ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική μελέτη επίδρασης διαβρωμένου χάλυβα οπλισμού στη διάδοση τασικού παλμού

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Κ. ΜΑΚΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:

ΒΑΔΑΛΟΥΚΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ
ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΣΕΜΦΕ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2017

Στον πατέρα μου που «έφυγε» νωρίς
και σε όλους τους δικούς μου ανθρώπους
που παραμένουν πεισματικά ακόμα δίπλα μου,
παρότι δοκίμασα πολύ την υπομονή τους
όλα αυτά τα χρόνια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους ανθρώπους που συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω:

Πρώτη από όλους, στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου Βασιλική Βαδαλούκα, Επίκουρη Καθηγήτρια της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του ΕΜΠ, για την καίρια στήριξη, την ουσιαστική καθοδήγηση και την απαραίτητη ώθηση σε κρίσιμες καμπές καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης και συγγραφής της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ και προσωπικά στη Βασιλική Παλιεράκη, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, στο Δημήτρη Χατζηρούμπη, Τεχνίτη του Εργαστηρίου και στον Παναγιώτη Κορνέζο, Ηλεκτρονικό του Εργαστηρίου, για την πολύτιμη βοήθειά τους στη σκυροδέτηση των δοκιμίων και για την άμεση ανταπόκρισή τους σε οτιδήποτε, μικρό ή μεγάλο, ζητήθηκε η συνδρομή τους.

Στους συναδέλφους διπλωματούχους Πολιτικούς Μηχανικούς και παλιούς μου συμφοιτητές Σταύρο Δηλέ και Μαριέττα Κολοκύθα για τις πολύωρες δημιουργικές επιστημονικές (και όχι μόνο) συζητήσεις, τις παρατηρήσεις και την εποικοδομητική κριτική κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών και της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, στο συνάδελφο διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό και παλιό μου συμφοιτητή Κώστα Βαδαλούκα για τη μεταφορά της εμπειρίας του, με τις σημαντικές συμβουλές του, από την εκπόνηση της δικής του διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας πειραματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού στη διάδοση τασικού παλμού. Αποτελεί μία πρώτη προσπάθεια να διερευνηθεί η δυνατότητα ποιοτικού ελέγχου του βαθμού διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού στο σκυρόδεμα με μη καταστροφικό τρόπο.

Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκαν τέσσερα κυλινδρικά δοκίμια από σκυρόδεμα. Σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν 2 ράβδοι οπλισμού, μία υγιής και μία προσβεβλημένη από διάβρωση. Στις ράβδους οπλισμού επικολλήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κρουστική καταπόνηση. Με το χτύπημα ενός σφυριού δημιουργήθηκε τασικός παλμός, σε τρία διαφορετικά σημεία κάθε δοκιμίου: στο ελεύθερο άκρο της προεξέχουσας υγιούς ράβδου, στο ελεύθερο άκρο της προεξέχουσας προσβεβλημένης από διάβρωση ράβδου και στην επιφάνεια του σκυροδέματος ανάμεσα στις δύο ράβδους. Με σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων, καταγράφηκαν οι χρονοϊστορίες διάδοσης του παλμού στην υγιή και στην προσβεβλημένη από διάβρωση ράβδο. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του ΕΜΠ.

Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι υπάρχει μία ασθενής διαφοροποίηση στη διάδοση του τασικού παλμού στις υγιείς ράβδους οπλισμού και στις διαβρωμένες ράβδους οπλισμού.

ABSTRACT

The object of the thesis is to investigate the effect of corrosion of steel reinforcement in stress pulse propagation. It is a first attempt to explore the possibility to control qualitatively the corrosion of steel reinforcement in concrete by non-destructive manner.

For this purpose, four cylindrical concrete specimens were made. Two reinforcing bars were placed to each specimen, one healthy and one affected by corrosion. Strain gauges were attached on the reinforcing bars. The specimens were subjected to impact stress load, on three different spots of each specimen: the free end of the non corroded rod, the free end of the rod affected by corrosion and the concrete surface between the two rods. The time-histories of pulse propagation in healthy and affected by corrosion rod were recorded, using a data acquisition system. The experimental procedure was carried out in the Laboratory of Strength of Materials, School of Applied Mathematical and Physical Sciences Mechanics, NTUA.

The results indicated that there is a weak differentiation in the stress pulse propagation within non corroded reinforcement rods and corroded ones.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί στις μέρες μας ένα από τα πιο διαδεδομένα υλικά για την κατασκευή του φέροντος οργανισμού κτηρίων. Παρά την εξαιρετική επίδοσή του ως φέροντος υλικού, διαπιστώθηκε ότι στη διάρκεια ζωής των κατασκευών, η οποία συχνά ξεπερνά τα 100 χρόνια, παρατηρείται συχνά μία βαθμιαία συσσώρευση βλάβης εξαιτίας της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ίδιων των κατασκευών, με σταδιακή απώλεια της λειτουργικότητας και της στατικής επάρκειάς τους, ακόμα και την τελική τους αστοχία.

Η διάβρωση του χάλυβα είναι ένα σύνθετο χημικό και ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που έχει ως συνέπεια την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του. Παρότι το σκυρόδεμα προσφέρει ένα προστατευτικό περιβάλλον για το χάλυβα οπλισμού, την ονομαζόμενη «παθητική» προστασία, με την πάροδο του χρόνου και με τη δράση μηχανισμών που οφείλονται κυρίως σε εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, η προστασία αυτή καταστρέφεται. Αυτό συμβαίνει κυρίως εξαιτίας της δράσης μηχανισμών του διοξειδίου του άνθρακα (ενανθράκωση σκυροδέματος) και της διείσδυσης χλωριόντων που διαχέονται μέσω του διαπερατού υλικού του σκυροδέματος, προκαλούν αποπαθητικοποίηση του προστατευτικού στρώματός του και με παρουσία νερού και οξυγόνου οδηγούν στη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού.

Με δεδομένο ότι μεγάλο πλήθος των κατασκευών της χώρας μας βρίσκεται κοντά στη θάλασσα και εκτίθεται στο επιθετικό θαλάσσιο περιβάλλον, αλλά και συνεκτιμώντας την υψηλής σεισμικότητα της περιοχής μας, γίνεται σαφής η ανάγκη διασφάλισης των κατασκευών μας μέσω της παρακολούθησης και της ταχείας ανίχνευσης της κατάστασης του χάλυβα οπλισμού ως προς τη διάβρωση. Διάφορες μέθοδοι και τεχνικές έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται για το σκοπό αυτό, από την εκτίμηση της κατάστασης με οπτικό έλεγχο των ορατών συνεπειών της διάβρωσης μέχρι ηλεκτρικές μεθόδους ενόργανης μέτρησης του ελεύθερου δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος.

Η παρούσα πειραματική εργασία αποτελεί μία προσπάθεια να διερευνηθεί η δυνατότητα ποιοτικού ελέγχου του βαθμού διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού στο σκυρόδεμα με μη καταστροφικό τρόπο. Σκοπός της είναι να μελετηθεί η διαφοροποίηση που συντελείται στον τασικό παλμό κατά τη διάδοσή του σε δοκίμια σκυροδέματος με υγιή και διαβρωμένο οπλισμό. Πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη της Επίκουρης Καθηγήτριας κυρίας Βασιλικής Βαδαλούκα.

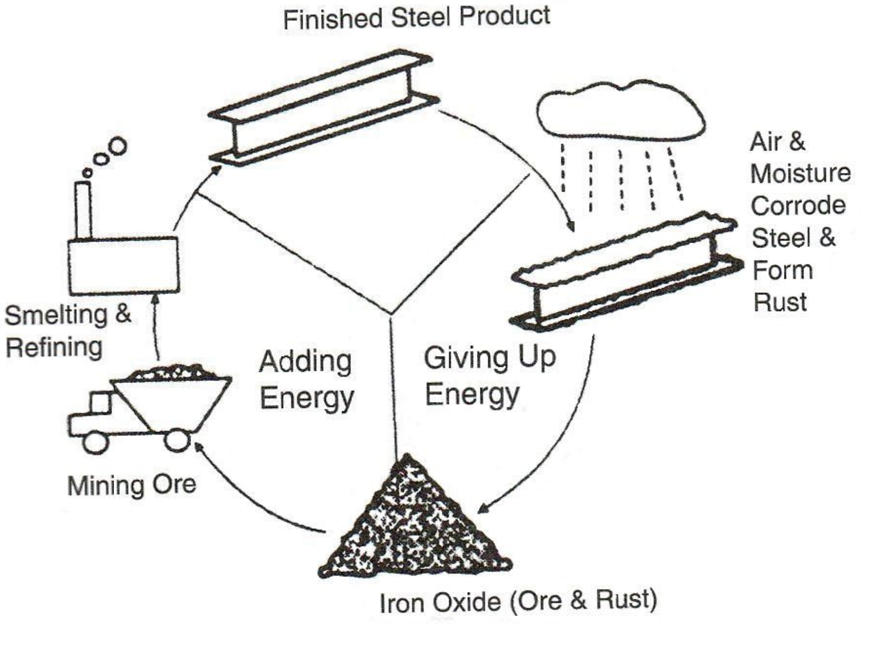
Ως προς την διάρθρωσή της, η εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της διάβρωσης, στο δεύτερο αναφέρονται στοιχεία για τη διάδοση των κυμάτων, στο τρίτο γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, στο τέταρτο παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα και στο πέμπτο καταγράφονται τα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΙΑΒΡΩΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Όλα τα υλικά, ανεξάρτητα από τη σύστασή τους, υφίστανται φθορά με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους (deterioration). Οι ιδιότητες ενός υλικού εξαρτώνται από τη δομή του και τη μέθοδο κατεργασίας του. Συνεπώς, η αντοχή ενός υλικού στη φθορά, ως ιδιότητα, εξαρτάται από τη δομή και τη μέθοδο κατεργασίας του. Η εξωτερική παράμετρος που υπεισέρχεται στην τριμερή σχέση δομή-κατεργασία-ιδιότητες είναι η επίδραση του περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθεται το υλικό. Η διάβρωση είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα υποβάθμισης των ιδιοτήτων ενός υλικού λόγω αντίδρασης με το περιβάλλον του. Είναι μία φυσική διεργασία, κατά το μεγαλύτερο μέρος της ήσυχη, που προχωράει βαθμιαία. Συμβαίνει κατά κύριο λόγο στα μέταλλα, διότι είναι θερμοδυναμικώς ασταθή, δηλαδή τείνουν να γυρίσουν στην αρχική κατάσταση στην οποία είχαν βρεθεί στη φύση, ως μεταλλεύματα.



Σχ. 1.1: Ο κύκλος διάβρωσης του χάλυβα (J.R. Davis, 2000)

Δεν είναι υπερβολικός ο ισχυρισμός ότι όλα τα μέταλλα παθαίνουν διάβρωση και σχεδόν όλα τα περιβάλλοντα προξενούν διάβρωση: ο αέρας, η υγρασία, το νερό, το θαλασσινό νερό, ο ατμός, τα καυσαέρια, η αμμωνία, τα οξέα κ.λπ. Το οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε όλες τις πτυχές των παγκόσμιων υποδομών, συμπεριλαμβανομένων των αυτοκινητόδρομων, των γεφυρών και των κτηρίων, είναι μεγάλο. Στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού προκαλεί μία σειρά προβλημάτων που οδηγούν στην υποβάθμισή τους και συνεπώς σε σημαντικά ζητήματα ασφάλειας. Αναδεικνύεται, λοιπόν, η ανάγκη κατανόησης του φαινομένου και χρήσης κατάλληλων μεθόδων πρόληψης και ελέγχου.

1.2 Ο μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα

1.2.1 Ορισμός

Η διάβρωση του χάλυβα είναι ένα σύνθετο χημικό και ηλεκτροχημικό φαινόμενο, μία αντίδραση που περιλαμβάνει μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα αντιδρόν στο άλλο. Η ανταλλαγή ηλεκτρονίων γίνεται με τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, όπου ένα άτομο ή ιόν χάνει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια (οξείδωση) και ένα άλλο άτομο ή ιόν λαμβάνει αυτά τα ηλεκτρόνια (αναγωγή). Για την πραγματοποίησή της απαιτείται η ύπαρξη μίας ανόδου, όπου λαμβάνει χώρα η οξείδωση (oxidation), μίας καθόδου, όπου λαμβάνει χώρα η αναγωγή (reduction) και ενός ηλεκτρολύτη, μέσω του οποίου μετακινούνται τα ηλεκτρόνια.

1.2.2 Δημιουργία σκωρίας

Η ανοδική και η καθοδική (ηλεκτροχημική) δράση συμβαίνουν ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές του χάλυβα. Στην περιοχή του χάλυβα που συμπεριφέρεται ως άνοδος, τα άτομα του σιδήρου μετατρέπονται σε ιόντα και ταυτόχρονα απελευθερώνονται ηλεκτρόνια, σύμφωνα με την αντίδραση:

$$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^{-}$$

Το δυναμικό μικραίνει σημαντικά, συγκριτικά με αυτό του αδιάβρωτου σιδήρου. Υπό την επίδραση αυτής της διαφοράς δυναμικού και για λόγους διατήρησης της ηλεκτρικής ουδετερότητας, τα ηλεκτρόνια που απελευθερώθηκαν μεταφέρονται προς την κάθοδο. Στην περιοχή αυτή του χάλυβα, με ταυτόχρονη παρουσία νερού και οξυγόνου, τα ηλεκτρόνια ενώνονται με το νερό και το οξυγόνο και παράγονται ιόντα υδροξυλίου, σύμφωνα με την αντίδραση:

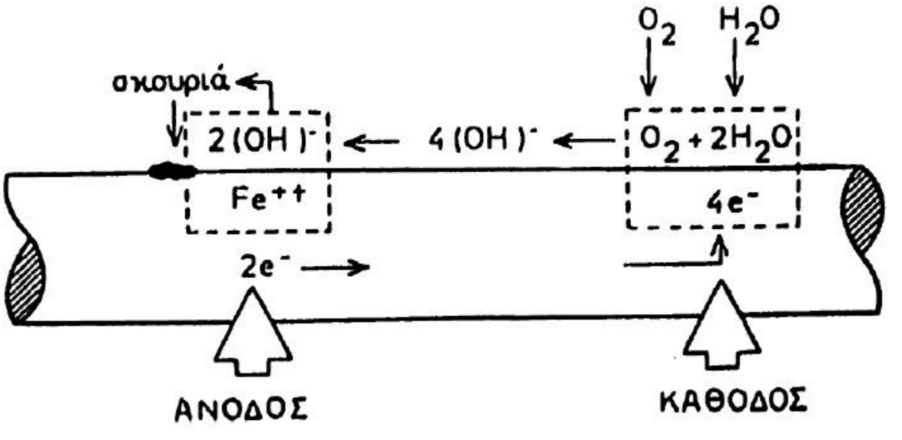
$$2e^- + H_2\mathrm{O} + \frac{1}{2}\mathrm{O}_2 \rightarrow 2(\mathrm{OH})^-$$

Τα ιόντα υδροξυλίου κινούνται μέσα στον ηλεκτρολύτη από την περιοχή της καθόδου προς την περιοχή της ανόδου, ενώνονται με τα ιόντα σιδήρου και σχηματίζουν διάφορες μορφές σκωρίας, ακολουθώντας την παρακάτω πορεία:

$$Fe^{++} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$$ (υδροξείδιο σιδήρου)

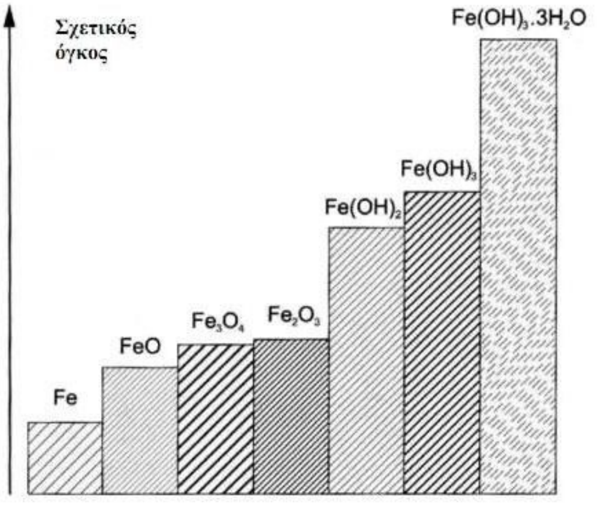
$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$$ (σιδηρικό υδροξείδιο)

$$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3.H_2O + 2H_2O$$ (ένυδρο οξείδιο του σιδήρου)



Σχ. 1.2: Απλοποιημένο προσομοίωμα της ηλεκτροχημικής διαδικασίας διάβρωσης του σιδηροπλισμού (Θ.Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιζάκη, 1993)

Το άνυδρο οξείδιο του σιδήρου Fe_2O_3 έχει διπλάσιο όγκο από το χάλυβα που αντικαθιστά, ενώ όταν ενυδατώνεται διογκώνεται ακόμα περισσότερο, με τη συνολική τοπική αύξηση του όγκου να κυμαίνεται μεταξύ δύο και δέκα φορές του αρχικού.



Σχ. 1.3: Όγκος προϊόντων διάβρωσης

1.3 Η διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα προστατευτικό περιβάλλον για το χάλυβα οπλισμού, παρέχει την ονομαζόμενη «παθητική» προστασία. Το υδατικό διάλυμα των πόρων του είναι έντονα αλκαλικό, εξαιτίας του υδροξειδίου του ασβεστίου $Ca(OH)_2$, υποπροϊόντος της ενυδάτωσης του τσιμέντου. Έτσι, για μεγάλες τιμές του pH (από 9 έως 12,8) σχηματίζεται στην επιφάνεια του μετάλλου ένα πολύ λεπτό και σφικτά προσκολλημένο στρώμα οξειδίων του σιδήρου. Η ύπαρξη του στρώματος αυτού εμποδίζει τη διάβρωση του χάλυβα. Ωστόσο, ακόμα κι αν το στρώμα οξειδίων καταστραφεί, μπορεί να μην επέλθει διάβρωση του χάλυβα στην περίπτωση που οι συνθήκες του περιβάλλοντος δεν είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη του φαινομένου, π.χ. σε σκυρόδεμα βυθισμένο στο νερό (λόγω ανεπάρκειας οξυγόνου) ή σε σκυρόδεμα στο εσωτερικό κτηρίων (λόγω έλλειψης υγρασίας).

Με την πάροδο του χρόνου, η προστασία που παρέχει το σκυρόδεμα μπορεί να καταστραφεί. Οι κυριότεροι μηχανισμοί που οδηγούν σε αυτό είναι η ενανθράκωση του σκυροδέματος (carbonation of concrete) και η προσβολή του από χλωριόντα (chloride attack).

1.3.1 Ενανθράκωση σκυροδέματος

Όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται σε περιβάλλον που περιέχει CO_2, λαμβάνει χώρα μία αντίδραση που παράγει ανθρακικά άλατα. Η ενανθράκωση προκαλείται κυρίως από τη χημική αντίδραση του υδροξειδίου του ασβεστίου του σκυροδέματος με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας, που οδηγεί στο σχηματισμό ανθρακικού ασβεστίου:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Πηγή του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να είναι και το νερό που μεταφέρει διαλυμένο CO_2. Για την πραγματοποίηση της αντίδρασης απαιτούνται μικρές ποσότητες νερού. Μέσω των πόρων, το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος και η διαδικασία συνεχίζεται σε μεγαλύτερα βάθη, μέχρι να φτάσει στο χάλυβα οπλισμού. Το pH μειώνεται σε τιμές χαμηλότερες του 9, οπότε το προστατευτικό στρώμα οξειδίων καταστρέφεται και ξεκινάει η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού (σε πλήρως ενανθρακωμένο σκυρόδεμα το pH παίρνει περίπου την τιμή 8,3).

Παράγοντες που επηρεάζουν την ενανθράκωση του σκυροδέματος είναι η *σχετική υγρασία του περιβάλλοντος* (το μεγαλύτερο ποσοστό ενανθράκωσης παρατηρείται σε αέρα με σχετική υγρασία 50% έως 70%. Το ξηρό σκυρόδεμα δε θα ενανθρακωθεί, λόγω απουσίας της απαιτούμενης υγρασίας, ενώ σε κορεσμένο με νερό σκυρόδεμα εμποδίζεται η διάχυση του αερίου CO_2 στους πόρους του), η *θερμοκρασία*, η *ποιότητα του σκυροδέματος* (σχετικά διαπερατά σκυροδέματα υποβάλλονται πιο γρήγορα σε εκτεταμένη ενανθράκωση από ότι τα πυκνά, καλά συμπυκνωμένα και συντηρημένα σκυροδέματα), το *πάχος της επικάλυψης* (μικρό πάχος επικάλυψης συνεπάγεται και μικρό βάθος που πρέπει να εξαπλωθεί η ενανθράκωση μέχρι να φτάσει στο χάλυβα οπλισμού), το *είδος του τσιμέντου* (π.χ. τσιμέντα με συγκεκριμένα συστατικά, όπως σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το τσιμέντο Portland κ.λπ.) και η *συγκέντρωση* CO_2 (οι βιομηχανικές περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις CO_2 στον αέρα οδηγούν σε υψηλότερους ρυθμούς ενανθράκωσης).

1.3.2 Προσβολή από χλωριόντα

Τα χλωριόντα προέρχονται από διάφορες πηγές, μπορεί να βρεθούν στο σκυρόδεμα εξαρχής με την παρασκευή του ή να διεισδύσουν αργότερα από το περιβάλλον. Αρχικά μπορεί να βρεθούν στο σκυρόδεμα εξαιτίας: εσκεμμένης προσθήκης *επιταχυντών σκλήρυνσης του σκυροδέματος* που περιέχουν χλωριόντα (π.χ. χλωριούχο ασβέστιο), χρήσης *θαλασσινού νερού ανάμιξης*, χρήσης *προσβεβλημένων αδρανών* (π.χ. αδρανών που προέρχονται από τη θάλασσα και δεν έχουν πλυθεί επαρκώς ή καθόλου). Διείσδυση χλωριόντων μπορεί να προκύψει εξαιτίας: χρήσης *αντιπαγωτικών αλάτων*, άμεσης επαφής *θαλασσινού νερού* με την κατασκευή ή μεταφοράς *σταγονιδίων θαλασσινού νερού* μέσω του αέρα, έκθεσης σε *χημικά* (π.χ. κατασκευή που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση άλατος, δεξαμενές άλμης, ενυδρεία, κ.λπ.). Μεγαλύτερο βάρος δίνεται στη διείσδυση χλωριόντων, εξαιτίας κυρίως της θαλάσσιας έκθεσης σημαντικού πλήθους κατασκευών σε όλο τον κόσμο (με δεδομένο ότι οι ωκεανοί αποτελούν περίπου το 80% της συνολικής επιφάνειας της γης). Το ίδιο ισχύει και για τη χώρα μας, που βρίσκεται σε θαλασσινό περιβάλλον (μεγάλο μήκος ακτών, καμιά πόλη δεν απέχει πολύ από τη θάλασσα).

Η διείσδυση των χλωριόντων γίνεται μέσω πόρων γεμάτων με νερό (εξ ολοκλήρου ή μερικώς). Το τσιμέντο μπορεί να δεσμεύσει μία ποσότητα χλωριόντων (0.4% ολικά χλωριόντα κατά βάρος τσιμέντου, ορίζεται ως ελάχιστο κατώφλι διάβρωσης), ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν ελεύθερα. Η διάβρωση του χάλυβα προκαλείται από τα ελεύθερα χλωριόντα, τα οποία επιτίθενται στο προστατευτικό στρώμα οξειδίων. Σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει στην ενανθράκωση, δεν επέρχεται γενική πτώση του pH.

Ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι η εναλλασσόμενη διαβροχή και ξήρανση της επιφάνειας του σκυροδέματος από νερό που περιέχει χλωριούχα άλατα. Κατά η διάρκεια της διαβροχής, μεγάλες ποσότητες νερού με διαλυμένα άλατα διεισδύουν στο σκυρόδεμα. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, το νερό εξατμίζεται, ενώ τα άλατα παραμένουν στο σκυρόδεμα. Όταν η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, δημιουργούνται μεγάλες συγκεντρώσεις χλωριόντων στη συγκεκριμένη περιοχή του σκυροδέματος.

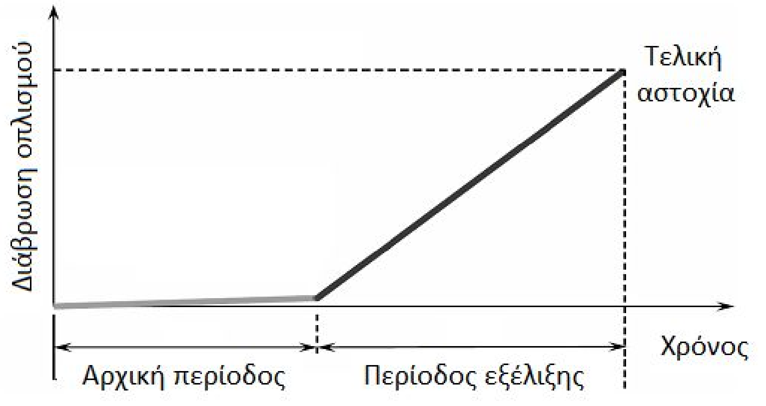
Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση του χάλυβα από χλωριόντα είναι η *ποιότητα του σκυροδέματος* (πυκνό σκυρόδεμα μικρής διαπερατότητας μειώνει την ποσότητα των χλωριόντων που μπορούν να διαχυθούν στο εσωτερικό του), το *πάχος* *επικάλυψης*, η *περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο και πρόσθετα* (η παρουσία ιπτάμενης τέφρας και ποζολάνων παρεμποδίζουν σημαντικά την κίνηση των χλωριόντων στο πορώδες σύστημα του σκυροδέματος), το *είδος και η συγκέντρωση των χλωριούχων αλάτων*, η *θερμοκρασία* και η *υγρασία του περιβάλλοντος* και η διακύμανσή της (σε τελείως κορεσμένο σκυρόδεμα είναι μεν ταχεία η διείσδυση χλωριόντων στο νερό των πόρων, είναι όμως αργή η διάχυση του απαραίτητου οξυγόνου για τη διεργασία της διάβρωσης. Αντίθετα σε μερικώς κορεσμένους πόρους επιβραδύνεται η διείσδυση χλωριόντων, ενώ επιταχύνεται η διάχυση οξυγόνου).

Σχ. 1.4: Συνθήκες για τη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού στο σκυρόδεμα

1.4 Η επίδραση της διάβρωσης του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα

Η διάβρωση του χάλυβα οδηγεί σε υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού οδηγεί σε μείωση της ενεργού διατομής του, σταδιακή απώλεια της συνάφειάς του με το σκυρόδεμα, σχετική αύξηση του όγκου από 2 μέχρι 10 φορές της μάζας που διαβρώνεται, μικρορηγματώσεις στο σκυρόδεμα, εκτίναξη της επικάλυψης του σκυροδέματος και τελικά υποβάθμιση των ίδιων των κατασκευών, με σταδιακή απώλεια της λειτουργικότητας και της στατικής επάρκειάς τους. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα, έχουν διαπιστωθεί αστοχίες κατασκευών που οφείλονταν στη διάβρωση του οπλισμού.

Η διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, σε σχέση με τη διάβρωση του χάλυβα, χωρίζεται σε δύο περιόδους, την αρχική περίοδο και την περίοδο εξέλιξης. Κατά την αρχική περίοδο λαμβάνουν χώρα οι διαδικασίες εκείνες που καταστρέφουν την παθητική προστασία του χάλυβα (όπως περιγράφηκαν παραπάνω). Κατά την περίοδο εξέλιξης λαμβάνει χώρα η διαδικασία της διάβρωσης με την παρουσία επαρκών ποσοτήτων οξυγόνου και υγρασίας, η κατασκευή χάνει τη λειτουργική ικανότητά της να ανθίσταται μέχρι να επέλθει η «τελική αστοχία» (η διακοπή λειτουργίας της κατασκευής). Αυτά περιγράφονται σχηματικά από το μοντέλο έναρξης – διασποράς της διάβρωσης του Tuutti (1982).



Σχ. 1.5: Εξέλιξη της διάβρωσης του χάλυβα στο σκυρόδεμα κατά το μοντέλο έναρξης – διασποράς της διάβρωσης του Tuutti (Θ.Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιζάκη, 1993)

1.4.1 Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα

Η διάβρωση του χάλυβα έχει ως συνέπεια τη μείωση της αντοχής του σε εφελκυσμό (μείωση τάσης διαρροής και τάσης θραύσης) και τη μείωση της ολκιμότητάς του (μείωση παραμόρφωσης αστοχίας). Όσο αυξάνει ο βαθμός διάβρωσής του, τόσο περισσότερο υποβαθμίζονται οι μηχανικές του ιδιότητες. Κατά την ερμηνεία του Παπαδόπουλου (2007), αυτό αποδίδεται στις εγκοπές που προκαλεί η διάβρωση στο υλικό και στη συγκέντρωση τάσεων που αυτές προκαλούν με τη σειρά τους.

Το παραπάνω πρόβλημα μεγεθύνεται στις περιπτώσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς οι ιδιότητες του διαβρωμένου χάλυβα διαφέρουν από αυτές με τις οποίες έγινε ο αρχικός σχεδιασμός, με συνέπειες στην ικανότητα της κατασκευής να αναλαμβάνει τις φορτίσεις για τις οποίες σχεδιάστηκε.

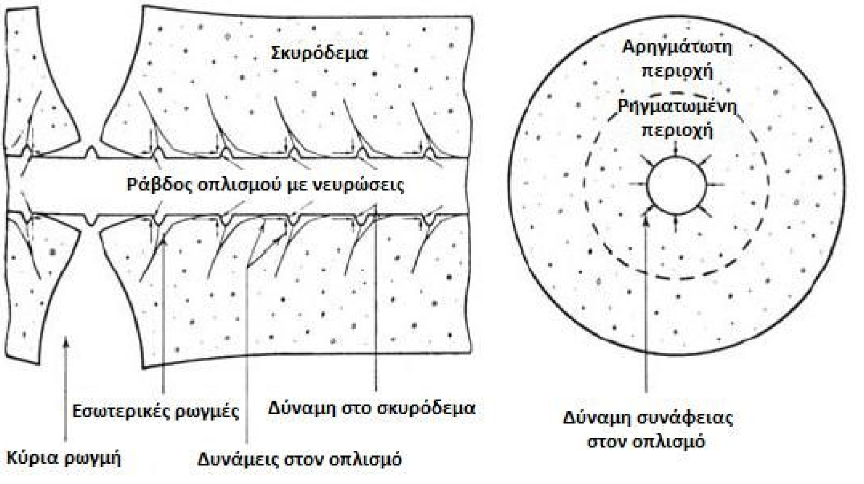
1.4.2 Μείωση ενεργού διατομής χάλυβα οπλισμού

Η διάβρωση του χάλυβα έχει ως συνέπεια τη μείωση της διατομής του, είτε ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του οπλισμού, όταν η διάβρωση είναι γενική ή ομοιόμορφη (κυρίως εξαιτίας ενανθράκωσης του σκυροδέματος), είτε σε ορισμένες θέσεις του οπλισμού, όταν η διάβρωση είναι τοπική (κυρίως εξαιτίας τοπικά αυξημένης συγκέντρωσης χλωριόντων). Σε κάθε περίπτωση, συνέπεια είναι η αύξηση της τάσης που ασκείται στον οπλισμό, καθώς τα φορτία σχεδιασμού παραμένουν σταθερά, δηλαδή μείωση της φέρουσας ικανότητας και σημαντικό ζήτημα ασφάλειας της κατασκευής. Επίσης, η μείωση της διατομής του χάλυβα οπλισμού οδηγεί σε μείωση της ροπής αδρανείας του και συνεπώς μείωση του μέγιστου φορτίου λυγισμού που μπορεί να αναληφθεί.

1.4.3 Συνάφεια χάλυβα οπλισμού – σκυροδέματος

Η συνάφεια μεταξύ του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος είναι μία από τις βασικές παραμέτρους που επιτρέπει τη χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος ως δομικού υλικού στις κατασκευές. Ως συνάφεια μπορεί να οριστεί το σύνολο των αιτιών που παρεμποδίζουν τη σχετική ολίσθηση μεταξύ των ράβδων οπλισμού και της μάζας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η συνάφεια εξασφαλίζει τη συνεργασία χάλυβα – σκυροδέματος στην ανάληψη των δράσεων που ασκούνται στα δομικά στοιχεία της κατασκευής.

Αρχικά, ανάμεσα στην επιφάνεια του χάλυβα και του σκυροδέματος που τον περιβάλλει, υπάρχει πρόσφυση που αντιστοιχεί σε ένα πολύ μικρό ποσοστό της τιμής της συνάφειας. Η πρόσφυση όμως καταστρέφεται, ακόμα και για πολύ μικρές μετατοπίσεις. Μετά την καταστροφή της πρόσφυσης, έναντι των μικρομετατοπίσεων μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, ενεργοποιείται η μάζα του σκυροδέματος που περιβάλλει τον χάλυβα και προβάλλει αντίσταση μέσω του μηχανισμού της τριβής. Όπως είναι λογικό, η συνάφεια λόγω τριβής αυξάνει όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα της επιφάνειας της ράβδου. Στην περίπτωση του χάλυβα οπλισμού με νευρώσεις, το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής συνάφειας προέρχεται από την αντίσταση του σκυροδέματος που εγκλωβίζεται μεταξύ των νευρώσεων. Πειραματικά η τάση συνάφειας εκτιμάται με τη δοκιμή εξόλκευσης.

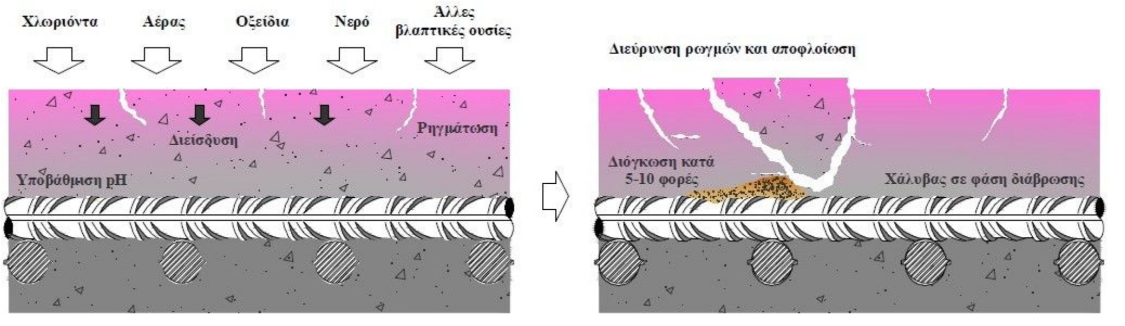


Σχ. 1.6: Ποιοτική παράσταση δημιουργίας ρωγμών σε ράβδο οπλισμένου σκυροδέματος υπό κεντρικό εφελκυσμό (Γιαννόπουλος, 2006)

Η συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος μειώνεται όσο αυξάνεται ο βαθμός διάβρωσης του χάλυβα. Αυτό οφείλεται αφενός στη ρηγμάτωση του σκυροδέματος που περιβάλλει τον οπλισμό, αφετέρου στην αλλοίωση των νευρώσεων του οπλισμού. Ωστόσο, για μικρό βαθμό διάβρωσης του χάλυβα η συνάφεια δεν επηρεάζεται, καθώς το σκυρόδεμα έχει τη δυνατότητα να αφομοιώνει μία ποσότητα των προϊόντων της διάβρωσης, ενώ μπορεί μάλιστα και να αυξάνεται ελαφρώς, καθώς η επιφάνεια του οπλισμού γίνεται πιο τραχεία.

1.4.4 Σχετική αύξηση όγκου των προϊόντων διάβρωσης

Τα προϊόντα της διάβρωσης του χάλυβα έχουν όγκο μεγαλύτερο από τον όγκο του χάλυβα που αντικαθιστούν, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων στο σκυρόδεμα. Όταν οι εσωτερικές αυτές τάσεις ξεπεράσουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος επέρχεται ρηγμάτωσή του. Αν η διάβρωση συνεχίσει να εξελίσσεται, οι ρωγμές διευρύνονται και επέρχεται εκτίναξη της επικάλυψης του σκυροδέματος.



Σχ. 1.7: Ρηγμάτωση και εκτίναξη επικάλυψη σκυροδέματος (ΣΠΜΕ Τεχνική Οδηγία 6, 2015)

1.5 Έλεγχος και παρακολούθηση της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού

Το πρώτο βήμα για τον έλεγχο της κατάστασης του χάλυβα από πλευράς διάβρωσης είναι ο οπτικός έλεγχος. Αν η διαδικασία της διάβρωσης έχει προχωρήσει, τότε είναι πολύ πιθανό οι συνέπειές της να είναι ορατές στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Σημάδια τα οποία μαρτυρούν ύπαρξη διαβρωμένου οπλισμού σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος είναι:

• Κηλίδες σκουριάς στην επιφάνεια του σκυροδέματος, που εμφανίζονται είτε όταν το εξωτερικό νερό διεισδύσει στη μάζα του σκυροδέματος και συμπαρασύρει σκουριά προς τα έξω, είτε όταν η ίδια η εσωτερική πίεση που δημιουργείται στο εσωτερικό του σκυροδέματος λόγω της αύξησης του όγκου των προϊόντων διάβρωσης εξωθήσει σκουριά προς τα έξω.

• Ρηγμάτωση παράλληλη στους οπλισμούς.

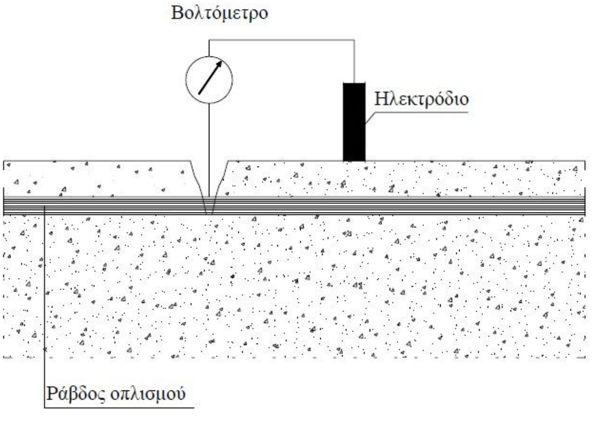
• Αποφλοίωση του σκυροδέματος.

• Εκτίναξη της επικάλυψης του σκυροδέματος.

Μετά τον οπτικό έλεγχο, που είναι κατά βάση προκαταρκτικός, ακολουθούν πιο αναλυτικοί έλεγχοι για τον καθορισμό του εύρους και της σοβαρότητας της κατάστασης, που απαιτούν κατά βάση τη χρήση οργάνων. Οι κυριότεροι διαθέσιμοι ενόργανοι έλεγχοι είναι οι εξής:

• Ανίχνευση αποκόλλησης σκυροδέματος προτού γίνει ορατή στην επιφάνεια, χτυπώντας απλά το σκυρόδεμα με σφυρί και ακούγοντας υπόκωφους ήχους ή χρησιμοποιώντας πιο εξελιγμένες μεθόδους όπως υπερήχους.

• Μέτρηση του ελεύθερου δυναμικού του χάλυβα ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς , που προσφέρει πληροφορίες σε σχέση με την πιθανότητα διάβρωσης του χάλυβα. Πρόκειται για μία απλή και γρήγορη μέθοδο, ως προς την εφαρμογή της, που μας δείχνει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο περιοχών και μας βοηθάει να εντοπίσουμε τις περιοχές του σκυροδέματος όπου υπάρχει πιθανότητα να συμβαίνει διάβρωση.



Σχ. 1.8: Μέτρηση του ελεύθερου δυναμικού του χάλυβα στο σκυρόδεμα (Σπανός Χ, Σπιθάκης Μ., Τρέζος Κ., 2001)

• Μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης του σκυροδέματος με ψεκασμό διαλύματος φαινολοφθαλεΐνης σε φρεσκοθραυσμένα ή φρεσκοκομμένα τμήματα σκυροδέματος και σύγκρισή του με το πάχος της επικάλυψης, έτσι ώστε να εκτιμηθεί αν η ενανθράκωση έχει εξαπλωθεί στο βάθος του οπλισμού.

• Χημική ανάλυση δείγματος σκυροδέματος για τον ακριβή προσδιορισμό της ποσότητας χλωριόντων και την κατανομή της συγκέντρωσής τους συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του σκυροδέματος, απ’ όπου μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την προέλευση των χλωριόντων (αρχική παρουσία ή διείσδυση).

• Μέτρηση της υγρασίας του σκυροδέματος με τη μέθοδο Wenner, που βοηθάει στον εντοπισμό προβληματικών περιοχών που ευνοούν τη διάβρωση.

• Μέτρηση της αντίστασης πόλωσης, σύνταξη και μελέτη καμπυλών πόλωσης, για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με την ταχύτητα διάβρωσης.

• Μέτρηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος, για αποτίμηση της ικανότητας της επιφάνειάς του να αποτρέπει την είσοδο διαβρωτικών ουσιών στη μάζα του.

Όλες οι παραπάνω τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό για να μας δώσουν ένα στιγμιότυπο της κατάστασης της κατασκευής σε σχέση με τη διάβρωση. Ωστόσο, αν μας ενδιαφέρει η εξέλιξη της κατάστασης με το πέρασμα του χρόνου, είναι χρήσιμη η παρακολούθηση της διάβρωσης σε κρίσιμα σημεία της κατασκευής. Για το σκοπό αυτό τοποθετούνται σταθερές διατάξεις σε επιλεγμένα σημεία της κατασκευής που συνδέονται με συστήματα καταγραφής δεδομένων και έτσι συλλέγονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν η εγκατάσταση μόνιμων διατάξεων για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού, της αντίστασης πόλωσης, της υγρασίας, της θερμοκρασίας, της διαπερατότητας του σκυροδέματος, της συγκέντρωσης χλωριόντων.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί μία εργαστηριακή δοκιμή που θα μπορούσε να εξελιχθεί σε τεχνική παρακολούθησης: η τεχνική των strain gauges (Batis and Routoulas, 1999). Τοποθετούνται στο εσωτερικό του σκυροδέματος μετρητές παραμόρφωσης, παράλληλα και εγκάρσια με το διαμήκη άξονα των ράβδων οπλισμού και καταγράφονται οι τάσεις διόγκωσης που προκαλούνται από τα προϊόντα διάβρωσης του χάλυβα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ

2.1 Βασικές έννοιες

Η κυματική κίνηση ενός παραμορφώσιμου σώματος μπορεί να περιγραφεί ως συλλογική κίνηση των σωματιδίων του, τα οποία κινούνται το ένα ως προς τα άλλα και εξασκούν, το ένα πάνω στα άλλα, δυνάμεις που εξαρτώνται από το χρόνο. Κάθε σωματίδιο αλληλεπιδρά μόνο με τα πλησιέστερα γειτονικά του σωματίδια. Ως κύμα, λοιπόν, ορίζουμε μία διαταραχή που διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα, διαμέσου ενός ή περισσότερων μέσων, από το ένα σωματίδιο στο επόμενο με βηματικό τρόπο.

Το κύμα που διαδίδεται σε ένα μέσο μεταφέρει ενέργεια, από ένα μέρος του μέσου σε ένα άλλο, χωρίς να μεταφέρει σωματίδια. Ως αποτέλεσμα αυτού, το μέσο διάδοσης του κύματος μπορεί να παραμορφώνεται σταδιακά, να υφίσταται τοπικές μετατοπίσεις και να ταλαντώνεται κατά τη διέλευση του κύματος, χωρίς κατ’ ανάγκη να παρατηρείται κάποια παραμόρφωση ή μετατόπιση στο σύνολο του μέσου.

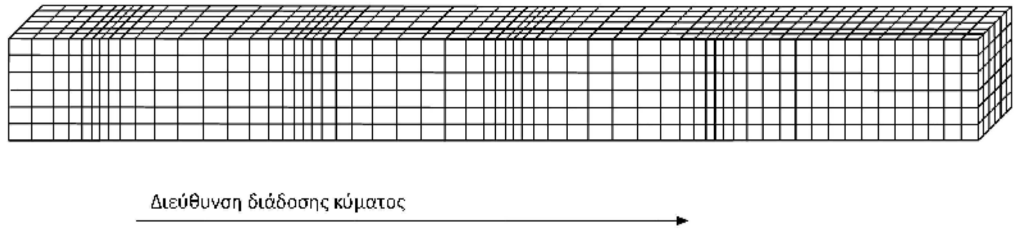
Υπάρχουν τρεις ταχύτητες που σχετίζονται με ένα κύμα:

- Η κυματική ή φασική ταχύτητα: είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, δηλαδή οι ισοφασικές επιφάνειες, στο μέσο.
- Η σωματιδιακή ή μοριακή ταχύτητα: είναι η ταχύτητα με την οποία ταλαντώνεται το κάθε τμήμα του μέσου, γύρω από τη θέση ισορροπίας του.
- Η ομαδική ταχύτητα: στην περίπτωση υπέρθεσης κυμάτων με διαφορετικές συχνότητες, μήκη κύματος και ταχύτητες, έχουμε τη δημιουργία ενός κυματοπακέτου. Η ομαδική ταχύτητα περιγράφει την ταχύτητα μετάδοσης της ενέργειας του κυματοπακέτου αυτού.

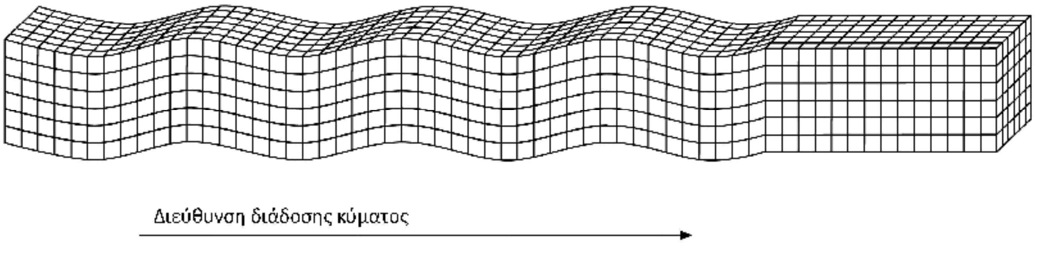
Τα κύματα διακρίνονται σε διαμήκη και εγκάρσια, ανάλογα με τον τρόπο που κινούνται τα σωματίδια του μέσου διάδοσης:

Διαμήκη (longitudinal) ονομάζονται τα κύματα όταν η διεύθυνση διάδοσής τους και η διεύθυνση κίνησης των σωματιδίων του μέσου είναι παράλληλες. Στα διαμήκη κύματα δημιουργούνται «πυκνώματα» και «αραιώματα». Παράδειγμα διαμηκών κυμάτων είναι τα ηχητικά κύματα ή ακόμη και τα κύματα που διαδίδονται μέσω ενός ελατηρίου, όπου παρατηρούμε πυκνώματα και αραιώματα του ελατηρίου.

Εγκάρσια (transverse) ονομάζονται τα κύματα όταν η διεύθυνση διάδοσής τους και η διεύθυνση κίνησης των σωματιδίων του μέσου είναι κάθετες. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο στα στερεά. Στα εγκάρσια κύματα, κατά τη διάδοσή τους, δημιουργούνται «όρη» και «κοιλάδες». Παράδειγμα εγκάρσιων κυμάτων είναι η διαταραχή που μεταφέρεται μέσω ενός σχοινιού, στην οποία ενώ το κύμα διαδίδεται κατά μήκος του σχοινιού, η κίνηση των σωματιδίων είναι πάνω- κάτω.



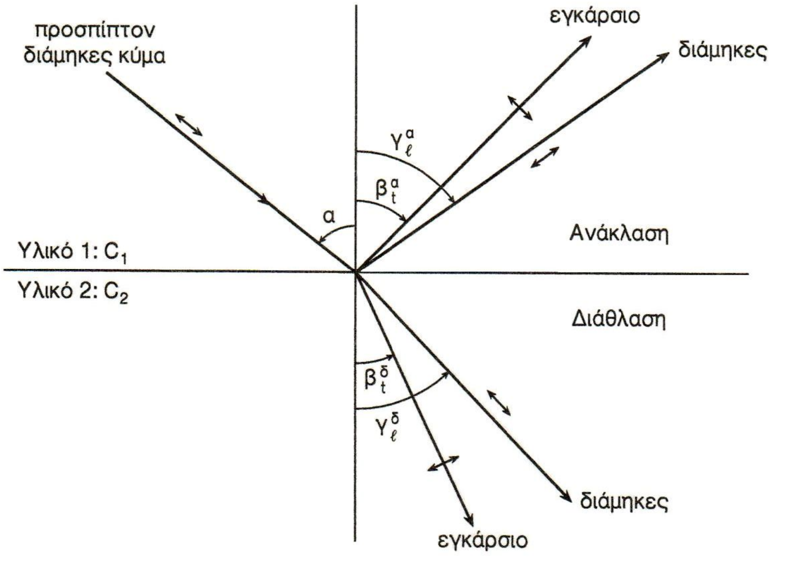
Σχ. 2.1: Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση διαμήκους κύματος



Σχ. 2.2: Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση εγκάρσιου κύματος

Ένα κρίσιμο σημείο της κυματικής θεωρίας αναφέρεται στην αλληλεπίδραση των κυμάτων που διαδίδονται στο εσωτερικό ενός σώματος με τα γεωμετρικά όρια αυτού του σώματος ή τις συνοριακές επιφάνειες που διαχωρίζουν υλικά με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες.

Ένα απλό παράδειγμα αποτελεί ένα επίπεδο σώμα που διαμορφώνεται από δύο υλικά, τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους από μία ευθύγραμμη διαχωριστική επιφάνεια. Η πρόσπτωση υπό γωνία α διαμήκους κύματος, που διαδίδεται στο πρώτο υλικό, στη συνοριακή επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τεσσάρων νέων κυμάτων: δύο ανακλώμενων στη συνοριακή επιφάνεια (εκ των οποίων το ένα διάμηκες και το άλλο εγκάρσιο) και δύο διαθλώμενων (εκ των οποίων επίσης το ένα διάμηκες και το άλλο εγκάρσιο).



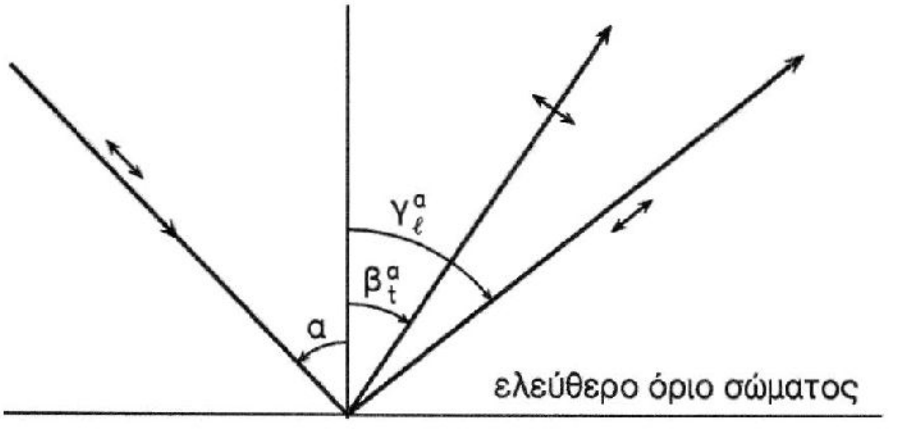
Σχ. 2.3: Πρόσπτωση κύματος σε διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών

Αν συμβολίσουμε με c τις ταχύτητες διάδοσης των τεσσάρων διαφορετικών κυμάτων, τότε η σχέση ανάμεσα στις γωνίες και τις ταχύτητες διάδοσης διατυπώνεται με βάση τον ακόλουθο νόμο του Snell:

$$\frac{\sin\alpha}{c^{\pi}{}_{l1}} = \frac{\sin\gamma^{\alpha}{}_{l}}{c^{\alpha}{}_{l1}} = \frac{\sin\beta^{\alpha}{}_{t}}{c^{\alpha}{}_{t1}} = \frac{\sin\gamma^{\delta}{}_{l}}{c^{\delta}{}_{l2}} = \frac{\sin\beta^{\delta}{}_{t}}{c^{\delta}{}_{t2}}$$

Αντιστοίχως, αν ένα διάμηκες μηχανικό κύμα που διαδίδεται στο εσωτερικό ενός σώματος προσπέσει υπό γωνία α στο ελεύθερο όριο του σώματος, θα προκύψουν δύο νέα κύματα ανάκλασης (ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο) και θα ισχύει:

$$\frac{\sin\alpha}{c_{\alpha}} = \frac{\sin\gamma^{\alpha}{}_{l}}{c_{l}} = \frac{\sin\beta^{\alpha}{}_{t}}{c_{t}}$$



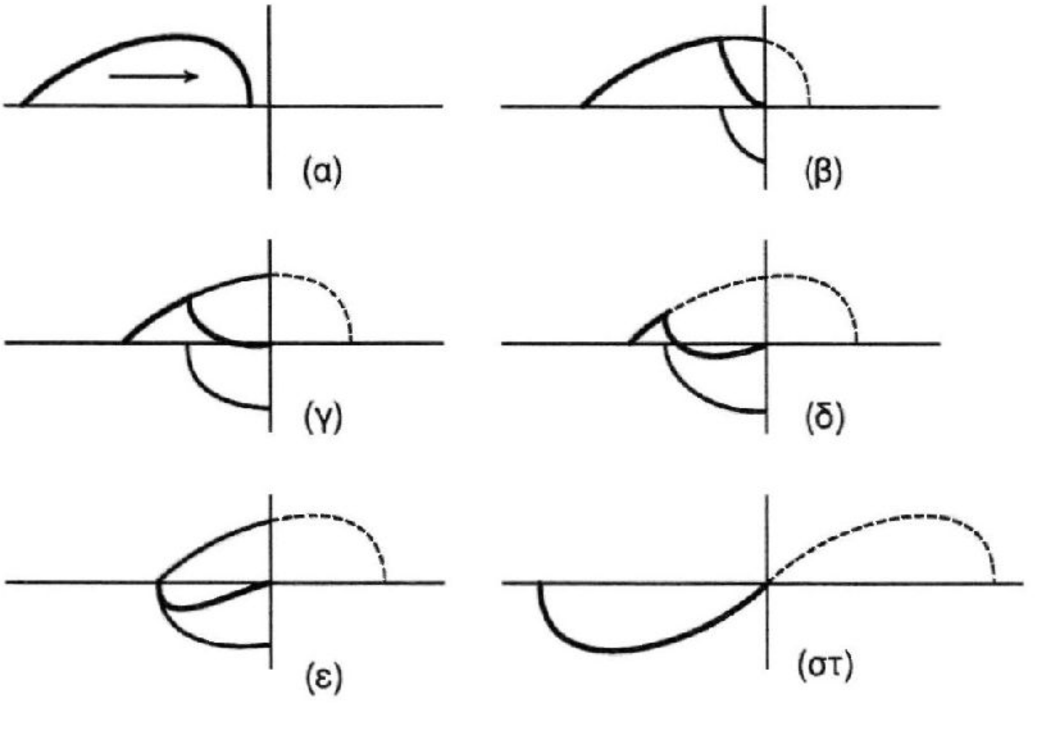
Σχ. 2.4: Πρόσπτωση κύματος σε ελεύθερο όριο

2.2 Κρουστικές τάσεις και παραμορφώσεις

Οι καταπονήσεις που επιβάλλονται σε ένα σώμα με μεγάλη ταχύτητα, έτσι ώστε η χρονική διάρκεια επιβολής του συνολικού φορτίου στο σώμα να είναι συγκρίσιμη με τη θεμελιώδη φυσική περίοδο του σώματος, ονομάζονται κρουστικές καταπονήσεις. Οι καταπονήσεις αυτές δημιουργούν κατ' αρχή μία (ελαστική) παραμόρφωση στο σημείο επιβολής τους και μία αντίστοιχη τάση. Οι αρχικές αυτές παραμορφώσεις και τάσεις διαδίδονται από το σημείο επιβολής προς το εσωτερικό του σώματος, αποτελώντας έτσι έναν μηχανικό (δηλαδή παραμορφωσιακό και τασικό) παλμό ή ένα μηχανικό (δηλαδή παραμορφωσιακό και τασικό) κύμα, στην περίπτωση που το εξωτερικό αίτιο επενεργεί προκαλώντας την ταλάντωση του υλικού του σώματος στο σημείο της επαφής.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη και οι ιδιότητες των μηχανικών κυμάτων περιγράφονται από την κυματική θεωρία της Φυσικής. Τα γεωμετρικά όρια του σώματος καθορίζουν τις διευθύνσεις διάδοσης των μηχανικών κυμάτων: σε περίπτωση κρουστικής καταπόνησης ελαστικού μέσου με άπειρες διαστάσεις, τα μηχανικά κύματα θα διαδοθούν προς όλες τις διευθύνσεις, ενώ σε περίπτωση κρουστικής καταπόνησης σε κυλινδρικό σύρμα με διάμετρο πολύ μικρή συγκριτικά με το μήκος του, το κύμα θα διαδοθεί προς μία μόνο κατεύθυνση, αυτή του άξονα του σύρματος.

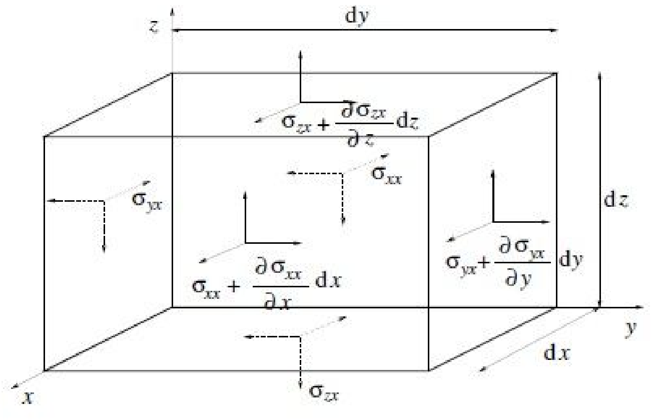
Η σημασία του κυματικού χαρακτήρα των τάσεων και παραμορφώσεων κατά την κρούση αναδεικνύεται από το πείραμα κρούσης μέσω της θλιπτικής ράβδου του Hopkinson (Hopkinson Pressure Bar). Πρόκειται για ένα απλό πείραμα: με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα, ένα βλήμα επιταχύνεται μέσα σε ένα σωλήνα και χτυπά στο ένα άκρο μίας κυλινδρικής ράβδου από ψαθυρό ελαστικό υλικό, δημιουργώντας σε αυτή ένα θλιπτικό τασικό παλμό, ο οποίος ξεκινά να διαδίδεται. Μόλις ο τασικός παλμός φτάσει στο ελεύθερο όριο της επιφάνειας του άλλου άκρου της ράβδου, ανακλάται προς τα πίσω με αντίθετο πρόσημο ως εφελκυστικό τασικό κύμα (σύμφωνα με τους νόμους που διέπουν τη διάδοση των κυμάτων). Ο εφελκυστικός παλμός θα προκαλέσει τη θραύση της ράβδου, αν έχει πλάτος μεγαλύτερο από την τάση θραύσης του υλικού. Η θραύση της ράβδου γίνεται κοντά στο άκρο της ράβδου, όπου ο τασικός παλμός γίνεται εφελκυστικός, δεδομένου ότι το υλικό της ράβδου είναι ψαθυρό και ανθεκτικότερο έναντι θλιπτικών τάσεων.



Σχ. 2.5: Η μετατροπή του αρχικού θλιπτικού παλμού σε εφελκυστικό

2.3 Εξίσωση κύματος

Για τον καθορισμό των εξισώσεων κίνησης σε ελαστικό στερεό εξετάζουμε τη μεταβολή των τάσεων ενός ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου στοιχειωδών διαστάσεων dx, dy και dz, με ακμές παράλληλες προς τους άξονες του καρτεσιανού συστήματος.



Σχ. 2.6: Τάσεις στις έδρες ενός ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου στοιχειωδών διαστάσεων

Οι τάσεις μεταβάλλονται συνεχώς μέσα στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Οι δυνάμεις στις έδρες του προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τις τάσεις με τα εμβαδά των επιφανειών όπου αυτές ασκούνται. Σε κάθε άξονα ασκούνται έξι ξεχωριστές δυνάμεις. Η συνισταμένη δύναμη στον άξονα x προκύπτει:

$$\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) dxdydz \tag{2.1}$$

Από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, αγνοώντας τις μαζικές δυνάμεις, γράφουμε την αδρανειακή δύναμη που ασκείται στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κατά τον άξονα x:

$$\rho dxdydz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.2}$$

όπου:

ρ είναι η πυκνότητα του σώματος

u είναι η μετατόπιση κατά τον άξονα x

Εξισώνοντας τις εκφράσεις (2.1) και (2.2) παίρνουμε την εξίσωση κίνησης κατά τη διεύθυνση x:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.3}$$

Αντίστοιχα προκύπτουν και οι εξισώσεις κίνησης κατά τις διευθύνσεις y και z:

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial t^2} \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \tag{2.5}$$

όπου:

υ, w είναι η μετατόπιση κατά τον άξονα y και z αντίστοιχα

Για ομογενές και ισότροπο υλικό, οι σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων είναι:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{yy} \\ \sigma_{zz} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{zz} \\ \sigma_{yz} &= 2\mu\varepsilon_{yz} \\ \sigma_{zx} &= 2\mu\varepsilon_{zx} \\ \sigma_{xy} &= 2\mu\varepsilon_{xy} \end{aligned} \tag{2.6}$$

όπου:

λ, μ είναι οι σταθερές του Lamé. Η σταθερά *μ* ταυτίζεται με το μέτρο διάτμησης

Δ είναι η διασταλτικότητα, δηλαδή η ανηγμένη διόγκωση: $\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$

Οι σχέσεις παραμορφώσεων – μετατοπίσεων είναι:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \qquad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial \upsilon}{\partial y}, \qquad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \upsilon}{\partial x}\right)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right) \tag{2.7}$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial \upsilon}{\partial z}\right)$$

Λαμβάνοντας υπ’ όψη τις σχέσεις (2.6) και (2.7), οι εξισώσεις κίνησης (2.3), (2.4) και (2.5) κατά τις διευθύνσεις x,y και z αντίστοιχα, γίνονται:

$$(\lambda + \mu)\frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.8}$$

$$(\lambda + \mu)\frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 \upsilon = \rho \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial t^2} \tag{2.9}$$

$$(\lambda + \mu)\frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \tag{2.10}$$

όπου:

∇^2 είναι ο τελεστής Laplace σε τρεις διαστάσεις: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Παραγωγίζουμε τα δύο μέλη της εξίσωσης (2.8) ως προς x, τα δύο μέλη της εξίσωσης (2.9) ως προς y και τα δύο μέλη της εξίσωσης (2.10) ως προς z και προσθέτουμε κατά μέλη:

$$\rho \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu)\nabla^2 \Delta \tag{2.11}$$

ή ισοδύναμα:

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = c_1^2 \nabla^2 \Delta \tag{2.12}$$

Η σχέση (2.12) εκφράζει μία εξίσωση κύματος. Ειδικότερα, εκφράζει τη διάδοση της διασταλτικότητας Δ μέσα σε ομογενές και ισότροπο ελαστικό μέσο, με ταχύτητα c_1 .

2.4 Ταχύτητα κύματος

Η ταχύτητα διάδοσης της διασταλτικότητας Δ μέσα σε ομογενές και ισότροπο ελαστικό μέσο δίνεται από τη σχέση:

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \tag{2.13}$$

Αν απαλείψουμε τη διασταλτικότητα Δ από τις σχέσεις (2.9) και (2.10), παραγωγίζοντας τα δύο μέλη της (2.9) ως προς z και τα δύο μέλη της (2.10) ως προς y και αφαιρέσουμε κατά μέλη, προκύπτει:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial \upsilon}{\partial z}\right) = \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial \upsilon}{\partial z}\right) \tag{2.14}$$

ή εναλλακτικά:

$$\rho \frac{\partial^2 \overline{\omega}_x}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \overline{\omega}_x \tag{2.15}$$

όπου:

$\overline{\omega}_x$ είναι η στροφή γύρω από τον άξονα x

Η σχέση (2.15) δείχνει ότι η στροφή διαδίδεται με ταχύτητα:

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{2.16}$$

Ανάλογες σχέσεις προκύπτουν και για τις στροφές $\overline{\omega}_y$ και $\overline{\omega}_z$.

Αν η διασταλτικότητα Δ μηδενιστεί (Δ = 0), τότε οι εξισώσεις κίνησης (2.8), (2.9) και (2.10) γίνονται:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 u \tag{2.17}$$

$$\rho \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \upsilon \tag{2.18}$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 w \tag{2.19}$$

Για να είναι τα στοιχεία των στροφών $\overline{\omega}_x$, $\overline{\omega}_y$ και $\overline{\omega}_z$ μηδενικά, δηλαδή για να είναι το πεδίο των μετατοπίσεων αστρόβιλο, θα πρέπει οι μετατοπίσεις *u*, *υ* και *w* να παράγονται από δυναμικό *φ* μέσα από τις σχέσεις:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \qquad \upsilon = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \qquad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \tag{2.20}$$

όπου:

φ είναι η μία συνάρτηση δυναμικού

Τότε ισχύουν οι σχέσεις:

$$\Delta = \nabla^2 \varphi, \qquad \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi} = \nabla^2 u \tag{2.21}$$

Εξαιτίας των σχέσεων (2.21), η εξίσωση κίνησης (2.8) γίνεται:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2 u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.22}$$

Ομοίως οι άλλες δύο εξισώσεις κίνησης (2.9) και (2.10) γίνονται:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2 \upsilon = \rho \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial t^2} \tag{2.23}$$

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2 w = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \tag{2.24}$$

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι στο εσωτερικό ενός ελαστικού σώματος, τα κύματα διαδίδονται με δύο διαφορετικές ταχύτητες. Τα κύματα που δεν περιλαμβάνουν στροφή, δηλαδή τα διαμήκη (θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και ως αστρόβιλα), διαδίδονται με ταχύτητα:

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \tag{2.13}$$

ενώ τα κύματα που δεν περιλαμβάνουν διασταλτικότητα, δηλαδή τα εγκάρσια (θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και ως ισόχωρα), διαδίδονται με ταχύτητα:

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{2.16}$$

Ορίζουμε ως μέτρο διόγκωσης k το λόγο της εξωτερικά εφαρμοζόμενης υδροστατικής πίεσης p προς την ανηγμένη αλλαγή του όγκου Δ:

$$k = \frac{p}{\Delta} = \lambda + \frac{2\mu}{3} \tag{2.25}$$

Συνεπώς, η σχέση (2.13) γίνεται:

$$c_1 = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \tag{2.26}$$

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων εξαρτάται μόνο από την πυκνότητα ρ και το μέτρο διάτμησης μ του ελαστικού μέσου. Αντίστοιχα, η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων εξαρτάται από την πυκνότητα ρ, το μέτρο διόγκωσης k αλλά και από το μέτρο διάτμησης μ (κάθε διαμήκης παραμόρφωση δημιουργεί αναπόφευκτα και πλευρικές μετατοπίσεις).

Συμπεραίνουμε ότι η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος (διαμήκους ή εγκάρσιου) στο εσωτερικό ενός υλικού, δεν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της καταπόνησης που το δημιούργησε, αλλά από τις ελαστικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Φυσικά δεν ισχύει το ίδιο και για την ταχύτητα επιβολής της κυματικής (τασικής και παραμορφωσιακής) διαταραχής, δηλαδή για τη σωματιδιακή ή μοριακή ταχύτητα. Τα χαρακτηριστικά της τασικής και παραμορφωσιακής διαταραχής του σημείου του υλικού, τη στιγμή της διέλευσης του μηχανικού κύματος από αυτό, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εξωτερικού αιτίου που τα προκάλεσε.

Η σωματιδιακή ταχύτητα διαχωρίζεται και αυτή σε δύο διαφορετικές: στην προκαλούμενη από τη διέλευση του διαμήκους κύματος, που παίρνει την τιμή:

$$\upsilon_1 = \frac{\sigma}{\rho c_1} \tag{2.27}$$

όπου:

σ είναι η ορθή τάση στη συγκεκριμένη θέση

και στην προκαλούμενη από τη διέλευση του εγκάρσιου κύματος, που παίρνει την τιμή:

$$\upsilon_2 = \frac{\tau}{\rho c_2} \tag{2.28}$$

όπου:

τ είναι η διατμητική τάση στη συγκεκριμένη θέση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

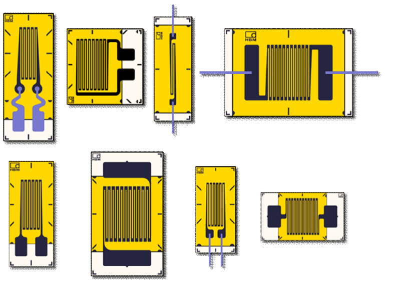
3.1 Εισαγωγή

Στον παρόν κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν τέσσερα κυλινδρικά δοκίμια από σκυρόδεμα, διαμέτρου 15 εκατοστών και ύψους 30 εκατοστών, μέσα στα οποία τοποθετήθηκαν ράβδοι χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος. Στις ράβδους οπλισμού επικολλήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης. Σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν 2 ράβδοι οπλισμού κατά τη διαμήκη έννοια, με ίδιο μήκος, μία υγιής και μία προσβεβλημένη από διάβρωση. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κρουστική καταπόνηση και με σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων, καταγράφηκαν οι τιμές των παραμορφώσεων. Κατόπιν, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των υγιών και των προσβεβλημένων από διάβρωση ράβδων.

3.2 Ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης

Προκειμένου να μετρηθεί η παραμόρφωση των ράβδων οπλισμού, που θα προκληθεί από την κρουστική καταπόνησή τους, επικολλήθηκαν σε κατάλληλα σημεία τους ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης.

Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης ή ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gauges) είναι ωμικές αντιστάσεις, ιδιαίτερα ευαίσθητες στην αλλαγή του μήκους τους. Το μήκος, το πλάτος και η αντίσταση του μετρητή είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά του και αναφέρονται στον τύπο του.



Σχ. 3.1: Διάφοροι τύποι ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης

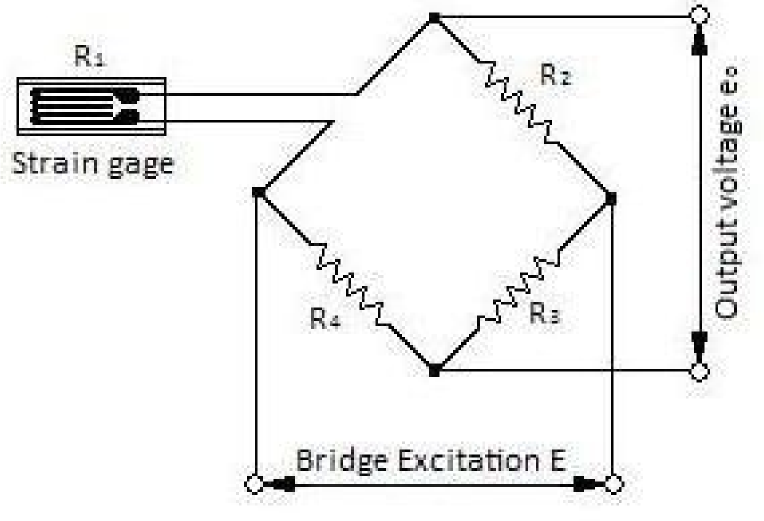
Η εφαρμογή μίας εξωτερικής θλιπτικής (ή αντίστοιχα εφελκυστικής) δύναμης προκαλεί βράχυνση (ή αντίστοιχα επιμήκυνση) στη ράβδο οπλισμού, με συνέπεια τη μείωση (ή αντίστοιχα αύξηση) της αντίστασης του μετρητή. Για αρχική αντίσταση R και για μεταβολή της αντίστασης λόγω έντασης ΔR, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\Delta R}{R} = Ks \cdot \varepsilon$$

όπου:

Ks είναι ο συντελεστής του μετρητή (gauge factor), μία σταθερά που εκφράζει την ευαισθησία του μετρητή

Η μεταβολή της αντίστασης του μετρητή εξαιτίας της παραμόρφωσης είναι πολύ μικρή. Ως εκ τούτου, για να μετρήσουμε την παραμόρφωση, σχηματίζουμε μια γέφυρα Wheatstone, η οποία μετατρέπει τη μεταβολή της αντίστασης σε μεταβολή δυναμικού.



Σχ. 3.2: Γέφυρα Wheatstone

Η τάση εξόδου (Output voltage) e_0 προκύπτει από τη σχέση:

$$e_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{\left(R_1 + R_2\right)\left(R_3 + R_4\right)} \cdot E$$

όπου:

E	είναι η τάση της γέφυρας (Bridge Excitation)
R_1	είναι η αντίσταση του μετρητή
R_2, R_3, R_4	είναι γνωστές σταθερές αντιστάσεις

Εξαιτίας της μεταβολής της αντίστασης κατά *ΔR*, που προκαλεί η παραμόρφωση, η τάση εξόδου γίνεται:

$$e_0 = \frac{\left(R_1 + \Delta R\right) R_3 - R_2 R_4}{\left(R_1 + \Delta R + R_2\right)\left(R_3 + R_4\right)} \cdot E$$

Αν οι αντιστάσεις είναι ίσες μεταξύ τους $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, τότε:

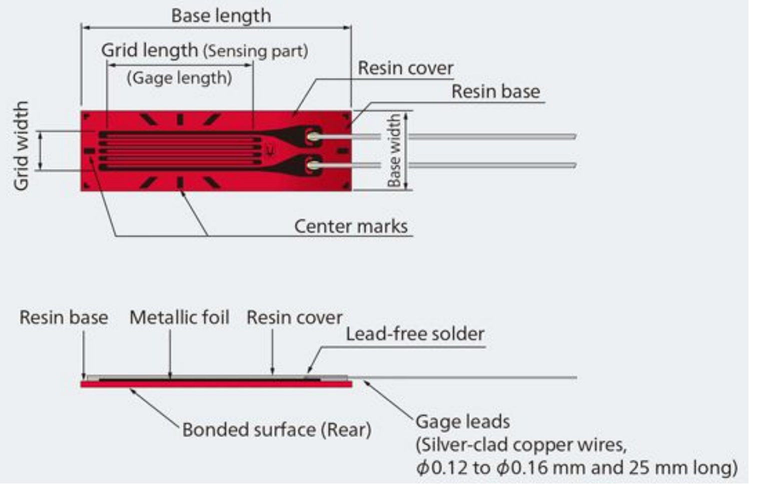
$$e_0 = \frac{R^2 + R\ \Delta R - R^2}{\left(2R + \Delta R\right) 2R} \cdot E$$

Με δεδομένο ότι η αντίσταση *R* είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μεταβολή *ΔR*, προκύπτει:

$$e_0 \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \cdot E = \frac{1}{4} Ks \cdot \varepsilon \cdot E$$

Επομένως, από την τάση εξόδου της γέφυρας, που είναι ανάλογη της μεταβολής της αντίστασης, μπορεί να μετρηθεί η παραμόρφωση *ε*, με αναλογικό ή ψηφιακό τρόπο.

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης KFG-2-120-C1-11, της εταιρίας KYOWA, οι οποίοι είναι συμβατοί με το χάλυβα των ράβδων οπλισμού του σκυροδέματος.



Σχ. 3.3: Δομή των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης

Η αντίσταση των μετρητών είναι $120.2 \pm 0.2\ \Omega\ \left(24^{\circ}C,\ 50\%\ RH\right)$ και ο συντελεστής τους (gauge factor) είναι $2.21 \pm 1.0\%\ \left(24^{\circ}C,\ 50\%\ RH\right)$. Στα παρακάτω σχήματα αναγράφονται οι κύριες ιδιότητες (όπως το εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες λειτουργούν ικανοποιητικά) και οι διαστάσεις των μετρητών.

Materials Resistive element	CuNi alloy foil
Materials Base	Polyimide
Operating temperature ranges in combination with major adhesives after curing (°C)	CC-33A: -196 to 120°C CC-36: -30 to 100°C EP-340: -55 to 150°C PC-600: -196 to 150°C
Operating temperature ranges in combination with major leadwire cables (°C)	Polyester-coated copper cable: -196 to 150°C Vinyl-coated flat cable (L-6, L-7): -10 to 80°C middle-temperature cable (L-11, L-12): -100 to 150°C
Selftemperature-compensation range (°C)	10 to 100°C
Applicable linear expansion coefficient ($\times 10^{-6}$/°C)	5, 11, 16, 23, 27
Strain limit at room temp. (approx. %)	5.0
Fatigue life at room temp., approx. (times)	1.2×10^{7} (±1500μm/m)

Σχ. 3.4: Κύριες ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης

Linear expansion coefficient based on the base color to distinguish

Lumber(5) Common steel (11) Stainless steel(16) Aluminum(23) Magnesium alloy(27)

Model	Corresponds to the Material Base color	Dimensions (mm)			
		Grid		Base	
		Length	Width	Length	Width
KFG-2-120-C1-11	●	2	1.2	6.3	2.8

Σχ. 3.5: Διαστάσεις των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης

Τέλος, για την υλοποίηση της γέφυρας Wheatstone (ένωση των ακροδεκτών των μετρητών με τον μετατροπέα) χρησιμοποιήθηκαν καλώδια L-11, των οποίων τα βασικά χαρακτηριστικά φαίνονται παρακάτω:

L-type Lead-wire Cables

Operating Temperature	Models	Types	Conductor Materials	Nominal Cross Section of Conductor (mm²)	Number of Strands/ Wire Diam. (mm)	Reciprocating Resistance per Meter (Ω)	Coated Wire Diameter (mm)	Unit Lengths (m)
−100 to 150°C	L-11	Mid-temperature 2-wire cable	Silver-plated copper	0.08	7/ϕ0.12	0.44	ϕ0.86	100

Σχ. 3.6: Χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων καλωδίων

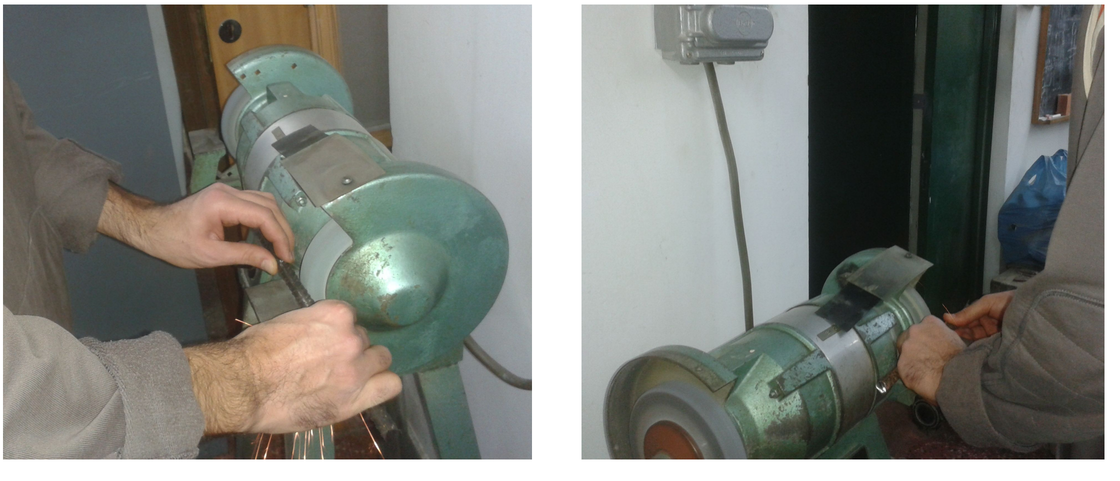
3.3 Προετοιμασία ράβδων οπλισμού

Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι από δομικό χάλυβα, κυκλικής διατομής, με νευρώσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί ράβδοι: μία υγιής ράβδος διαμέτρου 12 mm, μία προσβεβλημένη από διάβρωση ράβδος διαμέτρου 12 mm και μία προσβεβλημένη από διάβρωση ράβδος 14 mm. Αρχικά, οι ράβδοι κόπηκαν στον τροχό σε κομμάτια με μήκος 27 cm, 29 cm και 31 cm, σχηματίζοντας ζεύγη υγιών – διαβρωμένων ράβδων ίδιου μήκους. Τα χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις των ράβδων που τοποθετήθηκαν στα δοκίμια φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πιν. 3.1: Χαρακτηριστικά και διαστάσεις των ράβδων οπλισμού

α/α ράβδου	Φ(mm)	Μήκος (cm)	Κατηγορία χάλυβα	Διάβρωση
1	12	31.0	S500s	Ναι
2	12	31.0	B500c	Όχι
3	12	27.0	S500s	Ναι
4	12	27.0	B500c	Όχι
5	14	31.0	B500c	Ναι
6	12	31.0	B500c	Όχι
7	14	29.0	B500c	Ναι
8	12	29.0	B500c	Όχι

Στη συνέχεια, καθορίστηκαν τα σημεία όπου θα γίνει η επικόλληση των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης (στο μέσο κάθε ράβδου) και ακολούθησε η επιφανειακή λείανσή τους με σμυριδοτροχό, ώστε να εξαλειφθούν από τα σημεία αυτά οι νευρώσεις και να μπορεί να γίνει η επικόλληση των μετρητών, χωρίς ουσιαστική επίπτωση στην αντοχή του χάλυβα οπλισμού.



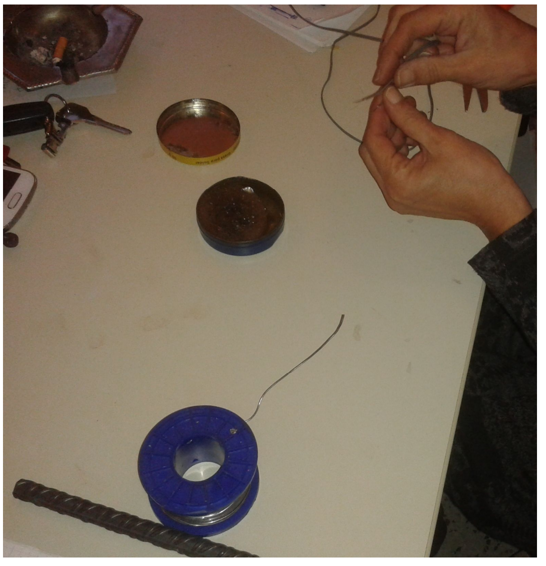
Εικ. 3.1: Λείανση ράβδων οπλισμού με σμυριδοτροχό

Στα επιλεγμένα σημεία επικολλήθηκαν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

Εικ. 3.2: Ράβδοι με επικολλημένους τους ηλεκτρικούς μετρητές παραμόρφωσης

Εικ. 3.3: Σημείο επικόλλησης του ηλεκτρικού μετρητή παραμόρφωσης σε μεγέθυνση

Οι ακροδέκτες των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης ενώθηκαν με τα καλώδια, με τη χρήση κολλητηριού χειρός (Antex), σύρματος κόλλησης και πάστας συγκολλήσεων.

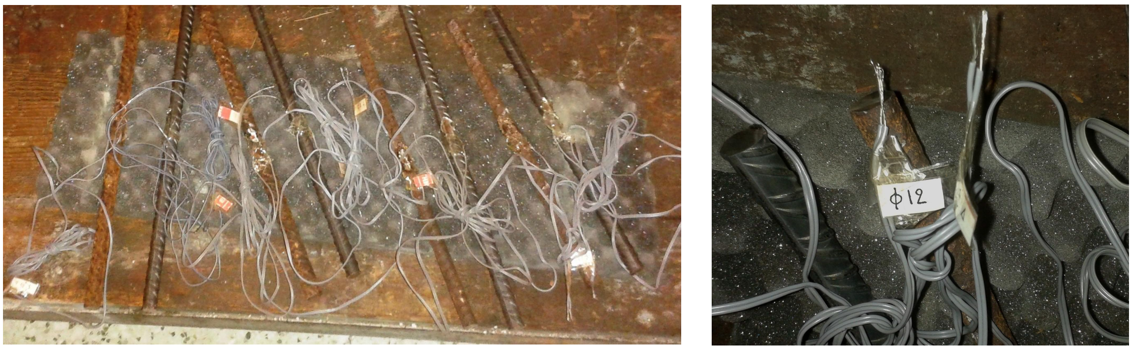



Εικ. 3.4: Ένωση ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης με τα καλώδια

Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης μονώθηκαν και στεγανοποιήθηκαν με σιλικόνη για να προστατευθούν κατά την διαδικασία της σκυροδέτησης.


Εικ. 3.5: Εφαρμογή σιλικόνης για τη μόνωση των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης

Τέλος, προσημαίνουμε τις ράβδους οπλισμού, ώστε να μπορούμε να τις ξεχωρίσουμε κατά τη σκυροδέτηση των δοκιμίων και κατά τη διάρκεια εκπόνησης των πειραμάτων.



Εικ. 3.6: Προσήμανση ράβδων οπλισμού

3.4 Δοκίμια σκυροδέματος

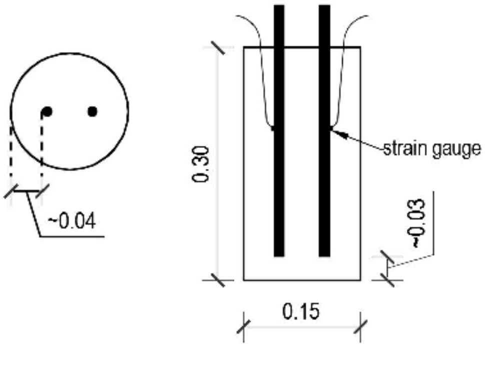
Η σκυροδέτηση των δοκιμίων έγινε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του τομέα Δομοστατικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Σκυροδετήθηκαν τέσσερα κυλινδρικά δοκίμια, με διάμετρο $d = 15\ cm$ και ύψος $h = 30\ cm$. Χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό τέσσερις χαλύβδινες κυλινδρικές μήτρες. Οι μήτρες είχαν καθαριστεί επιμελώς, ώστε να απομακρυνθούν όλα τα ξένα σώματα (όπως υπολείμματα σκυροδέματος) και οι εσωτερικές τους παρειές είχαν επαλειφθεί με λάδι μηχανής, προκειμένου να αποφευχθεί επικόλληση σκυροδέματος στις παρειές και απώλεια μικρών κομματιών κατά το ξεκαλούπωμα.

Εικ. 3.7: Καθαρισμός μητρών

Το σκυρόδεμα τοποθετήθηκε μέσα στις μήτρες. Κατά τη διάρκεια πλήρωσης των μητρών, έγινε συμπύκνωση του σκυροδέματος με τη χρήση ράβδου, κατά το πρότυπο ASTM C192/C192M. Η ράβδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν χαλύβδινη, ευθύγραμμη, κυκλικής διατομής, διαμέτρου 16 mm, με στρογγυλεμένα άκρα, όπως ορίζεται στο πρότυπο. Η διαδικασία συμπύκνωσης έγινε ως εξής: το σκυρόδεμα διαστρώθηκε μέσα στις μήτρες σε τρεις στρώσεις ίσου περίπου ύψους. Ο αριθμός των ομοιόμορφα κατανεμημένων χτύπων ανά στρώση ήταν 25. Στην κατώτερη στρώση, η ράβδος εισχωρούσε μέχρι τον πυθμένα της μήτρας. Στις ανώτερες στρώσεις, η ράβδος εισχωρούσε κατά 25 mm περίπου στην αμέσως κατώτερη στρώση. Μετά τη συμπύκνωση κάθε στρώσης, ακολουθούσαν 10 ελαφριά χτυπήματα στα πλαϊνά της μήτρας, προκειμένου το σκυρόδεμα να ομογενοποιηθεί στο εσωτερικό του και να διαφύγει τυχόν αέρας μέσα από τη μάζα του.


Εικ. 3.8: Σκυροδέτηση δοκιμίων

Παράλληλα με τη συμπύκνωση της δεύτερης στρώσης, έγινε η τοποθέτηση των ράβδων οπλισμού. Σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν δύο ράβδοι ίδιου μήκους, μία υγιής και μία προσβεβλημένη από διάβρωση. Οι ράβδοι τοποθετήθηκαν κατακόρυφα, με τη διάταξη που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 3.7: Διάταξη ράβδων μέσα στα δοκίμια

Μετά την ολοκλήρωση της συμπύκνωσης και της τοποθέτησης των ράβδων, η επιφάνεια του σκυροδέματος επιπεδώθηκε με τη χρήση μυστριού.

Εικ. 3.9: Ολοκλήρωση σκυροδέτησης δοκιμίων

Τα δοκίμια καλύφθηκαν με υγρές λινάτσες, για να διατηρηθεί η υγρασία που απαιτείται για τη σκλήρυνση του σκυροδέματος. Αμέσως μετά, αποθηκεύτηκαν στο εργαστήριο. Καθ' όλη τη διάρκεια της συντήρησης των δοκιμίων, οι λινάτσες διατηρούνταν υγρές.

Εικ. 3.10: Προστασία δοκιμίων με υγρές λινάτσες

Τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν δεκατέσσερις μέρες μετά τη σκυροδέτησή τους.

Εικ. 3.11: Τα δοκίμια σκυροδέματος μετά το ξεκαλούπωμά τους

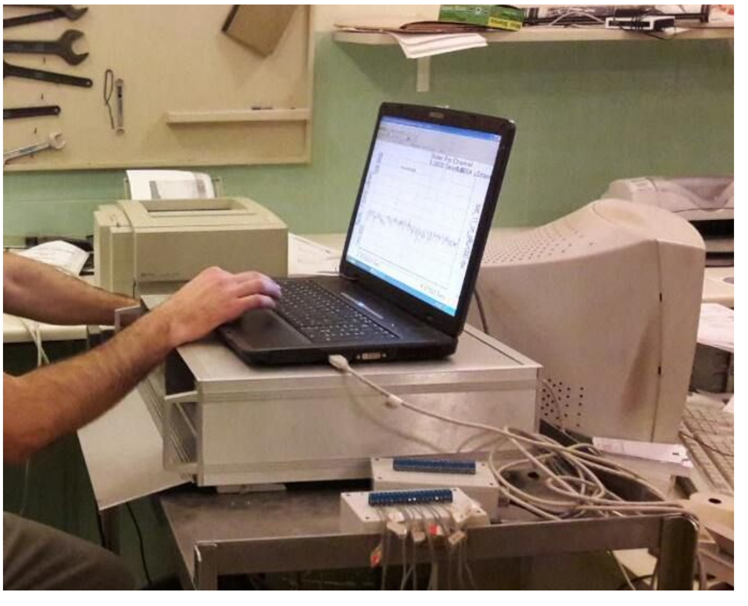
3.5 Κρουστική καταπόνηση

Σύμφωνα με το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κρουστική καταπόνηση, προκειμένου να συγκριθούν οι προκαλούμενες παραμορφώσεις στις υγιείς και στις προσβεβλημένες από διάβρωση ράβδους. Τα δοκίμια εδράζονταν απλά στο λείο μωσαϊκό δάπεδο του εργαστηρίου. Με ένα σφυρί δημιουργήθηκε τασικός παλμός και με σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων καταγράφηκε η χρονοϊστορία διάδοσης του παλμού στις ράβδους. Η κρούση έγινε σε τρία διαφορετικά σημεία κάθε δοκιμίου: στο ελεύθερο άκρο της προεξέχουσας υγιούς ράβδου, στο ελεύθερο άκρο της προεξέχουσας προσβεβλημένης από διάβρωση ράβδου και στην επιφάνεια του σκυροδέματος ανάμεσα στις δύο ράβδους.

Εικ. 3.12: Κρουστική καταπόνηση δοκιμίων με σφυρί

3.6 Μετρητικό σύστημα

Η καταγραφή της χρονοϊστορίας διάδοσης του παλμού στις ράβδους έγινε με μετρητικό σύστημα κατάλληλο για δυναμικές μετρήσεις. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το πολυκαναλικό σύστημα ταχείας λήψης, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων (Data Acquisition System) Model 6035 της Pacific Instruments, που διαθέτει το Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών ΕΜΠ.



Εικ. 3.13: Το μετρητικό σύστημα

Το μετρητικό 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 λήψης δεδομένων του συστήματος ανά κανάλι είναι 250.000 λήψεις το δευτερόλεπτο.

3.7 Παράμετροι του πειράματος

Σε κάθε ένα από τα τέσσερα δοκίμια τοποθετήθηκαν δύο ράβδοι ίδιου μήκους, μία υγιής και μία προσβεβλημένη από διάβρωση. Για τη διερεύνηση της επιρροής διάφορων παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι με μήκη 27 cm, 29 cm και 31 cm, διαμέτρου 12 mm και 14 mm, κατηγορίας χάλυβα B500c και S500s, με διαφορετικό βαθμό διάβρωσης. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά κάθε δοκιμίου.

Πιν. 3.2: Παράμετροι του πειράματος

α/α δοκιμίου	Ονομασία δοκιμίου	α/α ράβδου	Φ(mm)	Μήκος (cm)	Κατηγορία χάλυβα	Διάβρωση
1	F12_long	1	12	31.0	S500s	Ναι
		2	12	31.0	B500c	Όχι
2	F12_short	3	12	27.0	S500s	Ναι
		4	12	27.0	B500c	Όχι
3	F14_long	5	14	31.0	B500c	Ναι
		6	12	31.0	B500c	Όχι
4	F14_short	7	14	29.0	B500c	Ναι
		8	12	29.0	B500c	Όχι

3.8 Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος έγιναν δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm, στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε 23.9 MPa, στις 28 ημέρες και 27.5 MPa, στις 60 ημέρες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων, όπως αυτά καταγράφηκαν και επεξεργάστηκαν από το λογισμικό PI660-6000 του μετρητικού συστήματος Model 6035 της Pacific Instruments που χρησιμοποιήθηκε. Ακολουθεί σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων αυτών.

Συνολικά έγιναν τρεις σειρές πειραμάτων: η πρώτη σειρά ήταν αναγνωριστική και έγινε με σκοπό την εξοικείωση με το μετρητικό σύστημα, η δεύτερη σειρά έγινε με 50.000 λήψεις το δευτερόλεπτο (ταχύτητα λήψης δεδομένων του συστήματος ανά κανάλι) και η τρίτη με 80.000 λήψεις το δευτερόλεπτο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της τρίτης σειράς πειραμάτων, καθώς κρίθηκε ότι αποτύπωσαν πιο αναλυτικά την εικόνα της κρουστικής καταπόνησης που επιβλήθηκε στα δοκίμια. Η κρούση έγινε σε τρία διαφορετικά σημεία κάθε δοκιμίου: στο ελεύθερο άκρο της προεξέχουσας υγιούς ράβδου, στο ελεύθερο άκρο της προεξέχουσας προσβεβλημένης από διάβρωση ράβδου και στην επιφάνεια του σκυροδέματος ανάμεσα στις δύο ράβδους. Για κάθε κρούση καταγράφηκε η χρονοϊστορία διάδοσης του παλμού στην υγιή και στην προσβεβλημένη από διάβρωση ράβδο.

Στο παρόν κεφάλαιο δεν παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τις δοκιμές (μεγάλο πλήθος αποτελεσμάτων), παρά μόνο ενδεικτικά αποτελέσματα που όμως προσφέρονται για κάποιο αξιόλογο σχολιασμό και πιθανώς κάποιο συμπέρασμα.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται ως εξής:

• Τα διαγράμματα είναι χωρισμένα σε δύο ομάδες.

• Σε κάθε ομάδα, η παρουσίαση των διαγραμμάτων γίνεται ανά δοκίμιο (κατά τον αύξοντα αριθμό του, όπως αυτός φαίνεται στον Πίνακα 3.2) και ανά δοκιμή.

• Για κάθε δοκιμή, παρουσιάζεται όλη η εγγραφή της κυματομορφής (quickplot) για κάθε ράβδο και στη συνέχεια η κυματομορφή τη στιγμή της διαταραχής (oscilloscope).

• Στην πρώτη ομάδα, παρουσιάζονται τρεις δοκιμές για κάθε ένα από τα δοκίμια 1 και 3. Για κάθε δοκιμή, παρουσιάζεται όλη η εγγραφή της κυματομορφής της υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο, όλη η εγγραφή της κυματομορφής της διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο, όλη η εγγραφή της κυματομορφής της διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο και όλη η εγγραφή της κυματομορφής της υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται με την ίδια σειρά οι παραπάνω κυματομορφές τη στιγμή της διαταραχής.

• Στην πρώτη ομάδα συμπεριλαμβάνονται τα σχήματα 4.1 μέχρι 4.24. Ο δείκτης ‘q’ στην ονομασία του σχήματος αντιστοιχεί σε μορφή διαγράμματος quickplot και ο δείκτης ‘o’ σε oscilloscope.

• Στη δεύτερη ομάδα, παρουσιάζεται μία δοκιμή για κάθε δοκίμιο. Για κάθε δοκιμή, παρουσιάζεται όλη η εγγραφή της κυματομορφής της υγιούς ράβδου για κρούση στο δοκίμιο και όλη η εγγραφή της κυματομορφής της διαβρωμένης ράβδου για κρούση στο δοκίμιο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται με την ίδια σειρά οι παραπάνω κυματομορφές τη στιγμή της διαταραχής.

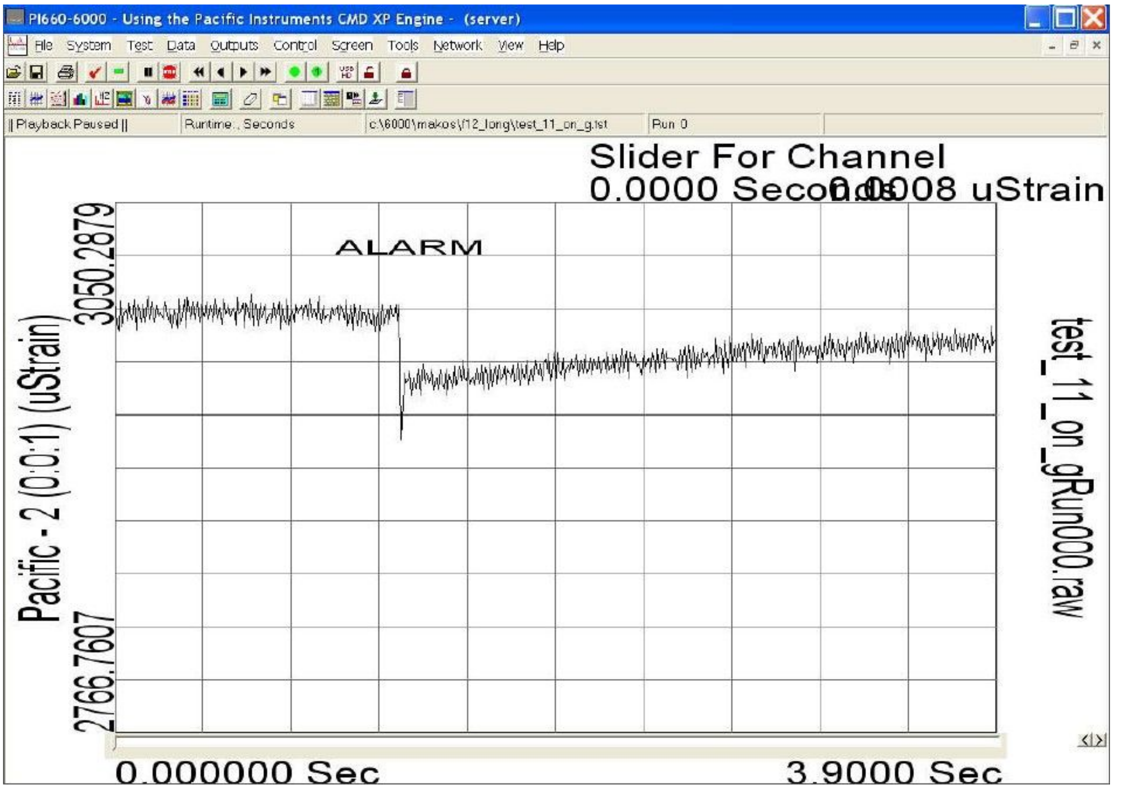
• Στη δεύτερη ομάδα συμπεριλαμβάνονται τα σχήματα 4.25 μέχρι 4.32. Ο δείκτης ‘q’ στην ονομασία του σχήματος αντιστοιχεί σε μορφή διαγράμματος quickplot και ο δείκτης ‘o’ σε oscilloscope.

4.2 Διαγράμματα

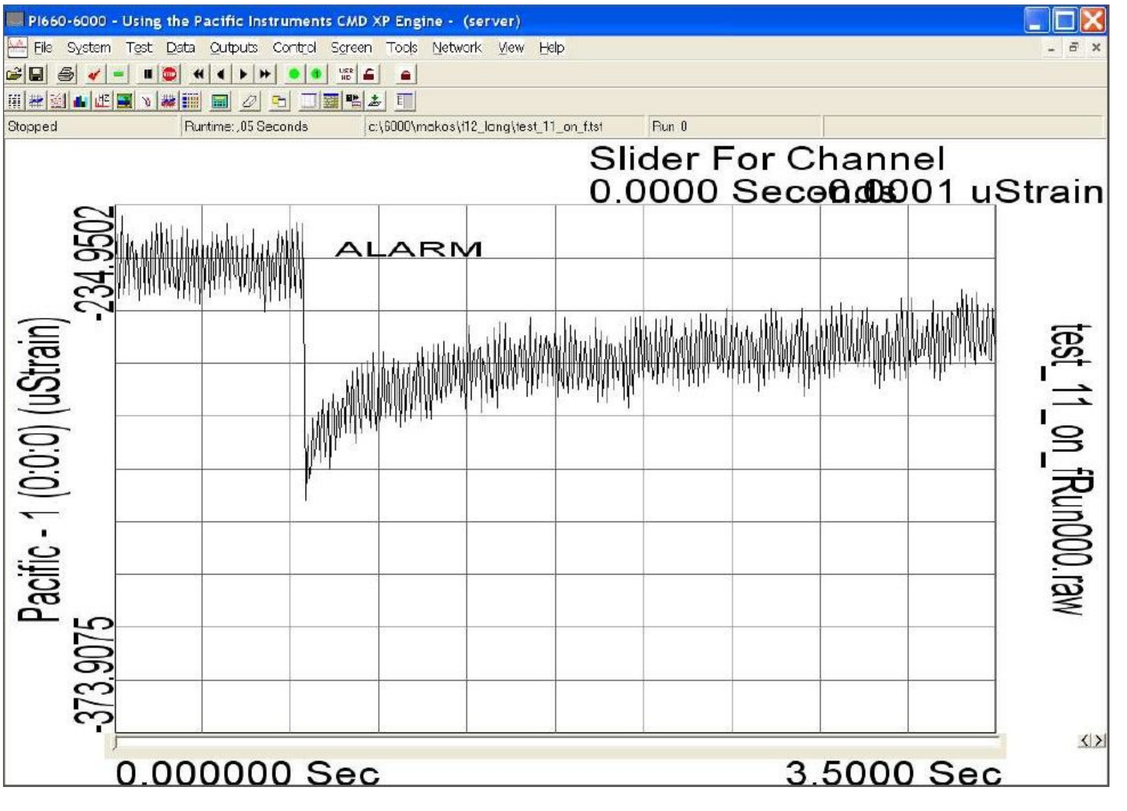
Στα διαγράμματα που παρουσιάζεται όλη η εγγραφή της κυματομορφής (quickplot, σχήματα με δείκτη ‘q’), ο οριζόντιος άξονας έχει τιμές πραγματικού χρόνου καταγραφής και ο κατακόρυφος άξονας τιμές παραμορφώσεων (σχετική κλίμακα).

Στα διαγράμματα που παρουσιάζεται η κυματομορφή τη στιγμή της διαταραχής (oscilloscope, σχήματα με δείκτη ‘o’), ο οριζόντιος άξονας έχει τιμές χρόνου, τάξης μεγέθους μερικών msec, ώστε να αποτυπωθεί αναλυτικότερα η διαταραχή λόγω της κρουστικής καταπόνησης, ενώ ο κατακόρυφος άξονας έχει τιμές παραμορφώσεων. Στα διαγράμματα αυτού του τύπου, δίνεται από το λογισμικό η δυνατότητα ανάγνωσης της τιμής της παραμόρφωσης μέσω του κέρσορα που εμφανίζεται στο κάτω τμήμα του διαγράμματος. Έτσι, στα διαγράμματα αυτά ο κέρσορας έχει μετακινηθεί στο σημείο όπου παρατηρείται η μέγιστη παραμόρφωση λόγω της κρουστικής καταπόνησης.

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 11

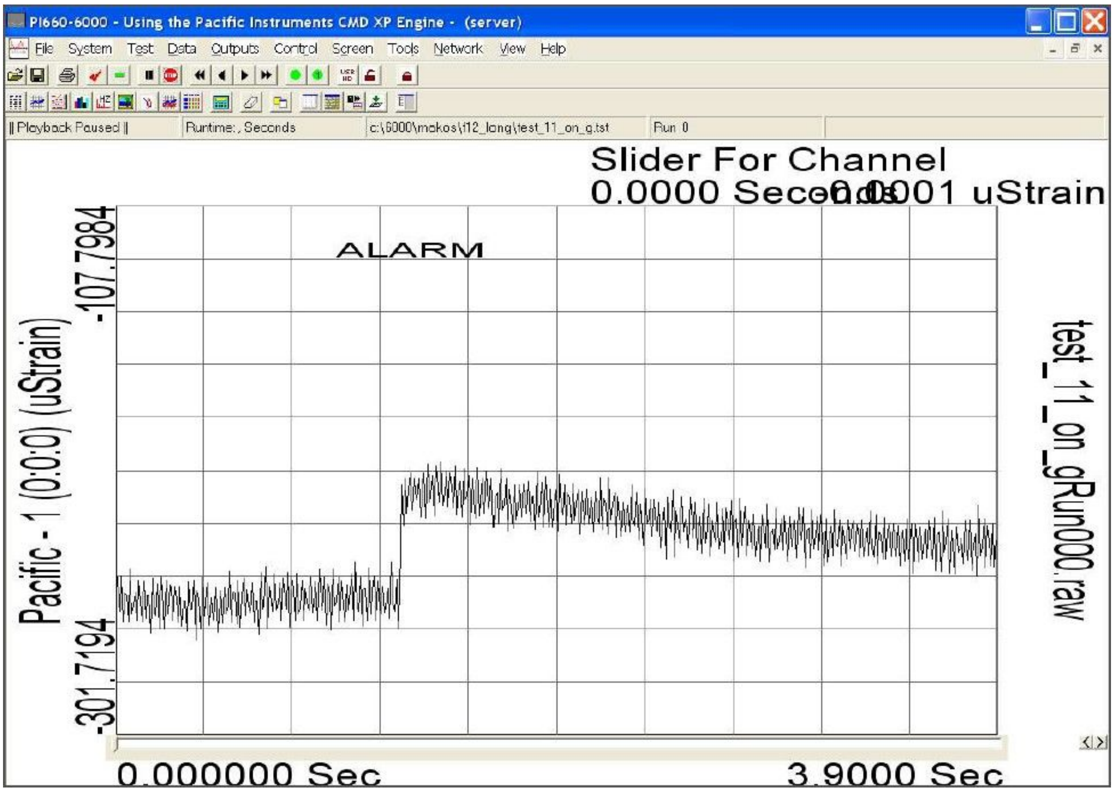


Σχ. 4.1q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

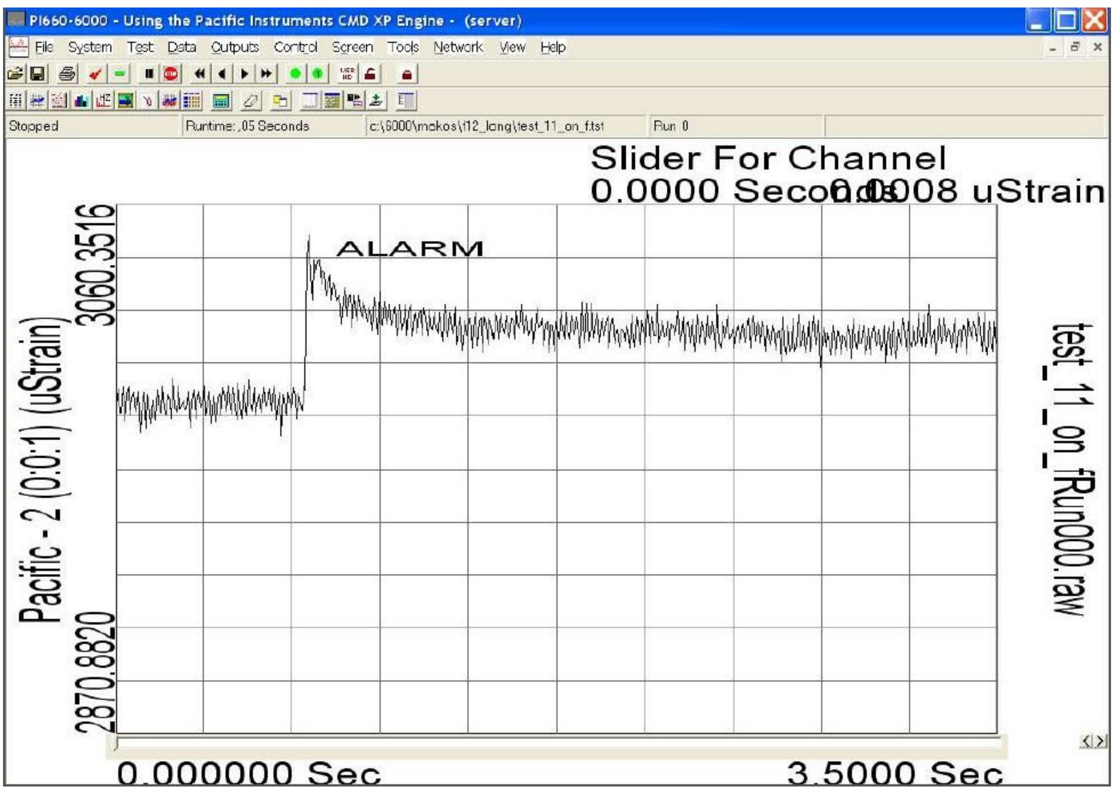


Σχ. 4.2q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 11

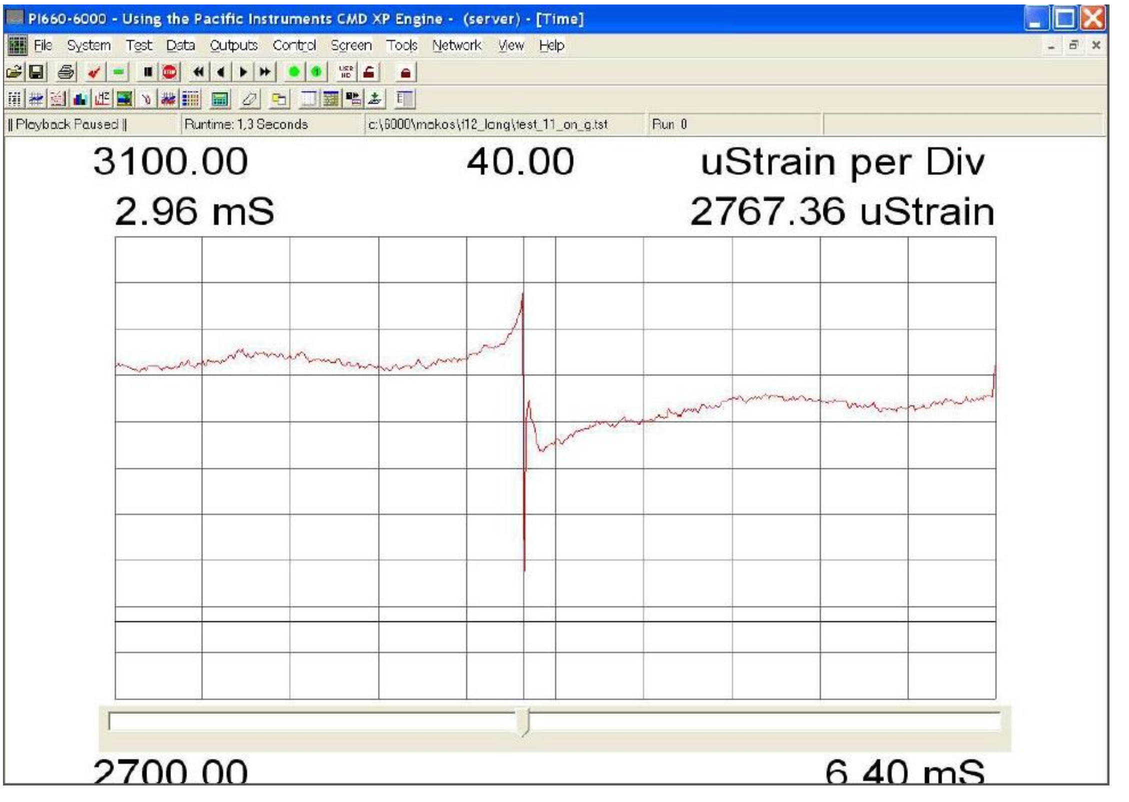


Σχ. 4.3q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

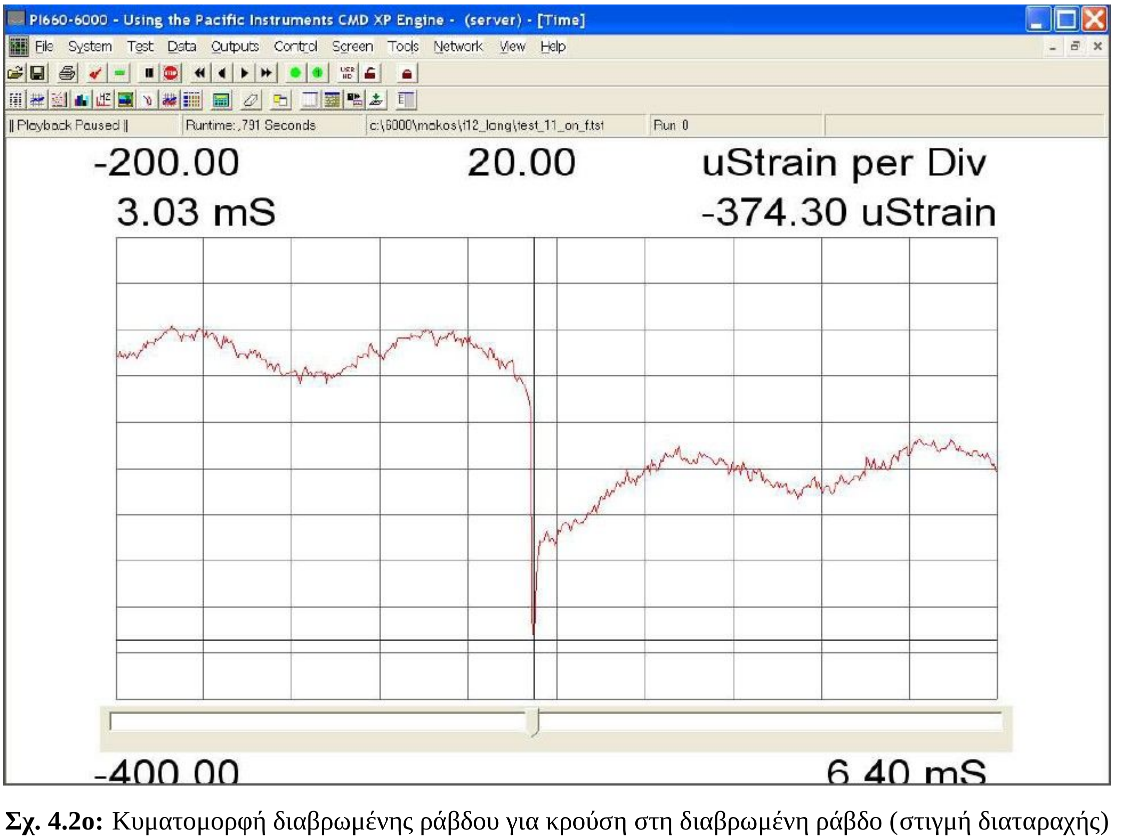


Σχ. 4.4q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 11

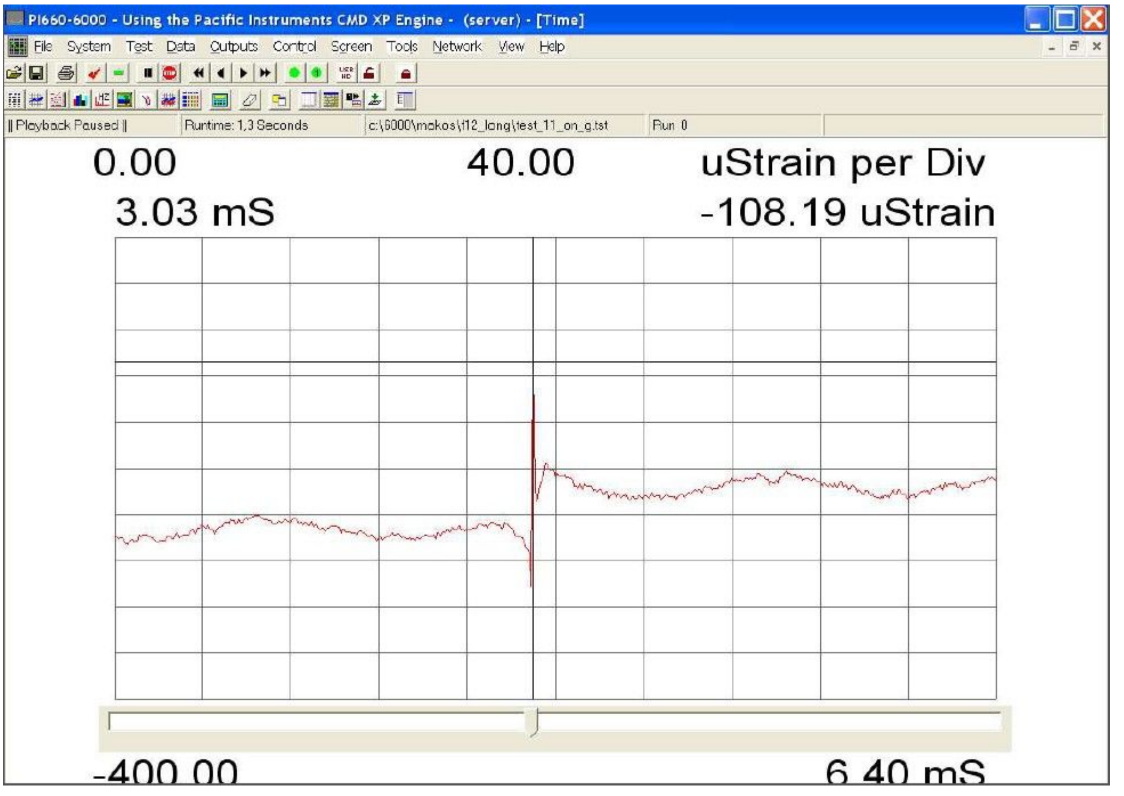


Σχ. 4.1ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

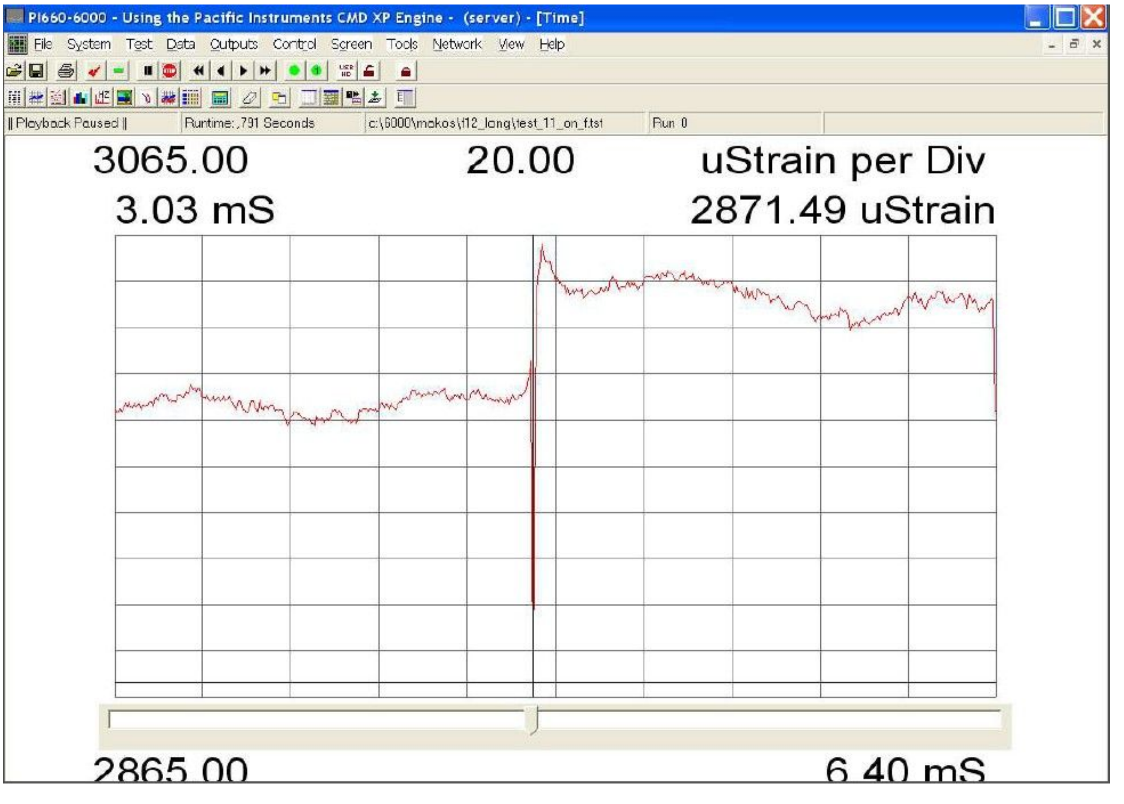


Σχ. 4.2ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 11

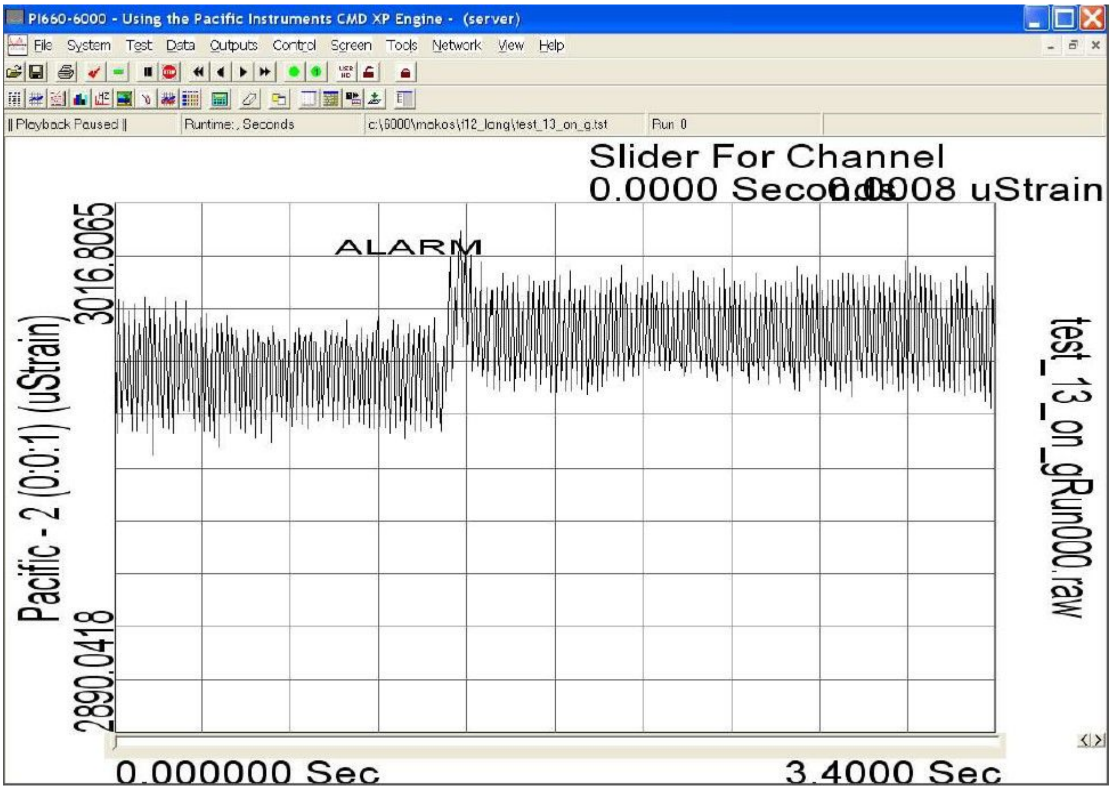


Σχ. 4.3ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

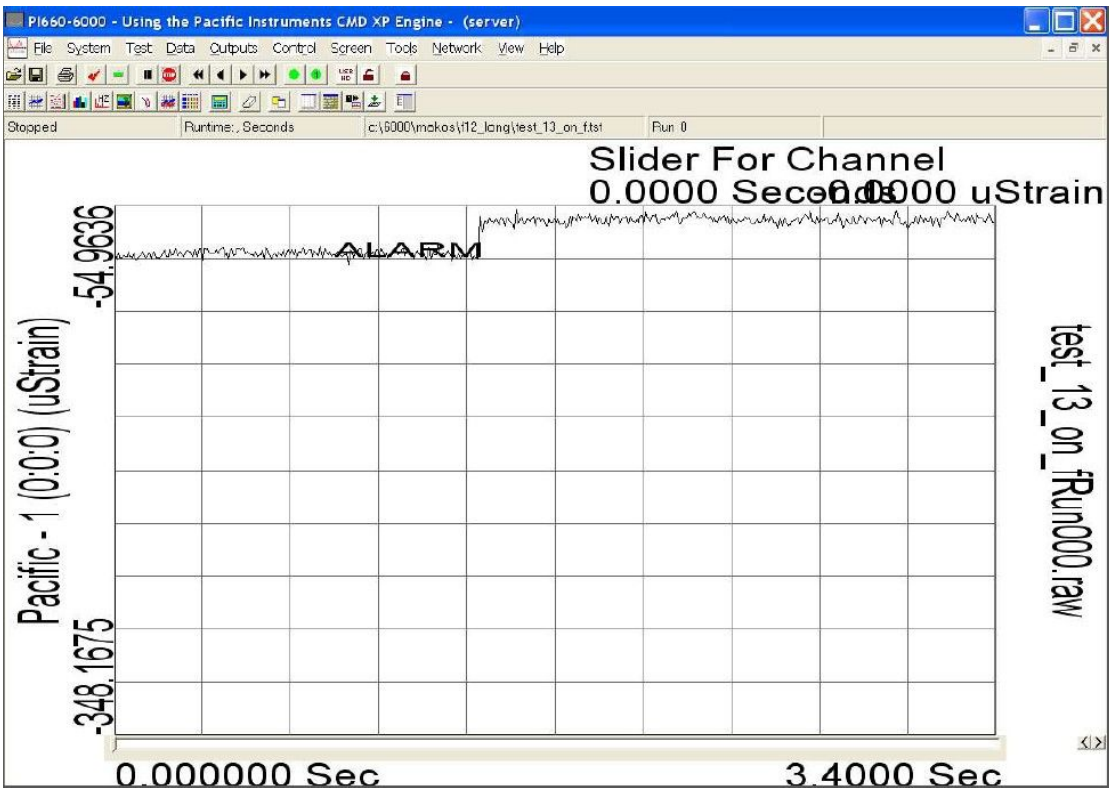


Σχ. 4.4ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 13

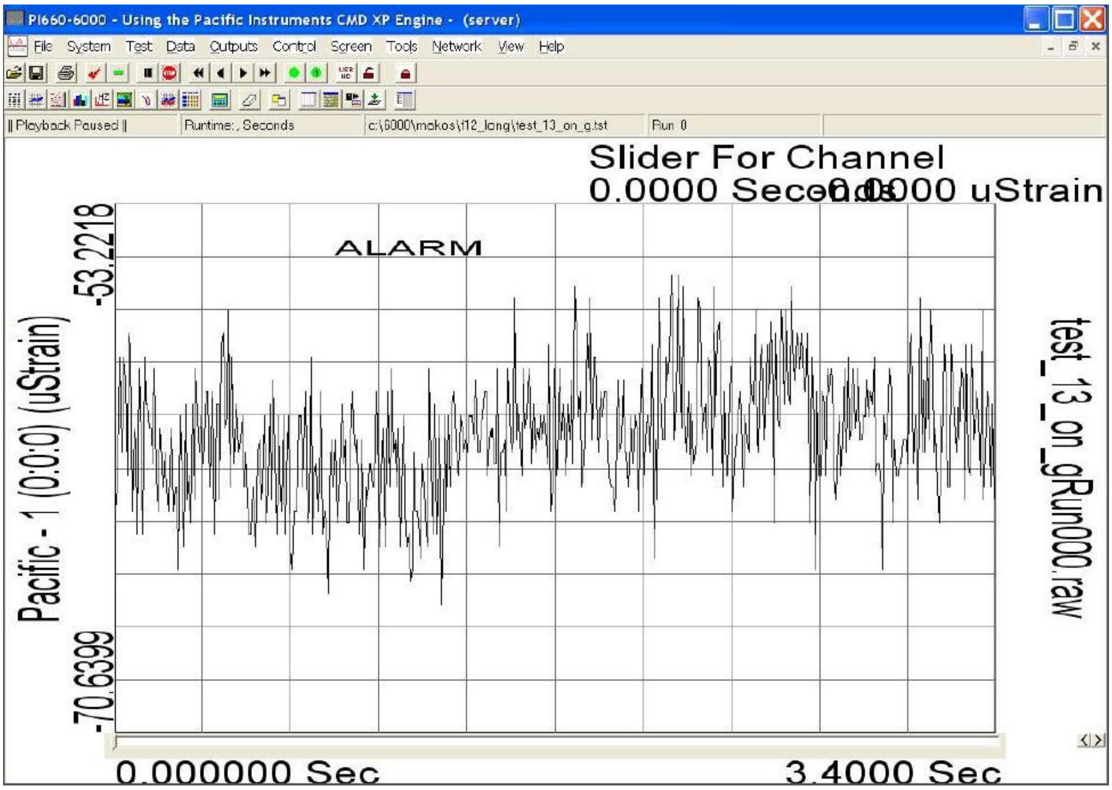


Σχ. 4.5q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

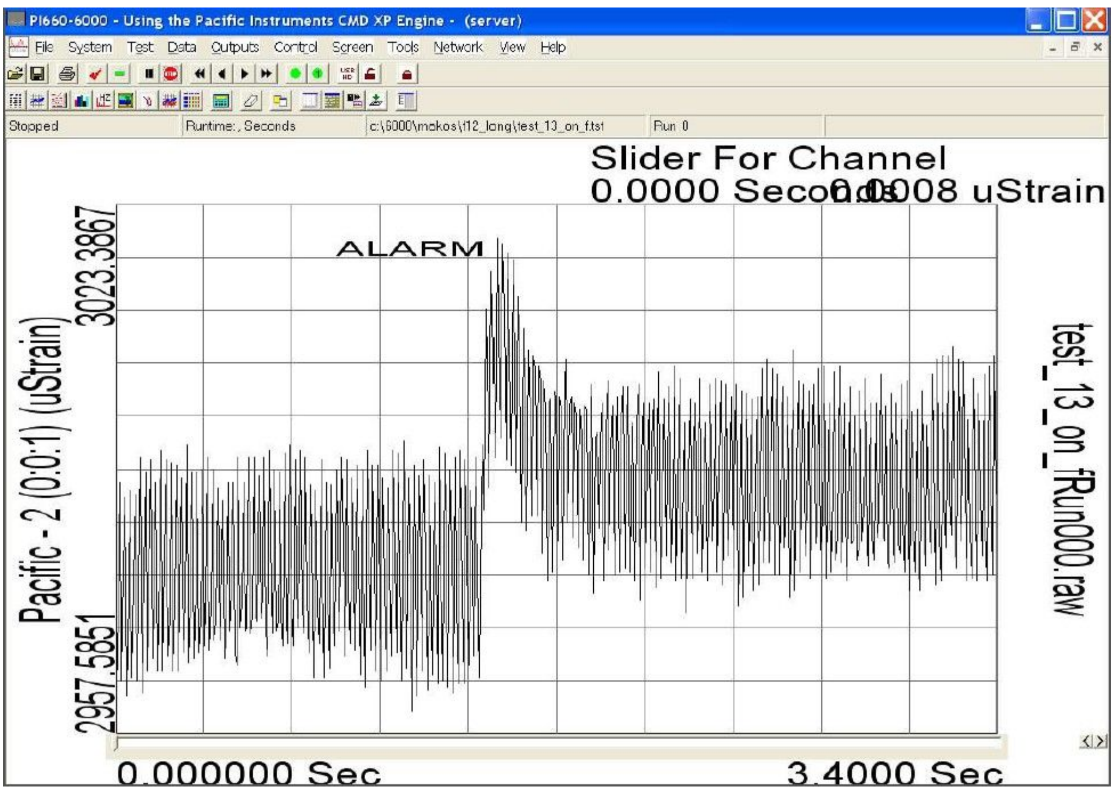


Σχ. 4.6q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 13

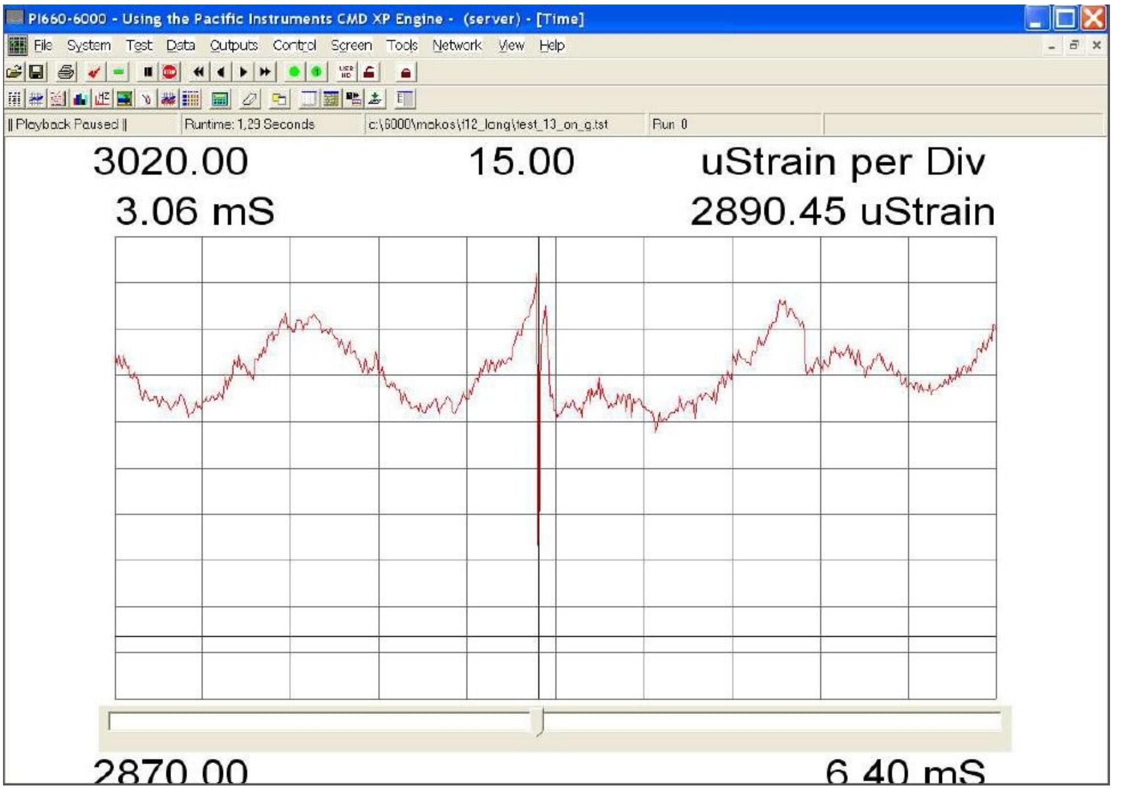


Σχ. 4.7q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

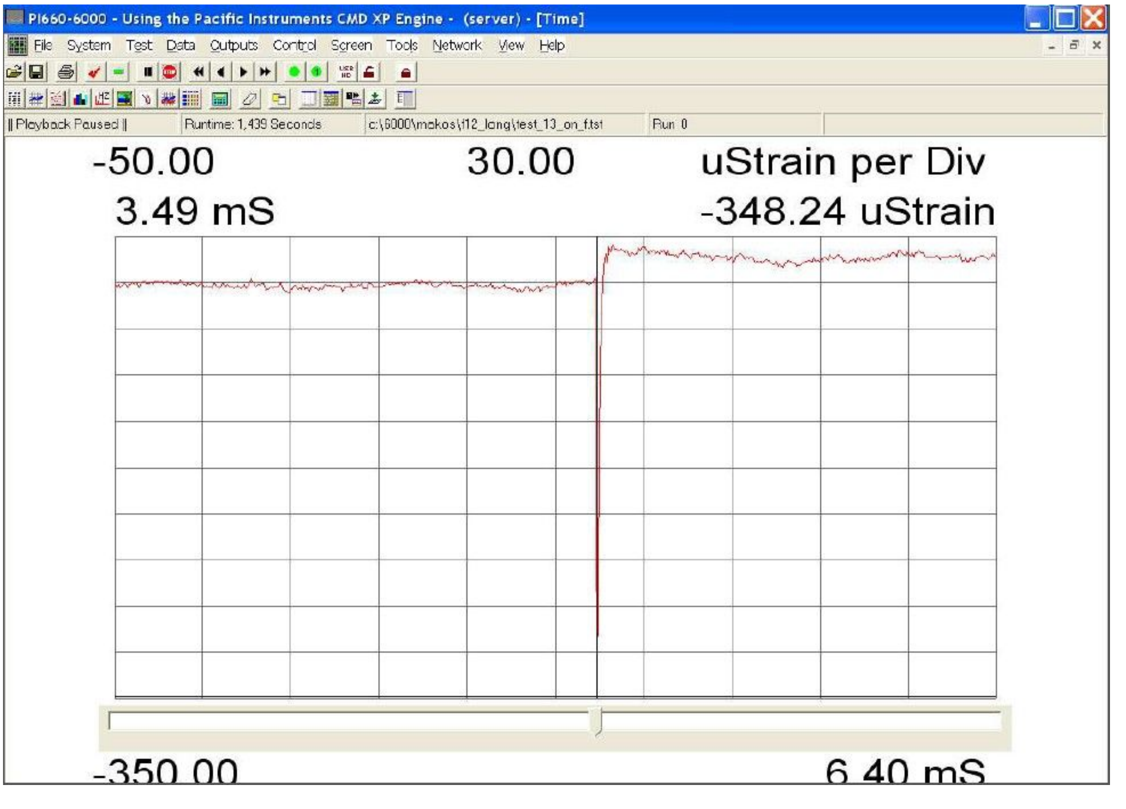


Σχ. 4.8q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 13

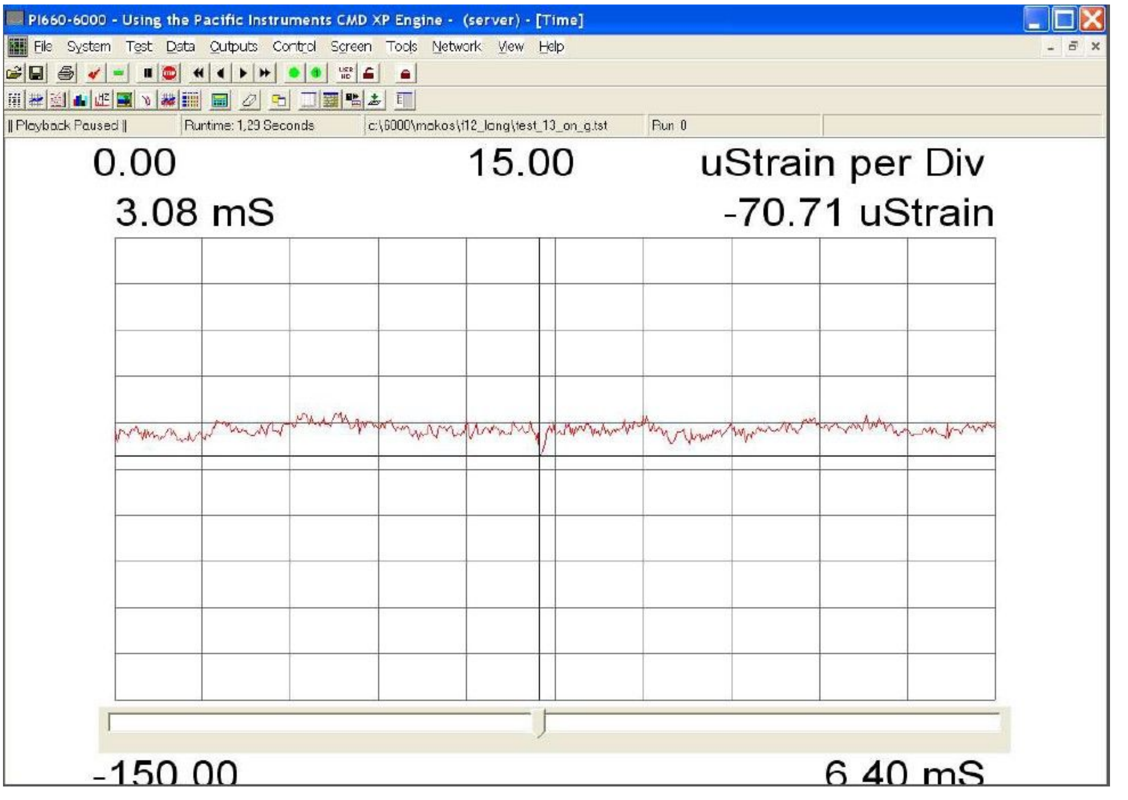


Σχ. 4.5ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

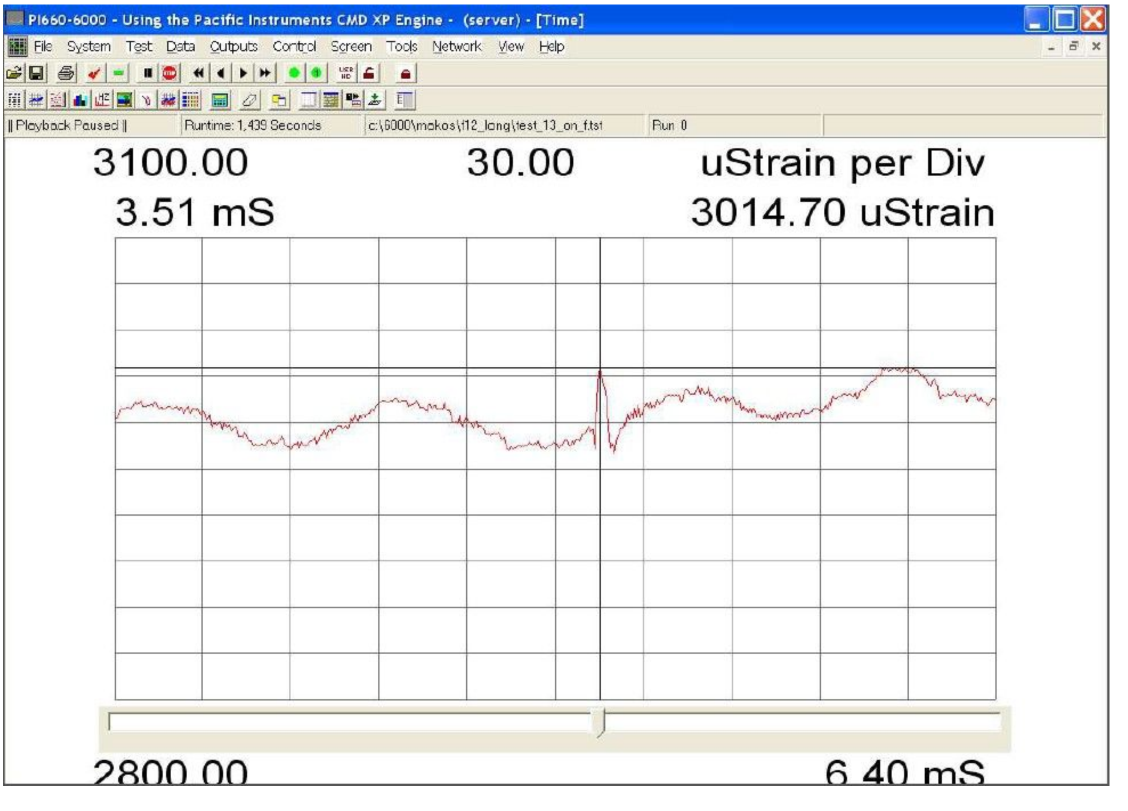


Σχ. 4.6ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 13

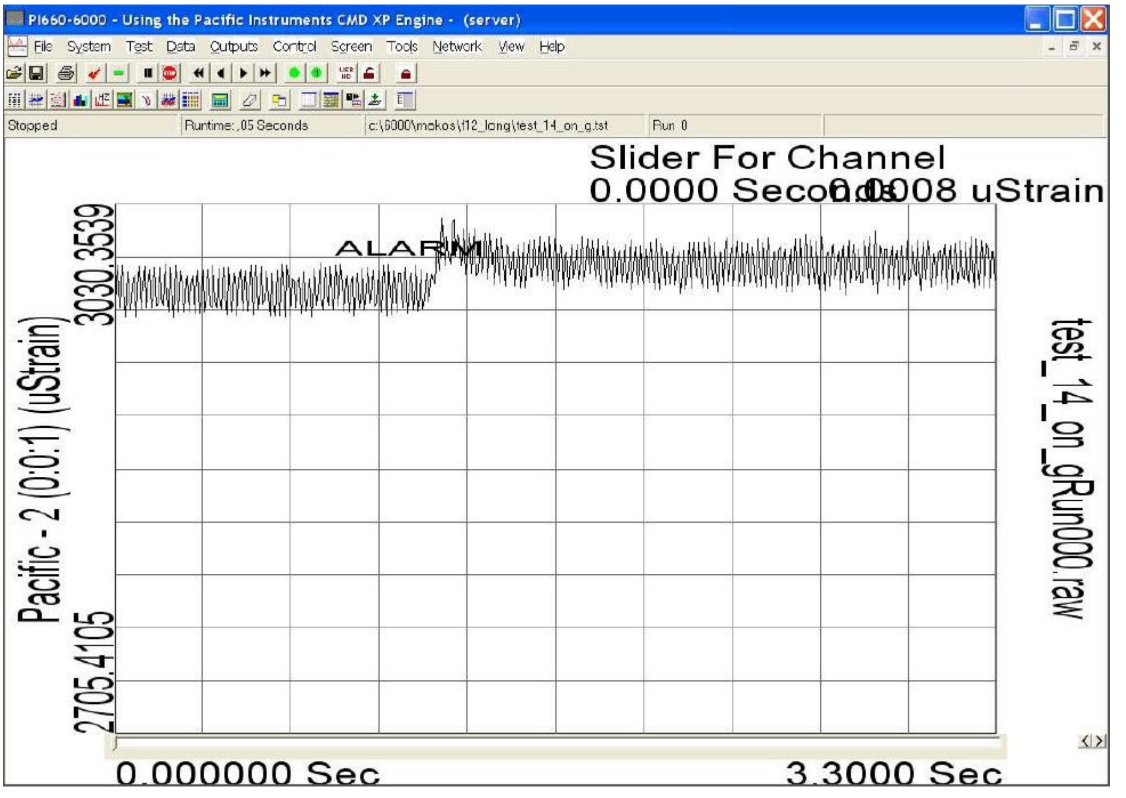


Σχ. 4.7ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

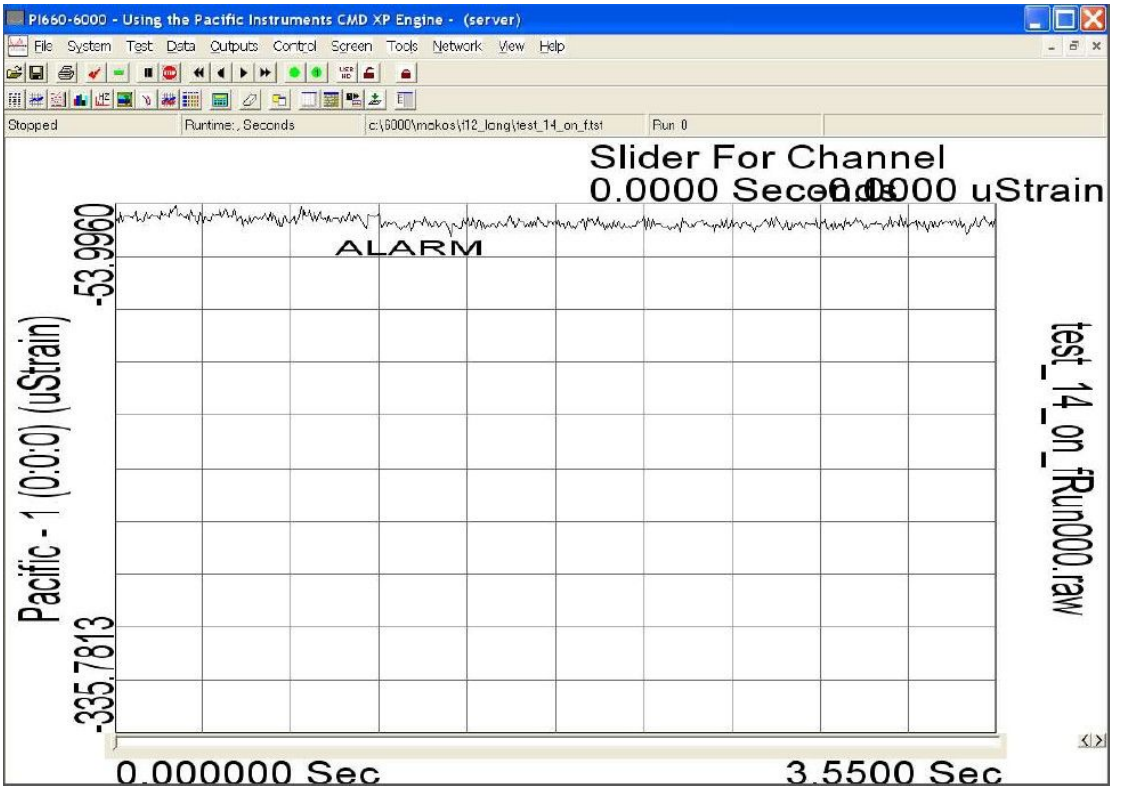


Σχ. 4.8ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 14

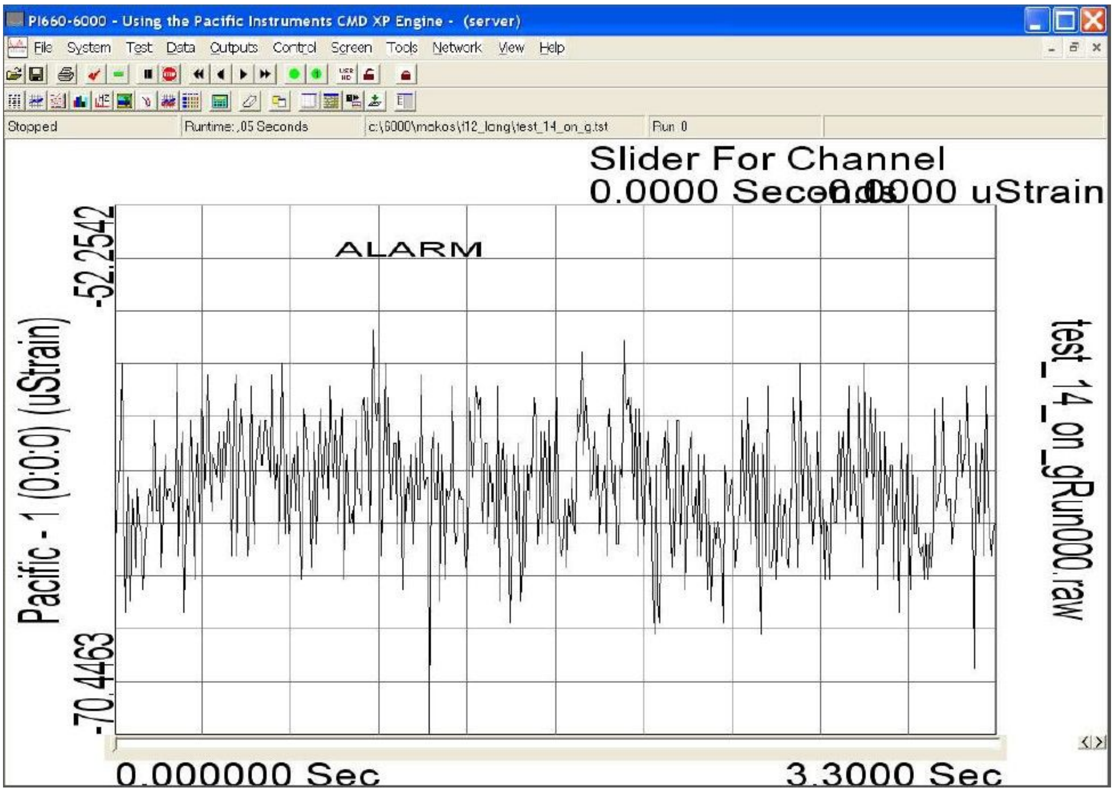


Σχ. 4.9q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

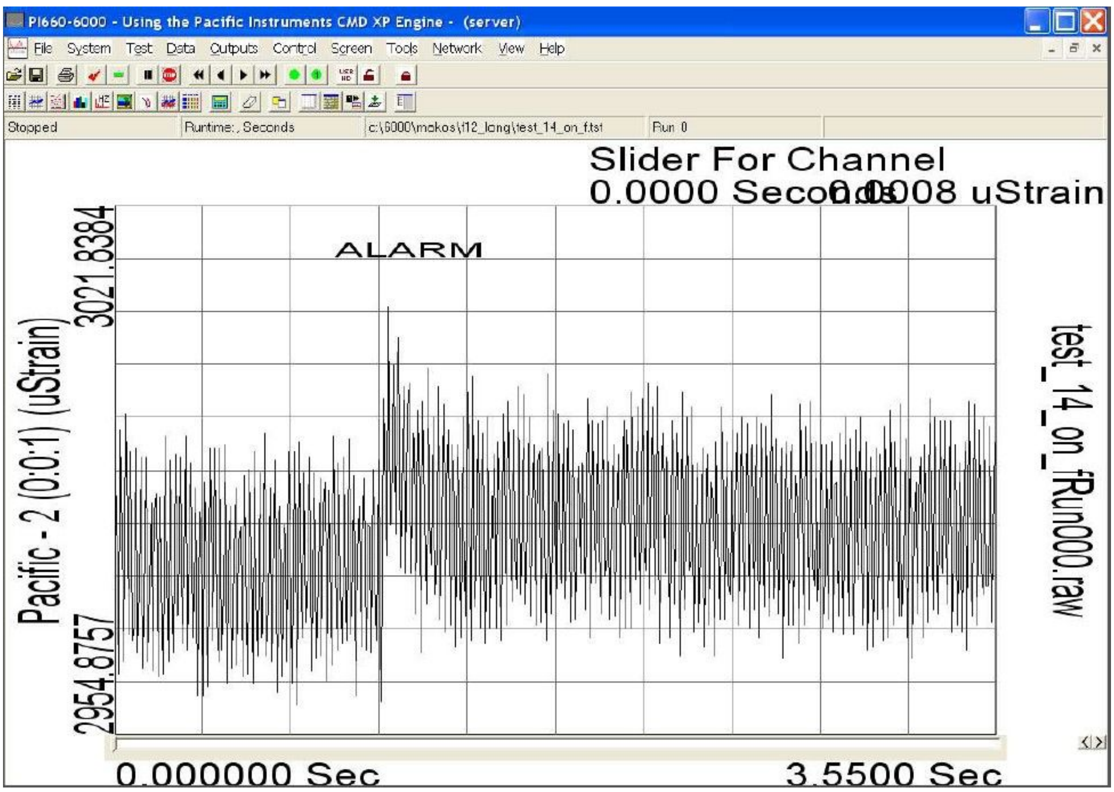


Σχ. 4.10q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 14

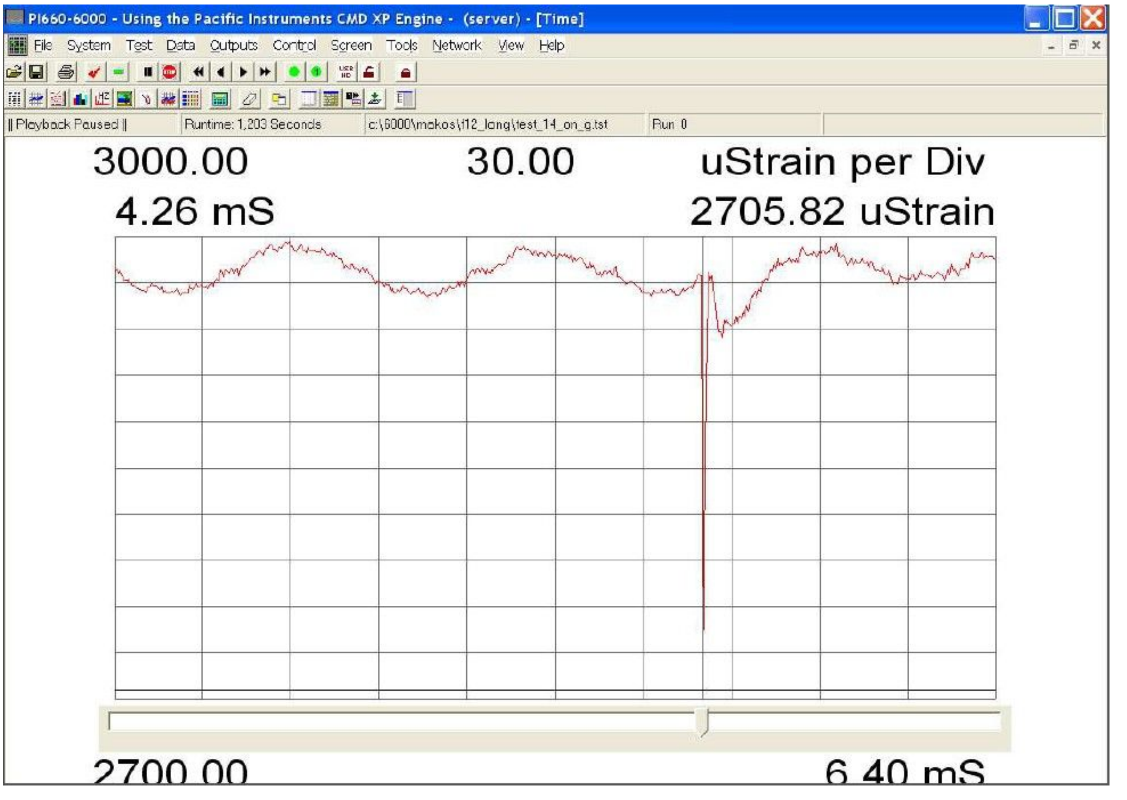


Σχ. 4.11q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

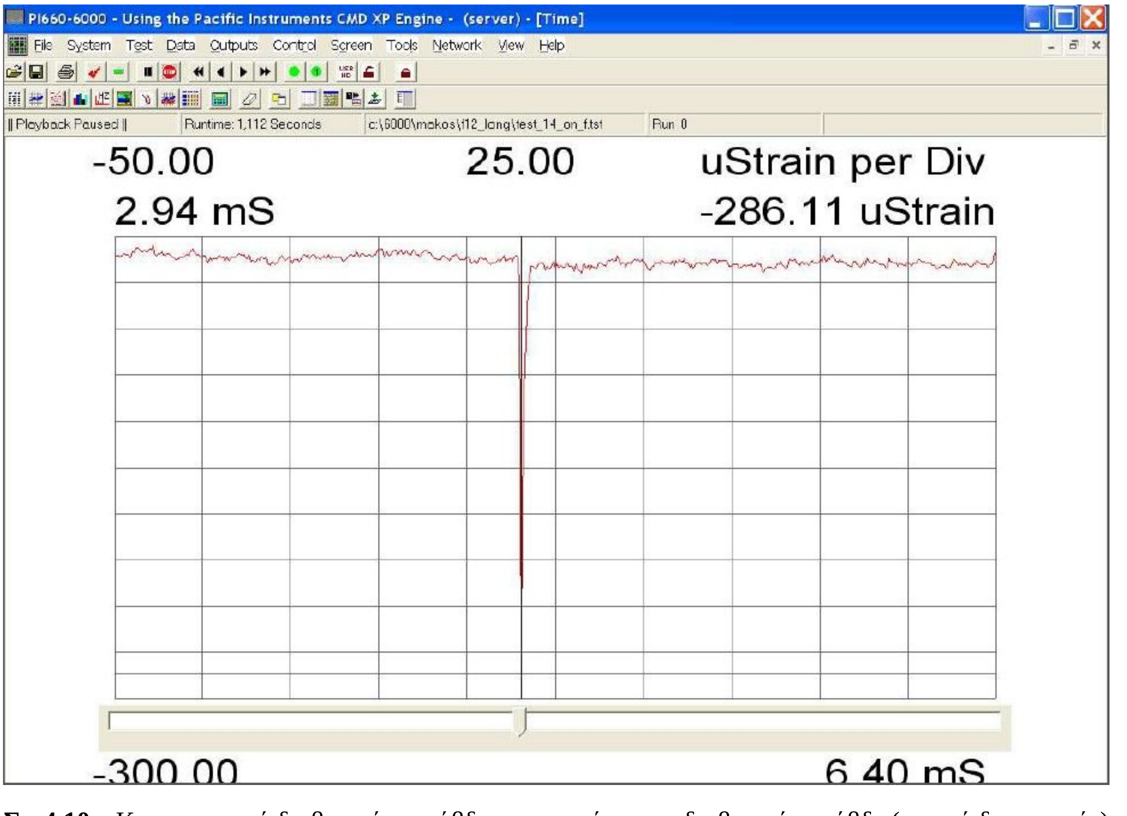


Σχ. 4.12q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 14

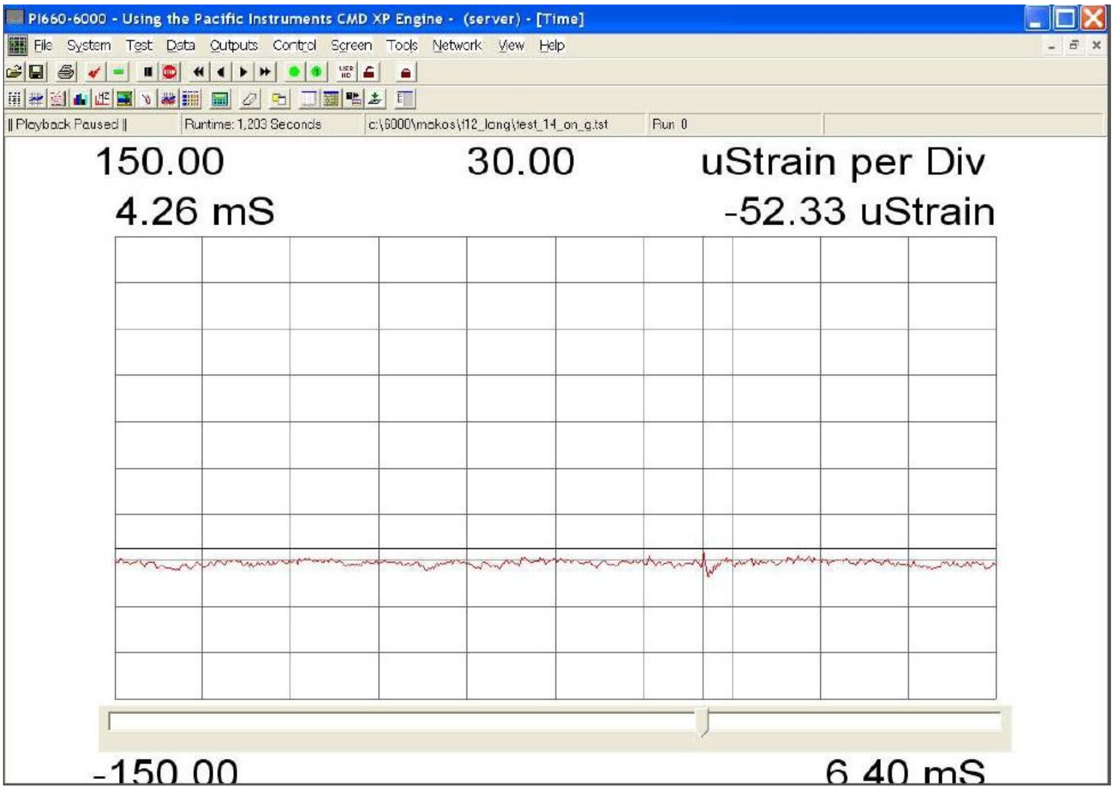


Σχ. 4.9ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

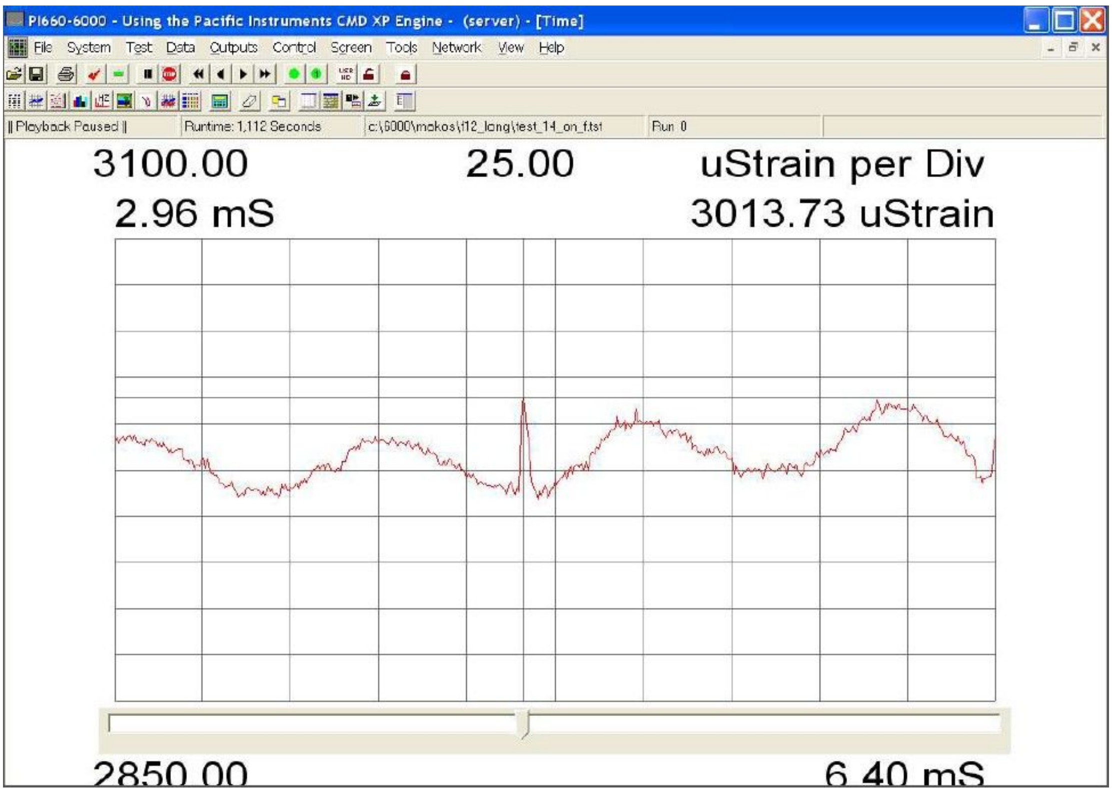


Σχ. 4.10ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 14

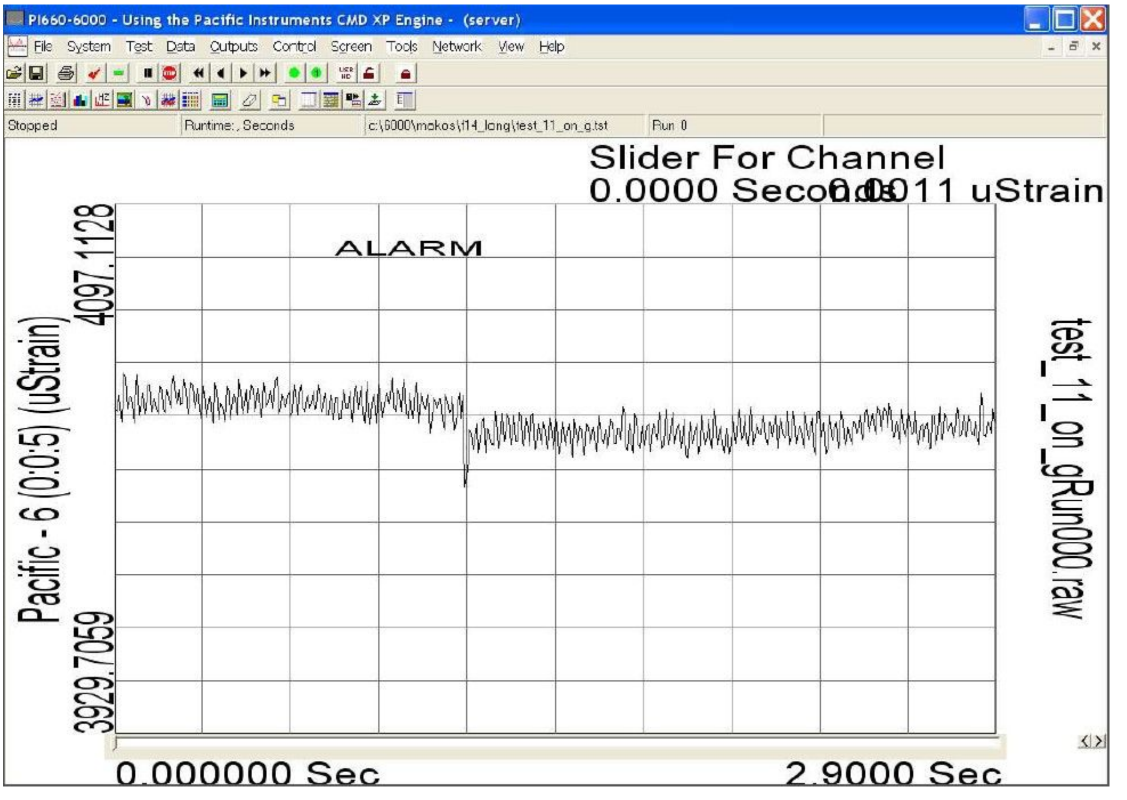


Σχ. 4.11ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

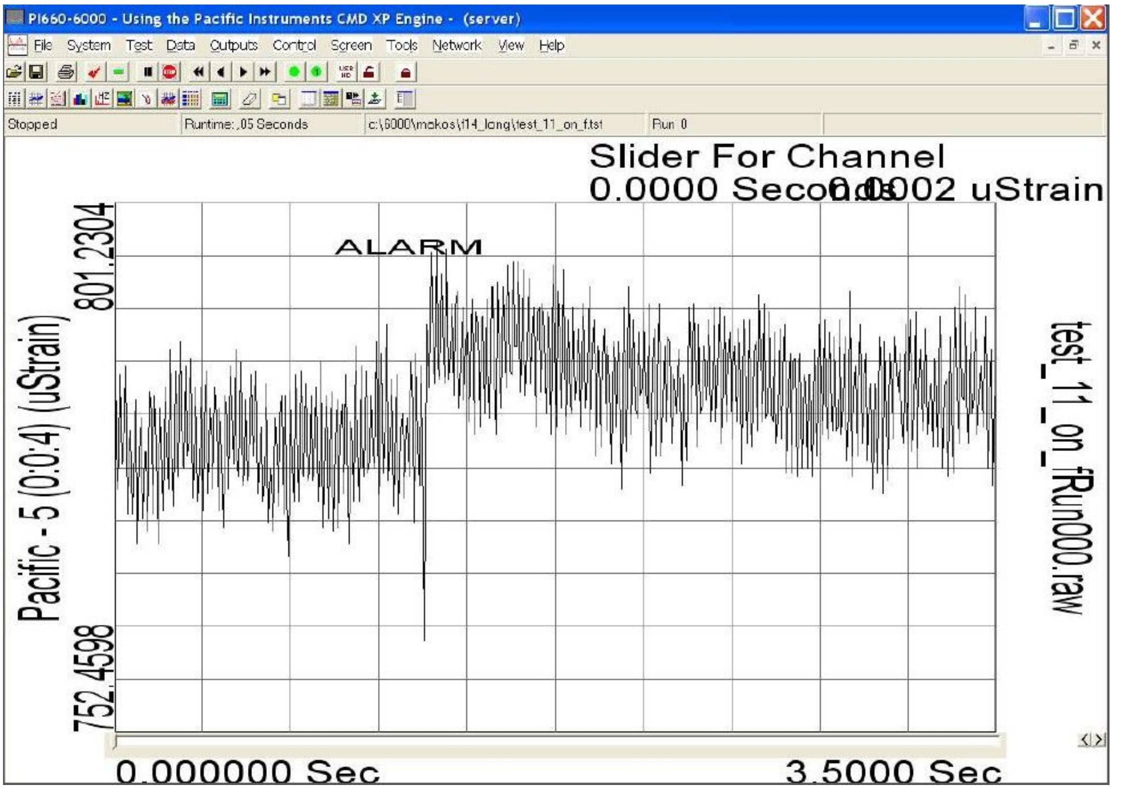


Σχ. 4.12ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 11

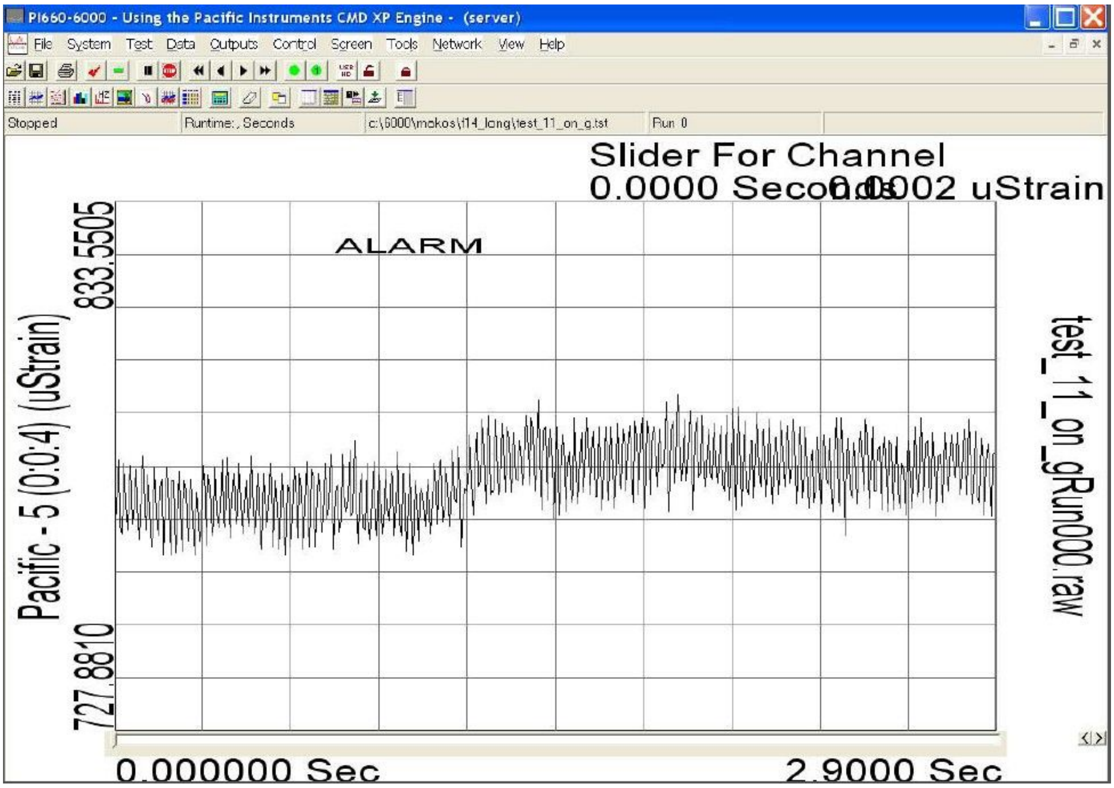


Σχ. 4.13q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

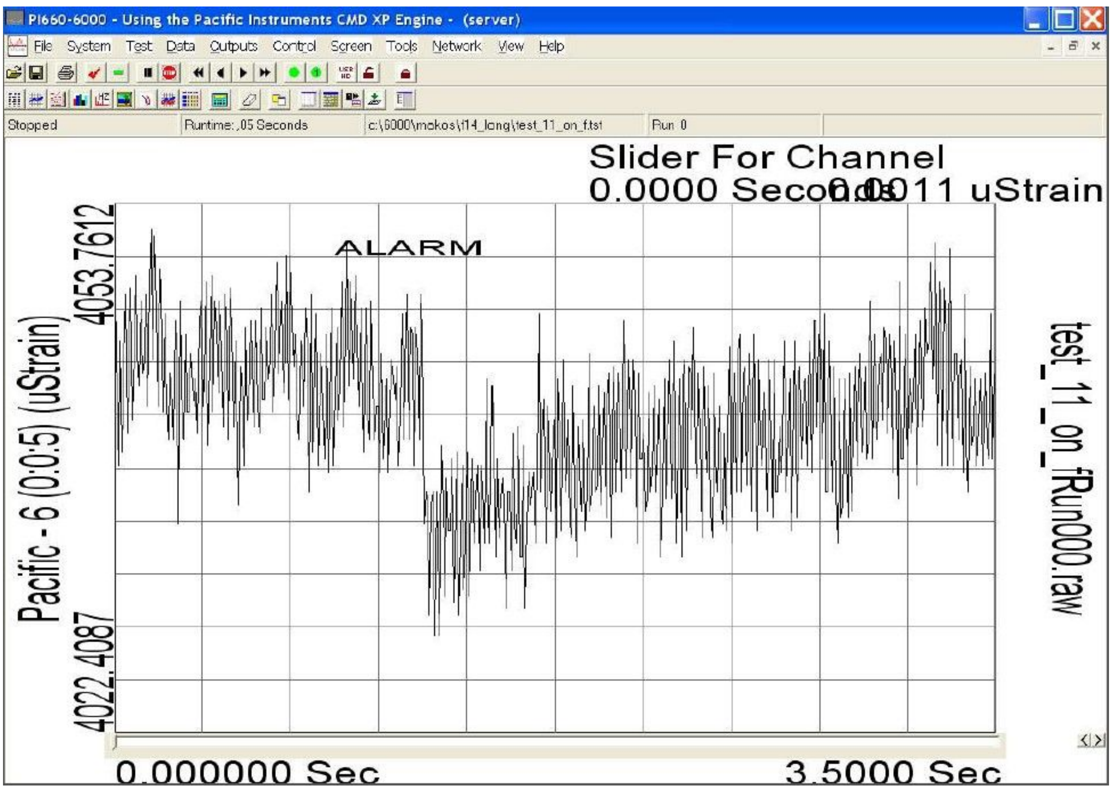


Σχ. 4.14q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 11

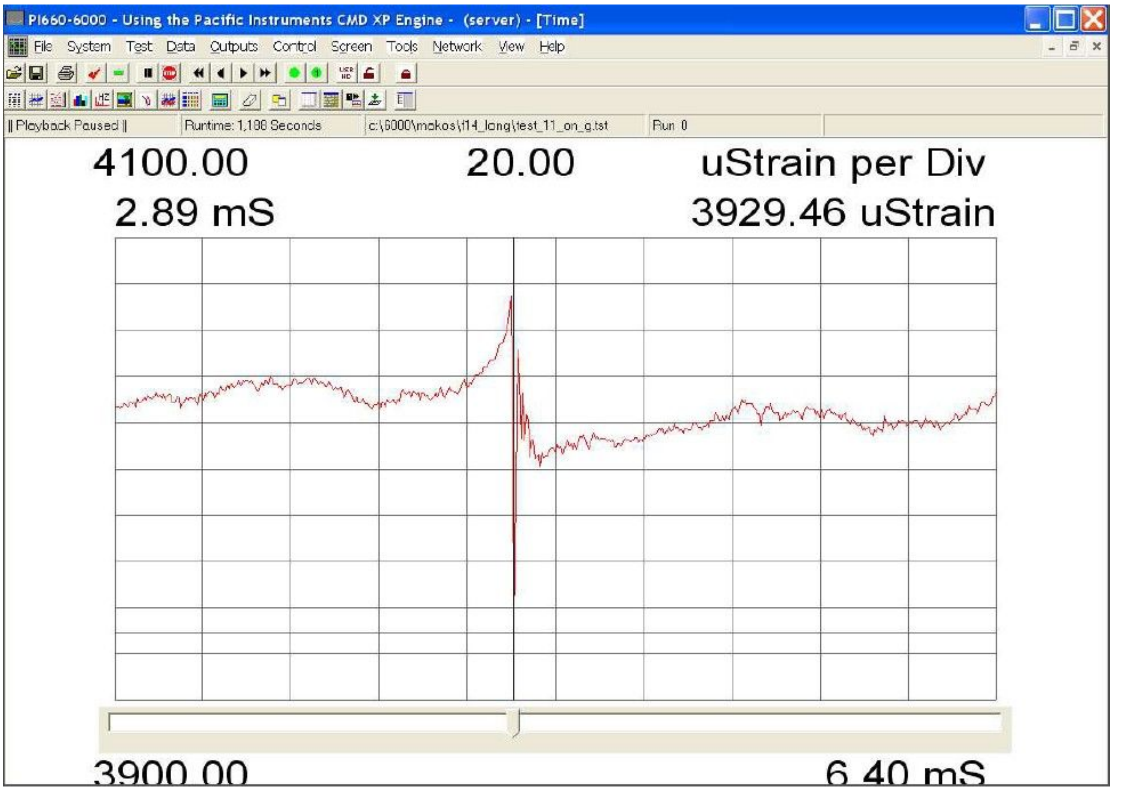


Σχ. 4.15q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

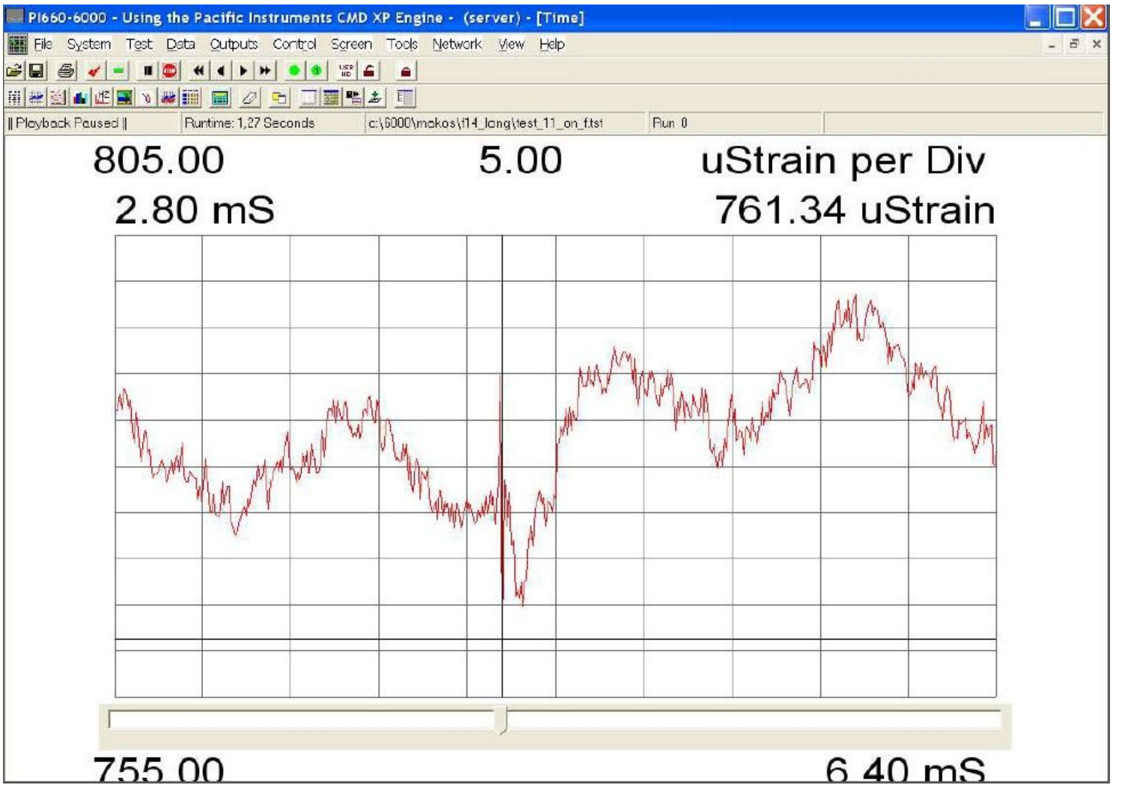


Σχ. 4.16q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 11

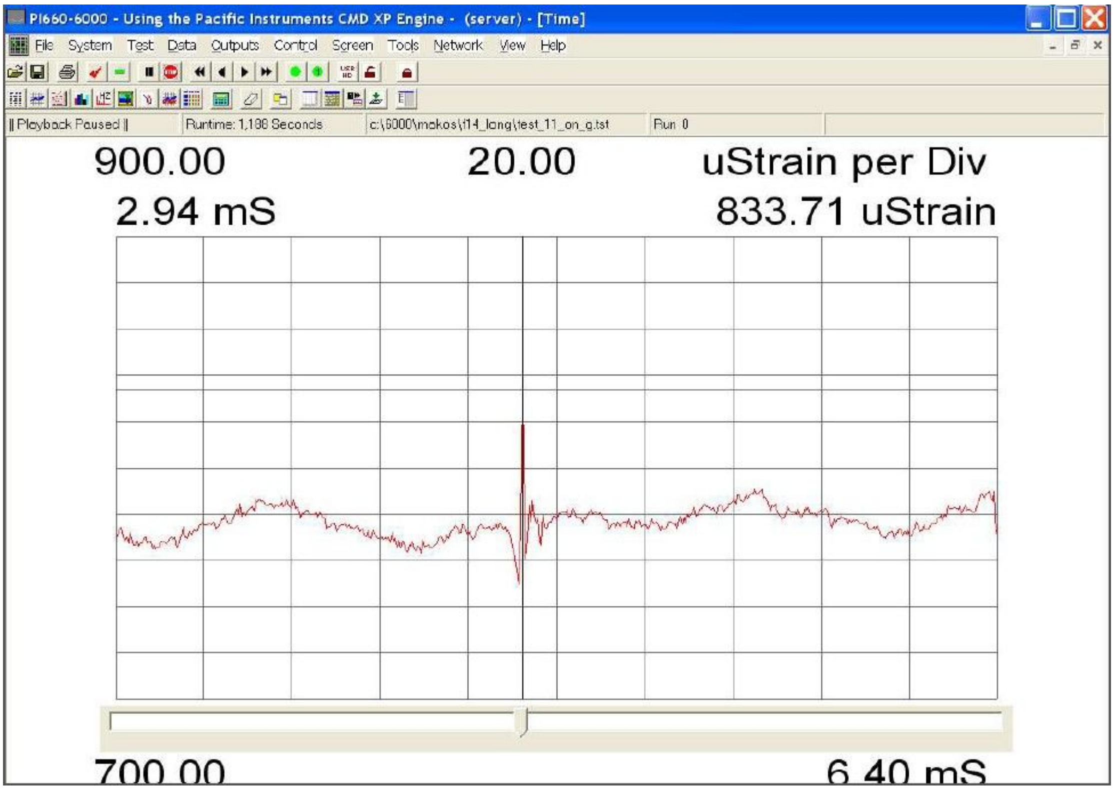


Σχ. 4.13ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

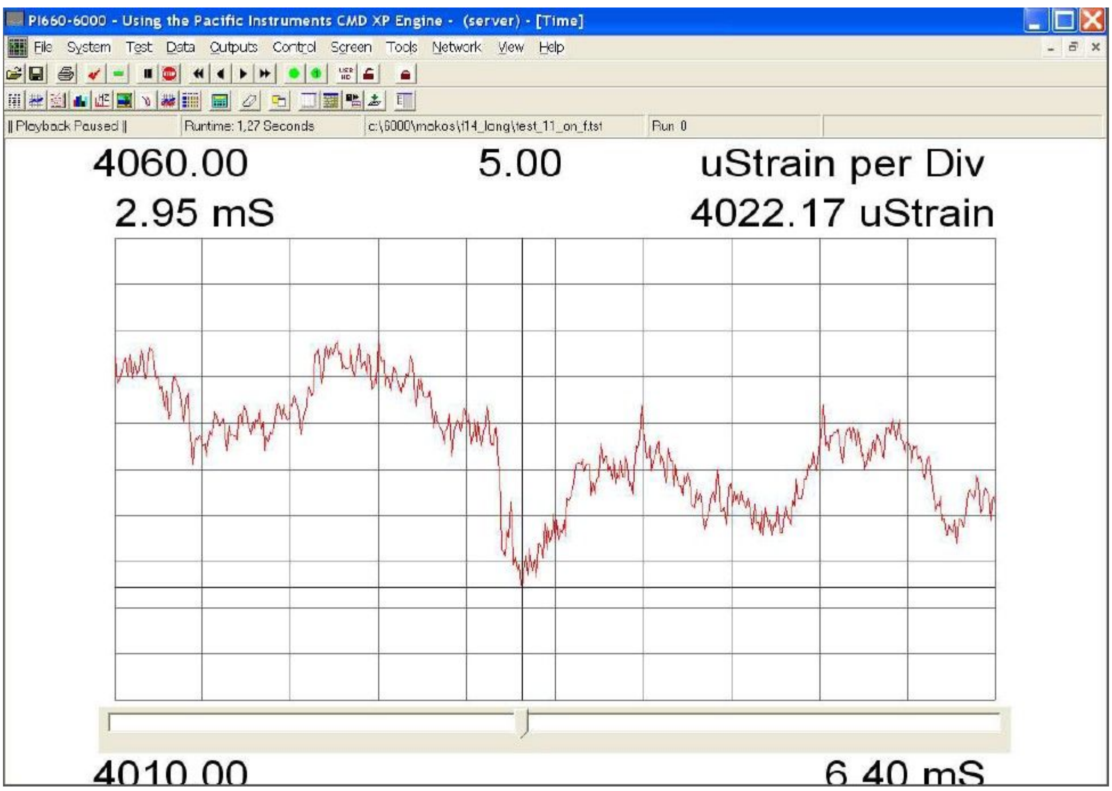


Σχ. 4.14ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 11

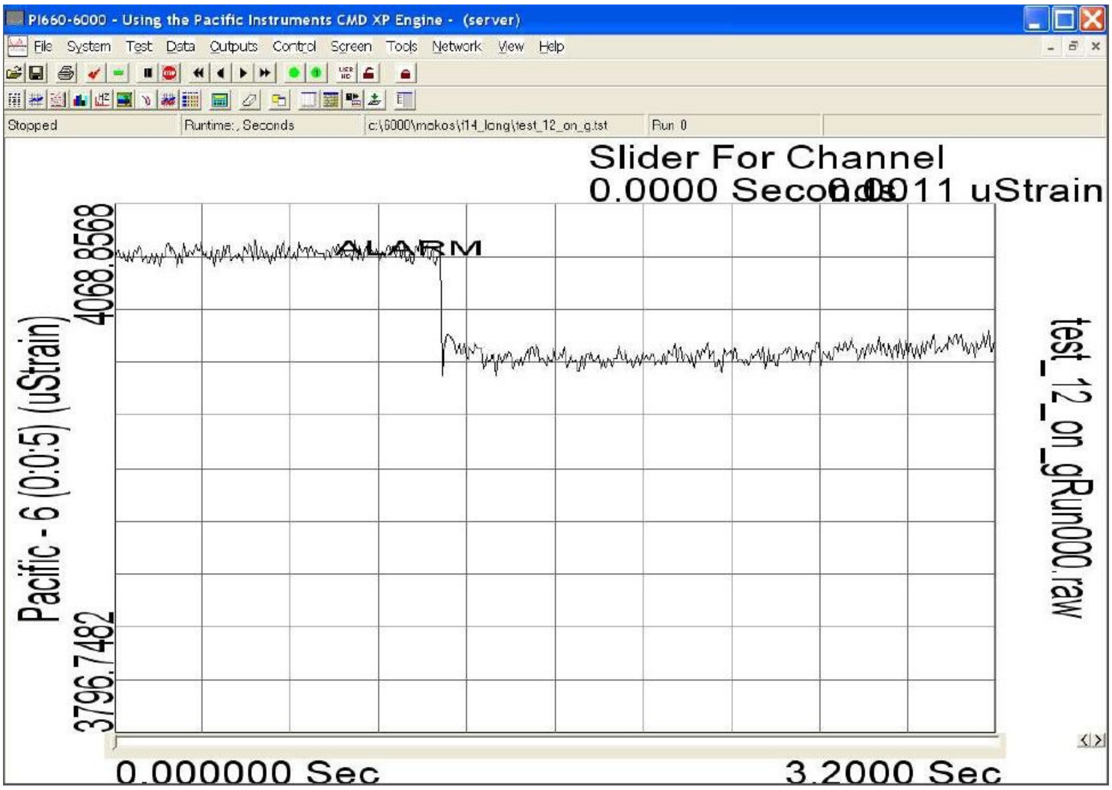


Σχ. 4.15ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

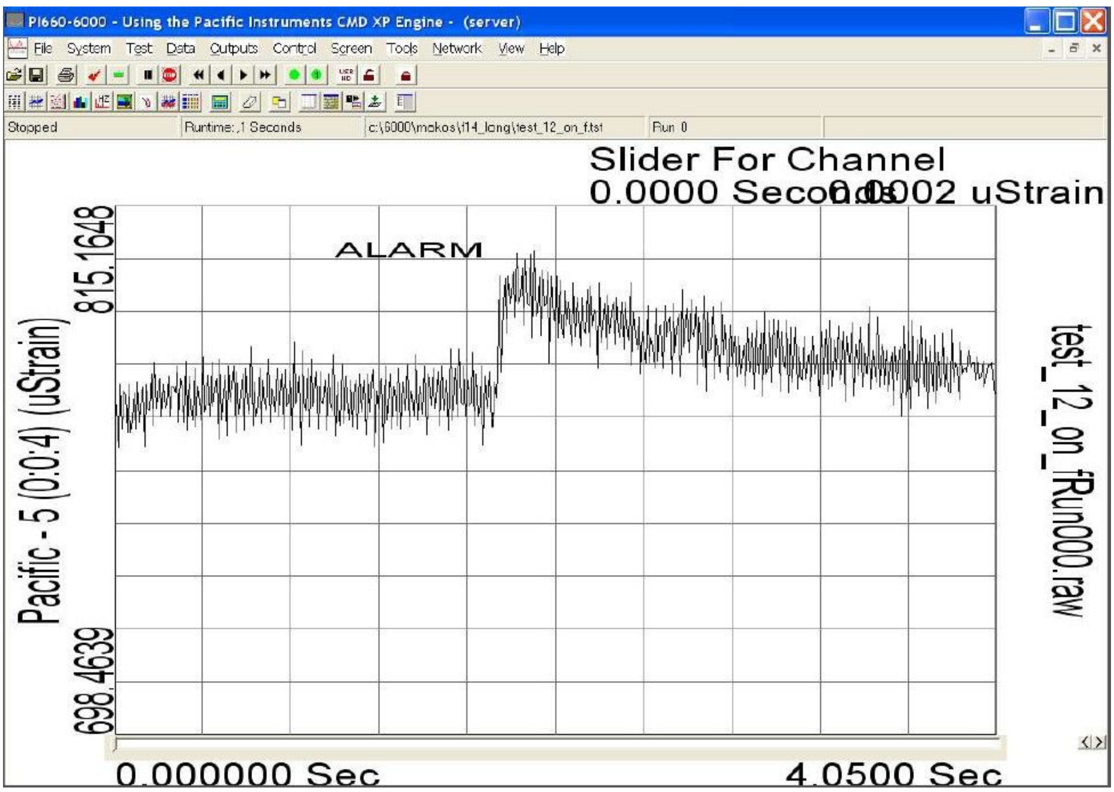


Σχ. 4.16ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 12

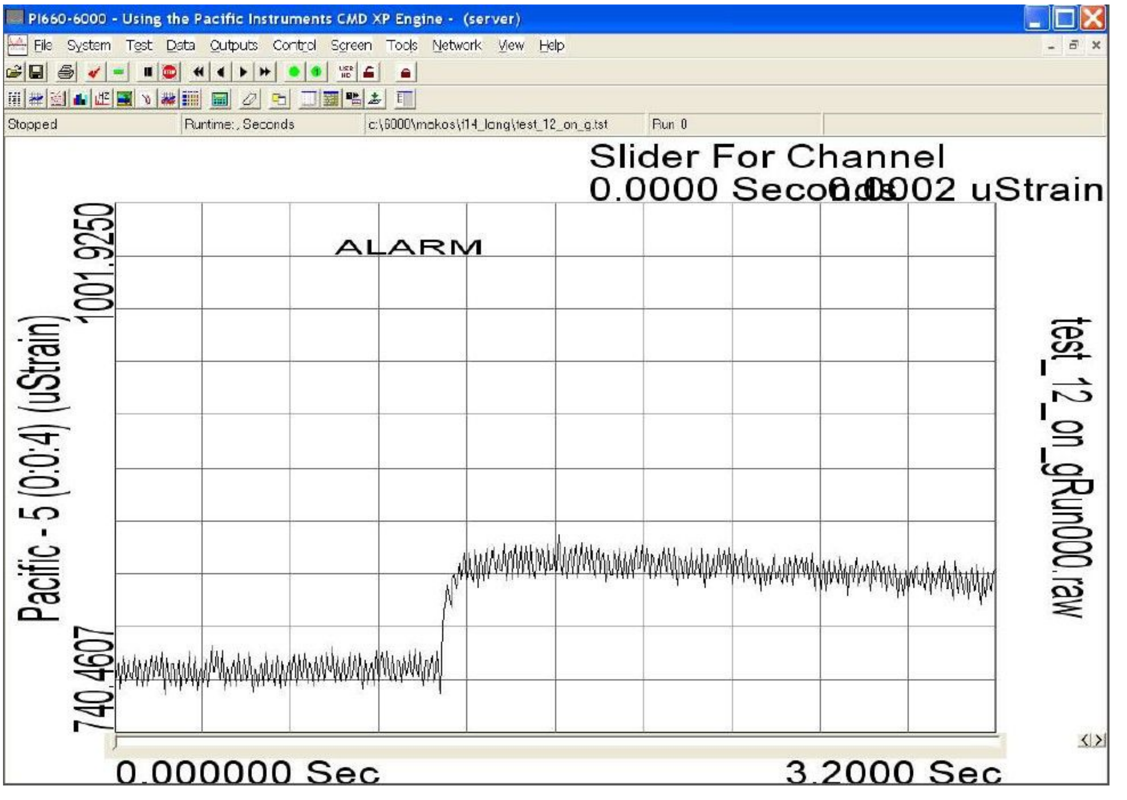


Σχ. 4.17q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

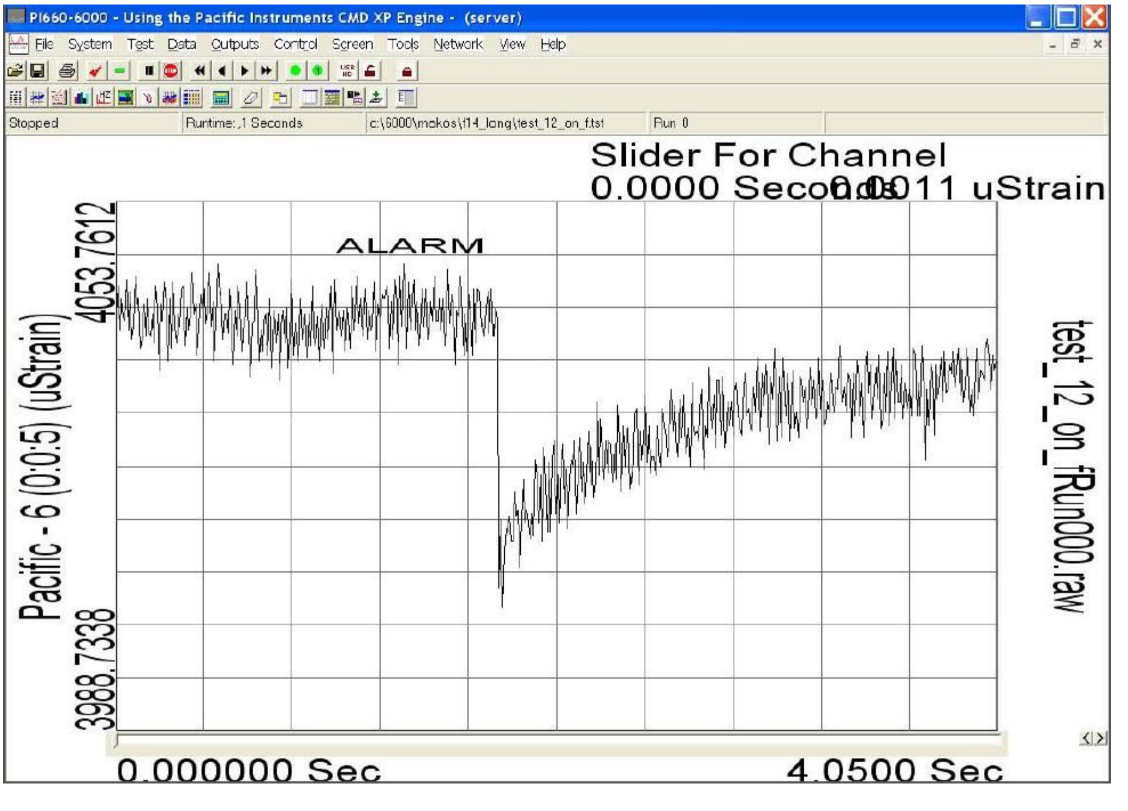


Σχ. 4.18q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 12

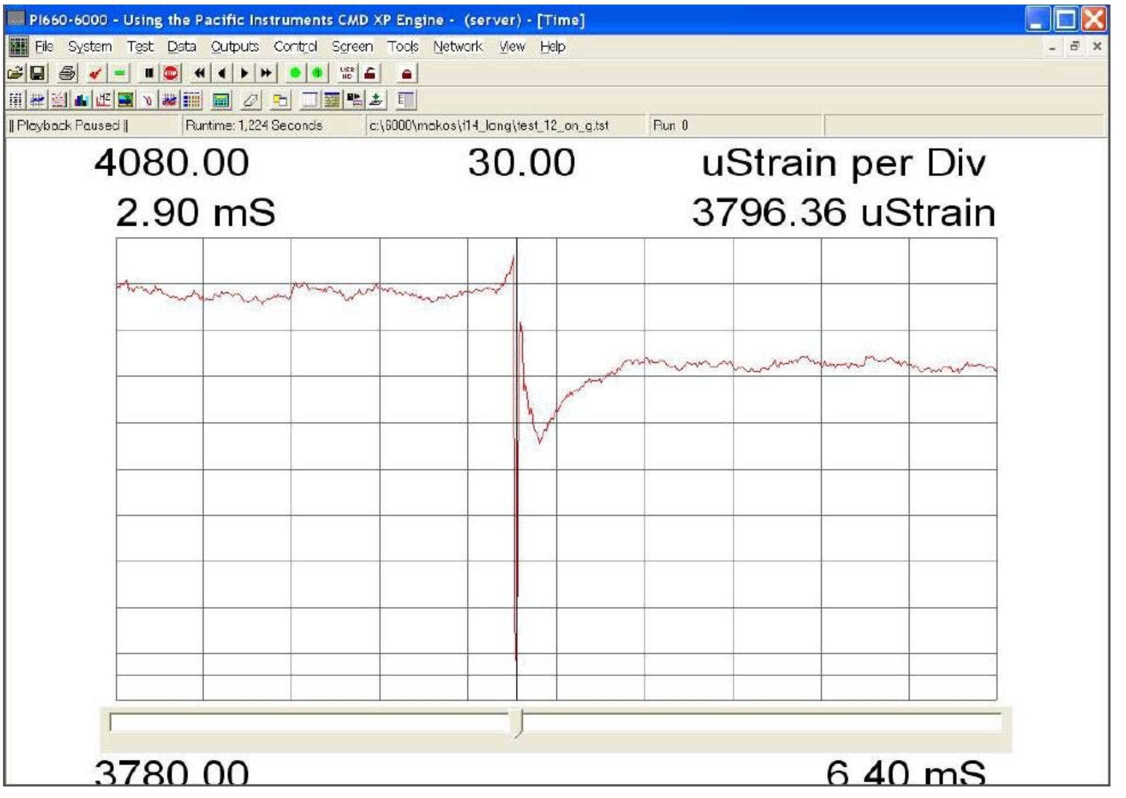


Σχ. 4.19q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

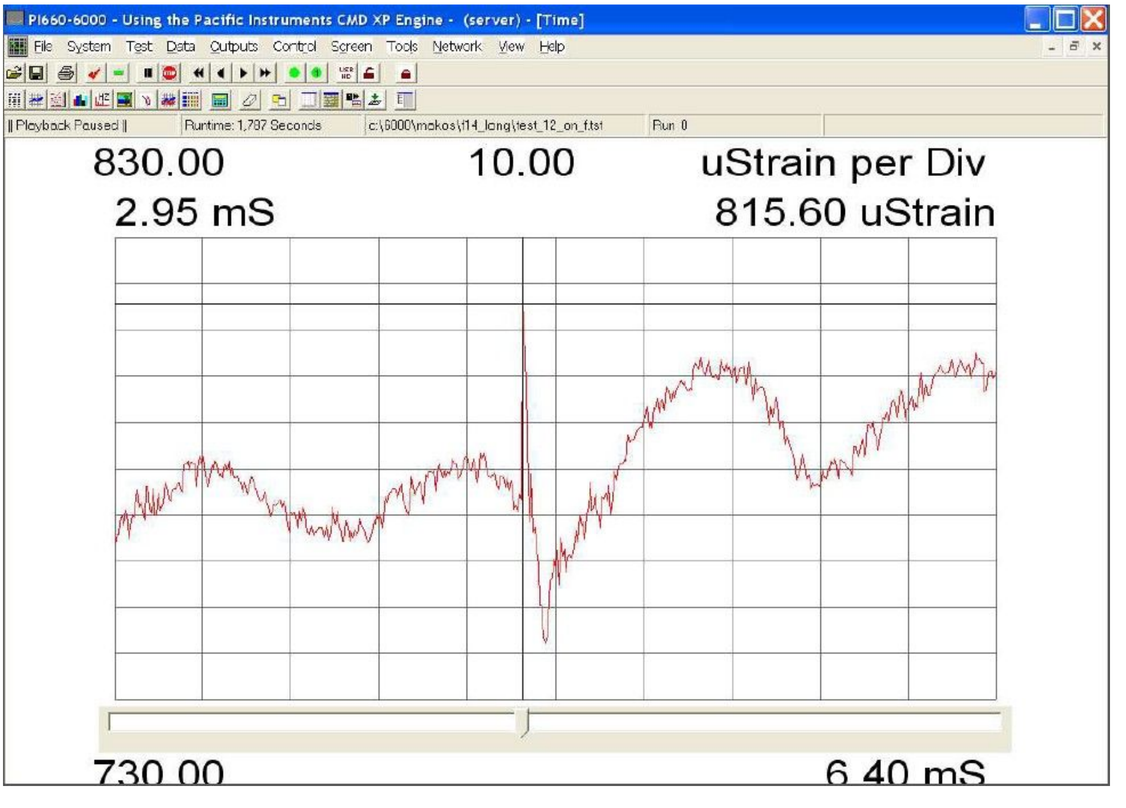


Σχ. 4.20q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 12

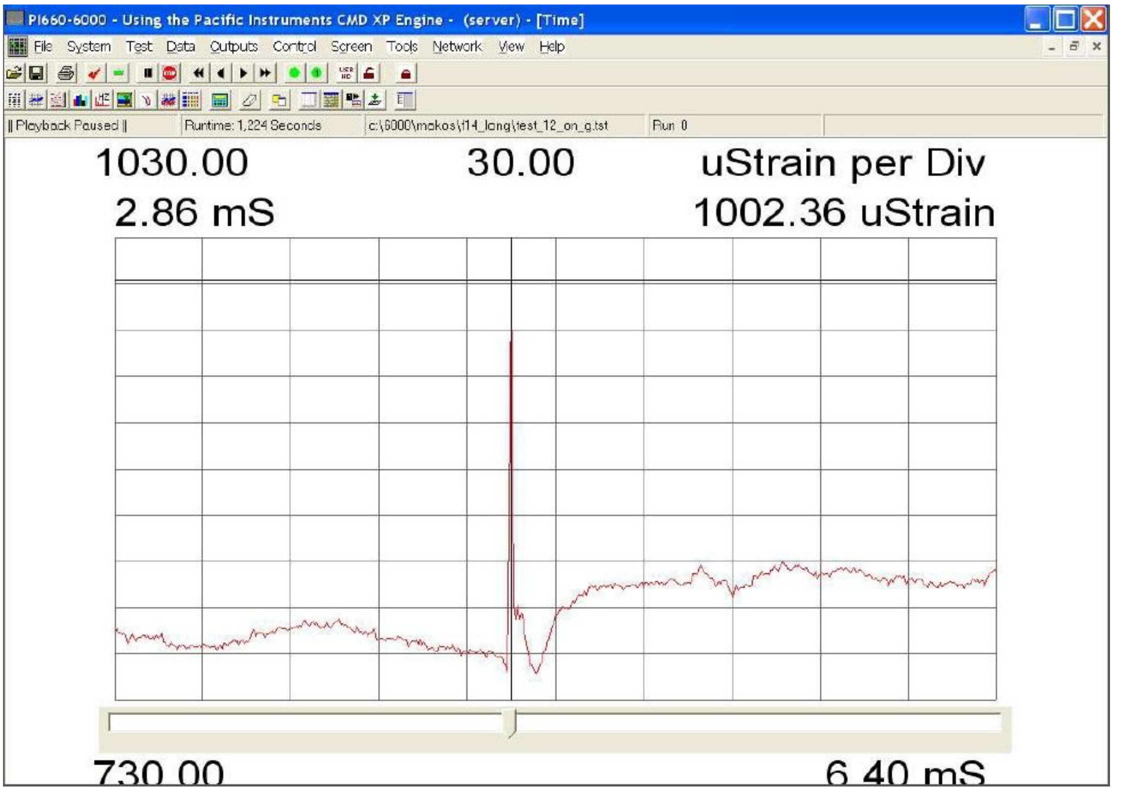


Σχ. 4.17ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)



Σχ. 4.18ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

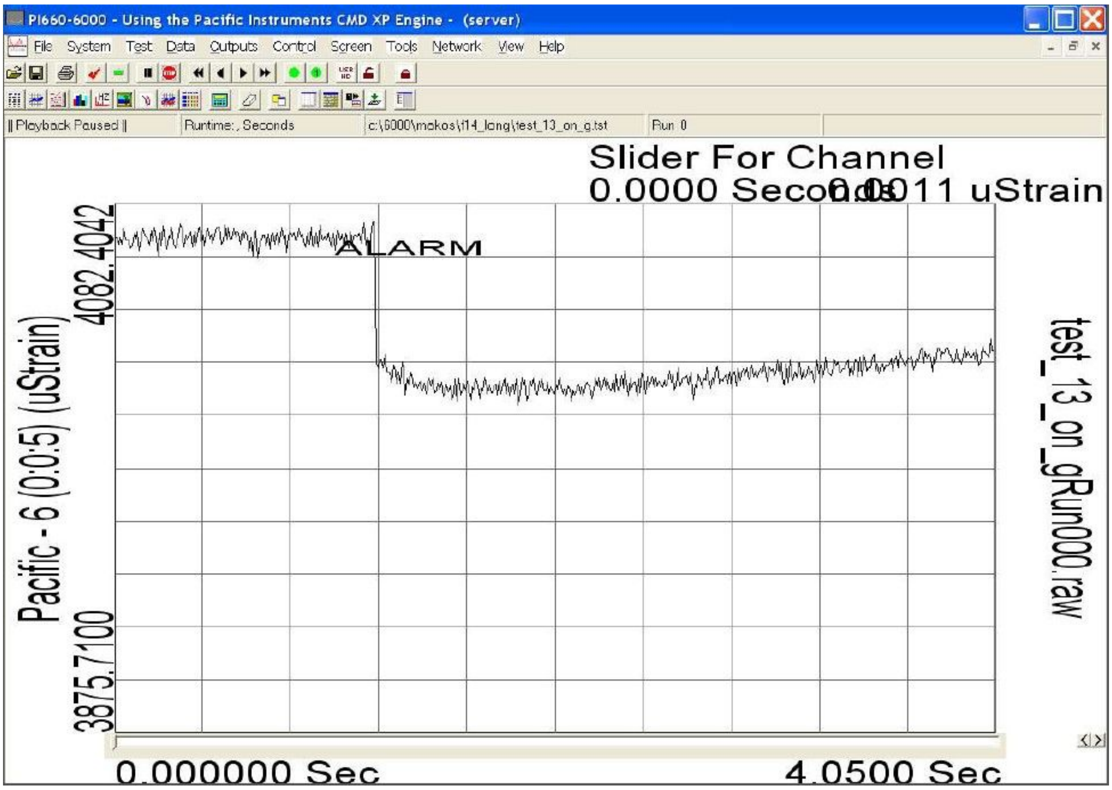
Δοκίμιο 3, Δοκιμή 12



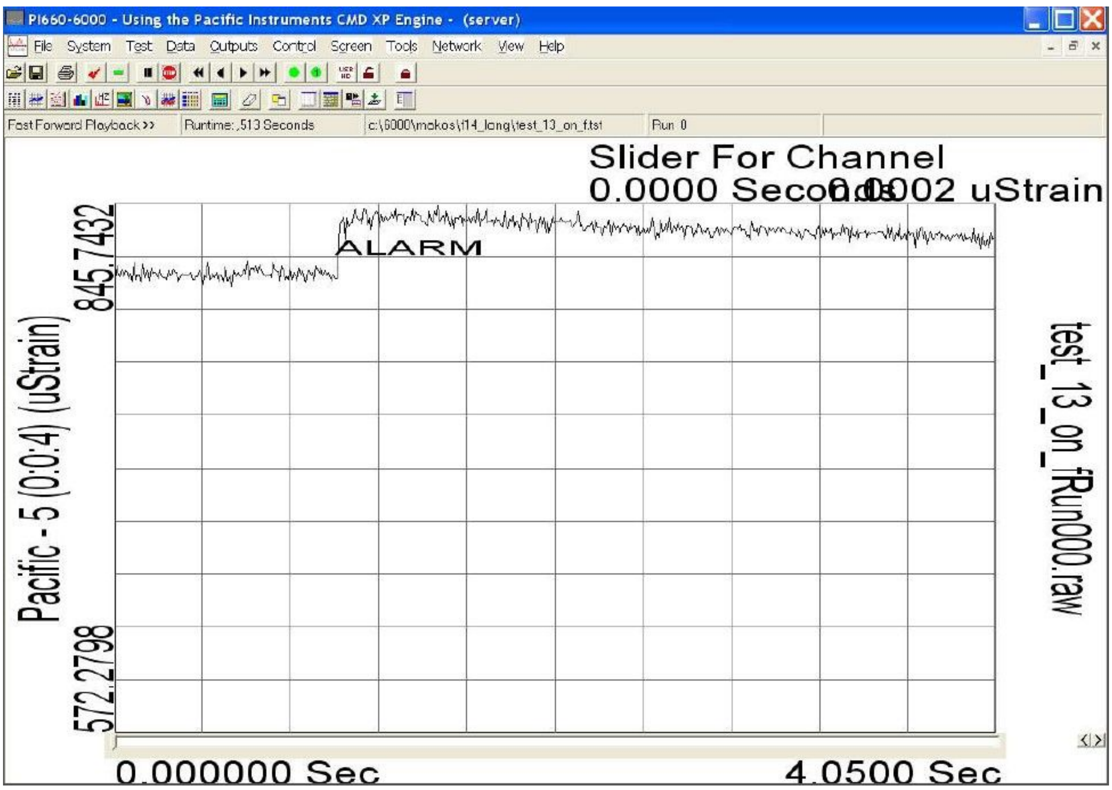
Σχ. 4.19ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Σχ. 4.20ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 13

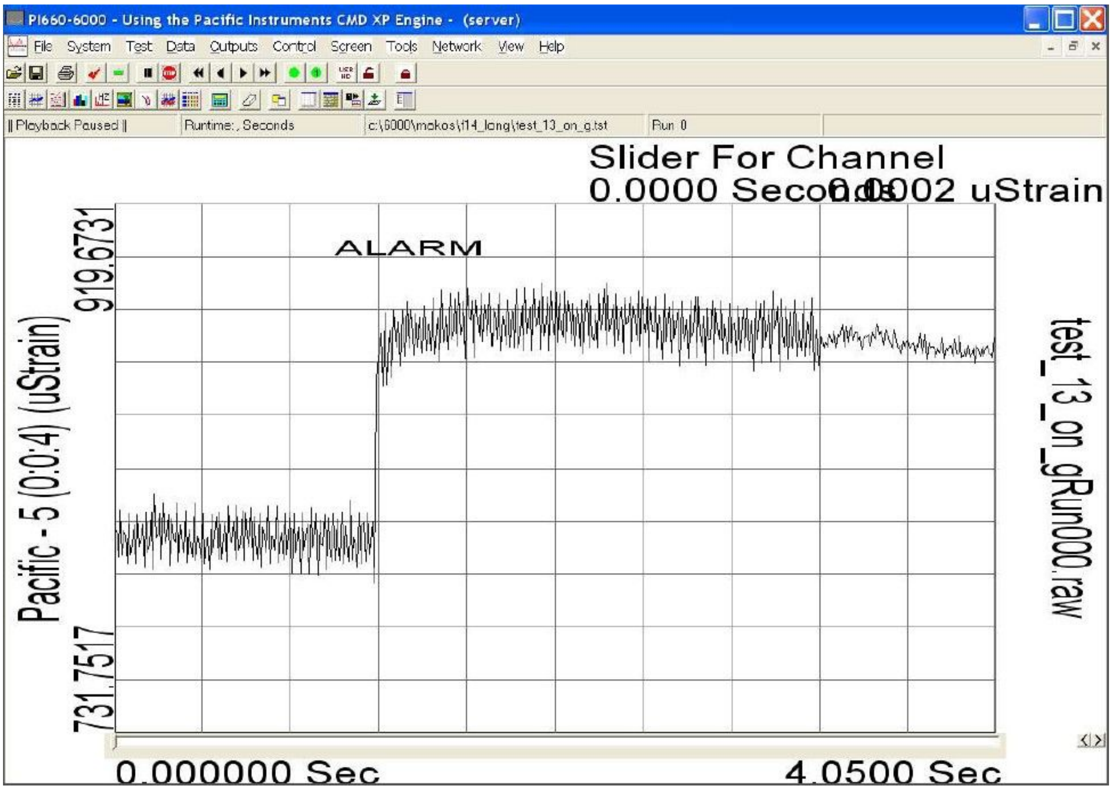


Σχ. 4.21q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

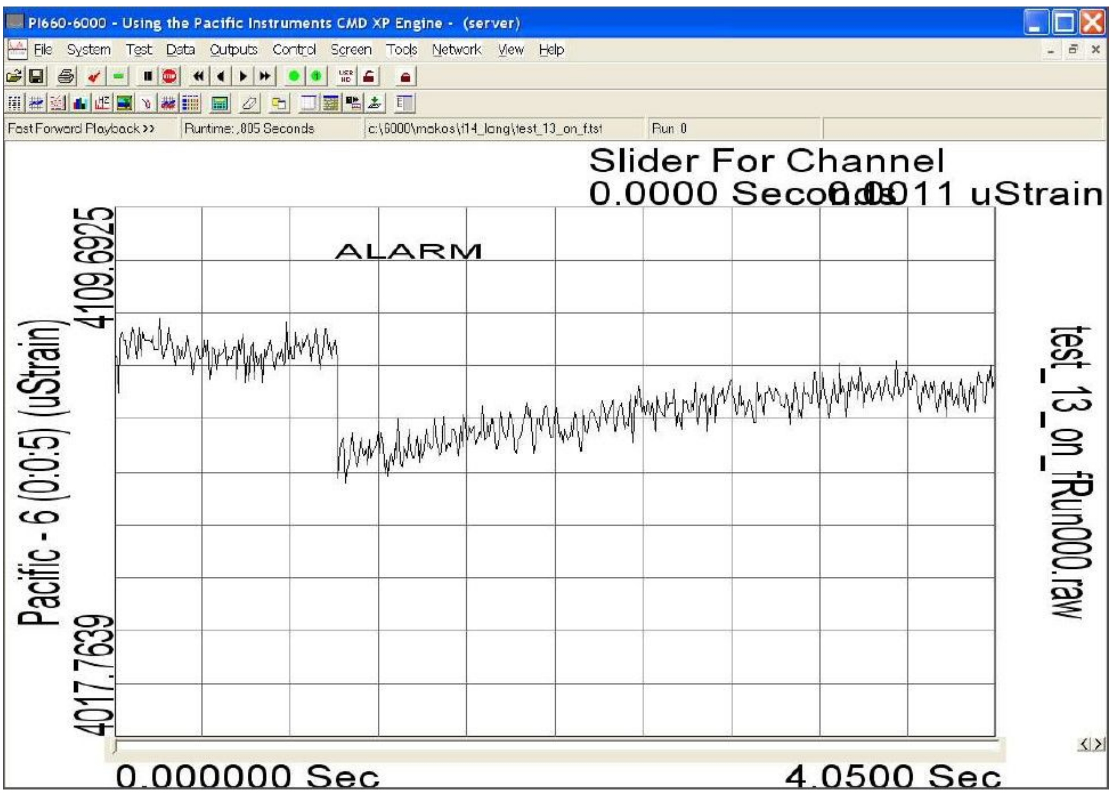


Σχ. 4.22q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 13

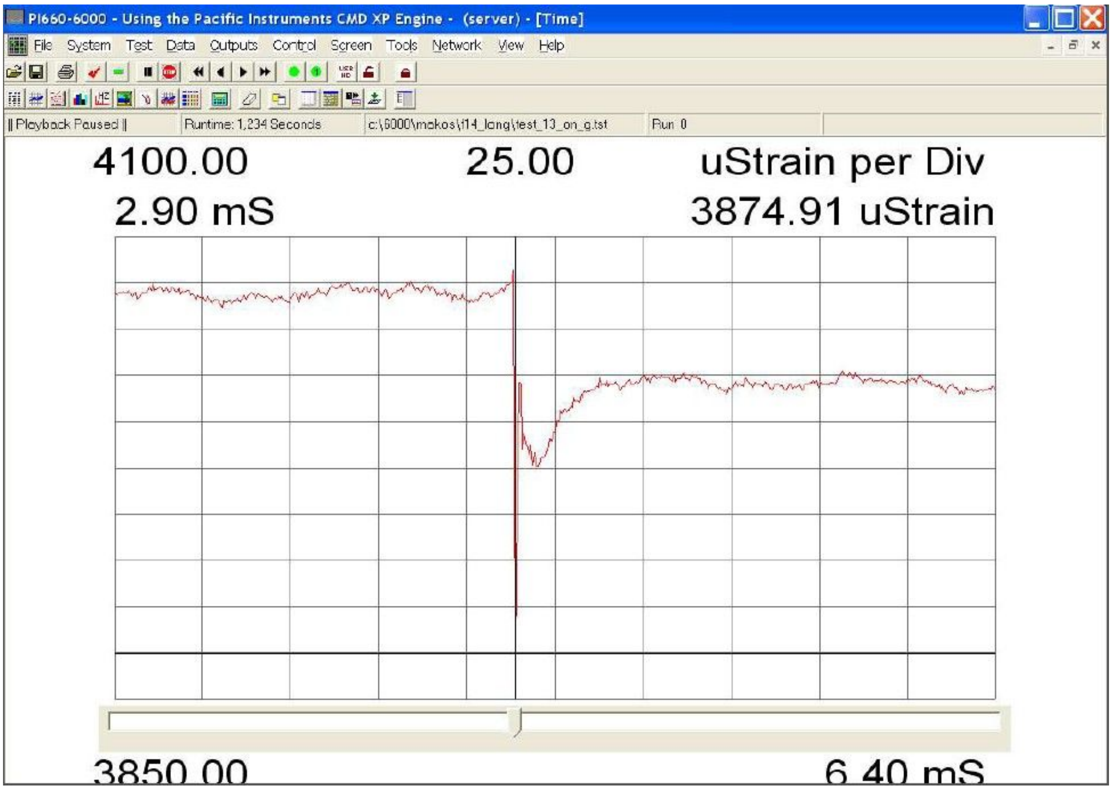


Σχ. 4.23q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (όλη η εγγραφή)

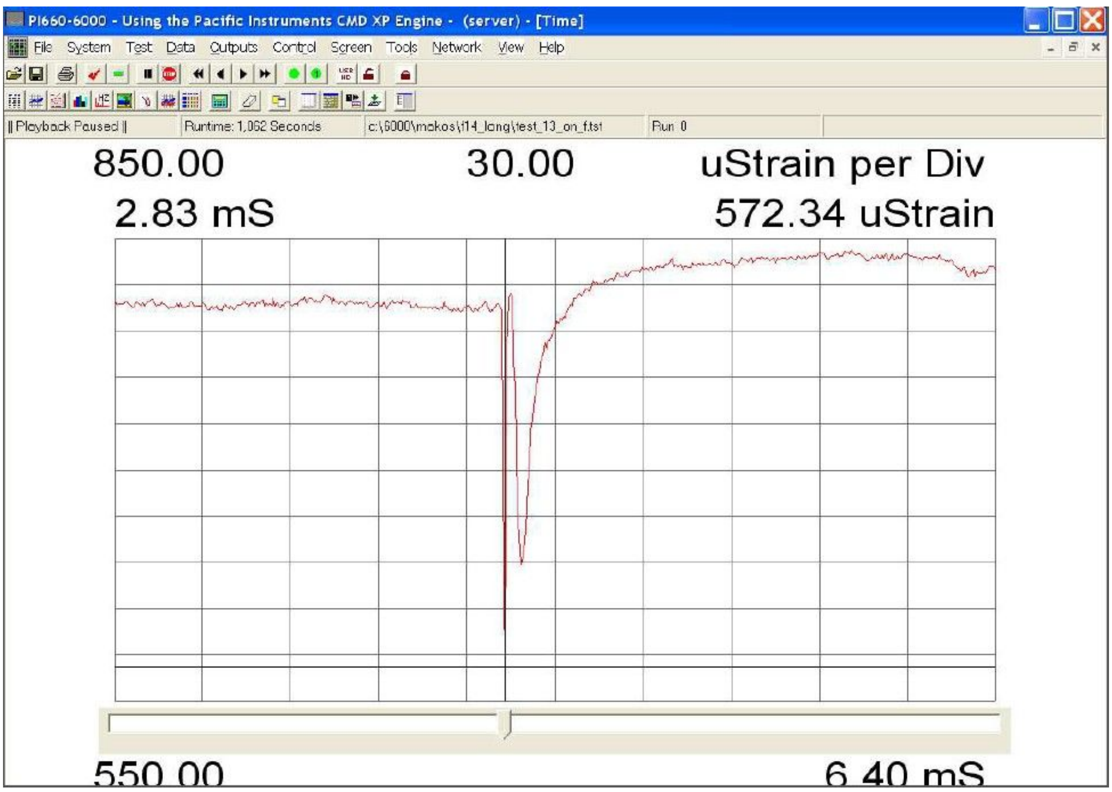


Σχ. 4.24q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 13

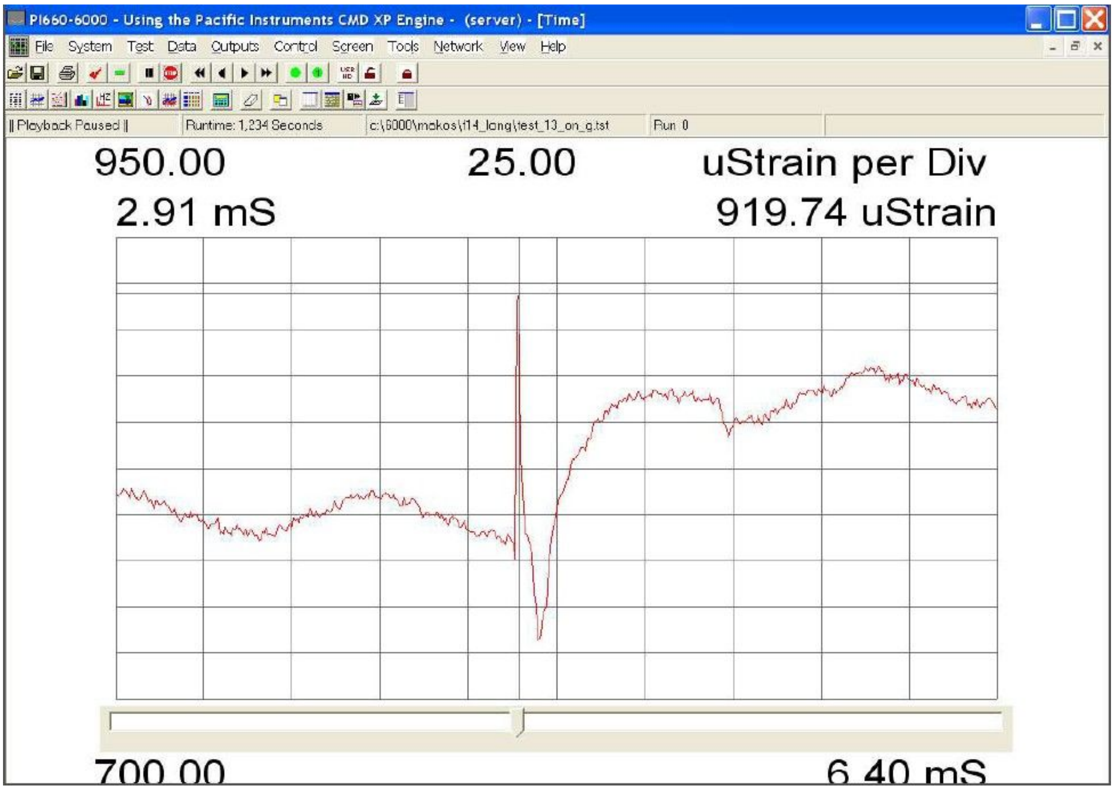


Σχ. 4.21ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

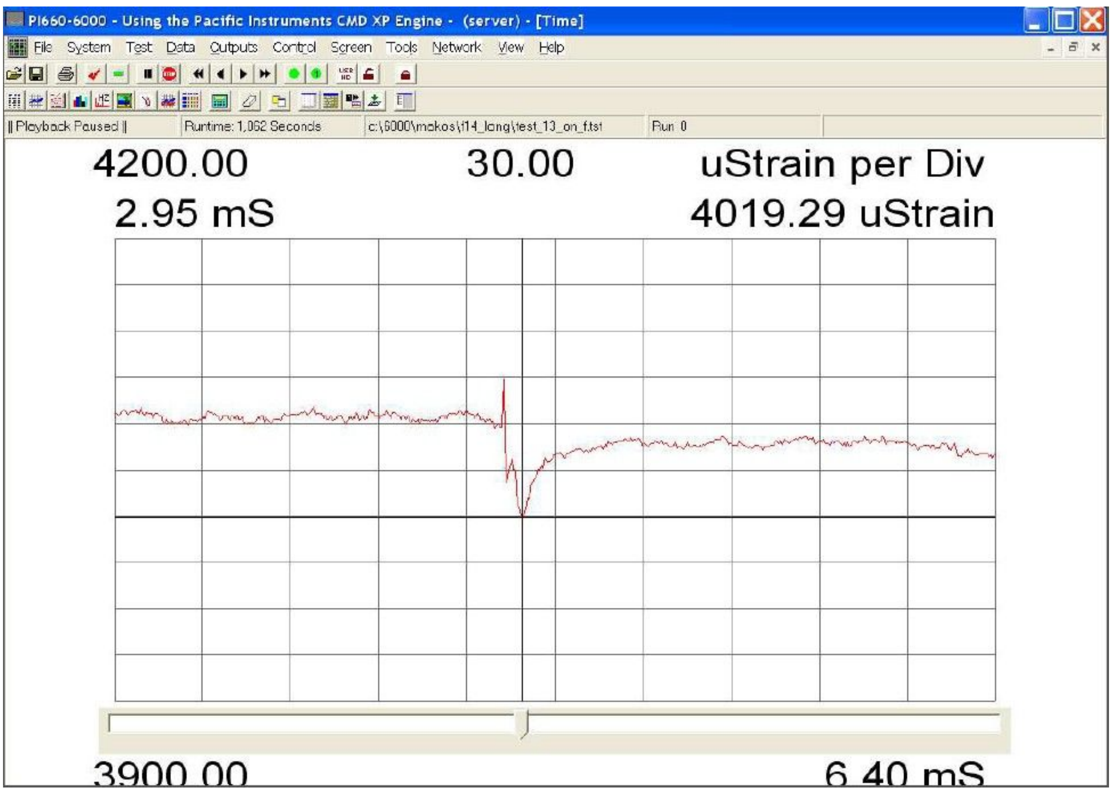


Σχ. 4.22ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 13

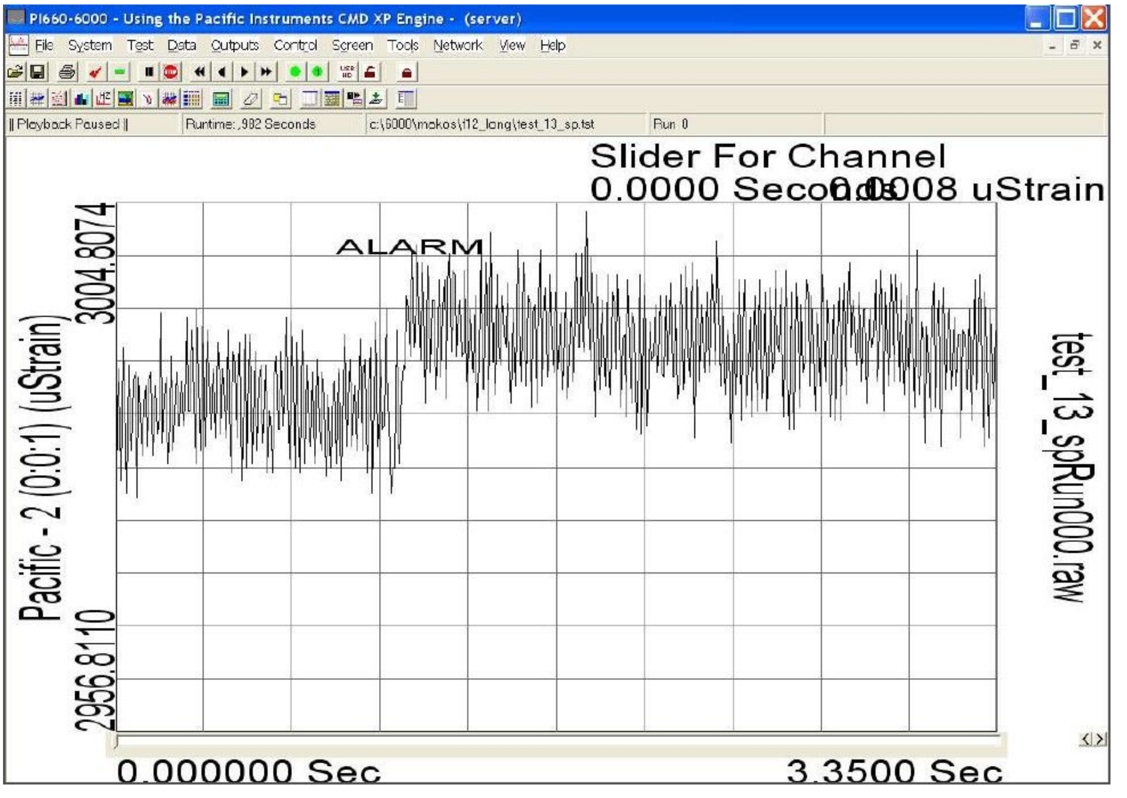


Σχ. 4.23o: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (στιγμή διαταραχής)

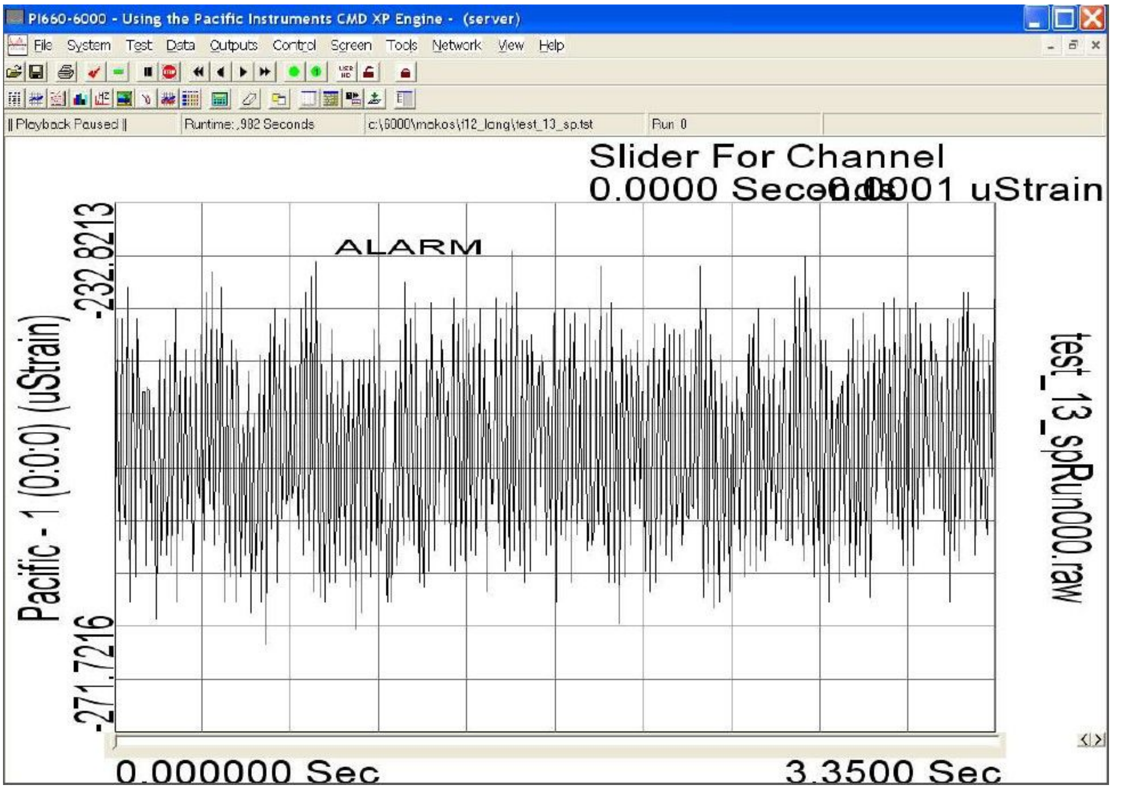


Σχ. 4.24o: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 13

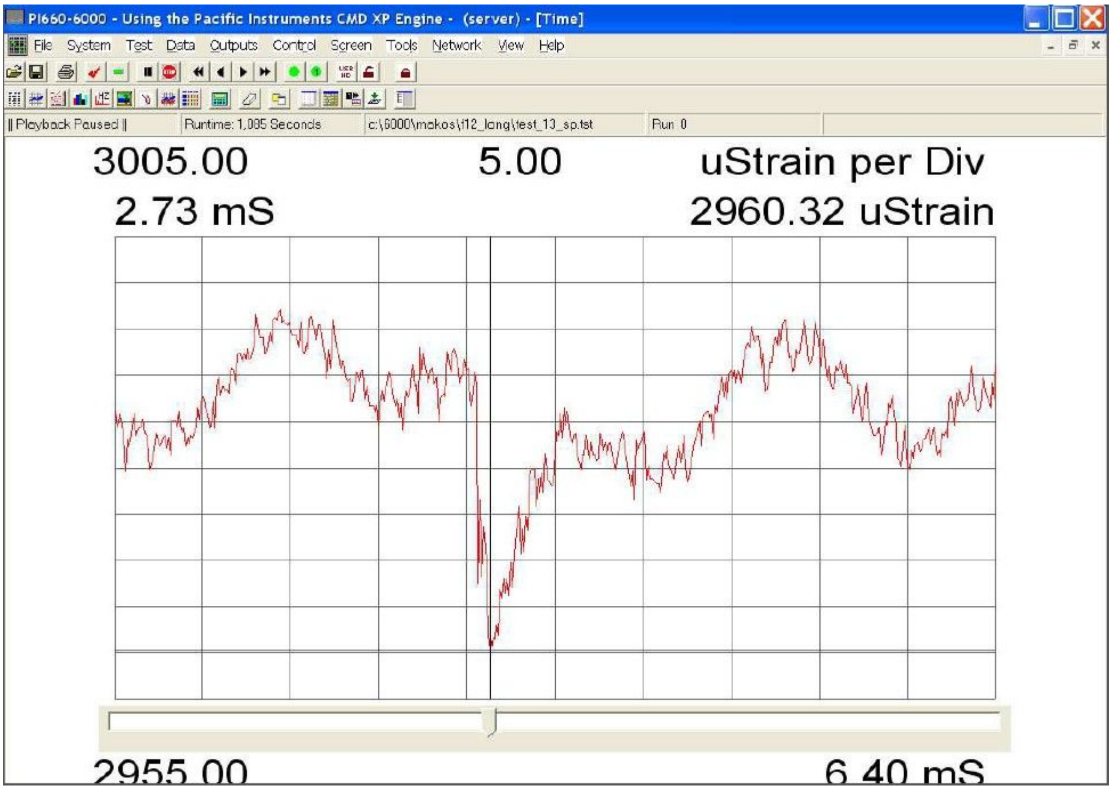


Σχ. 4.25q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (όλη η εγγραφή)



Σχ. 4.26q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (όλη η εγγραφή)

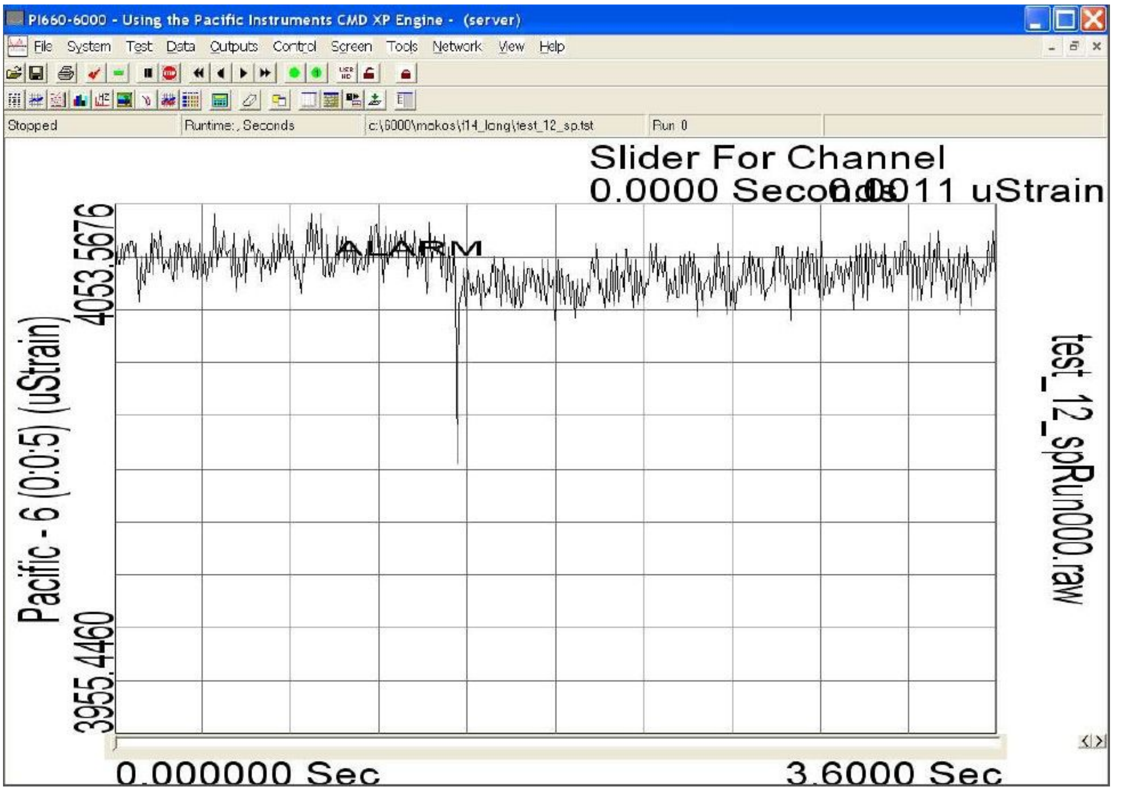
Δοκίμιο 1, Δοκιμή 13



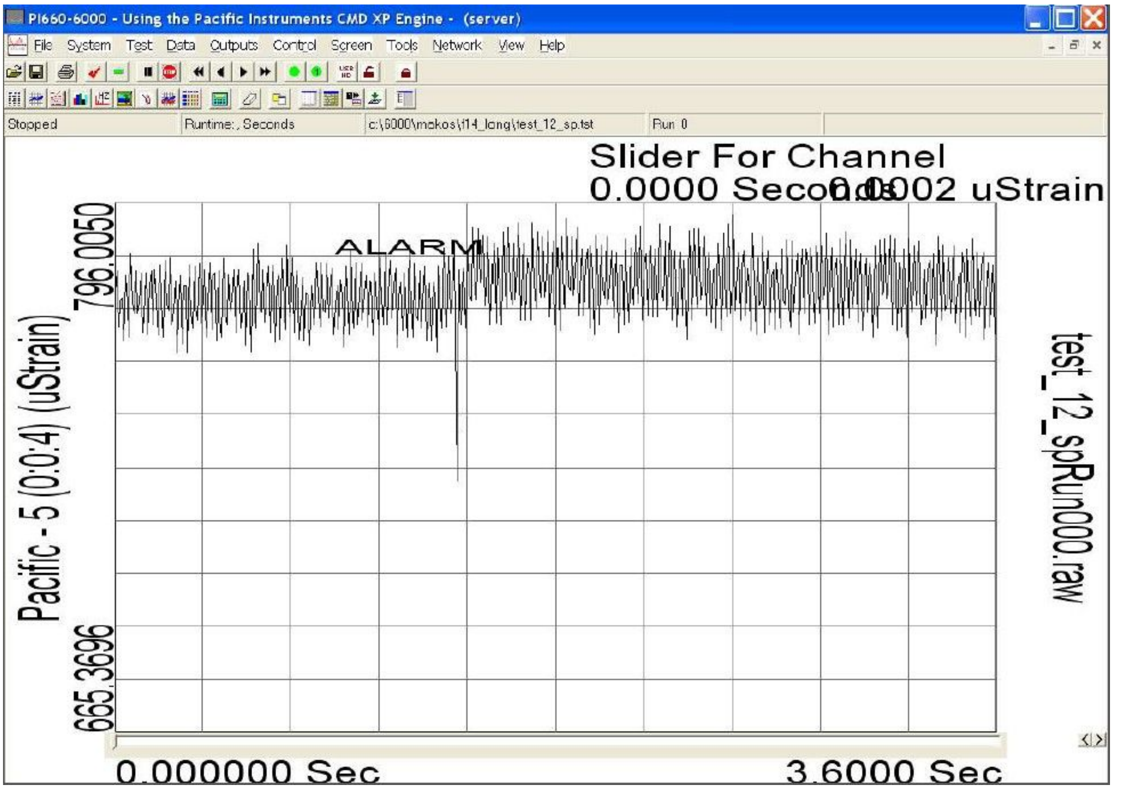
Σχ. 4.25ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (στιγμή διαταραχής)

Σχ. 4.26ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 12

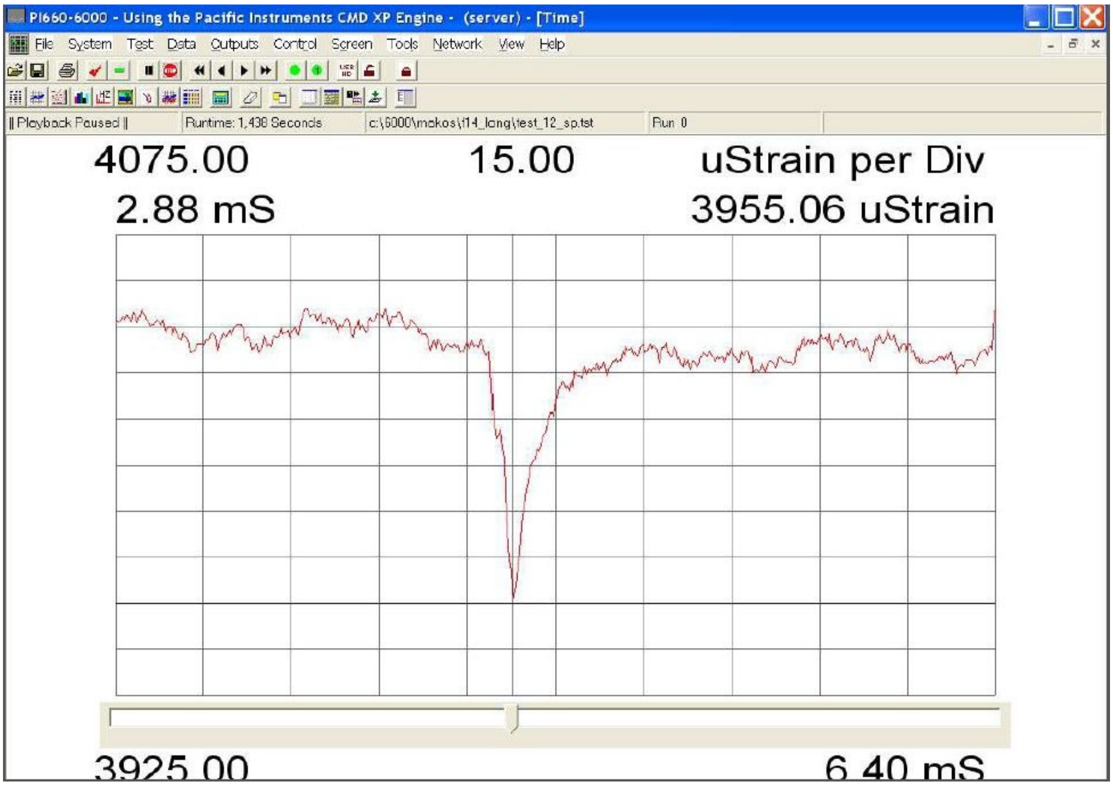


Σχ. 4.27q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (όλη η εγγραφή)

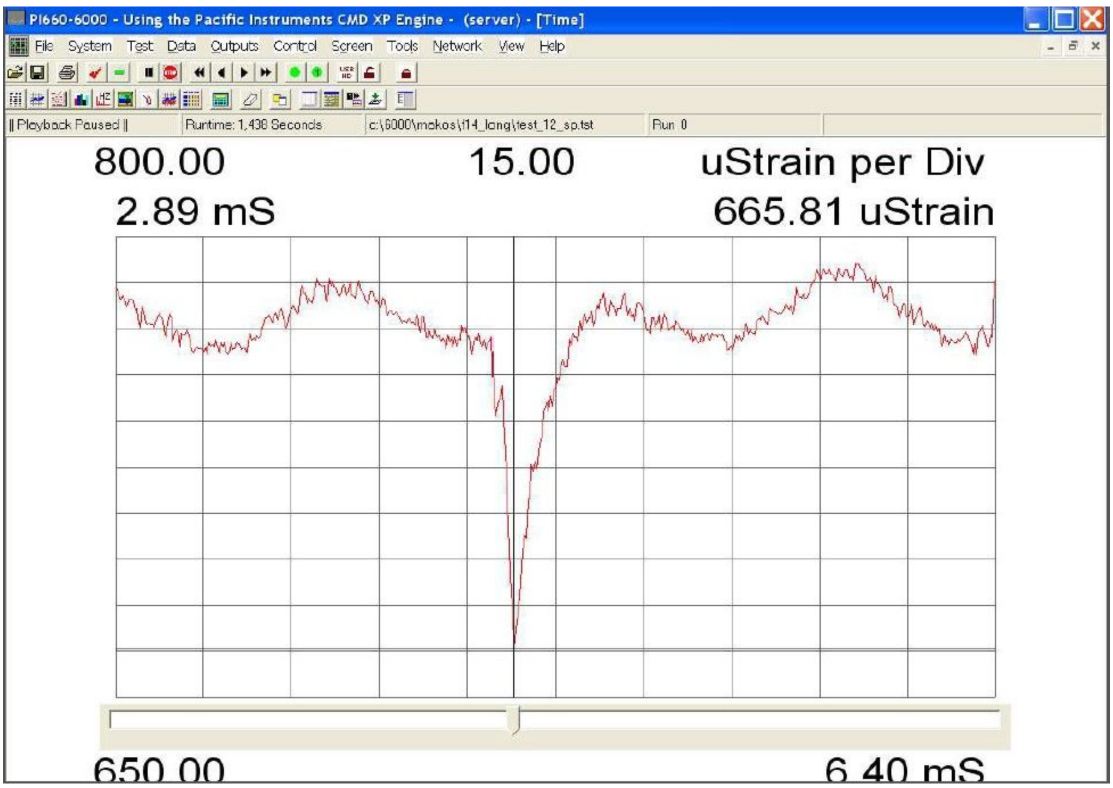


Σχ. 4.28q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 12

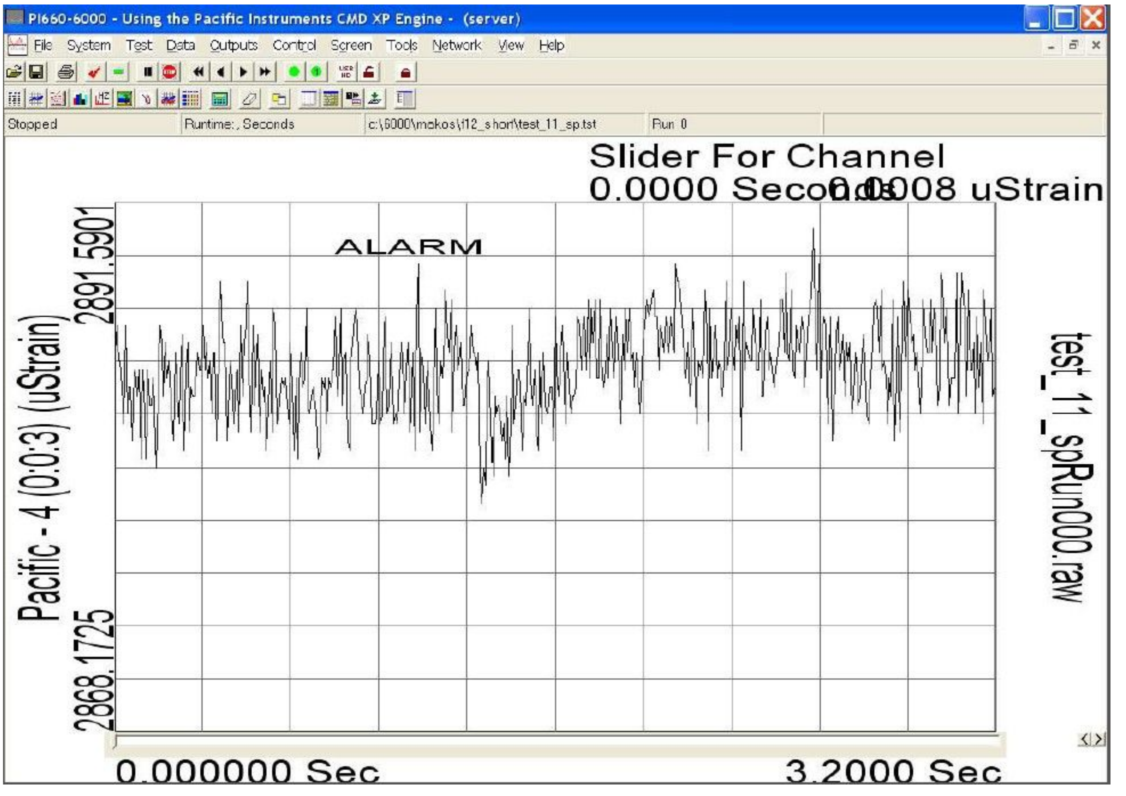


Σχ. 4.27ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (στιγμή διαταραχής)

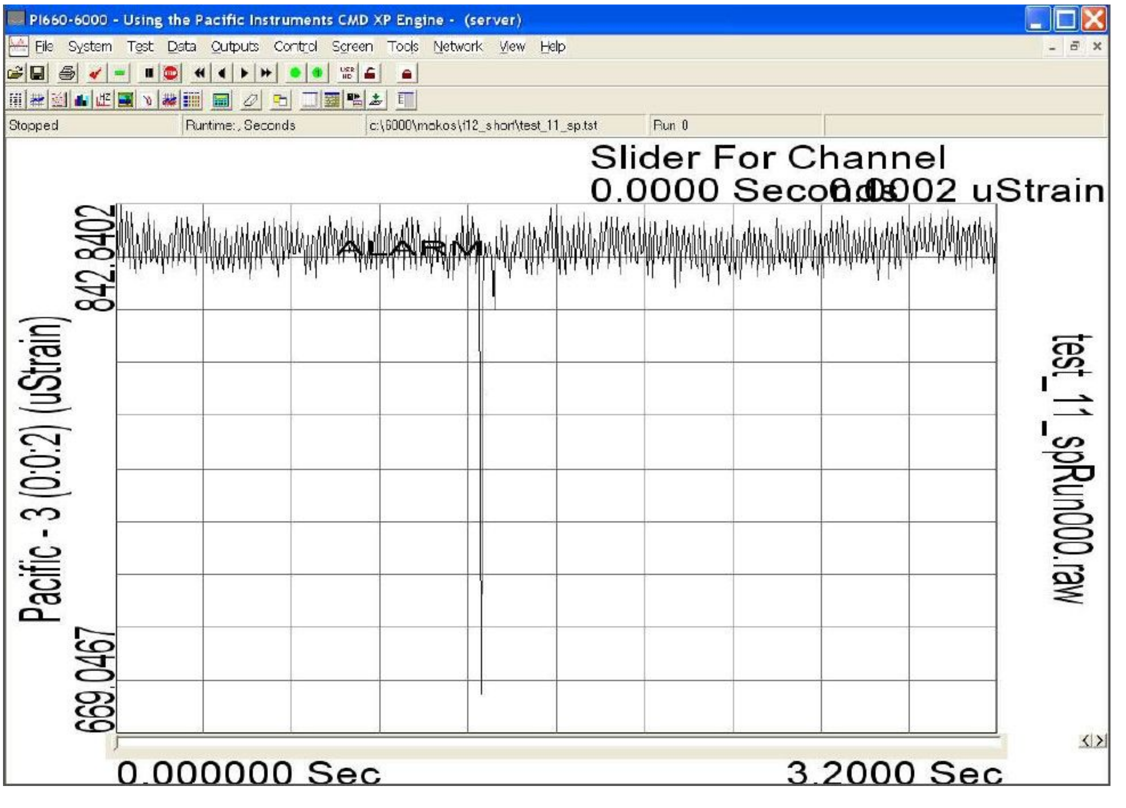


Σχ. 4.28ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 2, Δοκιμή 11

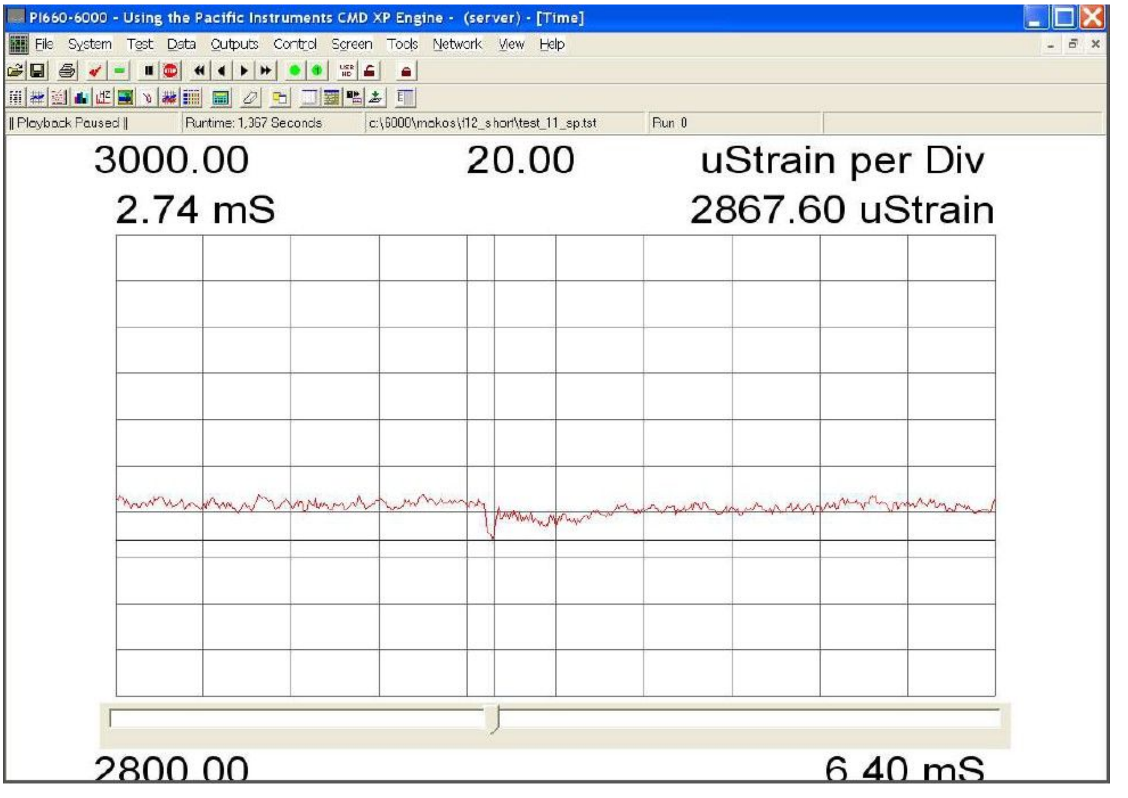


Σχ. 4.29q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (όλη η εγγραφή)

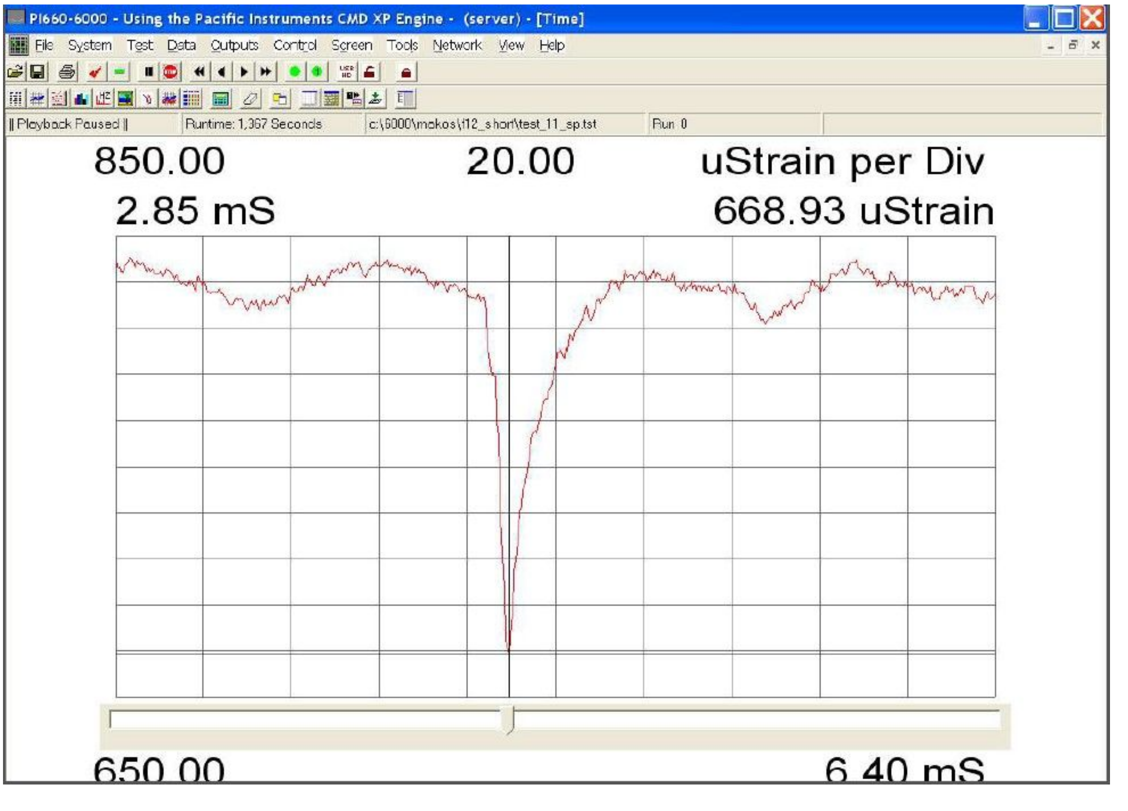


Σχ. 4.30q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 2, Δοκιμή 11

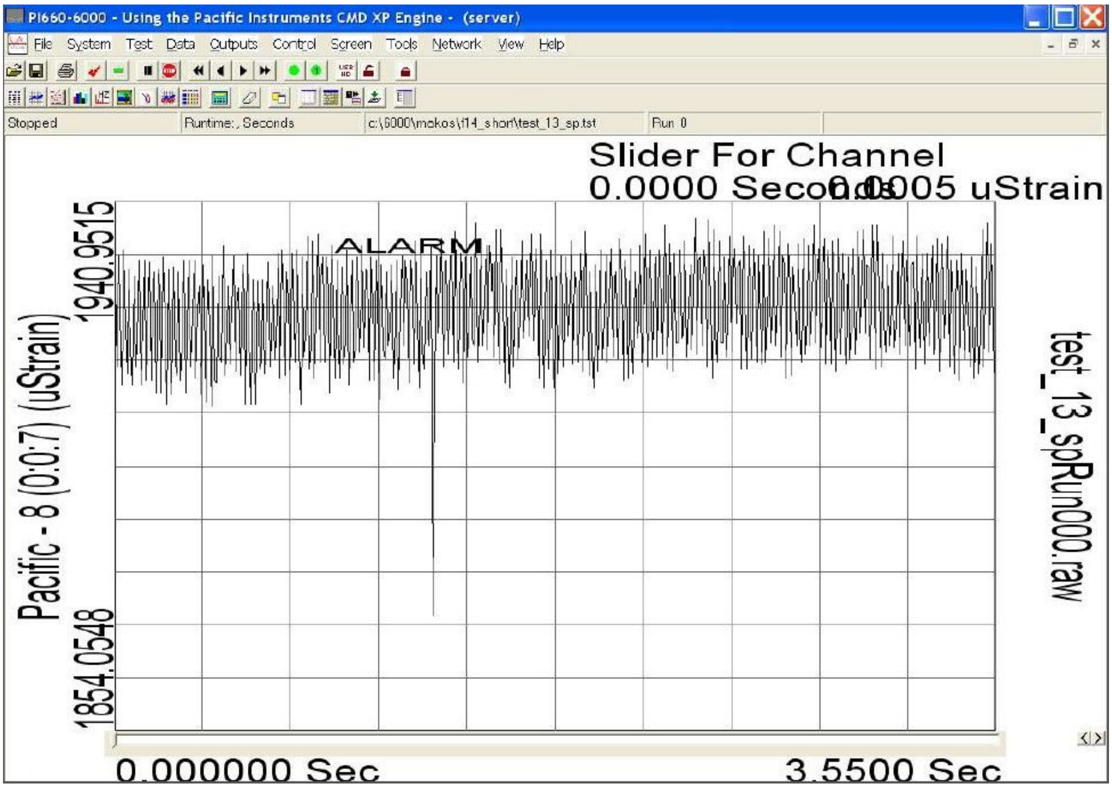


Σχ. 4.29o: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (στιγμή διαταραχής)

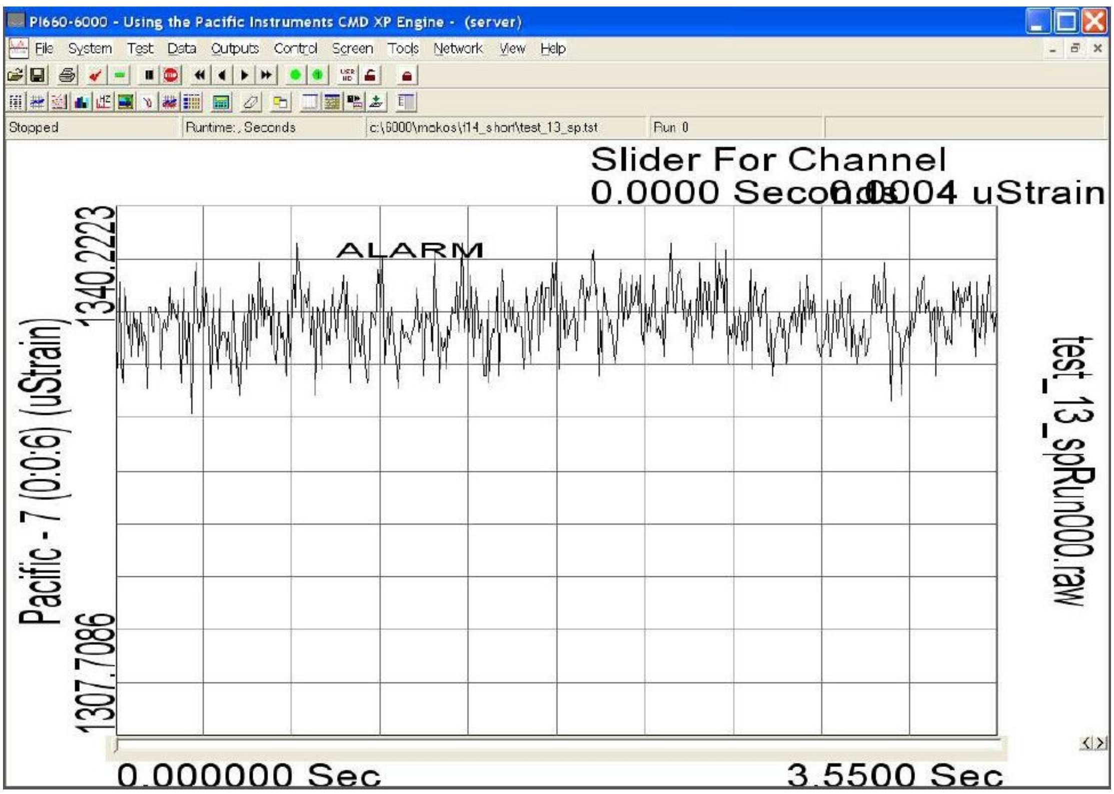


Σχ. 4.30o: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (στιγμή διαταραχής)

Δοκίμιο 4, Δοκιμή 13

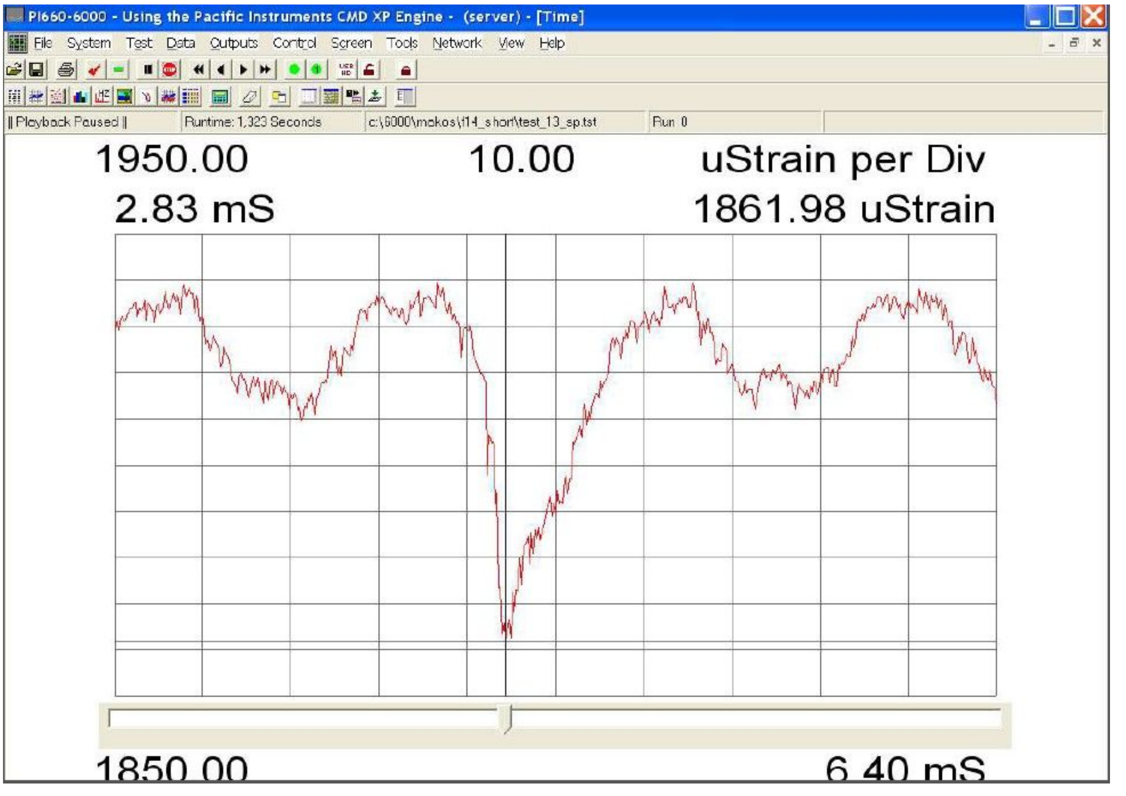


Σχ. 4.31q: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (όλη η εγγραφή)

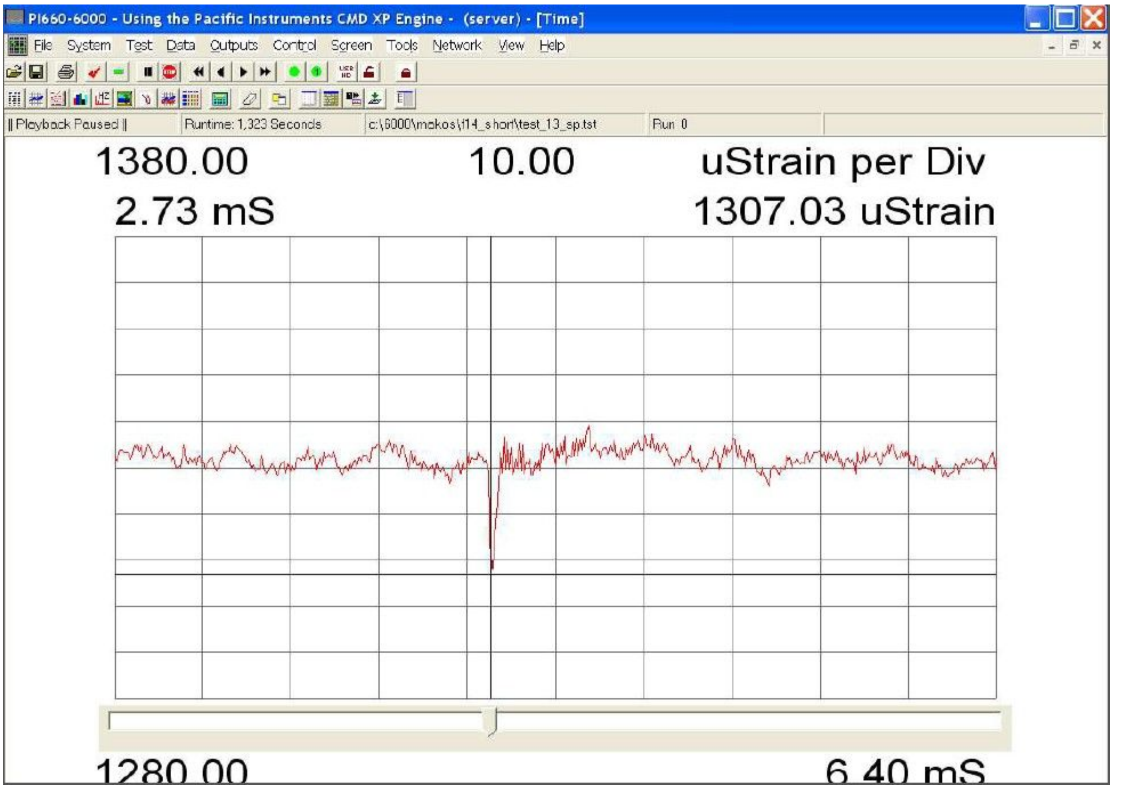


Σχ. 4.32q: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (όλη η εγγραφή)

Δοκίμιο 4, Δοκιμή 13



Σχ. 4.31ο: Κυματομορφή υγιούς ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (στιγμή διαταραχής)



Σχ. 4.32ο: Κυματομορφή διαβρωμένης ράβδου για κρούση στο δοκίμιο (στιγμή διαταραχής)

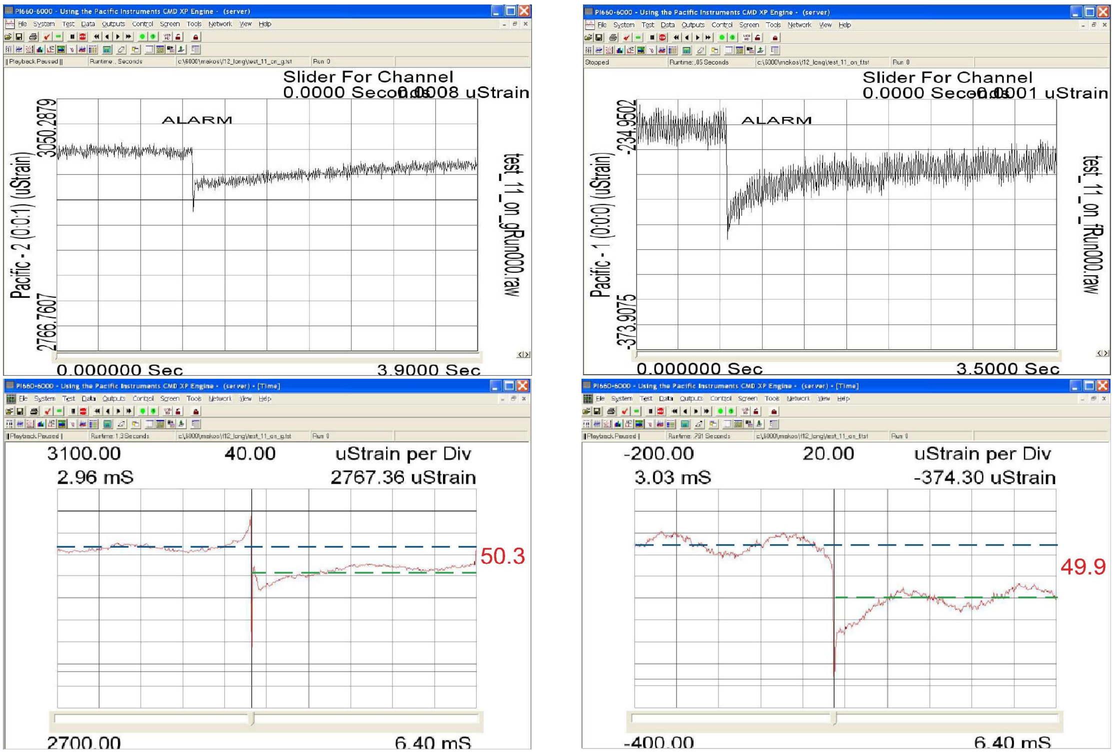
4.3 Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Αρχικά, συγκρίνουμε τα διαγράμματα των σχημάτων 4.1q μέχρι 4.24q, που αφορούν όλη την εγγραφή των κυματομορφών κάθε ράβδου (υγιούς και διαβρωμένης) όταν η κρούση γίνεται στην υγιή ράβδο και όταν η κρούση γίνεται στη διαβρωμένη ράβδο. Παρατηρούμε ένα «άλμα» στον άξονα της παραμόρφωσης, που οφείλεται στην κρουστική καταπόνηση που ασκήθηκε. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των σχημάτων 4.1ο μέχρι 4.24ο, που αφορούν τις αντίστοιχες κυματομορφές τη στιγμή της διαταραχής, παρατηρούμε μία στιγμιαία απότομη μεταβολή της παραμόρφωσης (κατά την άφιξη του παλμού στη θέση του μετρητή) και στη συνέχεια μετατόπιση της παραμόρφωσης σε διαφορετική στάθμη σε σχέση με τη στάθμη πριν τη διαταραχή («άλμα» στον άξονα της παραμόρφωσης). Η εικόνα αυτή παρατηρείται στις κυματομορφές (υγιών και διαβρωμένων ράβδων) όλων των δοκιμών, όπου η κρούση έγινε στα ελεύθερα άκρα των προεξεχουσών ράβδων (υγιών και διαβρωμένων), στα δοκίμια 1 και 3.

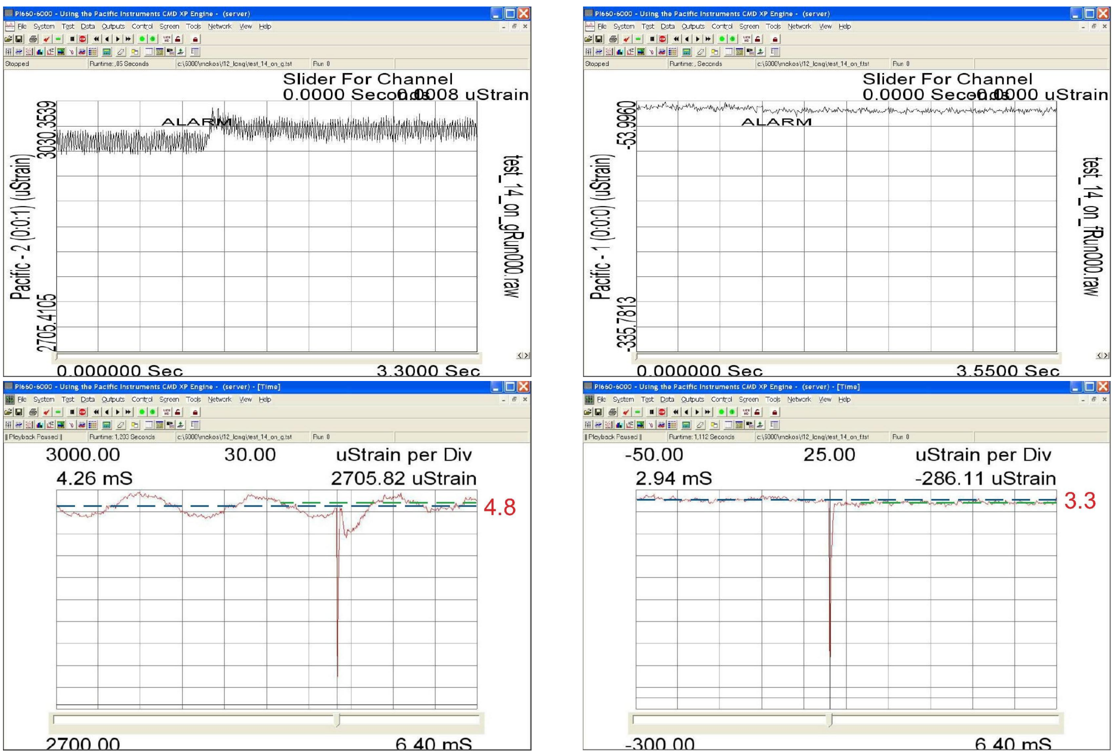
Η εμφάνιση «άλματος» στον άξονα της παραμόρφωσης σχετίζεται με την ύπαρξη συνάφειας μεταξύ των ράβδων και του σκυροδέματος, σύμφωνα με προηγούμενες πειραματικές εργασίες που πραγματεύονται την επίδραση του βαθμού συνάφειας οπλισμού - σκυροδέματος στη διάδοση τασικού παλμού (Βαδαλούκας, 2012; Σχοινοχωρίτης, 2013).

Τα διαγράμματα των κυματομορφών εισήχθησαν σε λογισμικό cad και έγινε μέτρηση του «άλματος» στον άξονα της παραμόρφωσης, για να συγκρίνουμε τις τιμές που παίρνει αυτό. Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της μέτρησης του «άλματος» στις κυματομορφές (τη στιγμή της διαταραχής) της υγιούς ράβδου όταν η κρούση γίνεται στην υγιή ράβδο και της διαβρωμένης ράβδου όταν η κρούση γίνεται στη διαβρωμένη ράβδο.

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 11

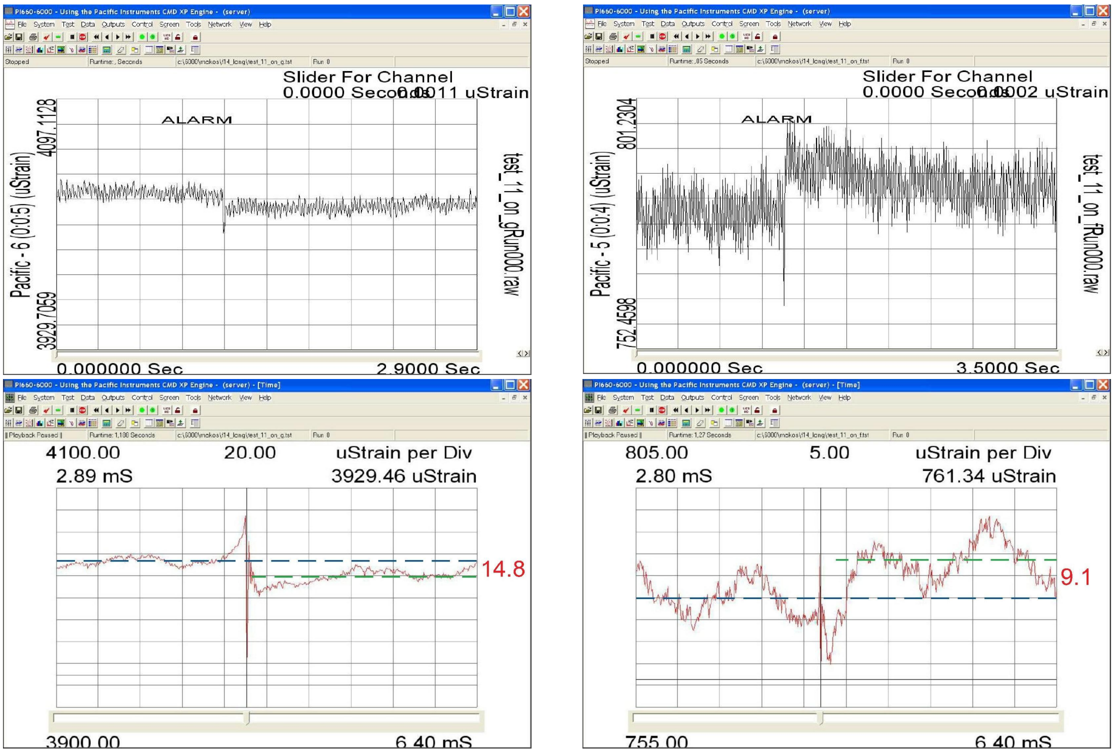


Δοκίμιο 1, Δοκιμή 14

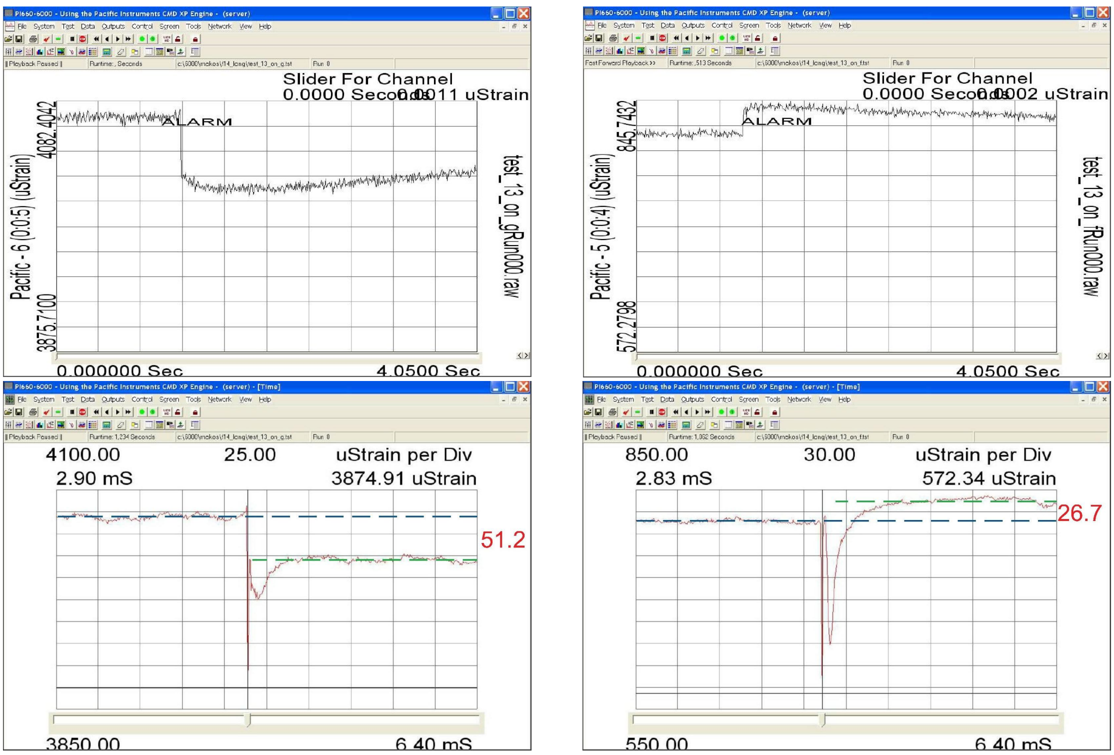


Σχ. 4.33: Κυματομορφές υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (αριστερά) και διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (δεξιά)

Δοκίμιο 3, Δοκιμή 11



Δοκίμιο 3, Δοκιμή 13



Σχ. 4.34: Κυματομορφές υγιούς ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (αριστερά) και διαβρωμένης ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (δεξιά)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι μετρήσεις του «άλματος» στις κυματομορφές τη στιγμή της διαταραχής, για όλες τις δοκιμές στα δοκίμια 1 και 3. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ανά δοκίμιο και για κάθε δοκιμή η τιμή του «άλματος» στην κυματομορφή της υγιούς ράβδου όταν η κρούση γίνεται στην υγιή ράβδο (στήλη on_g_g), η τιμή του «άλματος» στην κυματομορφή της διαβρωμένης ράβδου όταν η κρούση γίνεται στη διαβρωμένη ράβδο (στήλη on_f_f) και ο λόγος των δύο παραπάνω τιμών του «άλματος» (στήλη $\frac{on\_g\_g}{on\_f\_f}$).

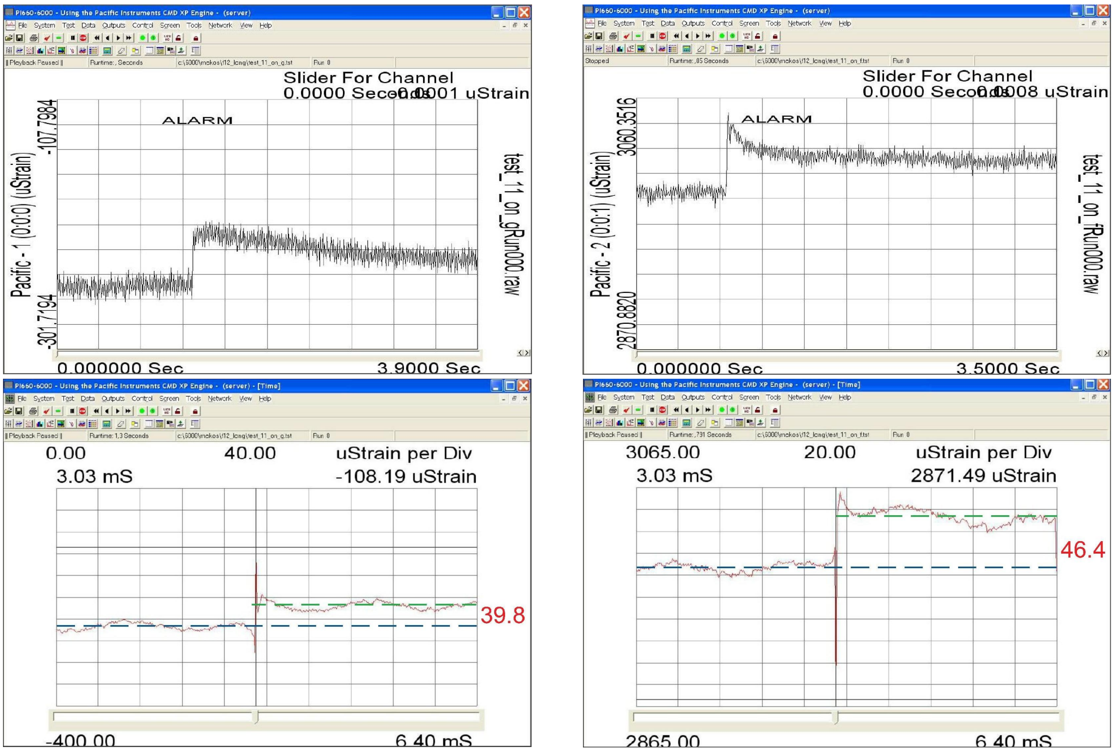
Πίν. 4.1: Μέτρηση «άλματος» στον άξονα της παραμόρφωσης

Δοκιμή	Δοκίμιο 1			Δοκίμιο 3		
	on_g_g	on_f_f	$\frac{on\_g\_g}{on\_f\_f}$	on_g_g	on_f_f	$\frac{on\_g\_g}{on\_f\_f}$
test_11	50.3	49.9	1.01	14.8	9.1	1.63
test_12	-	-	-	46.6	17.9	2.60
test_13	5.9	19.1	0.31	51.2	26.7	1.92
test_14	4.8	3.3	1.45	-	-	-

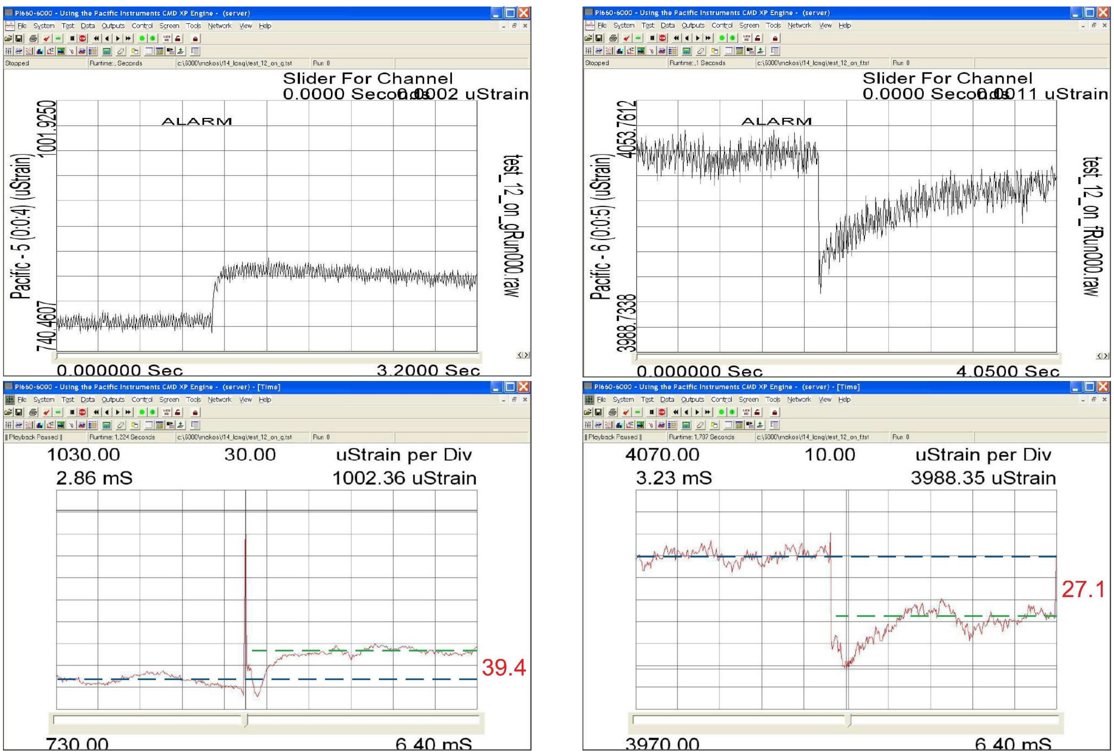
Παρατηρούμε ότι οι τιμές του «άλματος» στις κυματομορφές της υγιούς ράβδου όταν η κρούση γίνεται στην υγιή ράβδο είναι μεγαλύτερες από αυτές στις κυματομορφές της διαβρωμένης ράβδου όταν η κρούση γίνεται στη διαβρωμένη ράβδο. Η διαφορά αυτή στις τιμές του «άλματος» μπορεί να σχετίζεται με τη διαφορά μεταξύ της συνάφειας υγιών ράβδων – σκυροδέματος και της συνάφειας διαβρωμένων ράβδων – σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψη πειραματική εργασία που αναφέρθηκε και παραπάνω (Βαδαλούκας, 2012).

Βέβαια, η παραπάνω σύγκριση γίνεται σε δοκίμια που δεν έχουν υποστεί τον ίδιο τασικό παλμό. Για να αρθεί εν μέρει αυτό το πρόβλημα, γίνεται σύγκριση των τιμών του «άλματος» στις κυματομορφές των ράβδων που έχουν προκύψει από τον ίδιο τασικό παλμό. Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της μέτρησης του «άλματος» στις κυματομορφές (τη στιγμή της διαταραχής) της υγιούς ράβδου όταν η κρούση γίνεται στη διαβρωμένη και της διαβρωμένης ράβδου όταν η κρούση γίνεται στην υγιή.

Δοκίμιο 1, Δοκιμή 11



Δοκίμιο 3, Δοκιμή 12



Σχ. 4.35: Κυματομορφές διαβρωμένης ράβδου για κρούση στην υγιή ράβδο (αριστερά) και υγιούς ράβδου για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (δεξιά)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι μετρήσεις του «άλματος» στις κυματομορφές τη στιγμή της διαταραχής, για όλες τις δοκιμές στα δοκίμια 1 και 3. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ανά δοκίμιο και για κάθε δοκιμή, για κρούση στην υγιή ράβδο (στήλες on_g), η τιμή του «άλματος» στην κυματομορφή της υγιούς (στήλη g) και της διαβρωμένης ράβδου (στήλη f) και αντίστοιχα για κρούση στη διαβρωμένη ράβδο (στήλες on_f), η τιμή του «άλματος» στην κυματομορφή της υγιούς (στήλη g) και της διαβρωμένης ράβδου (στήλη f). Υπολογίζονται ακόμη οι λόγοι των τιμών του «άλματος» στις κυματομορφές της υγιούς προς τη διαβρωμένη ράβδο όταν η κρούση γίνεται στην υγιή ράβδο (στήλη $\frac{on\_g\_g}{on\_g\_f}$), της διαβρωμένης προς την υγιή ράβδο όταν η κρούση γίνεται στη διαβρωμένη ράβδο (στήλη $\frac{on\_f\_f}{on\_f\_g}$) και ο λόγος των δύο παραπάνω (στήλη $\frac{\left(\frac{on\_g\_g}{on\_g\_f}\right)}{\left(\frac{on\_f\_f}{on\_f\_g}\right)}$).

Πίν. 4.2: Μέτρηση «άλματος» στον άξονα της παραμόρφωσης

Δοκιμή	Δοκίμιο 1							
	on_g		on_f		$\frac{on\_g\_g}{on\_f\_f}$	$\frac{on\_g\_g}{on\_g\_f}$	$\frac{on\_f\_f}{on\_f\_g}$	$\frac{\left(\frac{on\_g\_g}{on\_g\_f}\right)}{\left(\frac{on\_f\_f}{on\_f\_g}\right)}$
	g	f	g	f				
test_11	50.3	39.8	46.4	49.9	1.01	1.26	1.08	1.18
test_13	5.9	1.3	17.5	19.1	0.31	4.54	1.09	4.16
test_14	4.8	1.4	9.8	3.3	1.45	3.43	0.34	10.18
Δοκιμή	**Δοκίμιο 3**							
	on_g		on_f		$\frac{on\_g\_g}{on\_f\_f}$	$\frac{on\_g\_g}{on\_g\_f}$	$\frac{on\_f\_f}{on\_f\_g}$	$\frac{\left(\frac{on\_g\_g}{on\_g\_f}\right)}{\left(\frac{on\_f\_f}{on\_f\_g}\right)}$
	g	f	g	f				
test_11	14.8	5.8	8.6	9.1	1.63	2.55	1.06	2.41
test_12	46.6	39.4	27.1	17.9	2.60	1.18	0.66	1.79
test_13	51.2	61.1	18.3	26.7	1.92	0.84	1.46	0.57

Παρατηρούμε ότι οι λόγοι των τιμών του «άλματος» στη στήλη $\frac{on\_g\_g}{on\_g\_f}$ είναι μεγαλύτεροι από αυτούς στη στήλη $\frac{on\_f\_f}{on\_f\_g}$, ενώ θα περίμενε κανείς να είναι περίπου ίσοι. Ασκώντας δηλαδή κρουστική καταπόνηση στη διαβρωμένη ράβδο, καταγράφεται οριακά μεγαλύτερο «άλμα» στις κυματομορφές της διαβρωμένης ράβδου σε σχέση με αυτές της υγιούς. Αντίθετα, ασκώντας κρουστική καταπόνηση στην υγιή ράβδο, καταγράφεται διακριτά μεγαλύτερο «άλμα» στις κυματομορφές της υγιούς ράβδου σε σχέση με αυτές της διαβρωμένης. Η διαφορά αυτή μεταξύ των λόγων μπορεί να σχετίζεται με τη διαφορά μεταξύ της συνάφειας υγιών ράβδων – σκυροδέματος και της συνάφειας διαβρωμένων ράβδων – σκυροδέματος. Η παρατήρηση αυτή είναι σύμφωνη και ενισχύει όσα σημειώθηκαν παραπάνω σχετικά με τις τιμές του «άλματος» στις κυματομορφές της υγιούς ράβδου όταν η κρούση γίνεται στην υγιή ράβδο και αυτές στις κυματομορφές της διαβρωμένης ράβδου όταν η κρούση γίνεται στη διαβρωμένη ράβδο.

Τέλος, συγκρίνουμε τα διαγράμματα των σχημάτων 4.25 μέχρι 4.32, που αφορούν τις κυματομορφές κάθε ράβδου (υγιούς και διαβρωμένης) όταν η κρούση γίνεται στο δοκίμιο. Παρατηρούμε ότι έχουμε ανομοιομορφία ως προς τα αποτελέσματα, συνεπώς δε μπορεί να γίνει κάποιο σχόλιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πειραματική εργασία, που ήταν κατά βάση διερευνητική, έγινε μία πρώτη προσπάθεια να ελεγχθεί η επίδραση της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού στη διάδοση τασικού παλμού.

Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκαν τέσσερα κυλινδρικά δοκίμια από σκυρόδεμα. Σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν 2 ράβδοι οπλισμού, μία υγιής και μία προσβεβλημένη από διάβρωση. Στις ράβδους οπλισμού επικολλήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κρουστική καταπόνηση, σε τρία διαφορετικά σημεία κάθε δοκιμίου: στο ελεύθερο άκρο της προεξέχουσας υγιούς ράβδου, στο ελεύθερο άκρο της προεξέχουσας προσβεβλημένης από διάβρωση ράβδου και στην επιφάνεια του σκυροδέματος ανάμεσα στις δύο ράβδους. Με σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων, καταγράφηκαν οι χρονοϊστορίες διάδοσης του παλμού στην υγιή και στην προσβεβλημένη από διάβρωση ράβδο.

Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι υπάρχει μία ασθενής διαφοροποίηση στη διάδοση τασικού παλμού στις υγιείς ράβδους οπλισμού και στις διαβρωμένες ράβδους οπλισμού. Συνοψίζοντας:

• Στα δοκίμια 1 και 3 (όπου οι ράβδοι οπλισμού προεξείχαν περίπου 4 cm εκτός του σκυροδέματος) παρατηρήθηκε ένα «άλμα» στον άξονα της παραμόρφωσης στις κυματομορφές και της υγιούς και της διαβρωμένης ράβδου, όταν η κρούση γινόταν στην υγιή ράβδο και όταν η κρούση γινόταν στη διαβρωμένη ράβδο. Η εμφάνιση του «άλματος» αυτού σχετίζεται με την ύπαρξη συνάφειας μεταξύ των ράβδων και του σκυροδέματος, σύμφωνα με προηγούμενες πειραματικές εργασίες που πραγματεύονται την επίδραση του βαθμού συνάφειας οπλισμού - σκυροδέματος στη διάδοση τασικού παλμού.

• Στο δοκίμιο 2 (όπου οι ράβδοι οπλισμού προεξείχαν λίγα mm) και στο δοκίμιο 4 (όπου οι ράβδοι οπλισμού προεξείχαν περίπου 2 cm) παρουσιάστηκε ανομοιομορφία ως προς τα αποτελέσματα. Φαίνεται ότι για να λειτουργήσει η πειραματική διαδικασία με τη συγκεκριμένη διάταξη και μέθοδο μέτρησης, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, πρέπει οι ράβδοι οπλισμού να προεξέχουν τουλάχιστον 4 cm από το σκυρόδεμα.

• Στα δοκίμια 1 και 3 παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του «άλματος» στις κυματομορφές της υγιούς ράβδου όταν η κρούση γινόταν στην υγιή ράβδο είναι μεγαλύτερες από αυτές στις κυματομορφές της διαβρωμένης ράβδου όταν η κρούση γινόταν στη διαβρωμένη ράβδο. Η διαφορά αυτή στις τιμές του «άλματος» μπορεί να σχετίζεται με τη διαφορά μεταξύ της συνάφειας υγιών ράβδων – σκυροδέματος και της συνάφειας διαβρωμένων ράβδων – σκυροδέματος. Βέβαια, το συμπέρασμα αυτό δεν είναι ασφαλές, διότι είναι ποιοτικό και προέκυψε από σύγκριση αποτελεσμάτων σε δοκίμια που δεν έχουν υποστεί τον ίδιο τασικό παλμό.

• Στα δοκίμια 1 και 3 παρατηρήθηκε ότι ασκώντας κρουστική καταπόνηση στη διαβρωμένη ράβδο, καταγράφεται οριακά μεγαλύτερο «άλμα» στις κυματομορφές της διαβρωμένης ράβδου σε σχέση με αυτές της υγιούς. Αντίθετα, ασκώντας κρουστική καταπόνηση στην υγιή ράβδο, καταγράφεται διακριτά μεγαλύτερο «άλμα» στις κυματομορφές της υγιούς ράβδου σε σχέση με αυτές της διαβρωμένης. Η διαφορά αυτή μεταξύ των λόγων μπορεί να σχετίζεται με τη διαφορά μεταξύ της συνάφειας υγιών ράβδων – σκυροδέματος και της συνάφειας διαβρωμένων ράβδων – σκυροδέματος. Αυτή η παρατήρηση είναι σύμφωνη και ενισχύει την προηγουμένη παρατήρηση.

• Σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκε ότι ασκώντας κρουστική καταπόνηση στην επιφάνεια του σκυροδέματος ανάμεσα στις δύο ράβδους, παρουσιάζεται έντονη ανομοιομορφία ως προς τα αποτελέσματα. Φαίνεται ότι η πειραματική διαδικασία με τη συγκεκριμένη διάταξη και μέθοδο μέτρησης, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, δε λειτουργεί όταν η κρουστική καταπόνηση ασκείται στο δοκίμιο.

Είναι προφανές ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα προς επιβεβαίωση των παραπάνω, αλλά και με στόχο να διερευνηθούν σημεία που δεν κατέστη δυνατό να προβλεφθούν από αυτήν την πειραματική διαδικασία, από τη σύλληψη και τον αρχικό σχεδιασμό της. Για τους λόγους αυτούς προτείνεται η επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας με:

• Δημιουργία κατάλληλης διάταξης για επιβολή σταθερού κρουστικού φορτίου σε κάθε δοκιμή.

• Ποσοτική μέτρηση της διάβρωσης των ράβδων οπλισμού ή χρήση ράβδων που έχουν υποβληθεί σε εξαναγκασμένη διάβρωση στο εργαστήριο (π.χ. σε ειδικό θάλαμο αλατονέφωσης).

• Εισαγωγή ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) και στο σκυρόδεμα.

• Παράλληλη εφαρμογή γνωστών μεθόδων προσδιορισμού του βαθμού διάβρωσης χάλυβα ράβδων οπλισμού (π.χ. χρήση υπερήχων).

• Υπολογιστική προσομοίωση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

• Παραλλαγές στα χαρακτηριστικά των δοκιμίων (π.χ. διάμετροι ράβδων οπλισμού, μέγεθος επικάλυψης).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Apostolopoulos C. A., Kappatos V. Tensile properties of corroded embedded steel bars B500c in concrete. *International Journal of Structural Integrity*, Vol. 4 Iss: 2, pp. 275-294, 2013.

Apostolopoulos C. A., Papadakis V. G. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, Vol. 22 Iss: 12, pp. 2316–2324, 2008.

ASTM C192/C192M-02 Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. ASTM International, 2002.

Batis G., Routoulas T. Steel rebars corrosion investigation with strain gages. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21(3), pp. 163-171, 1999.

Böhni H. Corrosion in reinforced concrete structures. CRC Press, 2005.

Broomfield J. P. Corrosion of steel in concrete, understanding, investigation and repair. E & FN SPON, 1997.

Broomfield J.P., Davies K., Hladky K. The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures. *Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 6 Iss: 6, pp. 631-646, 2000.

Davies J.R. Corrosion: understanding the basics. ASM International, 2000.

KYOWA Basic Information about Strain Gauges. Στο: http://www.kyowa-ei.com, τελευταία πρόσβαση στις 4 Μαρτίου 2017.

Lundgren K. Effect of corrosion on the bond between steel and concrete: an overview. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 59, No. 6, pp. 447–461, 2007.

Ohanian H. Φυσική, Τόμος Α’: Μηχανική – Θερμοδυναμική. μτφ. Φίλιππας Α. Συμμετρία, 1991.

Zeris C., Batis G., Mouloudakis V., Marakis J. Accelerated corrosion investigation of axially loaded reinforced concrete elements. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 61 Iss: 4, pp. 215-223, 2014.

Αποστολόπουλος Χ. Α., Ροδόπουλος Χ. Προβλήματα από τη διάβρωση του σιδηροοπλισμού των κατασκευών, ο ΚΤΧ 2008, ο ΚΑΝΕΠΕ και το ισχύον νομικό πλαίσιο. *Σκυρόδεμα & Χάλυβας*, Τ. 4ο, σ. 54-60, 2009.

Βαδαλούκας Κ. Πειραματική μελέτη επίδρασης της συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος στη διάδοση τασικού παλμού. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.

Γιαννόπουλος Π. Ι. Συνάφεια ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα. *Στο: 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος*, Αλεξανδρούπολη, Ελλάδα, 25-27 Οκτωβρίου 2006.

Ευταξιόπουλος Δ. Σημειώσεις Διάδοσης Κυμάτων στα Υλικά, μέρος Α'. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών, 2012.

ΚΤΧ 2008 Νέος κανονισμός τεχνολογίας χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος. Υπουργείο Περιβάλλοντος χωροταξίας και δημοσίων έργων, 2008.

Λεκάτου Α. Η διάβρωση και προστασία των μετάλλων με απλά λόγια. Νημερτής, 2013.

Παπαδάκης Ε. Γ. Υπολογισμός διάρκειας ζωής οπλισμένου σκυροδέματος λόγω διάβρωσης οπλισμού. *Στην: Ημερίδα τεχνολογίας σκυροδέματος και χαλύβων*, Ιωάννινα, Ελλάδα, 4 Δεκεμβρίου 2004.

Παπαδόπουλος Γ. Α., Βαδαλούκα Β. Γ. Εφαρμοσμένη Μηχανική, Μηχανική των Υλικών, Ελαστικότητα – Αντοχή. ΝΚ, 2009.

Παπαδόπουλος Μ. Π. Μηχανική συμπεριφορά διαβρωμένων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος. Πανεπιστήμιο Πατρών, 2007.

Πρασιανάκης Ι. Ν., Κουρκουλής Σ. Κ. Πειραματική Αντοχή των Υλικών. Συμμετρία, 1999.

Σπανός Χ., Σπιθάκης Μ., Τρέζος Κ. Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών. ΤΕΕ, 2001.

ΣΠΜΕ Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Τεχνική οδηγία 6: Ανθεκτικό σκυρόδεμα (Σε διάβρωση οπλισμού λόγω ενανθράκωσης ή-και δράσης χλωριόντων). Έκδοση 1η, 2015.

Σκουλικίδης Θ., Βασιλείου Π. Διάβρωση και προστασία υλικών. Συμεών, 2007.

Σχοινοχωρίτης Γ. Επίδραση της συνάφειας οπλισμού - σκυροδέματος με μικρή επικάλυψη στη διάδοση κύματος. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013.

Τάσιος Θ.Π., Αλιγιζάκη Κ. Ανθεκτικότητα ωπλισμένου σκυροδέματος. Φοίβος, 1993.

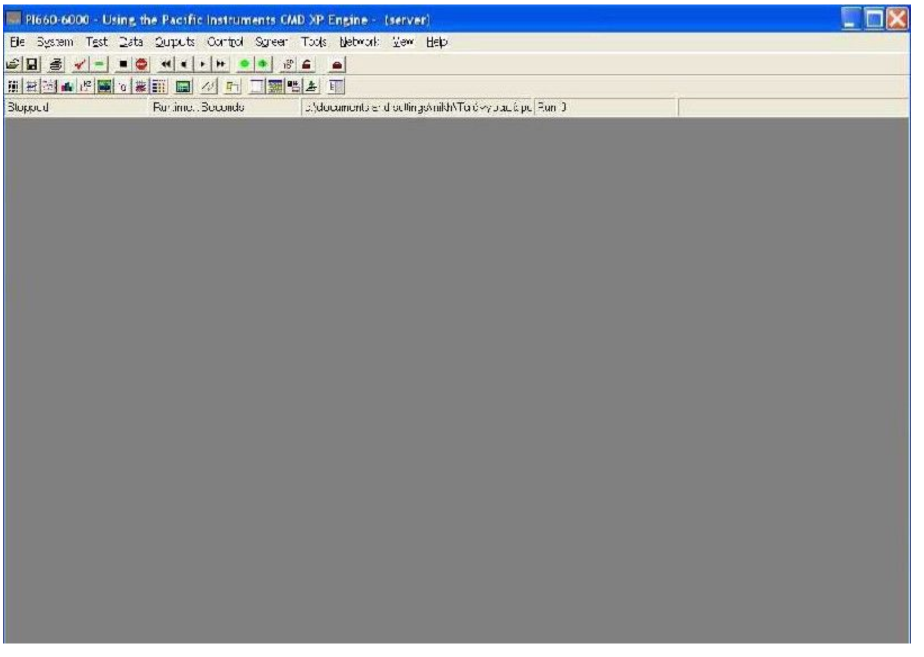
Τάσιος Θ. Π., Γιαννόπουλος Π. Ι., Τρέζος Κ. Π., Τσουκαντάς Σ. Γ. Ωπλισμένο Σκυρόδεμα. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1998.

Υφαντής Δ. Κ. Υλικά, διάβρωση & προστασία (Θεωρία και Ασκήσεις). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2003.

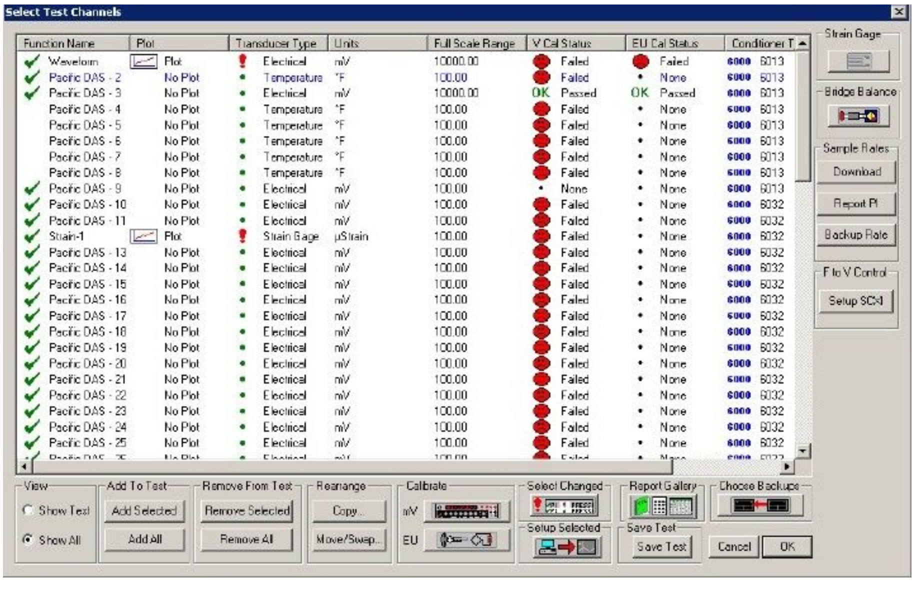
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Βασικά βήματα χρήσης λογισμικού PI660-6000 του μετρητικού συστήματος Model 6035 της Pacific Instruments

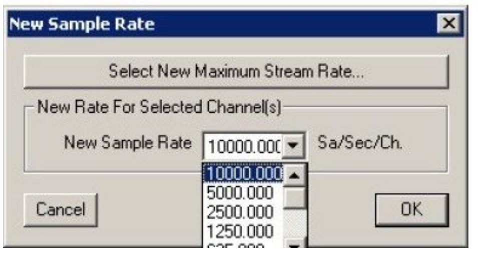
Βήμα 1ο: Στο παρακάτω παράθυρο επιλέγουμε Test→ Select Channel

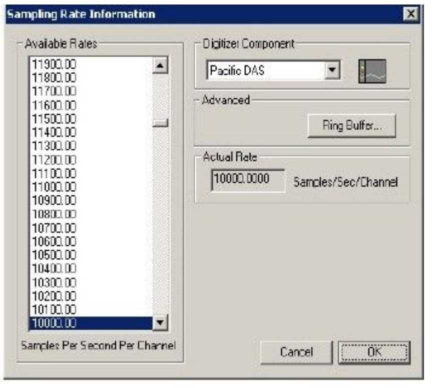


Βήμα 2ο: Επιλέγουμε τα κανάλια που θα χρησιμοποιήσουμε από το παρακάτω παράθυρο

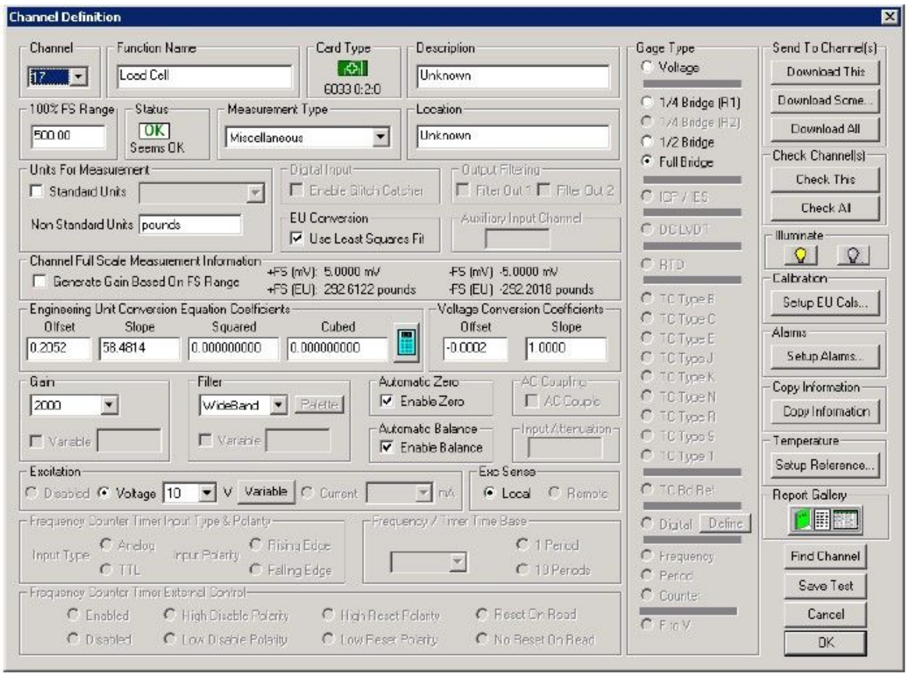


Βήμα 3ο: Επιλέγουμε το ρυθμό καταγραφής δεδομένων





Βήμα 4ο: Στο παρακάτω παράθυρο ορίζουμε τι θα μετρά το κανάλι π.χ. Strain gauge



Βήμα 5ο: Στο παρακάτω παράθυρο επιλέγουμε εγγραφή (πράσινος κύκλος)

Βήμα 6ο: Σώζουμε την εγγραφή και επιλέγουμε Data→ Select Playback file και επιλέγουμε ποιο κανάλι θέλουμε. Μετά πατάμε Screen και επιλέγουμε σε τι μορφή θα μας παρουσιάσει τα δεδομένα π.χ. Oscilloscope