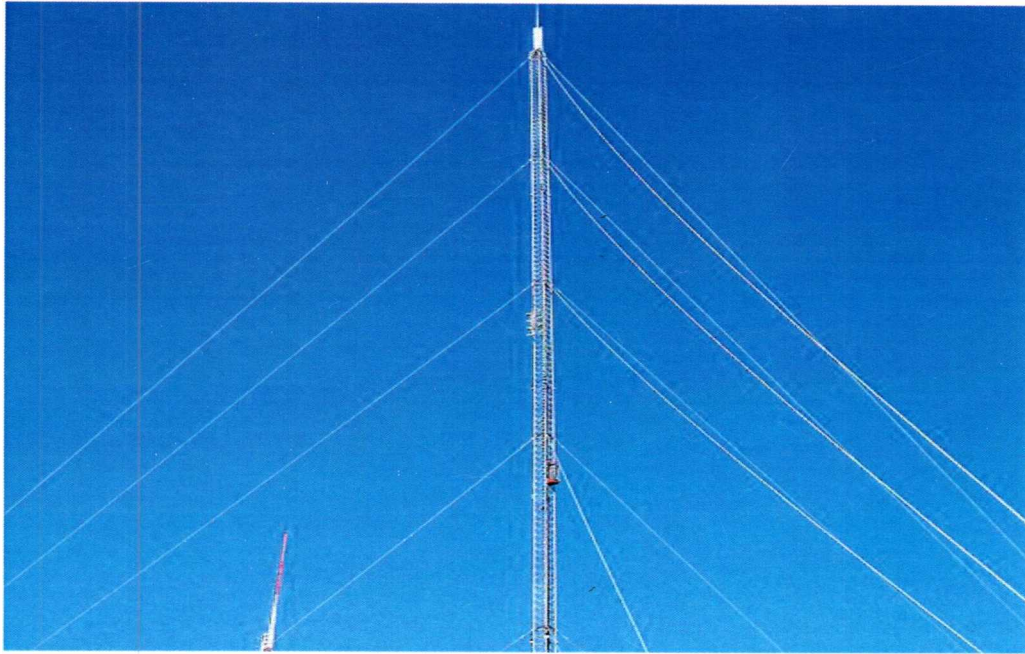




ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΛΩΔΙΩΤΩΝ ΙΣΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Δημήτριος Σ. Σοφιανόπουλος
Σπουδαστές: Αριστείδης Αρβανιτάκης - Δημήτριος Παπαδόπουλος

ΠΜ

ΒΟΛΟΣ 2013



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 11248/1
Ημερ. Εισ.: 20-03-2013
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2013
ΑΡΒ

(ΣΥΝΟΨΗ)

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός καλωδιωτών ιστών, που συνήθως χρησιμοποιείται στις ραδιοτηλεοπτικές εκπομπές και τις τηλεπικοινωνίες, δεν έχει μελετηθεί πλήρως στις Ηνωμένες Πολιτείες. Δεν υπάρχει κανένας ειδικός κώδικας σχεδιασμού και μόνο μια περιορισμένη έρευνα έχει αναφερθεί σχετικά με το θέμα. Αυτή η έρευνα εξετάζει τη συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών που διαθέτουν συνθετικά σχοινιά ως καλώδια στήριξης, με ιδιαίτερη έμφαση στην επίδραση των ακαριαίων φορτίων στη συμπεριφορά του ιστού. Είναι η τρίτη φάση ενός έργου πολλαπλών σταδίων που αποσκοπεί στην ανάλυση των δυνατοτήτων των αποσβεστήρων απορρόφησης ενέργειας (Snapping-Cable Energy Dissipators, SCEDs) να ελαχιστοποιούν την πλευρική απόκριση στις κατασκευές.

Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενός καλωδιωτού ιστού ύψους 120 m με το εμπορικό πρόγραμμα ABAQUS. Η τρισδιάστατη συμπεριφορά του ιστού παρατηρήθηκε όταν υπεβλήθη σε δύο καταγραφές εδαφικών κινήσεων: Northridge και El Centro. Εισήχθησαν τρεις ορθογώνιες συνιστώσες σεισμού, δύο οριζόντιες και μία κατακόρυφη. Διεξήχθη μια σειρά παραμετρικών μελετών για να προσδιοριστεί η ευαισθησία απόκρισης σε προένταση καλωδίου, το οποίο είναι ένα μέτρο υπολογισμού της ενδεχόμενης χαλάρωσης στα καλώδια κατά την απόκριση. Επιπροσθέτως, οι μελέτες εξέτασαν τις επιδράσεις της δυσκαμψίας καλωδίων, τις ιδιότητες των ιστών και την κατευθυντικότητα της κίνησης εισόδου. Εξετάστηκαν οι παραμορφώσεις, οι ροπές κάμψης, οι εφελκυστικές τάσεις των καλωδίων και οι τέμνουσες βάσης. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό των τάσεων στη δομική απόκριση των καλωδιωτών ιστών. Το επίπεδο χαλάρωσης στους ιστούς άλλαξε τη συμπεριφορά και τα διδάγματα που αντλήθηκαν θα χρησιμοποιηθούν για την συνέχιση της έρευνας σχετικά με την εφαρμογή των SCEDs στις κατασκευές.

Κεφάλαιο 1:	Εισαγωγή - Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	3
1.1	Εισαγωγή	3
1.2	Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	4
1.2.1	Προηγούμενη έρευνα	4
1.2.2	Συμπεριφορά Καλωδίων και Προσομοίωση	5
1.2.3	Σχεδιασμός Καλωδιωτών Ιστών	7
1.2.4	Έρευνα Σχετικά με τους Καλωδιωτούς Ιστούς	11
1.2.5	Εδαφικές Κινήσεις	13
1.3	Σκοπός και Πεδίο Εφαρμογής της Έρευνας	14
1.4	Γενική Επισκόπηση της Εργασίας	15
Κεφάλαιο 2:	Μέθοδοι και Μελέτες Τεκμηρίωσης	16
2.1	Προκαταρκτική Τεκμηρίωση	16
2.2	Προεπισκόπηση Λογισμικού	16
2.3	Βασικές Αποφάσεις Προσομοίωσης	16
2.4	Προκαταρκτικά Μοντέλα	19
2.4.1	Πρώτο Προκαταρκτικό Μοντέλο	19
2.4.2	Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο	21
2.5	Συμπέρασμα Προκαταρκτικής Τεκμηρίωσης	24
Κεφάλαιο 3:	Μοντέλα Σχοινιών	25
3.1	Δυναμική Συμπεριφορά Σχοινιών	25
3.2	Ανάπτυξη Μοντέλων Σχοινιών	26
3.2.1	Μοντέλο Α	27
3.2.2	Μοντέλο Β	27
3.2.3	Μοντέλο Γ	28
3.2.4	Μοντέλο Δ	29
3.2.5	Μοντέλο Ε	30
3.3	Συμπεράσματα για τα μοντέλα σχοινιών	32
Κεφάλαιο 4:	Αναλυτικό Μοντέλο	33
4.1	Προεπισκόπηση του Μοντέλου	33
4.2	Αρχεία καταγεγραμμένων ισχυρών εδαφικών κινήσεων	34
4.2.1	Northridge, 1994	36
4.2.2	ElCentro, 1940	38
4.3	Τρισδιάστατο Μοντέλο	40
4.3.1	Καλώδια	40
4.3.2	Ιστός	41

4.3.3	Επιλογές ανάλυσης	42
4.3.4	Παράμετροι εξαγόμενων αποτελεσμάτων	42
4.4	Μελέτες σύγκλισης, Απόσβεση και Παραμετρικές Μελέτες	42
Κεφάλαιο 5:	Αποτελέσματα Δυναμικών Αναλύσεων	47
5.1	Δυναμικές Αναλύσεις	47
5.2	Λεπτομερής δυναμική συμπεριφορά	47
5.2.1	Συμπεριφορά στο σεισμό Northbridge	48
5.2.2	Συμπεριφορά σε ενισχυμένο σεισμό ElCentro	58
5.3	Μελέτη 1: Τάσεις σχετικά με την προένταση	65
5.4	Μελέτη 2: Τάσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά του ιστού	71
5.5	Μελέτη 3: Τάσεις σχετικά με την κατεύθυνση σεισμού	72
Κεφάλαιο 6:	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	76
6.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα	76
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	80
Βιβλιογραφία		81
Παράρτημα Α:	Υποστηρικτικές Πληροφορίες για το Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο	84
A.1	Θεωρητική κίνηση Δοκού για Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο	84
A.2	Τιμές παραμέτρων για το Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο	85
Παράρτημα Β:	Υποστηρικτικές Πληροφορίες επί του Αναλυτικού Μοντέλου	86
Παράρτημα Γ:	Σχήματα από τα Αποτελέσματα της 1^{ης} Παραμετρικής Μελέτης	92

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγή

Οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στις κατασκευές, ιδίως μεταξύ των παλαιότερων που κατασκευάστηκαν με λιγότερο αυστηρούς κώδικες αντισεισμικού σχεδιασμού. Ένα αυξανόμενο ποσό χρημάτων δαπανάται για μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας για την άμβλυνση της δομικής απόκρισης λόγω μεγάλων εδαφικών κινήσεων κατά τη διάρκεια σεισμών. Ενώ ένα μέρος είναι αποτέλεσμα των διδαγμάτων που αντλήθηκαν κατά τα τελευταία σεισμικά γεγονότα, εν μέρει οφείλεται στην πρόσφατη στροφή προς τον σχεδιασμό με βάση την επιτελεστικότητα. Μερικοί δημοφιλείς μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας είναι τα συστήματα μόνωσης βάσης, συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας και αποσβεστήρες αδράνειας υγρών, μεταξύ πολλών άλλων παθητικών και ενεργητικών συστημάτων ελέγχου. Τα περισσότερα διαθέσιμα συστήματα είναι αρκετά ακριβά και το επιπλέον κόστος εγκατάστασής τους σε μια υπάρχουσα κατασκευή μπορεί να είναι υπερβολικό. Για τον τελευταίο αυτό λόγο έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό και έρευνα, η οποία αφορά στην ανάπτυξη παθητικών μηχανισμών ελέγχου χαμηλού κόστους για τον μετριασμό των δομικών βλαβών που οφείλονται στους σεισμούς.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την εξέταση της συμπεριφοράς των σχοινιών από συνθετικές ίνες και την εφαρμογή τους ως παθητικοί αποσβεστήρες σεισμών, γνωστών ως SCEDs, Snapping-Cable Energy Dissipators. Κατά την μετάβαση των σχοινιών από χαλαρή σε τεντωμένη κατάσταση, δημιουργούν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μεγάλες εφελκυστικές δυνάμεις, γνωστές ως ακαριαία φορτία. Τα συνθετικά σχοινιά έχουν την τάση να απορροφούν σημαντική ποσότητα ενέργειας λόγω τριβής κατά τη διάρκεια επενέργειας αυτών των φορτίων και μπορούν έτσι να χρησιμοποιηθούν ως οικονομικά αποδοτικοί μηχανισμοί παθητικού ελέγχου. Ενώ η αρχική εγκατάσταση περιλαμβάνει συνθετικά σχοινιά εγκατεστημένα διαγώνια στο κάθετο άνοιγμα του κτηριακού σκελετού, αυτά τα σχοινιά έχουν τη δυνατότητα και άλλων εφαρμογών όπως ως καλώδια συγκράτησης για την αποφυγή ανατροπής του καταστρώματος μιας γέφυρας.

Σκοπός της έρευνας στα πλαίσια της Διπλωματικής είναι να εξετάσει την συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών που χρησιμοποιούν συνθετικά σχοινιά, όταν υποβάλλονται σε σεισμική φόρτιση. Η περισσότερη δυσκαμψία παρέχεται απ' τους ιστούς και, ως εκ τούτου, η δομική απόκριση εξαρτάται απ' τις δυναμικές ιδιότητές τους. Προσομοιώθηκε ένας τυπικός καλωδιωτός ιστός με τη χρήση των δυναμικών ιδιοτήτων των συνθετικών σχοινιών ως στοιχεία του ιστού και εν συνεχεία ερευνήθηκε η απόκριση. Η δομική συμπεριφορά οφειλόμενη σε ακαριαίες δυνάμεις και η απόκριση των πύργων που υποβλήθηκαν σε τρισδιάστατες εδαφικές κινήσεις παρουσίασαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Προηγούμενες εργασίες των Pearson (2002) και Hennessey (2003) αφορούσαν στην δοκιμή και στον χαρακτηρισμό της δυναμικής συμπεριφοράς των συνθετικών

σχοινιών. Παράλληλα έχουν πραγματοποιηθεί και δοκιμές πεδίου (VirginiaTech) προκειμένου να επεκταθεί και να τεκμηριωθεί - επικυρωθεί το προηγούμενο μοντέλο που αναπτύχθηκε απ' τον Hennessey (2003). Αυτές οι ιδιότητες σχοινιών περιελήφθησαν στη συνέχεια στα τρισδιάστατα μοντέλα καλωδιωτών ιστών πεπερασμένων στοιχείων, που χρησιμοποιήθηκαν για την εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς. Με βάση τις προηγούμενες έρευνες, σχεδιάστηκε ένα πρότυπο μοντέλο για χρήση σε αυτή την έρευνα: ένας ιστός ύψους 120 m με 4 επίπεδα καλωδίων. Στη συνέχεια διεξήχθη μια σειρά παραμετρικών μελετών σε αυτό το μοντέλο μεταβάλλοντας τα σεισμικά δεδομένα, τη γεωμετρία της κατασκευής, την δυστένεια και την προένταση των καλωδίων καθώς και τις ιδιότητες του ιστού. Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών χρησιμοποιήθηκαν για να χαρακτηριστεί ο τρόπος που τα σχοινιά επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών, με στόχο την υποστήριξη της συνεχούς έρευνας προς την εφαρμογή και τη χρησιμοποίηση των SCEDs.

1.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

1.2.1 Προηγούμενη έρευνα

Η πρώτη εργασία για την εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς των συνθετικών σχοινιών υψηλού μέτρου ελαστικότητας πραγματοποιήθηκε απ' τον Pearson (2002). Σε εκείνη την έρευνα δοκιμάστηκαν 19 διαφορετικοί τύποι σχοινιών διαφόρων διαμέτρων προκειμένου να διαπιστωθεί ποια σχοινιά θα εμφανίσουν δυναμικά χαρακτηριστικά, επωφελή για την απορρόφηση ενέργειας. Οι στατικές και δυναμικές δοκιμές διεξήχθησαν με τη χρήση ενός πύργου πτώσης ύψους 3,7m. Αυτό το συναρμολογούμενο σύνολο χρησιμοποίησε ένα δυναμόμετρο και έναν επιταχυνσιογράφο για την καταγραφή της συμπεριφοράς του σχοινιού καθώς ένα βάρος έπεφτε απ' το ελεύθερο άκρο. Χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλοί συνδυασμοί υψών πτώσης και βαρών για να δοκιμαστούν δυναμικά τα σχοινιά. Μία απ' τις πιο σημαντικές τάσεις που βρέθηκαν σε αυτή την έρευνα ήταν ότι το μεγαλύτερο μέρος της μόνιμης παραμόρφωσης εμφανίζεται στον πρώτο κύκλο φόρτισης. Επιπροσθέτως, τα σχοινιά με μεγαλύτερες διαμέτρους, με υψηλότερα μέτρα ελαστικότητας και με πιο σφιχτές πλέξεις έδειξαν να μετατοπίζονται λιγότερο. Τέλος, διαπιστώθηκε επίσης ότι κατά τη διάρκεια των δυναμικών δοκιμών απορροφήθηκε σημαντική ενέργεια, δείχνοντας τις δυνατότητές τους να χρησιμοποιηθούν ως παθητικοί μηχανισμοί απόσβεσης.

Ο Hennessey (2003) συνέχισε την έρευνα σχετικά με τη δυναμική συμπεριφορά των συνθετικών σχοινιών με υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Η έρευνα του περιελάμβανε περισσότερο ελεγχόμενες στατικές και δυναμικές δοκιμές σε δύο από τους αρχικούς τύπους σχοινιών που δοκιμάστηκαν, το Amsteel Blue και το Amsteel II. Τα σχοινιά Amsteel Blue έχουν χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας και πιο χαλαρή πλέξη από τα σχοινιά Amsteel II. Όπως ήταν ίσως αναμενόμενο, τα πειράματα έδειξαν ότι μεγαλύτερη μετατόπιση και συνεπώς μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας, λόγω της τριβής μεταξύ των κλώνων, παρατηρήθηκε στα σχοινιά Amsteel Blue.

Τα αποτελέσματα αυτού του αρχικού σταδίου της έρευνας παρουσιάστηκαν από τον Hennessey. (2005). Ενώ τα σχοινιά Amsteel Blue απορροφούσαν περισσότερη ενέργεια, οι υπερβολικές μετατοπίσεις που συνδέονταν με την απορρόφηση ήταν πολύ μεγάλες για να αξιοποιηθούν πρακτικά τα σχοινιά. Επομένως, αποφασίστηκε ότι τα δυναμικά χαρακτηριστικά των σχοινιών Amsteel II θα τα καθιστούσαν καταλληλότερα για χρήση ως SCEDs. Επίσης, φορτίζοντας κυκλικά από πριν τα σχοινιά με στατικό φορτίο, ένα σημαντικό τμήμα της μόνιμης παραμόρφωσης μπορεί να αφαιρεθεί και, συνεπώς, οι μετατοπίσεις μπορούν να μειωθούν κατά το ήμισυ. Με την αποφυγή αυτών των μεγάλων μετατοπίσεων, τα σχοινιά θα είναι σε θέση να ενεργούν για κάτι περισσότερο από τον πρώτο κύκλο φόρτισης σε μία κατασκευή. Χρησιμοποιώντας τον μεγάλο αριθμό δεδομένων από αυτές τις δοκιμές πύργων πτώσης, αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για τον καθορισμό της δυναμικής φόρτισης σε ένα σχοινί με ακαριαία μετάβαση από χαλάρωμα σε τέντωμα (snapping force) ως συνάρτηση της σχετικής μετατόπισης και της σχετικής ταχύτητας.

Η τρέχουσα έρευνα εξετάζει την πιθανή χρησιμοποίηση αυτών των σχοινιών σε κατασκευές κτηριακών σκελετών. Έχουν ήδη πραγματοποιηθεί αρκετές πρόσθετες δυναμικές δοκιμές στα σχοινιά Amsteel II με εξαναγκασμένη αρμονική φόρτιση. Ειδικότερα, στα σχετικά πειράματα χρησιμοποιήθηκαν μικρότερες ταχύτητες, όπως αυτές που μπορούμε να δούμε όταν ένα ελαφρώς χαλαρό σχοινί τεντώνεται μέσα από έναν κτηριακό σκελετό υπό πλευρική φόρτιση. Ως αποτέλεσμα αυτών των δοκιμών, έχει αποδειχθεί ότι η δυναμική συμπεριφορά του σχοινιού εξαρτάται κυρίως από τη σχετική μετατόπιση και από το υψηλότερο φορτίο στο οποίο είχε προηγουμένως υποβληθεί, με το μικρό μέγεθος της σχετικής ταχύτητας να έχει μικρή επίπτωση στη δυναμική συμπεριφορά.

1.2.2 Συμπεριφορά Καλωδίων και Προσομοίωση

Για τις περισσότερες εφαρμογές, η πλήρης μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των καλωδίων είναι ένα αρκετά πολύπλοκο έργο. Το ίδιο βάρος και η έλλειψη αντοχής σε κάμψη του καλωδίου υπαγορεύει ότι ένα καλώδιο δεν είναι ποτέ ευθύγραμμο παρά μόνο σε κατακόρυφη θέση. Επίσης, η δυναμική διέγερση των ιδιομορφών των καλωδίων μπορεί να προκαλέσει ιδιαίτερα μη γραμμική απόκριση. Ένα σημαντικό μέρος της έρευνας έχει αφιερωθεί στην ανάπτυξη απλοποιημένων μοντέλων καλωδίων που εξακολουθούν να έχουν αρκετή ακρίβεια για δυναμικές αναλύσεις.

Ο Irvine (1981) παρουσίασε μία ολοκληρωμένη θεώρηση των κλασικών και σύγχρονων παραδειγμάτων καλωδιωτών κατασκευών και αναλυτικές τεχνικές για την επίλυση αυτών των προβλημάτων. Καλύφθηκαν οι βασικές έννοιες όσον αφορά το αλυσοειδές σχήμα, καθώς και η απόκριση σε στατικά και δυναμικά φορτία. Οι καλωδιωτοί πύργοι αναφέρθηκαν εν συντομία - παρουσιάστηκε ένα παράδειγμα που απεικόνιζε μία αναλυτική μέθοδο ανεύρεσης των στατικών και δυναμικών δυστενείων των δεσμών καλωδίων.

Οι Desai και Punde (2001) πρότειναν μία απλή ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων εννέα βαθμών ελευθερίας για την ακριβή περιγραφή των ταλαντώσεων σε ένα κεκλιμένο καλώδιο, σε αντίθεση με την κοινή μέθοδο διακριτοποίησης του καλωδίου σε μικρά στοιχεία. Οι ταλαντώσεις των καλωδίων μπορεί να είναι πολύ σημαντικές για τους καλωδιωτούς ιστούς, ιδιαίτερα για τους ψηλούς ιστούς με εξαιρετικά μακριά καλώδια. Η έρευνά τους επικύρωσε το μοντέλο καλωδίου που προτείνεται από την ανάλυση της απόκρισης των καλωδιωτών ιστών σε φυσική κλίμακα που ενσωματώνουν το μοντέλο τους, σε σύγκριση με άλλα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.

Ο Kahla (1994), προκειμένου να μοντελοποιήσει καλωδιωτούς ιστούς, χρησιμοποίησε στοιχεία καλωδίων που ήταν απολύτως εύκαμπτα και είχαν γραμμικούς ιξώδεις αποσβεστήρες παράλληλα με κάθε στοιχείο. Οι αποσβεστήρες αυτοί συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό για την απορρόφηση ενέργειας που σχετίζεται με τα υλικά και την τριβή μεταξύ των κλώνων.

Δεν έχουν υπάρξει πολλές μελέτες μοντέλων καλωδίων που εξετάζουν τη μετάβαση από χαλάρωση σε τέντωμα και την επίδρασή της στη συμπεριφορά των κατασκευών. Ενώ οι περισσότερες αναλύσεις με καλωδιωτές κατασκευές χρησιμοποιούν μόνο την τάση εφελκυσμού για τη διαμόρφωση του στοιχείου καλωδίου, οι συγκεκριμένες επιπτώσεις της εν λόγω απόφασης μοντελοποίησης σπάνια εξετάζονται. Τα φορτία θραύσης που συνδέονται με τα στάδια μετάβασης στα στοιχεία με τάση εφελκυσμού μόνο είναι γενικώς αποδεκτά και αυτό επιβάλλει μία πιο προσεκτική ματιά στις επιπτώσεις τους στη δομική απόκριση.

Ένα ιδιαίτερο πεδίο έρευνας που ασχολείται με τις εναλλασσόμενες ιδιομορφές χαλάρωσης και τεντώματος των καλωδίων είναι οι θαλάσσιες εφαρμογές. Ο Plaut (2000) διεξήγαγε μία μελέτη σχετικά με τα φορτία θραύσης στις γραμμές πρόσδεσης ενός υποβρύχιου κυλίνδρου. Διαπιστώθηκε ότι με τις μεγάλες κινήσεις οι γραμμές πρόσδεσης μπορούσαν να χαλαρώσουν και, με την επιστροφή τους σε τεντωμένη κατάσταση, σημειωνόταν μια ακίδα στην τάση εφελκυσμού, η οποία ήταν βραχύβια αλλά συχνά πολύ μεγαλύτερη από ό, τι θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί με ένα γραμμικό ελατήριο.

Μία τέτοια μελέτη, που εξέτασε τα αποτελέσματα των χαλαρών καλωδίων κατά τη διάρκεια της σεισμικής κίνησης, διεξήχθη από τους Filiatrault και Stearns (2004). Αν και η συγκεκριμένη μελέτη εξέτασε τα πιθανά οφέλη από τη σύνδεση ηλεκτρικού εξοπλισμού με ελαφρώς χαλαρά καλώδια, έχει ιδιαίτερη σημασία για όλους τους τύπους κατασκευών που θα μπορούσαν να επηρεαστούν από τη συμπεριφορά θραύσης των καλωδίων. Η έρευνα αυτή εξέτασε διάφορα είδη εξοπλισμών, με διαφορετικά επίπεδα αρχικής χαλάρωσης σχοινιών. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν δύο πολύ διαφορετικούς τύπους απόκρισης. Για τις περιπτώσεις μικρότερης χαλάρωσης, εμφανίστηκε ένας σημαντικός βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των εξοπλισμών, μεταβάλλοντας τις θεμελιώδεις συχνότητες των

εξοπλισμών και, κάποιες φορές, η δυναμική απόκριση ενισχύθηκε από την παρουσία των καλωδίων. Οι περιπτώσεις με μεγαλύτερη αρχική χαλάρωση δεν εμφάνισαν σημαντικές μεταβολές στις θεμελιώδεις συχνότητες και η δυναμική απόκριση ήταν γενικώς μειωμένη. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις, αύξησε τις αναλογίες απόσβεσης που συνδέονται με τον εξοπλισμό. Έτσι, τα οφέλη απόσβεσης μπορούν να φανούν με τη χρήση χαλαρών καλωδίων, αλλά πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή περιπτώσεων όπου η δυναμική απόκριση ενισχύεται.

Ο ενεργητικός έλεγχος των καλωδίων εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε από τους Preumontetal. (2000) για την απόσβεση ενός καλωδιωτού δικτυώματος. Κάθε καλώδιο ήταν εφοδιασμένο με έναν αισθητήρα για τη μέτρηση της τάσης εφελκυσμού του καλωδίου και με έναν ενεργοποιητή για τον έλεγχο της τάσης εφελκυσμού του καλωδίου. Υπάρχουν συγκεκριμένοι νόμοι ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον τρόπο μεταβολής της τάσης εφελκυσμού στα καλώδια. Αυτή η μορφή ενεργητικού ελέγχου αποδείχθηκε πως αυξάνει τη δυσκαμψία και απορροφά ενέργεια για όλες τις υπό έρευνα περιπτώσεις. Στα ευρήματα περιλαμβάνεται και η ανακάλυψη πως, όσο πιο ελαφριά είναι τα καλώδια, τόσο λιγότερη αρνητική επίπτωση έχουν στην κατασκευή οι ταλαντώσεις των καλωδίων.

Η χρήση τενόντων που συμπληρώνουν ένα ταλαντούμενο διατμητικό τοίχωμα εξετάστηκε από τους Ajrabetal. (2004). Σκοπός της έρευνας αυτής ήταν να εξετάσει οικονομικά αποτελεσματικούς τρόπους για την ελαχιστοποίηση των σχετικών μετατοπίσεων και τον έλεγχο δομικών βλαβών κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων. Σε προηγούμενες μελέτες αποδείχθηκε ότι η απόκριση του διατμητικού τοιχώματος παρείχε ελάχιστη απόσβεση, με ποσοστό απόσβεσης μικρότερο από 2%. Ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι η χρησιμοποίηση συμπληρωματικών συστημάτων τενόντων σε συνδυασμό με το διατμητικό τοίχωμα έχει τη δυνατότητα για σημαντική απόσβεση, με αναλογίες απόσβεσης στο γενικό φάσμα του 20%. Οι τένοντες τοποθετήθηκαν σε διάταξη «x» διαμέσου του διατμητικού τοιχώματος και κάθε τένοντα περιελάμβανε έναν αποσβεστήρα. Η δομική απόδοση ήταν σχετικά διαφορετική και άσχετη με τον βαθμό προέντασης στους τένοντες. Εντούτοις, οι προεντάσεις που περιείχονταν στη μελέτη ήταν πάντα αρκετά μεγάλες ώστε να εμποδίζουν τον τένοντα να χαλαρώνει κατά τη διάρκεια του κύκλου αντιστροφής της φόρτισης. Το αποτέλεσμα αυτών των πειραμάτων δείχνει ότι η εγγενής δυνατότητα στη συμπεριφορά των συνθετικών σχοινιών για απόσβεση μπορεί να αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην απόκριση μιας κατασκευής.

1.2.3 Σχεδιασμός Καλωδιωτών Ιστών

Η παρούσα έρευνα έχει ως στόχο να αποτελέσει μια γενική διερεύνηση χωρίς να είναι προσανατολισμένη σε συγκεκριμένο σχεδιασμό. Ενώ είναι απαραίτητη κάποια αίσθηση του πρακτικού σχεδιασμού και της φύσης των καλωδιωτών ιστών για την ενστάλαξη ενός μέτρου λογικότητας στα αποτελέσματα, ο σκοπός δεν είναι να σχεδιάσουμε

έναν συγκεκριμένο καλωδιωτό ιστό και στη συνέχεια να δοκιμάσουμε την κατασκευή κάτω από αναρίθμητες συνθήκες. Ο σκοπός είναι να διερευνηθεί η γενική συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών που ενσωματώνουν συνθετικά σχοινιά και η διεξαγωγή μελετών ευαισθησίας. Συνεπώς, δεν επιθυμούμε να συμπεριλάβουμε τον λυγισμό μεμονωμένων μελών, ειδικές οριακές καταστάσεις ή αστοχίες υλικού στο μοντέλο της κατασκευής. Για αυτόν το λόγο, διεξήχθη μόνο βασική έρευνα στο σχεδιασμό καλωδιωτών ιστών έτσι ώστε οι μελέτες να έχουν σχέση με καθημερινές εφαρμογές.

Οι καλωδιωτοί πύργοι χρησιμοποιούνται για μια σειρά κατασκευαστικών σκοπών, με τους δύο πιο κοινούς να είναι οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι πύργοι επικοινωνιών. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές ρυθμίσεις και δομικά σχήματα με τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν αυτοί οι καλωδιωτοί πύργοι, όλα με ξεκάθαρα πλεονεκτήματα για συγκεκριμένες καταστάσεις. Για την έρευνα αυτή, η απλή μορφή καλωδιωτού ιστού χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο για πύργους επικοινωνιών. Αυτοί αποτελούνται από έναν κατακόρυφο ιστό με συρματόσχοινα στήριξης που συνήθως εκτείνονται από πολλαπλά επίπεδα προς το έδαφος. Ωστόσο, ορισμένες από τις κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού που αφορούν τους πύργους ηλεκτρικής μεταφοράς εξακολουθούν να εφαρμόζονται και επανεξετάστηκαν επίσης.

Η Αμερικανική Εταιρεία Πολιτικών Μηχανικών (ASCE) διατηρεί μια σειρά Εγχειριδίων και Εκθέσεων Πρακτικής Εφαρμογής Μηχανικού. Αρκετά από αυτά είναι αφιερωμένα στο σχεδιασμό πύργων μετάδοσης και αποδείχθηκαν χρήσιμα για κριτήρια σχεδιασμού.

Στο Εγχειρίδιο 72 (ASCE 1990), σημειώνεται ότι τα μεταλλικά καλώδια με κλώνους είναι συνήθως το υλικό επιλογής για καλώδια και το μέτρο αντοχής που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι η ελάχιστη αντοχή σε θραύση. Εάν δεν είναι γνωστές οι συγκεκριμένες ιδιότητες του καλωδίου, χρησιμοποιούνται 23.000 ksi ως γενική εκτίμηση για το μέτρο ελαστικότητας αυτών των μεταλλικών καλωδίων με κλώνους. Όσον αφορά τον σχεδιασμό των καλωδίων, η τάση εφελκυσμού υπό φορτία μελέτης διατηρείται κάτω από 60% της αντοχής θραύσης ώστε να μην επιτραπεί στην παραμόρφωση να γίνει μη γραμμική στο σημείο διαρροής. Ορισμένες από τις συνιστώμενες πρακτικές μοντελοποίησης διευκρινίζουν ότι οι καλωδιωτοί ιστοί δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως αξονικές αντηρίδες και ότι τα καλώδια μπορούν να μοντελοποιηθούν ως στοιχεία μελών δικτυώματος τάσης εφελκυσμού μόνο. Και μία συμπληρωματική σημείωση, σε ορεινό έδαφος τα καλώδια μπορούν να είναι διπλάσια σε μήκος σε σύγκριση με μία κατασκευή σε επίπεδο έδαφος, κάτι που μπορεί να επιφέρει σημαντικές μεταβολές στη δομική συμπεριφορά.

Το Εγχειρίδιο 52 (ASCE 1988) παρέχει ορισμένα στοιχεία σχετικά με την προένταση των καλωδίων. Ενώ η αρχική τάση εφελκυσμού που απαιτείται εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (μήκος και μέγεθος του καλωδίου, επιτρεπόμενη παραμόρφωση της

δομής), μια προένταση του 10% της ονομαστικής αντοχής σε θραύση επαρκεί γενικώς προκειμένου να εμποδίσει την χαλάρωση των καλωδίων. Κάποιες φορές αυτά τα καλώδια παρέχονται προεντεταμένα και κομμένα σε ορισμένο μήκος, αλλά τις περισσότερες φορές κόβονται στο πεδίο και χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός ρύθμισης όπως ο εντατήρας. Ενδιαφέρον επίσης είναι το γεγονός ότι οι στήλες των καλωδιωτών ιστών σχεδόν πάντα έχουν συστήματα αντιστήριξης τάσης εφελκυσμού-θλίψης.

Όλες οι πραγματικές κατασκευές έχουν κάποια εγγενή απόσβεση, κάτι που δίνει τη δυνατότητα σημαντικής μεταβολής της δομικής συμπεριφοράς. Το Εγχειρίδιο 74 (ASCE 1991) παρέχει τις μέσες τιμές απόσβεσης για τις δομικές ταλαντώσεις στους πύργους μετάδοσης. Αυτές οι αναλογίες καλύπτουν το φάσμα από 4 έως 8%.

Το πλέον σχετικό αυτών των εγχειριδίων είναι το 91 (ASCE 1997), το οποίο έχει τίτλο *Σχεδιασμός Καλωδιωτών Κατασκευών Ηλεκτρικής Μετάδοσης*. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα καλώδια είναι συνήθως μεταλλικά με κλώνους και αυτό το εγχειρίδιο παρέχει έναν πίνακα των αντοχών σε θραύση για τυπικές διαμέτρους μεταλλικών καλωδίων με κλώνους. Αυτό είναι χρήσιμο για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μεταλλικών καλωδίων με κλώνους έναντι των συνθετικών σχοινιών υψηλού μέτρου ελαστικότητας, τα οποία προσφέρουν ισόποση αντοχή για την ίδια διάμετρο με πολύ λιγότερο βάρος. Για μια κανονική κατασκευή γραμμής μεταφοράς, η προένταση στα καλώδια κυμαίνεται από 5 έως 10% της αντοχής σε θραύση. Ωστόσο, τα καλώδια στις κατασκευές γραμμών ηλεκτρικής μεταφοράς είναι σχεδόν πάντα τεντωμένα, κάτι που δεν ισχύει για τις ψηλές κατασκευές μεταφοράς. Οι συνήθειες και αποτελεσματικές κλίσεις των καλωδίων κυμαίνονται από 45 έως εξήντα μοίρες από την οριζόντια.

Μεταξύ άλλων γενικών εκτιμήσεων σχεδιασμού, οι περισσότεροι ιστοί είναι θεωρητικά αρθρωτοί στις στηρίξεις τους. Για το επίπεδο των δικτυωτών ιστών με πολλαπλά καλώδια, το μοντέλο απλού στύλου (που δεν περιλαμβάνει την κάμψη) δεν είναι αποδεκτό για τη μοντελοποίηση καλύβδινων ιστών, ακόμη και όταν αρθρώνεται στη βάση, λόγω της σημαντικής δυσκαμψίας στον ιστό. Επίσης, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις πιθανών μεγάλων παραμορφώσεων επιπλέον της μεγάλης αξονικής θλίψης, συνιστάται η χρησιμοποίηση μηγραμμικής ανάλυσης με H/Y για το σχεδιασμό των καλωδιωτών κατασκευών στις γραμμές ηλεκτρικής μεταφοράς (ASCE 1997).

Ο Mulherin (1998) πραγματοποίησε μία μελέτη σχετικά με τις αστοχίες των πύργων επικοινωνίας εξαιτίας ατμοσφαιρικής ψύξης. Αν και οι αστοχίες λόγω ψύξης δεν είναι το επίκεντρο της τρέχουσας διερεύνησης, η έρευνα χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό των τάσεων που παρατηρήθηκαν στους πύργους αυτούς. Από τις 77 περιπτώσεις που μελετήθηκαν και διερευνήθηκαν, όλες εκτός από μία αφορούσαν καλωδιωτούς πύργους. Η έρευνα έδειξε ότι η πλειοψηφία αυτών των καλωδιωτών πύργων επικοινωνίας ήταν τριγωνικής διατομής, με σκέλη και αντιστήριξη από συμπαγή ράβδο,

κοίλες διατομές ή γωνιακά από χάλυβα. Ανάλογα με το ύψος του πύργου, τα καλώδια συνδέθηκαν σε οποιοδήποτε από το ένα έως τέσσερα σύνολα σημείων αγκύρωσης στο έδαφος. Ο Mulherin ανέφερε επίσης ότι οι περισσότεροι ιστοί είχαν μια ομοιόμορφη διατομή, αλλά δεν ήταν ασυνήθιστη η ύπαρξη κωνικού ιστού συνθέτων διατομών.

Ο Σύνδεσμος Τηλεπικοινωνιακής Βιομηχανίας εξέδωσε ένα πρότυπο (TIA 1996) για το σχεδιασμό των πύργων στήριξης κεραιών. Σε αυτό το βιομηχανικό πρότυπο, το συνιστώμενο εύρος για την αρχική τάση εφελκυσμού στους ιστούς είναι από 8 έως 15% της δημοσιευμένης αντοχής σε θραύση. Αυτές οι προτάσεις αποτελούν μία προσπάθεια αποφυγής της συμπεριφοράς αιώρησης και χαλάρωσης των καλωδίων για περιπτώσεις χαμηλής τάσης και για την αποφυγή αιολικών ταλαντώσεων για περιπτώσεις υψηλής τάσης.

Ο Madugula (2002) παρέχει ίσως την πιο ολοκληρωμένη διαθέσιμη θεώρηση σχετικά με τον σχεδιασμό καλωδιωτών ιστών και δικτυωτών πύργων. Ενώ ο αντισεισμικός σχεδιασμός των καλωδιωτών ιστών γενικώς αμελείται ή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας εσφαλμένα κανονισμούς δόμησης, ο Madugula παρέχει ένα ενδελεχές περίγραμμα πολλών στατικών και δυναμικών διαδικασιών εφαρμόσιμων σε καλωδιωτούς ιστούς. Από αυτή την πηγή καλύπτονται πολλά ενδιαφέροντα θέματα, όμως εδώ καλύπτονται μόνο οι πιο σχετικές ιδέες.

Μία διάκριση στο ύψος των πύργων επικοινωνίας είναι ότι οι περισσότεροι πύργοι τηλεπικοινωνιών έχουν ύψος μέχρι 100 m, ενώ οι πύργοι μετάδοσης κυμαίνονται γενικώς από 120 έως 600 m ύψος. Εκείνοι που έχουν κατασκευαστεί ως καλωδιωτοί ιστοί μπορούν να έχουν 20 ή περισσότερες ιδιομορφές ενεργητικής ταλάντωσης και οι σεισμοί έχουν γενικώς την δυνατότητα να διεγείρουν ιδιομορφές από 0,1 έως 10 Hz. Όταν μοντελοποιούμε καλωδιωτούς ιστούς για την ανάλυση των επιπτώσεων των σεισμών, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούμε έναν γυμνό πύργο, απαλλαγμένο από οποιαδήποτε επιπλέον μάζα κεραιών, δεικτών ή άλλου εξοπλισμού. Επίσης, ο Madugula επισημαίνει ότι, ενώ οι καλωδιωτοί ιστοί είναι συνήθως αρθρωτοί στη βάση τους, τα κοντά και συνήθως δύσκαμπτα καλώδια κοντά στη βάση μπορεί μερικές φορές να οδηγήσουν σε οριακή κατάσταση που προσεγγίζει τη συμπεριφορά πάκτωσης (Madugula, 2002).

Στους καλωδιωτούς ιστούς, τα καλώδια παρέχουν αντίσταση στην πλευρική κίνηση μέσω του ελαστικού τεντώματος και της αλλαγής της καμπύλωσης. Εάν υπάρχει μια μέτρια κοίλη καμπύλη στα καλώδια, η ενέργεια που απαιτείται για να μειωθεί η κοίλη καμπύλη, δηλ. αύξηση της μάζας του καλωδίου, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη δυστένεια του καλωδίου. Έτσι, η δυναμική δυσκαμψία και η απόκριση των καλωδίων μπορεί να γίνει εξαιρετικά μη γραμμική λόγω καμπυλότητας της διατομής καλωδίου και επιπλέον τάσης εφελκυσμού λόγω ταλάντωσης. Επίσης, εξαιτίας της σχετικής ελαφρότητας των τυπικών ιστών και των μεγάλων αθροιστικών μηκών των καλωδίων σε τέτοιες κατασκευές, τα

καλώδια μπορεί να αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό τμήμα της συνολικής μάζας της κατασκευής (Madugula, 2002).

Ο Madugula αναφέρει ότι οι μη γραμμικές επιπτώσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μοντελοποίηση καλωδιωτών ιστών, καθώς και η ισχυρή κατακόρυφη εδαφική κίνηση, όπως αυτή που φαίνεται στο σεισμό Northridge. Στο σύστημα υπάρχουν εγγενή μέσα απορρόφησης ενέργειας λόγω της δομικής, αεροδυναμικής και εδαφικής απόσβεσης. Ωστόσο, προκειμένου να ελεγχθεί η δυναμική απόκριση στον άνεμο και στις μεγάλες εδαφικές κινήσεις, υπάρχουν και πολλές επιλογές για συμπληρωματική απορρόφηση ενέργειας με τη χρήση ενεργητικών και παθητικών αποσβεστήρων, καθώς και αποσβεστήρες εξαρτώμενους από τη μετατόπιση και την ταχύτητα (Madugula, 2002).

1.2.4 Έρευνα σχετικά με τους Καλωδιωτούς Ιστούς

Υπήρξαν αρκετές προηγούμενες μελέτες σχετικά με τη δυναμική συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών και των πύργων τηλεπικοινωνιών. Η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των αναλύσεων πραγματεύονται τη δυναμική απόκριση των καλωδιωτών ιστών σε φορτία ανέμου. Παρόλο που η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται ειδικά στη σεισμική απόκριση, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των ιστών για φορτία ανέμου παραμένουν εφαρμόσιμες και παρέχουν ένα σημείο εκκίνησης για την ανάπτυξη των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν καθ' όλη την τρέχουσα έρευνα.

Τα πειράματα πεδίου σχετικά με τη δυναμική διέγερση υπό κανονικές ταχύτητες ανέμου ενός καλωδιωτού ιστού ύψους 50 m, διεξήχθησαν από τους Harikrishnaetal. (2003) στην Ινδία. Η κατασκευή που δοκιμάστηκε είχε μία σταθερή, τετράγωνη διατομή με για τα κατακόρυφα μέλη από χαλύβδινες διατομές γωνιακών. Είχε τέσσερα επίπεδα καλωδίων και τέσσερα επίπεδα σε κάθε καλώδιο. Ο ίδιος ο ιστός ήταν εξοπλισμένος με ανεμόμετρα και επιταχυνσιόμετρα για να καταγράψει τη δύναμη του ανέμου, καθώς και τη δομική απόκριση. Ελήφθη μεγάλος όγκος δεδομένων για μία εκτεταμένη χρονική περίοδο και η μετρηθείσα απόκριση έδειξε την παρουσία πυκνά διατεταγμένων ιδιομορφών και σημαντικής πολυμορφικής διέγερσης. Οι λόγοι απόσβεσης στην κατασκευή κυμαίνονταν μεταξύ 1 και 3% με μέσο όρο 1,6%, σε σύγκριση με μια αποδεκτή τιμή 2% για κοκλιωτές χαλύβδινες κατασκευές. Αυτή ήταν μικρότερη από την αναφερθείσα τιμή 4 έως 8% που σχετίζεται με πύργους μεταφοράς ηλεκτρισμού (ASCE, 1991).

Οι Borri και Zahlten (1991) ανέλυσαν έναν καλωδιωτό ιστό ύψους 130 m με τέσσερα επίπεδα καλωδίων υπό φορτία ανέμου. Ένα από τα βασικά αποτελέσματα ήταν ότι η δυναμική απόκριση της κατασκευής μπορεί να είναι αισθητά διαφορετική αν συμπεριληφθούν οι μη γραμμικές επιπτώσεις λόγω μεγάλων μετατοπίσεων. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν διαφορές της τάξης του 25% στις υπολογισμένες μετατοπίσεις και εσωτερικές δυνάμεις όταν διεξήχθη μη γραμμική ανάλυση.

Σε έρευνα που αφορά τη δυναμική ανάλυση καλωδιωτών ιστών υπό φορτία ανέμου, ο Kahla (1994) χρησιμοποίησε ισοδύναμες δοκούς-υποστυλώματα για να μοντελοποιήσει τον ιστό. Αυτό του πρόσφερε μία εύκολη μέθοδο να προσεγγίσει τη μοντελοποίηση του ιστού και να μειώσει δραστικά τον αριθμό των απαραίτητων στοιχείων, επιτυγχάνοντας παράλληλα αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ο Moossavi Nejad (1996) εξέτασε τη δυναμική απόκριση ενός καλωδιωτού ιστού ύψους 327 m με πέντε επίπεδα καλωδίων. Το αναλυτικό μοντέλο του ιστού υποβλήθηκε σε τρισδιάστατες, τεχνητά δημιουργημένες σεισμικές διεγέρσεις. Παρατηρήθηκε η ιδιαίτερα μη γραμμική δομική συμπεριφορά και φάνηκε ότι οι ισχυρές εδαφικές κινήσεις μπορούν να προκαλέσουν υψηλά επίπεδα δυναμικής τάσης εφελκυσμού στα καλώδια.

Σε μία μελέτη των Guevara και McClure (1993) αναλύθηκαν δύο καλωδιωτοί ιστοί υπό σεισμικές φορτίσεις. Δόθηκαν συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με τη γεωμετρία και τη δυσκαμψία των πύργων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των μοντέλων στην τρέχουσα έρευνα. Κατά την ανάλυση των ιστών, η απόκριση όσον αφορά τα αξονικά, πλευρικά και στρεπτικά φορτία ενός ισοδύναμου μοντέλου δοκού διέφερε κατά λιγότερο από 5% από ένα λεπτομερές μοντέλο χωροδικτυώματος. Η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ των καλωδίων και του ιστού είναι σημαντική, ιδιαίτερα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

Η επίδραση της πολλαπλής διέγερσης στηρίξεων στους καλωδιωτούς ιστούς εξετάστηκε ειδικά από τους Amirietal. (2004). Η έρευνα αυτή εξέτασε δύο ιστούς με ύψος 342 m και 607 m. Χρησιμοποιώντας μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, οι αποκρίσεις των κατασκευών μετρήθηκαν για διαφορετικές ταχύτητες εγκάρσιων κυμάτων (Vs) και συγκρίθηκαν με εκείνες που οφείλονται σε ομοιόμορφη εδαφική κίνηση. Όταν περιλαμβάνεται η χωρική επίπτωση των εδαφικών αποστάσεων μεταξύ των καλωδιακών αγκυρίων, διαπιστώθηκε ότι η πλευρική μετατόπιση του άκρου του πύργου μειώθηκε, ενώ η τέμνουσα βάσης και η αξονική δύναμη είχαν μία σημαντική αύξηση, της τάξης του 15 έως 38%.

Ο Amirgi (2002) διεξήγαγε αρκετές μελέτες πλήρους κλίμακας, ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για τη σεισμική απόκριση των καλωδιωτών ιστών. Σε αυτή την έρευνα επανεξετάστηκαν προηγούμενες σεισμικές μελέτες, οι οποίες όμως ήταν λίγες και μελετούσαν μόνο συγκεκριμένα θέματα. Συνήθως, τα φορτία ανέμου και πάγου ελέγχουν το σχεδιασμό των καλωδιωτών ιστών, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα οι επιπτώσεις των σεισμών συχνά να «αγνοούνται ή να αξιολογούνται εσφαλμένα». Σκοπός της μελέτης ήταν να αναπτύξει ορισμένους απλούς δείκτες ευαισθησίας στη σεισμική κίνηση έτσι ώστε οι μελετητές να γνωρίζουν πότε είναι σκόπιμο να συμπεριλάβουν τις σεισμικές επιπτώσεις στο σχεδιασμό των καλωδιωτών ιστών. Μελετήθηκαν οκτώ υφιστάμενοι πύργοι που κυμαίνονται σε ύψος από 150 m έως 607 m και τα εμπεριστατωμένα στοιχεία που δόθηκαν σχετικά με τις γεωμετρίες των

πύργων, τα βάρη και τις τάσεις καλωδίων χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων στην παρούσα έρευνα.

Ο Amiri (2002) περιέγραψε τις τάσεις και τις συμπεριφορές καλωδιωτών ιστών ύψους 150 έως m 350 m: οι ιστοί με θεμελιώδεις φυσικές περιόδους εύρους από 0,5 έως 3,0 Hz ήταν ευαίσθητοι στην οριζόντια κίνηση· η τέμνουσα βάση κυμαινόταν από 40 έως 80% του βάρους του πύργου· η δυναμική συνιστώσα της αξονικής δύναμης στον ιστό ήταν περίπου 80% του βάρους του πύργου· οι δυναμικές τάσεις καλωδίων κατά κανόνα κυμαίνονταν από 50 έως 200% της αρχικής τάσης· και οι καλωδιωτοί ιστοί με σχετικά χαλαρά καλώδια (αρχικές τάσεις κάτω από 5% της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό) ήταν ευαίσθητοι στο συνδυασμό κατακόρυφης και οριζόντιας εδαφικής κίνησης. Η μελέτη έδειξε ότι οι ασυνέχειες στη συμπεριφορά κατά μήκος του ιστού ήταν αναμενόμενες εξαιτίας των διαφορών στην πλευρική δυσκαμψία στα επίπεδα των καλωδίων και μεταξύ των επιπέδων των καλωδίων. Επιπροσθέτως, οι επιπτώσεις της αδράνειας των καλωδίων είχαν μόνο μία μικρή επιρροή στην πλευρική απόκριση του ιστού, αλλά ήταν δύσκολη η πρόβλεψη όσον αφορά την απόκριση στις κατακόρυφες επιταχύνσεις.

1.2.5 Εδαφικές Κινήσεις

Τα σεισμικά γεγονότα είναι εξαιρετικά απρόβλεπτα και, κατά συνέπεια, η επιλογή μίας συγκεκριμένης εδαφικής κίνησης (-εων) για χρήση στο σχεδιασμό μίας κατασκευής είναι πολύπλοκη. Ενώ υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την αναζήτηση και εύρεση καταγραφών κατάλληλων για έναν συγκεκριμένο σχεδιασμό, η παρούσα έρευνα προσπαθεί απλώς να χρησιμοποιήσει ιστορικές εδαφικές καταγραφές ανεξάρτητα από τον σχεδιασμό κινήσεων που θα υπάρχουν σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία.

Οι Chen και Scawthorn (2003) πρόσφεραν μία ολοκληρωμένη μελέτη ιστορικών σεισμών και πρακτικών σχεδιασμού. Παρουσιάστηκαν εξαιρετικά χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με παλαιότερους σεισμούς, τα μεγέθη τους και τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης, εξηγήθηκαν προσεκτικά πληροφορίες σχετικά με τη μοντελοποίηση ισχυρής εδαφικής κίνησης.

Ο Madugula (2003) ανέφερε ότι, εάν χρησιμοποιηθούν σωστά, οποιοδήποτε από τα τρία είδη καταγραφών (πραγματικές, τροποποιημένες και συνδυασμένες) εδαφικών κινήσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον αντισεισμικό σχεδιασμό καλωδιωτών ιστών.

Όταν απαιτείται από κώδικα ένας λεπτομερής αντισεισμικός σχεδιασμός, η πλειοψηφία των σεισμικών κωδίκων απαιτεί η κατασκευή να αναλυθεί για ένα γεγονός συγκεκριμένου μεγέθους και απόστασης. Μία από τις προσεγγίσεις για την παραγωγή μιας εδαφικής καταγραφής για τον σχεδιασμό αυτού του γεγονότος είναι να γίνει μια καταγραφή παρόμοιου μεγέθους και να κλιμακωθεί ώστε να ταιριάζει με το επιθυμητό συμβάν. Η

συνηθέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η κλιμάκωση σε σχέση με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), αν και δεν είναι η μοναδική τεχνική (Shomeetal., 1998).

1.3 Σκοπός και Πεδίο Εφαρμογής της Έρευνας

Ο σκοπός της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει τη σεισμική συμπεριφορά καλωδιωτών ιστών που χρησιμοποιούν συνθετικά σχοινιά. Η απορρόφηση ενέργειας που σχετίζεται με τη φύση υστερητικής φόρτισης των συνθετικών σχοινιών τα καθιστά δυνητικά χρήσιμα ως παθητικούς μηχανισμούς ελέγχου. Σήμερα, οι καλωδιωτοί ιστοί χρησιμοποιούνται συχνά στον τομέα των επικοινωνιών και χρησιμοποιούν σχεδόν αποκλειστικά συρματόσχοινα με κλώνους για τα καλώδια. Η εναλλακτική χρήση συνθετικών σχοινιών υψηλού μέτρου ελαστικότητας, τα οποία διαθέτουν συγκρίσιμη αντοχή και σημαντικά μικρότερο βάρος από ό,τι τα καλύβδινα συρματόσχοινα με κλώνους, προσφέρει τη δυνατότητα ελαχιστοποίησης της δυναμικής δομικής απόκρισης, καθώς και μείωσης των αρνητικών επιπτώσεων των ταλαντώσεων στα καλώδια. Επίσης, τα ακαριαία φορτία, που εμφανίζονται κατά τη μετάβαση από καλάρωση σε τέντωμα, έχουν την πιθανότητα να επηρεάσουν σημαντικά το δομικό σύστημα και οι επιπτώσεις τους πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά.

Οι προηγούμενες έρευνες σχετικά με τη συμπεριφορά των ακαριαίων φορτίων σε αυτά τα συνθετικά σχοινιά υψηλού μέτρου ελαστικότητας κατέστησαν δυνατό το χαρακτηρισμό της δυναμικής συμπεριφοράς τους. Ωστόσο, η συμπεριφορά αυτή είναι εξαιρετικά μη γραμμική και ασυνεχής μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης. Προκειμένου να ενσωματώσουμε αποτελεσματικά το μοντέλο σχοινιών σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, ήταν απαραίτητο ένα απλοποιημένο μοντέλο. Τα απλά ιξωδοελαστικά μοντέλα, που περιλαμβάνουν έναν συνδυασμό στοιχείων ελατηρίου και αποσβεστήρα, ερευνήθηκαν για να καθορίσουμε μια επαρκή, αλλά απλή απεικόνιση των σχοινιών. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων καλωδιωτού ιστού, βασισμένο στη βασική έρευνα σχετικά με τις τρέχουσες πρακτικές σχεδιασμού. Στο τυποποιημένο μοντέλο, κατά την παρατήρηση της τρισδιάστατης δομικής συμπεριφοράς και των ενδεχόμενων επιπτώσεων των φορτίων θραύσης, διεξήχθησαν παραμετρικές (ή ευαισθησίας) μελέτες.

Πολλές σεισμικές μελέτες περιλαμβάνουν εδαφικές κινήσεις προς μία κατεύθυνση μόνο, αλλά η απλοποίηση αυτή απέχει πολύ από αυτό που πραγματικά συμβαίνει. Επίσης, προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει ότι οι κατακόρυφες εδαφικές κινήσεις μπορεί να έχουν σημαντικές δυναμικές επιπτώσεις στις τάσεις των καλωδίων και, ως εκ τούτου, θα πρέπει να περιλαμβάνονται σε όλες τις σεισμικές αναλύσεις καλωδιωτών ιστών. Για αυτούς τους λόγους, δύο ιστορικές καταγραφές τρισδιάστατων εδαφικών κινήσεων, που παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά μεγέθους και συχνότητας, χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα και προσδιορίστηκαν οι τρισδιάστατες αποκρίσεις.

Οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν από αυτές τις μελέτες χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των συνθετικών σχοινιών στους καλωδιωτούς ιστούς. Τα αποτελέσματα θα χρησιμεύσουν για την αύξηση της γενικής γνώσης όσον αφορά τα ακαριαία φορτία και για την υποστήριξη της έρευνας με κατεύθυνση τη διερεύνηση της δυναμικής εφαρμογής των SCEDs στις κατασκευές.

1.4 Γενική Επισκόπηση της Εργασίας

Πέραν του παρόντος εισαγωγικού Κεφαλαίου 1, η όλη Διπλωματική Εργασία αποτελείται από πέντε (5) ακόμα Κεφάλαια, Βιβλιογραφία και τρία (3) Παραρτήματα (Α, Β, Γ). Το περιεχόμενο τους έχει συνοπτικά ως εξής:

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αποφάσεις προσομοίωσης, οι οποίες αφορούν το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε, ενώ περιγράφονται η ανάπτυξη και ο επακόλουθος έλεγχος των δύο μελετών τεκμηρίωσης - επικύρωσης που πραγματοποιήθηκαν, με σκοπό την επιβεβαίωση της ακρίβειας των αποφάσεων.

Το 3^ο Κεφάλαιο ασχολείται με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη ενός μοντέλου σχοινιών στο ABAQUS που προσεγγίζει τη συμπεριφορά που παρατηρήθηκε σε προηγούμενα πειράματα. Οι σχέσεις φορτίου-μετατόπισης των δυναμικών μοντέλων ελατηρίων και αποσβεστήρων παρουσιάζονται και συγκρίνονται με τη δυναμική συμπεριφορά που έχει καταγραφεί σε προηγούμενες έρευνες.

Στο 4^ο Κεφάλαιο εξετάζεται η μόρφωση των τρισδιάστατων μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα Εργασία. Εκτός από τις εδαφικές κινήσεις που θα χρησιμοποιηθούν, περιγράφονται και οι αποφάσεις σχετικά με το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση των πύργων. Δίνεται μία σύνοψη προκειμένου να επισημανθούν οι παράμετροι των δοκιμών - αναλύσεων που θα πραγματοποιηθούν.

Το 5^ο Κεφάλαιο αφορά την κατάδειξη και τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων των παραμετρικών μελετών που πραγματοποιήθηκαν σε δύο καλωδιωτούς ιστούς. Περιγράφονται οι τάσεις της συμπεριφοράς αυτών των κατασκευών καθώς και οι συγκεκριμένες επιπτώσεις των ακαριαίων φορτίων.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο δίνεται μια σύντομη περίληψη των διαδικασιών και των αποτελεσμάτων της Διπλωματικής, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα εξαχθέντα συμπεράσματα και κατατίθενται προτάσεις βελτίωσης - μελλοντικής έρευνας.

Σε ότι αφορά τα Παραρτήματα, στο Α παρέχονται υποστηρικτικές πληροφορίες για το πρώτο προκαταρκτικό μοντέλο που υιοθετήθηκε, στο Β δίνονται υποστηρικτικές πληροφορίες επί του αναλυτικού μοντέλου με έμφαση στις γραφικές απεικονίσεις των εδαφικών κινήσεων που χρησιμοποιήθηκαν και στο Παράρτημα Γ καταγράφονται τα γραφικά αποτελέσματα των παραμετρικών μελετών.

Κεφάλαιο 2 : Μέθοδοι και Μελέτες Τεκμηρίωσης

2.1 Προκαταρκτική Τεκμηρίωση

Η ποιότητα αυτής της ερευνητικής προσπάθειας βασίζεται αποκλειστικά στη δυνατότητα ακριβούς προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των συστημάτων καλωδιωτών ιστών και στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων με το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακριβής χρήση του λογισμικού αυτού, αναλύθηκαν αρκετά απλά προκαταρκτικά μοντέλα και στη συνέχεια συγκρίθηκαν με τη θεωρητική συμπεριφορά τους. Δεδομένου ότι η ακρίβεια των διαδικασιών προσομοίωσης υπαγορεύει πλήρως το βαθμό εφαρμοσιμότητας των αποτελεσμάτων της έρευνας, πρόκειται για ένα σημαντικό έργο που έπρεπε να ολοκληρωθεί πριν την περαιτέρω συνέχιση της έρευνας.

2.2 Προεπισκόπηση Λογισμικού

Το ABAQUS είναι ένα από τα κορυφαία προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στον κόσμο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση μιας ολοκληρωμένης σειράς φυσικών συμπεριφορών (ABAQUS, 2007). Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να επιλύσει εύκολα δυναμικά, μη γραμμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων καλωδιωτών ιστών. Προκειμένου να προσομοιωθεί κατάλληλα η μη γραμμική φύση των συνθετικών σχοινιών, με μια δυσκαμψία που μεταβάλλεται ως συνάρτηση της σχετικής μετατόπισης και της σχετικής ταχύτητας (Hennessey, 2003), επιλέχθηκε το ABAQUS για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των κατασκευών που ενσωματώνουν SCEDs.

2.3 Βασικές Αποφάσεις Προσομοίωσης

Στο προκαταρκτικό αυτό στάδιο της έρευνας, ελήφθησαν πολλές βασικές αποφάσεις σε ότι αφορά τον τρόπο προσομοίωσης των συγκεκριμένων υλικών, των δομικών στοιχείων και των φυσικών συμπεριφορών που θα αντιμετωπίζονταν σε αυτό το πρόβλημα. Οι επιλογές αυτές έγιναν ερευνώντας την τεκμηρίωση του λογισμικού και, στη συνέχεια, διεξάγοντας απλές δοκιμές για την παρατήρηση των επιπτώσεων της διαφοροποίησης των μεταβλητών εισόδου. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή αυτών των αποφάσεων προσομοίωσης.

Ένα από τα κύρια ζητήματα που σχετίζονται με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ήταν η επιλογή του τύπου στοιχείου. Η βιβλιοθήκη ABAQUS περιέχει πολλά στοιχεία και είναι όλα κατάλληλα για ορισμένες εφαρμογές. Από τις πολλές διαθέσιμες επιλογές, η καλύτερη για τη προσομοίωση του ιστού για τα προκαταρκτικά μοντέλα ήταν ένα τρισδιάστατο στοιχείο δοκού - υποστυλώματος. Επιλέχθηκε ένα συγκεκριμένο στοιχείο με τρία σημεία ολοκλήρωσης· το πρόγραμμα αναφέρεται σε αυτό ως στοιχείο B33. Αυτό το στοιχείο δοκού Euler έχει μία κυβική συνάρτηση παρεμβολής, η οποία είναι ικανοποιητικά ακριβής για κατανεμημένα φορτία και συνεπώς κατάλληλη για δυναμικές ταλαντώσεις που συνεπάγονται

περιλαμβάνουν αδρανειακά φορτία κατά μήκος της δοκού. Αυτό το συγκεκριμένο στοιχείο χρησιμοποιήθηκε επίσης στις μελέτες πλήρους κλίμακας.

Χρησιμοποιήθηκε μια αυθαίρετη διατομή που επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει της ιδιότητες της τομής ενός μέλους χωρίς στην πραγματικότητα να ορίζει τη γεωμετρία της διατομής. Επιπλέον, σε αυτό το στοιχείο εφαρμόστηκαν οι γραμμικές ελαστικές ιδιότητες υλικού για το χάλυβα. Αυτές οι επιλογές έγιναν επειδή σκοπός της μελέτης ήταν να διερευνήσει τις γενικές τάσεις στη συμπεριφορά της κατασκευής, αντί να επιτρέπει τον έλεγχο της συμπεριφοράς στις οριακές καταστάσεις των επιμέρους μελών του ιστού.

Για την προσομοίωση των καλωδίων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ελατηρίων και αποσβεστήρων. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε ένα στοιχείο SPRINGA, στο οποίο η γραμμή δράσης της δύναμης κατευθύνεται πάντα μεταξύ των κόμβων. Αυτό ταιριάζει με τη συμπεριφορά των καλωδίων κατά το ότι η γωνία της δύναμης επαναφοράς μπορεί να αλλάξει με μεγάλες μετατοπίσεις. Για τα προκαταρκτικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκε ένα απλό, γραμμικό ελατήριο που ενεργούσε σε θλίψη και εφελκυσμό σύμφωνα με μία σταθερή τιμή δυσκαμψίας. Μετά τα αρχικά αυτά μοντέλα, εξετάστηκε η διάταξη ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα (το στοιχείο DASHPOTA, επίσης με την ίδια γραμμή δράσης) μεταξύ δύο κόμβων. Χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί ελατηρίων και αποσβεστήρων για να βρεθεί ποιο θα αντιπροσώπευε με μεγαλύτερη ακρίβεια την παρατηρηθείσα συμπεριφορά των συνθετικών σχοινιών. Οι μη γραμμικότητες συμπεριλήφθηκαν και στους δύο τύπους στοιχείων, με την πρόβλεψη να μην υπάρχει καμία δύναμη εάν το στοιχείο ήταν υπό θλίψη.

Εκτός από τις μηγραμμικότητες υλικού των σχοινιών, ήταν επιθυμητή η συμπερίληψη στο μοντέλο μεγάλων μετατοπίσεων. Οι σεισμικές φορτίσεις έχουν τη δυνατότητα να παράγουν σημαντικές κινήσεις στις κατασκευές, συνεπώς ήταν απαραίτητη μια ανάλυση μεγάλων μετατοπίσεων. Αυτό ήταν εύκολο να πραγματοποιηθεί με το λογισμικό· απλά ενεργοποιήθηκε η εντολή NLGEOM για την ανάλυση και οι επιπτώσεις που συνδέονταν με τις μεταβολές στη γεωμετρία (με την παραμορφωμένη κατάσταση) της κατασκευής υπολογίσθηκαν σε όλη την ανάλυση.

Για αυστηρές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστοριών (time-historyanalyses), υπάρχουν στο ABAQUS τρεις βασικές επιλογές επίλυσης για την κίνηση μιας κατασκευής. Η πιο απλή από αυτές είναι μία ιδιομορφική προσέγγιση - ένα σύντομο πρόγραμμα εντός του λογισμικού επιλύει το πρόβλημα ιδιοτιμών για την κατασκευή και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποιες ιδιομορφές θα συμπεριλάβει στη δυναμική ανάλυση. Ωστόσο, αυτό δεν επιτρέπει στα μηγραμμικά στοιχεία να προσομοιώσουν τα σχοινιά, καθώς βασίζεται στις ιδιομορφές μιας κατασκευής στην απαραμόρφωτη κατάστασή της. Οι δυναμικές αναλύσεις είναι επίσης διαθέσιμες μέσω ενός έμμεσου ή άμεσου επιλυτή. Ο υπολογιστικός χρόνος είναι σχετικά μεγαλύτερος τόσο για τις έμμεσες όσο και για τις άμεσες αναλύσεις, αλλά αυτές είναι σε θέση να συμπεριλάβουν τα μη γραμμικά στοιχεία και τις μεγάλες μετατοπίσεις που

χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα. Ενώ μπορεί να υπάρχει κάποια αποδοτικότητα στον υπολογισμό όταν χρησιμοποιούμε τον άμεσο επιλυτή με ιδιαίτερα μεταβατικά φορτία σε πολύ σύντομα βήματα χρόνου, η ανάλυση περιορίζεται στη χρήση γραμμικών συναρτήσεων σχήματος για τα περισσότερα από τα διαθέσιμα στοιχεία. Επίσης, ο έμμεσος επιλυτής έχει μια παράμετρο σύγκλισης που καθιστά ευκολότερο τον έλεγχο της ευστάθειας της λύσης. Για τους λόγους αυτούς, από τις άλλες δύο επιλογές υιοθετήθηκε η τυπική δυναμική ανάλυση με έμμεσο επιλυτή.

Πριν να αξιολογηθεί σε βάθος κάθε γενικό μοντέλο, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη σύγκλισης για να καθορίσουμε τον αριθμό των στοιχείων που ήταν απαραίτητα για την πλήρη καταγραφή της συμπεριφοράς της κατασκευής. Οι δοκιμές έγιναν με αυξανόμενο αριθμό στοιχείων μέχρις ότου η επίλυση να συγκλίνει. Αυτή ήταν μια εύκολη μέθοδος για να διαπιστωθεί πόσα ακριβώς στοιχεία ήταν απαραίτητα προκειμένου να αναπαραστήσουμε με ακρίβεια την κατασκευή.

Η απόσβεση του δομήματος αποτελεί επίσης έναν παράγοντα προς αξιολόγηση κατά την μόνωση ενός μοντέλου. Μία γενική εκτίμηση της απόσβεσης σε μια κατασκευή από χάλυβα πριν τη διαρροή είναι 2% έως 6% της κρίσιμης απόσβεσης, ανάλογα με το εάν τα μέλη είναι συγκολλημένα ή κοκλιωμένα, αντίστοιχα (Chopra, 2001). Η πλειοψηφία των πύργων επικοινωνίας αποτελείται από κοκλιωτά συνδεδεμένα μέλη, αλλά δεν είναι ασυνήθιστοι και εκείνοι με συγκολλημένα μέλη (Madugula, 2002). Εντούτοις, για τις περισσότερες από τις αρχικές αναλύσεις, δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου απόσβεση βάσει της παραδοχής ότι αυτό οδηγεί γενικώς σε μεγαλύτερες κινήσεις σε μία κατασκευή. Όταν ήταν αναγκαίο να συμπεριληφθούν επιπτώσεις απόσβεσης, αυτό έγινε με την επιλογή απόσβεσης Rayleigh στο ABAQUS.

Προκειμένου να αναπτύξουμε κατάλληλους παράγοντες για χρήση με την επιλογή απόσβεσης Rayleigh, χρησιμοποιήθηκε μια σύντομη διαδικασία κατά Chopra (2001). Η απόσβεση Rayleigh χρησιμοποιεί έναν κλασικό πίνακα απόσβεσης, ο οποίος περιλαμβάνει απόσβεση ανάλογη της μάζας και της δυσκαμψίας ως εξής:

$$c = \alpha_0 m + \alpha_1 k \quad (2.1)$$

όπου c = μητρώο απόσβεσης, m = μητρώο μάζας, k = μητρώο δυσκαμψίας, α_0 = συντελεστής απόσβεσης ανάλογος της μάζας και α_1 = συντελεστής απόσβεσης ανάλογος της δυσκαμψίας.

Ο λόγος απόσβεσης ζ_n οποιασδήποτε ιδιομορφής n είναι ίσος με

$$\zeta_n = \frac{\alpha_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{\alpha_1}{2} \omega_n \quad (2.2)$$

όπου ω_n φυσική συχνότητα της n -οστής μορφής ιδιοταλάντωσης.

Μπορεί να είναι επιθυμητή η εισαγωγή απόσβεσης των ιδιομορφών που συμμετέχουν στην δομική απόκριση με την ίδια περίπου τιμή. Για να επιτευχθεί αυτό,

επιλέγουμε τις ιδιομορφές i και j κοντά στα απέναντι άκρα του φάσματος των συμμετεχουσών ιδιομορφών. Εάν αυτές έχουν τον ίδιο λόγο απόσβεσης, ζ , τότε οι τιμές των συντελεστών απόσβεσης είναι οι εξής:

$$\alpha_0 = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \quad \alpha_1 = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (2.3\alpha, \beta)$$

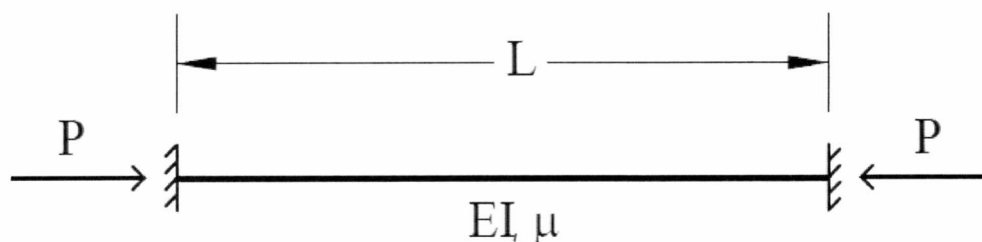
Οι επιλογές που παρουσιάζονται παραπάνω αποτελούν βασικές αποφάσεις μοντελοποίησης και μεθόδους που ήταν σταθερές καθ' όλη την έρευνα και όλες τεκμηριώθηκαν στα προκαταρκτικά μοντέλα που ακολουθούν. Οι αποφάσεις που σχετίζονται με κάποιο συγκεκριμένο μοντέλο, εξηγούνται με την μόρφωση αυτών των ιδιαίτερων μοντέλων. Επιπροσθέτως, για όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιείται το πρότυπο μετρικό σύστημα που βασίζεται σε μονάδες χιλιογράμμων και μέτρων.

2.4 Προκαταρκτικά Μοντέλα

Τα βασικά μοντέλα για την προκαταρκτική επικύρωση επιλέχθηκαν με δύο προτεραιότητες: την εφαρμογή στη γεωμετρία, στα συστατικά και στους μηχανισμούς εξαναγκασμού που θα εμπλέκονταν στα μοντέλα πλήρους κλίμακας και την ευκολία υπολογισμού των θεωρητικών για την επικύρωση των μοντέλων. Μοναδικός σκοπός τους ήταν η βεβαίωση πως οι διαδικασίες μοντελοποίησης ήταν επαρκείς και ότι όλα ταίριαζαν στη θεωρητική συμπεριφορά με ελάχιστη πιθανότητα σφάλματος.

2.4.1 Πρώτο Προκαταρκτικό Μοντέλο

Μία προηγούμενη μελέτη των Virgin και Plaut (1993) διερεύνησε την επίπτωση του αξονικού φορτίου στη συμπεριφορά των δοκών-υποστυλωμάτων που υποβάλλονταν σε εξαναγκασμένες ταλαντώσεις. Αυτή η σειρά ερευνών ήταν καθαρά θεωρητική και χρησιμοποίησε αδιάστατες δυνάμεις και ιδιότητες διατομής. Ένα μέρος της έρευνας αυτής εξέτασε τον τρόπο που η ιδιοσυχνότητα μιας δοκού μεταβαλλόταν αποκρινόμενη σε διαφορετικά μεγέθη αξονικού φορτίου. Για να ελέγξουμε την ακρίβεια των στοιχείων δοκών-υποστυλωμάτων σε συνδυασμό με τις μεθόδους του αλγορίθμου υπολογισμού ιδιοτιμών, προσομοιώθηκε τη συγκεκριμένη διάταξη και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα ευρήματα των Virgin και Plaut.



Σχήμα 2.1. Γεωμετρία αμφίπακτης δοκού του πρώτου προκαταρκτικού μοντέλου

Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μιας αμφίπακτης δοκού, της οποίας η γεωμετρία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1 ανωτέρω και χρησιμοποιήθηκε

toeigensolver στο ABAQUS προκειμένου να βρεθούν οι ιδιοσυχνότητες για διαφορετικά επίπεδα αξονικού φορτίου. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα από την ανάλυση αδιαστατοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν έναντι των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Σε αδιάστατους όρους, η επίλυση της εξίσωσης (2.4), που έπεται, δίνει τις ιδιοσυχνότητες της δοκού που υποβάλλεται σε αξονικό φορτίο. Η χαμηλότερη λύση είναι συνεπώς η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα. Η εξίσωση αυτή αποτελεί ένα μέσο για την εύρεση των ακριβών θεωρητικών συχνοτήτων που σχετίζονται με διαφορετικά επίπεδα τιμών αξονικού φορτίου.

$$\left. \begin{aligned} (\lambda^2 - \sigma^2) \sin(\sigma) \sinh(\lambda) + 2\sigma\lambda [1 - \cos(\sigma) \cosh(\lambda)] &= 0 \\ \sigma &= \sqrt{\frac{p + \sqrt{p^2 + 4\omega^2}}{2}}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{-p + \sqrt{p^2 + 4\omega^2}}{2}} \\ p &= \frac{PL^2}{EI}, \quad \omega^2 = \frac{\Omega^2 \mu L^4}{EI} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

όπου P = αξονική δύναμη, Ω = συχνότητα, EI = δυσκαμψία, L = μήκος και μ = μάζα ανά μονάδα μήκους της δοκού.

Μοντελοποιήθηκε μία δοκός-υποστύλωμα με 20 στοιχεία και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς μήκους και δυσκαμψίας δοκού-υποστυλώματος:

- 1) $L = 10 \text{ m}$, $I = 0.002 \text{ m}^4$
- 2) $L = 10 \text{ m}$, $I = 0.004 \text{ m}^4$
- 3) $L = 5 \text{ m}$, $I = 0.001 \text{ m}^4$.

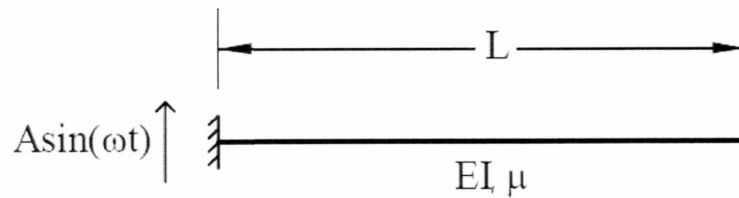
Το ίδιο μέτρο ελαστικότητας, $E = 209 \text{ GPa}$, χρησιμοποιήθηκε για κάθε δοκιμή. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε μέχρι ένα αδιάστατο αξονικό φορτίο της τάξης του $2\pi^2$, το οποίο αντιπροσωπεύει το ήμισυ του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Τα αξονικά φορτία σε αυτή την έρευνα δεν προσεγγίζουν αυτό το μέγεθος, επομένως τα αποτελέσματα ισχύουν στην παρούσα έρευνα. Και στις τρεις περιπτώσεις, οι ιδιοσυχνότητες αντιστοιχούσαν σε μεγάλο βαθμό με εκείνες που παρουσιάστηκαν από τους Virgin και Plaut (1993). Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις δοκιμές.

Πίνακας 2.1. Θεμελιώδεις Ιδιοσυχνότητες μιας αμφίπακτης δοκού υπό αξονικό φορτίο

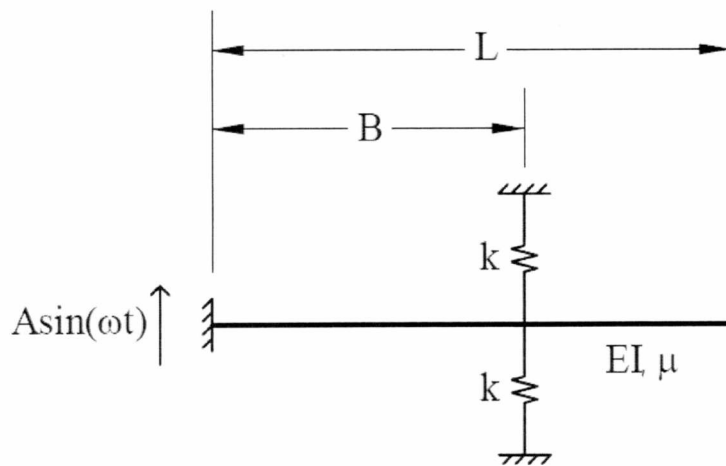
Αξονικό φορτίο, p	Θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα, ω_0 (rad/sec)						
	Θεωρητική	Δοκιμή 1	Σφάλμα %	Δοκιμή 2	Σφάλμα %	Δοκιμή 3	Σφάλμα %
$-\pi^2$	24.926	24.921	-0.02	24.916	-0.04	24.907	-0.07
0	22.373	22.373	0.00	22.374	0.00	22.373	0.00
π^2	19.452	19.446	-0.03	19.439	-0.07	19.426	-0.13
$2\pi^2$	15.951	15.920	-0.20	15.888	-0.40	15.822	-0.81

2.4.2 Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο

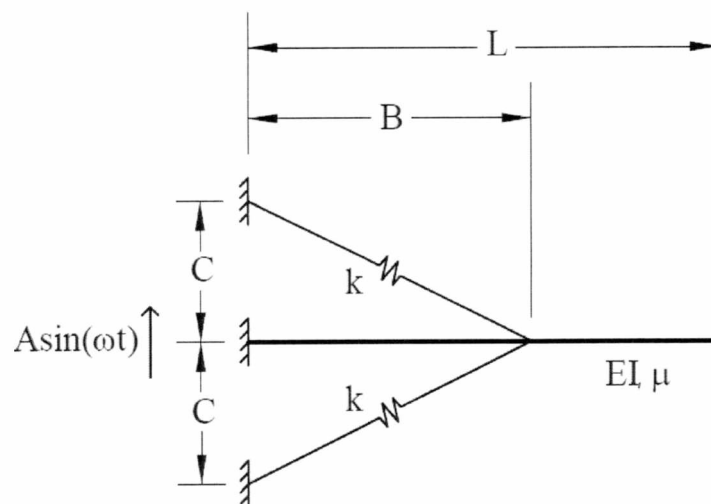
Το δεύτερο προκαταρκτικό μοντέλο περιελάμβανε έναν βασικό πρόβολο που υποβαλλόταν σε μια εγκάρσια, αρμονική μετατόπιση στο πακτωμένο άκρο. Μία συνάρτηση της μορφής $A\sin(\omega t)$ χρησιμοποιήθηκε για τον ορισμό της εξαναγκασμένης μετατόπισης, με πλάτος A , συχνότητα ω και χρόνο t . Εξετάστηκαν τρεις γενικές περιπτώσεις: Α) χωρίς ελατήρια, Β) κατακόρυφα ελατήρια και Γ) κεκλιμένα ελατήρια, με σταθερά του ελατηρίου k . Οι ιδιότητες αυτών των τριών περιπτώσεων παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.2, 2.3 και 2.4. Στην πράξη, αντιπροσωπεύουν έναν ιστό που υποβάλλεται σε εδαφική σεισμική διέγερση με διάφορους βαθμούς συγκράτησης λόγω των καλωδίων.



Σχήμα 2.2: Γεωμετρία προβόλου χωρίς ελατήρια (Περίπτωση Α)



Σχήμα 2.3: Γεωμετρία προβόλου με κατακόρυφα ελατήρια (Περίπτωση Β)



Σχήμα 2.4: Γεωμετρία προβόλου με κεκλιμένα ελατήρια (Περίπτωση Γ)

Το θεωρητικό μέρος της ανάλυσης της δοκού για τις ως άνω περιπτώσεις περιέχεται στο Παράρτημα Α. Στη συνέχεια βρέθηκαν οι κινήσεις σε σταθερή κατάσταση των δοκών με τη χρήση μιας τυποποιημένης δυναμικής ανάλυσης με 10 στοιχεία για κάθε δοκό. Χρησιμοποιήθηκε μία μικρή τιμή απόσβεσης για τον αποκλεισμό μεταβατικών κινήσεων εξαιτίας των αρχικών συνθηκών. Οι τιμές αυτές του εύρους μετατόπισης βρέθηκαν για οκτώ διαφορετικές παραλλαγές κάθε μίας από τις τρεις γενικές περιπτώσεις και στη συνέχεια συγκρίθηκαν με τη θεωρητική κίνηση. Οι ειδικές παράμετροι που αφορούν κάθε μία από αυτές τις δοκιμές βρίσκονται επίσης στο Παράρτημα Α.

Για την περίπτωση Α, το μοντέλο προβόλου χωρίς ελατήρια, το εύρος της αρμονικής μετατόπισης, η συχνότητα της αρμονικής μετατόπισης και το μήκος/δυσκαμψία της δοκού διέφεραν. Το εύρος της κίνησης μετρήθηκε στα $3/10$ του μήκους δοκού από το σταθερό άκρο και στο ελεύθερο άκρο της δοκού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.2 και 2.3.

Πίνακας 2.2. Εύρος κίνησης στο $x = 0.3L$ για τον πρόβολο χωρίς ελατήρια

Δοκιμή	Θεωρητικό Εύρος Μετατόπισης (mm)	Εύρος Μετατόπισης ABAQUS (mm)	Σφάλμα %
1	202.88	202.88	0.00
2	507.21	507.21	0.00
3	25.16	25.21	0.24
4	62.89	62.91	0.04
5	200.69	200.69	0.00
6	501.72	501.70	0.00
7	20.70	20.66	-0.23
8	51.76	51.64	-0.22

Πίνακας 2.3. Εύρος κίνησης στο $x = L$ για τον πρόβολο χωρίς ελατήρια

Δοκιμή	Θεωρητικό Εύρος Μετατόπισης (mm)	Εύρος Μετατόπισης ABAQUS (mm)	Σφάλμα %
1	219.73	219.73	0.00
2	549.33	549.38	0.01
3	56.51	56.94	0.76
4	141.27	142.24	0.69
5	204.71	204.71	0.00
6	511.76	511.75	0.00
7	24.83	24.81	-0.07
8	62.07	62.03	-0.07

Οι παράμετροι για το μοντέλο με κατακόρυφα ελατήρια, Περίπτωση Β, ήταν η συνάρτηση αρμονικής μετατόπισης, η δυσκαμψία των ελατηρίων και η θέση των ελατηρίων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4. Όσον αφορά το μοντέλο κεκλιμένων ελατηρίων, Περίπτωση Γ, η συνάρτηση αρμονικής μετατόπισης, η δυσκαμψία των ελατηρίων και η γωνία των ελατηρίων διέφεραν. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από αυτό το μοντέλο. Τα εύρη των μετατοπίσεων σε σταθερή κατάσταση συγκρίθηκαν μόνο στο ελεύθερο άκρο της δοκού και για τα δύο μοντέλα που περιλαμβάνουν ελατήρια.

Πίνακας 2.4. Εύρος κίνησης στο $x = L$ για τον πρόβολο με κατακόρυφα ελατήρια

Δοκιμή	Θεωρητικό Εύρος Μετατόπισης (mm)	Εύρος Μετατόπισης ABAQUS (mm)	Σφάλμα %
1	184.62	184.59	-0.01
2	89.24	89.03	-0.24
3	211.80	211.85	0.02
4	104.06	104.27	0.20
5	150.82	150.61	-0.14
6	66.87	66.82	-0.09
7	190.10	190.17	0.04
8	88.38	88.82	0.49

Πίνακας 2.5. Εύρος κίνησης στο $x = L$ για τον πρόβολο με κεκλιμένα ελατήρια

Δοκιμή	Θεωρητικό Εύρος Μετατόπισης (mm)	Εύρος Μετατόπισης ABAQUS (mm)	Σφάλμα %
1	222.79	222.88	0.04
2	108.57	108.63	0.06
3	205.32	205.41	0.04
4	97.50	97.32	-0.18
5	205.54	205.60	0.03
6	97.63	97.42	-0.21
7	175.47	175.51	0.02
8	80.05	80.45	0.50

Όλα τα μοντέλα προβόλων είχαν κινήσεις που παρέμειναν εντός του 1% της θεωρητικής κίνησης. Για το κατά προσέγγιση επίπεδο βελτίωσης που χρησιμοποιείται σε αυτές τις προκαταρκτικές μελέτες, αυτό το επίπεδο σφάλματος θεωρείται αποδεκτό.

2.5 Συμπέρασμα Προκαταρκτικής Τεκμηρίωσης

Οι μέθοδοι προσομοίωσης που επιλέγονται πρέπει να τεκμηριώνονται για τα απλά μοντέλα προκειμένου να υπάρχει εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα για τις πολύπλοκες, τρισδιάστατες αναλύσεις που αποτελούν την πλειοψηφία της παρούσας έρευνας. Τα προκαταρκτικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν ήταν εφαρμόσιμα παραδείγματα της συμπεριφοράς που θα εξετάσουμε στα μοντέλα που ακολουθούν, χρησιμοποιώντας τα ίδια στοιχεία, και τα αποτελέσματα συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις απαντήσεις που ορίζονται από τη θεωρία. Επομένως, οι διαδικασίες μοντελοποίησης επικυρώθηκαν και μπορούν να πραγματοποιηθούν πιο πολύπλοκες δυναμικές αναλύσεις με σημαντικό βαθμό εμπιστοσύνης στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

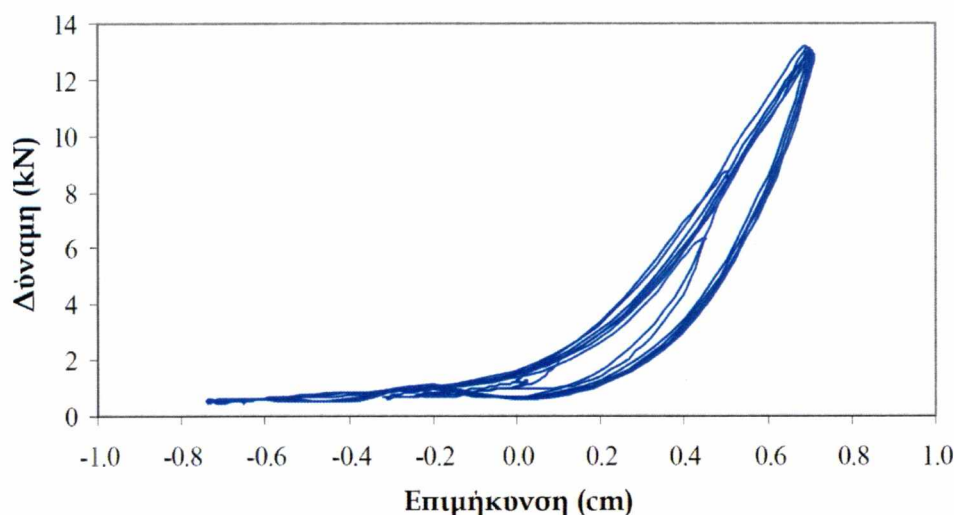
Κεφάλαιο 3 : Μοντέλα Σχοινιών

3.1 Δυναμική Συμπεριφορά Σχοινιών

Η δυναμική συμπεριφορά των συνθετικών σχοινιών με υψηλό μέτρο ελαστικότητας έχει διερευνηθεί διεξοδικά προηγούμενες μελέτες. Δοκιμάστηκε μία τεράστια ποικιλία από τύπους σχοινιών κάτω από πολλαπλές σειρές φόρτισης προκειμένου να καθορίσουμε εκείνα τα σχοινιά με ιδιότητες κατάλληλες για χρήση ως SCEDs. Εξήχθη το συμπέρασμα ότι τα σχοινιά Amsteel III είχαν τα πιο επιθυμητά χαρακτηριστικά και τα σχοινιά αυτά εξετάστηκαν περαιτέρω. Το ειδικό αυτό σχοινί διαθέτει διαμόρφωση διπλής πλέξης, υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας και κατασκευάζεται από την Samson Rope Technologies στο Ferndale, Washington.

Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές επιπλέον δοκιμές στα σχοινιά Amsteel III με ονομαστική διάμετρο 24 mm (1 ίντσα). Τα συγκεκριμένα σχοινιά 24 mm που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις επιπλέον μελέτες έχουν ελάχιστη αντοχή 230 kN και βάρος 44,2 kg/m (Samson, 2005). Μέχρι σήμερα έχουν διεξαχθεί δύο είδη δοκιμών επί των σχοινιών αυτών. Οι αρχικές δοκιμές περιελάμβαναν μέτρηση της επιμήκυνσης σε ένα μονό σχοινί υπό αρμονικά φορτία. Μετά τη χρήση αυτών των δοκιμών για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας και για τον καθορισμό μιας διαδικασίας προέντασης, εφαρμόστηκαν αρμονικές δυνάμεις πλευρικά σε ένα πλαίσιο υπό κλίμακα με προεντεταμένα σχοινιά εγκατεστημένα διαγωνίως στο άνοιγμα.

Ένα παράδειγμα του ιστορικού της μετατόπισης ενός σχοινιού στο πλαίσιο των ερευνών αυτών φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Υπήρχαν σαφώς διαφορετικές καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης, αλλά παρέμειναν αρκετά σταθερές καθ' όλο το πείραμα. Επίσης, είναι προφανές ότι γινόταν απορρόφηση της ενέργειας κατά τη διάρκεια καθενός από τους κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 3.1. Διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης ενός τυπικού πειραματικού σχοινιού στερεωμένου διαγωνίως σε πλαίσιο

Και στις δύο σειρές δοκιμών παρατηρήθηκε ότι το τμήμα φόρτισης της συμπεριφοράς μπορεί να προσεγγιστεί με την παρακάτω μη γραμμική έκφραση:

$$F = kx^{1.3} \quad (3.1)$$

όπου F = δύναμη, k = δυσκαμψία ελατηρίου και x = σχετική μετατόπιση.

Με σκοπό να αποκτηθεί η ίδια περίπου δυσκαμψία με αυτή ενός γραμμικού ελατηρίου για λόγους σύγκρισης, ο Motley (2004) έδειξε ότι η δυσκαμψία ενός μη γραμμικού ελατηρίου πρέπει να είναι περίπου 40% της δυσκαμψίας ενός γραμμικού ελατηρίου.

Ενώ αυτές οι προσεγγίσεις παρέχουν ένα επαρκές μοντέλο για το τμήμα φόρτισης της συμπεριφοράς, μόλις επιτευχθεί το μέγιστο φορτίο η συμπεριφορά αλλάζει και ακολουθείται μία διαφορετική καμπύλη κατά την αποφόρτιση. Ήταν απαραίτητο ένα μοντέλο που να συνδυάζει και τα δύο τμήματα της καμπύλης για να προσεγγίσει την πραγματική συμπεριφορά των σχοινιών.

3.2 Ανάπτυξη Μοντέλων Σχοινιών

Τα πειράματα με διαφορετικά μοντέλα σχοινιών πραγματοποιήθηκαν σε μια προσπάθεια να βρεθεί ένα μοντέλο που να ταιριάζει σε μεγάλο βαθμό με την πραγματική συμπεριφορά των σχοινιών. Χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμοί στοιχείων ελατηρίων και αποσβεστήρων για τη βάση αυτών των μοντέλων με στόχο την εύρεση ενός απλού και αποτελεσματικού μοντέλου που θα μπορούσε να αναπαραστήσει επαρκώς τα σχοινιά.

Η αριθμητική δοκιμή αυτών των μοντέλων αποτελείτο από το μοντέλο σχοινιού που συνδέει δύο κόμβους και από εφαρμοσμένες μετατοπίσεις στην αξονική κατεύθυνση. Οι περισσότερες από τις δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε πλάτος 0.2 m και σε συχνότητα 1 Hz, που καταλήγει σε μια μέγιστη επιτάχυνση περίπου 0,8 g. Αυτό ήταν στην κλίμακα του τι μπορεί να φανεί σε μια κατασκευή υπό σεισμική φόρτιση. Όλες οι δοκιμές είχαν διάρκεια πέντε δευτερολέπτων για να ευρεθεί η συμπεριφορά κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων κύκλων φορτίων.

Δοκιμάστηκαν πολλές παραλλαγές των μοντέλων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο αυτό. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διαφορετικούς συνδυασμούς δυσκαμψιών ελατηρίων και συντελεστών αποσβεστήρων ταλάντωσης, καθώς και με συνδυασμούς γραμμικών, διγραμμικών και μηγραμμικών ορισμών. Επίσης, ενίοτε χρησιμοποιήθηκε μια συγκεντρωμένη μάζα στον κεντρικό κόμβο του μοντέλου. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό ουσιαστικά προσέθεσε ενέργεια στο σύστημα με αποτέλεσμα να μην το εξετάζουμε περαιτέρω. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 50 δοκιμές προκειμένου να εξετάσουμε τα μοντέλα σχοινιών και να καθορίσουμε την εφαρμοσιμότητά τους στο προκείμενο πρόβλημα.

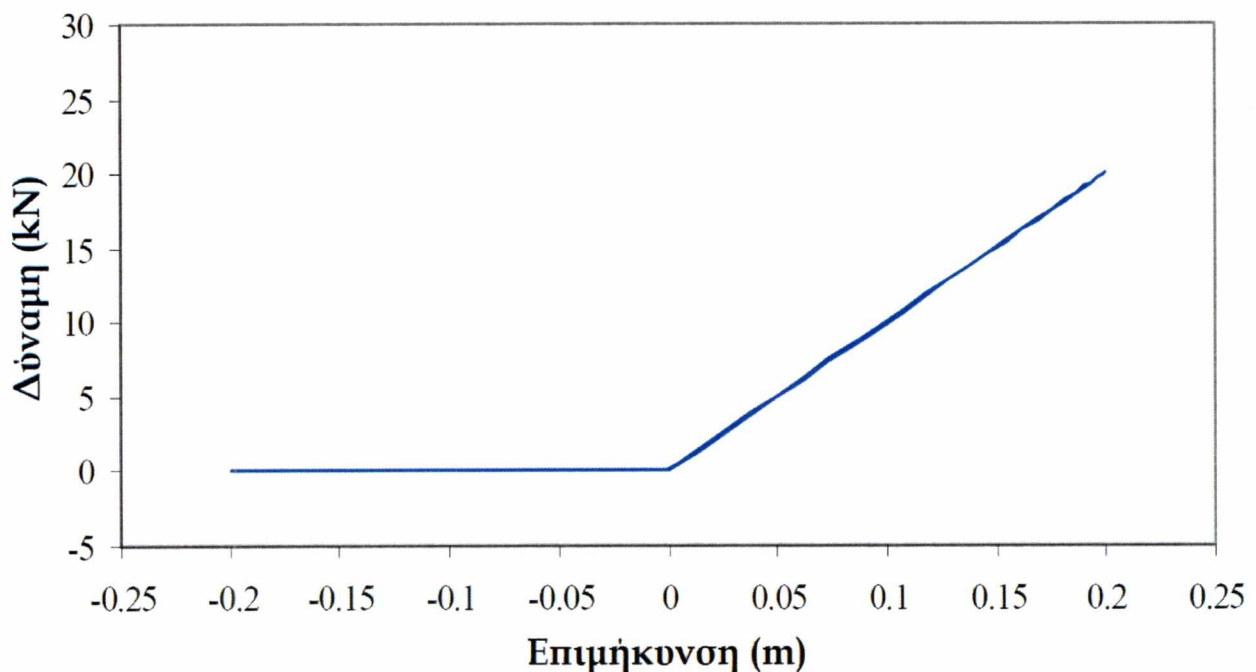
3.2.1 Μοντέλο Α

Το πρώτο μοντέλο σχοινιού που μελετήθηκε ήταν ένα απλό ελατήριο που συνδέει δύο κόμβους και φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Αυτό χρησιμοποιήθηκε ως η πιο βασική γενίκευση συμπεριφοράς χαλαρού - τεντωμένου σχοινιού, παρέχοντας ένα σημείο αναφοράς για τις υπόλοιπες δοκιμές.



Σχήμα 3.2. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου σχοινιού Α

Ένας διγραμμικός ορισμός του καταστατικού νόμου του ελατηρίου δημιούργησε μια συμπεριφορά φορτίου-μετατόπισης όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Με έναν μη-γραμμικό ορισμό της έντασης στο ελατήριο, το απλό μοντέλο θα μπορούσε να προσεγγίσει τις καμπύλες φόρτισης που εμφανίζονται στα πειράματα. Ενώ αυτό είναι παρόμοιο με το γενικό χαρακτήρα των συνθετικών σχοινιών υπό αρμονική φόρτιση, ή οποιουδήποτε καλωδίου για το θέμα αυτό, καμία απώλεια ενέργειας δε συνδέεται με κάθε κύκλο φόρτισης.



Σχήμα 3.3 Τυπική γραφική απεικόνιση δύναμης έναντι μετατόπισης του Μοντέλου Α

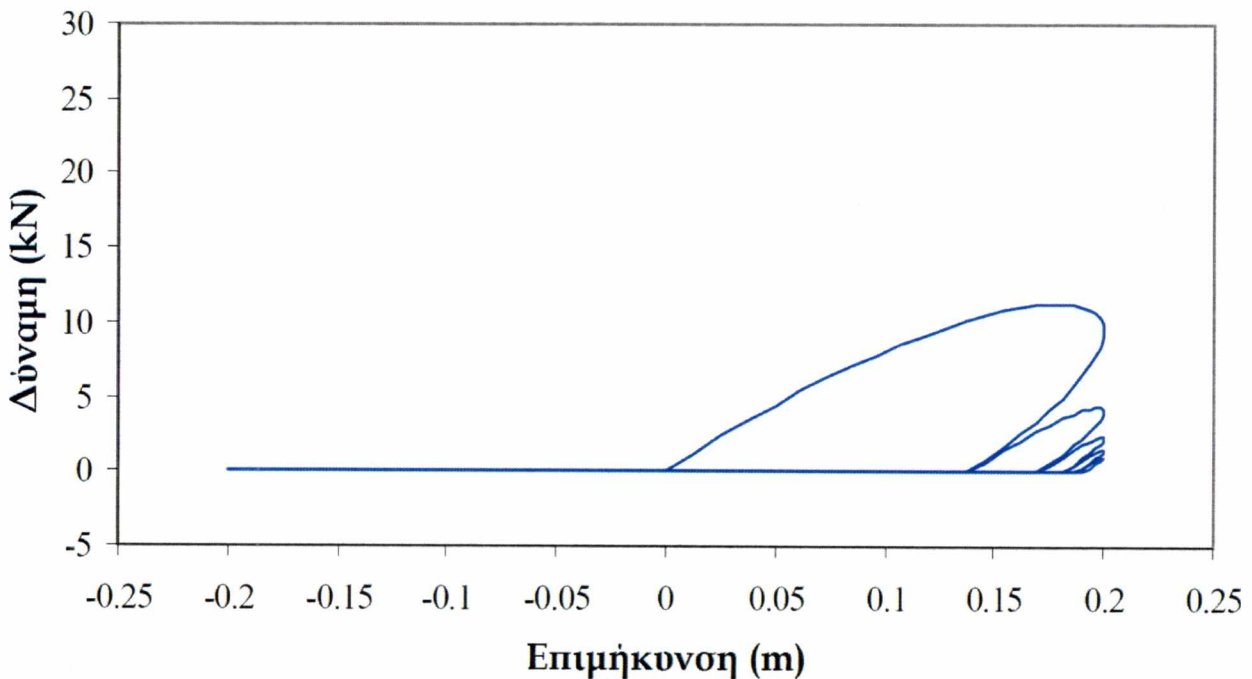
3.2.2 Μοντέλο Β

Η επόμενη σειρά δοκιμών εξέτασε τη συμπεριφορά του Μοντέλου Β, το οποίο αποτελείτο από ένα ελατήριο και αποσβεστήρα σε σειρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Παρόμοια με όλα τα μοντέλα εκτός του πρώτου, το μοντέλο αυτό περιελάμβανε έναν αποσβεστήρα προκειμένου να επιτρέπει στην ενέργεια να απορροφάται κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου φόρτισης, σε μια προσπάθεια να ταιριάζει με τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου σχοινιού Β

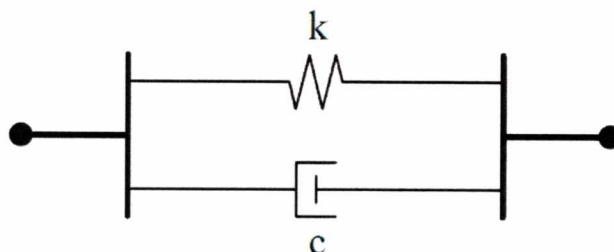
Η περίπτωση ενός διγραμμικού ελατηρίου και ενός γραμμικού αποσβεστήρα ταλάντωσης οδήγησε σε μια συμπεριφορά φορτίου-μετατόπισης όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5. Ο πρώτος κύκλος φόρτισης απορρόφησε ένα σημαντικό ποσό ενέργειας όπως η επιθυμητή συμπεριφορά. Ωστόσο, όπως συνέβαινε συνήθως, η μόνιμη μετατόπιση στον αποσβεστήρα, όταν το σχοινί χαλάρωνε, προκάλούσε τη μη παραγωγή εφελκυστικών τάσεων από τους κύκλους φόρτισης που ακολουθούσαν, αρχίζοντας από την ίδια μετατόπιση.



Σχήμα 3.5 Τυπική γραφική απεικόνιση δύναμης έναντι μετατόπισης του Μοντέλου Β

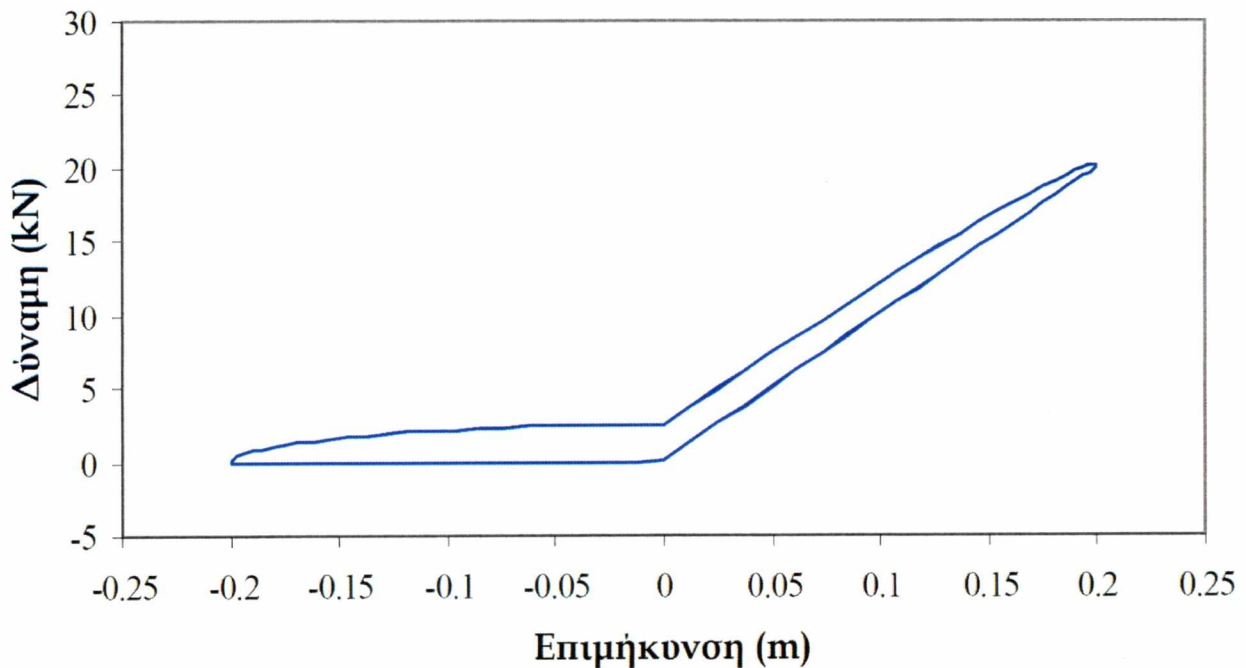
3.2.3 Μοντέλο Γ

Το μοντέλο Γ αποτελείται από ένα ελατήριο και αποσβεστήρα σε παράλληλη διάταξη, σύμφωνα με το Σχήμα 3.6. Αυτό το συγκεκριμένο μοντέλο είναι αρκετά συνηθισμένο και έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες μελέτες με στόχο να συμπεριλάβει απορρόφηση ενέργειας στο καλώδιο, όπως στην έρευνα του Kahla (1994).



Σχήμα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου σχοινιού Γ

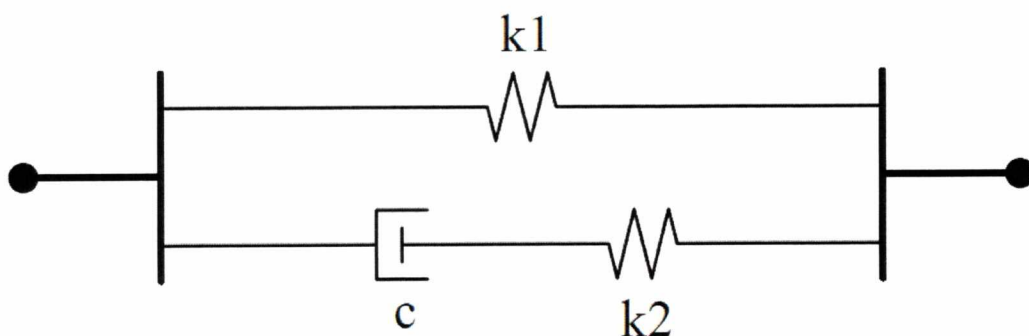
Το Σχήμα 3.7 απεικονίζει τη συμπεριφορά φορτίου-μετατόπισης ενός διγραμμικού ελατηρίου και διγραμμικού αποσβεστήρα. Κάθε κύκλος απορροφούσε μια σταθερή ποσότητα ενέργειας, ωστόσο, υπήρχε τόση απορρόφηση ενέργειας κατά τη διάρκεια των αρνητικών μετατοπίσεων, όση και κατά τη διάρκεια των θετικών μετατοπίσεων. Αν και το σχήμα του μοντέλου ήταν αρκετά καλό, η συμπεριφορά σε απορρόφηση ενέργεια ήταν ξεκάθαρα ανακριβής.



Σχήμα 3.7 Τυπική γραφική απεικόνιση δύναμης έναντι μετατόπισης του Μοντέλου Γ

3.2.4 Μοντέλο Δ

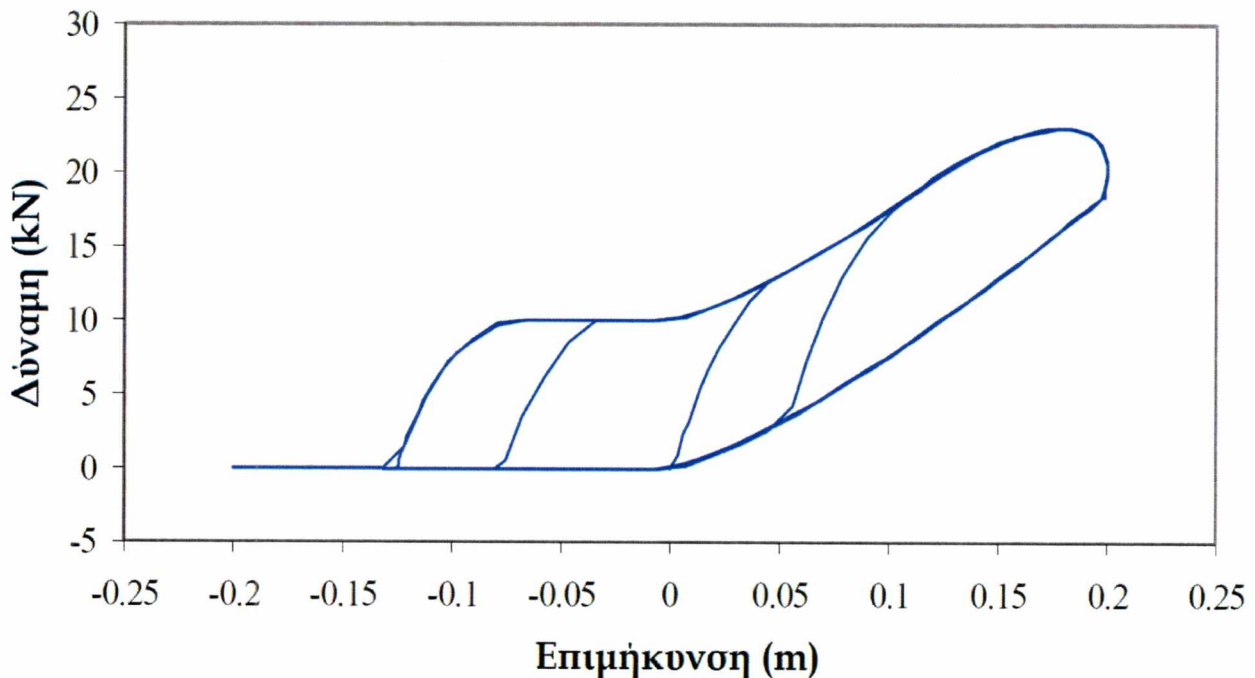
Το επόμενο μοντέλο που μελετήθηκε αποτελείτο από δύο ελατήρια και έναν αποσβεστήρα, με τη διάταξη να απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8. Είναι γνωστό ως το πρότυπο γραμμικό ιξωδο-ελαστικό μοντέλο, αλλά οι συγκεκριμένες μελέτες δε χρησιμοποίησαν μόνο γραμμικούς καταστατικούς νόμους για τα στοιχεία.



Σχήμα 3.8. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου σχοινιού Δ

Η συμπεριφορά φορτίου-μετατόπισης μιας περίπτωσης όπου το k_1 ήταν μη γραμμικό, το k_2 ήταν διγραμμικό και η c ήταν διγραμμική, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9. Το

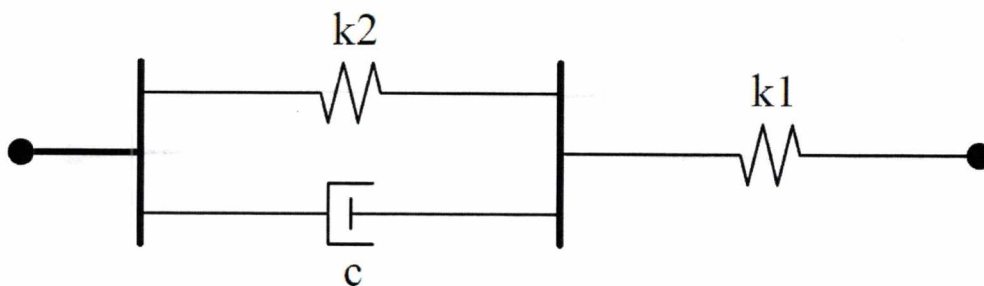
προαναφερθέν πρόβλημα του αποσβεστήρα που έχει μετατόπιση στην αρχή ενός νέου κύκλου φόρτισης εμφανίζεται και σε αυτό το μοντέλο, προκαλώντας ανακόλουθη συμπεριφορά φόρτισης.



Σχήμα 3.9 Τυπική γραφική απεικόνιση δύναμης έναντι μετατόπισης του Μοντέλου Δ

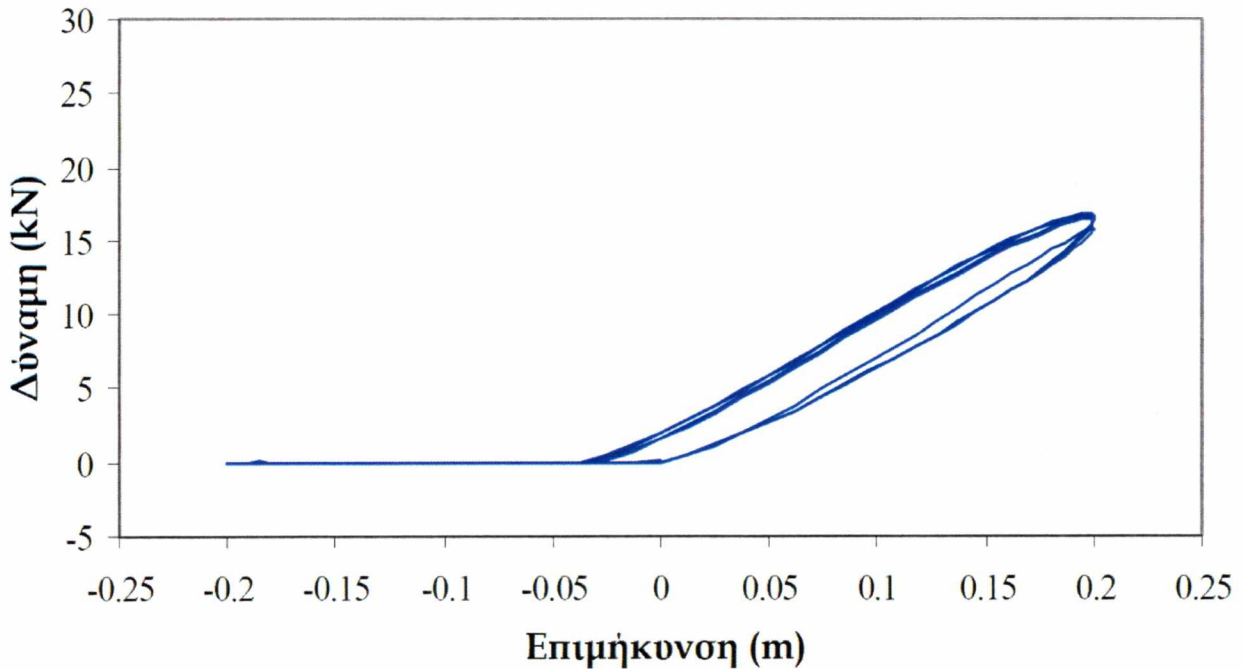
3.2.5 Μοντέλο Ε

Το Μοντέλο Ε αποτελείται επίσης από δύο ελατήρια και έναν αποσβεστήρα σε μία ελαφρώς διαφορετική διάταξη, σύμφωνα με το Σχήμα 3.10. Το μοντέλο αυτό προσέγγισε τη συμπεριφορά των συνθετικών σχοινιών περισσότερο από ό, τι τα άλλα μοντέλα, κυρίως λόγω ενός ελατηρίου που είχε την ικανότητα να επαναφέρει τον αποσβεστήρα στο αρχικό του μήκος κατά τη διάρκεια του τμήματος χαλάρωσης του κύκλου.



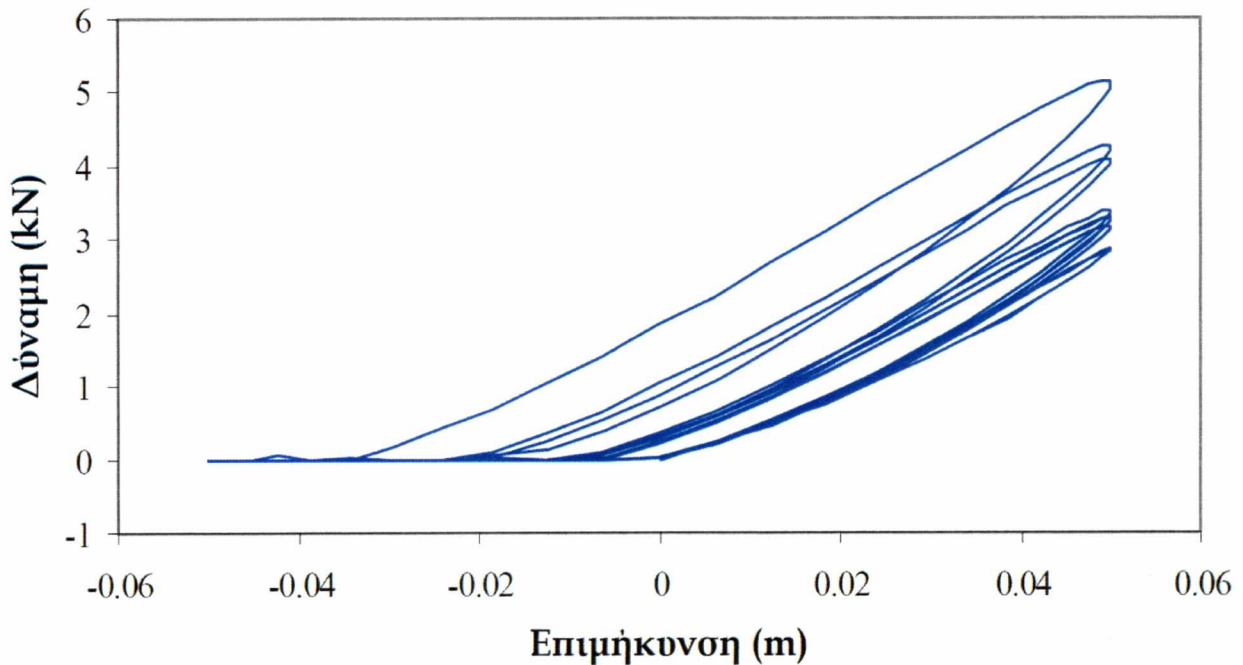
Σχήμα 3.10. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου σχοινιού Ε

Η συμπεριφορά φορτίου-μετατόπισης μιας περίπτωσης όπου το k_1 ήταν μη γραμμικό, το k_2 ήταν διγραμμικό και η c ήταν διγραμμική, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11. Η συμπεριφορά αυτή ήταν παρόμοια με εκείνη των συνθετικών σχοινιών και γινόταν απορρόφηση μιας συγκρίσιμης ποσότητας ενέργειας σταθερά σε κάθε κύκλο.



Σχήμα 3.11. Τυπική γραφική απεικόνιση δύναμης -μετατόπισης του Μοντέλου E

Ενώ το μοντέλο αυτό έδειξε να είναι πολύ χρησιμοποιήσιμο, είχε ακόμη ένα σημαντικό μειονέκτημα: η συμπεριφορά φόρτισης δεν ήταν σταθερή αν δεν δινόταν στον αποσβεστήρα να επανέλθει στο αρχικό μήκος του πριν ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος φόρτισης. Η συμπεριφορά ενός μοντέλου με τους ίδιους νόμους ελατηρίου και αποσβεστήρα, αλλά με συχνότητα 2 Hz (σε αντίθεση με την αρχική δοκιμή με 1 Hz), παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12 Τυπική γραφική απεικόνιση δύναμης έναντι μετατόπισης του Μοντέλου E σε υψηλότερη συχνότητα φόρτισης

3.3 Συμπεράσματα για τα μοντέλα σχοινιών

Από τα μοντέλα σχοινιών που εξετάστηκαν, το Μοντέλο Ε αποδείχθηκε το πλέον συνεπές και πλησιέστερο στην πραγματική συμπεριφορά των συνθετικών σχοινιών. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη συνέπειας και μεθόδου ικανής να περιορίσει τον αποσβεστήρα να είναι ενεργός μόνο όταν το ελατήριο είναι ενεργό. Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε ακριβέστερα τη συμπεριφορά των σχοινιών, συνιστάται η χρήση ενός πιο σύνθετου στοιχείου με ειδικούς συστατικούς νόμους ή ενός υποπρογράμματος για την επιστροφή της δύναμης του ελατηρίου σε κάθε στιγμή αύξησης για χρήση στον ορισμό του νόμου του αποσβεστήρα.

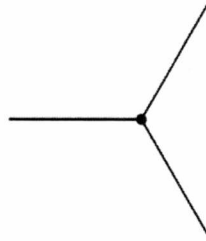
Η έλλειψη συνέπειας στη συμπεριφορά αυτών των μοντέλων σχοινιών οδήγησε στην απόφαση να μην συμπεριληφθούν στη μοντελοποίηση των καλωδιωτών ιστών για την παρούσα έρευνα. Αυτό υποστηρίχθηκε περαιτέρω από δοκιμές που έδειξαν λόγους απόσβεσης της τάξης του 0.01 έως 0.02 για έναν καλωδιωτό ιστό με ενσωματωμένο το Μοντέλο Σχοινιού Ε. Αυτό σημαίνει ότι το μέτρο απόσβεσης που παρέχεται από τα σχοινιά ήταν μικρότερο από την εγγενή απόσβεση μιας κοχλιωτής καλύβδινης κατασκευής. Συνεπώς, το να μη λάβουμε υπόψη την απορρόφηση ενέργειας στα σχοινιά, δεν θα μεταβάλλει δραστικά τη συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών που εξετάζονται στην παρούσα έρευνα.

Κεφάλαιο 4 : Αναλυτικό Μοντέλο

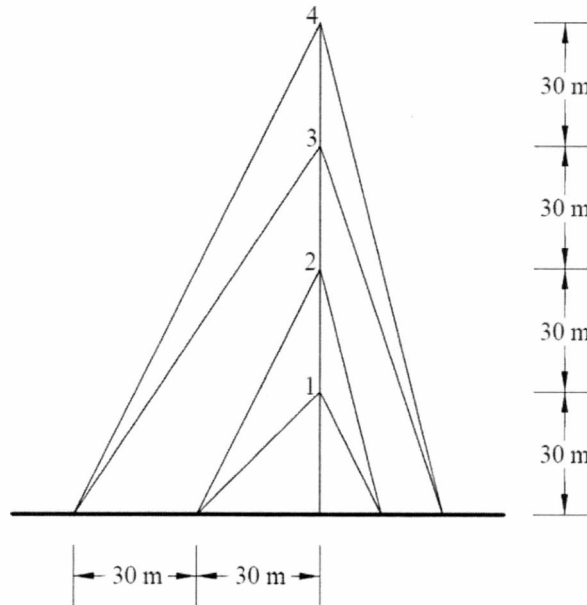
4.1 Προεπισκόπηση του Μοντέλου

Αρκετός χρόνος αφιερώθηκε στην μόρφωση των μοντέλων ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα. Όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 2, πολλές από τις βασικές αποφάσεις μοντελοποίησης και πολλά στοιχεία είχαν ήδη τεκμηριωθεί. Το Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τις λεπτομέρειες των συγκεκριμένων αποφάσεων μοντελοποίησης σε σχέση με το μοντέλο πλήρους κλίμακας, καθώς και τη συλλογιστική πίσω από την επιλογή τιμών για τις ιδιότητες των στοιχείων.

Αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο ενός καλωδιωτού ιστού βασισμένου πάνω σε έναν ιστό που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενη μελέτη των Desai και Punde (2001) και αρχικά μελετήθηκε από τον Irvine (1981). Ο ιστός είχε ύψος 120 m, με τέσσερα επίπεδα καλωδίων, τρία καλώδια ανά επίπεδο και δύο ομάδες σημείων αγκύρωσης καλωδίων, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.1 και 4.2. Στις δύο προηγούμενες μελέτες, κάθε καλώδιο είχε τις ίδιες ιδιότητες και την ίδια δύναμη προέντασης και τα χαρακτηριστικά αυτά χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα μελέτη. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μελέτες σύγκλισης προκειμένου να προσδιορίσουμε τον απαραίτητο αριθμό στοιχείων ενώ περιελήφθη γενική απόσβεση Rayleigh σε κάθε μοντέλο για να αντιπροσωπεύσει τη δομική απόσβεση.



Σχήμα 4.1 Κάτοψη του Καλωδιωτού Ιστού



Σχήμα 4.2 Όψη του Καλωδιωτού Ιστού

Αφού ολοκληρώθηκε αυτή η τυποποιημένη περίπτωση, οι παράμετροι μεταβάλλονταν με σκοπό τη δημιουργία μιας σειράς άλλων παρόμοιων μοντέλων. Η σεισμική απόκριση λόγω σεισμικής έντασης καταγράφηκε και κατόπιν αναλύθηκε.

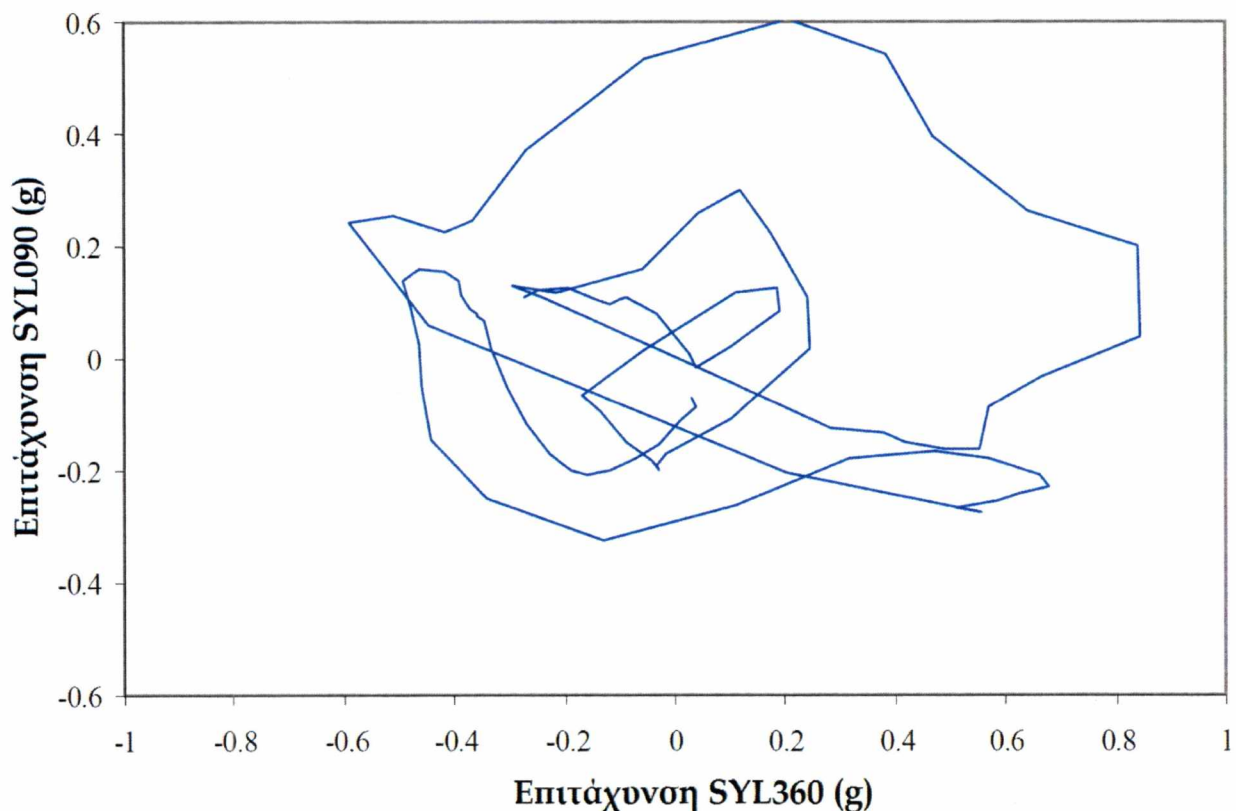
4.2 Αρχεία καταγεγραμμένων ισχυρών εδαφικών κινήσεων

Το επίκεντρο της παρούσας έρευνας δεν ήταν ο σχεδιασμός ενός συγκεκριμένου ιστού, ή για ένα συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός, αλλά η απόκτηση γενικής απόκρισης σε γενική σεισμική κίνηση. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση δύο ιστορικές καταγραφές ισχυρής εδαφικής κίνησης. Χρησιμοποιήθηκε η εδαφική κίνηση ElCentro, γνωστή και ως γεγονός 1940 ImperialValley, και η εδαφική κίνηση 1994 Northridge. Και οι δύο αυτές εδαφικές κινήσεις χρησιμοποιούνται συνήθως σε μελέτες που εξετάζουν τη δομική απόκριση σε σεισμούς.

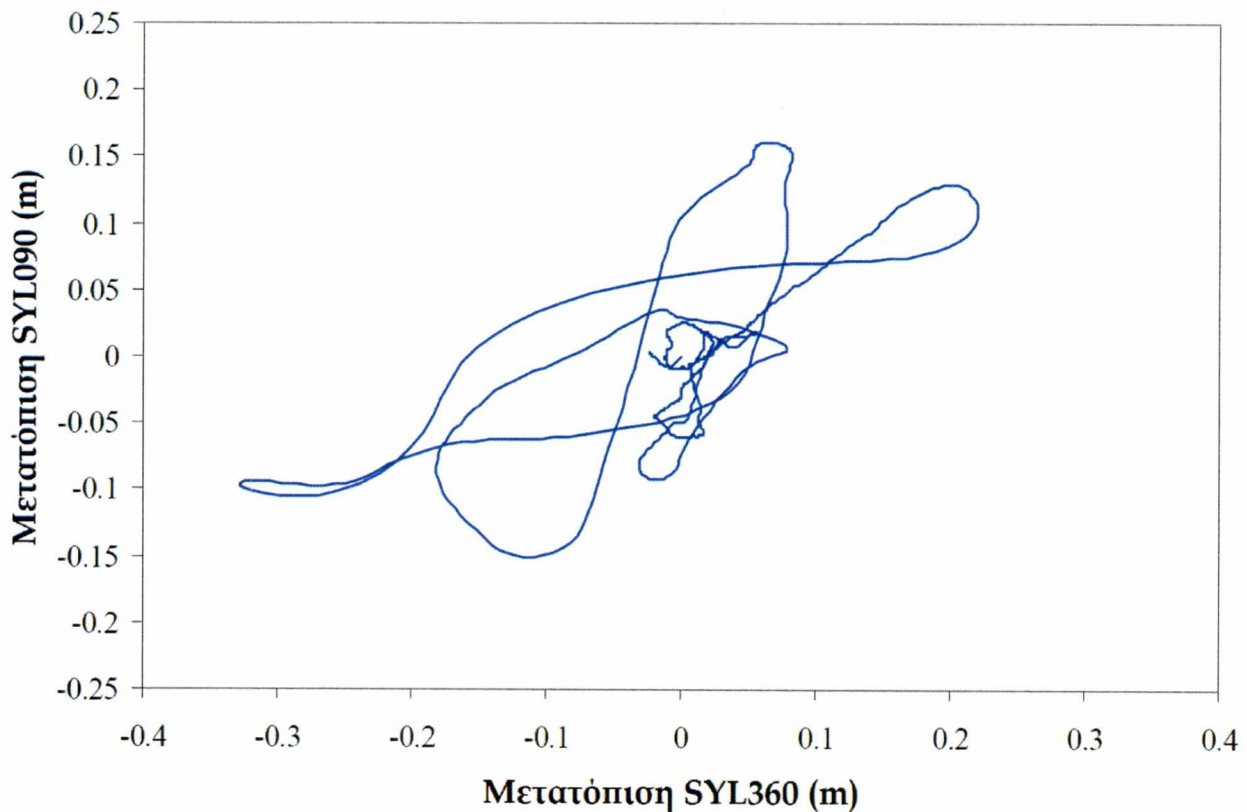
Οι χρονοϊστορίες αυτών των γεγονότων αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα του Συμβουλίου Μηχανικής και Σεισμών Ειρηνικού (PEER, 2005), όπου τηρούνται αρχεία από σχεδόν όλα τα μεγάλα σεισμικά γεγονότα που έχουν καταγραφεί. Οι καταγραφές αναλύονται σε τρεις ορθογωνικές συνιστώσες, δύο οριζόντιες και μία κατακόρυφη, και οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετατόπισης είναι διαθέσιμες σε πίνακες, καθώς και τα φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης για διαφορετικά επίπεδα απόσβεσης.

Για τις δοκιμές σε αυτή την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες μετατόπισης σε πίνακες προκειμένου να οριστεί η κίνηση και αυτή εισήχθη ως μία δυναμική οριακή συνθήκη στη βάση της κατασκευής και στα σημεία αγκύρωσης των καλωδίων. Η κίνηση Northridge περικόπηκε στα 20 δευτερόλεπτα μετά την παύση της ισχυρής κίνησης, ενώ χρησιμοποιήθηκε η πλήρης καταγραφή 40 δευτερολέπτων της κίνησης ElCentro.

Χρησιμοποιήθηκαν και οι τρεις ορθογώνιες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης. Πολλές μελέτες απλώς παίρνουν μία καταγραφή στην κατεύθυνση της ισχυρότερης κίνησης και την εφαρμόζουν στην υπό διερεύνηση κατασκευή. Ωστόσο, η εδαφική κίνηση είναι πραγματικά ένα τρισδιάστατο φαινόμενο και η παρούσα μελέτη επιχείρησε να το μοντελοποιήσει ως τέτοιο. Όπως φαίνεται στα ακόλουθα Σχήματα, συνέβαιναν πολύ περισσότερα από την απλή ευθύγραμμη κίνηση που συνήθως ερευνάται. Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται οι οριζόντιες επιταχύνσεις για μια χρονική περίοδο 2 δευτερολέπτων περίπου της ισχυρότερης κίνησης του σεισμού Northridge. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις για τα πρώτα 15 δευτερόλεπτα της καταγραφής Northridge παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4. Η πλήρης σειρά γραφικών απεικονίσεων μπορεί να βρεθεί στο Παράρτημα Β.

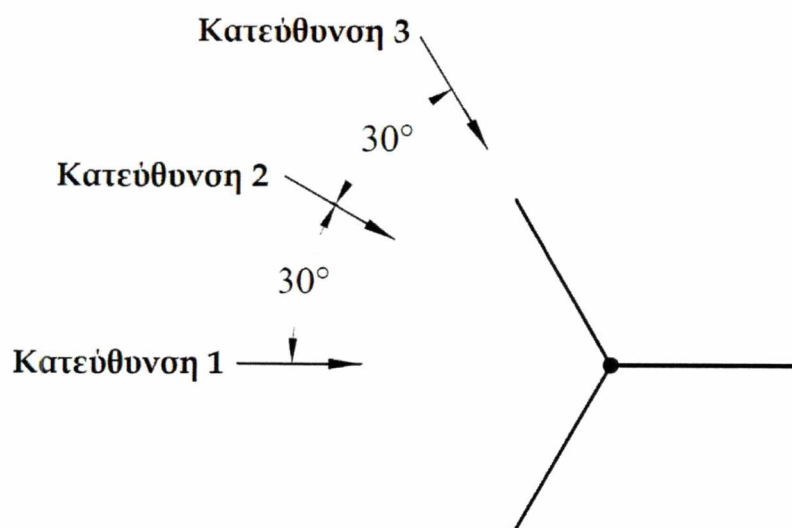


Σχήμα 4.3. Χρονοϊστορία επιτάχυνσης για την οριζόντια συνιστώσα της εδαφικής κίνησης Northridge



Σχήμα 4.4 Χρονοϊστορία μετατόπισης για την οριζόντια συνιστώσα της εδαφικής κίνησης Northridge

Ένας από τους στόχους της παρούσας μελέτης ήταν να εξετάσει την επίδραση της κατεύθυνσης της επενεργούσας κίνησης εισόδου στη δομική απόκριση των καλωδιωτών ιστών. Λόγω του γεγονότος ότι η περισσότερη δυσκαμψία παρέχεται από τα καλώδια, η γωνία υπό την οποία η κίνηση προσεγγίζει τον ιστό σε σχέση με τα καλώδια μπορεί να μεταβάλλει την απόκριση της κατασκευής. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις της ισχυρότερης εδαφικής κίνησης και ένα σχέδιο των σχετικών προσανατολισμών τους δίδεται στο Σχήμα 4.5.

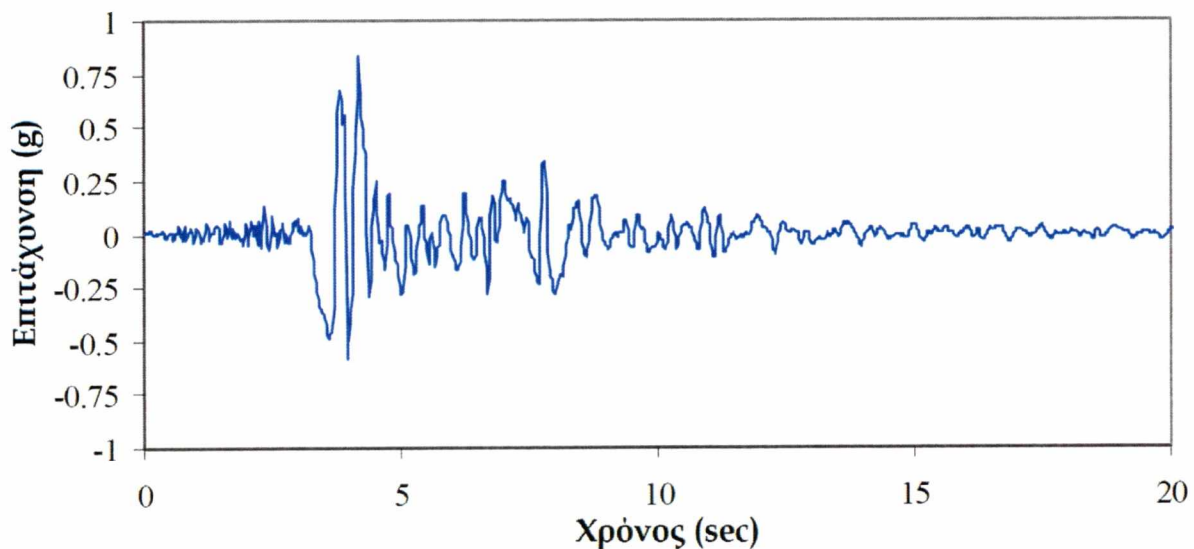


Σχήμα 4.5. Κάτοψη των κατευθύνσεων επενέργειας του ισχυρότερου σεισμού

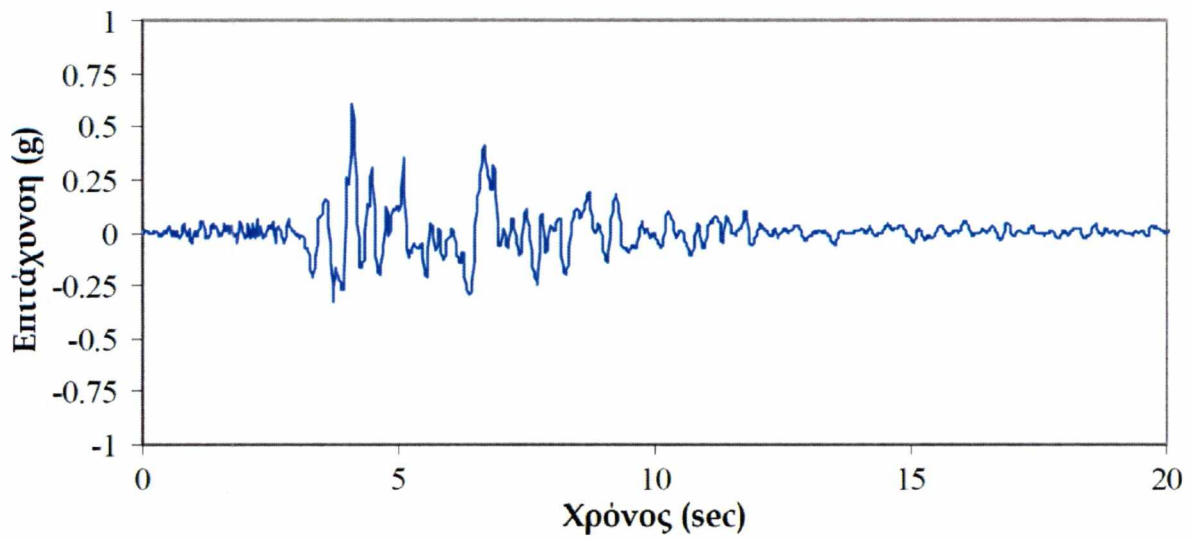
4.2.1 Northridge, 1994

Ο σεισμός Northridge σημειώθηκε ακριβώς βόρεια του Los Angeles στις 17 Ιανουαρίου 1994. Το μέγεθός του μετρήθηκε 6.7 (Chen και Scawthorn, 2003) και πολλοί σταθμοί καταγραφής εντόπισαν την εδαφική κίνηση. Για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας, η εδαφική κίνηση που χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος δεδομένων ήταν εκείνη που καταγράφηκε στο Ιατρικό Κέντρο Sylmar County, που αναφέρεται ως "SYL". Ο συγκεκριμένος σταθμός καταγραφής βρισκόταν πολύ κοντά στο ρήγμα και η καταγραφή της εδαφικής κίνησης παρουσιάζει μερικές επιρροές κοντινού πεδίου που δεν είναι κοινή σε άλλες καταγραφές. Η ισχυρότερη κατεύθυνση εδαφικής κίνησης ήταν SYL360, με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) 0.843 g. Η άλλη οριζόντια κατεύθυνση, SYL090, είχε PGA 0.604 g και η κατακόρυφη SYL-UP καταγραφή είχε μέτρηση PGA 0.535 g. Τα δεδομένα δόθηκαν σε χρονικά βήματα των 0.02 sec για αυτή την καταγραφή (PEER, 2005).

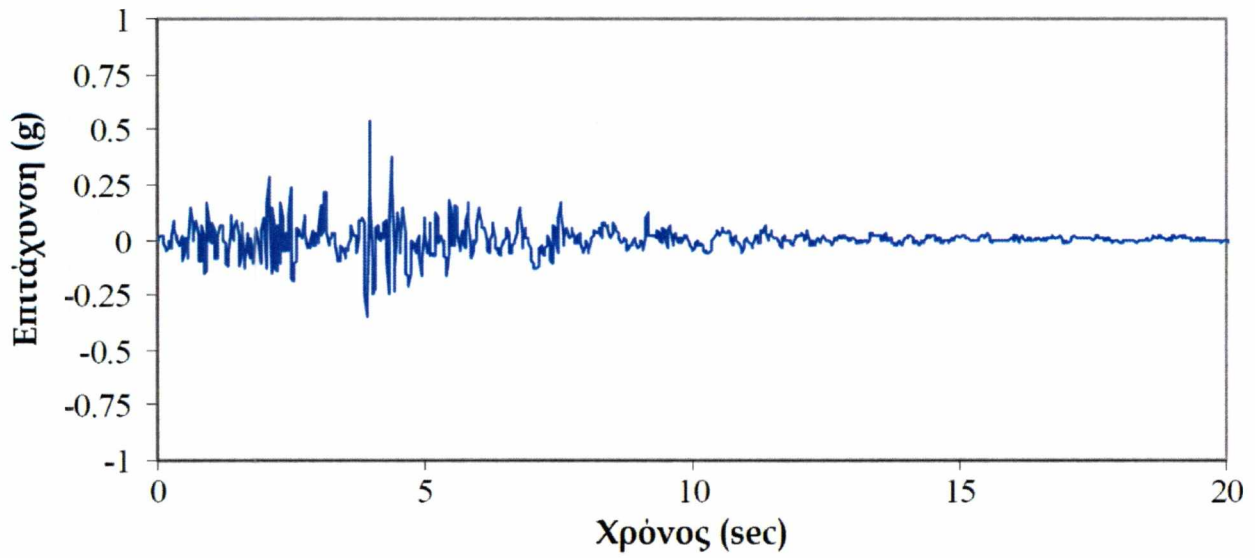
Τα Σχήματα 4.6, 4.7 και 4.8 δείχνουν τις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των τριών κατευθύνσεων εδαφικής κίνησης και το Σχήμα 4.9 δείχνει τα φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης των καταγραφών.



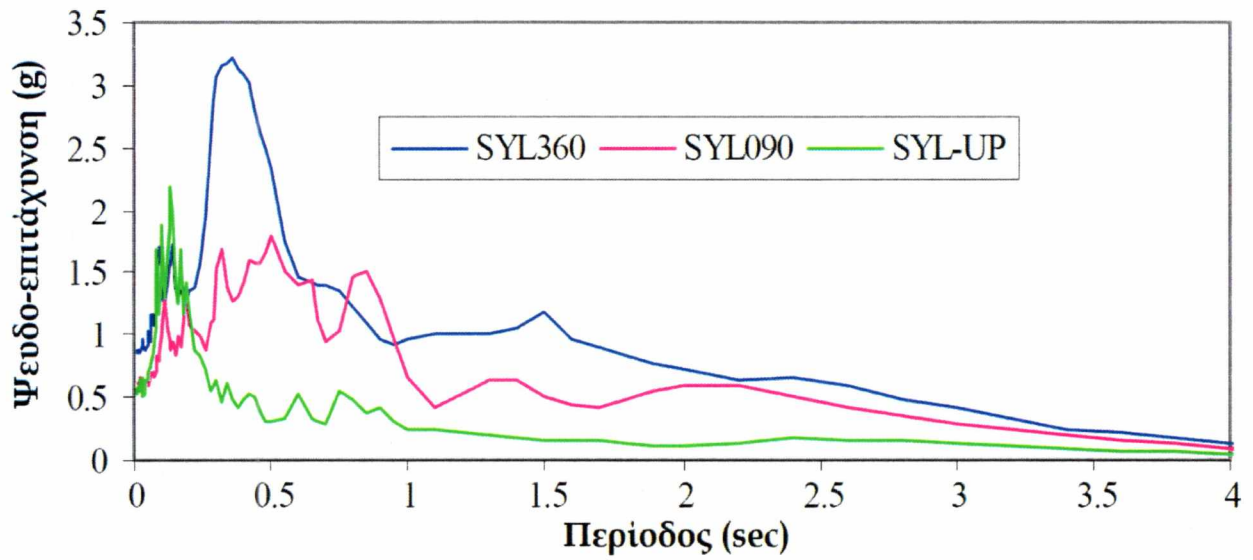
Σχήμα 4.6. Χρονοϊστορία επιτάχυνσης για SYL360



Σχήμα 4.7. Χρονοϊστορία επιτάχυνσης για SYL090



Σχήμα 4.8. Χρονοϊστορία επιτάχυνσης για SYL-UP



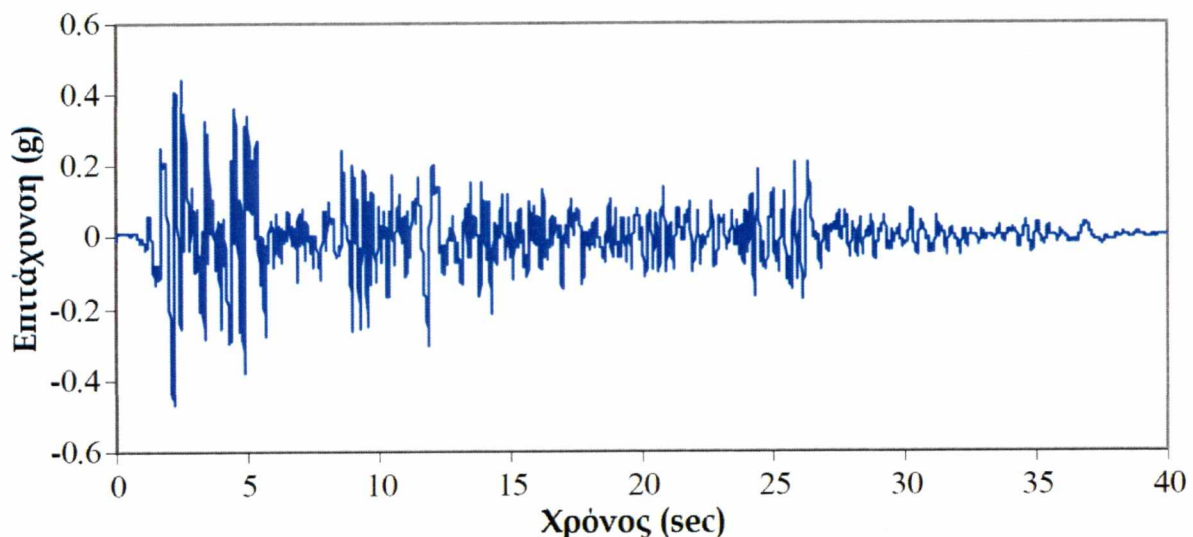
Σχήμα 4.9. Φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης Northridge Sylmar με απόσβεση 2%

4.2.2 El Centro, 1940

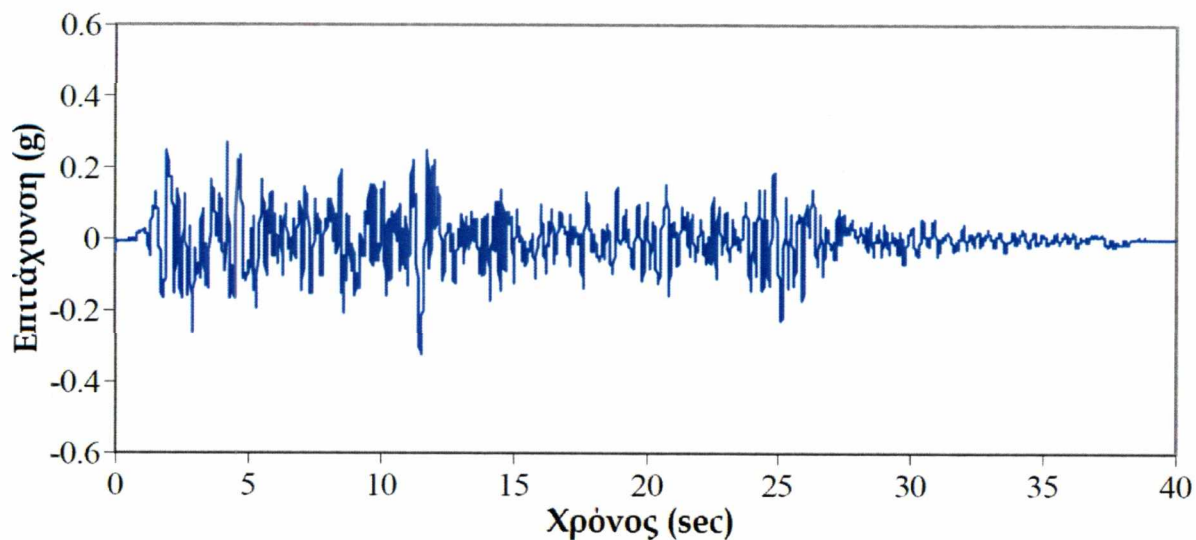
Ο σεισμός ElCentro του 1940 σημειώθηκε στις 19 Μαΐου. Χαρακτηρίστηκε ως γεγονός μεγέθους 7.0 και υπήρχε ένας μόνο σταθμός καταγραφής στη βάση δεδομένων PEER, ο El Centro Array #9. Για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας, η εδαφική κίνηση που χρησιμοποιείται ως είσοδος δεδομένων ήταν εκείνη που κατεγράφη στο El Centro Array, που αναφέρεται ως “ELC”. Η ισχυρότερη κατεύθυνση εδαφικής κίνησης ήταν η ELC180, με PGA 0.313 g. Η άλλη οριζόντια κατεύθυνση, ELC270, και η κατακόρυφη ELC-UP είχαν μετρήσεις PGA 0.215 g και 0.205 g, αντίστοιχα. Τα δεδομένα δόθηκαν σε χρονικά βήματα των 0.01 sec για αυτή την καταγραφή (PEER, 2005).

Το συγκεκριμένο αυτό σεισμικό γεγονός είχε υψηλότερης συχνότητας περιεχόμενο από τον σεισμό Northridge, αλλά μικρότερη ένταση όπως μετρήθηκε σε αυτή την τοποθεσία. Για να δούμε τη συμπεριφορά χαλάρωσης-τεντώματος σε έναν συγκεκριμένο καλωδιωτό ιστό κάτω από τις δύο εισόδους σεισμού, τα χρονοδιαγράμματα El Centro αυξήθηκαν κατά 50% σε σχέση με την PGA που αναφέρονται ως ενισχυμένες καταγραφές El Centro.

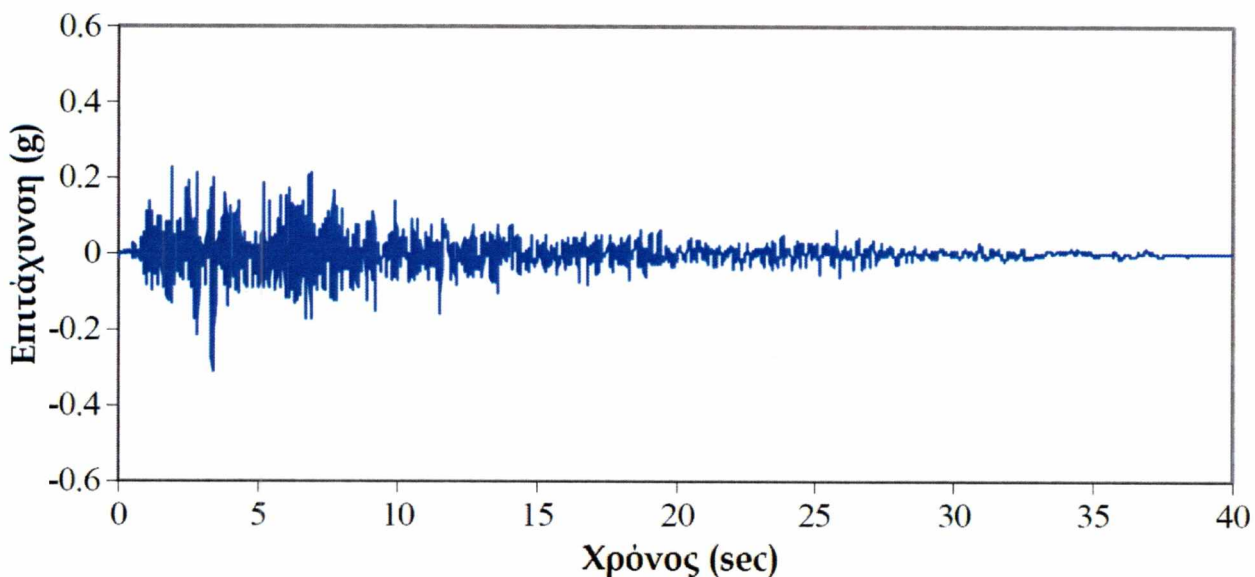
Τα Σχήματα 4.10, 4.11 και 4.12 καταδεικνύουν τα χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των τριών κατευθύνσεων εδαφικής κίνησης και το Σχήμα 4.13 τα φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης των καταγραφών.



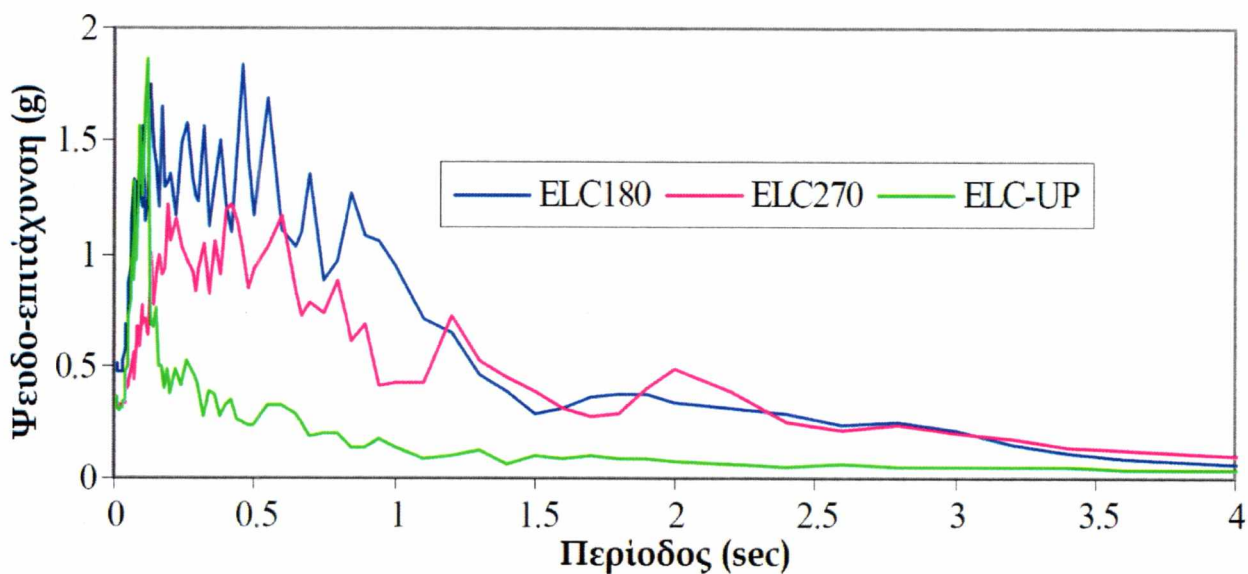
Σχήμα 4.10. Χρονοϊστορία επιτάχυνσης για ενισχυμένη ELC180



Σχήμα 4.11. Χρονοϊστορία επιτάχυνσης για ενισχυμένη ELC270



Σχήμα 4.12. Χρονοϊστορία επιτάχυνσης για ενισχυμένη ELC-UP

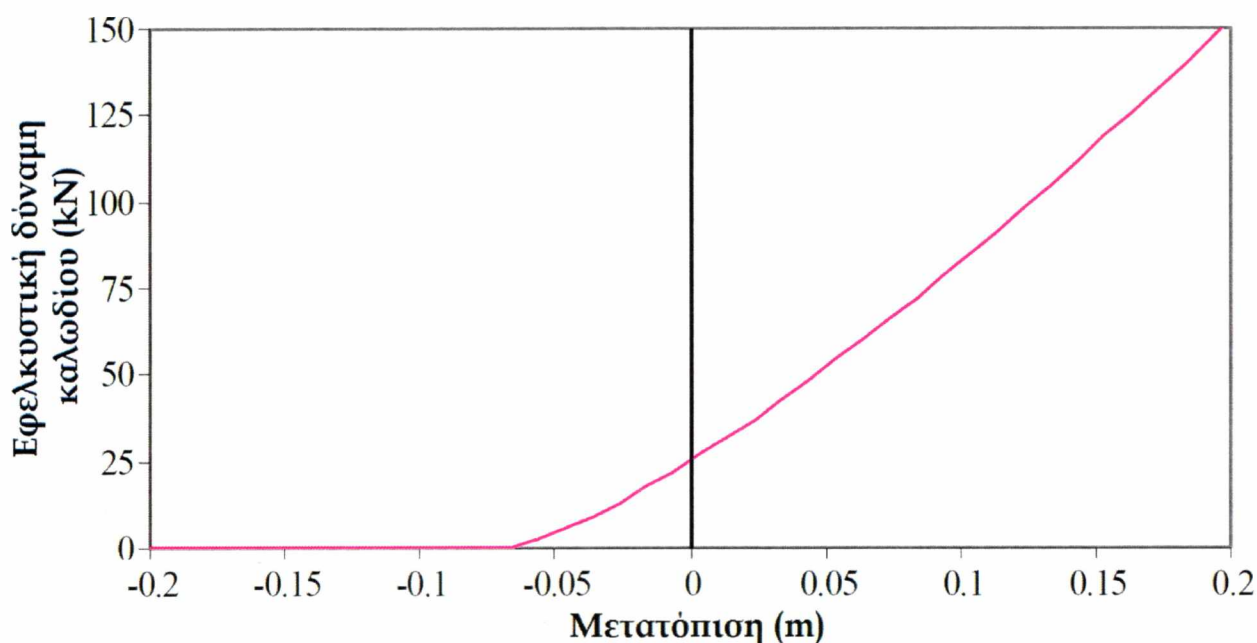


Σχήμα 4.13. Φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης ενισχυμένης El Centro με απόσβεση 2%

4.3. Τρισδιάστατο Μοντέλο

4.3.1 Καλώδια

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, δεν βρέθηκε ένα ικανοποιητικό μοντέλο ελατηρίου και αποσβεστήρα που να περιλαμβάνει τα αποτελέσματα απόσβεσης των συνθετικών σχοινιών. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήσαμε ένα απλό ελατήριο για την προσομοίωση των καλωδίων, το στοιχείο SPRINGA, που χρησιμοποιήθηκε στην προκαταρκτική τεκμηρίωση. Διέθετε μηδενική δυσκαμψία σε θλίψη και μη γραμμική δυσκαμψία εκ της (3.1) σε εφελκυσμό. Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζεται ένα απλό διάγραμμα της συμπεριφοράς του ελατηρίου για την τυποποιημένη περίπτωση $EA = 3 \times 10^7$ και 25 kN προέντασης.



Σχήμα 4.14. Ενδεικτική μη γραμμική συμπεριφορά ελατηρίου

Το ελατήριο ορίστηκε να περιλαμβάνει γραμμική δυσκαμψία καθώς και προένταση. Η παρούσα μελέτη χρησιμοποίησε την ιδιότητα της EA , για να ορίσει τη δυστένεια των σχοινιών. Ο ορισμός αυτού του είδους επιτρέπει στην παρούσα μελέτη να εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους υλικών σε καλωδιωτούς ιστούς και να περιλαμβάνει τις επιπτώσεις κράτνυσης που γενικώς υπάρχουν στα πλεγμένα συρματόσχοινα και καλώδια. Η γραμμική δυστένεια, όπως ορίζεται από τη διατομή και το μέτρο ελαστικότητας καλωδίου, μετατράπηκε σε μια ισοδύναμη μη γραμμική δυστένεια με βάση το συντελεστή που αναπτύχθηκε και αποδείχτηκε από τον Motley (2004).

Τα συνθετικά σχοινιά υψηλού μέτρου ελαστικότητας που μελετήθηκαν προηγουμένως, είναι κατά πολύ ελαφρύτερα από τα χαλύβδινα καλώδια. Λόγω της σημαντικής μείωσης βάρους, αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθεί κάποιο πιο σύνθετο μοντέλο καλωδίων, επειδή η μάζα δεν θα αποτελεί πλέον σημαντικό τμήμα της συνολικής

μάζας της κατασκευής και, επιπροσθέτως, οι δυναμικές ταλαντώσεις στα καλώδια θα έχουν πολύ μικρότερη επίδραση στις δυναμικές τάσεις εφελκυσμού στα σχοινιά από ό, τι στα καλώδια από χάλυβα.

Οι αγκύρωσεις των καλωδίων θεωρήθηκε ότι είναι δύσκαμπτες και η κίνησή τους συγχρονίστηκε με τη βάση του ιστού. Έχει αποδειχθεί ότι για πολύ μεγάλα ύψη ιστών, που έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σημείων αγκύρωσης των καλωδίων, οι πολλαπλές διεγέρσεις της στήριξης μπορούν να αλλάξουν σημαντικά τη δυναμική συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών. Ωστόσο, ο πύργος υπό έρευνα είχε ύψος 120m, διάσταση που βρίσκεται στο χαμηλότερο άκρο του φάσματος ύψους των καλωδιωτών ιστών και, επομένως, δεν πρέπει να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος σε πολλαπλές διεγέρσεις της στήριξης.

4.3.2 Ιστός

Ο ιστός προσομοιώθηκε ως δοκός-στυλός χρησιμοποιώντας το στοιχείο B33 με μία τυπική διατομή δοκού, όπως τεκμηριώθηκε στις προκαταρκτικές δοκιμές. Η επιλογή της τυπικής διατομής δοκού υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει κανένας ορισμός του σχήματος της διατομής της δοκού, και απλώς ορίζονται οι απαραίτητες ιδιότητες της διατομής, όπως το εμβαδόν, η ροπή αδράνειας και το μέτρο ελαστικότητας. Αυτό ήταν ενδεδειγμένο για την παρούσα έρευνα, από τη στιγμή που στόχος ήταν η εξέταση της συνολικής συμπεριφοράς του ιστού χωρίς να δίνεται έμφαση στα επιμέρους στοιχεία που απαρτίζουν τον ιστό.

Στο μοντέλο αυτό, τα καλώδια απλώς συνδέονταν με έναν κόμβο στο κέντρο της μάζας του ιστού και οι στρεπτικές μετατοπίσεις δε λαμβάνονταν υπόψη. Η βάση του ιστού μοντελοποιήθηκε ως αρθρωτή σύνδεση, καθώς η επισκόπηση της βιβλιογραφίας έδειξε ότι τούτο αποτελεί την πιο κοινή πρακτική.

4.3.3 Επιλογές ανάλυσης

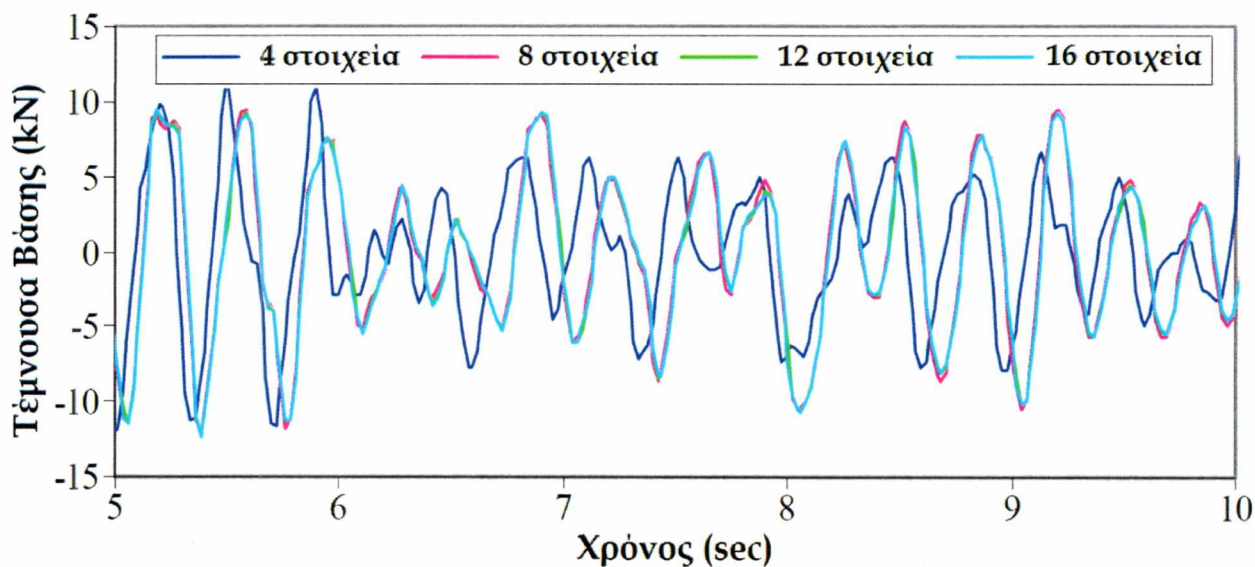
Η δυναμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε αριθμητικά και επαληθεύτηκε ήδη στην προκαταρκτική τεκμηρίωση. Η ανάλυση αυτή περιελάμβανε μεγάλες παραμορφώσεις, κατακόρυφα φορτία λόγω του βάρους του ιστού, καθώς και τις σεισμικές κινήσεις βάσης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Η διάρκεια των αναλύσεων ήταν 20 και 40 sec, για τις κινήσεις Northridge και ElCentro, αντίστοιχα. Η παράμετρος ανοχής, γνωστή ως υπόλοιπο μισού βήματος, ορίστηκε 10.000 N και βρέθηκε ικανοποιητική. Το μέγιστο χρονικό βήμα ελήφθη ως 0.01 sec. Αυτό συνεπάγεται ότι οι συχνότητες έως 10 Hz εξετάστηκαν στις αναλύσεις και το περιεχόμενο των κινήσεων του σεισμού δεν επηρεαζόταν σημαντικά, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.9 και 4.13.

4.3.4 Παράμετροι εξαγόμενων αποτελεσμάτων

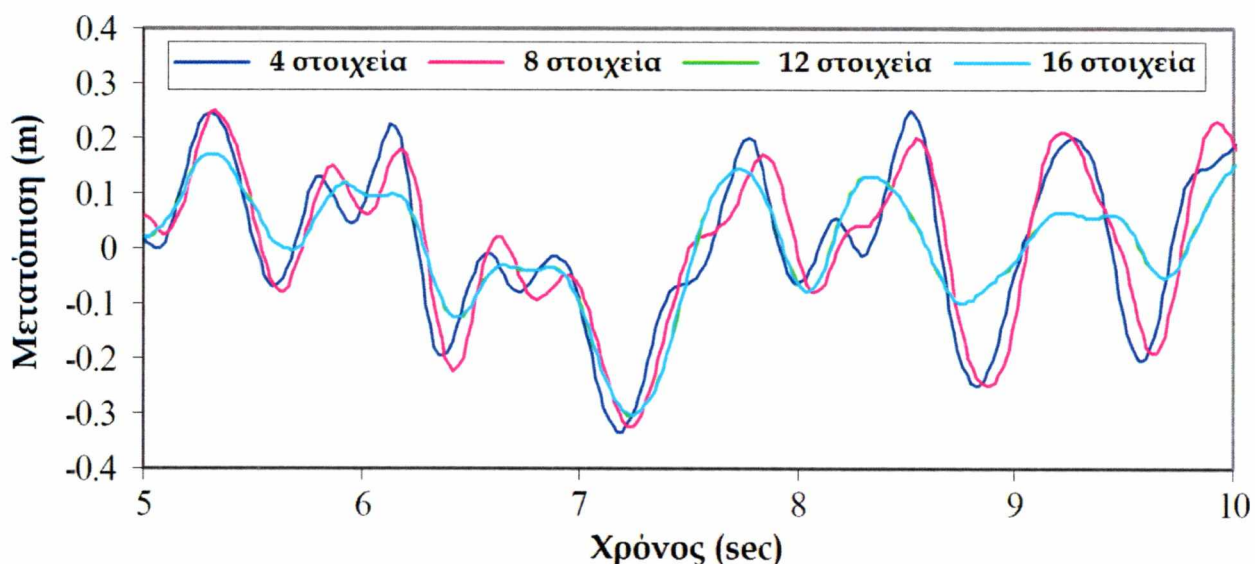
Προκειμένου να εξεταστεί η δομική απόκριση, ζητήθηκαν από την ανάλυση διάφορες μορφές εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Αυτά τα εξαγόμενα αποτελέσματα γράφτηκαν στη βάση δεδομένων εξαγόμενων αποτελεσμάτων σε κάθε άλλο χρονικό βήμα, το οποίο αντιστοιχεί το πολύ σε 0.02 sec μεταξύ των αναγνώσεων. Καταγράφηκαν οι τάσεις καλωδίων και οι τέμνουσες βάσης, καθώς και οι αξονικές δυνάμεις, οι ροπές κάμψης και μετατοπίσεις στα τέταρτα του ύψους του ιστού. Τα εξαχθέντα αποτελέσματα μετατράπηκαν σε λογιστικό φύλλο Excel και ενοποιήθηκαν και ελέγχθηκαν με το πρόγραμμα αυτό. Υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές όλων των παραμέτρων εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Οι μετατοπίσεις που καταγράφηκαν από το πρόγραμμα ήταν απόλυτες και αυτές οι καταγεγραμμένες τιμές τροποποιήθηκαν σε σχέση με την κίνηση βάσης προκειμένου να ληφθούν οι σχετικές μετατοπίσεις, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά για την ανάλυση αυτών των δοκιμών.

4.4 Μελέτες Σύγκλισης, Απόσβεση και Παραμετρικές Μελέτες

Οι μελέτες σύγκλισης του μοντέλου ιστού πραγματοποιήθηκαν υπό σεισμική φόρτιση, συγκεκριμένα το σεισμό Northridge, με σκοπό να προσδιορίσουμε έναν επαρκή αριθμό στοιχείων της δοκού για τη μοντελοποίηση του ιστού. Τα αποτελέσματα των μελετών σύγκλισης για ένα μικρό χρονικό διάστημα φαίνονται στα Σχήματα 4.15 και 4.16. Διαπιστώθηκε ότι 3 στοιχεία δοκού ανά τμήμα μεταξύ των επιπέδων των καλωδίων, για ένα σύνολο 12 στοιχείων δοκού, παρείχαν ακριβή αποτελέσματα. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί, καθώς η γαλάζια γραμμή βρίσκεται σχεδόν ακριβώς πάνω από την πράσινη γραμμή. Εξετάστηκαν αμφότερες οι μετατοπίσεις και οι ροπές κάμψης προκειμένου να γίνει αυτός ο προσδιορισμός.

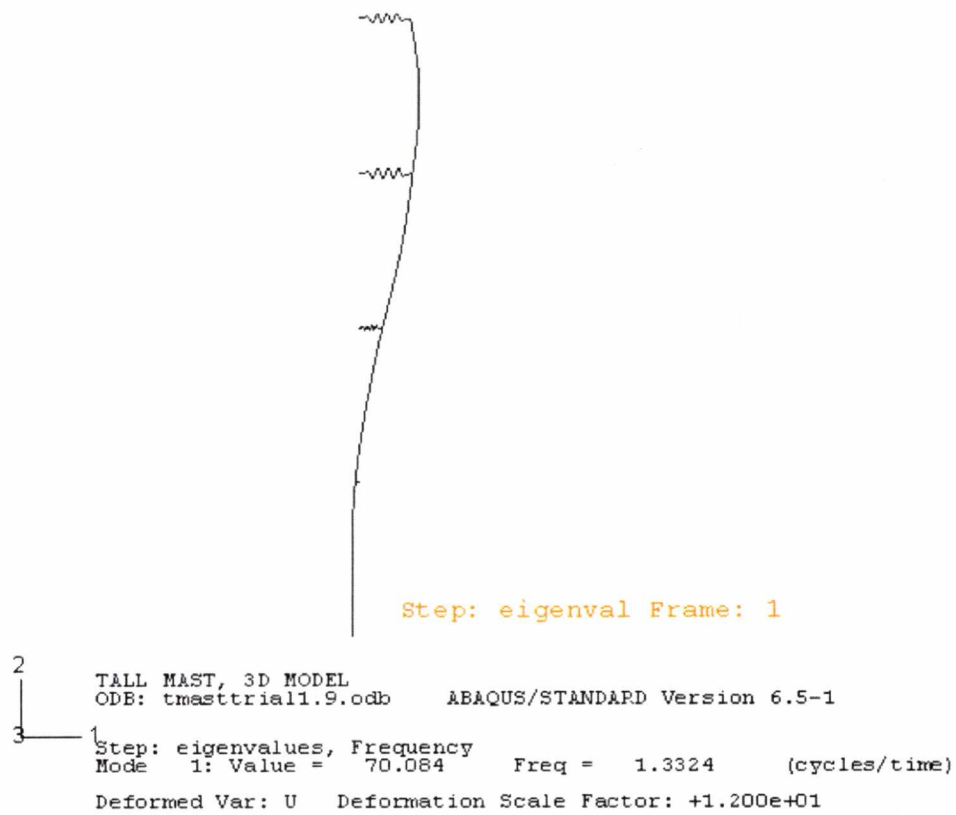


Σχήμα 4.15 Τέμνουσα Βάσης 1 στις μελέτες σύγκλισης

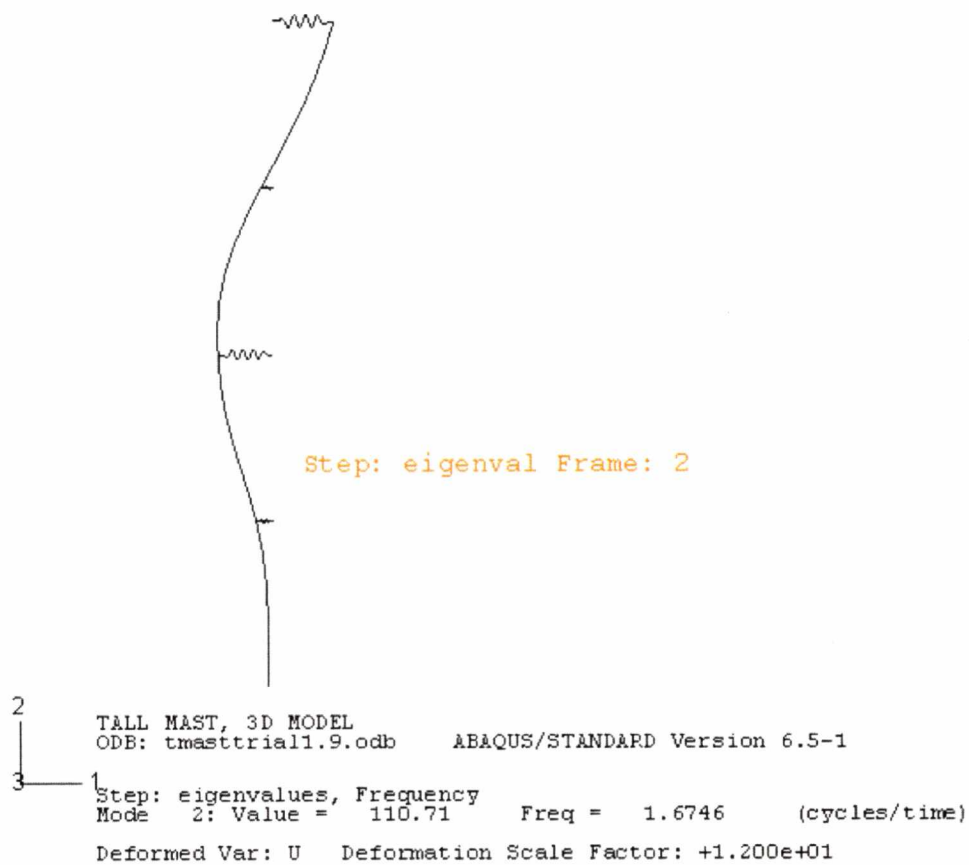


Σχήμα 4.16 Μετατόπιση 1 στην κορυφή του ιστού στις μελέτες σύγκλισης

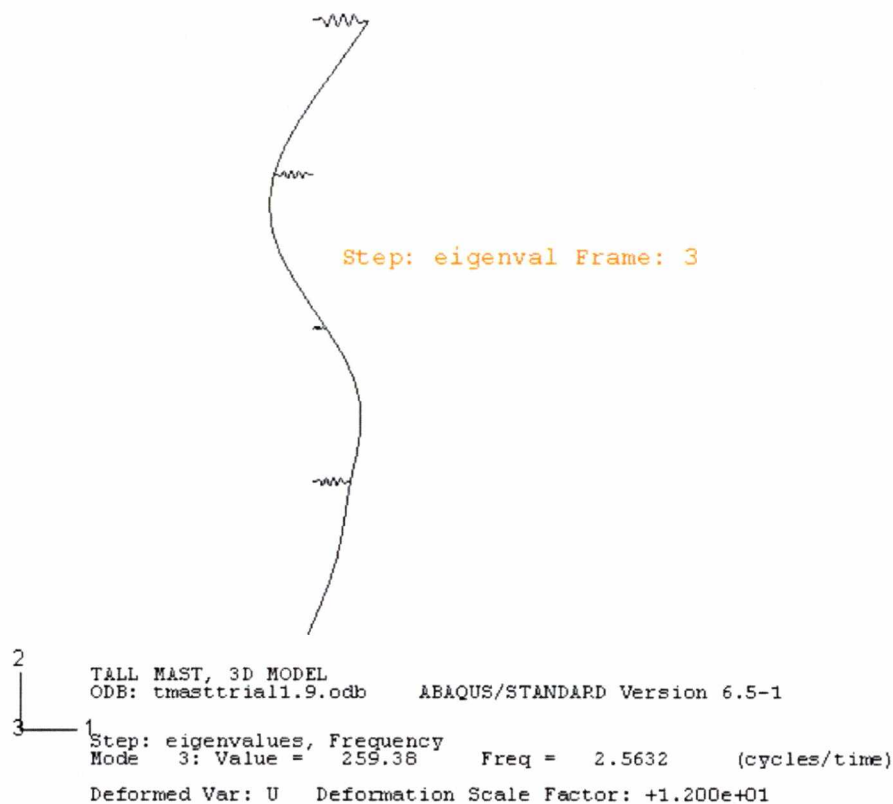
Το eigensolver, που τεκμηριώθηκε στις προκαταρκτικές μελέτες, χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των πέντε πρώτων ιδιομορφών κάμψης στη γενική περίπτωση του ιστού. Οι συχνότητες, σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο, των πρώτων πέντε ιδιομορφών διαπιστώθηκε ότι είναι ως ακολούθως: 8.37, 10.5, 16.1, 20.3 και 29.3. Οι συχνότητες είναι ουσιαστικά ταυτόσημες με τις θεωρητικές τιμές με τη χρήση της θεωρίας δοκού και οι συναρτήσεις σχήματος, με τη χρήση ενός ισοδύναμου ελατηρίου σε κάθε επίπεδο καλωδίου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.17, 4.18 και 4.19, αντιστοιχούν σε μεγάλο βαθμό με εκείνες που παρουσιάζονται στη σελίδα 149 του βιβλίου του Irvine (1981).



Σχήμα 4.17. Πρώτη καμπτική ιδιομορφή



Σχήμα 4.18. Δεύτερη καμπτική ιδιομορφή



Σχήμα 4.19. Τρίτη καμπτική ιδιομορφή

Η πρώτη και η τέταρτη ιδιομορφή χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια με την εξίσωση (2.3) για τον προσδιορισμό των παραμέτρων για την απόσβεση Rayleigh που θα προσέγγιζε το 2% της κρίσιμης απόσβεσης στον ιστό για τις πέντε πρώτες ιδιομορφές. Οι τιμές διαπιστώθηκε ότι ήταν $\alpha_0 = 0,237$ και $\alpha_1 = 0,00140$. Αυτές οι τιμές απόσβεσης διατηρήθηκαν σταθερές και περιλαμβάνονται σε όλες τις τρισδιάστατες δοκιμές.

Εκτός από τον ιστό που παρουσιάστηκε, μελετήθηκε και άλλος ένας μικρότερος ιστός, ύψους 40 m και με δύο επίπεδα καλωδίων. Ωστόσο, δεν υπέστη αρκετά μεγάλες μετατοπίσεις κάτω από τις σεισμικές κινήσεις ώστε να επιδείξει συμπεριφορά χαλάρωσης στα καλώδια. Ως εκ τούτου, η παρούσα έρευνα θα επικεντρωθεί στη συμπεριφορά του ιστού με ύψος 120 m. Στο συγκεκριμένο μοντέλο ιστού πραγματοποιήθηκαν 38 δοκιμές. Η δυστένεια των σχοινιών, η προένταση των σχοινιών, η μάζα και η δυσκαμψία του ιστού και η κατευθυντικότητα της κίνησης εισόδου ποίκιλλαν. Η δυστένεια των καλωδίων, η προένταση των καλωδίων, το βάρος του ιστού και η αντοχή σε κάμψη του ιστού που χρησιμοποιούνται στους Desai και Punde (2001), χρησιμοποιήθηκαν ως κατευθυντήρια γραμμή για την ανάπτυξη λογικών δομικών ιδιοτήτων για τις παραμετρικές μελέτες. Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τις σημαντικές παραμέτρους για κάθε μία δοκιμή. Για τα ονόματα των δοκιμών χρησιμοποιείται ένας συμβολισμός με τρία αναγνωριστικά που διαχωρίζονται από μία παύλα. Το πρώτο αντιπροσωπεύει την κίνηση του σεισμού, N για Northridge και E για ElCentro, το δεύτερο αντιπροσωπεύει την τιμή της EA για τα καλώδια σε Newton $\times 10^7$ και το τρίτο αντιπροσωπεύει την προένταση καλωδίου σε kN. Περιλαμβάνονται επίσης οι λεπτομέρειες σχετικά με τις τιμές

των ιδιοτήτων του ιστού και των σεισμικών κατευθύνσεων. Η τυποποιημένη περίπτωση σχεδιασμού του καλωδιωτού ιστού δηλώνεται με έναν αστερίσκο. Όλες οι δοκιμές αποτελούν παραλλαγές της τυποποιημένης περίπτωσης.

Πίνακας 4.1. Τιμές παραμέτρων για τρισδιάστατες δοκιμές

Δοκιμή	Κίνηση Εισόδου	EA (N x 10 ⁷)	Προένταση (kN)	Μάζα (kg/m)	Ροπή Αδρανείας Ιστού (m ⁴)	Κατεύθυνση Σεισμού
N-2-15	Northridge	2	15	60	1.8 x 10 ⁻³	1
N-2-20	"	"	20	"	"	"
N-2-25	"	"	25	"	"	"
N-2-30	"	"	30	"	"	"
N-2-35	"	"	35	"	"	"
N-3-15	Northridge	3	15	60	1.8 x 10 ⁻³	1
N-3-20	"	"	20	"	"	"
N-3-25 *	"	"	25	"	"	"
N-3-30	"	"	30	"	"	"
N-3-35	"	"	35	"	"	"
N-4-15	Northridge	4	15	60	1.8 x 10 ⁻³	1
N-4-20	"	"	20	"	"	"
N-4-25	"	"	25	"	"	"
N-4-30	"	"	30	"	"	"
N-4-35	"	"	35	"	"	"
N-3-25-M1	Northridge	3	25	45	1.6 x 10 ⁻³	1
N-3-25-M3	Northridge	3	25	75	2.0 x 10 ⁻³	1
N-3-25-D2	Northridge	3	25	60	1.8 x 10 ⁻³	2
N-3-25-D3	Northridge	3	25	60	1.8 x 10 ⁻³	3
E-2-15	Amp. El Centro	2	15	60	1.8 x 10 ⁻³	1
E-2-20	"	"	20	"	"	"
E-2-25	"	"	25	"	"	"
E-2-30	"	"	30	"	"	"
E-2-35	"	"	35	"	"	"
E-3-15	Amp. El Centro	3	15	60	1.8 x 10 ⁻³	1
E-3-20	"	"	20	"	"	"
E-3-25 *	"	"	25	"	"	"
E-3-30	"	"	30	"	"	"
E-3-35	"	"	35	"	"	"
E-4-15	Amp. El Centro	4	15	60	1.8 x 10 ⁻³	1
E-4-20	"	"	20	"	"	"
E-4-25	"	"	25	"	"	"
E-4-30	"	"	30	"	"	"
E-4-35	"	"	35	"	"	"
E-3-25-M1	Amp. El Centro	3	25	45	1.6 x 10 ⁻³	1
E-3-25-M3	Amp. El Centro	3	25	75	2.0 x 10 ⁻³	1
E-3-25-D2	Amp. El Centro	3	25	60	1.8 x 10 ⁻³	2
E-3-25-D3	Amp. El Centro	3	25	60	1.8 x 10 ⁻³	3

Κεφάλαιο 5 : Αποτελέσματα Δυναμικών Αναλύσεων

5.1 Δυναμικές Αναλύσεις

Εξετάστηκε η σεισμική συμπεριφορά ενός καλωδιωτού ιστού ύψους 120m με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Πραγματοποιήθηκαν 38 δοκιμές με ποικίλες δομικές παραμέτρους προκειμένου να βρεθούν οι επιπτώσεις αυτών των παραμέτρων στη δυναμική απόκριση της κατασκευής. Οι δύο εδαφικές κινήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι δεδομένων ήταν χαρακτηριστικά διαφορετικές και, ως εκ τούτου, η κατασκευή επέδειξε διαφορετικές αποκρίσεις ως προς τη φόρτιση. Οι τάσεις (trends) στην απόκριση μπορούν να συγκριθούν με σκοπό την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά.

Μία λεπτομερής περιγραφή των παραμέτρων για κάθε δοκιμή παρουσιάστηκε προηγουμένως στην ενότητα 4.4. Η ονοματολογία που χρησιμοποιήθηκε στην εν λόγω ενότητα για να υποδηλώσει τις διαφορετικές δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε και στην ακόλουθη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Επιπροσθέτως, το N-2 υποδηλώνει ένα σύνολο δοκιμών υπό την κίνηση εισόδου Northridge με $EA = 2 \times 10^7 N$, ενώ το N-2-20 υποδηλώνει τη συγκεκριμένη δοκιμή σε αυτό το σύνολο, όπου τα καλώδια είχαν προενταθεί έως 20 kN. Οι τιμές απόκρισης καταγράφηκαν στα τέταρτα του ιστού (όπως και στα επίπεδα καλωδίων), και αυτά υποδηλώνονται ως βάση και τα Σημεία 1 έως 4 ανεβαίνοντας από την επιφάνεια του εδάφους στον ιστό, όπου το Σημείο 4 είναι στην κορυφή. Οι διαφορετικοί βαθμοί ελευθερίας (DOF) για τις τιμές απόκρισης συνδέονται με την κατεύθυνση της κίνησης εισόδου: DOF1 ήταν στην κατεύθυνση της ισχυρής οριζόντιας εισόδου, DOF2 ήταν στην κατακόρυφη κατεύθυνση και DOF3 ήταν στην κατεύθυνση της άλλης οριζόντιας συνιστώσας.

Η λεπτομερής δυναμική συμπεριφορά του ιστού υπό τις δύο διαφορετικές εδαφικές κινήσεις συζητείται πρώτη. Η παρούσα έρευνα εστιάζει στην επίπτωση της συμπεριφοράς χαλάρωσης-τεντώματος στον ιστό και η πλειοψηφία των αναλυτικών δοκιμών είχαν ως στόχο την εξέταση αυτή. Κατ' αυτό τον τρόπο, οι γενικές τάσεις στις μέγιστες τιμές απόκρισης εξετάζονται για τα διαφορετικά επίπεδα προέντασης (χαλάρωσης) στη Μελέτη 1. Τέλος, παρουσιάζονται οι τάσεις σχετικά με τις μεταβολές στις ιδιότητες του ιστού (Μελέτη 2) και στη κατεύθυνση του σεισμού (Μελέτη 3).

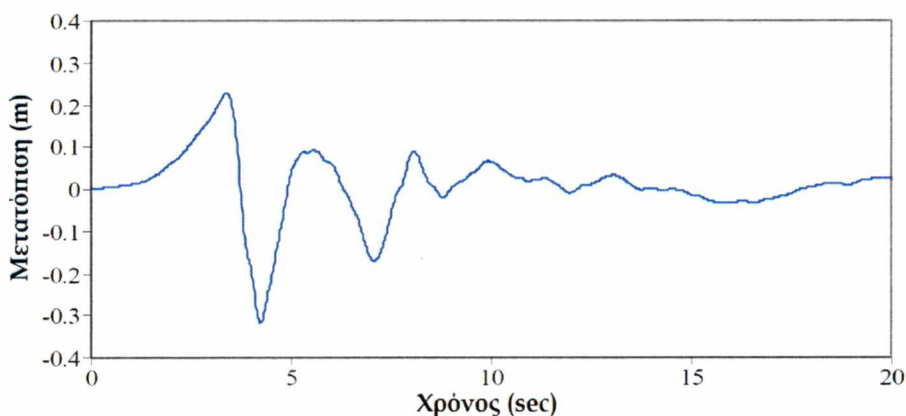
5.2 Λεπτομερής δυναμική συμπεριφορά

Προκειμένου να κατανοήσουμε κατ' αρχάς τον τρόπο που η σεισμική κίνηση επηρεάζει τον καλωδιωτό ιστό, περιγράφεται σταδιακά η συμπεριφορά για δύο συγκεκριμένες δοκιμές. Εξετάζονται τόσο η δοκιμή N-3-25 όσο και η δοκιμή E-3-25, περιπτώσεις όπου οι εισαγωγές εδαφικής κίνησης Northridge και ενισχυμένη ElCentro εφαρμόστηκαν στην ίδια τυποποιημένη περίπτωση του μοντέλου. Οι παράμετροι για τα μοντέλα ήταν οι ίδιες για τις δύο αυτές περιπτώσεις και ήταν στη μέση των πεδίων τιμών που ερευνήθηκαν. Επομένως, ενώ η δυναμική συμπεριφορά ήταν μη γραμμική και εξαρτώμενη από

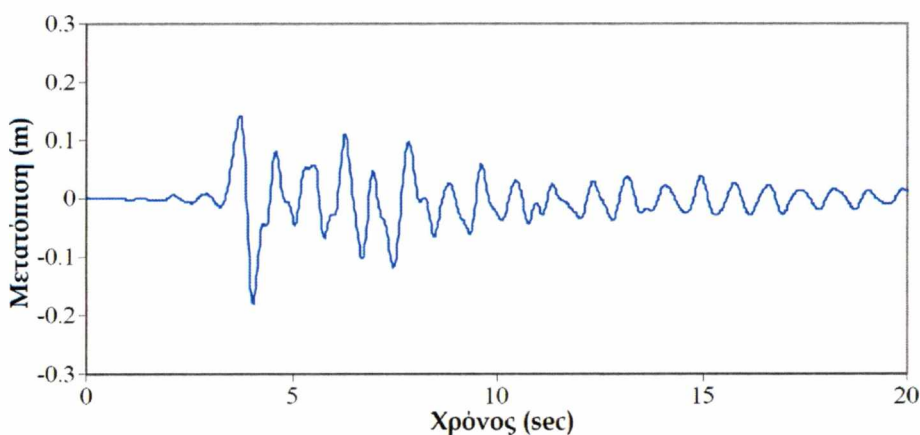
διάφορες μεταβλητές, οι δύο αυτές δοκιμές εξετάζουν τη συμπεριφορά της μέσης κατασκευής στην παρούσα έρευνα.

5.2.1 Συμπεριφορά στο σεισμό Northridge

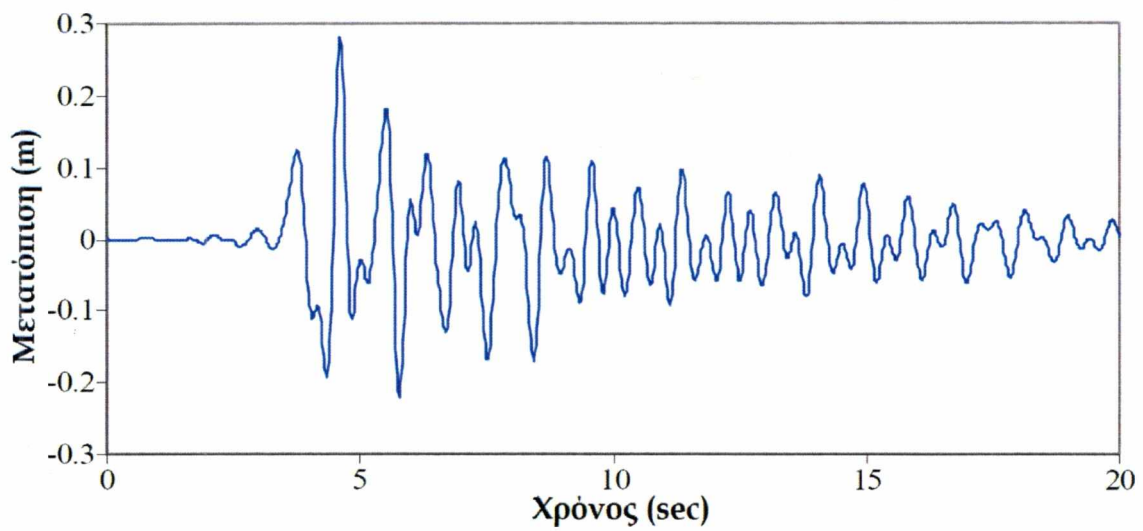
Οι δοκιμές που αφορούν το σεισμό Northridge είχαν διάρκεια 20 δευτερόλεπτα και η ισχυρότερη κίνηση σημειώθηκε στην καταγραφή μεταξύ των 3 και 5 δευτερολέπτων περίπου. Στα Σχήματα 5.1 έως 5.6 βλέπουμε τις μετατοπίσεις στη βάση και τις μετατοπίσεις σε σχέση με την εδαφική κίνηση στα Σημεία 2 και 4. Οι μετατοπίσεις εισόδου και για τους δύο οριζόντιους βαθμούς ελευθερίας ήταν αρκετά παρόμοιες σε σχήμα με διαφορετικά μεγέθη. Οι μετατοπίσεις στο Σημείο 4 έτειναν να είναι μεγαλύτερες από τις μετατοπίσεις στο Σημείο 2. Ωστόσο, υπήρχε μεγαλύτερη διαφορά στα δύο μεγέθη που σχετίζονται με το DOF1. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις στο DOF3 ήταν μεγαλύτερες από εκείνες στο DOF1, αν και η κίνηση εισόδου είχε λιγότερη ενέργεια. Επίσης, η ταλάντωση του ιστού στο DOF3 ήταν πολύ πιο σταθερή από εκείνη στο DOF1 και προσέγγιζε μια σχεδόν περιοδική συμπεριφορά. Αυτό υποδηλώνει ότι η συμπεριφορά του ιστού κυριαρχούταν από μία συγκεκριμένη καμπτική ιδιομορφή στο DOF3. Συνολικά, η οριζόντια μετατόπιση του ιστού χαρακτηριζόταν από μεγάλες κινήσεις που συνέπιπταν με το ισχυρότερο τμήμα της εδαφικής κίνησης και στη συνέχεια οι εναπομένουσες ταλαντώσεις σιγά-σιγά ελαχιστοποιούνταν.



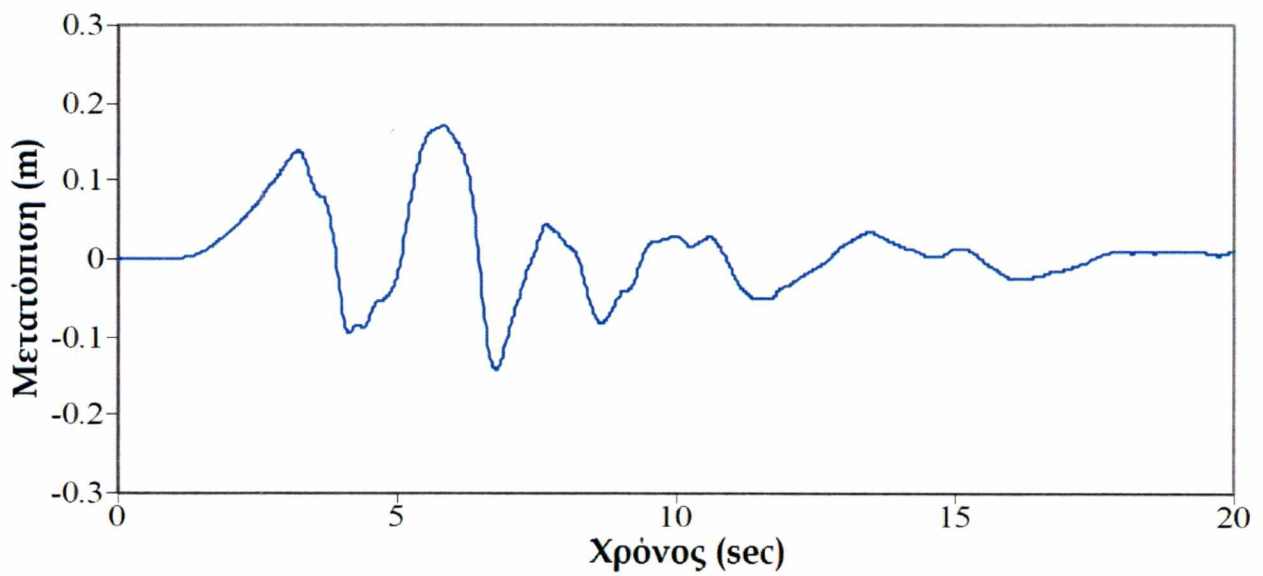
Σχήμα 5.1. Μετατόπιση 1 στη Βάση για N-3-25



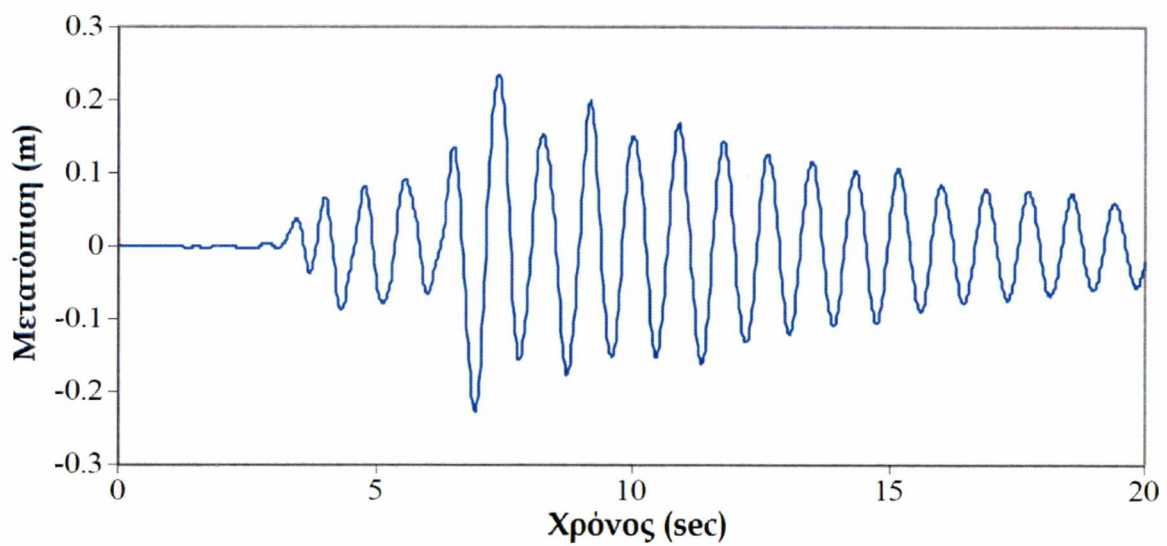
Σχήμα 5.2. Μετατόπιση 1 στο Σημείο 2 για N-3-25



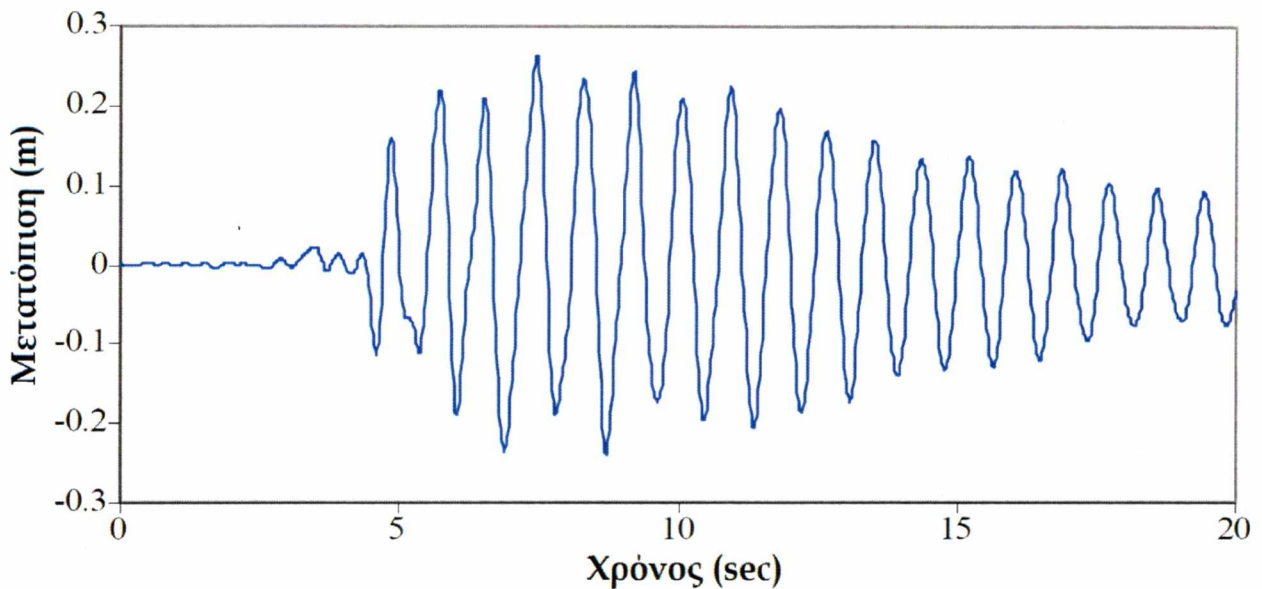
Σχήμα 5.3. Μετατόπιση 1 στο Σημείο 4 για N-3-25



Σχήμα 5.4. Μετατόπιση 3 στη Βάση για N-3-25

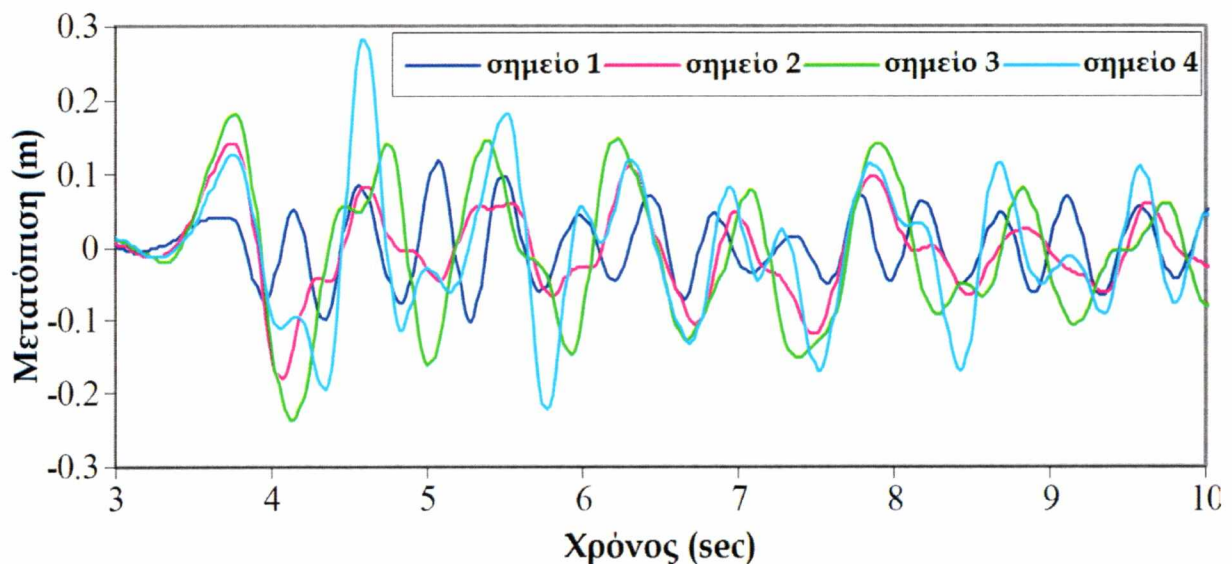


Σχήμα 5.5. Μετατόπιση 3 στο Σημείο 2 για N-3-25

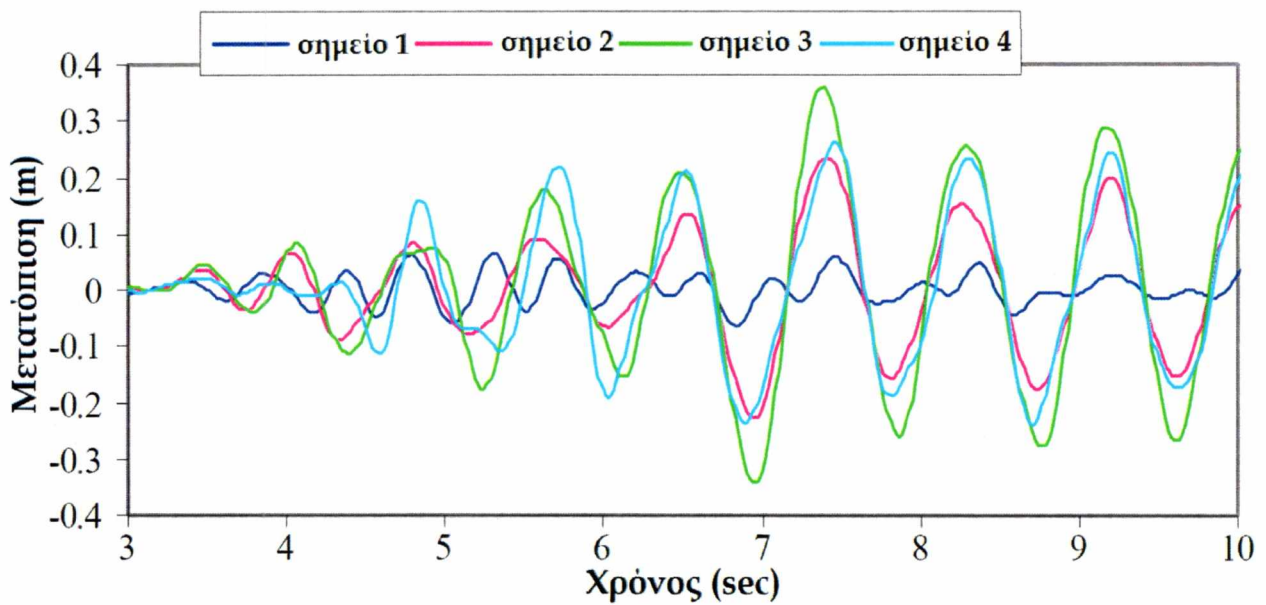


Σχήμα 5.6. Μετατόπιση 3 στο Σημείο 4 για N-3-25

Δεδομένου ότι η συμπεριφορά μετατόπισης ήταν κάπως διαφορετική σε κάθε επίπεδο καλωδίου, είναι ευκολότερο να δούμε τη σχέση μεταξύ των μετατοπίσεων σε κάθε επίπεδο καλωδίου όταν απεικονίζονται στο ίδιο διάγραμμα. Αυτό φαίνεται στα Σχήματα 5.7 και 5.8 για τη χρονική περίοδο της ισχυρότερης κίνησης. Και οι δύο κατευθύνσεις χαρακτηρίστηκαν από μετατοπίσεις σε κάθε ύψος, εμφανιζόμενες συνήθως προς την ίδια κατεύθυνση. Ωστόσο, υπήρχε πολύ μεγαλύτερη αυξομειώση στο DOF1, κάτι που υποδηλώνει ότι ορισμένες ανώτερες ιδιομορφές συμμετείχαν ενεργά στην απόκριση. Το Σημείο 4 επέδειξε την υψηλότερη μέγιστη τιμή στο Σχήμα 5.7 και το Σημείο 3 στο Σχήμα 5.8.

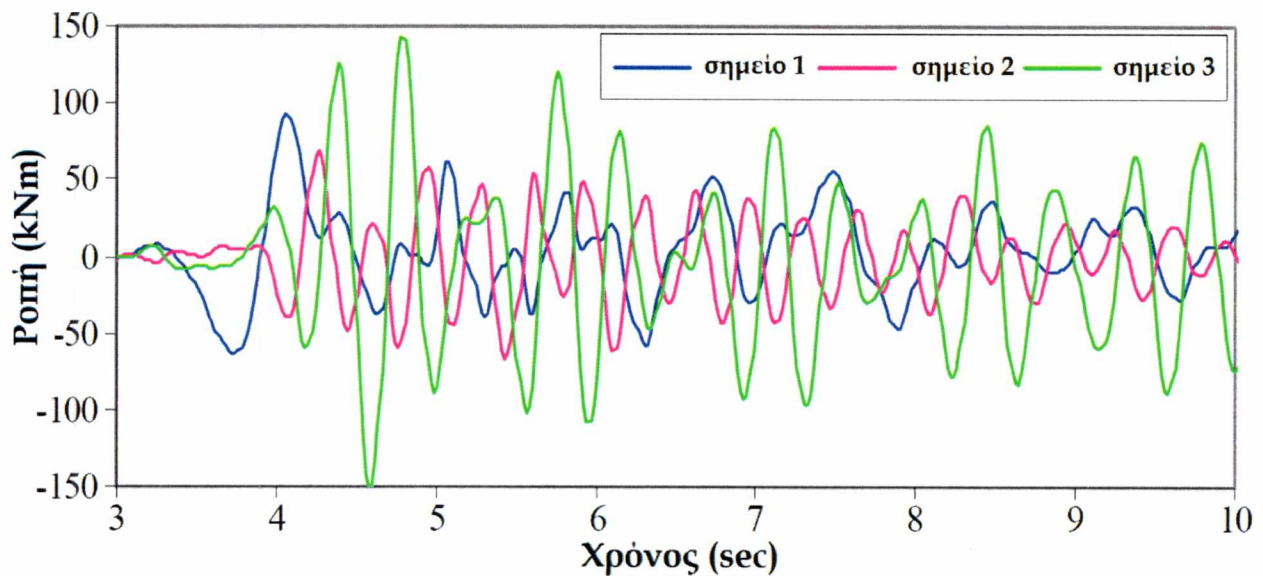


Σχήμα 5.7. Μετατόπιση 1 για N-3-25

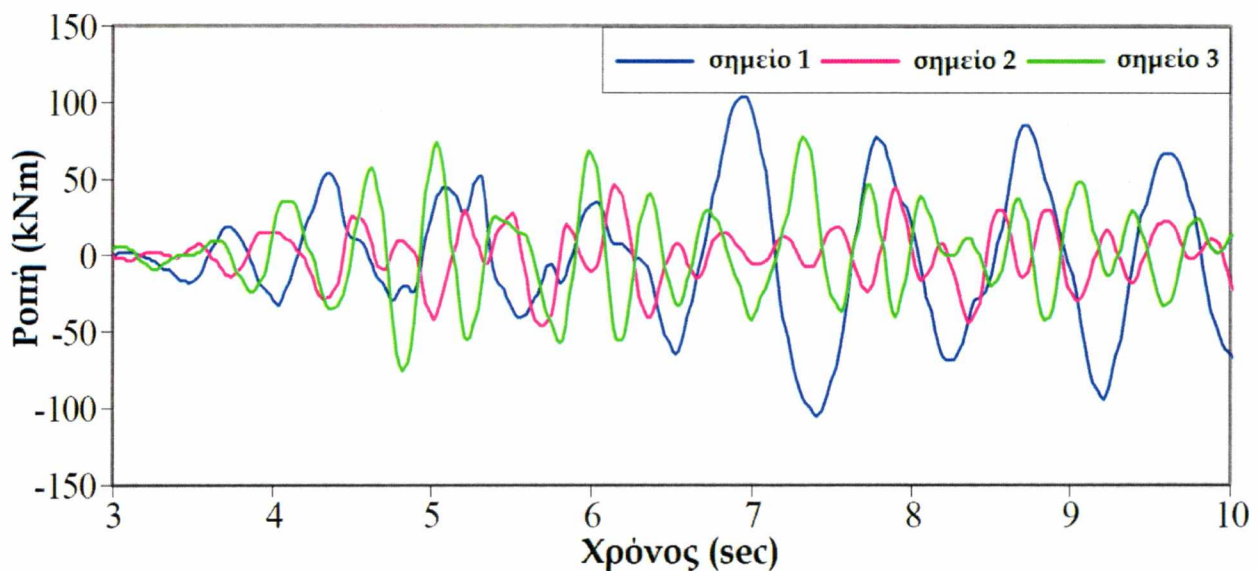


Σχήμα 5.8. Μετατόπιση 3 για N-3-25

Οι ροπές κάμψης στα επίπεδα καλωδίων απεικονίζονται στα Σχήματα 5.9 και 5.10 για την περίοδο της ισχυρότερης κίνησης. Οι ροπές κάμψης που αφορούν την κίνηση στο DOF1 παρουσίασαν σημαντική μεταβλητότητα και καθόλου ιδιαίτερες τάσεις. Ωστόσο, οι μεγάλες ροπές στο πρώτο επίπεδο καλωδίων που αφορούν την κίνηση στο DOF3 εμφανίστηκαν μετά από 6.5 δευτερόλεπτα, σηματοδοτώντας ίσως μία δραστική αλλαγή στην απόκριση του ιστού σε αυτή την κατεύθυνση.



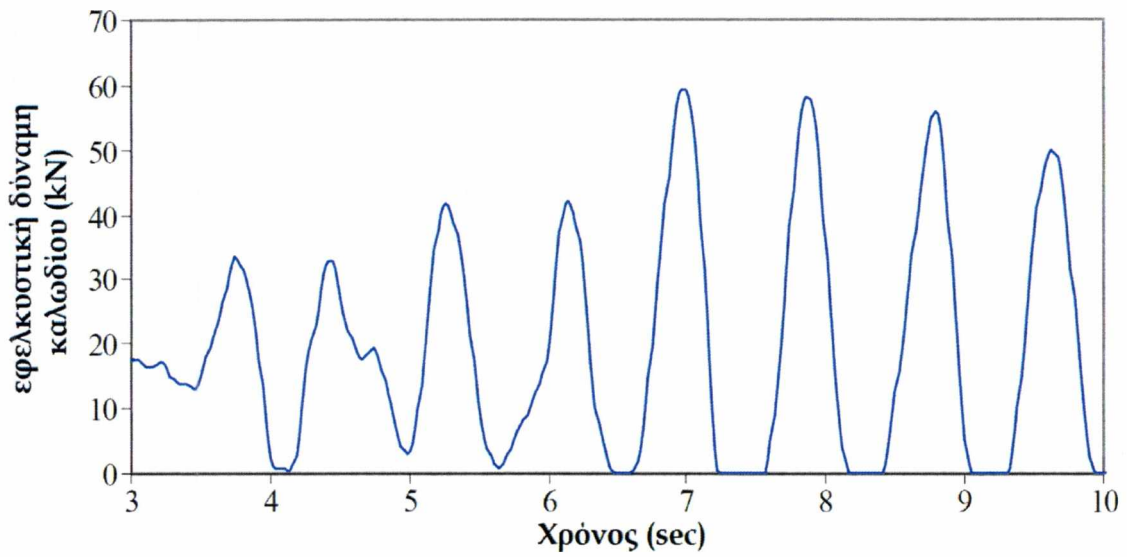
Σχήμα 5.9. Ροπή κάμψης 1 για N-3-25



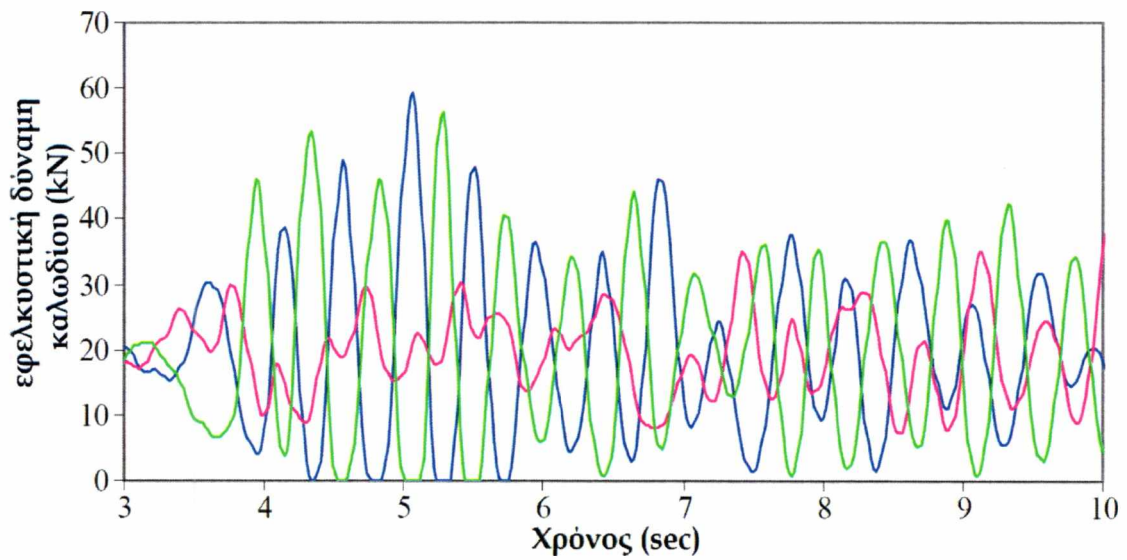
Σχήμα 5.10. Ροπή κάμψης 3 για N-3-25

Ένας από τους κύριους στόχους της παρούσας έρευνας ήταν να μελετήσει την επίπτωση των φορτίων ακαριαίας μεταβολής, δηλαδή όταν τα καλώδια χαλαρώνουν και στη συνέχεια τεντώνονται. Είναι ενδιαφέρον για την έρευνα αυτή να σημειωθεί ότι η αισθητή μεταβολή στη δομική συμπεριφορά σε DOF3 όπως επισημαίνεται στα Σχήματα 5.8 και 5.10, συνέπεσε με τη μεταβολή στη συμπεριφορά των καλωδίων. Το Σχήμα 5.11 παρουσιάζει την εφελκυστική δύναμη σε ένα από τα καλώδια που συνδέονται στο Σημείο 3. Αυτή στο εν λόγω καλώδιο άρχισε να χαλαρώνει ξεκινώντας περίπου στα 6.5 δευτερόλεπτα, την ίδια στιγμή που μεταβαλλόταν η απόκριση. Επομένως, φαίνεται ότι τα φορτία αυτά, που συνδέονται με τη συμπεριφορά χαλάρωσης-τεντώματος των καλωδίων, μπορούν να μεταβάλλουν σημαντικά τη δομική συμπεριφορά.

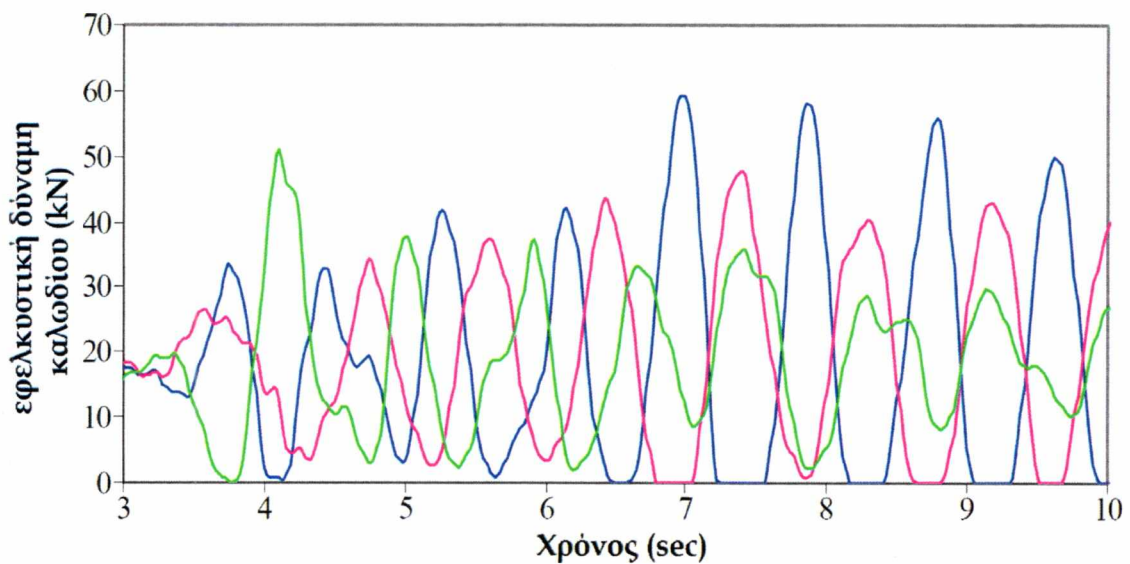
Τα Σχήματα 5.12 και 5.13 απεικονίζουν την απόκριση και των τριών καλωδίων στα δύο διαφορετικά επίπεδα του ιστού. Μπορούμε να δούμε ότι οι εφελκυστικές δυνάμεις των καλωδίων στο πρώτο επίπεδο καλωδίων κυμαίνονται σε υψηλότερη συχνότητα από ό, τι στα υπόλοιπα επίπεδα καλωδίων. Στο Σχήμα 5.13, το συγκεκριμένο καλώδιο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11 απεικονίζεται σε μπλε και ένα άλλο καλώδιο απεικονίζεται σε ροζ. Αντιπροσωπεύουν τα δύο καλώδια με συνιστώσες σε DOF3 και εμφανίζουν και τα δύο ακαριαία φορτία μετά από 6.5 δευτερόλεπτα περίπου.



Σχήμα 5.11. Εφελκυστική δύναμη καλωδίου στο Σημείο 3 για N-3-25

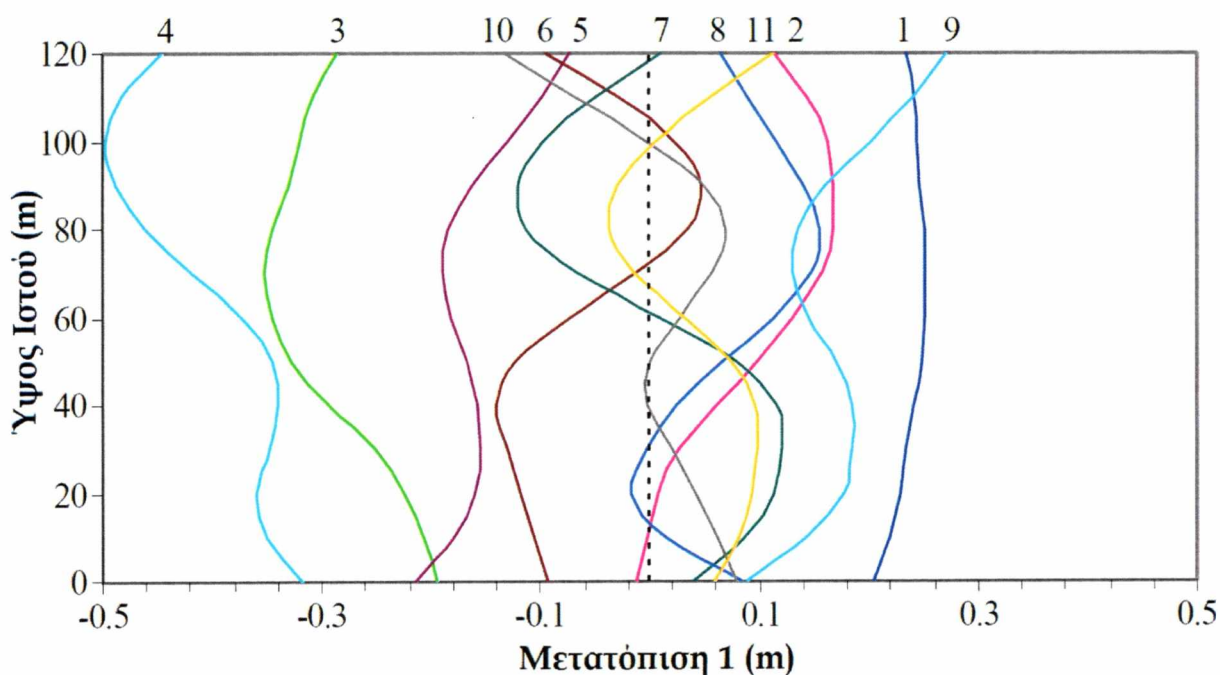


Σχήμα 5.12. Εφελκυστική δύναμη καλωδίων στο Σημείο 1 για N-3-25

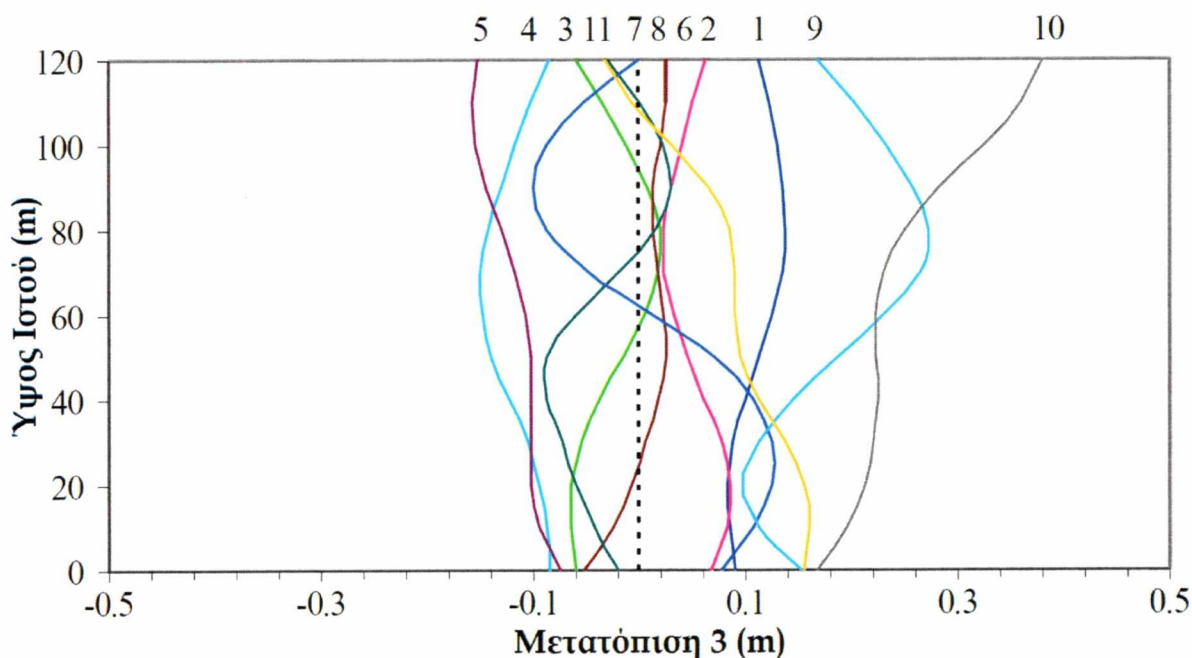


Σχήμα 5.13. Εφελκυστική δύναμη καλωδίων στο Σημείο 3 για N-3-25

Η δυναμική απόκριση ήταν ιδιαίτερα μη γραμμική και δημιουργήθηκαν γραφικές απεικονίσεις που δείχνουν τα σχήματα παραμόρφωσης του ιστού προοδευτικά με την πάροδο του χρόνου. Οι αριθμοί στο επάνω μέρος της γραφικής παράστασης αντιστοιχούν στη χρονολογική σειρά. Τα Σχήματα 5.14 και 5.15 απεικονίζουν τα καμπτικές μορφές και για τους δύο οριζόντιους βαθμούς ελευθερίας σε 0.6-sec βήματος τρέχοντος χρόνου από 3.5 έως 6 δευτερόλεπτα στην καταγραφή. Αυτό αντιστοιχεί στο σημείο που ξεκίνησε η εδαφική κίνηση. Φαίνεται ότι στο DOF1 υπήρχαν μεγαλύτερες μετατοπίσεις βάσης και υψηλότερες ιδιομορφές κάμψης.

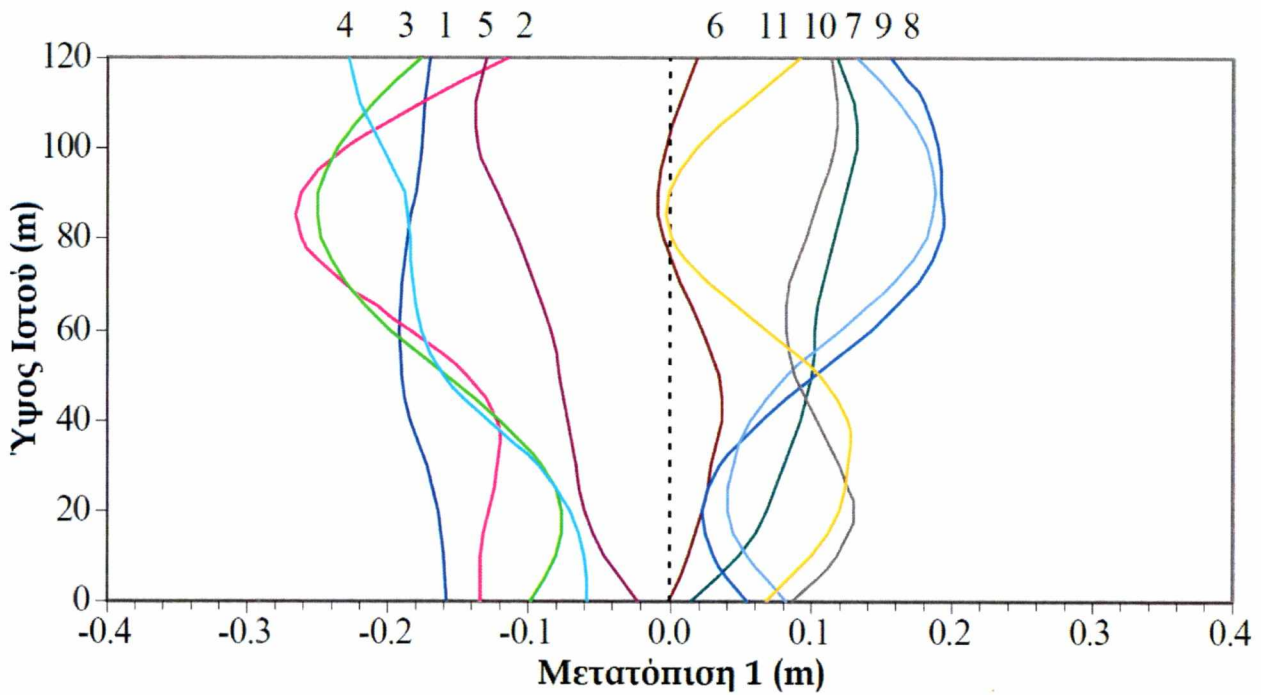


Σχήμα 5.14. Πρώτο σύνολο σχημάτων παραμόρφωσης στο DOF1 για N-3-25

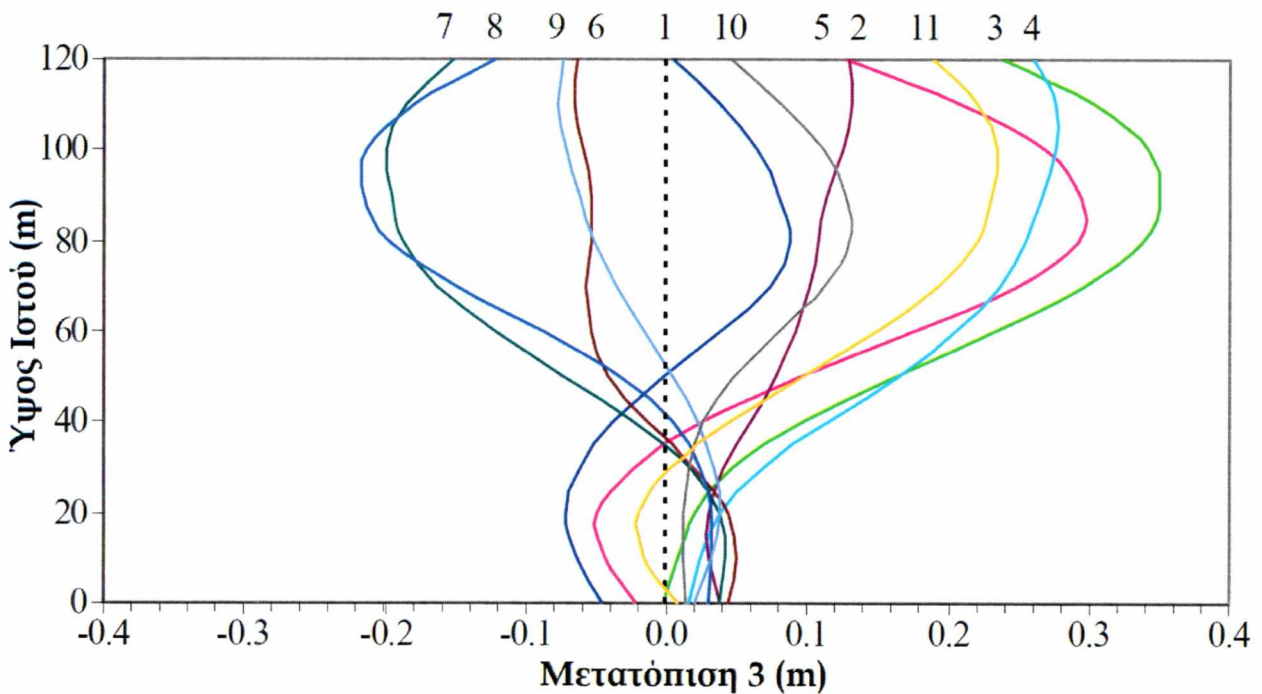


Σχήμα 5.15. Πρώτο σύνολο σχημάτων παραμόρφωσης στο DOF3 για N-3-25

Τα Σχήματα 5.16 και 5.17 απεικονίζουν την παραμόρφωση του ιστού ξεκινώντας στα 7 δευτερόλεπτα, όταν η δομική συμπεριφορά άρχισε να μεταβάλλεται. Αυτές οι γραφικές απεικονίσεις μας παρέχουν μια ματιά στη συμπεριφορά για διάρκεια 1 δευτερολέπτου σε μικρότερα χρονικά βήματα 0.1 δευτερολέπτων. Υπήρχαν προφανείς διαφορές στις ιδιομορφές κάμψης που αφορούν κάθε κατεύθυνση και οι μετατοπίσεις στο DOF3 είχαν πολύ πιο σταθερό σχήμα.

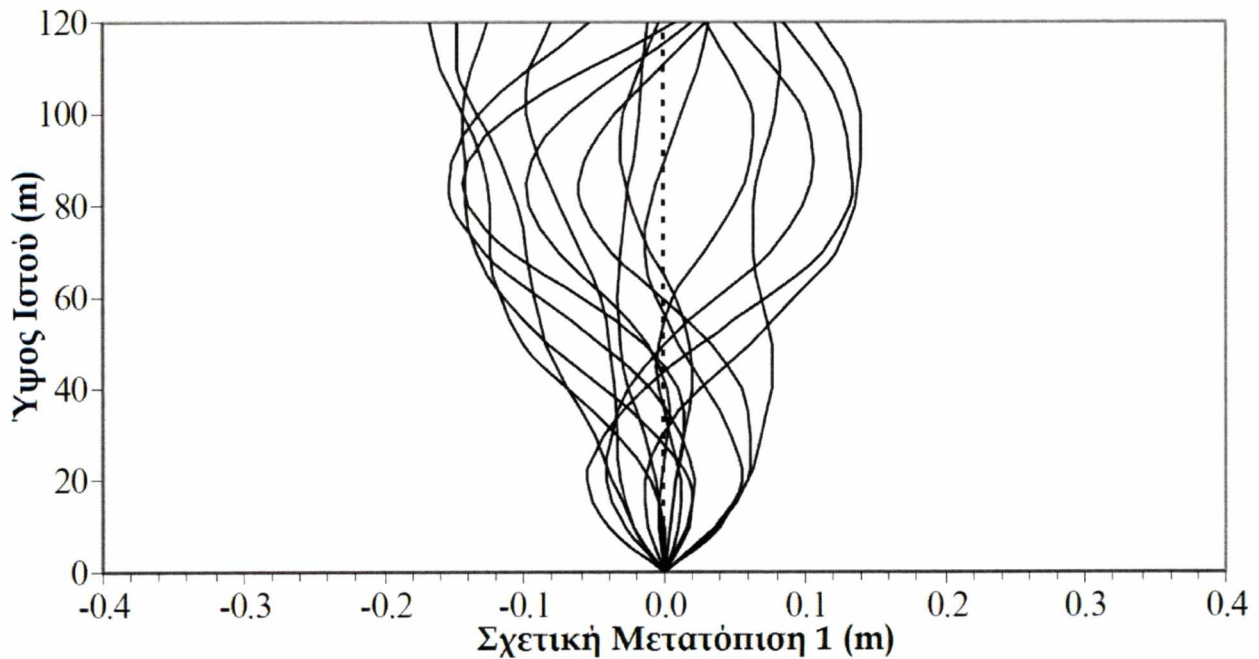


Σχήμα 5.16. Δεύτερο σύνολο σχημάτων μετατόπισης σε DOF1 για N-3-25

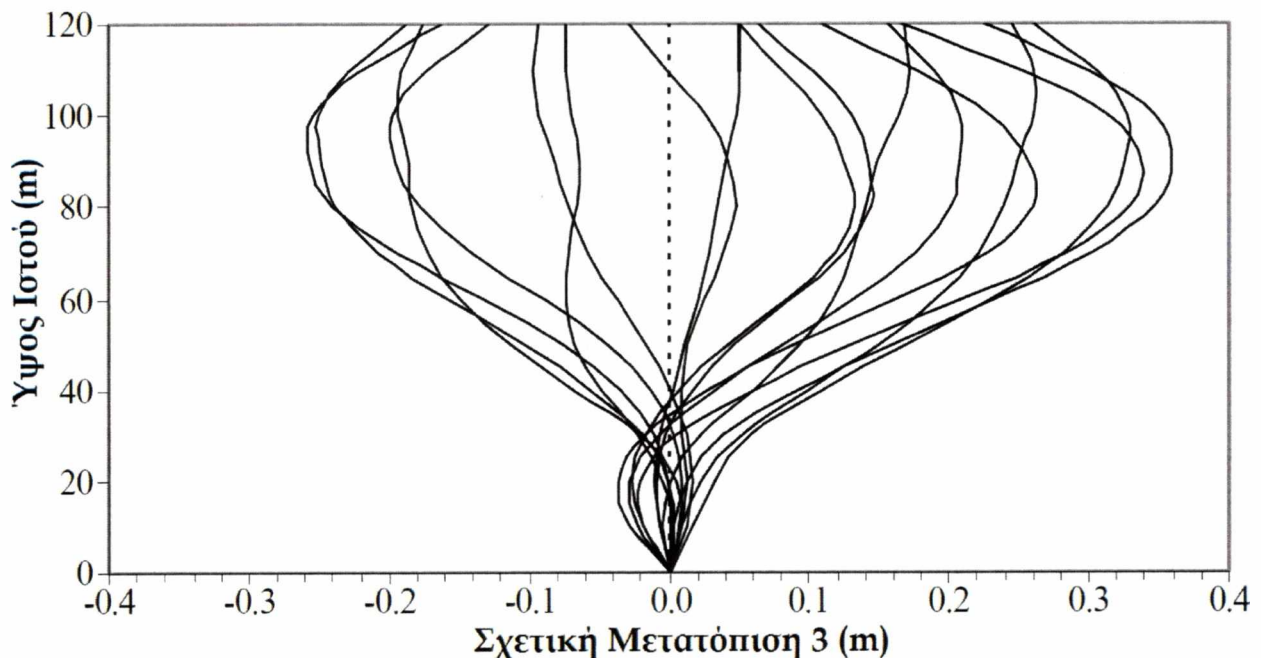


Σχήμα 5.17 Δεύτερο σύνολο σχημάτων μετατόπισης σε DOF3 για N-3-25

Για μία διαφορετική σύγκριση, οι σχετικές μετατοπίσεις του ιστού απεικονίζονται στα Σχήματα 5.18 και 5.19. Παρουσιάζονται για την ίδια διάρκεια, μεταξύ 7 και 8 δευτερολέπτων, με ακόμη μικρότερα χρονικά βήματα για την πλήρη καταγραφή της παραμορφωμένης γεωμετρίας για αυτό το χρονικό διάστημα. Οι μετατοπίσεις στο DOF1 φαινόταν να είναι ένας συνδυασμός των πρώτων τριών ιδιομορφών κάμψης, ενώ οι μετατοπίσεις στο DOF3 προσομοιάζαν σε μεγάλο βαθμό την πρώτη ιδιομορφή κάμψης που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.16.

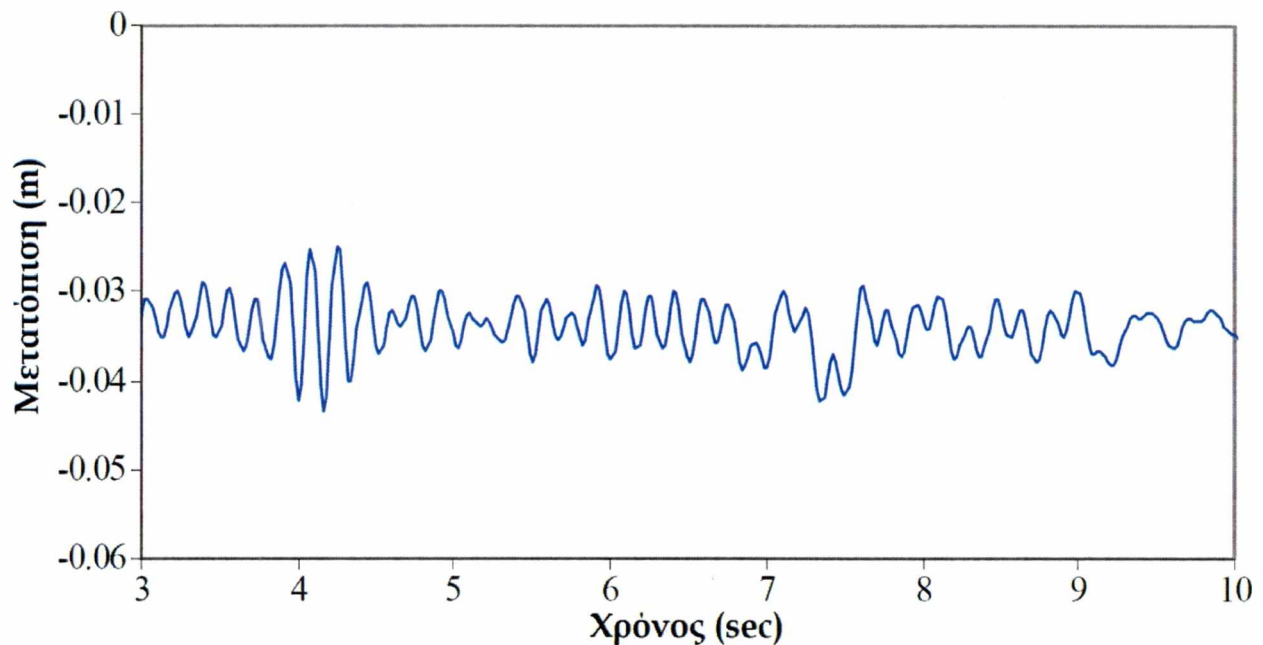


Σχήμα 5.18. Σχήματα σχετικών μετατοπίσεων σε DOF1 για N-3-25

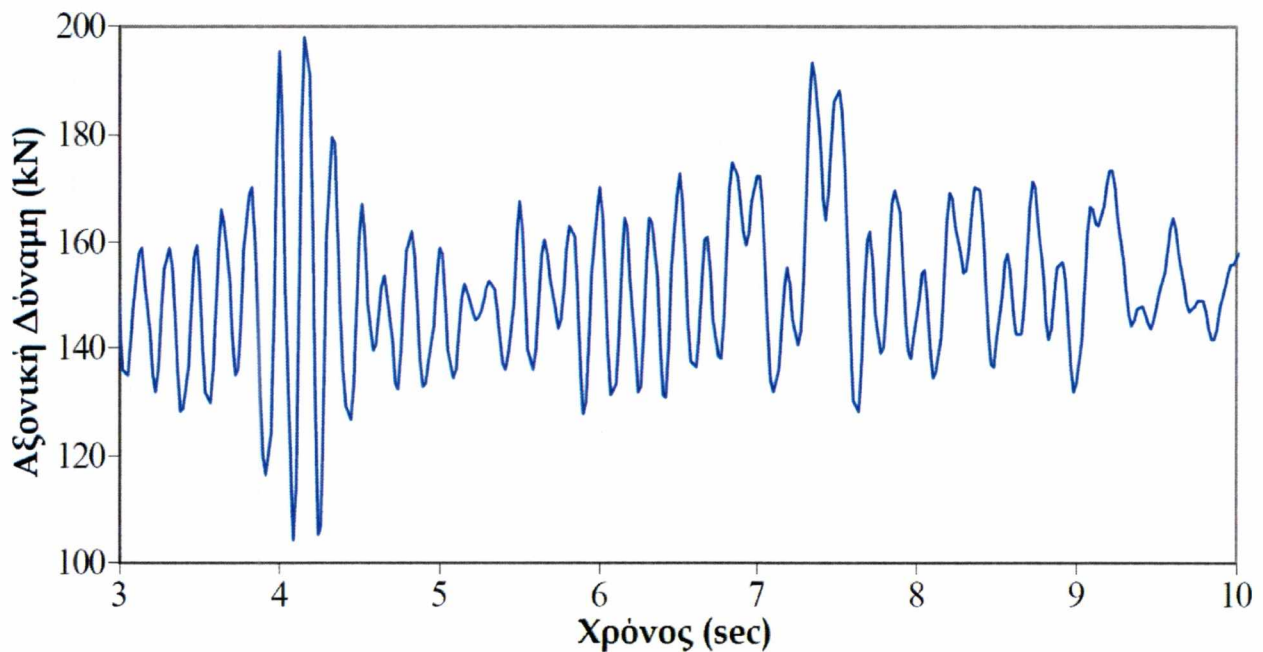


Σχήμα 5.19. Σχήματα σχετικών μετατοπίσεων σε DOF3 για N-3-25

Η απόκριση του καλωδιωτού ιστού στην κατακόρυφη διεύθυνση κατέδειξε ορισμένα σημαντικά αποτελέσματα. Το Σχήμα 5.20 απεικονίζει την κατακόρυφη μετατόπιση στο Σημείο 2 (αυτό ταλαντώθηκε γύρω από μία αρνητική θέση λόγω της θλίψης του πύργου από την αρχική του θέση λόγω του ίδιου βάρους και της εφελκυστικής δύναμης των καλωδίων). Το Σχήμα 5.21 απεικονίζει την αξονική θλιπτική δύναμη στον ιστό που σχετίζεται με αυτή τη μετατόπιση. Επομένως, η δυναμική συνιστώσα της αξονικής δύναμης στον ιστό μπορεί να είναι πολύ σημαντική, όπως επισημαίνεται από τον Amiri (2002).

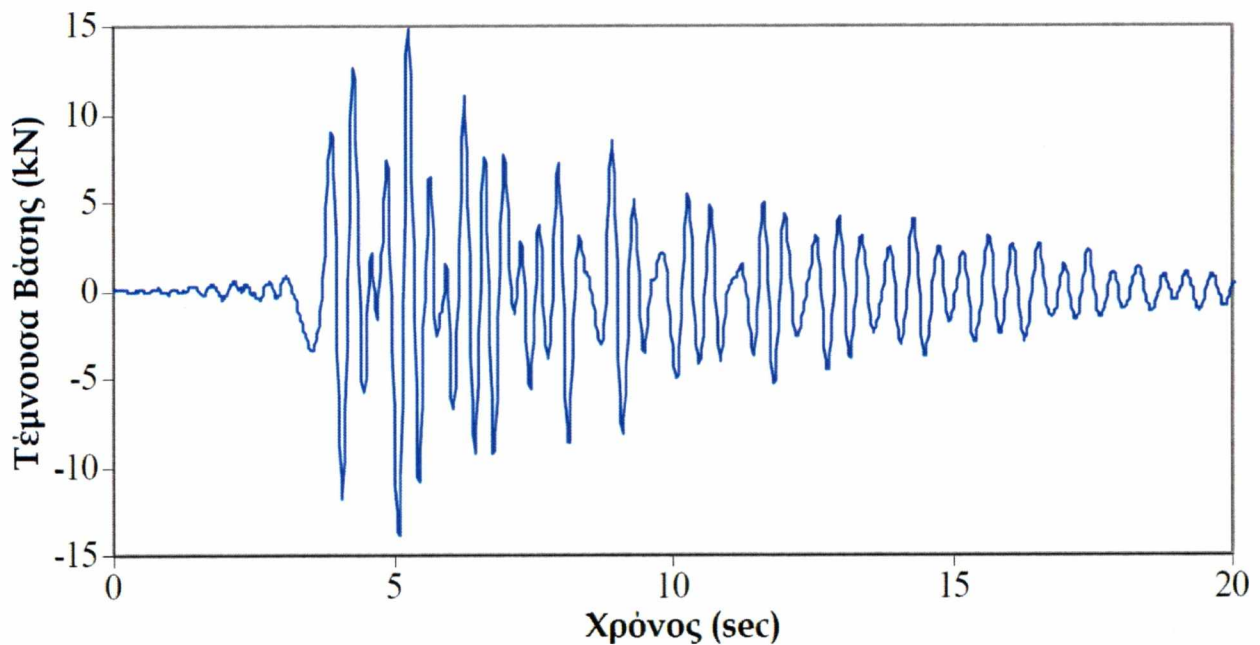


Σχήμα 5.20. Μετατόπιση 2 στο Σημείο 2 για N-3-25



Σχήμα 5.21. Αξονική δύναμη στον ιστό στο Σημείο 2 για N-3-25

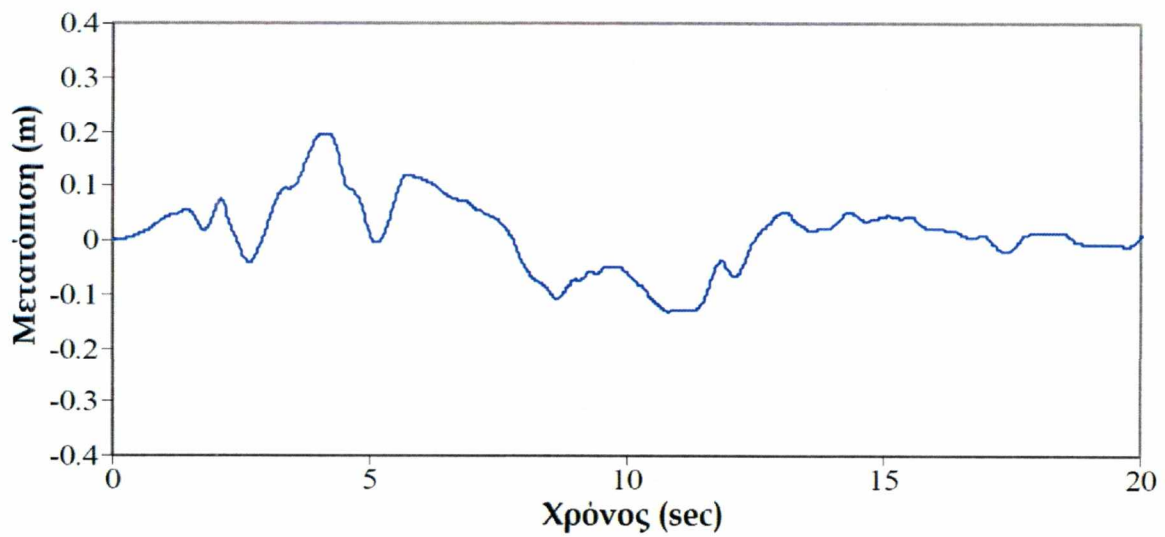
Στο Σχήμα 5.22 φαίνεται μία γραφική παράσταση στο DOF1 κατά τη διάρκεια του σεισμού Northridge. Το συνολικό βάρος της κατασκευής ήταν περίπου 70 kN, οπότε η μέγιστη τέμνουσα βάσης ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη από το 20% του ίδιου βάρους. Για πύργους ψηλότερους από εκείνον της παρούσας έρευνας (150 m έως 350 m ύψος), ο Amiri (2002) ανέφερε ότι αυτή η τιμή κυμαίνεται από 40 έως 80%.



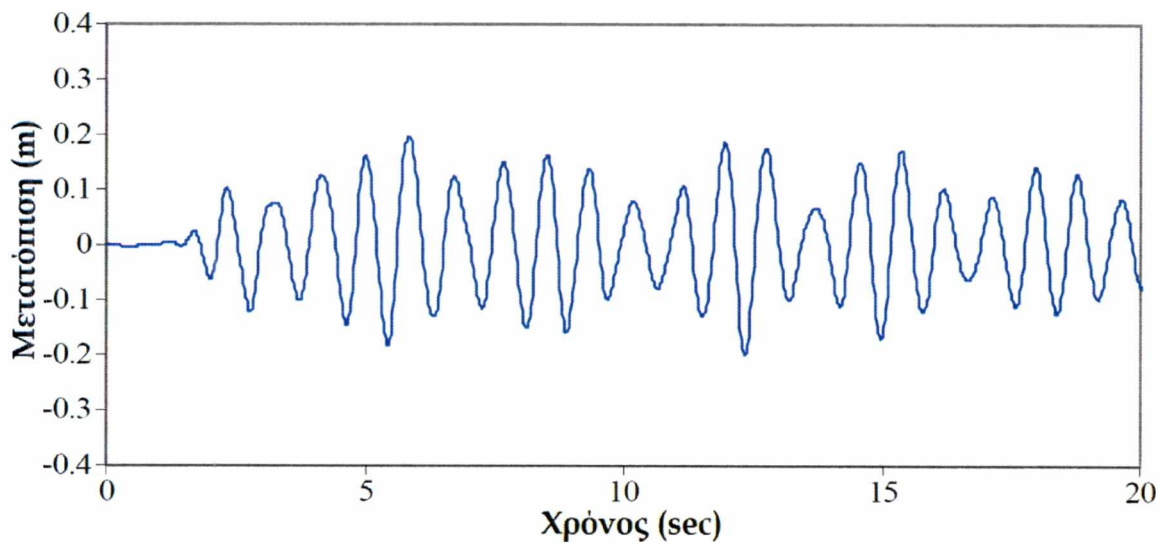
Σχήμα 5.22 Τέμνουσα Βάσης 1 για N-3-25

5.2.2 Συμπεριφορά σε ενισχυμένο σεισμό El Centro

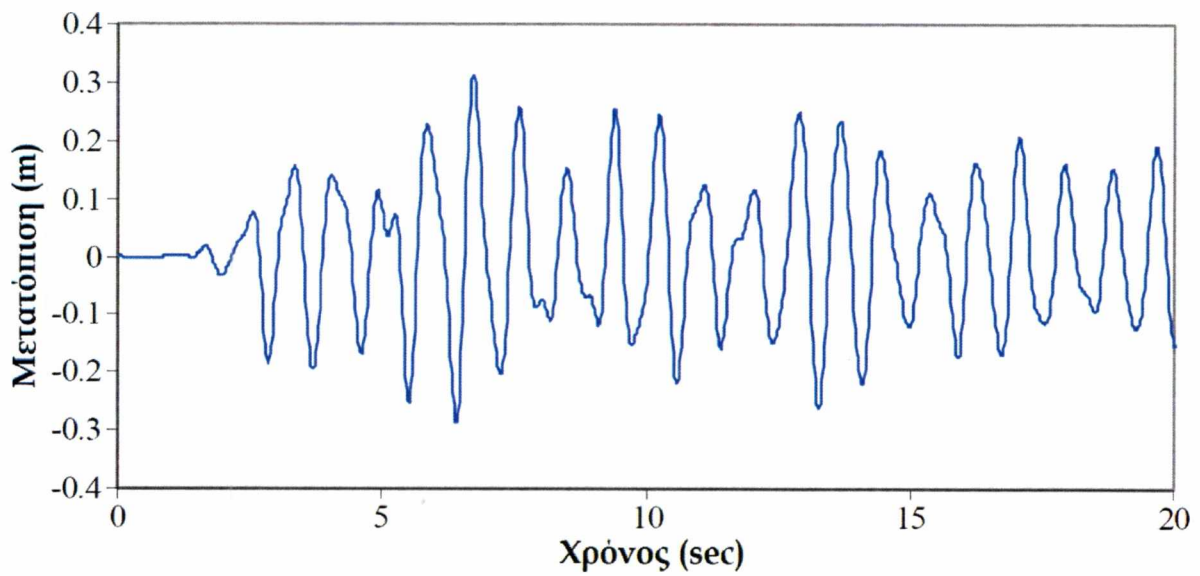
Οι αναλύσεις που αφορούν τον ενισχυμένο σεισμό El Centro υπέστησαν μεγάλη δόνηση για την πλειονότητα των 40 δευτερολέπτων της καταγραφής. Η ισχυρότερη δόνηση σημειώθηκε στα πρώτα 20 δευτερόλεπτα και, προκειμένου να διατηρηθεί η σαφήνεια, παρουσιάζεται μόνο η απόκριση σε αυτό το χρονικό διάστημα. Τα δεδομένα εισόδου των μετατοπίσεων στη βάση και των μετατοπίσεων που αφορούν την εδαφική κίνηση στα Σημεία 2 και 4 δίδονται στα Σχήματα 5.23 έως 5.28. Η εισαγωγή δεδομένων κίνησης ήταν αισθητά διαφορετική για τους δύο οριζόντιους βαθμούς ελευθερίας, κάτι που οδήγησε σε πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις στο DOF1. Όπως φαίνεται στο σεισμό Northridge, οι μετατοπίσεις στο Σημείο 4 ήταν σε γενικές γραμμές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μετατοπίσεις στο Σημείο 2. Συνολικά, η οριζόντια μετατόπιση του ιστού χαρακτηρίζεται από κινήσεις ενός μεγέθους αρκετά σταθερού κατά τη διάρκεια των πρώτων 20 δευτερολέπτων της απόκρισης.



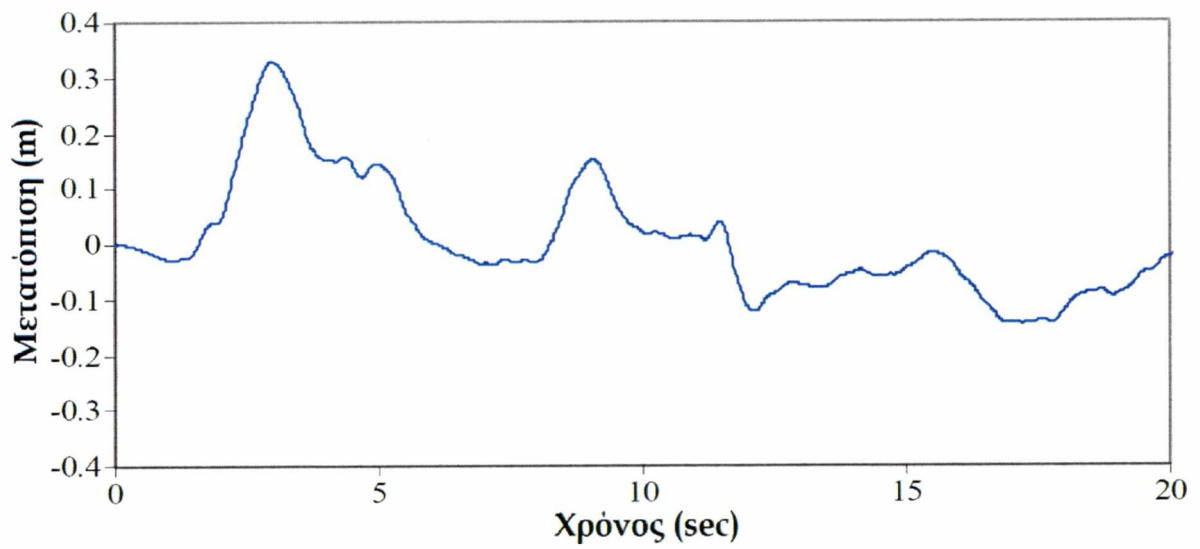
Σχήμα 5.23. Μετατόπιση 1 στη Βάση για E-3-25



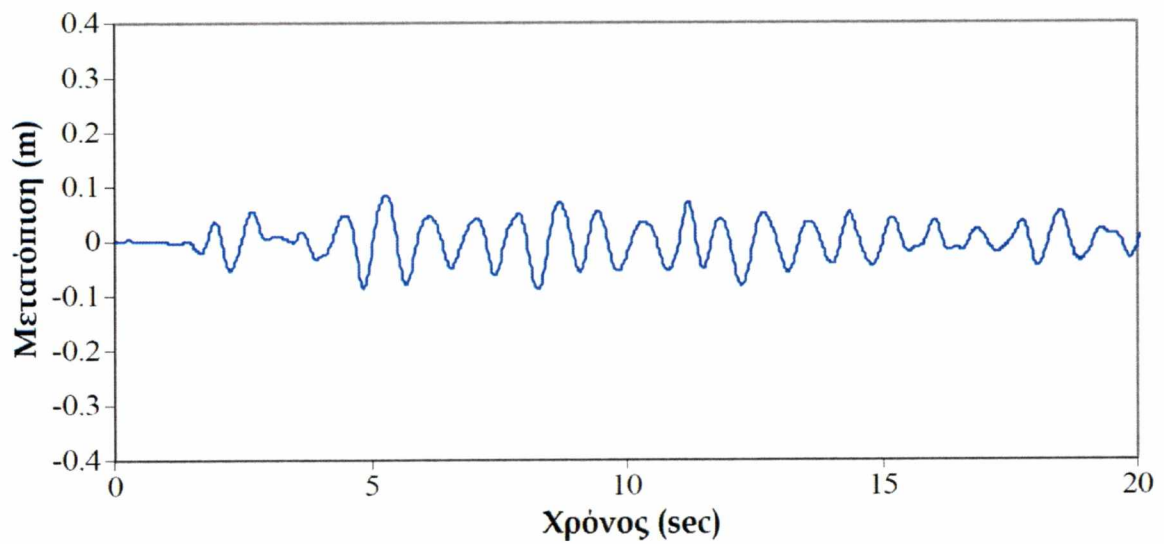
Σχήμα 5.24. Μετατόπιση 1 στο Σημείο 2 για E-3-25



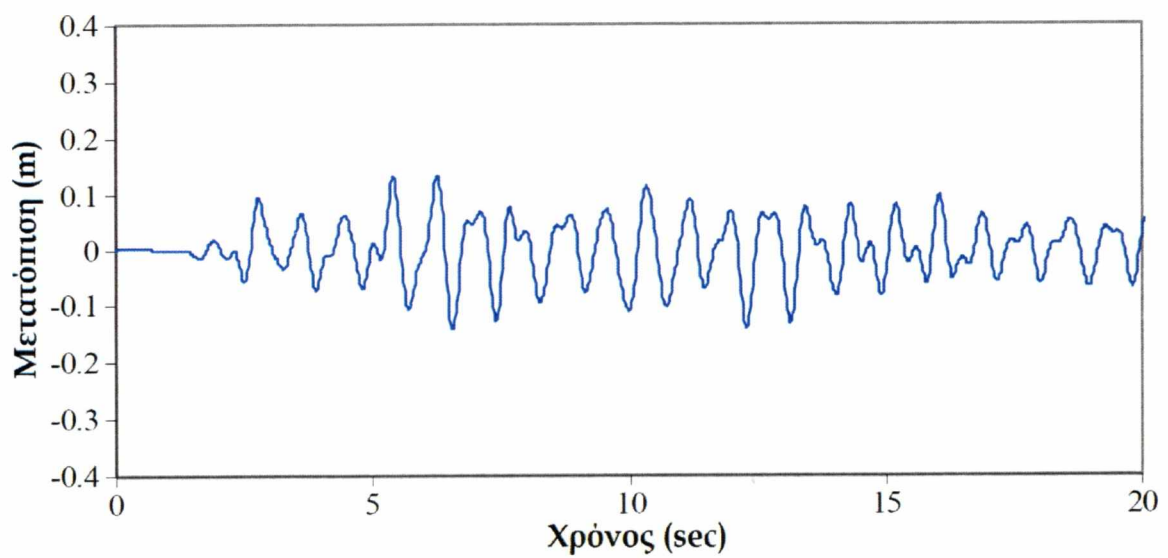
Σχήμα 5.25. Μετατόπιση 1 στο Σημείο 4 για E-3-25



Σχήμα 5.26. Μετατόπιση 3 στη Βάση για E-3-25

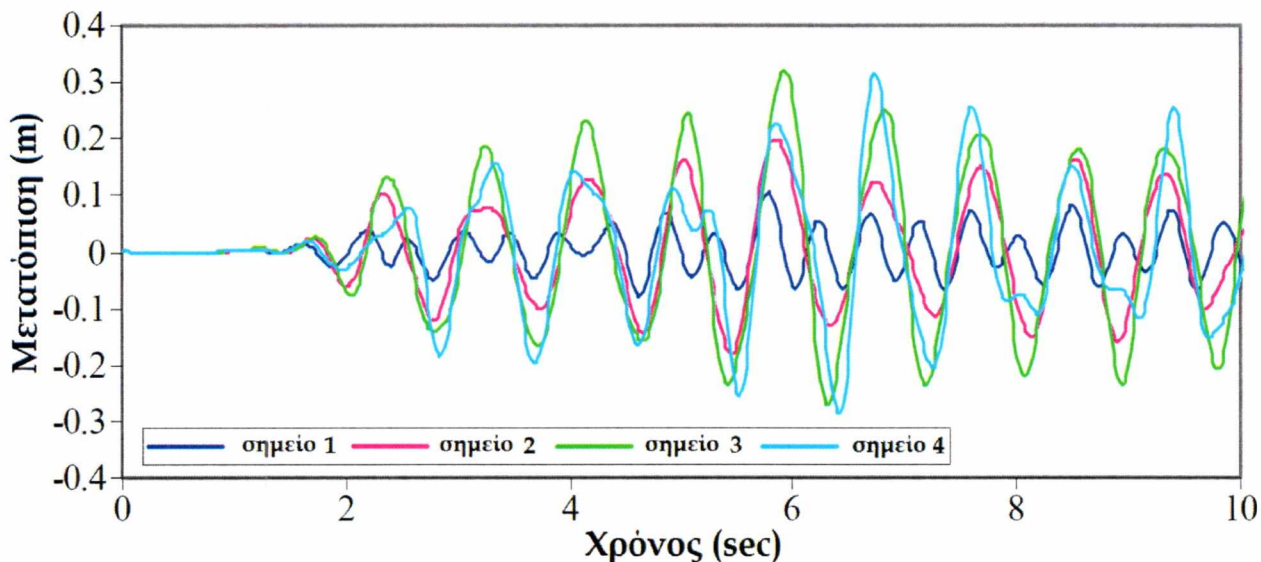


Σχήμα 5.27. Μετατόπιση 3 στο Σημείο 2 για E-3-25

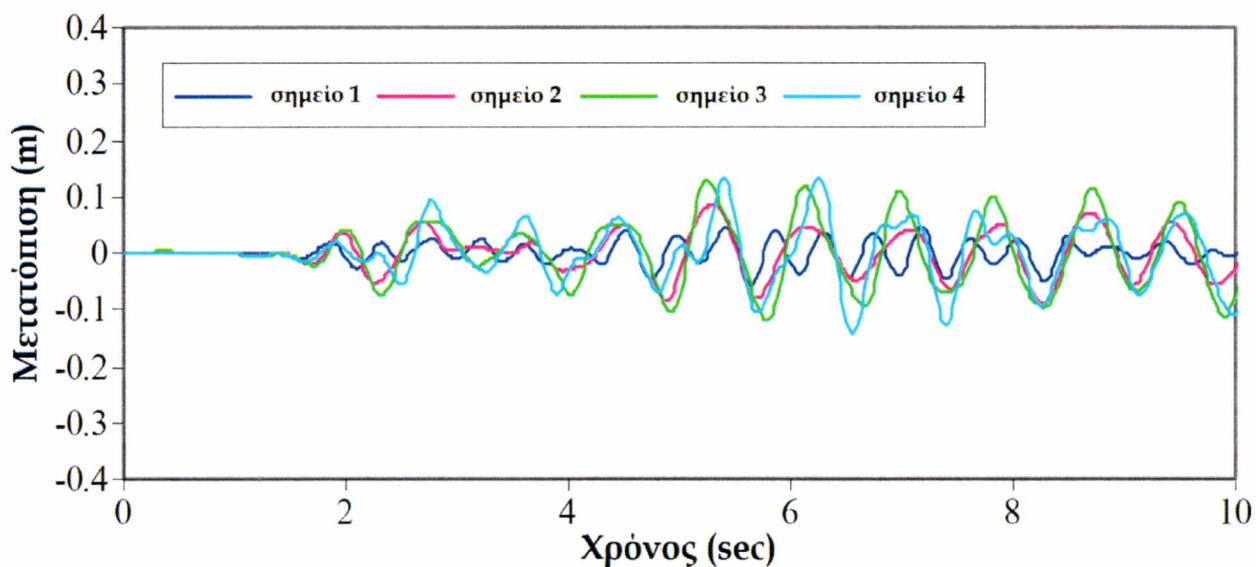


Σχήμα 5.28. Μετατόπιση 3 στο Σημείο 4 για E-3-25

Η συμπεριφορά μετατόπισης σε κάθε επίπεδο καλωδίων ως συνάρτηση του χρόνου παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.29 και 5.30 για τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα κίνησης. Όπως φάνηκε στις προηγούμενες γραφικές απεικονίσεις, οι μετατοπίσεις στο DOF1 ήταν πολύ μεγαλύτερες από εκείνες στο DOF3. Ούτε η κατεύθυνση επέδειξε κάποιες ισχυρές τάσεις στη συμπεριφορά και οι μετακινήσεις στα Σημεία 3 και 4 ήταν συγκρίσιμες σε μέγεθος και παρουσίασαν μέγιστες τιμές.



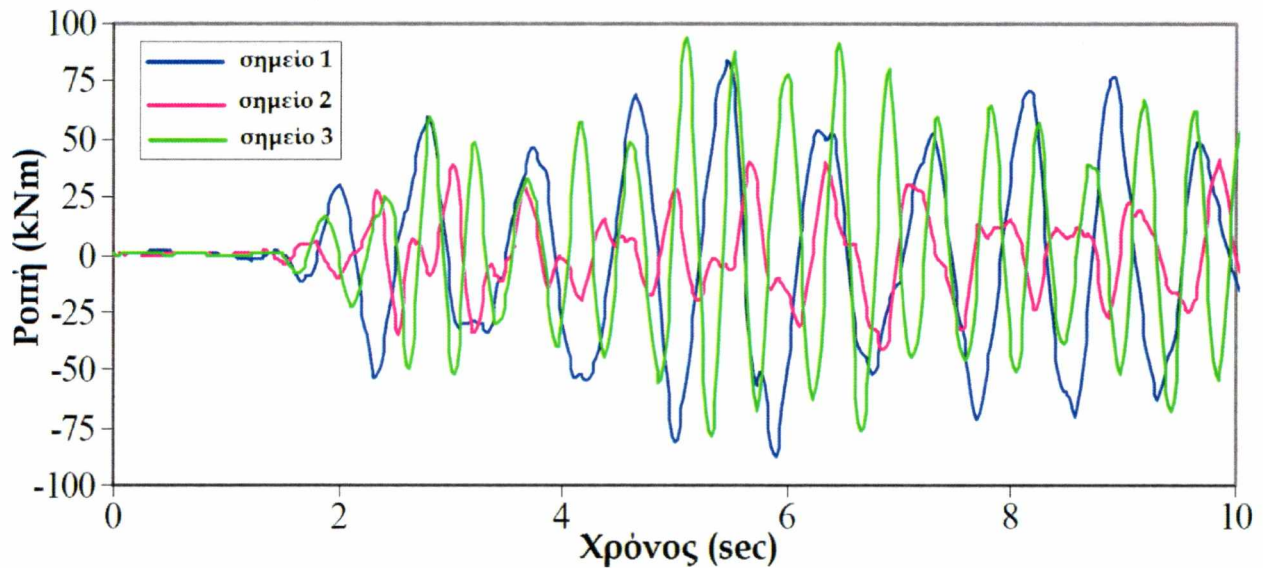
Σχήμα 5.29. Μετατόπιση 1 για E-3-25



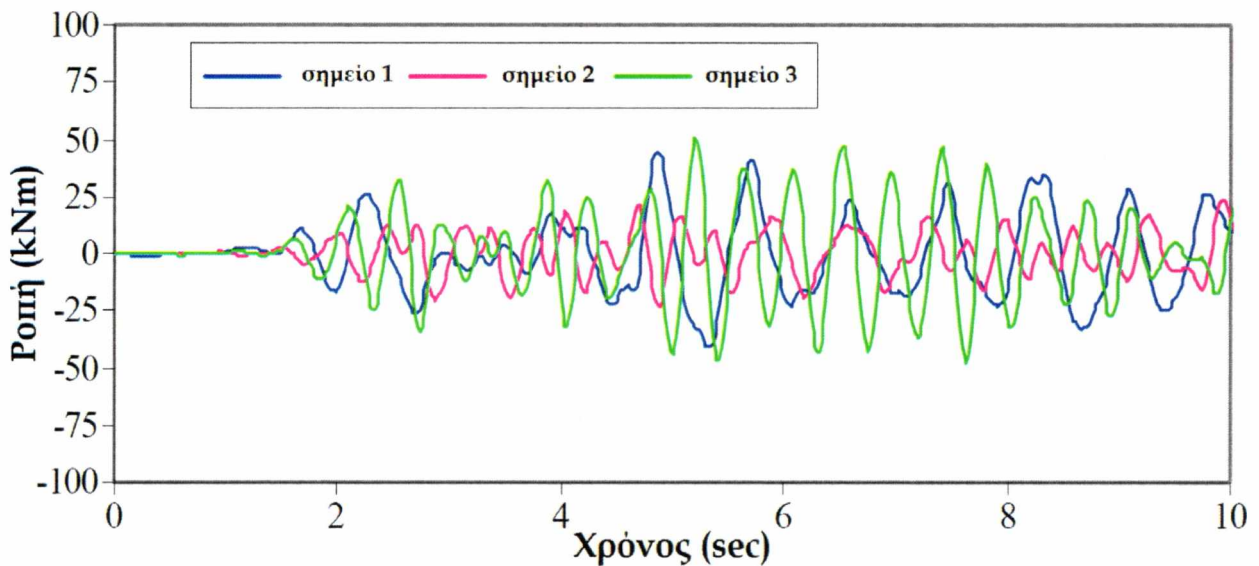
Σχήμα 5.30. Μετατόπιση 3 για E-3-25

Τα Σχήματα 5.31 και 5.32 απεικονίζουν τις ροπές κάμψης στα επίπεδα των καλωδίων για τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα της καταγραφής του σεισμού. Οι ροπές κάμψης που αφορούν την κίνηση στο DOF1 ήταν πολύ μεγαλύτερες από εκείνες στο DOF3, όπως θα ήταν αναμενόμενο λόγω των μεγαλύτερων μετατοπίσεων που συνδέονται με DOF1.

Επιπροσθέτως, οι ροπές κάμψης σε καθένα από τα επίπεδα καλωδίων φάνηκε να ταλαντώνονται σε διαφορετικές συχνότητες.

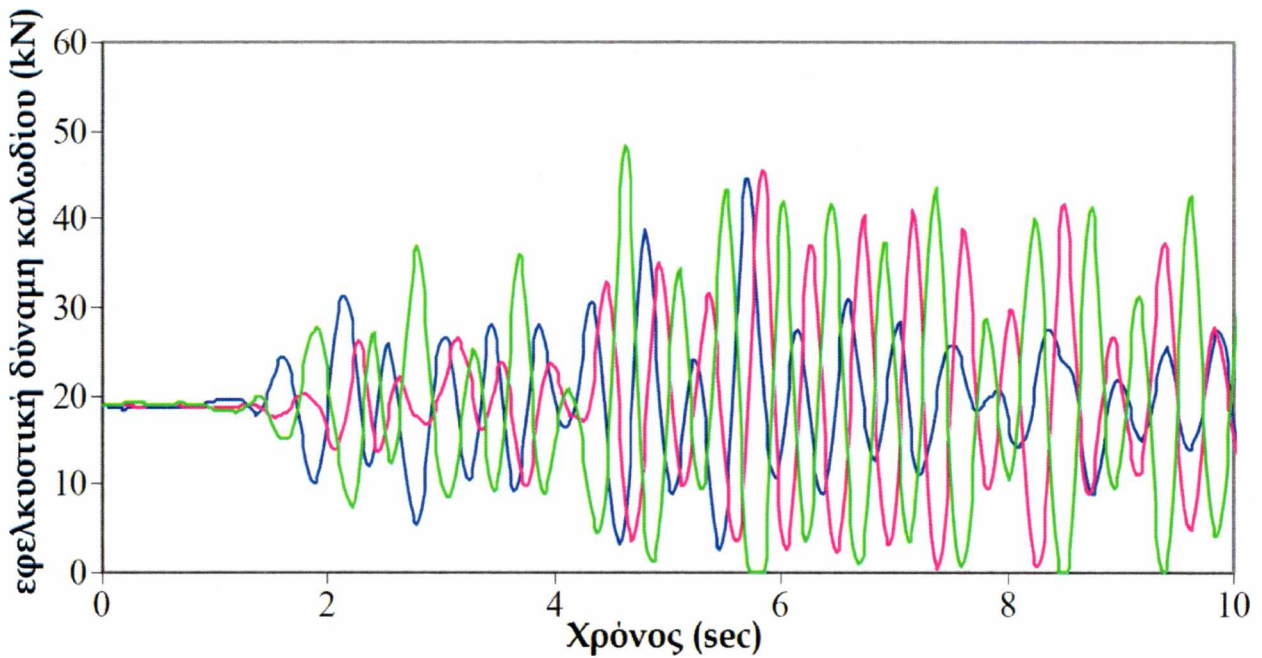


Σχήμα 5.31. Ροπή κάμψης 1 για E-3-25

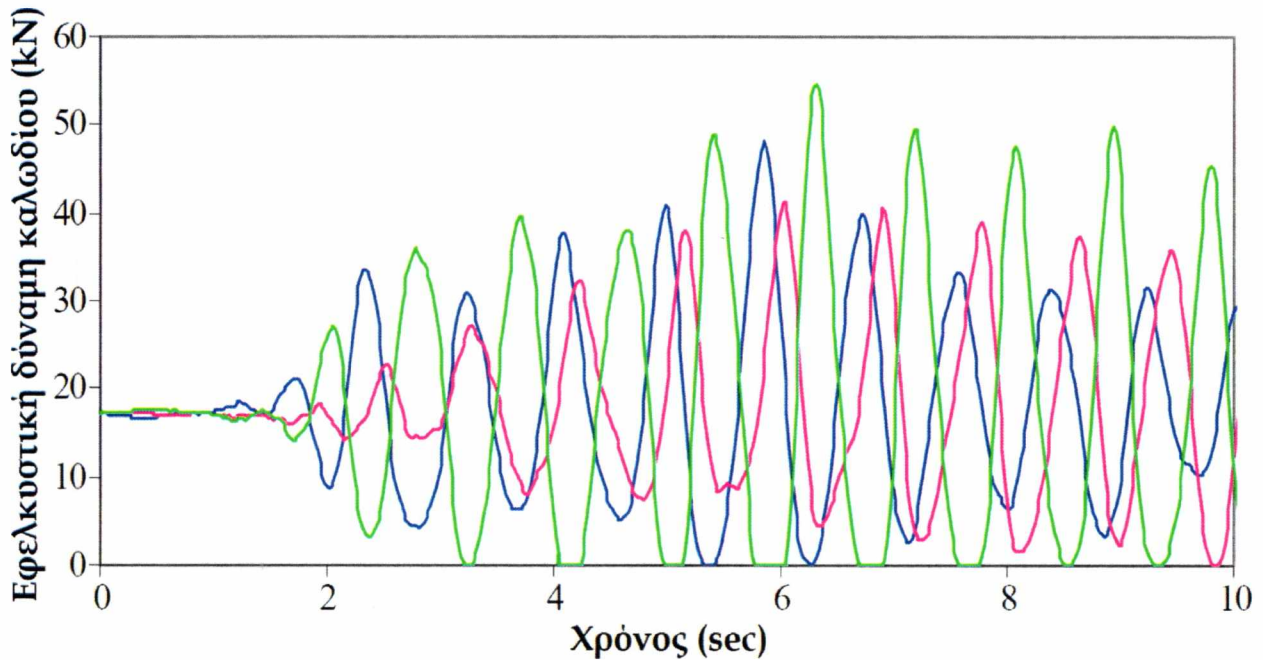


Σχήμα 5.32. Ροπή κάμψης 3 για E-3-25

Τα Σχήματα 5.33 και 5.34 απεικονίζουν την απόκριση και των τριών καλωδίων σε δύο διαφορετικά επίπεδα του ιστού. Οι δυνάμεις εφελκυσμού των καλωδίων στο πρώτο επίπεδο κυμάνθηκαν σε υψηλότερη συχνότητα από ό, τι στα άλλα επίπεδα καλωδίων, όπως παρατηρήθηκε στο σεισμό Northridge. Αν και υπήρχαν κάποιες περιπτώσεις χαλάρωσης καλωδίων στο πρώτο επίπεδο, η περισσότερη συμπεριφορά χαλάρωσης-τεντώματος σημειώθηκε στο τρίτο επίπεδο καλωδίων, όπου υπήρχαν πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

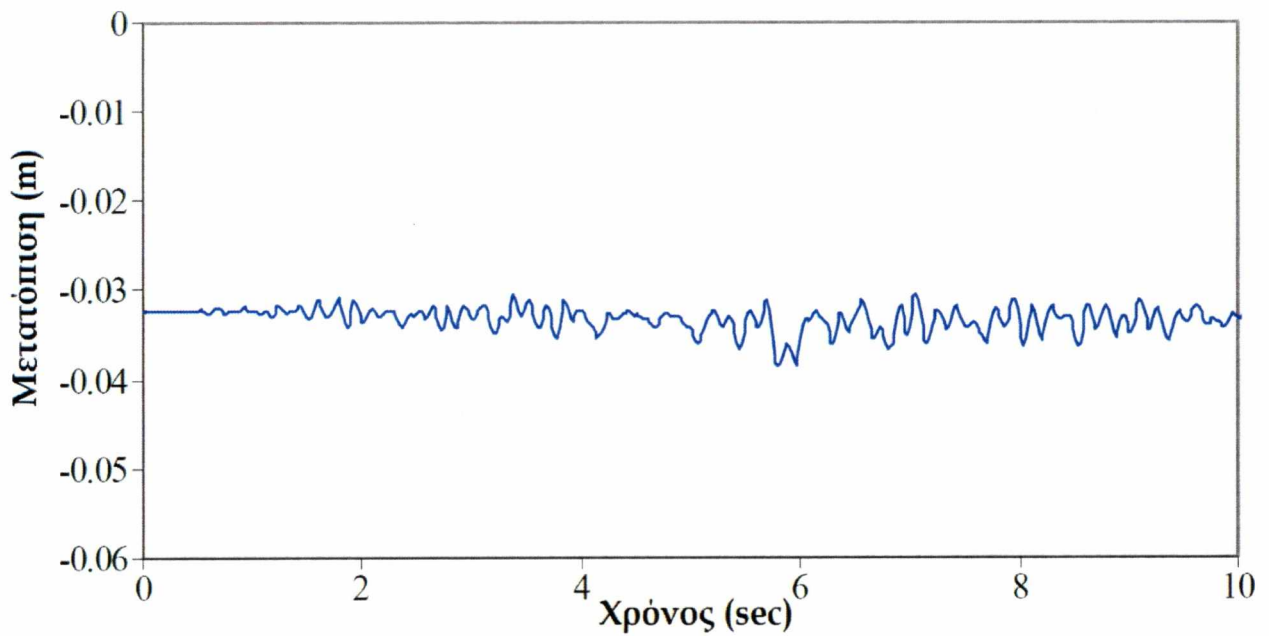


Σχήμα 5.33. Εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων στο Σημείο 1 για E-3-25

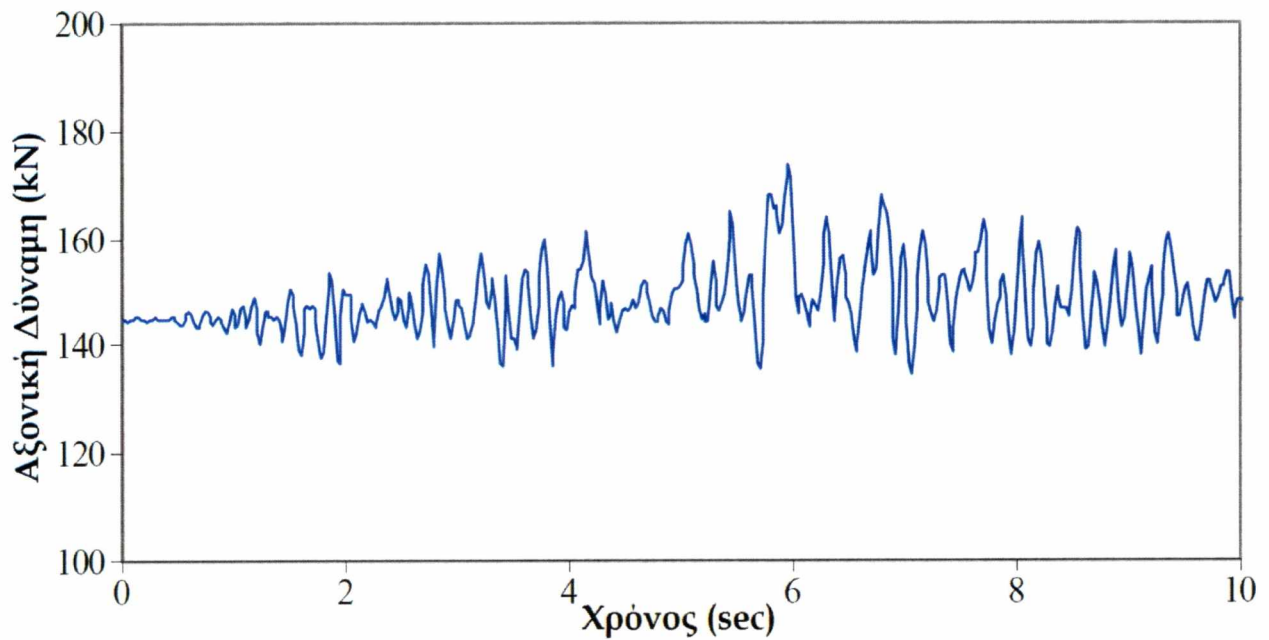


Σχήμα 5.34. Εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων στο Σημείο 3 για E-3-25

Η απόκριση του καλωδιωτού ιστού στην κατακόρυφη διεύθυνση κατά τη διάρκεια του σεισμού El Centro δεν ήταν τόσο δριμεία όσο η απόκριση που αφορά τη μεγάλη κατακόρυφη συνιστώσα στο σεισμό Northridge. Το Σχήμα 5.35 απεικονίζει την κατακόρυφη μετατόπιση στο Σημείο 2 και το Σχήμα 5.36 απεικονίζει την αξονική θλιπτική δύναμη στον ιστό που συνδέεται με την εν λόγω μετατόπιση. Ενώ η δυναμική συνιστώσα της αξονικής δύναμης στον ιστό δεν ήταν το ίδιο μεγάλη με εκείνη που εμφανίστηκε στο σεισμό Northridge, παρέμενε σημαντική.

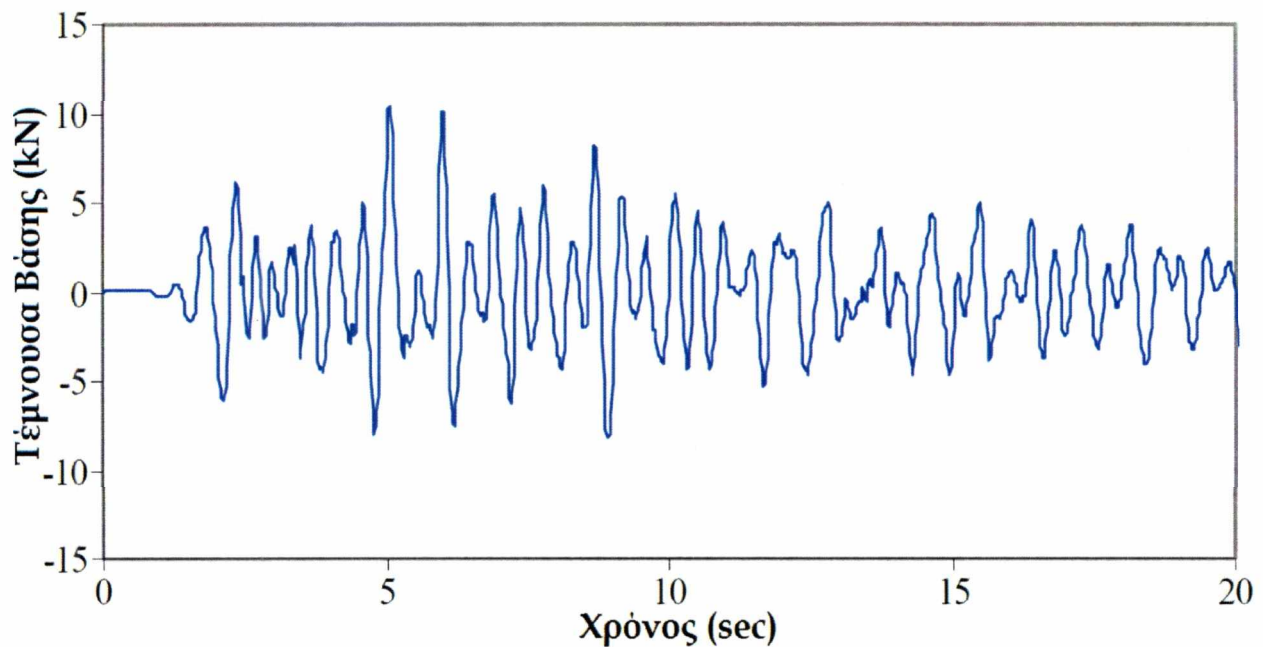


Σχήμα 5.35. Μετατόπιση 2 στο Σημείο 2 για E-3-25



Σχήμα 5.36. Αξονική δύναμη στον ιστό στο Σημείο 2 για E-3-25

Το Σχήμα 5.37 απεικονίζει την τέμνουσα Βάσης στο DOF1 κατά τη διάρκεια του σεισμού El Centro. Η τέμνουσα Βάσης που σημειώθηκε ήταν ελαφρώς μικρότερη από εκείνη που κατεγράφη στο σεισμό Northridge και αντιστοιχούσε στο 15% περίπου του βάρους της κατασκευής.

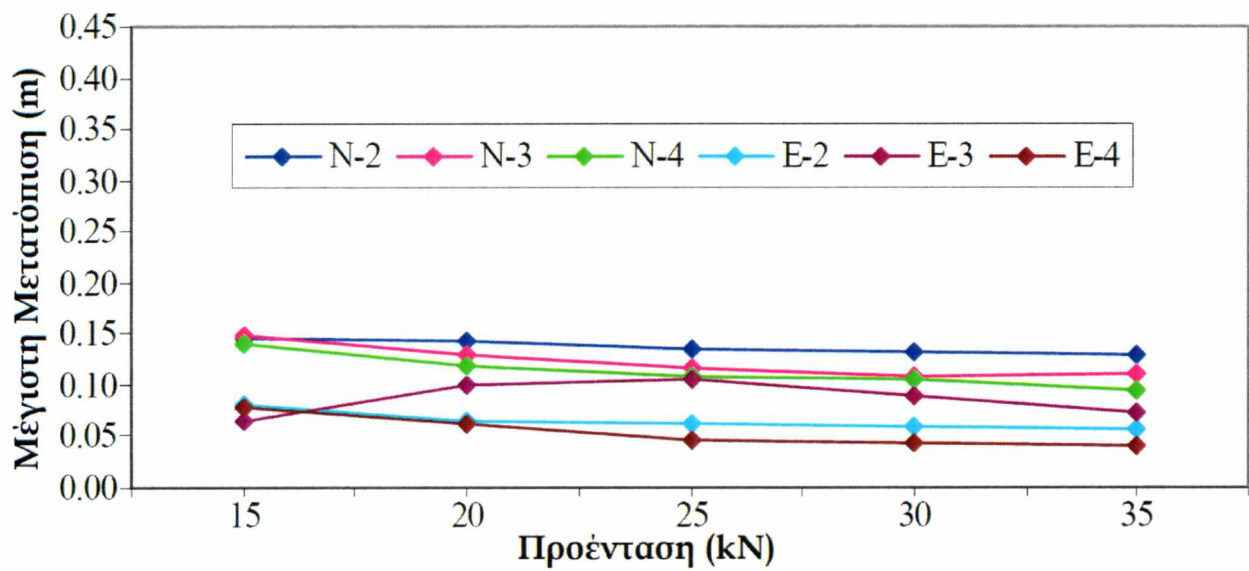


Σχήμα 5.37. Τέμνουσα βάσης 1 για E-3-25

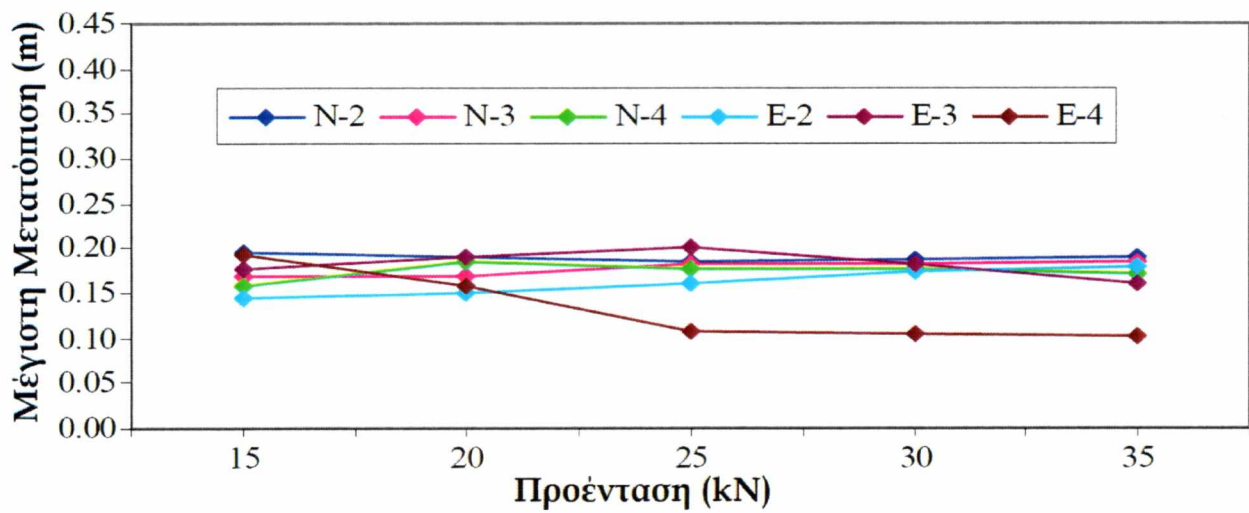
5.3 Μελέτη 1: Τάσεις σχετικά με την προένταση

Ο κύριος στόχος της παρούσας έρευνας ήταν να εξετάσει τη συμπεριφορά των καλωδιωτών πύργων και την επίπτωση των ακαριαίων φορτίων λόγω της δράσης χαλάρωσης-τεντώματος στα σχοινιά. Η ενότητα αυτή επιχειρεί να καλύψει τις τάσεις που παρατηρήθηκαν σε αυτή τη συμπεριφορά και τα αποτελέσματα παριστάνονται γραφικά ως συνάρτηση της προέντασης, η οποία συνδέεται άμεσα με τη χαλάρωση. Εξετάστηκαν τρεις δυστένιες καλωδίων και η κάθε μία απεικονίζεται γραφικά σαν σειρές. Όλες οι τιμές απόκρισης ήταν οι απόλυτες τιμές της μέγιστης απόκρισης. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στις δύο οριζόντιες κατευθύνσεις και, ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αφορώντας κυρίως την απόκριση στο DOF1.

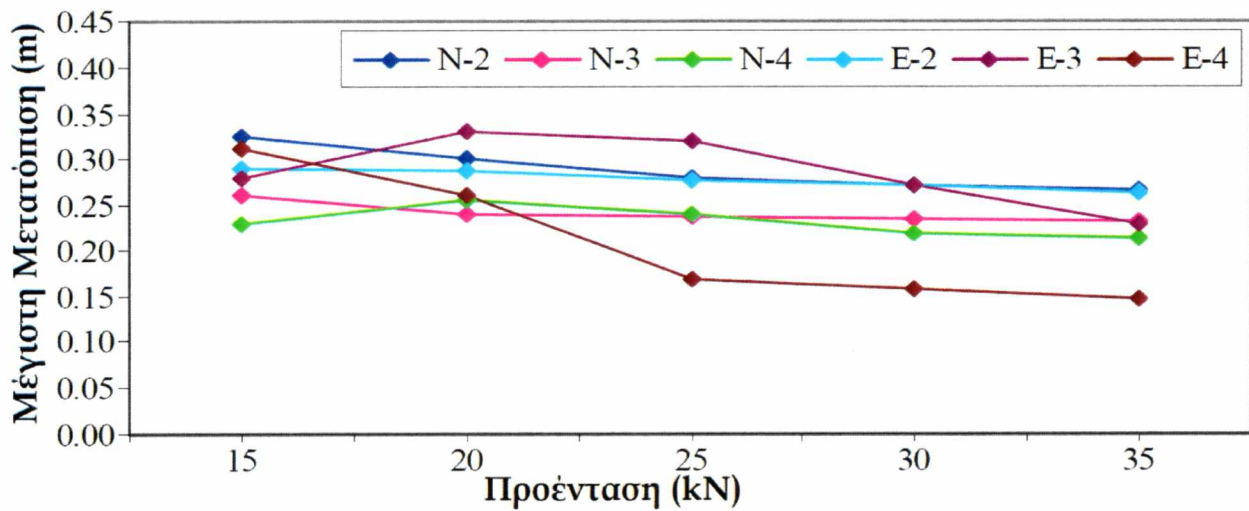
Οι μετατοπίσεις μειώθηκαν γενικώς με αυξημένες προεντάσεις καλωδίων και αυξημένες δυστένιες καλωδίων. Τα Σχήματα 5.38 έως 5.41 απεικονίζουν τις απόλυτες τιμές της μέγιστης σχετικής μετατόπισης του DOF1 σε κάθε ένα από τα επίπεδα καλωδίων για τις τρεις τιμές EA και στους δύο σεισμούς: 2×10^7 N και 4×10^7 N. Η τάση μείωσης των μετατοπίσεων ήταν περισσότερο εμφανής στα ανώτερα επίπεδα καλωδίων.



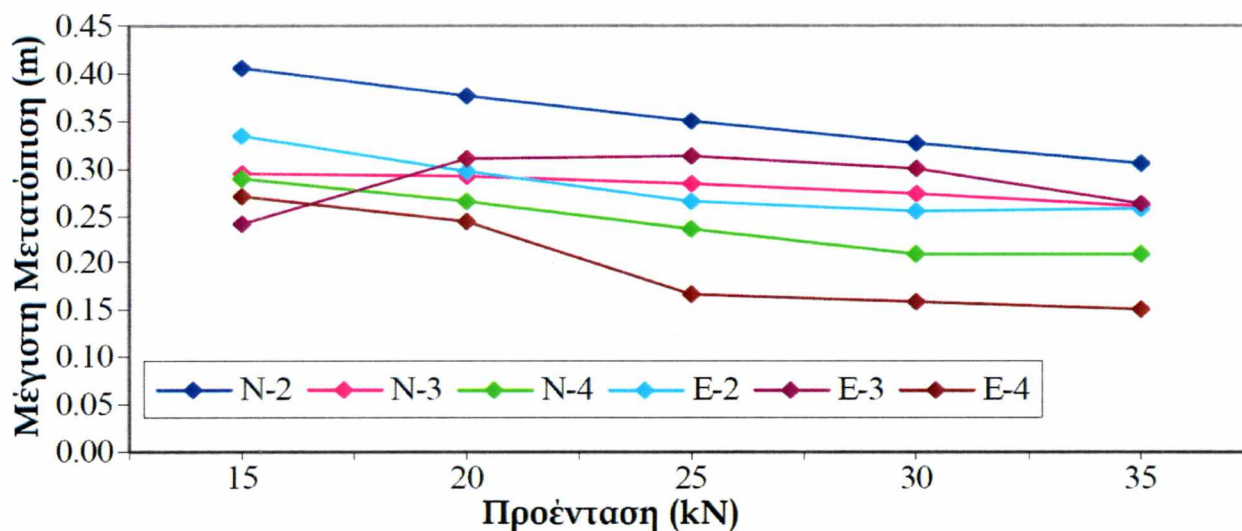
Σχήμα 5.38. Μετατόπιση 1 στο Σημείο 1 για τη Μελέτη 1



Σχήμα 5.39. Μετατόπιση 1 στο Σημείο 2 για τη Μελέτη 1

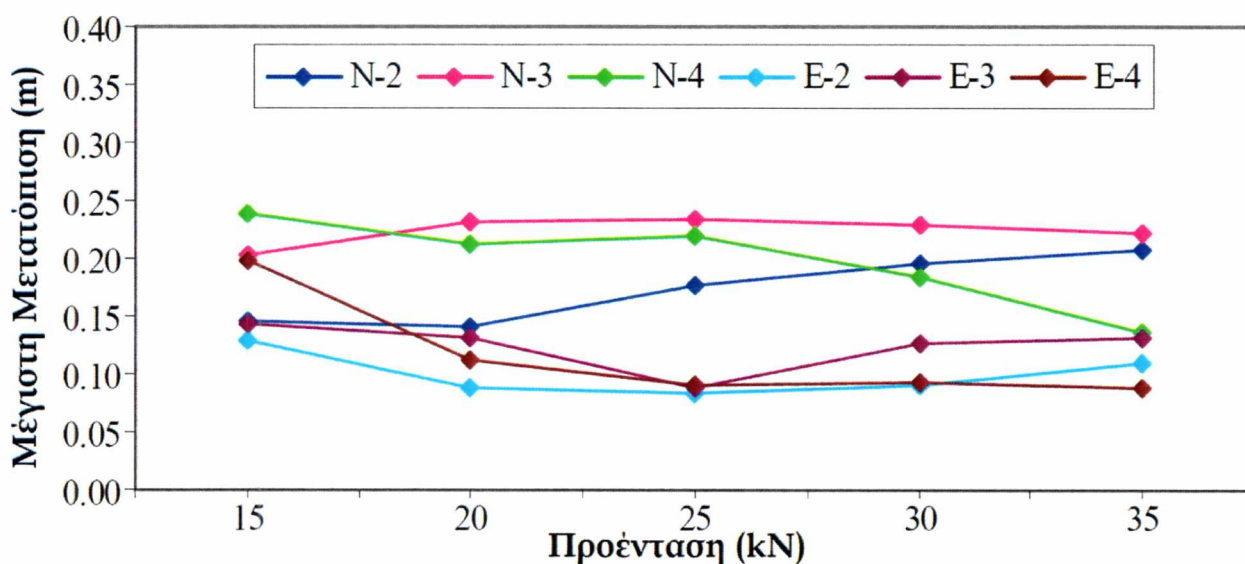


Σχήμα 5.40. Μετατόπιση 1 στο Σημείο 3 για τη Μελέτη 1

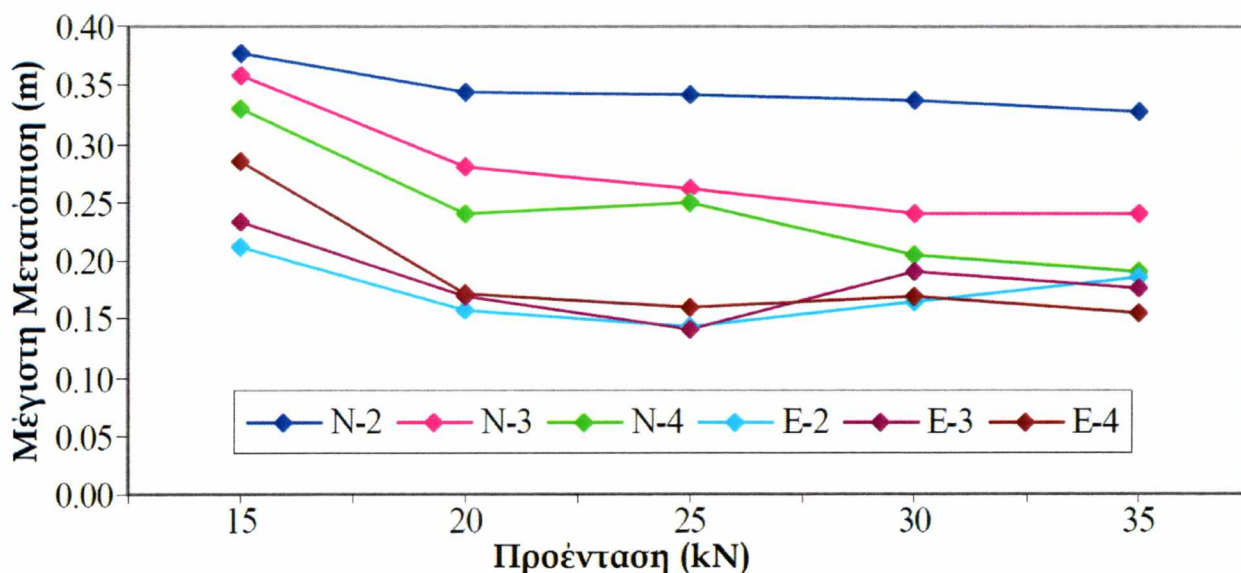


Σχήμα 5.41. Μετατόπιση 1 στο Σημείο 4 για τη Μελέτη 1

Οι μετατοπίσεις στο DOF3 επέδειξαν την ίδια γενική τάση μείωσης με την προένταση. Ωστόσο, οι μετατοπίσεις στο μεσαίο επίπεδο του ιστού δεν ακολουθούν εντελώς την ίδια αυτή τάση. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί στα Σχήματα 5.42 και 5.43, τα οποία απεικονίζουν τις μέγιστες μετατοπίσεις στο Σημείο 2 και στο Σημείο 4. Το γεγονός αυτό δείχνει επίσης ότι η απόκριση κυριαρχείται από διαφορετικές συμπεριφορές στις δύο οριζόντιες κατευθύνσεις.

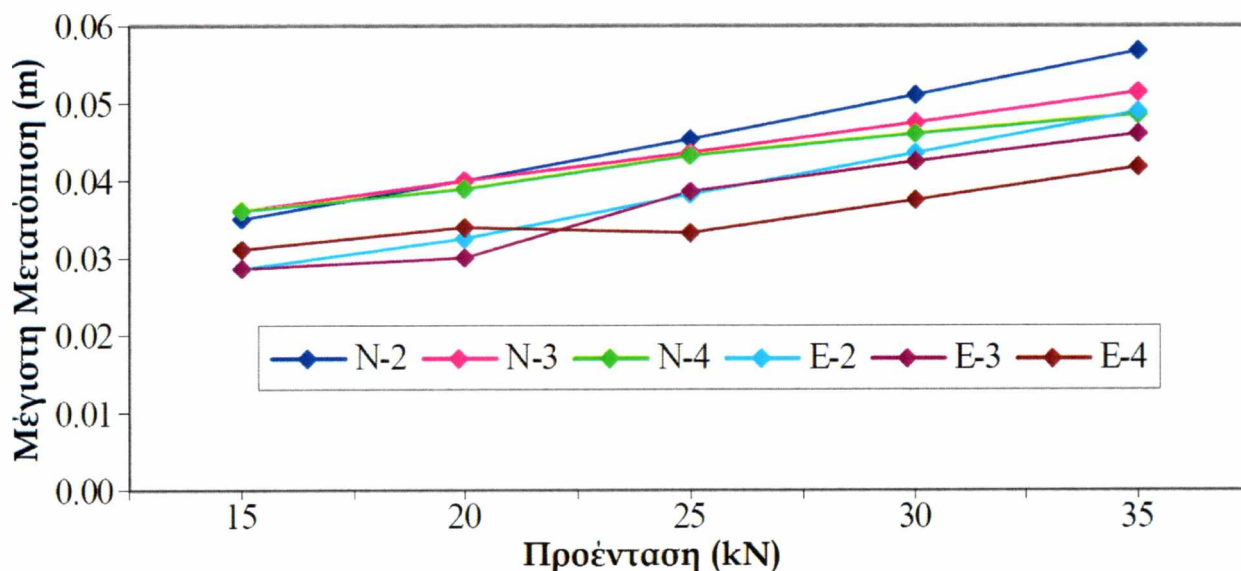


Σχήμα 5.42. Μετατόπιση 3 στο Σημείο 2 για τη Μελέτη 1



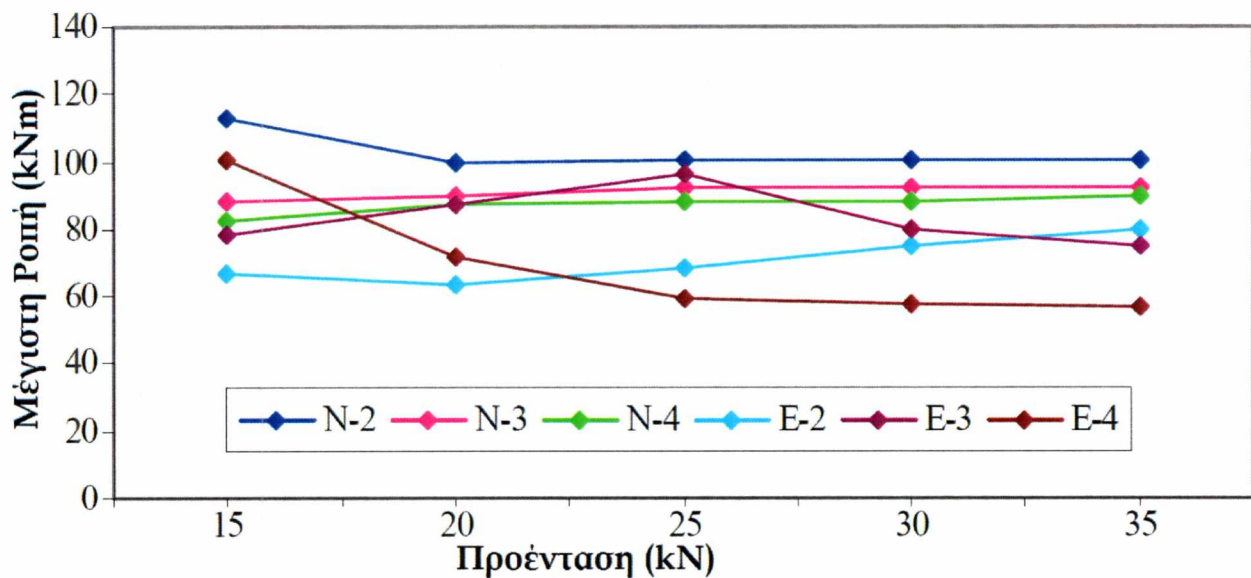
Σχήμα 5.43. Μετατόπιση 3 στο Σημείο 4 για τη Μελέτη 1

Η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση στο Σημείο 2 αυξήθηκε σε μέγεθος σχεδόν γραμμικά με την αυξημένη προένταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.44. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίστηκε σε όλα τα επίπεδα του ιστού και κατά πάσα πιθανότητα είναι το άμεσο αποτέλεσμα των υψηλότερων προεντάσεων που προκαλούν μεγαλύτερες θλιπτικές δυνάμεις στον ιστό.

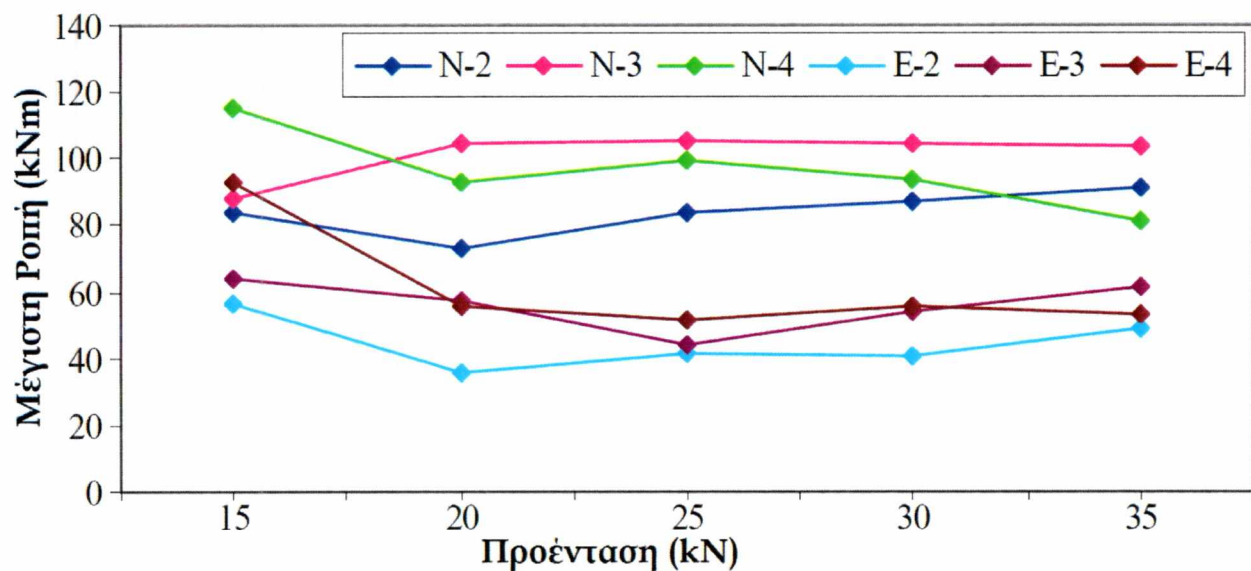


Σχήμα 5.44. Μετατόπιση 2 στο Σημείο 2 για τη Μελέτη 1

Οι ροπές κάμψης στο χαμηλότερο επίπεδο καλωδίων απεικονίζονται στα Σχήματα 5.45 και 5.46. Και οι δύο κατευθύνσεις κάμψης επέδειξαν ορισμένες ελαφρώς πτωτικές τάσεις. Επιπροσθέτως, εξετάστηκαν οι ροπές κάμψης στα άλλα δύο εσωτερικά σημεία κατά μήκος του ιστού. Γενικώς, οι ροπές κάμψης φάνηκε να μειώνονται με αυξημένη προένταση, αλλά αυτή δεν ήταν κάποια υπερβολικά ισχυρή τάση σε οποιοδήποτε από τα επίπεδα καλωδίων.

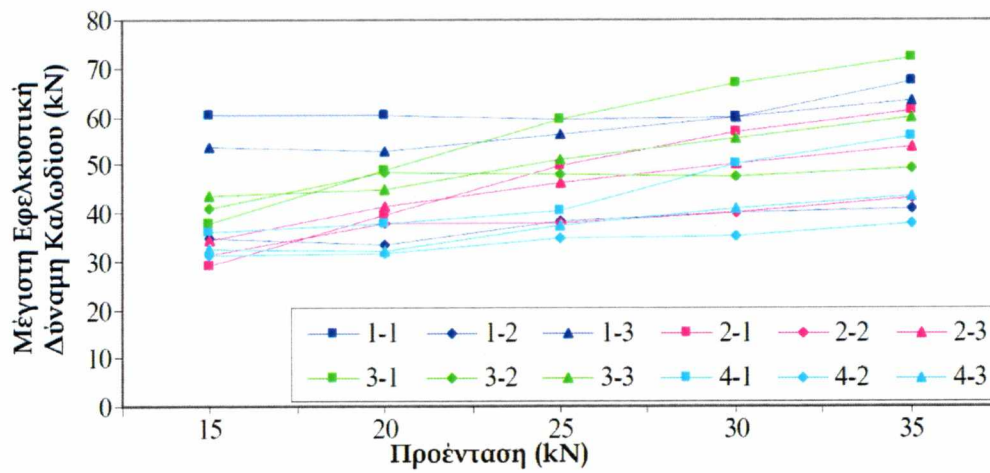


Σχήμα 5.45. Ροπή κάμψης 1 στο Σημείο 1 για τη Μελέτη 1



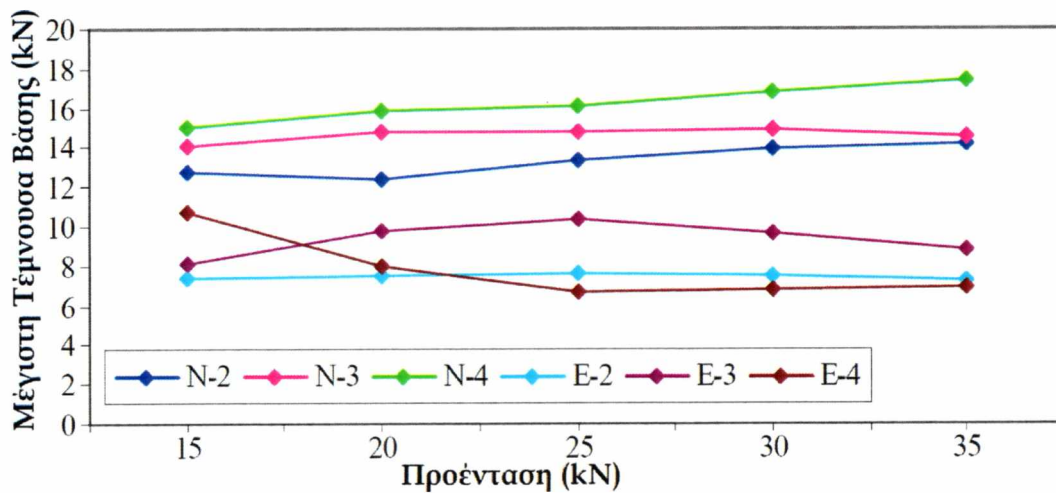
Σχήμα 5.46. Ροπή κάμψης 3 στο Σημείο 1 για τη Μελέτη 1

Το Σχήμα 5.47 απεικονίζει τις μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων και στα 12 καλώδια για τη σειρά N-3. Ομαδοποιούνται ανάλογα με το επίπεδο καλωδίων, όπου ο πρώτος αριθμός αντιπροσωπεύει το σημείο στο οποίο συνδέονται στον ιστό. Η συμπεριφορά όσον αφορά τις μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις των καλωδίων ποίκιλλε σημαντικά μεταξύ των διαφορετικών δοκιμών. Υπήρχε μια γενική τάση η μέγιστη δύναμη των καλωδίων να αυξάνει με την προένταση, αλλά αυτό δεν ίσχυε πάντοτε. Συγκεκριμένα, δύο από τα καλώδια στο πρώτο επίπεδο είχαν κατά προσέγγιση την ίδια μέγιστη εφελκυστική δύναμη ακόμη και όταν η δύναμη προέντασης διπλασιάστηκε. Παρόμοιες τάσεις στις δυνάμεις αυτές των καλωδίων παρατηρήθηκαν όταν ο ιστός υπεβλήθη στο σεισμό El Centro. Επιπλέον, η μέγιστη δύναμη καλωδίου καταγράφηκε έως 400% της αρχικής προέντασης, επαληθεύοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τον Amiri (2002).

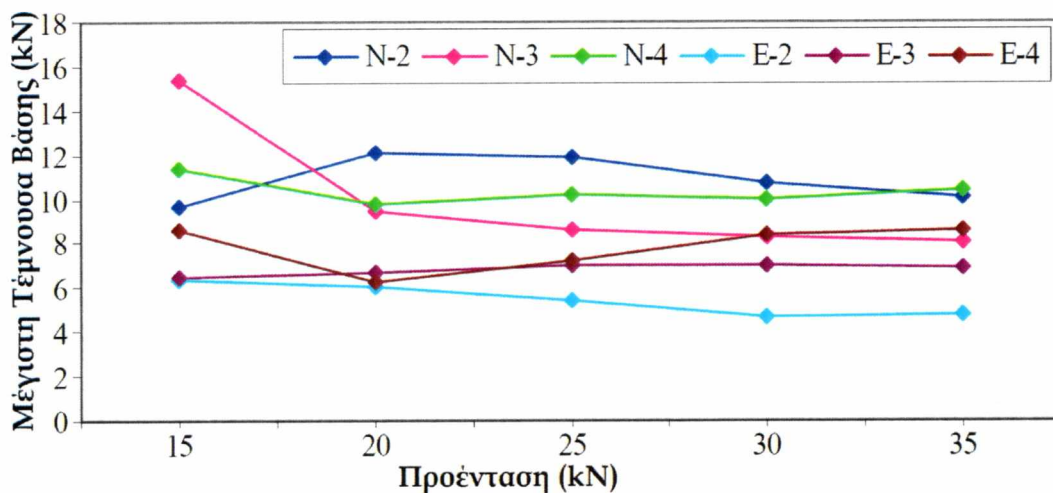


Σχήμα 5.47 Εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων για τη Ν-3 Μελέτη 1

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τέμνουσες βάσης στον καλωδιωτό ιστό δεν επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα προέντασης που υπήρχε στα καλώδια. Αν και δεν υπήρχε εμφανής τάση για DOF_1 , υπήρξε μια ελαφρά μείωση στην τέμνουσα βάσης που συνδέεται με DOF_1 . Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται στα Σχήματα 5.48 και 5.49.



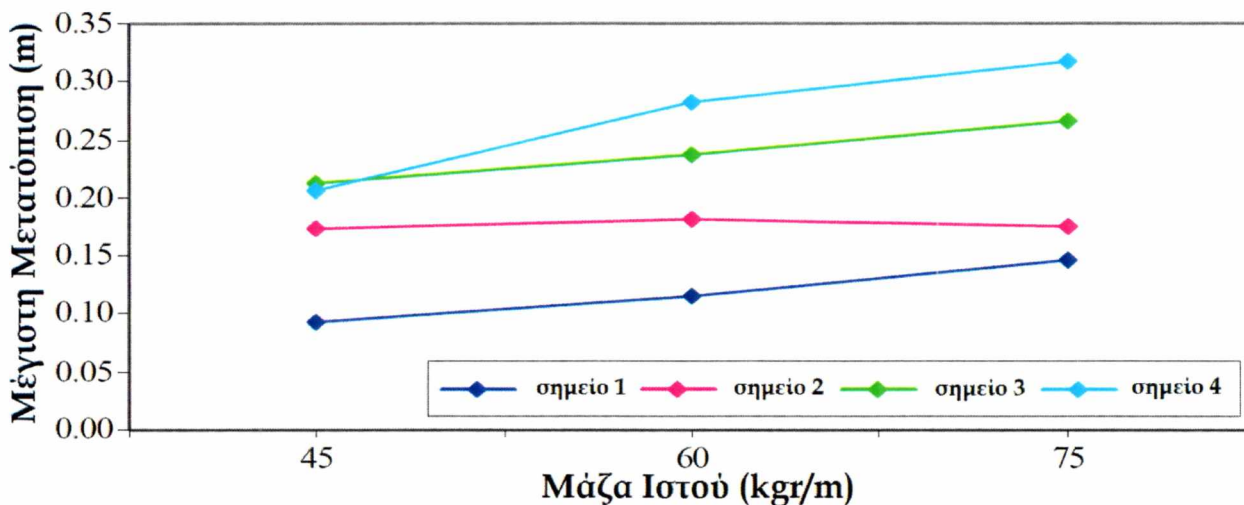
Σχήμα 5.48. Τέμνουσα Βάσης 1 για τη Μελέτη 1



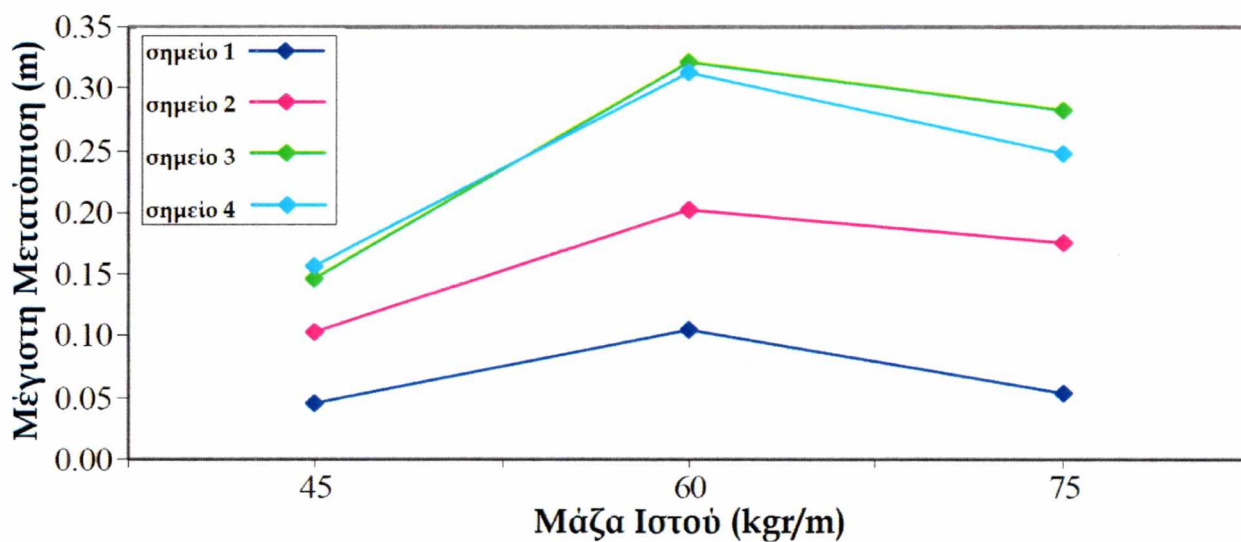
Σχήμα 5.49. Τέμνουσα Βάσης 3 για τη Μελέτη 1

5.4 Μελέτη 2: Τάσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά του ιστού

Αρκετές πρόσθετες μελέτες εξέτασαν τις επιπτώσεις των διαφορετικών ιδιοτήτων ιστού στη συμπεριφορά της κατασκευής. Η δυσκαμψία και η μάζα διέφεραν από κοινού, όπως σημειώνεται στην ενότητα 4.4. Διαπιστώθηκε ότι η απόκριση φάνηκε να κυριαρχείται από την αυξημένη μάζα σε αντίθεση με την αυξημένη δυσκαμψία. Τα Σχήματα 5.50 και 5.51 απεικονίζουν τις μέγιστες μετατοπίσεις για DOF1 και για τις δύο εισαγωγές δεδομένων κίνησης. Οι δοκιμές αυτές συνήθως εμφάνιζαν αυξημένες μετατοπίσεις με αυξημένη μάζα, καθώς κατά κανόνα συνδέονται με τις μεγαλύτερες δυνάμεις αδράνειας. Ωστόσο, οι δοκιμές El Centro έδειξαν μείωση των μετατοπίσεων με το βαρύτερο ιστό.

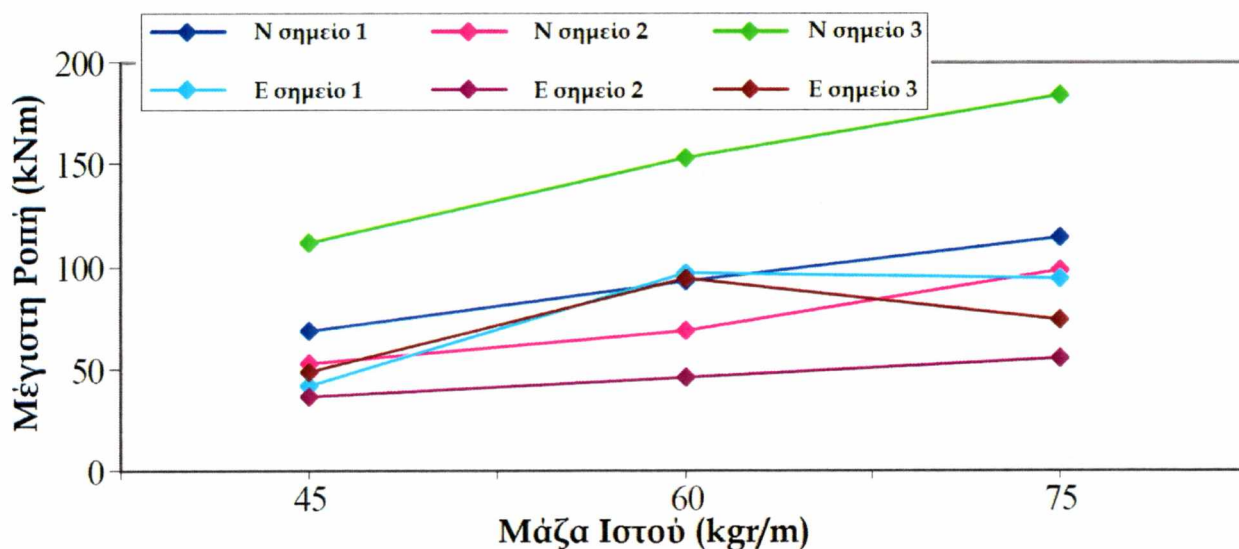


Σχήμα 5.50. Μετατόπιση 1 για Northridge - Μελέτη 2

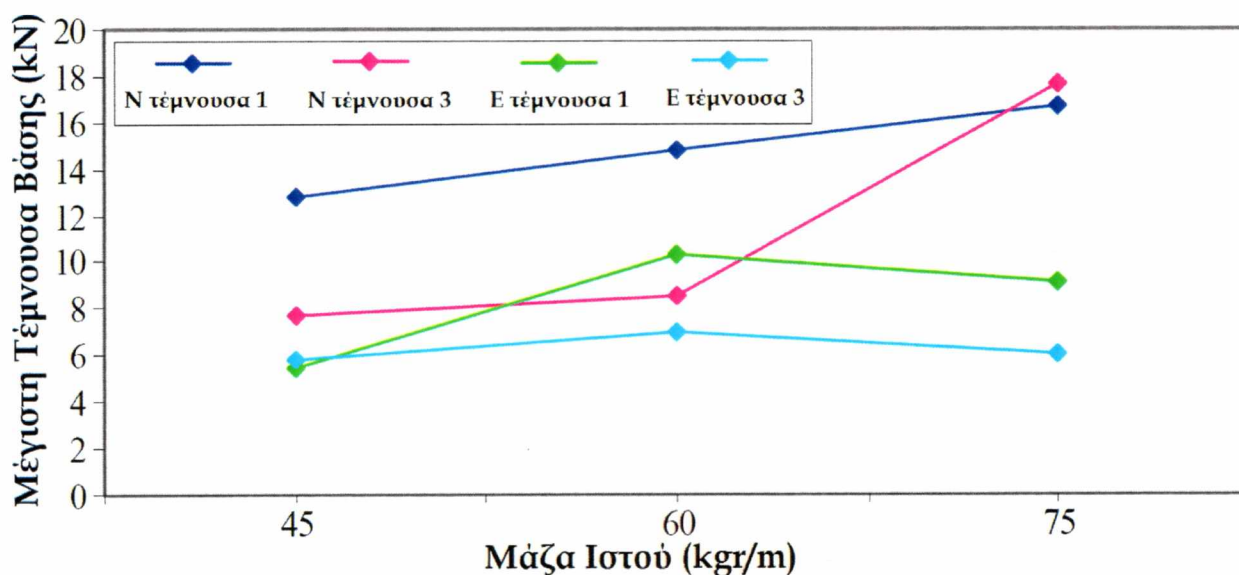


Σχήμα 5.51. Μετατόπιση 1 για El Centro - Μελέτη 2

Συνολικά, οι ροπές κάμψης και οι τέμνουσες βάσης επέδειξαν επίσης αυξημένες τιμές λόγω των μεγαλύτερων δυνάμεων αδράνειας που συνδέονται με αυξημένη μάζα. Το Σχήμα 5.52 απεικονίζει ροπές κάμψης στα Σημεία 1, 2 και 3 και το Σχήμα 5.53 απεικονίζει τις δύο συνιστώσες της τέμνουσας βάσης.



Σχήμα 5.52. Ροπή κάμψης 1 για τη Μελέτη 2

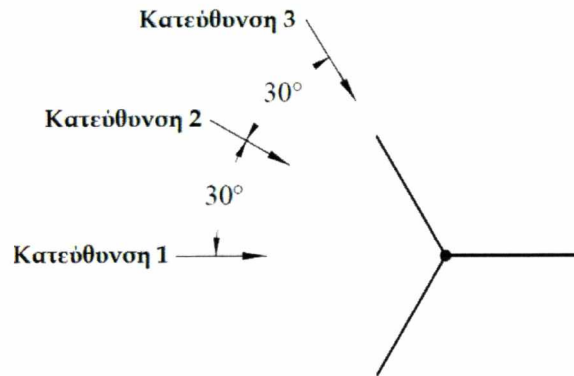


Σχήμα 5.53. Τέμνουσες Βάσης 1 και 3 για τη Μελέτη 2

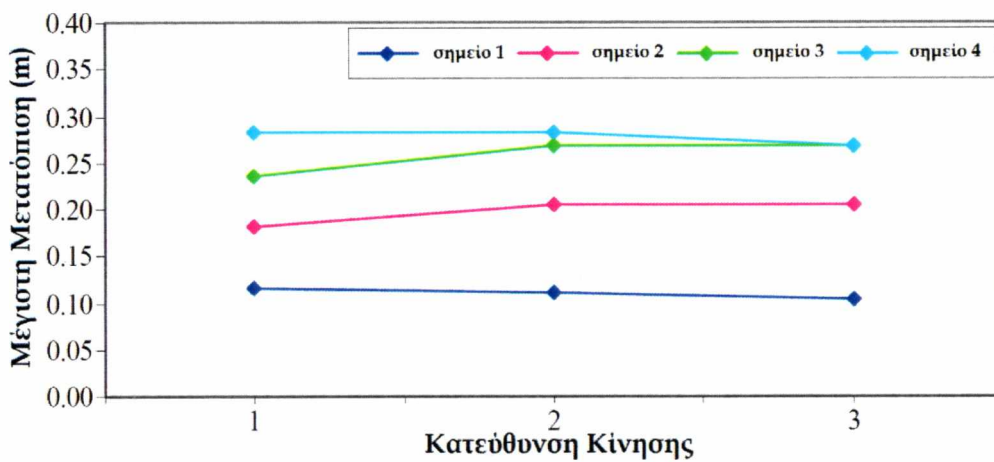
5.5 Μελέτη 3: Τάσεις σχετικά με την κατεύθυνση σεισμού

Είναι σπάνιο το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται πραγματικά, τρισδιάστατα δεδομένα εδαφικής κίνησης στην ανάλυση των κατασκευών. Η παρούσα έρευνα επιχείρησε να δει τις επιπτώσεις της τρισδιάστατης κίνησης και τροποποίησε τα δεδομένα εισαγωγής οριζόντιας κατεύθυνσης προκειμένου να το πετύχει. Η ενότητα 4.2 αναφέρει τους διαφορετικούς προσανατολισμούς που χρησιμοποιήθηκαν και στο Σχήμα 5.54 απεικονίζεται ένα αντίγραφο αυτών σε κάτοψη. Οι βαθμοί ελευθερίας παρέμειναν πάντα συντονισμένοι με

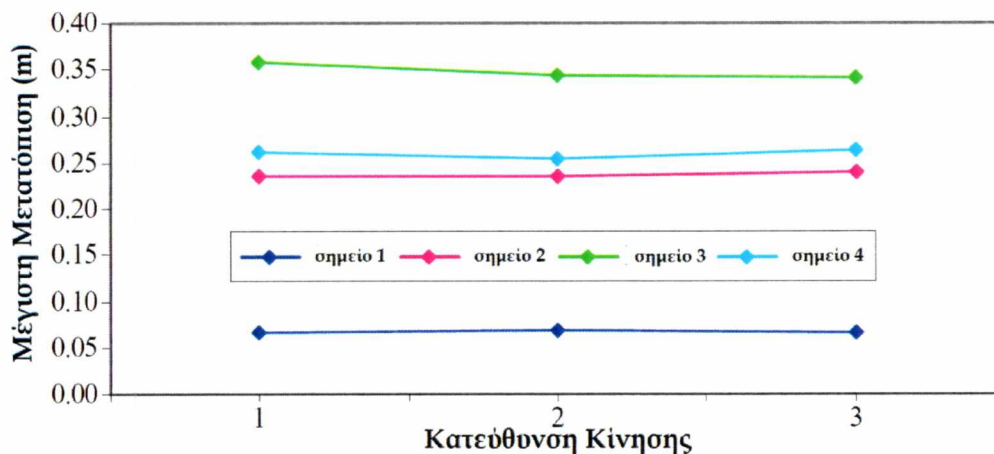
τις δύο συνιστώσες της εδαφικής κίνησης και η ίδια η κατασκευή περιστρέφεται στο χώρο του μοντέλου. Όπως φαίνεται στα ακόλουθα αντιπροσωπευτικά διαγράμματα, η κατεύθυνση της φόρτισης είχε αμελητέα επίπτωση στη συμπεριφορά της κατασκευής στις περισσότερες περιπτώσεις. Όλες οι τιμές απόκρισης που εξετάστηκαν δεν έδειξαν ισχυρές τάσεις. Τα Σχήματα 5.55 έως 5.58 απεικονίζουν τις μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις ως συνάρτηση της κατεύθυνσης εισόδου. Στο Σχήμα 5.59 φαίνονται ροπές κάμψης στα διαφορετικά επίπεδα καλωδίων και στο Σχήμα 5.60 οι ωτέμνουσες βάσεις.



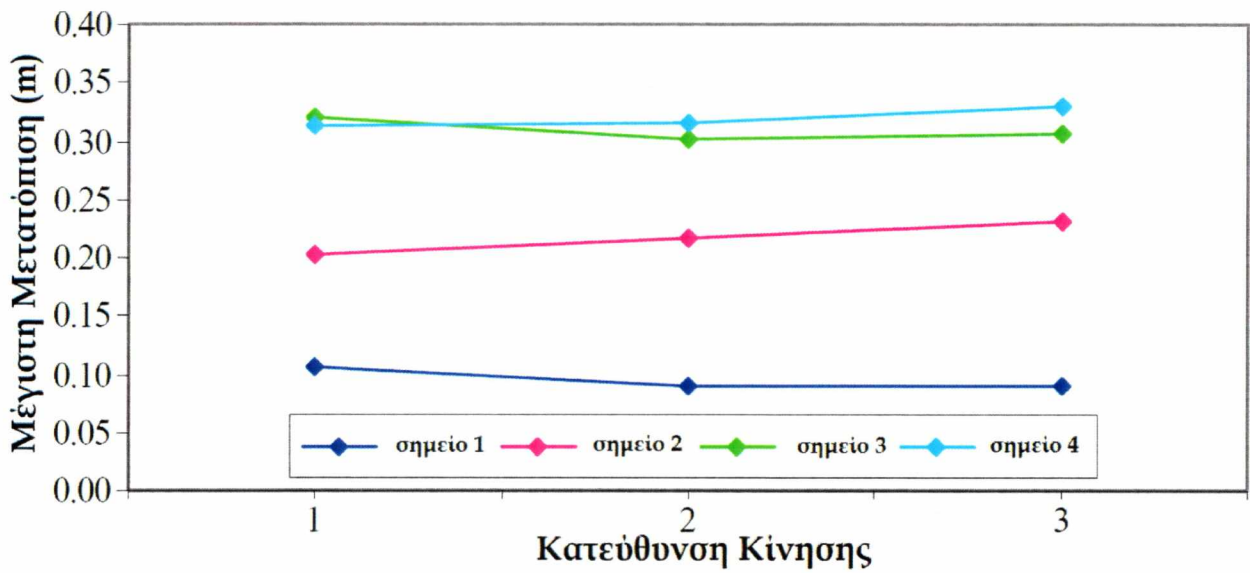
Σχήμα 5.54. Κάτοψη των κατευθύνσεων της ισχυρότερης σεισμικής εισαγωγής



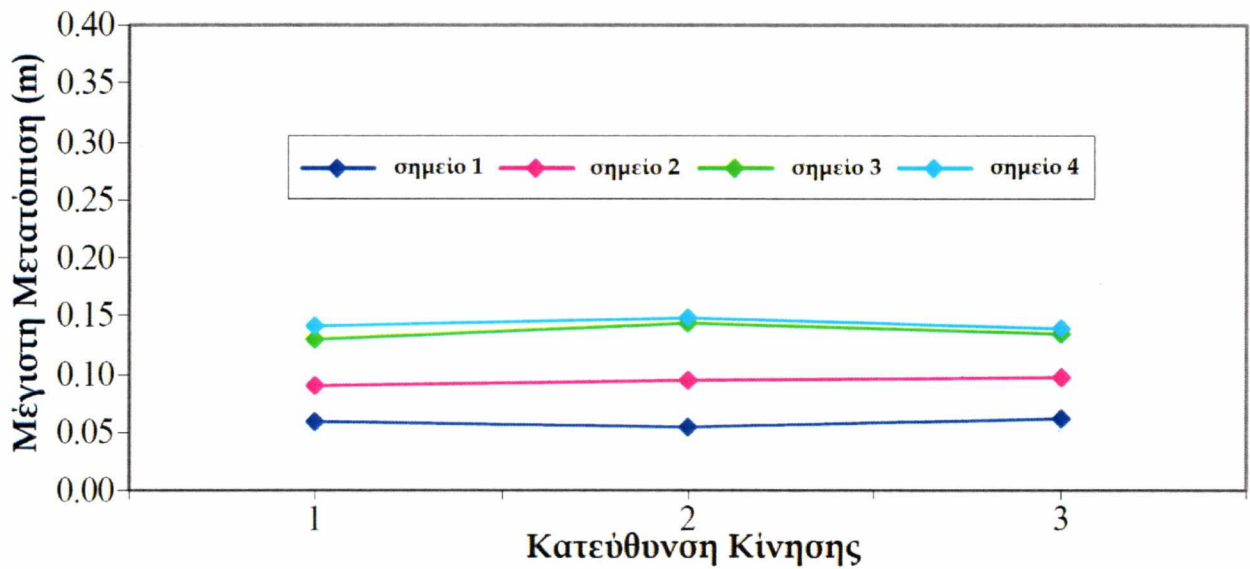
Σχήμα 5.55. Μετατόπιση 1 Northridge για τη Μελέτη 3



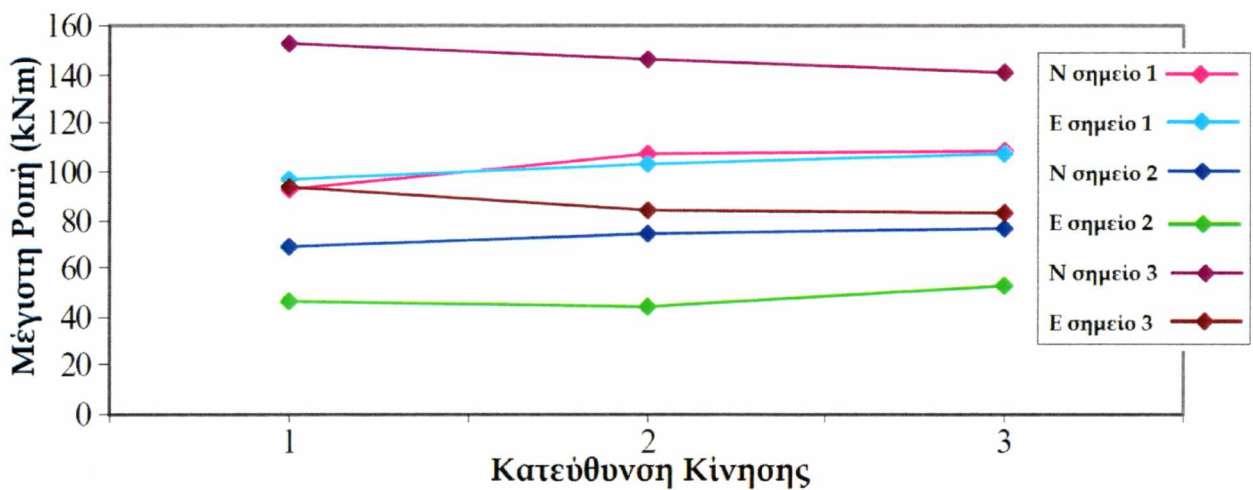
Σχήμα 5.56. Μετατόπιση 3 Northridge για τη Μελέτη 3



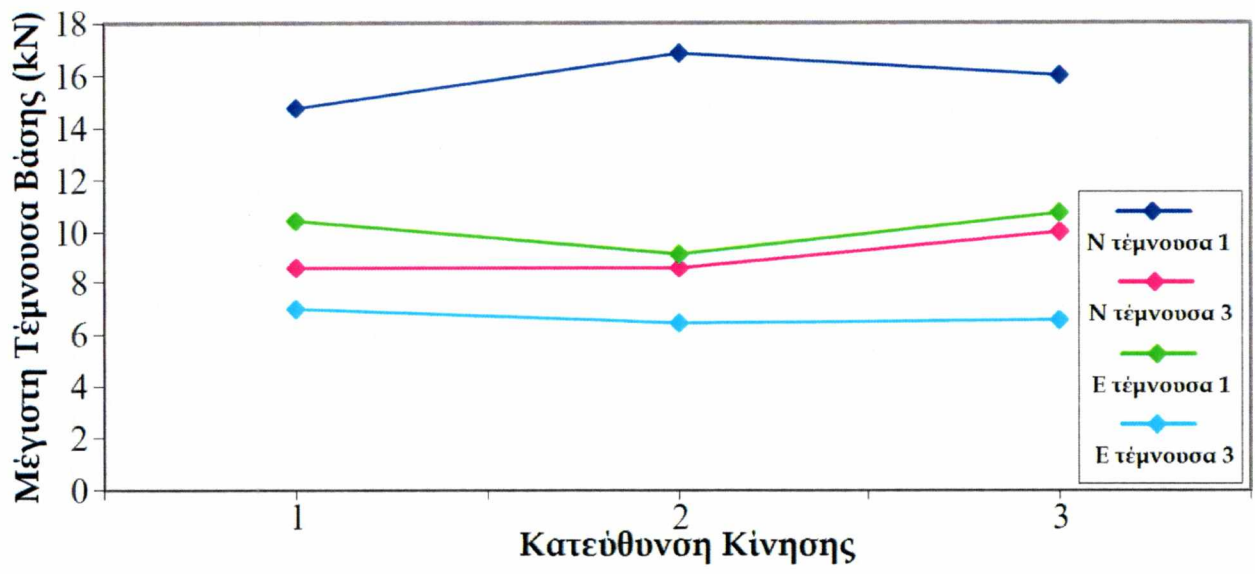
Σχήμα 5.57. Μετατόπιση 1 El Centro για τη Μελέτη 3



Σχήμα 5.58. Μετατόπιση 3 El Centro για τη Μελέτη 3



Σχήμα 5.59. Ροπή κάμψης 1 για τη Μελέτη 3



Σχήμα 5.60. Τέμνουσα Βάσης 1 και 3 για τη Μελέτη 3

Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

6.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Η παρούσα Εργασία εξέτασε αναλυτικά τη σεισμική συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών που ενσωματώνουν συνθετικά σχοινιά ως καλώδια. Πολλή έρευνα έχει γίνει σχετικά με τη συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών υπό φορτία ανέμου, καθώς αυτά είναι που γενικώς ελέγχουν το σχεδιασμό. Δεν υπάρχουν σεισμικοί κώδικες αποκλειστικά για το σχεδιασμό καλωδιωτών ιστών, αλλά έχει αποδειχθεί ότι οι σεισμικές δυνάμεις, κάποιες φορές, μπορούν να είναι αυτές οι κρίσιμες με αποτέλεσμα να ελέγχουν το σχεδιασμό. Ωστόσο, πολύ λίγη έρευνα έχει αναφερθεί στη συμπεριφορά των καλωδιωτών πύργων υπό φορτία σεισμού. Η παρούσα έρευνα επιχείρησε να εξετάσει τη σεισμική συμπεριφορά των καλωδιωτών πύργων, δίνοντας έμφαση ειδικά σε δύο θέματα: τα φορτία ακαριαίας μετάβασης από την χαλαρή στην τεντωμένη κατάσταση και την τρισδιάστατη φόρτιση.

Η μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδίων μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα φορτία κατά τη μετάβαση του καλωδίου από χαλαρή σε τεντωμένη κατάσταση. Η συγκεκριμένη αυτή συμπεριφορά μοντελοποιείται συνήθως σε καλωδιωτούς ιστούς, αλλά είναι λίγη η έρευνα που έχει εξετάσει ειδικά την επίπτωσή της στη δομική συμπεριφορά. Επίσης, πολλές αναλυτικές μελέτες χρησιμοποιούν μόνο μία οριζόντια συνιστώσα εδαφικής κίνησης. Ενώ αυτό μπορεί να είναι αρκετό σε ορισμένες περιπτώσεις, η τρισδιάστατη συμπεριφορά διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από την απλή ευθύγραμμη κίνηση. Θέλοντας να εξετάσουμε αυτά τα ερωτήματα, χρησιμοποιήσαμε αριθμητικές δοκιμές για την πραγματοποίηση μιας παραμετρικής μελέτης σχετικά με τη σεισμική συμπεριφορά των καλωδιωτών ιστών.

Η συγκεκριμένη έρευνα προσπάθησε να χρησιμοποιήσει τις γνωστές δυναμικές ιδιότητες των σχοινιών και να ενσωματώσει τα συνθετικά αυτά σχοινιά ως καλώδια σε καλωδιωτούς ιστούς, οι οποίοι είναι διαδεδομένοι στις ραδιοτηλεοπτικές εκπομπές και τις τηλεπικοινωνίες. Για τη μοντελοποίηση της δυστένειας των συνθετικών σχοινιών χρησιμοποιήθηκε ένας καταστατικός νόμος μη γραμμικής κράτυνσης βασισμένος σε προηγούμενη έρευνα. Ωστόσο, η έρευνα αυτή χρησιμοποίησε γενικές τιμές για την ποσότητα EA, κάτι που καθιστά τα αποτελέσματα εφαρμόσιμα και σε άλλα υλικά όπως ο χάλυβας, το πλέον διαδεδομένο υλικό για σχοινιά (το οποίο εμφανίζει κράτυνση). Πρέπει να σημειωθεί ότι, με το πρόσθετο βάρος που συνδέεται με τα καλύβδινα καλώδια, ίσως θα ήταν σκόπιμο να δημιουργήσουμε ένα πιο σύνθετο μοντέλο καλωδίου για την ανάλυση. Πάντως, οι επιπτώσεις από τη χαλάρωση-τέντωμα των καλωδίων που εξετάστηκαν εδώ, θα μπορούσαν κατά κάποιο τρόπο να είναι αντιπροσωπευτικές της συμπεριφοράς ολόκληρου του καλωδιωτού ιστού.

Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση των κατασκευών καλωδιωτού ιστού πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Ένα σημαντικό μέρος της προκαταρκτικής έρευνας αφιερώθηκε στην τεκμηρίωση των μεθόδων μοντελοποίησης και στην εξέταση των πιθανών μοντέλων ελατηρίου και αποσβεστήρα για την

προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς που παρατηρήθηκε στα συνθετικά σχοινιά. Το κύριο μέρος της έρευνας αποτελούταν από 38 αριθμητικές δοκιμές που περιλάμβαναν διάφορες παραλλαγές του γενικού σχεδιασμού ενός καλωδιωτού ιστού με ύψος 120 m. Ο καλωδιωτός ιστός που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλυτικές δοκιμές βασίστηκε σε έναν καλωδιωτό ιστό που είχε αναλυθεί σε προηγούμενες μελέτες, παρέχοντας έτσι ένα σημείο αναφοράς για την επικύρωση και μία ρεαλιστικά σχεδιασμένη κατασκευή, από την οποία διαφοροποιήθηκαν παράμετροι για τις μελέτες. Ο ιστός αποτελείτο από μία τριγωνική διατομή με τέσσερα ομοιόμορφα κατανομημένα επίπεδα καλωδίων. Όλα τα καλώδια είχαν τις ίδιες ιδιότητες (εκτός από το μήκος) και φορτίστηκαν αρχικά με την ίδια προένταση. Χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα στοιχεία δοκού-υποστυλώματος κατά μήκος του ιστού και για τα καλώδια χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικά ελατήρια. Οι ιστορικές δύο χαρακτηριστικών ισχυρών εδαφικών κινήσεων, του Σεισμού El Centro 1940 (κλιμακούμενος) και του Σεισμού Northridge 1994, χρησιμοποιήθηκαν ως κινήσεις εισόδου στη βάση της κατασκευής.

Οι περισσότερες δοκιμές αποσκοπούσαν στη μελέτη της επίπτωσης της προέντασης στη δομική συμπεριφορά. Ένα μικρότερο επίπεδο προέντασης στα καλώδια συνδέεται άμεσα με την πιθανότητα συμπεριφοράς χαλάρωσης καθόσον απαιτείται λιγότερη μετατόπιση του ιστού για τη χαλάρωση ενός καλωδίου. Οι δοκιμές αυτές αποτελούνταν από συνδυασμούς πέντε προεντάσεων καλωδίων και τριών δυστενιών καλωδίων κάτω από και τις δύο εισαγωγές δεδομένων σεισμού, καταλήγοντας σε ένα σύνολο 30 δοκιμών. Επιπροσθέτως, η μάζα και η δυσκαμψία του ιστού ποίκιλλαν για πρόσθετες δοκιμές κάτω από και τις δύο εισαγωγές δεδομένων σεισμού. Προκειμένου να εξετάσουμε τη δυνατότητα για χωρικές διαφοροποιήσεις στην απόκριση που προκύπτει από τις τρισδιάστατες κινήσεις εισόδου, η οριζόντια κατεύθυνση του σεισμού (γωνία πρόσπτωσης) διαφοροποιήθηκε για την τυπική περίπτωση και για τους δύο σεισμούς. Επίκεντρο της έρευνας ήταν η κύρια μελέτη που εξετάζει τις προεντάσεις και οι δύο πρόσθετες μελέτες ήταν συμπληρωματικές. Μελετήθηκε και ένας μικρότερος ιστός, με ύψος 40 m και δύο επίπεδα καλωδίων, αλλά η συγκεκριμένη κατασκευή δεν επέδειξε κίνηση χαλάρωσης στα καλώδια όταν υπεβλήθη σε σεισμική κίνηση και, κατά συνέπεια, δεν μελετήθηκε περαιτέρω στην παρούσα εργασία.

Τα δεδομένα εξόδου από τις αριθμητικές δοκιμές περιελάμβαναν μετατοπίσεις, ροπές κάμψης, αξονικές δυνάμεις, εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων και τέμνουσες βάσης. Χρησιμοποιήθηκαν όλα ως μέτρα δοκιμής απόκρισης. Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων από τις αριθμητικές δοκιμές εξετάστηκαν δύο διαφορετικά είδη απόκρισης. Πρώτον, η συμπεριφορά της τυπικής περίπτωσης εξετάστηκε σε βάθος προκειμένου να περιγράψουμε τη χρονικά εξαρτώμενη απόκριση του καλωδιωτού ιστού και στους δύο σεισμούς. Η μελέτη αυτών των δύο δοκιμών χαρακτήρισε τη γενική απόκριση που θα βλέπαμε σε όλες τις δοκιμές. Δεύτερον, υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές στις παραμέτρους απόκρισης

και χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των τάσεων στη συμπεριφορά για όλες τις δοκιμές.

Η αναλυτική συμπεριφορά του καλωδιωτού ιστού υπό τη φόρτιση Northridge χαρακτηρίστηκε από, σε κάποιο βαθμό, διαφορετική συμπεριφορά στις δύο οριζόντιες κατευθύνσεις. Στην ισχυρή κατεύθυνση της κίνησης, υπήρχε μία αρκετά τυχαία απόκριση μετατόπισης με αρκετά δευτερόλεπτα μεγάλης κίνησης και στη συνέχεια μικρότερες ταλαντώσεις που αποσβέστηκαν. Στην κάθετη ορθογώνια κατεύθυνση, σημειώθηκαν μεγαλύτερες μετατοπίσεις μολονότι υπήρχε λιγότερη ενέργεια εισόδου. Επίσης, η απόκριση ήταν πολύ περισσότερο περιοδική και πιο αργή στην απόσβεση, γεγονός που υποδηλώνει ότι στη συμπεριφορά κυριαρχούσε μία από τις ιδιομορφές κάμψης.

Η απόκριση της κατασκευής στην κατακόρυφη κατεύθυνση της κίνησης δεν επέδειξε τις ίδιες εξαρτήσεις από τη συμπεριφορά των καλωδίων που είδαμε στις δύο οριζόντιες κατευθύνσεις της κίνησης. Ένα κύριο σημείο ενδιαφέροντος ήταν ότι οι δυναμικές συνιστώσες της αξονικής δύναμης μπορούν να είναι σημαντικές και, ως εκ τούτου, πρέπει να μοντελοποιούνται κατά την εξέταση του σχεδιασμού των καλωδιωτών ιστών.

Όταν τα καλώδια άρχισαν να εμφανίζουν συμπεριφορά χαλάρωσης, η καμπτική απόκριση της κατασκευής άλλαξε ριζικά και αυξημένες ροπές σε ορισμένα σημεία στον ιστό παρατηρήθηκε να συμπίπτουν με τα φορτία ακαριαίας μετάβασης στα καλώδια. Αυτό καταδεικνύει την άμεση επιρροή της συμπεριφοράς χαλάρωσης των καλωδίων στην κατασκευή και το γεγονός ότι τα ακαριαία αυτά φορτία στα καλώδια έχουν τη δυνατότητα αύξησης της δομικής απόκρισης. Επιπλέον, οι δυναμικές εφελκυστικές δυνάμεις των καλωδίων παρατηρήθηκαν να γίνονται σημαντικά μεγαλύτερες από τις αρχικές δυνάμεις αυτών.

Η τέμνουσα βάσης παρατηρήθηκε να έχει αρκετά τυχαία απόκριση. Τα μεγέθη της διατμητικής δύναμης όσον αφορά την ισχυρή κατεύθυνση του σεισμού ήταν μεγαλύτερα από ό, τι στην άλλη κατεύθυνση κατά περίπου τον ίδιο παράγοντα όπως η σχέση μεταξύ της PGA καθεμιάς από τις συνιστώσες της κίνησης εισόδου. Επιπροσθέτως, η μέγιστη τέμνουσα βάσης φάνηκε να είναι περίπου 20% του βάρους του ιστού, ελαφρώς μικρότερη από εκείνη που παρατηρήθηκε σε ψηλότερους ιστούς προηγούμενων μελετών.

Η αναλυτική συμπεριφορά του καλωδιωτού ιστού υπό τη φόρτιση El Centro ήταν αρκετά παρεμφερής με τη συμπεριφορά Northridge στις περισσότερες πτυχές. Μία από τις λίγες διαφορές στη συμπεριφορά ήταν ότι η μεγαλύτερη οριζόντια συνιστώσα κυριαρχούσε στην απόκριση στη δοκιμή El Centro. Η δυναμική συμπεριφορά, ιδίως όσον αφορά τις ροπές κάμψης, μεταβαλλόταν όταν τα καλώδια παρουσίαζαν συμπεριφορά χαλάρωσης, αλλά η μεταβολή δεν ήταν τόσο ριζική όσο αυτή που είδαμε στην περίπτωση Northridge. Ωστόσο, για μία ακόμη φορά η κατακόρυφη απόκριση δεν επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό από τη συμπεριφορά των καλωδίων. Επιπλέον, η μέγιστη τέμνουσα βάσης που σημειώθηκε κατά τη διάρκεια αυτού του σεισμού ήταν ελαφρώς μικρότερη.

Οι μέγιστες τιμές απόκρισης υπολογίσθηκαν για τις διαφορετικές παραμετρικές μελέτες και χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των τάσεων στη συμπεριφορά. Η Μελέτη 1, που αφορά προεντάσεις, εμφάνισε κάποια ένδειξη αρκετά ισχυρών τάσεων για ορισμένες από τις τιμές απόκρισης, αν και υπήρχαν και κάποιες τυχαίες περιπτώσεις μέγιστων τιμών που δεν ακολουθούσαν τις τάσεις και δεν έχουν αποδοθεί σε καμία συγκεκριμένη αιτία. Οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις παρατηρήθηκαν σε γενικές γραμμές να παραμένουν σταθερές ή να μειώνονται σε συνάρτηση με την προένταση καλωδίου. Η συμπεριφορά αυτή ήταν σαφώς διαφορετική στα διάφορα επίπεδα καλωδίων και για τους δύο βαθμούς ελευθερίας. Αυτό υποδηλώνει ότι οι διαφορετικές ιδιομορφές κάμψης επηρεάζουν την απόκριση του ιστού λόγω των δύο διαφορετικών συνιστωσών κίνησης. Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις παρατηρήθηκαν να είναι μία σχεδόν γραμμική συνάρτηση της εφελκυστικής δύναμης του καλωδίου, πιθανότατα εξαιτίας των αυξημένων τέτοιων δυνάμεων που συνδέονται άμεσα με τη θλίψη του ιστού.

Οι ροπές κάμψης στον ιστό παρουσίασαν μία μικρή τάση μείωσης με την πρόσθετη προένταση. Ωστόσο, αυτή η συσχέτιση δεν ήταν σταθερή για τις ροπές κάμψης σε όλες τις θέσεις και ήταν ισχυρότερη στο μεσαίο επίπεδο καλωδίων. Οι μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις των καλωδίων ήταν στενά συσχετιζόμενες με το επίπεδο προέντασης. Οι μέγιστες τιμές σε γενικές γραμμές ήταν 200 έως 300% των αρχικών προεντάσεων, το οποίο είναι σύμφωνο με τα εύρη που είδαμε σε προηγούμενη μελέτη. Η τέμνουσα βάσης είχε αμελητέες τάσεις και για τις δύο οριζόντιες κατευθύνσεις.

Η δυναμική συμπεριφορά του καλωδιωτού ιστού στη Μελέτη 2, όπου τόσο η μάζα όσο και η δυσκαμψία του ιστού διέφεραν, κυριαρχούταν από τη μεταβολή στη μάζα. Φάνηκε ότι η αυξημένη δυσκαμψία δεν ήταν αρκετή για να αντισταθεί στις μεγαλύτερες δυνάμεις αδράνειας και, συνεπώς, όλες οι τιμές απόκρισης αυξήθηκαν με την προσθήκη της μάζας στον ιστό, κυρίως οι ροπές κάμψης που υπήρχαν στα διαφορετικά επίπεδα καλωδίων.

Στη Μελέτη 3, η μεταβολή της κατεύθυνσης εισόδου της εδαφικής κίνησης παρατηρήθηκε να έχει πολύ μικρή επίπτωση στη δυναμική συμπεριφορά του καλωδιωτού ιστού. Αν και εφελκυστική δύναμη σε καθένα από τα καλώδια εξαρτάται από τον προσανατολισμό εισόδου της σεισμικής βάσης, ο προσανατολισμός φαίνεται να έχει αμελητέα επίπτωση. Εν τούτοις, αυτό σε καμία περίπτωση δε μειώνει τη σημασία της χρησιμοποίησης τρισδιάστατων εδαφικών κινήσεων στις δυναμικές αναλύσεις καλωδιωτών ιστών. Οι πρόσθετες επιπτώσεις των τρισδιάστατων εισόδων κίνησης μπορεί να προκαλέσουν αυξήσεις στις μετατοπίσεις, στις ροπές και στις εντάσεις στον ιστό. Επίσης, η απόκριση σε κάθε οριζόντια κατεύθυνση μπορεί να είναι διαφορετική, όπως παρατηρήθηκε για την κίνηση εισόδου Northridge, όπου η μικρότερη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης προκάλεσε μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Τέλος, οι κατακόρυφες επιταχύνσεις που συνδέονται με τα

σεισμικά γεγονότα μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές δυναμικές συνιστώσες αξονικής δύναμης στον ιστό.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η αναλυτική προσομοίωση των καλωδιωτών πύργων που ενσωματώνουν συνθετικά σχοινιά αποτελεί μέρος ενός ερευνητικού έργου πολλαπλών σταδίων, που έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της απορρόφησης ενέργειας που σχετίζεται με τα SCEDs και την εφαρμογή τους σε νέες και υπάρχουσες κατασκευές για πρόσθετη δυσκαμψία κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων πλευρικής μετατόπισης, όπως οι σεισμοί και τα φορτία ανέμου. Οι αναλύσεις και τα δεδομένα που σχετίζονται με την παρούσα έρευνα της δυναμικής συμπεριφοράς των καλωδιωτών ιστών και την επιρροή των ακαριαίων φορτίων στη δομική απόκριση, προσφέρει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των κατασκευών που ενσωματώνουν αυτά τα σχοινιά.

Η παρούσα έρευνα διαπίστωσε ότι ένα πιο αναλυτικό μοντέλο για την αντιπροσώπευση των συστατικών ιδιοτήτων των συνθετικών σχοινιών, θα μπορούσε να είναι χρήσιμο για την αριθμητική ανάλυση. Μια πιθανή επιλογή για την ανάπτυξη αυτού του μοντέλου είναι η προσθήκη μιας οριζόμενης από το χρήστη συνάρτησης για την ανάκτηση πληροφοριών σχετικά με τη μετατόπιση και τις ταχύτητες σε κάθε χρονικό βήμα και για την ενημέρωση των εφελκυστικών δυνάμεων στο σχοινί αναλόγως. Επίσης, ίσως είναι δυνατό να αναπτυχθούν ή να προσδιοριστούν περισσότερο σύνθετα στοιχεία προκειμένου να φθάσουμε σε μια καλύτερη προσέγγιση της ιδιαίτερα μη γραμμικής συμπεριφοράς, συμπεριλαμβανομένης της εσωτερικής τριβής στα σχοινιά. Ανεξάρτητα με τον τρόπο που αυτό επιτυγχάνεται, μία πιο αναλυτική ματιά στα αριθμητικά μοντέλα σχοινιών είναι απαραίτητη για τη συνέχιση της αναλυτικής έρευνας.

Πολλές άλλες έρευνες σχετικά με την εφαρμογή των συνθετικών σχοινιών σε κατασκευές βρίσκονται σε εξέλιξη, όπως οι πειραματικές δοκιμές για πολλαπλή αντιστήριξη σε πλαίσιο κτηρίου και η αριθμητική ανάλυση που χρησιμοποιεί σχοινιά ως μέσα συγκράτησης γέφυρας για την αποφυγή ανατροπής του καταστρώματος. Η μετάβαση από την ανάλυση της θεωρητικής συμπεριφοράς στα πειραματικά αποτελέσματα έχει ήδη ξεκινήσει, αλλά πρέπει να συνεχιστεί και να επεκταθεί περαιτέρω για να δούμε σε ρεαλιστική σχεδίαση κατασκευές που ενσωματώνουν τα συνθετικά σχοινιά.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dassault Systems, Abaqus Analysis 6.7 User's Manual, Simulia Inc., 2007.
2. Ajrab, J. J., Pekcan, G., and Mander, J. B. (2004). "Rocking wall-frame structures with supplemental tendon systems." *Journal of Structural Engineering*, 130, 895-903.
3. Amiri, G. G. (2002). "Seismic sensitivity indicators for tall guyed telecommunication towers." *Computers and Structures*, 80, 349-364.
4. Amiri, G. G., Zahedi, M., and Jalali, R. S. (2004). "Multiple-support seismic excitation of tall guyed telecommunication towers." *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, British Columbia, Canada, August 1-6, 2004, Paper No.212.
5. ASCE (1988). *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 52: Guide for Design of Steel Transmission Towers*. American Society of Civil Engineers, New York, New York.
6. ASCE (1990). *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 72: Design of Steel Transmission Pole Structures*. American Society of Civil Engineers, New York, New York.
7. ASCE (1991). *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 74: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading*. American Society of Civil Engineers, New York, New York.
8. ASCE (1997). *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 91: Design of Guyed Electrical Transmission Structures*. American Society of Civil Engineers, New York, New York.
9. Borri, C., and Zahltan, W. (1991). "Fully simulated nonlinear analysis of large structures subjected to turbulent artificial wind." *Mechanics of Structures and Machines*, 19, 213-250.
10. Chen, W., and Scawthorn, C., eds. (2003). *Earthquake Engineering Handbook*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
11. Chopra, A. K. (2001). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Second Edition*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
12. Desai, Y. M., and Punde, S. (2001). "Simple model for dynamic analysis of cable supported structures." *Engineering Structures*, 23, 271-279.
13. Filiatrault, A., and Stearns, C. (2004). "Seismic response of electrical substation equipment interconnected by flexible conductors." *Journal of Structural Engineering*, 130, 769-778.
14. Guevara, E., and McClure, G. (1993). "Nonlinear seismic response of antenna-supporting structures." *Computers and Structures*, 47, 711-724.

15. Harikrishna, P., Annadurai, A., Gomathinayagam, S., and Lakshmanan, N. (2003). "Fullscale measurements of the structural response of a 50 m guyed mast under windloading." *Engineering Structures*, 25, 859-867.
16. Hennessey, C. M. (2003). "Analysis and modeling of snap loads on synthetic fiberropes." MS thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-11092003-135228>).
17. Hennessey, C. M., Pearson, N. J., and Plaut, R. H. (2005). "Experimental snap loading of synthetic ropes." *Shock and Vibration*, 12, 163-175.
18. Irvine, H. M. (1981). *Cable Structures*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
19. Kahla, N. B. (1994). "Dynamic analysis of guyed towers." *Engineering Structures*, 16, 293-301.
20. Madugula, M. K. S., ed. (2002). *Dynamic Response of Lattice Towers and Guyed Masts*. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
21. Moossavi Nejad, S. E. (1996). "Dynamic response of guyed masts to strong motion earthquake." *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, Paper No. 289.
22. Motley, M. R. (2004). "Finite element analysis of the application of synthetic fiber rope to reduce blast response of frames." MS thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-12152004-102556>).
23. Mulherin, N. D. (1998). "Atmospheric icing and communication tower failure in the United States." *Cold Regions Science and Technology*, 27, 91-104.
24. Pearson, N. J. (2002). "Experimental snap loading of synthetic fiber ropes." MS thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-01132003-105300>).
25. PEER (2005). *PEER Strong Motion Database*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California (<http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>).
26. Plaut, R. H., Archilla, J. C., and Mays, T. W. (2000). "Snap loads in mooring lines during large three-dimensional motions of a cylinder." *Nonlinear Dynamics*, 23, 271-284.
27. Preumont, A., Achkire, Y., and Bossens, F. (2000). "Active tendon control of large trusses." *AIAA Journal*, 38, 493-498.
28. Samson (2005). *Rigging: Double Braid: Amsteel II*. Samson Rope Technologies, Ferndale, Washington. (<http://www.samsonrope.com/home/industrial/riggingdoublebraids-amsteelii.cfm?ProdNum=180>).
29. Shome, N., Cornell, C. A., Bazzurro, P., and Carballo, J. E. (1998). "Earthquakes, records, and nonlinear responses." *Earthquake Spectra*, 14, 469-500.

30. TIA (1996). *TIA-222-F: Structural Standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures*. Telecommunications Industry Association, Arlington, Virginia.
31. Virgin, L. N., and Plaut, R. H. (1993). "Effect of axial load on forced vibrations of beams." *Journal of Sound and Vibration*, 168, 395-405.

A.1 Θεωρητική κίνηση Δοκού για το Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο

Για το Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο, Περίπτωση Α:

Εύρος μετατόπισης κατά μήκος της δοκού

$$Y_1(x) = A \cosh \alpha x + A_1 (\cos \alpha x - \cosh \alpha x) + B_1 (\sin \alpha x - \sinh \alpha x)$$

Μετατόπιση στη κορυφή

$$Y_1(L) = \frac{A(\cos \delta + \cosh \delta)}{1 + \cos \delta \cosh \delta}$$

όπου

$$\alpha = \left(\frac{\Omega^2 \mu}{EI}\right)^{1/4}, \quad \delta = \alpha L$$

$$A_1 = \frac{(1 + \cos \delta \cosh \delta - \sin \delta \sinh \delta)A}{2(1 + \cos \delta \cosh \delta)}$$

$$B_1 = \frac{(\cos \delta \sinh \delta - \sin \delta \cosh \delta)A}{2(1 + \cos \delta \cosh \delta)}$$

Για το Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο, Περιπτώσεις Β και Γ:

Μετατόπιση στη κορυφή

$$Y_2(L) = A_2 \cos \delta + B_2 \sin \delta + C_2 \cosh \delta + D_2 \sinh \delta$$

όπου οι συντελεστές A_2 , B_2 , C_2 και D_2 προκύπτουν από την επίλυση του κατωτέρω συστήματος, υπό μητρώϊκή μορφή:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ C_2 \\ D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cosh(\varepsilon) \\ -\sinh(\varepsilon) \\ -\cosh(\varepsilon) \\ \sinh(\varepsilon) - k \cosh(\varepsilon) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} A$$

όπου

$$\alpha = \left(\frac{\Omega^2 \mu}{EI}\right)^{1/4}, \quad \delta = \alpha L, \quad \varepsilon = \alpha B, \quad k = \frac{2K}{a^3 EI}$$

Κ η δυσκαμψία του ελατηρίου και

$$a_{11} = \cos(\varepsilon) - \cosh(\varepsilon)$$

$$a_{12} = \sin(\varepsilon) - \sinh(\varepsilon)$$

$$a_{13} = -\cos(\varepsilon)$$

$$a_{14} = -\sin(\varepsilon)$$

$$a_{15} = -\cosh(\varepsilon)$$

$$a_{16} = -\sinh(\varepsilon)$$

$$a_{21} = -\sin(\varepsilon) - \sinh(\varepsilon)$$

$$a_{22} = \cos(\varepsilon) - \cosh(\varepsilon)$$

$$a_{23} = \sin(\varepsilon)$$

$$a_{24} = -\cos(\varepsilon)$$

$$a_{25} = -\sinh(\varepsilon)$$

$$a_{26} = -\cosh(\varepsilon)$$

$$a_{31} = -\cos(\varepsilon) - \cosh(\varepsilon)$$

$$a_{32} = -\sin(\varepsilon) - \sinh(\varepsilon)$$

$$a_{33} = \cos(\varepsilon)$$

$$a_{34} = \sin(\varepsilon)$$

$$a_{35} = -\cosh(\varepsilon)$$

$$a_{36} = -\sinh(\varepsilon)$$

$$a_{41} = (-\sin(\varepsilon) + \sinh(\varepsilon) + k \cdot \cos(\varepsilon) - k \cdot \cosh(\varepsilon))$$

$$a_{42} = (\cos(\varepsilon) + \cosh(\varepsilon) + k \cdot \sin(\varepsilon) - k \cdot \sinh(\varepsilon))$$

$$a_{43} = \sin(\varepsilon)$$

$$a_{44} = -\cos(\varepsilon)$$

$$a_{45} = \sinh(\varepsilon)$$

$$a_{46} = \cosh(\varepsilon)$$

$$a_{51} = 0$$

$$a_{52} = 0$$

$$a_{53} = -\cos(\delta)$$

$$a_{54} = -\sin(\delta)$$

$$a_{55} = \cosh(\delta)$$

$$a_{56} = \sinh(\delta)$$

$$a_{61} = 0$$

$$a_{62} = 0$$

$$a_{63} = \sin(\delta)$$

$$a_{64} = -\cos(\delta)$$

$$a_{65} = \sinh(\delta) \quad a_{66} = \cosh(\delta)$$

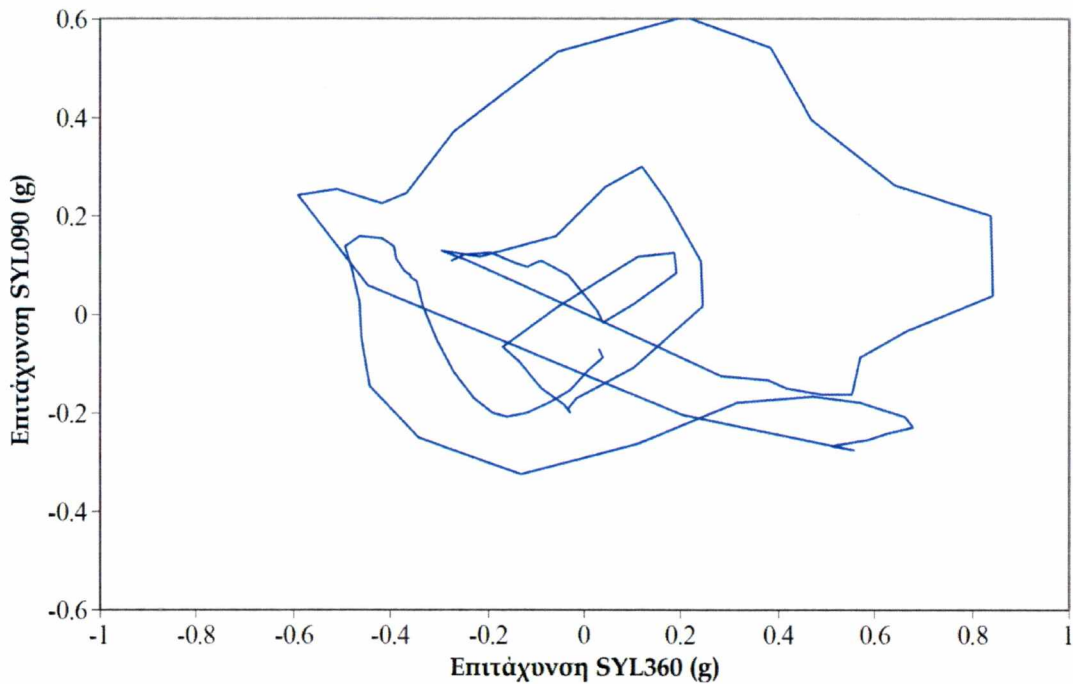
A.2 Τιμές παραμέτρων για το Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο

Πίνακας A.1 Τιμές παραμέτρων για το Δεύτερο Προκαταρκτικό Μοντέλο

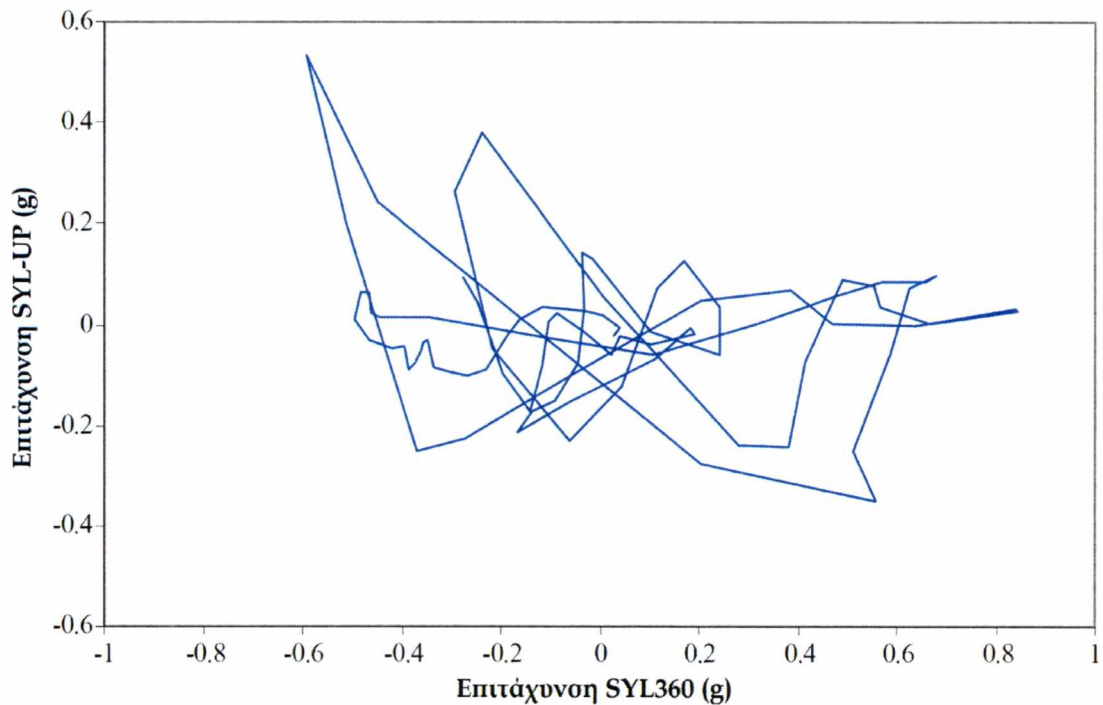
Περίπτωση	Δοκμή	E (Gpa)	μ (kg/m)	a_0 (sec ⁻¹)	a_1 (sec)	L (m)	I (m ⁴)	ω (rad/sec)	A (m)	k (kN/m)	B (m)	C (m)
A	1	209	1570	0.25	0.0005	10	0.004	2π	0.2	-	-	-
	2	"	"	"	"	10	0.004	2π	0.5	-	-	-
	3	"	"	"	"	10	0.004	6π	0.02	-	-	-
	4	"	"	"	"	10	0.004	6π	0.05	-	-	-
	5	"	"	"	"	5	0.001	2π	0.2	-	-	-
	6	"	"	"	"	5	0.001	2π	0.5	-	-	-
	7	"	"	"	"	5	0.001	6π	0.02	-	-	-
	8	"	"	"	"	5	0.001	6π	0.05	-	-	-
B	1	209	1570	0.25	0.0005	10	0.002	2π	0.2	525	5	-
	2	"	"	"	"	"	"	4π	0.05	525	5	-
	3	"	"	"	"	"	"	2π	0.2	263	5	-
	4	"	"	"	"	"	"	4π	0.05	263	5	-
	5	"	"	"	"	"	"	2π	0.2	525	7	-
	6	"	"	"	"	"	"	4π	0.05	525	7	-
	7	"	"	"	"	"	"	2π	0.2	263	7	-
	8	"	"	"	"	"	"	4π	0.05	263	7	-
Γ	1	209	1570	0.25	0.0005	10	0.002	2π	0.2	263	7	5
	2	"	"	"	"	"	"	4π	0.05	263	7	5
	3	"	"	"	"	"	"	2π	0.2	525	7	5
	4	"	"	"	"	"	"	4π	0.05	525	7	5
	5	"	"	"	"	"	"	2π	0.2	263	7	10
	6	"	"	"	"	"	"	4π	0.05	263	7	10
	7	"	"	"	"	"	"	2π	0.2	525	7	10
	8	"	"	"	"	"	"	4π	0.05	525	7	10

Παράρτημα Β : Υποστηρικτικές Πληροφορίες επί του Αναλυτικού Μοντέλου

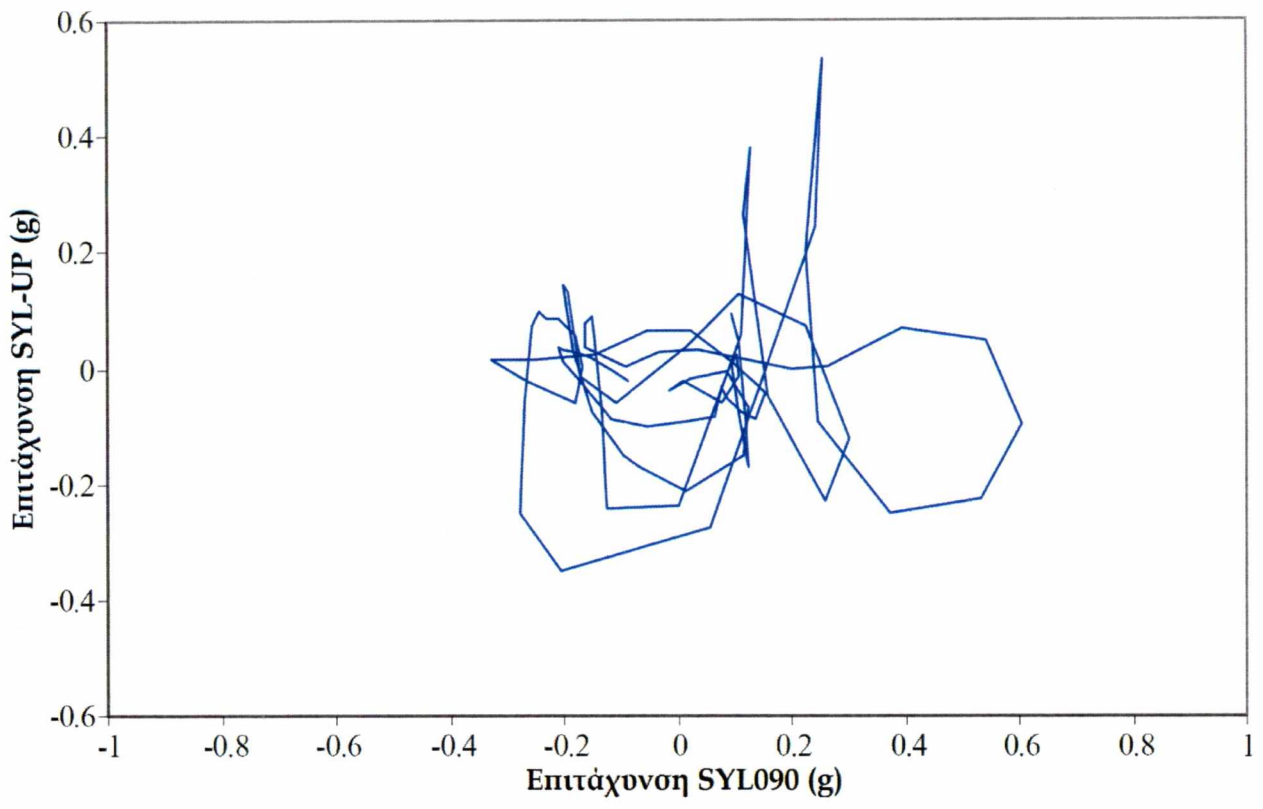
Στα Σχήματα που ακολουθούν, απεικονίζεται χωρική μεταβολή των επιταχύνσεων και των μετατοπίσεων κατά την εδαφική κίνηση. Οι επιταχύνσεις παρουσιάζονται γραφικά για δύο δευτερόλεπτα ισχυρής κίνησης, προς αποφυγή σύγχυσης, ενώ οι μετατοπίσεις για τα πρώτα 15 δευτερόλεπτα κίνησης.



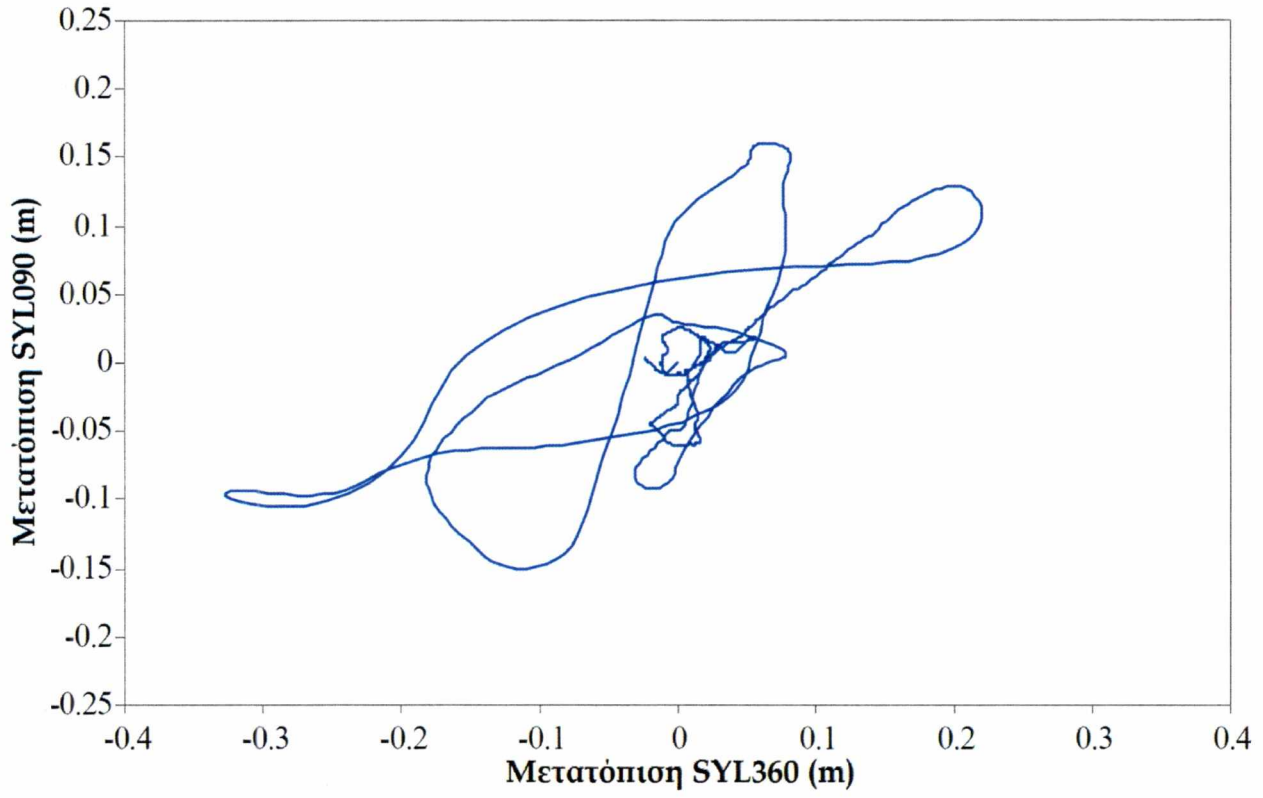
Σχήμα Β.1.Επιταχύνσεις στο οριζόντιο επίπεδο για το σεισμό του Northridge



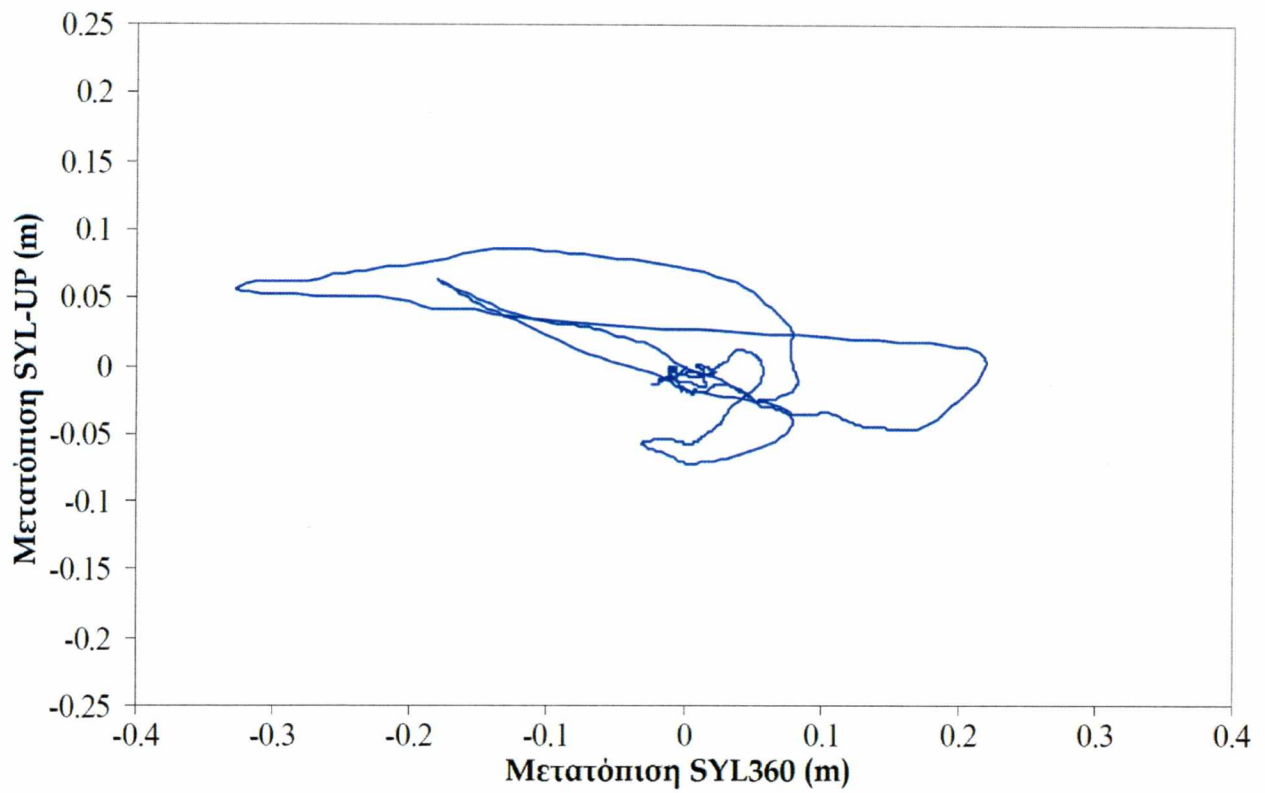
Σχήμα Β.2. Επιταχύνσεις στο κατακόρυφο επίπεδο 1 για το σεισμό του Northridge



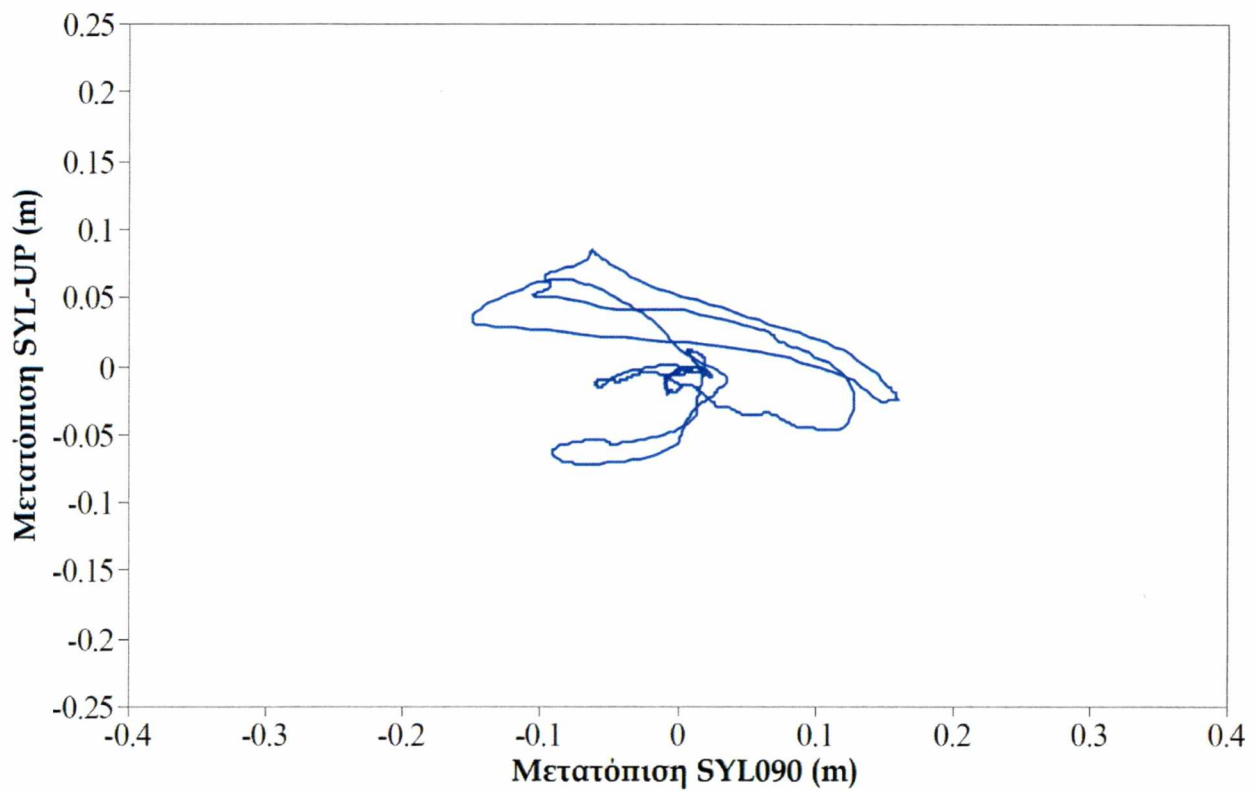
Σχήμα Β.3. Επιταχύνσεις στο κατακόρυφο επίπεδο 2 το σεισμό του για Northridge



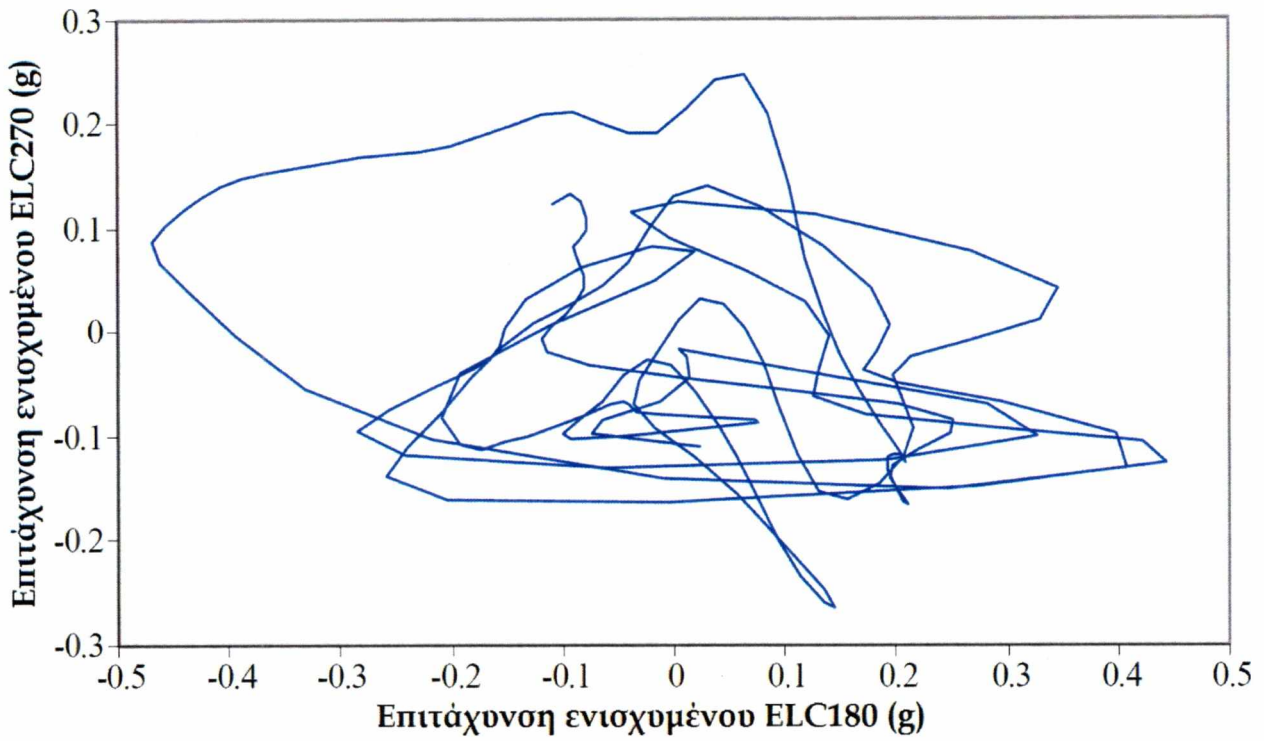
Σχήμα Β.4. Μετατοπίσεις στο οριζόντιο επίπεδο για το σεισμό του Northridge



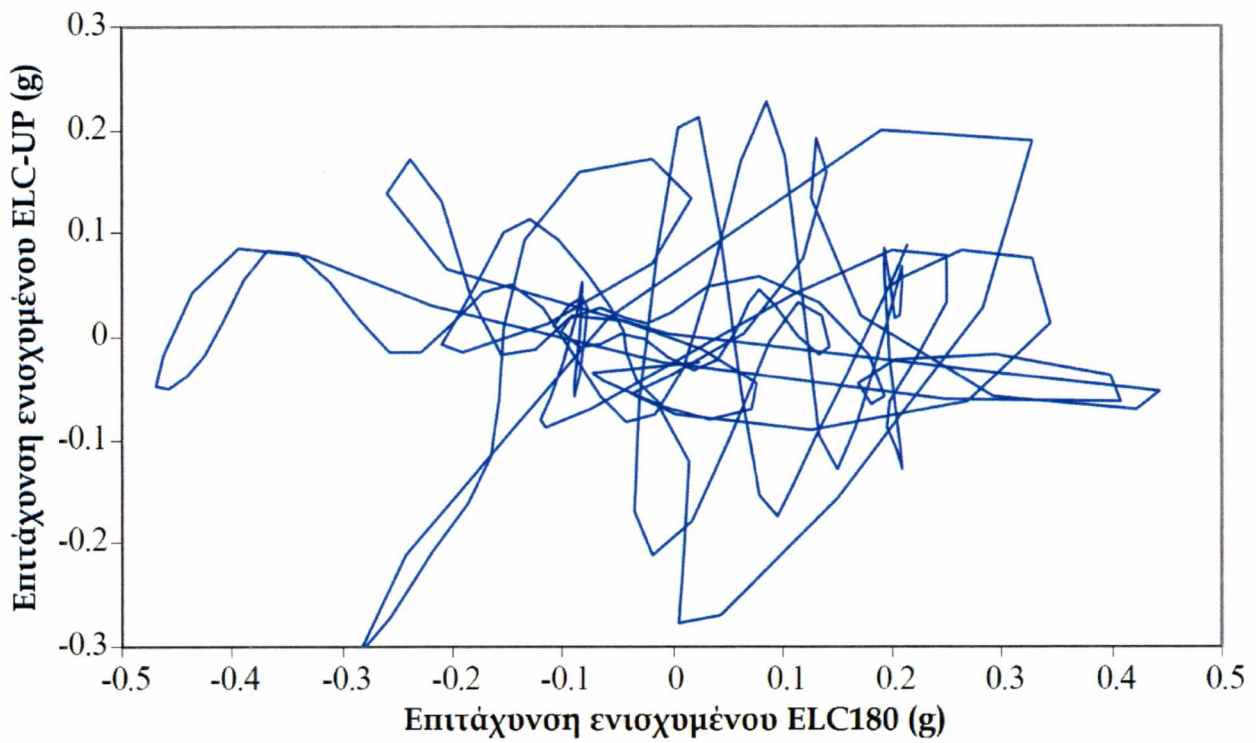
Σχήμα Β.5. Μετατοπίσεις στο κατακόρυφο επίπεδο 1 για το σεισμό του Northridge



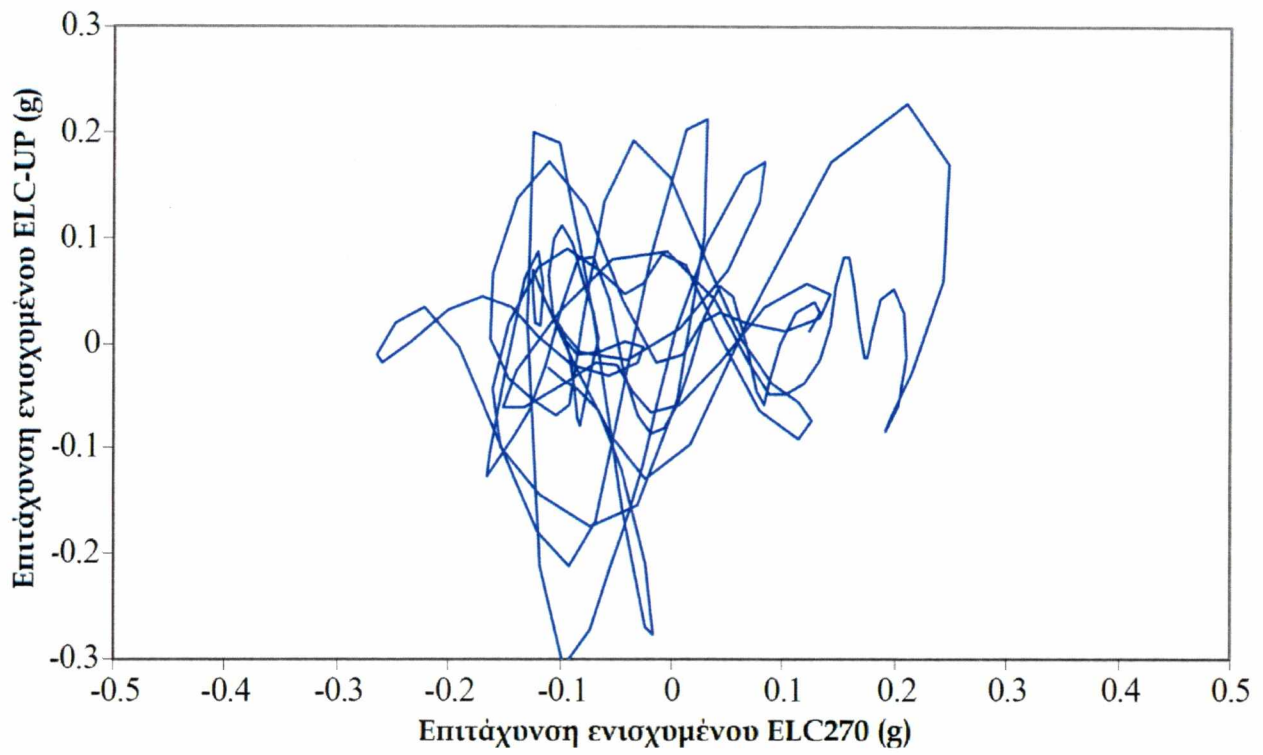
Σχήμα Β.6. Μετατοπίσεις στο κατακόρυφο επίπεδο 2 για το σεισμό του Northridge



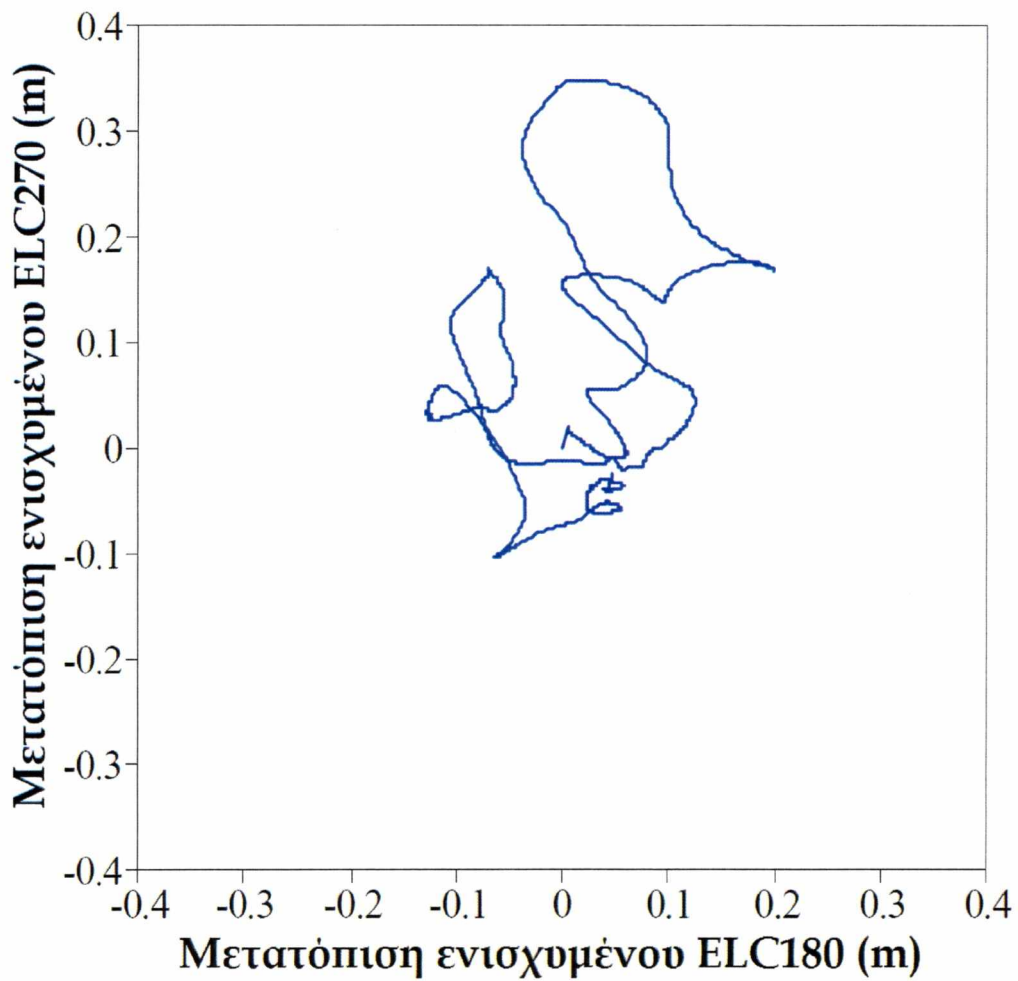
Σχήμα Β.7. Επιταχύνσεις στο οριζόντιο επίπεδο για ενισχυμένο σεισμό EICentro



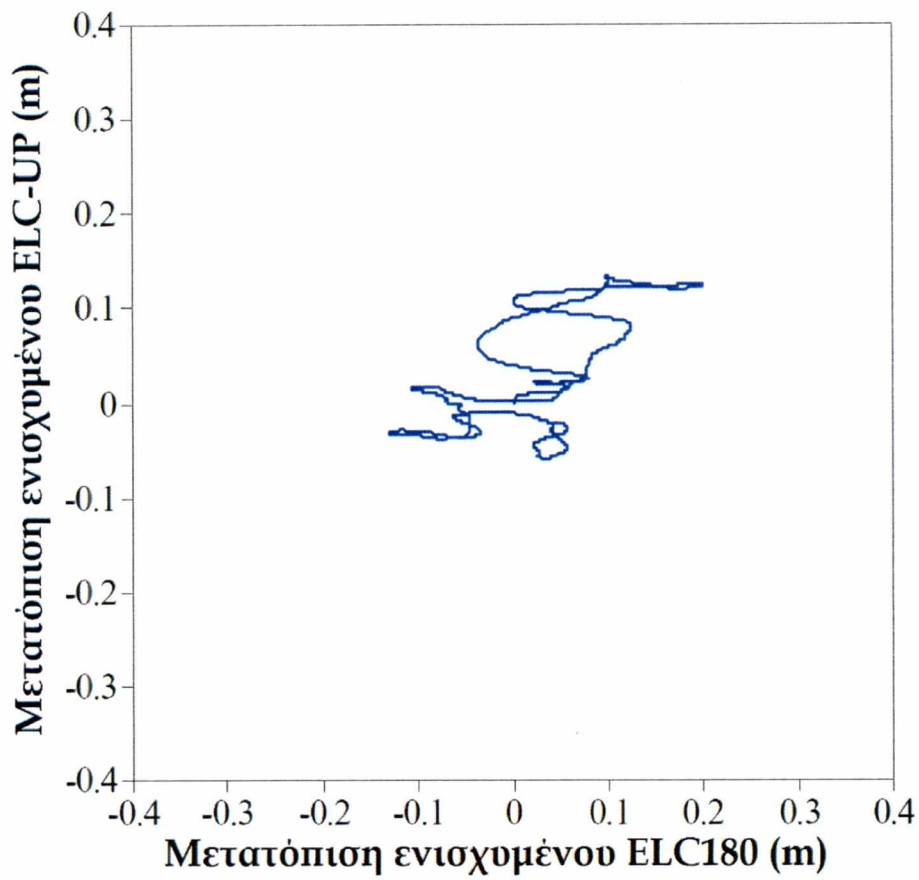
Σχήμα Β.8. Επιταχύνσεις στο κατακόρυφο επίπεδο 1 για ενισχυμένο σεισμό EICentro



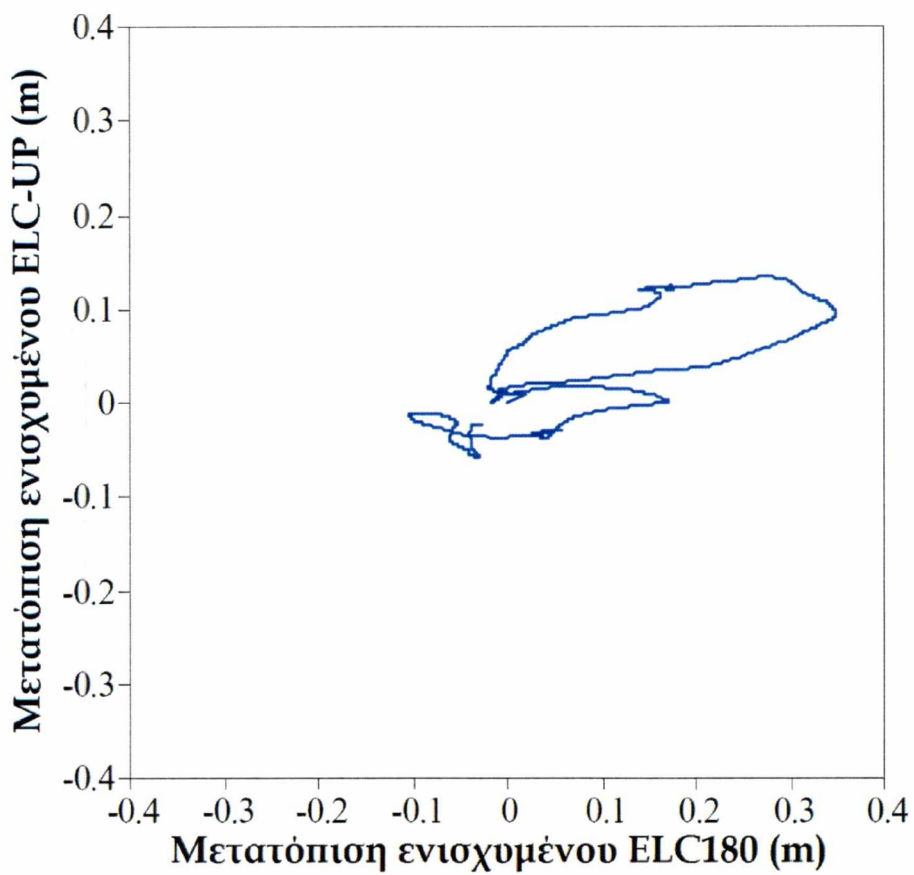
Σχήμα Β.9. Επιταχύνσεις στο κατακόρυφο επίπεδο 2 για ενισχυμένο σεισμό *ElCentro*



Σχήμα Β.10. Μετατοπίσεις στο οριζόντιο επίπεδο για ενισχυμένο σεισμό *ElCentro*

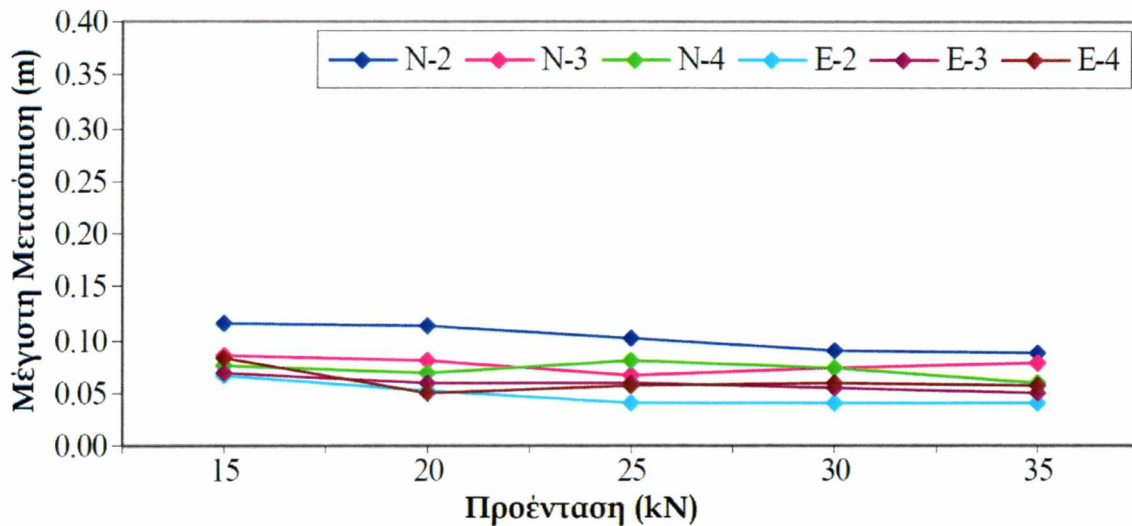


Σχήμα Β.11. Μετατοπίσεις στο κατακόρυφο επίπεδο 1 για ενισχυμένο σεισμό *ElCentro*

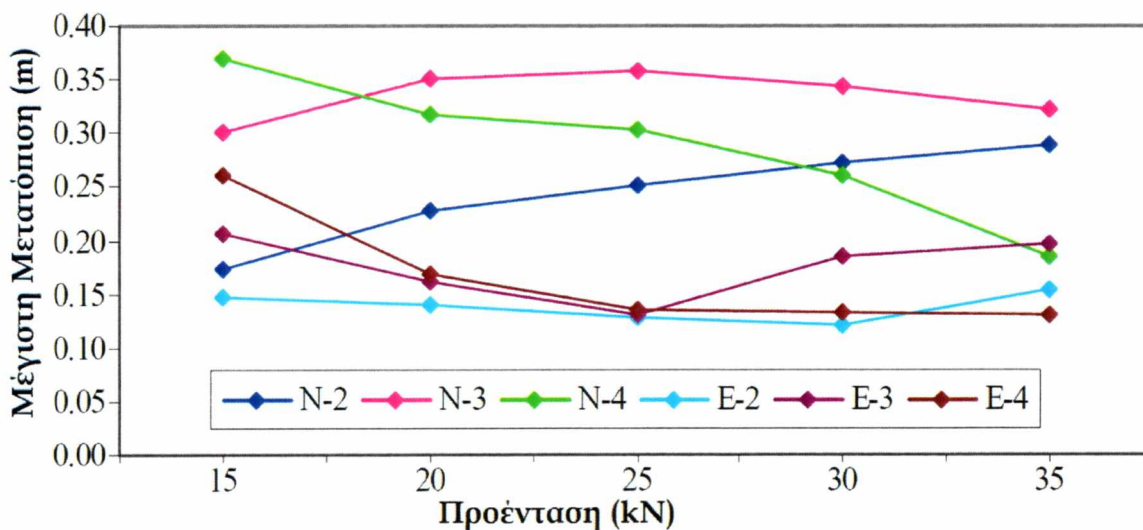


Σχήμα Β.12. Μετατοπίσεις στο κατακόρυφο επίπεδο 2 για ενισχυμένο σεισμό *ElCentro*

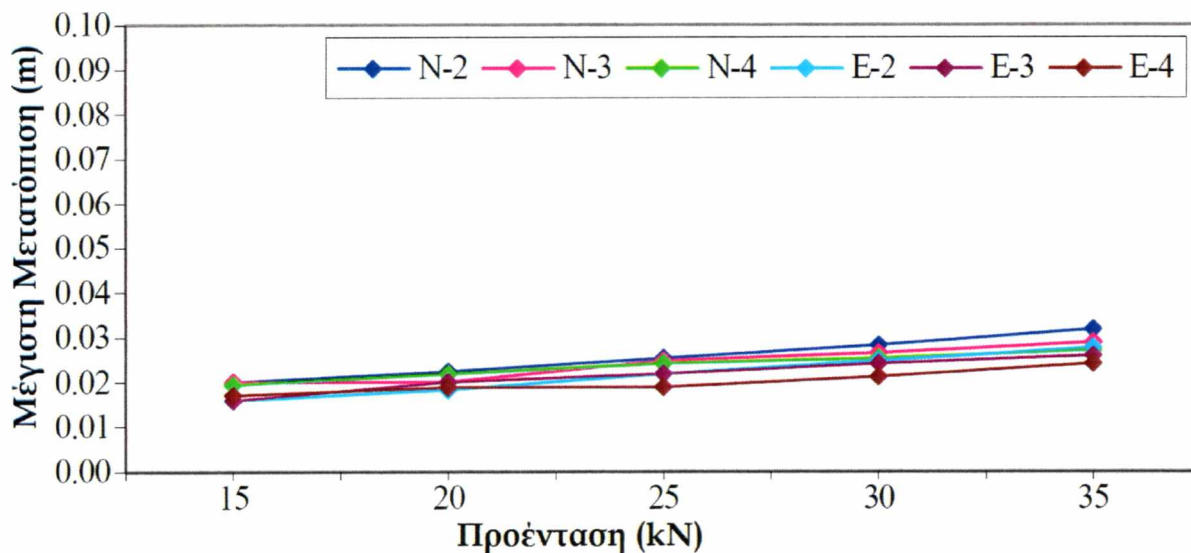
Παράρτημα Γ : Σχήματα από τα Αποτελέσματα της 1^{ης} Παραμετρικής Μελέτης



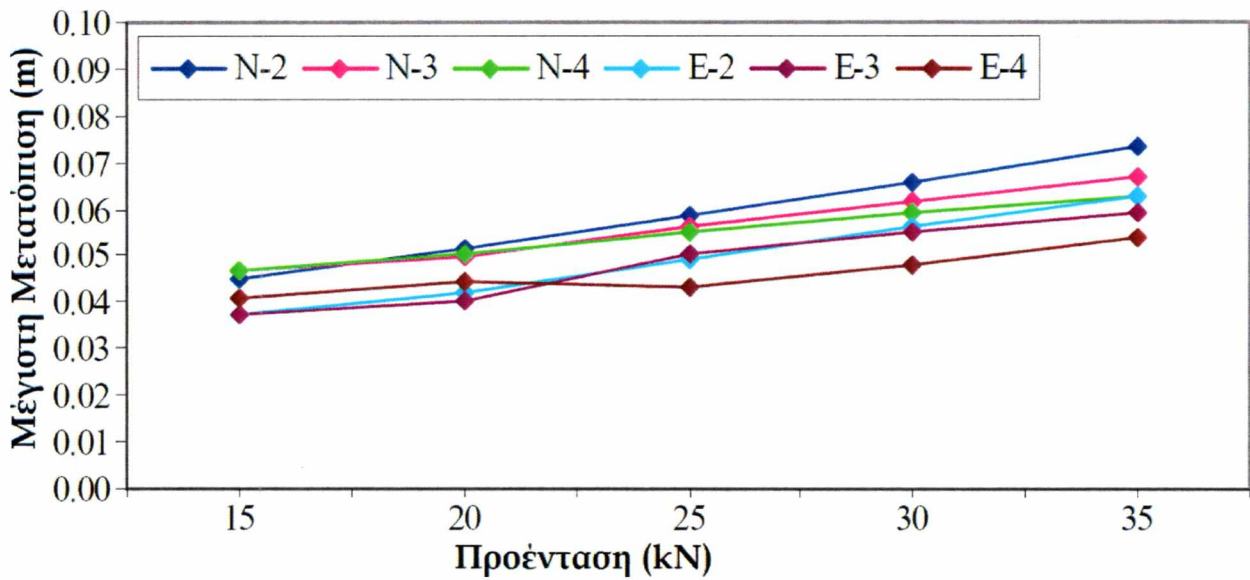
Σχήμα Γ.1. Μετατόπιση 3 στο σημείο 1



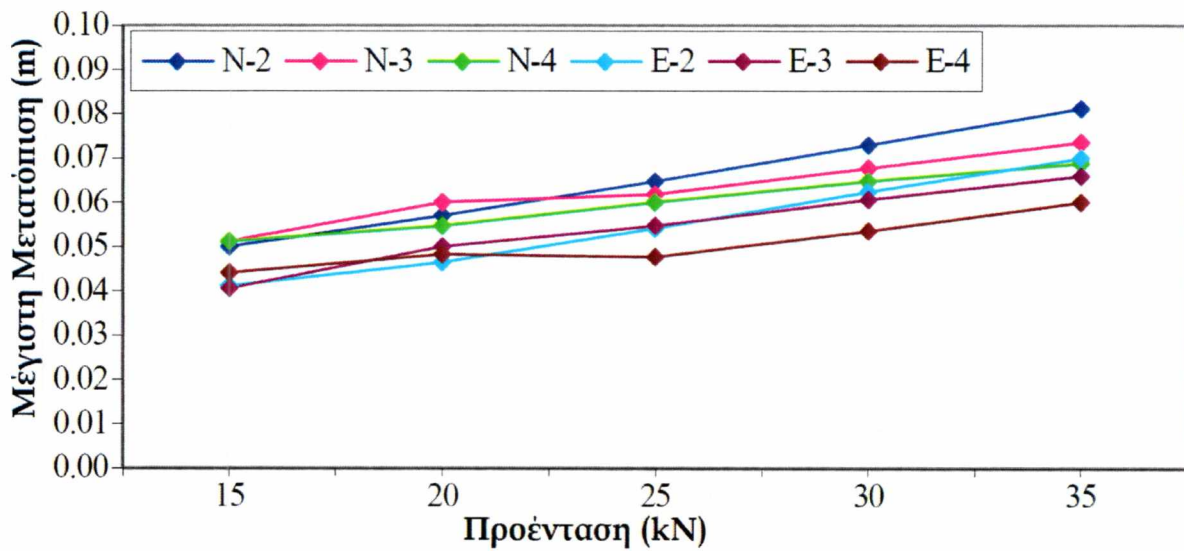
Σχήμα Γ.2. Μετατόπιση 3 στο σημείο 3



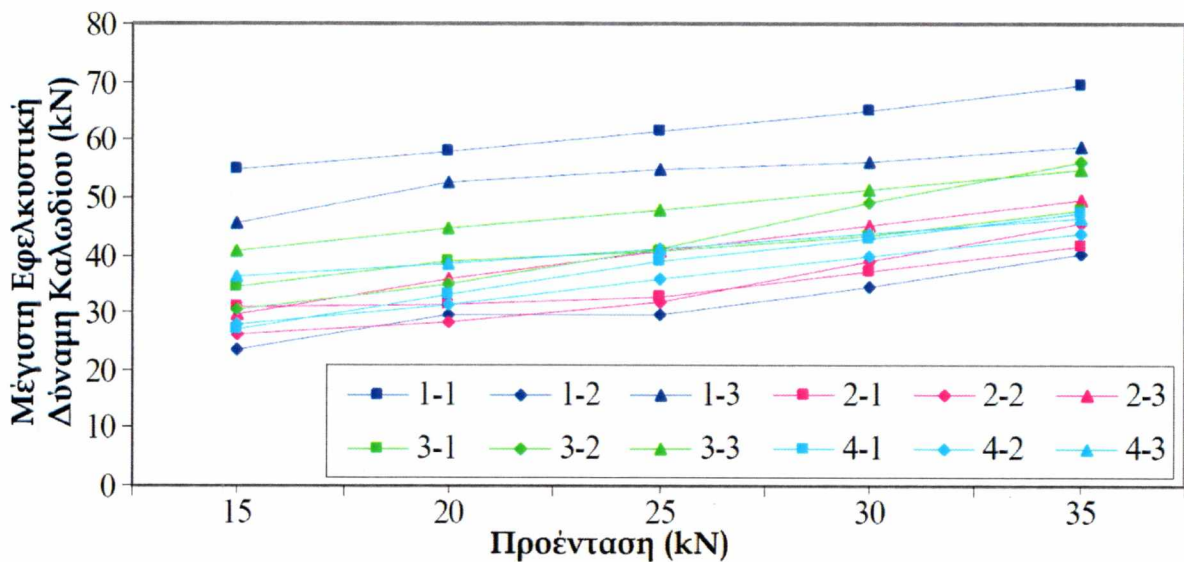
Σχήμα Γ.3. Μετατόπιση 2 στο σημείο 1



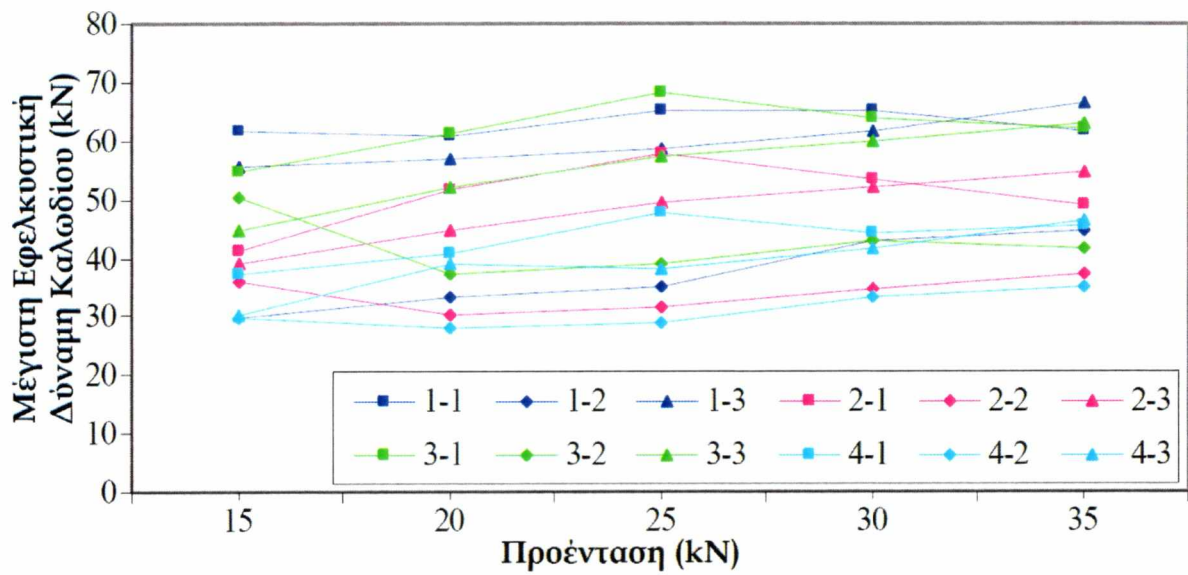
Σχήμα Γ.4. Μετατόπιση 2 στο σημείο 3



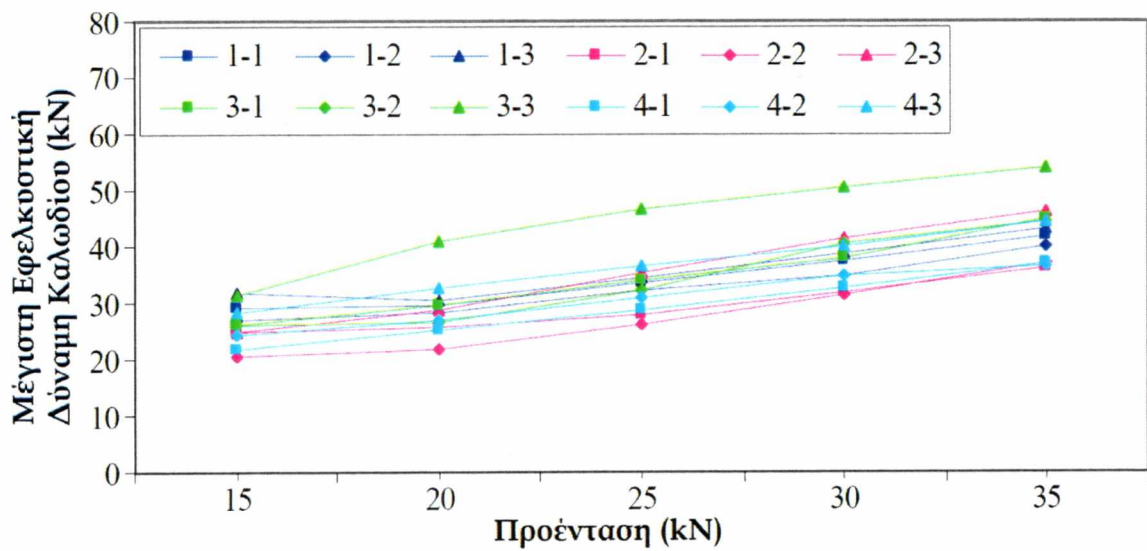
Σχήμα Γ.5. Μετατόπιση 2 στο σημείο 4



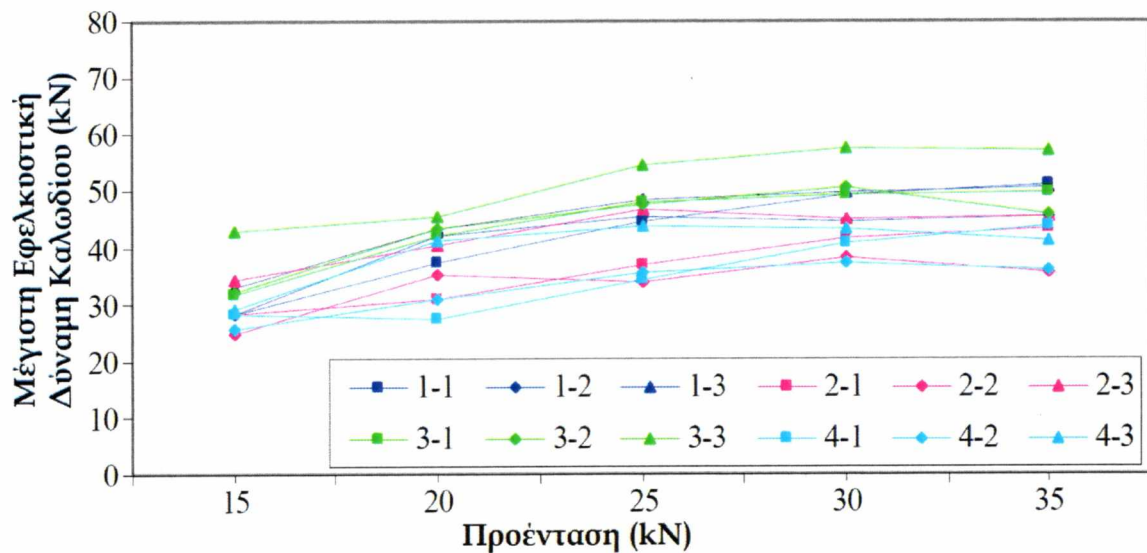
Σχήμα Γ.6. Εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων για N-2



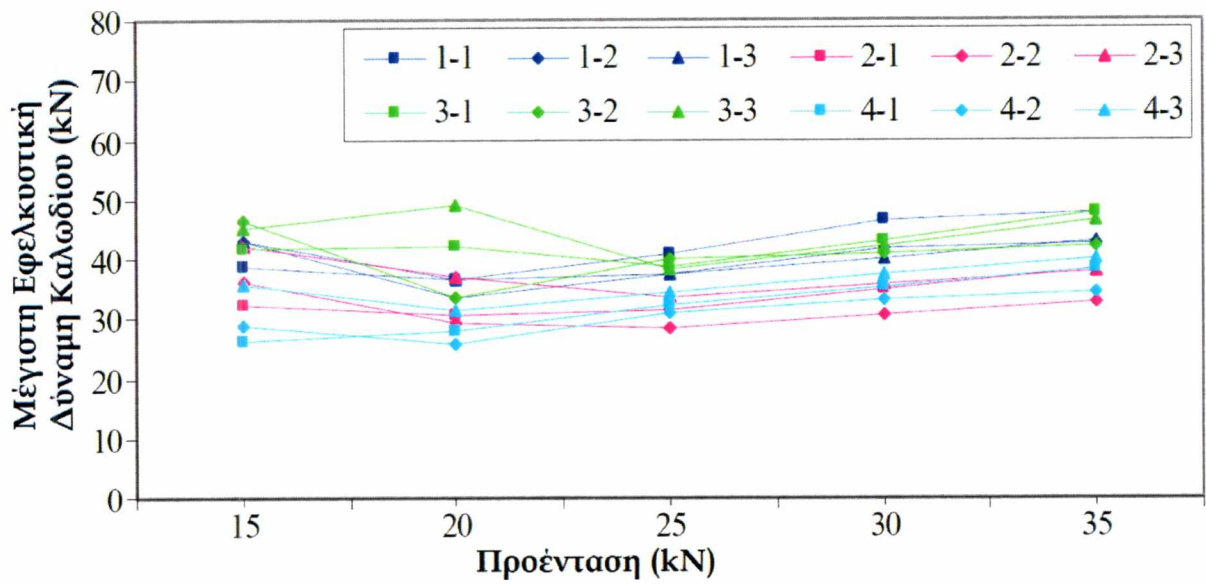
Σχήμα Γ.7. Εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων για N-4



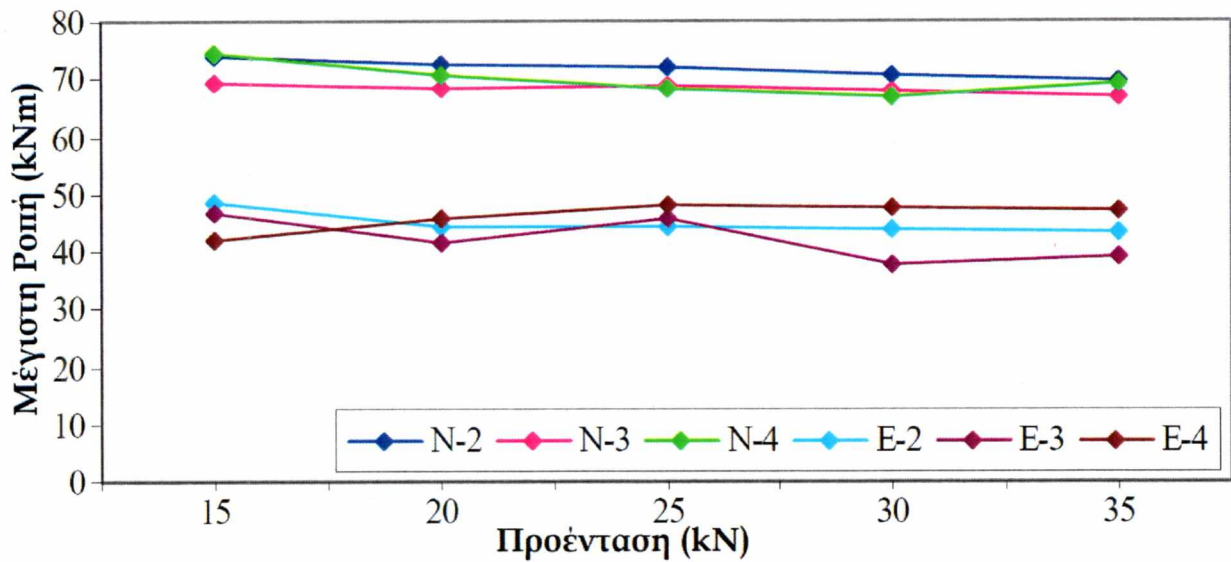
Σχήμα Γ.8. Εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων για E-2



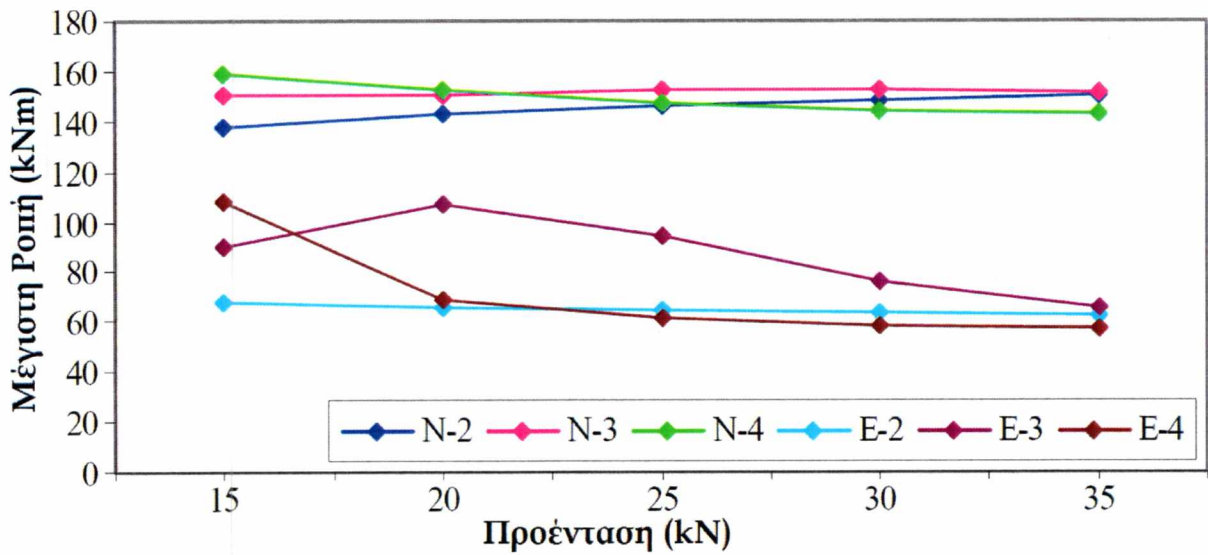
Σχήμα Γ.9. Εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων για E-3



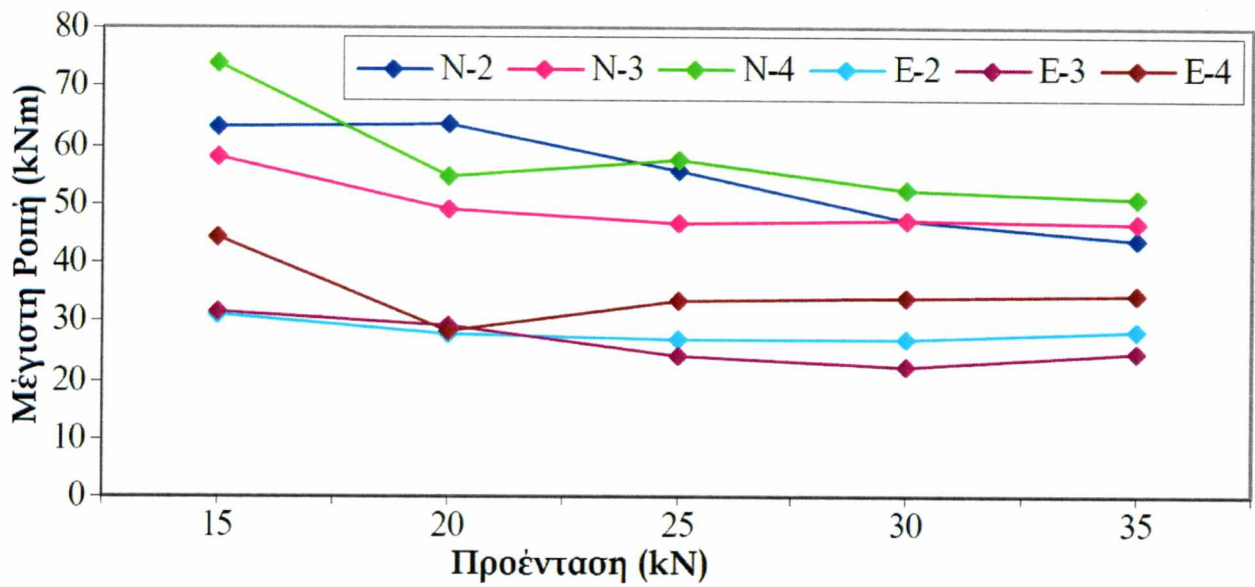
Σχήμα Γ.10. Εφελκυστικές δυνάμεις καλωδίων για E-4



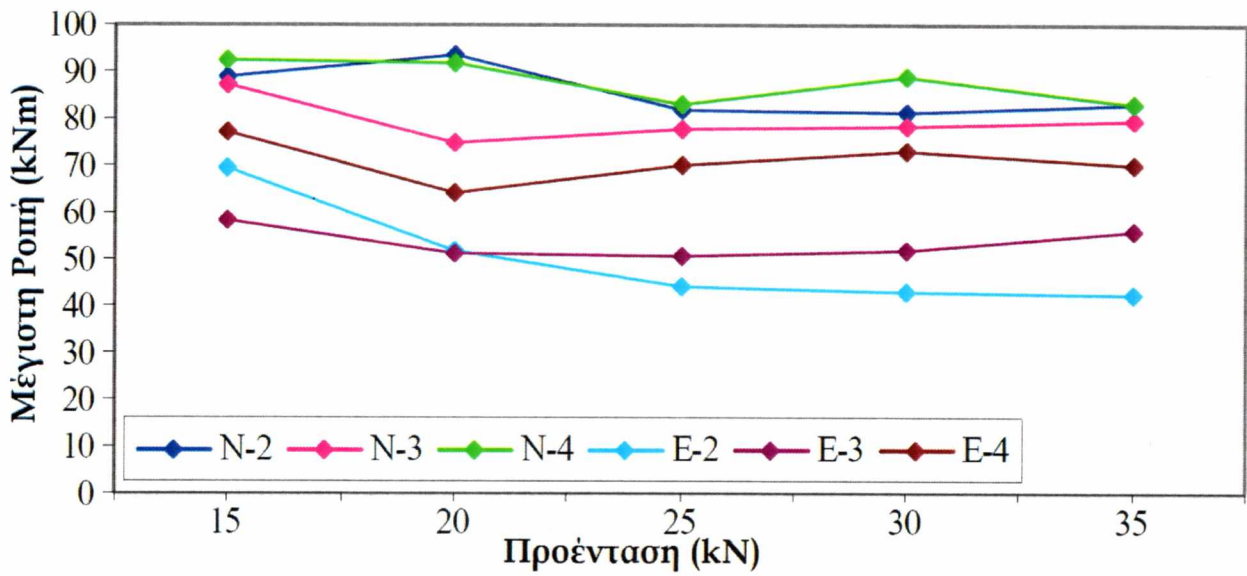
Σχήμα Γ.11. Καμπτική ροπή 1 στο σημείο 2



Σχήμα Γ.12. Καμπτική ροπή 1 στο σημείο 3



Σχήμα Γ.13. Καμπτική ροπή 3 στο σημείο 2



Σχήμα Γ.14. Καμπτική ροπή 3 στο σημείο 3



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000115270