



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΥΝΔΕΤΗΡΩΝ  
ΣΕ ΥΠΟΣΤΗΛΩΜΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΑΜΑΤΟΣ  
ΥΠΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Επιβλέπων : ΒΑΔΑΛΟΥΚΑ Β.Γ.      Επικ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Μέλη:            ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Γ.Α. Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
                     ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ Δ.            Καθηγητής Ε.Μ.Π

**ΑΘΗΝΑ 2009**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Μηχανικής του Ε.Μ.Π.  
Ευχαριστώ θερμά την Επίκουρο Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα του θέματος κα. Βαδαλούκα Β., για την αδιάκοπη και σε καθημερινή βάση βοήθεια της, την οποία και κρίνω καθοριστική τόσο στην καθοδήγηση όσο και στην επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς επίσης και τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π κ. Παπαδόπουλο Γ.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω και τον Πολιτικό Μηχανικό κ. Βαδαλούκα Γεώργιο για τις παρατηρήσεις του.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΥΝΔΕΤΗΡΩΝ ΣΕ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Στην εργασία αυτή θα γίνει μελέτη της πειραματικής απόκρισης συνδετήρων σε υποστύλωμα οπλισμένου σκυροδέματος υπό δυναμική φόρτιση. Το υποστύλωμα αποτελεί μέρος ενός στοιχείου υποστυλώματος –προβόλου δοκού, που καταπονείται με μεταβαλλόμενα φορτία τόσο κατά εύρος όσο και κατά συχνότητα. Τα εφαρμοζόμενα φορτία ασκούνται στο άκρο του προβόλου.

Αναλυτικά:

Αρχικά έγινε η κατασκευή των δοκιμίων, που ήταν σε σχεδόν πραγματική κλίμακα. Τα κυρίως δοκίμια αποτελούνταν από δοκό και υποστύλωμα διατομής 250mm x 250mm και ύψος τουλάχιστον 1500 mm. Αυτά οπλίστηκαν με χάλυβα S500s και κλωβούς συνδετήρων. Επί των κλωβών τοποθετήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμορφώσεων (strain gages) κατάλληλοι για μέταλλα. Επίσης ηλεκτρικοί μετρητές παραμορφώσεων κατάλληλοι για σκυροδέμα, τοποθετήθηκαν σε αντίστοιχες θέσεις της επιφάνειας σκυροδέματος, όπου με την εγκατάσταση των απαιτούμενων οργάνων και του λογισμικού είναι δυνατή η ταχεία λήψη, αποθήκευση και επεξεργασία αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια, τα κυρίως δοκίμια υποβλήθηκαν σε κρουστικά φορτία και εναλλασσόμενα φορτία συχνότητας 5-15 Hz, με αυξανόμενη ένταση έως τη τελική θραύση τους. Η όλη διαδικασία μαγνητοσκοπήθηκε ηλεκτρονικά και ταυτόχρονα υπήρξε συνεχής καταγραφή της απόκρισης των ηλεκτρικών μηχανομέτρων.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής αφορά μετρήσεις μικρής έντασης φορτίου, επομένως απέχουν από την ρηγμάτωση του δοκιμίου που έγινε βέβαια σε μεγαλύτερα φορτία. Η αντίστοιχη επεξεργασία θα γίνει από άλλους ερευνητές.

Τέλος σημειώνεται ότι υπάρχει πολύ περιορισμένος αριθμός βιβλιογραφικών αναφορών σε πειραματικές μελέτες που αφορούν τη διάδοση κύματος στον εγκάρσιο οπλισμό, καθώς και την απόκριση του σε υψηλές συχνότητες, όπως πειράματα στο Πανεπιστήμιο της California [11,12] που έχουν γίνει σε σπειρώειδη εγκάρσιο οπλισμό. Αναφέρονται επίσης αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες για την συμπεριφορά του οπλισμού σε ειδικές περιπτώσεις όπως π.χ. τον βαθμό περίσφυξης [13], ή την κατανομή των τάσεων σε υπερκάλυψη [14]

## SUMMARY

### EXPERIMENTAL STUDY OF THE RESPONSE OF LINKS IN REINFORCED CONCRETE COLUMN SUBJECTED TO DYNAMIC LOADS

In this work will become study of experimental response of fasteners in column armed concrete under dynamic charge. Column it constitutes part of element of column joist, that loaded with altered charges so much at breadth what at frequency. T

Analytically:

Initially became the manufacture of essays that was in almost real scale. The essays they were mainly constituted by joist and column cross-section 250mm x 250mm and height at least 1500 mm. These were armed with steel S500s and cages of fasteners. On the cages were placed electric meters of deformities (strain gages) suitable for metals. Also electric meters of deformities suitable for concrete, were placed in corresponding places of surface of concrete, where with the installation of required bodies and software is possible the rapid reception, storage and treatment of results.

Afterwards, the essays were mainly submitted in imp active charges and alternating charges of frequency 5-15 Hz, with increasing intensity until their final fracture. The all process had been recorded electronic and simultaneous existed continuous recording of response of electric strain gauges

The treatment of results of this work concerns measurements of small intensity of charge, consequently abstains from the crack of essay that became [in bigger charges. The corresponding treatment will become from other researchers.

Finally it is marked that exists very limited number of bibliographic reports in experimental studies that concern the distribution of wave in the traverse armament, as well as his response in high frequencies, as experiments in the University of California [11,12] that have become in traverse armament. Are reported also corresponding experimental processes for the behaviour of armament in special cases as eg the degree tightening [13], or the distribution of tendencies in overlap [14]

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
<b>1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ</b> .....	1.1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1.1
<b>2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ</b> .....	2.1
ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	2.1
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2.1
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΟΣ ΒΑΘΜΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ.....	2.1
<b>3.ΚΕΦΑΛΑΙΟ</b> .....	3.1
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	3.1
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	3.1
3.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (STRAIN GAUGES).....	3.1
3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ.....	3.3
3.4 ΜΟΡΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ.....	3.4
3.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	3.6
3.6 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΛΩΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ.....	3.7
3.7 ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ.....	3.8
3.8ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΤΟΣ.....	3.10
<b>4.ΚΕΦΑΛΑΙΟ</b> .....	4.1
4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	4.1
4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	4.31
ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	4.33
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	4.38
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	4.51
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	5.1

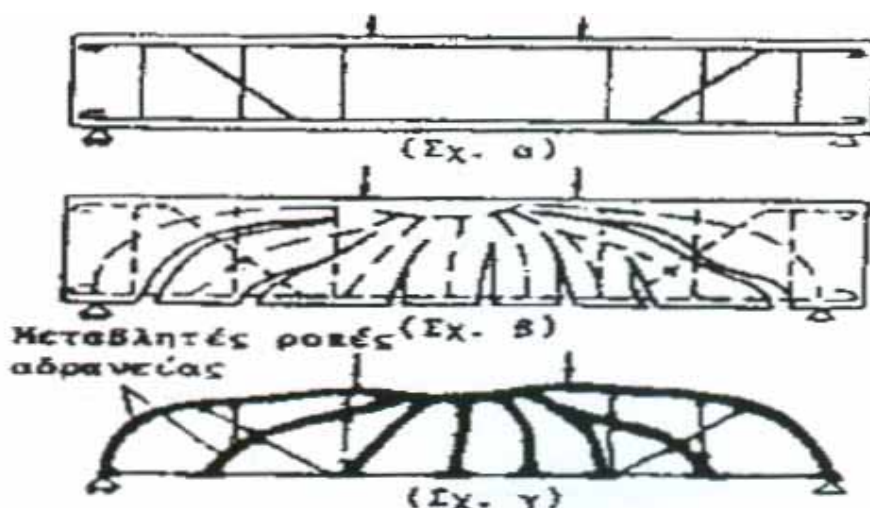
## 1.ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΠΟ ΤΕΜΝΟΥΣΑ ΔΥΝΑΜΗ.

#### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί για τον σχεδιασμό έναντι τέμνουσας δύναμης είναι κυρίως τέσσερις. Οι τρεις πρώτες αφορούν την κλασική θεωρία δικτύωματος Moersch καλύπτουν αδυναμίες της αρχικής θεωρίας, ενώ η τέταρτη είναι η θεωρία της τροχιάς της θλιπτικής δύναμης.

Πρώτος (1899-1900) αναπτύχθηκε η κλασική θεωρία του Moersch – Rither [1,2], στην οποία ο σχεδιασμός έναντι τέμνουσας δύναμης. Αυτή βασίζονταν στο δικτύωμα το οποίο φανταζόμασταν ότι εμφάνιζε παντού διαγωνίους υπό γωνία  $45^\circ$ . Οι επιλύσεις των δυνάμεων των σχεδιαζόμενων διαγωνίων και ορθοστατών που προέκυπταν από αυτή την μορφή του ιδεατού δικτύωματος, όριζαν τις διατομές των λοβών οπλισμών και των συνδετήρων αντίστοιχα, οι οποίοι αναλάμβαναν όλη την τέμνουσα δύναμη.



Σχήμα 1.1. Δικτύωμα Moersch.

Προέκταση αυτής της θεωρίας του απλού δικτύωματος έγινε από τον J. Schlaich "Strut and tie" [3] και κατόπιν από τον Καναδό M. Collins "Compression Field Theory" [4] στην οποία έγιναν προσπάθειες να καλυφθούν οι αδυναμίες της κλασικής θεωρίας του δικτύωματος Moersch.

Όμως παρατηρήθηκε ότι το δικτύωμα γενικά δεν σχηματιζόταν πάντοτε και όταν σχηματιζόταν δεν ήταν ακριβώς "τύπου Moersch".

Εξάλλου, όταν το δικτύωμα σχηματιζόταν, είναι πολλαπλώς υπερστατικό, και πρέπει κατά την επίλυση του να ληφθεί υπόψη και η ακαμψία των θλιπτικών ράβδων του κορμού και του ζυγώματος, ώστε να εξασφαλιστεί η συμβατότητα των παραμορφώσεων.

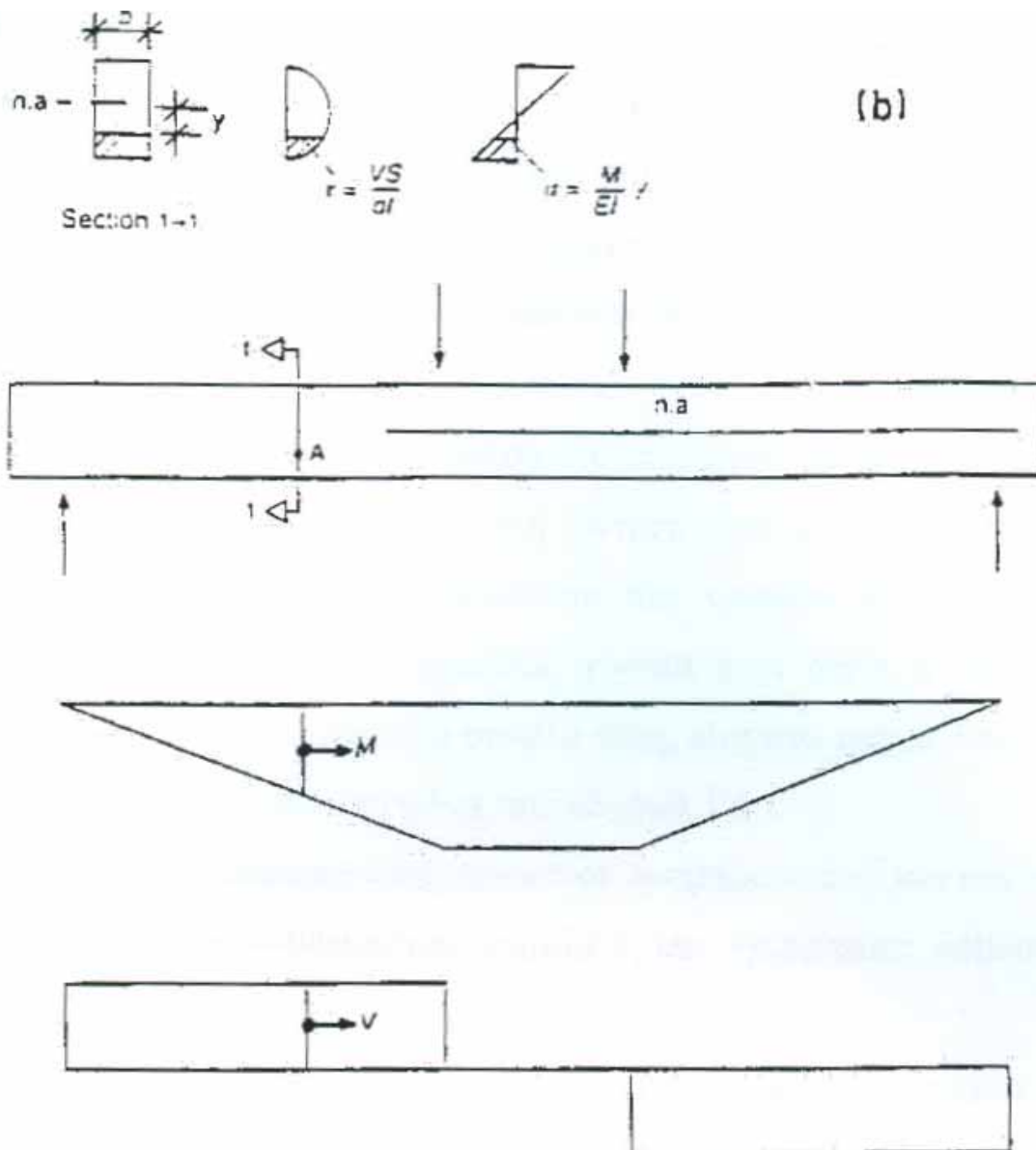
Σύμφωνα με την απλουστευμένη θεωρία της " γραμμικής ελαστικής δοκού", η εντατική κατάσταση ενός δομικού στοιχείου (όπως π.χ. μιας αμφιερείστου δοκού με ορθογωνική διατομή, η οποία υπόκειται είτε σε μονό, είτε σε διπλό σημειακό φορτίο, συμμετρικά διατεταγμένο ως προς την μεσαία διατομή της δοκού) μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα των ροπών κάμψης και των τεμνουσών δυνάμεων (Σχ. 1.2α).

Η επίπεδη εντατική κατάσταση (τάση παραμόρφωση,  $\sigma$ ,  $\tau$ ) σε οποιαδήποτε σημείο A της δοκού, μπορεί να υπολογιστεί από τις παρακάτω σχέσεις :

$$\sigma = (M/EI)y \quad \text{και} \quad \tau = (VS/bI)$$

Όπου M η καμπτική ροπή και V η τέμνουσα δύναμη στην διατομή που διέρχεται από το σημείο A, με μέτρο ελαστικότητας του γραμμοσκιασμένου τμήματος της διατομής S, y η απόσταση του σημείου A από την ουδέτερη γραμμή και b το πλάτος της διατομής στο σημείο A (Σχ. 1.2.b).

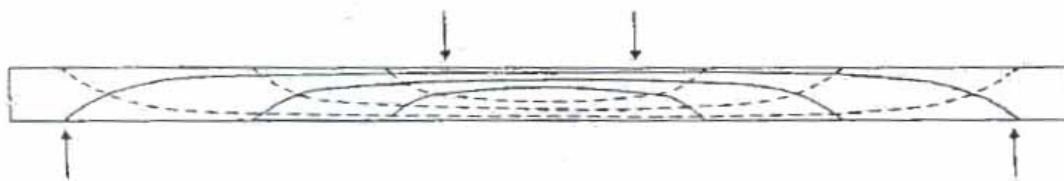
Εκφράζοντας την εντατική κατάσταση ( $\sigma, \tau$ ) με τη μορφή των κυρίων τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) και υπολογίζοντας τις κύριες τάσεις σε ικανό αριθμό σημείων της δοκού, μπορούμε να οδηγηθούμε στην κατασκευή των τροχιών των κυρίων τάσεων (Σχ.1.3) όπου οι συνεχείς και οι διακεκομμένες καμπύλες παριστάνουν τις τροχιές των θλιπτικών και των θλιπτικών τάσεων, αντίστοιχα:



**Σχήμα 1.2.** Αμφιέριστη δοκός υπό διπλό σημειακό φορτίο συμμετρικό ως προς την μεσαία διατομή

- (α) Διαγράμματα ροπών κάμψης και τεμνουσών δυνάμεων,
- (β) διανομές ορθών ( $\sigma$ ) και διατμητικών ( $\tau$ ) τάσεων σε διάτμηση 1-1 της δοκού





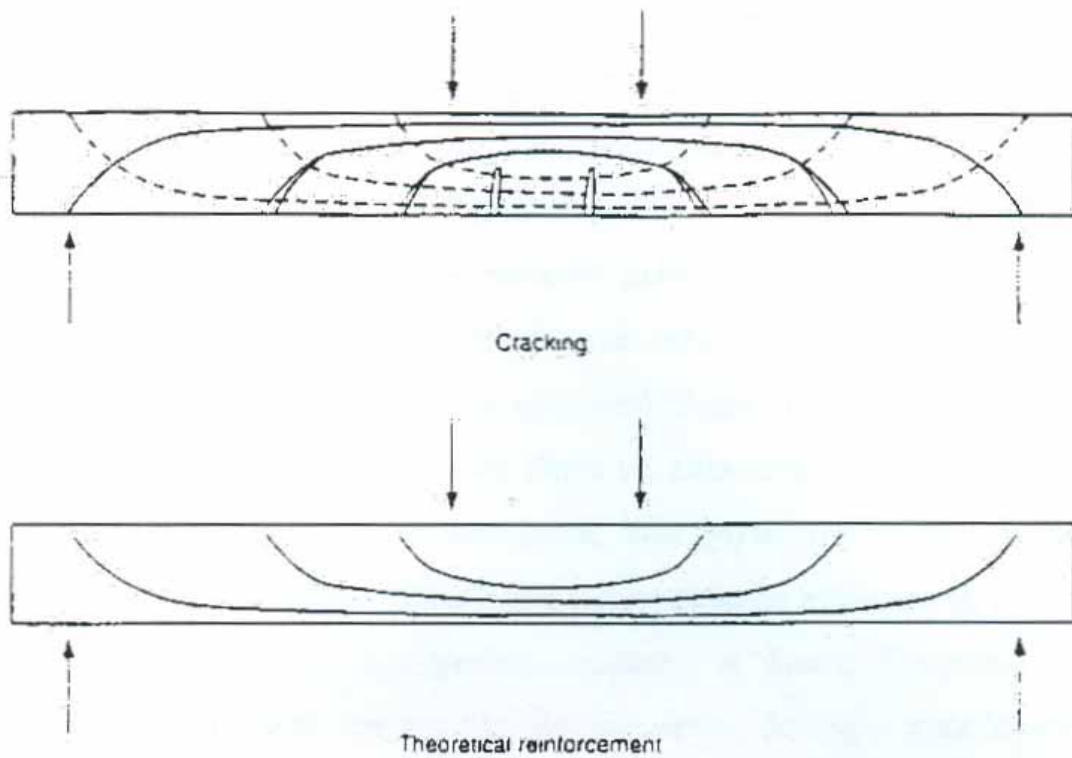
**Σχήμα 1.3.** Σχηματική απεικόνιση τροχιών θλιπτικών (συνεχείς γραμμές) και εφελκυστικών (διακεκομμένες γραμμές) τάσεων που αναπτύσσονται στην δοκό του σχήματος 1.2.

Για την περίπτωση δοκού από σκυρόδεμα, λόγω της μικρής εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, η δοκός θα ρηγματώθει στις περιοχές όπου η τιμή των εφελκυστικών τάσεων υπερβαίνει την αντοχή του υλικού. Οι ρωγμές αυτές θα σχηματιστούν κάθετα στην διεύθυνση των εφελκυστικών τάσεων, ακολουθώντας τη διεύθυνση των τροχιών των θλιπτικών τάσεων, οδηγώντας έτσι την δοκό σε αστοχία.

Όμως η φέρουσα ικανότητα της δοκού θα μπορούσε να υπερβεί κατά πολύ την τιμή που της υπαγορεύει η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος με την τοποθέτηση ράβδων χάλυβα κατά την διεύθυνση των τροχιών των εφελκυστικών τάσεων. Η τοποθέτηση των ράβδων συνήθως γίνεται έτσι ώστε ο οπλισμός να αναλάβει τις εφελκυστικές τάσεις είτε στο σύνολο τους, είτε στο τμήμα τους που δεν μπορεί να αναλάβει το σκυρόδεμα από μόνο του. (Σχήμα 1.4)

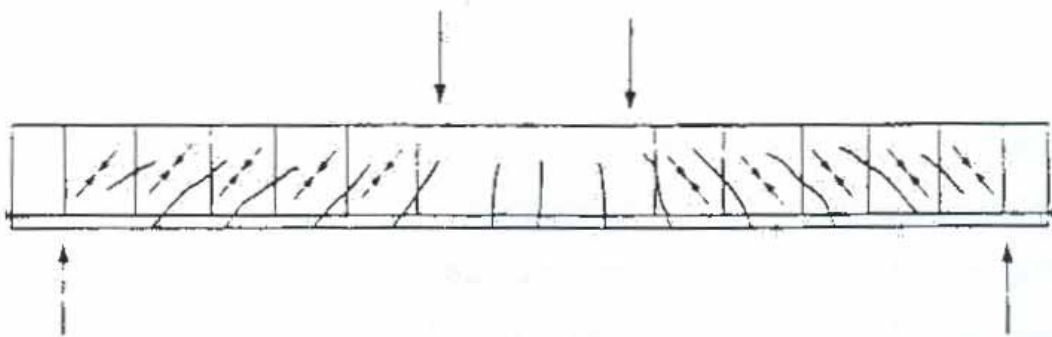
Ο παραπάνω τρόπος όπλισης είναι πρακτικά ανεφάρμοστος και αντί αυτού η όπλιση γίνεται συνήθως με ευθύγραμμες διαμήκειες και εγκάρσιους ράβδους από χάλυβα (Σχήμα 1.5.) [2].

Οι διαμήκειες ράβδους συνήθως τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από το εφελκόμενο πέλμα της δοκού και αναλαμβάνουν την συνολική εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται λόγω της καμπτικής ροπής. Αντίθετα, οι εγκάρσιες ράβδοι διανέμονται στα "διατμητικά μήκη" της δοκού και αναλαμβάνουν τις εγκάρσιες συνιστώσες των εφελκυστικών δράσεων, που αντιστοιχούν στο τμήμα της δρώσας τέμνουσας δύναμης (υπερβαίνοντας την τιμή που μπορεί από μόνο του να παραλάβει το σκυρόδεμα).



**Σχήμα 1.4. Σχηματική απεικόνιση ρηγάτωσης (cracking)**

(α) Αμφιερείστου δοκού από σκυρόδεμα και  
 (β) θεωρητική διάταξη οροπλισμού από ράβδους χάλυβα για την αποτροπή απώλειας της φέρουσας ικανότητας λόγω εφελκυστικής αστοχίας του σκυροδέματος.

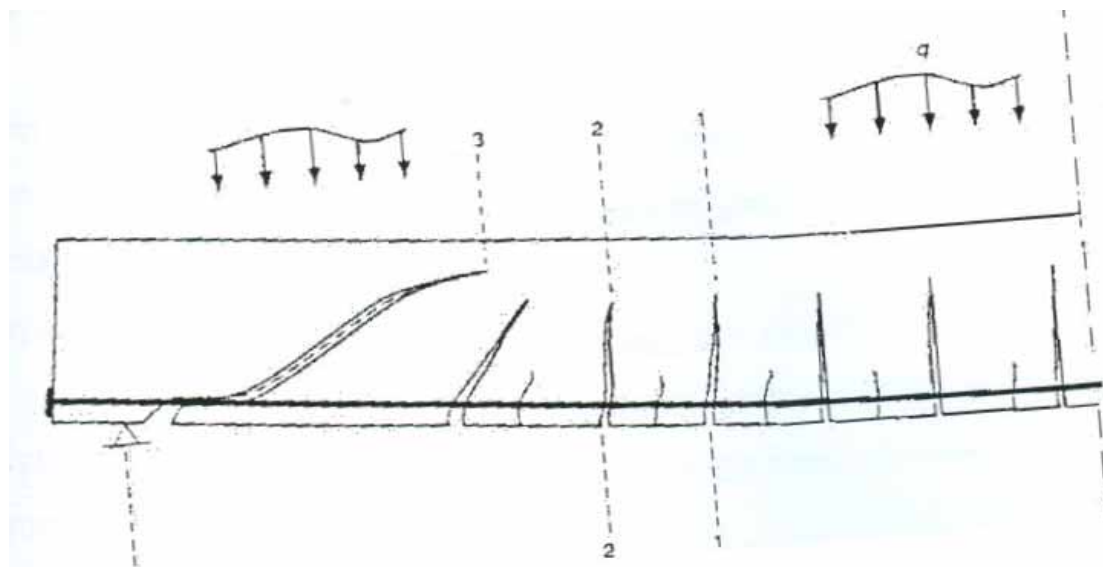


**Σχήμα 1.5. Συνήθης διάταξη οπλισμού αμφιερείστου δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα.**

Το προσομοίωμα του σχήματος 1.5 που είναι ένας συνδυασμός "δοκού" και "δικτύματος" αποτελεί την βάση των ισχυρικών μεθόδων σχεδιασμού [1]. Το προσομοίωμα αυτό, αρχικά χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της λογικής των "επιτρεπόμενων τάσεων", η οποία προϋπόθετε γραμμικά ελαστική συμπεριφορά των υλικών. Αργότερα, όμως τροποποιήθηκε, έτσι ώστε να επεκταθεί η χρήση του και στην περίπτωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς που χαρακτηρίζει την οριακή κατάσταση αστοχίας, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο κατασκευής [2].

Πριν τη δημιουργία των κεκλιμένων ρωγμών, η δοκός θεωρείται ότι λειτουργεί όπως περιγράφεται από την θεωρία της "ελαστικής δοκού", προοδευτικά όμως με τον σχηματισμό των κεκλιμένων ρωγμών στα "διατμητικά μήκη", η λειτουργία της γίνεται συνθετότερη, με τα "διατμητικά μήκη" να λειτουργούν σαν δικτύωμα, ενώ το τμήμα μεταξύ των σημειακών φορτίων εξακολουθεί να συμπεριφέρεται όπως έχουμε προηγουμένα περιγράψει.

Σύμφωνα με όσα αναφέραμε παραπάνω και όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6 το σκυρόδεμα παραμένει ουσιαστικά αρηγμάτωτο μόνο σε ένα σχετικά μικρό τμήμα της δοκού [5,6]. Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει αφενός μεν τις ακραίες περιοχές της δοκού, μέχρι τη βαθιά κεκλιμένη ρωγμή που σχηματίζεται πλησιέστερα στις στηρίξεις, αφετέρου δε μια λεπτή σχετικά ζώνη, μεταβλητού πάχους, που σχηματίζεται μεταξύ των κορυφών των ρωγμών και του άνω πέλματος και ενώνει τις παραπάνω αρηγμάτωτες ακραίες περιοχές.



**Σχήμα 1.6.** Σχηματική απεικόνιση ρηγμάτωσης και παραμόρφωσης σχήματος αμφιερείστου δοκού λίγο πριν την

Η φέρουσα ικανότητα της δοκού οφείλεται στον διαμήκη οπλισμό και στο αρηγμάτωτο σκυρόδεμα μέσω του οποίου το εξωτερικό φορτίο μεταφέρεται στις στηρίξεις. Τόσο η φέρουσα ικανότητα όσο και η δυσκαμψία του ρηγματωμένου σκυροδέματος δεν μπορεί παρά να είναι μόνο ένα μικρό ποσοστό της φέρουσας ικανότητας και δυσκαμψίας του αρηγμάτωτου σκυροδέματος στη φέρουσα ικανότητα δεν μπορεί παρά να είναι αμελητέα [7].

Παρ' όλα αυτά όμως το ρηγματωμένο σκυρόδεμα μέσω της "κάμψης των προβόλων" δημιουργεί ένα μηχανισμό που του επιτρέπει να κάνει μια σημαντική συμβολή στη μεταφορά του εξωτερικού φορτίου, μέσω του αρηγμάτωτου τμήματος, από τα σημεία εφαρμογής του στις στηρίξεις.

Το σκυρόδεμα αστοχεί πάντα σε εφελκυσμό. Αστοχία της δοκού προκαλείται από την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο αρηγμάτωτο σκυρόδεμα, που είναι εγκάρσιες στη διεύθυνση της τροχιάς των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της κάμψης της δοκού. Συνεπώς, η αναζήτηση των αιτιών αστοχίας του αρηγμάτωτου σκυροδέματος της δοκού θα πρέπει να επικεντρωθεί στις περιοχές εκείνες της θλιβόμενης ζώνης της δοκού όπου είναι δυνατό να αναπτυχθούν εφελκυστικές δυνάμεις, δηλαδή σε περιοχές [5,6].

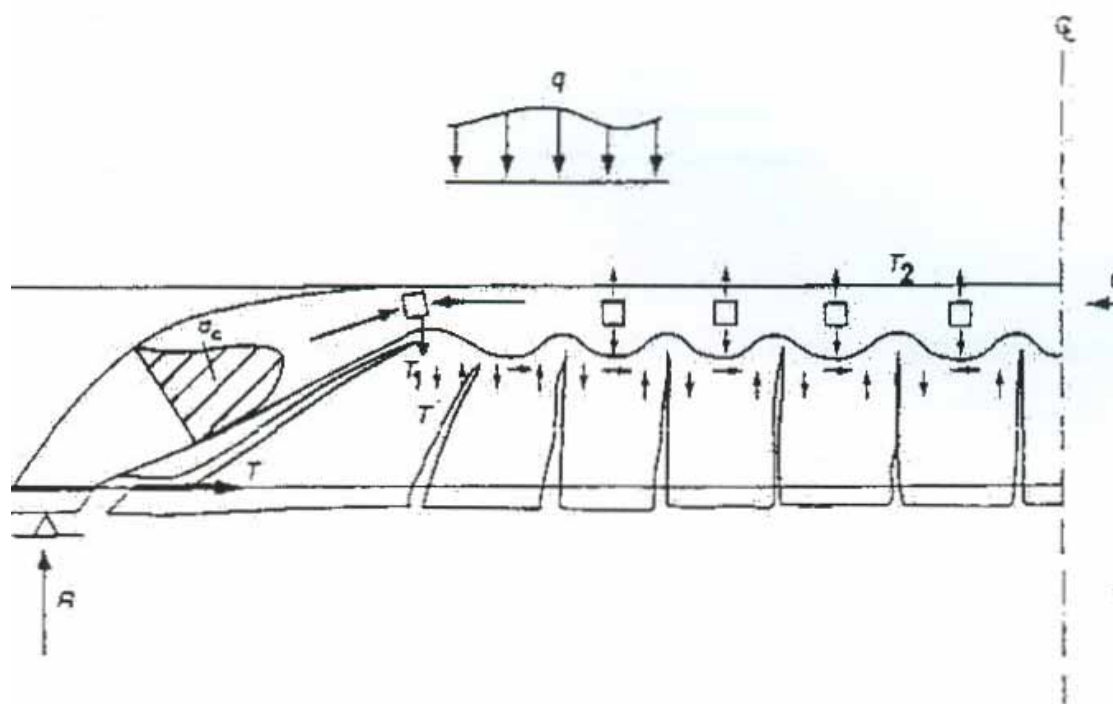
α) Αλλαγής της διεύθυνσης της τροχιάς της συνισταμένης των θλιπτικών τάσεων.

β) παράπλευρες στις διατομές όπου υπάρχουν κύριες καμπτικές ή κεκλιμένες ρωγμές

γ) σημειακών φορτιών

δ) στη διεπιφάνεια μεταξύ αρηγμάτωτου και ρηγματωμένου σκυροδέματος.

Οι πιθανές αυτές θέσεις ανάπτυξης εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 1. 7.** Αρηγμάτωτο τμήμα αμφιερείστου δοκού (υπό την δράση του εγκάρσιου φορτίου και των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια του με το ρηγματωμένο τμήμα της δοκού) στο οποίο έχουν σημειωθεί πιθανές θέσεις ανάπτυξης

**εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων**

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### 2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών στη πράξη είναι αρκετά πολύπλοκη. Επομένως για την μελέτη αυτή απαραίτητο είναι να γίνουν απλοποιήσεις και να εξετασθούν οι βασικές αρχές ταλαντώσεων απλών συστημάτων [10]. Κάθε δυναμικό σύστημα έχει ορισμένη πολλαπλότητα **βαθμών ελευθερίας**. Η πολλαπλότητα των βαθμών ελευθερίας, ισούται προς τον αριθμό των ανεξάρτητων συντεταγμένων, των απαιτούμενων δια τον πλήρη καθορισμό της μετατόπισης του συστήματος. Κάθε στερεό σώμα που κινείται επί του επιπέδου  $xy$  έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας, διότι δια τον καθορισμό της μετατόπισης του πρέπει να είναι γνωστές οι μετακινήσεις του κατά τους άξονες  $x$  και  $y$ , καθώς και η τυχόν περιστροφή του περί τον άξονα  $z$ , κάθετο επί το επίπεδο  $xy$ . Εξ' άλλου για τη μετατόπιση ελαστικού σώματος, καθορίζεται για κάθε σημείο του, με τη βοήθεια εξισώσεων, και επομένως το ελαστικό σώμα έχει άπειρους βαθμούς ελευθερίας. Στα προβλήματα ταλαντώσεων ο αριθμός των **τροπών ταλαντώσεως**, κατά τους οποίους η κατασκευή μπορεί να διεγερθεί, είναι ίσος με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας.

#### 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΟΣ ΒΑΘΜΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ

Σύμφωνα με τη στοιχειώδη θεωρία των αρμονικών ταλαντώσεων, η μετατόπιση  $u$  σώματος μάζας  $m$ , ισορροπεί υπό αβαρές και ελαστικό ελατήριο σταθεράς  $k$ , μηδενικής απόσβεσης, σύμφωνα με τον νόμο του Νεύτωνα. Επομένως ισχύει η σχέση:

$$m(d^2u/dt^2)+ku=0 \quad (2.1)$$

Η διαφορική αυτή εξίσωση έχει δυο ανεξάρτητες λύσεις, οι οποίες λαμβάνονται με τη πρόσθεση συναρτήσεων της μορφής  $u=ae^{bt}$ .

Αντικαθιστώντας την τιμή της συνάρτησης  $u$  στη σχέση (2.1) βρίσκεται η τιμή της σταθεράς  $b$  και είναι ίση με:

$$b= \pm i\sqrt{k/m} \quad (2.2)$$

Εάν ονομάσουμε τη ρίζα της σχέσης,  $\omega_0$  δηλαδή

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (2.3)$$

τότε η σχέση (2.2) γίνεται

$$b= \pm i\omega_0 \quad (2.4)$$

όπου το μέγεθος  $\omega$  καλείται κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης.

Προσθέτοντας τις δυο λύσεις της μορφής  $u=ae^{bt}$ , λαμβάνουμε την παρακάτω λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.1):

$$u=a_1e^{i\omega_0t} + a_2e^{-i\omega_0t} \quad (2.5)$$

Εισάγοντας στη σχέση (2.5) την παρακάτω τιμή :

$$e^{\pm i\omega_0t} = \cos\omega_0t \pm i\sin\omega_0t$$

και ανακατατάσσοντας τους όρους της λαμβάνουμε:

$$u= C \cos\omega_0t + D \sin\omega_0t \quad (2.6)$$

όπου οι σταθερές δίνονται από τις σχέσεις  $C = (a_1+a_2)$  και  $D = i(a_1 - a_2)$ .

Οι σταθερές  $C$  και  $D$  είναι δυνατόν να προσδιοριστούν από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Εάν κατά την έναρξη της ταλάντωσης, ( $t=0$ ) η μετατόπιση είναι  $u=0$ , ισχύει ότι  $C=0$  και η σχέση (2.6) γίνεται:

$$u=u_0\sin\omega_0t \quad (2.7)$$

όπου  $u_0$  είναι το εύρος της ταλάντωσης. Ο απαιτούμενος χρόνος  $T$  για μια πλήρη ταλάντωση ονομάζεται περίοδος και ισούται:

$$T = 2\pi/\omega_0 = 2\pi\sqrt{m/k} \quad (2.8)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η κυκλική συχνότητα  $\omega_0$  ισούται με τον αριθμό των ταλαντώσεων σε χρόνο ίσο με  $2\pi$ .

Η εξετασθείς ταλάντωση ανήκει στην απλή περίπτωση, η οποία το ελατήριο, ελαστικής σταθεράς  $k$ , θεωρείται αβαρές και επομένως μπορεί να παραληφθεί η αδράνεια του. Οπότε, η απλή αυτή σχέση μπορεί να εφαρμοσθεί με ικανοποιητική ακρίβεια στη περίπτωση κινήσεως μεγάλων φορτίων προσδεδεμένων σε ελαφρά ελαστική ράβδο. Στη περίπτωση όπου ελαστικό στέλεχος μήκους  $l$ , σταθεράς διατομής  $S$ , και μέτρου ελαστικότητας  $E$ , χρησιμοποιηθεί για την ανάρτηση του βάρους μάζας  $m$ , τότε ισχύει ότι  $k = ES/l$  και επομένως η περίοδος  $T$  δίνεται από τη σχέση

$$T = 2\pi\sqrt{ml/ES}$$

ράβδος διαμέτρου  $2R$ , μήκους  $l$  και μέτρου ελαστικότητας  $G$ , υποβληθεί σε ταλάντωση στέψεως η σταθερά  $k$  λαμβάνει την τιμή

$$k = \pi GR^4/2l$$

και η περίοδος  $T$  γίνεται  $T = 2\pi\sqrt{2ml/\pi GR^4}$

Τέλος για την λεπτή αμφιέριστη δοκό μήκους  $l$  και καμπτικής δυσκαμψίας  $EI$ , όπου το ταλαντούμενο βάρος βρίσκεται στο μέσο της δοκού, ισχύει ότι:

$$k = 48EI/l^3$$

και

$$T = 2\pi\sqrt{m l^3/48EI}$$

Οι δυο τελευταίες σχέσεις περιγράφουν προσεγγιστικά την ταλάντωση αφόρτιστης λεπτής αμφιέριστης δοκού μάζας  $m$ .

Η απλή εξίσωση (2.1) τροποποιείται στη περίπτωση όπου υπάρχουν δυνάμεις τριβής, οι οποίες αντιστέκονται στην κίνηση του σώματος. Στην περίπτωση αυτή η ταλάντωση αποσβένεται και η ενέργεια της ταλάντωσης προοδευτικά μεταβάλλεται σε θερμότητα. Αν οι δυνάμεις αυτές της τριβής θεωρηθούν αίτιο ώστε να αναπτυχθεί γραμμική, ιξώδες μορφή, απόσβεσης, κατά την οποία η δύναμη τριβής είναι ανάλογο της ταχύτητας  $du/dt$ , η σχέση (2.1) γράφεται ως

$$m d^2u/dt^2 + \alpha du/dt + \beta u = 0 \quad (2.9)$$

όπου ο συντελεστής  $\alpha$  εκφράζει το μέγεθος της απόσβεσης. Λύνοντας την παραπάνω διαφορική εξίσωση κατά αυτό τον τρόπο όπως και προηγουμένως προκύπτει:

$$m\varphi^2 + \alpha\varphi + \beta = 0 \quad (2.10)$$

$$\text{άρα: } \varphi = -\alpha/2m \pm \sqrt{(\beta/m - \alpha^2/4m^2)^{1/2}} \quad (2.11)$$

Σε περίπτωση όπου η απόσβεση είναι μικρή, δηλαδή εάν ισχύει  $\alpha^2/4m^2 < \beta/m$ , η επίλυση μπορεί να γίνει όπως και στην απλή περίπτωση, όπου δεν υπάρχουν τριβές, και η λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.9) παίρνει τη μορφή:

$$u = e^{-\alpha t/2m} (C \sin\omega t + D \cos\omega t) \quad (2.12)$$

όπου οι σταθερές  $C$  και  $D$  καθορίζονται από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος και η κυκλική συχνότητα  $\omega$  δίνεται από την σχέση

$$\omega = \sqrt{[\beta/m - \alpha^2/4m^2]} \quad (2.13)$$

Από την σχέση αυτή προκύπτει ότι η συχνότητα των αρμονικών ταλαντώσεων μειώνεται ελαφρώς λόγω της επίδρασης των τριβών, καθώς και το εύρος των ταλαντώσεων ελαττώνεται λόγω της ύπαρξης του εκθετικού παράγοντα  $e^{-\alpha t/2m}$  στη σχέση (2.12).



Το σχήμα 2.1 δείχνει τη μορφή της ταλάντωσης για την περίπτωση μηδενικής απόσβεσης (α), και θετικής απόσβεσης (β). Η ελάττωση της ταλάντωσης υπολογίζεται από την **λογαριθμική απόλεια**, η οποία δίνεται από τις σχέσεις:

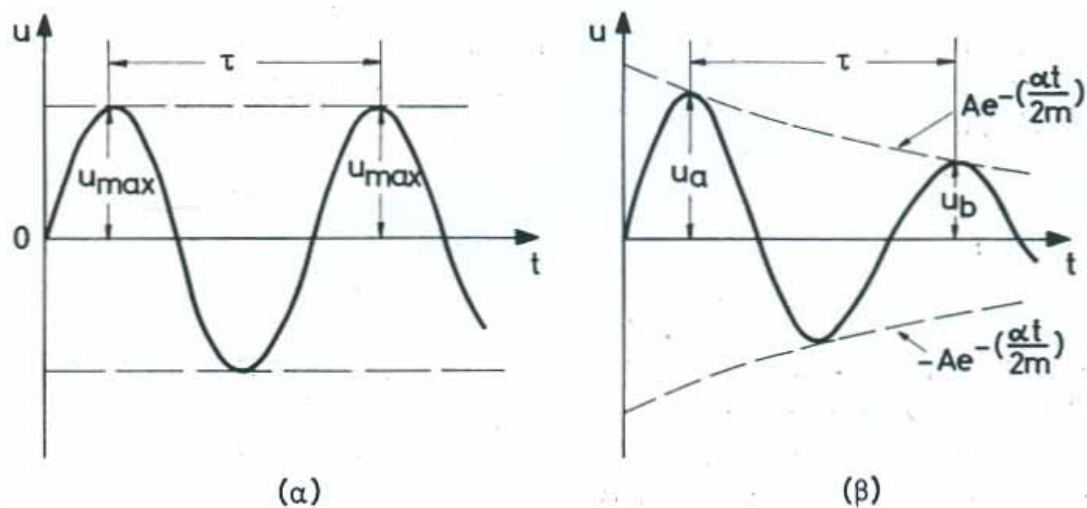
$$\delta = \ln (u_\alpha/u_\beta) = \alpha t/2m = \pi\alpha/m\omega \quad (2.14)$$

όπου τα μεγέθη  $u_\alpha$  και  $u_\beta$  και τα δίνονται στο σχήμα 2.1(β).

Η σχέση (2.12) μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$u = A e^{-\alpha t/2m} \sin (\omega t+c) \quad (2.15)$$

Η σχέση αυτή χαράσσεται στο σχήμα 2.1 (β), όπου η μετατόπιση  $u$  μεταβάλλεται μεταξύ των καμπυλών  $\pm Ae^{-\alpha t/2m}$



**Σχήμα 2.1** Μορφή ταλάντωσης για (α) μηδενική απόσβεση και (β) θετική απόσβεση

Στη περίπτωση όπου η απόσβεση είναι μεγάλη, η ταλάντωση δεν είναι πλέον ούτε "προσεγγιστικά" ημιτονοειδείς, και εάν  $(\alpha^2/4m^2) > (\beta/m)$ , η ταλάντωση γίνεται αperiοδική. Η εξίσωση (2.1) στη περίπτωση αυτή παίρνει τη μορφή

$$\varphi_1 = -\alpha/2m + \sqrt{[\alpha^2/4m^2 - \beta/m]}$$

(2.16)

$$\varphi_2 = -\alpha/2m - \sqrt{[\alpha^2/4m^2 - \beta/m]}$$

και επομένως το εύρος της ταλάντωσης δίνεται από την σχέση

$$u = A_1 e^{\beta_1 t} + A_2 e^{\beta_2 t}$$

(2.17)

Η σχέση αυτή δεν παριστάνει ταλάντωση, αλλά εκθετικά φθίνουσα καμπύλη μορφής ερπυσμού, την οποία ακολουθεί η μετατοπισμένη μάζα  $m$  μέχρι να επανέρθει στο σημείο ισορροπίας της, όπου και ισχύει ότι  $u = 0$ .

Η κρίσιμη απόσβεση αντιστοιχεί στη τιμή του συντελεστή απόσβεσης, κατά την οποία η ερπυστική κίνηση του σώματος μεταπίπτει σε ταλάντωση με απόσβεση. Κατά την κρίσιμη απόσβεση ισχύει ότι  $\omega = 0$ , και επομένως

$$(\alpha^2/4m^2) = \beta/m$$

ή

$$\alpha^2 = 4\beta m$$

(2.18)

Η σχέση (2.18) αντιστοιχεί στη περίπτωση ίσων ριζών της δευτεροβάθμιας εξίσωσης ως προς  $\varphi$  (σχέση 2.10). Εάν ονομάσουμε  $\alpha_0$  τον συντελεστή  $\alpha$ , ο οποίος αντιστοιχεί στη κρίσιμη απόσβεση, τότε η σχέση (2.18) μπορεί να γραφτεί:

$$\alpha_0 = 2\sqrt{\beta m}$$

Αλλά από την σχέση (2.3) η συχνότητα  $\omega_0$  της ταλάντωσης χωρίς απόσβεσης ( $\beta = k$ ) δίνεται ως :

$$\omega_0 = \sqrt{\beta/m}$$

Άρα η σχέση (2.10) γράφεται:

$$\alpha_0 = 2m\omega_0 = 2\beta/\omega_0$$

(2.20)

Εάν αντικαταστήσουμε την τιμή της συχνότητας  $\omega_0$ , για την περίπτωση της ταλάντωσης χωρίς απόσβεσης, με την συχνότητα  $\omega$  για την περίπτωση της ταλάντωσης με απόσβεση, τότε λαμβάνουμε:

$$\omega^2 = (\beta/m - \alpha^2/4m^2)$$

ή

$$\omega^2 = (\omega_0 - \gamma^2\alpha_0^2/4m^2)$$

όπου με  $\gamma$  εκφράζεται ο **συντελεστής απόσβεσης** άρα:

$$\gamma = \alpha/\alpha_0 \quad (2.21)$$

Εάν στην έκφραση της σχέσης  $\omega_0$  εισαχθεί η τιμή του  $\alpha_0$ , από τη σχέση 2.20, προκύπτει ότι:

$$\omega = \omega_0 (1 - \gamma^2)^{1/2} \quad (2.22)$$

Στην πράξη γενικά ισχύει ότι  $\omega \approx \omega_0$ , εκτός στις περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη απόσβεση στο σύστημα, και τότε οι τιμές του παράγοντα απόσβεσης  $\gamma$ , είναι μικρές και κυμαίνονται μεταξύ 0 και 0.2. Στις κατασκευές η τιμή του  $\gamma$  εξαρτάται από το υλικό και τον τρόπο συνδέσεως των συνδέσμων, π.χ χαλαρές συνδέσεις ράβδων σε κάποια κατασκευή έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της αποσβέσεως της.

Χαρακτηριστικές τιμές του παράγοντα  $\gamma$ , στις μεταλλικές κατασκευές είναι η τιμή  $\gamma = 0.03$ . Για τις τιμές της απόσβεσης που συναντάμε στη πράξη, ισχύει ότι, η συχνότητα των ελεύθερων αποσβέσεως της ταλάντωσης ισούται με την φυσική συχνότητα των ελεύθερων ταλαντώσεων του συστήματος.

Εισάγοντας την σχέση (2.22) στη σχέση που εκφράζει την λογαριθμική απώλεια (σχέση 2.14) προκύπτει η παρακάτω σχέση

$$\delta = 2\pi\gamma(1 - \gamma^2)^{-1/2} \quad (2.23)$$

Στη πράξη και σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, ισχύει η παρακάτω σχέση;

$$\delta \approx 2\pi\gamma \quad (2.24)$$

Η σχέση (2.23) που συνδέει την λογαριθμική απώλεια,  $\delta$ , η οποία στη πράξη υπολογίζεται εύκολα κατά την ελεύθερη ταλάντωση της κατασκευής μετρώντας διαδοχικά τις μέγιστες τιμές του εύρους της ταλάντωσης, με τον παράγοντα

απόσβεσης  $\gamma$ , ο οποίος αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο όσον αφορά τη μελέτη των εξαναγκασμένων ταλαντώσεων των κατασκευών.

Η σχέση (2.18) δίνει τον βέλτιστο βαθμό απόσβεσης για τα διάφορα όργανα και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στα γαλβανόμετρα. Μέγιστη τιμή της βέλτιστης απόσβεσης, λόγω μεγάλων τριβών, καθυστερεί την επιστροφή του οργάνου στη αρχική κατάσταση ισορροπίας, η ελάχιστη δε τιμή της απόσβεσης επιτρέπει την ταλάντωση του δείκτη περί τη θέση ισορροπίας κατά πολλές περιόδους.

Πολλά ελαστικά συστήματα διατηρούνται στη κατάσταση εξαναγκασμένης ταλάντωσης, εφαρμόζοντας σε αυτά κατά περιόδους εξωτερικές δυνάμεις. Η απλούστερη μορφή των εξωτερικών αυτών δυνάμεων μπορεί να παρασταθεί από τη ημιτονοειδή σχέση  $P_0 \cos \omega t$ , οπότε η διαφορική εξίσωση ταλάντωση με απόσβεση (σχέση 2.9) μπορεί να γραφτεί:

$$d^2u/dt^2 + \alpha du/dt + \beta u = P_0 \cos \omega t \quad (2.25)$$

Η πλήρης λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.25) συνίσταται από την συμπληρωματική συνάρτηση και από την ειδική λύση. Η συμπληρωματική συνάρτηση δίνεται από τη λύση της ομογενούς εξίσωσης (2.25). Η λύση αυτή αντιστοιχεί προς τη λύση της εξίσωσης (2.9), η οποία έχει δοθεί προηγουμένως. Για την ειδική λύση λαμβάνεται η σχέση  $u = A \cos \omega t + B \sin \omega t$ . Εισάγοντας την σχέση αυτή στην εξίσωση (2.25) και εξισώνοντας τους συντελεστές των  $\cos \omega t$  και  $\sin \omega t$  ξεχωριστά λαμβάνουμε:

$$P_0 = -m\omega^2 A + \alpha\omega B + \beta A$$

και

$$0 = -m\omega^2 B - \alpha\omega B + \beta B$$

Από το σύστημα αυτό των δυο εξισώσεων είναι δυνατόν να καθοριστούν οι τιμές των συντελεστών  $A$  και  $B$ . Από τη λύση αυτή λαμβάνουμε:

$$u = [P_0 \cos(\omega t - \varphi)] / [(\beta - m\omega^2)^2 + \alpha^2 \omega^2]^{1/2}$$

και

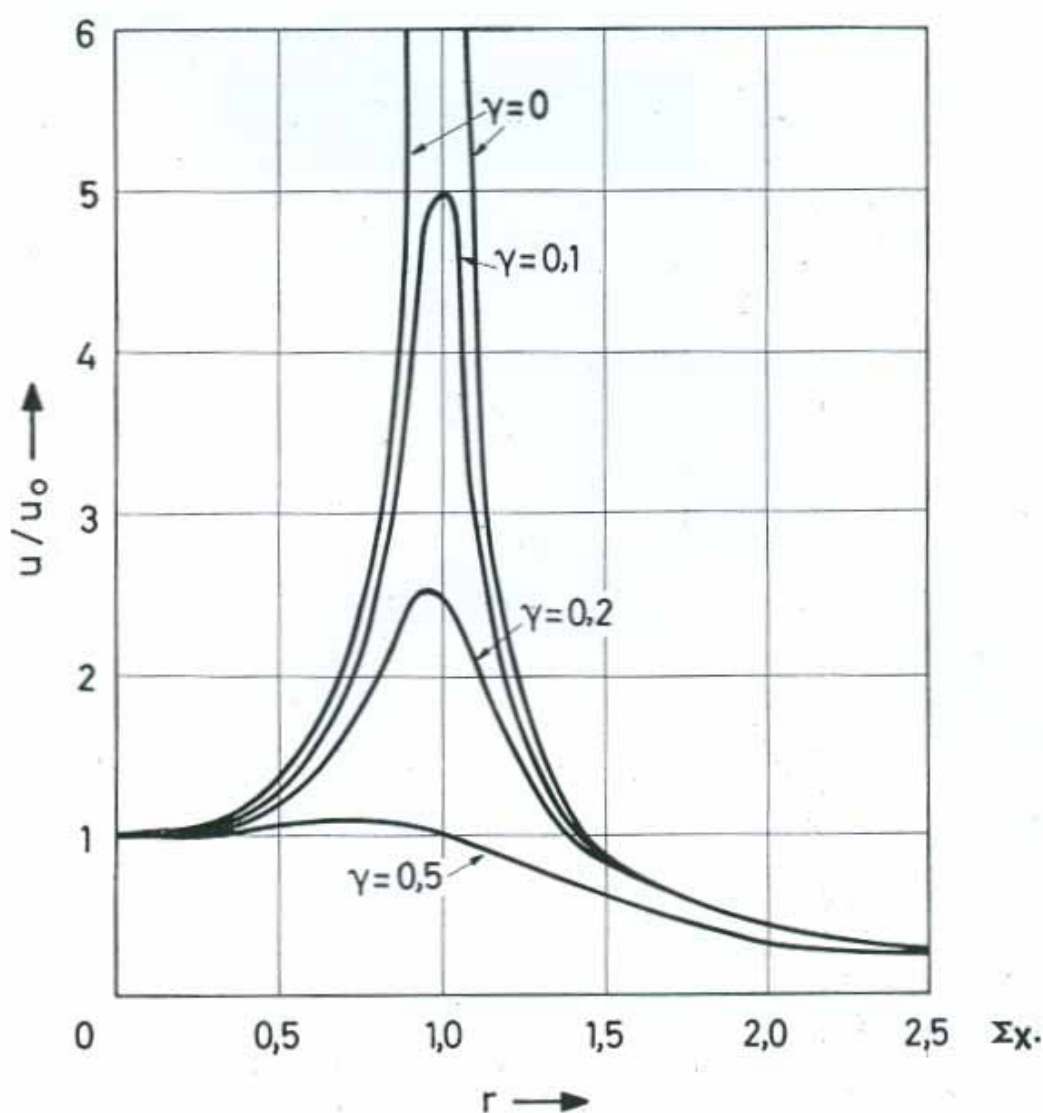
$$(2.26)$$

$$\tan \varphi = \alpha\omega / (\beta - m\omega^2)$$

Η πλήρης λύση της εξίσωσης (2.25) προκύπτει από το άθροισμα των σχέσεων (2.12) και (2.26) οπότε:

$$u = e^{(-\alpha t/2m)} ( C \sin \omega t + D \cos \omega t ) + [P_0 \cos(\omega t - \varphi)] / [(\beta - m\omega^2)^2 + \alpha^2 \omega^2]^{1/2}$$

Όπως και προηγουμένως, οι σταθερές C και D προσδιορίζονται από τις αρχικές συνθήκες. Από φυσική πλευρά, η πλήρης συμπεριφορά της κατασκευής που τίθεται σε εξαναγκασμένη ταλάντωση, αποτελείται από το άθροισμα της μεταβατικής κατάστασης, η οποία εμφανίζεται κατά την έναρξη των ταλαντώσεων, και η οποία αποσβένεται εκθετικά και από τη μόνιμη κατάσταση της ταλάντωσης. Εάν μας ενδιαφέρει η ταλάντωση κατά τη έναρξη της, τότε πρέπει να μελετηθεί η εξίσωση (2.27), αλλά στα περισσότερα προβλήματα μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά της κατασκευής, μετά την μεταβατική περίοδο κατά την έναρξη των ταλαντώσεων, η οποία όταν αυτή έχει ήδη αποσβεστεί, η μόνιμη κατάσταση της ταλάντωσης της κατασκευής να αποτελεί ουσιαστικά την ταλάντωση. Αυτή η κατάσταση περιγράφεται από την εξίσωση (2.26).



**Σχήμα 2.2** Ο παράγων μεγενθύσεως σε σχέση με τον λόγο συχνοτήτων για διάφορες τιμές του παράγοντα απόσβεσης.

Εάν ονομάσουμε  $U$  το εύρος της μόνιμης εξαναγκασμένης ταλάντωσης, όπου  $u = U \cos(\omega t - \varphi)$ , και  $u_0$  η μετατόπιση λόγω του στατικού φορτίου  $P$  θα έχουμε:

$$u/u_0 = 1/[(1 - \omega^2/\omega_0^2) + (\alpha\omega/\beta)^2]^{1/2}$$

Εισάγοντας τις σχέσεις (2.20) και (2.21) στην παραπάνω εξίσωση και θέτοντας με  $r$  τον λόγο των συχνοτήτων,  $\omega$  και  $\omega_0$ , δηλαδή τον λόγο της διεγείρουσας δύναμewς προς την φυσική συχνότητα του συστήματος ( $r = \omega/\omega_0$ ), προκύπτει:

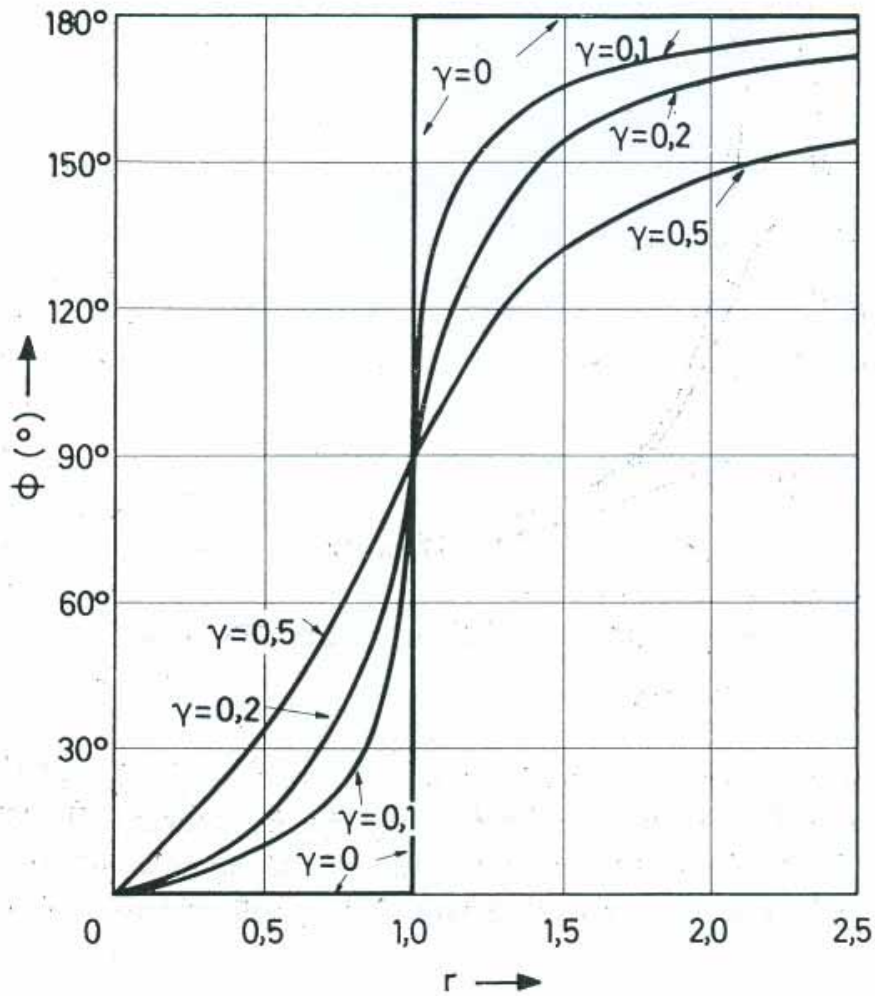
$$u/u_0 = 1/[(1 - r^2)^2 + (2\gamma r)^2]^{1/2} \quad (2.28)$$

και

$$\tan\varphi = 2\gamma r/(1 - r^2) \quad (2.29)$$

Η γωνία  $\varphi$  εκφράζει την φυσική γωνία κατά την οποία η δυναμική ανταπόκριση της κατασκευής προπορεύεται της διεγείρουσας δύναμης. Ο λόγος  $u/u_0$  ονομάζεται παράγοντας μεγένθυσης ή και ωφέλεια. Οι εξισώσεις (2.28) και (2.29) εκφράζουν τον παράγοντα μεγένθυσης και την φυσική γωνία ως προς το λόγο συχνοτήτων  $r$  και τον λόγο απόσβεσης  $\gamma$ . Οι σχέσεις (2.28) και (2.29) εκφράζονται γραφικά στα σχήματα 2.2 και 2.3 αντίστοιχα, όπου ο παράγοντας μεγένθυσης και η φυσική γωνία χαράχτηκαν συναρτήσεϊ του λόγου συχνοτήτων, για διάφορες παραμετρικές τιμές του παράγοντα απόσβεσης. Τα σχήματα αυτά απεικονίζουν το φαινόμενο του συντονισμού. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν η συχνότητα της διεγείρουσας δύναμης γίνεται ίση προς την ίδια συχνότητα της κατασκευής, οπότε το εύρος της εξαναγκασμένης είναι μέγιστο σε σύγκριση με τις τιμές της απόσβεσης που λαμβάνονται πρακτικά. Η τιμή του λόγου  $r$  για την οποία ο λόγος  $u/u_0$  γίνεται μέγιστος για κάποια τιμή του  $\gamma$  βρίσκεται με το καθορισμό της παραγώγου  $d(u/u_0)/dr$  και εξίσωσης της με μηδέν, οπότε:

$$r^2 = (1 - 2\gamma^2) \quad (2.30)$$



Σχ. 12.3

Σχήμα 2.3 Η φασική γωνία σε σχέση με τον λόγο συχνοτήτων για διάφορες τιμές του παράγοντα απόσβεσης.

Για πρακτικές τιμές της απόσβεσης ο συντελεστής μεγεθύνσεως γίνεται μέγιστος όταν ο λόγος συχνοτήτων είναι λίγο μικρότερος της μονάδας. Για  $\gamma = 0.02$  η μέγιστη ωφέλεια λαμβάνεται για  $r = 0.96$ , για  $r = 1$  ο λόγος  $u/u_0$  γίνεται:

$$u/u_0 = 1/2\gamma \quad (2.31)$$

Για μικρές τιμές της απόσβεσης το μέγιστο εύρος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης δίνεται προσεγγιστικός από τη σχέση (2.31). Μπορεί να δειχθεί ότι το σφάλμα από την προσέγγιση αυτή ή από τη παραδοχή ότι η μέγιστη τιμή της ωφέλειας λαμβάνεται για  $r = 1$ , αντί της πραγματικής της δεδομένης από τη σχέση (2.31), είναι μικρότερη του 2% για τις τιμές του  $\gamma$  μικρότερη του 0.2. Εάν η συχνότητα της διεγείρουσας δύναμης είναι ίση προς τη φυσική συχνότητα της κατασκευής, τότε το εύρος τείνει

προς κάποια μέγιστη τιμή, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον παράγοντα της απόσβεσης. Εάν τα μεγάλα εύροι είναι ανεπιθύμητα, η συχνότητα της διεγείρουσας δύναμης πρέπει να πλησιάζει τη φυσική συχνότητα του συστήματος. Άσχετα από τη τιμή της απόσβεσης, το εύρος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης πλησιάζει τη στατική μετατόπιση για  $\omega \gg \omega_0$ . Το εύρος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης καθίσταται πολύ μικρό για  $\omega \gg \omega_0$ . Για πρακτικές τιμές της απόσβεσης η γωνία φάσης, που βρίσκεται στη γειτονιά της συνθήκης συντονισμού, επηρεάζεται από την τιμή του  $r$ . Για κάθε τιμή της απόσβεσης η γωνία φάσης ισούται με  $\pi/2$  για  $r = 1$ .



## 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σκοπός του πειράματος είναι η μελέτη της συμπεριφοράς υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε συνθήκες δυναμικής καταπόνησης, με έμφαση στην διάδοση του κύματος στον εγκάρσιο οπλισμό. Η πειραματική μελέτη γίνεται καθώς το υποστυλώμα υποβάλλεται σε εναλλασσόμενα φορτία, έως 8Hz, και σε διάφορα εύροι ταλάντωσης.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges).

Πριν προχωρήσουμε στη πειραματική διαδικασία θα αναφερθούμε συνοπτικά στους μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges).

#### 3.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (STRAIN GAUGES)

Τα αισθητήρια όργανα διακρίνονται βασικά σε δύο κατηγορίες αναλόγως το είδος του ηλεκτρικού σήματος που παρέχουν στην έξοδο τους : **Αισθητήρια αναλογικής εξόδου**, όπου σήμα στην έξοδο είναι **αναλογικό (analog) με την έννοια του συνεχούς και αισθητήρια ψηφιακής εξόδου**, όπου το σήμα στην έξοδο είναι ψηφιακό δηλαδή παίρνει διακριτές τιμές . Η πληροφορία για το μέγεθος του μετρούμενου μεγέθους είναι υπό **μορφή δυαδικού αριθμού ή σειράς παλμών**.

Σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές η μέτρηση της δύναμης γίνεται έμμεσα ,μετρώντας δηλαδή την παραμόρφωση την οποία αυτή προκαλεί όταν επενεργεί σε κατάλληλα διαλεγμένα μηχανικά στοιχεία (μια ράβδο ή ένα διάφραγμα ή ένα ελατήριο) . Η παραμόρφωση - που όταν είναι μικρή, είναι σύμφωνα με τον νόμο του Hook, ανάλογη της δύναμης - μετριέται στη συνέχεια με κάποιο αισθητήριο θέσης ή παραμόρφωσης. Συνήθως χρησιμοποιείται το μηκυσιόμετρο ή μετρητής παραμόρφωσης (strain gauge) σπανιότερα δε το LVDT .

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε όταν πρόκειται να μετρήσουμε δύναμη με τον παραπάνω τρόπο, είναι ότι το μέγεθος των παραμορφώσεων είναι απειροελάχιστο - της τάξης μεγέθους μερικών μικρών πολύ συχνά . Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο έχουν αναπτυχθεί ειδικές διατάξεις μέτρησης των παραμορφώσεων .

Ο πιο γνωστός αισθητήρας παραμόρφωσης είναι το **μηκυσιόμετρο ενσωματωμένου συρματιδίου (bonded wire strain gauge)** . Η λειτουργία του στηρίζεται στο γεγονός ότι **η ηλεκτρική αντίσταση ενός συρματιδίου εξαρτάται εκτός των άλλων και από το μήκος και από τη διατομή του** . Όταν το συρματίδιο παραμορφώνεται υπό την επίδραση κάποιας δύναμης, τότε μεταβάλλεται και το μήκος και η διατομή του, άρα και η ηλεκτρική του αντίσταση .

Αποδεικνύεται ότι στην απλή περίπτωση της επιμήκυνσης, η μεταβολή της αντίστασης του συρματιδίου είναι

$$\Delta R/R = \epsilon * k$$

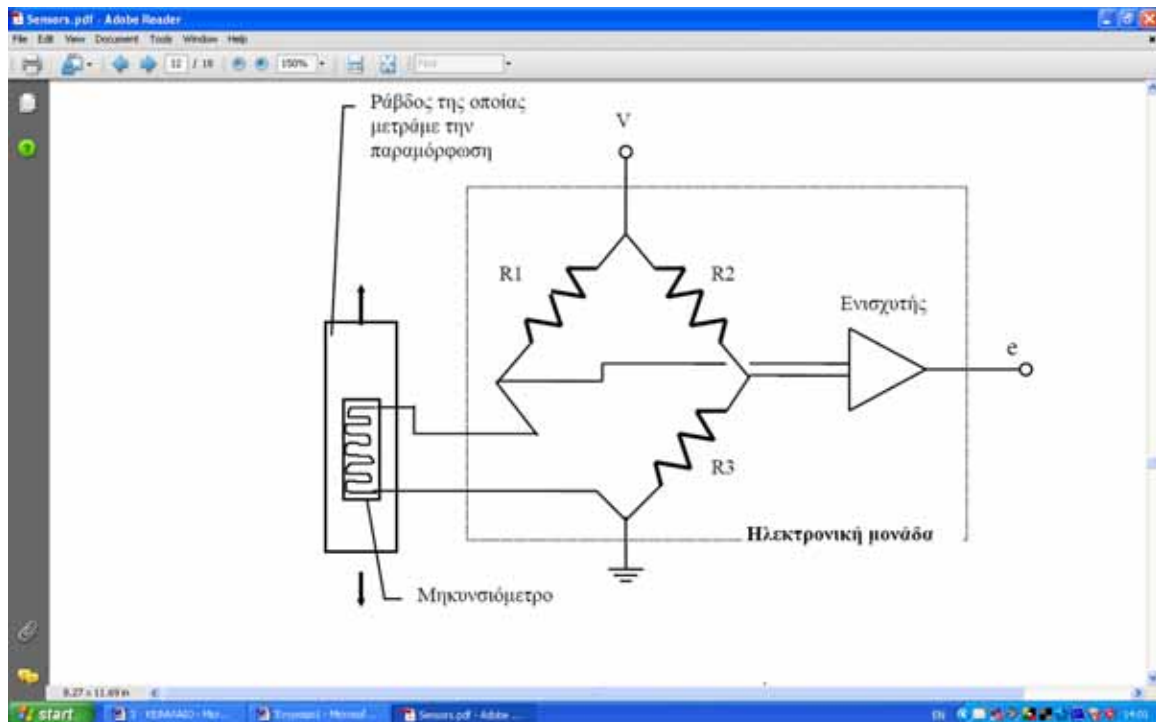
όπου

$\epsilon = \Delta l/L$  : επιμήκυνση για την οποία στην ελαστική περιοχή

όπου ισχύει ο νόμος του Hook έχουμε

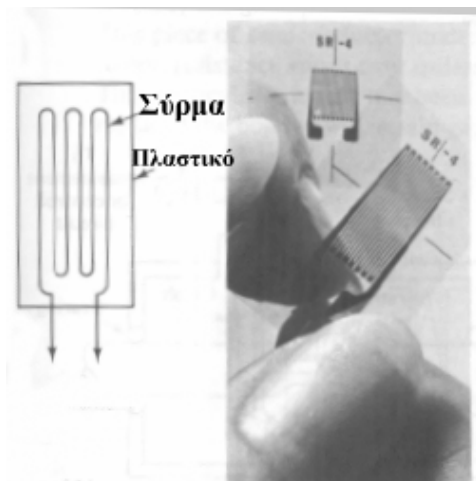
$\epsilon = \sigma/E$  :  $\sigma$  = τάση του συρματιδίου  
 $E$  = μέτρο ελαστικότητας του Young  
 $k$  : Συντελεστής μέτρησης

Για συρματίδιο από κοσταντάνη που συνήθως χρησιμοποιείται, ο συντελεστής  $k = 2.052$  . Με ένα τέτοιο υλικό έχουμε την δυνατότητα να μετρήσουμε παραμορφώσεις της τάξης του  $1\mu\text{m} / \text{μέτρο}$  ! Πραγματικά αυτή η παραμόρφωση επιφέρει μια αύξηση στην αντίσταση της τάξης των  $2 \times 10^{-6}$  . Αυτή η **απειροελάχιστη αύξηση της αντίστασης είναι μετρήσιμη - με γέφυρα και ενισχυτή** . Την παραμόρφωση αυτή θα αποκτήσει ένα συρματίδιο διατομής  $1\text{mm}$  όταν σ' αυτό επενεργήσει δύναμη μερικών γραμμαρίων .



Σχήμα 3.1

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η όλη διάταξη με την βοήθεια της οποίας ένα μηκυνσιόμετρο μετρά την παραμόρφωση κάποιας ράβδου. Το μηκυνσιόμετρο συνδέεται σαν η τέταρτη αντίσταση σε γέφυρα Wheatstone. Η γέφυρα τροφοδοτείται με τάση  $V$  στα δύο άκρα της, γνωρίζουμε δε ότι η τάση στα δύο άλλα είναι ανάλογη της μεταβολής της αντίστασης της μεταβαλλόμενης αντίστασης - δηλαδή του μηκυνσιομέτρου εν προκειμένω. Στη συνέχεια η μικρή αυτή τάση ενισχύεται και (φιλτράρεται συνήθως) έτσι που να μας δίδει ένα σήμα μετρήσιμο από μετρητικά όργανα ή τον Η/Υ. Όλη η εργασία γίνεται στην ηλεκτρονική μονάδα, το δε σήμα  $e$  που παίρνουμε είναι συνήθως **μια τάση  $0..5\text{ V}$  ή  $0..10\text{ V}$  ανάλογη της παραμόρφωσης** κατάλληλη δηλαδή να 'διαβασθεί' από Η/Υ.



**Σχήμα 3.2**

Από κατασκευαστική άποψη το συρματίδιο είναι σε μορφή μαιάνδρου ενσωματωμένο σε λεπτό φύλλο πλαστικού όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Το φιλμ του πλαστικού ενσωματώνεται στη συνέχεια στη ράβδο της οποίας πρόκειται να μετρηθεί η παραμόρφωση .

Αν φαντασθούμε στην κατασκευή του Σχήματος 3.2 την ράβδο να είναι κατάλληλα διαλεγμένη τότε η όλη κατασκευή αν **βαθμονομηθεί μετρά τη δύναμη επενέργειας πάνω στη ράβδο** - αφού η παραμόρφωση είναι ανάλογη της δύναμης στην ελαστική περιοχή.

Πρόσφατα έχουν κατασκευασθεί μετρητές παραμορφώσεων που χρησιμοποιούν ημιαγωγό υλικό αντί για συρματίδιο . Το πλεονέκτημα τους είναι ότι η αντίστασή τους μεταβάλλεται πολύ περισσότερο για μια δεδομένη παραμόρφωση από ότι αυτή του κοινού σύρματος, συνεπώς μπορούν να μετρήσουν μικρότερες δυνάμεις . Μειονεκτήματα τους το κόστος και η ευαισθησία σε θερμοκρασία και κτυπήματα .

### **3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ**

Το μετρητικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα πολυκαναλικό σύστημα ταχείας λήψης, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων, (Data Acquisition System Model 6035 της Pacific Instruments). Το σύστημα αυτό αποτελείται από:

1. Κεντρική μονάδα βυσματούμενων καρτών συλλογής δεδομένων, δυνατότητας 4 υποδοχών των 8 καναλιών, με θύρα USB.
2. Δυο 8 – καναλικές βυσματούμενες μονάδες –ψηφιοποιητές .

3. Λογισμικό αποθήκευσης, επεξεργασίας και παρουσίασης δεδομένων μέσω Η/Υ.
4. Φορητός Η/Υ/.

Το σύστημα έχει για κάθε κανάλι, δυνατότητα 10.000 λήψεων ανά δευτερόλεπτο. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται τμήμα του συστήματος κατά την διαδικασία της συνδεσμολογίας των μετρητών παραμόρφωσης.

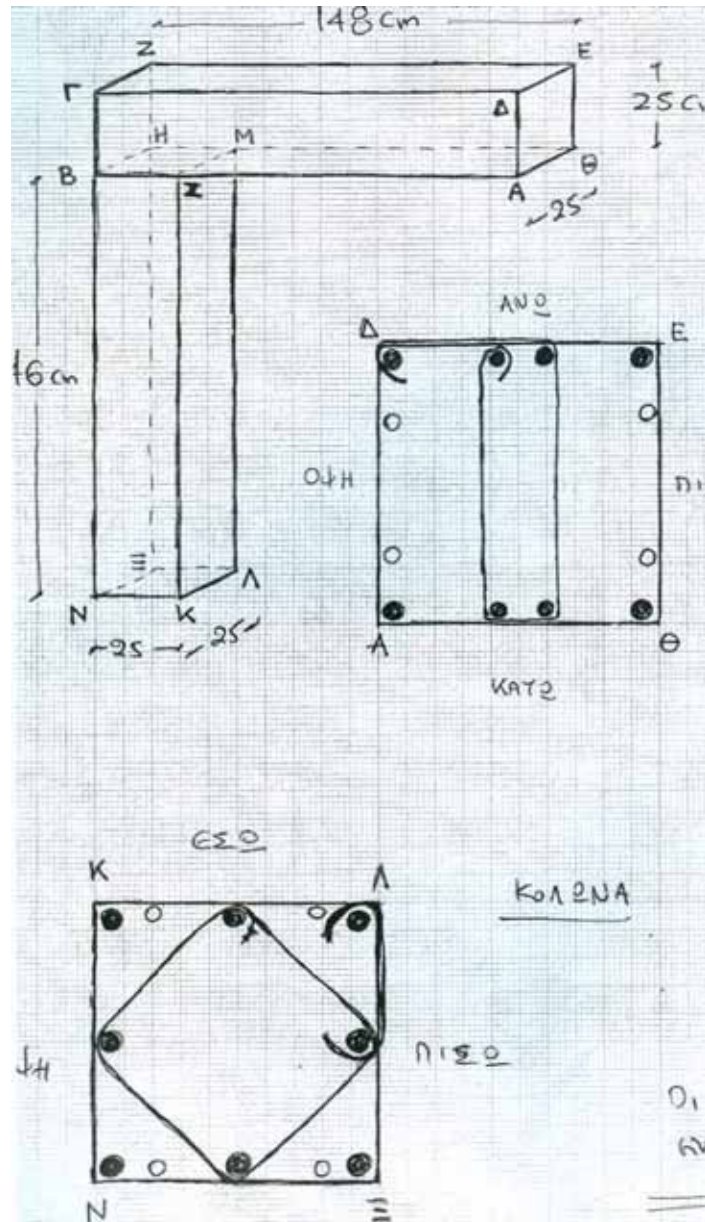


**Σχήμα 3.3** Συνδεσμολογία μετρητών παραμόρφωσης με το σύστημα.

### **3.4 ΜΟΡΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ**

Τα κυρίως δοκίμια αποτελούνται από δοκό και υποστύλωμα διατομής 250mm x 250mm και ύψος τουλάχιστον 1500 mm. Αυτά οπλίστηκαν με χάλυβα S500s και κλωβούς συνδετήρων. Επί των κλωβών τοποθετήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμορφώσεων (strain gages) κατάλληλοι για μέταλλα. Επίσης ηλεκτρικοί μετρητές παραμορφώσεων κατάλληλοι για σκυρόδεμα, τοποθετήθηκαν σε αντίστοιχες θέσεις της επιφάνειας σκυροδέματος, όπου με την εγκατάσταση των απαιτούμενων οργάνων και του λογισμικού ήταν δυνατή η ταχεία λήψη, αποθήκευση και επεξεργασία αποτελεσμάτων.

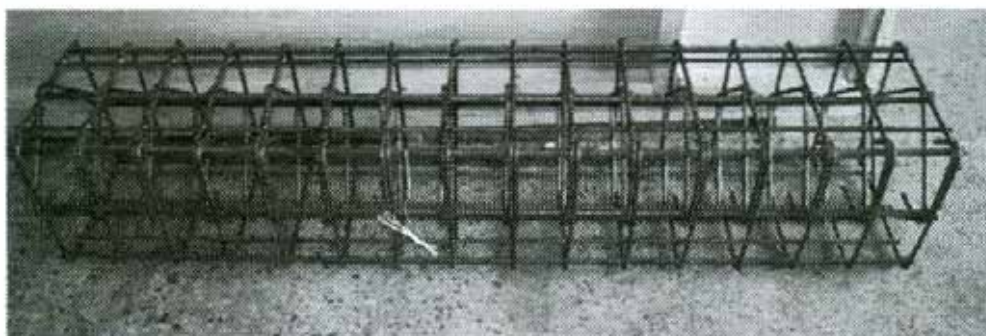
Παρακάτω, στο σχήμα 3.4, φαίνεται το σκαρίφημα του δοκιμίου, υποστύλωμα – πρόβολος, όπου όπως φαίνεται είναι σε μορφή Γ. Επίσης στο ίδιο σκαρίφημα φαίνεται και οι συνδετήρες του προβόλου καθώς και του υποστύλωματος.



Σχήμα 3.4. Σκαρίφημα υποστύλωμα - δοκού.

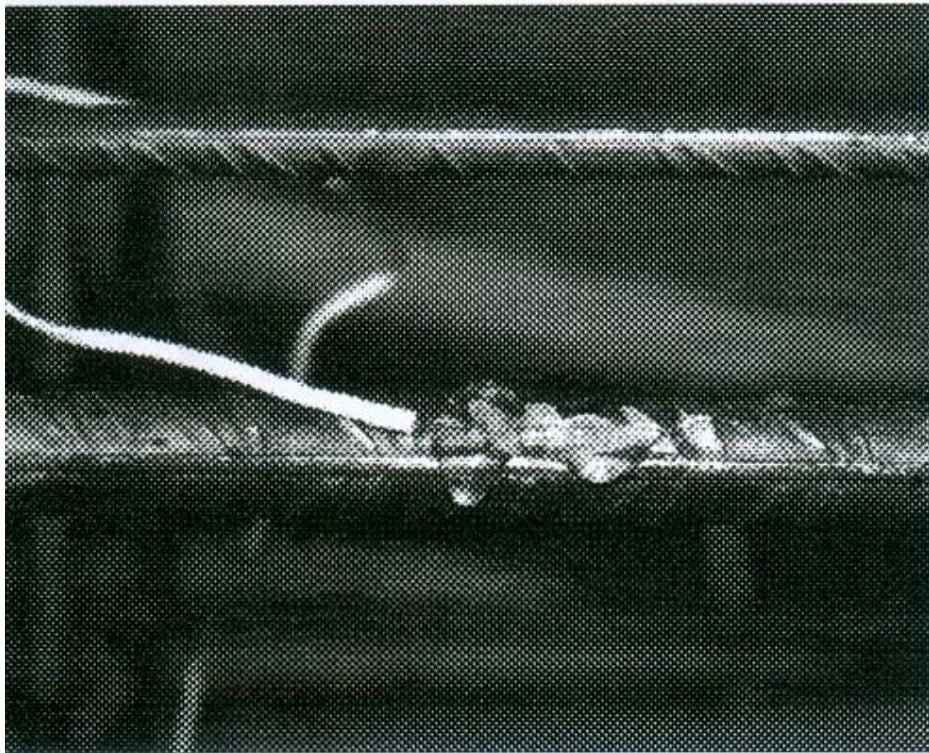
### 3.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

Στον οπλισμό των υποστυλωμάτων, για στατικές δοκιμές καταπόνησης, χρησιμοποιήθηκαν 2 βιομηχανοποιημένα χαλύβδινα δοκίμια. Κάθε ένα από αυτά έφερε περιμετρικά 8 χαλύβδινες ράβδους διαμήκους οπλισμού, διαμέτρου διατομής 12 mm και συνδετήρες εγκάρσιου οπλισμού, διαμέτρου διατομής 8 mm, συγκολλημένους σε 4 διαμήκεις ράβδους διαμέτρου 8 mm. Οι συνδετήρες, όπου το σκαρίφημα τους φαίνεται στο σχήμα 3.3, ήταν συγκολλημένοι στα μεν πρώτο δοκίμιο ανά 10cm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4, στο δε δεύτερο, ανά 20 cm καθ' ύψος. Οι διατάξεις ήταν 164cm x 34cm x 34cm και 160cm x 34cm x 34cm αντίστοιχα. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται το χαλύβδινο βιομηχανοποιημένο δοκίμιο.



Σχήμα 3.5. Χαλύβδινο βιομηχανοποιημένο δοκίμιο.

Στη συνέχεια σε διάφορα σημεία στο μέσον του ύψους των χαλύβδινων δοκιμίων έγινε λείανση, προκειμένου να εξαλειφθούν από τα σημεία αυτά οι νευρώσεις και να γίνει δυνατή η επικόλληση των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης (strain gages). Η λείανση αυτή ήταν επιφανειακή ώστε να μην επηρεαστεί η αντοχή τους. Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης που επικολλήθηκαν, σχήμα 3.6, ήταν τύπου **KFG-5-120-C1-11** της KYOWA.



**Σχήμα 3.6. Strain gage επί του διαμήκους οπλισμού.**

### **3.6 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΛΩΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ**

Οι δυο βιομηχανοποιημένοι κλωβοί είχαν μορφή μονόστηλου με μια δοκό εν πρόβολο, συνδεδεμένη με αγκύρωση από τη έξω πλευρά του κόμβου. Ο κάθε κλωβός έφερε ως διαμήκη οπλισμό 8 ράβδους Φ12 και εγκάρσιο οπλισμό Φ8 διατεταγμένο ανά 8cm περίπου και συγκολλημένο με 4 διαμήκειες ράβδους Φ8. Οι διαστάσεις του στύλου ήταν

146cm x 25cm x 25cm και της δοκού 148cm x 25cm x 25cm. Οι κλωβοί αυτοί χρησιμοποιήθηκαν ως οπλισμός στα δοκίμια σκυροδέματος που υποβλήθηκαν σε δυναμική φόρτιση.

Επί του κλωβού επιλέχθηκαν τα σημεία που θα τοποθετηθούν οι ηλεκτρικοί μετρητές της παραμόρφωσης (strain gauges). Τα σημεία αυτά καλύπτουν την περιοχή του στύλου και της δοκού, με πύκνωση στη περιοχή του κόμβου. Αφού επιλέχθηκαν τα σημεία, ακολούθησε η επιφανειακή λείανση τους ώστε να εξαλειφθούν από τα σημεία αυτά οι νευρώσεις, χωρίς επίπτωση στην αντοχή του οπλισμού και κατόπιν έγινε η συγκόλληση των μετρητών παραμόρφωσης. Στη συνέχεια οι ηλεκτρικοί μετρητές μονώθηκαν και στεγανοποιήθηκαν με σιλικόνη για να προστατευτούν κατά την διαδικασία της σκυροδέτησης και τέλος αριθμήθηκαν. Τοποθετήθηκαν συνολικά 40 μετρητές της παραμόρφωσης (strain gauges) εκ των οποίων 21 στους συνδετήρες, (13 στην δοκό και 8 στον στύλο), 15 στον διαμήκη οπλισμό (9 στην δοκό και 6 στον στύλο), 2 επί των γάντζων των οπλισμών και 2 επί των οπλισμών της συγκόλλησης.

Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης που επικολλήθηκαν ήταν τύπου FLA – 5-11-5L της TML. Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται τμήμα του κλωβού (περιοχή του κόμβου), με τους μετρητές παραμόρφωσης.



**Σχήμα 3.7 Ο κλωβός οπλισμού με τους μετρητές παραμόρφωσης.**

### **3.7 ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ**

Ο κλωβός με τους συγκολλημένους μετρητές παραμόρφωσης τοποθετήθηκε σε ανάλογο καλούπι και σκυροδετήθηκε προσεκτικά. Κάποια από τις φάσεις της σκυροδέτησης φαίνεται στο σχήμα 3.8. Μετά 7 ημέρες το δοκίμιο σκυροδέματος με τη βοήθεια γερανού μεταφέρθηκε στον χώρο που έγινε το πείραμα και τοποθετήθηκε σε νέο καλούπι-βάση στήριξης που σκυροδετήθηκε επίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9.

Για τη σκυροδέτηση φτιάχτηκε το τσιμέντο με την εξής αναλογία :

Σύσταση:

Άμμος: 110 kgr

Χαλίκι: 108 kgr

Τσιμέντο: 32 kgr

Νερό: 22 kgr



Επίσης για την αντοχή του πάθησαν κυλινδρικά δοκίμια με διατομή  $d=15\text{ cm}$  και ύψος  $h=30.3\text{ cm}$ , αντοχής B90.



**Σχήμα 3.8** Από τις εργασίες σκυροδέτησης.



**Σχήμα 3.9** Το δοκίμιο οπλισμένου σκυροδέματος στην βάση στήριξης του.

### **3.8 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

Ο κλωβός πριν σκυροδετηθεί υπέστη κρουστικές καταπονήσεις σε διάφορα σημεία του, τόσο στο στύλο όσο και στη δοκό, είτε με την βοήθεια σφύρας, είτε πίπτοντος βάρους. Για κάθε κρουστική καταπόνηση, συλλέγονταν μέσω του συστήματος ταχείας λήψης και αποθηκεύτηκαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή οι μετρήσεις με την μορφή κυματομορφής, για κάθε ένα από τους 40 συγκολλημένους μετρητές παραμόρφωσης (η επεξεργασία αυτών των μετρήσεων δεν γίνεται στη παρούσα εργασία).

Επί του κλωβού οπλισμού τοποθετήθηκαν συνολικά 40 ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, και επί της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου τοποθετήθηκαν επίσης 8 ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, κατάλληλοι για σκυρόδεμα τύπου FLA-30-11-5L της TML. (από 1 διαμήκως της άνω-εφελκυόμενης και κάτω-θλιβόμενης περιοχής του προβόλου, από 1 διαμήκως της έξω-εφελκυόμενης και έσω-θλιβόμενης περιοχής του στύλου, από 1 διαμήκως της άνω και κάτω παρειάς του προβόλου περίπου 3cm από την άνω και κάτω ίνα αντίστοιχα και 2 υπό γωνία  $45^{\circ}$  επί του κόμβου). Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης συνδέθηκαν με το πολυκαναλικό μετρητικό σύστημα ταχείας λήψης, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων, (Data Acquisition System Model 6035 της PACIFIC INSTRUMENTS).

Η βάση του στύλου πακτώθηκε σε βάση από σκυρόδεμα διαστάσεων περίπου 100cm x 100cm x 20cm. Ο στύλος αγκυρώθηκε με την βάση, από τις πλευρές του που θα καταπονούνταν σε εφελκυσμό-θλίψη. Τέλος η βάση πακτώθηκε με βύσματα

επί του δαπέδου, ώστε να επιτύχουμε την ταλάντωση μόνο του προβόλου και όχι ολόκληρου του συστήματος.

Η μηχανή τύπου MTS καταπόνησε το δοκίμιο με θλιπτικά εναλλασσόμενα φορτία που επιβλήθηκαν στο άκρο της δοκού. Το δοκίμιο και η πειραματική διάταξη φαίνονται στο σχήμα 3.10. Στο αριστερό τμήμα της μεγάλης φωτογραφίας καθώς και στην μικρή, φαίνεται το έμβολο της μηχανής, που επιβάλλει τα θλιπτικά εναλλασσόμενα φορτία. Κάτω δεξιά φαίνεται η πακτωμένη στο δάπεδο βάση. Στο βάθος φαίνεται το μετρητικό σύστημα με τα καλώδια των μετρητών παραμόρφωσης.



**Σχήμα 3.10 Η πειραματική διάταξη.**

Το δοκίμιο προσαρμόστηκε στην μηχανή έτσι ώστε το φορτίο να επιβάλλεται στο άκρο του προβόλου και τα εναλλασσόμενα φορτία να είναι μόνιμα θλιπτικά, ώστε να

μην δημιουργηθούν εφελκυστικές τάσεις στην έσω γωνία του κόμβου όπου δεν υπήρχε αγκύρωση.

Στο δοκίμιο επιβλήθηκε δυναμική φόρτιση που αντιστοιχούσε σε ταλάντωση του προβόλου με συχνότητα 8Hz και αυξανόμενο εύρος ταλάντωσης από 1mm ελάχιστο σε 5.2mm μέγιστο εύρος ταλάντωσης. Καθώς τα φορτία ήταν μόνιμα θλιπτικά, το εύρος της ταλάντωσης αποτελεί ταυτόχρονα και την μέγιστη βύθιση του προβόλου στην θέση επιβολής του φορτίου. Με το μετρητικό σύστημα ταχείας λήψης και αποθήκευσης δεδομένων, καταγράφηκαν οι 48 κυματομορφές, που αντιστοιχούν στις 40 θέσεις επί του οπλισμού και 8 επί της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου, που είχαν τοποθετηθεί οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης.

Στην συνέχεια στο δοκίμιο επιβλήθηκε δυναμική φόρτιση που αντιστοιχούσε σε ταλάντωση του προβόλου με συχνότητα 4Hz και αυξανόμενο εύρος ταλάντωσης από 2mm ελάχιστο σε 6.5mm μέγιστο εύρος ταλάντωσης και καταγράφηκαν επίσης οι 48 κυματομορφές. Η ίδια διαδικασία επανελήφθη για ταλάντωση συχνότητας 2Hz και αυξανόμενο εύρος ταλάντωσης από 3mm ελάχιστο σε 9.8mm μέγιστο εύρος ταλάντωσης.

Η ταλάντωση του δοκιμίου συνεχίστηκε με φθίνουσες τιμές συχνότητας και αυξανόμενο εύρος ταλάντωσης, ώστε να επιτευχθεί αστοχία του δοκιμίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τιμές συχνότητας μικρότερες του 1Hz παρατηρήθηκε μικρή κάμψη του όλου φορέα, (και της κολώνας). Προκειμένου να εντοπισθεί η συνεισφορά της κάμψης αυτής στην βύθιση του προβόλου, τοποθετήθηκαν βελόμετρα επί της κολώνας και του προβόλου. Το αποτέλεσμα ήταν ότι για τις τιμές αυτές, η μέγιστη βύθιση δεν αντιστοιχεί ακριβώς στο εύρος ταλάντωσης, αλλά στο 80% περίπου του εύρους ταλάντωσης.

Στην ταλάντωση με συχνότητα 0.2Hz και βύθιση 3.5cm παρουσιάστηκε τριχωειδής ρηγματώση στον κόμβο. Στην ταλάντωση με συχνότητα 0.1Hz και ίδια βύθιση η ρωγή αναπτύχθηκε, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11

Οι μετρήσεις που θα ακολουθήσουν αφορούν μικρές τιμές από εύρους ταλάντωσης και έτσι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι μακράν της ρηγμάτωσης.

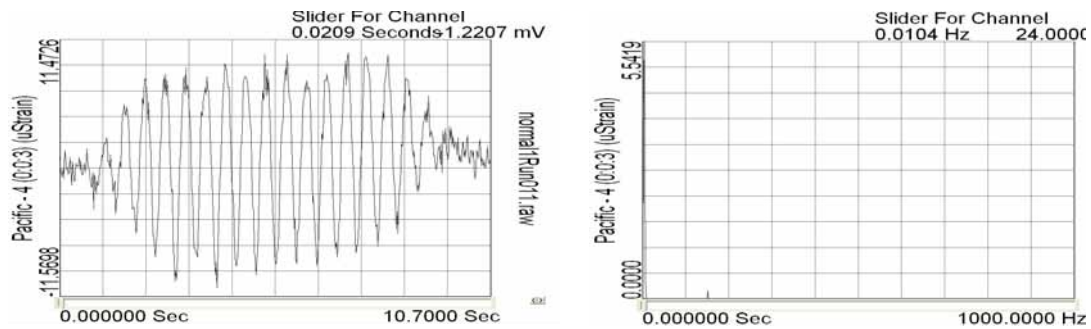
## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

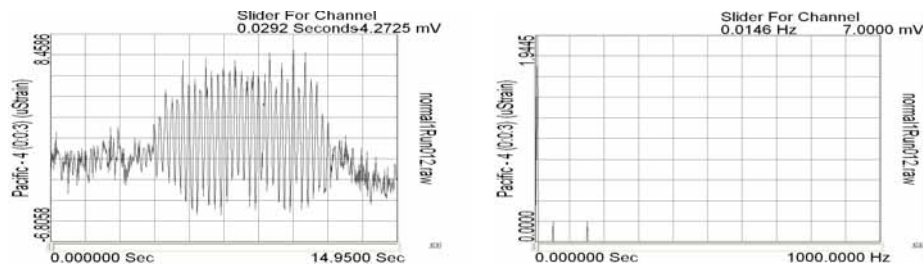
#### ΕΞΑΓΩΓΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Με τη βοήθεια του λογισμικού PI660-6000, προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα, όπου στην αριστερή στήλη φαίνονται τα διαγράμματα των κυματομορφών, ενώ στην δεξιά στήλη φαίνονται τα αντίστοιχα φάσματα (διαγράμματα συχνοτήτων).

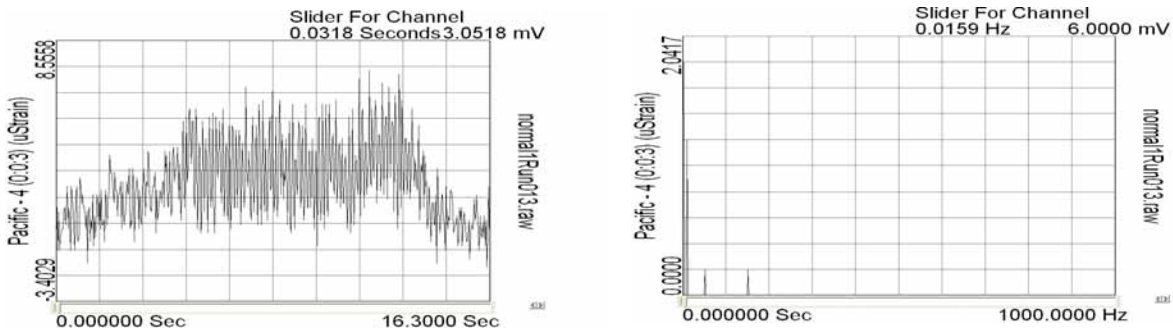
#### ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ



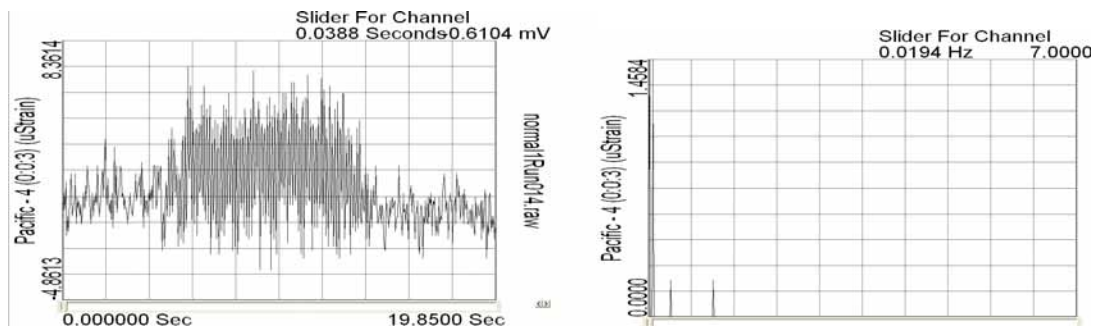
Σχήμα 4.1 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.3 και συχνότητα 2 Hz.



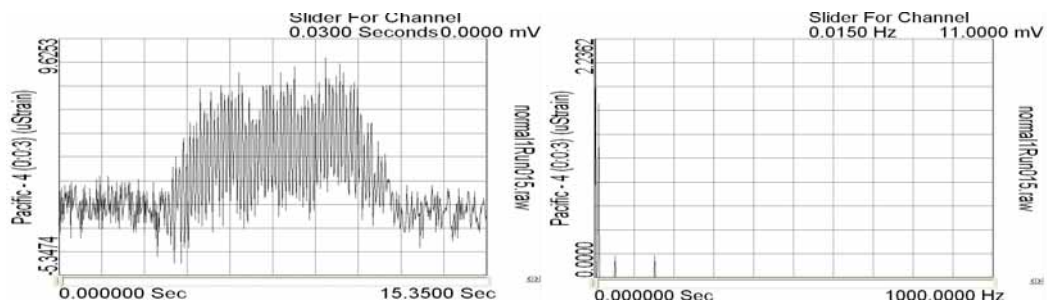
Σχήμα 4.2 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.3 και συχνότητα 4 Hz.



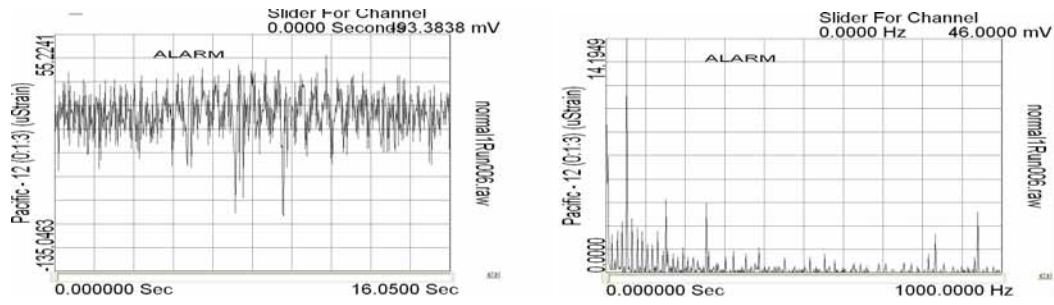
Σχήμα 4.3 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.3 και συχνότητα 8 Hz.



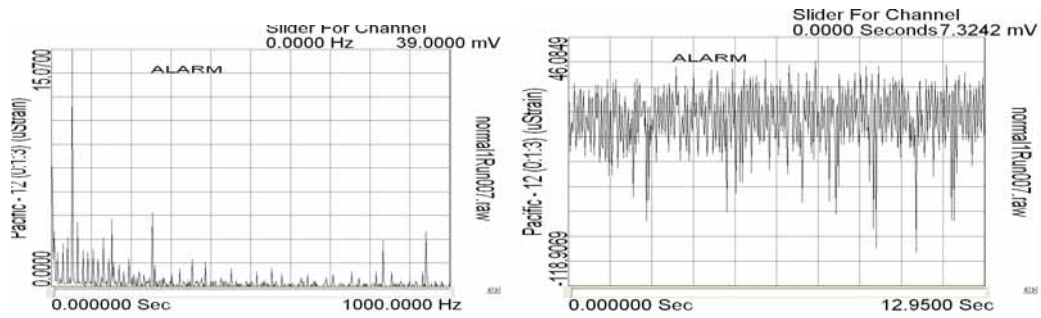
Σχήμα 4.4 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.5 και συχνότητα 8 Hz.



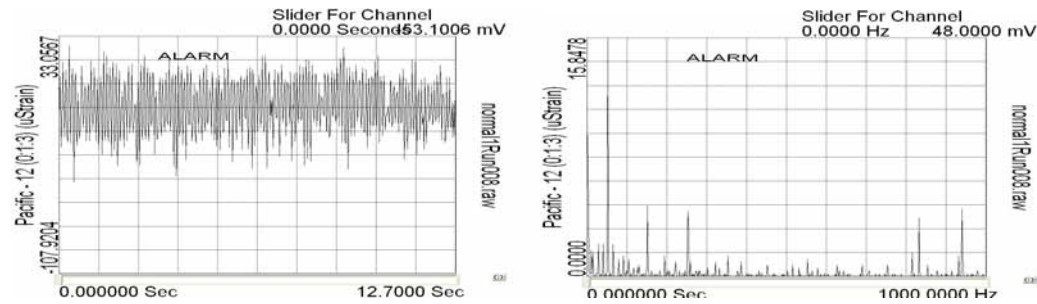
Σχήμα 4.5 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.6 και συχνότητα 8 Hz.



Σχήμα 4.6 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.3 και συχνότητα 2 Hz.

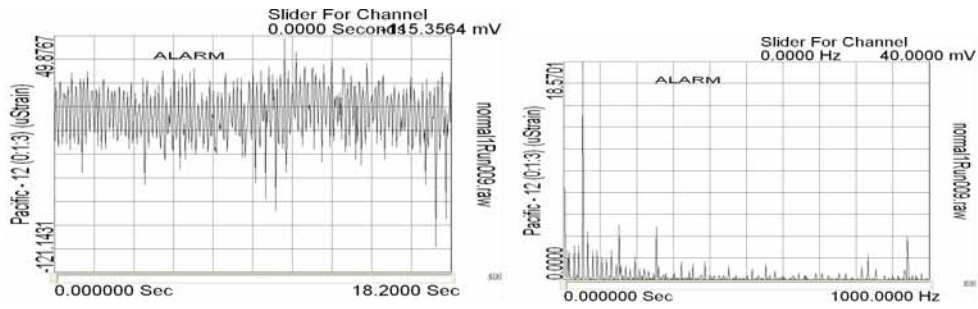


Σχήμα 4.7 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.3 και συχνότητα 4 Hz.

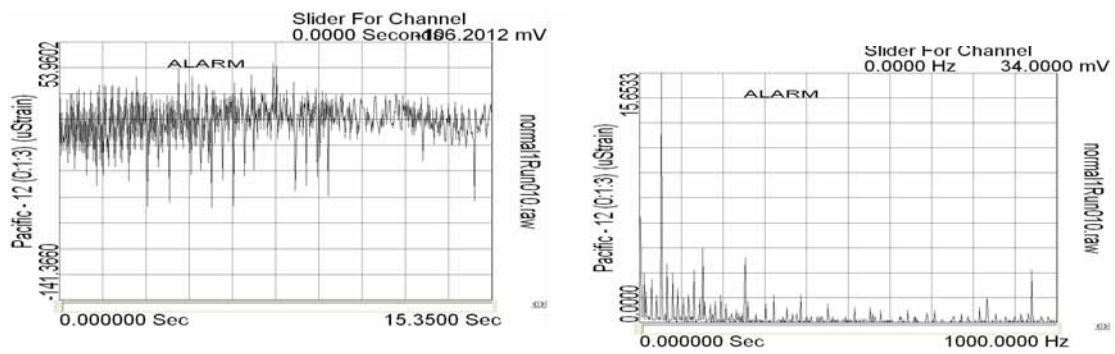


Σχήμα 4.8 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.3 και συχνότητα 8

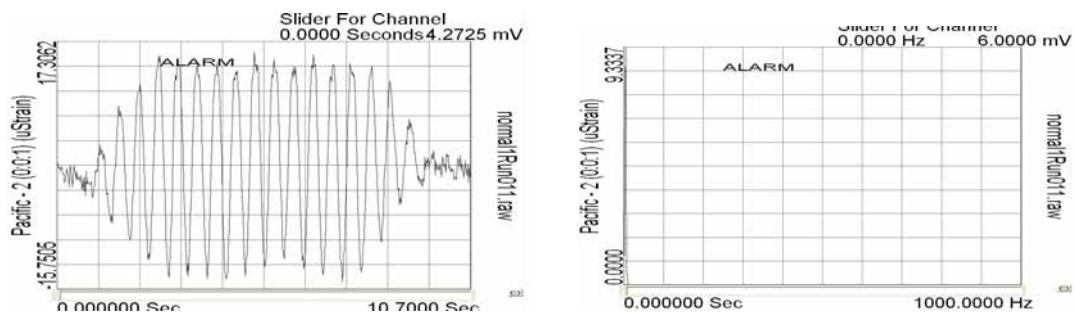




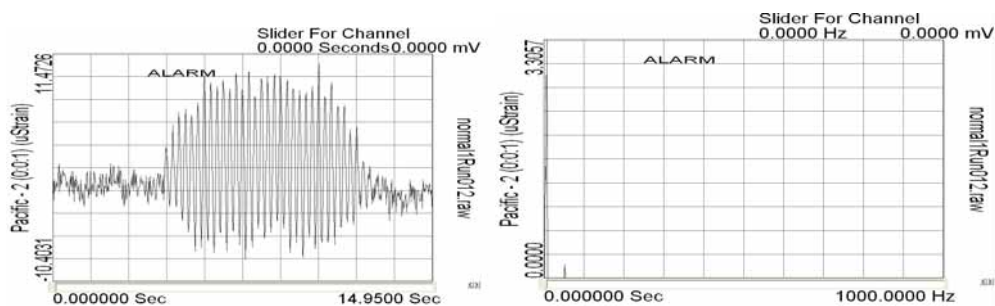
Σχήμα 4.9 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.5 και συχνότητα 8.



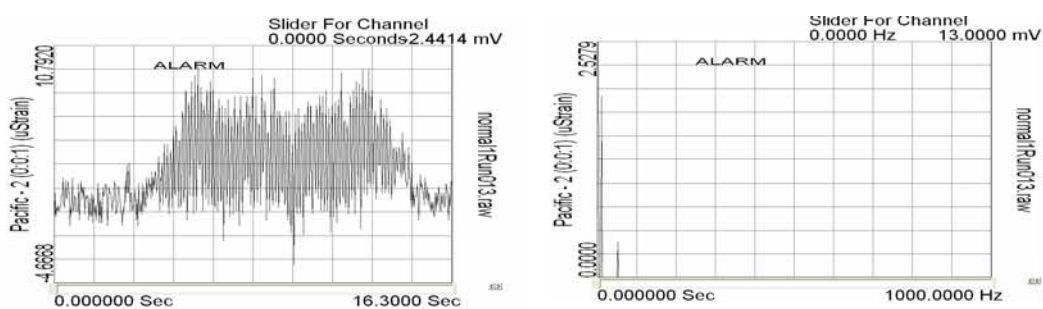
Σχήμα 4.10 Μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος συχνότητας 0.6 και συχνότητα 8.



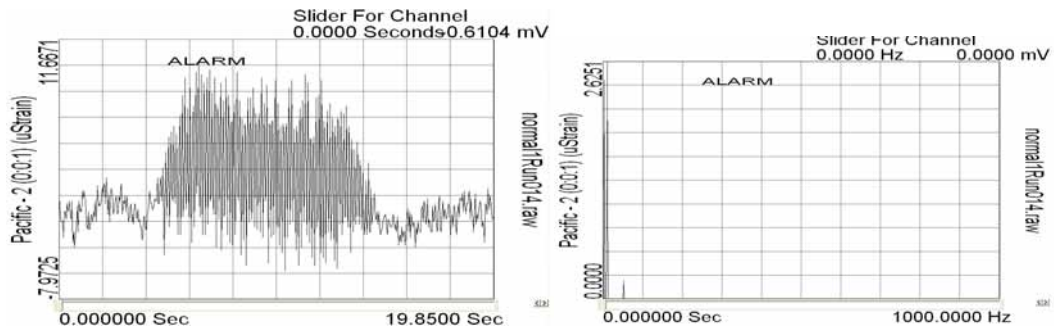
Σχήμα 4.11 Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 2Hz.



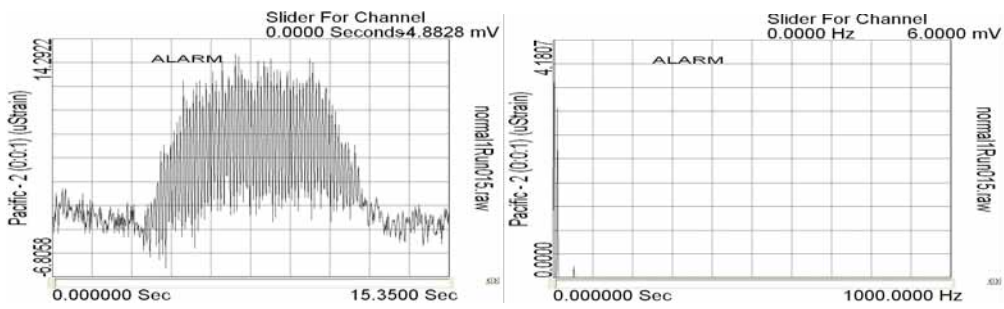
Σχήμα 4.12 Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 4 Hz.



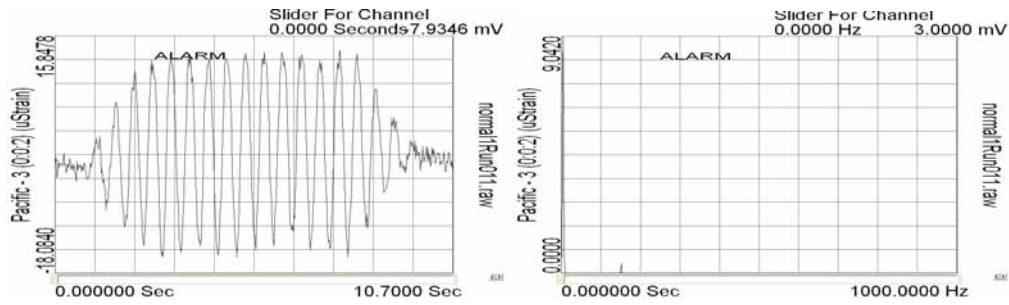
Σχήμα 4.13 Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 8Hz.



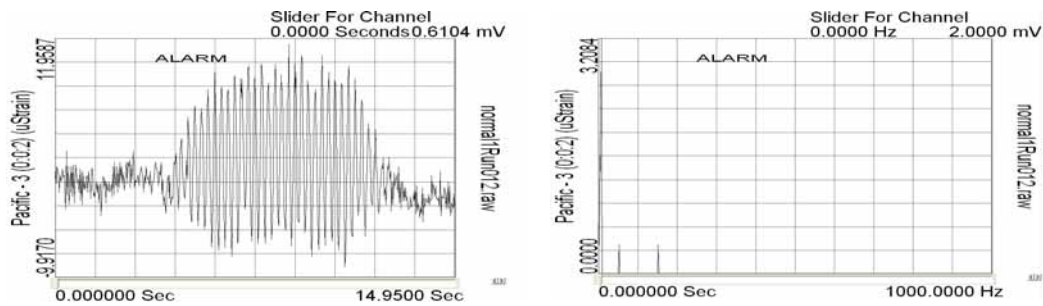
Σχήμα 4.14 Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.5 και συχνότητα 8Hz.



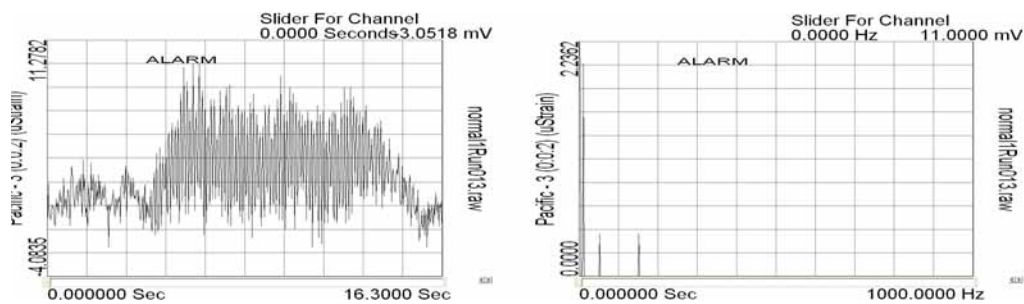
Σχήμα 4.15 Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.6 και συχνότητα 8Hz.



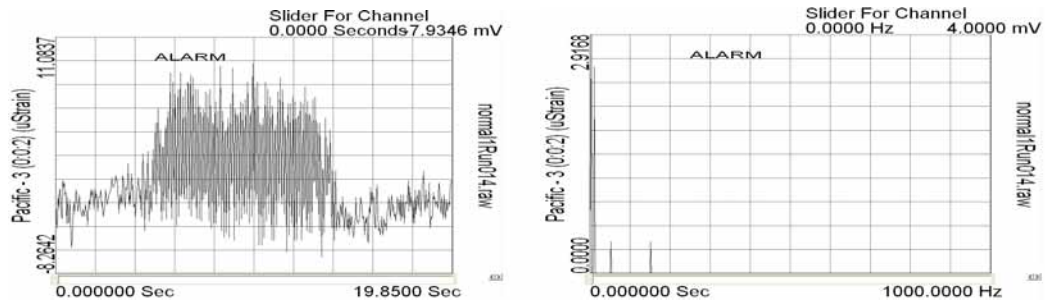
Σχήμα 4.16 Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 2Hz.



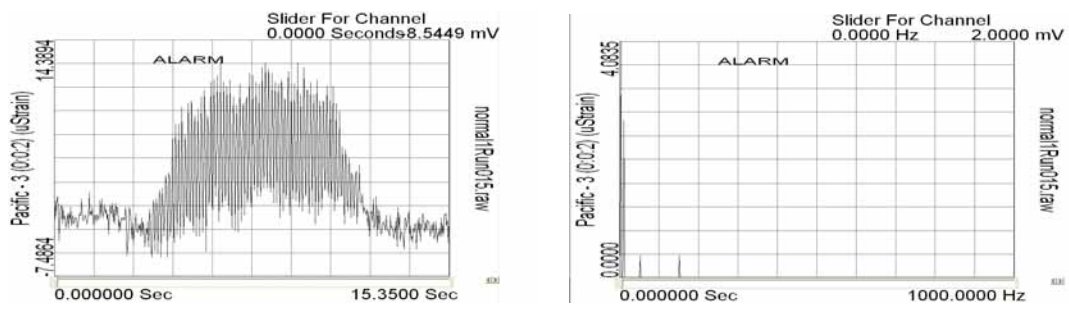
Σχήμα 4.17 Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 4Hz.



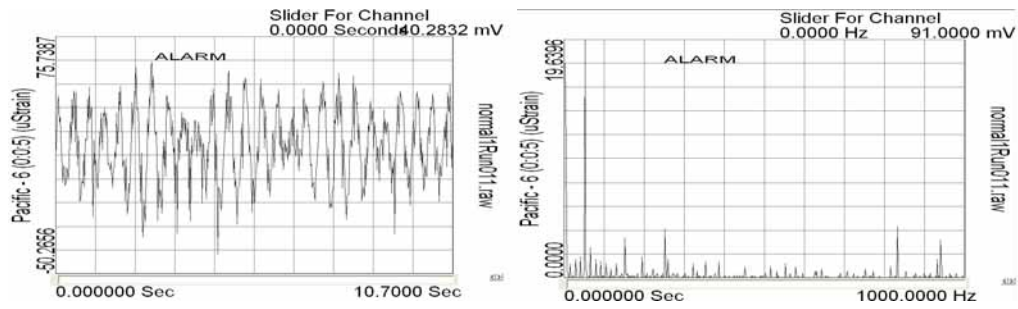
Σχήμα 4.18 Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 8Hz.



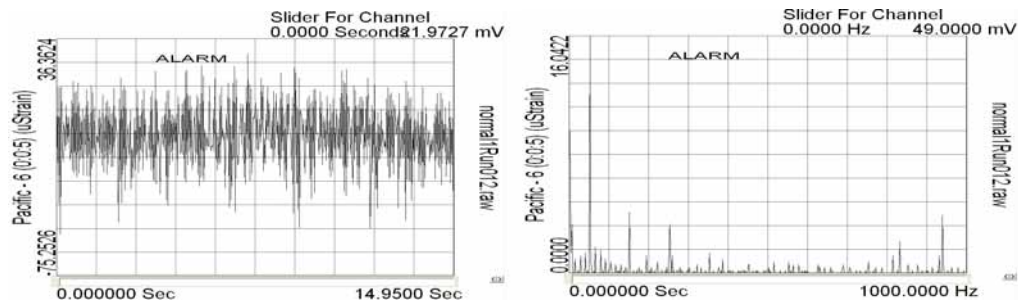
**Σχήμα 4.19** Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.5 και συχνότητα 8Hz.



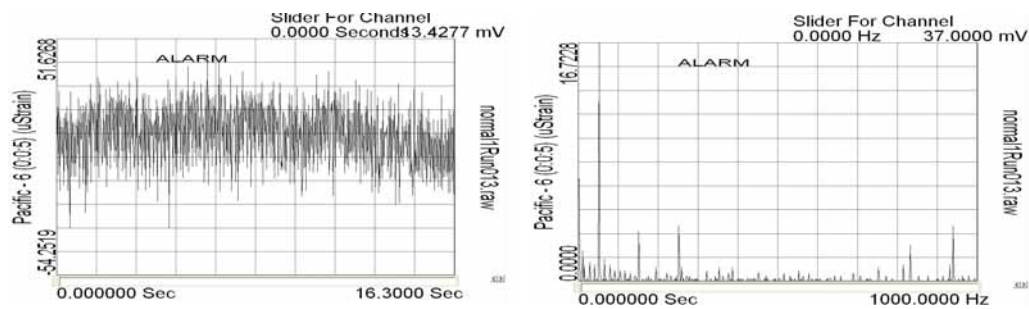
**Σχήμα 4.20** Μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.6 και συχνότητα 8Hz.



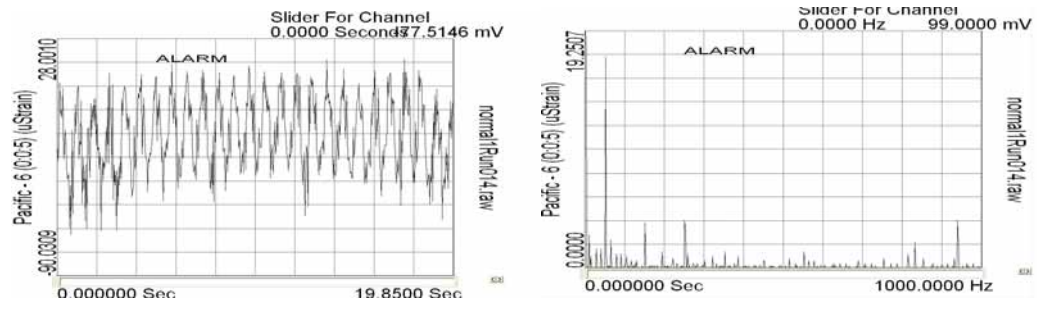
Σχήμα 4.21 Μεταξύ 7<sup>00</sup> και 8<sup>00</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 2Hz.



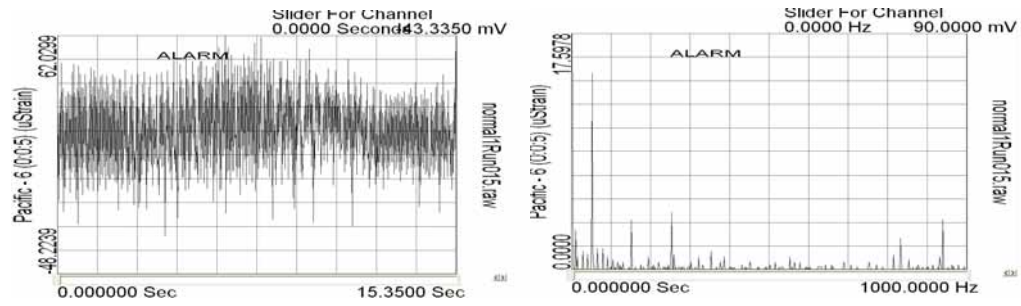
Σχήμα 4.22 Μεταξύ 7<sup>00</sup> και 8<sup>00</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 4Hz.



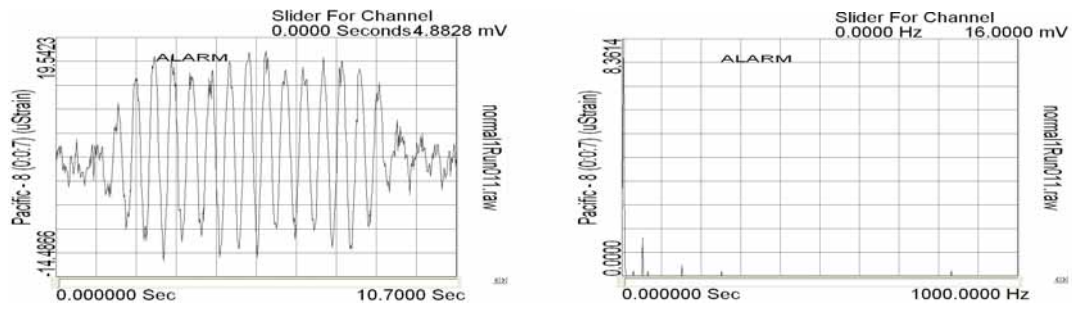
Σχήμα 4.23 Μεταξύ 7<sup>00</sup> και 8<sup>00</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 8Hz.



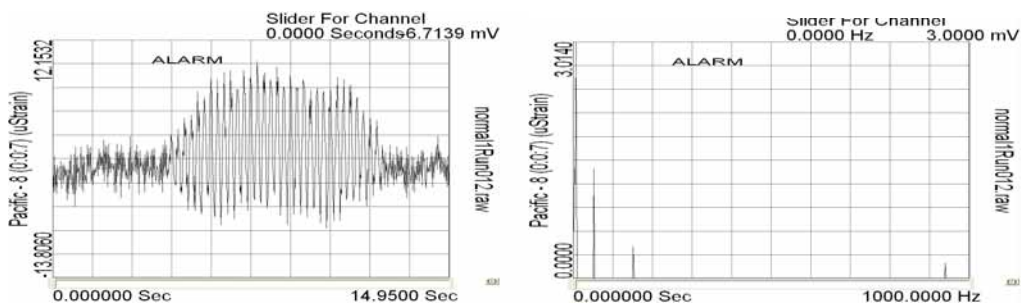
Σχήμα 4.24 Μεταξύ 7<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.5 και συχνότητα 8Hz.



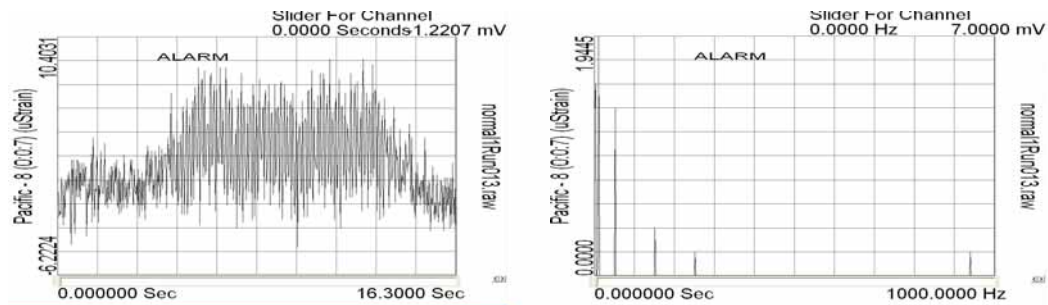
Σχήμα 4.25 Μεταξύ 7<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.6 και συχνότητα 8Hz.



Σχήμα 4.26 Μεταξύ 7<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 2Hz.

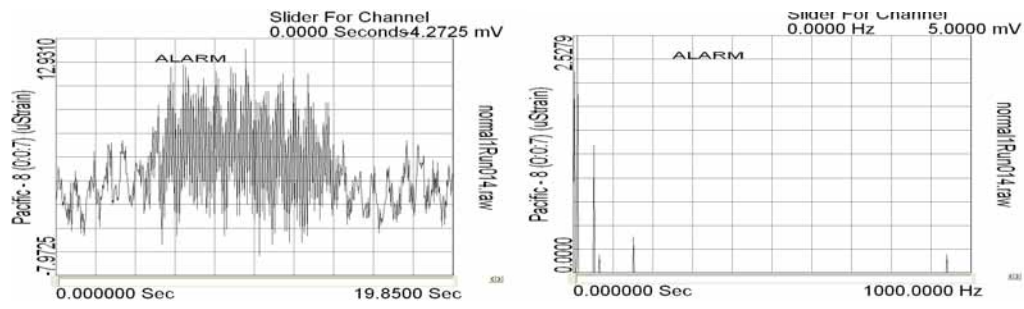


Σχήμα 4.27 Μεταξύ 7<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 4Hz.

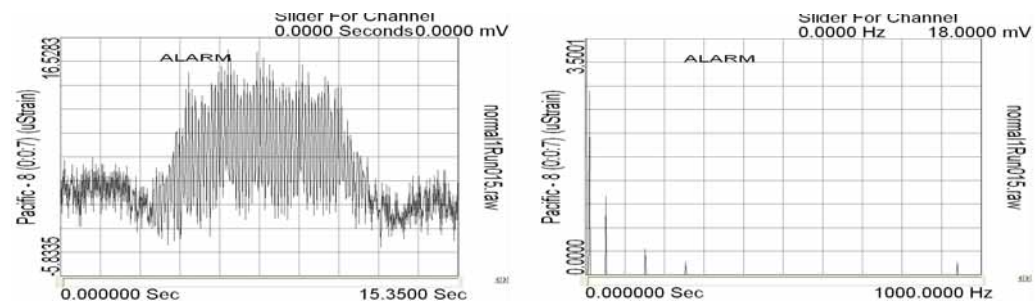


Σχήμα 4.28 Μεταξύ 7<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 8Hz.





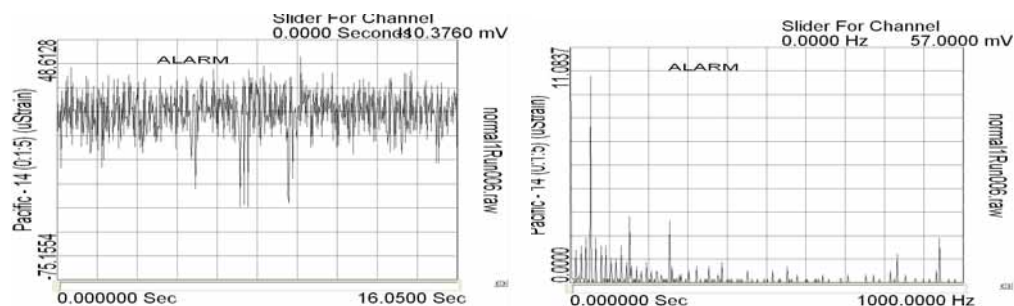
Σχήμα 4.29 Μεταξύ 7<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.5 και συχνότητα 8Hz.



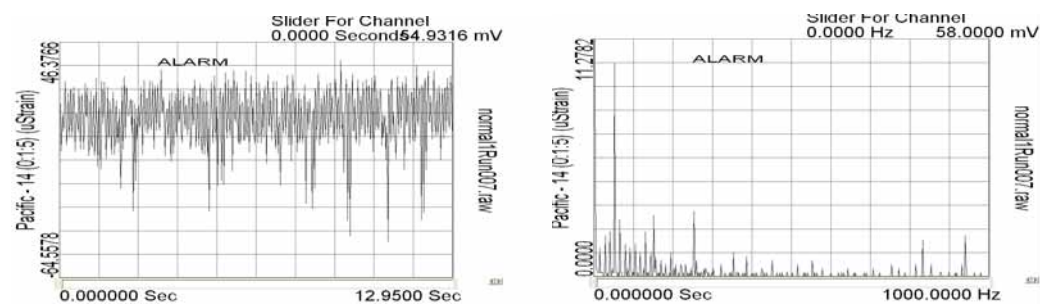
Σχήμα 4.30 Μεταξύ 7<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.6 και συχνότητα 8Hz.

## ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ (ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ)

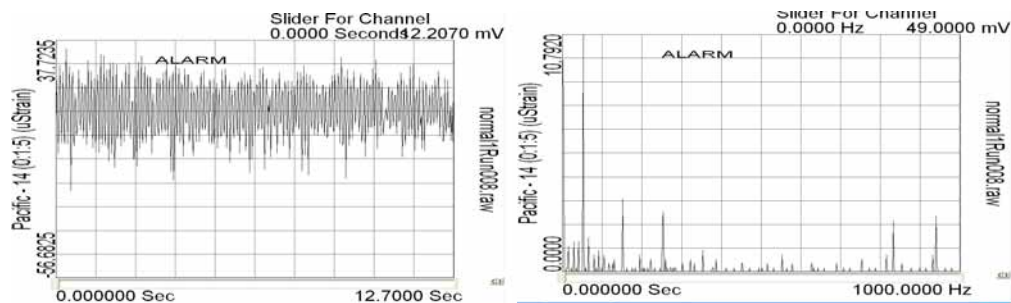
### ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ



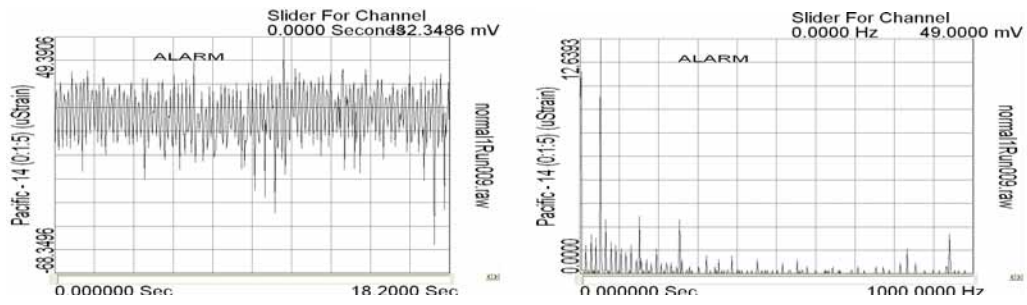
Σχήμα 4.31  $1^{ος}$  συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 2Hz.



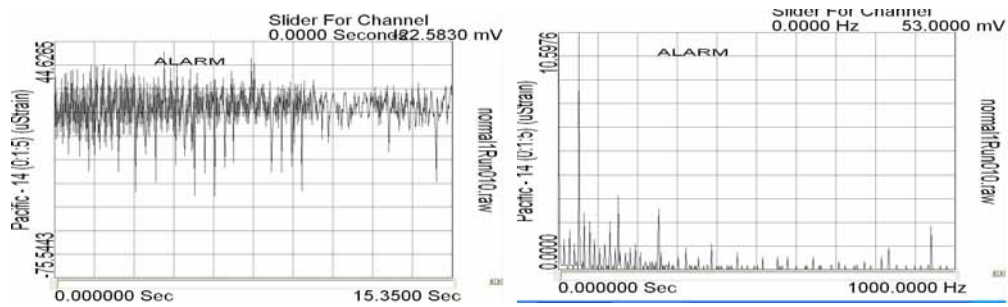
Σχήμα 4.32  $1^{ος}$  συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 4Hz.



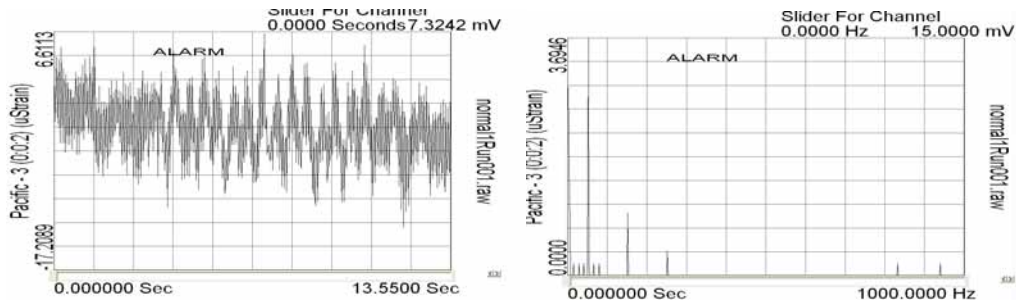
Σχήμα 4.33  $1^{ος}$  συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 8Hz.



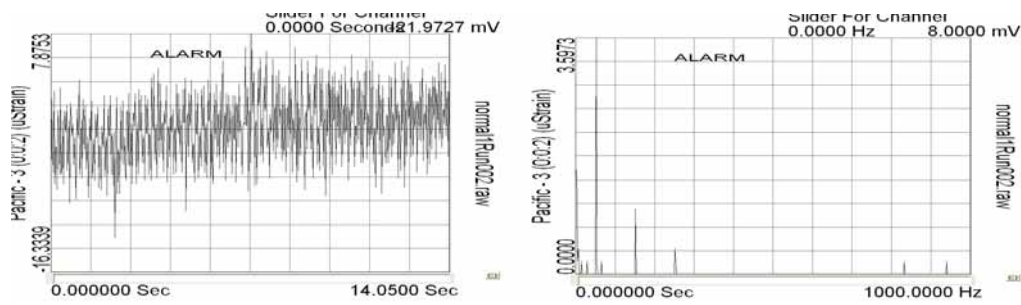
Σχήμα 4.34  $1^{ος}$  συνδετήρας με εύρος 0.5 και συχνότητα 8Hz.



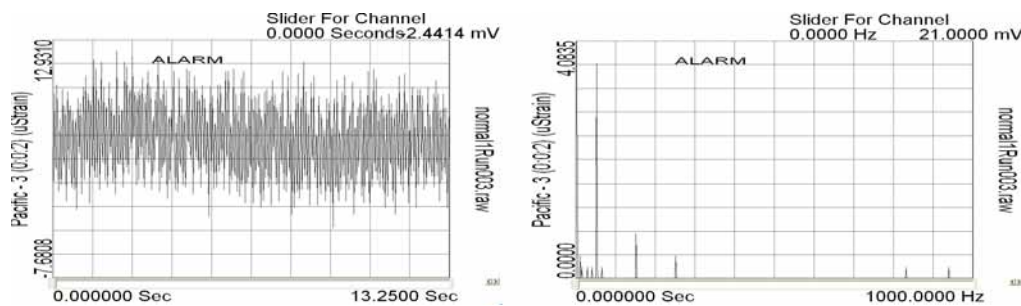
Σχήμα 4.35  $1^{ος}$  συνδετήρας με εύρος 0.6 και συχνότητα 8Hz.



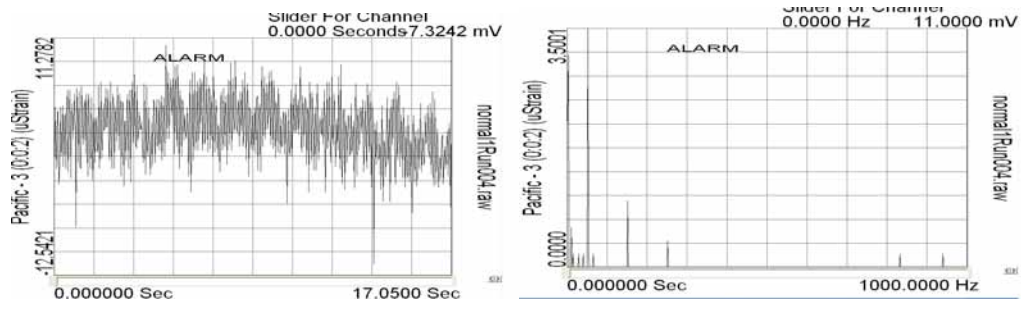
Σχήμα 4.36  $3^{05}$  συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 2Hz.



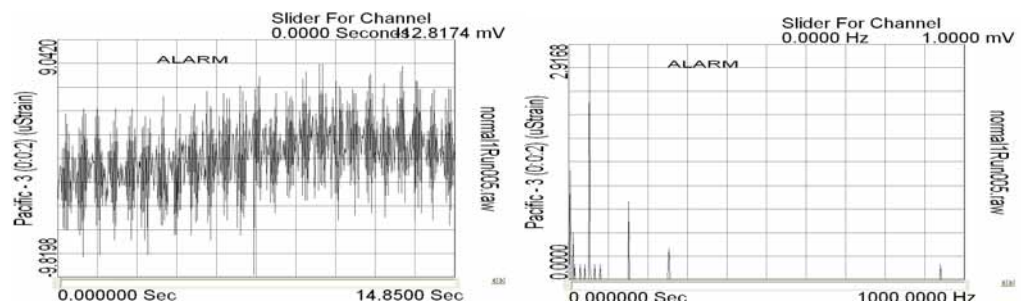
Σχήμα 4.367  $3^{05}$  συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 4Hz.



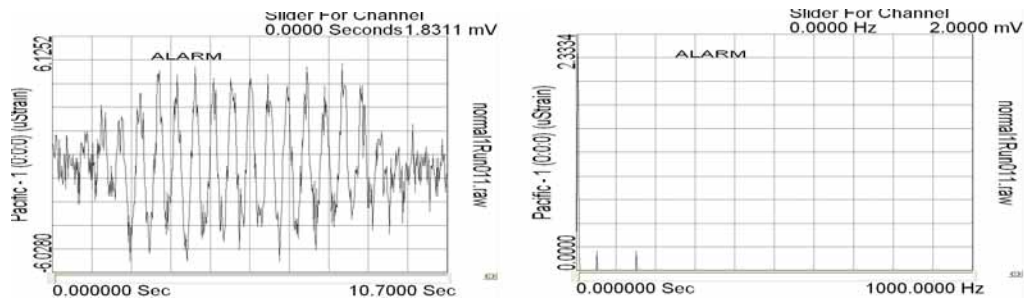
Σχήμα 4.38  $3^{05}$  συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 8 Hz.



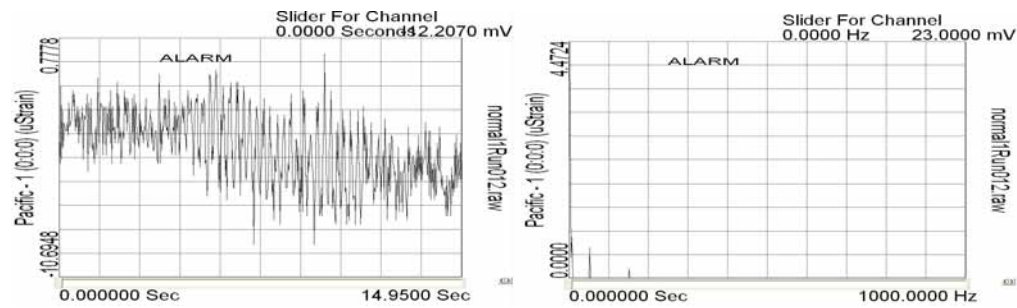
**Σχήμα 4.39** 3<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.5 και συχνότητα 8 Hz.



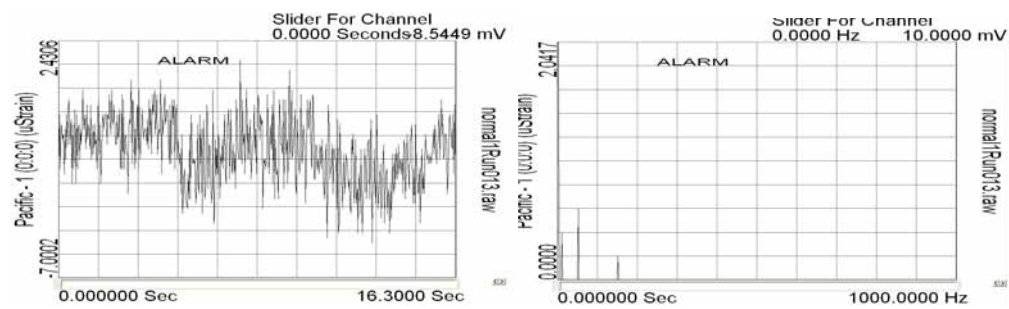
**Σχήμα 4.40** 3<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.6 και συχνότητα 8 Hz.



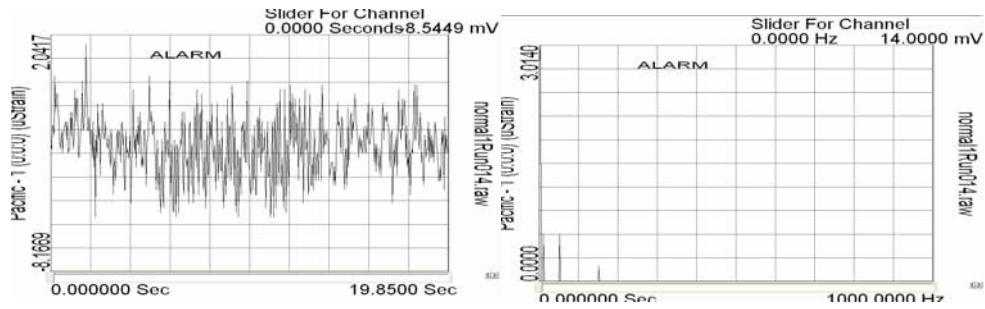
Σχήμα 4.41 3<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 2 Hz.



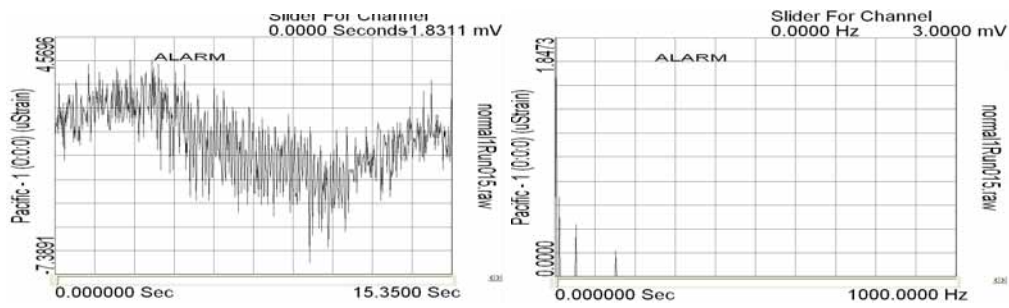
Σχήμα 4.42 3<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 4 Hz.



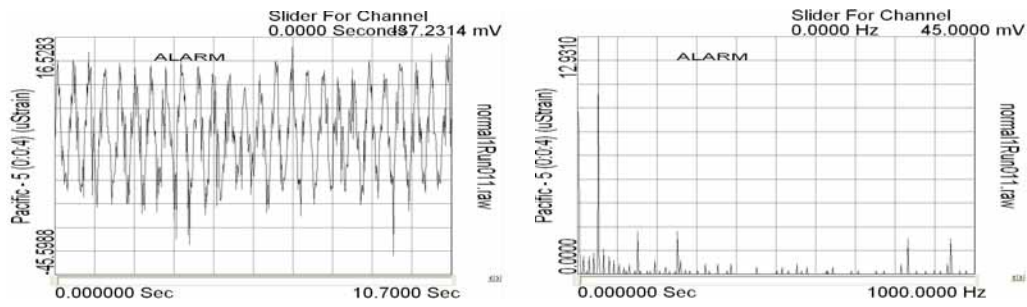
Σχήμα 4.43 3<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 8 Hz.



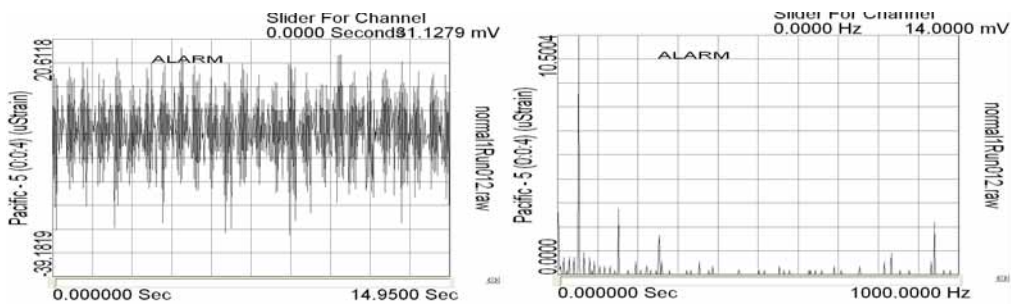
Σχήμα 4.44 3<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.5 και συχνότητα 8 Hz.



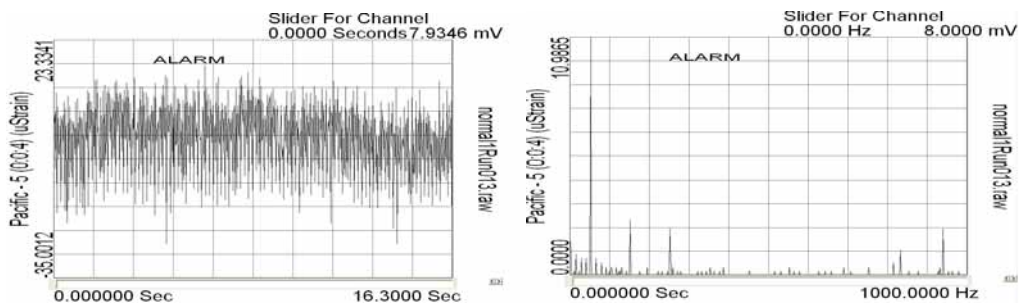
Σχήμα 4.45 3<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.6 και συχνότητα 8 Hz.



Σχήμα 4.46 5<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 2 Hz.

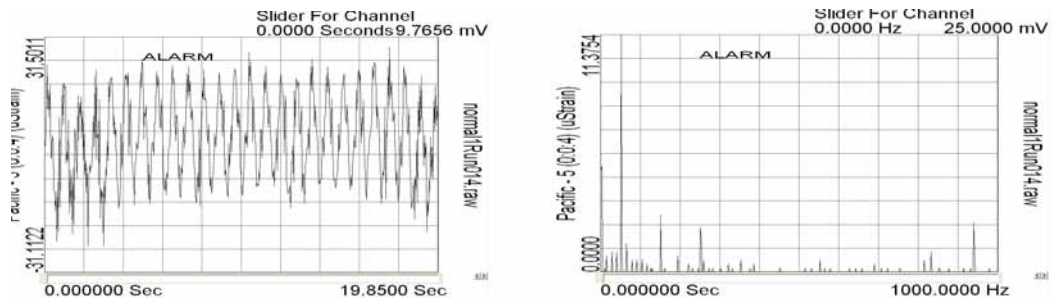


Σχήμα 4.47 5<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 4 Hz.

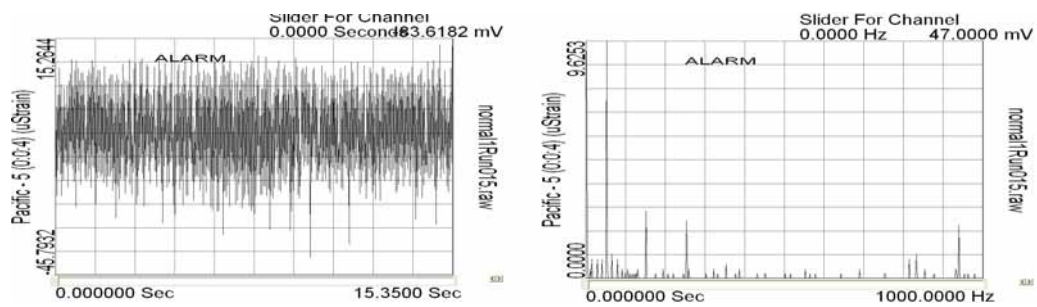


Σχήμα 4.48 5<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 8 Hz.

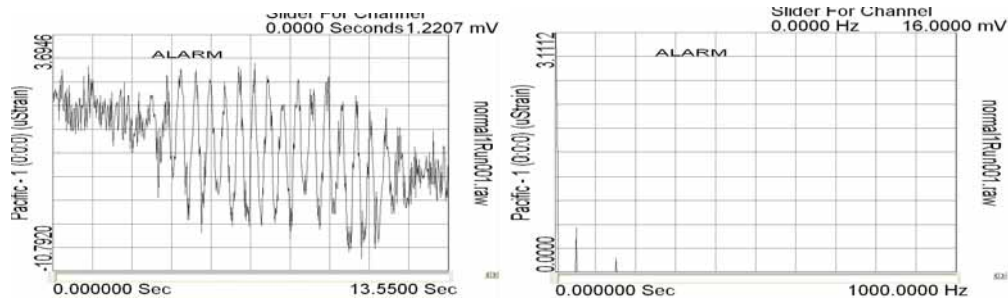




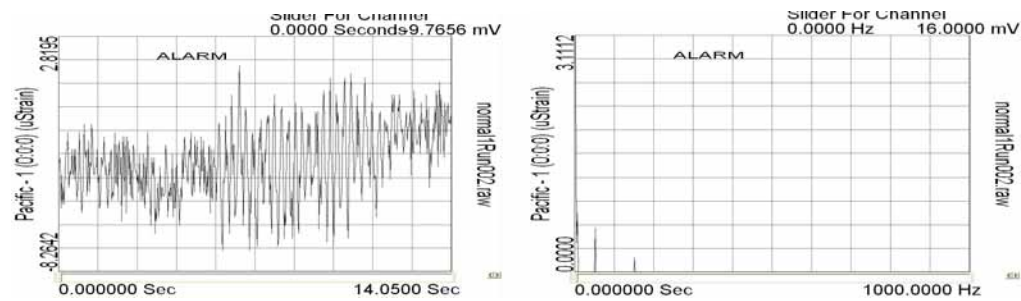
**Σχήμα 4.49**  $5^{0S}$  συνδετήρας με εύρος 0.5 και συχνότητα 8 Hz.



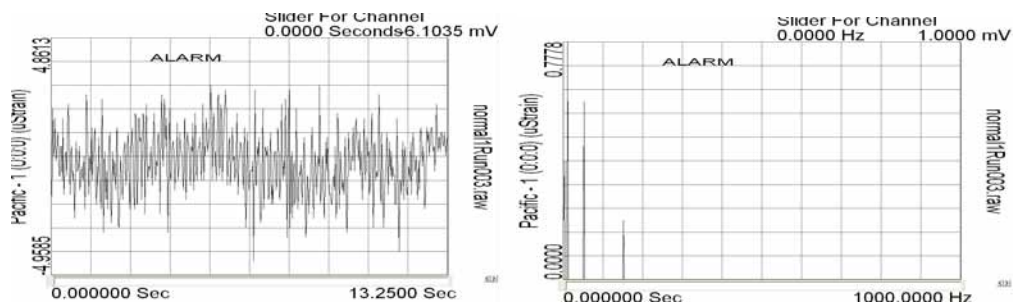
**Σχήμα 4.50**  $5^{0S}$  συνδετήρας με εύρος 0.6 και συχνότητα 8 Hz.



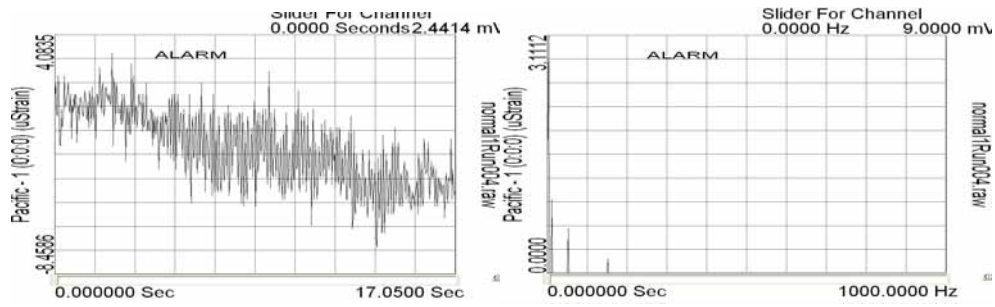
Σχήμα 4.51 5<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 2 Hz.



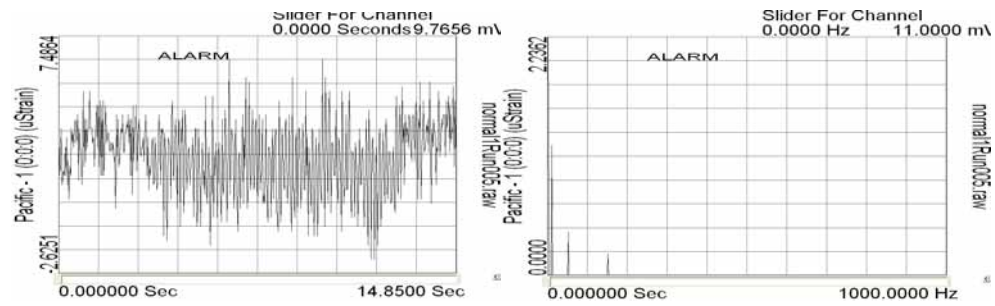
Σχήμα 4.52 5<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 4 Hz.



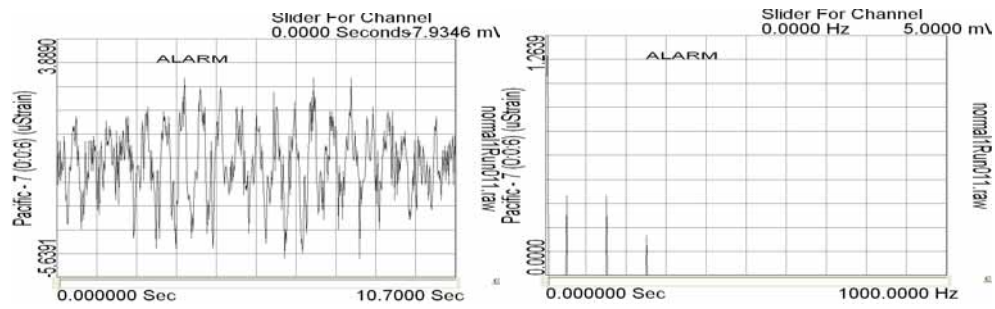
Σχήμα 4.53 5<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 8 Hz.



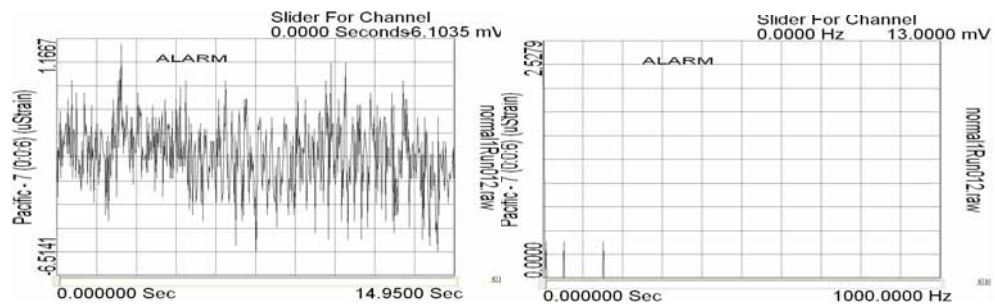
**Σχήμα 4.54** 5<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.5 και συχνότητα 8 Hz.



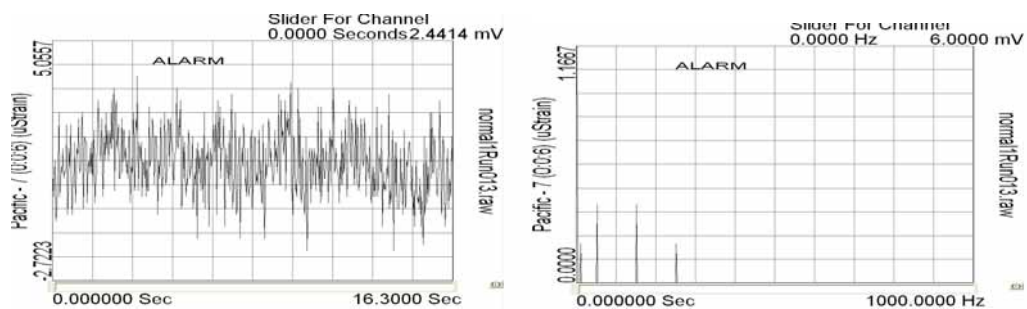
**Σχήμα 4.55** 5<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.6 και συχνότητα 8 Hz.



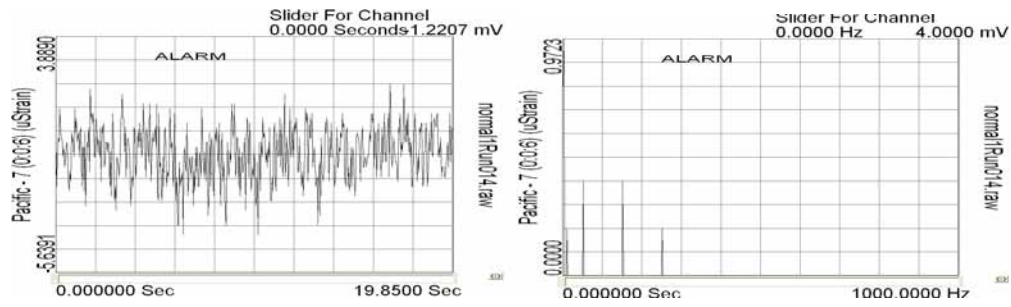
Σχήμα 4.56 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 2 Hz.



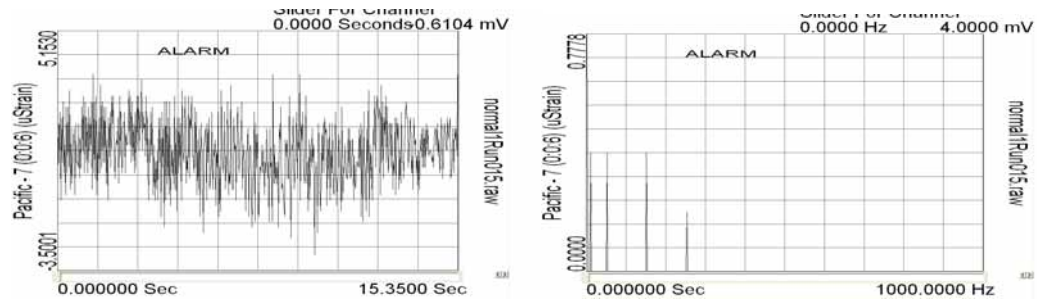
Σχήμα 4.57 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 4 Hz.



Σχήμα 4.58 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 8 Hz.



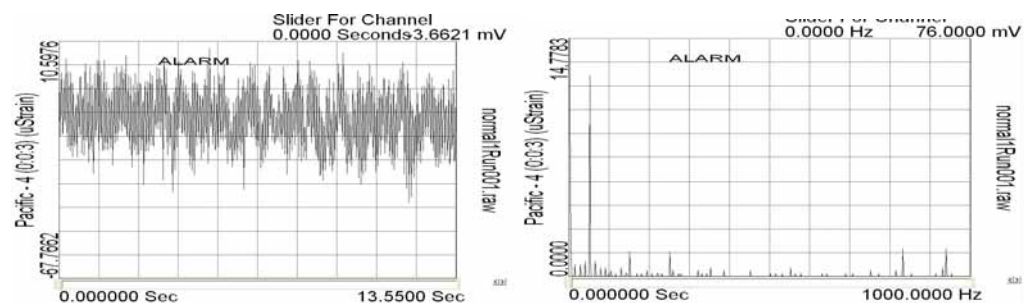
Σχήμα 4.59 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.5 και συχνότητα 8 Hz.



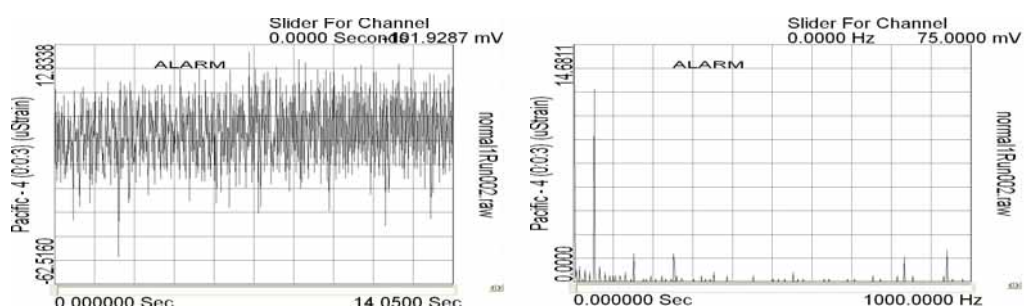
Σχήμα 4.60 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.6 και συχνότητα 8 Hz.

## ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ (ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ)

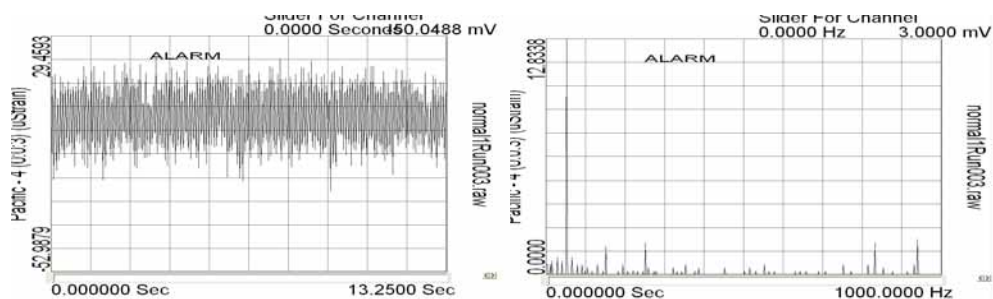
### ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ



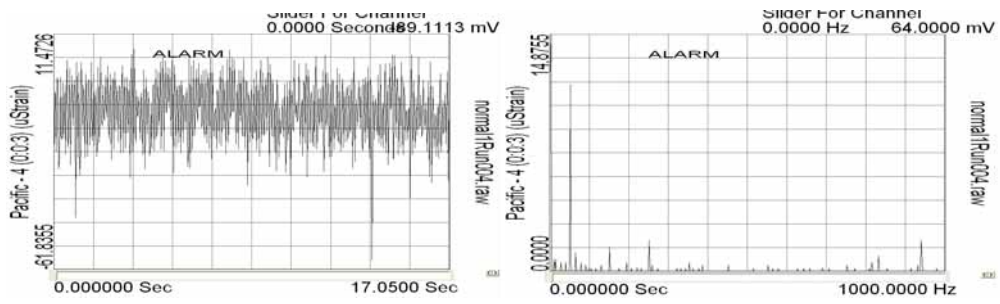
Σχήμα 4.61 1<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 2 Hz.



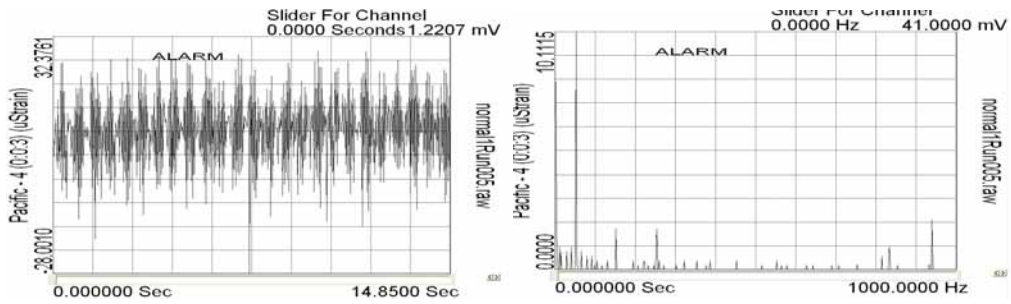
Σχήμα 4.62 1<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 4 Hz.



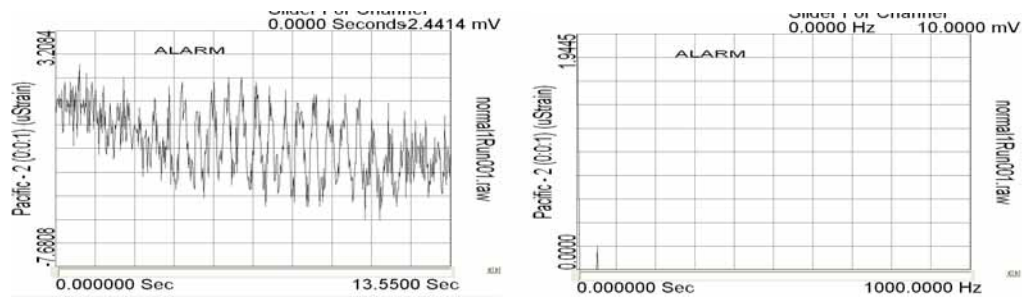
Σχήμα 4.63 1<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 8 Hz.



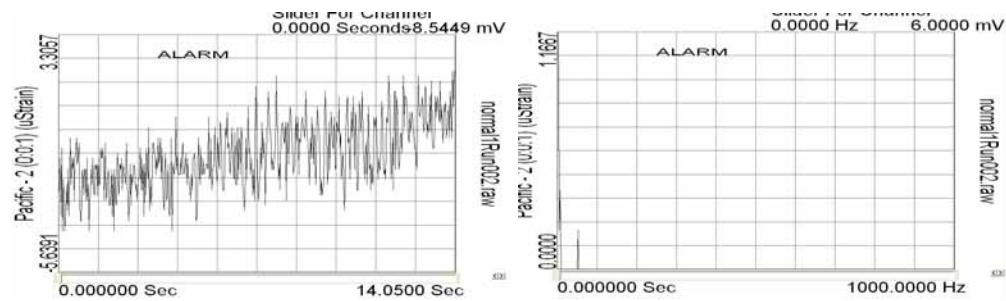
**Σχήμα 4.64**  $1^{ος}$  συνδετήρας με εύρος 0.5 και συχνότητα 8 Hz.



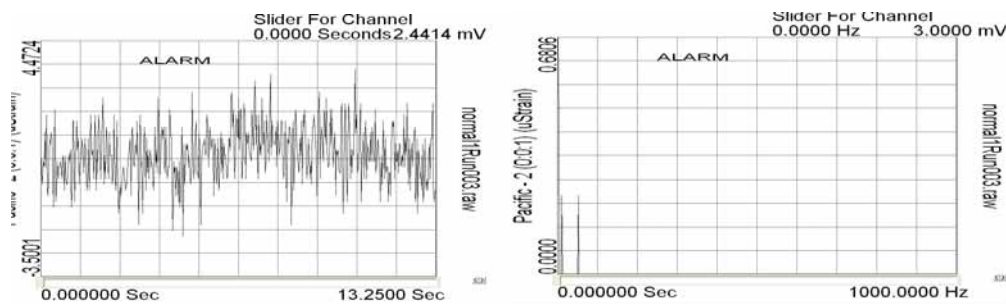
**Σχήμα 4.65**  $1^{ος}$  συνδετήρας με εύρος 0.6 και συχνότητα 8 Hz.



Σχήμα 4.66 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 2 Hz.

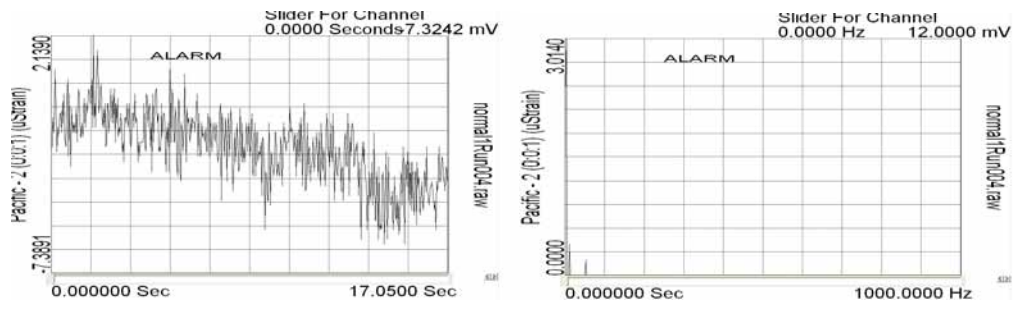


Σχήμα 4.67 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 4 Hz.

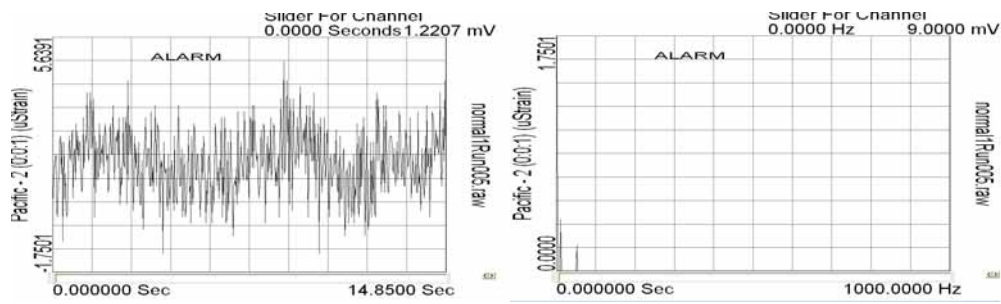


Σχήμα 4.68 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.3 και συχνότητα 8 Hz.



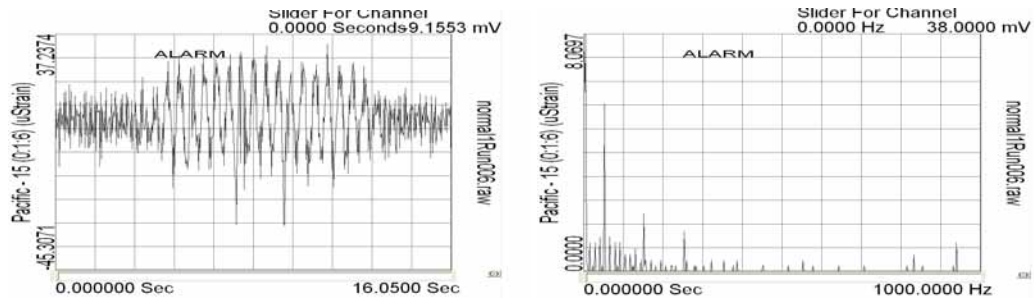


Σχήμα 4.69 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.5 και συχνότητα 8 Hz.

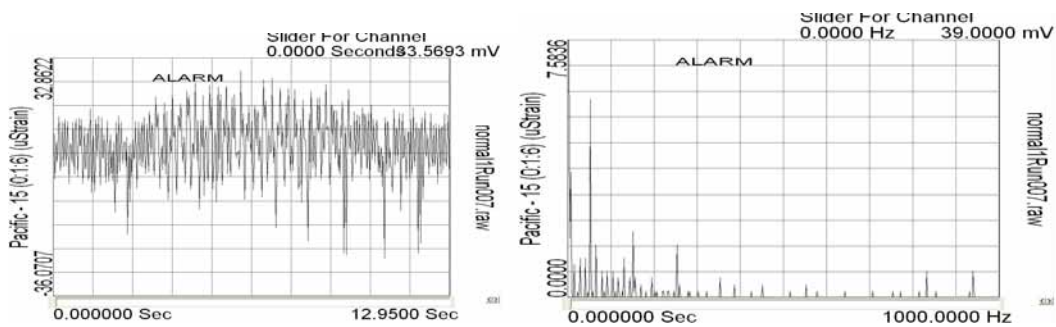


Σχήμα 4.70 7<sup>ος</sup> συνδετήρας με εύρος 0.6 και συχνότητα 8 Hz.

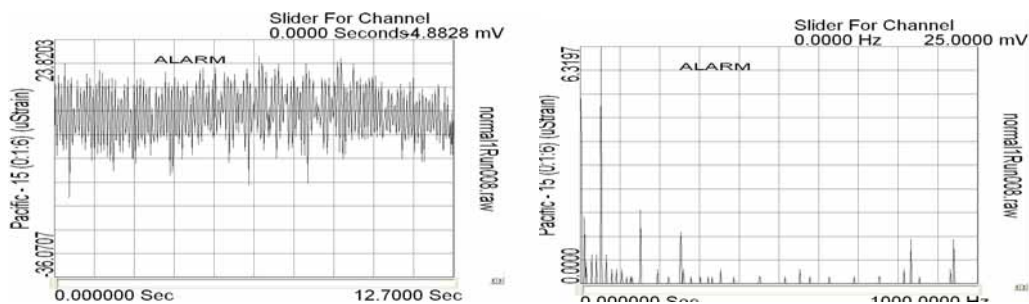
## ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ



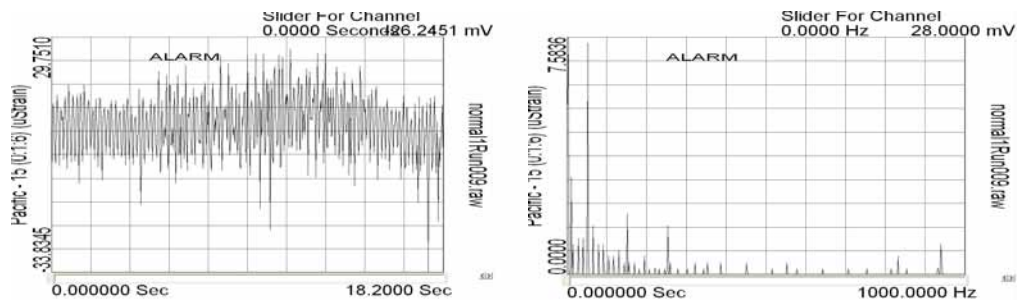
Σχήμα 4.71 Μεταξύ 4<sup>ου</sup> και 5<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 2 Hz.



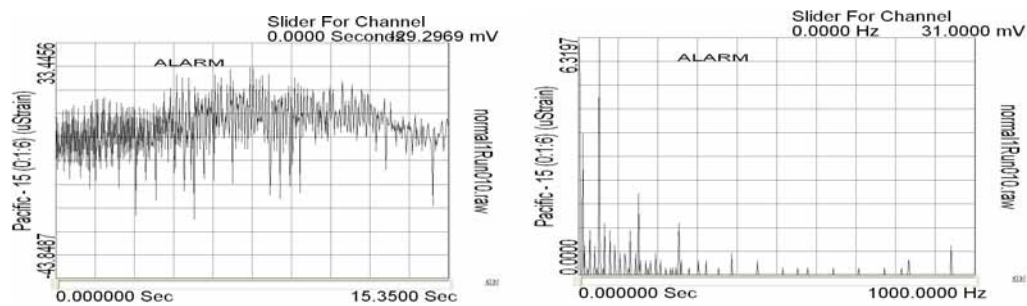
Σχήμα 4.72 Μεταξύ 4<sup>ου</sup> και 5<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 4 Hz.



Σχήμα 4.73 Μεταξύ 4<sup>ου</sup> και 5<sup>ου</sup> συνδετήρα με εύρος 0.3 και συχνότητα 8 Hz.



**Σχήμα 4.74** Μεταξύ 4<sup>οο</sup> και 5<sup>οο</sup> συνδετήρα με εύρος 0.5 και συχνότητα 8 Hz.



**Σχήμα 4.75** Μεταξύ 4<sup>οο</sup> και 5<sup>οο</sup> συνδετήρα με εύρος 0.6 και συχνότητα 8 Hz.

## ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από τα διαγράμματα του φάσματος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες, σύμφωνα με το εύρος ταλάντωσης της και τη συχνότητα της μηχανής επιβολής φορτίου.

Τα αποτελέσματα που αναγράφονται στην 4<sup>η</sup> στήλη (συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης),αφορούν την συχνότητα ταλάντωσης του υποστυλώματος, στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή αναγράφεται στη 5<sup>η</sup> στήλη του πίνακα (σχετική κλίμακα παραμόρφωσης σε mn).

Στην στήλη με τις παρατηρήσεις αναγράφεται η θέση στην οποία βρίσκεται ο μετρητής παραμόρφωσης. Όπου για λόγους εξοικονόμησης χώρου χρησιμοποιήσαμε τον παρακάτω συμβολισμό:

**εσ-** όπου σημαίνει **εσωτερικά**

**θλ-** όπου σημαίνει **θλιβόμενη περιοχή**

**ακρ-** όπου σημαίνει **ακραία θέση**

**μεσ-** όπου σημαίνει **μεσαία θέση**

Έτσι για παράδειγμα όταν στον πίνακα γράφουμε εσ-θλ-ακρ- εννοούμε εσωτερική θλιβόμενη άκρη.

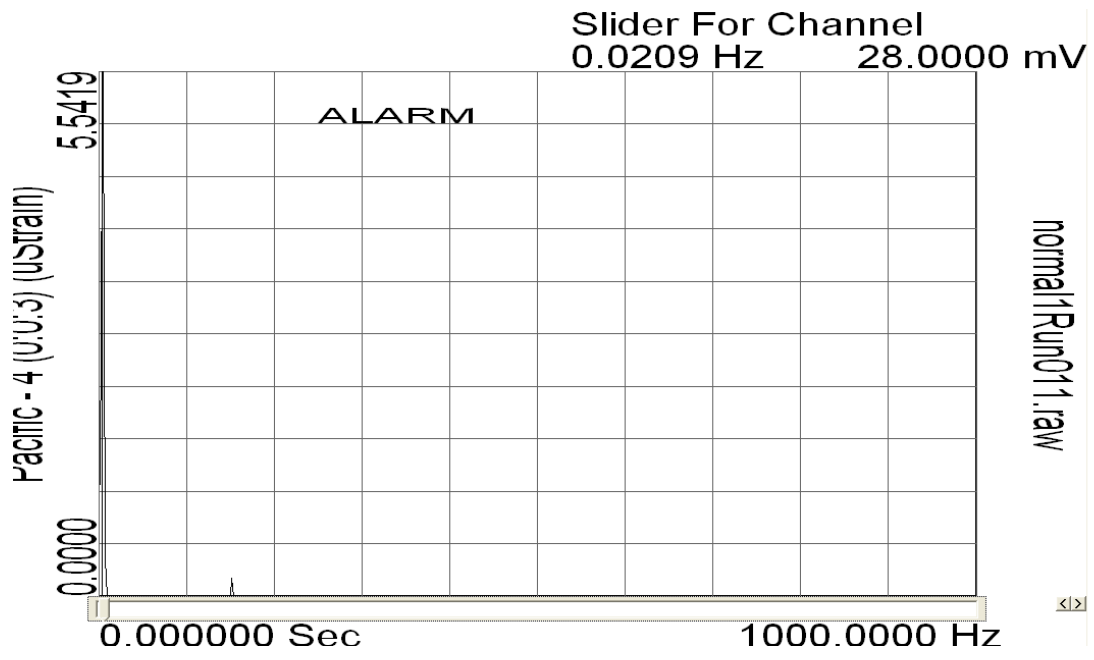
Επίσης αξιοσημείωτο είναι να αναφέρουμε πως ο οπλισμός συγκόλλησης δεν έχει επίπτωση στην αντοχή, δηλαδή δεν παραλαμβάνει τάσεις και φορτία, χρησιμοποιείται όμως για την συγκόλληση των συνδετήρων, έτσι ώστε αυτοί να παραμένουν στη θέση τους κατά την σκυροδέτηση.

Η διαδικασία με την οποία προέκυψαν τα αναγραφόμενα αποτελέσματα είναι η παρακάτω:

Ανοίγοντας το λογισμικό PI660-6000, επιλέγουμε το διάγραμμα του φάσματος του αισθητήρα παραμόρφωσης που μας ενδιαφέρει, και μετακινώντας το "κέρσορα", πάνω στη μέγιστη τιμή του διαγράμματος, αναγράφεται απευθείας η συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης, σε Hz, και στη συνέχεια η σχετική κλίμακα παραμόρφωσης σε mn.

Ως παράδειγμα φαίνεται σε εικόνα, σχήμα 4.76, το ανάλογο διάγραμμα του φάσματος για τον διαμήκη οπλισμό, μεταξύ του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> συνδετήρα, για εύρος 0.3 και συχνότητα 2 Hz, καθώς αναγράφεται στο διάγραμμα το προκύπτον αποτέλεσμα που αναγράφεται και στον σχετικό πίνακα.

Παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι ο "κέρσορας" στη κάτω πλευρά του διαγράμματος έχει μετακινηθεί, και στη πάνω θέση του διαγράμματος αναγράφονται οι μέγιστες τιμές.



**Σχήμα 4.76 Παράδειγμα για διεξαγωγή αποτελεσμάτων.**

**ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ**

Από κόμβο	Εύρος	Συχνότητα (Hz)	Συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης (Hz)	Σχετική κλίμακα παραμόρφωσης (mV)	Παρατηρήσεις
Μεταξύ 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> συνδετήρα	<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.0209 0.4075	28 73	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-μεσ
		<b>4</b>	0.0438 0.3288	10 77	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-μεσ
		<b>8</b>	0.0159 0.3225	6 81	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-μεσ
	<b>0.5</b>	<b>8</b>	0.0969 0.4621	7 95	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-μεσ
	<b>0.6</b>	<b>8</b>	0.015 0.3897	11 80	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-μεσ
Μεταξύ 3 <sup>ου</sup> και 4 <sup>ου</sup> συνδετήρα	<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.0209 0.0209	48 46	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ
		<b>4</b>	0.0438 0.0438	17 16	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ
		<b>8</b>	0.0796 0.0796	10 10	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ
	<b>0.5</b>	<b>8</b>	0.0969 0.0969	13 13	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ
	<b>0.6</b>	<b>8</b>	0.015 0.015	21 21	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ
Μεταξύ 7 <sup>ου</sup> και 8 <sup>ου</sup> συνδετήρα	<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.2717 0.0209	101 43	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ
		<b>4</b>	0.3796 0.0438	82 15	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ
		<b>8</b>	0.4139 0.0796	86 10	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ
	<b>0.5</b>	<b>8</b>	0.0194 0.0969	91 13	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ
	<b>0.6</b>	<b>8</b>	0.01 0.015	90 18	Έσ-θλ-ακρ Έσ-θλ-ακρ

**Πίνακα 4.1 Πίνακας αποτελεσμάτων α.**

**ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ (ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ)**

**ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΝΔΕΤΗΡΑ**

Από κόμβο	Εύρος	Συχνότητα (Hz)	Συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης (Hz)	Σχετική κλίμακα παραμόρφωσης (mV)	Παρατηρήσεις	
1 <sup>ος</sup> συνδετήρας	<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.4075	50	Θλιβ. όψη	
		<b>4</b>	0.3288	52		
		<b>8</b>	0.3225	55		
	<b>0.5</b>	<b>8</b>	0.4621	65		
	<b>0.6</b>	<b>8</b>	0.3897	54		
3 <sup>ος</sup> συνδετήρας	<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.0209 0.344	12 19	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη	
		<b>4</b>	0.0146 0.3567	8 18	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη	
		<b>8</b>	0.0159 0.3364	3 19	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη	
	<b>0.5</b>	<b>8</b>	0.0194 0.4329	15 18	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη	
	<b>0.6</b>	<b>8</b>	0.0156 0.3771	9 15	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη	
	5 <sup>ος</sup> συνδετήρας	<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.2717 0.0132	66 12	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη
			<b>4</b>	0.3796 0.0137	54 8	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη
			<b>8</b>	0.4139 0.0647	56 4	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη
<b>0.5</b>		<b>8</b>	0.5040 0.0167	58 16	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη	
<b>0.6</b>		<b>8</b>	0.3897 0.0725	49 6	Θλιβ. όψη Πλαϊνή όψη	
7 <sup>ος</sup> συνδετήρας		<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.0209	6	Πλαϊνή όψη
	<b>4</b>		0.0146	3		
	<b>8</b>		0.0796	1		
	<b>0.5</b>	<b>8</b>	0.0194	5		
	<b>0.6</b>	<b>8</b>	0.03897	2		

**Πίνακα 4.2 Πίνακας αποτελεσμάτων β**

### ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΣΥΝΔΕΤΗΡΑ

Από κόμβο	Εύρος	Συχνότητα (Hz)	Συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης (Hz)	Σχετική κλίμακα παραμόρφωσης (mV)	Παρατηρήσεις
1 <sup>ος</sup> συνδετήρας	<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.3440	64	Εσωτερικά του συνδετήρα
		<b>4</b>	0.3567	61	
		<b>8</b>	0.03364	66	
	<b>0.5</b>	<b>8</b>	0.0167	76	
	<b>0.6</b>	<b>8</b>	0.3771	52	
3 <sup>ος</sup> συνδετήρας	<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.0132	6	
		<b>4</b>	0.0137	5	
		<b>8</b>	0.0129	2	
	<b>0.5</b>	<b>8</b>	0.0167	15	
	<b>0.6</b>	<b>8</b>	0.0725	2	

**Πίνακα 4.3 Πίνακας αποτελεσμάτων γ.**



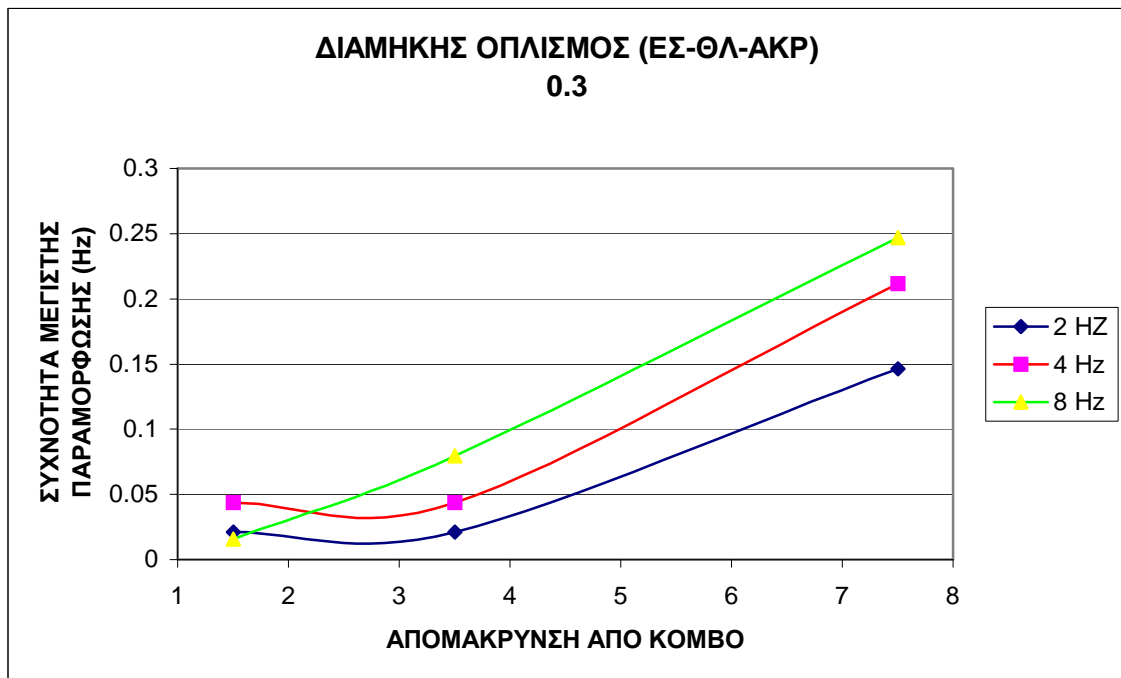
## ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Από κόμβο	Εύρος	Συχνότητα (Hz)	Συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης (Hz)	Σχετική κλίμακα παραμόρφωσης (mv)
Μεταξύ 4 <sup>ου</sup> και 5 <sup>ου</sup> συνδετήρα	<b>0.3</b>	<b>2</b>	0.0313	41
		<b>4</b>	0.0126	28
		<b>8</b>	0.0129	19
	<b>0.5</b>	<b>8</b>	0.0179	34
	<b>0.6</b>	<b>8</b>	0.3897	32

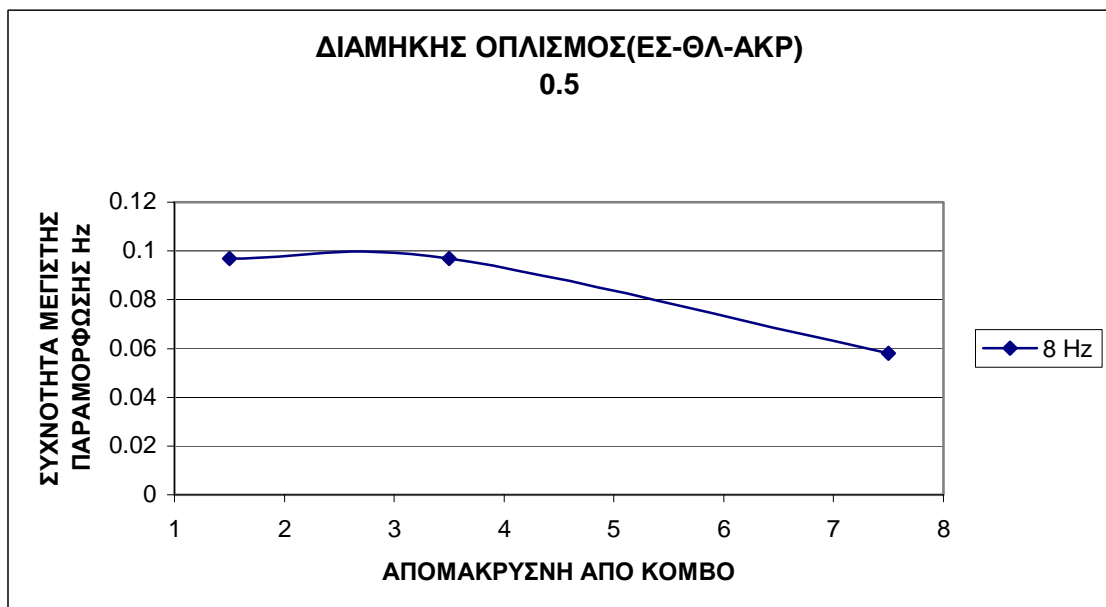
**Πίνακα 4.3 Πίνακας αποτελεσμάτων δ.**

Με βάση τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα για τον διαμήκη και τον εγκάρσιο οπλισμό χωριστά. Παρουσιάζονται διαγράμματα που αφορούν τη συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης καθώς και διαγράμματα της σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης, σε συνάρτηση της απόστασης από το κόμβο, καθώς τα διαγράμματα έχουν παραμέτρους το εύρος ταλάντωση και της εξωτερικής συχνότητας. Σε κάθε διάγραμμα αναγράφεται και το εύρος της ταλάντωσης.

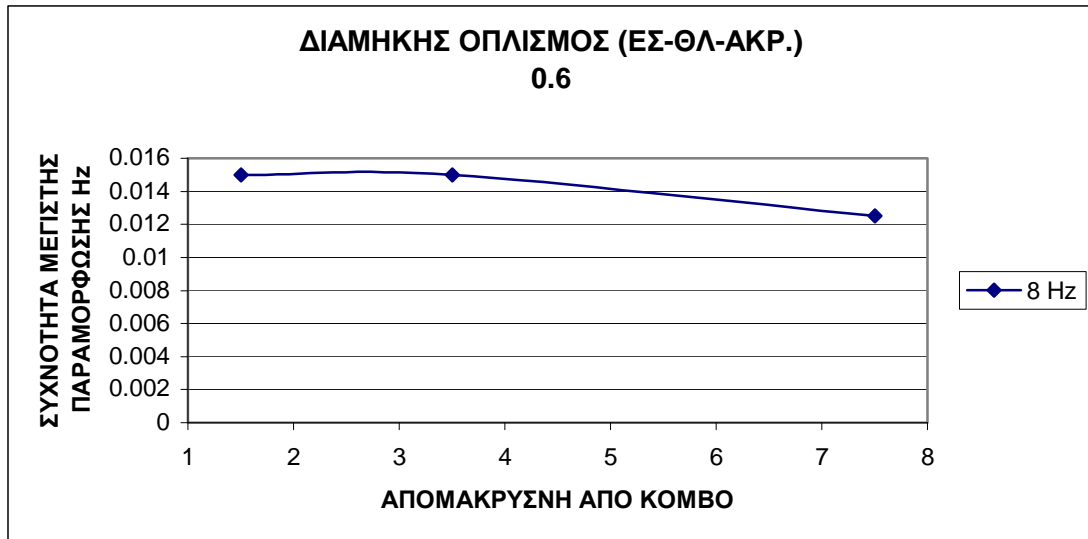
- ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ



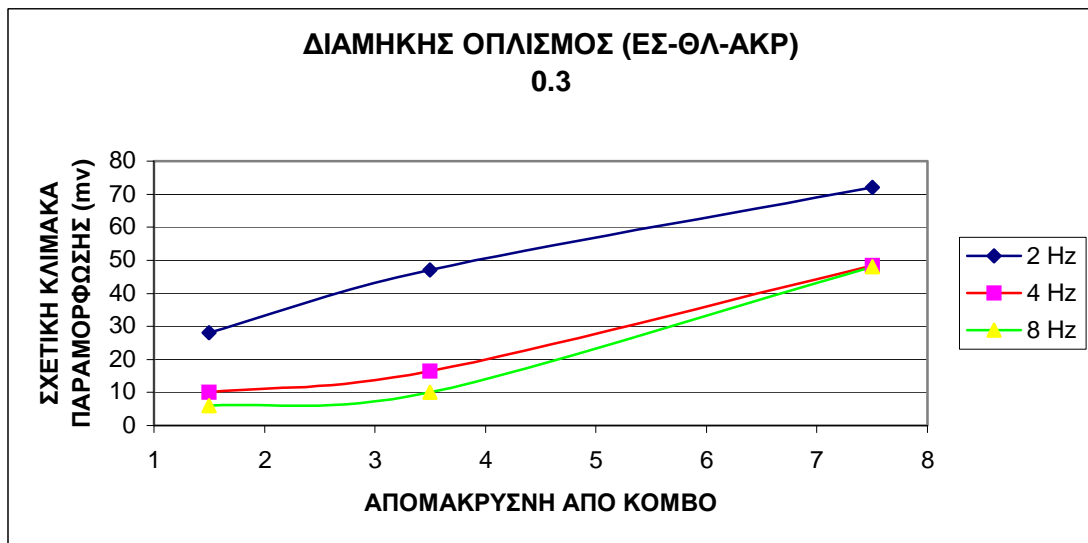
Σχήμα 4.77 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.3.



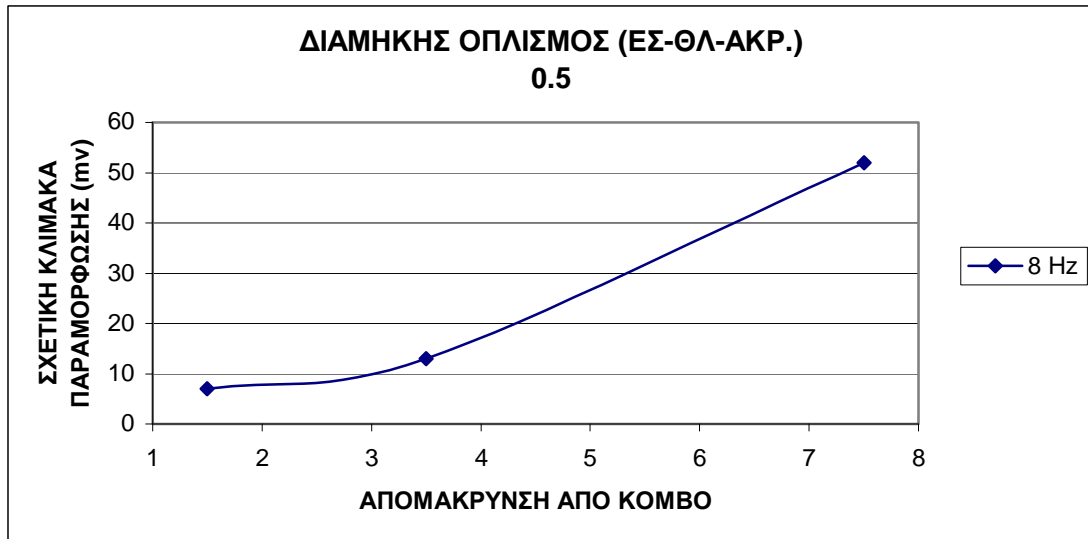
Σχήμα 4.78 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.5.



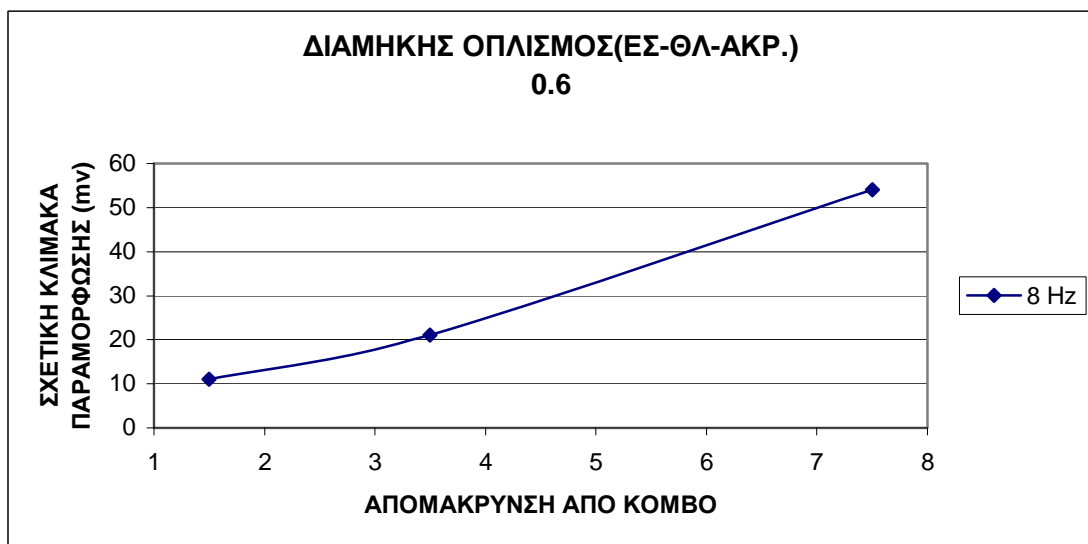
Σχήμα 4.79 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.6.



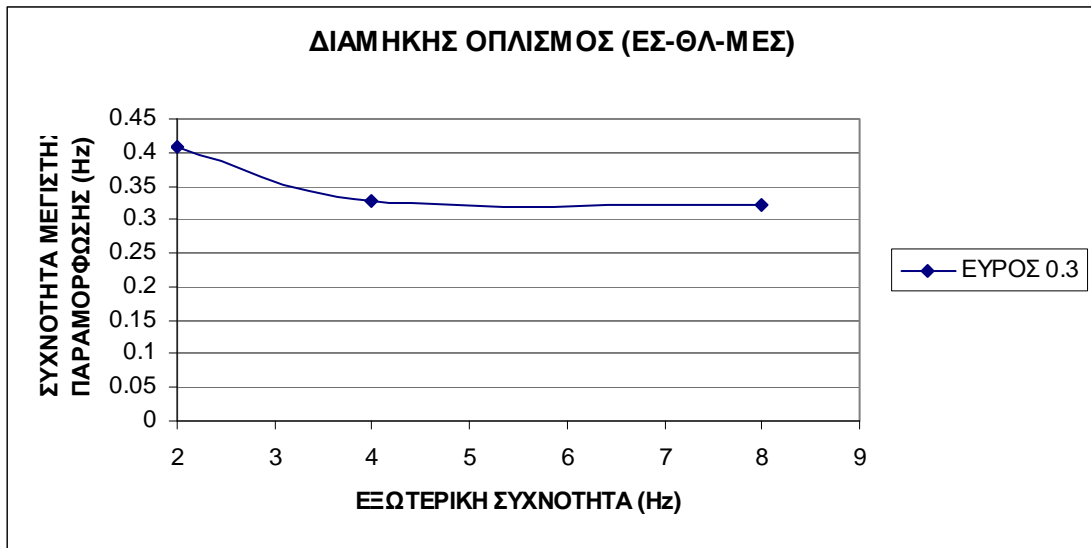
Σχήμα 4.80 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης με εύρος ταλάντωσης 0.3.



Σχήμα 4.81 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης με εύρος ταλάντωσης 0.5.



Σχήμα 4.82 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης με εύρος ταλάντωσης 0.6.

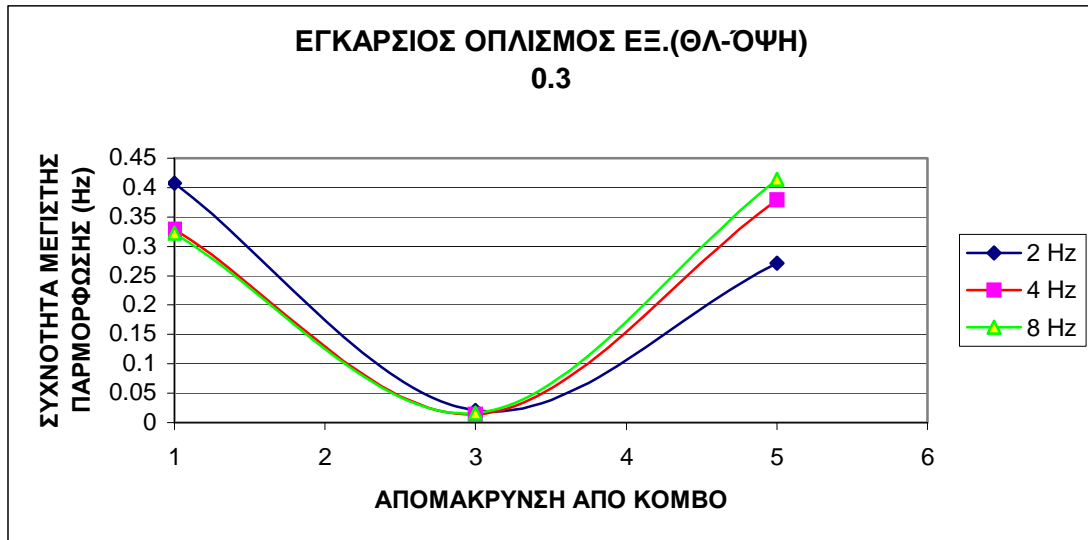


Σχήμα 4.83 Διάγραμμα συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.3.

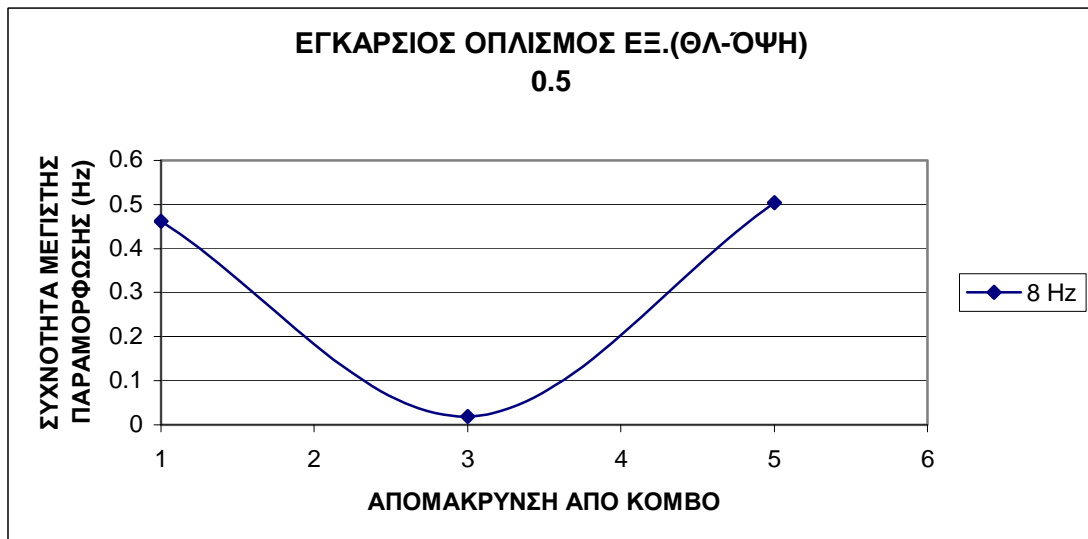


Σχήμα 4.84 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης με εύρος ταλάντωσης 0.3.

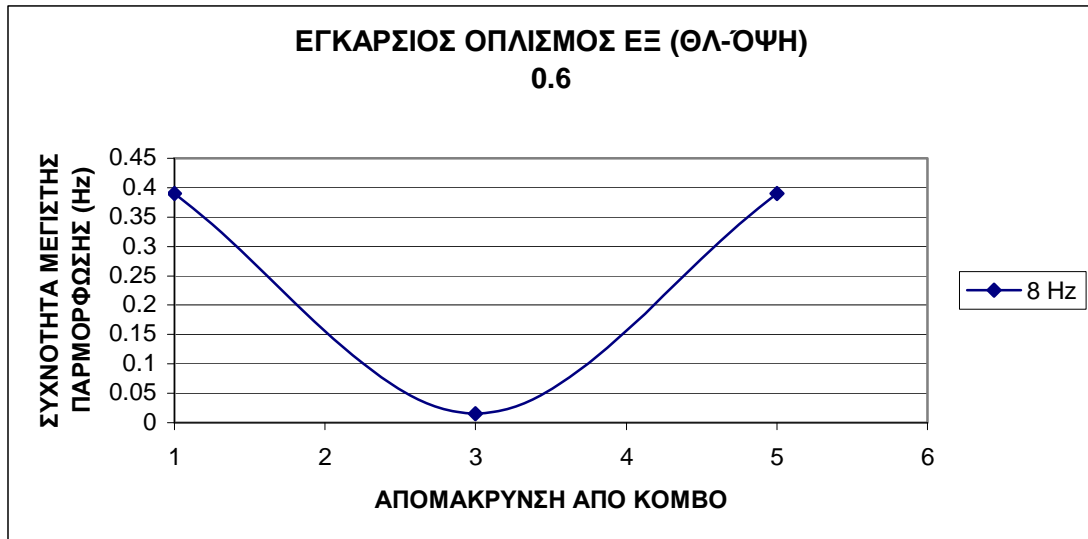
- ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ (ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ)



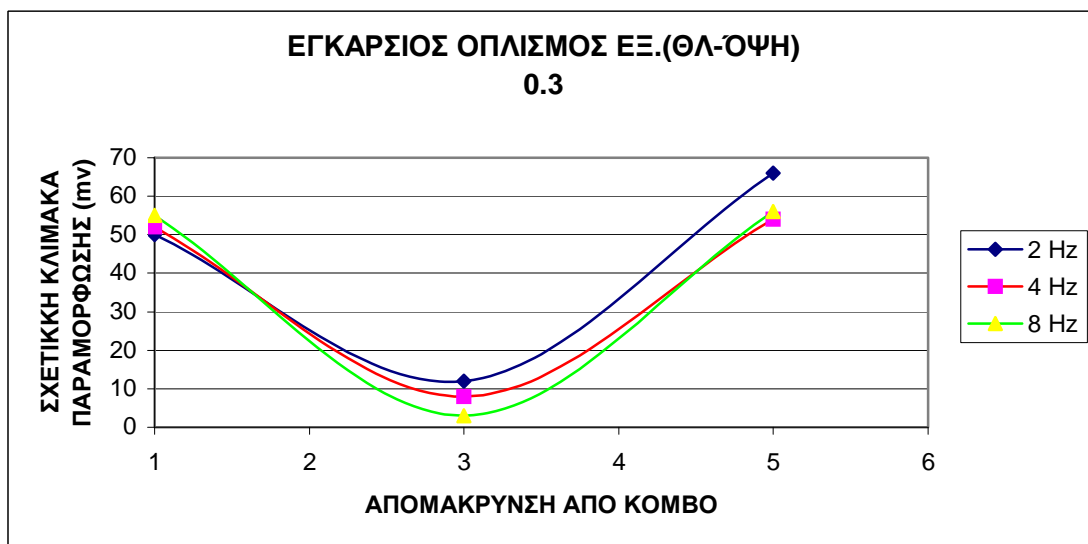
Σχήμα 4.85 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.3



Σχήμα 4.86 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.5

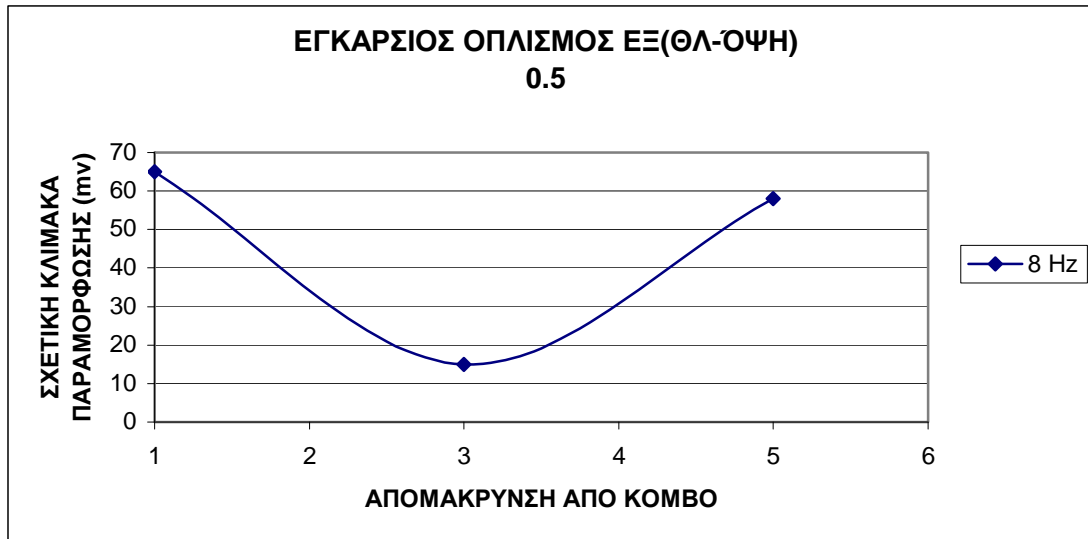


Σχήμα 4.87 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.6.

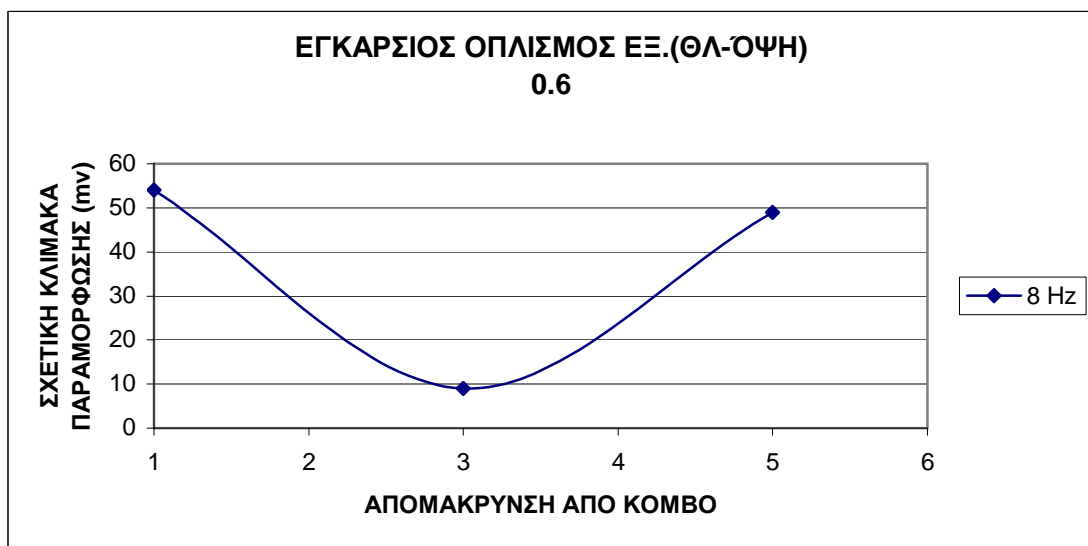


Σχήμα 4.88 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.3.

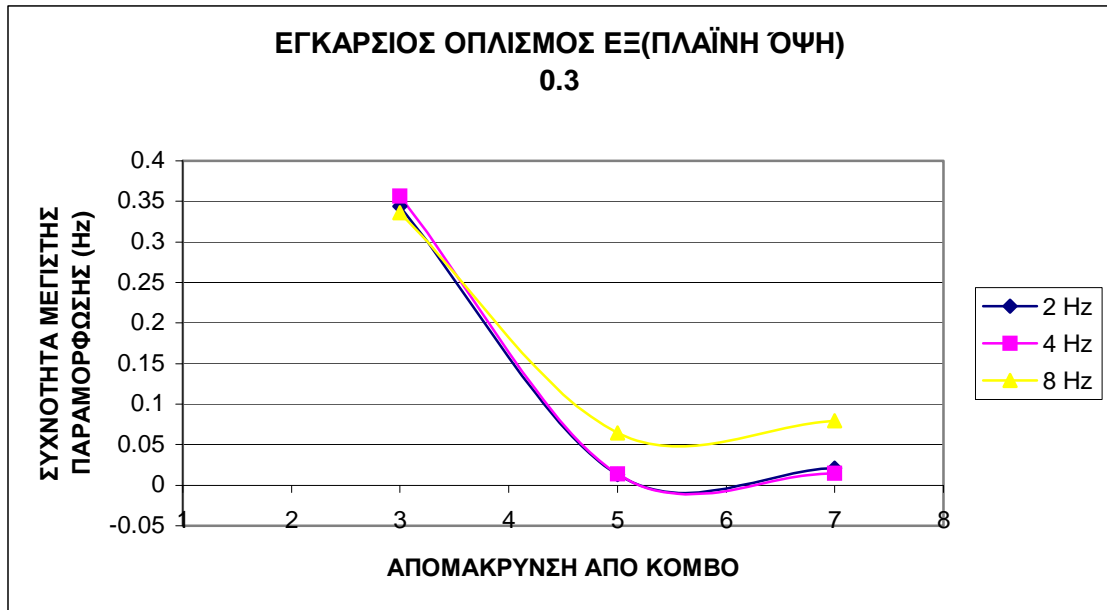




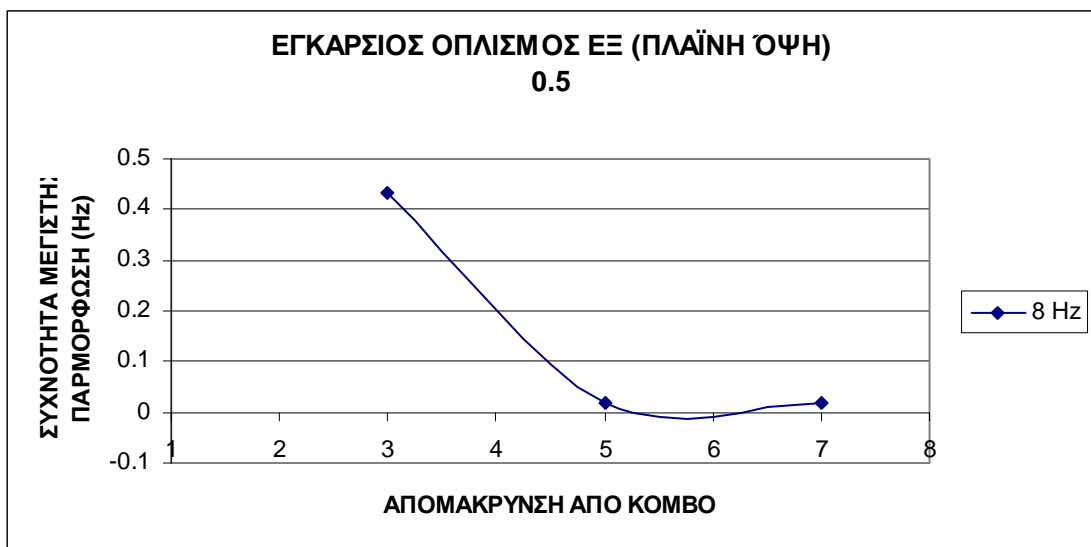
Σχήμα 4.89 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.5



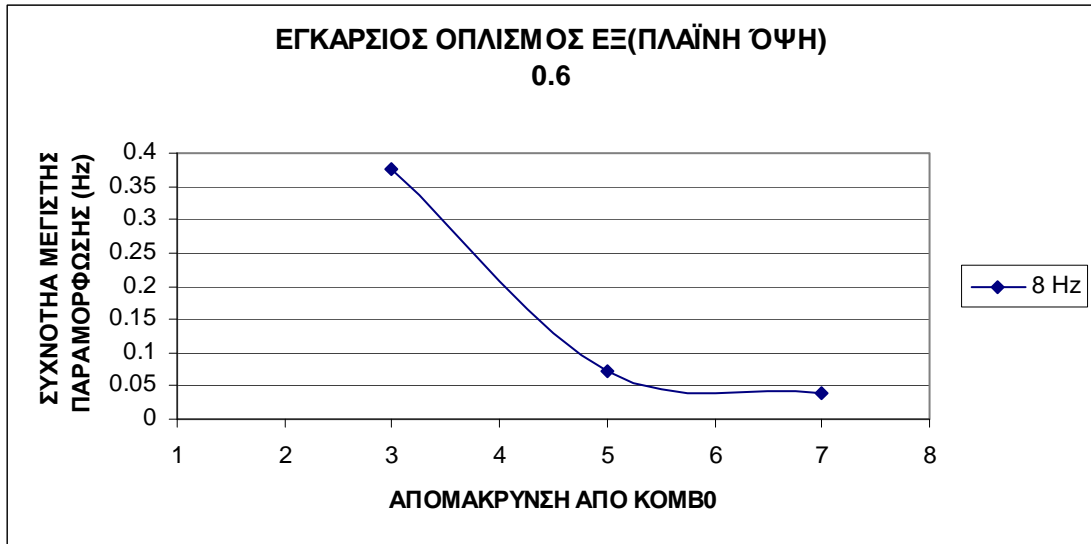
Σχήμα 4.90 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.6



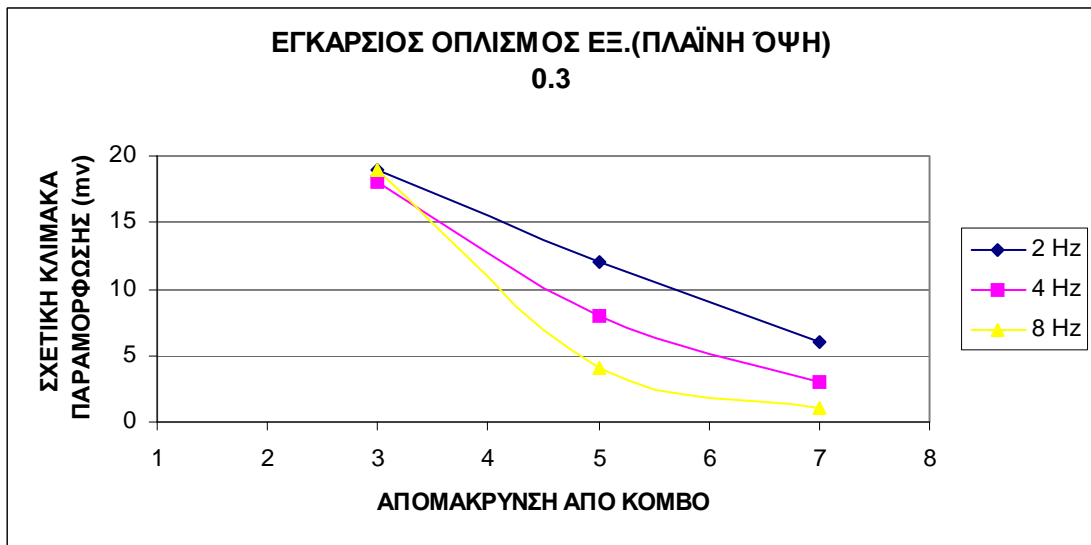
Σχήμα 4.91 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.3.



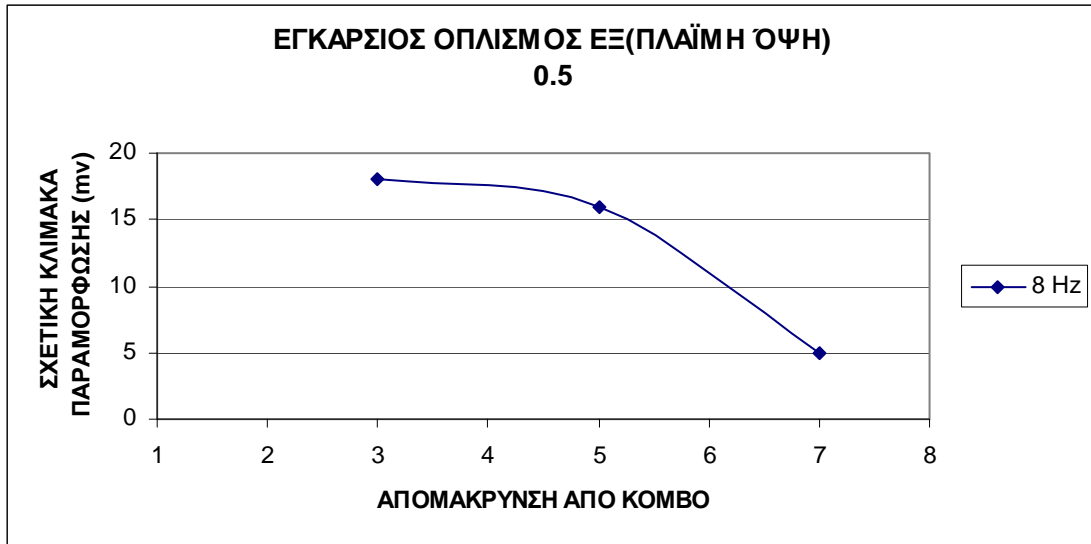
Σχήμα 4.92 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.5



Σχήμα 4.93 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.6



Σχήμα 4.94 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.3.

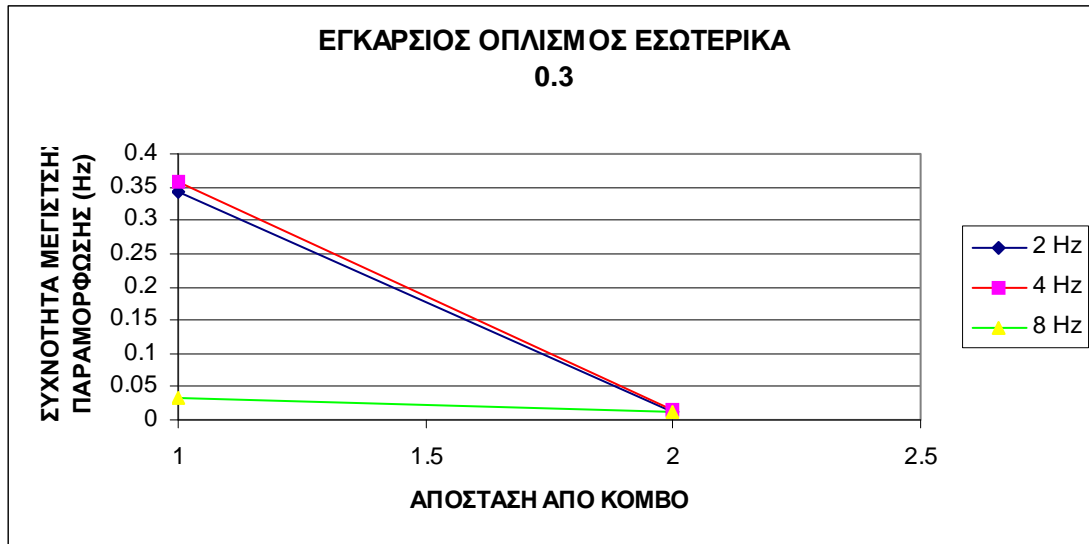


Σχήμα 4.95 94 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.5.

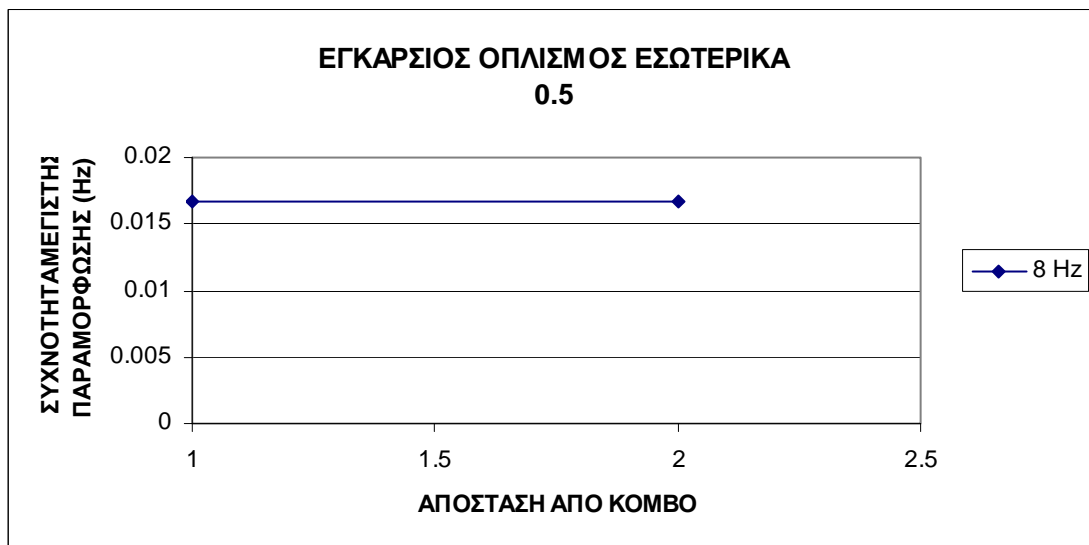


Σχήμα 4.96 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.6.

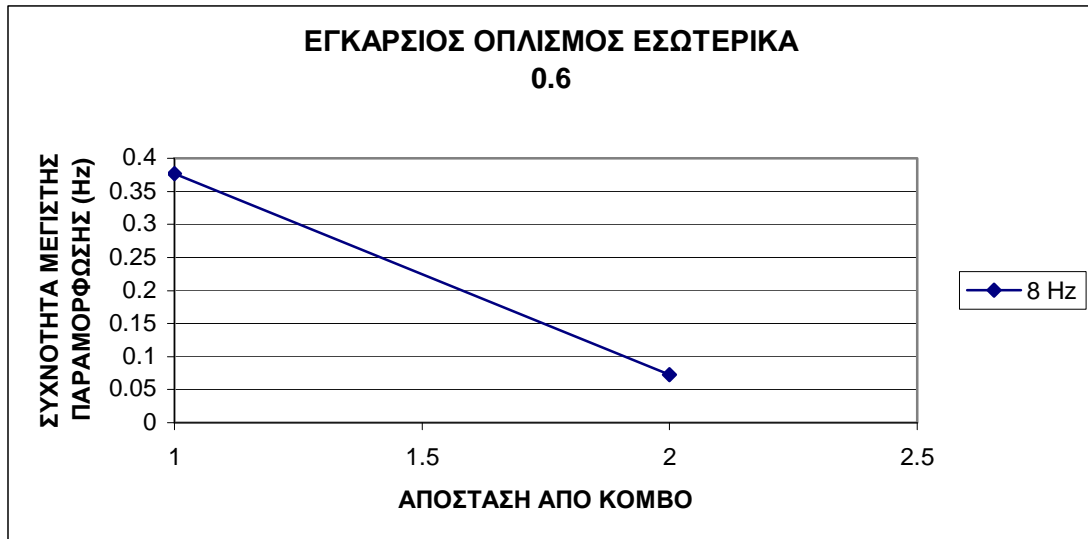
- ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ



Σχήμα 4.97 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.3.



Σχήμα 4.98 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.5



Σχήμα 4.99 Διάγραμμα συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.6.



Σχήμα 4.100 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.3.



Σχήμα 4.101 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.5.



Σχήμα 4.102 Διάγραμμα σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης για εύρος ταλάντωσης 0.6.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή έγινε η πειραματική μελέτη της απόκρισης συνδεδεμένων σε υποστυλώμα οπλισμένου σκυροδέματος υπό δυναμική φόρτιση και του διαμήκους οπλισμού υποστυλώματος από ένα στοιχείο υποστυλώματος- προβόλου δοκού που καταπονήθηκε με μεταβαλλόμενα φορτία κατά εύρος και συχνότητα που εφαρμόζονταν στο άκρο του προβόλου.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα

### • ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ

1. Για μικρή τιμή του εύρους ταλάντωσης έχουμε αύξηση της συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης, καθώς απομακρυνόμαστε από το κόμβο (σχήμα 4.77).
2. Παρατηρείται ακόμα ότι για την μικρή τιμή του εύρους ταλάντωσης έχουμε μικρή αύξηση της συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης καθώς αυξάνεται η εξωτερική συχνότητα. Επίσης η μορφή της μεταβολής είναι παρόμοια, με αυτή του σχήματος 4.77.
3. Στα μεγαλύτερα εύρη της εξωτερικής ταλάντωσης (0,5 και 0,6), δεν συμβαίνει τα παραπάνω (σχήμα 4.78 και 4.79).
4. Όσον αφορά τη παραμόρφωση αυτή αυξάνεται καθώς απομακρυνόμαστε από το κόμβο.
5. Το εύρος της εξωτερικής ταλάντωσης δεν φαίνεται να επηρεάζει την παραμόρφωση (σχήμα 4.80, 4.81 και 4.82).
6. Παρατηρείται μια αύξηση της παραμόρφωσης για μικρή εξωτερική συχνότητα 2 Hz (σχήμα 4.80) ενώ για τις εξωτερικές συχνότητες 4 Hz και 8 Hz δεν φαίνεται να επηρεάζεται η παραμόρφωση.

### • ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΣΤΗΝ ΘΛΙΒΟΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

1. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι τόσο η συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης όσο και η σχετική παραμόρφωση για όλα τα εύρη και για όλες τις εξωτερικές συχνότητες έχουν παρόμοια απόκριση (σχήμα 4.83, 4.84 και 4.85).
2. Η παραμόρφωση και η συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης, μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε από το κόμβο, επίσης παρουσιάζουν ελάχιστο στον 3<sup>ο</sup> συνδετήρα και στη συνέχεια αυξάνονται μέχρι τον 5<sup>ο</sup> συνδετήρα που είχαμε μετρήσει (σχήμα 4.83, 4.84 και 4.85).
3. Παρατηρείται μικρή αύξηση της συχνότητας μέγιστης παραμόρφωσης με την εξωτερική συχνότητα ταλάντωσης (σχήμα 4.83).



4. Και σε αυτό το σημείο παρατηρούμε μικρή αύξηση της σχετικής παραμόρφωσης για μικρή εξωτερική συχνότητα (2 Hz), ενώ για τις μεγαλύτερες (4 Hz, 8 Hz) δεν φαίνεται διαφοροποίηση.

• **ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΑΪΝΗ ΟΨΗ.**

1. Και σε αυτό το σημείο παρατηρούμε το γεγονός ότι τόσο η συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης όσο και η σχετική παραμόρφωση για όλα τα εύρη και για όλες τις εξωτερικές συχνότητες έχουν παρόμοια απόκριση.
2. Πτώση των τιμών, της συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης και σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης, καθώς απομακρυνόμαστε από το κόμβο.
3. Πάλι παρατηρούμε μεγαλύτερες τιμές της παραμόρφωσης για εξωτερική συχνότητα 2 Hz

• **ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ**

1. Και στον εγκάρσιο οπλισμό εσωτερικά, παρατηρούμε πτώση των τιμών, της συχνότητα μέγιστης παραμόρφωσης και σχετικής κλίμακας παραμόρφωσης, καθώς απομακρυνόμαστε από το κόμβο.

Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι παραπάνω μετρήσεις αφορούν μόνο το υποστύλωμα, ενώ παράλληλα γίνεται διπλωματική εργασία από συνάδελφο για τη δοκό-πρόβολο .

Το πείραμα που περιγράψαμε είναι μακράν της ρηγμάτωσης, επίσης συνεχίστηκε για μεγαλύτερη ένταση μέχρι της ρηγμάτωσης , και που θα ακολουθήσουν άλλες εργασίες.

Τα συμπεράσματα αυτά είναι χρήσιμα για μηχανικούς και κυρίως για Πολιτικούς Μηχανικούς, γιατί υπάρχουν λίγα πειραματικά δεδομένα στον τομέα της δυναμικής απόκρισης συνδετήρων οπλισμού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Θ. Π. Τάσιος, Π. Ι. Γιαννόπουλος, Κ.Γ. Τρέζος, Σ. Γ. Τσουκαντάς, <<ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ>>, Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998.
2. Θ. Π. Τάσιος, Π. Ι. Γιαννόπουλος, Κ.Γ. Τρέζος, Σ. Γ. Τσουκαντάς, <<Σημειώσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος>>, με βάση τον Ν.Κ.Ω.Σ., Έκδοση Ε.Μ.Π. Αθήνα 1997.
3. J. Schlaich 'Stryt and Tie', ACI Journal, Vol., No, pp.
4. M. Collinis, 'Compression fuild Theory', ACI Journal, Vol., No, pp.
5. Report of RILEM Cmmittee 148 SSC
6. Kotsovos M.D., 'Consideration of triaxial stress conditions in desing'. ACI Structural Journal, Vol.84, No.3, May-June 1987,pp.107-115.
7. IVAN
8. Kani G.N.J., 'The riddle of shear andi its solution.' ACI Journal, 1964,pp.441-467.
9. Leonhardt. F. and Walther R., 'The Stuttgart shear tests,' CCA, Library Translation, no.111, Vol.56, No,12,1961 ,and Vol.57,Nos 2,3,6,7,8, 1962.
10. Π. Σ . Θεοχάρη << Πειραματική μηχανική των υλικών>>
11. Natalie Gibson, Andre Filiatrault, Scott A. Ashoford, (2002), Performance of beam to column bridge joints subjected to a large velocity pulse, PEER Report, Pacific Earthquake Enginneering Research Center, College of Enginneering, University of California, Berkeley.
12. Greg L. Orozco and Scott A. Ashford (2002), Effects of Large Velocity Pulses on Reinforced Concrete Bridge Columns, PEER Report, Pacific Earthquake Enginneering Research Center, College of Enginneering, University of California, Berkeley.
13. Wilson Y.M Chung and Eddie S.S Lam (2004), Confinement of columns with non-seismic detailin , ANCER Annual Meeting: Networking of young Enginneering Researchers and Professionals, Honolulu, Hawaii.
14. R.H. Scott, P.A.T. Gill and R.C.B. Judge, (1990), Strain and bond stress disstrubutions in tension lap joints in reinforced concrete, Magazine of Concrete Research : Vol.42, No. 150.