

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



***ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΚΑΤΑ
ΤΙΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ
ΜΑΡΜΑΡΟΥ***



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΒΕΡΙΓΑΚΗΣ Ν. ΜΙΧΑΗΛ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής

Φίλιππος Βαλλιανάτος, Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ, 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της απόκρισης Ακουστικών Εκπομπών κατά τη φόρτιση δοκιμίων μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων. Το μάρμαρο που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από τα λατομεία Κοιμηνηών Νέστου.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής διαμορφώθηκαν δοκίμια και έγιναν πειράματα κάμψης τριών σημείων στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα πειράματα οι διαστάσεις των δοκιμίων, ο προσανατολισμός των νερών του μαρμάρου και ο ρυθμός μετατόπισης της συσκευής κάμψης παρέμειναν αμετάβλητα.

Σκοπός των πειραματικών δοκιμών είναι να μελετηθεί πως μεταβάλλονται οι χαρακτηριστικοί παράμετροι των Ακουστικών Εκπομπών καθώς εξελίσσεται η φόρτιση των δοκιμίων.

Τέλος στα αποτελέσματα περιλαμβάνεται συσχέτιση της φόρτισης και των Ακουστικών Εκπομπών.

ABSTRACT

The present thesis was focused on the acoustic emission technique during the loading on several marble specimens. The samples were prepared using Komninon Nestou marble and subjected to three point bending test.

The experiments were conducted at the laboratory of Rock mechanics at the school of Mineral Resources Engineering (Technical University of Crete). All the experiments were performed under the same loading pattern. Furthermore, the orientation of marble specimens with respect to the loading axis as well as the applied loading rate (displacement rate) for bending remained constant in all experiments.

The main goal of this work was to investigate the emitted acoustic emissions with respect to the stresses and strains measured during loading and failure. Results clearly indicate that acoustic emissions dramatically increase when close to failure.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ολοκληρώνοντας της εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην διεκπεραίωση της:

Τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη, καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, για την συνεχή καθοδήγηση του και βοήθεια και για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και διορθώσεις του στην συγγραφή του κειμένου.

Τον καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο και τον καθηγητή του ΤΕΙ Κρήτης κ. Φίλιππο Βαλλιανάτο για την συμμετοχή τους στην αξιολόγηση της εργασίας αυτής.

Τον Μηχανικό Μεταλλείων κ. Κωνσταντίνο Κακλή, για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του, την εύρεση πηγών και την πολύτιμη βοήθεια στο πρακτικό μέρος της εργασίας.

Τον Μηχανικό Μεταλλείων κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο για την καθοριστική συμβολή του στην εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών.

Συνεργάτες του ΤΕΙ Χανίων για την συμμετοχή τους στην διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών και την διάθεση απαραίτητου εξοπλισμού.

Την επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου της Μηχανικής Πετρωμάτων κ. Σταθογιάννη Φωτεινή για τις διορθώσεις της επί του κειμένου της διπλωματικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για την ηθική και υλική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης και όλους τους συγγενείς και φίλους που στάθηκαν δίπλα μου.



Acknowledgments

This work was supported by the THALES Program of the Ministry of Education of Greece and the European Union in the framework of the project entitled "Integrated understanding of Seismicity, using innovative Methodologies of Fracture mechanics along with Earthquake and non-extensive statistical physics - Application to the geodynamic system of the Hellenic Arc. SEISMO FEAR HELLARC".

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT.....	ii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	3
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ.....	3
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	3
2.2 ΤΑ ΜΑΡΜΑΡΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ	4
2.3 ΓΕΝΕΣΗ	4
2.4 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	5
2.5 ΜΑΡΜΑΡΟ ΚΟΜΝΗΝΩΝ ΝΕΣΤΟΥ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	8
ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΚΑΜΨΗΣ	8
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	8
3.2 ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΕ ΔΟΚΟΥΣ	14
3.3 Η ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	16
3.4 ΚΑΜΨΗ ΔΟΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ	18
3.5 ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ	21
3.5.1 ΙΣΟΤΡΟΠΑ ΥΛΙΚΑ.....	21
3.5.2 ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΑ ΥΛΙΚΑ	24
3.5.3 ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	26
ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ	26
4.1 ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ	26
4.1.1 ΕΙΔΗ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	27
4.1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	27
4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ	30
4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΕ	30
4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΑΕ	32
4.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΑΕ	35
4.5.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ	35
4.5.2 ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ	36

4.5.3 ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	37
4.6 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΛΗΨΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΕ	38
4.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ	39
4.7.1 ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ - ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ	39
4.7.2 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΠΗΓΗΣ ΑΕ	40
4.7.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΕ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	42
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	42
5.1 ΓΕΝΙΚΑ	42
5.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ	42
5.3 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ	44
5.4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ	45
5.5 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	45
5.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	53
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	53
6.1 ΓΕΝΙΚΑ	53
6.2 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	67
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	67
7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	67
7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69
Ελληνική Βιβλιογραφία	69
Διεθνής Βιβλιογραφία	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	70
Δοκίμιο 4	70
Δοκίμιο 6	78
Δοκίμιο 7	86
Δοκίμιο 8	94
Δοκίμιο 9	102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μάρμαρο είναι πέτρωμα αποτελούμενο από ασβεστίτη. Η λέξη ετυμολογείται από την αρχαιοελληνική μάρμαρος, δηλαδή «λαμπερός λίθος». Είναι ένα σύνηθες δομικό υλικό με πολλαπλές εφαρμογές όπως είναι η παρασκευή αδρανών υλικών, χημικών προϊόντων (συνθετικού μαγνησίτη, αλκαλίων, ανθρακασβεστίου, λευκαντικών, φωσφορικού ασβεστίου, οργανικών χημικών ενώσεων κ.α.) αλλά και υάλου. Αρκετά συχνά χρησιμοποιείται και ως προσθετικό υλικό σε ζωοτροφές. Πέρα όμως από τα παραπάνω το μάρμαρο έχει ταυτιστεί με τα αριστουργήματα της γλυπτικής και της αρχιτεκτονικής της αρχαίας Ελλάδας, με έργα τέχνης μοναδικά και ανεπανάληπτα, που συνεχίζουν μέχρι και σήμερα να προκαλούν τον θαυμασμό.

Λόγω λοιπόν της ευρείας χρήσης του μαρμάρου, η μελέτη της μηχανικής του συμπεριφοράς είναι εξέχουσας σημασίας. Για το λόγο αυτό έχουν ξεκινήσει πειράματα για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του μαρμάρου, ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια σε όλες τις εφαρμογές του. Στην αρχή τα πειράματα γίνονταν με δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού στην πορεία όμως χρησιμοποιήθηκαν και οι δοκιμές κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων, οι οποίες αποτελούν πλέον τις πιο συνήθεις μηχανικές δοκιμές (Πρασιανάκης, 1986).

Η μέθοδος της κάμψης τριών σημείων είναι η περίπτωση της ράβδου που δέχεται συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο της. Η μέθοδος αυτή προσομοιάζει την καταπόνηση του πετρώματος στην οροφή ανοίγματος, φυσικού ή τεχνητού, με μεγάλη εφαρμογή στην ευστάθεια αρχαίων μνημείων. Συνεπώς ο υπολογισμός των τάσεων στα μάρμαρα από τα οποία αποτελούνται τα αρχαία μνημεία μπορεί να διευκολύνει την εύρεση μεθόδων για την αντιμετώπιση των καταπονήσεων που υφίστανται τα μνημεία αυτά και έτσι να επιτευχθεί η αποκατάστασή τους.

Ο προσδιορισμός της μηχανικής κατάστασης των μαρμάρων από τα οποία αποτελούνται τα αρχαία μνημεία χωρίς την αποσυναρμολόγηση τους ή την λήψη δειγμάτων είναι ένα θέμα το οποίο απασχολεί την επιστημονική κοινότητα και δίνει κίνητρα για την εύρεση μη καταστροφικών μεθόδων οι οποίες μπορούν να δώσουν κρυμμένες πληροφορίες για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται μία μαρμάρινη κατασκευή. Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών είναι μία ευρύτατα διαδεδομένη μη καταστροφική τεχνική. Είναι μία εύκολα εφαρμόσιμη διαδικασία με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων και μετρητικού εξοπλισμού. Δίνει την εποπτική εικόνα της εξέλιξης πιθανών ρωγμών και ατελειών στο εσωτερικό του υλικού όπου δεν είναι εύκολη η μακροσκοπική διερεύνηση τους.

Η χρήση της μεθόδου των ακουστικών εκπομπών θα μπορούσε να βοηθήσει στην εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του μαρμάρου κατασκευής των μνημείων και της εξέλιξης αυτής, σε πραγματικό χρόνο και επομένως να συμβάλλει στην πρόβλεψη πιθανών αστοχιών.

Η αρχή της εφαρμογής της τεχνικής της ακουστικής εκπομπής στην μηχανική πετρωμάτων έγινε από τους Obert και Duvall (1942) οι οποίοι τη χρησιμοποίησαν για να προβλέψουν τις βίαιες εκτινάξεις πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας του 1930. Σήμερα η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής είναι δημοφιλής και ως εργαλείο για τον μη καταστρεπτικό έλεγχο (NDT) στη βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται για την επιτόπια ανίχνευση της εξέλιξης ρωγμών και τον έλεγχο ασφάλειας κατασκευών (κυρίως μεταλλικών) (Κυπριωτάκη, 2012).

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της απόκρισης ακουστικών εκπομπών κατά τη φόρτιση δοκιμίων μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από μάρμαρο Κομνηνών Νέστου υλικό στο οποίο δεν έχουν γίνει εκτεταμένες μελέτες, συνεπώς η μελέτη του παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η προέλευση της λέξης μάρμαρο είναι αρχαιοελληνική. Κατά τους ομηρικούς χρόνους η λέξη μάρμαρος σήμαινε πέτρα. Η αρχαία ελληνική λέξη «μαρμέρω» σημαίνει γυαλίζω την πέτρα. Στην ελληνική και τη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για τη λέξη μάρμαρο ανάλογα με τον τομέα στον οποίο χρησιμοποιείται, χωρίς όμως να αναιρεί ο ένας τον άλλο (Εξαδάκτυλος, 2006).

- **Γεωλογικά**, μάρμαρο σημαίνει το προϊόν της μεταμόρφωσης ασβεστολίθων, δηλαδή πέτρωμα που αποτελείται από κρυστάλλους ασβεστίτη ή δολομίτη ή μίγμα αυτών των δύο ορυκτών.
- **Τεχνικά**, μάρμαρο ονομάζεται κάθε πέτρωμα που μπορεί να εξορυχθεί σε όγκους ικανών διαστάσεων και μπορεί να κοπεί να λειανθεί και να στιλβωθεί. Για παράδειγμα στην τέχνη των μαρμαρογλυπτών ή των οικοδόμων με τον όρο «μάρμαρο» ονομάζεται κάθε πέτρωμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη γλυπτική, για την κατασκευή έργων τέχνης, στην εσωτερική ή εξωτερική διακόσμηση κτιρίων. Μάρμαρα μπορούν να θεωρηθούν ο ασβεστόλιθος (που επιδεικνύει μικρή κρυσταλλική δομή), ο όνυχας, ο σερπεντίνης και ο τραβερτίνης. Παρόλο που ασβεστόλιθος έχει την ίδια χημική σύσταση με το μάρμαρο διαφέρει στο ότι τα σωματίδια ανθρακικού ασβεστίου ή ανθρακικού μαγνησίου είναι κοκκώδη σε αντίθεση με το μάρμαρο στο οποίο είναι κρυσταλλικά. Οι ασβεστόλιθοι με κάποιο ποσοστό κρυσταλλικής δομής μπορούν να πουληθούν ως μάρμαρα με πολύ καλή στίλβωση.
- **Εμπορικά**, η λέξη μάρμαρο αναφέρεται σε κάθε πέτρωμα που μπορεί να πουληθεί σε όγκους και πλάκες. Ο ορισμός αυτός συμπεριλαμβάνει τους γρανίτες, τους σχιστόλιθους κ.ά.
- **Σύμφωνα με την Αμερικάνική Επιτροπή Δοκιμών Υλικών** (American Society of Testing Materials) ASTM (C 119) ο ορισμός του μαρμάρου είναι: ανθρακικό πέτρωμα που διακρίνεται από τη κρυσταλλική δομή του εξαιτίας ανακρυστάλλωσης, συνήθως από θέρμανση ή πίεση κατά τη διάρκεια μεταμόρφωσης, το οποίο συνίσταται κυρίως από ανθρακικά ορυκτά, ασβεστίτη ή δολομίτη, αποκλειστικά ή σε συνδυασμό (Εξαδάκτυλος 2006).

2.2 ΤΑ ΜΑΡΜΑΡΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Τα ελληνικά μάρμαρα παρουσιάζουν πολλές ποικιλίες και χρώματα. Τα ελληνικά μάρμαρα χρησιμοποιήθηκαν στη γλυπτική και στην αρχιτεκτονική λόγω της φυσικής ομορφιάς τους και από αυτά έχουν κατασκευαστεί ή διακοσμηθεί ιστορικά μνημεία και οικοδομήματα. Τα κυριότερα από τα ελληνικά μάρμαρα είναι:

- Τα μάρμαρα Αττικής: Τα πιο σημαντικά μάρμαρα της Αττικής είναι το Πεντελικό μάρμαρο και το μάρμαρο Διονύσου. Το λευκό μάρμαρο της Πεντέλης είναι περιζήτητο στη γλυπτική, λόγω της λαμπρότητας που δίνει στα έργα τέχνης, καθώς είναι πάλλευκο και διαφώτιστο. Από αυτό έχουν κατασκευαστεί σπουδαία μνημεία όπως ο Παρθενώνας, το Ερέχθειο, τα Προπύλαια, το Θησείο, ο ναός του Ολυμπίου Διός, η Ακαδημία Αθηνών κ.ά.
- Το περίφημο μάρμαρο της Πάρου, ο λυχνίτης ή λυχνεύς των αρχαίων, από το οποίο έχουν κατασκευαστεί ο Ερμής του Πραξιτέλους, ο ναός των Δελφών, το Πτι Παλαί στο Παρίσι.
- Τα λευκά μάρμαρα της Θάσου, το λευκό ή ανοιχτότεφρο μάρμαρο της Νάξου, τα πράσινα μάρμαρα της Σκύρου και της Τήνου (το περίφημο verde antico της αρχαιότητας), το κόκκινο μάρμαρο (rosso antico) στα Δημαριώτικα της Μάνης. Ακόμα ο κροκεάτης λίθος, πορφύρης που υπάρχει κοντά στις Κροκεές της Λακωνίας.
- Ο πράσινος λατυποπαγής οφείτης της Λάρισας, από τον οποίο κατασκευάστηκαν οι μονόλιθοι της Αγιάς Σοφιάς στη Κωνσταντινούπολη και του Αγίου Παύλου και του Αγίου Ιωάννη στη Ρώμη.
- Τέλος μάρμαρα απαντώνται στο Μαραθώνα, στη Θήβα, στην Ερέτρια, στην Άνδρο, στη Χίο, στην Εύβοια, στη Ρόδο και στη Διαλισκάρη (Εγκυκλοπαίδεια Δομή).

2.3 ΓΕΝΕΣΗ

Το μάρμαρο είναι ένας ασβεστόλιθος οργανικής προέλευσης με σακχαρώδεις κόκκους, ο οποίος είναι αποτέλεσμα έντονων διεργασιών μεταμόρφωσης, οι οποίες επέφεραν μια πλήρη ανακρυστάλλωση του ανθρακικού ασβεστίου το οποίο αποτελεί τη μάζα του πετρώματος. Το μάρμαρο είναι προϊόν μεταμόρφωσης ασβεστόλιθων ή δολομιτών. Πολλές ποικιλίες μαρμάρων έχουν δημιουργηθεί από μία διπλής δράσης μεταμόρφωση, δηλαδή πρώτα κατατεμαχίζονται από δυναμικές δράσεις και έπειτα ανασυγκολλούνται με απόθεση ανθρακικού ασβεστίου μέσα στις ρωγμές.

Οι ασβεστόλιθοι προκύπτουν από διαγένεση ασβεστολιθικών ιζημάτων. Τα ασβεστολιθικά ιζήματα προκύπτουν από συσσώρευση σκελετικών υπολειμμάτων διαφόρων

απολιθωμάτων, άλλων μη σκελετικών κόκκων, κλαστικό υλικό με ή χωρίς ασβεστολιθική ιλύ (μικριτικό υλικό). Σε πολλές περιπτώσεις το πέτρωμα αποτελείται εξ' ολοκλήρου από μικριτικό υλικό με αποτέλεσμα να έχει μεγάλη σκληρότητα και να εμφανίζει πολύ μικρό πορώδες και κογχοειδή θραυσμό.

Το ασβεστολιθικό υλικό μεταφέρεται από τη ξηρά με τη βοήθεια του νερού και αποτίθεται στις θαλάσσιες λεκάνες. Το εδαφικό και ποτάμιο νερό περιέχει ως κύριο διαλυμένο συστατικό το ιόν HCO_3^- , το οποίο τελικά καταλήγει στη θάλασσα. Στη συνέχεια το ανθρακικό ασβέστιο το παραλαμβάνουν οι θαλάσσιοι οργανισμοί όπως είναι τα κοράλλια, τα βρυόζωα, τα φύκη και τα διάφορα μαλάκια και το χρησιμοποιούν. Όταν πεθάνουν αποδίδουν το ανθρακικό ασβέστιο με τη μορφή των θρυμματισμένων κελυφών τους. Η καθίζηση χημικού ιζήματος πραγματοποιείται σε βάθη μικρότερα των 5500 μέτρων, καθώς σε μεγαλύτερα βάθη παραμένει διαλυμένο στο θαλασσινό νερό.

Στα μάρμαρα τα ίχνη της αρχικής στρώσης ασβεστόλιθου είναι γενικά εμφανή ενώ τα ίχνη απολιθωμάτων είναι σχεδόν αδύνατον να βρεθούν. Τα ορυκτά που συνυπάρχουν ως δευτερεύοντα είναι γενικά αυθιγενούς προέλευσης και δημιουργούνται από ρευστές προσμίξεις και ανακρυσταλλωμένες σε διάφορες ορυκτολογικές μορφές κατά τη διεργασία της διαγένεσης. Τα πιο συνήθη δευτερεύοντα συστατικά των μαρμάρων είναι ο διοψίδιος, ο χλωρίτης, το πλαγιόκλαστο, ο βιοτίτης, ο χαλαζίας, γρανίτης, ο αλβίτης (άστριος), ο μοσχοβίτης και ο γραφίτης. Είναι συχνό φαινόμενο να εμφανίζονται και μικρές ποσότητες πυριτικών ορυκτών.

Τα μάρμαρα μπορούν να σχηματιστούν και στις τρεις ζώνες θερμοκρασιών και πίεσης. Έτσι, ανάλογα με τα συμπτωματικά ορυκτά που περιέχουν, διακρίνονται σε μάρμαρα υψηλών θερμοκρασιών (καταζώνης), ή μέσων θερμοκρασιών (μεσοζώνης), ή χαμηλών θερμοκρασιών (επιζώνης). (Ιστάντσο, 2008)

2.4 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα χαρακτηριστικά των μαρμάρων που δίνουν σε αυτά την ανάλογη εμπορική τους αξία είναι:

- Η χρωματική και αισθητική τους εμφάνιση
- Ο ιστός
- Η παρουσία ή όχι φλεβιδίων και η διάταξη και το χρώμα αυτών
- Η παρουσία εγκλεισμάτων, καθώς και η ύπαρξη και η συχνότητα των λεγόμενων «λεκέδων»
- Οι φυσικές, χημικές, μηχανικές και τεχνικές τους ιδιότητες

Ένα από τα σημαντικότερα φυσικά γνωρίσματα του μαρμάρου είναι το χρώμα του, το οποίο καθορίζεται από τη φύση των συστατικών του. Έτσι τα μάρμαρα που αποτελούνται από καθαρό ασβεστίτη ή δολομίτη είναι λευκά, λόγω του λευκού χρώματος των ορυκτών

αυτών. Τα σερπεντινικά μάρμαρα έχουν πράσινο χρώμα, εφόσον το ορυκτό του σερπεντίνη το οποίο κυριαρχεί στη σύσταση αυτού του τύπου μαρμάρου έχει πράσινο χρώμα. Οι προσμίξεις διαφόρων ξένων ουσιών προσδίδουν διάφορες αποχρώσεις σε ένα λευκό αγνό μάρμαρο. Αυτές οι προσμίξεις κατανέμονται είτε ομοιόμορφα δίδοντας στο μάρμαρο ένα ομοιόμορφο χρωματισμό, είτε μπορεί να εμφανίζονται με ζωνώδη μορφή «μπαλωμάτων» αποδίδοντας στο μάρμαρο ανομοιόμορφο χρωματισμό.

Η πολυτιμότερη ποικιλία μαρμάρου είναι αυτή που χρησιμοποιείται στη γλυπτική. Είναι λεπτόκοκκο, ολόλευκο, διαφώτιστο, που λαξεύεται τέλεια, αλλά μπορεί να προσβληθεί εύκολα από ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Τα σημαντικότερα μάρμαρα γλυπτικής προέρχονται από την Πεντέλη, τη νήσο Πάρο και από ορισμένα λατομεία των Απουανών Άλπεων στην Ιταλία.

Το κοινό μάρμαρο είναι πιο χοντρόκοκκο από εκείνο που χρησιμοποιείται στη γλυπτική και είναι το πιο εύχρηστο ως δομικό υλικό. Το χρώμα του τείνει ελαφρώς προς το γκρι, ή το κυανότερο, με έντονες φλέβες ορισμένες φορές. Όταν οι φλέβες του είναι πολύ πυκνές, τότε δημιουργείται το λευκό φλεβώδες μάρμαρο. Οι πιο συνηθισμένες έγχρωμες ποικιλίες του κοινού μαρμάρου είναι το κυανότερο και ο σιπολίνης. Τα μάρμαρα αυτά, ανάλογα με το είδος των σχεδίων που σχηματίζουν τα πιο βαθύχρωμα τμήματα πάνω στα ανοιχτόχρωμα, χωρίζονται σε ταινιωτά, ζωνώδη, φλεβώδη και ποικιλόχρωμα.

Τα μάρμαρα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά, για τη παρασκευή αδρανών υλικών, χημικών προϊόντων (συνθετικού μαγνησίτη, αλκαλίων, ανθρακασβεστίου, λευκαντικών, φωσφορικού ασβεστίου, οργανικών χημικών ενώσεων), υάλου, ως προσθετικό στις ζωοτροφές κ.λ.π. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρασκευή κονιόδους ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο χρησιμοποιείται ως πληρωτικό υλικό στη χαρτοβιομηχανία, τη βιομηχανία πλαστικών, ελαστικών και χρωμάτων και σε διάφορα είδη στόκων και σε οικοδομικά υλικά (Ιστάντσο, 2008).

2.5 ΜΑΡΜΑΡΟ ΚΟΜΝΗΝΩΝ ΝΕΣΤΟΥ

Το υπό εξέταση μάρμαρο Κομνηνών Νέστου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων, εξορύσσεται με υπαίθρια εκμετάλλευση σε λατομείο που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 35 km ανατολικά της Καβάλας προς Ξάνθη. Η συνηθέστερη χρήση του είναι ως δομικό υλικό.

Το μάρμαρο Κομνηνών Νέστου είναι λευκό με γκριζα «νερά» λόγω της ύπαρξης δολομίτη. Η ορυκτολογική σύσταση του κατά βάρος, σύμφωνα με την ορυκτολογική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, είναι ασβεστίτης 93,4%, δολομίτης 6% και χαλαζίας 0,6%. Έχει ειδικό βάρος 2,67 g/cm³ και συντελεστή απορρόφησης κατά βάρος 0,09% (Κακλής, 2010).



Σχήμα 2.1: Λατομείο μαρμάρου Νέστου Κοζανών

Σύμφωνα με την ονοματολογία που χρησιμοποιείται στη τεχνολογία εξόρυξης των ογκομαρμάρων, οι χαρακτηριστικές επιφάνειες του μαρμάρου ορίζονται ως εξής (Εξαδάκτυλος 2006):

Α) Πρόσωπο ή «νερά» του μαρμάρου, ονομάζεται η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς τη στρώση (παράλληλου ιστού) του μαρμάρου. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στην θλίψη είναι μικρότερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.

Β) Μουρέλο ή παρειά ονομάζεται η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την παράταξη του μαρμαροφόρου κοιτάσματος και κάθετη προς το πρόσωπο.

Γ) Κεφάλι ονομάζεται η επιφάνεια που είναι κάθετη στις δύο προηγούμενες. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στη θλίψη είναι μεγαλύτερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΚΑΜΨΗΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η δοκιμή της κάμψης (bending test) χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί η συμπεριφορά ενός υλικού, όταν καταπονείται σε καθαρή κάμψη. Κατά την καταπόνηση των υλικών σε καμπτικές ροπές αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους ένας συνδυασμός εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων.

Για να μελετηθεί η κάμψη χρησιμοποιούνται τρισδιάστατες δοκοί, συνήθως κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, οι οποίες καταπονούνται υπό σταθερή καμπτική ροπή M , με την απουσία παράλληλα τεμνουσών δυνάμεων, αξονικών δυνάμεων, ή στρεπτικής ροπής (καθαρή κάμψη). Εάν η τιμή της ροπής κάμψης είναι τέτοια, ώστε το υλικό να βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, τότε οι τάσεις μεταβάλλονται σύμφωνα με το νόμο (Πρασιανάκης, 1986) :

$$\sigma^κ = \frac{M_Z}{W} = \frac{M_Z}{I_Z} y$$

όπου W είναι η ροπή αντίστασης και I_Z , η ροπή αδράνειας της διατομής της δοκού. Η διατομή της δοκού είναι πάντοτε μικρή σε σχέση με το μήκος της, (Πρασιανάκης, 1986).

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών σε κάμψη υιοθετούνται δύο παραδοχές (παραδοχές Bernoulli) οι οποίες εξάλλου ανταποκρίνονται σε πολύ μεγάλο βαθμό στην πραγματική συμπεριφορά των καμπτόμενων δοκών (υπό συνθήκες καθαρής κάμψης) :

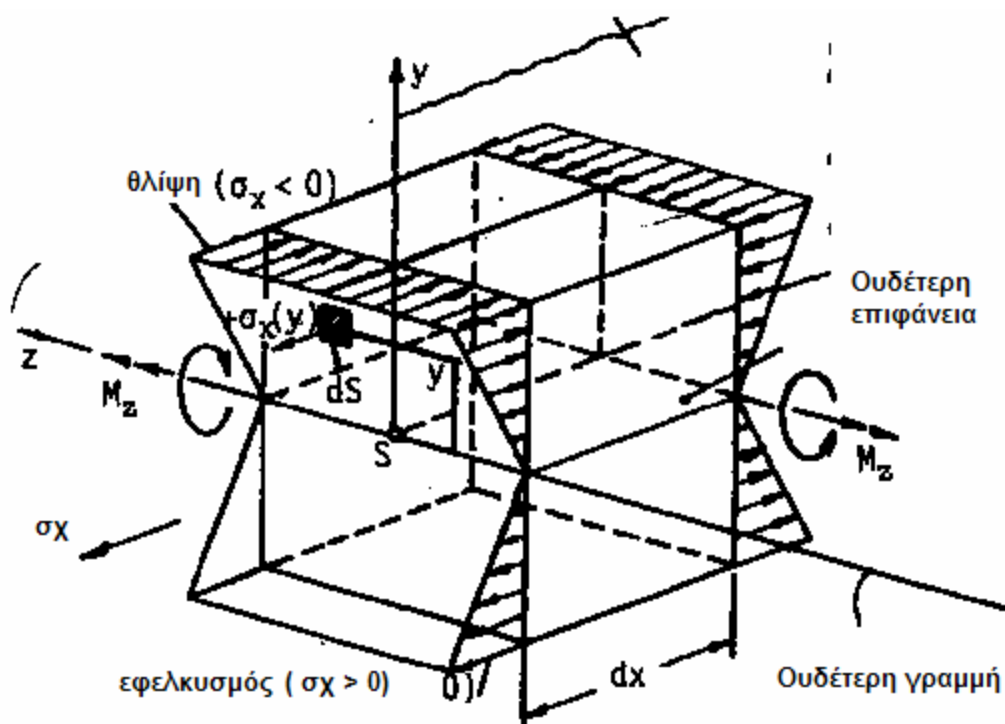
- α) Ότι οι εγκάρσιες διατομές της δοκού διατηρούν την επιπεδότητα τους κατά τη διάρκεια της καμπτικής παραμόρφωσης.
- β) Ότι η δοκός παραμορφώνεται σαν να ήταν ένα άθροισμα από ανεξάρτητες μεταξύ τους διαμήκεις ίνες.

Οι παραδοχές αυτές υποδεικνύουν ότι οι διατομές της δοκού στρέφονται υπό την επίδραση του καμπτικού φορτίου ως ανένδοτες επιφάνειες, καθώς η μια περιοχή ινών στο εσωτερικό του δοκιμίου εφελκύεται, ενώ η άλλη θλίβεται. Η μετάβαση από την περιοχή των θλιβόμενων ινών στη περιοχή των εφελκυσόμενων ινών συντελείται ομαλά (γραμμική μεταβολή των τάσεων από τη μέγιστη εφελκυστική τιμή στην ελάχιστη θλιπτική τιμή), πράγμα που σημαίνει ότι η περιοχή των εφελκυσόμενων ινών διαχωρίζεται από την περιοχή των θλιβόμενων ινών με μια επιφάνεια μηδενικών τάσεων. Η επιφάνεια αυτή, πάνω στην οποία οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι μηδέν, καλείται ουδέτερη επιφάνεια (Σχ. 3.1).

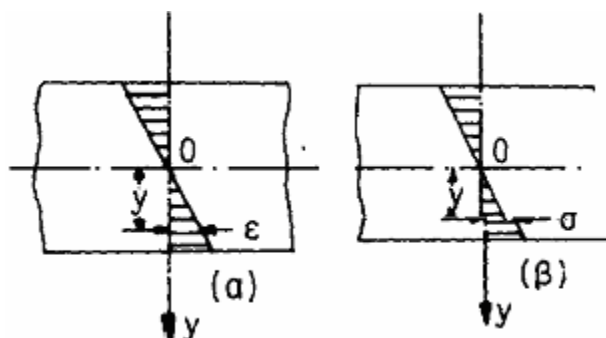
Από τη παραδοχή αυτή προκύπτει ότι η ουδέτερη επιφάνεια είναι ο τόπος των τομών των παλιών (πριν την παραμόρφωση) με τις νέες (μετά την παραμόρφωση) θέσεις των διατομών της ράβδου. Οι τομές αυτές ονομάζονται ουδέτερες γραμμές. Κάθε διαμήκης γραμμή πάνω στην ουδέτερη επιφάνεια, καλείται ουδέτερος άξονας.

Η παραδοχή της επιπεδότητας των εγκάρσιων διατομών σημαίνει παράλληλα ότι η παραμόρφωση των ινών της ράβδου είναι (στην ελαστική μόνο περιοχή) γραμμική συνάρτηση της απόστασης τους από τον ουδέτερο άξονα, δηλαδή (Πρασιανάκης, 1986):

$$\varepsilon = \kappa y \quad (3.1)$$



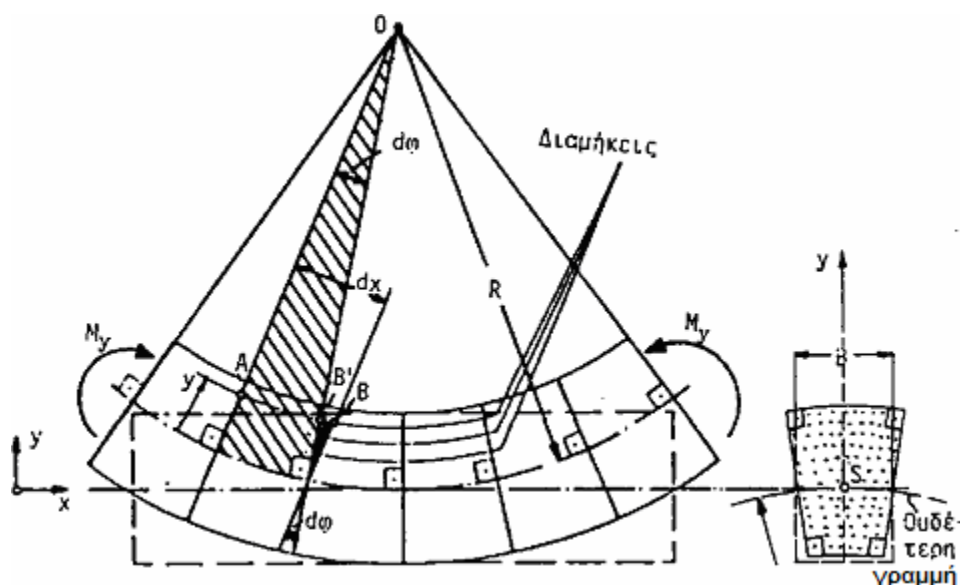
Σχήμα 3.1: Επιφάνεια φόρτισης (Πρασιανάκης, 1985)



Σχήμα 3.2: Παραμόρφωση των ινών από τον ουδέτερο άξονα (Πρασιανάκης, 1985)

Επειδή υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων πρέπει και η τάση των ινών της ράβδου να είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης τους y από τον ουδέτερο άξονα (Σχήμα 3.2). Όταν όμως η δοκός εισέλθει στη πλαστική περιοχή, τότε παύει να ισχύει η γραμμικότητα μεταξύ των τάσεων και παραμορφώσεων.

Κατά τα διαρκεία της κάμψης της δοκού οι κάτω ίνες της δοκού επιμηκύνονται, ενώ οι πάνω ίνες της βραχύνονται. Οι εξωτερικές ίνες εμφανίζουν τις (κατά απόλυτη τιμή) μέγιστες παραμορφώσεις. Σε όλο το μήκος μιας ίνας της δοκού η παραμόρφωση είναι ενιαία, πράγμα που σημαίνει ότι η αρχικά ευθεία δοκός μετασχηματίζεται σε τόξο κύκλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3



Σχήμα 3.3: Ευθεία δοκός που μετασχηματίζεται σε τόξο κύκλου κατά την κάμψη (Πρασιανάκης, 1985)

Για την ορθή διαμήκη παραμόρφωση $\varepsilon_{xx} = \varepsilon$ από την ομοιότητα των τριγώνων του σχήματος 3.3 προκύπτει (Πρασιανάκης, 1985):

$$\varepsilon = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{y}{R} \quad (3.2)$$

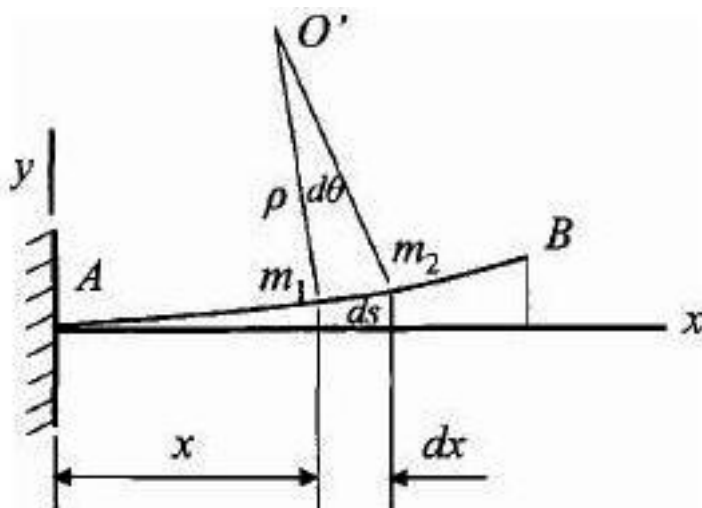
η οποία σε συνδυασμό με την σχέση 3.1 δίνει (Πρασιανάκης, 1985):

$$k = \frac{1}{R} \quad (3.3)$$

όπου R η ακτίνα καμπυλότητας της δοκού, (Πρασιανάκης, 1985).

Για τη διευκρίνιση της έννοιας της καμπυλότητας θεωρείται η διάταξη του σχήματος 3.4. Το βέλος κάμψης της δοκού είναι η καμπύλη AB . Στη συνέχεια σημειώνονται δύο

σημεία m_1 και m_2 πάνω στο βέλος κάμψης. Το σημείο m_1 επιλέγεται σε μια αυθαίρετη απόσταση x από τον άξονα y και το σημείο m_2 επιλέγεται σε μια μικρή απόσταση ds λίγο μακρύτερα κατά μήκος της καμπύλης. Σε κάθε ένα από αυτά τα δύο σημεία σχεδιάζεται μια γραμμή κάθετα στην εφαπτομένη του βέλους κάμψης. Αυτές οι κάθετες τέμνονται στο σημείο O' , το οποίο είναι το κέντρο της καμπυλότητας του βέλους κάμψης.



Σχήμα 3.4: Βέλος κάμψης της δοκού (Gere και Timoshenko, 1997)

Η απόσταση m_1O' καλείται ακτίνα καμπυλότητας ρ και η καμπυλότητα κ καθορίζεται σαν την αντίστροφη της ακτίνας της καμπυλότητας.

Με τη καμπυλότητα μετράται πόσο έντονα κάμπτεται μία δοκός. Στη περίπτωση που το φορτίο στη δοκό είναι μικρό, η δοκός θα είναι σχεδόν ευθεία, η ακτίνα της καμπυλότητας θα είναι πολύ μεγάλη και η καμπυλότητα πολύ μικρή. Από τη γεωμετρία του τριγώνου $O'm_1m_2$ προκύπτει ότι (Gere και Timoshenko, 1997):

$$\rho d\theta = ds$$

όπου $d\theta$ είναι η εσωτερική γωνία μεταξύ των δύο κάθετων και ds είναι η απόσταση μεταξύ των m_1 και m_2 .

Αν η καμπυλότητα είναι σταθερή κατά μήκος μιας καμπύλης, η ακτίνα καμπυλότητας θα είναι επίσης σταθερή και η καμπύλη θα είναι το τόξο ενός κύκλου. Τα βέλη κάμψης μιας δοκού είναι συνήθως πολύ μικρά σε σχέση με το μήκος της. Μικρά βέλη κάμψης σημαίνει ότι η καμπύλη τους είναι σχεδόν ευθεία. Συνεπώς η απόσταση ds κατά μήκος της καμπύλης μπορεί να τεθεί ίση με την οριζόντια προβολή της, dx (Gere και Timoshenko, 1997).

Αλλά από τη διαφορική γεωμετρία είναι γνωστό ότι (Πρασιανάκης, 1985):

$$\frac{1}{R} = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \approx y''$$

(για μικρά βέλη κάμψης y) και συνεπώς γίνεται (Πρασιανάκης, 1985):

$$\kappa = \frac{1}{R} \approx y'' \quad (3.4)$$

Στην ελαστική περιοχή ισχύει ο νόμος του Hooke (Πρασιανάκης, 1985):

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{Ey}{R} \quad (3.5)$$

Η τάση σ μεταβάλλεται λοιπόν γραμμικά από τη μέγιστη (εφελκυστική) τιμή

$\frac{Ey_{max}}{R} = \frac{Eh/2}{R}$ (εξωτερική εφελκυστική ίνα) μέχρι την ελάχιστη (θλιπτική) τιμή, $-\frac{Eh/2}{R}$ (εξωτερική θλιβόμενη ίνα)

Στη καθαρή κάμψη ισχύει ότι $M \approx 0$, $N=0$ (απουσία αξονικών δυνάμεων). Επειδή λοιπόν η συνισταμένη δύναμη, στη διατομή S είναι μηδέν γίνεται (Πρασιανάκης, 1985):

$$\int_s \sigma ds = 0 \Rightarrow \frac{E}{R} \int_s y dS = 0 \Rightarrow \int_s y dS = 0$$

Επομένως η ουδέτερη γραμμή περνάει από το κέντρο βάρους της διατομής. Η εξωτερική ροπή M που εφαρμόζεται στη δοκό ισούται με το άθροισμα των ροπών των εσωτερικών δυνάμεων ($\sigma \cdot dS$), άρα (Πρασιανάκης, 1985):

$$M = \int_s y \sigma ds = \frac{E}{R} \int_s y^2 dS \quad (3.6)$$

Στη σχέση (2.6) η ποσότητα $\int y^2 dS$ είναι η ροπή αδράνειας της διατομής ως προς τον άξονα z .

Άρα η σχέση (3.6) δίνει (Πρασιανάκης, 1985):

$$\frac{E}{R} = \frac{M}{I_z} \quad (3.7\alpha)$$

η οποία με τη βοήθεια της σχέσης (3.5) γίνεται (Πρασιανάκης, 1985):

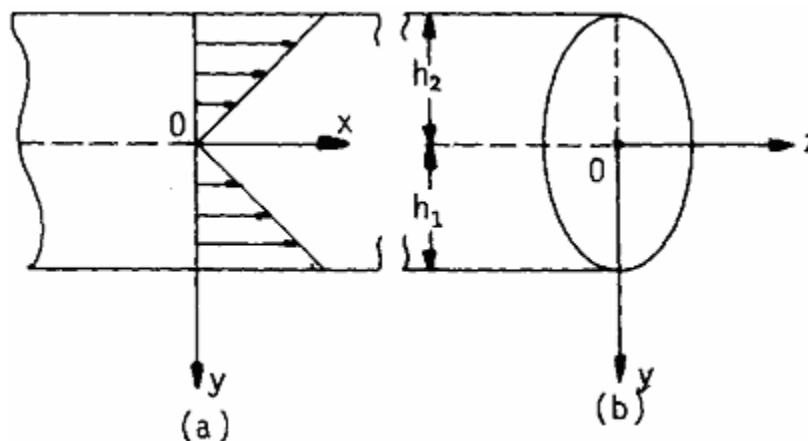
$$\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I_z} \quad (3.7\beta)$$

Για $y=y_{max}$ προκύπτει (Πρασιανάκης, 1985):

$$\sigma_{max} = \frac{My_{max}}{I_z} \quad (3.8)$$

Άρα η τάση γίνεται μέγιστη στις ακραίες τιμές, δηλαδή τις πλέον απομακρυσμένες ίνες από τον ουδέτερο άξονα της δοκού.

Στην κυρτή κατώτερη ίνα της δοκού η τάση είναι εφελκυστική, ενώ στην κοίλη ανώτερη ίνα η τάση είναι θλιπτική (Ιστάντσο, 2008).



Σχήμα 3.5: Συμπεριφορά των ινών κατά την κάμψη (Πρασιανάκης, 1985)

Συμβολίζοντας τις αποστάσεις των εφελκόμενων ακρότατων ινών με h_1 και των θλιβόμενων αντίστοιχα με h_2 , (Σχήμα 3.5), τότε για τη τάση σε κάθε μία από αυτές τις ίνες ισχύει αντίστοιχα ότι (Πρασιανάκης, 1985):

$$\sigma_{\max} = \frac{Mh_1}{I_z} \text{ και } \sigma_{\min} = \frac{Mh_2}{I_z} \quad (3.9)$$

Αν η διατομή είναι συμμετρική ως προς τον άξονα που περνάει από το κέντρο βάρους είναι $h_1 = h_2 = \frac{h}{2}$ τότε και οι τάσεις των ακρότατων ινών σε εφελκυσμό και θλίψη είναι ίσες.

Στη σχέση (3.8) ο λόγος $\frac{I_z}{y} = w$ ονομάζεται ροπή αντίστασης της διατομής. Στην περίπτωση της ορθογωνικής διατομής είναι: $w = \frac{bh^2}{6}$, ενώ στην περίπτωση κυκλικής διατομής διαμέτρου d είναι: $w = \frac{\pi d^3}{32}$, (Πρασιανάκης, 1985).

Οι ποσότητες που προσδιορίζονται με τη δοκιμή κάμψης είναι (Ιστάντσο, 2008):

A) η αντοχή κάμψης σ_{θ}^k που για τα ψαθυρά υλικά ορίζεται ως ο λόγος της ροπής κάμψης τη στιγμή της θραύσης προς τη ροπή αντίστασης της διατομής:

$$\sigma_{\theta}^k = \frac{M_z^{\theta}}{W}$$

Για δοκό ορθογωνικής διατομής πλάτους b και ύψους h , που στηρίζεται σε εφέδρανα, που απέχουν μεταξύ τους απόσταση L , η προηγούμενη σχέση γίνεται (Πρασιανάκης, 1986):

$$\sigma_{\theta}^k = \frac{3P_{\max}L}{2bh^2}$$

όπου P_{\max} είναι το μέγιστο φορτίο.

B) το βέλος κάμψης y κατά τη στιγμή της θραύσης, που είναι η κατακόρυφη μετακίνηση του σημείου εφαρμογής του φορτίου P κατά τη θραύση. Όταν σε μία δοκό δρουν φορτία, την αναγκάζουν σε κάμψη και με αυτό τον τρόπο ο άξονας της παραμορφώνεται σε καμπύλη. Αν για παράδειγμα θεωρηθεί μια μονόπακτη δοκός AB που υπόκειται σε φορτίο P στο ελεύθερο

άκρο της, ο αρχικά ευθύγραμμος άξονας της δοκού καμπυλώνεται. Η απόκλιση αυτή δίνεται από το βέλος κάμψης της δοκού, y , (deflection curve).

Γ) η δυσκαμψία K , που είναι ο λόγος της αντοχής κάμψης προς το βέλος κάμψης τη στιγμή της θραύσης της δοκού (Πρασιανάκης, 1986):

$$K = \frac{\sigma_{\theta}^{\kappa}}{y}$$

Δ) ο συντελεστής κάμψης λ , που ορίζεται ως ο λόγος της αντοχής σε κάμψη σ_{θ}^{κ} προς την αντοχή σε εφελκυσμό $\sigma_{\theta}^{\varepsilon}$ (Πρασιανάκης, 1986).

$$\lambda = \frac{\sigma_{\theta}^{\kappa}}{\sigma_{\theta}^{\varepsilon}}$$

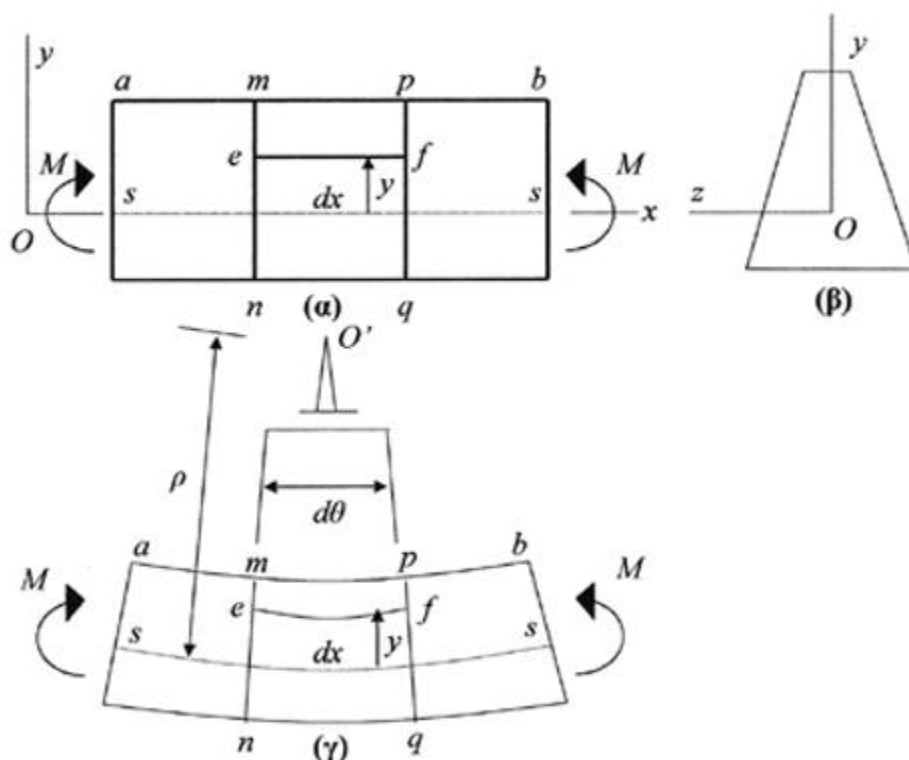
Η αντοχή σε κάμψη, σ_{θ}^{κ} είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη από την αντοχή σε εφελκυσμό, $\sigma_{\theta}^{\varepsilon}$ και αυτό επειδή η σ_{θ}^{κ} συνάγεται με βάση την υπόθεση ότι ο νόμος του Hooke ισχύει σε όλη τη διάρκεια της καταπόνησης, πράγμα που ακόμα και για τα περισσότερα ψαθυρά υλικά δεν είναι απόλυτα ακριβές.

Ε) η μορφή της ελαστικής γραμμής $y = f(x)$ σε διάφορες καταστάσεις φόρτισης της δοκού, (Πρασιανάκης, 1986).

3.2 ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΕ ΔΟΚΟΥΣ

Οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε μια δοκό μπορούν να προσδιοριστούν με την ανάλυση της καμπυλότητας της δοκού και τις σχετιζόμενες παραμορφώσεις. Για το σκοπό αυτό θεωρείται ένα τμήμα ab μιας δοκού σε απλή κάμψη, στην οποία εφαρμόζεται θετική καμπτική ροπή M (Σχήμα 3.6.α). Θεωρείται ότι η δοκός έχει στην αρχή ένα ευθύ διαμήκη άξονα (ο άξονας x στο σχήμα 3.6.α) και ότι η τομή της είναι συμμετρική ως προς τον άξονα y όπως φαίνεται στο σχήμα (3.6.β).

Υπό την επίδραση των καμπτικών ροπών η δοκός κάμπτεται στο επίπεδο xy και ο διαμήκης άξονας της σχηματίζει την καμπύλη ss όπως φαίνεται στο σχήμα (3.6.γ). Οι τομές mn και pq στο σχήμα (2.9.α) παραμένουν επίπεδες και κάθετες στο διαμήκη άξονα. Αυτό το γεγονός είναι τόσο βασικό στη θεωρία της κάμψης που θεωρείται αξίωμα. Παρόλα αυτά μπορεί να καλείται και θεώρημα σύμφωνα με την ακόλουθη θεώρηση: Το βασικό σημείο είναι η συμμετρία της δοκού και του φορτίου της, γεγονός που σημαίνει ότι όλα τα στοιχεία της δοκού (όπως το στοιχείο $mpqn$) πρέπει να παραμορφωθούν με ένα ίδιο τρόπο και αυτό μπορεί να συμβεί μόνο αν οι διατομές παραμένουν επίπεδες κατά την κάμψη (Σχήμα 3.6.γ). Αυτό το συμπέρασμα ισχύει για δοκούς οποιουδήποτε υλικού, ανεξάρτητα αν το υλικό είναι ελαστικό ή μη ελαστικό, γραμμικό ή μη γραμμικό (Μητριτσάκης, 2008).



Σχήμα 3.6: Παραμορφώσεις της δοκού σε απλή κάμψη (Gere & Timoshenko, 1997)

Οι τομές mn και pq περιστρέφονται σε σχέση μεταξύ τους ως προς τους κάθετους άξονες, κάθετα στο επίπεδο xy , λόγω των παραμορφώσεων που προκαλούνται από την κάμψη. Οι διαμήκειες γραμμές στο κατώτερο μέρος της δοκού επιμηκύνονται, ενώ οι διαμήκειες γραμμές στο ανώτερο μέρος της δοκού βραχύνονται. Για το λόγο αυτό το κατώτερο μέρος της δοκού βρίσκεται σε εφελκυσμό και το ανώτερο μέρος σε θλίψη. Μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου τμήματος της δοκού υπάρχει μία διαμήκης επιφάνεια η οποία δεν διαφοροποιείται στο μήκος της. Η επιφάνεια αυτή απεικονίζεται με τη διακεκομμένη γραμμή ss στα σχήματα (3.6.α) και (3.6.γ) και ονομάζεται ουδέτερη επιφάνεια της δοκού.

Τα επίπεδα που περιέχουν τις τομές mn και pq στην παραμορφωμένη δοκό τέμνονται σε μια γραμμή στο κέντρο της καμπυλότητας O' . Η γωνία μεταξύ αυτών των επιπέδων συμβολίζεται με $d\theta$. Ως ακτίνα καμπυλότητας ρ ορίζεται η απόσταση από το κέντρο καμπυλότητας O' έως την ουδέτερη επιφάνεια ss . Η αρχική απόσταση dx μεταξύ των δύο επιπέδων (Σχήμα 3.6.α) είναι απαράλλαχτη στην ουδέτερη επιφάνεια (Σχήμα 3.6.γ) και για αυτό το λόγο ισχύει ότι $\rho \cdot d\theta = dx$. Όμως, όλες οι υπόλοιπες διαμήκειες γραμμές μεταξύ των δύο επιπέδων δημιουργούν κάθετες παραμορφώσεις ϵ_x .

Για να εκτιμηθούν αυτές οι κάθετες παραμορφώσεις χρησιμοποιείται μια διαμήκης γραμμή ef η οποία βρίσκεται μέσα στη δοκό μεταξύ των επιπέδων mn και pq (Σχήμα 3.6.α). Η γραμμή ef προσδιορίζεται από την απόσταση της y από την ουδέτερη επιφάνεια στην

αρχική απαραμόρφωτη δοκό. Έτσι θεωρείται ότι ο ουδέτερος άξονας της μη παραμορφωμένης δοκού συμπίπτει με τον άξονα x . Κατά την κάμψη της δοκού ο ουδέτερος άξονας μετακινείται μαζί με τη δοκό, αλλά ο άξονας x παραμένει στη θέση του. Ωστόσο, η διαμήκης γραμμή ef στη παραμορφωμένη δοκό παραμένει στην ίδια απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα. Γι' αυτό, το μήκος L_1 της γραμμής ef μετά την κάμψη είναι (Gere & Timoshenko, 1997):

$$L_1 = (\rho - y)d\theta = dx - \frac{y}{\rho}dx \quad (3.10)$$

Όταν το πραγματικό μήκος της γραμμής ef είναι dx , προκύπτει ότι η επιμήκυνση του είναι $L_1 - dx$ ή $-ydx/\rho$. Η αντίστοιχη διαμήκης παραμόρφωση είναι ίση με την επιμήκυνση διαιρούμενη με το αρχικό μήκος dx , οπότε (Gere & Timoshenko, 1997):

$$\varepsilon_x = -\frac{y}{\rho} = -\kappa y \quad (3.11)$$

όπου κ είναι η καμπυλότητα.

Από τη παραπάνω εξίσωση (3.11) προκύπτει ότι:

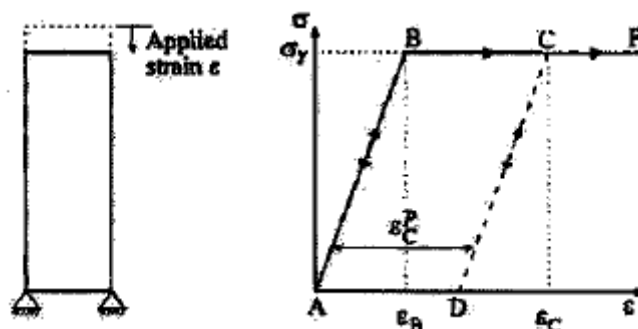
- Οι διαμήκεις παραμορφώσεις στη δοκό είναι ανάλογες με τη καμπυλότητα και μεταβάλλονται γραμμικά με την απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα.
- Όταν η υπό εξέταση ίνα της δοκού είναι πάνω από τον ουδέτερο άξονα, η απόσταση y της ίνας από τον ουδέτερο άξονα είναι θετική. Αν και η καμπυλότητα είναι και αυτή θετική, τότε η παραμόρφωση ε_x θα είναι αρνητική και η ίνα θα έχει υποστεί βράχυνση.
- Όταν η υπό εξέταση ίνα της δοκού είναι κάτω από τον ουδέτερο άξονα, η απόσταση y της ίνας από τον ουδέτερο άξονα είναι αρνητική. Αν και η καμπυλότητα είναι θετική, τότε η παραμόρφωση ε_x θα είναι επίσης θετική και η ίνα θα έχει υποστεί επιμήκυνση.

Η εξίσωση (3.11) για τις διαμήκεις παραμορφώσεις σε μια δοκό προέκυψε μόνο από τη γεωμετρία της παραμορφωμένης δοκού και δεν λήφθηκαν υπόψη οι ιδιότητες του υλικού. Γι' αυτό το λόγο οι παραμορφώσεις σε μια δοκό σε απλή κάμψη μεταβάλλονται γραμμικά με την απόσταση από τον ουδέτερο άξονα ανεξάρτητα από τη μορφή της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του υλικού (Μητρίτσάκης, 2008).

3.3 Η ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από ένα γραμμικά ή μη γραμμικά ελαστικό κλάδο. Όταν η εντατική κατάσταση του υλικού αντιπροσωπεύεται από τον ελαστικό κλάδο, τότε το υλικό εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά. Όταν όμως η εντατική κατάσταση υπερβεί το σημείο διαρροής του υλικού, τότε αρχίζει η εμφάνιση μόνιμων παραμορφώσεων. Ένα πέτρωμα ή γεωυλικό μπορεί να μην χαρακτηρίζεται από τέλεια

ελαστοπλαστική συμπεριφορά, αλλά στον κλάδο, μετά το σημείο διαρροής, να παρουσιάζει είτε κράτυνση είτε χαλάρωση.



Σχήμα 3.7: Μονοαξονική φόρτιση γραμμικά ελαστικού, τέλεια πλαστικού υλικού (Πρασιανάκης, 1986)

Στο σχήμα 3.7 απεικονίζεται μια δοκός ενός ιδανικού γραμμικού ελαστοπλαστικού υλικού, το οποίο φορτίζεται κατά τον κάθετο άξονα με την εφαρμογή θλιπτικής αξονικής παραμόρφωσης, ε . Επίσης στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για τη αυτή δοκό.

Κατά την πρώτη παραμορφωσιακή κατάσταση, η δοκός παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά, όπως φαίνεται στη γραμμή AB. Όταν το υλικό της δοκού είναι γραμμικά ελαστικό η σχέση τάσης - παραμόρφωσης είναι της μορφής $\sigma = E \cdot \varepsilon$ και η κλίση της ευθείας γραμμής AB δίνεται από το μέτρο ελαστικότητας του Young, E . Αν η διαδικασία παραμόρφωσης σταματήσει πριν η τάση στη δοκό φτάσει στο σημείο B, τότε κατά την αποφόρτιση της, η δοκός συμπεριφέρεται με γραμμικά ελαστικό τρόπο και επιστρέφει στην αρχική της κατάσταση χωρίς να έχει υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις. Στην περίπτωση αυτή η σχέση τάσης παραμόρφωσης περιγράφεται από τη γραμμή BA.

Αν η δοκός φορτιστεί πέρα από την τροπή ε_B μέχρι το σημείο C, τότε η καμπύλη περνάει το σημείο B. Από το σημείο B μέχρι το σημείο C η δοκός γίνεται πλαστική, δηλαδή δεν υπάρχει πλέον γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης και η τάση στη δοκό παραμένει σταθερή και ίση με σ_y . Η τάση σ_y της πλαστικής περιοχής, ονομάζεται τάση διαρροής.

Αν η δοκός αποφορτιστεί τότε γίνεται ελαστική και η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης περιγράφεται από τη γραμμή CD, η οποία είναι παράλληλη με τη γραμμή BA. Μετά το πέρας της αποφόρτισης, όταν η αξονική τάση γίνει μηδέν (σημείο D), υπάρχει ακόμα παραμόρφωση στη δοκό, η οποία είναι ίδια με την πλαστική παραμόρφωση που επιτυγχάνεται κατά τη γραμμή BC και δίνεται από τη σχέση: $\varepsilon_c^p = \varepsilon_c - \varepsilon_B$. Έτσι η δοκός δεν επιστρέφει στην αρχική της μορφή, αφού έχει υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις.

Αν η δοκός επαναφορτιστεί, η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης ακολουθεί και πάλι τη γραμμή DC μέχρι το σημείο C, στο οποίο η αξονική τάση ισούται με τη τάση διαρροής και η δοκός γίνεται και πάλι πλαστική. Μετά το σημείο C, η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης περιγράφεται από τη γραμμή CF. Η συμπεριφορά της δοκού στις γραμμές AB και DC είναι

αναστρέψιμη και γι αυτό το λόγο ελαστική, ενώ στο τμήμα BCF η συμπεριφορά είναι μη αναστρέψιμη. Το υλικό που συμπεριφέρεται όπως στο σχήμα 3.7, είναι ένα γραμμικά ελαστικό, ιδανικά πλαστικό υλικό, (Ιστάντσο, 2008).

3.4 ΚΑΜΨΗ ΔΟΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

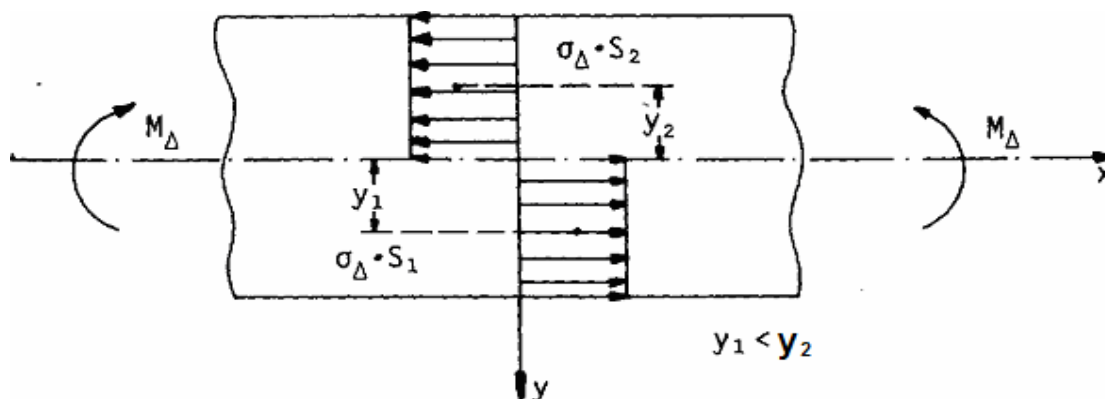
Η απόλυτη τιμή των τάσεων, τόσο στη θλιπτική όσο και στην εφελκυστική περιοχή, παρουσιάζει γραμμική αύξηση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, καθώς αυξάνεται η απόσταση y των ινών της ράβδου από τον ουδέτερο άξονα. Η γραμμική αυτή αύξηση έχει σαν αποτέλεσμα μια σταδιακή διαρροή της ράβδου, καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο P .

Αρχικά διαρρέουν οι εξωτερικές ίνες, ενώ στο εσωτερικό της ράβδου διατηρείται μια ελαστική ζώνη, ο ελαστικός πυρήνας, ο οποίος διαρκώς συρρικνώνεται με την αύξηση του φορτίου και την επέκταση του διαρρέοντος εξωτερικού φλοιού του δοκιμίου. Η ομαλή, συνεχής μεταβολή της τιμής των τάσεων από την περιοχή του εφελκυσμού (θετικές τιμές) στην περιοχή της θλίψης (αρνητικές τιμές) σημαίνει ότι όσο και αν επεκταθεί προς το εσωτερικό ο πλαστικός φλοιός της ράβδου, εξακολουθεί πάντοτε να υφίσταται στο εσωτερικό της ένας ελαστικός πυρήνας (γύρω από τον ουδέτερο άξονα).

Επειδή όμως για μεγάλες παραμορφώσεις, η διάμετρος του ελαστικού πυρήνα γίνεται πάρα πολύ μικρή σε σχέση με τη διάμετρο της ράβδου (για τους χάλυβες έχει υπολογιστεί ότι η ελάχιστη τιμή της ελαστικής περιοχής συρρικνώνεται στο $\frac{1}{200} y_{\max}$ περίπου), γίνεται η παραδοχή ότι ολόκληρη η διατομή του υλικού διαρρέει, οπότε η κατανομή των τάσεων παίρνει τη μορφή του «πλαστικού στροφέα», (Ιστάντσο, 2008).

Για τη μελέτη της κάμψης στην πλαστική περιοχή θεωρείται ότι η συμπεριφορά του υλικού είναι ελαστική-απολύτως πλαστική. Αν σ_{Δ} είναι η τάση διαρροής του υλικού σε κάμψη, τότε όταν η διατομή εισέλθει εξ ολοκλήρου στην πλαστική περιοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, τότε το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων σε ολόκληρη τη διατομή ανάγεται σε ζεύγος με ροπή ίση με (Πρασιανάκης 1986):

$$M_{\Delta} = \sigma_{\Delta} S_1 y_1 + \sigma_{\Delta} S_2 y_2 \quad (3.12)$$



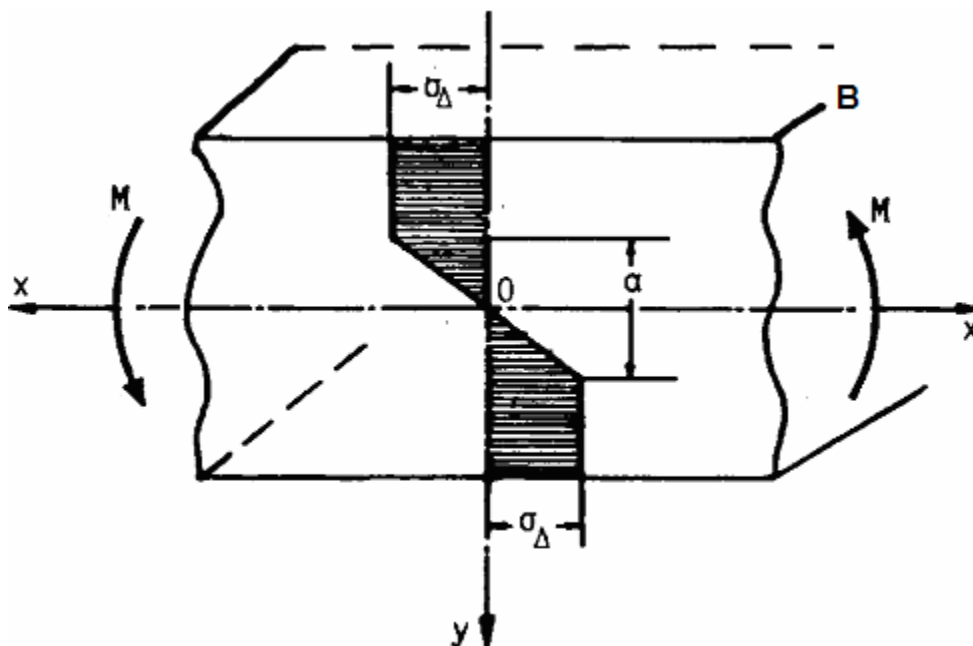
Σχήμα 3.8: Πλαστική συμπεριφορά κάμψης (Πρασιανάκης, 1986)

Για ορθογωνική διατομή και όταν $S_1=S_2=S/2$ προκύπτει ότι (Πρασιανάκης, 1986):

$$M_{\Delta} = \frac{\beta h^2}{4} \sigma_{\Delta} \quad (3.13)$$

όπου h και β είναι το ύψος και το πλάτος της ορθογωνικής διατομής αντίστοιχα.

Στην περίπτωση της ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης σε κάμψη (δοκός με ορθογωνική διατομή, σχήμα 3.9) για το ύψος του ελαστικού πυρήνα λαμβάνεται υπόψη ότι σε αυτή την περίπτωση η επιβαλλόμενη ροπή ισούται με το άθροισμα των ροπών των εσωτερικών δυνάμεων. Αυτό ισχύει τόσο για την περιοχή του ελαστικού πυρήνα όσο και για την περιοχή της διαρροής, (Πρασιανάκης, 1986).



Σχήμα 3.9: Ελαστοπλαστική παραμόρφωση σε κάμψη (Πρασιανάκης, 1986)

Είναι δηλαδή (Πρασιανάκης, 1986):

$$M = \left[\sigma_{\Delta} \left(\frac{h}{2} \beta \frac{h}{2} - \frac{1}{2} \frac{a}{2} \beta \frac{a}{3} \right) \right] = \beta \sigma_{\Delta} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{a^2}{12} \right) \quad (3.14)$$

όπου a είναι το ύψος του ελαστικού πυρήνα της διατομής και β το πλάτος της ορθογωνικής δοκού.

Επίσης ισχύουν οι σχέσεις (Πρασιανάκης, 1986)

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\sigma_{\Delta}}{E} \quad (3.15. \alpha)$$

και

$$y'' = \frac{1}{R} = \frac{\varepsilon_{\Delta}}{a/2} = \frac{2\sigma_{\Delta}}{Ea} \quad (3.15. \beta)$$

Από τη σχέση (3.15.β) προκύπτει (Πρασιανάκης, 1986):

$$\alpha = \frac{2\sigma_{\Delta}}{Ey''} \quad (3.15. \gamma)$$

και αντικαθιστώντας την τιμή του ελαστικού πυρήνα στη σχέση (3.14) προκύπτει για τη ροπή M η σχέση (Πρασιανάκης, 1986):

$$M = \frac{\beta h^2 \sigma_{\Delta}}{4} - \frac{\beta \sigma_{\Delta}^3}{3E^2(y'')^2} \quad (3.16)$$

Η σχέση (3.16) δίνει τη ροπή M για τη γενική περίπτωση της ελαστο-πλαστικής καμπτικής παραμόρφωσης. Για την οριακή ελαστική περίπτωση, όπου $\sigma_{\max} = \sigma_{\Delta}$ και $\alpha = h$, η ροπή δίνεται από τη σχέση (Πρασιανάκης, 1986):

$$M = M_E = \frac{\beta h^2}{6} \sigma_{\Delta} = W_E \sigma_{\Delta} \quad (3.17)$$

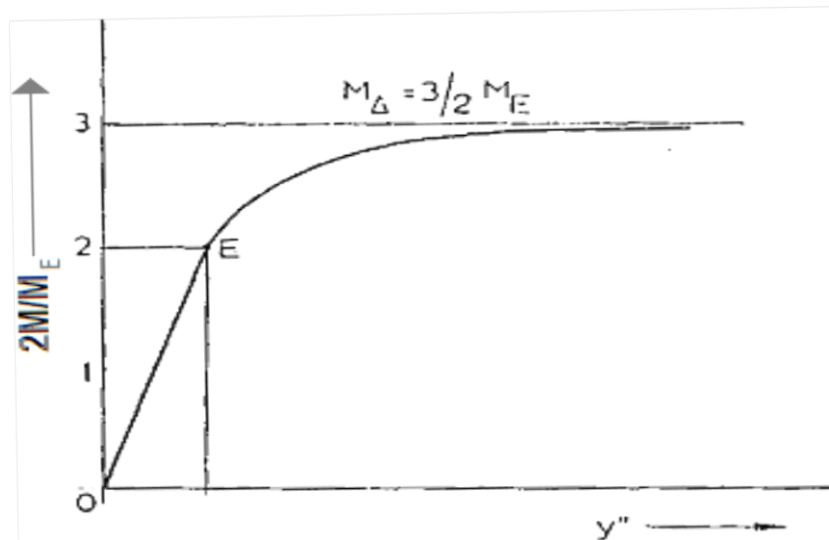
όπου W_E η ελαστική ροπή αντίστασης.

Τέλος με συνδυασμό των σχέσεων (3.16) και (3.17) προκύπτει (Πρασιανάκης, 1986):

$$M = M_E \left(\frac{3}{2} - \frac{2\sigma_{\Delta}^2}{h^2 E^2 (y'')^2} \right) \quad (3.18)$$

που δίνει τη ροπή στη γενική περίπτωση της ελαστικής καμπτικής παραμόρφωσης συναρτήσει της τιμής της καμπτικής ροπής στην ελαστική περιοχή και της καμπυλότητας της δοκού y'' . Το σχήμα 3.10, παρουσιάζει τη μεταβολή της ροπής M σαν συνάρτηση του y'' . Για την οριακή περίπτωση του πλαστικού στροφέα, όπου $\alpha \rightarrow 0$ και $y'' \rightarrow \infty$ προκύπτει από τη σχέση (3.16) (Πρασιανάκης, 1986):

$$M_{\Delta} = \frac{3}{2} M_E = \frac{\beta h^2}{4} \sigma_{\Delta} = W_{\Delta} \sigma_{\Delta} \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.10: Μεταβολή της ροπής M συναρτήσει του y'' (Πρασιανάκης, 1986)

Το μέγεθος $W_{\Delta} = \frac{\beta h^2}{4}$ ονομάζεται πλαστική ροπή αντίστασης και καθορίζει την οριακή φέρουσα ικανότητα της δοκού στην πλαστική περιοχή. Ο λόγος της ροπής στην πλαστική

περιοχή (M_A) προς τη ροπή στην ελαστική περιοχή (M_E) λέγεται συντελεστής μορφής και εξαρτάται από τη μορφή της καταπονούμενης διατομής.

Για την περίπτωση της ράβδου ορθογωνικής διατομής ισχύει $\frac{M_A}{M_E} = \frac{W_A}{W_E} = 1,5$.

3.5 ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Σύμφωνα με την τεχνική θεωρία του Bernoulli – Euler, η επίδραση του συγκεντρωμένου φορτίου παραλείπεται. Είναι όμως γνωστό ότι στην κεντρική περιοχή μιας δοκού που υποβάλλεται σε κάμψη τριων σημείων, αναμένεται σημαντική διαταραχή του πεδίου των τάσεων και παραμορφώσεων, λόγω της επίδρασης του συγκεντρωμένου φορτίου.

Στα ισότροπα υλικά η κατάσταση της επίπεδης τάσης εμφανίζεται όταν όλες οι τάσεις (ορθές και διατμητικές) που επιδρούν σ' ένα από τα ορθογώνια επίπεδα ενός στοιχειώδους κομματιού όγκου είναι μηδέν.

Η κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης εμφανίζεται όταν οι παραμορφώσεις σ' ένα από τα ορθογώνια επίπεδα ενός στοιχειώδους κομματιού της δοκού είναι μηδέν. Για παράδειγμα στην περίπτωση της στοάς μεγάλου μήκους εμφανίζεται κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης. Μπορεί να θεωρηθεί δηλαδή ότι οι παραμορφώσεις στην διεύθυνση κατά μήκος της στοάς είναι μηδέν.

Όπως παρατηρείται και στην κατάσταση επίπεδης τάσης και στην κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης οι σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης έχουν την ίδια μορφή. Διαφέρουν μόνο στις ελαστικές σταθερές, (Ιστάντσο, 2008).

3.5.1 ΙΣΟΤΡΟΠΑ ΥΛΙΚΑ

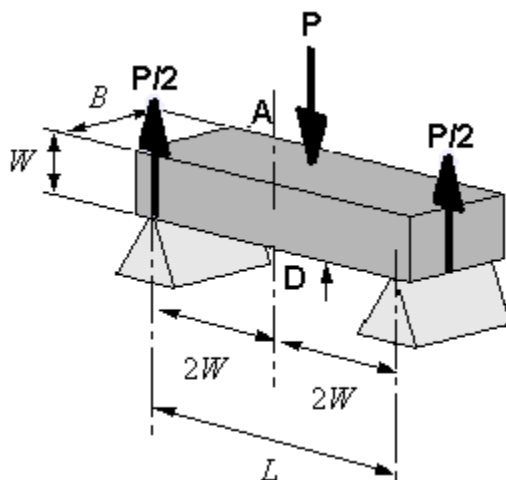
Σε ένα ισότροπο υλικό οι ελαστικές του ιδιότητες είναι ίδιες σε όλες τις κατευθύνσεις. Γι' αυτό έχει ένα μέτρο ελαστικότητας και ένα λόγο Poisson και στις τρεις κατευθύνσεις (X, Y και Z).

Μια πρώτη προσπάθεια μελέτης για τη διαταραχή των τάσεων, σε μια ράβδο που υφίσταται κάμψη τριών σημείων, στη θέση που εφαρμόζεται το συγκεντρωμένο φορτίο έγινε από τον Cams Wilson.

Σε πειράματα που έγινα με μια γυάλινη ράβδο ορθογωνικής διατομής (πλάτους ίσο με τη μονάδα) η οποία στηρίζεται στα δύο άκρα της, όπως στο σχήμα 3.11 και υπόκειται σε συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο της παρατηρήθηκε ότι στο σημείο A, εφαρμόζεται η κατανομή των τάσεων και προσεγγίζει την κατανομή των τάσεων που παράγεται σε ένα πλακίδιο που υπόκειται σε κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο, (Ιστάντσο, 2008).

Κατά μήκος της τομής AD η οριζόντια τάση σ_x δεν ακολουθεί γραμμική κατανομή και στο σημείο D απέναντι από το A η εφελκυστική τάση παίρνει μικρότερη τιμή απ' την τιμή που αναμενόταν από τη θεωρία κάμψης, (Ιστάντσο 2008).

Τα αποτελέσματα αυτά ερμηνεύτηκαν με τη χρήση εμπειρικών υποθέσεων από τον Stokes (Stokes, 1984).

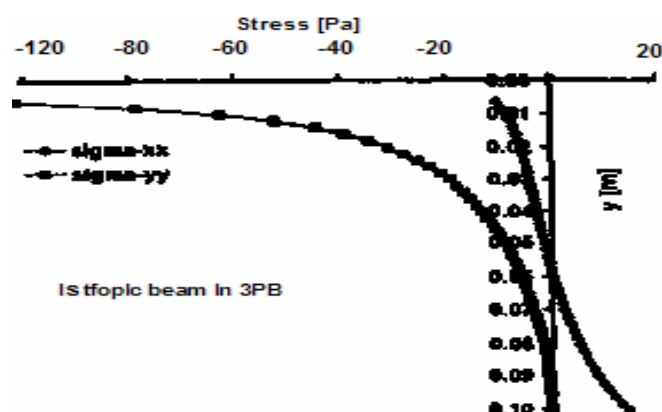


Σχήμα 3.11: Πειραματικό μοντέλο του Carus Wilson (Stokes, 1984)

Η ροπή κάμψης στο μέσο της τομής AD ράβδου υπολογίστηκε αθροίζοντας τη ροπή αντίδρασης $P/2$ με τις ροπές των ακτινικών εφελκυστικών δυνάμεων που ασκούνται στο μισό της ράβδου.

Αυτή η ροπή μπορεί εύκολα να υπολογιστεί αν παρατηρηθεί ότι οι ακτινικά κατανομημένες εφελκυστικές δυνάμεις είναι στατικά ισοδύναμες με την κατανομή της πίεσης γύρω από το σημείο A, (Ιστάντσο 2008).

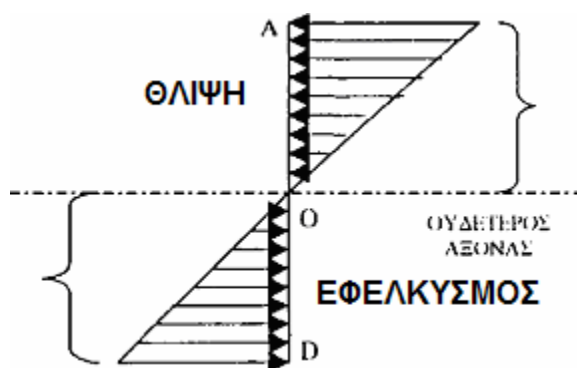
Οι Coker και Filon έκαναν πειραματικές μετρήσεις για τον υπολογισμό της κατανομής των κύριων τάσεων (σ_{xx} και σ_{yy}) κατά μήκος του ύψους της δοκού (για διάφορα ύψη της δοκού), που υποβάλλεται σε κάμψη τριών σημείων, οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Πειραματικές μετρήσεις των Coker και Filon

Στο σχήμα 3.12 παρατηρείται ότι η κατανομή των οριζόντιων τάσεων σ_{xx} κατά μήκος της τομής AD αρχικά αποτελείται από θετικές τάσεις, στη συνέχεια όμως γίνεται αρνητική. Η θέση στην οποία εμφανίζονται οι θετικές τάσεις είναι η περιοχή της τομής AD που υφίσταται εφελκυσμό, ενώ οι θέση στην οποία εμφανίζονται αρνητικές τάσεις είναι η περιοχή της τομής που υφίσταται θλίψη. Το σημείο στο οποίο η κατανομή των οριζόντιων τάσεων σ_{xx} τέμνει τον άξονα Y είναι η θέση της τομής AD που ούτε θλίβεται ούτε εφελκύεται. Από τη θέση αυτή διέρχεται ο ουδέτερος άξονας της ράβδου.

Στη θέση αυτή η ράβδος ούτε θλίβεται, ούτε εφελκύεται, δηλαδή οι τάσεις είναι μηδέν, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Μεταβολή των τάσεων από θλιπτικές σε εφελκυστικές (Gere & Timoshenko, 1997)

Στη μέση της ράβδου (κατά μήκος της τομής AD) αναπτύσσεται μια κατανομή τάσεων η οποία μεταβάλλεται απ' το μηδέν μέχρι μια ελάχιστη αρνητική τιμή στην ακραία ίνα της ράβδου που θλίβεται (σημείο A της διατομής της ράβδου) και από το μηδέν μέχρι μια μέγιστη θετική τιμή στην ακραία ίνα που εφελκύεται (σημείο D της διατομής της ράβδου). Από τη θέση O διέρχεται μια νοητή ευθεία που ονομάζεται ουδέτερος άξονας της ράβδου, (Ιστάντσο 2008).

Η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων σ_{yy} του σχήματος 3.17 στη θέση A (θέση στην οποία εφαρμόζεται το κατακόρυφο φορτίο), παρουσιάζει υψηλότερες τιμές τάσεων και στη συνέχεια μειώνεται εκθετικά μέχρι μια τιμή κοντά στο μηδέν (θέση D).

Πειράματα κάμψης τριών σημείων συνεχίστηκαν από τον Seewald. Ο Seewald εισήγαγε νέα συμπεράσματα επηρεασμένος από την τεχνική θεωρία Bernoulli – Euler. Από τις τιμές του πίνακα 3.1 του Seewald και των συντελεστών Seewald, προκύπτει ότι για μικρούς λόγους $2L/H$ ο λόγος β αυξάνει συνεχώς, ενώ από το λόγο $2L/H=6$ και μετά τείνει ασυμπτωματικά προς την μονάδα. Άρα η τεχνική θεωρία προσεγγίζεται για μεγάλους λόγους $2L/H$, (Ιστάντσο 2008).

Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας του Seewald για λόγους 2L/H (Gere & Timoshenko, 1997)

2L/H	SEEWALD
1,5	0,764
2	0,823
2,3	0,846
2,6	0,863
3	0,882
3,8	0,906
4	0,911
6	0,941
8	0,955
10	0,964

3.5.2 ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΥΛΙΚΑ

Σε ένα ανισότροπο υλικό οι ελαστικές ιδιότητες είναι διαφορετικές σε κάθε κατεύθυνση. Οι κατευθύνσεις στις οποίες οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού είναι ίδιες είναι ελαστικά ισοδύναμες. Σε ένα ισότροπο υλικό όλες οι κατευθύνσεις είναι ελαστικά ισοδύναμες ενώ σε ένα ανισότροπο υλικό ορισμένες από τις κατευθύνσεις είναι ελαστικά ισοδύναμες.

Στη γενική περίπτωση της ανισοτροπίας κάθε συντελεστής της παραμόρφωσης είναι μια γραμμική συνάρτηση των έξι συντελεστών της τάσης. Μελετώντας ένα ομογενές σώμα που βρίσκεται σε κατάσταση ανισοτροπίας και αναφερόμενοι στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, οι εξισώσεις της τάσης εκφράζονται από το γενικευμένο νόμο του Hooke.

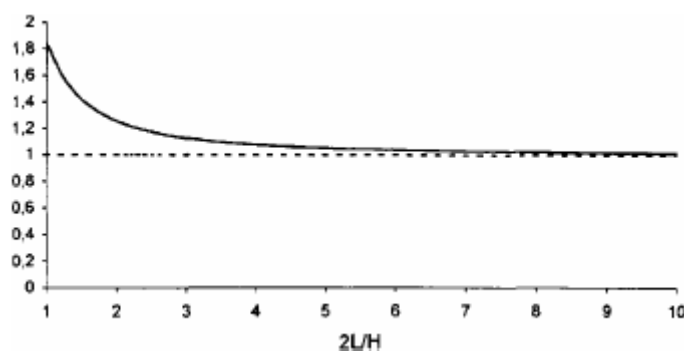
Σε περίπτωση που οι αλλαγές στο υλικό γίνονται ισοθερμικά (η θερμοκρασία κάθε στοιχείου παραμένει σταθερή) κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης τότε θεωρείται ότι υπάρχει ένα ελαστικό δυναμικό ίσο με την ενέργεια παραμόρφωσης ανά μονάδα όγκου.

Ο Seewald έκανε πειράματα και με ανισότροπα υλικά και έτσι προέκυψε ο πίνακας 3.2 για τα ανισότροπα υλικά, με δοκιμές για διάφορους λόγους 2L/H, (Ιστάντσο, 2008).

Πίνακας 3.2: Συγκεντρωτικός πίνακας του Seewald για λόγους 2L/H (Gere & Timoshenko, 1997)

2L/H	βαναλ.
1.5	1.543
2	1.229
2.3	1.177
2.6	1.14
3	1.107
3.8	1.068
4	1.045
6	1.028
8	1.015
10	1.011

Από τον πίνακα 3.2 κατασκευάζεται το σχήμα 3.14, για διάφορους λόγους 2L/H, (Gere & Timoshenko, 1997).



Σχήμα 3.14: Διάγραμμα του Seewald για λόγους 2L/H (Gere & Timoshenko, 1997)

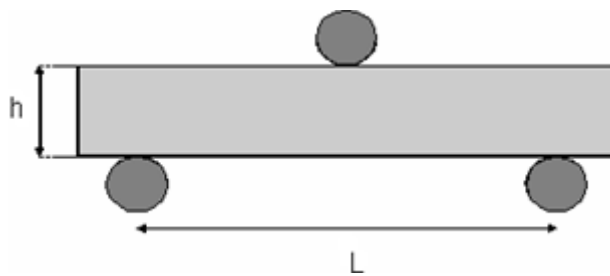
Όπως παρατηρείται από το σχήμα 3.14 για μικρούς λόγους 2L/H ο λόγος β μειώνεται συνεχώς μέχρις ότου να ομαλοποιηθεί για τιμές του λόγου $2L/H \geq 6$.

3.5.3 ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Η μέγιστη αντοχή σε κάμψη τριών σημείων αντιστοιχεί στη τιμή της τάσης η οποία οδηγεί σε αστοχία ενός υλικού. Η μέγιστη τάση είναι ανάλογη του μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου στο οποίο ασκείται. Η τάση σ_{max} (MPa) δίνεται από την εξής σχέση (ASTM C293):

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3.20)$$

Στην εξίσωση (3.20) το P είναι το μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο σε N, το L αντιστοιχεί στην απόσταση των δύο κάτω εδράνων στήριξης σε mm, το b είναι το πάχος του δοκιμίου σε mm, ενώ με h συμβολίζεται το ύψος του σε mm. Στο σχήμα 3.15 απεικονίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός δοκιμίου που υποβάλλεται σε κάμψη τριών σημείων, (Μητριτσάκης, 2008).



Σχήμα 3.15: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου σε κάμψη τριών σημείων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

4.1 ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Ήχος καλείται το αίσθημα που δημιουργείται εξαιτίας μεταβολών πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα ή άλλου μέσου διάδοσης και λαμβάνεται από τα αντίστοιχα όργανα. Οι μεταβολές αυτές διαδίδονται με τη μορφή ηχητικών κυμάτων.

Κύμα ονομάζεται η διάδοση μιας ελαστικής διαταραχής σε ένα ελαστικό μέσο. Κατά τη διάδοση της ελαστικής αυτής διαταραχής μεταφέρεται ενέργεια από σημείο σε σημείο του ελαστικού μέσου, όχι όμως και ύλη. Το μέσο διάδοσης των κυμάτων μπορεί να είναι οποιοδήποτε στερεό, υγρό, αέριο.

Το σώμα, στο οποίο οι παραμορφώσεις, οι οποίες προκαλούνται από διάφορες εξωτερικές αιτίες, εξαφανίζονται αμέσως μόλις οι αιτίες αυτές σταματήσουν να επενεργούν, χαρακτηρίζεται ως ελαστικό μέσο. Ισότροπο ελαστικό μέσο ως προς μια συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα ονομάζεται κάθε ελαστικό μέσο στο οποίο η συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα έχει το ίδιο μέτρο προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι για παράδειγμα ένα ελαστικό μέσο στο οποίο η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις, είναι ισότροπο ως προς την ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Η παρακάτω εξίσωση της κυματικής ισχύει για όλα τα κύματα και για όλα τα ελαστικά κύματα μέσω των οποίων αυτά διαδίδονται.

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ ή } \lambda = cT \quad (4.1)$$

Στη εξίσωση (4.1) λ είναι το μήκος κύματος, δηλαδή η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου, c είναι η ταχύτητα του κύματος, T είναι η περίοδος, δηλαδή το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών και f είναι η συχνότητα του κύματος, δηλαδή ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν σε ένα συγκεκριμένο σημείο του μέσου ανά μονάδα χρόνου (Μπακογιάννης, 2011).

4.1.1 ΕΙΔΗ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τα κύματα που διαδίδονται στο χώρο με ορισμένη ταχύτητα λέγονται τρέχοντα, οδεύοντα ή διαδιδόμενα κύματα σε αντίθεση προς τα στάσιμα κύματα τα οποία είναι παγιδευμένα σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του ελαστικού μέσου (συμβολή δύο κυμάτων ίδιας συχνότητας, ταχύτητας, πλάτους και διεύθυνσης διάδοσης αλλά με αντίθετες φορές).

Εγκάρσια ονομάζονται τα κύματα στα οποία όλα τα σημεία του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Στα εγκάρσια κύματα έχουμε “όρη” και “κοιλιάδες”, δηλαδή περιοδική μεταβολή του σχήματος του φορέως του κύματος (του ελαστικού μέσου μέσω του οποίου διαδίδεται το κύμα). Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο δια μέσου των στερεών σωμάτων και στην ελεύθερη επιφάνεια των υγρών.

Διαμήκη ονομάζονται τα κύματα στα οποία όλα τα σημεία του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Στα διαμήκη κύματα έχουμε “πυκνώματα” και “αραιώματα” δηλαδή περιοδική μεταβολή της πυκνότητας του φορέως του κύματος. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται τόσο στα στερεά όσο και στα υγρά (εξαιρουμένης της ελεύθερης επιφάνειας τους) και τα αέρια (Μπακογιάννης, 2011)

Το φάσμα συχνοτήτων, στα ακουστικά φαινόμενα που αφορούν τον άνθρωπο, διαιρείται συνήθως σε τρεις διαδοχικές περιοχές. Διαμήκη κύματα με συχνότητες κάτω των 16 Hz και μέχρι τα 0,1 Hz χαρακτηρίζονται ως υπόηχοι (infrasonics). Διαμήκη κύματα με συχνότητες από 16 Hz έως 16.000 Hz ανήκουν στην περιοχή ακουστών συχνοτήτων για το αυτί και χαρακτηρίζονται ως ήχοι (sounds). Διαμήκη κύματα με συχνότητες από 16.000 Hz έως 1.000.000 Hz (1MHz) αναφέρονται ως υπέρηχοι (ultrasonics).

4.1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων σε ένα ελαστικό μέσο εξαρτάται κυρίως από το είδος του κύματος (εάν είναι εγκάρσιο ή διαμήκες), την πυκνότητα (ρ) και τις ιδιότητες του ελαστικού μέσου, διότι η ενέργεια μεταβιβάζεται από το ένα μόριο στο άλλο, εξαιτίας της σύζευξης που υπάρχει ανάμεσα τους. Οι ταχύτητες διάδοσης υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (4.2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1+\nu)}} \quad (4.3)$$

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

όπου V_p και V_s είναι οι ταχύτητες διάδοσης του διαμήκους και του εγκάρσιου (διατμητικού) κύματος αντίστοιχα, E το μέτρο ελαστικότητας, ν ο λόγος Poisson, K το μέτρο ελαστικής συστολής και G το μέτρο διάτμησης. Οι ταχύτητες διάδοσης είναι χαρακτηριστικές για κάθε πέτρωμα και αποτελούν ένα έμμεσο μέτρο εκτίμησης των ιδιοτήτων του πετρώματος.

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι ταχύτητες διάδοσης αυτών των κυμάτων (διαμηκών και εγκαρσίων) σε διάφορα πετρώματα και εδάφη.

Πίνακας 4.1: Ταχύτητες διάδοσης διαμηκών και διατμητικών κυμάτων σε διάφορα πετρώματα και εδάφη (Μπακογιάννης 2011)

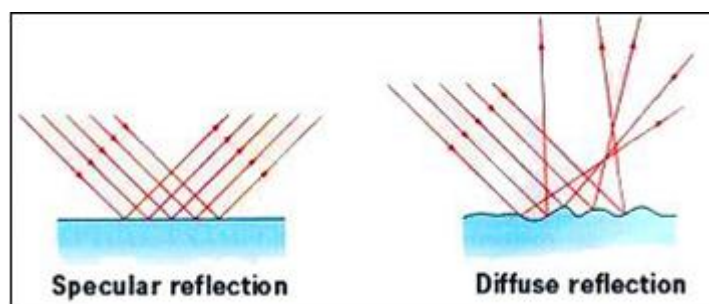
Πέτρωμα	Πυκνότητα [kg/m^3]	V_p [m/s]	V_s [m/s]
Ξηρή άμμος, χαλαρή δομή	1.5 -1.7	300-1000	50-400
Ξηρή άμμος	1.6 -1.7	1000-1700	400-900
Υγρή άμμος, χαλαρή δομή	1.8 -2.2	1500-2000	50-400
Υγής ψαμμίτης	2.0 -2.65	1800-4500	1000-3000
Ψαμμίτης Berea	2.2	3800-4000	2300-2400
Ασθενής ψαμμίτης	1.7-2.0	1000-2000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

Τα ηχητικά κύματα που μεταδίδονται σε ένα ελαστικό μέσο προκαλούν ταλαντώσεις των μορίων του και δημιουργούν ένα πεδίο, που ονομάζεται ακουστικό πεδίο. Ελεύθερο πεδίο (free field) λέγεται το ακουστικό πεδίο που δεν είναι κλειστό ή οι επιφάνειες που το περιβάλλουν είναι ιδανικά απορροφητικές, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μόνο κύματα που φεύγουν από την πηγή.

Η ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων (σύμφωνα με την αρχή του Huygens) συμβαίνει όταν στο πεδίο που μεταδίδονται τα ηχητικά κύματα βρεθεί ένα εμπόδιο του οποίου οι διαστάσεις είναι μεγάλες σε σχέση με το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων.

Εάν η επιφάνεια του εμποδίου είναι λεία και στιλπνή, δηλαδή οι ανωμαλίες της είναι ασήμαντες μπροστά στο μήκος κύματος (λ) των ηχητικών κυμάτων, τότε συμβαίνει κανονική ανάκλαση (specular reflection), δηλαδή τα κύματα φαίνονται σαν να προέρχονται από το συμμετρικό ως προς το εμπόδιο είδωλο της ηχητικής πηγής. Εάν η επιφάνεια είναι τραχιά,

δηλαδή οι ανωμαλίες της είναι σημαντικές ως προς το μήκος κύματος (λ), τότε τα ηχητικά κύματα διασκορπίζονται ή σκεδάζονται (diffuse reflection).



Σχήμα 4.1: Ανάκλαση κυμάτων (Μπακογιάννης, 2011)

Το φαινόμενο της διάθλασης των ηχητικών κυμάτων παρατηρείται, όταν στη διαδρομή του ήχου εμφανίζεται διαφορά πυκνότητας του ελαστικού μέσου διάδοσης.

Το φαινόμενο της περίθλασης παρατηρείται όταν υπάρχει ένα εμπόδιο στη διαδρομή των ηχητικών κυμάτων του οποίου οι διαστάσεις δεν είναι εμφανώς μεγαλύτερες από το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων (λ). Τα ηχητικά κύματα περιθλώνται γύρω από το εμπόδιο κι φτάνουν σε σημεία που δεν είναι ορατά από την ηχητική πηγή.

Το φαινόμενο της συμβολής εμφανίζεται όταν δύο ή περισσότερα κύματα συναντώνται στο ίδιο σημείο ενός ελαστικού μέσου. Τα κύματα προστίθενται γεωμετρικά (διανυσματικά) με αποτέλεσμα τη μεταβολή του πλάτους κύμανσης του εν λόγω σημείου του ελαστικού μέσου. Αυτή η μεταβολή του πλάτους μπορεί να κυμαίνεται από μια μέγιστη τιμή έως μια ελάχιστη τιμή, συμπεριλαμβανομένης της μηδενικής.

Η απορρόφηση του ήχου είναι η διαδικασία με την οποία η ακουστική ενέργεια ελαττώνεται, όταν ο ήχος περνά μέσα από ένα μέσο (ηχομόνωση) ή όταν πέφτει και ανακλάται σε μια επιφάνεια (ηχοαπορρόφηση). Στην απορρόφηση του ήχου συνήθως η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και ταυτόχρονα εξασθενεί και η ένταση του ηχητικού κύματος (Μπακογιάννης, 2011).

Η μονάδα μέτρησης decibel (dB), που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Ακουστική, αποτελεί δάνειο από την Ηλεκτρική Μηχανολογία. Η μέτρηση της στάθμης ισχύος ενός σήματος (PL=Power Level) σε decibel ισούται με το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου του λόγου των αριθμητικών τιμών της ισχύος δύο σημάτων, ένα εκ των οποίων λαμβάνεται ως σήμα αναφοράς, δηλαδή:

$PL(dB)=10\log(\text{Αριθμητική τιμή ισχύος σήματος} / \text{Αριθμητική τιμή ισχύος σήματος αναφοράς})$

4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Σύμφωνα με τον ορισμό της ISRM, 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.

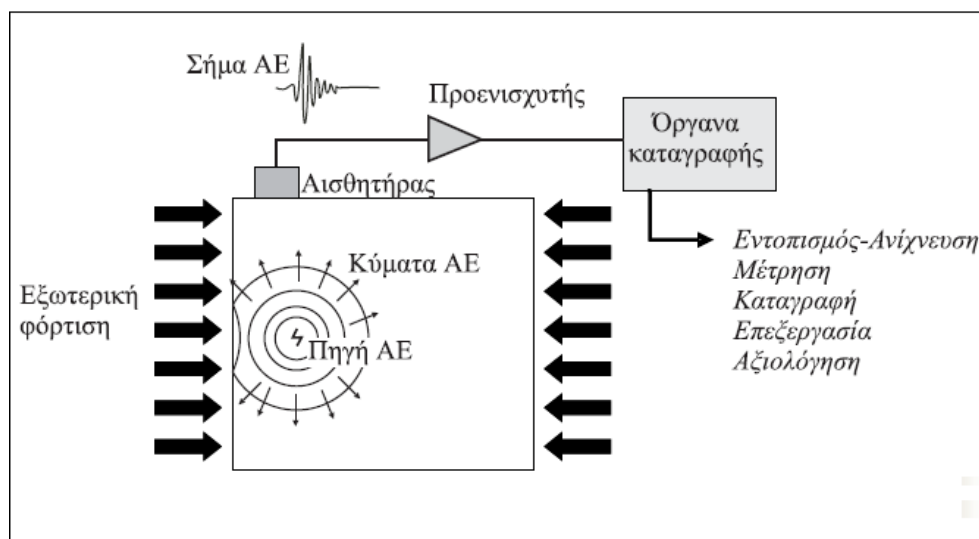
Η προέλευση της ακουστικής εκπομπής στα πετρώματα σχετίζεται με την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος ή με την έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, όταν αυτό βρίσκεται υπό ένταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα, ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή.

Τα κύματα AE διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων), οι οποίοι βρίσκονται σε επαφή με το πέτρωμα και μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα που φθάνουν σε αυτούς σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία με τη σειρά τους ενισχύονται, φιλτράρονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ακουστικής εκπομπής. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique, AET). Τα σήματα ακουστικής εκπομπής ελέγχονται σε συχνότητες υπερήχων, δηλαδή σε εύρος συχνοτήτων από 15 KHz έως μερικά MHz.

Η αρχή της εφαρμογής της AET στη μηχανική πετρωμάτων έγινε με τις μελέτες των Obert και Duvall (1942) για την πρόβλεψη των βίαιων εκτινάξεων των πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας του 1930. Η ανάπτυξη της μεθόδου ευνοήθηκε και από την έρευνα και σε άλλα υλικά πλην του πετρώματος. Οι μελέτες του Kaiser (1950) θεωρούνται από τις πιο σημαντικές. Ο Kaiser παρατήρησε ότι τα υλικά έχουν “μνήμη” των εφαρμοσθέντων σε αυτά τάσεων, φαινόμενο γνωστό ως φαινόμενο Kaiser (Σοφιανός, 2008).

4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΗΜΑΤΩΝ AE

Ένα γεγονός Ακουστικής Εκπομπής 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 AE. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται στον προενισχυτή και στη μονάδα επεξεργασίας. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της AE.

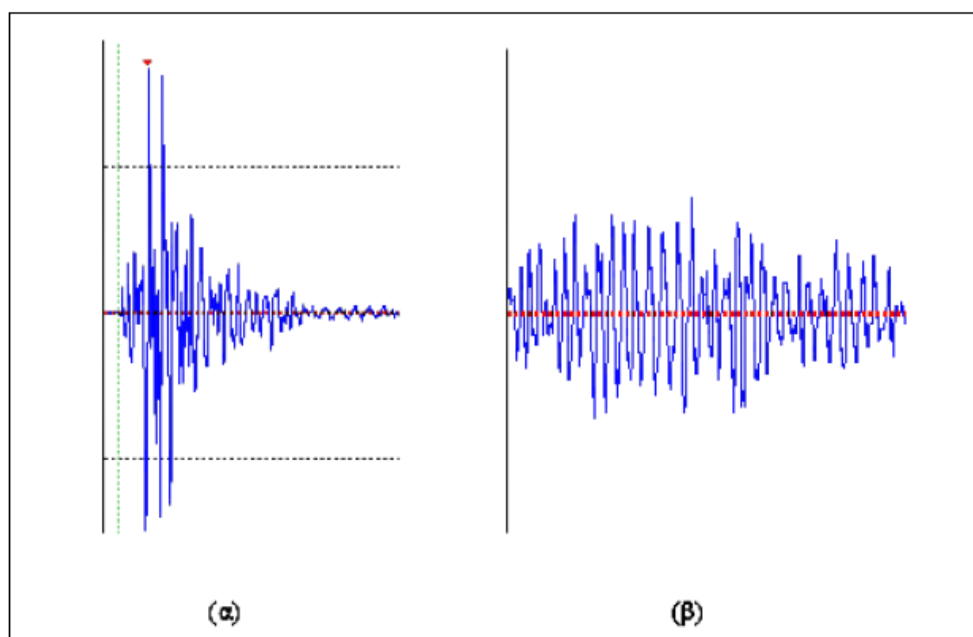


Σχήμα 4.2: Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της AE (Σοφιανός, 2008)

Το κύμα AE στην πηγή περιέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μερικές δεκάδες KHz έως μερικά MHz. Τα ανιχνευόμενα σήματα έχουν πολύπλοκη μορφή, που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένιση, ανακλάσεις και συμβολές) και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Αυτές οι επιδράσεις διαφοροποιούν τα ανιχνευόμενα σήματα από αυτά που εκπέμπονται στην πηγή.

Η δραστηριότητα AE περιγράφεται από παραμέτρους συσχετισμένες με το πλήθος και το μέγεθος των γεγονότων AE. Τα σήματα AE που ανιχνεύονται από τους αισθητήρες, διακρίνονται σε συνεχούς και κρουστικού τύπου και τα δεδομένα τους διακρίνονται αντίστοιχα σε χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα (time driven data) και δεδομένα συσχετισμένα με την κρουστική μορφή ενός σήματος AE (hit driven data).

Ένα κρουστικό σήμα θεωρείται ότι προέρχεται από ένα διακριτό γεγονός. Όταν ο ρυθμός των γεγονότων AE είναι μεγάλος, τότε τα σήματα AE επικαλύπτονται και συνδυάζονται με αποτέλεσμα το σχηματισμό σημάτων συνεχούς μορφής. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα των δύο τύπων σημάτων AE (Σοφιανός, 2008).



Σχήμα 4.3: (α) τυπική μορφή κρουστικού σήματος ΑΕ, (β) τυπική μορφή συνεχούς σήματος ΑΕ (Σοφιανός, 2008)

4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΑΕ

Οι κυριότερες παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα σήμα ΑΕ κρουστικού τύπου είναι το πλάτος του σήματος (amplitude), ο χρόνος ανύψωσης (rise time) και η διάρκεια του σήματος (duration).

Στη συνέχεια αναφέρονται χαρακτηριστικές παράμετροι των γεγονότων Ακουστικής Εκπομπής, όπως επίσης και σχετική ορολογία.

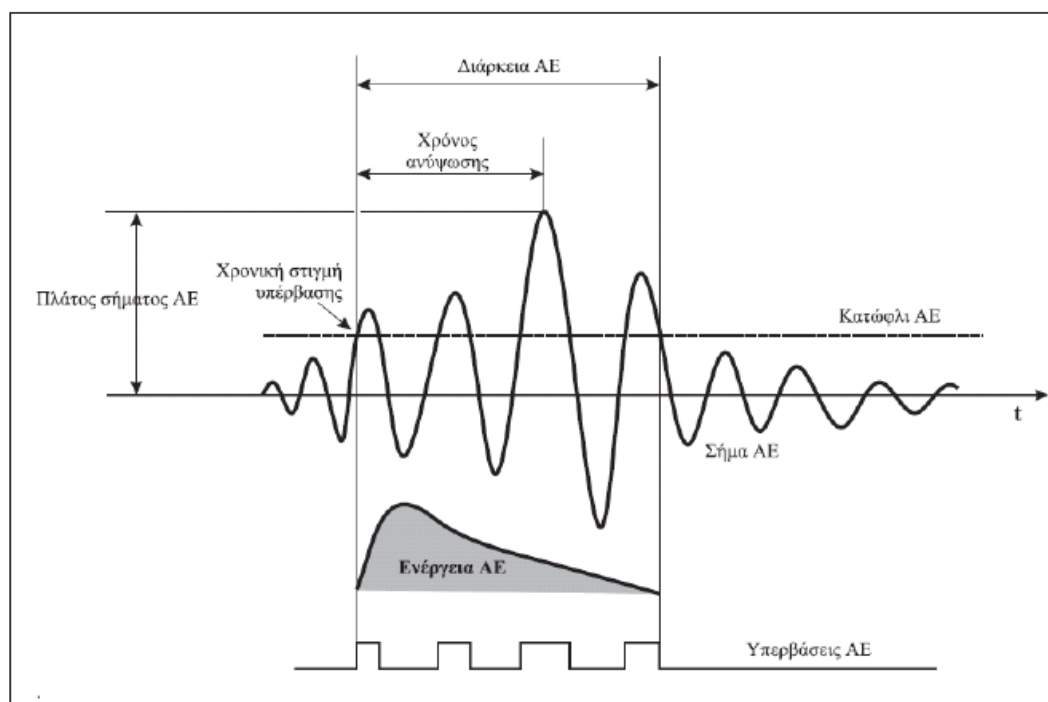
- **Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission):** Ελαστικά κύματα παραγόμενα από την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από πηγές εντός του υλικού.
- **Ενεργοποίηση ΑΕ (Activation):** Η εκδήλωση ακουστικής εκπομπής λόγω εφαρμογής αιτίου, όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα κ.λ.π.
- **Δραστηριότητα ΑΕ (Activity):** Μέτρησης της ποσότητας της εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας των γεγονότων.
- **Σήμα ΑΕ:** Το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μορφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας).
- **Χαρακτηριστικά Σήματος (Signal Features):** Μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος ΑΕ, όπως το πλάτος, η ενέργεια σήματος ΑΕ, η διάρκεια, ο χρόνος ανύψωσης και τα counts.
- **Ισχύς σήματος (Signal Strength):** Η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνευόμενου σήματος ΑΕ. Επίσης γνωστή ως “σχετική ενέργεια” (relative energy) και “Marse”.
- **Πηγή:** Η φυσική προέλευση ενός ή περισσότερων γεγονότων ΑΕ.

- **Ενέργεια Πηγής (Source Energy):** Η ολική ενέργεια (όλων των μορφών) που διαχέεται από τις διεργασίες της πηγής.
- **Αισθητήρας:** Συσκευή που περιέχει ένα μορφοτροπικό στοιχείο, που μετατρέπει τα κινούμενα κύματα ΑΕ σε ηλεκτρική τάση.
- **Κανάλι (Channel):** Ένας αισθητήρας ΑΕ και ο συναφής εξοπλισμός για διαβίβαση, τροποποίηση, εντοπισμό και μέτρηση των σημάτων που έρχονται από αυτόν.
- **Guard sensors:** Αισθητήρες των οποίων η κύρια λειτουργία είναι η εξάλειψη του εξωτερικού θορύβου, βασιζόμενοι στις διαφορές του χρόνου άφιξης.
- **Κατώφλι Τάσης (Threshold):** Όριο τάσης πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα Ακουστικής Εκπομπής.
- **Ανίχνευση ΑΕ:** Αναγνώριση της παρουσίας σήματος (πρακτικώς/τυπικώς επιτυγχάνεται όταν το σήμα διασχίζει το όριο ανίχνευσης).
- **Θόρυβος (Noise):** Σήματα παραγόμενα από αιτίες διαφορετικές από αυτές των ακουστικών εκπομπών ή από πηγές που δεν έχουν σχέση με το σκοπό της δοκιμής.
- **Συμβάν (Event):** Τοπική αλλαγή στο εσωτερικό ενός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή.
- **Hit:** αναφέρεται στον εντοπισμό και την μέτρηση ενός σήματος ΑΕ. Όταν ένα σήμα ΑΕ υπερβεί το κατώφλι καταγράφεται ένας κτύπος (Hit).
- **Απαριθμήσεις (Counts):** Παράμετρος που προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι τάσης (όριο ανίχνευσης).
- **Counts to Peak:** Παράμετρος που προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ακουστικής εκπομπής υπερβαίνει το κατώφλι τάσης μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τάση του (πλάτος σήματος).
- **Πλάτος ΑΕ (Amplitude):** Η μέγιστη τιμή της ηλεκτρικής τάσης στην κυματομορφή ΑΕ, συνήθως εκφρασμένη σε decibels και αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος.
- **Κατανομή Πλάτους (Amplitude Distribution):** Ψηφιακή αναπαράσταση του αριθμού των σημάτων ΑΕ σε συγκεκριμένο ή και μεγαλύτερο πλάτος, σχεδιασμένη ως λειτουργία του πλάτους.
- **Απόσβεση (Attenuation):** Απώλεια πλάτους με την απόσταση που διανύει το κύμα καθώς ταξιδεύει στην υπό δοκιμή δομή.
- **Διάρκεια ΑΕ (Duration):** Αναφέρεται στη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί από την στιγμή που ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι τάσης για πρώτη φορά μέχρι την στιγμή που διασχίζει το κατώφλι τάσης για τελευταία φορά.

- **Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time):** Το χρονικό διάστημα από τη χρονική στιγμή που ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι τάσης μέχρι τη χρονική στιγμή που το σήμα φθάνει στη μέγιστη τάση του (πλάτος σήματος ΑΕ).
- **Χρόνος Άφιξης (Arrival Time):** Η χρονική στιγμή που ένα σήμα ακουστικής εκπομπής υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι. Απαραίτητος για τον υπολογισμό της θέσης της πηγής του γεγονότος ΑΕ.
- **Ενέργεια γεγονότος (Event Energy):** Η ολική ελαστική ενέργεια (στην κυματομορφή) που απελευθερώνεται από ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής
- **Ένταση (Intensity):** Η μέτρηση του μεγέθους των ανιχνευμένων σημάτων εκπομπής, όπως το μέσο πλάτος, η μέση ενέργεια ΑΕ ή ο μέσος όρος counts.
- **Φαινόμενο Kaiser:** Η απουσία ανιχνεύσιμης ακουστικής εκπομπής σε ένα σταθερό επίπεδο ευαισθησίας, μέχρι την υπέρβαση των προηγούμενων εφαρμοσθέντων επιπέδων φόρτισης.
- **Φαινόμενο Felicity:** Η ανίχνευση ακουστικών εκπομπών σε επίπεδα φόρτισης κάτω από την προηγούμενη μέγιστη φόρτιση
- **Τοποθεσία/Εντοπισμός (Location):** Αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών αισθητήρων ΑΕ για τον προσδιορισμό των σχετικών θέσεων των πηγών ακουστικής εκπομπής.

Με την καταγραφή και εξέταση των παραμέτρων ΑΕ μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με το μηχανισμό γένεσης των σημάτων ΑΕ. Όμως αυτά τα συμπεράσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή καθότι η κυματομορφή των σημάτων μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες, όπως η φύση του υλικού, η διαδρομή που ακολουθεί το σήμα ΑΕ μέχρι την ανίχνευσή του, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και το καταγραφικό σύστημα (Μπακογιάννης, 2011, Κυπριωτάκη, 2012).

Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται μια κυματομορφή ΑΕ και ορισμένες από τις σημαντικότερες παραμέτρους της.

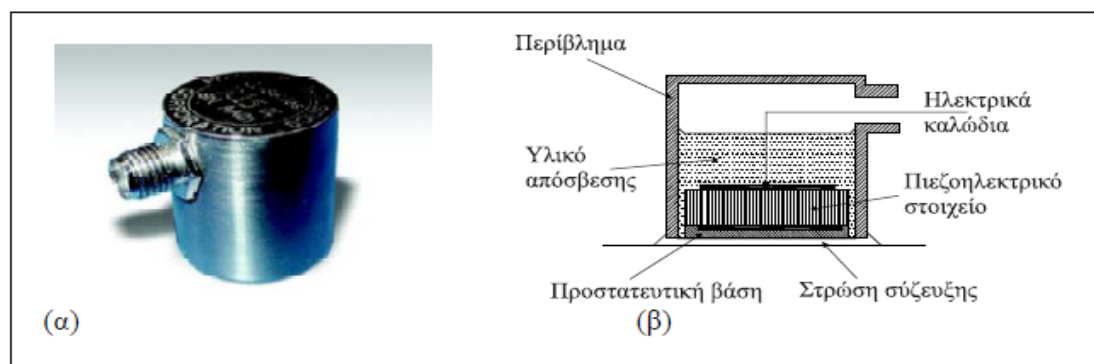


Σχήμα 4.4: Κυματομορφή γεγονότος ακουστικής εκπομπής και μερικά προκύπτοντα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας (Μπακογιάννης, 2011)

4.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΑΕ

4.5.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ

Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Πρόκειται για ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT (lead-zirconate-titanate), το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση που επιβάλλεται στην επιφάνεια του, λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Οι αισθητήρες (sensors) ονομάζονται και μορφοτροπείς (transducers), επειδή μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα. Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας δίνεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: (α) Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της PAC, (β) κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Σοφιανός, 2008)

Όταν ένας αισθητήρας έχει απλά τοποθετηθεί στην επιφάνεια ενός υλικού που παράγει ακουστικά κύματα διαπιστώνεται ότι ο αισθητήρας παράγει πολύ ασθενές σήμα. Για να αξιοποιηθεί λοιπόν η πολύ υψηλή ευαισθησία του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πρέπει να εφάπτεται στο υπό εξέταση υλικό με τέτοιο τρόπο, ώστε η ακουστική ενέργεια να περνά στον αισθητήρα με την ελάχιστη απώλεια στην διεπιφάνεια αισθητήρα-υλικού.

Ανάμεσα στον αισθητήρα και το υλικό χρησιμοποιείται ένα είδος ενδιάμεσου συγκολλητικού ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες της ακουστικής ενέργειας και να είναι δυνατή η ανίχνευση χαμηλού επιπέδου ακουστικών κυμάτων. Το ενδιάμεσο συγκολλητικό είναι συνήθως μια λεπτή μεμβράνη ενός ρευστού με υψηλό ιξώδες το οποίο διασφαλίζει την καλή επαφή των επιφανειών του αισθητήρα και του υλικού σε μικροσκοπικό επίπεδο και βοηθά τη διάδοση των ακουστικών κυμάτων μεταξύ των δύο επιφανειών. Απαραίτητη είναι η χρήση και ενός δεσμού (bond) που κρατάει σε επαφή τον αισθητήρα με την επιφάνεια του υλικού.

Εκτός από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες (PZT) και άλλοι τα τύποι βρίσκονται υπό ανάπτυξη όπως οι αισθητήρες laser και οι αισθητήρες οπτικών ινών. Οι αισθητήρες laser επιτυγχάνουν μέτρηση της ΑΕ χωρίς να είναι σε επαφή με το δοκίμιο, αλλά είναι λιγότερο ευαίσθητοι από τους PZT και γενικά χρησιμοποιούνται σε φαινόμενα ΑΕ μεγάλου πλάτους. Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους και είναι δυνατή η μακροχρόνια χρήση τους (Μπακογιάννης, 2011, Σοφιανός, 2008).

4.5.2 ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

Ο προενισχυτής έχει ως σκοπό να παράγει ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύρηστο για περαιτέρω επεξεργασία. Για τη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) τοποθετείται συνήθως κοντά ή μέσα στο περίβλημα του αισθητήρα. Οι προενισχυτές τύπου PAC έχουν τη δυνατότητα ενίσχυσης της έντασης του σήματος ΑΕ κατά 20/40/60 dB $\pm 0,5\%$ dB. Η επιλογή ενίσχυσης του εισερχόμενου σήματος γίνεται μέσω διακόπτη (Gain Select).

Το πλάτος του σήματος ΑΕ που καταγράφεται στο σύστημα υπολογίζεται λογαριθμικά από τη σχέση:

$$dB = 20 \cdot \log (V_{max}/1\mu Volt) - (\text{ενίσχυση προενισχυτή σε dB}) \quad (4.4)$$

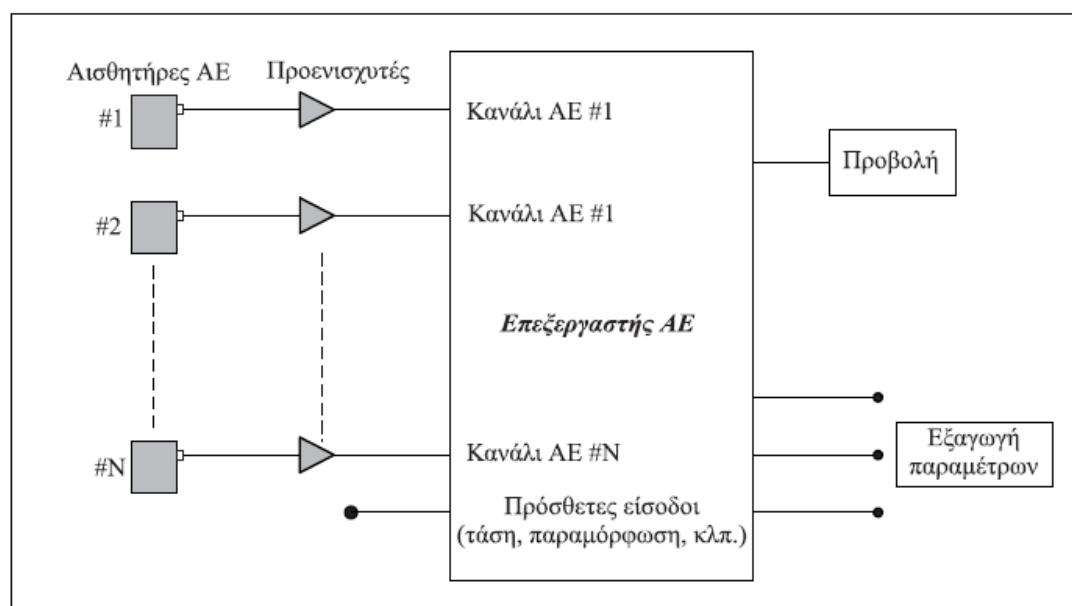
Επειδή ο προενισχυτής παράγει και αυτός θόρυβο, όπως και ο αισθητήρας, είναι αναγκαία η χρήση φίλτρου για ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Η σύνδεση φίλτρου δίνει τη δυνατότητα επιλογής του διερχόμενου σήματος. Γενικά υπάρχουν φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass Filter), υψηλών συχνοτήτων (Low Pass Filter) και ανοιχτού τύπου (Band Pass Filter) (Μπακογιάννης, 2011).

4.5.3 ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

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. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ.

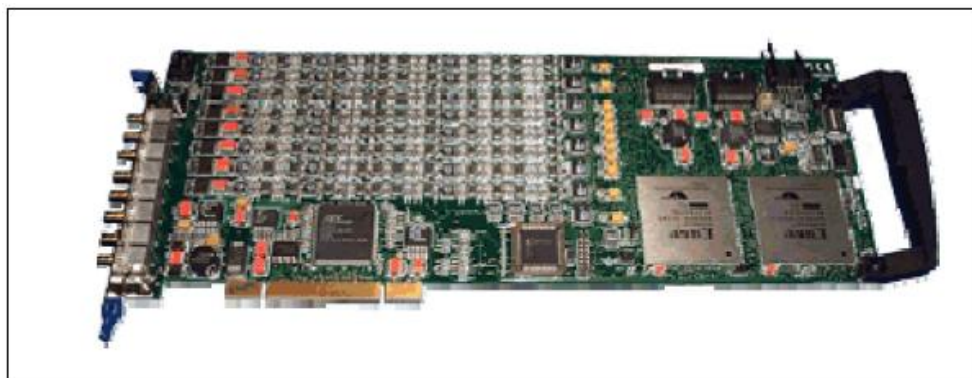
Τα κανάλια ΑΕ είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε δύο ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής. Για κάθε σήμα ΑΕ μετριοούνται χαρακτηριστικοί παράμετροι όπως το πλάτος (Amplitude-dB), το πλήθος των “απαριθμήσεων” (Counts), ο χρόνος ανύψωσης (Rise Time), η συνολική διάρκεια (duration) κ.τ.λ.



Σχήμα 4.6 Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ (Σοφιανός, 2008)

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται μια κάρτα οχτώ καναλιών (PCI-8) καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων ΑΕ της PAC (Physical Acoustics Corporation). Τα δεδομένα ανιχνεύονται και καταγράφονται σε ένα προηγμένο ψηφιακό παραμετρικό σύστημα παρακολούθησης. Τα οχτώ κανάλια είναι υψηλής ταχύτητας απόκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 132 Megabytes/sec) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανύψωσης, υπερβάσεις κατωφλίου, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS, κ.λπ.), ενώ το συνοδευτικό λογισμικό έχει τη δυνατότητα προβολής παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τα οχτώ

κανάλια ΑΕ το σύστημα διαθέτει δύο επιπλέον εισόδους (παραμετρικές εισοδοί) για την περίπτωση εισαγωγής σήματος από ένα εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα από ένα κελί φορτίου. Αυτές οι παραμετρικές εισοδοί, που καταγράφουν ταυτόχρονα με την καταγραφή των δεδομένων ΑΕ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση των παραμέτρων ΑΕ με άλλες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα η εφαρμοζόμενη τάση σε ένα δοκίμιο ή η παραμόρφωση του (Σοφιανός, 2008).



Σχήμα 4.7: Ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ (Σοφιανός, 2008)

4.6 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΛΗΨΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΕ

Οι παράγοντες που επιδρούν στη λήψη των σημάτων, πέρα από τις ιδιότητες του υλικού που επηρεάζουν τη μορφή του λαμβανόμενου σήματος, είναι:

- Η εξασθένιση ενός κύματος ΑΕ, η οποία αναφέρεται στη μείωση του πλάτους του κύματος κατά τη διάδοση του στο υλικό. Η εξασθένιση αυτή οφείλεται στη γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο (το πλάτος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης), στην απόσβεση του υλικού διάδοσης και σε τυχόν απώλειες ενέργειας. Στα δοκίμια των εργαστηριακών δοκιμών, λόγω των μικρών διαστάσεων των δοκιμών, περιορίζεται σημαντικά η εξασθένιση που προκαλείται από την γεωμετρική εξάπλωση και την απόσβεση.
- Ο θόρυβος, ο οποίος διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, σε ηλεκτρονικό και σε μηχανικό. Σημαντικές πηγές θορύβου στις μελέτες ΑΕ είναι οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference EMI), που δημιουργούνται στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της ΑΕ, λόγω ακτινοβολίας ή ηλεκτρικής επαγωγής. Πηγές EMI είναι οι μετασχηματιστές, οι ισχυρές λάμπες, οι ηλεκτρικές μηχανές κ.α. Όλα τα εξαρτήματα σε ένα σύστημα παρακολούθησης ΑΕ θεωρούνται έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Οι πηγές μηχανικού θορύβου προκαλούν κρουστικού τύπου ακουστικά σήματα. Κάθε κίνηση ενός μηχανικού μέρους που βρίσκεται σε επαφή με το

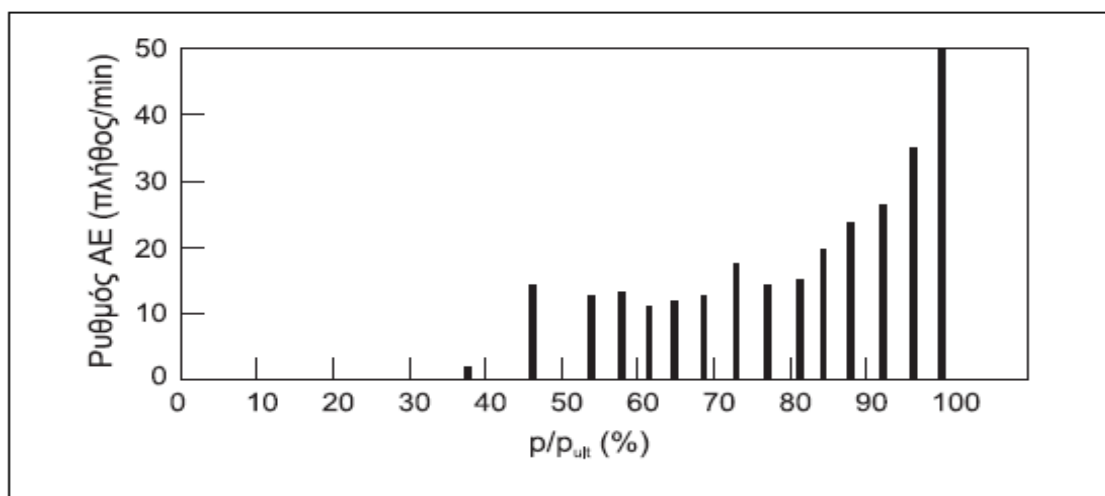
δοκίμιο αποτελεί πιθανή πηγή μηχανικού θορύβου. Σε συχνότητες άνω των 100 KHz ο μηχανικός θόρυβος ελαττώνεται σημαντικά (Μπακογιάννης, 2011).

4.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

Στη μηχανική των πετρωμάτων το φαινόμενο της Ακουστικής Εκπομπής εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της αστοχίας και της παραμόρφωσης των ψαθυρών πετρωμάτων υπό μηχανική καταπόνηση, συσχετίζοντας τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος με παραμέτρους της ΑΕ, όπως το πλήθος, το πλάτος, η ενέργεια των γεγονότων πρόκλησης ΑΕ, η θέση της πηγής τους κλπ. Η μέθοδος της ΑΕ χρησιμοποιείται επίσης σε επιτόπιες έρευνες, όπως είναι για παράδειγμα ο εντοπισμός ιδιαίτερα φορτισμένων περιοχών και η μελέτη των εκτινάξεων βράχων (rockbursts) σε βαθιά μεταλλεία και σήραγγες (Σοφιανός, 2008).

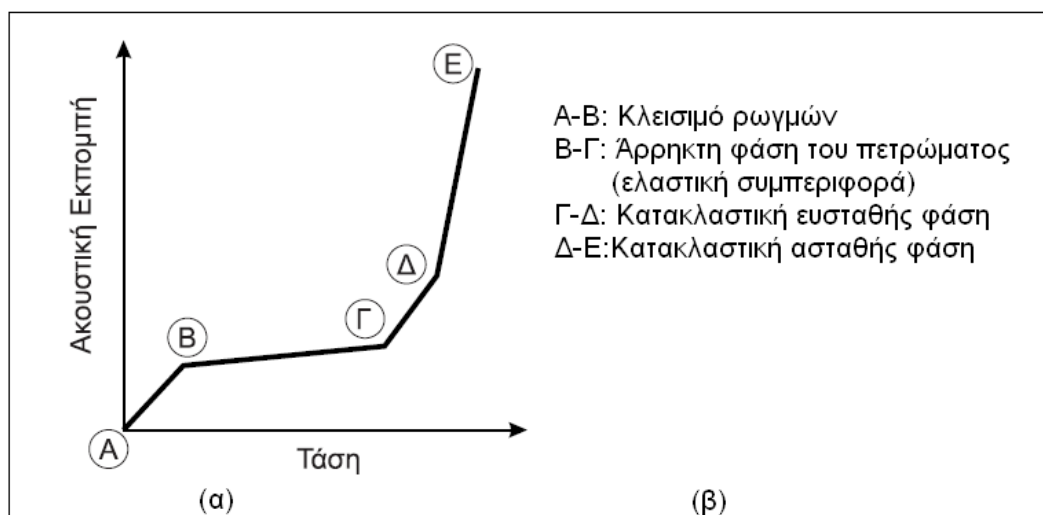
4.7.1 ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ - ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

Από τις πρώτες μελέτες ΑΕ στα πετρώματα παρατηρήθηκε ότι όταν ένα πέτρωμα υποβάλλεται σε θλιπτική φόρτιση, ο ρυθμός ΑΕ αυξάνεται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χονδρόκοκκο γρανίτη.



Σχήμα 4.8: Μεταβολή του ρυθμού ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου p (ως αστοχίας p_{ult}) σε χονδρόκοκκο γρανίτη (Σοφιανός, 2008).

Σημαντική δουλειά στον τομέα αυτό έχει γίνει από το Mogi, ο οποίος δίνει σε διάγραμμα (Σχήμα 4.9) τη γενική μορφή της σχέσης μεταξύ της ΑΕ και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Στο ίδιο διάγραμμα συνδυάζεται από τους Boyce et al (1981) η ΑΕ με τη διαδικασία καταστροφής του δοκιμίου κατά τις δοκιμές θλίψης (Σοφιανός, 2008).

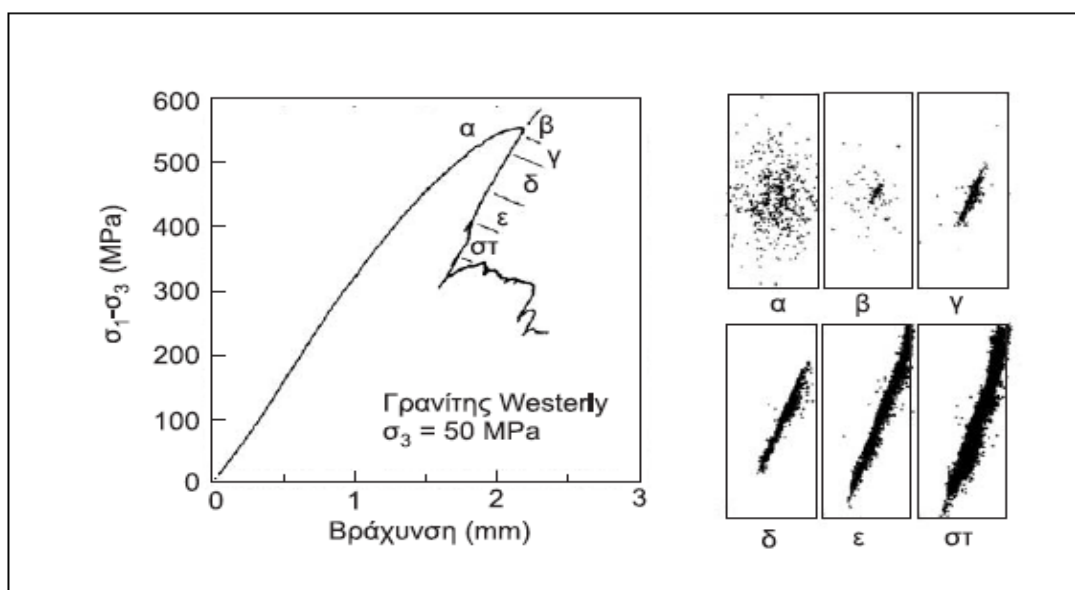


Σχήμα 4.9: (α) Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής ΑΕ, (β) συσχέτιση της ΑΕ με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Σοφιανός, 2008)

4.7.2 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΠΗΓΗΣ ΑΕ

Ο προσδιορισμός της θέσης της πηγής των σημάτων ΑΕ σε ένα δοκίμιο είναι δυνατός με τη χρησιμοποίηση περισσότερων του ενός αισθητήρων, οι οποίοι είναι προσαρμοσμένοι στο δοκίμιο. Η ΑΕ συνδέεται άμεσα με το σχηματισμό και τη διάδοση μικρορωγμών στα πετρώματα γι' αυτό παρέχει μια ιδανική μέθοδο για τη μελέτη της αστοχίας τους.

Ο ρυθμός της ΑΕ είναι στη φάση της αστοχίας του δοκιμίου τόσο υψηλός που είναι 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. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ανιχνευθεί η ανάπτυξη της αστοχίας κατά τη φόρτιση και να συσχετιστεί με τον εντοπισμό των γεγονότων ΑΕ. Στο σχήμα 4.10 φαίνονται αποτελέσματα από σχετικά πειράματα του Lockner.



Σχήμα 4.10: Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης ΑΕ σε δοκίμιο γρανίτη Westerly διαμέτρου 76,2 mm υπό τριαξονική θλίψη με πλευρική πίεση $\sigma_3=50$ MPa και ελεγχόμενο ρυθμό εκπομπής ΑΕ (Σοφιανός, 2008).

4.7.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΕ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ

Σημαντικό πεδίο εφαρμογής της ΑΕ επί τόπου αποτελούν τα υπόγεια μεταλλεία μεγάλου βάθους, όπου υπάρχει ο κίνδυνος της βίαιης εκτίναξης των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Επιπλέον στα υπόγεια μεταλλεία υπάρχει η διαρκής ανάγκη πρόβλεψης ενδεχόμενων αστοχιών της οροφής, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες να κινδυνέψουν οι εργαζόμενοι και ο εξοπλισμός. Για το σκοπό αυτό έχουν υιοθετηθεί διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης της συμπεριφοράς του πετρώματος, με πιο συνηθισμένη μέθοδο αυτή της μέτρησης της κάμψης της οροφής.

Η μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής για την πρόβλεψη καταπτώσεων της οροφής των υπόγειων μεταλλευτικών εκσκαφών έχει αρχίσει και χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο. Με την εφαρμογή της ΑΕ επιτυγχάνεται πρόβλεψη της επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστόλιθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα. Σε όλες τις περιπτώσεις η ακουστική δραστηριότητα αυξήθηκε πριν από την επικείμενη αστοχία. Καθοριστικός παράγοντας στην επιτυχή πρόβλεψη είναι η μορφή της αστοχίας, δηλαδή αν είναι προοδευτική ή επεισοδιακή και το αν δίνει πρόδρομα φαινόμενα ή όχι.

Άλλες εφαρμογές της ΑΕ επί τόπου (in situ) έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρηνή, στη μελέτη της ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser (Σοφιανός, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η προετοιμασία και η εκτέλεση των πειραμάτων κάμψης τριών σημείων, που ως στόχο έχουν τη διερεύνηση της απόκρισης ακουστικών εκπομπών κατά την φόρτιση και θραύση του δοκιμίου.

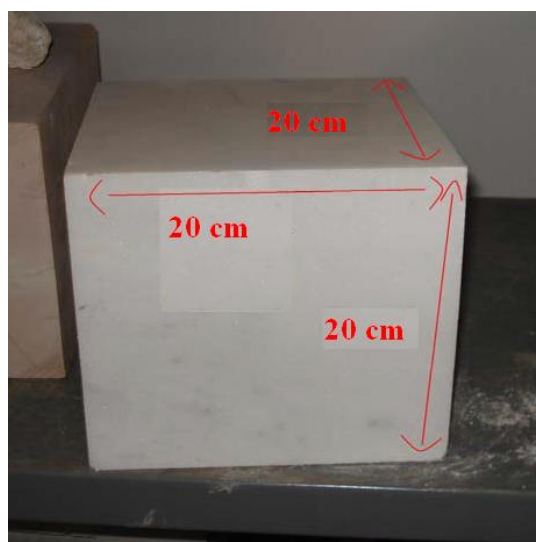
Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε:

- Την κατασκευή των δοκιμίων από μάρμαρο Κομνηνών Νέστου και την καταπόνησή τους σε κάμψη τριών σημείων. Η καταπόνηση των δοκιμίων ήταν σταδιακά αυξανόμενη μέχρι το φορτίο θραύσης τους.
- Την ανίχνευση και καταγραφή των παραγόμενων ακουστικών εκπομπών κατά την καταπόνηση των δοκιμίων.

Σκοπός των πειραμάτων ήταν η συσχέτιση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων μαρμάρου Κομνηνών Νέστου με τις χαρακτηριστικές παραμέτρους των ακουστικών εκπομπών (πλήθος, πλάτος, ενέργεια των γεγονότων πρόκλησης ακουστικών εκπομπών κ.λπ.) καθ' όλη τη διάρκεια της καταπόνησης.

5.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων προήλθαν από κύβο μαρμάρου Κομνηνών Νέστου, Σχήμα 5.1, διαστάσεων 20x20x20 (cm).



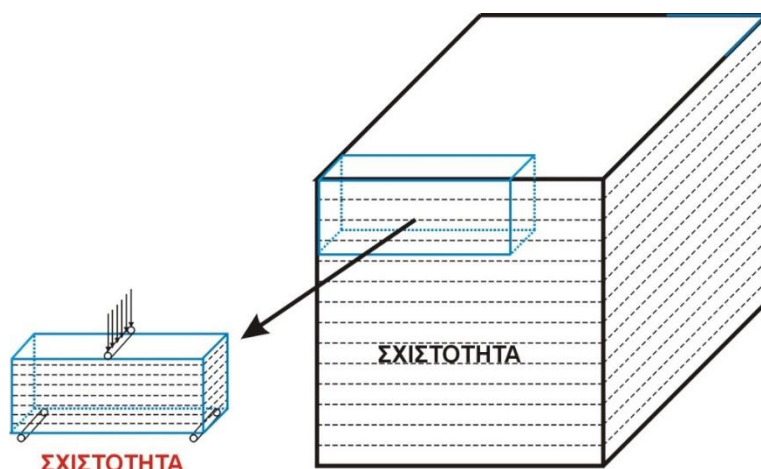
Σχήμα 5.1: Κύβος μαρμάρου Κομνηνών Νέστου διαστάσεων 20x20x20cm

Η κοπή του κύβου σε ράβδους έγινε από ειδικό δίσκο μαρμαροκοπής σε εργαστήριο κοπής μαρμάρων (μαρμαράδικο). Τα δοκίμια που προήλθαν από τον κύβο μαρμάρου Κομνηνών Νέστου είχαν τη μορφή ράβδου με τετραγωνική διατομή.

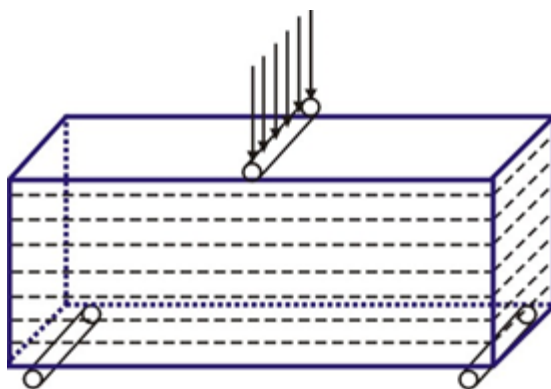
Οι χαρακτηριστικές επιφάνειες του μαρμάρου, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο 2^ο κεφάλαιο είναι:

- Πρόσωπο ή «νερά» του μαρμάρου, ονομάζεται η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς τη στρώση (παράλληλου ιστού) του μαρμάρου. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στην θλίψη είναι μικρότερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.
- Μουρέλο ή παρειά ονομάζεται η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την παράταξη του μαρμαροφόρου κοιτάσματος και κάθετη προς το πρόσωπο.
- Κεφάλι ονομάζεται η επιφάνεια που είναι κάθετη στις δύο προηγούμενες. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στη θλίψη είναι μεγαλύτερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου (Εξαδάκτυλος, 2006).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το μάρμαρο Κομνηνών Νέστου θεωρήθηκε εγκαρσίως ισότροπο και ο προσανατολισμός των δοκιμών φαίνεται στα Σχήματα 5.2, 5.3.



Σχήμα 5.2: Προσανατολισμός δοκιμών κατά τη φόρτιση (Κακλής, 2010)



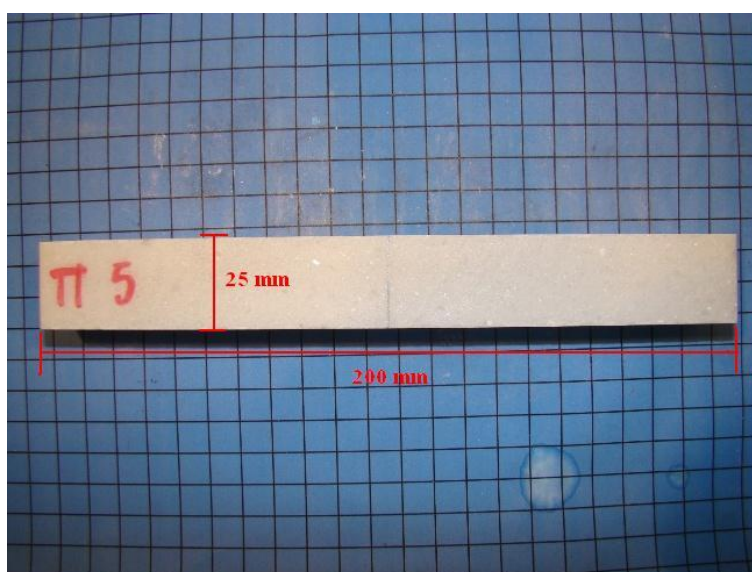
Σχήμα 5.3: Λεπτομέρεια προσανατολισμού δοκιμών κατά τη φόρτιση (Κακλής, 2010)

5.3 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

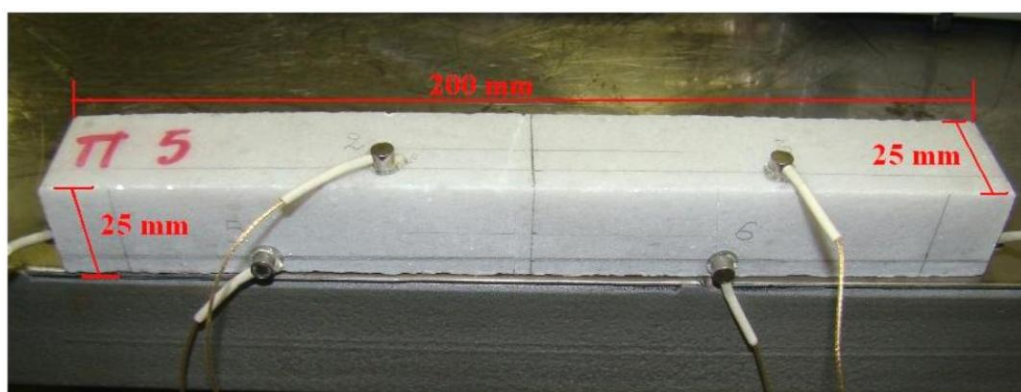
Όλα τα δοκίμια μαρμάρου είχαν τις ίδιες διαστάσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση ήταν οι διαστάσεις του δοκιμίων να είναι τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τους στην συσκευή κάμψης.

Επίσης τα δοκίμια διαμορφώθηκαν σε τέτοιο μήκος ώστε να μην προεξέχουν πολύ από τους κυλίνδρους έδρασης έπειτα από την τοποθέτησή τους στη διάταξη της κάμψης. Το μήκος L των δοκιμίων ήταν 200 mm, το πλάτος b ήταν 25 mm και το ύψος h ήταν επίσης 25 mm.

Οι διαστάσεις των δοκιμίων μετρήθηκαν με παχύμετρο σε τρία σημεία και καταγράφηκε ο μέσος όρος ως τελική μέτρηση. Στα Σχήματα 5.2 και 5.3 εμφανίζεται ενδεικτικά ένα δοκίμιο με τις διαστάσεις του.



Σχήμα 5.4: Δοκίμιο διαστάσεων 200x25x25



Σχήμα 5.5: Δοκίμιο διαστάσεων 200x25x25

Στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται αναλυτικά οι διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές κάμψης.

Πίνακας 5.1: Διαστάσεις δοκιμών δοκιμής κάμψης

ΔΟΚΙΜΙΟ	b (mm)	h (mm)	L (mm)
4	25,62	24,03	200
5	25,58	24,10	200
6	26,43	23,08	200
7	25,73	23,35	200
8	25,88	23,05	200
9	25,67	24,03	200

5.4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Για τον εντοπισμό των ακουστικών εκπομπών (ΑΕ) που παράγονται κατά τη διάρκεια της καταπόνησης των δοκιμών μαρμάρου χρησιμοποιείται ένα σύστημα παρακολούθησης το οποίο αποτελείται από (Κατσιογιάννη, 2007):

- Τους αισθητήρες (μορφοτροπείς) που συνήθως είναι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες, οι οποίοι μετατρέπουν τα παραγόμενα ελαστικά τασικά κύματα, που φθάνουν σε αυτούς, σε ηλεκτρικά σήματα.
- Τους προενισχυτές, οι οποίοι ενισχύουν το ανιχνευόμενο ηλεκτρικό σήμα σε υψηλότερη τάση ώστε να είναι κατάλληλο για περαιτέρω επεξεργασία.
- Τη μονάδα επεξεργασίας, η οποία αποτελείται από ηλεκτρονικά συστήματα ΑΕ τα οποία είναι ειδικά σχεδιασμένα για την επεξεργασία του ενισχυμένου, φιλτραρισμένου ηλεκτρικού σήματος. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος.

5.5 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

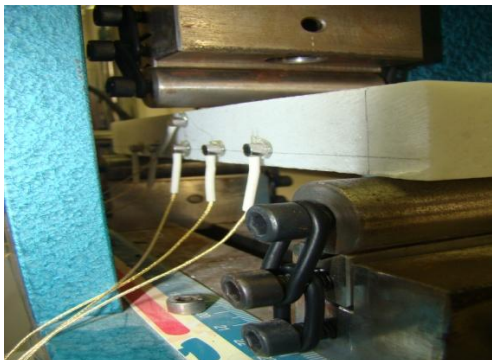
Σε κάθε δοκίμιο μαρμάρου τοποθετήθηκαν έξι αισθητήρες, προτού ξεκινήσει η δοκιμή κάμψης τριών σημείων, για την ανίχνευση των ακουστικών εκπομπών που παράγονται κατά την κάμψη.

Μεταξύ πλακιδίου μαρμάρου και αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε σιλικόνη ως ενδιάμεσο συγκολλητικό. Η σιλικόνη κρατάει σταθερό τον αισθητήρα πάνω στο πλακίδιο και εξασφαλίζει την καλή επαφή μεταξύ των δύο επιφανειών (αισθητήρα-πετρώματος) ώστε να μην υπάρχουν σημαντικές απώλειες κατά τη μετάδοση των ακουστικών κυμάτων. Έτσι ευνοείται ο εντοπισμός χαμηλού επιπέδου ακουστικών εκπομπών από τους αισθητήρες.

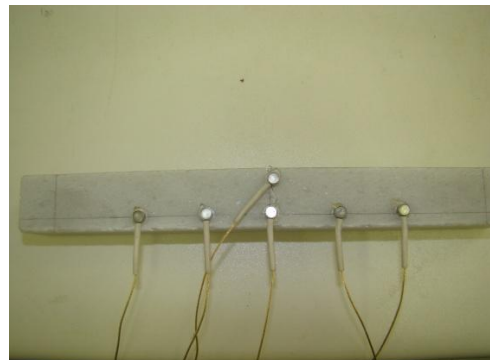
Οι αισθητήρες δεν τοποθετήθηκαν άτακτα αλλά σε συγκεκριμένες θέσεις πάνω στα πλακίδια μαρμάρου. Πάνω στην επιφάνεια των δοκιμών σχεδιάστηκαν με μολύβι ευθείες

γραμμές, παράλληλες με κάποιες από τις ακμές των δοκιμίων, πάνω στις οποίες ορίστηκαν οι θέσεις των αισθητήρων.

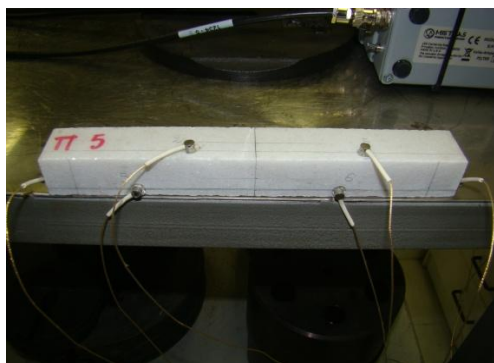
Η διάταξη των αισθητήρων δεν παρέμεινε ίδια σε όλα τα πειράματα που έγιναν. Στα σχήματα 5.4 έως 5.8 απεικονίζεται η διάταξη των αισθητήρων σε κάθε δοκίμιο.



Σχήμα 5.4: Διάταξη αισθητήρων δοκίμιο 4



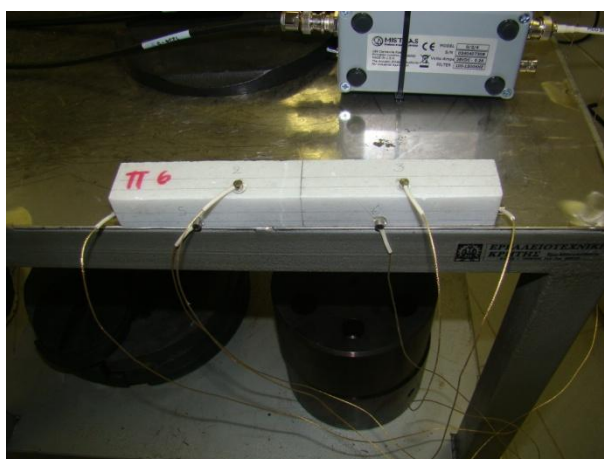
Σχήμα 5.5: Διάταξη αισθητήρων δοκίμιο 4



Σχήμα 5.6: Διάταξη αισθητήρων δοκίμιο 5

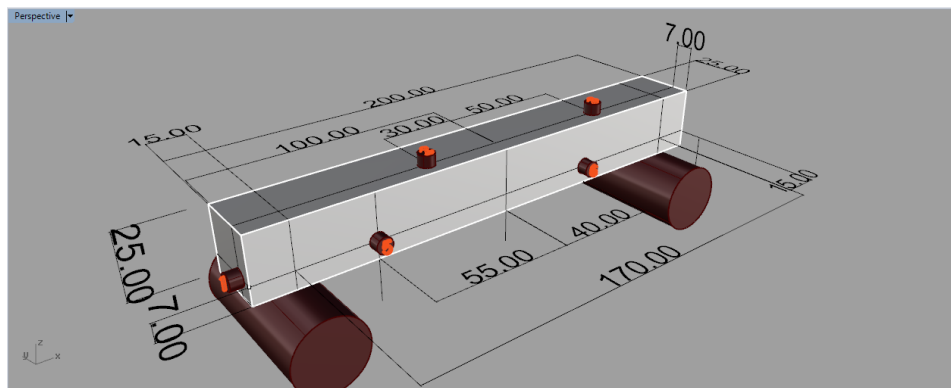


Σχήμα 5.7: Διάταξη αισθητήρων δοκίμιο 5

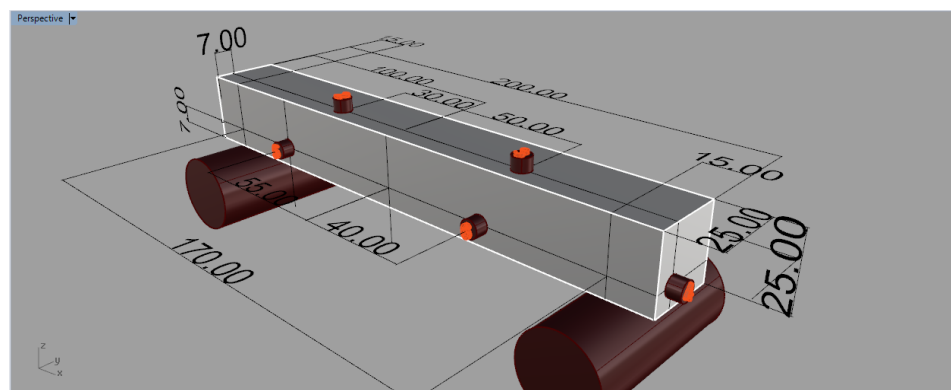


Σχήμα 5.8: Διάταξη αισθητήρων δοκίμιο 6

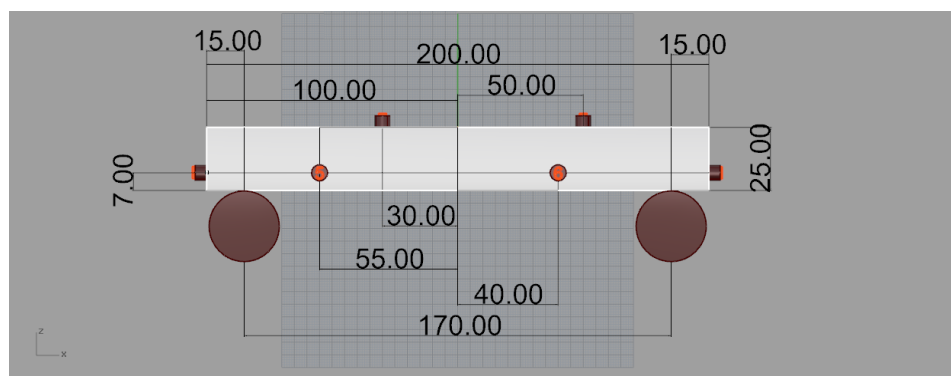
Με το πρόγραμμα Rhino 3D σχεδιάστηκαν τρισδιάστατα μοντέλα των δοκιμίων μαρμάρου πάνω στα οποία αναγράφονται οι διαστάσεις των δοκιμίων, οι αποστάσεις μεταξύ των αισθητήρων και ορίζονται με ακρίβεια οι θέσεις των αισθητήρων.



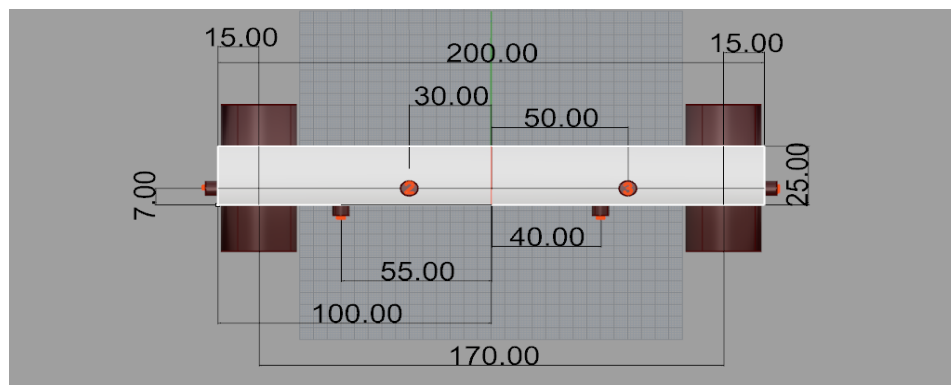
Σχήμα 5.12: Προοπτική 1 δοκιμών 5, 6



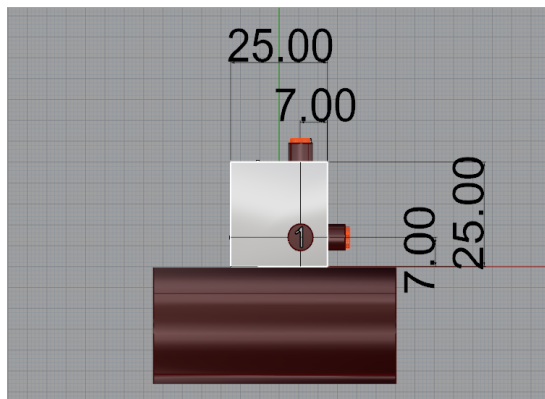
Σχήμα 5.13: Προοπτική 2 δοκιμών 5, 6



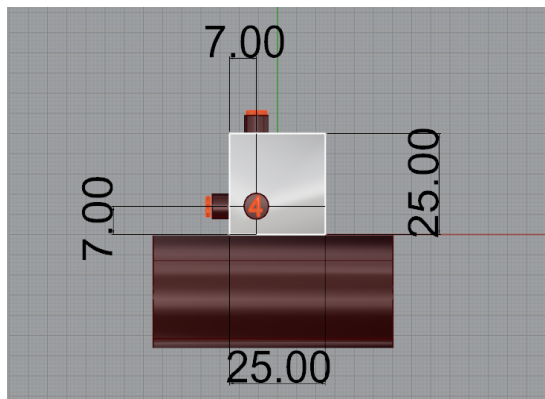
Σχήμα 5.14: Πρόσοψη δοκιμών 5, 6



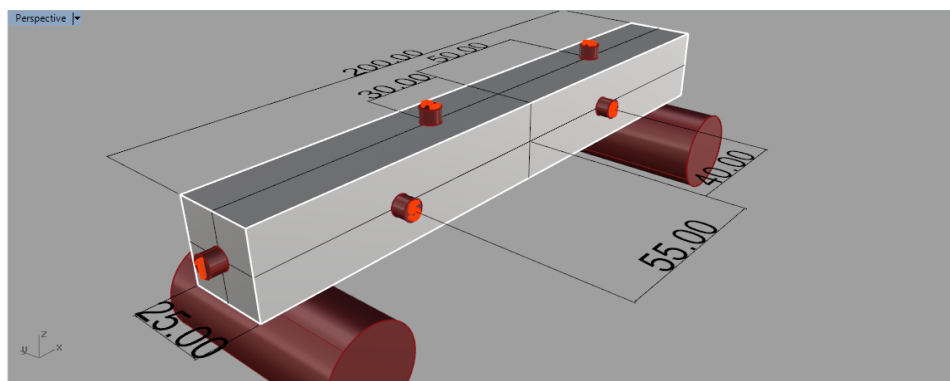
Σχήμα 5.15: Κάτοψη δοκιμών 5, 6



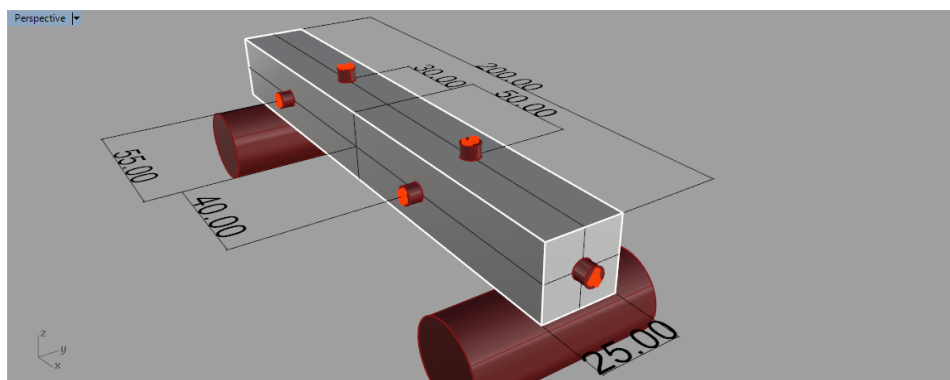
Σχήμα 5.16: Πλάγια όψη 1 δοκιμίων 5, 6



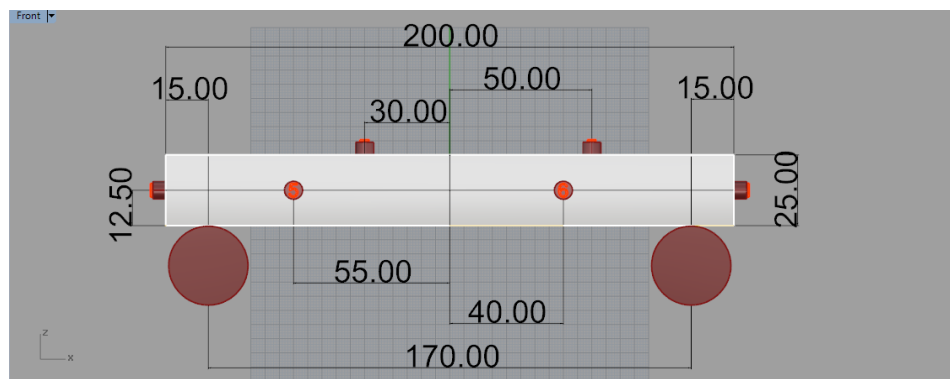
Σχήμα 5.17: Πλάγια όψη 2 δοκιμίων 5, 6



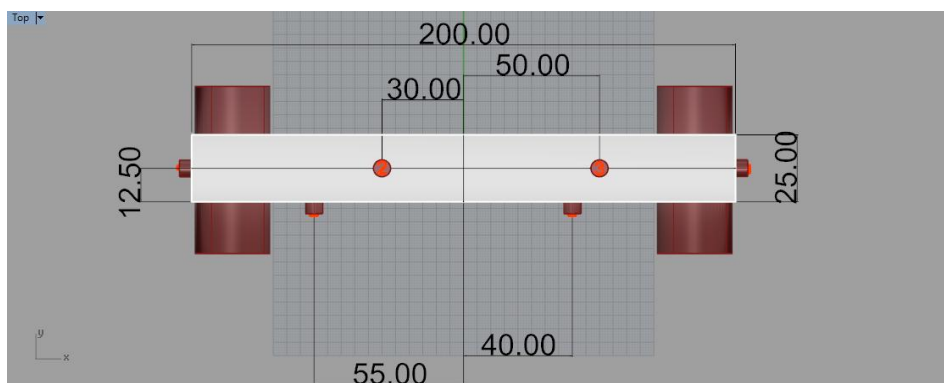
Σχήμα 5.18: Προοπτική 1 δοκιμίων 7, 8, 9



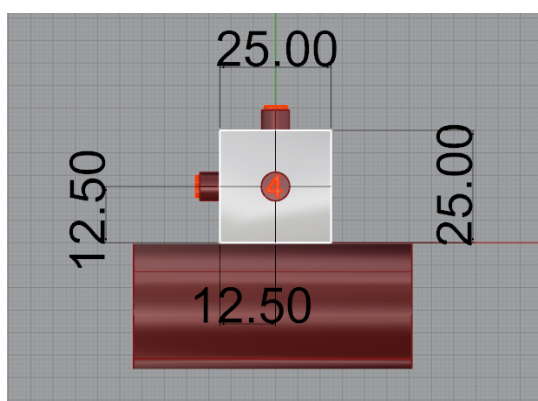
Σχήμα 5.19: Προοπτική 2 δοκιμίων 7, 8, 9



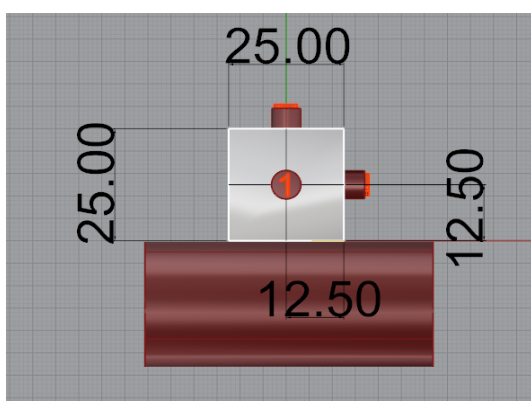
Σχήμα 5.20: Πρόσοψη δοκιμίων 7, 8, 9



Σχήμα 5.21: Κάτοψη δοκιμίων 7, 8, 9



Σχήμα 5.22: Πλάγια όψη 1 δοκιμίων 7, 8, 9



Σχήμα 5.23: Πλάγια όψη 2 δοκιμίων 7, 8, 9

5.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Μετά την εφαρμογή των αισθητήρων στα δοκίμια μαρμάρου Κομνηνών Νέστου ακολούθησε η τοποθέτηση τους στη διάταξη κάμψης τριών σημείων για να φορτιστούν μέχρι την θραύση τους.

Η φόρτιση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με τη συσκευή Tri-scan 50 στην οποία προσαρμόστηκε πρόσθετο εξάρτημα ειδικά σχεδιασμένο για δοκιμές κάμψης τριών σημείων, Σχήμα 5.18. Ο έλεγχος στην συσκευή Tri-scan γίνεται από την ενσωματωμένη κονσόλα ελέγχου. Η κονσόλα αυτή μπορεί να επιβάλλει μόνο έλεγχο μετατόπισης (displacement control), δηλαδή να καθορίζει το ρυθμό κίνησης του εμβόλου σε mm/min. Το σύστημα ελέγχει κατά πόσο η επιβαλλόμενη μετατόπιση διαφέρει από αυτή που εφαρμόζεται στο δοκίμιο. Ο ρυθμός κίνησης του εμβόλου ορίστηκε στα 0,06 mm/min.



Σχήμα 5.18: Συσκευή Tri-scan 50

Σε όλες τις δοκιμές κάμψης η φόρτιση έγινε κάθετα προς το πρόσωπο των δοκιμίων μαρμάρου και το μήκος ανοίγματος κεφαλών, l_s , της διάταξης κάμψης ήταν στα 170 mm. Τα δοκίμια κόπηκαν κατά μήκος $L = l_s + 30\text{mm}$, ώστε κατά την τοποθέτησή τους στο μηχάνημα κάμψης να μην προεξέχουν πολύ από τις κεφαλές (εφέδρανα στήριξης). Τα δοκίμια που δεν είχαν επαφή σε όλο το μήκος των εφέδρανων στήριξης δεν δοκιμάστηκαν, επειδή θα οδηγούσαν σε λάθος αποτελέσματα.

Προτού ξεκινήσει η δοκιμή της κάμψης σε κάθε δοκιμίου ελέγχθηκε αν όλοι οι αισθητήρες καταγράφουν ακουστικά σήματα, με το σπάσιμο της μύτης ενός μολυβιού πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου.

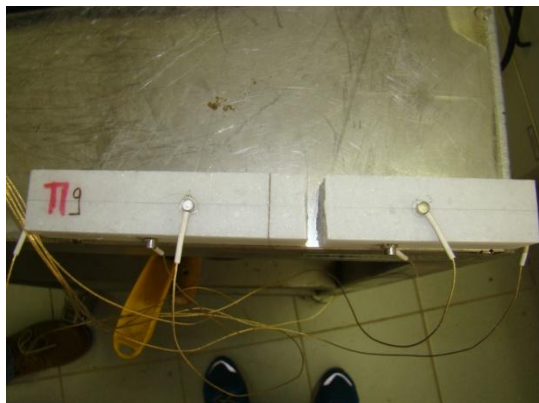
Επίσης ορίστηκε ένα κατώφλι τάσης (threshold) για την εξάλειψη του θορύβου του περιβάλλοντος αλλά και το χαρακτηρισμό ενός σήματος ως κρουστικού. Το κατώφλι τάσης ορίστηκε στα 38 db (κατά τη διάρκεια της καταπόνησης κάθε φορά που ένα σήμα υπερβαίνει το κατώφλι τάσης σημειωνόταν ένας «κτύπος» και καταγραφόταν ως γεγονός ακουστικής εκπομπής).

Στην αρχή το άνω στέλεχος της μηχανής κατέβαινε προσεχτικά έως ότου ακουμπήσει οριακά το δοκίμιο. Στη συνέχεια, καθοριζόταν ο ρυθμός μετατόπισης του κινητού πλαισίου της μηχανής σε 0,06 mm/min. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον συγχρονισμό των μετρητικών συστημάτων ώστε να επιτευχθεί η ταυτόχρονη καταγραφή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή των παραμέτρων της κάμψης (δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο από το άνω στέλεχος της μηχανής και μετατόπιση δοκιμίου) αλλά και των παραμέτρων της ακουστικής εκπομπής (πλήθος, πλάτος, χρόνος ανύψωσης, ενέργεια των γεγονότων κ.τ.λ.).

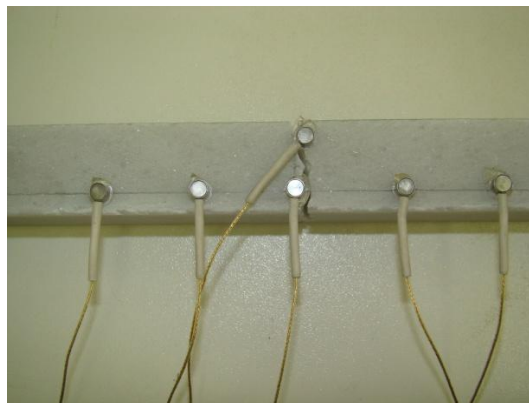
Τη στιγμή της θραύσης των δοκιμίων σταματούσε η μηχανή και η καταγραφή των μετρήσεων. Το άνω στέλεχος επέστρεφε στην αρχική του θέση για να τοποθετηθεί νέο δοκίμιο και να επαναληφθεί το πείραμα.

Τα δοκίμια πριν τοποθετηθούν στη διάταξη της κάμψης σηματοδύνονταν με μολύβι στο μέσο του μήκους τους L , σημείο στο οποίο εφαρμόζοταν το φορτίο από το άνω στέλεχος της διάταξης της κάμψης.

Στα Σχήματα 5.19 και 5.20 απεικονίζονται δοκίμια μαρμάρου μετά τη θραύση τους.



Σχήμα 5.19: Θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο



Σχήμα 5.20: Κάθετη θραύση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης τριών σημείων και των ακουστικών εκπομπών, ενώ παράλληλα γίνεται μια συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών. Επίσης παρατίθενται πίνακες και διαγράμματα των τελικών αποτελεσμάτων. Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, που λήφθηκαν από τις εργαστηριακές δοκιμές και τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν έγιναν με το πρόγραμμα Excel.

6.2 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα δοκίμια μαρμάρου συμπεριφέρθηκαν με παρόμοιο τρόπο κατά τη διάρκεια των δοκιμών κάμψης τριών σημείων. Παρατηρήθηκε λοιπόν επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών και γι' αυτό επιλέχθηκε ενδεικτικά η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του δοκιμίου 5.

Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος ένας ειδικός καταγραφέας συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό υπολογιστή κατέγραφε τη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο από το άνω στέλεχος ανά μονάδα χρόνου. Καταγραφόταν επίσης ο χρόνος του πειράματος και η μετατόπιση του μαρμάρου.

Με τα δεδομένα της δύναμης υπολογίστηκε η τάση στο δοκίμιο από τον τύπο:

$$\sigma_t = \frac{3 P_f l_s}{2 b h^2} \quad (6.1)$$

όπου b είναι το πλάτος, h το ύψος, l_s η απόσταση μεταξύ των εφέδρανων στήριξης του δοκιμίου και P_f η δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο.

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά δοκιμίου 5

Χαρακτηριστικά δοκιμίου	
b	25,58 mm
h	24,10 mm
L	200 mm
l _s	170 mm

Πίνακας 6.2: Συνοπτικός πίνακας με αποτελέσματα δοκιμής στο δοκίμιο 5

Time (sec)	Displacement (mm)	Load (KN)	Stress (KPa)
0	0	0	0
1	0,000413	-7,9E-05	-1,360355276
2	0,00167	0,000299	5,127442272
3	0,002505	0,000128	2,197472563
4	0,003577	7,32E-05	1,255697381
5	0,004638	5,49E-05	0,941775181
6	0,005702	-6,7E-05	-1,151056648
...
222	0,231948	1,188158	20390,27998
223	0,232849	1,1925	20464,79413
224	0,234411	1,193585	20483,41409
225	0,239583	0,298762	5127,132906
...
230	0,239371	0,021244	364,5719705
231	0,23995	0,020848	357,7702799
232	0,240817	0,020646	354,3170928
233	0,24151	0,019768	339,2486556
234	0,242285	0,019835	340,3996608

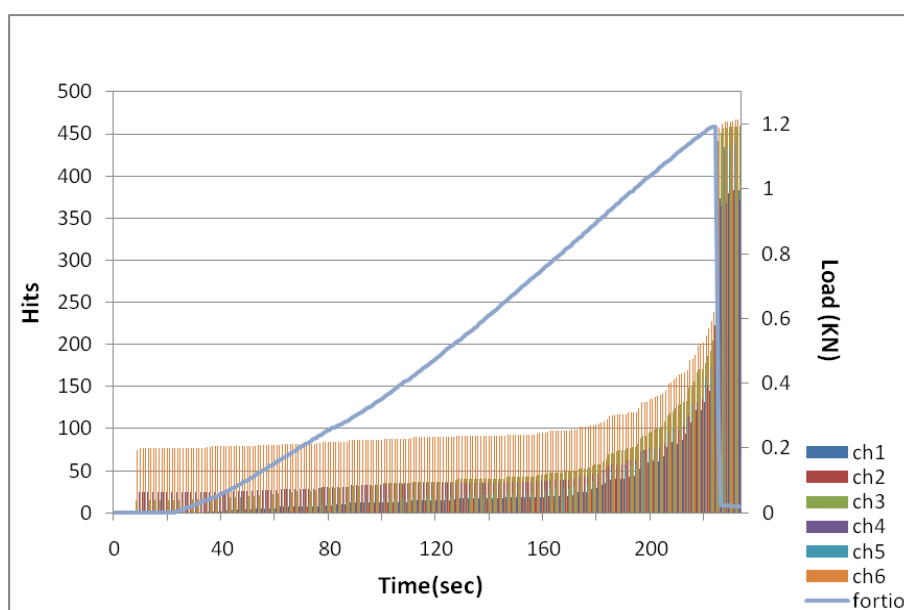
Στον πίνακα 6.2 με τη χρωματιστή ένδειξη φαίνονται οι τιμές του χρόνου, της συνολικής μετατόπισης, της δύναμης που ασκείται στο δοκίμιο και της τάσης τη στιγμή της θραύσης του. Οι αρνητικές τιμές των δυνάμεων φανερώνουν ότι αυτές δεν εφαρμόζονται στο δοκίμιο. Μετά τη θραύση του δοκιμίου παρατηρείται αισθητή ελάττωση της δύναμης.

Με τη βοήθεια του Excel κατασκευάστηκαν διαγράμματα συσχετισμού της δύναμης, που ασκείται από το άνω στέλεχος της μηχανής στο δοκίμιο, και των παραμέτρων ακουστικής εκπομπής συναρτήσει του χρόνου. Τα διαγράμματα αυτά φανερώνουν πως εξελίσσεται το φαινόμενο των ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς αυξάνεται σταδιακά η φόρτιση στο δοκίμιο.

Οι παράμετροι ΑΕ καταγράφηκαν ξεχωριστά από έξι κανάλια (channel). Το κάθε κανάλι αποτελείται από ένα αισθητήρα και τον συναφή εξοπλισμό για διαβίβαση, τροποποίηση, εντοπισμό και μέτρηση των σημάτων που έρχονται από αυτόν. Για την κατασκευή των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν στο Excel έξι σειρές δεδομένων ΑΕ (όσα και τα κανάλια) με τις ονομασίες Ch1, Ch2, Ch3 κ.τ.λ.

Το διάγραμμα 6.1 που ακολουθεί εμφανίζει το συνολικό πλήθος των ακουστικών σημάτων (hits), που έχουν ανιχνευθεί από κάθε αισθητήρα σε κάθε δευτερόλεπτο του πειράματος, ενώ παράλληλα φαίνεται η εξέλιξη της φόρτισης στο δοκίμιο.

Τα συμβάντα (hits) που φαίνονται στο διάγραμμα είναι αθροιστικά, δηλαδή περιλαμβάνουν το σύνολο των συμβάντων που έχουν καταγραφεί από την αρχή του πειράματος μέχρι την κάθε στιγμή μέτρησης του πειράματος.



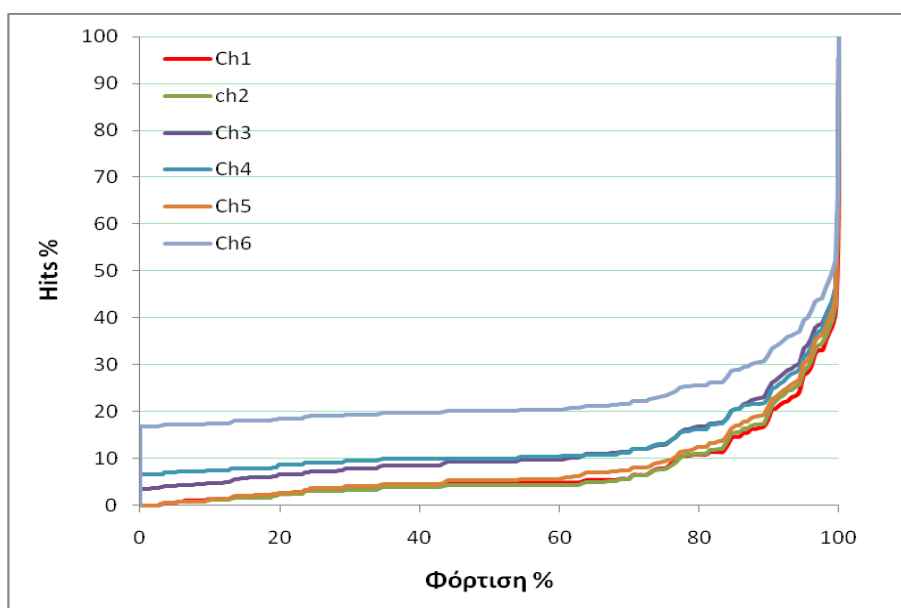
Διάγραμμα 6.1: Hits, Load-Time

Στο διάγραμμα 6.1 παρατηρείται ότι:

1. Η φόρτιση στο δοκίμιο αυξάνεται προοδευτικά μέχρι τη στιγμή της θραύσης του δοκιμίου.
2. Με την αύξηση του φορτίου, που ασκείται στο δοκίμιο, αυξάνεται το πλήθος των ακουστικών σημάτων (hits) που καταγράφονται από κάθε αισθητήρα.
3. Στην αρχή της φόρτισης ο αριθμός των καταγραφόμενων ακουστικών σημάτων δεν είναι σημαντικός και ο ρυθμός αύξησης τους είναι αργός. Καθώς η φόρτιση πλησιάζει την κατάσταση αστοχίας του δοκιμίου τα ακουστικά σήματα αυξάνονται με πιο έντονους ρυθμούς με αποκορύφωμα τη στιγμή της θραύσης όπου συμβαίνει κατακόρυφη αύξηση των ακουστικών εκπομπών.
4. Κάθε αισθητήρας εντοπίζει διαφορετικό αριθμό ακουστικών σημάτων.

Στο διάγραμμα 6.2 φαίνεται το ποσοστό των συμβάντων ακουστικής εκπομπής (hits) που αντιστοιχεί σε κάθε ποσοστό της φόρτισης. Το ποσοστό της φόρτισης υπολογίζεται ως προς τη δύναμη με την οποία επέρχεται η αστοχία του δοκιμίου, ενώ το ποσοστό των συμβάντων (hits) υπολογίζεται ως προς το σύνολο των συμβάντων που έχουν καταγραφεί μέχρι τη στιγμή της αστοχίας.

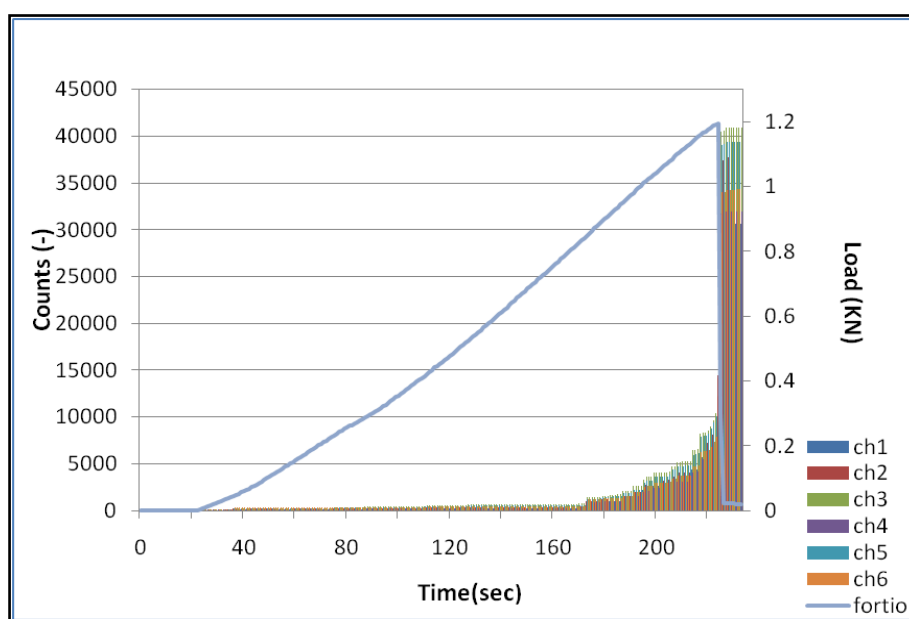
Τη στιγμή που έχει πραγματοποιηθεί το 90% της φόρτισης το ποσοστό των συμβάντων (hits) στα έξι κανάλια καταγραφής κυμαίνεται από 15-30%. Δηλαδή μετά το 90% της φόρτισης (πολύ κοντά στην κατάσταση αστοχίας) καταγράφονται τα περισσότερα συμβάντα ακουστικών εκπομπών, περίπου το 70-80% του συνόλου τους.



Διάγραμμα 6.2: Ποσοστό Hits(%)-ποσοστό φόρτισης (%)

Το επόμενο διάγραμμα, 6.3, συσχετίζει την παράμετρο “απαριθμήσεις” (counts) των ακουστικών εκπομπών με τη φόρτιση που δέχεται το δοκίμιο σε συνάρτηση με το χρόνο του πειράματος.

Η παράμετρος “απαριθμήσεις” (counts) προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ακουστικής εκπομπής υπερβαίνει το κατώφλι τάσης (38db). Οι “απαριθμήσεις” που φαίνονται στο διάγραμμα είναι αθροιστικές, δηλαδή περιλαμβάνουν το σύνολο των “απαριθμήσεων” που έχουν καταμετρηθεί από την αρχή του πειράματος μέχρι την κάθε στιγμή μέτρησης.

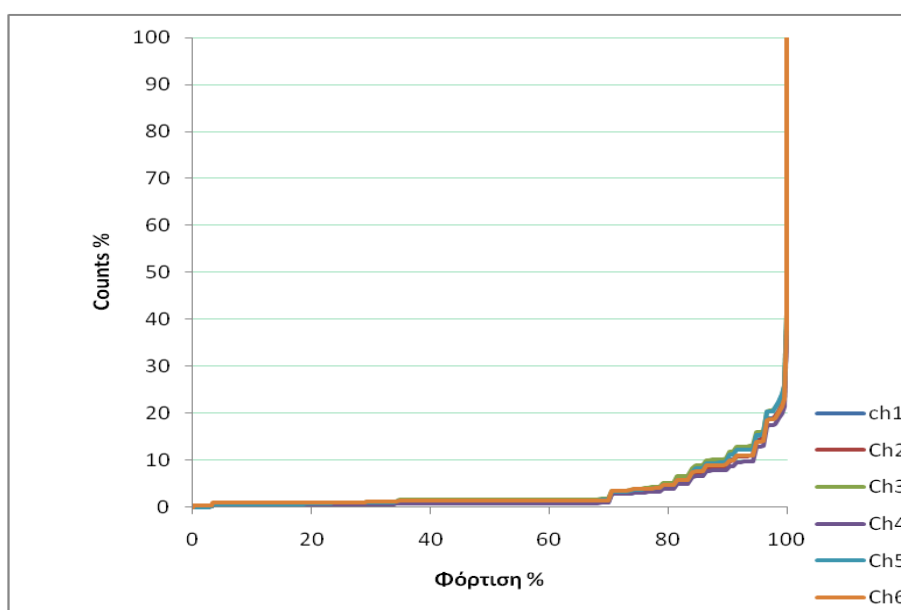


Διάγραμμα 6.3: Counts, Load-Time

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.3, οι “απαριθμήσεις” αυξάνονται καθώς αυξάνεται η φόρτιση του δοκιμίου. Όταν η φόρτιση πλησιάζει στο τέλος (αστοχία δοκιμίου) η αύξηση των “απαριθμήσεων” γίνεται πιο αισθητή. Τη στιγμή που θραύεται το δοκίμιο παρατηρείται ραγδαία αύξηση των “απαριθμήσεων” (περίπου από τις 10000 στις 40000).

Αυτή η ραγδαία αύξηση των “απαριθμήσεων” που συνοδεύει την αστοχία γίνεται επίσης εμφανής στο διάγραμμα 6.4 στο οποίο για κάθε ποσοστό της φόρτισης που έχει πραγματοποιηθεί αντιστοιχίζεται το ποσοστό των “απαριθμήσεων” που έχουν καταγραφεί. Το ποσοστό της φόρτισης υπολογίζεται ως προς τη δύναμη με την οποία επέρχεται η αστοχία του δοκιμίου, ενώ το ποσοστό των “απαριθμήσεων” υπολογίζεται ως προς το σύνολο των “απαριθμήσεων” που έχουν καταγραφεί μέχρι τη στιγμή της αστοχίας.

Τη στιγμή που έχει πραγματοποιηθεί το 80% της φόρτισης το ποσοστό των “απαριθμήσεων” που έχουν καταγραφεί είναι μικρότερο από 10% και στα έξι κανάλια καταγραφής. Στο 99% της φόρτισης, τα ποσοστά των “απαριθμήσεων” στα έξι κανάλια ΑΕ κυμαίνονται από 20-25%, άρα τη στιγμή της αστοχίας (99-100% της φόρτισης) το ποσοστό των “απαριθμήσεων” που καταγράφηκε στα έξι κανάλια κυμαίνεται από 75-80% (διάγραμμα 6.4).



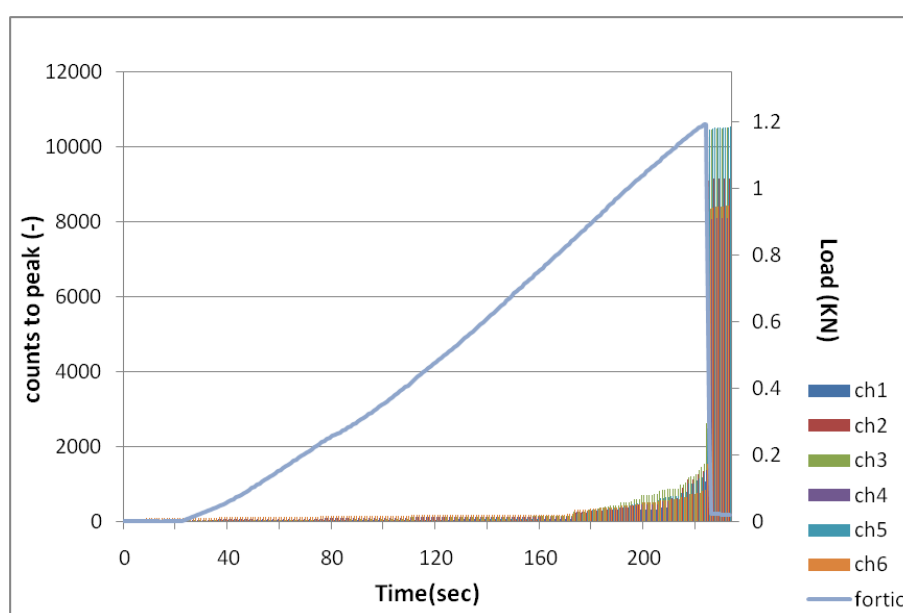
Διάγραμμα 6.4: Ποσοστό counts %-ποσοστό φόρτισης %

Το διάγραμμα 6.5, πιο κάτω, συσχετίζει την παράμετρο “απαριθμήσεις μέχρι τη μέγιστη τάση” (counts to peak) των ακουστικών εκπομπών με τη φόρτιση που δέχεται το δοκίμιο σε κάθε χρονική στιγμή του πειράματος. Η παράμετρος counts to peak προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ακουστικής εκπομπής υπερβαίνει το κατώφλι τάσης μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τάση του (πλάτος σήματος).

Οι τιμές των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” (counts to peak) που φαίνονται στο διάγραμμα είναι αθροιστικές, δηλαδή περιλαμβάνουν το σύνολο των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” που έχουν καταγραφεί από την αρχή του πειράματος μέχρι την κάθε στιγμή μέτρησης.

Στο διάγραμμα 6.5 παρατηρείται ότι οι “απαριθμήσεις μέχρι τη μέγιστη τάση” αυξάνονται καθώς μεγαλώνει το φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο. Όταν η φόρτιση πλησιάζει στο τέλος (αστοχία δοκιμίου) η αύξηση των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” (counts to peak) γίνεται πιο αισθητή. Τη στιγμή που θραύεται το δοκίμιο παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση τους.

Οι αθροιστικές τιμές των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” στα 6 κανάλια καταγραφής κυμαίνονται λίγο πριν τη θραύση του δοκιμίου στα 1000-2000 ενώ τη στιγμή της αστοχίας κυμαίνονται στις 7000-10000. Δηλαδή την στιγμή της αστοχίας ανιχνεύθηκαν από 6000-8000 “απαριθμήσεις μέχρι τη μέγιστη τάση” στα έξι κανάλια ΑΕ.

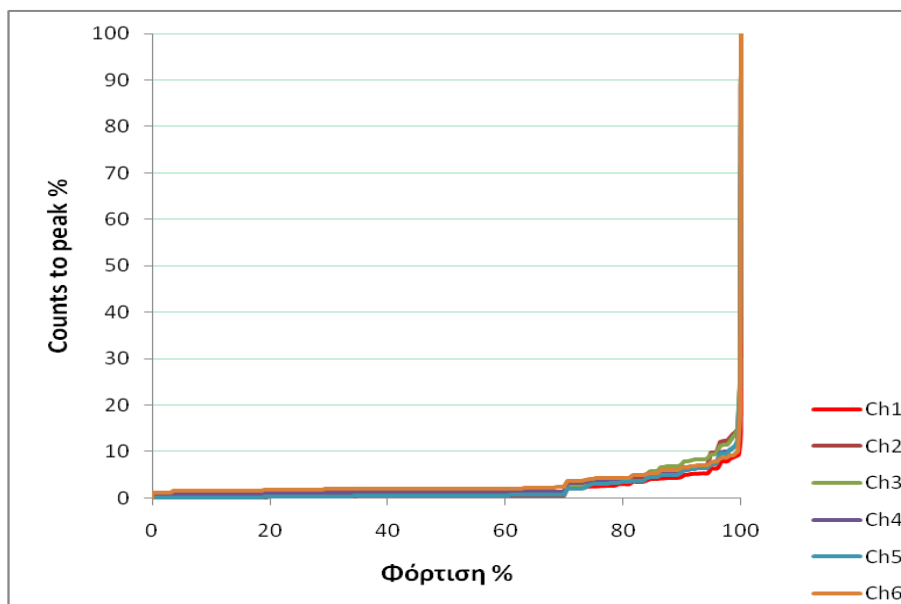


Διάγραμμα 6.5: Counts to peak, Load-Time

Στο διάγραμμα 6.6, σε κάθε ποσοστό της φόρτισης που έχει πραγματοποιηθεί αντιστοιχίζεται το ποσοστό των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” που έχει καταγραφεί. Το ποσοστό της φόρτισης υπολογίζεται ως προς τη δύναμη με την οποία επέρχεται η αστοχία του δοκιμίου, ενώ το ποσοστό των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” υπολογίζεται ως προς το σύνολο των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” (counts to peak) που έχουν καταγραφεί μέχρι τη στιγμή της αστοχίας.

Μέχρι το 80% της φόρτισης τα ποσοστά των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” είναι κάτω από το 10%. Τη στιγμή που έχει πραγματοποιηθεί το 99,9% της φόρτισης τα ποσοστά των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” κυμαίνονται από 15-25% στα έξι

κανάλια των αισθητήρων. Από το 99.9% έως το 100% της φόρτισης (στιγμή αστοχίας δοκιμίου) το ποσοστό των “απαριθμήσεων μέχρι τη μέγιστη τάση” που καταγράφηκε στα έξι κανάλια κυμαίνεται από 75-85%.

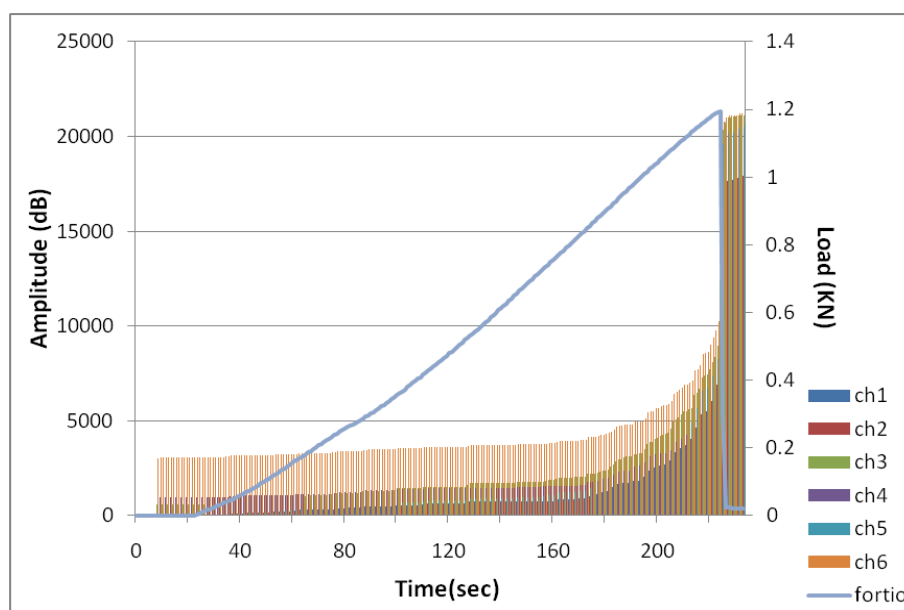


Διάγραμμα 6.6: Counts to peak%-φόρτιση%

Στο διάγραμμα 6.7 που ακολουθεί συσχετίζεται το “πλάτος” (amplitude) των ακουστικών εκπομπών με την εξέλιξη της φόρτισης. Το “πλάτος”, το οποίο είναι η μέγιστη τάση της κυματομορφής ενός σήματος ΑΕ, αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος και μετριέται σε db.

Τα πλάτη των ακουστικών εκπομπών που φαίνονται στο διάγραμμα 6.7, κάθε χρονική στιγμή του πειράματος είναι αθροιστικά, δηλαδή είναι το άθροισμα όλων των πλατών που έχουν καταγραφεί από την αρχή του πειράματος μέχρι την κάθε στιγμή μέτρησης.

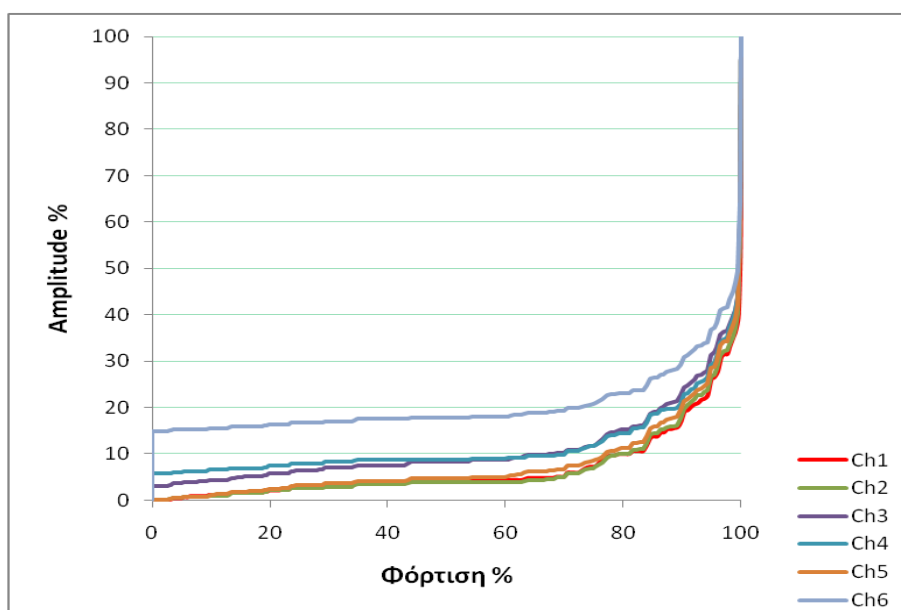
Οι τιμές του “πλάτους” ακουστικής εκπομπής αυξάνονται καθώς εξελίσσεται η φόρτιση του δοκιμίου. Όσο η φόρτιση πλησιάζει στην ολοκλήρωση της (θραύση δοκιμίου), παρατηρούνται σημαντικές αυξήσεις του “πλάτους” (amplitude), με τη μεγαλύτερη να συμβαίνει την στιγμή της αστοχίας.



Διάγραμμα 6.7: Amplitude, Load-Time

Στο διάγραμμα 6.8, σε κάθε ποσοστό της φόρτισης που έχει πραγματοποιηθεί αντιστοιχίζεται ένα ποσοστό του πλάτους. Για κάθε χρονική στιγμή του πειράματος, το ποσοστό της φόρτισης υπολογίζεται ως προς τη δύναμη με την οποία το δοκίμιο οδηγείται σε αστοχία, ενώ το ποσοστό του πλάτους υπολογίζεται ως προς το συνολικό άθροισμα του πλάτους (amplitude) τη στιγμή της αστοχίας.

Τη στιγμή που έχει πραγματοποιηθεί το 80% της φόρτισης το ποσοστό του πλάτους στα έξι κανάλια καταγραφής κυμαίνεται από 10-25%. Από το 80% έως το 100% της φόρτισης (στιγμή αστοχίας δοκιμίου) το ποσοστό του πλάτους στα έξι κανάλια κυμαίνεται από 75-85%.

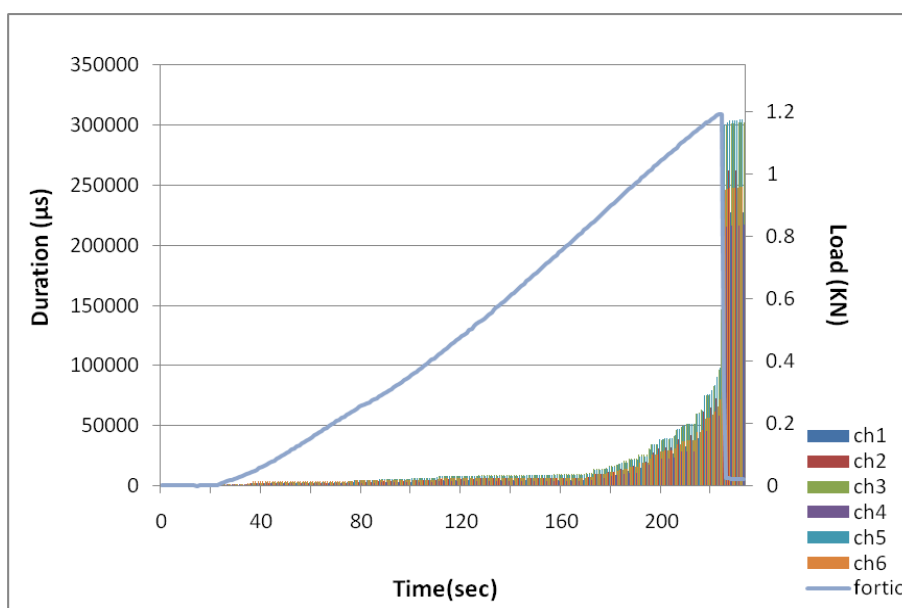


Διάγραμμα 6.8: Amplitude%-Φόρτιση%

Στο διάγραμμα 6.9 που ακολουθεί περιγράφεται η σχέση της διάρκειας (duration) των σημάτων ακουστικής εκπομπής με τη φόρτιση στο δοκίμιο. Η παράμετρος duration των ΑΕ αναφέρεται στη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί από την στιγμή που ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι τάσης για πρώτη φορά μέχρι την στιγμή που διασχίζει το κατώφλι τάσης για τελευταία φορά.

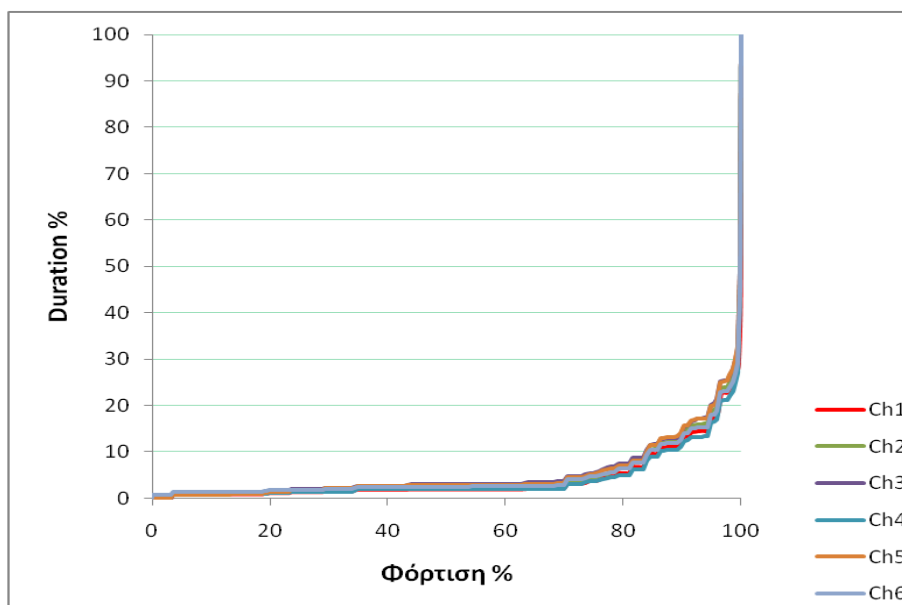
Οι τιμές της παραμέτρου “διάρκεια” (duration) που φαίνονται στο διάγραμμα είναι αθροιστικές, είναι δηλαδή το άθροισμα της διάρκειας των ακουστικών σημάτων από την αρχή του πειράματος μέχρι την κάθε στιγμή μέτρησης. Η μονάδα μέτρησης της διάρκειας των σημάτων είναι το ms.

Η παράμετρος “διάρκεια” εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με τις προηγούμενες παραμέτρους στη διάρκεια της φόρτισης, δηλαδή μια προοδευτική αύξηση των τιμών της η οποία κορυφώνεται τη στιγμή της αστοχίας.



Διάγραμμα 6.9: Duration, Load-Time

Στο διάγραμμα 6.10, σε κάθε ποσοστό της φόρτισης που έχει πραγματοποιηθεί αντιστοιχίζεται ένα ποσοστό της διάρκειας ΑΕ (duration %). Για κάθε χρονική στιγμή του πειράματος, το ποσοστό της φόρτισης υπολογίζεται ως προς τη δύναμη με την οποία το δοκίμιο οδηγείται σε αστοχία, ενώ το ποσοστό της διάρκειας ΑΕ υπολογίζεται ως προς το άθροισμα της διάρκειας των ακουστικών σημάτων από την αρχή του πειράματος μέχρι τη στιγμή της αστοχίας.

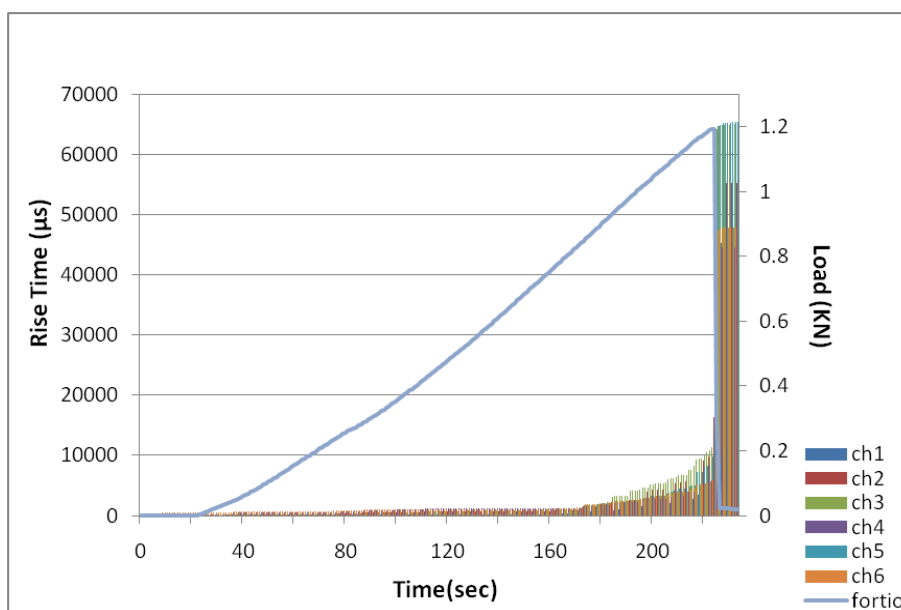


Διάγραμμα 6.10: Duration%- Φόρτιση %

Στο διάγραμμα 6.11 που ακολουθεί περιγράφεται η σχέση του χρόνου ανύψωσης (rise time) των σημάτων ακουστικής εκπομπής με τη φόρτιση στο δοκίμιο. Η παράμετρος rise time των ΑΕ αναφέρεται στη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί από την στιγμή που ένα σήμα ΑΕ

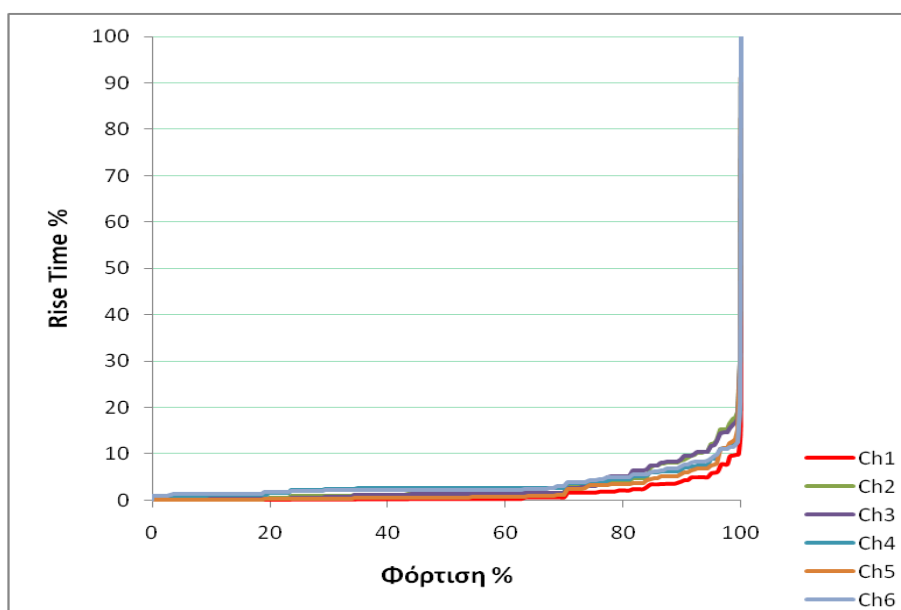
υπερβαίνει το κατώφλι τάσης για πρώτη φορά μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τάση του (πλάτος σήματος).

Οι τιμές της παραμέτρου “χρόνος ανύψωσης”(rise time) που φαίνονται στο διάγραμμα είναι αθροιστικές, είναι δηλαδή το άθροισμα των χρόνων ανύψωσης των ακουστικών σημάτων από την αρχή του πειράματος μέχρι την κάθε στιγμή μέτρησης. Η μέτρηση του “χρόνου ανύψωσης” των σημάτων γίνεται σε μs . Η παράμετρος “χρόνος ανύψωσης” (rise time) εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με τις προηγούμενες παραμέτρους κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



Διάγραμμα 6.11: Rise Time, Load-Time

Στο διάγραμμα 6.12 συσχετίζεται ο χρόνος ανύψωσης (rise time) των ακουστικών σημάτων με τη φόρτιση στο δοκίμιο, εκφρασμένα σε ποσοστά. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα μετά το 80% της φόρτισης οι αυξήσεις των ποσοστών του χρόνου ανύψωσης γίνονται αισθητές και ιδιαίτερα κοντά στην κατάσταση αστοχίας (100% φόρτισης).

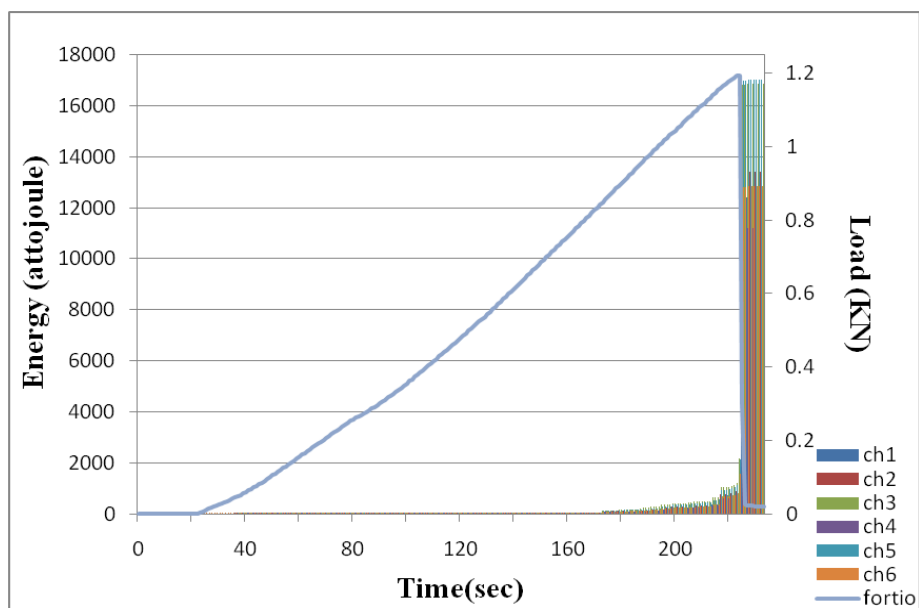


Διάγραμμα 6.12: Rise Time%- Φόρτιση%

Στο διάγραμμα 6.13 που ακολουθεί περιγράφεται πως εξελίσσεται η “ενέργεια” (energy) των γεγονότων ακουστικής εκπομπής σε σχέση με τη φόρτιση στο δοκίμιο, στη διάρκεια του πειράματος. Η παράμετρος energy των ΑΕ αναφέρεται στην ολική ελαστική ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής.

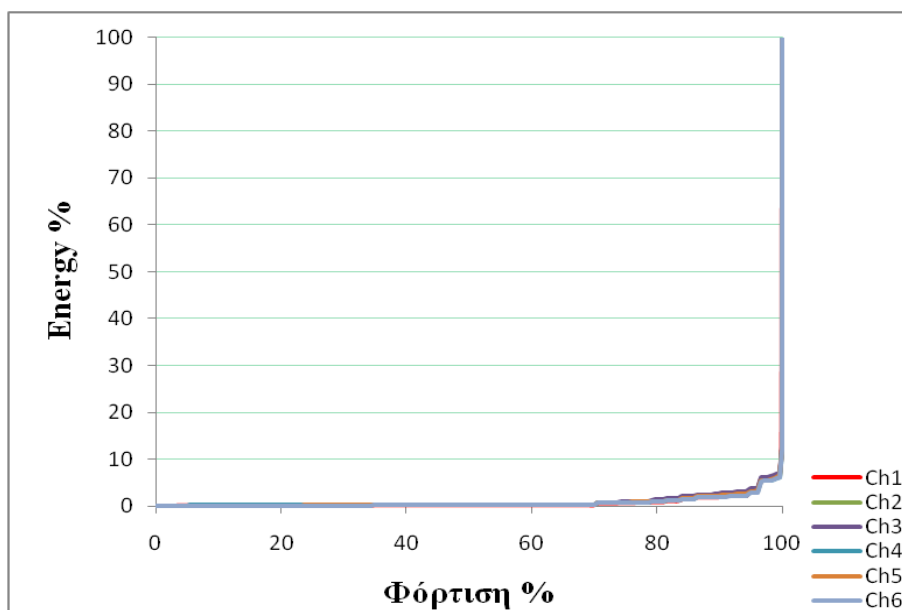
Οι τιμές της “ενέργειας” ΑΕ είναι αθροιστικές, είναι δηλαδή το άθροισμα της ενέργειας των σημάτων ΑΕ από την αρχή του πειράματος μέχρι την κάθε στιγμή μέτρησης. Η ενέργεια ΑΕ μετριέται σε attojoule.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.13 τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας απελευθερώνονται τη στιγμή της θραύσης του δοκιμίου.



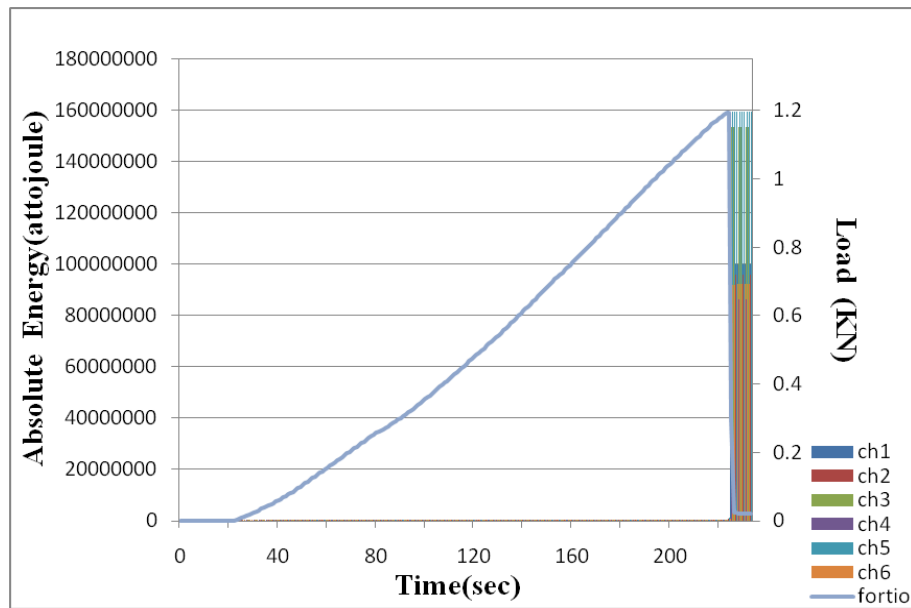
Διάγραμμα 6.13: Energy, Load-Time

Στο διάγραμμα 6.14 συσχετίζεται η ενέργεια των ακουστικών σημάτων με τη φόρτιση στο δοκίμιο, εκφρασμένες σε ποσοστά. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα τη στιγμή της θραύσης του δοκιμίου απελευθερώνεται περίπου το 90% της ενέργειας ΑΕ.

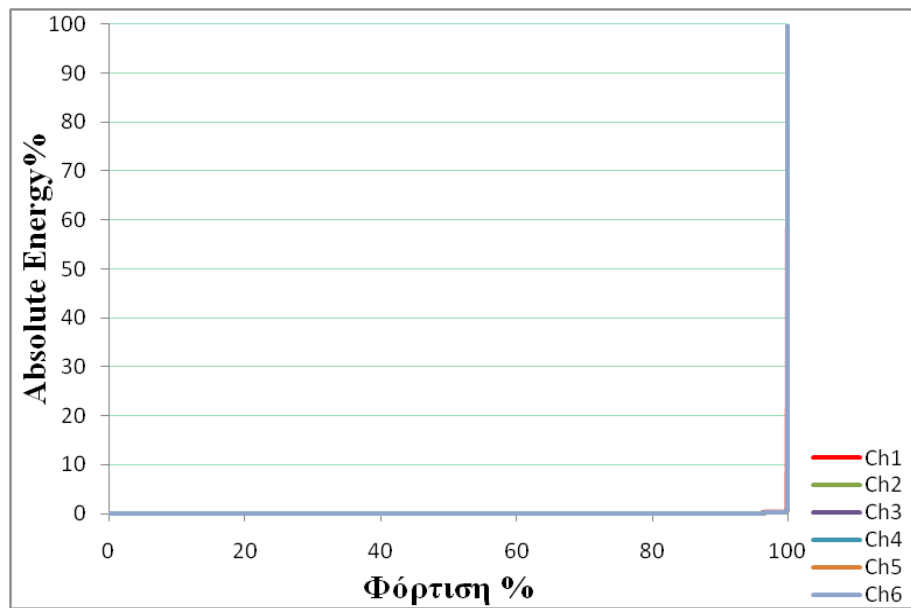


Διάγραμμα 6.14: Energy%-φόρτιση%

Ακολουθούν τα διαγράμματα 6.15 και 6.16 για την απόλυτη ενέργεια ΑΕ (absolute energy).



Διάγραμμα 6.15: Absolute Energy, Load-Time



Διάγραμμα 6.16: Absolute Energy%-Φόρτιση%

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας διαμορφώθηκαν δοκίμια από μάρμαρο Νέστου Κομνηνών και διεξήχθησαν πειράματα κάμψης τριών σημείων για τη διερεύνηση απόκρισης ακουστικών εκπομπών στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Σκοπός των πειραμάτων ήταν να εξεταστεί πως επηρεάζεται η παραγωγή ακουστικών εκπομπών στο εσωτερικό των δοκιμίων καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο, το οποίο ασκείται από το άνω στέλεχος της μηχανής στο μέσο των δοκιμίων, σε όλη τη διάρκεια της καταπόνησης τους σε κάμψη τριών σημείων.

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων 6.1-6.16 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Τα γεγονότα ακουστικών εκπομπών αυξάνονται καθώς αυξάνεται η φόρτιση των δοκιμίων. Στην αρχή της φόρτισης το πλήθος των καταγραφόμενων γεγονότων ακουστικής εκπομπής δεν είναι σημαντικό και ο ρυθμός αύξησης τους είναι αργός. Καθώς η φόρτιση του δοκιμίου πλησιάζει προς την ολοκλήρωση της (μετά το 80% της φόρτισης) τα ακουστικά σήματα αυξάνονται με πιο έντονους ρυθμούς. Τη στιγμή της αστοχίας του δοκιμίου παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση των σημάτων ΑΕ (καταγράφεται περίπου το 80% των παραγόμενων ακουστικών εκπομπών).

Παρόμοια συμπεριφορά επιδεικνύουν όλες οι χαρακτηριστικές παράμετροι των ακουστικών εκπομπών (πλάτος, χρόνος ανύψωσης, ενέργεια κ.τ.λ) οι τιμές των οποίων επηρεάζονται ανοδικά από την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου στο δοκίμιο. Τη στιγμή της αστοχίας παρατηρείται χαρακτηριστική αύξηση των τιμών των παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ακουστικών εκπομπών ήταν αναμενόμενα επειδή η δημιουργία ακουστικών εκπομπών στα πετρώματα προκαλείται από την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος ή με την έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, φαινόμενα που οφείλονται στην φόρτιση του πετρώματος.

Η διάταξη των αισθητήρων στα δοκίμια επηρεάζει την ανίχνευση-καταγραφή των ακουστικών σημάτων. Τα ακουστικά σήματα που δημιουργούνται παρόλο που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις υπάρχει περίπτωση να μην ανιχνεύονται από όλους τους αισθητήρες. Αυτό οφείλεται στην απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και της πηγής του ακουστικού σήματος. Όσο αυξάνεται η απόσταση αισθητήρα-πηγής, μειώνεται η ανιχνευσιμότητα των ακουστικών σημάτων λόγω εξασθένησης τους. Για το λόγο αυτό οι

τιμές των δεδομένων των ακουστικών εκπομπών που προήλθαν από κάθε ένα από τους έξι αισθητήρες εμφανίζουν μικρές διαφορές.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Για τη βελτίωση της παρούσας εργασίας αλλά και την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου των ακουστικών εκπομπών προτείνεται να γίνουν τα ακόλουθα:

- Πραγματοποίηση πειραματικών δοκιμών διατηρώντας τον ίδιο προσανατολισμό (επιφάνεια φόρτισης) και μεταβάλλοντας το ύψος των δοκιμών-σύγκριση αποτελεσμάτων.
- Πραγματοποίηση πειραματικών δοκιμών διατηρώντας τον ίδιο προσανατολισμό (επιφάνεια φόρτισης) και μεταβάλλοντας το μήκος των δοκιμών σύγκριση αποτελεσμάτων.
- Πραγματοποίηση πειραματικών δοκιμών διατηρώντας τις διαστάσεις ίδιες και μεταβάλλοντας τον προσανατολισμό του δοκιμίου από το πρόσωπο στο μωρέλο-σύγκριση αποτελεσμάτων.
- Χρησιμοποίηση περισσότερων αισθητήρων ώστε να επιτευχθεί μια πιο ολοκληρωμένη παρατήρηση των ακουστικών εκπομπών. Τοποθέτηση αισθητήρων και στις έξι έδρες των δοκιμών.
- Προσδιορισμός της θέσης της πηγής των ακουστικών εκπομπών (location).
- Περαιτέρω διερεύνηση των χρόνων μεταξύ των Ακουστικών γεγονότων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Εξαδάκτυλος, Γ, (2006). Σχεδιασμός Γεωτεχνικών και Λατομικών Έργων, Σημειώσεις Διδασκαλίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
2. Ιστάντζο, Π. Χ., (2008). Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς σε Κάμψη Μαρμάρου Διονύσου, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. Κακλής Κ., Σ Μαυριγιαννάκης, Ζ. Αγιουτάντης και Γ. Μπαζδάνης (2010). Διερεύνηση Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαρμάρου Κομνηνών Νέστου, Τιμητικός Τόμος στη Μνήμη του Καθ. Κωνσταντίνου Καβουρίδη, Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
4. Κυπριωτάκη Α. (2012). Εργαστηριακές Εφαρμογές Ακουστικής Εκπομπής σε Δοκίμια Άοπλου και Ινοπλισμένου Σκυροδέματος, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
5. Κατσοκογιάννη Π., Π.Π. Νομικός και Α.Ι. Σοφιανός (2007). Ακουστική Εκπομπή στην Μηχανική Πετρωμάτων, Ορυκτός Πλούτος, Τεύχος 145/2007.
6. Μητριτσάκης Ν. (2008). Διερεύνηση Διηλεκτρικής Συμπεριφοράς Μαρμάρου Διονύσου σε Συνθήκες Κυκλικής Αξονικής Φόρτισης και Κάμψης Τριών Σημείων, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
7. Μπακογιάννης Σ. (2011). Ακουστική Εκπομπή κατά την Καταπόνηση Βωξίτη, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
8. Πρασιανάκης Ι.Ν. (1985). Μηχανική ΙΙ: Κινηματική και Δυναμική του Υλικού Σημείου και του Απόλυτα Στερεού Σώματος, Αθήνα 1985.
9. Πρασιανάκης Ι.Ν. (1986). Μηχανική ΙΙΙ: Μηχανική Παραμορφώσιμων Σωμάτων Αντοχή των Υλικών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1986.
10. Σοφιανός Α.Ι. και Νομικός Π.Π. (2008). Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ΔΠΜΕ/ΣΚΥΕ, Οκτώβριος 2008.

Διεθνής Βιβλιογραφία

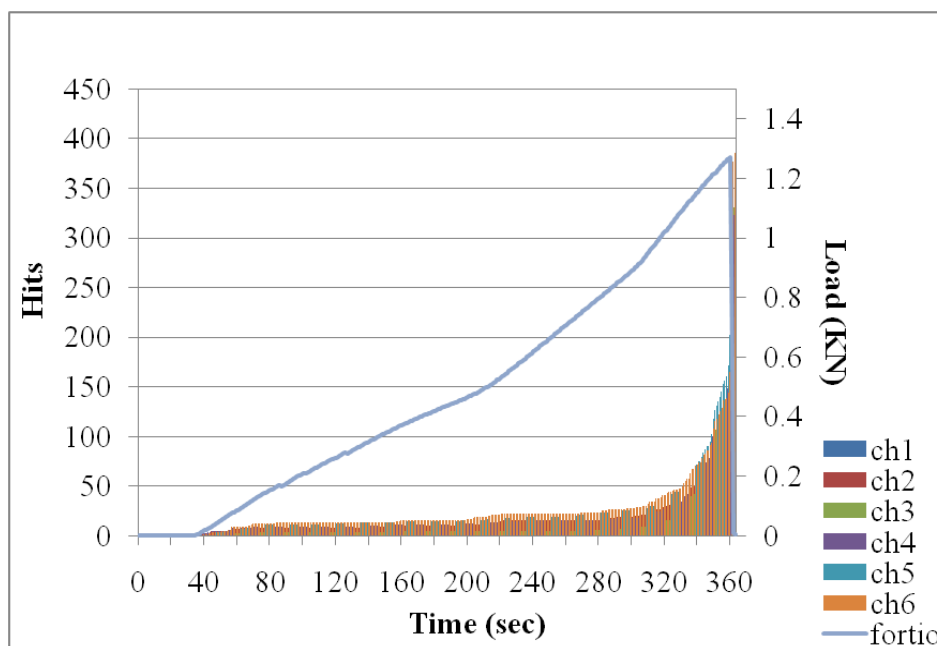
1. ASTM C293, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete” (Using Simple Beam With Center-Point Loading).
2. Gere, J.M. and Timoshenko, S.P., (1997). “Mechanics of Materials”, 4th Edition, PWS Publishing Company, Boston, USA.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

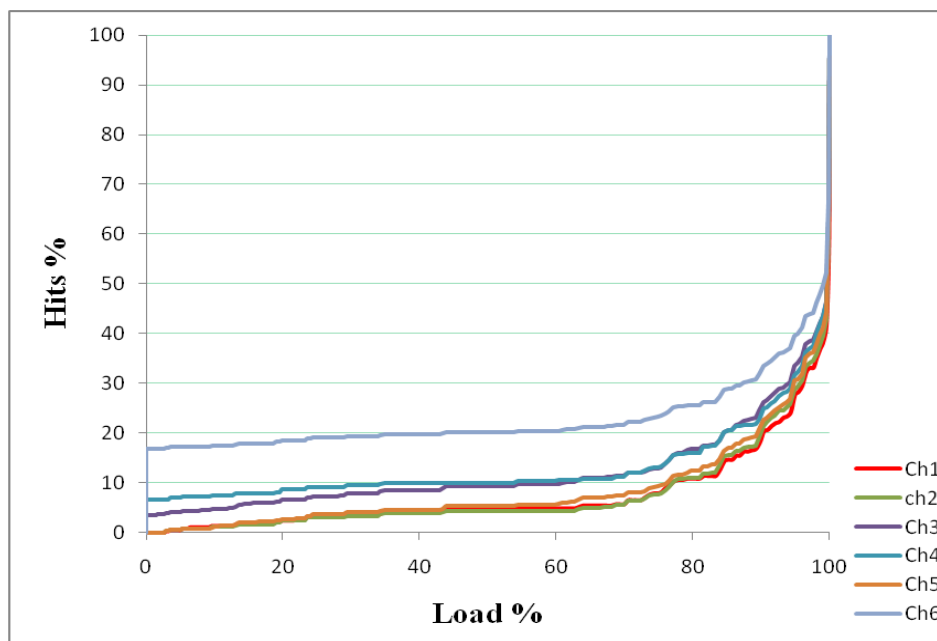
Δοκίμιο 4

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά δοκιμίου 4

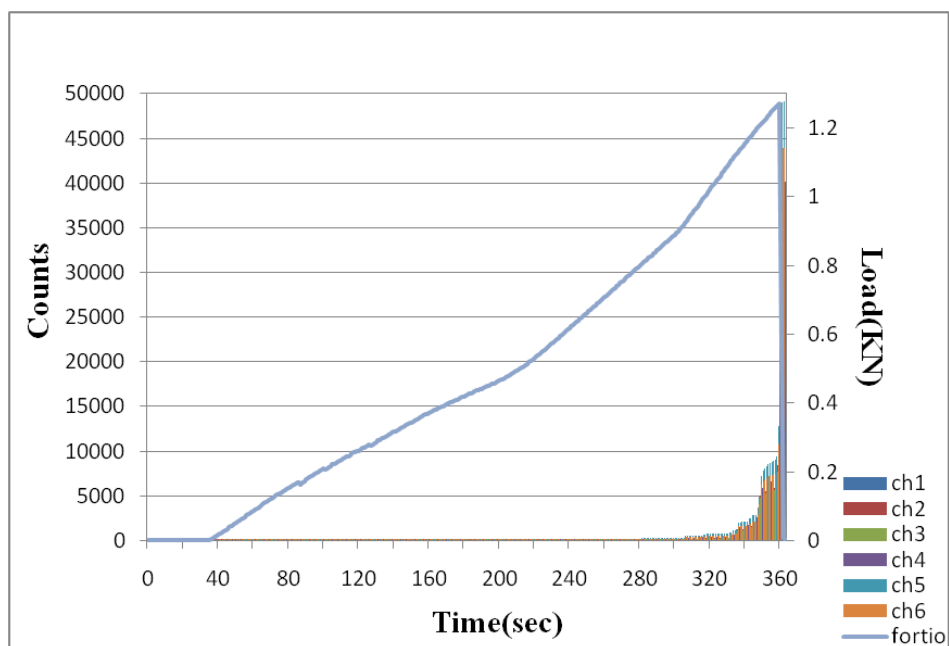
Χαρακτηριστικά δοκιμίου	
b	25,62 mm
h	24,03 mm
L	200 mm
ls	170 mm



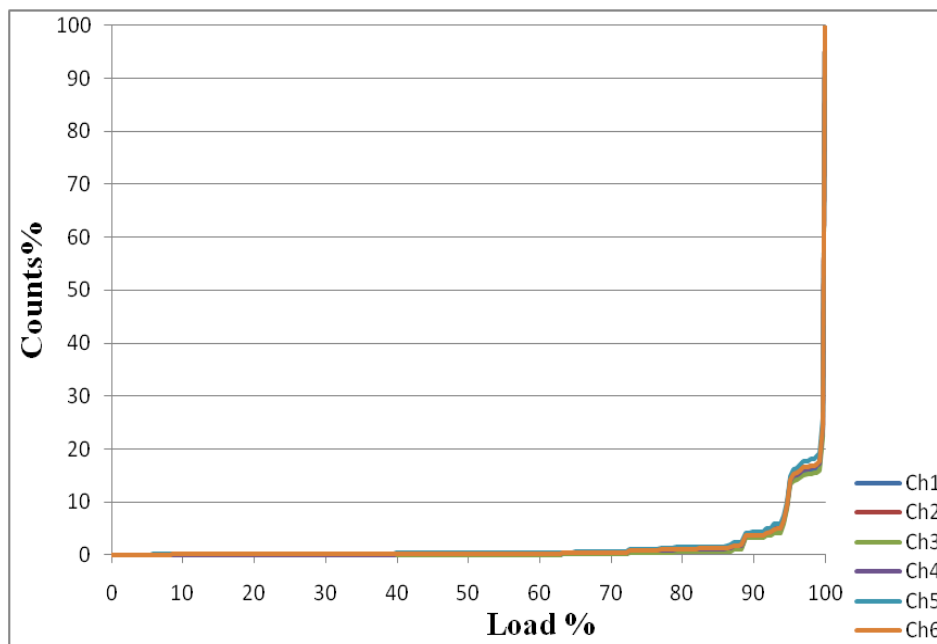
Διάγραμμα 1: Hits, Load-Time



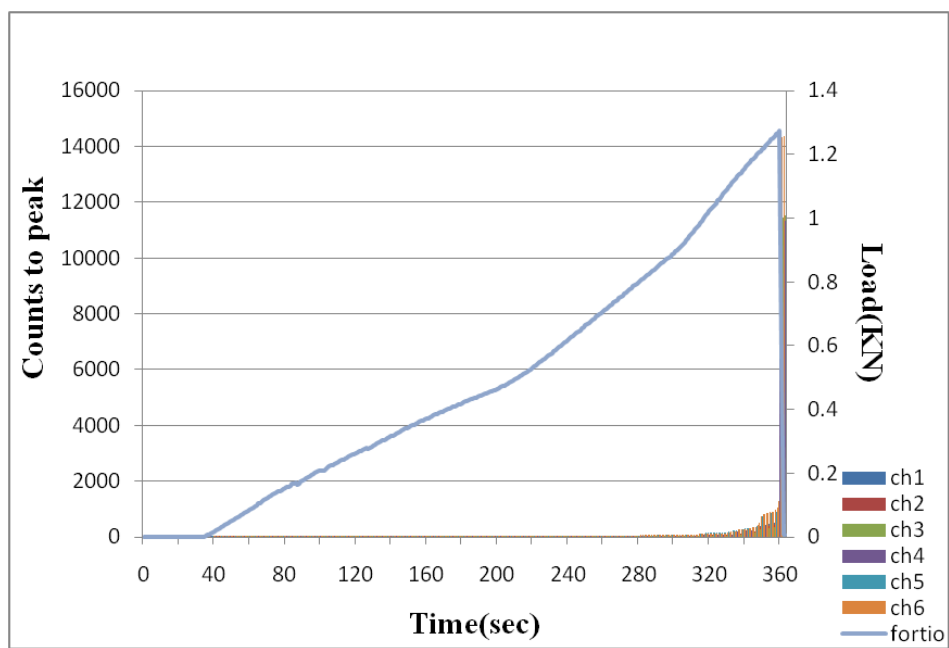
Διάγραμμα 2: Hits%-Load%



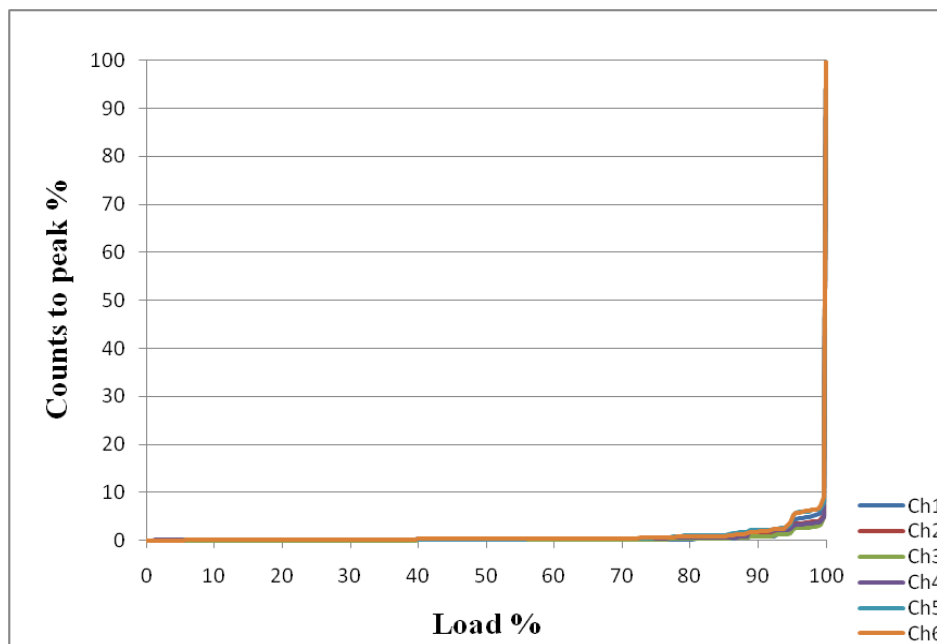
Διάγραμμα 3: Counts, Load-Time



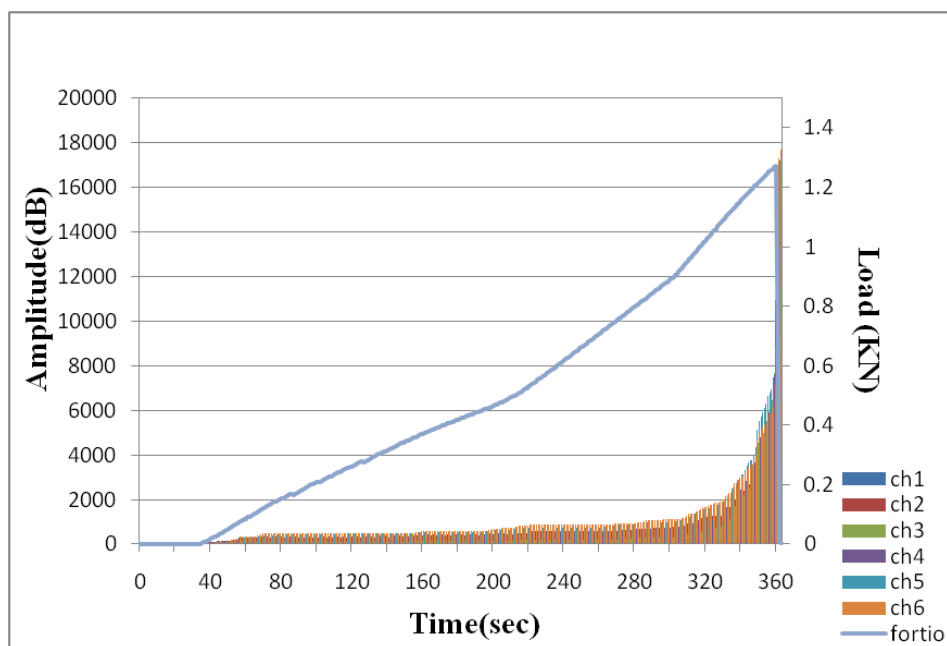
Διάγραμμα 4: Counts%-Load%



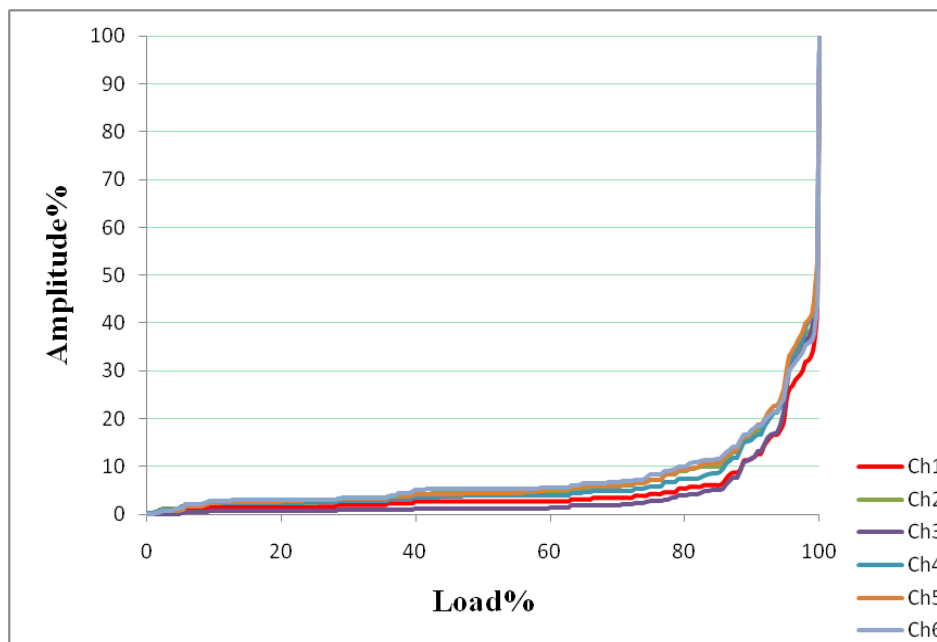
Διάγραμμα 5: Counts to peak, Load-Time



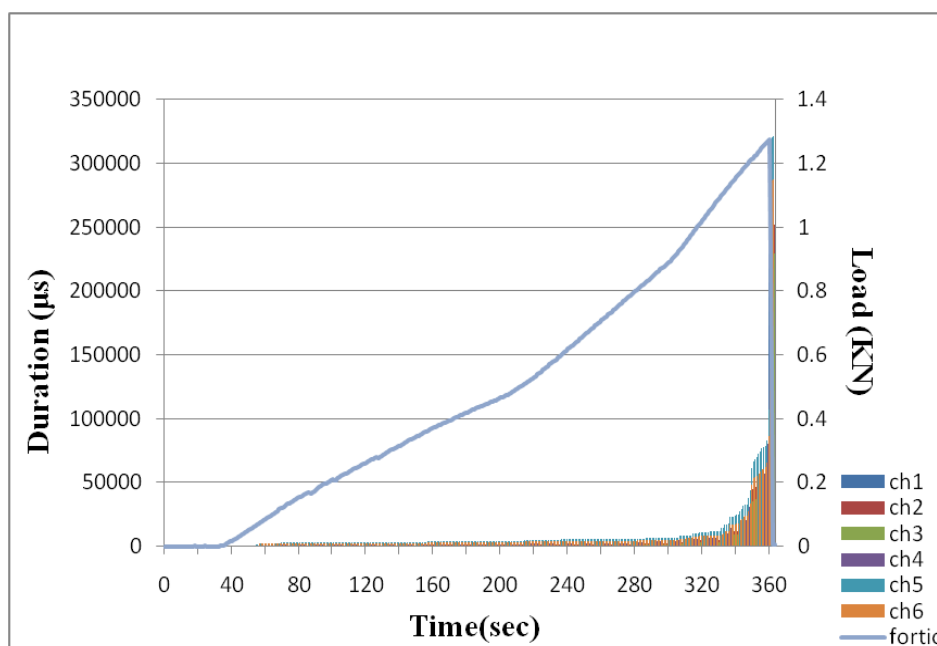
Διάγραμμα 6: Counts to peak%- Load%



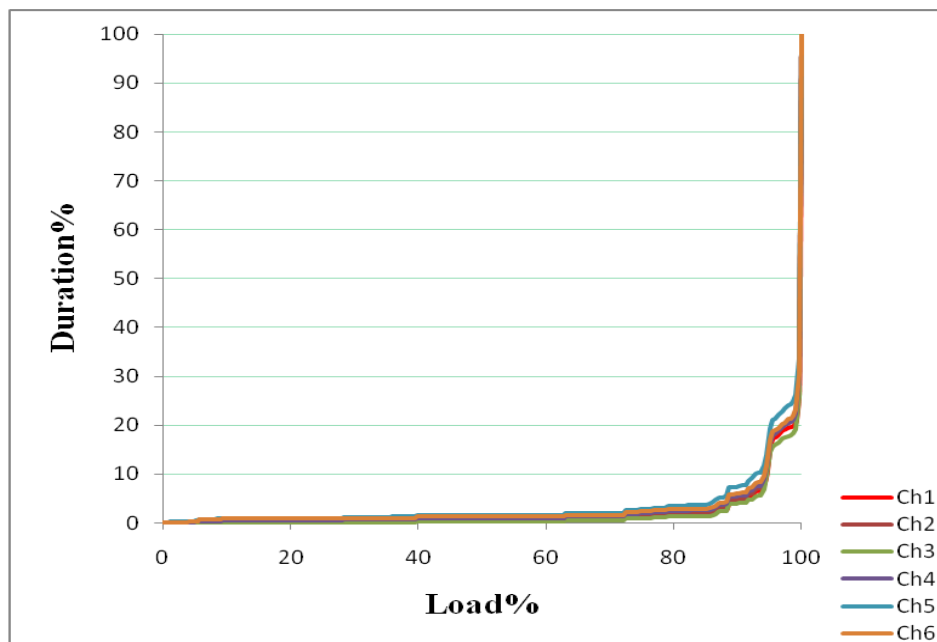
Διάγραμμα 7: Amplitude, Load-Time



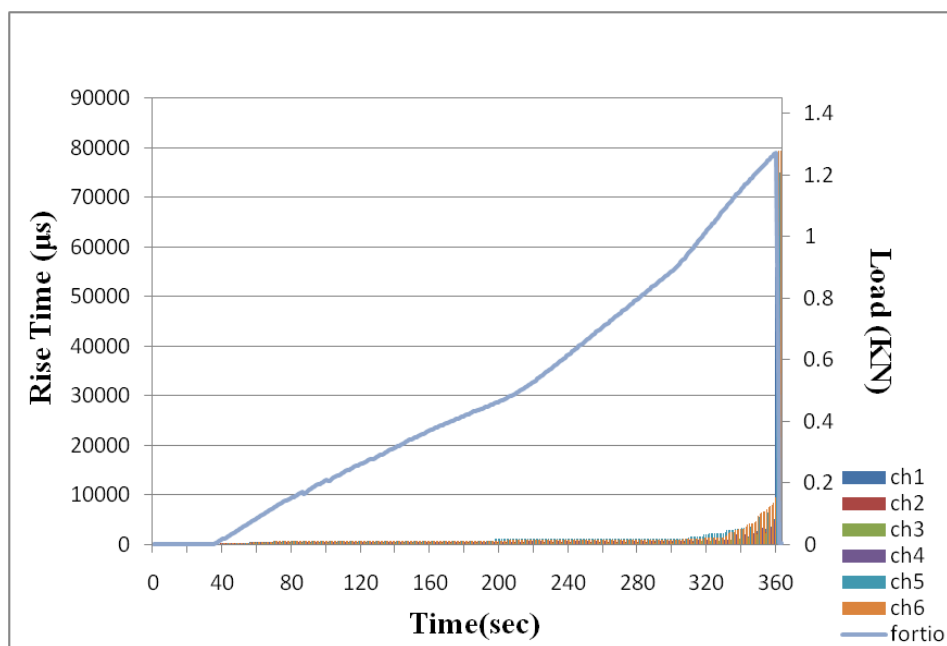
Διάγραμμα 8: Amplitude%-Load%



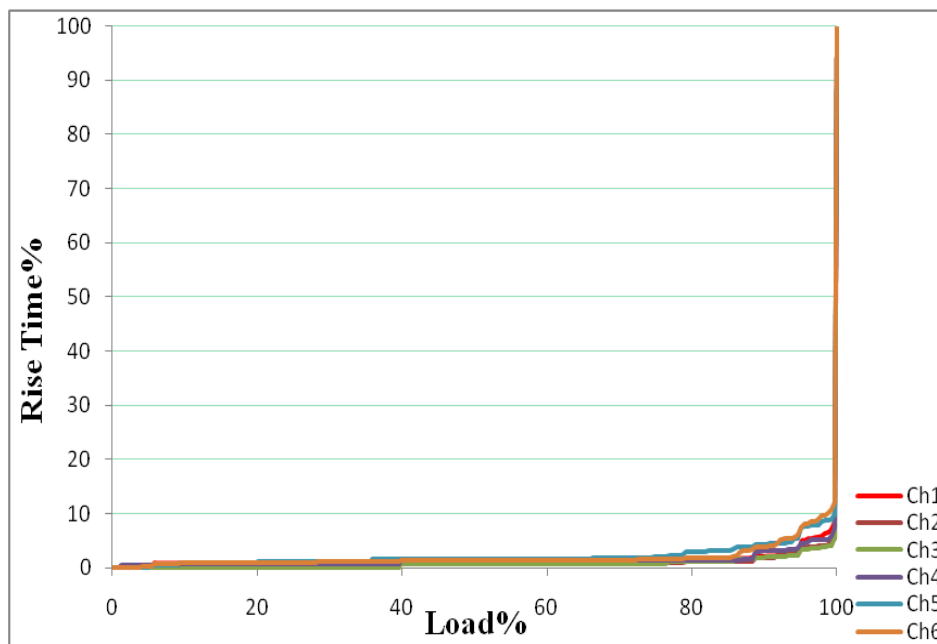
Διάγραμμα 9: Duration, Load-Time



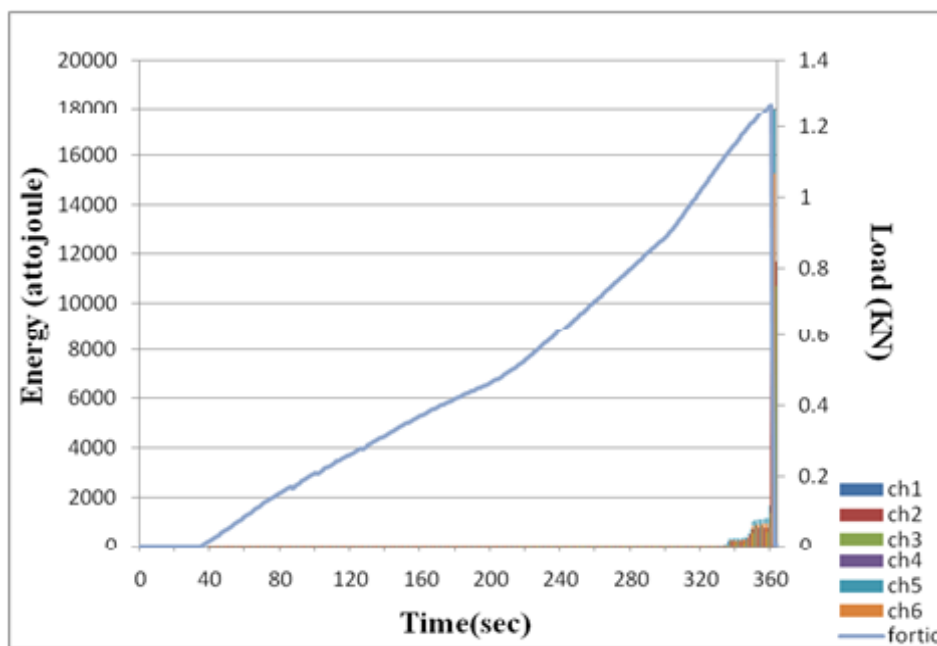
Διάγραμμα 10: Duration%-Load%



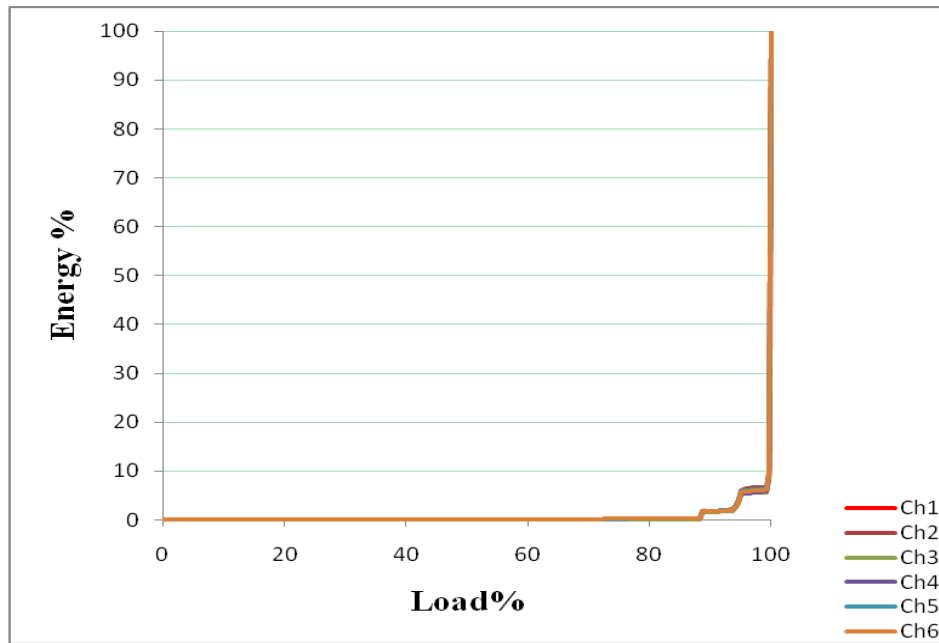
Διάγραμμα 11: Rise Time, Load-Time



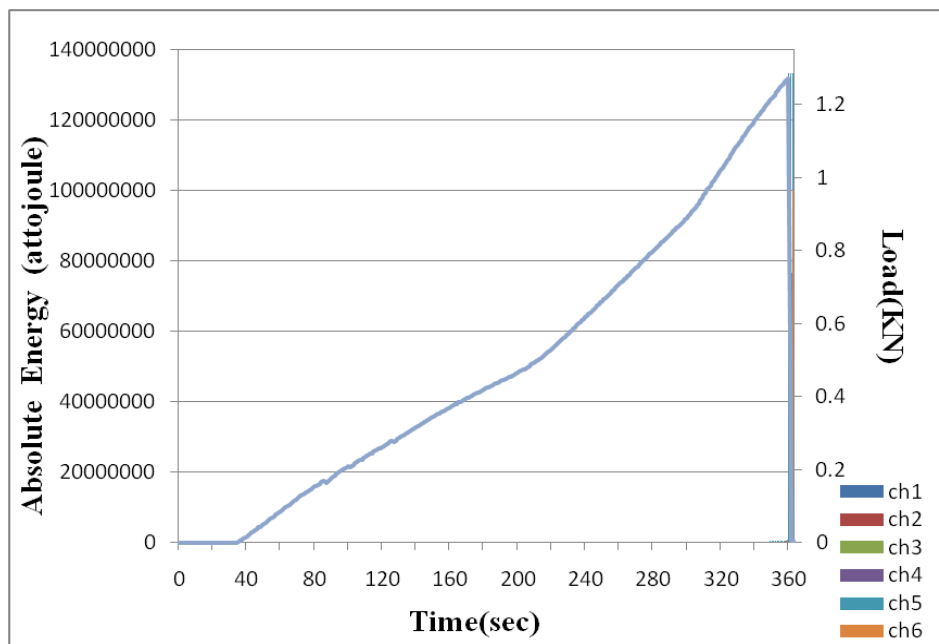
Διάγραμμα 12: Rise Time%-Load%



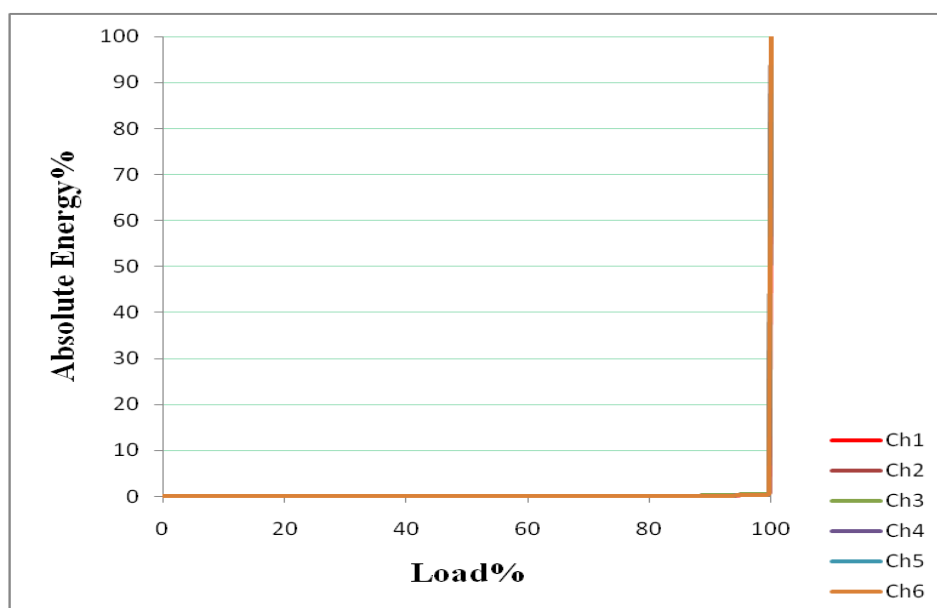
Διάγραμμα 13: Energy, Load-Time



Διάγραμμα 14: Energy%-Load%



Διάγραμμα 15: Absolute Energy, Load-Time

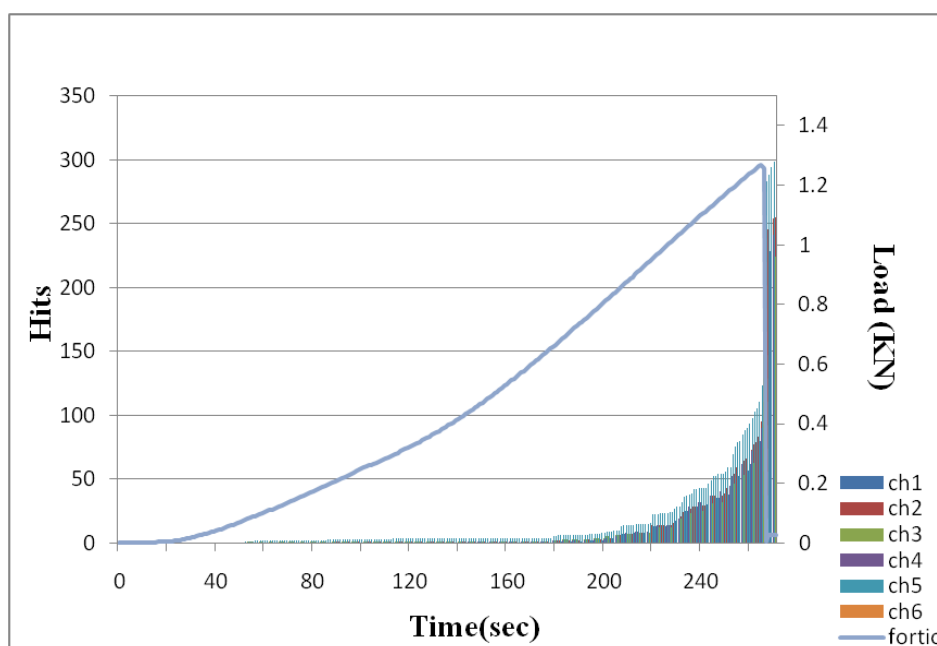


Διάγραμμα 16: Absolute Energy%-Load%

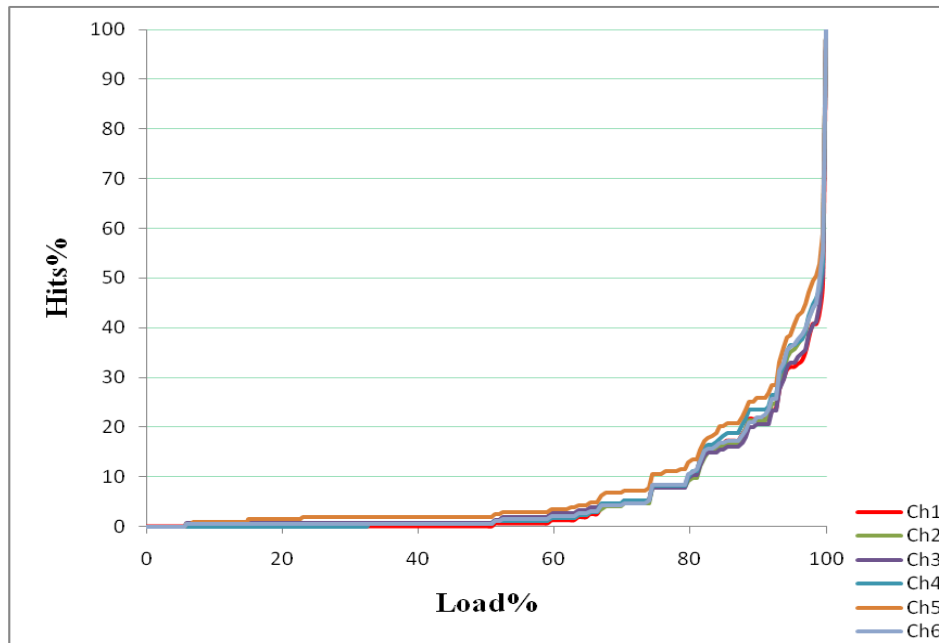
Δοκίμιο 6

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά δοκιμίου 6

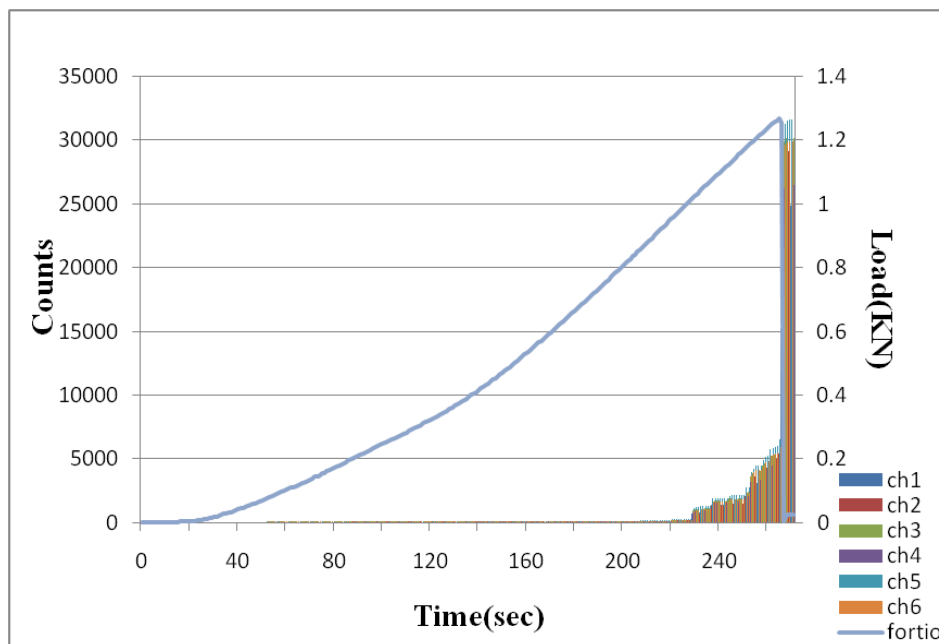
Χαρακτηριστικά δοκιμίου	
b	26,43 mm
h	23,08 mm
L	200 mm
ls	170 mm



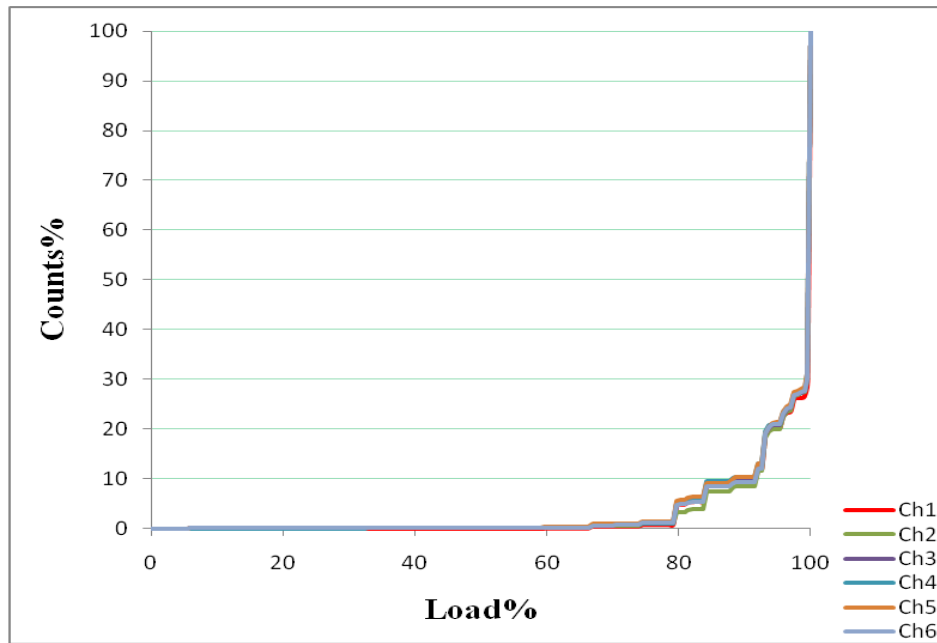
Διάγραμμα 17: Hits, Load-Time



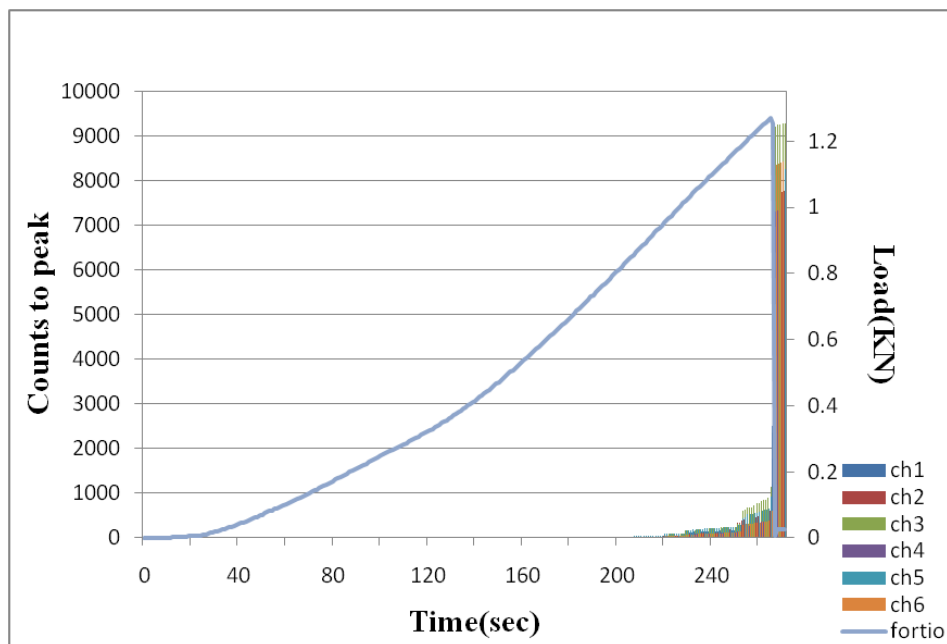
Διάγραμμα 18: Hits%-Load%



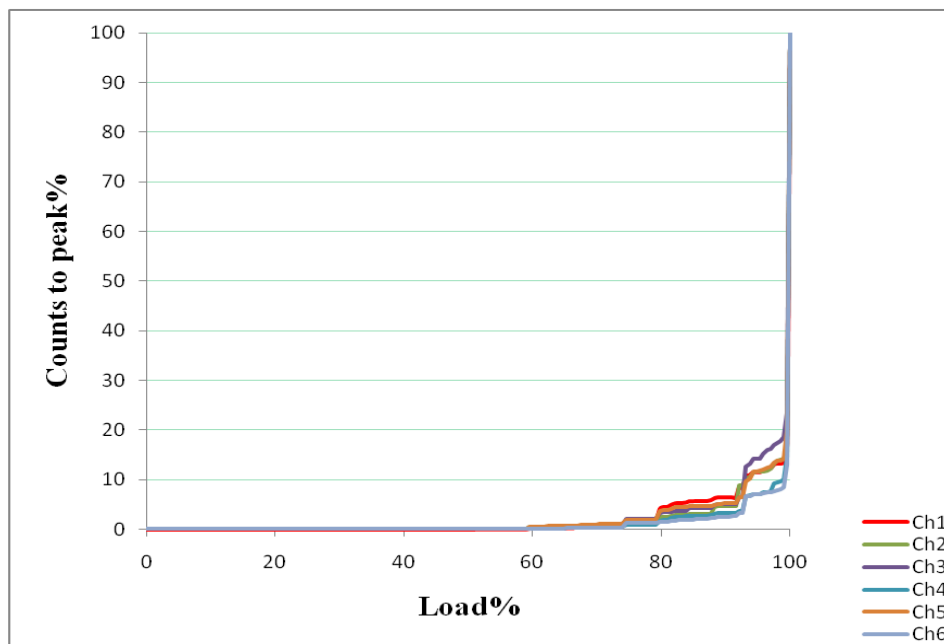
Διάγραμμα 19: Counts, Load-Time



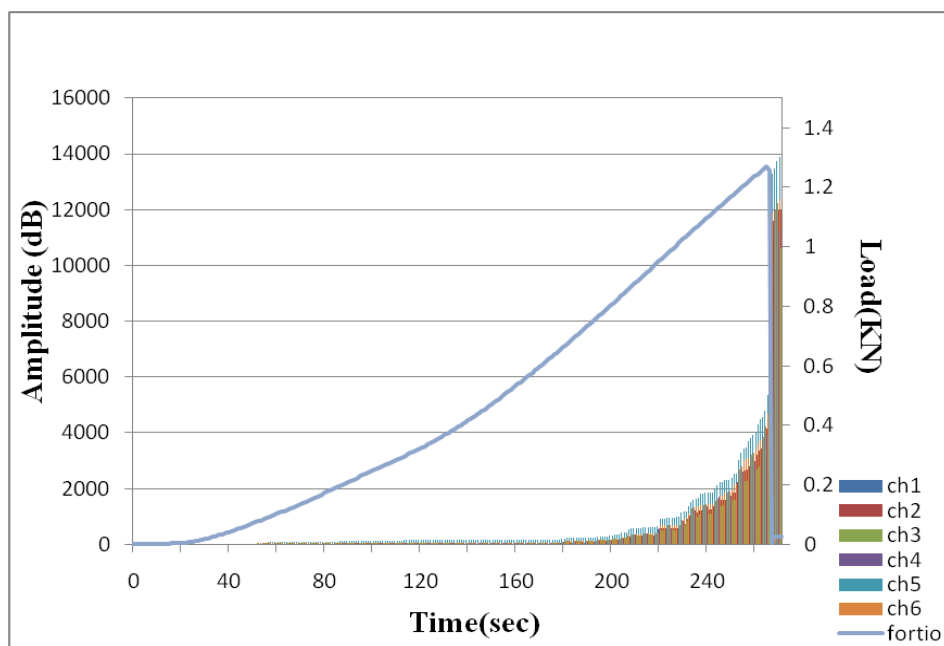
Διάγραμμα 20: Counts%-Load%



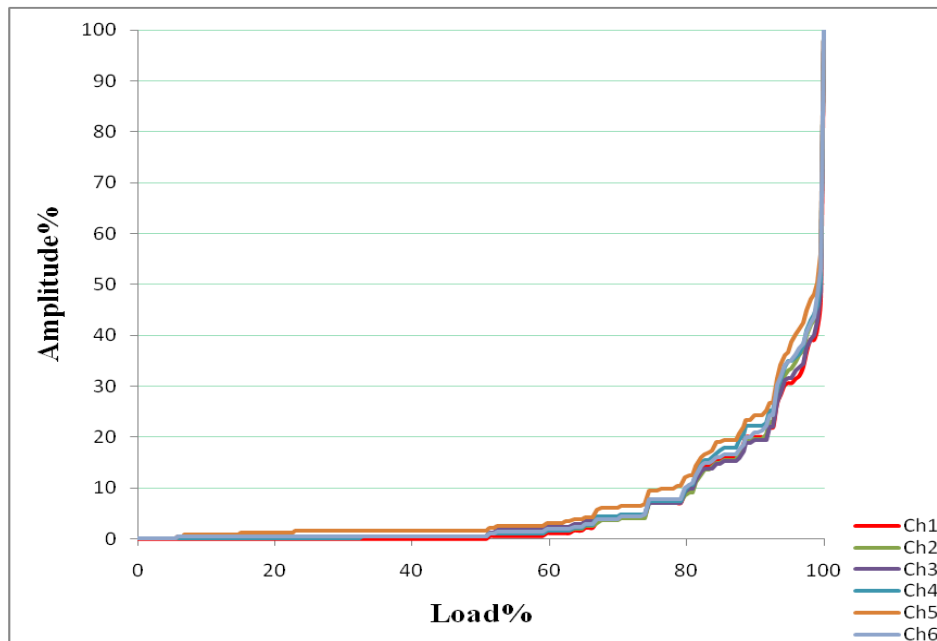
Διάγραμμα 21: Counts to peak, Load-Time



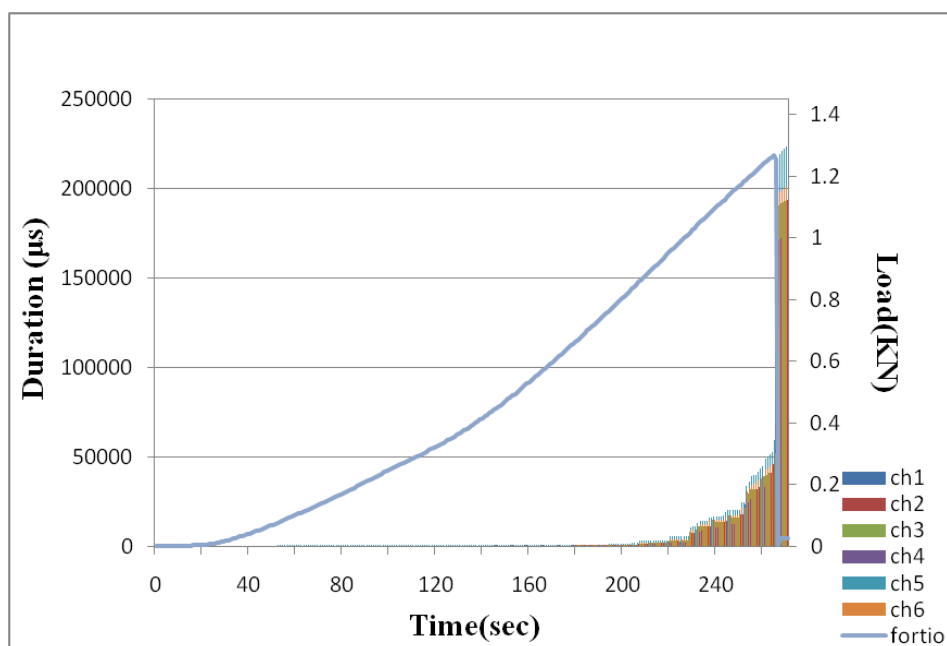
Διάγραμμα 22: Counts to peak%-Load%



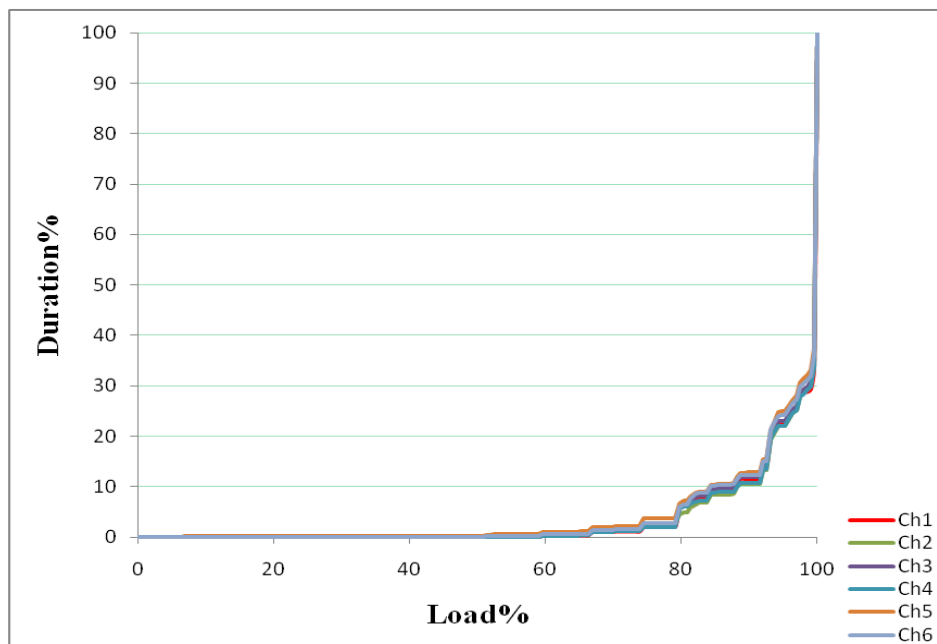
Διάγραμμα 23: Amplitude, Load-Time



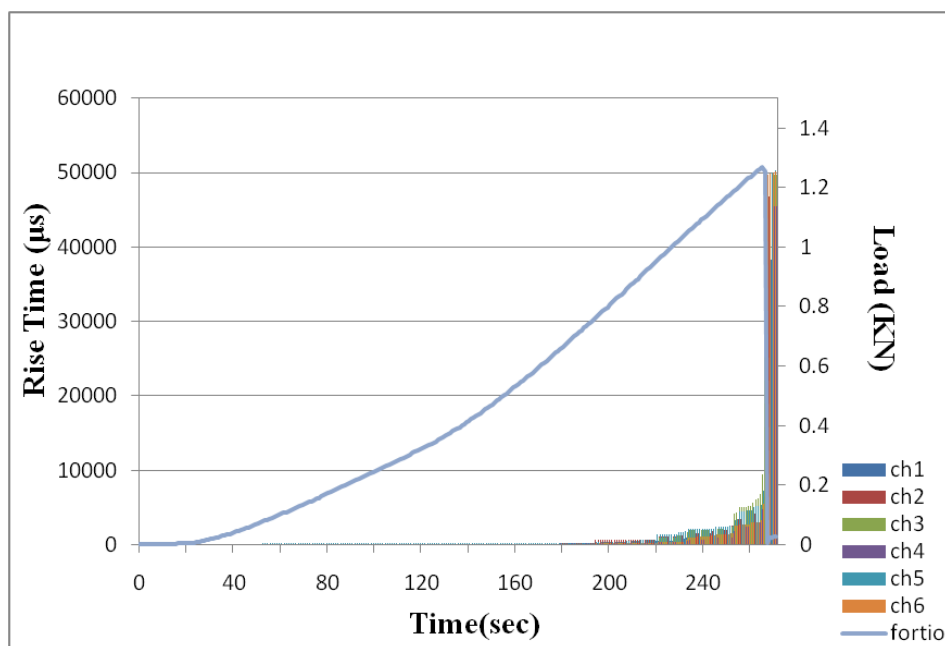
Διάγραμμα 24: Amplitude%-Load%



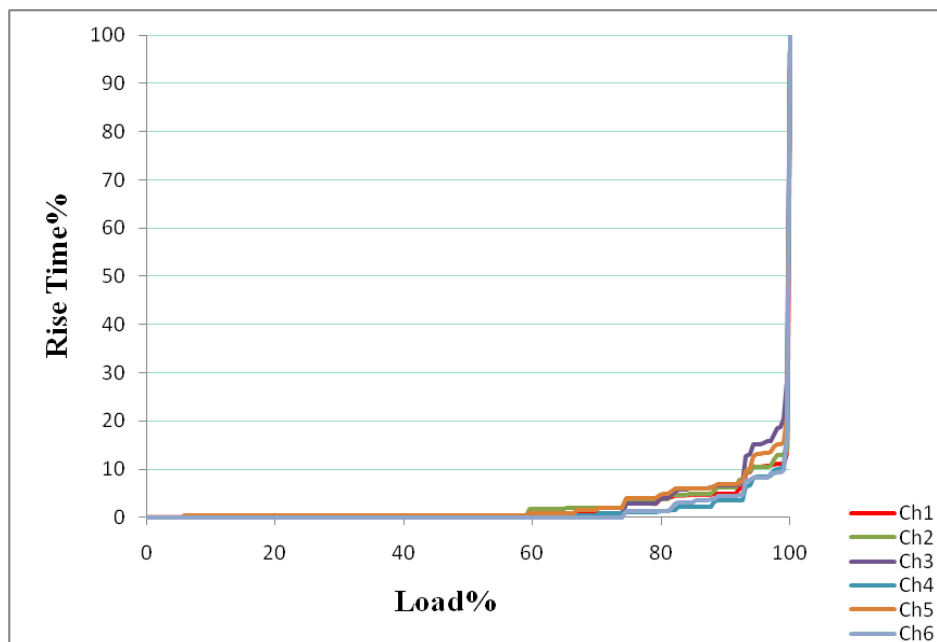
Διάγραμμα 25: Duration, Load-Time



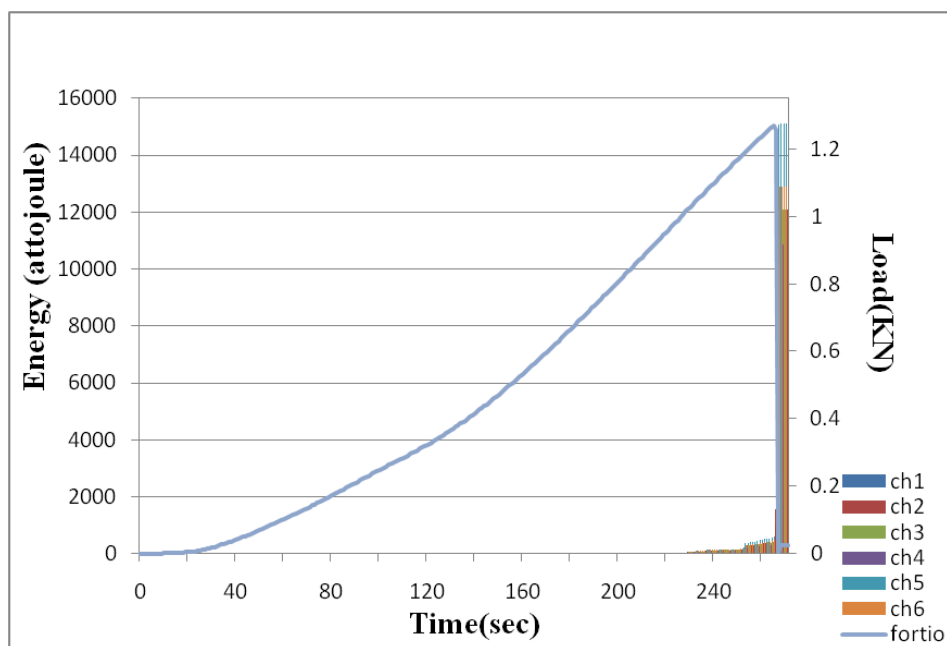
Διάγραμμα 26: Duration%-Load%



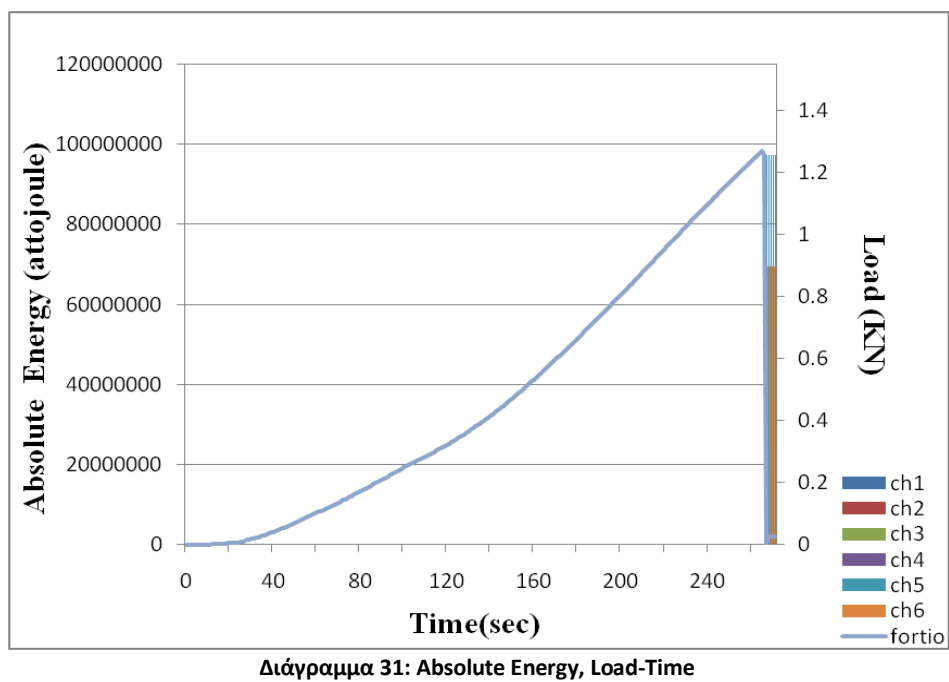
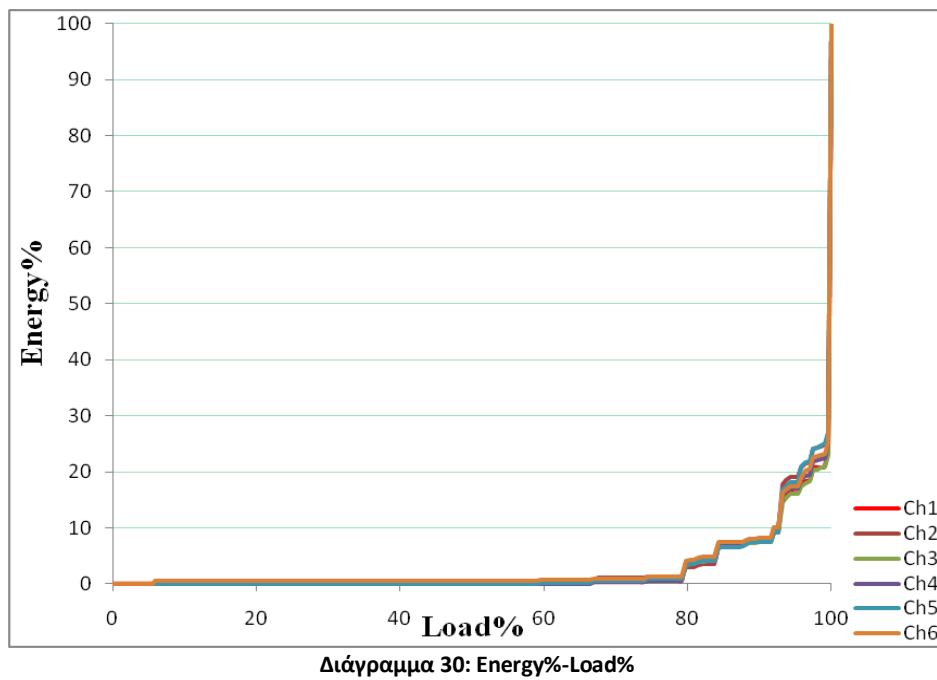
Διάγραμμα 27: Rise Time, Load-Time

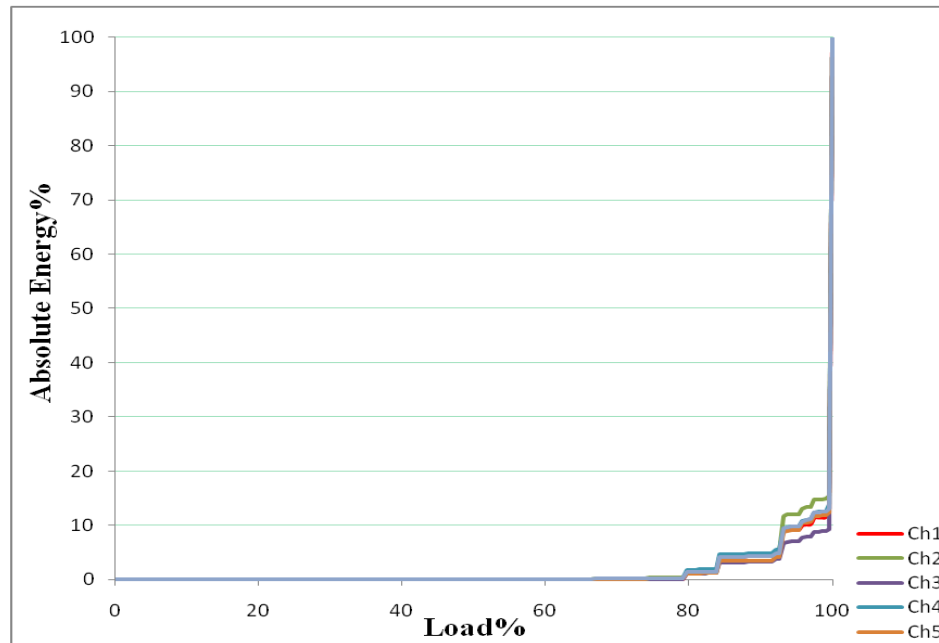


Διάγραμμα 28: Rise Time%-Load%



Διάγραμμα 29: Energy, Load-Time



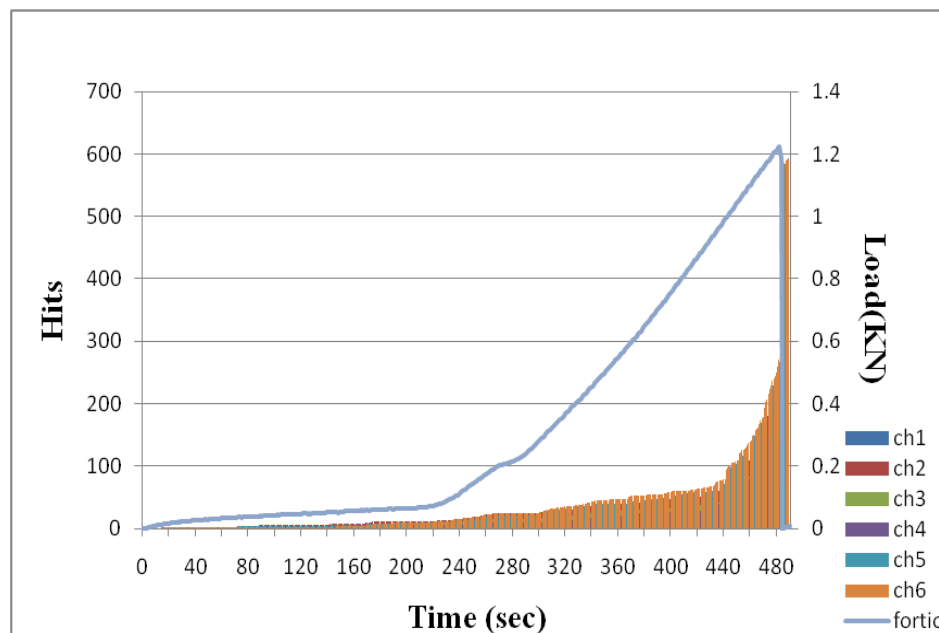


Διάγραμμα 32: Absolute Energy%-Load%

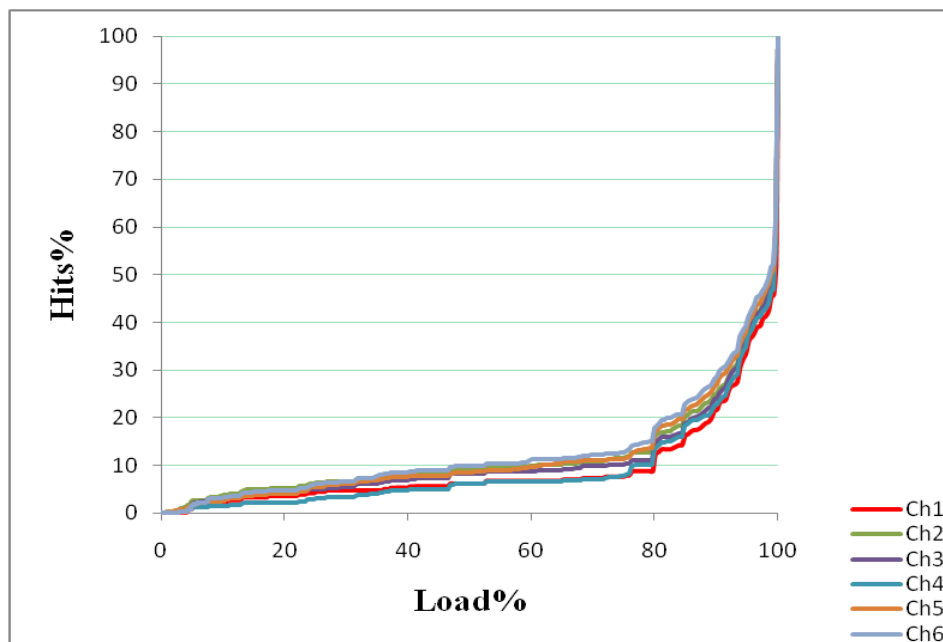
Δοκίμιο 7

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά δοκιμίου 7

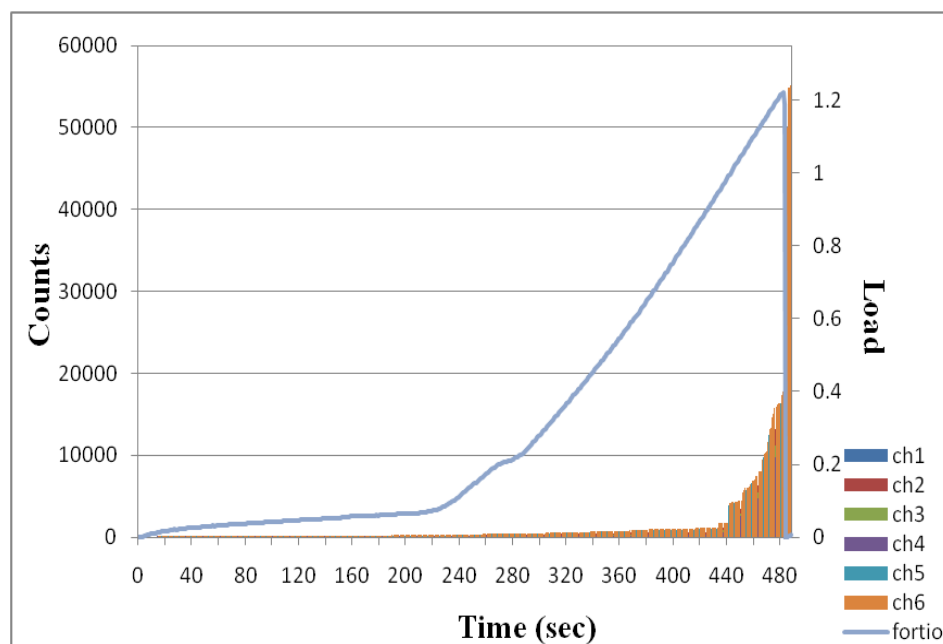
Χαρακτηριστικά δοκιμίου	
b	25,73 mm
h	23,35 mm
L	200 mm
ls	170 mm



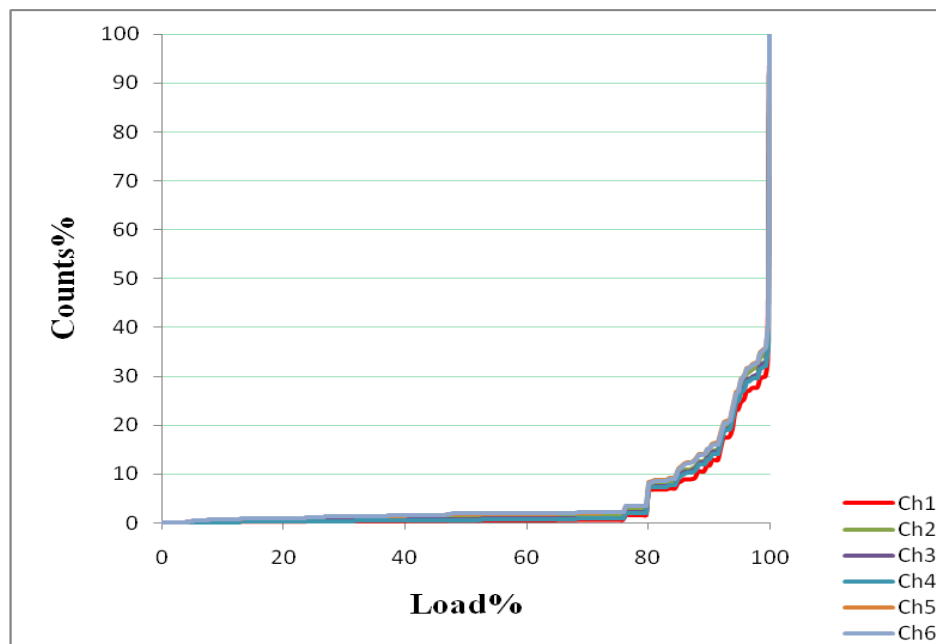
Διάγραμμα 33: Hits, Load-Time



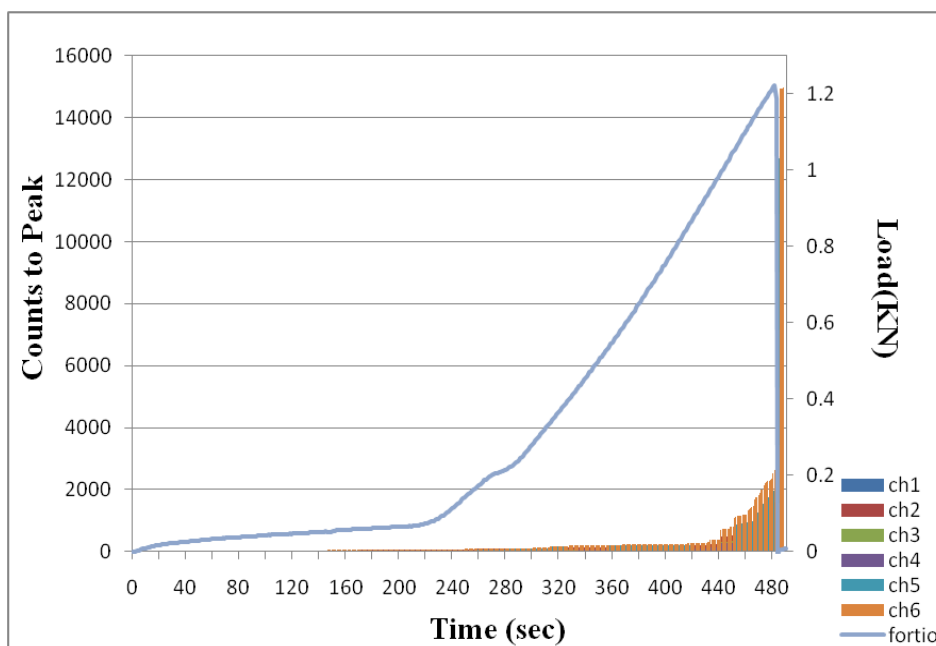
Διάγραμμα 34: Hits%-Load%



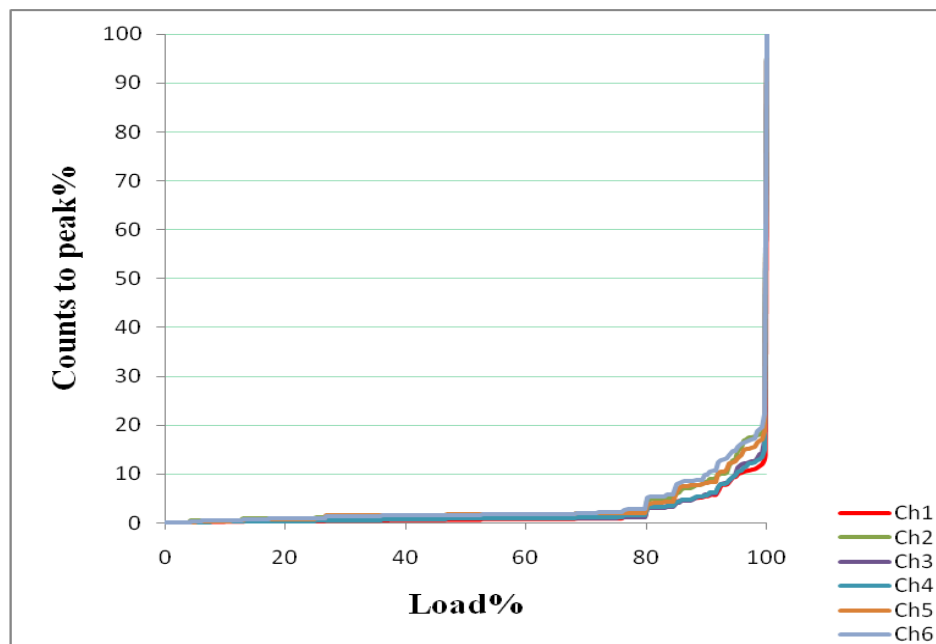
Διάγραμμα 35: Counts, Load-Time



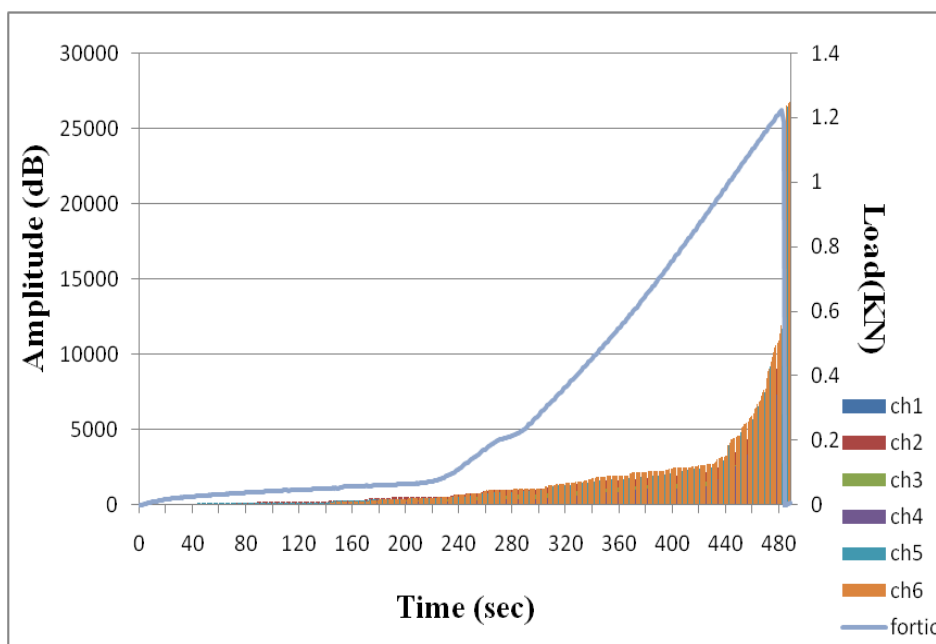
Διάγραμμα 36: Counts%-Load%



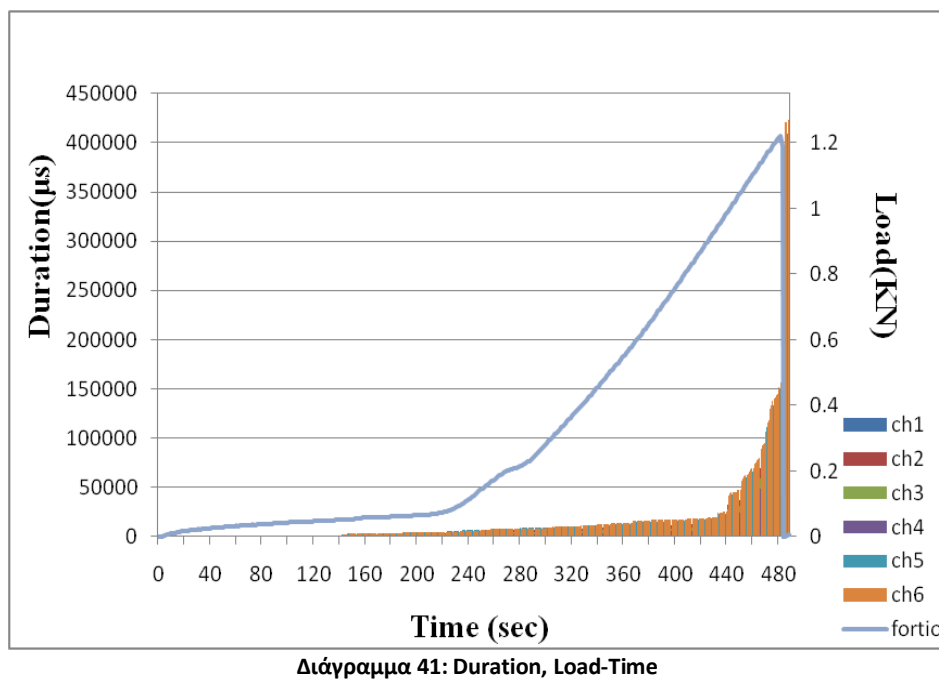
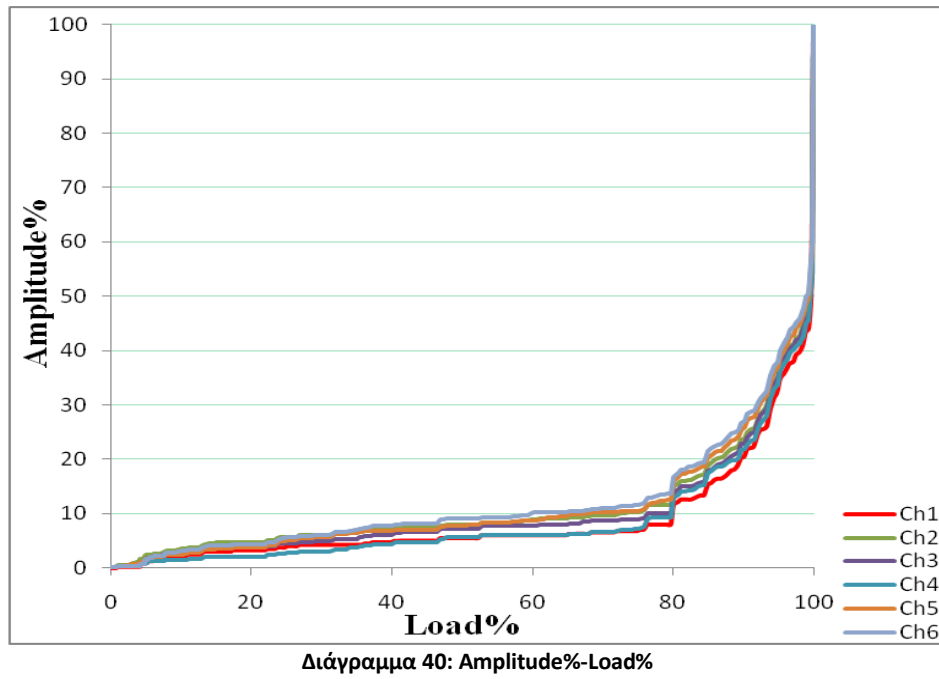
Διάγραμμα 37: Counts to peak, Load-Time

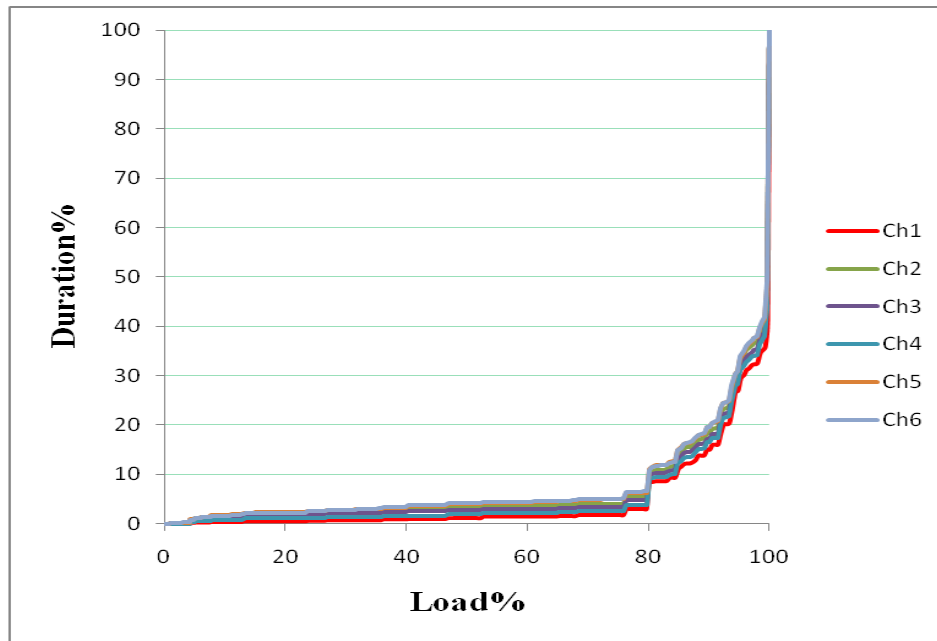


Διάγραμμα 38: Counts to peak%-Load%

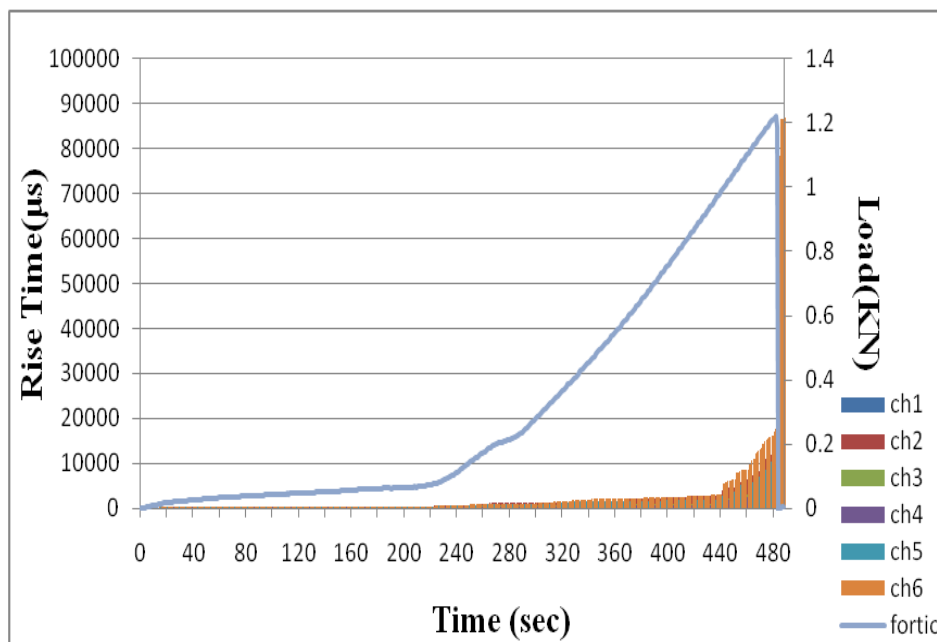


Διάγραμμα 39: Amplitude, Load-Time

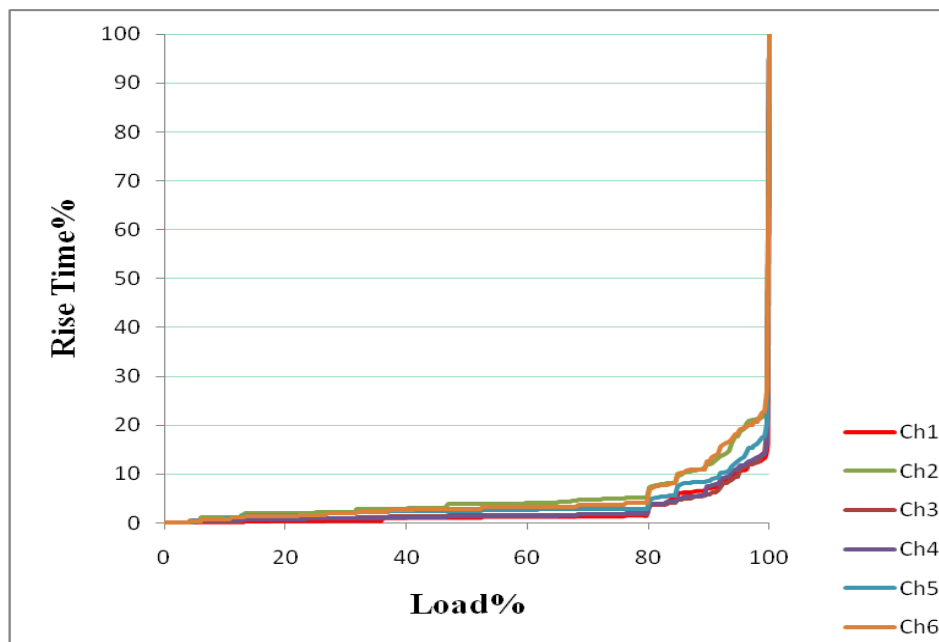




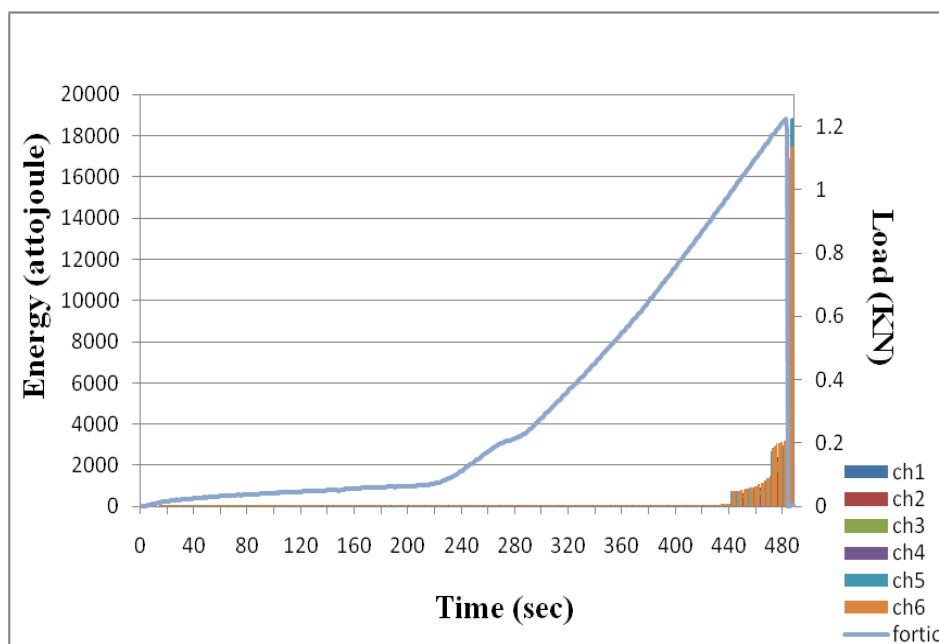
Διάγραμμα 42: Duration%-Load%



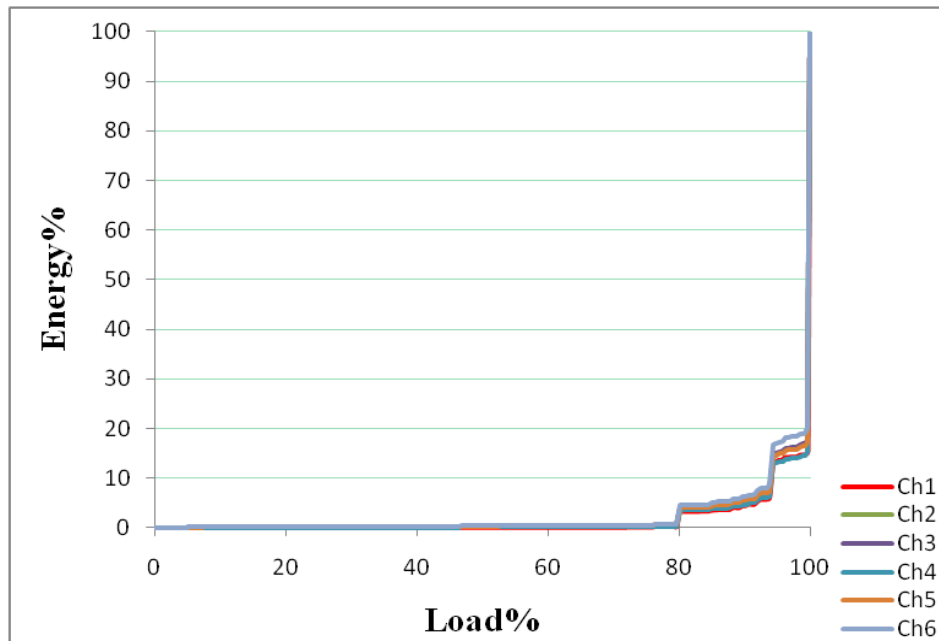
Διάγραμμα 43: Rise Time, Load-Time



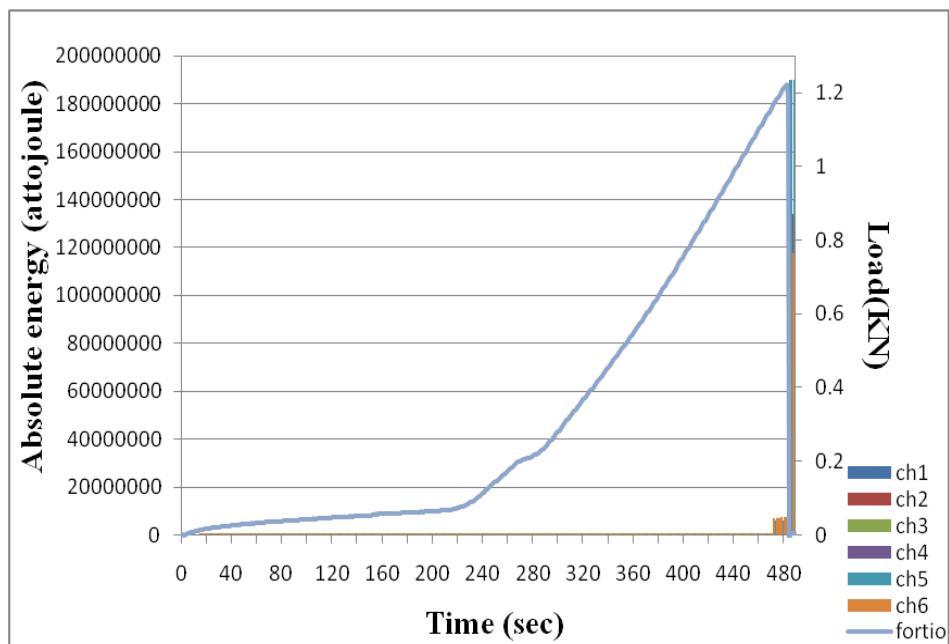
Διάγραμμα 44: Rise Time%-Load%



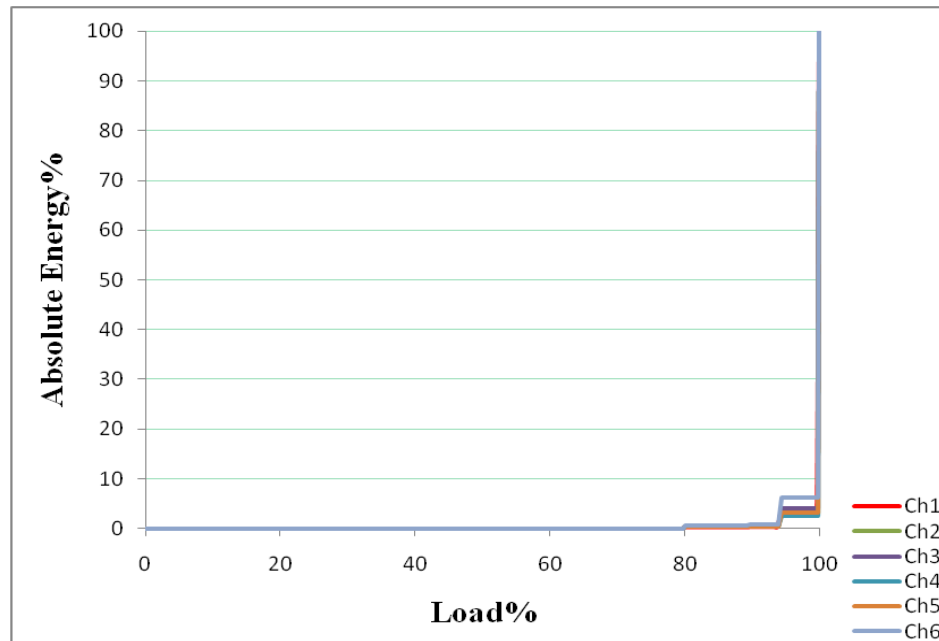
Διάγραμμα 45: Energy, Load-Time



Διάγραμμα 46: Energy%-Load%



Διάγραμμα 47: Absolute Energy, Load-Time

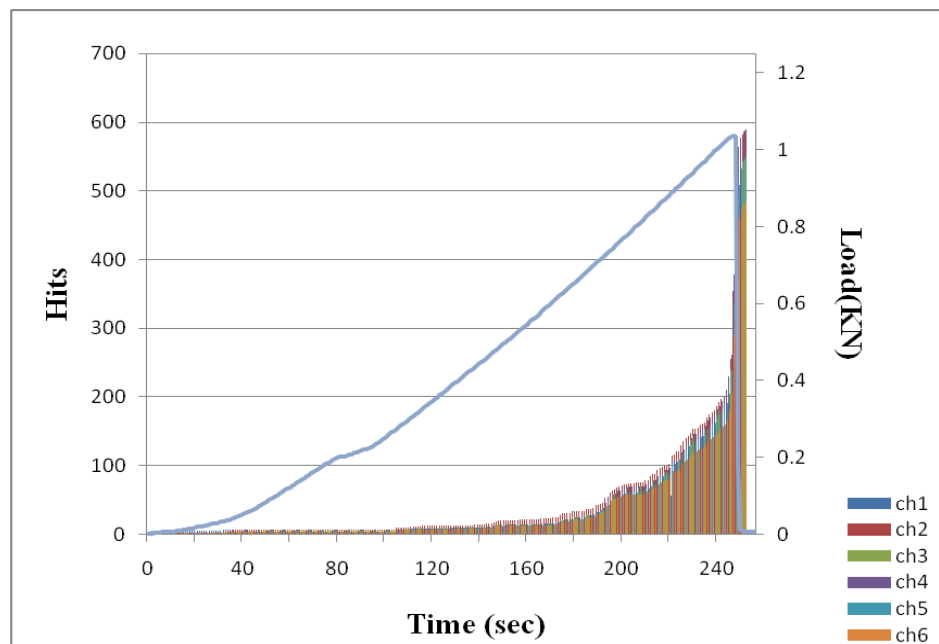


Διάγραμμα 48: Absolute Energy%-Load%

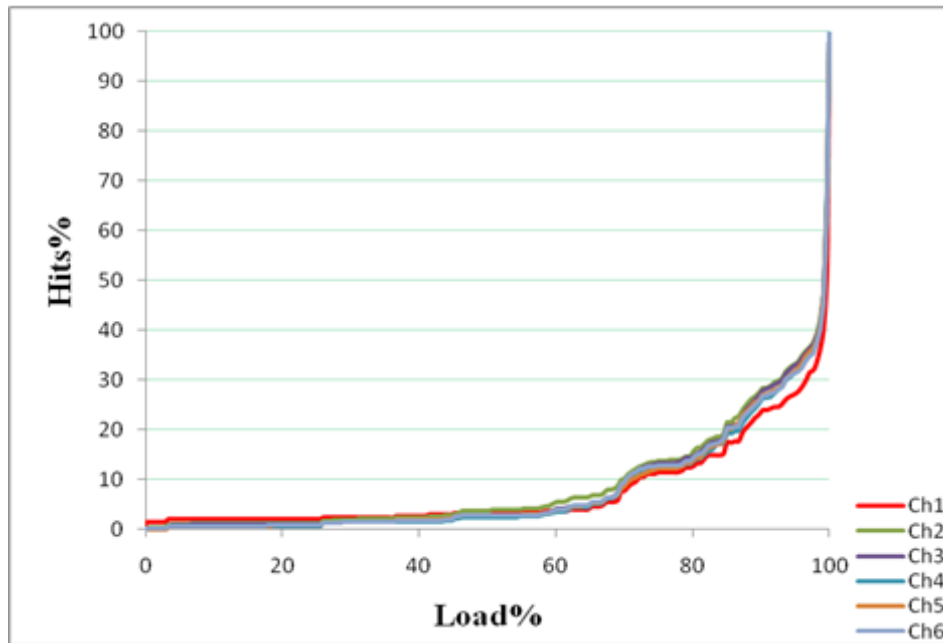
Δοκίμιο 8

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά δοκιμίου 8

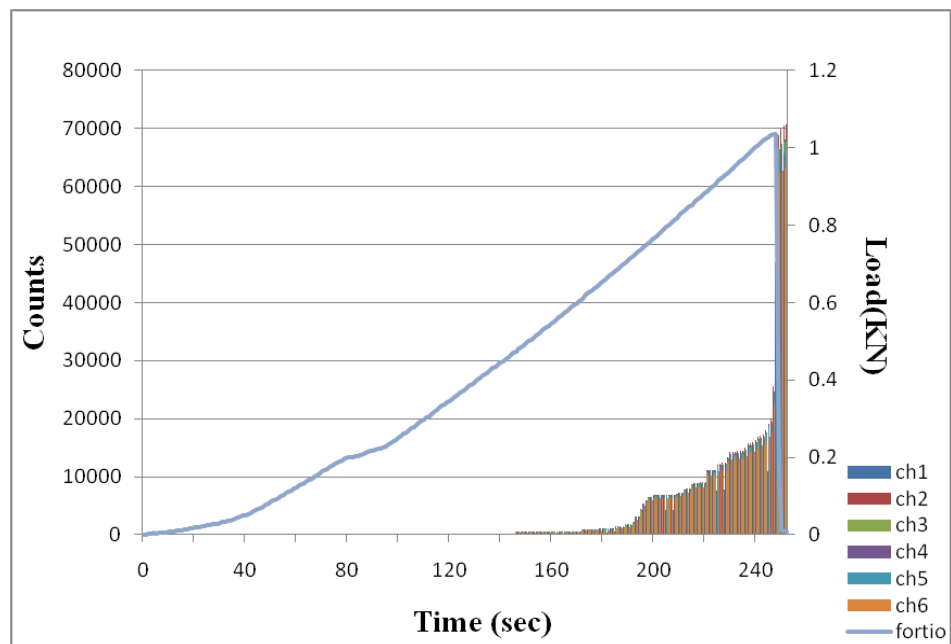
Χαρακτηριστικά δοκιμίου	
b	25,88 mm
h	23,05mm
L	200 mm
ls	170 mm



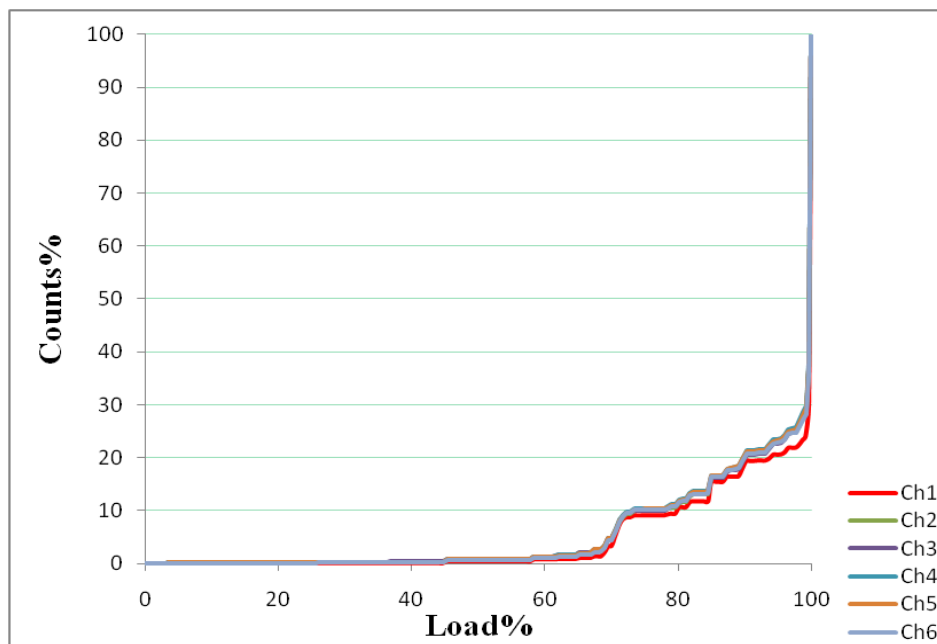
Διάγραμμα 49: Hits, Load-Time



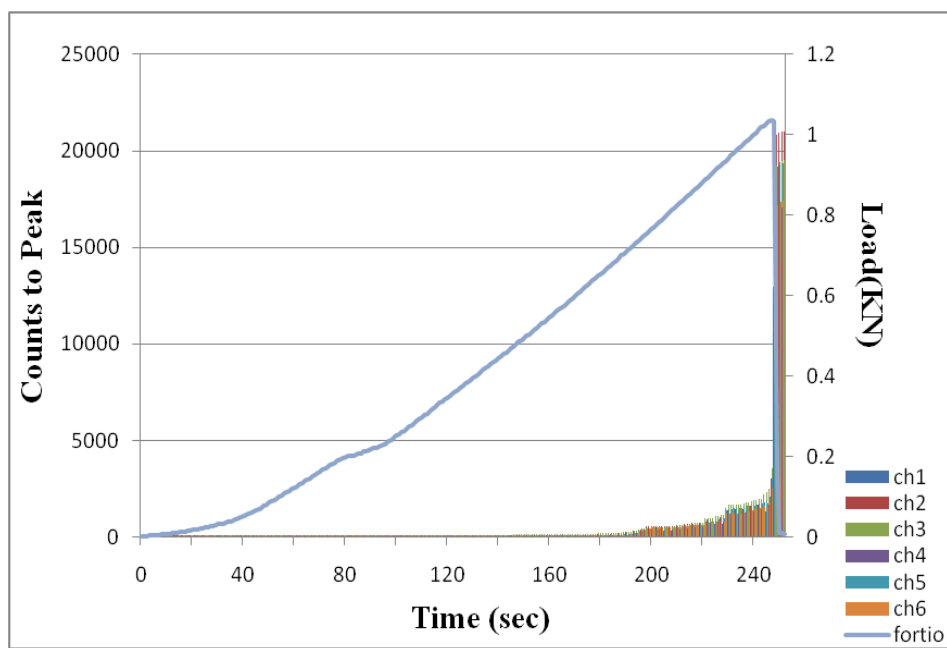
Διάγραμμα 50: Hits%-Load%



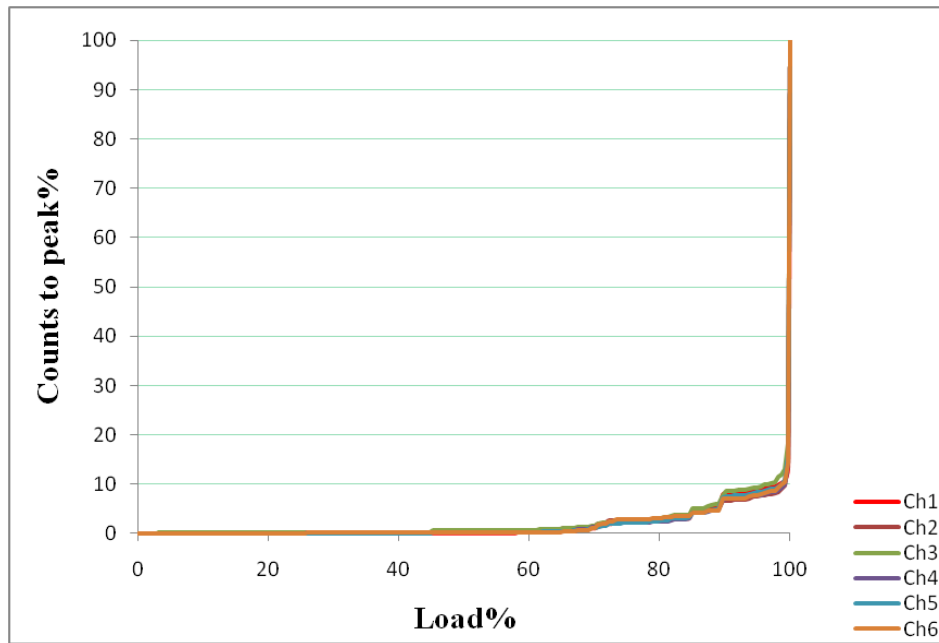
Διάγραμμα 51: Counts, Load-Time



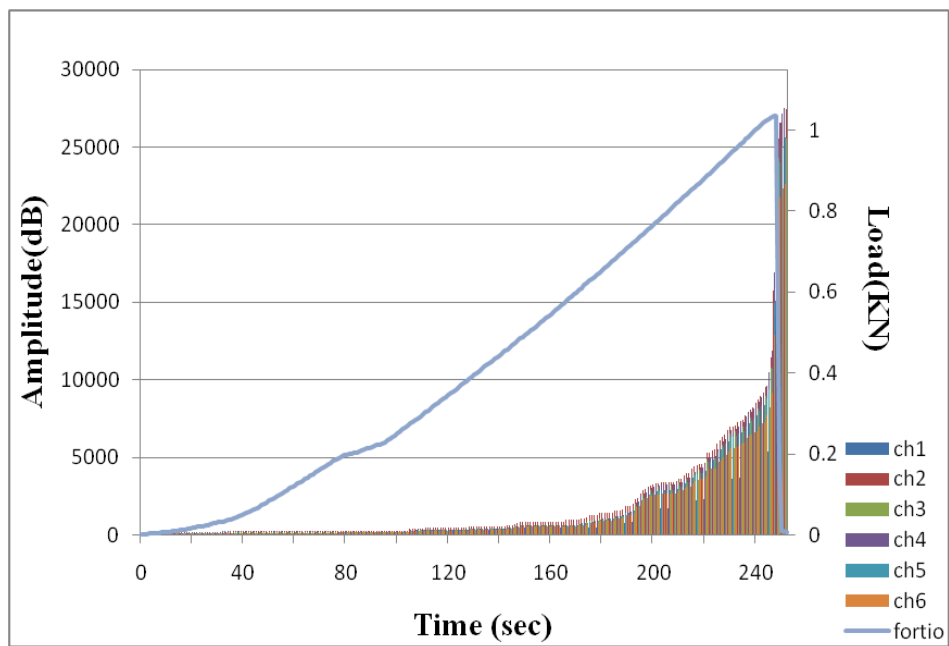
Διάγραμμα 52: Counts%-Load%



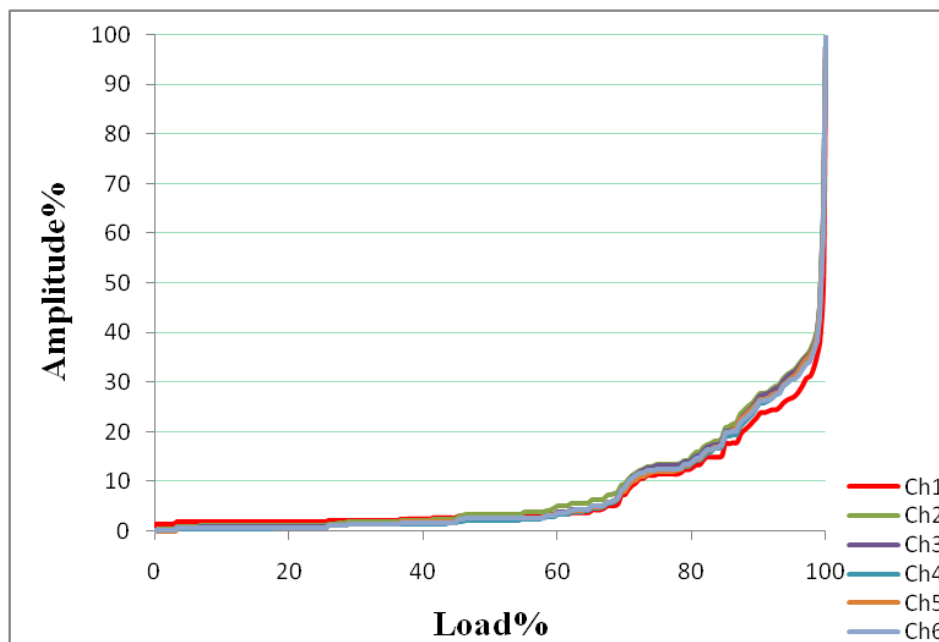
Διάγραμμα 53: Counts to Peak, Load-Time



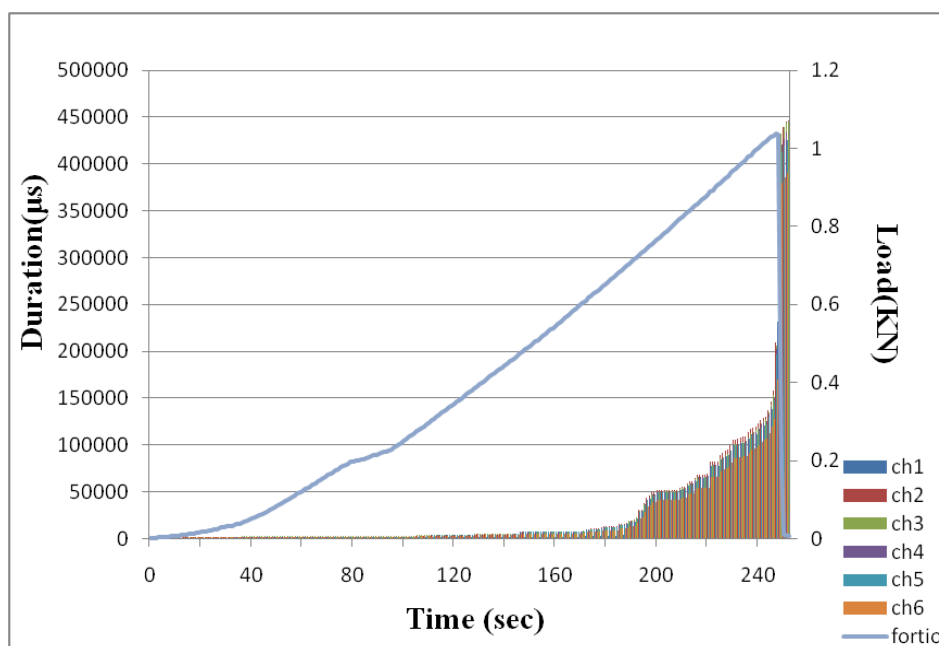
Διάγραμμα 54: Counts to peak%-Load%



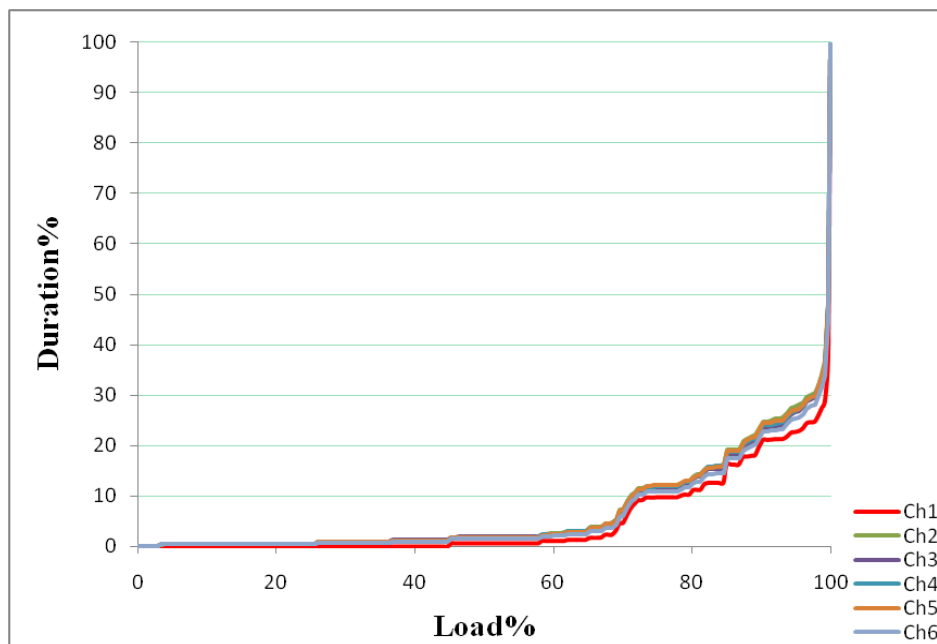
Διάγραμμα 55: Amplitude, Load-Time



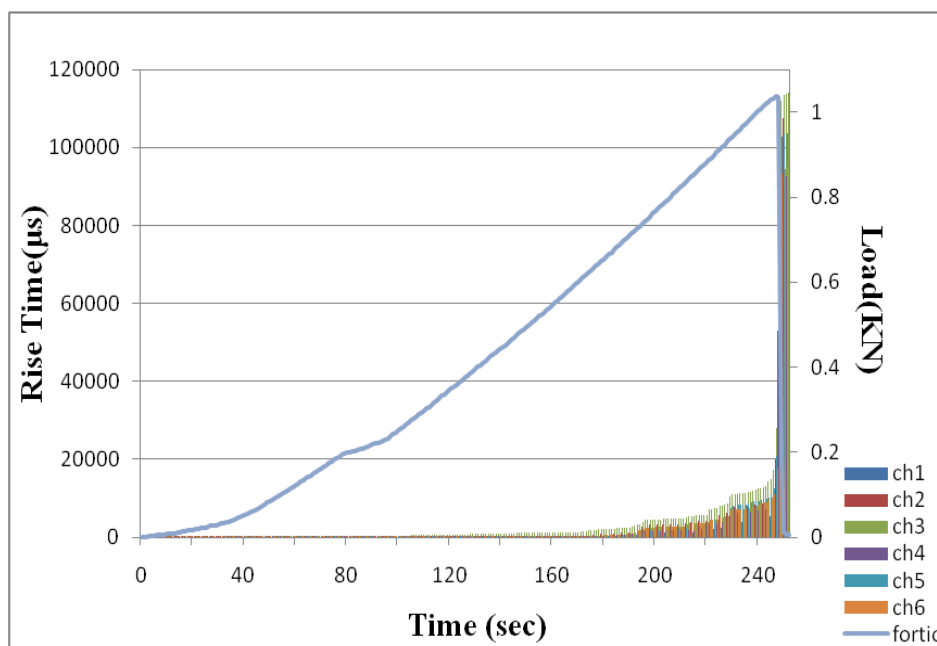
Διάγραμμα 56: Amplitude%-Load%



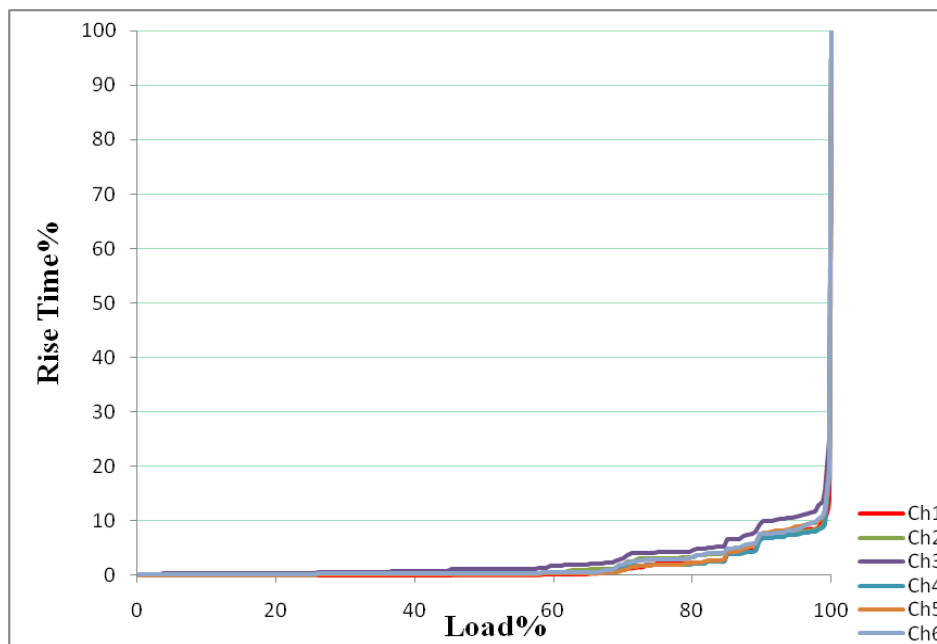
Διάγραμμα 57: Duration, Load-Time



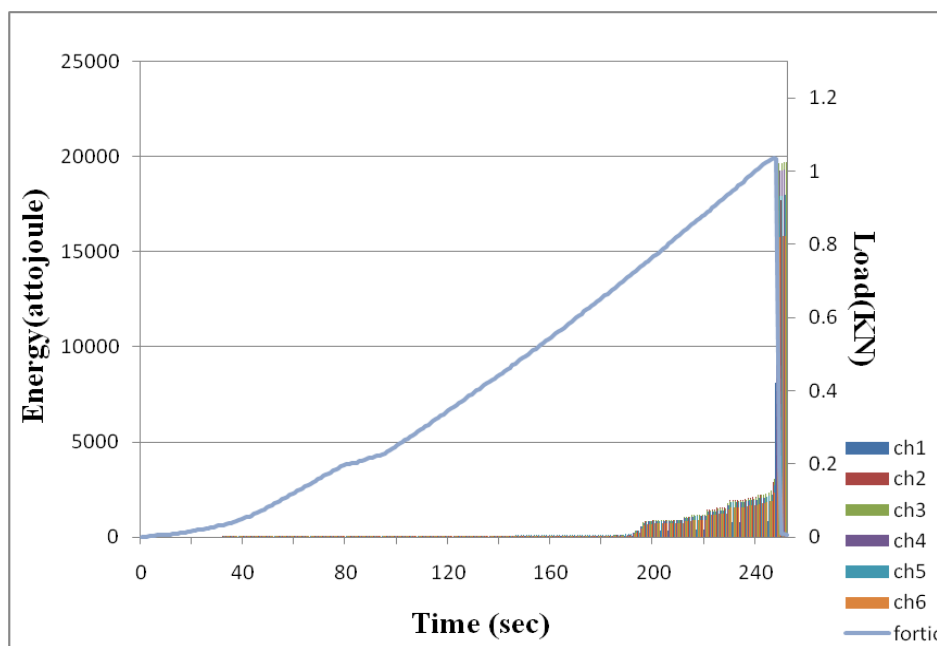
Διάγραμμα 58: Duration%-Load%



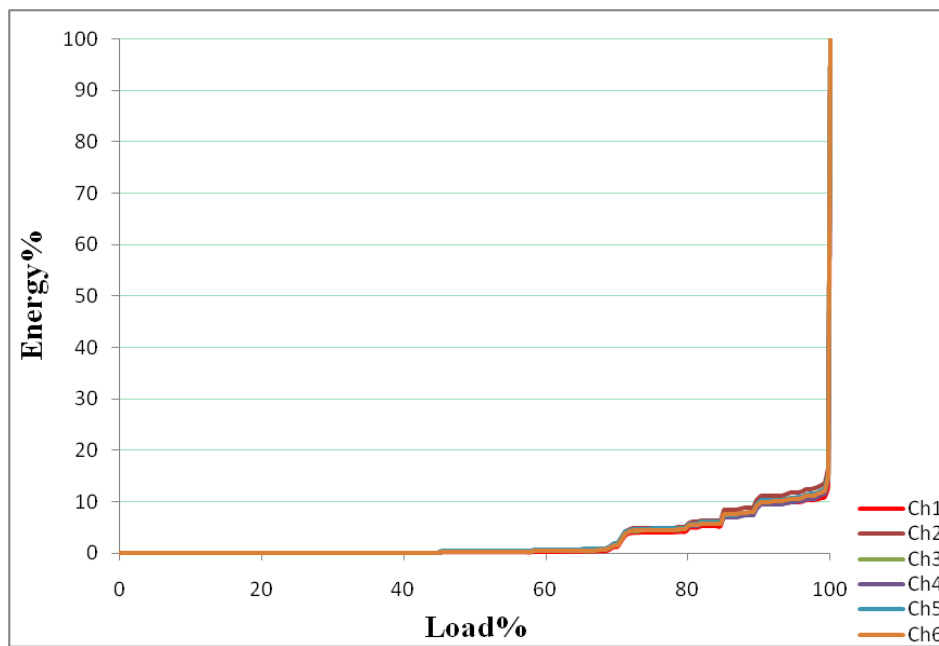
Διάγραμμα 59: Rise Time, Load-Time



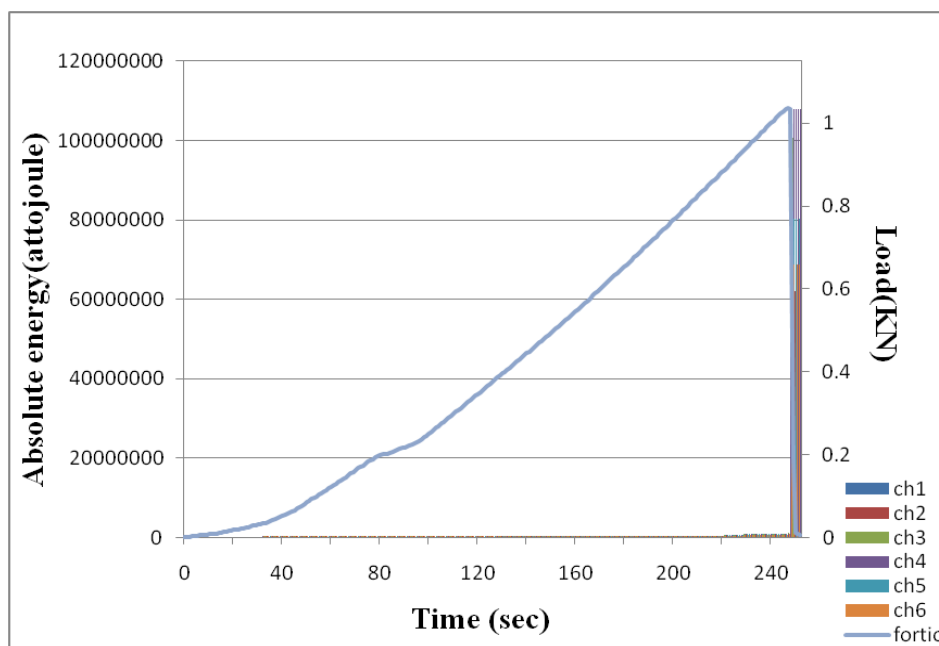
Διάγραμμα 60: Rise Time%-Load%



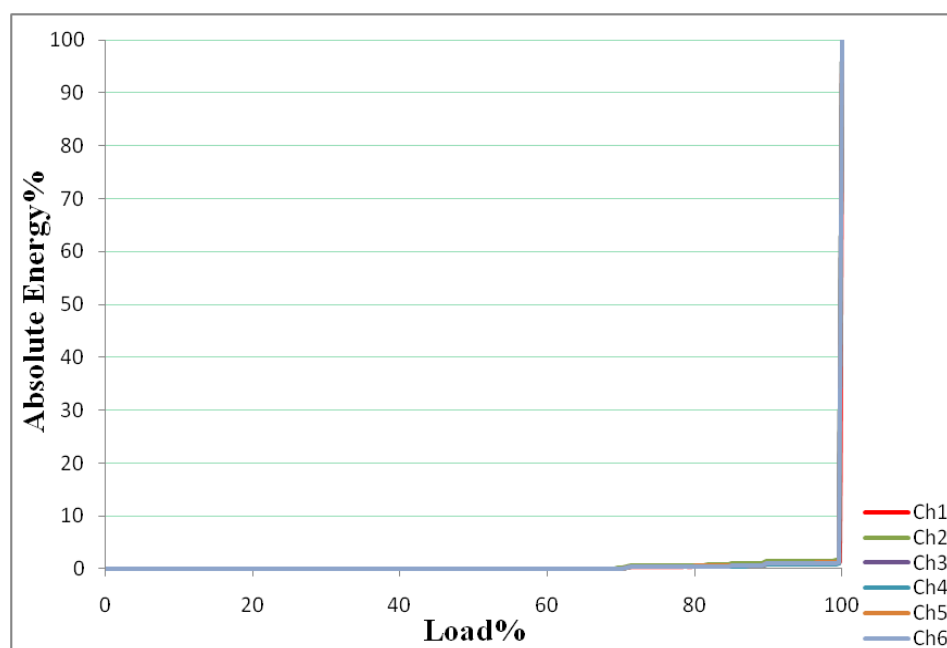
Διάγραμμα 61: Energy, Load-Time



Διάγραμμα 62: Energy%-Load%



Διάγραμμα 63: Absolute energy, Load-Time

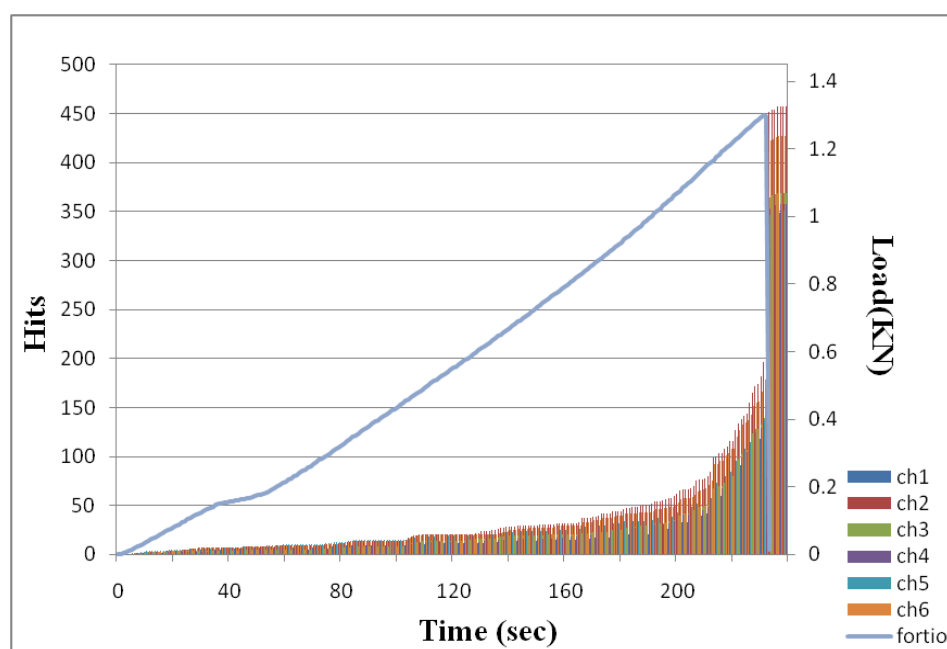


Διάγραμμα 64: Absolute energy%-Load%

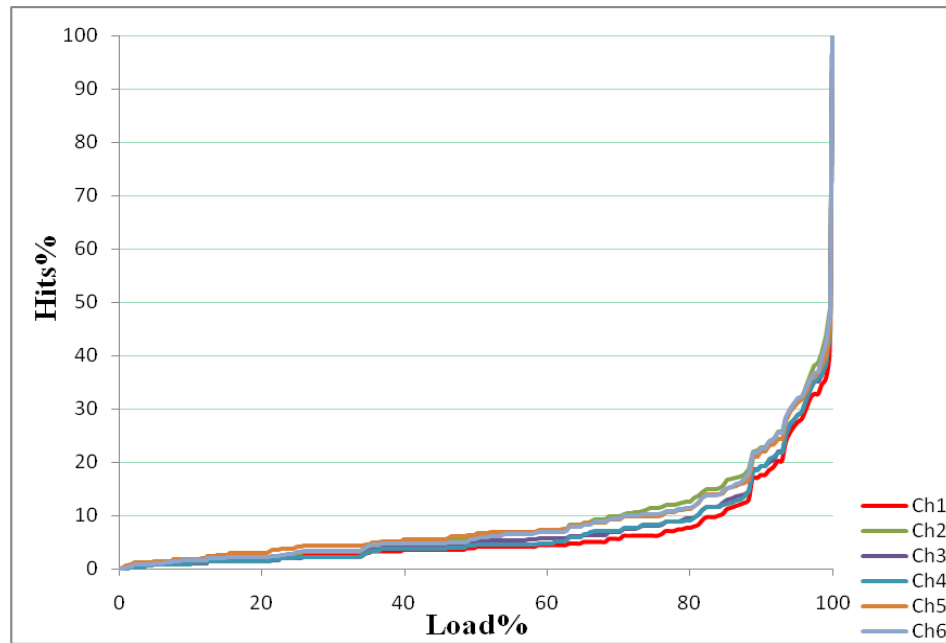
Δοκίμιο 9

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά δοκιμίου 9

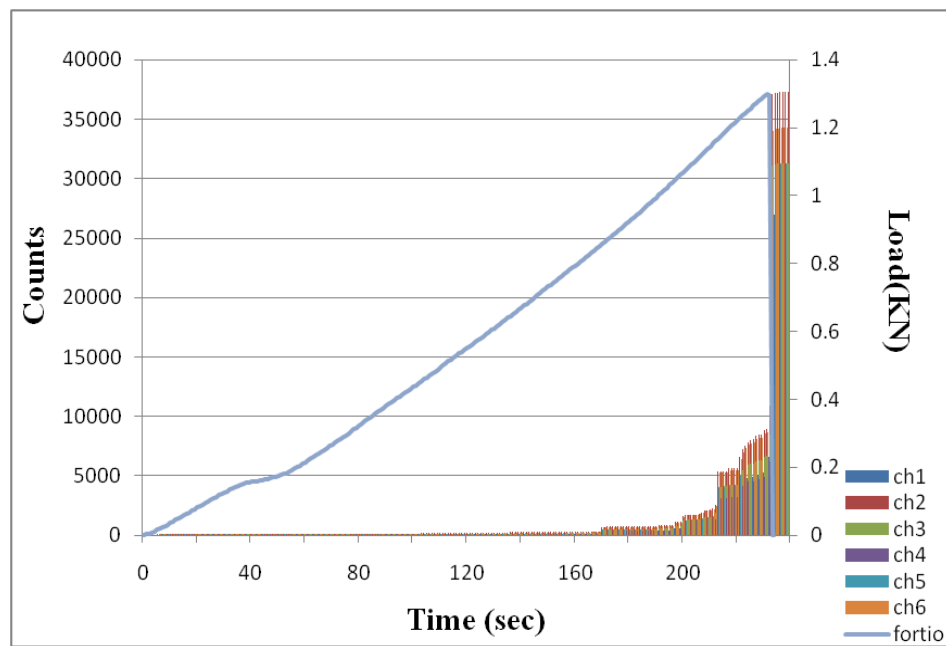
Χαρακτηριστικά δοκιμίου	
b	25,67 mm
h	24,47 mm
L	200 mm
ls	170 mm



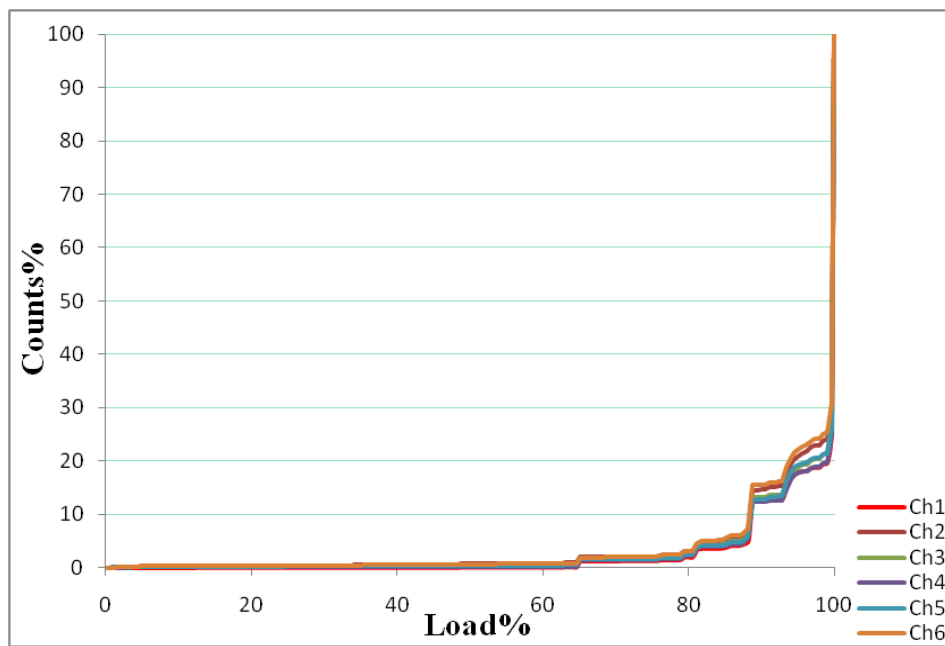
Διάγραμμα 65: Hits, Load-Time



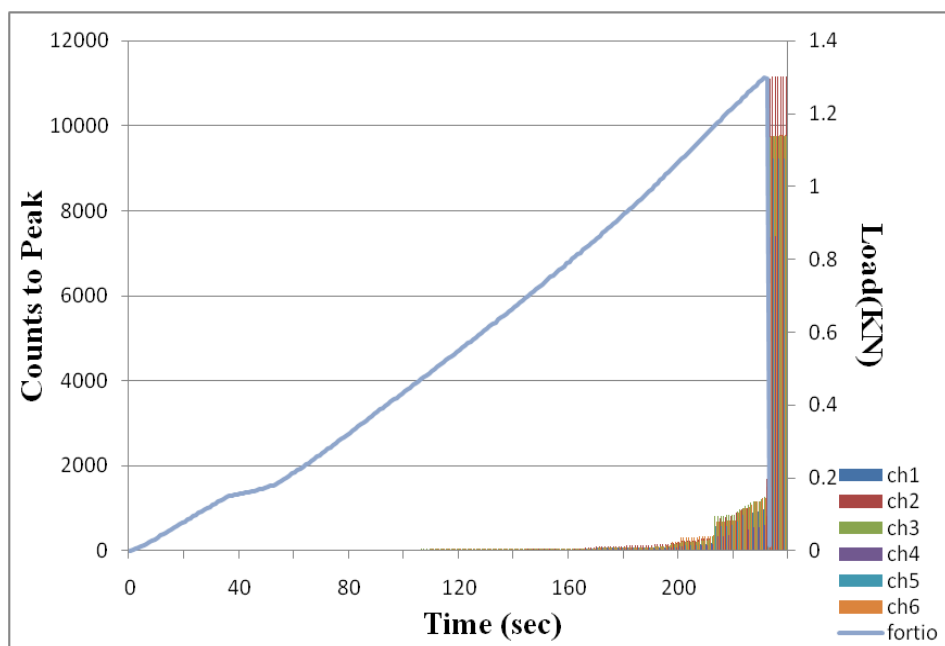
Διάγραμμα 66: Hits%-Load%



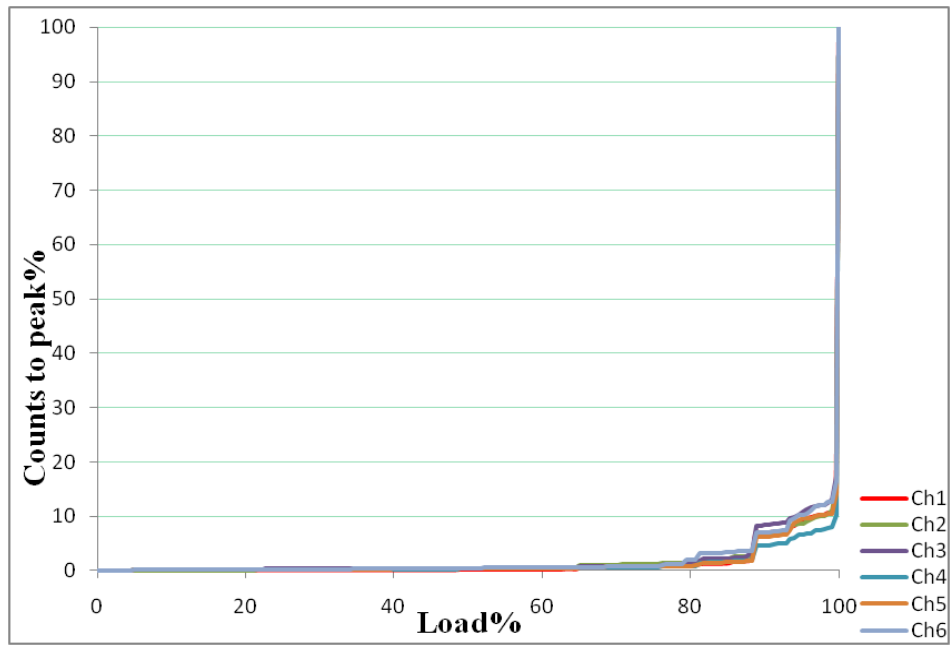
Διάγραμμα 67: Counts, Load-Time



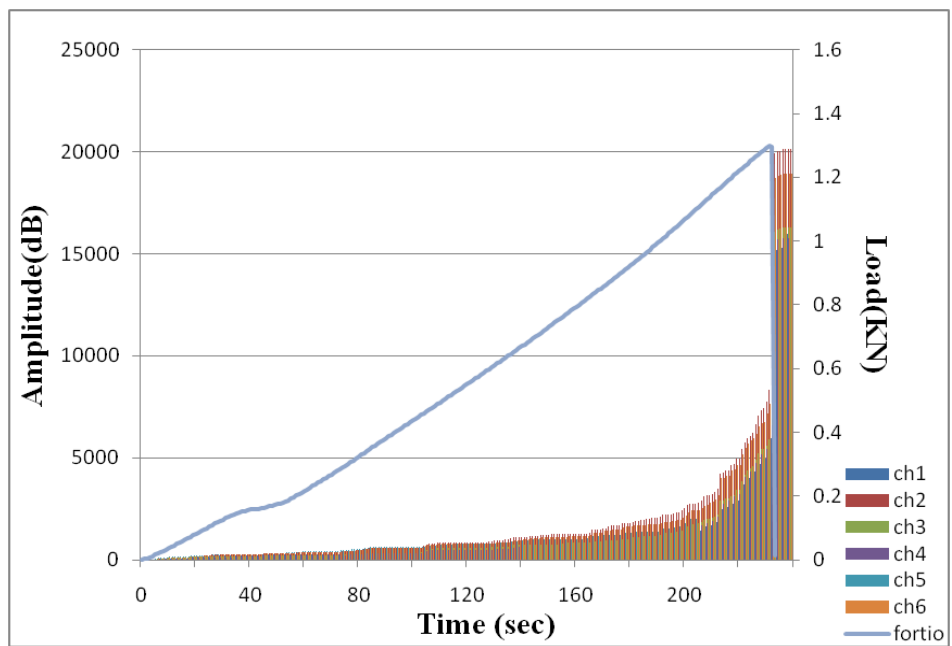
Διάγραμμα 68: Counts%-Load%



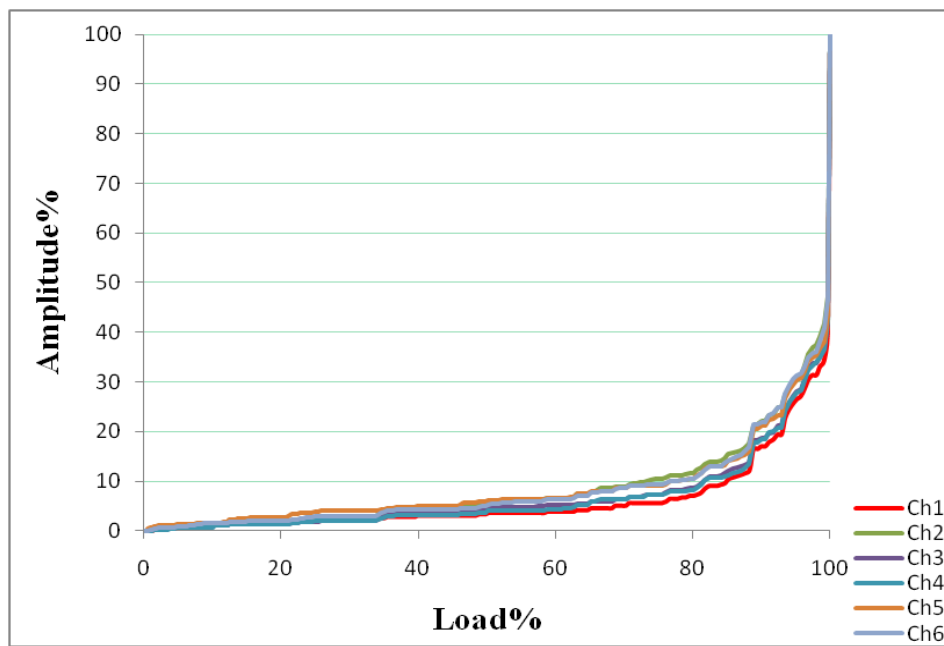
Διάγραμμα 69: Counts to peak, Load-Time



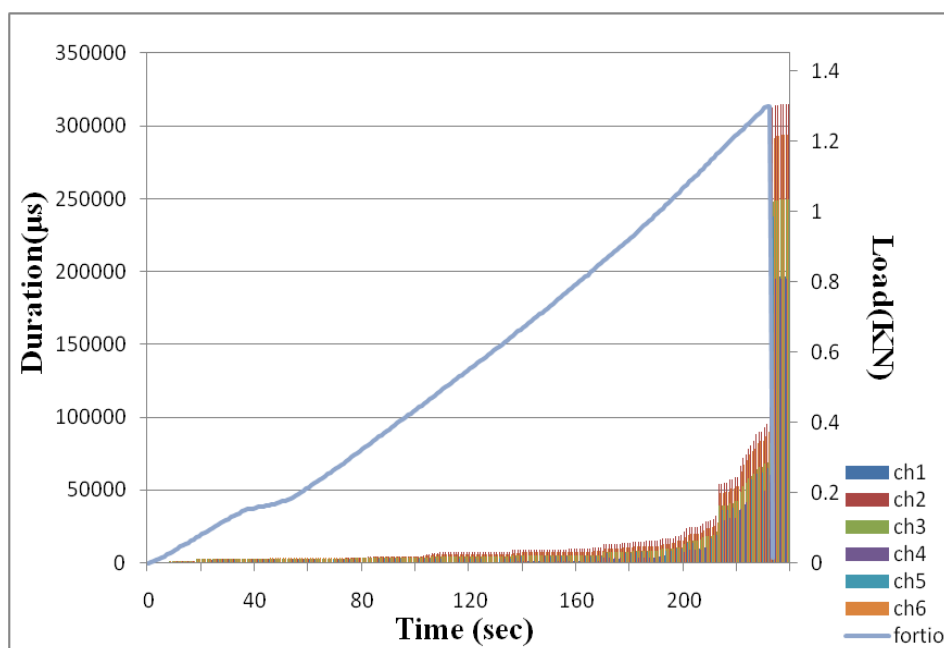
Διάγραμμα 70: Counts to peak%-Load%



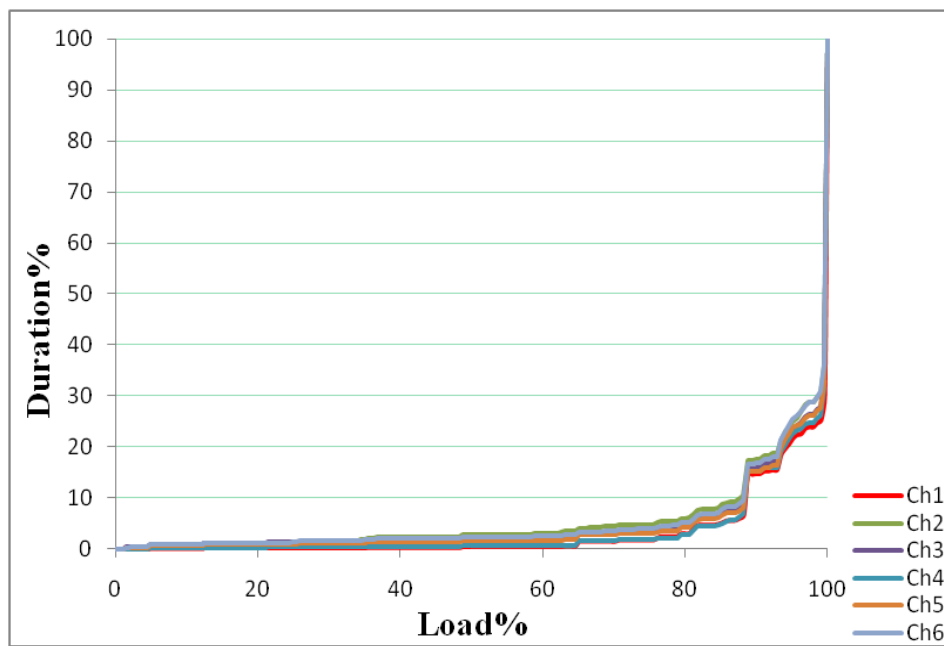
Διάγραμμα 71: Amplitude, Load-Time



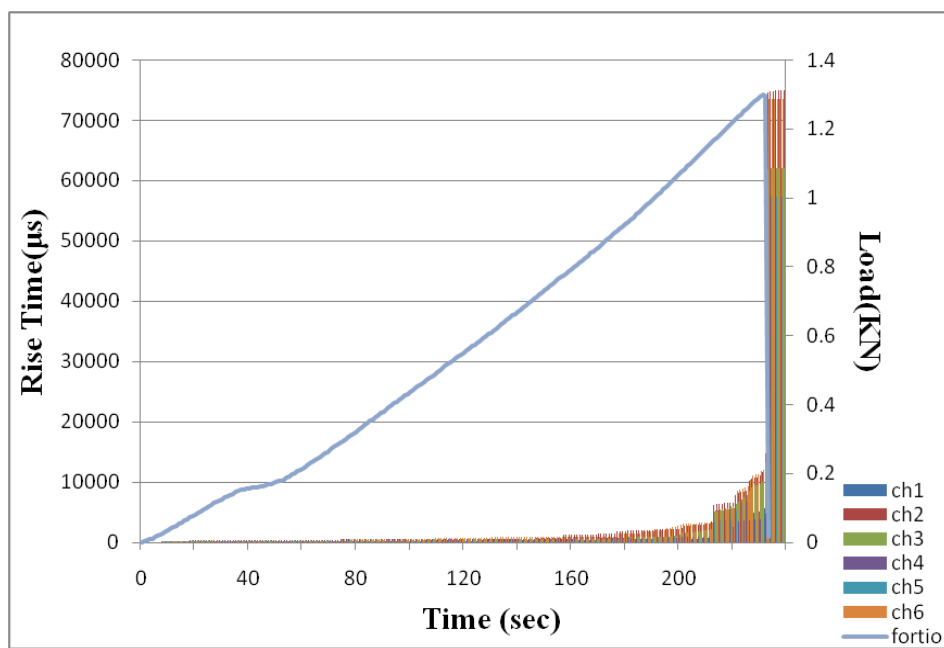
Διάγραμμα 72: Amplitude%-Load%



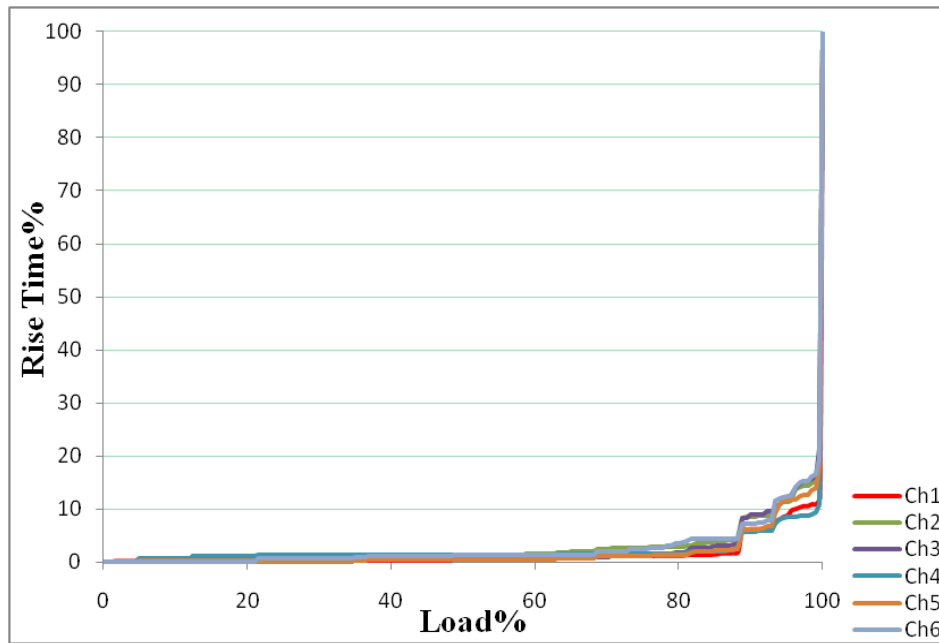
Διάγραμμα 73: Duration, Load-Time



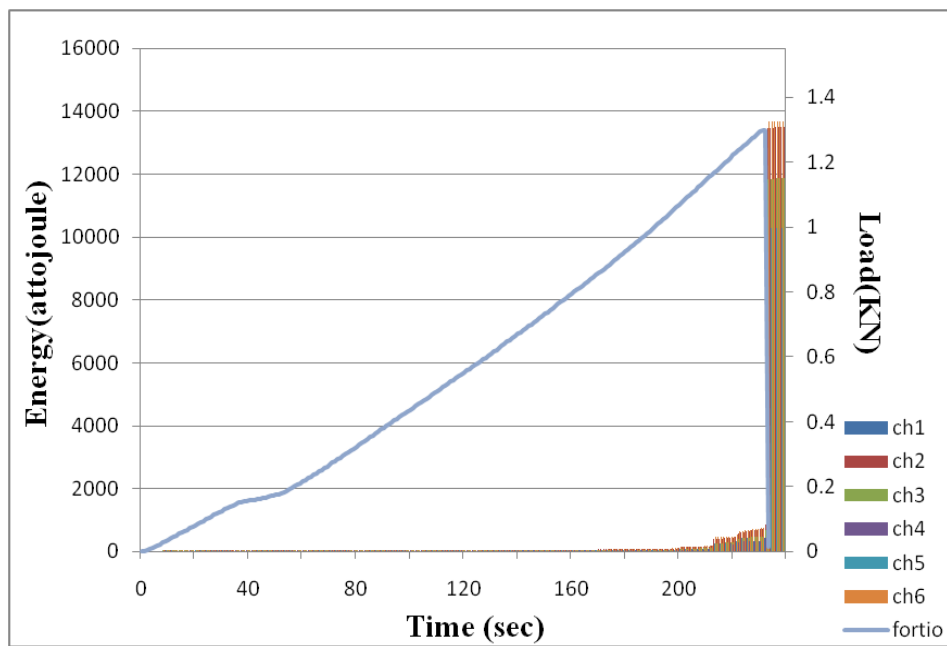
Διάγραμμα 74: Duration%-Load%



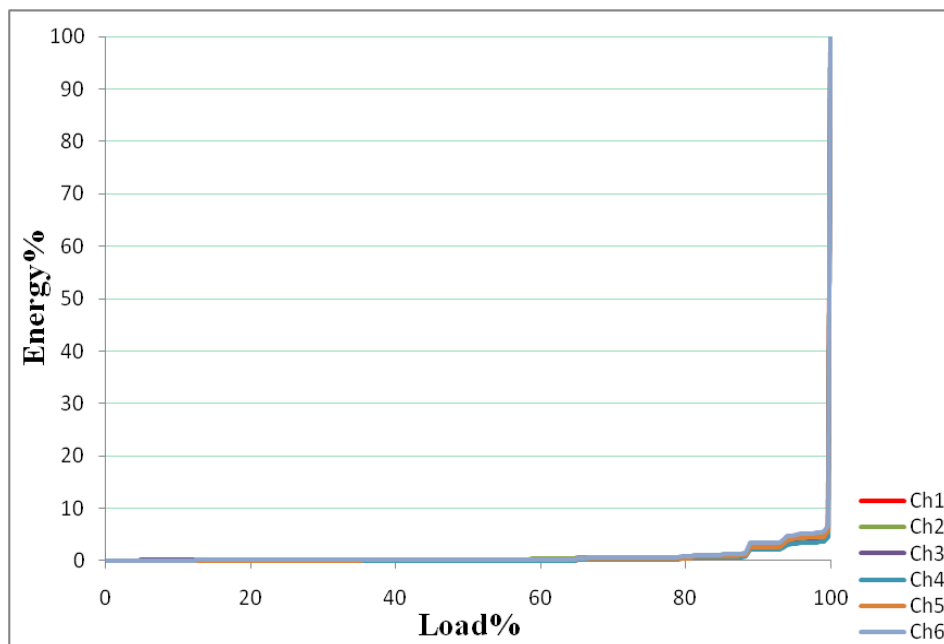
Διάγραμμα 75: Rise Time, Load-Time



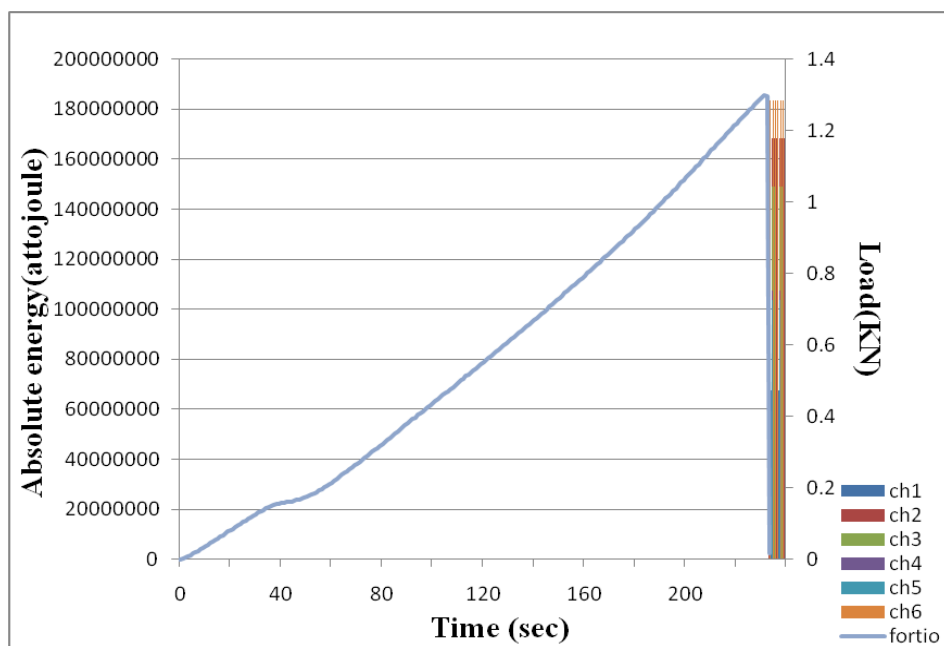
Διάγραμμα 76: Rise Time%-Load%



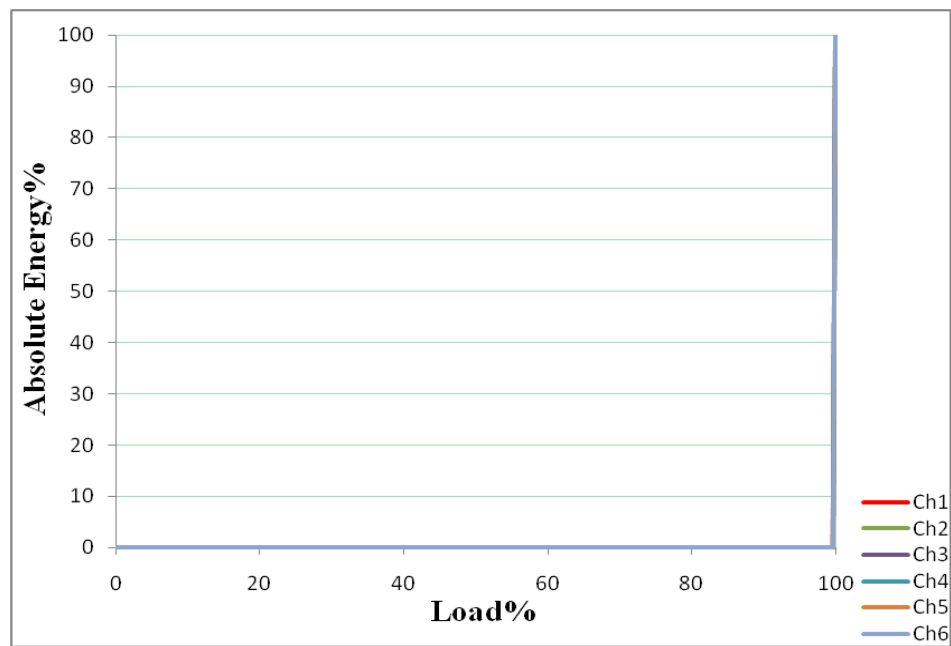
Διάγραμμα 77: Energy, Load-Time



Διάγραμμα 78: Energy%-Load%



Διάγραμμα 79: Absolute energy, Load-Time



Διάγραμμα 80: Absolute energy%-Load%