

Equation Chapter 1 Section 1
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ



ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΑΠΟ ΣΥΡΜΑΤΟΣΧΟΙΝΟ (WIRE ROPE)

Η Διπλωματική Εργασία
παρουσιάστηκε ενώπιον
του Διδακτικού Προσωπικού του
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Σε Μερική Εκπλήρωση
των Απαιτήσεων για το Δίπλωμα του
Πολιτικών Μηχανικών

του
Κόπανου Ζ. Δημήτριου

Επιβλέπων Καθηγητής: Παναγιώτης Τσόπελας- Αναπληρωτής Καθηγητής

Βόλος – Οκτώβριος 2011



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

Αριθ. Εισ.: 9976/1
Ημερ. Εισ.: 09-11-2011
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2011
ΚΟΠ

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ ΕΠΙΚΥΡΩΝΕΙ
ΤΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ ΚΟΠΑΝΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ:

Παναγιώτης Τσόπελας Αναπληρωτής Καθηγητής, Επιβλέπων /09/2011
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Μυστακίδης Ευριπίδης Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Σοφιανόπουλος Δημήτριος Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία γίνεται η μελέτη της συμπεριφοράς ενός εναλλακτικού τρόπου μόνωσης, μέσω μονωτήρων από συρματόσχοινο(wire ropes). Αρχικά αναφέρεται η έννοια της σεισμικής μόνωσης και η σημασία της στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού καθώς και κάποιες εφαρμογές σε κατασκευές. Στην συνέχεια περιγράφεται ένα πείραμα που έγινε για την μελέτη της συμπεριφοράς των συγκεκριμένων μονωτήρων, οι οποίοι είναι ευρέως διαδεδομένοι στον κλάδο των μηχανολόγων μηχανικών. Έπειτα περιγράφεται η εφαρμογή τους σε μία υφιστάμενη κατασκευή, συγκεκριμένα σε μία ήδη σεισμικά μονωμένη γέφυρα, και η συμπεριφορά τους σε περίπτωση σεισμού. Για τη καλύτερη μελέτη της συμπεριφοράς του νέου συστήματος μόνωσης, έγινε ανάλυση για 10 διαφορετικούς σεισμούς 5 τεχνητούς και 5 πραγματικούς. Επίσης έγινε παραμετρικός έλεγχος για συστήματα μόνωσης από συρματόσχοινο με διαφορετικά χαρακτηριστικά (συγκεκριμένα, διαφορετική τιμή πρόσθετης αξονικής δύναμης). Τέλος αναφέρονται τα συμπεράσματα που λήφθηκαν όσον αφορά την συμπεριφορά του συστήματος μόνωσης και του μεσόβαθρου στο οποίο εδράζεται.

© 2011

ΤΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Ζ. ΚΟΠΑΝΟΥ

στους γονείς μου
και στον αδερφό μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Τσόπελα Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος πολιτικών μηχανικών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ο οποίος με τις επιστημονικές του γνώσεις και την καθοδήγησή του, με βοήθησε σημαντικά στον σχεδιασμό της Διπλωματικής μου εργασίας. Οδηγός για την εκπόνηση της εργασίας μου υπήρξε έρευνα του κ. Τσόπελα η οποία έγινε στο πανεπιστήμιο Buffalo της Ν. Υόρκης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που είχα κατά την διάρκεια των σπουδών μου και για ό,τι μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μηχανικούς του γραφείου Π. ΜΑΚΡΙΔΗΣ + ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Α.Ε. ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ που με την εμπειρία τους και τις γνώσεις τους στο επάγγελμα του μηχανικού με γέμισαν με εφόδια κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vi
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.1 Σεισμική μόνωση (<i>seismic isolation</i>)	15
1.1.1 Στόχος.....	16
1.1.2 Απαιτήσεις συστήματος σεισμικής μόνωσης.....	17
1.1.3 Τύποι σεισμικών μονωτήρων	18
1.1.4 Πλεονεκτήματα σεισμικής μόνωσης	20
1.2 Μόνωση έναντι κραδασμών-ταλαντώσεων (<i>vibration isolation</i>).....	21
1.2.1 Έννοια και τύποι ταλάντωσης.....	21
1.2.2 Μόνωση και η φυσική της αρχή.....	22
1.3 Μόνωση έναντι κραδασμών στην επιστήμη του μηχανικού.....	24
1.4 Σεισμική μόνωση σε γέφυρες	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Wire ropes (μονωτήρες από συρματόσχοινο)	30
2.1 Γενικές πληροφορίες	30
2.2 Χρήση των wire ropes στην σεισμική μόνωση (πείραμα)	32
2.3 Συμπεράσματα	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Εφαρμογή σε γέφυρα.....	39
3.1 Περιγραφή γέφυρας.....	39
3.2 Μοντελοποίηση.....	44
3.3 Τα δεδομένα	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Σεισμικές διεγέρσεις.....	50
4.1 Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα	50
4.2 Φυσικά επιταχυνσιογραφήματα.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	58
5.1 Σύστημα μόνωσης	58
5.2 Μεσόβαθρα.....	61
5.3 Αναλυτική περιγραφή μεταβολής δύναμης-μετατόπισης(σύστημα μόνωσης).....	63
5.3.1 Για έναν τεχνητό σεισμό (E 1111).....	63
5.3.2 Για έναν φυσικό σεισμό (Imperial valley).....	69
5.3.3 Σχόλια.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Συμπεράσματα	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - Διαγράμματα - Πίνακες	80
Μεσόβαθρα με ελαστομεταλλικά εφέδρανα και εφέδρανα τριβής.....	80
Διαγράμματα για τον σεισμό E1111.....	80
Διαγράμματα για τον σεισμό E1235.....	82
Διαγράμματα για τον σεισμό E2387.....	84
Διαγράμματα για τον σεισμό E5679.....	86
Διαγράμματα για τον σεισμό E9873.....	88
Διαγράμματα για τον σεισμό Imperial Valley.....	90
Διαγράμματα για τον σεισμό Chi-Chi	92
Διαγράμματα για τον σεισμό Kobe	94
Διαγράμματα για τον σεισμό Tabas	96

Διαγράμματα για τον σεισμό Duzce.....	98
Μεσόβαθρα με wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης (χωρίς την πρόσθετη αξονική δύναμη)	100
Διαγράμματα για τον σεισμό E1111.....	100
Διαγράμματα για τον σεισμό E1235.....	102
Διαγράμματα για τον σεισμό E2387.....	104
Διαγράμματα για τον σεισμό E5679.....	106
Διαγράμματα για τον σεισμό E9873.....	108
Διαγράμματα για τον σεισμό Imperial valley	110
Διαγράμματα για τον σεισμό Chi-Chi	112
Διαγράμματα για τον σεισμό Kobe	114
Διαγράμματα για τον σεισμό Tabas	116
Διαγράμματα για τον σεισμό Duzce.....	118
Μεσόβαθρα με wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης(πρόσθετη αξονική δύναμη N=0.5W).....	120
Διαγράμματα για τον σεισμό E1111.....	120
Διαγράμματα για τον σεισμό E1235.....	122
Διαγράμματα για τον σεισμό E2387.....	124
Διαγράμματα για τον σεισμό E5679.....	126
Διαγράμματα για τον σεισμό E9873.....	128
Διαγράμματα για τον σεισμό Imperial Valley.....	130
Διαγράμματα για τον σεισμό Chi-Chi	132
Διαγράμματα για τον σεισμό Kobe	134
Διαγράμματα για τον σεισμό Tabas	136
Διαγράμματα για τον σεισμό Duzce.....	138
Μεσόβαθρα με wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης(πρόσθετη αξονική δύναμη N=W).....	140
Διαγράμματα για τον σεισμό E1111.....	140
Διαγράμματα για τον σεισμό E1235.....	142
Διαγράμματα για τον σεισμό E2387.....	144
Διαγράμματα για τον σεισμό E5679.....	146
Διαγράμματα για τον σεισμό E9873.....	148
Διαγράμματα για τον σεισμό Imperial Valley.....	150
Διαγράμματα για τον σεισμό Chi-Chi	152
Διαγράμματα για τον σεισμό Kobe	154
Διαγράμματα για τον σεισμό Tabas	156
Διαγράμματα για τον σεισμό Duzce.....	158
Μεσόβαθρα με wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης(πρόσθετη αξονική δύναμη N=1.5W).....	160
Διαγράμματα για τον σεισμό E1111.....	160
Διαγράμματα για τον σεισμό E1235.....	162
Διαγράμματα για τον σεισμό E2387.....	164
Διαγράμματα για τον σεισμό E5679.....	166
Διαγράμματα για τον σεισμό E9873.....	168
Διαγράμματα για τον σεισμό Imperial valley	170
Διαγράμματα για τον σεισμό Chi-Chi	172
Διαγράμματα για τον σεισμό Kobe	174

Διαγράμματα για τον σεισμό Tabas	176
Διαγράμματα για τον σεισμό Duzce	178
Μεσόβαθρα με wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης(πρόσθετη αξονική δύναμη N=2W)	180
Διαγράμματα για τον σεισμό E1111	180
Διαγράμματα για τον σεισμό E1235	182
Διαγράμματα για τον σεισμό E2387	184
Διαγράμματα για τον σεισμό E5679	186
Διαγράμματα για τον σεισμό E9873	188
Διαγράμματα για τον σεισμό Imperial valley	190
Διαγράμματα για τον σεισμό Chi-Chi	192
Διαγράμματα για τον σεισμό Kobe	194
Διαγράμματα για τον σεισμό Tabas	196
Διαγράμματα για τον σεισμό Duzce	198
Πίνακας για ελαστομεταλλικά εφέδρανα και εφέδρανα ολίσθησης	201
Πίνακας για wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης (+N=0)	202
Πίνακας για wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης (+N=0.5W)	203
Πίνακας για wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης (+N=W)	204
Πίνακας για wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης (+N=1.5W)	205
Πίνακας για wire ropes και εφέδρανα ολίσθησης (+N=2W)	206

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές της θεωρίας της δυναμικής των κατασκευών είναι η ανάλυση της απόκρισης των κατασκευών σε βίαιη εδαφική δόνηση που προκαλείται από έναν σεισμό. Ο σεισμός είναι μία ακολουθία εδαφικών μετακινήσεων (σεισμικών διεγέρσεων), οι οποίες προέρχονται από ένα σημείο του στερεού φλοιού της γης. Πρόκειται ουσιαστικά για μία ταλάντωση του εδάφους που προέρχεται από την απελευθέρωση ενέργειας εξαιτίας μιας θραύσης που συμβαίνει στην εστία. Τα κύματα διαδίδονται διαμέσου του εδάφους, το οποίο με τη σειρά του διεγείρει το δόμημα, που είναι θεμελιωμένο σ' αυτό. Προφανώς υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ δομήματος και γειτνιάζοντος εδάφους θεμελίωσης αλλά και επιρροή της ποιότητας του εδάφους στα χαρακτηριστικά των σεισμικών κυμάτων. Για αυτό το λόγο η ένταση των σεισμικών διεγέρσεων καθορίζεται συμβατικά με μία μόνη παράμετρο, την επιτάχυνση σχεδιασμού A , ανάλογα με την ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας στην οποία βρίσκεται το έργο. Ο σεισμός δεν επιβάλλει δυνάμεις στο δόμημα αλλά οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι οι εσωτερικές αντιδράσεις στις εξωτερικά επιβαλλόμενες παραμορφώσεις. Κατά το σεισμό το δόμημα υφίσταται μια μετακίνηση δυναμικής υφής, δηλαδή μεταβαλλόμενη με το χρόνο και μάλιστα με εναλλασσόμενη φορά. Η καταπόνηση των μελών δεν είναι σταθερή, μεταβάλλεται χρονικά και μάλιστα επηρεάζεται από την ίδια τη συμπεριφορά του φορέα. Βασικά οι σεισμικές δυνάμεις προκύπτουν λόγω της αντίστασης του φορέα, στο να παρακολουθήσουν οι μάζες του την κίνηση που μεταδίδεται σ' αυτόν, μέσω της σύνδεσής του (θεμελίωσης) με το ταλαντευόμενο έδαφος.

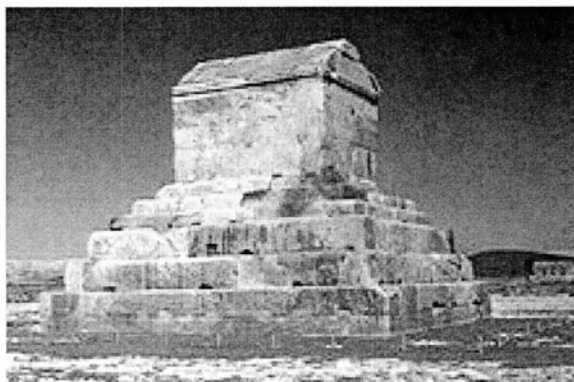
Για την αντιμετώπιση του προβλήματος που προκύπτει, δημιουργήθηκε η μόνωση των κατασκευών από σεισμό. Η έννοια της μόνωσης των κτιρίων από τις σεισμικές δράσεις είναι γνωστή από τους αρχαίους χρόνους. Στις ελληνικές αποικίες της νότιας Ιταλίας του 5^{ου} π.χ. αιώνα τοποθετούσαν ανάμεσα στη θεμελίωση και την ανωδομή ένα στρώμα άμμου, το οποίο αποτελεί το πρώτο αρχειοθετημένο εφέδρανο. Στη σύγχρονη εποχή η σεισμική μόνωση άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως σε γέφυρες από την αρχή της δεκαετίας του '70 και σε κτίρια από τα τέλη της δεκαετίας του '70, αν και υπάρχουν παραδείγματα σεισμικά μονωμένων κατασκευών πολύ νωρίτερα. Στην πραγματικότητα η σεισμική μόνωση κτιρίων είναι μια μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί και πολύ παλαιότερα. Παραδείγματα σεισμικά μονωμένων κτιρίων είναι οι ιαπωνικές παγόδες. Στις παγόδες κάθε όροφος είναι ένα κουτί που εδράζεται πάνω στον αμέσως προηγούμενο όροφο και πάνω του εδράζεται ο αμέσως επόμενος όροφος. Στο κέντρο των ορόφων και σε όλο το ύψος της παγόδας υπάρχει ένας ισχυρός κατακόρυφος στύλος ο οποίος δεν είναι πουθενά συνδεδεμένος με τους ορόφους. Επίσης στην Κίνα υπήρχαν μικρά μονώροφα κτίρια τα οποία εδράζονταν πάνω σε μια λεπτή στρώση άμμου και δεν ήταν μονολιθικά συνδεδεμένα με το έδαφος. Αυτές οι κατασκευές έχουν συμπεριφερθεί άριστα στους μεγάλους σεισμούς που έχουν υποστεί. Οι πρώτες καταγεγραμμένες μελέτες σεισμικά μονωμένων κτιρίων έγιναν από τον

Δρ. Calantarients, Άγγλος στην καταγωγή το 1904 (Kelly 1999). Στην Ελλάδα η σεισμική μόνωση εισήχθη από τον καθηγητή Αρ. Οικονόμου την περίοδο 1968-1977 με το «Αλεξίσεισμο» (Οικονόμου 1972).

Παράδειγμα σεισμικά μονωμένου κτιρίου είναι το Νέο Μουσείο Ακρόπολης. Το Νέο Μουσείο Ακρόπολης εδράζεται πάνω σε εφέδρανα. Έτσι επιτυγχάνεται προστασία και του φέροντος οργανισμού του μουσείου και του ανεκτίμητου και αναντικατάστατου περιεχομένου του από έναν καταστροφικό σεισμό. Αυτή η ταυτόχρονη προστασία και του κτιρίου και του περιεχόμενου δεν μπορεί να επιτευχθεί παρά μόνο με τη σεισμική μόνωση. Άλλα παραδείγματα είναι η Ωνάσειος στέγη γραμμάτων και τεχνών και οι δεξαμενές αποθήκευσης φυσικού αερίου στη Ρεβυθούσα.

Δυστυχώς στην Ελλάδα δεν έχει ανθίσει η σεισμική μόνωση κυρίως λόγω έλλειψης εμπειρίας και τεχνογνωσίας αλλά και για οικονομικούς λόγους. Επίσης επικρατεί η άποψη ότι ο σχεδιασμός με βάση τους ισχύοντες Αντισεισμικούς Κανονισμούς είναι απόλυτα ασφαλής καθώς δεν θα δημιουργηθούν σημαντικές βλάβες στον φέροντα οργανισμό. Παρόλα αυτά, πολύ καλά μελετημένα κτίρια σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει ο ΕΑΚ μπορεί να υποστούν μεγάλες μη επιδιορθώσιμες βλάβες όταν δεχθεί ενέργεια από έναν πολύ ισχυρό σεισμό.

Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό σεισμικά μονωμένων κατασκευών (ή τουλάχιστον προσπάθειες για σεισμική μόνωση) τόσο στην Ελλάδα όσο και στον υπόλοιπο κόσμο από τα αρχαία χρόνια μέχρι σήμερα.



Ο τάφος του Κύρου, η παλαιότερη σεισμικά μονωμένη κατασκευή



Ξύλινη πενταόροφη παγόδα στην Ιαπωνία χτισμένη τον 7^ο αιώνα

Νοσοκομείο USC California



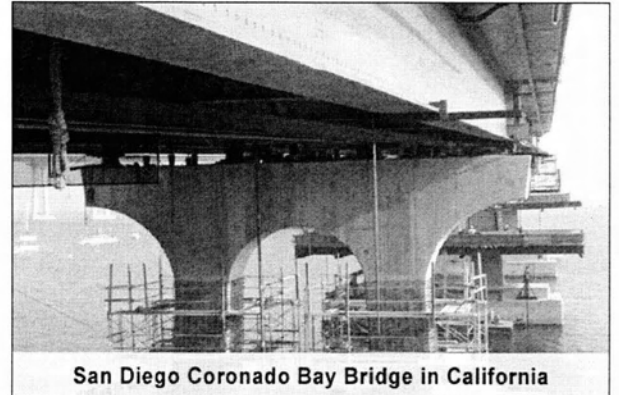
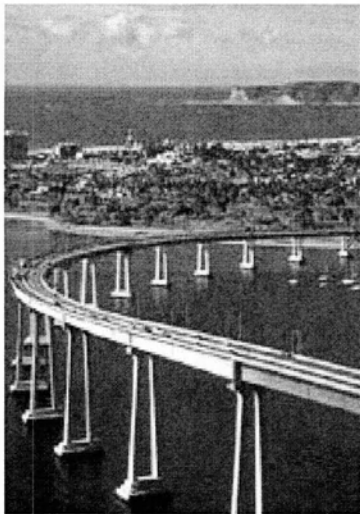
Κατασκευάστηκε με σεισμική μόνωση βάσης. Στον ισχυρό σεισμό Northridge 1994, δεν υπέστη καμία βλάβη και δεν διακόπηκε η λειτουργία του

Christchurch Women's Hospital New Zealand



Στις 4 Σεπτεμβρίου 2010 έγινε ένας σεισμός μεγέθους 7.1 με επίκεντρο την πόλη Christchurch της Νέας Ζηλανδίας. Λόγω του σεισμού τουλάχιστον 500 κτίρια κατέρρευσαν ή έπαθαν ζημιές που τα καθιστούν ακατάλληλα για χρήση. Ο σεισμός προκλήθηκε από την πρόσκρουση των τεκτονικών πλακών του Ειρηνικού και της Αυστραλίας. Το σεισμικά μονωμένο νοσοκομείο της περιοχής Christchurch Women's Hospital δεν παρουσίασε βλάβες και συνέχισε απρόσκοπτα τη λειτουργία του. Η μετακίνηση στα εφέδρανα ήταν περίπου 100mm, ενώ ο σχεδιασμός τους επιτρέπει μετακινήσεις έως 450mm. Τα εφέδρανα σεισμικής μόνωσης είναι ελαστομεταλλικά με πυρήνα μολύβδου (LRB).

San Diego Coronado Bay Bridge in California



San Diego Coronado Bay Bridge in California

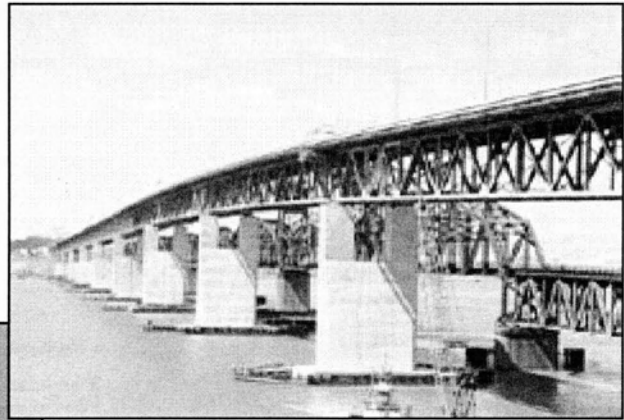
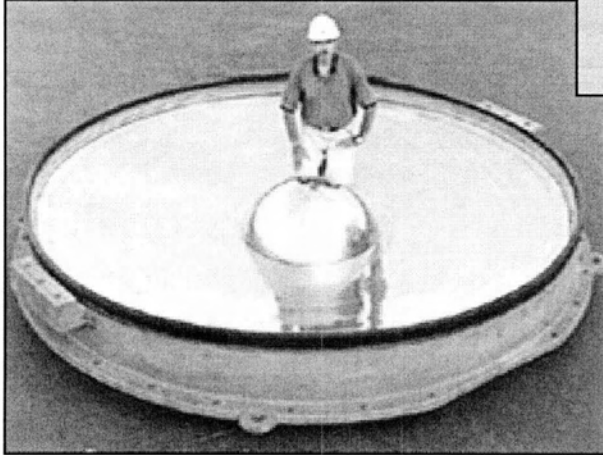


San Diego Coronado Bay Bridge isolator installation

Τα εφέδρανα σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να δεχτούν μετατοπίσεις της τάξεως των 1,2 μέτρων. Δοκιμάστηκαν στο πανεπιστήμιο του San Diego της California και ήταν οι πρώτες δοκιμές που έγιναν με πραγματικές ταχύτητες σεισμού.

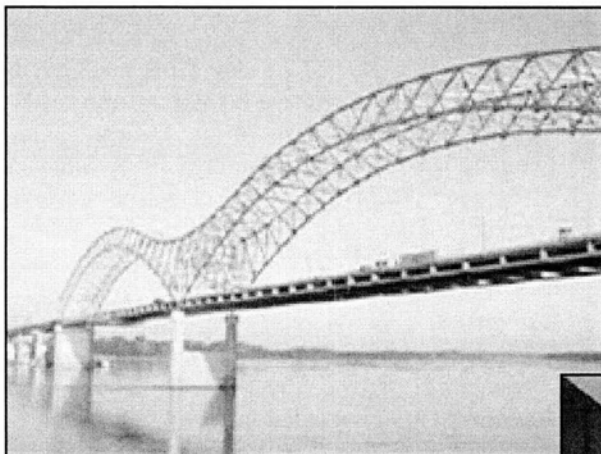
Γέφυρα Benicia-Martinez, San Francisco California

Είναι μία από τις τρεις πιο σημαντικές γέφυρες Του San Francisco μεγάλης ζωτικής σημασίας και η μόνωσή της έναντι σεισμών ήταν απαραίτητη. Τα εφεδράνα ολίσθησης που έχουν επιλεγεί επιτυγχάνουν ελαστική παραμόρφωση για τον σεισμό σχεδιασμού, ο οποίος περιλαμβάνει πολύ μεγάλες μετατοπίσεις εδάφους. Η χρήση των εφεδράνων τριβής μείωσε το κόστος κατασκευής κατά 30 εκ. δολάρια.



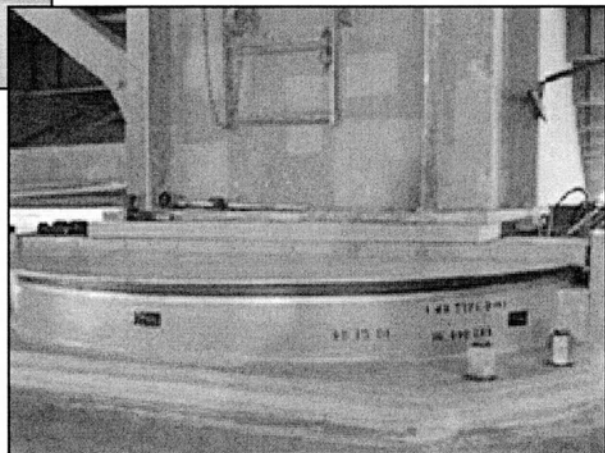
Η συγκεκριμένη γέφυρα κατέχει το ρεκόρ μεγέθους σε εφεδράνα σφαιρικής ολίσθησης. Αναλυτικότερα έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: περίοδο 5 sec, δυνατότητα μετατόπισης 1,34 μ, διάμετρο 4,30 μ. και βάρος 18 τόνων.

Γέφυρα του Mississippi, Tennessee

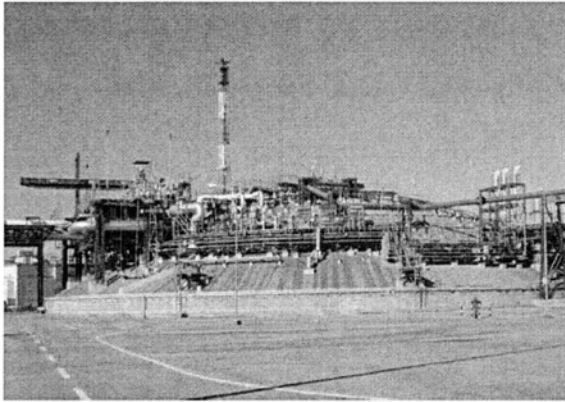
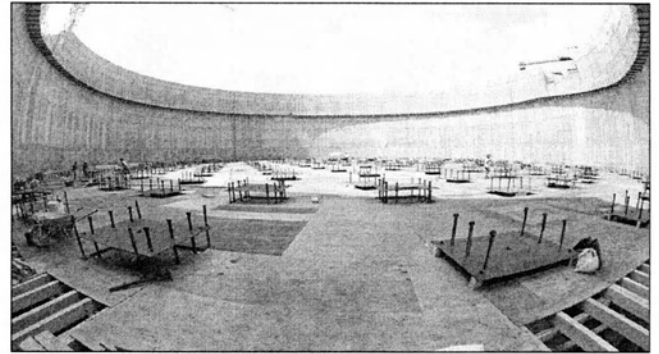
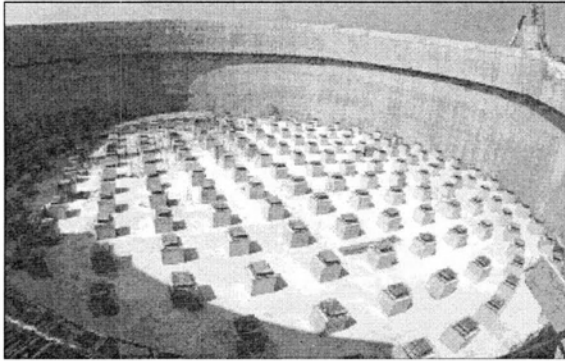


Αυτή η κατασκευή είναι πολύ σημαντική για την περιοχή του Memphis καθώς εξυπηρετεί τόσο συγκοινωνιακούς όσο και εμπορικούς σκοπούς. Βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της σεισμικής Ζώνης της Νέας Μαδρίτης όπου 3 από τους πιο ισχυρούς σεισμούς έλαβαν χώρα στην κεντρική Αμερική κατά τον 19^ο αιώνα. Η τοποθέτηση των εφεδράνων έγινε μετά την κατασκευή της γέφυρας.

Η χρήση των εφεδράνων επιτρέπει λειτουργία της γέφυρας μετά από ακραίο σεισμό. Επίσης μείωσε το κόστος ανασκευής της κατά 16 εκ. δολάρια αν γινόταν με συμβατικές μεθόδους. Τα συγκεκριμένα εφεδράνα δοκιμάστηκαν στο πανεπιστήμιο της California, San Diego για ταχύτητες 54in/sec.(1,37m/sec.)

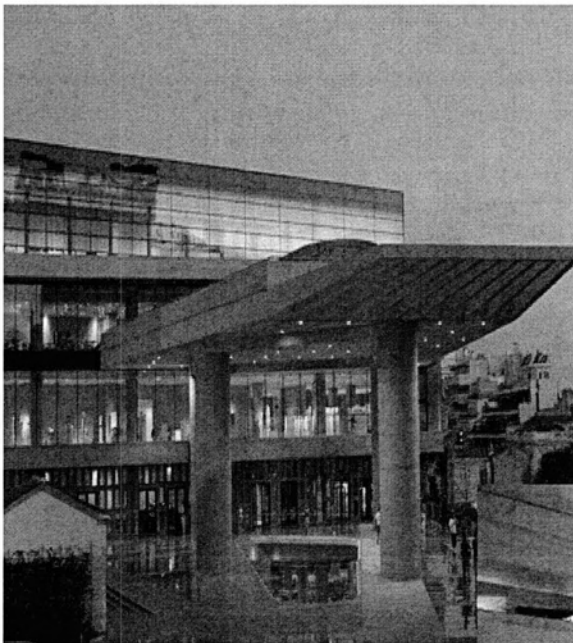


Φωτογραφίες των εγκαταστάσεων στη Ρεβυθούσα

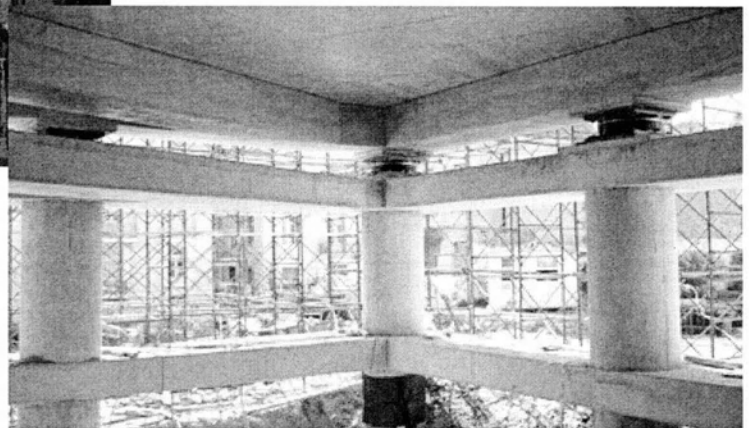


Οι δεξαμενές διαστάσεων 75 μ. (διάμετρο) και 35 μ. (ύψος) στηρίζονται επάνω σε 212 εφέδρανα. Κάθε ένα από αυτά έχει: κάθετο φορτίο 900 τόνων, δυναμική περίοδο των 2.75 sec., τριβή 5%, δυνατότητα μετατόπισης 30.5 εκ. και ζυγίζει 1,8 τόνους. Η ολική χωρητικότητα τους ανέρχεται στα 173 εκ. λίτρα, και αποτελούν τις μεγαλύτερες αλλά και τις βαρύτερες σεισμικά μονωμένες δεξαμενές του κόσμου.

Φωτογραφίες από το μουσείο της Ακρόπολης



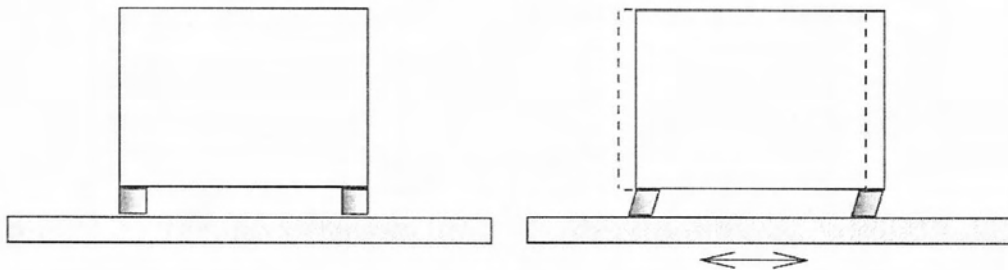
Το σύστημα σεισμικής μόνωσης περιλαμβάνει 94 εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς, από τον ίδιο προμηθευτή, όπως και στην Ωνάσειο Στέγη Γραμμάτων και Τεχνών (Maurer-Soehne Structural Protection). Το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης βρίσκεται κάτω από την πλάκα σκυροδέματος διαστάσεων 110m x 70m που στηρίζει το ύψους 40m τετραώροφο κτίριο, το οποίο σε μερικά χρόνια θα στεγάζει τα μάρμαρα του Παρθενώνα. Τα εφέδρανα είναι σχεδιασμένα να αναλαμβάνουν κατακόρυφο φορτίο 16000 KN, και έχουν δυνατότητα μέγιστης μετακίνησης +/-250mm.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σεισμική μόνωση (*seismic isolation*)

Η σεισμική μόνωση ή αλλιώς μόνωση βάσης αποτελεί ανέκαθεν αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τους μηχανικούς, οι οποίοι επεδίωκαν να απομονώσουν την κίνηση του εδάφους από την ανωδομή με στόχο τον περιορισμό κατά το δυνατό των δυνάμεων και των παραμορφώσεων που οφείλονται στην σεισμική κίνηση του εδάφους, διατηρώντας έτσι την ακεραιότητα της κατασκευής και προφυλάσσοντας τους χρήστες από τραυματισμό ή θάνατο και το περιεχόμενο από βλάβη. Οι απαιτήσεις αντισεισμικού σχεδιασμού των φορέων κατά τους ισχύοντες κανονισμούς επιβάλλουν αυξημένη παραμορφωσιμότητα και ταχεία απόσβεση των ταλαντώσεων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη απόκριση των δομικών στοιχείων στις εξωτερικά επιβαλλόμενες σεισμικές δράσεις. Με τον τρόπο αυτό οι 'επαρκώς πλαστικές' κατασκευές αντέχουν και στους πιο ισχυρούς σεισμούς. Σαν εναλλακτική στρατηγική σε μια τέτοια προσέγγιση αναπτύχθηκε η μεθοδολογία της σεισμικής μόνωσης, η οποία αποσκοπεί στην απομόνωση της ανωδομής από τη σεισμική κίνηση του εδάφους. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ειδικών συσκευών μικρής δυσκαμψίας, τους μονωτήρες. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1 η καταλληλότερη θέση για να τοποθετηθούν οι μονωτήρες είναι η διεπιφάνεια μεταξύ των υποστυλωμάτων και των θεμελίων του κτιρίου. Το τμήμα της κατασκευής πάνω από την στάθμη που τοποθετούνται οι μονωτήρες αποτελεί την ανωδομή ενώ κάτω από την στάθμη τους βρίσκεται το τμήμα της υποδομής, το οποίο ουσιαστικά μετακινείται μαζί με το έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο η ανωδομή συμπεριφέρεται ελαστικά σε ισχυρό σεισμό.



Σχήμα 1.1 Αρχή λειτουργίας σεισμικής μόνωσης



Εικόνα 1.1 Επίδειξη σεισμικής μόνωσης σε μουσείο του Chicago

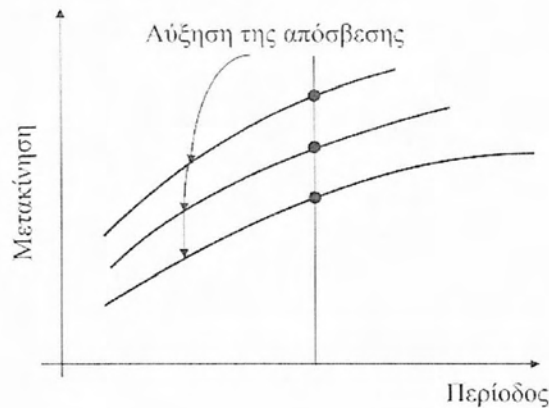
1.1.1 Στόχος

Η σεισμική μόνωση είναι μια διαφορετική προσέγγιση για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών, η οποία έχει ως στόχο την μείωση της σεισμικής απαίτησης και όχι την αύξηση της σεισμικής αντοχής μιας κατασκευής. Συγκεκριμένα η σύγχρονη τεχνολογία της σεισμικής μόνωσης επιτυγχάνει πενταπλάσια έως και δεκαπλάσια μείωση του μεγέθους των σεισμικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή στη περίπτωση ισχυρής σεισμικής δόνησης. Μια τέτοια μείωση αποτρέπει την κατάρρευση της κατασκευής σε ισχυρό σεισμό αλλά επίσης συμβάλλει και στον περιορισμό των βλαβών που μπορούν να προκαλέσουν σεισμοί με μικρότερη ένταση. Η μείωση της σεισμικής απαίτησης επιτυγχάνεται με αύξηση της ιδιοπερίοδου των κατασκευών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2 καθώς η περίοδος αυξάνει η μεταδιδόμενη σεισμική δύναμη μειώνεται με ταυτόχρονη αύξηση της πλευρικής μετακίνησης.



Σχήμα 1.2 Μεταβολή σεισμικής δύναμης και μετατόπισης λόγω σεισμού

Ο περιορισμός αυτών των μεγάλων κινήσεων της κατασκευής επιτυγχάνεται συνήθως με αύξηση της απόσβεσης (σχήμα 1.3). Με την παρουσία των μονωτήρων το κτίριο κινείται πολύ πιο αργά σε σύγκριση με τα διαδιδόμενα στο έδαφος σεισμικά κύματα και μειώνεται η πιθανότητα συντονισμού που μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες μετακινήσεις στο κτίριο και πιθανή κατάρρευση.



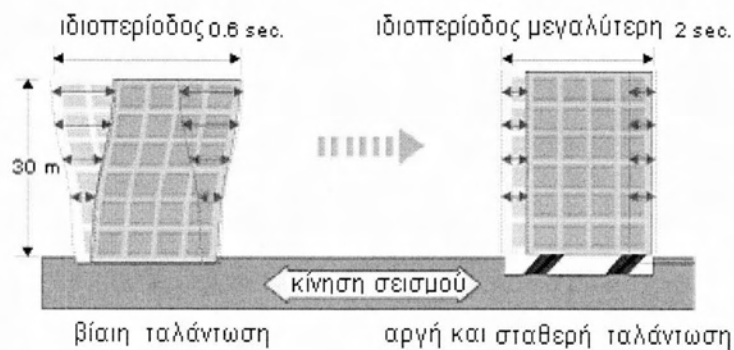
Σχήμα 1.3 Μεταβολή της μετακίνησης λόγω αύξησης της απόσβεσης

1.1.2 Απαιτήσεις συστήματος σεισμικής μόνωσης

Ένα σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω κριτήρια. Καταρχήν θα πρέπει ένα τέτοιο σύστημα να παρέχει πλευρική ευκαμψία στην κατασκευή για ισχυρή σεισμική δόνηση αλλά και να παραμένει πρακτικά άκαμπτο για συνήθη πλευρικά φορτία όπως ανεμοπιέσεις και σεισμούς μικρής έντασης. Επίσης τα κτίρια πρέπει να παραμένουν αμετακίνητα για τα συνήθη κατακόρυφα φορτία. Η κατασκευή πρέπει να είναι σχετικά δύσκαμπτη για να εμποδίσει τη διασπορά ενέργειας στην ανωδομή και να την περιορίσει στο σύστημα σεισμικής μόνωσης που βρίσκεται στη βάση.

Γενικά για την επιλογή ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης είναι επιθυμητό να πληρούνται και οι παρακάτω προϋποθέσεις χωρίς να είναι περιοριστικές.

- Το έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής να μην ευνοεί εδαφικές δονήσεις πλούσιες σε μεγάλες περιόδους, γεγονός που χαρακτηρίζει τα «μαλακά» εδάφη.
- Η κατασκευή η οποία μονώνεται σεισμικά να είναι σχετικά δύσκαμπτη, δηλαδή να έχει ιδιοπερίοδο μικρότερη από 1,5 έως 2sec, γεγονός που χαρακτηρίζει τις δύσκαμπτες κατασκευές αλλά και ένα ευρύ φάσμα σχετικά εύκαμπτων κατασκευών.
- Τέλος το μέγεθος των ανεμοφορτίων σχεδιασμού καθώς και των υπόλοιπων μη σεισμικών πλευρικών φορτίων να μην ξεπερνά το 10 % του βάρους του κτιρίου.

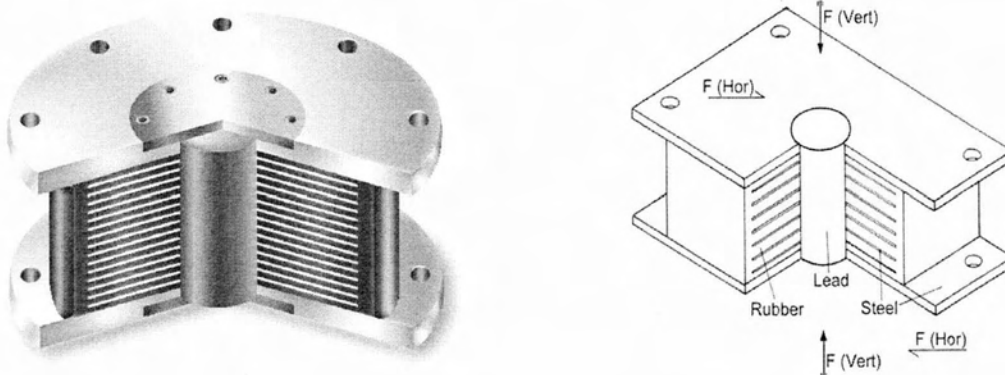


Εικόνα 1.2 Αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής

1.1.3 Τύποι σεισμικών μονωτήρων

Όλα τα εν χρήση συστήματα διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους. Ο πρώτος περιλαμβάνει τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα και ο δεύτερος τα συστήματα ολίσθησης με τριβή.

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα λειτουργούν ως ένα στρώμα με μικρή οριζόντια ακαμψία που παρεμβάλλεται μεταξύ εδάφους και ανωδομής. Επιτρέπουν σχετική μετατόπιση που μπορεί να φτάσει τα 30-40 cm. Η κατακόρυφη ακαμψία τους είναι πολύ μεγάλη ώστε να θεωρούνται πρακτικά απαραμόρφωτα, όταν υποβάλλονται σε μεγάλα κατακόρυφα φορτία. Έχουν συνήθως κυλινδρικό σχήμα και μικρό ύψος και κατασκευάζονται από στρώματα σκληρού υλικού (καουτσούκ ή νεοπρέν) τα οποία εναλλάσσονται με χαλύβδινες πλάκες. Επειδή η απόσβεση του ελαστικού είναι μικρή, χρησιμοποιούνται μηχανικοί αποσβεστήρες ή υδραυλικοί αποσβεστήρες ή πυρήνες μολύβδου στα ελαστομεταλλικά εφέδρανα. Τα τελευταία είναι γνωστά με το όνομα LRB (Lead Rubber Bearings). Οι μεταλλικοί αποσβεστήρες απορροφούν ενέργεια δια της διαρροής, καθιστούν όμως τη συμπεριφορά του εφεδράνου μη γραμμική που περιγράφεται από διγραμμικό μοντέλο.



Εικόνα 1.3 Τομή ελαστομεταλλικού εφεδράνου

Ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί κύλιτρα ή ολισθητήρες μεταξύ του εδάφους και της ανωδομής. Η διατμητική δύναμη, η οποία μεταβιβάζεται μέσω της διεπιφάνειας της μονώσεως, περιορίζεται σημαντικά δια μείωσης του συντελεστή τριβής όσο είναι πρακτικά εφικτό. Παρόλα αυτά η τριβή δεν πρέπει να εκμηδενιστεί ώστε να εμποδίζονται οι μετακινήσεις από άνεμο ή από μικρής έντασης σειμούς, πράγμα το οποίο μειώνει την αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης. Σ' αυτό τον τύπο μόνωσης οι μετατοπίσεις ελέγχονται με ελατήρια ή με ελαστομερή εφέδρανα ή ακόμη κοίλες επιφάνειες ολίσθησης. Πολλά συστήματα ολίσθησεως έχουν προταθεί και μερικά έχουν χρησιμοποιηθεί. Ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει ορειχάλκινη πλάκα που ολισθαίνει πάνω σε επιφάνεια από ανοξείδωτο χάλυβα. Το εκκρεμές τριβής είναι ένα άλλο σύστημα που χρησιμοποιεί ειδικό υλικό διεπιφάνειας που κυλιέται σε κοίλη επιφάνεια από ανοξείδωτο χάλυβα. Το σύστημα αυτό λόγω ανυψώσεως της κατασκευής προκαλεί δυνάμεις που την επαναφέρουν στην αρχική της θέση

ισορροπίας μετά από μετατόπιση. Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών με μόνωση ολίσθησης είναι αρκετά πολύπλοκη λόγω της μη γραμμικότητας της διαδικασίας ολίσθησης.



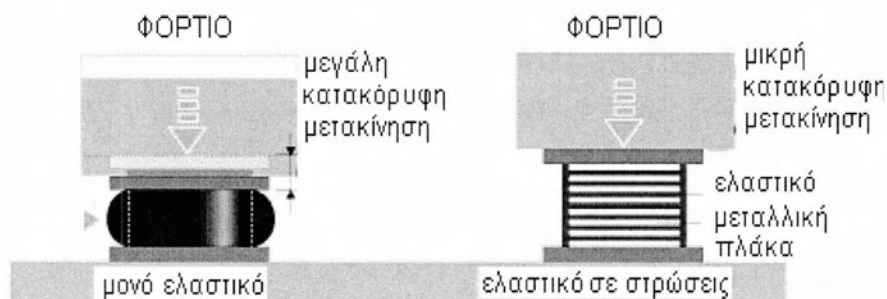
Εικόνα 1.4 Εφέδρανα ολίσθησης (τριβής)

Τα συμπεράσματα που μπορούμε να βγάλουμε είναι τα εξής:

Τα συστήματα μόνωσης μειώνουν την ακαμψία και αυξάνουν την απόσβεση. Η μείωση της ακαμψίας έχει σκοπό να απομακρύνει τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής από τη χαρακτηριστική περίοδο της κινήσεως του εδάφους. Οι μονωμένες κατασκευές έχουν θεμελιώδεις ιδιοπερίόδους ταλαντώσεων σε σύγκριση με αυτές των περισσοτέρων σεισμικών κινήσεων. Η αύξηση της απόσβεσης μειώνει τις μετακινήσεις στα εφέδρανα και αποτρέπει τον κίνδυνο λυγισμού τους. Εντούτοις υπερβολική απόσβεση μπορεί να εισάγει δυνάμεις στη κατασκευή που αυξάνουν τις παραμορφώσεις στις υψηλότερες ιδιομορφές.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Δουδούμης 2006) και περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί από εμάς, για τα περισσότερα κτίρια η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης κοστίζει περίπου 2-10% επιπλέον από μια συμβατική κατασκευή. Όμως η συμβατική κατασκευή παρέχει μια περιορισμένη προστασία σε ένα ισχυρό σεισμό εξασφαλίζοντας μόνο τη μη κατάρρευση του κτιρίου. Δεν προστατεύει το κτίριο από ζημιές στο φέροντα οργανισμό. Επίσης δεν προστατεύει το περιεχόμενο του κτιρίου και τα δευτερεύοντα μη φέροντα στοιχεία.

Όταν ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό παρόμοια επίπεδα προστασίας και συμπεριφοράς στο σεισμό (ελαχιστοποίηση πιθανότητας βλαβών σε φέροντα και μη στοιχεία), τότε ένα κτίριο σεισμικά μονωμένο είναι πάντα οικονομικότερο.



Εικόνα 1.5 Όσο μειώνεται το πάχος των στρώσεων τόσο αυξάνεται η κατακόρυφη δυσκαμψία

1.1.4 Πλεονεκτήματα σεισμικής μόνωσης

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα μιας σεισμικά μονωμένης κατασκευής είναι:

1. Προστασία του φέροντα οργανισμού της κατασκευής, δηλαδή αποφυγή μετελαστικών παραμορφώσεων (βλαβών) στα φέροντα δομικά στοιχεία του έργου. Κατά αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούνται ή και αποφεύγονται δύσκολες, υψηλού κόστους και αμφιβόλου αποτελεσματικότητας επισκευές του φέροντα οργανισμού του έργου.
2. Ελαστική συμπεριφορά της ανωδομής πάνω από τα εφέδρανα. Δηλαδή ισχύει ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς $q=1,0$ έως $1,5$.
3. Αυτόματη επαναφορά του κτιρίου στην αρχική του θέση μετά το σεισμό.
4. Προστασία των μη-φερόντων στοιχείων της κατασκευής (π.χ. τοιχοποιίες πλήρωσης, υαλοπίνακες). Τα μη φέροντα στοιχεία ενός κτιρίου αντιπροσωπεύουν περίπου το 65% έως 75% του συνολικού κόστους κατασκευής του έργου. Η προστασία τους ισοδυναμεί με σημαντική μείωση τυχόν δαπάνης για την επισκευή της κατασκευής.
5. Προστασία της μετασεισμικής ασφάλειας της κατασκευής. Η αντοχή και η σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής δεν επηρεάζονται ακόμα μετά από έναν ισχυρό σεισμό. Η κατασκευή είναι ικανή να αντισταθεί με ασφάλεια επάλληλες μετασεισμικές δονήσεις.
6. Προστασία της θεμελίωσης. Ελαττώνεται σημαντικά η δυναμική καταπόνηση του εδάφους θεμελίωσης, (ελαχιστοποίηση ή και αποφυγή καθιζήσεων).
7. Οικονομία του έργου. Η προστασία των φερόντων και μη-φερόντων στοιχείων της κατασκευής της θεμελίωσής της, του περιεχομένου της και η προστασία της λειτουργίας της έχουν ως αποτέλεσμα ότι το κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής με σεισμική μόνωση ή αποσβεστήρες ενέργειας, είναι πολύ χαμηλότερο του κόστους συντήρησης της αντίστοιχης συμβατικής κατασκευής.
8. Αύξηση της εμπορικής αξίας ενός σεισμικά μονωμένου κτιρίου λόγω της τεράστιας και πραγματικής αύξησης της αντισεισμικότητας του σε σχέση με μια συμβατική κατασκευή.
9. Υψηλό επίπεδο ποιότητας ζωής των χρηστών του έργου με την δημιουργία αισθήματος ασφάλειας και καλής ψυχολογικής κατάστασης.
10. Η σεισμική μόνωση είναι η μοναδική λύση σε κατασκευές με ειδικές αρχιτεκτονικές απαιτήσεις οι οποίες περιορίζουν την θέση και τις διαστάσεις των φερόντων στοιχείων ή όταν εξαιτίας της μόρφωσης του φορέα η παραδοχή της πλαστιμότητας-υπεραντοχής είναι ανεπαρκής.
11. Επιτυγχάνεται αδιάλειπτη χρήση του κτιρίου μετά το σεισμό.
12. Αποδεδειγμένη και δοκιμασμένη συμπεριφορά σε πραγματικές κατασκευές και σε εργαστηριακές δοκιμές.
13. Τα εφέδρανα LRB έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και δεν απαιτούν συντήρηση. Σε περίπτωση που υποστούν ζημιά (πχ. από φωτιά) μπορούν να αντικατασταθούν.

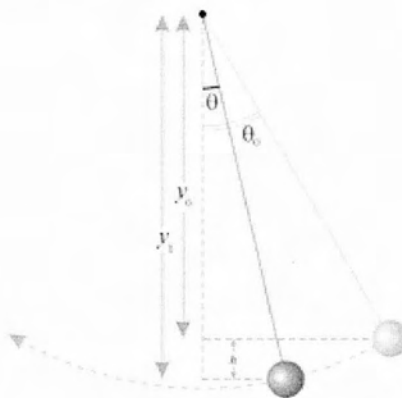
1.2 Μόνωση έναντι κραδασμών-ταλαντώσεων (*vibration isolation*)

1.2.1 Έννοια και τύποι ταλάντωσης

Η ταλάντωση αναφέρεται σε μηχανικές ταλαντώσεις γύρω από ένα σημείο ισορροπίας. Οι ταλαντώσεις μπορεί να είναι περιοδικές, όπως η κίνηση ενός εκκρεμούς ή τυχαία, όπως η μετακίνηση ενός ελαστικού σε έναν χωματόδρομο. Η ταλάντωση είναι, περιστασιακά «επιθυμητή». Για παράδειγμα, η κίνηση ενός διαπασών, το καλάμι σε ένα μέσο ξύλινων πνευστών ή φουσαρμόνικα, ή τον κώνο του ηχείου είναι επιθυμητή η δόνηση που απαιτείται για την ορθή λειτουργία των διαφόρων συσκευών. Πιο συχνά, οι ταλαντώσεις είναι ανεπιθύμητες σε περιπτώσεις που εμφανίζεται σπατάλη ενέργειας και δημιουργία ανεπιθύμητου ήχου - θορύβου. Για παράδειγμα, η παλμική κίνηση των μηχανών, ηλεκτροκινητήρων, ή οποιασδήποτε μηχανικής συσκευής σε λειτουργία είναι συνήθως ανεπιθύμητη. Τέτοιες ταλαντώσεις μπορεί να προκληθούν από ανισορροπίες στα περιστρεφόμενα μέρη, ανομοιόμορφη τριβή, κλπ.

Τύποι ταλαντώσεων:

- Ελεύθερη ταλάντωση συμβαίνει όταν ένα μηχανικό σύστημα έχει μετατοπιστεί με μια αρχική δύναμη και στη συνέχεια αφήνεται ελεύθερο έχοντας τη δυνατότητα να ταλαντώνεται ελεύθερα. Παραδείγματα αυτού του τύπου των ταλαντώσεων είναι όταν ένα παιδί που κάνει κούνια τραβιέται προς τα πίσω και στη συνέχεια αφήνεται ελεύθερο να κινηθεί, όπως ισχύει και με το εκκρεμές. Το μηχανικό σύστημα θα ταλαντώνεται με τη φυσική του συχνότητα.
- Εξαναγκασμένη ταλάντωση είναι όταν μια εναλλασσόμενη δύναμη ή μετατόπιση εφαρμόζεται σε ένα μηχανικό σύστημα. Παραδείγματα αυτού του τύπου ταλαντώσεων αποτελούν οι ταλαντώσεις ενός κτιρίου κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Σε εξαναγκασμένη ταλάντωση η συχνότητα της είναι η συχνότητα της εφαρμοσμένης δύναμης ή μετατόπισης, με τάξη μεγέθους που εξαρτάται από το πραγματικό μηχανικό σύστημα.



Εικόνα 1.6 Εκκρεμές, η πιο γνωστή μορφή ταλαντωτή

1.2.2 Μόνωση και η φυσική της αρχή

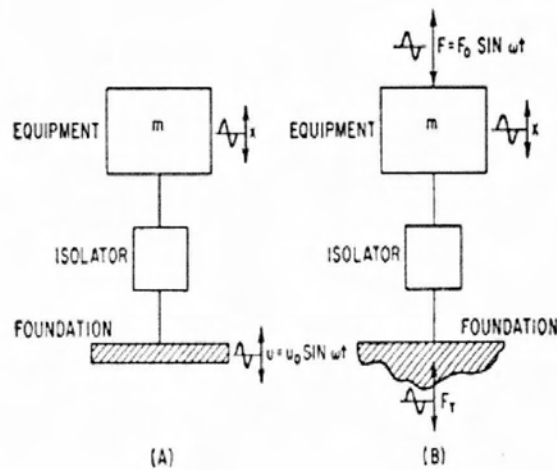
Πρόκειται ουσιαστικά για την διαδικασία απομόνωσης ενός αντικειμένου, όπως για παράδειγμα ένα μέρος μιας μηχανής, από τις πηγές που εισάγουν ταλαντώσεις. Αυτό χρειάζεται καθώς συχνά στις κατασκευές μας τοποθετούνται μηχανές, οι οποίες παράγουν ταλαντώσεις. Οι ταλαντώσεις αυτές, οι οποίες μεταβιβάζονται στη φέρουσα κατασκευή (έδαφος, θεμέλιο), είναι ενοχλητικές ή ακόμη και επικίνδυνες και απαιτείται η ελαχιστοποίηση τους. Αυτό επιτυγχάνεται με παρεμβολή συστήματος ελατηρίων και αποσβεστήρων μεταξύ της μηχανής και του θεμελίου. Το αντίστροφο πρόβλημα αντιμετωπίζουμε, όταν ταλαντώσεις από το περιβάλλον (έδαφος στηρίξεως) μεταβιβάζονται στην κατασκευή. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται όταν ευαίσθητα όργανα τοποθετούνται στο εσωτερικό κινουμένων σωμάτων (διαστημοπλοίων, αεροπλάνων, πλοίων) ή υπάρχουν μνημεία πλησίον πηγών παραγωγής ταλαντώσεων. Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων μόνωσης έναντι ταλαντώσεων.

- Τα παθητικά συστήματα τα οποία αποτελούνται κυρίως από τη μάζα, το ελατήριο και έναν αποσβεστήρα.
- Τα ενεργητικά συστήματα τα οποία περιέχουν μαζί με το ελατήριο ένα κύκλωμα ανάδρασης το οποίο αποτελείται από ένα πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο, έναν ελεγκτή, και ένα ηλεκτρομαγνητικό αισθητηρίου. Το σήμα της επιτάχυνσης υποβάλλεται σε επεξεργασία από ένα κύκλωμα ελέγχου και ενισχυτή. Στη συνέχεια τροφοδοτεί τον ηλεκτρομαγνητικό ενεργοποιητή, το οποίο ενισχύει το σήμα. Ως αποτέλεσμα ενός τέτοιου συστήματος ανατροφοδότησης είναι πως σημαντικά ισχυρότερη καταστολή των κραδασμών επιτυγχάνεται σε σύγκριση με έναν συνήθη αποσβεστήρα.

Σχηματικά το πρόβλημα της μόνωσης έναντι ταλαντώσεων περιγράφεται διαιρώντας το σε δομές. Μία δομή αποτελεί η πηγή που εισάγει τις ταλαντώσεις στο σύστημα και συνδέεται με μία άλλη δομή τον δέκτη. Ανάμεσα σε αυτές τις δύο δομές ενσωματώνεται μία τρίτη δομή ο μονωτήρας. (Εικόνα 1.7)

Όταν ένα κύμα που διαδίδεται σε ένα ελαστικό μέσο συναντήσει κάποια ασυνέχεια τότε ένα μόνο μέρος του κύματος περνά την ασυνέχεια αυτή και το υπόλοιπο ανακλάται και επιστρέφει προς την κατεύθυνση της πηγής που το δημιούργησε. Το ποσοστό του τμήματος του κύματος που ανακλάται οφείλεται στο μέγεθος της μεταβολής των ιδιοτήτων. Στην περίπτωση της μόνωσης έναντι ταλαντώσεων, γίνεται προσπάθεια να εμποδιστεί η διάδοση του κύματος, επιφέροντας ασυνέχειες των ιδιοτήτων κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την επίτευξη διακοπής των ιδιοτήτων του μέσου είναι να ενσωματωθεί ένα στοιχείο που είναι πολύ πιο συμβατό, δηλαδή, έχει χαμηλότερη ακαμψία από το περιβάλλον του μέσου. Αυτό το είδος του στοιχείου καλείται συνήθως μονωτήρας. Είναι επίσης προφανές πως κάποιος μπορεί να επιφέρει αντανάκλαση ενσωματώνοντας ένα

στοιχείο με διαφορετική αδράνεια από αυτή του μέσου. Λαμβάνοντας υπόψη, ωστόσο, ότι τα πιο κοινά υλικά κατασκευής είναι αρκετά δύσκαμπτα, όπως ο χάλυβας και το σκυρόδεμα, είναι συχνά απλούστερο να επιτύχει σημαντικές ασυνέχειες στις ιδιότητες του μέσου χρησιμοποιώντας μαλακά-εύκαμπτα στοιχεία. Για το λόγο αυτό, είναι πολύ συχνότερη η χρήση εύκαμπτων από δύσκαμπτα στοιχεία. Παρ'όλα αυτά, για κατασκευαστικούς λόγους, υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες είναι αναγκαία η χρήση δύσκαμπτων στοιχείων.

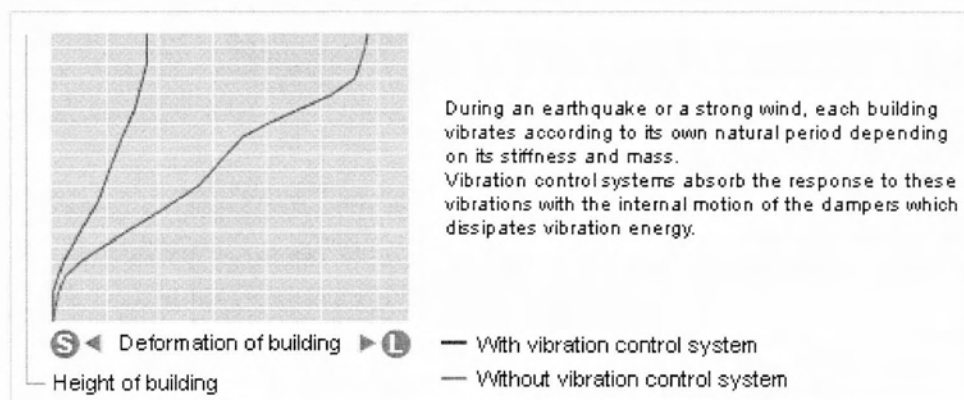


Εικόνα 1.7 Μόνωση έναντι μετατοπίσεων του εδάφους στην κατασκευή (A) και έναντι δυνάμεων στο έδαφος(B)

1.3 Μόνωση έναντι κραδασμών στην επιστήμη του μηχανικού

Βλέπουμε πως η χρήση μονωτήρων έναντι κραδασμών ή ταλαντώσεων έχει μεγάλη χρήση στον κλάδο των μηχανολόγων μηχανικών. Βασιζόμενοι στην παραπάνω φυσική αρχή κατασκευάζονται μονωτήρες οι οποίοι αποτρέπουν την μεταφορά κραδασμών και ήχων από την συσκευή που τα παράγει προς το υπόλοιπο κτίριο και ως φυσικό επακόλουθο και στα θεμέλια αποφεύγοντας τον κίνδυνο να μεταφερθούν ταλαντώσεις μέσω του εδάφους σε γειτονικά κτίρια.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται χρήση αυτών των μονωτήρων προς όφελος των κατασκευών πολιτικών μηχανικών χρησιμοποιώντας τους ως σεισμικούς μονωτήρες. Γενικότερα η μόνωση έναντι ταλαντώσεων παρέχει ασφάλεια και λειτουργικότητα στις κατασκευές όταν αυτές εκτίθενται σε ισχυρά φορτία ανέμου ή/και σεισμού. Οι μονωτήρες αυτοί λειτουργούν ουσιαστικά αποσβένοντας ενέργεια ταλάντωσης περιορίζοντας ταυτόχρονα τις μετακινήσεις είτε λόγο σεισμού είτε λόγο αέρα και προστατεύοντας τους κάτοικους, τις εγκαταστάσεις, την λειτουργικότητα αλλά και εμποδίζοντας την δημιουργία ζημιών στην κατασκευή. Πρέπει να σημειώσουμε ότι όσο πιο ψηλό είναι το κτίριο τόσο μεγαλύτερες είναι οι απαιτήσεις σε μόνωση έναντι ταλαντώσεων.



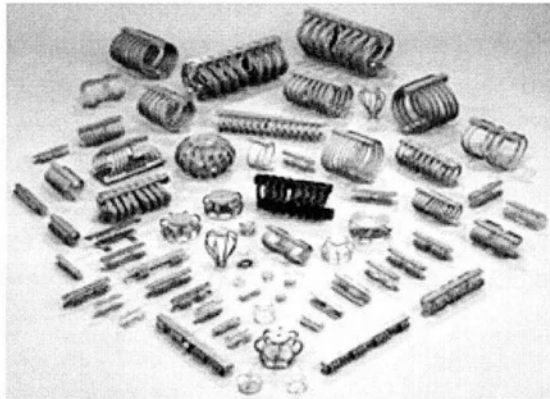
Σχήμα 1.4 Μετατόπιση ενός κτιρίου λόγω κάποιας ταλάντωσης ανάλογα με το ύψος της με και χωρίς κάποια μόνωση

Ορισμένοι τρόποι μόνωσης οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού και χρησιμοποιούνται στην μόνωση κατασκευών είναι οι εξής:

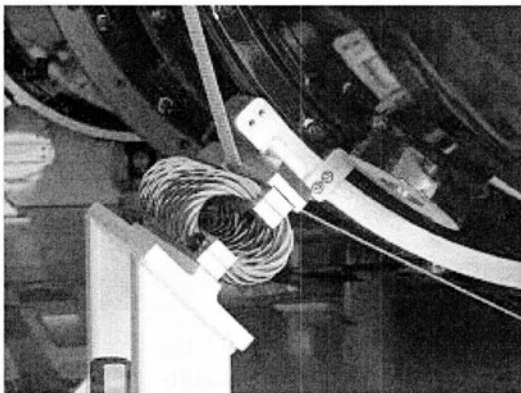
- VWD (Vibration Wall Damper).
- CVD (Cylindrical Viscous Damper)
- BMD (Bingham Material Damper)
- LED (Lead Extrusion Damper)
- TMD-RP (Tuned Mass Damper-Roller Pendulum type)
- AMD (Active Mass Damper)

Οι παραπάνω μονωτήρες χρησιμοποιούνται ευρέως στο εξωτερικό και κυρίως στην Ιαπωνία για την μόνωση έναντι ταλαντώσεων που οφείλονται τόσο σε ισχυρούς ανέμους όσο και σε πολύ δυνατούς σεισμούς κατασκευών και ιδιαίτερα κατασκευών μεγάλου ύψους.

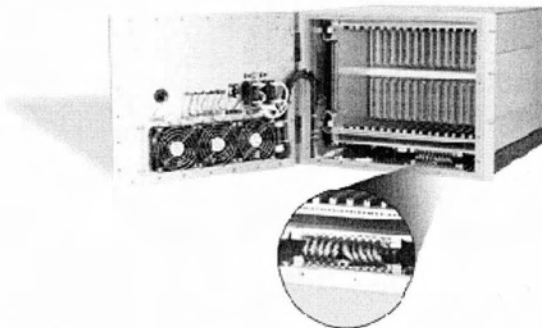
Στην συγκεκριμένη εργασία δεν θα χρησιμοποιήσουμε κάποια από τις παραπάνω, ευρέως διαδεδομένες σε χρήση, μεθόδους. Θα εξετάσουμε έναν διαφορετικό μονωτήρα που χρησιμοποιείται πολύ συχνά από τους μηχανολόγους για την μόνωση συσκευών έναντι κραδασμών και θα μπορούσαμε να τον κατατάξουμε στην κατηγορία TMD (Tuned Mass Damper). Στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού δεν είναι διαδεδομένος και πρόκειται για έναν μονωτήρα από συρματοπλέγμα (γνωστό ως Wire Rope).



Εικόνα 1.8 Η ποικιλία των wire ropes



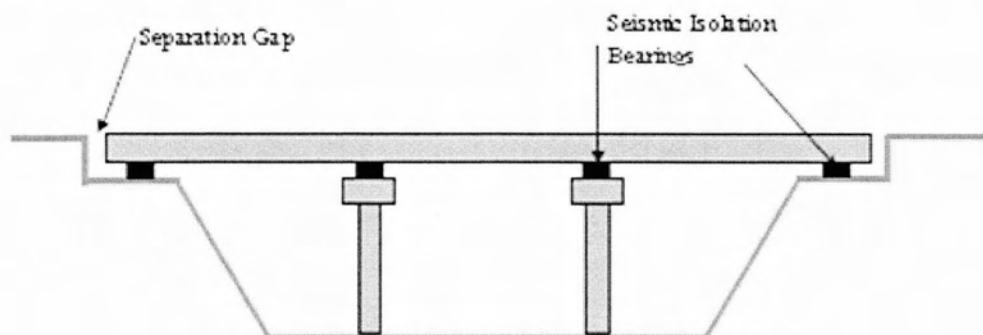
Εικόνα 1.9 Εφαρμογές των wire ropes



1.4 Σεισμική μόνωση σε γέφυρες

Η σεισμική μόνωση είναι μια δοκιμασμένη μέθοδος για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κτιρίων, γεφυρών και άλλων κατασκευών. Ειδικά για τη σεισμική μόνωση των γεφυρών, παρουσιάζονται κάποιες ιδιαιτερότητες - λόγω της μόνωσης του φορέα μίας γέφυρας οι οποίες επηρεάζουν τον σχεδιασμό του συστήματος μόνωσης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το βάρος (μάζα) είναι συγκεντρωμένο στην υπερκατασκευή, σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Η υπερκατασκευή έχει μεγάλη αντοχή σε σεισμικά φορτία - ειδικά κατά μήκος του άξονα της - σε σχέση με τα βάθρα της. Η αντίσταση στα σεισμικά φορτία είναι διαφορετική στις δύο κύριες διευθύνσεις, την διαμήκη και την εγκάρσια. Η γέφυρα πρέπει να σχεδιαστεί να αντέχει και να είναι λειτουργική για σημαντικά φορτία λειτουργίας όπως, άνεμος, κυκλοφορία, ερπυσμός, θερμοκρασιακή μεταβολή κτλ. Ακόμα ο αντικειμενικός σκοπός της σεισμικής μόνωσης μίας γέφυρας είναι διαφορετικός σε σχέση με την σεισμική μόνωση ενός κτιρίου. Σε ένα κτίριο, η σεισμική μόνωση χρησιμοποιείται για να μειωθούν οι δυνάμεις και άρα και οι απαιτήσεις πλαστιμότητας, που καταπονούν την κατασκευή πάνω από το επίπεδο μόνωσης. Μία γέφυρα μονώνεται ακριβώς κάτω από το κατάστρωμα έτσι ώστε να μειωθούν οι αδρανειακές δυνάμεις -λόγω της μάζας του καταστρώματος - που καταπονούν τα βάθρα. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της τυπικής εφαρμογής της σεισμικής μόνωσης.

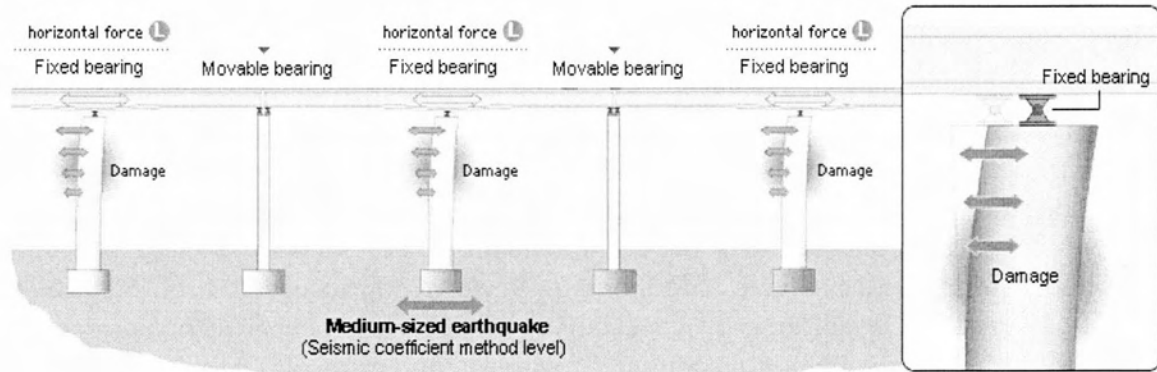


Εικόνα 1.12 Τυπικός σχεδιασμός σεισμικά μονωμένης γέφυρας

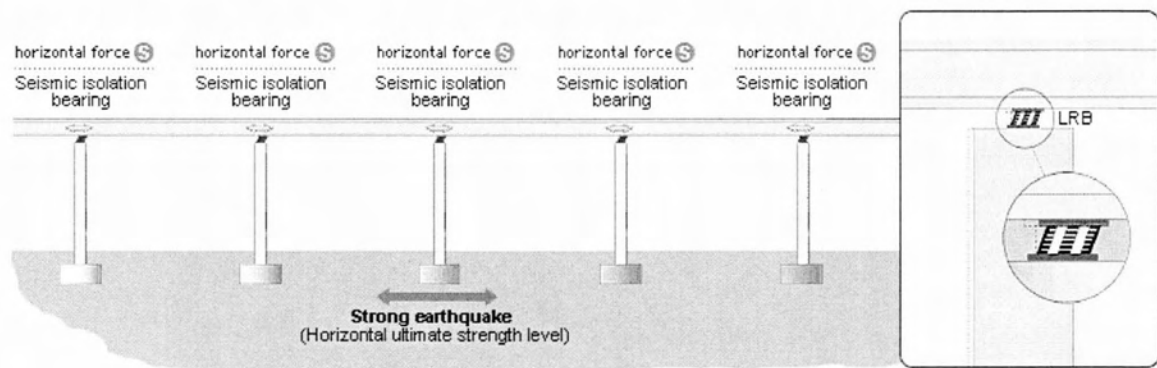
Επίσης η σεισμική μόνωση γεφυρών δεν αποσκοπεί πάντα στην μείωση των επιταχύνσεων των ορόφων (PFA, PFSA). Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει περιορισμός στην ισοδύναμη απόσβεση του συστήματος μόνωσης, και άρα ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει για μεγιστοποίηση της απόσβεσης παρά για αύξηση της βασικής ιδιοπεριόδου. Σε κάθε περίπτωση πάντως η απαίτηση είναι στον σεισμό σχεδιασμού η γέφυρα να συμπεριφερθεί ελαστικά, χωρίς βλάβες. Έχουμε και εδώ δηλαδή το κριτήριο της ελαχιστοποίησης της πιθανότητας βλαβών ($q=1.0$).

Η σεισμική μόνωση στις γέφυρες συνδυάζει δύο φαινόμενα: (α) αύξηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου του συστήματος, και (β) προσθήκη αυξημένης απόσβεσης στο σύστημα. Το πρώτο επιτυγχάνεται με την εισαγωγή εύκαμπτων εφεδράνων ή εφεδράνων ολίσθησης στην επιφάνεια μόνωσης. Το δεύτερο επιτυγχάνεται είτε με την εισαγωγή αποσβεστήρων με ιξώδη συμπεριφορά, είτε με τη χρήση ελαστοπλαστικών μονωτήρων, είτε με τη χρήση εφεδράνων αυξημένης ικανότητας απόσβεσης (π.χ. εφέδρανα με πυρήνα μόλυβδου LRB, εφέδρανα τριβής με επίπεδη ή σφαιρική

επιφάνεια - FPS, εφέδρανα με ελαστομερή υψηλής απόσβεσης - HDRB). Σε πολλές χώρες υψηλής σεισμικότητας και υψηλής στάθμης αντισεισμικής τεχνολογίας (π.χ. στην Ιταλία) δεν συνηθίζεται, ούτε επιτρέπεται, η χρήση κοινών ελαστομερών εφεδράνων για την επίτευξη του πρώτου από τα δύο ανωτέρω φαινόμενα/αποτελέσματα. Μάλιστα, η σεισμική μόνωση θεωρείται ότι πρέπει να συνδυάζει και τα δύο φαινόμενα/ αποτελέσματα με χρήση ειδικών προς τούτο συσκευών. Αντίθετα, στις ΗΠΑ και στην Ελλάδα συνηθίζεται, και επιτρέπεται, η χρήση κοινών ελαστομεταλλικών εφεδράνων για την επίτευξη του πρώτου αποτελέσματος, με ή χωρίς πρόσθετη απόσβεση μέσω ειδικών αποσβεστήρων.



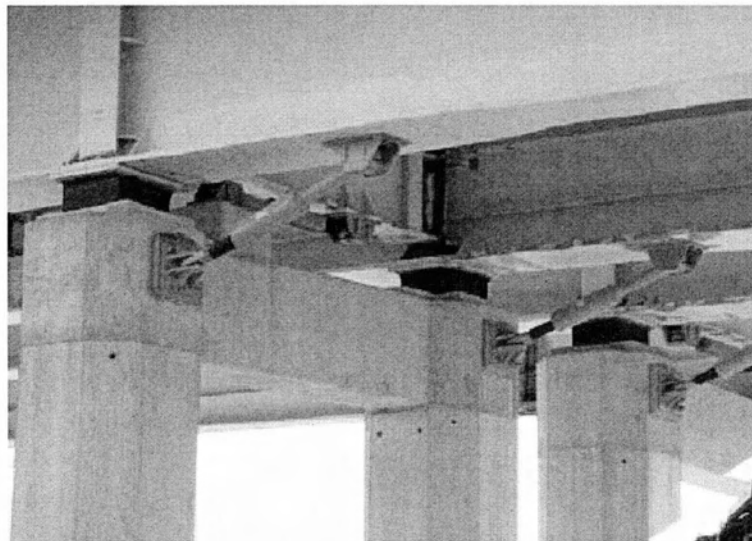
Εικόνα 1.13 Γέφυρα με απλά εφέδρανα σχεδιασμένη με αντισεισμικό κανονισμό



Εικόνα 1.14 Γέφυρα σεισμικά μονωμένη με ελαστομεταλλικά εφέδρανα LRB (Lead Rubber Bearings)(

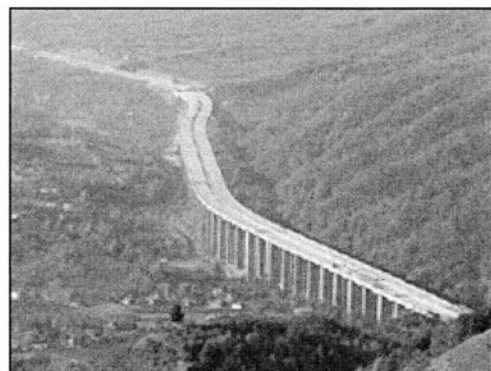
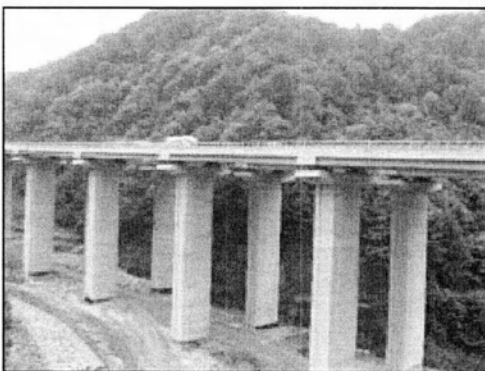
Παράδειγμα κατασκευής που δείχνει τις δυνατότητες της σεισμικής μόνωσης είναι η γέφυρα Benicia-Martinez στην Καλιφόρνια (www.earthquakeprotection.com). Λόγω της κρισιμότητας της για την κυκλοφορία, επιλέχθηκε η σεισμική μόνωση της. Στο σχεδιασμό λήφθηκαν υπόψη κοντινά ρήγματα και παράγοντες ενίσχυσης της επιτάχυνσης λόγω εδαφικών αποθέσεων. Έτσι οι φασματικές επιταχύνσεις ξεπέρασαν τα 7g (εφτά φορές την επιτάχυνση της βαρύτητας)!! Είναι φανερό ότι σε αυτό το επίπεδο ασφάλειας η μόνη εφικτή λύση από οικονομική και τεχνική άποψη είναι η σεισμική μόνωση. (Φωτογραφικό υλικό και κάποιες πρόσθετες πληροφορίες υπάρχουν στον πρόλογο)

Η γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου (γέφυρα Χαριλάου Τρικούπη) αποτελεί την πιο διάσημη εφαρμογή σεισμικής μόνωσης στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, οι γέφυρες πρόσβασης της κατασκευής είναι σεισμικά μονωμένες. Η γέφυρα διασχίζει εγκάρσια τον Κορινθιακό Κόλπο και οι εδαφικές και γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εμπόδιζαν για πολλά χρόνια την κατασκευή της. Η περιοχή είναι έντονα σεισμογενής (ζώνη 2, 0.24g σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ.) και έχει δώσει αρκετούς σεισμούς μεσαίου έως μεγάλου μεγέθους τις τελευταίες δεκαετίες. Ο μεγαλύτερος από αυτούς, ο σεισμός του Αιγίου το 1995 είχε μέγεθος 6.2 βαθμούς της κλίμακας Ρίχτερ. Στην ευρύτερη υποθαλάσσια περιοχή υπάρχουν ρήγματα, επιπλέον οι όχθες του Κορινθιακού εκτιμώνται ως αβέβαιης σταθερότητας από τους Γεωτεχνικούς. Η επιτυχής πραγμάτωση της γέφυρας οφείλεται αφενός στη βαθιά θεμελίωση και αφετέρου στη σεισμική μόνωση. Η γέφυρα έχει μήκος 2.880m ,είναι καλωδιωτή, αποτελείται από 5 ανοίγματα και έχει δύο καταστρώματα με δύο λωρίδες κυκλοφορίας ανά διεύθυνση κυκλοφορίας και πεζοδρόμιο. Στα ακρόβαθρα έχουν τοποθετηθεί 6 ελαστομεταλλικά εφέδρανα ολίσθησης, με μέγιστο φορτίο σχεδιασμού 4.600kN. επίσης, τοποθετήθηκαν αντίβαρα στα ακρόβαθρα για να εξαιρεθεί κάθε πιθανότητα ανύψωσης των εφεδράνων υπό οποιοδήποτε συνδυασμό φορτίων. Σε καθένα από τα μεσόβαθρα τοποθετήθηκε ένα εφέδρανο ολίσθησης με μέγιστο φορτίο σχεδιασμού 60.400kN. Οι αρμοί διαστολής σχεδιάστηκαν να έχουν τη μεγαλύτερη δυνατότητα διαμήκους και εγκάρσιας μετακίνησης παγκοσμίως, περισσότερο από 5000mm. Επίσης έχουν τοποθετηθεί αποσβεστήρες σε διάφορα σημεία σύνδεσης καταστρώματος και βάθρων για μείωση των μετακινήσεων και απορρόφηση ενέργειας. Έχει σχεδιαστεί για σεισμό μεγέθους 7 Ρίχτερ, σύγκρουση με τάνκερ 18.000 τόνων με ταχύτητα 18 knots και ανέμους 250 km/h.



Εικόνα 1.15 Χρήση αποσβεστήρων που βοηθούν στην μόνωση των γεφυρών πρόσβασης

Ιδιαίτερα απαιτητική ήταν και η κατασκευή του συστήματος σεισμικής μόνωσης στην κοιλαδογέφυρα της περιοχής Bolu στην Τουρκία (Bolu Viaduct). Το 1999 δύο μεγάλοι σεισμοί, γειτονικοί και με μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους χτύπησαν την Τουρκία προκαλώντας 15,000 θανάτους και πολυάριθμους τραυματισμούς. Ο πρώτος σεισμός προκλήθηκε από θραύση κατά μήκος του ρήγματος της Ανατολίας, χτύπησε τον Αύγουστο του 1999 και είχε μέγεθος 7.4 και ο δεύτερος το Νοέμβρη με μέγεθος 7.2 επίσης από ένα παρακλάδι του ίδιου ρήγματος. Πολύ κοντά στο επίκεντρο της δεύτερης σεισμικής δόνησης έτυχε να βρίσκεται η κοιλαδογέφυρα Bolu, τμήμα του αυτοκινητόδρομου Trans-European Motorway. Όταν χτύπησε ο σεισμός η κοιλαδογέφυρα ήταν έτοιμη κατά 95%, υπολείπονταν μόνο οι αρμοί (expansion joints) και είχε κατασκευαστεί με μέθοδο σεισμικής μόνωσης. Συγκεκριμένα οι κατασκευαστές επέλεξαν ένα υβριδικό σύστημα σεισμικής μόνωσης με ιξώδεις αποσβεστήρες και μονωτήρες τριβής στα βάθρα, το οποίο υπέστη σοβαρότατες ζημιές εξαιτίας της διάδοσης της επιφανειακής ρήξης ανάμεσα στα βάθρα. Ο λόγος που η γέφυρα υπέστη τόσο σοβαρές ζημιές ήταν η κοντινή απόσταση του επικέντρου και η έντονη κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού, για την οποία η σεισμική μόνωση δεν είναι αποτελεσματική. Μετά τη μεγάλη φυσική καταστροφή η σεισμικότητα της περιοχής μελετήθηκε εκ νέου και οι κανονισμοί προσαρμόστηκαν αναλόγως. Η σεισμική ένταση σχεδιασμού αυξήθηκε από 0.54g σε 0.81g. Αυτό σημαίνει ότι δεν ήταν αρκετή η επαναφορά της γέφυρας στην αρχική της θέση αλλά έπρεπε να αναβαθμιστεί σεισμικά για να ανταποκρίνεται στις νέες απαιτήσεις των κανονισμών. Η νέα γέφυρα σχεδιάστηκε με περίοδο επαναφοράς 500 ετών, σύμφωνα με τους κανονισμούς AASHTO του 1992. Χρησιμοποιήθηκαν 536 εφέδρανα ολίσθησης με ικανότητα πλευρικής μετατόπισης 500-700mm. Η καταστροφή της κοιλαδογέφυρας Bolu κατέδειξε τη σημασία της σχεδίασης ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης με ικανότητα επαναφοράς, ειδικά για κατασκευές που βρίσκονται πολύ κοντά ή πάνω σε ενεργά ρήγματα.



Εικόνα 1.16 Bolu Viaducts, Turkey

Στη Βόρεια Αμερική υπολογίζεται χονδρικά ότι οι σεισμικά μονωμένες γέφυρες είναι περισσότερες από διακρίσεις. Εντύπωση όμως προκαλεί το γεγονός ότι περίπου το 40% αυτών βρίσκεται σε περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας, όπως στη Νέα Υόρκη και τη Μασαχουσέτη. Το ένα τέταρτο των σεισμικά μονωμένων γεφυρών χρησιμοποιεί ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου και πολλές είναι και οι εφαρμογές του Earthquake isolator.

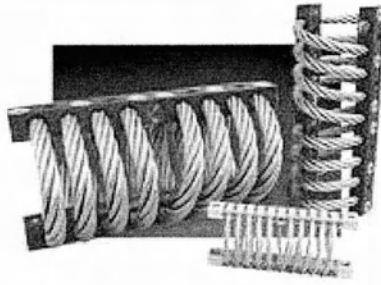
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Wire ropes (μονωτήρες από συρματόσχοινο)

2.1 Γενικές πληροφορίες

Οι ελικοειδείς μονωτήρες από συρματόσχοινα (wire ropes) χρησιμοποιούνται εκτεταμένα και με μεγάλη επιτυχία για πολλά χρόνια σε εφαρμογές μόνωσης έναντι ταλαντώσεων. Ένας wire rope μονωτήρας αποτελείται από πλεγμένο καλώδιο που είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα, μπάρες από κράμα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται για να συγκρατηθεί ο χάλυβας, πιάνονται μαζί και τοποθετούνται για την αποτελεσματική μόνωση έναντι δονήσεων. Τα μέταλλα κατασκευής είναι ανθεκτικά έναντι διάβρωσης, δεν επηρεάζονται από ακραίες θερμοκρασίες, διάφορα χημικά προϊόντα, το όζον και διάφορα λειαντικά, έχοντας την ικανότητα απόσβεσης κραδασμών και δονήσεων μεγάλης απόδοσης. Αυτές οι συσκευές έχουν ελαστικότητα και στις 3 κατευθύνσεις, μεγάλη δυνατότητα μετατόπισης και ικανότητα απόσβεσης το οποίο οφείλεται στην τριβή που δημιουργείται ανάμεσα στα πλεγμένα καλώδια. Ουσιαστικά μέσω της τριβής η κινητική ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα μετατρέπεται σε θερμική και μειώνεται έτσι το εύρος της ταλάντωσης. Έχουν την δυνατότητα να αποσβέσουν ενέργεια και στις 3 κατευθύνσεις ταυτόχρονα.

Λόγω κατασκευής τους η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου αρχικά ήταν πολύ δύσκολη. Ωστόσο έγιναν πειράματα και επιτεύχθηκε η μοντελοποίηση του συγκεκριμένου μονωτήρα. Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας αρχικά γινόταν σε πειραματική βάση από μηχανικούς με αξιοσημείωτη εμπειρία στην χρήση τους. Υπήρχε η ανάγκη δημιουργίας μιας καλά ανεπτυγμένης διαδικασίας η οποία θα προέβλεπε την συμπεριφορά των μονωτήρων στις διάφορες εφαρμογές. Αυτό επιτεύχθηκε από την NASA σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Auburn για τις ανάγκες που είχε η πρώτη σε μόνωση στα διαστημόπλοια. Η χρήση τους ξεκίνησε από τον αμερικανικό στρατό που χρησιμοποιούσε τους μονωτήρες για τη μεταφορά, ευαίσθητου σε δονήσεις, εξοπλισμού όπως πύραυλοι για την προστασία τους από κραδασμούς και ταλαντώσεις. Σήμερα χρησιμοποιούνται επίσης: στα ηλεκτρονικά αεροπλάνων (Avionics), στις μεταφορές, σε μηχανήματα επεξεργασίας χημικών, σε καμινάδες σκαφών, σε εξοπλισμούς πλοήγησης, σε μεταφορές εκτός δρόμου είτε θαλάσσιες είτε αεροπορικές, σε αντλίες, στα ηλεκτρονικά πλοίων και τώρα τελευταία και στη σεισμική μόνωση.

Στο εμπόριο οι μονωτήρες wire ropes ποικίλουν όσο αφορά τόσο το μέγεθος όσο και της δυνατότητας απόσβεσης ώστε να μπορεί ο μηχανικός να τους χρησιμοποιεί ανάλογα με της ανάγκες του. Και αυτό διότι είναι γνωστό πως διαφέρουν τα χαρακτηριστικά απόκρισης ανάλογα τη διάμετρο του wire rope, τον αριθμό των συρμάτων που αποτελούν το συρματόσχοινο, το μήκος του καλωδίου, τις στροφές του καλωδίου, τον αριθμό των καλωδίων ανά τμήμα και την διεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης.



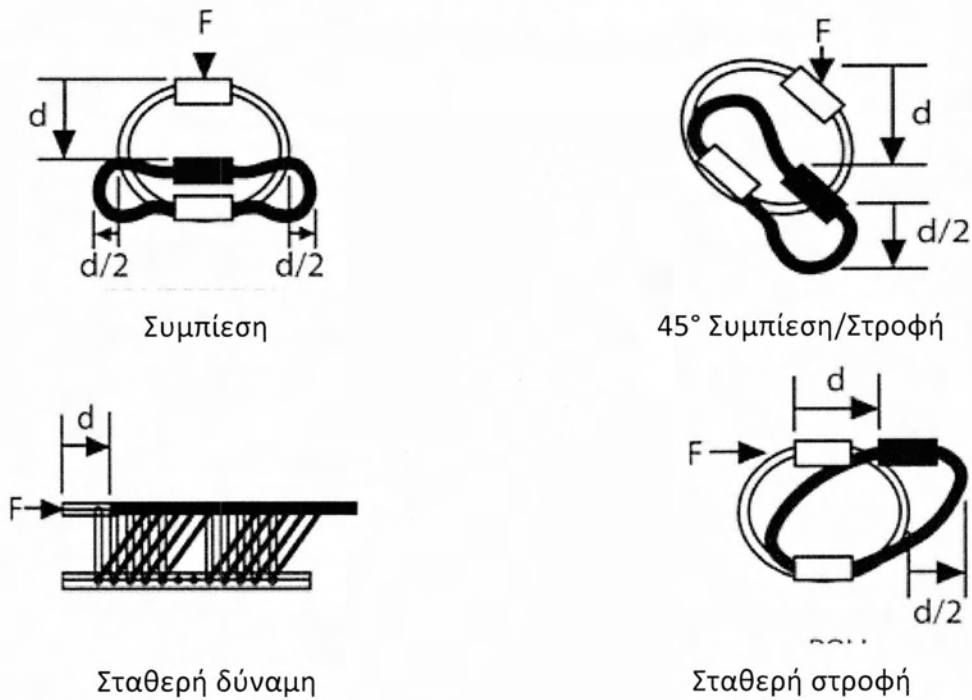
Εικόνα 2.1 Wire rope μονωτήρας

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης Wire rope μονωτήρων είναι τα εξής:

- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού
- Αυξημένη αξιοπιστία
- Υψηλότερες ταχύτητες λειτουργίας
- Βελτίωση της ποιότητας της παραγωγής
- Ασφαλέστερη λειτουργία μηχανημάτων
- Μείωση των ζημιών

Οι μονωτήρες wire ropes παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά στην δυσκαμψία. Οι μικρές αποκλίσεις που τυχόν έχει λόγω της μόνωσης έναντι κραδασμών μπορεί να είναι μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερη είναι η δόνηση.

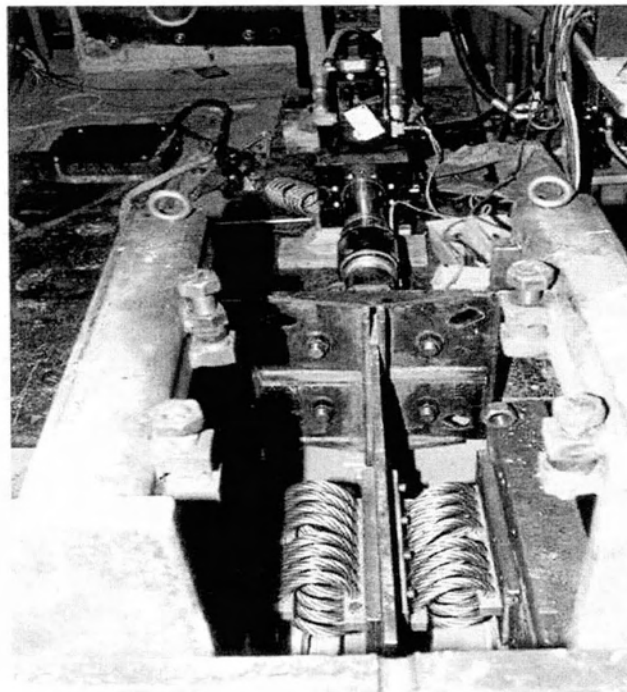
Εικόνα 2.2 Εκτίμηση παραμόρφωσης του μονωτήρα



2.2 Χρήση των wire ropes στην σεισμική μόνωση (πείραμα)

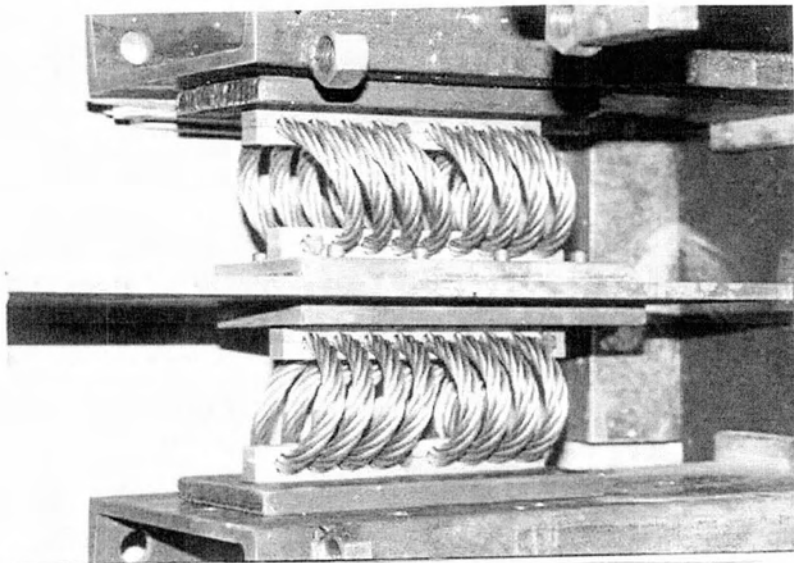
Η πρώτη προσπάθεια για την χρησιμοποίηση αυτών των συσκευών στην σεισμική μόνωση έγινε από τον Δημητριάδη Γ.Φ. [Technical Report NCEER-92-0012]. Εγκαταστάθηκαν σε κατάλληλο εξοπλισμό (IBM υπολογιστή) και δοκιμάστηκαν κάτω από σεισμικές διεγέρσεις. Κατά την εισαγωγή τους στον υπολογιστή χρησιμοποιήθηκαν ως συσκευές αποκατάστασης που συμμετείχαν στη μείωση της μετατόπισης αλλά και της επιτάχυνσης. Αυτή η παραδοχή λύθηκε υπόψιν μετά την μελέτη της συμπεριφοράς των μονωτήρων αυτών ως συστήματα μεταφοράς ευαίσθητου εξοπλισμού. Όπως ανέφερα οι μονωτήρες wire ropes εμφανίζουν μη γραμμική υστεριτική συμπεριφορά και στις εφαρμογές στις οποίες φέρουν το βάρος του μονωμένου εξοπλισμού, υποβάλλονται ταυτόχρονα σε κινήσεις και στις τρεις κατευθύνσεις. Αυτό συνεπάγεται την αλληλεπίδραση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στις τρεις κατευθύνσεις. Κατά την μοντελοποίηση του μονωτήρα θεωρήθηκε πως η αλληλεπίδραση αυτή δεν είναι σημαντική και κάθε μονωτήρας μοντελοποιήθηκε από τρία υστερικά, ανεξάρτητα μεταξύ τους, ελατήρια στις τρεις κύριες κατευθύνσεις.

Οι μονωτήρες από συρματόσχοινο εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά απόκρισης τα οποία εξαρτώνται ανάλογα με την κατασκευή του συρματόσχοινου και με την κατεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων τους κάτω από δυναμική φόρτιση μία σειρά από δοκιμές σε τέσσερα δείγματα τα οποία δεν είχαν φορτιστεί ξανά. Στην εικόνα 2.3 φαίνεται το πείραμα το οποίο έγινε για την ταυτόχρονη δοκιμή των δύο δειγμάτων.

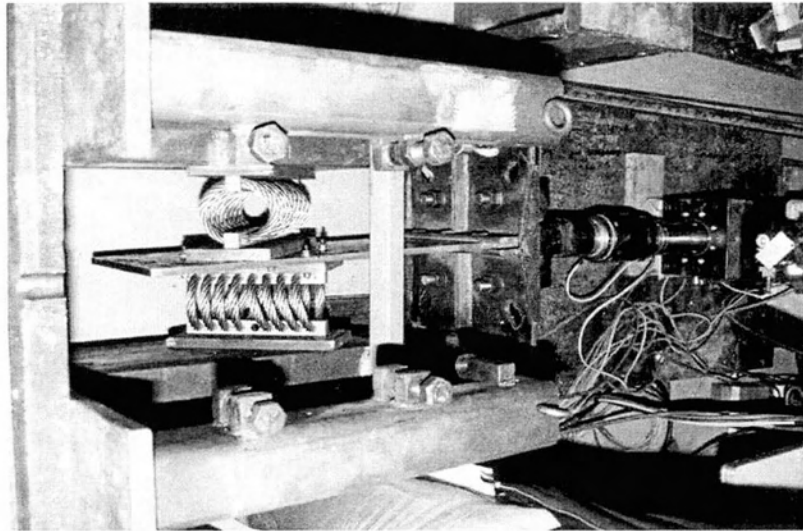


Εικόνα 2.3 Πειραματική συσκευή για την δοκιμή των wire ropes σε τέμνουσα (Τσόπελας, 1992)

Ένας υδραυλικός ενεργοποιητής, στον εισάγονται ελεγχόμενα οι μετατοπίσεις, χρησιμοποιήθηκε για την επιβολή της κίνησης. Η δύναμη καταγραφότανε διαμέσου μίας δυναμοκυψέλης η οποία ήταν τοποθετημένη ανάμεσα στον ενεργοποιητή και μία χαλύβδινη πλάκα, πάνω στην οποία ήταν τοποθετημένες και οι δύο συσκευές. Οι ελεύθερες πλευρές των συσκευών ακουμπούσαν σε στερεά βάθρα τοποθετημένα και στις δύο πλευρές του συστήματος. Έτσι οποιαδήποτε πλευρική μετατόπιση ήταν περιορισμένη. Τα δείγματα δοκιμάστηκαν σε τέμνουσα, στροφή (εικ. 2.4) αλλά και στον συνδυασμό των δύο (εικ. 2.5). Πριν γίνουν οι δυναμικές δοκιμές προηγήθηκε μία στατική δοκιμή δύο κύκλων μεγάλου εύρους μετατόπισης. Αυτό έγινε ώστε να οριστούν οι αρχικές συνθήκες των συσκευών (wire ropes) αλλά και για να έναν λειτουργικό έλεγχο της πειραματικής συσκευής. Αξίζει να σημειωθεί πως το εύρος της στατικής δοκιμής ήταν πολύ μεγαλύτερο από την μέγιστη τιμή της μετατόπισης των wire ropes κατά τις δυναμικές δοκιμές. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων τα wire ropes έδειξαν πολύ σταθερή συμπεριφορά χωρίς αλλοίωση τόσο της δυσκαμψίας όσο και της απόσβεσης μετά από μεγάλο αριθμό ανακυκλιζόμενων φορτίσεων. Μετά από υπερβολικό τέντωμα των συσκευών κάποια καλώδια έσπασαν, χωρίς ωστόσο να χάσουν την σταθερότητά τους οποιαδήποτε στιγμή, προκαλώντας χαλάρωση της πρόσφυσης των πλεγμένων καλωδίων στην κορυφή και στη βάση των περιοριστών. Μετά το τέλος των δοκιμών τα wire ropes αφαιρέθηκαν από την πειραματική συσκευή. Παρατηρήθηκε πως οι δύο από τις τρεις διαστάσεις και συγκεκριμένα το πλάτος και το ύψος, είχαν αλλάξει και συγκεκριμένα είχαν μειωθεί.

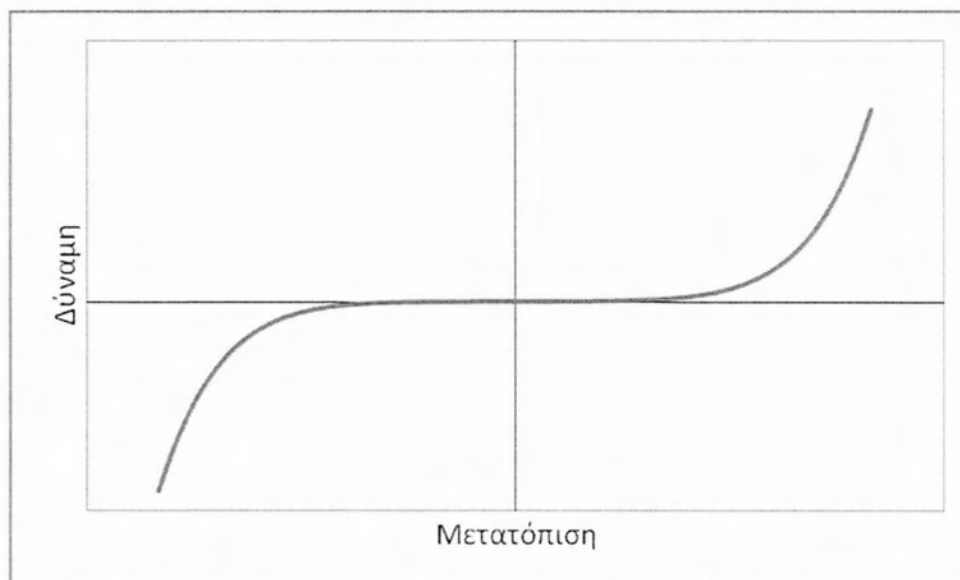


Εικόνα 2.4 Στροφική παραμόρφωση(Τσόπελας,1992)



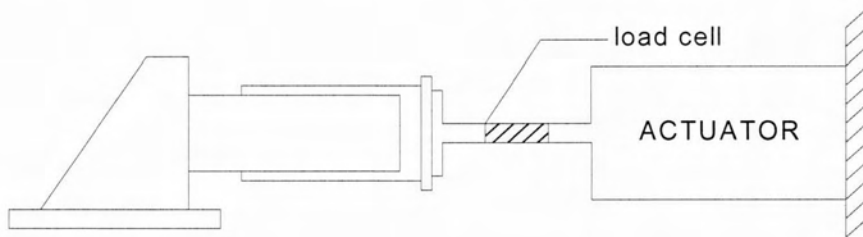
Εικόνα 2.5 Συνδυασμός διαμητικής και στροφικής παραμόρφωσης (Τσόπελας, 1992)

Στη συνέχεια έγινε νέος κύκλος δοκιμών σε τέμνουσα με τα ίδια ήδη χρησιμοποιημένα δοκίμια ξανά. Τα δοκίμια, βέβαια, πείστηκαν ώστε να χωρέσουν στην πειραματική συσκευή και συγκεκριμένα αυξήθηκε το ύψος τους ώστε να διατηρήσουμε τις ίδιες πειραματικές συνθήκες. Παρατηρήθηκε μία μείωση του γραμμικού μέρους της δυσκαμψίας μετά από εκτεταμένη χρήση και επαναλαμβανόμενο τέντωμα των δύο δειγμάτων. Ωστόσο επιτεύχθηκε μία ελαφριά αύξηση της ικανότητας απόσβεσης των συσκευών. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στην χαλάρωση της πρόσφυσης στα πλεγμένα καλώδια και στην αναδιάταξη της θέσης των καλωδίων στα σημεία πρόσφυσης. (Στο διάγραμμα 2.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης των wire ropes χωρίς την υστερική συμπεριφορά)

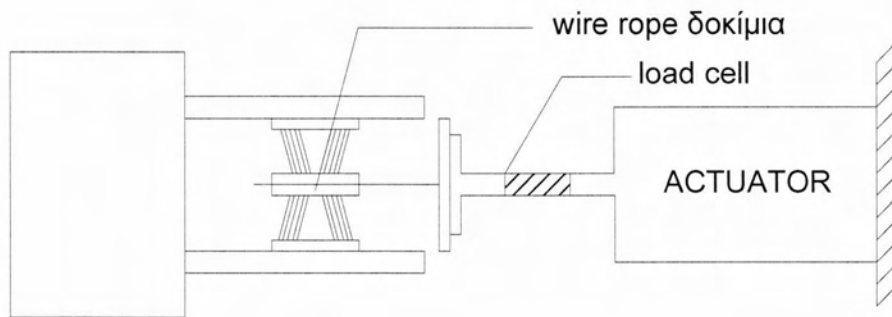


Διάγραμμα 2.1 Τυπικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης των wire ropes

Στη συνέχεια δύο νέα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην πειραματική συσκευή για να δοκιμαστούν σε τέμνουσα. Όπως έγινε και στην προηγούμενη δοκιμή, έτσι και τώρα προηγήθηκε στατική δοκιμή των δυναμικών, αυτή τη φορά μικρότερου εύρους (περίπου το 60% της προηγούμενης τιμής). Μετά το πέρας των πειραμάτων ήταν φανερό πως η δυσκαμψία των συσκευών από το μέγεθος της μετατόπισης που λάμβαναν κατά την στατική δοκιμή.

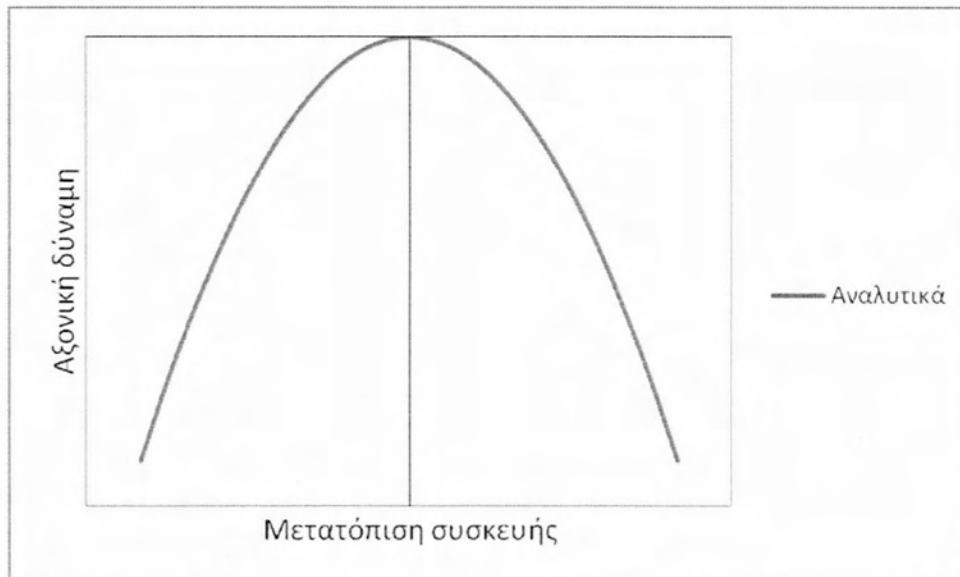


Σχήμα 2.1 Πλάγια όψη της πειραματικής διάταξης



Σχήμα 2.2 Κάτοψη της πειραματικής διάταξης

Οι wire ropes μονωτήρες όταν παραμορφώνονται λόγω διάτμησης έχουν την τάση να μειώνουν το ύψος τους. Εάν το ύψος της συσκευής μείνει σταθερό η παραμόρφωση αυτή δημιουργεί μία αξονική δύναμη. Όμως το πείραμα δεν ήταν σχεδιασμένο για να μετρήσει αυτήν τη δύναμη. Ωστόσο αυτή η δύναμη μπόρεσε να καταγραφεί κατά τη διάρκεια μιας σειράς από αναγνωριστικές δοκιμές που προηγήθηκαν των σεισμικών δοκιμών που έγιναν σε ένα μοντέλο γέφυρας (Στο διάγραμμα 2.2 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της δύναμης αυτής με βάση τα αναλυτικά αποτελέσματα). Η συμπεριφορά εμφανίζει μία υστέρηση η οποία οφείλεται στην τριβή των καλωδίων (απορρόφηση ενέργειας λόγω της τριβής). Επίσης παρουσιάζει και μία ασυμμετρία του τρόπου που πλέχτηκαν τα καλώδια ώστε να δημιουργηθεί ο μονωτήρας. Αυτή η ασυμμετρία πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν εάν αυτές οι συσκευές πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κάποιον σχεδιασμό.



Διάγραμμα 2.2 Συμπεριφορά της αξονικής δύναμης

Αυτή η αξονική δύναμη παρουσιάζει δύο πολύ σημαντικές εφαρμογές κατά την εφαρμογή των wire ropes στη μόνωση κατασκευών. Η πρώτη αφορά το μέρος της κατασκευής στο οποίο τοποθετείται ο μονωτήρας (υποσύλωμα για κάποιο κτίριο ή μεσόβαθρο για κάποια γέφυρα κ.α.). Συγκεκριμένα κατά την οριζόντια μετατόπιση της κατασκευής, άρα και του μονωτήρα, λόγω της κατασκευής του, έχει την τάση να ασκεί μία αξονική δύναμη στο στοιχείο της κατασκευής όπου εδράζεται, αντίθετη στη κατεύθυνση της βαρύτητας. Αυτό έχει ως συνέπεια να ελαφραίνει το στοιχείο σε αξονική φόρτιση. Αυτή η επιπλέον αξονική δύναμη που δημιουργείται μεταφέρεται στα εφέδρανα τριβής τα οποία συνοδεύουν τα wire ropes στη μόνωση της κατασκευής. Εδώ εμφανίζεται η δεύτερη πολύ σημαντική εφαρμογή. Το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης διαφοροποιείται. Παύει να είναι το γνωστό παραλληλόγραμμο (διάγραμμα 2.3) και έχει μία διαφορετική μορφή (διάγραμμα 2.4).

$$T = \mu \cdot W \quad (2-1)$$

η γνωστή εξίσωση τριβής όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής και W το βάρος της κατασκευής που αναλογεί στον μονωτήρα.

$$\mu = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min}) \exp(-\alpha \left| \frac{dy}{dx} \right|) \quad (2-2)$$

Όπου f_{\max} ο συντελεστής τριβής για υψηλή ταχύτητα ολίσθησης, f_{\min} ο συντελεστής τριβής για σχεδόν μηδενική ταχύτητα ολίσθησης, α είναι ένας συντελεστής ελέγχου της μεταβολής του συντελεστή τριβής με την ταχύτητα ολίσθησης και $\frac{dy}{dx}$ η ταχύτητα ολίσθησης.

$$T = \mu \cdot (W + N)$$

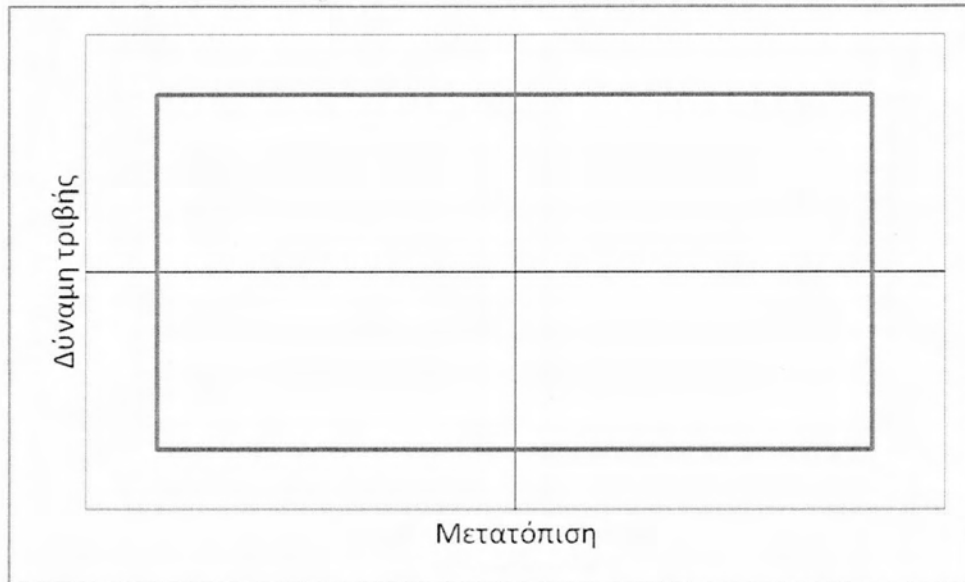
(2-3)

Η εξίσωση με την πρόσθετη αξονική δύναμη

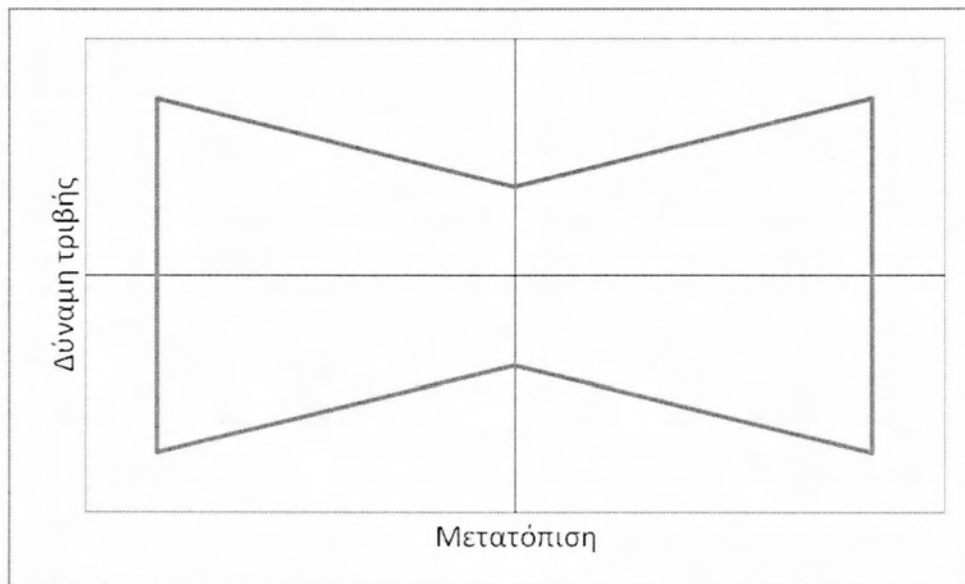
$$N = C1 \cdot u^2 + C2 \cdot u^4 + C3 \cdot u^6$$

(2-4)

Όπου u η μετατόπιση και $C1, C2, C3$, συντελεστές που καθορίζουν την μορφή της καμπύλης(διάγραμμα 2.2)



Διάγραμμα 2.3 Αναμενόμενο διάγραμμα δύναμης τριβής-μετατόπισης



Διάγραμμα 2.4 Διάγραμμα δύναμης τριβής-μετατόπισης με την εφαρμογή της επιπλέον αξονικής δύναμης

2.3 Συμπεράσματα

Τα wire ropes (συρματόσχοινα) ως εξοπλισμός για την σεισμική προστασία κατασκευών μελετήθηκε και πειραματικά και αναλυτικά. Παρατηρήθηκε πως οι μονωτήρες από συρματόσχοινο επιδεικνύουν υστεριτική απόσβεση η οποία μειώνει το αυξανόμενο εύρος της κίνησης. Τυπικές τιμές του ισοδύναμου βαθμού απόσβεσης είναι περίπου 0,1 του κρίσιμου για μεγάλες παραμορφώσεις και περίπου 0,2-0,3 για μικρές παραμορφώσεις. Αυτές οι τιμές υπολογίστηκαν σε συστήματα τα οποία μείωσαν την απόκριση της επιτάχυνσης του υπό δοκιμή εξοπλισμού σε σύγκρισή με τον πάγιο εξοπλισμό. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του πειράματος συμπεραίνουμε ότι ένα δύσκαμπτο σύστημα από wire ropes μπορεί να παρέχει προστασία έναντι σεισμού σε μία κατασκευή επιτρέποντας πολύ μικρές μετακινήσεις. Αντίθετα, η κλασική προσέγγιση μόνωσης με αύξηση της ιδιοπεριόδου του συστήματος σε τιμές μεγαλύτερες από την επικρατέστερη περίοδο της εισαγόμενης κίνησης δεν είναι πρακτική. Αυτό συμβαίνει διότι οι σεισμικές κινήσεις του εδάφους είναι πλούσιες σε συνιστώσες μεγάλων περιόδων και οι μετατοπίσεις είναι απαγορευτικά μεγάλες για τον εξοπλισμό.

Αναλυτικά μοντέλα για την περιγραφή της υστεριτικής συμπεριφοράς των μονωτήρων από συρματόσχοινο αναπτύχθηκαν και πειραματικά καλιμπραρίστηκαν και επαληθεύτηκαν. Αναλυτικές προβλέψεις της απόκρισης ενός εξοπλισμού εφοδιασμένο με wire rope μονωτήρες έρχονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον, μία απλοποιημένη αναλυτική μέθοδος αναπτύχθηκε και δείχνει ικανή να παρέχει αξιόπιστες εκτιμήσεις για την μέγιστη απόκριση του εξοπλισμού στον οποίο έχουν εισαχθεί οι συσκευές αυτές. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί το διάγραμμα απόκρισης του εδάφους το οποίο είναι η συνηθισμένη προδιαγραφή για τον εξοπλισμό.

Επίσης υπολογίστηκε πως τα δύσκαμπτα συστήματα αυτών των μονωτήρων μειώνουν ή διατηρούν τις επιταχύνσεις στα ίδια επίπεδα ενώ μειώνουν τις μετατοπίσεις. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας αυτή η μέθοδος μόνωσης δεν είναι μόνιμη, ωστόσο επιτρέπει την εύκολη αφαίρεση για μετεγκατάσταση του εξοπλισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Εφαρμογή σε γέφυρα

3.1 Περιγραφή γέφυρας

Ως αντικείμενο μελέτης επιλέχθηκε μία πραγματική γέφυρα. Η γέφυρα Μεγαλορέματος της Εγνατίας οδού. Η γέφυρα ευρίσκεται μεταξύ διαδοχικών διδύμων σήραγγων : της σήραγγας Βοτονοσίου και της σήραγγας Δύο Κορυφών. Αποτελείται από δύο κλάδους τον Αριστερό και τον Δεξιό. Κάθε κλάδος αποτελείται από συνεχή προεντεταμένο φορέα έντεκα ανοιγμάτων. Αρμοί συστολοδιαστολής τοποθετούνται μόνο στα ακρόβαθρα της γέφυρας και επιτρέπουν οριζόντιες μετακινήσεις κατά την επαπτομενική και ακτινική διεύθυνση ως προς τον άξονα της γέφυρας. Η αρίθμηση των βάθρων γίνεται από δυτικά προς τα ανατολικά κατά την φορά χιλιομέτρησης. Έτσι για τον Δεξιό Κλάδο έχουμε $A_0, M_1, M_2, M_{10}, A_{12}$ και για τον Αριστερό Κλάδο $A_{13}, M_{14}, M_{15}, M_{22}, A_{23}$. Με Α συμβολίζονται τα ακρόβαθρα και με Μ τα μεσόβαθρα.

Εμείς θα μελετήσουμε τον δεξιό κλάδο. Ο Δεξιός Κλάδος της γέφυρας εκτείνεται μεταξύ των Χ.Θ. 6+972.33 έως Χ.Θ. 7+453.021 και έχει συνολικό μήκος 483.45m μεταξύ των αρμών των ακροβάθρων. Η διατομή του φορέα ανωδομής είναι μονοκύψελο κιβώτιο σταθερού ύψους 3.60m και πλάτους 13.0m. Το μήκος των προβόλων της άνω πλάκας του κιβωτίου είναι 2.90m και οι κορμοί έχουν κλίση 1:3,15. Η κάτω πλάκα του κιβωτίου έχει πλάτος 5.56m. Το κιβώτιο προεντείνεται διαμήκως και εγκαρσίως στην άνω πλάκα. Οι κορμοί των μεσοβάθρων είναι ορθογωνικοί κιβωτοειδούς διατομής 3.00x5.80m σταθερού πάχους καθ' ύψος. Τα ακρόβαθρα της γέφυρας είναι γενικώς τοιχοειδούς μορφής.

Τα μεσόβαθρα είναι ορθογωνικής κιβωτοειδούς διατομής 3.00x5.80m σταθερού πάχους καθ' ύψος. Οι φορείς ανωδομής εδράζονται στα βάθρα γενικώς μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων από φυσικό ελαστικό (natural rubber). Τα εφέδρανα περιμετρικά προστατεύονται με επικάλυψη από πολυχλωροπρένιο (noeprren).). Ειδικότερα στα Μεσόβαθρα M_1, M_2, M_9, M_{10} τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα φέρουν επικάλυψη PTFE και οδηγούς ώστε να παρέχεται ελευθερία ολίσθησης μόνο στην επαπτομενική διεύθυνση ως προς τον άξονα της γέφυρας και να λειτουργούν ως ελαστομεταλλικά στην ακτινική διεύθυνση. Τα εφέδρανα των Ακροβάθρων των δύο κλάδων φέρουν επικάλυψη PTFE και έχουν δυνατότητα ολίσθησης και στις δύο διευθύνσεις.

Ο πίνακας 3.1 περιγράφει τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα που χρησιμοποιήθηκαν στα ακρόβαθρα αλλά και σε κάθε μεσόβαθρο.

ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ

ΒΑΘΡΑ ΔΕΞΙΟΥ ΚΛΑΔΟΥ

ΒΑΘΡΟ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ b * d * H _{ελ}	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ
A0	700 x 700 x 128	
M1	850 x 850 x 144	
M2	850 x 850 x 144	
M3	850 x 850 x 128	
M4	850 x 850 x 128	
M5	850 x 850 x 112	
M6	850 x 850 x 112	
M7	850 x 850 x 128	
M8	850 x 850 x 128	
M9	850 x 850 x 144	
M10	850 x 850 x 176	
A11	700 x 700 x 128	

ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ:

α: Διαστάσεις εφεδράνων b*d*H_{ελ}
b,d διαστάσεις κάτοψης σε mm
H_{ελ} συνολικό ύψος ελαστικού

β: Συμβολισμός εφεδράνων

: Ελαστομεταλλικό εφέδρανο

: Ελαστομεταλλικό εφέδρανο με επικάλυψη PTFE και οδηγούς το οποίο παρέχει ελευθερία ολίσθησης μόνο στην εφαπτομενική διεύθυνση ως προς τον άξονα της γέφυρας και λειτουργεί ως ελαστομεταλλικό στην ακτινική διεύθυνση αντιστοίχως.

: Ελαστομεταλλικό εφέδρανο με επικάλυψη PTFE με δυνατότητα ολίσθησης και στις δύο διευθύνσεις.

Πίνακας 3.1 Πίνακας εφεδράνων[9]

Σε κάθε Ακρόβαθρο τοποθετούνται 2 υδραυλικοί αποσβεστήρες τύπου MAURER MHD-750 κατά την εφαπτομενική διεύθυνση του άξονα της γέφυρας και 2 αποσβεστήρες τύπου MAURER MHD-450 κατά την ακτινική διεύθυνση. Οι αποσβεστήρες έχουν τις εξής ιδιότητες:

(α) Για χαμηλές ταχύτητες κίνησης του εμβόλου $v < 0.1 \text{ mm/sec}$ η αντίδραση που αναπτύσσεται είναι πολύ μικρή. Ως εκ τούτου οι μετακινήσεις από θερμοκρασιακές μεταβολές, συστολή ξήρανσης και ερπυσμό δεν αναπτύσσουν σημαντικές αντιδράσεις. Συγκεκριμένα, οι αποσβεστήρες στις χαμηλές αυτές ταχύτητες αναπτύσσουν δύναμη η οποία δεν υπερβαίνει τα 60 KN.

(β) Για ταχύτητες κίνησης του εμβόλου από 0.1mm/sec έως 0.7mm/sec ή δύναμη αυξάνεται σταδιακά.

(γ) Για ταχύτητες κίνησης του εμβόλου από 2mm/sec και άνω, η δύναμη παραμένει πρακτικώς σταθερά, δηλαδή ανεξάρτητη της ταχύτητας. Το σημαντικό πλεονέκτημα της ιδιότητας αυτής είναι ότι υπάρχει μεγάλη κατανάλωση ενέργειας για όλο το φάσμα των ταχυτήτων που αναμένονται σε περίπτωση σεισμού.

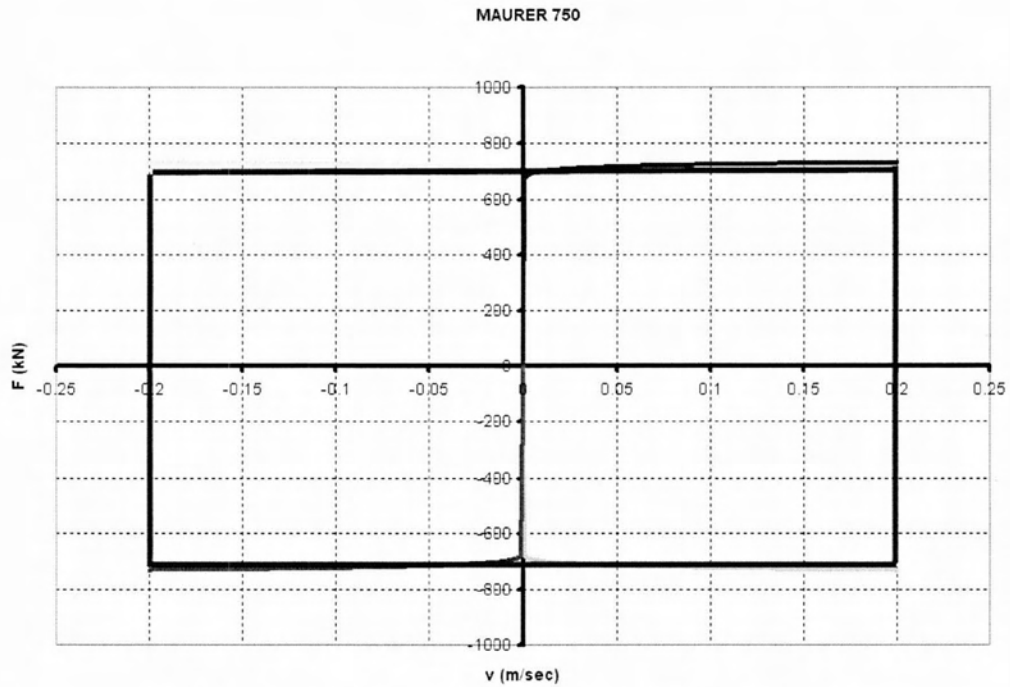
Η δύναμη που αναπτύσσουν δίνεται από τη σχέση

$$F = C \cdot v^{\alpha}$$

Όπου C η σταθερά του αποσβεστήρα 750 KN για τους διαμήκεις

v η ταχύτητα

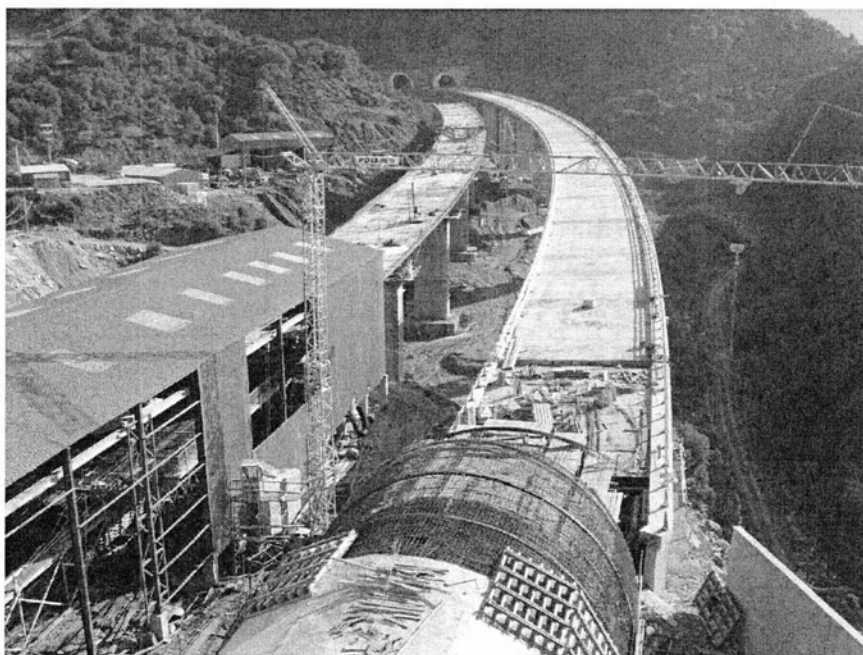
$\alpha = 0.015$ εκθέτης της ταχύτητας,



Διάγραμμα 3.1 Δύναμη-ταχύτητα για τον αποσβεστήρα Maurer 750[9]

Στην μελέτη μας δεν θα λάβουμε υπόψιν τους αποσβεστήρες κατά την ακτινική διεύθυνση της γέφυρας καθώς οι μετατοπίσεις σε αυτήν την διεύθυνση φροντίζεται λόγω κατασκευής να πολύ μικρές και δεν επηρεάζουν καθόλου τα αποτελέσματα.

Στις εικόνες 3.1-3.6 παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό της γέφυρας κατά τη διάρκεια της φάσης κατασκευής



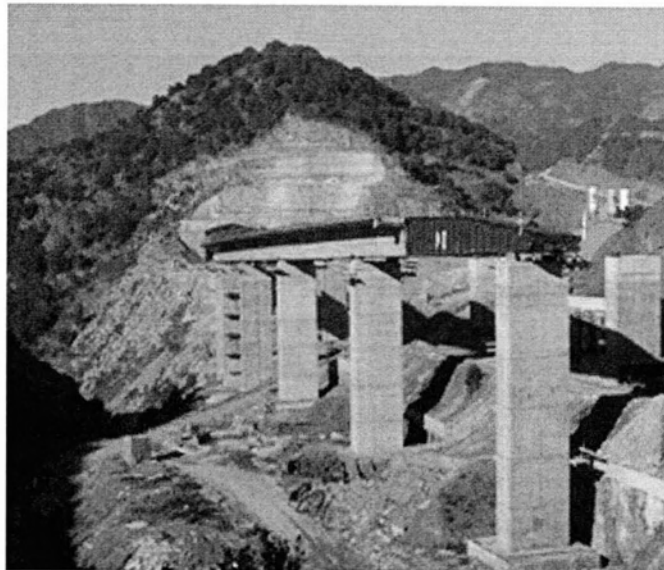
Εικόνα 3.1 Πάνω από το ανατολικό στόμιο της σήραγγας Βοτονοσίου



Εικόνα 3.2 Διάταξη μεσόβαθρων



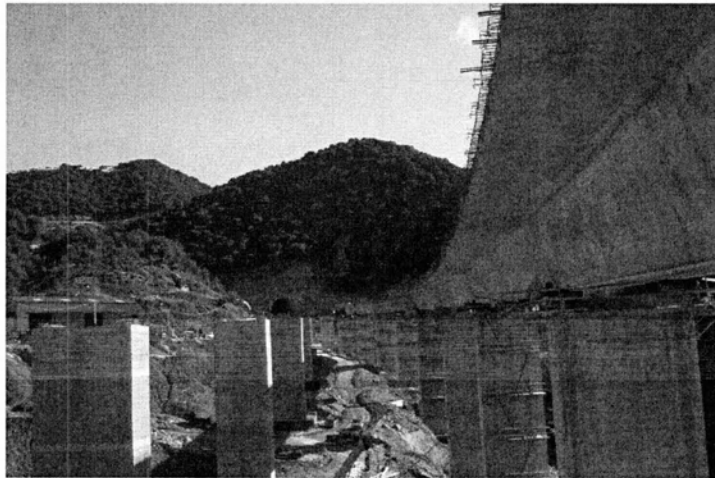
Εικόνα 3.3 Ολοκλήρωση δεξιού κλάδου



Εικόνα 3.4 Κατά τη φάση προώθησης του δεξιού κλάδου



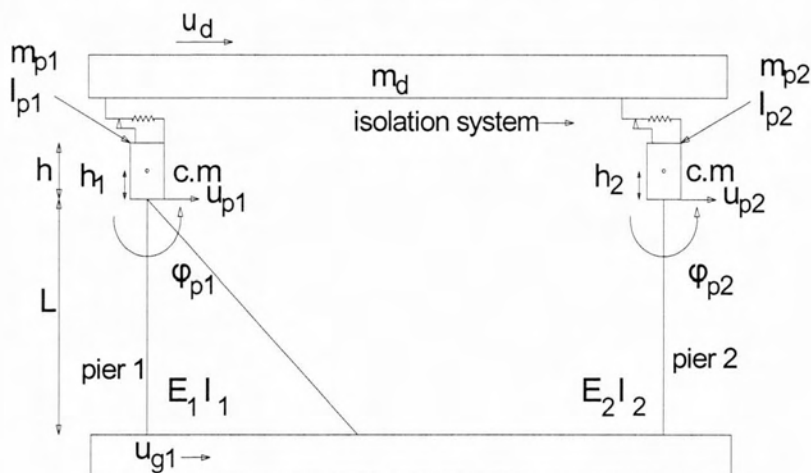
Εικόνα 3.5 Κατασκευή μεσόβαθρων



Εικόνα 3.6 Άποψη από το ακρόβαθρο Α0

3.2 Μοντελοποίηση

Το αναλυτικό μοντέλο της γέφυρας που μελετήθηκε αποτελείται από ένα άκαμπτο βάθρο το οποίο συμβολίζει τα δύο ακρόβαθρα, το κατάστρωμα, και δέκα με ένα βάθρο το οποίο λαμβάνει υπόψιν του την ελαστικότητα του υποστυλώματος, την στροφή στην κορυφή του υποστυλώματος, τα χαρακτηριστικά των δυνάμεων αποκατάστασης και των συσκευών απόσβεσης, το οποίο συμβολίζει τα δέκα μεσόβαθρα.

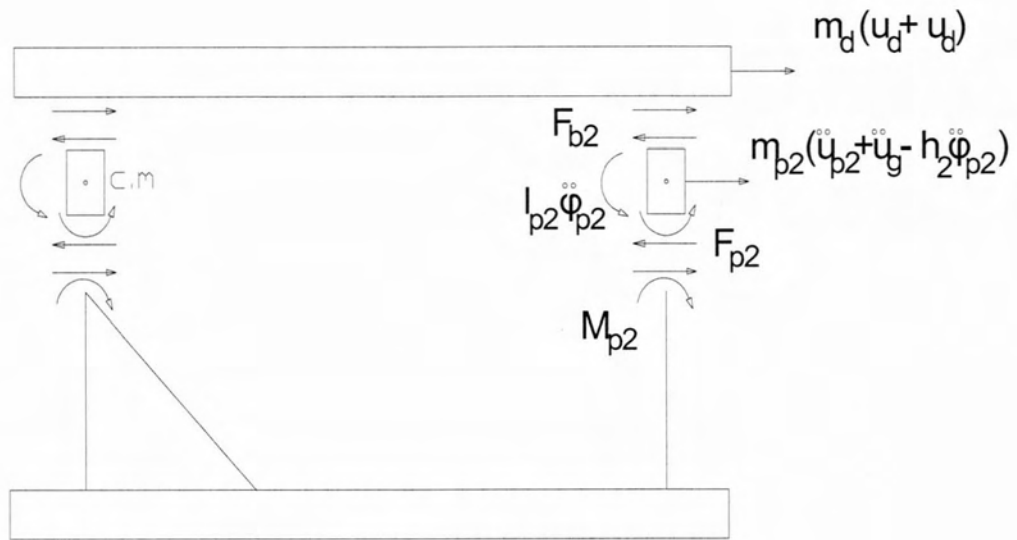


Σχήμα 3.1 Το μοντέλο της γέφυρας

Το μοντέλο αποτελείται από 5 βαθμούς ελευθερίας:
 Την μετατόπιση του καταστρώματος " u_d ",
 Την μετατόπιση των υποστυλωμάτων " u_{p1} " και " u_{p2} "
 Την στροφή των υποστυλωμάτων " φ_{p1} " και " φ_{p2} "

Κανονικά η γέφυρα έχει άλλους τρεις βαθμούς ελευθερίας την στροφή του καταστρώματος και την στροφή στα δύο θεμέλια. Αυτοί οι 3 βαθμοί ελευθερίας παραλείπονται καθώς η συμμετοχή τους στα αποτελέσματα είναι ελάχιστη όπως έδειξαν τα πειράματα.

Κάθε υποστυλώμα αντιπροσωπεύεται από ένα στοιχείο δοκού τοποθετημένο στον σεισμικό μονωτήρα, καθώς και η μάζα του είναι συγκεντρωμένη στην κορυφή του. Η συγκεντρωμένη μάζα θεωρείται ως ένα άκαμπτο σώμα ύψους " h ", μάζα " m_p " και τη ροπή αδράνειας γύρω από το κέντρο μάζας " I_p ". Το κέντρο της μάζας βρίσκεται σε απόσταση " h_i " από το κάτω μέρος του σώματος. Οι ιδιότητες του υποστυλώματος που καθορίζουν την δυναμική απόκριση, είναι το μήκος του υποστυλώματος " L_i ", η ροπή αδράνειας " I_i " και το μέτρο ελαστικότητας " E_i ". Το κατάστρωμα θεωρείται ως ένα άκαμπτο στερεό αρθρωτό στις κορυφές των υποστυλωμάτων (χωρίς στιγμιαία μετατόπιση). Στην πραγματικότητα, υπάρχει στιγμιαία μετατόπιση λόγω της περιστροφικής ακαμψίας των δίσκων των εφεδράνων ολίσθησης.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ελεύθερου σώματος

Οι εξισώσεις κίνησης υπολογίζονται θεωρώντας δυναμική ισορροπία του μεταφορικού βαθμού ελευθερίας του καταστρώματος και των υποστυλωμάτων και του στροφικού βαθμού ελευθερίας των υποστυλωμάτων. Το προκύπτον σύστημα διαφορικών εξισώσεων είναι:

$$m_d(\ddot{u}_d + \ddot{u}_g) + F_{b1} + F_{b2} = 0 \quad (3-1)$$

$$m_{p1}(\ddot{u}_{p1} + \ddot{u}_g - h_1\ddot{\phi}_{p1}) + F_{p1} - F_{b1} = 0 \quad (3-2)$$

$$m_{p2}(\ddot{u}_{p2} + \ddot{u}_g - h_2\ddot{\phi}_{p2}) + F_{p2} - F_{b2} = 0 \quad (3-3)$$

$$I_{p1}\ddot{\phi}_{p1} + M_{p1} + F_{p1}h_1 + F_{b1}(h - h_1) = 0 \quad (3-4)$$

$$I_{p2}\ddot{\phi}_{p2} + M_{p2} + F_{p2}h_2 + F_{b2}(h - h_2) = 0 \quad (3-5)$$

Αυτές οι εξισώσεις αφορούν μοντέλο γέφυρας το οποίο έχει και τα δύο του υποστυλώματα ελαστικά (flexible). Στο συγκεκριμένο μοντέλο οι εξισώσεις (3-2) & (3-4) δεν συμμετέχουν καθώς το υποστυλώμα 1 που συμβολίζει τα ακρόβαθρα είναι άκαμπτο (stiff).

Όπου " \ddot{u}_g " είναι η οριζόντια επιτάχυνση του εδάφους, " F_{b1} , F_{b2} " οι πλευρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται από το σύστημα μόνωσης, " F_{pi} " οι πλευρικές δυνάμεις στα υποστυλώματα και " M_{pi} " είναι οι καμπτικές ροπές στα υποστυλώματα. Οι γραμμικές ελαστικές δυνάμεις επαναφοράς των υποστυλωμάτων μπορούν να προσομοιωθεί με μία εξίσωση συνάρτηση της μετατόπισης και της στροφής των υποστυλωμάτων, όπως φαίνεται στον πίνακα παρακάτω. Στο δεύτερο μέρος της εξίσωσης υπολογίζονται οι δυνάμεις απόσβεσης που ασκούνται στα υποστυλώματα.

$$\begin{Bmatrix} F_{pi} \\ M_{pi} \end{Bmatrix} = E_i I_i \begin{bmatrix} \frac{12}{L_i^3} & \frac{6}{L_i^2} \\ \frac{6}{L_i^2} & \frac{4}{L_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{pi} \\ \varphi_{pi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{pi}^1 & 0 \\ 0 & C_{pi}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_{pi} \\ \dot{\varphi}_{pi} \end{Bmatrix} \quad (3-6)$$

Πρέπει να σημειώσουμε ότι οι μη γραμμικότητες των αποσβεστήρων Maurer που παρουσιάστηκαν είχαν ως αποτέλεσμα να εισάγουν μεγάλη δυσκαμψία στις εξισώσεις κίνησης γεγονός που συνεπάγεται τη δημιουργία αριθμητικών ασταθειών όταν παρουσιαζόταν ο βαθμός ελευθερίας της στροφής για τα ακρόβαθρα. Συνεπώς για απλοποιητικούς λόγους αυτός ο βαθμός ελευθερίας παραλήφθηκε.

Για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN κατάλληλα τροποποιημένη ώστε να επιλύει τις εξισώσεις για το συγκεκριμένο μοντέλο γέφυρας.

3.3 Τα δεδομένα

Για την εισαγωγή των δεδομένων θεωρήθηκε διεθνές σύστημα μονάδων μέτρησης(S.I.)

Η επιτάχυνση της βαρύτητας $g = 9.81 m/s^2$

Ειδικό βάρος σκυροδέματος $\gamma = 25 KN/m^3$

Κατάστρωμα γέφυρας:

Υπολογίστηκε συνολικό βάρος καταστρώματος

$$Wd = 159000KN$$

Το ποσοστό του βάρους καταστρώματος που πάει στα ακρόβαθρα

$$Wd_1 = 26500KN$$

Το ποσοστό του βάρους καταστρώματος που πάει στα μεσόβαθρα

$$Wd_2 = 132500KN$$

Ύψος καταστρώματος

$$h = 2.5m$$

Μεσόβαθρα:

Θεωρήθηκε ίδιο ύψος για όλα τα μεσόβαθρα για απλοποιητικούς λόγους ίσο με το μέσο όρο όλων των μεσόβαθρων.

$$h_p = 22m$$

Υπολογίστηκε συνολικό βάρος για τα μεσόβαθρα

$$W_p = 30810KN$$

Ροπή αδράνειας κέντρου μάζας

$$I_p = 1325kgr \cdot m^2$$

Μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

$$E = 34000MPa$$

Ροπή αδράνειας των μεσόβαθρων

$$I = 87.5m^4$$

Συντελεστής απόσβεσης

$$C = 481.25KN \cdot s/m$$

Για τα εφέδρανα ολίσθησης που εδράζουν στα μεσόβαθρα θεωρήθηκε

$\mu = 0.01$, ο συντελεστής τριβής

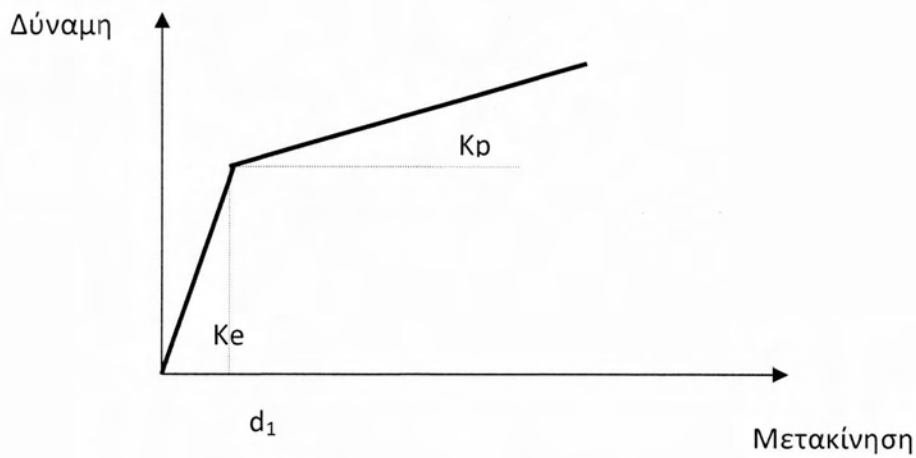
$a = 75 \frac{s}{m}$, ο συντελεστής ταχύτητας ολίσθησης

Για τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα που χρησιμοποιήθηκαν στα μεσόβαθρα θεωρήθηκε

$$a = \frac{K_p}{K_{el}} = 0.44, \text{ ο λόγος μετελαστικής προς ελαστικής ακαμψίας}$$

$F_y = 1180KN$, η δύναμη διαρροής

$u_y = 6.6mm$, η μετατόπιση διαρροής



Διάγραμμα 3.2 Δύναμη-μετατόπιση για τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα

Οι παράμετροι καθορισμού του διγραμμικού δίνονται στον ακόλουθο πίνακα :

Διαστάσεις Εφεδράνου Β x D x H	Ελαστική Ακαμψία $K_e(N/mm)$	Ελαστική Μετακίνηση $d_1(mm)$	Ελαστικό Όριο $F_1(N)$	Μετελαστική Ακαμψία $K_p(N/mm)$
850 x 850 x 112	15000	7,70	115500	7135
850 x 850 x 128	15000	6,07	91050	6241
850 x 850 x 144	15000	5,00	75000	5543
850 x 850 x 160	15000	4,25	63750	4992
850 x 850 x 176	15000	3,68	55200	4540

Ακρόβαθρα:

Για να προσομοιωθούν τα ακρόβαθρα στο συγκεκριμένο μοντέλο, θεωρήθηκαν ως δύο μεσόβαθρα με γεωμετρικά χαρακτηριστικά ίδια με τα υπόλοιπα μεσόβαθρα, τα οποία όμως είναι άκαμπτα (άπειρη δυσκαμψία) και απαγορεύεται η στροφή τους.

Τα εφέδρανα ολίσθησης προσομοιώθηκαν ακριβώς όπως αυτά στα μεσόβαθρα και τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα παραλήφθηκαν καθώς δεν είχαν καμία επιρροή στα αποτελέσματα για την συγκεκριμένη εργασία.

Οι αποσβεστήρες Maurer δεν εισήχθησαν στο μοντέλο όπως περιγράφηκαν στην ενότητα 3.1, καθώς το πρόγραμμα δεν μπορούσε να επιλύσει τις διαφορικές εξισώσεις που προέκυπταν λόγω γραμμικότητας. Για αυτόν το λόγο προσομοιώθηκαν ως επιπλέον εφέδρανα ολίσθησης με τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

$\mu = 0.113$, ο συντελεστής τριβής

$a = 75 \frac{s}{m}$, ο συντελεστής ταχύτητας ολίσθησης

Wire ropes:

Για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά των μονωτήρων από συρματόσχοινο (wire ropes) θα αντικαταστήσουμε τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα που υπάρχουν στα μεσόβαθρα με αυτούς τους μονωτήρες. Όπως ανέφερα και παραπάνω στο εμπόριο οι μονωτήρες αυτοί ποικίλουν και είναι εύκολο για κάποιον να επιλέξει τους κατάλληλους μονωτήρες με τα χαρακτηριστικά που θέλει. Συνεπώς κατάλληλη διάταξη μονωτήρων ώστε να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Σεισμικές διεγέρσεις

Για την μελέτη της συμπεριφοράς της γέφυρας χρησιμοποιήθηκαν 5 τεχνητά και 5 φυσικά επιταχυνσιογραφήματα έτσι ώστε να έχουμε μία πιο ολοκληρωμένη άποψη για την συμπεριφορά του συστήματος σεισμικής μόνωσης.

4.1 Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα

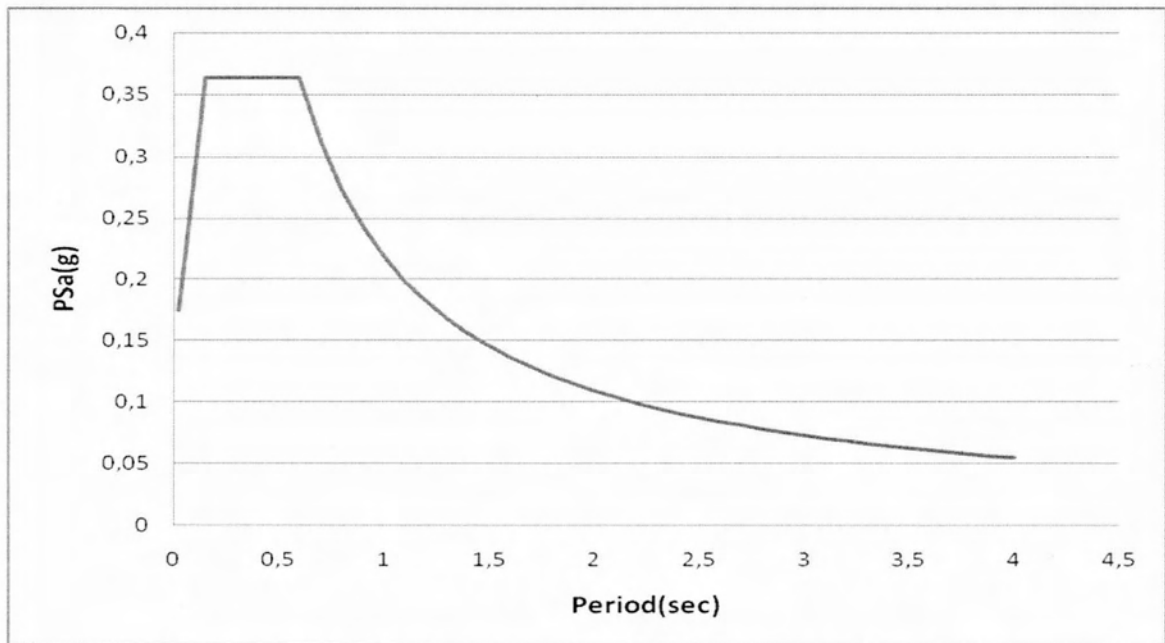
Η παραγωγή των συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων γίνεται με το πρόγραμμα SIMQKE-2 θεωρώντας τραπεζοειδή περιβάλλουσα έντασης (trapezoidal intensity envelope) που χαρακτηρίζεται από earthquake rise time 4 sec και earthquake level time of intensity envelope ίσο με 11 sec. Η επιθυμητή διάρκεια του επιταχυνσιογραφήματος καθορίστηκε σε 20 sec και το χρονικό διάστημα διακριτοποίησης (discretization interval) λήφθηκε ίσο με 0.01sec. Ως εκ τούτου το κάθε συνθετικό επιταχυνσιογράφημα περιγράφεται με 2001 χρονικά σημεία. Η διάρκεια των 20sec καθορίστηκε με βάση την σύσταση του. Το ποσοστό απόσβεσης καθορίστηκε σε 5%. Τα επιταχυνσιογραφήματα και τα αντίστοιχα φάσματα δίνονται στα Σχήματα 1 έως 5. Φυσικά εισήχθη το φάσμα σχεδιασμού της γέφυρας ώστε τα επιταχυνσιογραφήματα που παρήχθησαν να ακολουθούν το φάσμα σχεδιασμού της γέφυρας σύμφωνα με τον ΕΑΚ. Χρησιμοποιήθηκε μειωτικός συντελεστής 0,7.

$$0 \leq T < T_1 \quad \Phi_z(T) = A\gamma_z \left[1 + (\eta\beta_0 - 1) \frac{T}{T_1} \right]$$

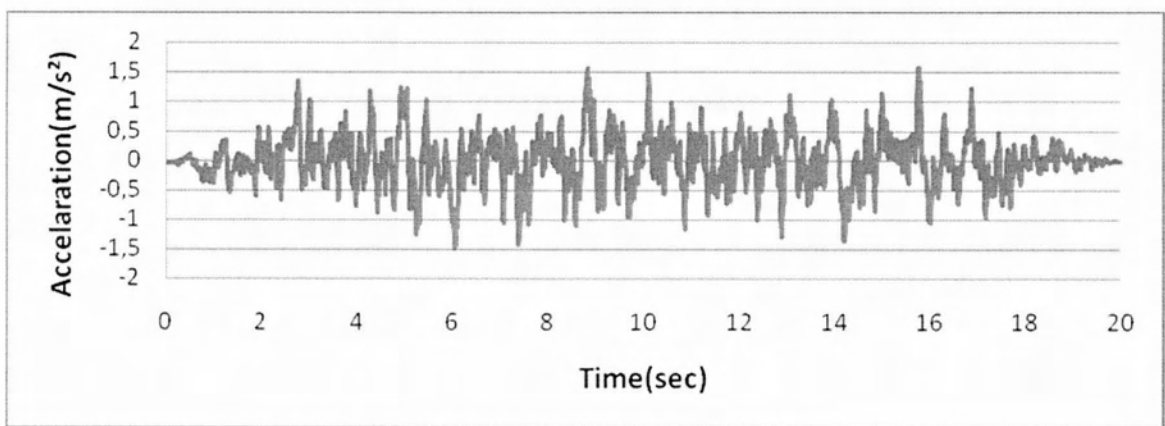
$$T_1 \leq T \leq T_2 \quad \Phi_z(T) = A\gamma_1\eta\beta_0$$

$$T_2 < T \quad \Phi_z(T) = A\gamma_1\eta\beta_0 \frac{T_2}{T}$$

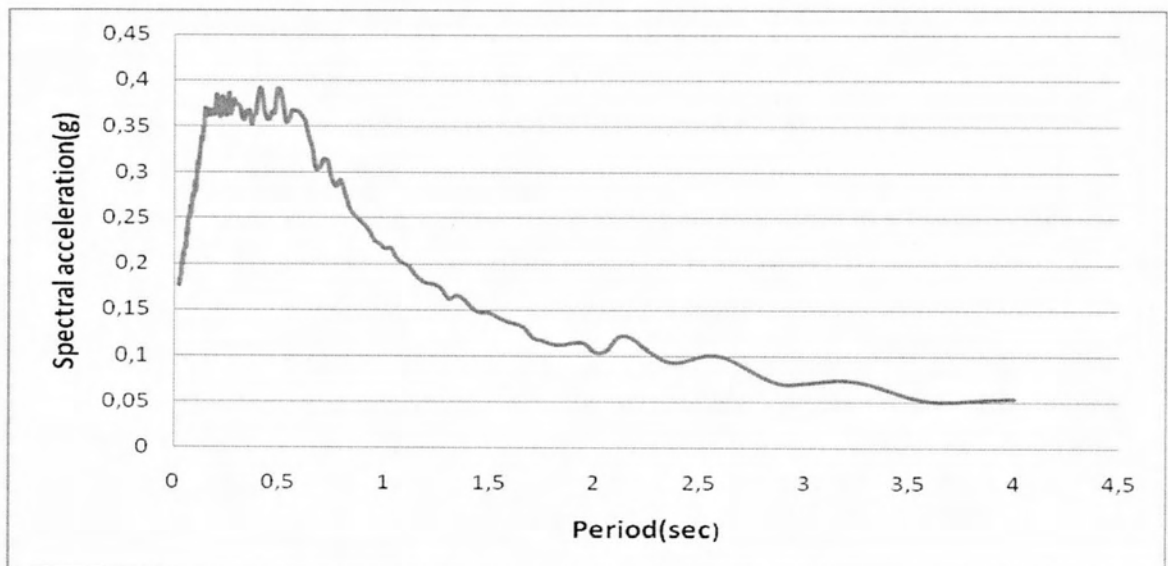
α	0.16
γ	1.3
η	1
β_0	2.5
T_1	0.15
T_2	0.6
q	1.00
g	9.81



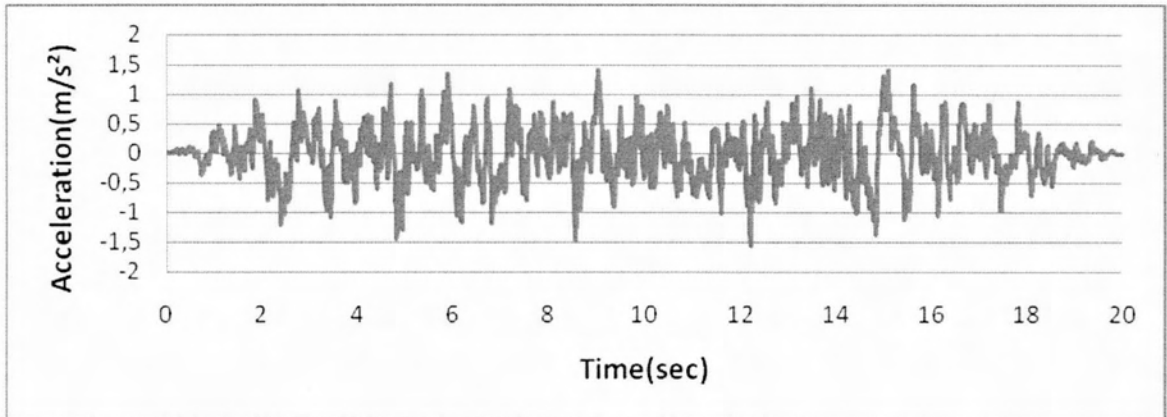
Διάγραμμα 4.1 Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για απόσβεση 5%(ΕΑΚ)



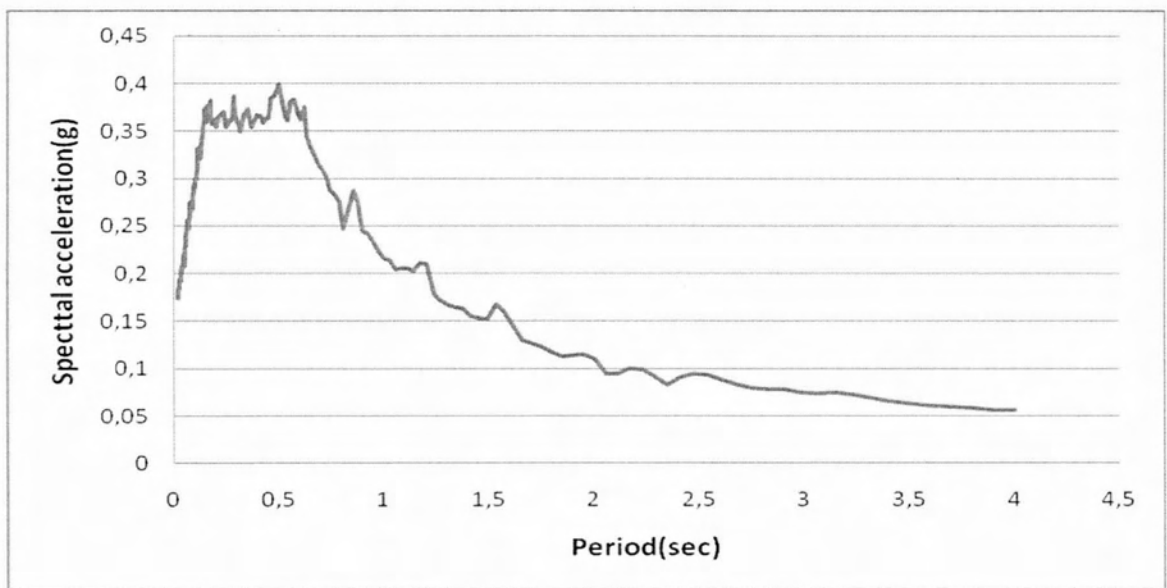
Διάγραμμα 4.2 Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα E1111



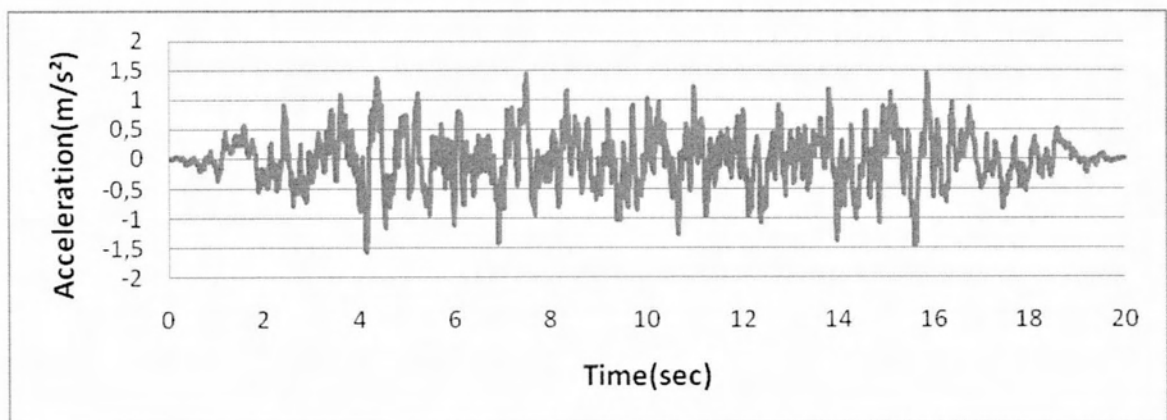
Διάγραμμα 4.2 Φάσμα απόκρισης για τον E1111



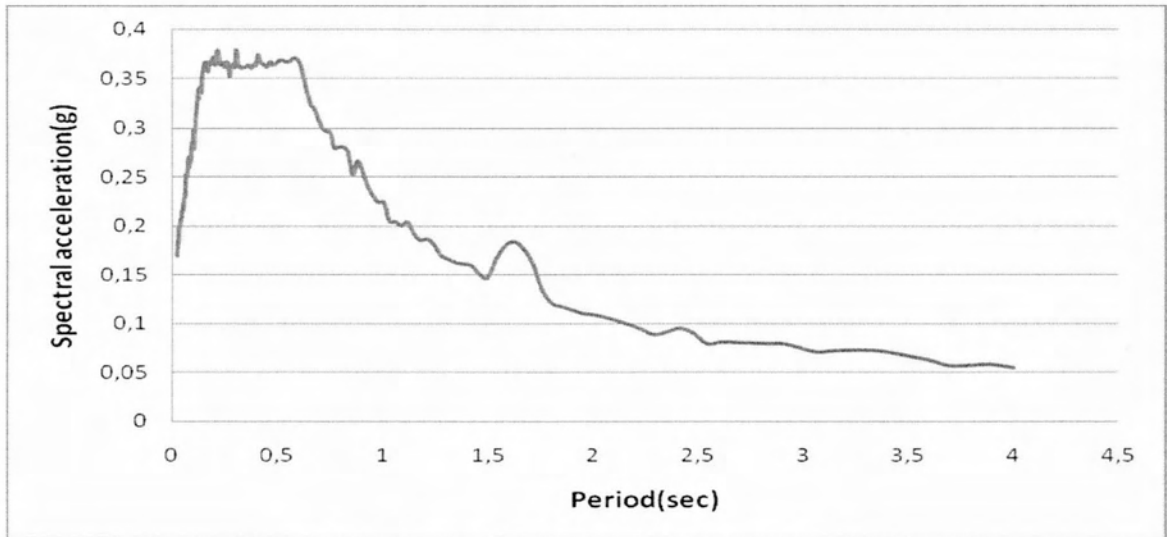
Διάγραμμα 4.3 Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα E1235



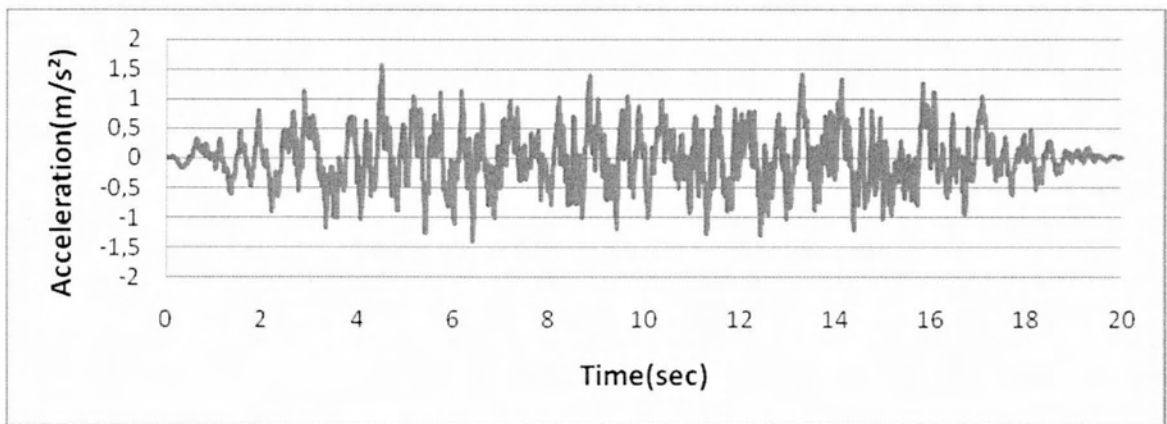
Διάγραμμα 4.4 Φάσμα απόκρισης για τον E1235



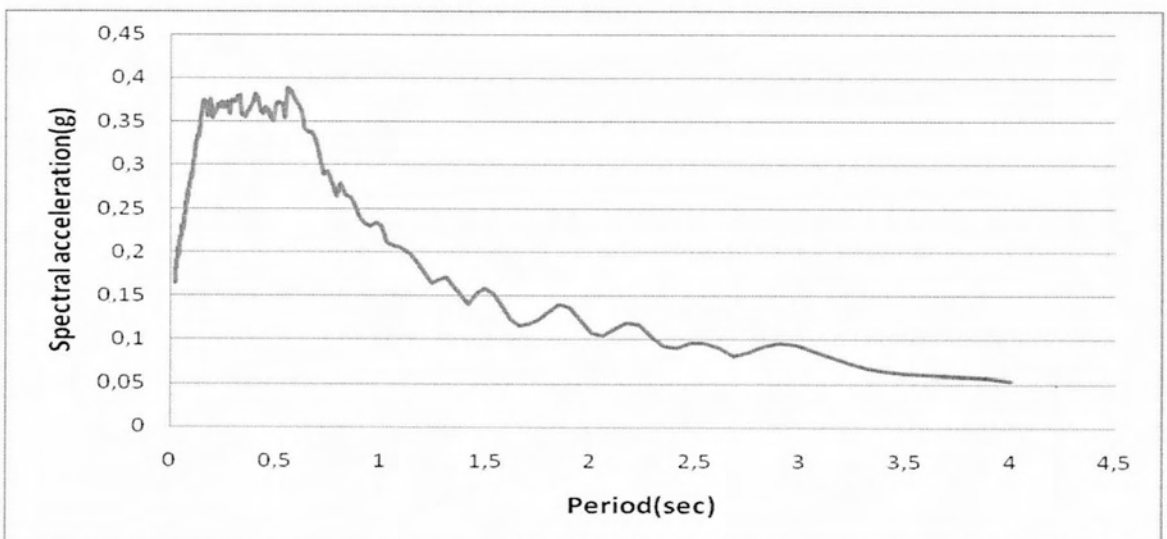
Διάγραμμα 4.5 Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα E2387



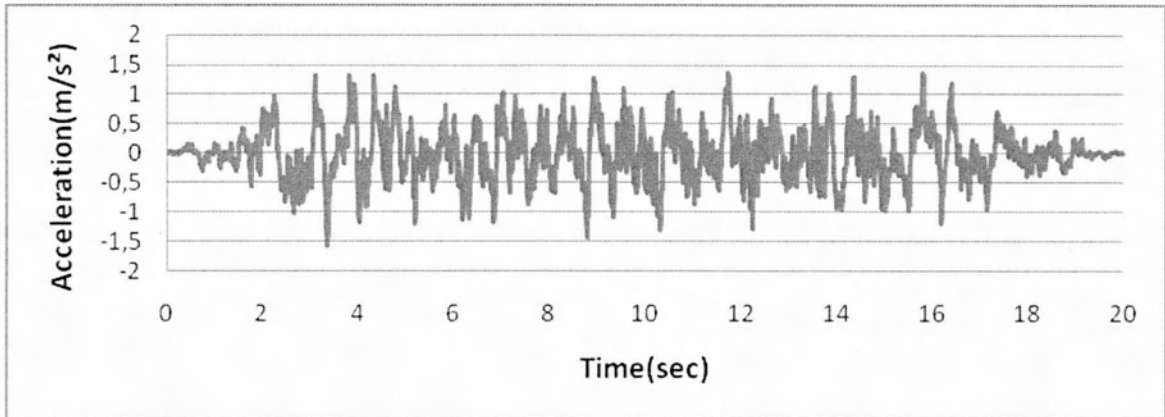
Διάγραμμα 4.6 Φάσμα απόκρισης για τον E2387



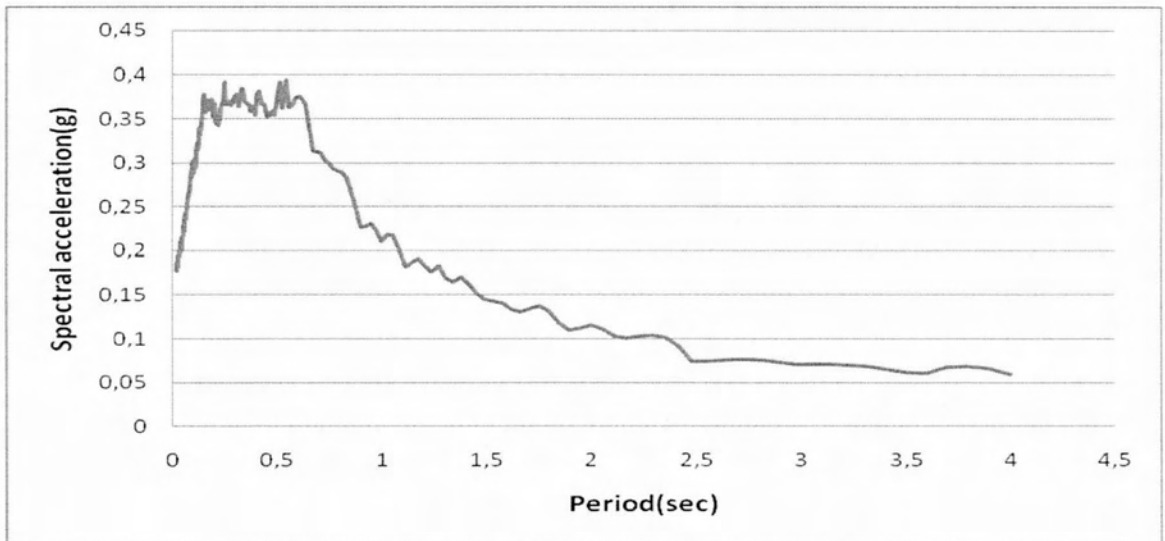
Διάγραμμα 4.7 Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα E5679



Διάγραμμα 4.8 Φάσμα απόκρισης για τον E5679



Διάγραμμα 4.9 Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα E9873

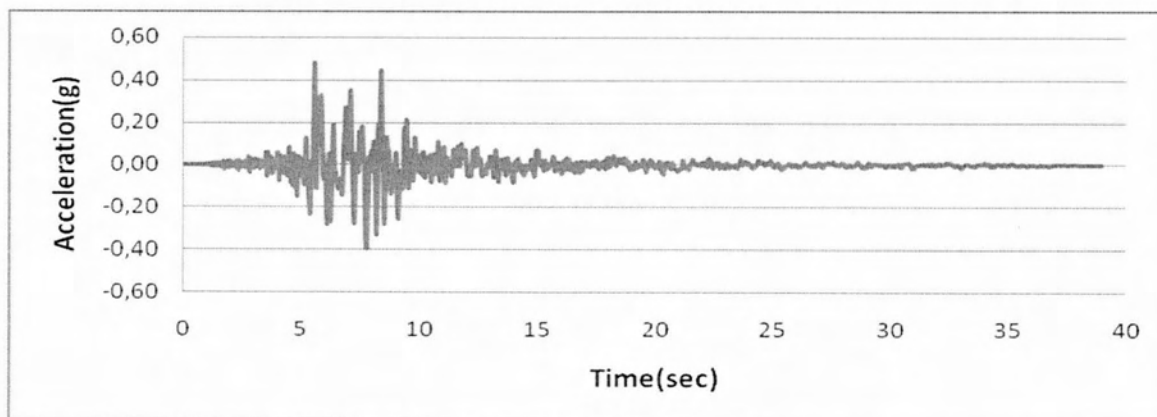


Διάγραμμα 4.10 Φάσμα απόκρισης για τον E9873

4.2 Φυσικά επιταχυνσιογραφήματα

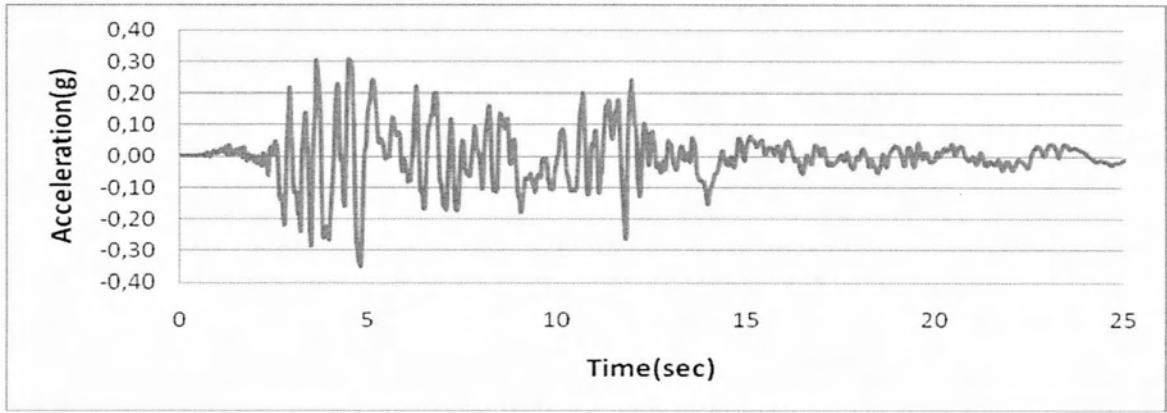
Τα φυσικά επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήσαμε σε αυτήν την μελέτη πάρθηκαν από τη βάση δεδομένων **Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)**. Αντιπροσωπεύουν 5 πολύ δυνατούς σεισμούς και είναι οι ακόλουθοι: (Χάριν ευκολίας οι σεισμοί θα αναφέρονται με το όνομα της περιοχής που έγιναν)

A/A	Περιοχή	Ημερομηνία	Σταθμός	Πηγή	Κατεύθυνση	Μέγεθος
1.	IMPERIAL VALLEY	10 / 15 / 79	5165 El Centro Differential Array	USGS	IMPVALL/H-EDA360	Mw = 6.5
2.	DUZCE	11 / 12 / 99	Duzce	ERD	DUZCE/DZC180	Mw = 7.2
3.	CHI-CHI	09 / 20 / 99	TCU072	CWB	CHICHI/TCU072-N	Mw = 7.3
4.	KOBE	01 / 16 / 95	Takarazuka	CUE	KOBE/TAZ000	Mw = 6.9
5.	TABAS, IRAN	09 / 16 / 78	9102 Dayhook		TABAS/DAY-LN	Mw = 7.8

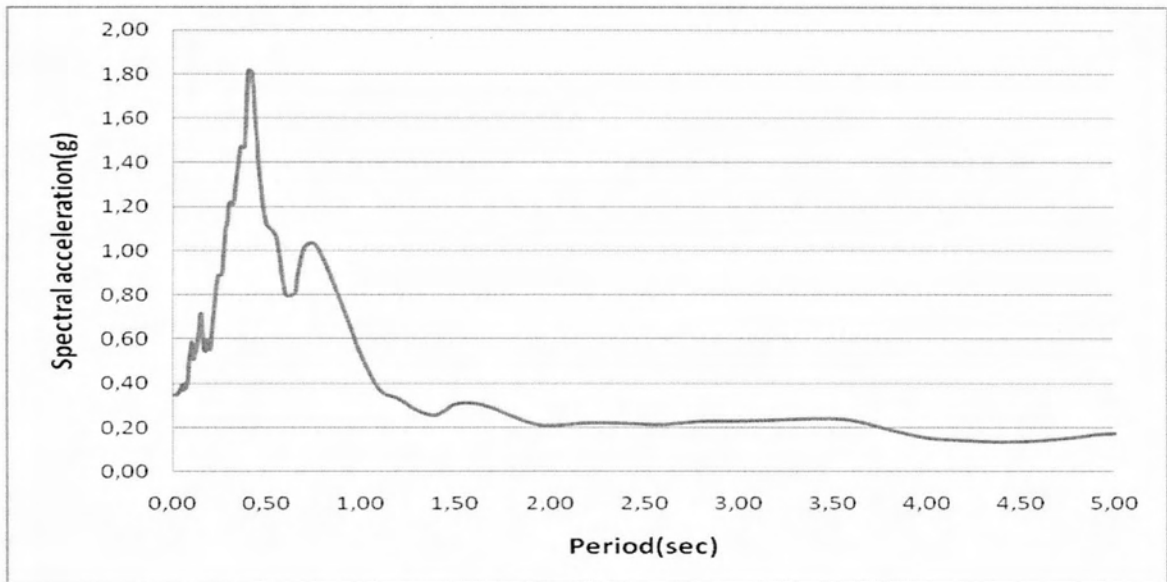


Διάγραμμα 4.11 Επιταχυνσιογράφημα Imperial Valley 10/15/79

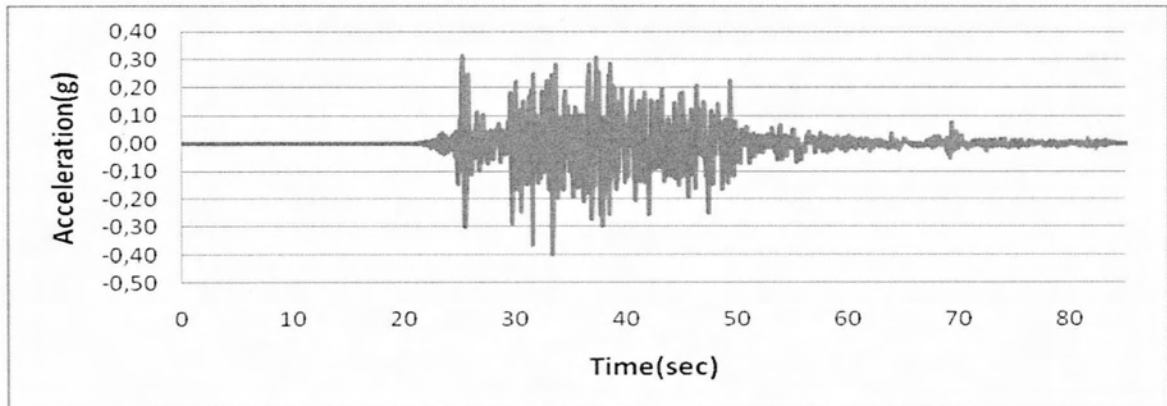
Διάγραμμα 4.12 Φάσμα απόκρισης για Imperial Valley 10/15/79



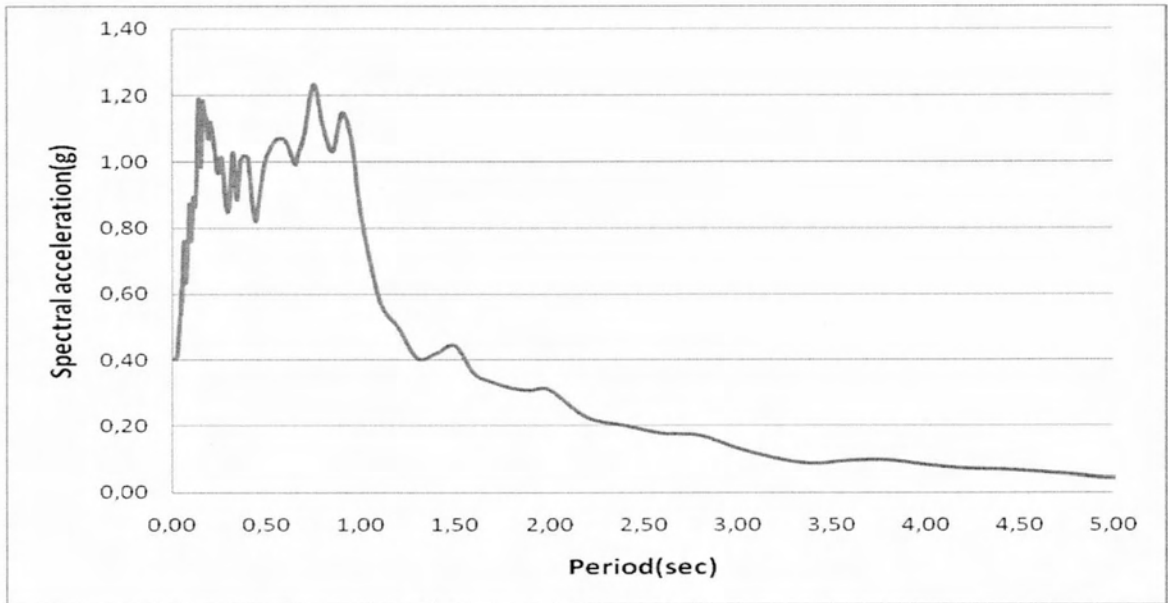
Διάγραμμα 4.13 Επιταχυνσιογράφημα Duzce 11/12/99



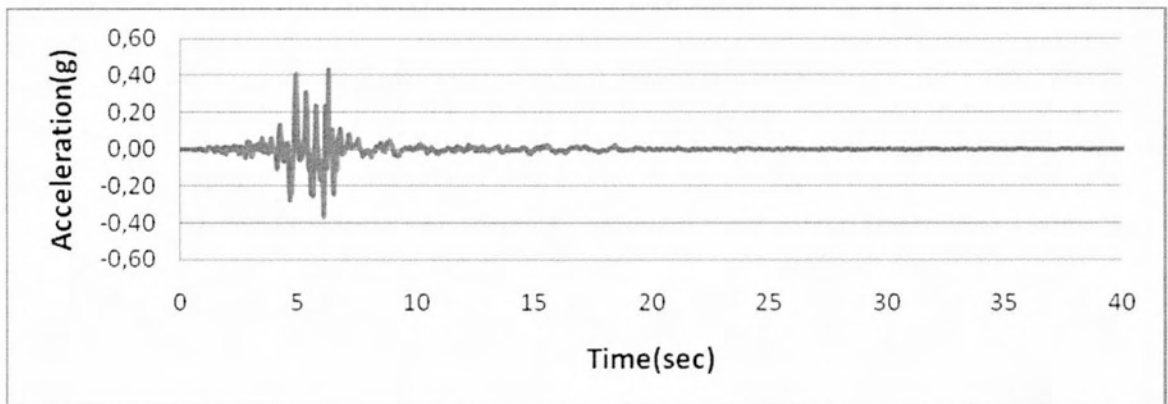
Διάγραμμα 4.14 Φάσμα απόκρισης για Duzce 11/12/99



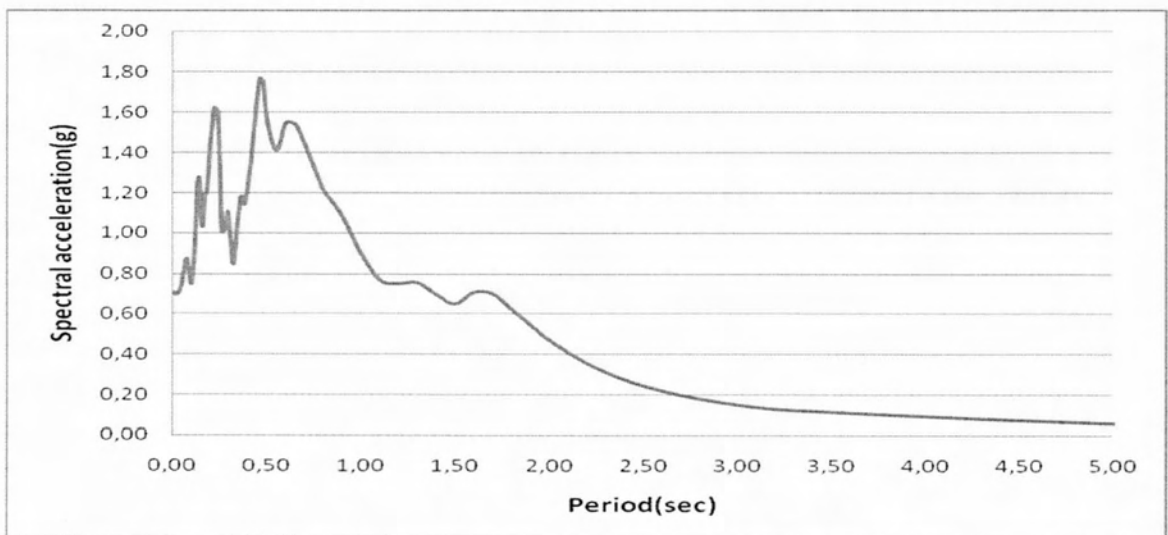
Διάγραμμα 4.15 Επιταχυνσιογράφημα Chi-Chi 09/20/99



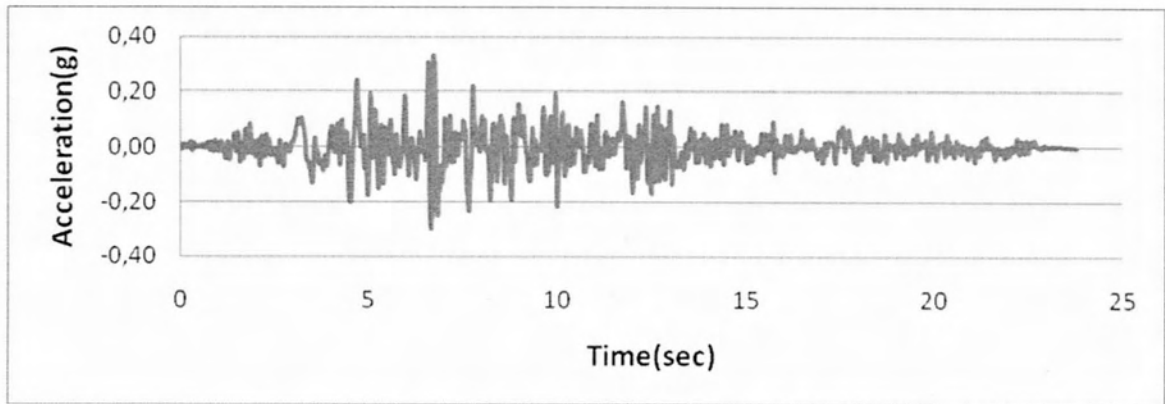
Διάγραμμα 4.16 Φάσμα απόκρισης για Chi-Chi 09/20/99



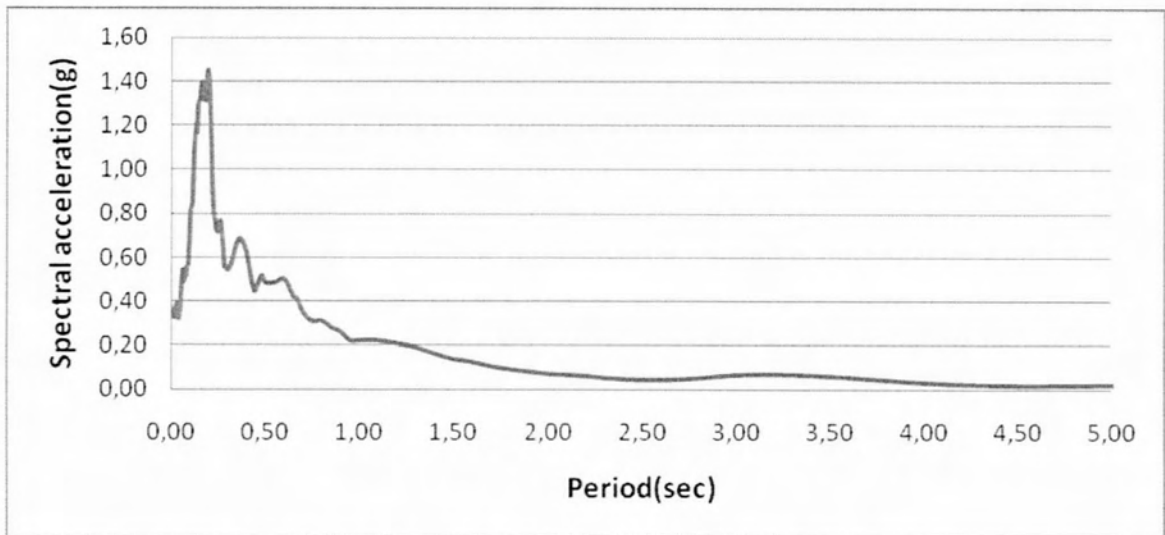
Διάγραμμα 4.17 Επιταχυνσιογράφημα Kobe 01/16/95



Διάγραμμα 4.18 Φάσμα απόκρισης για Kobe 01/16/95



Διάγραμμα 4.19 Επιταχυνσιογράφημα Tabas, Iran 09/16/78



Διάγραμμα 4.20 Φάσμα απόκρισης για Tabas, Iran 09/16/78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

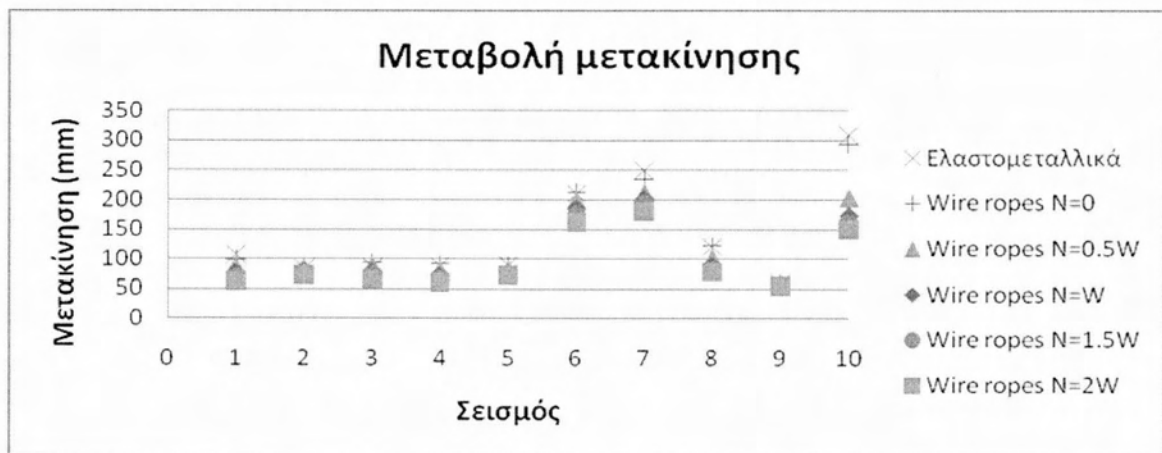
5.1 Σύστημα μόνωσης

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέγιστες μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα μόνωσης για κάθε σεισμό και για κάθε διάταξη μονωτήρων που χρησιμοποιείται (διάγραμμα 5.1). Οι μετατοπίσεις αυτές ισούνται με την διαφορά της μετατόπισης που αναπτύσσεται στα μεσόβαθρα " u_{p2} " από αυτήν που αναπτύσσεται στο κατάστρωμα " u_d ". Η μετατόπιση στα ακρόβαθρα ισούται με αυτήν του καταστρώματος καθώς λόγω της μεγάλης τους δυσκαμψίας " $u_{p1}=0$ ". Ωστόσο οι μετατοπίσεις καταστρώματος και συστήματος μόνωσης είναι περίπου ίσες καθώς οι " u_{p2} " είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις " u_d ". Η μετατόπιση του καταστρώματος είναι ουσιαστικά η μετακίνηση του κέντρου βάρους από την αρχική του θέση, η οποία λήφθηκε υπόψιν ως η θέση με συντεταγμένες (0,0). Επίσης παρουσιάζονται οι μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται στα εφέδρανα ολίσθησης (διάγραμμα 5.2), οι μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται είτε στα ελαστομεταλλικά εφέδρανα είτε στους

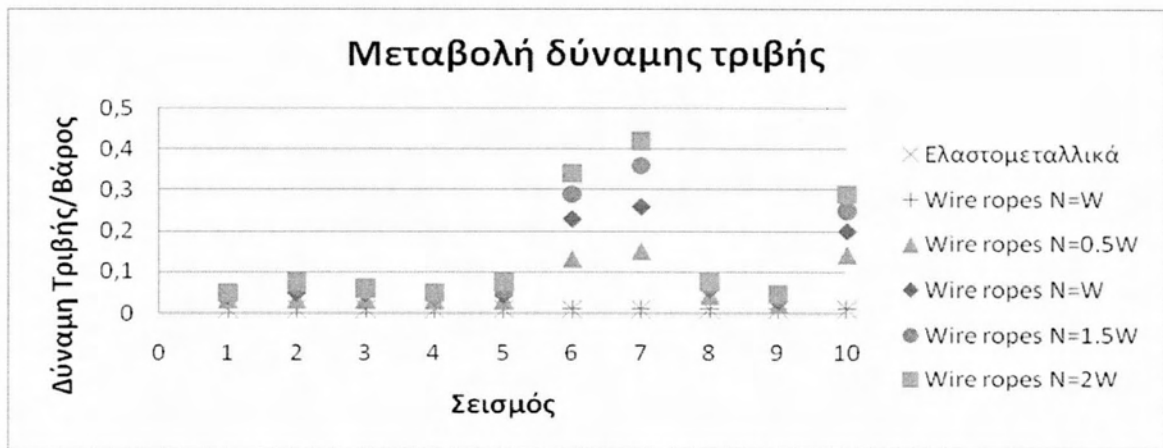
μονωτήρες από συρματόσχοινο (wire ropes) ανάλογα με το ποια συσκευή μόνωσης χρησιμοποιείται (διάγραμμα 5.3) και οι μέγιστες συνολικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σύστημα μόνωσης και ισούνται με το άθροισμα των δύο παραπάνω δυνάμεων (διάγραμμα 5.4). Όπως και στο διάγραμμα των μετακινήσεων έτσι και εδώ παρουσιάζονται οι μέγιστες δυνάμεις για κάθε σεισμό ανάλογα με τον τρόπο μόνωσης που χρησιμοποιώ. Οι μέγιστες δυνάμεις είναι διαιρεμένες με το ποσοστό του βάρους του καταστρώματος που αντιστοιχεί στα μεσόβαθρα της γέφυρας. Στο υπόμνημα κάθε διαγράμματος ορίζεται κάθε φορά το σύστημα μόνωσης. Οι σεισμοί για τους οποίους αναφερόμαστε παρουσιάζονται σε παρακάτω πίνακα. (πίνακας 5.1)

Πίνακας 5.1 Σεισμοί

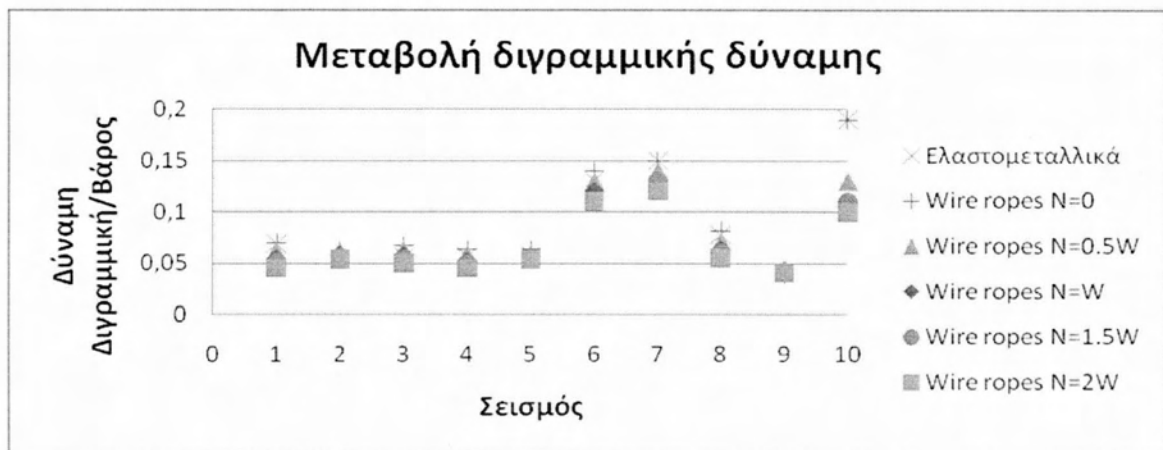
1	E 1111
2	E 1235
3	E 2387
4	E 5679
5	E 9873
6	Imperial Valley
7	Chi-Chi
8	Kobe
9	Tabas
10	Duzce



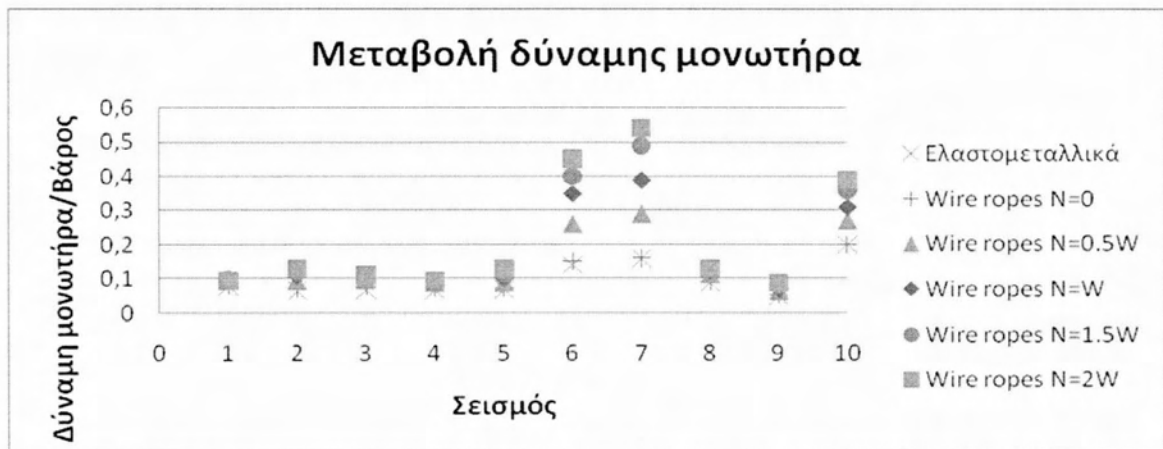
Διάγραμμα 5.1 Μέγιστη μετακίνηση συστήματος μόνωσης σε κάθε περίπτωση για κάθε σεισμό



Διάγραμμα 5.2 Μέγιστη δύναμη τριβής προς το βάρος σε κάθε περίπτωση για κάθε σεισμό



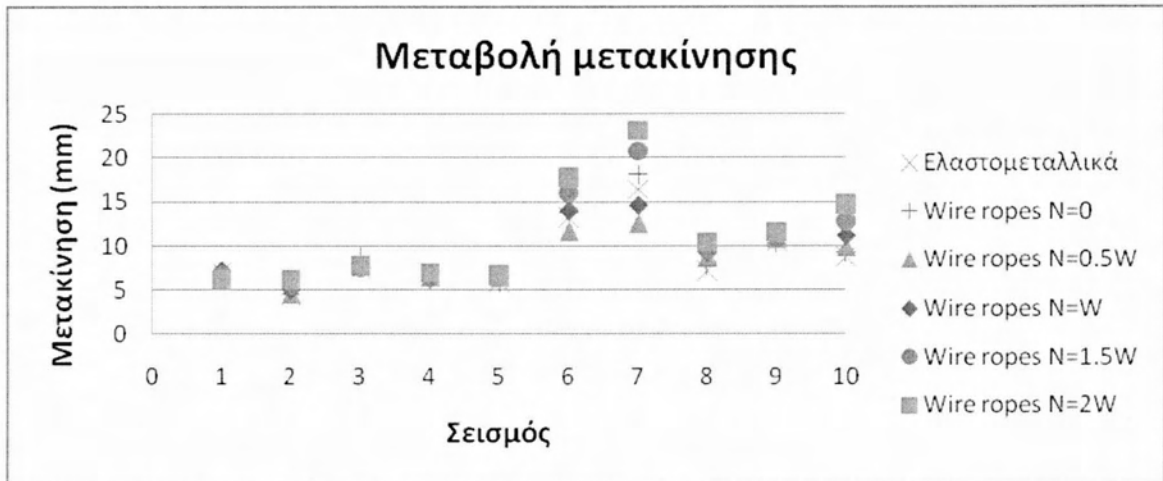
Διάγραμμα 5.3 Μέγιστη διγραμμική δύναμη προς το βάρος σε κάθε περίπτωση για κάθε σεισμό



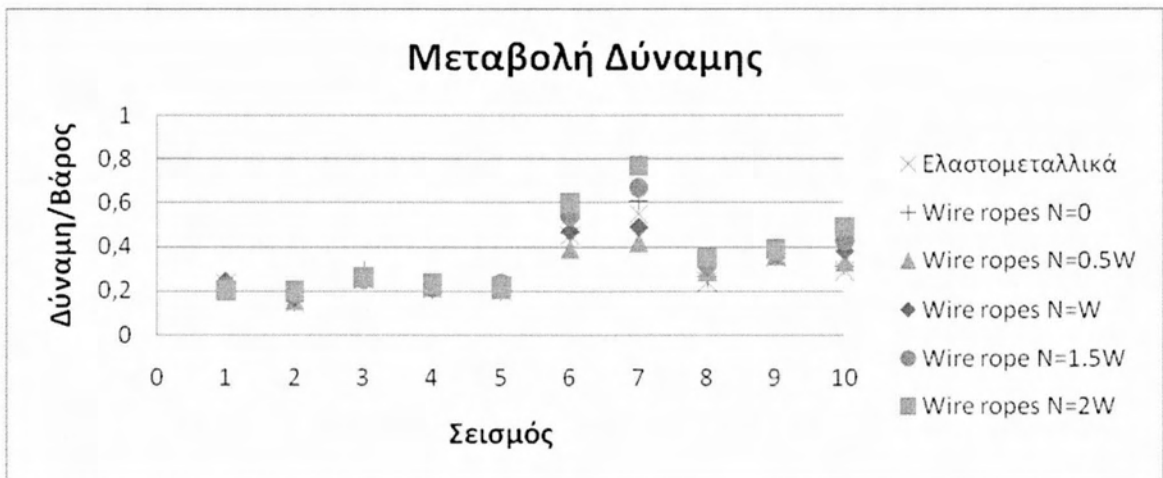
Διάγραμμα 5.4 Μέγιστη συνολική δύναμη μόνωσης προς το βάρος σε κάθε περίπτωση για κάθε σεισμό

5.2 Μεσόβαθρα

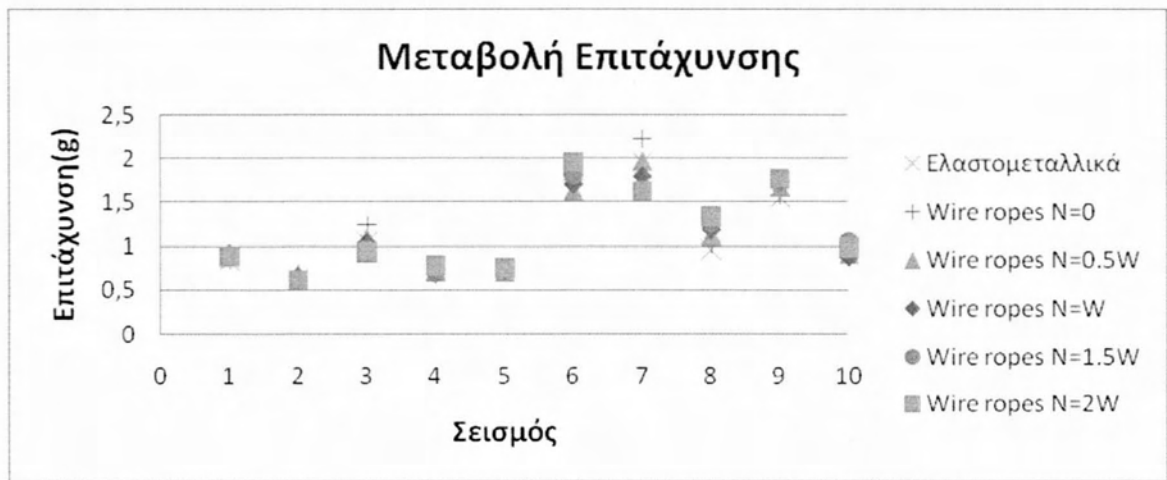
Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται οι μέγιστες μετακίνησης που αναπτύσσονται στα μεσόβαθρα(διάγραμμα 5.5), οι μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται στα μεσόβαθρα(διάγραμμα 5.6), καθώς και οι μέγιστες επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στα μεσόβαθρα(διάγραμμα 5.7) για κάθε σεισμό του πίνακα 5.1.



Διάγραμμα 5.5 Μετακίνηση στα μεσόβαθρα σε κάθε περίπτωση για κάθε σεισμό



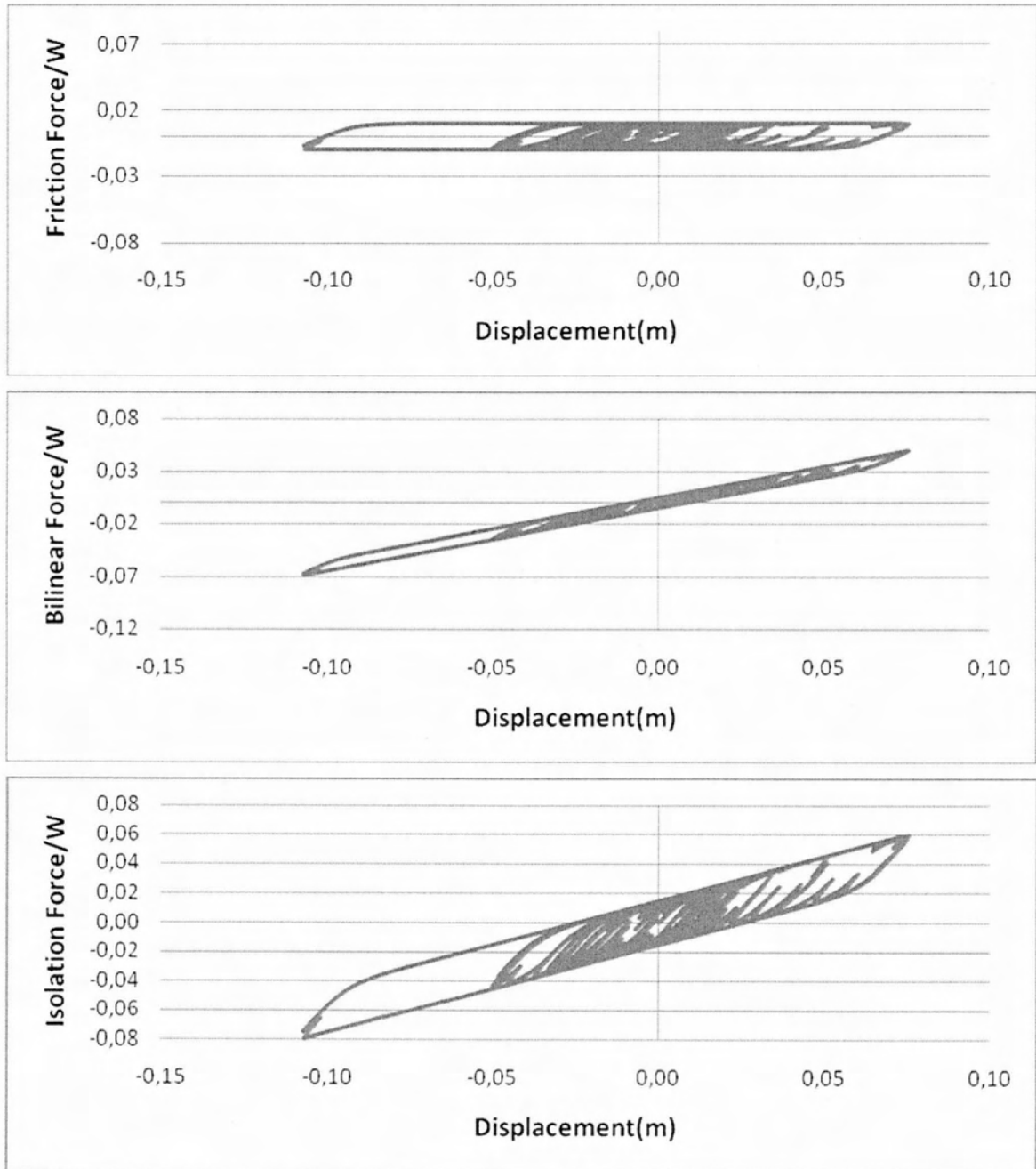
Διάγραμμα 5.6 Δύναμη στα μεσόβαθρα σε κάθε περίπτωση για κάθε σεισμό



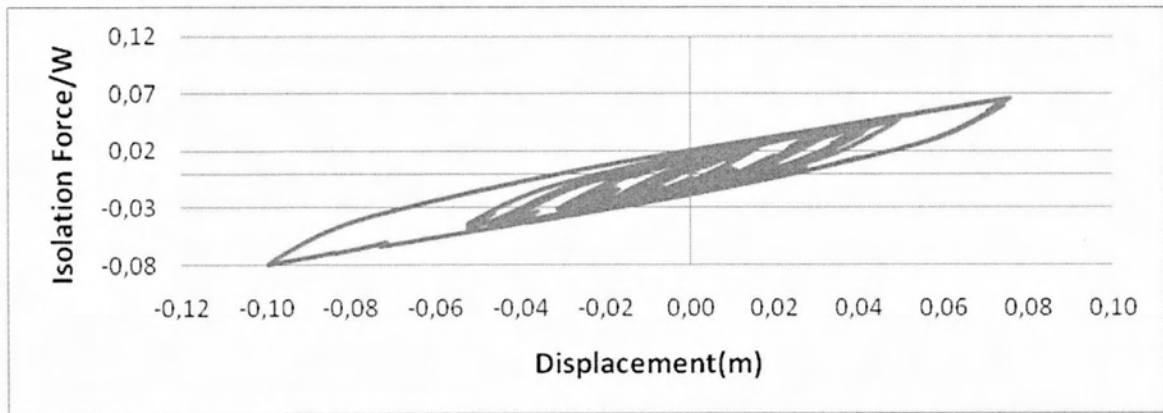
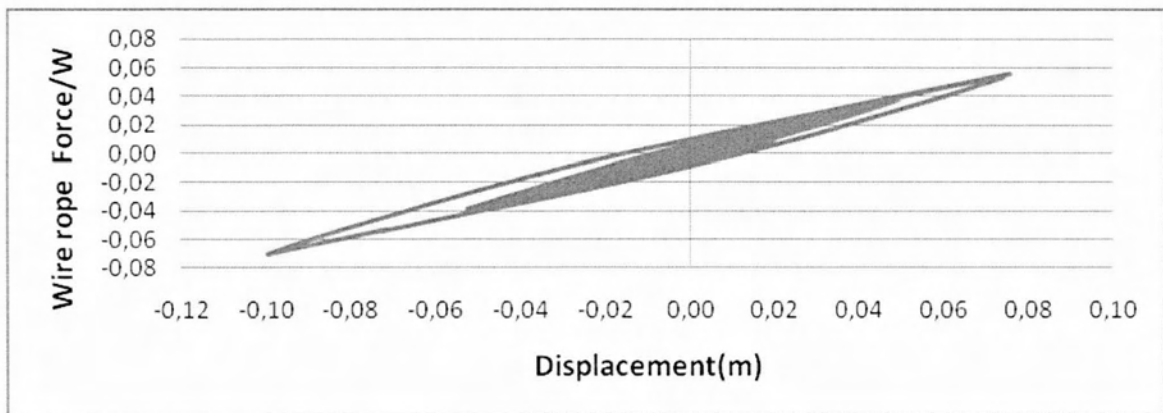
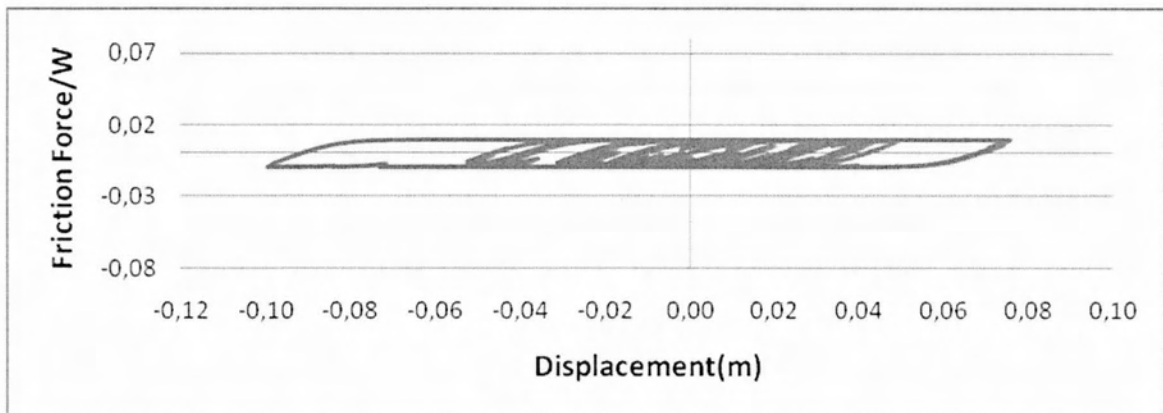
Διάγραμμα 5.7 Επιτάχυνση στα μεσόβαθρα σε κάθε περίπτωση για κάθε σεισμό

5.3 Αναλυτική περιγραφή μεταβολής δύναμης-μετατόπισης(σύστημα μόνωσης)

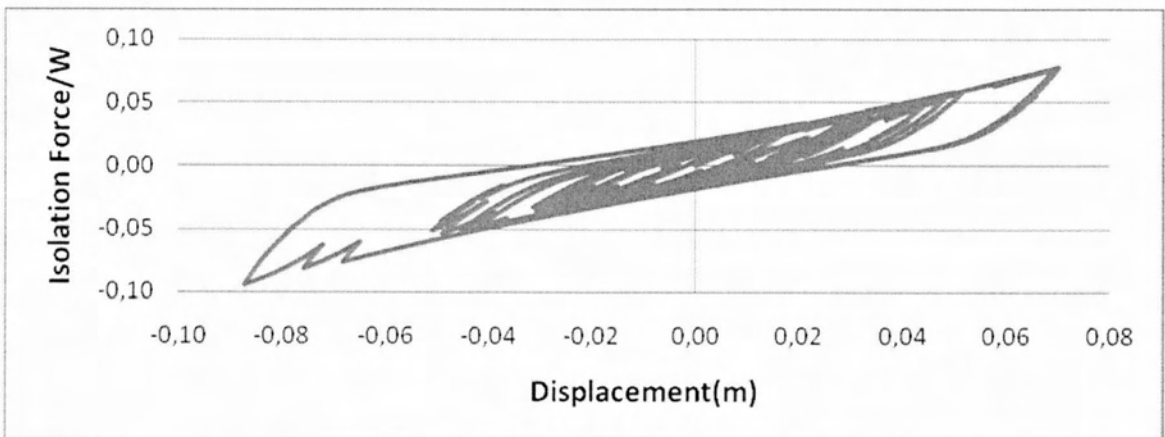
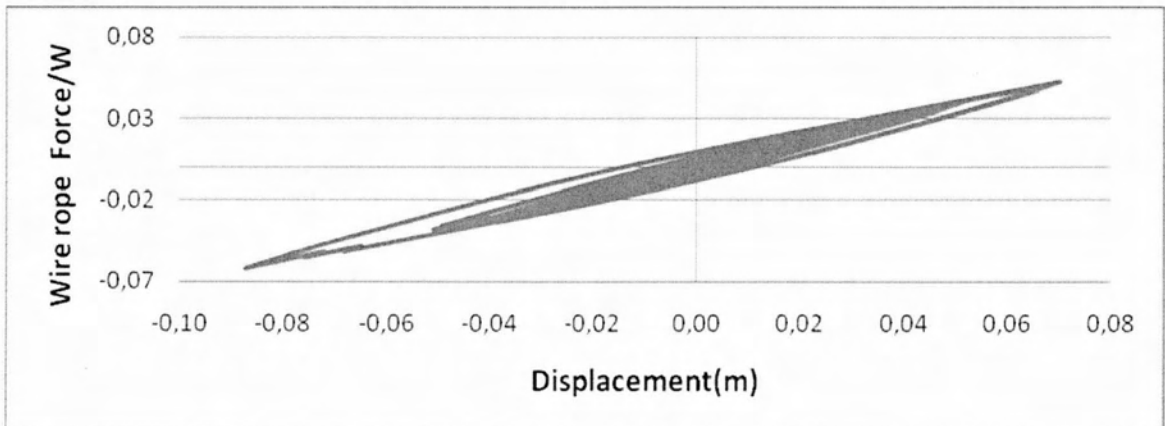
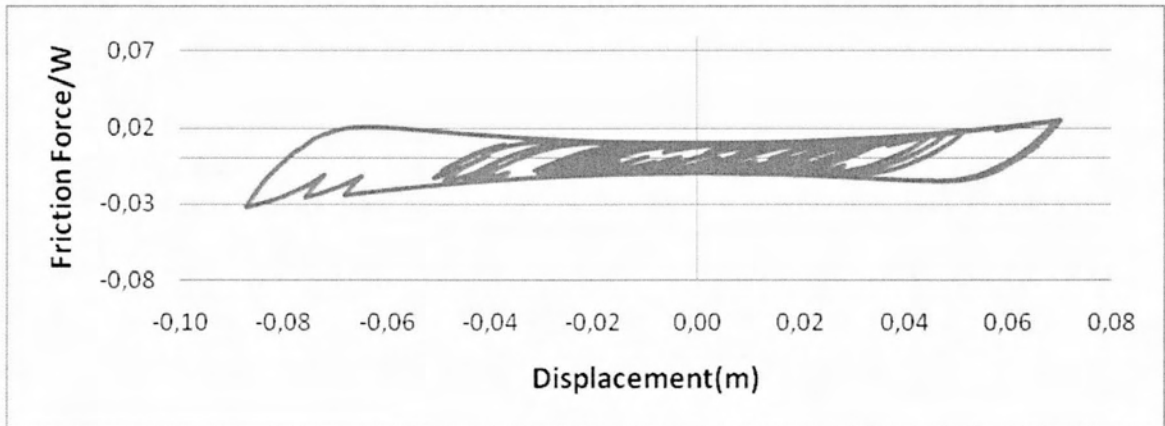
5.3.1 Για έναν τεχνητό σεισμό (E 1111)



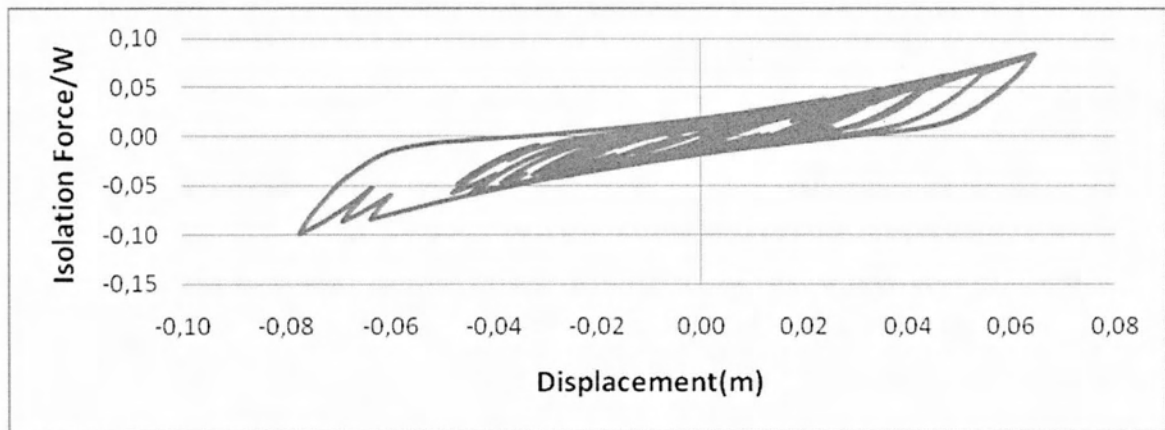
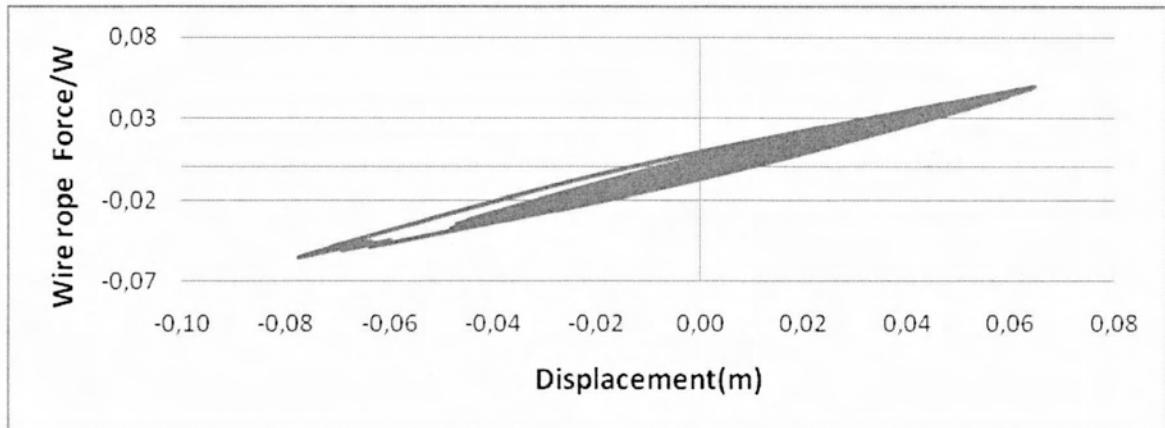
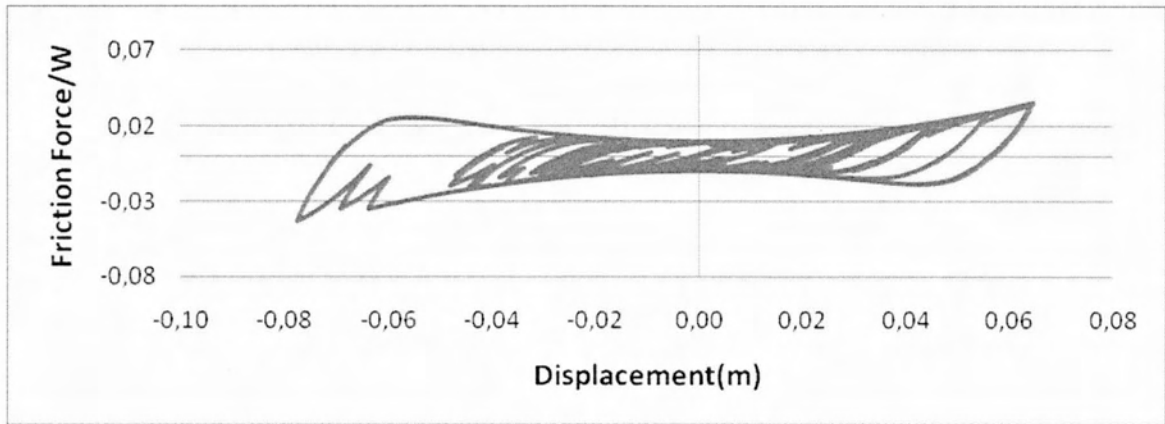
Διάγραμμα 5.8 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης με ελαστομεταλλικά εφέδρανα και εφέδρανα ολίσθησης



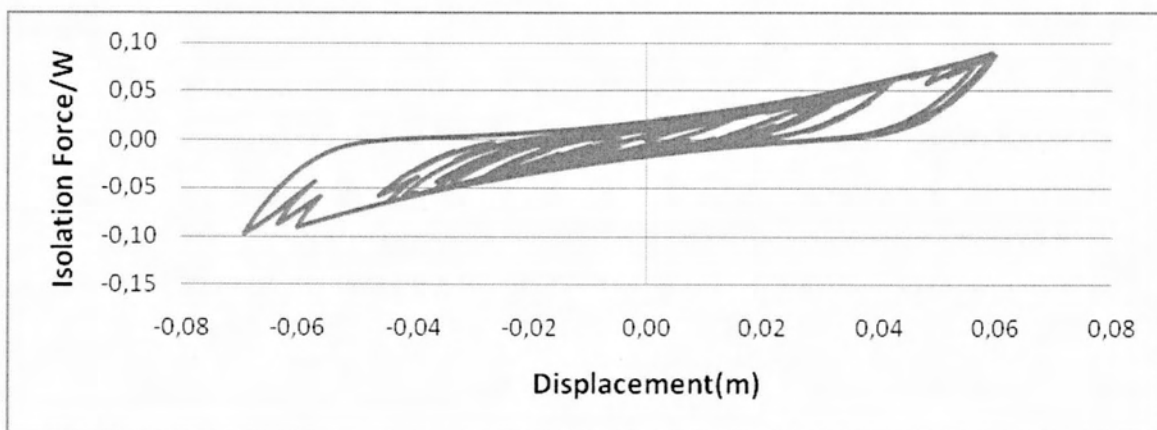
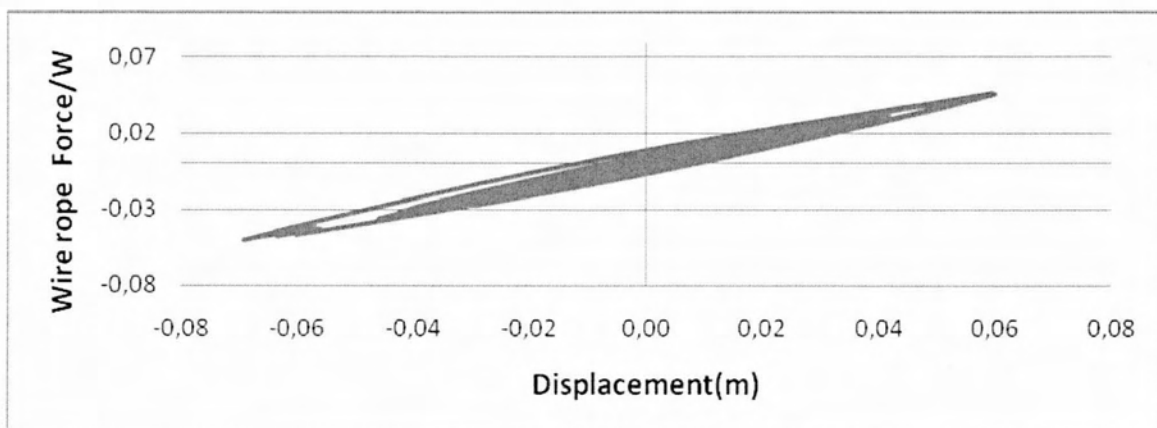
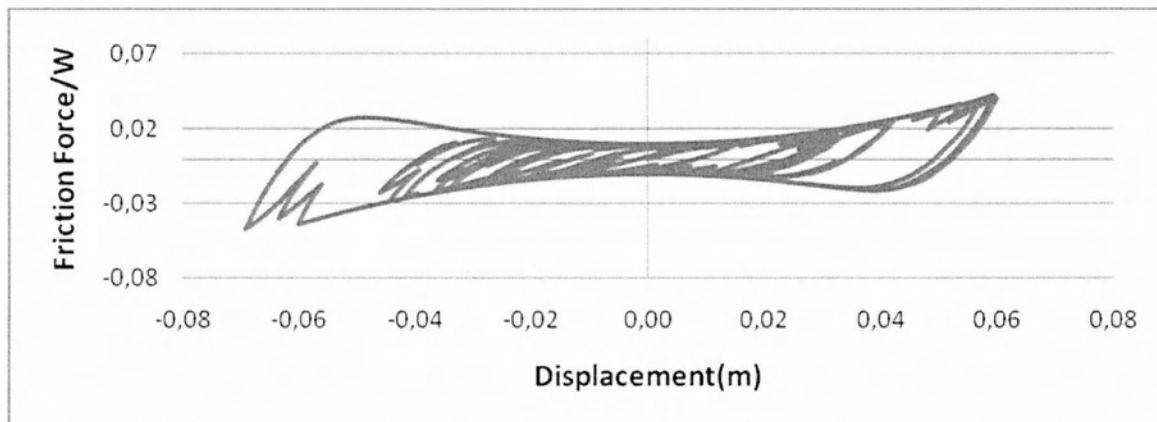
Διάγραμμα 5.9 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=0) και εφέδρανα ολίσθησης



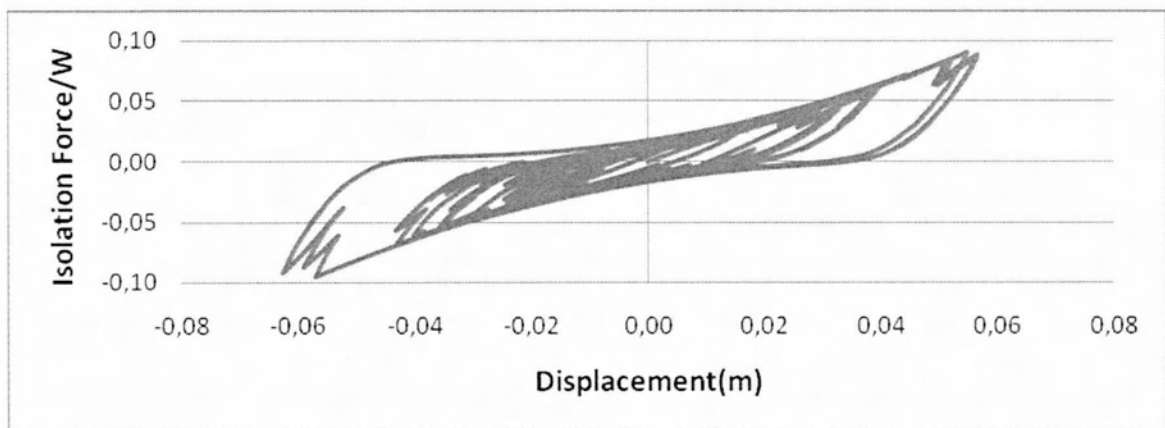
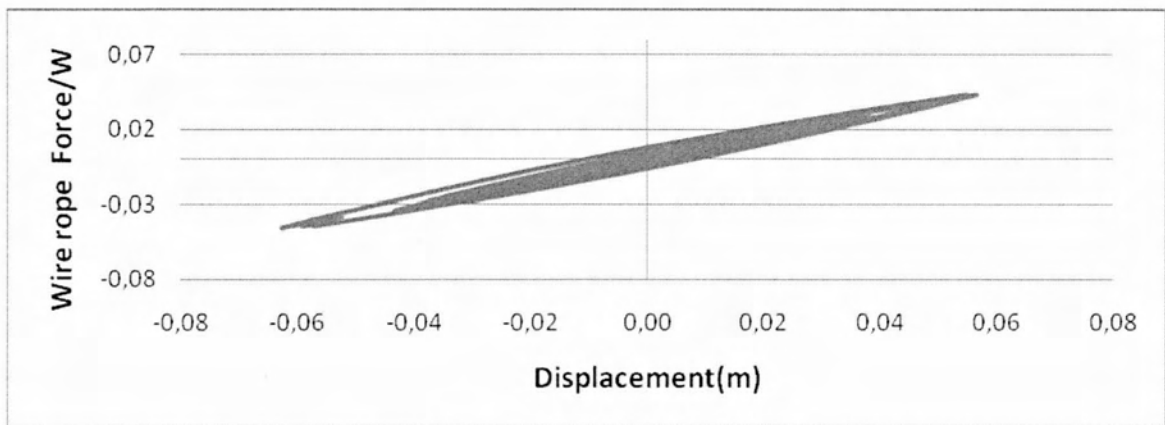
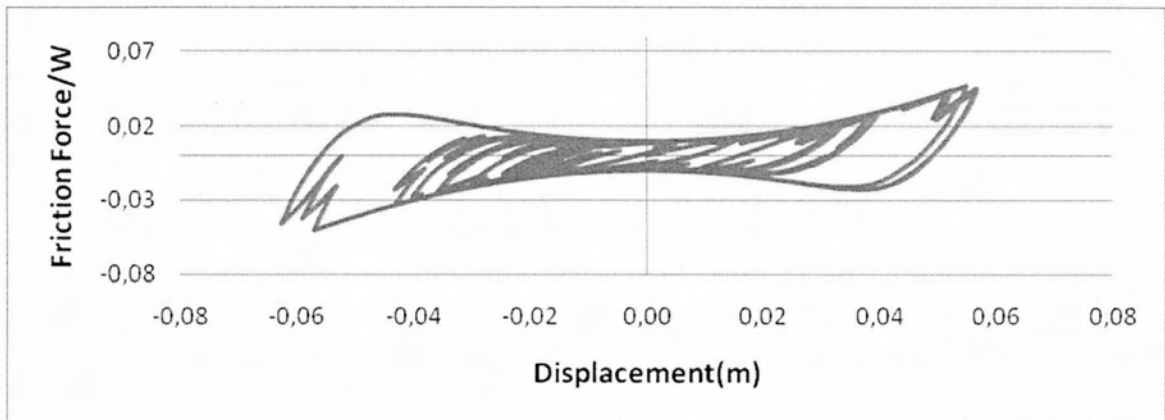
Διάγραμμα 5.10 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=0.5W) και εφέδρανα ολίσθησης



Διάγραμμα 5.11 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=W) και εφάδρανα ολίσθησης

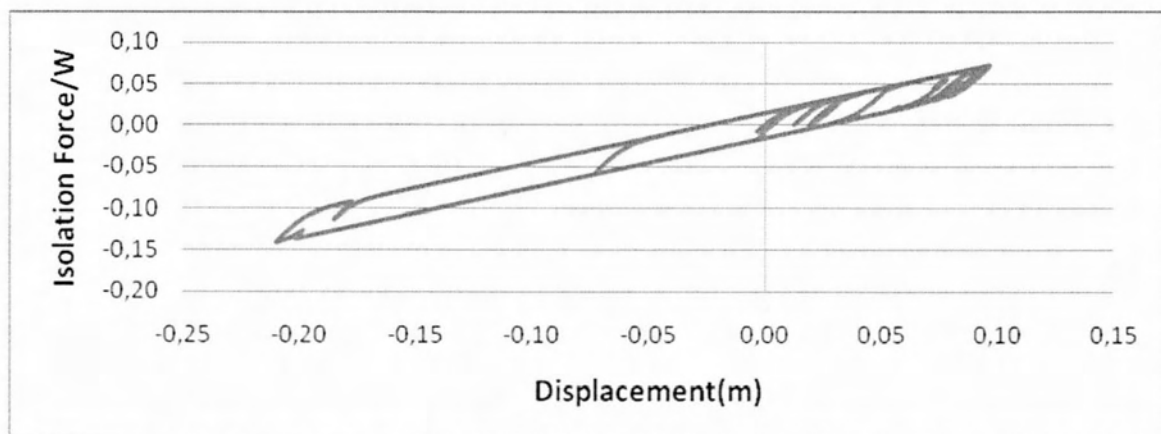
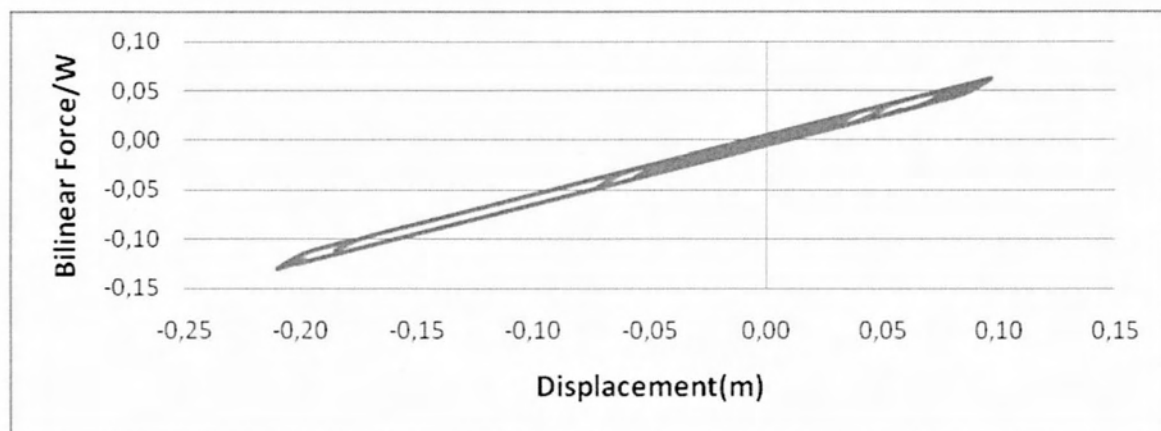
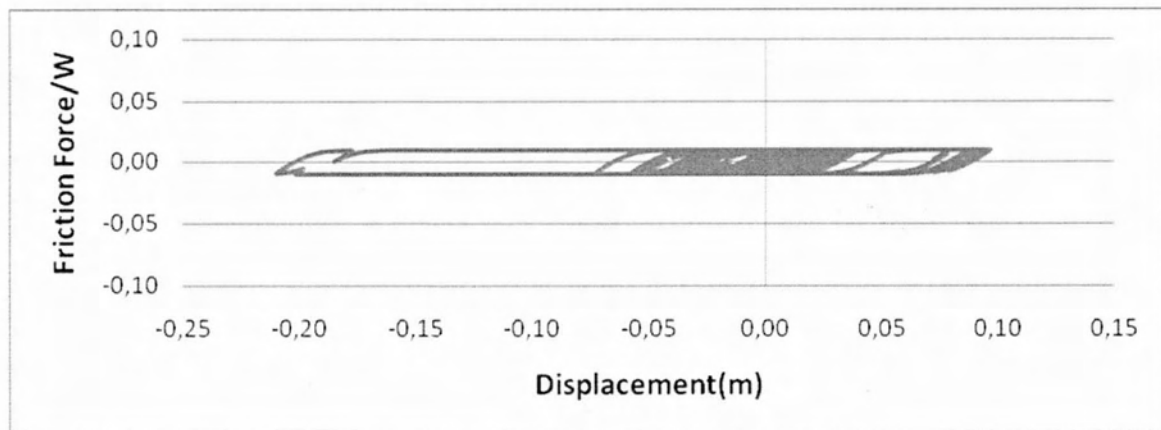


Διάγραμμα 5.12 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=1.5W) και εφέδρανα ολίσθησης

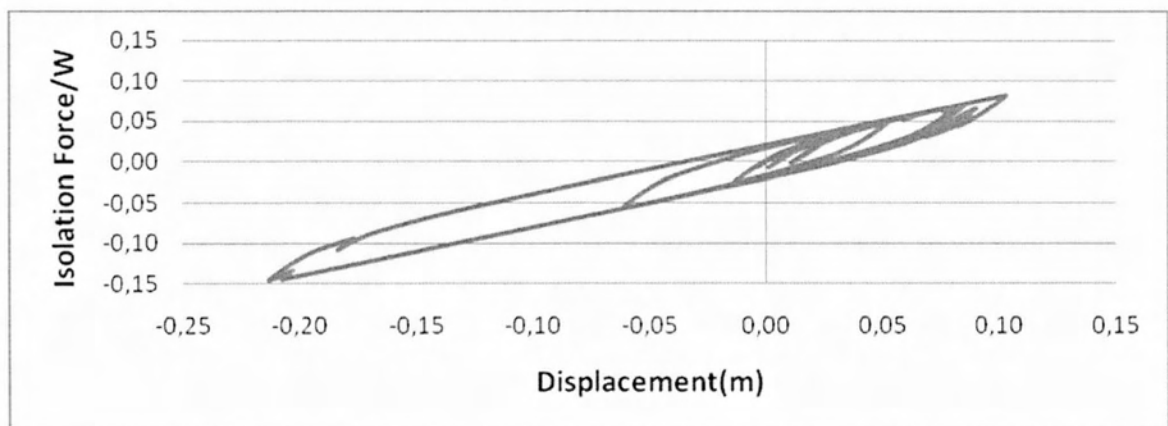
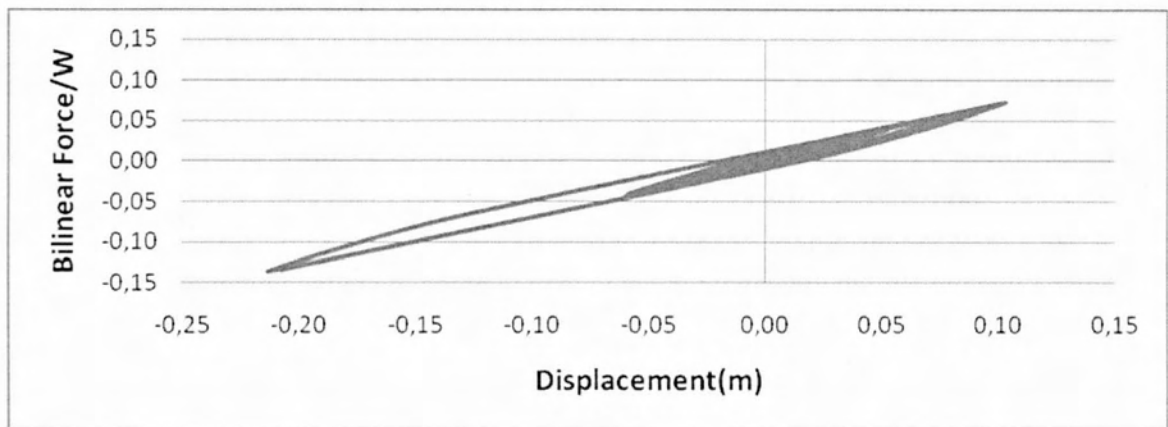
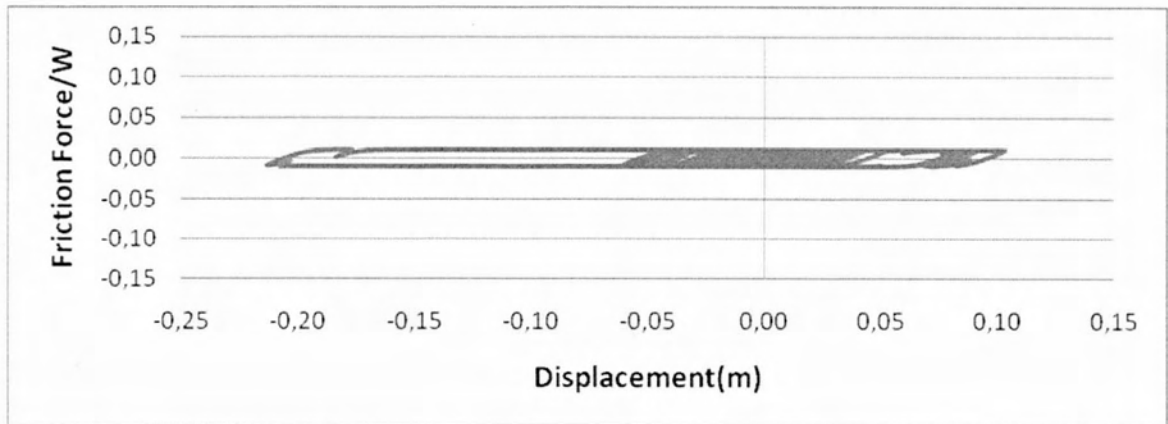


Διάγραμμα 5.13 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=2W) και εφέδρανα ολίσθησης

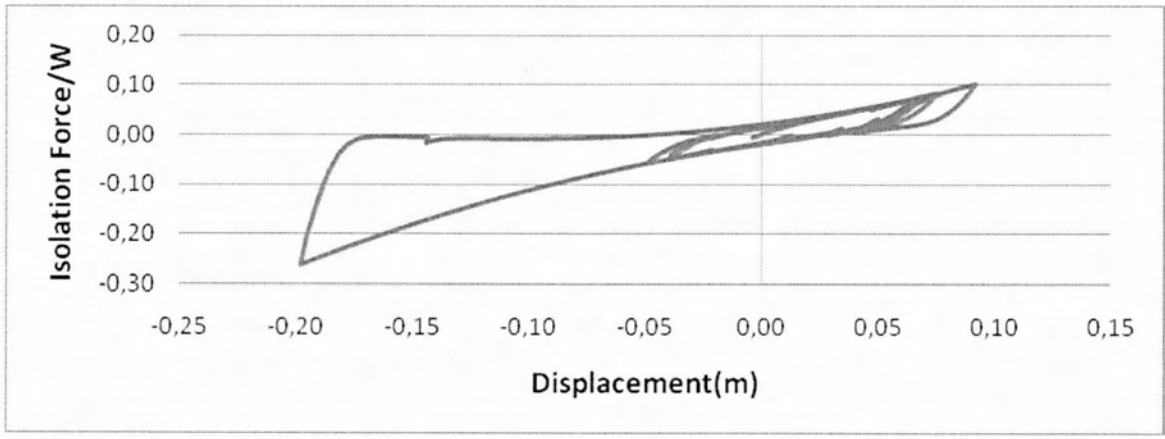
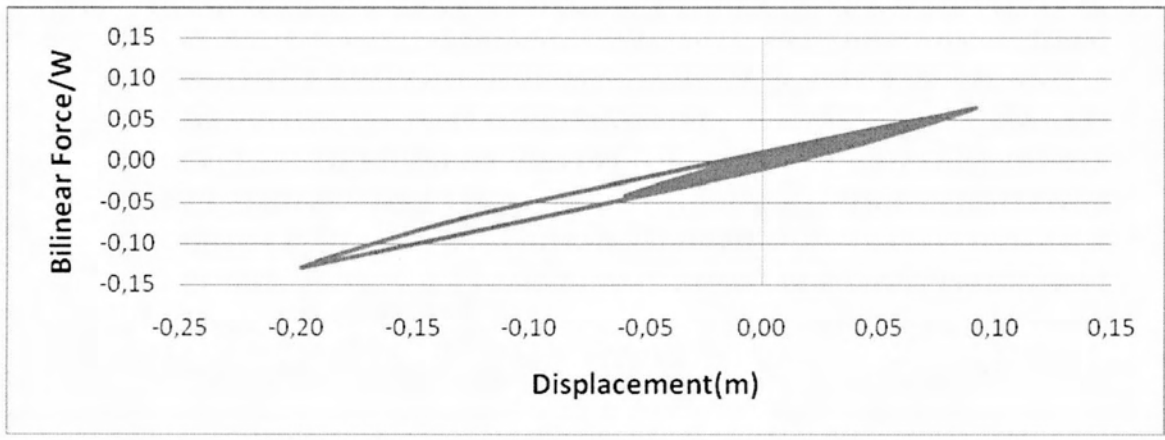
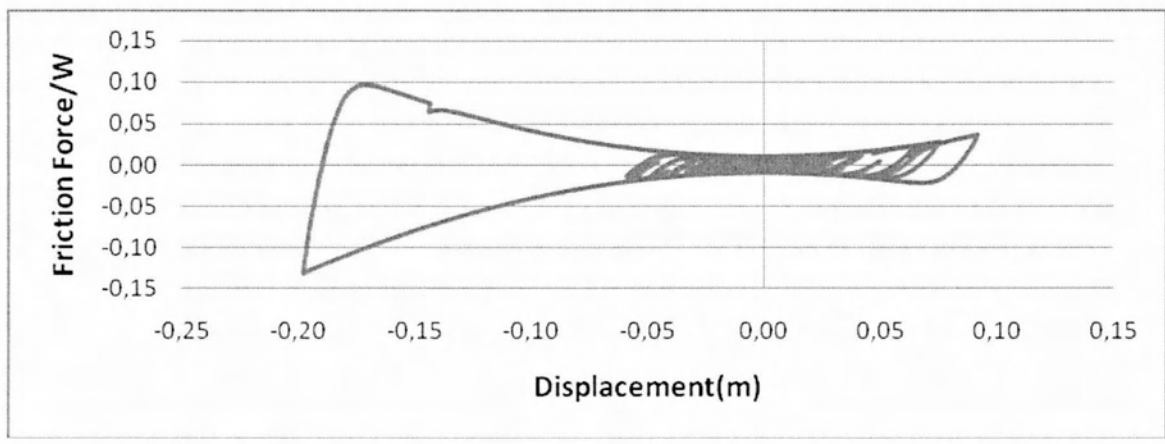
5.3.2 Για έναν φυσικό σεισμό (Imperial valley)



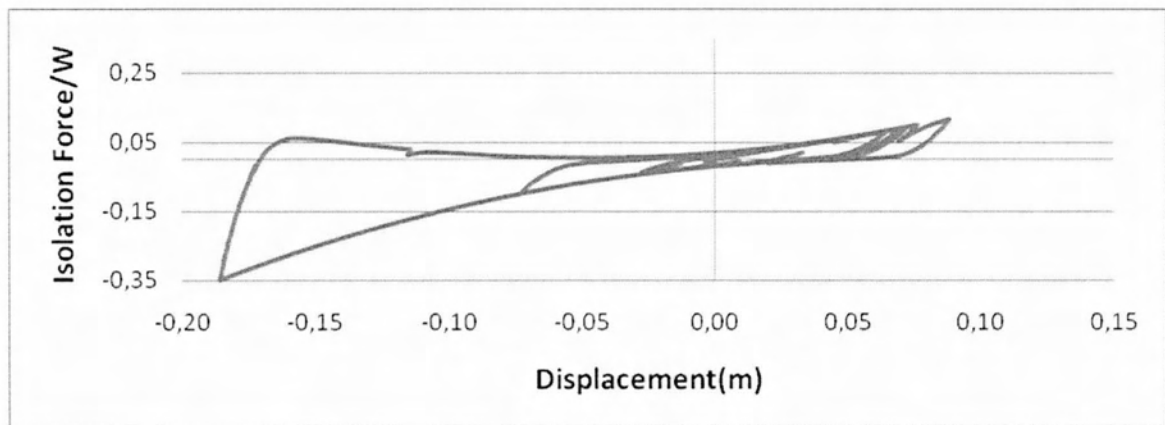
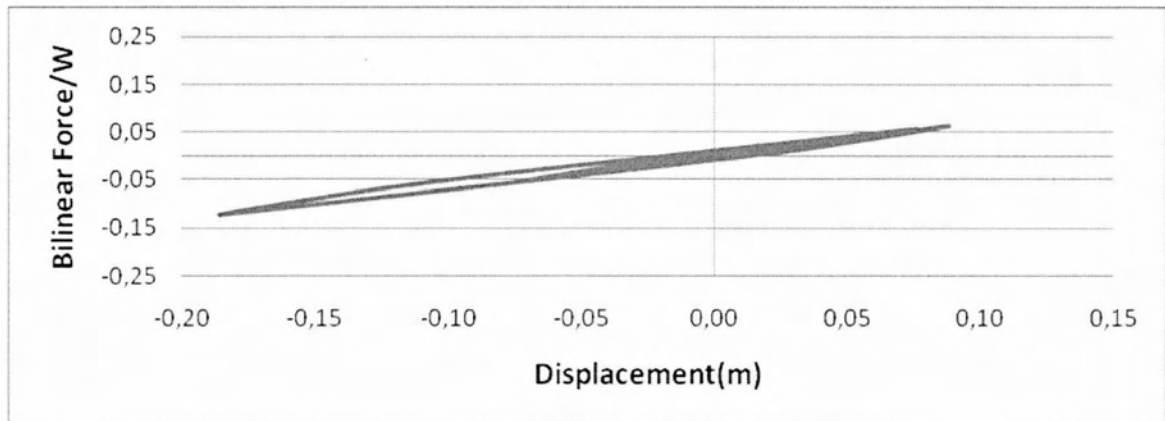
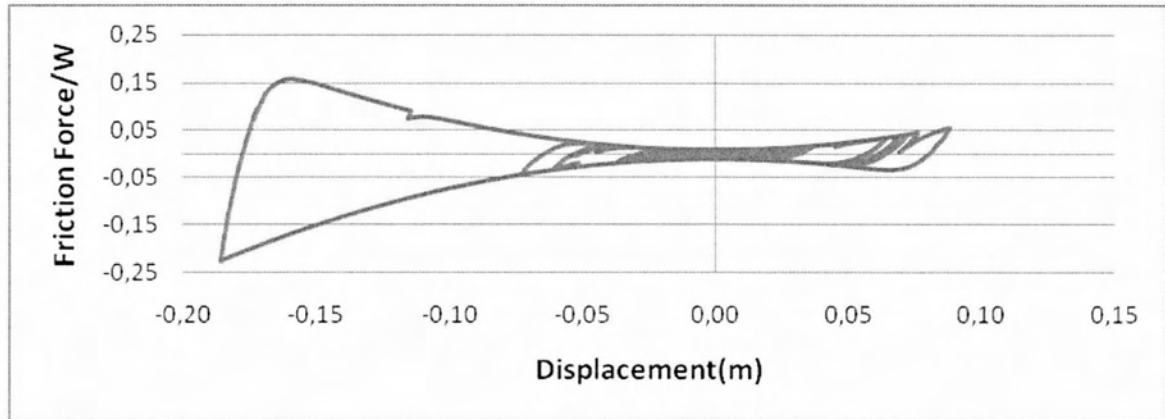
Διάγραμμα 5.14 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης με ελαστομεταλλικά εφέδρανα και εφέδρανα ολίσθησης



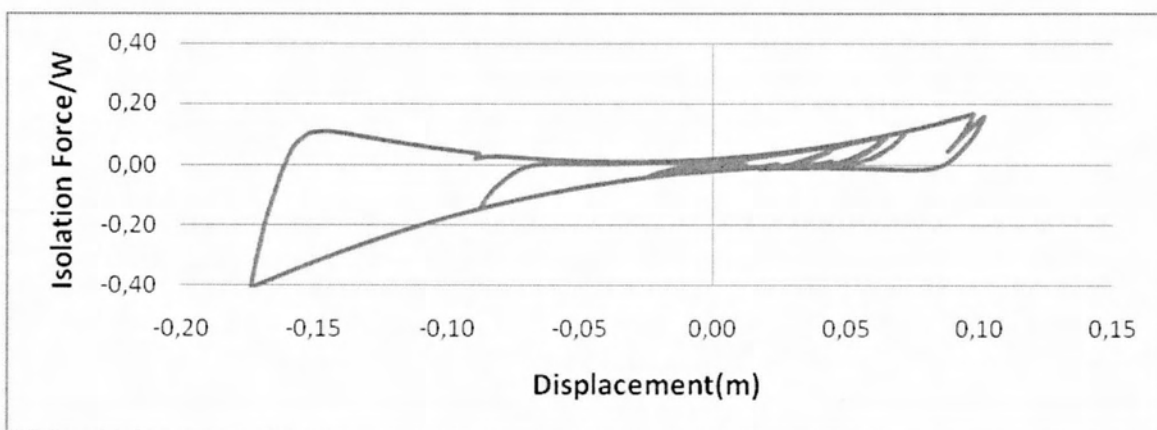
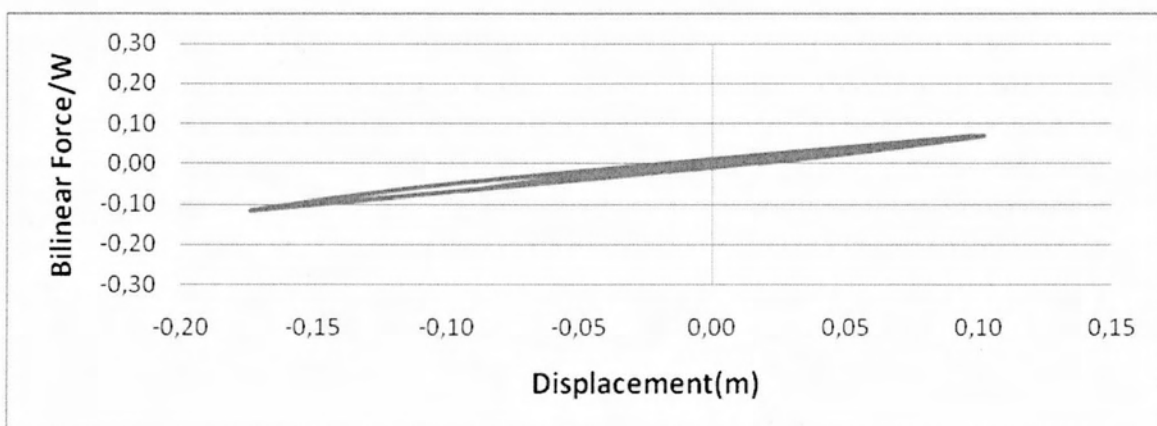
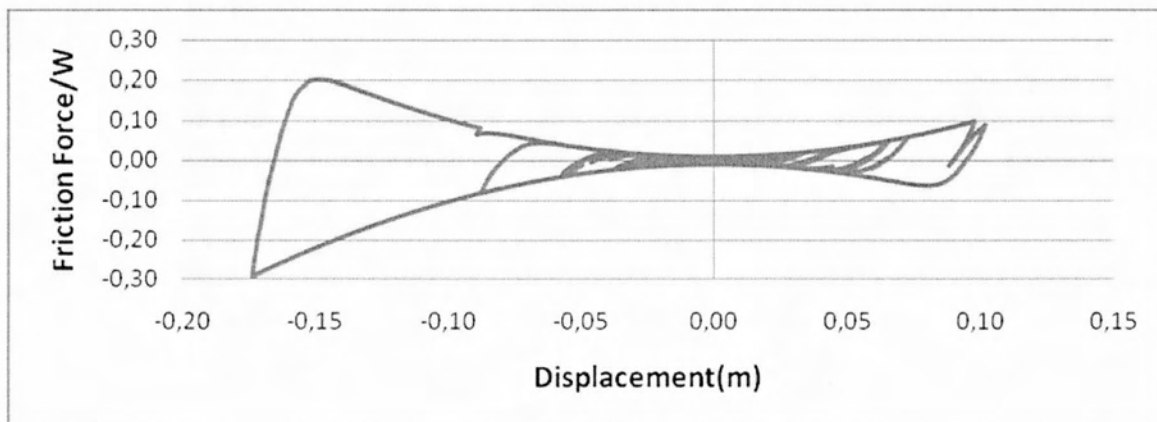
Διάγραμμα 5.15 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=0) και εφέδρανα ολίσθησης



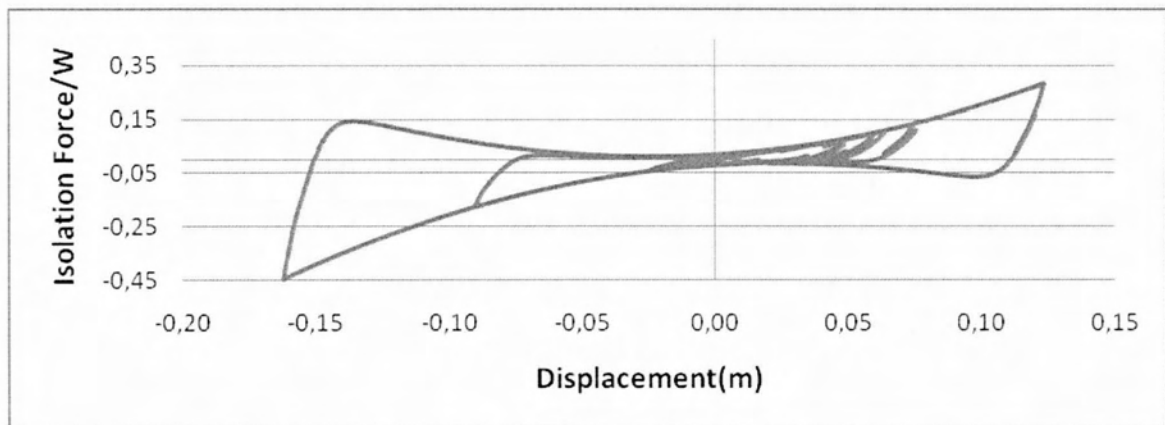
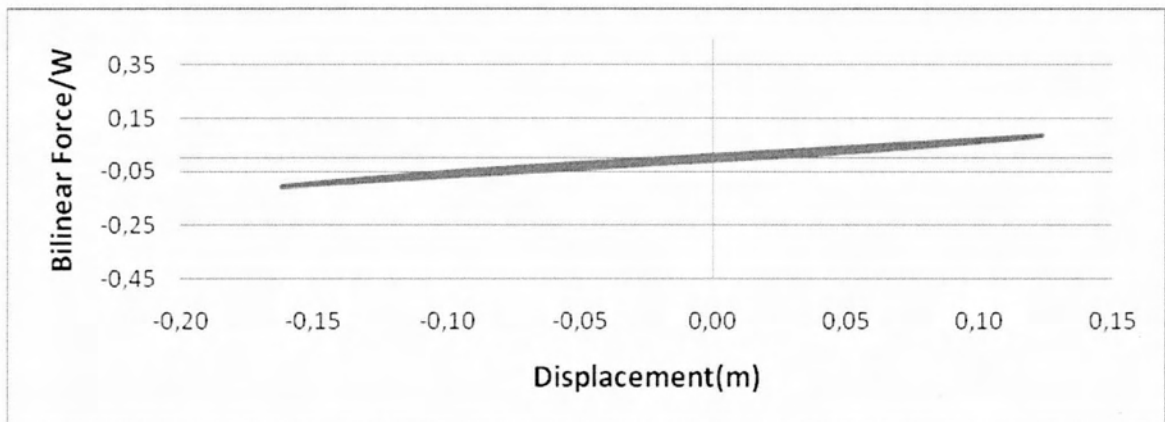
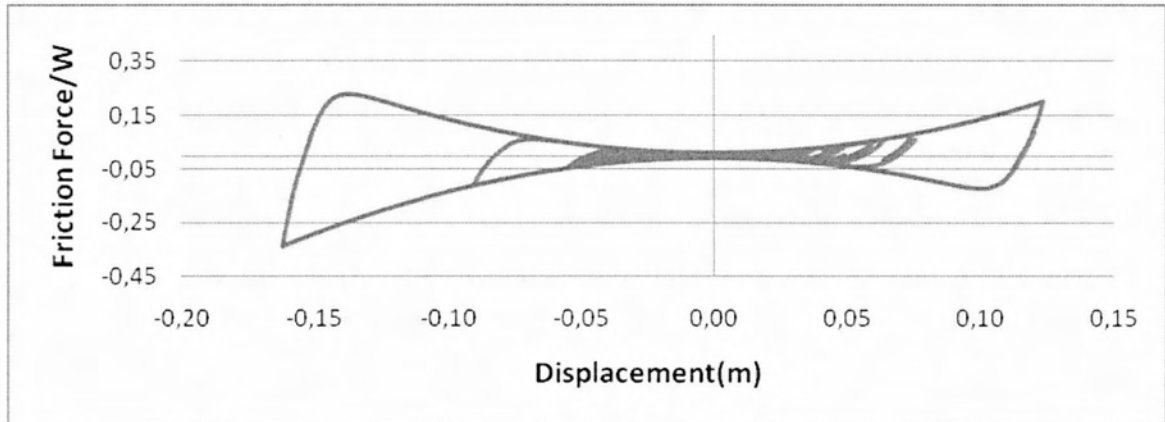
Διάγραμμα 5.16 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=0.5W) και εφέδρανα ολίσθησης



Διάγραμμα 5.17 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=W) και εφεδρανα ολίσθησης



Διάγραμμα 5.18 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=1.5W) και εφέδρανα ολίσθησης



Διάγραμμα 5.18 Δύναμη-μετατόπιση για σύστημα μόνωσης wire ropes (+N=2W) και εφέδρανα ολίσθησης

Όλα τα διαγράμματα για όλους τους σεισμούς βρίσκονται αναλυτικά στο παράρτημα.

5.3.3 Σχόλια

Τα διαγράμματα 5.8-5.13 παρουσιάζουν τον βρόγχο υστέρησης δύναμης- μετατόπισης για την δύναμη τριβής των εφεδράνων ολίσθησης, για την δύναμη που αναπτύσσεται στην άλλη συσκευή μόνωσης που χρησιμοποιείται (είτε είναι ελαστομεταλλικά εφέδρανα είτε wire ropes), καθώς και για την συνολική δύναμη μόνωσης που αναπτύσσεται. Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται μόνο 2 σεισμοί από τους 10 που μελετήθηκαν, ένας τεχνητός (E1111) και ένας φυσικός (Imperial Valley). Τα διαγράμματα για τους υπόλοιπους σεισμούς βρίσκονται στο παράρτημα. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε πως η αντικατάσταση του ελαστομεταλλικού εφεδράνου με κατάλληλη διάταξη μονωτήρων από συρματόσχοινο, χωρίς να λάβουμε υπόψιν την πρόσθετη αξονική δύναμη, δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφορά τόσο στην μέγιστη μετατόπιση του συστήματος μόνωσης όσο και στην μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται σε αυτό. Ωστόσο, μέσω του παραμετρικού ελέγχου που έγινε για σύστημα μόνωσης που δημιουργεί πρόσθετη αξονική δύναμη, που συνεπάγεται επιπλέον οριζόντια αντίσταση στα εφέδρανα ολίσθησης, παρατηρήθηκε πως όσο αυξάνεται η πρόσθετη αξονική δύναμη ($N=0.5W$, $N=W$, $N=1.5W$, $N=2W$) τόσο μικρότερη μέγιστη μετακίνηση έχω στο σύστημα μόνωσης άρα και στο κατάστρωμα καθώς όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο η μετακίνηση του καταστρώματος είναι σχεδόν ίση με αυτή του συστήματος μόνωσης.

Στα παραπάνω διαγράμματα (5.8-5.13) παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η πρόσθετη αξονική δύναμη στα εφέδρανα ολίσθησης, τόσο το πάχος του βρόγχου υστέρησης στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης μειώνεται και τείνει να γίνει μία ευθεία γραμμή. Αυτό σημαίνει πως στους μονωτήρες από συρματόσχοινο δεν δημιουργούνται καθόλου πλαστικές παραμόρφωση παραμόνο ελαστικές.

Γνωρίζουμε πως η ενέργεια που εισάγεται σε μία κατασκευή μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης καθώς ισούται με το εμβαδόν που περικλείει η καμπύλη. Εξάλλου η ενέργεια του σεισμού εισάγεται στην κατασκευή μέσω των μετατοπίσεων. Παρατηρούμε, λοιπόν, πως για τον ίδιο σεισμό για ίδια τιμή της μετατόπισης, το ποσό της ενέργειας που αποσβένεται είναι μεγαλύτερο όσο μεγαλύτερη είναι η πρόσθετη αξονική φόρτιση που αναπτύσσεται στα εφέδρανα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των ενοτήτων 5.1 & 5.2 μπορούμε να βγάλουμε κάποια πιο γενικά συμπεράσματα τόσο για το σύστημα μόνωσης όσο και για την συμπεριφορά του μεσόβαθρου.

• Σύστημα μόνωσης:

Μία σημαντική παρατήρηση είναι το γεγονός ότι όσο πιο ισχυρός είναι ο σεισμός, συνεπώς, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της μέγιστης μετακίνησης για το σύστημα με τα wire ropes. Κατά την αλλαγή των ελαστομεταλλικών εφεδράνων με τα wire ropes χωρίς να λάβουμε υπόψιν την πρόσθετη αξονική δύναμη η μέγιστη μετακίνηση παραμένει σχεδόν ίδια με μία πολύ μικρή απόκλιση της τάξεως των 0-6mm για 7/10 σεισμούς ενώ 10-15mm για 3 οι οποίοι ήταν και οι πιο ισχυροί (Imperial valley, Chi-Chi, Duzce). Ο σεισμός κατά τον οποίο είχαμε την μικρότερη μέγιστη μετακίνηση (Tabas - 60mm), παρουσίασε μεταβολή στα 59mm, 57.4mm, 56.9mm, 55.8mm, 55mm για πρόσθετη αξονική δύναμη N=0.5W, N=W, N=1.5W, N=2W αντίστοιχα. Δηλαδή η μέγιστη μεταβολή ήταν της τάξεως του 8.3%. Ενώ για τον σεισμό με την μεγαλύτερη μέγιστη μετακίνηση (Duzce - 309mm), είχαμε μεταβολή στα 203mm, 173.6mm, 161mm, 149.8mm, για πρόσθετη αξονική δύναμη N=0.5W, N=W, N=1.5W, N=2W αντίστοιχα. Δηλαδή η μέγιστη μεταβολή ήταν της τάξεως του 51.5%.

Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι μεταβολές της μέγιστης μετακίνησης κάποιων σεισμών:

E1235 από 83mm σε 72.7mm δηλαδή μεταβολή 12.4%

E2387 από 86mm σε 66.2mm δηλαδή μεταβολή 23%

E5679 από 88mm σε 60.3mm δηλαδή μεταβολή 31.4%

Kobe από 121mm σε 77.5mm δηλαδή μεταβολή 36%

Βέβαια υπάρχουν και κάποιοι σεισμοί οι οποίοι εμφάνισαν διαφορετική μεταβολή από το αναμενόμενο όπως:

E1111 από 107mm σε 62.7mm δηλαδή μεταβολή 41.4%

E9873 από 89mm σε 72.7mm δηλαδή μεταβολή 18.3%

Imperial Valley από 210mm σε 162mm δηλαδή μεταβολή 22.8%

Chi-Chi από 250mm σε 180.6mm δηλαδή μεταβολή 27.8%

Αυτό οφείλεται στην συμπεριφορά του μεσόβαθρου. Σε αυτούς τους τέσσερις σεισμούς η συμπεριφορά του μεσόβαθρου είναι διαφορετική από αυτήν των υπόλοιπων έξι. Πιο αναλυτικά θα μιλήσουμε παρακάτω για την συμπεριφορά των μεσόβαθρων.

Όσον αφορά το σύστημα μόνωσης και την δύναμη που αναπτύσσεται σε αυτό, παρατηρούμε πως η δύναμη τριβής αυξάνεται περισσότερο στους σεισμούς που είχαμε την μεγαλύτερη μέγιστη μετατόπιση όταν το σύστημα μόνωσης αποτελούνταν από εφέδρανα ολίσθησης και ελαστομεταλλικά εφέδρανα. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι στις περιπτώσεις που έχουμε μεγάλες μετατοπίσεις, προκειμένου να απορροφηθεί το ίδιο ποσοστό ενέργειας η μείωση της μετακίνησης απαιτεί την δημιουργία ακόμα μεγαλύτερης δύναμης. Αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι η

μεταβολή της μετακίνησης στους σεισμούς Imperial Valley και Chi-Chi δεν είναι αυτή που περιμένουμε βάση των υπόλοιπων μεταβολών αλλά πολύ μικρότερη. Συνεπώς, προκειμένου να απορροφηθεί η επιθυμητή ποσότητα ενέργειας αυξάνεται η δύναμη(ισότητα εμβαδόν στο διάγραμμα δύναμη-μετατόπιση).

Η μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται στα wire ropes, συγκριτικά με αυτήν που αναπτύσσεται στα ελαστομεταλλικά εφέδρανα, είναι αρκετά μικρότερη όσο μεγαλύτερη είναι η πρόσθετη αξονική φόρτιση που οφείλεται στους μονωτήρες από συρματόσχοινο. Πρέπει να σημειώσουμε πως η διγραμμική δύναμη που αναπτύσσεται στα wire ropes χωρίς να λάβουμε υπόψιν την πρόσθετη αξονική δύναμη δεν παρουσιάζει καμία μεταβολή συγκριτικά με αυτήν που αναπτύσσεται στα ελαστομεταλλικά εφέδρανα καθώς θεωρήσαμε ως δεδομένο ότι τα wire ropes που θα αντικαταστήσουν τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα θα έχουν τις ίδιες ιδιότητες. Ο τρόπος που μειώνεται μοιάζει με τον τρόπο που μειώνεται η μετακίνηση. Για σεισμούς όπου η μέγιστη δύναμη στα ελαστομεταλλικά εφέδρανα είναι μεγαλύτερη, έχουν την μέγιστη μείωση. Για παράδειγμα στον σεισμό Duzce έχουμε μείωση 47.3%, ενώ για τον Tabas 0%. Βέβαια το ποσοστό της μείωσης της μέγιστης διγραμμικής δύναμης είναι μικρότερο από αυτό της μέγιστης μετακίνησης.

Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι μεταβολές στους υπόλοιπους σεισμούς:

E1111	34.7%
E1235	0%
E2387	10.7%
E5679	21%
E9873	6.9%
Imperial Valley	15.4%
Chi-Chi	20%
Kobe	29.5%

Πίνακας 6.1 Μεταβολή της διγραμμικής δύναμης

Η μείωση που υπάρχει στην διγραμμική δύναμη που αναπτύσσεται δεν επηρεάζει σημαντικά την συνολική δύναμη μόνωσης που αναπτύσσεται καθώς η αύξηση της δύναμης τριβής που αναπτύσσεται στα εφέδρανα ολίσθησης είναι μεγαλύτερη από την μείωση της διγραμμικής δύναμης συνεπώς η συνολική δύναμη μόνωσης αυξάνεται. Μπορούμε να επισημάνουμε εδώ πως η επιπλέον αύξηση της αξονικής δύναμης που συνεπάγεται αύξηση της δύναμης τριβής, βοηθάει τα wire ropes καθώς η δύναμη που αναπτύσσεται σε αυτά μειώνεται.

• Μεσόβαθρο:

Αρχικά όσον αφορά την επιτάχυνση που αναπτύσσεται στα μεσόβαθρα δεν μπορούμε να πούμε πως υπάρχει κάποια ακριβής μεταβολή της συμπεριφοράς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι επιταχύνσεις είναι πάρα πολύ ευαίσθητες σε υψηλές συχνότητες και στις κορυφές που δημιουργούνται στο διάγραμμα. Συνεπώς η μεταβολή τους θα μπορούσε να είναι οποιαδήποτε και άρα η σχετική τους απόκριση κατά τον παραμετρικό έλεγχο δεν μας ενδιαφέρει.

Παρατηρούμε πως οι μεταβολές στα διαγράμματα μετατόπισης και δύναμης είναι αντίστοιχες για κάθε σεισμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δυνάμεις είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις μετατοπίσεις κάτι που αποδεικνύεται εάν παρατηρήσουμε τις εξισώσεις κίνησης (εξίσωση 3-6). Εκτός όμως από την μετατόπιση η δύναμη που αναπτύσσεται στο μεσόβαθρο εξαρτάται και από την επιτάχυνση (την συνολική επιτάχυνση) (εξισώσεις 3-2, 3-3). [Γνωρίζουμε πως η επιτάχυνση είναι η δεύτερη παράγωγος της μετατόπισης συνεπώς αυτοί οι δύο όροι είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι]. Όπως είδαμε παραπάνω οι επιταχύνσεις είναι πολύ ευαίσθητες σε υψηλές συχνότητες. Άρα επηρεάζουν τις μετατοπίσεις και κατά συνέπεια και τις δυνάμεις. Γενικά, στους περισσότερους σεισμούς υπάρχει αύξηση της μετατόπισης άρα και της δύναμης. Εξάιρεση αποτελούν οι σεισμοί E1111 που μειώνονται, E9873 που παραμένουν σχεδόν ίδια, Imperial valley και Chi-Chi οι οποίοι για τιμές του $N=(0,5-1)W$ υπάρχει μια μείωση (για τις μετατοπίσεις της τάξης των 2-3mm) και στη συνέχεια για μεγαλύτερες τιμές του N αυξάνονται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε.Κ.Ο.Σ. 2000. "Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος", Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), Αθήνα.
- [2] ΕΑΚ 2000. "Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός ", Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ). Αθήνα.
- [3] Οδηγίες για την αντισεισμική μελέτη γεφυρών σε συνδυασμό με DIN-FB 102, 103, 104 (ΟΑΜΓ-FB) Ιούνιος 2007
- [4] Οδηγίες για μελέτη γεφυρών με σεισμική μόνωση, Ιούνιος 2007,Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.
- [5] Ι.Θ. Κατσικαδέλης, Δυναμική των κατασκευών, τόμος Ι,ΙΙ , εκδόσεις συμμετρία
- [6] Chopra, A.K, Δυναμική των κατασκευών, εκδόσεις Μ. Γκιούρδας
- [7] Demetriades, G. F., M. C. Constantinou, A. M. Reinhorn, "Study of wire rope systems for seismic protection of equipment in buildings", Technical report NCEER-92-0012, May 20, 1992
- [8] P. Tsopeles, S. Okamoto, M.C. Constantinou, D.Ozaki, S. Fujii, "Experimental and analytical study of systems consisting of sliding bearings, rubber restoring force devices and fluid dampers, Volume I", Technical report NCEER-94-0002, February 4, 1994
- [9] Ευάγγελος Γ. Ζιώγος "Δυναμική απόκριση σεισμικά μονωμένης κοιλαδογέφυρας πολλαπλών ανοιγμάτων και διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής", Διπλωματική εργασία, Βόλος-Ιούνιος 2011
- [10] Michael L. Tinker "A NASA industry university partnership for development of dual-use vibration isolation technology" , Tabes paper No.94-613
- [11] peer.berkeley.edu/smcat/search.html, Peer strong motion database
- [12] www.earthquakeprotection.com
- [13] www.sieng.com
- [14] www.oiles.co.jp
- [15] www.pennair.com , Wire rope Catalog

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000108292

