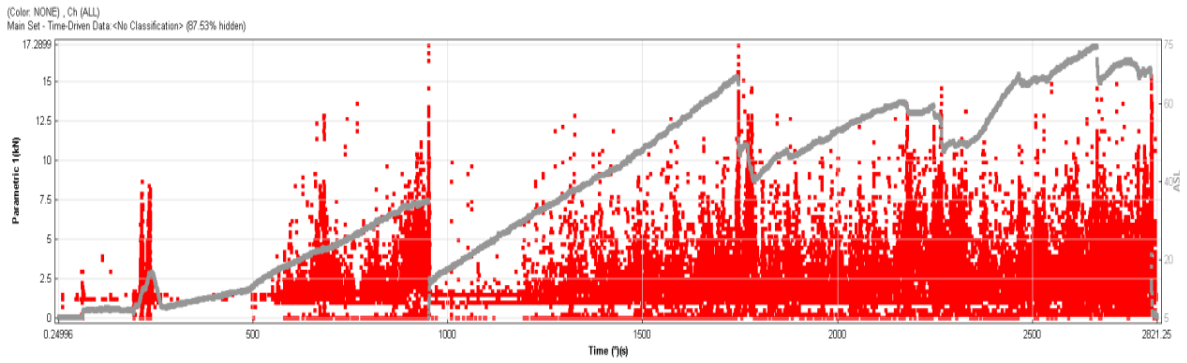
Διάγραμμα 7.46. Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου.

Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου



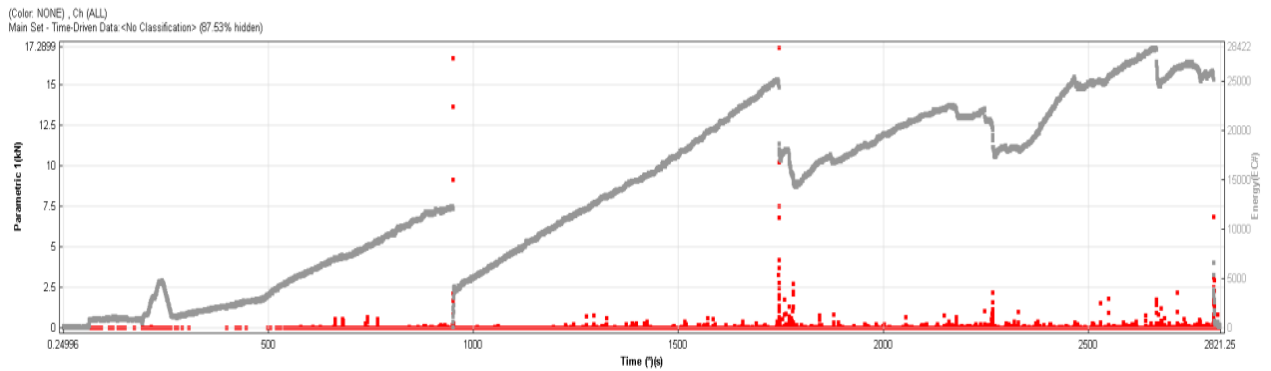
Διάγραμμα 7.47. Διάγραμμα πλάτους – χρόνου.

Διάγραμμα ASL (Average Signal Level) – χρόνου



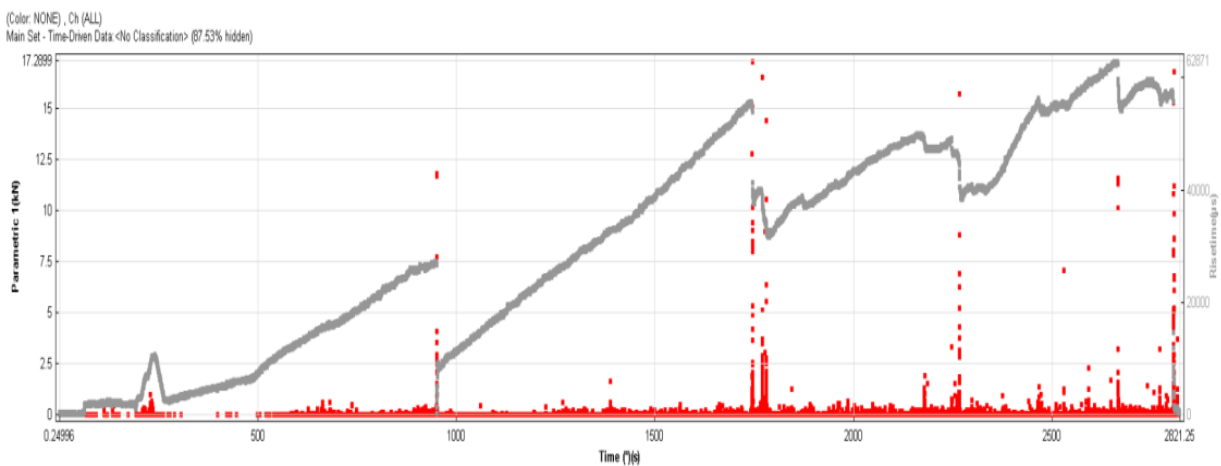
Διάγραμμα 7.48. Διάγραμμα ASL – χρόνου.

Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου



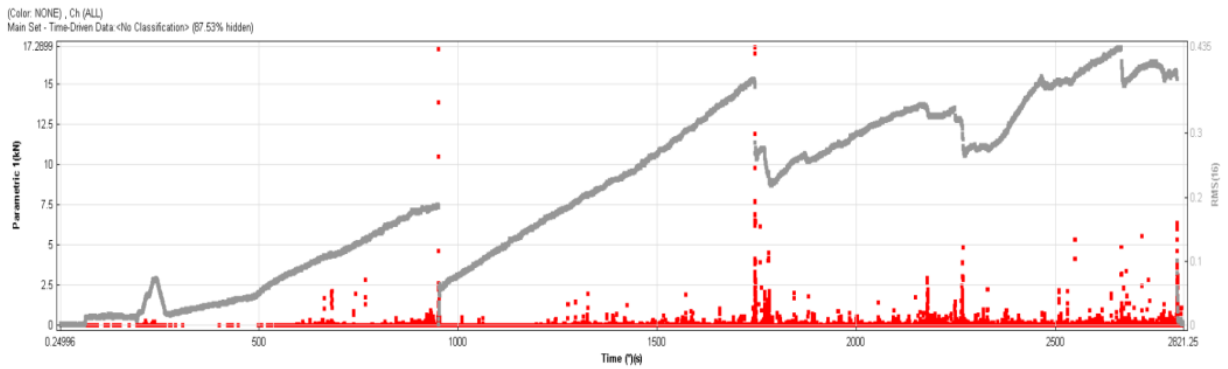
Διάγραμμα 7.49. Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου.

Διάγραμμα Risetime – χρόνου



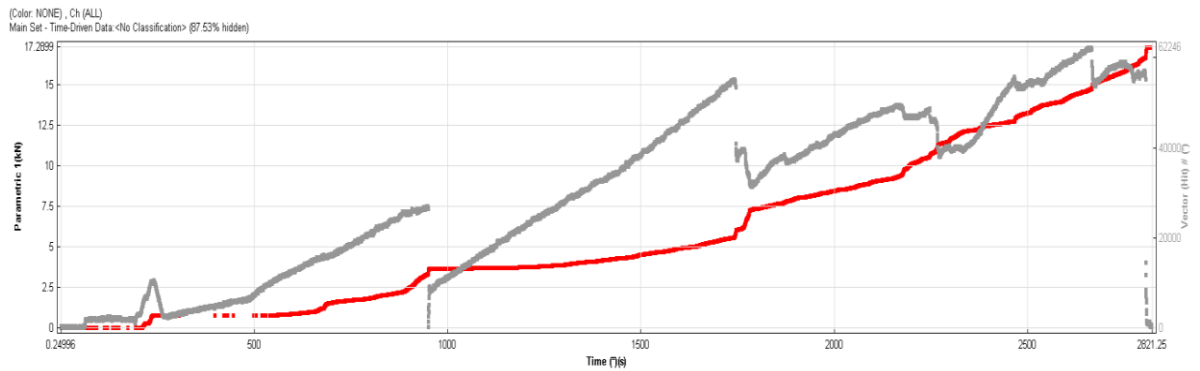
Διάγραμμα 7.50. Διάγραμμα risetime – χρόνου.

Διάγραμμα RMS (Root Mean Square) – χρόνου



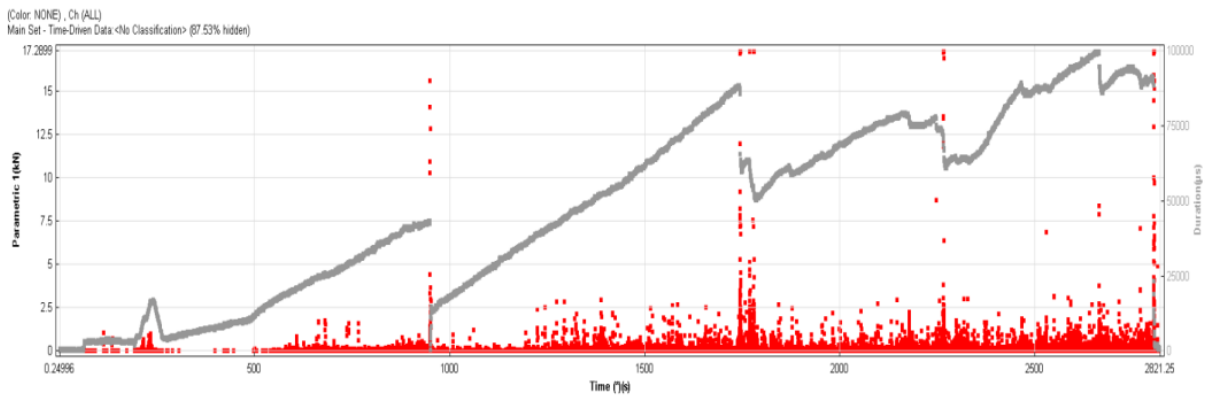
Διάγραμμα 7.51. Διάγραμμα RMS – χρόνου.

Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου



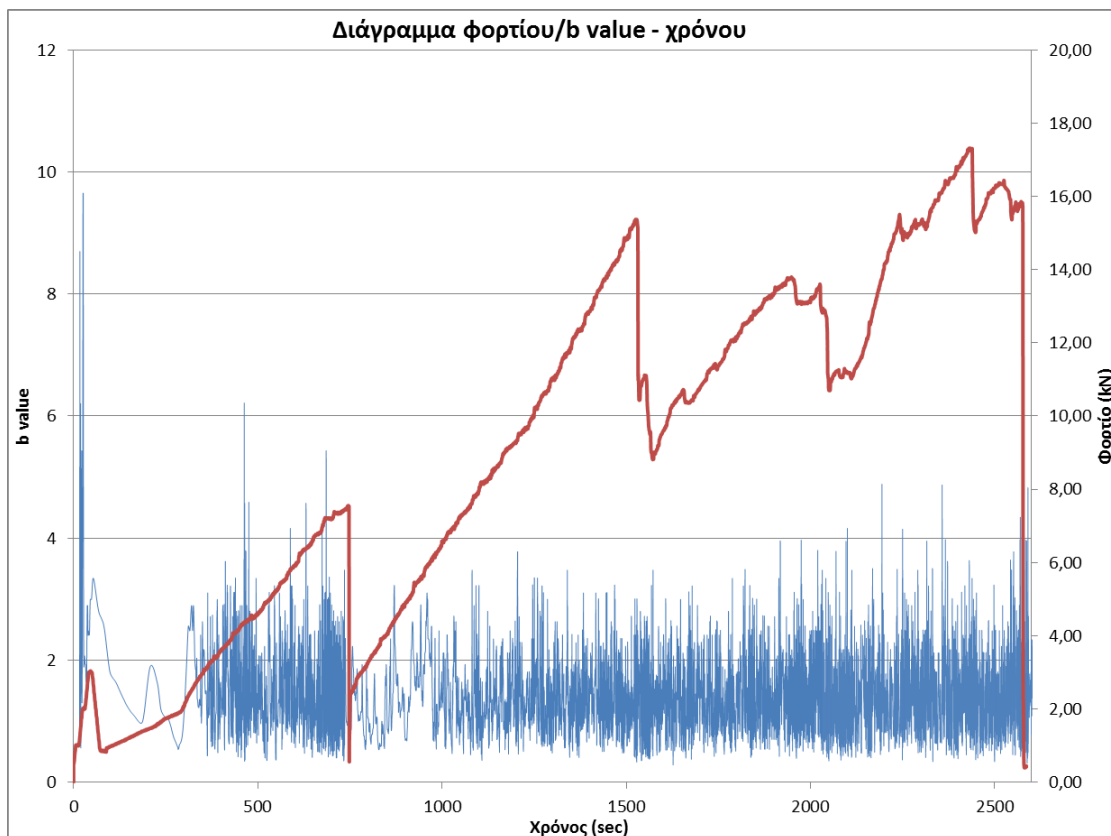
Διάγραμμα 7.52. Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου.

Διάγραμμα Duration - χρόνου



Διάγραμμα 7.53. Διάγραμμα Duration – χρόνου.

Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου



Διάγραμμα 7.54. Διάγραμμα b value – χρόνου.

7.6.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής

Για να γίνει συσχέτιση μεταξύ του φορτίου και του χρόνου της πρέσσας και του χρόνου των διαγραμμάτων της ακουστικής εκπομπής, αφαιρείται από τον χρόνο της ακουστικής εκπομπής 203 sec. Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα:

- Στα **747 sec (Σχήμα 7.53)**, παρατηρήθηκαν τρία γεγονότα: 1) Δημιουργία σκαλοπατιού στο πάνω μέρος μεταξύ του ογκοτεμαχίου 1 και 2, 2) Αποκόλληση κάτω τμήματος ογκοτεμαχίου 1 και 3) Αποφλοίωση στην κάτω γωνία του ογκοτεμαχίου 2. Οι κτύποι (hits) της ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν από τα 8892 σε 13042. Υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το μέγιστο πλάτος του γεγονότος που έφτασε στα 99 dB, ήταν 42032 msec, με διάρκεια γεγονότος 91011 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 74 dB με RMS 0,43. Το ελάχιστο b value μειώθηκε σε 0,914 από 0,94 στα 746 sec και αυξήθηκε ξανά σε 0,94 στα 748 sec.
- Στα **1531,80 sec (Σχήμα 7.55)**, παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα της ρωγμής και αποκόλληση πάνω τμήματος στο ογκοτεμάχιο 2. Οι κτύποι (hits) της ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν από τα 19563 σε 26084. Υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το μέγιστο πλάτος του γεγονότος που έφτασε στα 98 dB, ήταν 63470 msec, με διάρκεια

γεγονότος 100952 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 75 dB με RMS 0,12. Το b value μειώθηκε στα 1,44 από τα 1,84.

- Στα **2028 sec (Σχήμα 7.58)**, είχαμε δημιουργία ρωγμής στο κάτω τέμαχος του ογκοτεμαχίου 1 και περαιτέρω άνοιγμα της προηγούμενης ρωγμής. Οι κτύποι (hits) της ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν από τα 38533 σε 40905. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το μέγιστο πλάτος του γεγονότος που έφτασε στα 97 dB, ήταν 56883 msec, με διάρκεια γεγονότος 99048 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 65 dB με RMS 0,12. Το b value μειώθηκε σε 1,099 από τα 1,17.
- Στα **2429,80 sec (Σχήμα 7.60)**, είχαμε δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 2, και σύνθλιψη στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 3. Οι κτύποι (hits) της ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν από τα 53354 σε 53947. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το μέγιστο πλάτος του γεγονότος που έφτασε στα 98 dB, ήταν 63470 msec, με διάρκεια γεγονότος 99048 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 64 dB με RMS 0,12. Το b value μειώθηκε από τα 1,73 στα 1,47.

7.7 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό τσιμέντου (Δοκός 6)

Για την πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής, και την μέτρηση της αξονικής δύναμης χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη των strain gages με την δοκό 5, αλλά αφαιρέσαμε το strain gage 2. Χρησιμοποιήσαμε 3 συνολικά strain gauges, τα strain gauges 4 (Ράβδος 2 – Κανάλι 5 του πλαισίου φόρτισης), 6 (Ράβδος 3 – Κανάλι 7 του πλαισίου φόρτισης) και 8 (Ράβδος 4 – Κανάλι 8 του πλαισίου φόρτισης). Τα strain gages στράφηκαν κατά 90° από την προηγούμενη θέση τους, η οποία ήταν στο πάνω μέρος της κάθε ράβδου, για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την μέγιστη παραμόρφωση, πάνω στη μέση τάση της κατανομής των τάσεων. Τα strain gages 4,6 και 8, τα συνδέσαμε στο καταγραφικό της μονάδας ελέγχου της δοκιμής, για να μπορέσουμε να έχουμε πλήρη συγχρονισμό του φορτίου και των παραμορφώσεων. Η δοκός και πάλι σχηματίστηκε από 6 κυβικά άρρηκτα ογκοτεμάχια τσιμέντου διαστάσεων 10cm x 10cm x 10cm.

Η διάταξη των αισθητήρων της ακουστικής εκπομπής στο ακριανό ογκοτεμάχιο είναι:

- Αισθητήρας (51 – Κανάλι 5 του καταγραφικού) στο κάτω αριστερό άκρο.
- Αισθητήρας (512 – Κανάλι 6 του καταγραφικού) στο πάνω δεξί άκρο.
- Αισθητήρας (012 – Κανάλι 8 του καταγραφικού) στο πάνω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.
- Αισθητήρας (01 – Κανάλι 7 του καταγραφικού) στο κάτω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.

Επίσης με τον ίδια διάταξη τοποθετήθηκαν και οι άλλοι 4 αισθητήρες στο μεσαίο ογκοτεμάχιο δεξιά της κεντρικής ασυνέχειας. Οι θέσεις τους προέκυψαν:

- Αισθητήρας (31 – Κανάλι 3 του καταγραφικού) στο αριστερό κάτω άκρο.

- Αισθητήρας (312 – Κανάλι 4 του καταγραφικού) στο πάνω δεξί άκρο.
- Αισθητήρας (112 – Κανάλι 2 του καταγραφικού) στο πάνω αριστερό άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.
- Αισθητήρας (12 – Κανάλι 1 του καταγραφικού) στο κάτω δεξί άκρο από την αντίθετη κάθετη πλευρά.

7.7.1 Αποτελέσματα φόρτισης

Το πείραμα διήρκεσε 4856,6 sec = 81 min. Στα 2497,7 sec (Σχήμα 7.66), παρατηρείται η δημιουργία ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6.



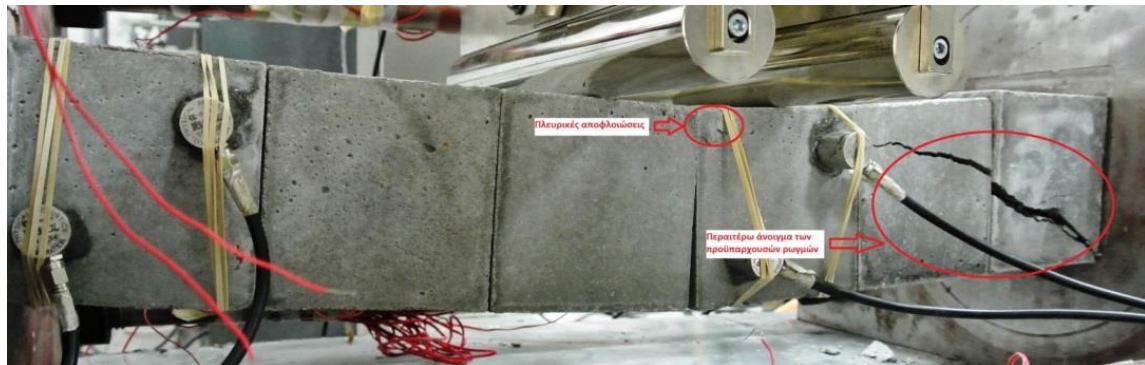
Σχήμα 7.66. Αρχίζουν να δημιουργούνται εφελκυστικές ρωγμές στα ογκοτεμάχια 5 και 6.

Στα 2527,7 sec (Σχήμα 7.67), παρατηρείται η διάδοση, επέκταση και άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, όπως επίσης και δημιουργία σκαλοπατιού στο πάνω μέρος μεταξύ των ογκοτεμαχίων 5 και 6.



Σχήμα 7.67. Διάδοση και άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, με δημιουργία σκαλοπατιού στο πάνω μέρος.

Στα 2677,7 sec (Σχήμα 7.68), παρατηρούνται πλευρικές αποφλοιώσεις στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 4, με περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6.



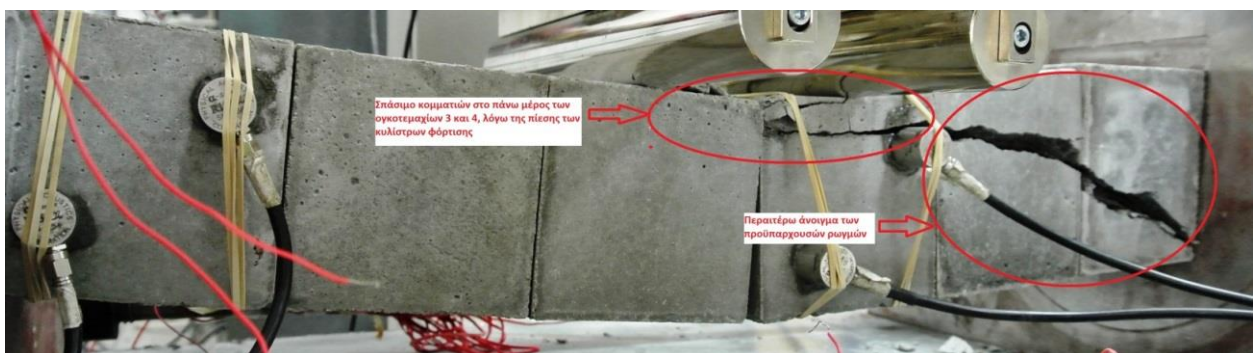
Σχήμα 7.68.Πλευρικές αποφλοιώσεις στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 4 και περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6.

Στα 2892,7 sec (Σχήμα 7.69), παρατηρείται η δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 4 με επέκταση από την διπλανή ρωγμή του ογκοτεμαχίου 5, πάνω από τον αισθητήρα.



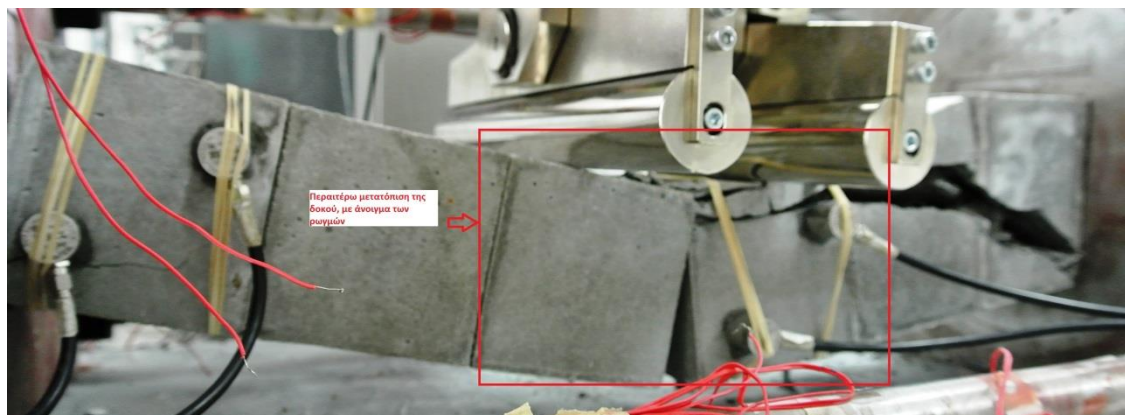
Σχήμα 7.69.Δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 4 πάνω από τον αισθητήρα και περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6.

Στα 3302,7 sec (Σχήμα 7.70), παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών, σπάσιμο κομματιών στο πάνω μέρος τοπική σύνθλιψη κάτω από το κύλιτρο φόρτισης λόγω πίεσης του κυλίστρου και εφελκυστικές ρωγμές λόγω επαγόμενου εφελκυσμού εξαιτίας της θλιπτικής συγκέντρωσης τάσεων στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου.



Σχήμα 7.70.Περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών και σπάσιμο κομματιών στο πάνω μέρος των ογκοτεμαχίων 3 και 4, λόγω της πίεσης των κυλίστρων φόρτισης.

Στα 4816,6 sec (Σχήμα 7.71), παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα των ρωγμών και μετατόπιση της δοκού.



Σχήμα 7.71.Περαιτέρω μετατόπιση της δοκού, με άνοιγμα των ρωγμών.

Η τελική μορφή της αστοχίας της δοκού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 7.72).



Σχήμα 7.72.Τελική μορφή αστοχίας της δοκού.

Στα παρακάτω σχήματα 7.73,7.74 και 7.75 διακρίνονται αντίστοιχα το πάνω μέρος της δοκού μετά την αστοχία, η πίσω πλευρά των ογκοτεμαχίων 4,5 και 6, και τέλος η πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 1.



Σχήμα 7.73.Το πάνω μέρος της δοκού μετά την αστοχία.



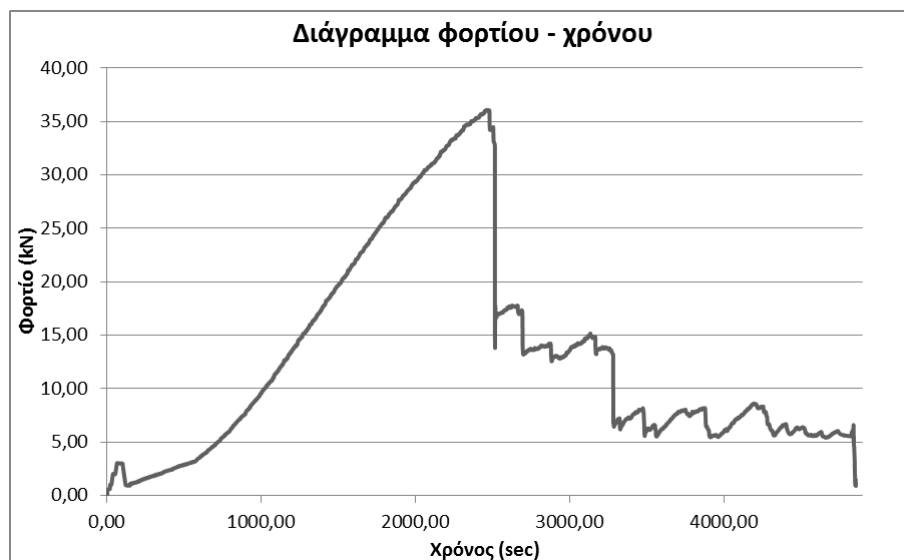
Σχήμα 7.74.Η πίσω πλευρά των ογκοτεμαχίων 4,5 και 6.



Σχήμα 7.75. Η πίσω πλευρά του ογκοτεμαχίου 1.

7.7.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Διάγραμμα φορτίου – χρόνου



Διάγραμμα 7.55. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου.

Πραγματοποιήθηκαν 3 στάδια προφορτίσεων και η μετέπειτα αποφόρτιση:

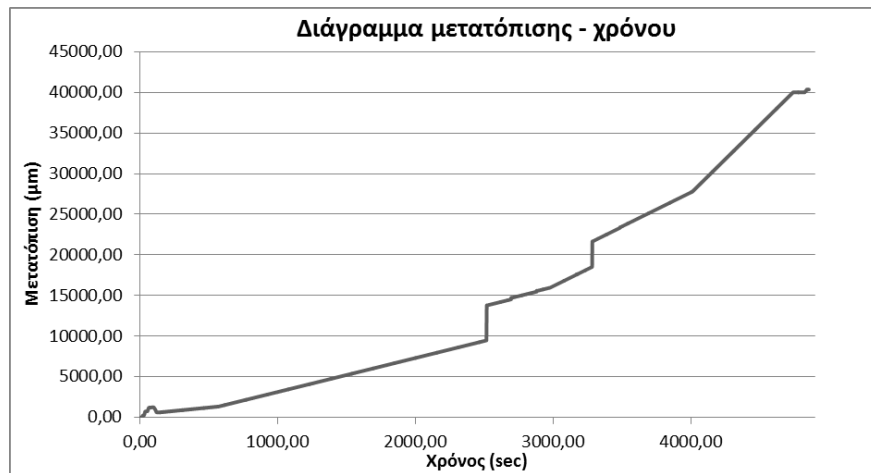
- Προφόρτιση 1 kN στα 18,80 sec.
- Προφόρτιση 2 kN στα 37 sec.
- Προφόρτιση 3 kN στα 62,40 sec.
- Αποφόρτιση 0,92 kN στα 146,60 sec.

Παρατηρήθηκαν τα εξής σκαλοπάτια στο παραπάνω διάγραμμα 7.55:

- (**1^ο σκαλοπάτι**) – Στα 2463,60 sec, το φορτίο έφτασε το μέγιστο στα 36,07 kN. Μετέπειτα το φορτίο μειώθηκε στα 13,90 kN στα 2515,20 sec, ενώ το τσιμεντοκονίαμα έχει μπει στη φάση παραμένουσας αντοχής και το φορτίο σταδιακά μειώνεται.
- (**2^ο σκαλοπάτι**) – Στα 2691,80 sec, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 17,25 kN.
- (**3^ο σκαλοπάτι**) – Στα 2874,40 sec, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 14,15 kN.
- (**4^ο σκαλοπάτι**) – Στα 3164,20 sec, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 14,87 kN.
- (**5^ο σκαλοπάτι**) – Στα 3283,40 sec, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 13,51 kN.
- (**6^ο σκαλοπάτι**) – Στα 3477,4 sec, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 7,95 kN.
- (**7^ο σκαλοπάτι**) – Στα 3870 sec, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 8,16 kN.

- (8^ο σκαλοπάτι) – Στα 4256,20 sec, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 8,29 kN.

Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου



Διάγραμμα 7.56. Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούνται δύο μεγάλα σκαλοπάτια:

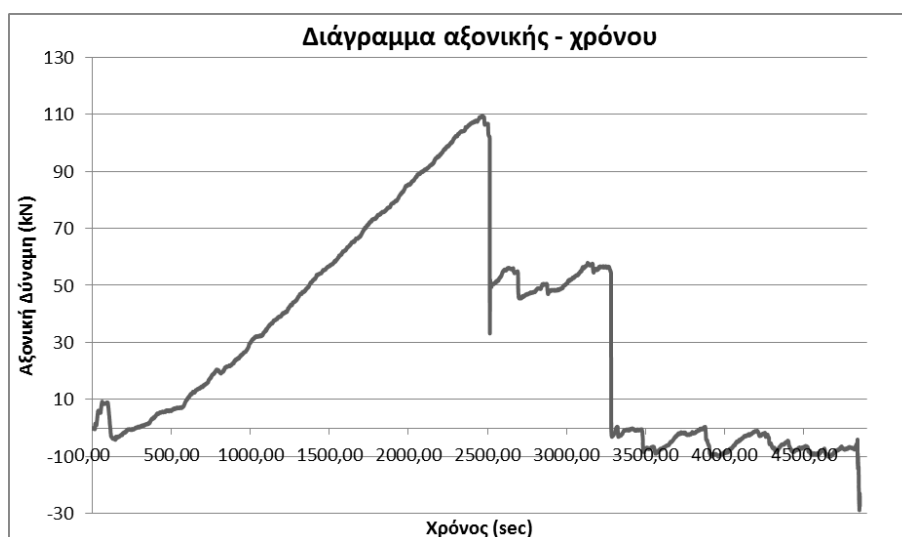
- Στα 2516,20 sec, η μετατόπιση αυξήθηκε απότομα από τα 9481 μm στα 13931 μm.
- Στα 3283,40 sec, η μετατόπιση αυξήθηκε απότομα από τα 18458 μm στα 21472 μm.

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Διάγραμμα 7.57. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου



Διάγραμμα 7.58. Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου.

Για να κατασκευαστεί το παραπάνω διάγραμμα, πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gages 6 (Ράβδος 3) και 8 (Ράβδος 4), προσθέσαμε τις παραμορφώσεις και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2.

Παρατηρήθηκαν από το παραπάνω διάγραμμα τρία σημαντικά γεγονότα:

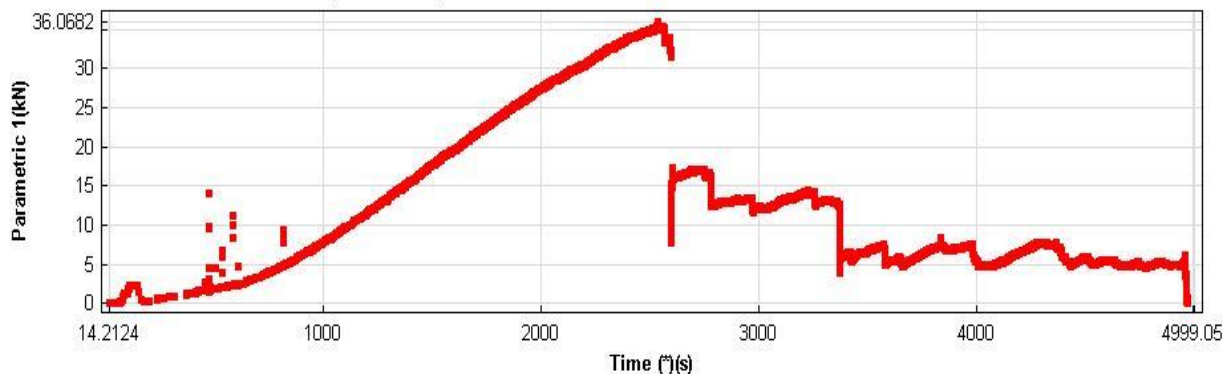
- **(1^ο σκαλοπάτι)** – Στα 2468,80 sec, η αξονική δύναμη έφτασε στο μέγιστο που διαμορφώθηκε στα 109,543 kN.
- **(2^ο σκαλοπάτι)** – Στα 2690,4 sec, η αξονική δύναμη διαμορφώθηκε στα 54,873 kN.
- **(3^ο σκαλοπάτι)** – Στα 3268,80 sec, η αξονική δύναμη διαμορφώθηκε στα 56,56 kN.

7.7.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής

Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου

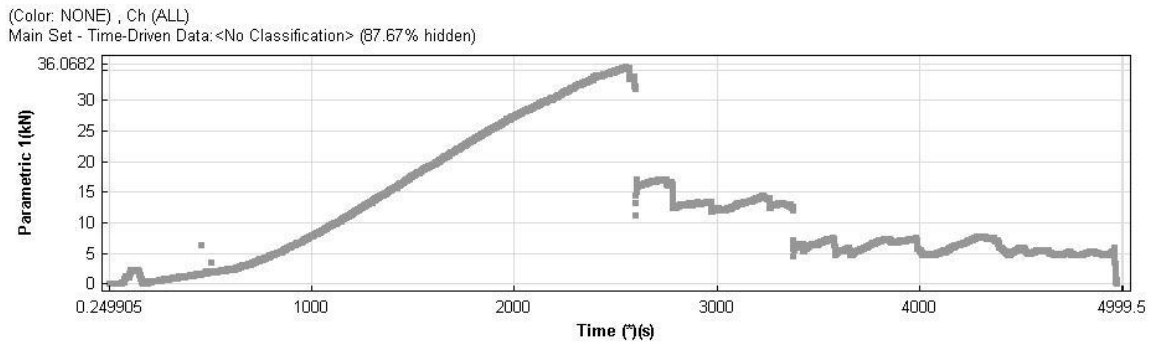
(Color: NONE) , Ch (ALL), Class (ALL)

Main Set - As Loaded:<No Classification> (1.74% hidden)



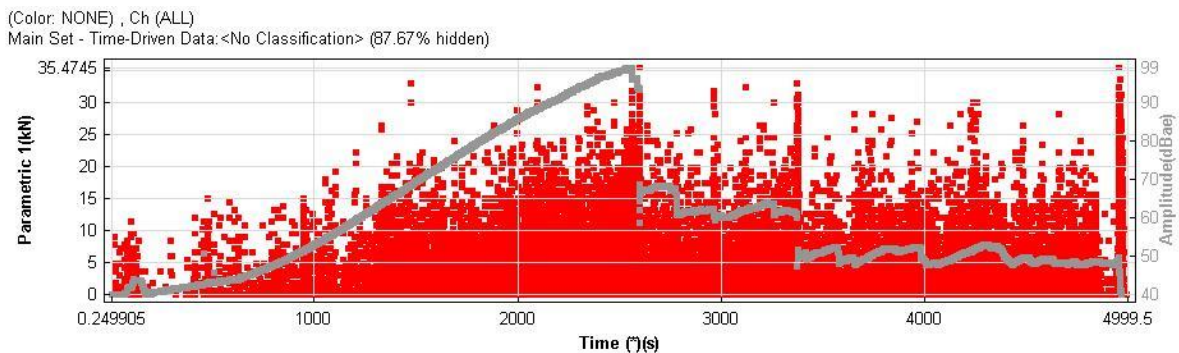
Διάγραμμα 7.59. Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου.

Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου



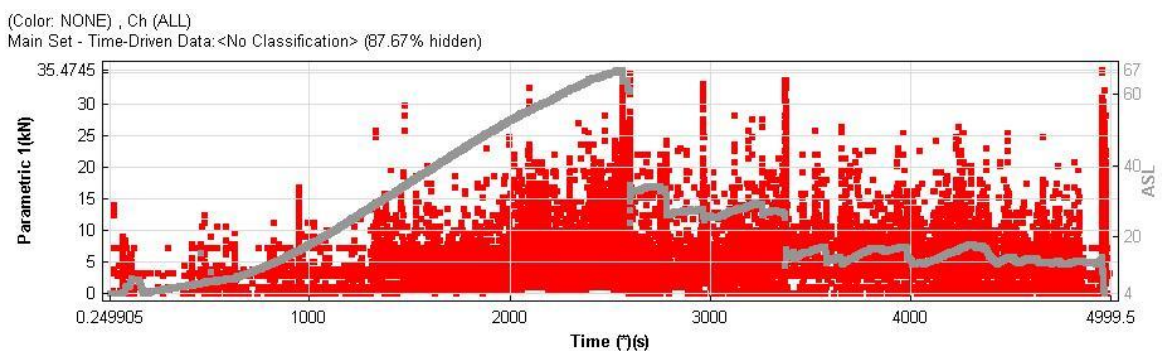
Διάγραμμα 7.60. Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου.

Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου



Διάγραμμα 7.61. Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου.

Διάγραμμα ASL (Average Signal Level) – χρόνου

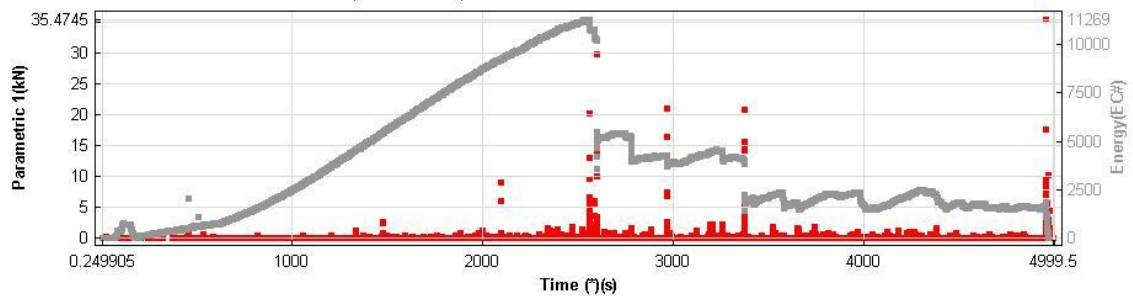


Διάγραμμα 7.62. Διάγραμμα ASL – χρόνου.

Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.67% hidden)

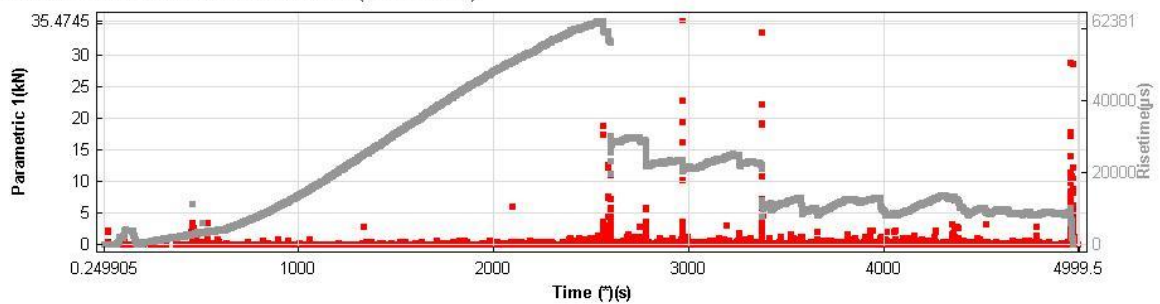


Διάγραμμα 7.63. Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου.

Διάγραμμα Risetime – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.67% hidden)

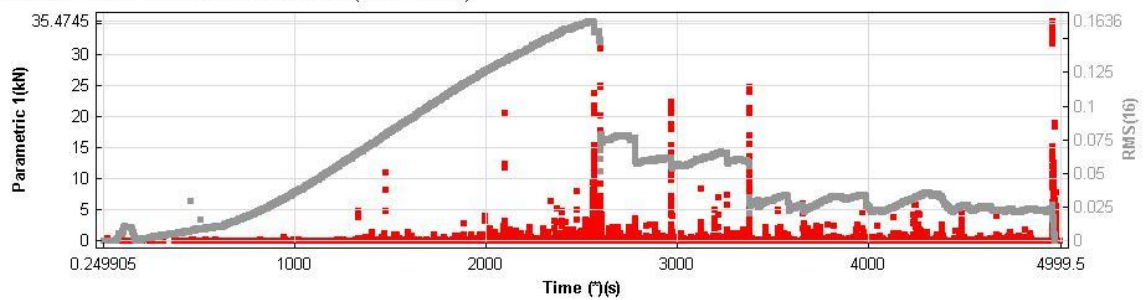


Διάγραμμα 7.64. Διάγραμμα risetime – χρόνου.

Διάγραμμα RMS (Root Mean Square) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.67% hidden)

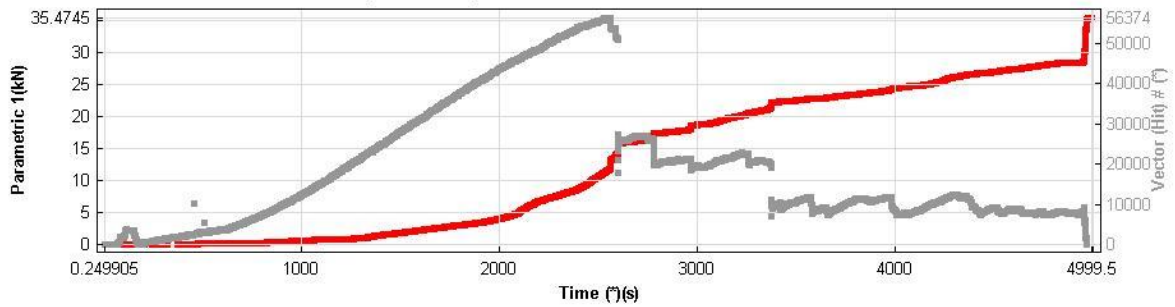


Διάγραμμα 7.65. Διάγραμμα RMS – χρόνου.

Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.67% hidden)

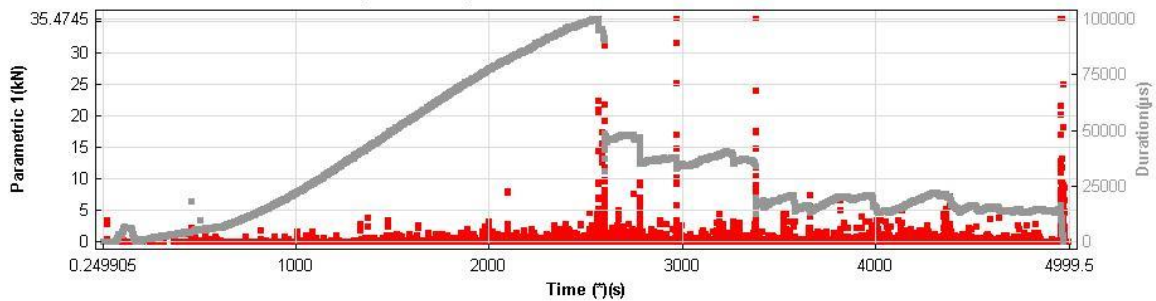


Διάγραμμα 7.66. Διάγραμμα vector hit – χρόνου.

Διάγραμμα Duration – χρόνου

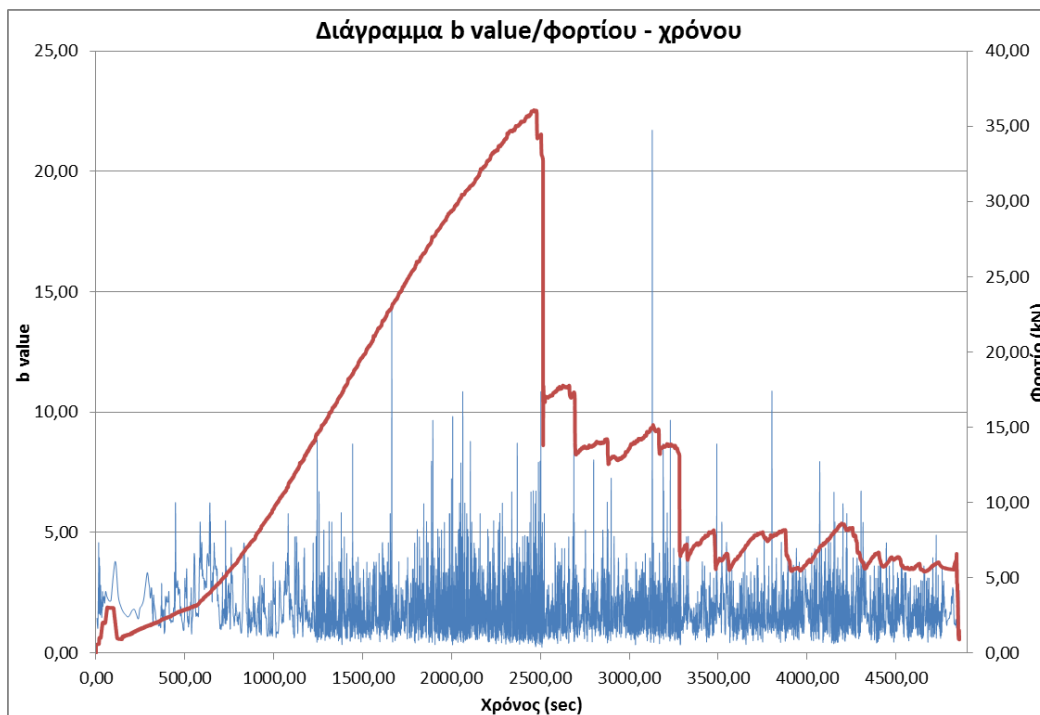
(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.67% hidden)



Διάγραμμα 7.67. Διάγραμμα duration – χρόνου.

Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου



Διάγραμμα 7.68. Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου.

7.7.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής

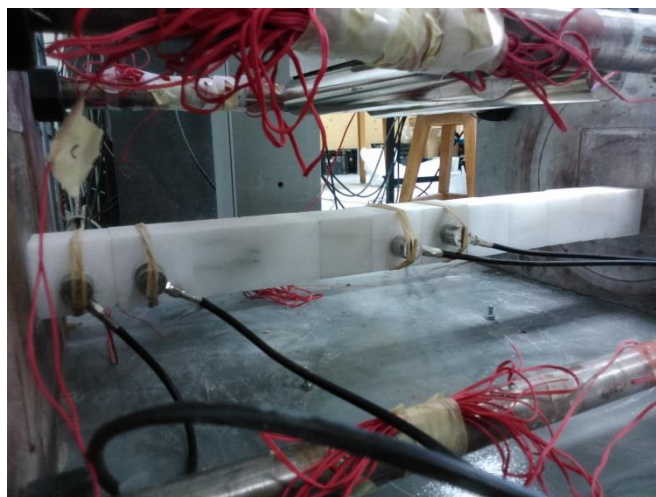
Για να γίνει συσχέτιση μεταξύ του φορτίου και του χρόνου της πρέσσας και του χρόνου των διαγραμμάτων της ακουστικής εκπομπής, αφαιρείται από τον χρόνο της ακουστικής εκπομπής 70,67 sec. Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα:

- Στα **2096 sec (2025,4 sec πειράματος)**, είχαμε έκλυση ενέργειας αλλά όχι τόσο αξιοσημείωτη. Η διάρκεια του γεγονότος ήταν 23034 μsec και ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το πλάτος 93 dB, ήταν 10864 μsec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 61 dB με RMS 0,09. Τα hits αυξήθηκαν απότομα από τα 7284 στα 9501. Το b value μειώθηκε σε αυτό τον χρόνο στα 0,53 από 2,07.
- Στα **2598,4 sec (2527,7 sec πειράματος – Σχήμα 7.67)**, είχαμε σημαντική έκλυση ενέργειας. Η διάρκεια του γεγονότος ήταν 100000 μsec και ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το πλάτος 99 dB, ήταν 33644 μsec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 67 dB με RMS 0,14. Τα hits αυξήθηκαν απότομα από τα 18686 στα 25970. Το b value μειώθηκε σε αυτό τον χρόνο στα 0,99 από 1,40. Στα 2527,7 sec, παρατηρείται η διάδοση, επέκταση και άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, όπως επίσης και δημιουργία σκαλοπατιού στο πάνω μέρος μεταξύ των ογκοτεμαχίων 5 και 6.
- Στα **2963,37 sec (2892,7 sec πειράματος – Σχήμα 7.69)**, είχαμε σημαντική έκλυση ενέργειας. Η διάρκεια του γεγονότος ήταν 100000 μsec και ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το πλάτος 92 dB, ήταν 62031 μsec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 63 dB με RMS 0,10. Τα hits αυξήθηκαν απότομα από τα 28504 στα 30404. Το b value μειώθηκε σε αυτό τον χρόνο στα 1,03 από 1,32. Στα 2892,7 sec, παρατηρείται η δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 4 με επέκταση από την διπλανή ρωγμή του ογκοτεμαχίου 5, πάνω από τον αισθητήρα.
- Στα **3373,4 sec (3302,7 sec πειράματος – Σχήμα 7.70)**, είχαμε σημαντική έκλυση ενέργειας. Η διάρκεια του γεγονότος ήταν 100000 μsec και ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το πλάτος 95 dB, ήταν 59227 μsec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 64 dB με RMS 0,11. Τα hits αυξήθηκαν απότομα από τα 33571 στα 36105. Το b value μειώθηκε σε αυτό τον χρόνο στα 1,40 από 3,22. Στα 3302,7 sec, παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών, σπάσιμο κομματιών στο πάνω μέρος λόγω πίεσης των κυλίστρων φόρτισης.

7.8 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό μαρμάρου Διονύσου (Δοκός 7)

Για την πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής, και την μέτρηση της αξονικής δύναμης χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη των strain gages με την δοκό 6, αλλά αφαιρέσαμε το strain gage 2. Χρησιμοποιήσαμε 3 συνολικά strain gauges, τα strain gauges 4 (Ράβδος 2 – Κανάλι 5 του πλαισίου φόρτισης), 6 (Ράβδος 3 – Κανάλι 7 του πλαισίου φόρτισης) και 8 (Ράβδος 4 – Κανάλι 8 του πλαισίου φόρτισης). Τα strain gages στράφηκαν κατά 90° από την προηγούμενη θέση τους, η οποία ήταν στο πάνω μέρος της κάθε ράβδου, για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την μέγιστη

παραμόρφωση, πάνω στη μέση τάση της κατανομής των τάσεων. Τα strain gages 4,6 και 8, τα συνδέσαμε στο πλαίσιο φόρτισης, για να μπορέσουμε να έχουμε πλήρη συγχρονισμό του φορτίου της πρέσσας και των παραμορφώσεων, και στο κανάλι 6 της μονάδας ελέγχου των δοκιμών συνδέσαμε το βελόμετρο. Η δοκός σχηματίστηκε από 12 κυβικά άρρηκτα ογκοτεμάχια μαρμάρου Διονύσου διαστάσεων 5cm x 5cm x 5cm (Σχήμα 7.76).



Σχήμα 7.76. Η ρωγματομένη δοκός μαρμάρου Διονύσου που σχηματίζεται από 12 κυβικά άρρηκτα ογκοτεμάχια, τοποθετημένη στην πειραματική διάταξη.

Η διάταξη των αισθητήρων της ακουστικής εκπομπής στην δοκό είναι:

- Ογκοτεμάχιο 1: (Μπροστινή πλευρά) - Αισθητήρας 51 (Κανάλι 5 του καταγραφικού)/(Πίσω πλευρά) – Αισθητήρας 01 (Κανάλι 7 του καταγραφικού).
- Ογκοτεμάχιο 2: (Μπροστινή πλευρά) - Αισθητήρας 512 (Κανάλι 6 του καταγραφικού)/(Πίσω πλευρά) – Αισθητήρας 012 (Κανάλι 8 του καταγραφικού).
- Ογκοτεμάχιο 6: (Μπροστινή πλευρά) - Αισθητήρας 31 (Κανάλι 3 του καταγραφικού)/(Πίσω πλευρά) – Αισθητήρας 12 (Κανάλι 1 του καταγραφικού).
- Ογκοτεμάχιο 7: (Μπροστινή πλευρά) - Αισθητήρας 312 (Κανάλι 4 του καταγραφικού)/(Πίσω πλευρά) – Αισθητήρας 112 (Κανάλι 2 του καταγραφικού).

7.8.1 Αποτελέσματα φόρτισης

Το πείραμα διήρκεσε 1138,60 sec = 18,79 min. Να τονιστεί ότι για να μπορέσει το μηχάνημα να ακολουθήσει την διαδρομή της φόρτισης, και για τις σωστές μετρήσεις του βελομέτρου, λόγω του γεγονότος ότι η δοκός μαρμάρου σε ύψος είναι 5 cm χαμηλότερη από τις προηγούμενες δοκούς, τοποθετήσαμε 2 παραπάνω κυβικά

ογκοτεμάχια διαστάσεων 5cm x 5cm x 5cm, κάτω από τα κύλινδρα φόρτισης (Σχήμα 7.77).



Σχήμα 7.77. Διακρίνονται τα 2 κυβικά ογκοτεμάχια κάτω από τα κύλινδρα φόρτισης.

Το γεγονός αυτό όμως σημαίνει ότι το φορτίο κατανέμεται όχι σημειακά αλλά κατανέμεται (θεωρητικά) σε ένα εμβαδόν 25 cm^2 . Λόγω των μικρών διαστάσεων των κυβικών δοκιμίων, η δοκός κατέρρευσε απότομα μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, παρατηρήθηκε όμως η συνηθισμένη μορφή αστοχίας της δοκού, στα μεσαία και στα ακριανά ογκοτεμάχια λόγω θλίψης. Η απότομη κατάρρευση οφείλεται σε ένα συνδυασμό θλιπτικής αστοχίας στα ακραία και μεσαία τεμάχια και μηχανικής αστάθειας (snap through mechanism). Όπως παρατηρείται και από τα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής, δεν παρατηρήθηκαν μακροσκοπικά φαινόμενα αστοχίας ή δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών κατά την διάρκεια του πειράματος και η κατάρρευση προέκυψε σχεδόν απότομα. Η τελική μορφή αστοχίας της δοκού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 7.78.



Σχήμα 7.78. Η τελική εικόνα της δοκού μετά την κατάρρευση.

Το δεξί ακριανό ογκοτεμάχιο 12 όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα 7.79, έσπασε σε τρία κομμάτια, ενώ το διπλανό ογκοτεμάχιο 11, έσπασε ένα μικρό κομμάτι στο κάτω μέρος.



Σχήμα 7.79. Διακρίνονται τα ογκοτεμάχια 11 και 12. Το 12 έσπασε σε τρία κομμάτια και στο 11 αποκολλήθηκε ένα πολύ μικρό κομμάτι στο κάτω μέρος.

Το αριστερό ακριανό ογκοτεμάχιο 1, αποκολλήθηκε το κάτω μέρος λόγω συγκέντρωσης όπως ήταν αναμενόμενο θλιπτικών τάσεων (Σχήμα 7.80).



Σχήμα 7.80. Σπάσιμο του κάτω μέρους του ογκοτεμαχίου 1.

Στο παρακάτω σχήμα 7.81, φαίνονται τα 2 μεσαία ογκοτεμάχια 6 και 7. Το ογκοτεμάχιο 6, αριστερά της μεσαίας ασυνέχειας έσπασε στο πάνω μέρος σε δύο κομμάτια και στο ογκοτεμάχιο 7, δεξιά της μεσαίας ασυνέχειας, είχαμε αποφλοιώση στο πάνω μέρος λόγω θλίψης.



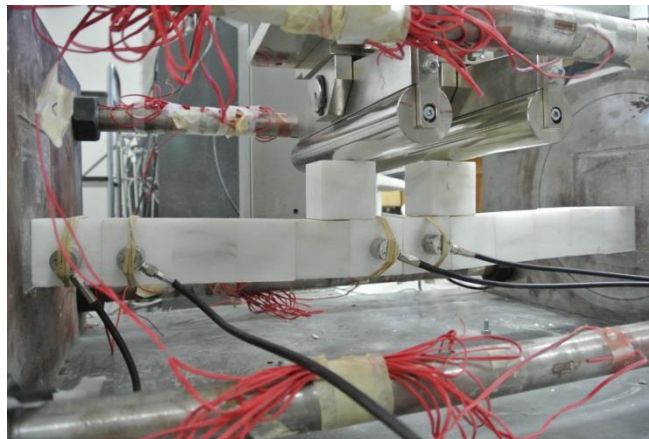
Σχήμα 7.81. Διακρίνονται τα μεσαία ογκοτεμάχια 6 και 7, από την μπροστινή πλευρά.

Στο παρακάτω σχήμα 7.82 φαίνονται αντίστοιχα τα ογκοτεμάχια 6 και 7 από την πίσω πλευρά τους.



Σχήμα 7.82. Διακρίνονται τα ογκοτεμάχια 6 και 7 από την πίσω πλευρά τους.

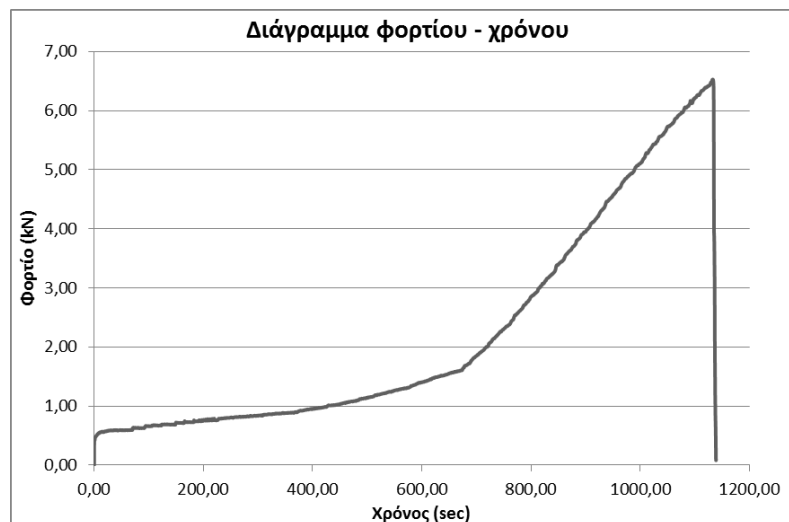
Επίσης στο παρακάτω σχήμα 7.83 διακρίνεται η κάμψη της δοκού 5 sec, πριν την τελική αστοχία.



Σχήμα 7.83. Διακρίνεται το βέλος κάμψης της δοκού 5 sec, πριν την αστοχία.

7.8.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

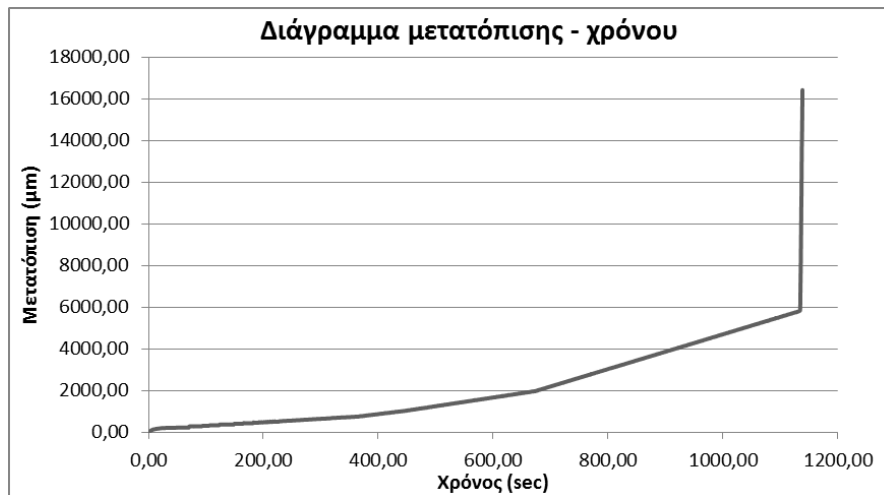
Διάγραμμα φορτίου – χρόνου



Διάγραμμα 7.69. Διάγραμμα φορτίου – χρόνου.

Παρατηρούμε ότι στα 672,40 sec το φορτίο διαμορφώθηκε στα 1,61 kN, έπειτα άρχισε να αυξάνεται απότομα με το φορτίο να φτάνει στο μέγιστο 6,53 kN στα 1132 sec.

Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου



Διάγραμμα 7.70. Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.

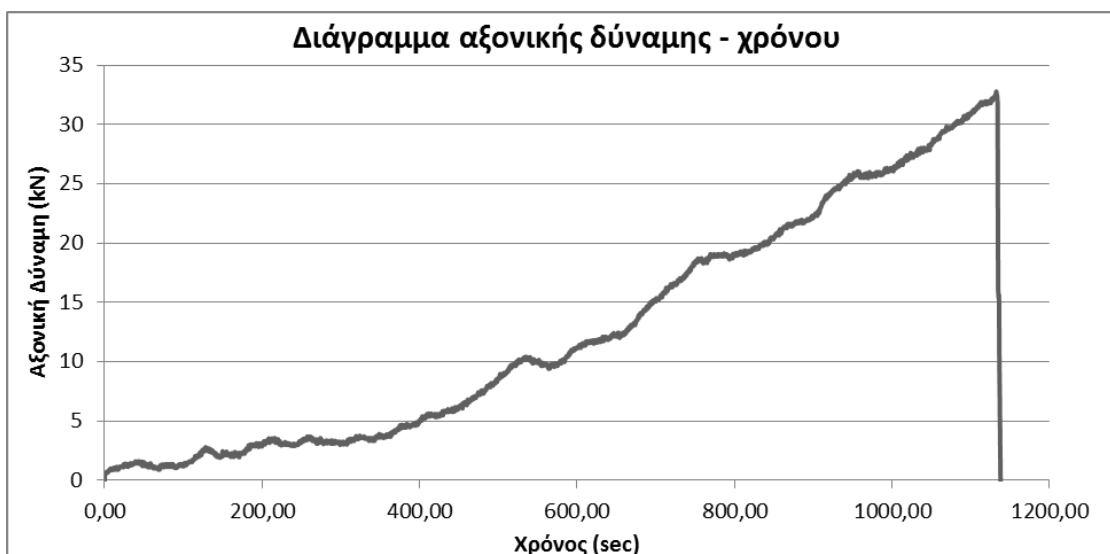
Η μέγιστη μετατόπιση μετρήθηκε 16340 μm = 1,6 cm στα 1138,60 sec.

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Διάγραμμα 7.71. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου

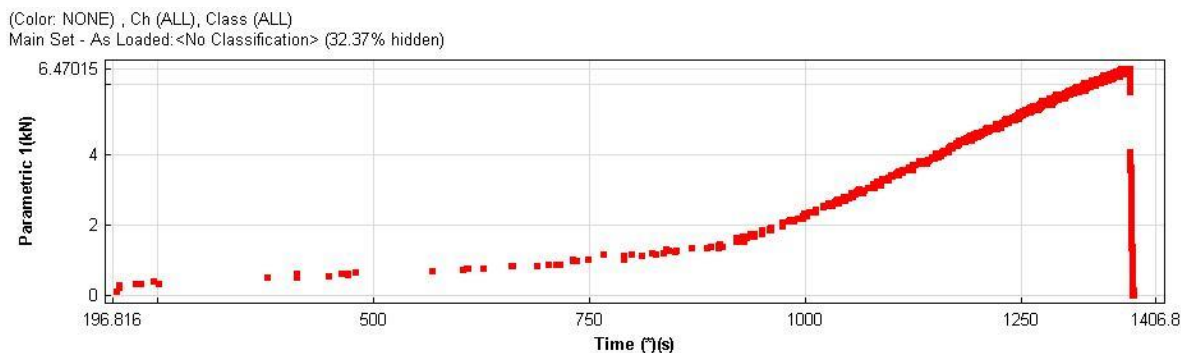


Διάγραμμα 7.72. Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου.

Για να κατασκευαστεί το παραπάνω διάγραμμα, πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gages 6 (Ράβδος 3) και 8 (Ράβδος 4), προσθέσαμε τις παραμορφώσεις και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2. Η μέγιστη αξονική δύναμη μετρήθηκε 32,78 kN στα 1132,60 sec.

7.8.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής

Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου

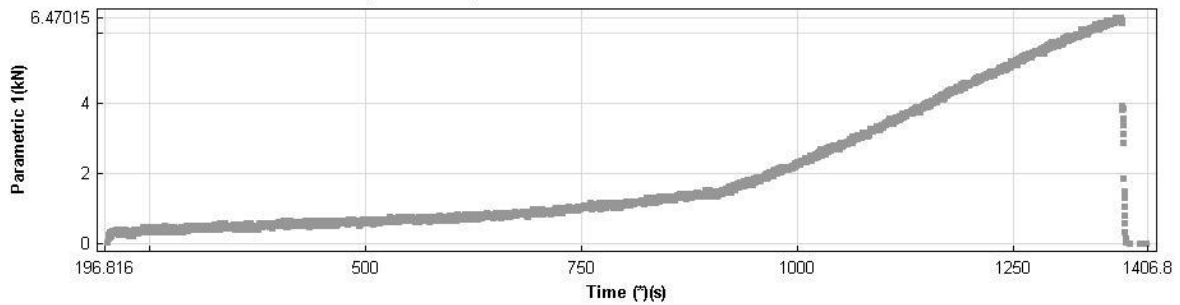


Διάγραμμα 7.73. Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου.

Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (89.58% hidden)

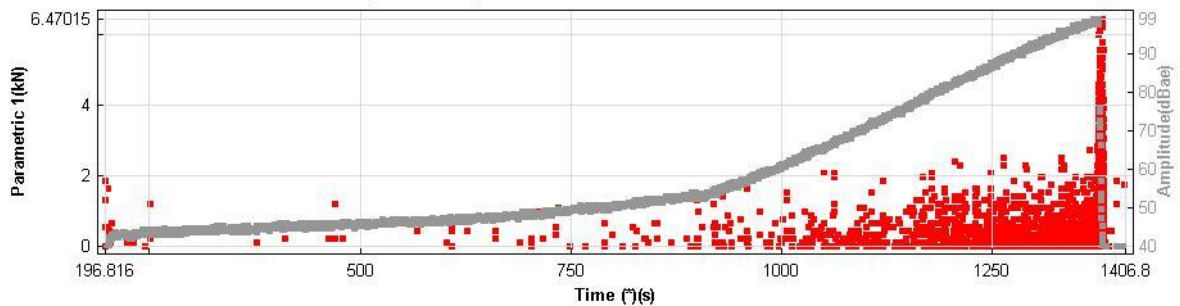


Διάγραμμα 7.74. Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου.

Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (89.58% hidden)

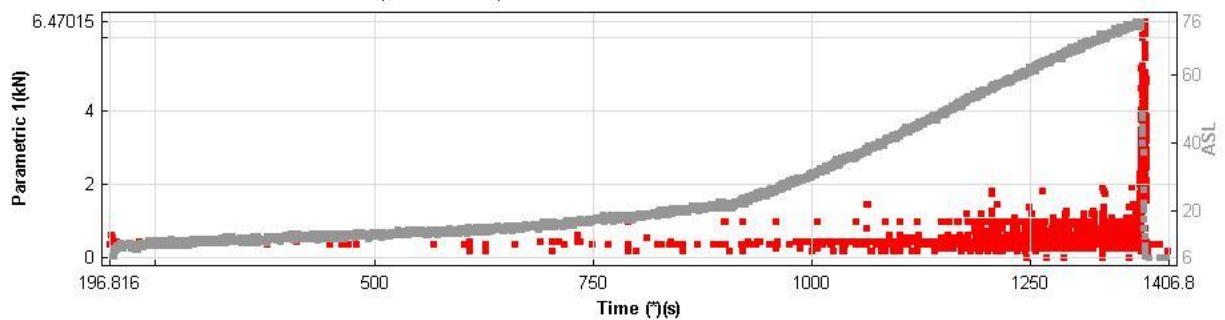


Διάγραμμα 7.75. Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου.

Διάγραμμα ASL (Average Signal Level) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (89.58% hidden)

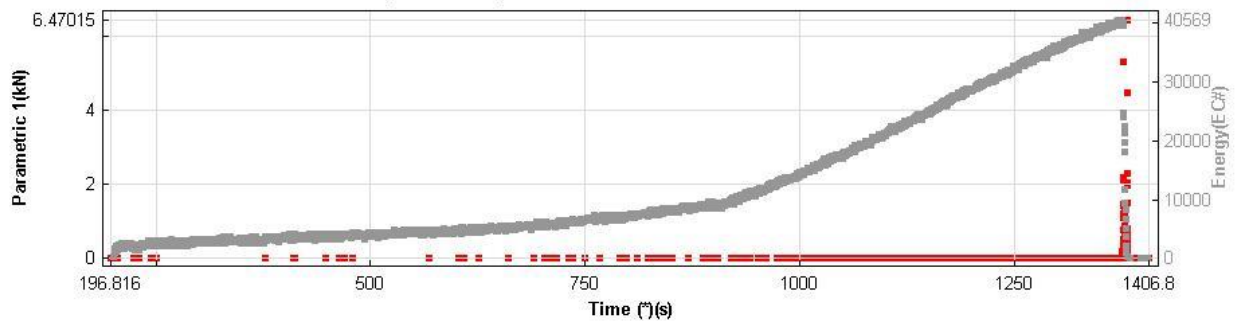


Διάγραμμα 7.76. Διάγραμμα ASL – χρόνου.

Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (89.58% hidden)

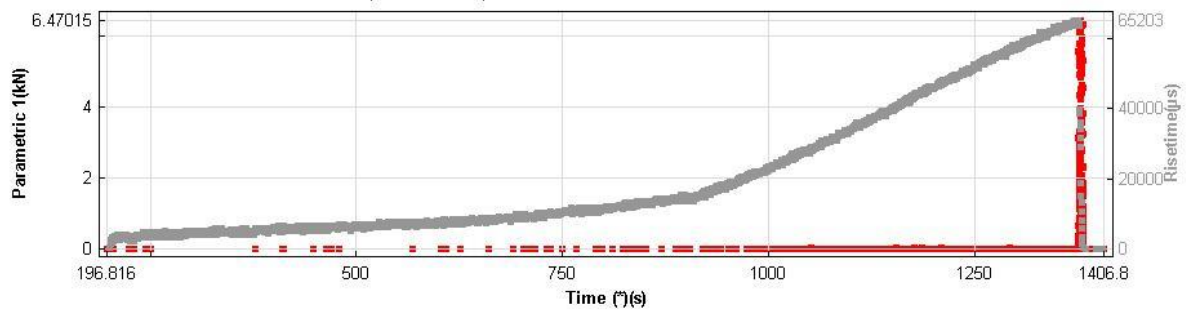


Διάγραμμα 7.77. Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου.

Διάγραμμα Risetime – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (89.58% hidden)

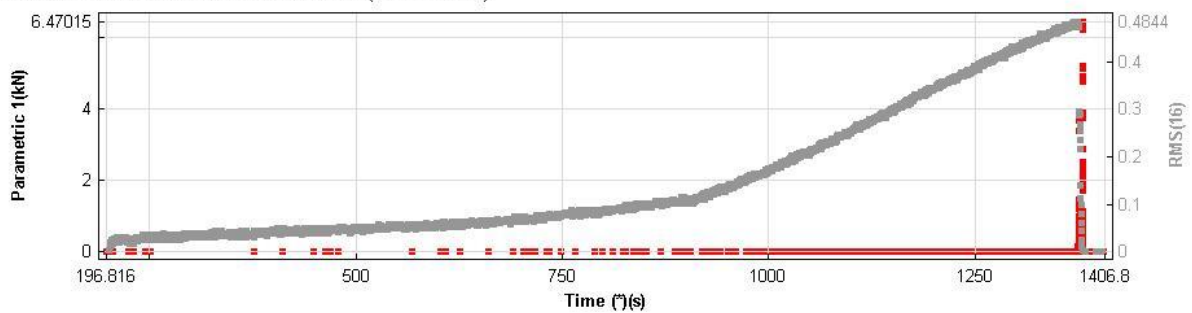


Διάγραμμα 7.78. Διάγραμμα risetime – χρόνου.

Διάγραμμα RMS (Root Mean Square) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (89.58% hidden)

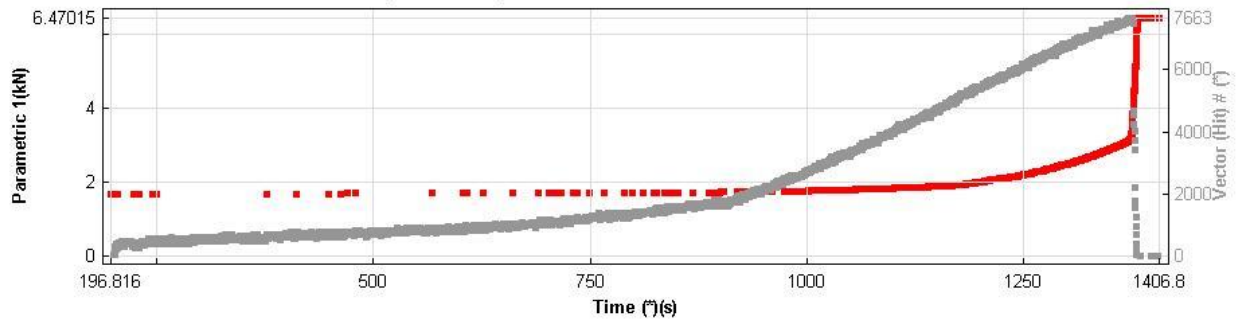


Διάγραμμα 7.79. Διάγραμμα RMS – χρόνου.

Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (89.58% hidden)

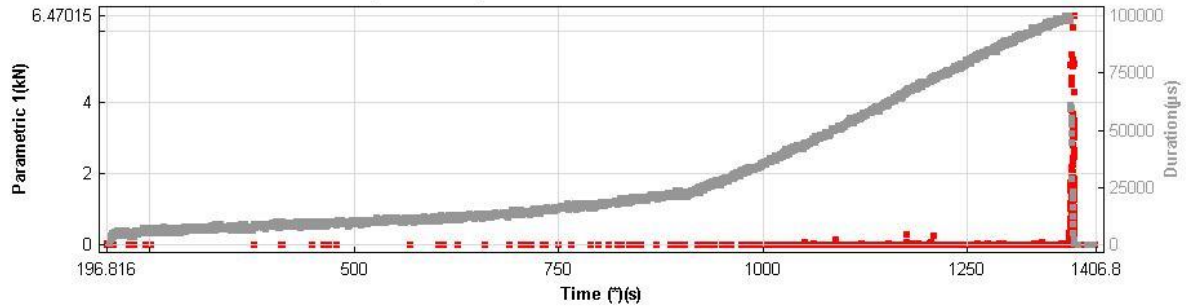


Διάγραμμα 7.80. Διάγραμμα vector hit – χρόνου.

Διάγραμμα Duration – χρόνου

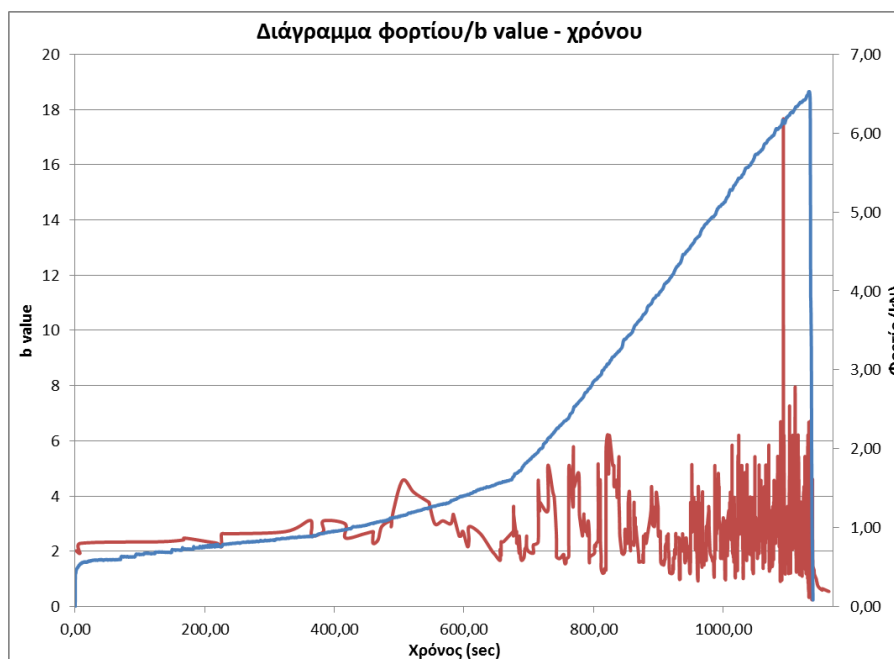
(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (89.58% hidden)



Διάγραμμα 7.81. Διάγραμμα duration – χρόνου.

Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου



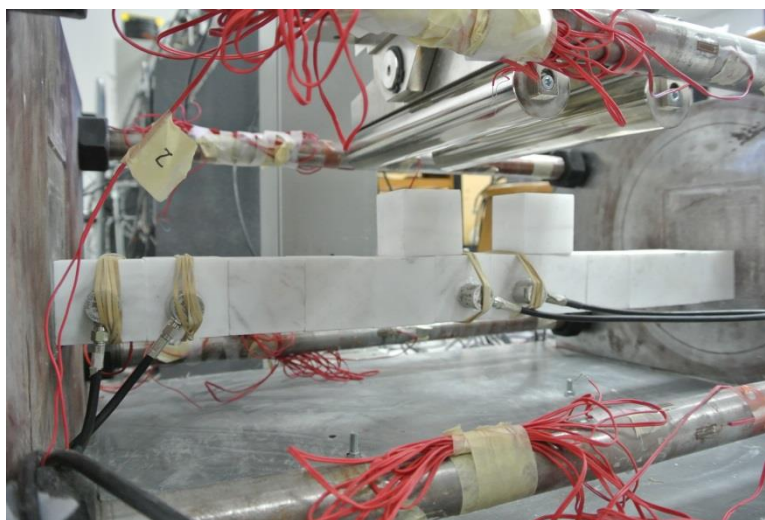
Διάγραμμα 7.82. Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου.

7.8.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής

Για να γίνει συσχέτιση μεταξύ του φορτίου και του χρόνου της πρέσσας και του χρόνου των διαγραμμάτων της ακουστικής εκπομπής, αφαιρείται από τον χρόνο της ακουστικής εκπομπής 243,63 sec. Δεν παρατηρήθηκαν μακροσκοπικά κατά την διάρκεια του πειράματος εφελκυστικές ρωγμές, και όπως βλέπουμε και από τα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής, δεν έχουμε έκλυση ενέργειας, άρα δεν έχουμε και αξιοσημείωτα γεγονότα ακουστικής εκπομπής. Η μεγαλύτερη έκλυση ενέργειας παρατηρείται στα 1382,22 sec (1138,60 sec), όπου είχαμε και την απότομη κατάρρευση της δοκού (Διάγραμμα 7.77). Επίσης όπως παρατηρούμε και από το διάγραμμα 7.80, τα hits παραμένουν σταθερά μέχρι τα 941 sec (2000 hits), ενώ μετά τα 941 sec, τα hits αρχίζουν να αυξάνονται ομαλά μέχρι τα 1370 sec (1127 sec πειράματος), όπου άρχισαν να αυξάνονται απότομα την στιγμή της αστοχίας. Τέλος από το διάγραμμα 7.82, παρατηρείται ότι η παράμετρος b, αυξομειώνεται, ενώ παρατηρείται ένα μέγιστο 17,37 στα 1092,92 sec.

7.9 Εργαστηριακή δοκιμή σε δοκό μαρμάρου Βόλακα (Δοκός 8)

Για την πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής, και την μέτρηση της αξονικής δύναμης χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη των strain gages με την δοκό 7, αλλά αφαιρέσαμε το strain gage 2. Χρησιμοποιήσαμε 3 συνολικά strain gauges, τα strain gauges 4 (Ράβδος 2 – Κανάλι 5 του πλαισίου φόρτισης), 6 (Ράβδος 3 – Κανάλι 7 του πλαισίου φόρτισης) και 8 (Ράβδος 4 – Κανάλι 8 του πλαισίου φόρτισης). Τα strain gages στράφηκαν κατά 90° από την προηγούμενη θέση τους, η οποία ήταν στο πάνω μέρος της κάθε ράβδου, για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την μέγιστη παραμόρφωση, πάνω στη μέση τάση της κατανομής των τάσεων. Τα strain gages 4,6 και 8, τα συνδέσαμε στο πλαίσιο φόρτισης, για να μπορέσουμε να έχουμε πλήρη συγχρονισμό του φορτίου της πρέσσας και των παραμορφώσεων, και στο κανάλι 6 του πλαισίου φόρτισης συνδέσαμε το βελόμετρο. Η δοκός σχηματίστηκε από 12 κυβικά άρρηκτα ογκοτεμάχια μαρμάρου Βόλακα διαστάσεων 5cm x 5cm x 5cm (Σχήμα 7.84).



Σχήμα 7.84. Η ρωγματωμένη δοκός μαρμάρου Βόλακα που σχηματίζεται από 12 κυβικά άρρηκτα ογκοτεμάχια, τοποθετημένη στην πειραματική διάταξη.

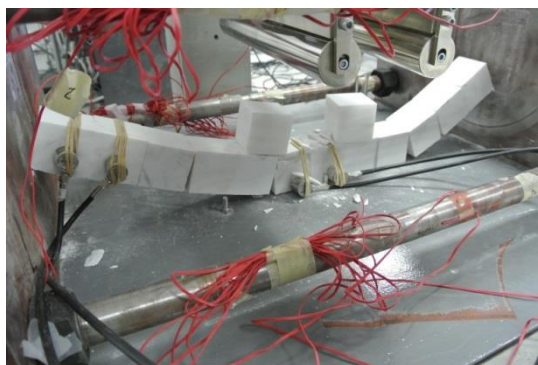
Η διάταξη των αισθητήρων ακουστικής εκπομπής στην δοκό είναι:

- Ογκοτεμάχιο 1: (Μπροστινή πλευρά) - Αισθητήρας 51 (Κανάλι 5 του καταγραφικού)/(Πίσω πλευρά) – Αισθητήρας 01 (Κανάλι 7 του καταγραφικού).
- Ογκοτεμάχιο 2: (Μπροστινή πλευρά) - Αισθητήρας 512 (Κανάλι 6 του καταγραφικού)/(Πίσω πλευρά) – Αισθητήρας 012 (Κανάλι 8 του καταγραφικού).
- Ογκοτεμάχιο 6: (Μπροστινή πλευρά) - Αισθητήρας 31 (Κανάλι 3 του καταγραφικού)/(Πίσω πλευρά) – Αισθητήρας 12 (Κανάλι 1 του καταγραφικού).
- Ογκοτεμάχιο 7: (Μπροστινή πλευρά) - Αισθητήρας 312 (Κανάλι 4 του καταγραφικού)/(Πίσω πλευρά) – Αισθητήρας 112 (Κανάλι 2 του καταγραφικού).

7.9.1 Αποτελέσματα φόρτισης

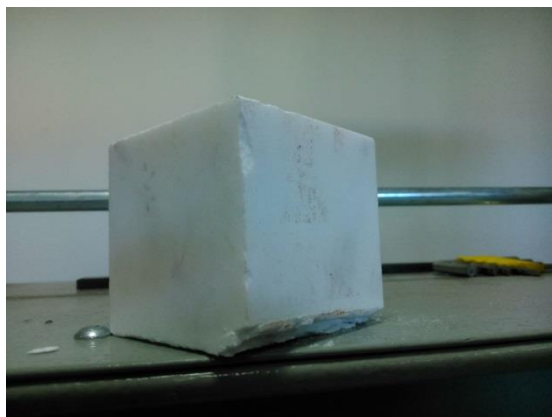
Το πείραμα διήρκεσε $5110,80 \text{ sec} = 85,18 \text{ min}$. Να τονιστεί ότι για να μπορέσει το μηχάνημα να ακολουθήσει την διαδρομή της φόρτισης, και για τις σωστές μετρήσεις του βελομέτρου, λόγω του γεγονότος ότι η δοκός μαρμάρου σε ύψος είναι 5 cm χαμηλότερη από τις προηγούμενες δοκούς, τοποθετήσαμε 2 παραπάνω κυβικά ογκοτεμάχια διαστάσεων 5cm x 5cm x 5cm, κάτω από τα κύλιστρα φόρτισης (Σχήμα 7.84).

Το γεγονός αυτό όμως σημαίνει ότι το φορτίο κατανέμεται όχι σημειακά αλλά κατανέμεται σε ένα εμβαδόν 25 cm^2 . Η δοκός κατέρρευσε απότομα μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, παρατηρήθηκε όμως η συνηθισμένη μορφή αστοχίας της δοκού, στα μεσαία και στα ακριανά ογκοτεμάχια λόγω θλίψης. Η απότομη κατάρρευση οφείλεται σε ένα συνδυασμό θλιπτικής αστοχίας στα ακραία και μεσαία τεμάχια και μηχανικής αστάθειας (snap through mechanism). Όπως παρατηρείται και από τα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής, δεν παρατηρήθηκαν μακροσκοπικά φαινόμενα αστοχίας ή δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών κατά την διάρκεια του πειράματος και η κατάρρευση προέκυψε σχεδόν απότομα. Η τελική μορφή αστοχίας της δοκού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 7.85.



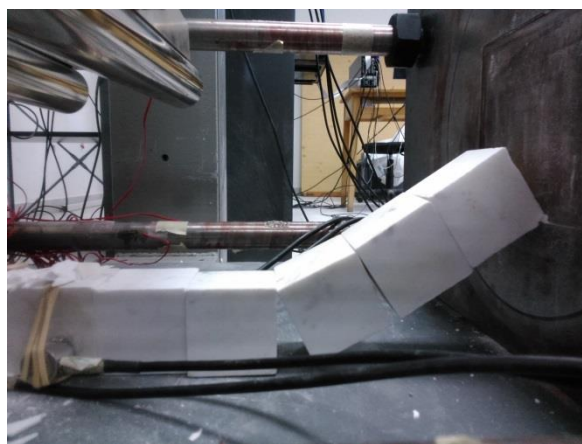
Σχήμα 7.85. Η τελική εικόνα της δοκού μετά την κατάρρευση.

Το δεξί ακριανό ογκοτεμάχιο 12 όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα 7.86, έσπασε στο κάτω μέρος γωνιακό κομμάτι, λόγω συγκέντρωσης σε εκείνο το σημείο όπως ήταν αναμενόμενο θλιπτικών τάσεων.



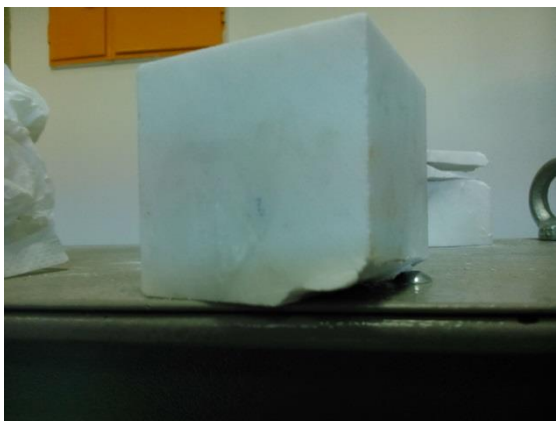
Σχήμα 7.86. Διακρίνεται το σπάσιμο στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 12.

Στο παρακάτω σχήμα 7.87, διακρίνεται το ίδιο ογκοτεμάχιο 12, πάνω στην δοκό μετά την αστοχία.



Σχήμα 7.87. Διακρίνεται το ογκοτεμάχιο 12 πάνω στην δοκό μετά την αστοχία.

Το αριστερό ακριανό ογκοτεμάχιο 1, αποκόλληθηκε το κάτω μέρος λόγω συγκέντρωσης όπως ήταν αναμενόμενο θλιπτικών τάσεων (Σχήμα 7.88).



Σχήμα 7.88. Διακρίνεται το αριστερό ακριανό ογκοτεμάχιο 1, όπου παρατηρείται το σπάσιμο και αποκόλληση γωνιακού τεμάχους στο κάτω μέρος.

Στο παρακάτω σχήμα 7.89, φαίνονται τα 2 μεσαία ογκοτεμάχια 6 και 7. Το ογκοτεμάχιο 6, αριστερά της μεσαίας ασυνέχειας έσπασε στο πάνω μέρος λόγω θλίψης ενώ το ογκοτεμάχιο 7 έσπασε σε τρία διακριτά κομμάτια.



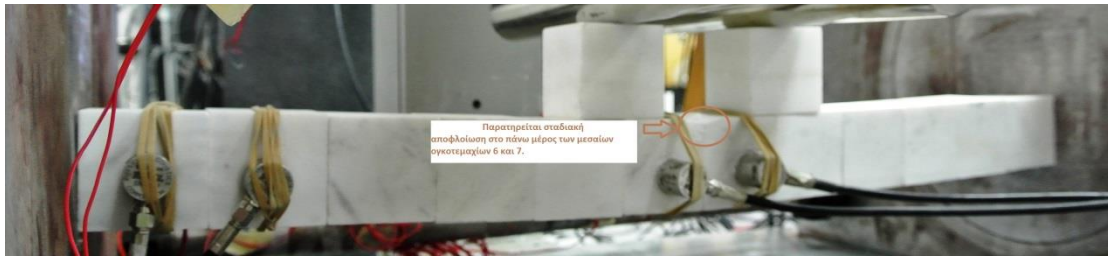
Σχήμα 7.89. Διακρίνονται τα μεσαία ογκοτεμάχια 6 και 7, από την μπροστινή πλευρά.

Στο παρακάτω σχήμα 7.90 φαίνονται αντίστοιχα τα ογκοτεμάχια 6 και 7 από την πίσω πλευρά τους.



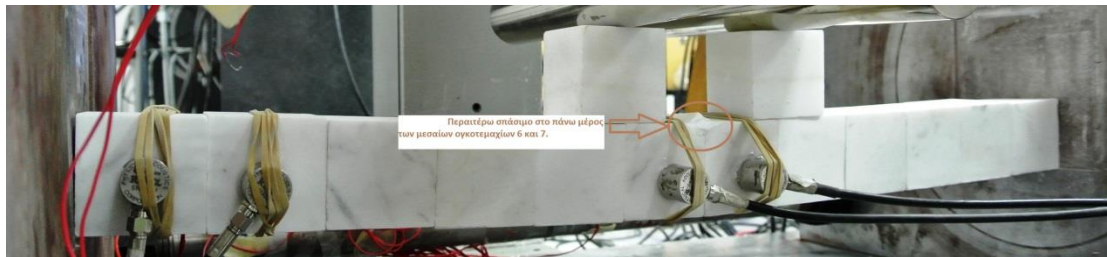
Σχήμα 7.90. Διακρίνονται τα ογκοτεμάχια 6 και 7 από την πίσω πλευρά τους.

Στα 4092,80 sec (Σχήμα 7.91), παρατηρήθηκε, σταδιακή αποφλοιώση στο πάνω μέρος των μεσαίων ογκοτεμαχίων 6 και 7, με σταδιακό σπάσιμο και σύνθλιψη του πάνω μέρους λόγω επικράτησης θλιπτικών τάσεων.



Σχήμα 7.91.Σταδιακή σύνθλιψη στο πάνω μέρος των μεσαίων ογκοτεμαχίων 6 και 7.

Στα 4538,81 sec (Σχήμα 7.92), παρατηρείται περαιτέρω σπάσιμο και σύνθλιψη στο πάνω μέρος των ογκοτεμαχίων 6 και 7.

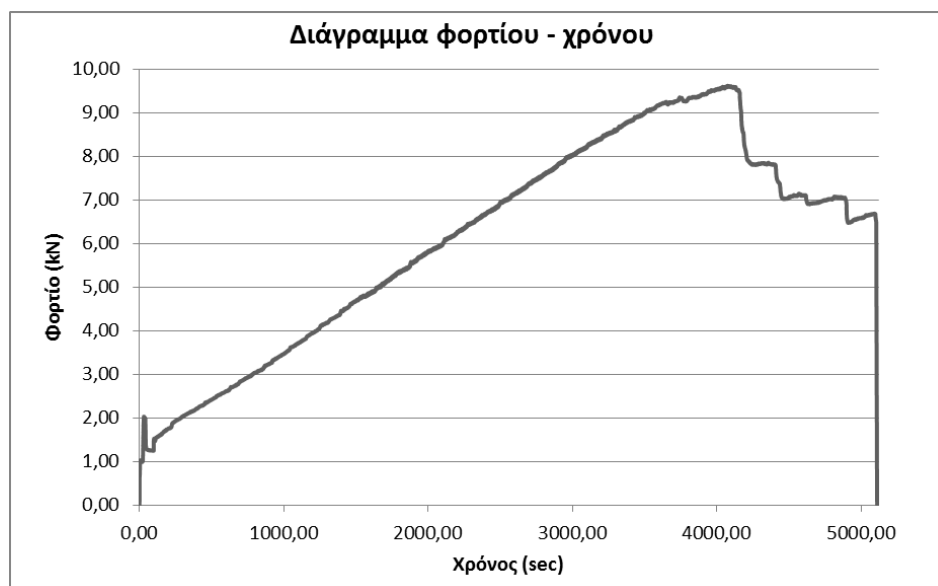


Σχήμα 7.92.Περαιτέρω σύνθλιψη στο πάνω μέρος των μεσαίων ογκοτεμαχίων 6 και 7.

Δεν παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος άλλα μακροσκοπικά φαινόμενα αστοχίας. Η δοκός κατέρρευσε μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, απότομα. Συνολικά όπως και στην δοκό 7 (Μάρμαρο Διονύσου), τα ογκοτεμάχια που αστόχησαν είναι τα 1,6,7 και 12, δηλαδή τα 2 ακριανά και 2 μεσαία ογκοτεμάχια, όπως ήταν αναμενόμενο στην συνηθισμένη μορφή αστοχίας μιας δοκού voussoir.

7.9.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Διάγραμμα φορτίου – χρόνου



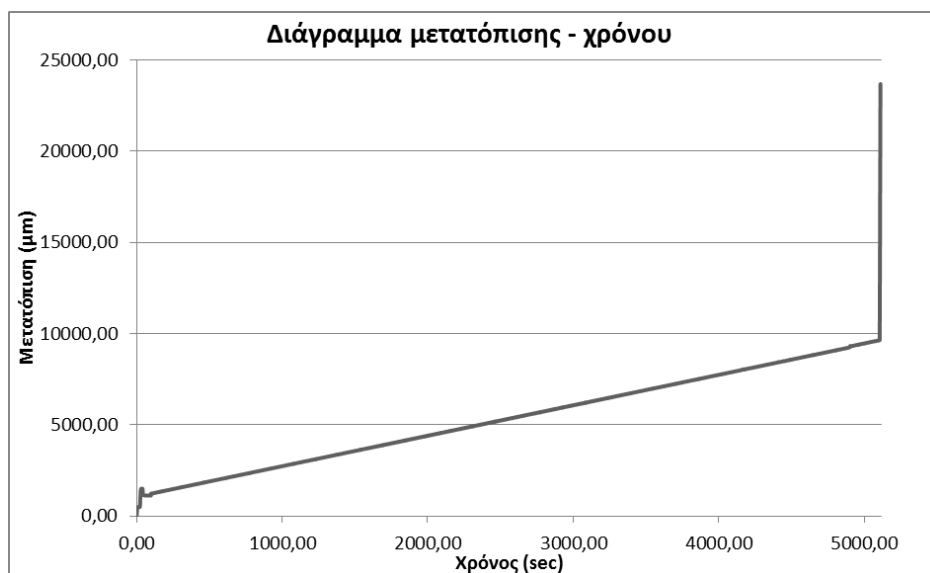
Διάγραμμα 7.83.Διάγραμμα φορτίου – χρόνου.

Παρατηρήθηκαν 4 συνολικά σκαλοπάτια:

- (1^ο σκαλοπάτι – Σχήμα 7.90): Στα 4092,80 sec, το φορτίο από τα 9,60 kN, κατέβηκε απότομα στα 8,07 kN στα 4203 sec.
- (2^ο σκαλοπάτι): Στα 4323 sec, το φορτίο από τα 7,85 kN, κατέβηκε απότομα στα 7,31 kN στα 4438 sec.
- (3^ο σκαλοπάτι – Σχήμα 7.91): Στα 4538,81 sec, το φορτίο από τα 7,11 kN, κατέβηκε απότομα στα 6,93 kN στα 4665,40 sec.
- (4^ο σκαλοπάτι): Στα 4787,81 sec, το φορτίο από τα 7,04 kN, κατέβηκε απότομα στα 6,51 kN στα 4905,60 sec.

Τελικά στα 5105,20 sec, η δοκός κατέρρευσε με το φορτίο να διαμορφώνεται στα 6,50 kN. Να τονιστεί ότι το μέγιστο φορτίο ήταν 9,62 kN στα 4073,60 sec.

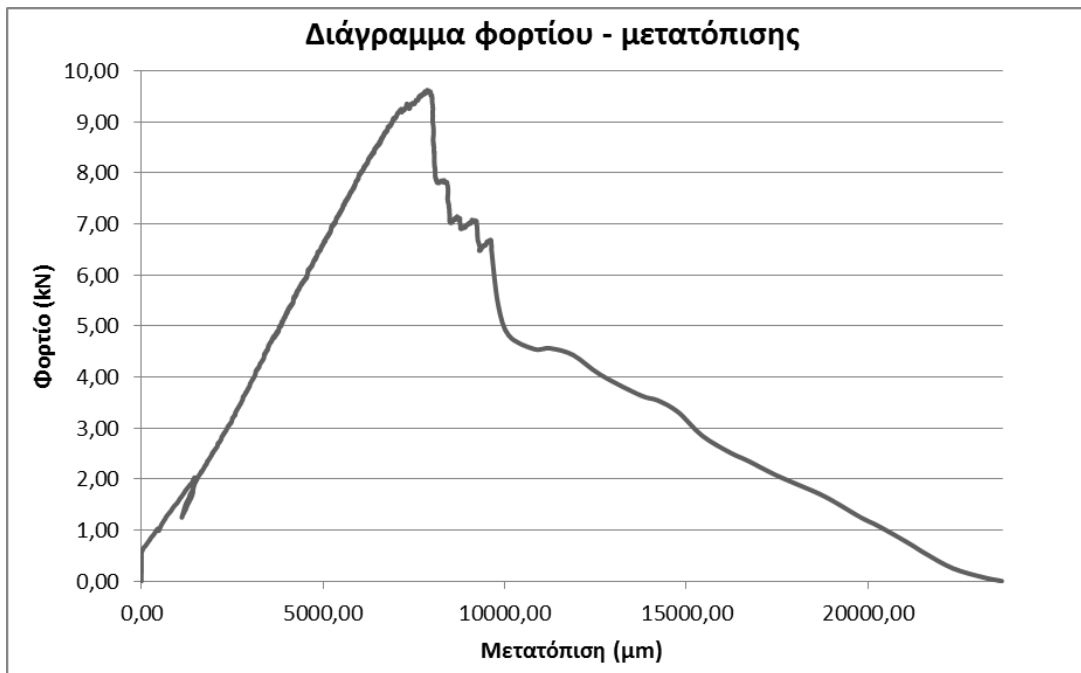
Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου



Διάγραμμα 7.84. Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου.

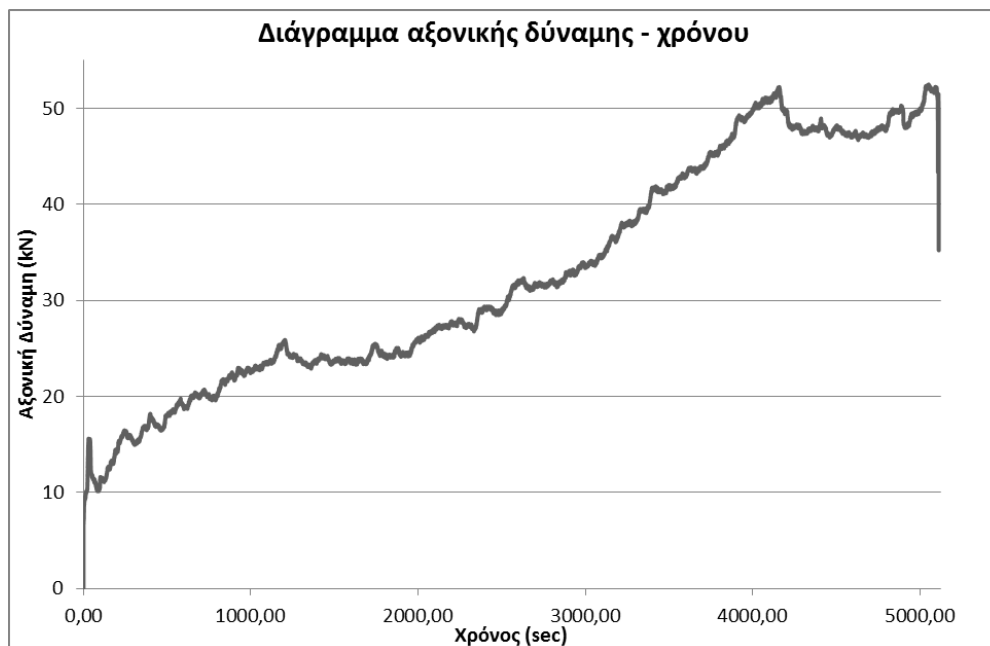
Η μέγιστη μετατόπιση μετρήθηκε 23677 μm = 2,3 cm στα 5110,80 sec, ενώ παρατηρείται ομαλή μεταβολή της μετατόπισης σε σχέση με τον χρόνο.

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Διάγραμμα 7.85. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου



Διάγραμμα 7.86. Διάγραμμα αξονικής δύναμης – χρόνου.

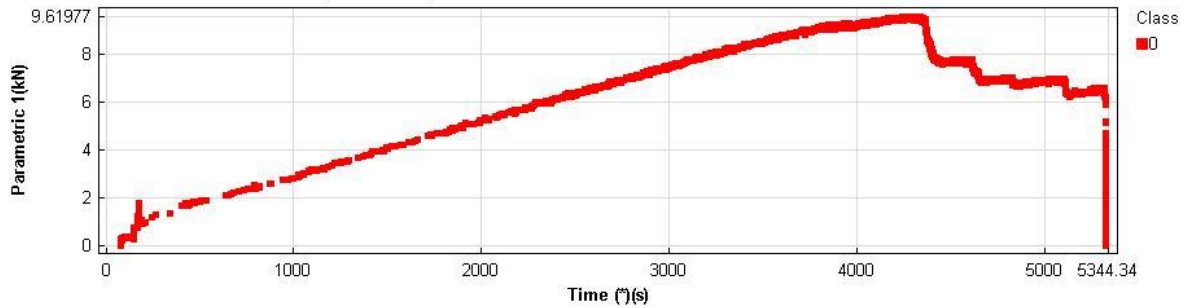
Για να κατασκευαστεί το παραπάνω διάγραμμα, πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gages 6 (Ράβδος 3) και 8 (Ράβδος 4), προσθέσαμε τις παραμορφώσεις και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2. Η μέγιστη αξονική δύναμη μετρήθηκε 52,50 kN στα 5049,60 sec.

7.9.3 Αποτελέσματα ακουστικής εκπομπής

Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου

(Color: CLASSES) , Ch (ALL), Class (ALL)

Main Set - As Loaded: <No Classification> (3.43% hidden)

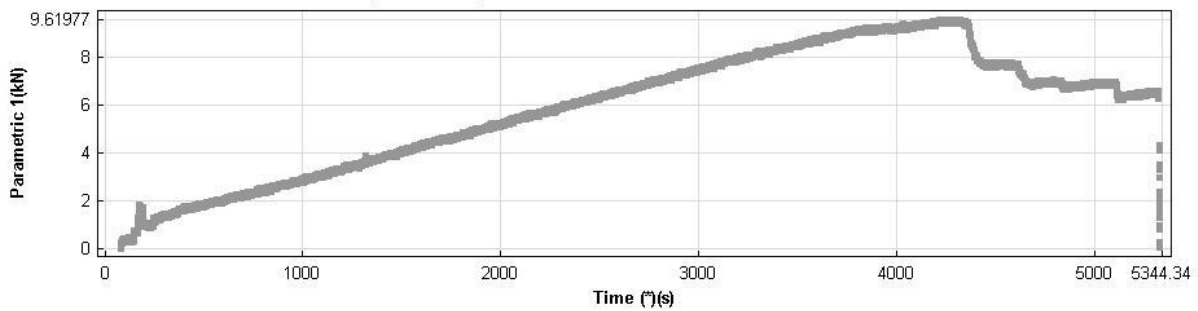


Διάγραμμα 7.87. Διάγραμμα φορτίου (Hit Driven Data) – χρόνου.

Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.79% hidden)

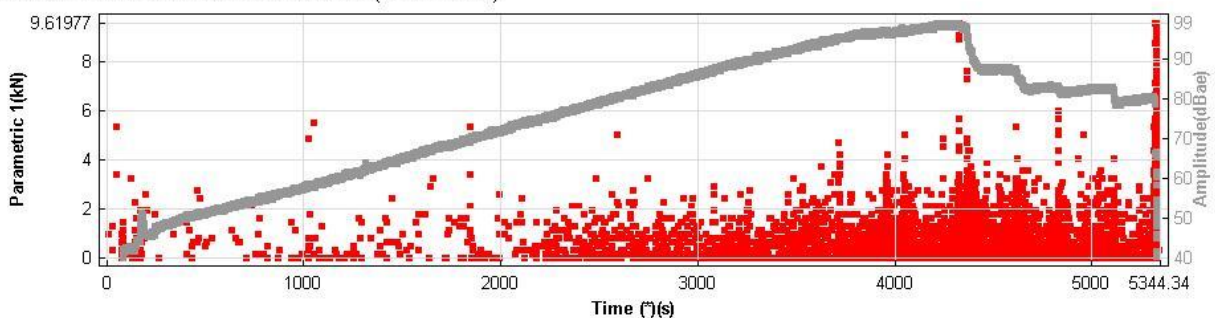


Διάγραμμα 7.88. Διάγραμμα φορτίου (Time Driven Data) – χρόνου.

Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

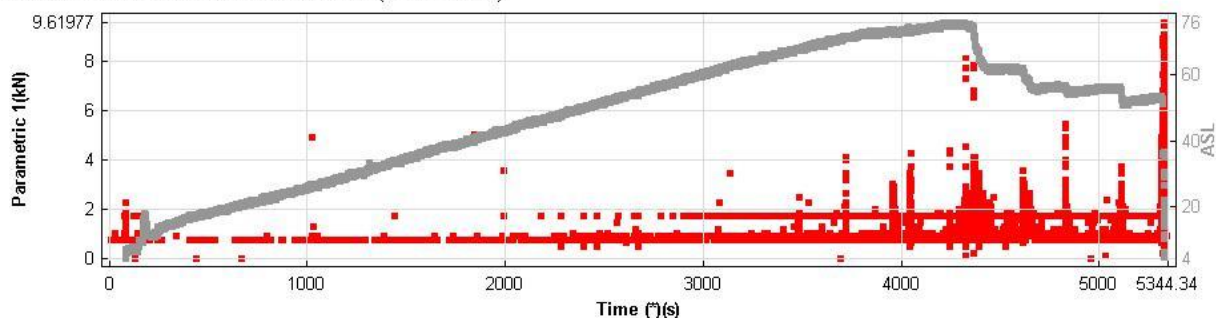
Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.79% hidden)



Διάγραμμα 7.89. Διάγραμμα πλάτους (Amplitude) – χρόνου.

Διάγραμμα ASL (Average Signal Level) – χρόνου

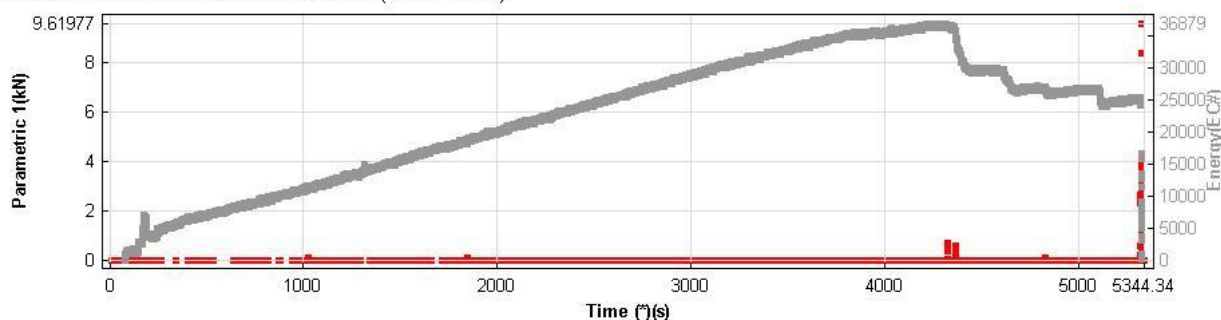
(Color: NONE) , Ch (ALL)
Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.79% hidden)



Διάγραμμα 7.90. Διάγραμμα ASL – χρόνου.

Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου

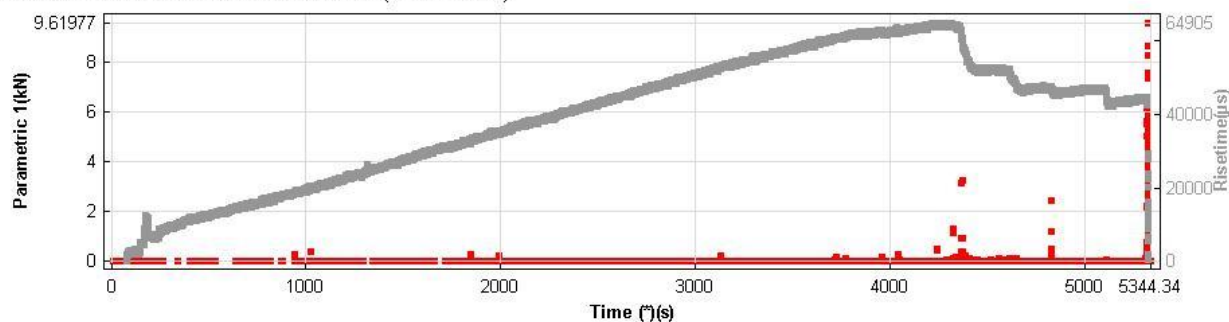
(Color: NONE) , Ch (ALL)
Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.79% hidden)



Διάγραμμα 7.91. Διάγραμμα ενέργειας – χρόνου.

Διάγραμμα Risetime – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)
Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.79% hidden)

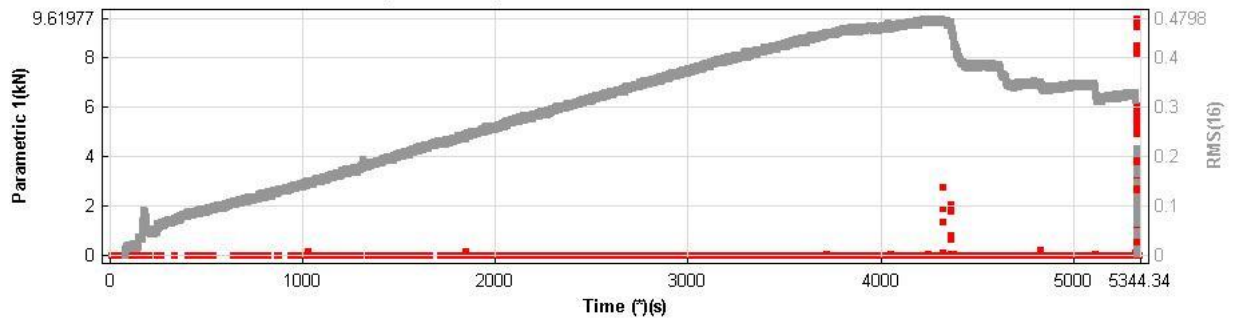


Διάγραμμα 7.92. Διάγραμμα risetime – χρόνου.

Διάγραμμα RMS (Root Mean Square) – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.79% hidden)

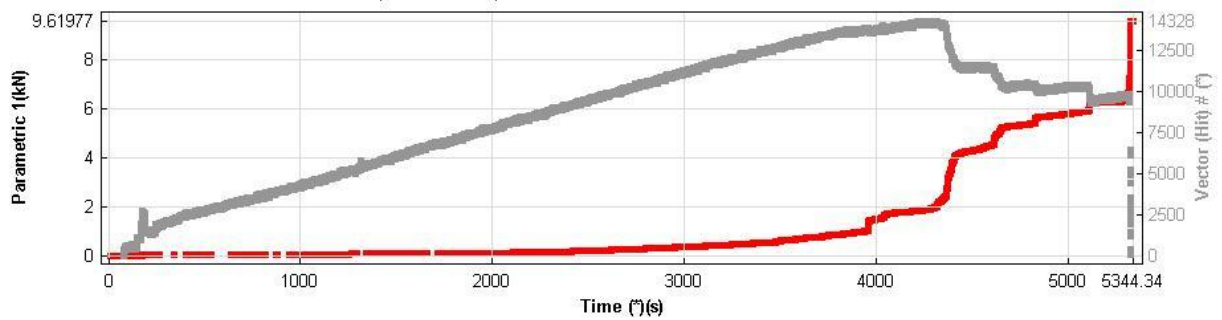


Διάγραμμα 7.93. Διάγραμμα RMS – χρόνου.

Διάγραμμα Vector Hit – χρόνου

(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.79% hidden)

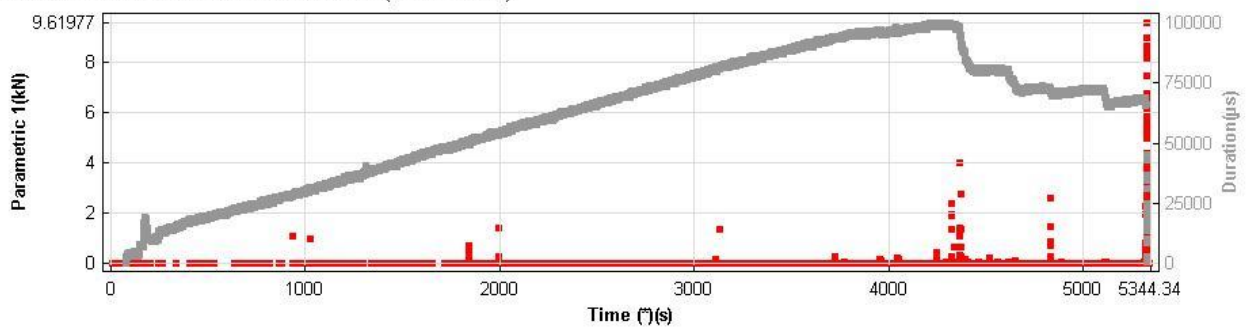


Διάγραμμα 7.94. Διάγραμμα vector hit – χρόνου.

Διάγραμμα Duration – χρόνου

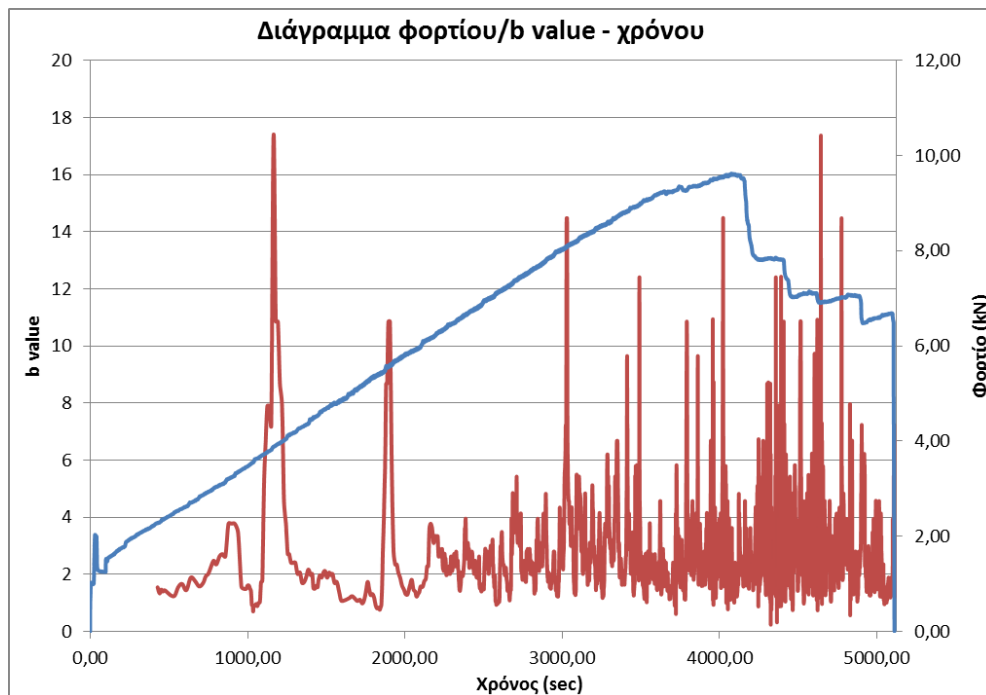
(Color: NONE) , Ch (ALL)

Main Set - Time-Driven Data: <No Classification> (87.79% hidden)



Διάγραμμα 7.95. Διάγραμμα duration – χρόνου.

Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου



Διάγραμμα 7.96. Διάγραμμα παραμέτρου b – χρόνου.

7.9.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ακουστικής εκπομπής

Για να γίνει συσχέτιση μεταξύ του φορτίου και του χρόνου της πρέσσας και του χρόνου των διαγραμμάτων της ακουστικής εκπομπής, αφαιρούνται από τον χρόνο της ακουστικής εκπομπής 290,19 sec. Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα:

- Στα **3956,98 sec (3661,61 sec χρόνος πειράματος)**, τα hits αυξήθηκαν από τα 1529 στα 2334, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 7.94, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 66 dB. Δεν παρατηρήθηκε όμως μακροσκοπικά κάποιο φαινόμενο, όπως επίσης δεν είχαμε και έκλυση ενέργειας.
- Στα **4383 sec (4092,80 sec χρόνος πειράματος/Σχήμα 7.91)**, τα hits αυξήθηκαν από τα 3059 στα 5957, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 7.94, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 99 dB. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το μέγιστο πλάτος 99 dB (Risetime), ήταν 21878 μ sec, με την διάρκεια του γεγονότος να κρατάει 41573 μ sec. Παρατηρήθηκε και μία μικρή έκλυση ενέργειας. Το b value μειώθηκε από τα 2,94 στα 2,28, λόγω μεγιστοποίησης του πλάτους. Στα 4092,80 sec, παρατηρήθηκε, σταδιακή αποφλοίωση στο πάνω μέρος των μεσαίων ογκοτεμαχίων 6 και 7, με σταδιακό σπάσιμο και σύνθλιψη του πάνω μέρους λόγω επικράτησης θλιπτικών τάσεων.
- Στα **4614 sec (4323,81 sec χρόνος πειράματος)**, τα hits αυξήθηκαν από 6842 σε 7808, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 73dB. Δεν παρατηρείται έκλυση ενέργειας, ούτε αξιοσημείωτη αλλαγή στην διάρκεια duration ή στο risetime. Το b value μειώθηκε από τα 2,89 στα 2,01.

- Στα **4829 sec (4538,81 sec χρόνος πειράματος/Σχήμα 7.92)**, τα hits αυξήθηκαν από 7969 σε 8532. Υπήρξε μία ανεπαίσθητη έκλυση ενέργειας, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 77 dB. Ο χρόνος για να επιτευχθεί αυτό το πλάτος ήταν 16773 msec, και η συνολική διάρκεια του γεγονότος 26404 msec. Το b value μειώθηκε από τα 1,73 στα 1,52. Στα 4538,81 sec), παρατηρείται περαιτέρω σπάσιμο και σύνθλιψη στο πάνω μέρος των ογκοτεμαχίων 6 και 7.
- Στα **5087 sec (4787,81 sec χρόνος πειράματος)**, τα hits αυξήθηκαν από τα 8935 στα 9337, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 65 dB. Δεν παρατηρείται έκλυση ενέργειας, ούτε αξιοσημείωτη αλλαγή στην διάρκεια duration ή στο risetime. Το b value μειώθηκε από τα 4,57 στα 3,21.

Τέλος να σημειωθεί ότι όπως ήταν αναμενόμενο και φαίνεται και από το διάγραμμα 7.94, τα hits ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν απότομα τη στιγμή της αστοχίας, όπου κατέρρευσε η δοκός, όπως επίσης και η ενέργεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Αριθμητική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς εγκάρσιας ρωγματομένης δοκού

8.1 Εισαγωγή

Η αριθμητική προσομοίωση έγινε με το λογισμικό πακέτο RS² (Phase² 9.0) της εταιρείας Rocscience. Το Phase είναι ένα διδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (finite element) για εφαρμογές εδαφομηχανικής και βραχομηχανικής (RS² = Rock and Soil 2-dimensional analysis program). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα μεγάλο εύρος κατασκευαστικών έργων που περιλαμβάνουν το σχέδιο της εκσκαφής, ευστάθεια πρανών, επίδραση υπόγειου υδροφόρου, πιθανοκρατική ανάλυση, στερεοποίηση εδαφών και παρέχει δυνατότητες δυναμικών αναλύσεων (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs2>).

Πολύπλοκα, πολλαπλών-σταδίων μοντέλα μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν και να αναλυθούν γρήγορα. Ενδεικτικά αναφέρονται σήραγγες σε συμπαγή, σκληρά πετρώματα, σήραγγες σε πτωχό σε μηχανικές ιδιότητες ή/και διακλασμένο πέτρωμα, υπόγειοι θάλαμοι παραγωγής ενέργειας, επιφανειακές εξορύξεις και πρανή, αναχώματα, προοδευτική αστοχία, αλληλεπίδραση της υποστήριξης και μια ποικιλία από άλλα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν εύκολα (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs2>).

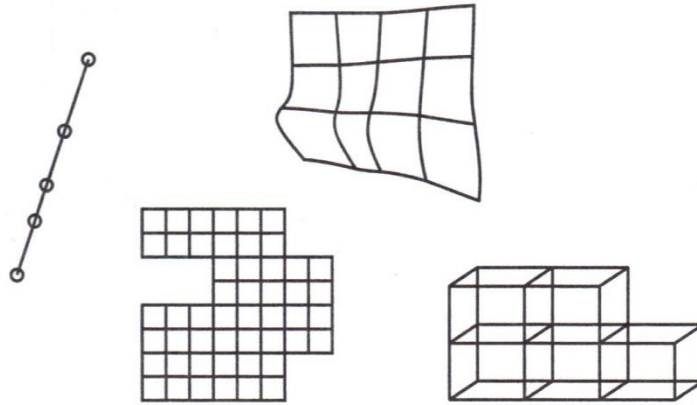
Το Phase προσφέρει ένα ευρύ φάσμα επιλογών από μεθόδους υποστήριξης. Στοιχεία επένδυσης μπορούν να εφαρμοστούν στην μοντελοποίηση συστημάτων εκτοξευόμενου σκυροδέματος, χαλύβδινων πλαισίων ή χαλύβδινων πλεγμάτων, τοίχων αντιστήριξης, πασσάλων, γεωυφασμάτων κ.α. (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs2>).

8.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ζητείται ο υπολογισμός των αγνώστων μεγεθών στους κόμβους, οι οποίοι δημιουργούνται από τη διαίρεση του πεδίου σε στοιχεία. Στη συνέχεια, με τη θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν την κατανομή των μεγεθών στα εσωτερικά σημεία κάθε στοιχείου, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή των μεγεθών αυτών σε κάθε σημείο του πεδίου με τους κόμβους του στοιχείου αυτού (Αγιουτάντης, 2010).

Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα ελαστικότητας (ή γενικότερα παραμόρφωσης των υλικών) σε δύο ή τρεις διαστάσεις περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Desai, 1979):

- Διαίρεση του πεδίου, το οποίο εξετάζεται σε κατάλληλα στοιχεία. Η διαίρεση πεδίων με ακανόνιστη γεωμετρία γίνεται προσεγγιστικά με μικρά τμήματα (Σχήμα 8.1).



Σχήμα 8.1. Διαίρεση πεδίου.

- Επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων για την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο.
- Προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανηγμένη παραμόρφωση με τη μετατόπιση (strain – displacement) και των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανηγμένη παραμόρφωση (stress – strain), ώστε να συνδεθεί το αίτιο (τάση, δύναμη) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.
- Διατύπωση των καταστατικών (θεμελιωδών) εξισώσεων για κάθε στοιχείο (element equations).
- Υπέρθωση (άθροιση κατά κόμβο) των εξισώσεων των στοιχείων για τον προσδιορισμό του τελικού συστήματος και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών.
- Υπολογισμό της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.
- Υπολογισμό των δευτερογενών μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση (ανηγμένες παραμορφώσεις, τάσεις, κλπ).
- Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

Σημειώνεται ότι, τα στάδια αυτά είναι γενικά και αναφέρονται στα περισσότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Οι πρώτες εφαρμογές της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε θέματα Εδαφομηχανικής και Βραχομηχανικής, ή γενικότερα Γεωμηχανικής, εμφανίστηκαν αμέσως μετά την ανάπτυξη της μεθόδου σε θέματα αεροναυπηγικής και αντοχής των υλικών. Για την εφαρμογή, όμως, της μεθόδου σε γεωτεχνικά προβλήματα, πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι δεν υφίστανται στα άλλα πεδία εφαρμογής. Ο σημαντικότερος ίσως παράγοντας είναι ότι τα γεωυλικά δεν ακολουθούν κάποιο

συγκεκριμένο πρότυπο καταστατικής συμπεριφοράς (π.χ. ελαστικό, ελαστοπλαστικό, πλαστικό, ιξωδοελαστικό, κλπ), καθόσον από τη φύση τους είναι ανομοιογενή. Πρόσθετα προβλήματα εμφανίζονται από την ύπαρξη διακλάσεων, επίπεδων διαστρώσεων, κλπ. Λόγω των ανωτέρω δυσκολιών, στις περισσότερες εφαρμογές λαμβάνονται απλοποιημένα πρότυπα υλικών και συμπεριφοράς, γεγονός που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την εφαρμογή της μεθόδου. Παρ'όλα αυτά, η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι πολύ χρήσιμη στην εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός σχηματισμού, καθώς προσφέρει δυνατότητες λεπτομερούς περιγραφής ενός σχηματισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό δεν επιλύει το χρόνιο πρόβλημα που εμφανίζεται στα γεωτεχνικά προβλήματα ή έργα και το οποίο είναι η έλλειψη επαρκών και επακριβών στοιχείων όσον αφορά στην κατανομή των ιδιοτήτων των διαφόρων γεωυλικών (Αγιουτάντης,2010).

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί βασικά μία αριθμητική μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων με συγκεκριμένο γεωμετρικό τόπο εφαρμογής, στον οποίο τίθενται και οι συνοριακές συνθήκες. Με την ίδια μεθοδολογία που αναπτύσσεται παρακάτω για προβλήματα ελαστικότητας, είναι δυνατόν να επιλυθούν και άλλα προβλήματα με παρόμοιες διαφορικές εξισώσεις (Αγιουτάντης,2010).

8.3 Αριθμητική προσομοίωση δοκού γύψου (Δοκός 4)

Οι ιδιότητες που βάλαμε στις παραμέτρους του προγράμματος είναι οι παρακάτω:

Χάλυβας

- Initial Element Loading: Body Force Only
- Unit Weight: 0.072 MN/m³
- Material Type: Elastic
- Poisson's Ratio: 0.3
- Young's Modulus: 210.000 MPa

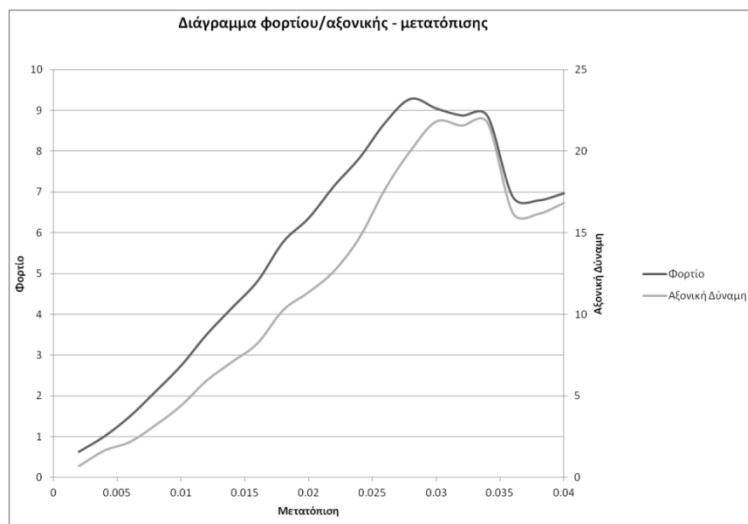
Γύψος

- Initial Element Loading: Body Force Only
- Failure Criterion: Mohr – Coulomb
- Material Type: Plastic
- Tensile Strength (peak): 1,6366 MPa
- Tensile Strength (residual): 0 MPa
- Friction Angle (peak): 25°
- Cohesion (peak): 2,2243 MPa
- Poisson's Ratio: 0.1
- Young's Modulus: 5260 MPa
- Joints: $\varphi = 89^\circ$

Για να γίνει σωστά η προσομοίωση και το τελικό αποτέλεσμα να προσεγγίζει το πραγματικό μοντέλο ώστε να μπορέσουν να συσχετιστούν τα δεδομένα της αριθμητικής προσομοίωσης με το πραγματικό πείραμα, εξετάστηκαν διάφορες τιμές για το shear stiffness k_s και το normal stiffness k_n , μέχρι να επιτύχουμε την κατάλληλη τιμή του φορτίου (ή προσεγγιστικά την ανώτερη τιμή από τους παραπάνω συνδυασμούς, στην κατάλληλη όμως κάθε φορά μετατόπιση στην οποία επιτεύχθηκε το μέγιστο φορτίο). Να τονιστεί ότι όπου αναφέρεται shear stiffness, εννοείται η διατμητική δυστροπία και normal stiffness η ορθή δυστροπία.

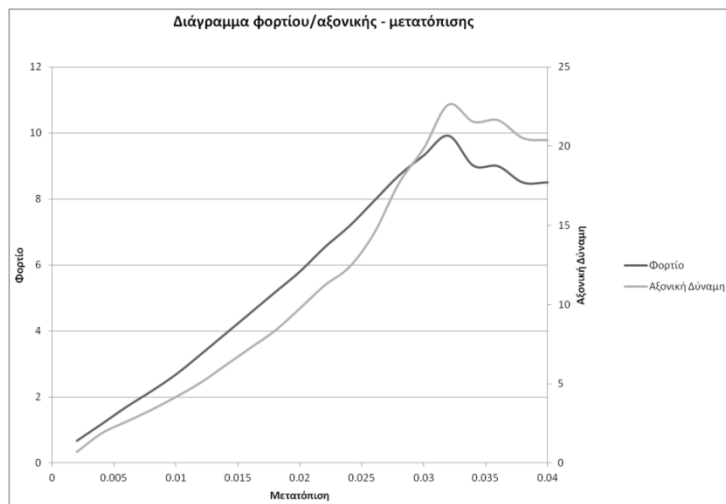
Η αριθμητική προσομοίωση συσχετίστηκε με την δοκό γύψου 4, γιατί σε αυτή την δοκό παρουσιάστηκε η κατάλληλη μορφή αστοχίας μιας δοκού voussoir. Το μέγιστο φορτίο διαμορφώθηκε στα 13,30kN στα 2259,80 sec σε μετατόπιση 7132 μm , ενώ η μέγιστη αξονική διαμορφώθηκε στα 41,33kN. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατακόρυφου φορτίου-αξονικής δύναμης κατά περίπτωση για διάφορους συνδυασμούς k_s και k_n .

$k_s=100 \text{ MPa/m} - k_n=1.000.000 \text{ MPa/m}$



Διάγραμμα 8.1

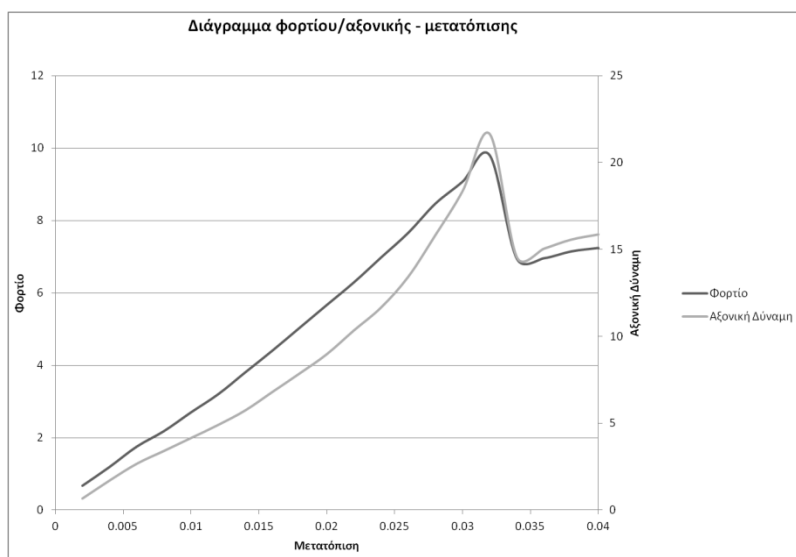
$k_s=100 \text{ MPa/m} - k_n=10.000.000 \text{ MPa/m}$



Διάγραμμα 8.2

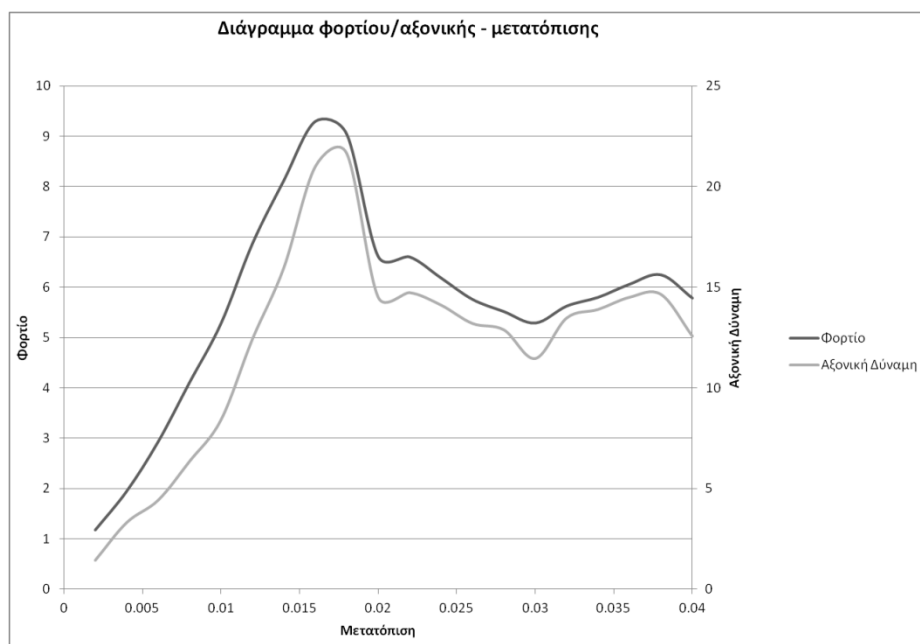
$k_s=100 \text{ MPa/m} - k_n=20.000.000 \text{ MPa/m}$

Παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα ότι, για δεδομένη τιμή shear stiffness, όσο αυξάνεται το normal stiffness, τόσο αυξάνεται το μέγιστο φορτίο όσο και η μετατόπιση στην οποία συμβαίνει αυτό.



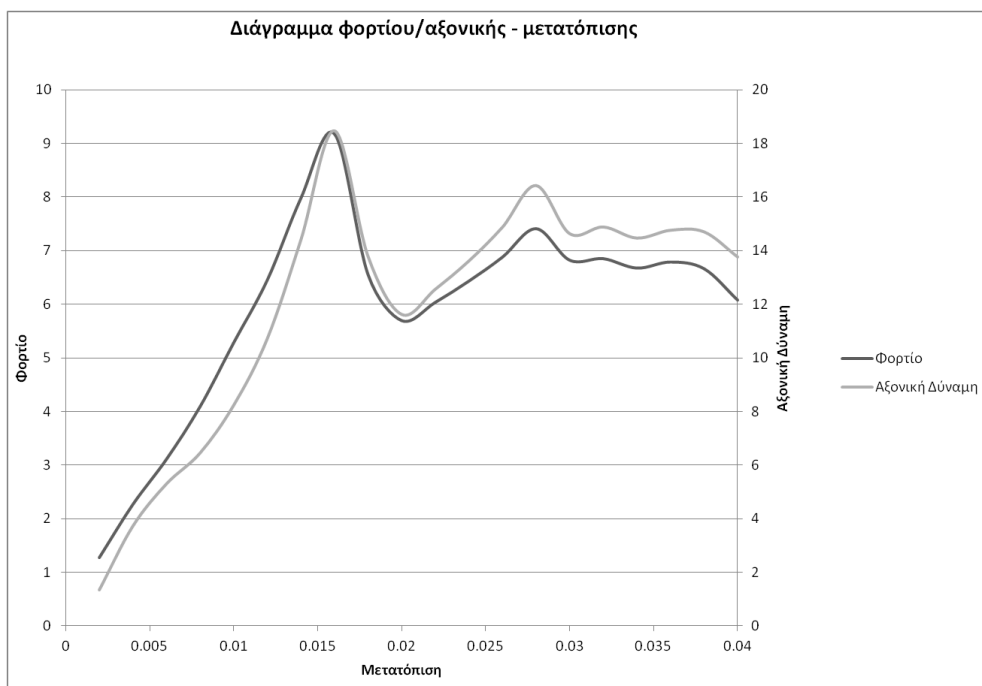
Διάγραμμα 8.3

$k_s=200 \text{ MPa/m} - k_n=1.000.000 \text{ MPa/m}$



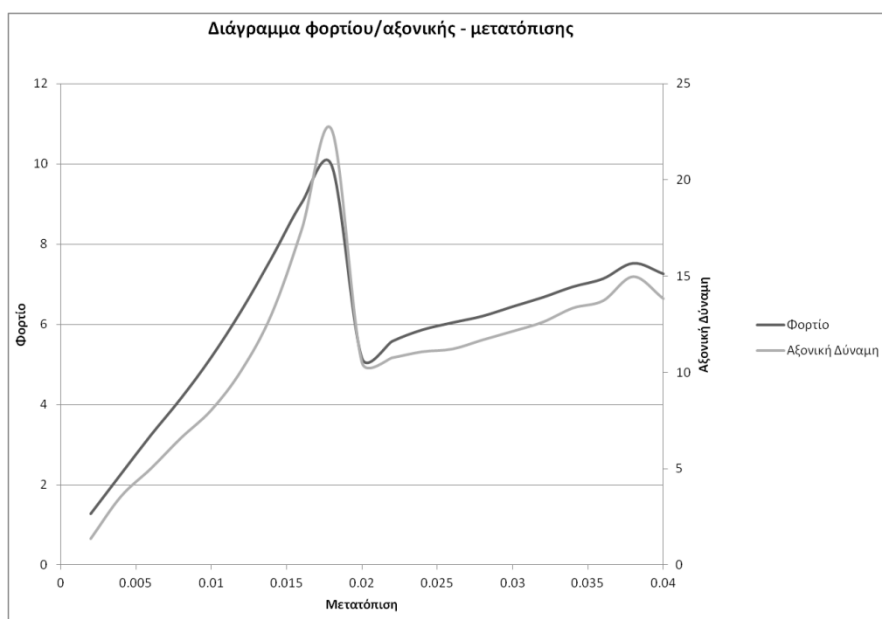
Διάγραμμα 8.4

$k_s=200 \text{ MPa/m} - k_n=10.000.000 \text{ MPa/m}$



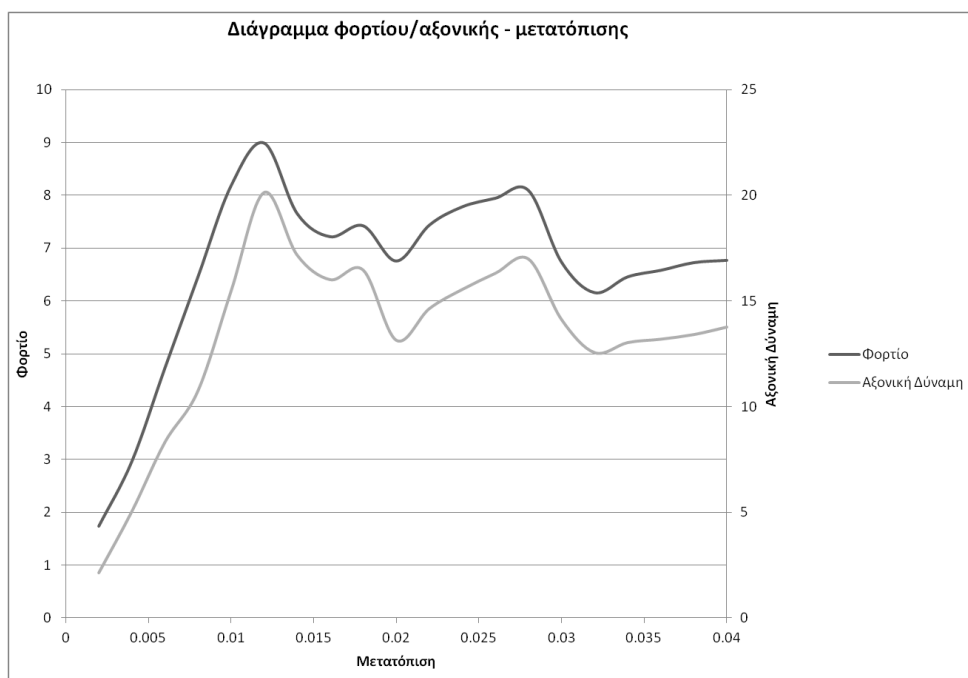
Διάγραμμα 8.5

$k_s=200 \text{ MPa/m} - k_n=20.000.000 \text{ MPa/m}$



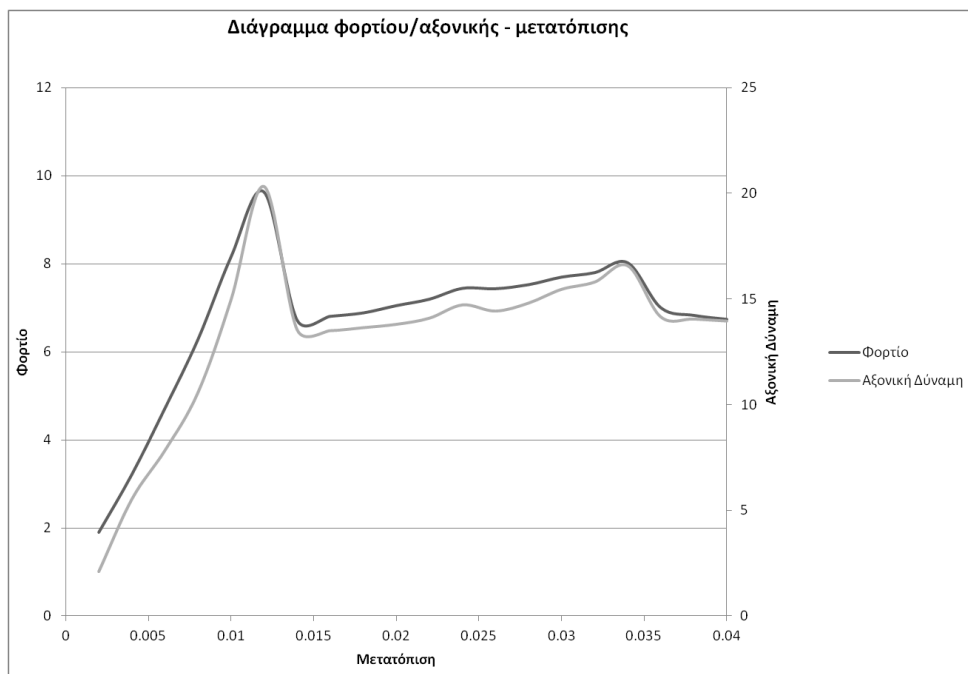
Διάγραμμα 8.6

$k_s=300 \text{ MPa/m} - k_n=1.000.000 \text{ MPa/m}$



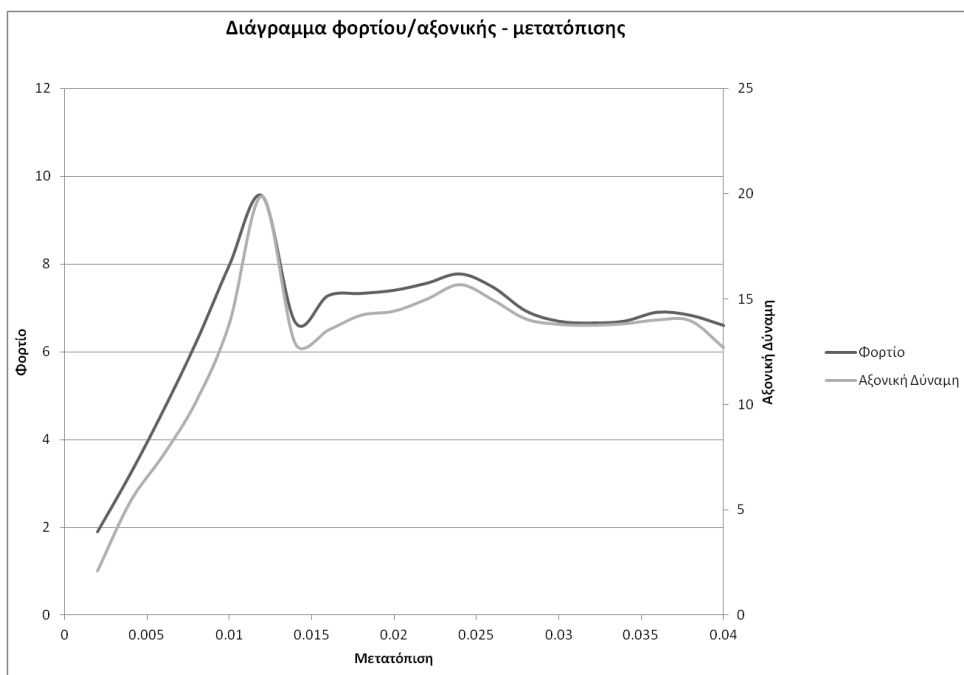
Διάγραμμα 8.7

$k_s=300 \text{ MPa/m} - k_n=10.000.000 \text{ MPa/m}$



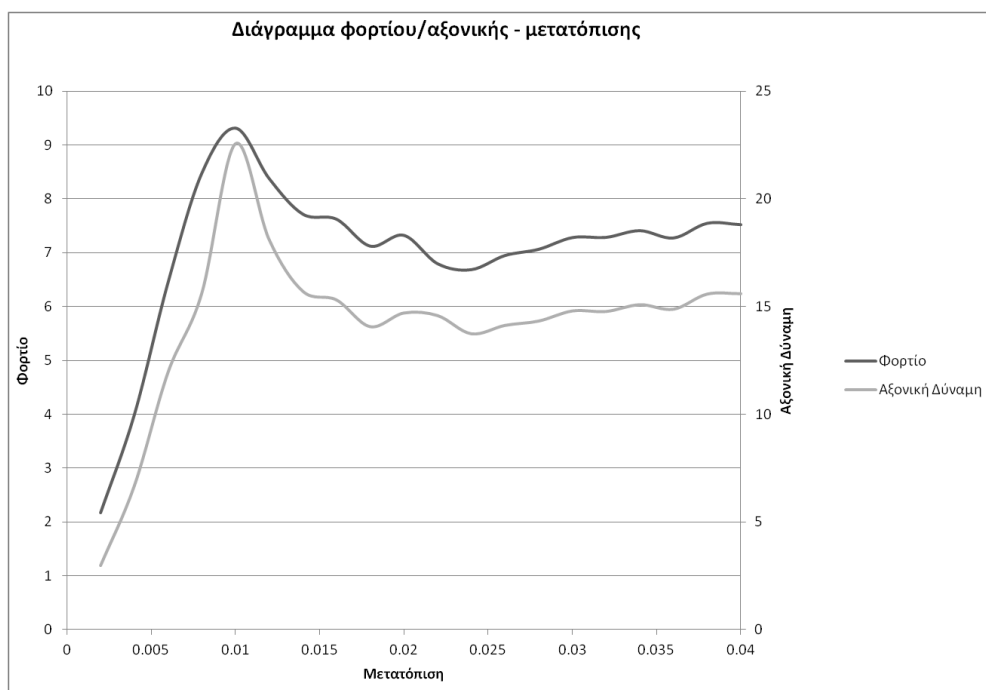
Διάγραμμα 8.8

$k_s=300 \text{ MPa/m} - k_n=20.000.000 \text{ MPa/m}$



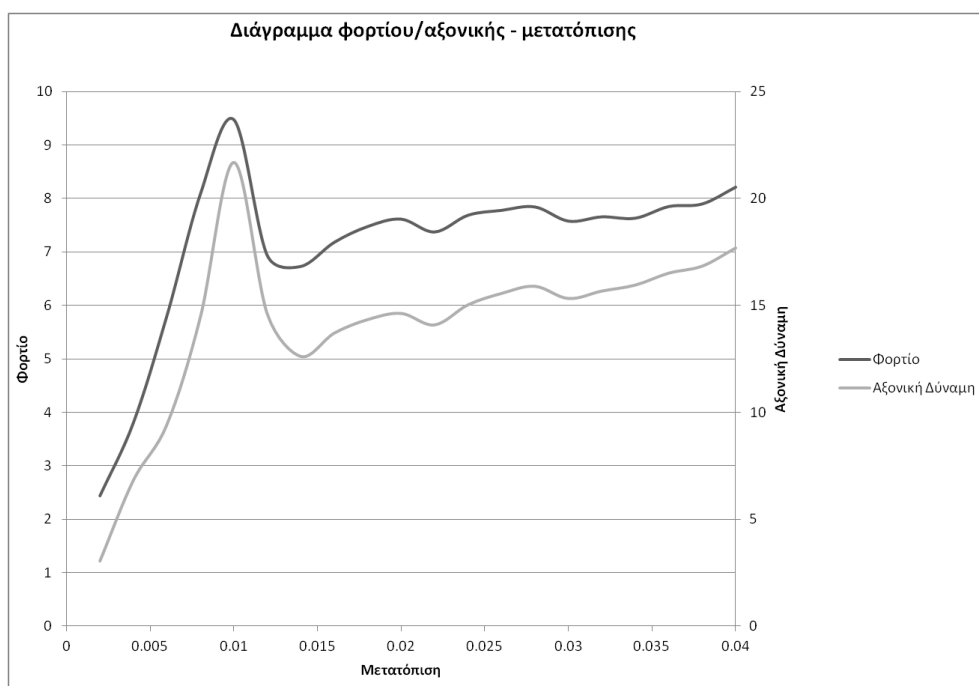
Διάγραμμα 8.9

$k_s=400 \text{ MPa/m} - k_n=1.000.000 \text{ MPa/m}$



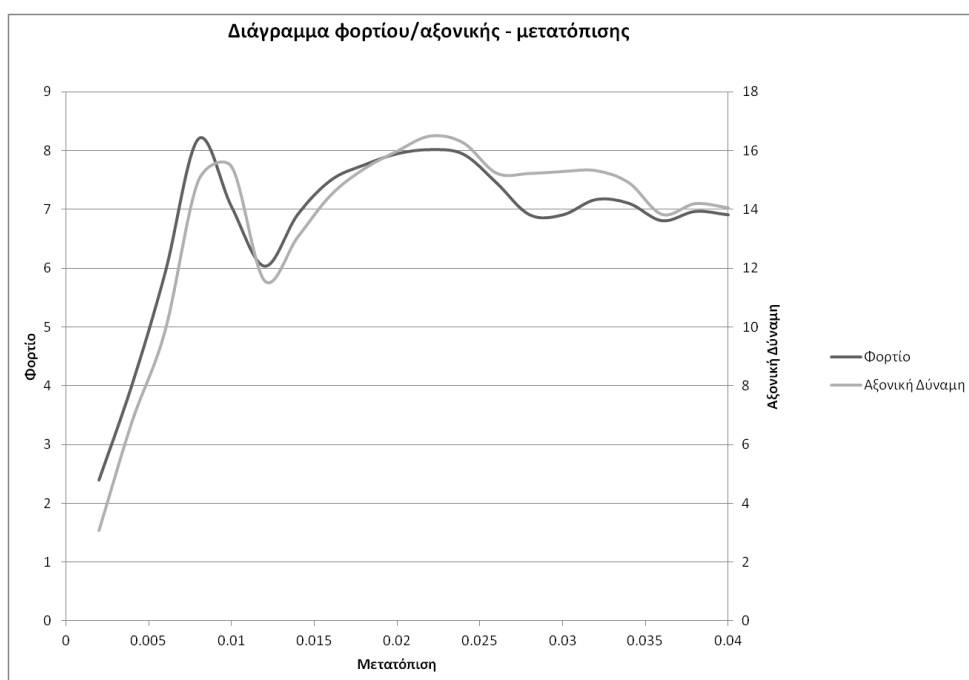
Διάγραμμα 8.10

$k_s=400 \text{ MPa/m} - k_n=10.000.000 \text{ MPa/m}$



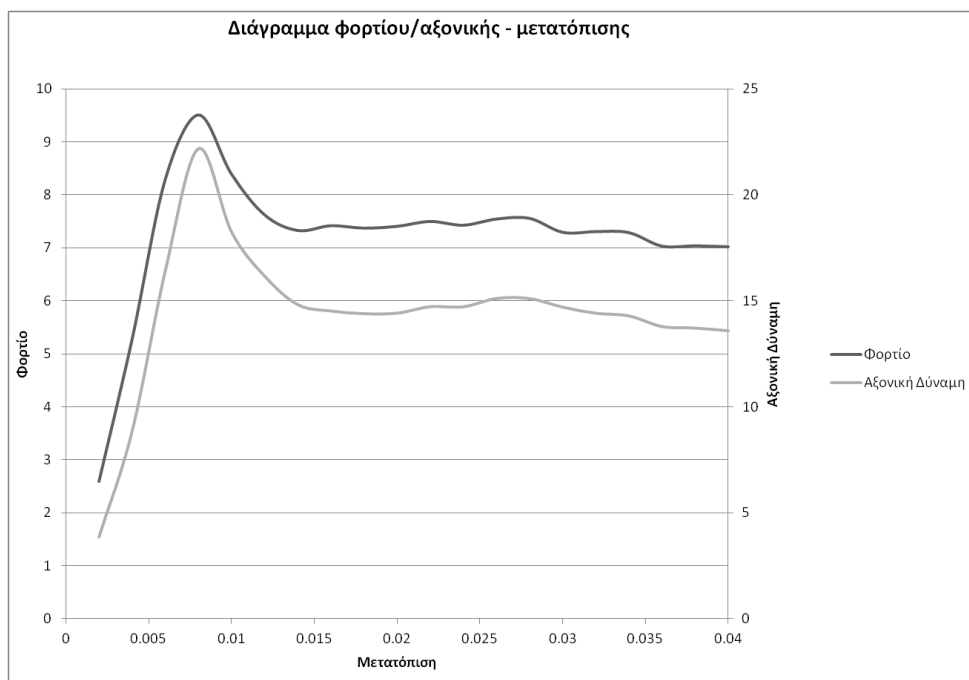
Διάγραμμα 8.11

$k_s=400 \text{ MPa/m} - k_n=20.000.000 \text{ MPa/m}$



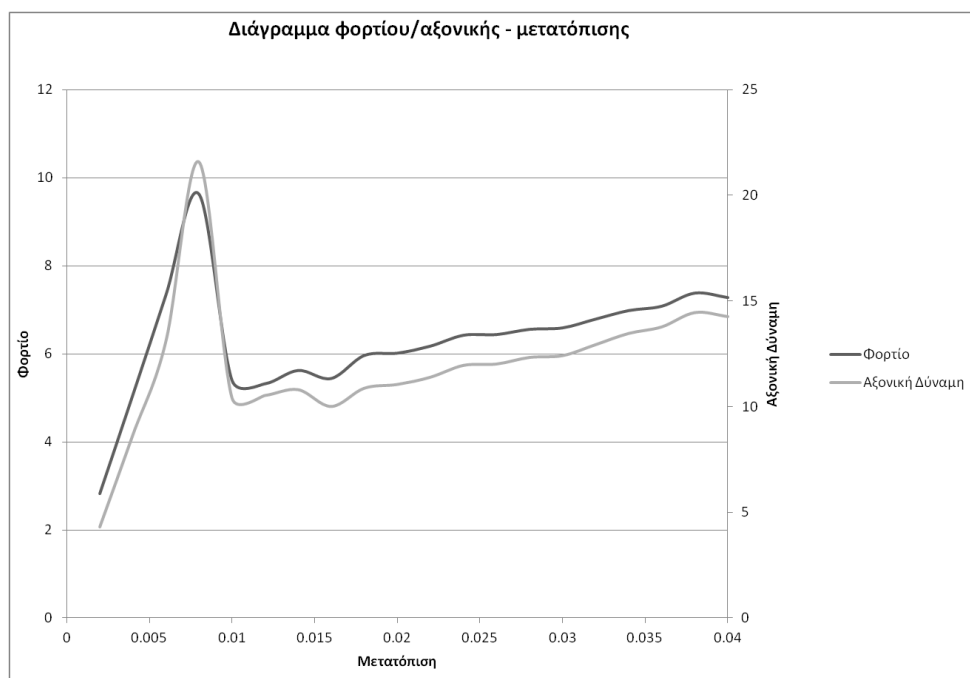
Διάγραμμα 8.12

$k_s=500 \text{ MPa/m} - k_n=1.000.000 \text{ MPa/m}$



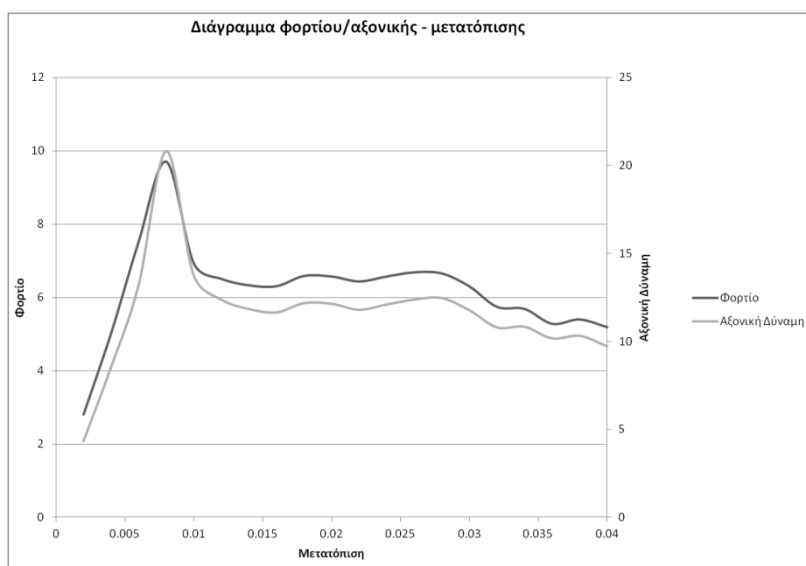
Διάγραμμα 8.13

$k_s=500 \text{ MPa/m} - k_n=10.000.000 \text{ MPa/m}$



Διάγραμμα 8.14

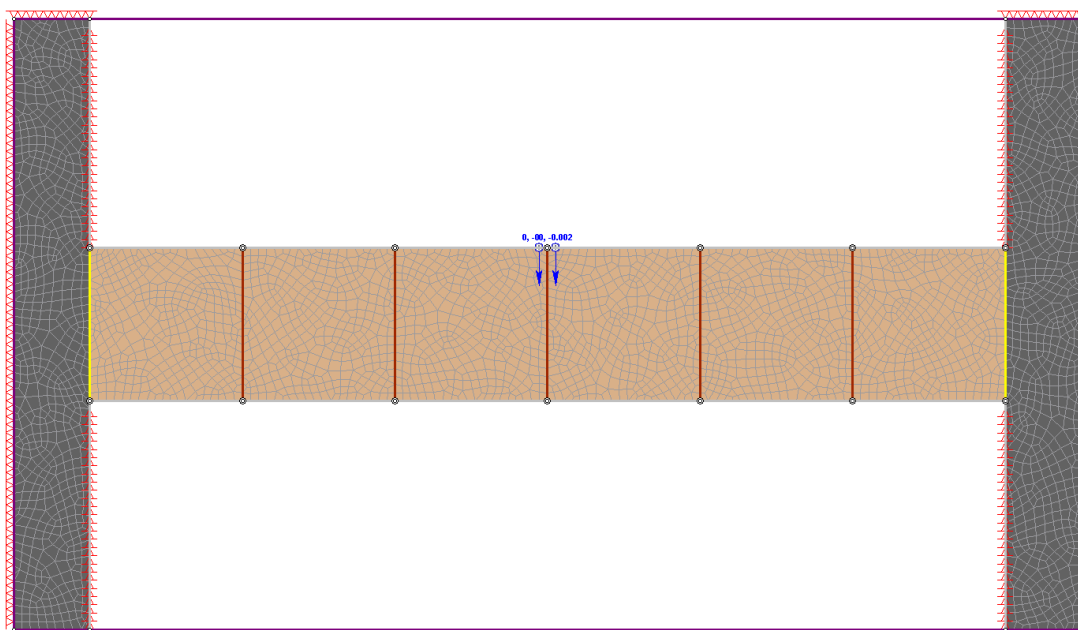
$k_s=500 \text{ MPa/m} - k_n=20.000.000 \text{ MPa/m}$



Διάγραμμα 8.15

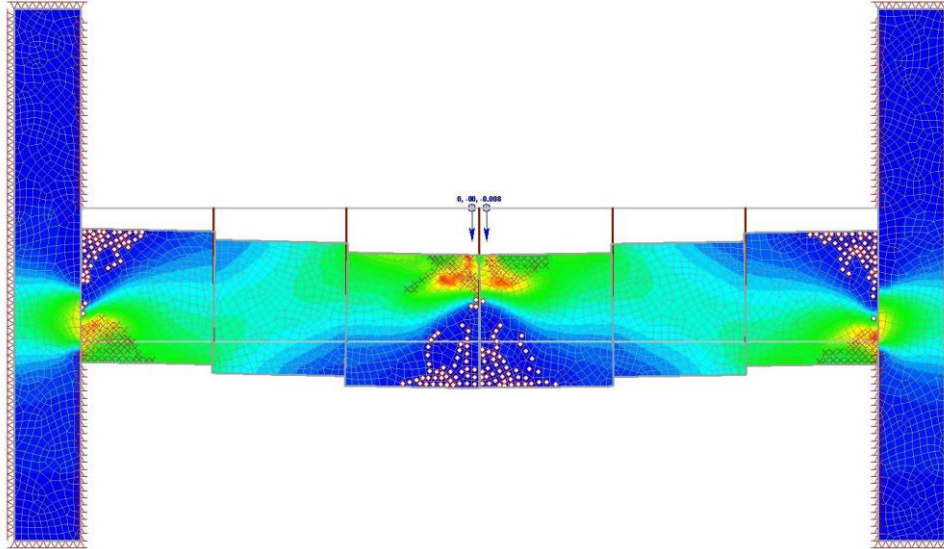
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για shear stiffness 500 MPa/m και normal stiffness 20.000.000 MPa/m, το μέγιστο φορτίο επιτυγχάνεται στα 0,007 m και είναι 9,69kN, η οποία είναι η βέλτιστη τιμή δεδομένων των συνθηκών που τέθηκαν στις παραμέτρους, ενώ στην πειραματική διαδικασία το μέγιστο έφτασε 13,30kN στα 0,007m. Επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το shear stiffness τόσο μειώνεται η μετατόπιση στην οποία παρατηρείται το μέγιστο φορτίο, αλλά το πρόβλημα σε αυτό το μοντέλο είναι ότι παρουσιάζεται εφελκυσμός σε περιοχές όπου δεν εμφανίστηκαν κανονικά στην πειραματική δοκό.

Στο παρακάτω σχήμα 8.2, φαίνεται το αρχικό μοντέλο της δοκού όπως δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα.

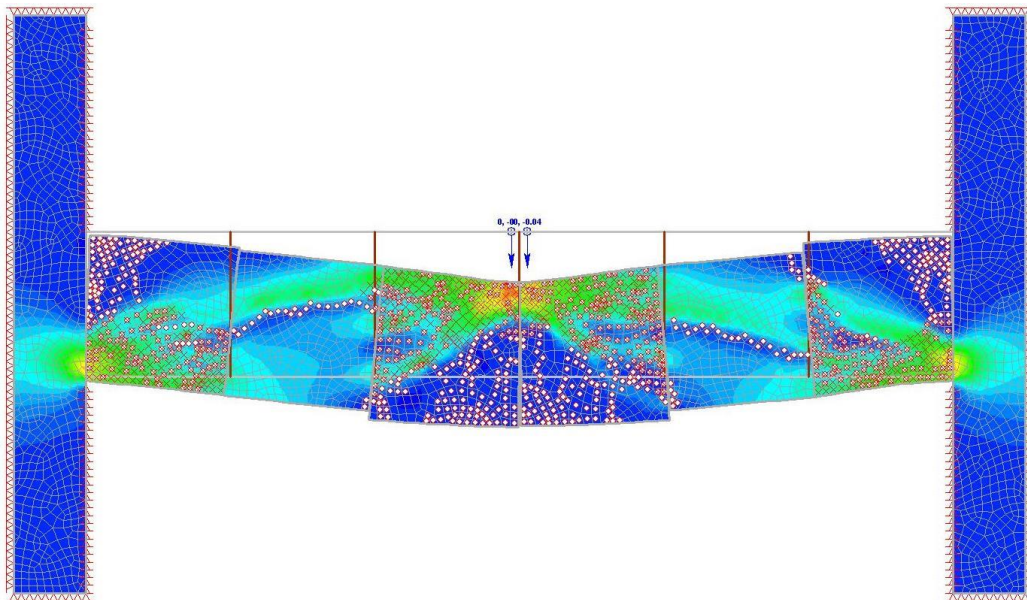


Σχήμα 8.2. Το αρχικό μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού στην προσομοίωση.

Στα παρακάτω δύο σχήματα 8.3 και 8.4, φαίνονται αντίστοιχα μετά την προσομοίωση το μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού, στο στάδιο 5, όπου παρατηρήθηκε το μέγιστο φορτίο των 9,69kN (με μετατόπιση 0,007m), και το τελικό στάδιο 20, με την δοκό να φτάνει στην τελική αστοχία με μέγιστη μετατόπιση 40.000μm.



Σχήμα 8.3. Το μοντέλο της γύψου στο στάδιο 5.



Σχήμα 8.4. Το τελικό μοντέλο της δοκού στο στάδιο 20.

8.4 Αριθμητική προσομοίωση δοκού τσιμέντου (Δοκός 6)

Οι ιδιότητες που βάλαμε στις παραμέτρους του προγράμματος είναι οι παρακάτω:

Χάλυβας

- Initial Element Loading: Body Force Only
- Unit Weight: 0.072 MN/m³
- Material Type: Elastic
- Poisson's Ratio: 0.3
- Young's Modulus: 210.000 MPa

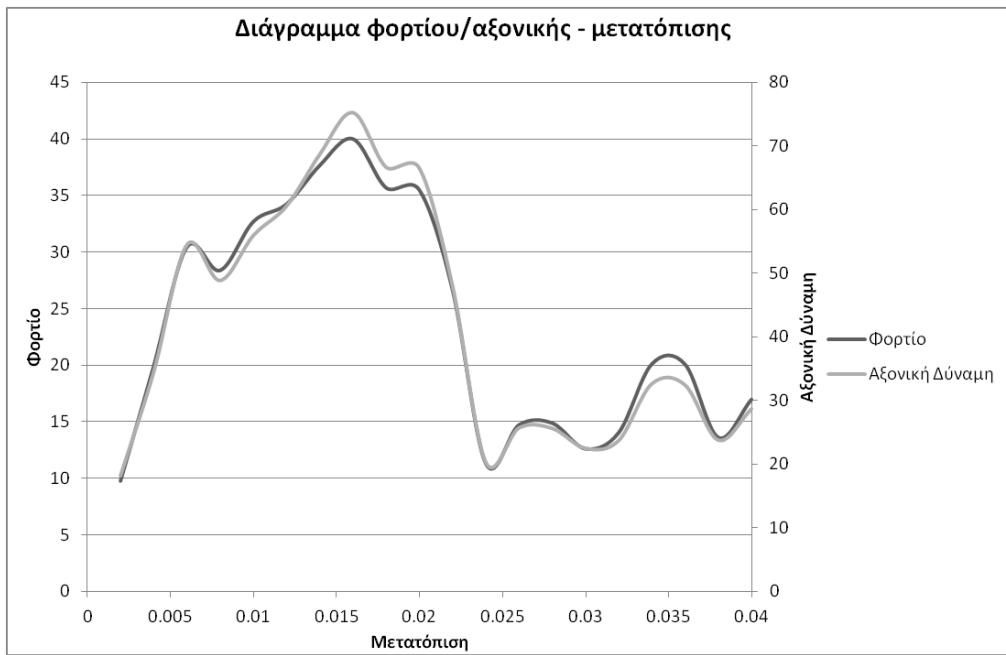
Τσιμέντο

- Initial Element Loading: Body Force Only
- Failure Criterion: Mohr – Coulomb
- Material Type: Plastic
- Tensile Strength (peak): 2,963 MPa
- Tensile Strength (residual): 0 MPa
- Friction Angle (peak): 40°
- Cohesion (peak): 8,5847 MPa
- Poisson's Ratio: 0.2
- Young's Modulus: 23600 MPa
- Joints: $\varphi = 89^\circ$

Για να γίνει σωστά η προσομοίωση και το τελικό αποτέλεσμα να προσεγγίζει το πραγματικό μοντέλο ώστε να μπορέσουν να συσχετιστούν τα δεδομένα της αριθμητικής προσομοίωσης με το πραγματικό πείραμα, εξετάστηκαν διάφορες τιμές για το shear stiffness k_s και το normal stiffness k_n , μέχρι να επιτύχουμε την κατάλληλη τιμή του φορτίου (ή προσεγγιστικά την ανώτερη τιμή από τους παραπάνω συνδυασμούς, στην κατάλληλη όμως κάθε φορά μετατόπιση στην οποία επιτεύχθηκε το μέγιστο φορτίο).

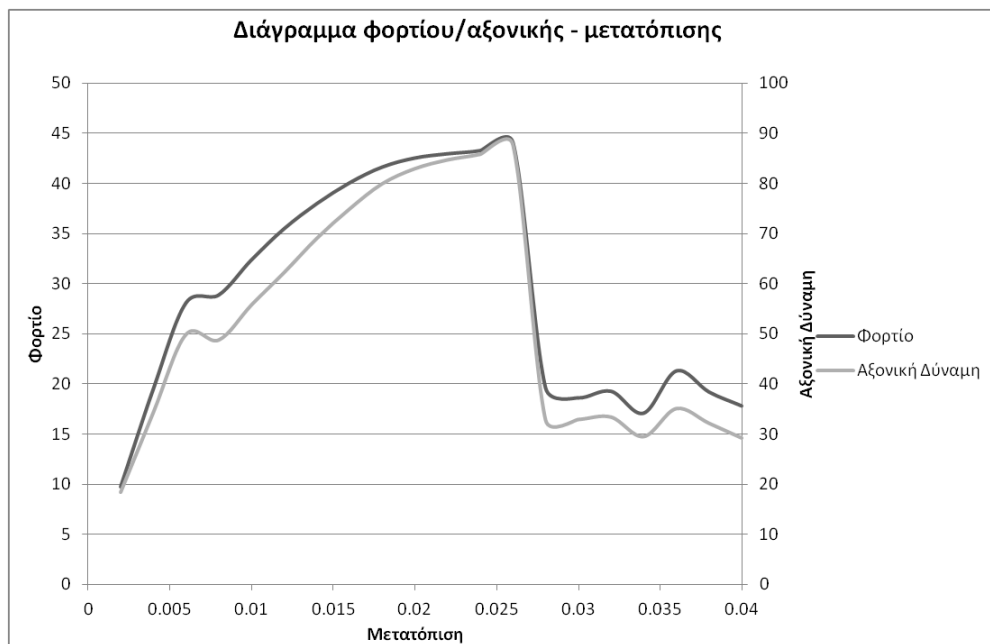
Η αριθμητική προσομοίωση συσχετίστηκε με την δοκό τσιμέντου 6, γιατί σε αυτή την δοκό παρουσιάστηκε η κατάλληλη μορφή αστοχίας μιας δοκού voussoir. Το μέγιστο φορτίο διαμορφώθηκε στα 36,07kN στα 2463,60 sec σε μετατόπιση 9269 μm , ενώ η μέγιστη αξονική διαμορφώθηκε στα 109,543kN. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-αξονικής κατά περίπτωση για διάφορους συνδυασμούς k_s και k_n .

$k_s=2000 \text{ MPa/m} - k_n=10.000.000 \text{ MPa/m}$



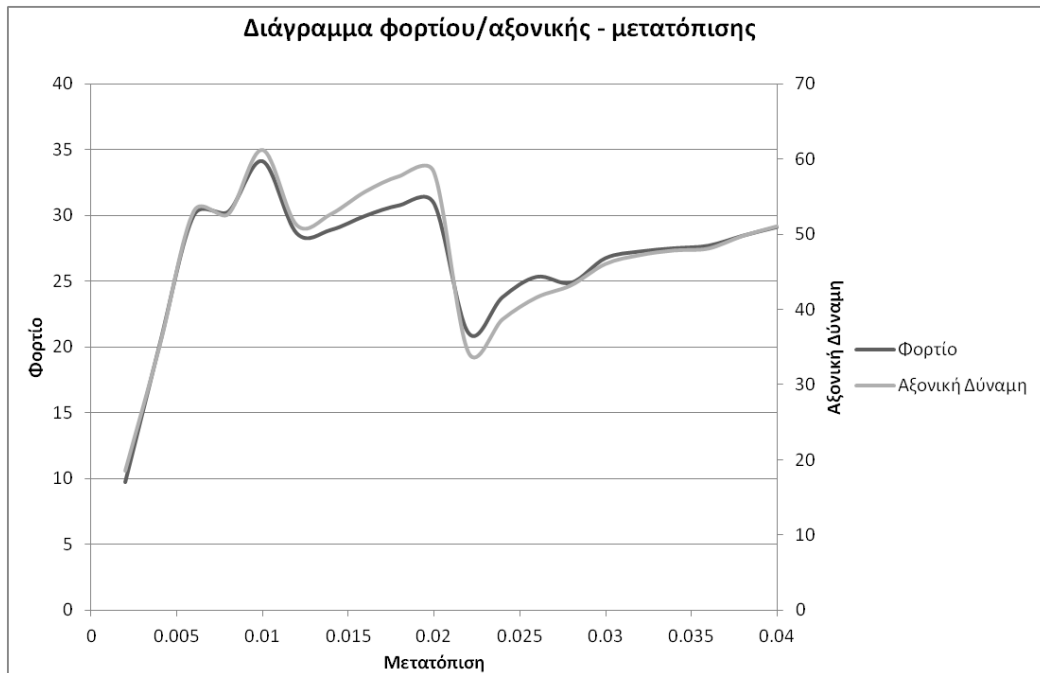
Διάγραμμα 8.16

$k_s=2000 \text{ MPa/m} - k_n=20.000.000 \text{ MPa/m}$



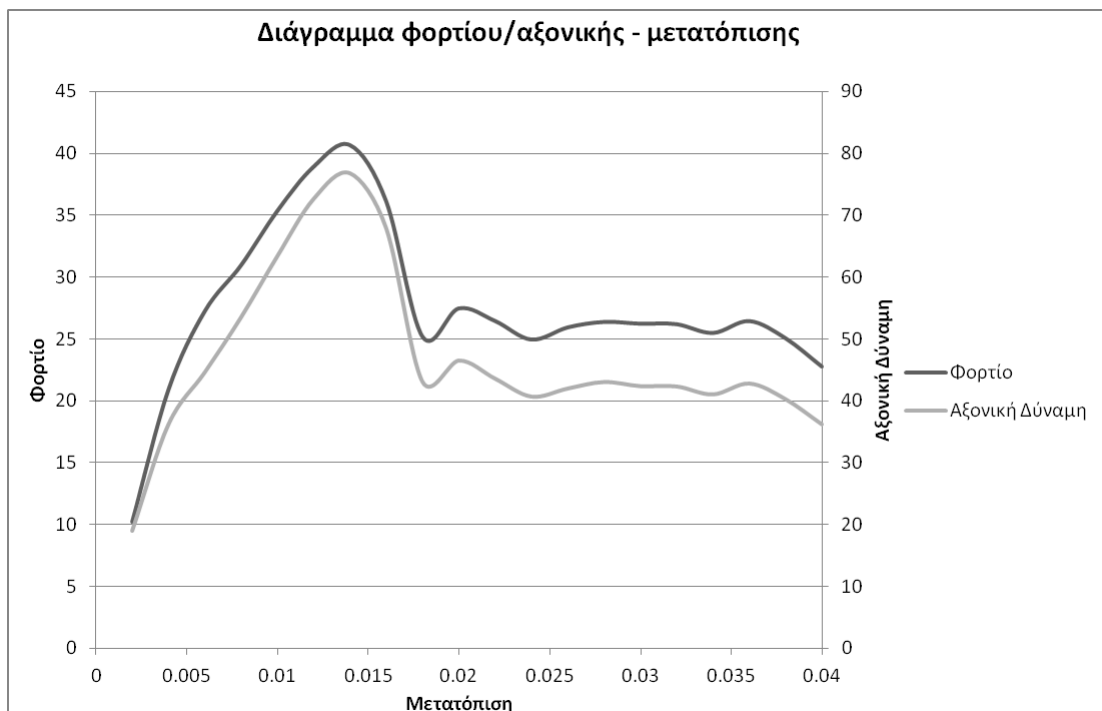
Διάγραμμα 8.17

$k_s=2000 \text{ MPa/m} - k_n=50.000.000 \text{ MPa/m}$



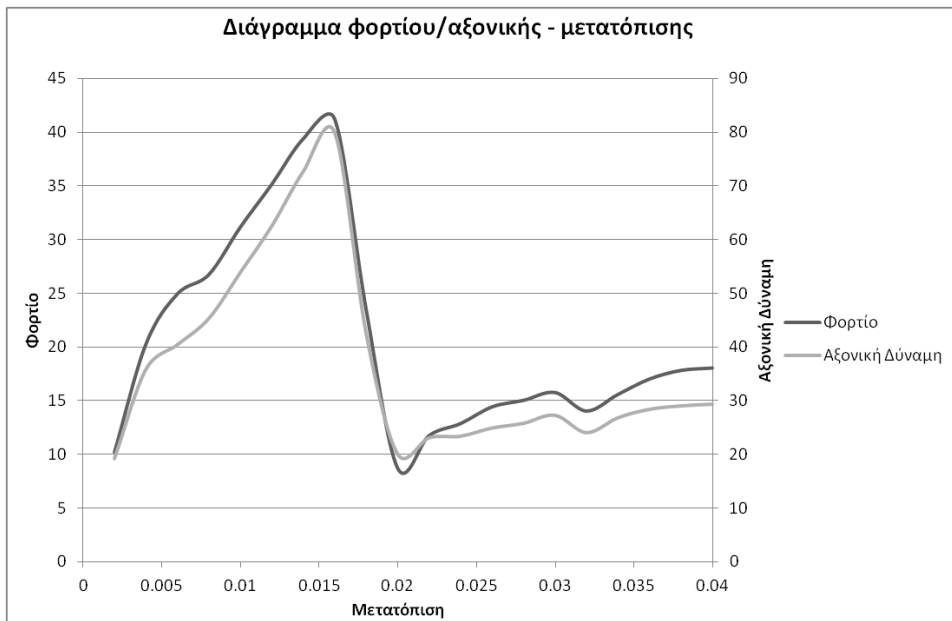
Διάγραμμα 8.18

$k_s=2100 \text{ MPa/m} - k_n=10.000.000 \text{ MPa/m}$



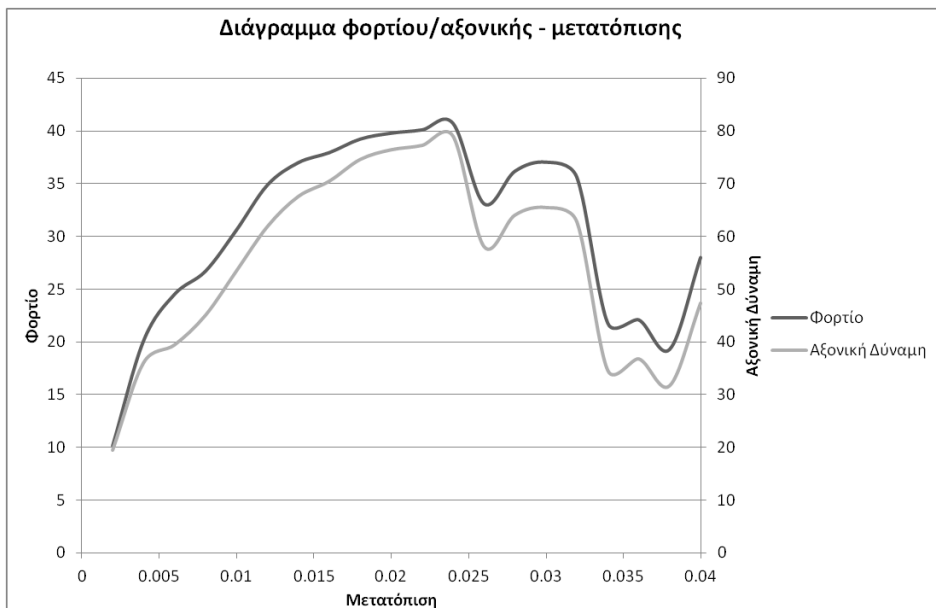
Διάγραμμα 8.19

$k_s=2100 \text{ MPa/m} - k_n=20.000.000 \text{ MPa/m}$



Διάγραμμα 8.20

$k_s=2100 \text{ MPa/m} - k_n=50.000.000 \text{ MPa/m}$

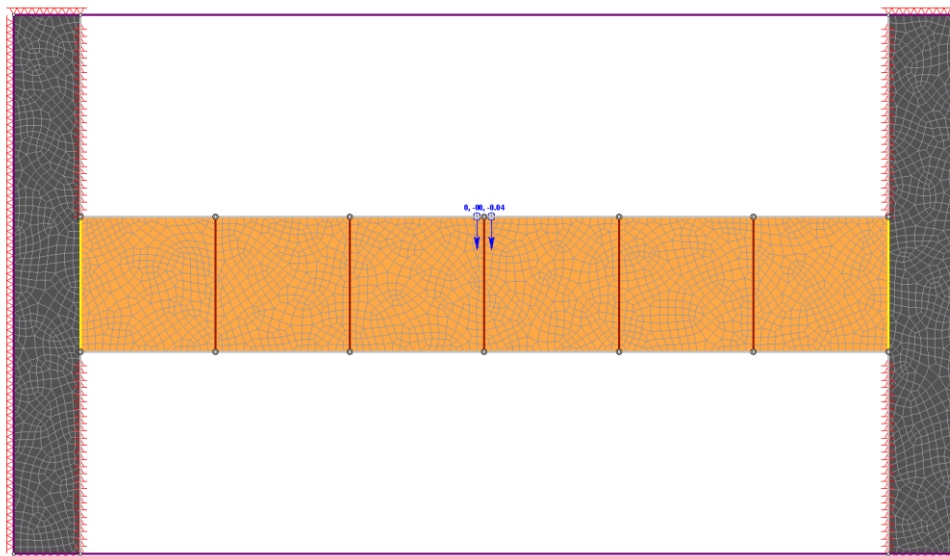


Διάγραμμα 8.21

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για shear stiffness 2000 MPa/m και normal stiffness 50.000.000 MPa/m, το μέγιστο φορτίο επιτυγχάνεται στα 0,009 m και είναι 33,95kN, περίπου όπως και στην πειραματική διαδικασία, στην οποία το μέγιστο φορτίο έφτασε 36,07kN στην ίδια μετατόπιση. Επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το shear stiffness τόσο αυξάνεται το μέγιστο φορτίο, ενώ όσο αυξάνεται το normal stiffness, τόσο αυξάνεται η μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο

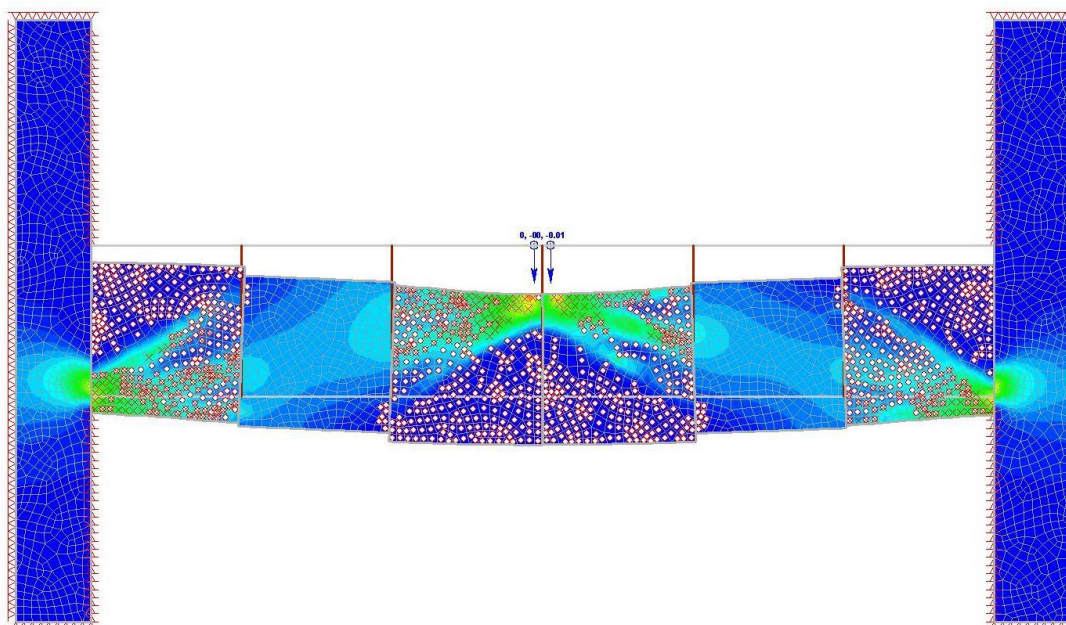
φορτίο, αλλά το πρόβλημα και σε αυτό το μοντέλο είναι ότι παρουσιάζεται εφελκυσμός σε περιοχές όπου δεν εμφανίστηκαν κανονικά στην πειραματική δοκό.

Στο παρακάτω σχήμα 8.5, φαίνεται το αρχικό μοντέλο της δοκού τσιμέντου όπως δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα.

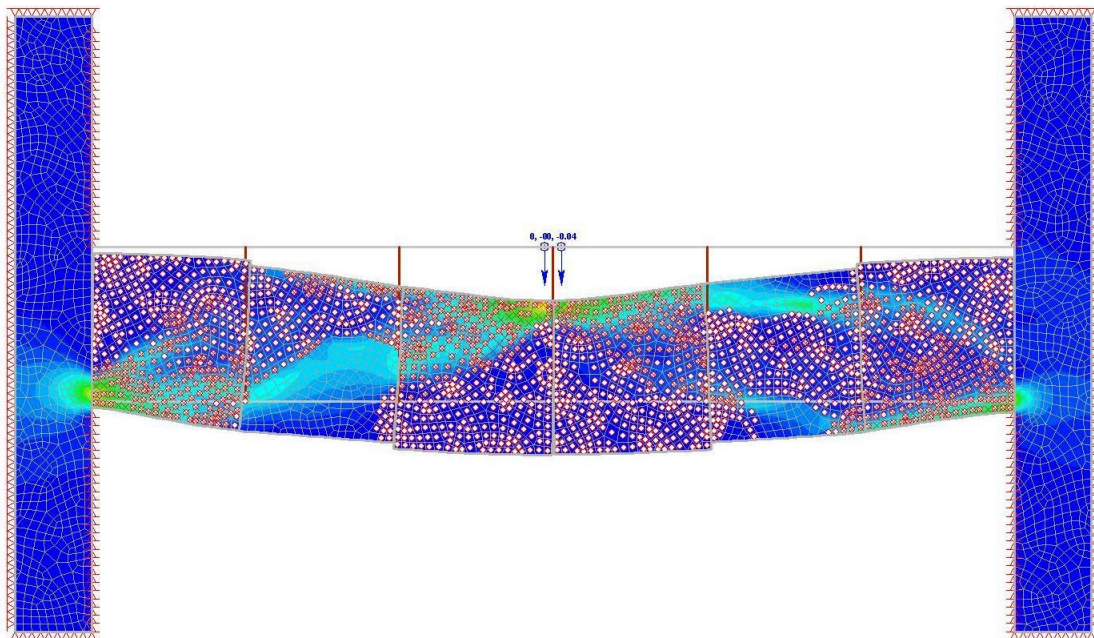


Σχήμα 8.5. Το αρχικό μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού τσιμέντου.

Στα παρακάτω δύο σχήματα 8.6 και 8.7, φαίνονται αντίστοιχα μετά την προσομοίωση το μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού, στο στάδιο 5, όπου παρατηρήθηκε το μέγιστο φορτίο των 33,95kN (με μετατόπιση 0,009m), και το τελικό στάδιο 20, με την δοκό να φτάνει στην τελική αστοχία με μέγιστη μετατόπιση 40.355μm.



Σχήμα 8.6. Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 5.



Σχήμα 8.7. Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 20.

8.5 Αριθμητική προσομοίωση δοκού μαρμάρου Διονύσου (Δοκός 7)

Οι ιδιότητες που βάλαμε στις παραμέτρους του προγράμματος είναι οι παρακάτω:

Χάλυβας

- Initial Element Loading: Body Force Only
- Unit Weight: 0.072 MN/m^3
- Material Type: Elastic
- Poisson's Ratio: 0.3
- Young's Modulus: 210.000 MPa

Μάρμαρο Διονύσου

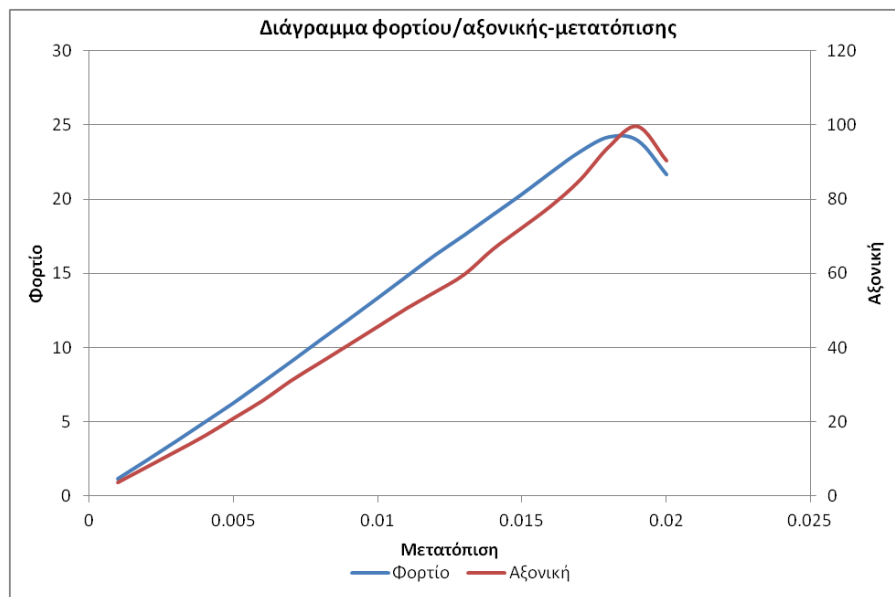
- Initial Element Loading: Body Force Only
- Failure Criterion: Mohr – Coulomb
- Material Type: Plastic
- Tensile Strength (peak): 8,5 MPa
- Friction Angle (peak): 40°
- Cohesion (peak): 18,42 MPa
- Poisson's Ratio: 0.18
- Young's Modulus: 74500 MPa
- Joints: $\varphi = 89^\circ$

Για να γίνει σωστά η προσομοίωση και το τελικό αποτέλεσμα να προσεγγίζει το πραγματικό μοντέλο ώστε να μπορέσουν να συσχετιστούν τα δεδομένα της αριθμητικής προσομοίωσης με το πραγματικό πείραμα, εξετάστηκαν διάφορες τιμές για το shear stiffness k_s και το normal stiffness k_n , μέχρι να επιτύχουμε την κατάλληλη τιμή του φορτίου (ή προσεγγιστικά την ανώτερη τιμή από τους παραπάνω

συνδυασμούς, στην κατάλληλη όμως κάθε φορά μετατόπιση στην οποία επιτεύχθηκε το μέγιστο φορτίο).

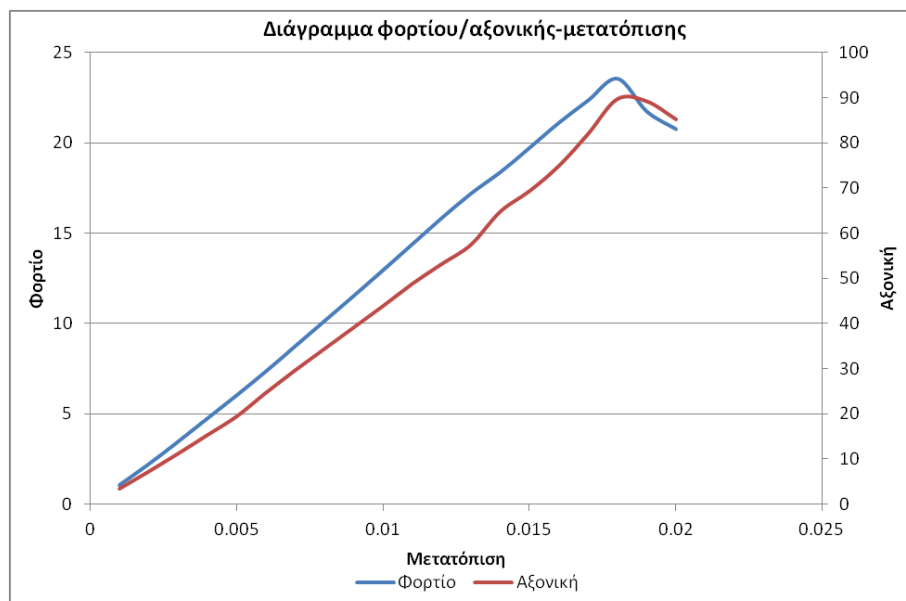
Η αριθμητική προσομοίωση συσχετίστηκε με την δοκό μαρμάρου Διονύσου (Δοκός 7). Το μέγιστο φορτίο διαμορφώθηκε στα 6,53kN στα 1132 sec σε μετατόπιση 5809 μm, ενώ η μέγιστη αξονική διαμορφώθηκε στα 32,78kN. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-αξονικής κατά περίπτωση για διάφορους συνδυασμούς k_s και k_n .

$k_s=1000 \text{ MPa/m} - k_n=50.000.000 \text{ MPa/m}$



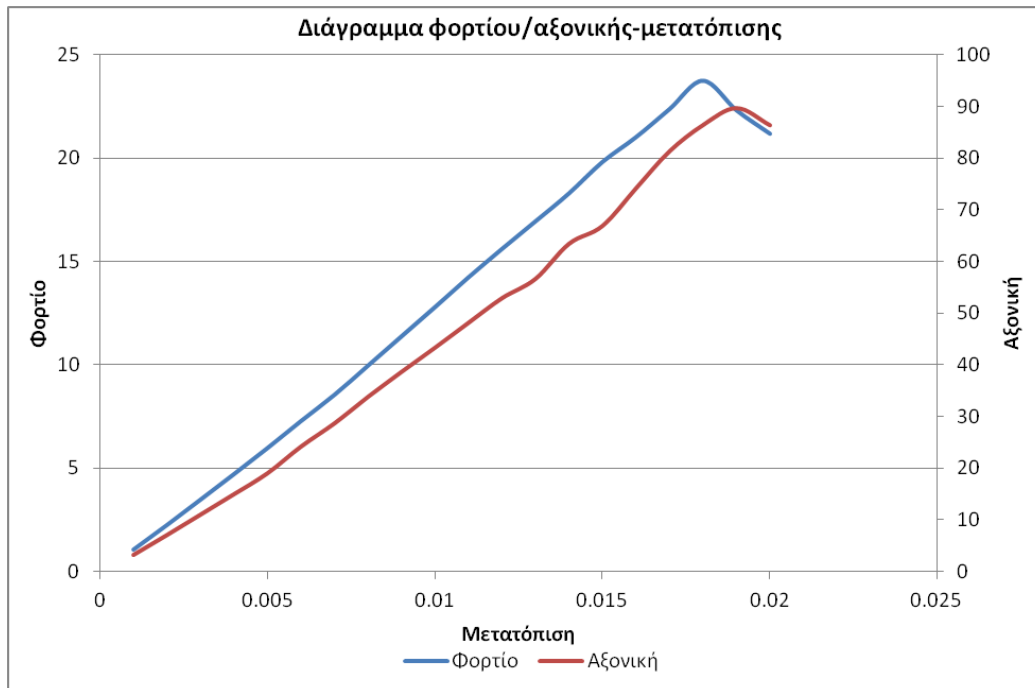
Διάγραμμα 8.22

$k_s=1000 \text{ MPa/m} - k_n=150.000.000 \text{ MPa/m}$



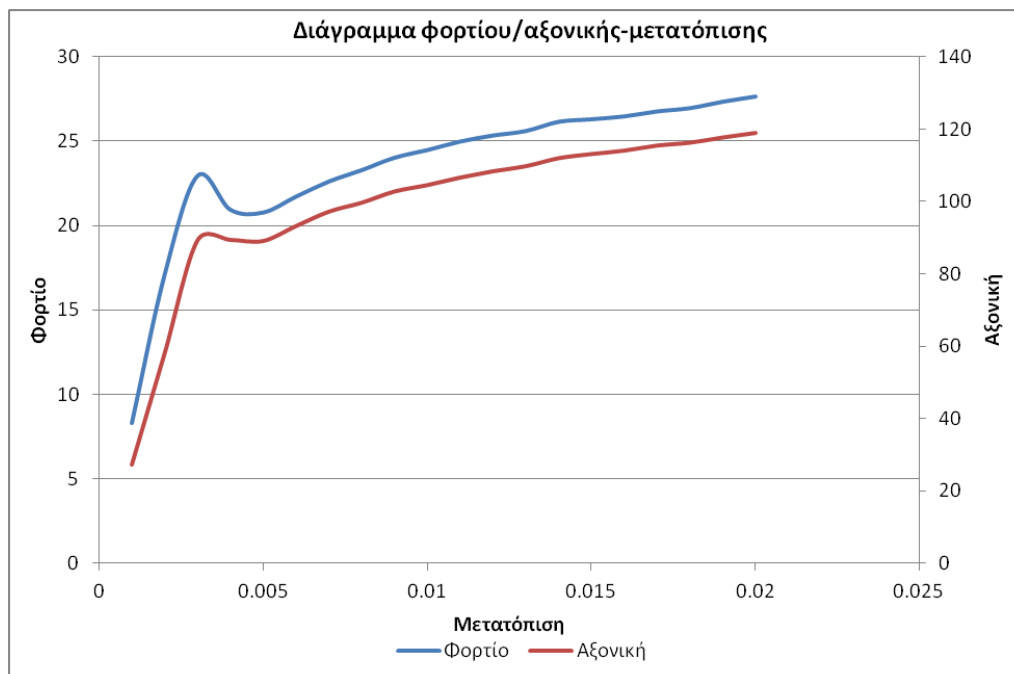
Διάγραμμα 8.23

$k_s=1000 \text{ MPa/m} - k_n=200.000.000 \text{ MPa/m}$



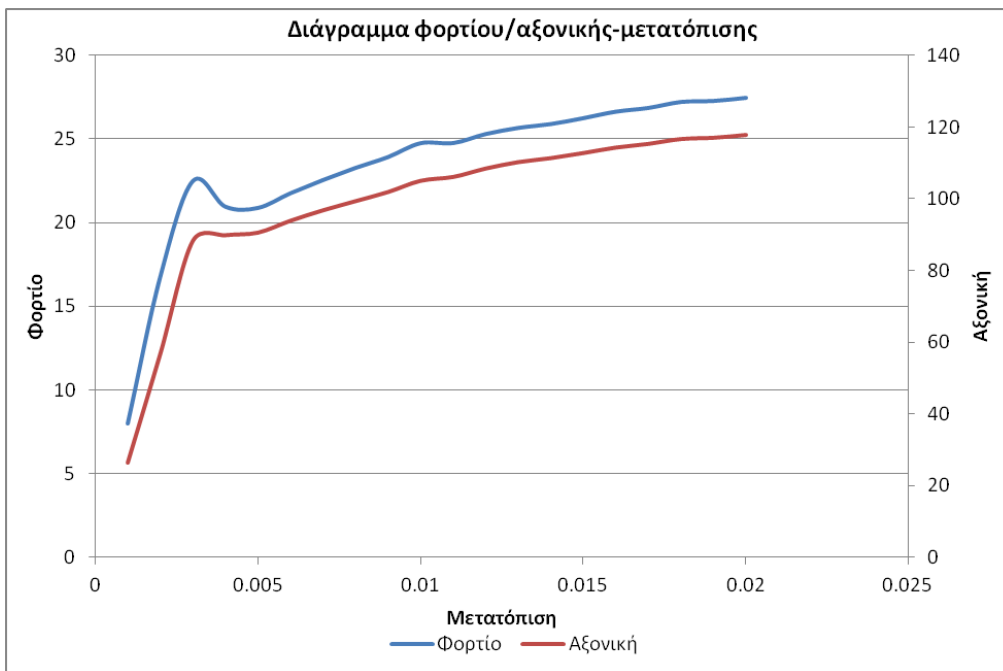
Διάγραμμα 8.24

$k_s=10.000 \text{ MPa/m} - k_n=50.000.000 \text{ MPa/m}$



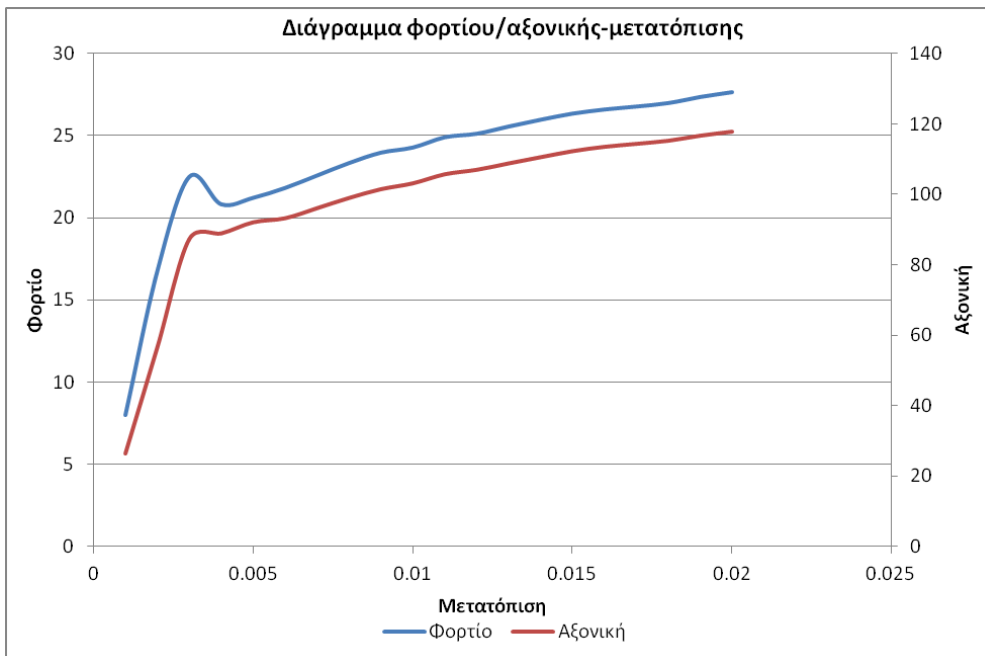
Διάγραμμα 8.25

$k_s=10.000 \text{ MPa/m} - k_n=150.000.000 \text{ MPa/m}$



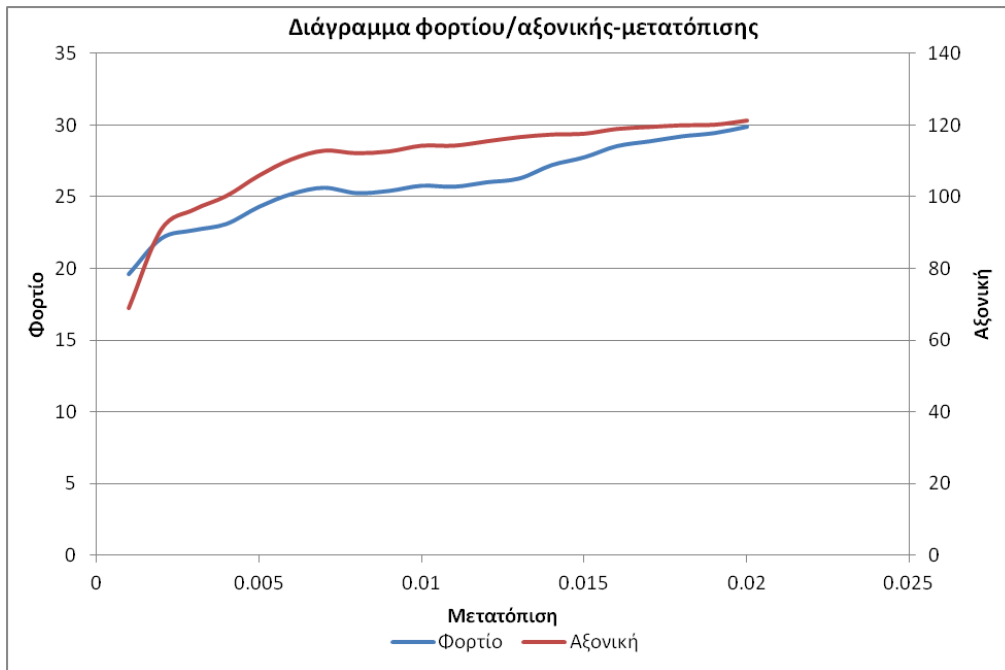
Διάγραμμα 8.26

$k_s=10.000 \text{ MPa/m} - k_n=200.000.000 \text{ MPa/m}$



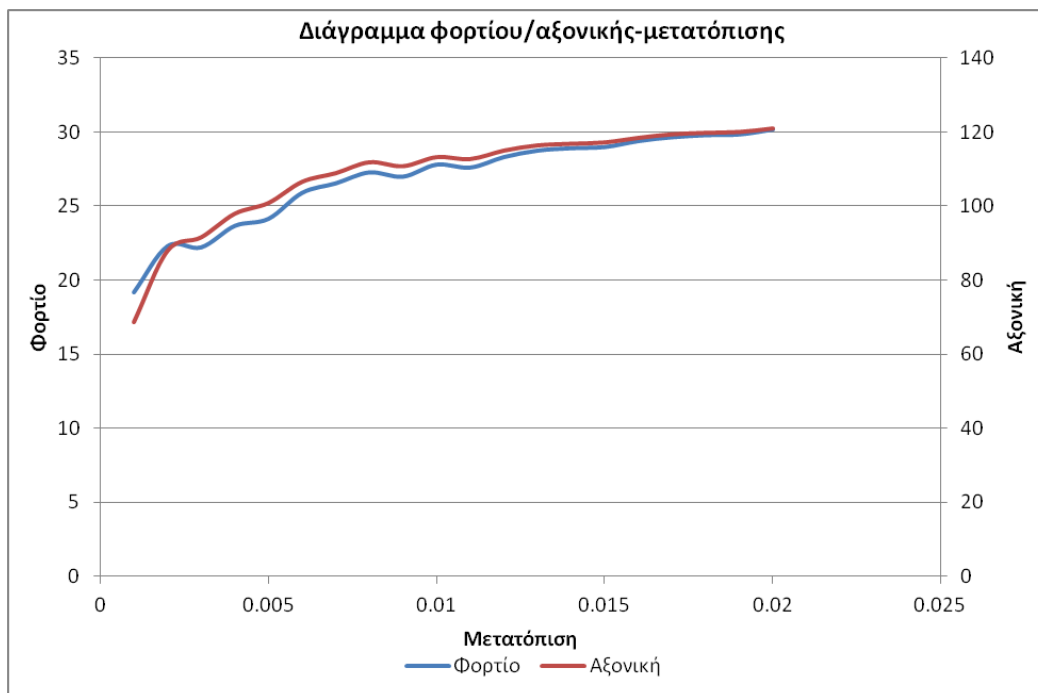
Διάγραμμα 8.27

$k_s=100.000 \text{ MPa/m} - k_n=50.000.000 \text{ MPa/m}$



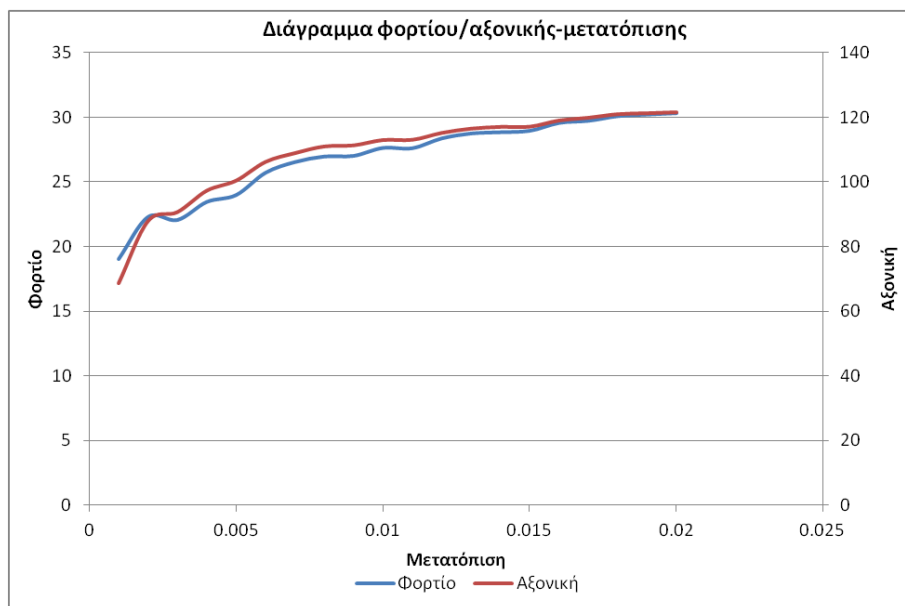
Διάγραμμα 8.28

$k_s=100.000 \text{ MPa/m} - k_n=150.000.000 \text{ MPa/m}$



Διάγραμμα 8.29

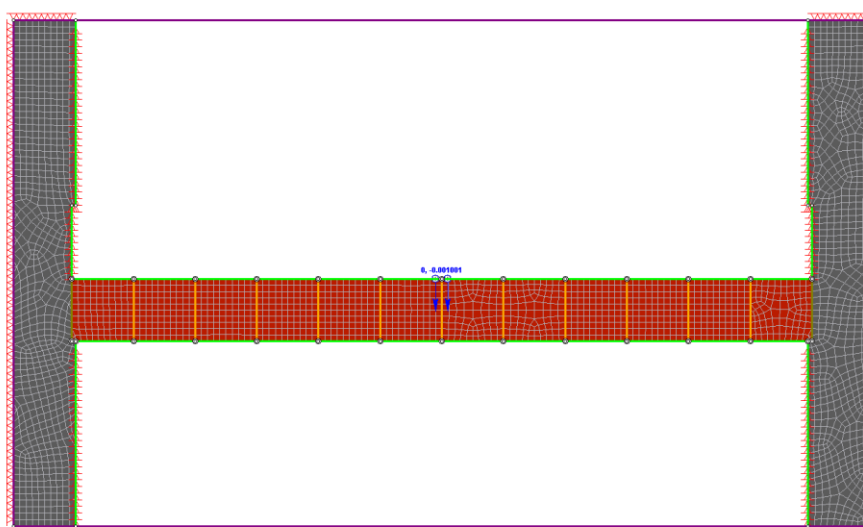
$$\underline{k_s=100.000 \text{ MPa/m} - k_n=200.000.000 \text{ MPa/m}}$$



Διάγραμμα 8.30

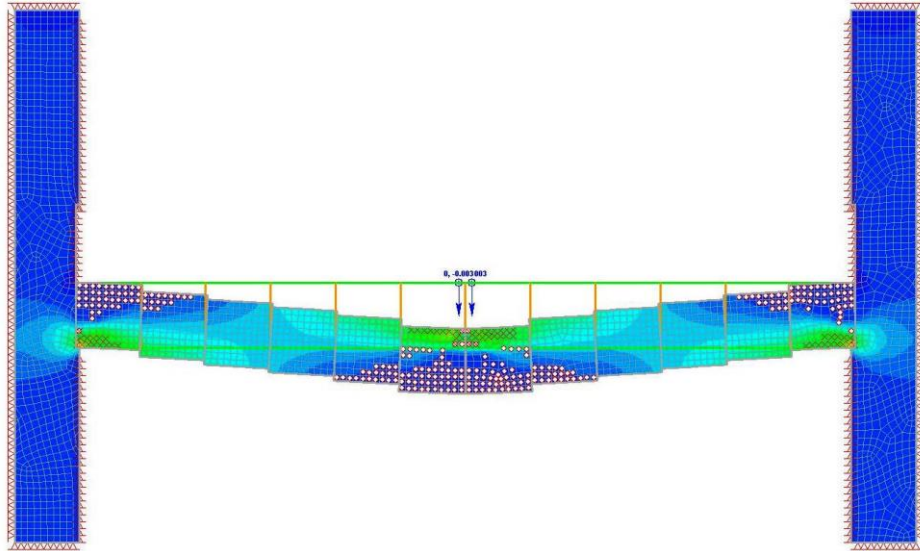
Παρατηρούμε ότι για shear stiffness 10.000 MPa/m και normal stiffness 200.000.000 MPa/m, το φορτίο διαμορφώνεται στην πρώτη κορυφή στα 0,003 m και είναι 22,43kN, ενώ στο πείραμα το μέγιστο φορτίο έφτασε στα 6,53kN στα 0,005m, όπως επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το shear stiffness τόσο μειώνεται η μετατόπιση στην οποία παρατηρείται το μέγιστο φορτίο, αλλά το πρόβλημα σε αυτό το μοντέλο είναι ότι παρουσιάζεται εφελκυσμός σε περιοχές όπου δεν εμφανίστηκαν κανονικά στην πειραματική δοκό.

Στο παρακάτω σχήμα 8.8, φαίνεται το αρχικό μοντέλο της δοκού μαρμάρου Διονύσου όπως δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα.

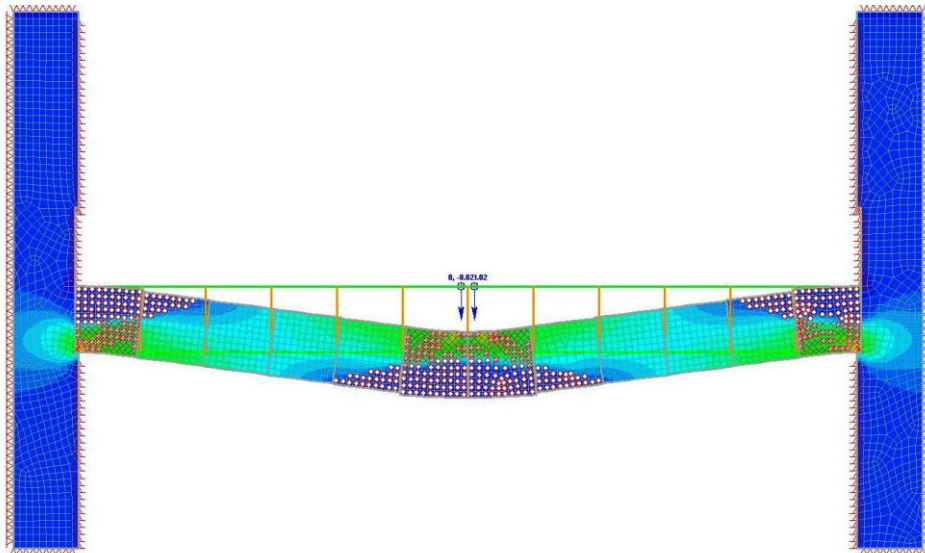


Σχήμα 8.8. Το αρχικό μοντέλο της δοκού μαρμάρου Διονύσου.

Στα παρακάτω δύο σχήματα 8.9 και 8.10, φαίνονται αντίστοιχα μετά την προσομοίωση το μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού, στο στάδιο 5, όπου παρατηρήθηκε το μέγιστο φορτίο των 22,43kN (με μετατόπιση 0,003m), και το τελικό στάδιο 20, με την δοκό να φτάνει στην τελική αστοχία με μέγιστη μετατόπιση 16.430μm.



Σχήμα 8.9. Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 5.



Σχήμα 8.10. Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 20.

8.6 Αριθμητική προσομοίωση δοκού μαρμάρου Βόλακα

Οι ιδιότητες που βάλαμε στις παραμέτρους του προγράμματος είναι οι παρακάτω:

Χάλυβας

- Initial Element Loading: Body Force Only
- Unit Weight: 0.072 MN/m³
- Material Type: Elastic
- Poisson's Ratio: 0.3
- Young's Modulus: 210.000 MPa

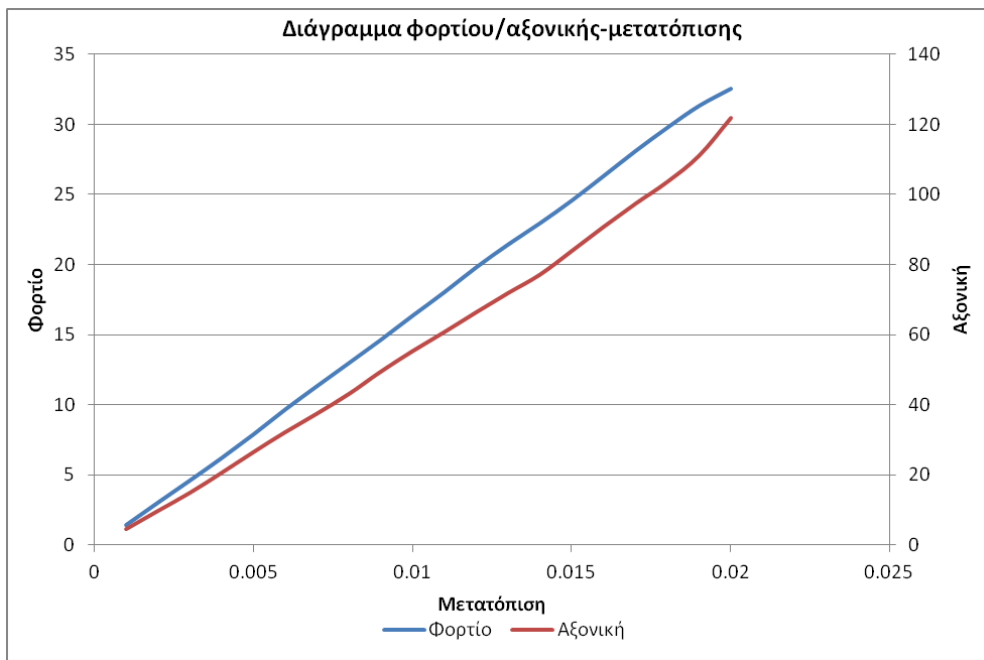
Μάρμαρο Βόλακα

- Initial Element Loading: Body Force Only
- Failure Criterion: Mohr – Coulomb
- Material Type: Plastic
- Tensile Strength (peak): 8,47 MPa
- Friction Angle (peak): 40°
- Cohesion (peak): 29 MPa
- Poisson's Ratio: 0.33
- Young's Modulus: 59000 MPa
- Joints: $\varphi = 89^\circ$

Για να γίνει σωστά η προσομοίωση και το τελικό αποτέλεσμα να προσεγγίζει το πραγματικό μοντέλο ώστε να μπορέσουν να συσχετιστούν τα δεδομένα της αριθμητικής προσομοίωσης με το πραγματικό πείραμα, εξετάστηκαν διάφορες τιμές για το shear stiffness k_s και το normal stiffness k_n , μέχρι να επιτύχουμε την κατάλληλη τιμή του φορτίου (ή προσεγγιστικά την ανώτερη τιμή από τους παραπάνω συνδυασμούς, στην κατάλληλη όμως κάθε φορά μετατόπιση στην οποία επιτεύχθηκε το μέγιστο φορτίο).

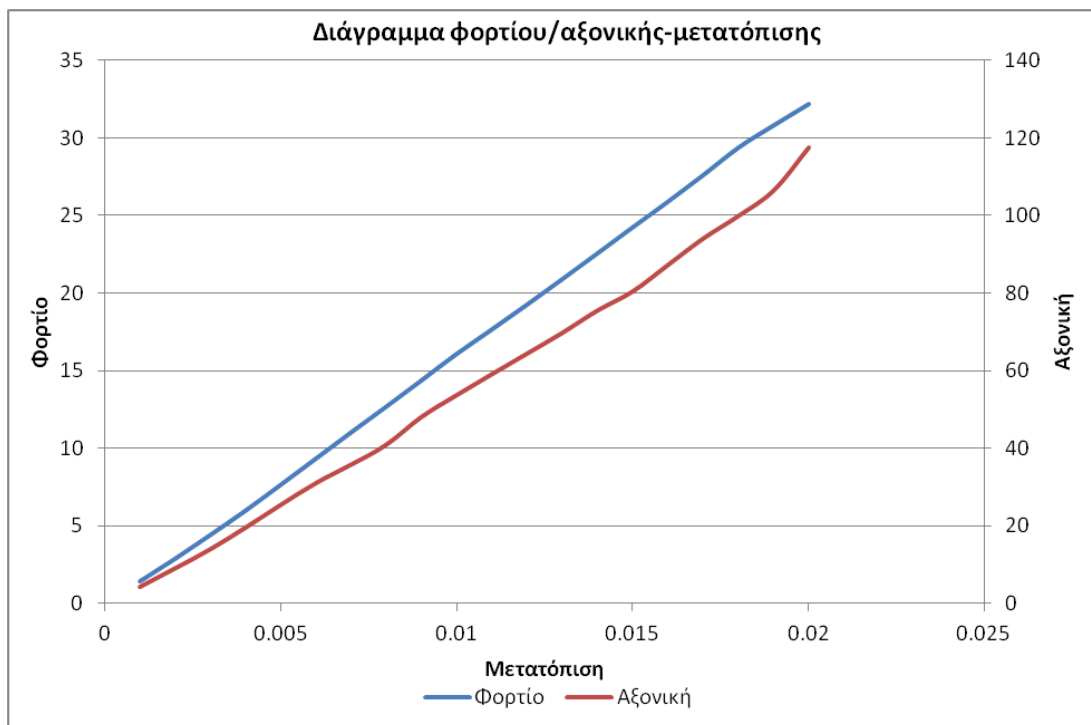
Η αριθμητική προσομοίωση συσχετίστηκε με την δοκό μαρμάρου Βόλακα (Δοκός 8). Το μέγιστο φορτίο διαμορφώθηκε στα 9,62kN στα 4073,60 sec σε μετατόπιση 7859 μm , ενώ η μέγιστη αξονική διαμορφώθηκε στα 52,20kN. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-αξονικής κατά περίπτωση για διάφορους συνδυασμούς k_s και k_n .

$k_s=1000 \text{ MPa/m} - k_n=50.000.000 \text{ MPa/m}$



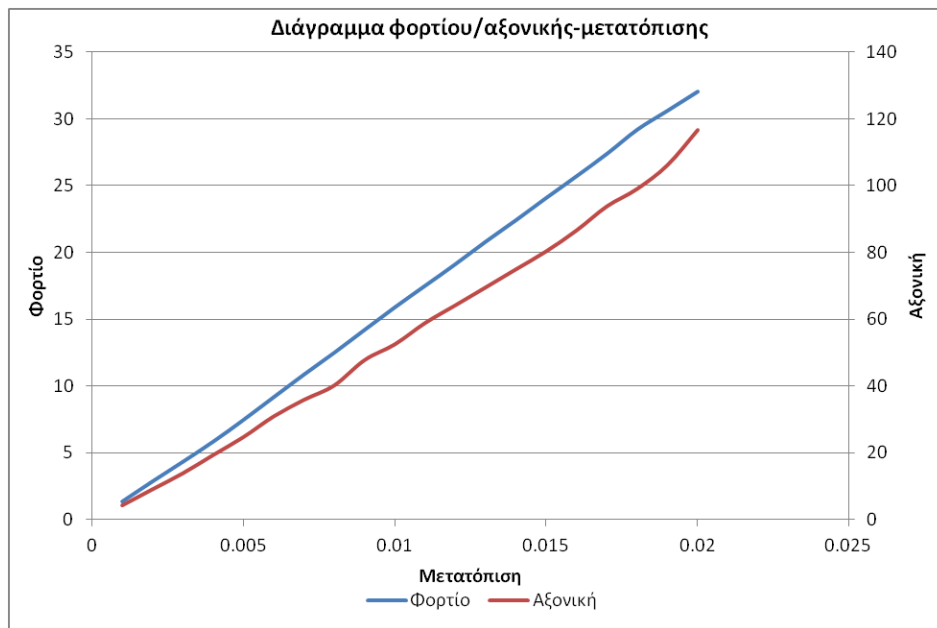
Διάγραμμα 8.31

$k_s=1000 \text{ MPa/m} - k_n=150.000.000 \text{ MPa/m}$



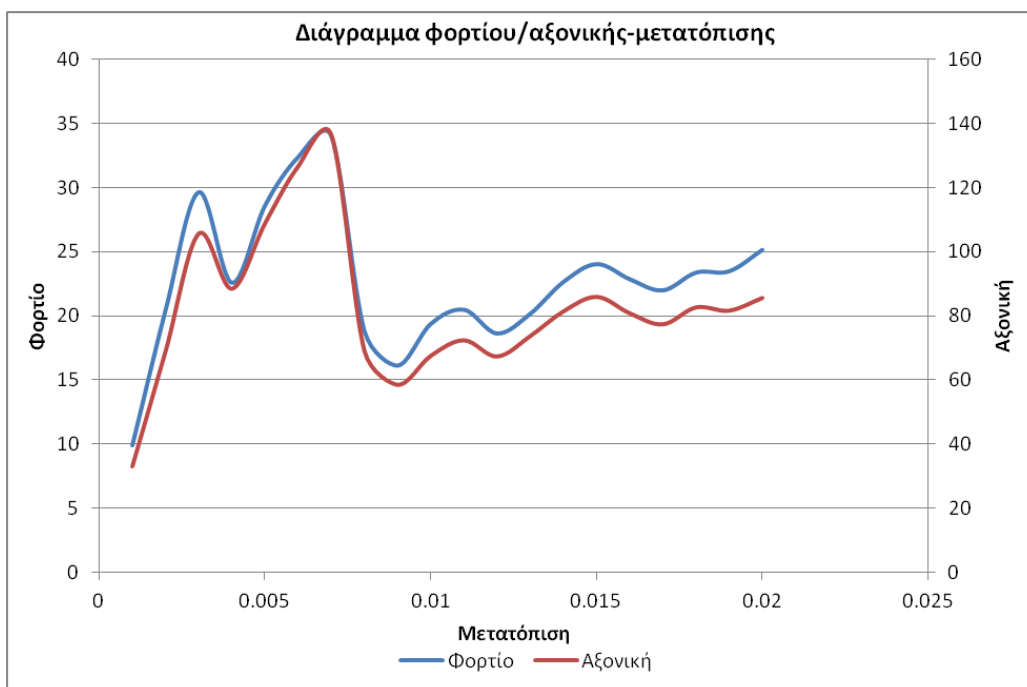
Διάγραμμα 8.32

$k_s=1000 \text{ MPa/m} - k_n=200.000.000 \text{ MPa/m}$



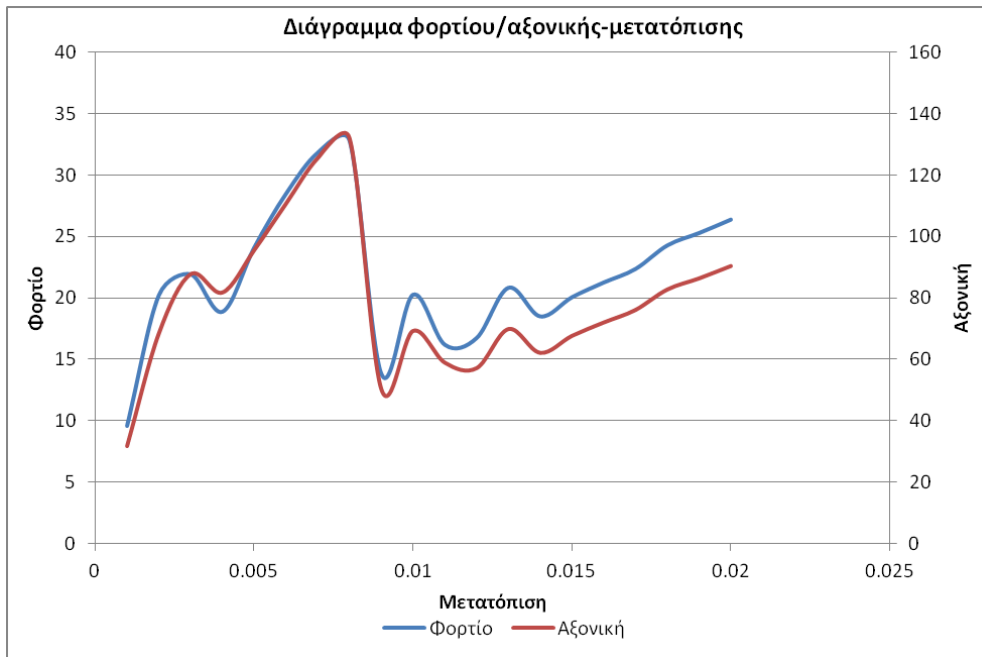
Διάγραμμα 8.33

$k_s=10.000 \text{ MPa/m} - k_n=50.000.000 \text{ MPa/m}$



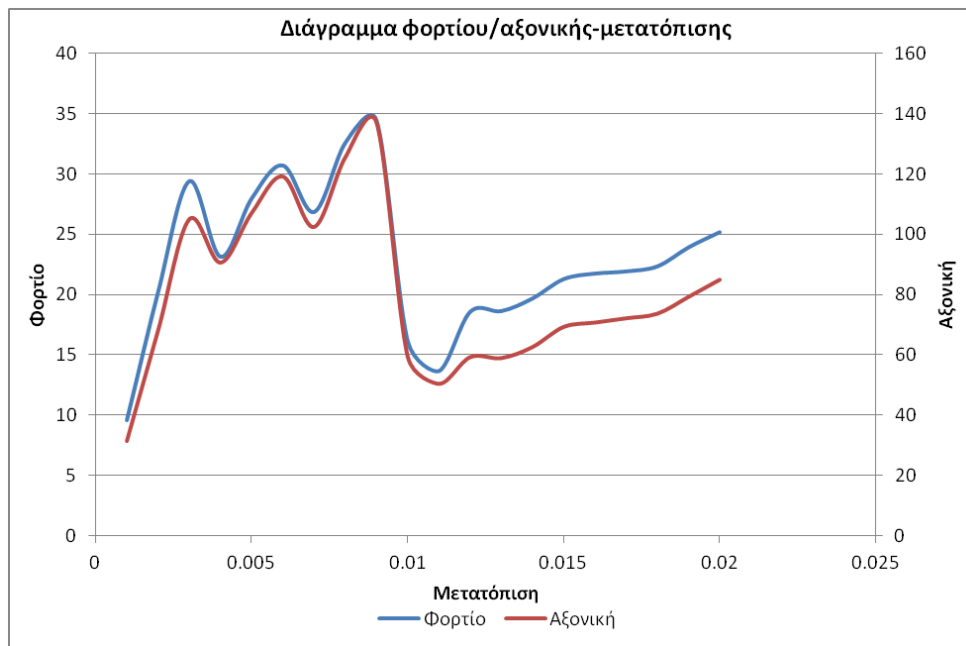
Διάγραμμα 8.34

$k_s=10.000 \text{ MPa/m} - k_n=150.000.000 \text{ MPa/m}$



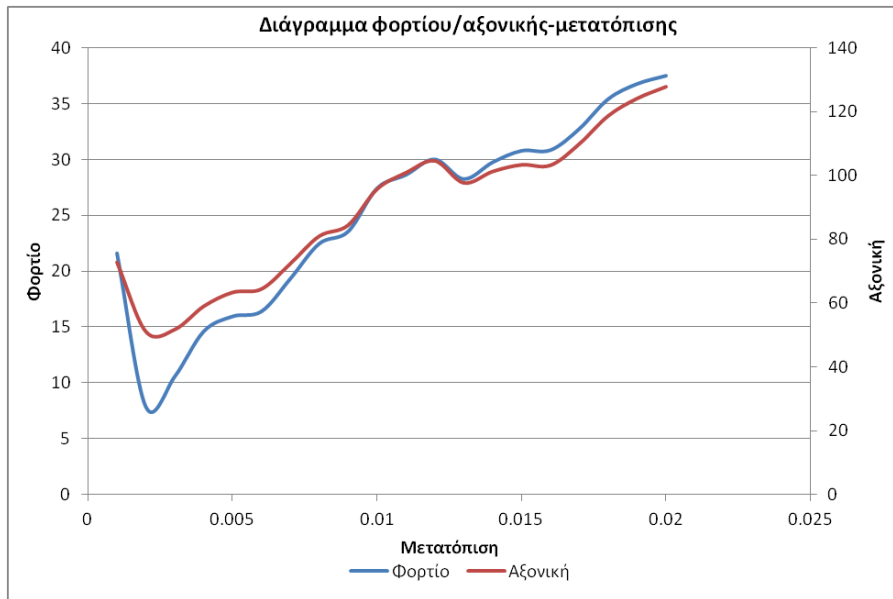
Διάγραμμα 8.35

$k_s=10.000 \text{ MPa/m} - k_n=200.000.000 \text{ MPa/m}$



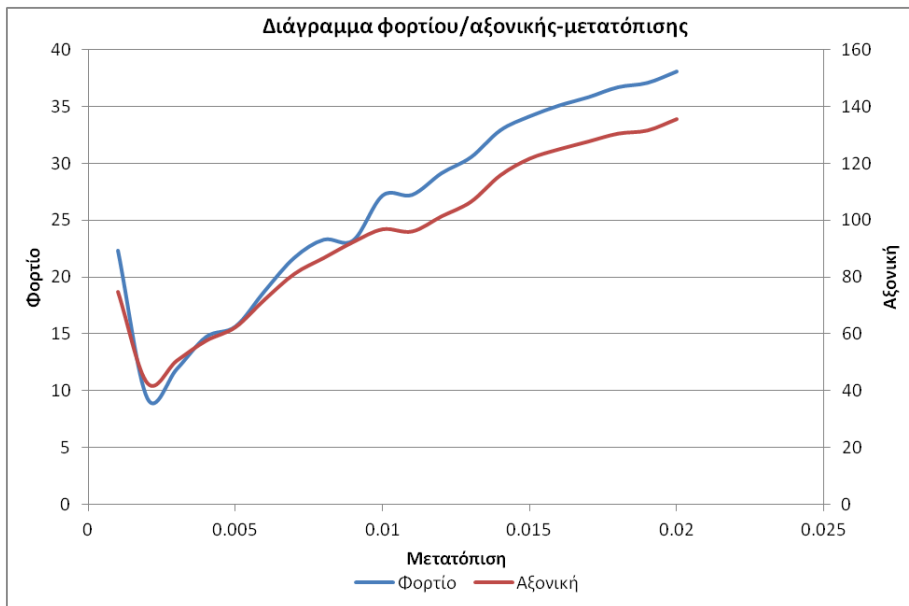
Διάγραμμα 8.36

$k_s=100.000 \text{ MPa/m} - k_n=50.000.000 \text{ MPa/m}$



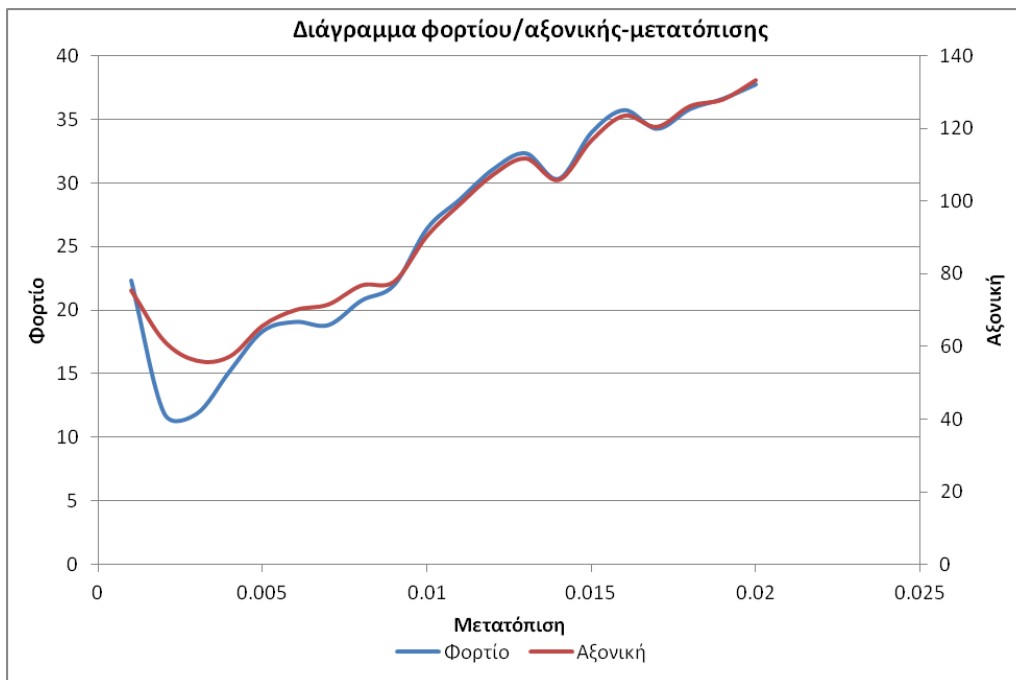
Διάγραμμα 8.37

$k_s=100.000 \text{ MPa/m} - k_n=150.000.000 \text{ MPa/m}$



Διάγραμμα 8.38

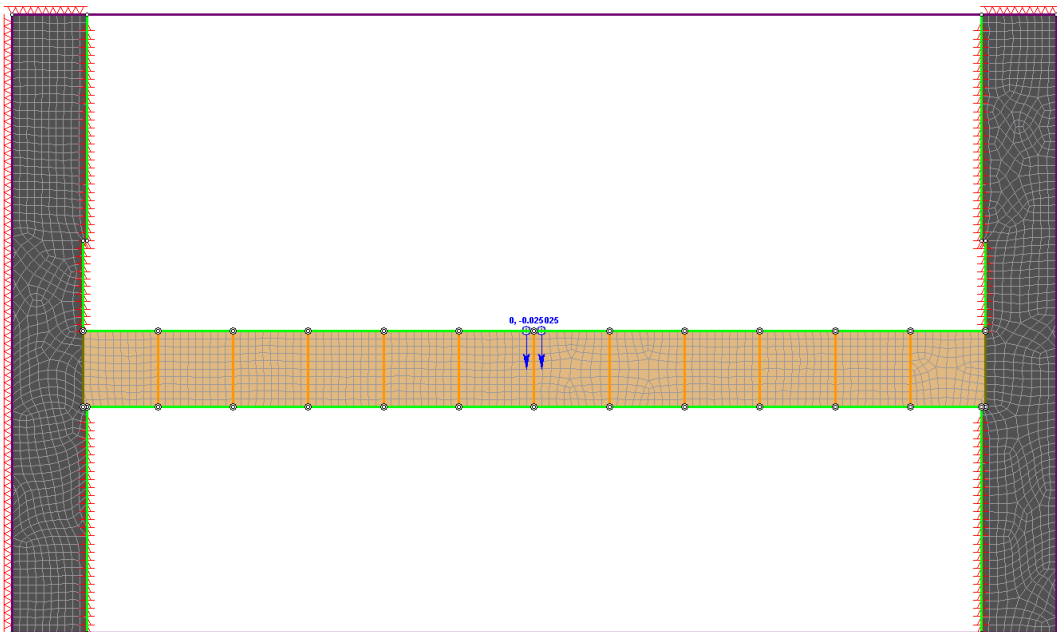
$k_s=100.000 \text{ MPa/m} - k_n=200.000.000 \text{ MPa/m}$



Διάγραμμα 8.39

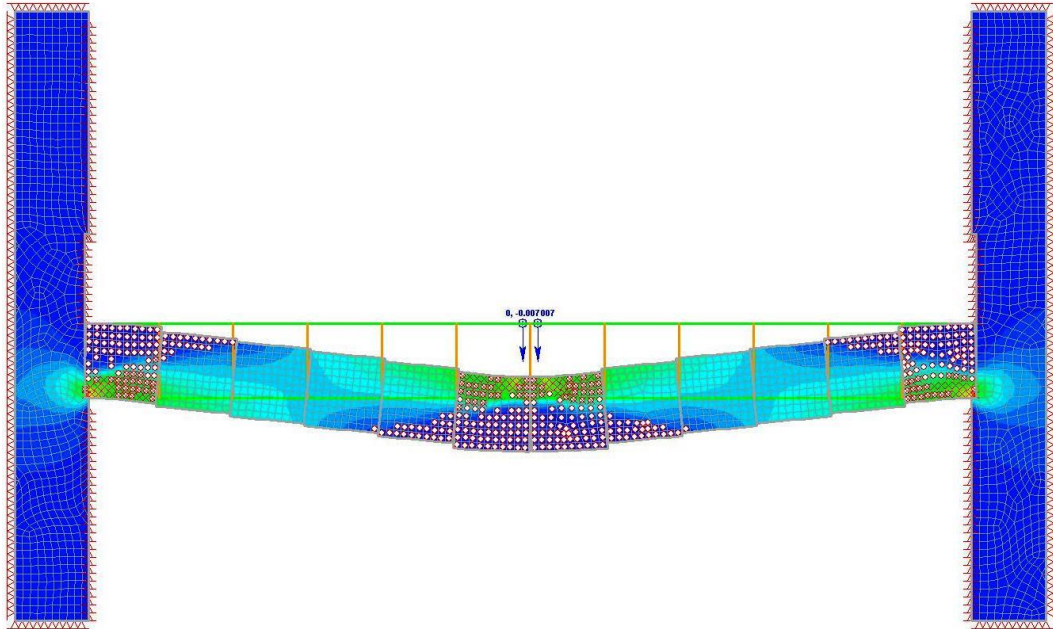
Παρατηρούμε ότι για shear stiffness 10.000 MPa/m και normal stiffness 50.000.000 MPa/m, το μέγιστο φορτίο επιτυγχάνεται στα 0,007 m και είναι 34kN και στην πειραματική διαδικασία επιτεύχθηκε μέγιστο 9,62kN στην ίδια μετατόπιση, όπως επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το shear stiffness τόσο μειώνεται η μετατόπιση στην οποία παρατηρείται το μέγιστο φορτίο, αλλά το πρόβλημα σε αυτό το μοντέλο είναι ότι παρουσιάζεται εφελκυσμός σε περιοχές όπου δεν εμφανίστηκαν κανονικά στην πειραματική δοκό.

Στο παρακάτω σχήμα 8.11, φαίνεται το αρχικό μοντέλο της δοκού μαρμάρου Βώλακα όπως δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα.

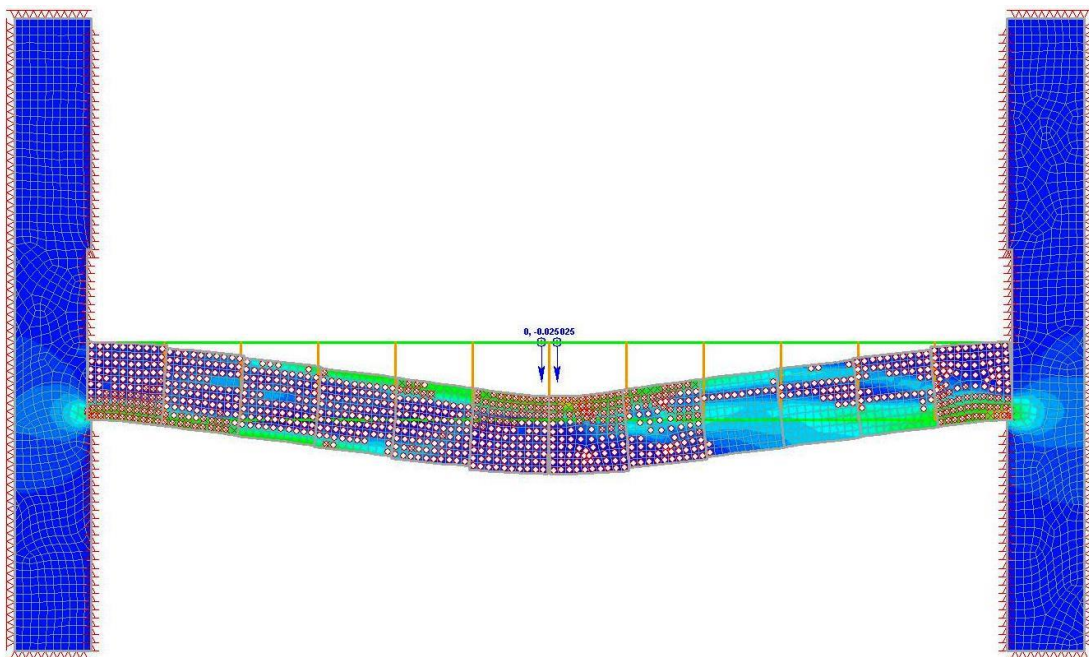


Σχήμα 8.11. Το μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού μαρμάρου Βώλακα.

Στα παρακάτω δύο σχήματα 8.12 και 8.13, φαίνονται αντίστοιχα μετά την προσομοίωση το μοντέλο της ρωγματωμένης δοκού, στο στάδιο 5, όπου παρατηρήθηκε το μέγιστο φορτίο των 34kN (με μετατόπιση 0,007m), και το τελικό στάδιο 20, με την δοκό να φτάνει στην τελική αστοχία με μέγιστη μετατόπιση 23.677μm.



Σχήμα 8.12. Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 5.



Σχήμα 8.13. Το μοντέλο της δοκού στο στάδιο 20.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Συμπεράσματα

Η δοκός 1 (Δοκός Γύψος 1), όπως είδαμε **αστόχησε λόγω σύνθλιψης στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων**. Παρατηρήθηκε δηλαδή η συνηθισμένη μορφή αστοχίας μιας δοκού voussoir. Η αστοχία περιλαμβάνει σύνθλιψη στο πάνω μέρος των μεσαίων ογκοτεμαχίων 3 και 4, και στο κάτω μέρος στις στηρίξεις των ακριανών ογκοτεμαχίων 1 και 6. Δημιουργήθηκαν επίσης και εφελκυστικές ρωγμές όπως και αποκόλληση τμημάτων σε συγκεκριμένα ογκοτεμάχια. Το πείραμα διήρκεσε 53,6 sec με τον ρυθμό φόρτισης να διαμορφώνεται στα 250 $\mu\text{m}/\text{λεπτό}$. Στην συγκεκριμένη δοκό παρατηρήθηκαν ταλαντώσεις κατά την διάρκεια της φόρτισης, πιθανόν λόγω του γεγονότος ότι δεν είχε προηγηθεί διαδικασία φόρτισης – αποφόρτισης με βήματα φορτίου, αλλά το φορτίο ασκήθηκε αμέσως την στιγμή που ακούμπησαν τα κύλιστρα φόρτισης στην δοκό. Να τονιστεί ότι στην δοκό 1, δεν χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες ακουστικής εκπομπής.

Τα αποτελέσματα φόρτισης ήταν τα εξής:

- Το μέγιστο φορτίο επιτεύχθηκε στα 41,4sec και διαμορφώθηκε στα 8,99kN.
- Η μέγιστη μετατόπιση διαμορφώθηκε στα 0,2374 cm.
- Η μέγιστη αξονική δύναμη επιτεύχθηκε στα 5,3sec και διαμορφώθηκε στα 6,75kN.

Για τον υπολογισμό αυτής της αξονικής δύναμης πήραμε τις μετρήσεις μόνο από την ράβδο 2 (Strain gages 3 και 4) και τις διπλασιάσαμε λόγω συμμετρίας.

Η δοκός 2 (Δοκός Γύψου 2), **κατέρρευσε απότομα λόγω μηχανικής αστάθειας των ογκοτεμαχίων 1 και 2** (Διάρκεια πειράματος 32,8 sec), και δεν παρουσιάστηκε η συνηθισμένη αστοχία μιας δοκού voussoir, γιατί στο ογκοτεμάχιο 2 συνέβη διαχωρισμός σε 2 επίπεδα παράλληλα με τον άξονα της δοκού. Δύο πιθανοί λόγοι που συνέβηκε αυτό είναι:

- Ύπαρξη εξογκώματος στην παρακείμενη πλευρική ασυνέχεια με το ογκοτεμάχιο (διεπιφάνεια τεμαχίων 1 και 2).
- Παραπάνω πλευρική σύσφιξη των περικοχλίων, που οδήγησε σε προφόρτιση της δοκού, και συνεπώς σε αξονική δύναμη που μπορεί να προκάλεσε αξονική θράυση στο τεμάχιο 1.

Επίσης παρατηρήθηκαν και εφελκυστικές ρωγμές όπως και αποκόλληση τμημάτων σε συγκεκριμένα ογκοτεμάχια. Τα αποτελέσματα φόρτισης ήταν τα εξής:

- Το μέγιστο φορτίο επιτεύχθηκε στα 26,6sec και διαμορφώθηκε στα 7,162kN.
- Η μέγιστη μετατόπιση διαμορφώθηκε στα 2,2 cm.

Για την δοκό 2 δεν μπορέσαμε λόγω και του γεγονότος ότι το πείραμα τέλειωσε σχεδόν απότομα, να εξάγουμε μετρήσιμες τιμές από τα strain gages και των 4 ράβδων, και να υπολογίσουμε την αξονική δύναμη. Τέλος να τονιστεί ότι παρατηρήθηκε πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ φορτίου και γεγονότων ακουστικής εκπομπής. Στα 91,53 sec (26,6 sec πειράματος), επιτεύχθηκε όπως είδαμε και από το διάγραμμα φορτίου-χρόνου το μέγιστο φορτίο 7,162kN, με το πλάτος της ακουστικής εκπομπής να διαμορφώνεται στο μέγιστο 99dB. Σε αυτό το φορτίο έσπασαν απότομα και τα ογκοτεμάχια 1 και 2 (Σχήμα 7.25), ενώ παρατηρείται ότι οι κτύποι (hits) ακουστικής εκπομπής άρχισαν να αυξάνονται απότομα, όπως επίσης και η ενέργεια έφτασε στο μέγιστο (Διάγραμμα 7.14).

Όσον αφορά την δοκό 3 (Δοκός Γύψου 3), παρατηρήθηκε ότι το ογκοτεμάχιο 5 ήταν ανομοιογενές σε σχέση με την υπόλοιπη δοκό (Σχήμα 7.27 – Το πίο λευκό σε σχέση με τα υπόλοιπα). Το συγκεκριμένο ογκοτεμάχιο έπαιξε σημαντικό ρόλο στην μηχανική συμπεριφορά ολόκληρης της δοκού, γιατί στην ουσία μόνο αυτό παραμορφώθηκε έντονα υπό τα φορτία της δοκού, μέχρι την μέγιστη αντοχή της δοκού και την επακολουθείσα κατάρρευση. **Η δοκός συνολικά αστόχησε λόγω σύνθλιψης του ογκοτεμαχίου 5.** Παρατηρήθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών και αποκόλληση τμημάτων από το ογκοτεμάχιο 5. Το ογκοτεμάχιο 5 τελικά έσπασε σε 4 κομμάτια, ενώ επίσης παρουσίασε πλαστική συμπεριφορά στο πάνω μέρος. Το πάνω κομμάτι διέρρευσε πλαστικά από την πίεση που του ασκήθηκε από το διπλανό ογκοτεμάχιο 4 (Σχήμα 7.39(β)). Το πείραμα διήρκεσε συνολικά 4103,6 sec. Τα αποτελέσματα φόρτισης ήταν τα εξής:

- Το μέγιστο φορτίο επιτεύχθηκε στα 2470,2sec = 41,17min και διαμορφώθηκε στα 3,993kN.
- Η μέγιστη μετατόπιση διαμορφώθηκε στα 3,5 cm.
- Η μέγιστη αξονική δύναμη επιτεύχθηκε στα 4100,6sec και διαμορφώθηκε στα 19,11kN.

Για να υπολογιστεί η παραπάνω αξονική δύναμη πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gages 3,4,7 και 8 (Ράβδοι 2 και 4). Η συνολική τάση υπολογίστηκε με την παραδοχή της συμμετρίας, δηλαδή τις μετρήσεις της ράβδου 2 τις διπλασιάσαμε όπως επίσης και τις μετρήσεις της ράβδου 4 και έπειτα τις προσθέσαμε.

Είχαμε καλή συσχέτιση φορτίου και γεγονότων ακουστικής εκπομπής. Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα ακουστικής εκπομπής:

- (1682,82 sec (1413,42 sec πειράματος)/Σχήμα 7.29): Αρχίζει να αναπτύσσεται η εφελκυστική ρωγμή, όπου στο τέλος του πειράματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.39(β), συνεχίστηκε και αποκόλλησε το πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 5. Το πλάτος διαμορφώθηκε στα 72 dB.
- (3144 sec (2887 sec πειράματος)/Σχήμα 7.33): Επέκταση της ήδη υπάρχουσας ρωγμής, επέκταση ρωγμής στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 5,

η οποία αποκόλλησε προς το τέλος το κάτω κομμάτι, όπως επίσης δημιουργία πλευρικών αποφλοιώσεων και σκαλοπατιού στο πάνω μέρος. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα κτύπων (Hits) – χρόνου και Ενέργειας – χρόνου, αυτό το γεγονός δημιούργησε την μεγαλύτερη έκλυση ενέργειας.

Όπως παρατηρούμε και από το διάγραμμα 7.23 το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας εκλύθηκε στα 3144 sec, όπου είχαμε και το μεγαλύτερο πλάτος της ακουστικής εκπομπής (83 dB), όπου τα πλάτη είναι στενά συνδεδεμένα με το μέγεθος της πηγής. Σε αυτό τον χρόνο είχαμε επέκταση της ήδη υπάρχουσας ρωγμής, επέκταση ρωγμής στο κάτω μέρος του ογκοτεμαχίου 5, λόγω της οποίας αποκολλήθηκε προς το τέλος το κάτω κομμάτι, όπως επίσης δημιουργία πλευρικών αποφλοιώσεων και σκαλοπατιού στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου.

Η δοκός 4 (Δοκός Γύψου 4), όπως είδαμε **αστόχησε λόγω σύνθλιψης στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων**. Παρατηρήθηκε δηλαδή η συνηθισμένη μορφή αστοχίας μιας δοκού voussoir. Η αστοχία περιλαμβάνει σύνθλιψη στο πάνω μέρος των μεσαίων ογκοτεμαχίων 3 και 4, και στο κάτω μέρος στις στηρίξεις των ακριανών ογκοτεμαχίων 1 και 6. Δημιουργήθηκαν επίσης και εφελκυστικές ρωγμές όπως και αποκόλληση τμημάτων σε συγκεκριμένα ογκοτεμάχια. Το πείραμα διήρκησε 4074 sec = 67,9 min. Τα αποτελέσματα φόρτισης ήταν τα εξής:

- Το μέγιστο φορτίο επιτεύχθηκε στα 2259,80sec και διαμορφώθηκε στα 13,30kN.
- Η μέγιστη μετατόπιση διαμορφώθηκε στα 3,6 cm.
- Η μέγιστη αξονική δύναμη επιτεύχθηκε στα 37min και διαμορφώθηκε στα 41,33kN.

Για να υπολογιστεί η παραπάνω αξονική, πήραμε τις μετρήσεις (παραμορφώσεις) από τα strain gages 6 και 8, τις προσθέσαμε και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2.

Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα:

- Στα **2037 sec (Σχήμα 7.40 – Σε όλα τα διαγράμματα της ακουστικής εκπομπής ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί στο πρώτο σκαλοπάτι)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 11,794 kN. Το πλάτος έφτασε στα 99 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 226, με **σημαντική έκλυση ενέργειας** και RMS 0,35. Το b value μετρήθηκε 0,75. Στα 2037 sec, άρχισε η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στο δεξί ακριανό ογκοτεμάχιο 6 στο κάτω μέρος.
- Στα **2337 sec (Σχήμα 7.41)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 12,372 kN. Το πλάτος έφτασε στα 71 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα

371, με **σημαντική έκλυση ενέργειας** . Το b value μετρήθηκε 0,24. Στα 2337 sec, άρχισε να αναπτύσσεται εφελκυστική ρωγμή στο αριστερό ακριανό ογκοτεμάχιο 1 στο κάτω μέρος, λόγω θλιπτικών τάσεων.

- Στα **2442 sec (Σχήμα 7.42)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 11,426 kN. Το πλάτος έφτασε στα 46 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 419. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 1,20. Στα 2442 sec, δημιουργείται εφελκυστική ρωγμή στο ογκοτεμάχιο 4 και αρχίζουν να δημιουργούνται λόγω της πίεσης του κυλίστρου στο ογκοτεμάχιο 4 και λόγω συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων εφελκυστικές ρωγμές.
- Στα **2487 sec (Σχήμα 7.43)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 11,077 kN. Το πλάτος έφτασε στα 52 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 447. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 0,79. Στα 2487 sec, παρατηρείται η επέκταση της ρωγμής από το ογκοτεμάχιο 4 στο ογκοτεμάχιο 3 λόγω επικράτησης θλιπτικών τάσεων στο πάνω μέρος της μεσαίας ασυνέχειας.
- Στα **2617 sec (Σχήμα 7.44 – Τρίτο σκαλοπάτι στα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 10,175 kN. Το πλάτος έφτασε στα 53 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 484. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 0,42. Στα 2617 sec, παρατηρείται το φαινόμενο της συνεχιζόμενης επέκτασης των ρωγμών στα ογκοτεμάχια 3 και 4 λόγω θλιπτικών τάσεων, και ενώνονται οι ρωγμές στο ογκοτεμάχιο 4, με πλευρική αποφλοίωση.
- Στα **2677 sec (Σχήμα 7.45 – Τέταρτο σκαλοπάτι στα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 9,511 kN. Το πλάτος έφτασε στα 51 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 522. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 0,22. Στα 2677 sec, παρατηρήσαμε δημιουργία δεύτερης ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 6 στο πάνω μέρος και επέκταση της ρωγμής του 6 στο ογκοτεμάχιο 5, όπως επίσης και διάδοση και επέκταση της προϋπάρχουσας ρωγμής από το ογκοτεμάχιο 6 στο 5.
- Στα **2787 sec (Σχήμα 7.46 – Σε όλα τα διαγράμματα της ακουστικής εκπομπής ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί στο πέμπτο σκαλοπάτι)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 6,911 kN. Το πλάτος έφτασε στα 99 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 565, με **σημαντική έκλυση ενέργειας** και RMS 0,3. Το b value μετρήθηκε 0,53. Στα 2787 sec, παρατηρείται δημιουργία δεύτερης εφελκυστικής ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 5 και επέκτασή της στο ογκοτεμάχιο 4.
- Στα **3067 sec (Σχήμα 7.47)**, το φορτίο διαμορφώθηκε στα 5,803 kN. Το πλάτος έφτασε στα 49 dB. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν στα 650. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Το b value μετρήθηκε 0,51. Στα 3067 sec, έχουμε περαιτέρω άνοιγμα και επέκταση των ρωγμών

στα ογκοτεμάχια 5 και 6, δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 1 και στο ογκοτεμάχιο 4 κάτω από τον αισθητήρα.

Η δοκός 5 (Δοκός Τσιμεντοκονιάματος 1) **κατέρρευσε λόγω της αστοχίας των ογκοτεμαχίων 1 και 2 (Σχήμα 7.63), από την υπέρβαση της θλιπτικής τους αντοχής κατά την δοκιμή κάμψης.** Πρέπει να τονιστεί ότι τα ογκοτεμάχια 1,2 και 3 αστόχησαν κατά την διάρκεια του πειράματος, ενώ τα ογκοτεμάχια 4,5 και 6 (τα τρία ογκοτεμάχια δεξιά της μεσαίας ασυνέχειας, παρέμειναν άθικτα). Επίσης σημαντικό γεγονός ήταν στα 747 sec (Σχήμα 7.53), όπου παρατηρήθηκαν τρία γεγονότα: 1) Δημιουργία σκαλοπατιού στο πάνω μέρος μεταξύ του ογκοτεμαχίου 1 και 2, 2) Αποκόλληση κάτω τμήματος ογκοτεμαχίου 1 και 3) Αποφλοιώση στην κάτω γωνία του ογκοτεμαχίου 2. Το πείραμα διήρκεσε 2586 sec = 43,1 min. Τα αποτελέσματα φόρτισης ήταν τα εξής:

- Το μέγιστο φορτίο επιτεύχθηκε στα 2429,80sec και διαμορφώθηκε στα 17,32kN.
- Η μέγιστη μετατόπιση διαμορφώθηκε στα 2,5 cm.
- Η μέγιστη αξονική δύναμη επιτεύχθηκε στα 2436sec και διαμορφώθηκε στα 89,95kN.

Για να υπολογιστεί η παραπάνω αξονική, πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gages 6 (Ράβδος 3) και 8 (Ράβδος 4), προσθέσαμε τις παραμορφώσεις και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2. Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα:

- Στα **747 sec (Σχήμα 7.53)**, παρατηρήθηκαν τρία γεγονότα: 1) Δημιουργία σκαλοπατιού στο πάνω μέρος μεταξύ του ογκοτεμαχίου 1 και 2, 2) Αποκόλληση κάτω τμήματος ογκοτεμαχίου 1 και 3) Αποφλοιώση στην κάτω γωνία του ογκοτεμαχίου 2. Οι κτύποι (hits) της ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν από τα 8892 σε 13042. Υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το μέγιστο πλάτος του γεγονότος που έφτασε στα 99 dB, ήταν 42032 msec, με διάρκεια γεγονότος 91011 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 74 dB με RMS 0,43. Το ελάχιστο b value μειώθηκε σε 0,914 από 0,94 στα 746 sec και αυξήθηκε ξανά σε 0,94 στα 748 sec.
- Στα **1531,80 sec (Σχήμα 7.55)**, παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα της ρωγμής και αποκόλληση πάνω τμήματος στο ογκοτεμάχιο 2. Οι κτύποι (hits) της ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν από τα 19563 σε 26084. Υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το μέγιστο πλάτος του γεγονότος που έφτασε στα 98 dB, ήταν 63470 msec, με διάρκεια γεγονότος 100952 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 75 dB με RMS 0,12. Το b value μειώθηκε στα 1,44 από τα 1,84.
- Στα **2028 sec (Σχήμα 7.58)**, είχαμε δημιουργία ρωγμής στο κάτω τέμαχος του ογκοτεμαχίου 1 και περαιτέρω άνοιγμα της προηγούμενης ρωγμής. Οι κτύποι (hits) της ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν από τα 38533 σε 40905. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το

μέγιστο πλάτος του γεγονότος που έφτασε στα 97 dB, ήταν 56883 msec, με διάρκεια γεγονότος 99048 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 65 dB με RMS 0,12. Το b value μειώθηκε σε 1,099 από τα 1,17.

- Στα **2429,80 sec (Σχήμα 7.60)**, είχαμε δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 2, και σύνθλιψη στο πάνω μέρος του ογκοτεμαχίου 3. Οι κτύποι (hits) της ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν από τα 53354 σε 53947. Δεν υπήρξε σημαντική έκλυση ενέργειας. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το μέγιστο πλάτος του γεγονότος που έφτασε στα 98 dB, ήταν 63470 msec, με διάρκεια γεγονότος 99048 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 64 dB με RMS 0,12. Το b value μειώθηκε από τα 1,73 στα 1,47.

Η δοκός 6 (Δοκός Τσιμεντοκονιάματος 2), όπως είδαμε **αστόχησε λόγω σύνθλιψης στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων**. Παρατηρήθηκε δηλαδή η συνηθισμένη μορφή αστοχίας μιας δοκού voussoir. Κυρίως αστόχησαν τα ογκοτεμάχια 4,5 και 6. Δημιουργήθηκαν επίσης και εφελκυστικές ρωγμές όπως και αποκόλληση τμημάτων σε συγκεκριμένα ογκοτεμάχια. Το πείραμα διήρκεσε 4856,6 sec = 81 min. Τα αποτελέσματα φόρτισης ήταν τα εξής:

- Το μέγιστο φορτίο επιτεύχθηκε στα 2463,60sec και διαμορφώθηκε στα 36,07kN.
- Η μέγιστη μετατόπιση διαμορφώθηκε στα 4 cm.
- Η μέγιστη αξονική δύναμη επιτεύχθηκε στα 2468,80sec και διαμορφώθηκε στα 109,543kN.

Για να υπολογιστεί η παραπάνω αξονική, πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gages 6 (Ράβδος 3) και 8 (Ράβδος 4), προσθέσαμε τις παραμορφώσεις και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2. Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα:

- Στα **2096 sec (2025,4 sec πειράματος)**, είχαμε έκλυση ενέργειας αλλά όχι τόσο αξιοσημείωτη. Η διάρκεια του γεγονότος ήταν 23034 msec και ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το πλάτος 93 dB, ήταν 10864 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 61 dB με RMS 0,09. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν απότομα από τα 7284 στα 9501. Το b value μειώθηκε σε αυτό τον χρόνο στα 0,53 από 2,07.
- Στα **2598,4 sec (2527,7 sec πειράματος – Σχήμα 7.67)**, είχαμε σημαντική έκλυση ενέργειας. Η διάρκεια του γεγονότος ήταν 100000 msec και ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το πλάτος 99 dB, ήταν 33644 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 67 dB με RMS 0,14. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν απότομα από τα 18686 στα 25970. Το b value μειώθηκε σε αυτό τον χρόνο στα 0,99 από 1,40. Στα 2527,7 sec, παρατηρείται η διάδοση, επέκταση και άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών στα ογκοτεμάχια 5 και 6, όπως επίσης και δημιουργία σκαλοπατιού στο πάνω μέρος μεταξύ των ογκοτεμαχίων 5 και 6.
- Στα **2963,37 sec (2892,7 sec πειράματος – Σχήμα 7.69)**, είχαμε σημαντική έκλυση ενέργειας. Η διάρκεια του γεγονότος ήταν 100000 msec και ο χρόνος

μέχρι να επιτευχθεί το πλάτος 92 dB, ήταν 62031 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 63 dB με RMS 0,10. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν απότομα από τα 28504 στα 30404. Το b value μειώθηκε σε αυτό τον χρόνο στα 1,03 από 1,32. Στα 2892,7 sec, παρατηρείται η δημιουργία ρωγμής στο ογκοτεμάχιο 4 με επέκταση από την διπλανή ρωγμή του ογκοτεμαχίου 5, πάνω από τον αισθητήρα.

Στα **3373,4 sec (3302,7 sec πειράματος – Σχήμα 7.70)**, είχαμε σημαντική έκλυση ενέργειας. Η διάρκεια του γεγονότος ήταν 100000 msec και ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το πλάτος 95 dB, ήταν 59227 msec. Το μέσο πλάτος διαμορφώθηκε στα 64 dB με RMS 0,11. Οι κτύποι (hits) αυξήθηκαν απότομα από τα 33571 στα 36105. Το b value μειώθηκε σε αυτό τον χρόνο στα 1,40 από 3,22. Στα 3302,7 sec, παρατηρείται περαιτέρω άνοιγμα των προϋπαρχουσών ρωγμών, σπάσιμο κομματιών στο πάνω μέρος λόγω πίεσης των κυλίστρων φόρτισης.

Η δοκός 7 (Δοκός μαρμάρου Διονύσου), **κατέρρευσε απότομα μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου**, παρατηρήθηκε όμως η συνηθισμένη μορφή αστοχίας της δοκού, στα μεσαία και στα ακριανά ογκοτεμάχια λόγω θλίψης. Η απότομη κατάρρευση οφείλεται σε ένα συνδυασμό θλιπτικής αστοχίας στα ακραία και μεσαία τεμάχια και μηχανικής αστάθειας (snap through mechanism). Όπως παρατηρείται και από τα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής, δεν παρατηρήθηκαν μακροσκοπικά φαινόμενα αστοχίας ή δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών κατά την διάρκεια του πειράματος και η κατάρρευση προέκυψε σχεδόν απότομα. Το πείραμα διήρκεσε 1138,60 sec = 18,79 min. Τα αποτελέσματα φόρτισης ήταν τα εξής:

- Το μέγιστο φορτίο επιτεύχθηκε στα 1132sec και διαμορφώθηκε στα 6,53kN.
- Η μέγιστη μετατόπιση διαμορφώθηκε στα 1,6 cm.
- Η μέγιστη αξονική δύναμη επιτεύχθηκε στα 1132,6sec και διαμορφώθηκε στα 32,78kN.

Για να υπολογιστεί η παραπάνω αξονική, πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gages 6 (Ράβδος 3) και 8 (Ράβδος 4), προσθέσαμε τις παραμορφώσεις και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2. Για να γίνει συσχέτιση μεταξύ του φορτίου και του χρόνου της πρέσσας και του χρόνου των διαγραμμάτων της ακουστικής εκπομπής, αφαιρείται από τον χρόνο της ακουστικής εκπομπής 243,63 sec. Δεν παρατηρήθηκαν μακροσκοπικά κατά την διάρκεια του πειράματος εφελκυστικές ρωγμές, και όπως βλέπουμε και από τα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής, δεν έχουμε έκλυση ενέργειας, άρα δεν έχουμε και αξιοσημείωτα γεγονότα ακουστικής εκπομπής. Η μεγαλύτερη έκλυση ενέργειας παρατηρείται στα 1382,22 sec (1138,60 sec), όπου είχαμε και την απότομη κατάρρευση της δοκού (Διάγραμμα 7.77). Επίσης όπως παρατηρούμε και από το διάγραμμα 7.80, τα hits παραμένουν σταθερά μέχρι τα 941 sec (2000 hits), ενώ μετά τα 941 sec, τα hits αρχίζουν να αυξάνονται ομαλά μέχρι τα 1370 sec (1127 sec πειράματος), όπου άρχισαν να αυξάνονται απότομα την στιγμή της αστοχίας. Τέλος από το διάγραμμα 7.82,

παρατηρείται ότι η παράμετρος b , αυξομειώνεται, ενώ παρατηρείται ένα μέγιστο 17,37 στα 1092,92 sec.

Η δοκός 8 (Δοκός μαρμάρου Βόλακα), **κατέρρευσε απότομα μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου**, παρατηρήθηκε όμως η συνηθισμένη μορφή αστοχίας της δοκού, στα μεσαία και στα ακριανά ογκοτεμάχια λόγω θλίψης. Η απότομη κατάρρευση οφείλεται σε ένα συνδυασμό θλιπτικής αστοχίας στα ακραία και μεσαία τεμάχια και μηχανικής αστάθειας (snap through mechanism). Όπως παρατηρείται και από τα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής, δεν παρατηρήθηκαν μακροσκοπικά φαινόμενα αστοχίας ή δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών κατά την διάρκεια του πειράματος και η κατάρρευση προέκυψε σχεδόν απότομα. Η δοκός κατέρρευσε μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, απότομα. Συνολικά όπως και στην δοκό 7 (Μάρμαρο Διονύσου), τα ογκοτεμάχια που αστόχησαν είναι τα 1,6,7 και 12, δηλαδή τα 2 ακριανά και 2 μεσαία ογκοτεμάχια, όπως ήταν αναμενόμενο στην συνηθισμένη μορφή αστοχίας μιας δοκού voussoir. Το πείραμα διήρκεσε 5110,80 sec = 85,18 min. Τα αποτελέσματα φόρτισης ήταν τα εξής:

- Το μέγιστο φορτίο επιτεύχθηκε στα 4073,60sec και διαμορφώθηκε στα 9,62kN.
- Η μέγιστη μετατόπιση διαμορφώθηκε στα 2,3 cm.
- Η μέγιστη αξονική δύναμη επιτεύχθηκε στα 5049,60sec και διαμορφώθηκε στα 52,50kN.

Για να υπολογιστεί η παραπάνω αξονική, πήραμε τις μετρήσεις από τα strain gages 6 (Ράβδος 3) και 8 (Ράβδος 4), προσθέσαμε τις παραμορφώσεις και έπειτα λόγω συμμετρίας τις πολλαπλασιάσαμε επί 2. Για να γίνει συσχέτιση μεταξύ του φορτίου και του χρόνου της πρέσσας και του χρόνου των διαγραμμάτων της ακουστικής εκπομπής, αφαιρούνται από τον χρόνο της ακουστικής εκπομπής 290,19 sec. Παρατηρήθηκαν τα εξής γεγονότα:

- Στα **3956,98 sec (3661,61 sec χρόνος πειράματος)**, τα hits αυξήθηκαν από τα 1529 στα 2334, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 7.94, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 66 dB. Δεν παρατηρήθηκε όμως μακροσκοπικά κάποιο φαινόμενο, όπως επίσης δεν είχαμε και έκλυση ενέργειας.
- Στα **4383 sec (4092,80 sec χρόνος πειράματος/Σχήμα 7.91)**, τα hits αυξήθηκαν από τα 3059 στα 5957, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 7.94, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 99 dB. Ο χρόνος μέχρι να επιτευχθεί το μέγιστο πλάτος 99 dB (Risetime), ήταν 21878 msec, με την διάρκεια του γεγονότος να κρατάει 41573 msec. Παρατηρήθηκε και μία μικρή έκλυση ενέργειας. Το b value μειώθηκε από τα 2,94 στα 2,28, λόγω μεγιστοποίησης του πλάτους. Στα 4092,80 sec, παρατηρήθηκε, σταδιακή αποφλοίωση στο πάνω μέρος των μεσαίων ογκοτεμαχίων 6 και 7, με σταδιακό σπάσιμο και σύνθλιψη του πάνω μέρους λόγω επικράτησης θλιπτικών τάσεων.
- Στα **4614 sec (4323,81 sec χρόνος πειράματος)**, τα hits αυξήθηκαν από 6842 σε 7808, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 73dB. Δεν παρατηρείται

έκλυση ενέργειας, ούτε αξιοσημείωτη αλλαγή στην διάρκεια duration ή στο risetime. Το b value μειώθηκε από τα 2,89 στα 2,01.

- Στα **4829 sec (4538,81 sec χρόνος πειράματος/Σχήμα 7.92)**, τα hits αυξήθηκαν από 7969 σε 8532. Υπήρξε μία ανεπαίσθητη έκλυση ενέργειας, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 77 dB. Ο χρόνος για να επιτευχθεί αυτό το πλάτος ήταν 16773 msec, και η συνολική διάρκεια του γεγονότος 26404 msec. Το b value μειώθηκε από τα 1,73 στα 1,52. Στα 4538,81 sec), παρατηρείται περαιτέρω σπάσιμο και σύνθλιψη στο πάνω μέρος των ογκοτεμαχίων 6 και 7.
- Στα **5087 sec (4787,81 sec χρόνος πειράματος)**, τα hits αυξήθηκαν από τα 8935 στα 9337, με το πλάτος να διαμορφώνεται στα 65 dB. Δεν παρατηρείται έκλυση ενέργειας, ούτε αξιοσημείωτη αλλαγή στην διάρκεια duration ή στο risetime. Το b value μειώθηκε από τα 4,57 στα 3,21.

Τέλος να σημειωθεί ότι όπως ήταν αναμενόμενο και φαίνεται και από το διάγραμμα 7.94, τα hits ακουστικής εκπομπής αυξήθηκαν απότομα τη στιγμή της αστοχίας, όπου κατέρρευσε η δοκός, όπως επίσης και η ενέργεια.

Όσον αφορά τις αριθμητικές προσομοιώσεις:

Η αριθμητική προσομοίωση για τις δοκούς γύψου συσχετίστηκε με την δοκό γύψου 4, γιατί σε αυτή την δοκό παρουσιάστηκε η κατάλληλη μορφή αστοχίας μιας δοκού voussoir. το μέγιστο φορτίο επιτυγχάνεται στα 0,007 m και είναι 9,69kN, η οποία είναι η βέλτιστη τιμή δεδομένων των συνθηκών που τέθηκαν στις παραμέτρους, ενώ στην πειραματική διαδικασία το μέγιστο έφτασε 13,30kN στα 0,007m. Επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η διατμητική δυστροπία των ασυνχειών (shear stiffness) τόσο αυξάνεται το μέγιστο φορτίο, ενώ όσο αυξάνεται η ορθή δυστροπία (normal stiffness), τόσο αυξάνεται η μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο, αλλά το πρόβλημα και σε αυτό το μοντέλο είναι ότι παρουσιάζεται εφελκυσμός σε περιοχές όπου δεν εμφανίστηκαν κανονικά στην πειραματική δοκό.

Η αριθμητική προσομοίωση για τις δοκούς τσιμεντοκονιάματος συσχετίστηκε με την δοκό 6, γιατί σε αυτή την δοκό παρουσιάστηκε η κατάλληλη μορφή αστοχίας μιας δοκού voussoir. το μέγιστο φορτίο επιτυγχάνεται στα 0,009 m και είναι 33,95kN, περίπου όπως και στην πειραματική διαδικασία, στην οποία το μέγιστο φορτίο έφτασε 36,07kN στην ίδια μετατόπιση. Επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το shear stiffness τόσο αυξάνεται το μέγιστο φορτίο, ενώ όσο αυξάνεται το normal stiffness, τόσο αυξάνεται η μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο, αλλά το πρόβλημα και σε αυτό το μοντέλο είναι ότι παρουσιάζεται εφελκυσμός σε περιοχές όπου δεν εμφανίστηκαν κανονικά στην πειραματική δοκό.

Η αριθμητική προσομοίωση για τις δοκούς μαρμάρου συσχετίστηκε με την δοκό μαρμάρου Διονύσου (Δοκός 7). Το φορτίο διαμορφώνεται στην πρώτη κορυφή στα

0,003 m και είναι 22,43kN, ενώ στο πείραμα το μέγιστο φορτίο έφτασε στα 6,53kN στα 0,005m, όπως επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το shear stiffness τόσο μειώνεται η μετατόπιση στην οποία παρατηρείται το μέγιστο φορτίο, αλλά το πρόβλημα και σε αυτό το μοντέλο είναι ότι παρουσιάζεται εφελκυσμός σε περιοχές όπου δεν εμφανίστηκαν κανονικά στην πειραματική δοκό.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι πίνακες με τα αποτελέσματα:

ΔΟΚΟΙ	Μορφή αστοχίας	Μέγιστο Φορτίο (kN)	Μέγιστη μετατόπιση (cm)	Μέγιστη Αξονική δύναμη (kN)	Διάρκεια πειράματος (sec)
Δοκός 1 (Γύψος 1)	Αστοχία λόγω σύνθλιψης στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων	8,99	0,2374	6,75	53,6
Δοκός 2 (Γύψος 2)	Απότομη κατάρρευση λόγω μηχανικής αστάθειας	7,162	2,2	-	32,8
Δοκός 3 (Γύψος 3)	Αστοχία της δοκού λόγω σύνθλιψης συγκεκριμένου ογκοτεμαχίου (Ογκοτεμάχιο 5)	3,993	3,5	19,11	4103,6
Δοκός 4 (Γύψος 4)	Αστοχία λόγω σύνθλιψης στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων	13,3	3,6	41,33	4074
Δοκός 5 (Τσιμεντοκονίαμα 1)	Αστοχία συγκεκριμένων ογκοτεμαχίων (Ογκοτεμάχια 1,2 και 3)	17,32	2,5	89,95	2586
Δοκός 6 (Τσιμεντοκονίαμα 2)	Αστοχία λόγω σύνθλιψης στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων	36,07	4	109,543	4856,6
Δοκός 7 (Μάρμαρο Διονύσου)	Απότομη κατάρρευση μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου	6,53	1,6	32,78	1138,6
Δοκός 8 (Μάρμαρο Βώλακα)	Απότομη κατάρρευση μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου	9,62	2,3	52,5	5110,8

Πίνακας 9.1.

ΔΟΚΟΙ	Πείραμα	Προσομοίωση
Δοκός 4 (Γύψος 4)	Μέγιστο φορτίο 13,30kN σε μετατόπιση 0,7 cm	Μέγιστο φορτίο 9,69kN σε μετατόπιση 0,7 cm
Δοκός 6 (Τσιμεντοκονίαμα 2)	Μέγιστο φορτίο 36,07kN σε μετατόπιση 0,9 cm	Μέγιστο φορτίο 33,95kN σε μετατόπιση 0,9 cm
Δοκός 7 (Μάρμαρο Διονύσου)	Μέγιστο φορτίο 6,53kN σε μετατόπιση 0,5 cm	Μέγιστο φορτίο 22,43kN σε μετατόπιση 0,3 cm

Πίνακας 9.2.

Από τον πίνακα 9.1 παρατηρούμε ότι όταν η αστοχία προέκυψε λόγω σύνθλιψης στις περιοχές συγκεντρώσεως υψηλών θλιπτικών τάσεων όσον αφορά τις δοκούς

γύψου 1 και 4, όπως επίσης και της δοκού 6, είχαμε εμφάνιση μεγάλου φορτίου την στιγμή της αστοχίας, όπως επίσης παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η μονοαξονική αντοχή του υλικού, δηλαδή όταν πάμε από τις δοκούς γύψου στις δοκούς τσιμεντοκονιάματος το μέγιστο φορτίο όπως ήταν αναμενόμενο αυξάνεται. Οι δοκοί μαρμάρου εμφανίζουν μικρότερα μέγιστα φορτία, λόγω του γεγονότος ότι οι δοκοί μαρμάρου είχαν μικρότερες διαστάσεις από τις δοκούς γύψου και τσιμεντοκονιάματος (Οι δοκοί γύψου και τσιμεντοκονιάματος σχηματίστηκαν από 6 άρρηκτα κυβικά δοκίμια διαστάσεων 10cm x 10cm x 10cm, ενώ οι δοκοί μαρμάρου σχηματίστηκαν από 12 άρρηκτα κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5cm x 5cm x 5cm). Το μέγιστο φορτίο για τις δοκούς γύψου κυμάνθηκε από 3,993kN έως 13,3kN, με μέση τιμή 8,36kN. Το μέγιστο φορτίο για τις δοκούς τσιμεντοκονιάματος κυμάνθηκε από 17,32kN έως 36,07kN, με μέση τιμή 26,69kN. Το μέγιστο φορτίο για τις δοκούς μαρμάρου κυμάνθηκε από 6,53kN έως 9,62kN, με μέση τιμή 8kN.

Η μέγιστη αξονική δύναμη σταδιακά μετρήθηκε αυξημένη μεταβαίνοντας από τις δοκούς γύψου στις δοκούς τσιμεντοκονιάματος. Να τονιστεί ότι στις δοκούς μαρμάρου η αξονική δύναμη ήταν μικρότερη σε σχέση με τις δοκούς τσιμεντοκονιάματος, λόγω και πάλι των διαφορετικών διαστάσεων των δοκών. Η αξονική δύναμη για τις δοκούς γύψου κυμάνθηκε από 6,75kN έως 41,33kN, με μία μέση αξονική δύναμη 22,39kN. Για τις δοκούς τσιμεντοκονιάματος η αξονική δύναμη κυμάνθηκε από 89,95kN έως 109,543kN, με μία μέση αξονική 99,74kN. Για τις δοκούς μαρμάρου η αξονική κυμάνθηκε από 32,78kN έως 52,5kN, με μία μέση αξονική 42,64kN.

Η μέγιστη μετατόπιση για τις δοκούς γύψου κυμάνθηκε από 2,2cm έως 3,6cm, με μια μέση τιμή μετατόπισης 3,1cm. Η μέγιστη μετατόπιση για τις δοκούς τσιμεντοκονιάματος κυμάνθηκε από 2,5cm έως 4cm, με μέση μετατόπιση 3,25cm. Όσον αφορά τις δοκούς μαρμάρου, η μέγιστη μετατόπιση κυμάνθηκε από 1,6cm έως 2,3cm, με μέση μετατόπιση 1,95cm.

Από τον πίνακα 9.2, παρατηρούμε ότι για την δοκό τσιμεντοκονιάματος έγινε καλή συσχέτιση μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος. Στο πείραμα το μέγιστο φορτίο ανήλθε σε 36,07kN σε μετατόπιση 0,9cm, ενώ στην προσομοίωση το μέγιστο φορτίο ανήλθε στα 33,95kN σε μετατόπιση 0,9cm. Για τις δοκούς γύψου το μέγιστο φορτίο πραγματοποιήθηκε στην ίδια μετατόπιση (0,7cm), αλλά με διαφορετική τιμή φορτίου. Τέλος όσον αφορά τις δοκούς μαρμάρου, δεν επετεύχθη τέλεια συσχέτιση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης, λόγω των πολλών διαφορετικών μεταβλητών που υπεισέρχονται στις παραμέτρους του προγράμματος Phase.

Τέλος να τονιστεί ότι, όσον αφορά την ακουστική εκπομπή, όταν είχαμε γεγονότα σύνθλιψης είχαμε πολλά γεγονότα AE, ενώ στις δοκούς μαρμάρου (με αστοχία snap through mechanism), δεν παρατηρήθηκαν αρκετά γεγονότα AE.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αγιουτάντης Γ.Ζαχαρίας: Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων. Εκδόσεις Ίων, Αθήνα, 2010.
- «ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΜΨΗ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΔΟΚΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ», ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ Π.Ε.Β.Ε.- Ε.Μ.Π., Μάϊος 2012.
- Beer G., Meek J.L.: Design curves for roofs and hanging-walls in bedded rock based on “voussoir” beam and plate solution. Trans. Inst. Min. Metall. 91, A18 – A22, 1982.
- Brady B.H.G., Brown E.T.: Rock mechanics for underground mining. Allen and Unwin. London, 209-222, 1985.
- Bucky P.B.: Effect of Approximately Vertical Cracks on Behaviour of Horizontally Lying Roof Strata. Trans. A.I.M.E., vol. 109, p. 212, 1934.
- Chugh A.K.: Stability analysis of a jointed beam. Int.J.Numer.Anal.Methods in Geomech. 1, 323-341, 1977.
- Evans W.H.: The strength of undermined strata. Trans. Inst. Min. Metall. 50, 475-500, 1941.
- Goodman R.E.: Methods of geological engineering in discontinuous rocks, West Publishing Co., New York, 170-173, 1976.
- Goodman R.E.: Introduction to rock mechanics, 2nd ed. J. Wiley, New York, 233-237, 1989.
- Hoffman K.: An introduction to measurements using strain gauges. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Darmstadt, 1989.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W.: Fundamentals of Rock Mechanics. Third Edition, Chapman and Hall, 1979.
- Κοτσάνης Δ., Νομικός Π., Ρόζος Δ., Σοφιανός Α.Ι., «Ακουστική εκπομπή και παραμόρφωση μαρμάρου σε θλίψη», 8ο Εθνικό Συνέδριο ΜΚΕ της Ελληνικής Εταιρείας Μη Καταστροφικών Ελέγχων, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα 8-9 Μαΐου 2015.
- Κουρτής Μαρίνος: Διερεύνηση της συσχέτισης των ακουστικών εκπομπών με φόρτιση και αστοχία ψαθυρών πετρωμάτων. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2013.
- Mohr F.: Research in Rock Pressure. A most Important Function of The Mining Industry., Bergbau, vol.8, pp. 131-135, 1954.
- Mohr F.: Rock Pressure and Support. Mine and Quarry Engineering, pp. 227-230, 1965.
- Νομικός Π.: Εισαγωγή στην μηχανική των πετρωμάτων. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2015.

- Νομικός Π.: Μηχανική αστάθεια και αστοχία μεγάλων υπόγειων ανοιγμάτων σε ογκοτεμαχισμένες δομές πετρώματος. Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2004.
- Obert L., Duvall W.I.: Rock mechanics and the design of structures in rock, J.Wiley, New York, 518-524, 1967.
- Passaris E.K.S., Ran J.Q., Mottahed P.: Stability analysis of the jointed roof in stratified rock. Pre-print Proc., 34th US Symp. On Rock Mech. 2, 693-696, 1993.
- Potts E.L.J., Szeki A., Watson S.H., Mottahed P.: The evaluation of the design criteria for an underground roof considered as a linear arch. In. Proc, 4th Congr. ISRM, Montreux, 531-538, 1979.
- Ran, J.Q.: Voussoir beam stability analysis for the jointed roof in stratified rock mass, Ph.D thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK, 1993.
- Ran J.Q., Passaris E.K.S., Mottahed P.: Shear Sliding Failure of the jointed Roof in Laminated Rock Mass. Rock Mech. Rock Engng, 27 (4), 235-251, 1994.
- Saeb S., Amadei B.A.: Mathematical model for the shear behavior of a dilatant rock joint. Rock Mechanics Contributions and Challenges, pp. 237-244, 1990.
- Σοφιανός Α.Ι.: Υποστήριξη Υπογείων Έργων. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2013.
- Sterling R.L., Nelson C.R.: An experimental investigation of the ultimate strength of laterally constrained rock beams. Exper.Mech. 18, 261-268, 1978.
- Sterling R.L.: The ultimate load behavior of latterly constrained rock beams. 21st U.S. Symposium of Rock Mechanics, pp. 533-542, 1980.
- Wright F.D.: Arching action in cracked roof beams. 5th Int. Strata Control Conf. paper 29., 1972.
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Bending>
- http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/uploads/4/3/A03_Seismic_Signals.pdf.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge
- https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge
- <http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/57-gupsos>
- <http://www.fhl.gr/2/wp-content/uploads/2015/05/Tech.-Data-Volakas.pdf>
- <https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs2>
http://www.metal.ntua.gr/uploads/4240/Kotsovovs_KEF_3.pdf

