

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

*Διπλωματική Εργασία*

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**ΜΕ ΜΙΚΡΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ**

**Φοιτητής:**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΣΧΟΙΝΟΧΩΡΙΤΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Β. Γ. ΒΑΔΑΛΟΥΚΑ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ, ΣΕΜΦΕ**

**ΜΕΛΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ: Χ. ΖΕΡΗΣ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΠΜ**

**Χ. Γ. ΓΕΩΡΓΙΑΔΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΕΜΦΕ**

**ΑΘΗΝΑ**

**2013**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Επιβλέπουσα της Διπλωματικής Εργασίας μου Επίκουρο Καθηγήτρια Β. Βαδαλούκα για την βοήθειά της σε όλα τα στάδια της εργασίας, για την υπομονή και τον χρόνο που αφιέρωσε κατά την διάρκεια πραγματοποίησης των πειραμάτων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδακτορικό φοιτητή Ι. Π. Σφήκα για την βοήθειά του στην σκυροδέτηση των δοκιμίων στο εργαστήριο του Ωπλισμένου Σκυροδέματος.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη . . . . .	4
Εισαγωγή . . . . .	6
<b>Κεφάλαιο 1. Μη καταστροφικός έλεγχος</b>	
1.1 Εισαγωγή . . . . .	9
1.2 Οπτικός έλεγχος . . . . .	12
1.3 Εκτίμηση βάθους ρωγμής με μέθοδο υπερήχων . . . . .	12
1.4 Κρουσίμετρο . . . . .	13
1.5 Μέθοδος εξόλκευσης ήλου . . . . .	15
1.6 Ραδιογραφικές μέθοδοι . . . . .	16
1.7 Διαπερατότητα. . . . .	17
1.8 Ραντάρ . . . . .	17
1.9 Ενδοσκόπηση. . . . .	17
1.10 Μέτρηση εύρους ρωγμών – έλεγχος παραμορφώσεων. . . . .	18
1.11 Δοκιμαστικές φορτίσεις (στατικές ή δυναμικές) . . . . .	18
<b>Κεφάλαιο 2. Συνάφεια Οπλισμού-Σκυροδέματος</b>	
2.1 Γενικά στοιχεία. . . . .	20
2.2 Ιστορική αναδρομή. . . . .	21
2.3 Η επιστημονική κατάσταση σήμερα. . . . .	23
2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια. . . . .	26
2.5 Ο υπολογισμός και η σημασία της συνάφειας σε νέες κατασκευές (ΕΚΟΣ2000) . . . . .	32
<b>Κεφάλαιο 3. Διάδοση κυμάτων</b>	
3.1 Γενικά-ορισμοί . . . . .	40
3.2 Η Κυματική εξίσωση . . . . .	43
3.3 Ταχύτητες κύματος. . . . .	46
<b>Κεφάλαιο 4. Πειραματική διαδικασία</b>	
4.1 Εισαγωγή. . . . .	49
4.2 Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, (Strain gauges) . . . . .	49
4.3 Προετοιμασία του οπλισμού των δοκιμίων. . . . .	52
4.4 Σκυροδέτηση δοκιμίων. . . . .	54
4.5 Το μετρητικό σύστημα . . . . .	56
<b>Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα</b>	
5.1 Τρόπος παρουσίασης. . . . .	59
5.2 Διαγράμματα. . . . .	60
5.3 Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων. . . . .	88
<b>Συμπεράσματα</b> . . . . .	93
<b>Βιβλιογραφικές αναφορές</b> . . . . .	95

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αποτελεί ένα από τα αρχικά βήματα μιας προσπάθειας που αποσκοπεί στην δυνατότητα προσδιορισμού της διαφοροποίησης του βαθμού συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος με Μη Καταστροφικές Μεθόδους.

Συγκεκριμένα στην παρούσα πειραματική εργασία γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για την συσχέτιση του βαθμού συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος σε στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος με το μέγεθος της επικάλυψης του οπλισμού. Η συσχέτιση αυτή γίνεται με βάση τις διαφοροποιήσεις που θα υποστεί ο τασικός παλμός, προκαλούμενος από κρούση στον οπλισμό, κατά την διάδοσή του στα στοιχεία αυτά. Η εργασία αυτή, καθώς και η όλη πειραματική διαδικασία που διεξήχθη στο πλαίσιο της, έχει την βάση της σε προγενέστερη πειραματική διαδικασία στην οποία δημιουργήθηκε κρουστικό κύμα σε στοιχεία Ωπλισμένου Σκυροδέματος, στα οποία υπήρχε διαφοροποίηση του βαθμού συνάφειας, και συγκρίθηκαν οι προκαλούμενες παραμορφώσεις και οι διαφοροποιήσεις χαρακτηριστικών του τασικού παλμού.

Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν τρία τυποποιημένα κατά ASTM κυλινδρικά δοκίμια. Στα τρία αυτά δοκίμια τοποθετήθηκε διαμήκης οπλισμός από χάλυβα Φ10 σε θέσεις με διαφοροποίηση στο μέγεθος της επικάλυψης. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε ράβδος χάλυβα στο κέντρο της διατομής του δοκιμίου αλλά και σε ακραία θέση της διατομής ώστε να επιτευχθεί μικρό μέγεθος επικάλυψής του. Σε όλες τις περιπτώσεις ο οπλισμός προεξείχε του δοκιμίου σκυροδέματος. Σε επιλεγμένη θέση καθ' ύψος των όλων οπλισμών των δοκιμίων, εντός του σκυροδέματος, επικολλήθηκαν μετρητές παραμόρφωσης. Ο τασικός παλμός δημιουργήθηκε από την κρούση σφύρας κατακορύφως επί του προεξέχοντος οπλισμού των δοκιμίων. Μέσω μετρητικού συστήματος ταχείας λήψης δεδομένων, ελήφθησαν οι κυματομορφές και οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων που προκλήθηκαν από την κρούση. Για τα χαρακτηριστικά αυτά έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων για τους οπλισμούς με διαφορετικό μέγεθος επικάλυψης και προσπάθεια εξαγωγής των πρώτων συμπερασμάτων.

## **ABSTRACT**

This experimental work examines the correlation between the bond of reinforcement in concrete elements with little reinforcement cover, and the undergo changes due dynamic vibration, caused by shock.

For this work, there were fabricated three concrete cylinder specimens according to ASTM standard. In each specimen there were placed two longitudinal reinforcement. The first was placed at the center of the cross section and the second at outboard position or the cross section. At selected locations along the reinforcement of all specimens, within the concrete, strain gauges attached. The dynamic vibration produced by impact hammer vertically projecting at the cores. For the recording, a data acquisition system was used. Time history diagram's were compared.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, κυρίαρχης σημασίας μηχανισμός για την συνολική εντατική απόκριση αποτελεί η συνάφεια μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος. Η σημασία της συνάφειας εντοπίζεται ήδη στις αρχές του προηγούμενου αιώνα, [1]. Μέχρι σήμερα έχει διεξαχθεί εκτεταμένη πειραματική και αναλυτική έρευνα, [2,3,4], με σκοπό τον καθορισμό των παραμέτρων που την επηρεάζουν, καθώς και την κατανόηση της μηχανικής του προβλήματος. Ο αναλυτικός μηχανισμός κυρίως περιγράφεται ως 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.

Η εκτίμηση της απομένουσας διαθέσιμης αντοχής συνάφειας «προβληματικών» αγκυρώσεων αποτελεί αντικείμενο μελέτης των τελευταίων δεκαετιών, [5]. Η κρισιμότητα αφορά στην επάρκεια υφιστάμενων κατασκευών να αντεπεξέλθουν σε ενδεχόμενες σεισμικές δράσεις. Στην περίπτωση μειωμένης συνάφειας, η κατά τον σχεδιασμό ιεράρχηση των εκδηλούμενων μορφών αστοχίας ανατρέπεται, με συνέπεια την πρόιμη αστοχία της κατασκευής. Ακόμη, το πάχος της επικάλυψης με σκυρόδεμα της ράβδου αποτελεί βασικό παράγοντα για την αντοχή συνάφειας, γεγονός εξέχουσας σημασίας για τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η αναγκαιότητα του ελέγχου υφιστάμενων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι μεγάλης σημασίας και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές από τον τομέα Δομοστατικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Ο έλεγχος της συνάφειας είναι πειραματικός και προσδιορίζεται με δοκιμή εξόλκευσης, η οποία βεβαίως είναι ‘‘καταστροφική’’. Μη καταστροφικές μέθοδοι ελέγχου έχουν αναπτυχθεί, [6,7,8] και ερευνούν παράγοντες που έχουν επίδραση στην συνάφεια, όπως η διάβρωση κ.λ.π., υπάρχουν όμως δυσκολίες για τον έλεγχο της κατάστασης της διεπιφάνειας μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος ενός αρχικού διερευνητικού σταδίου για την δυνατότητα ποιοτικού ελέγχου του βαθμού συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος με μη καταστροφικό τρόπο καθώς επίσης και την διαφοροποίησή της σε σχέση με το μέγεθος της επικάλυψης. Βασίζεται στην διαφοροποίηση που θα υποστεί το τασικό κύμα κατά την διάδοσή του σε στοιχεία Ω.Σ. με διαφορετικό μέγεθος επικάλυψης του νευροχάλυβα από σκυρόδεμα. Πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών, ΕΑΥ, του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας κ. Β. Βαδαλούκα. Στο εργαστήριο αντοχής υλικών έχει πραγματοποιηθεί πλήθος πειραματικών και αναλυτικών εργασιών για την διάδοση κύματος σε στερεά σώματα. Αναφέρονται ενδεικτικά πειραματικές εργασίες που έχουν εκπονηθεί από την κ. Β. Βαδαλούκα σε συνεργασία με άλλα μέλη του τομέα [9,10] καθώς και αναλυτικές και πειραματικές εργασίες από τον Χ. Γεωργιάδη που αφορούν κυρίως την εκπομπή τασικών κυμάτων κατά την διάρκεια θραύσης ρηγματωμένων πλακών ή ταινιών [11,12,13].

Ως προς την διάρθρωσή της, η εργασία αυτή αποτελείται από την Περίληψη, την Εισαγωγή, 5 Κεφάλαια, τα Συμπεράσματα, την Βιβλιογραφική αναφορά. Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται περιληπτική περιγραφή των πιο γνωστών μη καταστροφικών μεθόδων. Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρονται βασικά στοιχεία για την συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος. Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται στοιχεία για την διάδοση κύματος. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

**ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ  
ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ  
ΑΠΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**



# Κεφάλαιο 1

## Μη Καταστροφικός Έλεγχος σε υφιστάμενες κατασκευές από σκυρόδεμα

### 1.1 Εισαγωγή

Για την δημιουργία μιας νέας κατασκευής, η μελέτη και η διαστασιολόγηση βασίζονται σε συμβατικές ιδιότητες των δομικών υλικών από τον μελετητή μέσω των παραδοχών που κάνει, και κατά την φάση της κατασκευής μέσω ποιοτικών ελέγχων ώστε να ελέγχεται εάν αυτές τηρούνται. Φυσικά από το στάδιο της μελέτης λαμβάνονται πάντα υπ όψιν παρεκκλίσεις ως προς την ποιότητα των δομικών υλικών αλλά και παρεκκλίσεις κατά την φάση της κατασκευής, το μέγεθος των οποίων είναι μικρό και ελαχιστοποιείται διαρκώς χάρη στην πρόοδο του μηχανολογικού εξοπλισμού, για τις οποίες βέβαια υπάρχει πρόληψη από τον μελετητή χρησιμοποιώντας συντελεστές ασφαλείας που αποτυπώνονται και στους κανονισμούς. Όταν όμως πρόκειται να πραγματοποιηθεί μελέτη και παρέμβαση σε υφιστάμενη κατασκευή όπου συνήθως δεν υπάρχουν στοιχεία για τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιηθέντων υλικών ή ακόμα και στοιχεία για το πώς έχουν μεταβληθεί οι ιδιότητές τους με την πάροδο του χρόνου, τότε πρέπει αυτά να εκτιμηθούν είτε επιτόπου είτε σε εργαστήριο. Οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση κατατάσσονται σε 2 βασικές κατηγορίες, άμεσες και έμμεσες. Με τις μεθόδους αυτές συνήθως προσδιορίζονται διάφορες ιδιότητες των υλικών από τις οποίες προκύπτουν έμμεσα (και σπανιότερα άμεσα) συμπεράσματα για άλλα χαρακτηριστικά ή ιδιότητες των υλικών της υπάρχουσας κατασκευής, για τον λόγο αυτό χαρακτηρίζονται και έμμεσες μέθοδοι. Όταν οι πληροφορίες που συλλέγουμε από τις έμμεσες μεθόδους δεν είναι επαρκείς ώστε να βγάλουμε τα απαραίτητα συμπεράσματα τότε καταφεύγουμε και σε άμεσες μεθόδους οι οποίες έχουν το μειονέκτημα ότι είναι κατά κύριο λόγο ημικαταστροφικές ( με την έννοια ότι προκαλούνται περιορισμένης εκτάσεως φθορές στην κατασκευή, πχ πυρηνοληψία).

Γενικότερα, ανάγκη για επιτόπου προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών προκύπτει συνήθως στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Ποιοτικός έλεγχος υφιστάμενων ή νέων κατασκευών
- Αμφισβήτηση της ποιότητας των υλικών υφιστάμενων ή νέων κατασκευών
- Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των υλικών προκειμένου να γίνουν εργασίες επεμβάσεων (επισκευών ή και ενισχύσεων) σε υφιστάμενες κατασκευές.

Σε περιπτώσεις κατασκευών με ιστορική και αρχιτεκτονική αξία, για τον ευνόητο λόγο της αποφυγής διαταραχής της μορφής τους, προτιμάται η χρήση μη καταστροφικών (έμμεσων) μεθόδων. Προς το παρόν όμως οι μη καταστροφικές μέθοδοι, αν και συνήθως παρουσιάζουν μειωμένο κόστος, έχουν μειωμένη αξιοπιστία και αξιοποιούνται κυρίως για την προκαταρκτική διερεύνηση της καταστάσεως της κατασκευής.

Λόγο κοινωνικό-πολιτιστικών αναγκών η τεχνολογία των μη καταστροφικών μεθόδων αναπτύσσεται ταχύτατα, αναπτύσσονται νέες μέθοδοι, ενώ οι υφιστάμενες εξελίσσονται. Παρά ταύτα για τον υπολογισμό της υπάρχουσας συνάφειας δεν υπάρχει προς το παρόν τυποποιημένη μέθοδος. Υπάρχουν περιπτώσεις που χρειάζεται άμεση εκτίμηση της εναπομείνουσας συνάφειας όπως πχ σεισμός μερικές ώρες μετά την σκυροδέτηση.

Οι έμμεσες, μη καταστροφικές μέθοδοι, και οι ημικαταστροφικές μέθοδοι που είναι οι πλέον γνωστές και χρησιμοποιούνται είναι:

- Οπτικός έλεγχος
- Πυρηνοληψία
- Μέθοδος τασικών κυμάτων - Υπέρηχοι
- Κρουσίμετρο

- Κρουστικές μέθοδοι
- Εξόλκευση ήλου
- Ραδιογραφικές μέθοδοι
- Μαγνητικές μέθοδοι
- Ηλεκτρικές μέθοδοι
- Διαπερατότητα
- Υπέρυθρη φωτογράφιση
- Ραντάρ
- Ενανθράκωση
- Ενδοσκοπήσεις
- Δοκιμή χαραγής
- Δοκιμή Μικροθραυσμάτων
- Μέθοδος των επίπεδων γρύλων
- Μέτρηση εύρους ρωγμών – έλεγχος παραμορφώσεων
- Δοκιμαστικές φορτίσεις (στατικές ή δυναμικές)
- Δοκιμές χάλυβα
- Χημικές αναλύσεις
- Εμπηξη ήλου - εξόλκευση κοιλία
- Διάτρηση
- Μέτρηση σκληρότητας

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ενδεικτικά μια περιληπτική αναφορά σε κάποιες από τις γνωστές μέχρι σήμερα μεθόδους Μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) και αποτιμήσεως για κατασκευές από σκυρόδεμα.

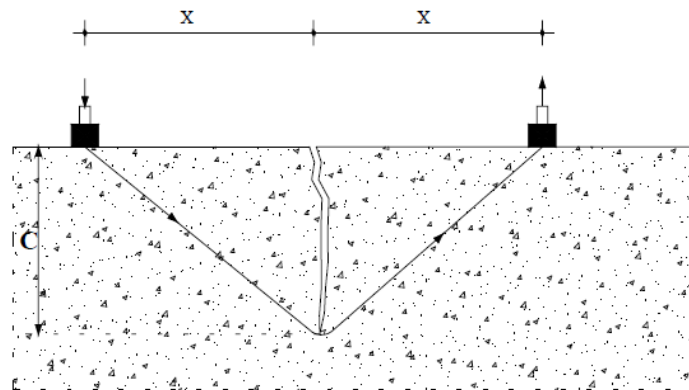
## 1.2 Οπτικός έλεγχος

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 εξής στοιχείων: Ρωγμές (θέση και εύρος) - διαβρωμένοι οπλισμοί - Προβλήματα υγρασίας, ανερχόμενης ή κατερχόμενης - Ανωμαλίες και φθορές σε σκυρόδεμα και χάλυβα, όπως : απόμιξη, φωλιές, αποθέσεις αλάτων, δημιουργία μικροσταλακτιτών, απολεπίσεις, αποφλοιώσεις, άτακτη ρηγμάτωση, απόσπαση τεμαχίων, εκτινάξεις, ίχνη - κηλίδες σκουριάς, χρωματικές αλλοιώσεις, απογυμνωμένοι οπλισμοί, θραυσμένοι οπλισμοί, κατάσταση τενόντων προεντάσεως (κώνοι αγκυρώσεως, σωλήνες και καλώδια προεντάσεως, κατάσταση τσιμεντενέματος)

## 1.3 Εκτίμηση βάθους ρωγμής με μέθοδο υπερήχων

Η μέθοδος των υπερήχων όπως και άλλες μέθοδοι τασικών κυμάτων βασίζονται στην ηχώ εξ αντανακλάσεως των υπερηχητικών ή κρουστικών κυμάτων και χρησιμοποιούνται για τον μη καταστροφικό έλεγχο κατασκευών από σκυρόδεμα και τοιχοποιία. Η συσκευή των υπερήχων αποτελείται από δύο κρυστάλλους εκ των οποίων ο ένας είναι ο πομπός και ο άλλος ο δέκτης. Με την μέθοδο αυτή καθίσταται δυνατή η εκτίμηση του βάθους μιας ρωγμής στο σκυρόδεμα. 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 υπέρηχου 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 στο σχήμα 1.1.



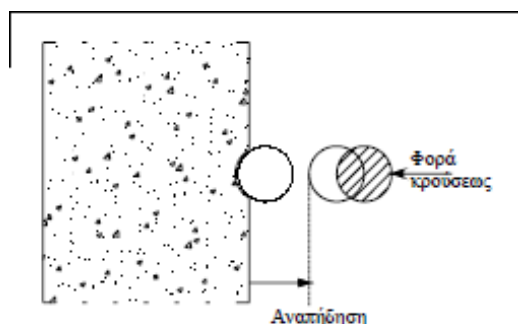
Σχήμα 1.1 Εκτίμηση βάθους ρωγμής

## 1.4 Κρουσίμετρο

Η μέθοδος του κρουσίμετρου είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος εκτιμήσεως της αντοχής του σκυροδέματος, η οποία βασίζεται στην μέτρηση της επιφανειακής σκληρότητας των δομικών στοιχείων που εξετάζονται. Με την μέθοδο αυτή εξετάζεται η ποιότητα του σκυροδέματος της εξωτερικής επιφάνειας των κατασκευών και σε βάθος έως 30mm. Η μέθοδος του κρουσίμετρου

μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα για την αντοχή ενός δομικού στοιχείου μόνο όταν συνδυαστεί και με άλλες μεθόδους.

Η αρχή της μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Μια μεταλλική μάζα προσκρούει στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Το ύψος αναπήδησής αυτής της μάζας εξαρτάται από την ελαστικότητα του υλικού και, επομένως, από την αντοχή του.



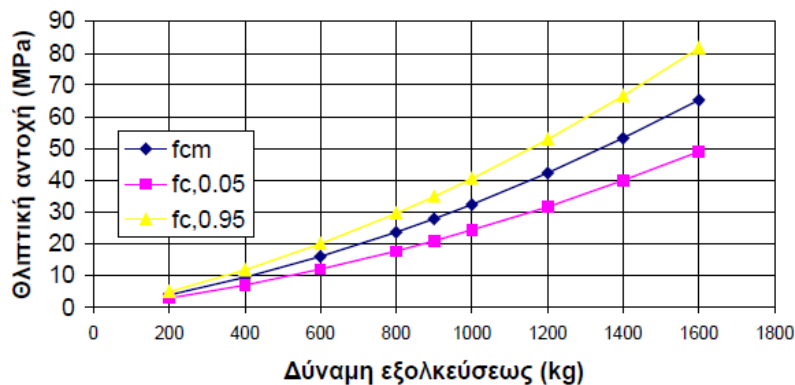
Σχήμα 1.2 Αρχή λειτουργίας μεθόδου κρουσιμέτρου

Πριν την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται απομάκρυνση των επιχρισμάτων και τοπική λείανση των δομικών στοιχείων στις θέσεις εφαρμογής. Απαιτούνται 10 τουλάχιστον κρουσιμετρήσεις σε κάθε θέση.

**Εφαρμογές:** Η μέθοδος του κρουσίμετρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαπίστωση της ομοιογένειας του σκυροδέματος των εξεταζόμενων δομικών στοιχείων, κυρίως πριν τον έλεγχό τους από άλλες μεθόδους όπως πυρηνοληψία και εξόλκευση ήλου. Η ομοιογένεια και η ποιότητα του σκυροδέματος μας ενδιαφέρουν ακόμη στα προεντεταμένα δομικά στοιχεία, όπου περιοχές με χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία του έργου. Η μέτρηση του δείκτη επιφανειακής σκληρότητας πρέπει να γίνεται για ηλικίες σκυροδέματος μεταξύ 14 ημερών και 3 μηνών. Για τέτοιες ηλικίες το σφάλμα των μετρήσεων μπορεί να φτάσει το 15%, ενώ αντίθετα για σκυροδέματα ηλικίας μεγαλύτερης των 3 μηνών, για τα οποία δεν έχουμε αρκετά στοιχεία για την σύνθεση και συντήρησή τους, το σφάλμα φτάνει το 25%.

## 1.5 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).

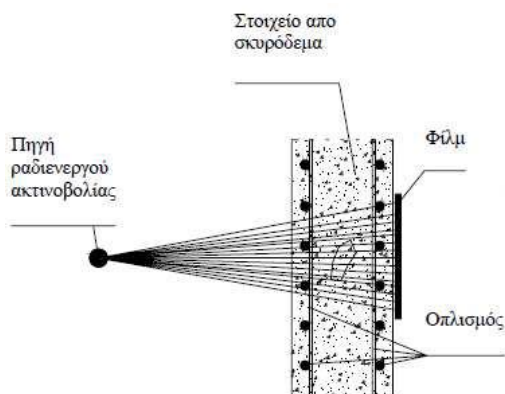


Σχήμα 1.3 Συσχέτιση δύναμης εξολκείσεως με την μέση θλιπτική αντοχή του Σκυροδέματος

Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται καμπύλη συσχέτισεως της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με δύναμη εξολκείσεως, σύμφωνα με τα πειράματα Λογοθέτης, 1979.

## 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 στο σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4 Η αρχή της μεθόδου 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).



## **1.7 Διαπερατότητα**

Μη καταστροφική μέθοδος (όταν εφαρμόζεται επί τόπου του έργου) και ημικαταστροφική (όταν εφαρμόζεται στο εργαστήριο). Η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση της ροής ρευστού (αέρα ή ύδατος) δια μέσου τους σκυροδέματος υπό δεδομένες συνθήκες. Εφαρμόζεται για σύγκριση σκυροδεμάτων με διάφορες συνθέσεις, έλεγχο ωρίμανσης σκυροδέματος.

## **1.8 Ραντάρ**

Μη καταστροφική μέθοδος η οποία βασίζεται στην μελέτη της ανακλάσεως ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθώς διέρχονται από υλικά με διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές. Με την μέθοδο αυτή γίνεται προσδιορισμός μεταλλικών αντικειμένων και κενών σε δάπεδα, περιοχών με αυξημένη υγρασία, εκτίμηση του πάχους στοιχείων.

## **1.9 Ενδοσκόπηση**

Μη καταστροφική μέθοδος με την οποία μπορεί να ελεγχθεί και φωτογραφηθεί η κατάσταση της μάζας δομικού στοιχείου αφού προηγηθεί μικρή διάτρηση. Μέθοδος με την οποία διανοίγεται μικρή οπή 10 έως 15 mm, εισάγεται ο σωλήνας του ενδοσκοπίου, ελέγχεται ή και φωτογραφίζεται το εσωτερικό ή η παράπλευρη επιφάνεια της διατήσεως για τον εντοπισμό κοιλιοτήτων, κενών, φωλεών σε σκυρόδεμα ή τοιχοποιία, έλεγχο της κατάστασης οπλισμού (διαβρωμένων ή μή) κυρίως προεντεταμένων στοιχείων, πληρότητας ενέσεων (κόλλας ή ενεμάτων).

## **1.10 Μέτρηση εύρους ρωγμών – έλεγχος παραμορφώσεων**

Μη καταστροφικές μέθοδοι με τις οποίες γίνεται μέτρηση και παρακολούθηση των παραμορφώσεων σε δοκιμές που γίνονται στο εργαστήριο ή επί τόπου του έργου. Ο έλεγχος / μέτρηση γίνεται με τα παρακάτω όργανα: Ακουστικά μηκυσιόμετρα, Μηχανικά μηκυσιόμετρα, Ηλεκτρικά μηκυσιόμετρα, Μετρητές μετακινήσεων. Εφαρμόζονται για την παρακολούθηση και καταγραφή μακροχρόνιων παραμορφώσεων, παρακολούθηση και καταγραφή παραμορφώσεων που προέρχονται από παροδικά φορτία.

## **1.11 Δοκιμαστικές φορτίσεις (στατικές ή δυναμικές)**

Μη καταστροφικές μέθοδοι με τις οποίες γίνεται πειραματικός έλεγχος της φέρουσας ικανότητας ή των δυναμικών χαρακτηριστικών (απόσβεση και ιδιοπερίοδος) μιας κατασκευής, καθώς και παρακολούθηση της παραμορφώσεως των υλικών. Ανάλογα με την μέθοδο που εφαρμόζεται ελέγχονται τα εξής χαρακτηριστικά:

- Στατική μέθοδος Φέρουσα ικανότητα ( η κατασκευή φορτίζεται με φορτίο μεγαλύτερο του φορτίου λειτουργίας), παραμορφώσεις υλικών και δομικών στοιχείων, από τα οποία κατασκευάζονται διαγράμματα τάσεως – παραμορφώσεως ή φορτίου – παραμορφώσεως, από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας
- Δυναμική φόρτιση, προσδιορισμός δυναμικών χαρακτηριστικών (ιδιοπερίοδος και απόσβεση), μέτρηση παραμορφώσεων

**ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ -  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

# Κεφάλαιο 2

## Συνάφεια οπλισμού σκυροδέματος

### 2.1 Γενικά στοιχεία

Συνάφεια είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μεταφορά δυνάμεων από το σκυρόδεμα προς τον χάλυβα και αντιστρόφως. Αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη ιδιότητα του οπλισμένου σκυροδέματος. Χάρης σε αυτή είναι δυνατή η συνεργασία των δύο υλικών. Η συνάφεια κατά κύριο λόγο οφείλεται στη μηχανική σύνδεση μεταξύ των ραβδώσεων του οπλισμού και του σκυροδέματος. Η χημική συνοχή και η τριβή συνεισφέρουν και αυτές στη δημιουργία της, αλλά δευτερευόντως.

Η συνάφεια επηρεάζει τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ποικιλοτρόπως. Όσον αφορά τις Οριακές Καταστάσεις Λειτουργικότητας (*OKL*) η συνάφεια παίζει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό του ανοίγματος των ρωγμών και στις καμπυλότητες διαρροής και αστοχίας. Όσον αφορά πάλι τις Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας (*OKA*) η συνάφεια επηρεάζει δραστικά τις αγκυρώσεις παντός τύπου, καθώς και τη δυνατότητα στροφής των περιοχών σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων.

Κατά τη μεταφορά των δυνάμεων, η ένταση στο σκυρόδεμα και στον οπλισμό του, μεταβάλλεται κατά το μήκος των στοιχείων. Όταν οι ασκούμενες εντάσεις δημιουργούν διαφορετικές παραμορφώσεις στα δύο υλικά, τότε παρατηρείται η σχετική ολίσθηση του ενός ως προς το άλλο. Στην περίπτωση των ράβδων με νευρώσεις, οι ολισθήσεις αυτές επιτείνονται ακόμη περισσότερο εξαιτίας των υψηλών εντάσεων που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα στην περιοχή γύρω από τη ράβδο. Η συνολική τιμή των ολισθήσεων οφείλεται τόσο στις σχετικές μετακινήσεις της διεπιφάνειας των δύο υλικών, όσο και στην διατμητικές παραμορφώσεις του σκυροδέματος. Η μέτρηση των ολισθήσεων γίνεται πάντα ως προς την απαραμόρφωτη επιφάνεια του σκυροδέματος.

## 2.2 Ιστορική αναδρομή

Το ενδιαφέρον των μηχανικών για την συνάφεια ξεκινάει από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα όπου εντοπίζονται και οι πρώτες δημοσιεύσεις (Mörsch 1908, Abrams 1913). Πειράματα ξεκίνησαν το 1939 από τον Menzel [1], 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 διεύθυνσης της ράβδου. Απέδειξε ότι η κατάσταση της επιφάνειας λείων ράβδων είχε πολύ σημαντική επίδραση στην αντοχή συνάφειας. Μια απόλυτα λειασμένη ράβδος είχε μόνο το  $\frac{1}{4}$  της τιμής αντίστασης σε εξόλκευση από ράβδο θερμής έλασης.

Ο Menzel επίσης κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αυξημένη αναλογία τσιμέντου ή το αυξημένο βάθος έμπηξης οδηγούσε σε αύξηση της αντίστασης σε εξόλκευση. Οι Ferguson και Thompson, το 1962, [2], πραγματοποίησαν σειρά πειραμάτων για να καθορίσουν το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης σε στοιχεία δοκού. Οι μεταβλητές που ελέγχθηκαν συμπεριελάμβαναν την διάμετρο των ράβδων (# 3, # 7 και # 11) με ή χωρίς συνδετήρες και τις διαστάσεις δοκού. Διαπιστώθηκε ότι η συνάφεια ήταν συνάρτηση του μήκους των ράβδων και όχι του μεγέθους της ράβδου. Το πλάτος δοκού και η επικάλυψη είχαν επίσης σημαντική επίδραση. Οι Ferguson και Thompson, το 1965, [14], πραγματοποίησαν μια μελέτη σχετικά με το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης μεγάλων (# 11 και # 18) ράβδων. Κατά την έρευνα κύριες μεταβλητές ήταν η επικάλυψη, το πλάτος δοκού, ποσοστό συνδετήρων, μήκος έμπηξης και η απόσταση από την άλλη επιφάνεια σκυροδέματος. Βρήκαν όπως και στην προηγούμενη εργασία, ότι αυξημένο βάθος έμπηξης οδηγεί στην ανάπτυξη χαμηλότερων τάσεων συνάφειας. Αυξημένη επικάλυψη οδήγησε σε αύξηση της αντίστασης σε εξόλκευση, αλλά δεν ήταν χρήσιμη για τη μείωση της έκτασης των ρωγμών.

Το 1983 (Vos), [16], έγινε μια σειρά από δυναμικά πειράματα με στόχο τον καθορισμό ποσοτικά της σχέσης ολίσθησης – τάσης για να χρησιμοποιηθεί σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιήθηκε μόνο μία ράβδος διαμέτρου 10 mm με μήκος έμπηξης  $3d = 30$  mm. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος 22, 45, και 55 N/mm<sup>2</sup>. Επιπλέον διάφοροι τύποι χάλυβα σπλισμού λείοι και νευροχάλυβες. Κατέληξαν στα συμπεράσματα ότι η αντοχή συνάφειας των λείων ράβδων είναι ανεξάρτητη από το είδος της φόρτισης και της

αντοχής του σκυροδέματος, και ότι ο νευροχάλυβας από την άλλη πλευρά έδειξε αξιοσημείωτη αύξηση της συνάφειας με την αύξηση του είτε της φόρτισης είτε της αντοχής του σκυροδέματος.

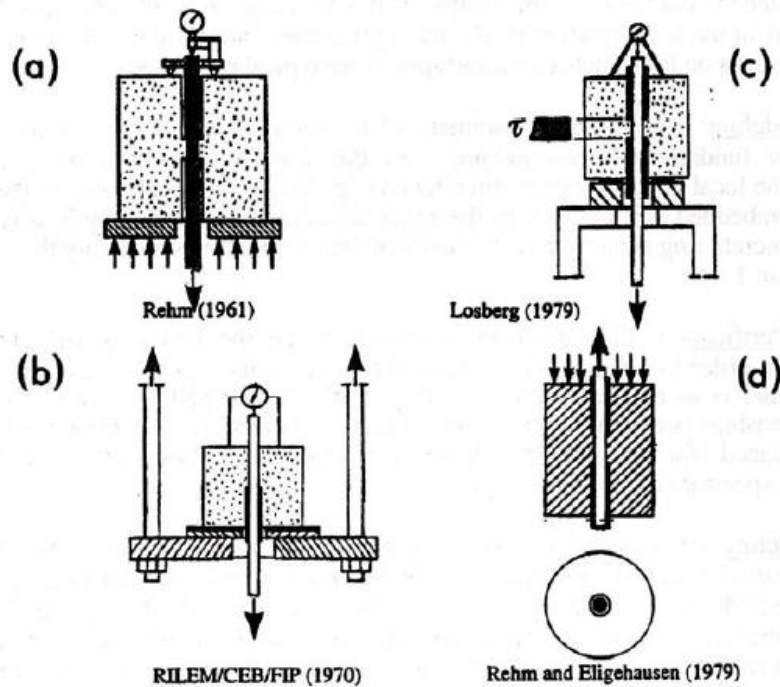
Μια σε βάθος μελέτη για την ολίσθηση υπό κρουστικό φορτίο έγινε το 1992 (Yan 1992), [15]. Το Δυναμικό φορτίο παράγονταν από την πτώση βάρους 345 κιλών. Τα πειράματα αφορούσαν τόσο την εξόλκευση όσο και την έμπηξη. Και για τους δύο τύπους των δοκιμών, η πειραματική αφορούσε τρεις διαφορετικούς τύπους φόρτωσης: στατική, δυναμική, και κρουστική. 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), ίδια περιεκτικότητα (0,1%, 0,5% και 1,0% κατ όγκο), και οι συνθήκες επιφάνειας (με επικάλυψη εποξειδικής κόλλας και χωρίς κόλλα). Το φορτίο εφαρμόζονταν στον οπλισμό και οι παραμορφώσεις κατά μήκος του οπλισμού μετρήθηκαν άμεσα. Διαπιστώθηκε ότι για τους λείους οπλισμούς, υπήρχε μια γραμμική σχέση τάσης συνάφειας - ολίσθησης τόσο για τα στατικά φορτία στατικά 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 σε αυτήν τη σχέση. Διαπιστώθηκε επίσης ότι υπάρχει πάντα υψηλότερη αντοχή για φόρτιση θλιπτική από τη εφελκυστική φόρτιση.

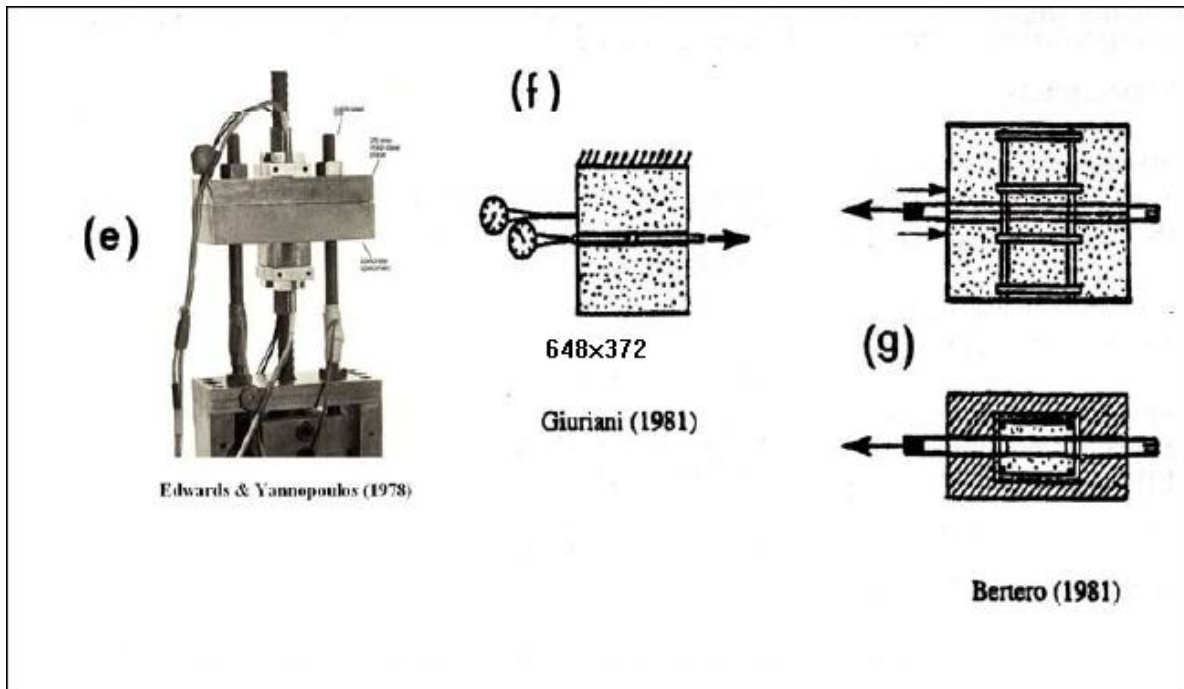
Επιπρόσθετα, σημαντικές πειραματικές έρευνες για τη συνάφεια σε νευροχάλυβες έχουν γίνει και από τους Eligehausen κ.ά. (1983) (125 δοκίμια) και Balázs (1992) (106 δοκίμια). Πιο πρόσφατα είναι τα πειράματα του Weathersby (2003) ο οποίος ερεύνησε τη συνάφεια χάλυβα και σκυροδέματος σε δυναμικές και οιονεί μόνιμες φορτίσεις και των Verderame, Ricci κ.ά. (2009) και Verderame, De Carlo κ.ά. (2009) [18,19] οι οποίοι μελέτησαν τη συμπεριφορά των λείων χαλύβων.

### 2.3 Η επιστημονική κατάσταση σήμερα

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. Στο σχήμα 2.1 φαίνονται παραδείγματα δοκιμών εξόλκευσης.

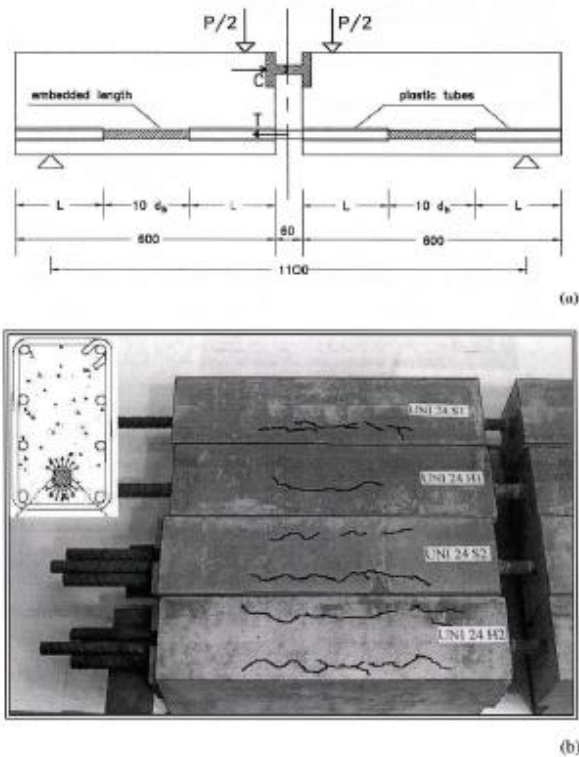




Σχήμα 2.1 Παραδείγματα δοκιμίων εξόλκευσης

Στην πραγματικότητα (δηλαδή στις κατασκευές) η επικάλυψη είναι περιορισμένη, και η αστοχία εκδηλώνεται με ρηγματώση του σκυροδέματος προς την πλησιέστερη ελεύθερη παρειά. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε τυποποιημένη δοκιμή δοκού η οποία φαίνεται στο σχήμα 2.2.





Σχήμα 2.2 Τυποποιημένη δοκιμή δοκού για τον προσδιορισμό της τοπικής συνάφειας-ολίσθησης:  
 (a) γεωμετρία δοκιμίου  
 (b) τριχοειδείς ρωγμές διάρρηξης κατά μήκος της κάτω πλευράς των δοκών

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.

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.

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 την τελευταία δεκαετία, [20].

## **2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια**

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια είναι πολλοί, χωρίς όμως μέχρι σήμερα να έχουν διερευνηθεί επαρκώς όλοι. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι οι ακόλουθοι:

- η γεωμετρία των νευρώσεων του χάλυβα (εφόσον υπάρχουν),
- η θέση των ράβδων ως προς τη διεύθυνση σκυροδέτησης (οριζόντια ή κατακόρυφη),
- η επικάλυψη της ράβδου,
- η περίσφιγξη της ράβδου,
- η δράση βλήτρου ,
- η αντοχή του σκυροδέματος (θλιπτική – εφελκυστική),
- η διάρκεια των δράσεων (βραχείας ή μακράς διάρκειας, στιγμιαίες, κρουστικές κτλ),

- ο τύπος των δράσεων (μονότονες, επαναλαμβανόμενες ή ανακυκλιζόμενες).
- η διάβρωση.

Για την εξέλιξη του φαινομένου εκδόθηκε το *State of the Art Report* (FIB 2000) [21], 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 ρηγμάτωση*).

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 περίσφιγξης που προσφέρουν, οι ρωγμές διάρρηξης περιορίζονται σε μια μικρή περιοχή γύρω από τη ράβδο

### Στάδιο IVa (*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 IVb (*Αστοχία διάρρηξης*).

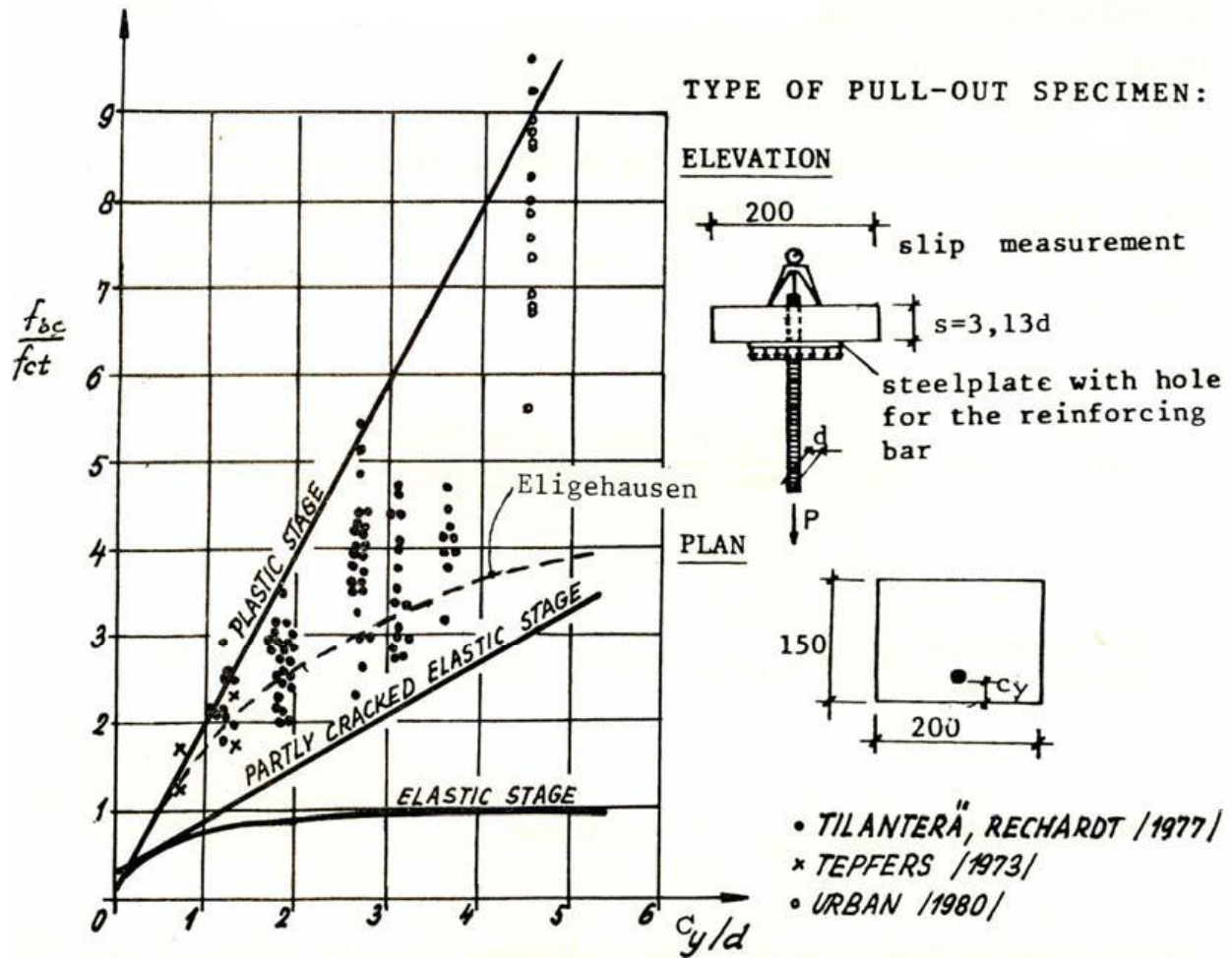
Στην περίπτωση ράβδων με νευρώσεις, με ελαφρύ ή μέτριο εγκάρσιο οπλισμό οι διαμήκεις ρηγματώσεις του *Σταδίου III* διαπερνούν ολόκληρη την επικάλυψη της ράβδου, με αποτέλεσμα να παρατηρείται έντονη μείωση της συνάφειας. Στην περίπτωση επαρκούς εγκάρσιου οπλισμού (*συνδετήρες*), παρά τη διάρρηξη του σκυροδέματος,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

Στάδιο IVc (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*).

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως υπάρχουν δύο τύποι αστοχίας της συνάφειας: αστοχία εξόλκευσης και αστοχία διάρρηξης. Υπό αυξανόμενα φορτία θα δημιουργηθούν αναγκαστικά εγκάρσιες ρωγμές και τελικά ρωγμές διάρρηξης.

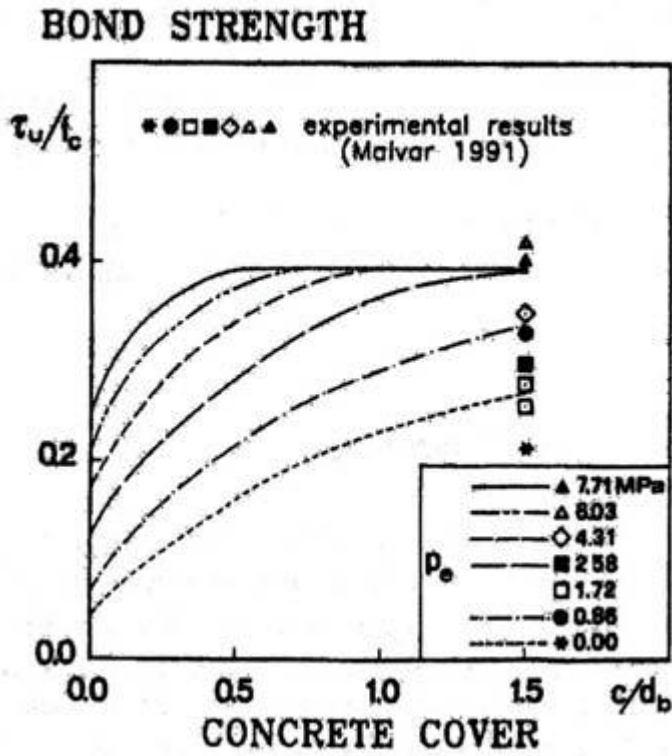
Το πάχος της επικάλυψης με σκυρόδεμα της ράβδου αποτελεί βασικό παράγοντα για τον περιορισμό των ρωγμών διάρρηξης και για βελτίωση της αντοχής και της παραμόρφωσης συνάφειας. Η αντοχή σε συνάφεια αυξάνει με το πάχος της επικάλυψης του χάλυβα όπως φαίνεται στα κάτωθι σχήματα.



Σχήμα 2.3 Η επιρροή του πάχους της επικάλυψης του χάλυβα με σκυρόδεμα στην αντοχή συνάφειας δοκιμίων εξόλκευσης με διαμήκη ρωγή διάρρηξης. Πειραματικά αποτελέσματα των Tepfers (1973, 1979), Tilanterä & Rechart (1977), Eligehausen (1979) και Urban (1980).

Ουσιαστικά για περιορισμό των ρωγμών διάρρηξης χρειάζεται μια δράση περίσφιγξης κατά μήκος της αγκυρωμένης ράβδου έτσι ώστε να ισορροπηθούν οι περιμετρικές εφελκυστικές τάσεις που δημιουργούνται από τις νευρώσεις των ράβδων. Αυτή η δράση περίσφιγξης πέρα από το πάχος της επικάλυψης με σκυρόδεμα της ράβδου εξαρτάται από μια σειρά άλλους φυσικούς και μηχανικούς παράγοντες, όπως η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, ο εγκάρσιος οπλισμός και η πλευρική πίεση. Η δράση περίσφιγξης επηρεάζει τη μορφή της αστοχίας της συνάφειας. Εάν η δράση περίσφιγξης είναι μέτρια, τότε αναπτύσσονται ρωγμές διάρρηξης κατά μήκος των αγκυρωμένων ράβδων και δια μέσου όλης της επικάλυψης (πλήρης διάρρηξη) και μπορεί να ακολουθήσει απότομα αστοχία της συνάφειας. Για ισχυρή δράση περίσφιγξης, με

κατάλληλο συνδυασμό ενός ή περισσότερων από τους προηγούμενους ευνοϊκούς παράγοντες, οι διαμήκεις ρωγμές διάρρηξης μπορούν να περιοριστούν σε μια ζώνη του σκυροδέματος γύρω από τη ράβδο, οπότε έχουμε μερική διάρρηξη και τελικά ακολουθεί αστοχία εξόλκευσης [(Plizzari & Schumm (1990)].



Σχήμα 2.4 Επιρροή του πάχους επικάλυψης ( $c$ ) του χάλυβα και της πλευρικής πίεσης ( $p_e$ ) στην αντοχή της συνάφειας ( $\tau_u$ ) [Gambarova & Rosati (1979)].

## 2.5 Ο υπολογισμός και η σημασία της συνάφειας σε νέες κατασκευές (ΕΚΟΣ2000)

Η ποιότητα της συνάφειας εξαρτάται από την μορφή της επιφάνειας της ράβδου, την διάσταση του δομικού στοιχείου και από την θέση και κλίση του οπλισμού κατά την σκυροδέτηση. Η ελάχιστη επικάλυψη των οπλισμών πρέπει να εξασφαλίζει την ανάπτυξη και μεταβίβαση των τάσεων συνάφειας. Οι τάσεις συνάφειας θεωρούνται σταθερές κατά μήκος των ράβδων. Ο προσδιορισμός των μηκών αγκυρώσεως και των υπερκαλύψεων βασίζεται στην τιμή σχεδιασμού της τάσεως συνάφειας  $f_{bd}$ .

Διακρίνονται δύο περιοχές συνάφειας:

Περιοχή συνάφειας I: όπου οι συνθήκες συνάφειας θεωρούνται ευνοϊκές.

Περιοχή συνάφειας II: όπου οι συνθήκες συνάφειας δεν θεωρούνται ευνοϊκές.

Στην περιοχή συνάφειας II (δυσμενείς συνθήκες) ανήκουν ράβδοι για τις οποίες ισχύουν όλες οι παρακάτω συνθήκες:

- έχουν κλίση ως προς την οριζόντια 0-45° για κατακόρυφη σκυροδέτηση,
- βρίσκονται σε στοιχεία με πάχος κατά τη διεύθυνση σκυροδετήσεως μεγαλύτερο από 250mm,
- είναι τοποθετημένες στο πάνω μισό πάχος του στοιχείου,
- το πάχος του σκυροδέματος που τις καλύπτει είναι μικρότερο από 300mm.

Στην περιοχή συνάφειας I (ευνοϊκές συνθήκες) ανήκουν όλες οι άλλες ράβδοι

Περιοχή συνάφειας I	$f_{ck}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50
	Λείες ράβδοι	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
	Ράβδοι $\varnothing \leq 32$ υψηλής συνάφειας	1.6	2.0	2.3	2.7	3.0	3.4	3.7	4.0	4.3
Περιοχή συνάφειας II	70% των τιμών της περιοχής συνάφειας I									

Πίνακας 2.1 : Καθορισμός των περιοχών συνάφειας



		Πάχος στοιχείου			
		Μικρότερο ή ίσο από 250mm	Μεγαλύτερο από 250mm		
			Η ράβδος βρίσκεται στο:		
			Κάτω ήμισο	Άνω ήμισο	
Η ράβδος καλύπτεται από σκυρόδεμα πάχους:					
			< 300mm	≥ 300mm	
Κλίση ως προς την οριζόντια	0 – 45°	I	I	II	I
	45 – 90°	I	I	I	I

Πίνακας 2.2: Βασικές τιμές του  $f_{bd}$  (MPa)

Βασικό μήκος αγκύρωσης:

Το βασικό μήκος αγκύρωσης  $l_b$  είναι το ευθύγραμμο μήκος αγκύρωσης με πλήρη εκμετάλλευση της αντοχής της ράβδου.

$$l_b = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{bd}}$$

όπου:  $\phi$  η διάμετρος της ράβδου

$f_{bd}$  η τιμή σχεδιασμού της τάσης συνάφειας

$f_{yd}$  η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του χάλυβα,

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω η πλήρης συνάφεια είναι προαπαιτούμενο για την ανάπτυξη της αντοχής της ράβδου. Η πιθανή μείωση της μπορεί να έχει απρόβλεπτες συνέπειες.

Και στον Ευρωκώδικα 2 μέρος 1 προβλέπεται ότι η οριακή αντοχή συνάφειας πρέπει να είναι επαρκής για να αποκλείεται αστοχία.

Ενώ η τιμή της τάσης σχεδιασμού της συνάφειας λαμβάνεται ως

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd}$$

Με  $f_{ctd}$  την τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος

Για τον έλεγχο υπάρχοντος ο κανονισμός είναι ιδιαίτερα απαιτητικός στην γνώση της διαθέσιμης συνάφειας

.....

α) Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους πλήρους αγκυρώσεως ή της μέγιστης εφελκυστικής δυνάμεως την οποία μπορεί να μεταφέρει η ράβδος για δεδομένο μήκος εμπήξεως, εφαρμόζονται οι σχέσεις του Κανονισμού για τον σχεδιασμό έργων από ωπλισμένο σκυρόδεμα.

β) Όταν απαιτείται ο υπολογισμός της επιστρατευόμενης τάσεως «σ» της ράβδου, λόγω εξολκεύσεως της, συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετωπικής ολισθήσεως «δ» στο εξωτερικό άκρο της ράβδου, θα χρησιμοποιείται κατάλληλο αναλυτικό προσομοίωμα, στηριζόμενο σε αξιόπιστα δεδομένα καταστατικού νόμου «τοπικής συνάφειας-τοπικής ολισθήσεως» κατά μήκος της ράβδου.

Στο διάγραμμα F-δ ο ΚΑΝΕΠΕ τονίζει

Επειδή στα στοιχεία ΟΣ οι καμπτικές παραμορφώσεις συνυπάρχουν με τις διατμητικές και με τις στροφές των ακραίων διατομών λόγω εξόλκευσης των οπλισμών στην αγκύρωση πέραν του άκρου του στοιχείου, η καταλληλότερη επιλογή F και δ είναι η ροπή M και η γωνία στροφής χορδής "θ" στα άκρα του στοιχείου, όπου η θ περιλαμβάνει το σύνολο των καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων, καθώς και τη στροφή των άκρων λόγω εξόλκευσης οπλισμών

Στο κεφάλαιο για την συμπεριφορά (αντίσταση, δυσκαμψία και ικανότητα παραμόρφωσης) υφιστάμενων στοιχείων και για το Εντατικό μέγεθος αντίστασης διαρροής ή αστοχίας στοιχείου

ε) Εάν οι εφελκυσόμενοι διαμήκεις οπλισμοί προεκτείνονται πέραν της ακραίας διατομής απλώς για αγκύρωση (π.χ. οπλισμός πάνω ή κάτω πέλματος δοκών σε ακραία στήριξη, οπλισμοί κάτω πέλματος δοκών σε ενδιάμεση στήριξη, διατομή κεφαλής ανωτάτου ορόφου κατακόρυφου στοιχείου, διατομή σύνδεσης ποδός κατακόρυφου στοιχείου με στοιχείο θεμελίωσης, κ.λπ.), η ροπή διαρροής της υπόψη ακραίας διατομής μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

ι) Για ράβδους με νευρώσεις και ευθύγραμμα άκρα, με βάση το ανωτέρω εδάφιο, όπου πλέον τα  $I_b$  και  $I_{b,min}$  αναφέρονται σε μήκος ευθυγράμμισης αγκύρωσης.

ii) Για λείες ράβδους με άγκιστρο, επιτρέπεται να ληφθεί η πλήρης ροπή διαρροής, εφόσον οι ράβδοι επεκτείνονται πέραν της ακραίας διατομής κατά 10Φ τουλάχιστον

Το μήκος  $L_s$  είναι ο λόγος  $M/V$  στην ακραία διατομή του στοιχείου, δηλαδή η απόσταση της ακραίας διατομής από το σημείο μηδενισμού των ροπών.

Η εξόλκευση του τμήματος των ράβδων πέραν της διατομής στήριξης είναι ανάλογη:

(i) της μήκυνσης του χάλυβα στη διαρροή,

και (ii) του μήκους που απαιτείται για την αγκύρωση των ράβδων (με υπόθεση πλήρους συνάφειας).

Για την παραμόρφωση στην διαρροή

Η τιμή της παραμόρφωσης στη διαρροή,  $\delta_y$ , πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμορφώσεις κατά τη διαρροή του στοιχείου (καμπτικές, διατμητικές, λόγω εξόλκευσης οπλισμών)

Τιμή δηλαδή που εξαρτάται άμεσα από την διαθέσιμη συνάφεια.

Και για την ροπή διαρροής ή αστοχίας

ε) Εάν οι εφελκόμενοι διαμήκεις οπλισμοί επεκτείνονται πέραν της ακραίας διατομής απλώς για αγκύρωση κατά το εδ. (ε) της § 7.2.1, σε μήκος το οποίο δεν είναι επαρκές για την ανάπτυξη της πλήρους ροπής διαρροής (ή αστοχίας)  $M_y$ , στην ακραία διατομή κατά το εδ. (ε) της § 7.2.1, τότε χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η επιρροή της ελλιπούς αγκύρωσης των εφελκωμένων ράβδων στην παραμόρφωση διαρροής του στοιχείου.

### **Ανθεκτικότητα σε διάρκεια, συνθήκες περιβάλλοντος, ελάχιστη επικάλυψη**

Για να εξασφαλιστεί η ανθεκτικότητα σε διάρκεια μίας κατασκευής, θα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες:

- τα κριτήρια σχεδιασμού
- η πιθανολογούμενη χρήση, συντήρηση και επιθεώρηση κατά την διάρκεια ζωής του έργου
- τυχόν ειδικά προστατευτικά μέτρα

- η μορφολογία των δομικών στοιχείων και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες
- η σύνθεση , οι ιδιότητες και η συμπεριφορά των υλικών
- οι συνθήκες περιβάλλοντος.

Η ελάχιστη τιμή της επικάλυψης σχετίζεται και με τις απαιτήσεις για εξασφάλιση ικανοποιητικής συνάφειας και πυρασφάλειας.

Ορίζονται 4 κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος ως εξής:

*Κατηγορία 1:* Ελάχιστα διαβρωτικό περιβάλλον

*Κατηγορία 2:* Μετρίως διαβρωτικό περιβάλλον

*Κατηγορία 3:* Παραθαλάσσιο περιβάλλον. Παραθαλάσσιες περιοχές.

*Κατηγορία 4:* Πολύ διαβρωτικό περιβάλλον. Βιομηχανικές ζώνες, χώροι με υψηλή περιεκτικότητα σε χημικά προϊόντα.

Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε οπλισμού και της πλησιέστερης επιφάνειας σκυροδέματος (επικάλυψη) δίνεται στον πίνακα 2.3.

Η ονομαστική τιμή  $C_{nom}$  της επικάλυψης σκυροδέματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη κατά 5 έως 10mm της ελάχιστης  $C_{min}$ .

Τιμές $C_{min}$				Διόρθωση για:		
Κατηγορία συνθηκών περιβάλλοντος				Πλάκες ή κελύφη	Προσανυόμενους τένοντες	Προεντεταμένους τένοντες
1	2	3	4	-5	+5	+10
20	25	30	30-45*			
* Αναλόγως της διαβρωτικότητας του μέσου. Για προσβολή κατά την παρ.12.4 του Κ.Τ.Σ. ισχύει $C_{min} = 30,35,40$ και 45mm για ασθενή, μέτριο, ισχυρό και πολύ ισχυρό βαθμό προσβολής, αντιστοίχως.						

Πίνακας 2.3 Ελάχιστες επικαλύψεις σε mm ( $C_{min}$ )

Η τελική τιμή της ελάχιστης επικάλυψης δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερη από 15 mm ή από ( $\Phi + 10$  mm ή 20 mm) για κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος 1 / 2 ή 3 / 4 , αντιστοίχως, όπου  $\Phi$  η διάμετρος ράβδου οπλισμού ή η ισοδύναμη διάμετρος δέσμης ράβδων.

#### Έλεγχοι συνάφειας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο μόνος έλεγχος προς το παρόν είναι πειραματικός και πραγματοποιείται με δοκιμή εξόλκευσης. Υπάρχουν μη καταστροφικοί έλεγχοι που ερευνούν τους παράγοντες που έχουν επίδραση στην συνάφεια, όπως η διάβρωση κ.λ.π., [6,7] Έλεγχος όμως της κατάστασης της διεπιφάνειας μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος δεν υπάρχει.

Η συνάφεια μεταξύ του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος και για να είναι αποτελεσματική, πρέπει να υπάρχει επαρκής τριβής 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 / τετραγωνική ίντσα το δευτερόλεπτο. Το φορτίο και η ολίσθηση καταγράφονται κατά διαστήματα μέχρι

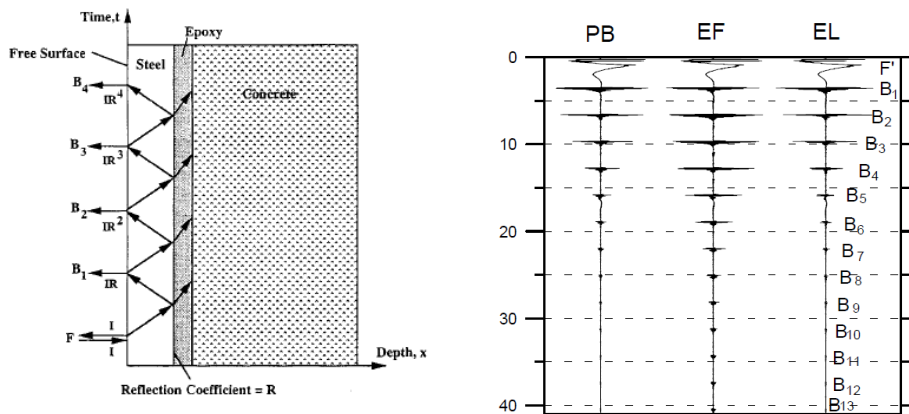
- (1) ο χάλυβας να διαρρεύσει ή
- (2) Το σκυρόδεμα να ρηγματώσει ή
- (3) Ολίσθηση 2.5 mm να συμβεί στο τέλος της φόρτισης

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 Wang<sup>1</sup>, 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.



**ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

# Κεφάλαιο 3

## Διάδοση Κυμάτων

### 3.1 Γενικά-ορισμοί

ΚΥΜΑ: θεωρείται 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:

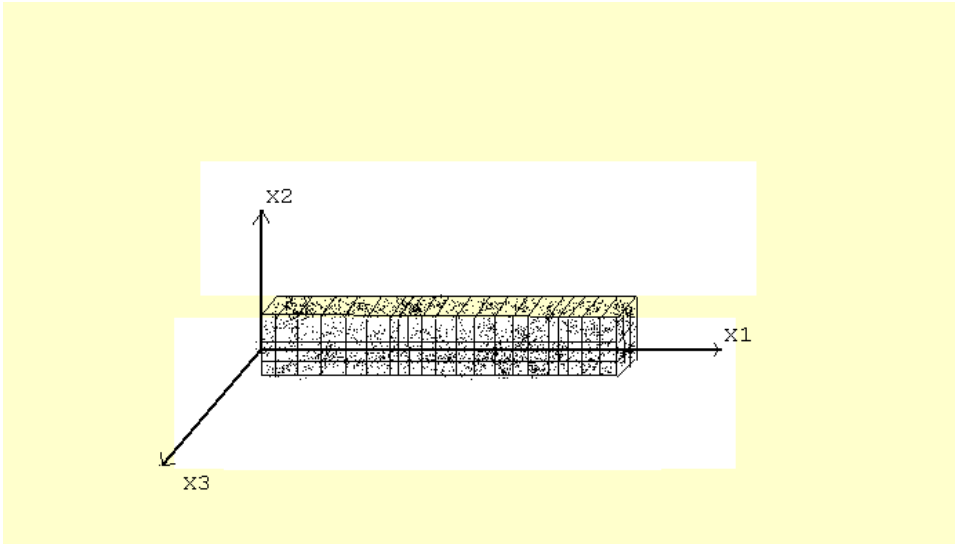
- Η κυματική ή φασική ταχύτητα. Είναι η ταχύτητα που διαδίδεται το κύμα, δηλαδή οι ισοφασικές επιφάνειες, στο μέσο.
- Η σωματιδιακή ή μοριακή ταχύτητα. Είναι η ταχύτητα με την οποία ταλαντώνεται γύρω από την θέση ισορροπίας του, το κάθε τμήμα του μέσου.
- Η ομαδική ταχύτητα. Για την περίπτωση υπέρθεσης 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 στα οποία η διεύθυνση διάδοσής τους και η διεύθυνση των ταλαντώσεων ή μετατοπίσεων του μέσου είναι παράλληλες.

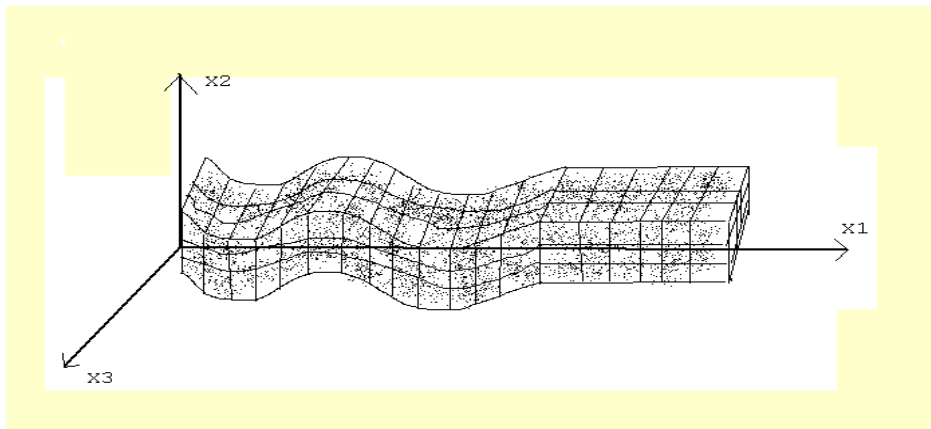
Εγκάρσια λέγονται τα κύματα στα οποία η διεύθυνση διάδοσής τους και η διεύθυνση των ταλαντώσεων ή μετατοπίσεων του μέσου είναι κάθετες.



Η κίνηση του ελαστικού μέσου για ένα διαμήκες και ένα εγκάρσιο κύμα που διαδίδεται σε διδιάστατο χώρο κατά την διεύθυνση  $x_1$ , φαίνεται στα σχήματα 3.1 και 3.2.



Σχήμα 3.1 Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση ενός διαμήκους κύματος



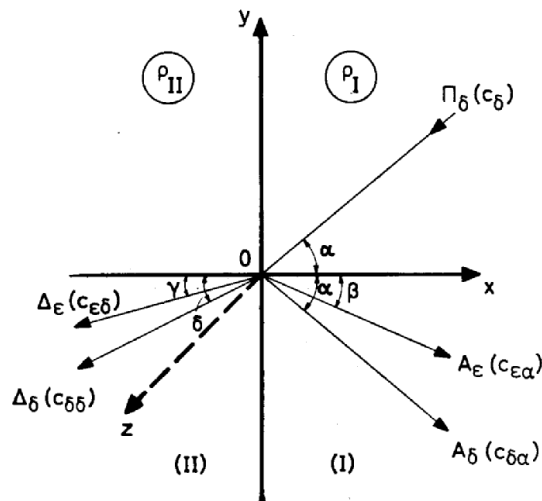
Σχήμα 3.2 Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση ενός εγκάρσιου κύματος

Κρουστικός παλμός, δημιουργείται από κρουστικό φορτίο. Κρουστικό δε 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, (σχήμα 3.3), δύο από ανάκλαση, ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο και δύο από διάθλαση, ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο.

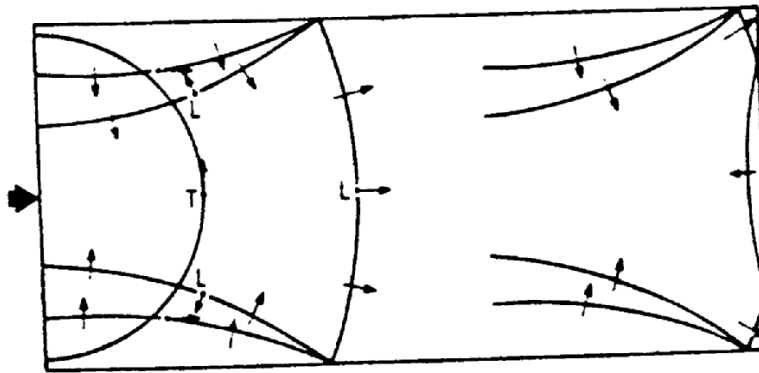


Σχήμα 3.3 Ανάκλαση και διάθλαση προσπίπτοντος διαμήκους κύματος σε διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων.

Ισχύει δε ότι:

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

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 στο σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4 Τασικά κύματα σε πλάκα.

### 3.2 Η Κυματική εξίσωση

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

$$\nabla^2 F = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

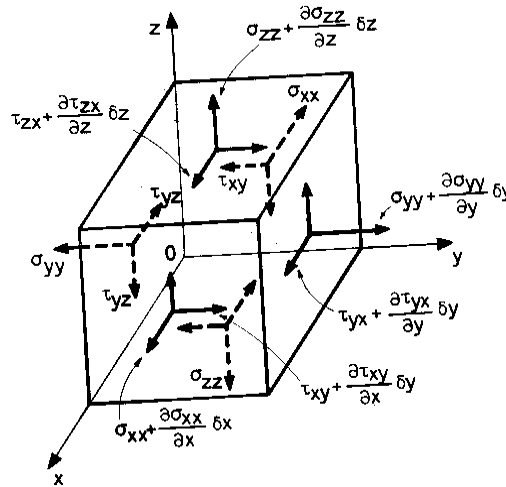
Όπου  $c$  είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής στο μέσον και  $F$ , μια χρονοεξαρτώμενη συνάρτηση, που περιγράφει την διαταραχή, πχ  $F(x \pm ct)$ .

Για τον καθορισμό των εξισώσεων κίνησης σε ελαστικό στερεό, [21], θεωρούμε ένα στοιχειώδες παραλληλεπίπεδο πλευρών  $dx, dy, dz$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 και θεωρούμε τις μεταβολές των τάσεων στις πλευρές του.

Από τον 2<sup>ο</sup> νόμο κίνησης του Νεύτωνα, (για τον άξονα  $x$  αρχικά), έχουμε:

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

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του σώματος και  $u$  η μετατόπιση κατά τον άξονα  $x$



Σχήμα 3.5 Οι μεταβολές των τάσεων κατά την διεύθυνση  $x$ , στο στοιχειώδες παραλλ/πεδο.

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

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \tag{3.2}$$

Για ομογενές και ισότροπο ελαστικό υλικό όπου ισχύουν οι γνωστές σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{yy} \\ \sigma_{zz} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{zz}\end{aligned}\tag{3.3}$$

$$\tau_{xy} = 2G\varepsilon_{xy}, \quad \tau_{yz} = 2G\varepsilon_{yz}, \quad \tau_{zx} = 2G\varepsilon_{zx}$$

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

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

Και από τις σχέσεις μεταξύ παραμορφώσεων-μετατοπίσεων:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)\end{aligned}\tag{3.4}$$

Καταλήγουμε στις παρακάτω εξισώσεις που εκφράζουν τις συνθήκες κίνησης:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v\end{aligned}\tag{3.5}$$

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

ο τελεστής  $\nabla$ , 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 της εξίσωσης (3.5) ως προς  $x, y, z$  αντίστοιχα και προσθέτοντας έχουμε:

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

(3.6)

Η εξίσωση (3.6) είναι της μορφής (3.1) και εκφράζει την κυματική εξίσωση του ισότροπου και ομογενούς ελαστικού σώματος.

### 3.3 Ταχύτητες κύματος

Η κυματική εξίσωση (3.6), δείχνει ότι η διόγκωση  $\theta$  διαδίδεται με ταχύτητα  $\left(\frac{\lambda+2\mu}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$

Διαφορίζοντας την δεύτερη και την τρίτη των σχέσεων (3.5) ως προς  $y, z$  αντίστοιχα και αφαιρώντας έχουμε:

$$\rho \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \omega_x \quad (3.7)$$

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 διόγκωσης

- 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 (σχήμα 3.1), διαδίδονται με τη φασική ταχύτητα  $c_{\delta}$ , ενώ παραμορφώσεις που οδηγούν σε αλλαγή σχήματος, χωρίς αλλαγή όγκου, (σχήμα 3.2), διαδίδονται με τη φασική ταχύτητα  $c_{\varepsilon}$ . 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:  $v_{\delta} = \frac{\sigma}{\rho c_{\delta}}$ , όπου  $\sigma$  η υπάρχουσα στην θέση ορθή τάση, και στην προκαλούμενη από την δίοδο του εγκάρσιου, με τιμή:  $v_{\varepsilon} = \frac{\tau}{\rho c_{\varepsilon}}$ , όπου  $\tau$  η διατμητική τάση στη υπ' όψιν θέση.

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**



# Κεφάλαιο 4

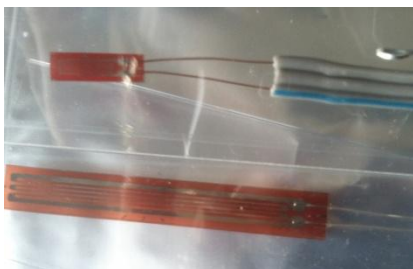
## Πειραματική διαδικασία

### 4.1 Εισαγωγή

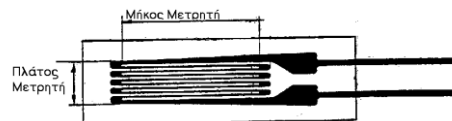
Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκαν τρία (3) κυλινδρικά δοκίμια από σκυρόδεμα ύψους  $h=30\text{cm}$  και διαμέτρου  $d=15\text{cm}$ . Εντός των δοκιμίων αυτών τοποθετήθηκε πριν την σκυροδέτησή τους διαμήκης οπλισμός από κατασκευαστικό χάλυβα, διαμέτρου  $\Phi 10$ , με νευρώσεις. Σε κάθε ένα από τα δοκίμια τοποθετήθηκε ένας διαμήκης χαλύβδινος οπλισμός στο κέντρο της διατομής του δοκιμίου καθώς και διαμήκης οπλισμός στο άκρο της διατομής, με μικρή επικάλυψη από σκυρόδεμα. Στην συνέχεια, οι οπλισμοί υποβλήθηκαν σε κρουστική καταπόνηση και με σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων, αφού καταγράφηκαν οι τιμές των παραμορφώσεων, ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με την θέση του οπλισμού εντός του δοκιμίου (κεντρικός- ακραίος).

### 4.2 Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, (Strain gauges)

Με σκοπό να μετρηθεί η παραμόρφωση του οπλισμού των δοκιμίων, που θα προκληθεί από την κρουστική καταπόνησή τους, επικολλήθηκαν σε ύψος  $h=10\text{cm}$  από την βάση των δοκιμίων, ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης.



Σχήμα 4.1 Ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης



Σχήμα 4.2 Σχηματική παράσταση μετρητή

Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης (Strain gauges) (Σχ.4.1), είναι ωμικές αντιστάσεις, ιδιαίτερα ευαίσθητες στην αλλαγή του μήκους τους. Το μήκος και το πλάτος του μετρητή, (Σχ. 4.2 ), 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  $\rho$ , 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  $\Delta L$ , οπότε η ορθή παραμόρφωση  $\varepsilon$  δίνεται από την σχέση:

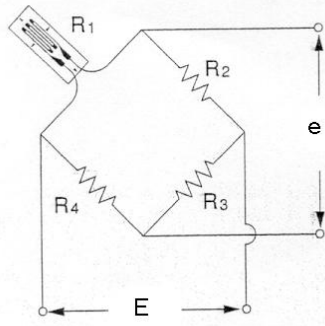
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Επομένως όταν ένα δοκίμιο, στο οποίο έχει επικολληθεί ηλεκτρικός μετρητής παραμόρφωσης, υποστεί εφελκυστική ή θλιπτική καταπόνηση, τότε η ορθή παραμόρφωση του είναι ανάλογη με την μεταβολή της αντίστασης του ηλεκτρικού μετρητή παραμόρφωσης:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R/R}{K} \quad (4.1)$$

Όπου  $R$ , η αντίσταση του μετρητή,  $\Delta R$ , 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,  $\Delta R$ , του μετρητή είναι εν γένει μικρή, προκειμένου να μετρηθεί και να έχουμε έτσι την τιμή της παραμόρφωσης, απαιτείται η αντίσταση του μετρητή να αποτελέσει τμήμα του κυκλώματος μιας “γέφυρας Wheatstone”, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3 Η 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 ανωτέρω μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης:

$$e = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E \quad (4.2)$$

Στην περίπτωση μεταβολής της αντίστασης του μετρητή,  $\Delta R_1$  λόγω της παραμόρφωσης του δοκιμίου, δημιουργείται ανάλογη μεταβολή,  $\Delta e$ , στην τάση εξόδου της γέφυρας, η οποία στην περίπτωση που όλες οι αντιστάσεις είναι ίσες γίνεται:

$$\Delta e = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} E \quad (4.3)$$

Και επειδή  $\Delta R \ll R$ , είναι λόγω της σχέσης (4.1):

$$\Delta e = \frac{\Delta R}{4R} E = \frac{E}{4} K \varepsilon \quad (4.4)$$

Έτσι από την διαφορά δυναμικού  $\Delta e$  της τάσης εξόδου της γέφυρας, μετριέται άμεσα η παραμόρφωση,  $\varepsilon$ , με αναλογικό ή ψηφιακό τρόπο.

### 4.3 Προετοιμασία του οπλισμού των δοκιμίων

Στα δοκίμια τοποθετήθηκε διαμήκης οπλισμός. Χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι από κατασκευαστικό χάλυβα, κυκλικής διατομής,  $\Phi 10$ , με νευρώσεις. Οι ράβδοι χάλυβα τεμαχίστηκαν ώστε να έχει ο καθένας συνολικό μήκος  $l=50\text{cm}$ , εκ των οποίων τα  $30\text{cm}$  βρίσκονταν εντός του σκυροδέματος και τα  $20\text{cm}$  εκτός.



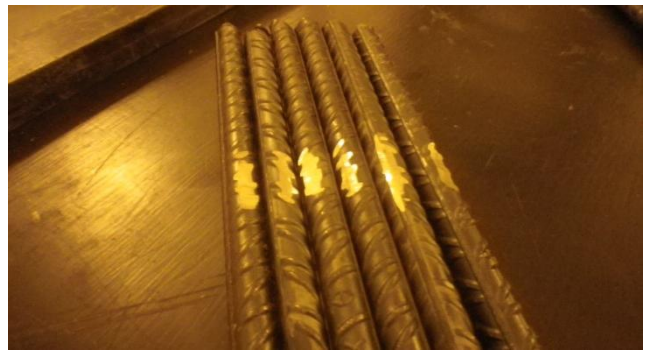
*Σχήμα 4.4 Κοπή οπλισμού στο κατάλληλο μήκος*

Επί των ράβδων και σε ύψος  $10\text{cm}$  από το κατώτερο άκρο τους τοποθετήθηκαν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges). Για την σωστή επικόλληση των μετρητών στην επιφάνεια του οπλισμού προηγήθηκε λείανση της ράβδου στα συγκεκριμένα σημεία με σμυριδοτροχό στο εργαστήριο του τομέα Μηχανικής. Σκοπός της επιφανειακής λείανσης ήταν η εξάλειψη των νευρώσεων καθώς και της επιφανειακής τραχύτητας του υλικού, από τις θέσεις αυτές. Εκτιμάται ότι με την παρέμβαση αυτή δεν υπήρξε ουσιαστική επίπτωση στην αντοχή του

οπλισμού ούτε και ουσιαστική απομείωση της μηχανικής συνάφειας λόγω της αφαίρεσης ενός μικρού τμήματος της νεύρωσης.



Σχήμα 4.5 Διαδικασία επιφανειακής λείανσης



Σχήμα 4.6 Όψη οπλισμού μετά από λείανση

Στα επιλεγμένα σημεία επικολλήθηκαν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, (strain gauges). Αυτοί ήταν της TML, τύπου FLA-5-11 με καλώδια και αντίσταση  $120\Omega$ . Εν συνεχεία έγινε ένωση των μετρητών με καλώδια και κατόπιν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης μονώθηκαν και στεγανοποιήθηκαν με σιλικόνη για να προστατευθούν κατά την διαδικασία της σκυροδέτησης.



Σχήμα 4.7 συνδεδεμένη με καλώδια και μονωμένη ράβδος

#### 4.4 Σκυροδέτηση δοκιμίων

Για την σκυροδέτηση των τριών κυλινδρικών δοκιμίων ύψους  $h = 30\text{cm}$  και διαμέτρου  $d = 15\text{cm}$  χρησιμοποιήθηκαν τρεις χαλύβδινες κυλινδρικές μήτρες οι οποίες αρχικά καθαρίστηκαν, τρίφτηκαν με γυαλόχαρτο και στην συνέχεια ακολούθησε επάλειψη με λάδι ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα κατά το ξεκαλούπωμά τους.

Για την σκυροδέτηση χρησιμοποιήθηκε εμπορικό αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα μέσης-υψηλής εργασιμότητας της εταιρείας ET Μπετόν (Italcementi Group) με μέση αντοχή 28 ημερών  $44.1\text{ N/mm}^2$  και μέση εφελκυστική αντοχή 28 ημερών  $3.6\text{ N/mm}^2$ . Η σύνθεσή του δεν κοινοποιήθηκε από την εταιρία για προφανείς λόγους.

Πριν την έγχυση του σκυροδέματος στις χαλύβδινες μήτρες τοποθετήθηκε και στερεώθηκε ο οπλισμός στις κατάλληλες θέσεις, η μία χαλύβδινη ράβδος στο κέντρο της διατομής και οι άλλες δύο αντιδιαμετρικά, όσο πιο κοντά κατέστη δυνατό κατασκευαστικά, στην εσωτερική περιμετρική επιφάνεια της μήτρας. Ο προσανατολισμός τους ήταν διαμήκης. Όσον αφορά στις ακριαίες ράβδους, στόχος ήταν η επίτευξη μικρής επικάλυψης σκυροδέματος. Και στα τρία δοκίμια η επικάλυψη ανέρχεται στα 3 mm. Για την αποφυγή του τραυματισμού των μετρητών, αυτοί τοποθετήθηκαν με μέτωπο στο κέντρο της διατομής. Ακολούθησε έγχυση

του σκυροδέματος στις μήτρες. Εν συνεχεία διατηρήθηκαν σε κατάλληλο περιβάλλον μέχρι την 29<sup>η</sup> μέρα, οπότε και αφαιρέθηκαν οι μήτρες.



*Σχήμα 4.8 Σκυροδέτηση δοκιμίων*



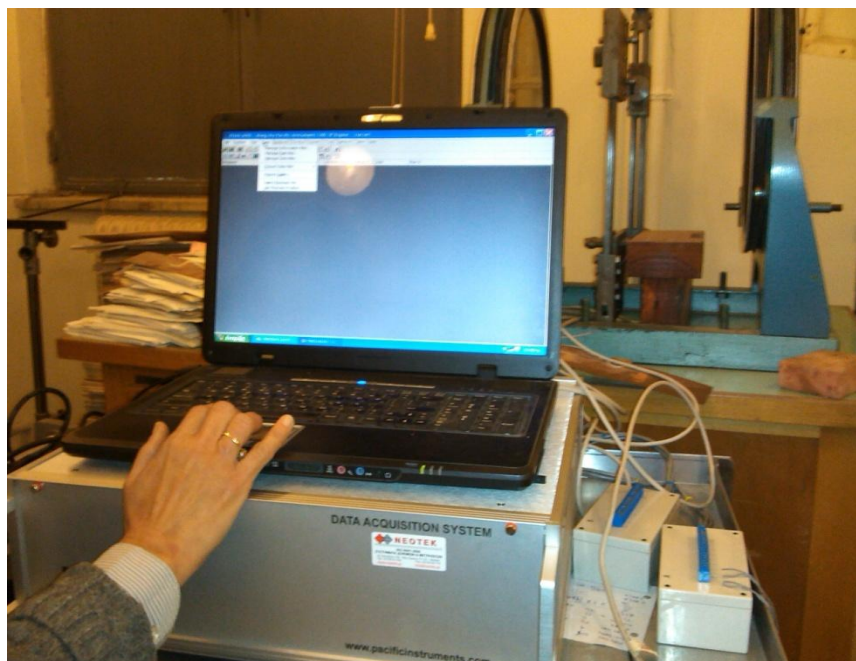
*Σχήμα 4.9 Όψη δοκιμίων στις μήτρες*



*Σχήμα 4.10 Ξεκαλούπωμα δοκιμίων*

## 4.5 Το μετρητικό σύστημα

Προκειμένου να καταγραφεί η κυματομορφή και να μετρηθούν οι παραμορφώσεις στα επιλεγμένα σημεία των δοκιμίων, 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, (σχήμα 4.11).



*Σχήμα 4.11 Το μετρητικό σύστημα*



Το σύστημα αποτελείται από τα εξής:

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

Η μέγιστη ταχύτητα λήψεως δεδομένων του συστήματος, είναι για ένα κανάλι, 250.000 λήψεις ανά sec. Οι μετρήσεις έγιναν με 60.000 λήψεις/sec ανά κανάλι.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

# Κεφάλαιο 5

## Αποτελέσματα

### 5.1 Τρόπος παρουσίασης

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και εν συνεχεία σύγκριση και σχολιασμός. Τα διαγράμματα που παρατίθενται είναι αυτά που προέκυψαν από το λογισμικό PI660-6000 του μετρητικού συστήματος (Data Acquisition System), Model 6035 της PACIFIC INSTRUMENTS.

Η παρουσίαση των διαγραμμάτων που ακολουθείται έχει ως εξής:

- Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κυματομορφών που προέκυψαν από την καταπόνηση του κεντρικού οπλισμού και εν συνεχεία τα διαγράμματα κυματομορφών που αφορούν στους οπλισμούς με μικρή επικάλυψη. Η επιλογή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η όλη πειραματική διαδικασία επικεντρώνεται στο να εξετάσει τις πιθανές διαφορές ανάμεσα στους κεντρικούς οπλισμούς και σε αυτούς με μικρή επικάλυψη.
- Για κάθε μια από τις ξεχωριστές καταπονήσεις-μετρήσεις παρατίθεται ένα γενικό διάγραμμα όπου παρουσιάζονται οι κυματομορφές στο σύνολο του χρόνου της μέτρησης και έπειτα παρουσιάζονται οι κυματομορφές εστιασμένες στο σημείο ενδιαφέροντος. Το πρώτο διάγραμμα προκύπτει από την επιλογή ανάγνωσης της μέτρησης του χρησιμοποιηθέντος προγράμματος «quick plot». Οι εστιασμένες κυματομορφές στο σημείο ενδιαφέροντος προέκυψαν από την επιλογή «osqilloscope».
- Η σειρά παράθεσης των διαγραμμάτων πραγματοποιείται πρωτίστως ανά αύξοντα αριθμό δοκιμίου και δευτερευόντως ανά αύξοντα αριθμό πειράματος στο κάθε δοκίμιο. Η επιλογή αυτή γίνεται για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι ότι τα δοκίμια δεν είναι πανομοιότυπα μεταξύ τους. Σίγουρα θα υπάρχουν μικροδιαφοροποιήσεις στο εσωτερικό τους οι οποίες οφείλονται είτε στον τρόπο παρασκευής τους είτε σε παράγοντες που δεν υπάρχει ούτως ή άλλως δυνατότητα να αποφευχθούν. Ο δεύτερος λόγος είναι το γεγονός ότι η επανάληψη της καταπόνησης ενός οπλισμού μπορεί να επιφέρει μετρήσιμες διαφοροποιήσεις στην εξέλιξη του πειράματος.

## 5.2 Διαγράμματα

Στα κάτωθι διαγράμματα παρουσιάζονται κυματομορφές σύμφωνα με την σειρά που έχουμε αναφέρει παραπάνω.

Και στους δύο τύπους διαγραμμάτων ο οριζόντιος άξονας αποτυπώνει τις τιμές του χρόνου καταγραφής και ο κατακόρυφος των παραμορφώσεων.

Στα διαγράμματα που αντλούνται από την επιλογή «quick plot», στον οριζόντιο άξονα εμφανίζεται το σύνολο του χρόνου καταγραφής για το κάθε συγκεκριμένο πείραμα, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ δύο έως τεσσάρων δευτερολέπτων, ενώ στον κάθετο άξονα η κλίμακα των τιμών παραμόρφωσης που εμφανίζεται είναι αυτή που αυτόματα μας παρουσιάζει το πρόγραμμα και γι' αυτό διαφέρει από πείραμα σε πείραμα.

Στα διαγράμματα που αντλούνται από την επιλογή «oscilloscope» στον οριζόντιο άξονα η κλίμακα του χρόνου έχει ανοιχθεί στο χρονικό διάστημα της διαταραχής ώστε να φανεί καλύτερα το περιεχόμενο. Στον κατακόρυφο άξονα των παραμορφώσεων η κλίμακα έχει προσαρμοστεί ώστε να καθίσταται ευδιάκριτη η όλη διαδικασία της μεταβολής της παραμόρφωσης. Και εδώ από πείραμα σε πείραμα η κλίμακα των παραμορφώσεων αλλάζει οπότε η σύγκριση των διαγραμμάτων δεν μπορεί να γίνει με μία απλή οπτική αντιπαράθεσή τους. Επίσης η τιμή εκκίνησης στον κατακόρυφο άξονα είναι διαφορετική από πείραμα σε πείραμα.

Επιπρόσθετα στα διαγράμματα αυτά δίνεται η δυνατότητα από το λογισμικό της εμφάνισης ενός κέρσορα στο κάτω μέρος του διαγράμματος, ο οποίος συρόμενος επί του άξονα του χρόνου παρέχει την δυνατότητα ανάγνωσης της τιμής της παραμόρφωσης της αντίστοιχης χρονικής στιγμής. Χρήση των δυνατοτήτων του κέρσορα έγινε στα διαγράμματα που υπήρξε αξιόλογη μεταβολή της παραμόρφωσης, όπου και σημειώνεται η αρχική και η τελική τιμή της, με σκοπό την καλύτερη ανάγνωση της μεταβολής της.

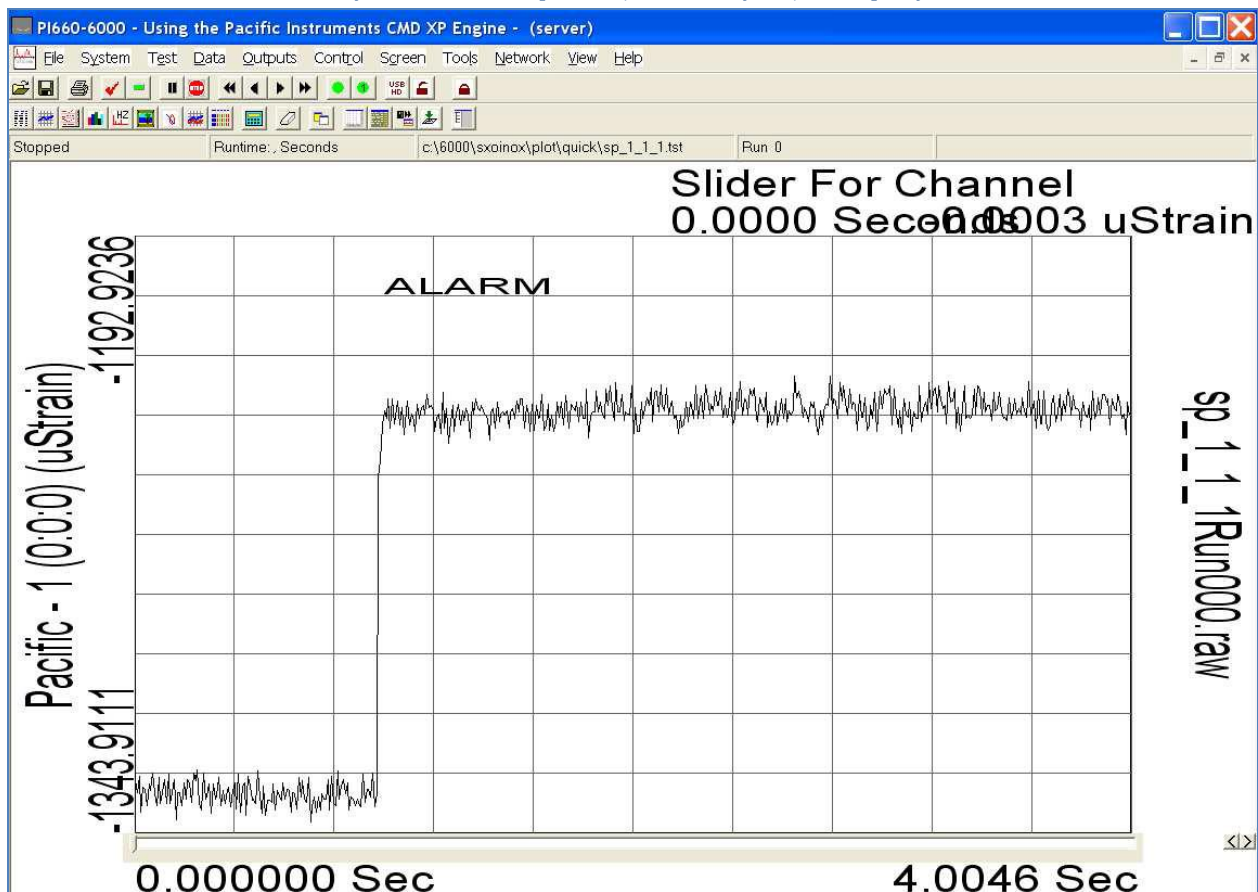
Η ονομασία των διαγραμμάτων γίνεται στην παρούσα εργασία με βάση την παραπάνω κατηγοριοποίησή τους. Κάθε διάγραμμα φέρει ένα κωδικό όνομα από τρεις αριθμούς π.χ. Διάγραμμα 1\_2\_2.

- Ο πρώτος αναφέρεται στον αύξοντα αριθμό του δοκιμίου στο οποίο είναι τοποθετημένος ο οπλισμός που καταπονείται με κρουστικό φορτίο. Παίρνει τιμές από ένα έως τρία, διότι τρία είναι στο σύνολό τους τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική διαδικασία, π.χ. Διάγραμμα 1\_2\_2.
- Ο δεύτερος προσδιορίζει την θέση του οπλισμού στο δοκίμιο. Με τον αριθμό 1 συμβολίζεται ο οπλισμός που έχει τοποθετηθεί στο κέντρο της διατομής του δοκιμίου και

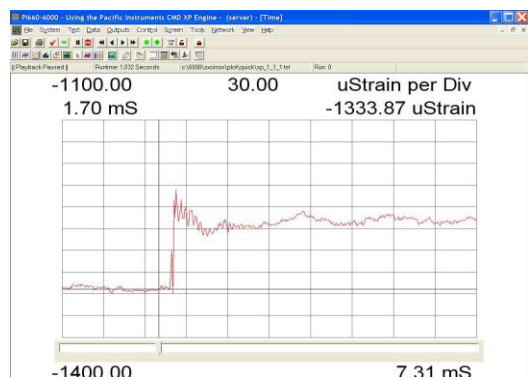
με τον αριθμό 2 συμβολίζεται ο οπλισμός που έχει τοποθετηθεί σε ακραία θέση στο δοκίμιο, δηλαδή οπλισμός με μικρή επικάλυψη π.χ. Διάγραμμα\_1\_2\_2.

- Ο τρίτος αναφέρεται στον αύξοντα αριθμό του πειράματος σε κάθε συγκεκριμένο οπλισμό σε συγκεκριμένο δοκίμιο. π.χ. Διάγραμμα 1\_2\_2.
- Στα εστιασμένα διαγράμματα στο σημείο ενδιαφέροντος προστίθεται το γράμμα p για την περίπτωση που ο κέρσορας είναι τοποθετημένος πριν από το άλμα και a για την περίπτωση που ο κέρσορας είναι τοποθετημένος αμέσως μετά την πραγματοποίηση του άλματος. Αυτό εξυπηρετεί στην ανάγνωση των τιμών της παραμορφωσιακής κατάστασης που εμφανίζονται πάνω και δεξιά στο παράθυρο του διαγράμματος.

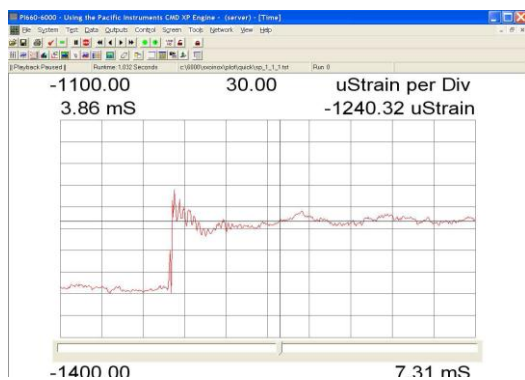
## Δοκίμο 1-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 1



Διάγραμμα 1\_1\_1



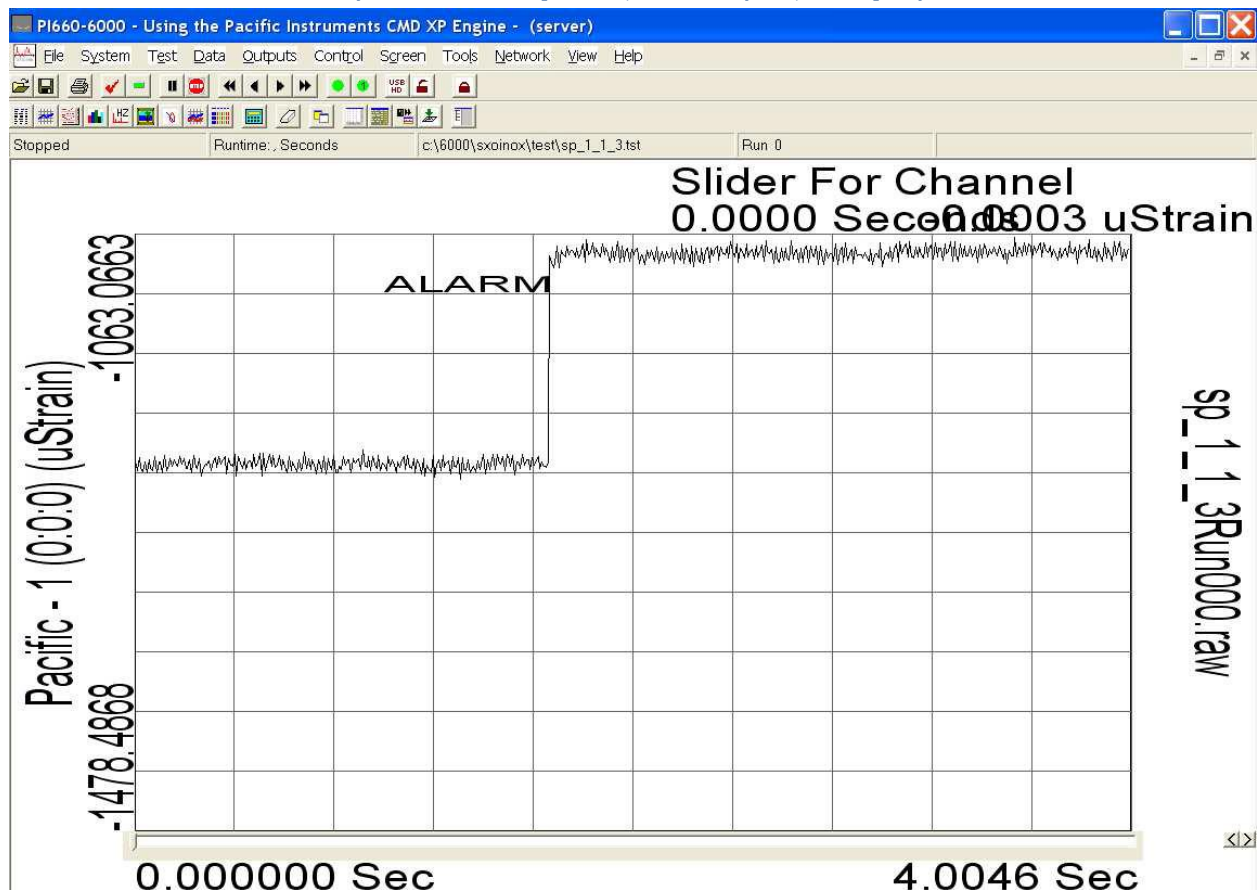
Διάγραμμα 1\_1\_1p



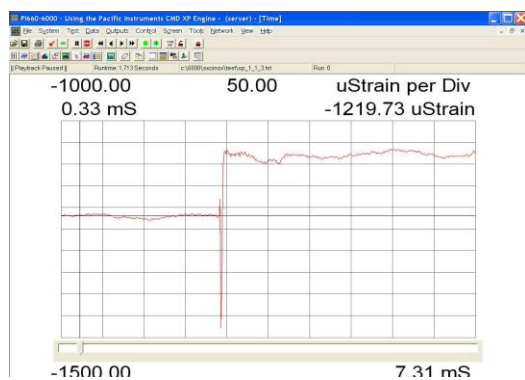
Διάγραμμα 1\_1\_1a

Διαφορά: 94

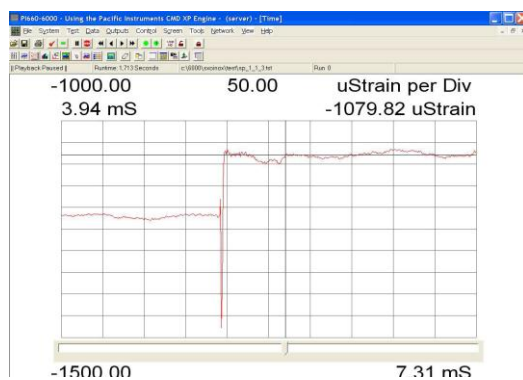
## Δοκίμιο 1-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 3



Διάγραμμα 1\_1\_3



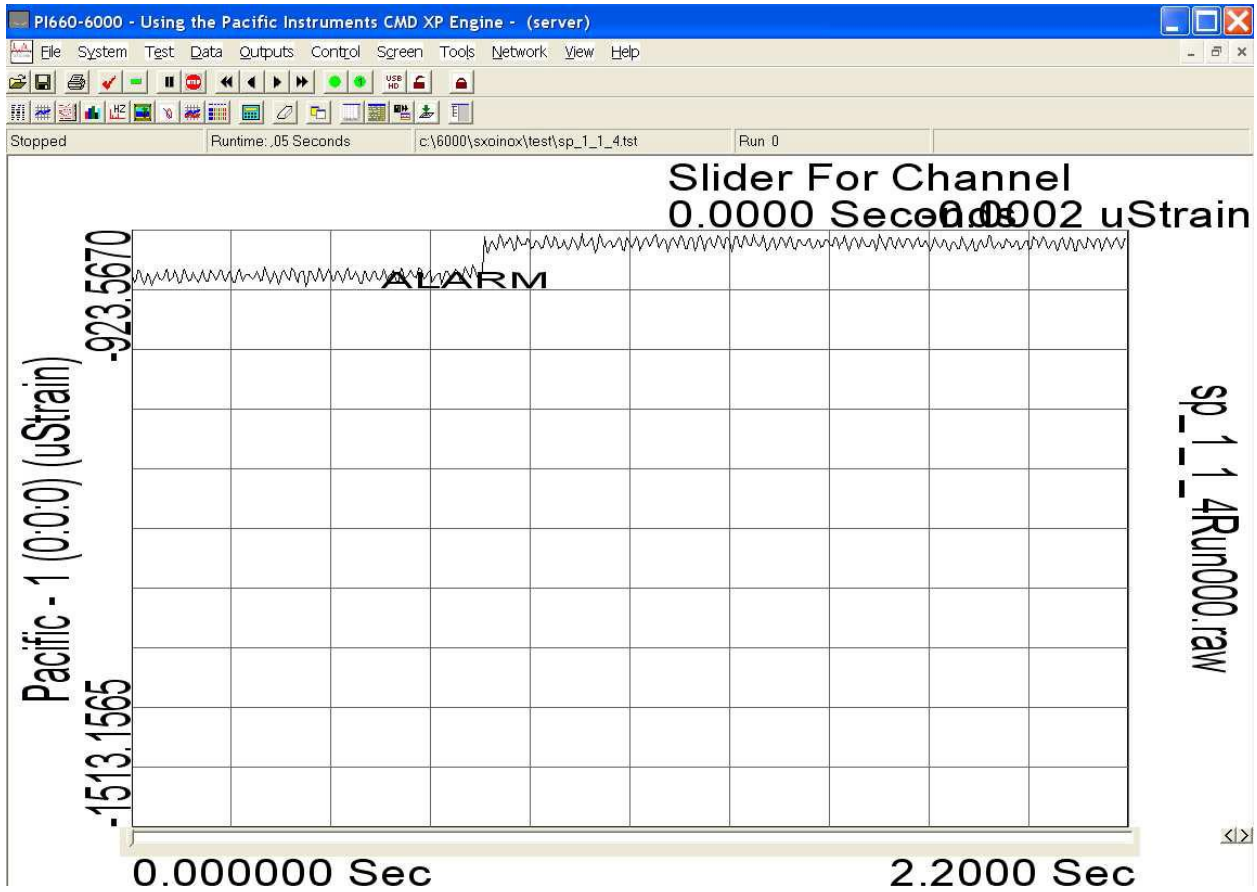
Διάγραμμα 1\_1\_3β



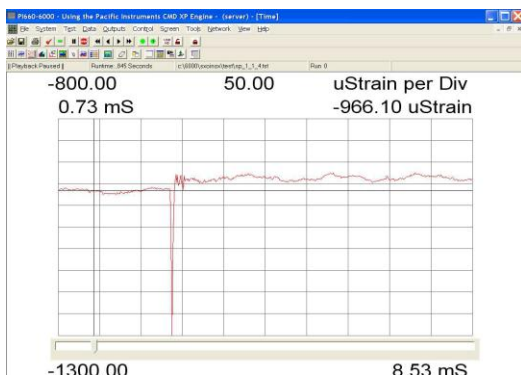
Διάγραμμα 1\_1\_3α

Διαφορά: 140

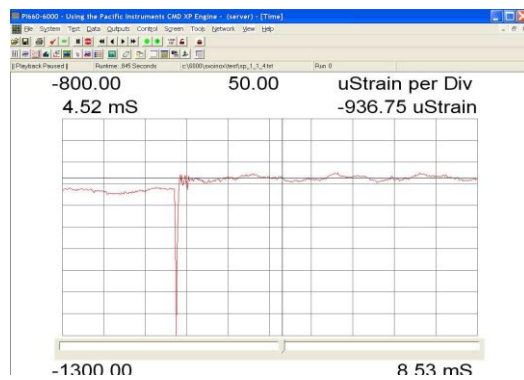
## Δοκίμιο 1-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 4



Διάγραμμα 1\_1\_4



Διάγραμμα 1\_1\_4p

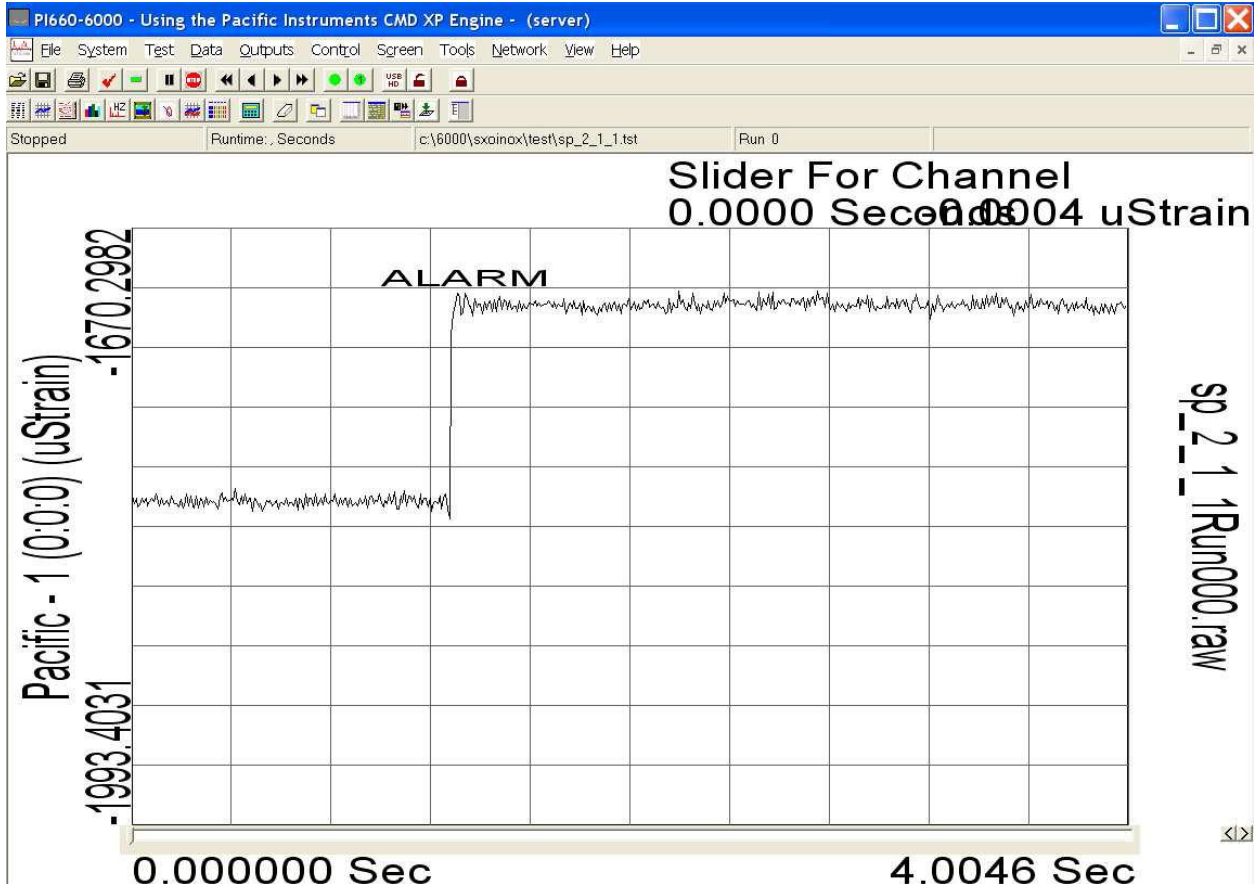


Διάγραμμα 1\_1\_4a

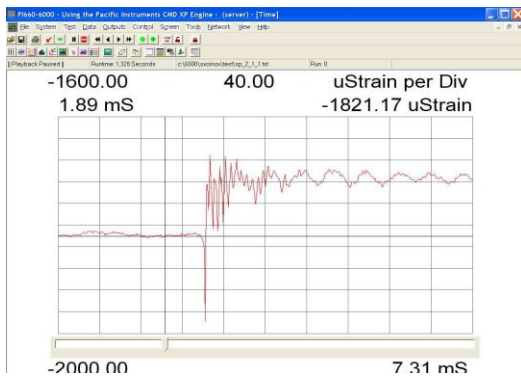
Διαφορά: 60



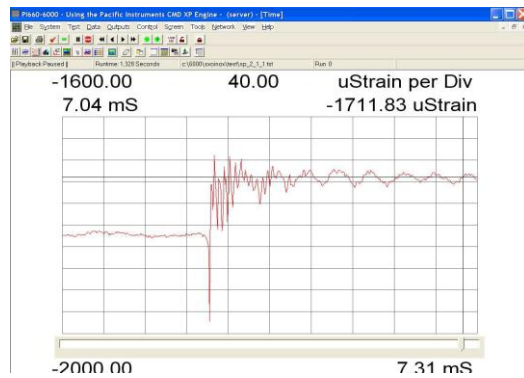
## Δοκίμιο 2-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 1



Διάγραμμα 2\_1\_1



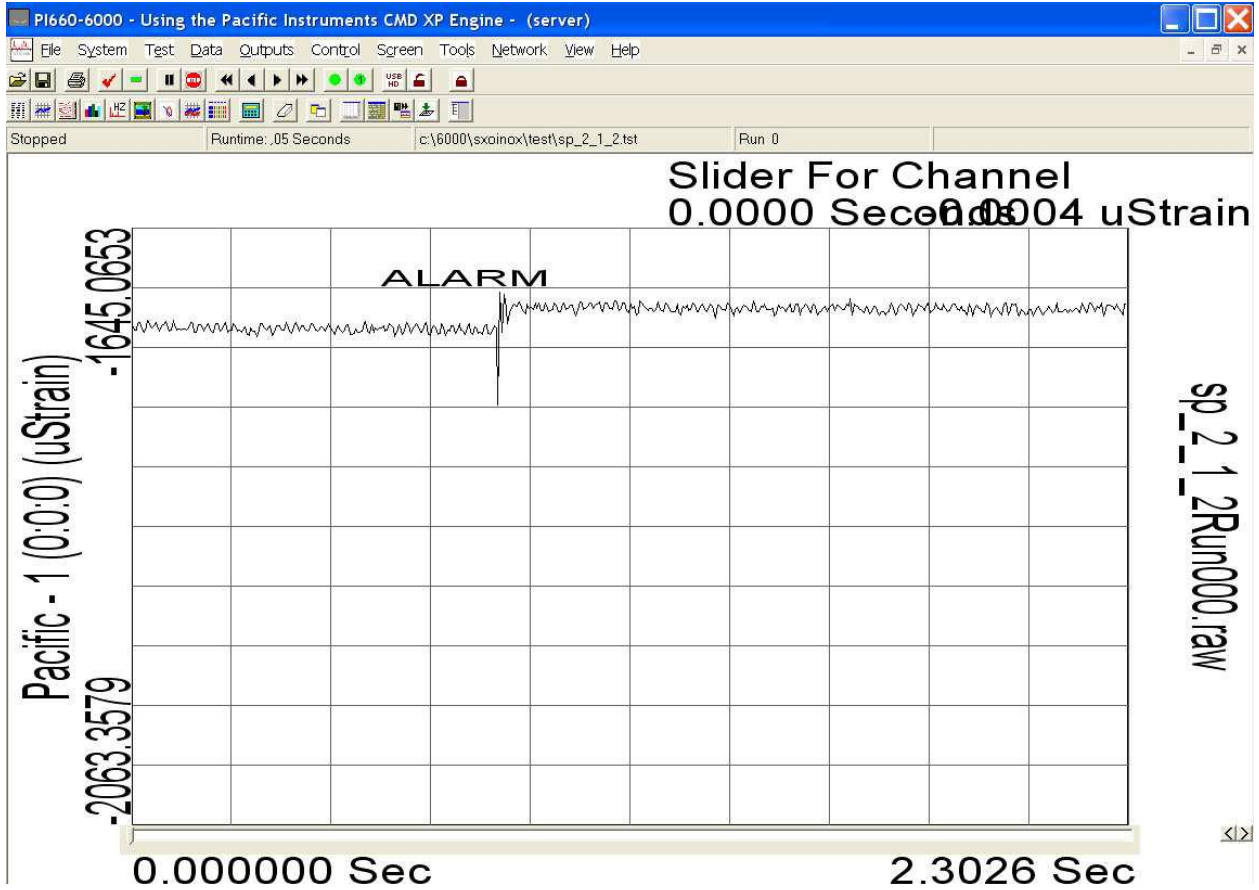
Διάγραμμα 2\_1\_1p



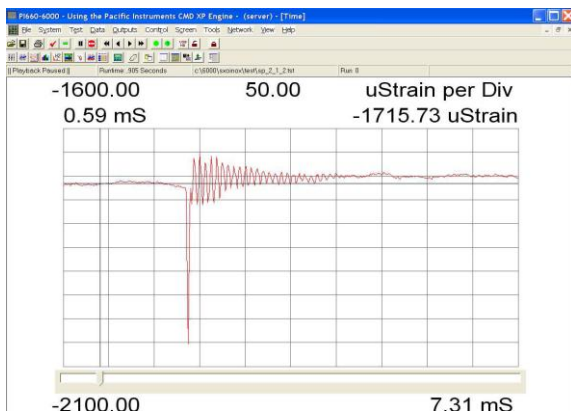
Διάγραμμα 2\_1\_1a

Διαφορά: 109

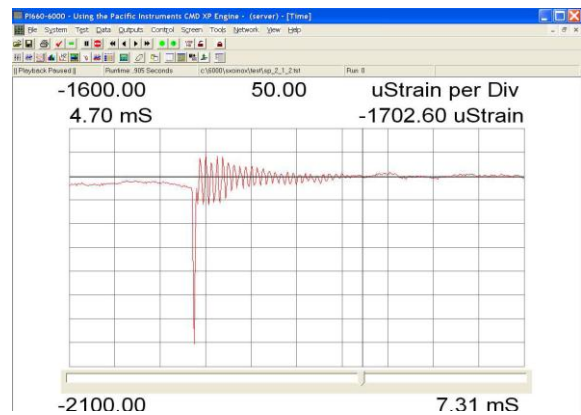
## Δοκίμιο 2-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 2



Διάγραμμα 2\_1\_2



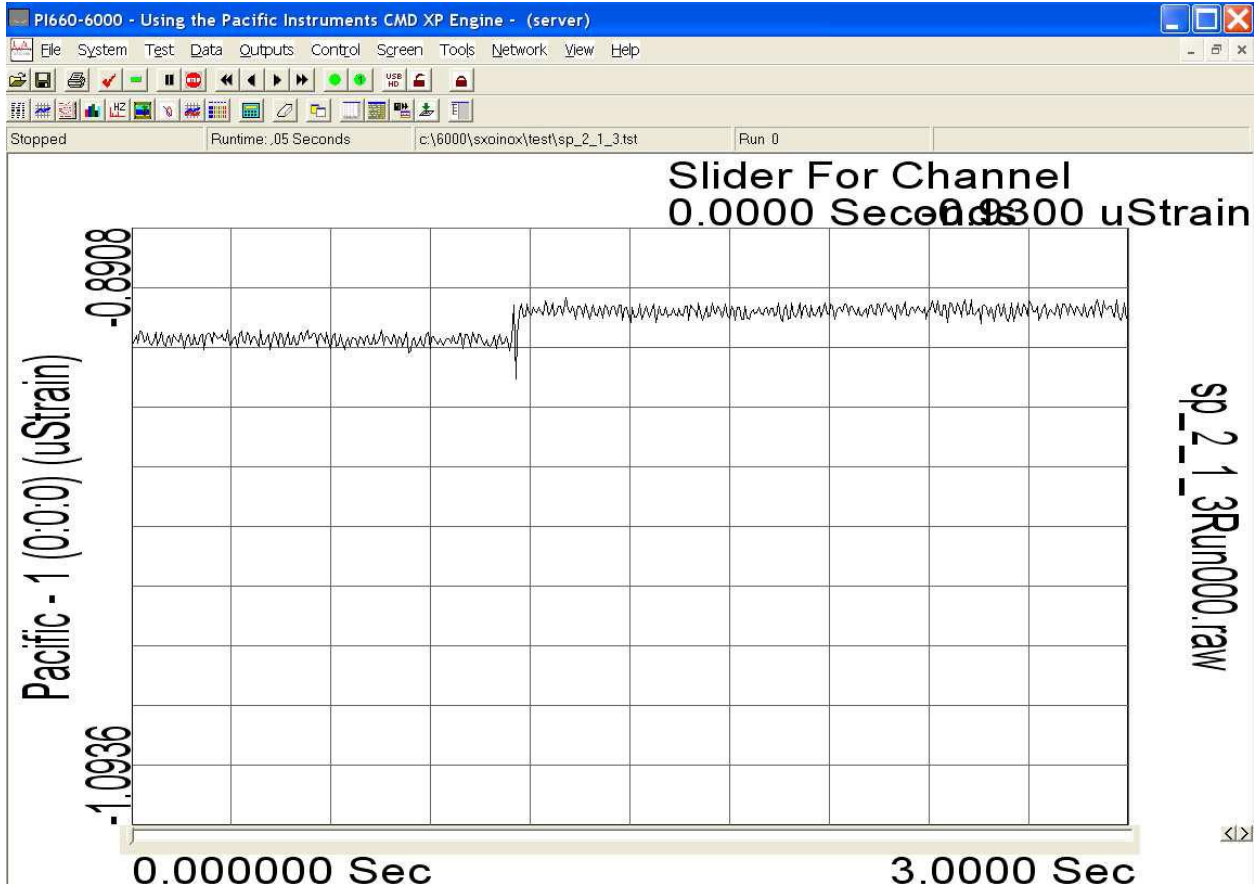
Διάγραμμα 2\_1\_1p



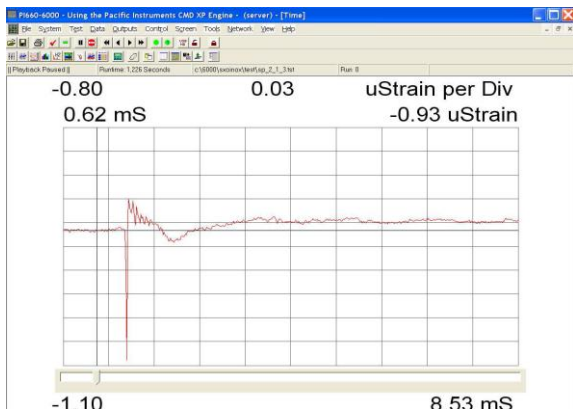
Διάγραμμα 2\_1\_1a

Διαφορά: 13

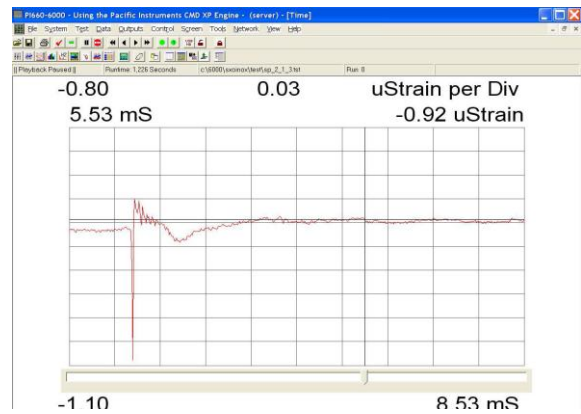
## Δοκίμιο 2-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 3



Διάγραμμα 2\_1\_3



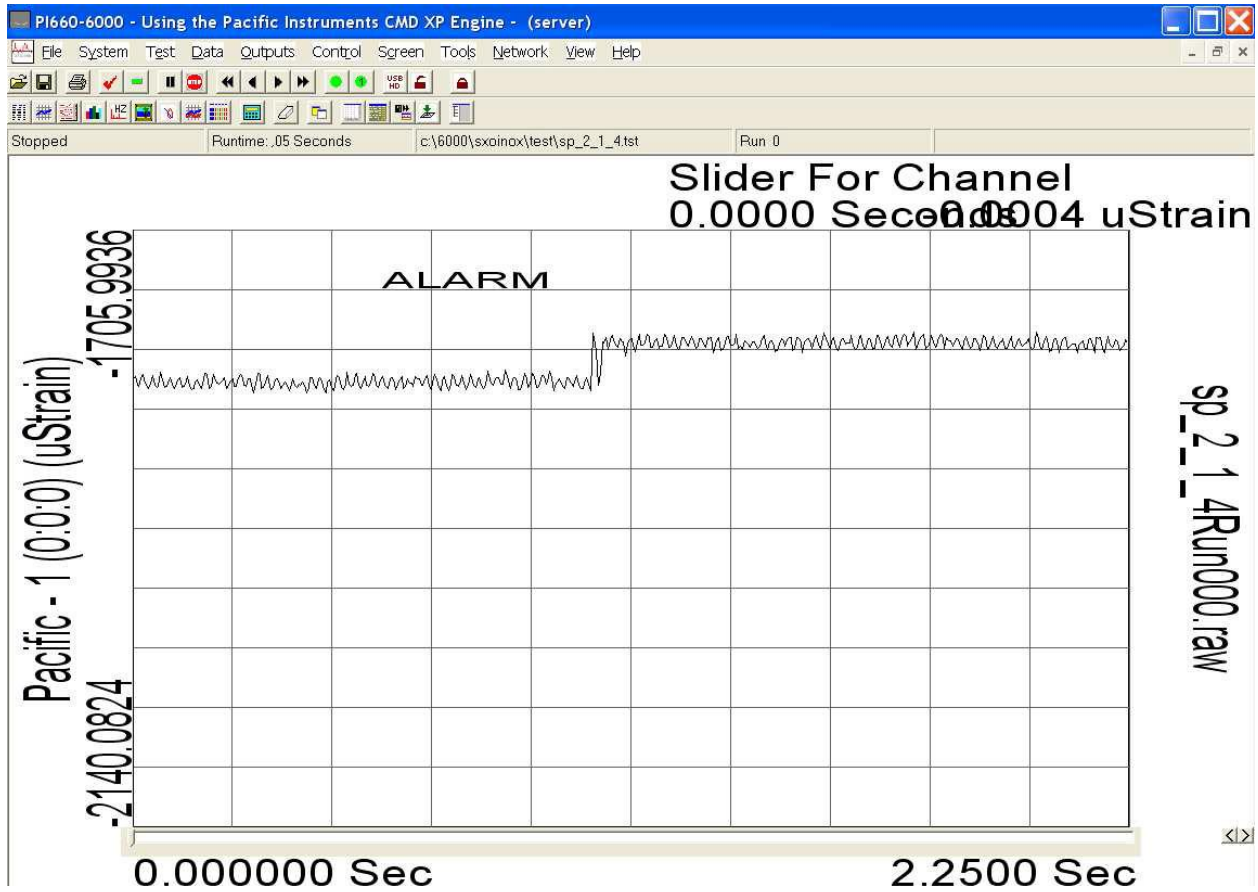
Διάγραμμα 2\_1\_3ρ



Διάγραμμα 2\_1\_3α

Διαφορά: 1

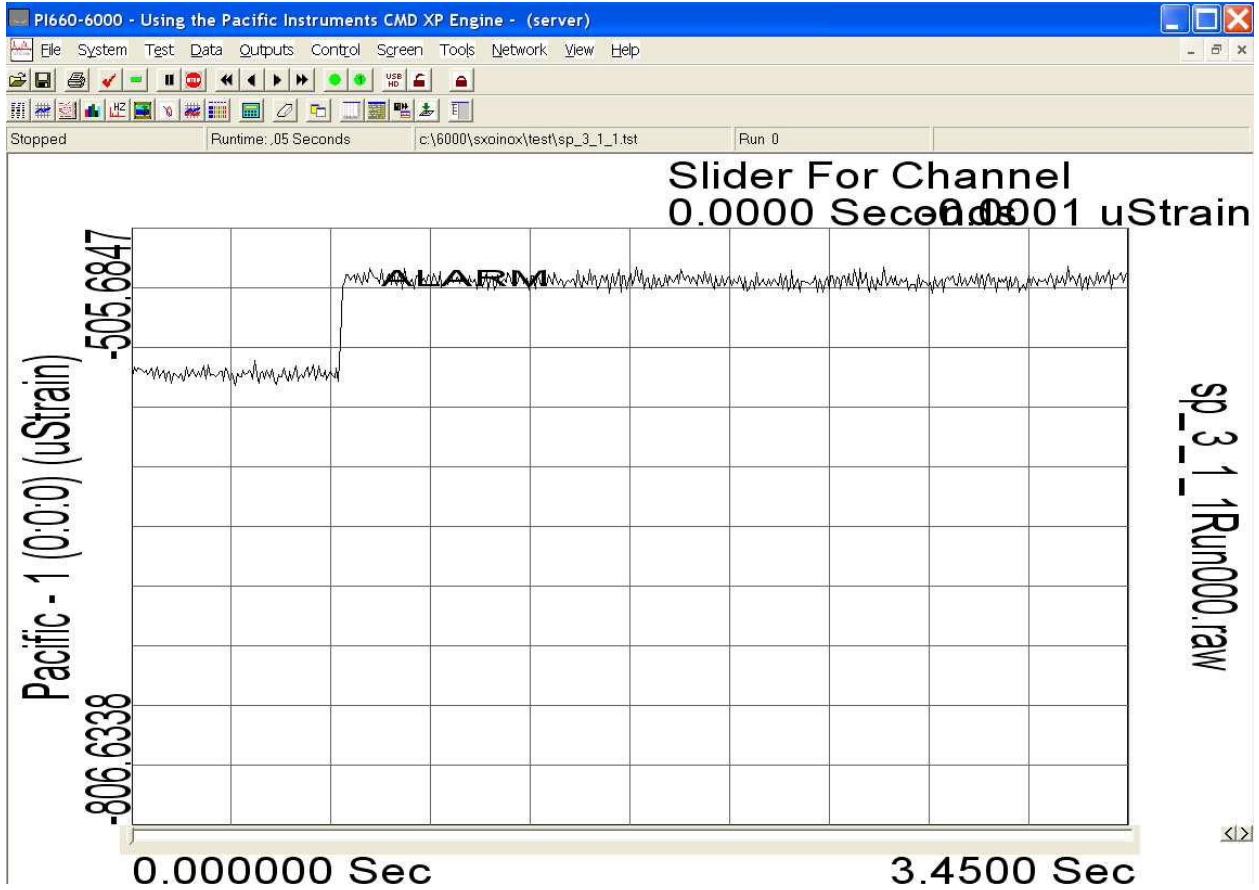
## Δοκίμιο 2-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 4



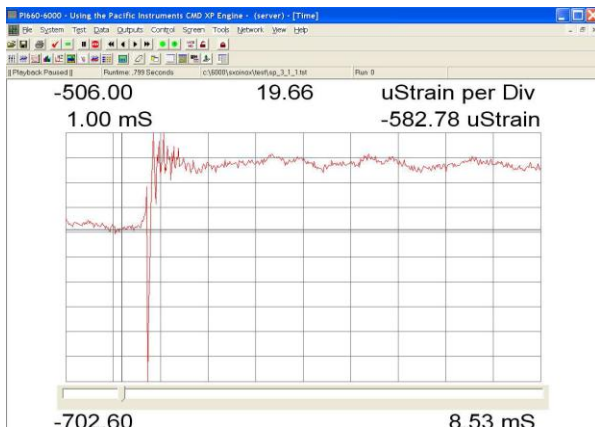
Διάγραμμα 2\_1\_4

Διαφορά: 31

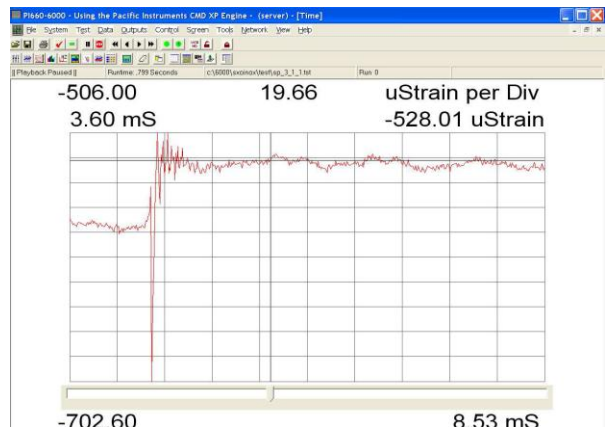
## Δοκίμο 3-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 1



Διάγραμμα 3\_1\_1



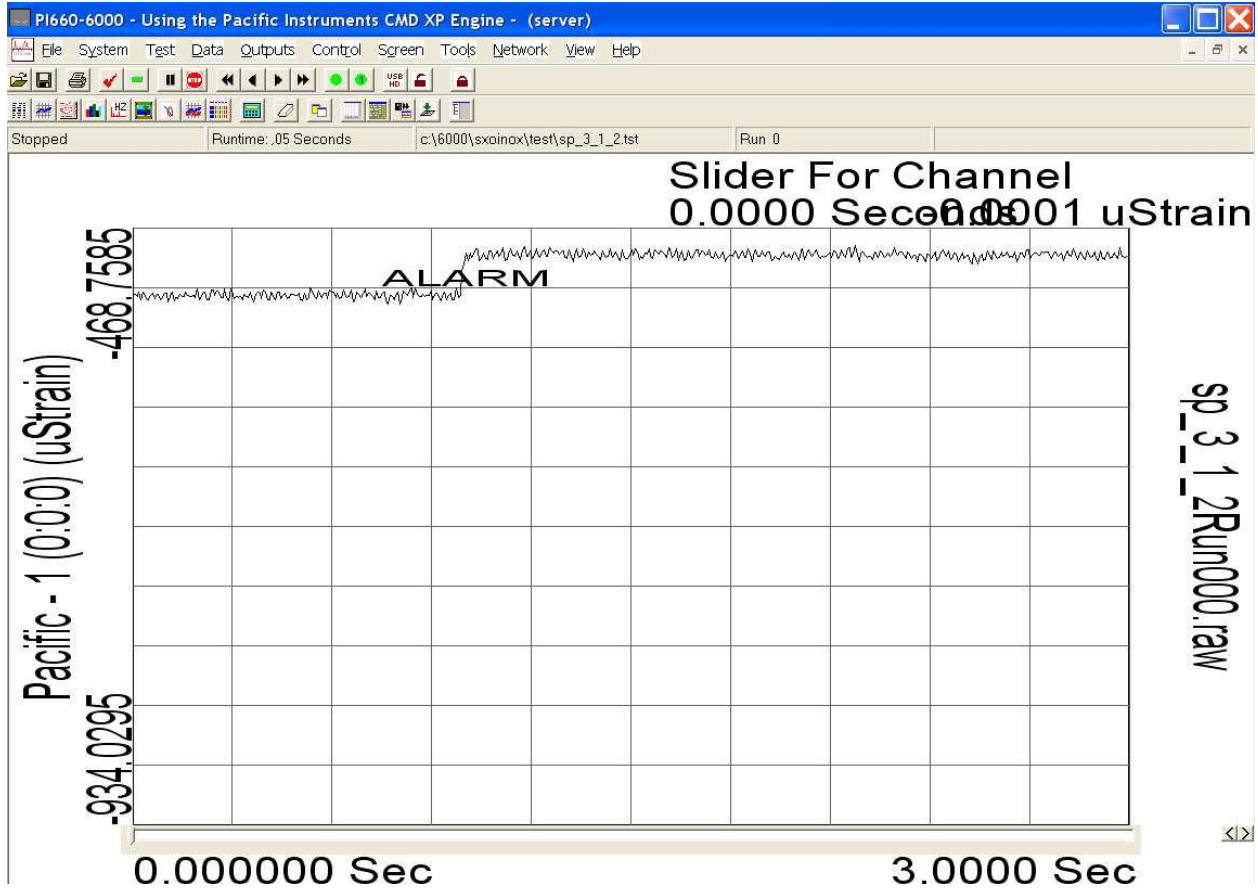
Διάγραμμα 3\_1\_1p



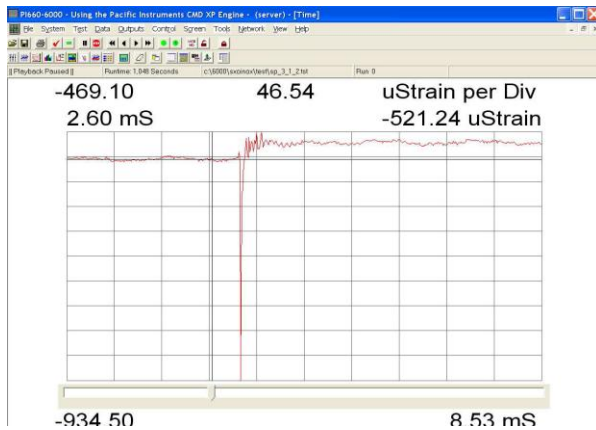
Διάγραμμα 3\_1\_1a

Διαφορά: 55

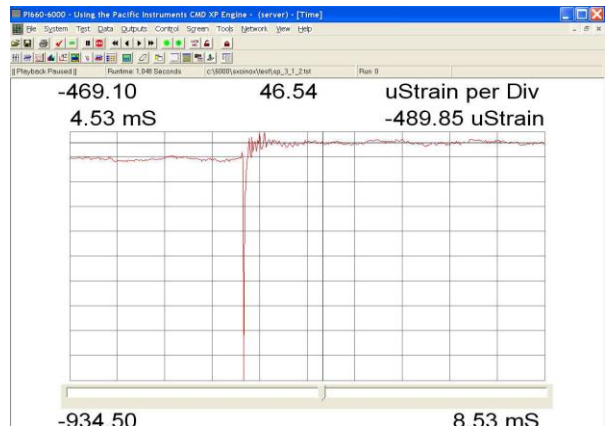
## Δοκίμο 3-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 2



Διάγραμμα 3\_1\_2



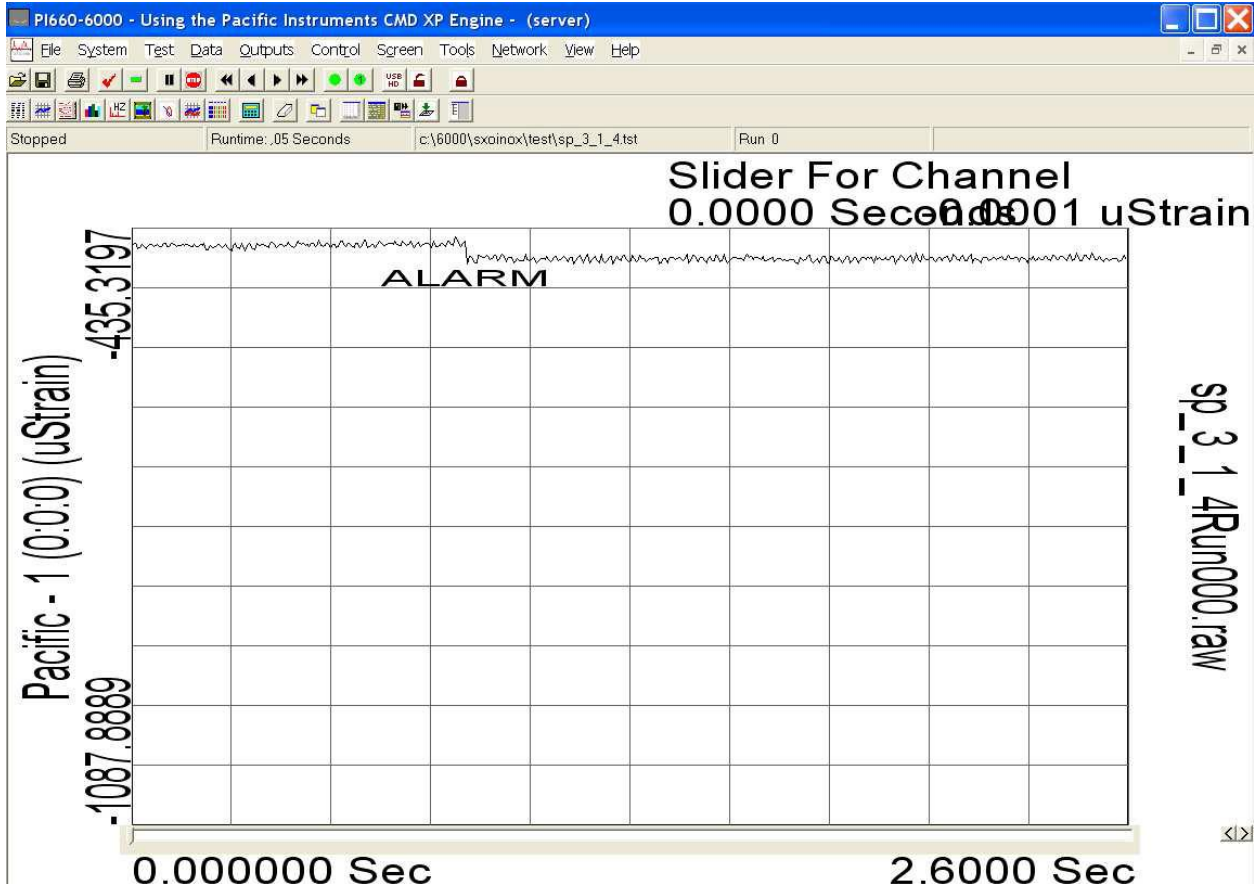
Διάγραμμα 3\_1\_2p



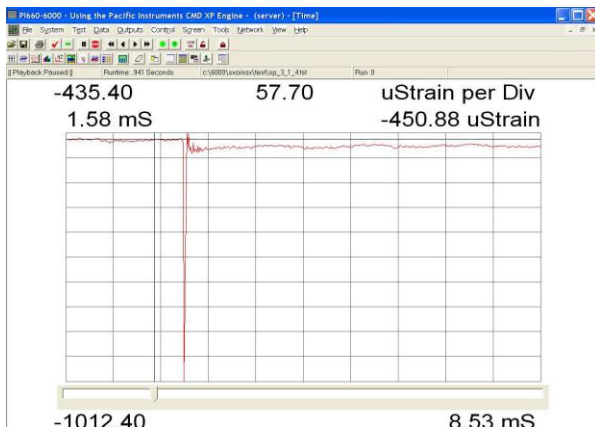
Διάγραμμα 3\_1\_2a

Διαφορά: 31

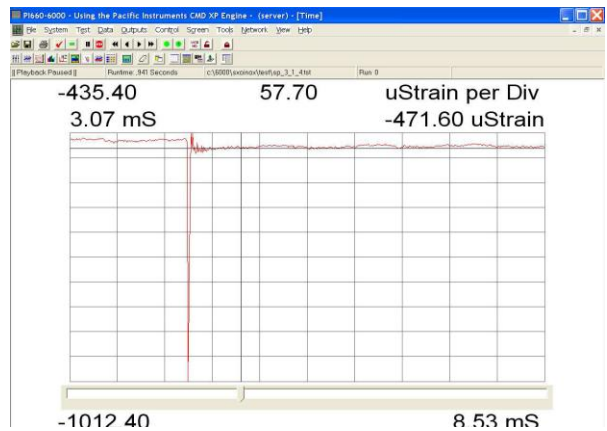
## Δοκίμιο 3-Κεντρικός σπλισμός-πείραμα 4



Διάγραμμα 3\_1\_4



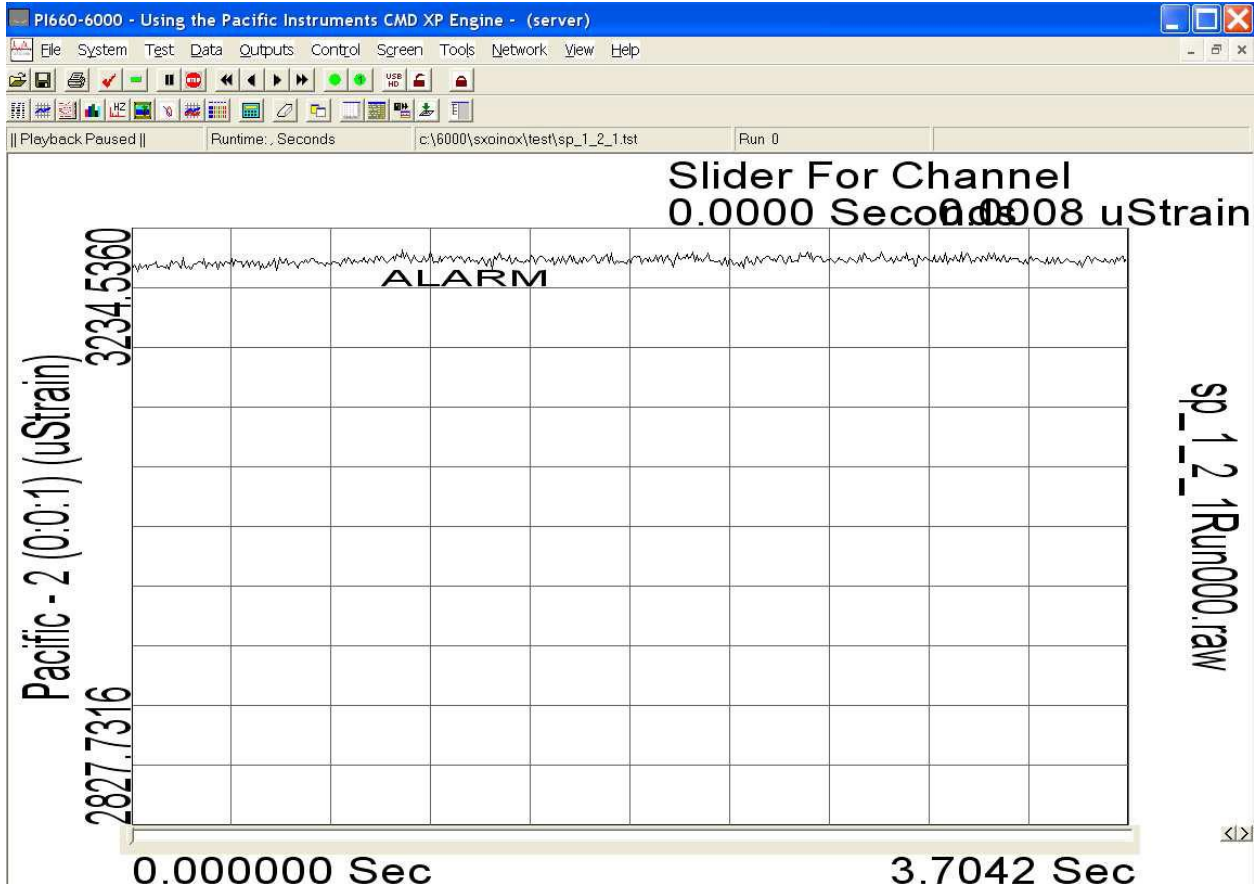
Διάγραμμα 3\_1\_4ρ



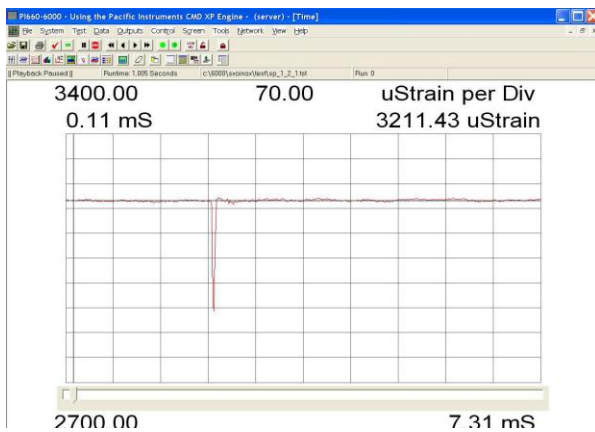
Διάγραμμα 3\_1\_4α

Διαφορά: 20

# 1 Δοκίμο-Ακραίος σπλισμός-πείραμα 1



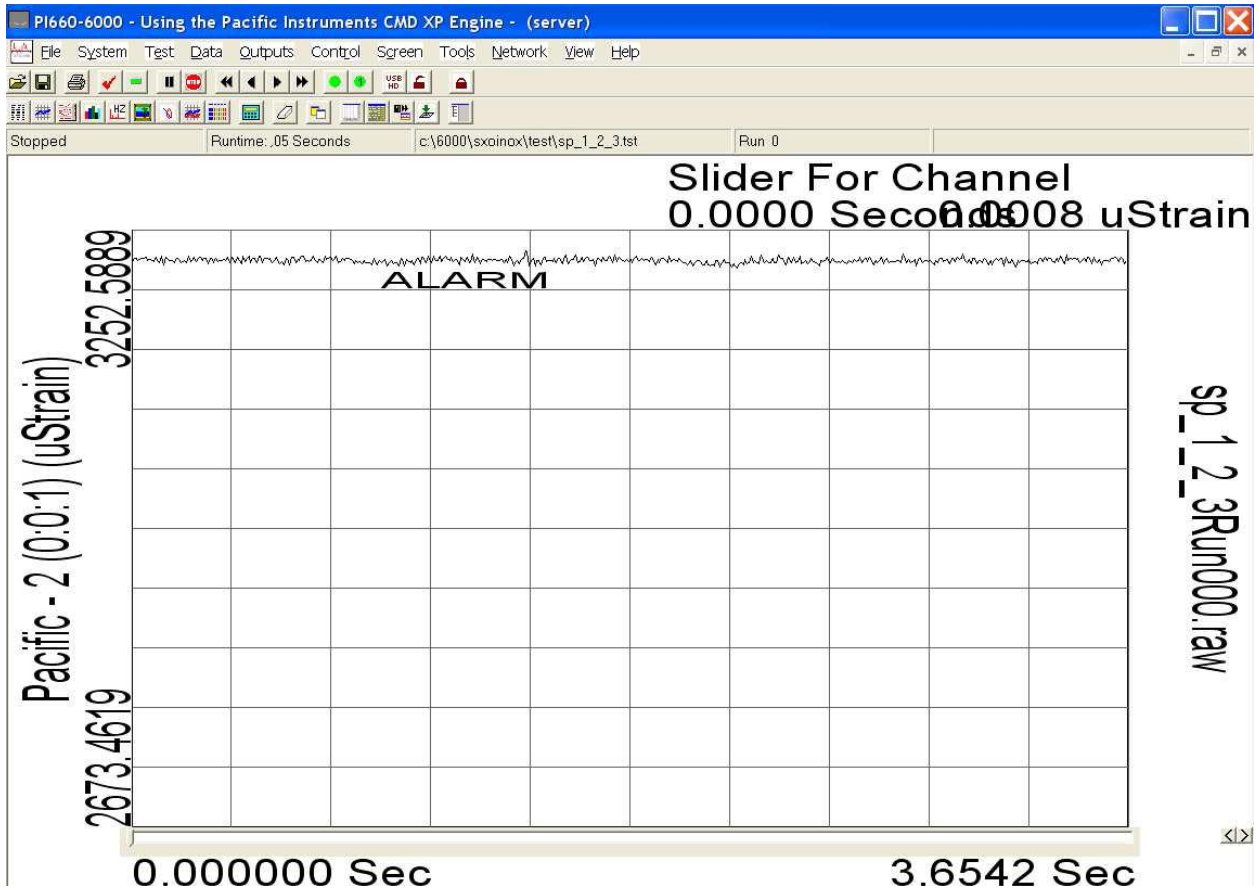
Διάγραμμα 1\_2\_1



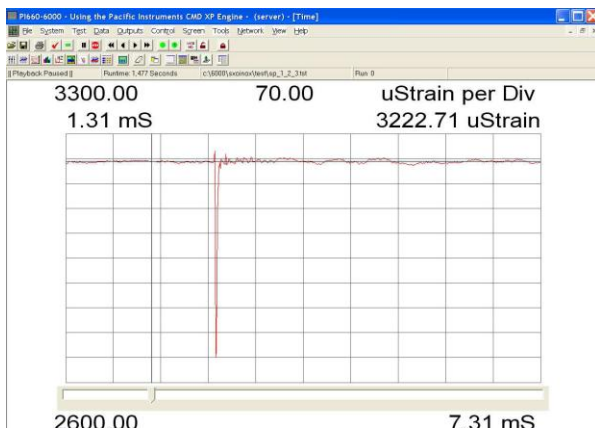
Διάγραμμα 1\_2\_1p



# 1 Δοκίμιο- Ακραίος σπλισμός-πείραμα 3

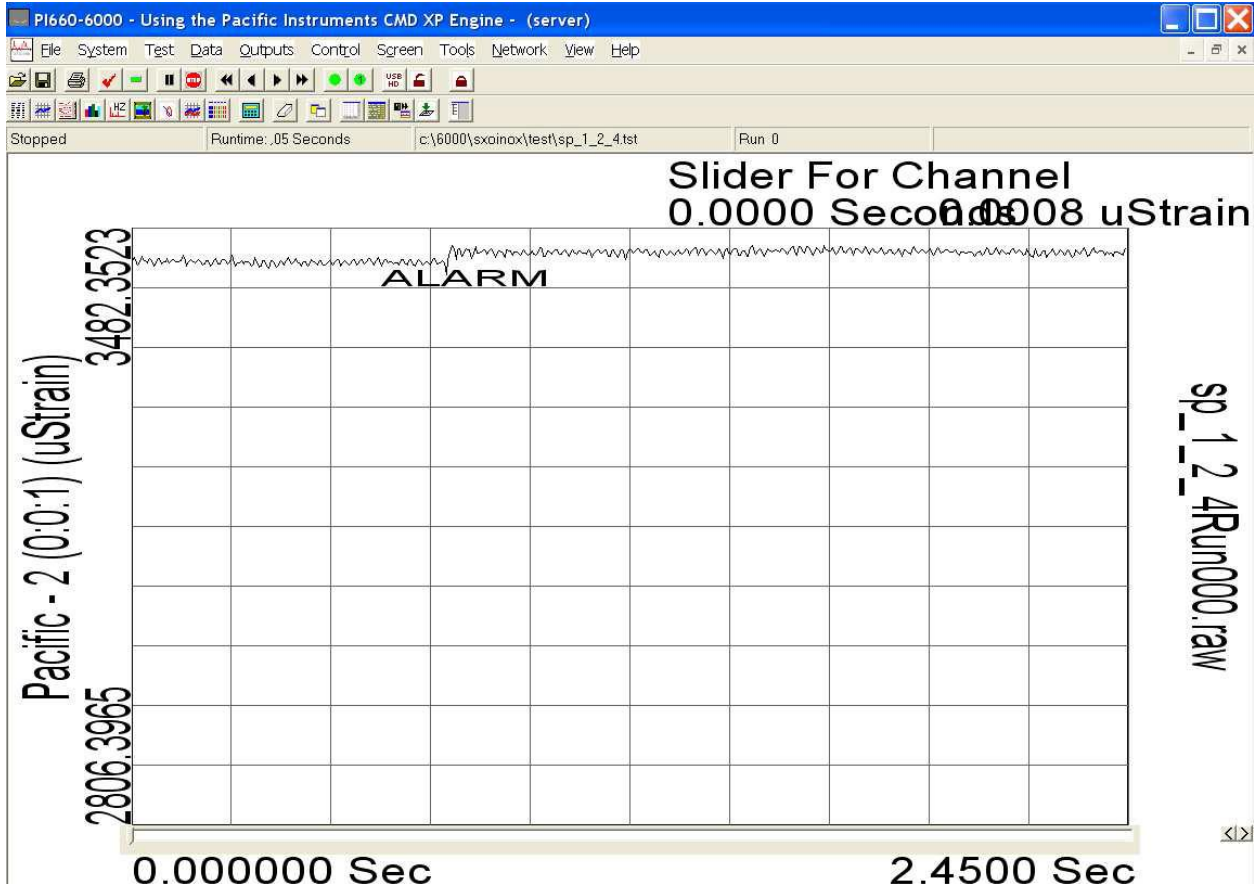


Διάγραμμα 1\_2\_3

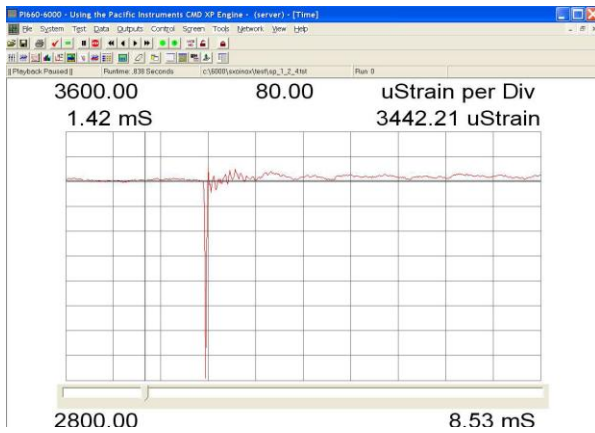


Διάγραμμα 1\_2\_3p

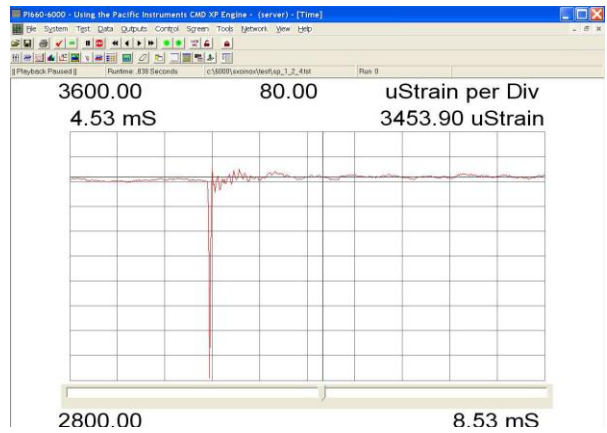
# 1 Δοκίμιο- Ακραίος σπλισμός-πείραμα 4



Διάγραμμα 1\_2\_4



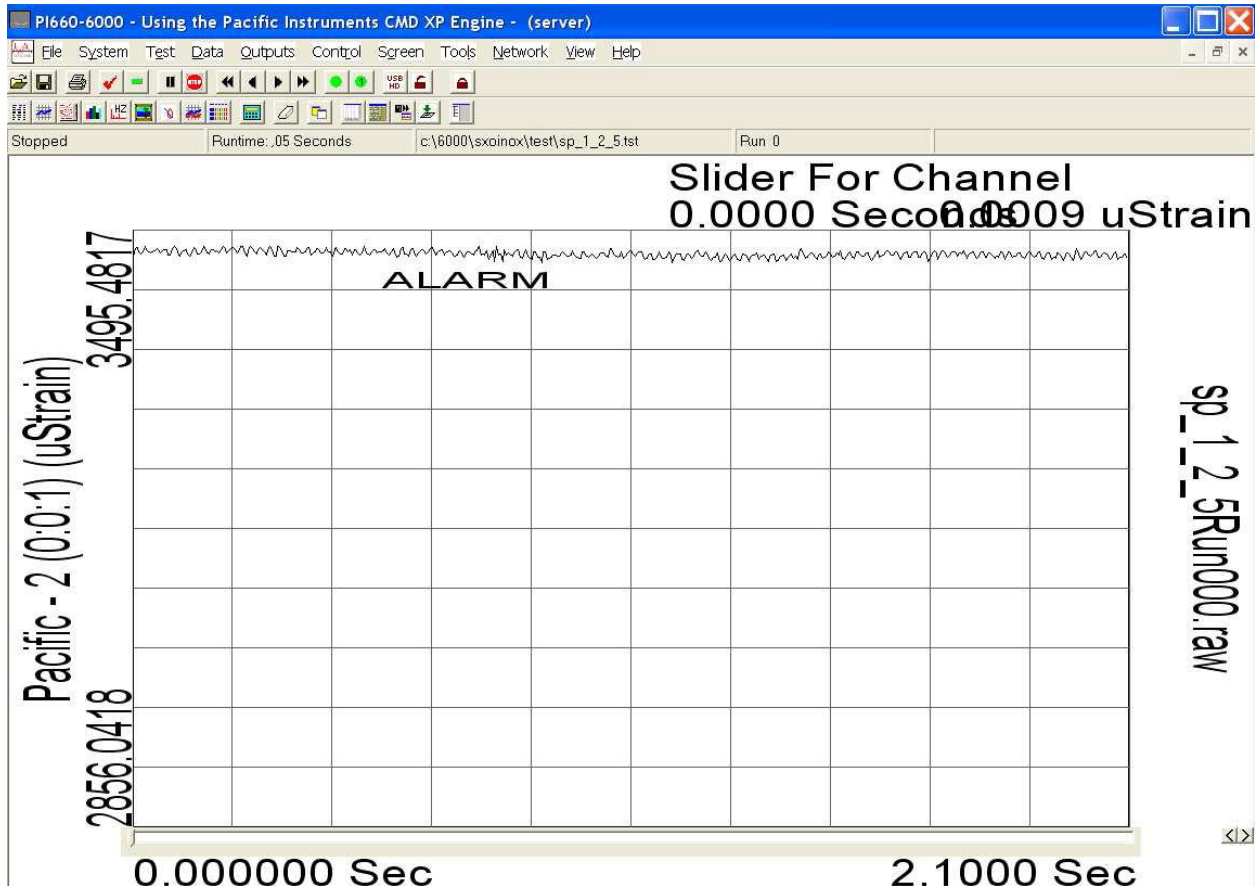
Διάγραμμα 1\_2\_4p



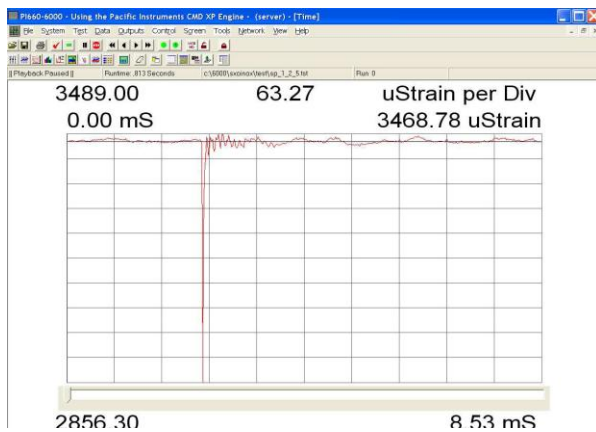
Διάγραμμα 1\_2\_4a

Διαφορά: 12

# 1 Δοκίμιο- Ακραίος σπλισμός-πείραμα 5

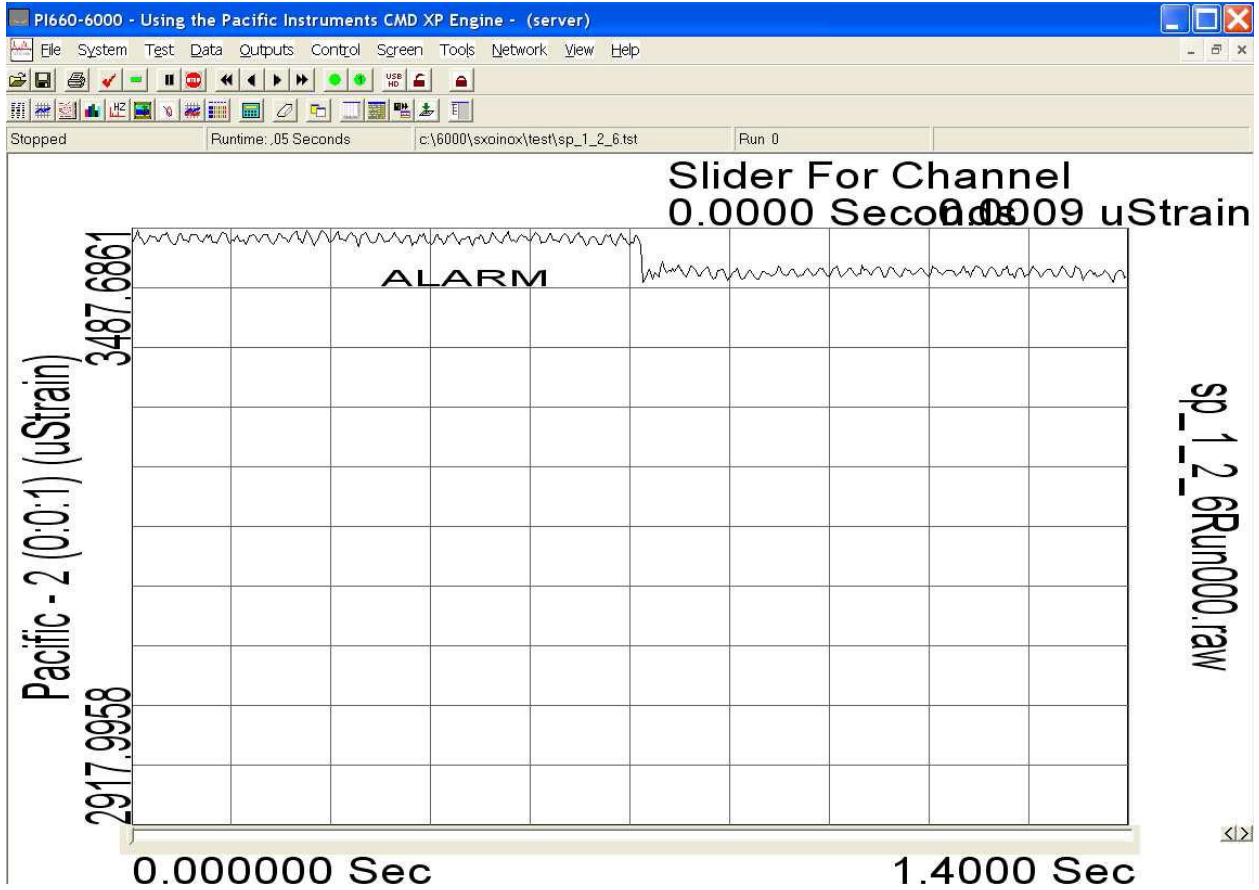


Διάγραμμα 1\_2\_5

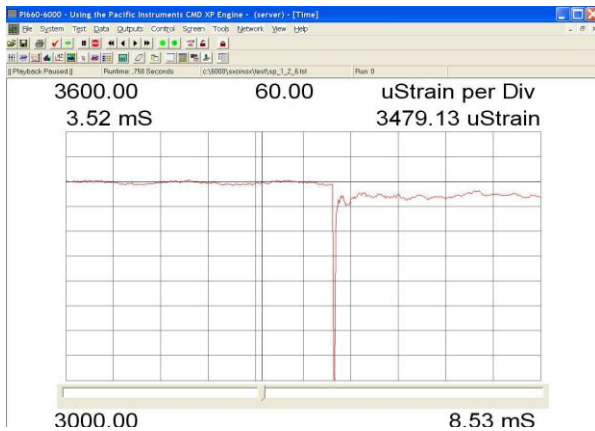


Διάγραμμα 1\_2\_5p

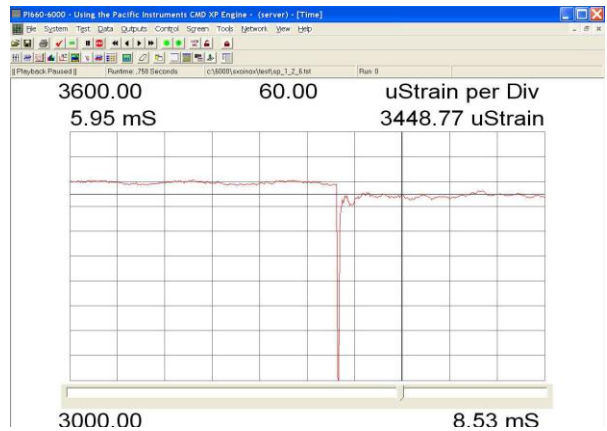
# 1 Δοκίμιο- Ακραίος σπλισμός-πείραμα 6



Διάγραμμα 1\_2\_6



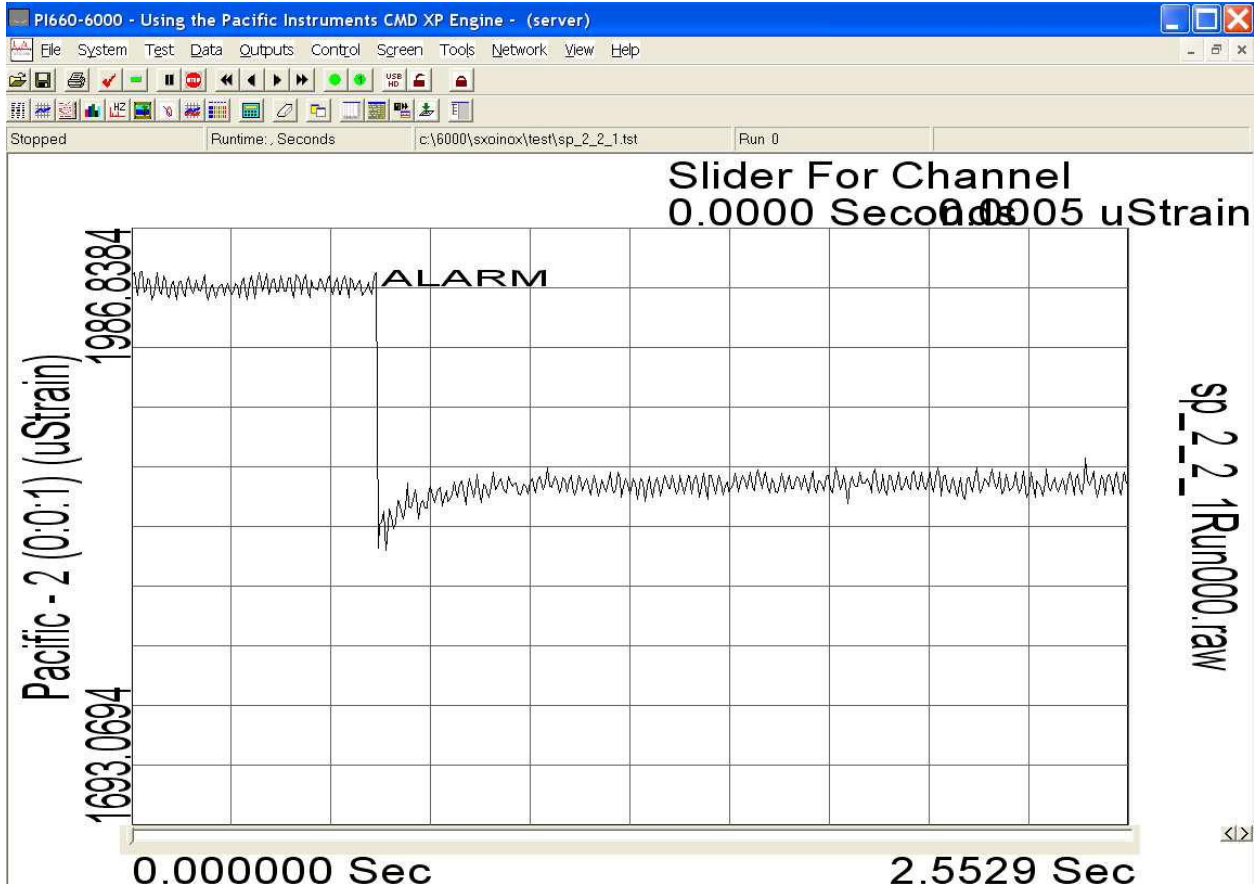
Διάγραμμα 1\_2\_6ρ



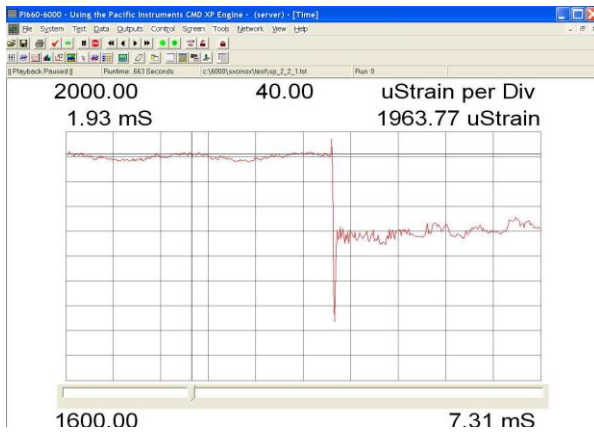
Διάγραμμα 1\_2\_6α

Διαφορά: 31

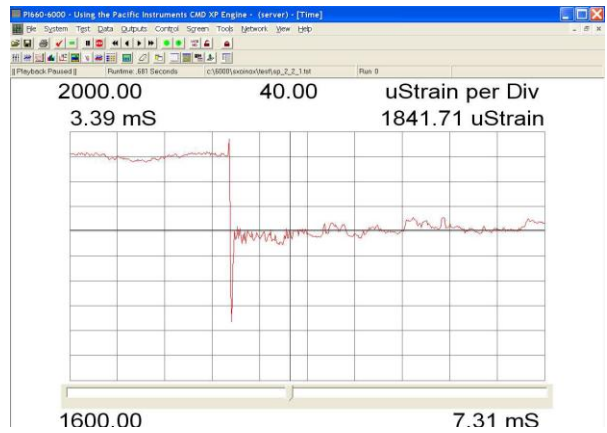
## 2 Δοκίμο- Ακράιος σπλισμός-πείραμα 1



Διάγραμμα 2\_2\_1



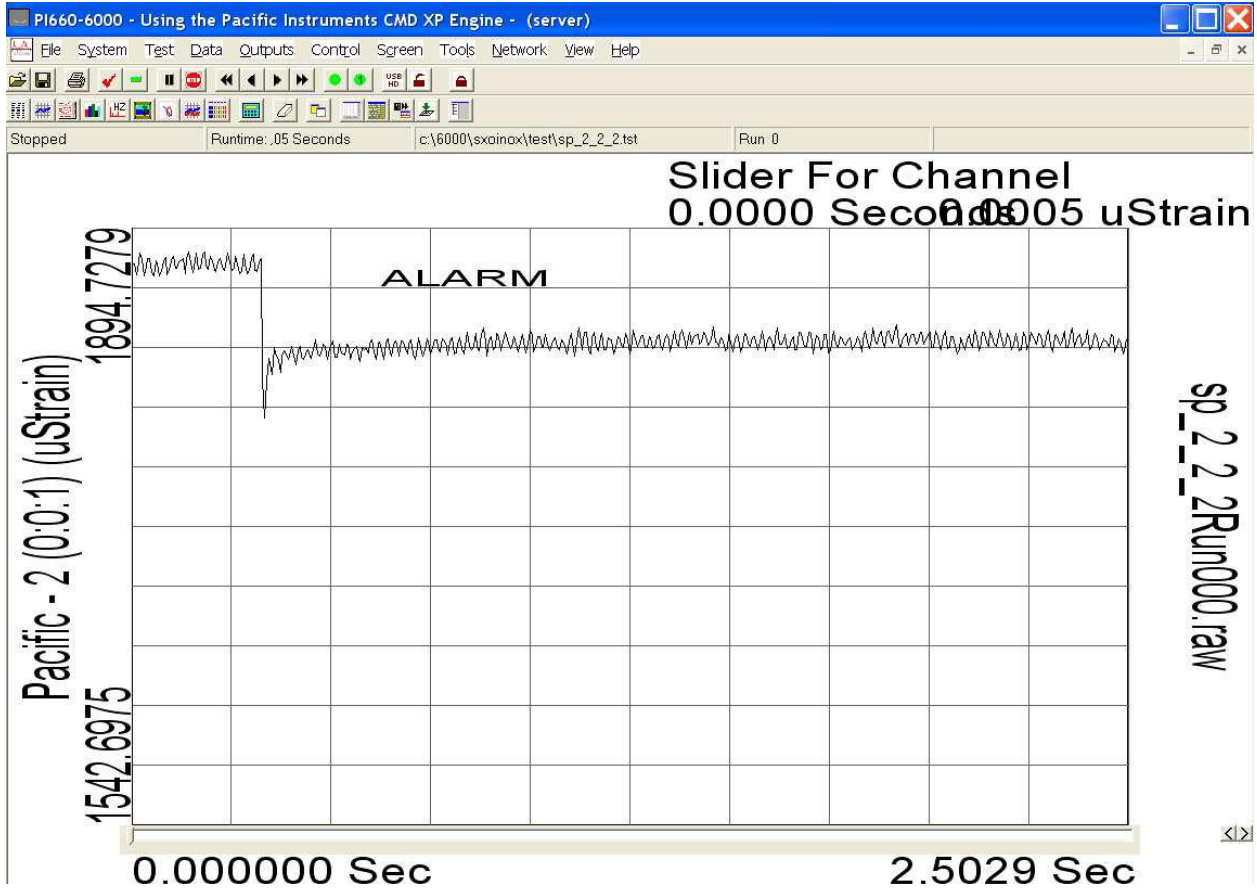
Διάγραμμα 2\_2\_1p



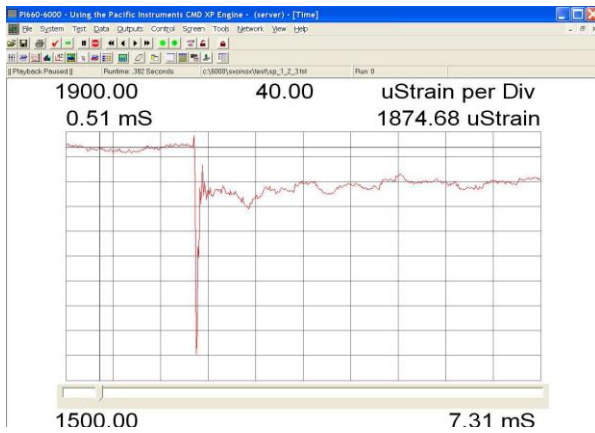
Διάγραμμα 2\_2\_1a

Διαφορά: 122

## 2 Δοκίμο- Ακράιος σπλισμός-πείραμα 2



Διάγραμμα 2\_2\_2



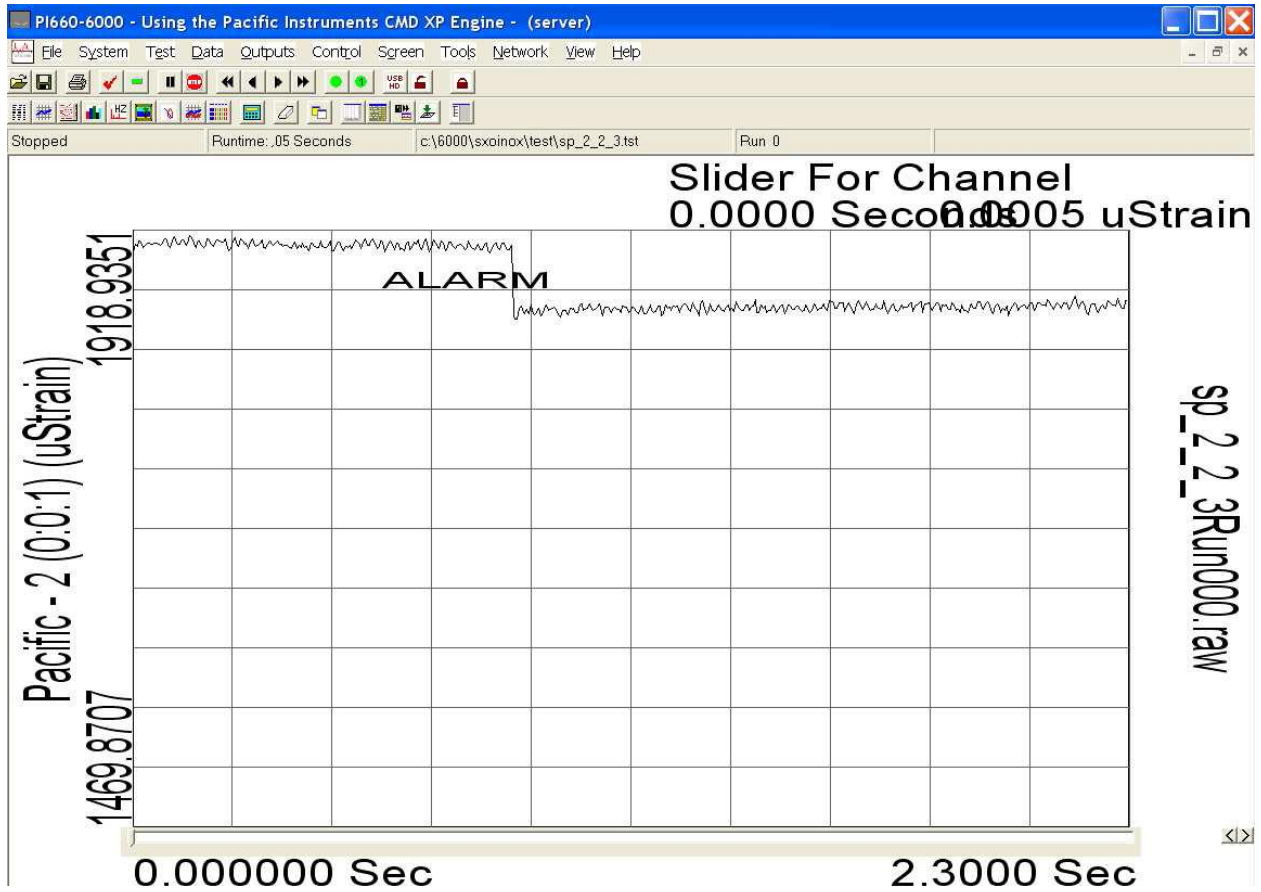
Διάγραμμα 2\_2\_2p



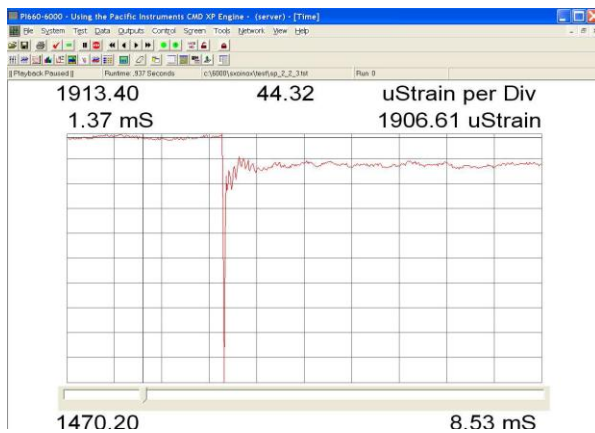
Διάγραμμα 2\_2\_2a

Διαφορά: 57

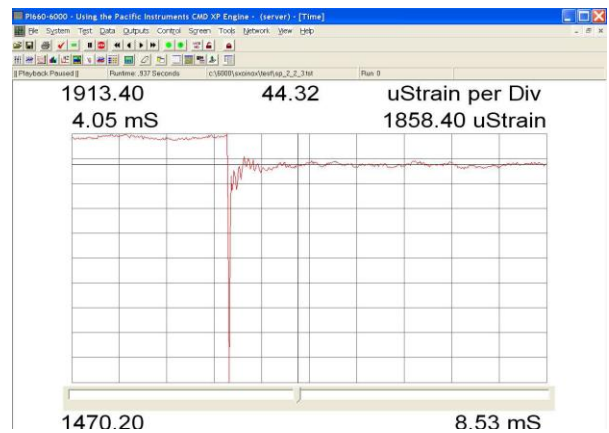
## 2 Δοκίμο- Ακράιος σπλισμός-πείραμα 3



Διάγραμμα 2\_2\_3



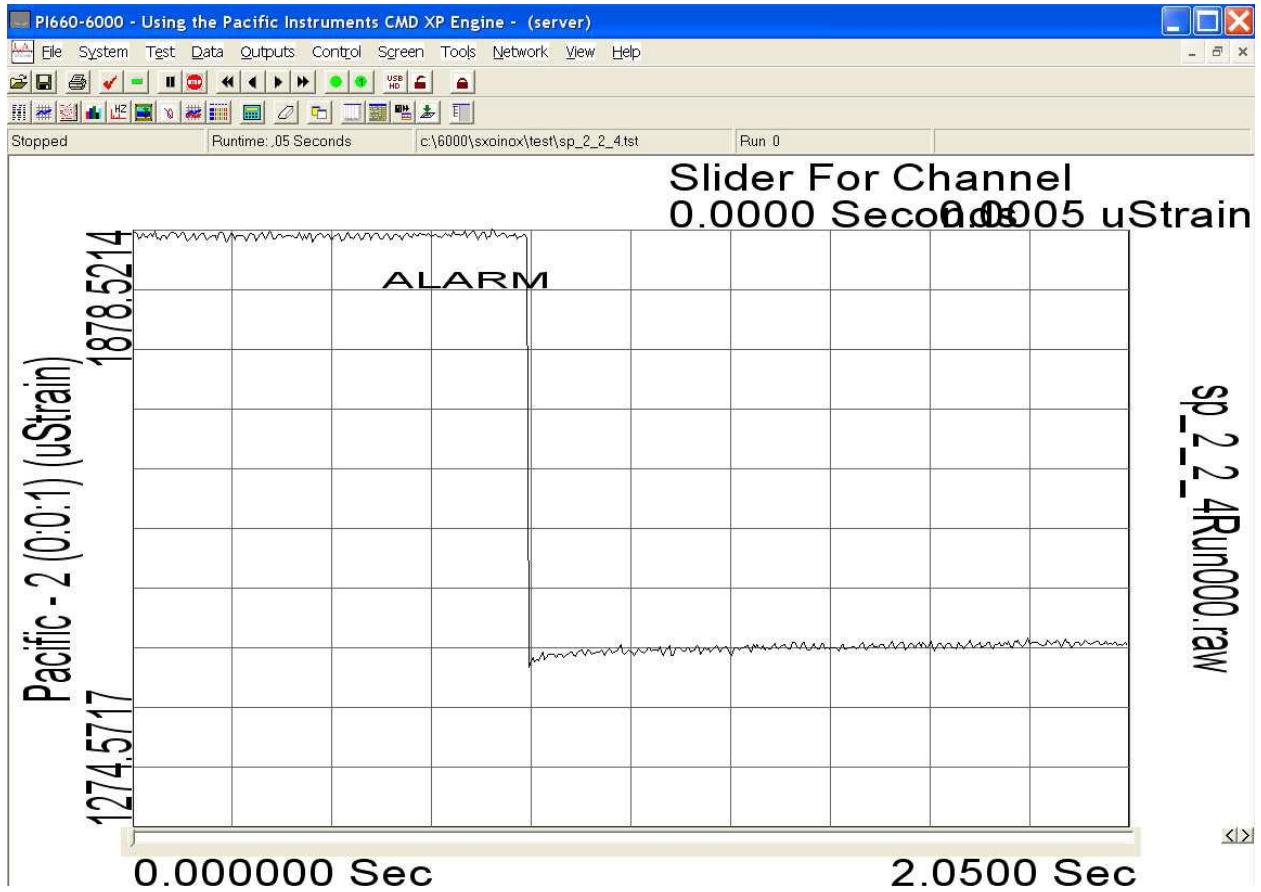
Διάγραμμα 2\_2\_3p



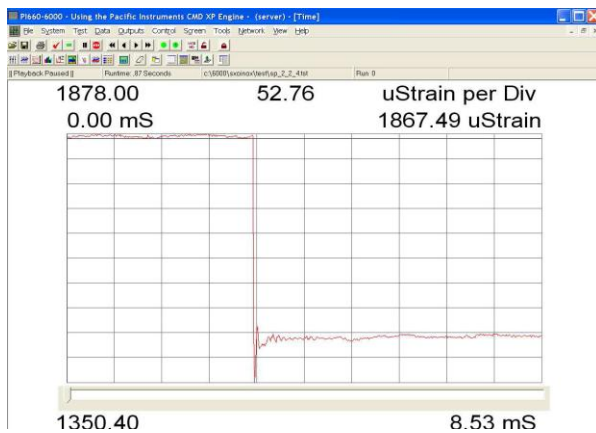
Διάγραμμα 2\_2\_3a

Διαφορά: 49

## 2 Δοκίμο- Ακράιος σπλισμός-πείραμα 4



Διάγραμμα 2\_2\_4

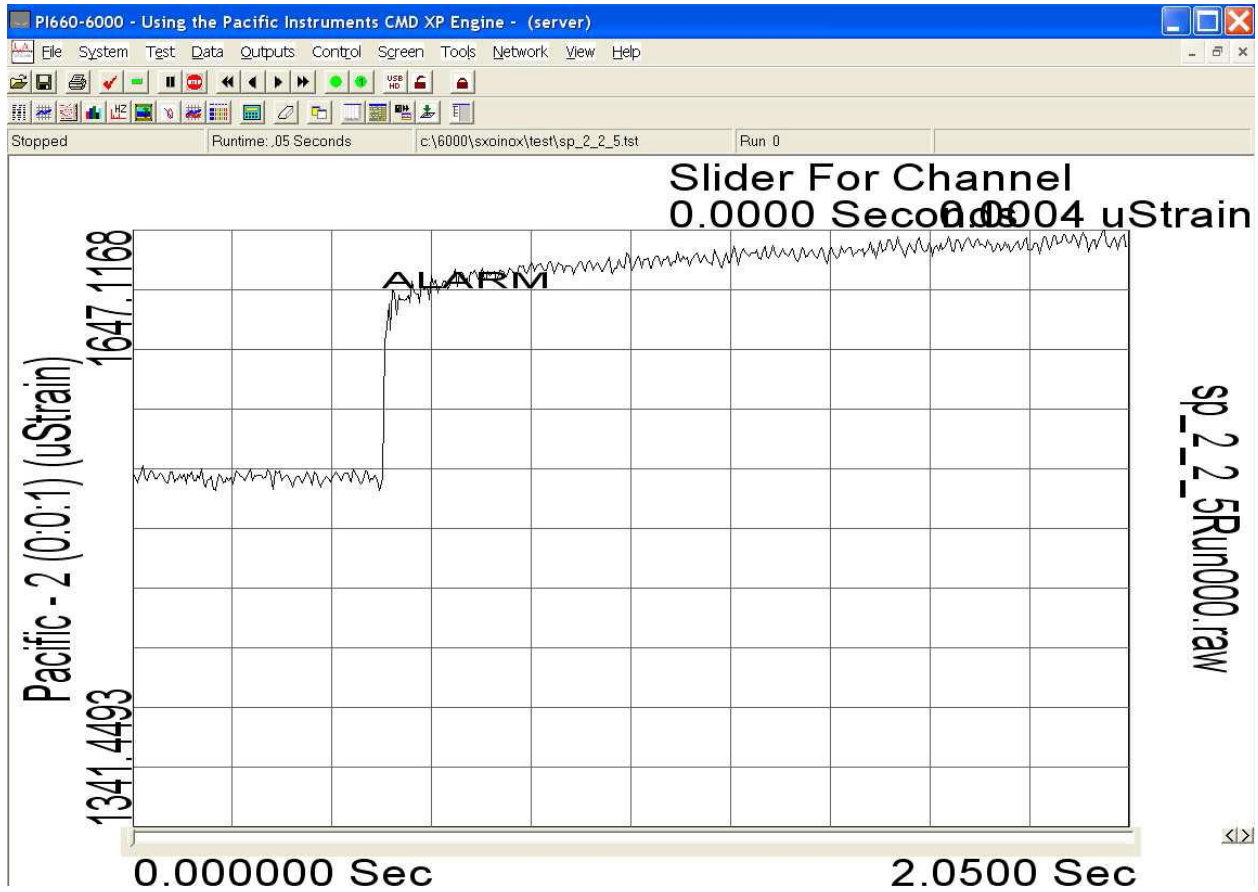


Διάγραμμα 2\_2\_4p

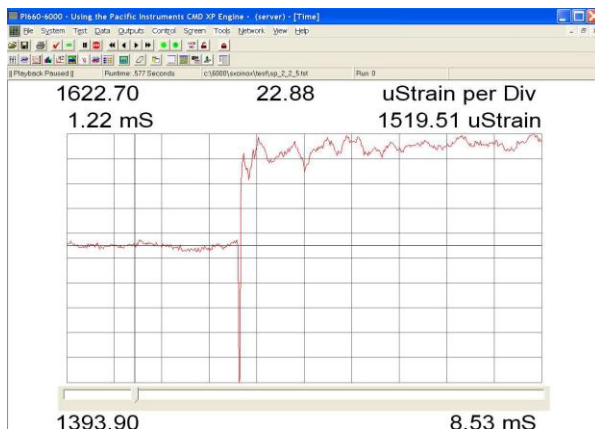
Διαφορά: 422



## 2 Δοκίμο- Ακραίος σπλισμός-πείραμα 5



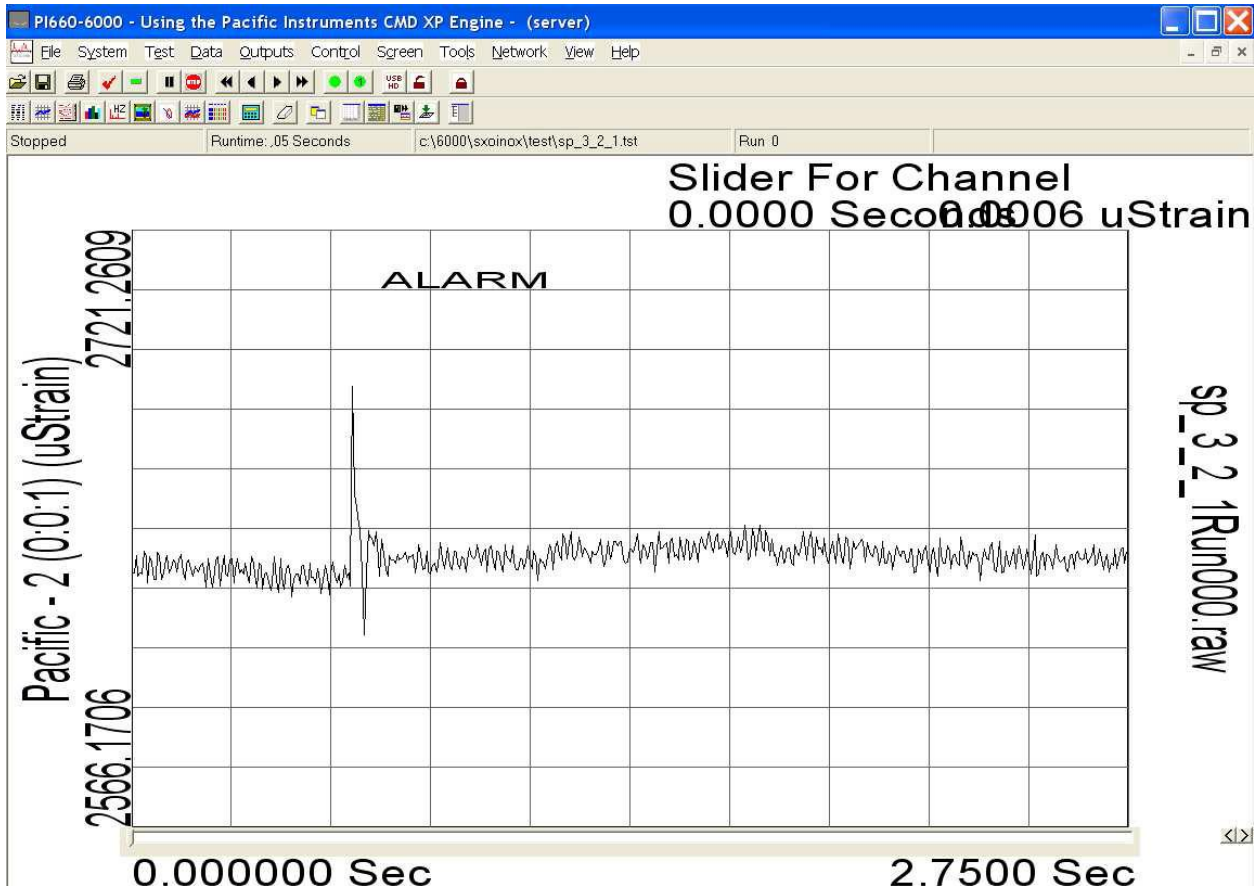
Διάγραμμα 2\_2\_5



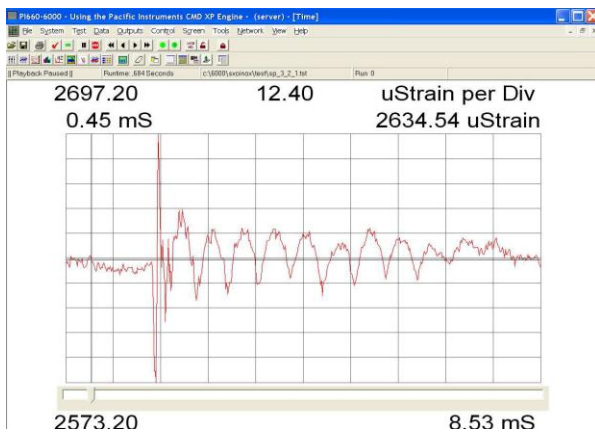
Διάγραμμα 2\_2\_5p

Διαφορά: 91

### 3 Δοκίμιο- Ακράιος σπλισμός-πείραμα 1

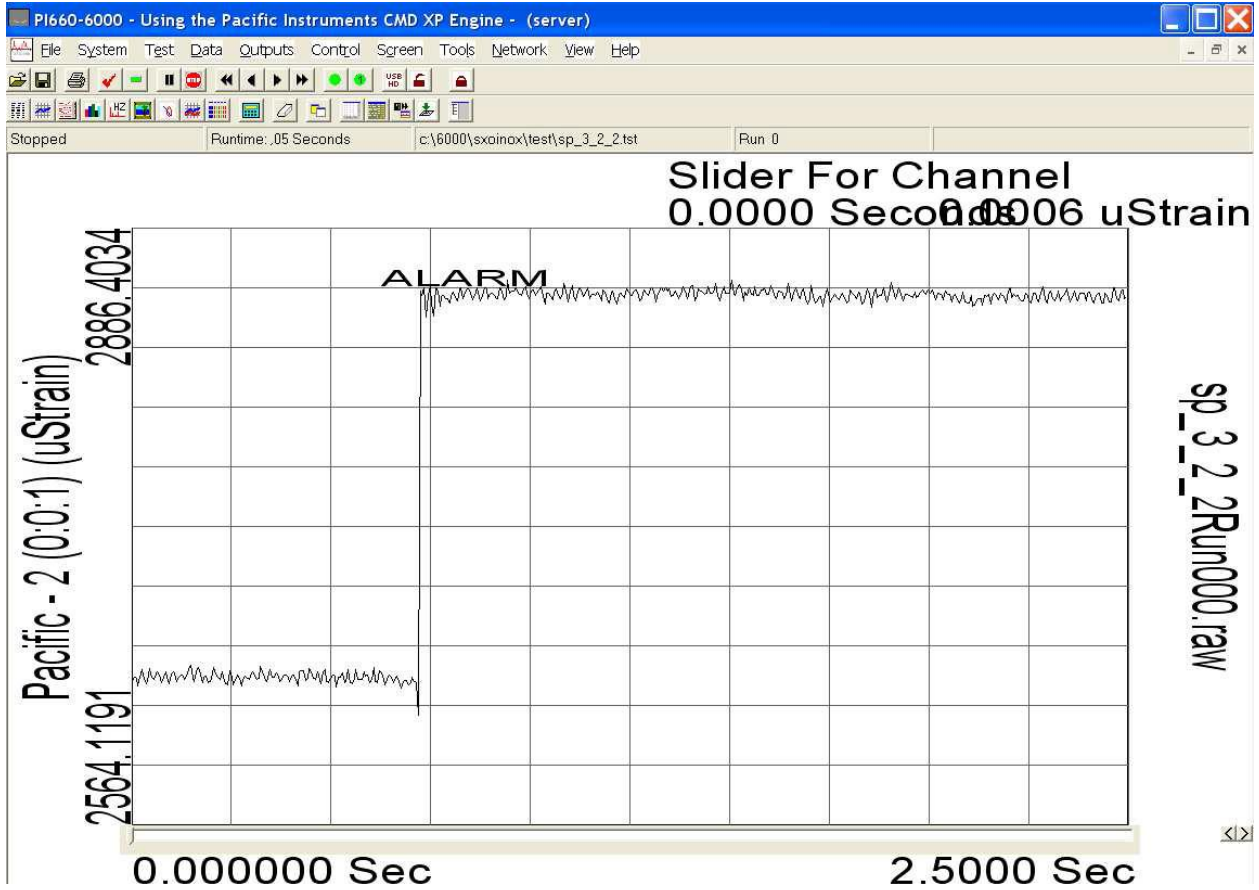


Διάγραμμα 3\_2\_1

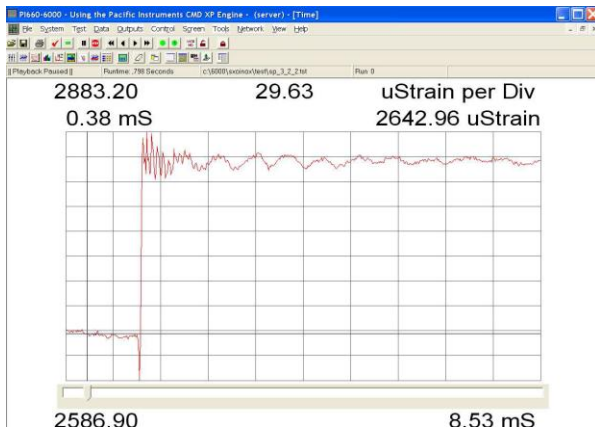


Διάγραμμα 3\_2\_1p

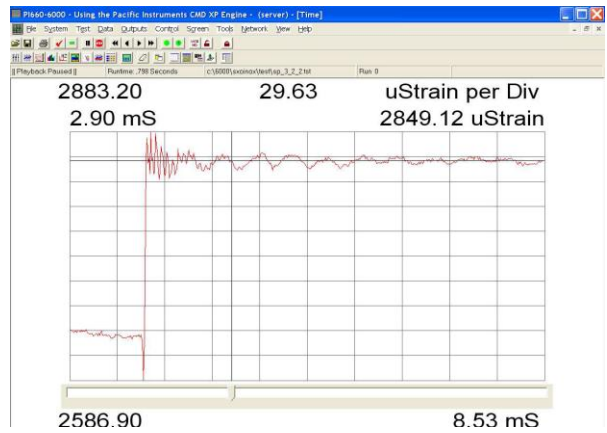
### 3 Δοκίμιο- Ακραίος σπλισμός-πείραμα 2



Διάγραμμα 3\_2\_2



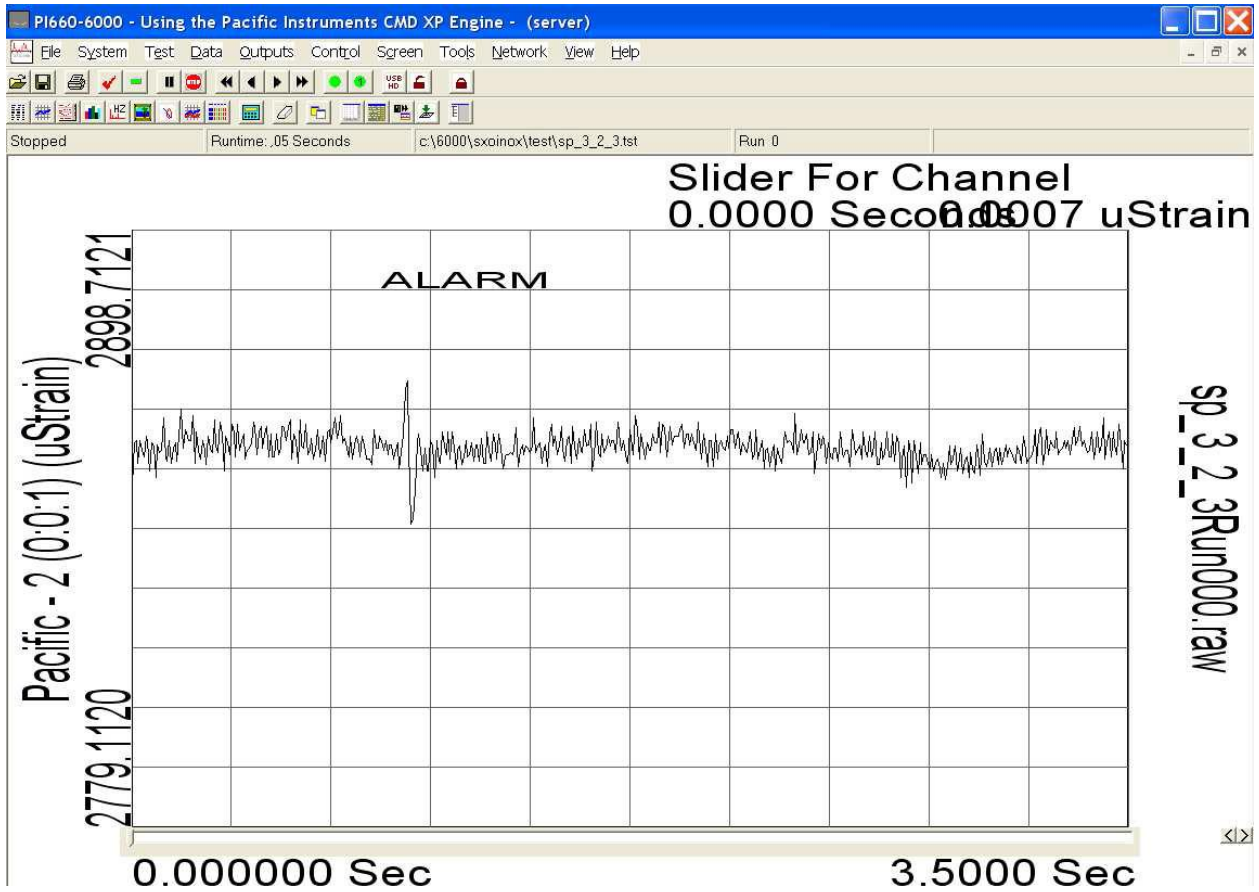
Διάγραμμα 3\_2\_2p



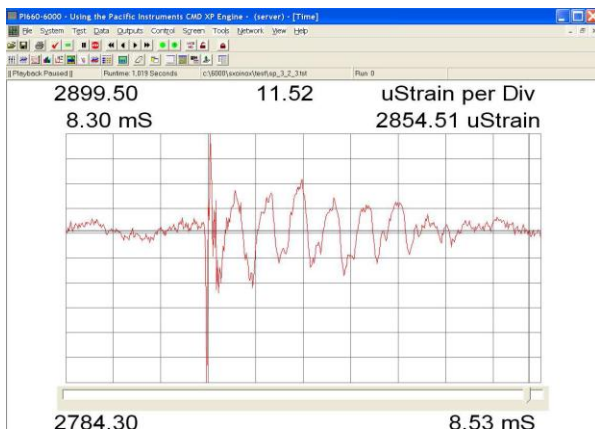
Διάγραμμα 3\_2\_2a

Διαφορά: 206

### 3 Δοκίμιο- Ακράιος σπλισμός-πείραμα 3

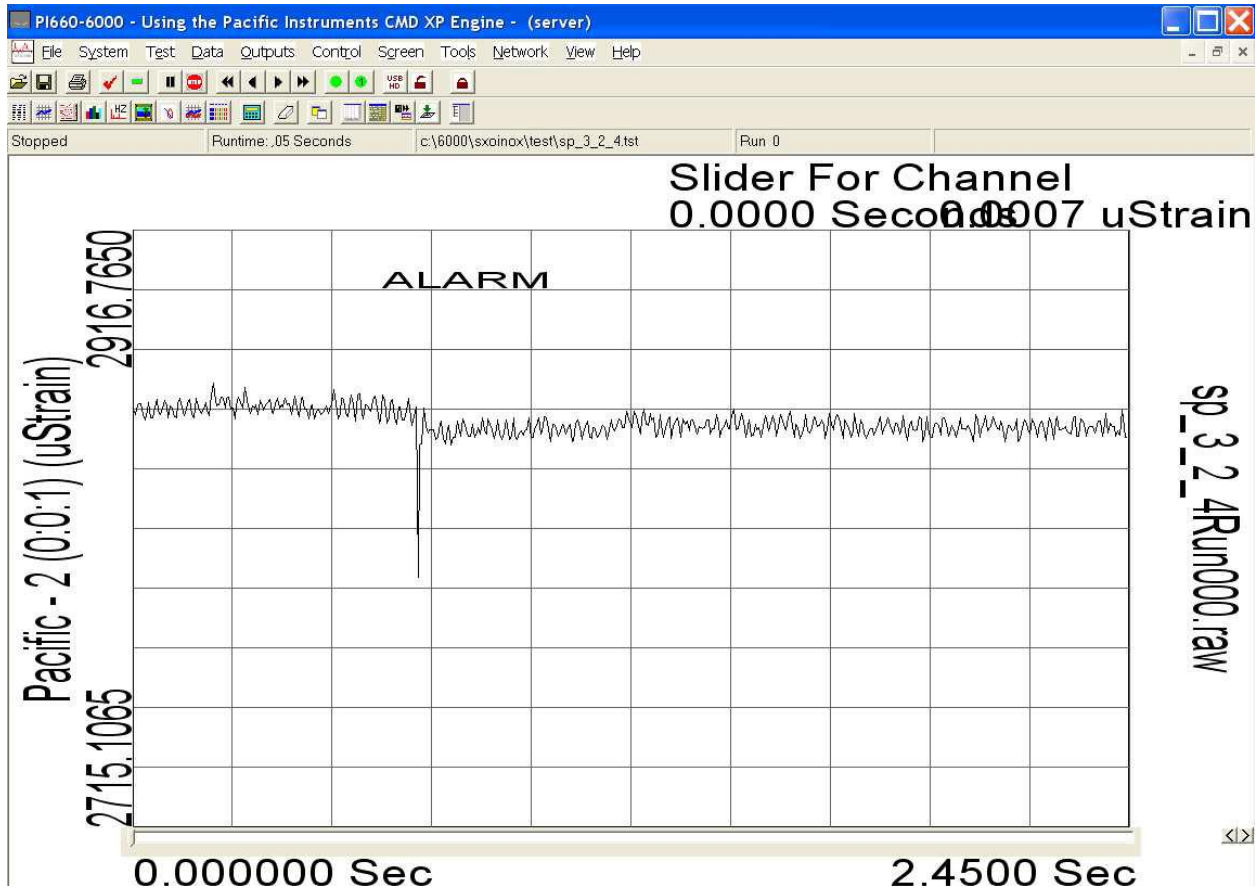


Διάγραμμα 3\_2\_3

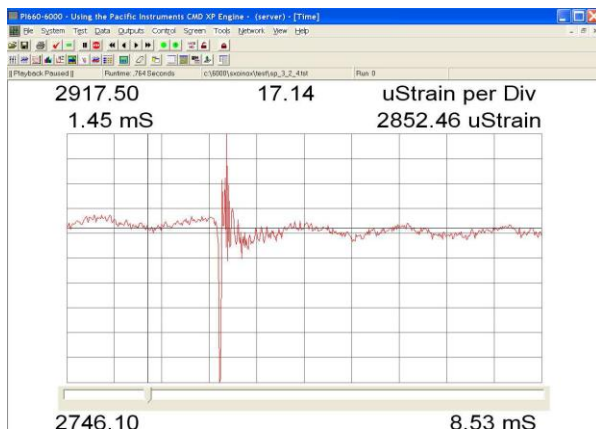


Διάγραμμα 3\_2\_3p

### 3 Δοκίμιο- Ακραίος σπλισμός-πείραμα 4

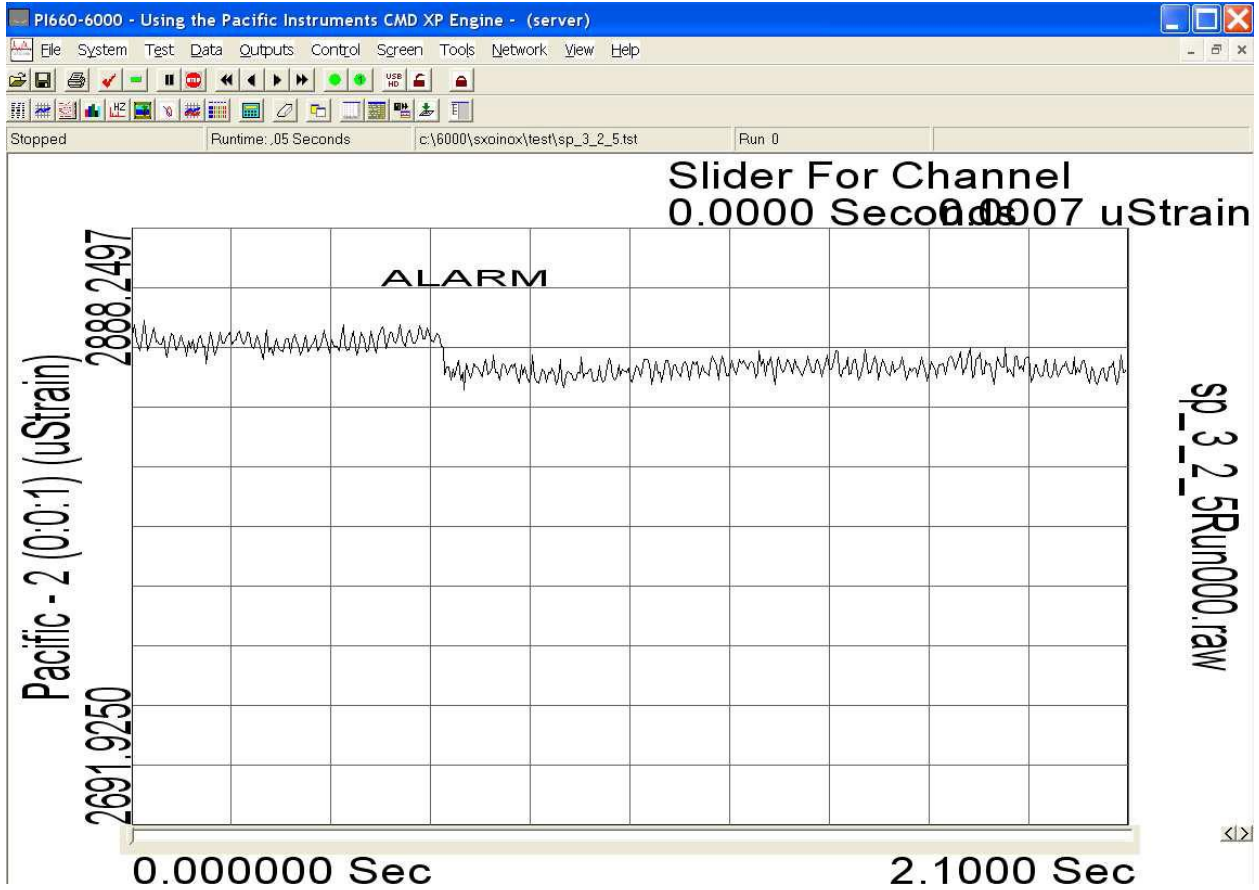


Διάγραμμα 3\_2\_4

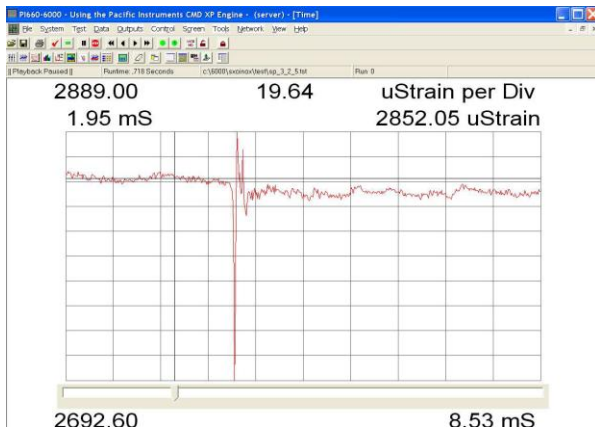


Διάγραμμα 3\_2\_4p

### 3 Δοκίμιο- Ακραίος σπλισμός-πείραμα 5



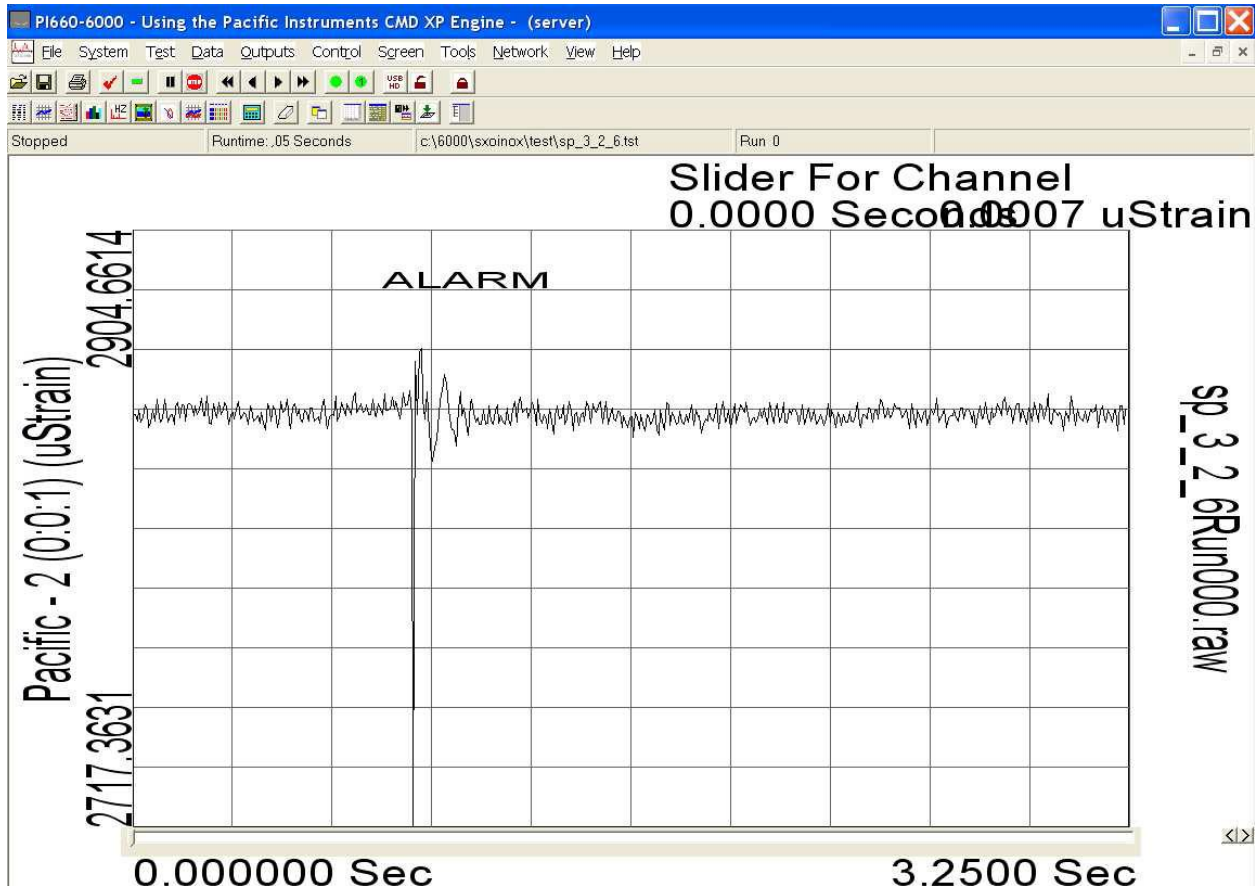
Διάγραμμα 3\_2\_5



Διάγραμμα 3\_2\_5p

Διαφορά: 10

### 3 Δοκίμιο- Ακράιος σπλισμός-πείραμα 6



Διάγραμμα 3\_2\_6

### 5.3 Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η πειραματική διαδικασία σχεδιάστηκε με κύριο στόχο την αποτύπωση των πιθανών διαφορών στις μετρήσεις μεταξύ των οπλισμών που έχουν τοποθετηθεί στο κέντρο της διατομής του δοκιμίου και των οπλισμών με μικρή επικάλυψη. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των δύο αυτών βασικών ομάδων παρατηρούμε τα εξής:

Στους οπλισμούς που έχουν τοποθετηθεί στο κέντρο της διατομής των δοκιμίων, στην πλειοψηφία των πειραμάτων, όταν φτάνει ο παλμός στη θέση του μετρητή, παρατηρείται μια στιγμιαία ταλάντωση, όμως μετά το πέρας του παλμού αποτυπώνεται μια παραμένουσα παραμόρφωση. Η παραμόρφωση δεν επανέρχεται στην αρχική της στάθμη μετά την διέλευση του παλμού, αλλά διατηρείται στην νέα της στάθμη, τουλάχιστον όσο διαρκεί η καταγραφή. Η διαδικασία αυτή διαπιστώνεται και στα τρία δοκίμια και στο σύνολο των πειραμάτων σε κάθε ξεχωριστό κεντρικό οπλισμό. Ακόμα διαφαίνεται μία τάση μείωσης της παραμένουσας παραμόρφωσης κατά την διαδικασία επανάληψης της κρουστικής καταπόνησης του κάθε ξεχωριστού οπλισμού, χωρίς όμως να μπορεί αξιολογηθεί στην παρούσα εργασία, λόγω του μικρού αριθμού των επαναλήψεων και του γεγονότος ότι το εφαρμοζόμενο κρουστικό φορτίο δεν ήταν το ίδιο από πείραμα σε πείραμα. Τέλος, παρατηρείται ότι σε όλα τα διαγράμματα που αφορούν στους κεντρικούς οπλισμούς η μετατόπιση της στάθμης της παραμόρφωσης γίνεται προς τα θετικά (προς τα πάνω).

Στους οπλισμούς με μικρή επικάλυψη παρουσιάστηκε σημαντική ανομοιομορφία ως προς τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Στο πρώτο και στο τρίτο δοκίμιο, όπου η κρουστική καταπόνηση επαναλήφθηκε πέντε φορές στο δοκίμιο 1 και έξι στο δοκίμιο 3, στις τρεις και τέσσερις επαναλήψεις αντίστοιχα, παρατηρείται μια στιγμιαία ταλάντωση της παραμόρφωσης. Μετά το πέρας του παλμού η παραμόρφωση επανέρχεται στην αρχική της στάθμη. Αντίθετα, στα ίδια δοκίμια (δοκίμιο 1 – δοκίμιο 3) στις δύο από τις πέντε και έξι επαναλήψεις αντίστοιχα, φαίνεται ότι αμέσως μετά την διέλευση του παλμού η παραμόρφωση δεν επανέρχεται πλήρως στην αρχική της στάθμη. Στο δοκίμιο 2 μετά την διέλευση του παλμού παρατηρείται ότι η παραμόρφωση δεν επανέρχεται στην αρχική της στάθμη σε καμία από τις πέντε επαναλήψεις της κρουστικής καταπόνησης του οπλισμού. Η διαφορά στάθμης της παραμόρφωσης πριν και μετά τη διέλευση του παλμού είναι παρόμοια με αυτήν που παρατηρείται στους οπλισμούς που έχουν τοποθετηθεί στο κέντρο της διατομής του δοκιμίου. Στα διαγράμματα που αφορούν στους οπλισμούς με μικρή επικάλυψη, στα δοκίμια 1 και 3, στο πρώτο πείραμα που παρατηρείται αλλαγή στάθμης της παραμόρφωσης, αυτή πραγματοποιείται προς τα θετικά, ενώ στο αμέσως επόμενο πείραμα που παρατηρείται αλλαγή στάθμης της παραμόρφωσης αυτή πραγματοποιείται προς τα αρνητικά (προς τα κάτω). Στο δοκίμιο 2, στα διαγράμματα που αφορούν στον ακραίο οπλισμό, παρατηρείται ότι η αλλαγή στάθμης της παραμόρφωσης πραγματοποιείται προς τα



αρνητικά στις 4 πρώτες επαναλήψεις, ενώ στην τελευταία αυτή γίνεται προς τα θετικά του άξονα της παραμόρφωσης.

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται συνοπτικά τα ύψη των αλμάτων που καταγράφηκαν στο σύνολο των πειραμάτων. Στον Πίνακα\_1 αποτυπώνονται τα ύψη των αλμάτων για τους κεντρικούς σπλισμούς ενώ στον Πίνακα\_2 για τους ακραίους σπλισμούς.

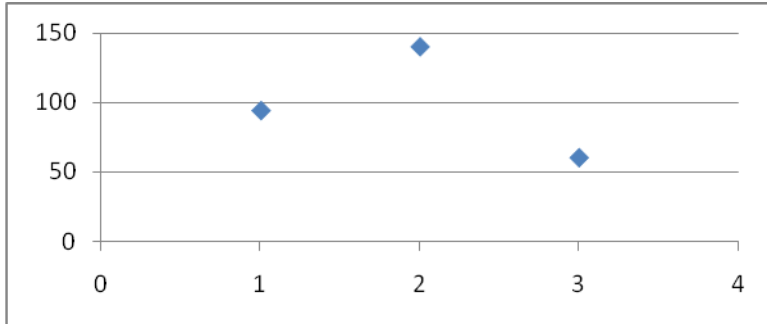
### Πίνακας 1

Δοκίμιο	Αριθμός πειράματος	Διαφορά (ύψος άλματος) *10 <sup>-6</sup>
1	1_1_1	94
	1_1_3	140
	1_1_4	60
2	2_1_1	109
	2_1_2	13
	2_1_3	1
	2_1_4	31
3	3_1_1	55
	3_1_3	31
	3_1_4	-20

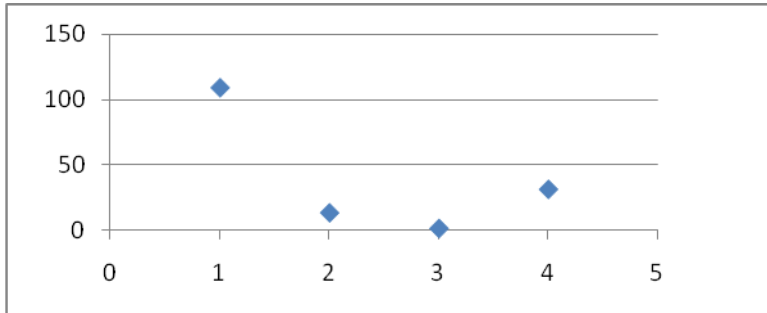
**Πίνακας 2**

Δοκίμιο	Αριθμός πειράματος	Διαφορά (ύψος άλματος) *10 <sup>-6</sup>
1	1_2_1	0
	1_2_3	0
	1_2_4	12
	1_2_5	0
	1_2_6	-31
2	2_2_1	-122
	2_2_2	-57
	2_2_3	-49
	2_2_4	-422
	2_2_5	91
3	3_2_1	0
	3_2_2	206
	3_2_3	0
	3_2_4	0
	3_2_5	-10
	3_2_6	0

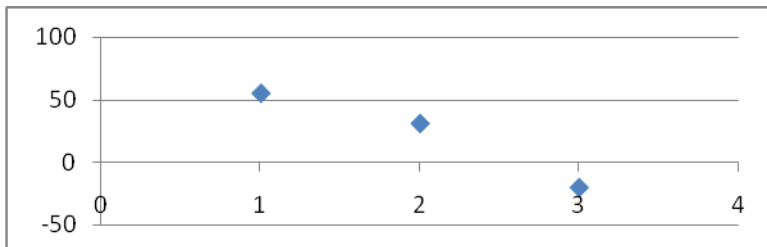
### Ύψη αλμάτων σε κεντρικό οπλισμό στο δοκίμιο 1



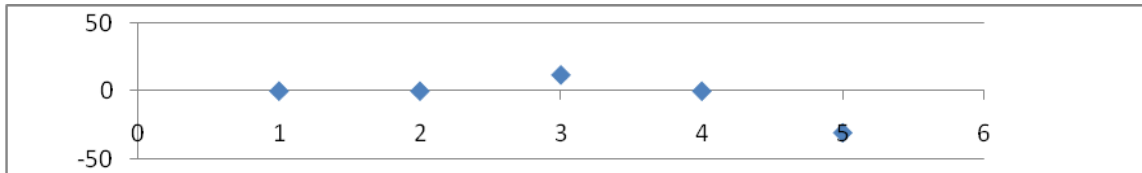
### Ύψη αλμάτων σε κεντρικό οπλισμό στο δοκίμιο 2



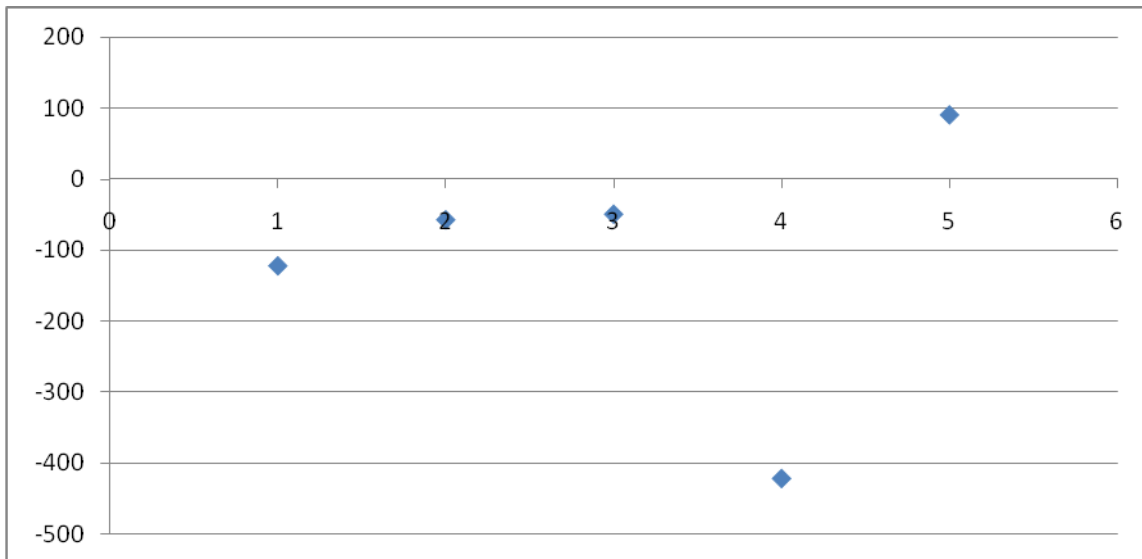
### Ύψη αλμάτων σε κεντρικό οπλισμό στο δοκίμιο 3



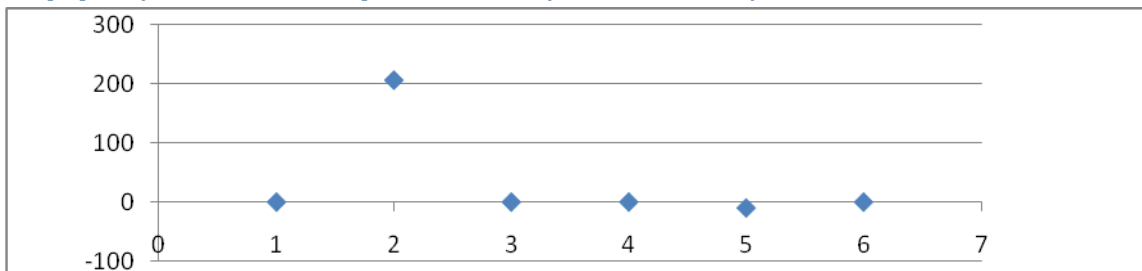
### Ύψη αλμάτων σε ακραίο σπλισμό στο δοκίμιο 1



### Ύψη αλμάτων σε ακραίο σπλισμό στο δοκίμιο 2



### Ύψη αλμάτων σε ακραίο σπλισμό στο δοκίμιο 2



## Συμπεράσματα

Η παρούσα πειραματική εργασία έχει κατά βάση χαρακτήρα διερευνητικό. Ως βάση ελήφθη υπόψη προηγούμενη πειραματική διαδικασία,[22], στην οποία, με αντίστοιχη διάταξη οργάνων και μεθόδου μετρήσεων, αποτυπώθηκε σαφέστατα στα αποτελέσματα των μετρήσεων η ύπαρξη ή η μη ύπαρξη συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος.

Βασικός στόχος της παρούσας πειραματικής διαδικασίας ήταν η πραγματοποίηση μιας πρώτης προσπάθειας, ώστε με την συγκεκριμένη διάταξη και μέθοδο μετρήσεων να ελεγχθεί η επίδραση του μεγέθους της επικάλυψης του οπλισμού στον βαθμό συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος.

Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι πράγματι υπάρχει διαφοροποίηση στο βαθμό συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος μεταξύ της διάταξης όπου ο οπλισμός έχει μικρή επικάλυψη και της διάταξης στην οποία ο οπλισμός είναι τοποθετημένος στον κέντρο της διατομής του δοκιμίου. Συνοψίζοντας φάνηκε ότι:

Στους οπλισμούς που τοποθετήθηκαν στο κέντρο της διατομής του δοκιμίου παρατηρούνται τα εξής:

- Παραμένουσα παραμόρφωση στον οπλισμό μετά την διέλευση του κρουστικού παλμού. Μετά την στιγμιαία ταλάντωση το άλμα είναι ορατό και μετρήσιμο.
- Όλα τα άλματα κινούνται προς τα θετικά, δηλαδή έχουμε μετρήσιμη απομείωση της αρχικής θλιπτικής παραμόρφωσης της χαλύβδινης ράβδου.
- Διαφαίνεται σχετική πτώση του άλματος στην παραμόρφωση κατά την επανάληψη της καταπόνησης του οπλισμού.
- Συμφωνία αποτελεσμάτων με προηγούμενη πειραματική εργασία στα δοκίμια που είχαν πλήρη συνάφεια.

Στους οπλισμούς που τοποθετήθηκαν σε ακραία θέση της διατομής του δοκιμίου, ώστε να έχουν μικρή επικάλυψη από σκυροδέμα:

- Παρουσιάζεται έντονη ανομοιομορφία ως προς τα αποτελέσματα, κυρίως μεταξύ διαφορετικών δοκιμίων. *(Το γεγονός αυτό υπάρχει πιθανότητα να οφείλεται και σε μικροδιαφοροποιήσεις στο εσωτερικό των δοκιμίων οι οποίες οφείλονται είτε στον τρόπο παρασκευής τους είτε σε παράγοντες που δεν υπάρχει ούτως ή άλλως δυνατότητα να αποφευχθούν. Συμπέρασμα ίσως μπορούσε να εξαχθεί εάν ελεγχόταν η αντοχή συνάφειας με κάποια καταστροφική μέθοδο. Προς το παρόν όμως τα δοκίμια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω πειραματική έρευνα.)*

- Για συγκεκριμένο οπλισμό σε συγκεκριμένο δοκίμιο παρουσιάζεται σχετική ομοιομορφία στα επαναλαμβανόμενα πειράματα.
- Το δοκίμιο που κατά βάση παρουσίαζε άλμα, το άλμα αυτό ήταν αρνητικό, αντίθετου προσήμου από αυτό των κεντρικών οπλισμών.

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι το μέγεθος της επικάλυψης ενός οπλισμού συνδέεται με την συνάφειά του, χωρίς όμως να είναι σαφής και μονοσήμαντος ο τρόπος με τον οποίον επιδρά. Κατά κύριο λόγο συμπεραίνεται ότι έχουμε μειωμένη συνάφεια.

Είναι προφανές ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα προς επιβεβαίωση των παραπάνω συμπερασμάτων αλλά και με στόχο να διερευνηθούν σημεία που αυτή η πειραματική διαδικασία από την σύλληψή της και τον αρχικό σχεδιασμό δεν μπόρεσε να προβλέψει. Για τους λόγους αυτούς προτείνεται η επανάληψη αυτής της πειραματικής διαδικασίας με:

- Σταθερού μεγέθους κρουστικό φορτίο.
- Τοποθέτηση οπλισμών με κλιμακούμενο βαθμό επικάλυψης (3, 5, 7, 10, 15mm).
- Μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων της κρουστικής καταπόνησης του κάθε ξεχωριστού οπλισμού.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Menzel, C.A., "Some Factors Influencing Results of Pull-Out Bond Tests," Journal of the American Concrete Institute, Vol.35, June 1939, pp 516-543.
2. Ferguson, P.M. and Thompson, J.N., "Development Length of High Strength Reinforcing Bars in Bond," Journal of the American Concrete Institute, July, 1962, pp 887-921.
3. McDermott, J.F., "Effect of Steel Strength and of Reinforcement Ratio on the Mode of Failure and Strain Energy Capacity of Reinforced Concrete Beams," Report by ACI Committee 439, American Concrete Institute Journal, March 1969, pp 165-172.
4. Mitchell, D. et.al., "State-of-the-Art Report on Bond Under Cyclic Loads," Reported by ACI Committee 408, ACI 408.2R-92, 1992, pp 1-31.
5. Π. Ι. Γιαννόπουλος, Συνάφεια ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου, 2006
6. Σπανός Χρ., Σπιθάκης Μ., Τρέζος Κ., «Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών», Εκδόσεις ΤΕΕ,, Αθήνα, 2006
7. Trezos C.G., Vassilopoulos Th. and Mouggiakos S. Influence of the surface corrosion on the bond behavior of reinforced concrete, 14<sup>th</sup> 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, 15<sup>th</sup> Greek Conference of Reinforced Concrete, 2006.
9. P.S. Theocaris, B.G. Badalouka and G.A. Papadopoulos, A Two-column single frameinteraction with soil to travelling stress pulses, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 11, 1992, pp. 163-172.
10. B.G. Badalouka and G.A. Papadopoulos, Experimental study of a structure under stress pulse simulating vertical ground motion, Journal of Earthquake Engineering, 2008, 12, pp 341-356.
11. P.S. Theocaris and H.G. Georgiadis (1984) Emission of stress waves during fracture, Journal of Sound and Vibration 92, 517-528.

12. P.S. Theocaris and H.G. Georgiadis (1984) Rayleigh waves emitted by a propagating crack in a strain-rate dependent elastic medium, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 32, 491-510.
13. H.G. Georgiadis and N. Charambakis (1994) An analytical/numerical approach for cracked elastic strips under concentrated loads – Transient response, *International Journal of Fracture* 65, 49-61.
14. Ferguson, P.M., and Thompson, J.N., “Development Length for Large High Strength Reinforcing Bars,” *Journal of the American Concrete Institute*, January 1965, pp 71-91
15. Yan, C., *Bond Between Reinforcing Bars and Concrete Under Impact Loading*, Ph.D.Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, 1992, p 369.
16. Vos, I.E., *Influence of Loading Rate and Radial Pressure on Bond in Reinforced Concrete. A Numerical and Experimental Approach*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1983, p 234.
17. J. H. Weathersby, *Investigation of bond slip between concrete and steel reinforcement under dynamic loading conditions*, Ph.D. Thesis, 2003
18. Verderame, G. M., P. Ricci, G. De Carlo και G. Manfredi (2009). Cyclic bond behavior of plain bars. Part I: Experimental investigation. *Construction and Building Materials* 23.12, pp. 3499—3511.
19. Verderame, G. M., G. De Carlo, P. Ricci και G. Fabbrocino (2009). Cyclic bond behavior of plain bars. Part II: Analytical investigation, *Construction and Building Materials*, pp 3512—3522.
20. Trezos C.G., Mpomporis L., Fotopoulos A., and Georgiou Chr., *Fress concrete under seismic action*, 14<sup>th</sup> Greek Conference of Reinforced Concrete, Kos island, 2003.
21. Fédération Internationale du Béton (2010a). *Model Code 2010 - First complete draft*. v. 1. fib, σ. 292. isbn: 978-2-88394-095-6.— (2010b). *Model Code 2010 - First complete draft*. v. 2. fib, σ. 288. isbn: 978-2-88394-096-3.
22. Βαδαλούκας Γ. Κων/νος, «Πειραματική μελέτη επίδρασης της συνάφειας οπλισμού – σκυροδέματος στη διάδοση κύματος», *Διπλωματική Εργασία*, Αθήνα, 2012.



