

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ  
ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ  
ΣΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΑΣΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ**

**ΒΑΔΑΛΟΥΚΑΣ Γ. ΚΩΝ/ΝΟΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Γ.Α. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΕΜΦΕ**

**ΜΕΛΗ: Κ. ΤΡΕΖΟΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΠΜ**

**Β.Ν. ΚΥΤΟΠΟΥΛΟΣ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΕΜΦΕ**

**ΑΘΗΝΑ**

**2012**

Στον πατέρα μου.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα της Διπλωματικής Εργασίας μου Καθηγητή κ. Παπαδόπουλο για την καθοριστική βοήθειά του σε όλα τα στάδια της εργασίας και ιδιαίτερα για την παρουσία του και την υπομονή του κατά την διάρκεια των πειραμάτων, πολλά από τα οποία έγιναν σε μη συμβατικά ωράρια και πιεστικές χρονικά συνθήκες, λόγω της παράλληλης στρατιωτικής μου θητείας.

Επίσης ευχαριστώ τα μέλη της Επιτροπής, Αν. Καθ. κ. Τρέζο και Επ. Καθ. κ. Κυτόπουλο για την εν γένει συμβολή τους και τις παρατηρήσεις τους.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τον πατέρα μου, Γιώργο Βαδαλούκα Πολιτικό Μηχανικό, για την υπόδειξη του θέματος και για τις συζητήσεις που είχα μαζί του για την συμπεριφορά του σκυροδέματος και την μητέρα μου, Βασιλική Βαδαλούκα Επίκ. Καθ. ΕΜΠ, για τις συζητήσεις μας σε θέματα της πειραματικής διαδικασίας.

## Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	5
<b>Εισαγωγή</b> .....	7
<b>Κεφάλαιο 1. Μη καταστροφικός έλεγχος</b>	
1.1 Εισαγωγή. ....	9
1.2 Οπτικός έλεγχος. ....	10
1.3 Μέθοδος εξόλκευσης ήλου. ....	11
1.4 Υπέρηχοι. ....	12
1.5 Μέθοδος κρουσιμέτρου. ....	14
1.6 Ραδιογραφικές μέθοδοι. ....	16
1.7 Μαγνητικές μέθοδοι. ....	17
1.8 Ραντάρ. ....	18
<b>Κεφάλαιο 2. Συνάφεια σπλισμού - σκυροδέματος</b>	
2.1 Γενικά. ....	21
2.2 Ιστορική αναδρομή. ....	21
2.3 Νεώτερες εργασίες. ....	23
2.4 Υπολογισμός και σημασία της συνάφειας σε νέες κατασκευές. ...	29
2.5 Έλεγχοι συνάφειας. ....	33
<b>Κεφάλαιο 3. Διάδοση κυμάτων</b>	
3.1 Γενικά - Ορισμοί. ....	35
3.2 Η κυματική εξίσωση. ....	38
3.3 Ταχύτητες κύματος. ....	41
<b>Κεφάλαιο 4 Πειραματική διαδικασία</b>	
4.1 Εισαγωγή. ....	43
4.2 Ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης. ....	43
4.3 Προετοιμασία σπλισμού δοκιμίων. ....	46
4.4 Τα δοκίμια σκυροδέματος. ....	48
4.5 Η κρουστική καταπόνηση. ....	50
4.5 Το μετρητικό σύστημα. ....	51
4.7 Οι παράμετροι του πειράματος. ....	52
4.8 Στατικές μετρήσεις. ....	53
<b>Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα.</b>	
5.1 Τρόπος παρουσίασης. ....	55
5.2 Διαγράμματα. ....	56
5.3 Σύγκριση Σχολιασμός. ....	108
<b>Συμπεράσματα.</b> .....	117
<b>Βιβλιογραφικές Αναφορές.</b> .....	119

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αποτελεί το πρώτο βήμα μιας προσπάθειας, που αποσκοπεί στη δυνατότητα προσδιορισμού της συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος με Μη Καταστροφικές Μεθόδους.

Το αντικείμενο της παρούσας πειραματικής εργασίας, είναι η προσπάθεια συσχέτισης του βαθμού συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος σε στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος, ( $\Omega$ .Σ), με τις διαφοροποιήσεις που θα υποστεί τασικός παλμός, προκαλούμενος από κρούση, κατά την διάδοσή του στα στοιχεία αυτά. Πιο συγκεκριμένα, σε στοιχεία  $\Omega$ .Σ, στα οποία υπάρχει διαφοροποίηση του βαθμού συνάφειας, δημιουργείται κρουστικό κύμα και συγκρίνονται οι προκαλούμενες παραμορφώσεις και οι διαφοροποιήσεις χαρακτηριστικών του τασικού παλμού.

Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν δύο ομάδες τυποποιημένων κατά ASTM κυλινδρικών δοκιμίων. Και οι δύο ομάδες δοκιμίων, έφεραν διαμήκη οπλισμό από χάλυβα  $\Phi 12$ . Στη μεν πρώτη ομάδα δοκιμίων, ο οπλισμός παρουσίαζε πλήρη συνάφεια με το σκυροδέμα, στην δε δεύτερη, δεν υπήρχε πλήρης συνάφεια. Σε όλες τις περιπτώσεις ο οπλισμός προεξείχε του δοκιμίου σκυροδέματος. Σε επιλεγμένες θέσεις κατά μήκος του οπλισμού όλων των δοκιμίων, εντός και εκτός του σκυροδέματος, καθώς και επί της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων, επικολλήθηκαν μετρητές παραμόρφωσης. Ο τασικός παλμός δημιουργήθηκε από την κρούση σφύρας κατακορύφως επί του προεξέχοντος οπλισμού των δοκιμίων. Μέσω μετρητικού συστήματος ταχείας λήψης δεδομένων, ελήφθησαν για τις επιλεγμένες θέσεις, οι κυματομορφές, οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων που προκλήθηκαν από την κρούση, καθώς και οι συχνότητες που αυτές παρουσίαστηκαν. Για αυτά τα χαρακτηριστικά, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις δύο ομάδες των δοκιμίων και εξήχθησαν πρώτα συμπεράσματα.

## SUMMARY

The object of this experimental work is the correlation between the degree of bond of reinforcement in concrete elements, and the undergo changes due dynamic vibration, caused by shock

For this purpose, two groups test cylinders according to ASTM standard were made. In both groups of specimens the longitudinal reinforcement were  $\Phi 12$ . In the first group of specimens, the reinforcement had a perfect bond with the concrete. Second group of specimens, had partial bond. At selected locations along the reinforcement of all specimens, within the concrete and on the outer surface of the specimens, strain gauges attached. The dynamic vibration produced by impact hammer vertically projecting at the cores. For the recording, a data acquisition system was used. Time history and spectrum analysis diagram's are compared.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, κυρίαρχης σημασίας μηχανισμός για την συνολική εντατική απόκριση αποτελεί η συνάφεια μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος. Η σημασία της συνάφειας εντοπίζεται ήδη στις αρχές του προηγούμενου αιώνα, [1]. Μέχρι σήμερα έχει διεξαχθεί εκτεταμένη πειραματική και αναλυτική έρευνα, [2,3,4], με σκοπό τον καθορισμό των παραμέτρων που την επηρεάζουν, καθώς και την κατανόηση της μηχανικής του προβλήματος. Ο αναλυτικός μηχανισμός κυρίως περιγράφεται σαν σχέση μεταξύ της διεπιφανειακής τάσης και της σχετικής ολίσθησης του οπλισμού. Η σχέση αυτή αποτελεί βασικό εργαλείο κατά τον σχεδιασμό αλλά και την ανάλυση των δομικών στοιχείων. Πειραματικά προσδιορίζεται με δοκιμή εξόλκευσης.

Η εκτίμηση της απομένουσας διαθέσιμης αντοχής συνάφειας "προβληματικών» αγκυρώσεων αποτελεί αντικείμενο μελέτης των τελευταίων δεκαετιών, [5]. Η κρισιμότητα αφορά στην επάρκεια υφιστάμενων κατασκευών να ανταπεξέλθουν σε ενδεχόμενες σεισμικές δράσεις. Στην περίπτωση μειωμένης συνάφειας, η κατά τον σχεδιασμό ιεράρχηση των εκδηλούμενων μορφών αστοχίας ανατρέπεται, με συνέπεια την πρώιμη αστοχία της κατασκευής.

Ο έλεγχος της συνάφειας είναι πειραματικός και προσδιορίζεται με δοκιμή εξόλκευσης, η οποία βεβαίως είναι "καταστροφική". Μη καταστροφικοί έλεγχοι έχουν αναπτυχθεί, [6,7] και ερευνούν παράγοντες που έχουν επίδραση στην συνάφεια, όπως η διάβρωση κ.λπ., υπάρχουν όμως δυσκολίες για τον έλεγχο της κατάστασης της διεπιφάνειας μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί το αρχικό στάδιο, διερευνητικό θα μπορούσε να χαρακτηριστεί, για την δυνατότητα ποιοτικού ελέγχου του βαθμού συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος με μη καταστροφικό τρόπο. Βασίζεται στην διαφοροποίηση που θα υποστεί το τασικό κύμα κατά την διάδοσή του σε στοιχεία Ω.Σ. με διαφορετικό βαθμό συνάφειας. Πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών, ΕΑΥ, του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Γ.Α. Παπαδόπουλου. Εργασίες στον τομέα της πειραματικής διάδοσης

κύματος έχουν εκπονηθεί από τον ίδιο και σε συνεργασία με άλλα μέλη του Τομέα Μηχανικής, [8,9,10].

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



# Κεφάλαιο 1.

## Μη Καταστροφικός Έλεγχος σε υφιστάμενες κατασκευές από σκυρόδεμα

### 1.1 Εισαγωγή

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

Γενικότερα, ανάγκη για τον επιτόπου προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών ανακύπτει συνήθως στις εξής περιπτώσεις [11]:

- ποιοτικός έλεγχος υφισταμένων ή νέων κατασκευών
- αμφισβήτηση της ποιότητας των υλικών υφισταμένων ή νέων κατασκευών.

- προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των υλικών, προκειμένου να γίνουν εργασίες επεμβάσεων, (επισκευών ή και ενισχύσεων), σε υφιστάμενες κατασκευές.

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

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

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια περιληπτική αναφορά στις κλασικές αλλά και στις πλέον σύγχρονες και γνωστές σήμερα μεθόδους Μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) και αποτιμήσεως για κατασκευές από σκυρόδεμα.

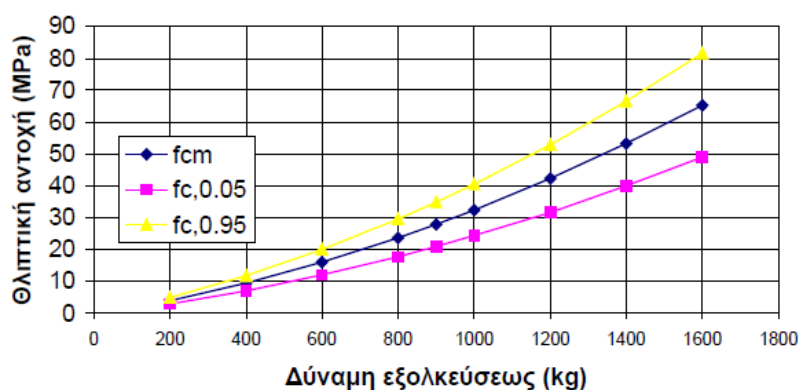
## **1.2 Οπτικός έλεγχος**

Πρόκειται για την πιο κλασική και απλή μέθοδο Μη Καταστροφικού Ελέγχου, (ΜΚΕ). Ο μηχανικός κάνει επιθεώρηση και συλλογή πληροφοριών για την κατασκευή πριν προβεί στον πιο λεπτομερή έλεγχο με τις άλλες μεθόδους. Κατά τον οπτικό έλεγχο εντοπίζονται και καταγράφονται οι φθορές – βλάβες που παρουσιάζει μία κατασκευή. Έτσι, ο έλεγχος συνίσταται στην καταγραφή, πάνω σε σχέδια ή σκαριφήματα, των εξής στοιχείων: Ρωγμές (θέση και εύρος) - διαβρωμένοι οπλισμοί - Προβλήματα υγρασίας, ανερχόμενης ή κατερχόμενης - Ανωμαλίες και φθορές σε σκυρόδεμα και χάλυβα, όπως : απόμιξη, φωλιές, αποθέσεις αλάτων, δημιουργία μικροσταλακτιτών, απολεπίσεις, αποφλοιώσεις, άτακτη

ρηγμάτωση, απόσπαση τεμαχίων, εκτινάξεις, ίχνη - κηλίδες σκουριάς, χρωματικές αλλοιώσεις, απογυμνωμένοι οπλισμοί, θραυσμένοι οπλισμοί, κατάσταση τενόντων προεντάσεως (κώνοι αγκυρώσεως, σωλήνες και καλώδια προεντάσεως, κατάσταση τσιμεντενέματος)

### 1.3 Μέθοδος εξόλκευσης ήλου

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



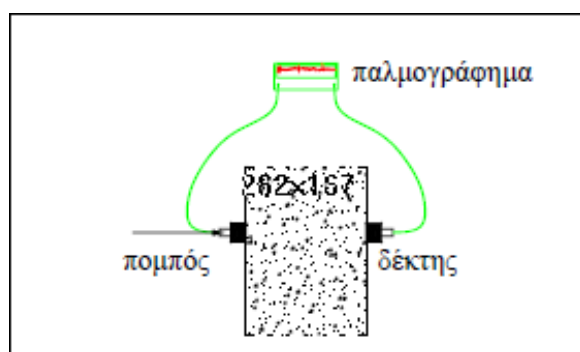
Σχήμα 1.1 Συσχέτιση δύναμης εξολκείσεως με την μέση θλιπτική αντοχή του Σκυροδέματος

Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται καμπύλη συσχέτισεως της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με δύναμη εξολκείσεως, σύμφωνα με τα πειράματα Λογοθέτης, 1979.

## 1.4 Υπέρηχοι

### 1.4.1 Περιγραφή της μεθόδου

Είναι μια έμμεση μη καταστροφική μέθοδος. Τα κύρια στοιχεία της συσκευής των υπερήχων φαίνονται στο σχήμα 1.2. Η συσκευή αποτελείται από δύο κρυστάλλους εκ των οποίων ο ένας είναι πομπός και ο άλλος δέκτης. Οι δύο κρύσταλλοι τοποθετούνται αντικριστά σε δύο παράλληλες επιφάνειες του υπό εξέταση στοιχείου. Οι κρύσταλλοι αποτελούνται από πιεζοηλεκτρικά κεραμικά στοιχεία τα οποία αλλάζουν μέγεθος όταν τους εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα ή παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν αλλάζουν μέγεθος.



Σχήμα 1.2 Σχηματική παράσταση συσκευής υπερήχων

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

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

Για την καλύτερη επαφή των κρυστάλλων στην επιφάνεια του σκυροδέματος χρησιμοποιείται λιπαντική ουσία, η οποία καλύπτει τις ατέλειες της εξωτερικής επιφάνειας

του στοιχείου. Παράλληλα κατά την διάρκεια της μέτρησης, θα πρέπει οι κρύσταλλοι να πιέζονται με μεγάλη δύναμη πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η ιδιοσυχνότητα των κρυστάλλων είναι συνήθως 50kHz. Γενικώς μικρότερης συχνότητας κρύσταλλοι, (20kHz), χρησιμοποιούνται σε στοιχεία με μεγάλη μάζα σκυροδέματος, ενώ μεγαλύτερης συχνότητας κρύσταλλοι, (>100kHz), χρησιμοποιούνται σε στοιχεία μικρού πάχους, όταν απαιτείται ακριβέστερη μέτρηση του χρόνου διαδόσεως. Για τους υπολογισμούς βρίσκεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των ταχυτήτων. Η ποιότητα του σκυροδέματος βάσει της Ατομική Επιτροπής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency Training Course Series No 17, Table 11.3, Page 110) χαρακτηρίζεται βάσει των ταχυτήτων όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1

$V_p$ (km/s)	Ποιότητα σκυροδέματος με πυκνότητα $\cong 2400 \text{ kg/m}^3$
> 4.5	Εξαιρετική
3.5 - 4.5	Καλή
3.0 - 3.5	Αμφίβολη
2.0 - 3.0	Κακή
< 2.0	Κακίστη

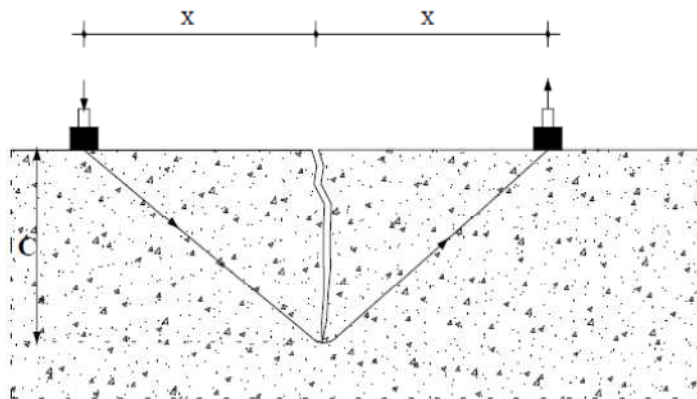
#### 1.4.2 Εκτίμηση του βάθους ρωγμής με την μέθοδο των υπερήχων

Η ύπαρξη μίας ρωγμής μπορεί να διαπιστωθεί μόνο όταν το μήκος της είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του κρυστάλλου-πομπού, ή μεγαλύτερο από το μήκος κύματος του υπέρηχου που χρησιμοποιείται. Αν υπάρχει ρωγμή τέτοιων διαστάσεων μέσα σε ένα δομικό στοιχείο, τότε όταν τοποθετηθούν οι κρύσταλλοι κατά μήκος του άξονα του, ο χρόνος διαδόσεως του υπερηχητικού κύματος παρουσιάζεται σημαντικά αυξημένος σε σχέση με τον χρόνο διαδόσεως που παρατηρείται όταν τοποθετήσουμε τους κρυστάλλους σε γειτονικές θέσεις χωρίς ρωγμές. Για να είναι οι μετρηθέντες χρόνοι συγκρίσιμοι, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ομοιογένεια του σκυροδέματος του εξεταζόμενου στοιχείου. Η εκτίμηση του βάθους μιας επιφανειακής ρωγμής, κάθετης στην επιφάνεια, μπορεί να γίνει τοποθετώντας τους κρυστάλλους όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.

Δίνουμε στο L τις τιμές 150mm και 300mm και μετράμε τους αντίστοιχους χρόνους διαδόσεως των υπερήχων,  $t_1$  και  $t_2$ . Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές υπολογίζουμε το βάθος της ρωγμής C (σε mm) ως εξής:

$$\left(\frac{c}{150}\right)^2 = \frac{(4t_1^2 - t_2^2)}{(t_2^2 - t_1^2)}$$

Όπου,  $t_1$  : ο χρόνος διαδόσεως για L=150mm,  $t_2$  : ο χρόνος διαδόσεως για L=300mm



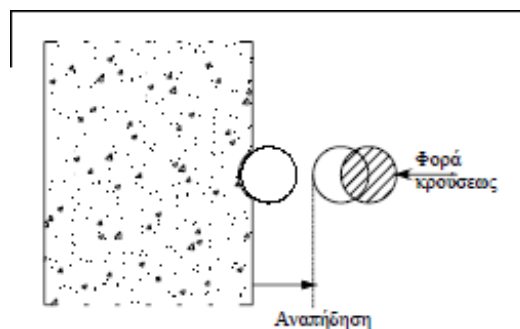
Σχήμα 1.3 Εκτίμηση βάθους ρωγμής

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

## 1.5 Μέθοδος Κρουσίμετρου

Η μέθοδος του κρουσίμετρου είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος εκτιμήσεως της αντοχής του σκυροδέματος, που βασίζεται στην μέτρηση της επιφανειακής σκληρότητας των υπό εξέταση δομικών στοιχείων. Με την μέθοδο αυτή εξετάζεται η ποιότητα του σκυροδέματος της εξωτερικής επιφάνειας των κατασκευών και σε βάθος έως 30mm περίπου. Μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα για την αντοχή ενός δομικού στοιχείου μόνο όταν συνδυαστεί και με άλλες μεθόδους. Στον κανονισμό ASTM C805 (1985), προτείνεται ο

συνδυασμός της μεθόδου του κρουσίμετρου με την ημικαταστρεπτική μέθοδο των πυρήνων, ώστε να συσχετισθεί η ένδειξη R του κρουσίμετρου με την αντοχή του σκυροδέματος. Η αρχή της μεθόδου φαίνεται στο σχήμα 1.4. Μια μεταλλική μάζα προσκρούει στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Το ύψος αναπήδησής αυτής της μάζας εξαρτάται από την ελαστικότητα του υλικού και, επομένως, από την αντοχή του. (Η θλιπτική αντοχή συμβολίζεται με f)



Σχήμα 1.4 Αρχή λειτουργίας μεθόδου κρουσιμέτρου

Η μέθοδος χρησιμοποιείται και για την διαπίστωση της ομοιογένειας του σκυροδέματος των εξεταζόμενων δομικών στοιχείων, κυρίως πριν τον έλεγχο τους από άλλες μεθόδους όπως πυρηνοληψία και εξόλκευση ήλου. Κατά την μέτρηση του δείκτη επιφανειακής σκληρότητας για ηλικίες σκυροδέματος μεταξύ 14 ημερών και 3 μηνών, το σφάλμα των μετρήσεων μπορεί να φτάσει το 15%, ενώ για σκυροδέματα ηλικίας μεγαλύτερης των 3 μηνών, το σφάλμα φτάνει το 25%.

Οι τιμές του δείκτη σκληρομέτρησης R συσχετίζονται με πιθανή τιμή του βw από την εμπειρική έκφραση:

$$\lambda \cdot R'$$

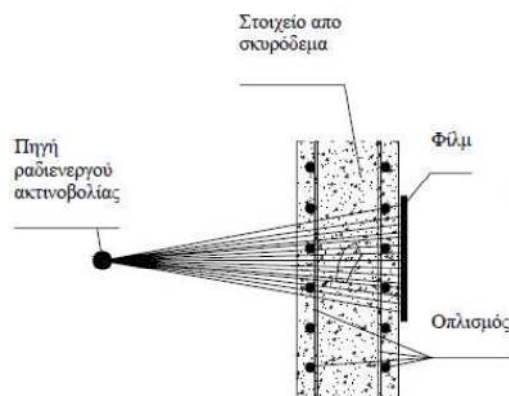
με  $R' = -95,9 + 5,35R + 0,23R^2$  και λ ο διορθωτικός συντελεστής θέσης, (λ=1 για οριζόντια θέση του οργάνου ή λ=1,1 ή 1/1,1 για κατακόρυφη θέση του οργάνου).

Ελέγχονται οι τιμές βw, καθώς και η μέση τιμή τους με το κριτήριο συμμορφώσεως του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος με την μέθοδο του κρουσίμετρου είναι:

Ο τύπος τσιμέντου, ο τύπος και η γεωμετρία των εξεταζόμενων δοκιμίων, η υγρασία, η θερμοκρασία, η ενανθράκωση (χαρακτηριστικό είναι ότι για κάθε mm βάθους ενανθράκωσης στο σκυρόδεμα, το κρουσίμετρο δίνει πλασματική τιμή μεγαλύτερη κατά 4%)

## 1.6 Ραδιογραφικές μέθοδοι

Ανήκουν στην κατηγορία των εμμέσων μεθόδων. Χρησιμοποιείται η ραδιενέργεια προκειμένου να παραχθεί μια ακτινογραφία του εσωτερικού του ελεγχόμενου τμήματος της κατασκευής. Η αρχή της μεθόδου φαίνεται στο σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5 Η αρχή της μεθόδου ραδιογραφίας

Μια ραδιενεργός πηγή τοποθετείται στην μία πλευρά του εξεταζόμενου στοιχείου, κατάλληλα προστατευμένη για λόγους ασφαλείας του προσωπικού, ενώ από το πίσω μέρος του στοιχείου τοποθετείται και ένα ειδικό φωτογραφικό φιλμ. Στο φιλμ καταγράφεται η ένταση της διερχομένης ακτινοβολίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερη είναι η έκθεση του φιλμ. Η μέθοδος είναι ακριβώς ίδια με την χρησιμοποιούμενη στην ιατρική. Με την μέθοδο αυτή ανιχνεύεται η παρουσία του



οπλισμού (παρουσιάζεται ως λευκά σημεία στην ακτινογραφία) και η ύπαρξη κενών στο σκυρόδεμα (παρουσιάζονται ως μαύρες περιοχές).

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

## 1.7 Μαγνητικές μέθοδοι

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

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

Τα εμπορικά μαγνητόμετρα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Σε αυτά που βασίζονται στην αρχή της μαγνητικής αντίστασης. Για δεδομένη επικάλυψη η ένδειξη του οργάνου εξαρτάται από το εμβαδόν της ράβδου και τις μαγνητικές ιδιότητές της, (σύνθεση του κράματος και τύπος επεξεργασίας). Η ένδειξη επίσης εξαρτάται και από την παρουσία σιδηρούχων αδρανών στο σκυρόδεμα, (σε αντίθεση προς τα μαγνητόμετρα που βασίζονται σε δινορεύματα, τα οποία δεν επηρεάζονται από σιδηρούχα αδρανή).
- Σε εκείνα που βασίζονται στα δινορεύματα (ρεύματα Φουκώ). Βασίζονται στην ηλεκτρική αγωγιμότητα της ράβδου και ανιχνεύουν μαγνητικά αλλά και μή μαγνητικά αντικείμενα.

Πρόκειται για καθαρά μή καταστρεπτική μέθοδο. Ο εξοπλισμός είναι ελαφρύς, φορητός και εύχρηστος. Προσδιορίζεται με ακρίβεια η θέση του οπλισμού, ενώ το πάχος της επικαλύψεως εκτιμάται με αρκετά καλή προσέγγιση. Επειδή η ένδειξη του οργάνου εξαρτάται τόσο από την επικάλυψη όσο και από την διάμετρο της ράβδου, δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός και των δύο παραμέτρων με μία μόνον μέτρηση. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη μια διπλή μέτρηση (BS 1881, part 204): η πρώτη γίνεται με την κεφαλή του οργάνου σε επαφή με το σκυρόδεμα και η δεύτερη με την κεφαλή του οργάνου σε δεδομένη απόσταση. Η διακριτική ικανότητα εξαρτάται από το πόσο διακεκριμένες είναι οι καμπύλες της ενδείξεως του οργάνου συναρτήσει της επικαλύψεως για διάφορες διαμέτρους του οπλισμού. Επειδή όμως οι καμπύλες για δύο διαδοχικές διαμέτρους είναι σχετικά κοντά η μια με την άλλη, γι' αυτό η εκτίμηση της διαμέτρου δεν γίνεται με μεγάλη ακρίβεια. Τελευταίως πάντως κυκλοφόρησαν όργανα τα οποία εκτιμούν την διάμετρο της ράβδου χωρίς διπλή μέτρηση.

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

## **1.8 Ραντάρ**

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

σωλήνων, πάχος εδαφικών στρώσεων κλπ). Προσφάτως άρχισε να εφαρμόζεται και σε κατασκευές για τον προσδιορισμό του πάχους πλακών από σκυρόδεμα, εντοπισμό ράβδων σκυροδέματος και έλεγχο εσωτερικών φθορών.

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

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου κατατάσσονται η ικανότητα διεισδύσεως και ο προσδιορισμός μη ορατών καταστάσεων, η ικανότητα σαρώσεως μεγάλων επιφανειών σε μικρό χρόνο και η μεγάλη ευαισθησία στην υγρασία και στα ενσωματωμένα μεταλλικά αντικείμενα. Το πάχος σκυροδέματος το οποίο μπορεί να ελεγχθεί με την μέθοδο του ραντάρ είναι της τάξεως των 750mm, (εξαρτώμενο από την συχνότητα της αντένας και την περιεχόμενη υγρασία). Οι συνήθεις αντένες καλύπτουν μια κωνική περιοχή. Σε ένα βάθος 200mm καλύπτουν μια περιοχή περίπου 0.1m<sup>2</sup>, δηλαδή για τέτοια βάθη απαιτούνται παράλληλες διελεύσεις ανά περίπου 0.3m. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μικρή διακριτική ικανότητα όταν οι ράβδοι οπλισμού στο σκυρόδεμα βρίσκονται η μία κοντά στην άλλη. Η διακριτική ικανότητα, εκτός από την απόσταση των ράβδων μεταξύ

τους, εξαρτάται και από την επικάλυψη του οπλισμού. Ενδεικτικώς αναφέρεται ότι, για επικάλυψη οπλισμών 5cm, οι ράβδοι πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 10 έως 15cm για να είναι ανιχνεύσιμες. Πολύ πυκνοί οπλισμοί, λόγω της έντονης αντανάκλασης, αποτρέπουν την ανίχνευση λοιπών χαρακτηριστικών που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη. Τέλος, με την μέθοδο αυτή, δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός της διαμέτρου της ράβδου καθώς και η ύπαρξη εσωτερικών ρωγμών. Συμπερασματικά η μέθοδος είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό του πάχους του σκυροδέματος καθώς και τον προσδιορισμό της στάθμης των οπλισμών.

## Κεφάλαιο 2.

### Συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος

#### 2.1 Γενικά

Συνάφεια είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μεταφορά δυνάμεων από το σκυρόδεμα προς τον χάλυβα και αντιστρόφως.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική ανασκόπηση του φαινομένου της συνάφειας οπλισμού και σκυροδέματος. Παρουσιάζονται βασικά πειράματα, ενώ γίνεται και μία σύντομη αναφορά στα σύγχρονα κανονιστικά πλαίσια.

Στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, κυρίαρχης σημασίας μηχανισμός για την συνολική εντατική απόκριση αποτελεί η συνάφεια μεταξύ οπλισμού και του σκυροδέματος.

#### 2.2 Ιστορική αναδρομή

Η σημασία της συνάφειας εντοπίζεται στις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Πειράματα ξεκίνησαν ήδη από το 1939 από τον Menzel [1], που πραγματοποίησε μια σειρά δοκιμών για να διερευνήσει την επίδραση της κατάστασης των επιφανειών στην εξόλκευση των ράβδων. Ερεύνησε επίσης τις συνέπειες, της αναλογίας τσιμέντου, του μήκους αγκύρωσης και της διεύθυνση της ράβδου. Απέδειξε ότι η κατάσταση της επιφάνειας λείων ράβδων είχε πολύ σημαντική επίδραση στην αντοχή συνάφειας. Μια απόλυτα λειασμένη ράβδος είχε μόνο το  $\frac{1}{4}$  της τιμής αντίστασης σε εξόλκευση από ράβδο θερμής έλασης. Ο Menzel επίσης κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αυξημένη αναλογία τσιμέντου ή το αυξημένο βάθος έμπηξης οδήγησε σε αύξηση της αντίστασης σε εξόλκευση. Οι Furguson και Thompson, το 1962, [2], πραγματοποίησαν σειρά πειραμάτων για να καθορίσουν το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης σε στοιχεία δοκού. Οι μεταβλητές που ελέγχθηκαν συμπεριελάμβαναν την διάμετρο των ράβδων (# 3, # 7 και # 11) με ή χωρίς συνδετήρες και τις διαστάσεις δοκού. Διαπιστώθηκε ότι η συνάφεια ήταν συνάρτηση του

μήκους των ράβδων και όχι του μεγέθους της ράβδου. Το πλάτος δοκού και η επικάλυψη είχαν επίσης σημαντική επίδραση. Οι Furguson και Thompson, το 1965, [12], πραγματοποίησαν μια μελέτη σχετικά με το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης μεγάλων (# 11 και # 18) ράβδων. Κατά την έρευνα κύριες μεταβλητές ήταν η επικάλυψη, το πλάτος δοκού, ποσοστό συνδετήρων, μήκος έμπηξης και η απόσταση από την άλλη επιφάνεια σκυροδέματος. Βρήκαν όπως και στην προηγούμενη εργασία, ότι αυξημένο βάθος έμπηξης οδηγεί στην ανάπτυξη χαμηλότερων τάσεων συνάφειας. Αυξημένη επικάλυψη οδήγησε σε αύξηση της αντίστασης σε εξόλκευση, αλλά δεν ήταν χρήσιμη για τη μείωση της έκτασης των ρωγμών.

Ο McDermott, 1969, [3], συνέταξε έκθεση για την Επιτροπή ACI 439 που διερεύνησε την επίδραση της αντοχής του χάλυβα και του ποσοστού οπλισμού στην μορφή αστοχίας. Η επιτροπή ACI 408 ερεύνησε τις επιπτώσεις που είχε ανακυκλιζόμενη φόρτιση στην συνάφεια σκυροδέματος χάλυβα. Στην έκθεσή τους (Mitchell, et al., 1992), [4], δήλωσαν ότι ενώ η μέση τάση κυμαίνονταν από 1500 έως 3000 psi για τις απαιτήσεις σχεδιασμού έπρεπε να περιορίζεται έως 350 psi. Προέκυψε επίσης ότι δυνάμεις συνάφειας ήταν ένας συνδυασμός των τριών πραγμάτων, της χημικής πρόσφυσης μεταξύ τσιμέντου και χάλυβα, η οποία ήταν συνάρτηση της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος, της μηχανικής σύμπλεξης των παραμορφώσεων του χάλυβα και σκυροδέματος και της τριβής μεταξύ του σκυροδέματος και χάλυβα.

Μια σε βάθος μελέτη για την ολίσθηση υπό κρουστικό φορτίο έγινε το 1992 (Yan 1992), [13]. Το Δυναμικό φορτίο παράγονταν από την πτώση βάρους 345 κιλών. Τα πειράματα αφορούσαν τόσο την εξόλκευση όσο και την έμπηξη. Και για τους δύο τύπους των δοκιμών, η πειραματική αφορούσε τρεις διαφορετικούς τύπους φόρτωσης: στατική, δυναμική, και κρουστική. Σημαντικές μεταβλητές της πειραματικής μελέτης ήταν δύο διαφορετικοί τύποι ράβδων οπλισμού σκυροδέματος (λείοι και νευροχάλυβες), δύο διαφορετικές αντοχές σκυροδέματος (Κανονική και υψηλή), δύο διαφορετικές ίνες (πολυπροπυλένιο και χάλυβα), ίδια περιεκτικότητα (0,1%, 0,5% και 1,0% κατ όγκο), και οι συνθήκες επιφάνειας (με επικάλυψη εποξειδικής κόλλας και χωρίς κόλλα). Το φορτίο εφαρμόζονταν στο οπλισμού και οι παραμορφώσεις κατά μήκος του οπλισμού μετρήθηκαν άμεσα. Διαπιστώθηκε ότι για

τους λείους οπλισμούς, υπήρχε μια γραμμική σχέση τάσης συνάφειας - ολίσθησης τόσο για τα στατικά φορτία στατικά όσο και για τα δυναμικά. Οι διαφορετικές φορτίσεις, αντοχές, τα είδη ινών, η περιεκτικότητα σε ίνες βρέθηκαν να μην έχουν σημαντική επίπτωση στην σχέση συνάφειας - ολίσθησης. Για νευροχάλυβες, ο μηχανισμός διάτμηση λόγω των νευρώσεων έπαιζε τον σημαντικό ρόλο στην συνάφεια σε αυτήν τη σχέση. Διαπιστώθηκε επίσης ότι υπάρχει πάντα υψηλότερη αντοχή για φόρτιση θλιπτική από τη εφελκυστική φόρτιση. Το 1983 (Vos), [14], έγινε μια σειρά από δυναμικά πειράματα με στόχο τον καθορισμό ποσοτικά της σχέσης ολίσθησης – τάσης για να χρησιμοποιηθεί σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιήθηκε μόνο μία ράβδος διαμέτρου 10 mm με μήκος έμπληξης  $3d = 30 \text{ mm}$ . Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος 22, 45, και 55 N/mm<sup>2</sup>. Επιπλέον διάφοροι τύποι χάλυβα οπλισμού λείοι και νευροχάλυβες. Κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που επιτεύχθηκαν από Yan, δηλαδή, ότι η αντοχή συνάφειας των λείων ράβδων είναι ανεξάρτητη από το είδος της φόρτισης και της αντοχής του σκυροδέματος. Ο νευροχάλυβας από την άλλη πλευρά έδειξε αξιοσημείωτη αύξηση της συνάφειας με την αύξηση του είτε της φόρτισης είτε της αντοχής του σκυροδέματος

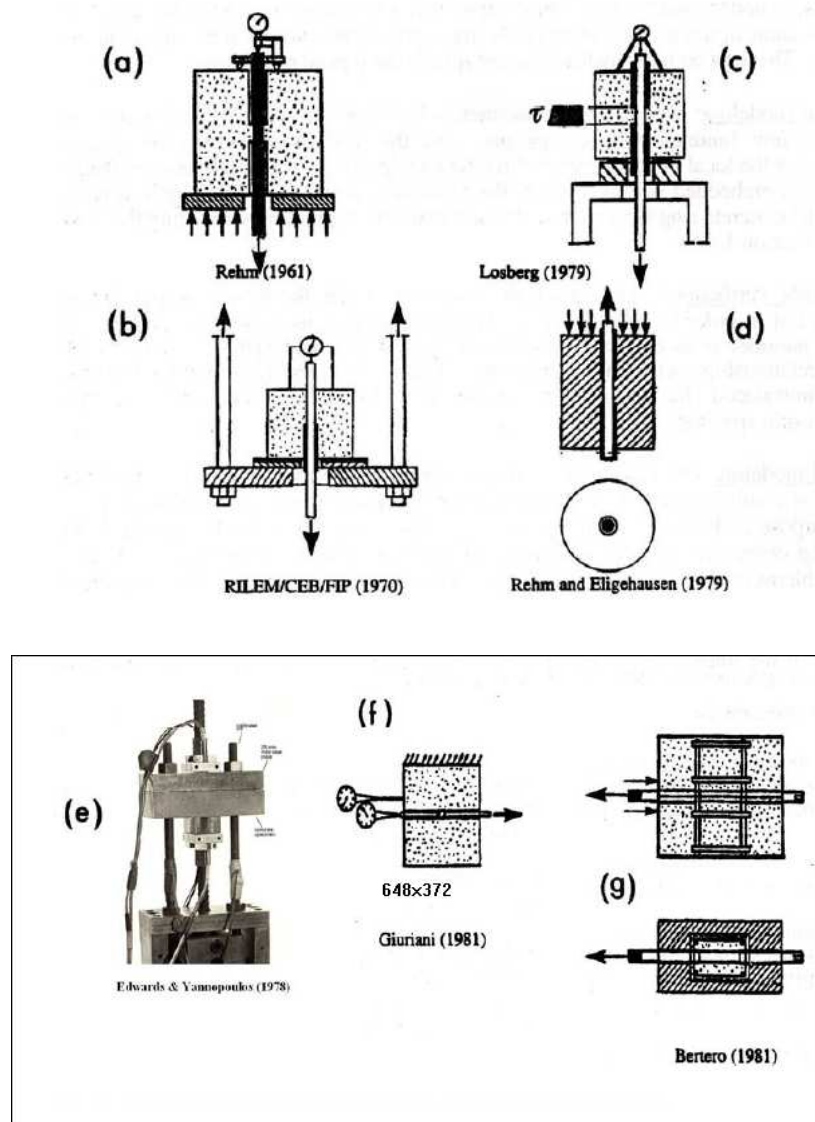
### **2.3 Νεώτερες εργασίες**

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

Ο αναλυτικός μηχανισμός κυρίως περιγράφεται σαν σχέση μεταξύ της διεπιφανειακής τάσης και της σχετικής ολίσθησης του οπλισμού. Η σχέση αυτή αποτελεί βασικό εργαλείο κατά τον σχεδιασμό αλλά και την ανάλυση των δομικών στοιχείων. Πειραματικά προσδιορίζεται με δοκιμή εξόλκευσης. Σε ράβδο μέσα σε κύβο σκυροδέματος και με περιορισμένο μήκος αγκύρωσης εφαρμόζεται εφελκυστική δύναμη. Στο σχήμα 2.1 φαίνονται παραδείγματα δοκιμών εξόλκευσης.

Στην πραγματικότητα (δηλαδή στις κατασκευές) η επικάλυψη είναι περιορισμένη, και η αστοχία εκδηλώνεται με ρηγμάτωση του σκυροδέματος προς την πλησιέστερη ελεύθερη

παρειά. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε τυποποιημένη δοκιμή δοκού η οποία φαίνεται στο σχήμα 2.2.

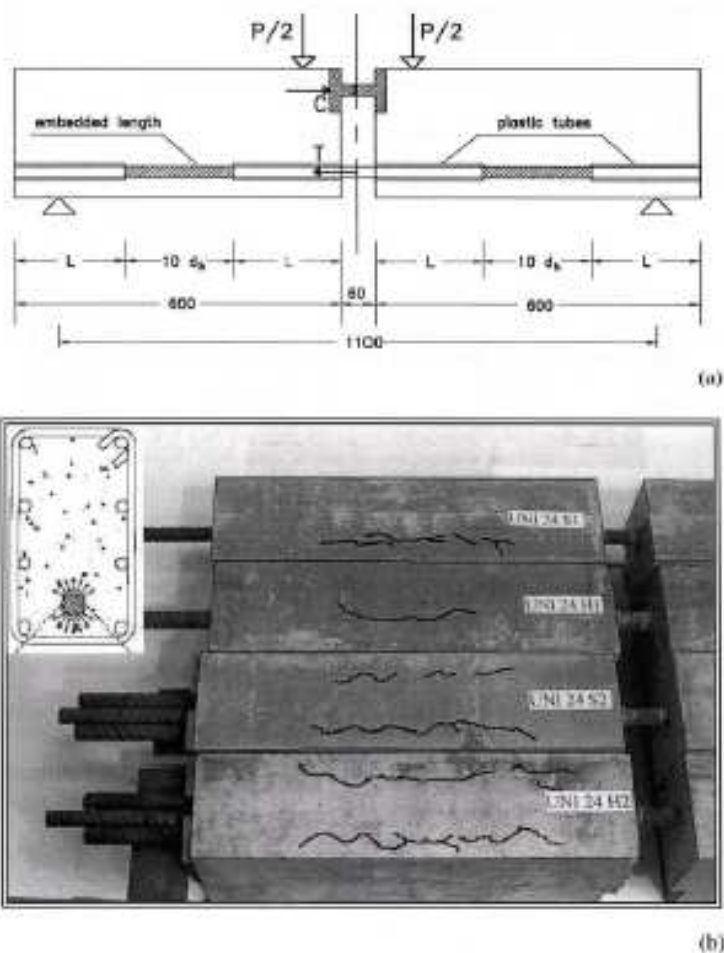


Σχήμα 2.1 Παραδείγματα δοκιμών εξόλκευσης

Η εκτίμηση της απομένουσας διαθέσιμης αντοχής συνάφειας “προβληματικών» αγκυρώσεων αποτελεί αντικείμενο μελέτης των τελευταίων δύο δεκαετιών. Η κρισιμότητα αφορά στην επάρκεια υφιστάμενων κατασκευών να ανταπεξέλθουν σε ενδεχόμενες σεισμικές δράσεις. Στην περίπτωση μειωμένης συνάφειας, η κατά τον σχεδιασμό ιεράρχηση



των εκδηλούμενων μορφών αστοχίας ανατρέπεται με συνέπεια την πρώιμη αστοχία της κατασκευής.



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

Η συνάφεια επηρεάζει τις κατασκευές με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους.

Στην Οριακή κατάσταση αστοχίας είναι καθοριστικός ο ρόλος της μέσω των αγκυρώσεων για την δυνατότητα στροφής των διατομών κάτω από τις σεισμικές δράσεις και την δυνατότητα σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στην κρίσιμη περιοχή των δοκών και υποστυλωμάτων

Αλλά και στις καταστάσεις λειτουργικότητας παίζει καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος των ρωγμών που θα εμφανιστούν και στα βέλη που θα αναπτυχθούν

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

Πρόσφατα σημαντικά πειράματα έχουν γίνει από Weathersby (2003), [15], ο οποίος ερεύνησε τη συνάφεια χάλυβα και σκυροδέματος σε δυναμικές και οιονεί μόνιμες φορτίσεις. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ένα από τα δοκίμια και η απόκρισή του.

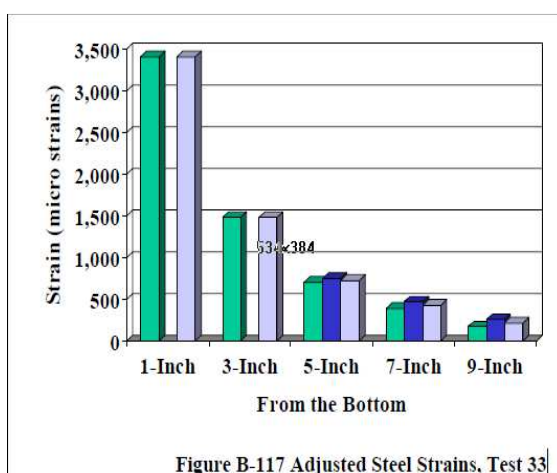


Figure B-117 Adjusted Steel Strains, Test 33

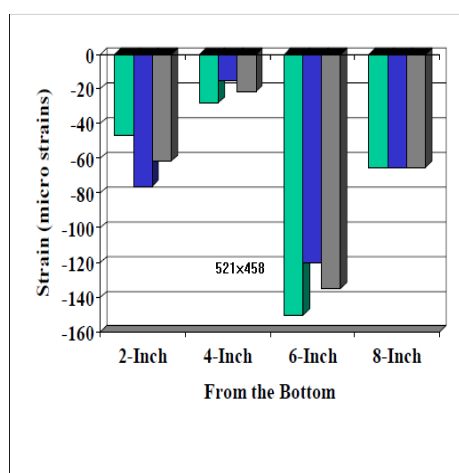


Figure B-118 Adjusted Concrete Strains, Test

Σχήμα 2.3 Απόκριση σε δυναμικές καταπονήσεις

Πρόσφατη έρευνα για την συνάφεια έκαναν και οι Verderame, κ.ά. (2009), [16,17], οι οποίοι μελέτησαν τη συμπεριφορά των λείων χαλύβων.

Το θέμα των επιπτώσεων της σεισμικής δράσης στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, όταν η δράση συντελείται ενώ το σκυρόδεμα είναι ακόμα νωπό, ως προς την συνάφεια έχει διερευνηθεί την τελευταία δεκαετία, [18].

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

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

Για την εξέλιξη του φαινομένου εκδόθηκε το *State of the Art Report* (FIB 2000) [19], στο οποίο και γίνεται εκτενής αναφορά για τα προσομοιώματα που έχουν προταθεί για την περιγραφή του καταστατικού νόμου τοπικής συνάφειας τοπικής ολίσθησης. Σύμφωνα με αυτό, ο μηχανισμός της συνάφειας σε μονοτονική φόρτιση εμφανίζει τέσσερα διακριτά στάδια:

### Στάδιο I (Μή ρηγματωμένο σκυρόδεμα).

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

### Στάδιο II (Πρώτη ρηγμάτωση).

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

### Στάδιο III (Διαμήκειες ρηγματώσεις)

Εξαιτίας της ανάπτυξης ακτινικών εφελκυστικών τάσεων, αναπτύσσονται διαμήκειες ρηγματώσεις που οφείλονται στη διάρρηξη του σκυροδέματος. Η ανάπτυξη των ρωγμών αυτών περιορίζεται από το περιβάλλον σκυρόδεμα (επικάλυψη), από την ύπαρξη εγκάρσιων οπλισμών και από την ύπαρξη εγκάρσιας θλίψης. Σε μέλη με ελαφρύ εγκάρσιο οπλισμό ή μικρές επικαλύψεις, το στάδιο αυτό λήγει μόλις οι διαμήκειες ρωγμές φτάσουν

στην επιφάνεια του στοιχείου και ακολουθείται από έντονη πτώση της συνάφειας (Στάδιο IVb). Αντιθέτως, σε μέλη με ισχυρό εγκάρσιο οπλισμό ή μεγάλες επικαλύψεις, εξαιτίας της περισφιγξης που προσφέρουν, οι ρωγμές διάρρηξης περιορίζονται σε μια μικρή περιοχή γύρω από τη ράβδο

**Στάδιο IVa (Λείες ράβδοι – Αστοχία εξόλκευσης).**

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

**Στάδιο IVb (Αστοχία διάρρηξης).**

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

**Στάδιο IVc (Αστοχία εξόλκευσης).**

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

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

*Η ποιότητα της συνάφειας εξαρτάται από την μορφή της επιφάνειας της ράβδου, την διάσταση του δομικού στοιχείου και από την θέση και κλίση του οπλισμού κατά την σκυροδέτηση. Η ελάχιστη*

επικάλυψη των οπλισμών πρέπει να εξασφαλίζει την ανάπτυξη και μεταβίβαση των τάσεων συνάφειας. Οι τάσεις συνάφειας θεωρούνται σταθερές κατά μήκος των ράβδων. Ο προσδιορισμός των μηκών αγκυρώσεως και των υπερκαλύψεων βασίζεται στην τιμή σχεδιασμού της τάσεως συνάφειας  $f_{bd}$ .

Διακρίνονται δύο περιοχές συνάφειας:

Περιοχή συνάφειας I: όπου οι συνθήκες συνάφειας θεωρούνται ευνοϊκές.

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

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

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

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

Περιοχή συνάφειας I  $f_{ck}$  12 16 20 25 30 35 40 45 50

Λείες ράβδοι 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7

Ράβδοι  $\phi < 32$  υψηλής συνάφειας 1.6 2.0 2.3 2.7 3.0 3.4 3.7 4.0 4.3

Περιοχή συνάφειας II 70% των τιμών της περιοχής συνάφειας I

Βασικό μήκος αγκύρωσης:

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

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

όπου:  $\varnothing$  η διάμετρος της ράβδου

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

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

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

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

Ενώ η τιμή της τάσης σχεδιασμού της συνάφειας λαμβάνεται ως

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

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

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

.....

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

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

Στο διάγραμμα F- $\delta$  ο ΚΑΝΕΠΕ τονίζει

Επειδή στα στοιχεία ΟΣ οι καμπτικές παραμορφώσεις συνυπάρχουν με τις διατμητικές και με τις στροφές των ακραίων διατομών λόγω εξόλκευσης των οπλισμών στην αγκύρωση πέραν του άκρου

του στοιχείου, η καταλληλότερη επιλογή  $F$  και  $\delta$  είναι η ροπή  $M$  και η γωνία στροφής χορδής “ $\theta$ ” στα άκρα του στοιχείου, όπου η  $\theta$  περιλαμβάνει το σύνολο των καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων, καθώς και τη στροφή των άκρων λόγω εξόλκευσης οπλισμών

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

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

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

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

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

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

(i) της μήκυνσης του χάλυβα στη διαρροή,

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

Για την παραμόρφωση στην διαρροής

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

Τιμή δηλαδή που εξαρτάται άμεσα από την διαθέσιμη συνάφεια.

Και για την ροπή διαρροής ή αστοχίας



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

## 2.5 Έλεγχοι συνάφειας

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

Η συνάφεια μεταξύ του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος και για να είναι αποτελεσματική, πρέπει να υπάρχει επαρκής τριβής μεταξύ των δύο υλικών. Όμως με την πάροδο των ετών υπάρχει συρρίκνωση και μπορεί να υπάρξει και μείωση της αντοχής των υλικών ή εάν τα υπάρχουν ρωγμές ή είναι πολύ διαπερατό το σκυρόδεμα μπορεί να εμφανιστεί διάβρωση του χάλυβα. Δεν υπάρχει πρότυπη δοκιμή για την μέτρηση της συνάφειας, ωστόσο, ένα τεστ που στηρίζεται στην εξόλκευση έχει αναπτυχθεί για τη σύγκριση των διαφόρων σκυροδεμάτων (ASTM C234). Το τεστ αποτελείται από ένα κύβο 6 ιντσών με ενσωματωμένη ράβδο διαμέτρου 19 mm. Η ράβδος φορτίζεται με τιμή όχι μεγαλύτερη από 5000 λίβρες / τετραγωνική ίντσα το δευτερόλεπτο. Το φορτίο και η ολίσθηση καταγράφονται κατά διαστήματα μέχρι

(1) ο χάλυβας να διαρρεύσει ή

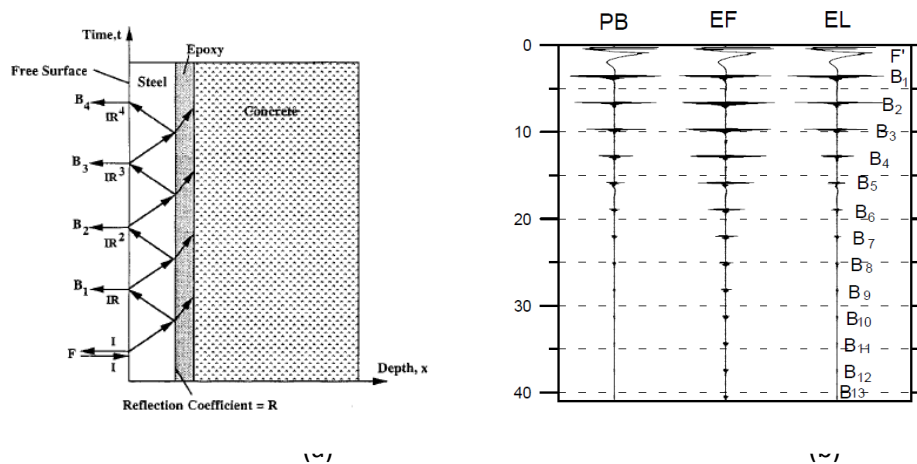
(2) Το σκυρόδεμα να ρηγματώσει ή

(3) Ολίσθηση 2.5 mm να συμβεί στο τέλος της φόρτισης

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

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

Οι Chung-Yue Wang<sup>1</sup>, et., ανέπτυξαν μία μέθοδο για τον Μη καταστροφικό έλεγχο της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και ατσάλινης πλάκας επικολλημένης σε διατομή του. Για το πρόβλημα αυτό, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα μικρό σφυρί για να χτυπήσουμε την πλάκα από χάλυβα και να ακούσουμε τους ήχους. Ανώμαλη δόνηση σημαίνει ελαττωματική περιοχή. Όταν η περιοχή αποκόλλησης είναι μικρή και η ατσάλινη πλάκα είναι μεγάλου πάχους, καθίσταται αδύνατο να προσδιοριστεί μια ανώμαλη δόνηση από τον ήχο. Η μέθοδος που ανέπτυξαν στηρίζεται στην διαφοροποίηση του ανακλώμενου κύματος. Στο σχ.2.4a φαίνονται οι ανακλάσεις του υπερηχητικού παλμού. Στο σχ.2.4b, οι καταγραφές για τις περιπτώσεις διαφορετικής συνάφειας (εξασφαλισμένης μέσω κόλλας)



Σχήμα 2.4 (α) Διάδοση παλμού (β) Καταγραφές διαφορετικής συνάφειας

Όπου PB= Τέλεια συνάφεια, EF= Καμία συνάφεια, EL= Μερική συνάφεια

## Κεφάλαιο 3.

### Διάδοση Κυμάτων

#### 3.1 Γενικά-όρισμοί

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

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

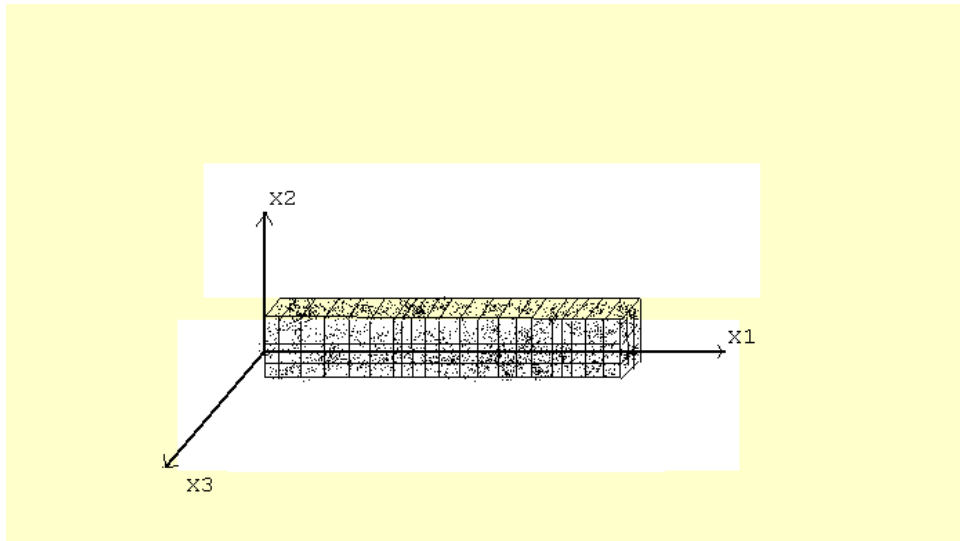
Έτσι προκύπτει ότι στην πραγματικότητα υπάρχουν τρεις ταχύτητες που σχετίζονται με ένα κύμα:

- Η κυματική ή φασική ταχύτητα. Είναι η ταχύτητα που διαδίδεται το κύμα, δηλαδή οι ισοφασικές επιφάνειες, στο μέσο.
- Η σωματιδιακή ή μοριακή ταχύτητα. Είναι η ταχύτητα με την οποία ταλαντώνεται γύρω από την θέση ισορροπίας του, το κάθε τμήμα του μέσου.
- Η ομαδική ταχύτητα. Για την περίπτωση υπέρθεσης κυμάτων με διαφορετικές συχνότητες, μήκη κύματος και ταχυτήτων, έχουμε την δημιουργία ενός κυματοπακέτου. Η ομαδική ταχύτητα περιγράφει την ταχύτητα μετάδοσης της ενέργειας του κυματοπακέτου.

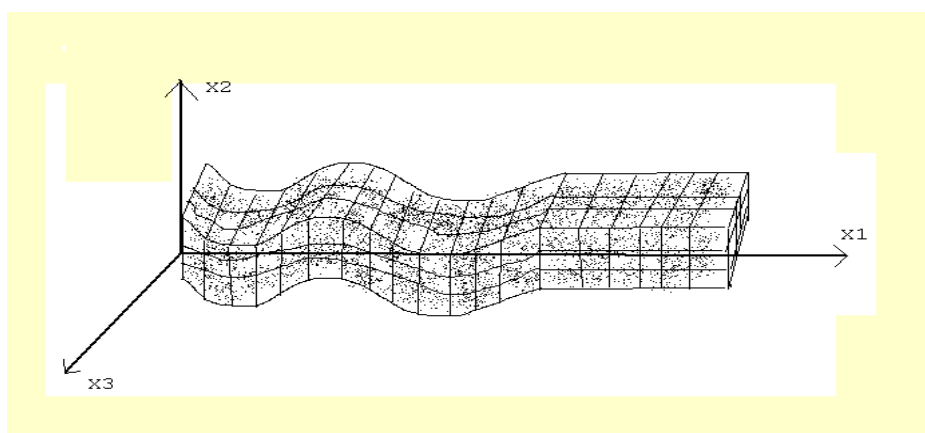
Διαμήκη λέγονται τα κύματα όταν η διεύθυνση διάδοσής τους και η διεύθυνση των ταλαντώσεων ή μετατοπίσεων του μέσου είναι παράλληλες.

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

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



Σχήμα 3.1 Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση ενός διαμήκους κύματος



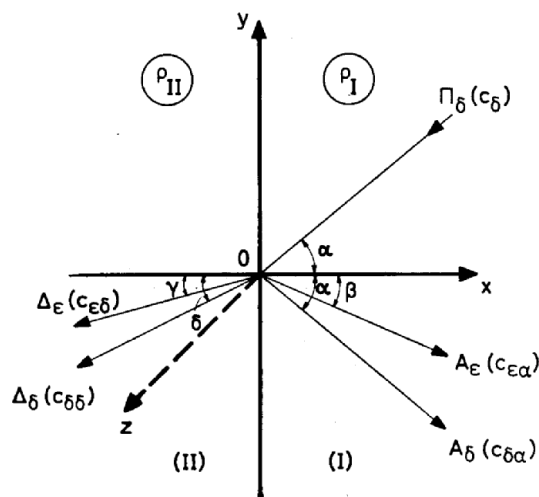
Σχήμα 3.2 Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση ενός εγκάρσιου κύματος

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

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

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

Τα τασικά κύματα ακολουθούν τους γνωστούς νόμους των κυμάτων, ανάκλασης, διάθλασης, σκέδασης κλπ. Όταν ένα επίπεδο διάμηκες κύμα ανακλάται σε μια ελεύθερη επιφάνεια, οι συνοριακές συνθήκες δεν ικανοποιούνται, αν θεωρήσουμε ως ανακλώμενο μόνο διάμηκες κύμα. Αντίθετα, ικανοποιούνται αν θεωρήσουμε ότι επιπρόσθετα ανακλάται και ένα εγκάρσιο κύμα. Γενικά όταν ένα επίπεδο διάμηκες κύμα προσπέσει στην διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων τότε θα δημιουργηθούν τέσσερα κύματα, (σχήμα 3.3), δύο από ανάκλαση, ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο και δύο από διάθλαση, ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο.

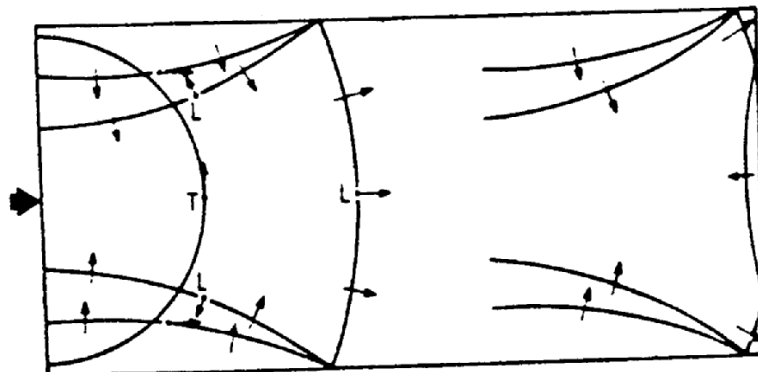


Σχήμα 3.3 Ανάκλαση και διάθλαση προσπίπτοντος διαμήκους κύματος σε διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων.

Ισχύει δε ότι:

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

Για κάθε πρόσπτωση δεν υπάρχει πάντα ανακλώμενο εγκάρσιο κύμα. Το ανακλώμενο διαμήκες, έχει το αυτό πλάτος με το προσπίπτον, αλλά αντίθετο πρόσημο. Αν το προσπίπτον κάθετα σε επιφάνεια κύμα είναι θλιπτικό, τότε το ανακλώμενο διαμήκες είναι εφελκυστικό. Σχηματική παράσταση έχουμε στο σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4 Τασικά κύματα σε πλάκα.

### 3.2 Η Κυματική εξίσωση

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

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

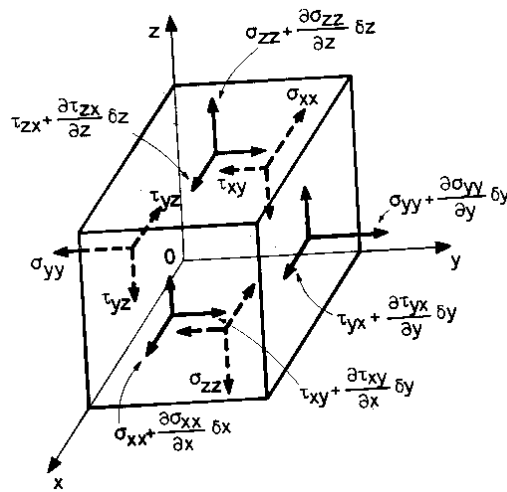
Όπου  $c$  είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής στο μέσον και  $F$ , μια χρονοεξαρτώμενη συνάρτηση, που περιγράφει την διαταραχή, πχ  $F(x \pm ct)$ .

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

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

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

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



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

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

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

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

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda\theta + 2\mu\epsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} &= \lambda\theta + 2\mu\epsilon_{yy} \\ \sigma_{zz} &= \lambda\theta + 2\mu\epsilon_{zz} \\ \tau_{xy} &= 2G\epsilon_{xy}, \quad \tau_{yz} = 2G\epsilon_{yz}, \quad \tau_{zx} = 2G\epsilon_{zx} \end{aligned} \quad (3.3)$$

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

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

Και από τις σχέσεις μεταξύ παραμορφώσεων-μετατοπίσεων:

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

Καταλήγουμε στις παρακάτω εξισώσεις που εκφράζουν τις συνθήκες κίνησης:

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

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

Διαφορίζοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης (3.5) ως προς  $x, y, z$  αντίστοιχα και προσθέτοντας έχουμε:

$$\rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \theta\tag{3.6}$$

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



### 3.3 Ταχύτητες κύματος

Η κυματική εξίσωση (3.6), δείχνει ότι η διόγκωση  $\theta$  διαδίδεται με ταχύτητα  $\left(\frac{\lambda+2\mu}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$ . Διαφορίζοντας την δεύτερη και την τρίτη των σχέσεων (3.5) ως προς  $y, z$  αντίστοιχα και αφαιρώντας έχουμε:

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

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

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

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

- Τα κύματα που δεν περιλαμβάνουν περιστροφές, δηλαδή τα διαμήκη, που διαδίδονται με ταχύτητα:

$$c_\delta = \left(\frac{\lambda+2\mu}{\rho}\right)^{1/2} = \left(\frac{3K+4G}{\rho}\right)^{1/2}$$

όπου  $K$  το μέτρο διόγκωσης

- Τα κύματα που περιλαμβάνουν μόνο περιστροφές, δηλαδή τα εγκάρσια, που διαδίδονται με ταχύτητα:

$$c_\varepsilon = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{1/2} = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{1/2}$$

Από τις πιο πάνω εξισώσεις προκύπτει ότι παραμορφώσεις που οδηγούν σε αλλαγή όγκου αλλά όχι σχήματος (σχήμα 3.1), διαδίδονται με τη φασική ταχύτητα  $c_\delta$ , ενώ παραμορφώσεις που οδηγούν σε αλλαγή σχήματος, χωρίς αλλαγή όγκου, (σχήμα 3.2), διαδίδονται με τη φασική ταχύτητα  $c_\varepsilon$ . Επίσης παρατηρείται ότι η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων είναι μεγαλύτερη των εγκάρσιων κυμάτων και ότι και οι δύο ταχύτητες δεν εξαρτώνται από την ταχύτητα κρούσεως, αλλά από τις μηχανικές σταθερές του σώματος. Αντίθετα η σωματιδιακή ταχύτητα εξαρτάται.

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

# Κεφάλαιο 4

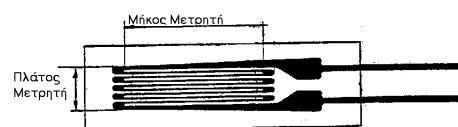
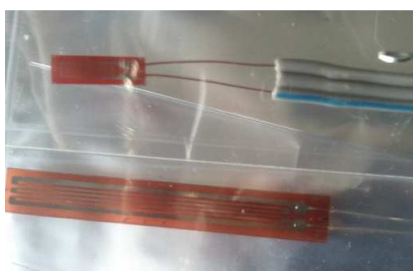
## Πειραματική Διαδικασία

### 4.1 Εισαγωγή

Κατασκευάσθηκαν έξι κυλινδρικά δοκίμια από σκυρόδεμα, κατά ASTM, ύψους  $h = 30cm$  και διαμέτρου  $d = 15cm$ . Στα δοκίμια υπήρχε διαμήκης οπλισμός από κατασκευαστικό χάλυβα,  $\Phi 12$ , με νευρώσεις. Στα τρία από αυτά, ο διαμήκης οπλισμός είχε πλήρη συνάφεια με το σκυρόδεμα, ενώ στα άλλα τρία, η συνάφεια δεν ήταν πλήρης. Κατά μήκος του οπλισμού, καθώς και στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων επικολλήθηκαν μετρητές παραμόρφωσης. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κρουστική καταπόνηση και με σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων, καταγράφηκαν οι τιμές των παραμορφώσεων και κατόπιν έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε σχέση με τον τύπο του δοκιμίου και την θέση της μέτρησης. Τέλος σε ένα δοκίμιο, μετρήθηκε το μέτρο ελαστικότητας και η θλιπτική αντοχή και σε ένα άλλο η εφελκυστική αντοχή, (Brazilian test).

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

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



Σχήμα 4.1 Ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης Σχήμα 4.2 Σχηματική παράσταση μετρητή

Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, (Σχ.4.1), είναι ωμικές αντιστάσεις, ιδιαίτερα ευαίσθητες στην αλλαγή του μήκους τους. Το μήκος και το πλάτος του μετρητή, (Σχ. 4.2 ), καθώς και η αντίστασή του είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά του και αναφέρονται στον τύπο του.

Όπως είναι γνωστό από τον ηλεκτρισμό, η αντίσταση,  $R$ , ηλεκτρικού αγωγού μήκους,  $L$ , ειδικής αντίστασης,  $\rho$  και εμβαδού διατομής,  $S$ , δίνεται από την σχέση:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Επομένως μεταβολή του μήκους του αγωγού επιφέρει αναλόγως, μεταβολή στην ηλεκτρική του αντίσταση.

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

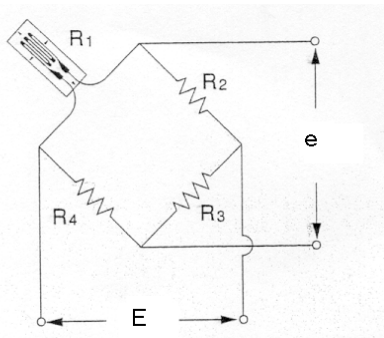
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

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

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

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

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



Σχήμα 4.3 Η γέφυρα Wheatstone

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

Τα ανωτέρω μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης:

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

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

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

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

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

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

### 4.3 Προετοιμασία του οπλισμού των δοκιμών

Τα δοκίμια έφεραν διαμήκη οπλισμό. Χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι από κατασκευαστικό χάλυβα, κυκλικής διατομής,  $\Phi 12$ , με νευρώσεις. Οι ράβδοι του χάλυβα είχαν μήκος  $l = 55\text{cm}$ , εκ των οποίων τα  $30\text{cm}$  βρίσκονταν μέσα στο δοκίμιο του σκυροδέματος και τα  $25\text{cm}$  εκτός. Επί των ράβδων του χάλυβα επιλέχθηκαν τα σημεία που τοποθετήθηκαν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges). Τα σημεία αυτά ήταν ίδια για όλες τις ράβδους για να επιτρέπεται η σύγκριση. Επιλέχθηκαν τρία σημεία για κάθε ράβδο χάλυβα, στα  $10\text{cm}$ , στα  $20\text{cm}$  και στα  $42\text{cm}$ , έτσι ώστε τα δύο πρώτα να βρίσκονται μέσα στο δοκίμιο του σκυροδέματος, ονομαζόμενα “κάτω” και “πάνω” αντίστοιχα, το δε τρίτο να βρίσκεται εκτός του δοκιμίου, ονομαζόμενο “έξω”. Μετά την επιλογή των σημείων, ακολούθησε η επιφανειακή λείανσή τους με σμυριδοτροχό, (Σχ. 4.4),



Σχήμα 4.4 Επιφανειακή λείανση με σμυριδοτροχό.

ώστε χωρίς ουσιαστική επίπτωση στην αντοχή του οπλισμού, να εξαλειφθούν από τα σημεία αυτά οι νευρώσεις και να μπορεί να γίνει η επικόλληση των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης.

Στα επιλεγμένα σημεία επικολλήθηκαν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, (strain gauges). Αυτοί ήταν της TML, τύπου FLA-5-11 με καλώδια και αντίστασης  $120\Omega$ . Στην Εικ. 4.5α, παρουσιάζονται οι ράβδοι χάλυβα με τους ηλεκτρικούς μετρητές παραμόρφωσης

επικολλημένους στα επιλεγμένα σημεία και στο Σχήμα 4.5β, φαίνονται σε μεγέθυνση οι μετρητές.



(α)



(β)

Σχήμα 4.5 (α): Ράβδοι χάλυβα με τους ηλεκτρικούς μετρητές παραμόρφωσης,

(β): Μεγέθυνση

Κατόπιν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης μονώθηκαν και στεγανοποιήθηκαν με σιλικόνη για να προστατευθούν κατά την διαδικασία της σκυροδέτησης. Στο σχήμα 4.6α φαίνονται οι μονωμένοι με σιλικόνη, ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης και στο 4.6β σε μεγέθυνση.



(α)



(β)

Σχήμα 4.6 (α): Μόνωση των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης (β): Μεγένθυση

Στη συνέχεια, προκειμένου να μειωθεί η συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος στα τρία δοκίμια, έγινε επικάλυψη σε κάποια τμήματα τριών ράβδων χάλυβα, με πλαστικό περιτύλιγμα αεροφουσαλίδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Επικάλυψη του οπλισμού για μείωση συνάφειας

#### 4.4 Τα δοκίμια σκυροδέματος

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

Τσιμέντο:	50%
Χαλίκι:	25%
Νερό:	25%

Σε κάθε μήτρα τοποθετήθηκε από μία ράβδος χάλυβα και έγινε η σκυροδέτηση. Η θέση της ήταν κεντρική και ο προσανατολισμός της διαμήκης. Σημειώνεται ότι δεν έγινε δόνηση για να μην υπάρξει πρόβλημα από τον δονητή στους ηλεκτρικούς μετρητές παραμόρφωσης,



λόγω των μικρών σχετικά διαστάσεων της μήτρας. Η σκυροδέτηση φαίνεται στα Σχήματα 4.8, 4.9 και 4.10.

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

Επί της εξωτερικής επιφάνειας ενός δοκιμίου σκυροδέματος επικολλήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, επικολλήθηκε ένας ηλεκτρικός μετρητής παραμόρφωσης, παράλληλα με τον άξονα του δοκιμίου, δηλαδή κατά μήκος γενέτειρας του κυλίνδρου, ονομαζόμενος “εκτός-δ”.



Σχήμα 4.8 Σκυροδέτηση δοκιμίων



Σχήμα 4.9 Σκυροδέτηση δοκιμίων



Σχήμα 4.10 Τα δοκίμια στις μήτρες

Έτσι ήταν δυνατή η μέτρηση της παραμόρφωσης, τόσο κατά την κρουστική καταπόνηση του δοκιμίου, όσο και του μέτρου ελαστικότητας κατά την στατική καταπόνηση σε θλίψη. Επικολλήθηκε επίσης και ένας ηλεκτρικός μετρητής παραμόρφωσης καθέτως προς το προηγούμενο, (σχήμα 4.11), προκειμένου να μετρηθεί και ο λόγος Poisson, ονομαζόμενος “εκτός-ε”. Οι εξωτερικοί ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης ήταν της TML, τύπου FLA-30-11, με καλώδια, αντίστασης  $120\Omega$  .



Σχήμα 4.11 Το δοκίμιο με τους εξωτερικούς ηλεκτρικούς μετρητές παραμόρφωσης.

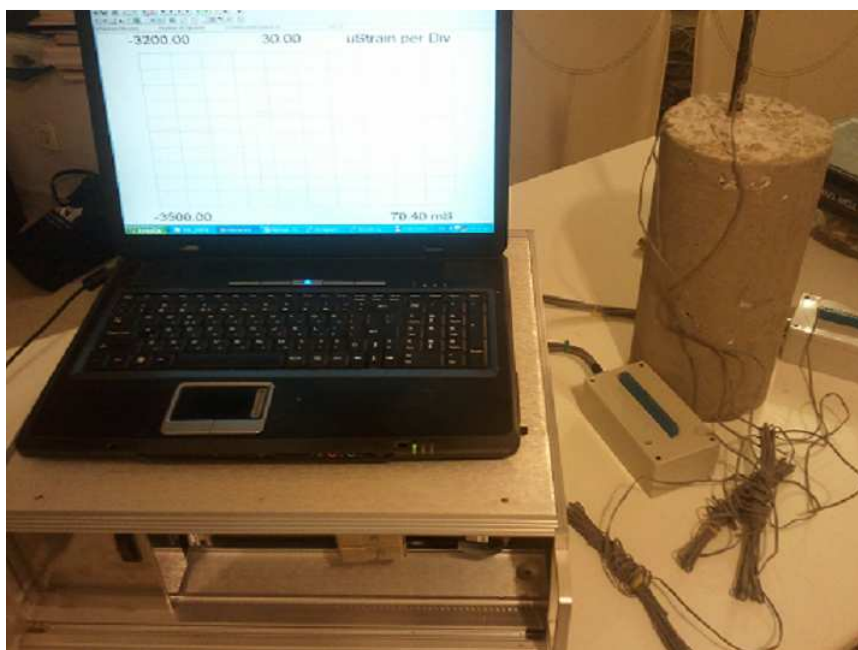
#### 4.5 Η κρουστική καταπόνηση

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

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

## 4.6 Το μετρητικό σύστημα

Προκειμένου να καταγραφεί η κυματομορφή και να μετρηθούν οι παραμορφώσεις στα επιλεγμένα σημεία των δοκιμών, απαιτείται μετρητικό σύστημα κατάλληλο για δυναμικές μετρήσεις. Χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό, το πολυκαναλικό σύστημα ταχείας λήψης, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων, (Data Acquisition System), που είναι το Model 6035 της PACIFIC INSTRUMENTS, που διαθέτει το Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του ΕΜΠ, (σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12 Το μετρητικό σύστημα

Το σύστημα αποτελείται από τα εξής:

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

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

#### 4.7 Οι παράμετροι του πειράματος

Όπως έχει ήδη λεχθεί, υπήρξαν δύο διαφορετικοί τύποι δοκιμών. Στον πρώτο υπήρχε πλήρης συνάφεια του σπλισμού με το σκυρόδεμα, ενώ στον δεύτερο, η συνάφεια δεν ήταν πλήρης.

Η σύγκριση μεταξύ των δύο τύπων δοκιμών, έγινε στα τρία επιλεγμένα σημεία του σπλισμού, που είχαν τοποθετηθεί οι ηλεκτρικοί μετρητές της παραμόρφωσης.

Συνοψίζοντας, στο Πίνακα 4.1 φαίνονται αναλυτικά, η αρίθμηση των δοκιμών, η θέση των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης και ο βαθμός συνάφειας του σπλισμού τους:

Πίνακας 4.1 Παράμετροι του πειράματος

α/α	Όνομα	Κάτω kato	Πάνω pano	Έξω exo	Εκτός-δ Κατά Μήκος	Εκτός-ε Εγκάρ- σια	Πλήρης Συνά- Φεια	Μερική Συνά- Φεια
1	spec_1m	+	+	+			+	
2	spec_2x	+	+	+				+
3	spec_3m	+	+	+			+	
4	spec_4x	+	+	+				+
5	spec_5m	+	+		+	+	+	
6	spec_6x	+	+					+

#### 4.8 Στατικές Μετρήσεις - Προσδιορισμός Μηχανικών Ιδιοτήτων

Μετά την περάτωση των πειραμάτων κρούσης των δοκιμίων, την λήψη και σύγκριση των αποτελεσμάτων, ακολούθησαν στατικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, επί της εξωτερικής επιφάνειας ενός δοκιμίου και κατά μήκος, είχε επικολληθεί ηλεκτρικός μετρητής παραμόρφωσης. Επιπρόσθετα, είχε τοποθετηθεί και εγκάρσια επί της εξωτερικής επιφάνειάς του, ένας ηλεκτρικός μετρητής παραμόρφωσης.

Έτσι, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1, το δοκίμιο 5 υποβλήθηκε σε θλιπτική καταπόνηση, προκειμένου να γίνει το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων και να προσδιορισθεί το μέτρο ελαστικότητας,  $E$ , ο λόγος Poisson,  $\nu$ , καθώς και η θλιπτική αντοχή του. Η θλιπτική καταπόνηση, (σχήμα 4.13), έγινε στην θλιπτική μηχανή τύπου AMSLER, μέγιστης θλιπτικής ικανότητας 100tn του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ. Για την καταγραφή των μετρήσεων των παραμορφώσεων, από τους δύο μετρητές, χρησιμοποιήθηκε η στατική γέφυρα τύπου TDS 60 της TML, που διαθέτει το Εργαστήριο.

Η θλιπτική αντοχή βρέθηκε 18MPa , το μέτρο ελαστικότητας 28GPa και ο λόγος Poisson 0.24.



Σχήμα 4.13 Η θλίψη

Οι τιμές των τάσεων προέκυψαν από τις τιμές του φορτίου της μηχανής διηρημένες δια του αρχικού εμβαδού της κυκλικής διατομής του δοκιμίου. Το μέτρο ελαστικότητας προέκυψε από την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων. Ο λόγος Poisson προέκυψε από τον μέσο όρο των τιμών των πηλίκων της εγκάρσιας προς την διαμήκη παραμόρφωση στην γραμμική περιοχή της καμπύλης.

Το δοκίμιο 6 υποβλήθηκε σε αντιδιαμετρική θλίψη, (Brazilian test), καταπόνηση αντίστοιχη με εφελκυσμό, προκειμένου να προσδιορισθεί η εφελκυστική αντοχή του. Η εφελκυστική αντοχή του κυλινδρικού δοκιμίου,  $\sigma_{\theta}$ , προκύπτει από το φορτίο θραύσης,  $P_{\theta}$ , που δίνει η μηχανή, μέσω της σχέσης:

$$\sigma_{\theta} = \frac{2P_{\theta}}{\pi dh}$$

Όπου  $d$ ,  $h$ , είναι αντίστοιχα η διάμετρος της διατομής και το ύψος του δοκιμίου.

Στο σχήμα 4.14. φαίνεται το δοκίμιο 6. κατά την διάρκεια της καταπόνησης.



Σχήμα. 4.14 Η αντιδιαμετρική θλίψη

Η εφελκυστική αντοχή σε ένα από τα δοκίμια βρέθηκε ίση με 1,1MPa.

# Κεφάλαιο 5

## Αποτελέσματα

### 5.1 Τρόπος παρουσίασης

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται πρώτα η παρουσίαση και μετά η σύγκριση-σχολιασμός των αποτελεσμάτων, (διαγράμματα), όπως αυτά προέκυψαν από το λογισμικό PI660-6000 του μετρητικού συστήματος (Data Acquisition System), Model 6035 της PACIFIC INSTRUMENTS.

Η σειρά παρουσίασης που ακολουθείται, είναι η εξής:

- Η παρουσίαση των διαγραμμάτων γίνεται σε τρεις ομάδες.
- Σε κάθε ομάδα, η παρουσίαση των διαγραμμάτων γίνεται ανά δοκίμιο κατά τον αύξοντα αριθμό τους, όπως αυτός φαίνεται στον Πίνακα 4.1.
- Για κάθε δοκίμιο, παρουσιάζονται πρώτα τα αποτελέσματα που αφορούν την “κάτω” θέση του μετρητή επί του οπλισμού μέσα στο δοκίμιο, μετά τα αποτελέσματα που αφορούν την “πάνω” θέση του μετρητή επί του οπλισμού μέσα στο δοκίμιο και τέλος τα αποτελέσματα που αφορούν τον “έξω” μετρητή, δηλαδή αυτόν που βρίσκεται έξω από το δοκίμιο, επί του προεξέχοντος οπλισμού.
- Στην πρώτη ομάδα διαγραμμάτων, από το Σχήμα 5.1 ~ 5.15, παρουσιάζονται οι κυματομορφές, όπως προκύπτουν για κάθε θέση και για κάθε δοκίμιο με την προαναφερθείσα σειρά.
- Στην δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων, από το Σχήμα 5.16 ~ 5.26, παρουσιάζονται τα φάσματα, όπως προκύπτουν για κάθε θέση και για κάθε δοκίμιο με την προαναφερθείσα σειρά.
- Στην τρίτη ομάδα διαγραμμάτων, από το Σχήμα 5.27 ~ 5.41, παρουσιάζονται τα διαγράμματα SRS, όπως προκύπτουν για κάθε θέση και για κάθε δοκίμιο με την προαναφερθείσα σειρά.

## 5.2 Διαγράμματα

Η πρώτη, Α, ομάδα διαγραμμάτων, περιλαμβάνει τα σχήματα από το Σχήμα 5.1 έως το Σχήμα 5.15. Σε αυτά παρουσιάζονται οι κυματομορφές, (Time history), σύμφωνα με την προαναφερθείσα σειρά. Έτσι παρουσιάζονται εναλλάξ δοκίμια με συνάφεια και δοκίμια χωρίς συνάφεια, (μερική απώλεια συνάφειας).

Στα διαγράμματα των σχημάτων αυτών, ο οριζόντιος άξονας έχει τιμές πραγματικού χρόνου καταγραφής και ο κατακόρυφος, παραμορφώσεων, (σχετική κλίμακα).

Τα σχήματα που σημειώνονται με την ίδια αρίθμηση και με ένδειξη αστερίσκου (\*), αντιστοιχούν στο ίδιο αριθμό σχήματος, αλλά η κλίμακα χρόνου έχει ανοιχθεί στο χρονικό διάστημα της διαταραχής, ώστε να φανεί καλλίτερα το περιεχόμενο.

Στα σχήματα αυτά, (με την ένδειξη \*), διατίθεται από το λογισμικό η δυνατότητα “κέρσορα” εμφανιζόμενου στο κάτω τμήμα του διαγράμματος. Συρόμενος επί του διαγράμματος παρέχει την δυνατότητα ανάγνωσης της τιμής της παραμόρφωσης, στον αντίστοιχο χρόνο. Έτσι, στα διαγράμματα που υπήρξε αξιόλογη μεταβολή της παραμόρφωσης, παραθέτεται το ίδιο διάγραμμα ως Σχήμα..\*(α), όπου σημειώνεται η αρχική τιμή της παραμόρφωσης και επίσης το ίδιο, ως Σχήμα..\*(β), όπου σημειώνεται η τελική τιμή της παραμόρφωσης, ώστε να προκύπτει η μεταβολή της.

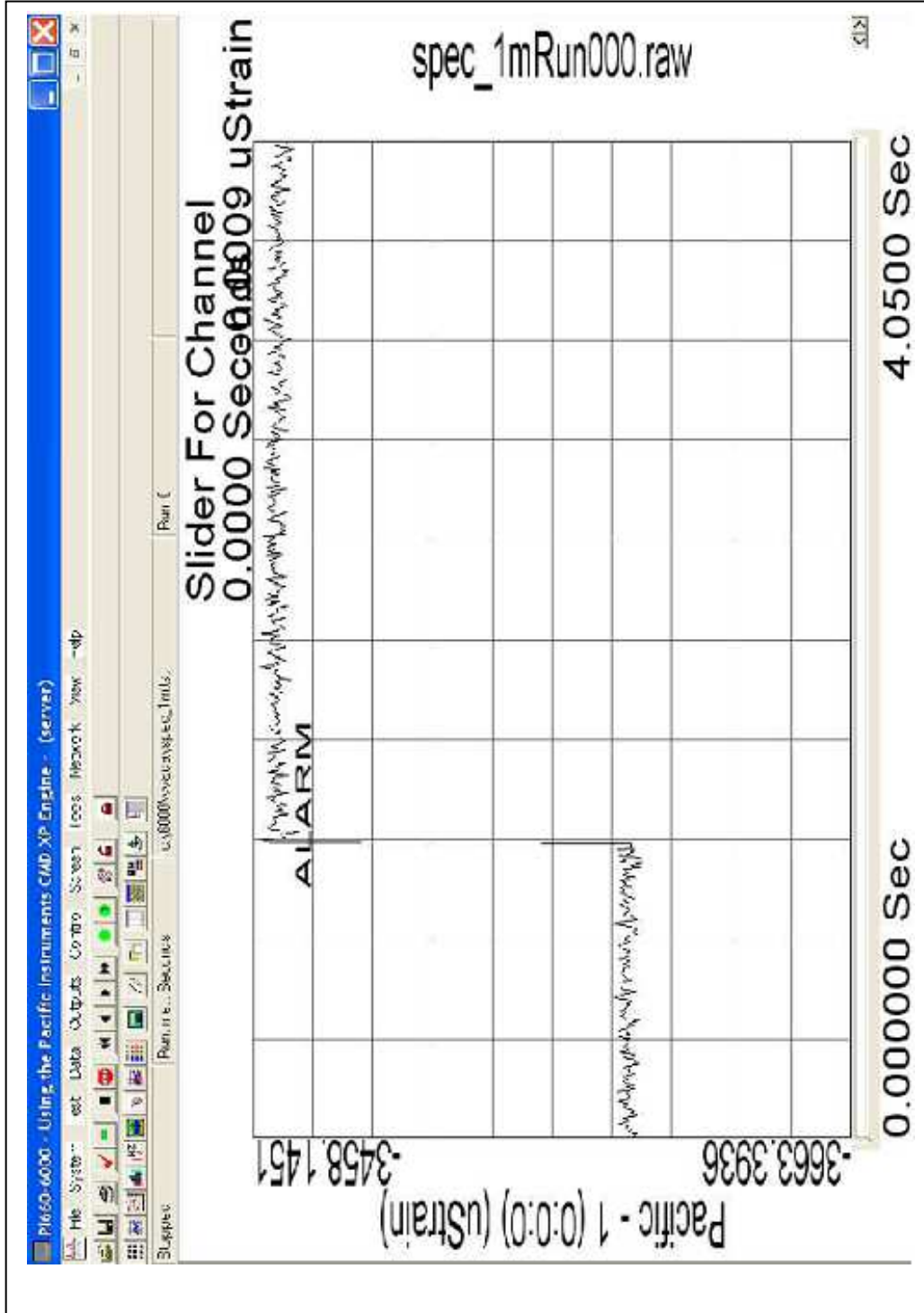
Η δεύτερη, Β, ομάδα διαγραμμάτων περιλαμβάνει τα σχήματα από το Σχήμα 5.16 έως το Σχήμα 5.26. Σε αυτά παρουσιάζονται τα φάσματα (Spectrum), σύμφωνα με την προαναφερθείσα σειρά. Ο οριζόντιος άξονας έχει τιμές συχνότητας και ο κατακόρυφος, παραμορφώσεων, (σχετική κλίμακα).

Η Τρίτη, Γ, ομάδα περιλαμβάνει τα σχήματα από το Σχήμα 5.27 έως το Σχήμα 5.41. Σε αυτά και με την ένδειξη (α), παρουσιάζονται τα διαγράμματα SRS (Sock Response Spectrum), ενώ με την ένδειξη (β) παρουσιάζονται οι καμπύλες των θετικών μεγίστων της ενέργειας, (μαύρο), των αρνητικών ελαχίστων (κόκκινο), της απόλυτης τιμής των ελαχίστων (πράσινη), καθώς και της απόλυτης τιμής της μέγιστης εκ των δύο (μπλε).



# A. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

## ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (Με συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ

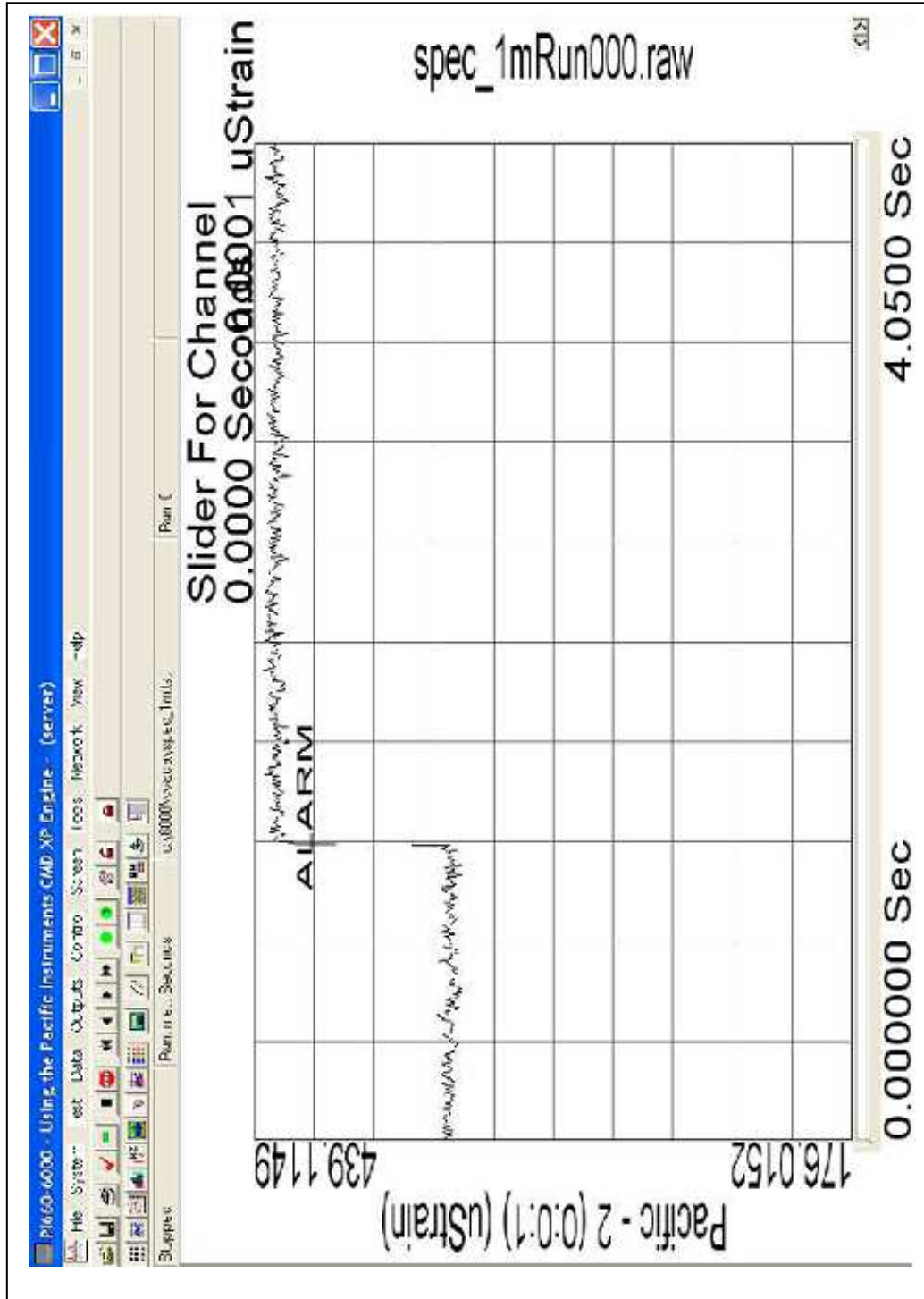


Σχήμα 5.1 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.1 (Με συνάφεια)-Κάτω θέση

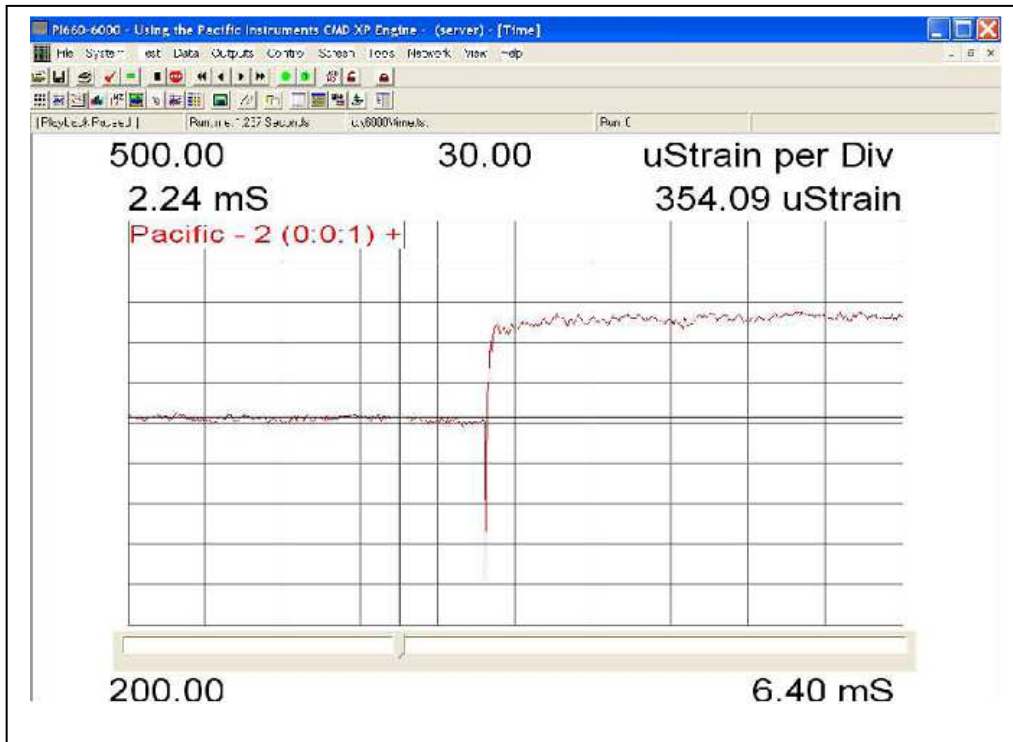


# A. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

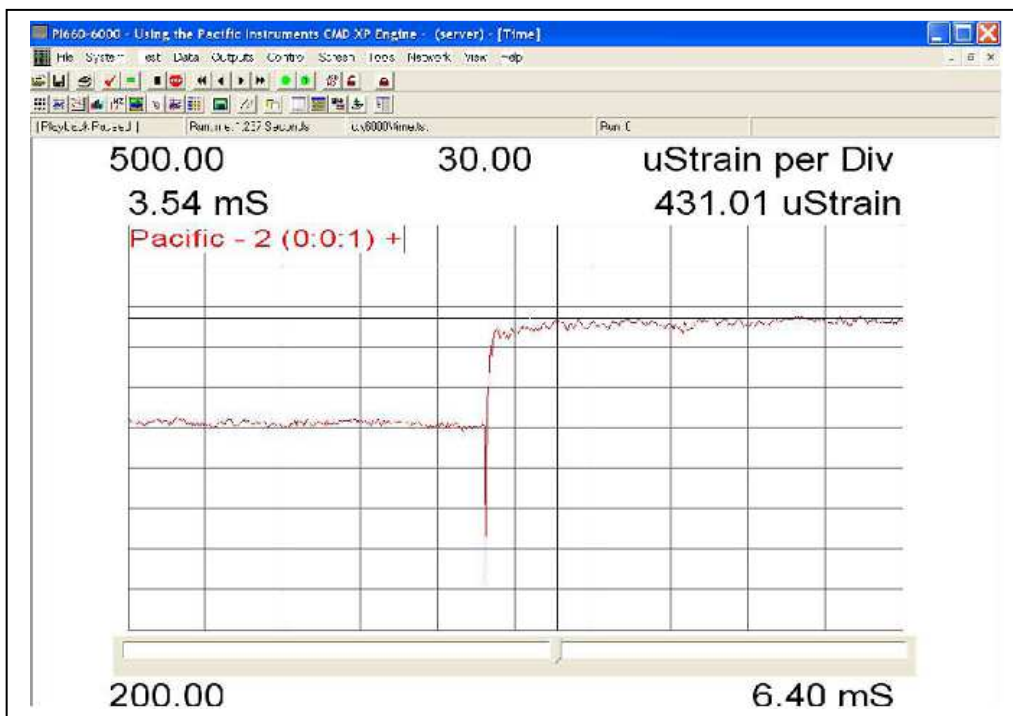
## ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (Με συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.2 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.1 (Με συνάφεια)-Πάνω θέση



(α) Τιμή παραμόρφωσης πριν την διαταραχή

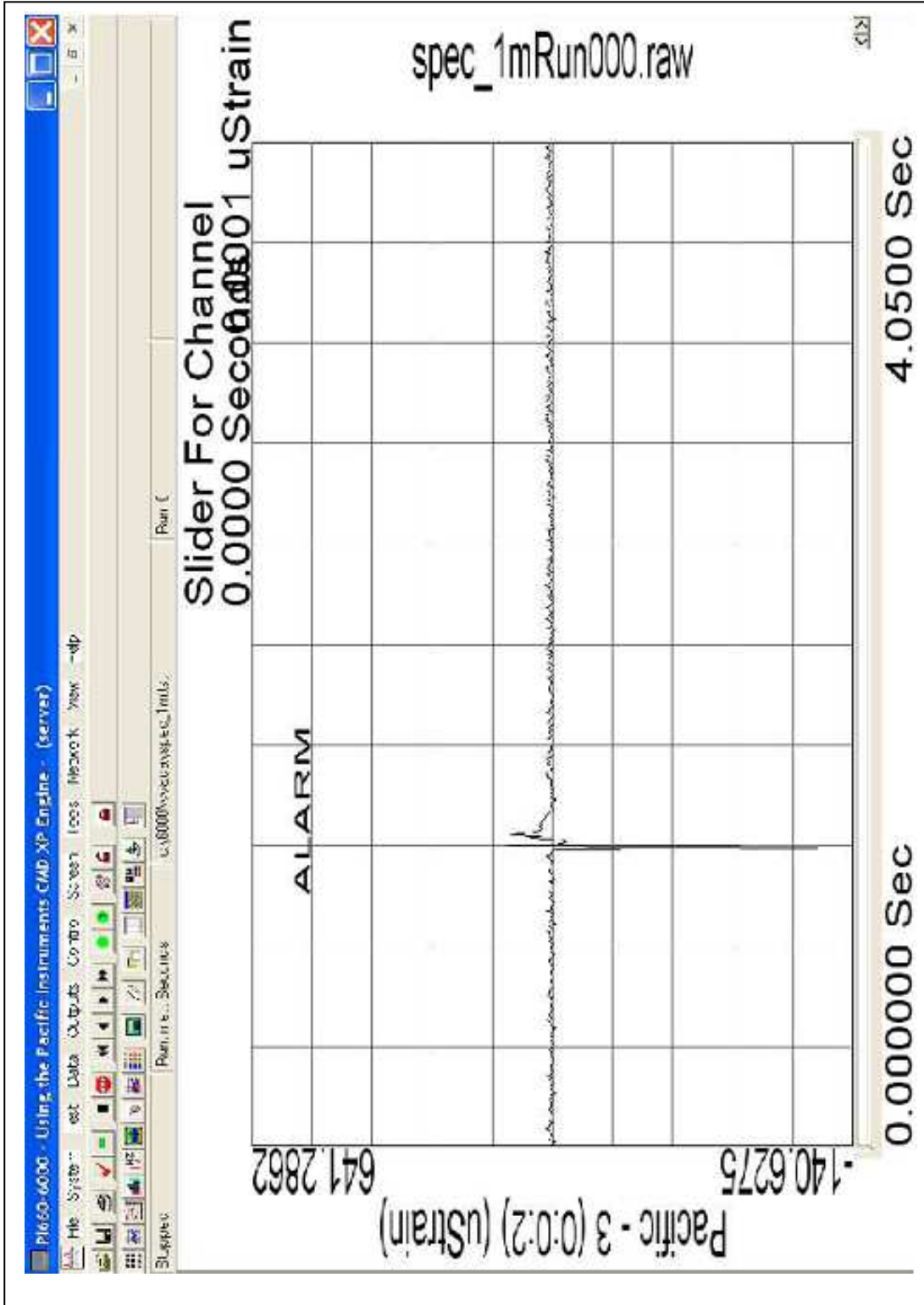


(β) Τιμή παραμόρφωσης μετά την διαταραχή

Σχήμα 5.2\* Κυματομορφή--Δοκ.1 (Με συνάφεια)-Πάνω θέση

# Α. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

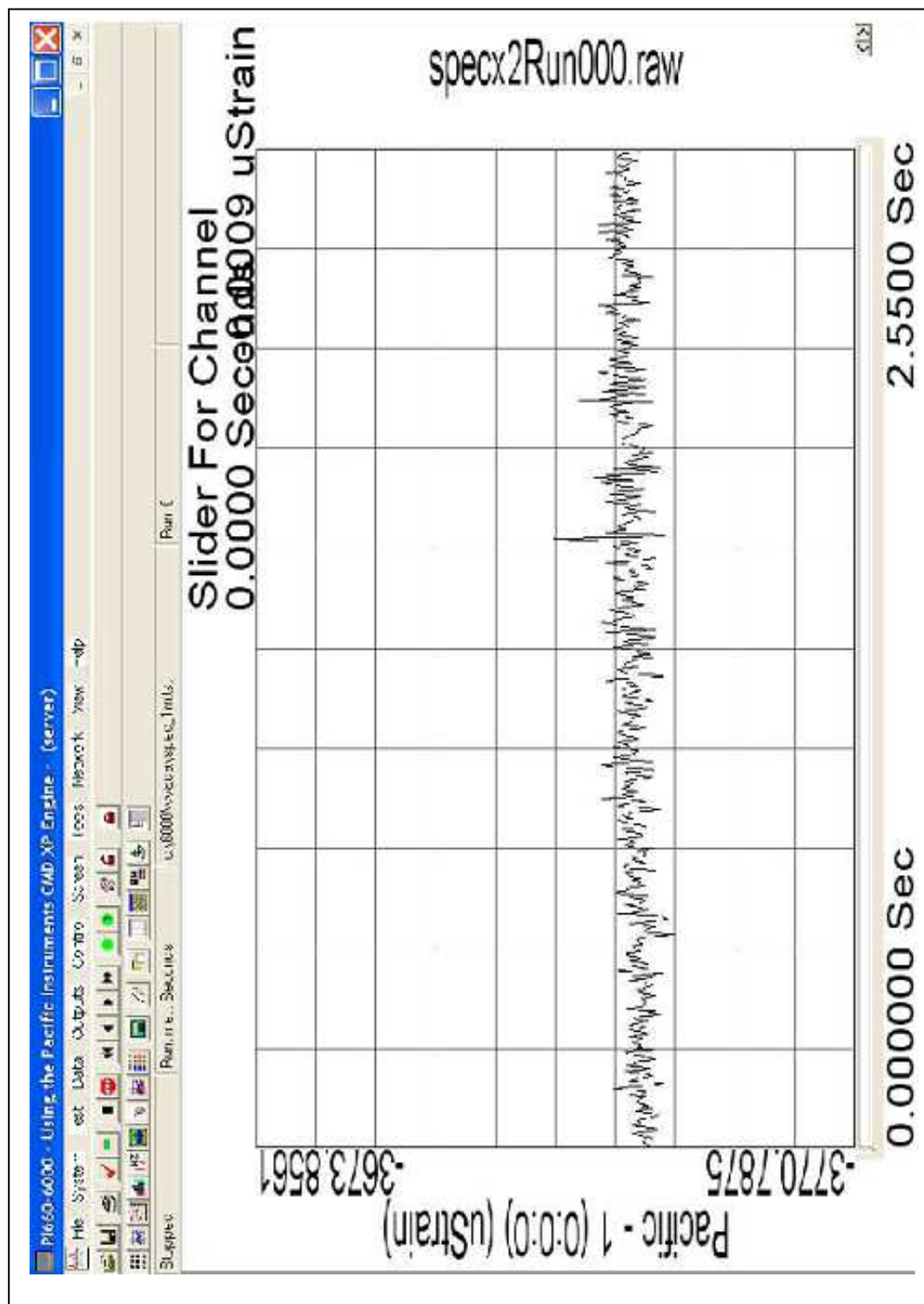
## ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (Με συνάφεια) - ΕΞΩ ΘΕΣΗ



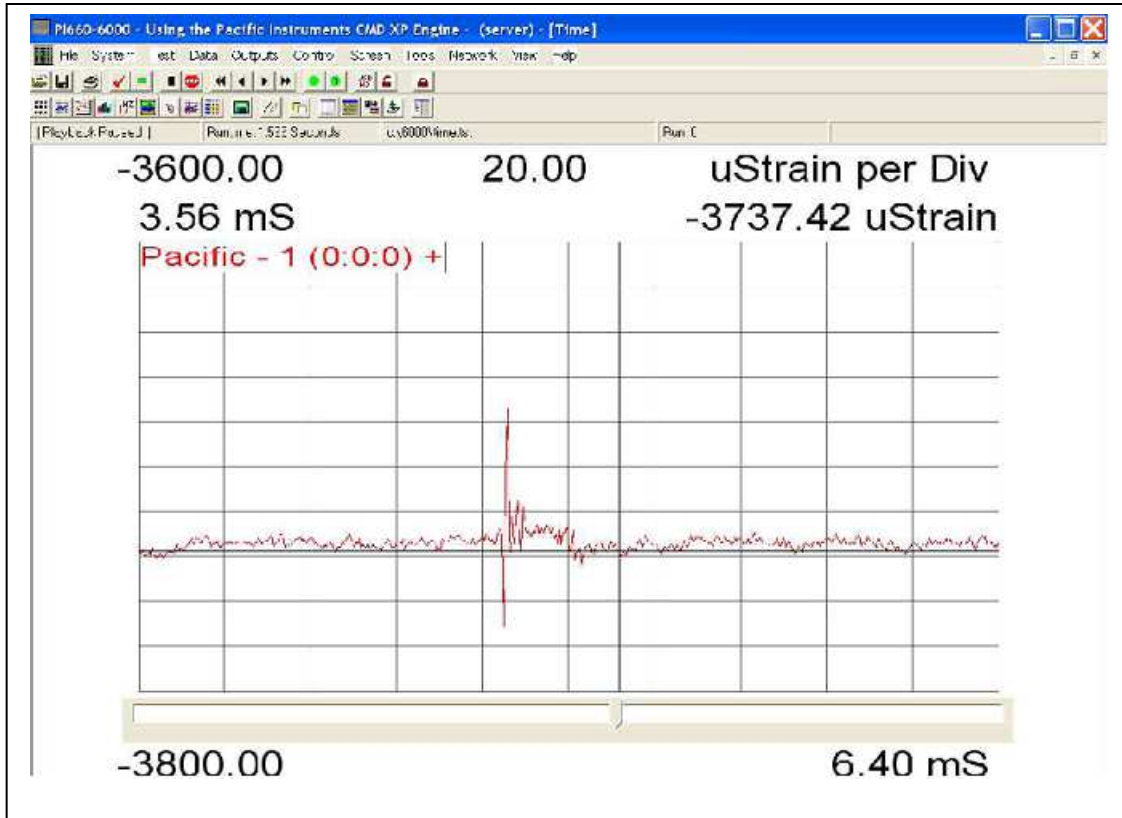
Σχήμα 5.3 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.1 (Με συνάφεια)-Εξω θέση

## A. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Χωρίς συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



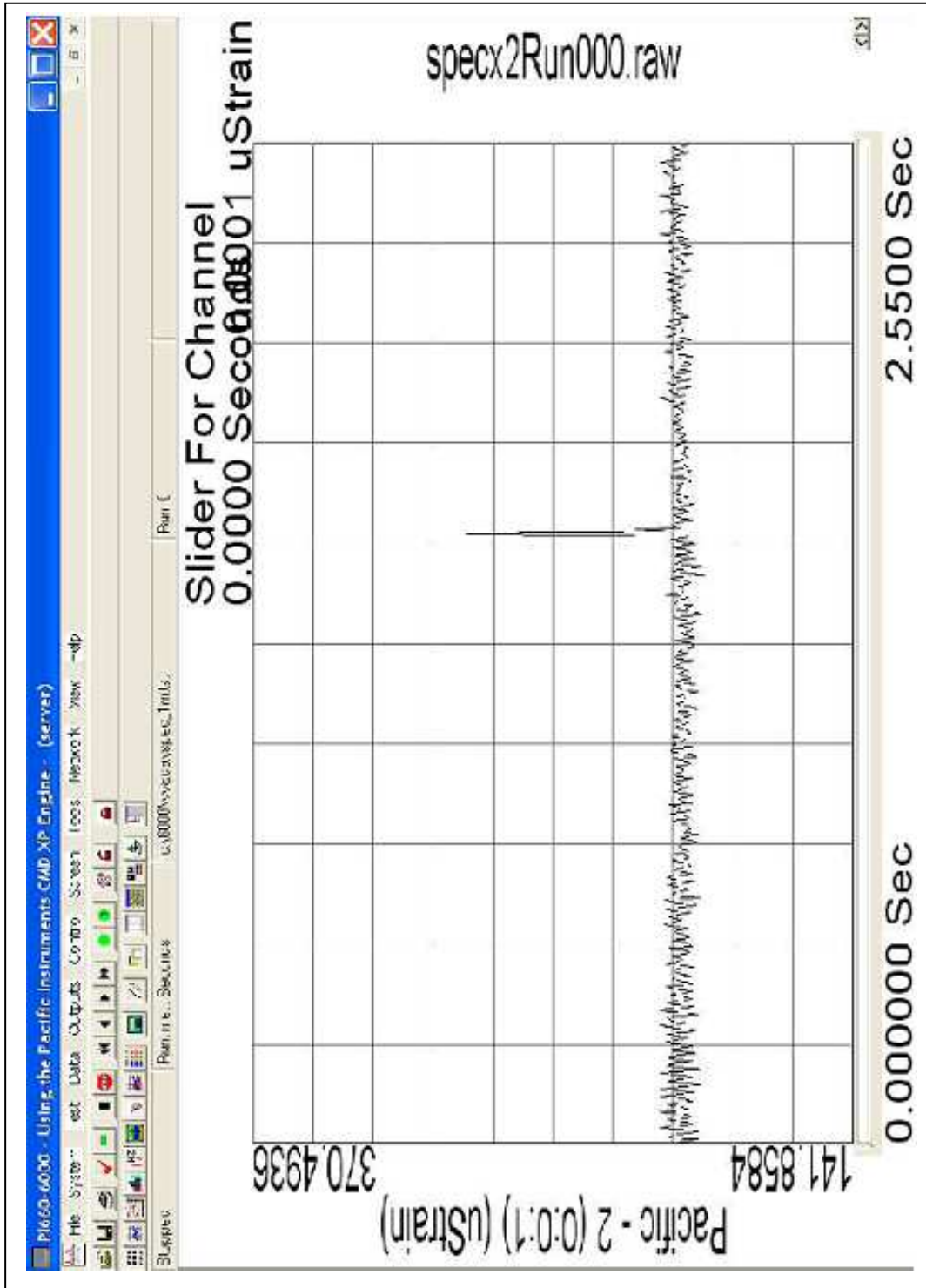
Σχήμα 5.4 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.2 (Χωρίς συνάφεια)-Κάτω θέση



Σχήμα 5.4\* Κυματομορφή--Δοκ.2 (Χωρίς συνάφεια)-Κάτω θέση

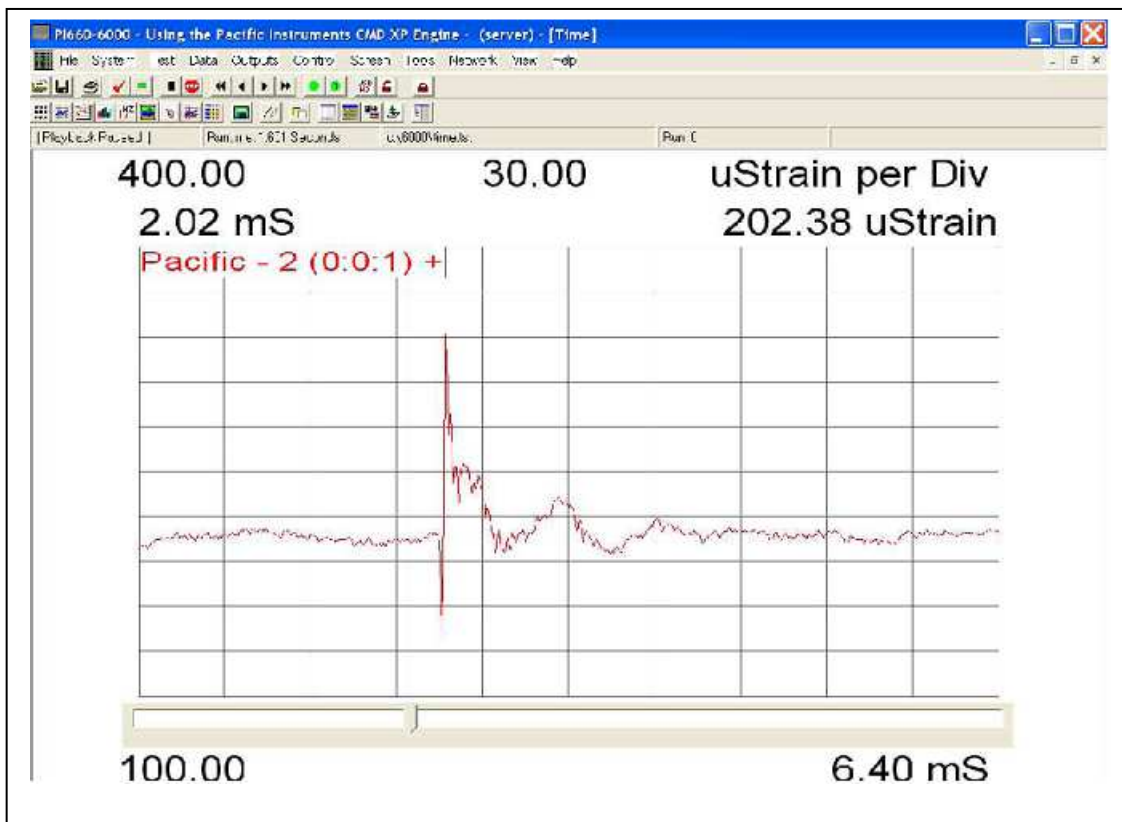
## A. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Χωρίς συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.5 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.2 (Χωρίς συνάφεια)-Πάνω θέση

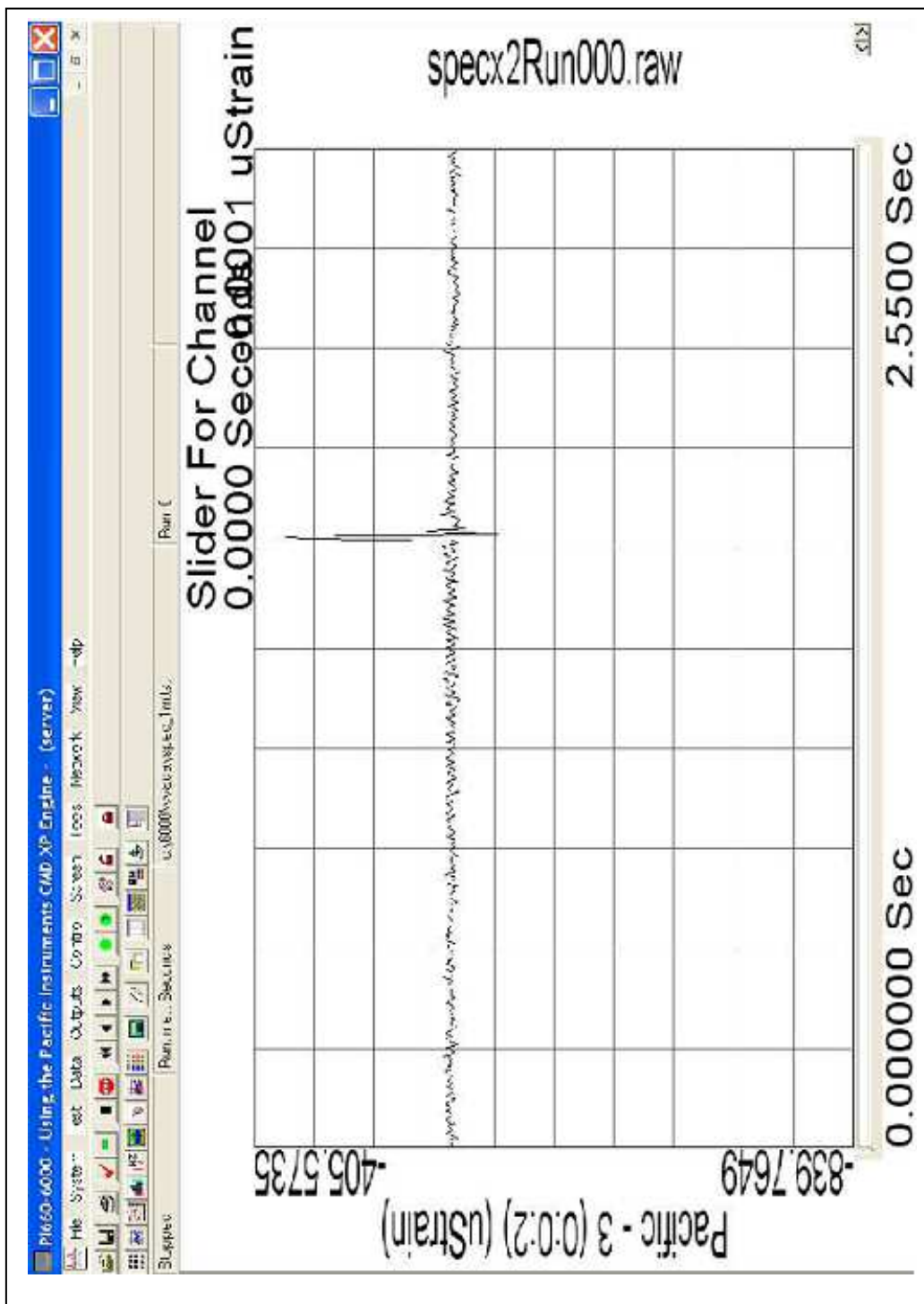




Σχήμα 5.5\* Κυματομορφή--Δοκ.2 (Χωρίς συνάφεια)-Πάνω θέση

## A. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

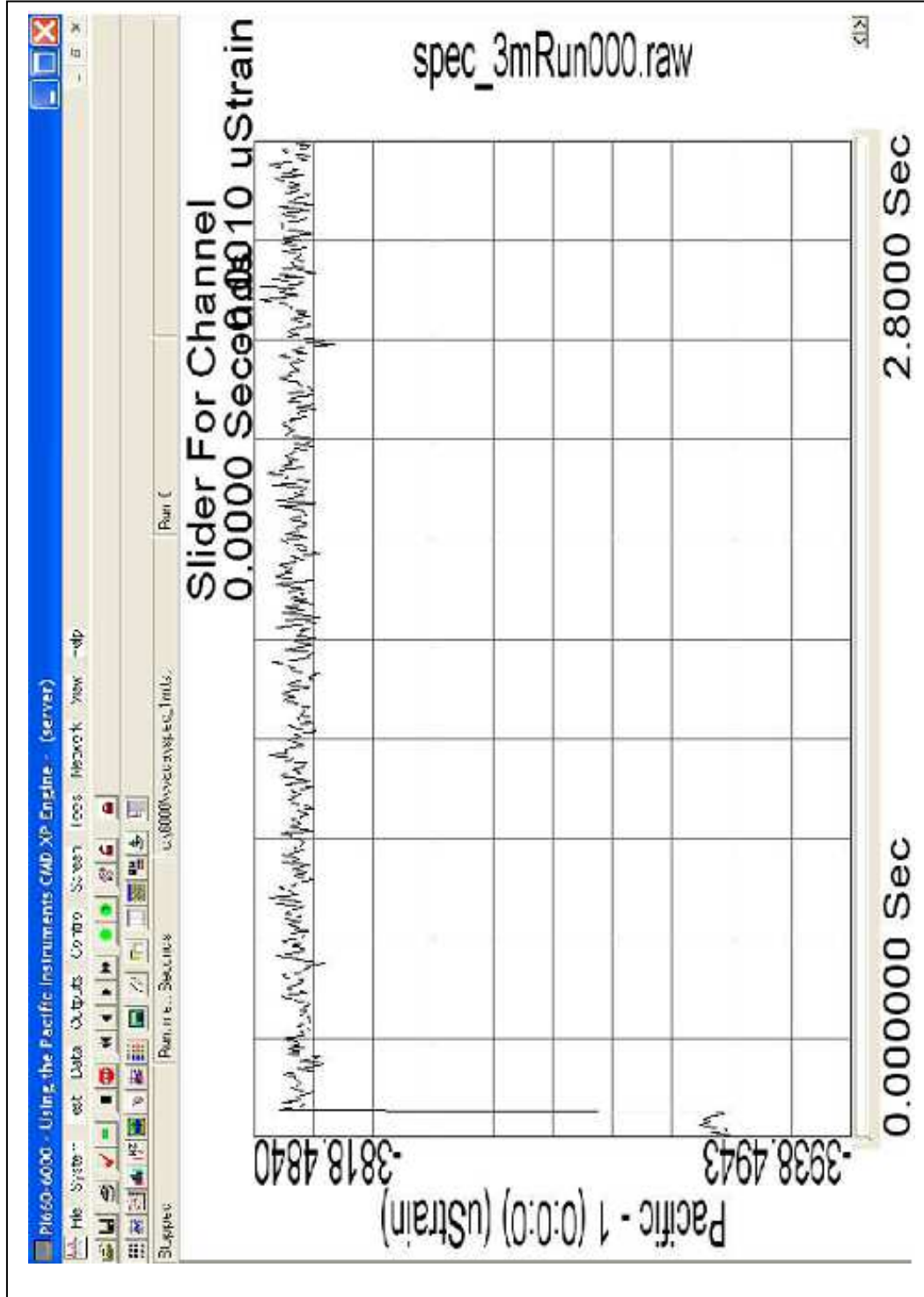
### ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Χωρίς συνάφεια) - ΕΞΩ ΘΕΣΗ



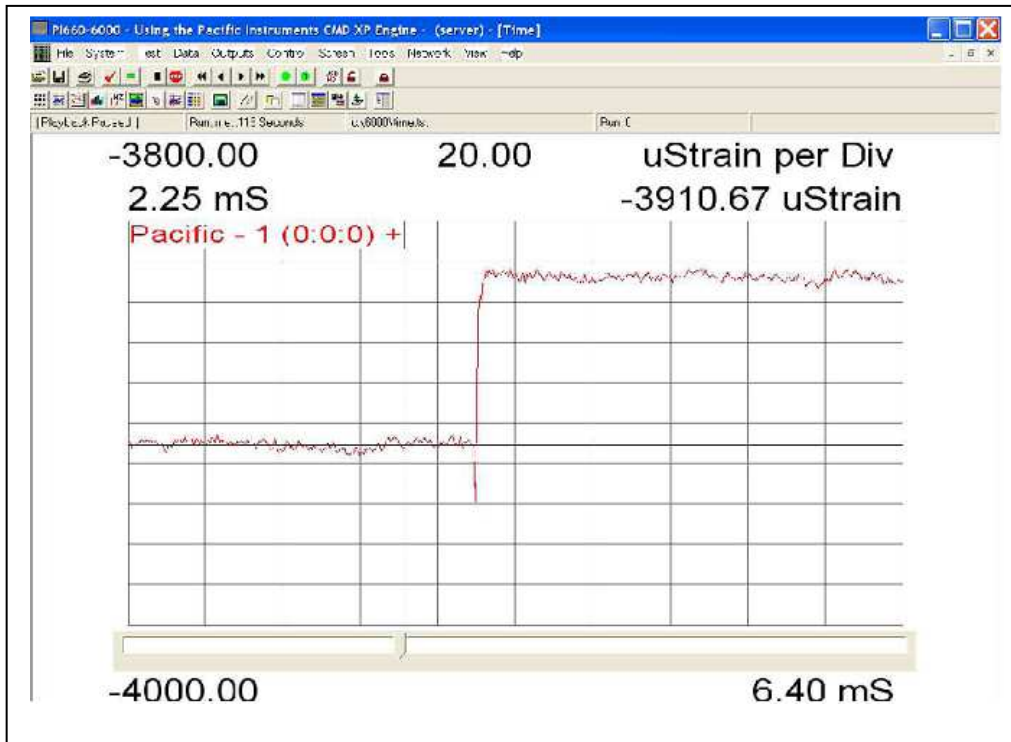
Σχήμα 5.6 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.2 (Χωρίς συνάφεια)-Έξω θέση

# A. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

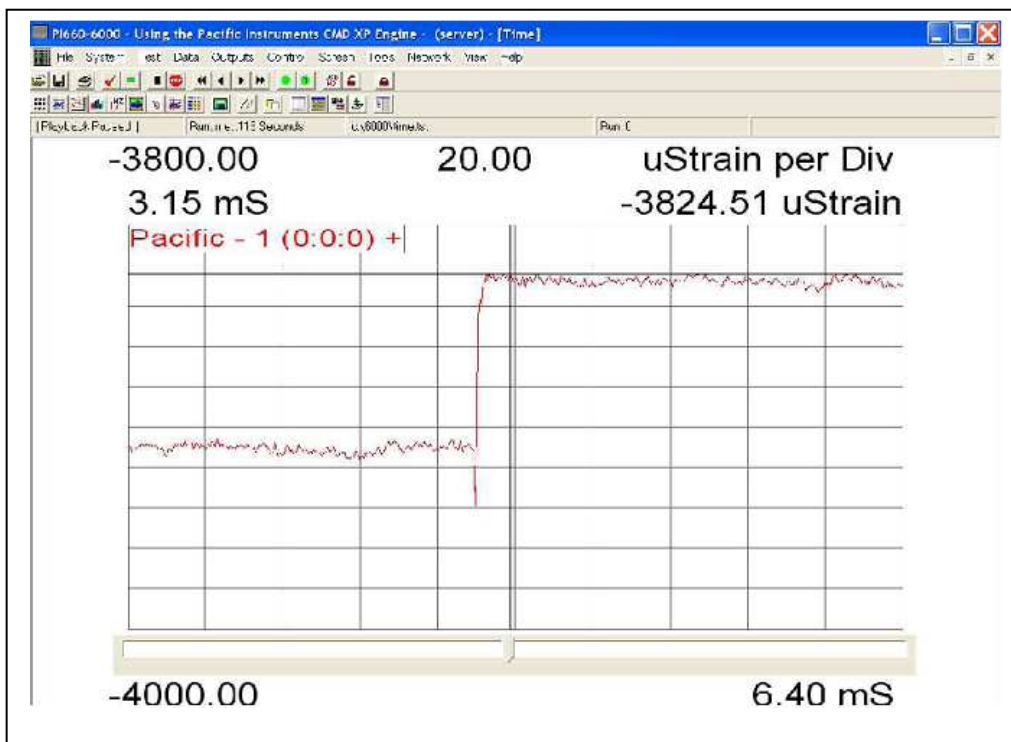
## ΔΟΚΙΜΙΟ 3 (Με συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.7 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.3 (Με συνάφεια)-Κάτω θέση



(α) Τιμή παραμόρφωσης πριν την διαταραχή

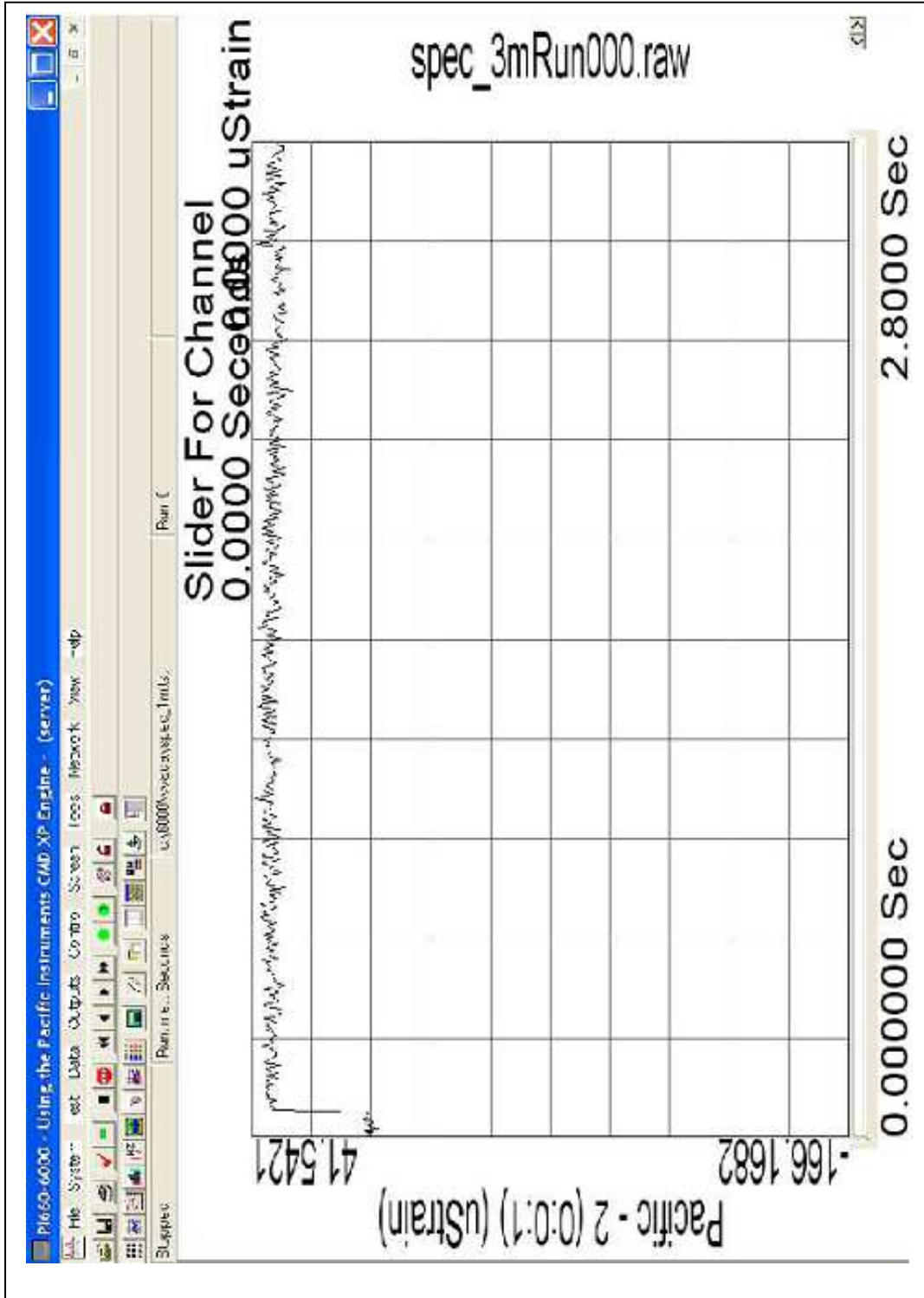


(β) Τιμή παραμόρφωσης μετά την διαταραχή

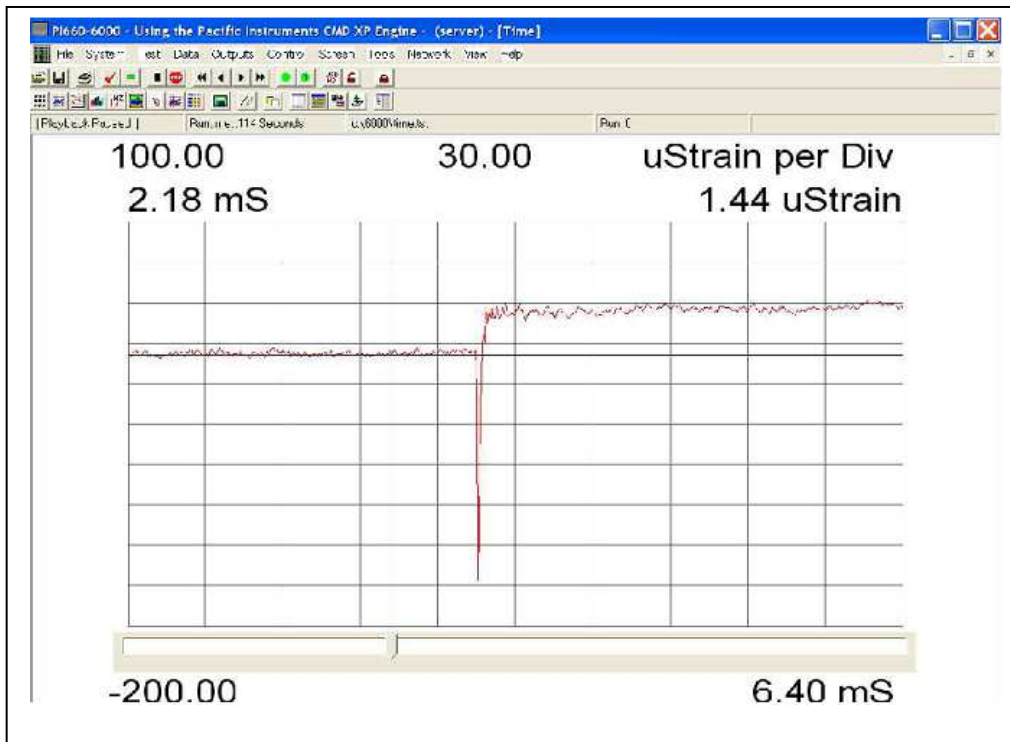
Σχήμα 5.7\* Κυματομορφή--Δοκ.3 (Με συνάφεια)-Κάτω θέση

# Α. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

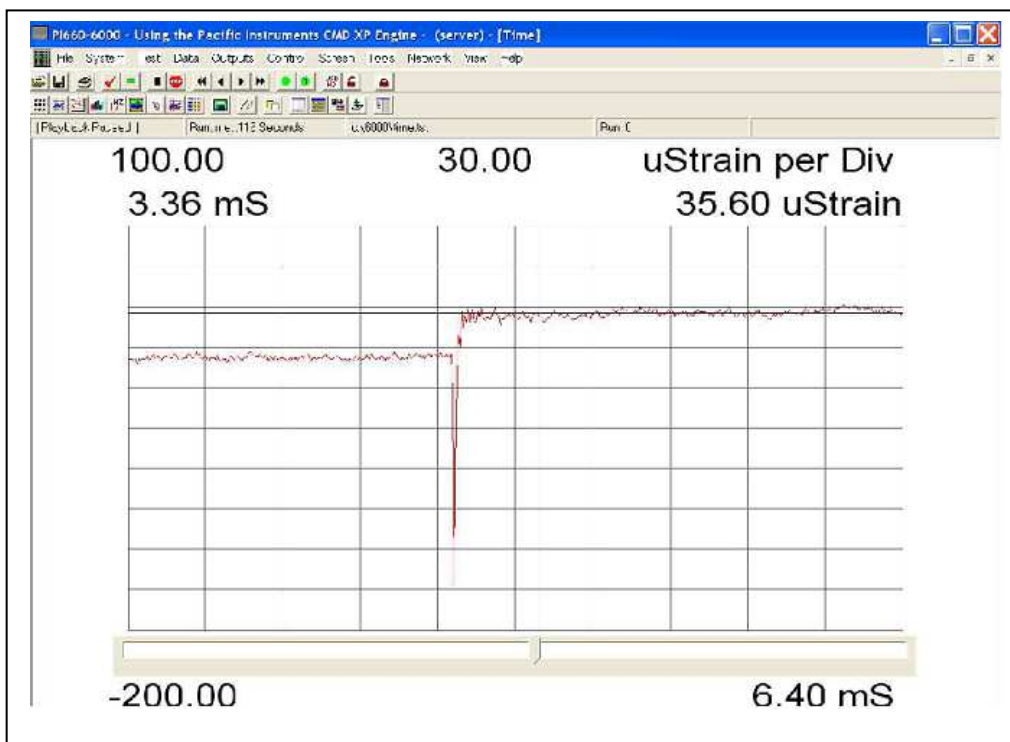
## ΔΟΚΙΜΙΟ 3 (Με συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.8 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.3 (Με συνάφεια)-Πάνω θέση



(α) Τιμή παραμόρφωσης πριν την διαταραχή

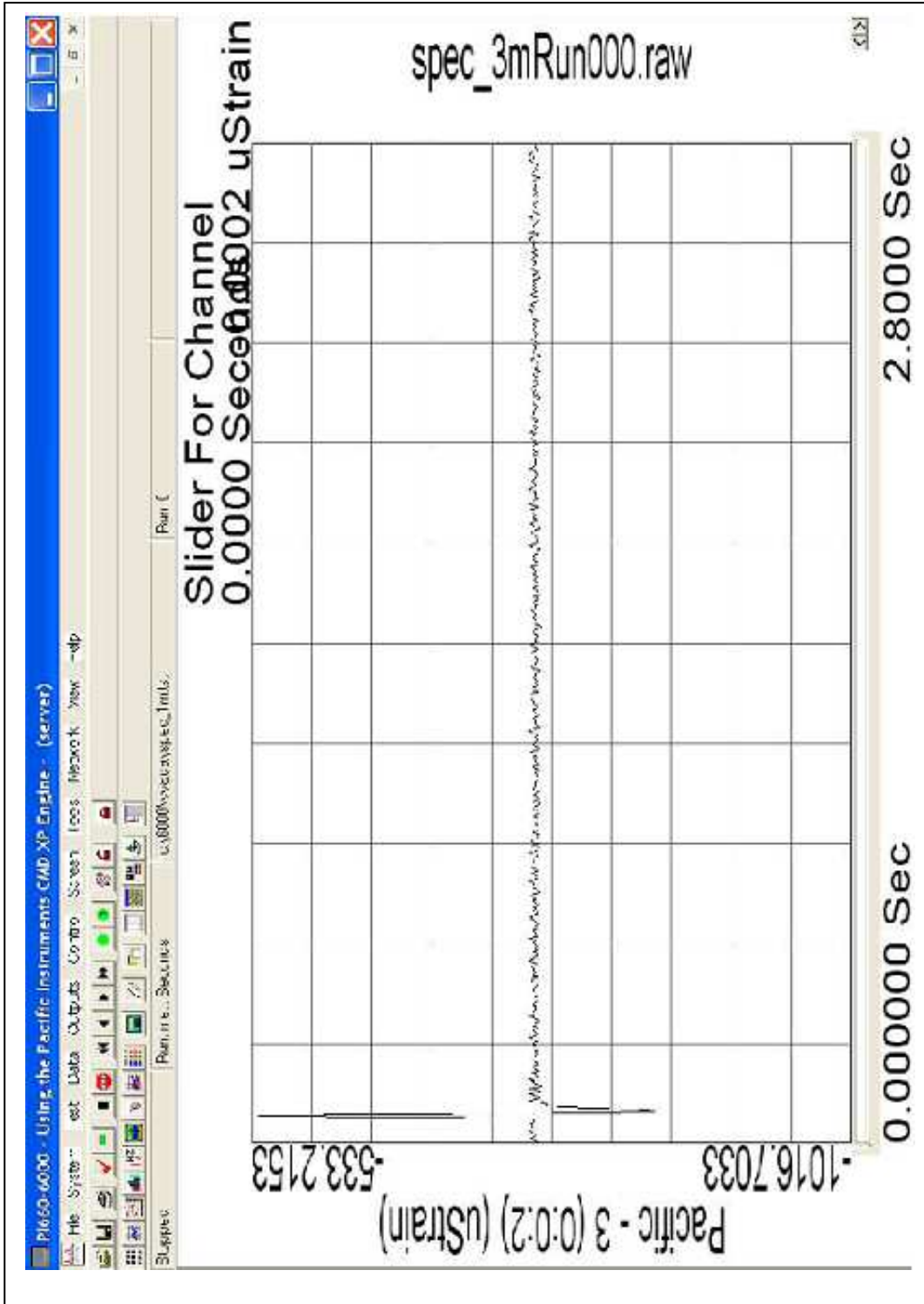


(β) Τιμή παραμόρφωσης μετά την διαταραχή

Σχήμα 5.8\* Κυματομορφή--Δοκ.3 (Με συνάφεια)-Πάνω θέση

# A. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

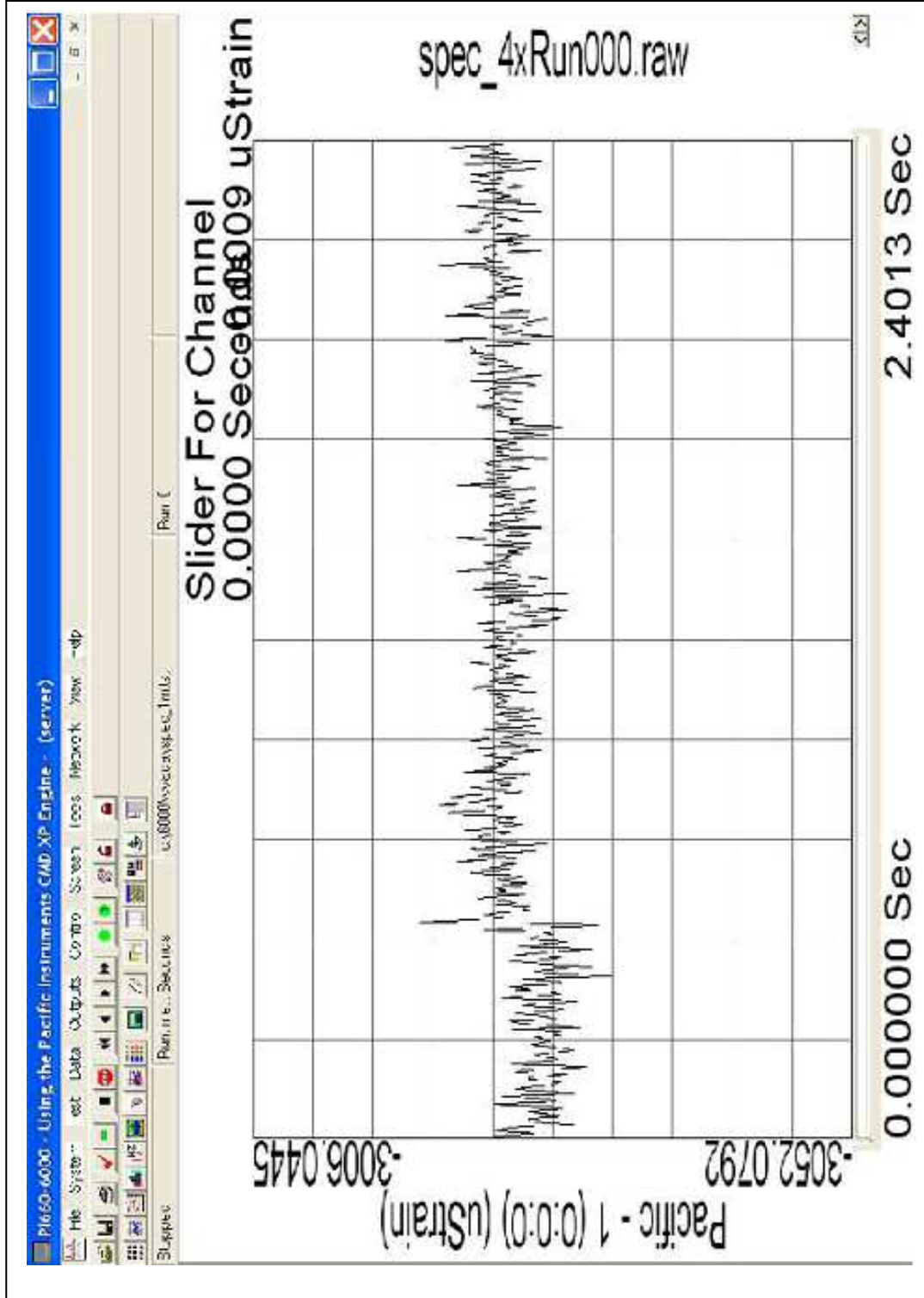
## ΔΟΚΙΜΙΟ 3 (Με συνάφεια) - ΕΞΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.9 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.3-(Με συνάφεια)-Έξω θέση

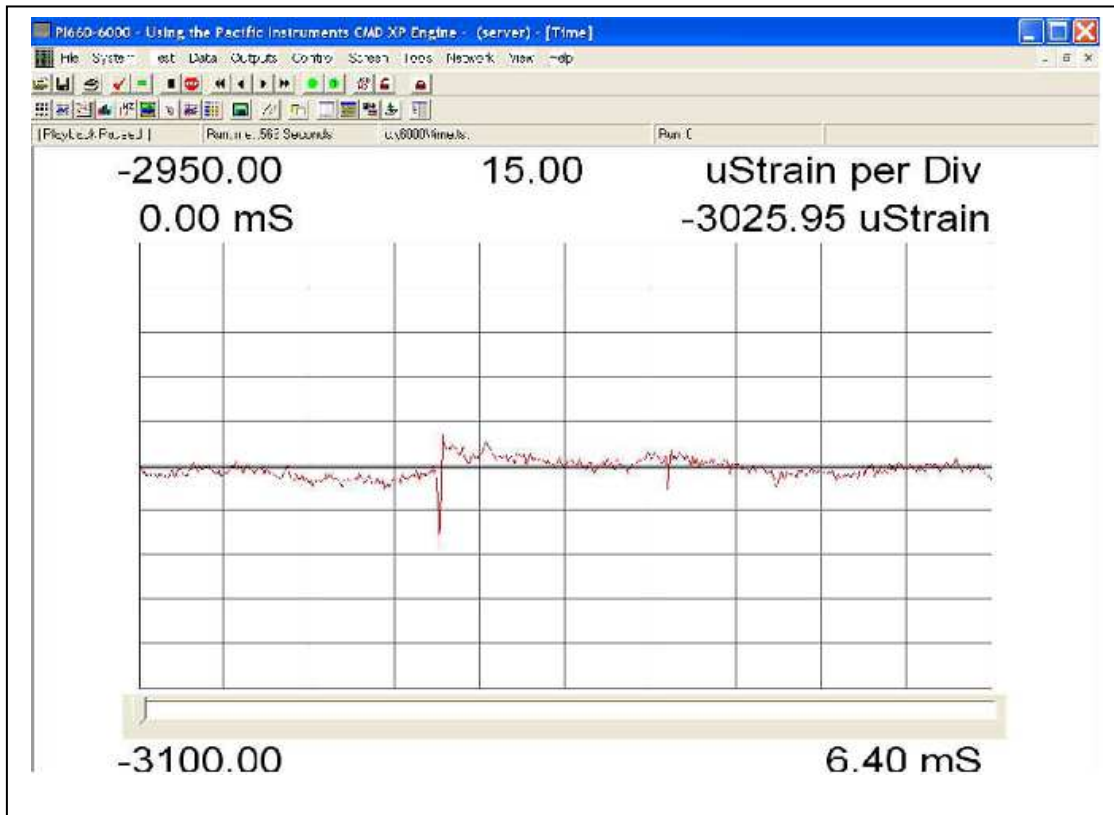
## Α. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 4 (Χωρίς συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.10 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.4 (Χωρίς συνάφεια)-Κάτω θέση

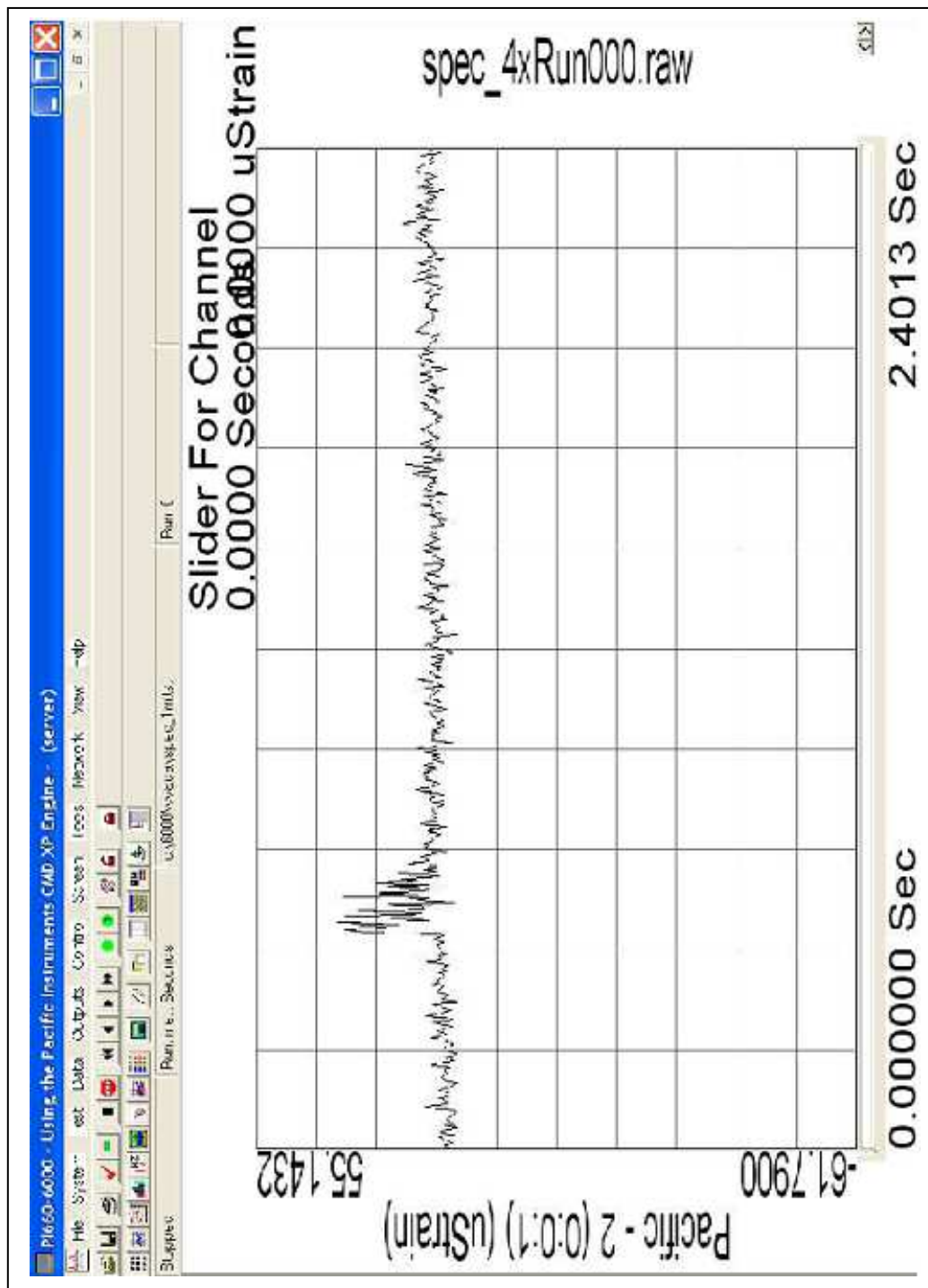




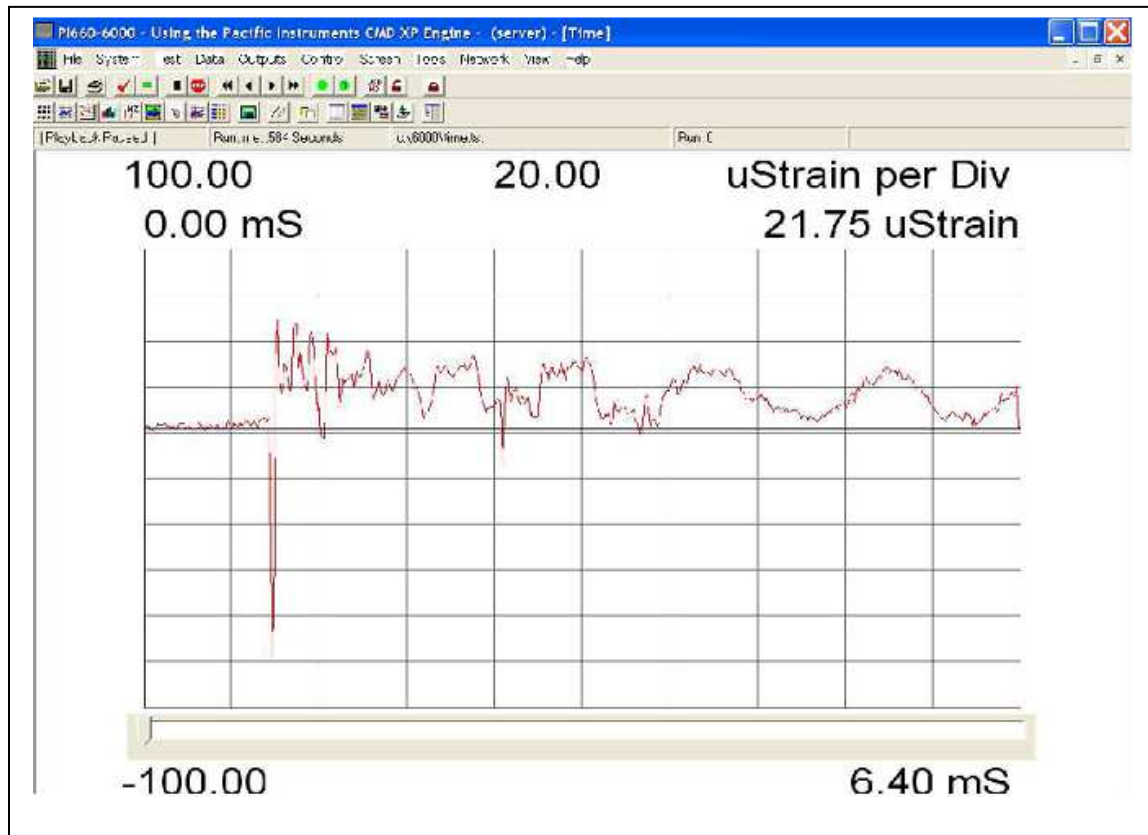
Σχήμα 5.10\* Κυματομορφή--Δοκ.4 (Χωρίς συνάφεια)-Κάτω θέση

## Α. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 4 (Χωρίς συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



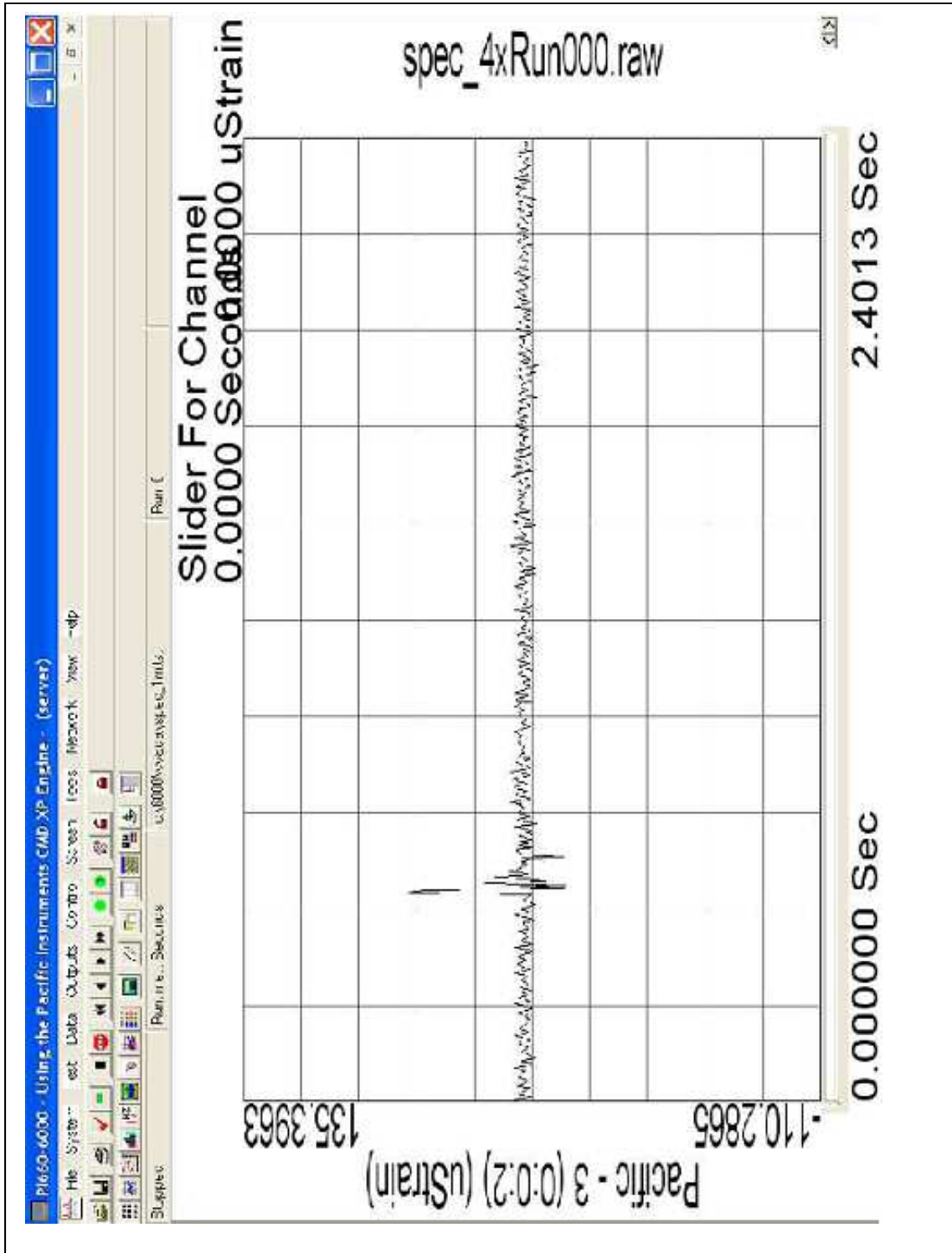
Σχήμα 5.11 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.4 (Χωρίς συνάφεια)-Πάνω θέση



Σχήμα 5.11\* Κυματομορφή--Δοκ.4 (Χωρίς συνάφεια)-Πάνω θέση

## Α. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

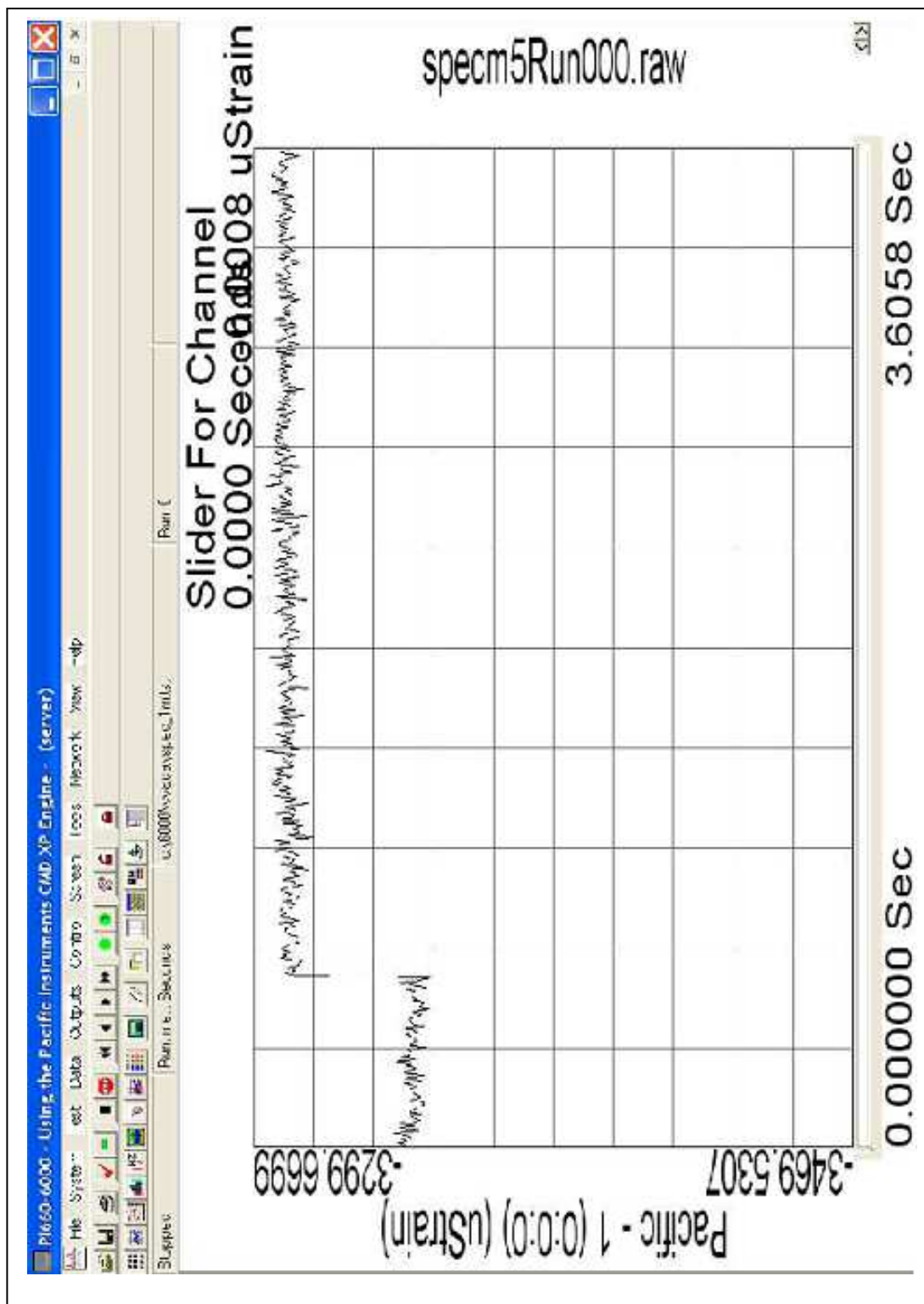
### ΔΟΚΙΜΙΟ 4 (Χωρίς συνάφεια) - ΕΞΩ ΘΕΣΗ



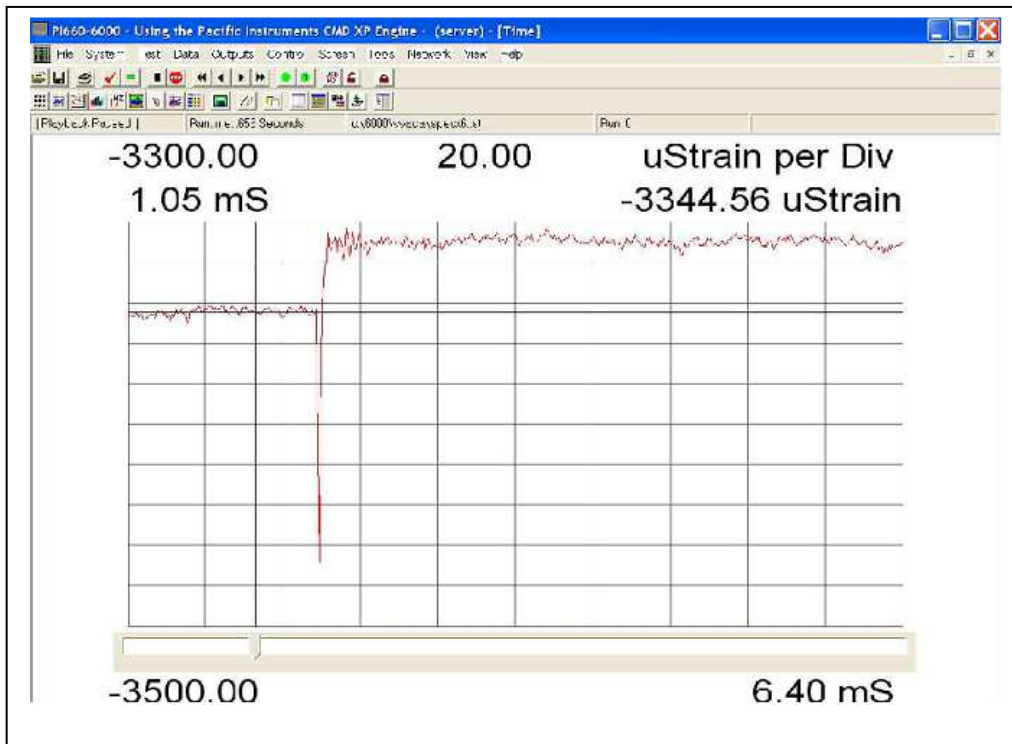
Σχήμα 5.12 Κυματομορφή Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.4 (Χωρίς συνάφεια)-Έξω θέση

## A. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

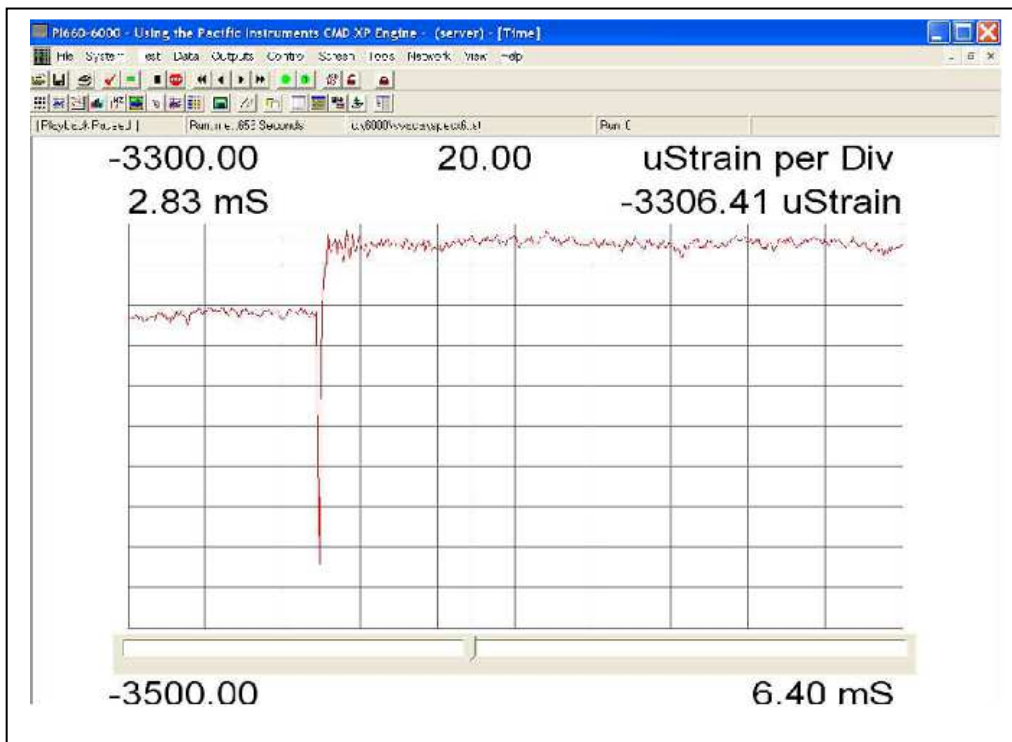
### ΔΟΚΙΜΙΟ 5 (Με συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.13 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.5 (Με συνάφεια)-Κάτω θέση



(α) Τιμή παραμόρφωσης πριν την διαταραχή

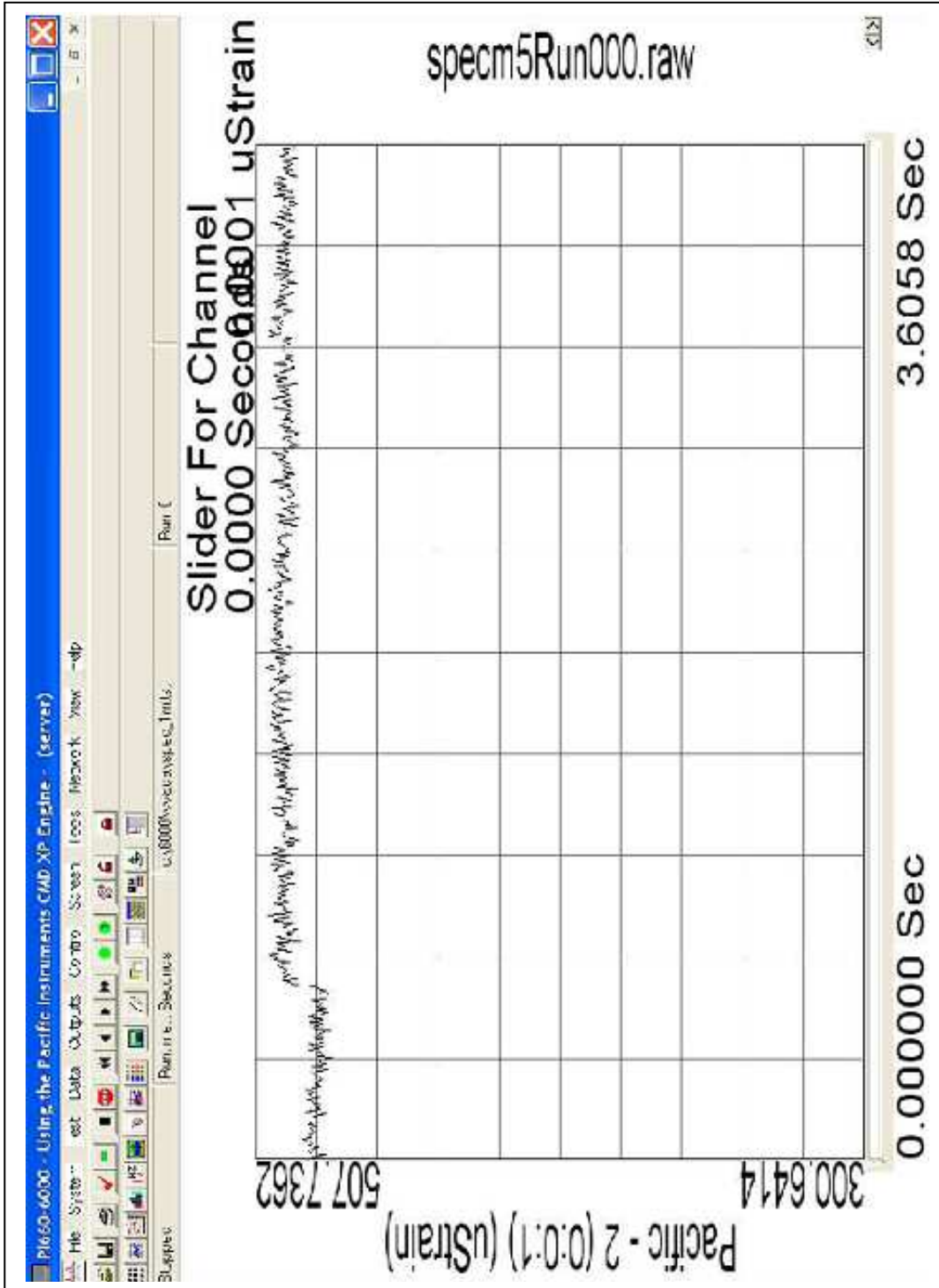


(β) Τιμή παραμόρφωσης μετά την διαταραχή

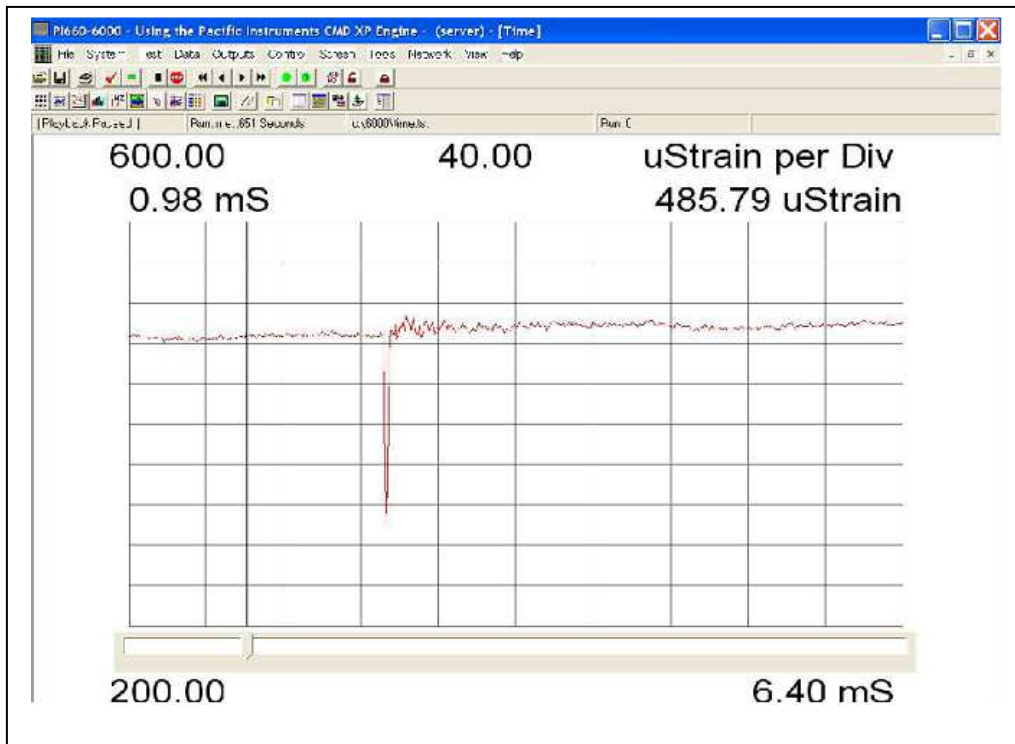
Σχήμα 5.13\* Κυματομορφή--Δοκ.5 (Με συνάφεια)-Κάτω θέση

# Α. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

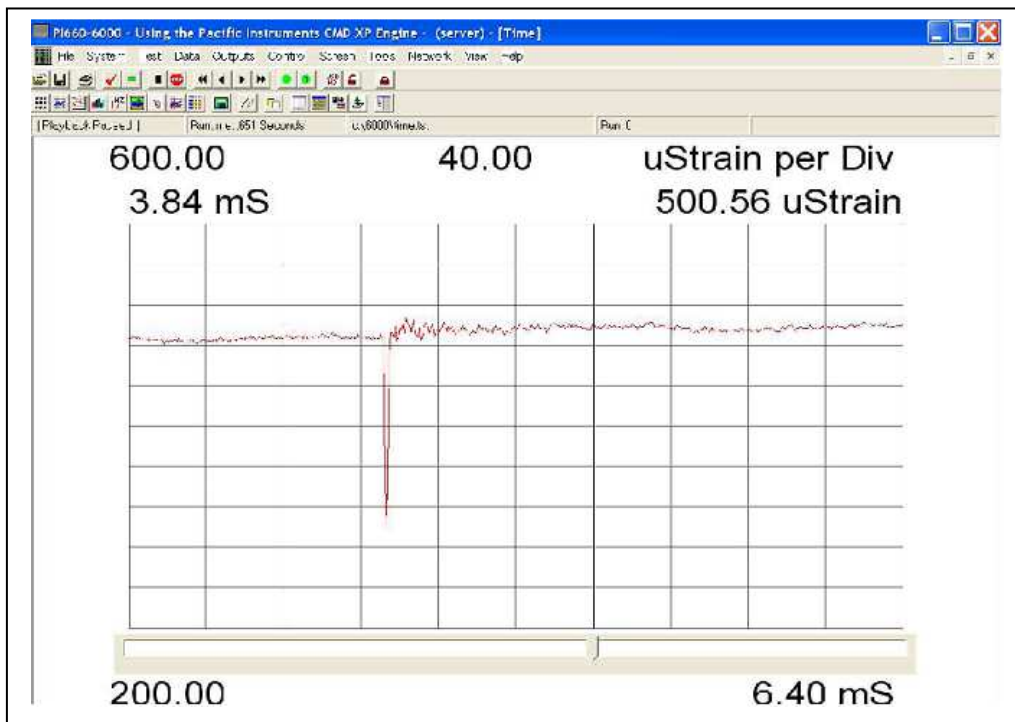
## ΔΟΚΙΜΙΟ 5 (Με συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.14 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.5(Με συνάφεια)-Πάνω θέση



(α) Τιμή παραμόρφωσης πριν την διαταραχή



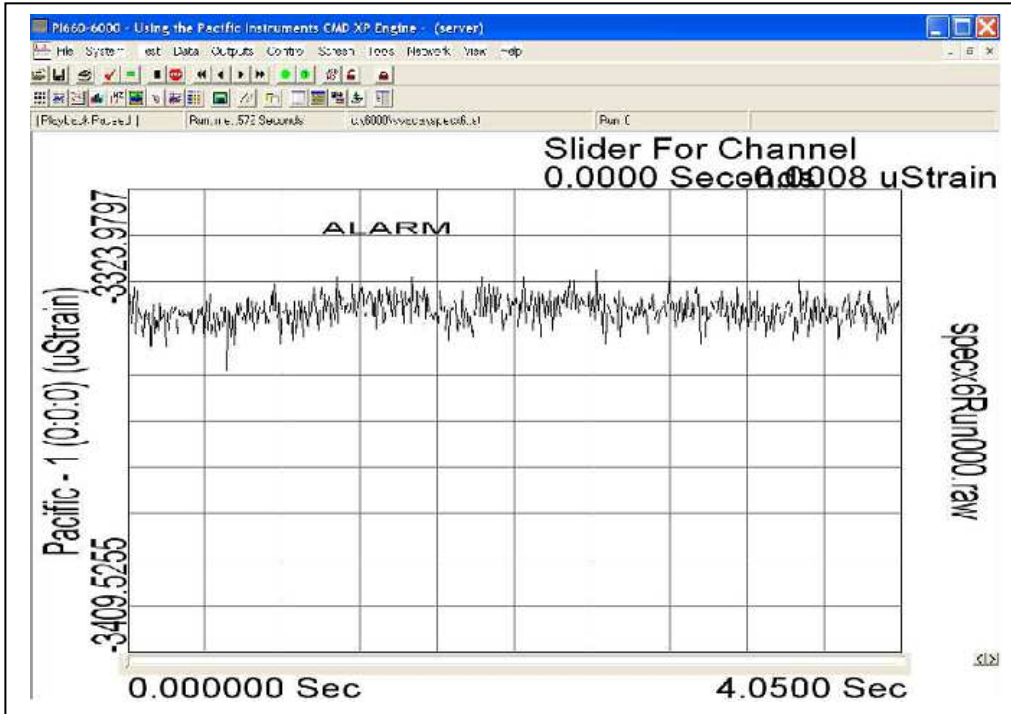
(β) Τιμή παραμόρφωσης μετά την διαταραχή

Σχήμα 5.14\* Κυματομορφή--Δοκ.5(Με συνάφεια)-Πάνω θέση

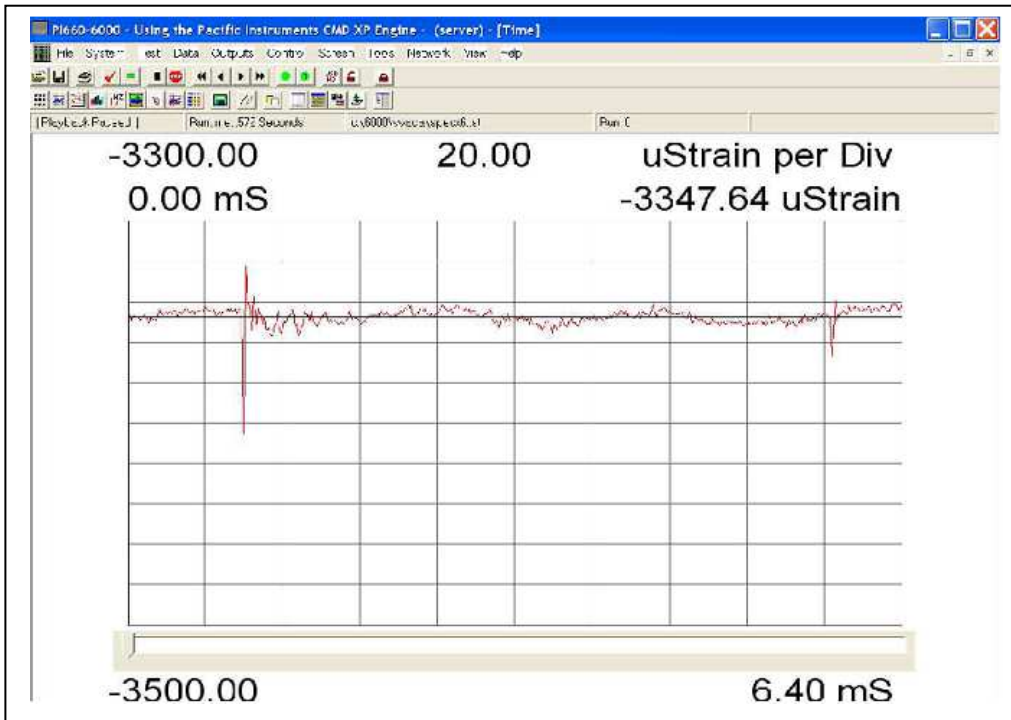


## A. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 6 (Χωρίς συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



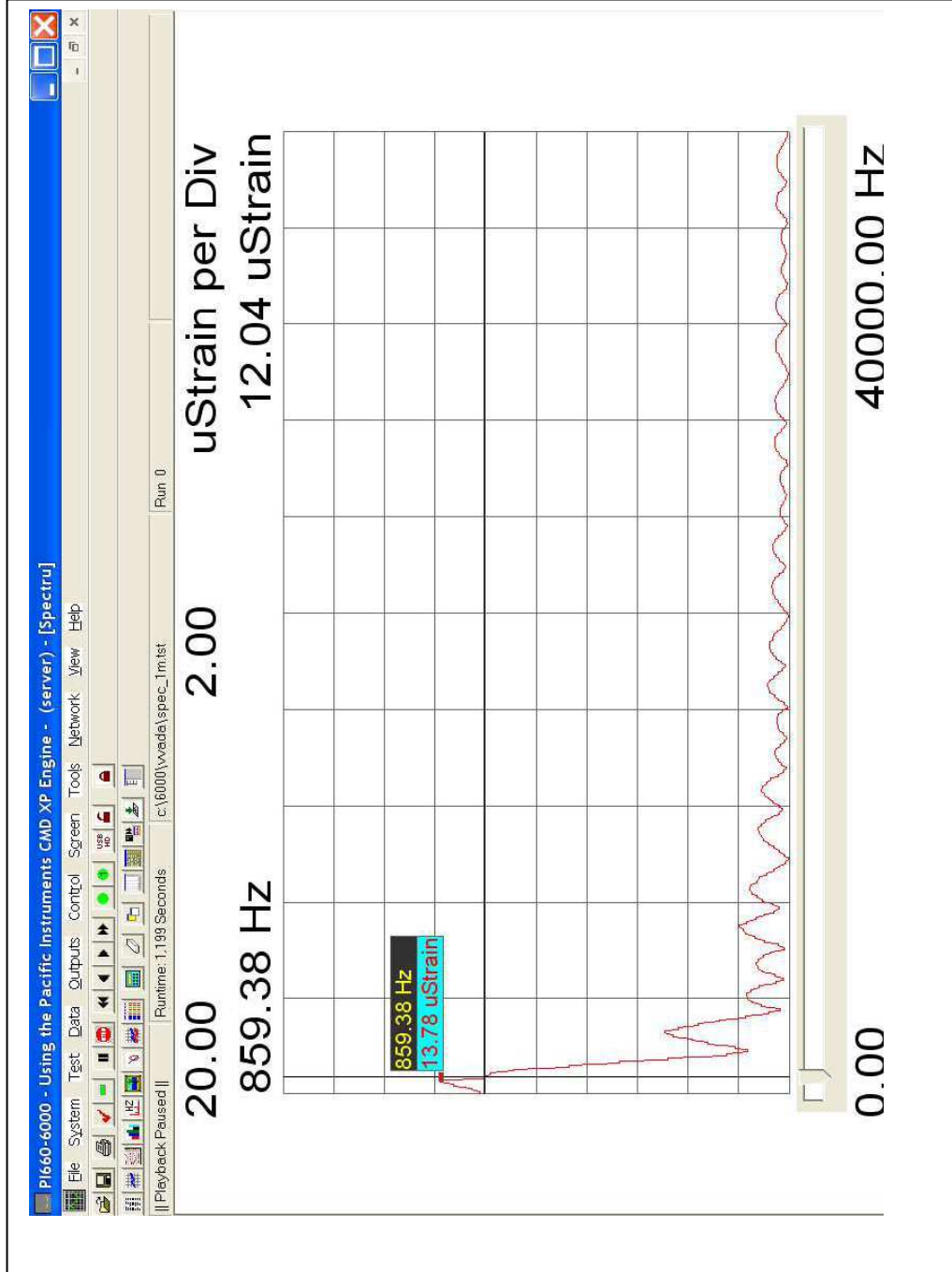
Σχήμα 5.15 Κυματομορφή-Όλος ο χρόνος εγγραφής-Δοκ.6 (Χωρίς συνάφεια)-Κάτω θέση



Σχήμα 5.15\* Κυματομορφή--Δοκ.6 (Χωρίς συνάφεια)-Κάτω θέση

## Β. ΦΑΣΜΑ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (Με συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.16 Φάσμα συχνοτήτων--Δοκ.1 (Με συνάφεια)-Κάτω θέση

## Β. ΦΑΣΜΑ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (Με συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.17 Φάσμα συχνοτήτων--Δοκ.1 (Με συνάφεια)-Πάνω θέση

## Β. ΦΑΣΜΑ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Χωρίς συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.18 Φάσμα συχνοτήτων--Δοκ.2 (Χωρίς συνάφεια)-Κάτω θέση

## Β. ΦΑΣΜΑ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Χωρίς συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.19 Φάσμα συχνοτήτων--Δοκ.2 (Χωρίς συνάφεια)-Πάνω θέση

## Β. ΦΑΣΜΑ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 3 (Με συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.20 Φάσμα συχνότητων--Δοκ.3 (Με συνάφεια)-Κάτω θέση

## Β. ΦΑΣΜΑ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 3 (Με συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.21 Φάσμα συχνοτήτων--Δοκ.3 (Με συνάφεια)-Πάνω θέση

## Β. ΦΑΣΜΑ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 4 (Χωρίς συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ

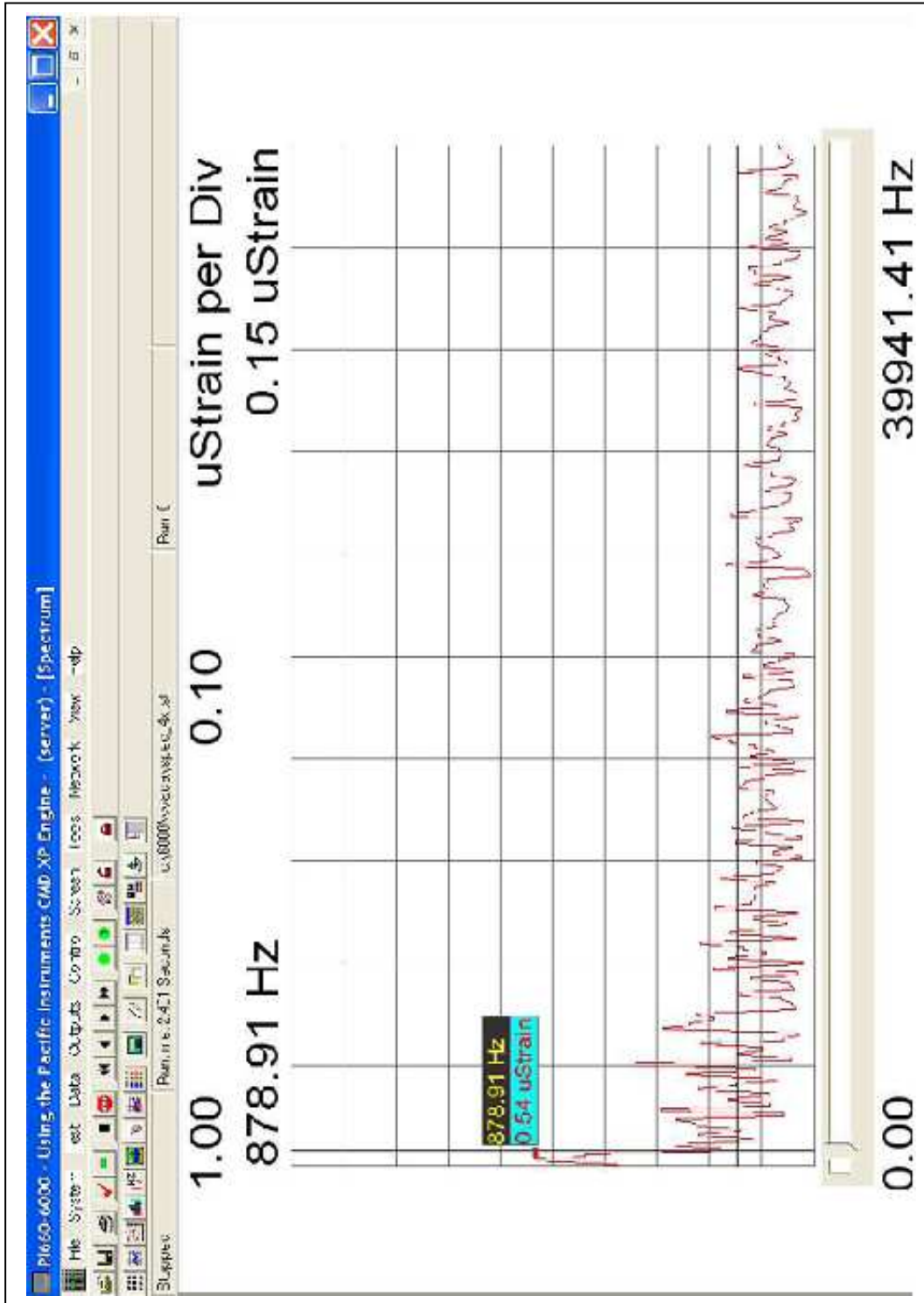


Σχήμα 5.22 Φάσμα συχνοτήτων--Δοκ.4 (Χωρίς συνάφεια)-Κάτω θέση



## Β. ΦΑΣΜΑ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 4 (Χωρίς συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.23 Φάσμα συχνοτήτων--Δοκ.4 (Χωρίς συνάφεια)-Πάνω θέση

## Β. ΦΑΣΜΑ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 5 (Με συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.24 Φάσμα συχνοτήτων--Δοκ.5 (Μεσ συνάφεια)-Κάτω θέση



## Β. ΦΑΣΜΑ

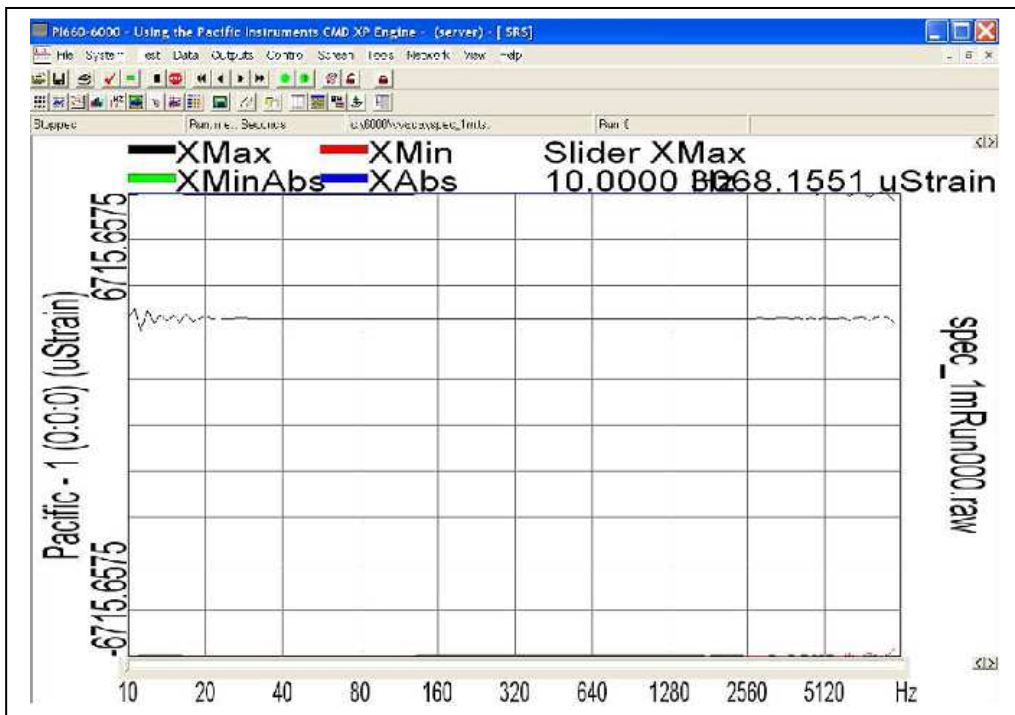
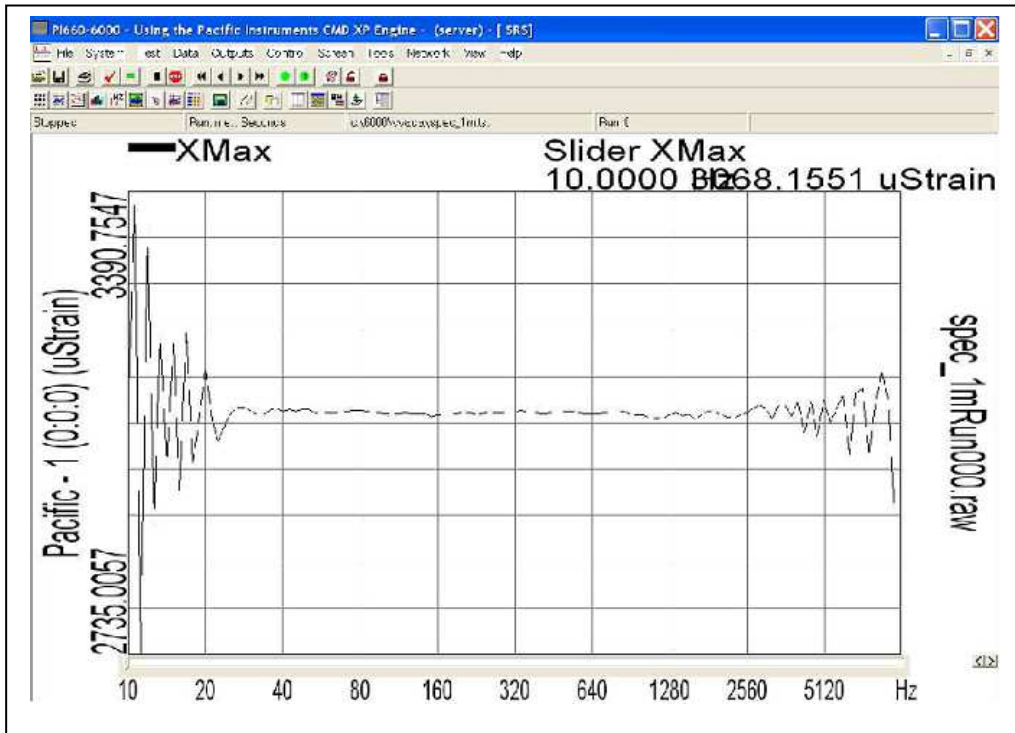
### ΔΟΚΙΜΙΟ 6 (Χωρίς συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.26 Φάσμα συχνοτήτων--Δοκ.6 (Χωρίς συνάφεια)-Κάτω θέση

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

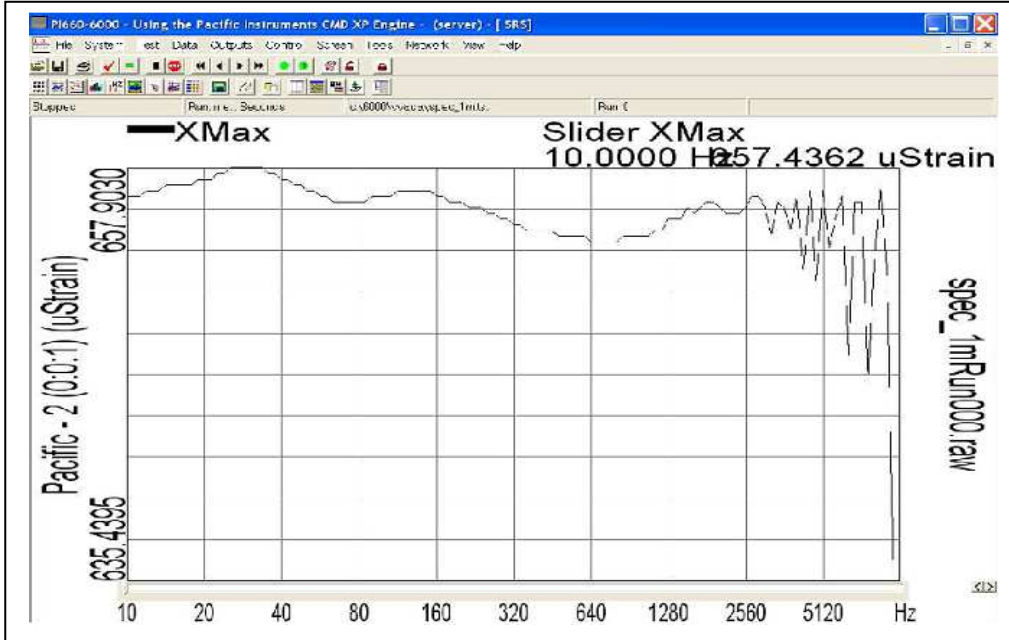
### ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (Με συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



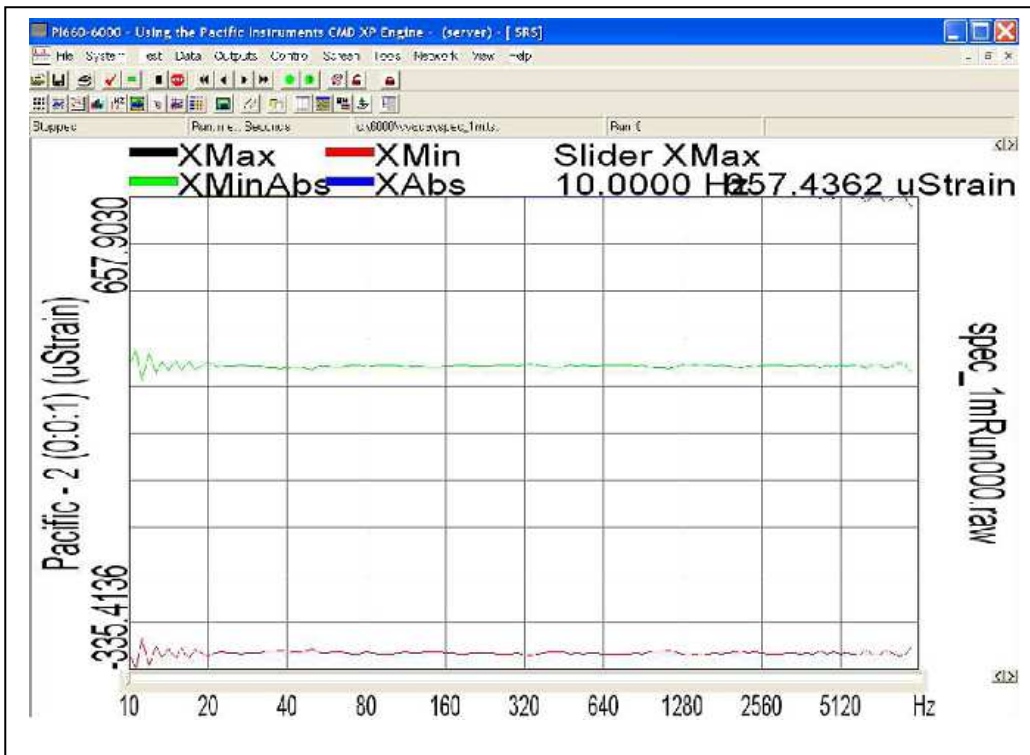
Σχήμα 5.27 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (Με συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



(a)

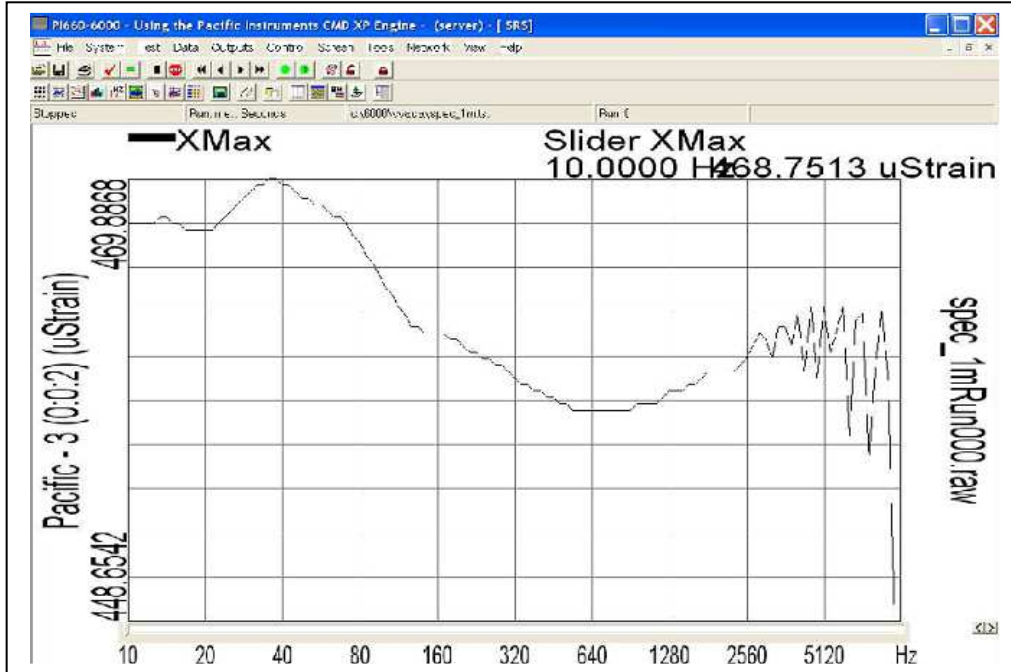


(b)

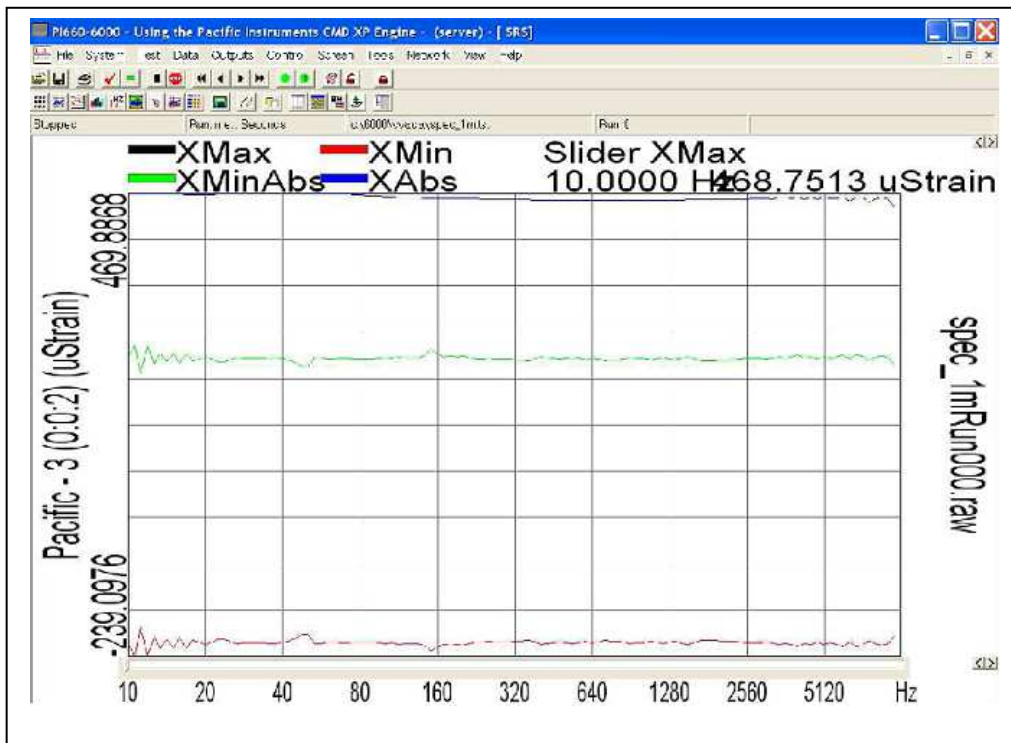
Σχήμα 5.28 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (Με συνάφεια) - ΕΞΩ ΘΕΣΗ



(a)

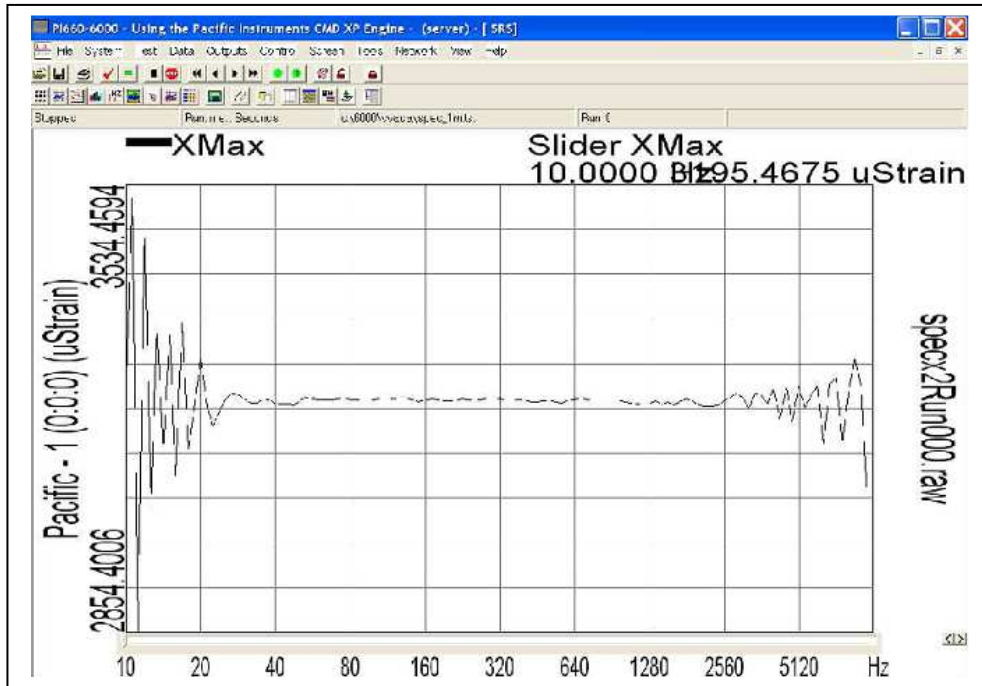


(b)

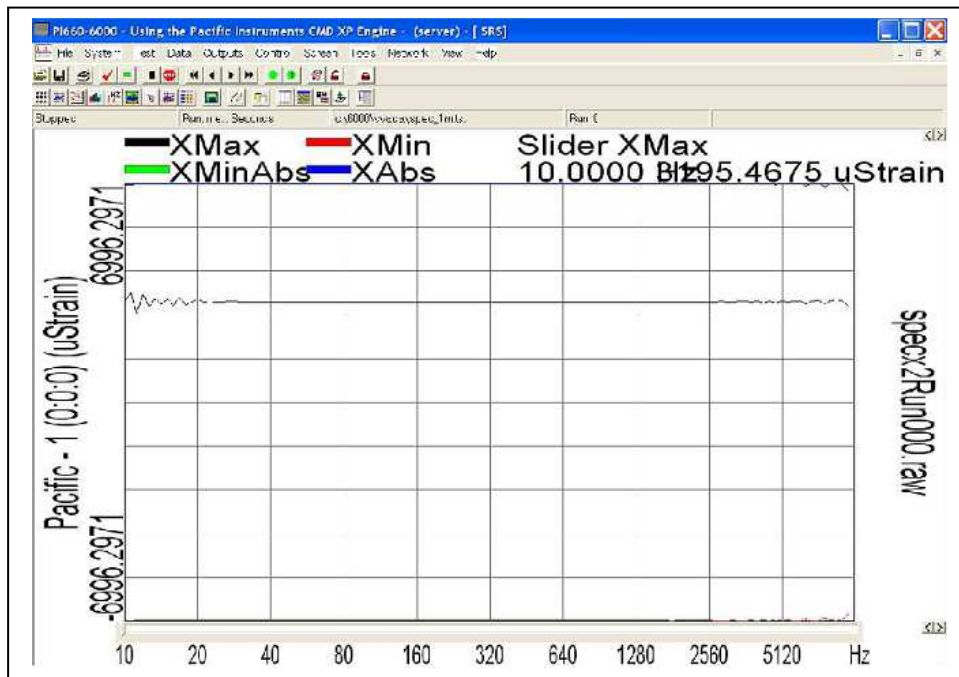
Σχήμα 5.29 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Χωρίς συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



(a)



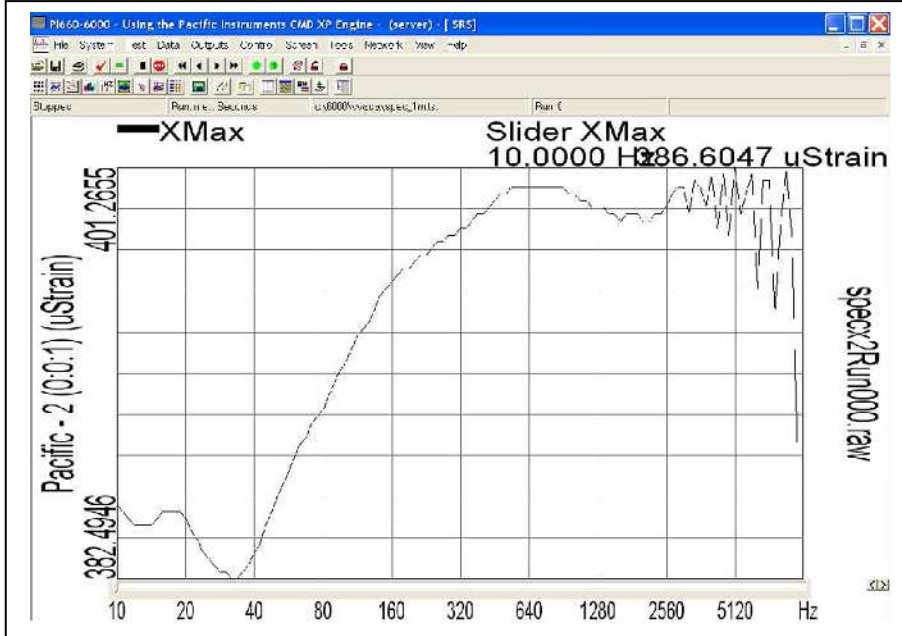
(b)

Σχήμα 5.30 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

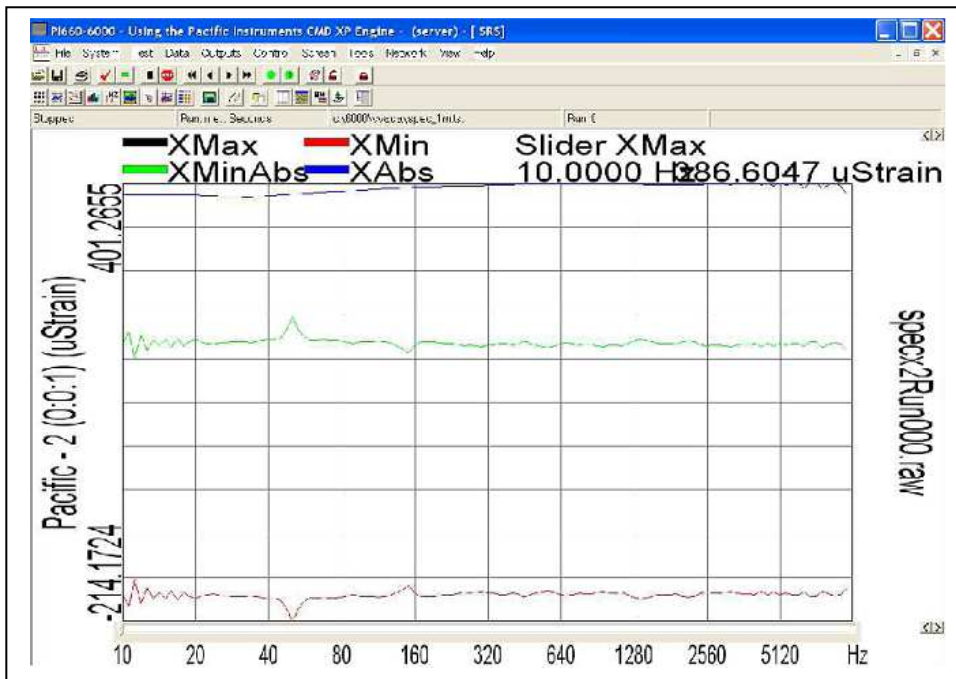


## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Χωρίς συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



(a)

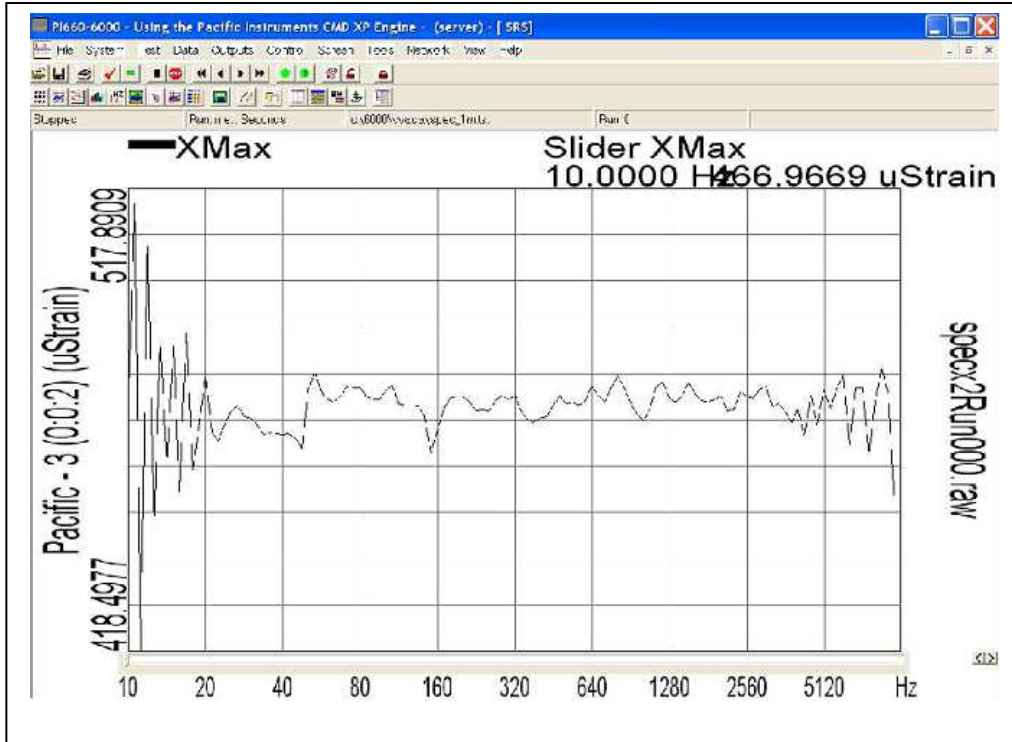


(b)

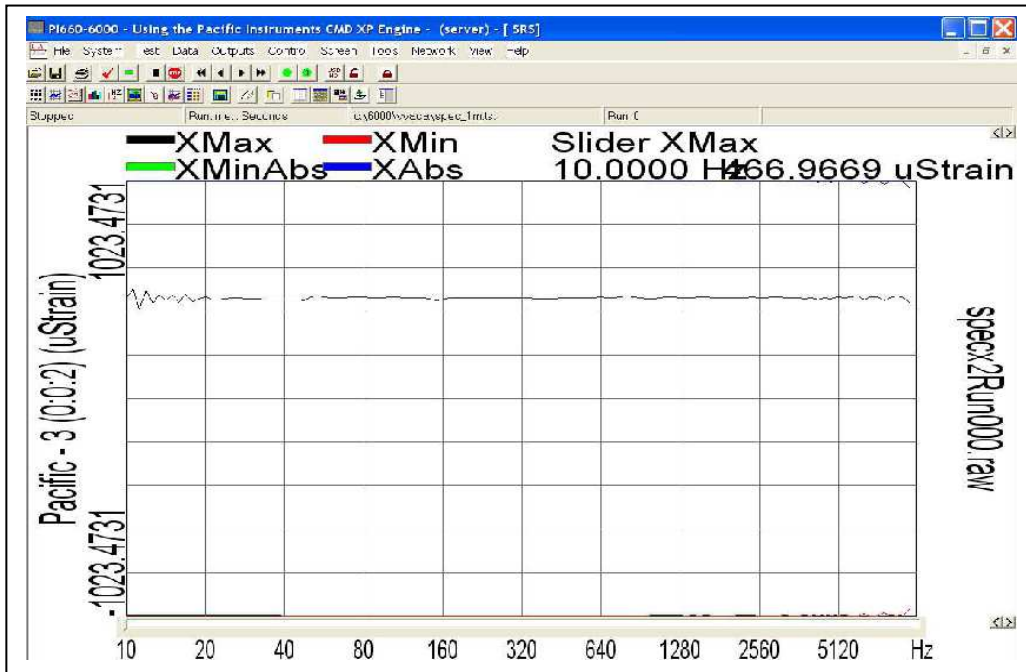
Σχήμα 5.31 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

### Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

#### ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Χωρίς συνάφεια) - ΕΞΩ ΘΕΣΗ



(a)

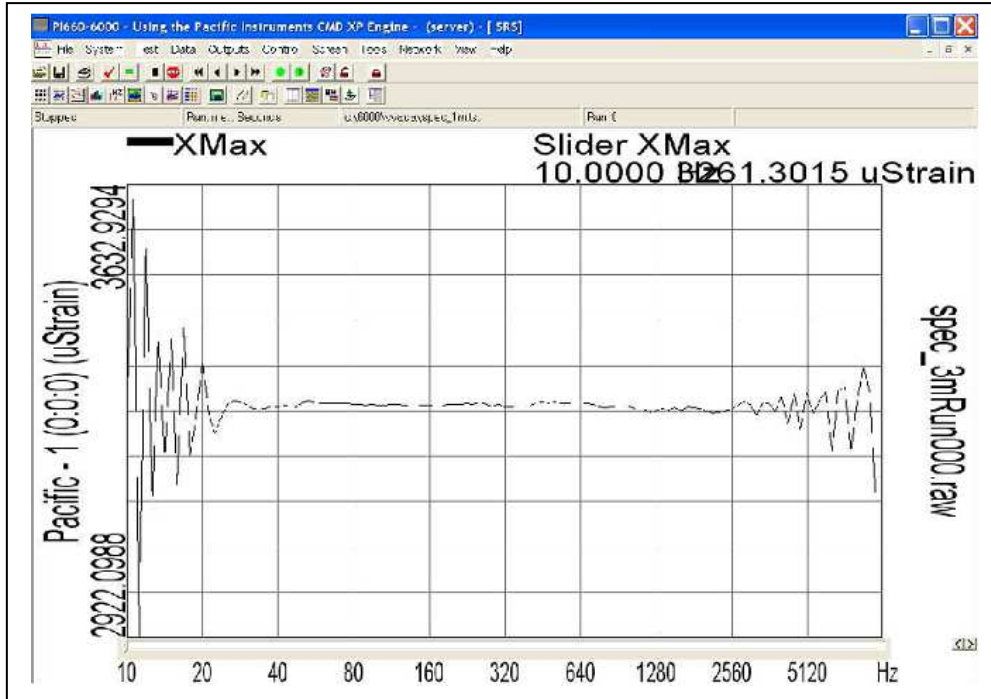


(b)

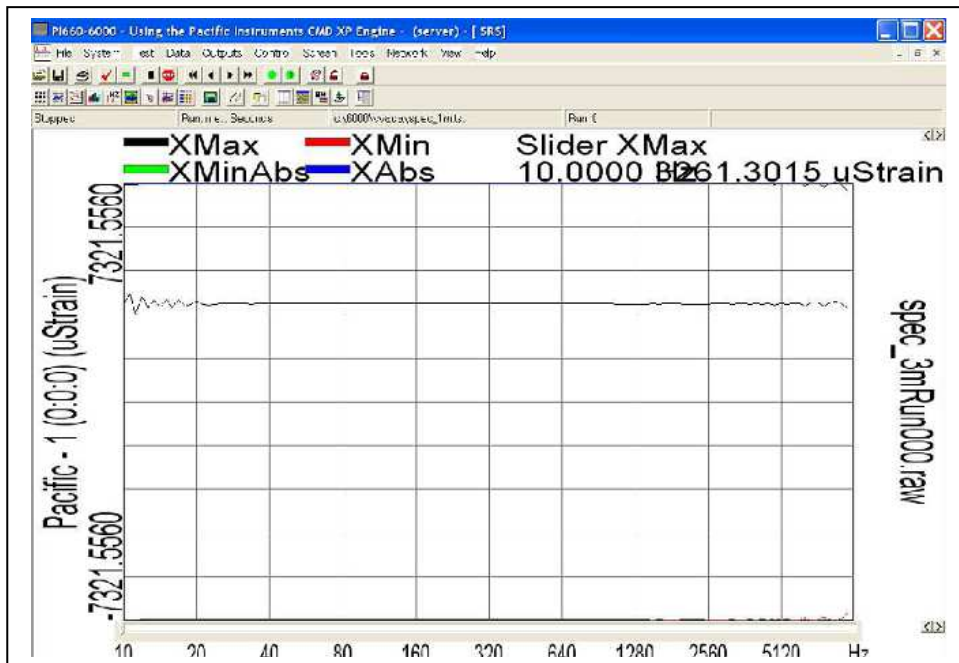
Σχήμα 5.32 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 3 (Με συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



(a)

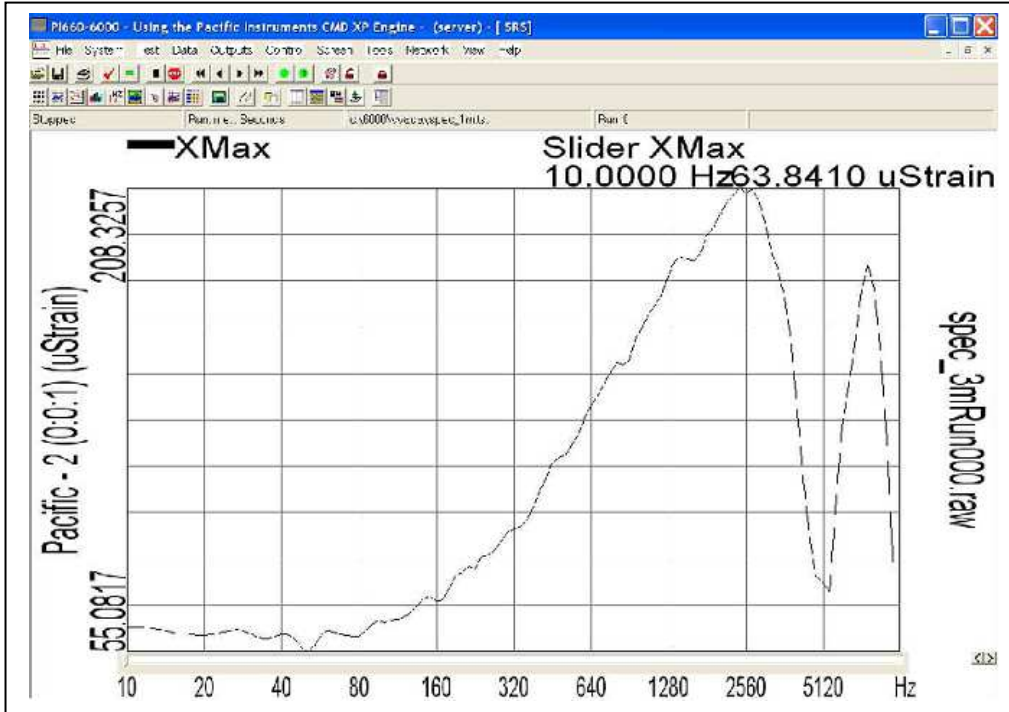


(b)

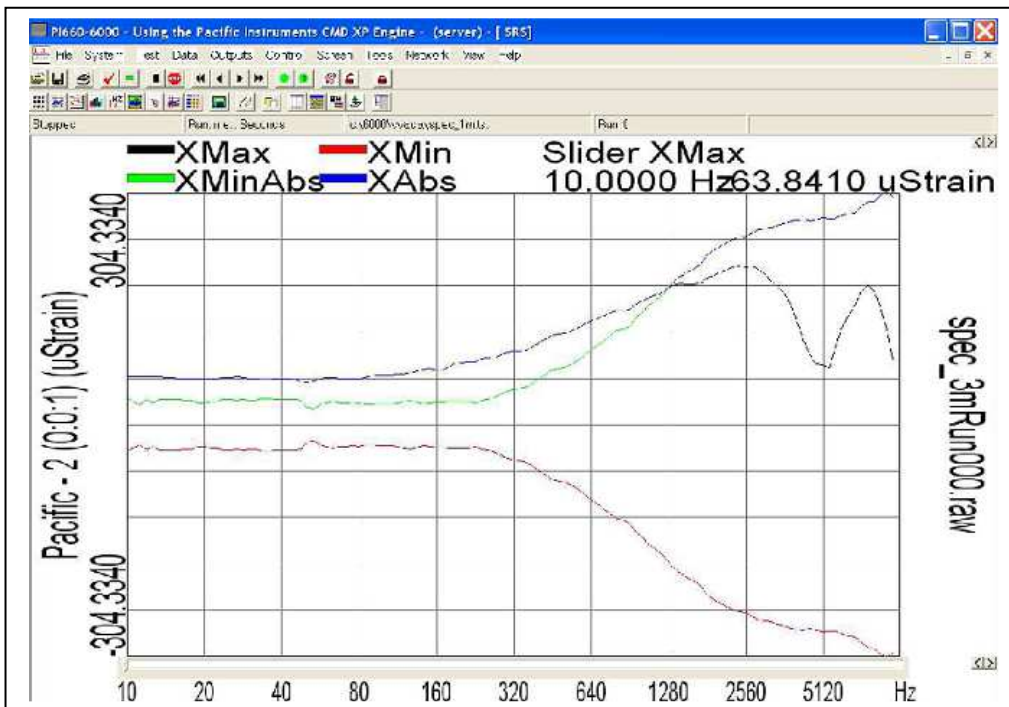
Σχήμα 5.33 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 3 (Με συνάφεια) -ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



(a)

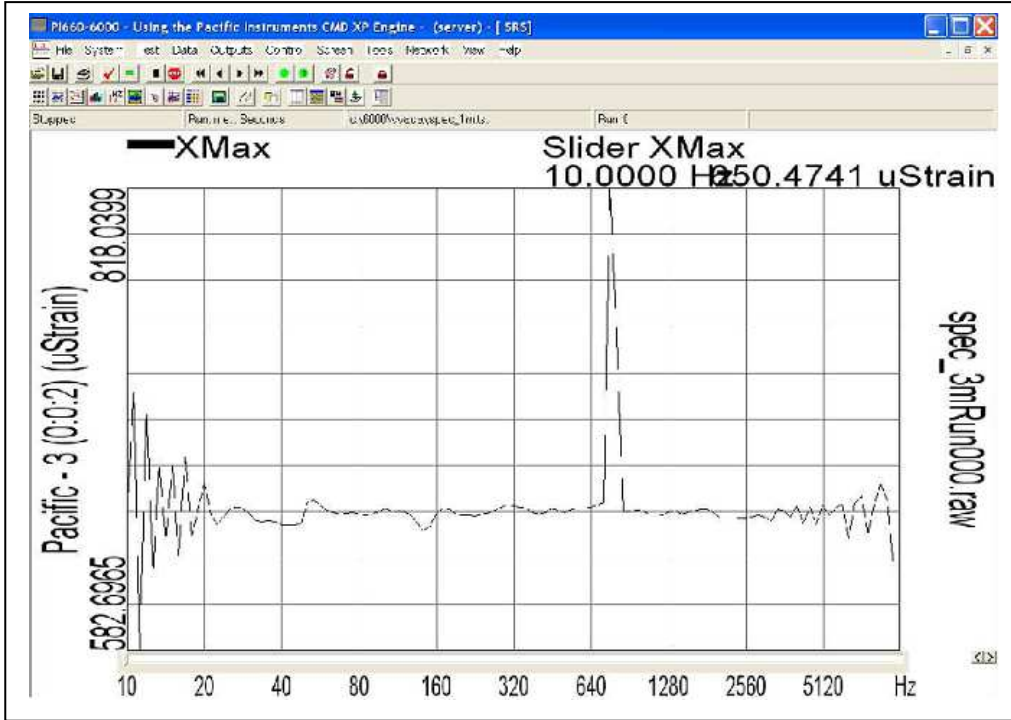


(b)

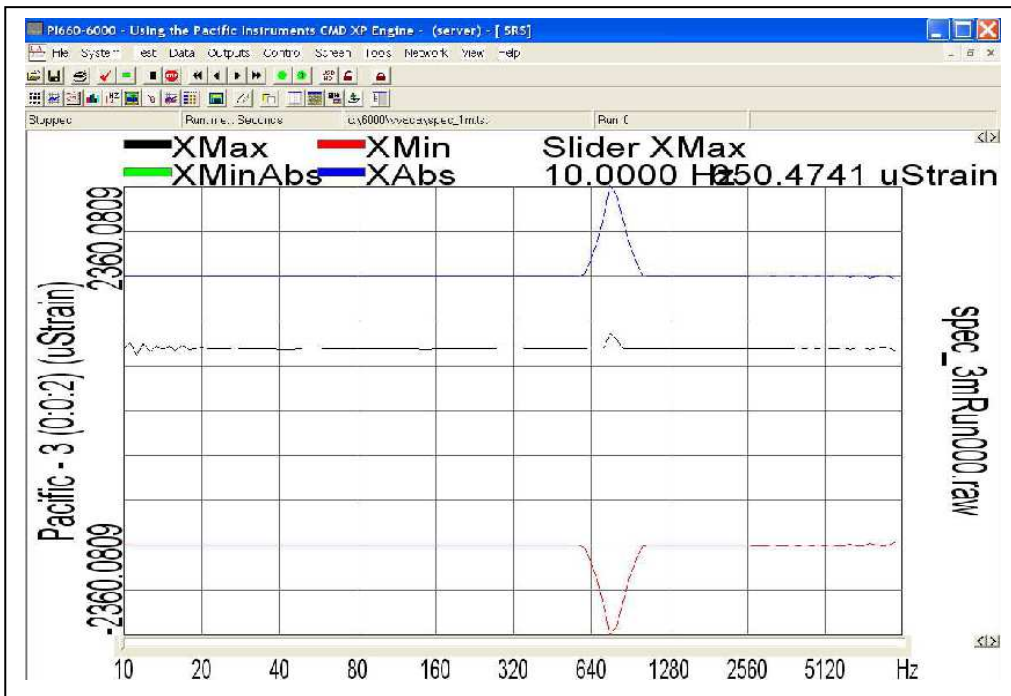
Σχήμα 5.34 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

### Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

#### ΔΟΚΙΜΙΟ 3 (Με συνάφεια) - ΕΞΩ ΘΕΣΗ



(a)

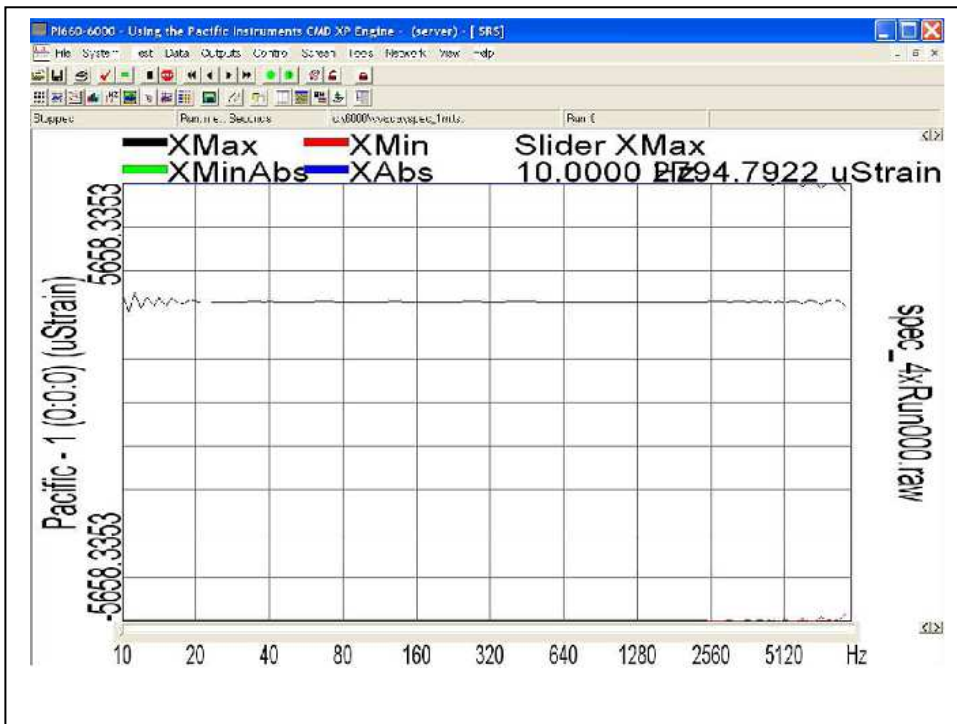
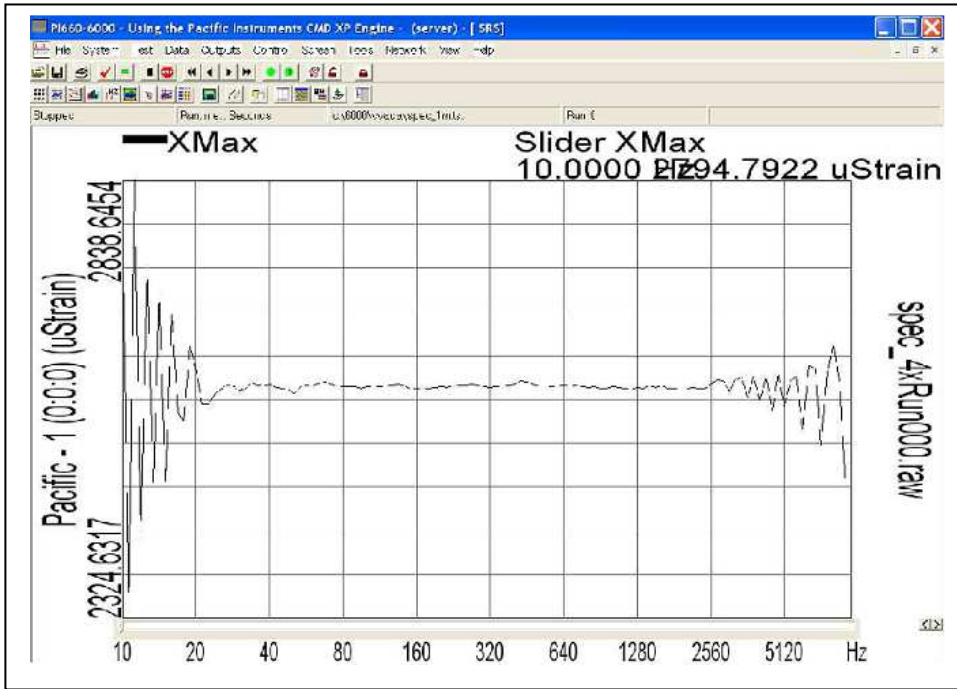


(b)

Σχήμα 5.35 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

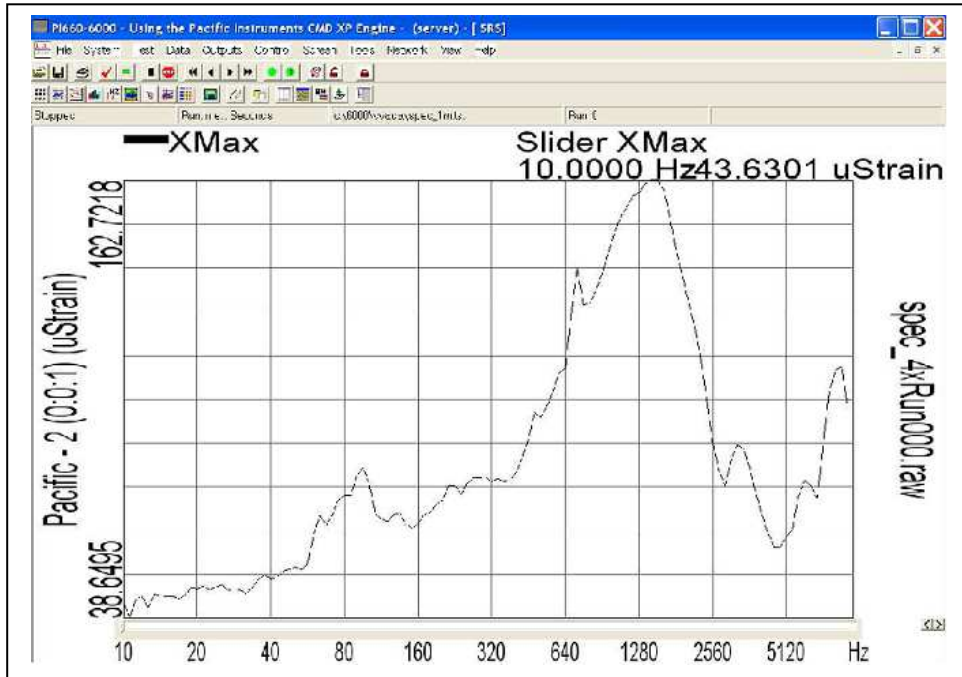
### ΔΟΚΙΜΙΟ 4 (Χωρίς συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



Σχήμα 5.36 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 4 (Χωρίς συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



(a)

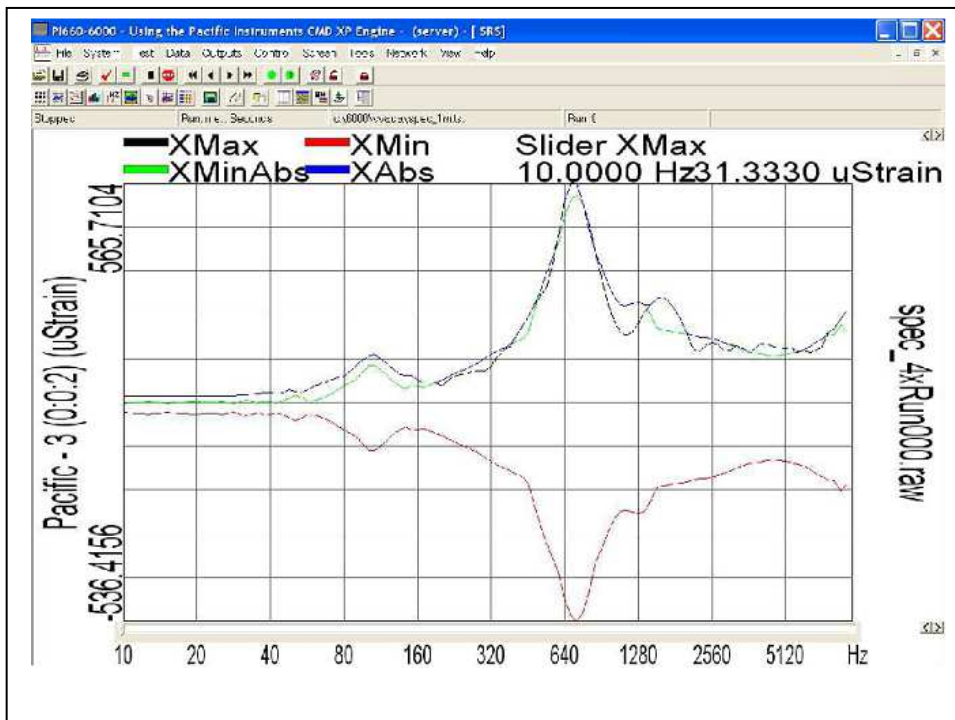
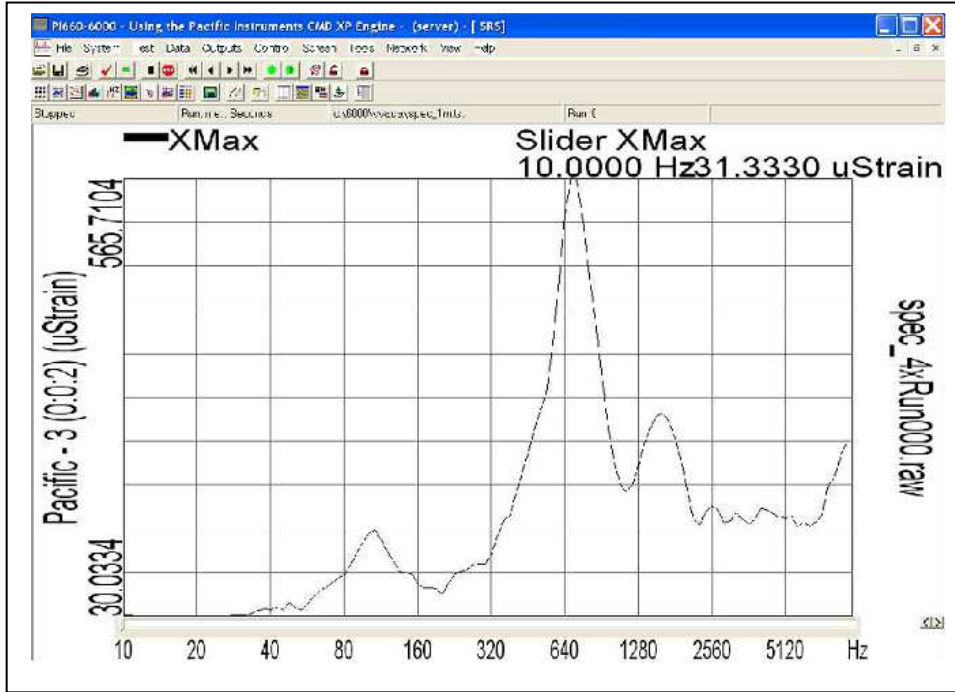


(b)

Σχήμα 5.37 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 4 (Χωρίς συνάφεια) - ΕΞΩ ΘΕΣΗ

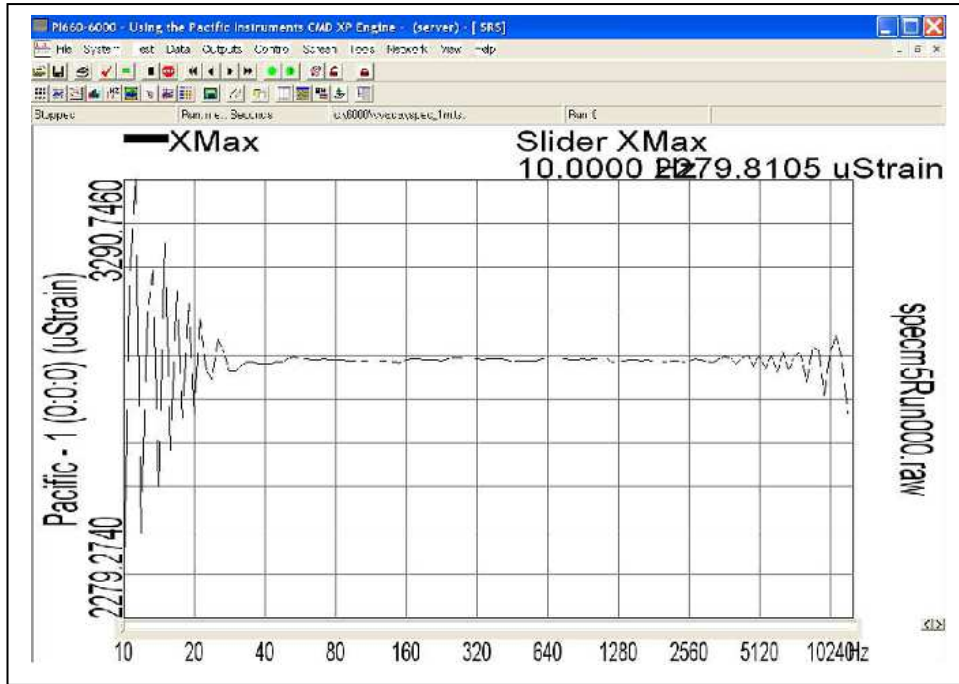


Σχήμα 5.38 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

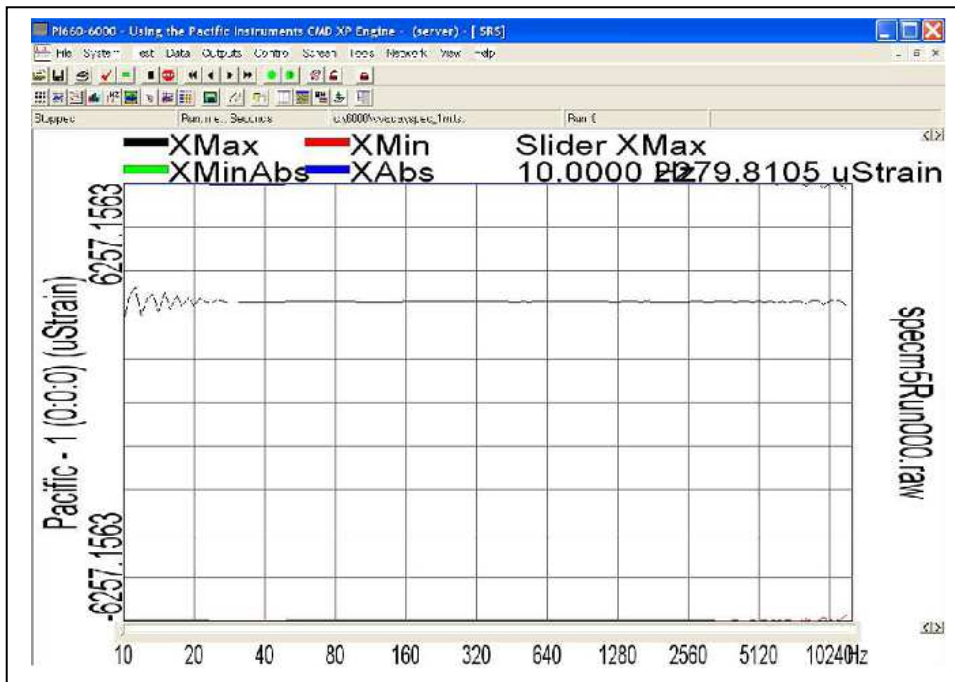


## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 5 (Με συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



(a)

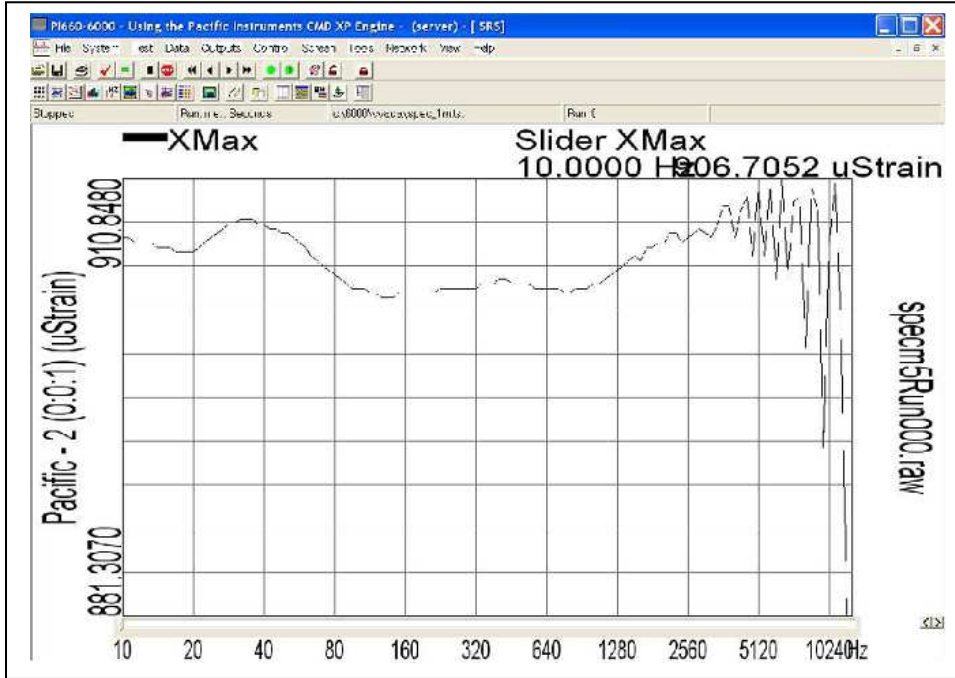


(b)

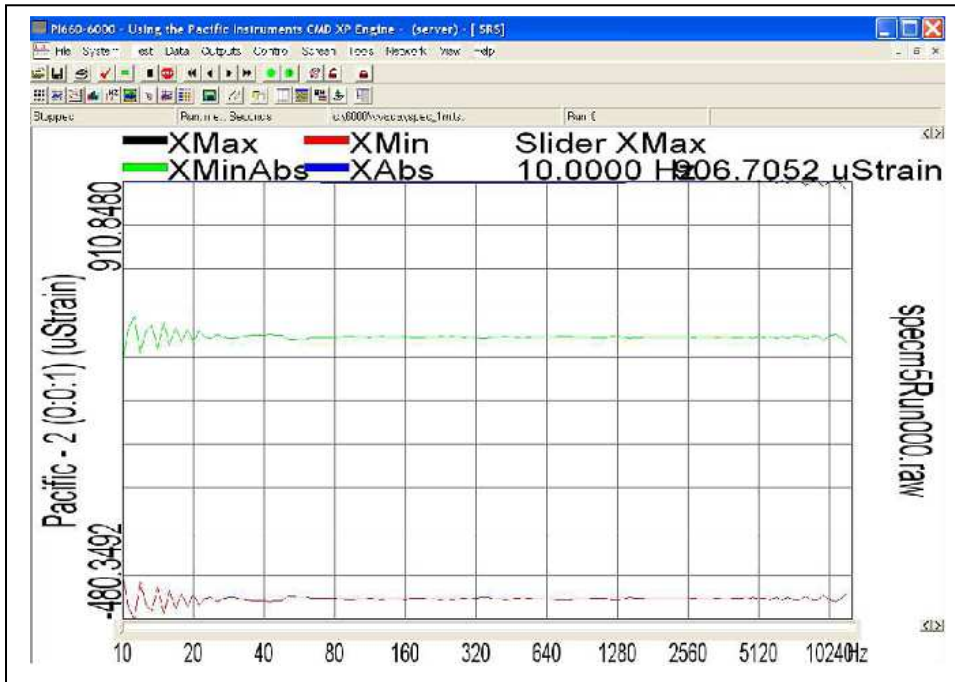
Σχήμα 5.39 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 5 (Με συνάφεια) - ΠΑΝΩ ΘΕΣΗ



(a)

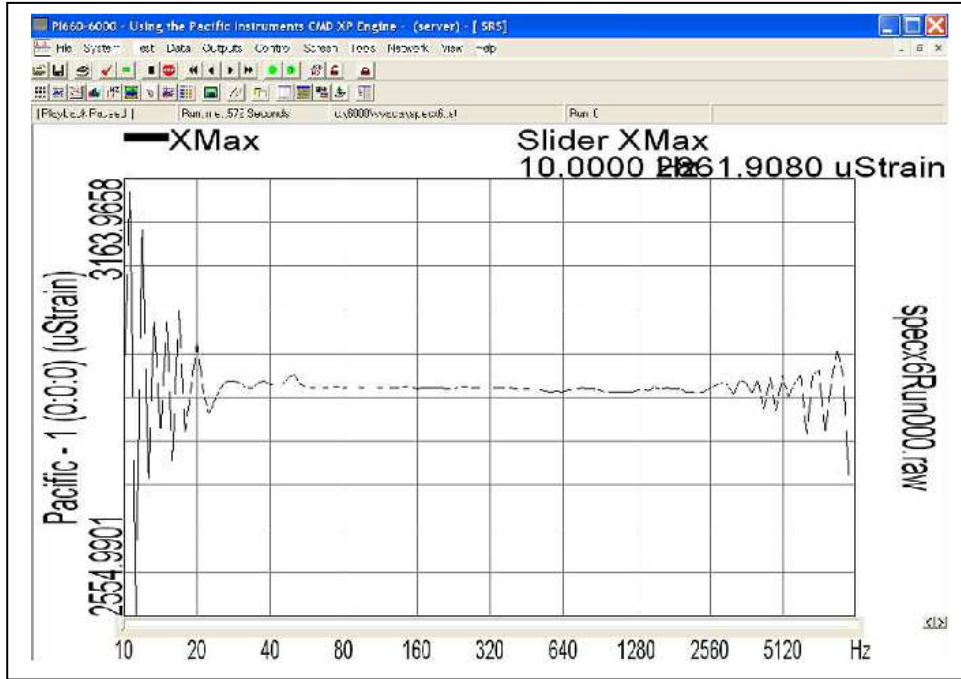


(b)

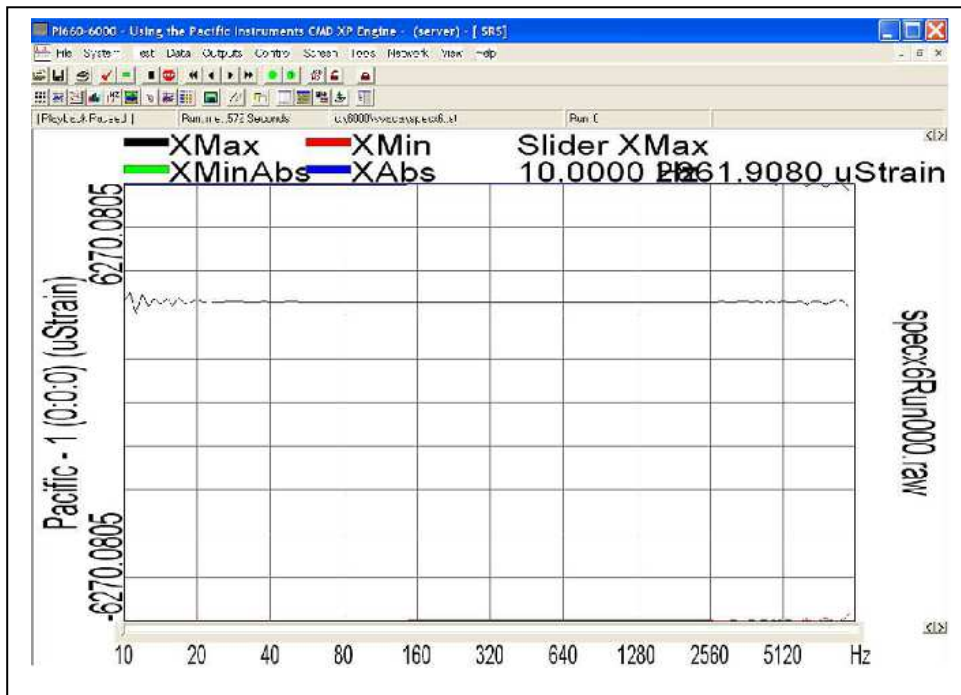
Σχήμα 5.40 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

## Γ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SRS

### ΔΟΚΙΜΙΟ 6 (Χωρίς συνάφεια) - ΚΑΤΩ ΘΕΣΗ



(a)



(b)

Σχήμα 5.41 (a): Διαγράμματα SRS (b): Απόλυτες τιμές max-min

### 5.3 Σχολιασμός – Σύγκριση

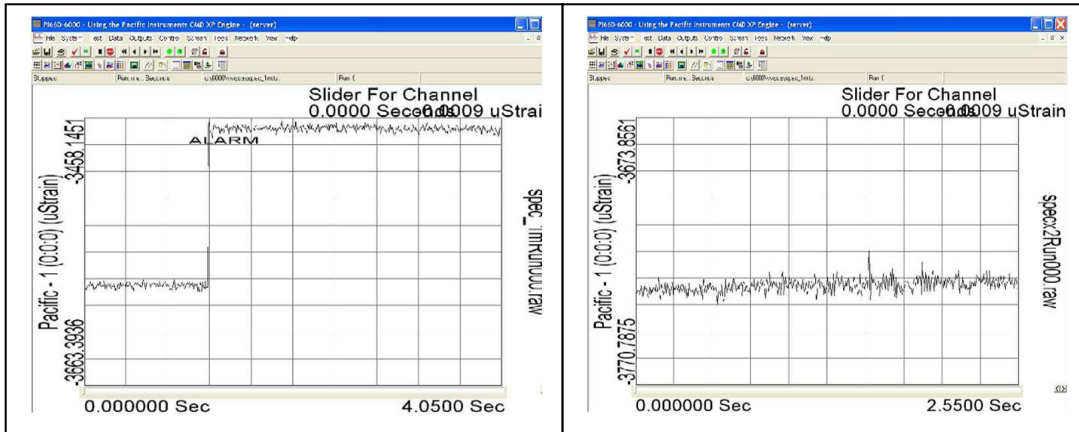
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα της Α ομάδας, δηλαδή τις κυματομορφές, μεταξύ των δοκιμών που έχουν πλήρη συνάφεια και αυτών που δεν έχουν, παρατηρούμε την εξής εμφανή διαφορά:

Στα δοκίμια που έχουν συνάφεια, όταν φτάνει ο παλμός στη θέση του μετρητή, δεν γίνεται ουσιαστικά ταλάντωση, αλλά δημιουργείται μία παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή δεν επανέρχεται στην αρχική της στάθμη μετά την διέλευση του παλμού, αλλά διατηρείται στην νέα της στάθμη, τουλάχιστον όσο διαρκεί η καταγραφή, (2.5-4sec). Αντίθετα στα δοκίμια που δεν έχουν πλήρη συνάφεια, γίνεται κάποια ταλάντωση. Αμέσως όμως μόλις διέλθει ο παλμός, η όποια παραμόρφωση δημιουργήθηκε κατά την στιγμή της διαταραχής μηδενίζεται και η παραμόρφωση επανέρχεται στην αρχική της στάθμη. Η διαφορά αυτή παρατηρείται τόσο για τις κάτω θέσεις, όσο και για την πάνω θέσεις των μετρητών μέσα στα δοκίμια.

Την διαφορά αυτή στην συμπεριφορά της απόκρισης των δοκιμών με και χωρίς συνάφεια μπορούμε να την δούμε για την “κάτω” θέση, συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.1, 5.7, 5.13, που αφορούν δοκίμια με συνάφεια, (Δοκ.1, Δοκ.3, Δοκ.5), με τα Σχήματα 5.4, 5.10, 5.15, που αφορούν δοκίμια χωρίς συνάφεια, (Δοκ.2, Δοκ.4, Δοκ.6). Εποπτική εικόνα μπορούμε να έχουμε στο Σχήμα 5.42, καθώς και στο Σχήμα 5.42\*, που αποτελεί ουσιαστικά την μεγέθυνση της περιοχής.

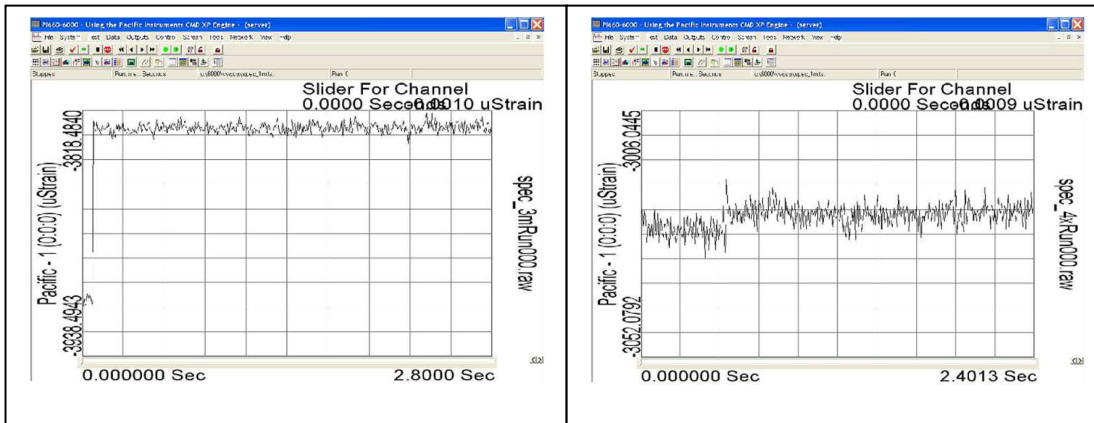
Μπορούμε επίσης να την δούμε και για την “πάνω” θέση των μετρητών, συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.2, 5.8, 5.14, που αφορούν τα δοκίμια με συνάφεια, με τα Σχήματα 5.5, 5.11, που αφορούν δοκίμια χωρίς συνάφεια. Εποπτική εικόνα μπορούμε να δούμε στο Σχήμα 5.43 και στο Σχήμα 5.43\*

(Διευκρινίζεται ότι δεν υπάρχει το διάγραμμα για την πάνω θέση του Δοκ.6 χωρίς συνάφεια, λόγω αστοχίας του μετρητή παραμόρφωσης, πιθανώς κατά την σκυροδέτηση)



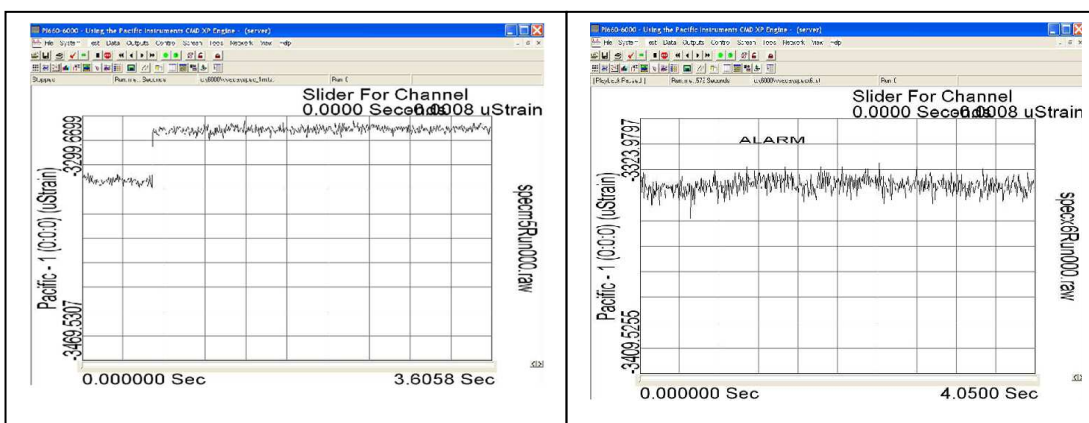
(a)

(b)



(a)

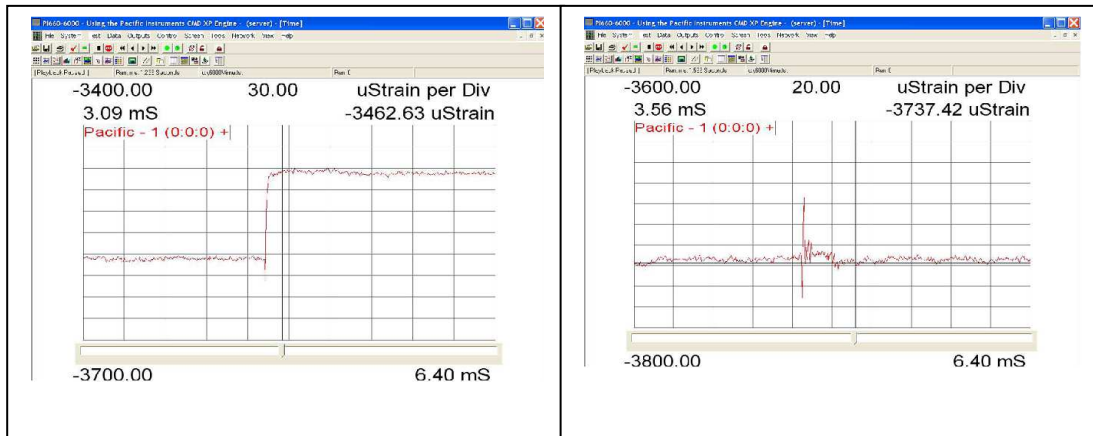
(b)



(a)

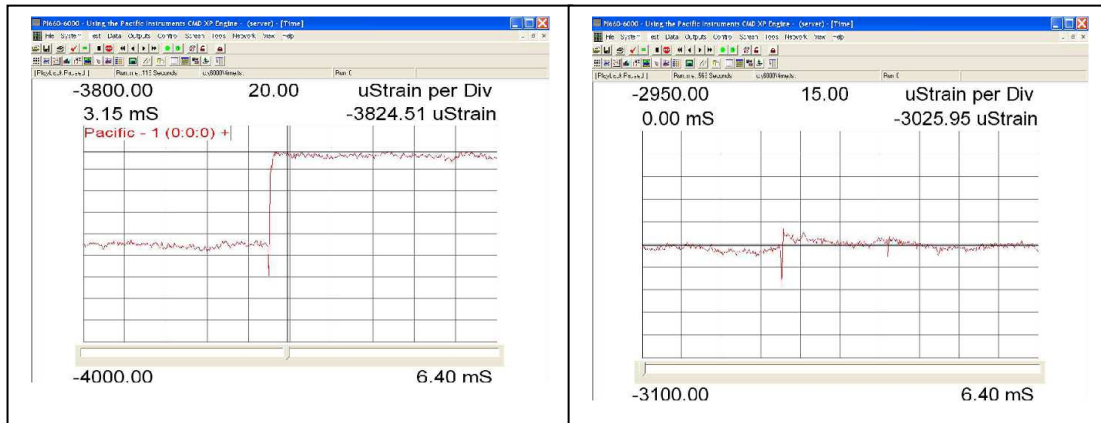
(b)

Σχήμα 5.42 Σύγκριση μεταξύ: (α) με συνάφεια, (β) χωρίς συνάφεια, για την κάτω θέση



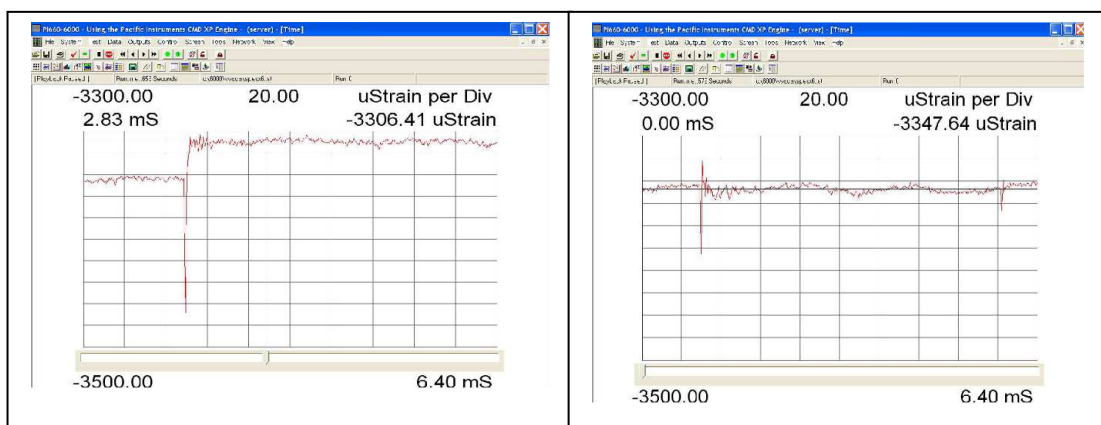
(a)

(b)



(a)

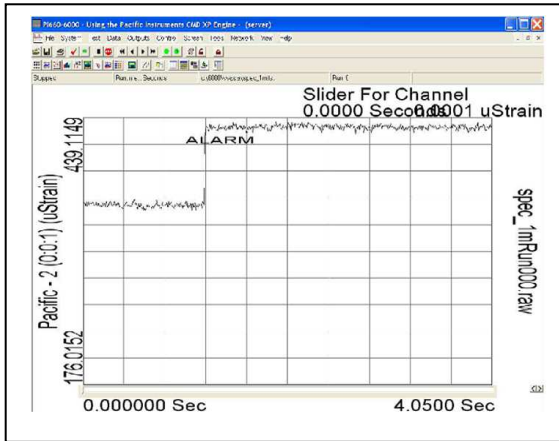
(b)



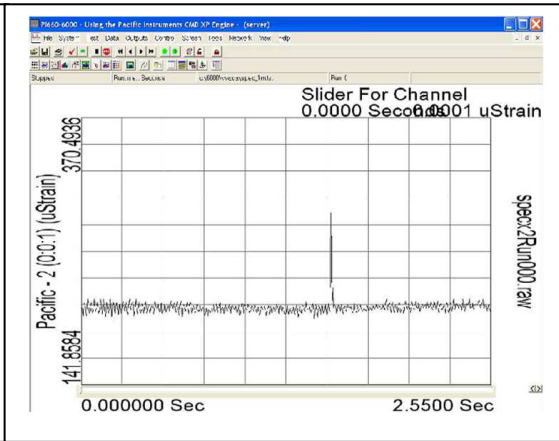
(a)

(b)

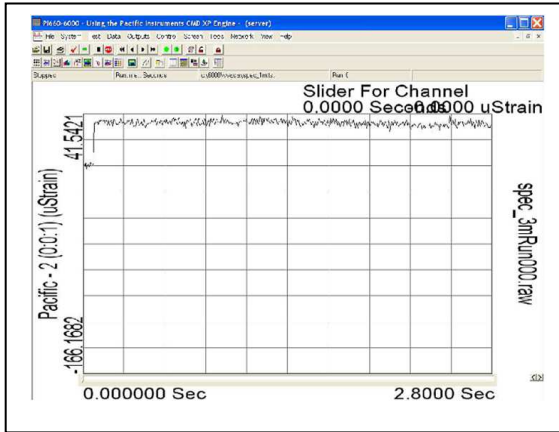
Σχήμα 5.42\* Σύγκριση μεταξύ: (α) με συνάφεια, (β) χωρίς συνάφεια, για την κάτω θέση



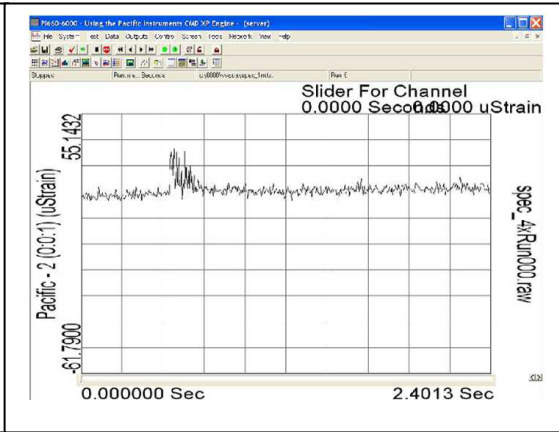
(a)



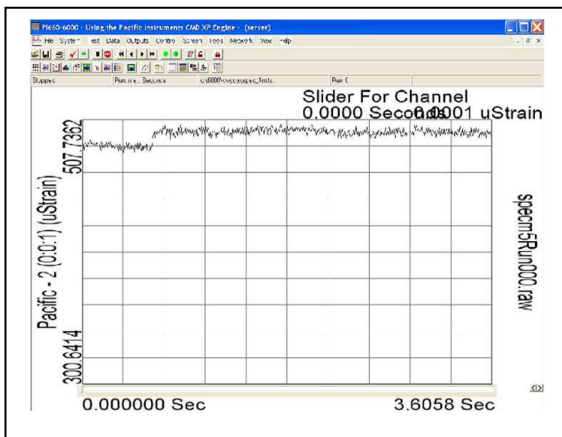
(b)



(a)

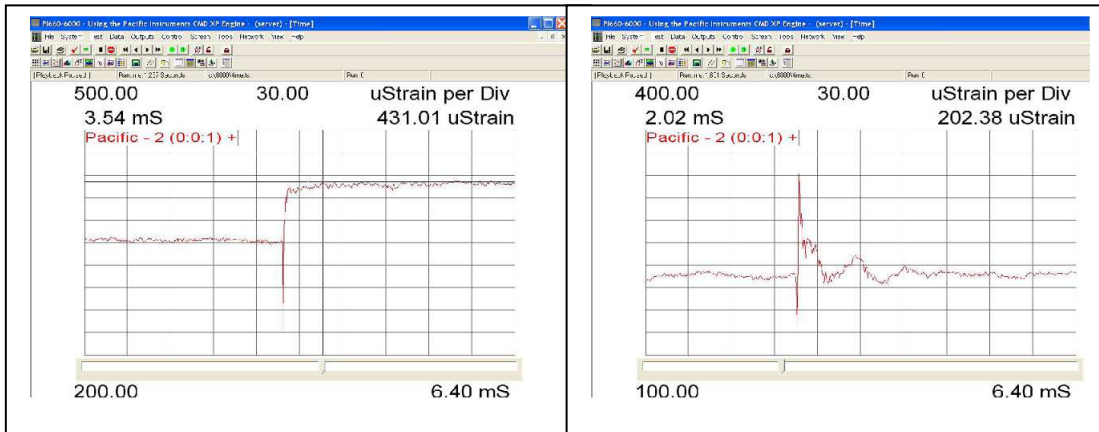


(b)



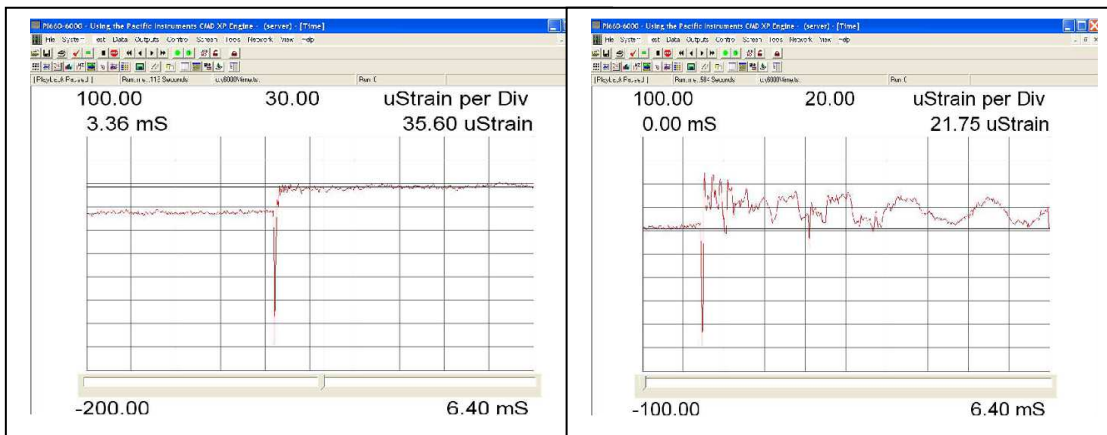
(a)

Σχήμα 5.43 Σύγκριση μεταξύ (a) με συνάφεια, (b) χωρίς συνάφεια για την πάνω θέση



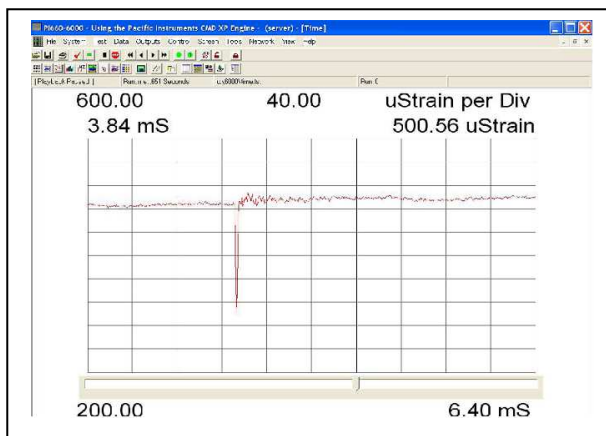
(a)

(b)



(a)

(b)



(a)

Σχήμα 5.43\* Σύγκριση μεταξύ (a) με συνάφεια, (b) χωρίς συνάφεια για την πάνω θέση



Στα δοκίμια που δεν έχουν συνάφεια η ταλάντωση που παρατηρείται είναι εντονότερη για την πάνω θέση του μετρητή και λιγότερο έντονη για την κάτω στο ίδιο δοκίμιο. Δηλαδή η ταλάντωση είναι εντονότερη εκεί που ο βαθμός συνάφειας είναι μικρότερος. Μπορούμε να το δούμε συγκρίνοντας τα (b) του Σχήματος 5.42\* με τα (b) του Σχήματος 5.43\*, που είναι δοκίμια χωρίς συνάφεια σε κάτω και πάνω θέσεις αντίστοιχα.

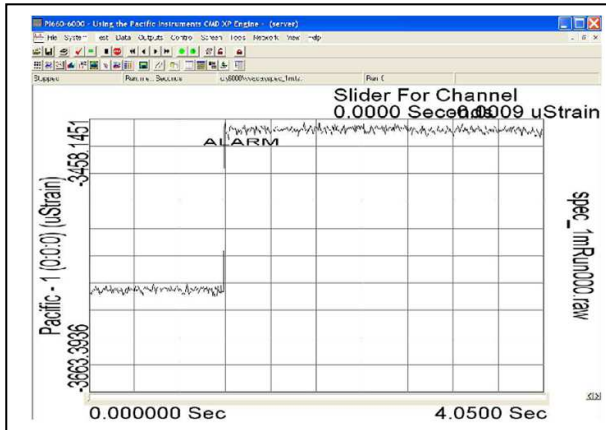
Στα δοκίμια με συνάφεια, στα οποία παρατηρείται το “άλμα” της παραμόρφωσης σε άλλη στάθμη και η παραμονή της εκεί, βλέπουμε ότι το άλμα αυτό είναι μεγαλύτερο για τις θέσεις “κάτω” και μικρότερο για τις θέσεις “πάνω”, στο ίδιο δοκίμιο. Δηλαδή είναι μεγαλύτερο στην βάση του δοκιμίου, όπου ο βαθμός συνάφειας είναι μεγαλύτερος. Αυτό μπορούμε να το δούμε συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.1, 5.2 ή 5.1\*, 5.2\* για το Δοκ.1, τα Σχήματα 5.7, 5.8 ή 5.7\*, 5.8\* για το Δοκ.3 και τα Σχήματα 5.13, 5.14 ή 5.13\*, 5.14\* για το Δοκ.5. Για καλύτερη εποπτεία παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.44 και 5.44\*.

Στον παρακάτω Πίνακα φαίνονται οι τιμές τις μεταβολής της παραμόρφωσης για τα δοκίμια με συνάφεια, όπως προέκυψαν από τα Σχήματα 5.1\* και 5.2\*, 5.7\* και 5.8\*, 5.13\* και 5.14\*, με τη βοήθεια του “κέρσορα”.

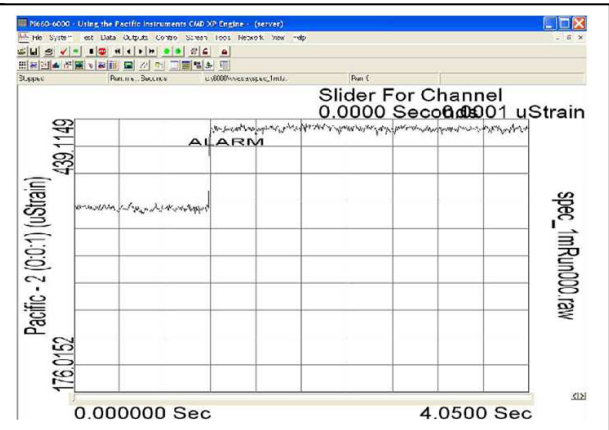
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1

Δοκίμια	Αρχική τιμή παραμόρφ.	Τελική τιμή παραμόρφ.	Διαφορά (ύψος άλματος)	Θέση Μέτρησης	Λόγος κάτω/πάνω
<b>1</b>	-3587	-3462	125	Κάτω	1,62
	354	431	77	Πάνω	
<b>2</b>	-3824	-3910	86	Κάτω	2,53
	1,5	35,5	34	Πάνω	
<b>3</b>	-3344	-3306	38	Κάτω	2,53
	485	500	15	Πάνω	

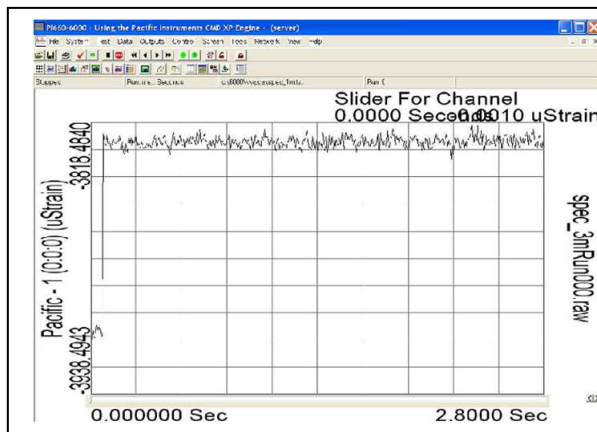
Δοκίμο 1 (α)



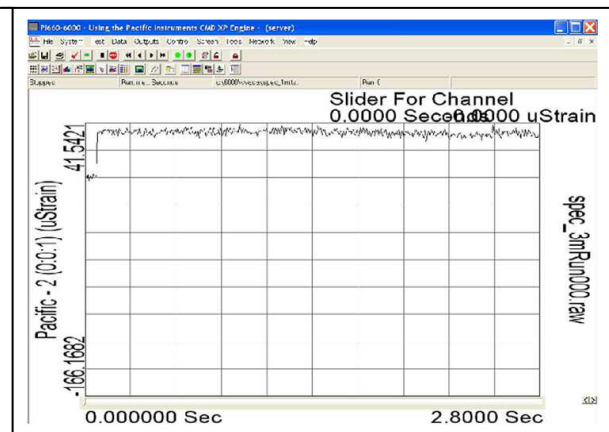
(β)



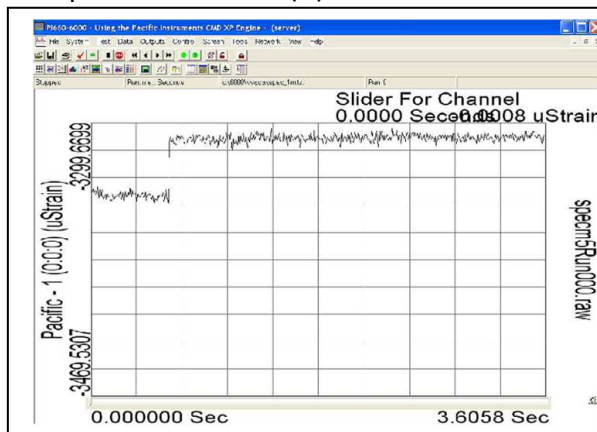
Δοκίμο 3 (α)



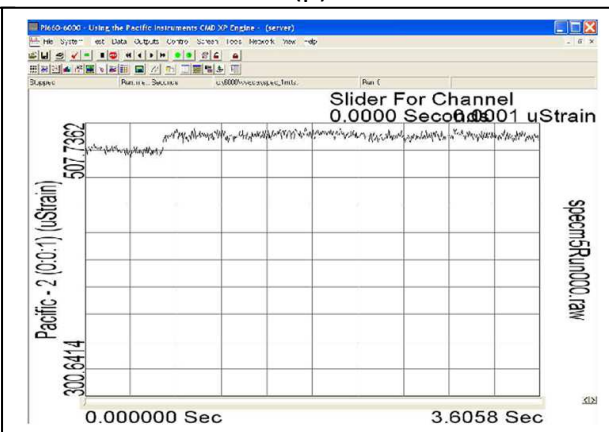
(β)



Δοκίμο 5 (α)



(β)

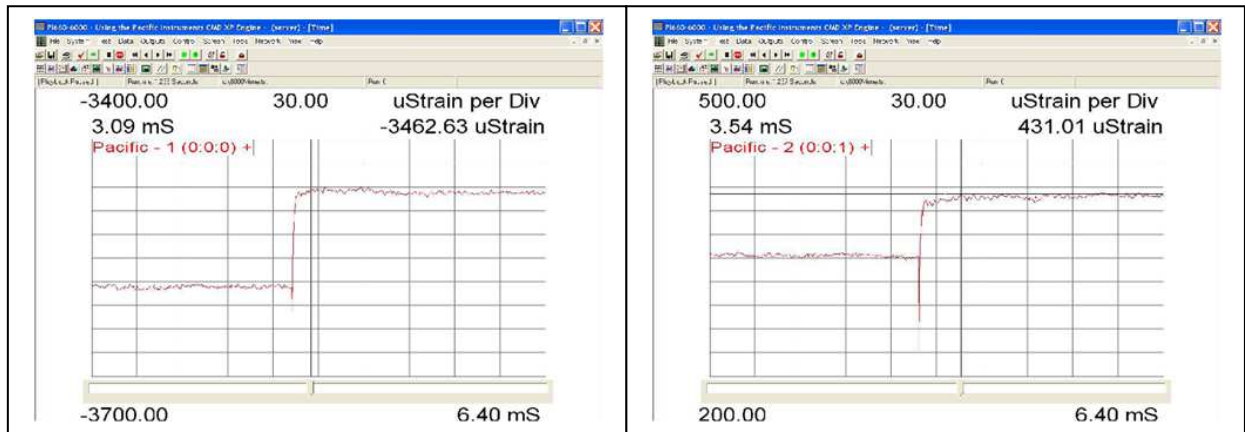


Σχήμα 5.44 Σύγκριση ανά δοκίμο για την επίδραση του βάθους (α):κάτω (β):πάνω

Δοκίμο 1

(α)

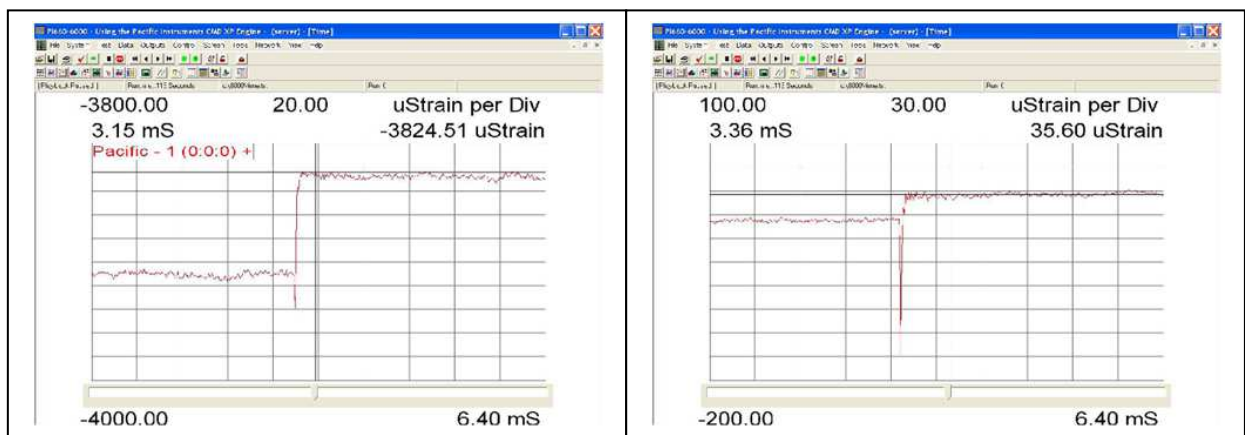
(β)



Δοκίμο 3

(α)

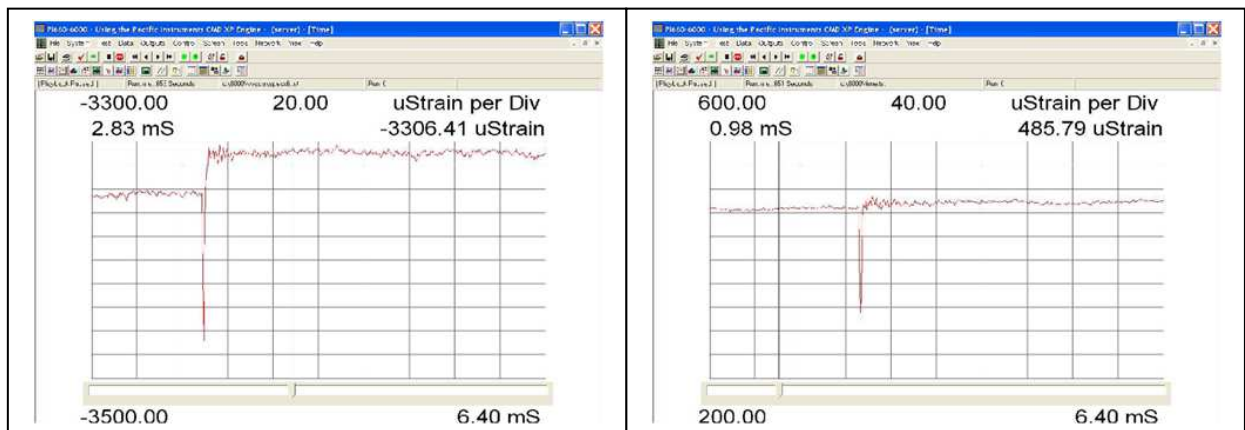
(β)



Δοκίμο 5

(α)

(β)



Σχήμα 5.44\* Σύγκριση ανά δοκίμο για την επίδραση του βάθους (α):κάτω (β):πάνω

Η συσχέτιση της διαφοροποίησης της παραμόρφωσης με τον βαθμό συνάφειας, ενισχύεται και από το εξής. Λόγω εξασθένησης του παλμού σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στο δοκίμιο, θα περίμενε κανείς ασθενέστερες παραμορφώσεις προς την βάση του. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, ο παλμός πράγματι εξασθενεί με το βάθος. Σε όλα τα διαγράμματα φαίνεται ότι το αρχικό ύψος του παλμού μειώνεται από το ελεύθερο άκρο ως την βάση του δοκιμίου. Εν τούτοις η παραμόρφωση αυξάνει επομένως επηρεάζεται ισχυρά από άλλον παράγοντα που πιθανότατα είναι ο βαθμός συνάφειας.

Μια ακόμα παρατήρηση είναι, ότι σε όλες τις περιπτώσεις του δημιουργούμενου “άλματος” της παραμόρφωσης για τα δοκίμια με συνάφεια, αυτή η παραμόρφωση ήταν πάντα θετική, με το νόημα ότι η νέα θέση ήταν προς τα θετικά του άξονα των παραμορφώσεων. Αλλά και τα δοκίμια που δεν έχουν συνάφεια και που δεν παρουσίασαν το άλμα αυτό, είχαν την τάση να κινηθούν προς τα θετικά, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.4\*, 5.5\*, 5.10\*, 5.11\*, ή τα Σχήματα 5.42\*(b) και 5.43\*(b).

Από την σύγκριση των διαγραμμάτων της ομάδας Β (φάσματα) και της ομάδας Γ (SRS) δεν έγινε δυνατή κάποια συσχέτιση.

Τέλος πρέπει να ειπωθεί ότι η κρούση με την σφύρα και η καταγραφή των αποτελεσμάτων επαναλήφθηκε τρεις φορές σε κάθε δοκίμιο. Τα αποτελέσματα ήταν ποιοτικά όμοια, δηλαδή παρουσιάστηκαν τα ίδια φαινόμενα με τα προαναφερθέντα. Διαφορές υπήρχαν μόνο ποσοτικές στο ύψος του αρχικού παλμού και στο ύψος του άλματος της παραμόρφωσης, αποτέλεσμα πιθανότατα της μη σταθερής αρχικής κρουστικής δύναμης.

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα, μπορούμε να πούμε ότι οι οπλισμοί που δεν είχαν πλήρη συνάφεια ως πιο “ελεύθεροι”, είχαν την δυνατότητα ταλάντωσης και επαναφοράς στην αρχική τους κατάσταση και αποκρίθηκαν ουσιαστικά σαν την θέση “έξω” από το δοκίμιο. Αντίθετα οι οπλισμοί που είχαν συνάφεια και υφίστανται μεγαλύτερες δυνάμεις ιδιαίτερα στην “κάτω” θέση, ως πιο δεσμευμένοι δεν είχαν ιδιαίτερη δυνατότητα ταλάντωσης, αλλά με την κρούση μάλλον ολίσθησαν απειροστά και δεσμεύτηκαν σε νέα θέση. Κατά την ελαστική επαναφορά τους έχουν τώρα απειροστά περισσότερο μήκος στη διάθεσή τους, που ισοδυναμεί με απειροστή μείωση των θλιπτικών παραμορφώσεων.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην πειραματική εργασία αυτή, που ήταν κατά βάσει διερευνητική, έγινε μια πρώτη προσπάθεια για να ελεγχθεί αν συσχετίζεται η επίδραση του βαθμού συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος στην διάδοση τασικού παλμού.

Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι πράγματι υπάρχει επίδραση του βαθμού συνάφειας, γιατί υπήρξε διαφοροποίηση του παλμού. Συνοψίζοντας φάνηκε ότι:

- Στα δοκίμια που δεν είχαν καλή συνάφεια οπλισμού σκυροδέματος, η απόκριση του οπλισμού στον κρουστικό παλμό, ήταν διαταραχή της παραμόρφωσης επίσης μορφής παλμού, (εξασθενημένου), δηλαδή μικρή ταλάντωση και επαναφορά στα αρχικά επίπεδα.
- Για τα πάνω σημεία, (που ο βαθμός συνάφειας ήταν μικρότερος), η ταλάντωση ήταν εντονότερη μέχρι την επαναφορά της.
- Στα δοκίμια που είχαν συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος, η απόκριση του οπλισμού δεν ήταν της μορφής παλμού, γιατί αμέσως μετά την πρώτη διαταραχή η παραμόρφωση παρουσίαζε θετική μεταβολή την οποία και διατηρούσε χωρίς να επιστρέφει στα αρχικά της επίπεδα.
- Για τα κάτω σημεία (που ο βαθμός συνάφειας ήταν μεγαλύτερος), ήταν μεγαλύτερη και η θετική μεταβολή της παραμόρφωσης.
- Τα φαινόμενα ως προς τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά ήταν επαναλήψιμα.

Είναι προφανές ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα προς επιβεβαίωση των πιο πάνω συμπερασμάτων, προτείνεται δε η επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας με:

- Σταθερό κρουστικό φορτίο π.χ. με πίπτον βάρους ή κρούση στην κρουστική μηχανή Charpy ή Izod.
- Κρούση όχι μόνο στον οπλισμό αλλά και στο δοκίμιο, κατά τον άξονα ή και εγκάρσια.

- Διαφορετικό βαθμό συνάφειας, π.χ. πλευρική και όχι κεντρική τοποθέτηση του οπλισμού κατά την σκυροδέτηση, ώστε να επιτυγχάνεται διαφορετική επικάλυψη. Επίσης σε πρόσφατα σκυροδετημένα δοκίμια.
- Διαφορετική σύσταση και ποιότητα υλικών

Τέλος θα μπορούσε να γίνει υπολογιστική προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία με βάσει τα πειραματικά αποτελέσματα.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Menzel, C.A., "Some Factors Influencing Results of Pull-Out Bond Tests," Journal of the American Concrete Institute, Vol.35, June 1939, pp 516-543.
2. Ferguson, P.M. and Thompson, J.N., "Development Length of High Strength Reinforcing Bars in Bond," Journal of the American Concrete Institute, July, 1962, pp 887-921.
3. McDermott, J.F., "Effect of Steel Strength and of Reinforcement Ratio on the Mode of Failure and Strain Energy Capacity of Reinforced Concrete Beams," Report by ACI Committee 439, American Concrete Institute Journal, March 1969, pp 165-172.
4. Mitchell, D. et.al., "State-of-the-Art Report on Bond Under Cyclic Loads," Reported by ACI Committee 408, ACI 408.2R-92, 1992, pp 1-31.
5. Π. Ι. Γιαννόπουλος, Συνάφεια ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου., 2006
6. Trezos C.G., Vassilopoulos Th. and Mouggiakos S. Influence of the surface corrosion on the bond behavior of reinforced concrete, 14<sup>th</sup> Greek Conference of Reinforced Concrete, Kos island, 2003.
7. Trezos C.G. and Sagias D., Influence of high temperatures on the bond behavior of reinforced concrete, 15<sup>th</sup> Greek Conference of Reinforced Concrete, 2006.
8. P.S., Theocaris, B.G., Badalouka and G.A., Papadopoulos, A Two-column single frame interaction with soil to travelling stress pulses, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.11, 1992, pp163-172.
9. Badalouka, B.G., Papadopoulos, G.A., Experimental study of a structure under stress pulse simulating vertical ground motion, Journal of Earthquake Engineering, 12, (3), 2008, 341-356.
10. Βασιλική Γ. Βαδαλούκα, Ελένη Γ. Παπαδοπούλου, Νικόλαος Γ. Βαδαλούκας, Πειραματική μελέτη απόκρισης εγκαρσίου οπλισμού υποστυλώματος-δοκού υπό δυναμική φόρτιση, 16ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23 Οκτωβρίου 2009, Πάφος, Κύπρος

11. Χρ. Σπανός, Μ. Σπιθάκης, Κ. Τρέζος, Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών, Αθήνα, 2001
12. Ferguson, P.M., and Thompson, J.N., "Development Length for Large High Strength Reinforcing Bars," Journal of the American Concrete Institute, January 1965, pp 71-91
13. Yan, C., Bond Between Reinforcing Bars and Concrete Under Impact Loading, Ph.D.Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, 1992, p 369.
14. Vos, I.E., Influence of Loading Rate and Radial Pressure on Bond in Reinforced Concrete. A Numerical and Experimental Approach, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1983, p 234.
15. J. H. Weathersby, Investigation of bond slip between concrete and steel reinforcement under dynamic loading conditions, Ph.D. Thesis, 2003
16. Verderame, G. M., P. Ricci, G. De Carlo και G. Manfredi (2009). Cyclic bond behavior of plain bars. Part I: Experimental investigation. Construction and Building Materials 23.12, pp. 3499—3511.
17. Verderame, G. M., G. De Carlo, P. Ricci και G. Fabbrocino (2009). Cyclic bond behavior of plain bars. Part II: Analytical investigation, Construction and Building Materials, pp 3512—3522.
18. Trezos C.G., Mpomporis L., Fotopoulos A., and Georgiou Chr., Fress concrete under seismic action, 14<sup>th</sup> Greek Conference of Reinforced Concrete, Kos island, 2003.
19. Fédération Internationale du Béton (2010a). Model Code 2010 - First complete dra<sup>ft</sup>. v. 1. fib, σ. 292. isbn: 978-2-88394-095-6.— (2010b). Model Code 2010 - First complete dra<sup>ft</sup>. v. 2. fib, σ. 288. isbn: 978-2-88394-096-3.
20. S. Fassbender und W. Arnold, Bestimmung der Haftung von Materialverbund mittels Ultraschall, <http://www.ndt.net/article/fassb/fassb.htm>
21. Π.Σ. Θεοχάρη, Πειραματική Μηχανική των Υλικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 1970



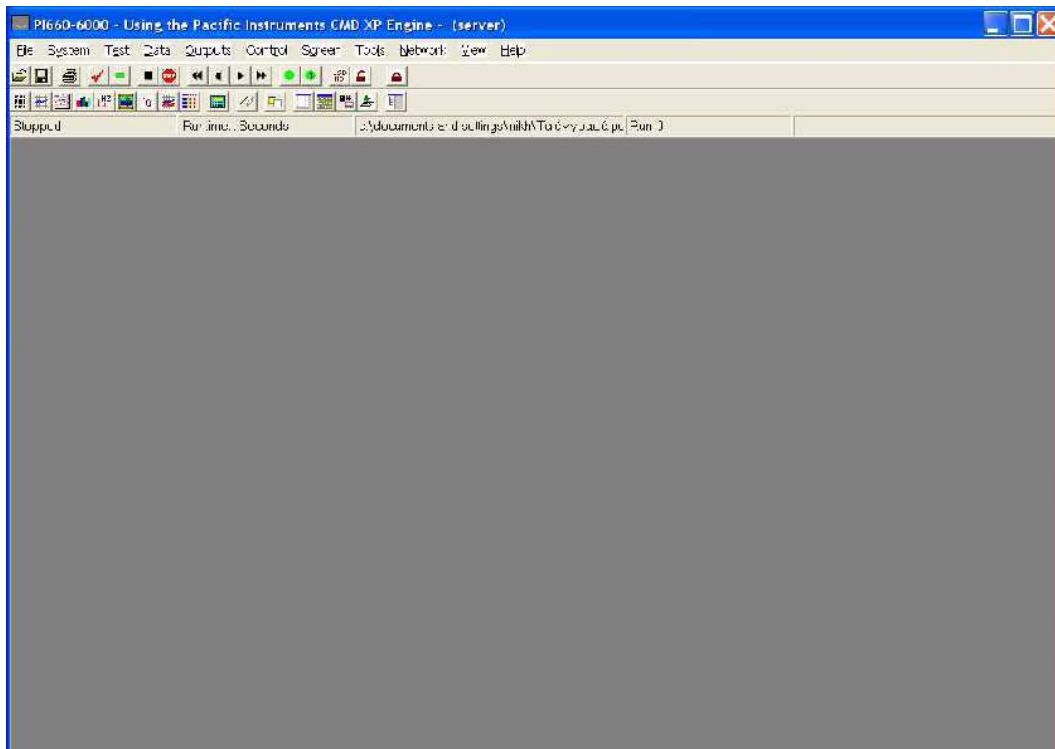
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PI660-6000 ΤΟΥ

#### DATA ACQUISITION SYSTEM

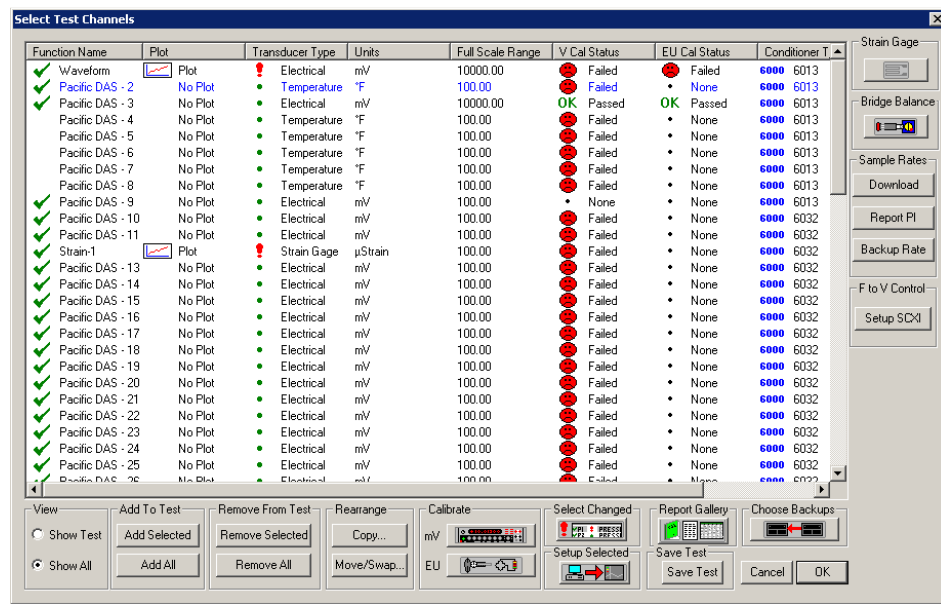
##### Βήμα 1

Στο\_ παρακάτω παράθυρο επιλέγουμε Test→ Select Channel→



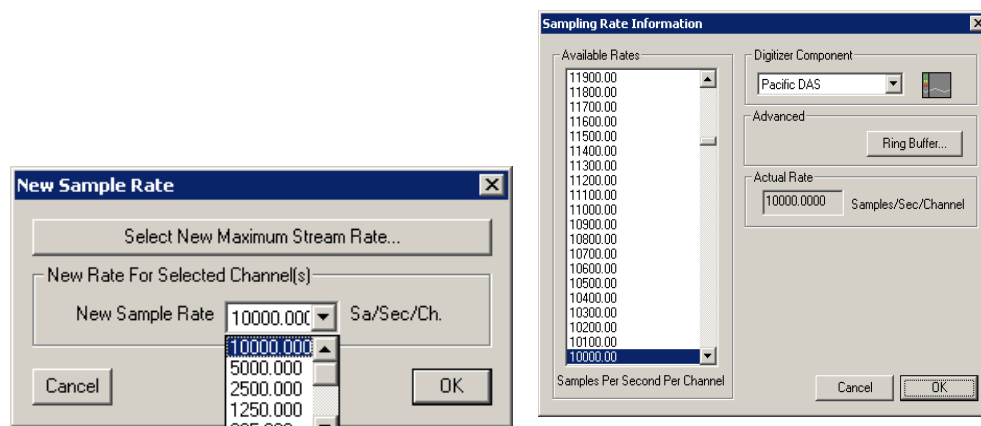
##### Βήμα 2

Επιλέγουμε τα κανάλια που θα χρησιμοποιήσουμε από το παρακάτω παράθυρο



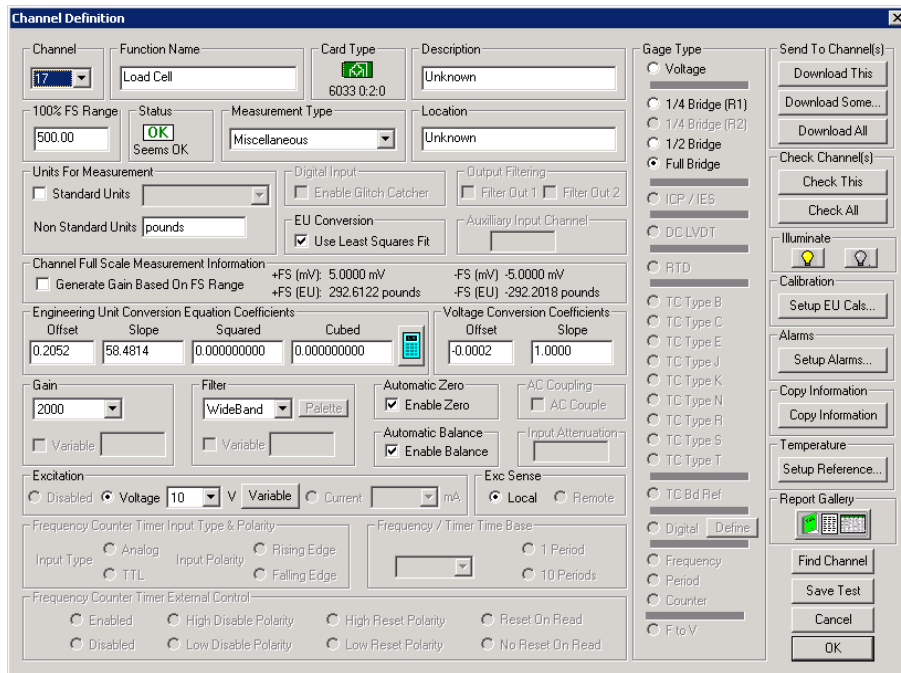
### Βήμα 3

Επιλέγουμε τον ρυθμό καταγραφής δεδομένων



### Βήμα 4

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



## Βήμα 5

Στο παρακάτω παράθυρο επιλέγουμε εγγραφή (πράσινο κύκλος)



## Βήμα 6

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

