

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΗΣ ΜΠΙΖΑΣ

**Η ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΑΣΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΣΑΝ
ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ**

ΑΘΗΝΑ
2016

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:

ΒΑΔΑΛΟΥΚΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΣΧΟΛΗ ΕΜΦΕ ΕΜΠ

ΜΕΛΗ:

ΚΥΤΟΠΟΥΛΟΣ ΒΙΚΤΩΡ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΕΜΦΕ ΕΜΠ

ΣΙΔΕΡΙΔΗΣ ΑΙΜΙΛΙΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΕΜΦΕ ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω την επιβλέπουσα της Διπλωματικής Εργασίας μου κυρία Βασιλική Βαδαλούκα, Επ. Καθηγήτρια, για την υπόδειξη του θέματος, την επιστημονική καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου παρείχε, τόσο κατά την εκτέλεση των πειραμάτων όσο και κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	11
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.2 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ.....	12
1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ ΗΛΟΥ.....	12
1.4 ΥΠΕΡΗΧΟΙ	13
1.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟΥ	14
1.6 ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	15
1.7 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	16
1.8 ΡΑΝΤΑΡ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	19
ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ – ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ	19
2.1 ΓΕΝΙΚΑ – ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	19
2.2 Η ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ	22
2.3 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	24
2.4 ΓΕΝΙΚΑ – ΟΡΙΣΜΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ	25
2.5 ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ	26
2.6 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ	28
2.2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	29
2.2.1 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΡΑΒΔΟΥ	29
2.2.2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	34
ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ – ΤΟ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	34
3.1 ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ)	34
3.1.1 ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ KENNEDY-KRUPP.....	35
3.1.2 ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ HUGGENBERGER	35
3.1.3 ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ WHITTEMORE ΚΑΙ BERRY	36
3.1.4 ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ MARTENS	36
3.1.5 ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ TUCKERMAN	38
3.1.6 ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ VOSE	38
3.1.7 ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ (STRAIN GAUGES).....	39

3.2 ΤΟ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	44
ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ – ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	44
4.1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	44
4.1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	44
4.1.3 ΈΛΕΓΧΟΙ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ	49
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	51
4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	51
4.2.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	52
4.2.3 ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	53
4.2.5 Η ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ	54
4.2.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	54
4.2.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	85
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ	85
5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ	85
5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	86
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	95
ΈΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	95
6.1 ΑΓΩΓΟΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	95
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	125
ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΡΙ660-6000 ΤΟΥ DATA ACQUISITION SYSTEM.....	125

Περίληψη

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στο να εξετάσει την δυνατότητα μη καταστροφικού ελέγχου προβληματικών υφισταμένων κατασκευών υπό δυναμική καταπόνηση. Συγκεκριμένα προκαλούνται κρουστικές φορτίσεις σε υγιείς και προβληματικές κατασκευές, οι οποίες παραμορφώνονται μέσω της διάδοσης σε αυτές του προκαλούμενου τασικού παλμού. Στη συνέχεια ελέγχονται οι παραμορφώσεις σε επιλεγμένα σημεία των υγείων και προβληματικών κατασκευών, αντίστοιχα. Ακολούθως συγκρίνονται οι αντίστοιχες παραμορφώσεις των υγείων και προβληματικών κατασκευών, προκειμένου να εντοπισθούν διαφορές, που κωδικοποιώντας τις, θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα για την ποιότητα τυχαίας πλέον αντίστοιχης κατασκευής. Ο έλεγχος των παραμορφώσεων γίνεται στα επιλεγμένα σημεία με επικολλούμενους σε αυτά ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης η δε συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω συστήματος ταχείας λήψης δεδομένων.

Ο έλεγχος αναφέρεται σε τρία διαφορετικά, αλλά βασικά κατασκευαστικά προβλήματα. Την συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος, το υδραυλικό πλήγμα σε σωλήνες και την ποιότητα μεταλλικών συγκολλήσεων.

Για τον έλεγχο της συνάφειας οπλισμού - σκυροδέματος κατασκευάστηκαν δύο ομάδες τυποποιημένων κατά ASTM κυλινδρικών δοκιμίων. Και οι δύο ομάδες δοκιμίων, έφεραν διαμήκη οπλισμό από χάλυβα Φ12. Η πρώτη ομάδα ήταν των υγείων δοκιμίων, όπου ο οπλισμός παρουσίαζε πλήρη συνάφεια με το σκυρόδεμα. Η δεύτερη ομάδα ήταν των προβληματικών δοκιμίων, όπου δεν υπήρχε πλήρης συνάφεια. Σε όλες τις περιπτώσεις ο οπλισμός προεξείχε του δοκιμίου σκυροδέματος. Σε επιλεγμένες θέσεις κατά μήκος του οπλισμού όλων των δοκιμίων, επικολλήθηκαν μετρητές παραμόρφωσης. Ο τασικός παλμός δημιουργήθηκε από την κρούση σφυριού κατακορύφως επί του προεξέχοντος οπλισμού των δοκιμίων.

Ο έλεγχος του υδραυλικού πλήγματος αφορούσε σωλήνες από δύο διαφορετικά υλικά χάλυβα και πολυαιθυλένιο, που είτε ήταν γυμνοί, είτε μονωμένοι με επικάλυψη από διάφορα μονωτικά υλικά. Σε κάθε δοκίμιο εκτελέστηκε κρουστική καταπόνηση κατά μήκος και εγκάρσια της εξωτερικής επιφάνειάς του. Οι προκαλούμενες παραμορφώσεις μετρήθηκαν με τη βοήθεια ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης οι οποίοι επικολλήθηκαν, κατά μήκος και εγκάρσια, στο μέσο της εξωτερικής επιφάνειας των σωλήνων. Ο τασικός παλμός προέκυψε από σφύρα μηχανής κρούσης.

Για τον έλεγχο των συγκολλήσεων χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια χάλυβα από οπλισμό σκυροδέματος, τα οποία αφού κόπηκαν στη μέση με τροχό, συγκολλήθηκαν με διάφορες προβληματικές συγκολλήσεις. Ύστερα κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε κρουστικές καταπονήσεις κατά μήκος και εγκάρσια του άξονά του. Με τη βοήθεια μετρητών παραμόρφωσης, που επικολλήθηκαν λίγο πριν την συγκόλληση, ώστε να αποτελούν την υγιή περιοχή και λίγο μετά το σημείο της κακής συγκόλλησης, ώστε να αποτελούν την προβληματική περιοχή, μετρήθηκαν οι προκαλούμενες παραμορφώσεις από τη διέλευση του τασικού παλμού. Ο τασικός παλμός προέκυψε από προσκρουόμενο βλήμα, προερχόμενο από αεριοβόλο.

Σε όλες τις περιπτώσεις η συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία των τιμών της παραμόρφωσης, έγινε μέσω μετρητικού συστήματος ταχείας λήψης δεδομένων, με το οποίο ήταν συνδεδεμένοι οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης. Ελήφθησαν για τις επιλεγμένες θέσεις, οι κυματομορφές και οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων που προκλήθηκαν από την κρούση. Για αυτά τα χαρακτηριστικά, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις διάφορες ομάδες των δοκιμίων και εξήχθησαν πρώτα συμπεράσματα.

Abstract

This paper aims to examine the possibility of non-destructive testing, in problem existing structures under dynamic stress. Specifically there are caused percussive loads in healthy and problematic constructions that deform, by disseminating to these, induced dynamic vibration. Then the strains are tested in selected areas of healthy and problematic construction. Then the deformations of healthy and problematic structures are compared in order to identify differences that encoding them, could lead to conclusions about the quality of random corresponding construction. The control of the strain happens in selected locations by adhering to these electric deformation cash and the collection, storage and processing of results is through rapid data acquisition system.

Control refers to three different but basic construction problems. The reinforcement - concrete connection, the water hammer in pipes and metal quality welds.

To test the relevance of arms - concrete there are constructed two groups according to ASTM standard cylindrical specimens. Both groups of specimens were longitudinal steel reinforcement D12. The first group was the group of healthy specimens, where the reinforcement had complete affinity with concrete. The second group was the group of problematic samples, where there is not complete consistency. In all cases the reinforcement is protruded to the concrete specimen. In selected locations along the reinforcement of all specimens, there are pasted deformation gauges. The dynamic vibration is created by the impact hammer on the vertically protruding reinforcing specimens.

The control of the hydraulic hammer related tubes of two different materials, steel and polyethylene, which was either naked or insulated with a coating of various insulating materials. In each specimen was performed impulse stress, longitudinally and transversely of their outer surface. The induced strains were measured by electric deflection cash who pasted longitudinally and transversely in the middle of the outer surface of the tubes. The dynamic vibration is the result of impact hammer machine.

To control the welding there are used steel cores of reinforced concrete which, when cut in half with a wheel, welded the first one healthy group with proper adhesion, and the other with various problematic welding. After each specimen was subjected to percussive loads longitudinally and transversely of their axis. Using deformation cash pasted shortly before and shortly after the welding point, were measured deformations caused by the passage of the dynamic vibration. The dynamic vibration resulting from impacted projectile comes from a gun of air.

In all cases, the collection, storage and processing of the deformation values, took place by metering rapid data acquisition system, which was connected to the electric deformation gauges. For selected positions the waveforms were obtained and maximum values of the deformations caused by the shock. For these characteristics, the results were compared for different groups of test pieces and exported initial conclusions.

Εισαγωγή

Στις υφιστάμενες κατασκευές διαφόρων ειδών, από μικρές απλές κατασκευές, μέχρι και τεράστια κτηριακά συγκροτήματα, πολλές φορές υπάρχει δυσκολία στον έλεγχο της ποιότητας τους. Οι μέχρι τώρα μέθοδοι, είτε είναι καταστροφικές, είτε γίνεται συνεχής προσπάθεια ανάπτυξης μη καταστροφικών μεθόδων.

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με το να εξεταστεί η δυνατότητα μη καταστροφικού ελέγχου προβληματικών υφισταμένων κατασκευών υπό δυναμική καταπόνηση. Συγκεκριμένα προκαλούνται κρουστικές φορτίσεις σε υγιείς και προβληματικές κατασκευές, οι οποίες παραμορφώνονται μέσω της διάδοσης σε αυτές του δημιουργούμενου τασικού παλμού. Στη συνέχεια ελέγχονται οι παραμορφώσεις σε επιλεγμένα σημεία των υγιών και προβληματικών κατασκευών, αντίστοιχα. Ακολούθως συγκρίνονται οι αντίστοιχες παραμορφώσεις των υγιών και προβληματικών κατασκευών, προκειμένου να εντοπισθούν διαφορές, που κωδικοποιώντας τις, θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα για την ποιότητα τυχαίας πλέον αντίστοιχης κατασκευής

Μας απασχόλησαν τρία βασικά κατασκευαστικά προβλήματα, ο έλεγχος της συνάφειας οπλισμού σκυροδέματος, η ποιότητα των συγκολλήσεων και ο έλεγχος του υδραυλικού πλήγματος σε σωλήνες.

Η διαμόρφωση των δοκιμών, η τοποθέτηση αισθητήρων και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών, ΕΑΥ, του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη της επιβλέπουσας.

Πειραματικές μελέτες για την απόκριση διάφορων κατασκευών κατά την διάδοση τασικού παλμού προερχόμενου από κρουστικές καταπονήσεις έχουν ήδη πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο [1,2]. Επίσης προκαταρκτικές πειραματικές μελέτες για τα τρία βασικά προβλήματα που μας απασχόλησαν, έχουν γίνει από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες, [3,4,5].

Ως προς την διάρθρωσή της, η εργασία αποτελείται από την Περίληψη, την Εισαγωγή, 6 Κεφάλαια, Συμπεράσματα, την Βιβλιογραφική αναφορά και το Παράρτημα. Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται περιληπτική περιγραφή των πιο γνωστών μη καταστροφικών μεθόδων. Στο Κεφάλαιο 2, αναφέρονται στοιχεία για την διάδοση κύματος και τις Ταλαντώσεις. Στο Κεφάλαιο 3, αναφέρονται στοιχεία για τους μετρητές παραμόρφωσης και το μετρητικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε. Στο Κεφάλαιο 4, εξετάζεται η συγκεκριμένη μέθοδος για τον έλεγχο της συνάφειας οπλισμού - σκυροδέματος. Στο Κεφάλαιο 5, εξετάζεται η συγκεκριμένη μέθοδος για τον έλεγχο συγκολλήσεων. Στο Κεφάλαιο 6, εξετάζεται η συγκεκριμένη μέθοδος στον έλεγχο του υδραυλικού πλήγματος.

Κεφάλαιο 1

Μη καταστροφικός έλεγχος σε υφιστάμενες κατασκευές

1.1 Εισαγωγή

Η μελέτη και η διαστασιολόγηση νέων κατασκευών βασίζονται σε συμβατικές ιδιότητες, που καθορίζονται κατά την φάση της μελέτης, (μέσω των παραδοχών που κάνει ο Μελετητής) και κατά την φάση της κατασκευής, (μέσω ενός συστήματος διασφάλισης ποιότητας, ποιοτικών ελέγχων), ελέγχεται αν αυτές τηρούνται. Όταν όμως πρόκειται για επεμβάσεις σε υφιστάμενες κατασκευές, στις οποίες συνήθως δεν υπάρχουν στοιχεία για τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιηθέντων υλικών, αυτά πρέπει να εκτιμηθούν κυρίως επιτόπου ή, και με κάποια μεγαλύτερη δυσκολία, στο εργαστήριο. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να γίνει με άμεσες ή με έμμεσες μεθόδους. Με τις μεθόδους αυτές συνήθως προσδιορίζονται διάφορες ιδιότητες των υλικών από τις οποίες προκύπτουν κυρίως έμμεσα (και σπανιότερα άμεσα) συμπεράσματα για άλλες ιδιότητες ή χαρακτηριστικά των υλικών της κατασκευής. Για τον λόγο αυτό και οι μέθοδοι αυτές λέγονται γενικότερα και Έμμεσες Μέθοδοι - μη καταστροφικές. Όταν οι πληροφορίες από τις έμμεσες μεθόδους δεν είναι επαρκείς, τότε καταφεύγουμε και σε άμεσες μεθόδους, οι οποίες όμως κατά κανόνα είναι ημικαταστροφικές (με την έννοια ότι προκαλούν περιορισμένης εκτάσεως φθορές, όπως π.χ. είναι η πυρηνοληψία).

Γενικότερα, ανάγκη για τον επιτόπου προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών ανακύπτει συνήθως στις εξής περιπτώσεις:

- ποιοτικός έλεγχος υφισταμένων ή νέων κατασκευών
- αμφισβήτηση της ποιότητας των υλικών υφισταμένων ή νέων κατασκευών.
- προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των υλικών, προκειμένου να γίνουν εργασίες επεμβάσεων, (επισκευών ή και ενισχύσεων), σε υφιστάμενες κατασκευές.

Όπως είναι φυσικό, η χρήση των έμμεσων (μη καταστρεπτικών) μεθόδων προτιμάται συνήθως στην περίπτωση κατασκευών με μεγάλη ιστορική και αρχιτεκτονική αξία, για τις οποίες έχει σημασία να αποφευχθεί η διαταραχή της μορφής τους. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι έμμεσες (μη καταστροφικές) μέθοδοι, οι οποίες επί πλέον, παρουσιάζουν και χαμηλό κόστος εφαρμογής, έχουν μειωμένη αξιοπιστία και μπορούν να

χρησιμεύσουν κυρίως για την προκαταρκτική διερεύνηση της καταστάσεως μιας κατασκευής, καθώς τα αποτελέσματά τους είναι ποιοτικώς μόνον αξιοποιήσιμα.

Η τεχνολογία των μη καταστροφικών μεθόδων εξελίσσεται ραγδαία, οι υφιστάμενες μέθοδοι βελτιώνονται, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται νέες. Ένα σημαντικότατο πρόβλημα για το οποίο δεν υπάρχει τυποποιημένη μη καταστροφική μέθοδος είναι η συνάφεια. Υπάρχουν περιπτώσεις που χρειάζεται άμεση εκτίμηση της εναπομείνουσας συνάφειας όπως π.χ. σεισμικό γεγονός μερικές ώρες μετά την σκυροδέτηση.

1.2 Οπτικός έλεγχος

Πρόκειται για την πιο κλασική και απλή μέθοδο Μη Καταστροφικού Ελέγχου, (ΜΚΕ). Ο μηχανικός κάνει επιθεώρηση και συλλογή πληροφοριών για την κατασκευή πριν προβεί στον πιο λεπτομερή έλεγχο με τις άλλες μεθόδους. Κατά τον οπτικό έλεγχο εντοπίζονται και καταγράφονται οι φθορές - βλάβες που παρουσιάζει μία κατασκευή. Έτσι, ο έλεγχος συνίσταται στην καταγραφή, πάνω σε σχέδια ή σκαριφήματα, των ρωγμών (θέση και εύρος), των διαβρωμένων οπλισμών - προβλήματα υγρασίας, ανωμαλίες και φθορές σε σκυρόδεμα και χάλυβα.

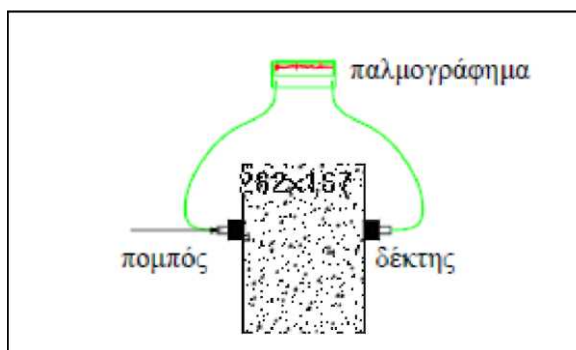
1.3 Μέθοδος εξόλκευσης ήλου

Πρόκειται για έμμεση (Μη Καταστροφική) Μέθοδο προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Με την χρήση ενός πυροδοτικού εκτοξευτή, εκτοξεύεται σε επαφή με το σκυρόδεμα, ένας πρότυπος ήλος μήκους 4cm και διαμέτρου 4mm, που εισάγεται στο σκυρόδεμα. Μετά την πάροδο μερικών λεπτών ο ήλος εξολκεύεται με ειδικό εξολκέα, που φέρει και δυναμόμετρο. Μετράται η δύναμη εξολκείσεως, που μεταφράζεται, με κατάλληλα διαγράμματα, σε θλιπτική αντοχή σκυροδέματος. Σε κάθε θέση πρέπει να γίνονται τουλάχιστον 6 επιτυχείς δοκιμές σε απόσταση 10cm τουλάχιστον μεταξύ τους. Επιφάνειες που δεν είναι αντιπροσωπευτικές της αντοχής του σκυροδέματος πρέπει να αποφεύγονται (π.χ. η πάνω επιφάνεια πλακών, τσιμεντοκονίες κλπ).

1.4 Υπέρηχοι

Είναι μια έμμεση (μη καταστροφική) μέθοδος. Τα κύρια στοιχεία της συσκευής των υπερήχων φαίνονται στην εικόνα 1. Η συσκευή αποτελείται από δύο κρυστάλλους εκ των οποίων ο ένας είναι πομπός και ο άλλος δέκτης. Οι δύο κρύσταλλοι τοποθετούνται αντικριστά σε δύο παράλληλες επιφάνειες του υπό εξέταση στοιχείου. Οι κρύσταλλοι αποτελούνται από πιεζοηλεκτρικά κεραμικά στοιχεία τα οποία αλλάζουν μέγεθος όταν τους εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα ή παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν αλλάζουν μέγεθος.

Η επιβολή κατάλληλου ρεύματος έχει ως συνέπεια ο κρύσταλλος πομπός να πάλλεται με την φυσική του συχνότητα που είναι υπερηχητική (>20 KHz).



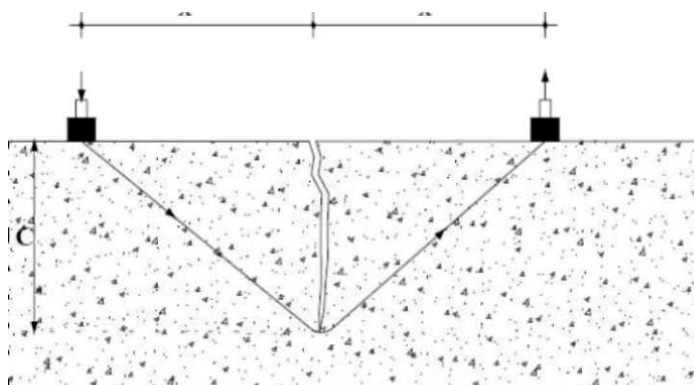
Εικόνα 1: Σχηματική παράσταση συσκευής υπερήχων

Η ταλάντωση του κρυστάλλου παράγει τασικά κύματα, τα οποία διαδίδονται δια μέσου του σκυροδέματος. Εν τω μεταξύ, ταυτόχρονα με την δημιουργία του παλμού του ηλεκτρικού ρεύματος, ένα ηλεκτρονικό χρονόμετρο ακριβείας τίθεται σε λειτουργία. Μόλις ο παλμός φθάσει στον δέκτη παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο σταματά το χρονόμετρο και στην οθόνη της συσκευής αναγράφεται ο αντίστοιχος χρόνος. Αν το πάχος του δοκιμίου είναι ίσο με L και ο χρόνος που χρειάστηκε το υπερηχητικό κύμα για να το διανύσει T , τότε η ταχύτητα των υπερήχων, V , (συνήθως σε km/s), δίνεται απ' τον τύπο: $V=L/T$.

Για την καλύτερη επαφή των κρυστάλλων στην επιφάνεια του σκυροδέματος χρησιμοποιείται λιπαντική ουσία, η οποία καλύπτει τις ατέλειες της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου. Παράλληλα κατά την διάρκεια της μέτρησης, θα πρέπει οι κρύσταλλοι να πιέζονται με μεγάλη δύναμη πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η ιδιοσυχνότητα των κρυστάλλων είναι συνήθως 50kHz. Γενικώς μικρότερης συχνότητας κρύσταλλοι, (20kHz), χρησιμοποιούνται σε στοιχεία με μεγάλη μάζα σκυροδέματος, ενώ μεγαλύτερης συχνότητας κρύσταλλοι, (>100kHz), χρησιμοποιούνται σε στοιχεία μικρού πάχους, όταν απαιτείται ακριβέστερη

μέτρηση του χρόνου διαδόσεως. Για τους υπολογισμούς βρίσκεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των ταχυτήτων.

Η ύπαρξη μίας ρωγμής μπορεί να διαπιστωθεί μόνο όταν το μήκος της είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του κρυστάλλου-πομπού, ή μεγαλύτερο από το μήκος κύματος του υπερήχου που χρησιμοποιείται. Αν υπάρχει ρωγμή τέτοιων διαστάσεων μέσα σε ένα δομικό στοιχείο, τότε όταν τοποθετηθούν οι κρύσταλλοι κατά μήκος του άξονα του, ο χρόνος διαδόσεως του υπερηχητικού κύματος παρουσιάζεται σημαντικά αυξημένος σε σχέση με τον χρόνο διαδόσεως που παρατηρείται όταν τοποθετήσουμε τους κρυστάλλους σε γειτονικές θέσεις χωρίς ρωγμές. Για να είναι οι μετρηθέντες χρόνοι συγκρίσιμοι, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ομοιογένεια του σκυροδέματος του εξεταζόμενου στοιχείου. Η εκτίμηση του βάθους μιας επιφανειακής ρωγμής, κάθετης στην επιφάνεια, μπορεί να γίνει τοποθετώντας τους κρυστάλλους όπως φαίνεται στην εικόνα 2.



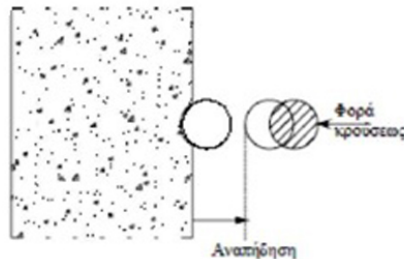
Εικόνα 2: Εκτίμηση βάθους ρωγμής

Η ύπαρξη εσωτερικών ρωγμών ή κενών προκαλούν περίθλαση των υπερήχων με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου διαδόσεως των υπερήχων. Έτσι, αν δεν είναι γνωστή η εσωτερική κατάσταση του στοιχείου, η φαινομενικά μειωμένη ταχύτητα των υπερήχων, μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλεται στην μειωμένη αντοχή του σκυροδέματος.

1.5 Μέθοδος κρουσίμετρου

Η μέθοδος του κρουσίμετρου είναι μια μη καταστροφική μέθοδος εκτιμήσεως της αντοχής του σκυροδέματος, που βασίζεται στην μέτρηση της επιφανειακής σκληρότητας των υπό εξέταση δομικών στοιχείων. Με την μέθοδο αυτή εξετάζεται η ποιότητα του σκυροδέματος της εξωτερικής επιφάνειας των κατασκευών και σε βάθος έως 30mm περίπου. Μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα για την αντοχή ενός δομικού στοιχείου μόνο όταν συνδυαστεί και με άλλες μεθόδους. Η αρχή της μεθόδου φαίνεται στην εικόνα 3. Μια μεταλλική μάζα προσκρούει στην επιφάνεια του εξεταζόμενου

υλικού. Το ύψος αναπηδήσεως αυτής της μάζας εξαρτάται από την ελαστικότητα του υλικού και, επομένως, από την αντοχή του. (Η θλιπτική αντοχή συμβολίζεται με f)

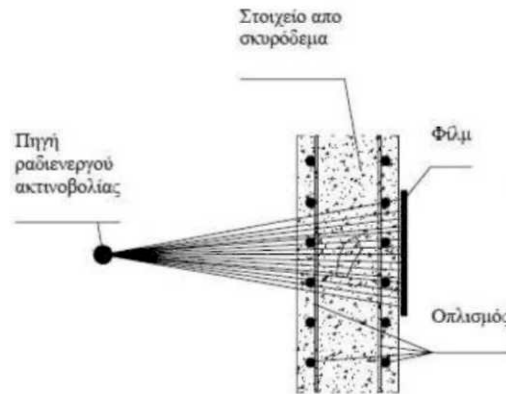


Εικόνα 3: Αρχή λειτουργίας κρουσιμέτρου

Η μέθοδος χρησιμοποιείται και για την διαπίστωση της ομοιογένειας του σκυροδέματος των εξεταζόμενων δομικών στοιχείων, κυρίως πριν τον έλεγχο τους από άλλες μεθόδους όπως πυρηνοληψία και εξόλκευση ήλου. Κατά την μέτρηση του δείκτη επιφανειακής σκληρότητας για ηλικίες σκυροδέματος μεταξύ 14 ημερών και 3 μηνών, το σφάλμα των μετρήσεων μπορεί να φτάσει το 15%, ενώ για σκυροδέματα ηλικίας μεγαλύτερης των 3 μηνών, το σφάλμα φτάνει το 25%. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος με την μέθοδο του κρουσιμέτρου είναι ο τύπος τσιμέντου, ο τύπος και η γεωμετρία των εξεταζόμενων δοκιμίων, η υγρασία, η θερμοκρασία κλπ.

1.6 Ραδιογραφικές μέθοδοι

Ανήκουν στην κατηγορία των εμμέσων μεθόδων. Χρησιμοποιείται η ραδιενέργεια προκειμένου να παραχθεί μια ακτινογραφία του εσωτερικού του ελεγχόμενου τμήματος της κατασκευής. Η αρχή της μεθόδου φαίνεται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4: Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου της ραδιογραφίας

Μια ραδιενεργός πηγή τοποθετείται στην μία πλευρά του εξεταζόμενου στοιχείου, κατάλληλα προστατευμένη για λόγους ασφαλείας του προσωπικού, ενώ από το πίσω μέρος του στοιχείου τοποθετείται και ένα ειδικό φωτογραφικό φιλμ. Στο φιλμ καταγράφεται η ένταση της διερχομένης ακτινοβολίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερη είναι η έκθεση του φιλμ. Η μέθοδος είναι ακριβώς ίδια με την χρησιμοποιούμενη στην ιατρική. Με την μέθοδο αυτή ανιχνεύεται η παρουσία του οπλισμού (παρουσιάζεται ως λευκά σημεία στην ακτινογραφία) και η ύπαρξη κενών στο σκυρόδεμα (παρουσιάζονται ως μαύρες περιοχές).

Η επιλογή της ραδιενεργού πηγής εξαρτάται από την πυκνότητα και το πάχος του ελεγχόμενου στοιχείου. Η πλέον ισχυρή πηγή, το κοβάλτιο-60 (^{60}Co), εισχωρεί μέχρι 500mm στο σκυρόδεμα. Για πάχη μέχρι 150mm χρησιμοποιείται το ιρίδιο-192 (^{192}Ir) ή το καίσιο-137 (^{137}Cs). Για την χρήση της μεθόδου απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό και ειδικά μέτρα ασφαλείας.

1.7 Μαγνητικές μέθοδοι

Τα μαγνητόμετρα είναι όργανα με τα οποία εντοπίζεται ο οπλισμός στο σκυρόδεμα, εκτιμάται αρκετά καλά το πάχος της επικάλυψης, ενώ με μικρότερη ακρίβεια μπορεί να εκτιμηθεί και η διάμετρος της ράβδου.

Τα μαγνητόμετρα βασίζονται στην αλληλεπίδραση των ράβδων του οπλισμού και ενός, χαμηλής συχνότητας, ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ειδικότερα, βασίζονται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, (ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί ηλεκτρικό δυναμικό σε ένα κύκλωμα). Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday το ηλεκτρικό δυναμικό είναι ανάλογο του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Τα εμπορικά μαγνητόμετρα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

Σε αυτά που βασίζονται στην αρχή της μαγνητικής αντίστασης. Για δεδομένη επικάλυψη η ένδειξη του οργάνου εξαρτάται από το εμβαδόν της ράβδου και τις μαγνητικές ιδιότητές της, (σύνθεση του κράματος και τύπος επεξεργασίας). Η ένδειξη επίσης εξαρτάται και από την παρουσία σιδηρούχων αδρανών στο σκυρόδεμα.

Σε εκείνα που βασίζονται στα δινορεύματα (ρεύματα Φουκώ). Βασίζονται στην ηλεκτρική αγωγιμότητα της ράβδου και ανιχνεύουν μαγνητικά αλλά και μη μαγνητικά αντικείμενα.

Πρόκειται για καθαρά μη καταστροφική μέθοδο. Ο εξοπλισμός είναι ελαφρύς, φορητός και εύχρηστος. Προσδιορίζεται με ακρίβεια η θέση του οπλισμού, ενώ το πάχος της επικάλυψης εκτιμάται με αρκετά καλή προσέγγιση. Επειδή η ένδειξη του οργάνου εξαρτάται τόσο από την επικάλυψη όσο και από την διάμετρο της ράβδου, δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός και των δύο παραμέτρων με μία μόνον μέτρηση. Η διακριτική ικανότητα εξαρτάται από το πόσο διακεκριμένες είναι οι καμπύλες της ενδείξεως του οργάνου συναρτήσει της επικάλυψης για διάφορες διαμέτρους του οπλισμού. Επειδή όμως οι καμπύλες για δύο διαδοχικές διαμέτρους είναι σχετικά κοντά η μια με την άλλη, γι' αυτό η εκτίμηση της διαμέτρου δεν γίνεται με μεγάλη ακρίβεια. Τελευταία πάντως κυκλοφόρησαν όργανα τα οποία εκτιμούν την διάμετρο της ράβδου χωρίς διπλή μέτρηση.

Η ακρίβεια κατά τον υπολογισμό της επικάλυψης εξαρτάται και από την παρουσία άλλων ράβδων πλησίον της εξεταζόμενης ράβδου. Αν μάλιστα η απόσταση δύο διαδοχικών ράβδων είναι μικρότερη από μια κρίσιμη απόσταση, τότε το όργανο τις αντιλαμβάνεται ως μια ράβδο. Η κρίσιμη αυτή απόσταση εξαρτάται από την επικάλυψη, (αυξάνεται αυξανόμενης της επικάλυψης), αλλά και από το μέγεθος της κεφαλής του οργάνου. Επίσης, στην περίπτωση δύο επάλληλων στρώσεων οπλισμού, η δεύτερη στρώση δεν είναι δυνατόν να διακριθεί επειδή το σήμα από την πρώτη στρώση είναι πολύ ισχυρότερο του σήματος της δεύτερης στρώσεως. Πάντως έχουν αναφερθεί ανιχνεύσεις μήκους επικάλυψης ράβδων που βρίσκονται σε επαφή.

1.8 Παντάρ

Η μέθοδος είναι ανάλογη με εκείνες που χρησιμοποιούν τασικά κύματα με την διαφορά ότι στην προκειμένη περίπτωση εκπέμπονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η μέθοδος είχε αρχικώς στρατιωτικές εφαρμογές, αλλά τώρα εφαρμόζεται και σε πολιτικές. Σε έργα πολιτικού μηχανικού εφαρμόσθηκε σε έρευνες εδάφους (προσδιορισμός υπόγειων σωλήνων, πάχος εδαφικών στρώσεων κλπ). Προσφάτως άρχισε να

εφαρμόζεται και σε κατασκευές για τον προσδιορισμό του πάχους πλακών από σκυρόδεμα, εντοπισμό ράβδων σκυροδέματος και έλεγχο εσωτερικών φθορών.

Η μέθοδος βασίζεται στην ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όταν διέρχονται από υλικά με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά. Μια αντένα σύρεται στην επιφάνεια εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεδομένης συχνότητας, τα οποία εισέρχονται στην προς έλεγχο περιοχή. Τα κύματα διαδίδονται δια μέσου του υλικού. Στην διεπιφάνεια δύο υλικών, με διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές, ένα μέρος της ακτινοβολίας αντανακλάται και επιστρέφει πίσω στην αντένα, η οποία παράγει σήμα με ένταση ανάλογη του ανακλωμένου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Έτσι το επιστρέφον σήμα περιέχει πληροφορίες σχετικά με το είδος της επιφάνειας στην οποία έγινε η ανάκλαση, τον χρόνο διαδρομής και την απόσβεση του σήματος. Οι ιδιότητες που επηρεάζουν την μεταδιδόμενη και την ανακλώμενη ενέργεια είναι η σχετική (ως προς τον αέρα) διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα του υλικού. Ειδικότερα, το ποσόν της ανακλώμενης ενέργειας στην διεπιφάνεια δύο διαφορετικών υλικών, εξαρτάται από την διαφορά των διηλεκτρικών σταθερών. Η χρονική ανάλυση των ανακλωμένων κυμάτων επιτρέπει τον προσδιορισμό του βάθους της ανακλώσας επιφάνειας όταν είναι γνωστές οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των υλικών (από τις οποίες υπολογίζονται και οι ταχύτητες διαδόσεως των κυμάτων εντός των αντιστοιχών υλικών).

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου κατατάσσονται η ικανότητα διεισδύσεως και ο προσδιορισμός μη ορατών καταστάσεων, η ικανότητα σαρώσεως μεγάλων επιφανειών σε μικρό χρόνο και η μεγάλη ευαισθησία στην υγρασία και στα ενσωματωμένα μεταλλικά αντικείμενα. Το πάχος σκυροδέματος το οποίο μπορεί να ελεγχθεί με την μέθοδο του ραντάρ είναι της τάξεως των 750mm, (εξαρτώμενο από την συχνότητα της αντένας και την περιεχόμενη υγρασία). Οι συνήθεις αντένες καλύπτουν μια κωνική περιοχή. Σε ένα βάθος 200mm καλύπτουν μια περιοχή περίπου 0.1m^2 , δηλαδή για τέτοια βάθη απαιτούνται παράλληλες διελεύσεις ανά περίπου 0.3m. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μικρή διακριτική ικανότητα όταν οι ράβδοι οπλισμού στο σκυρόδεμα βρίσκονται η μία κοντά στην άλλη. Η διακριτική ικανότητα, εκτός από την απόσταση των ράβδων μεταξύ τους, εξαρτάται και από την επικάλυψη του οπλισμού. Ενδεικτικώς αναφέρεται ότι, για επικάλυψη οπλισμών 5cm, οι ράβδοι πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 10 έως 15cm για να είναι ανιχνεύσιμες. Πολύ πυκνοί οπλισμοί, λόγω της έντονης αντανακλάσεως, αποτρέπουν την ανίχνευση λοιπών χαρακτηριστικών που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη. Τέλος, με την μέθοδο αυτή, δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός της διαμέτρου της ράβδου καθώς και η ύπαρξη εσωτερικών ρωγμών. Συμπερασματικά η μέθοδος είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό του πάχους του σκυροδέματος καθώς και τον προσδιορισμό της στάθμης των οπλισμών.

Κεφάλαιο 2

Διάδοση Κυμάτων – Ταλαντώσεις

2.1 Γενικά – Ορισμοί κύματος

Ως κύμα ορίζουμε μια διαταραχή, συνήθως περιοδική, που διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα διαμέσου ενός ή περισσότερων μέσων.

Μέσω του κύματος, έχουμε διάδοση ενέργειας στο μέσο και μεταφορά της σε άλλο σημείο του μέσου. Αποτέλεσμα αυτού, είναι το ότι το μέσο μπορεί να παραμορφώνεται σταδιακά, να υφίσταται τοπικές μετατοπίσεις και να ταλαντώνεται κατά την διέλευση του κύματος, χωρίς κατ' ανάγκη να παρατηρείται κάποια παραμόρφωση, ή μετατόπιση στο σύνολο του μέσου.

Έτσι προκύπτει ότι στην πραγματικότητα υπάρχουν τρεις ταχύτητες που σχετίζονται με ένα κύμα:

Η κυματική ή φασική ταχύτητα. Είναι η ταχύτητα που διαδίδεται το κύμα, δηλαδή οι ισοφασικές επιφάνειες, στο μέσο.

Η σωματιδιακή ή μοριακή ταχύτητα. Είναι η ταχύτητα με την οποία ταλαντώνεται γύρω από την θέση ισορροπίας του, το κάθε τμήμα του μέσου.

Η ομαδική ταχύτητα. Για την περίπτωση υπέρθεσης κυμάτων με διαφορετικές συχνότητες, μήκη κύματος και ταχυτήτων, έχουμε την δημιουργία ενός κυματοπακέτου. Η ομαδική ταχύτητα περιγράφει την ταχύτητα μετάδοσης της ενέργειας του κυματοπακέτου.

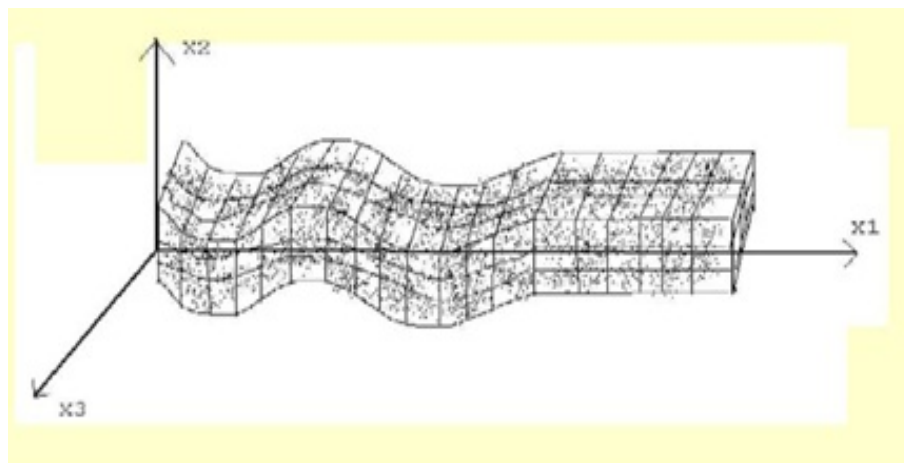
Διαμήκη λέγονται τα κύματα όταν η διεύθυνση διάδοσής τους και η διεύθυνση των ταλαντώσεων ή μετατοπίσεων του μέσου είναι παράλληλες.

Εγκάρσια λέγονται τα κύματα όταν η διεύθυνση διάδοσής τους και η διεύθυνση των ταλαντώσεων ή μετατοπίσεων του μέσου είναι κάθετες.

Η κίνηση του ελαστικού μέσου για ένα διαμήκες και ένα εγκάρσιο κύμα που διαδίδεται σε δισδιάστατο χώρο κατά την διεύθυνση x_1 , φαίνεται στις εικόνες 5 και 6 αντίστοιχα.



Εικόνα 5: Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση διαμήκους κύματος.



Εικόνα 6: Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση εγκάρσιου κύματος.

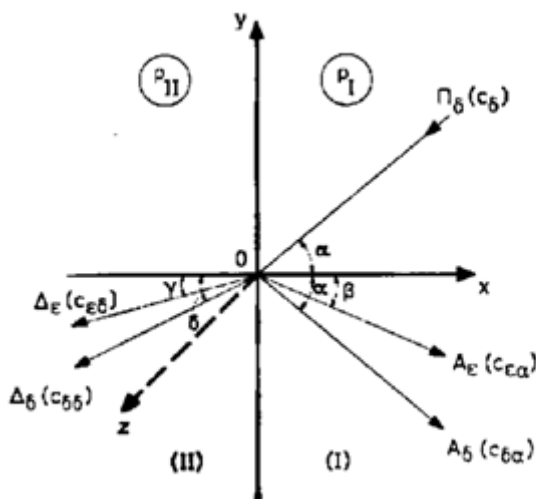
Κρουστικός παλμός, δημιουργείται από κρουστικό φορτίο. Κρουστικό λέγεται το φορτίο, όταν η διάρκεια της επιβολής του σε μία κατασκευή, είναι συγκρίσιμη με την θεμελιώδη φυσική περίοδο της κατασκευής.

Συγκεκριμένα ένα φορτίο θεωρείται κρουστικό, όταν ο συνολικός χρόνος επιβολής του είναι το πολύ ίσος με την θεμελιώδη φυσική περίοδο της κατασκευής, ενώ θεωρείται στατικό, όταν ο χρόνος αυτός είναι μεγαλύτερος από τον τριπλάσιο της φυσικής περιόδου.

Αποτέλεσμα της κρουστικής καταπόνησης είναι η δημιουργία μηχανικής διαταραχής σε ένα σημείο του σώματος, που στην συνέχεια διαδίδεται με την μορφή μηχανικών κυμάτων (τασικών και παραμορφωσιακών) στο υλικό.

Τα τασικά κύματα ακολουθούν τους γνωστούς νόμους των κυμάτων, ανάκλασης, διάθλασης, σκέδασης κλπ. Όταν ένα επίπεδο διάμηκες κύμα

ανακλάται σε μια ελεύθερη επιφάνεια, οι συνοριακές συνθήκες δεν ικανοποιούνται, αν θεωρήσουμε ως ανακλώμενο μόνο διάμηκες κύμα. Αντίθετα, ικανοποιούνται αν θεωρήσουμε ότι επιπρόσθετα ανακλάται και ένα εγκάρσιο κύμα. Γενικά όταν ένα επίπεδο διάμηκες κύμα προσπέσει στην διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων τότε θα δημιουργηθούν τέσσερα κύματα, (εικόνα 7), δύο από ανάκλαση, ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο και δύο από διάθλαση, ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο.

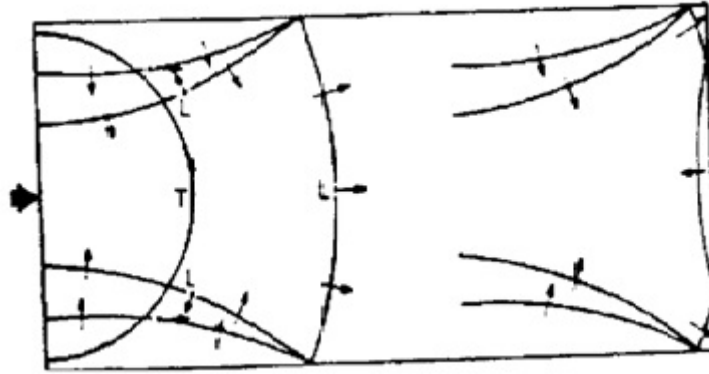


Εικόνα 7: Ανάκλαση και διάθλαση προσπίπτοντος διαμήκους κύματος σε διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων

Ισχύει επίσης ότι:

$$\frac{\sin\alpha}{c_\delta} = \frac{\sin\alpha}{c_{\delta\alpha}} = \frac{\sin\beta}{c_{\epsilon\alpha}} = \frac{\sin\gamma}{c_{\epsilon\delta}} = \frac{\sin\delta}{c_{\delta\delta}}$$

Για κάθε πρόσπτωση δεν υπάρχει πάντα ανακλώμενο εγκάρσιο κύμα. Το ανακλώμενο διαμήκες, έχει το αυτό πλάτος με το προσπίπτον, αλλά αντίθετο πρόσημο. Αν το προσπίπτον κάθετα σε επιφάνεια κύμα είναι θλιπτικό, τότε το ανακλώμενο διαμήκες είναι εφελκυστικό. Σχηματική παράσταση έχουμε στην εικόνα 8.



Εικόνα 8: Τασικά κύματα σε πλάκα

2.2 Η κυματική εξίσωση

Τα περισσότερα είδη κυμάτων εκφράζονται μαθηματικά με την κυματική εξίσωση, που είναι μία γραμμική μερική διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού:

$$\nabla^2 F = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

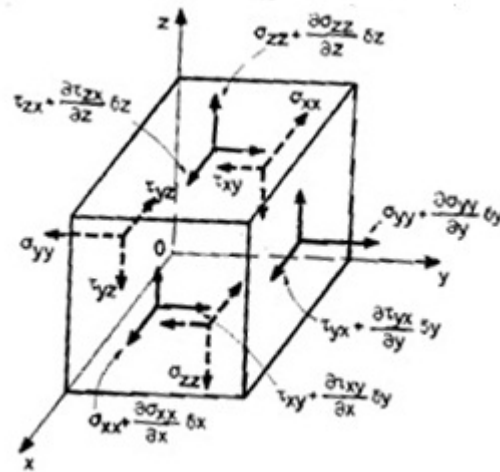
Όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής στο μέσον και F , μια χρονοεξαρτώμενη συνάρτηση, που περιγράφει την διαταραχή, πχ $F(x \pm ct)$.

Για τον καθορισμό των εξισώσεων κίνησης σε ελαστικό στερεό, θεωρούμε ένα στοιχειώδες παραλληλεπίπεδο πλευρών dx, dy, dz , όπως φαίνεται στην εικόνα 12 και θεωρούμε τις μεταβολές των τάσεων στις πλευρές του.

Από τον 2^ο νόμο κίνησης του Νεύτωνα, (για τον άξονα x αρχικά), έχουμε:

$$\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dx \cdot dy \cdot dz = (\rho \cdot dx dy dz) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του σώματος και u η μετατόπιση κατά τον άξονα x .



Εικόνα 9: Μεταβολές των τάσεων κατά τη διεύθυνση x , στο στοιχειώδες παραλ/πεδο

Για τους τρεις άξονες θα έχουμε τις γενικευμένες διαφορικές εξισώσεις μεταξύ τάσεων και μετατοπίσεων u, v, w :

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (2.3.a)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (2.3.β)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.3.γ)$$

Για ομογενές και ισότροπο ελαστικό υλικό, ισχύουν οι γνωστές σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων:

$$\sigma_{xx} = \lambda \theta = 2\mu \varepsilon_{xx} \quad (2.4.a)$$

$$\sigma_{yy} = \lambda \theta = 2\mu \varepsilon_{yy} \quad (2.4.β)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \theta = 2\mu \varepsilon_{zz} \quad (2.4.γ)$$

$$\tau_{xy} = 2G\varepsilon_{xy}, \quad \tau_{yz} = 2G\varepsilon_{yz}, \quad \tau_{zx} = 2G\varepsilon_{zx} \quad (2.4.δ.)$$

όπου G το μέτρο διάτμησης, λ, μ οι σταθερές Lamé, $\mu = G$

και θ η διόγκωση, $\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$

Οι σχέσεις μεταξύ παραμορφώσεων – μετατοπίσεων είναι:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.5.a)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.5.β)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.5.γ)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.5.δ)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.5.ε)$$

$$\varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.5.στ)$$

Έτσι καταλήγουμε στις παρακάτω εξισώσεις που εκφράζουν τις συνθήκες κίνησης:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2.6.α)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (2.6.β)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (2.6.γ)$$

Όπου ο τελεστής ∇^2 , εκφράζεται από την: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Διαφορίζοντας και τα δύο μέλη των εξισώσεων (2.6) ως προς x, y, z αντίστοιχα και προσθέτοντας έχουμε:

$$\rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \theta \quad (2.7)$$

Η εξίσωση (2.7) είναι της μορφής (2.1) και εκφράζει την κυματική εξίσωση του ισότροπου και ομογενούς ελαστικού σώματος.

2.3 Ταχύτητες κύματος

Η κυματική εξίσωση (2.7), δείχνει ότι η διόγκωση θ διαδίδεται με ταχύτητα: $\left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}$.

Διαφορίζοντας την δεύτερη και την τρίτη των σχέσεων (2.6) ως προς y, z αντίστοιχα και αφαιρώντας έχουμε:

$$\rho \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \omega_x, \quad (2.8)$$

όπου $\omega_x = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$ εκφράζει την περιστροφή γύρω από τον άξονα x , και αντίστοιχες εκφράσεις με κυκλική εναλλαγή.

Δηλαδή η περιστροφή διαδίδεται με ταχύτητα: $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$.

Επομένως στο εσωτερικό του σώματος το κύμα διαδίδεται με δύο διαφορετικές ταχύτητες:

Τα κύματα που δεν περιλαμβάνουν περιστροφές, δηλαδή τα διαμήκη, που διαδίδονται με ταχύτητα: $C_\delta = \left(\frac{\lambda+2\mu}{\rho}\right)^{1/2} = \left(\frac{3K+4G}{\rho}\right)^{1/2}$, όπου K το μέτρο δόγκωσης.

Τα κύματα που περιλαμβάνουν μόνο περιστροφές, δηλαδή τα εγκάρσια, που διαδίδονται με ταχύτητα: $C_\varepsilon = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{1/2} = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{1/2}$.

Από τις πιο πάνω εξισώσεις προκύπτει ότι παραμορφώσεις που οδηγούν σε αλλαγή όγκου αλλά όχι σχήματος (εικόνα 8), διαδίδονται με τη φασική ταχύτητα C_δ , ενώ παραμορφώσεις που οδηγούν σε αλλαγή σχήματος, χωρίς αλλαγή όγκου, (εικόνα 9), διαδίδονται με τη φασική ταχύτητα C_ε . Επίσης παρατηρείται ότι η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων είναι μεγαλύτερη των εγκάρσιων κυμάτων και ότι και οι δύο ταχύτητες δεν εξαρτώνται από την ταχύτητα κρούσεως, αλλά από τις μηχανικές σταθερές του σώματος. Αντίθετα η σωματιδιακή ταχύτητα εξαρτάται.

Η σωματιδιακή ταχύτητα διαχωρίζεται και αυτή σε δύο, στην προκαλούμενη από την δίοδο του διαμήκους με τιμή: $u_\delta = \frac{\sigma}{\rho C_\delta}$, όπου σ η υπάρχουσα στην θέση ορθή τάση, και στην προκαλούμενη από την δίοδο του εγκάρσιου, με τιμή: $u_\varepsilon = \frac{\tau}{\rho C_\varepsilon}$, όπου τ η διατμητική τάση στη υπόψη θέση.

2.4 Γενικά – Ορισμοί ταλαντώσεων

Ταλάντωση ενός υλικού σημείου ή σώματος ή συστήματος σωμάτων είναι η κίνηση του γύρω από τη θέση ισορροπίας. Το σώμα ή το σύστημα διαταράσσεται αρχικά από εξωτερικές δυνάμεις οι οποίες τείνουν να επαναφέρουν το σώμα ή το σύστημα στην ισορροπία. Μια μηχανική ταλάντωση δημιουργείται όταν το σώμα μετατοπίζεται από τη θέση ισορροπίας του. Το σώμα τείνει να επανέλθει στην ισορροπία του από την επίδραση δυνάμεων επαναφοράς οι οποίες είναι δυνάμεις βαρύτητας ή δυνάμεις ελαστικές (ελατήρια). Στην περίπτωση που απαιτείται διατήρηση των ταλαντώσεων (διαρκής ταλάντωση) του σώματος, εξασκούνται εξωτερικές δυνάμεις (χρονικά μεταβαλλόμενες ή περιοδικές) που αποτρέπουν την ισορροπία του σώματος. Η ταλάντωση ενός σώματος χαρακτηρίζεται από:

Την περίοδο της ταλάντωσης που είναι ο χρόνος ενός κύκλου κίνησης.

Την συχνότητα της ταλάντωσης που είναι ο αριθμός των κύκλων κίνησης στη μονάδα του χρόνου.

Το πλάτος της ταλάντωσης που είναι η μέγιστη απομάκρυνση του σώματος από τη θέση ισορροπίας.

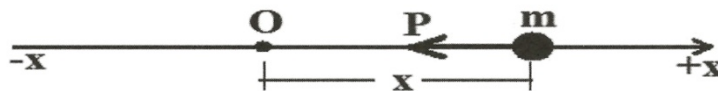
Όταν η ταλάντωση διατηρείται από τις δυνάμεις επαναφοράς, η ταλάντωση καλείται ελεύθερη ταλάντωση. Εάν όμως επιδρούν δυνάμεις αντίθετες προς τις δυνάμεις επαναφοράς π.χ. τριβές, αντιστάσεις κλπ, η ταλάντωση καλείται αποσβεννυόμενη.

Η ταλάντωση ενός σώματος μπορεί να είναι:

- Ελεύθερη ταλάντωση
- Ταλάντωση με επίδραση σταθεράς δύναμης
- Ταλάντωση με επίδραση δύναμης ανάλογης της ταχύτητας
- Ταλάντωση με επίδραση δύναμης ανάλογης του τετραγώνου της ταχύτητας
- Εξηναγκασμένη ταλάντωση.

2.5 Ελεύθερη ταλάντωση

Έστω υλικό σημείο μάζας m κινούμενο ευθύγραμμα χωρίς τριβές υπό την επίδραση δύναμης P αντιθέτου φοράς, προς την κίνηση του και κατευθυνόμενη προς σταθερό κέντρο, όπως φαίνεται στην εικόνα 10. Τέτοια δύναμη προκύπτει από ελατήριο συνδεδεμένο σε σταθερό σημείο και στο σώμα.



Εικόνα 10: Σχηματική αναπαράσταση ελεύθερης ταλάντωσης

Από την εξίσωση της δυναμικής $P = m \cdot \gamma$ προκύπτει:

$$P = -kx = m\gamma = m\ddot{x} \quad (2.9)$$

όπου k είναι η σταθερά αναλογίας της δύναμης ή σταθερά του ελατηρίου και x είναι η μετατόπιση του υλικού σημείου ή σώματος ή επιμήκυνση του ελατηρίου. Από την εξίσωση (2.9) προκύπτει:

$$mx + k\ddot{x} = 0 \quad (2.10)$$

Η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται στην:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0, \quad \text{με} \quad \omega^2 = \frac{k}{m} \quad (2.11)$$

Όπου το ω καλείται κυκλική συχνότητα και είναι ίση με:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \quad (2.12)$$

Όπου ν είναι η συχνότητα της ταλάντωσης και T είναι η περίοδος της ταλάντωσης.

Η περίοδος της ταλάντωσης είναι:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{k/m}} = 2\pi \sqrt{m/k} \quad (2.13)$$

Η εξίσωση (2.11) είναι ομογενής διαφορική εξίσωση δευτέρας τάξεως με σταθερούς συντελεστές. Η λύση της διαφορικής αυτής εξίσωσης είναι:

$$\text{Χαρακτηριστικό πολυώνυμο: } \rho^2 + \omega^2 = 0 \rightarrow \rho_{1,2} = \pm i\omega$$

Άρα η γενική λύση της διαφορικής είναι:

$$x = Ae^{\rho_1 t} + Be^{\rho_2 t} = Ae^{i\omega t} + Be^{-i\omega t} = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t \quad (2.14)$$

Οι σταθερές C_1 και C_2 υπολογίζονται από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Αν για $t=0$, είναι $x=x_0$, και $u = \dot{x} = u_0$, παραγωγίζοντας την εξίσωση (2.12) προκύπτει:

$$\dot{x} = u = \omega C_1 \cos \omega t - \omega C_2 \sin \omega t \quad (2.15)$$

Από τις εξισώσεις (2.14) και (2.15), σύμφωνα με τις αρχικές συνθήκες, οι σταθερές C_1 και C_2 είναι: $C_1 = \frac{u_0}{\omega}$, $C_2 = x_0$

Αντικαθιστώντας τις σταθερές στην παραπάνω εξίσωση (2.14) έχουμε:

$$x = \frac{u_0}{\omega} \sin \omega t + x_0 \cos \omega t \quad (2.16)$$

Η εξίσωση (2.16) περιγράφει την κίνηση του σώματος, η οποία είναι ελεύθερη ταλάντωση και καλείται αρμονική ή ημιτονοειδής ταλάντωση.

Τα μεγέθη συχνότητα ν , κυκλική συχνότητα ω και περίοδος T είναι αναλλοίωτα και δεν εξαρτώνται από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Στη γενική κίνηση (ταλάντωση) του σώματος, η διαφορική εξίσωση (2.11) της κίνησης γράφεται:

$$\ddot{r} + \omega^2 r = 0 \quad (2.17)$$

Με λύση:

$$r = C_1 \sin \omega t - C_2 \cos \omega t \quad (2.18)$$

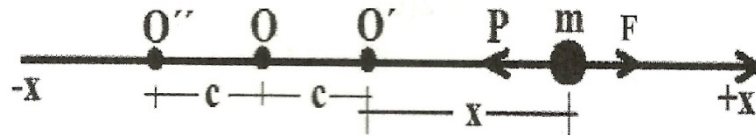
Και ταχύτητα:

$$u = \dot{r} = \omega C_1 \cos \omega t - \omega C_2 \sin \omega t \quad (2.19)$$

Όπου C_1, C_2 είναι διανύσματα 2×1 . Η λύση της εξίσωσης (2.17) είναι ταλάντωση ευθύγραμμη ή κυκλική ή ελλειπτική, ανάλογα με τις σταθερές.

2.6 Ταλάντωση με επίδραση σταθερής δύναμης

Έστω υλικό σημείο μάζας m κινούμενο ευθύγραμμο υπό την επίδραση της δύναμης επαναφοράς P (αρμονική ταλάντωση). Συγχρόνως, επιδρά στο υλικό σημείο σταθερή δύναμη F αντίθετη προς την κίνηση, όπως φαίνεται στην εικόνα 11:



Εικόνα 11: Σχηματική αναπαράσταση ταλάντωσης με επίδραση σταθερής δύναμης

Το σημείο ισορροπίας δεν είναι το O , όπου μηδενίζεται η δύναμη του ελατηρίου κατά την ελεύθερη ταλάντωση, αλλά το σημείο O' ώστε να ισχύει:

$$P = F \rightarrow k(OO') = F \rightarrow (OO') = c = \frac{F}{k} \quad (2.20)$$

Από την εξίσωση της δυναμικής $P = m \cdot \gamma$ προκύπτει:

$$m\ddot{x} = P + F = -k(c + x) + F = -kc - kx + kc = -kx \quad (2.21)$$

και:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \rightarrow \ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \rightarrow \ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (2.22)$$

Με

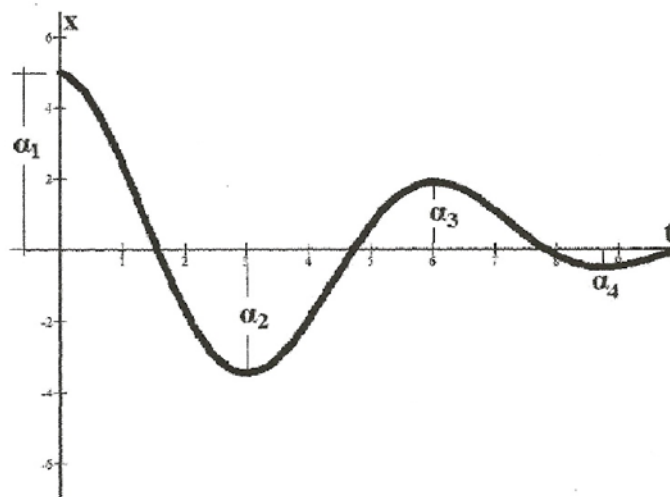
$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (2.23)$$

Από την κυκλική συχνότητα ω και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (2.20), η περίοδος της ταλάντωσης είναι:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{cm}{F}} \quad (2.24)$$

δηλαδή, η κίνηση είναι ισόχρονη με περίοδο ίδια με την περίοδο της ελεύθερης αρμονικής ταλάντωσης. Επομένως, η κίνηση αυτή είναι ελεύθερη

αρμονική ταλάντωση με κέντρο ισορροπίας το σημείο O' μετατοπισμένο κατά c προς τη φορά της F . Τα εκάστοτε σημεία ισορροπίας μεταφέρονται κατά τη σταθερή απόσταση c έτσι ώστε το πλάτος της ελεύθερης ταλάντωσης να μειώνεται κατά την ποσότητα c . Δύο διαδοχικά πλάτη της ταλάντωσης θα είναι: $a_n - a_{n+1} = 2c$. Αυτό σημαίνει ότι η ελεύθερη ταλάντωση είναι αποσβεννυόμενη κατά αριθμητική πρόοδο, όπως φαίνεται στην εικόνα 12.

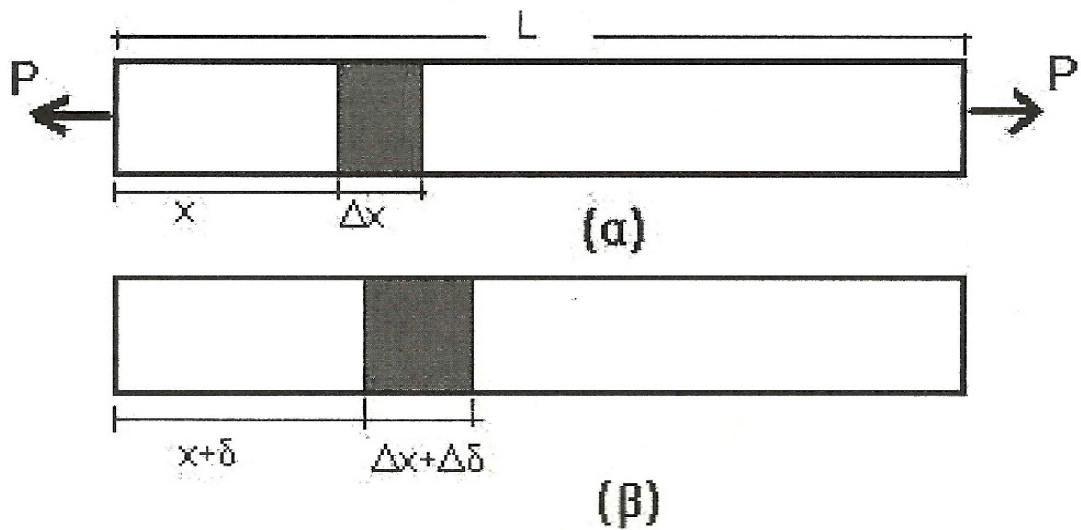


Εικόνα 12: Αποσβεννυόμενη αρμονική ταλάντωση

2.2 Παραμόρφωση

2.2.1 Παραμόρφωση ράβδου

Έστω ράβδος σταθερής διατομής, μήκους L , όπως φαίνεται στην εικόνα 13(a). Το στοιχείο μήκους Δx , στη θέση x , μετά τη φόρτιση της ράβδου θα επιμηκυνθεί κατά $\Delta \delta$.



Εικόνα 13: Ορθή παραμόρφωση ράβδου

Ως ορθή παραμόρφωση ε , ορίζεται η σχέση:

$$\varepsilon = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta \delta}{\Delta x} = \frac{d\delta}{dx} \quad (2.2.1)$$

Και εξ' αυτής προκύπτει:

$$\int_0^L \varepsilon dx = \int_0^\delta d\delta \quad (2.2.2)$$

Εάν η ε είναι σταθερή για κάθε x , τότε:

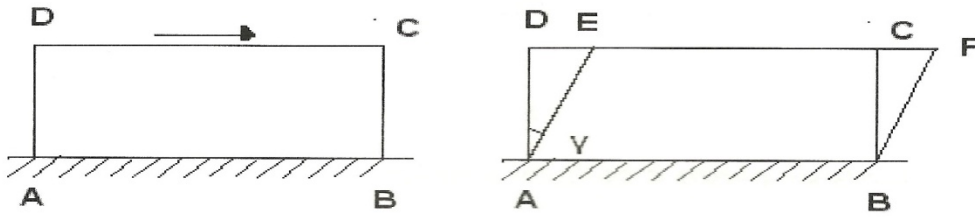
$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.2.3)$$

όπου δ είναι η ολική επιμήκυνση της ράβδου. Η σχέση (2.2.3) εκφράζει την ανοιγμένη μήκυνση ή την ορθή παραμόρφωση (ανοιγμένη παραμόρφωση στο μήκος L). Εκτός της ανοιγμένης παραμόρφωσης υπολογίζεται η πραγματική ή λογαριθμική παραμόρφωση. Σε κάθε βήμα φόρτισης η θέση x γίνεται $x + \delta$ και το στοιχείο Δx γίνεται $\Delta x + \Delta \delta$, όπως φαίνεται στην εικόνα 13(β).

Η παραμόρφωση θα είναι:

$$\varepsilon_l = \int_L^{L+\delta} \frac{dx}{x} = \ln \frac{L+\delta}{L} = \ln \left(1 + \frac{\delta}{L} \right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.2.4)$$

Έστω τώρα ότι σε ένα στοιχείο ABCD εφαρμόζεται μία διατμητική τάση. Έστω δε ότι το στοιχείο θα βρεθεί την θέση ABFE, όπως φαίνεται στην εικόνα 14.



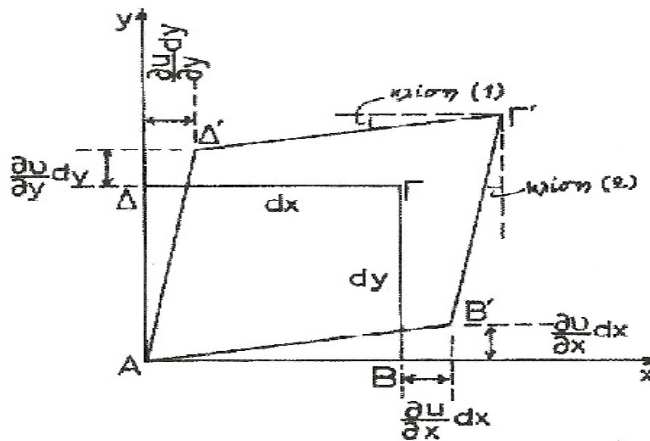
Εικόνα 14: Διατμητική παραμόρφωση

Ονομάζουμε διατμητική παραμόρφωση το μέγεθος: $\tan \gamma = \frac{DE}{AD}$, όπου για πολύ μικρές γωνίες $\tan \gamma = \gamma$ (γ σε rad). Η διατμητική παραμόρφωση είναι θετική όταν μειώνεται η αρχικά ορθή γωνία.

Η ορθή και η διατμητική παραμόρφωση είναι αδιάστατα μεγέθη, δηλαδή καθαροί αριθμοί και συνήθως εκφράζονται % ή σε μ , όπου $\mu = 10^{-6}$.

2.2.2 Παραμόρφωση στο επίπεδο

Μικρό ορθογώνιο στοιχείο ABΓΔ (επίπεδη κατάσταση) μετά την παραμόρφωση μεταβάλλεται σε μέγεθος και σχήμα όπως φαίνεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15: Παραμόρφωση του στοιχείου ABΓΔ

Οι παραμορφώσεις του στοιχείου είναι οι ορθές ϵ_{ii} (μεταβολή μήκους) και οι διατμητικές ϵ_{ij} , με $i \neq j$ (μεταβολή γωνιών).

Οι ορθές παραμορφώσεις του στοιχείου είναι:

$$\epsilon_{xx} = \frac{AB' - AB}{AB} = \frac{\frac{\partial u}{\partial x} dx}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.2.5)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{A\Delta' - A\Delta}{A\Delta} = \frac{\frac{\partial v}{\partial y} dy}{dy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.2.6)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.2.7)$$

Όπου u , v , w , είναι οι μετατοπίσεις στις τρεις διευθύνσεις x , y , w αντίστοιχα.

Οι διατμητικές παραμορφώσεις υπολογίζονται από τις κλίσεις των πλευρών του παραμορφωμένου στοιχείου:

$$\text{κλίση (1)} = \tan(1) = \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{dx} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.2.8)$$

$$\text{κλίση (2)} = \tan(2) = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{dy} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.2.9)$$

και για μικρές γωνίες κλίσης (μικρές ελαστικές παραμορφώσεις) η συνολική μεταβολή της γωνίας του στοιχείου ορίζει τη διατμητική παραμόρφωση γ_{xy} (μεταβολή γωνίας σε rad) η οποία ισούται:

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.2.10)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.2.11)$$

Και ανάλογα με τις άλλες δύο διατμητικές παραμορφώσεις προκύπτει:

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\gamma_{xz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.2.12)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.2.13)$$

Ο τανυστής των παραμορφώσεων λοιπόν είναι:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} = \gamma_{xy}/2 & \varepsilon_{xz} = \gamma_{xz}/2 \\ \varepsilon_{yx} = \gamma_{yx}/2 & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} = \gamma_{yz}/2 \\ \varepsilon_{zx} = \gamma_{zx}/2 & \varepsilon_{zy} = \gamma_{zy}/2 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.2.14)$$

Και για την επίπεδη κατάσταση είναι:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} = \gamma_{xy}/2 \\ \varepsilon_{yx} = \gamma_{yx}/2 & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \quad (2.2.15)$$

Οι κύριες παραμορφώσεις υπολογίζονται ως εξής:

$$|\varepsilon_{ij} - \lambda I| = 0 \quad (2.2.16)$$

$$(\varepsilon_{ij} - \lambda_{\kappa} I)n = 0, \quad n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1 \quad (2.2.17)$$

Στην επίπεδη κατάσταση οι κύριες παραμορφώσεις δίνονται:

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + 4\varepsilon_{xy}^2} \quad (2.2.18)$$

$$\tan 2\theta_0 = \frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}} \quad (2.2.19)$$

Η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma^{max} = 2\varepsilon^{max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + 4\varepsilon_{xy}^2} \quad (2.2.20)$$

Κεφάλαιο 3

Μετρητές Παραμόρφωσης – Το μετρητικό σύστημα

3.1 Μετρητές παραμόρφωσης (μηκυνσιόμετρα)

Μηκυνσιόμετρα ονομάζονται τα όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται για την απευθείας μέτρηση των παραμορφώσεων. Τα παλαιότερα όργανα είναι εκείνα που χρησιμοποιούν κατευθείαν μηχανικές μετρήσεις της μεταβολής του μήκους ενός δοκιμίου, η οποία με ένα σύστημα μοχλών ή οδοντωτών τροχών και ράβδων μεγεθύνεται και μεταφέρεται στην κλίμακα αναγνώσεως (άντυγα) του οργάνου. Τα μηκυνσιόμετρα αυτά λόγω του βάρους τους, της χαμηλής ανταποκρίσεως στην συχνότητα μεταβολής του φορτίου καθώς και του περιορισμένου εύρους της κλίμακας ανάγνωσης, μειονεκτούν έναντι των ηλεκτρικών μηκυνσιόμετρων, αλλά παρόλα αυτά αποτελούν βασικά στοιχεία του εξοπλισμού τόσο ενός συγχρόνου επιστημονικού εργαστηρίου αντοχής υλικών όσο και ενός σωστά οργανωμένου εργοταξίου.

Τα μηχανικά μηκυνσιόμετρα εφάπτονται με δύο ακροδέκτες προς το υπό μέτρηση δοκίμιο, εκ των οποίων ο ένας είναι ακλόνητος και ο άλλος μπορεί να μεταφέρει τη μεταβολή του μήκους στο δείκτη του οργάνου, ο οποίος κινούμενος μπροστά από την άντυγα μας δίνει σε κάθε στιγμή την παραμόρφωση. Το πρόβλημα είναι να έχουμε την κατάλληλη μεγέθυνση της παραμορφώσεως με τη βοήθεια των οργάνων ώστε να μπορούμε να την αναγνώσουμε στην κλίμακα, πράγμα που όπως ξέρουμε δεν ισχύει μόνο για τα μηκυνσιόμετρα αλλά και για κάθε μετρητικό όργανο.

Για τις μετρήσεις με τα μηχανικά μηκυνσιόμετρα θα πρέπει να ορίσουμε τις έννοιες: βάση μέτρησης, ευαισθησία, μεγέθυνση, πεδίο μέτρησης.

Ονομάζουμε βάση μέτρησης λ , την αρχική απόσταση των ακροδεκτών του οργάνου που καθορίζει και το μήκος πάνω στο υπό εξέταση δοκίμιο, του οποίου ζητούμε να μετρήσουμε τη μεταβολή. Έστω ότι το μήκος μεταβάλλεται κατά $\Delta\lambda$. Ο παράγοντας m με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιασθεί, η μεταβολή αυτή για να μας δώσει την ένδειξη a στην άντυγα του οργάνου, ονομάζεται παράγοντας πολλαπλασιασμού ή μεγέθυνση του οργάνου. Αφού λοιπόν $a = m \Delta\lambda$ η ανοιγμένη παραμόρφωση $\varepsilon = \Delta\lambda/\lambda$, η οποία μετράται από το όργανο θα δίνεται από τη σχέση: $\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{a}{m\lambda}$ (3.1).

Ονομάζεται ευαισθησία του οργάνου, η ελαχίστη τιμή του μετρουμένου μεγέθους την οποία μπορεί να δώσει το όργανο και η οποία θα προκύπτει από την σχέση (3.1) για $a=1$. Αντίστοιχα ονομάζεται πεδίο μετρήσεως του οργάνου, η μέγιστη τιμή του μετρουμένου μεγέθους την οποία μπορεί να δώσει το όργανο.

Ονομάζεται σφάλμα του οργάνου η διαφορά μεταξύ της αληθούς τιμής της παραμόρφωσης και εκείνης την οποία μετράει το όργανο.

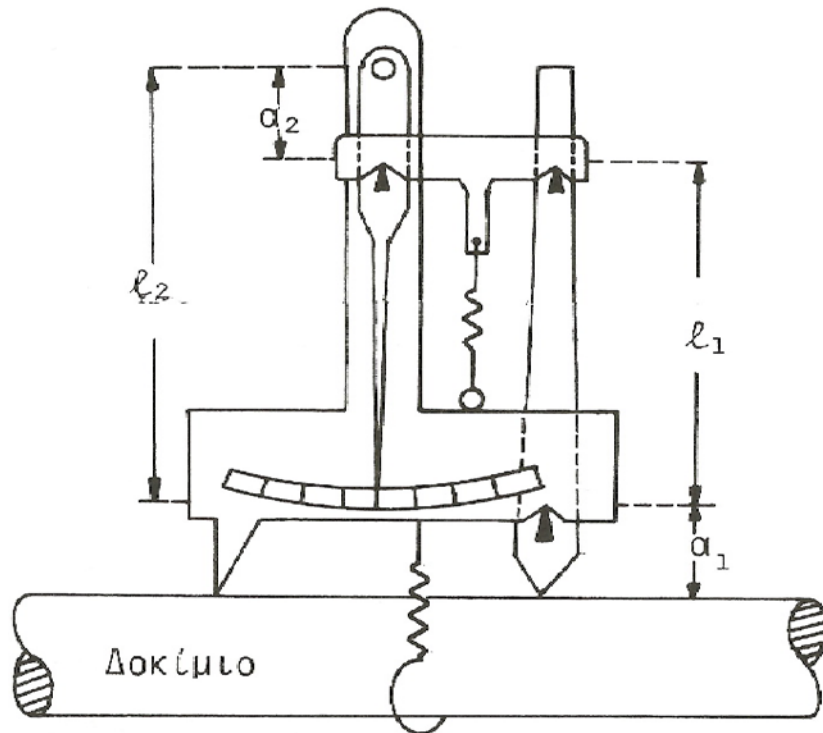
Επειδή η μέγιστη ένδειξη στην κλίμακα των οργάνων μπορεί να μην καλύπτει το επιθυμητό εύρος του μετρουμένου μεγέθους, αναγκαζόμαστε πολλές φορές να σταματάμε τη φόρτιση, να επαναφέρουμε το δείκτη του οργάνου στο μηδέν και να συνεχίζουμε, λαμβάνοντας υπόψη ότι στις ενδείξεις που θα πάρουμε θα πρέπει να προσθέσουμε την τελευταία τιμή που είχαμε πριν από την επαναφορά του δείκτη στο μηδέν. Η διαδικασία αυτή επαναφοράς του δείκτη στο μηδέν, η οποία μπορεί να γίνει περισσότερες από μία φορές, ονομάζεται επανάταξη του οργάνου.

3.1.1 Μηκυσιόμετρο Kennedy-Krupp

Είναι μηχανικό μηκυσιόμετρο το οποίο αποτελείται από ένα στέλεχος που στο ένα του άκρο έχει ένα σταθερό ακροδέκτη (ακίδα), ενώ στο άλλο έναν περιστρεπτό, έτσι ώστε η μεταβολή του μήκους να μπορεί να μεταφερθεί μέσω ενός δείκτη, στην άντυγα του οργάνου. Η συνηθισμένη βάση μετρήσεως είναι 100 mm, όπου με κατάλληλη προσαρμογή μπορεί να φθάσει μέχρι τα 200 mm. Η μεγέθυνση του οργάνου είναι συνήθως $m=20$, οπότε η ένδειξη $a = 4$ αντιστοιχεί σύμφωνα με την σχέση (3.1) σε παραμόρφωση: $\varepsilon = \frac{4}{100 \cdot 20} = 0,002$. Αυτή η χαρακτηριστική ανάγνωση ($a=4$) είναι εκείνη που όπως αναφέρεται στο πείραμα εφελκυσμού χρησιμεύει για τον πειραματικό προσδιορισμό του συμβατικού ορίου διαρροής. Συνήθως, το μηκυσιόμετρο αυτό όπως και το μηκυσιόμετρο Huggenberger έχει διπλά στελέχη με δύο άντυγες που προσαρμόζονται συμμετρικά στο δοκίμιο. Έτσι για οποιεσδήποτε μετρήσεις λαμβάνουμε υπόψη το μέσο όρο των ενδείξεων των αντύγων.

3.1.2 Μηκυσιόμετρο Huggenberger

Το μηκυσιόμετρο αυτό που με ένα διπλό σύστημα μοχλών μεταφέρει την παραμόρφωση, μέσω του δείκτη στην άντυγα του οργάνου, παριστάνεται στην εικόνα 16 και είναι επίσης μηχανικό. Η μεγέθυνση του οργάνου δίνεται από την σχέση: $m = \frac{l_1 l_2}{a_1 a_2}$, όπου l_1, l_2, a_1, a_2 , τα μήκη που φαίνονται στην εικόνα 16.



Εικόνα 16: Μηκυνσιόμετρο Huggenberger

Η μεγέθυνση αυτή κυμαίνεται από 300 έως 2000, ενώ η βάση μέτρησης l κυμαίνεται από 20 mm έως 1000 mm. Τα όργανα αυτά είναι αρκετά ακριβή και χρησιμοποιούνται τόσο στα εργαστήρια όσο και στις κατασκευές. Όμως είναι ευαίσθητα σε δονήσεις που μπορεί να αλλοιώσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

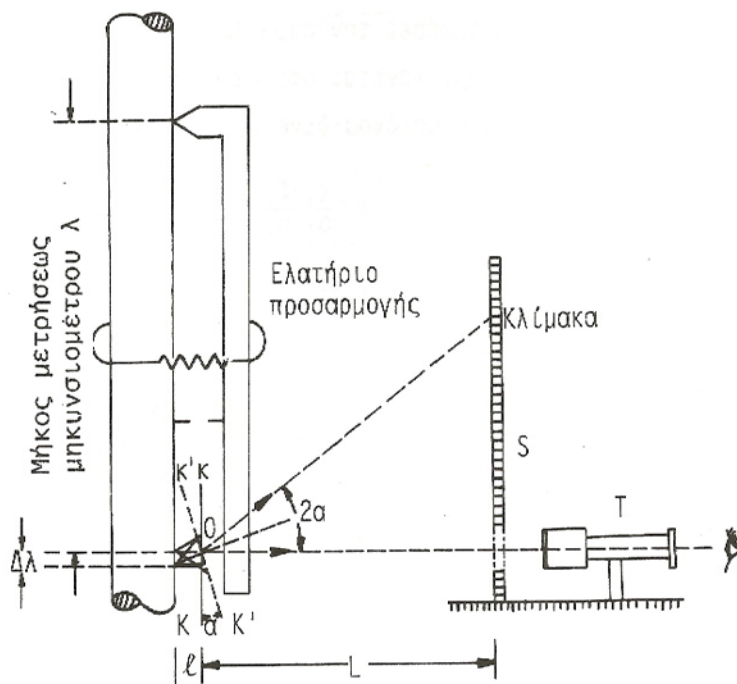
3.1.3 Μηκυνσιόμετρα Whittemore και Berry

Και τα δύο ανήκουν στα μηχανικά ωρολογιακά μηκυνσιόμετρα στα οποία η άντυγα με το δείκτη εγκλείονται σε μια πυξίδα που έχει τη μορφή ρολογιού. Το πρώτο μεταφέρει την παραμόρφωση με τη βοήθεια ενός συστήματος οδοντωτών τροχών και ράβδων στο δείκτη του οργάνου, ενώ το δεύτερο είναι συνδυασμός αυτού του συστήματος με μοχλούς. Στα συνηθισμένα ωρολογιακά μηκυνσιόμετρα μια πλήρης περιστροφή του δείκτη πάνω στην άντυγα που είναι βαθμονομημένη από 0 έως 100, αντιστοιχεί σε μετατόπιση του ακροδέκτη του οργάνου κατά 1 mm και επομένως η μετατόπιση κατά μία χαραγή αντιστοιχεί σε μεταβολή μήκους κατά 0.01 mm.

3.1.4 Μηκυνσιόμετρο Martens

Το μηκυνσιόμετρο Martens αποτελείται από στέλεχος που στο ένα άκρο έχει μια σταθερή ακίδα και στο άλλο μια τριγωνική περιστρεπτή περι-

άξονα O κάθετο στο επίπεδο της εικόνας (εικόνα 17). Η ακίδα αυτή έχει προσαρμοσμένο στη βάση της ένα επίπεδο κάτοπτρο KK . Καθώς η ακίδα περιστρέφεται, παρακολουθώντας την επιμήκυνση $\Delta\lambda$ του δοκιμίου, το ίχνος μιας φωτεινής ακτίνας που στέλλεται προς το κάτοπτρο αποκλίνει και με τη βοήθεια ενός τηλεσκοπικού φακού T , η απόκλιση αυτή S μετρείται πάνω σε μια κλίμακα. Ονομάζεται μεγέθυνση του οργάνου ο λόγος του μέτρου της αποκλίσεως S προς την επιμήκυνση $\Delta\lambda$, δηλαδή: $m = \frac{S}{\Delta\lambda}$.



Εικόνα 17: Μηκυνσιόμετρο Martens

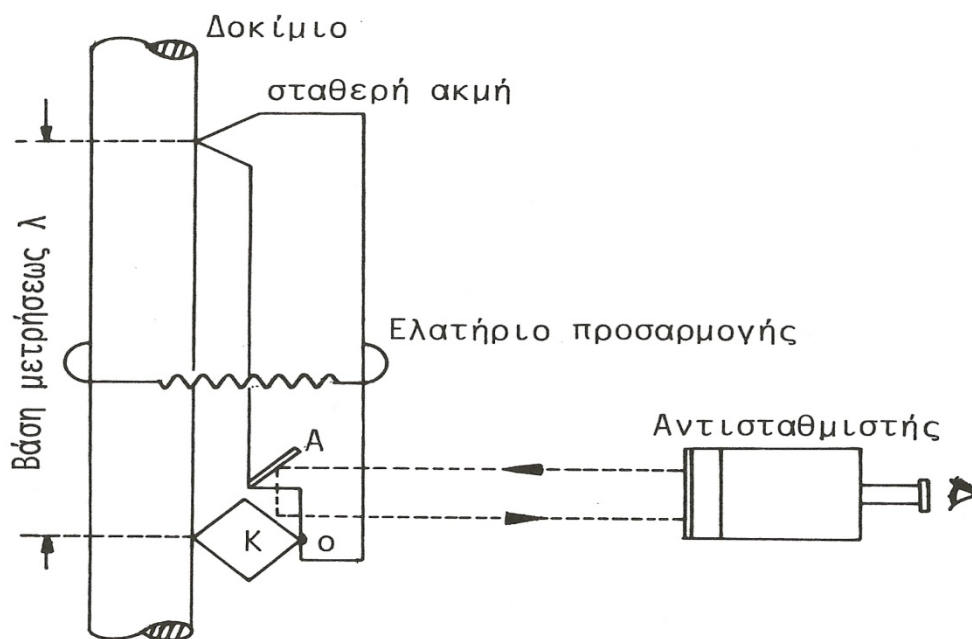
Εάν η γωνία προσπτώσεως a είναι μικρή, είναι φανερό από το σχήμα ότι:

$m = \frac{S}{\Delta\lambda} = \frac{L \tan 2a}{l \sin a} \approx \frac{2L}{l}$, όπου L η απόσταση κατόπτρου και κλίμακας, ενώ l η απόσταση κατόπτρου και δοκιμίου.

Με το μηκυνσιόμετρο αυτό επιτυγχάνεται συνήθως μεγέθυνση της τάξης του 1000, ενώ η μικρότερη βάση μετρήσεως λ για τα μηκυνσιόμετρα αυτά είναι 5cm. Τα όργανα αυτά παρουσιάζουν πολλά σφάλματα λόγω της κατασκευής τους, αλλά παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται πολλές φορές για περιπτώσεις όπου απαιτούνται μικρές σχετικά μεγεθύνσεις. Το μηκυνσιόμετρο αυτό ανήκει στην κατηγορία των μηχανικών-οπτικών μηκυνσιομέτρων.

3.1.5 Μηκυσιόμετρο Tuckerman

Το οπτικό αυτό μηκυσιόμετρο που φαίνεται στην εικόνα 18, στο ένα άκρο έχει μια σταθερή ακίδα, ενώ στο άλλο υπάρχει ένα σύστημα που αποτελείται από ένα ακίνητο κάτοπτρο A και ένα κινητό K που είναι προσαρμοσμένο σε μια πρισματική επιφάνεια, περιστρεπτή μέσα σε μια κατάλληλη υποδοχή θ , παρακολουθώντας έτσι την επιμήκυνση του δοκιμίου. Το σύστημα έχει προσοφθάλμιο φακό και κλίμακα που είναι προσαρμοσμένα σε έναν αντισταθμιστή που το κύριο μέρος του είναι μια κατάλληλη επτάεδρη πρισματική επιφάνεια. Με την ανάκλαση της φωτεινής ακτίνας στα κάτοπτρα και τις επιφάνειες του πρίσματος του αντισταθμιστή επιτυγχάνεται να μπορεί να εκτιμηθεί η σχετική περιστροφή μεταξύ του κινητού και του ακινήτου κατόπτρου και επομένως να μπορεί να μηδενισθεί το αποτέλεσμα της σχετικής περιστροφής του ανακλώντος κατόπτρου και του δοκιμίου που θα οφείλεται στην επιμήκυνση του τελευταίου. Το όργανο είναι ακριβέστατο με μεγέθυνση της τάξεως του 2500.

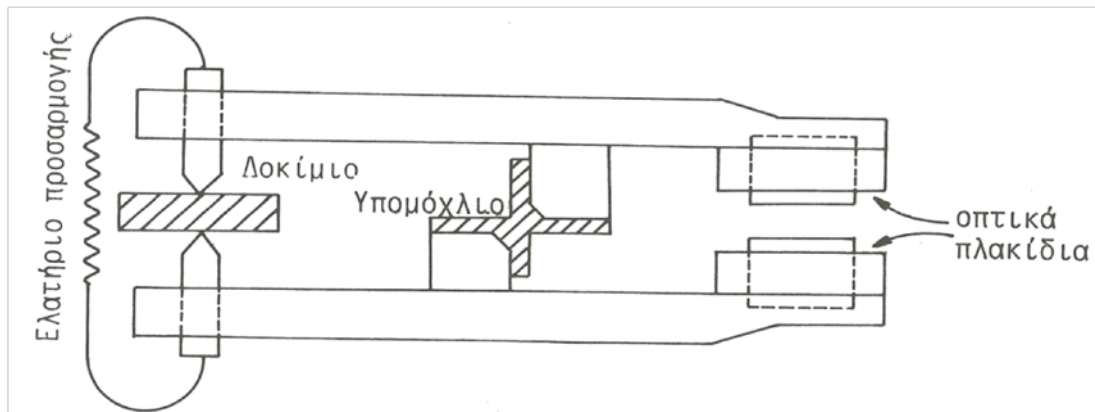


Εικόνα 18: Μηκυσιόμετρο Tuckerman

3.1.6 Μηκυσιόμετρο Vose

Το μηκυσιόμετρο αυτό που φαίνεται στην εικόνα 19 μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα καθαρό συμβολόμετρο. Δύο οπτικά πλακίδια συνδέονται με κατάλληλο τρόπο προς τις αντικείμενες επιφάνειες του προς μέτρηση δοκιμίου. Εφόσον το δοκίμιο επιμηκύνεται θα υπάρξει σχετική μετατόπιση των πλακιδίων έτσι ώστε μια μονοχρωματική φωτεινή ακτινοβολία, μετά από

διπλή ανάκλαση στα πλακίδια κατά την έξοδο της θα εμφανίζει πεδίο κροσσών συμβολής.



Εικόνα 19: Μηκυσιόμετρο Vose

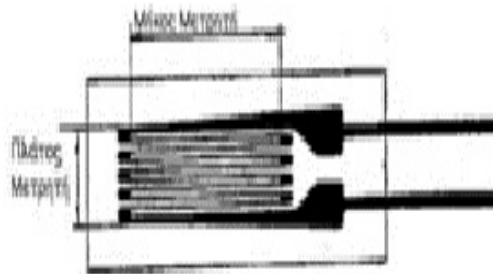
Είναι γνωστό ότι η διέλευση ενός κροσσού από το σταυρόνημα ενός τηλεσκοπικού φακού παρατηρήσεως αντιστοιχεί σε σχετική μετατόπιση των οπτικών επιπέδων κατά $\lambda/2$ όπου λ το μήκος κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας. Τα μηκυσιόμετρα αυτά είναι μεγάλης ακριβείας και δεν χρησιμοποιούνται παρά μόνο στα επιστημονικά εργαστήρια δεδομένου ότι είναι πολύ ευαίσθητα στους οποιουσδήποτε κραδασμούς. Τα μηκυσιόμετρα αυτά τα χρησιμοποιούμε για να μετρούμε κυρίως εγκάρσιες παραμορφώσεις, ενώ εξάλλου με τη βοήθεια τους ελέγχουμε την ακρίβεια των ενδείξεων των μηχανικών μηκυσιομέτρων.

3.1.7 Ηλεκτρομηκυσιόμετρα (Strain gauges)

Στην παρούσα εργασία, προκειμένου να μετρηθεί η παραμόρφωση των δοκιμίων, που θα προκληθεί από την κρουστική καταπόνηση τους, επικολλήθηκαν σε κατάλληλα σημεία τους, ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης.



Εικόνα 20: Ηλεκτρομηκυνσιόμετρα



Εικόνα 21: Ηλεκτρομηκυνσιόμετρο

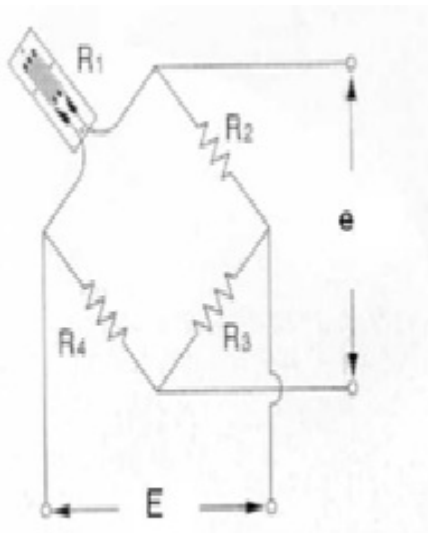
Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, όπως φαίνονται στην εικόνα 20 είναι ωμικές αντιστάσεις, ιδιαίτερα ευαίσθητες στην αλλαγή του μήκους τους. Το μήκος και το πλάτος του μετρητή καθώς και η αντίστασή του είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά του και αναφέρονται στον τύπο του. Όπως είναι γνωστό από τον ηλεκτρισμό, η αντίσταση, R , ηλεκτρικού αγωγού μήκους, L , ειδικής αντίστασης, ρ και εμβαδού διατομής, S , δίνεται από την σχέση: $R = \rho \frac{L}{S}$. Επομένως μεταβολή του μήκους του αγωγού επιφέρει αναλόγως, μεταβολή στην ηλεκτρική του αντίσταση.

Επίσης είναι γνωστό ότι κατά την μονοαξονική καταπόνηση σώματος, σε εφελκυσμό ή θλίψη, το μήκος του, L , θα υποστεί μεταβολή, ΔL , οπότε η ορθή παραμόρφωση, ε , δίνεται από την σχέση: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$.

Επομένως όταν ένα δοκίμιο, στο οποίο έχει κολληθεί ηλεκτρικός μετρητής παραμόρφωσης, υποστεί εφελκυστική ή θλιπτική καταπόνηση, τότε η ορθή παραμόρφωση του, είναι ανάλογη με την μεταβολή της αντίστασης του ηλεκτρικού μετρητή παραμόρφωσης: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R/R}{K}$, όπου R ,

η αντίσταση του μετρητή, ΔR , η μεταβολή της αντίστασής του η οφειλόμενη στην παραμόρφωση του δοκιμίου και K ο συντελεστής του μετρητή, (gauge factor), που δίνεται από τον κατασκευαστή.

Επειδή η μεταβολή της αντίστασης, ΔR , του μετρητή είναι εν γένει μικρή, προκειμένου να μετρηθεί και να έχουμε έτσι την τιμή της παραμόρφωσης, απαιτείται η αντίσταση του μετρητή να αποτελεί τμήμα του κυκλώματος μιας "γέφυρας Wheatstone", όπως φαίνεται στην εικόνα 22.



Εικόνα 22: Γέφυρα Wheatstone

όπου e , είναι η τάση εξόδου, E , η τάση της γέφυρας, R_1 η αντίσταση του μετρητή και $R_2 \sim R_4$, γνωστές σταθερές αντιστάσεις.

Τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης:

$$e = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E$$

Στην περίπτωση μεταβολής της αντίστασης του μετρητή, ΔR_1 λόγω της παραμόρφωσης του δοκιμίου, δημιουργείται ανάλογη μεταβολή, Δe , στην τάση εξόδου της γέφυρας, η οποία στην περίπτωση που όλες οι αντιστάσεις είναι ίσες γίνεται:

$$\Delta e = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} E$$

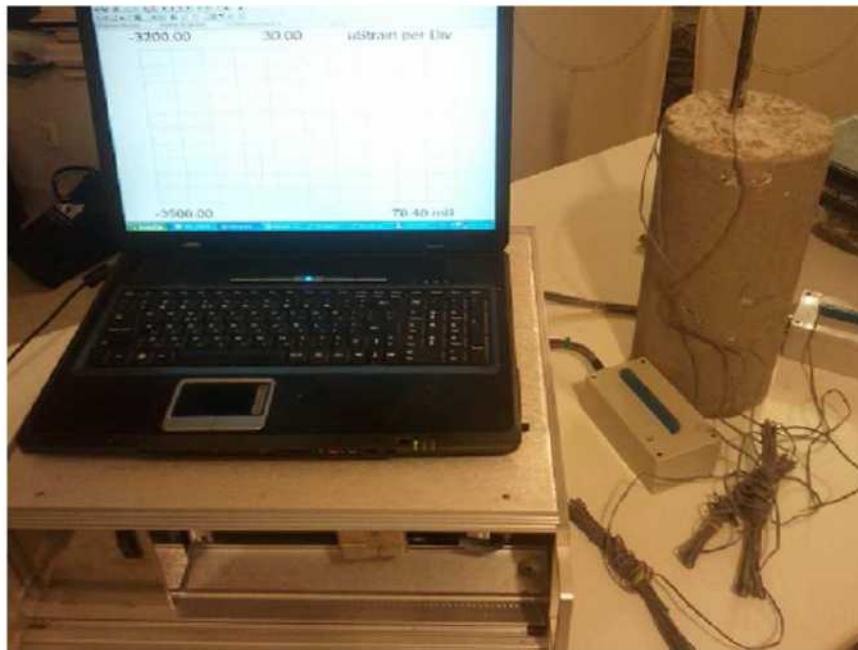
Και επειδή $\Delta R \ll R$, είναι:

$$\Delta e = \frac{\Delta R}{4R} E = \frac{E}{4} K \epsilon$$

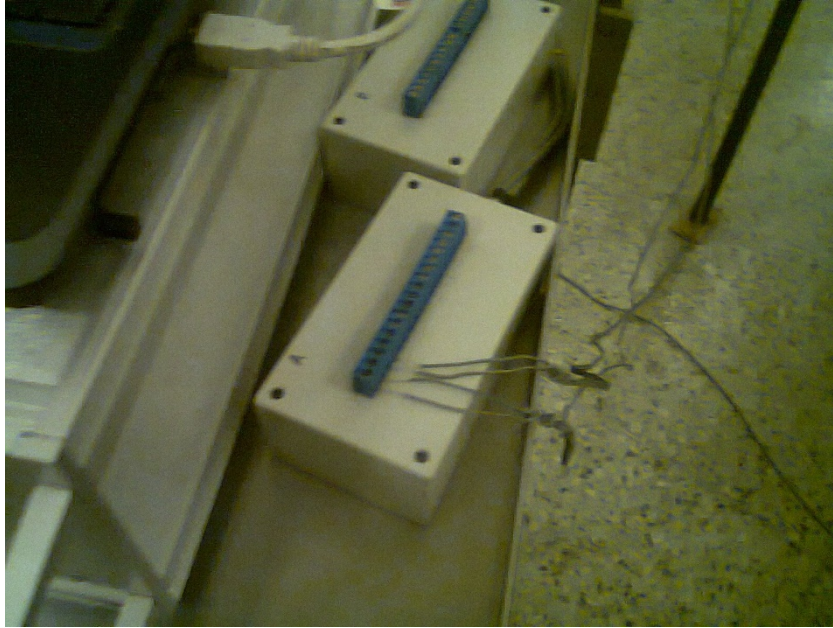
Έτσι από την διαφορά δυναμικού Δe της τάσης εξόδου της γέφυρας, μετρείται άμεσα η παραμόρφωση, ϵ , με αναλογικό ή ψηφιακό τρόπο.

3.2 Το μετρητικό σύστημα

Προκειμένου να καταγραφεί η κυματομορφή και να μετρηθούν οι παραμορφώσεις στα επιλεγμένα σημεία των δοκιμών, απαιτείται μετρητικό σύστημα κατάλληλο για δυναμικές μετρήσεις. Χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό, το πολυκαναλικό σύστημα ταχείας λήψης, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων, (Data Acquisition System), που είναι το Model 6035 της PACIFIC INSTRUMENTS, που διαθέτει το Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του ΕΜΠ, (εικόνα 23).



Εικόνα 23: Το μετρητικό σύστημα



Εικόνα 24: Το μετρητικό σύστημα

Το μετρητικό σύστημα αποτελείται από τα εξής:

- Την κεντρική μονάδα με βυσματούμενες κάρτες συλλογής δεδομένων, δυνατότητας 4 υποδοχών των 8 καναλιών, με θύρα USB.
- Δύο 8-καναλικές βυσματούμενες μονάδες-ψηφιοποιητές.
- Λογισμικό για την αποθήκευση, την επεξεργασία και την παρουσίαση των δεδομένων, μέσω Η/Υ.
- Φορητός Η/Υ.

Η μέγιστη ταχύτητα λήψεως δεδομένων του συστήματος, είναι για ένα κανάλι, 250.000 λήψεις ανά sec. Οι μετρήσεις έγιναν με 80.000 λήψεις/sec ανά κανάλι.

Κεφάλαιο 4

Συνάφεια Οπλισμού – Σκυροδέματος

4.1.1 Γενικά

Ο όρος συνάφεια οπλισμού -σκυροδέματος χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αλληλεπίδραση μεταξύ του σκυροδέματος και της ράβδου οπλισμού του. Ένας ορισμός είναι ο εξής:

«Συνάφεια οπλισμού - σκυροδέματος καλείται το σύνολο των αιτιών που παρεμποδίζουν τη σχετική ολίσθηση μεταξύ των ράβδων οπλισμού και της μάζας σκυροδέματος που τις περιβάλλει.»

4.1.2 Ιστορική αναδρομή

Η σημασία της συνάφειας εντοπίζεται στις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Πειράματα ξεκίνησαν ήδη από το 1939 από τον Menzel, που πραγματοποίησε μια σειρά δοκιμών για να διερευνήσει την επίδραση της κατάστασης των επιφανειών στην εξόλκευση των ράβδων. Ερεύνησε επίσης τις συνέπειες, της αναλογίας τσιμέντου, του μήκους αγκύρωσης και της διεύθυνση της ράβδου και απέδειξε ότι η κατάσταση της επιφάνειας λείων ράβδων είχε πολύ σημαντική επίδραση στην αντοχή συνάφειας. Κατέληξε επίσης στο συμπέρασμα ότι η αυξημένη αναλογία τσιμέντου ή το αυξημένο βάθος έμπηξης οδήγησε σε αύξηση της αντίστασης σε εξόλκευση.

Οι Furguson και Thompson, το 1962, πραγματοποίησαν σειρά πειραμάτων για να καθορίσουν το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης σε στοιχεία δοκού. Διαπιστώθηκε ότι η συνάφεια ήταν συνάρτηση του μήκους των ράβδων και όχι του μεγέθους της ράβδου, ενώ σημαντική επίδραση είχαν επίσης το πλάτος της δοκού και η επικάλυψη.

Οι Furguson και Thompson, το 1965, πραγματοποίησαν επίσης μια μελέτη σχετικά με το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης μεγάλων ράβδων και διαπίστωσαν ότι αυξημένη επικάλυψη οδήγησε σε αύξηση της αντίστασης σε εξόλκευση, αλλά δεν ήταν χρήσιμη για τη μείωση της έκτασης των ρωγμών.

Ο McDermott, 1969, συνέταξε έκθεση για την Επιτροπή ACI 439 που διερεύνησε την επίδραση της αντοχής του χάλυβα και του ποσοστού οπλισμού στην μορφή αστοχίας. Η επιτροπή ACI 408 ερεύνησε τις επιπτώσεις που είχε ανακυκλιζόμενη φόρτιση στην συνάφεια σκυροδέματος χάλυβα. Στην έκθεσή τους (Mitchell, et al., 1992), δήλωσαν ότι ενώ η μέση τάση κυμαίνονταν από 1500 έως 3000 psi για τις απαιτήσεις σχεδιασμού έπρεπε να περιορίζεται έως 350 psi. Προέκυψε επίσης ότι δυνάμεις συνάφειας ήταν ένας συνδυασμός των τριών πραγμάτων, της χημικής πρόσφυσης μεταξύ τσιμέντου και χάλυβα, η οποία ήταν συνάρτηση της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος, της μηχανικής σύμπλεξης των παραμορφώσεων του χάλυβα και σκυροδέματος και της τριβής μεταξύ του σκυροδέματος και χάλυβα.

Μια σε βάθος μελέτη για την ολίσθηση υπό κρουστικό φορτίο έγινε το 1992 (Yan 1992). Τα πειράματα αφορούσαν τόσο την εξόλκευση όσο και την έμπηξη. Σημαντικές μεταβλητές της πειραματικής μελέτης ήταν δύο διαφορετικοί τύποι ράβδων οπλισμού σκυροδέματος (λείοι και νευροχάλυβες), δύο διαφορετικές αντοχές σκυροδέματος (Κανονική και υψηλή), δύο διαφορετικές ίνες (πολυπροπυλένιο και χάλυβα). Διαπιστώθηκε ότι για τους λείους οπλισμούς, υπήρχε μια γραμμική σχέση τάσης συνάφειας - ολίσθησης τόσο για τα στατικά φορτία όσο και για τα δυναμικά. Οι διαφορετικές φορτίσεις, αντοχές, τα είδη ινών, η περιεκτικότητα σε ίνες βρέθηκαν να μην έχουν σημαντική επίπτωση στην σχέση συνάφειας - ολίσθησης. Για νευροχάλυβες, ο μηχανισμός διάτμησης λόγω των νευρώσεων έπαιξε τον σημαντικό ρόλο στην συνάφεια. Διαπιστώθηκε επίσης ότι υπάρχει πάντα υψηλότερη αντοχή για φόρτιση θλιπτική από τη εφελκυστική φόρτιση.

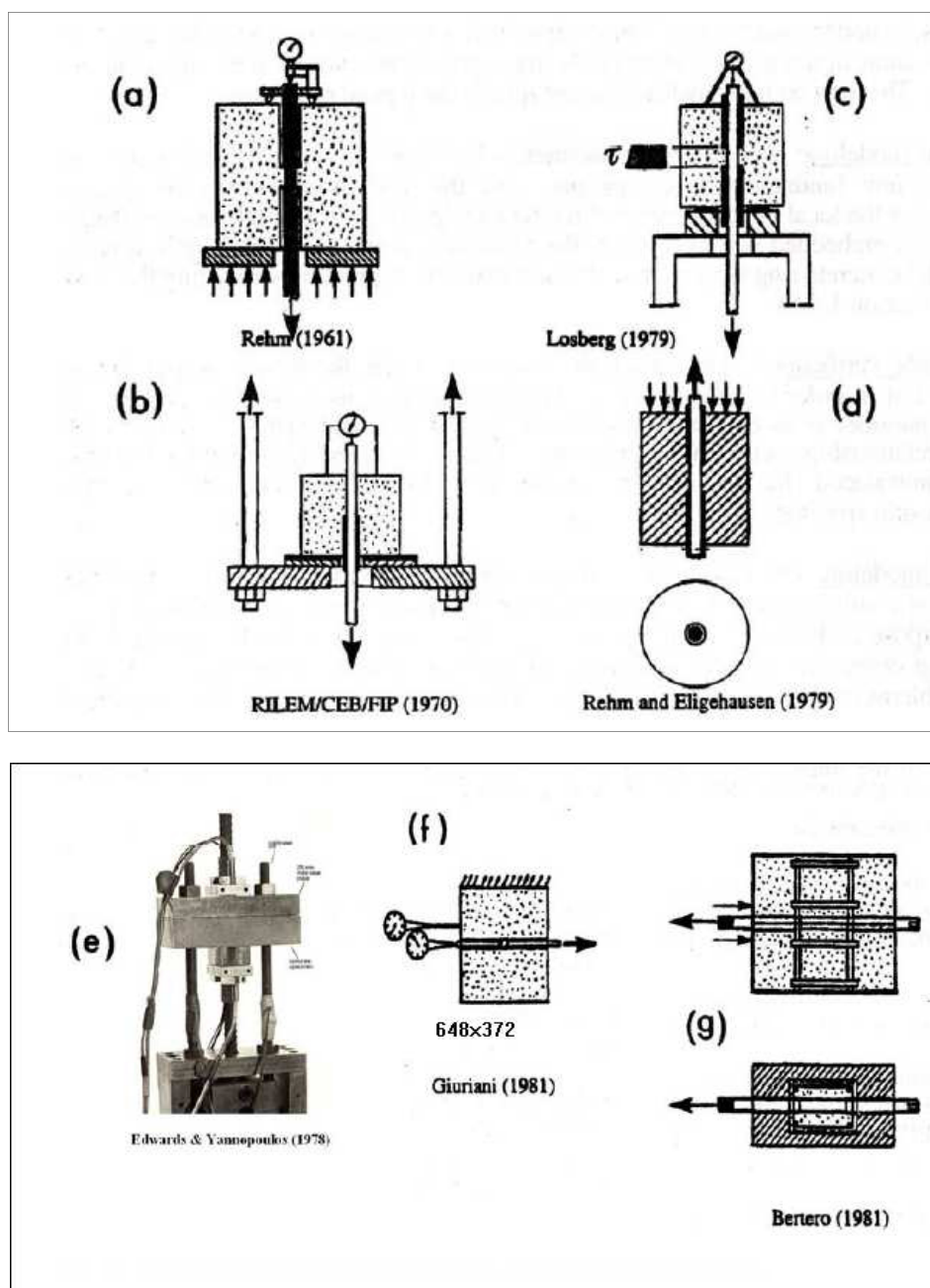
Το 1983 (Vos), έγινε μια σειρά από δυναμικά πειράματα με στόχο τον καθορισμό ποσοτικά της σχέσης ολίσθησης - τάσης για να χρησιμοποιηθεί σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που επιτεύχθηκαν από Yan, δηλαδή, ότι η αντοχή συνάφειας των λείων ράβδων είναι ανεξάρτητη από το είδος της φόρτισης και της αντοχής του σκυροδέματος. Ο νευροχάλυβας από την άλλη πλευρά έδειξε αξιοσημείωτη αύξηση της συνάφειας με την αύξηση του είτε της φόρτισης είτε της αντοχής του σκυροδέματος.

Μέχρι σήμερα έχει διεξαχθεί εκτεταμένη πειραματική και αναλυτική έρευνα με σκοπό τον καθορισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν την συνάφεια, καθώς και την κατανόηση της μηχανικής του προβλήματος.

Ο αναλυτικός μηχανισμός κυρίως περιγράφεται σαν σχέση μεταξύ της διεπιφανειακής τάσης και της σχετικής ολίσθησης του οπλισμού. Η σχέση αυτή αποτελεί βασικό εργαλείο κατά τον σχεδιασμό αλλά και την ανάλυση των δομικών στοιχείων. Πειραματικά προσδιορίζεται με δοκιμή εξόλκευσης. Σε ράβδο μέσα σε κύβο σκυροδέματος και με περιορισμένο μήκος

αγκύρωσης εφαρμόζεται εφελκυστική δύναμη. Στην εικόνα 5 φαίνονται παραδείγματα δοκιμών εξόλκευσης.

Η εκτίμηση της απομένουσας διαθέσιμης αντοχής συνάφειας «προβληματικών» αγκυρώσεων αποτελεί αντικείμενο μελέτης των τελευταίων δύο δεκαετιών. Η κρισιμότητα αφορά στην επάρκεια υφιστάμενων κατασκευών να ανταπεξέλθουν σε ενδεχόμενες σεισμικές δράσεις. Στην περίπτωση μειωμένης συνάφειας, η κατά τον σχεδιασμό ιεράρχηση των εκδηλούμενων μορφών αστοχίας ανατρέπεται με συνέπεια την πρώιμη αστοχία της κατασκευής.



Εικόνα 25: Παραδείγματα δοκιμών εξόλκευσης

Η συνάφεια επηρεάζει τις κατασκευές με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους.

Στην Οριακή κατάσταση αστοχίας είναι καθοριστικός ο ρόλος της μέσω των αγκυρώσεων για την δυνατότητα στροφής των διατομών κάτω από τις σεισμικές δράσεις και την δυνατότητα σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στην κρίσιμη περιοχή των δοκών και υποστυλωμάτων. Αλλά και στις καταστάσεις λειτουργικότητας παίζει καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος των ρωγμών που θα εμφανιστούν και στα βέλη που θα αναπτυχθούν.

Η συνάφεια οφείλεται στην χημική συνοχή και την τριβή για τους λείους χάλυβες αλλά και στην σύνδεση μεταξύ των ραβδώσεων και του περιβάλλοντος σκυροδέματος στους νευροχάλυβες. Οι ασκούμενες δυνάμεις δημιουργούν σχετική ολίσθηση μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος. Η συνολική ολίσθηση οφείλεται στην παραμόρφωση της διεπιφάνειας και στις διατμητικές τάσεις του σκυροδέματος.

Πρόσφατα σημαντικά πειράματα έχουν γίνει από Weathersby (2003), ο οποίος ερεύνησε τη συνάφεια χάλυβα και σκυροδέματος σε δυναμικές και οιονεί μόνιμες φορτίσεις.

Πρόσφατη έρευνα για την συνάφεια έκαναν και οι Verderame, Ricci κ.ά. (2009), οι οποίοι μελέτησαν τη συμπεριφορά των λείων χαλύβων.

Το θέμα των επιπτώσεων της σεισμικής δράσης στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, όταν η δράση συντελείται ενώ το σκυρόδεμα είναι ακόμα νωπό, ως προς την συνάφεια έχει διερευνηθεί επίσης την τελευταία δεκαετία.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια (χωρίς όμως μέχρι σήμερα να έχουν διερευνηθεί επαρκώς όλοι) είναι :

- η θέση των ράβδων ως προς τη διεύθυνση σκυροδέτησης (οριζόντια ή κατακόρυφη)
- η περίσφιγξη στην περιοχή της αγκύρωσης
- η αντοχή του σκυροδέματος
- η διάρκεια των δράσεων (βραχείας ή μακράς, στιγμιαίες, κρουστικές κ.α.)
- η επικάλυψη
- η γεωμετρία των νευρώσεων του χάλυβα (στους νευροχάλυβες)
- η δράση βλήτρου
- ο τύπος των δράσεων (μονότονες, επαναλαμβανόμενες ή ανακυκλιζόμενες).
- η διάβρωση.

Για την εξέλιξη του φαινομένου εκδόθηκε το *State of the Art Report* (FIB 2000), στο οποίο και γίνεται εκτενής αναφορά για τα προσομοιώματα

που έχουν προταθεί για την περιγραφή του καταστατικού νόμου τοπικής συνάφειας τοπικής ολίσθησης. Σύμφωνα με αυτό, ο μηχανισμός της συνάφειας σε μονοτονική φόρτιση εμφανίζει τέσσερα διακριτά στάδια:

Στάδιο I (Μή ρηγματωμένο σκυρόδεμα).

Για χαμηλές τιμές συνάφειας υπάρχει μόνο χημική πρόσφυση, η οποία συνοδεύεται και από τη μηχανική πρόσφυση του σκυροδέματος με την (αδρομερή) επιφάνεια της ράβδου, αλλά η επίδραση της είναι μικρή. Τοπικά στο σκυρόδεμα γύρω από τις νευρώσεις της ράβδου, αναπτύσσονται υψηλές τάσεις θλιπτικές στο σκυρόδεμα, η συμπεριφορά του όμως παραμένει ελαστική. Λόγω της χαμηλής τιμής των τάσεων, οι σχετικές ολισθήσεις της ράβδου ως προς το σκυρόδεμα είναι μικρές και οφείλονται κυρίως στις παραμορφώσεις του σκυροδέματος. Στις λείες ράβδους, όπως έχει αποδειχτεί και πειραματικά, η δυνατότητα ανάπτυξης μηχανικής πρόσφυσης είναι περιορισμένη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έντονη ολίσθηση της ράβδου πολύ σύντομα μετά την υπέρβαση της χημικής συνοχής

Στάδιο II (Πρώτη ρηγματώση).

Όσο η τιμή της συνάφειας αυξάνει, οι δεσμοί της χημικής πρόσφυσης καταλύονται. Πλέον, και καθώς οι σχετικές ολισθήσεις αυξάνονται, οι νευρώσεις του οπλισμού εισάγουν αυξημένες πιέσεις στην περιβάλλουσα μάζα σκυροδέματος, η οποία και αστοχεί μόνο τοπικά σε θλίψη. Παράλληλα, αναπτύσσεται εγκάρσιος εφελκυσμός ο οποίος με τη σειρά του δημιουργεί τις πρώτες ρηγματώσεις. Παρά την αύξηση των διατμητικών τάσεων του σκυροδέματος μεταξύ των νευρώσεων, ακόμα δεν παρατηρείται διάρρηξη του σκυροδέματος, αν και πλέον η σχετική ολίσθηση της ράβδου ως προς το σκυρόδεμα αρχίζει να γίνεται αντιληπτή. Η αλλαγή μηχανισμού της συνάφειας απεικονίζεται με την αλλαγή κλίσης του σχετικού διαγράμματος. Όπως είναι φυσικό, οι λείες ράβδοι αδυνατούν να αναπτύξουν συνάφεια αυτού του είδους.

Στάδιο III (Διαμήκεις ρηγματώσεις).

Εξαιτίας της ανάπτυξης ακτινικών εφελκυστικών τάσεων, αναπτύσσονται διαμήκεις ρηγματώσεις που οφείλονται στη διάρρηξη του σκυροδέματος. Η ανάπτυξη των ρωγμών αυτών περιορίζεται από το περιβάλλον σκυρόδεμα (επικάλυψη), από την ύπαρξη εγκάρσιων οπλισμών και από την ύπαρξη εγκάρσιας θλίψης. Σε μέλη με ελαφρύ εγκάρσιο οπλισμό ή μικρές επικαλύψεις, το στάδιο αυτό λήγει μόλις οι διαμήκεις ρωγμές φτάσουν στην επιφάνεια του στοιχείου και ακολουθείται από έντονη πτώση της συνάφειας (Στάδιο IVb). Αντιθέτως, σε μέλη με ισχυρό εγκάρσιο οπλισμό ή μεγάλες επικαλύψεις, εξαιτίας της περισφιγξης που προσφέρουν,

οι ρωγμές διάρρηξης περιορίζονται σε μια μικρή περιοχή γύρω από τη ράβδο.

Στάδιο IVα (Λείες ράβδοι - Αστοχία εξόλκευσης).

Στις λείες ράβδους, μετά την καταστροφή της χημικής πρόσφυσης Στάδιο I) η μεταφορά των δυνάμεων δεν εξασφαλίζεται παρά μόνο μέσω της τριβής. Η ύπαρξη εγκάρσιας θλίψης και η συστολή ξήρανσης συνεπικουρούν στην ανάπτυξη της συνάφειας, ενώ αντίθετα η φθορά (λείανση) της διεπιφάνειας σκυροδέματος - χάλυβα, περιορίζουν τη δυνατότητα ανάπτυξής της, ιδιαίτερα κατά τις ανακυκλίσεις.

Στάδιο IVβ (Αστοχία διάρρηξης).

Στην περίπτωση ράβδων με νευρώσεις, με ελαφρύ ή μέτριο εγκάρσιο οπλισμό οι διαμήκεις ρηγματώσεις του Σταδίου III διαπερνούν ολόκληρη την επικάλυψη της ράβδου, με αποτέλεσμα να παρατηρείται έντονη μείωση της συνάφειας. Στην περίπτωση επαρκούς εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρες), παρά τη διάρρηξη του σκυροδέματος, εξασφαλίζεται ικανοποιητική συνάφεια εξαιτίας της περίσφιγξης που αυτός προσφέρει. Συχνά οι ολισθήσεις που παρατηρούνται δεν είναι αποδεκτές (άνοιγμα ρωγμών κτλ).

Στάδιο IVγ (Αστοχία εξόλκευσης).

Στις ράβδους με νευρώσεις με βαρύ εγκάρσιο οπλισμό, οι διαμήκεις ρηγματώσεις περιορίζονται στην περιοχή γύρω από τη ράβδο, χωρίς να διαπεράσουν ολόκληρη την επικάλυψη. Η αστοχία σε αυτή την περίπτωση είναι αστοχία εξόλκευσης (pull out).

Η συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος έχει μεγάλη σημασία για τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, γεγονός που αποδुकνείται και από την αναφορά που κάνουν σε αυτή και νέοι κανονισμοί.

4.1.3 Έλεγχος συνάφειας

Όπως προαναφέρθηκε, ο μόνος έλεγχος είναι πειραματικός και προσδιορίζεται με δοκιμή εξόλκευσης. Υπάρχουν μη καταστροφικοί έλεγχοι που ερευνούν παράγοντες που έχουν επίδραση στην συνάφεια όπως η διάβρωση κ.λ.π. Έλεγχος όμως της κατάστασης της διεπιφάνειας μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος δεν υπάρχει.

Η συνάφεια μεταξύ του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος, για να είναι αποτελεσματική, πρέπει να υπάρχει επαρκής τριβή μεταξύ των δύο υλικών. Όμως με την πάροδο των ετών υπάρχει συρρίκνωση και μπορεί να υπάρξει και μείωση της αντοχής των υλικών ή εάν τα υπάρχουν ρωγμές ή

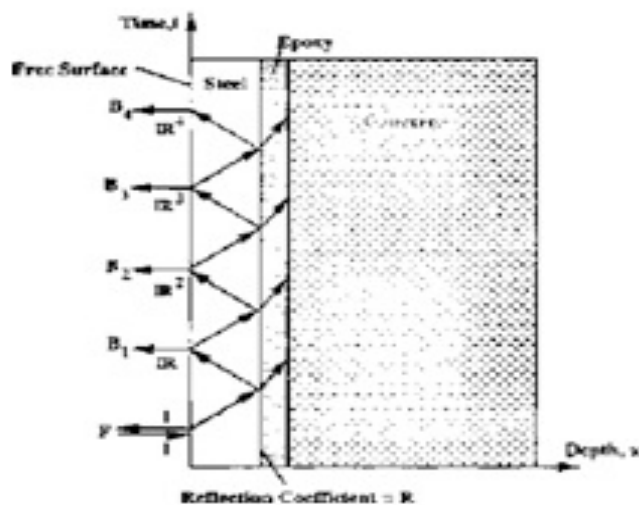
είναι πολύ διαπερατό το σκυρόδεμα μπορεί να εμφανιστεί διάβρωση του χάλυβα.

Δεν υπάρχει πρότυπη δοκιμή για την μέτρηση της συνάφειας, ωστόσο, ένα τεστ που στηρίζεται στην εξόλκευση έχει αναπτυχθεί για τη σύγκριση των διαφόρων σκυροδεμάτων (ASTM C234). Το τεστ αποτελείται από ένα κύβο 6 ιντσών με ενσωματωμένη ράβδο διαμέτρου 19 mm. Η ράβδος φορτίζεται με τιμή όχι μεγαλύτερη από 5000 λίβρες ανά τετραγωνική ίντσα το δευτερόλεπτο. Το φορτίο και η ολίσθηση καταγράφονται κατά διαστήματα μέχρι είτε ο χάλυβας να διαρρεύσει είτε το σκυρόδεμα να ρηγματώσει είτε να συμβεί ολίσθηση 2.5 mm στο τέλος της φόρτισης.

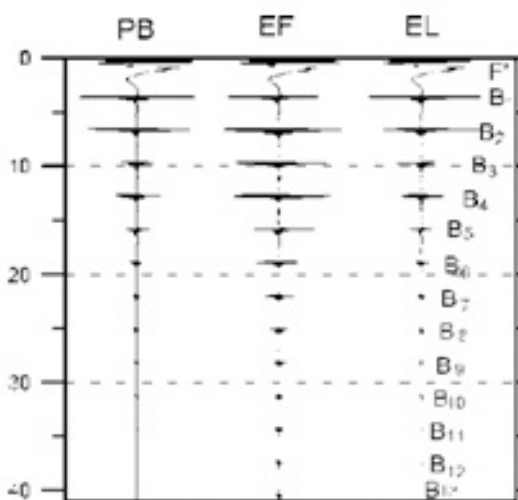
Παρόμοιοι έλεγχοι υπάρχουν πχ. όπως το «Pull out test». Η δοκιμή αυτή είναι ένας μη καταστροφικός έλεγχος που αποσκοπεί στη μέτρηση της δύναμης αγκύρωσης σε βράχο.

Ερευνητές από το Fraunhofer Institute for-NDT, [20], προσεγγίζουν το πρόβλημα ελέγχου της συνάφειας με μη καταστροφικές μεθόδους, με την μέθοδο υπερήχων. Η τεχνική υπερήχων επιτρέπει ακόμη να προσδιορίσουμε το είδος της βλάβης, αν προκλήθηκε από παγιδευμένο αέρα, υγρασία ξένα σωματίδια. Αυτό αποτελεί ένα ποιοτικό άλμα στον έλεγχο συγκολλήσεων.

Οι Chung-Yue Wangl, et., ανέπτυξαν μία μέθοδο για τον Μη καταστροφικό έλεγχο της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και ατσάλινης πλάκας επικολλημένης σε διατομή του. Για το πρόβλημα αυτό, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα μικρό σφυρί για να χτυπήσουμε την πλάκα από χάλυβα και να ακούσουμε τους ήχους. Ανώμαλη δόνηση σημαίνει ελαττωματική περιοχή. Όταν η περιοχή αποκόλλησης είναι μικρή και η ατσάλινη πλάκα είναι μεγάλου πάχους, καθίσταται αδύνατο να προσδιοριστεί μια ανώμαλη δόνηση από τον ήχο. Η μέθοδος που ανέπτυξαν στηρίζεται στην διαφοροποίηση του ανακλώμενου κύματος. Στην εικόνα 6 φαίνονται οι ανακλάσεις του υπερηχητικού παλμού, ενώ στην εικόνα 7, οι καταγραφές για τις περιπτώσεις διαφορετικής συνάφειας (εξασφαλισμένης μέσω κόλλας).



Εικόνα 26: Διάδοση παλμού



Εικόνα 27: Καταγραφές διαφορετικής συνάφειας

4.2 Πειραματική Διαδικασία

4.2.1 Εισαγωγή

Κατασκευάστηκαν δύο κυλινδρικά δοκίμια από σκυρόδεμα, κατά ASTM, ύψους $R = 30\text{cm}$ και διαμέτρου $d = 15\text{cm}$. Στα δοκίμια υπήρχε διαμήκης οπλισμός από κατασκευαστικό χάλυβα, $\Phi 12$, με νευρώσεις. Στο

πρώτο από αυτά, ο διαμήκης οπλισμός είχε πλήρη συνάφεια με το σκυρόδεμα, ενώ στο άλλο, η συνάφεια δεν ήταν πλήρης. Οι μετρητές παραμόρφωσης, επικολλήθηκαν σε διάφορα σημεία των δοκιμίων. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κρουστική καταπόνηση και με σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων, καταγράφηκαν οι τιμές των παραμορφώσεων και κατόπιν έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε σχέση με τον τύπο του δοκιμίου και την θέση της μέτρησης.

4.2.2 Προετοιμασία του οπλισμού των δοκιμίων

Τα δοκίμια έφεραν διαμήκη οπλισμό. Χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι από κατασκευαστικό χάλυβα, κυκλικής διατομής, Φ12, με νευρώσεις. Οι ράβδοι του χάλυβα είχαν μήκος $I = 55\text{cm}$, εκ των οποίων τα 30cm βρίσκονταν μέσα στο δοκίμιο του σκυροδέματος και τα 25cm εκτός. Επί των ράβδων του χάλυβα επιλέχθηκαν τα σημεία που τοποθετήθηκαν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges). Επιλέχθηκαν τρία και δύο σημεία αντίστοιχα για κάθε ράβδο χάλυβα. Στην ράβδο χωρίς πλήρη συνάφεια οπλισμού - σκυροδέματος, στα 10cm, και στα 20cm, έτσι ώστε να βρίσκονται μέσα στο δοκίμιο του σκυροδέματος, ονομαζόμενα «κάτω» και «πάνω» αντίστοιχα. Στην ράβδο με συνάφεια, τοποθετήθηκαν στα 5cm, στα 10cm και στα 20cm, ονομαζόμενα, «πάνω», «μέση» και «κάτω», αντίστοιχα. Μετά την επιλογή των σημείων, ακολούθησε η επιφανειακή λείανσή τους με σμυριδοτροχό, ώστε χωρίς ουσιαστική επίπτωση στην αντοχή του οπλισμού, να εξαλειφθούν από τα σημεία αυτά οι νευρώσεις και να μπορεί να γίνει η επικόλληση των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης.

Στα επιλεγμένα σημεία επικολλήθηκαν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, (strain gauges), παράλληλα με τον προσανατολισμό του οπλισμού, εκτός από τον «κάτω» μετρητή, της πρώτης ράβδου, που τοποθετήθηκε εγκάρσια. Αυτοί ήταν της TML, τύπου FLA-5-11 με καλώδια και αντίστασης 120Ω. Κατόπιν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης μονώθηκαν και στεγανοποιήθηκαν με σιλικόνη για να προστατευθούν κατά την διαδικασία της σκυροδέτησης. Στην εικόνα 4, παρουσιάζονται οι ράβδοι χάλυβα μετά τη λείανση τους στα συγκεκριμένα σημεία και με τους ηλεκτρικούς μετρητές παραμόρφωσης κολλημένους στις ράβδους.



Εικόνα 28: Προετοιμασία Οπλισμού

Στη συνέχεια, προκειμένου να μειωθεί η συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος στο δεύτερο δοκίμιο, έγινε επικάλυψη σε κάποια τμήματα της ράβδου χάλυβα, με πλαστικό περιτύλιγμα αεροφουσαλίδων.

4.2.3 Τα δοκίμια σκυροδέματος

Σκυροδετήθηκαν τα τρία δοκίμια, κατά ASTM, δηλαδή κυλινδρικά, με ύψος, $h = 30\text{cm}$ και διάμετρο, $d = 15\text{cm}$. Χρησιμοποιήθηκαν προς τούτο, έξι χαλύβδινες κυλινδρικές μήτρες, οι οποίες αρχικά καθαρίστηκαν και λαδώθηκαν. Για την σκυροδέτηση χρησιμοποιήθηκε ταχύπηκτο επισκευαστικό τσιμέντο, D-11 Super Fast της Durostick , λεπτόκοκκο και νερό σε αναλογία κατ' όγκο:

Τσιμέντο: 50%

Χαλίκι: 25%

Νερό: 25%

Σε κάθε μήτρα τοποθετήθηκε από μία ράβδος χάλυβα και έγινε η σκυροδέτηση. Η θέση της ήταν κεντρική και ο προσανατολισμός της διαμήκης. Σημειώνεται ότι δεν έγινε δόνηση για να μην υπάρξει πρόβλημα από τον δονητή στους ηλεκτρικούς μετρητές παραμόρφωσης, λόγω των μικρών σχετικά διαστάσεων της μήτρας. Η σκυροδέτηση φαίνεται στην εικόνα 29.

Οι μήτρες με τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε υγρό περιβάλλον. Τα δοκίμια βγήκαν από τις μήτρες την έβδομη μέρα από την σκυροδέτησή τους.



Εικόνα 29: Χαλύβδινη Κυλινδρική Μήτρα – Δοκίμιο κατά τη Σκυροδέτηση

4.2.5 Η κρουστική καταπόνηση

Σύμφωνα με το αντικείμενο της εργασίας, στα δοκίμια πρέπει να δημιουργηθεί τασικό κύμα, προκειμένου να συγκριθεί η κυματομορφή του και οι προκαλούμενες παραμορφώσεις για τους δύο τύπους των δοκιμίων, δηλαδή της πλήρους και της μερικής συνάφειας.

Στα δοκίμια δημιουργήθηκε τασικός παλμός από κρουστική καταπόνηση με σφυρί. Τα δοκίμια στηρίζονταν με απλή έδραση και ο διαμήκης οπλισμός προεξείχε. Η κρούση έγινε επί του ελεύθερου άκρου του προεξέχοντος διαμήκους οπλισμού.

4.2.6 Διαγράμματα

Στην πρώτη, Α, ομάδα διαγραμμάτων, παρουσιάζονται οι κυματομορφές, (Time history), των δοκιμίων με συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος. Στα διαγράμματα των σχημάτων αυτών, ο οριζόντιος άξονας έχει τιμές πραγματικού χρόνου καταγραφής και ο κατακόρυφος, παραμορφώσεων, (σχετική κλίμακα). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σχήματα, που σημειώνονται με την ίδια αρίθμηση και με ένδειξη αστερίσκου (*), αντιστοιχούν στο ίδιο αριθμό σχήματος, αλλά η κλίμακα χρόνου έχει ανοιχθεί στο χρονικό διάστημα της διαταραχής, ώστε να φανεί καλλύτερα το περιεχόμενο.

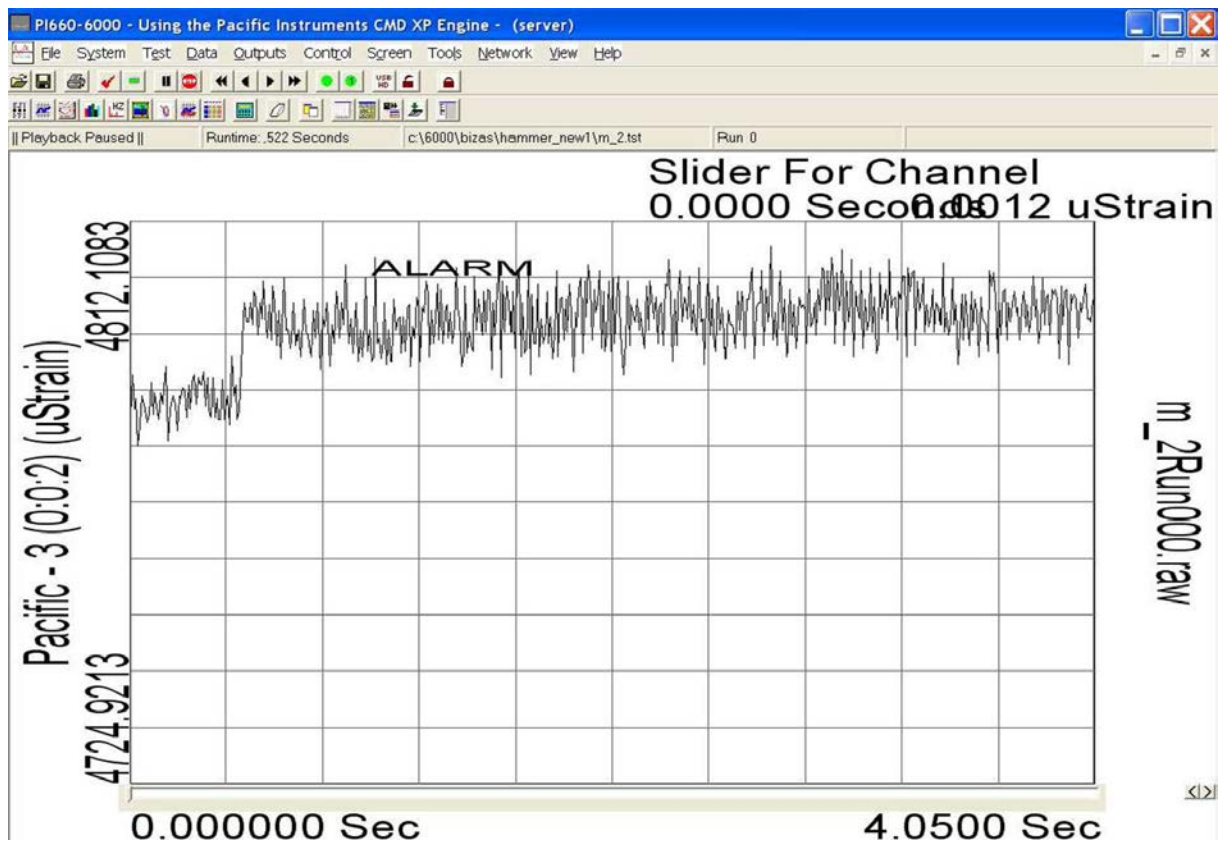
Στα σχήματα αυτά, (με την ένδειξη *), διατίθεται από το λογισμικό η δυνατότητα "κέρσορα" εμφανιζόμενου στο κάτω τμήμα του διαγράμματος.

Συρόμενος επί του διαγράμματος παρέχει την δυνατότητα ανάγνωσης της τιμής της παραμόρφωσης, στον αντίστοιχο χρόνο.

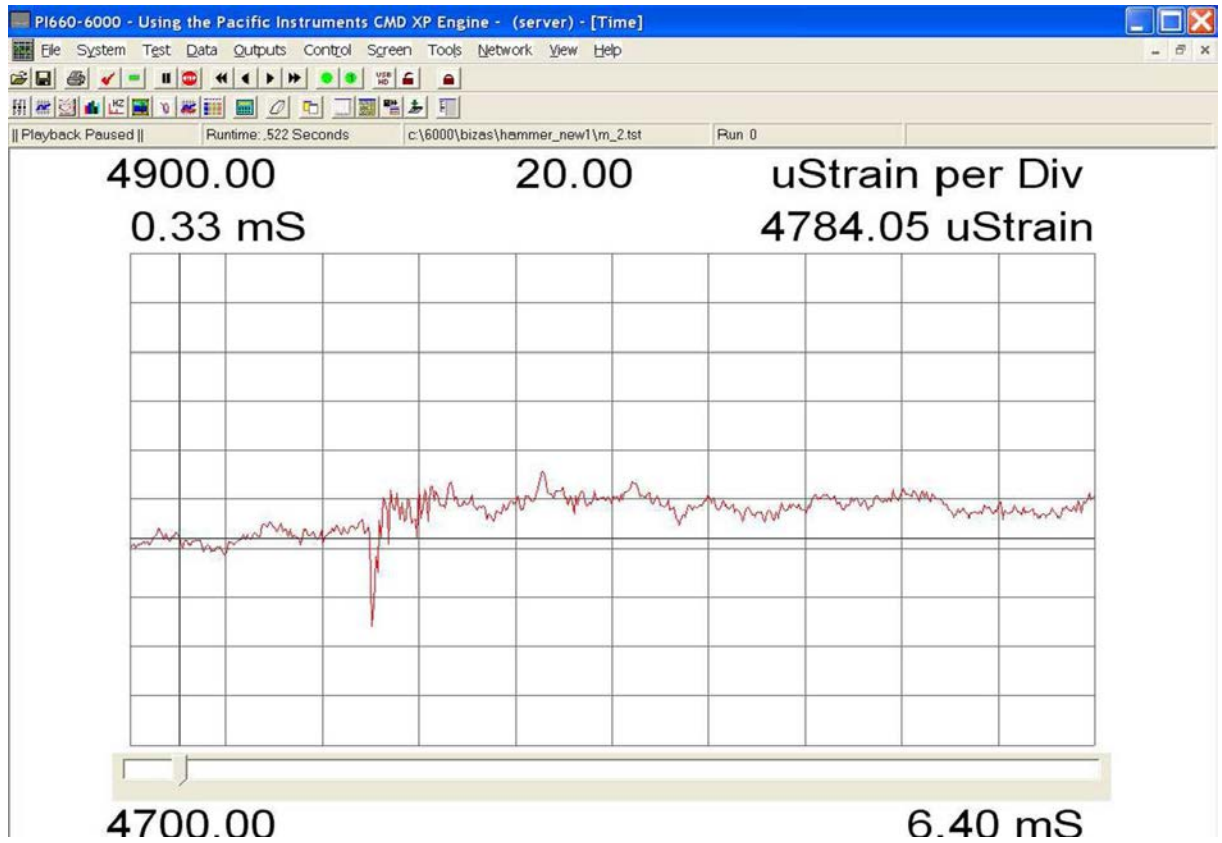
Στη δεύτερη, Β. ομάδα διαγραμμάτων παρουσιάζονται με αντίστοιχο τρόπο, όπως στην ομάδα Α, τα αποτελέσματα, για τις μετρήσεις του δοκιμίου, χωρίς συνάφεια (μερική απώλεια συνάφειας).

Η Τρίτη, Γ, ομάδα περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του μετρητή παραμόρφωσης «κάτω», στο δοκίμιο με συνάφεια, ο οποίος ήταν εγκάρσια τοποθετημένος.

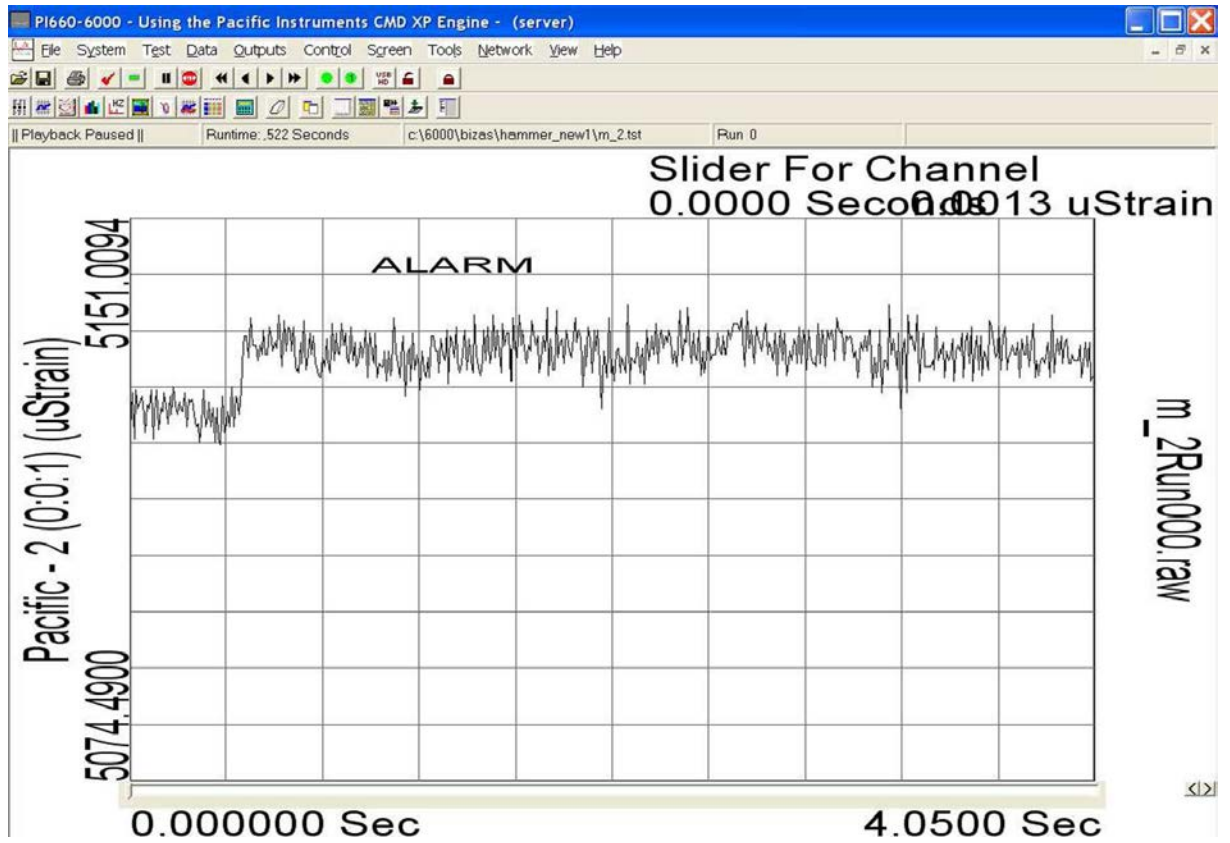
Ομάδα Α:



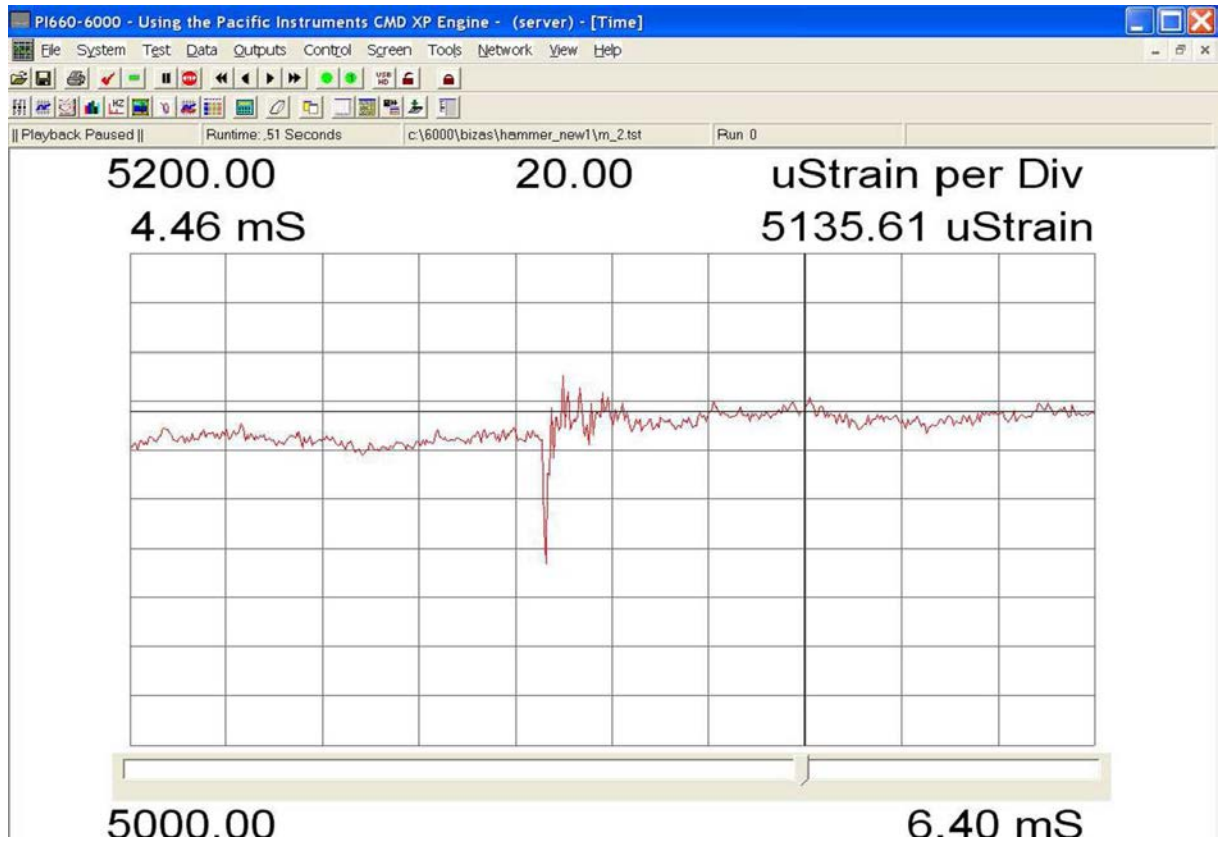
Εικόνα 30 : Μέτρηση 1 Πάνω



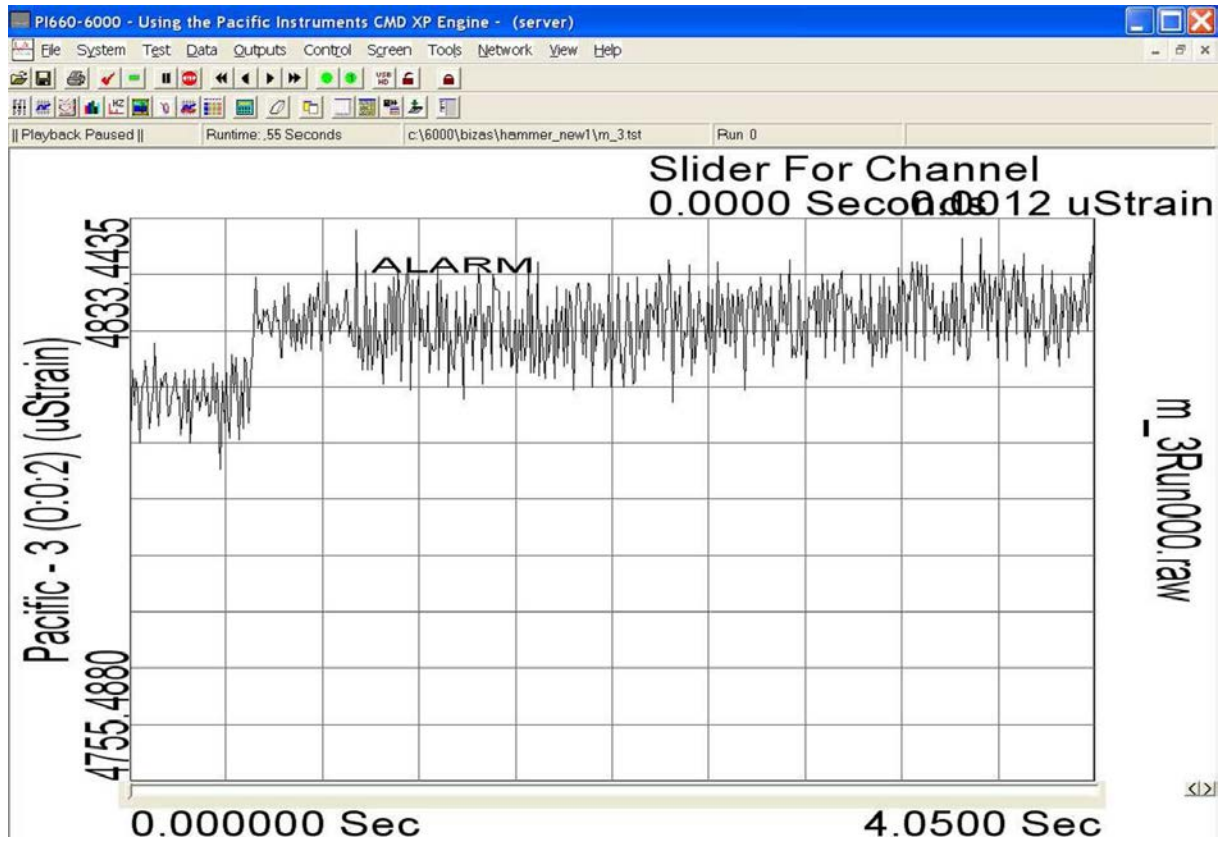
Εικόνα 31: Μέτρηση 1 Πάνω*



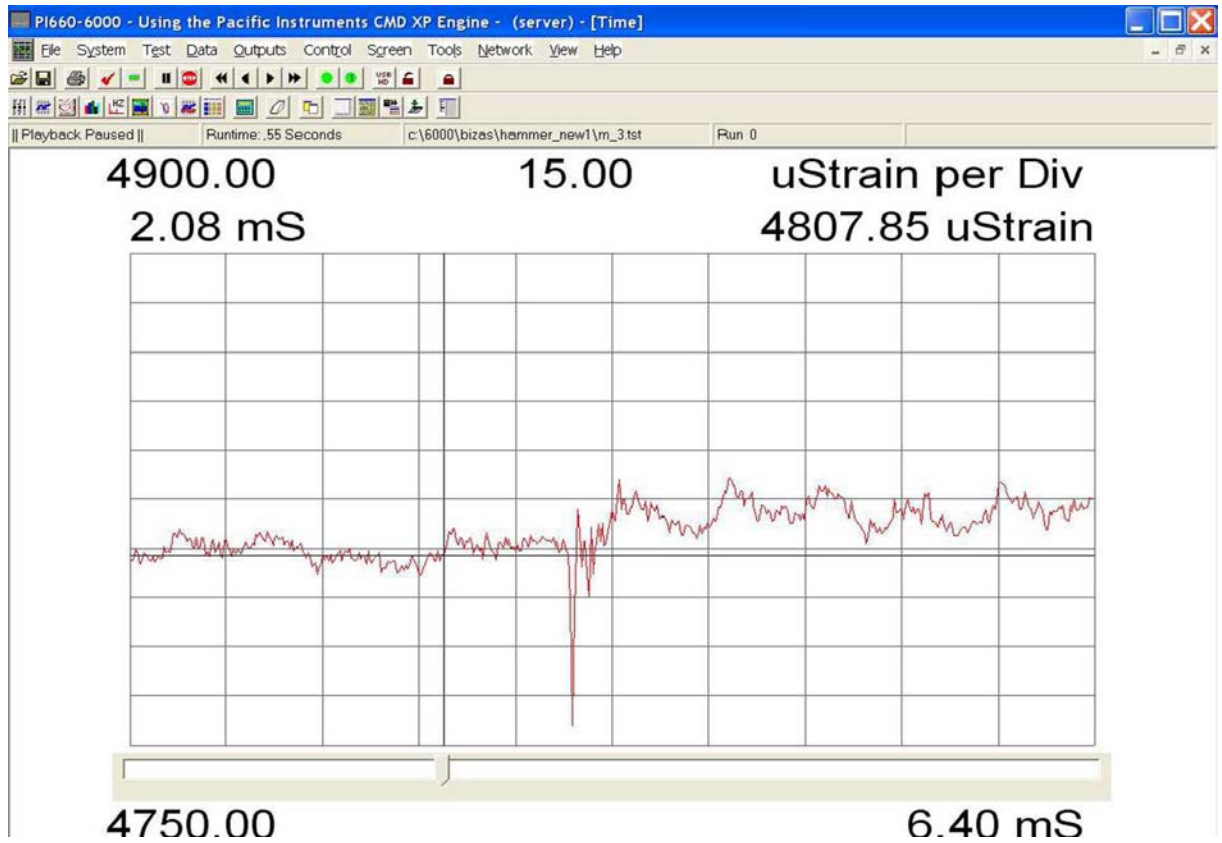
Εικόνα 32: Μέτρηση 1 μέση



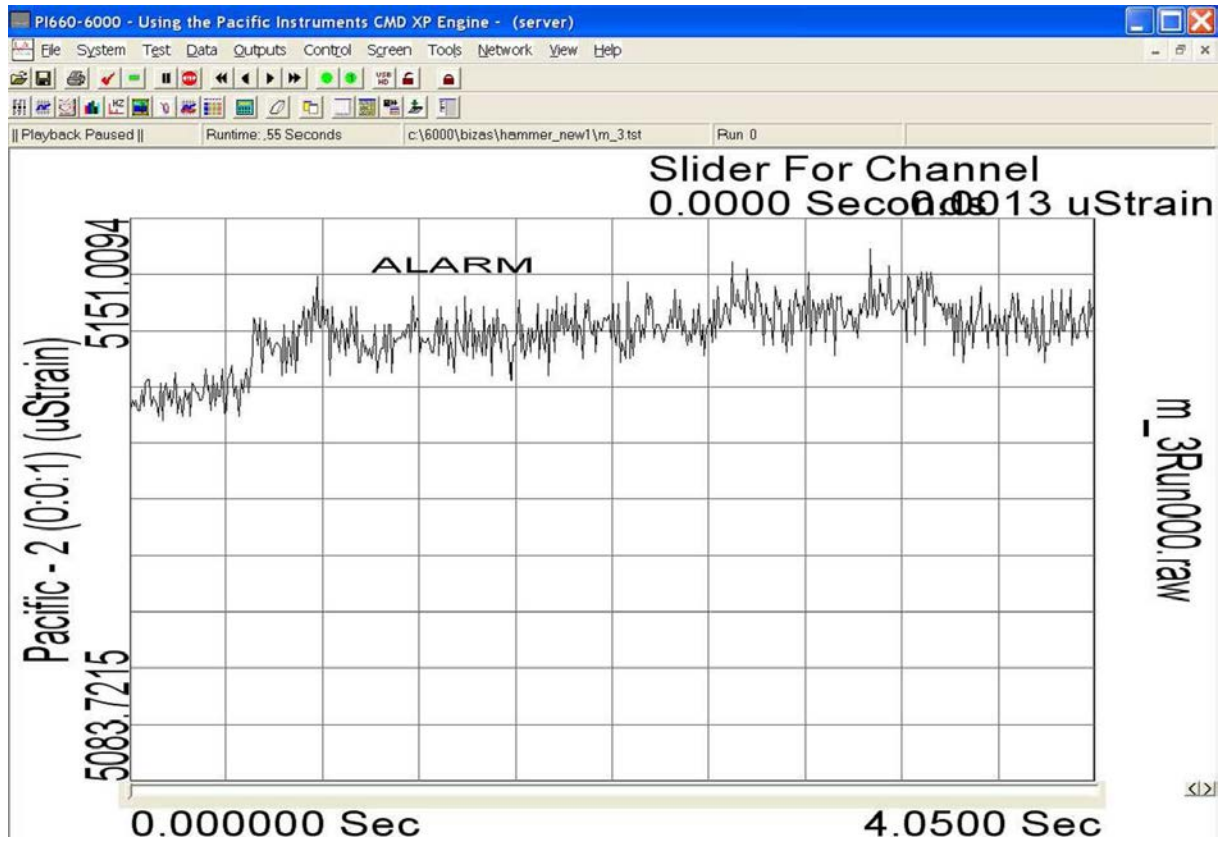
Εικόνα 33: Μέτρηση 1 Μέση*



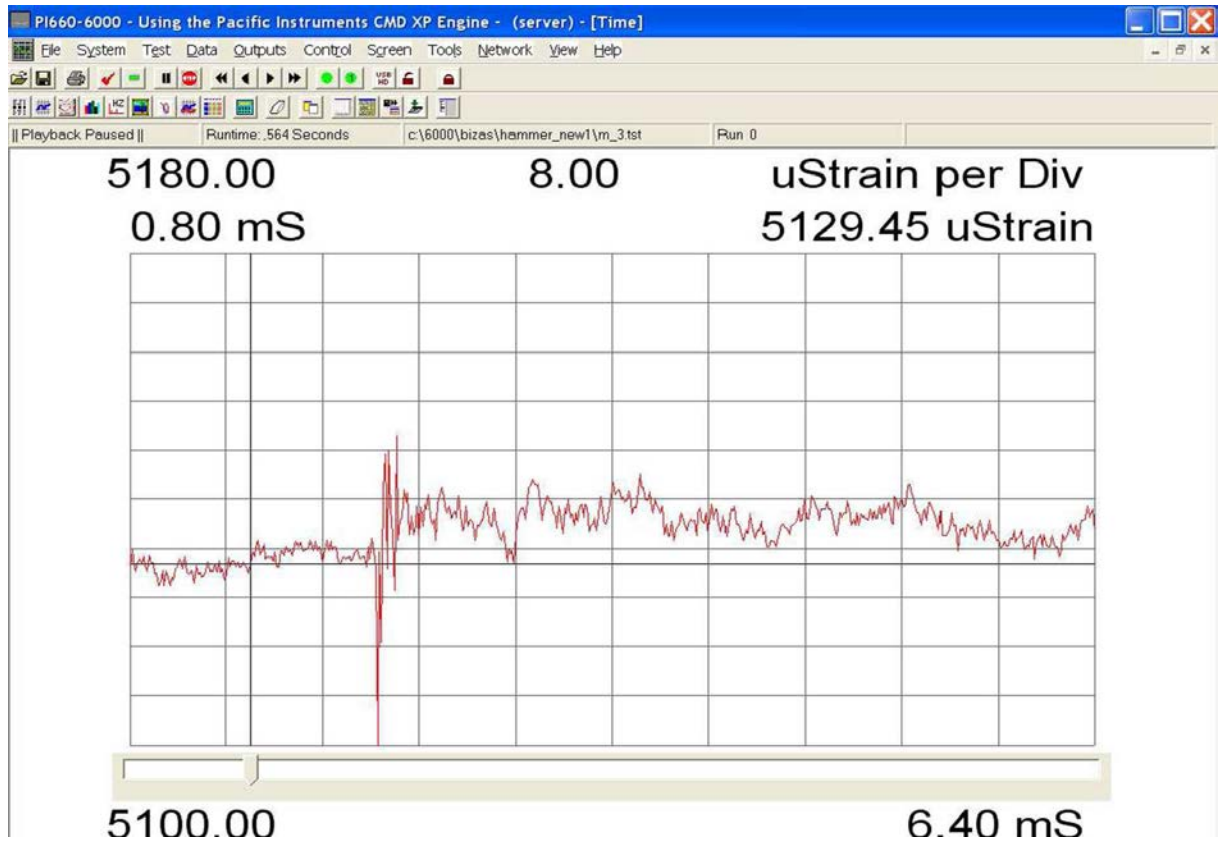
Εικόνα 34: Μέτρηση 2 Πάνω



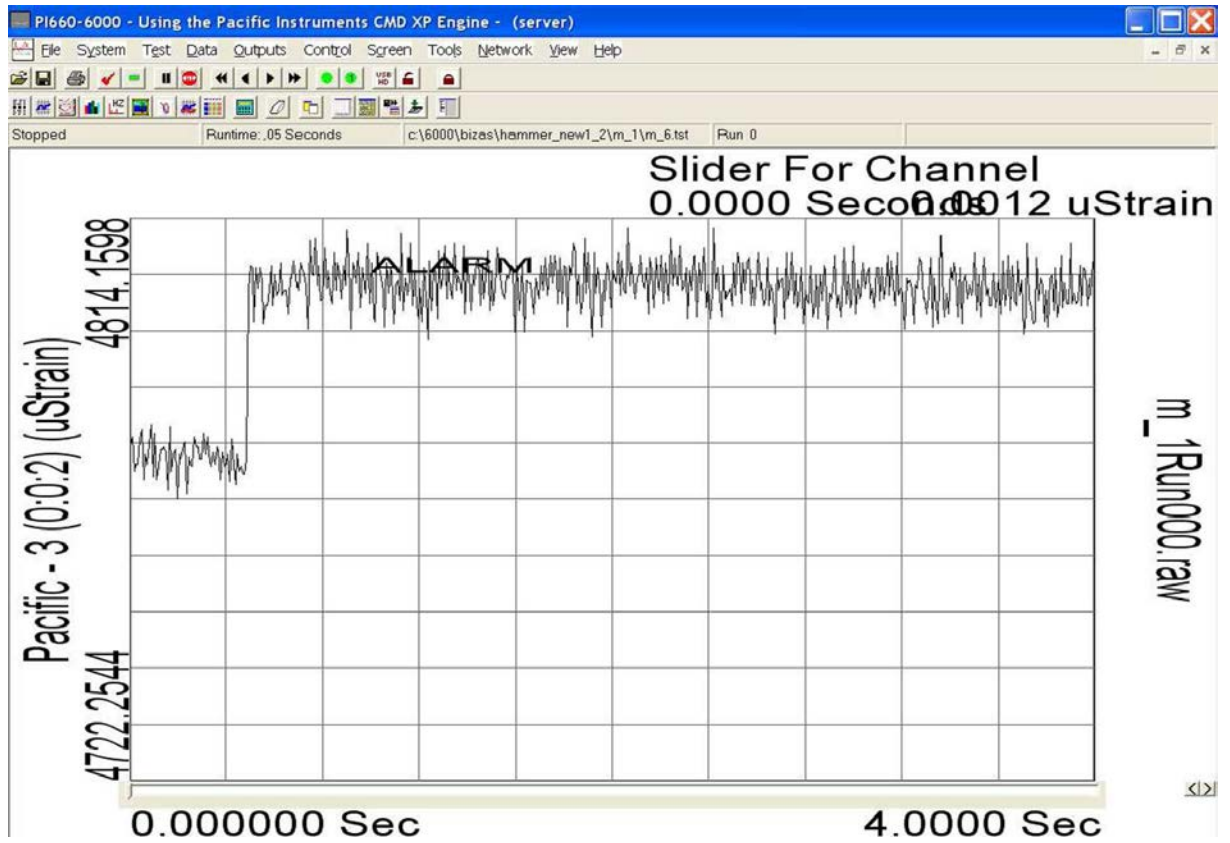
Εικόνα 35: Μέτρηση 2 Πάνω *



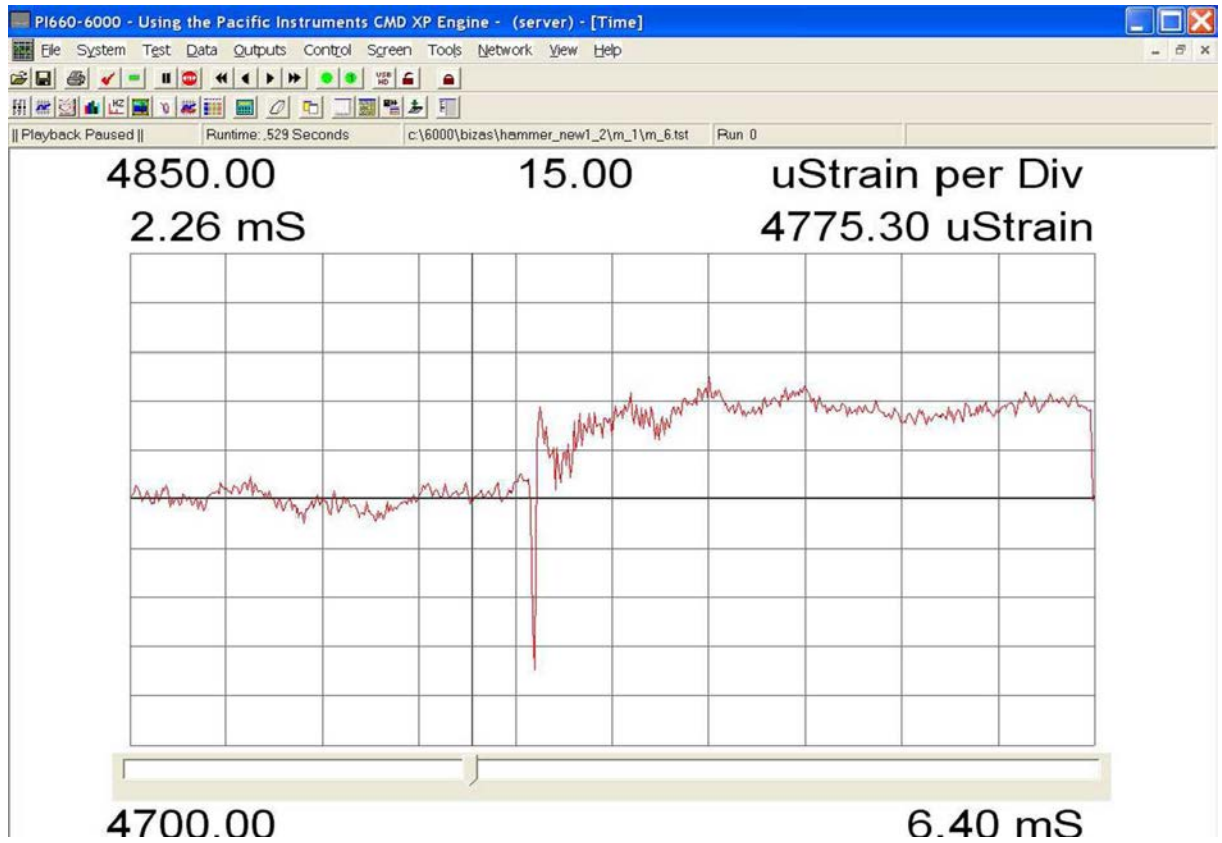
Εικόνα 36: Μέτρηση 2 Μέση



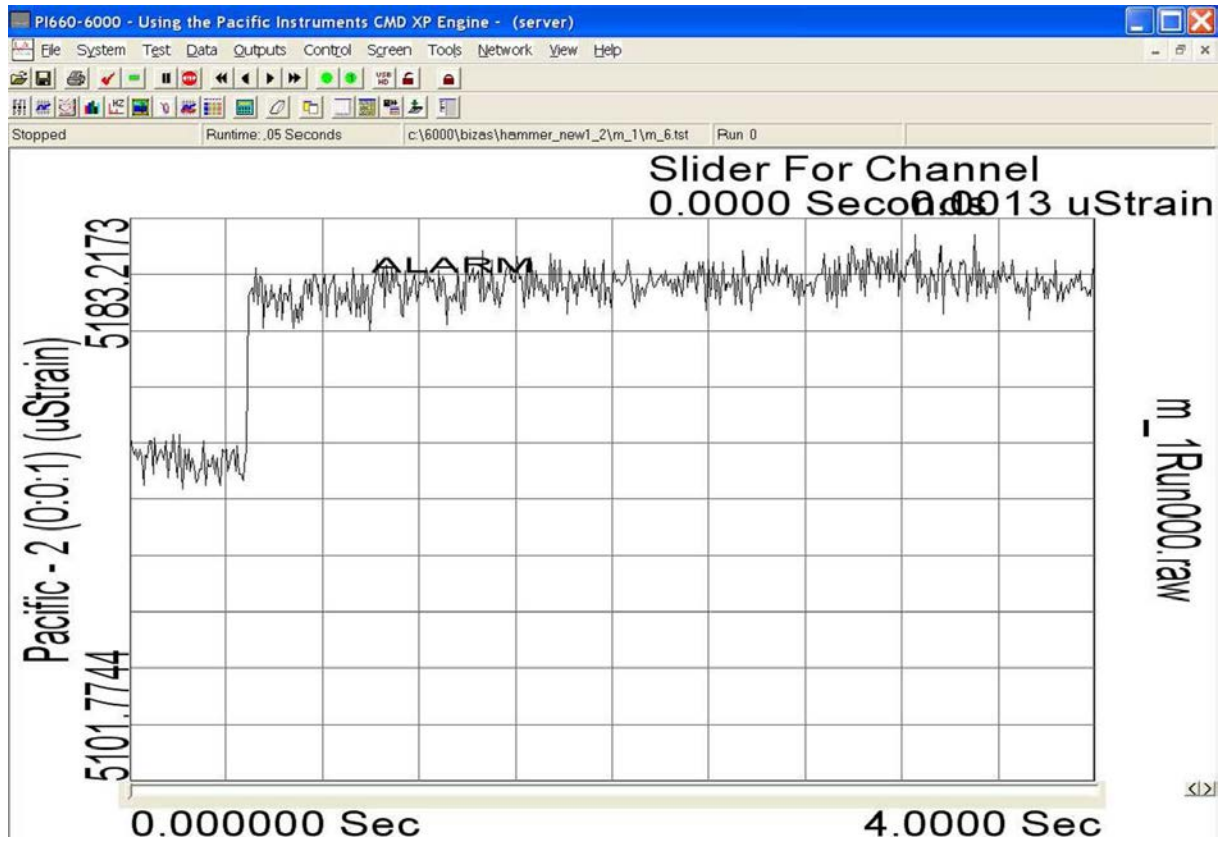
Εικόνα 37: Μέτρηση 2 Μέση *



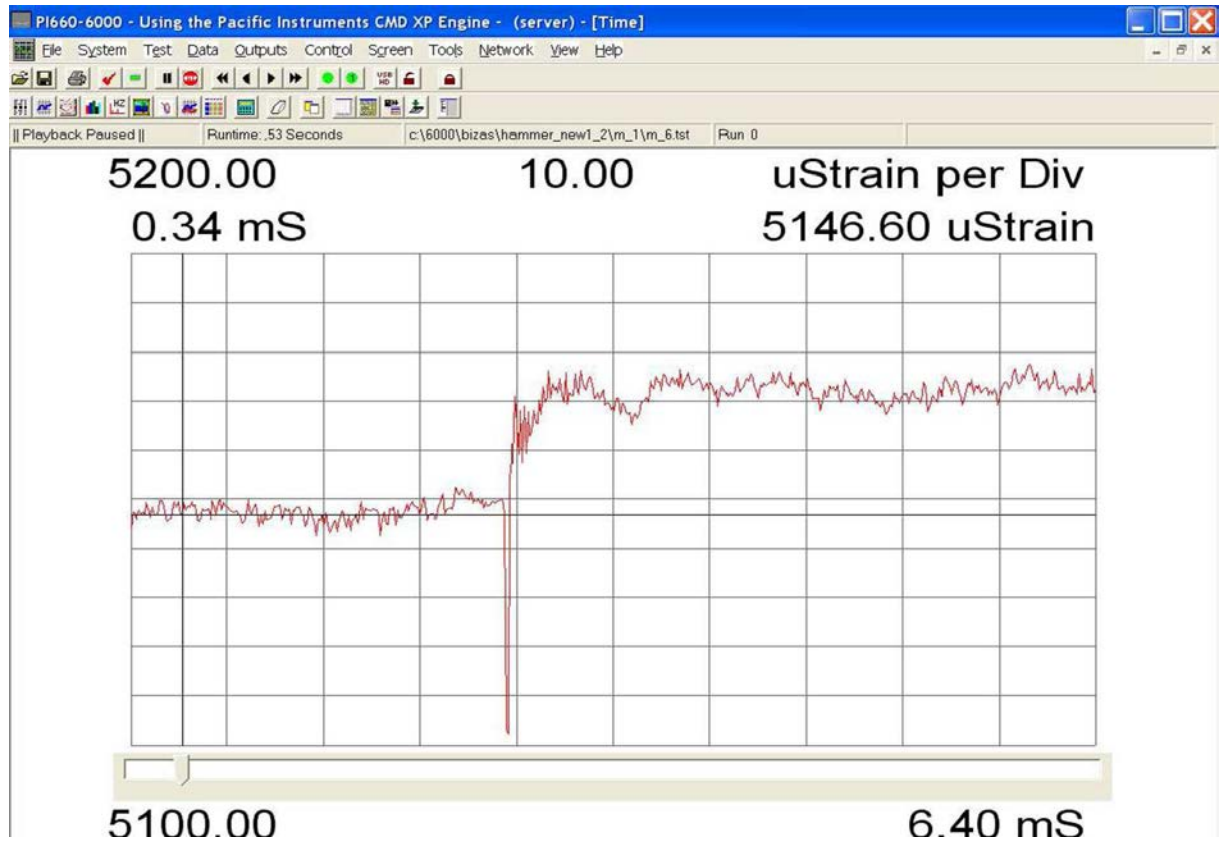
Εικόνα 38: Μέτρηση 3 Πάνω



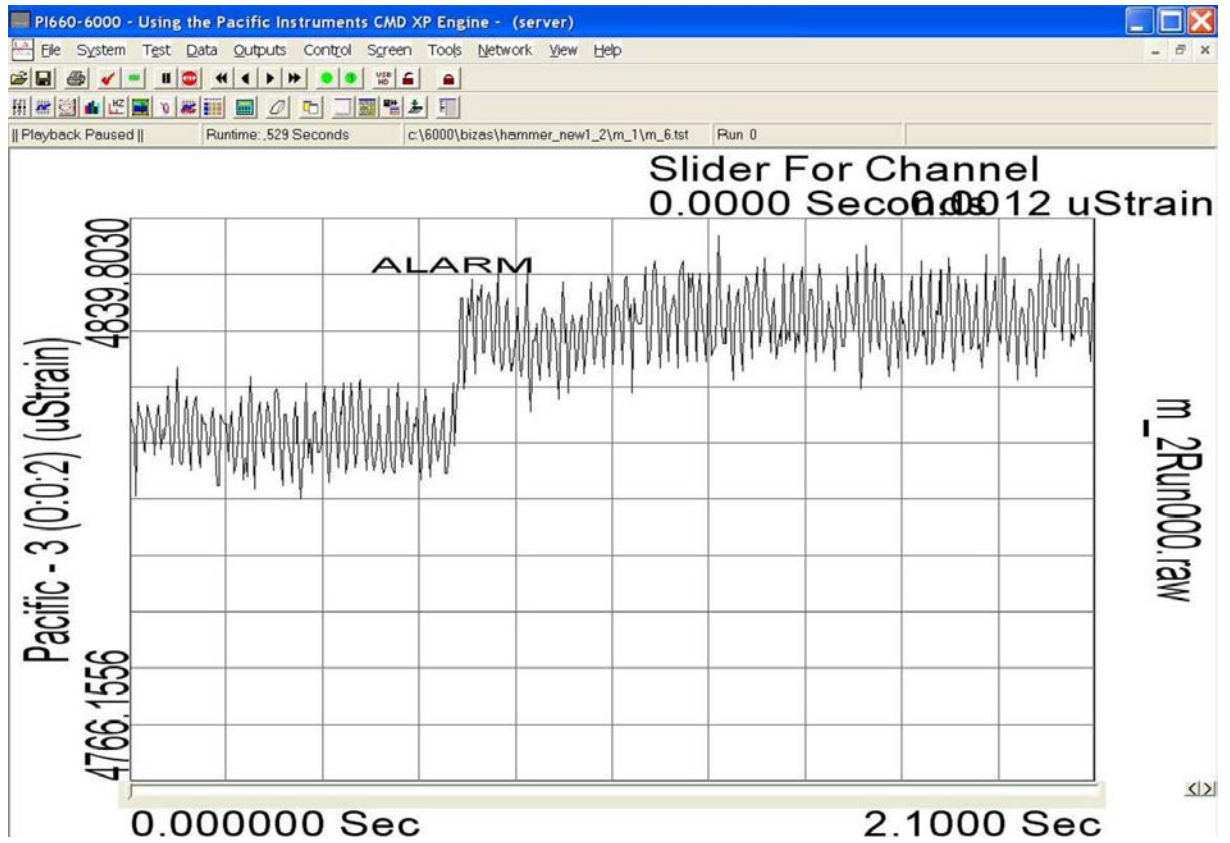
Εικόνα 39:Μέτρηση 3 Πάνω *



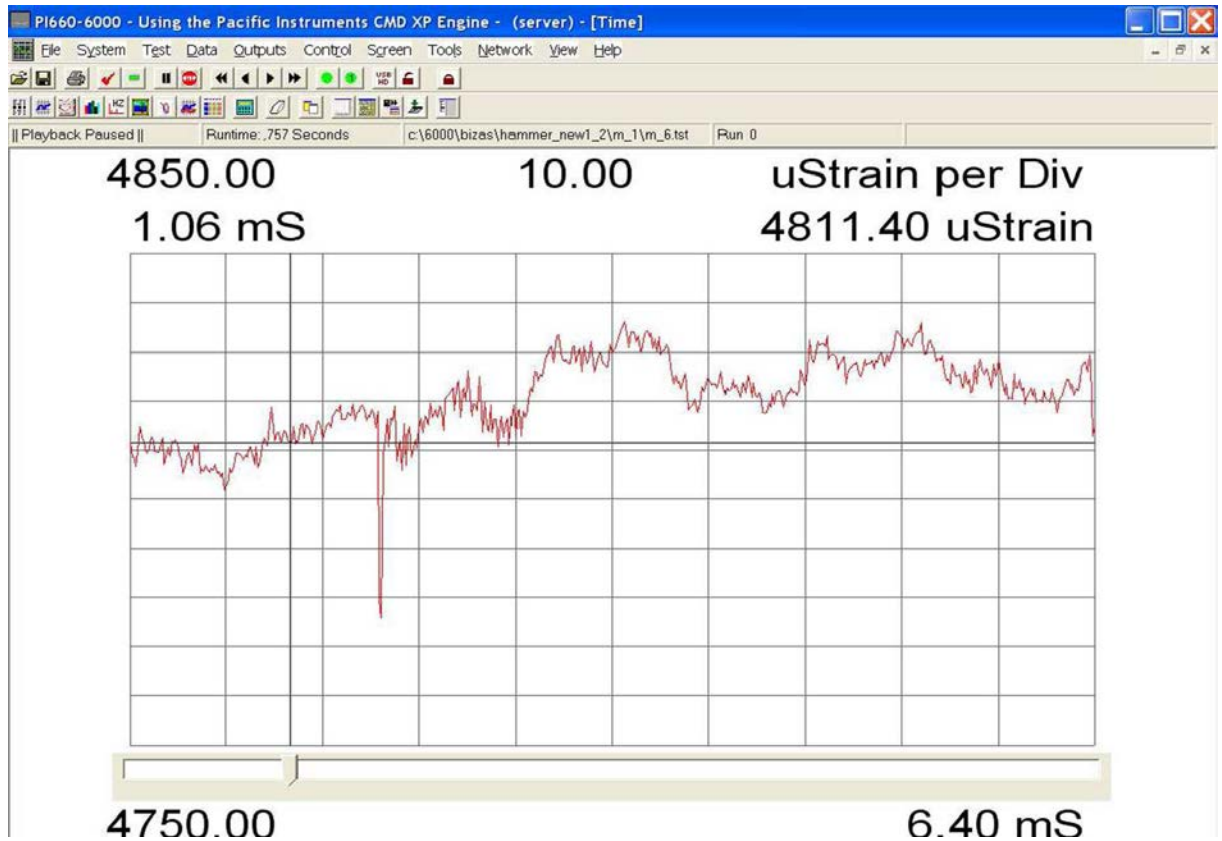
Εικόνα 40: Μέτρηση 3 Μέση



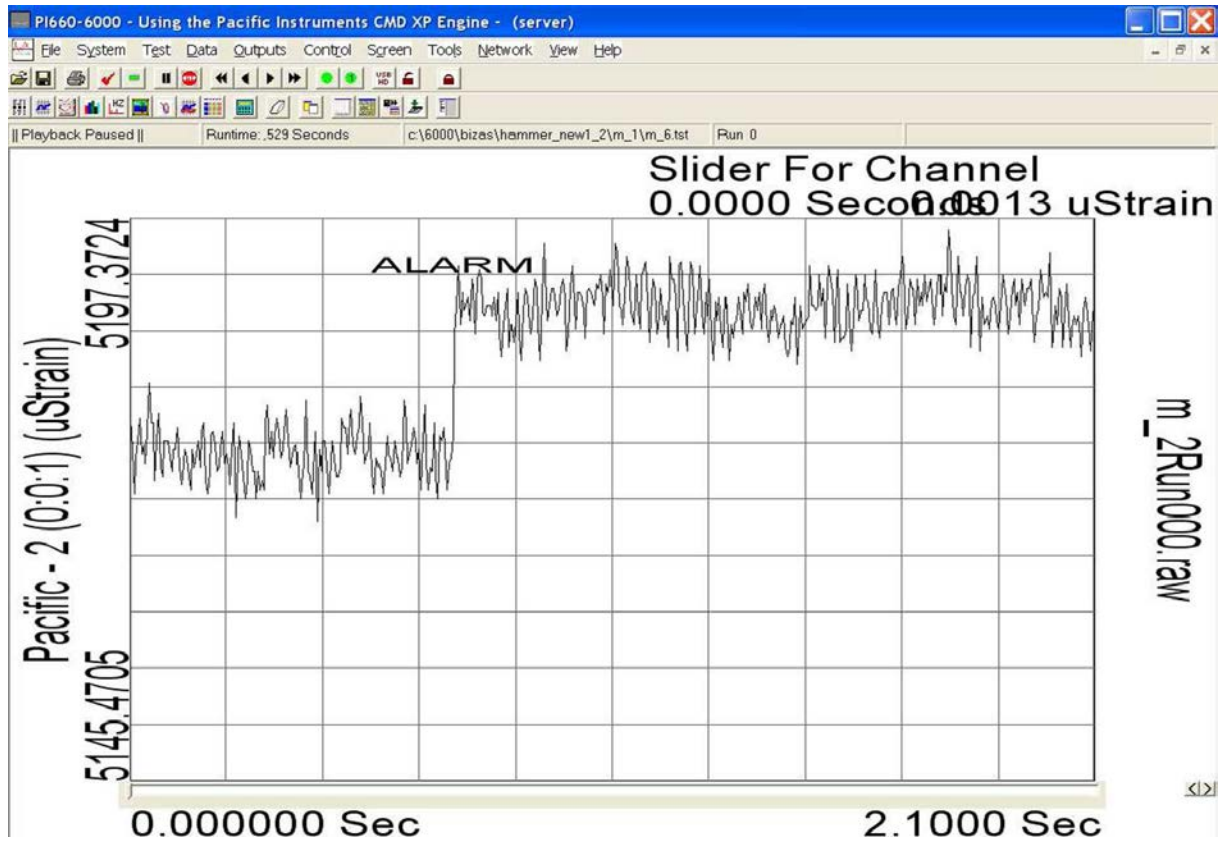
Εικόνα 41: Μέτρηση 3 Μέση*



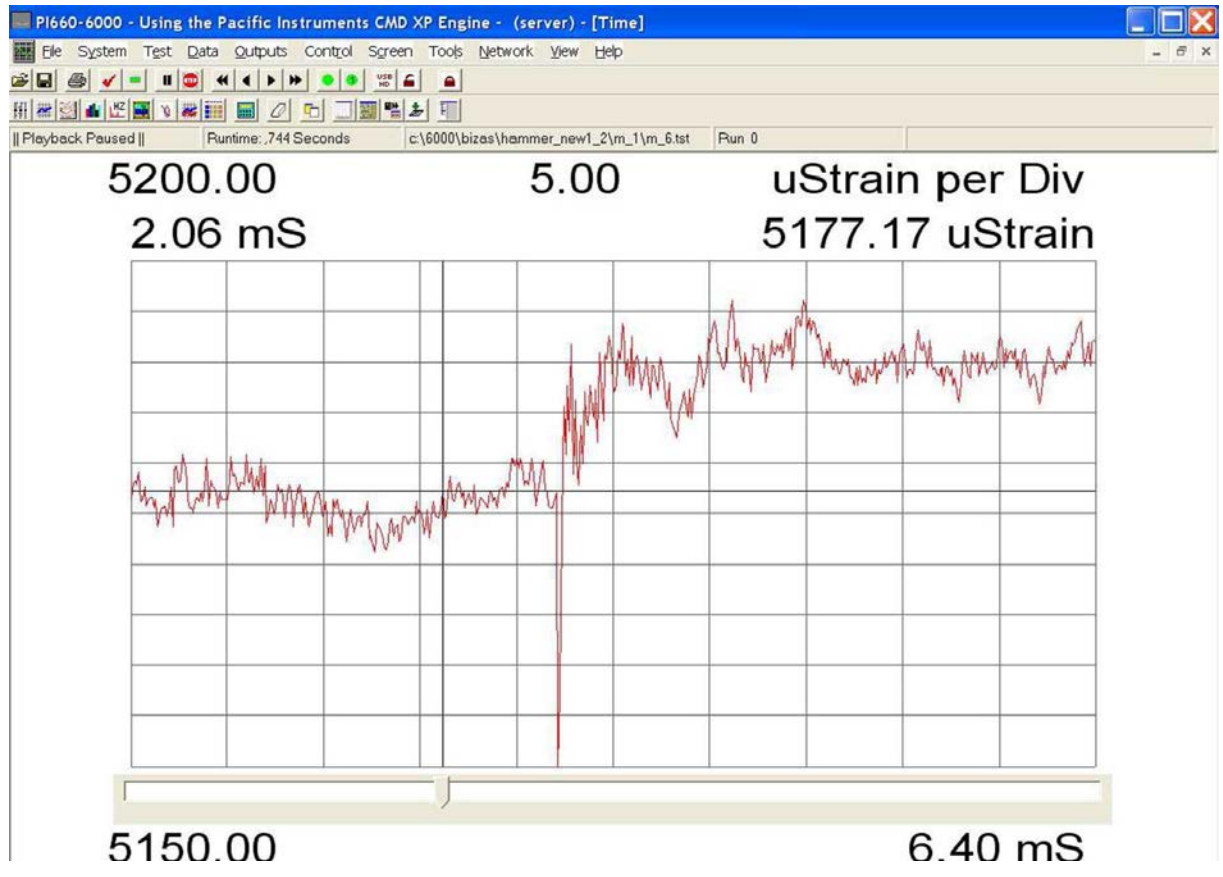
Εικόνα 42: Μέτρηση 4 Πάνω



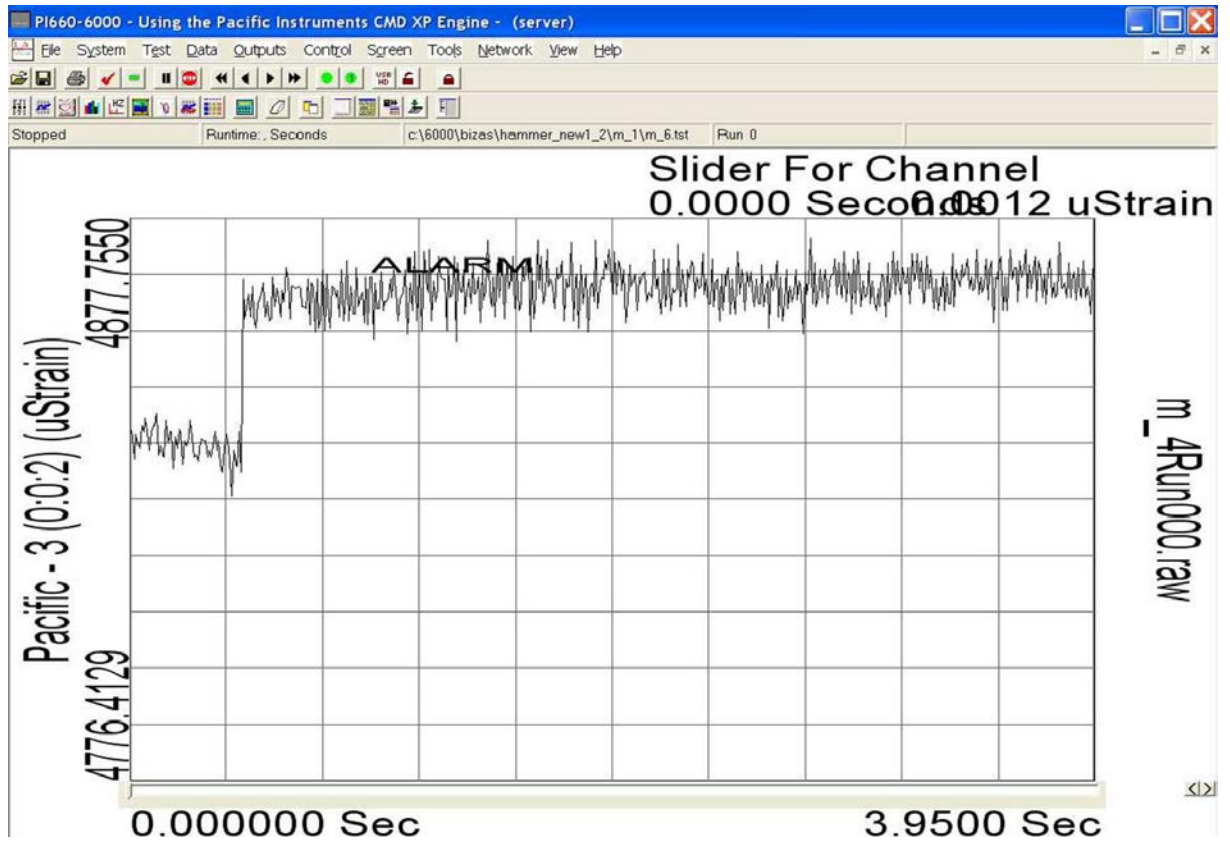
Εικόνα 43: Μέτρηση 4 Πάνω *



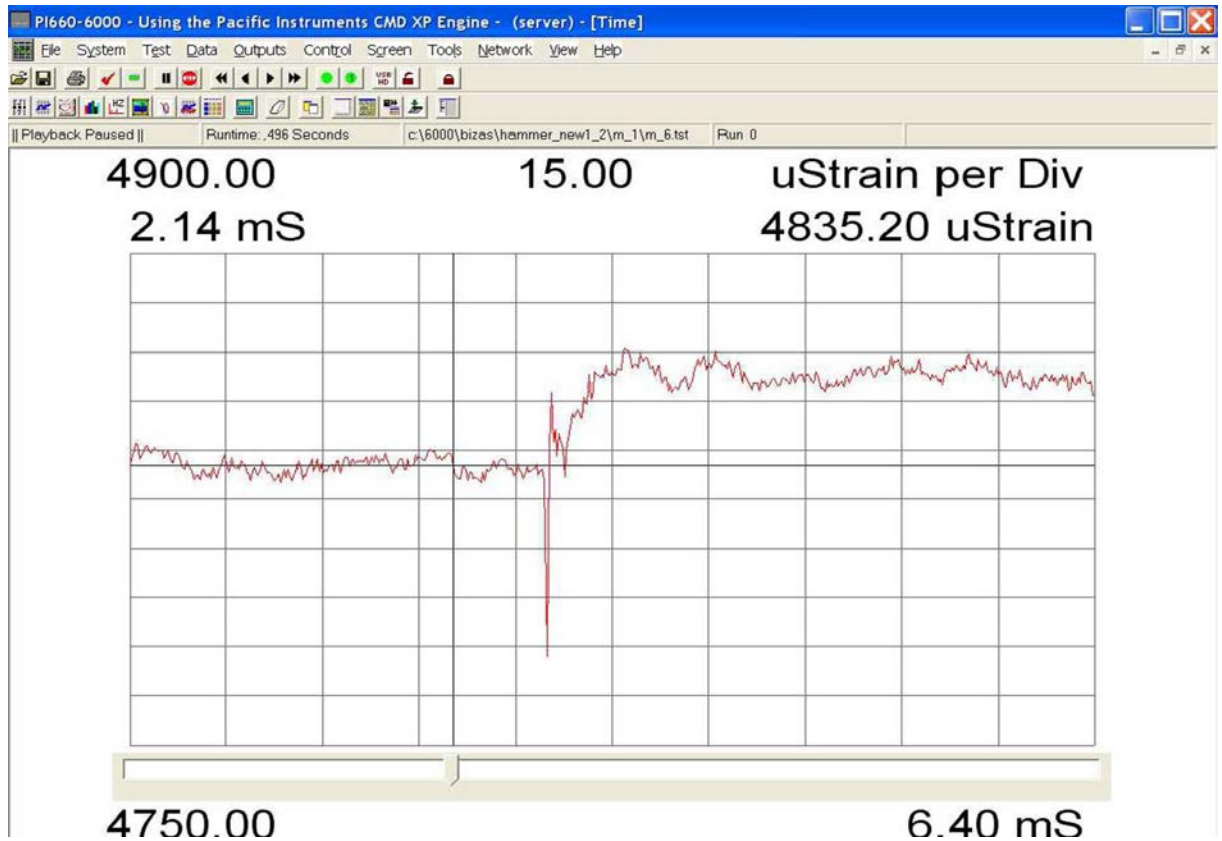
Εικόνα 44: Μετρηση 4 Μέση



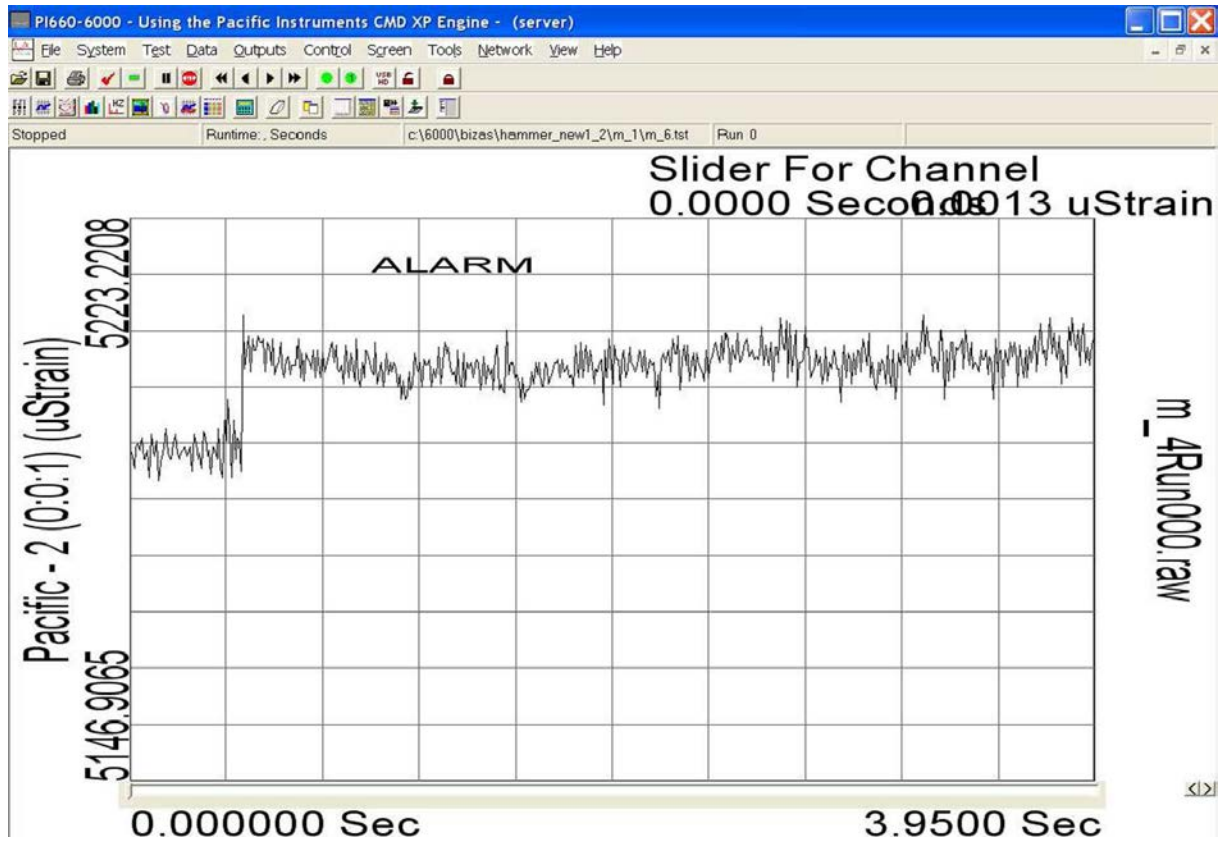
Εικόνα 45: Μετρηση 4 Μέση*



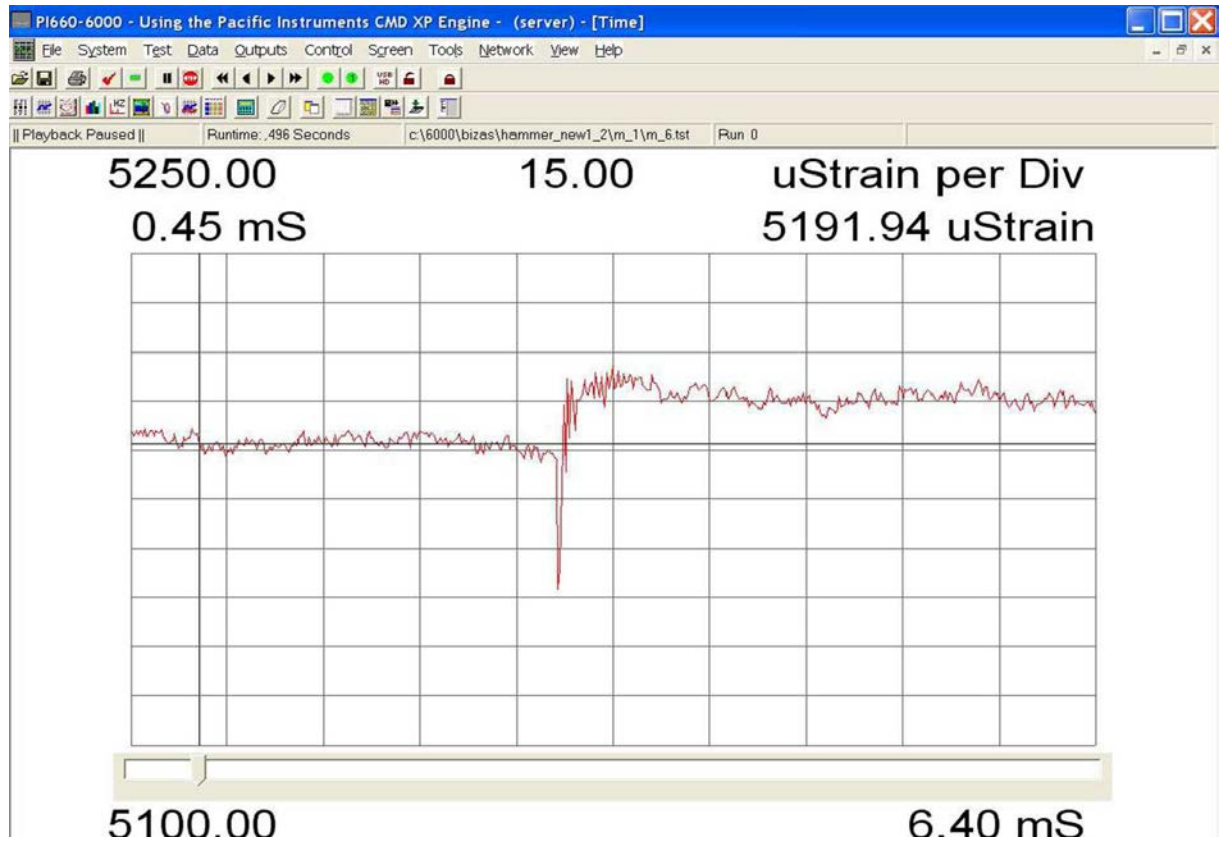
Εικόνα 46: Μέτρηση 5 Πάνω



Εικόνα 47: Μέτρηση 5 Πάνω *

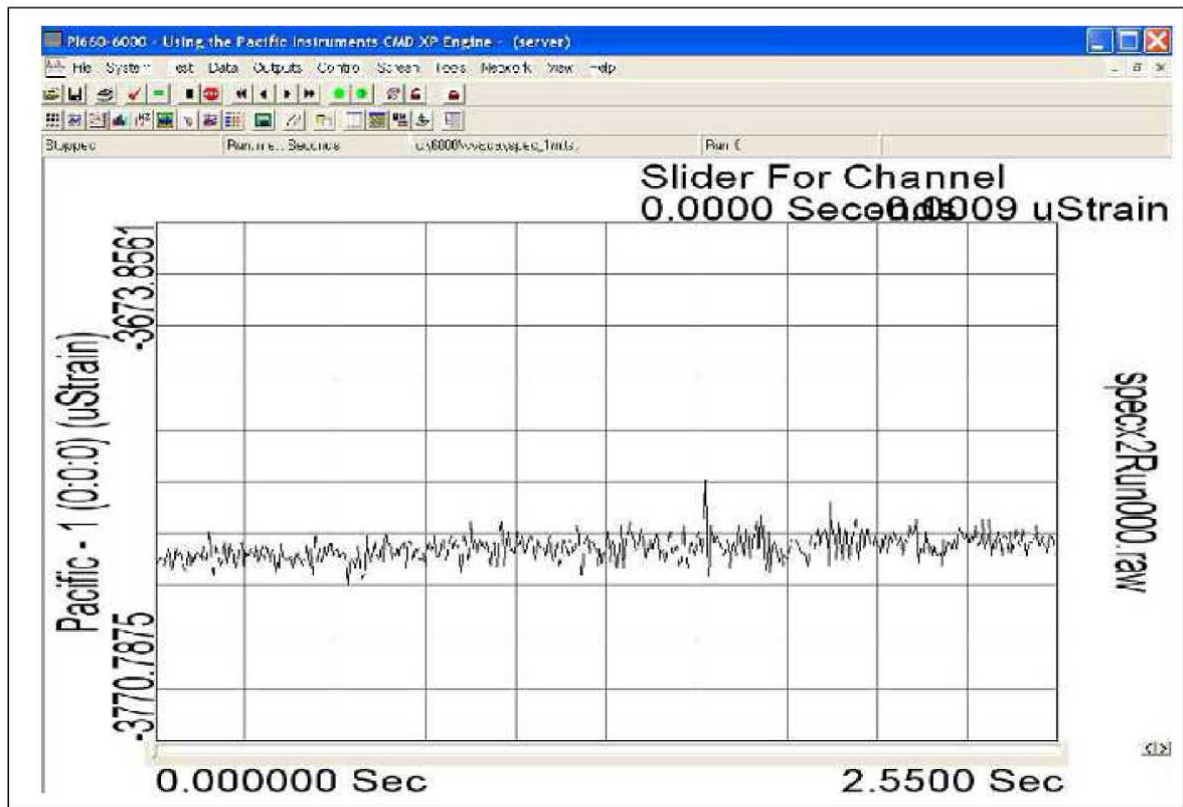


Εικόνα 48: Μέτρηση 5 Μέση

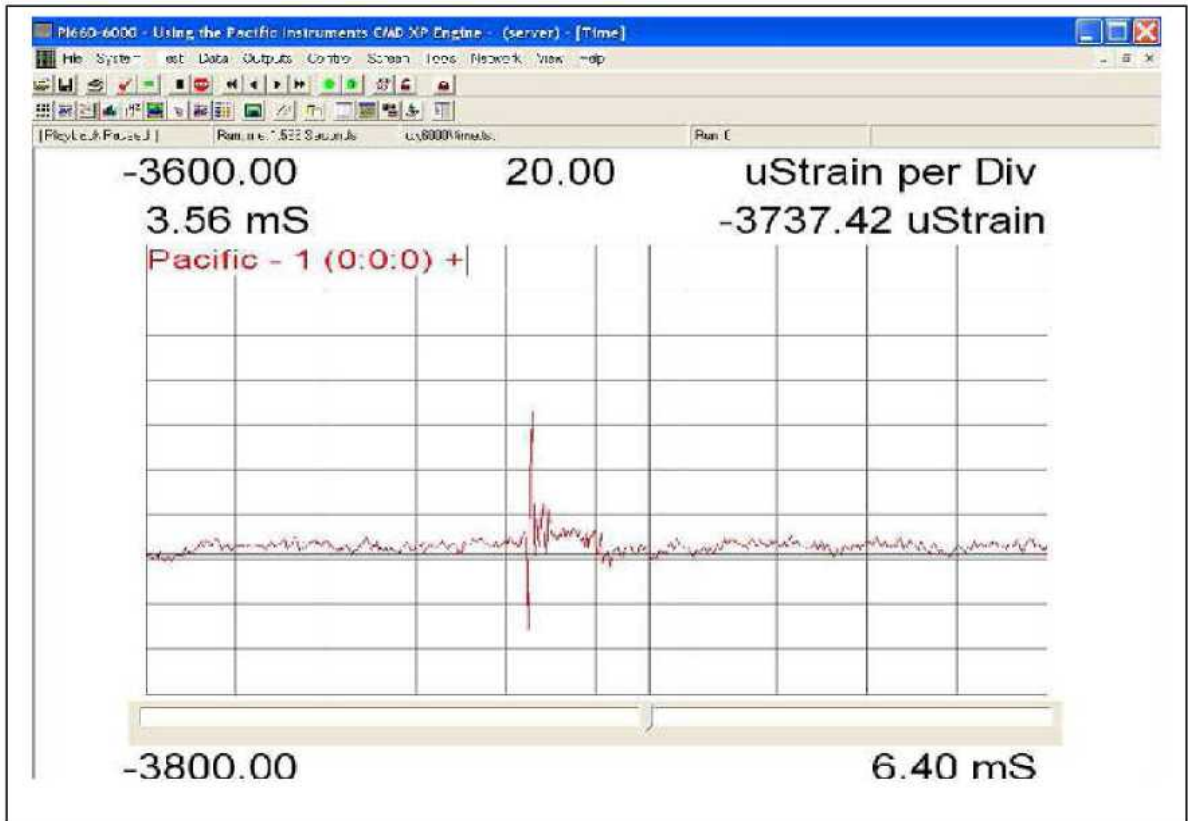


Εικόνα 49: Μέτρηση 5 Μέση *

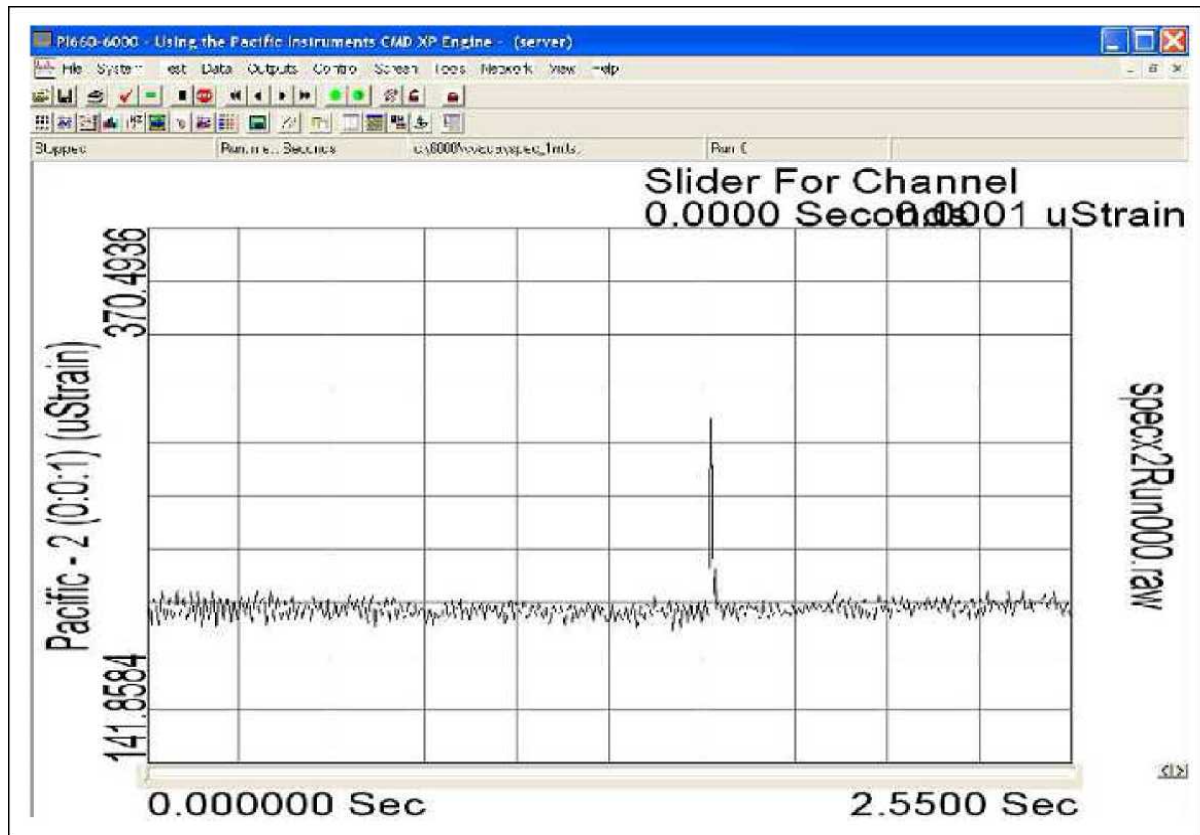
Ομάδα Β:



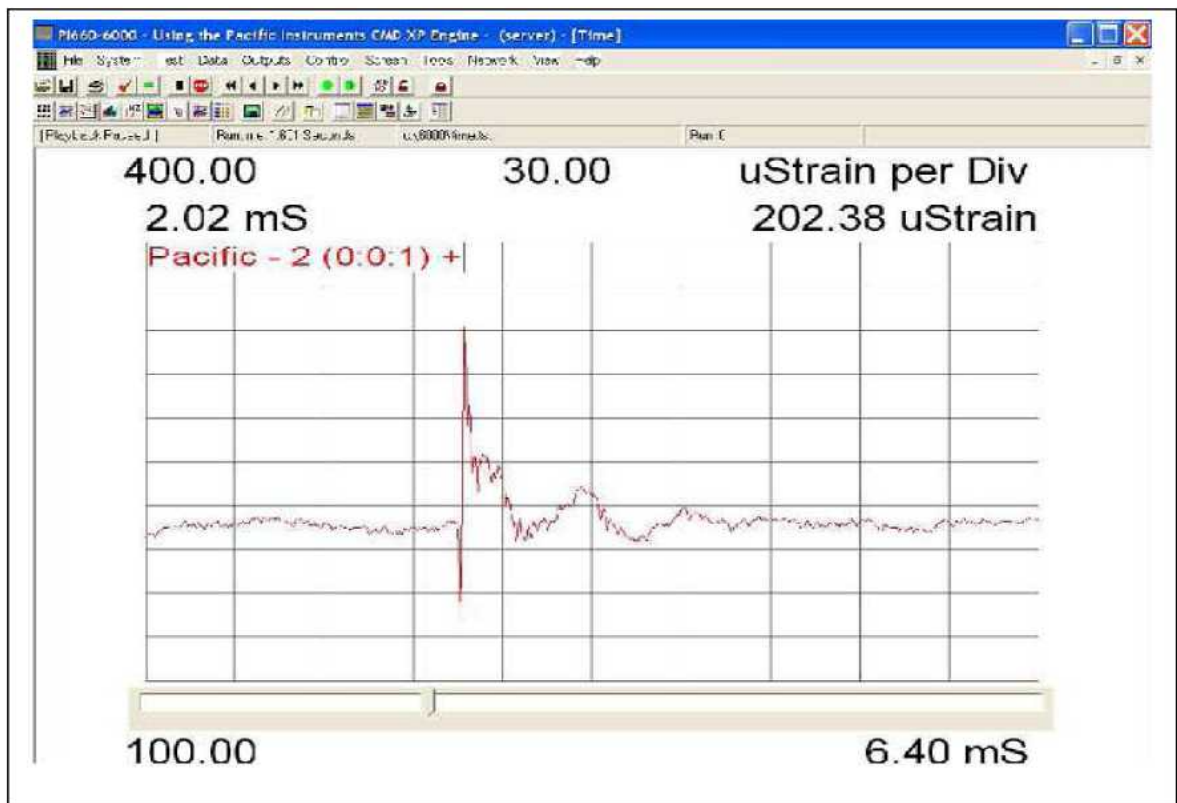
Εικόνα 50: Κάτω



Εικόνα 51: Κάτω*

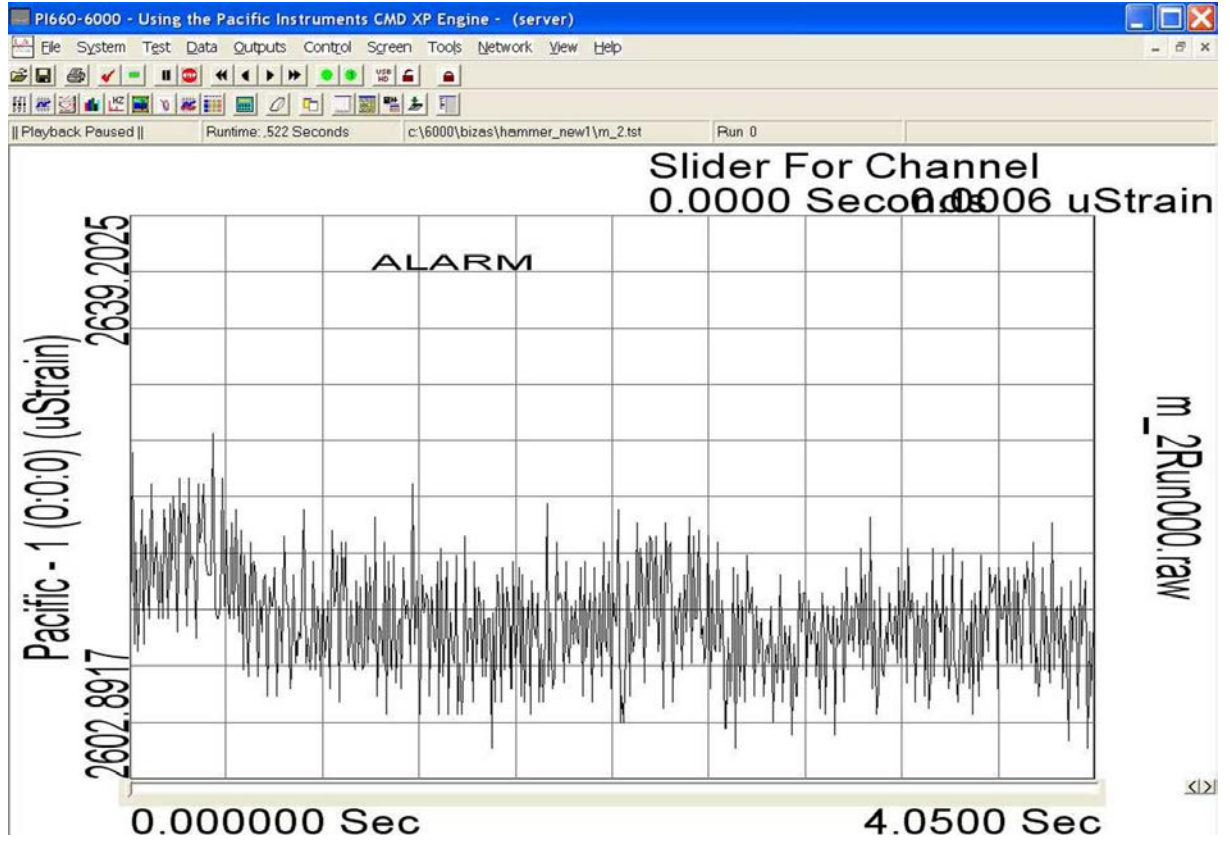


Εικόνα 52: Πάνω

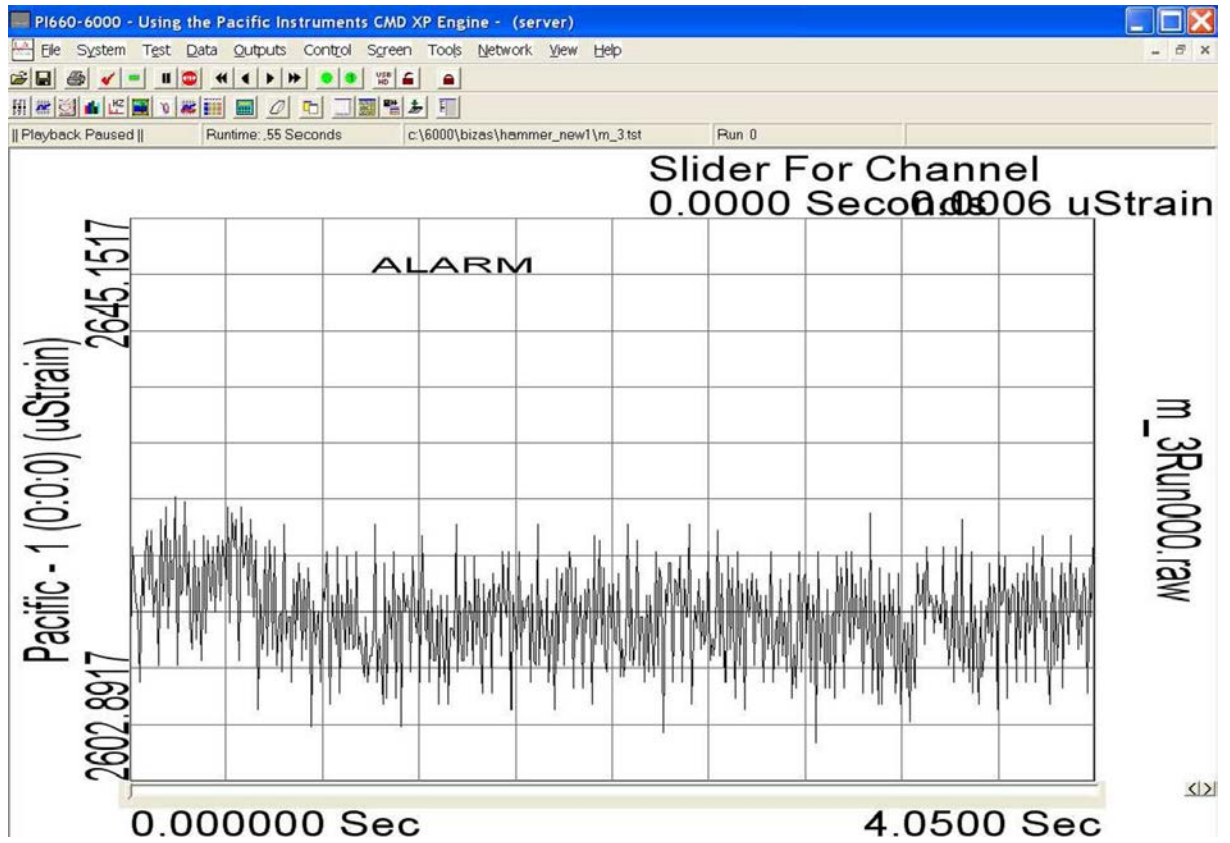


Εικόνα 53: Πάνω*

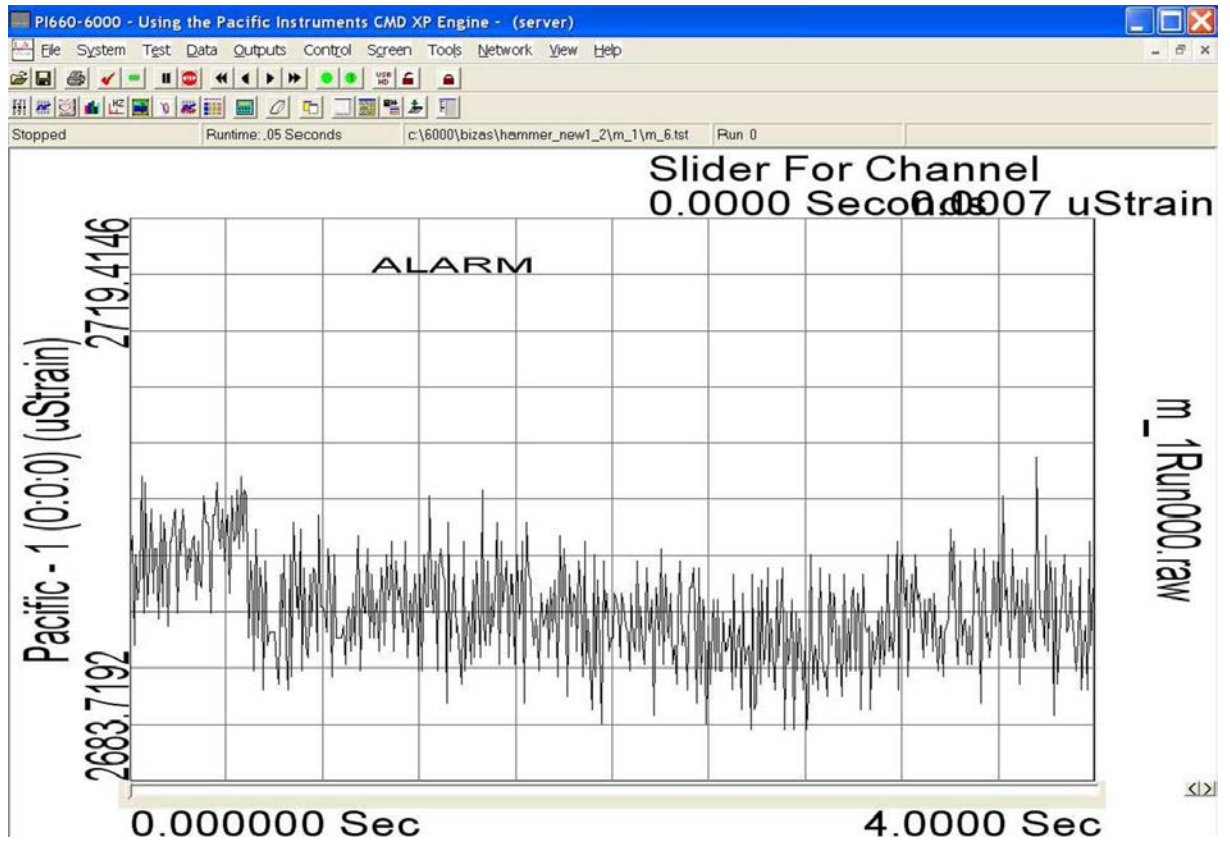
Ομάδα Γ:



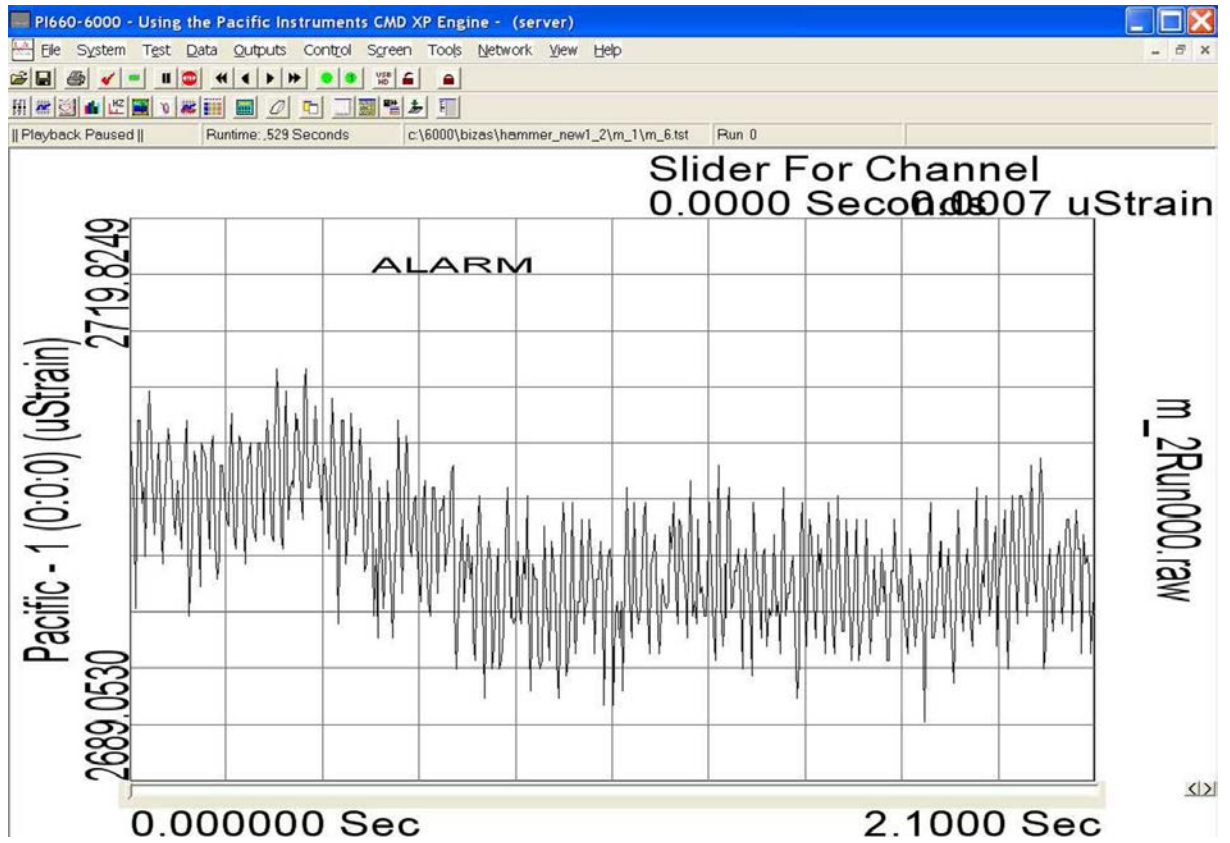
Εικόνα 54: Μέτρηση 1



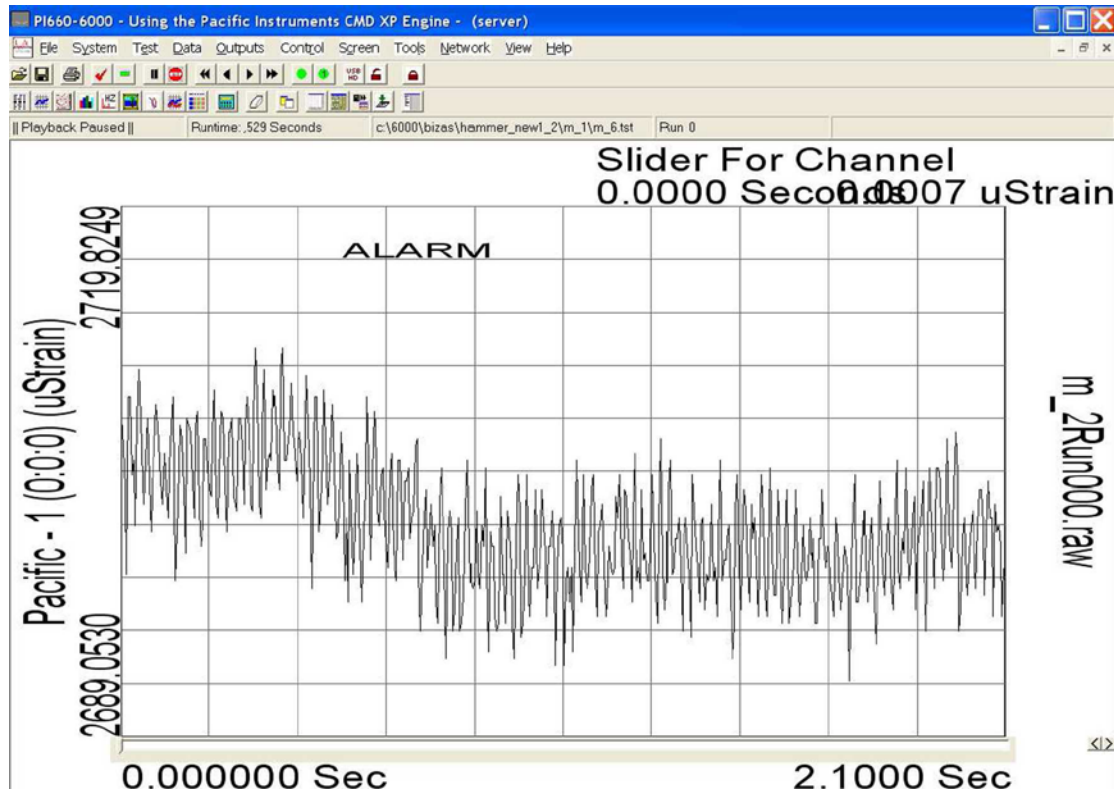
Εικόνα 55: Μέτρηση 2



Εικόνα 56: Μέτρηση 3



Εικόνα 57: Μέτρηση 4



Εικόνα 58: Μέτρηση 5

4.2.7 Συμπεράσματα

Στην πειραματική εργασία αυτή, ελέγχθηκε αν συσχετίζεται η επίδραση του βαθμού συνάφειας οπλισμού- σκυροδέματος στην διάδοση τασικού παλμού. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι υπάρχει επίδραση του βαθμού συνάφειας, γιατί υπήρξε διαφοροποίηση του παλμού. Συνοψίζοντας φάνηκε ότι:

- Στο δοκίμιο που δεν είχε καλή συνάφεια οπλισμού σκυροδέματος, η απόκριση του οπλισμού στον κρουστικό παλμό, ήταν διαταραχή της παραμόρφωσης επίσης μορφής παλμού, (εξασθενημένου), δηλαδή μικρή ταλάντωση και επαναφορά στα αρχικά επίπεδα.
- Για το πιο πάνω σημείο, (που ο βαθμός συνάφειας ήταν μικρότερος), η ταλάντωση ήταν εντονότερη μέχρι την επαναφορά της.
- Στα δοκίμια που είχαν συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος, η απόκριση του οπλισμού δεν ήταν της μορφής παλμού, γιατί αμέσως μετά την πρώτη διαταραχή η παραμόρφωση παρουσιάζε

θετική μεταβολή την οποία και διατηρούσε χωρίς να επιστρέφει στα αρχικά της επίπεδα.

- Για το πιο κάτω σημείο («μέση») (που ο βαθμός συνάφειας ήταν μεγαλύτερος), ήταν μεγαλύτερη και η θετική μεταβολή της παραμόρφωσης.
- Τα φαινόμενα ως προς τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά ήταν επαναλήψιμα.
- Στο δοκίμιο με συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος, στην κάτω θέση, που ο μετρητής παραμόρφωσης είναι εγκάρσια τοποθετημένος, η απόκριση του οπλισμού, ναι μεν δεν ήταν της μορφής παλμού, όπως και στα διαμήκη, όμως, παρουσίαζε μια ελαφρά αρνητική διαραχή, την οποία διατηρεί, χωρίς να επιστρέφει στα αρχικά επίπεδα.

Κεφάλαιο 5

Συγκολλήσεις

5.1 Γενικά περί συγκολλήσεων

Συγκόλληση ονομάζουμε την μέθοδο κατά την οποία δύο υλικά, συνήθως μέταλλα, συνδέονται μόνιμα μεταξύ τους μέσω τοπικής πρόσφυσης, που επιτυγχάνεται με κατάλληλο συνδυασμό θερμοκρασίας, πίεσης και μεταλλουργικών συνθηκών. Από την εποχή της αρχαιότητας εμφανίζονταν διαδικασίες συγκόλλησης, που βασίζονταν κυρίως στη μέχρι τότε γνώση των υλικών. Έτσι, η συγκόλληση με χύτευση καθιερώθηκε από τους αρχαίους χρόνους ως η κύρια μορφή σύνδεσης και επισκευής σπασμένων κατασκευών από μπρούντζο ή χυτοσίδηρο. Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η συγκόλληση σε κάμινο (καμινοσυγκόλληση), η κασιτεροκόλληση, που χρησιμοποιείται μέχρι τις μέρες μας ιδιαίτερα στη λευκοσιδηρουργία, η μπρουτζοκόλληση κ.λπ.. Η πιο κλασική μέθοδος συγκόλλησης, που είναι η συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη, εμφανίστηκε στην αρχή του εικοστού αιώνα. Από τότε πολλές διαφορετικές μέθοδοι έχουν ανακαλυφθεί και προσφέρονται για την πραγματοποίηση πολύπλοκων προϊόντων. Η λίστα με τα αντικείμενα ή προϊόντα που έχουν συγκολλητά μέρη είναι ατελείωτη και περιλαμβάνει από στοιχεία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μέχρι πλοία, μηχανές αεριοθούμενων, αυτοκίνητα, γέφυρες, μεταλλικά έπιπλα, κτίρια με μεταλλικό σκελετό κ.λπ.. Επειδή ο συνδυασμός θερμοκρασίας και πίεσης μπορεί να κυμαίνεται από υψηλή θερμοκρασία με καθόλου πίεση, μέχρι υψηλή πίεση με χαμηλή θερμοκρασία, η συγκόλληση μπορεί να επιτευχθεί με μεγάλη ποικιλία συνθηκών, με αποτέλεσμα σήμερα να έχει αναπτυχθεί και να χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία μεγάλος αριθμός μεθόδων-συγκόλλησης (περίπου 50 διαφορετικές τεχνικές). Οι συγκολλήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες:

1. Συγκολλήσεις τήξης

Πραγματοποιούνται με πλήρωση της περιοχής σύνδεσης με τηγμένο συγκολλητικό υλικό. Εν συνεχεία οι συγκολλήσεις τήξης ανάλογα την φύση του συγκολλητικού υλικού διακρίνονται σε:

- Αυτογενείς συγκολλήσεις, όπου η κόλληση και τα συγκολλημένα τεμάχια αποτελούνται από το ίδιο ή παρόμοιο υλικό.
- Ετερογενείς συγκολλήσεις, όπου το υλικό κόλλησης των τεμαχίων είναι διαφορετικό.

2. Συγκολλήσεις στερεάς φάσης ή πίεσης

Πραγματοποιούνται με διάχυση του υλικού μέσω μιας ενδιάμεσης επιφάνειας σύνδεσης ή μέσω αυτόματης σύνδεσης των επιφανειών που έρχονται σε επαφή.

Η συγκόλληση αποτελεί μια πανάρχαια μέθοδο μόνιμης σύνδεσης δύο υλικών, συνήθως μετάλλων. Οι χρήσεις της στη σημερινή εποχή επεκτείνονται από τα πολύ μικρά κυκλώματα που υπάρχουν στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές μέχρι την κατασκευή πλοίων και αεροσκαφών. Γίνεται κατανοητό λοιπόν πόσο σημαντικό είναι το πρόβλημα ελέγχου των συγκολλήσεων.

Υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι ελέγχου συγκολλήσεων, δαπανηροί και μη, περίπλοκοι ή απλοί κλπ, με πιο διαδεδομένες ίσως τις μεθόδους των υπερήχων, της ακουστικής εκπομπής και των διεισδυτικών υγρών, που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από συγκολλήσεις σε διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δεξαμενές, σωλήνες αλλά και πλήθος άλλων κατασκευών, π.χ. αεροσκάφη. Ο έλεγχος αφορά την ποιότητα των συγκολλήσεων τόσο από μεριάς αντοχής όσο και του ποιοτικού ελέγχου για την ύπαρξη μικρορωγμών ή άλλων ατελειών.

Μία πρώτη προσπάθεια για πειραματικό έλεγχο της ποιότητας μιας συγκόλλησης, επιτυγχάνεται, εξετάζοντας τις μεταβολές που μπορεί να υποστεί τασικός παλμός κατά τη διάδοσή του διαμέσου αυτής. Ελέγχοντας λοιπόν δοκίμια - χαλύβδινες ράβδους οπλισμού σκυροδέματος, που επιλέχθηκαν λόγω ευρείας χρήσης τους στις νέες οικοδομικές κατασκευές αλλά κυρίως στις προσθήκες ορόφων υπάρχοντων κατασκευών, που συνήθως υπάρχει ελλειμματικός έλεγχος της ποιότητάς του. Οι χαλύβδινες ράβδοι οπλισμού κόπηκαν και συγκολλήθηκαν με μη ορθό τρόπο προκειμένου να ελεγχθούν με τη βοήθεια τασικού παλμού. Ο τασικός παλμός δημιουργήθηκε από την κρούση επί του δοκιμίου μιας σφαίρας μικρής διαμέτρου που εκτοξευόταν από κάνη αεριοβόλου. Η κρούση έγινε διαμήκως και εγκάρσιως του άξονα των δοκιμίων. Με τη βοήθεια ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης, που επικολλήθηκαν λίγο πριν και λίγο μετά το σημείο συγκόλλησης, μετρήθηκαν οι προκαλούμενες παραμορφώσεις. Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός μετρητικού συστήματος ταχείας λήψης δεδομένων με τον οποίο ήταν συνδεδεμένοι οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης.

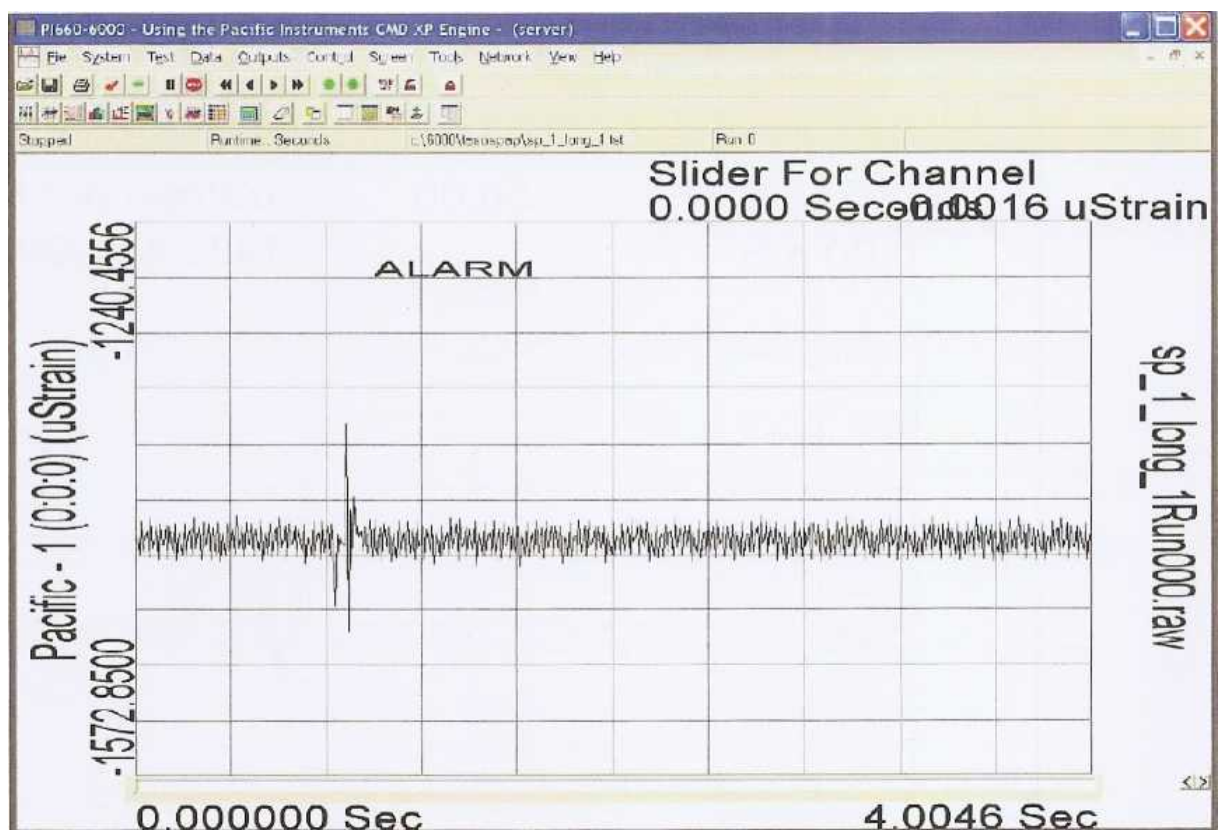
5.2 Διαγράμματα

Ακολουθεί η παρουσίαση των διαγραμμάτων-μετρήσεων. Όπως έχει αναφερθεί, στα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν, έγιναν κρούσεις κατά τον

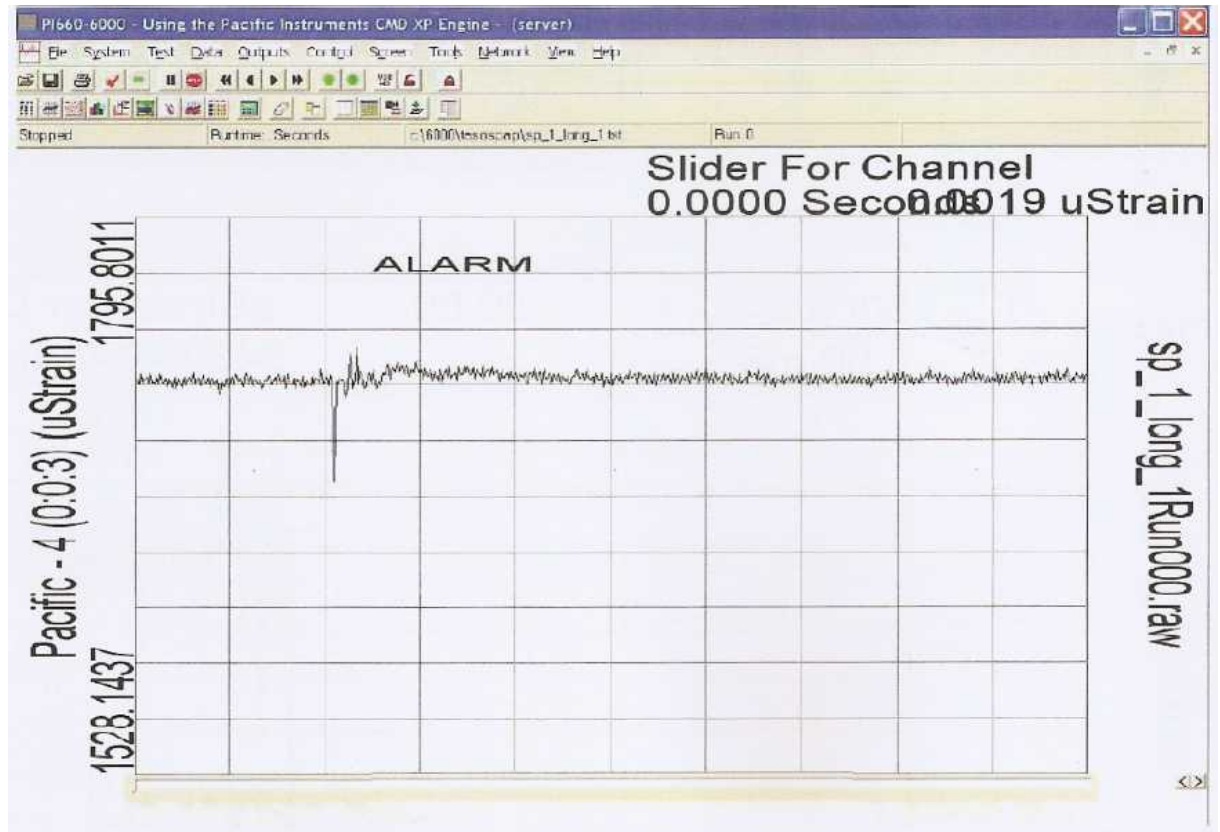
άξονα τους (διαμήκες χτύπημα) και κάθετα σε αυτόν (εγκάρσιο χτύπημα). Στο κάθε δοκίμιο είχαν τοποθετηθεί 4 μετρητές: ένας διαμήκως και ένας εγκαρσίως πριν το σημείο συγκόλλησης και άλλοι δύο αντίστοιχοι μετά το σημείο συγκόλλησης.

Ο τρόπος παρουσίασης έχει ως εξής:

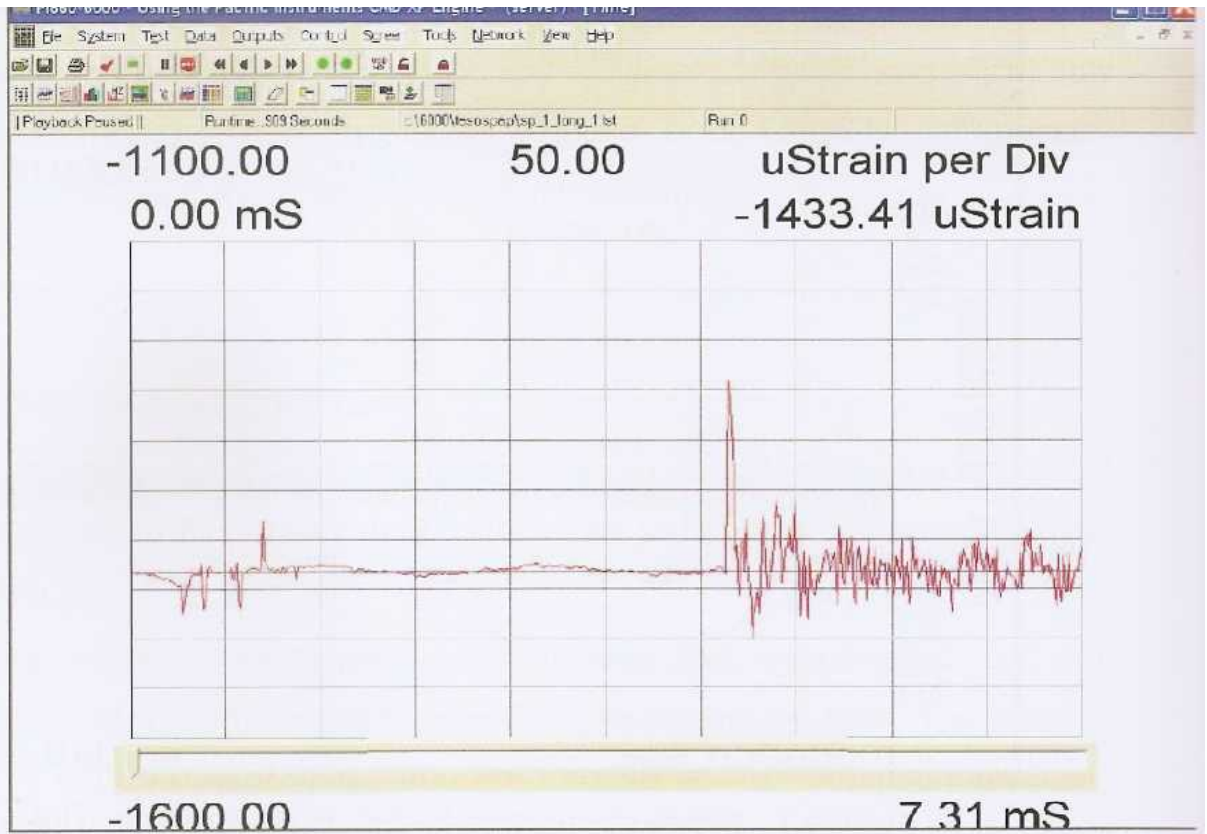
Η πρώτη ομάδα διαγραμμάτων αφορά το διαμήκες χτύπημα. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που κατέγραψαν οι δύο μετρητές παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί παράλληλα με τον άξονα της ράβδου, δηλαδή οι διαμήκεις. Επίσης παρουσιάζονται και κάποια αποτελέσματα μετρητών που είχαν τοποθετηθεί κάθετα με τον άξονα της κάθε ράβδου, δηλαδή οι εγκάρσιοι. Το πρώτο διάγραμμα αφορά τον μετρητή πριν το σημείο συγκόλλησης και το δεύτερο αυτόν μετά. Πρώτα παρουσιάζονται τα Quick Plot (QP) διαγράμματα και μετά τα Oscilloscope (Osc).



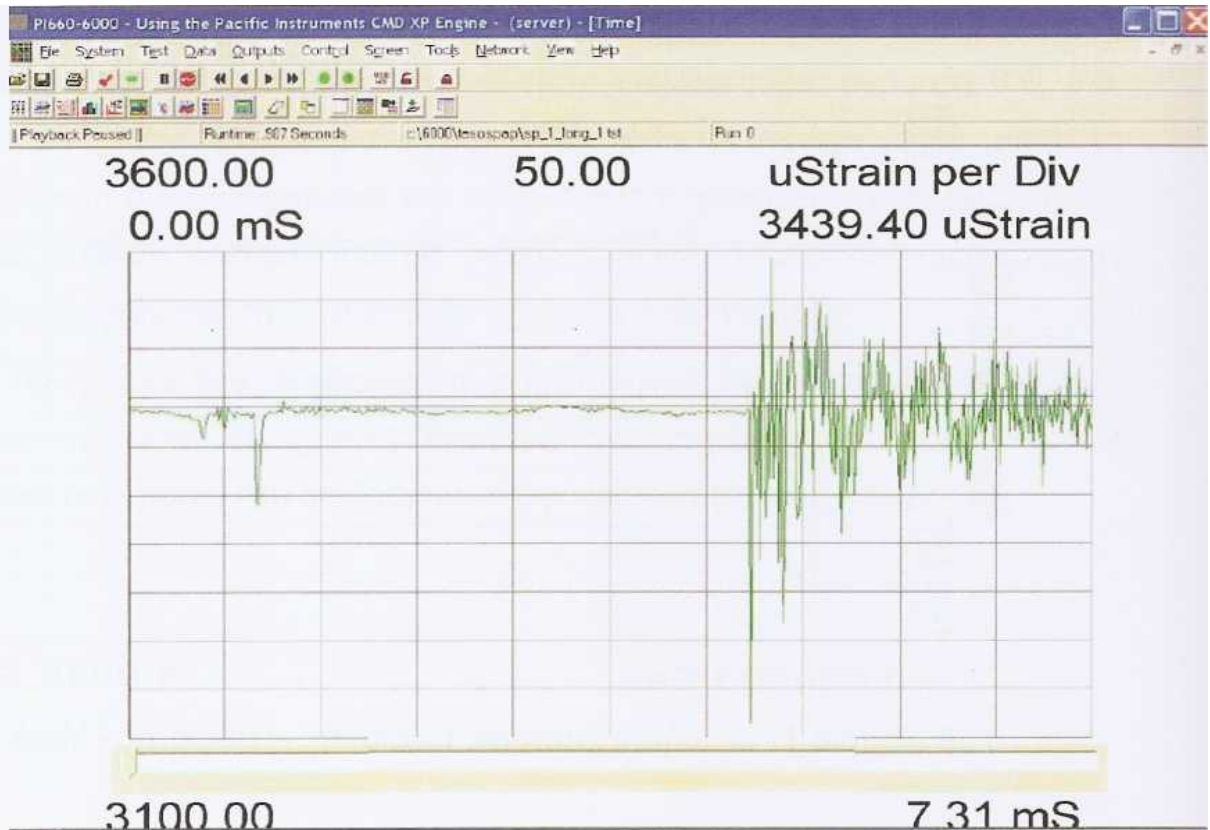
Εικόνα 59: Διαμήκες. (QP) Πριν το σημείο συγκόλλησης



Εικόνα 60: Διαμήκης. (QP) Μετά το σημείο συγκόλλησης



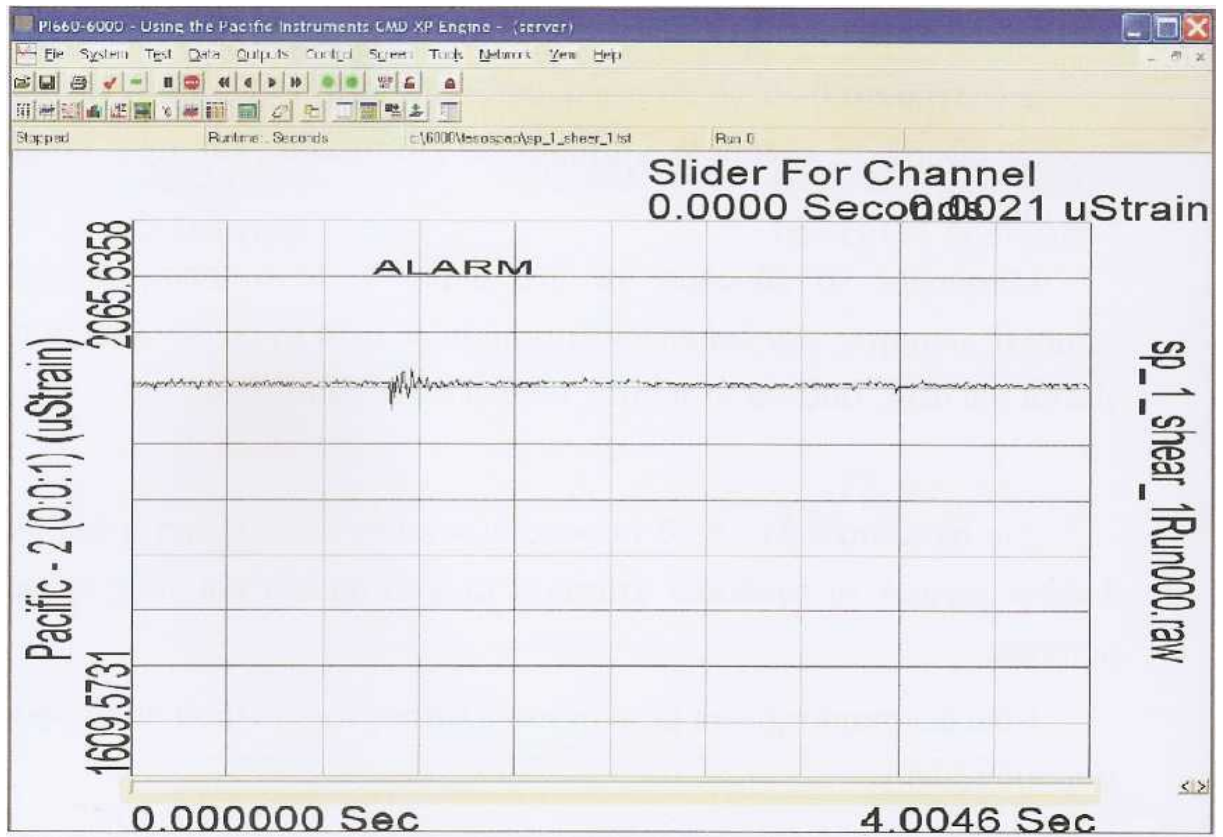
Εικόνα 61: Διαμήκης. (OSC) Πριν το σημείο συγκόλλησης



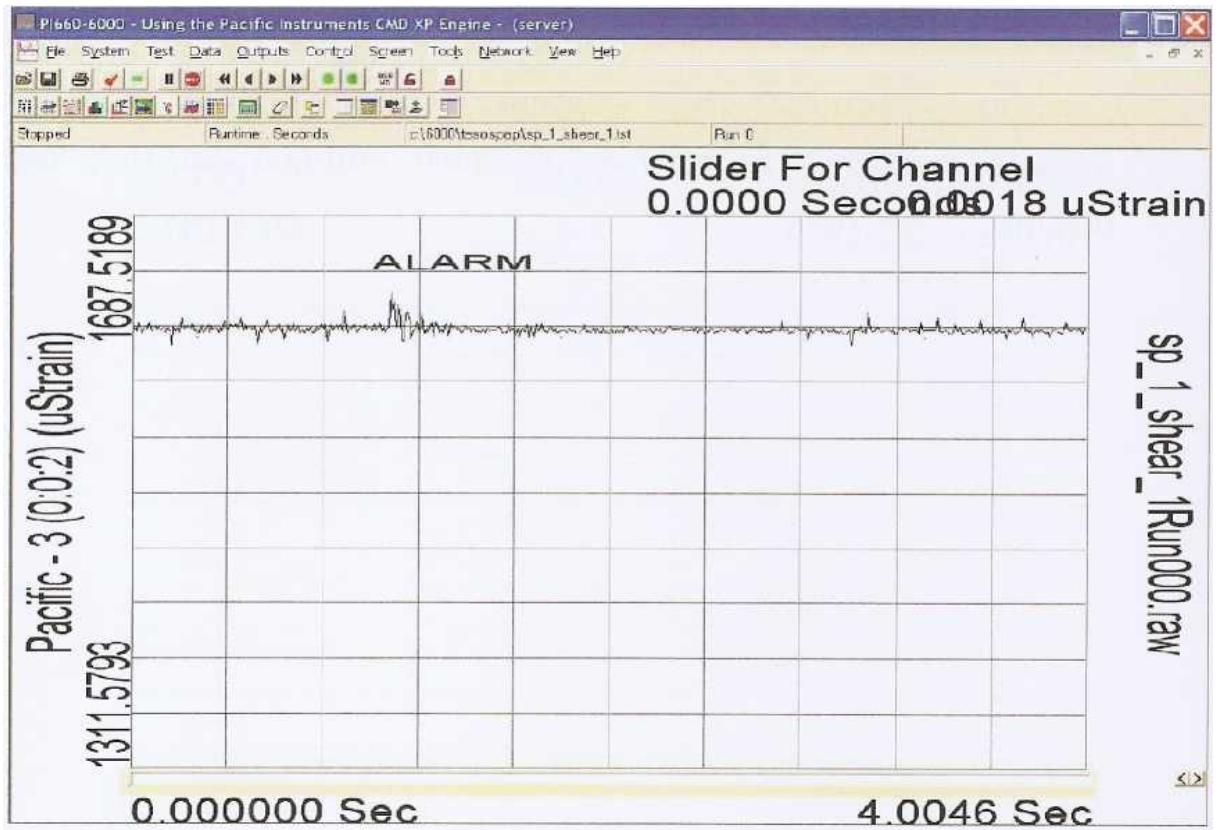
Εικόνα 62: Διαμήκες. (OSC) Μετά το σημείο συγκόλλησης

Η δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων αφορά το εγκάρσιο χτύπημα. Παρουσιάζονται για κάθε δοκίμιο χωριστά τα αποτελέσματα που κατέγραψαν οι δύο μετρητές παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί κάθετα με τον άξονα της κάθε ράβδου, δηλαδή οι εγκάρσιοι. Επίσης παρουσιάζονται και κάποια αποτελέσματα μετρητών που είχαν τοποθετηθεί παράλληλα με τον άξονα της κάθε ράβδου, δηλαδή οι διαμήκεις. Σε κάθε σελίδα το πρώτο διάγραμμα αφορά τον μετρητή πριν το σημείο συγκόλλησης και το δεύτερο αυτόν μετά. Πρώτα παρουσιάζονται τα Quick Plot (QP) διαγράμματα και μετά τα Oscilloscope (Osc).

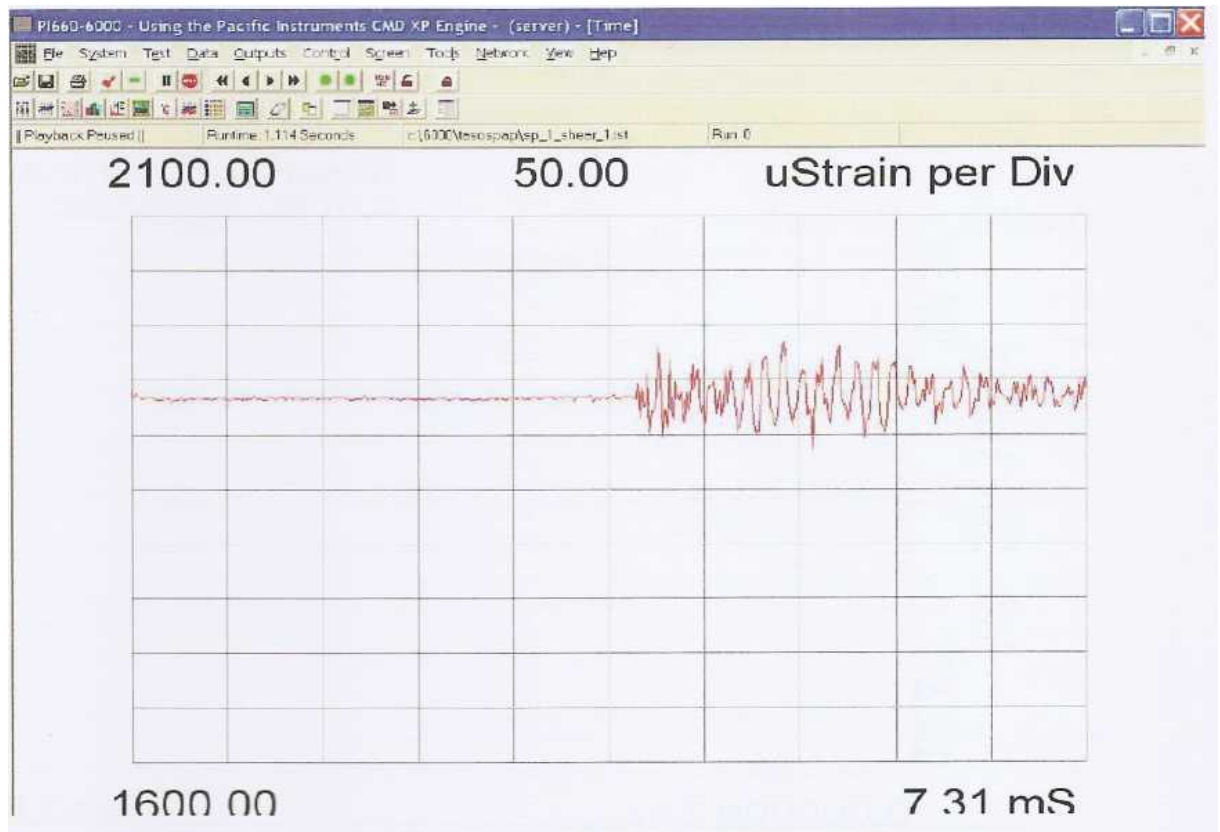
Προκειμένου να έχουμε καλύτερη εποπτεία της χρονικής ιστορίας και να μπορούμε να κάνουμε ευκολότερα σύγκριση, έγινε αναγωγή των διαγραμμάτων Oscilloscope στην ίδια κλίμακα, εκτός κάποιων περιπτώσεων που οι διαφορές ήταν μεγάλες οπότε διπλασιάστηκε.



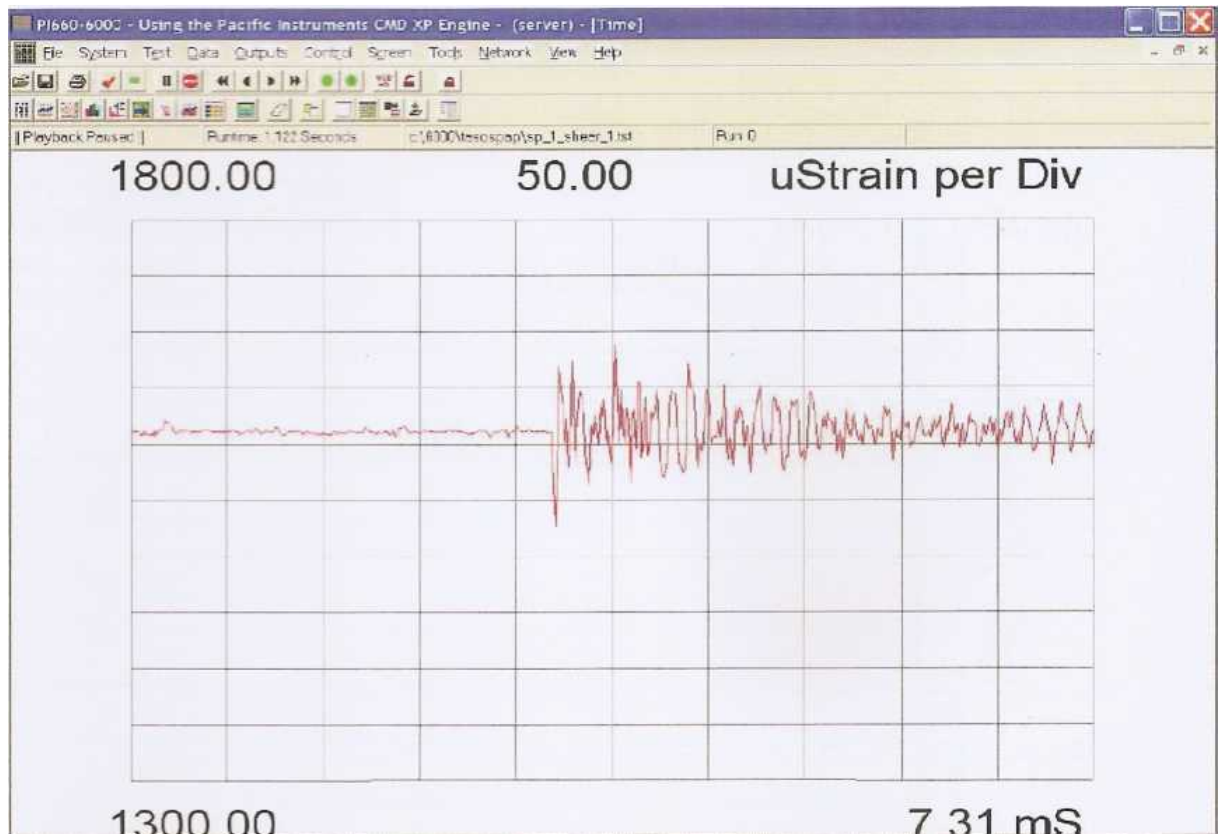
Εικόνα 63: Εγκάρσιο (QP) Πριν το σημείο συγκόλλησης



Εικόνα 64: Εγκάρσιο (QP) Μετά το σημείο συγκόλλησης



Εικόνα 65: Εγκάρσιο (OSC) Πριν το σημείο συγκόλλησης



Εικόνα 66: Εγκάρσιο (OSC) Μετά το σημείο συγκόλλησης

5.3 Συμπεράσματα

- Στην περίπτωση του διαμήκους χτυπήματος:

Από τους μετρητές παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί παρατηρήθηκε ενίσχυση του παλμού μετά τη διέλευσή του από τη συγκόλληση. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκε αύξηση του πλάτους του παλμού με ταυτόχρονη μικρή ελάττωση της περιόδου του.

Όσον αφορά τους μετρητές παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί εγκαρσίως δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή του πλάτους του παλμού πριν και μετά τη συγκόλληση.

- Στην περίπτωση του εγκαρσίου χτυπήματος:

Η απόκριση των μετρητών παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί διαμήκως ήταν παρόμοια, δηλαδή παρατηρήθηκε το φαινόμενο ενίσχυσης του παλμού μετά τη συγκόλληση.

Κεφάλαιο 6

Έλεγχος διαταραχών σε αγωγούς υδραυλικών δικτύων

6.1 Αγωγοί υδραυλικών δικτύων

Τα δίκτυα ύδρευσης - αποχέτευσης συνεχώς επεκτείνονται καθώς νέες περιοχές εντάσσονται στα δίκτυα. Την πλειοψηφία των δικτύων αποτελούν κλειστοί αγωγοί. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρουσιάζουν είναι οι βλάβες από το υδραυλικό πλήγμα. Η αντικατάσταση- επισκευή δικτύων είναι γενικά επίπονη και ακριβή διαδικασία. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ενεργητικοί και παθητικοί για την αντιμετώπιση του υδραυλικού πλήγματος. Βεβαίως και άλλες πηγές κραδασμών δεν μπορούν να αποκλειστούν που μπορεί να προκληθούν από τυχαίες κρούσεις ή σεισμικές δράσεις.

Οι διαταραχές στους αγωγούς υδραυλικών δικτύων προκαλούνται από το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος. Κατά το φαινόμενο αυτό, οι διαταραχές εκδηλώνονται ως ένα κύμα πίεσης που βαίνει μέσα σε έναν αγωγό. Το κύμα αυτό μπορεί προσεγγιστικά να προσομοιωθεί από τον τασικό παλμό που μπορεί να προκληθεί με κρουστική καταπόνηση σε ένα αγωγό.

Η προσπάθεια συσχέτισης των παραμορφώσεων που προκαλούνται υπό διαφορετικές πειραματικές συνθήκες σε έναν αγωγό, όταν σε αυτόν μεταδίδεται τασικός παλμός από κρουστική σφύρα σταθερής δυναμικής ενέργειας. Η πειραματική διαδικασία, εκτελέστηκε σε πολλαπλές καταστάσεις, προέκυψαν συγκριτικά αποτελέσματα και εξακριβώθηκε ότι η χρήση μόνωσης στην εξωτερική επιφάνεια ενός αγωγού μπορεί να επηρεάσει τις προκαλούμενες διαταραχές.

Η αποτύπωση της διάδοσης κύματος μέσω των παραμορφώσεων που προκαλεί κατά την διαμήκη και εγκάρσια διάδοσή του στον αγωγό, αποτελεί σημαντικό βοήθημα-εργαλείο για όσους ασχολούνται με την μελέτη του προβλήματος και ιδιαίτερα για την ακριβέστερη προσομοίωσή του με υπολογιστικές μεθόδους.

Η μελέτη της διάδοσης γίνεται μέσω της καταγραφής των παραμορφώσεων και αφορά την κυματομορφή του παλμού. Γίνεται σύγκριση των κυματομορφών για διάφορους τύπους φόρτισης σε

μεταλλικούς και πλαστικούς σωλήνες γυμνούς ή μονωμένους με διαφορετικά μονωτικά υλικά.

Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δύο κυλινδρικά δοκίμια-σωλήνες, ένα από χάλυβα και ένα πλαστικό. Κατά μήκος και εγκάρσια της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων, περίπου στο μέσο αυτών, επικολλήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges). Τα δοκίμια επικαλύφθηκαν με δύο διαφορετικά είδη μονώσεων και τελικά υποβλήθηκαν σε κρουστική καταπόνηση σε διαφορετικές περιπτώσεις: γυμνή επιφάνεια και επικαλυμμένα με τη μόνωση, κατά μήκος και εγκάρσια. Οι τιμές των διαμήκων και εγκαρσίων παραμορφώσεων καταγράφηκαν σε σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων και κατόπιν έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων.

Στα δοκίμια δημιουργήθηκε τασικό κύμα, προκειμένου να συγκριθεί η κυματομορφή του και οι προκαλούμενες παραμορφώσεις για τους δύο τύπους δοκιμίων.

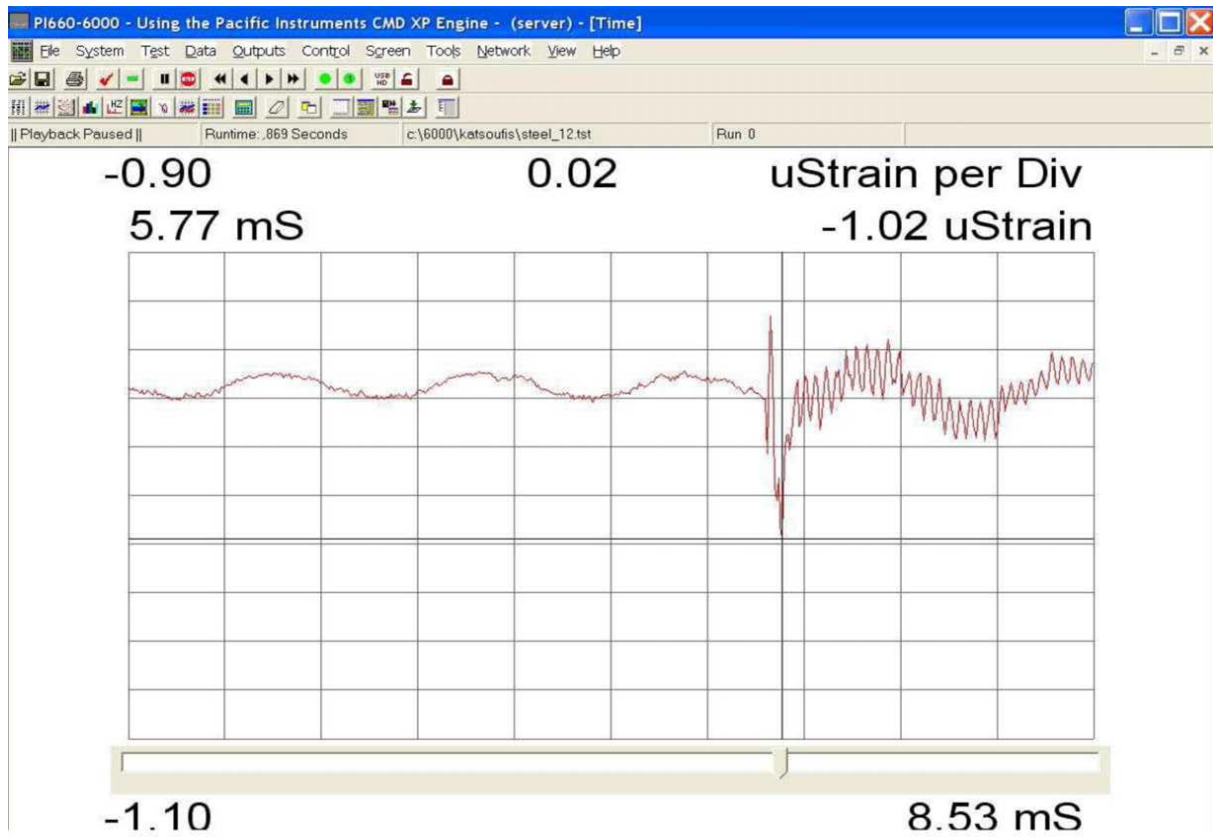
Στα δοκίμια δημιουργήθηκε τασικός παλμός από κρουστική καταπόνηση προερχόμενη από σφύρα μηχανής κρούσης. Η σφύρα σε όλες τις δοκιμές είχε σταθερή αρχική δυναμική ενέργεια, ώστε να διασφαλίζεται σταθερό κρουστικό φορτίο. Τα δοκίμια ήταν πακτωμένα εν προβόλω με δύο μεταλλικές εδράσεις για την εγκάρσια κρούση που πραγματοποιούνταν στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου, ενώ στην περίπτωση της διαμήκου κρούσης στηρίζονταν με απλή έδραση και αντιστήριξη.

6.2 Συμπεράσματα

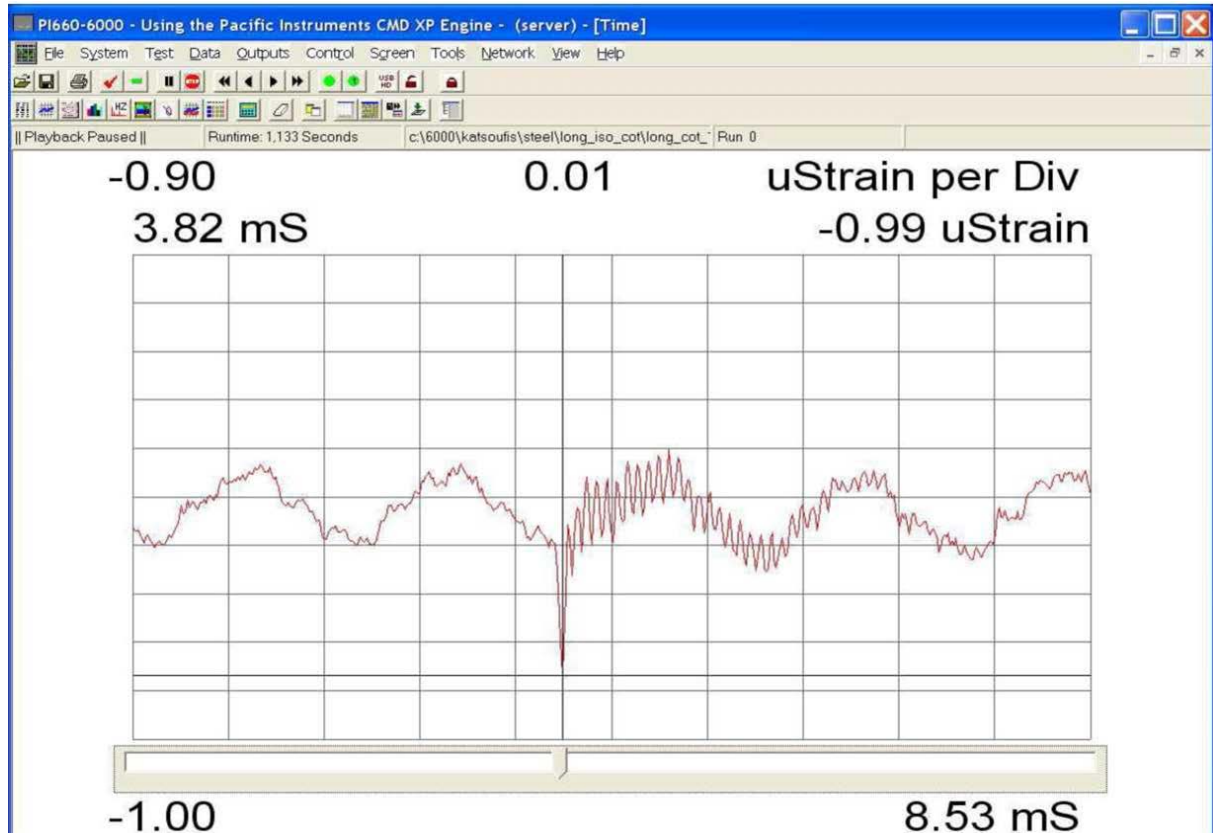
Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την προαναφερθείσα

πειραματική διαδικασία, εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι τα εξής:

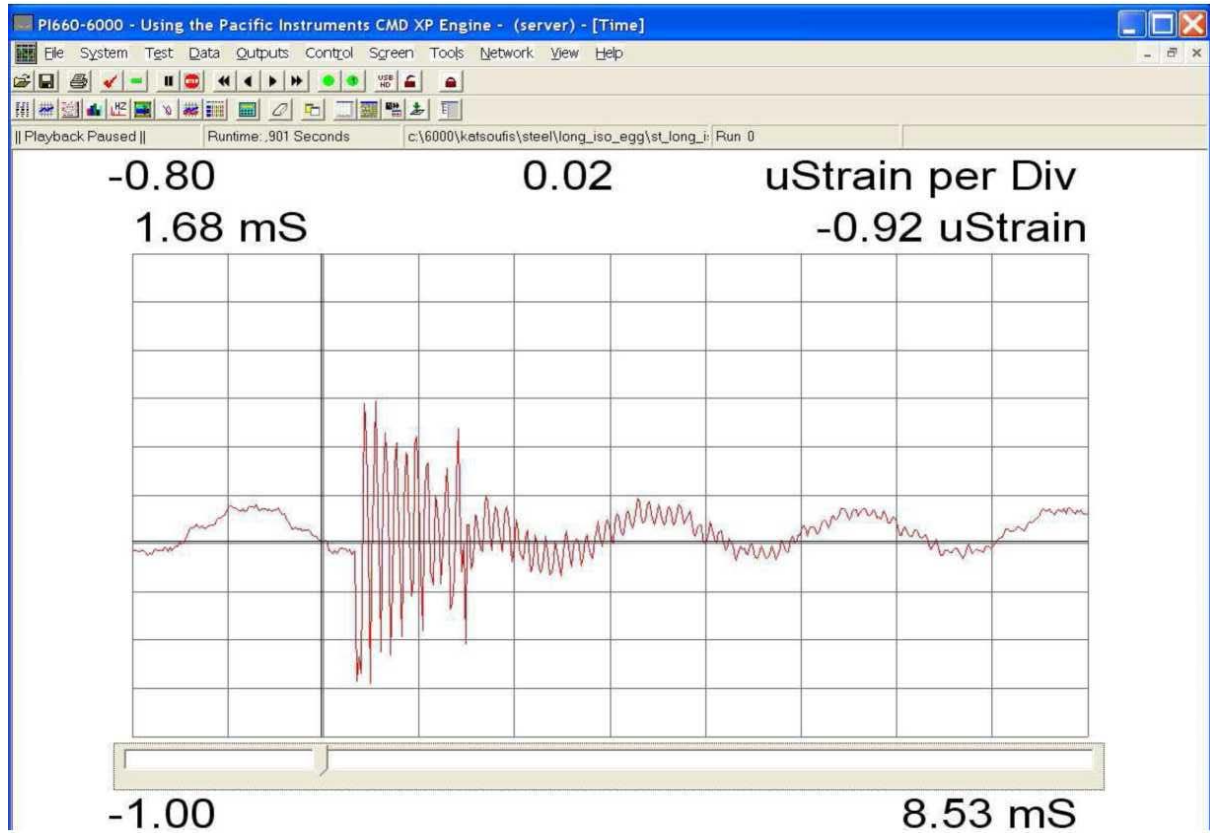
- Κατά τη διαμήκη κρούση στο δοκίμιο του χάλυβα, όσο και στο πλαστικό δοκίμιο, η επικάλυψη μόνωσης δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τον τασικό παλμό τόσο της κατά μήκος όσο και της εγκάρσιας παραμόρφωσης καθώς οι μέγιστες τιμές που προκύπτουν βάσει των διαγραμμάτων είναι παραπλήσιες. Ομοίως, η κυματομορφή παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη. Επομένως, δεν υπάρχει σχέση μόνωσης.



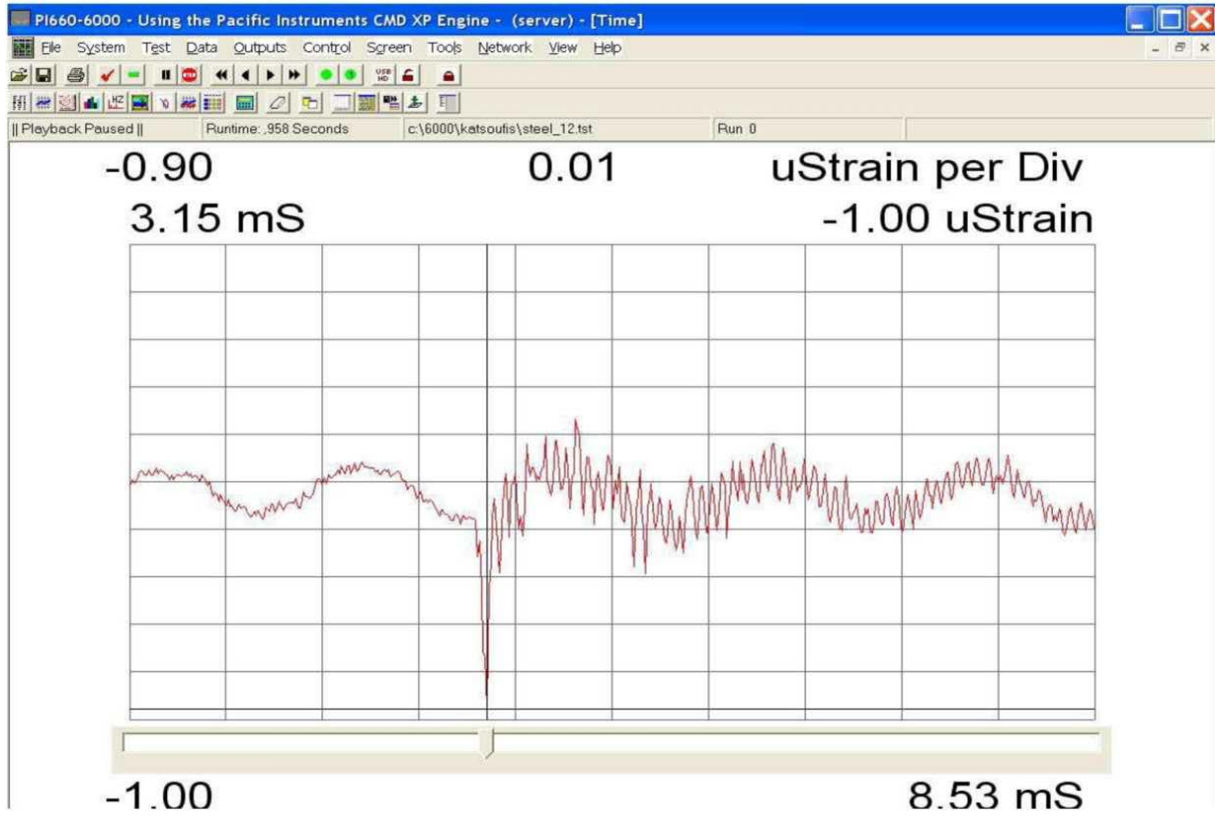
Εικόνα 67: Δοκίμιο Χάλυβα κατά μήκος κρούση - κατά μήκος παραμόρφωση, χωρίς μόνωση



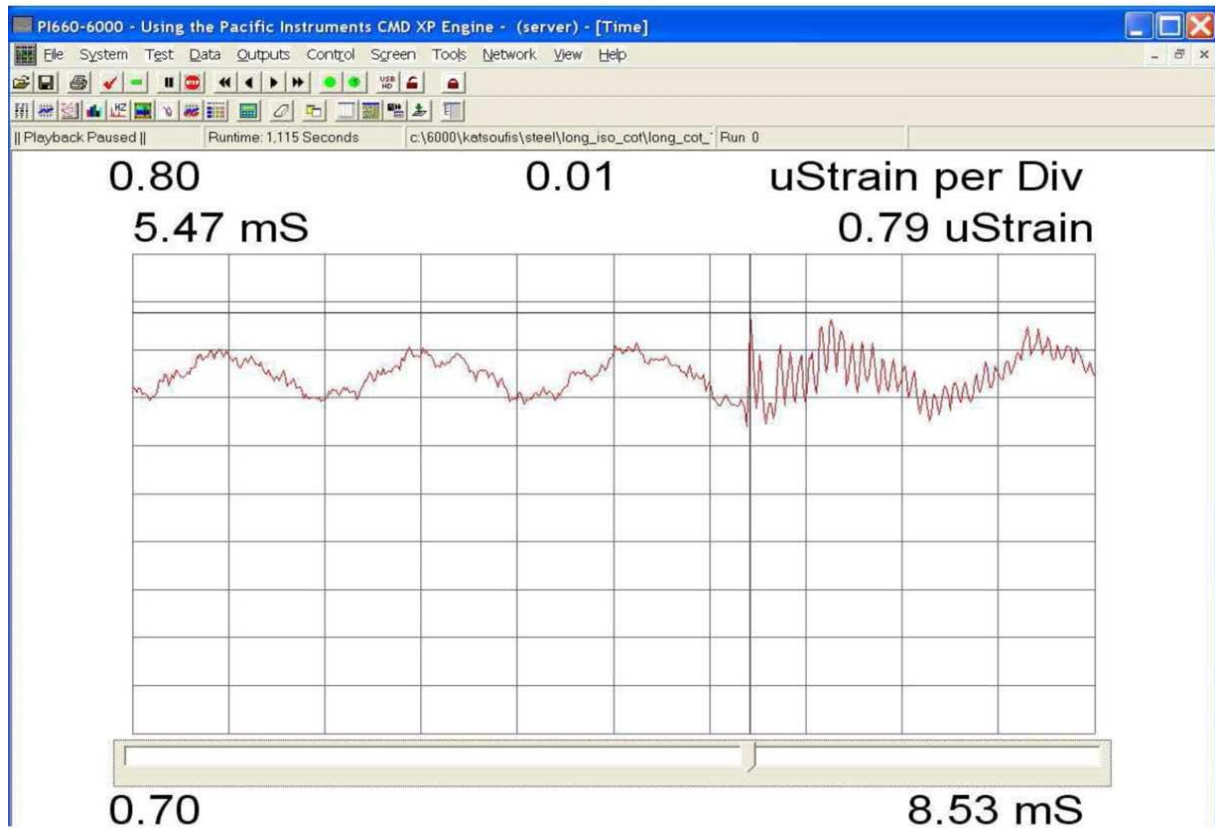
Εικόνα 68: Δοκίμιο Χάλυβα κατά μήκος κρούση - κατά μήκος παραμόρφωση, χωρίς μόνωση



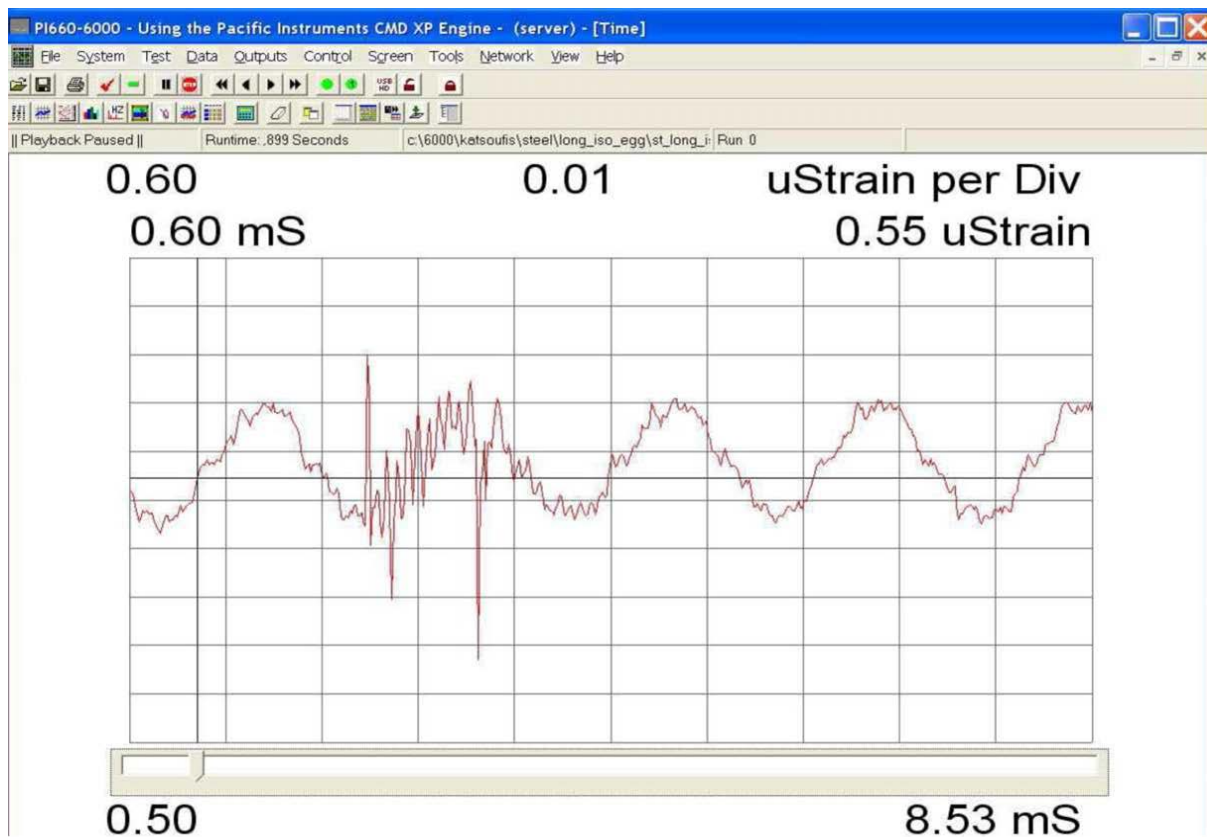
Εικόνα 69: Δοκίμιο Χάλυβα κατά μήκος κρούση - κατά μήκος παραμόρφωση, κυματοειδής μόνωση



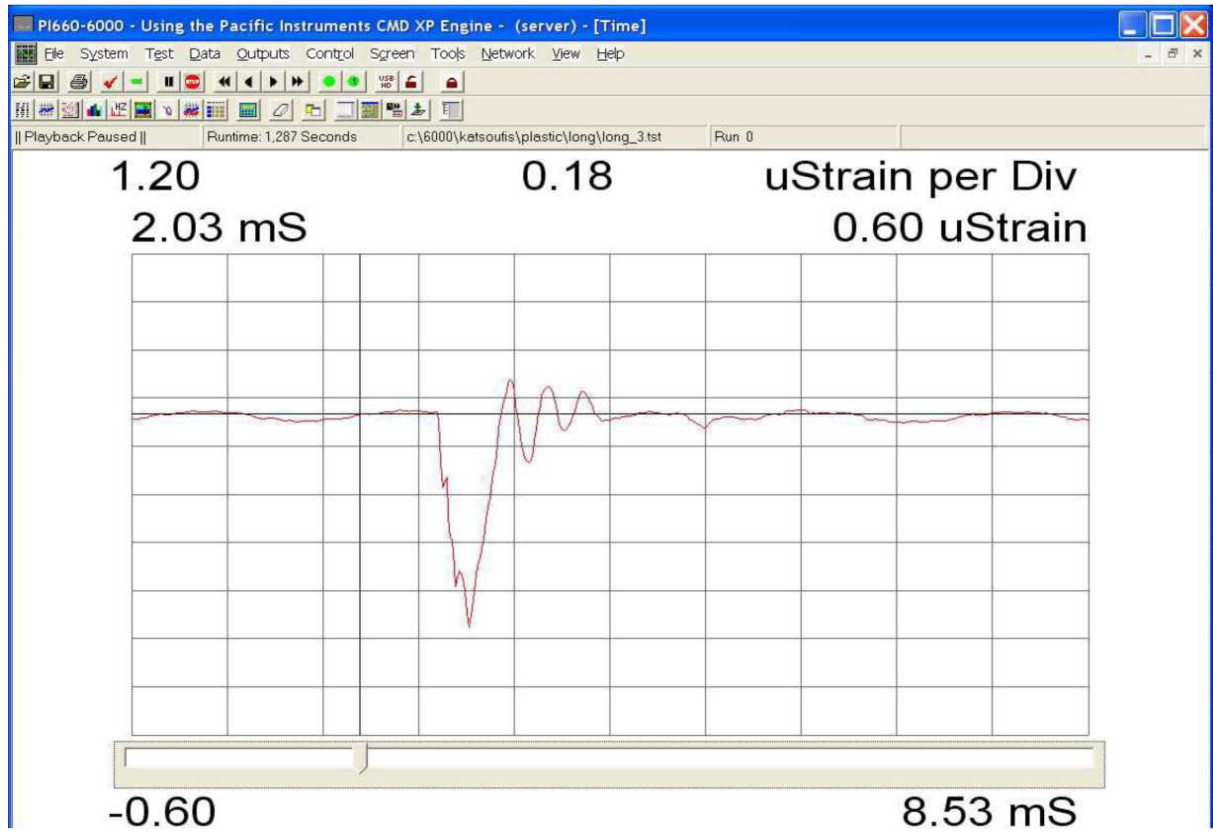
Εικόνα 70: Δοκίμιο Χάλυβα κατά μήκος κρούση - εγκάρσια παραμόρφωση, χωρίς μόνωση



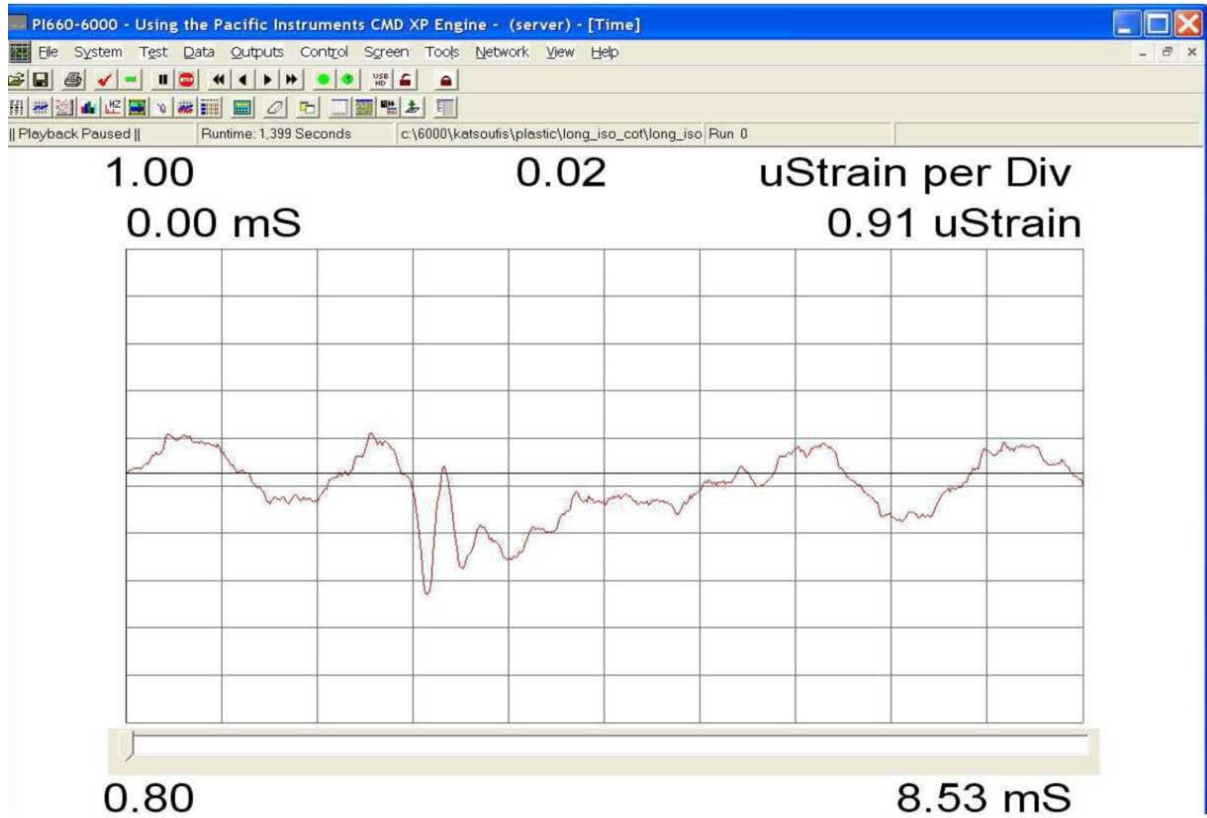
Εικόνα 71: Δοκίμιο Χάλυβα κατά μήκος κρούση - εγκάρσια παραμόρφωση, μόνωση υαλοβάμβακα



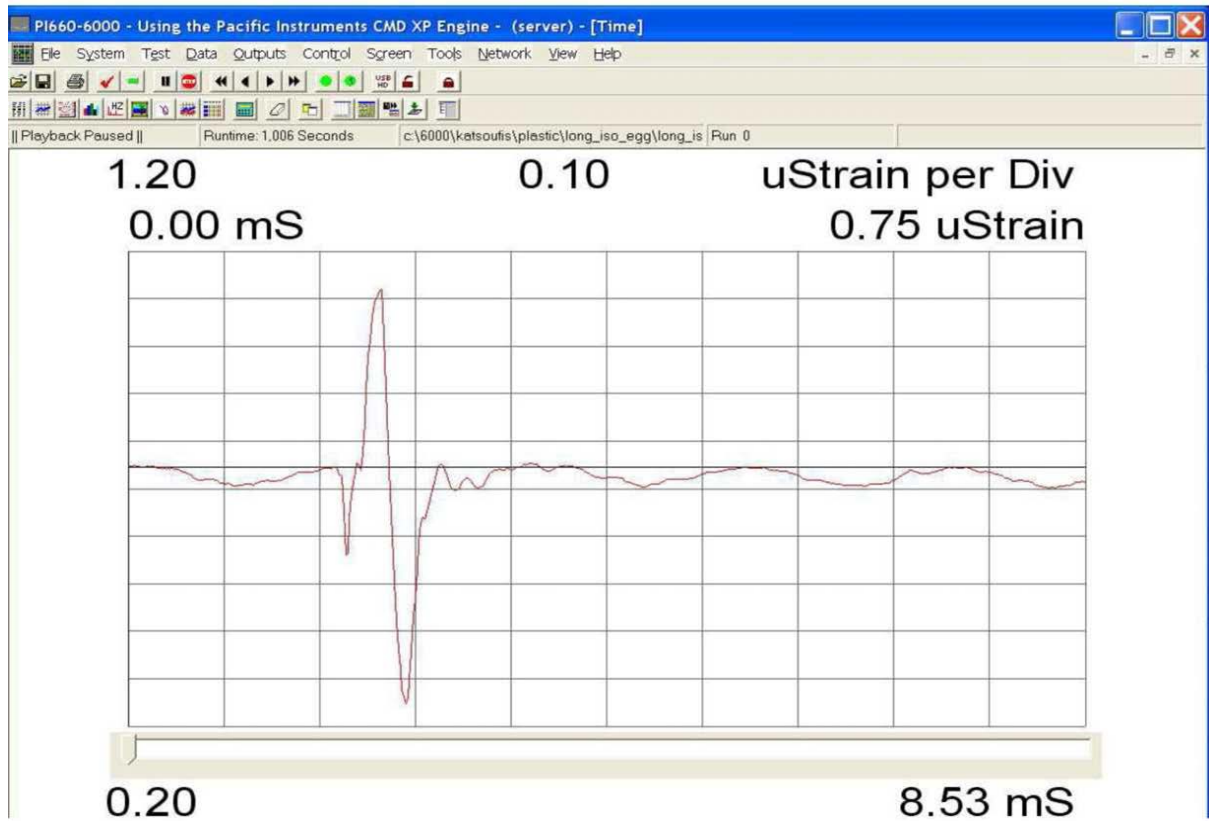
Εικόνα 72: Δοκίμιο Χάλυβα κατά μήκος κρούση - εγκάρσια παραμόρφωση, κυματοειδής μόνωση



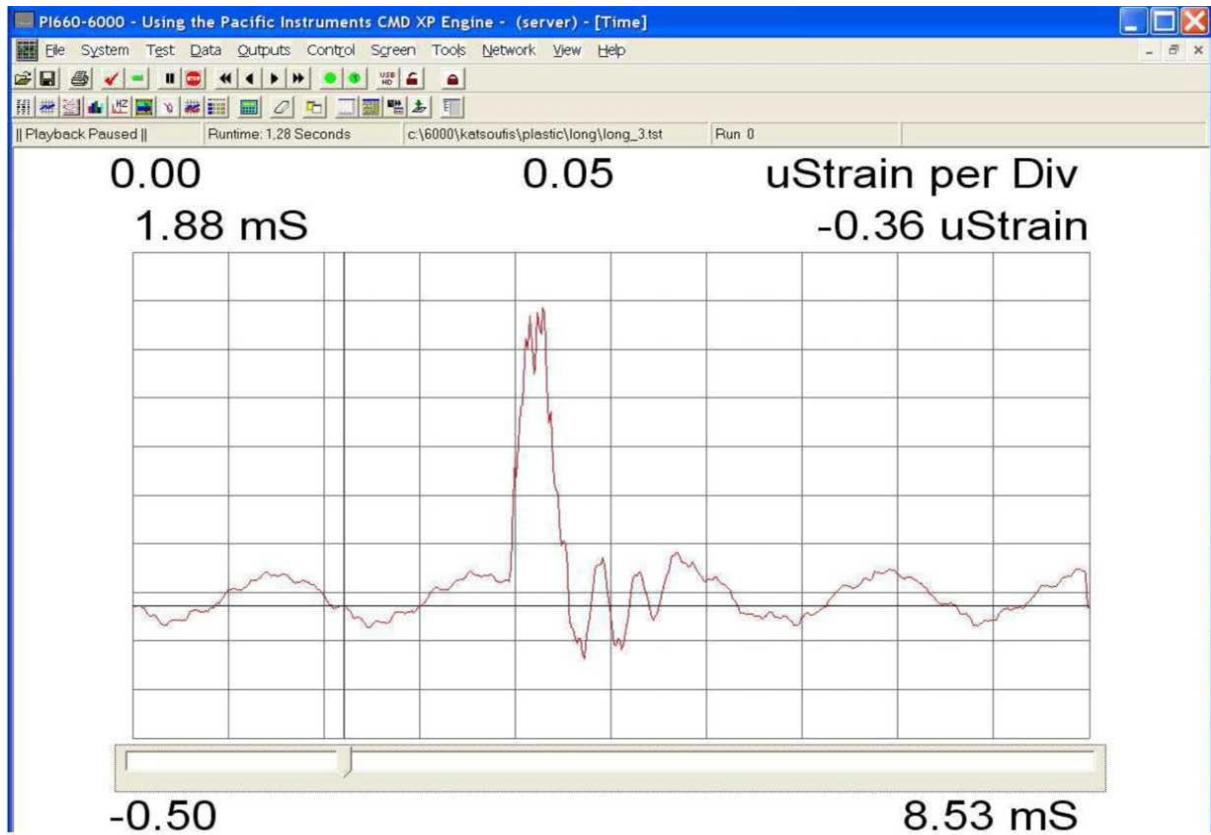
Εικόνα 73: Πλαστικό Δοκίμιο κατά μήκος κρούση - κατά μήκος παραμόρφωση, χωρίς μόνωση



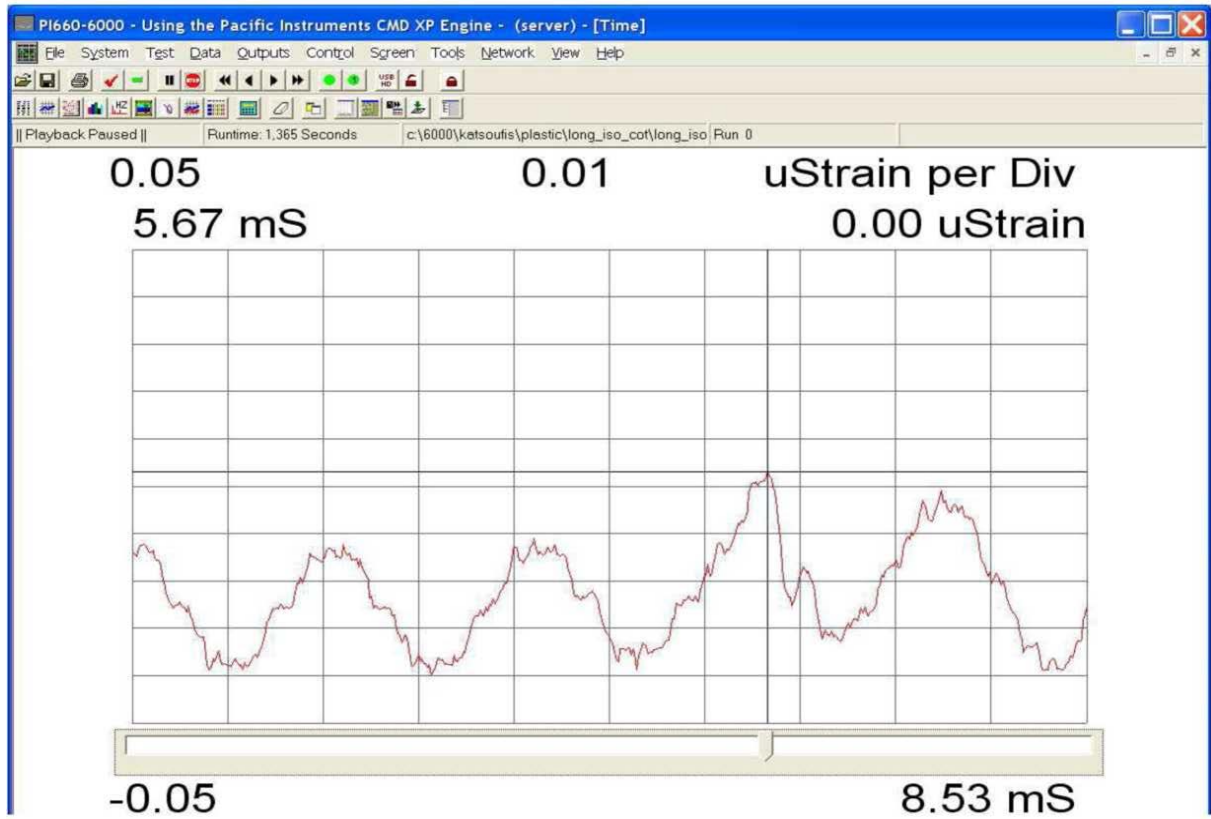
Εικόνα 74: Πλαστικό Δοκίμιο κατά μήκος κρούση - κατά μήκος παραμόρφωση, μόνωση υαλοβάμβακα



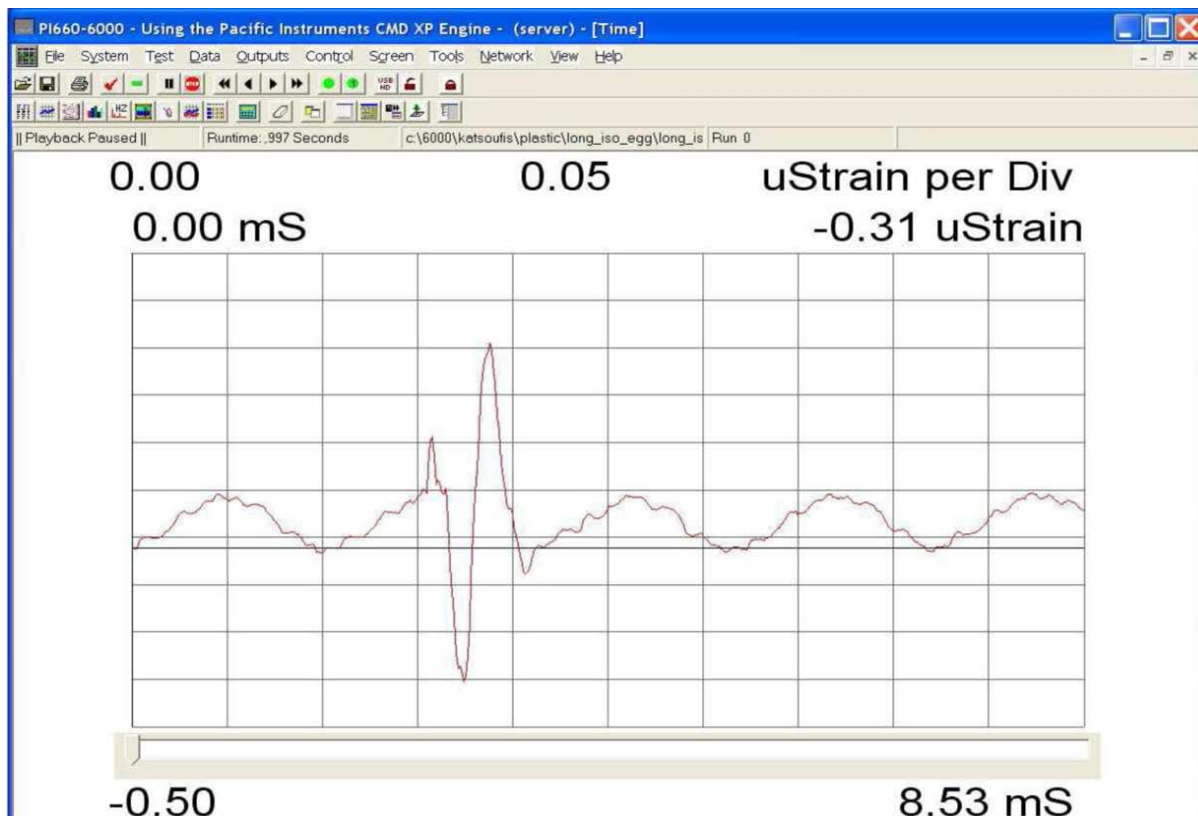
Εικόνα 75: Πλαστικό Δοκίμιο κατά μήκος κρούση - κατά μήκος παραμόρφωση, κυματοειδής μόνωση



Εικόνα 76: Πλαστικό Δοκίμιο κατά μήκος κρούση - εγκάρσια παραμόρφωση, χωρίς μόνωση

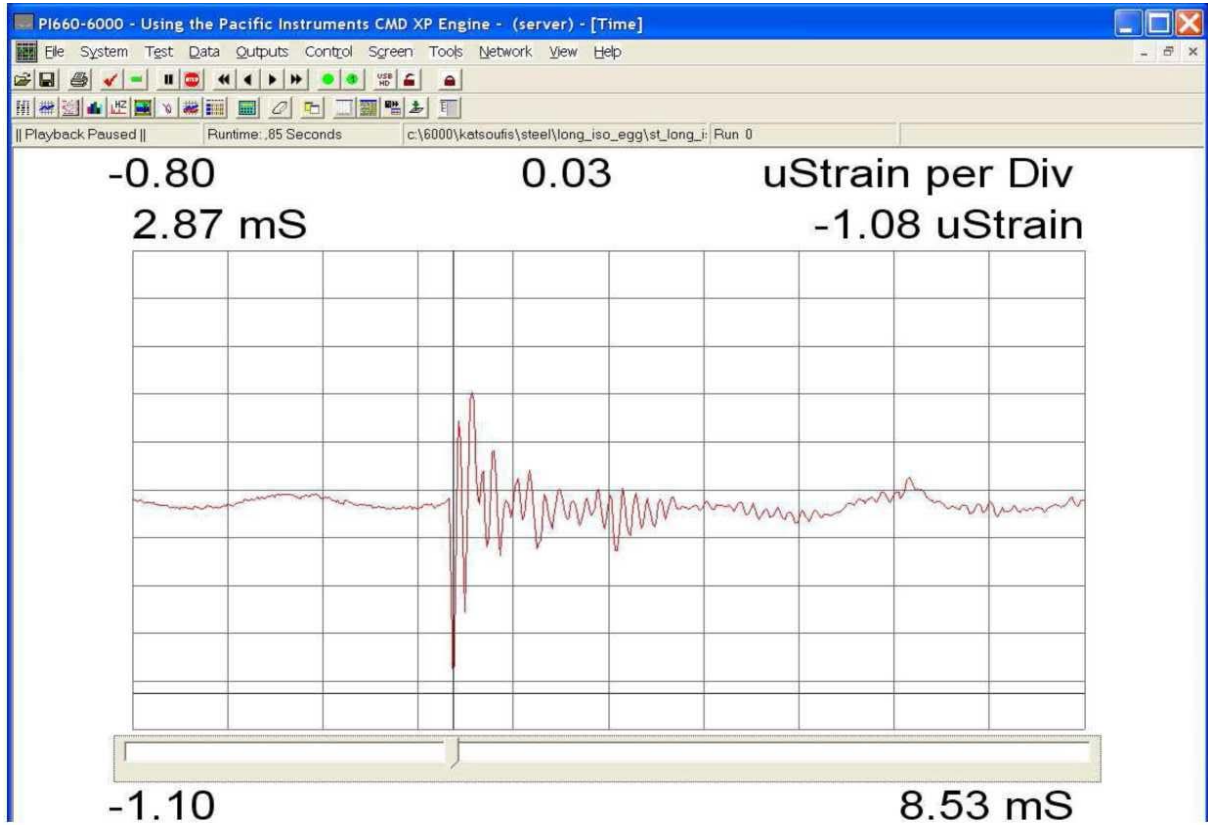


Εικόνα 77: Πλαστικό Δοκίμιο κατά μήκος κρούση - εγκάρσια παραμόρφωση, μόνωση υαλοβάμβακα

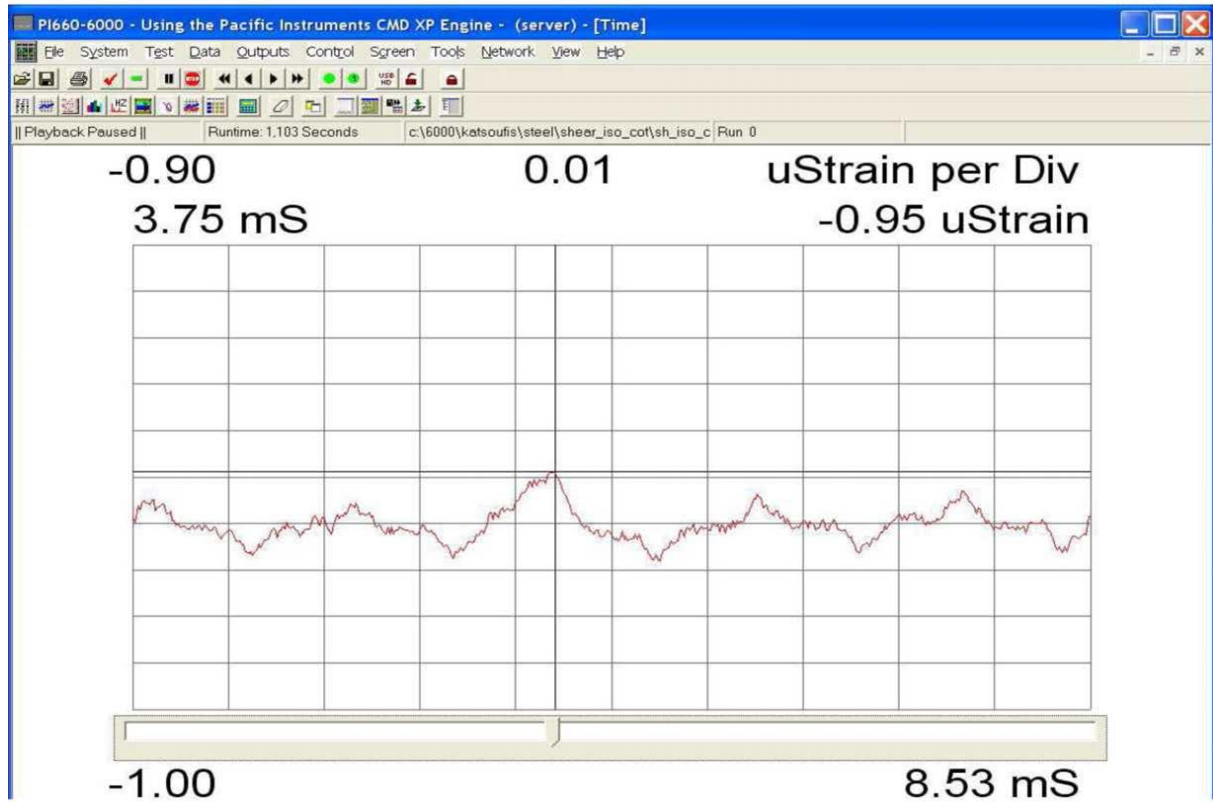


Εικόνα 78: Πλαστικό Δοκίμιο κατά μήκος κρούση - εγκάρσια παραμόρφωση, κυματοειδής μόνωση

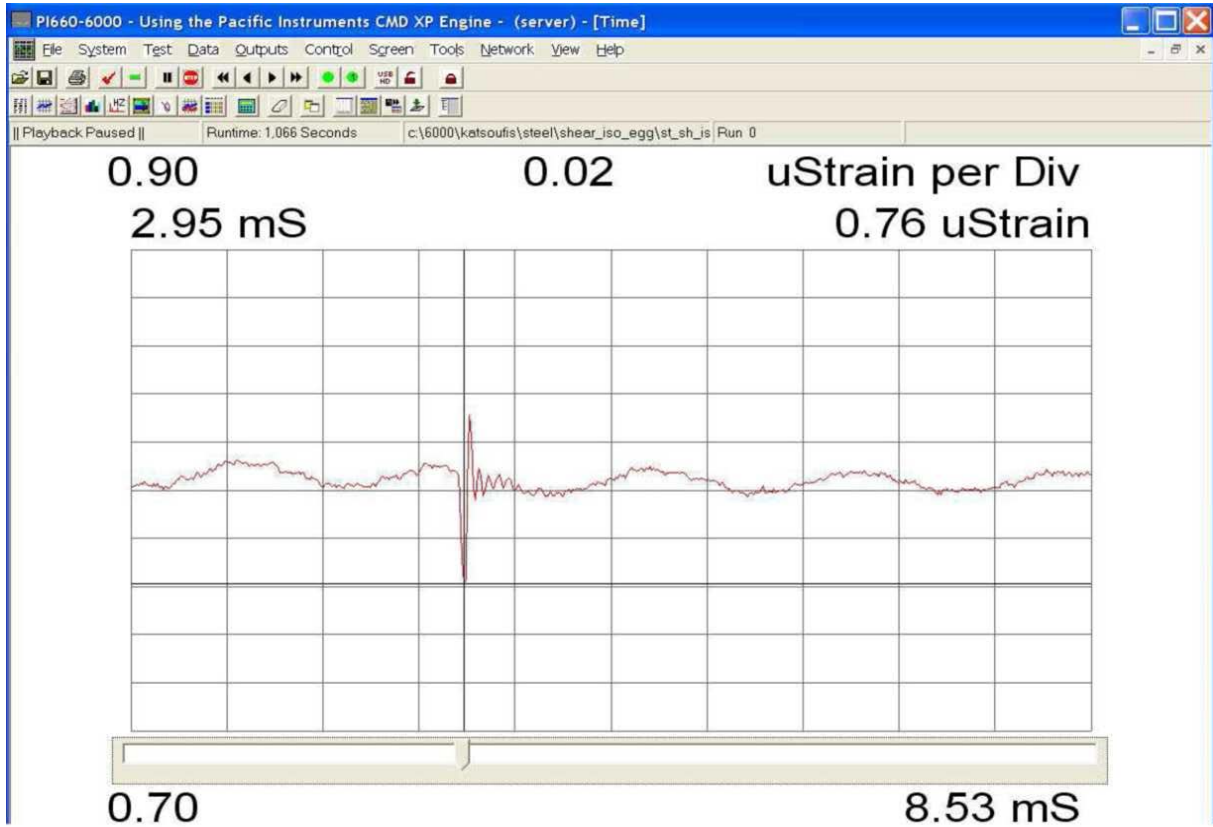
- Κατά την εγκάρσια κρούση στο δοκίμιο του χάλυβα, παρατηρείται αλλαγή στην κυματομορφή καθώς εμφανίζεται «άλμα» τη στιγμή της διαταραχής. Όσον αφορά την απορρόφηση, τόσο για την διαμήκη όσο και για την εγκάρσια παραμόρφωση, η χρήση μόνωσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση του υαλοβάμβακα, εξαφανίζει το «άλμα» που παρατηρείται κατά την κρούση σε γυμνή επιφάνεια και παράλληλα μηδενίζει ουσιαστικά τις τιμές των προκαλούμενων παραμορφώσεων.



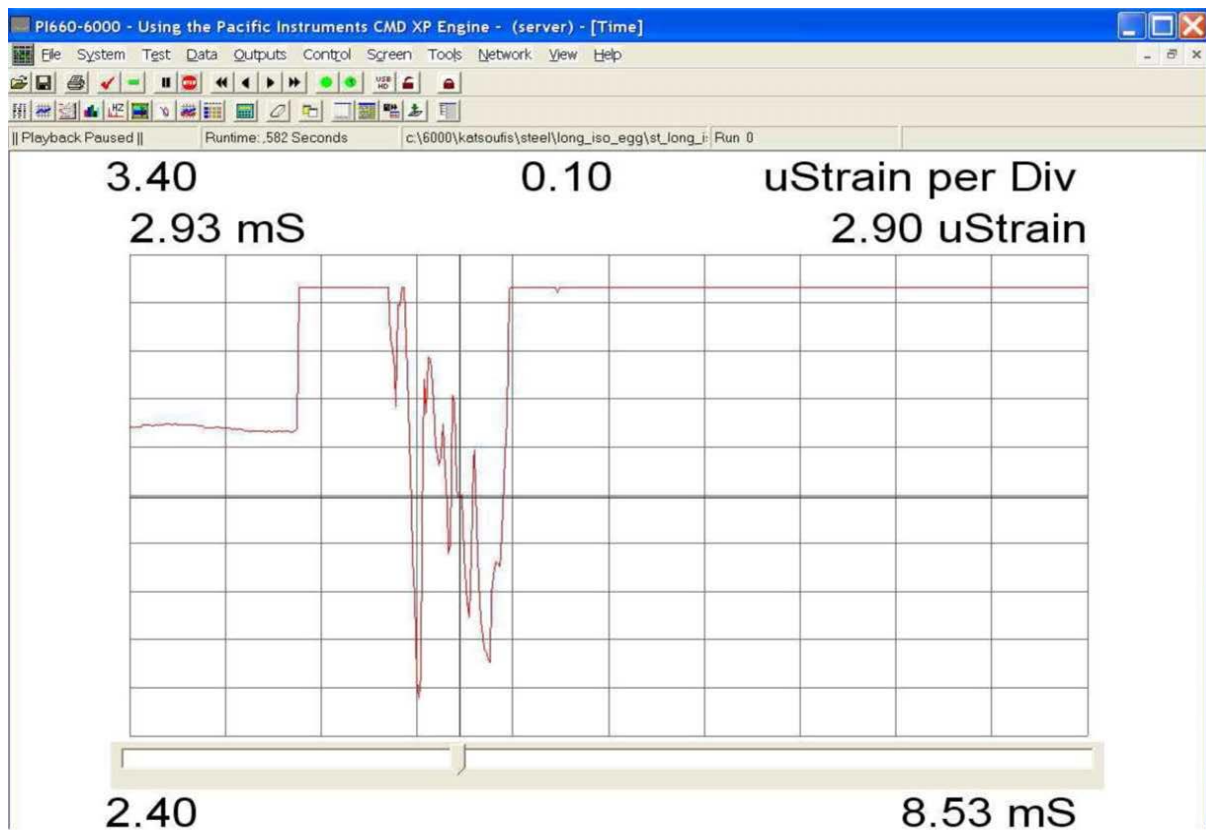
Εικόνα 79: Δοκίμιο Χάλυβα εγκάρσια κρούση - κατα μήκος παραμόρφωση, χωρίς μόνωση



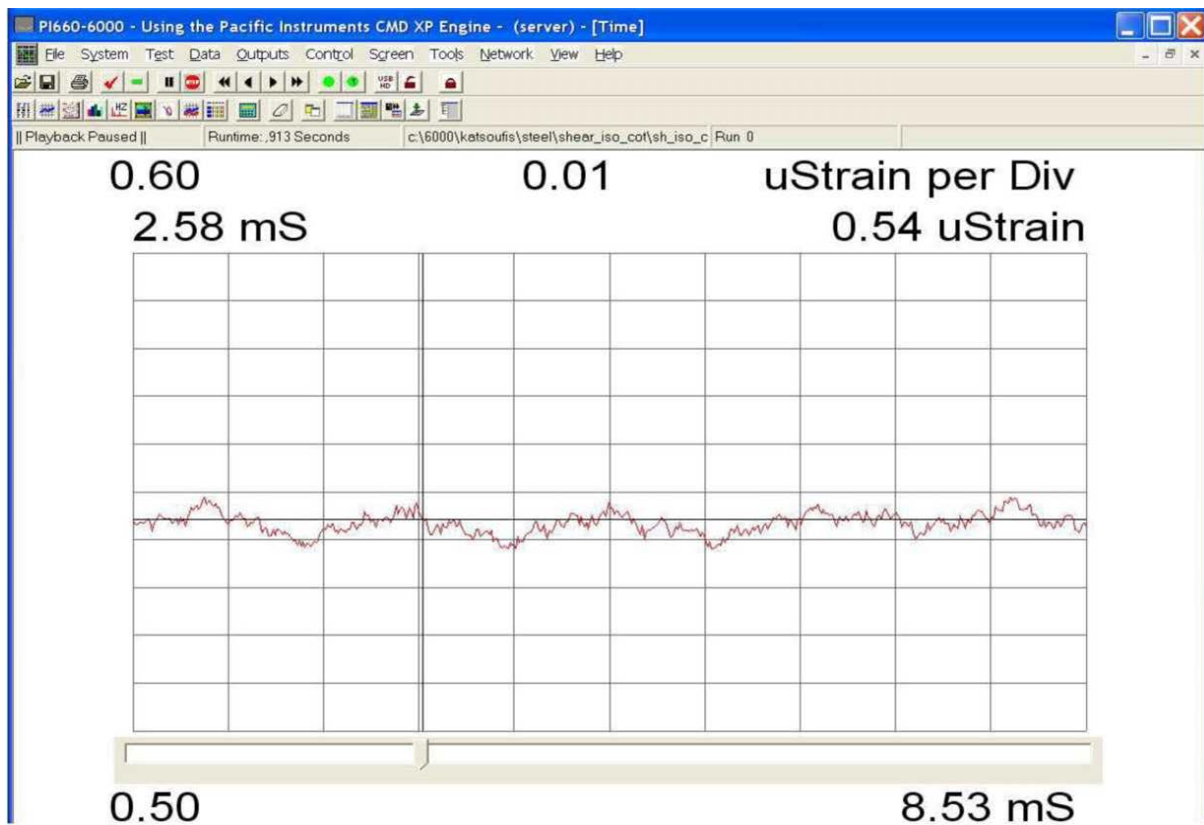
Εικόνα 80: Δοκίμιο Χάλυβα εγκάρσια κρούση - κατα μήκος παραμόρφωση, μόνωση υαλοβάμβακα



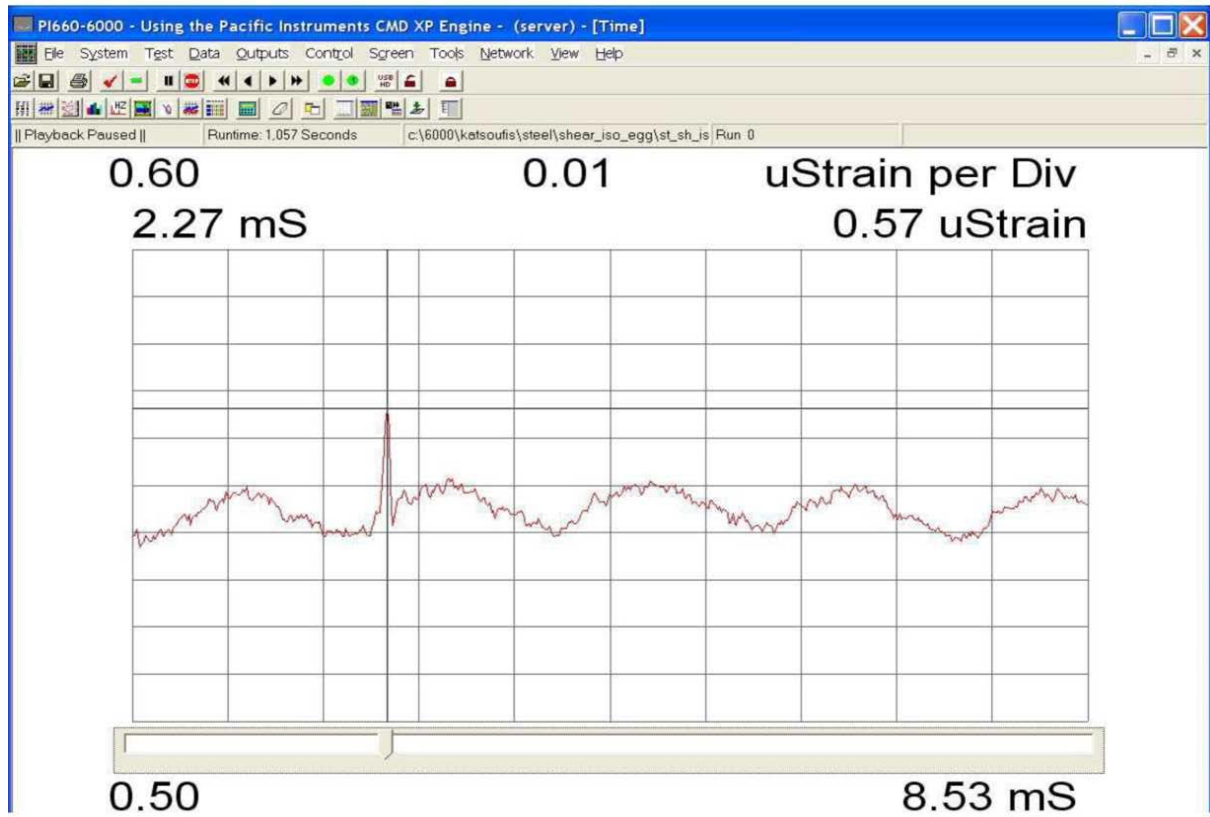
Εικόνα 81: Δοκίμιο Χάλυβα εγκάρσια κρούση – κατα μήκος παραμόρφωση, κυματοειδής μόνωση



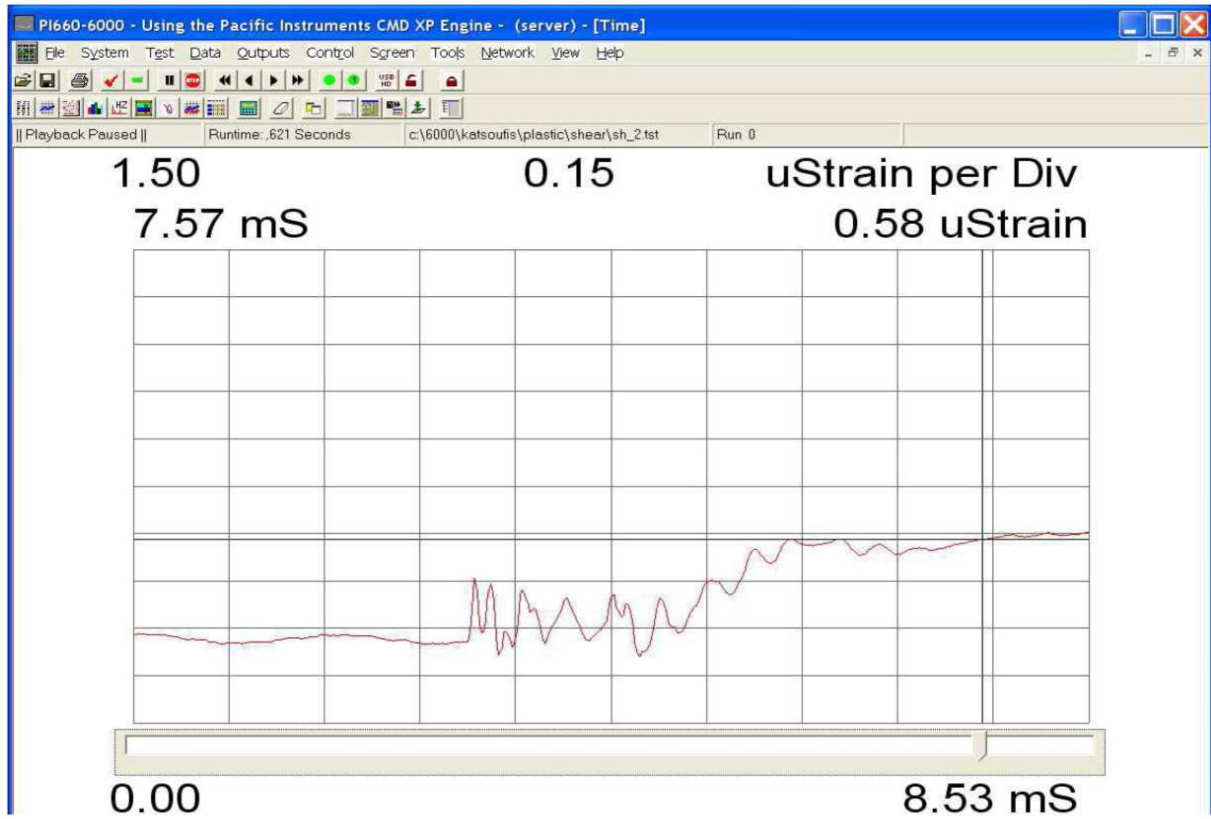
Εικόνα 82: Δοκίμιο Χάλυβα εγκάρσια κρούση – εγκάρσια παραμόρφωση, χωρίς μόνωση



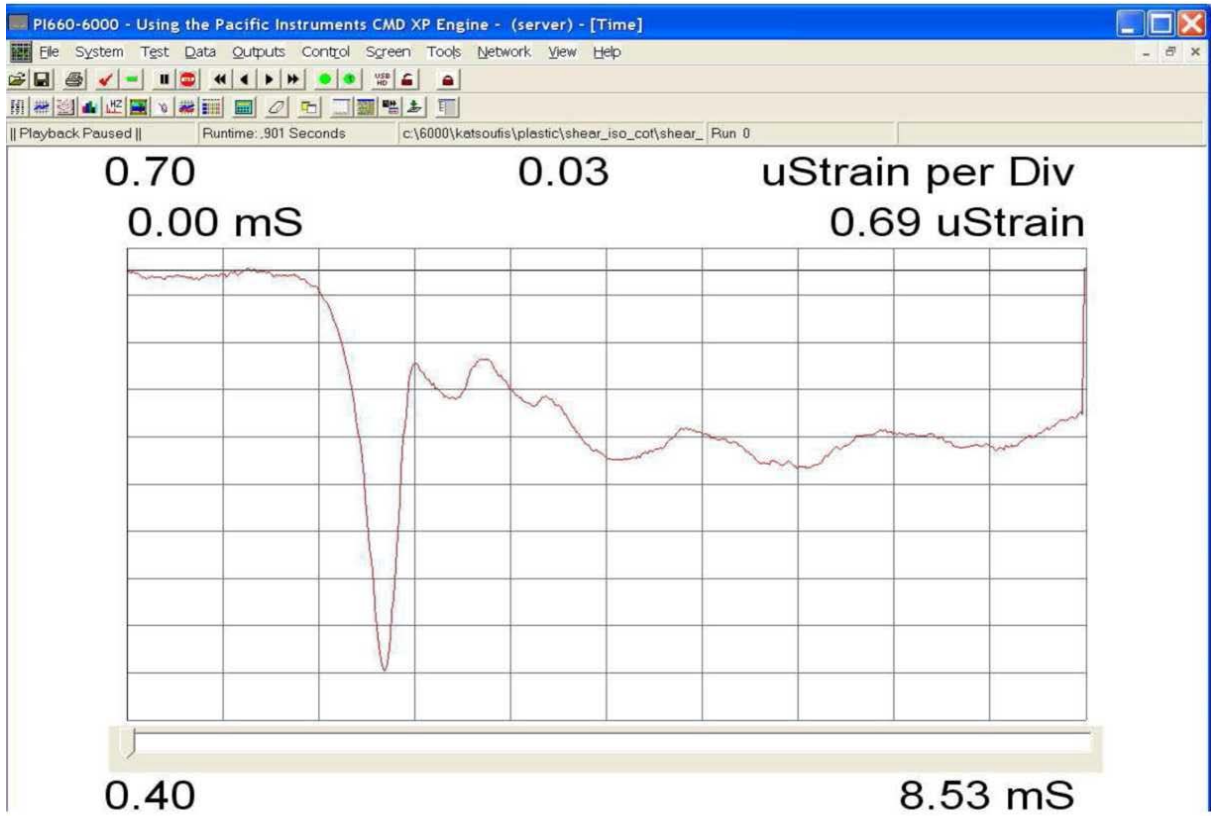
Εικόνα 83: Δοκίμιο Χάλυβα εγκάρσια κρούση – εγκάρσια παραμόρφωση, μόνωση υαλοβάμβακα



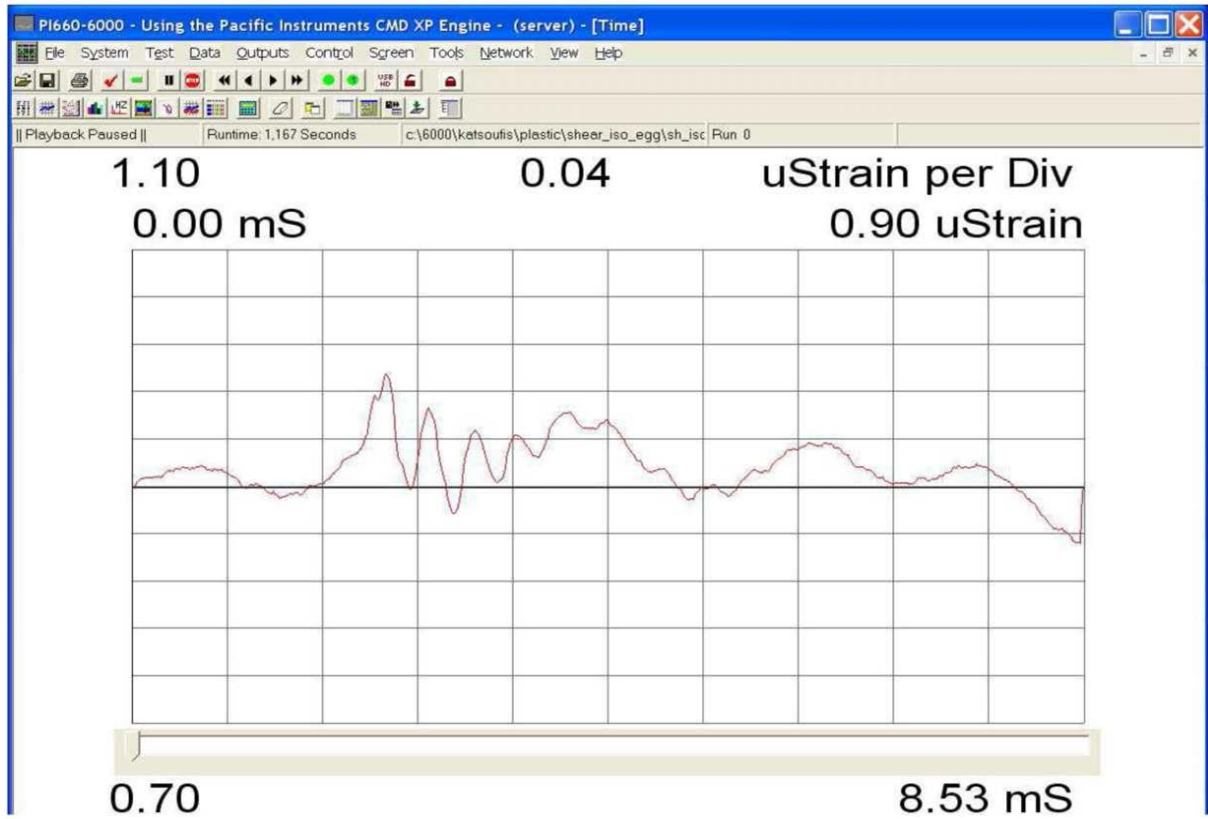
Εικόνα 84: Δοκίμιο Χάλυβα εγκάρσια κρούση – εγκάρσια παραμόρφωση, κυματοειδής μόνωση



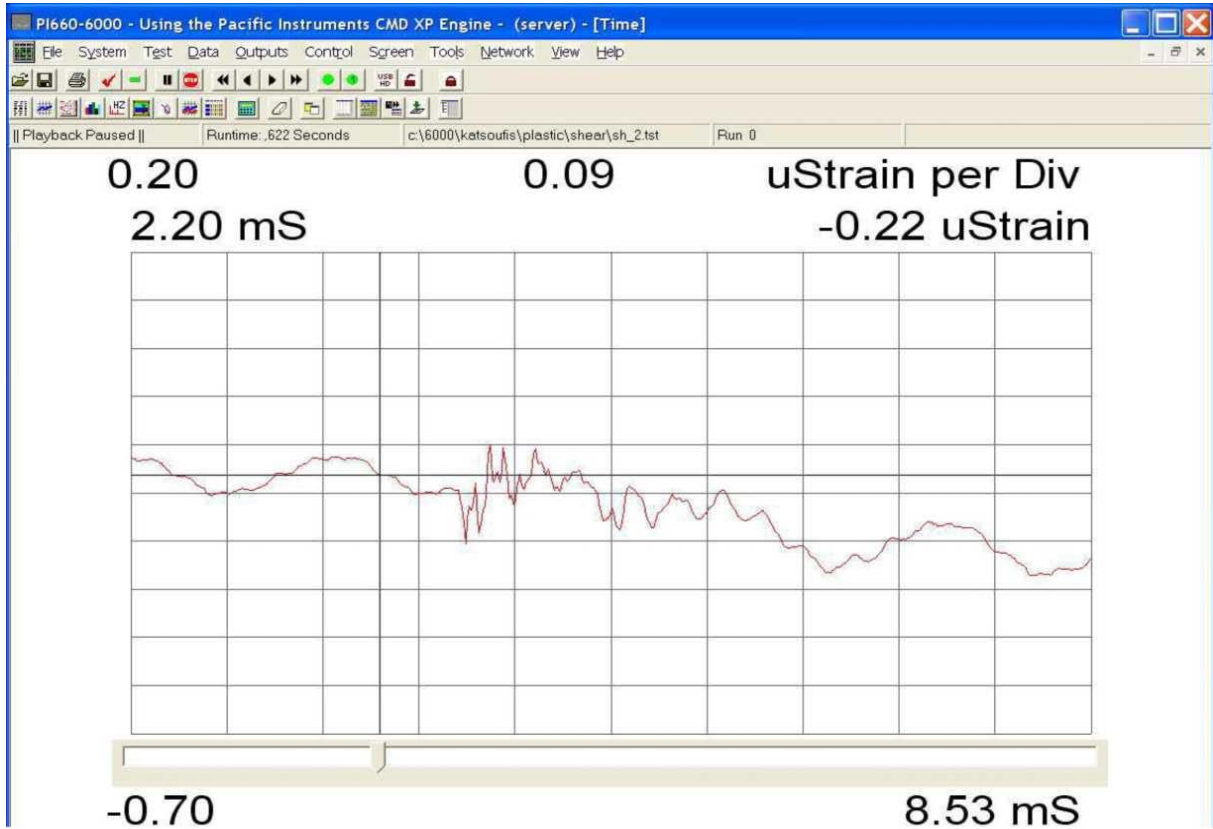
Εικόνα 85: Πλαστικό Δοκίμιο εγκάρσια κρούση - κατα μήκος παραμόρφωση, χωρίς μόνωση



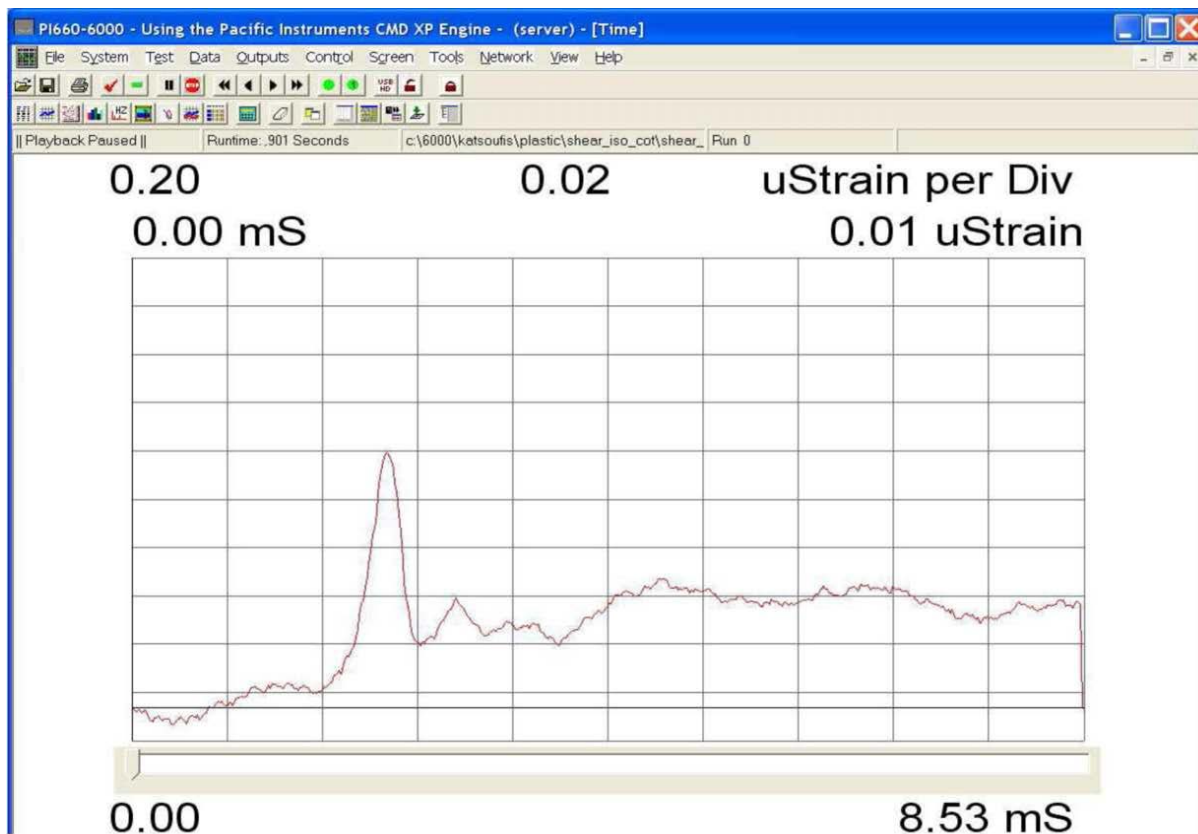
Εικόνα 86: : Πλαστικό Δοκίμιο εγκάρσια κρούση - κατα μήκος παραμόρφωση, μόνωση υαλοβάμβακα



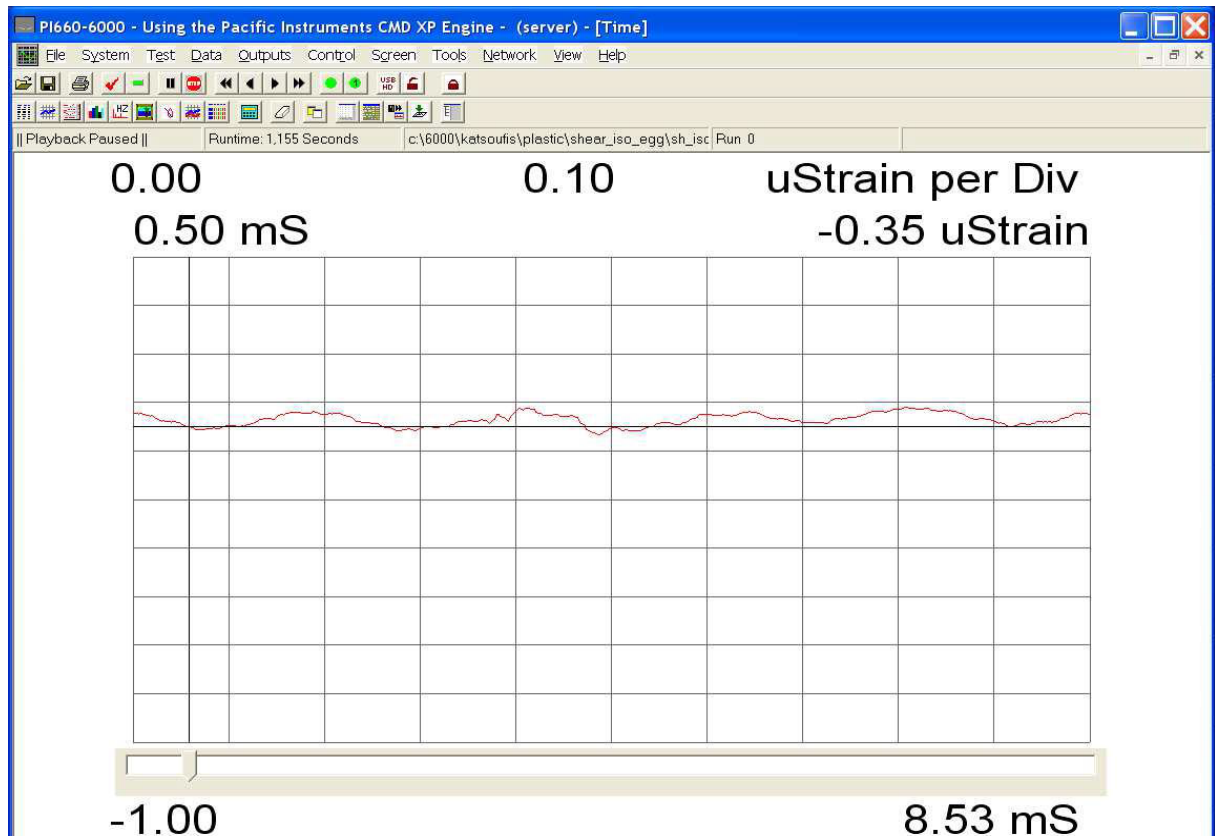
Εικόνα 87: Πλαστικό Δοκίμιο εγκάρσια κρούση - κατα μήκος παραμόρφωση, κυματοειδής μόνωση



Εικόνα 88: Πλαστικό Δοκίμιο εγκάρσια κρούση - εγκάρσια παραμόρφωση, χωρίς μόνωση



Εικόνα 89: Πλαστικό Δοκίμιο εγκάρσια κρούση - εγκάρσια παραμόρφωση, μόνωση υαλοβάμβακα



Εικόνα 90: Πλαστικό Δοκίμιο εγκάρσια κρούση - εγκάρσια παραμόρφωση, κυματοειδής μόνωση

Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν να εξετάσει την δυνατότητα μη καταστροφικού ελέγχου προβληματικών υφισταμένων κατασκευών υπό δυναμική καταπόνηση. Συγκεκριμένα προκαλέσαμε κρουστικές φορτίσεις σε υγιείς και προβληματικές κατασκευές, οι οποίες παραμορφώθηκαν μέσω της διάδοσης σε αυτές του προκαλούμενου τασικού παλμού. Στη συνέχεια ελέγχθηκαν οι παραμορφώσεις σε επιλεγμένα σημεία των υγιών και προβληματικών κατασκευών, αντίστοιχα, έγινε σύγκριση των αντίστοιχων παραμορφώσεων των υγιών και προβληματικών κατασκευών. Οι διαφορές που εντοπίστηκαν, έγινε προσπάθεια να κωδικοποιηθούν, ώστε να οδηγήσουν σε συμπεράσματα για την ποιότητα τυχαίας πλέον αντίστοιχης κατασκευής.

Επαναλήφθηκαν και επιβεβαιώθηκαν προηγούμενα εργαστηριακά πειράματα, για τα τρία βασικά κατασκευαστικά προβλήματα που μελετήθηκαν.

Συμπερασματικά αναφέρουμε ότι η μέθοδος ελέγχου, μέσω της διάδοσης του τασικού παλμού, είχε σχετικά καλή επαναληψιμότητα, στα αντίστοιχα διάφορα προβλήματα που εξετάστηκαν. Οι τυχόν διαφοροποιήσεις της επαναληψιμότητας, πιθανότατα οφείλονται στο ότι δεν στάθηκε δυνατό να βρούμε έναν τρόπο απόλυτα σταθερής επιβολής του κρουστικού φορτίου.

Σημειώνεται ότι η μέθοδος του σταθερού πίπτωντος βάρους, δοκιμάστηκε, αλλά απορρίφθηκε, γιατί δημιουργούσε φαινόμενα ανάκρουσης, που είχαν αποτέλεσμα σύγχυσης στον λαμβανόμενο από το σύστημα παλμό. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν για τη συνάφεια οπλισμού σκυροδέματος, το χτύπημα με σφυρί, για τις συγκολλήσεις, σαν πιο ακριβής, η πρόσκρουση βλήματος από αεριοβόλο (με μικρές διαφορές στην πίεση του αέρα) και για τον έλεγχο του υδραυλικού πλήγματος, η σφύρα του μηχανήματος κρούσης.

Ως προς την ακρίβεια της μεθόδου, δεν μπορεί να γίνει προς το παρόν ακριβής έλεγχος, λόγω των προαναφερθέντων προβλημάτων, αλλά περιοριζόμαστε στα ποιοτικά συμπεράσματα της διαφοροποίησης του παλμού, μεταξύ των υγιών και προβληματικών κατασκευών που δοκιμάσαμε.

Επειδή πράγματι υπήρξαν διαφοροποιήσεις, θα πρέπει να συνεχιστεί η ερευνητική προσπάθεια, πάνω σε αυτή τη μέθοδο, βελτιώνοντας τη σταθερότητα της κρουστικής καταπόνησης, γιατί η μέθοδος είναι εξαιρετικά ταχεία για εξαγωγή συμπερασμάτων, για τον εν τη γενέσει έλεγχο των

κατασκευών, ιδιαίτερα όσον αφορά τις συγκολλήσεις και τη συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. Badalouka, B.G., Papadopoulos, G.A., Experimental study of a structure under stress pulse simulating vertical ground motion, Journal of Earthquake Engineering.
2. Βασιλική Γ. Βαδαλούκα, Ελένη Γ. Παπαδοπούλου, Νικόλαος Γ. Βαδαλούκας, Πειραματική μελέτη απόκρισης εγκαρσίου οπλισμού υποστυλώματος - δοκού υπό δυναμική φόρτιση, 16ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23 Οκτωβρίου 2009, Πάφος, Κύπρος.
3. Βαδαλούκας Κωνσταντίνος, Πειραματική μελέτη επίδρασης της συνάφειας οπλισμού – σκυροδέματος στη διάδοση τασικού παλμού, Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων Γ.Α. Παπαδόπουλος, ΕΜΠ, 2012.
4. Κατσούφης Παύλος, Πειραματική μελέτη απόκρισης σωλήνων κατά τη διάδοση κύματος, Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων Βαδαλούκα Βασιλική, ΕΜΠ, 2014.
5. Παπαχριστοδούλου Αναστάσιος, Πειραματική μελέτη ελέγχου συγκολλήσεων μέσω διάδοσης τασικού παλμού, Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων Βαδαλούκα Βασιλική, ΕΜΠ, 2015.
6. Π. Ι. Γιαννόπουλος, Συνάφεια ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου., 2006.
7. Trezos C.G., Vassilopoulos Th. and Mouggiakos S. Influence of the surface corrosion on the bond behavior of reinforced concrete, 14th Greek Conference of Reinforced Concrete, Kos island, 2003.
8. Trezos C.G. and Sagias D., Influence of high temperatures on the bond behavior of reinforced concrete, 15th Greek Conference of Reinforced Concrete, 2006.
9. Χρ. Σπανός, Μ. Σπιθάκης, Κ. Τρέζος, Μέθοδοι για την επί τόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών, Αθήνα 2001.
10. Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών – Πειραματικές ασκήσεις εργαστηρίου - Α. Μάμαλης , ΕΜΠ , 1996.
11. Κατεργασίες των υλικών - Α. Μάμαλης , ΕΜΠ , 1991.
12. Αθαν. Γ. Μάμαλη, Κατεργασίες των υλικών, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1991
13. Καϊρης Σταύρος, Η εφαρμογή της ραδιογραφίας για τον μη καταστροφικό έλεγχο συγκολλητών συνδέσεων στη βιομηχανία: εξέταση των μεταβλητών της μεθόδου και πειραματική επαλήθευση, Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων Μανωλάκος Δημήτριος, ΕΜΠ 2009
14. Π. Σ. Θεοχάρη, Πειραματική μηχανική των υλικών, ΕΜΠ, Αθήνα 1970

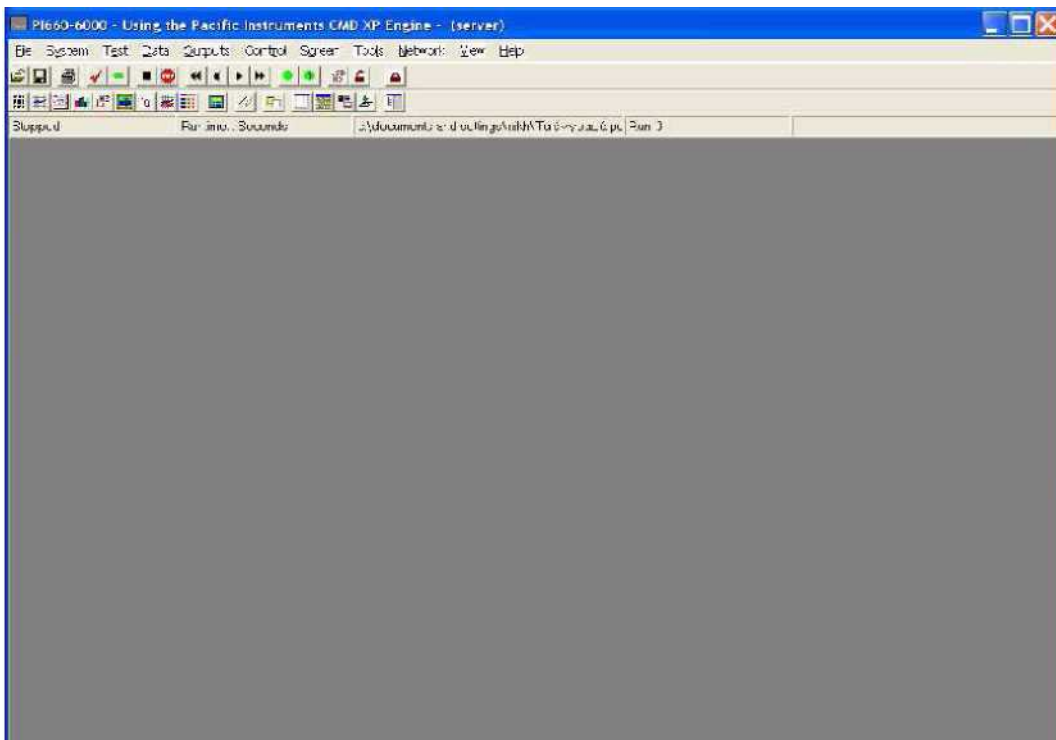
15. Γ.Ι. Τσαμασφύρος, Μηχανική Παραμορφώσιμων Σωμάτων Ι, 1990
16. Γ.Α. Παπαδόπουλος, Β.Γ. Βαδαλούκα, Μηχανική των Υλικών, Ελαστικότητα - Αντοχή, Εκδόσεις ΝΚ, Αθήνα, 2009
17. Ranauld V. Giles, Μηχανική των Ρευστών και Υδραυλική, McGraw-Hill, New York, 1982
18. Κ. Δ. Τολίκας, Υδραυλικό Πλήγμα, ΑΠΘ, 2005
19. <http://catalog.pacificinstruments.com/item/6000-series-analog-i-o-modules/model-6035-8-channel-strain-bridge-transducer-ampl/6035-6>
20. <http://www.fibran.gr/sappek/docs/deliverables/deliverable4.pdf>
21. 10. R.L. Hannah, S.E. Reed, Strain Gauge Users' Handbook, Babcock & Wilcox, Alliance, Ohio, USA, 1992

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΡΙ660-6000 ΤΟΥ DATA ACQUISITION SYSTEM

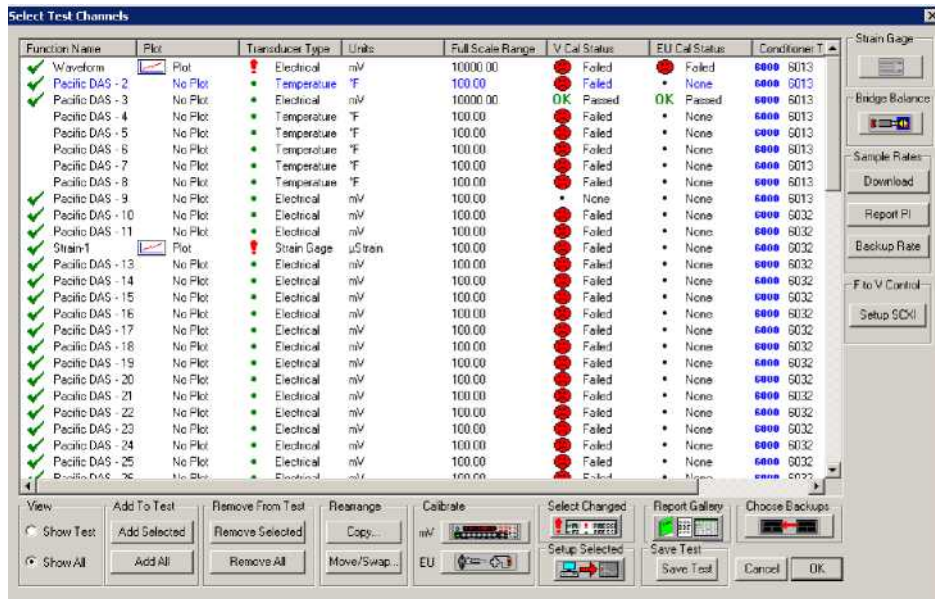
Βήμα 1

Στο παρακάτω παράθυρο επιλέγουμε Test -> Select -> Channel



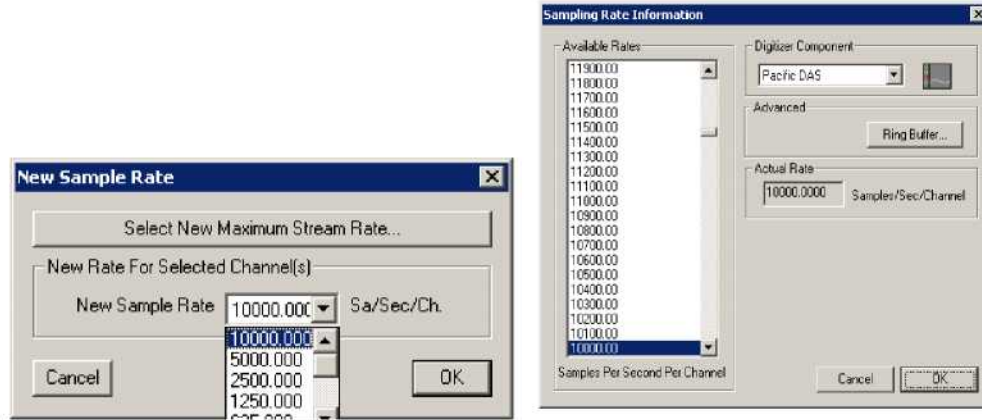
Βήμα 2

Επιλέγουμε τα κανάλια που θα χρησιμοποιήσουμε από το παρακάτω παράθυρο



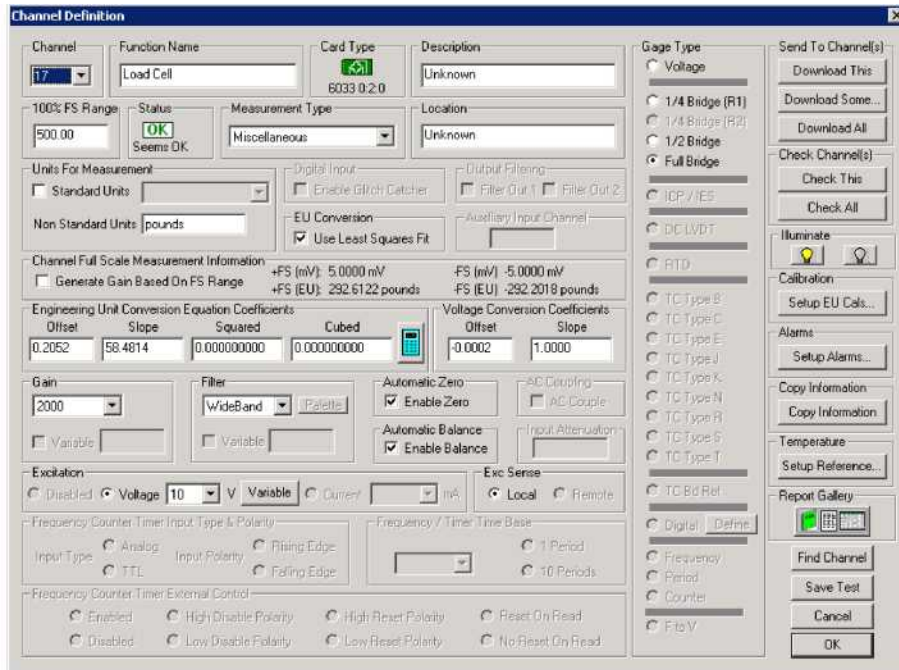
Βήμα 3

Επιλέγουμε τον ρυθμό καταγραφής δεδομένων



Βήμα 4

Στο παρακάτω παράθυρο ορίζουμε τι θα μετρά το κανάλι πχ strain gauge, 120 Ohm gauge factor, κλπ.



Βήμα 5

Στο παρακάτω παράθυρο επιλέγουμε εγγραφή (πράσινος κύκλος)



Βήμα 6

Σώζουμε την εγγραφή και επιλέγουμε Data ^ Select Play back file και επιλέγουμε ποιο κανάλι θέλουμε. Μετά πατάμε Screen και επιλέγουμε σε τι μορφή θα μας παρουσιάσει τα δεδομένα πχ Oscilloscope ή Spectrum

