



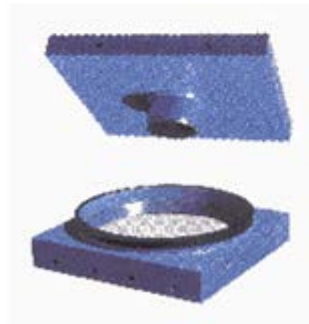
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ



ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: **ΜΠΟΛΤΣΗ Γ. ΑΡΙΑΔΝΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΟΥΜΟΥΣΗΣ Κ. ΒΛΑΣΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέσα από αυτές τις γραμμές θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους όσους υποστήριξαν πρακτικά και ηθικά την προσπάθειά μου.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Κουμούση Βλάση, Καθηγητή ΕΜΠ για την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Οι πολύτιμες υποδείξεις του, η καθοδήγησή του και η συνεχής υποστήριξή του συνέβαλαν ουσιαστικά στην περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχε και την αμέριστη συμπαράστασή της σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου για την υποστήριξη και τη συμπαράστασή τους σε όλη την πορεία της μεταπτυχιακής μου ζωής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς συστημάτων σεισμικής μόνωσης λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση των μηχανικών ιδιοτήτων των συστημάτων αυτών. Οι ιδιότητες των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης ποικίλουν λόγω της μεταβολής των ιδιοτήτων του υλικού, των περιβαλλοντικών επιδράσεων, της ηλικίας, της φθοράς, της ιστορίας φόρτισης, κλπ. Για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός σεισμικά μονωμένων κατασκευών απαιτεί ανάλυση με χρήση άνω και κάτω ορίων στις τιμές των ιδιοτήτων των συστημάτων σεισμικής μόνωσης. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής εξετάσθηκαν τα συστήματα εκκρεμούς τριβής (*Friction Pendulum Systems ή FPS*) και ορίστηκαν τα άνω και κάτω όρια τιμών σημαντικών ιδιοτήτων τους χρησιμοποιώντας τους συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων του συστήματος σεισμικής μόνωσης, γνωστοί στη βιβλιογραφία ως συντελεστές λ. Παράλληλα έγινε μια προσπάθεια θεώρησης της επιρροής των μεταβαλλόμενων παραμέτρων στις ιδιότητες των εφεδράνων βάσει μιας απλής στοχαστικής διαδικασίας. Η εξαγωγή συμπερασμάτων πραγματοποιήθηκε μετά από κατάλληλες προσομοιώσεις του διαφράγματος της σεισμικής μόνωσης μιας επταώροφης κατασκευής, η ανωδομή της οποίας θεωρήθηκε ως στερεό σώμα, καθώς και μιας υφιστάμενης τετραώροφης κατασκευής. Οι κατασκευές αυτές υποβλήθηκαν σε ένα σύνολο δυναμικών αναλύσεων και μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας υπό δεδομένες σεισμικές διεγέρσεις. Οι αναλύσεις διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας τις μέσες και τις οριακές τιμές των ιδιοτήτων των εφεδράνων τριβής.

Συνοπτικά η δομή της εργασίας έχει ως ακολούθως:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική εισαγωγή με αναφορές σε μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού νέων και υφιστάμενων κατασκευών και παρουσιάζεται το αντικείμενο της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σεισμική μόνωση βάσης ως μέθοδος αντισεισμικού σχεδιασμού και παρατίθενται οι βασικές της αρχές και οι στόχοι της καθώς και η επίδρασή της στη σεισμική απόκριση των κατασκευών. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι διάφορες μέθοδοι ανάλυσης των σεισμικά μονωμένων κατασκευών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι συστημάτων σεισμικής μόνωσης, οι ιδιότητες και οι διατάξεις σχεδιασμού τους καθώς και παραδείγματα κατασκευών όπου έχει εφαρμοσθεί η εν λόγω μέθοδος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται η τριβή σε επιλεγμένες επιφάνειες ολίσθησης και η εξάρτησή της από διάφορους μεταβαλλόμενους παράγοντες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος εισαγωγής των συντελεστών τροποποίησης ιδιοτήτων συστήματος σεισμικής μόνωσης καθώς και προτεινόμενες τιμές τους για εφέδρανα ολίσθησης και ελαστομερή εφέδρανα, οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές των επιδράσεων διαφόρων μεταβαλλόμενων παραγόντων.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα διαφορετικά προσομοιώματα του διαφράγματος της σεισμικής μόνωσης με εφέδρανα τριβής (*FPS*) μιας επταώροφης κατασκευής, η ανωδομή της οποίας θεωρήθηκε ως στερεό σώμα, και παρατίθενται τα αποτελέσματά τους σε επίπεδο δυναμικών φασματικών αναλύσεων και μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας. Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια προσπάθεια σύγκρισης μιας απλής στοχαστικής μεθόδου και της μεθόδου συντελεστών λ για τη θεώρηση της επιρροής των μεταβαλλόμενων παραμέτρων στις ιδιότητες των εφεδράνων.

Στο έβδομο κεφάλαιο εφαρμόζεται σεισμική μόνωση με δύο διαφορετικούς τύπους εφεδράνων, εφέδρανα τριβής (*FPS*) και ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (*LRB*), σε υφιστάμενη τετραώροφη κατασκευή και συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους σε επίπεδο δυναμικών φασματικών αναλύσεων και μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας. Στην ανάλυση αυτή, μελετήθηκε επίσης η επιρροή της μεταβλητότητας των τιμών των συντελεστών τριβής στη συμπεριφορά των εφεδράνων τριβής χρησιμοποιώντας τους συντελεστές λ .

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

ABSTRACT

This diploma thesis is aiming at investigating the behaviour of seismic isolation systems focusing at the mechanical properties of isolators. The properties of seismic isolation systems vary due to environmental effects, aging, wear, history of loading, etc. For this reason, the design of seismic isolated structures requires a bounding analysis utilizing lower and upper bounds for the properties of the seismic isolation hardware. In this work the Friction Pendulum Systems are studied and the upper and lower values of important properties of the systems are determined using system property modification factors the so called λ -factors. At the same time an attempt was conceptualizing the influence of the variation of the mechanical properties of the isolators on a simple stochastic process. After appropriate simulations of the seismic isolation diaphragm of a seven-storey building, the superstructure of which was considered rigid, and of an existing four-storey structure the static and dynamic behaviour was determined and compared for different methods. The structures were subjected to a range of dynamic spectral analyses and non linear time history analyses under specific seismic excitations. The analyses were performed for both the upper and lower values of the properties of friction pendulum systems.

Briefly the organization of this thesis is the following:

In the first chapter, general methods of seismic design of new and existing structures and the objective of this thesis are presented.

In the second chapter, base isolation is introduced as a method of seismic design, the basic principles, targets and the effect of seismic base isolation to the seismic response of the structures are described.

In the third chapter, the main types of seismic isolation devices, their properties and general design provisions are described, as well as some applications of the seismic isolation method worldwide.

In the fourth chapter, we describe the nature of friction for specific sliding interfaces and its dependence on several changing parameters.

In the fifth chapter, the method of coefficients λ that account for the system property modification factors is presented. Furthermore values of the parameters for sliding and elastomeric bearings are suggested, which are representative for their effect on several changing parameters.

In the sixth chapter, different simulation models of the seismic isolation diaphragm of a seven-storey structure, the superstructure of which was considered rigid, using friction pendulum systems (FPS) are described and the results of spectral and non linear time history analyses are compared for specific seismic excitations. Furthermore the λ factor method is compared with a proposed simple stochastic method that accounts for the variation of the mechanical properties of the isolators.

In the seventh chapter, seismic isolation using two different types of bearings i. e. friction pendulum systems (FPS) and lead-rubber bearings (LRB) is applied to an existing four-storey structure and the results from both dynamic spectral analyses and non linear time history analyses under specific seismic excitations are compared. Also, the influence of the variability of the values of the coefficients of friction to the behaviour of friction pendulum systems using factors λ is examined.

Finally, in the eighth chapter, the main conclusions of this thesis are presented.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Αντικείμενο Εργασίας.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΒΑΣΗΣ	3
2.1 Σεισμική Μόνωση	3
2.2 Φιλοσοφία Σχεδιασμού Της Σεισμικής Μόνωσης Και Προϋποθέσεις Εφαρμογής Της.....	9
2.2.1 Σύγκριση Με Συμβατικό Αντισεισμικό Σχεδιασμό.....	9
2.2.2 Σύγκριση Αρχικού Κόστους Κατασκευής.....	11
2.2.3 Σύγκριση Έμμεσου Κόστους Αποκατάστασης Βλαβών.....	12
2.3 Καταλληλότητα Κτιρίων Για Εφαρμογή Σεισμικής Μόνωσης	13
2.4 Μέθοδοι Ανάλυσης Σεισμικά Μονωμένης Κατασκευής.....	16
2.4.1 Προϋποθέσεις Ανάλυσης Σεισμικά Μονωμένων Κατασκευών Σύμφωνα Με EC8.....	16
2.4.2 Ισοδύναμη Στατική Ανάλυση	17
2.4.3 Δυναμική Φασματική Ανάλυση.....	20
2.4.4 Μη-Γραμμική Δυναμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΥΠΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ	22
3.1 Συστήματα Σεισμικής Μόνωσης.....	22
3.2 Ιδιότητες Συστημάτων Σεισμικής Μόνωσης Σύμφωνα Με EC8.....	23
3.3 Γενικές Διατάξεις Σχεδιασμού Σύμφωνα Με EC8	24
3.3.1 Γενικές Διατάξεις Σχετικά Με Τις Συσκευές	24
3.3.2 Έλεγχος Ανεπιθύμητων Μετακινήσεων	24
3.3.3 Έλεγχος Διαφορικών Σεισμικών Εδαφικών Κινήσεων	24
3.3.4 Έλεγχος Μετατοπίσεων Σχετικών Με Περιβάλλον Έδαφος Και Κατασκευές.....	25
3.4 Ελαστομερή Συστήματα.....	25

3.4.1 Ελαστομεταλλικά Εφέδρανα Χαμηλής Απόσβεσης (Low Damping Rubber Bearings-LDRB).....	26
3.4.2 Ελαστομεταλλικά Εφέδρανα Υψηλής Απόσβεσης (High Damping Rubber Bearings-HDRB).....	27
3.4.3 Ελαστομεταλλικά Εφέδρανα Με Πυρήνα Μολύβδου (Lead Rubber Bearings-LRB) ..	28
3.4.3.1 Προσομοίωση LRB Μέσω Διγραμμικού Υστερητικού Μοντέλου.....	31
3.4.3.2 Απαιτήσεις AASHTO Για Εφέδρανα LRB	37
3.4.3.3 Απαιτήσεις EC8 Για Εφέδρανα LRB	39
3.5 Συστήματα Εκκρεμούς Τριβής (Friction Pendulum Systems – FPS)	41
3.5.1 Συμπεριφορά Συστήματος Εκκρεμούς Τριβής (FPS) Σε Οριζόντια Διάτμηση	42
3.6 Παραδείγματα Εφαρμογής Συστημάτων Σεισμικής Μόνωσης.....	45
3.6.1 Σεισμικά Μονωμένα Κτίρια Στις Ηνωμένες Πολιτείες.....	46
3.6.2 Σεισμικά Μονωμένα Κτίρια Στην Ιαπωνία	52
3.6.3 Σεισμικά Μονωμένα Κτίρια Στη Νέα Ζηλανδία	54
3.6.4 Σεισμικά Μονωμένα Κτίρια Στην Ευρώπη.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	60
4.1 Τριβή.....	60
4.2 Βασικοί Μηχανισμοί Τριβής.....	60
4.3 Στατική Τριβή (breakaway friction) Και Τριβή Ολίσθησης (kinetic friction)	62
4.4 Η Τριβή Σε PTFE-Στιλπνές Ανοξειδωτες Χαλύβδινες Διεπιφάνειες.....	62
4.4.1 Εξάρτηση Από Την Ταχύτητα Ολίσθησης Και Την Πίεση.....	62
4.4.2 Επίδραση Της Θερμοκρασίας	64
4.5 Η Τριβή Σε Διμεταλλικές Επιφάνειες	66
4.6 Ιδιότητες Τριβής PTFE-Στιλπνών Ανοξειδωτων Χαλύβδινων Διεπιφανειών	67
4.6.1 Επίδραση Του Χρόνου Φόρτισης (Load Dwell) Στη Στατική Τριβή (Breakaway Friction)	67

4.6.2 Επίδραση Φαινομενικής Πίεσης Και Ταχύτητας Ολίσθησης	69
4.6.3 Επίδραση Της Θερμοκρασίας.....	73
4.6.4 Επίδραση Της Συνολικής Κίνησης Διαδρομής.....	78
4.6.5 Επίδραση Τραχύτητας Επιφάνειας Ανοξείδωτου Χάλυβα.....	80
4.6.6 Διάβρωση Ανοξείδωτου Χάλυβα	82
4.6.7 Επίδραση Της Μόλυνσης.....	84
4.6.8 Επίδραση Της Αίπανσης	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ	88
5.1 Εισαγωγή.....	88
5.2 Η Έννοια Των Συντελεστών Τροποποίησης Των Ιδιοτήτων Συστήματος Σεισμικής Μόνωσης	90
5.3 Συντελεστές Προσαρμογής Ιδιοτήτων Συστήματος Σεισμικής Μόνωσης.....	92
5.4 Προτεινόμενοι Συντελεστές Τροποποίησης Ιδιοτήτων Εφεδράνων Ολίσθησης.....	93
5.4.1 Επίδραση Της Ηλικίας	94
5.4.2 Επίδραση Της Μόλυνσης (Περιβαλλοντικών Επιδράσεων).....	96
5.4.3 Επίδραση Της Συνολικής Κίνησης Διαδρομής (Φθοράς)	97
5.4.4 Επίδραση Της Θερμοκρασίας.....	98
5.5 Άλλες Εφαρμογές Των Συντελεστών Τροποποίησης Των Ιδιοτήτων Συστήματος Σεισμικής Μόνωσης.....	99
5.6 Συντελεστές Τροποποίησης Ιδιοτήτων Ελαστομερών Εφεδράνων Μόνωσης.....	100
5.6.1 Επίδραση Της Ηλικίας	100
5.6.2 Επίδραση Της Μοριακής Εμπλοκής “scragging”	101
5.6.3 Επίδραση Της Θερμοκρασίας.....	105
5.7 Σύνοψη.....	108
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	111

6.1 Γενικά	111
6.2 Μορφολογία Φορέα.....	111
6.2 Προσομοίωση Εφεδράνων FPS	112
6.3 Μοντέλα Προσομοίωσης και Αποτελέσματα Αναλύσεων.....	113
6.3.1 1 ^ο Μοντέλο Προσομοίωσης.....	113
6.3.2 2 ^ο Μοντέλο Προσομοίωσης.....	121
6.3.3 3 ^ο Μοντέλο Προσομοίωσης – Στοχαστικό Μοντέλο.....	136
6.3.4 4 ^ο Και 5 ^ο Μοντέλο Προσομοίωσης – Εισαγωγή Συντελεστών Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος	147
6.4 Σύγκριση Στοχαστικής Μεθόδου Με Μέθοδο Συντελεστών λ.....	163
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΜΟΝΩΜΕΝΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	166
7.1 Γενικά	166
7.2 Μορφολογία Φορέα.....	167
7.3 Προσομοίωση Εφεδράνων LRB.....	169
7.4 Προσομοίωση Εφεδράνων FPS	172
7.5 Δυναμική Φασματική Ανάλυση Κατασκευής	175
7.6 Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας	175
7.7 Αποτελέσματα Αναλύσεων - Σύγκριση Σεισμικής Μόνωσης Με Εφέδρανα LRB και FPS	177
7.8 Εισαγωγή Συντελεστών Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος	184
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	191
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	193

1.1 Γενικά

Η συμβατική τεχνική που ακολουθείται για τον αντισεισμικό σχεδιασμό νέων κατασκευών περιλαμβάνει την εφαρμογή όλων εκείνων των μεθοδολογιών που προτείνονται στους ισχύοντες Κανονισμούς με σκοπό την επίτευξη επαρκούς αντοχής στα δομικά μέλη, όπως επίσης ικανότητας παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας, ώστε αυτά να ανθίστανται επιτυχώς και με ασφάλεια στις απαιτήσεις των ισχυρών σεισμικών δονήσεων. Αντίστοιχα, ο ανασχεδιασμός ή/και η ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών που είτε έχουν υποστεί βλάβες από προγενέστερους σεισμούς είτε απλώς δεν πληρούν τις απαιτήσεις των σύγχρονων Κανονισμών, επιβάλλει την αύξηση της αντοχής των μελών που αναλαμβάνουν τις σεισμικές δράσεις με ένα πολύ σημαντικό όμως κι αναπόφευκτο μειονέκτημα την αύξηση των μαζών κι άρα και των αδρανειακών δυνάμεων που ασκούνται στην κατασκευή. Κατασκευές σχεδιασμένες βάσει των παραπάνω θεωρήσεων είναι πολύ πιθανό να αντέξουν έναν μεγάλο σεισμό, εκδηλώνοντας όμως παράλληλα μεγάλης έκτασης βλάβες τόσο στον φέροντα οργανισμό όσο και στα στοιχεία πληρώσεως και στον εσωτερικό τους εξοπλισμό με αποτέλεσμα διακοπή της λειτουργίας τους και υψηλό οικονομικό κόστος αποκατάστασης για επανάχρηση.

Μια εναλλακτική και συγχρόνως ελκυστική για τα πλεονεκτήματά της μέθοδος αντισεισμικού σχεδιασμού είναι η εφαρμογή μέσων παθητικού ελέγχου της δόνησης της κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμικού κραδασμού που υλοποιείται με την τοποθέτηση στη διεπιφάνεια ανωδομής- θεμελίωσης στοιχείων εύκαμπτων σε οριζόντιες μετακινήσεις, τους μονωτήρες. Η μέθοδος αυτή, η οποία έχει εξελιχθεί αρκετά και έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε κατασκευές διαφόρων τύπων (κτιριακές, γέφυρες, δεξαμενές κ.ά.) τις δύο τελευταίες δεκαετίες, αποσκοπεί στη μείωση της σεισμικής απαίτησης που εισάγεται μέσω των μηχανισμών που περιγράφονται στη συνέχεια και έχει ως αποτέλεσμα οικονομικότερες και πιο ελαφρές κατασκευές. Η σημαντική μείωση των σεισμικών απαιτήσεων αφενός αποτρέπει την κατάρρευση της κατασκευής σε ισχυρούς σεισμούς, αλλά επιπλέον περιορίζει τις βλάβες σε περιπτώσεις σεισμών μέτριας έντασης.

1.2 Αντικείμενο Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς συστημάτων σεισμικής μόνωσης λαμβάνοντας υπόψη τις αναμενόμενες μεταβολές των παραμέτρων τους. Τα συστήματα μόνωσης που εξετάζονται είναι τα συστήματα εκκρεμούς τριβής (*Friction Pendulum Systems* ή *FPS*) ή εφέδρανα σφαιρικής τριβής όπως αναφέρονται στους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς.

Ειδικότερα, γίνεται μια προσπάθεια να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις των αλλαγών των μηχανικών ιδιοτήτων των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης στην απόκριση των μονωμένων κατασκευών εντός της διάρκειας ζωής τους. Για το λόγο αυτό εισάγονται συντελεστές τροποποίησης των ιδιοτήτων του συστήματος σεισμικής μόνωσης, δηλαδή, συντελεστές οι οποίοι ποσοτικοποιούν την επίδραση ενός συγκεκριμένου φαινομένου στις ονομαστικές ιδιότητες ενός εφεδράνου μόνωσης. Με τη χρήση των συντελεστών τροποποίησης ιδιοτήτων του συστήματος σεισμικής μόνωσης, γνωστοί ως συντελεστές λ , καθορίζονται τα άνω και κάτω όρια των τιμών των συντελεστών τριβής χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, μ_{slow} και μ_{fast} αντίστοιχα, των εφεδράνων τριβής. Οι συντελεστές λ αντιπροσωπεύουν την επίδραση της ιστορίας φόρτισης, των περιβαλλοντικών συνθηκών και της ηλικίας στις ιδιότητες των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες προσομοιώσεις του διαφράγματος σεισμικής μόνωσης μιας επταώροφης κατασκευής, η ανωδομή της οποίας θεωρήθηκε ως στερεό σώμα, και μιας υφιστάμενης τετραώροφης κατασκευής με τη βοήθεια του λογισμικού SAP2000 v15.1.0 της εταιρείας CSI. Σε πρώτο στάδιο οι επιδράσεις των μεταβαλλόμενων παραγόντων λήφθηκαν υπόψη με τη βοήθεια του λογισμικού Microsoft Office Excel και της συνάρτησης $NORMINV(RAND();mean;standard_deviation)$ με τη δημιουργία ενός στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης και έπειτα με τη χρήση των συντελεστών λ . Οι τιμές των συντελεστών λ προέκυψαν από ένα συνδυασμό αποτελεσμάτων πειραμάτων και ορθολογιστικής ανάλυσης όπως έχουν ενσωματωθεί σε Αμερικανικές διατάξεις.

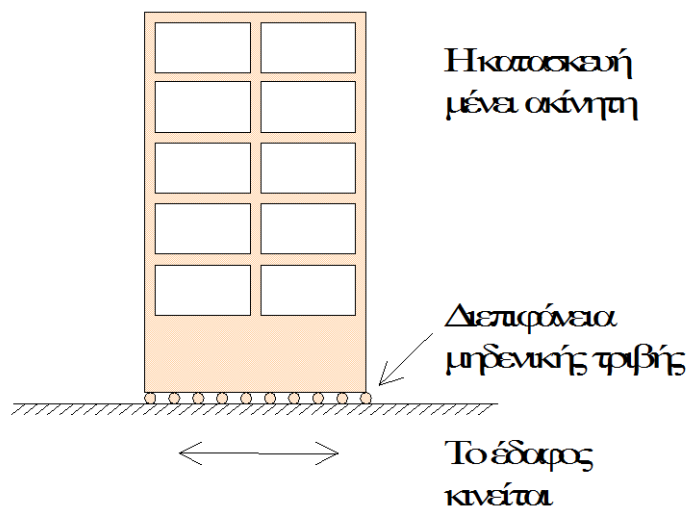
Οι κατασκευές υποβλήθηκαν σε ένα σύνολο μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας για γνωστές σεισμικές διεγέρσεις και σε κάποιες φασματικές αναλύσεις για το φάσμα του κανονισμού, υπό το οποίο γίνεται ο σχεδιασμός του συστήματος της σεισμικής μόνωσης. Οι αναλύσεις διεξήχθησαν δύο φορές χρησιμοποιώντας τις οριακές τιμές των ιδιοτήτων των εφεδράνων τριβής. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αξιολογήθηκαν και οδήγησαν στα τελικά συμπεράσματα.

2.1 Σεισμική Μόνωση

Ο όρος *Σεισμική Μόνωση* ή *Μόνωση Βάσης* ενός κτιριακού ή άλλου έργου αναφέρεται στην στρατηγική σχεδιασμού η οποία αποσκοπεί στην κατά το δυνατόν απομόνωση της ανωδομής από την σεισμική κίνηση του εδάφους. Το αίτιο της σεισμικής δράσης θέτει την κατασκευή σε ταλάντωση κατά την οποία εκδηλώνονται έντονες σχετικές μετακινήσεις στις στάθμες της κατασκευής. Αυτές έχουν ως αποτέλεσμα ενδεχόμενες υπερβάσεις των αντοχών των φερόντων στοιχείων της κατασκευής δηλ. την πρόκληση βλαβών οι οποίες κλιμακούμενες ενδέχεται να οδηγήσουν σε τοπικές αστοχίες ή και την ολική κατάρρευση.

Αν μία κατασκευή μπορούσε να διαχωριστεί πλήρως από το έδαφος (π.χ. αν εδραζόταν στο έδαφος μέσω μίας διεπιφάνειας μηδενικής τριβής) τότε η κίνηση του εδάφους θα την άφηνε ανέπαφη αφού καμία οριζόντια δύναμη δεν θα μπορούσε να μεταδοθεί σε αυτή. Η κατασκευή δεν θα επηρεαζόταν από τον σεισμό, θα έμενε ακίνητη ενώ το έδαφος κάτω της θα εκδήλωνε όλη την κίνηση (Σχήμα 2.1). Κάτι τέτοιο όμως θα την έκανε παράλληλα ιδιαίτερα ευάλωτη σε μετακινήσεις λόγω ανέμου ή άλλων οριζόντιων δράσεων γεγονός βεβαίως άκρως ανεπιθύμητο. Πέραν τούτου ο πλήρης διαχωρισμός εδάφους-κατασκευής με την επίτευξη μηδενικής τριβής είναι στην πράξη ανέφικτος.

Στάθμιση αυτών των αντικρουόμενων απαιτήσεων επιτυγχάνεται με την παρεμβολή εν σειρά μεταξύ του εδάφους και της κατασκευής ειδικών δομικών στοιχείων (σεισμικοί μονωτήρες) τα οποία παρέχουν μεγάλη οριζόντια ευκαμψία σε ένα επίπεδο διαχωρισμού, συνήθως στην βάση της κατασκευής (σεισμική μόνωση βάσης).



Σχήμα 2.1: Η Έννοια της Απομόνωσης της Κατασκευής από την Εδαφική Κίνηση

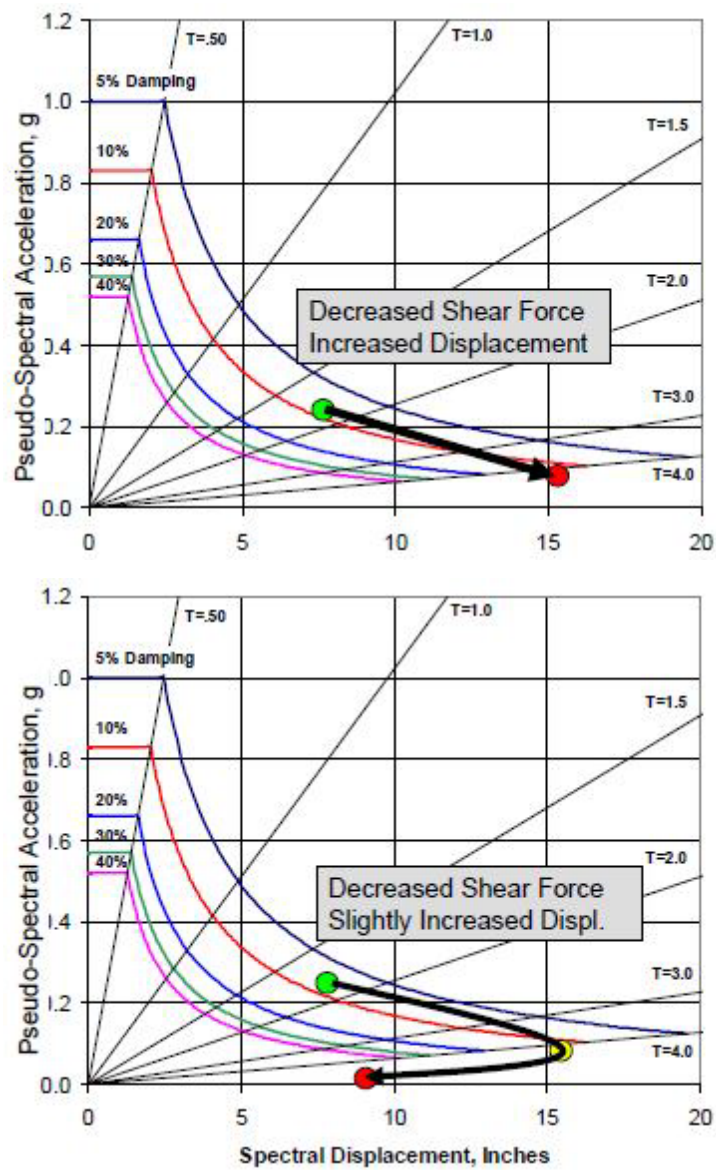
Η εφαρμογή των μεθόδων σεισμικής μόνωσης βάσης έχει ως κύριο άξονα τον διαχωρισμό της κίνησης της ανωδομής από την ισχυρή κίνηση του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η ενέργεια που εισάγεται στην κατασκευή, εν μέρει εκδηλώνοντας την ως κινητική ενέργεια στη στάθμη της σεισμικής μόνωσης και εν μέρει αποσβένοντάς την στο σύστημα μόνωσης. Το σύνολο της μετακίνησης καλείται να παραληφθεί από μεμονωμένους μονωτήρες τα δυναμικά χαρακτηριστικά των οποίων επιλέγονται έτσι ώστε να απαλλάξουν την κατασκευή από την εδαφική κίνηση στη βάση.

Στόχος της σεισμικής μόνωσης είναι η μείωση ή βελτίωση της απόκρισης της ανωδομής που οφείλεται στις οριζόντιες σεισμικές δράσεις συγκεντρώνοντας τις μετακινήσεις και τις όποιες διαρροές στη στάθμη του συστήματος μόνωσης. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιούνται κατά το δυνατόν οι παραμορφώσεις στις κρίσιμες διατομές των στοιχείων του φέροντος οργανισμού περιορίζοντας σημαντικά τις βλάβες και κάνοντας την ανωδομή να συμπεριφέρεται σχεδόν ως στερεό σώμα.

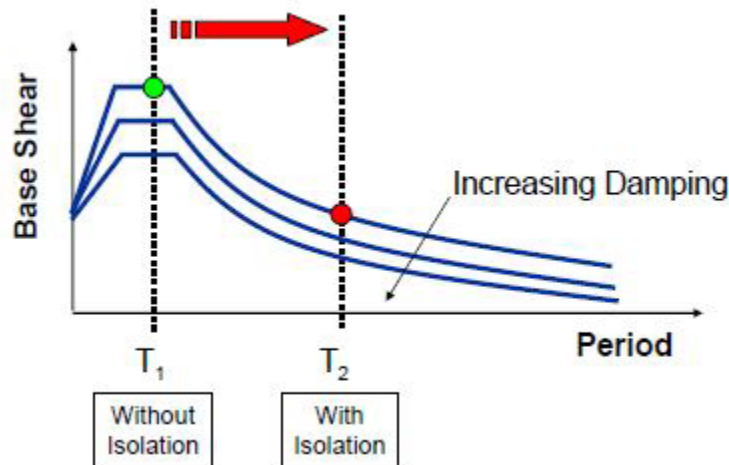
Η μείωση της απόκρισης μέσω των συστημάτων σεισμικής μόνωσης επιτυγχάνεται με τους ακόλουθους τρόπους :

- α) Με επιμήκυνση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου της κατασκευής (ευνοϊκή επίδραση της μετάθεσης της ιδιοπεριόδου στο φάσμα σχεδιασμού), με την οποία επιτυγχάνεται μείωση των σεισμικών δυνάμεων, αλλά με συνέπεια την παράλληλη αύξηση των μετακινήσεων (οι οποίες όμως συγκεντρώνονται στο επίπεδο της μόνωσης)
- β) Με αύξηση της ικανότητας απόσβεσης, με την οποία επιτυγχάνεται μείωση των μετακινήσεων και των σεισμικών δυνάμεων

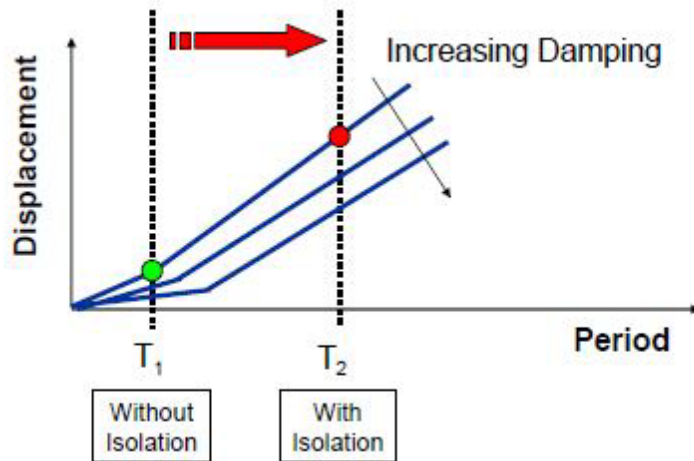
γ) Με συνδυασμό – κατά προτίμηση – των ευνοϊκών επιδράσεων και των δύο παραπάνω παραγόντων.



Σχήμα 2.2 : Επίδραση της αύξησης της ιδιοπεριόδου στην απόκριση της κατασκευής χωρίς ή με σύγχρονη αύξηση της απόσβεσης (φάσμα ADRS).



Σχήμα 2.3 : Επίδραση της αύξησης της ιδιοπεριόδου στην τέμνουσα βάσης σχεδιασμού (φάσμα επιταχύνσεων).



Σχήμα 2.4 : Επίδραση της αύξησης της ιδιοπεριόδου στις μετακινήσεις σχεδιασμού (φάσμα μετακινήσεων).

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι τα συστήματα σεισμικής μόνωσης που μπορούν να αποδειχθούν αποτελεσματικά στην πράξη πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν σε ικανοποιητικό βαθμό τόσο μείωση των σεισμικών δυνάμεων που εισάγονται στην κατασκευή, όσο και περιορισμό εντός των επιτρεπόμενων ορίων των μετακινήσεων των ίδιων των μονωτήρων. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό εξασφαλίζοντας σημαντική ικανότητα απόσβεσης στο σύστημα μόνωσης παράλληλα με την αυξημένη οριζόντια ευκαμψία κάνοντας χρήση μονωτήρων με υστερητική συμπεριφορά ή/και πρόσθετων αποσβεστήρων.

Από τις σημαντικότερες ιδιότητες της σεισμικά μονωμένης κατασκευής είναι η αύξηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου, καθώς για συμβατικούς σεισμούς σε τυπικά εδάφη, οδηγεί

στην αποφυγή του φαινομένου του συντονισμού και ταυτόχρονα μειώνει τις επιβαλλόμενες επιταχύνσεις, περισσότερο σε σχέση με την ανελαστική συμπεριφορά της ανωδομής. Όπως είναι γνωστό οι αδρανειακές δυνάμεις στους ορόφους ενός δομήματος, είναι ανάλογες της επιτάχυνσης. Η επιτάχυνση λόγω της εδαφικής κίνησης είναι μια συνάρτηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\Sigma K}} \quad (2.1)$$

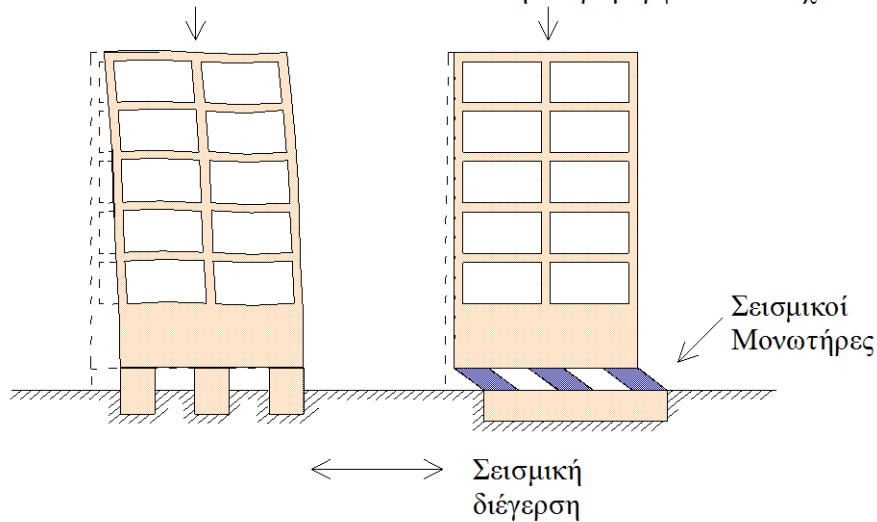
Έτσι, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι οι επιταχύνσεις που αναπτύσσουν οι σεισμικά μονωμένες κατασκευές είναι κατά πολύ μικρότερες των επιταχύνσεων συμβατικά θεμελιωμένων κατασκευών, καθώς η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος είναι κατά πολύ μεγαλύτερη. Η μείωση αυτή αποκτά πολύ μεγαλύτερη σημασία στις περιπτώσεις όπου το δόμημα φιλοξενεί ευπαθή εξοπλισμό και η προστασία του είναι απαραίτητη. Τέτοιες περιπτώσεις είναι αρχαιολογικά εκθέματα, κτίρια υψηλής σπουδαιότητας, πυρηνικές εγκαταστάσεις κ.λπ. Από την άλλη η αύξηση της ιδιοπεριόδου έχει ως συνέπεια την αύξηση των μετατοπίσεων του συστήματος, οι οποίες είναι συγκεντρωμένες στο επίπεδο της μόνωσης. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να υπάρχει επαρκής πιστοποίηση της ευστάθειας των μονωτικών διατάξεων.

Μια άλλη ιδιότητα της σεισμικής μόνωσης είναι η κατανάλωση σεισμικής ενέργειας κατά την διάρκεια ενός επεισοδίου. Η κατανάλωση της σεισμικής ενέργειας στο συμβατικό αντισεισμικό σχεδιασμό γίνεται μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης συγκεκριμένων θέσεων των μελών της κατασκευής. Οι θέσεις αυτές σχεδιάζονται βάσει των υπαρχόντων κανονισμών, ενώ η ενίσχυση και επαναλειτουργία τους στην περίπτωση σημαντικών βλαβών είναι αρκετά δυσχερής τόσο πρακτικά όσο και οικονομικά. Αντίθετα, η απορρόφηση του συνόλου της ενέργειας σε ένα επίπεδο επιτρέπει έναν σαφώς ευκολότερο σχεδιασμό και παράλληλα παρέχει ευελιξία στην αντικατάσταση. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η πρόσθετη μείωση της επιτάχυνσης που επιτυγχάνεται μέσω της απόσβεσης.

Η παρεμβολή των σεισμικών μονωτήρων συνιστά ουσιαστικά τροποποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής σε ενδεχόμενες σεισμικές διεγέρσεις (βλέπε Σχήμα 2.).

Συμβατικά θεμελιωμένη κατασκευή :
Αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις
οι οποίες την παραμορφώνουν

Σεισμικά μονωμένη κατασκευή :
Οι αναπτύσσομενες αδρανειακές
δυνάμεις είναι πολύ μικρότερες
και την παραμορφώνουν ελάχιστα



Σχήμα 2.5: Σύγκριση Σεισμικά Μονωμένης και Συμβατικά Θεμελιωμένης Κατασκευής

Η συμβατικά θεμελιωμένη κατασκευή είναι σχετικώς δύσκαμπτη. Καθώς κινείται το έδαφος, η κατασκευή τίθεται σε κίνηση και αδρανειακές δυνάμεις και ροπές αναπτύσσονται καθ' όλο το ύψος στις θέσεις συγκέντρωσης των μαζών και στρωφικών ροπών αδράνειας οι οποίες την παραμορφώνουν και την εντείνουν. Αντίθετα στην περίπτωση της σεισμικά μονωμένης κατασκευής η συγκεντρωμένη ευκαμψία στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης περιορίζει σημαντικά τις δυνάμεις οι οποίες μεταφέρονται στην ανωδομή. Καθώς το έδαφος κινείται σημαντικές μετατοπίσεις εκδηλώνονται στους σεισμικούς μονωτήρες. Έτσι όμως πολύ μικρό μέρος της κίνησης μεταδίδεται στην ανωδομή, οι αναπτυσσόμενες αδρανειακές δυνάμεις είναι σημαντικά μικρότερες και η ανωδομή παραμορφώνεται και εντείνεται ελάχιστα.

Η πρώτη δυναμική μορφή (ιδιομορφή) της μονωμένης κατασκευής είναι πολύ εύκαμπτη. Αφορά συγκεντρωμένες μετατοπίσεις στο επίπεδο των σεισμικών μονωτήρων και την ανωδομή να μετακινείται σχεδόν ως στερεό σώμα. Η δυναμική συμπεριφορά της μονωμένης κατασκευής κυριαρχείται από αυτή την πρώτη ιδιομορφή. Οι ανώτερες ιδιομορφές αφορούν σύζευξη του συστήματος σεισμικής μόνωσης με τις ιδιομορφές της ανωδομής και ελάχιστα συμμετέχουν στην κίνηση για τις συνήθεις περιπτώσεις όπου η ανωδομή είναι πολύ πιο δύσκαμπτη σε σχέση με το σύστημα σεισμικής μόνωσης. Σε αυτή την τροποποίηση της

δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής οφείλονται οι μειωμένες μετατοπίσεις και επιταχύνσεις στην ανωδομή.

Είναι φανερό ότι η εισαγωγή της επιπλέον ευκαμψίας στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αυξημένων μετατοπίσεων στους μονωτήρες, οι οποίοι πρέπει να είναι ικανοί να τις αναλάβουν. Για τον περιορισμό των μετατοπίσεων των μονωτήρων και την επίτευξη ενός οικονομικού σχεδιασμού τους, η συνήθης πρακτική είναι η αύξηση του συντελεστή απόσβεσης β του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Οι τιμές του συντελεστή απόσβεσης των διαθέσιμων συστημάτων σεισμικής μόνωσης κυμαίνονται από 15% έως 40% της κρίσιμης απόσβεσης.

2.2 Φιλοσοφία Σχεδιασμού Της Σεισμικής Μόνωσης Και Προϋποθέσεις Εφαρμογής Της

2.2.1 Σύγκριση Με Συμβατικό Αντισεισμικό Σχεδιασμό

Η ιδέα της σεισμικής μόνωσης οδηγεί σε μία διαφορετική φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού. Η βασική απαίτηση κάθε σχεδιασμού είναι η αντοχή της κατασκευής να είναι μεγαλύτερη από την απαίτηση του σεισμού.

Αντοχή Κατασκευής > Απαίτηση Σεισμού

Η φιλοσοφία του συμβατικού σχεδιασμού βασίζεται στην αύξηση της αντοχής της κατασκευής έτσι ώστε να επαρκεί για την απαίτηση του σεισμού.

Συμβατικός Σχεδιασμός $\Rightarrow$ Αύξηση Αντοχής Κατασκευής

Όσο αυξάνεται η απαίτηση του σεισμού σχεδιασμού τόσο πρέπει να αυξάνεται και η αντοχή της κατασκευής. Ο ελαστικός σχεδιασμός για τέτοια επίπεδα αντοχής είναι αφενός αντισυμβατικός και αφετέρου δεν προσφέρει τη δυνατότητα απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας. Έτσι ο συμβατικός σχεδιασμός ακολουθεί την λογική της πλάστιμης συμπεριφοράς που αναφέρεται στην δυνατότητα της κατασκευής να εισέρχεται στην μετελαστική περιοχή (δηλαδή να παραμορφώνεται μετά το όριο διαρροής) κατά ένα ελεγχόμενο τρόπο. Η πλάστιμη συμπεριφορά της κατασκευής εκδηλώνεται σε προεπιλεγμένα μέλη της κατασκευής (άκρα δοκών) τα οποία διαστασιολογούνται κατά τρόπο ώστε να αναλαμβάνουν σημαντικές μετελαστικές παραμορφώσεις χωρίς αστοχία. Όσο μεγαλύτερη ικανότητα πλάστιμης συμπεριφοράς έχουν τα μέλη αυτά τόσο μικρότερη αντοχή απαιτείται

για να ικανοποιηθεί η απαίτηση του σεισμού. Επιπλέον στις θέσεις αυτές απορροφώνται σημαντικά ποσά της σεισμικής ενέργειας με αποτέλεσμα την ταχύτερη εκτόνωση της.

Το όριο διαρροής καθορίζει το σημείο πέρα από το οποίο η φόρτιση παράγει μόνιμες παραμορφώσεις στην κατασκευή. Για τα περισσότερα δομικά συστήματα η πλάστιμη συμπεριφορά προκαλεί μόνιμη βλάβη σε ορισμένες θέσεις του φέροντος οργανισμού. Μετά από ένα ισχυρό σεισμό οι διαπιστούμενες βλάβες στα στοιχεία του φέροντος οργανισμού της κατασκευής πρέπει να αποκαθίστανται έτσι ώστε η ικανότητα πλάστιμης συμπεριφοράς να είναι διαθέσιμη για ενδεχόμενο νέο σεισμικό επεισόδιο. Συνεπώς ο σχεδιασμός των κατασκευών μέσω πλάστιμης συμπεριφοράς αποδέχεται ένα έμμεσο κόστος επισκευής των φερόντων και μη φερόντων στοιχείων της κατασκευής μετά από ισχυρούς σεισμούς καθώς και μια πιθανότητα κατάρρευσης της κατασκευής στην περίπτωση όπου η σεισμική δράση είναι μεγαλύτερη του σεισμού σχεδιασμού.

Η φιλοσοφία της σεισμικής μόνωσης ακολουθεί την αντίθετη λογική. Στοχεύει στην μείωση της σεισμικής απαίτησης παρά στην αύξηση της αντοχής της κατασκευής.

Σεισμική Μόνωση $\Rightarrow$ Μείωση Απαίτησης Σεισμού

Βέβαια το σεισμικό επεισόδιο αυτό καθ' εαυτό δεν μπορεί να ελεγχθεί. Όμως μπορεί να μειωθεί η απαίτηση του σεισμού από την κατασκευή με την παρεμβολή ειδικών δομικών στοιχείων μεταξύ εδάφους και κατασκευής τα οποία αναλαμβάνουν την απομείωση της σεισμικής κίνησης η οποία μεταδίδεται στην ανωδομή. Με αυτό τον τρόπο η ανωδομή δεν είναι ανάγκη να συμπεριφέρεται πλάστιμα για να αναλάβει με ασφάλεια την μειωμένη απαίτηση του σεισμού. Για την ακρίβεια δεν είναι επιθυμητό να συμπεριφέρεται πλάστιμα γιατί διαρρέοντας αυξάνει η ευκαμψία της και έτσι μειώνεται η απόδοση του συστήματος σεισμικής μόνωσης, ενώ αυξάνει η πιθανότητα σύζευξης των δύο συστημάτων και εμφάνισης ανεπιθύμητων φαινομένων. Έτσι η μονωμένη κατασκευή σχεδιάζεται για πολύ μικρά επίπεδα πλάστιμης συμπεριφοράς. Για παράδειγμα ο αμερικάνικος κανονισμός IBC 2000 ορίζει τον επιτρεπόμενο συντελεστή συμπεριφοράς R_I των μονωμένων κατασκευών ως τα $\frac{3}{8}$ του αντίστοιχου συντελεστή συμπεριφοράς R της συμβατικά θεμελιωμένης κατασκευής (καθώς επίσης $1.0 \leq R_I < 2.0$). Έτσι εάν $2.66 \leq R < 5.33$, το σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να μειώνει τις σεισμικές δυνάμεις τουλάχιστον κατά 2.66 φορές για να φτάσει τα επίπεδα της συμβατικά θεμελιωμένης πλάστιμης κατασκευής.

Στην πράξη η μείωση της σεισμικής απαίτησης εξαρτάται από το σύστημα σεισμικής μόνωσης, το είδος της κατασκευής και την σεισμικότητα της περιοχής και κυμαίνεται από 3

έως και 6 φορές. Γενικά η μείωση των σεισμικών δυνάμεων δεν ξεπερνάει κατά πολύ την αντίστοιχη μείωση των σεισμικών δυνάμεων λόγω πλαστικής συμπεριφοράς μιας συμβατικά θεμελιωμένης κατασκευής. Επίσης η μονωμένη ανωδομή πρέπει με επάρκεια να φέρει τα φορτία βαρύτητας καθώς και τις λοιπές περιπτώσεις οριζόντιας φόρτισης όπως π.χ. ο άνεμος. Έτσι το άμεσο όφελος από την διαστασιολόγηση της ανωδομής για μικρότερες σεισμικές δυνάμεις είναι γενικά μικρό της τάξης του 0% έως 5%. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση ανακατασκευής και ενίσχυσης υφιστάμενων κτιρίων. Σε αυτή την περίπτωση το δομικό σύστημα της ενίσχυσης δεν είναι δυνατό να σχεδιαστεί για υψηλά επίπεδα πλαστιμότητας επειδή αυτά δεν μπορούν να αναπτυχθούν από το υφιστάμενο δομικό σύστημα. Έτσι η μείωση των σεισμικών δυνάμεων που προσφέρει η λύση της σεισμικής μόνωσης μειώνει σημαντικά το κόστος της αποκατάστασης – ενίσχυσης της ανωδομής. Η σύγκριση αυτή συνοδεύεται και από το επίπεδο των αναμενόμενων βλαβών στο φέροντα οργανισμό της κατασκευής, όπου κατά τον συμβατικό σχεδιασμό αναμένονται σημαντικές δομικές βλάβες, ενώ στη περίπτωση των συστημάτων σεισμικής μόνωσης δεν παρουσιάζονται βλάβες στην ανωδομή.

2.2.2 Σύγκριση Αρχικού Κόστους Κατασκευής

Στις περισσότερες περιπτώσεις το κόστος κατασκευής ενός σεισμικά μονωμένου κτιρίου, συμπεριλαμβανομένου και του οφέλους από την μείωση των σεισμικών δυνάμεων στην ανωδομή, είναι γενικά αυξημένο σε σχέση με το κόστος του συμβατικά θεμελιωμένου κτιρίου κατά 0% έως 12%. Το επιπλέον αυτό κόστος οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες :

- **Κόστος σεισμικών μονωτήρων:** Γενικά το κόστος των σεισμικών μονωτήρων μεταβάλλεται σε μεγάλο εύρος. Για τις συνήθεις περιπτώσεις εξαρτάται κυρίως από την μετατόπιση που πρέπει να αναλάβουν οι μονωτήρες και πολύ λιγότερο από το κατακόρυφο φορτίο το οποίο φέρουν. Επιπλέον οι διάφοροι κανονισμοί απαιτούν πειραματικό έλεγχο των πρότυπων μονωτήρων και πρόγραμμα επιθεώρησης και συντήρησης τους μετά τα σεισμικά επεισόδια κάτι το οποίο αυξάνει το κόστος.
- **Κόστος σχεδιασμού και μελέτης:** Μια μονωμένη κατασκευή έχει μεγαλύτερη απαίτηση από τον μηχανικό για την προδιαστασιολόγηση, την ανάλυση (συνήθως απαιτείται μη-γραμμική δυναμική ανάλυση) και την μελέτη των λεπτομερειών κατασκευής της.

- **Κόστος δομικών και αρχιτεκτονικών αλλαγών:** Το κόστος των δομικών αλλαγών για την εισαγωγή των μονωτήρων αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του επιπλέον κόστους κατασκευής. Εξαρτάται έντονα από την κατασκευή και την θέση τοποθέτησης των μονωτήρων. Επιπλέον για τα στοιχεία που διέρχονται από το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης απαιτούνται αρχιτεκτονικές αλλαγές, όπως κυλιόμενες στην βάση τους σκάλες και ειδικές λεπτομέρειες εγκαταστάσεων όπως ανελκυστήρες, εύκαμπτοι αγωγοί κλπ.

2.2.3 Σύγκριση Έμμεσου Κόστους Αποκατάστασης Βλαβών

Το μεγάλο πλεονέκτημα των σεισμικά μονωμένων κατασκευών έναντι των συμβατικά θεμελιωμένων προέρχεται από την μείωση του αρχικού αλλά και του έμμεσου κόστους αποκατάστασης των βλαβών μετά τον σεισμό. Ο πρώτος παράγοντας της μείωσης προέρχεται από την μειωμένη απαίτηση πλαστιμότητας από την ανωδομή. Συνεπώς δεν αναμένονται βλάβες στο δομικό σύστημα ακόμα και για ισχυρούς σεισμούς. Επιπλέον μειώνονται σημαντικά και οι πιθανές βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία πληρώσεως όπως τοίχοι, χωρίσματα, παράθυρα κτλ. Η πολύ μικρή απαίτηση πλάστιμης συμπεριφοράς από την ανωδομή μειώνει σημαντικά και την πιθανότητα κατάρρευσης της κατασκευής στην περίπτωση όπου ξεπερνιέται ο σεισμός σχεδιασμού κατά συνέπεια η σεισμική μόνωση οδηγεί σε πολύ ασφαλέστερο αντισεισμικό σχεδιασμό.

Ένας δεύτερος παράγοντας μείωσης του κόστους επισκευής των βλαβών προέρχεται από την μείωση των επιταχύνσεων ορόφων. Οι μεγάλες επιταχύνσεις ορόφων προκαλούν βλάβες στα περιεχόμενα του κτιρίου όπως συσκευές, μηχανήματα, εξοπλισμό κτλ. Κατά τον συμβατικό σχεδιασμό όσο αυξάνεται η αντοχή το κτίριο γίνεται πιο δύσκαμπτο και αυξάνουν οι επιταχύνσεις ορόφων. Αντίθετα η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης μειώνει σημαντικά τις επιταχύνσεις ορόφων και τις συνακόλουθες βλάβες.

Η μείωση του έμμεσου κόστους επισκευής των βλαβών μετά τον σεισμό είναι δύσκολο να αποτιμηθεί εκ των προτέρων για όλο τον χρόνο ζωής του έργου και να συμπεριληφθεί στην σύγκριση των λύσεων. Χονδρικές αποτιμήσεις αυτού του κόστους οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η χρήση της σεισμικής μόνωσης οδηγεί σε μακροχρόνιο όφελος της τάξης του 15% έως 25% του αρχικού κόστους κατασκευής του έργου το οποίο είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από το πρόσθετο κόστος εγκατάστασης των σεισμικών μονωτήρων.

2.3 Καταλληλότητα Κτιρίων Για Εφαρμογή Σεισμικής Μόνωσης

Από τα προηγούμενα είναι φανερό ότι η φιλοσοφία σχεδιασμού της σεισμικής μόνωσης είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τις εξής κατηγορίες κτιρίων :

- κτίρια μεγάλης σπουδαιότητας για τα οποία είναι αναγκαία η χρήση τους μετά το σεισμό (όπως νοσοκομεία, σταθμοί παραγωγής ενέργειας κτλ.).
- κτίρια τα οποία περιέχουν αντικείμενα μεγάλης αξίας (όπως μουσεία, βιομηχανικές μονάδες παραγωγής ευαίσθητων αντικειμένων κτλ.).
- κτίρια τα οποία έχουν μικρή δυνατότητα πλάστιμης συμπεριφοράς (όπως στις περιπτώσεις ενίσχυσης υφιστάμενων παλαιών κτιρίων).

Η αυξημένη ασφάλεια έναντι σεισμού μπορεί να κάνει ανταγωνιστική την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις συμβατικών έργων. Μέχρι στιγμής η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης στην Ελλάδα δεν έχει επεκταθεί στις συμβατικές κατοικίες, αλλά ο αριθμός των μεγαλύτερων έργων τα οποία υιοθετούν την λογική της σεισμικής μόνωσης διαρκώς αυξάνει.

Γενικά η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης είναι καταλληλότερη για κτίρια στα οποία η μείωση της σεισμικής απαίτησης είναι σημαντική και μεγαλύτερη από άλλες μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού. Μερικοί παράγοντες οι οποίοι κάνουν την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλη είναι οι ακόλουθοι :

- **Βάρος της Κατασκευής:** Για τα περισσότερα συστήματα σεισμικής μόνωσης η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης είναι καταλληλότερη για σχετικά βαριά κτίρια. Αυτό γιατί για να επιτευχθεί μια δεδομένη επιμήκυνση της ιδιοπερίόδου της σεισμικής μόνωσης, αν είναι μικρή η μάζα της υπερκείμενης κατασκευής θα πρέπει να είναι πολύ μικρή και η δυσκαμψία του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Ορισμένοι τύποι εφεδράνων όπως τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα δεν μπορούν να φτάσουν σε τόσο μικρά επίπεδα δυσκαμψίας γιατί γίνονται ασταθή υπό το κατακόρυφο φορτίο. Αντίθετα τα συστήματα ολίσθησης δεν έχουν κίνδυνο αστάθειας και η ιδιοπερίοδος τους δεν εξαρτάται από την μάζα της ανωδομής. Κατά συνέπεια και η μετακίνηση του συστήματος σεισμικής μόνωσης είναι ανεξάρτητη από την μάζα της ανωδομής. Όμως το κόστος των συστημάτων ολίσθησης αυξάνει με το μέγεθος των επιφανειών ολίσθησης και κατά συνέπεια εξαρτάται έντονα από την μετατόπιση. Συνεπώς το κόστος του συστήματος μόνωσης ανάγεται σε ένα σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό του αρχικού κόστους κατασκευής για ελαφριά κτίρια σε σχέση με βαρύτερα.

- **Ιδιοπερίοδος της κατασκευής:** Οι πιο κατάλληλες κατασκευές για την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης είναι αυτές με ιδιοπερίοδο μικρότερη από 0.5sec-0.8 sec. Αυτό γιατί η επίδραση της σεισμικής μόνωσης μετατοπίζει την ιδιοπερίοδο της κατασκευής στο διάστημα από 1.5sec έως 3.5sec. Αν η κατασκευή έχει ήδη ιδιοπερίοδο κοντά σε αυτό το διάστημα τότε η μείωση των σεισμικών δυνάμεων η οποία επιτυγχάνεται είναι μικρή και η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης δεν είναι συμφέρουσα.
- **Εδαφικές συνθήκες:** Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης είναι καταλληλότερη σε θέσεις όπου υπάρχουν βραχώδη εδάφη και εν γένει σκληροί εδαφικοί σχηματισμοί. Οι μαλακοί εδαφικοί σχηματισμοί τροποποιούν την σεισμική διέγερση ενισχύοντας τις μεγάλες περιόδους. Αν ο εδαφικός σχηματισμός ενισχύει την εδαφική κίνηση στο εύρος των ιδιοπεριόδων των σεισμικά μονωμένων κατασκευών τότε η απόδοση της σεισμικής μόνωσης μειώνεται σημαντικά. Δηλαδή οι στρώσεις των χαλαρών εδαφικών σχηματισμών λειτουργούν οι ίδιες ως μονωτική στρώση ακυρώνοντας την δράση της σεισμικής μόνωσης.
- **Απόσταση από ενεργά ρήγματα:** Στην περίπτωση όπου το σεισμογόνο ρήγμα βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την θέση της κατασκευής (μικρότερη από 5Km) τότε είναι δυνατό να εμφανιστεί ένας παλμός υψηλής περιόδου και υψηλής ταχύτητας στην εδαφική κίνηση. Ο παλμός αυτός οφείλεται σε υπέρθεση των σεισμικών κυμάτων κατά την διεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης του ρήγματος (φαινόμενο Doppler). Το αποτέλεσμα είναι η σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων στις υψηλές περιόδους όπου βρίσκονται οι μονωμένες κατασκευές. Τα συστήματα σεισμικής μόνωσης χρησιμοποιούνται και σε θέσεις κοντά σε ενεργά ρήγματα, αλλά καλούνται να αναλάβουν σημαντικά μεγαλύτερες μετατοπίσεις και το κόστος τους είναι αρκετά υψηλότερο.
- **Εφελκυστικά Αξονικά Φορτία:** Για τα περισσότερα συστήματα σεισμικής μόνωσης δεν είναι επιθυμητή η εμφάνιση εφελκυστικών καταπονήσεων στους μονωτήρες. Για τα συστήματα ολίσθησης αυτό συνεπάγεται ανύψωση ενώ για τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα συνεπάγεται εφελκυστικές τάσεις στο ελαστικό το οποίο έχει σχετικά χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό (φαινόμενα σπηλαίωσης). Γενικά η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης δεν είναι κατάλληλη για κατασκευές οι οποίες αναλαμβάνουν τα σεισμικά φορτία εμφανίζοντας εφελκυσμό σε μέρος της βάσης τους όπως στην περίπτωση υψηλών διατμητικών πλευρικών τοιχωμάτων τα οποία λειτουργούν ως πρόβολοι.

- **Απαιτούμενες Δομικές αλλαγές:** Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης απαιτεί συγκεκριμένες αλλαγές στο δομικό σύστημα της κατασκευής όπως η διαμόρφωση κοινής βάσης πάνω από τα εφέδρανα με σκοπό την ομογενοποίηση των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων καθώς και ειδικές αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες. Κατ' αρχήν το σύστημα σεισμικής μόνωσης απαιτεί ένα επίπεδο διαχωρισμού κατά το οποίο εμφανίζονται σημαντικές σχετικές μετακινήσεις. Συνεπώς για την μέγιστη μετακίνηση του συστήματος σεισμικής μόνωσης δεν πρέπει να υπάρχουν προσκρούσεις. Για τα νέα κτίρια, αν το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης βρίσκεται κάτω από το έδαφος, η παραπάνω απαίτηση μπορεί να υλοποιηθεί με περιμετρική τάφρο και περιμετρικό τοίχο αντιστήριξης. Για την περίπτωση αποκατάστασης -ενίσχυσης υφιστάμενων κτιρίων ο διαθέσιμος χώρος μπορεί να επιβάλει περιορισμό στην μέγιστη μετακίνηση του συστήματος σεισμικής μόνωσης, ενώ τον καθιστά πρακτικά αδύνατη την εφαρμογή του σε συνεχές σύστημα δόμησης.

Επίσης είναι συνήθης πρακτική η κατασκευή ενός διαφράγματος αμέσως πάνω από το επίπεδο των μονωτήρων για την ομαλή κατανομή των οριζόντιων φορτίων στα εφέδρανα. Έτσι το δάπεδο του υπογείου αμέσως πάνω από το σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να κατασκευαστεί ως φέρουσα πλάκα. Αν στην συμβατικά θεμελιωμένη κατασκευή εδραζόταν στο έδαφος τότε η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης συνεπάγεται το επιπλέον κόστος ενός ακόμα φέροντος ορόφου μικρού ύψους, κάτι το οποίο αποτελεί σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους για κτίρια μερικών ορόφων. Κατά συνέπεια η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης συνεπάγεται μικρότερο αρχικό κόστος σε κατασκευές στις οποίες θα κατασκευαζόταν έτσι και αλλιώς φέρων όροφος αμέσως πάνω από το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης. Για την περίπτωση ανακατασκευής υφιστάμενων κτιρίων σημαντικό ρόλο έχει η ευκολία με την οποία μπορεί να διαχωριστεί η κατασκευή και να αντιστηριχτεί κατά την εισαγωγή των σεισμικών μονωτήρων.

2.4 Μέθοδοι Ανάλυσης Σεισμικά Μονωμένης Κατασκευής

Οι μέθοδοι οι οποίες συνιστώνται από τους διάφορους κανονισμούς και οδηγίες για την ανάλυση σεισμικά μονωμένων κατασκευών είναι κατά αύξουσα σειρά ακρίβειας και πολυπλοκότητας οι εξής :

1. Η ισοδύναμη στατική ανάλυση
2. Η δυναμική φασματική ανάλυση
3. Η μη-γραμμική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας

Η ισοδύναμη στατική ανάλυση επιτρέπεται για ένα περιορισμένο εύρος συστημάτων σεισμικής μόνωσης. Στην πράξη η δυναμική φασματική ανάλυση και η μη-γραμμική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την μελέτη συστημάτων σεισμικής μόνωσης. Οι δύο αυτές μέθοδοι εξετάζουν την δυναμική απόκριση του σύνθετου συστήματος σεισμικής μόνωσης – ανωδομής και λαμβάνουν υπόψη τους τις εκδηλούμενες μη-γραμμικότητες στη συμπεριφορά της κατασκευής.

2.4.1 Προϋποθέσεις Ανάλυσης Σεισμικά Μονωμένων Κατασκευών Σύμφωνα Με EC8

Σύμφωνα με τον κανονισμό EC8 (*Eurocode 8, Part 1 [10]*) πρέπει να πληρούνται οι εξής γενικές προϋποθέσεις για την ανάλυση των σεισμικά μονωμένων κατασκευών:

- 1) Η δυναμική απόκριση του δομικού συστήματος πρέπει να αναλύεται σε όρους επιταχύνσεων, δυνάμεων αδράνειας και μετατοπίσεων.
- 2) Σε κτίρια, οι στρεπτικές επιδράσεις, συμπεριλαμβάνοντας τις επιδράσεις της τυχαίας εκκεντρότητας, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.
- 3) Η προσομοίωση του συστήματος μόνωσης πρέπει να ενσωματώνει με επαρκή ακρίβεια τη χωρική κατανομή των μονάδων των εφεδράνων, έτσι ώστε η μετατόπιση και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, οι αντίστοιχες δράσεις ανατροπής και η περιστροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα να λαμβάνονται επαρκώς υπόψη. Πρέπει να αντανakλά επαρκώς τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών τύπων μονάδων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μόνωσης.

2.4.2 Ισοδύναμη Στατική Ανάλυση

Η ισοδύναμη στατική μέθοδος είναι μια απλοποιημένη διαδικασία ανάλυσης η οποία βασίζεται στην παραδοχή τελείως άκαμπτης ανωδομής πάνω από τους σεισμικούς μονωτήρες. Αν και όλες οι κατασκευές έχουν κάποια ευκαμψία η οποία τροποποιεί την δυναμική απόκριση του συνδυασμένου συστήματος, η παραδοχή της άκαμπτης ανωδομής εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι για τα συνήθη συστήματα σεισμικής μόνωσης οι μετατοπίσεις συγκεντρώνονται στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης. Η μη-γραμμική δυναμική απόκριση του συνδυασμένου συστήματος προσεγγίζεται με την φασματική απόκριση ενός μονοβάθμιου γραμμικώς ελαστικού ταλαντωτή ο οποίος προσομοιώνει την ενεργό δυσκαμψία και τον ενεργό βαθμό απόσβεσης του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά οδηγούν σε μια απλή προσεγγιστική διαδικασία σχεδιασμού η οποία είναι ουσιώδης για την προδιαστασιολόγηση τόσο του συστήματος σεισμικής μόνωσης όσο και της ανωδομής μέσω της μεταφερόμενης τέμνουσας βάσης.

Σύμφωνα με το φάσμα απόκρισης των επιταχύνσεων του κανονισμού, η μετατόπιση σχεδιασμού του μονοβάθμιου ελαστικού συστήματος το οποίο προσομοιώνει την μονωμένη κατασκευή κατά την ισοδύναμη στατική μέθοδο δίνεται από την ακόλουθη γενική σχέση:

$$D = \frac{SA(T, \beta)}{\omega^2} = \frac{SA(T, \beta)T^2}{4\pi^2} \quad (2.2)$$

όπου $SA(T, \beta)$ είναι η ελαστική φασματική επιτάχυνση του κανονισμού για την ιδιοπερίοδο T και τον ισοδύναμο βαθμό απόσβεσης β του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ-2000) η ελαστική φασματική επιτάχυνση προκύπτει αν ο συντελεστής συμπεριφοράς q τεθεί ίσως με την μονάδα.

Η ιδιοπερίοδος του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος της μονωμένης κατασκευής δίνεται από την σχέση :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\sum K_{eff}}} \quad (2.3)$$

όπου m είναι η συνολική μάζα της μονωμένης κατασκευής και $\sum K_{eff}$ είναι η ενεργός δυσκαμψία του συστήματος σεισμικής μόνωσης για εύρος ανακυκλικής μετατόπισης D , η οποία ισούται με το άθροισμα των ενεργών ακαμψιών των μονωτήρων. Τόσο η ιδιοπερίοδος T όσο και ο βαθμός απόσβεσης β είναι συναρτήσεις της μετατόπισης D και κατά συνέπεια

απαιτείται επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό της μετατόπισης D στο κέντρο ακαμψίας του συστήματος σεισμικής μόνωσης.

Η επαναληπτική διαδικασία έχει ως εξής:

1. Τίθεται μια αρχική τιμή για την μετατόπιση D
2. Υπολογίζονται η ιδιοπερίοδος T και ο βαθμός απόσβεσης β για αυτό το εύρος μετατόπισης
3. Υπολογίζεται η νέα διορθωμένη τιμή της μετατόπισης από την σχέση (2.2)
4. Επιστροφή στο βήμα 2 με την νέα διορθωμένη τιμή της μετατόπισης

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η μετατόπιση D να έχει την επιθυμητή σύγκλιση (συνήθως 4 έως 5 επαναλήψεις).

Η τέμνουσα βάσης V_b για την οποία πρέπει να σχεδιαστεί το σύστημα σεισμικής μόνωσης και όλα τα στοιχεία κάτω από αυτό είναι ίση με την μέγιστη δύναμη την οποία αναλαμβάνει το σύστημα σεισμικής μόνωσης.

$$V_b = K_{eff} D \quad (2.4)$$

Η σεισμικά μονωμένη ανωδομή απαιτείται να σχεδιαστεί για τέμνουσα βάσης V_s η οποία είναι ίση με την μέγιστη δύναμη την οποία αναλαμβάνει το σύστημα σεισμικής μόνωσης απομειωμένη με τον συντελεστή συμπεριφοράς R_I της μονωμένης ανωδομής.

$$V_s = \frac{K_{eff} D}{R_I} \quad (2.5)$$

Ο συντελεστής συμπεριφοράς R_I της μονωμένης ανωδομής λαμβάνει τιμές κοντά στην μονάδα αφού η μονωμένη ανωδομή έχει πολύ μικρή δυνατότητα πλάστιμης συμπεριφοράς (βλέπε παράγραφο 0). Στην πράξη συνιστάται να λαμβάνεται ίσος με την μονάδα.

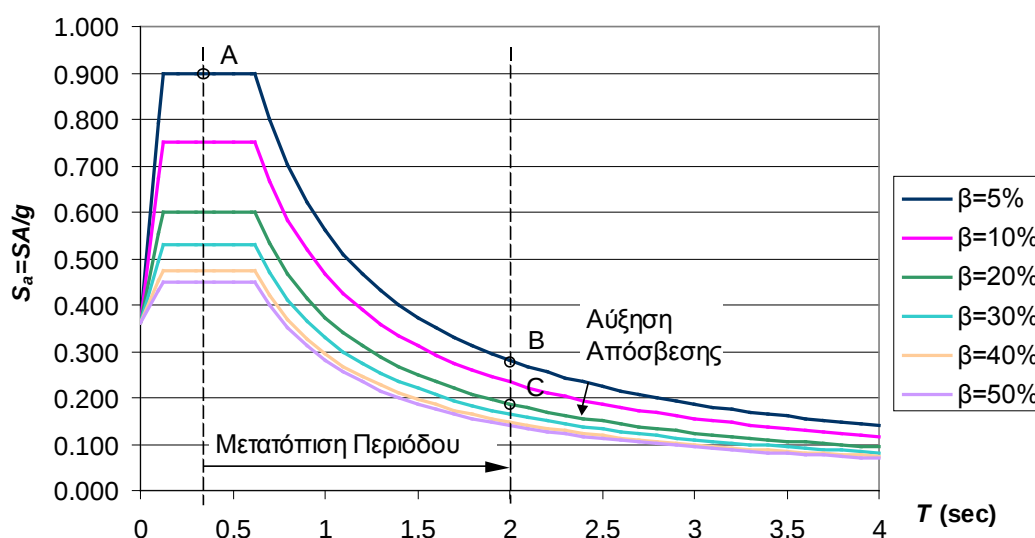
Η τέμνουσα βάσης V_s κατανέμεται στους ορόφους της ανωδομής μέσω τριγωνικής κατανομής. Αν h_i και w_i είναι τα ύψη πάνω από την βάση και το ποσοστό του συνολικού βάρους αντίστοιχα για τους ορόφους της ανωδομής τότε η ισοδύναμη στατικώς επιβαλλόμενη σεισμική δύναμη σε κάθε όροφο x δίνεται από την σχέση :

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (2.6)$$

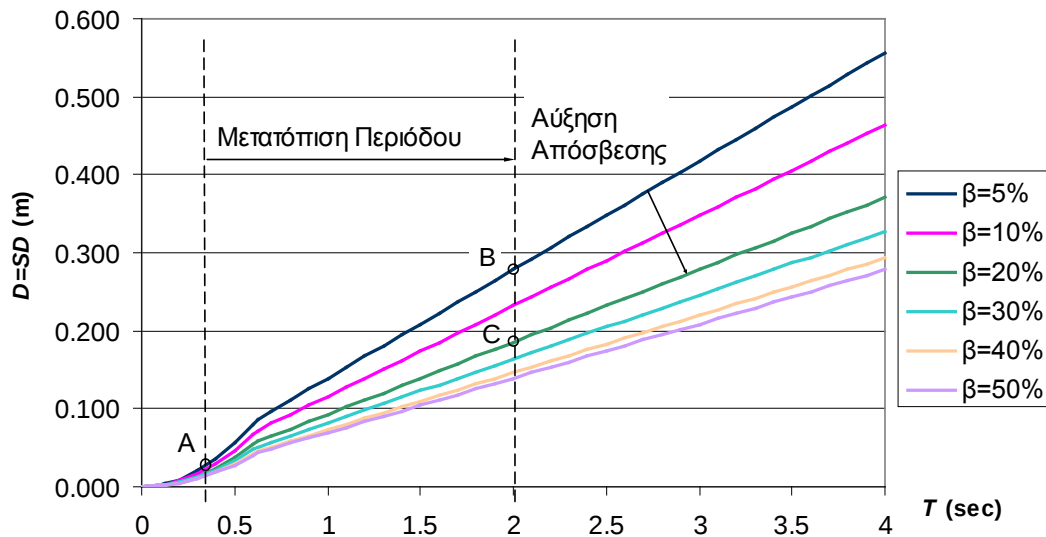
Θεωρητικά η κατανομή των δυνάμεων για διέγερση μόνο της πρώτης ιδιομορφής της σεισμικά μονωμένης κατασκευής θα έπρεπε να ήταν ομοιόμορφη σε όλους τους ορόφους (παραδοχή άκαμπτης ανωδομής). Η ισοδύναμη στατική μέθοδος εφαρμόζει την παραπάνω τριγωνική κατανομή έτσι ώστε να ληφθεί έμμεσα υπόψη η σχετική ευκαμψία της ανωδομής.

Η επίδραση της μετατόπισης της ιδιοπεριόδου και της αύξησης της απόσβεσης κατά την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης μπορεί ναδειχθεί εποπτικά μέσω της φασματικής απόκρισης του κανονισμού κατά την ισοδύναμη στατική μέθοδο. Στο Σχήμα 2.6 και στο Σχήμα 2.7 που ακολουθούν φαίνονται τα φάσματα επιταχύνσεων και μετατοπίσεων του αμερικάνικου κανονισμού IBC-2000 για παραμέτρους $S_{DS}=0.90$, $S_{D1}=0.56\text{sec}$ και για διάφορες τιμές του βαθμού απόσβεσης β . Έστω ότι η συμβατικά θεμελιωμένη κατασκευή έχει ιδιοπερίοδο 0.3sec και απόσβεση 5% ενώ η μονωμένη κατασκευή έχει ιδιοπερίοδο 2.0sec και απόσβεση 20%. Η φασματική απόκριση των δύο κατασκευών περιγράφεται από τα σημεία A και C των σχημάτων αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι κατά την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης, η συνδυασμένη δράση της μετατόπισης της περιόδου και της αύξησης της απόσβεσης μειώνει τις φασματικές επιταχύνσεις της ανωδομής κατά 4.5 φορές. Η μείωση των επιταχύνσεων συνοδεύεται από αύξηση των μετατοπίσεων κατά 7.2 φορές. Έτσι η σεισμικοί μονωτήρες θα πρέπει να είναι ικανοί να αναλάβουν μετατόπιση της τάξης των 18cm. Η μετατόπιση αυτή θα ήταν κοντά στα 30cm αν η απόσβεση του συστήματος σεισμικής μόνωσης είχε παραμείνει στο 5%.



Σχήμα 2.6: Φάσμα Ελαστικών Επιταχύνσεων IBC-2000 ($S_{DS}=0.90$, $S_{D1}=0.56\text{sec}$)



Σχήμα 2.7: Φάσμα Ελαστικών Μετατοπίσεων IBC-2000 ($S_{DS}=0.90$, $S_{DI}=0.56\text{sec}$)

2.4.3 Δυναμική Φασματική Ανάλυση

Η εφαρμογή της δυναμικής φασματικής ανάλυσης ακολουθεί την συνηθισμένη διαδικασία για κτιριακά έργα με δύο τροποποιήσεις. Οι σεισμικοί μονωτήρες προσομοιώνονται με γραμμικά ελατήρια τα οποία έχουν την ενεργό δυσκαμψία των μονωτήρων για τον σεισμό σχεδιασμού και το φάσμα σχεδιασμού τροποποιείται για να λάβει υπόψη την αυξημένη απόσβεση του συστήματος σεισμικής μόνωσης.

Η εφαρμογή της δυναμικής φασματικής ανάλυσης συνήθως οδηγεί σε υποεκτίμηση των επιταχύνσεων ορόφων και των ροπών ανατροπής στην βάση.

2.4.4 Μη-Γραμμική Δυναμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας

Η μέθοδος αυτή εξετάζει με ακρίβεια την έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά του συνδυασμένου συστήματος σεισμικής μόνωσης και ανωδομής. Κατά την ανάλυση αυτή θεωρείται ότι η ανωδομή συμπεριφέρεται ελαστικά και οι μονωτήρες μη γραμμικά (υστερητική συμπεριφορά). Έτσι, στην πραγματικότητα η μη γραμμική συμπεριφορά συγκεντρώνεται στο επίπεδο της μόνωσης, όπου λαμβάνει χώρα και η κατανάλωση ενέργειας. Στην πραγματικότητα η κατασκευή διεγείρεται από ένα σύνολο επιταχυνσιογραφημάτων σεισμικών διεγέρσεων, τα οποία ολοκληρώνονται στη μονάδα του

χρόνου και παράγεται η απόκριση υπό το συγκεκριμένο σύνολο σεισμών. Τα παραπάνω επιταχυνσιογραφήματα 5 – 7 επιλέγονται ώστε να ανταποκρίνονται στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής της κατασκευής, αλλά και να προσεγγίζουν κατά το δυνατόν καλύτερα το φάσμα του κανονισμού κάτω από το οποίο έγινε ο σχεδιασμός. Στην κατεύθυνση αυτή υπάρχουν διάφορες μέθοδοι όπως αυτή του μέσου όρου των φασμάτων απόκρισης ή του γεωμετρικού μέσου όρου.

Η ανάλυση χρονοϊστοριών είναι η πιο ακριβής και πιο ορθή μέθοδος ανάλυσης των σεισμικά μονωμένων κατασκευών. Παρά ταύτα απαιτεί υπολογιστικό κόστος και αυξημένες απαιτήσεις λογισμικού. Για το λόγο αυτό δεν είναι ευρέως διαδεδομένη και γενικώς εφαρμόζεται σε περιπτώσεις έργων μεγάλης σημασίας, τελεί δε ακόμη υπό την αβεβαιότητα του προσδιορισμού που πλήθους και των χαρακτηριστικών των επιλεγόμενων σεισμικών διεγέρσεων, πραγματικών ή και τεχνητών.

3.1 Συστήματα Σεισμικής Μόνωσης

Οι πλέον κοινοί τύποι συστημάτων σεισμικής μόνωσης που χρησιμοποιούνται ευρέως σε έργα ανά τον κόσμο κατατάσσονται πολλές κατηγορίες οι κυριότερες των οποίων είναι οι εξής δύο:

- 1) Ελαστομερή Συστήματα
- 2) Συστήματα Τριβής (ή ολίσθησης).

Στα ελαστομερή συστήματα περιλαμβάνονται:

- a) τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης (*Low Damping Rubber Bearings – LDRB*)
- b) τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (*High Damping Rubber Bearings – HDRB*)
- c) τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (*Lead Rubber Bearings – LRB*).

Τα συστήματα τριβής περιλαμβάνουν:

- a) μηχανισμούς με σφαιρική επιφάνεια ολίσθησης (*Friction Pendulum Systems – FPS*)
- b) μηχανισμούς με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης (*Friction Sliding Systems – FSS*).

Τα συστήματα σεισμικής μόνωσης πρέπει να ικανοποιούν ένα σύνολο απαιτήσεων ώστε να είναι κατάλληλα για χρήση. Οι βασικές απαιτήσεις είναι:

- **Πρόσθετη ευκαμψία:** Η αύξηση της ιδιοπεριόδου της μονωμένης κατασκευής μειώνει την διέγερση της ανωδομής κατά τον σεισμό και κατά συνέπεια μειώνει την απαίτηση αντοχής από αυτή.
- **Πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας:** Η αυξημένη απόσβεση ενέργειας απαιτείται για τον περιορισμό των μετατοπίσεων του συστήματος σεισμικής μόνωσης σε πρακτικό επίπεδο για τον σχεδιασμό των μονωτήρων καθώς και για την μείωση των επιπτώσεων ενός πιθανού συντονισμού της μονωμένης κατασκευής με την εδαφική κίνηση.

- **Επάρκεια για την ανάληψη των μετακινήσεων:** Οι μονωτήρες πρέπει να είναι ικανοί να αναλάβουν τις αυξημένες μετακινήσεις στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης χωρίς αστοχία.
- **Επαρκής ακαμψία για τις υπόλοιπες οριζόντιες φορτίσεις:** Το σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να είναι ικανό να αναλαμβάνει τις υπόλοιπες οριζόντιες φορτίσεις όπως ο άνεμος και τα μικρά σεισμικά επεισόδια χωρίς υπερβολικές μετατοπίσεις (συνήθως απαιτείται να μην διαρρέει ή να μην ολισθαίνει).
- **Επάρκεια για την ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων:** Σε όλες τις φάσεις λειτουργίας το σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να είναι ικανό να φέρει με ασφάλεια τα κατακόρυφα φορτία μαζί με τις οριζόντιες μετακινήσεις όταν αυτές συνυπάρχουν.

3.2 Ιδιότητες Συστημάτων Σεισμικής Μόνωσης Σύμφωνα Με EC8

- 1) Οι τιμές των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των συστημάτων σεισμικής μόνωσης που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση πρέπει να είναι οι πιο δυσμενείς που είναι δυνατόν να επιτευχθούν κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Πρέπει να αντανakλούν, ανάλογα με την περίπτωση, την επιρροή:
 - Του ρυθμού φόρτισης
 - Του μεγέθους του ταυτόχρονου κατακόρυφου φορτίου
 - Του μεγέθους του ταυτόχρονου οριζόντιου φορτίου στην εγκάρσια διεύθυνση
 - Της θερμοκρασίας
 - Της αλλαγής των ιδιοτήτων κατά τη διάρκεια της προβλεπόμενης ζωής.
- 2) Οι επιταχύνσεις και οι δυνάμεις αδρανείας που προκαλούνται από τον σεισμό πρέπει να εκτιμώνται λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη τιμή της ακαμψίας και την ελάχιστη τιμή της απόσβεσης και των συντελεστών τριβής.
- 3) Οι μετακινήσεις πρέπει να εκτιμώνται λαμβάνοντας υπόψη την ελάχιστη τιμή της ακαμψίας, της απόσβεσης και των συντελεστών τριβής.
- 4) Στα κτίρια τάξης σημαντικότητας I ή II, οι μέσες τιμές των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν, υπό τον όρο ότι οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές δε διαφέρουν περισσότερο από 15% από τις μέσες.

3.3 Γενικές Διατάξεις Σχεδιασμού Σύμφωνα Με EC8

3.3.1 Γενικές Διατάξεις Σχετικά Με Τις Συσκευές

- 1) Πρέπει να παρέχεται επαρκές ύψος μεταξύ της ανωδομής και της θεμελίωσης, μαζί με άλλες απαραίτητες ρυθμίσεις, ώστε να επιτρέπεται η επιθεώρηση, η συντήρηση και η αντικατάσταση των συσκευών κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής της κατασκευής.
- 2) Αν είναι απαραίτητο, οι συσκευές πρέπει να προστατεύονται από πιθανές επικίνδυνες επιδράσεις, όπως η φωτιά, οι χημικές και βιολογικές προσβολές.
- 3) Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό και την κατασκευή των συσκευών πρέπει να συμμορφώνονται με τους σχετικούς υφιστάμενους κανόνες.

3.3.2 Έλεγχος Ανεπιθύμητων Μετακινήσεων

- 1) Για την ελαχιστοποίηση των στρεπτικών επιδράσεων, το κέντρο ενεργού δυσκαμψίας του συστήματος μόνωσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κέντρο μάζας για το διάφραγμα της σεισμικής μόνωσης.
- 2) Για την ελαχιστοποίηση διαφορετικών συμπεριφορών των συστημάτων μόνωσης και της έντασης της πλάκας ή εσχάρας του διαφράγματος της σεισμικής μόνωσης, η θλιπτική τάση που προκαλείται σε αυτά από τις μόνιμες δράσεις πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη.
- 3) Τα εφέδρανα πρέπει να είναι επαρκώς αγκυρωμένα τόσο στην ανωδομή όσο και στη θεμελίωση.
- 4) Τα συστήματα μόνωσης πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι σε θέση να αποκρίνονται ελεγχόμενα σε αιφνίδιες προσβολές - πλήγματα ενώ θα πρέπει να ελέγχονται οι στρεπτικές μετακινήσεις από κατάλληλα μέτρα.
- 5) Η απαίτηση που αφορά την αιφνίδια προσβολή θεωρείται ότι ικανοποιείται αν πιθανές αιφνίδιες επιδράσεις αποσβένονται μέσω κατάλληλων συσκευών (όπως αποσβεστήρες, κλπ.)

3.3.3 Έλεγχος Διαφορικών Σεισμικών Εδαφικών Κινήσεων

- 1) Τα δομικά στοιχεία που βρίσκονται πάνω και κάτω από τη διεπιφάνεια μόνωσης πρέπει να είναι επαρκώς δύσκαμπτα και στην οριζόντια και στην κατακόρυφη

διεύθυνση, έτσι ώστε οι επιδράσεις των διαφορικών εδαφικών σεισμικών μετακινήσεων να ελαχιστοποιούνται. Αυτό δεν εφαρμόζεται σε γέφυρες ή ανυψωμένες κατασκευές, όπου τα βάθρα που βρίσκονται κάτω από τη διεπιφάνεια μόνωσης μπορεί να είναι παραμορφώσιμα, αρκεί η ενδοσιμότητά τους να συνυπολογίζεται.

2) Στα κτίρια, θεωρείται ότι η απαίτηση (1) ικανοποιείται όταν ικανοποιούνται όλες οι συνθήκες που αναφέρονται παρακάτω:

- a) Ένα δύσκαμπτο διάφραγμα παρέχεται πάνω και κάτω από το σύστημα μόνωσης, αποτελούμενο από μια πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος ή από ένα κάνναβο δοκών, σχεδιασμένο λαμβάνοντας υπόψη όλες τις σχετικές τοπικές και καθολικές μορφές λυγισμού. Αυτό το διάφραγμα δεν απαιτείται όταν οι κατασκευές αποτελούνται από άκαμπτες κιβωτιοειδείς κατασκευές
- b) Οι συσκευές που απαρτίζουν το σύστημα μόνωσης είναι στερεωμένες και στις δύο άκρες άνω και κάτω, είτε άμεσα είτε, αν δεν είναι εφικτό, μέσω κατακόρυφων στοιχείων, η σχετική οριζόντια μετατόπιση των οποίων στην κατάσταση σεισμού σχεδιασμού πρέπει να είναι μικρότερη από το 1/20 της σχετικής μετατόπισης του συστήματος μόνωσης.

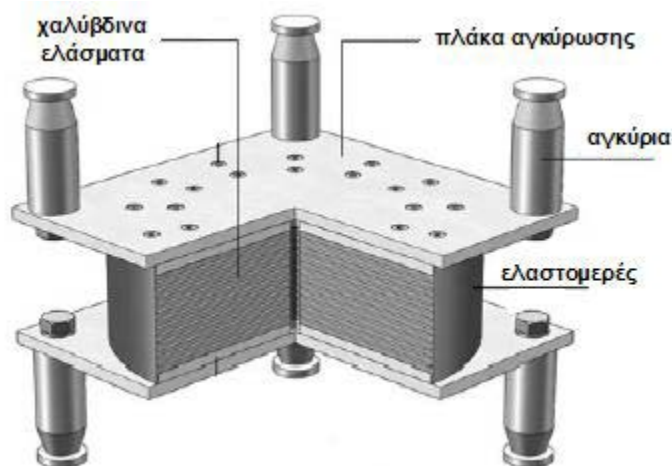
3.3.4 Έλεγχος Μετατοπίσεων Σχετικών Με Περιβάλλον Έδαφος Και Κατασκευές

Πρέπει να παρέχεται επαρκές διάστημα μεταξύ της μονωμένης ανωδομής και του περιβάλλοντος εδάφους ή κατασκευών, ώστε να επιτρέπονται οι μετακινήσεις σε όλες τις διευθύνσεις στην κατάσταση σεισμού σχεδιασμού.

3.4 Ελαστομερή Συστήματα

Συνιστούν τον συνηθέστερο τύπο συστημάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές σεισμικής μόνωσης. Αποτελούνται από επάλληλες στρώσεις φυσικού ελαστομερούς υλικού ή (Neoprene) - ειδικά επεξεργασμένου (vulcanized) ώστε να καταστεί ανθεκτικότερο στις περιβαλλοντικές επιδράσεις – στο οποίο συγκολλώνται και εγκιβωτίζονται πλήρως λεπτά χαλύβδινα φύλλα προκειμένου να εξασφαλισθεί υψηλή δυσκαμψία στην κατακόρυφη διεύθυνση για την ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων και να περιοριστούν σημαντικά οι πλευρικές παραμορφώσεις (λόγω φαινομένου Poisson) του ελαστομερούς. Η σύνδεση των

εφεδράνων αυτών με την ανωδομή και τη θεμελίωση επιτυγχάνεται μέσω μεταλλικών πλακών πάνω στις οποίες κοχλιώνονται βλήτρα τοποθετημένα στα στοιχεία σύνδεσης πάνω και κάτω από τα εφέδρανα. Διατίθενται τόσο σε ορθογωνικές όσο και κυκλικές διατομές διαφόρων διαστάσεων ανάλογα με τον σχεδιασμό και τις απαιτήσεις που καλούνται να καλύψουν. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται μια τυπική διατομή ενός τέτοιου εφεδράνου. Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα διακρίνονται ανάλογα με το ποσοστό της απόσβεσης που προσδίδουν στο σύστημα μόνωσης και κατηγοριοποιούνται σε εφέδρανα χαμηλής και υψηλής απόσβεσης. Η απόσβεση (εκφρασμένη ως ποσοστό % της κρίσιμης τιμής) προσδίδεται από το ελαστομερές, το οποίο παράλληλα προσφέρει υψηλή πλευρική ευκαμψία και την απαιτούμενη δύναμη επαναφοράς στο εφέδρανο για την επαναφορά του μετά την επιβολή οριζόντιας μετακίνησης, ενώ στα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου η (υψηλή) τιμή της απόσβεσης οφείλεται στην παρουσία του μολύβδου. Ακολουθώς, αναφέρονται επιγραμματικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τριών τύπων ελαστομερών συστημάτων μόνωσης, ο τρόπος προσομοίωσης της συμπεριφοράς τους σε δυναμική φόρτιση καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.



Σχήμα 3.1 : Τυπική διατομή ελαστομεταλλικών εφεδράνων χαμηλής ή υψηλής απόσβεσης χωρίς πυρήνα μολύβδου.

3.4.1 Ελαστομεταλλικά Εφέδρανα Χαμηλής Απόσβεσης (Low Damping Rubber Bearings-LDRB)

Σύμφωνα με τις Οδηγίες Σεισμικής Μόνωσης (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 2007), τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης έχουν ισοδύναμο λόγο ιξώδους απόσβεσης ζ μικρότερο του 6%, με συνηθέστερα θεωρούμενη τιμή το 5%. Η ανακυκλική συμπεριφορά τέτοιων

εφεδράνων είναι παρόμοια με την υστερητική με λεπτούς βρόχους. Η συμπεριφορά τους μπορεί να προσεγγιστεί με συμπεριφορά γραμμικών ελαστικών στοιχείων με ισοδύναμη ελαστική δυσκαμψία $G_b \cdot A_b / t_e$ για διατμητικές παραμορφώσεις ίσες ή και μεγαλύτερες του 100%, όπου G_b είναι το μέτρο διάτμησης του ελαστομερούς, A_b η επιφάνειά του και t_e το συνολικό του πάχος. Στα πλεονεκτήματα όσον αφορά τη χρήση τους περιλαμβάνονται η εύκολη και τυποποιημένη πλέον παραγωγή τους, η απλότητα στην προσομοίωσή τους στη φάση του σχεδιασμού και το ότι η απόκρισή τους δεν είναι ευαίσθητη σε επιδράσεις του περιβάλλοντος αλλά ούτε και σε παραμέτρους όπως η ταχύτητα και η ιστορία της φόρτισης. Βασικό τους μειονέκτημα αποτελεί η χαμηλή απόσβεση που προσφέρουν με αποτέλεσμα μεγάλες απαιτήσεις μετακινήσεων στο σύστημα μόνωσης που καθιστούν απαραίτητη τη χρήση πρόσθετων μέσων απόσβεσης.

3.4.2 Ελαστομεταλλικά Εφέδρανα Υψηλής Απόσβεσης (High Damping Rubber Bearings-HDRB)

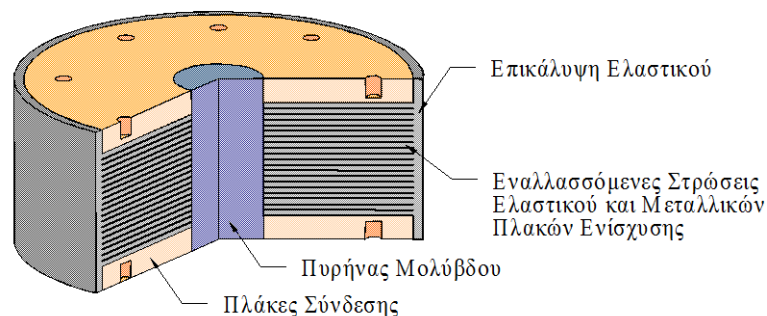
Το 1982 εφευρέθηκαν διάφορα μίγματα συνθετικού ή φυσικού ελαστικού τα οποία εμφανίζουν υψηλό βαθμό απόσβεσης έτσι ώστε να μην απαιτούνται πρόσθετοι μηχανισμοί απόσβεσης. Η αύξηση του βαθμού απόσβεσης επιτυγχάνεται με την προσθήκη κατάλληλων συμπληρωματικών ουσιών όπως άνθρακα και ρητινών. Η απόσβεση αυτή είναι κάτι ενδιάμεσο μεταξύ της υστερητικής απόσβεσης και της ιξώδους απόσβεσης με το κυρίαρχο κομμάτι της να είναι το υστερητικό. Με βάση αυτά τα βελτιωμένα μείγματα ελαστικού κατασκευάζονται τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα ελαστικού υψηλής απόσβεσης (High Damping Rubber Bearing ή HDRB). Η μέθοδος κατασκευής των HDRB είναι ίδια με αυτή των ελαστομεταλλικών εφεδράνων φυσικού ελαστικού.

Το ελαστικό των εφεδράνων HDRB παρουσιάζει μη-γραμμική συμπεριφορά για διατμητικές παραμορφώσεις μικρότερες του 20%. Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζεται από υψηλό μέτρο διάτμησης (της τάξης των 2MPa) και υψηλό βαθμό απόσβεσης, τα οποία μειώνουν την απόκριση για τις μη σεισμικές οριζόντιες φορτίσεις όπως ο άνεμος. Για διατμητικές παραμορφώσεις στο διάστημα 20% έως 120% το μέτρο διάτμησης είναι μικρό και σταθερό (της τάξης του 0.5MPa) ενώ ο βαθμός απόσβεσης κυμαίνεται από 10% έως 20%. Για τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης υψηλότερες από 120% το μέτρο διάτμησης και ο βαθμός απόσβεσης αυξάνουν λόγω ενός φαινομένου κρυσταλλοποίησης των μακρομορίων του ελαστικού. Η παραπάνω μεταβολή της οριζόντιας δυσκαμψίας και της απόσβεσης των

εφεδράνων HDRB είναι χρήσιμη για την κατασκευή ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης το οποίο είναι σχετικά δύσκαμπτο για μικρού εύρους μετακινήσεις, έχει την απαιτούμενη ευκαμψία για τις σεισμικές μετακινήσεις σχεδιασμού ενώ αυξάνει πάλι την δυσκαμψία και περιορίζει τις μετακινήσεις στην περίπτωση όπου ξεπερνιέται ο σεισμός σχεδιασμού.

3.4.3 Ελαστομεταλλικά Εφέδρανα Με Πυρήνα Μολύβδου (Lead Rubber Bearings-LRB)

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (Lead Rubber Bearing ή LRB) εφευρέθηκαν στην Νέα Ζηλανδία την δεκαετία του 1970. Αποτελούνται από ένα κεντρικό πυρήνα μολύβδου ο οποίος εισάγεται με πίεση στην προανοιγμένη οπή ενός ελαστομεταλλικού εφεδράνου κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής (Σχήμα 3.). Όλο το εφέδρανο περιβάλλεται από επικάλυψη ελαστικού (σύνθετος πάχος από 5mm έως 20mm) για λόγους περιβαλλοντικής προστασίας. Στις άνω και κάτω επιφάνειες καταλήγει σε παχιές μεταλλικές πλάκες (πάχος από 2 έως 3cm) οι οποίες ισοκατανέμουν την κατακόρυφη παραμόρφωση και προσφέρουν την σύνδεση με την ανωδομή και την θεμελίωση.



Σχήμα 3.2: Σκαριφηματική Τομή Εφεδράνου LRB



Σχήμα 3.3: Εφέδρανο LRB – Κτίριο Μουσείου Δυτικής Τέχνης (Τόκιο, Ιαπωνία)

Το κύριο πλεονέκτημα του εφεδράνου LRB είναι ότι παρέχει ευκαμψία για τις σεισμικές ανακυκλικές μετακινήσεις, ακαμψία για τις μη σεισμικές οριζόντιες φορτίσεις, υψηλό βαθμό υστερητικής απόσβεσης και επάρκεια στην ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων με την μορφή ενός εφεδράνου σεισμικής μόνωσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτυγχάνονται με τον συνδυασμό του ελαστομεταλλικού μέρους και του πυρήνα μολύβδου και κάνουν τα εφέδρανα LRB ένα ανταγωνιστικό σύστημα σεισμικής μόνωσης για εφαρμογή σε κτίρια και γέφυρες.

Το ελαστομεταλλικό μέρος κατασκευάζεται από εναλλασσόμενες στρώσεις ελαστικού και μεταλλικών πλακών οι οποίες συνενώνονται κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας μέσα σε ένα καλούπι. Οι μεταλλικές πλάκες (τυπικό πάχος 2 έως 3mm) εμποδίζουν το ελαστικό από το να διογκώνεται πλευρικά λόγω του κατακόρυφου φορτίου αλλά δεν έχουν καμία επίδραση στις οριζόντιες παραμορφώσεις του ελαστικού. Όσο μειώνεται το πάχος των στρώσεων ελαστικού τόσο αυξάνει η κατακόρυφη δυσκαμψία και η επάρκεια ανάληψης των κατακόρυφων φορτίων. Όμως η οριζόντια ακαμψία του ελαστομεταλλικού μέρους παραμένει χαμηλή λόγω του χαμηλού μέτρου διάτμησης του φυσικού ελαστικού (από 0.4 έως 1.0MPa). Το ελαστομεταλλικό μέρος από μόνο του εμφανίζει μια σχεδόν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με μικρό βαθμό απόσβεσης της τάξης του 2% με 3%.

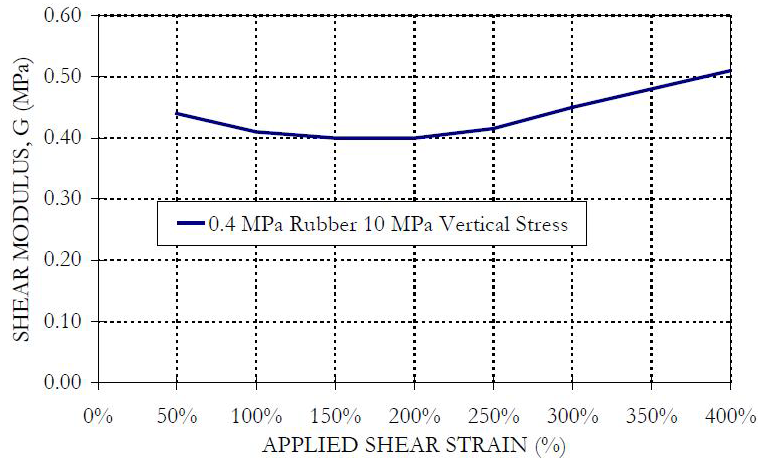
Η παρουσία του πυρήνα μολύβδου τροποποιεί την συμπεριφορά του εφεδράνου. Ο πυρήνας έχει υψηλή ελαστική ακαμψία η οποία παρέχει επαρκή ακαμψία στο εφέδρανο για τις μη σεισμικές οριζόντιες φορτίσεις. Όταν το εφέδρανο υποβάλλεται σε ανακυκλικές σεισμικές μετατοπίσεις, ο πυρήνας μολύβδου αναγκάζεται σε διατμητική παραμόρφωση από

τις μεταλλικές πλάκες και διαρρέει εύκολα σε χαμηλά επίπεδα τάσεων της τάξης των 10MPa. Μετά την διαρροή ο μόλυβδος παρουσιάζει σχεδόν τέλεια πλαστική συμπεριφορά. Το αποτέλεσμα είναι το εφέδρανο να εμφανίζει μια σχεδόν διγραμμική υστερητική συμπεριφορά. Η ενεργός ακαμψία του εφεδράνου κάτω από την ανακυκλική σεισμική φόρτιση μειώνεται σημαντικά όσο το εύρος της ανακυκλικής παραμόρφωσης ξεπερνά την μετατόπιση διαρροής του μολύβδου. Για τα επίπεδα του σεισμού σχεδιασμού ιδιοπερίοδοι της τάξης των 2 sec είναι εύκολο να επιτευχθούν για την μονωμένη κατασκευή. Ακόμα ενέργεια καταναλώνεται με την μορφή θερμότητας η οποία είναι ανάλογη με το εμβαδόν που σχηματίζουν οι βρόχοι υστέρησης. Ο ισοδύναμος βαθμός ιξώδους απόσβεσης ο οποίος επιτυγχάνεται είναι αρκετά υψηλός, της τάξης του 15% έως 30%.

Το μέτρο διόγκωσης K (Bulk Modulus) του φυσικού ελαστικού είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέτρο ελαστικότητας E . Έτσι, για πρακτικούς σκοπούς ο λόγος Poisson ν μπορεί να θεωρείται ίσος με 0.5 και το φυσικό ελαστικό ασυμπίεστο ακόμα και κάτω από υψηλά φορτία. Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του φυσικού ελαστικού καθώς και μια εικόνα της μεταβολής του μέτρου διάτμησης του με την μεταβολή της παραμόρφωσης.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά Φυσικού Ελαστικού

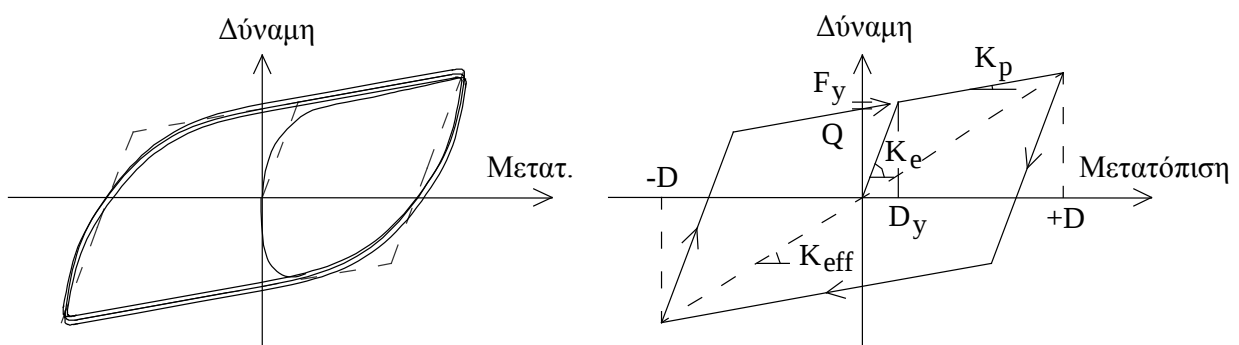
Σκληρότητα IRHD ± 2	Μέτρο Ελαστικότητας E(MPa)	Μέτρο Διατμήσεως G (MPa)	k	Παραμόρφωση Θραύσης (%)
37	1.35	0.4	0.87	650
40	1.50	0.45	0.85	600
45	1.80	0.54	0.80	600
50	2.20	0.64	0.73	500
55	3.25	0.81	0.64	500
60	4.45	1.06	0.57	400



Σχήμα 3.4: Μεταβολή του Μέτρου Διάτμησης Ελαστικού

3.4.3.1 Προσομοίωση LRB Μέσω Διγραμμικού Υστερητικού Μοντέλου

Οι πραγματικοί βρόχοι υστέρησης των εφεδράνων LRB σε ανακυκλική μετατόπιση εύρους D δεν είναι εντελώς διγραμμικοί. Η απόκλιση από τον διγραμμικό βρόχο υστέρησης είναι γενικά μεγαλύτερη όσο λιγότερο αποτελεσματικός είναι ο εγκιβωτισμός του πυρήνα μολύβδου από τις μεταλλικές πλάκες. Για τον σκοπό της ανάλυσης και του σχεδιασμού των εφεδράνων LRB η προσομοίωση μέσω ενός ισοδύναμου διγραμμικού υστερητικού μοντέλου είναι επαρκής (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Προσομοίωση Υστερητικής Συμπεριφοράς Εφεδράνων LRB μέσω Διγραμμικού Υστερητικού Μοντέλου

Οι βασικές παράμετροι του διγραμμικού υστερητικού μοντέλου είναι η δυσκαμψία μετά την διαρροή K_p , η ελαστική δυσκαμψία (ή δυσκαμψία αποφόρτισης) K_e , η δύναμη διαρροής

F_y , η μετακίνηση διαρροής D_y και η χαρακτηριστική δύναμη Q (σημείο όπου ο η πλαστική δυσκαμψία τέμνει τον άξονα της δύναμης). Μόνο 3 από τις 5 προηγούμενες ποσότητες απαιτούνται για να περιγράψουν πλήρως τον διγραμμικό υστερητικό βρόχο. Οι δύο εξισώσεις οι οποίες συνδέουν τις επιπλέον ποσότητες είναι οι εξής :

$$D_y = F_y / K_e \quad \text{και} \quad F_y = Q + K_p D_y \quad (3.1), (3.2)$$

Η δυσκαμψία μετά την διαρροή K_p και η χαρακτηριστική δύναμη Q οι οποίες μαζί ορίζουν τον μετελαστικό κλάδο του διγραμμικού βρόχου μπορούν να εκτιμηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια. Η ακαμψία μετά την διαρροή K_p είναι ίση με την οριζόντια δυσκαμψία του ελαστομεταλλικού μέρους του εφεδράνου μόνο, προσαναυξημένη με ένα παράγοντα f_L :

$$K_p = f_L \frac{GA_r}{t_r} \quad (3.3)$$

όπου A_r είναι η επιφάνεια του συγκολλημένου ελαστικού στις μεταλλικές πλάκες, t_r είναι το συνολικό πάχος του ελαστικού και G είναι το μέτρο διάτμησης του ελαστικού το οποίο κυμαίνεται από 0.40MPa έως 1.20MPa. Το μέτρο διάτμησης του φυσικού ελαστικού το οποίο χρησιμοποιείται για τα εφέδρανα LRB είναι πρακτικά ανεξάρτητο από την εφαρμοζόμενη διατμητική τάση και εμφανίζει μικρή μόνο εξάρτηση από το κατακόρυφο φορτίο. Ο παράγοντας f_L είναι μεγαλύτερος από την μονάδα και λαμβάνει υπόψη την αύξηση της μετελαστικής ακαμψίας του μολύβδου λόγω μη τέλει πλαστικής συμπεριφοράς. Τυπική τιμή του παράγοντα f_L είναι το 1.15 η οποία επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά δεδομένα. Ο παράγοντας f_L θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη με κατάλληλα προσαναυξημένο μέτρο διάτμησης G .

Η χαρακτηριστική δύναμη Q ισούται με την δύναμη διαρροής του μολύβδου και εκφράζεται ως :

$$Q = A_{pb} f_{ypb} \quad (3.4)$$

όπου A_{pb} είναι η επιφάνεια κάτοψης του πυρήνα μολύβδου και f_{ypb} είναι η τάση διαρροής του μολύβδου η οποία έχει θεωρητική τιμή 10.5MPa. Για τους σκοπούς του σχεδιασμού και της ανάλυσης θεωρείται μια μικρότερη φαινόμενη τιμή η οποία εξαρτάται από το πόσο επαρκής είναι η περίσφιξη του πυρήνα μολύβδου από τις μεταλλικές πλάκες. Τυπική τιμή για συνήθη εφέδρανα LRB είναι τα 7.5MPa η οποία επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά δεδομένα.

Η ενεργός δυσκαμψία K_{eff} ορίζεται ως η κλίση της ευθείας μεταξύ των κορυφών του βρόχου υστέρησης για τις ακραίες μετατοπίσεις και εξαρτάται από την μετατόπιση. Για δεδομένο εύρος ανακυκλικής μετατόπισης D η ενεργός δυσκαμψία δίνεται από την σχέση:

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q}{D} \quad \text{για } D > D_y \quad (3.5)$$

Για εύρος ανακυκλικής μετατόπισης D μικρότερο από την μετατόπιση διαρροής D_y η ενεργός δυσκαμψία K_{eff} ισούται με την ελαστική δυσκαμψία K_e . Για μεγαλύτερο εύρος ανακυκλικής μετατόπισης D η K_{eff} μειώνεται και τείνει στη δυσκαμψία μετά την διαρροή K_p όταν η D γίνεται πολύ μεγάλη.

Η μετατόπιση διαρροής D_y μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των κύριων παραμέτρων ως εξής :

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_p} = \frac{Q}{K_p (K_e / K_p - 1)} \quad (3.6)$$

Η τρίτη παράμετρος η οποία ορίζει πλήρως τον διγραμμικό υστερητικό βρόχο είναι ο λόγος της ελαστικής δυσκαμψίας προς την μετελαστική δυσκαμψία K_e/K_p . Συνήθως ορίζεται εμπειρικά έτσι ώστε το εμβαδόν του διγραμμικού βρόχου να ισούται με το εμβαδόν των πειραματικά μετρημένων βρόχων υστέρησης. Έχει τυπικές τιμές από 6 έως 25 με συνήθη τιμή για τα εφένδρανα LRB το 10. Η παράμετρος K_e/K_p δεν έχει καμία επίδραση στην ενεργό δυσκαμψία K_{eff} αλλά έχει σημαντική επίδραση στον ισοδύναμο βαθμό απόσβεσης β .

Η επιφάνεια υστέρησης του διγραμμικού μοντέλου αντιπροσωπεύει την καταναλισκόμενη ενέργεια ED σε κάθε κύκλο φόρτισης και ισούται με :

$$ED = 4Q(D - D_y) \quad (3.7)$$

Η υστερητική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από την μετατόπιση. Για τον σκοπό της ανάλυσης πρέπει να μετατραπεί σε ισοδύναμο βαθμό απόσβεσης ενός καθαρού ιξώδους αποσβεστήρα όπου η δύναμη απόσβεσης είναι ανάλογη της ταχύτητας. Ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης β ορίζεται ως ο βαθμός απόσβεσης ενός ιξώδους ελαστικού στοιχείου το οποίο κάτω από ανακυκλική μετατόπιση εύρους D καταναλώνει ίδια ποσότητα ενέργειας με αυτή που καταναλώνεται από τον υστερητικό βρόχο. Δίνεται από την σχέση :

$$\beta = \frac{ED}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (3.8)$$

όπου η μετατόπιση διαρροής D_y εκτιμάται από την εξίσωση (3.7). Τόσο ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης β όσο και η ενεργός δυσκαμψία K_{eff} εξαρτώνται έντονα από το εύρος της ανακυκλικής παραμόρφωσης D . Ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης β εξαρτάται επίσης έντονα από τον λόγο δυσκαμψιών K_e/K_p του διγραμμικού υστερητικού βρόχου.

Η συμπεριφορά ενός ελαστομεταλλικού εφεδράνου σε κατακόρυφη συμπίεση κατά την αρχική φάση της φόρτισης είναι ιδιαίτερα μη γραμμική και εξαρτάται από πολλούς δευτερεύοντες παράγοντες που δεν μπορούν να προβλεφτούν αναλυτικά. Σημαντικό ρόλο παίζει ο συντελεστής σχήματος S που αποτελεί τον λόγο της ελεύθερης σε διόγκωση προς την φορτιζόμενη επιφάνεια. Η τελική συμπεριφορά του εφεδράνου εκτιμάται αναλυτικά από την επόμενη σχέση κατακόρυφης δυσκαμψίας, κατ' αναλογία με την αξονική δυσκαμψία δοκού.

$$K_v = \frac{E_c A_r}{t_r} \quad (3.9)$$

Ο υπολογισμός του μέτρου συμπίεστότητας E_c γίνεται κάνοντας την παραδοχή γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς και μικρών παραμορφώσεων. Η θεώρηση βασίζεται στην γραμμική ελαστική θεωρία με τις παραδοχές ότι σημεία σε κατακόρυφες ευθείες βρίσκονται σε παραβολή μετά την παραμόρφωση και ότι σε κάθε σημείο του όγκου οι ορθές τάσεις έχουν την ίδια τιμή $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = p(x, y)$.

Για παραδοχή ασυμπίεστου υλικού το μέτρο ελαστικότητας κυκλικής διατομής δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_c^\infty = 8GS^2 \quad (3.10)$$

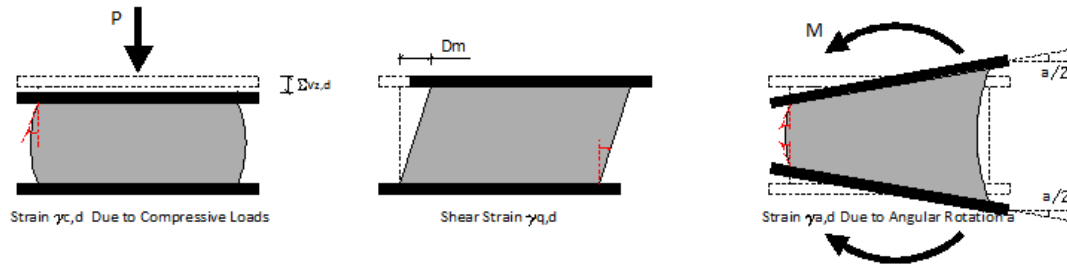
Για συμπίεστό ελαστικό το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται συναρτήσει του E_c^∞ και του μέτρου διόγκωσης K , από την ακόλουθη σχέση:

$$E_c = E_c^\infty \left(1 - \frac{4E_c^\infty}{3K} \right) \quad (3.11)$$

Οι διατμητικές παραμορφώσεις που μπορεί να αναλάβει ένα ελαστομεταλλικό εφέδρανο είναι οι ακόλουθες:

1. Διατμητική παραμόρφωση λόγω κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου
2. Διατμητική παραμόρφωση λόγω οριζόντιας μετατόπισης
3. Διατμητική παραμόρφωση λόγω στροφής των ακραίων πλακών

Οι τρεις αυτές παραμορφώσεις (Σχήμα 0.) ενεργούν ταυτόχρονα κατά την λειτουργία ενός εφεδράνου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένας από τους λόγους τοποθέτησης μεταλλικών φύλλων στο εσωτερικό των εφεδράνων είναι ο περιορισμός των διατμητικών παραμορφώσεων λόγω κατακόρυφου φορτίου.



Σχήμα 0.6: Χαρακτηριστικές Διατμητικές Παραμορφώσεις Ελαστομεταλλικού Εφεδράνου

Η δυσκαμψία λόγω καμπτικής στρώσης των άκρων δίνεται κατ' αντιστοιχία με την θεωρία δοκών από την έκφραση:

$$K_b = \frac{EI_{eff}}{n \cdot t_i} \quad (3.12)$$

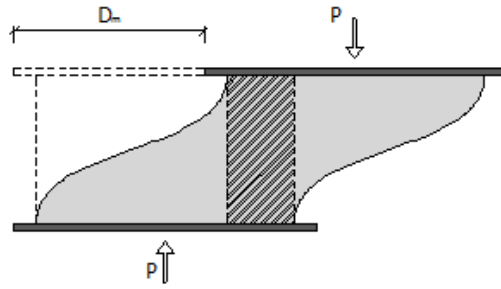
Για παραδοχή ασυμπίεστου υλικού η ενεργός καμπτική δυσκαμψία μιας στρώσης ελαστικού κυκλικού εφεδράνου είναι:

$$(EI)_{eff}^{\infty} = E_c \left(\frac{1}{3} \frac{\pi D^4}{64} \right) \quad (3.13)$$

Και για παραδοχή συμπίεστου υλικού:

$$(EI)_{eff} = (EI)_{eff}^{\infty} \left(1 - \frac{E_c^{\infty}}{2K} \right) \quad (3.14)$$

Ακόμα, ορίζεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, το οποίο αποτελεί το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο έτσι ώστε να αποφευχθούν αστοχίες αντίστοιχες του λυγισμού ενός υποστυλώματος. Μια αστοχία αυτού του τύπου οφείλεται στη χαμηλή διατμητική δυσκαμψία του εφεδράνου.

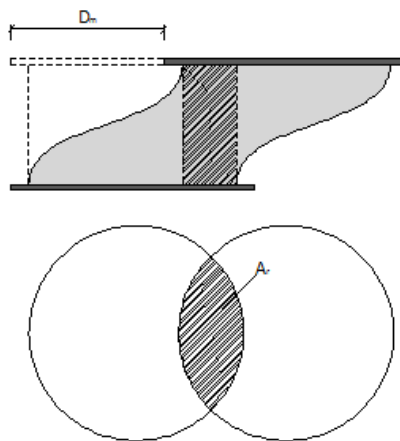


Σχήμα 0.7 Οριακές Συνθήκες Λυγισμού εφεδράνου υπό Κατακόρυφη Φόρτιση

Η τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού είναι ιδιαίτερως σημαντική καθώς επηρεάζει άμεσα την οριζόντια δυσκαμψία. Έτσι, όταν το κατακόρυφο φορτίο είναι συγκρίσιμο με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού η τιμή της οριζόντιας δυσκαμψίας μειώνεται σημαντικά τείνοντας στο μηδέν όταν το φορτίο προσεγγίσει την τιμή του κρίσιμου φορτίου.

$$K_H^* = K_H \left[1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right] \quad (3.15)$$

Ορίζεται επίσης η ενεργός επιφάνεια A_r (Σχήμα 0.) ως η εναπομένουσα επιφάνεια αλληλοεπικάλυψης μετά την παραμόρφωση του εφεδράνου. Στην περίπτωση ορθογωνικών εφεδράνων ο υπολογισμός της συγκεκριμένης επιφάνειας είναι απλός, δυσχεραίνει όμως στην περίπτωση κυκλικών εφεδράνων. Όπως θα δούμε στη συνέχεια οι κανονισμοί προτείνουν διάφορες σχέσεις υπολογισμού της ενεργού επιφάνειας κυκλικού εφεδράνου.



Σχήμα 0.8: Ενεργός Επιφάνεια Κυκλικού Εφεδράνου

Για μεγάλες τιμές μετατόπισης η ενεργός επιφάνεια εκφυλίζεται και λαμβάνει μηδενική τιμή στην περίπτωση που η σεισμική μετατόπιση γίνει ίση με τη διάμετρο του εφεδράνου. Σε αυτή τη περίπτωση η ευστάθεια του μονωτήρα είναι ανεπαρκής και επέρχεται αστοχία λόγω κατακόρυφης φόρτισης, ανάλογη με τον λυγισμό ενός υποστυλώματος.

3.4.3.2 Απαιτήσεις AASHTO Για Εφέδρανα LRB

Ο κανονισμός AASHTO 2006 (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) είναι ένας ευρύς αμερικανικός κανονισμός ο οποίος απευθύνεται κυρίως στον αντισεισμικό σχεδιασμό γεφυρών. Οι αμερικανικοί κανονισμοί όπως ο AASHTO ή ο UBC (*Uniform Building Code*) εισάγουν δύο επίπεδα σεισμών, το σεισμό σχεδιασμού (*Design Basis Earthquake*) και το μέγιστο πιθανό (*Maximum Capable Earthquake*). Ο πρώτος αντιστοιχεί στο σεισμό ο οποίος έχει 10% πιθανότητα υπέρβασης στα 50 χρόνια (περίοδος επαναφοράς 475 χρόνων). Ο δεύτερος αναφέρεται στο μέγιστο επίπεδο σεισμικού επεισοδίου που μπορεί ποτέ να συμβεί. Αυτός ο σεισμός αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 100 χρόνια (περίοδος επαναφοράς 1000 χρόνων).

Σύμφωνα με τον κανονισμό AASHTO ο συντελεστής σχήματος για κυκλικά εφέδρανα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_i = \frac{A_{ext} - A_{int}}{\pi \cdot D_{ext} \cdot t_i} \quad (3.16)$$

Ο συντελεστής σχήματος S_i ισούται με το λόγο του εμβαδού της φορτιζόμενης επιφάνειας προς την ελεύθερη επιφάνεια. Ως φορτιζόμενη ορίζεται η επιφάνεια της κάτοψης του ελαστομεταλλικού εφεδράνου, ενώ ως ελεύθερη ορίζεται η παράπλευρη επιφάνεια. Ο συντελεστής αυτός έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς επηρεάζει άμεσα στην κατακόρυφη ακαμψία και την αντίστοιχη αντοχή.

Η ενεργός επιφάνεια είναι η επιφάνεια εκείνη που απομένει μετά την οριζόντια μετατόπιση του εφεδράνου (Σχήμα 3.8). Για κυκλικά εφέδρανα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$A_r = 0.5 \cdot \left[D_{ext}^2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{D_{ext}^2 - D_m^2}}{D_{ext}} \right) - D_m \cdot \sqrt{D_{ext}^2 - D_m^2} \right] \quad (3.17)$$

Η ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}\gamma_c &= \frac{3 \cdot S \cdot P}{2 \cdot A_r \cdot G \cdot (1 + 2 \cdot k \cdot S^2)} & S \leq 15 \\ \gamma_c &= \frac{3 \cdot P \cdot \left(1 + 8 \cdot G \cdot k \cdot \frac{S^2}{K}\right)}{4 \cdot G \cdot k \cdot S \cdot A_r} & S > 15\end{aligned} \quad (3.18)$$

Η ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω οριζόντιας μετατόπισης δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{s,s} = \frac{D_m}{n \cdot t_i} \quad (3.19)$$

Η ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω στροφής περί οριζόντιο άξονα δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_r = \frac{D_{ext}^2}{2 \cdot t_i \cdot \sum t_i} \cdot a \quad (3.20)$$

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού ορίζεται ως ακολούθως:

$$P_{cr}^0 = \frac{R}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{4 \cdot T \cdot Q^2}{R}} - 1 \right) \quad (3.21)$$

Όπου οι σταθερές T, R και Q υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}T &= E_b \cdot I \cdot \frac{T_e}{n \cdot t_i} \\ R &= K_d \cdot T_e \\ Q &= \frac{\pi}{T_e}\end{aligned} \quad (3.22)$$

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού στην παραμορφωμένη θέση είναι:

$$P_{cr} = P_{cr}^0 \cdot \frac{A_r}{A_{ext}} \quad (3.23)$$

Στη περίπτωση λυγισμού το μέτρο ελαστικότητας E_b ορίζεται συναρτήσει του μέτρου διάτμησης ($E \cong 4G$) και δίνεται για ασυμπίεστο και συμπίεστο ελαστικό από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$E_b = \begin{cases} 4G(1+2kS^2), & \text{ασυμπίεστο ελαστικό} \\ \frac{1}{\frac{1}{8GkS^2} + \frac{1}{K}}, & \text{συμπιεστό ελαστικό} \end{cases} \quad (3.24)$$

Σύμφωνα με τον κανονισμό οι τιμές των διατμητικών παραμορφώσεων δεν πρέπει να υπερβαίνουν κάποια άνω όρια. Τα όρια αυτά είναι:

$$\begin{aligned} \gamma_c &\leq 2.5 \\ \gamma_c + \gamma_{s,s} + 0.5\gamma_r &\leq 5.5 \end{aligned} \quad (3.25)$$

3.4.3.3 Απαιτήσεις EC8 Για Εφέδρανα LRB

Ο κανονισμός EC8 (*Eurocode 8*) [10], είναι το μέρος εκείνο του ευρωπαϊκού κανονισμού που απευθύνεται στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Όσον αφορά τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα, ο κανονισμός αυτός υιοθετεί στην πραγματικότητα τις σχέσεις του EN 1337-3 (*European Standards-Elastomeric Bearings*) [11].

Η ενεργός επιφάνεια για κυκλικά εφέδρανα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} A_r &= (\delta - \sin \delta) \frac{D_{ext}^2}{4} \\ \delta &= 2 \cos^{-1} \left(\frac{D_{Ed}}{D_{ext}} \right) \\ D_{Ed} &= \sqrt{D_{d,x}^2 + D_{d,y}^2} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Σε κάθε σημείο του εφεδράνου, το άθροισμα των παραμορφώσεων εξαιτίας της επίδρασης της φόρτισης δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{t,d} &= \varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{a,d} \\ \varepsilon_{t,d} &\leq 7.0 \\ \varepsilon_{q,d} &\leq 1.0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Η διατμητική παραμόρφωση σχεδιασμού λόγω κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1.5 \cdot P}{A_r \cdot G \cdot S} \quad (3.28)$$

Η ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω οριζόντιας μετατόπισης δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{q,d} = \frac{D_{Ed}}{n \cdot t_i} \quad (3.29)$$

Η ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω στροφής περί οριζόντιο άξονα δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{a,d} = \frac{D_{ext}^2 \cdot a_d \cdot t_i}{2 \cdot \sum t_i^3} \quad (3.30)$$

$$a_d = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού ορίζεται ως ακολούθως:

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot D' \cdot G \cdot S}{3T_e} A_r \quad (3.31)$$

Ακόμα, για τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα θα πρέπει να υπολογιστεί το πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων που εμπεριέχονται στο σώμα του ελαστικού. Σε κάθε περίπτωση το πάχος αυτό δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 2 mm. Η σχέση που προτείνεται είναι η ακόλουθη:

$$t_{si} = \frac{K_p \cdot P \cdot (t_1 + t_2) \cdot K_h \cdot \gamma_m}{A_r \cdot f_y} \quad (3.32)$$

Όπου, K_p : Συντελεστής διόρθωσης τάσης, $K_p=1.3$

K_h : Συντελεστής αποφυγής εφελκυστικών τάσεων, $K_h=2.0$ για LRBs

γ_m : επιμέρους συντελεστής ασφαλείας, $\gamma_m=1.0$

Τέλος, ορίζεται και ένας περιορισμός σχετικός με τη συνολική βύθιση του εφεδράνου εξαιτίας της στροφής. Ο περιορισμός αυτός, για κυκλικά εφέδρανα, είναι ο ακόλουθος:

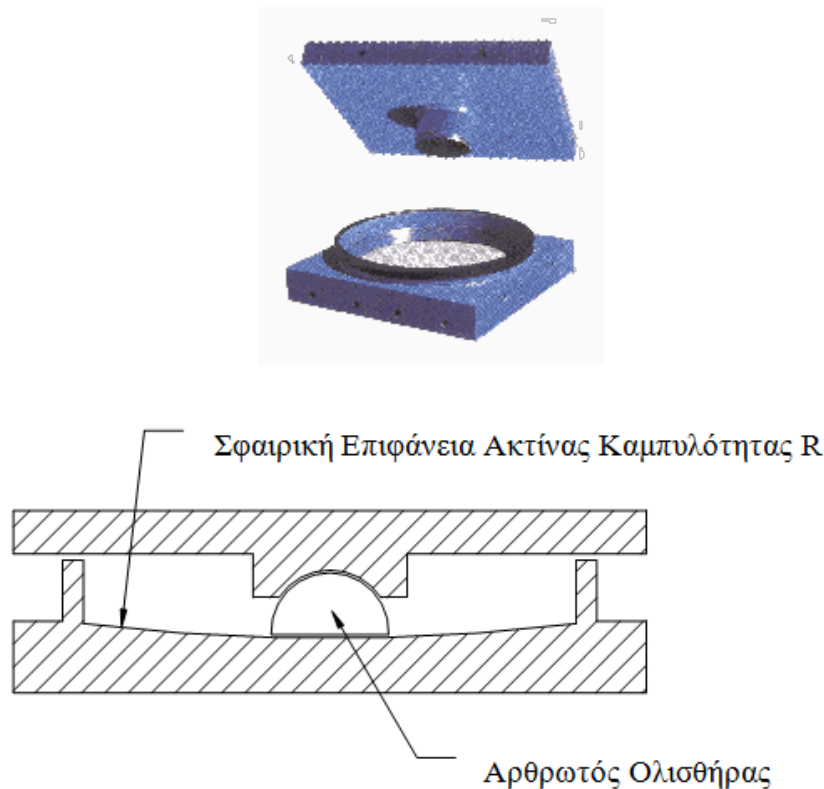
$$\sum v_{z,d} - \frac{D' \cdot a_d}{K_{r,d}} \geq 0 \quad (3.33)$$

Όπου, $K_{r,d}$: Στροφικός Συντελεστής, $K_{r,d}=1.0$

$$\sum v_{z,d} : \text{Η συνολική κατακόρυφη απόκλιση, } \sum v_{z,d} = \sum \frac{P \cdot t_i}{A'} \left(\frac{1}{5 \cdot G \cdot S^2} + \frac{1}{K} \right)$$

3.5 Συστήματα Εκκρεμούς Τριβής (Friction Pendulum Systems – FPS)

Τα συστήματα εκκρεμούς τριβής (Friction Pendulum Systems ή FPS) ή σφαιρικής ολίσθησης διακρίνονται σε δύο τύπους ανάλογα με το αν οι επιφάνειες ολίσθησης, που είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα, είναι σφαιρικές ή επίπεδες. Το σύστημα εκκρεμούς τριβής (ή σύστημα ολίσθησης) συνδυάζει την ολίσθηση σε επιφάνεια τριβής με μια δύναμη επαναφοράς η οποία προκύπτει από την γεωμετρία της σφαιρικής επιφάνειας ολίσθησης. Στο Σχήμα 3.9 εικονίζεται η τομή ενός μονωτήρα FPS. Αποτελείται από ένα αρθρωτό ολισθητήρα ο οποίος ολισθαίνει πάνω σε σφαιρική επιφάνεια τριβής από χάλυβα ακτίνας καμπυλότητας R . Η επιφάνεια του ολισθητήρα η οποία έρχεται σε επαφή με την σφαιρική επιφάνεια έχει επικάλυψη από συνθετικό υλικό συνήθως τύπου Teflon ©.



Σχήμα 3.9: Τομή Εφεδράνου Συστήματος Εκκρεμούς Τριβής (FPS)



Σχήμα 3.10: Εγκατεστημένο Εφέδρανο FPS

Καθώς ο ολισθητήρας ολισθαίνει στην σφαιρική επιφάνεια η υποστηριζόμενη μάζα της ανωδομής ανυψώνεται και έτσι εμφανίζεται δύναμη επαναφοράς η οποία τείνει να επαναφέρει το εφέδρανο στην θέση ισορροπίας. Αυτή η δύναμη επαναφοράς είναι ανάλογη της μετατόπισης του μονωτήρα και αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας καμπυλότητας R . Επιπλέον η τριβή μεταξύ του αρθρωτού ολισθητήρα και της σφαιρικής επιφάνειας παράγει την απόσβεση των μονωτήρων. Η ενεργός δυσκαμψία και ο βαθμός απόσβεσης του μονωτήρα εξαρτώνται από την ακτίνα καμπυλότητας R της σφαιρικής επιφάνειας.

Δύο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του συστήματος FPS είναι ότι η ιδιοπερίοδος της μονωμένης κατασκευής καθώς και ο βαθμός απόσβεσης δεν εξαρτώνται από την μάζα της κατασκευής. Επίσης για ένα σύστημα σεισμικής μόνωσης το οποίο αποτελείται από σεισμικούς μονωτήρες FPS ίδιας ακτίνας καμπυλότητας R , η ενεργός δυσκαμψία κάθε μονωτήρα είναι ανάλογη του βάρους που υποστηρίζει και κατά συνέπεια το κέντρο ακαμψίας του συστήματος σεισμικής μόνωσης ταυτίζεται με το κέντρο μάζας. Η ιδιότητα αυτή τείνει να μηδενίσει τις στρεπτικές κινήσεις της μονωμένης κατασκευής.

3.5.1 Συμπεριφορά Συστήματος Εκκρεμούς Τριβής (FPS) Σε Οριζόντια Διάτμηση

Η συμπεριφορά ενός συστήματος FPS ουσιαστικά ελέγχεται από μία παράμετρο, την ακτίνα καμπυλότητας R της κοίλης επιφάνειας ολίσθησης κάτι το οποίο κάνει την προσομοίωση της συμπεριφοράς του αρκετά απλή. Η δύναμη επαναφοράς ενός συστήματος FPS δίνεται από την σχέση:

$$F = \frac{W}{R}D + \mu W \text{sign}(\dot{D}) \quad (3.34)$$

όπου W είναι το κατακόρυφο φορτίο στο εφέδρανο FPS, D είναι η οριζόντια μετατόπιση, $\dot{D}$ είναι η οριζόντια ταχύτητα, R είναι η ακτίνα καμπυλότητας της διεπιφάνειας ολίσθησης και μ είναι ο συντελεστής τριβής της διεπιφάνειας ολίσθησης. Ο πρώτος όρος είναι η δύναμη επαναφοράς λόγω της ανύψωσης της μάζας η οποία παρέχει μια οριζόντια δυσκαμψία:

$$K_H = \frac{W}{R} \quad (3.35)$$

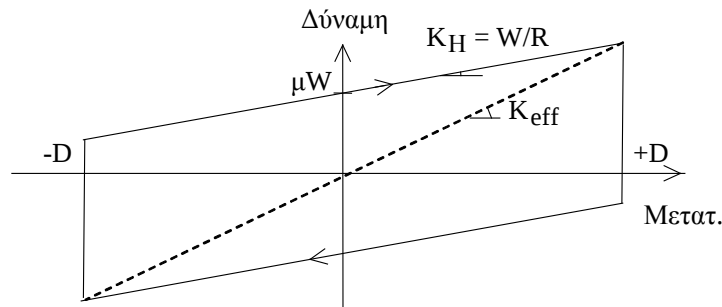
Η συμπεριφορά του συστήματος FPS μπορεί να προσομοιωθεί μέσω ενός διγραμμικού μοντέλου με μηδενική μετατόπιση διαρροής (Σχήμα 3.11). Η ενεργός δυσκαμψία K_{eff} ορίζεται ως η κλίση της ευθείας μεταξύ των κορυφών του βρόχου υστέρησης για τις ακραίες μετατοπίσεις και εξαρτάται από την μετατόπιση. Για δεδομένο εύρος ανακυκλικής μετατόπισης D η ενεργός δυσκαμψία δίνεται από την σχέση:

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (3.36)$$

η οποία αντιστοιχεί σε ιδιοπερίοδο της σεισμικής μόνωσης:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{eff}}} = 2\pi \sqrt{\frac{RD}{gD + \mu gR}} \quad (3.37)$$

Η ιδιοπερίοδος T είναι ανεξάρτητη της υποστηριζόμενης μάζας.



Σχήμα 3.11: Προσομοίωση Υστερητικής Συμπεριφοράς Συστημάτων FPS μέσω Διγραμμικού Υστερητικού Μοντέλου

Η επιφάνεια υστέρησης του διγραμμικού μοντέλου αντιπροσωπεύει την καταναλισκόμενη ενέργεια ED σε κάθε κύκλο φόρτισης και ισούται με :

$$ED = 4\mu WD \quad (3.38)$$

Η υστερητική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από την μετατόπιση. Για τον σκοπό της ανάλυσης πρέπει να μετατραπεί σε ισοδύναμο βαθμό απόσβεσης ενός καθαρού ιξώδους αποσβεστήρα όπου η δύναμη απόσβεσης είναι ανάλογη της ταχύτητας. Ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης β ορίζεται ως ο βαθμός απόσβεσης ενός ιξώδους ελαστικού στοιχείου το οποίο κάτω από ανακυκλική μετατόπιση εύρους D καταναλώνει ίδια ποσότητα ενέργειας με αυτή που καταναλώνεται από τον υστερητικό βρόχο. Δίνεται από την σχέση :

$$\beta = \frac{ED}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{4\mu WD}{2\pi(W/R + \mu W/D)D^2} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu}{D/R + \mu} \quad (3.39)$$

Τόσο ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης β όσο και η ενεργός δυσκαμψία K_{eff} εξαρτώνται έντονα από το εύρος της ανακυκλικής παραμόρφωσης D . Ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης β δεν εξαρτάται από την υποστηριζόμενη μάζα. Ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης μειώνεται από $2/\pi$ για πολύ μικρές μετατοπίσεις σε 0 για πολύ μεγάλες μετατοπίσεις.

Ο συντελεστής τριβής μ στην διεπιφάνεια Teflon-χάλυβα γενικά εξαρτάται από την ταχύτητα ολίσθησης και από την πίεση. Η επίδραση αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την μη-γραμμική ανάλυση της σεισμικά μονωμένης κατασκευής. Ο συντελεστής τριβής μ μειώνεται όσο αυξάνει η πίεση και αυξάνεται όσο αυξάνει η ταχύτητα ολίσθησης. Για αρκετά μεγάλη ταχύτητα ολίσθησης ο συντελεστής τριβής γίνεται πρακτικά ανεξάρτητος της ταχύτητας.

Ο συντελεστής τριβής μ για μια δεδομένη πίεση μπορεί να προσομοιωθεί μέσω της παρακάτω εξίσωσης η οποία προτάθηκε από τον M. Constantinou, 1990 [9]:

$$\mu = f_{max} - (f_{max} - f_{min}) \exp(-a|\dot{U}|) \quad (3.40)$$

Όπου f_{max} είναι η μέγιστη τιμή του συντελεστή τριβής (για $|\dot{U}|=\infty$) και f_{min} είναι η ελάχιστη τιμή του συντελεστή τριβής (για $|\dot{U}|=0$). Επιπλέον, a είναι συντελεστής ο οποίος ελέγχει την μεταβολή του συντελεστή τριβής με την ταχύτητα. Όταν $f_{max} = f_{min}$ τότε το μοντέλο αυτό εκφυλίζεται στο μοντέλο τριβής του Coulomb.

Οι παράμετροι f_{max} , f_{min} , α εξαρτώνται από την πίεση στο εφέδρανο ολίσθησης. Ο Μ. Constantinou, 1990 και 1993 περιέγραψε την εξάρτηση των παραμέτρων αυτών από την πίεση. Γενικά την πιο σημαντική εξάρτηση εμφανίζει ο συντελεστής f_{max} . Για την επίδραση αυτή προτάθηκε η ακόλουθη σχέση:

$$f_{max} = f_{max,0} - (f_{max,0} - f_{max,p}) \tanh(\varepsilon p) \quad (3.41)$$

Όπου p είναι η πίεση, $f_{max,p}$ είναι ο μέγιστος συντελεστής τριβής για υψηλές πιέσεις, $f_{max,0}$ είναι ο μέγιστος συντελεστής τριβής για μηδενική πίεση και ε είναι ένας συντελεστής ο οποίος ελέγχει την μετάβαση του f_{max} μεταξύ των πολύ χαμηλών και των πολύ υψηλών πιέσεων. Πειραματικά μετρημένες τιμές των παραπάνω παραμέτρων για την περίπτωση ενός εφεδράνου FPS είναι οι εξής: $f_{max,0}=0.12$, $f_{max,p}=0.05$, $f_{min}=0.04$, $\varepsilon=0.012 \text{ MPa}^{-1}$, $\alpha=0.0429 \text{ sec/mm}$.

3.6 Παραδείγματα Εφαρμογής Συστημάτων Σεισμικής Μόνωσης

Οι περισσότερες εφαρμογές συστημάτων σεισμικής μόνωσης έχουν γίνει σε χώρες όπως οι Η.Π.Α, η Ιαπωνία, η Νέα Ζηλανδία, η Ιταλία και η Γαλλία, ενώ στη χώρα μας απαντώνται κυρίως σε οδικές και σιδηροδρομικές γέφυρες των νέων δικτύων (λ.χ Εγνατία Οδός, Ιωνία Οδός), στη γέφυρα ζεύξης Ρίου-Αντιρρίου και σε επεμβάσεις κτιρίων που κρίνονται διατηρητέα λόγω της ιστορικής τους αξίας. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα κτιριακών έργων όπου έχει εφαρμοσθεί η σεισμική μόνωση βάσης, με διαθέσιμα τεχνικά στοιχεία αναφορικά με τις εφαρμογές αυτές.

3.6.1 Σεισμικά Μονωμένα Κτίρια Στις Ηνωμένες Πολιτείες

- Foothill Communities Law & Justice Center, County of San Bernardino, California



Σχήμα 3.12: Foothill Communities Law & Justice Center, County of San Bernardino, California

Κτίριο 4 ορόφων που απέχει 12 μίλια από το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα, στην πόλη Rancho Cucamonga, ήταν το πρώτο κτίριο των ΗΠΑ το 1985 που εφαρμόστηκε ο καινοτόμος αντισεισμικός σχεδιασμός με μόνωση βάσης ώστε να αντέχει σε σεισμό μεγέθους 8.3. Αποτελείται από 98 μονωτήρες τύπου LRB με συνολικό φορτίο 23.900 kips και αντοχή σε μετακίνηση 40cm.

Το ίδιο σύστημα ελαστομεταλλικών εφεδράνων χρησιμοποιήθηκε το 1990 για ένα κτίριο του Λος Άντζελες, το Fire Command and Control Facility (FCCF), το οποίο στεγάζει τα πληροφοριακά και επικοινωνιακά συστήματα για το πρόγραμμα υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης της χώρας. Το κτίριο αυτό μονώθηκε σεισμικά με έναν συνδυασμό συμβατικών και μονωτικών συστημάτων σχεδιασμένα να παρέχουν τον ίδιο βαθμό προστασίας. Έτσι ο αντισεισμικός σχεδιασμός υπολογίστηκε πως κόστισε 6% λιγότερο από τον συμβατικό σχεδιασμό.

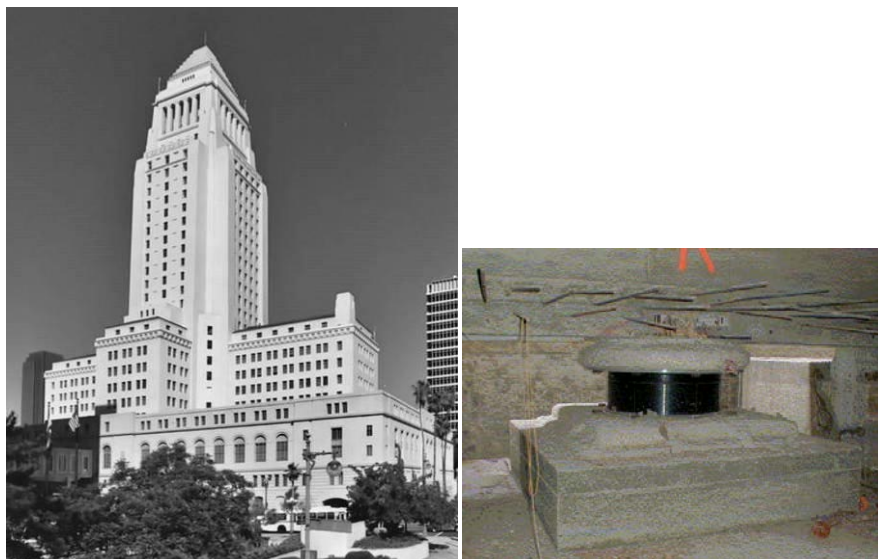
- Mackay School of Mines, University of Nevada - Reno, Nevada (retrofit)



Σχήμα 3.13: Mackay School of Mines, University of Nevada - Reno, Nevada

Οι μηχανικοί κατάφεραν να βελτιώσουν την αντοχή του κτιρίου σε σεισμούς ανυψώνοντας τη θεμελίωση από το έδαφος, εγκαθιστώντας μια τάφρο και τοποθετώντας 44 ολισθητήρες με πλάκες Teflon και 64 υποστυλώματα με μόνωση βάσης στο υπόγειο. Το Mackay Mines είναι το δεύτερο ιστορικό κτίριο στις Ηνωμένες Πολιτείες με ενίσχυση με σεισμική μόνωση βάσης.

- Los Angeles City Hall



Σχήμα 3.14: Los Angeles City Hall

Το Los Angeles City Hall είναι ένα 28-όροφο μεταλλικό κτίριο που ολοκληρώθηκε το 1928 με συνολική επιφάνεια ορόφου 83.000m^2 . Το κτίριο καταστράφηκε το 1994 από το

σεισμό Northridge. Για την ενίσχυση με σεισμική μόνωση βάσης χρησιμοποιήθηκαν περίπου 475 ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης σε συνδυασμό με περίπου 60 ολισθητήρες και συμπληρώθηκαν με περίπου 52 μηχανικούς ιξώδεις αποσβεστήρες στο επίπεδο της μόνωσης.

- Utah State Capitol, Salt Lake City



Σχήμα 3.15: Utah State Capitol, Salt Lake City

Στημένο σε μια σεισμική ζώνη όπου οι σταθμοί σεισμικού ελέγχου καταγράφουν περισσότερους από 700 σεισμούς κάθε χρόνο, το ιστορικό κτίριο Utah State Capitol υπέστη πλήρη συντήρηση και ενίσχυση με σεισμική μόνωση βάσης. Το Καπιτώλιο είναι ένα μνημειώδες, 4-όροφο, κτίριο οπλισμένου σκυροδέματος με επένδυση γρανίτη και ένα μεγάλο τρούλο με επιχαλκωμένο σκυρόδεμα. Το σύστημα σεισμικής μόνωσης βάσης αποτελείται από 265 μονωτήρες, καθένας από τους οποίους ζυγίζει 5.000pounds.

- San Diego Coronado Bay Bridge



Σχήμα 3.16: San Diego Coronado Bay Bridge

Αυτό το διακεκριμένο έργο ήταν το πρώτο που χαρακτήριζε τις δοκιμές υψηλής ταχύτητας των εφεδράνων. Η διάταξη δοκιμής ήταν η πρώτη ικανή να ελέγχει τα εφένδρανα σε πραγματικές ταχύτητες σεισμού. Τα εφένδρανα είναι σχεδιασμένα να φιλοξενούν ένα ρήγμα έκτασης 1.2m κάτω από τη γέφυρα.

- Golden Gate Bridge



Σχήμα 3.17: Golden Gate Bridge

Η βόρεια όψη της Golden Gate Bridge είναι ενισχυμένη με εφένδρανα DIS. Η μόνωση εξασφαλίζει ότι η γέφυρα θα αντέξει ένα σεισμό μεγέθους 8.3.

- MILLS-PENINSULA HEALTH SERVICES NEW HOSPITAL



Σχήμα 3.18: MILLS-PENINSULA HEALTH SERVICES NEW HOSPITAL

Τοποθετημένη μόλις 2 μίλια από το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια, η ιατρική μονάδα Sutter Health ,εμβαδού 450.000ft^2 , χρησιμοποιεί σεισμική μόνωση με εφέδρανα τριπλής εκκρεμούς τριβής προκειμένου να αντέξει ένα ενδεχομένως δυνατό σεισμό, μεγέθους 8. Τα 176 εφέδρανα είναι τοποθετημένα μεταξύ της θεμελίωσης και των υποστυλωμάτων του κτιρίου και επιτρέπουν στην αποσυνδεδεμένη κατασκευή να μετακινείται 30inches σε κάθε διεύθυνση κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.

- The Cathedral of Christ the Light



Σχήμα 3.19: The Cathedral of Christ the Light

Ο καθεδρικός ναός βρίσκεται μόλις 4.7km από το ρήγμα Hayward και χρησιμοποιούνται σεισμικά εφέδρανα εκκρεμούς τριβής προκειμένου να τον προστατέψουν από καταστροφή κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Τα εφέδρανα στηρίζουν ένα ψηλό κύριο ιερό ύψους 120ft από οπλισμένο σκυρόδεμα, υψηλής αντοχής χάλυβα, αλουμίνιο και γυαλί ώστε να δημιουργείται μια κατασκευή γεμάτη φως.

- San Francisco International Airport Terminal



Σχήμα 3.20: San Francisco International Airport Terminal

Ο διεθνής τερματικός σταθμός αεροδρομίου του San Francisco έχει συνταρακτικά αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνοντας: εκτεταμένους εσωτερικούς χώρους, υποστυλώματα ύψους 24.4m, δικτυώματα στέγης μήκους 213.4m και εξωτερικούς γυάλινους τοίχους. Το κτίριο σχεδιάστηκε από τους Skidmore, Owings και Merrill να αντέχει ένα σεισμό μεγέθους 8 που θα συμβεί κοντά στο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα. Τα 267 εφέδρανα εκκρεμούς τριβής προστατεύουν αυτό το κτίριο ορόσημο από τις διάφορες εδαφικές κινήσεις που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια σεισμών. Με περίπου πάνω από 6.5 εκατομμύρια m³ εσωτερικού χώρου, είναι το μεγαλύτερο σεισμικά μονωμένο κτίριο στον κόσμο. Αυτό το έργο κέρδισε το 2001 το βραβείο Merit Award for Excellence in Structural Engineering Award από το National Council of Structural Engineers για το πιο ξεχωριστό έργο. Τα εφέδρανα εκκρεμούς τριβής παρέχουν μια μονωμένη περίοδο 3sec και μειώνουν τις απαιτήσεις των σεισμικών δυνάμεων στο κτίριο περίπου 70%. Κάθε εφέδρανο μπορεί να εκτοπιστεί πάνω από 20inches σε κάθε οριζόντια διεύθυνση καθώς στηρίζει φορτία του κτιρίου και του σεισμού πάνω από 6 εκατομμύρια pounds. Η σεισμική μόνωση παρείχε το ελάχιστο κατασκευαστικό κόστος για την επίτευξη της επιθυμητής σεισμικής απόκρισης. Επιπλέον, η χρήση εφεδράνων εκκρεμούς τριβής σε σύγκριση με ελαστομερή εφέδρανα, επέτρεψε μια επιπλέον μείωση των διαστάσεων των δοκών και των υποστυλωμάτων, και εξοικονόμησε 680tons δομικού χάλυβα.

Άλλα σεισμικά μονωμένα κτίρια στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι το Emergency Operations Center (EOC) στο Los Angeles, το Traffic Management Center for Caltrans in Kearny Mesa, California, κοντά στο San Diego και το νοσοκομείο M.L. King/C.R. Drew Diagnostics Trauma Center στο Willowbrook.

3.6.2 Σεισμικά Μονωμένα Κτίρια Στην Ιαπωνία

Ο Αντισεισμικός Σχεδιασμός είχε ανέκαθεν υψηλή θέση στην Ιαπωνία και πολλοί μηχανισμοί για την σεισμική προστασία των κατασκευών, συμπεριλαμβανομένων μορφών σεισμικής μόνωσης, αναπτύχθηκαν σε αυτήν. Οι Ιάπωνες μηχανικοί γενικώς σχεδιάζουν κτίρια με υψηλότερη σεισμική αντοχή από ότι στις Η.Π.Α ή την Ευρώπη και είναι πιο ανοιχτοί σε δαπανηρούς σχεδιασμούς.

Όλα τα έργα με σεισμική μόνωση στην Ιαπωνία έχουν εγκριθεί από μια μόνιμη επιτροπή του Υπουργείου Κατασκευής. Καθώς πολλά από τα ολοκληρωμένα κτίρια έχουν υποστεί σεισμούς, σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν δυνατόν να συγκριθεί η απόκρισή τους με

γειτονικές συμβατικά σχεδιασμένες κατασκευές. Σε κάθε περίπτωση που έγινε μια τέτοια σύγκριση, η απόκριση του σεισμικά μονωμένου κτιρίου υπήρξε ιδιαίτερα ικανοποιητική, ιδιαίτερα για τις κινήσεις του εδάφους με υψηλά επίπεδα επιτάχυνσης.

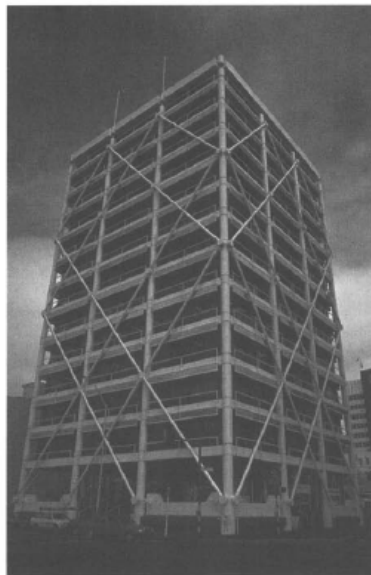
Ένα από τα μεγαλύτερα σεισμικά μονωμένα κτίρια στον κόσμο είναι το West Japan Postal Computer Center που βρίσκεται στην Σάντα, στην επαρχία του Kobe. Η χρήση της μόνωσης στην Ιαπωνία συνεχίζει να αναπτύσσεται, ιδιαίτερα μετά τον σεισμό του Kobe. Ως αποτέλεσμα της υψηλής απόδοσης του προαναφερθέντος κτιρίου, υπήρξε ταχύτατη αύξηση του αριθμού των αδειών για σεισμικά μονωμένα κτίρια, συμπεριλαμβανομένων πολλών διαμερισμάτων και πολυκατοικιών.



Σχήμα 3.21: West Japan Postal Center, Sanda, Jap

3.6.3 Σεισμικά Μονωμένα Κτίρια Στη Νέα Ζηλανδία

Το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο στη Νέα Ζηλανδία ήταν το κτίριο William Clayton στο Wellington. Ολοκληρώθηκε το 1981 και ήταν το πρώτο κτίριο στον κόσμο που μονώθηκε με εφέδρανα μολύβδου-καουτσούκ. Άλλα σεισμικά μονωμένα κτίρια είναι το Union House, στο Όκλαντ, το Wellington Central Police Station και το National Museum of New Zealand στο Wellington.



Σχήμα 3.22: Union House, Auckland, New Zealand

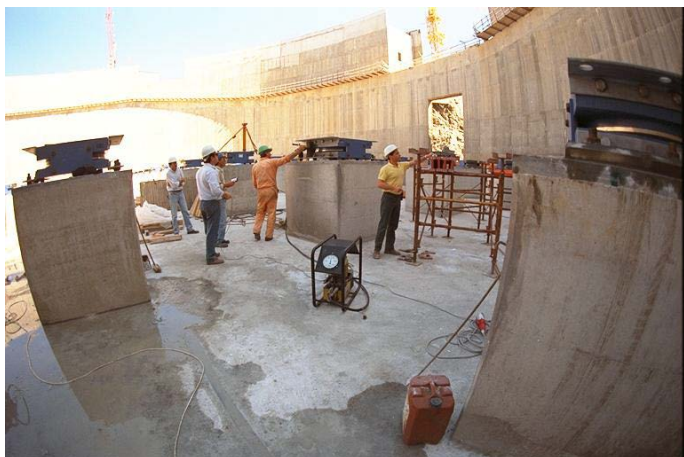
3.6.4 Σεισμικά Μονωμένα Κτίρια Στην Ευρώπη

Στην Ευρώπη η σεισμική μόνωση έχει μελετηθεί πιο ενεργά στην Ιταλία υπό την αιγίδα της Εθνικής Ομάδας Εργασίας για την Σεισμική Μόνωση [*Gruppo de Lavoro isolamento Sismico (GUS)*]. Ένα από τα κτίρια που έχουν κατασκευαστεί με σεισμική μόνωση στην Ιταλία είναι το Κέντρο Διοίκησης της Εθνικής Τηλεφωνικής Εταιρείας (*Administration Center of the National Telephone Company (SIP)*), ένα συγκρότημα από πέντε 7-όροφα κτίρια στην Ancona.



Σχήμα 3.23: The SIP Complex, Ancona, Italy

Στην Ελλάδα μέχρι τώρα η σεισμική μόνωση έχει εφαρμοστεί σε γέφυρες (π.χ. Ισθμός Κορίνθου) και σε κατασκευές με μεγάλη σημασία που απαιτείται να παραμείνουν λειτουργικές τόσο κατά την διάρκεια, όσο και ύστερα από έναν πολύ ισχυρό σεισμό, όπως οι δεξαμενές αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου στην Ελλάδα (ΥΦΑ) στο νησί Ρεβυθούσα, κοντά στην Αθήνα. Αυτές οι δεξαμενές περιέχουν 38 εκατομμύρια γαλιόνια εύφλεκτου ΥΦΑ και βρίσκονται σε μία από τις σεισμικά υψηλότερες περιοχές της Ευρώπης. Οι απαιτήσεις για την απόδοση των εφεδράνων του συγκεκριμένου έργου ήταν οι πιο αυστηρές στην ιστορία της σεισμικής μόνωσης. Τα εφέδρανα απαιτούνταν να διατηρούν τις σχεδιαστικές τους ιδιότητες και παράλληλα να υπομένουν τις επιπτώσεις από 35 χρόνια γήρανσης σε ένα θαλάσσιο περιβάλλον, ταυτόχρονες πλευρικές και κατακόρυφες σεισμικές κινήσεις, θερμοκρασίες που κυμαίνονται από -12°C έως 30°C . Εφέδρανα τριβής (*Friction Pendulum Bearings*) επιλέχθηκαν πάνω από τα ελαστομερή εφέδρανα μετά από δοκιμές που έδειξαν ότι ήταν σε καλύτερη θέση να ικανοποιήσουν αυτές τις απαιτήσεις υψηλών επιδόσεων και να επιτευχθεί η ασφαλέστερη απόκριση της δεξαμενής. Οι δεξαμενές διαστάσεων 75m (διάμετρος) και 35m (ύψος) στηρίζονται πάνω σε 212 εφέδρανα τριβής. Κάθε ένα από αυτά έχει: κάθετο φορτίο 900tons, δυναμική περίοδο 2.75sec, τριβή 5%, δυνατότητα μετατόπισης 30.5cm και ζυγίζει 1.8tons. Η χωρητικότητα τους ανέρχεται στα 173 εκατομμύρια λίτρα και αποτελούν τις μεγαλύτερες αλλά και τις βαρύτερες σεισμικά μονωμένες δεξαμενές του κόσμου.



Σχήμα 3.24: Εγκατάσταση σεισμικών εφεδράνων τριβής στη Ρεβυθούσα, Ελλάδα

Ένα άλλο κτίριο που σχεδιάστηκε με την τεχνική της σεισμικής μόνωσης στην Ελλάδα ήταν η Στέγη Γραμμάτων και Τεχνών του Ιδρύματος Ωνάση, η οποία είναι μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος που έχει μοναδικό σχήμα και δυναμική συμπεριφορά. Προκειμένου να συνδυαστεί ο κατασκευαστικός σχεδιασμός με τις σεισμικές προδιαγραφές υψηλής απόδοσης που τέθηκαν, έπρεπε να χρησιμοποιηθεί σεισμική μόνωση. Το σύστημα σεισμικής μόνωσης διαχωρίζει οριζόντια την ανωδομή

από το υπόγειο. Τη μεταφορά των φορτίων της ανωδομής στο υπόγειο αναλαμβάνουν 46 εφέδρανα ολίσθησης (FPS, $R=2.235\text{m}$, $D=0.25\text{m}$, $L=25000\text{KN}$) πάνω από τα οποία βρίσκεται πλάκα πάχους 1.50m .



Σχήμα 3.25: Στέγη Γραμμάτων και Τεχνών του Ιδρύματος Ωνάση, Αθήνα, Ελλάδα

Τέλος, η σεισμική μόνωση κρίθηκε ως η πλέον ενδεδειγμένη μέθοδος την προστασία του νέου Μουσείου της Ακρόπολης που βρίσκεται στο νότιο άκρο της Ακρόπολης. Η σπουδαιότητα του κτιρίου, μαζί με την τεράστια ιστορική αξία των εκθεμάτων δεν άφηναν περιθώρια για οποιασδήποτε μορφής ζημιά στο σκελετό του κτιρίου. Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός προέβλεπε μεγάλους ανοιχτούς χώρους στο εσωτερικό, έτσι ώστε να παρέχεται ανεμπόδιστη θέα του Παρθενώνα. Το σύστημα σεισμικής μόνωσης

αποτελείται από 94 σεισμικές συσκευές τριβής (*FPS*). Το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης είναι εγκατεστημένο κάτω από μια τσιμεντένια βάση διαστάσεων 110m x 70m, πάνω στην οποία έχει κατασκευαστεί το τετραώροφο κτίριο ύψους 40m. Τα εφάδρανα είναι σχεδιασμένα να αναλαμβάνουν κατακόρυφο φορτίο 160000kN και έχουν μέγιστη οριζόντια μετατόπιση ± 250 χιλιοστά.





Σχήμα 3.26: Μουσείο Ακρόπολης, Αθήνα, Ελλάδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Οι πληροφορίες που παρατίθενται στο κεφάλαιο αυτό βασίζονται στην έκθεση (Technical Report MCEER-99-0012) “Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings” των Constantinou M.C., Tsopeles P., Kasalanati A. and Wolff E.D. [9].

4.1 Τριβή

Η τριβή είναι η αντίσταση στην κίνηση ενός σώματος σε σχέση με ένα άλλο. Το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται σε κινήσεις ολίσθησης μεταξύ στερεών σωμάτων όπου έχουμε την τριβή ολίσθησης στερεών (*sliding solid friction*).

Η δύναμη τριβής, F , στη διεπιφάνεια ολίσθησης ενός εφεδράνου περιγράφεται με την ακόλουθη σχέση:

$$F = \mu \cdot N \quad (4.1)$$

Όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής και N είναι το κάθετο φορτίο στη διεπιφάνεια. Υπάρχει διάκριση μεταξύ του συντελεστή τριβής ολίσθησης και του στατικού (*breakaway*) συντελεστή τριβής. Ο τελευταίος ορίζεται ως ο λόγος F/N στην αρχή της κίνησης.

4.2 Βασικοί Μηχανισμοί Τριβής

Διάφοροι μηχανισμοί τριβής έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια. Πιστεύεται ότι όλοι αυτοί οι μηχανισμοί συνεισφέρουν στη γέννηση της τριβής σε διάφορους βαθμούς ανάλογα με τη συγκεκριμένη κατάσταση. Αυτοί οι μηχανισμοί είναι:

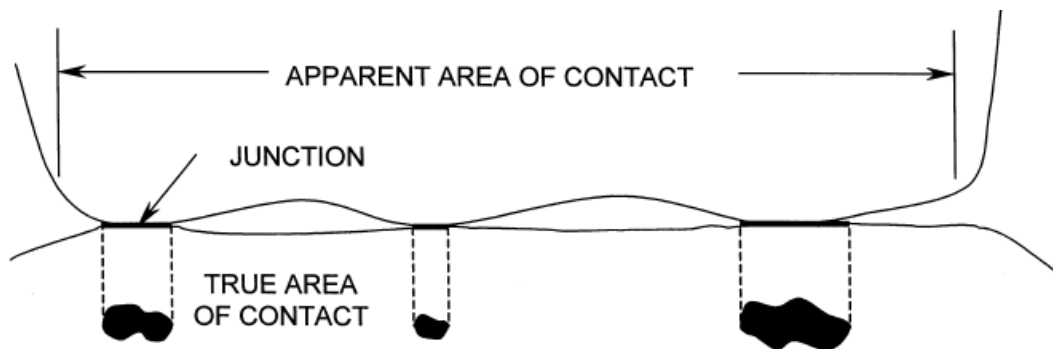
a) Πρόσφυση

Όταν δύο καθαρά στερεά υλικά έρχονται σε επαφή σχηματίζουν στενούς ατομικούς δεσμούς σε όλη τη διεπιφάνεια επαφής. Αυτές οι περιοχές επαφής καλούνται συνδέσεις (*junctions*) και το άθροισμα των επιφανειών όλων των συνδέσεων αποτελεί την πραγματική επιφάνεια επαφής. Σε σύγκριση με τη φαινομενική επιφάνεια επαφής, η

πραγματική επιφάνεια επαφής είναι πολύ μικρή (Σχήμα 4.1). Οι συνδέσεις χαρακτηρίζονται από διεπιφανειακές δυνάμεις που προκαλούνται από την πρόσφυση. Η δύναμη τριβής δίνεται ορίζεται ως το γινόμενο της πραγματικής επιφάνειας επαφής, A_r , και της διατμητικής αντοχής των συνδέσεων, s :

$$F_a = sA_r \quad (4.2)$$

Γενικά αναγνωρίζεται ότι η προσκόλληση δε συνεισφέρει μια καθαρά ξεχωριστή συνιστώσα της τριβής. Μάλλον, θεωρείται ότι αποτελεί συνιστώσα της παραμόρφωσης των τραχιών προεξέχοντων κομματιών της επιφάνειας ολίσθησης.



Σχήμα 4.1: Φαινομενική και πραγματική επιφάνεια επαφής

b) “Plowing”

Οι επιφάνειες χαρακτηρίζονται από τραχιά προεξέχοντα τμήματα. Σε επαφή αυτά τα κομμάτια υφίστανται ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις. Η συνιστώσα της τριβής “plowing” οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας κατά τη διάρκεια πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτό εξηγείται καλύτερα θεωρώντας ένα σκληρό σφαιρικό κομμάτι πάνω από μια πιο μαλακή επίπεδη επιφάνεια. Με εφαρμογή αξονικού φορτίου στο τραχύ προεξέχον κομμάτι η μαλακότερη επιφάνεια από κάτω διαρρέει, σχηματίζονται συνδέσεις (*junctions*) και το κομμάτι κολλάει στην κάτω επιφάνεια. Με εφαρμογή διατμητικού φορτίου, το κομμάτι μετακινείται οριζόντια σπρώχνοντας ένα τοίχο μαλακότερου υλικού στο δρόμο του δημιουργώντας ένα αυλάκι.

c) Επιδράσεις Τρίτου-Σώματος

Τα συντρίμια της φθοράς και οι προσμίξεις στην επιφάνεια ολίσθησης συνεισφέρουν έναν επιπρόσθετο όρο στη δύναμη τριβής. Η συνεισφορά οφείλεται στην πλαστική

παραμόρφωση όπως τα συσσωματώματα των συντριμμιών και των προσμίξεων κυλούν μεταξύ των επιφανειών ή όπως κόβουν οδοντωτά αυτές τις επιφάνειες.

d) Ιξωδοελαστικές επιδράσεις

Τα πολυμερή, όπως τα PTFE, παρουσιάζουν ιξώδη ελαστική συμπεριφορά. Καθώς κομμάτια πιο σκληρού υλικού κυλούν πάνω από ένα ιξωδοελαστικό υλικό, απορροφάται ενέργεια λόγω της ιξωδοελαστικής παραμόρφωσης, συνεισφέροντας έτσι μια πρόσθετη συνιστώσα στην τριβή.

4.3 Στατική Τριβή (breakaway friction) Και Τριβή Ολίσθησης (kinetic friction)

Η στατική τριβή είναι η μέγιστη δύναμη, η οποία πρέπει να ξεπερασθεί ώστε να ξεκινήσει η μακροσκοπική κίνηση. Η στατική τριβή συνηθίζεται να αναφέρεται ως *breakaway friction*. Μετά το ξεκίνημα της κίνησης έχει παρατηρηθεί ότι η τριβή μειώνεται. Δηλαδή, τυπικά η στατική τριβή είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη τριβής ολίσθησης, η οποία μετρείται σε πολύ χαμηλή ταχύτητα ολίσθησης.

Η αρχή της διαφοράς μεταξύ στατικής τριβής και τριβής ολίσθησης μπορεί να εξηγηθεί από την υπόθεση είτε μιας ταχείας πτώσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής είτε στη δύναμη των συνδέσμων που ακολουθούν το ξεκίνημα της ολίσθησης. Στην περίπτωση των PTFE αυτό οφείλεται πιθανόν στη μεταφορά μιας πολύ λεπτής στρώσης του PTFE στην ανοξειδωτή χαλύβδινη πλάκα.

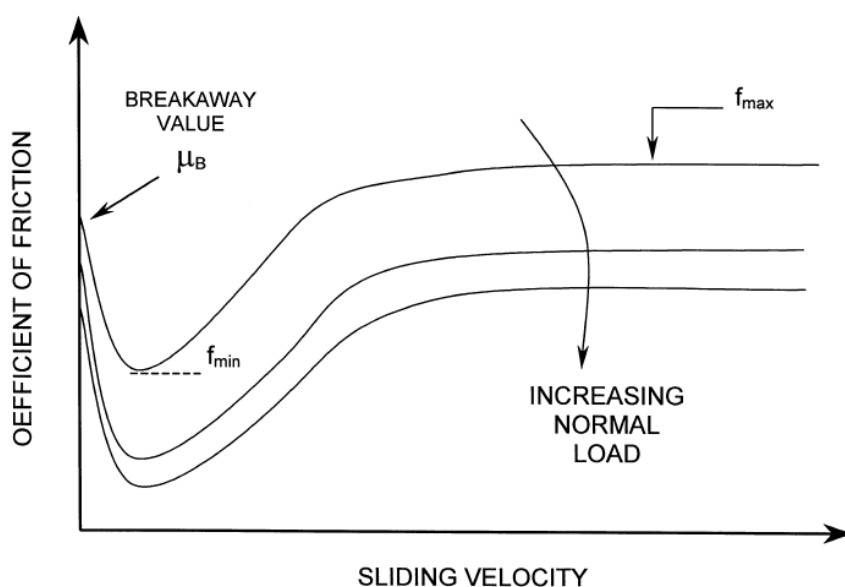
4.4 Η Τριβή Σε PTFE-Στιλπνές Ανοξειδωτες Χαλύβδινες Διεπιφάνειες

4.4.1 Εξάρτηση Από Την Ταχύτητα Ολίσθησης Και Την Πίεση

Το σχήμα 4.2 απεικονίζει την εξάρτηση του συντελεστή τριβής (δύναμη τριβής διαιρεμένη με το κάθετο φορτίο F/N) από την ταχύτητα ολίσθησης και το φυσικό φορτίο. Η συμπεριφορά που εμφανίζεται είναι χαρακτηριστική διεπιφανειών καθαρών και χωρίς λιπαντική ουσία σε φυσική θερμοκρασία περιβάλλοντος (περίπου 20 °C). Η στατική (*breakaway*) τιμή φαίνεται για μηδενική ταχύτητα ολίσθησης. Η τιμή ολίσθησης χαρακτηρίζεται από μια χαμηλή τιμή που ακολουθεί αμέσως το ξεκίνημα της ολίσθησης, f_{min} , και από μια προοδευτικά αυξανόμενη τιμή καθώς αυξάνει η ταχύτητα.

Σε μεγάλες ταχύτητες η τιμή ολίσθησης φθάνει μια σταθερή τιμή, f_{max} . Αυξήσεις στο φυσικό φορτίο έχουν ως αποτέλεσμα μείωση του συντελεστή τριβής – αυτή η μείωση τελικά μειώνεται σε μια οριακή τιμή του φυσικού φορτίου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συμπεριφορά που απεικονίζεται αποκτήθηκε από δοκιμή εφεδράνων ολίσθησης υπό κυκλική αρμονική μετακίνηση και ότι οι μετρήσεις της τριβής ολίσθησης αποκτήθηκαν μέσα στον πρώτο κύκλο στην πρώτη στιγμή στην οποία επιτεύχθηκε η μέγιστη ταχύτητα ολίσθησης. Είναι γνωστό ότι η τριβή ολίσθησης μειώνεται με αύξηση του αριθμού των κύκλων ως αποτέλεσμα της θέρμανσης της διεπιφάνειας.



Σχήμα 4.2: Εξάρτηση του συντελεστή τριβής των PTFE- Στιλπνών Ανοξειδωτων Χαλύβδινων Επιφανειών από την Ταχύτητα Ολίσθησης και το Φυσικό Φορτίο

Πριν προχωρήσουμε στις επιδράσεις της ταχύτητας ολίσθησης, είναι αναγκαίο να συζητήσουμε την προέλευση της πολύ χαμηλής τιμής του συντελεστή τριβής ολίσθησης σε πολύ χαμηλή ταχύτητα. Υπήρχε κάποτε η πεποίθηση ότι αυτή η χαμηλή τριβή οφείλεται στην κακή πρόσφυση. Στην πραγματικότητα οι συνδέσεις είναι σταθερά προσδεμένες με την επιφάνεια (ως εκ τούτου, η μεγαλύτερη στατική τριβή). Ωστόσο, στην ολίσθηση μια πολύ λεπτή ιδιαίτερα προσανατολισμένη και κρυσταλλική στρώση

του PTFE έχει εναποτεθεί στην ανοξειδωτή χαλύβδινη επιφάνεια. Η ολίσθηση συμβαίνει στη διεπιφάνεια αυτής της στρώσης και του όγκου του PTFE. Η χαμηλή τριβή αποδίδεται στην εύκολη διάτμηση αυτής της λεπτής στρώσης υπό εφαπτομενική έλξη.

Ο συντελεστής τριβής ολίσθησης αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας ολίσθησης. Η αύξηση πάνω από την τιμή χαμηλής ταχύτητας (f_{min} , βλέπε Σχήμα 4.2) εξαρτάται από την ταχύτητα ολίσθησης και είναι περίπου 5 με 6 φορές της f_{min} στις ταχύτητες ενδιαφέροντος στις σεισμικές εφαρμογές (500 mm/s ή μεγαλύτερες). Κάτω από αυτές τις συνθήκες έντονης φόρτισης, υπάρχει μια αξιοσημείωτη θέρμανση τριβής. Όταν η θέρμανση είναι εκτεταμένη μπορεί να συμβεί κάποια τοπική τήξη του PTFE και κάτω από αυτές τις συνθήκες η τριβή θα μειωθεί σημαντικά. Έτσι, πρέπει να υπάρχει κάποια πολύ υψηλή ταχύτητα για την οποία ο συντελεστής τριβής πέφτει.

Η θέρμανση τριβής δεν είναι υπεύθυνη για την αύξηση της τριβής γιατί κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε σε δοκιμές χαμηλής ταχύτητας, οι οποίες διεξήχθησαν σε υψηλές θερμοκρασίες (Bowden and Tabor, 1964). Μάλλον, οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες των PTFE και η μαζική μεταφορά των PTFE είναι υπεύθυνες για την παρατηρημένη αύξηση στην τριβή (Makison and Tabor, 1964). Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ολίσθησης, η δύναμη που χρειάζεται να διατμήσει την πολύ λεπτή στρώση του PTFE αυξάνει. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η τέμνουσα δύναμη να υπερβεί την αντοχή των ορίων μεταξύ των κρυστάλλων του PTFE και να συμβεί η μαζική μεταφορά του PTFE. Σε αυτή τη φάση, η τριβή παρουσιάζει μικρές αυξήσεις με την αύξηση της ταχύτητας λόγω, πιθανώς, του γεγονότος ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης του όγκου του PTFE είναι αρκετά μικρότερος από αυτόν στην πολύ λεπτή στρώση στην ανοξειδωτή χαλύβδινη επιφάνεια.

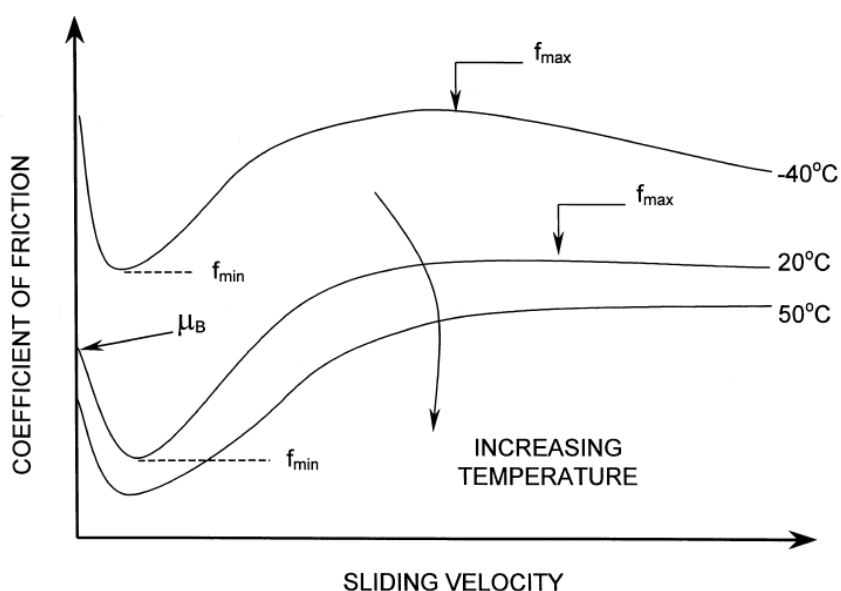
4.4.2 Επίδραση Της Θερμοκρασίας

Το Σχήμα 4.3 απεικονίζει το συντελεστή τριβής ως συνάρτηση της ταχύτητας ολίσθησης για διάφορες θερμοκρασίες. Αυτή είναι η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια στην αρχή του πειράματος, ή αλλιώς, είναι η θερμοκρασία του όγκου της διάταξης της δοκιμής αρκετά μακριά από τη διεπιφάνεια ολίσθησης.

Η θερμοκρασία έχει μια δραματική επίδραση στους συντελεστές στατικής τριβής και πολύ χαμηλής ταχύτητας (μ_B και f_{min} , αντίστοιχα στο Σχήμα 4.2). Για PTFE που δεν

είναι εμπλουτισμένα με ίνες υάλου υπάρχει προσεγγιστικά μια αύξηση 7 φορές στις τιμές της τριβής αυτής για θερμοκρασίες μεταξύ 50° C και -40° C. Αυτή η ουσιαστική αύξηση είναι η επίδραση της αλλαγής των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων του PTFE λόγω θερμοκρασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές της τριβής στο Σχήμα 4.3 αποκτήθηκαν από την πρώτη στιγμή στην οποία επιτεύχθηκε μια συγκεκριμένη τιμή ταχύτητας ολίσθησης (σημειωτέον ότι τα πειράματα διεξήχθησαν με κυκλική κίνηση) έτσι ώστε για πολύ χαμηλή ταχύτητα η εισαγόμενη θερμότητα να μην είναι επαρκής να αλλάξει ουσιαστικά τη θερμοκρασία.

Η ροή θερμότητας που παράγεται από την τριβή είναι ανάλογη του συντελεστή τριβής, της μέσης πίεσης και της ταχύτητας ολίσθησης. Συνεπώς, η ροή θερμότητας σε μεγάλες ταχύτητες (περίπου 500mm/s) είναι μερικές φορές μεγαλύτερη από τη ροή θερμότητας σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ($\leq 1\text{mm/s}$). Έτσι, ουσιαστική θερμότητα τριβής της διεπιφάνειας ολίσθησης συμβαίνει σε μεγάλες ταχύτητες, η οποία, με τη σειρά της, ουσιαστικά μετριάξει τις επιδράσεις της χαμηλής θερμοκρασίας στις ιξωδοελαστικές ιδιότητες των PTFE. Το αποτέλεσμα είναι ότι η τιμή υψηλής ταχύτητας του συντελεστή τριβής ($f_{\max}$ στο Σχήμα 4.3) αυξάνει περίπου μόνο 50% σε διακύμανση θερμοκρασίας 20° C έως -40° C.



Σχήμα 4.3 : Επίδραση της Θερμοκρασίας στις Ιδιότητες Τριβής των PTFE- Στιλπνών
Ανοξείδωτων Χαλύβδινων Διεπιφανειών

4.4.3 Επίδραση Του Χρόνου Φόρτισης (Load Dwell)

Εφόσον το PTFE είναι ένα ιξωδοελαστικό υλικό θα έπρεπε να περιμένουμε η πραγματική επιφάνεια επαφής και ως εκ τούτου και η τριβή να εξαρτώνται από το χρόνο φόρτισης (Bowden and Tabor, 1964). Πράγματι, πειράματα που διεξήχθησαν με μια χαλύβδινη σφαίρα σε ένα μπλοκ πλαστικών απέδειξαν αυξήσεις και στην πραγματική επιφάνεια επαφής και στη δύναμη τριβής για χρόνους φόρτισης 6 ως 1000sec.

Έχει αποδειχθεί ότι τα “περιορισμένα” (*confined*) PTFE εκδηλώνουν ερπυστική συμπεριφορά με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με τα *unconfined* PTFE. Επομένως, είναι πιθανό ότι η προϋπόθεση η πραγματική επιφάνεια επαφής να γίνεται σχεδόν ίση με τη φαινομενική επιφάνεια του εφεδράνου να επιτυγχάνεται μέσα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Αν ναι, έχουμε μια λογική εξήγηση για (α) την ασήμαντη επίδραση του χρόνου φόρτισης στη στατική τριβή και (β) την εξάρτηση της τριβής ολίσθησης πολύ χαμηλής ταχύτητας από το αντίστροφο του φυσικού φορτίου.

4.5 Η Τριβή Σε Διμεταλλικές Επιφάνειες

Οι διμεταλλικές διεπιφάνειες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφέδρανα ολίσθησης ή σε άλλα στοιχεία σε συστήματα μόνωσης (όπως η διεπιφάνεια ολίσθησης) αποτελούνται από ανοξείδωτο χάλυβα σε επαφή με μπρούτζο ο οποίος εμποτίζεται με κάποια μορφή συμπαγούς λιπαντικού. Εργαστηριακά πειράματα και δεδομένα από βιομηχανικές εφαρμογές δείχνουν ενδεχόμενες αυξήσεις της στατικής τριβής αυτών των διεπιφανειών με το χρόνο φόρτισης. Η πιθανή εξήγηση για το φαινόμενο αυτό είναι η πολύ μικρή πραγματική επιφάνεια επαφής στις διμεταλλικές διεπιφάνειες, και έτσι η πιθανότητα για αύξηση στην επιφάνεια κάτω από παρατεταμένη φόρτιση.

4.6 Ιδιότητες Τριβής PTFE-Στιλπνών Ανοξειδωτων Χαλύβδινων Διεπιφανειών

4.6.1 Επίδραση Του Χρόνου Φόρτισης (Load Dwell) Στη Στατική Τριβή (Breakaway Friction)

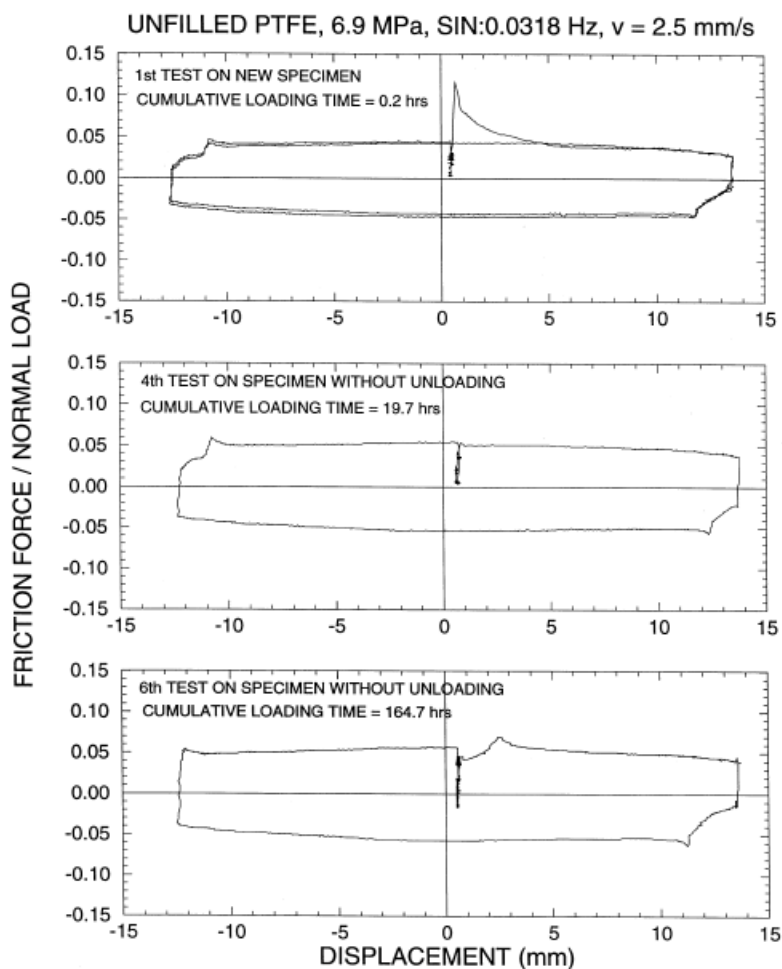
Είναι κοινή πρακτική η διατήρηση φορτίου σε εφέδρανα PTFE για ορισμένο χρόνο πριν την επιβολή ολίσθησης. Διεξήχθησαν δοκιμές (Mokha et al. (1990)) χρησιμοποιώντας δοκίμια PTFE διαμέτρου 95mm, μη εμπλουτισμένα με ίνες υάλου, σε επαφή με στιλπνό ανοξειδωτο χάλυβα (ASTM A240, Type 304) με τραχύτητα επιφάνειας ίση με 0.03μm. Το πείραμα διεξήχθη σε φαινομενική πίεση 6.9 MPa χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά δοκίμια. Κατά τη διάρκεια του πειράματος η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 20° C και η σχετική υγρασία διακυμάνθηκε μεταξύ 25% και 30% . Στις εξεταζόμενες διεπιφάνειες επιβλήθηκε πλευρική κίνηση ως ημιτονοειδές κύμα συχνότητας 0.0318Hz και εύρους 12.5mm έτσι ώστε η μέγιστη ταχύτητα ολίσθησης να είναι ίση με 2.5mm/s.

Ο Πίνακας 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζει τα αποτελέσματα για το πείραμα αυτό. Το πρώτο δοκίμιο (στην πραγματικότητα ζεύγος δοκιμίων) φορτίστηκε για 0.2 ώρες και έπειτα επιβλήθηκε πλευρική κίνηση. Το δοκίμιο έπειτα διατηρήθηκε υπό φόρτιση για άλλη μια ώρα και το πείραμα επαναλήφθηκε. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε επτά φορές για συνολικό χρόνο φόρτισης 167 ωρών. Συνεπώς, νέα δοκίμια δοκιμάστηκαν όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1. Τα αποτελέσματα του πειράματος αποδεικνύουν ότι για νέα δοκίμια (δεν έχουν δοκιμαστεί προηγουμένως) χρόνοι φόρτισης που κυμαίνονται μεταξύ 0.2 και 118.4 ώρες οδηγούν σε τιμές στατικής τριβής οι οποίες δεν επηρεάζονται από το χρόνο φόρτισης. Υπάρχει, σαφώς, κάποια μεταβλητότητα στα ληφθέντα αποτελέσματα αλλά όχι κάποια συστηματική αύξηση στη στατική τριβή με αύξηση του χρόνου φόρτισης (μάλλον το αντίθετο παρατηρείται).

Πίνακας 4.1 : Αποτελέσματα Πειράματος για την Επίδραση του Χρόνου Φόρτισης στη Στατική Τριβή Εφεδράνων PTFE Μη-Εμπλουτισμένων με ίνες υάλου σε επαφή με Στιλπνό Ανοξείδωτο Χάλυβα για Φαινομενική Πίεση 6.9 MPa

Specimen	Cumulative Loading Time (hrs)	Static Friction Coefficient	Comments
1	0.2	0.116	Tests were conducted in the presented sequence without unloading of the interface.
	1.2	0.056	
	6.5	0.050	
	19.7	0.052	
	45.9	0.062	
	164.7	0.068	
	167.0	0.066	
2	118.4	0.095	Two high velocity tests were conducted immediately after the second and prior to the third test.
	128.9	0.031	
	153.3	0.073	
3	0.3	0.092	

Άλλη μια παρατήρηση σε αυτές τις δοκιμές είναι η αξιοσημείωτη μείωση στη στατική τριβή μετά την πρώτη δοκιμή. Αυτό απεικονίζεται καλύτερα στους βρόχους που παρουσιάζονται στην Σχήμα 4.4. Πιθανόν η μείωση αυτή οφείλεται στην εναπόθεση μιας λεπτής στρώσης PTFE στην ανοξείδωτη χαλύβδινη πλάκα στις προηγούμενες δοκιμές.



Σχήμα 4.4: Βρόχοι Δύναμης Τριβής διαιρεμένη με Φυσικό Φορτίο έναντι Μετακίνησης σε Δοκιμές Χρόνου Φόρτισης για Φαινομενική Πίεση 6.9 MPa

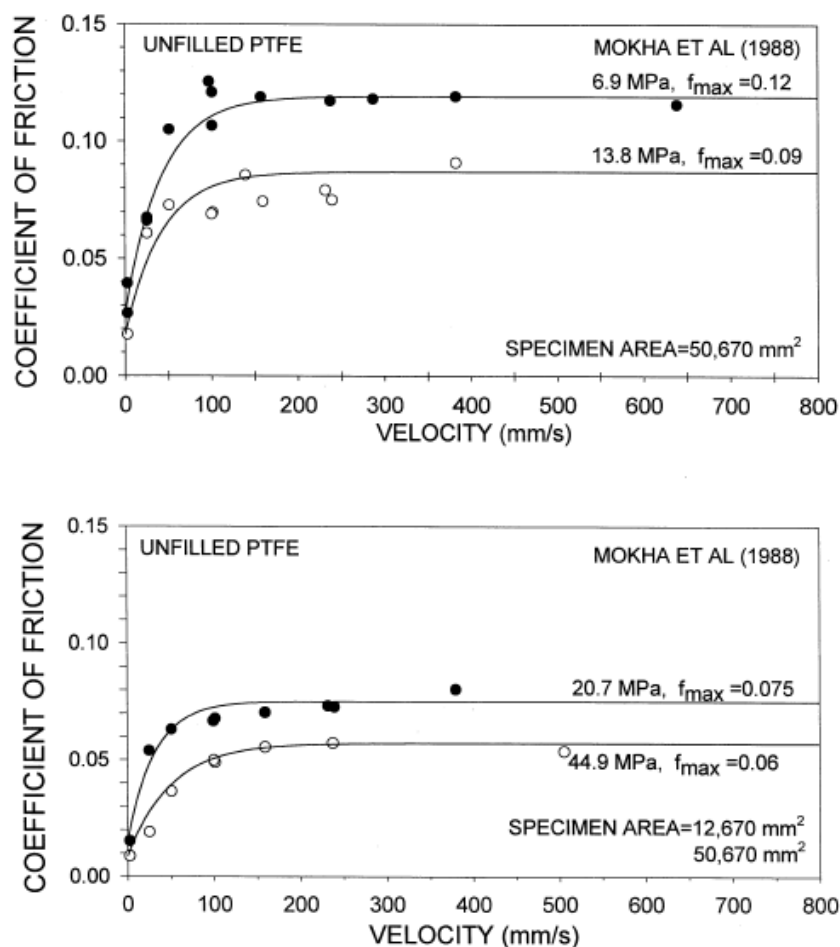
Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν υποδεικνύουν ότι όταν λαμβάνεται υπόψη η φυσική μεταβλητότητα στις ιδιότητες τριβής που αποκτήθηκε από διαφορετικά δοκίμια ή διαφορετικές δοκιμές στο ίδιο δοκίμιο και όταν λαμβάνονται υπόψη πιθανά υπολογιστικά λάθη, η στατική τριβή σε διεπιφάνειες PTFE- σιλικονίου ανοξείδωτου χάλυβα είναι ανεπηρέαστη από το χρόνο φόρτισης.

4.6.2 Επίδραση Φαινομενικής Πίεσης Και Ταχύτητας Ολίσθησης

Η επίδραση της φαινόμενης πίεσης και της ταχύτητας ολίσθησης στο συντελεστή τριβής απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Ο συντελεστής στατικής τριβής (*breakaway friction*) (συμβολίζεται ως μ_B στο Σχήμα 4.2) είναι η τιμή για σχεδόν μηδενική ταχύτητα

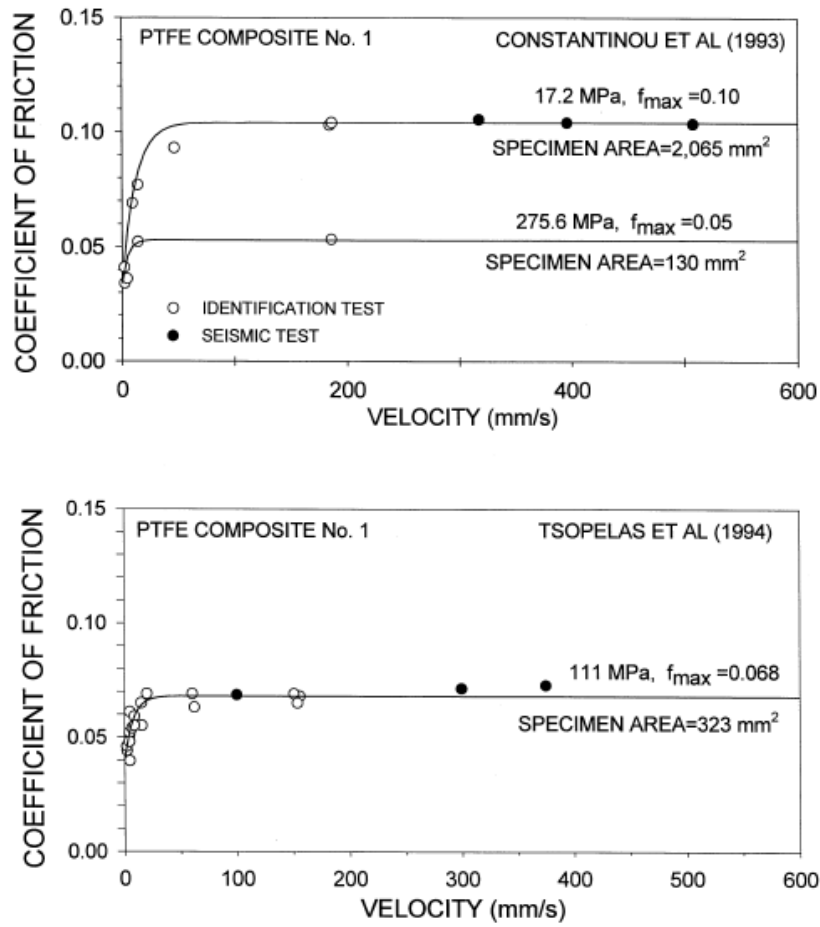
ολίσθησης. Είναι η τιμή του συντελεστή τριβής στην αρχή της κίνησης υπό οιονεί-στατικές συνθήκες. Η τιμή του συντελεστή τριβής ολίσθησης υπό πολύ χαμηλή ταχύτητα ολίσθησης συμβολίζεται ως $f_{\min}$ στο Σχήμα 4.2.

Το Σχήμα 4.5 που ακολουθεί παρουσιάζει δεδομένα (Mokha et al. (1988)) για το συντελεστή τριβής ολίσθησης PTFE μη εμπλουτισμένων με ίνες υάλου σε επαφή με στιλπνό ASTM A240, ανοξείδωτο χάλυβα τύπου 304 σε θερμοκρασία (αυτή είναι η θερμοκρασία στην αρχή του πειράματος) περίπου 20° C. Τα δεδομένα αποδεικνύουν την εξάρτηση του συντελεστή αυτού από τη φαινόμενη πίεση και την ταχύτητα ολίσθησης. Ωστόσο, οι τιμές του συντελεστή τριβής δεν πρέπει να θεωρηθούν ως απόλυτες. Συγκεκριμένα, οι τιμές που παρουσιάζονται έχουν αποσπασθεί από τον πρώτο κύκλο της δοκιμής και είναι γνωστό ότι ο συντελεστής τριβής μπορεί να αυξηθεί με αύξηση της κίνησης ανάλογα με τις συνθήκες της δοκιμής. Επιπλέον, το μέγεθος του δοκιμίου έχει μια επιρροή. Τυπικά, λαμβάνονται ελαφρώς μικρότερες τιμές από δοκιμές σε πολύ μεγάλα δοκίμια. Πιθανόν, αυτό οφείλεται στην άνιση κατανομή και συγκέντρωση της πίεσης του εφεδράνου η οποία είναι αποτέλεσμα της μεγάλης στροφικής δυσκαμψίας των μεγάλων εφεδράνων. Επίσης, υπάρχει μια διακύμανση στις καταγραφόμενες τιμές τριβής που ίσως είναι αποτέλεσμα των αγνώστων ακόμη επιρροών, όπως ο τύπος του ανοξείδωτου χάλυβα, η υγρασία, κλπ.



Σχήμα 4.5: Συντελεστής Τριβής Ολίσθησης Διεπιφανειών Μη Εμπλουτισμένων με ίνες νάιλον PTFE- Στιλπνού Ανοξείδωτου Χάλυβα. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι περίπου 20°C

Το Σχήμα 4.6 παρουσιάζει δεδομένα πειραμάτων (Constantinou et al. (1993), Tsopelas et al. (1994)) για τις ιδιότητες τριβής σύνθετων PTFE που χρησιμοποιήθηκαν σε εφέδρανα τριβής (*FPS bearings*). Οι τιμές του συντελεστή τριβής ολίσθησης λήφθηκαν από δοκιμές μοντέλου γέφυρας σε σεισμική τράπεζα είτε με εφέδρανα FPS (Constantinou et al. (1993)) είτε με επίπεδα εφέδρανα ολίσθησης (Tsopelas et al. (1994)). Τα δεδομένα προήλθαν είτε από δοκιμές ελεγχόμενης μετακίνησης (ανοιχτά κυκλικά σύμβολα) είτε από πειράματα σεισμικής κίνησης (σκούρα κυκλικά σύμβολα). Σε όλα τα πειράματα το φυσικό φορτίο που ασκούσαν στα εφέδρανα ήταν περίπου 35 KN.



Σχήμα 4.6: Συντελεστής Τριβής Ολίσθησης Διεπιφανειών Σύνθετου Νο.1-Ανοξείδωτου Χάλυβα. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι περίπου 20° C. Όλες οι δοκιμές διεξήχθησαν υπό φυσικό φορτίο περίπου 35 KN.

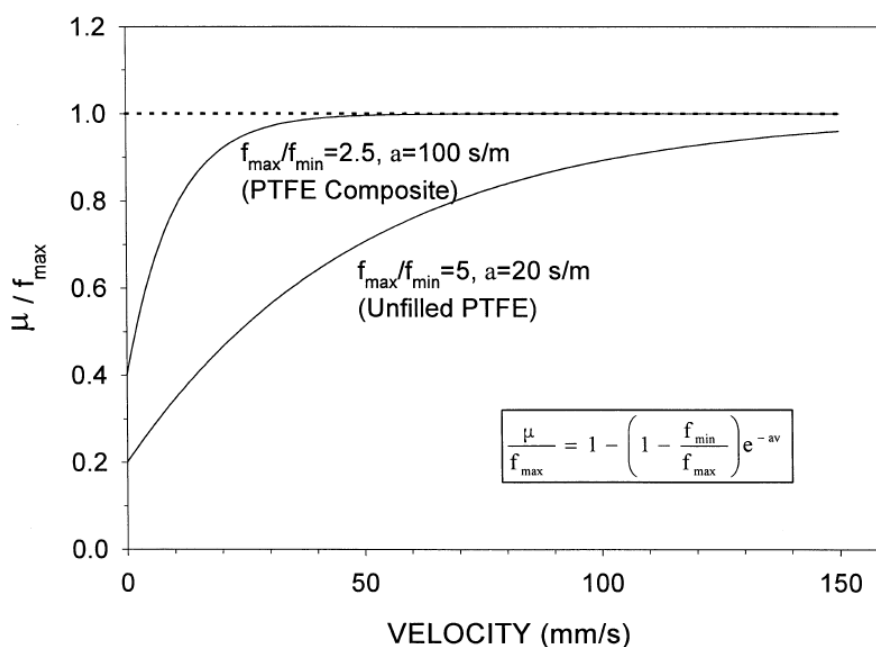
Γενικά, για μια συγκεκριμένη τιμή της φαινομενικής πίεσης, ο συντελεστής τριβής ολίσθησης εξαρτάται από την ταχύτητα, V , με ένα τρόπο που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση (Mokha et al., 1988, Constantinou et al., 1990):

$$\mu = f_{max} - (f_{max} - f_{min}) \exp(-aV) \quad (4.3)$$

Στην οποία η έννοια των f_{max} και f_{min} απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2 και a είναι μια παράμετρος με τιμές 20 έως 30s/m για PTFE μη εμπλουτισμένα με ίνες υάλου και περίπου 100s/m ή μεγαλύτερες για σύνθετα PTFE. Η εξίσωση (4.3) με κατάλληλες παραμέτρους (βλέπε Mokha et al., 1988, Constantinou et al., 1993, Tsopelas et al., 1994) οδήγησε στις καμπύλες που φαίνονται στα Σχήματα 4.5 και 4.6. Πράγματι, η εξίσωση

(4.3) περιγράφει καλά την εξάρτηση του συντελεστή τριβής ολίσθησης από την ταχύτητα.

Η παράμετρος a ελέγχει τη μετάβαση του συντελεστή τριβής από την ελάχιστη στη μέγιστη τιμή του σε υψηλή ταχύτητα ολίσθησης. Το Σχήμα 4.7 απεικονίζει την επίδραση της παραμέτρου a για δύο τιμές του λόγου f_{max}/f_{min} , 2.5 και 5. Η χαμηλότερη τιμή αυτού του λόγου είναι αντιπροσωπευτική του σύνθετου PTFE, ενώ η ανώτερη τιμή είναι αντιπροσωπευτική του μη εμπλουτισμένου με ίνες υάλου PTFE. Το Σχήμα αυτό, όπως και τα Σχήματα 4.5 και 4.6 αποδεικνύουν ότι δοκιμή σε μια ταχύτητα ολίσθησης μεγαλύτερη από 150mm/s επαρκεί για την απόκτηση της μέγιστης τιμής του συντελεστή τριβής ολίσθησης όλων των PTFE υπό συνθήκες κανονικής θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.7: Επίδραση της Παραμέτρου a στη Διακύμανση του Συντελεστή Τριβής με την Ταχύτητα

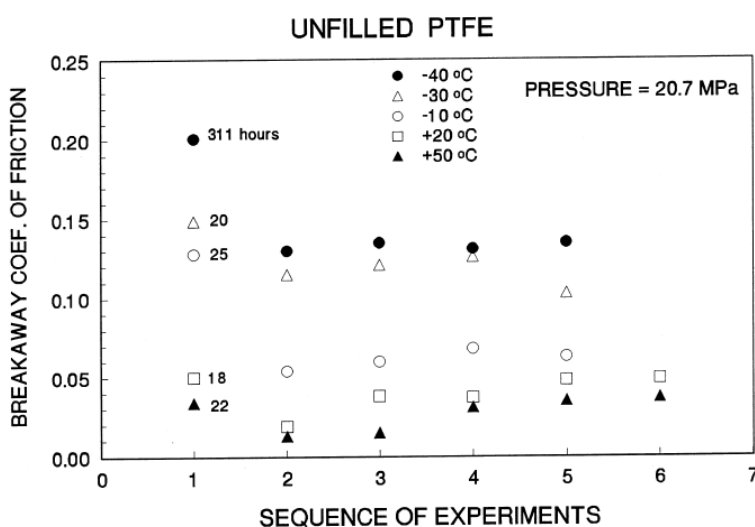
4.6.3 Επίδραση Της Θερμοκρασίας

Τα Σχήματα 4.8 έως 4.10 παρουσιάζουν δεδομένα για την επίδραση της θερμοκρασίας στις ιδιότητες τριβής μη-εμπλουτισμένων με ίνες υάλου PTFE που δεν έχουν λιπανθεί με λιπαντική ουσία. Το Σχήμα 4.8 παρουσιάζει τη στατική τριβή όπως μετρήθηκε σε διάφορες δοκιμές. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ -40°C και 50°C .

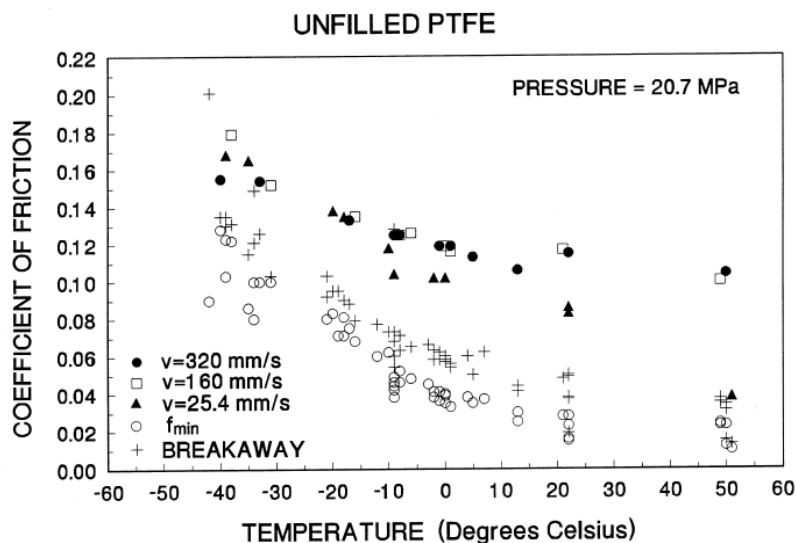
Αυτή είναι η θερμοκρασία στην αρχή του πειράματος, στρογγυλεμένη στο κοντινότερο πολλαπλάσιο του δέκα. Για κάθε ένα από τα πρώτα πειράματα σε κάθε σειρά, ο χρόνος φόρτισης φαίνεται δίπλα στα σημεία των δεδομένων. Κάθε ένα από τα μεταγενέστερα πειράματα διεξήχθη μετά από χρόνο φόρτισης λιγότερο από μια ώρα.

Το Σχήμα 4.9 παρουσιάζει τη μετρούμενη στατική τριβή, την ελάχιστη τριβή ολίσθησης, f_{min} , και την τριβή ολίσθησης σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες ως συνάρτηση της θερμοκρασίας στην αρχή κάθε πειράματος. Το Σχήμα απεικονίζει την ουσιαστική επίδραση της θερμοκρασίας στη χαμηλή ταχύτητα, f_{min} , και στη στατική τριβή και την πολύ μικρότερη επίδραση στην υψηλή ταχύτητα τριβής. Το τελευταίο είναι ξεκάθαρα το αποτέλεσμα της θέρμανσης λόγω τριβής.

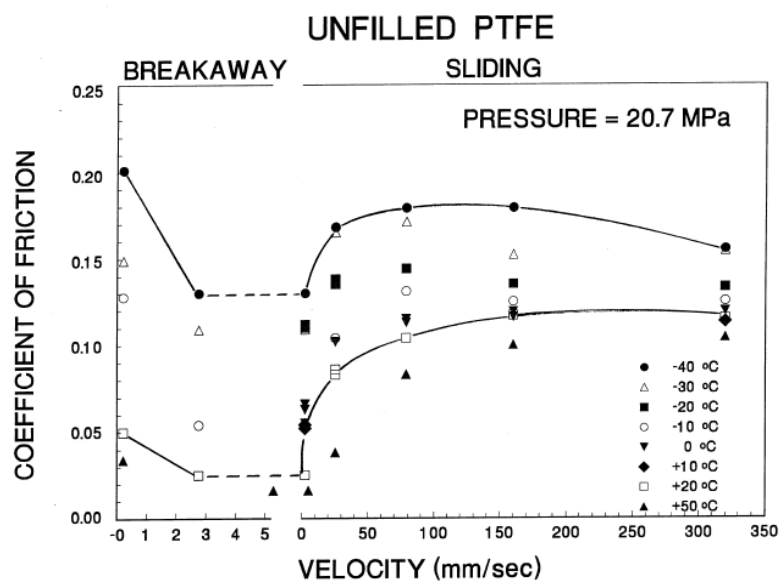
Το Σχήμα 4.10 παρουσιάζει το μετρούμενο συντελεστή τριβής ως συνάρτηση της ταχύτητας ολίσθησης για ποικίλες θερμοκρασίες στην αρχή κάθε πειράματος (στρογγυλεμένο στο κοντινότερο πολλαπλάσιο του δέκα). Όταν τα σημεία δεδομένων για την ίδια θερμοκρασία συνδέονται με μια καμπύλη, όπως γίνεται στην εικόνα για δυο περιπτώσεις, φαίνεται μια ξεκάθαρη εικόνα της επίδρασης της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, ανάμεσα στις θερμοκρασίες 20° C και -40° C παρατηρούμε μια αύξηση 4 με 5 φορές στη στατική τριβή και στη χαμηλής ταχύτητας τριβή ολίσθησης (f_{min}) αλλά μόνο μια αύξηση περίπου 1.6 φορές στην τριβή υψηλής ταχύτητας (f_{max}). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάποια αρκετά υψηλή ταχύτητα η θερμοκρασία στην αρχή του πειράματος έχει μια ασήμαντη επίδραση στην τριβή – ένα αποτέλεσμα της θέρμανσης λόγω τριβής.



Σχήμα 4.8: Στατική Τριβή Διεπιφανειών Μη-Εμπλουτισμένων με ίνες υάλου PTFE-Ανοξείδωτου Χάλυβα ως Συνάρτηση της Θερμοκρασίας και Αλληλουχίας Πειραμάτων



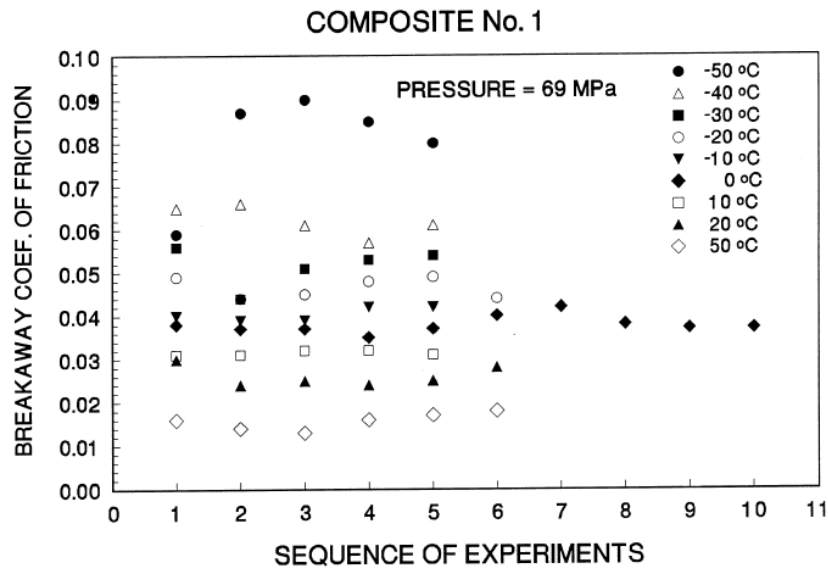
Σχήμα 4.9: Τριβή Διεπιφανειών Μη-Εμπλουτισμένων με ίνες υάλου PTFE-Στιλπνού Ανοξείδωτου Χάλυβα ως Συνάρτηση της Θερμοκρασίας



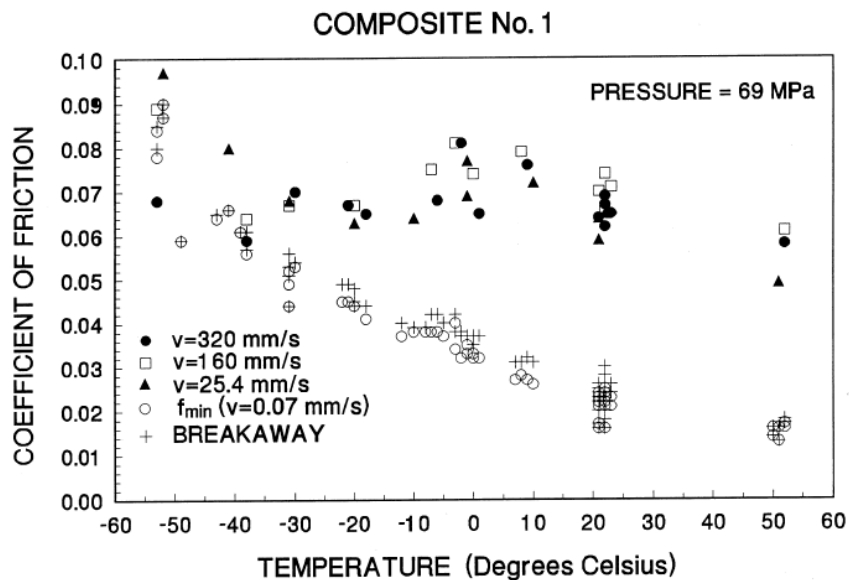
Σχήμα 4.10: Τριβή Διεπιφανειών Μη-Εμπλουτισμένων με ίνες υάλου PTFE-Στιλπνού Ανοξείδωτου Χάλυβα σε Ποικίλες Θερμοκρασίες ως Συνάρτηση της Ταχύτητας Ολίσθησης

Τα Σχήματα 4.11 έως 4.13 παρουσιάζουν τα δεδομένα για την επίδραση της θερμοκρασίας στις ιδιότητες τριβής των σύνθετων PTFE. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα για τα μη-εμπλουτισμένα με ίνες υάλου PTFE κάνουμε δυο παρατηρήσεις:

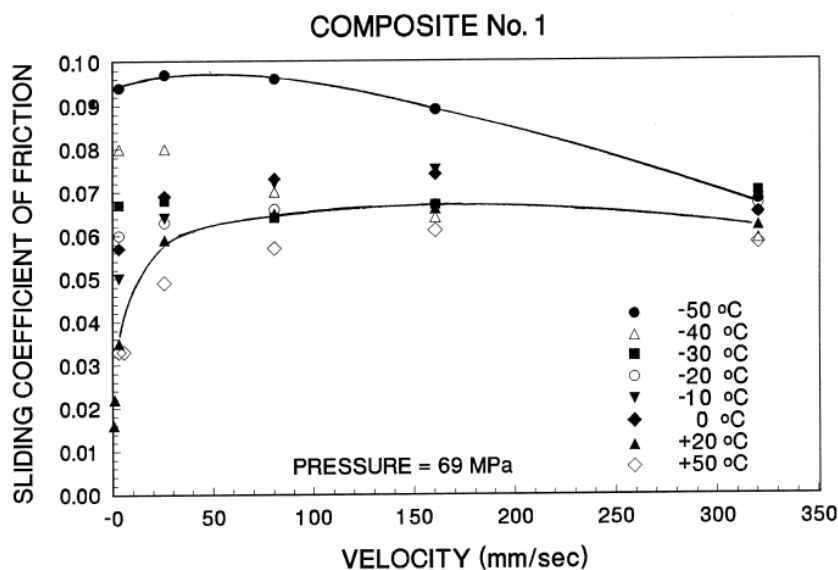
1. Η στατική τριβή είναι σχεδόν η ίδια όπως η τριβή ολίσθησης χαμηλής ταχύτητας (f_{min})
2. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι, γενικά, πολύ μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση των μη-εμπλουτισμένων με ίνες υάλου PTFE



Σχήμα 4.11: Στατική Τριβή Διεπιφανειών Σύνθετων PTFE- Στιλπνού Ανοξειδωτού Χάλυβα ως Συνάρτηση της Θερμοκρασίας και Αλληλογονίας Πειραμάτων



Σχήμα 4.12: Τριβή Σύνθετων PTFE-Στιλπνού Ανοξειδωτού Χάλυβα ως Συνάρτηση της Θερμοκρασίας



Σχήμα 4.13: Τριβή Σύνθετων PTFE-Στιλπνού Ανοξειδωτου Χάλυβα σε Ποικίλες Θερμοκρασίες ως Συνάρτηση της Ταχύτητας Ολίσθησης

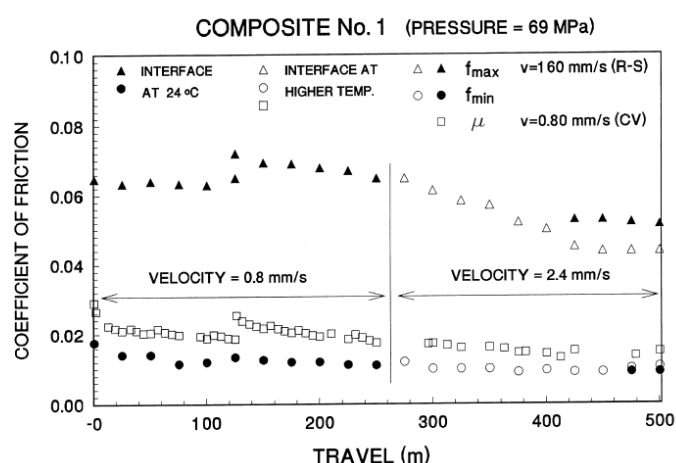
Μια εξήγηση για τη μικρότερη επίδραση της θερμοκρασίας σχετίζεται με την παραγόμενη ροή θερμότητας. Η τριβή στο σύνθετο υλικό είναι περίπου η μισή σε σχέση με αυτή του μη-εμπλουτισμένου με ίνες υάλου PTFE, ενώ η φαινομενική πίεση είναι 3.3 φορές μεγαλύτερη. Δεδομένου ότι οι επιβαλλόμενες κινήσεις ήταν ίδιες, η ροή θερμότητας στη δοκιμή του σύνθετου υλικού ήταν περίπου 1.7 φορές περισσότερη σε σχέση με τη δοκιμή του μη-εμπλουτισμένου με ίνες υάλου PTFE. Ωστόσο, οι μετρήσεις της αύξησης της θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου που ήταν ενσωματωμένο στην ανοξειδωτή χαλύβδινη πλάκα ήταν αρκετά μικρότερη από αυτή που καταγράφηκε, για ίδιες κινήσεις, στη δοκιμή του μη-εμπλουτισμένου με ίνες υάλου PTFE. Επομένως, έπρεπε να υπήρχε μια ουσιαστική ροή θερμότητας προς το σύνθετο υλικό, ενώ στην περίπτωση του μη-εμπλουτισμένου με ίνες υάλου PTFE σχεδόν όλη η παραγόμενη θερμότητα παρεχόταν στην ανοξειδωτή χαλύβδινη επιφάνεια. Ο κύριος λόγος για αυτό πρέπει να ήταν το πολύ μικρό πάχος του σύνθετου υλικού. Είναι προφανές ότι η επίδραση της θερμοκρασίας για υλικά μεγαλύτερου πάχους είναι μεγαλύτερη από αυτή που φαίνεται στα Σχήματα 4.11 έως 4.13.

4.6.4 Επίδραση Της Συνολικής Κίνησης Διαδρομής

Μια ανασκόπηση στη βιβλιογραφία για την επίδραση της συνολικής κίνησης στο συντελεστή τριβής διεπιφανειών PTFE-ανοξειδωτου χάλυβα οδηγεί σε αντικρουόμενα συμπεράσματα. Η αναφορά των Campbell και Kong (1987) δείχνει μια ουσιαστική αύξηση της χαμηλής ταχύτητας τριβής με τη συνολική κίνηση, περίπου 300% αύξηση για κίνηση πάνω από 20km. Τα αποτελέσματα αυτής της αναφοράς αφορούν λειασμένα εφάδρανα γερμανικής προέλευσης.

Ωστόσο, πιο πρόσφατα αποτελέσματα πειραμάτων (Campbell et al. (1991)) από μη-εμπλουτισμένα PTFE σε επαφή με στιλπνό ανοξειδωτο χάλυβα για διάφορες φαινομενικές πιέσεις και θερμοκρασίες δείχνουν αξιοσημείωτες αυξήσεις στην τριβή χαμηλής ταχύτητας μετά από σύντομη κίνηση. Οι δοκιμές διεξήχθησαν με δοκίμια διαμέτρου 75mm χρησιμοποιώντας περιοδική σταθερή κίνηση εύρους 12.5mm και ταχύτητας 1mm/s. Τυπικά, ο συντελεστής τριβής ξεκινά με μια μεγάλη τιμή (*breakaway value*), έπειτα μειώνεται και παραμένει σταθερός μέχρι συνολική κίνηση περίπου 10m και έπειτα αυξάνεται.

Διεξήχθησαν δοκιμές για την επίδραση της συνολικής κίνησης στην τριβή με περιοδική σταθερή κίνηση ταχύτητας 0.8mm/s για κίνηση περίπου 260m, ακολουθούμενη από κίνηση ταχύτητας 2.4mm/s για επιπρόσθετη κίνηση περίπου 240m. Πρώτα διεξήχθησαν δοκιμές για σύνθετα PTFE. Η φαινομενική πίεση των εφεδράνων ήταν 69MPa. Στο Σχήμα 4.14 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.14: Επίδραση της Συνολικής Κίνησης στο Συντελεστή Τριβής Ολίσθησης Σύνθετων PTFE σε επαφή με Στιλπνό Ανοξειδωτο Χάλυβα

Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι ο συντελεστής τριβής ολίσθησης για πολύ χαμηλές ταχύτητες και για κάποια αντιπροσωπευτική υψηλή ταχύτητα μειώνεται με αύξηση της συνολικής κίνησης και εμφανίζεται σταθερός μετά από κίνηση 500m. Συγκεκριμένα, η υψηλή ταχύτητα (f_{max}) ξεκινά περίπου με τιμή 0.075 και σταθεροποιείται περίπου σε τιμή 0.052, δηλαδή, η μείωση είναι περίπου 30%.

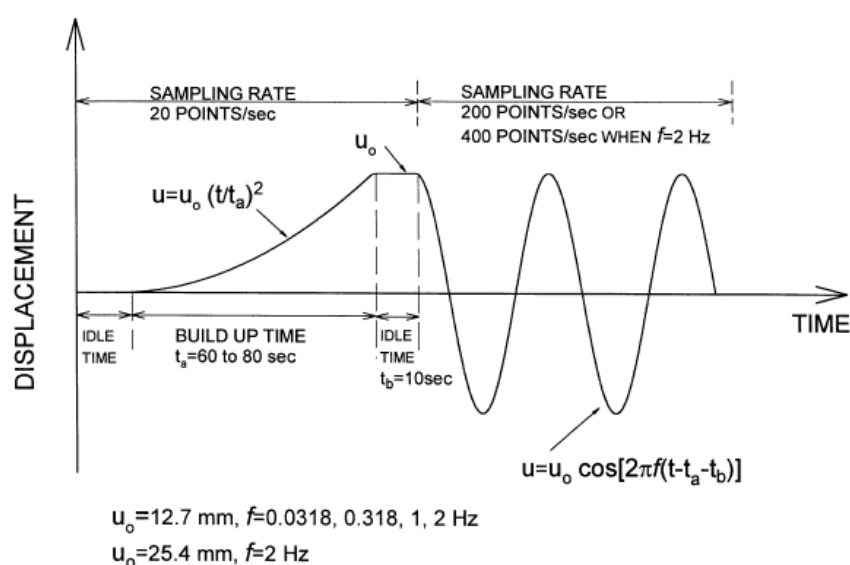
Συνοψίζοντας, τα διαθέσιμα δεδομένα για την τριβή χαμηλής ταχύτητας μη εμπλουτισμένων PTFE με ίνες υάλου σε επαφή με ανοξείδωτο χάλυβα είναι είτε γερμανικής προέλευσης και δείχνουν μια μέτρια αύξηση για κίνηση πάνω από 2km είτε είναι αγγλικής προέλευσης (Long, 1969) και δείχνουν μια μείωση για κίνηση πάνω από 5km. Είναι πιθανό ότι η διαφορά οφείλεται στις διαφορές στην τραχύτητα και στη σύνθεση των χρησιμοποιούμενων ανοξείδωτων χαλύβδινων πλακών.

Είναι πιθανό ότι η τριβή υψηλής ταχύτητας αυξάνεται πέρα από την τιμή εκκίνησης μετά από περίπου 1 με 2km συνολικής κίνησης. Αν αποδεχούμε ότι η τάση για την τριβή υψηλής ταχύτητας είναι η ίδια με αυτή για την τριβή χαμηλής ταχύτητας, αναμένουμε μια αύξηση περίπου 20% για την τριβή υψηλής ταχύτητας μετά από κίνηση περίπου 2km. Η θεώρηση αυτή βασίζεται σε αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών γερμανικής προέλευσης (Kauschke and Baigent, 1986).

Συγκεκριμένα φαινόμενα παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια δοκιμών τα οποία είναι ενδιαφέροντα να αναφερθούν. Στη δοκιμή μη εμπλουτισμένων με ίνες υάλου PTFE παρατηρήθηκε ότι, μετά από κίνηση 0.5km, η επιφάνεια των PTFE συγκρατούσε πολύ μικρά σκούρα σωματίδια, τα οποία θα μπορούσαν να αφαιρεθούν ξύνοντας την επιφάνεια. Πιστεύεται ότι αυτά ήταν είτε λεπτά χαλύβδινα σωματίδια που αφαιρέθηκαν από τη χαλύβδινη επιφάνεια με την τριβή ή κατάλοιπα του λειαντικού μέσου που χρησιμοποιήθηκε για τη λείανση της πλάκας, ή και τα δύο. Είναι πιθανό ότι αυτά τα σωματίδια αυξάνονται σε πυκνότητα με αύξηση της κίνησης και τελικά προκαλούν μια αύξηση στην τριβή. Το πρόβλημα θα μπορούσε να μειωθεί με τη χρήση υψηλής αντοχής και υψηλού βαθμού στιλπνότητας ανοξείδωτου χάλυβα ο οποίος θα καθαρίζεται για την αφαίρεση καταλοίπων λειαντικών μέσων.

4.6.5 Επίδραση Τραχύτητας Επιφάνειας Ανοξείδωτου Χάλυβα

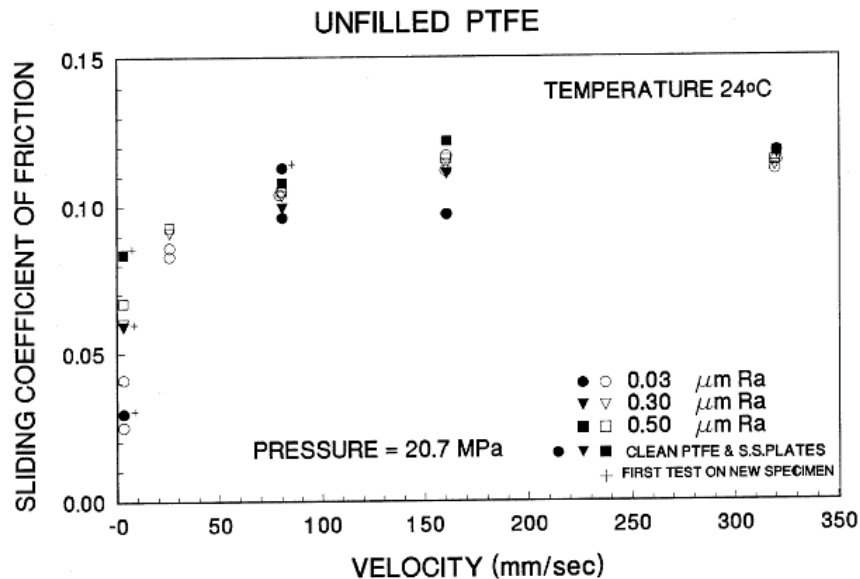
Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε PTFE μη εμπλουτισμένα με ίνες υάλου και σε σύνθετα PTFE σε επαφή με ανοξείδωτο χάλυβα (ASTM 240, type 304) με τραχύτητα επιφάνειας 0.03, 0.30 και 0.50 μm R_a . Οι δοκιμές διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας τις κινήσεις που φαίνονται στο Σχήμα 4.15. Ο χρόνος φόρτισης πριν την επιβολή της κίνησης ήταν γενικά λιγότερος από μια ώρα ενώ η θερμοκρασία στην αρχή κάθε πειράματος ήταν περίπου 24° C. Οι φαινομενικές πιέσεις στις δυο περιπτώσεις ήταν 69MPa και 20.7MPa, αντίστοιχα.



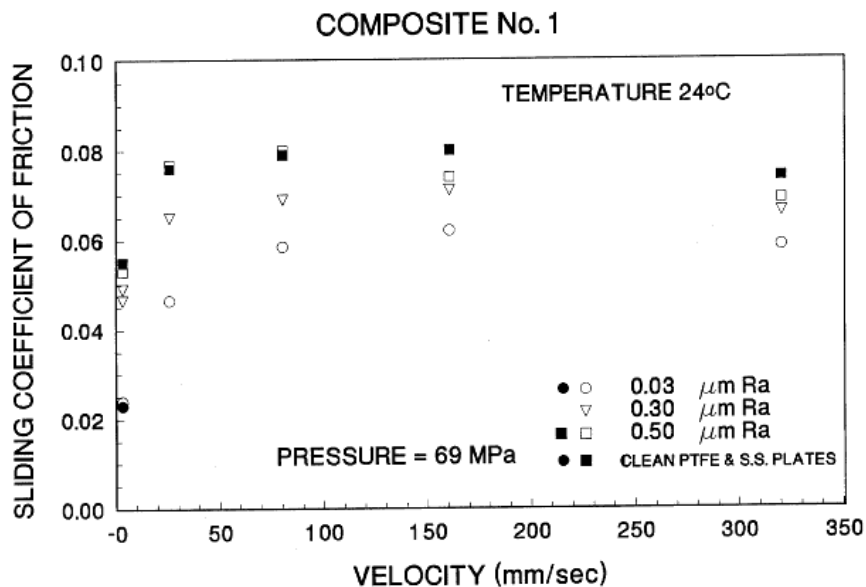
Σχήμα 4.15: Επιβαλλόμενη Ιστορία Μετακίνησης σε Δοκιμές Διεπιφανειών Ολίσθησης

Τα Σχήματα 4.16 και 4.17 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το συντελεστή τριβής ολίσθησης όπως μετρήθηκαν την πρώτη στιγμή στην οποία επιτεύχθηκε η ενδεδειγμένη ταχύτητα. Για κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις τραχύτητας, χρησιμοποιήθηκε ένα νέο δοκίμιο μη εμπλουτισμένου με ίνες υάλου PTFE. Ωστόσο, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο δοκίμιο σύνθετου PTFE σε όλες τις δοκιμές. Οι περισσότερες δοκιμές διεξήχθησαν χωρίς αποφόρτιση του δοκιμίου και χωρίς καθαρισμό της διεπιφάνειας. Δηλαδή, σε αυτές τις δοκιμές ο ανοξείδωτος χάλυβας ήταν επικαλυμμένος με PTFE από τις προηγούμενες δοκιμές. Ωστόσο, επιλεγμένες δοκιμές (ιδιαίτερα στην περίπτωση της υψηλότερης τραχύτητας) επαναλήφθηκαν αφού είχε καθαρισθεί προηγουμένως η

διεπιφάνεια. Τα αποτελέσματα για αυτές τις περιπτώσεις φαίνονται στα σχήματα με σκούρα σύμβολα, ενώ τα υπόλοιπα αποτελέσματα φαίνονται με ανοικτά σύμβολα.



Σχήμα 4.16: Επίδραση Τραχύτητας Επιφάνειας Ανοξειδωτου Χάλυβα στην Τριβή Ολίσθησης Μη Εμπλουτισμένων με Ίνες Υάλου PTFE



Σχήμα 4.17: Επίδραση Τραχύτητας Επιφάνειας Ανοξειδωτου Χάλυβα στην Τριβή Ολίσθησης Σύνθετων PTFE

Τα αποτελέσματα των Σχημάτων 4.16 και 4.17 απεικονίζουν μια αύξηση της τριβής ολίσθησης με αύξηση της τραχύτητας. Η αύξηση είναι ουσιαστική σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ολίσθησης. Αυτή η αύξηση πιθανότατα προκαλείται από:

- a) Την εισαγωγή μιας συνιστώσας της τριβής λόγω του “plowing” του PTFE από τον τραχύ ανοξείδωτο χάλυβα
- b) Τις επιδράσεις ενός αυξημένου αριθμού σωματιδίων λόγω φθοράς παγιδευμένων ανάμεσα στις επιφάνειες ολίσθησης

Αξιοσημείωτο στα Σχήματα 4.16 και 4.17 είναι ότι η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας στην τριβή ολίσθησης μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας ολίσθησης. Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα σαφές για PTFE μη εμπλουτισμένα με ίνες υάλου, για τα οποία η τριβή υψηλής ταχύτητας ολίσθησης (f_{max}) είναι σχεδόν ανεπηρέαστη από την τραχύτητα. Μια εξήγηση για αυτό το φαινόμενο σχετίζεται με την επίδραση σωματιδίων τρίτου σώματος τα οποία κυριαρχούν την τριβή σε υψηλές ταχύτητες ολίσθησης. Η επίδραση σωματιδίων τρίτου σώματος περιορίζεται, όταν η τριβή φθάνει μια σταθερή τιμή πέρα από κάποια μεγάλη ταχύτητα. Η υψηλή τραχύτητα οδηγεί στην παραγωγή περισσότερων σωματιδίων λόγω φθοράς, των οποίων, ωστόσο, οι επιδράσεις είναι μικρές για μεγάλες ταχύτητες ολίσθησης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17 η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας στην τριβή ολίσθησης των σύνθετων PTFE είναι μεγαλύτερη από αυτή των μη εμπλουτισμένων με ίνες υάλου PTFE στο εύρος των υψηλών ταχυτήτων. Τα δεδομένα εξετάστηκαν προσεκτικά για τον προσδιορισμό πιθανών συντελεστών σε αυτή την επίδραση. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε ότι τα πειράματα διεξήχθησαν σε μια περίοδο στην οποία η σχετική υγρασία στο εργαστήριο ήταν είτε περίπου 20% ή περίπου 45%. Ωστόσο, ακόμη και όταν κάποια δεδομένα αγνοήθηκαν οι επιδράσεις της τραχύτητας παρέμειναν στο ίδιο επίπεδο που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.17.

4.6.6 Διάβρωση Ανοξείδωτου Χάλυβα

Παρόλο την πληθώρα πληροφοριών για τη διάβρωση ανοξείδωτων χαλύβων, υπάρχει έλλειψη δεδομένων για συσχέτισμό διάβρωσης με τριβή και ιδιαίτερα για τριβή υψηλής ταχύτητας. Προκειμένου να παρέχουμε κάποιες ποσοτικές πληροφορίες πάνω σε αυτό το πρόβλημα πρέπει να συσχετίσουμε τις πληροφορίες για την εμφάνιση του

ανοξειδωτου χάλυβα με κάποια σχετική ποσότητα, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας. Όταν αυτό εκπληρωθεί, δεδομένα όπως αυτά των σχημάτων 4.16 και 4.17 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επίδρασης της διάβρωσης στην τριβή.

Με βάση αυτές τις υποθέσεις, κατασκευάστηκε ο Πίνακας 4.2. Παρουσιάζει υποθετικές τιμές της τραχύτητας επιφάνειας ανοξειδωτου χάλυβα τύπου 304 για διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και μεθόδους εγκατάστασης της ανοξειδωτης χαλύβδινης πλάκας. Από αυτές τις τιμές μόνο η τιμή 0.3μm υποστηρίζεται από πραγματικές μετρήσεις. Οι τιμές στον πίνακα ίσως είναι πολύ συντηρητικές. Ωστόσο, αντιπροσωπεύουν ένα σημείο εκκίνησης για την εκτίμηση των επιδράσεων της διάβρωσης στην τριβή. Επιπλέον, αντικατοπτρίζουν τις επιδράσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών και μεθόδων εγκατάστασης, όπως αυτές έχουν κατανοηθεί από τη μελέτη των μηχανισμών διάβρωσης του ανοξειδωτου χάλυβα.

Πίνακας 4.2: Προτεινόμενες Τιμές Τραχύτητας Επιφάνειας (σε μm) Ωστενιτικού Ανοξειδωτου Χάλυβα Τύπου 304 Μετά από 30 χρόνια Έκθεσης Εντός Μη Λειασμένων Εφεδράνων Ολίσθησης

Environment	Installation Method of Stainless Steel Plate in Sliding Bearing			
	Sealed Facing Down	Sealed Facing Up	Unsealed Facing Down	Unsealed Facing Up
Rural	0.10	0.30	0.30	Unacceptable* Installation
Industrial/ Urban	<u>0.30</u>	0.40	0.40	Unacceptable Installation
Marine	0.40	0.50	0.50	Unacceptable Installation
Industrial/ Chemical	0.50	>0.50	>0.50	Unacceptable Installation

*Η μέθοδος εγκατάστασης είναι μη αποδεκτή λόγω ενδεχομένου σημαντικής μόλυνσης

Βάση της πρότασης στον Πίνακα 4.2 και των τιμών τριβής των Σχημάτων 4.16 και 4.17, κατασκευάστηκε ο Πίνακας 4.3. Ο πίνακας αυτός παρουσιάζει προτεινόμενους συντελεστές για αύξηση της τριβής υψηλής ταχύτητας (f_{max}) μη λειασμένων και μη εμπλουτισμένων με ίνες υάλου PTFE και σύνθετων PTFE σε επαφή με ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα τύπου 304 μετά από 30 χρόνια έκθεσης σε διάφορα είδη περιβάλλοντος. Στην άφιξη αυτών των συντελεστών, έγινε χρήση των δεδομένων στα

Σχήματα 4.16 και 4.17 για ταχύτητες περίπου 75mm/s. Ο συντελεστής πρέπει να είναι μικρότερος (κοντά στη μονάδα) για ταχύτητες που υπερβαίνουν τα 75mm/s.

Ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας τύπου 316 επιδεικνύει αντοχή στη διάβρωση πολύ ανώτερη από αυτή του ανοξείδωτου χάλυβα τύπου 304. Αναλόγως, οι συντελεστές για την προσαρμογή της τριβής για τις επιδράσεις της διάβρωσης θα έπρεπε να είναι μικρότεροι από αυτούς του Πίνακα 4.3. Ως σημείο εκκίνησης πρέπει να υποθέσουμε τιμές οι οποίες είναι ο μέσος όρος των τιμών του Πίνακα 4.3 και της μονάδας (για παράδειγμα, συντελεστής ίσος με 1.20 για τύπο 304 και συντελεστής ίσος με 1.10 για τύπο 316).

Πίνακας 4.3: Προτεινόμενοι Συντελεστές για Αύξηση του Συντελεστή Τριβής για Υψηλή Ταχύτητα Ολίσθησης (f_{max}) Μη Λειασμένων και Μη Εμπλουτισμένων με Ίνες Υάλου PTFE και Σύνθετων PTFE Σε Επαφή με Ωστενιτικό Ανοξείδωτο Χάλυβα Τύπου 304 Μετά Από 30 Χρόνια Έκθεσης σε Διάφορα Είδη Περιβάλλοντος

Environment	Installation Method of Stainless Steel Plate in Sliding Bearing		
	Sealed Facing Down	Sealed Facing Up	Unsealed Facing Down
Rural	1.10	<u>1.20</u>	<u>1.20</u>
Industrial/Urban	<u>1.20</u>	1.30	1.30
Marine	1.30	<u>1.40</u>	<u>1.40</u>
Industrial/Chemical	<u>1.40</u>	>1.40	>1.40

Οι υπογραμμισμένες τιμές βασίζονται σε πραγματικά μετρημένες τιμές τριβής για ταχύτητα 75mm/s. Ο συντελεστής είναι μικρότερος (κοντά στη μονάδα) για ταχύτητες που υπερβαίνουν τα 75mm/s.

4.6.7 Επίδραση Της Μόλυνσης

Η μόλυνση της διεπιφάνειας ολίσθησης είναι γνωστό ότι προκαλεί μια αύξηση στην τριβή. Ένας αριθμός πειραματικών μελετών έχουν τεκμηριώσει το φαινόμενο αυτό, το οποίο προφανώς προκαλείται από την εισαγωγή μιας πρόσθετης συνιστώσας της τριβής λόγω επιδράσεων τρίτου σώματος και λόγω εκδοράς του ανοξείδωτου χάλυβα.

Η μόλυνση έχει σημαντικές επιδράσεις στην τριβή, όταν εισάγεται τεχνητά στη διεπιφάνεια ολίσθησης. Ενώ για τα εφέδρανα που δεν έχουν λιπανθεί με κάποια λιπαντική ουσία η επίδραση αυτή έχει μετρηθεί σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ολίσθησης ή υπό συνθήκες στατικής τριβής, είναι πιθανό ότι μεγάλες αυξήσεις στην τριβή θα συμβούν επίσης και σε μεγάλες ταχύτητες ολίσθησης. Διαισθητικά, περιμένουμε η αύξηση στην τριβή σε υψηλή ταχύτητα ολίσθησης μολυσμένων διεπιφανειών ολίσθησης PTFE-ανοξειδωτού χάλυβα που δεν έχουν λιπανθεί με κάποια λιπαντική ουσία να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη αύξηση στην τριβή σε χαμηλή ταχύτητα ολίσθησης. Ο λόγος είναι ότι η σημαντική συνεισφορά του τρίτου σώματος στην τριβή από τους ρύπους είναι κάπως μικρότερη σε υψηλές ταχύτητες λόγω της μεγάλης συνεισφοράς του τρίτου σώματος στην τριβή από τα συσσωματώματα των συντριμμάτων των PTFE. Παρ' όλα αυτά, η αύξηση αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από τις άλλες επιδράσεις, όπως φθορά, θερμοκρασία, διάβρωση, κλπ.

Η μόλυνση της διεπιφάνειας ολίσθησης είναι πιθανή όταν τα εφέδρανα έχουν αποσυναρμολογηθεί στη θέση κατασκευής. Αυτό είναι ένα πρόβλημα το οποίο μπορεί να προληφθεί πραγματοποιώντας ελέγχους ποιότητας στη θέση κατασκευής. Τα εφέδρανα ολίσθησης θα έπρεπε να παραδίδονται συναρμολογημένα, ελαφρώς προσυμπιεσμένα και κλειδωμένα από πλευρικές πλάκες.

Αποτελέσματα πειραμάτων (Campbell and Fatemi (1989), Campbell et al. (1993), Long (1969)) αποδεικνύουν ότι η μόλυνση της διεπιφάνειας ολίσθησης των εφεδράνων ολίσθησης σε λειτουργία είναι απίθανη, ακόμη και με παρουσία σημαντικής εκκεντρότητας φορτίου. Παρ' όλα αυτά, θα ήταν συνετό να υποθέσουμε κάποια μικρή αύξηση στην τριβή λόγω της μόλυνσης κατά τη λειτουργία η οποία εξαρτάται από τη μέθοδο εγκατάστασης της επιφάνειας του ανοξειδωτού χάλυβα. Για παράδειγμα, αν η επιφάνεια του ανοξειδωτού χάλυβα τοποθετηθεί στραμμένη προς τα πάνω, πιθανόν να συγκεντρώσει με την πάροδο των ετών κάποια μόλυνση, η οποία ίσως μεταφερθεί στη διεπιφάνεια ολίσθησης κατά τη διάρκεια της κίνησης του εφεδράνου υπό τη δράση των μόνιμων φορτίων.

4.6.8 Επίδραση Της Λίπανσης

Η λίπανση της διεπιφάνειας PTFE-ανοξειδωτού χάλυβα μειώνει το συντελεστή τριβής. Η λιπαντική ουσία, τυπικά στη μορφή γράσου, αποθηκεύεται σε λακκάκια υπό υδροστατική πίεση από όπου εξωθείται στη διεπιφάνεια ολίσθησης. Τα λακκάκια είναι σημαντικά για την παράταση της ενεργού ζωής της λιπαντικής ουσίας (Campbell and Kong, 1987). Τα λακκάκια καλύπτουν περίπου το 30% της επιφάνειας επαφής. Το γράσο αποτελείται κυρίως από λάδι ή κάποιο συνθετικό υγρό (περίπου 80% ή περισσότερο), ένα παράγοντα πυκνώσης (τυπικά σαπούνι σε ποσοστό περίπου 10%) και πρόσθετα (αντιοξειδωτικά, αντιδιαβρωτικοί παράγοντες, κλπ σε ποσοστό λιγότερο από 10%).

Στις διεπιφάνειες PTFE-ανοξειδωτού χάλυβα που δεν έχουν λιπανθεί με κάποια λιπαντική ουσία, η τριβή σε χαμηλής ταχύτητας ολίσθηση είναι κυρίως το αποτέλεσμα διάτμησης στις συνδέσεις. Επιπλέον, σε υψηλή ταχύτητα ολίσθησης σημαντικές συνεισφορές στην τριβή ολίσθησης παρέχονται από επιδράσεις τρίτου σώματος και την ιξωδοελαστική παραμόρφωση του PTFE. Για αυτές τις διεπιφάνειες είναι επίσης πιθανό η πραγματική επιφάνεια επαφής να είναι ίση με την φαινομενική επιφάνεια επαφής.

Παρά τις σημαντικές επιδράσεις της χαμηλής θερμοκρασίας και της υψηλής τραχύτητας, ο συντελεστής τριβής ολίσθησης εφεδράνων PTFE που έχουν λιπανθεί με κάποια λιπαντική ουσία είναι χαμηλός. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.4 που ακολουθεί, οι τιμές του συντελεστή είναι γενικά μικρότερες από 0.04. Αυτό θα ήταν μια πολύ καλή επίδοση των εφεδράνων που έχουν λιπανθεί με κάποια λιπαντική ουσία αν ήταν δυνατό να διατηρηθεί η λιπαντική ουσία στην αρχική της κατάσταση. Είναι γνωστό ότι οι λιπαντικές ουσίες που χρησιμοποιούνται σε εφέδρανα PTFE σκληραίνουν με το χρόνο και η αναπλήρωση της λιπαντικής ουσίας είναι εξαιρετικά δύσκολη (Campbell and Kong (1987), Kauschke and Baigent (1986)).

Πίνακας 4.4: Συντελεστής Τριβής Ολίσθησης Διεπιφανειών Μη-Εμπλουτισμένων με ίνες υάλου PTFE που δεν έχουν λιπανθεί με λιπαντική ουσία- Ανοξείδωτου Χάλυβα Μετά από 50 Κύκλους Κίνησης και Ταχύτητας 20mm/s (Campbell and Kong, 1989)

Apparent Pressure (MPa)	Surface Roughness of Stainless Steel ($\mu\text{m R}_a$)	Coefficient of Sliding Friction	
		Temp. 20° C	Temp. -25° C
10	0.03	0.0064	0.0290
15		0.0028	0.0223
25		0.0035	0.0230
30		0.0044	0.0238
45		0.0030	0.0163
10	0.34	0.0310	0.0434
15		0.0233	0.0365
25		0.0136	0.0370
30		0.0107	0.0212
45		0.0078	0.0209

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Οι πληροφορίες που παρατίθενται στο κεφάλαιο αυτό βασίζονται στην έκθεση (Technical Report MCEER-99-0012) “Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings” των Constantinou M.C., Tsopelas P., Kasalanati A. and Wolff E.D. [9].

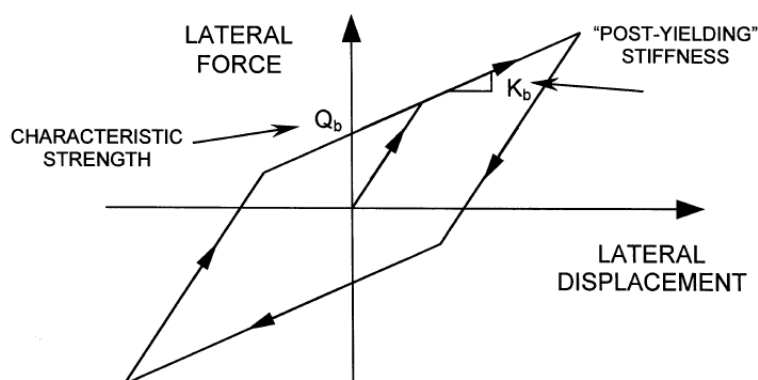
5.1 Εισαγωγή

Η πρόβλεψη της δυναμικής απόκρισης και του σχεδιασμού σεισμικά μονωμένων κατασκευών βασίζεται προς στιγμήν σε πειράματα προσφάτως κατασκευασμένων εφεδράνων σεισμικής μόνωσης. Συχνά οι συνθήκες στις οποίες ίσως βρίσκονται τα εφέδρανα μετά από μερικά χρόνια επισκευής, δε λαμβάνονται υπόψη στον αρχικό σχεδιασμό. Δηλαδή, η επίδραση των αλλαγών των μηχανικών ιδιοτήτων των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης στην απόκριση των μονωμένων κατασκευών τυπικά αμελείται. Ωστόσο, σε μερικές εργασίες αυτές οι επιδράσεις έχουν ληφθεί υπόψη είτε βάση παραδοχών είτε βάση περιορισμένων πειραμάτων. Πρέπει να αναφερθεί ότι αυτές οι θεωρήσεις δε βασίζονται σε συστηματική ανάλυση των πιθανών συνθηκών των εφεδράνων και ότι τα πειράματα δεν αξιολογούν αληθώς τις πιθανές συνθήκες των εφεδράνων. Δηλαδή, η τρέχουσα κατάσταση πρακτικής είτε αμελεί εντελώς πιθανές αλλαγές των ιδιοτήτων των εφεδράνων μόνωσης ή θεωρεί αλλαγές με ένα μη-συστηματικό και αισιόδοξο τρόπο.

Ο σχεδιασμός μονωμένων κατασκευών απαιτεί ανάλυση με χρήση ορίων των τιμών των ιδιοτήτων των συστημάτων σεισμικής μόνωσης. Ο προσδιορισμός αυτών των οριακών τιμών απαιτεί θεώρηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων (για παράδειγμα, θερμοκρασία), της ιστορίας φόρτισης, της ηλικίας, κλπ, και θεώρηση της πιθανότητας αυτές οι επιδράσεις να συμβούν ταυτόχρονα με το σεισμό σχεδιασμού. Μερικές από αυτές τις επιδράσεις μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν με πειράματα (όπως για παράδειγμα, η επίδραση της θερμοκρασίας), ενώ άλλες είναι εξαιρετικά δύσκολο να εκτιμηθούν. Για παράδειγμα, η επίδραση της ηλικίας σε εφέδρανα σεισμικής μόνωσης δε μπορεί εύκολα να προβλεφθεί, ούτε υπάρχει ένα απλό πείραμα που μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για αυτές τις επιδράσεις. Ο πιο ασφαλής οδηγός για τα

χαρακτηριστικά της ηλικίας ενός συγκεκριμένου εφεδράνου σεισμικής μόνωσης είναι η προγενέστερη εμπειρία. Επιπλέον, ο προσδιορισμός των οριακών τιμών των ιδιοτήτων των συστημάτων σεισμικής μόνωσης απαιτεί την κατανόηση της προέλευσης των επιδράσεων ώστε να προσδιοριστούν οι συντελεστές για την τροποποίηση των ιδιοτήτων των μονωτήρων που αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες κατασκευής, εγκατάστασης και περιβάλλοντος.

Οι ιδιότητες των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης ποικίλουν λόγω των επιδράσεων της φθοράς, της ηλικίας, της θερμοκρασίας, της ιστορίας φόρτισης, κλπ. Η ακριβής κατάσταση των εφεδράνων τη στιγμή της σεισμικής διέγερσης δε μπορεί να είναι γνωστή. Ωστόσο, είναι πιθανό να καθιερωθούν πιθανές μέγιστες και ελάχιστες τιμές των σημαντικών ιδιοτήτων (όπως, χαρακτηριστική αντοχή και δυσκαμψία μετά τη διαρροή, βλέπε Σχήμα 5.1) εντός της διάρκειας ζωής της κατασκευής. Η ανάλυση μπορεί τότε να διεξαχθεί δύο φορές χρησιμοποιώντας τις οριακές τιμές των ιδιοτήτων. Γενικά, η μέγιστη δύναμη και η μέγιστη μετατόπιση μπορεί να αποκτηθεί σε αυτές τις αναλύσεις.



Σχήμα 5.1: Εξιδανικευμένη Σχέση Δύναμης-Μετατόπισης ενός Τυπικού Εφεδράνου Σεισμικής Μόνωσης

Κατ' αρχήν, οι πιθανές μέγιστες και ελάχιστες τιμές των ιδιοτήτων μπορούν να προσδιοριστούν βάσει των στατιστικών αναλύσεων της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων και της πιθανότητας εμφάνισης σχετικών γεγονότων, συμπεριλαμβανομένου και αυτής της σεισμικής διέγερσης που έχει θεωρηθεί. Αυτό είναι ένα ομολογουμένως δύσκολο πρόβλημα. Ωστόσο, είναι σχετικά ευκολότερο να αξιολογήσει κανείς την επίδραση ενός συγκεκριμένου φαινομένου στις ιδιότητες ενός επιλεγμένου τύπου εφεδράνου, είτε εκτελώντας πειράματα (για παράδειγμα, επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή

τριβής των εφεδράνων ολίσθησης) είτε με ένα συνδυασμό εκτέλεσης πειραμάτων, ορθολογιστικής ανάλυσης και κρίσης του μηχανικού (για παράδειγμα, επίδραση της ηλικίας). Αυτό οδηγεί στην καθιέρωση συντελεστών τροποποίησης ιδιοτήτων του συστήματος σεισμικής μόνωσης, δηλαδή, συντελεστών οι οποίοι ποσοτικοποιούν την επίδραση ενός συγκεκριμένου φαινομένου στις ονομαστικές ιδιότητες ενός εφεδράνου μόνωσης.

Οι συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων του συστήματος σεισμικής μόνωσης, γνωστοί ως συντελεστές λ , καθορίζουν τα άνω και κάτω όρια των τιμών των ιδιοτήτων των εφεδράνων της σεισμικής μόνωσης. Οι συντελεστές λ αντιπροσωπεύουν την επίδραση της ιστορίας φόρτισης, των περιβαλλοντικών συνθηκών και της ηλικίας στις ιδιότητες των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης. Ενώ φαίνεται ότι αυτοί οι συντελεστές μπορούν να προσδιοριστούν από πειράματα, η διαδικασία απαιτεί πολύ καλή γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς των εφεδράνων τόσο σε μακροσκοπικό όσο και σε μικροσκοπικό επίπεδο.

5.2 Η Έννοια Των Συντελεστών Τροποποίησης Των Ιδιοτήτων Συστήματος Σεισμικής Μόνωσης

Θεωρούμε ότι η ονομαστική τιμή μιας ιδιότητας ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης είναι γνωστή. Η τιμή αυτή θεωρείται (βάσει εμπειρίας προηγούμενων πειραμάτων) κατά τη διάρκεια της φάσης ανάλυσης και σχεδιασμού της εργασίας ή προσδιορίζεται στην πρωτότυπη δοκιμή του εφεδράνου. Τυπικά, αυτή η ονομαστική τιμή ισχύει για συγκεκριμένες συνθήκες, όπως συνθήκες νέου εφεδράνου, θερμοκρασία 20° C και σχετικές συνθήκες κατακόρυφης φόρτισης, συχνότητας, ταχύτητας, παραμόρφωσης και μετακίνησης. Έστω ότι η τιμή αυτή είναι η P_n .

Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της ιδιότητας αυτής, P_{min} και P_{max} αντίστοιχα, ορίζονται ως το γινόμενο των ονομαστικών τιμών και μιας σειράς συντελεστών τροποποίησης των ιδιοτήτων των συστημάτων μόνωσης, γνωστοί ως συντελεστές λ , ως ακολούθως:

$$P_{max} = \lambda_{max} \cdot P_n \quad (5.1)$$

$$P_{min} = \lambda_{min} \cdot P_n \quad (5.2)$$

Όπου:

$$\lambda_{\max} = \lambda_{\max,1} \cdot \lambda_{\max,2} \cdot \lambda_{\max,3} \cdot \dots \quad (5.3)$$

$$\lambda_{\min} = \lambda_{\min,1} \cdot \lambda_{\min,2} \cdot \lambda_{\min,3} \cdot \dots \quad (5.4)$$

Καθένας από τους συντελεστές $\lambda_{\max,i}$, $i=1,2,3,..$ είναι μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδας, ενώ καθένας από τους συντελεστές $\lambda_{\min,i}$, $i=1,2,3,..$ είναι μικρότερος ή ίσος της μονάδας. Επιπλέον, καθένας από τους συντελεστές λ σχετίζεται με διαφορετική παράμετρο του συστήματος μόνωσης, όπως φθορά, μόλυνση, ηλικία, ιστορία φόρτισης, θερμοκρασία, κλπ.

Για παράδειγμα, θεωρούμε την επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή τριβής ενός εφεδράνου ολίσθησης. Η διακύμανση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής της κατασκευής καθορίστηκε αρχικά για μια συγκεκριμένη τοποθεσία ή γενική γεωγραφική περιοχή του έργου. Η διακύμανση αυτή δε χρειάζεται να είναι μία από τις ακραίες θερμοκρασίες (χαμηλότερη και υψηλότερη). Προτιμότερο είναι να είναι μια αντιπροσωπευτική διακύμανση καθορισμένη από τον αρμόδιο επαγγελματία (πιο σωστά, η διακύμανση αυτή πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στις ισχύουσες προδιαγραφές). Ας πούμε ότι αυτή η διακύμανση της θερμοκρασίας είναι -10°C έως 50°C . Η δοκιμή τότε εκτελείται στις δύο θερμοκρασίες και οι συντελεστές λ καθιερώνονται ως ο λόγος του συντελεστή τριβής στη δοκιμαζόμενη θερμοκρασία προς το συντελεστή τριβής στη θερμοκρασία αναφοράς (ας πούμε 20°C). Ο συντελεστής $\lambda_{\min,t}$ θα βασίζεται σε δεδομένα για την υψηλότερη θερμοκρασία (50°C), ενώ ο συντελεστής $\lambda_{\max,t}$ θα βασίζεται σε δεδομένα για τη χαμηλότερη θερμοκρασία (-10°C).

Ως ένα άλλο παράδειγμα, θεωρούμε την επίδραση της φθοράς στο συντελεστή τριβής. Βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας γέφυρας (άνοιγμα, βάθος δοκού, κλπ), μέσο ποσοστό διέλευσης οχημάτων και διάρκεια ζωής της κατασκευής, προσδιορίζεται η συνολική κίνηση. Δεδομένα πειράματος χρησιμοποιούνται τότε για να προσδιοριστούν οι συντελεστές λ λόγω φθοράς. Τυπικά, ο συντελεστής $\lambda_{\max,tr}$ είναι ο λόγος του συντελεστή τριβής προσδιορισμένου σε υψηλής ταχύτητας δοκιμή μετά και πριν μιας δοκιμής στην κατάλληλη ταχύτητα (περίπου 1mm/sec) για μια συνολική μετακίνηση ισοδύναμη με την υπολογιζόμενη συνολική κίνηση. Ο συντελεστής $\lambda_{\min,tr}$ προσδιορίζεται με παρόμοιο τρόπο αλλά για μια συνολική μετακίνηση μικρότερη από

την υπολογιζόμενη συνολική κίνηση για την οποία ο συντελεστής τριβής φθάνει την ελάχιστη τιμή του.

5.3 Συντελεστές Προσαρμογής Ιδιοτήτων Συστήματος Σεισμικής Μόνωσης

Οι συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων συστήματος σεισμικής μόνωσης συνδέονται με διαφορετικές ιδιότητες του συστήματος μόνωσης. Ενώ κάθε ένας από αυτούς τους συντελεστές περιγράφει τη διακύμανση της επίδρασης μιας συγκεκριμένης ιδιότητας, ο πολλαπλασιασμός τους οδηγεί σε ένα συνδυασμένο συντελεστή του οποίου η τιμή μπορεί να είναι πολύ συντηρητική. Δηλαδή, η πιθανότητα ότι διάφορα γεγονότα (όπως η χαμηλότερη θερμοκρασία, η μέγιστη φθορά, η μέγιστη διάβρωση, κλπ) θα συμβούν ταυτόχρονα με το σεισμό σχεδιασμού είναι πολύ μικρή.

Είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί μια προσαρμογή των συντελεστών τροποποίησης των ιδιοτήτων του συστήματος, η οποία να αντανακλά τον επιθυμητό βαθμό συντηρητισμού. Αυτή η προσαρμογή πρέπει να βασίζεται σε μια στατιστική ανάλυση της μεταβολής των ιδιοτήτων με το χρόνο, την πιθανότητα της εμφάνισης κοινών γεγονότων και της σπουδαιότητας της κατασκευής. Είναι επίσης επιθυμητό να εφαρμόζεται αυτή η προσαρμογή με τον απλούστερο δυνατό τρόπο.

Τέτοια διαδικασία βασίζεται σε συντελεστές προσαρμογής ιδιοτήτων συστήματος, α , τέτοιοι που οι προσαρμοσμένες τιμές των συντελεστών λ δίνονται από:

$$adjusted \lambda_{\max} = 1 + (\lambda_{\max} - 1) \cdot \alpha \quad (5.5)$$

$$adjusted \lambda_{\min} = 1 + (1 - \lambda_{\min}) \cdot \alpha \quad (5.6)$$

Δηλαδή, ο συντελεστής προσαρμογής ιδιοτήτων πολλαπλασιάζεται με την ποσότητα από την οποία ο συντελεστής λ διαφέρει από τη μονάδα και το αποτέλεσμα προστίθεται στη μονάδα ώστε να αποδώσει τον προσαρμοσμένο συντελεστή λ . Είναι προφανές ότι ο συντελεστής προσαρμογής μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η τιμή $\alpha=0$ οδηγεί σε ένα προσαρμοσμένο συντελεστή ίσο με τη μονάδα (δηλαδή, η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων αμελείται – η λιγότερο συντηρητική προσέγγιση). Η τιμή $\alpha=1$ οδηγεί σε μη προσαρμογή (δηλαδή, θεωρείται ότι οι μέγιστες μεταβλητότητες συμβαίνουν ταυτόχρονα – η πιο συντηρητική προσέγγιση).

5.4 Προτεινόμενοι Συντελεστές Τροποποίησης Ιδιοτήτων Εφεδράνων Ολίσθησης

Οι συντελεστές ισχύουν για ονομαστικές τιμές των συντελεστών τριβής κάτω από συνθήκες σχετικότητας στη δυναμική ανάλυση σεισμικά μονωμένων γεφυρών (δηλαδή, συνθήκες κίνησης υψηλής ταχύτητας). Οι προτεινόμενες τιμές παρουσιάζονται σε πίνακες για μια διακύμανση συνθηκών σχετικές με το περιβάλλον, της συνθήκες λειτουργίας, τις λεπτομέρειες εγκατάστασης και τα υλικά.

Σε αυτούς τους πίνακες προσδιορίζονται οι διεπιφάνειες τριών υλικών:

- a) PTFE χωρίς λιπαντική ουσία. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει διεπιφάνειες χωρίς λιπαντική ουσία αποτελούμενες από υψηλά γυαλισμένο ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα σε επαφή με PTFE ή παρόμοια σύνθετα υλικά (όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε εφέδρανα ολίσθησης).
- b) PTFE με λιπαντική ουσία. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει διεπιφάνειες με λιπαντική ουσία αποτελούμενες από υψηλά γυαλισμένο ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα σε επαφή με PTFE μη-εμπλουτισμένα με ίνες υάλου. Η λίπανση εφαρμόζεται με γράσο, το οποίο αποθηκεύεται σε λακκάκια.
- c) Διμεταλλικές διεπιφάνειες. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει διεπιφάνειες αποτελούμενες από ανοξείδωτο χάλυβα σε επαφή με μπρούτζο (ή παρόμοια μέταλλα και κράματα) και χωρίς ή με συμπαγή λιπαντικά όπως ο γραφίτης, ο μόλυβδος, PTFE, κλπ. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της διεπιφάνειας είναι η διμεταλλική επαφή, η οποία μπορεί να επηρεάζεται σημαντικά από κινητό φορτίο. Επιπλέον, αυτή η διεπιφάνεια δεν περιλαμβάνει ανόμοια μέταλλα, τα οποία ενισχύουν πρόσθετη διάβρωση όπως ο άνθρακας και ευτελές κράμα χάλυβα σε επαφή με κράματα χαλκού. Υπάρχει η πεποίθηση ότι τέτοια κράματα πρέπει να αποφεύγονται.

5.4.1 Επίδραση Της Ηλικίας

Η διάβρωση των επιφανειών επαφής, η οποία είναι αποτέλεσμα χρήσης ακατάλληλων υλικών παρουσία διαρροής αρμών διαστολής, ίσως είναι ο κύριος παράγοντας για την ανάπτυξη της αντίληψης μεταξύ πολλών μηχανικών ότι τα εφέδρανα ολίσθησης παρουσιάζουν άσχημα χαρακτηριστικά με την ηλικία.

Για διεπιφάνειες από ανοξείδωτο χάλυβα-PTFE, είτε με λιπαντική ουσία είτε όχι, οι προτεινόμενοι συντελεστές βασίζονται σε δεδομένα της επίδρασης της τραχύτητας της επιφάνειας στο συντελεστή τριβής. Όταν δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα (βλέπε Πίνακα 5.1), κατάλληλες τιμές θεωρούνται βάσει της κρίσης του μηχανικού.

Πίνακας 5.1: Προτεινόμενοι Συντελεστές για Αύξηση του Συντελεστή Τριβής Υψηλής Ταχύτητας Ολίσθησης (f_{max}) PTFE Μη-Εμπλουτισμένων Με Ίνες Υάλου και Χωρίς Λιπαντική Ουσία και Σύνθετων PTFE Σε Επαφή Με Ανοξείδωτο Ωστενιτικό Χάλυβα Τύπου 304 Μετά Από 30 Χρόνια Έκθεσης Σε Διάφορα Είδη Περιβάλλοντος

Environment	Installation Method of Stainless Steel Plate in Sliding Bearing		
	Sealed Facing Down	Sealed Facing Up	Unsealed Facing Down
Rural	1.10	<u>1.20</u>	<u>1.20</u>
Industrial/ Urban	<u>1.20</u>	1.30	1.30
Marine	1.30	<u>1.40</u>	<u>1.40</u>
Industrial/ Chemical	<u>1.40</u>	>1.40	>1.40

Οι υπογραμμισμένες τιμές βασίζονται σε πραγματικά μετρημένες τιμές τριβής σε ταχύτητα 75mm/s. Ο συντελεστής είναι κοντά στη μονάδα για ταχύτητες που υπερβαίνουν τα 75mm/s.

Για διμεταλλικές διεπιφάνειες, οι προτεινόμενοι συντελεστές βασίζονται σε δεδομένα της επίδρασης του χρόνου φόρτισης μετά από προσαρμογή για τις πιθανές επιδράσεις της διάβρωσης.

Οι προτεινόμενες τιμές για το συντελεστή λ_{max} για την επίδραση της ηλικίας, συμβολίζεται ως $\lambda_{max,a}$ και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Ο συντελεστής $\lambda_{min,a}$ είναι ίσος με τη μονάδα.

Πίνακας 5.2: Συντελεστής Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος Για Επιδράσεις Της Ηλικίας
($\lambda_{max,a}$) Στο Συντελεστή Τριβής Των Εφεδράνων Ολίσθησης

Interface	Unlubricated PTFE		Lubricated PTFE		Bimetallic Interfaces	
Installation Method	Sealed	Unsealed	Sealed	Unsealed	Sealed	Unsealed
Normal Environment	1.1	1.2	1.3	1.4	2.0	2.2
Severe Environment	1.2	1.5	1.4	1.8	2.2	2.5

Επιπλέον, ισχύουν τα ακόλουθα σχόλια:

- Ο χρόνος έκθεσης είναι 30 χρόνια.
- Για διεπιφάνειες αποτελούμενες από PTFE, είτε με λιπαντική ουσία είτε όχι, ο ανοξειδωτός χάλυβας είναι ωστενιτικός, τύπου 304. Χαμηλότερες τιμές ίσως δικαιολογούνται για ωστενιτικό ανοξειδωτό χάλυβα τύπου 316.
- Ο Πίνακας 5.2 διακρίνει μεταξύ σφραγισμένες (*sealed*) και μη σφραγισμένες (*unsealed*) για προστασία από περιβαλλοντικές επιδράσεις συνθήκες εφεδράνου, με την τελευταία περίπτωση να σχετίζεται με υψηλότερες τιμές του συντελεστή $\lambda_{max,a}$. Τεκμαίρεται ότι οι μη σφραγισμένες συνθήκες εφεδράνου επιτρέπουν έκθεση στο νερό και στο αλάτι και έτσι ενισχύουν επιπλέον διάβρωση.
- Ενώ ο Πίνακας 5.1 διακρίνει μεταξύ τριών μεθόδων εγκατάστασης και τεσσάρων περιβαλλοντικών συνθηκών, ο Πίνακας 5.2 περιλαμβάνει δυο μεθόδους εγκατάστασης και δυο περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτές οι συνθήκες είναι κανονικές, οι οποίες περιλαμβάνουν αγροτικά και αστικά περιβάλλοντα, και αυστηρές, οι οποίες περιλαμβάνουν παραθαλάσσια και βιομηχανικά περιβάλλοντα.
- Οι συντελεστές για PTFE με λιπαντική ουσία δεν απευθύνονται επαρκώς στο πρόβλημα της ξήρανσης του λιπαντικού. Αν συμβεί αυτό, οι τιμές του Πίνακα 5.2 είναι πιθανώς μικρότερες από ένα συντελεστή με τιμή 2.

5.4.2 Επίδραση Της Μόλυνσης (Περιβαλλοντικών Επιδράσεων)

Οι τιμές των μέγιστων προτεινόμενων συντελεστών για την επίδραση της μόλυνσης, $\lambda_{max,c}$, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3, ενώ η τιμή του ελάχιστου συντελεστή, $\lambda_{min,c}$, είναι ίση με 1. Η μόλυνση λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν τα εφεδράνα είναι σε λειτουργία, ενώ η μόλυνση λόγω αποσυναρμολόγησης των εφεδράνων στο εργοτάξιο δε λαμβάνεται υπόψη. Επιπλέον, μη σφραγισμένα (*unsealed*) εφεδράνα με την ανοξείδωτη χαλύβδινη επιφάνεια στραμμένη προς τα πάνω θεωρούνται ευαίσθητα στη μόλυνση, η επίδραση της οποίας μπορεί να είναι σημαντική. Επομένως, τέτοια μέθοδος εγκατάστασης απαγορεύεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα σφραγιστικά μέσα (*seals*) χρησιμοποιούνται για να εμποδίζουν τη μόλυνση αλλά επιτρέπουν τη ροή του αέρα έτσι ώστε ο ανοξείδωτος χάλυβας να εφοδιάζεται με οξυγόνο και να αποφεύγεται η συμπύκνωση υγρασίας.

Στις αποδεκτές μεθόδους εγκατάστασης, η επίδραση της μόλυνσης αναμένεται να είναι ελάχιστη. Επομένως, οι τιμές των συντελεστών $\lambda_{max,c}$ συνίσταται να κυμαίνονται από 1 έως 1.1. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση των PTFE με λιπαντική ουσία εφεδράνων όταν είναι μη σφραγισμένα (*unsealed*). Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η μόλυνση πιθανώς να προκαλέσει σκλήρυνση του λιπαντικού και σημαντική αύξηση της τριβής. Ο προτεινόμενος συντελεστής με τιμή 3 αντανakλά αυτή την πραγματικότητα και σκοπεύει να αποθαρρύνει τη χρήση μη σφραγισμένων με λιπαντική ουσία PTFE εφεδράνων.

Πρέπει να σημειωθεί στον Πίνακα 5.3 ότι η τιμή του συντελεστή $\lambda_{max,c}$ ίση με 1.1 συνίσταται για σφραγισμένα (*sealed*) εφεδράνα με τον ανοξείδωτο χάλυβα στραμμένο προς τα κάτω. Σε αυτή την περίπτωση υποτίθεται ότι κάποια μόλυνση προέρχεται πιθανώς από πτώση σκωρίας ή κομματιών μπογιάς από την πλάκα άνθρακα και χάλυβα του εφεδράνου πάνω από την ανοξείδωτη χαλύβδινη επιφάνεια. Όταν αυτή η πλάκα προστατεύεται έναντι διάβρωσης, είτε με γαλβανισμό είτε με βάψιμο για διάρκεια ζωής 30 χρόνια, ο προτεινόμενος συντελεστής είναι ίσος με 1.

Πίνακας 5.3: Συντελεστής Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος Για Επιδράσεις Της Μόλυνσης ($\lambda_{max,c}$) Στο Συντελεστή Τριβής Των Εφεδράνων Ολίσθησης

Installation Method	Unlubricated PTFE	Lubricated PTFE	Bimetallic Interfaces
Sealed with Stainless Steel Surface Facing Down	1.0	1.0	1.0
Sealed with Stainless Steel Surface Facing Up, Bearing Galvanized or Painted for 30 Years	1.0	1.0	1.0
Sealed with Stainless Steel Surface Facing Up	1.1	1.1	1.1
Unsealed with Stainless Steel Surface Facing Down	1.1	3.0	1.1
Unsealed with Stainless Steel Surface Facing Up	Not Allowed	Not Allowed	Not Allowed

5.4.3 Επίδραση Της Συνολικής Κίνησης Διαδρομής (Φθοράς)

Οι συνιστώμενοι συντελεστές για την επίδραση της συνολικής κίνησης (φθοράς) βασίζονται σε δεδομένα, τα οποία υποδεικνύουν ότι ο συντελεστής τριβής των εφεδράνων ολίσθησης μειώνεται με μικρή συσσωρευμένη κίνηση και συνεπώς αυξάνεται με μεγάλη. Το ποσό αύξησης εξαρτάται από τη σκληρότητα του ανοξείδωτου χάλυβα και τη σύνθεση της διεπιφάνειας του ολισθητήρα.

Οι προτεινόμενοι συντελεστές για τη φθορά βασίζονται σε δεδομένα για PTFE μη εμπλουτισμένα με ίνες υάλου σε επαφή με υψηλά γυαλισμένο ανοξείδωτο χάλυβα. Αυτά τα δεδομένα δείχνουν τάσεις, οι οποίες είναι παρόμοιες με αυτές που παρατηρούνται για δοκιμασμένα PTFE με σύνθετο υλικό (βλέπε Σχήματα 4.6, 4.7). Γενικά, τα δεδομένα είναι περιορισμένα ή είναι ελλιπή για την επίδραση της φθοράς (συνολικής κίνησης) για τις συνήθεις χρησιμοποιούμενες διεπιφάνειες ολίσθησης σε κινήσεις που υπερβαίνουν τα 2km. Επομένως, οι προτεινόμενοι συντελεστές περιορίζονται σε κίνηση 2km. Πιστεύεται ότι οι κατασκευαστές των εφεδράνων ολίσθησης θα έπρεπε να καθιερώσουν τους συντελεστές λ για τη φθορά των προϊόντων τους κάτω από τις συνήθως χρησιμοποιούμενες συνθήκες της εφαρμογής τους (για παράδειγμα, πάχος του υλικού του εφεδράνου, σκληρότητα του ανοξείδωτου χάλυβα και φαινομενική πίεση εφεδράνου).

Οι οδηγίες προδιαγραφών AASHTO 1999 για σχεδιασμό σεισμικής μόνωσης (*American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999*) ορίζουν την τιμή των συντελεστών $\lambda_{min,w}$ ίση με τη μονάδα. Στην πραγματικότητα, ο συντελεστής $\lambda_{min,w}$ είναι μικρότερος από τη μονάδα για κάποιες διεπιφάνειες, ωστόσο αυτό ίσως δεν είναι μεγάλης πρακτικής σημασίας. Κατάλληλες τιμές των συντελεστών $\lambda_{min,w}$ κυμαίνονται μεταξύ 0.8 έως 0.9 για PTFE εφέδρανα χωρίς λιπαντική ουσία και μονάδα για PTFE εφέδρανα με λιπαντική ουσία. Δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες για πρόταση τιμών για διμεταλλικές επιφάνειες.

Ο Πίνακας 5.4 περιλαμβάνει προτεινόμενες τιμές για τους συντελεστές $\lambda_{max,w}$. Η ατέλεια του πίνακα υποδηλώνει την έλλειψη δεδομένων για την επίδραση της φθοράς και την αναγκαιότητα δοκιμών.

Πίνακας 5.4: Συντελεστής Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος Για Επιδράσεις Της Φθοράς (Συνολικής Κίνησης) ($\lambda_{max,w}$) Στο Συντελεστή Τριβής Των Εφεδράνων Ολίσθησης

Cumulative Travel (m)	Unfilled PTFE	Lubricated PTFE	Bimetallic Interfaces
1000	1.0	1.0	NA
2000	1.2	1.0	NA
>2000	NA	NA	NA

5.4.4 Επίδραση Της Θερμοκρασίας

Γενικά, ο συντελεστής τριβής αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας στην αρχή του πειράματος. Η αύξηση στην τριβή εξαρτάται από τη θερμότητα τριβής κατά τη διάρκεια του διαστήματος μεταξύ της αρχής του πειράματος και του χρόνου στον οποίο γίνεται η μέτρηση. Ακόμη και όταν ο χρόνος του διαστήματος είναι πολύ μικρός, ουσιαστική θερμότητα τριβής σε υψηλή ταχύτητα κίνησης προκαλεί αξιοσημείωτη ανακούφιση των επιδράσεων λόγω χαμηλής θερμοκρασίας.

Οι τιμές των συντελεστών $\lambda_{max,t}$ παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5 που ακολουθεί. Οι τιμές αυτές βασίζονται σε θερμοκρασία αναφοράς 20° C. Επιπλέον, για διεπιφάνειες PTFE με και χωρίς λιπαντική ουσία, οι τιμές των συντελεστών $\lambda_{min,t}$ είναι ίσες με 0.9 και 0.8 αντίστοιχα, και συνίστανται για θερμοκρασία 50° C.

Πίνακας 5.5: Συντελεστής Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος Για Επιδράσεις Της Θερμοκρασίας ($\lambda_{max,t}$) Στο Συντελεστή Τριβής Των Εφεδράνων Ολίσθησης

Temperature (°C)	Unlubricated PTFE	Lubricated PTFE	Bimetallic Interfaces
20	1.0	1.0	NA
0	1.1	1.3	NA
-10	1.2	1.5	NA
-30	1.5	3.0	NA
-40	1.7	NA	NA
-50	2.0	NA	NA

5.5 Άλλες Εφαρμογές Των Συντελεστών Τροποποίησης Των Ιδιοτήτων Συστήματος Σεισμικής Μόνωσης

Οι συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθιερώσουν τις ονομαστικές ιδιότητες των συστημάτων μόνωσης σε σχετικές συνθήκες των εφαρμογών τους από δεδομένα που αποκτήθηκαν κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Αυτή είναι τυπικά η περίπτωση όταν εφέδρανα μόνωσης πλήρους κλίμακας δε μπορούν να δοκιμαστούν στις πραγματικές συνθήκες της εφαρμογής τους λόγω των περιορισμών του διαθέσιμου εξοπλισμού δοκιμής.

Επιδράσεις οι οποίες ίσως αντιπροσωπεύονται από τη χρήση συντελεστών τροποποίησης ιδιοτήτων συστήματος είναι αυτές της φαινομενικής πίεσης εφεδράνου, της ταχύτητας κίνησης (για εφέδρανα ολίσθησης) και της συχνότητας κίνησης (για ελαστομερή εφέδρανα). Αυτές οι επιδράσεις μπορούν να μελετηθούν σε κλιμακούμενα πειράματα εφεδράνων και οι κατάλληλοι συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων συστήματος μπορούν να καθιερωθούν βάσει των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, της εφαρμογής των αρχών της μηχανικής και της κρίσης του μηχανικού. Αυτοί οι συντελεστές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται χωρίς προσαρμογή (δηλαδή, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με ένα συντελεστή προσαρμογής των ιδιοτήτων του συστήματος ίσο με τη μονάδα).

Οι προδιαγραφές του κανονισμού AASHTO 1999 (*American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999*) ορίζουν μόνο ένα συντελεστή λ για τις επιδράσεις της ταχύτητας στο συντελεστή τριβής των εφεδράνων ολίσθησης. Ωστόσο, οι προδιαγραφές του κανονισμού υπαινίσσονται ότι ένας συντελεστής λ για την ταχύτητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ελαστομερή εφέδρανα. Σε αυτή την

περίπτωση, η ταχύτητα σχετίζεται με τη συχνότητα εφόσον το πείραμα διεξάγεται με ημιτονοειδή κίνηση συγκεκριμένου εύρους και συχνότητας. Εννοείται επίσης ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν συντελεστές λ για τις επιδράσεις της ταχύτητας στη δυσκαμψία μετά τη διαρροή και στη χαρακτηριστική αντοχή των ελαστομερών εφεδράνων.

5.6 Συντελεστές Τροποποίησης Ιδιοτήτων Ελαστομερών Εφεδράνων Μόνωσης

Οι προδιαγραφές του κανονισμού AASHTO 1999 για σχεδιασμό σεισμικής μόνωσης ορίζουν συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων συστήματος για τις επιδράσεις της ηλικίας, της θερμοκρασίας, της φθοράς και της μοριακής απεμπλοκής “scragging” σε ελαστομερή εφέδρανα μόνωσης.

Αναγνωρίζεται ότι τα ελαστομερή εφέδρανα παράγονται σε ποικιλία συνθέσεων και ότι οι τιμές των συντελεστών λ εξαρτώνται σημαντικά από τη συγκεκριμένη σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, τα πειραματικά δεδομένα που έχουν δημοσιευθεί για τα ελαστομερή εφέδρανα είναι σπάνια, γεγονός που περιπλέκει σημαντικά την καθιέρωση των τιμών των συντελεστών λ .

5.6.1 Επίδραση Της Ηλικίας

Πιστεύεται ότι η ηλικία προκαλεί μια αύξηση στη δυσκαμψία μετά τη διαρροή και στη χαρακτηριστική αντοχή των ελαστομερών εφεδράνων. Για περίπου πάνω από 30 χρόνια, αυτή η αύξηση πιστεύεται ότι είναι της τάξης του 10% για τα χαμηλής απόσβεσης φυσικού ελαστικού εφέδρανα και υψηλότερο για τα υψηλής απόσβεσης φυσικού ελαστικού εφέδρανα. Μεγάλες διαφορές μεταξύ “scragged” (η μετέπειτα “πιο ξεμπλεγμένη” ινώδης δομή) και “unscragged” (η αρχική μπλεγμένη ινώδης δομή) ιδιοτήτων συνεπάγονται ότι οι χημικές διαδικασίες συνεχίζουν να ακολουθούν τη σκλήρυνση του ελαστομερούς. Ως εκ τούτου, τέτοιες μεγάλες διαφορές μεταξύ “scragged” και “unscragged” ιδιοτήτων είναι ενδεχόμενες για την ηλικία. Επομένως, αναπτύχθηκε μία πρόταση για να συσχετίζει τις επιδράσεις της ηλικίας με τη διαφορά μεταξύ των “scragged” και “unscragged ιδιοτήτων”. Κάπως αυθαίρετα, μια μεγάλη διαφορά έχει οριστεί να είναι μια στην οποία οι “unscragged” ιδιότητες (δυσκαμψία

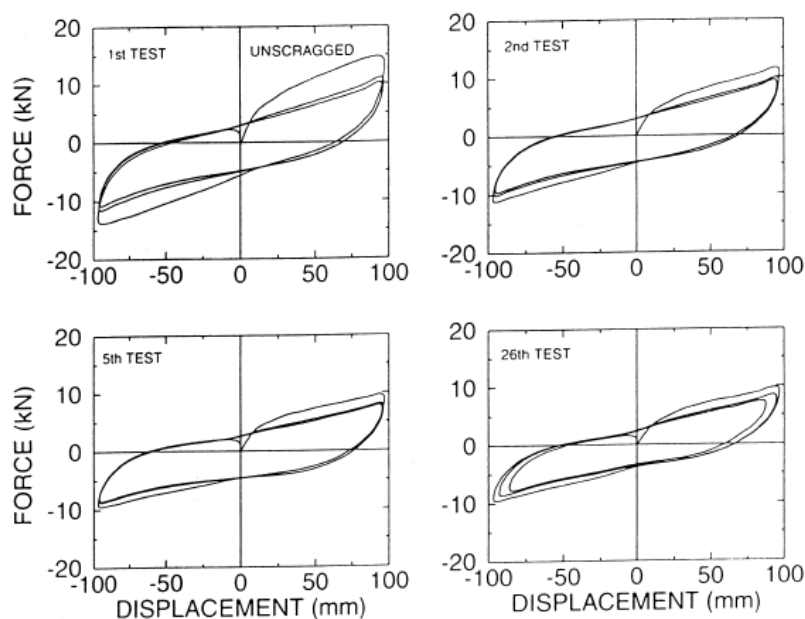
μετά τη διαρροή ή χαρακτηριστική αντοχή) είναι τουλάχιστον 25% μεγαλύτερες από τις “scragged” ιδιότητες. Συνεπώς, αναπτύχθηκε ο Πίνακας 5.6, που ακολουθεί, στον οποίο οι τιμές 1.1 και 1.2 των συντελεστών λ βασίζονται σε περιορισμένα πειραματικά δεδομένα, ενώ η τιμή 1.3 βασίζεται στην κρίση του μηχανικού.

Πίνακας 5.6: Συντελεστής Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος Για Επιδράσεις Της Ηλικίας ($\lambda_{max,a}$) Στις Ιδιότητες Των Ελαστομερών Εφεδράνων

Natural Rubber Compound	Factor for Post-Yielding Stiffness	Factor for Characteristic Strength
Low Damping	1.1	1.1
High Damping with Small Difference between Unscragged and Scragged Properties	1.2	1.2
High Damping with Large Difference between Unscragged and Scragged Properties	1.3	1.3

5.6.2 Επίδραση Της Μοριακής Εμπλοκής “scragging”

Τα ελαστομερή εφεδράνα τυπικά επιδεικνύουν υψηλότερη χαρακτηριστική αντοχή και δυσκαμψία όταν υποβάλλονται σε δοκιμή για πρώτη φορά. Οι ιδιότητες κάτω από αυτές τις συνθήκες ονομάζονται άθικτες ή “unscragged” ιδιότητες. Μεταγενέστερη δοκιμή κάτω από τις ίδιες συνθήκες οδηγεί σε σταθερή αλλά χαμηλότερη αντοχή και δυσκαμψία, οι οποίες ονομάζονται “scragged” ιδιότητες. Για παράδειγμα, το Σχήμα 5.2 παρουσιάζει βρόγχους δύναμης-μετατόπισης από τη δοκιμή ενός μικρής κλίμακας και υψηλής απόσβεσης ελαστομερούς εφεδράνου (Kasalanati and Constantinou, 1999).



Σχήμα 5.2: Βρόγχοι πλευρικής δύναμης-πλευρικής μετατόπισης για ένα μικρής κλίμακας και υψηλής απόσβεσης ελαστομερές εφέδρανο (όλα οι δομικές είναι σε συχνότητα 1.0Hz)

Έχει υποτεθεί στο παρελθόν ότι κατά τη διάρκεια δοκιμής συγκεκριμένες εσωτερικές κατασκευές ελαστομερούς διαχωρίζονταν ώστε οι “scragged” ιδιότητες να κυριαρχούν και να γίνονται μόνιμες. Τώρα αναγνωρίζεται ότι συμβαίνει ανάκτηση του άθικτου (“unscragged”) σταδίου των ελαστομερών εφεδράνων. Η ύπαρξη της ανάκτησης υποδηλώνει ότι χημικές διεργασίες συνεχίζονται στο εφέδρανο ακολουθώντας το βουλκανισμό του. Συνεπώς, είναι πιθανό πλήρης ανάκτηση να συμβεί σε επαρκές χρόνο, με τη διάρκεια της διεργασίας να εξαρτάται από τη χημική ένωση του ελαστομερούς και την έκταση της σκλήρυνσής του.

Αν δεχτούμε ότι συμβαίνει πλήρης ανάκτηση, τότε τα εφέδρανα επιδεικνύουν δυο ξεχωριστές συμπεριφορές επί τη βάσει των φαινομένων του “scragging” και της ανάκτησης μόνο. Οι ιδιότητες μπορούν να καθιερωθούν με δοκιμές των εφεδράνων, όπως για παράδειγμα, στο μικρό εφέδρανο τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στο Σχήμα 5.2. Σε αυτή την περίπτωση, ένα τεστ τριών κύκλων με το σχετικό φορτίο, συχνότητα και μετακίνηση (πάνω αριστερά διάγραμμα στο Σχήμα 5.2) είναι επαρκές για την καθιέρωση των δύο συνόλων ιδιοτήτων.

Όταν οι ονομαστικές ιδιότητες ενός συστήματος μόνωσης βασίζονται στις “scragged” συνθήκες του εφεδράνου, τότε ένας συντελεστής τροποποίησης ιδιοτήτων συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην καθιέρωση της συνεισφοράς της

ανάκτησης στα άνω όρια των ιδιοτήτων του συστήματος. Επομένως, ορίζεται ένας συντελεστής $\lambda_{max,scrag}$ για τις ιδιότητες της χαρακτηριστικής αντοχής και της δυσκαμψίας μετά τη διαρροή. Ωστόσο, είναι διαθέσιμα αρκετά δημοσιευμένα αποτελέσματα σε μια μορφή η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποσπάσει κανείς τους κατάλληλους συντελεστές λ για την επίδραση του “scragging”.

Είναι γενικά αναγνωρισμένο ότι τα χαμηλής απόσβεσης ελαστομερή εφέδρανα δεν επιδεικνύουν αρκετή διαφορά μεταξύ “scragged” και “unscragged” ιδιοτήτων. Αυτό υποδηλώνει ότι τα πρόσθετα στο ελαστομερές και η διαδικασία της σκλήρυνσης που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της απόσβεσης είναι υπεύθυνα για αυτή την αυξημένη διαφορά μεταξύ “scragged” και “unscragged” ιδιοτήτων στα υψηλής απόσβεσης ελαστομερή εφέδρανα. Παρουσιάζει επίσης την ευκαιρία για συσχετισμό της διαφοράς μεταξύ των δυο ιδιοτήτων στην ενεργό απόσβεση των εφεδράνων.

Σύμφωνα με δοκιμές σε χαμηλής κλίμακας υψηλής απόσβεσης ελαστομερή εφέδρανα έχει παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής $\lambda_{max,scrag}$ για τη χαρακτηριστική αντοχή και για τη δυσκαμψία μετά τη διαρροή είναι της τάξης του 1.2 ή λιγότερο όταν η ενεργός απόσβεση στα εφέδρανα (ορισμένη ως ισοδύναμη απόσβεση στις προδιαγραφές του κανονισμού AASHTO 1999 αλλά για ένα μόνο εφέδρανο) είναι μικρότερη από 0.15. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι τα εφέδρανα που έχουν επεξεργαστεί εσφαλμένα παρουσιάζουν αρκετά υψηλότερη απόσβεση και αρκετά υψηλότερο λόγο “unscragged” προς “scragged” ιδιοτήτων.

Με βάση αυτά τα περιορισμένα δεδομένα έχει συνταχθεί ο ακόλουθος πίνακας (Πίνακας 5.7) στον οποίο προτείνονται οι τιμές των συντελεστών $\lambda_{max,scrag}$.

Πίνακας 5.7: Συντελεστής Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος Για Επιδράσεις Των “Scragging”-Ανάκτησης ($\lambda_{max,scrag}$) Στις Ιδιότητες Των Ελαστομερών Εφεδράνων

Natural Rubber Compound	Factor for Post-Yielding Stiffness	Factor for Characteristic Strength
Low Damping	1.0	1.0
High Damping with Effective Damping ≤ 0.15	1.2	1.2
High Damping with Effective Damping > 0.15	1.8	1.5

Το “scragging” και η ανάκτηση των υψηλής απόσβεσης ελαστομερών εφεδράνων έχει πρόσφατα επανεξετασθεί από ερευνητές του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας, Berkeley (Thompson et al., 2000). Με βάση πρόσφατα διεξαγμένα πειράματα και εξέταση διαθέσιμων δεδομένων από 34 εφέδρανα κατασκευασμένα από 5 κατασκευαστές χρησιμοποιώντας δέκα διαφορετικές συνθέσεις, προέκυψαν τα ακόλουθα:

- a) Ανάκτηση συμβαίνει σε ένα μικρό διάστημα μετά το “scragging”.
- b) Ο συντελεστής λ για το “scragging” φαίνεται να συσχετίζεται καλύτερα με το μέτρο διάτμησης του ελαστομερούς παρά με το βαθμό απόσβεσης.
- c) Οι τιμές των συντελεστών λ για να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις του “scragging” στο ενεργό μέτρο διάτμησης κυμαίνονται μεταξύ 1.4 και 2.1 για ελαστομερή με μέτρο διάτμησης στο τρίτο κύκλο για 100% παραμόρφωση κάτω από 0.7 MPa (100 psi), και κυμαίνονται μεταξύ 1.2 και 1.5 για ελαστομερή με μέτρο διάτμησης στο τρίτο κύκλο για 100% παραμόρφωση πάνω από 0.7 MPa (100 psi).

Οι τιμές των συντελεστών εμπλοκής “scragging” οι οποίοι προτάθηκαν από τον Thompson (Thompson et al., 2000) ισχύουν για το ενεργό μέτρο διάτμησης, ενώ οι προδιαγραφές του κανονισμού AASHTO 1999 προσδιορίζουν τους συντελεστές λ για τη δυσκαμψία μετά τη διαρροή και για τη χαρακτηριστική αντοχή. Οι διάφορες παράμετροι μπορούν να συσχετιστούν ως ακολούθως:

$$G_{eff} = G + \frac{Q_b}{A_r \gamma} = G + \frac{(Q_b / N)(N / A_r)}{\gamma} \quad (5.7)$$

Όπου G_{eff} είναι ενεργό μέτρο διάτμησης, G είναι το μέτρο διάτμησης βασισμένο στη δυσκαμψία μετά τη διαρροή ($G=K_b T/A_r$, T είναι το συνολικό πάχος του ελαστομερούς), Q_b είναι η χαρακτηριστική αντοχή, N είναι το φορτίο βαρύτητας στο εφέδρανο, A_r είναι η επιφάνεια του ελαστομερούς, γ είναι το εύρος διατμητικής παραμόρφωσης στο ελαστομερές. Σημειωτέον ότι η ποσότητα N/A_r είναι η μέση πίεση του εφεδράνου.

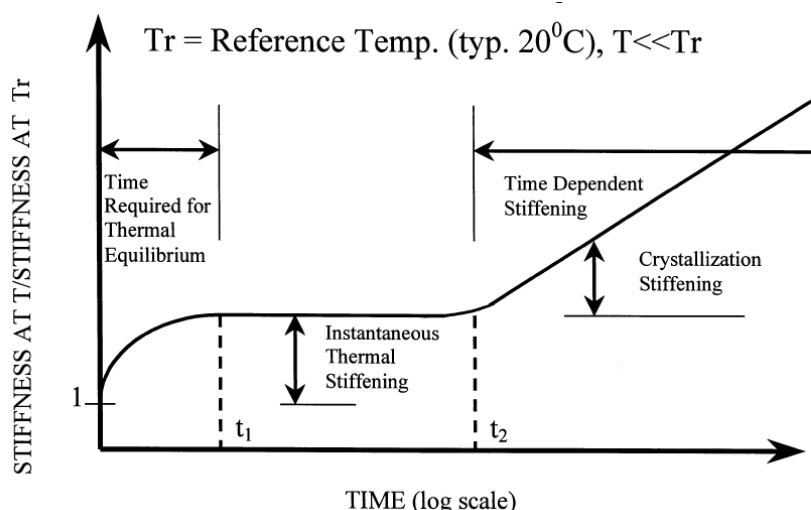
Βάσει της σχέσης (5.7) και των συντελεστών λ του Πίνακα 5.7, μπορεί κανείς να υπολογίσει ένα συντελεστή λόγω εμπλοκής “scragging” για το ενεργό μέτρο διάτμησης ίσο με 1.2 όταν οι τιμές των συντελεστών λ που χρησιμοποιούνται για τη δυσκαμψία μετά τη διαρροή και τη χαρακτηριστική αντοχή είναι αντίστοιχα 1.2 και 1.2. Επιπλέον,

ένας συντελεστής λόγω “scragging” για το ενεργό μέτρο διάτμησης ίσος με 1.7 έως 1.8 υπολογίζεται όταν χρησιμοποιούνται οι τιμές των συντελεστών λ 1.8 και 1.5 αντίστοιχα και χρησιμοποιείται ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων ($\gamma=1$ έως 2, $G= 0.35$ έως 0.7 MPa, $N/A_r = 7$ έως 11 MPa, $Q_b/N= 0.02$ έως 0.04). Οι υπολογιζόμενες τιμές είναι χαμηλότερες περίπου 10 με 20% από τις τιμές που προτείνονται από τον Thompson. Ως εκ τούτου, θα ήταν συνετό να τροποποιήσει κανείς τις τιμές των συντελεστών $\lambda_{max,scrag}$ του Πίνακα 5.7 για τη δυσκαμψία μετά τη διαρροή και για τη χαρακτηριστική αντοχή όπως συνίσταται από τον Thompson:

- a) για υψηλής απόσβεσης ελαστομερή με μέτρο διάτμησης στο τρίτο κύκλο για 100% διατμητική παραμόρφωση πάνω από 0.7 MPa, 1.5.
- b) για υψηλής απόσβεσης ελαστομερή με μέτρο διάτμησης στο τρίτο κύκλο για 100% διατμητική παραμόρφωση κάτω από 0.7 MPa, 2.0.

5.6.3 Επίδραση Της Θερμοκρασίας

Είναι γνωστό ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες προκαλούν αύξηση και στη δυσκαμψία και στην αντοχή των ελαστομερών εφεδράνων. Γενικά, η επίδραση της χαμηλής θερμοκρασίας συνίσταται από τη στιγμιαία θερμική σκλήρυνση, η οποία επιτυγχάνεται μέσα στο χρόνο που απαιτείται για θερμική ισορροπία και τη σκλήρυνση κρυστάλλωσης (*crystallization stiffening*), η οποία εξαρτάται από το χρόνο. Το Σχήμα 5.3 απεικονίζει την τυπική συμπεριφορά των ελαστομερών σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο χρόνος t_1 εξαρτάται από το μέγεθος του εφεδράνου, και συγκεκριμένα από το ύψος του. Ο χρόνος t_1 ίσως είναι της τάξης των 12 ή των 24 ωρών για ελαστομερή εφεδράνα μεγάλου μεγέθους, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σεισμικής μόνωσης. Ο χρόνος t_2 εξαρτάται από τη σύνθεση του ελαστομερούς και τη θερμοκρασία και είναι σχετικά μικρός, της τάξης μερικών ωρών. Όταν αρχίζει η σκλήρυνση κρυστάλλωσης, το υλικό σκληραίνει με το χρόνο λόγω του αναπροσανατολισμού της μοριακής του σύνθεσης. Ωστόσο, η κρυστάλλωση είναι αναστρέψιμη όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.



Σχήμα 5.3: Συμπεριφορά Ελαστομερών Εξαρτώμενη από το Χρόνο σε Χαμηλή Θερμοκρασία

Επιπλέον, ένα άλλο φαινόμενο, ονομάζεται μετάπτωση φυσικής κατάστασης (*glass transition*), συμβαίνει όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από τη θερμοκρασία μετάπτωσης φυσικής κατάστασης, η οποία είναι χαρακτηριστική της σύνθεσης του ελαστομερούς. Όταν συμβεί μετάπτωση φυσικής κατάστασης (*glass transition*), το ελαστομερές γίνεται εύθραυστο και πολλές από τις μηχανικές του και τις φυσικές του ιδιότητες υποβάλλονται σε σημαντικές και γρήγορες αλλαγές. Το φυσικό ελαστομερές έχει μια θερμοκρασία μετάπτωσης φυσικής κατάστασης γύρω στους -55°C .

Οι μηχανικές ιδιότητες των ελαστομερών εφεδράνων επηρεάζονται από χαμηλές θερμοκρασίες και από τη διάρκεια έκθεσής τους σε αυτές.

Ακολουθεί ο Πίνακας 5.8 στον οποίο παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών λ για την επίδραση της θερμοκρασίας στις ιδιότητες των ελαστομερών εφεδράνων. Η προετοιμασία του πίνακα αυτού βασίζεται σε αποτελέσματα των Nanako (Nanako et al. (1993)) και Kim (Kim et al. (1996)). Τα δεδομένα για εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου είναι για φυσικό ελαστομερές βαθμού 3, ενώ αυτά για υψηλής απόσβεσης ελαστομερές ισχύουν για υλικό με ενεργό απόσβεση μικρότερη του 15% και με μέτρια διαφορά μεταξύ “scragged” και “unscragged” ιδιοτήτων.

Ο Nanako εξέθεσε δεδομένα για την ενεργό δυσκαμψία και την ενεργό απόσβεση ενός ελαστομερούς εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου και ενός υψηλής απόσβεσης ελαστομερούς εφεδράνου, τα οποία ψύχθηκαν σε θερμοκρασία περίπου -18°C και ακολούθως δοκιμάστηκαν. Μετρήσεις έγιναν σε διάφορες θερμοκρασίες πάνω από 5°C

καθώς τα εφεδράνα θερμαίνονταν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ο χρόνος έκθεσης για κάθε μια από τις αναφερόμενες θερμοκρασίες ήταν υπερβολικά μικρός. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν εδώ για τον προσδιορισμό των συντελεστών λ για υψηλής απόσβεσης ελαστομερή εφεδράνα.

Ο Kim εξέθεσε αποτελέσματα για τις ιδιότητες σε χαμηλή θερμοκρασία ενός ελαστομερούς εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου και ενός ελαστομερούς εφεδράνου χαμηλής απόσβεσης. Τα εφεδράνα ψύχθηκαν στους -60°C για τουλάχιστον τρεις μέρες και ακολούθως δοκιμάστηκαν. Καταγραφές βρόγχων δύναμης-μετατόπισης και τιμές χαρακτηριστικής αντοχής και δυσκαμψίας μετά τη διαρροή αναφέρονται για διάφορες θερμοκρασίες καθώς το εφεδράνο θερμαίνονταν μέχρι τη θερμοκρασία του εργαστηρίου. Η δοκιμή διεξήχθη για ένα εύρος των διατμητικών παραμορφώσεων του ελαστικού και για συχνότητα 0.1 Hz. Αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν εδώ για τον προσδιορισμό των συντελεστών λ για τις επιδράσεις της θερμοκρασίας σε ελαστομερή εφεδράνα με πυρήνα μολύβδου. Ωστόσο, ο αναγνώστης ειδοποιείται ότι τα αποτελέσματα ίσως έχουν επηρεαστεί από την ιστορία ψύξης (αρχικά εκτενής έκθεση σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία και έπειτα πολύ γρήγορη θέρμανση στις θερμοκρασίες της δοκιμής).

Πίνακας 5.8: Συντελεστής Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος Για Επιδράσεις Της Θερμοκρασίας ($\lambda_{max,i}$) Στις Ιδιότητες Των Ελαστομερών Εφεδράνων

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Factor for Post-Yielding Stiffness		Factor for Characteristic Strength	
	LRB	HDRB	LRB	HDRB
20	1.0	1.0	1.0	1.0
0	1.1	1.2	1.2	1.2
-10	1.1	1.4	1.4	1.4
-30	1.3	2.0 ¹	1.8	2.3 ¹

Τα δεδομένα του Πίνακα 5.8 διαφέρουν ελαφρώς από τις τιμές των συντελεστών λ σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κανονισμού AASHTO 1999 για σχεδιασμό σεισμικής μόνωσης. Οι τιμές των συντελεστών στις προδιαγραφές αντανakλούν μια επιθυμία επέκτασης της περιγραφής των υψηλής απόσβεσης ελαστομερών εφεδράνων, τα οποία κάπως αυθαίρετα διακρίνονται με βάση τη διαφορά μεταξύ “scragged” και “unscragged” ιδιοτήτων.

5.7 Σύνοψη

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι αναμένεται από τους κατασκευαστές των συστημάτων μόνωσης να διεξάγουν δοκιμές και να προσδιορίζουν τις τιμές των συντελεστών τροποποίησης των ιδιοτήτων του συστήματος των προϊόντων τους. Υπάρχει επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν πρότυπα σύμφωνα με τα οποία θα διεξάγονται οι δοκιμές και θα ερμηνεύονται τα αποτελέσματά τους. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η ευθύνη των δοκιμών και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων είναι ένα λεπτό θέμα. Φαίνεται ότι ο “αυτό-έλεγχος” είναι απίθανο να λειτουργήσει και για το λόγο αυτό θα έπρεπε μια αντιπροσωπεία να πάρει την ευθύνη του επανέλεγχου και της απόδειξης των αποτελεσμάτων των κατασκευαστών. Επιπλέον, δε θα έπρεπε να καθιερώνονται συγκεκριμένοι συντελεστές από τους κατασκευαστές αλλά θα ήταν προτιμότερο να προσδιορίζονται από επιτροπές με βάση εργαστηριακά αποτελέσματα, παρατηρήσεις πεδίου και κρίση. Συγκεκριμένα, συντελεστές που συσχετίζονται με την ηλικία και τη μόλυνση είναι οι πιο δύσκολοι να καθιερωθούν και δε μπορεί να προσδιοριστούν με μία μόνο δοκιμή.

Τέλος, επισημαίνονται δέκα θέματα τα οποία δεν έχουν μελετηθεί ακόμη πλήρως και χρειάζονται περισσότερη διερεύνηση:

- 1) Η ηλικία των συστημάτων σεισμικής μόνωσης είναι ένα σημαντικό θέμα για το οποίο μέχρι τώρα δεν έχει ληφθεί η κατάλληλη προσοχή. Τα δεδομένα για την ηλικία είναι σπάνια και η εγκυρότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση της ηλικίας είναι ανοικτές σε σοβαρά ερωτήματα. Είναι σημαντικό ότι οι βασικοί μηχανισμοί για την ηλικία και άλλα σχετικά φαινόμενα είναι κατανοητοί.
- 2) Ο μηχανισμός της τριβής σε εφέδρανα ολίσθησης σεισμικής μόνωσης δεν είναι πλήρως κατανοητός. Ένα σημαντικό θέμα είναι η επίδραση του χρόνου φόρτισης στη στατική τριβή των διεπιφανειών αποτελούμενες από PTFE ή PTFE-βάσει υλικών σε επαφή με γυαλισμένο ανοξείδωτο χάλυβα. Υπάρχουν κάποιες θεωρητικές και πειραματικές αποδείξεις ότι ο χρόνος φόρτισης δεν επηρεάζει τη στατική τριβή, αλλά απαιτείται η διεξαγωγή επιπλέον μελετών.
- 3) Η θέρμανση λόγω τριβής είναι σημαντική στο σχεδιασμό εφεδράνων ολίσθησης σεισμικής μόνωσης. Προβλέπεται ότι η θερμοκρασία των διεπιφανειών

αυξάνεται σε υψηλές ταχύτητες κίνησης. Θα ήταν ενδιαφέρον να διεξαχθούν πειράματα και μετρήσεις της θερμοκρασίας στην επιφάνεια, παρά σε κάποιο βάθος. Αυτό θα απατούσε τη χρήση νέων τεχνικών μέτρησης της θερμοκρασίας.

- 4) Η επίδραση των χαμηλών θερμοκρασιών στις ιδιότητες των εφεδράνων ολίσθησης και των ελαστομερών εφεδράνων μόνωσης δεν είναι καλά τεκμηριωμένη. Συγκεκριμένα, για ελαστομερή εφέδρανα οι συνδυασμένες επιδράσεις της χαμηλής θερμοκρασίας και της διάρκειας έκθεσης απαιτούν τεκμηρίωση. Ομοίως για τα εφέδρανα ολίσθησης, η επίδραση της διάρκειας έκθεσης σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι άγνωστη.
- 5) Η επίδραση της συνολικής κίνησης στις ιδιότητες τριβής των διεπιφανειών ολίσθησης πρέπει να τεκμηριωθεί για μεγάλη κίνηση. Ομοίως, η επίδραση της μεγάλης συνολικής κίνησης σε ελαστομερή εφέδρανα σεισμικής μόνωσης (και για μικρού μεγέθους ελαστικού) είναι τελείως άγνωστη. Έμμεσες πληροφορίες υπάρχουν από την παρατήρηση της λειτουργίας τυπικών εφεδράνων γεφυρών.
- 6) Το πρόβλημα της θέρμανσης των ελαστομερών εφεδράνων με πυρήνα μολύβδου όταν υπόκεινται σε σεισμική κίνηση (ή δοκιμή) είναι προκλητικό να επιλυθεί αναλυτικά αλλά και ενδιαφέρον για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς αυτών των εφεδράνων και για την ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων.
- 7) Επιπλέον μελέτες για τα φαινόμενα του “scragging” και της ανάκτησης στα ελαστομερή εφέδρανα απαιτούνται για την εκτίμηση τόσο της έκτασης της ανάκτησης όσο και του χρόνου που απαιτεί. Ενδιαφέρον είναι να μελετηθούν συνθέσεις χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, περιλαμβάνοντας και αυτές με χαμηλή απόσβεση. Υπάρχει ένα πρόσφατο ενδιαφέρον στη χρήση τέτοιων συνθέσεων για την επίτευξη μεγάλης ενεργού περιόδου με συμπαγή σχεδιασμό εφεδράνου.
- 8) Οι διμεταλλικές διεπιφάνειες ολίσθησης είναι οι λιγότερο μελετημένες και επίσης οι λιγότερο χρησιμοποιούμενες. Υπάρχει η πεποίθηση ότι αυτές οι διεπιφάνειες είναι αναξιόπιστες και ακατάλληλες για χρήση σε μονωτήρες και υπάρχουν αποδείξεις για αυτό. Ωστόσο, απαιτείται μελέτη και πλήρης τεκμηρίωση των υπαρχόντων πληροφοριών για αυτές τις διεπιφάνειες.
- 9) Πρέπει να διεξαχθεί μια μελέτη για τη συσχέτιση των συντελεστών προσαρμογής των ιδιοτήτων του συστήματος με τη μεταβλητότητα στις ιδιότητες των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης και την πιθανότητα να συμβούν τα διάφορα γεγονότα που λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση ορίων.

10) Υπάρχει επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν πρότυπα για την καθιέρωση των συντελεστών τροποποίησης των ιδιοτήτων του συστήματος. Επιπλέον, υπάρχει η ανάγκη για κάποια αντιπροσωπεία που θα πάρει την ευθύνη του επανέλεγχου και της απόδειξης των αποτελεσμάτων των κατασκευαστών των συστημάτων σεισμικής μόνωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

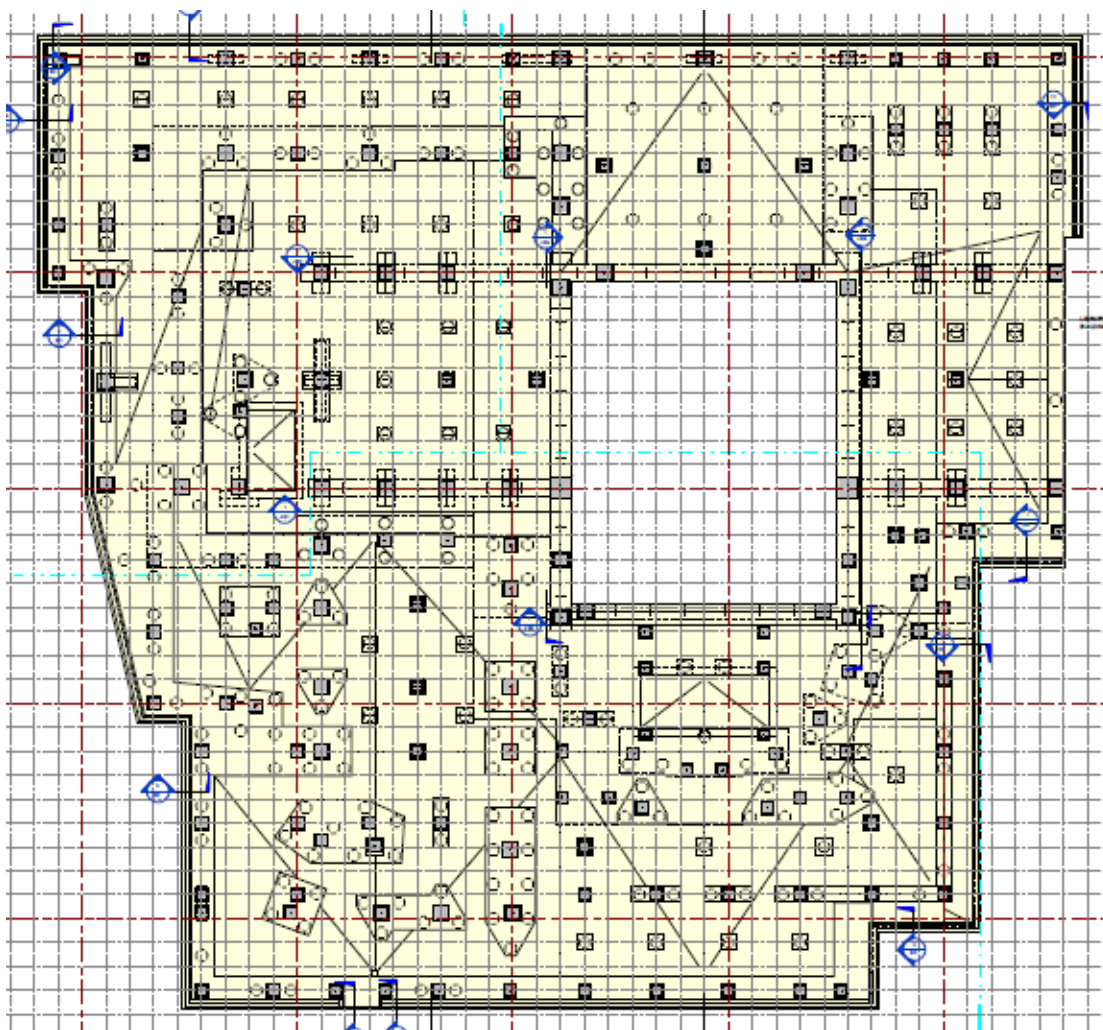
6.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων σεισμικής μόνωσης λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή μεταβαλλόμενων παραμέτρων, όπως η ηλικία, η θερμοκρασία, η φθορά κτλ. Η εξαγωγή συμπερασμάτων καθίσταται δυνατή μετά από κατάλληλη προσομοίωση και ανάλυση του φορέα. Ο φορέας που μελετήθηκε είναι το διάφραγμα σεισμικής μόνωσης μιας κατασκευής.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η διαμόρφωση του προσομοιώματος του διαφράγματος της σεισμικής μόνωσης και οι αναλύσεις για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των εφεδράνων πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό SAP2000 v15.1.0 της εταιρείας CSI. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται πέντε διαφορετικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας εφέδρανα εκκρεμούς τριβής (*FPS*) καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές.

6.2 Μορφολογία Φορέα

Πρόκειται για το διάφραγμα σεισμικής μόνωσης μιας επτάώροφης κατασκευής, η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως Λυρική Σκηνή στο Φάληρο στο Έργο του Ιδρύματος Νιάρχου. Ακολουθεί η κάτοψη (Σχήμα 6.1) του επιπέδου μόνωσης της κατασκευής όπου φαίνεται και η διάταξη των 172 μονωτήρων που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 6.1: Κάτοψη Επιπέδου Σεισμικής Μόνωσης Επτάώροφης Κατασκευής

6.2 Προσομοίωση Εφεδράνων FPS

Για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν 11 διαφορετικοί τύποι εφεδράνων εκκρεμούς τριβής. Τα μεγέθη που απαιτούνται ώστε να γίνει η προσομοίωση των εφεδράνων στο SAP2000 είναι η ενεργός δυσκαμψία (K_{eff}), η ενεργός απόσβεση (C_{eff}), η ελαστική δυσκαμψία του μονωτήρα (K_{el}), ο συντελεστής τριβής για χαμηλή ταχύτητα ολίσθησης ($\mu_{slow}=f_{min}$), ο συντελεστής τριβής για υψηλή ταχύτητα ολίσθησης ($\mu_{fast}=f_{max}$), η παράμετρος α η οποία ελέγχει τη μετάβαση του συντελεστή τριβής από την ελάχιστη στη μέγιστη τιμή του σε υψηλή ταχύτητα ολίσθησης, η ακτίνα καμπυλότητας της διεπιφάνειας ολίσθησης (R). Η απόσβεση θα πρέπει να υπολογιστεί κατάλληλα ώστε να περιέχει μόνο την πρόσθετη απόσβεση που παρέχουν τα εφέδρανα. Σε διαφορετική περίπτωση το πρόγραμμα υπολογίζει δύο φορές την απόσβεση του

κτιρίου (5%) κατά τον προσδιορισμό των ιδιομορφικών αποκρίσεων, καθώς προσθέτει κάθε φορά την απόσβεση αυτή κατά τη διαδικασία ανάλυσης. Η τροποποίηση αυτή στον προσδιορισμό της απόσβεσης που εισάγεται στο πρόγραμμα επιτυγχάνεται αφαιρώντας κάθε φορά την απόσβεση του κτιρίου (5%) από τη συνολική υπολογισθείσα απόσβεση του κάθε εφεδράνου.

$$c_i = 2 \cdot m_i \cdot \omega_b \cdot (\xi_b - \xi_{el}) \Rightarrow c_i = 2 \cdot m_i \cdot \omega_b \cdot \xi_b - 2 \cdot m_i \cdot \omega_b \cdot \xi_{el} \Rightarrow c_i = 2 \cdot m_i \cdot \omega_b \cdot \xi_b - c_{el} \quad (6.1)$$

Η συνολική απόσβεση του συστήματος υπολογίζεται:

$$\begin{aligned} C = \sum_{i=1}^N c_i &= 2 \cdot M \cdot \omega_b \cdot \sum_{i=1}^N (\xi_b^i - \xi_{el}^i) \Rightarrow C = 2 \cdot M \cdot \omega_b \cdot \sum_{i=1}^N \xi_b^i - C_{el} \Rightarrow \\ C &= 2 \cdot M \cdot \omega_b \cdot \frac{\sum_{i=1}^N W_D}{2\pi \sum_{i=1}^N K_{eff} D_d^2} - C_{el} \Rightarrow C = \frac{\sum_{i=1}^N W_D}{\pi \cdot \omega_b \cdot D_d^2} - C_{el} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πέντε προσομοιώματα που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματά τους.

6.3 Μοντέλα Προσομοίωσης και Αποτελέσματα Αναλύσεων

6.3.1 1^ο Μοντέλο Προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, με τη βοήθεια του λογισμικού SAP2000 δημιουργήθηκε ένα μοντέλο αποτελούμενο από 172 εφέδρανα τα οποία ομαδοποιήθηκαν σε 11 κατηγορίες σύμφωνα με την κατακόρυφη φόρτισή τους. Κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εφεδράνων φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6.1: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Εφεδράνων FPS 1^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΤΗΡΑ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΤΗΡΑ (m ²)
E1	0.15	0.0177
E2	0.15	0.0177
E3	0.2	0.0314
E4	0.2	0.0314
E5	0.25	0.0491
E6	0.25	0.0491
E7	0.3	0.0707
E8	0.3	0.0707
E9	0.35	0.0962
E10	0.35	0.0962
E11	0.4	0.1257

Έπειτα καθορίστηκαν οι ιδιότητες των εφεδράνων, αφού πρώτα προηγήθηκαν υπολογισμοί σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους (βλέπε παράγραφο 3.3.1). Θεωρήσαμε αρχικά τα εξής μεγέθη:

- Ακτίνα καμπυλότητας κοίλης επιφάνειας ολίσθησης $R=2.325\text{m}$
- Οριζόντια μετατόπιση $D=0.234\text{m}$
- Συντελεστής τριβής ολίσθησης $\mu=0.04$
- Επιτάχυνση βαρύτητας $g=9.81\text{m/s}^2$

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακα 6.2) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των 11 διαφορετικών τύπων εφεδράνων.

Πίνακας 6.2: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εφεδράνων FPS 1^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΦΟΡΤΙΟ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ W (KN)	ΜΑΖΑ M (t)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ F _H (KN)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΛΟΓΟ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ K _H (KN/m)	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΟΝΟΤΗΡΑ T (s)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ K _{eff} (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ T (s)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ A _{hys} (KNm)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ξ _{eff}	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ δν (m)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ D/R _p >1	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ K _e =100*K _H (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ C _{eff}
E1	3500	356.78	492.26	1505.38	3.06	2103.67	2.59	131.04	0.181	0.01	2.52	150537.63	227.08
E2	5500	560.65	773.55	2365.59	3.06	3305.76	2.59	205.92	0.181	0.01	2.52	236559.14	356.84
E3	6750	688.07	949.35	2903.23	3.06	4057.07	2.59	252.72	0.181	0.01	2.52	290322.58	437.94
E4	8000	815.49	1125.16	3440.86	3.06	4808.38	2.59	299.52	0.181	0.01	2.52	344086.02	519.04
E5	10000	1019.37	1406.45	4301.08	3.06	6010.48	2.59	374.40	0.181	0.01	2.52	430107.53	648.80
E6	12500	1274.21	1758.06	5376.34	3.06	7513.10	2.59	468.00	0.181	0.01	2.52	537634.41	811.00
E7	15000	1529.05	2109.68	6451.61	3.06	9015.72	2.59	561.60	0.181	0.01	2.52	645161.29	973.20
E8	21500	2191.64	3023.87	9247.31	3.06	12922.53	2.59	804.96	0.181	0.01	2.52	924731.18	1394.92
E9	26500	2701.33	3727.10	11397.85	3.06	15927.76	2.59	992.16	0.181	0.01	2.52	1139784.95	1719.32
E10	31800	3241.59	4472.52	13677.42	3.06	19113.32	2.59	1190.59	0.181	0.01	2.52	1367741.94	2063.18
E11	70000	7135.58	9845.16	30107.53	3.06	42073.34	2.59	2620.80	0.181	0.01	2.52	3010752.69	4541.59

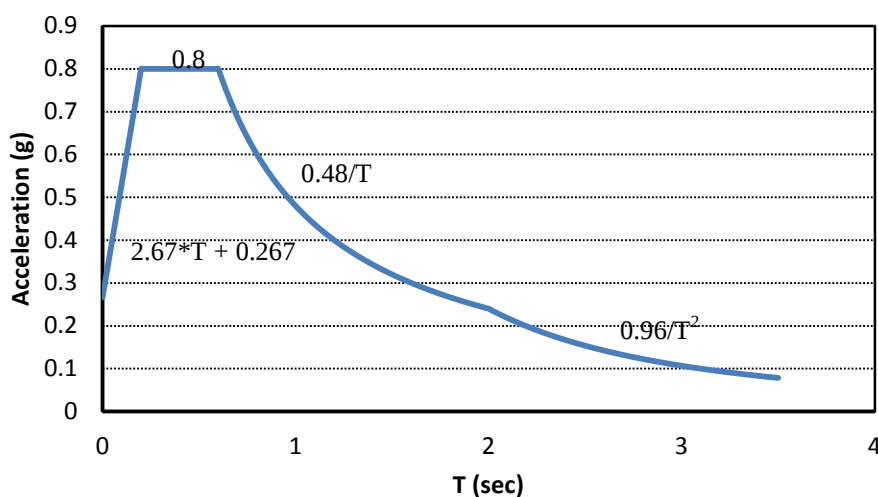
Στο συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης οι ιδιότητες των εφεδράνων στις τρεις διευθύνσεις ορίστηκαν ως εξής:

- U1(κατά τον κατακόρυφο άξονα z): θεωρήθηκε δεσμευμένη (fixed)
- U2 (κατά τον άξονα x),U3 (κατά τον άξονα y): γραμμικές ορίζοντας την ενεργό δυσκαμψία K_{eff} και την ενεργό απόσβεσης C_{eff} για κάθε τύπο εφεδράνου αντίστοιχα

Στο επίπεδο των εφεδράνων (xy, z=0) επιβλήθηκε διαφραγματική λειτουργία.

Η φόρτιση που επιβλήθηκε στην κατασκευή είναι η εξής:

- Μόνιμα φορτία, τα κατακόρυφα φορτία ικανότητας (σχεδιασμού) του κάθε τύπου εφεδράνου, τα οποία φαίνονται στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 6.2)
- Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων με συντελεστή απόσβεσης 5%, εφαρμοζόμενο κατά τις κύριες διευθύνσεις κίνησης. Ο συνδυασμός των διαφόρων διευθύνσεων και ποσοστών συμμετοχής της κάθε διεύθυνσης δίνει ένα σύνολο συνδυασμών φόρτισης υπό τους οποίους γίνεται ο τελικός σχεδιασμός. Το φάσμα αυτό προτάθηκε για το συγκεκριμένο έργο από τον Καθηγητή Γεώργιο Γκαζέτα και φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 6.2)



Σχήμα 6.2: Ελαστικό Φάσμα Επιτάχυνσης

Πραγματοποιήθηκαν οι εξής αναλύσεις:

- Ιδιομορφική Ανάλυση
- Δυναμική Φασματική Ανάλυση

Για τη Δυναμική Φασματική Ανάλυση ορίζονται συνδυασμοί δράσεων που λαμβάνουν υπόψη την ταυτόχρονη δράση του σεισμού κατά τις δυο διευθύνσεις x και y. Η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού μπορεί να αγνοηθεί.

Οι συνδυασμοί φόρτισης που επιβλήθηκαν είναι οι εξής:

- $E_x + 0.3E_y$
- $E_x - 0.3E_y$
- $G + E_x + 0.3E_y$
- $G + E_x - 0.3E_y$

Η μάζα την οποία λαμβάνει υπόψη το πρόγραμμα ώστε να κατασκευαστεί το μητρώο μάζας της κατασκευής καθορίστηκε να λαμβάνεται από τα φορτία (μόνιμα με πολλαπλασιαστή ίσο με 1).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής :

➤ Δυναμικά Χαρακτηριστικά Διαφράγματος Σεισμικής Μόνωσης

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ιδιοπερίοδοι αλλά και τα αντίστοιχα ποσοστά ιδιομορφικών μαζών του διαφράγματος του συστήματος μόνωσης για κάθε ιδιομορφή και διεύθυνση.

Πίνακας 6.3: Ιδιομορφές Ταλάντωσης 1^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ	ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ (sec)	ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ (cyc/sec)
1 ^η	2.5880	0.3864
2 ^η	2.5848	0.3869
3 ^η	2.5807	0.3875

Πίνακας 6.4: Ποσοστά Ιδιομορφικών Μαζών 1^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ	ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ (sec)	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless
1 ^η	2.5880	0.0432	0.5147	0
2 ^η	2.5848	0.9226	0.0774	0
3 ^η	2.5807	0.0342	0.4079	0

➤ Μετακινήσεις Εφεδράνων

Λόγω της διαφραγματικής λειτουργίας που έχει επιβληθεί, τα εφέδρανα σεισμικής μόνωσης κινούνται όλα μαζί και παρουσιάζουν σχεδόν τις ίδιες μετατοπίσεις λόγω των μικρών στροφών που αναπτύσσονται. Στον Πίνακα 6.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέσες και οι μέγιστες τιμές μετακινήσεων όλων των τύπων εφεδράνων στις τρεις διαφορετικές διευθύνσεις τους για κάθε επιβαλλόμενη φόρτιση.

Πίνακας 6.5: Μετακινήσεις Εφεδράνων FPS 1^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ					
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	0	0	0	0	0
RSP-x	0	0.162234	0.000162	0	0.162256	0.000342
RSP-y	0	0.000565	0.162232	0	0.001134	0.162312
Ex+0.3Ey	0	0.162234	0.048670	0	0.162256	0.048695
Ex-0.3Ey	0	0.162234	0.048670	0	0.162256	0.048695
G+Ex+0.3Ey	0	0.162234	0.048670	0	0.162256	0.048695
G+Ex-0.3Ey	0	0.162234	0.048670	0	0.162256	0.048695

➤ Εντατικά Μεγέθη Εφεδράνων

▪ Μέση Τιμή

Πίνακας 6.6: Μέση Τιμή Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων I^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΦΟΡΤΙΣΗ	DEAD			RSP-x			RSP-y			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey		
	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
ΤΥΠΟΣ												
ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ												
E1	0	0	0	0	341.2914	0.3376	0	1.2553	341.2569	0	341.2915	102.3778
E2	0	0	0	0	536.2955	0.6376	0	2.2775	536.2250	0	536.2965	160.8692
E3	0	0	0	0	658.1553	0.6185	0	2.4475	658.0973	0	658.1557	197.4304
E4	0	0	0	0	780.0446	0.8187	0	3.2330	780.0743	0	780.0454	234.0239
E5	0	0	0	0	975.1036	1.0888	0	3.6429	975.1808	0	975.1044	292.5567
E6	0	0	0	0	1218.8969	1.2503	0	4.0497	1219.0233	0	1218.8977	365.7098
E7	0	0	0	0	1462.6806	1.1218	0	5.3644	1462.8335	0	1462.6818	438.8522
E8	0	0	0	0	2096.5652	2.1128	0	6.6683	2096.4069	0	2096.5663	628.9271
E9	0	0	0	0	2584.0689	1.6264	0	4.9958	2584.2268	0	2584.0698	775.2708
E10	0	0	0	0	3101.0020	2.8656	0	6.5012	3100.6770	0	3101.0026	930.2096
E11	0	0	0	0	6825.8230	4.5625	0	0.2440	6824.6490	0	6825.8230	2047.4035

▪ **Μέγιστη Τιμή**

Πίνακας 6.7: Μέγιστη Τιμή Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων I^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΦΟΡΤΙΣΗ	DEAD			RSP-x			RSP-y			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey		
	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ												
E1	0	0	0	0	341.3330	0.7170	0	2.3850	341.4500	0	341.3330	102.4370
E2	0	0	0	0	536.3790	1.1310	0	3.7480	536.5640	0	536.3800	160.9730
E3	0	0	0	0	658.1910	1.0770	0	4.6000	658.3640	0	658.1910	197.5100
E4	0	0	0	0	780.1720	1.3480	0	5.4510	780.3600	0	780.1730	234.1110
E5	0	0	0	0	975.2360	2.0460	0	5.8810	975.5230	0	975.2370	292.6620
E6	0	0	0	0	1219.0450	2.3740	0	7.3510	1219.4640	0	1219.0470	365.8470
E7	0	0	0	0	1462.8540	2.5650	0	8.8220	1463.2840	0	1462.8560	438.9930
E8	0	0	0	0	2096.7560	4.4030	0	12.6440	2097.3730	0	2096.7600	629.2230
E9	0	0	0	0	2584.3730	3.7370	0	15.5850	2584.9300	0	2584.3770	775.4880
E10	0	0	0	0	3101.002	2.8656	0	6.5012	3100.677	0	3101.0026	930.2096
E11	0	0	0	0	6825.823	4.5625	0	0.244	6824.649	0	6825.823	2047.4035

6.3.2 2^ο Μοντέλο Προσομοίωσης

Το δεύτερο μοντέλο προσομοίωσης είναι όμοιο του πρώτου με τις εξής τροποποιήσεις:

- Στα εφεδράνα τύπου E_{10} και E_{11} επιβλήθηκαν τα πραγματικά φορτία και όχι τα φορτία σχεδιασμού, όπως έγινε στο πρώτο μοντέλο προσομοίωσης. Τα φορτία που επιβλήθηκαν φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.8: Μόνιμα Φορτία Εφεδράνων Τύπου E_{10} , E_{11} 2^ο Μοντέλου Προσομοίωσης

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΚΕΝΤΡΟΥ			ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ (KN)
	x (m)	y (m)	z (m)	
E10-1	85.1	50.6	0	26980
E10-2	9.2	60.92	0	26918
E10-3	52.9	69.8	0	27355
E10-4	57.05	71.3	0	31712
E10-5	76.35	71.3	0	29117
E11-1	52.9	50.6	0	66502
E11-2	80.5	50.6	0	58526

- Οι ιδιότητες των εφεδράνων στις τρεις διευθύνσεις ορίστηκαν ως εξής:
 - U1(κατά τον κατακόρυφο άξονα z): θεωρήθηκε δεσμευμένη (fixed)
 - U2 (κατά τον άξονα x), U3 (κατά τον άξονα y): **μη γραμμικές** ορίζοντας τις ιδιότητες για την περίπτωση γραμμικής ανάλυσης: την ενεργό δυσκαμψία K_{eff} , την ενεργό απόσβεση C_{eff} και τις ιδιότητες για την περίπτωση μη-γραμμικής ανάλυσης: την ελαστική δυσκαμψία K_{el} , τους συντελεστές τριβής μ_{slow} και μ_{fast} , την παράμετρο α και την ακτίνα καμπυλότητας κοίλης επιφάνειας ολίσθησης R για κάθε τύπο εφεδράνου αντίστοιχα

Ο συντελεστής τριβής χαμηλής ταχύτητας ολίσθησης μ_{slow} θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με 4%. Στον πίνακα 6.9 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών τριβής υψηλής ταχύτητας ολίσθησης μ_{fast} και των συντελεστών τριβής ολίσθησης μ . Οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τις σχέσεις (3.40), (3.41) και θεωρώντας σταθερές τιμές των ακόλουθων παραμέτρων, οι οποίες λήφθηκαν από πειραματικές μετρήσεις:

$$f_{\max,0}=0.12$$

$$f_{\max,p}=0.05$$

$$\varepsilon=0.012 \text{ MPa}^{-1}$$

$$\alpha=0.0429 \text{ sec/mm} = 42.9 \text{ sec/m}$$

Πίνακας 6.9: Τιμές Συντελεστών Τριβής Ολίσθησης μ Εφεδράνων 2^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΦΟΡΤΙΟ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ W (KN)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΤΗΡΑ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΤΗΡΑ (m ²)	ΠΙΕΣΗ p (MPa)	$f_{\max}=\mu_{\text{fast}}$	μ
E1	3500	0.15	0.0177	198.0595	0.0512	0.0510
E2	5500	0.175	0.0241	228.6634	0.0506	0.0504
E3	6750	0.2	0.0314	214.8592	0.0508	0.0507
E4	8000	0.225	0.0398	201.2033	0.0511	0.0510
E5	10000	0.25	0.0491	203.7183	0.0510	0.0509
E6	12500	0.275	0.0594	210.4528	0.0509	0.0507
E7	15000	0.3	0.0707	212.2066	0.0509	0.0507
E8	21500	0.325	0.0830	259.1683	0.0503	0.0501
E9	26500	0.35	0.0962	275.4355	0.0502	0.0500
E10-1	26980	0.375	0.1104	244.2809	0.0504	0.0503
E10-2	26918	0.375	0.1104	243.7196	0.0504	0.0503
E10-3	27355	0.375	0.1104	247.6762	0.0504	0.0502
E10-4	31712	0.375	0.1104	287.1251	0.0501	0.0500
E10-5	29117	0.375	0.1104	263.6296	0.0502	0.0501
E11-1	66502	0.4	0.1257	529.2061	0.0500	0.0499
E11-2	58526	0.4	0.1257	465.7351	0.0500	0.0499

Έπειτα έγιναν ξανά οι υπολογισμοί των ιδιοτήτων των εφεδράνων λόγω των διαφορετικών συντελεστών τριβής μ. Οι νέες ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.10 που ακολουθεί.

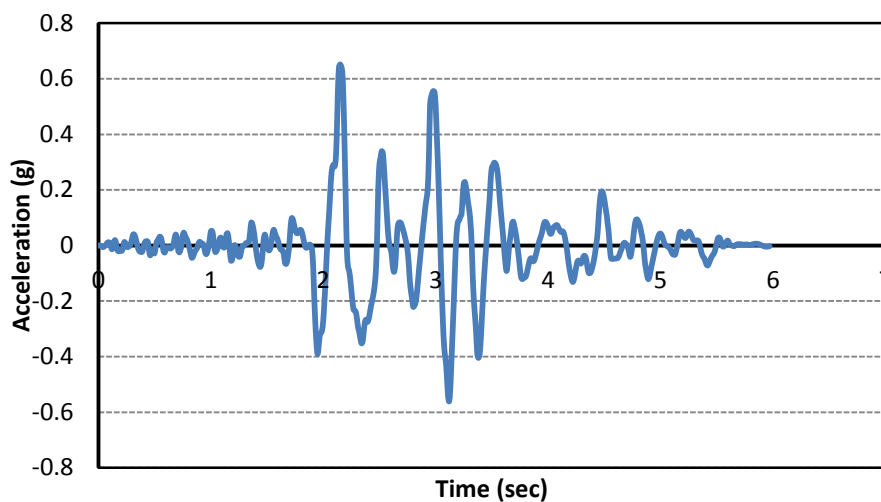
Πίνακας 6.10: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εφεδράνων FPS 2^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΦΟΡΤΙΟ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ W (KN)	ΜΑΖΑ M (t)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ F _H (KN)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΛΟΙΩ ΔΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ K _H (KN/m)	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΟΝΩΤΗΡΑ T (s)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ K _{eff} (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ T (s)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ A _{hys} (KNm)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ξ _{eff}	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ δv (m)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ D/R _μ >1	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ K _{eq} =100*K _H (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ C _{eff}
E1	3500	356.78	530.91	1505.38	3.06	2268.84	2.49	167.22	0.214	0.01	1.97	150537.63	295.51
E2	5500	560.65	830.92	2365.59	3.06	3550.95	2.50	259.62	0.213	0.01	2.00	236559.14	458.60
E3	6750	688.07	1021.27	2903.23	3.06	4364.40	2.49	320.03	0.213	0.01	1.99	290322.58	565.40
E4	8000	815.49	1212.83	3440.86	3.06	5183.02	2.49	381.58	0.214	0.01	1.98	344086.02	674.28
E5	10000	1019.37	1515.40	4301.08	3.06	6476.06	2.49	476.37	0.214	0.01	1.98	430107.53	841.76
E6	12500	1274.21	1892.33	5376.34	3.06	8086.90	2.49	593.68	0.213	0.01	1.98	537634.41	1048.92
E7	15000	1529.05	2270.26	6451.61	3.06	9701.97	2.49	711.91	0.213	0.01	1.98	645161.29	1257.78
E8	21500	2191.64	3241.82	9247.31	3.06	13853.92	2.50	1008.96	0.212	0.01	2.01	924731.18	1781.84
E9	26500	2701.33	3993.38	11397.85	3.06	17065.75	2.50	1241.41	0.211	0.01	2.01	1139784.95	2192.19
E10-1	26980	2750.25	4071.27	11604.30	3.06	17398.60	2.50	1269.09	0.212	0.01	2.00	1160430.11	2241.45
E10-2	26918	2743.93	4062.06	11577.63	3.06	17359.22	2.50	1266.31	0.212	0.01	2.00	1157763.44	2236.54
E10-3	27355	2788.48	4127.02	11765.59	3.06	17636.85	2.50	1285.95	0.212	0.01	2.00	1176559.14	2271.17
E10-4	31712	3232.62	4777.36	13639.57	3.06	20416.07	2.50	1484.22	0.211	0.01	2.01	1363956.99	2620.88
E10-5	29117	2968.09	4389.52	12523.44	3.06	18758.62	2.50	1365.65	0.212	0.01	2.01	1252344.09	2411.72
E11-1	66502	6779.00	10009.12	28603.01	3.06	42774.01	2.50	3103.79	0.211	0.01	2.02	2860301.08	5480.12
E11-2	58526	5965.95	8808.75	25172.47	3.06	37644.23	2.50	2731.61	0.211	0.01	2.02	2517247.31	4823.01

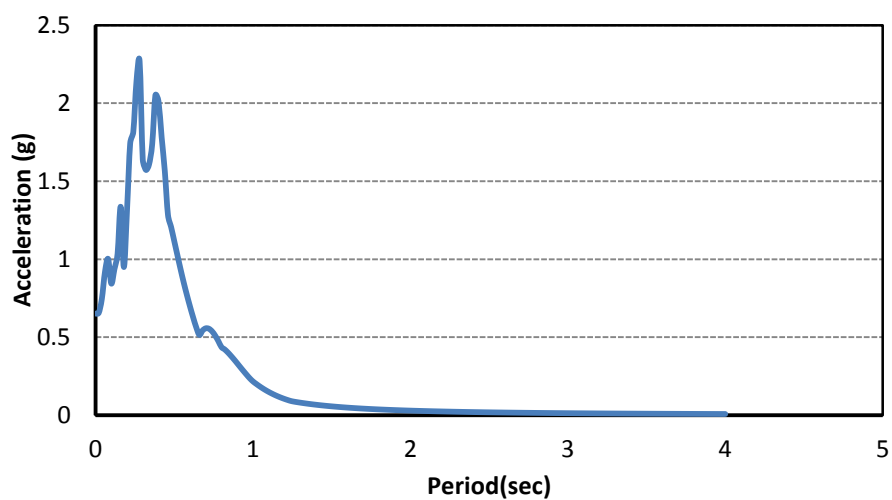
- Πραγματοποιήθηκε επιπλέον Δυναμική Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας. Κατά την ανάλυση αυτή θεωρείται ότι οι μονωτήρες συμπεριφέρονται μη γραμμικά (υστερητική συμπεριφορά). Η ανάλυση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα ακριβής και προτείνεται για τον οριστικό έλεγχο των αποτελεσμάτων των προηγούμενων αναλύσεων. Στην κατασκευή εισαγάγαμε δύο σεισμικές καταγραφές. Οι σεισμικές καταγραφές που επιλέχθηκαν ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων Peer Strong Motion Database του Berkeley και είναι οι εξής;
 - η καταγραφή του σεισμού του Northridge των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 20/03/1994 και ελήφθη από το σταθμό Rinaldi.
 - η καταγραφή του σεισμού Chi-Chi της Ταϊβάν, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 20/09/1999 και ελήφθη από το σταθμό CHY039.

Η ανάλυση είναι μη γραμμική με βήμα χρονικής ολοκλήρωσης που ορίζεται κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτήσεις του εισαχθέντος επιταχυνσιογραφήματος.

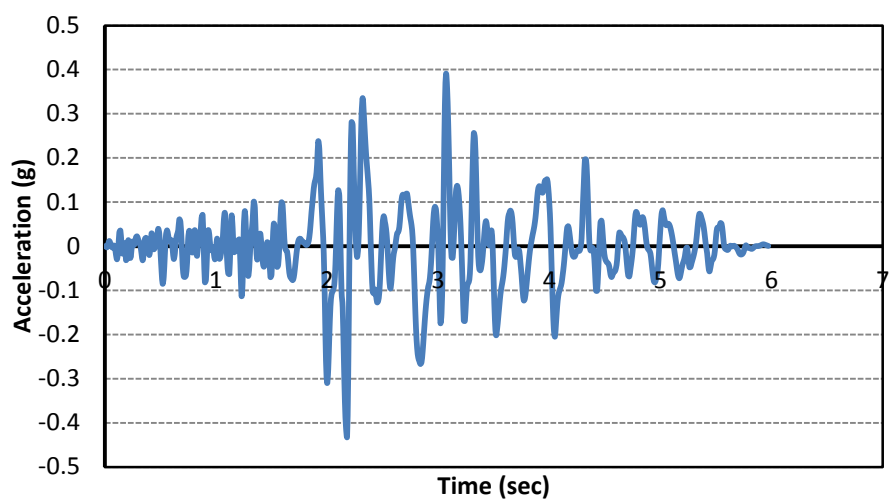
Ακολουθούν γραφήματα στα οποία παρουσιάζονται τα επιταχυνσιογραφήματα καθώς και τα φάσματα επιταχύνσεων των καταγραφών.



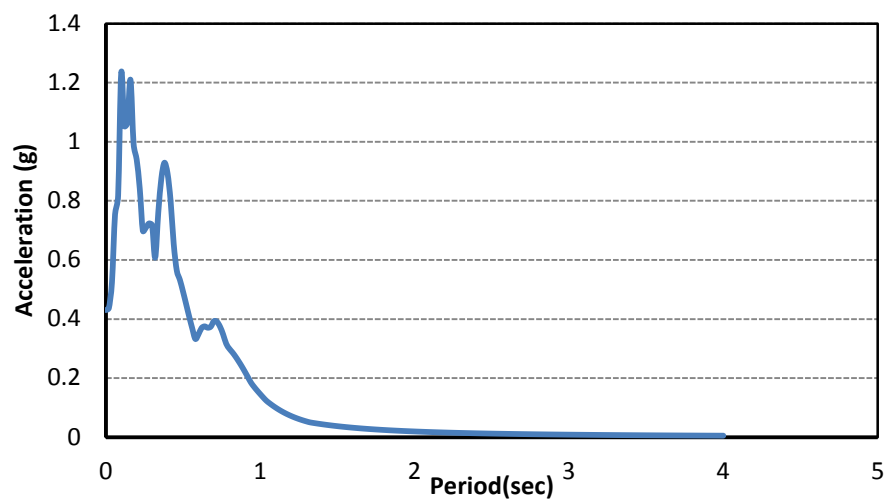
Σχήμα 6.3:Επιταχυνσιογράφημα καταγραφής Northridge στη διεύθυνση x



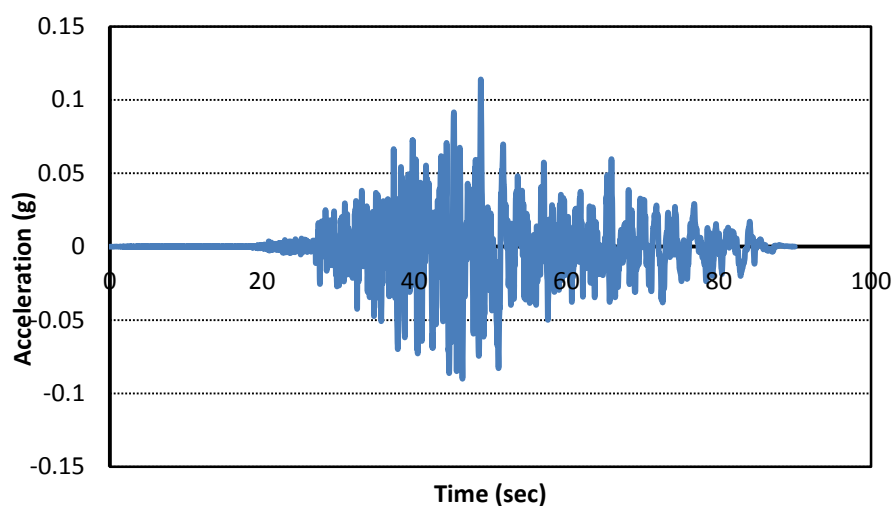
Σχήμα 6.4: Φάσμα επιταχύνσεων καταγραφής Northridge στη διεύθυνση x



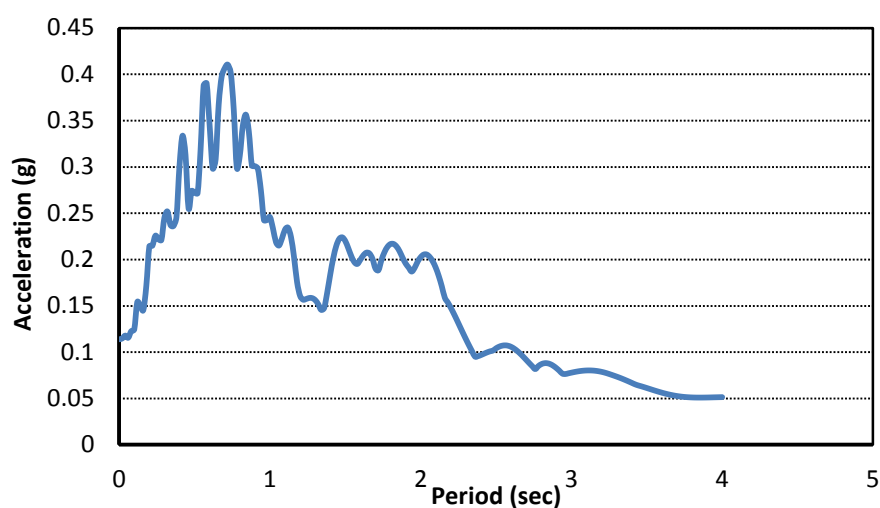
Σχήμα 6.5: Επιταχυνσιογράφημα καταγραφής Northridge στη διεύθυνση y



Σχήμα 6.6: Φάσμα επιταχύνσεων καταγραφής Northridge στη διεύθυνση y



Σχήμα 6.7: Επιταχυνσιογράφημα καταγραφής Chi-Chi



Σχήμα 6.8: Φάσμα επιταχύνσεων καταγραφής Chi-Chi

Για λόγους υπολογιστικού κόστους αλλά και λόγω της συμμετρίας του φορέα δημιουργούνται λίγοι σε αριθμό συνδυασμοί φόρτισης για τον υπολογισμό της απόκρισης χρονοϊστορίας της κατασκευής.

Οι συνδυασμοί φόρτισης που επιβλήθηκαν στην κατασκευή είναι οι εξής:

- $E_x+0.3E_y$
- $E_x-0.3E_y$
- $G+E_x+0.3E_y$
- $G+E_x-0.3E_y$
- $G+Northridge-x$
- $G+Northridge-y$
- $Northridge-x + Northridge-y$
- $G+Northridge-x + Northridge-y$
- $G+Chi-Chi$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

➤ Δυναμικά Χαρακτηριστικά Διαφράγματος Σεισμικής Μόνωσης

Πίνακας 6.11: Ιδιομορφές Ταλάντωσης 2^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ	ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ (sec)	ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ (cyc/sec)
1 ^η	2.4968	0.4005
2 ^η	2.4940	0.4010
3 ^η	2.4897	0.4017

Πίνακας 6.12: Ποσοστά Ιδιομορφικών Μαζών 2^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ	ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ (sec)	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless
1 ^η	2.4968	0.1072	0.4966	0
2 ^η	2.4940	0.8225	0.1775	0
3 ^η	2.4897	0.0703	0.3259	0

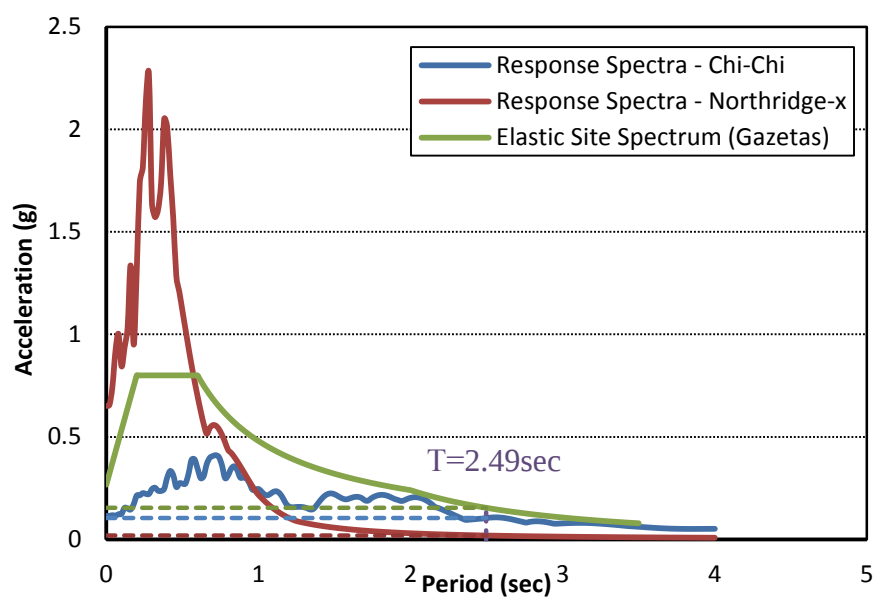
➤ Μετακινήσεις Εφεδράνων

Πίνακας 6.13: Μετακινήσεις Εφεδράνων FPS 2^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 2 ^{ov} ΜΟΝΤΕΛΟΥ					
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	0	0	0	0	0
RSP-x	0	0.152739	0.000198	0	0.152777	0.000419
RSP-y	0	0.000430	0.152723	0	0.000859	0.152808
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.152739	0.045817	0	0.152777	0.045844
G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey	0	0.152739	0.045817	0	0.152777	0.045844
Northridge-x / G+Northridge-x	0	0.006551	4.207E-06	0	0.006558	8.977E-06
Northridge-y / G+Northridge-y	0	6.105E-06	0.003333	0	0.000014	0.003341
(Northridge-x) + (Northridge-y) / (G+Northridge-x) +(G+Northridge-y)	0	0.0080341	0.003333	0	0.008039	0.003341
Chi-Chi	0	0.004657	0.004658	0	0.004686	0.004688

Παρατηρούμε ότι η μετακίνηση των εφεδράνων υπό την επιβολή του φάσματος του καθ. Γ. Γκαζέτα (0.1527m) είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη μετακίνηση λόγω της επιβολής των σεισμικών καταγραφών Northridge (0.0066m) και Chi-Chi (0.0047m). Το γεγονός αυτό εξηγείται παρατηρώντας το παρακάτω γράφημα (Σχήμα 6.9) όπου φαίνεται ότι για περίοδο εφεδράνων $T=2.49\text{sec}$ οι φασματικές επιταχύνσεις των φυσικών καταγραφών Northridge και Chi-Chi είναι αρκετά μικρότερες από την επιτάχυνση του ελαστικού φάσματος του καθ. Γ. Γκαζέτα.

Γενικά σημειώνουμε ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη φασματική ανάλυση δεν είναι αξιόπιστα καθώς ο συνδυασμός της ελαστικής φασματικής ανάλυσης με εφέδρανα προσομοιωμένα με ανελαστικά στοιχεία στο λογισμικό SAP2000 δε συνάδει. Ο σχεδιασμός των σεισμικών μονωτήρων πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης ιστορίας καθώς είναι η μέθοδος η οποία ανταποκρίνεται με ορθότητα και ακρίβεια στη μη γραμμική (υστερητική) συμπεριφορά των μονωτήρων.



Σχήμα 6.9: Σύγκριση Φασμάτων Επιταχύνσεων Καταγραφών Chi-Chi/ Northridge Με Ελαστικό Φάσμα Επιταχύνσεων του καθ. Γ. Γκαζέτα

Πίνακας 6.14: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων 1^{ov} - 2^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης (Μέση Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 2 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 1 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	0	0	0	0	0
RSP-x	0	0.152739	0.000198	0	0.162234	0.000162
RSP-y	0	0.000430	0.152723	0	0.000565	0.162232
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.152739	0.045817	0	0.162234	0.048670
G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey	0	0.152739	0.045817	0	0.162234	0.048670

Πίνακας 6.15: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων 1^{ov} - 2^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης (Μέγιστη Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 2 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 1 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	0	0	0	0	0
RSP-x	0	0.152777	0.000419	0	0.162256	0.000342
RSP-y	0	0.000859	0.152808	0	0.001134	0.162312
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.152777	0.045844	0	0.162256	0.048695
G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey	0	0.152777	0.045844	0	0.162256	0.048695

Παρατηρούμε ότι οι μετακινήσεις των εφεδράνων των δύο μοντέλων παρουσιάζουν μικρή διαφορά. Λόγω των μεγάλων οριζόντιων δυσκαμψιών και λόγω της διαφραγματικής λειτουργίας που έχει επιβληθεί, γίνεται ανακατανομή των δυνάμεων με συνέπεια να επέρχεται ισορροπία στο σύστημα μόνωσης και ως αποτέλεσμα τα εφέδρανα να μετατοπίζονται το ίδιο.

➤ Εντατικά Μεγέθη Εφεδράνων

Πίνακες 6.16, 6.17, 6.18: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων (Μέση Τιμή) $2^{ov} - 1^{ov}$
Μοντέλου Προσομοίωσης

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	346.5482	0.4475	0	341.2914	0.3376
E2	0	542.3476	0.8418	0	536.2955	0.6376
E3	0	666.5399	0.8231	0	658.1553	0.6185
E4	0	791.5769	1.0781	0	780.0446	0.8187
E5	0	989.1442	1.4303	0	975.1036	1.0888
E6	0	1235.2141	1.6425	0	1218.8969	1.2503
E7	0	1481.9119	1.4812	0	1462.6806	1.1218
E8	0	2116.2004	2.7811	0	2096.5652	2.1128
E9	0	2606.6848	2.1366	0	2584.0689	1.6264
E10-1	0	2657.5100	5.0020	0	3101.0020	2.8656
E10-2	0	2651.6410	5.9820			
E10-3	0	2694.1770	0.4460			
E10-4	0	3118.7510	1.1470			
E10-5	0	2865.5600	4.0310			
E11-1	0	6533.4200	1.0810	0	6825.8230	4.5625
E11-2	0	5749.8830	9.3860			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-y			RSP-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	1.0278	346.4748	0	1.2553	341.2569
E2	0	1.8572	542.2249	0	2.2775	536.2250
E3	0	1.9948	666.4422	0	2.4475	658.0973
E4	0	2.6427	791.5691	0	3.2330	780.0743
E5	0	2.9798	989.1474	0	3.6429	975.1808
E6	0	3.3103	1235.2412	0	4.0497	1219.0233
E7	0	4.3937	1481.9450	0	5.3644	1462.8335
E8	0	5.4508	2115.7677	0	6.6683	2096.4069
E9	0	4.1672	2606.6135	0	4.9958	2584.2268
E10-1	0	0.3000	2656.1870	0	6.5012	3100.6770
E10-2	0	3.3140	2652.4840			
E10-3	0	6.1650	2693.5290			
E10-4	0	7.6850	3117.8290			
E10-5	0	7.0610	2864.0930			
E11-1	0	0.7390	6532.5180	0	0.2440	6824.6490
E11-2	0	0.6500	5747.3110			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	346.5484	103.9436	0	341.2915	102.3778
E2	0	542.3479	162.6701	0	536.2965	160.8692
E3	0	666.5403	199.9350	0	658.1557	197.4304
E4	0	791.5774	237.4734	0	780.0454	234.0239
E5	0	989.1448	296.7484	0	975.1044	292.5567
E6	0	1235.2146	370.5770	0	1218.8977	365.7098
E7	0	1481.9127	444.5871	0	1462.6818	438.8522
E8	0	2116.2010	634.7386	0	2096.5663	628.9271
E9	0	2606.6852	781.9882	0	2584.0698	775.2708
E10-1	0	2657.5100	796.8720	0	3101.0026	930.2096
E10-2	0	2651.6410	795.7680			
E10-3	0	2694.1780	808.0590			
E10-4	0	3118.7520	935.3490			
E10-5	0	2865.5610	859.2370			
E11-1	0	6533.4200	1959.7560	0	6825.8230	2047.4035
E11-2	0	5749.8830	1724.2190			

Πίνακες 6.19, 6.20, 6.21: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων (Μέγιστη Τιμή) 2^{ου} -1^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	346.6260	0.9460	0	341.3330	0.7170
E2	0	542.5020	1.4870	0	536.3790	1.1310
E3	0	666.6060	1.4220	0	658.1910	1.0770
E4	0	791.8150	1.7810	0	780.1720	1.3480
E5	0	989.3900	2.6990	0	975.2360	2.0460
E6	0	1235.4890	3.0960	0	1219.0450	2.3740
E7	0	1482.2340	3.3430	0	1462.8540	2.5650
E8	0	2116.5550	5.7790	0	2096.7560	4.4030
E9	0	2607.2470	4.8460	0	2584.3730	3.7370
E10-1	0	2657.5100	5.0020	0	3101.002	2.8656
E10-2	0	2651.6410	5.9820			
E10-3	0	2694.1770	0.4460			
E10-4	0	3118.7510	1.1470			
E10-5	0	2865.5600	4.0310			
E11-1	0	6533.4200	1.0810	0	6825.823	4.5625
E11-2	0	5749.8830	9.3860			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-y			RSP-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	1.9500	346.6970	0	2.3850	341.4500
E2	0	3.0520	542.6140	0	3.7480	536.5640
E3	0	3.7510	666.7520	0	4.6000	658.3640
E4	0	4.4540	791.8990	0	5.4510	780.3600
E5	0	4.8190	989.5400	0	5.8810	975.5230
E6	0	6.0180	1235.7450	0	7.3510	1219.4640
E7	0	7.2200	1482.4580	0	8.8220	1463.2840
E8	0	10.3090	2116.8750	0	12.6440	2097.3730
E9	0	12.6990	2607.4150	0	15.5850	2584.9300
E10-1	0	0.3000	2656.1870	0	6.5012	3100.677
E10-2	0	3.3140	2652.4840			
E10-3	0	6.1650	2693.5290			
E10-4	0	7.6850	3117.8290			
E10-5	0	7.0610	2864.0930			
E11-1	0	0.7390	6532.5180	0	0.244	6824.649
E11-2	0	0.6500	5747.3110			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			
	ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	346.6260	104.0130	0	341.3330	102.4370	
E2	0	542.5030	162.7900	0	536.3800	160.9730	
E3	0	666.6060	200.0280	0	658.1910	197.5100	
E4	0	791.8160	237.5740	0	780.1730	234.1110	
E5	0	989.3910	296.8700	0	975.2370	292.6620	
E6	0	1235.4900	370.7360	0	1219.0470	365.8470	
E7	0	1482.2350	444.7500	0	1462.8560	438.9930	
E8	0	2116.5570	635.0810	0	2096.7600	629.2230	
E9	0	2607.2500	782.2390	0	2584.3770	775.4880	
E10-1	0	2657.5100	796.8720	0	3101.0026	930.2096	
E10-2	0	2651.6410	795.7680				
E10-3	0	2694.1780	808.0590				
E10-4	0	3118.7520	935.3490				
E10-5	0	2865.5610	859.2370				
E11-1	0	6533.4200	1959.7560	0	6825.823	2047.4035	
E11-2	0	5749.8830	1724.2190				

Παρατηρούμε ότι οι δυνάμεις του 2^{ου} μοντέλου προσομοίωσης είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές του 1^{ου}, όπως λογικά αναμένονται, καθώς ο συντελεστής τριβής μ των εφεδράνων του 2^{ου} μοντέλου (περίπου 5%) είναι μεγαλύτερος από αυτόν του 1^{ου} (4%).

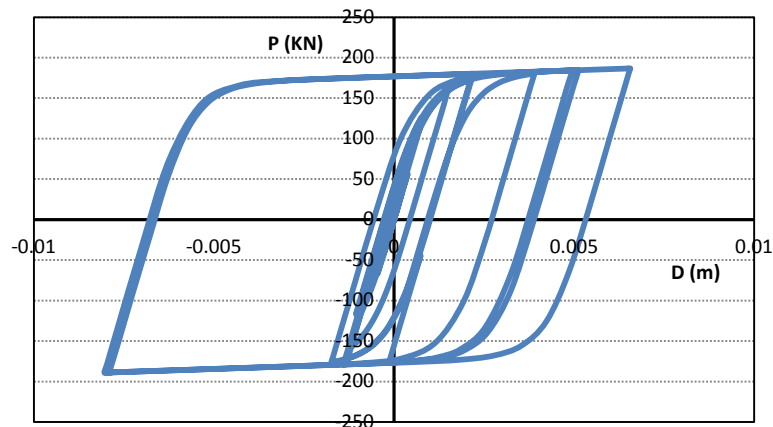
Πίνακας 6.22: Εντατικά Μεγέθη Εφεδράνων (Μέση Τιμή) Εφεδράνων FPS 2^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης Λόγω Σεισμικών Καταγραφών

ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x / G+Northridge-x			Northridge-y / G+Northridge-y			Northridge-x+y / G+Northridge-x+y			Chi-Chi		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	186.7228	0.3387	0	0.6169	181.2075	0	188.9610	181.2077	0	132.1543	131.9364
E2	0	290.0885	0.6401	0	1.1028	281.4804	0	293.6068	281.4814	0	205.2148	205.0584
E3	0	357.4958	0.6253	0	1.1689	346.9121	0	361.8154	346.9128	0	252.5575	253.0284
E4	0	426.1101	0.8111	0	1.5578	413.5344	0	431.2301	413.5352	0	300.7722	301.8837
E5	0	532.0181	1.0645	0	1.7783	516.3106	0	538.4138	516.3120	0	375.8313	376.6712
E6	0	663.1343	1.2129	0	1.9799	643.5362	0	671.1263	643.5378	0	468.5093	469.4734
E7	0	795.2279	1.0797	0	2.6297	771.7196	0	804.8189	771.7208	0	561.8520	562.9819
E8	0	1127.7423	2.0847	0	3.2856	1094.2055	0	1141.4798	1094.2083	0	798.6055	796.5402
E9	0	1387.6726	1.5597	0	2.4482	1346.4292	0	1404.6056	1346.4305	0	980.8411	982.0042
E10-1	0	1418.3020	3.8640	0	0.0670	1376.0830	0	1435.5390	1376.0890	0	1006.1250	999.7160
E10-2	0	1415.2010	4.3670	0	2.0210	1373.3080	0	1432.3940	1373.3160	0	998.2230	1003.8540
E10-3	0	1437.2230	0.2480	0	3.7740	1394.5030	0	1454.6940	1394.5030	0	1018.4960	1014.4420
E10-4	0	1659.2160	0.8330	0	4.7010	1609.7890	0	1679.4670	1609.7900	0	1176.4180	1170.5180
E10-5	0	1526.4970	3.1030	0	4.3280	1480.9960	0	1545.0920	1480.9990	0	1084.1530	1074.9060
E11-1	0	3470.1820	0.6010	0	0.1650	3366.8150	0	3512.6640	3366.8150	0	2454.7450	2453.5790
E11-2	0	3054.0660	7.2380	0	0.1460	2962.9040	0	3091.4530	2962.9130	0	2165.6710	2153.6710

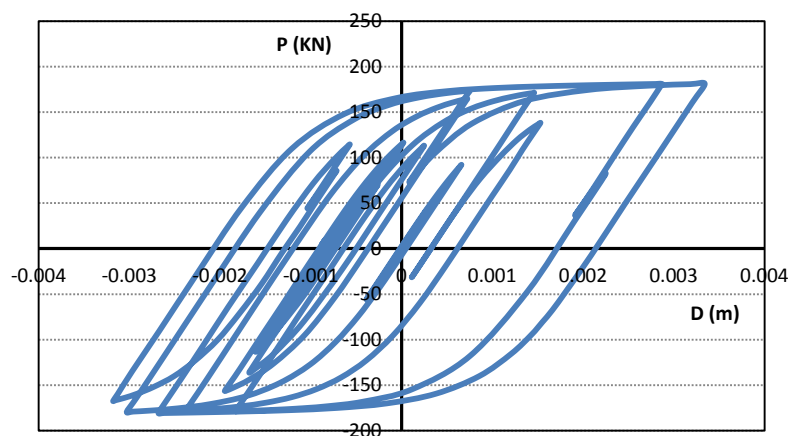
Πίνακας 6.23: Εντατικά Μεγέθη Εφεδράνων (Μέγιστη Τιμή) Εφεδράνων FPS 2^{ου} Μοντέλου
Προσομοίωσης Λόγω Σεισμικών Καταγραφών

ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x / G+Northridge-x			Northridge-y / G+Northridge-y			Northridge-x+y / G+Northridge-x+y			Chi-Chi		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	186.7320	0.7330	0	1.1470	181.2320	0	188.9690	181.2330	0	133.1510	132.4850
E2	0	290.1070	1.1520	0	1.7920	281.5230	0	293.6210	281.5250	0	206.7560	206.6540
E3	0	357.5040	1.1010	0	2.1990	346.9470	0	361.8180	346.9480	0	253.4380	254.5090
E4	0	426.1390	1.3790	0	2.6130	413.5720	0	431.2510	413.5730	0	303.2610	303.3020
E5	0	532.0480	2.0890	0	2.9540	516.3530	0	538.4390	516.3560	0	378.9800	378.7370
E6	0	663.1680	2.2600	0	3.6880	643.5890	0	671.1560	643.5940	0	470.7270	471.7240
E7	0	795.2670	2.4430	0	4.4190	771.7770	0	804.8520	771.7810	0	565.6040	565.2010
E8	0	1127.7860	4.4730	0	6.3180	1094.3240	0	1141.5210	1094.3310	0	802.8060	801.1040
E9	0	1387.7410	3.5380	0	7.7720	1346.5150	0	1404.6690	1346.5200	0	986.6650	984.6190
E10-1	0	1418.3020	3.8640	0	0.0670	1376.0830	0	1435.5390	1376.0890	0	1006.1250	999.7160
E10-2	0	1415.2010	4.3670	0	2.0210	1373.3080	0	1432.3940	1373.3160	0	998.2230	1003.8540
E10-3	0	1437.2230	0.2480	0	3.7740	1394.5030	0	1454.6940	1394.5030	0	1018.4960	1014.4420
E10-4	0	1659.2160	0.8330	0	4.7010	1609.7890	0	1679.4670	1609.7900	0	1176.4180	1170.5180
E10-5	0	1526.4970	3.1030	0	4.3280	1480.9960	0	1545.0920	1480.9990	0	1084.1530	1074.9060
E11-1	0	3470.1820	0.6010	0	0.1650	3366.8150	0	3512.6640	3366.8150	0	2454.7450	2453.5790
E11-2	0	3054.0660	7.2380	0	0.1460	2962.9040	0	3091.4530	2962.9130	0	2165.6710	2153.6780

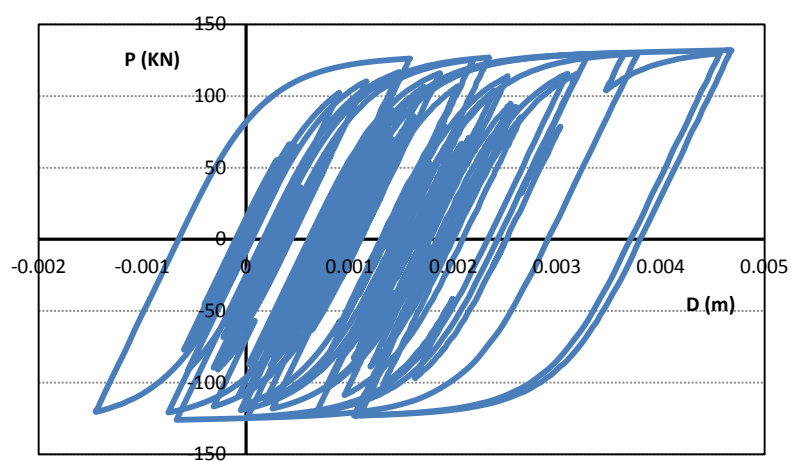
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βρόχοι υστέρησης τριών ενδεικτικών τύπων εφεδράνων FPS (E₁, E₆, E₁₁₋₁) προκειμένου να φανεί η συμπεριφορά τους σε οριζόντια διάτμηση υπό την επιβολή φυσικών σεισμικών καταγραφών.



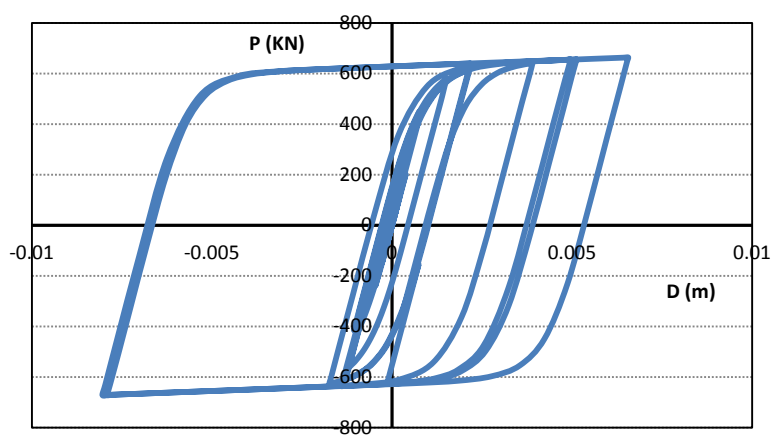
Σχήμα 6.10: Βρόχος Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E₁ για την Καταγραφή Northridge-x



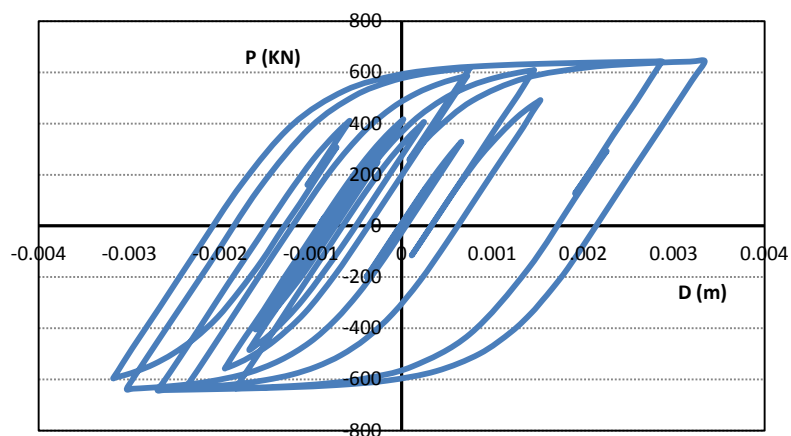
Σχήμα 6.11: Βρόχος Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_1 για την Καταγραφή Northridge-y



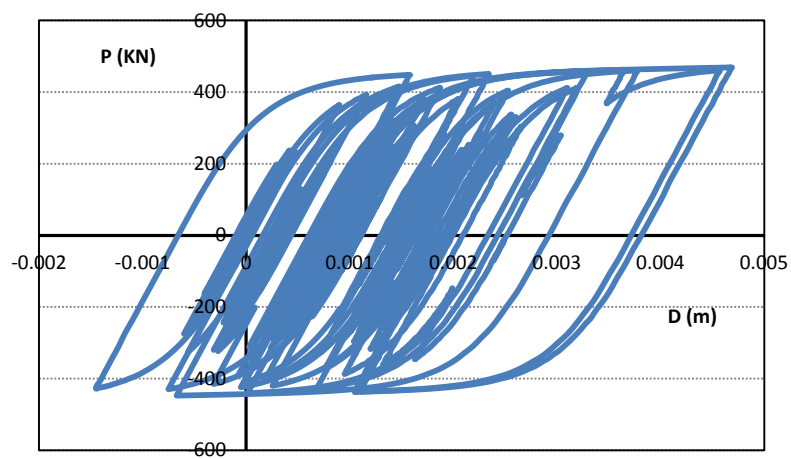
Σχήμα 6.12: Βρόχος Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_1 για την Καταγραφή Chi-Chi



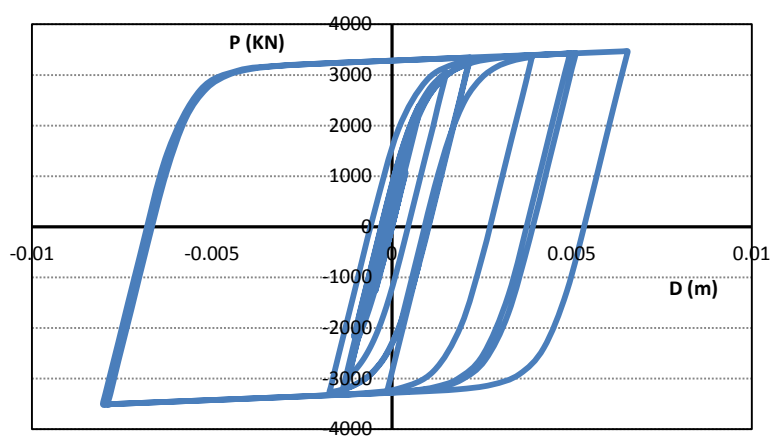
Σχήμα 6.14: Βρόχος Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_6 για την Καταγραφή Northridge-x



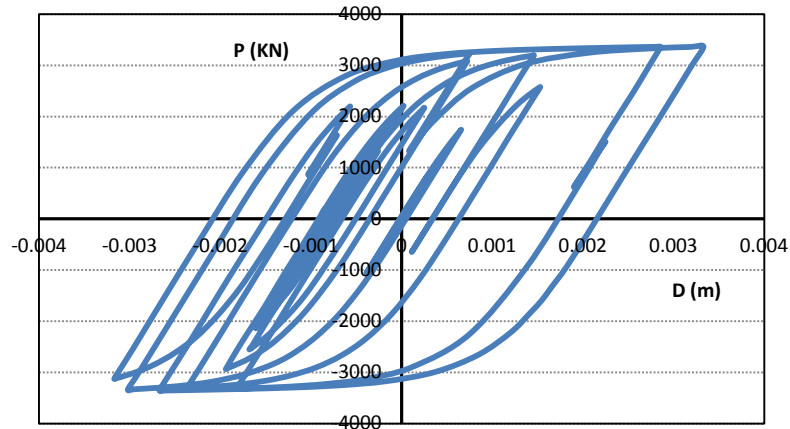
Σχήμα 6.15: Βρόχος Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_6 για την Καταγραφή Northridge-y



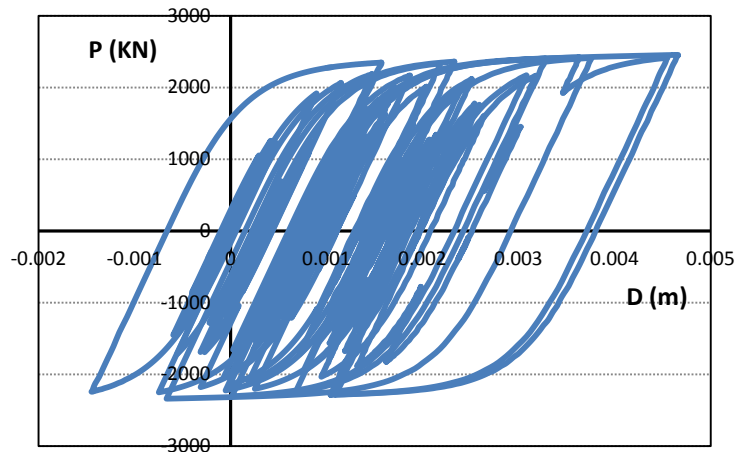
Σχήμα 6.16: Βρόχος Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_6 για την Καταγραφή Chi-Chi



Σχήμα 6.17: Βρόχος Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_{11-1} για την Καταγραφή Northridge-x



Σχήμα 6.18: Βρόχος Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_{11-1} για την Καταγραφή Northridge-y



Σχήμα 6.19: Βρόχος Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_{11-1} για την Καταγραφή Chi-Chi

6.3.3 3^ο Μοντέλο Προσομοίωσης – Στοχαστικό Μοντέλο

Το τρίτο μοντέλο προσομοίωσης είναι το ίδιο με το δεύτερο με την εξής τροποποίηση:

Οι συντελεστές τριβής για χαμηλή και υψηλή ταχύτητα ολίσθησης, μ_{slow} και μ_{fast} αντίστοιχα, και η παράμετρος α κάθε τύπου μονωτήρα εισήχθησαν ως σειρά τυχαίων αριθμών από την κανονική κατανομή με μέση τιμή 4% για τους συντελεστές τριβής και 42.9 για την παράμετρο α , και τυπική απόκλιση 20% για τους συντελεστές τριβής και 5% για την παράμετρο α αντίστοιχα.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Microsoft Office Excel και της συνάρτησης $NORMINV(RAND();mean;standard_deviation)$. Έτσι, δημιουργήθηκε ένα στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης. Οι τιμές των συντελεστών τριβής και της παραμέτρου α που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.24: Τιμές Συντελεστών Τριβής Ολίσθησης μ_{slow} και μ_{fast} και Παραμέτρου α που Χρησιμοποιήθηκαν στο 3^ο (Στοχαστικό) Μοντέλο Προσομοίωσης

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	α (sec/m)	μ_{slow}	μ_{fast}
E1	38.549	0.0531	0.0342
E2	41.926	0.0295	0.0231
E3	39.978	0.0365	0.0259
E4	42.641	0.0273	0.0175
E5	43.265	0.0518	0.036
E6	39.324	0.0433	0.0423
E7	40.996	0.0358	0.0341
E8	46.732	0.0312	0.0456
E9	43.731	0.046	0.0304
E10-1	42.25	0.0558	0.0555
E10-2	46.857	0.0455	0.0414
E10-3	42.863	0.0268	0.0294
E10-4	40.751	0.0435	0.0439
E10-5	44.395	0.0493	0.0387
E11-1	42.589	0.0233	0.0367
E11-2	43.081	0.0468	0.0524

Με τη βοήθεια της σχέσης (3.40) και θεωρώντας την ταχύτητα ολίσθησης $\dot{U} = 0.10m/sec$ έγινε ο υπολογισμός των νέων συντελεστών τριβής μ , οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 6.25: Τιμές Συντελεστών Τριβής Ολίσθησης μ που Χρησιμοποιήθηκαν στο 3^ο
(Στοχαστικό) Μοντέλο Προσομοίωσης

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	μ
E1	0.0346
E2	0.0232
E3	0.0261
E4	0.0176
E5	0.0362
E6	0.0423
E7	0.0341
E8	0.0455
E9	0.0306
E10-1	0.0555
E10-2	0.0414
E10-3	0.0294
E10-4	0.0439
E10-5	0.0388
E11-1	0.0365
E11-2	0.0523

Έπειτα έγιναν ξανά οι υπολογισμοί των μηχανικών ιδιοτήτων των εφεδράνων λόγω των διαφορετικών συντελεστών τριβής μ . Οι νέες ιδιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 6.26: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εφεδράνων FPS 3^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΦΟΡΤΙΟ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ W (KN)	ΜΑΖΑ M (t)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ F _H (KN)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΛΟΓΩ ΑΝΨΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ K _H (KN/m)	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΟΝΩΤΗΡΑ T (s)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ K _{eff} (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ T (s)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ A _{hys} (KNm)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ξ _{eff}	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ δv (m)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ D/Rp>1	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ K _{el} =100*K _H (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ C _{eff}
E1	3500	356.78	473.36	1505.38	3.06	2022.90	2.64	113.35	0.163	0.01	2.91	150537.63	191.77
E2	5500	560.65	681.13	2365.59	3.06	2910.81	2.76	119.42	0.119	0.01	4.34	236559.14	176.92
E3	6750	688.07	855.49	2903.23	3.06	3655.95	2.73	164.87	0.131	0.01	3.86	290322.58	257.18
E4	8000	815.49	946.26	3440.86	3.06	4043.86	2.82	132.07	0.095	0.01	5.71	344086.02	163.18
E5	10000	1019.37	1368.54	4301.08	3.06	5848.46	2.62	338.91	0.168	0.01	2.78	430107.53	578.37
E6	12500	1274.21	1787.06	5376.34	3.06	7637.01	2.57	495.14	0.188	0.01	2.38	537634.41	863.77
E7	15000	1529.05	2021.60	6451.61	3.06	8639.32	2.64	479.16	0.161	0.01	2.95	645161.29	808.39
E8	21500	2191.64	3141.38	9247.31	3.06	13424.69	2.54	914.95	0.198	0.01	2.21	924731.18	1606.63
E9	26500	2701.33	3477.91	11397.85	3.06	14862.87	2.68	758.92	0.148	0.01	3.29	1139784.95	1247.21
E10-1	26980	2750.25	4212.91	11604.30	3.06	18003.91	2.46	1401.67	0.226	0.01	1.81	1160430.11	2481.01
E10-2	26918	2743.93	3824.59	11577.63	3.06	16344.40	2.57	1044.04	0.186	0.01	2.43	1157763.44	1817.09
E10-3	27355	2788.48	3556.41	11765.59	3.06	15198.32	2.69	751.85	0.144	0.01	3.43	1176559.14	1221.13
E10-4	31712	3232.62	4583.60	13639.57	3.06	19588.04	2.55	1302.86	0.193	0.01	2.29	1363956.99	2281.04
E10-5	29117	2968.09	4060.96	12523.44	3.06	17354.51	2.60	1058.12	0.177	0.01	2.59	1252344.09	1826.11
E11-1	66502	6779.00	9121.13	28603.01	3.06	38979.19	2.62	2272.63	0.169	0.01	2.76	2860301.08	3883.98
E11-2	58526	5965.95	8952.71	25172.47	3.06	38259.44	2.48	2866.36	0.218	0.01	1.92	2517247.31	5069.10

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

➤ Δυναμικά Χαρακτηριστικά Διαφράγματος Σεισμικής Μόνωσης

Πίνακας 6.27: Ιδιομορφές Ταλάντωσης 3^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ	ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ (sec)	ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ (cyc/sec)
1 ^η	2.636164	0.37934
2 ^η	2.61783	0.382
3 ^η	2.602044	0.38431

Πίνακας 6.28: Ποσοστά Ιδιομορφικών Μαζών 3^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης

ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ	ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ (sec)	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless
1 ^η	2.6362	0.4190	0.0485	0
2 ^η	2.6178	0.1038	0.8962	0
3 ^η	2.6020	0.4772	0.0553	0

➤ Μετακινήσεις Εφεδράνων

Πίνακας 6.29: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων FPS 3^{ου} – 2^{ου} -1^{ου} Μοντέλου

Προσομοίωσης (Μέση Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 3 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 2 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 1 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RSP-x	0	0.166896	0.003493	0	0.152739	0.000198	0	0.162234	0.000162
RSP-y	0	0.001226	0.166531	0	0.000430	0.152723	0	0.000565	0.162232
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.166896	0.050122	0	0.152739	0.045817	0	0.162234	0.048670
G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey	0	0.166896	0.050122	0	0.152739	0.045817	0	0.162234	0.048670
Northridge-x / G+Northridge-x	0	0.007827	0.000033	0	0.006551	4.21E-06			
Northridge-y / G+Northridge-y	0	0.000012	0.003871	0	6.1045E-06	0.003333			
(Northridge-x) + (Northridge-y) / (G+Northridge-x) + (G+Northridge-y)	0	0.009164	0.003899	0	0.00803408	0.003333			
Chi-Chi	0	0.006552	0.006548	0	0.004657	0.004658			

Πίνακας 6.30: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων FPS 3^{ov} – 2^{ov} -1^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης (Μέγιστη Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 3 ^{ov} ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 2 ^{ov} ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 1 ^{ov} ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RSP-x	0	0.169444	0.007361	0	0.152777	0.000419	0	0.162256	0.000342
RSP-y	0	0.002489	0.167465	0	0.000859	0.152808	0	0.001134	0.162312
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.169445	0.050707	0	0.152777	0.045844	0	0.162256	0.048695
G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey	0	0.169445	0.050707	0	0.152777	0.045844	0	0.162256	0.048695
Northridge-x / G+Northridge-x	0	0.007836	0.000086	0	0.006558	8.98E-06			
Northridge-y / G+Northridge-y	0	0.000029	0.003878	0	0.000014	0.003341			
(Northridge-x) + (Northridge-y) / (G+Northridge-x) + (G+Northridge-y)	0	0.009184	0.003922	0	0.008039	0.003341			
Chi-Chi	0	0.006604	0.006606	0	0.004686	0.004688			

➤ Εντατικά Μεγέθη Εφεδράνων

Πίνακες 6.31, 6.32, 6.33, 6.34, 6.35, 6.36, 6.37: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων (Μέση Τιμή) 3^{ov}-2^{ov}-1^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	337.1365	6.9850	0	346.5482	0.4475	0	341.2914	0.3376
E2	0	487.0938	12.0982	0	542.3476	0.8418	0	536.2955	0.6376
E3	0	614.5244	11.9723	0	666.5399	0.8231	0	658.1553	0.6185
E4	0	678.9116	14.8924	0	791.5769	1.0781	0	780.0446	0.8187
E5	0	976.2848	22.9969	0	989.1442	1.4303	0	975.1036	1.0888
E6	0	1272.6584	27.5962	0	1235.2141	1.6425	0	1218.8969	1.2503
E7	0	1439.2923	23.4052	0	1481.9119	1.4812	0	1462.6806	1.1218
E8	0	2229.2129	47.4614	0	2116.2004	2.7811	0	2096.5652	2.1128
E9	0	2475.4033	33.2233	0	2606.6848	2.1366	0	2584.0689	1.6264
E10-1	0	2999.1640	90.4880	0	2657.5100	5.0020	0	3101.0020	2.8656
E10-2	0	2713.2760	101.2090	0	2651.6410	5.9820			
E10-3	0	2515.6130	4.1240	0	2694.1770	0.4460			
E10-4	0	3240.6000	17.2660	0	3118.7510	1.1470			
E10-5	0	2871.0900	64.7820	0	2865.5600	4.0310			
E11-1	0	6493.3100	10.5760	0	6533.4200	1.0810	0	6825.8230	4.5625
E11-2	0	6373.4110	166.2830	0	5749.8830	9.3860			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-γ			RSP-γ			RSP-γ		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	2.6030	336.5963	0	1.0278	346.4748	0	1.2553	341.2569
E2	0	4.3498	483.9645	0	1.8572	542.2249	0	2.2775	536.2250
E3	0	4.9681	607.9035	0	1.9948	666.4422	0	2.4475	658.0973
E4	0	6.0090	673.4697	0	2.6427	791.5691	0	3.2330	780.0743
E5	0	7.6835	975.0023	0	2.9798	989.1474	0	3.6429	975.1808
E6	0	8.9339	1273.7562	0	3.3103	1235.2412	0	4.0497	1219.0233
E7	0	10.9997	1441.0233	0	4.3937	1481.9450	0	5.3644	1462.8335
E8	0	14.6572	2235.2034	0	5.4508	2115.7677	0	6.6683	2096.4069
E9	0	10.3025	2477.9092	0	4.1672	2606.6135	0	4.9958	2584.2268
E10-1	0	1.3960	2987.0910	0	0.3000	2656.1870	0	6.5012	3100.6770
E10-2	0	7.5570	2735.6290	0	3.3140	2652.4840			
E10-3	0	13.7960	2530.8850	0	6.1650	2693.5290			
E10-4	0	19.2560	3260.3230	0	7.6850	3117.8290			
E10-5	0	17.0610	2882.2030	0	7.0610	2864.0930			
E11-1	0	3.0230	6490.9710	0	0.7390	6532.5180	0	0.2440	6824.6490
E11-2	0	2.9670	6351.0620	0	0.6500	5747.3110			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	337.1375	101.2949	0	346.5484	103.9436	0	341.2915	102.3778
E2	0	487.0962	145.8328	0	542.3479	162.6701	0	536.2965	160.8692
E3	0	614.5264	182.9104	0	666.5403	199.9350	0	658.1557	197.4304
E4	0	678.9144	202.6622	0	791.5774	237.4734	0	780.0454	234.0239
E5	0	976.2880	293.6132	0	989.1448	296.7484	0	975.1044	292.5567
E6	0	1272.6622	383.4024	0	1235.2146	370.5770	0	1218.8977	365.7098
E7	0	1439.2970	433.2346	0	1481.9127	444.5871	0	1462.6818	438.8522
E8	0	2229.2183	672.8952	0	2116.2010	634.7386	0	2096.5663	628.9271
E9	0	2475.4071	744.4888	0	2606.6852	781.9882	0	2584.0698	775.2708
E10-1	0	2999.1640	900.6840	0	2657.5100	796.8720	0	3101.0026	930.2096
E10-2	0	2713.2770	826.9060	0	2651.6410	795.7680			
E10-3	0	2515.6160	759.2770	0	2694.1780	808.0590			
E10-4	0	3240.6050	978.2490	0	3118.7520	935.3490			
E10-5	0	2871.0950	867.0840	0	2865.5610	859.2370			
E11-1	0	6493.3100	1947.3200	0	6533.4200	1959.7560	0	6825.8230	2047.4035
E11-2	0	6373.4110	1912.5610	0	5749.8830	1724.2190			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x / G+Northridge-x			Northridge-x / G+Northridge-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	131.6638	4.2761	0	186.7228	0.3387
E2	0	144.8095	7.5276	0	290.0885	0.6401
E3	0	197.1007	7.4729	0	357.4958	0.6253
E4	0	166.6206	8.7654	0	426.1101	0.8111
E5	0	392.1074	13.5784	0	532.0181	1.0645
E6	0	565.7537	16.0313	0	663.1343	1.2129
E7	0	557.2724	13.9734	0	795.2279	1.0797
E8	0	1040.0330	28.1415	0	1127.7423	2.0847
E9	0	891.8772	19.8885	0	1387.6726	1.5597
E10-1	0	1573.2460	53.8390	0	1418.3020	3.8640
E10-2	0	1194.7190	58.3910	0	1415.2010	4.3670
E10-3	0	887.2550	3.4250	0	1437.2230	0.2480
E10-4	0	1484.7010	11.2310	0	1659.2160	0.8330
E10-5	0	1217.0640	39.9370	0	1526.4970	3.1030
E11-1	0	2627.5900	8.4110	0	3470.1820	0.6010
E11-2	0	3228.5690	100.7820	0	3054.0660	7.2380

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-γ / G+Northridge-γ			Northridge-γ / G+Northridge-γ		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	0.9523	125.7072	0	0.6169	181.2075
E2	0	1.4650	135.4584	0	1.1028	281.4804
E3	0	1.6310	185.6091	0	1.1689	346.9121
E4	0	1.7877	153.0116	0	1.5578	413.5344
E5	0	2.7988	375.0860	0	1.7783	516.3106
E6	0	3.4470	544.3563	0	1.9799	643.5362
E7	0	4.0461	531.7580	0	2.6297	771.7196
E8	0	5.9021	1003.0545	0	3.2856	1094.2055
E9	0	3.7124	846.8234	0	2.4482	1346.4292
E10-1	0	0.4750	1525.0890	0	0.0670	1376.0830
E10-2	0	3.2370	1148.8450	0	2.0210	1373.3080
E10-3	0	5.3850	840.7580	0	3.7740	1394.5030
E10-4	0	7.9050	1430.2600	0	4.7010	1609.7890
E10-5	0	6.9300	1167.4040	0	4.3280	1480.9960
E11-1	0	0.9740	2514.2220	0	0.1650	3366.8150
E11-2	0	1.0180	3125.4250	0	0.1460	2962.9040

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x+y / G+Northridge-x+y			Northridge-x+y / G+Northridge-x+y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	133.6806	125.8020	0	188.9610	181.2077
E2	0	147.9886	135.7562	0	293.6068	281.4814
E3	0	201.0082	185.8163	0	361.8154	346.9128
E4	0	171.2490	153.3985	0	431.2301	413.5352
E5	0	397.8756	375.3960	0	538.4138	516.3120
E6	0	572.9553	544.6701	0	671.1263	643.5378
E7	0	565.9147	532.0292	0	804.8189	771.7208
E8	0	1052.3954	1003.6213	0	1141.4798	1094.2083
E9	0	907.1232	847.1928	0	1404.6056	1346.4305
E10-1	0	1588.7790	1526.0390	0	1435.5390	1376.0890
E10-2	0	1210.1820	1150.3980	0	1432.3940	1373.3160
E10-3	0	902.9370	840.7650	0	1454.6940	1394.5030
E10-4	0	1502.8790	1430.3040	0	1679.4670	1609.7900
E10-5	0	1233.7610	1168.0870	0	1545.0920	1480.9990
E11-1	0	2665.8110	2514.2360	0	3512.6640	3366.8150
E11-2	0	3262.2400	3127.0490	0	3091.4530	2962.9130

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Chi-Chi			Chi-Chi		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	94.5081	95.0632	0	132.1543	131.9364
E2	0	105.0496	105.3149	0	205.2148	205.0584
E3	0	143.2067	141.9490	0	252.5575	253.0284
E4	0	122.8995	120.5944	0	300.7722	301.8837
E5	0	283.7996	280.8327	0	375.8313	376.6712
E6	0	407.7342	403.9390	0	468.5093	469.4734
E7	0	403.1871	399.3742	0	561.8520	562.9819
E8	0	742.2758	749.5562	0	798.6055	796.5402
E9	0	645.2513	640.8745	0	980.8411	982.0042
E10-1	0	1111.1400	1139.6570	0	1006.1250	999.7160
E10-2	0	868.3330	846.6990	0	998.2230	1003.8540
E10-3	0	633.8290	645.7910	0	1018.4960	1014.4420
E10-4	0	1053.2670	1075.8690	0	1176.4180	1170.5180
E10-5	0	860.2900	891.2710	0	1084.1530	1074.9060
E11-1	0	1885.3950	1888.5340	0	2454.7450	2453.5790
E11-2	0	2284.5800	2336.4460	0	2165.6710	2153.6780

Πίνακες 6.38, 6.39, 6.40, 6.41, 6.42, 6.43, 6.44: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων
(Μέγιστη Τιμή) 3^{ov} -2^{ov} -1^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	342.7670	14.8310	0	346.6260	0.9460	0	341.3330	0.7170
E2	0	493.2180	21.4270	0	542.5020	1.4870	0	536.3790	1.1310
E3	0	619.4770	20.8600	0	666.6060	1.4220	0	658.1910	1.0770
E4	0	685.2060	24.3590	0	791.8150	1.7810	0	780.1720	1.3480
E5	0	988.2900	42.8350	0	989.3900	2.6990	0	975.2360	2.0460
E6	0	1286.5470	52.4820	0	1235.4890	3.0960	0	1219.0450	2.3740
E7	0	1459.8970	53.4970	0	1482.2340	3.3430	0	1462.8540	2.5650
E8	0	2268.5430	98.4240	0	2116.5550	5.7790	0	2096.7560	4.4030
E9	0	2506.1580	75.9990	0	2607.2470	4.8460	0	2584.3730	3.7370
E10-1	0	2999.1640	90.4880	0	2657.5100	5.0020	0	3101.002	2.8656
E10-2	0	2713.2760	101.2090	0	2651.6410	5.9820			
E10-3	0	2515.6130	4.1240	0	2694.1770	0.4460			
E10-4	0	3240.6000	17.2660	0	3118.7510	1.1470			
E10-5	0	2871.0900	64.7820	0	2865.5600	4.0310			
E11-1	0	6493.3100	10.5760	0	6533.4200	1.0810	0	6825.823	4.5625
E11-2	0	6373.4110	166.2830	0	5749.8830	9.3860			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-y			RSP-y			RSP-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	5.0360	338.7650	0	1.9500	346.6970	0	2.3850	341.4500
E2	0	7.2460	487.4590	0	3.0520	542.6140	0	3.7480	536.5640
E3	0	9.1010	610.7560	0	3.7510	666.7520	0	4.6000	658.3640
E4	0	10.0670	676.2880	0	4.4540	791.8990	0	5.4510	780.3600
E5	0	12.3530	978.8810	0	4.8190	989.5400	0	5.8810	975.5230
E6	0	15.3970	1278.9320	0	6.0180	1235.7450	0	7.3510	1219.4640
E7	0	18.2480	1445.9980	0	7.2200	1482.4580	0	8.8220	1463.2840
E8	0	28.3560	2246.9450	0	10.3090	2116.8750	0	12.6440	2097.3730
E9	0	29.9650	2485.5230	0	12.6990	2607.4150	0	15.5850	2584.9300
E10-1	0	1.3960	2987.0910	0	0.3000	2656.1870	0	6.5012	3100.677
E10-2	0	7.5570	2735.6290	0	3.3140	2652.4840			
E10-3	0	13.7960	2530.8850	0	6.1650	2693.5290			
E10-4	0	19.2560	3260.3230	0	7.6850	3117.8290			
E10-5	0	17.0610	2882.2030	0	7.0610	2864.0930			
E11-1	0	3.0230	6490.9710	0	0.7390	6532.5180	0	0.244	6824.649
E11-2	0	2.9670	6351.0620	0	0.6500	5747.3110			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 1ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	342.7710	102.5760	0	346.6260	104.0130	0	341.3330	102.4370
E2	0	493.2230	147.5990	0	542.5030	162.7900	0	536.3800	160.9730
E3	0	619.4830	183.7560	0	666.6060	200.0280	0	658.1910	197.5100
E4	0	685.2120	203.9620	0	791.8160	237.5740	0	780.1730	234.1110
E5	0	988.2970	295.8890	0	989.3910	296.8700	0	975.2370	292.6620
E6	0	1286.5530	387.2520	0	1235.4900	370.7360	0	1219.0470	365.8470
E7	0	1459.9070	437.0860	0	1482.2350	444.7500	0	1462.8560	438.9930
E8	0	2268.5590	679.1900	0	2116.5570	635.0810	0	2096.7600	629.2230
E9	0	2506.1710	749.5200	0	2607.2500	782.2390	0	2584.3770	775.4880
E10-1	0	2999.1640	900.6840	0	2657.5100	796.8720	0	3101.0026	930.2096
E10-2	0	2713.2770	826.9060	0	2651.6410	795.7680			
E10-3	0	2515.6160	759.2770	0	2694.1780	808.0590			
E10-4	0	3240.6050	978.2490	0	3118.7520	935.3490			
E10-5	0	2871.0950	867.0840	0	2865.5610	859.2370			
E11-1	0	6493.3100	1947.3200	0	6533.4200	1959.7560	0	6825.823	2047.4035
E11-2	0	6373.4110	1912.5610	0	5749.8830	1724.2190			

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x / G+Northridge-x			Northridge-x / G+Northridge-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	131.6820	9.1230	0	186.7320	0.7330
E2	0	144.8430	13.4440	0	290.1070	1.1520
E3	0	197.1270	13.0700	0	357.5040	1.1010
E4	0	166.6530	14.3880	0	426.1390	1.3790
E5	0	392.1590	26.2360	0	532.0480	2.0890
E6	0	565.8120	30.5430	0	663.1680	2.2600
E7	0	557.3490	31.7790	0	795.2670	2.4430
E8	0	1040.1760	59.8440	0	1127.7860	4.4730
E9	0	891.9880	45.5720	0	1387.7410	3.5380
E10-1	0	1573.2460	53.8390	0	1418.3020	3.8640
E10-2	0	1194.7190	58.3910	0	1415.2010	4.3670
E10-3	0	887.2550	3.4250	0	1437.2230	0.2480
E10-4	0	1484.7010	11.2310	0	1659.2160	0.8330
E10-5	0	1217.0640	39.9370	0	1526.4970	3.1030
E11-1	0	2627.5900	8.4110	0	3470.1820	0.6010
E11-2	0	3228.5690	100.7820	0	3054.0660	7.2380

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-y / G+Northridge-y			Northridge-y / G+Northridge-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	1.7750	125.7190	0	1.1470	181.2320
E2	0	2.4010	135.4780	0	1.7920	281.5230
E3	0	3.0520	185.6260	0	2.1990	346.9470
E4	0	2.9990	153.0290	0	2.6130	413.5720
E5	0	4.6140	375.1070	0	2.9540	516.3530
E6	0	6.1350	544.3840	0	3.6880	643.5890
E7	0	6.7570	531.7870	0	4.4190	771.7770
E8	0	11.2410	1003.1250	0	6.3180	1094.3240
E9	0	11.4700	846.8660	0	7.7720	1346.5150
E10-1	0	0.4750	1525.0890	0	0.0670	1376.0830
E10-2	0	3.2370	1148.8450	0	2.0210	1373.3080
E10-3	0	5.3850	840.7580	0	3.7740	1394.5030
E10-4	0	7.9050	1430.2600	0	4.7010	1609.7890
E10-5	0	6.9300	1167.4040	0	4.3280	1480.9960
E11-1	0	0.9740	2514.2220	0	0.1650	3366.8150
E11-2	0	1.0180	3125.4250	0	0.1460	2962.9040

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x+y / G+Northridge-x+y			Northridge-x+y / G+Northridge-x+y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	133.7210	126.0290	0	188.9690	181.2330
E2	0	148.0530	136.1140	0	293.6210	281.5250
E3	0	201.0660	186.0600	0	361.8180	346.9480
E4	0	171.3200	153.7580	0	431.2510	413.5730
E5	0	397.9720	375.9680	0	538.4390	516.3560
E6	0	573.0550	545.2800	0	671.1560	643.5940
E7	0	566.0750	532.7490	0	804.8520	771.7810
E8	0	1052.6860	1004.7680	0	1141.5210	1094.3310
E9	0	907.3680	848.1370	0	1404.6690	1346.5200
E10-1	0	1588.7790	1526.0390	0	1435.5390	1376.0890
E10-2	0	1210.1820	1150.3980	0	1432.3940	1373.3160
E10-3	0	902.9370	840.7650	0	1454.6940	1394.5030
E10-4	0	1502.8790	1430.3040	0	1679.4670	1609.7900
E10-5	0	1233.7610	1168.0870	0	1545.0920	1480.9990
E11-1	0	2665.8110	2514.2360	0	3512.6640	3366.8150
E11-2	0	3262.2400	3127.0490	0	3091.4530	2962.9130

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 3ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Chi-Chi			Chi-Chi		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	96.2680	98.5510	0	133.1510	132.4850
E2	0	109.1080	109.2910	0	206.7560	206.6540
E3	0	147.5250	144.2970	0	253.4380	254.5090
E4	0	125.9970	125.7860	0	303.2610	303.3020
E5	0	290.9920	291.7260	0	378.9800	378.7370
E6	0	416.8940	412.2530	0	470.7270	471.7240
E7	0	411.0460	411.9990	0	565.6040	565.2010
E8	0	760.8110	767.0770	0	802.8060	801.1040
E9	0	653.9520	659.6200	0	986.6650	984.6190
E10-1	0	1111.1400	1139.6570	0	1006.1250	999.7160
E10-2	0	868.3330	846.6990	0	998.2230	1003.8540
E10-3	0	633.8290	645.7910	0	1018.4960	1014.4420
E10-4	0	1053.2670	1075.8690	0	1176.4180	1170.5180
E10-5	0	860.2900	891.2710	0	1084.1530	1074.9060
E11-1	0	1885.3950	1888.5340	0	2454.7450	2453.5790
E11-2	0	2284.5800	2336.4460	0	2165.6710	2153.6780

Παρατηρούνται διαφορές ανάμεσα στις δυνάμεις των τριών μοντέλων προσομοίωσης καθώς είναι διαφορετικοί οι συντελεστές τριβής μ . Όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής μ , αυξάνονται οι δυνάμεις και μειώνονται οι μετακινήσεις των εφεδράνων. Ενώ, όσο μειώνεται ο συντελεστής τριβής μ , μειώνονται οι δυνάμεις και αυξάνονται οι μετακινήσεις των εφεδράνων.

6.3.4 4^ο Και 5^ο Μοντέλο Προσομοίωσης – Εισαγωγή Συντελεστών Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος

Το 4^ο και το 5^ο μοντέλο προσομοίωσης δημιουργήθηκαν τροποποιώντας το 2^ο μοντέλο προσομοίωσης. Συγκεκριμένα προχωρήσαμε σε τροποποιήσεις των συντελεστών τριβής για χαμηλή και υψηλή ταχύτητα ολίσθησης, μ_{slow} και μ_{fast} αντίστοιχα, των εφεδράνων ολίσθησης (FPS) εισάγοντας τους συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων του συστήματος σεισμικής μόνωσης, γνωστοί ως συντελεστές λ . Με τη χρήση των συντελεστών λ καθορίσαμε τα άνω και κάτω όρια των τιμών των συντελεστών τριβής μ_{slow} και μ_{fast} και εξετάσαμε την επιρροή της μεταβλητότητας παραμέτρων, όπως η ηλικία, η μόλυνση και η θερμοκρασία, στη συμπεριφορά των εφεδράνων.

Οι ονομαστικές τιμές των συντελεστών τριβής μ_{fast} και μ_{slow} των εφεδράνων είναι γνωστές από το 2^ο μοντέλο προσομοίωσης. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε συνθήκες νέου εφεδράνου, θερμοκρασία 20^ο C και σχετικές συνθήκες κατακόρυφης φόρτισης, συχνότητας, ταχύτητας, παραμόρφωσης και μετακίνησης. Θεωρούμε τις τιμές των συντελεστών μ_{fast} και μ_{slow} ως $\mu_{fast,n}$ και $\mu_{slow,n}$.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των συντελεστών αυτών, $\mu_{fast,min}$, $\mu_{slow,min}$ και $\mu_{fast,max}$, $\mu_{slow,max}$ αντίστοιχα, ορίζονται ως το γινόμενο των ονομαστικών τιμών και μιας σειράς συντελεστών λ , ως ακολούθως:

$$\begin{aligned}\mu_{fast,max} &= \lambda_{max} \cdot \mu_{fast} \\ \mu_{fast,min} &= \lambda_{min} \cdot \mu_{fast}\end{aligned}\tag{6.3}$$

$$\begin{aligned}\mu_{slow,max} &= \lambda_{max} \cdot \mu_{slow} \\ \mu_{slow,min} &= \lambda_{min} \cdot \mu_{slow}\end{aligned}$$

Όπου

$$\begin{aligned}\lambda_{max} &= \lambda_{max,1} \cdot \lambda_{max,2} \cdot \lambda_{max,3} \cdot \dots \\ \lambda_{min} &= \lambda_{min,1} \cdot \lambda_{min,2} \cdot \lambda_{min,3} \cdot \dots\end{aligned}\tag{6.4}$$

Καθένας από τους συντελεστές $\lambda_{\max,i}$, $i=1,2,3,..$ είναι μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδας, ενώ καθένας από τους συντελεστές $\lambda_{\min,i}$, $i=1,2,3,..$ είναι μικρότερος ή ίσος της μονάδας. Επιπλέον, καθένας από τους συντελεστές λ σχετίζεται με διαφορετική παράμετρο του συστήματος μόνωσης, όπως φθορά, μόλυνση, ηλικία, ιστορία φόρτισης, θερμοκρασία, κλπ. Οι τιμές των συντελεστών $\lambda_{\max,i}$ και $\lambda_{\min,i}$ ελήφθησαν από τους Πίνακες 5.2, 5.3, 5.5 των παραγράφων 5.4.1, 5.4.2, 5.4.4. Έτσι, προέκυψαν οι τιμές των συντελεστών λ που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.45: Τιμές Συντελεστών $\lambda_{\max,i}$ και $\lambda_{\min,i}$

	EFFECT OF AGING	EFFECT OF CONTAMINATION	EFFECT OF TEMPERATURE
$\lambda_{\min}$	1	1	0.8
$\lambda_{\max}$	1.3	1	1

Έτσι, έχουμε:

$$\lambda_{\max} = \lambda_{\max,a} \cdot \lambda_{\max,c} \cdot \lambda_{\max,t} = 1.3 \cdot 1 \cdot 1 = 1.3 \quad (6.5)$$

$$\lambda_{\min} = \lambda_{\min,a} \cdot \lambda_{\min,c} \cdot \lambda_{\min,t} = 1 \cdot 1 \cdot 0.8 = 0.8 \quad (6.6)$$

Έτσι, σύμφωνα με τους τύπους (6.3) προκύπτουν οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των συντελεστών τριβής μ_{fast} και μ_{slow} και έπειτα με τη βοήθεια της σχέσης (3.40) υπολογίστηκαν οι τιμές των συντελεστών τριβής μ των εφεδράνων. Ακολουθούν πίνακες οι οποίοι παρουσιάζουν τις τιμές των συντελεστών αυτών.

Πίνακας 6.46: Ελάχιστες Τιμές Συντελεστών Τριβής μ_{fast} , μ_{slow} , μ

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	$f_{\min}=\mu_{\text{slow}}$	$f_{\max}=\mu_{\text{fast}}$	$\lambda_{\min}$	$\mu_{\text{slow,min}}$	$\mu_{\text{fast,min}}$	$\mu_{\min}$
E1	0.04	0.0512	0.8	0.032	0.0410	0.0408
E2	0.04	0.0506	0.8	0.032	0.0405	0.0403
E3	0.04	0.0508	0.8	0.032	0.0406	0.0405
E4	0.04	0.0511	0.8	0.032	0.0409	0.0408
E5	0.04	0.0510	0.8	0.032	0.0408	0.0407
E6	0.04	0.0509	0.8	0.032	0.0407	0.0406
E7	0.04	0.0509	0.8	0.032	0.0407	0.0406
E8	0.04	0.0503	0.8	0.032	0.0402	0.0401
E9	0.04	0.0502	0.8	0.032	0.0402	0.0400
E10-1	0.04	0.0504	0.8	0.032	0.0403	0.0402
E10-2	0.04	0.0504	0.8	0.032	0.0403	0.0402
E10-3	0.04	0.0504	0.8	0.032	0.0403	0.0402
E10-4	0.04	0.0501	0.8	0.032	0.0401	0.0400
E10-5	0.04	0.0502	0.8	0.032	0.0402	0.0401
E11-1	0.04	0.0500	0.8	0.032	0.0400	0.0399
E11-2	0.04	0.0500	0.8	0.032	0.0400	0.0399

Πίνακας 6.47: Μέγιστες Τιμές Συντελεστών Τριβής μ_{fast} , μ_{slow} , μ

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	$f_{min}=\mu_{slow}$	$f_{max}=\mu_{fast}$	λ_{max}	$\mu_{slow,max}$	$\mu_{fast,max}$	μ_{max}
E1	0.04	0.0512	1.3	0.052	0.0666	0.0664
E2	0.04	0.0506	1.3	0.052	0.0657	0.0656
E3	0.04	0.0508	1.3	0.052	0.0660	0.0659
E4	0.04	0.0511	1.3	0.052	0.0664	0.0662
E5	0.04	0.0510	1.3	0.052	0.0664	0.0662
E6	0.04	0.0509	1.3	0.052	0.0662	0.0660
E7	0.04	0.0509	1.3	0.052	0.0661	0.0659
E8	0.04	0.0503	1.3	0.052	0.0654	0.0652
E9	0.04	0.0502	1.3	0.052	0.0652	0.0651
E10-1	0.04	0.0504	1.3	0.052	0.0655	0.0653
E10-2	0.04	0.0504	1.3	0.052	0.0655	0.0653
E10-3	0.04	0.0504	1.3	0.052	0.0655	0.0653
E10-4	0.04	0.0501	1.3	0.052	0.0652	0.0650
E10-5	0.04	0.0502	1.3	0.052	0.0653	0.0651
E11-1	0.04	0.0500	1.3	0.052	0.0650	0.0648
E11-2	0.04	0.0500	1.3	0.052	0.0650	0.0648

Έπειτα υπολογίστηκαν ξανά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των 11 διαφορετικών τύπων εφεδράνων για τις ελάχιστες και για τις μέγιστες τιμές των συντελεστών τριβής και παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 6.48: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ερεδράνων FPS 4^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης
(Χρήση Συντελεστών λmin)

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΦΟΡΤΙΟ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ W (kN)	ΜΑΖΑ M (t)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ F _H (kN)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΛΟΓΩ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ K _H (kN/m)	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΟΝΩΤΗΡΑ T (s)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ K _{eff} (kN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ T (s)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ A _{hys} (kNm)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ξ _{eff}	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ δν (m)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ D/Rμ>1	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ K _{el} =100*K _H (kN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ C _{eff}
E1	3500	356.78	495.18	1505.38	3.06	2116.15	2.58	133.77	0.184	0.01	2.46	150537.63	232.42
E2	5500	560.65	775.45	2365.59	3.06	3313.88	2.58	207.70	0.182	0.01	2.49	236559.14	360.32
E3	6750	688.07	952.89	2903.23	3.06	4072.16	2.58	256.03	0.183	0.01	2.48	290322.58	444.40
E4	8000	815.49	1131.29	3440.86	3.06	4834.59	2.58	305.26	0.184	0.01	2.47	344086.02	530.26
E5	10000	1019.37	1413.61	4301.08	3.06	6041.06	2.58	381.10	0.183	0.01	2.47	430107.53	661.89
E6	12500	1274.21	1765.48	5376.34	3.06	7544.79	2.58	474.94	0.183	0.01	2.48	537634.41	824.57
E7	15000	1529.05	2118.14	6451.61	3.06	9051.90	2.58	569.52	0.183	0.01	2.48	645161.29	988.70
E8	21500	2191.64	3026.23	9247.31	3.06	12932.60	2.59	807.17	0.181	0.01	2.51	924731.18	1399.24
E9	26500	2701.33	3728.13	11397.85	3.06	15932.17	2.59	993.12	0.181	0.01	2.51	1139784.95	1721.21
E10-1	26980	2750.25	3800.10	11604.30	3.06	16239.74	2.59	1015.27	0.182	0.01	2.50	1160430.11	1760.53
E10-2	26918	2743.93	3791.48	11577.63	3.06	16202.91	2.59	1013.05	0.182	0.01	2.50	1157763.44	1756.69
E10-3	27355	2788.48	3852.25	11765.59	3.06	16462.60	2.59	1028.76	0.182	0.01	2.50	1176559.14	1783.77
E10-4	31712	3232.62	4460.22	13639.57	3.06	19060.77	2.59	1187.37	0.181	0.01	2.52	1363956.99	2057.62
E10-5	29117	2968.09	4097.71	12523.44	3.06	17511.58	2.59	1092.52	0.181	0.01	2.51	1252344.09	1893.78
E11-1	66502	6779.00	9345.92	28603.01	3.06	39939.81	2.59	2483.03	0.181	0.01	2.52	2860301.08	4301.31
E11-2	58526	5965.95	8225.07	25172.47	3.06	35149.88	2.59	2185.29	0.181	0.01	2.52	2517247.31	3785.55

Πίνακας 6.49: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ερεδράνων FPS 5^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης
(Χρήση Συντελεστών λ_{max})

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΦΟΡΤΙΟ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ W (KN)	ΜΑΖΑ M (t)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ F _H (KN)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΛΟΓΩ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ K _H (KN/m)	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΟΝΩΤΗΡΑ T (s)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ K _{eff} (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ T (s)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ A _{hys} (KNm)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ξ _{eff}	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ δν (m)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ D/R _μ >1	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ K _{el} =100*K _H (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ C _{eff}
E1	3500	356.78	584.51	1505.38	3.06	2497.89	2.37	217.38	0.253	0.01	1.52	150537.63	383.19
E2	5500	560.65	914.14	2365.59	3.06	3906.56	2.38	337.51	0.251	0.01	1.54	236559.14	595.29
E3	6750	688.07	1123.84	2903.23	3.06	4802.75	2.38	416.04	0.252	0.01	1.53	290322.58	733.65
E4	8000	815.49	1335.13	3440.86	3.06	5705.67	2.38	496.05	0.253	0.01	1.52	344086.02	874.48
E5	10000	1019.37	1668.08	4301.08	3.06	7128.55	2.38	619.28	0.253	0.01	1.52	430107.53	1091.80
E6	12500	1274.21	2082.61	5376.34	3.06	8900.06	2.38	771.78	0.252	0.01	1.53	537634.41	1360.84
E7	15000	1529.05	2498.44	6451.61	3.06	10677.08	2.38	925.48	0.252	0.01	1.53	645161.29	1631.91
E8	21500	2191.64	3565.20	9247.31	3.06	15235.91	2.38	1311.65	0.250	0.01	1.54	924731.18	2314.06
E9	26500	2701.33	4391.27	11397.85	3.06	18766.11	2.38	1613.83	0.250	0.01	1.55	1139784.95	2847.41
E10-1	26980	2750.25	4478.03	11604.30	3.06	19136.89	2.38	1649.82	0.251	0.01	1.54	1160430.11	2910.37
E10-2	26918	2743.93	4467.93	11577.63	3.06	19093.70	2.38	1646.20	0.251	0.01	1.54	1157763.44	2903.97
E10-3	27355	2788.48	4539.19	11765.59	3.06	19398.23	2.38	1671.73	0.250	0.01	1.54	1176559.14	2949.11
E10-4	31712	3232.62	5253.07	13639.57	3.06	22449.03	2.38	1929.48	0.250	0.01	1.55	1363956.99	3404.48
E10-5	29117	2968.09	4827.23	12523.44	3.06	20629.17	2.38	1775.35	0.250	0.01	1.55	1252344.09	3132.23
E11-1	66502	6779.00	11003.92	28603.01	3.06	47025.31	2.39	4034.93	0.249	0.01	1.55	2860301.08	7120.31
E11-2	58526	5965.95	9684.27	25172.47	3.06	41385.76	2.39	3551.10	0.249	0.01	1.55	2517247.31	6266.50

Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται ο συντελεστής τριβής μ μειώνεται η δύναμη επαναφοράς F_H , η ενεργός δυσκαμψία K_{eff} , η καταναλισκόμενη ενέργεια σε κάθε κύκλο φόρτισης που αντιπροσωπεύεται από την επιφάνεια υστέρησης του διγραμμικού μοντέλου A_{hys} και ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης ξ_{eff} του εφεδράνου, ενώ αυξάνεται η ενεργός ιδιοπερίοδος του εφεδράνου T . Το αντίθετο συμβαίνει όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής μ του εφεδράνου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του 4^{ου} και 5^{ου} μοντέλου προσομοίωσης και συγκρίνονται μεταξύ τους, καθώς και με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του 2^{ου} μοντέλου προσομοίωσης.

➤ Μετακινήσεις Εφεδράνων

Πίνακας 6.50: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων FPS 4^{ου} – 2^{ου} – 5^{ου} Μοντέλου Προσομοίωσης (Μέση Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 4 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 2 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 5 ^{ου} ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RSP-x	0	0.161873	0.000233	0	0.152739	0.000198	0	0.142842	0.000167
RSP-y	0	0.000536	0.161853	0	0.000430	0.152723	0	0.000337	0.142830
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.161873	0.048557	0	0.152739	0.045817	0	0.142842	0.042849
G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey	0	0.161873	0.048557	0	0.152739	0.045817	0	0.142842	0.042849
Northridge-x / G+Northridge-x	0	0.006649	0.000004	0	0.006551	0.000004	0	0.006374	0.000004
Northridge-y / G+Northridge-y	0	0.000006	0.003407	0	0.000006	0.003333	0	0.000006	0.003282
(Northridge-x) + (Northridge-y) / (G+Northridge-x) + (G+Northridge-y)	0	0.007944	0.003407	0	0.008034	0.003333	0	0.008217	0.003282
Chi-Chi	0	0.005359	0.005360	0	0.004657	0.004658	0	0.003677	0.003678

Πίνακας 6.51: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων FPS 4^{ov} – 2^{ov} – 5^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης (Μέγιστη Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 4 ^{ov} ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 2 ^{ov} ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ 5 ^{ov} ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RSP-x	0	0.161906	0.000491	0	0.152777	0.000419	0	0.142883	0.000353
RSP-y	0	0.001071	0.161935	0	0.000859	0.152808	0	0.000673	0.142916
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.161906	0.048583	0	0.152777	0.045844	0	0.142883	0.042876
G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey	0	0.161906	0.048583	0	0.152777	0.045844	0	0.142883	0.042876
Northridge-x / G+Northridge-x	0	0.006656	0.000009	0	0.006558	0.000009	0	0.006381	0.000009
Northridge-y / G+Northridge-y	0	0.000014	0.003415	0	0.000014	0.003341	0	0.000013	0.003290
(Northridge-x) + (Northridge-y) / (G+Northridge-x) + (G+Northridge-y)	0	0.007949	0.003415	0	0.008039	0.003341	0	0.008222	0.003290
Chi-Chi	0	0.005389	0.005392	0	0.004686	0.004688	0	0.003702	0.003704

➤ Εντατικά Μεγέθη Εφεδράνων

▪ Μέση Τιμή

Πίνακες 6.52, 6.53, 6.54, 6.55, 6.56, 6.57, 6.58: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων (Μέση Τιμή) 4^{ov} -2^{ov} -5^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	342.5529	0.4896	0	346.5482	0.4475	0	356.8122	0.4154
E2	0	536.4083	0.9218	0	542.3476	0.8418	0	557.9945	0.7806
E3	0	659.1085	0.9004	0	666.5399	0.8231	0	685.9439	0.7632
E4	0	782.5266	1.1805	0	791.5769	1.0781	0	814.9205	0.9998
E5	0	977.8788	1.5671	0	989.1442	1.4303	0	1018.2510	1.3256
E6	0	1221.3178	1.7998	0	1235.2141	1.6425	0	1271.3348	1.5216
E7	0	1465.2887	1.6231	0	1481.9119	1.4812	0	1525.1834	1.3707
E8	0	2093.5700	3.0474	0	2116.2004	2.7811	0	2176.5228	2.5760
E9	0	2579.0442	2.3440	0	2606.6848	2.1366	0	2680.6784	1.9739
E10-1	0	2628.8190	5.4760	0	2657.5100	5.0020	0	2733.6250	4.6410
E10-2	0	2622.9790	6.5620	0	2651.6410	5.9820	0	2727.6300	5.5390
E10-3	0	2665.1260	0.4790	0	2694.1770	0.4460	0	2771.2870	0.4100
E10-4	0	3085.7640	1.2490	0	3118.7510	1.1470	0	3207.1630	1.0650
E10-5	0	2834.9640	4.4120	0	2865.5600	4.0310	0	2947.1700	3.7400
E11-1	0	6465.2850	1.1620	0	6533.4200	1.0810	0	6717.3700	0.9940
E11-2	0	5689.9110	10.2770	0	5749.8830	9.3860	0	5911.7840	8.7050

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-γ			RSP-γ			RSP-γ		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	1.1953	342.4808	0	1.0278	346.4748	0	0.8867	356.7411
E2	0	2.1605	536.2873	0	1.8572	542.2249	0	1.6009	557.8769
E3	0	2.3192	659.0036	0	1.9948	666.4422	0	1.7207	685.8631
E4	0	3.0724	782.4989	0	2.6427	791.5691	0	2.2797	814.9444
E5	0	3.4652	977.8604	0	2.9798	989.1474	0	2.5697	1018.2869
E6	0	3.8499	1221.3166	0	3.3103	1235.2412	0	2.8545	1271.4029
E7	0	5.1101	1465.2868	0	4.3937	1481.9450	0	3.7876	1525.2665
E8	0	6.3436	2093.1503	0	5.4508	2115.7677	0	4.6950	2176.0960
E9	0	4.8407	2578.9262	0	4.1672	2606.6135	0	3.5913	2680.6802
E10-1	0	0.3260	2627.5980	0	0.3000	2656.1870	0	0.2650	2732.2280
E10-2	0	3.8610	2623.6900	0	3.3140	2652.4840	0	2.8510	2728.6320
E10-3	0	7.1810	2664.5050	0	6.1650	2693.5290	0	5.3070	2770.6290
E10-4	0	8.9520	3084.8950	0	7.6850	3117.8290	0	6.6130	3206.2080
E10-5	0	8.2250	2833.6220	0	7.0610	2864.0930	0	6.0770	2945.5970
E11-1	0	0.8020	6464.3400	0	0.7390	6532.5180	0	0.6500	6716.5770
E11-2	0	0.7060	5687.5200	0	0.6500	5747.3110	0	0.5720	5909.0900

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	342.5530	102.7459	0	346.5484	103.9436	0	356.8124	107.0235
E2	0	536.4088	160.8895	0	542.3479	162.6701	0	557.9945	167.3653
E3	0	659.1088	197.7039	0	666.5403	199.9350	0	685.9441	205.7607
E4	0	782.5271	234.7531	0	791.5774	237.4734	0	814.9209	244.4854
E5	0	977.8795	293.3633	0	989.1448	296.7484	0	1018.2512	305.4896
E6	0	1221.3185	366.4007	0	1235.2146	370.5770	0	1271.3351	381.4247
E7	0	1465.2897	439.5905	0	1481.9127	444.5871	0	1525.1839	457.5829
E8	0	2093.5710	627.9553	0	2116.2010	634.7386	0	2176.5236	652.8359
E9	0	2579.0450	773.6832	0	2606.6852	781.9882	0	2680.6788	804.2079
E10-1	0	2628.8190	788.2980	0	2657.5100	796.8720	0	2733.6250	819.6810
E10-2	0	2622.9790	787.1340	0	2651.6410	795.7680	0	2727.6300	818.6080
E10-3	0	2665.1270	799.3520	0	2694.1780	808.0590	0	2771.2880	831.1890
E10-4	0	3085.7650	925.4690	0	3118.7520	935.3490	0	3207.1640	961.8630
E10-5	0	2834.9650	850.0980	0	2865.5610	859.2370	0	2947.1710	883.6870
E11-1	0	6465.2850	1939.3020	0	6533.4200	1959.7560	0	6717.3700	2014.9730
E11-2	0	5689.9110	1706.2870	0	5749.8830	1724.2190	0	5911.7840	1772.7480

	<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})</i>			<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ</i>			<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})</i>		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x / G+Northridge-x			Northridge-x / G+Northridge-x			Northridge-x / G+Northridge-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	151.5018	0.2908	0	186.7228	0.3387	0	239.4135	0.4077
E2	0	235.4068	0.5506	0	290.0885	0.6401	0	371.9056	0.7709
E3	0	290.0897	0.5384	0	357.4958	0.6253	0	458.3453	0.7533
E4	0	345.7407	0.6947	0	426.1101	0.8111	0	546.3459	0.9756
E5	0	431.6812	0.9091	0	532.0181	1.0645	0	682.1289	1.2796
E6	0	538.0921	1.0341	0	663.1343	1.2129	0	850.2147	1.4577
E7	0	645.2837	0.9188	0	795.2279	1.0797	0	1019.5680	1.2968
E8	0	915.2393	1.7871	0	1127.7423	2.0847	0	1445.7259	2.5093
E9	0	1126.2135	1.3293	0	1387.6726	1.5597	0	1778.9184	1.8745
E10-1	0	1151.0080	3.3360	0	1418.3020	3.8640	0	1818.2580	4.6580
E10-2	0	1148.4940	3.7040	0	1415.2010	4.3670	0	1814.2820	5.2440
E10-3	0	1166.3810	0.2140	0	1437.2230	0.2480	0	1842.4990	0.2990
E10-4	0	1346.6180	0.7200	0	1659.2160	0.8330	0	2126.9960	1.0050
E10-5	0	1238.8690	2.6790	0	1526.4970	3.1030	0	1956.9020	3.7410
E11-1	0	2816.4850	0.5190	0	3470.1820	0.6010	0	4448.4150	0.7260
E11-2	0	2478.7540	6.2490	0	3054.0660	7.2380	0	3914.9990	8.7260

	<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})</i>			<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ</i>			<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})</i>		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-y / G+Northridge-y			Northridge-y / G+Northridge-y			Northridge-y / G+Northridge-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	0.5382	146.5101	0	0.6169	181.2075	0	0.7291	233.1917
E2	0	0.9660	227.5768	0	1.1028	281.4804	0	1.3002	362.2743
E3	0	1.0304	280.4813	0	1.1689	346.9121	0	1.3703	446.4679
E4	0	1.3701	334.3502	0	1.5578	413.5344	0	1.8293	532.1837
E5	0	1.5547	417.4433	0	1.7783	516.3106	0	2.0990	664.4660
E6	0	1.7270	520.3016	0	1.9799	643.5362	0	2.3419	828.2307
E7	0	2.2931	623.9365	0	2.6297	771.7196	0	3.1111	993.2110
E8	0	2.8513	884.6451	0	3.2856	1094.2055	0	3.9060	1408.3779
E9	0	2.1328	1088.5528	0	2.4482	1346.4292	0	2.9003	1733.0732
E10-1	0	0.0580	1112.5580	0	0.0670	1376.0830	0	0.0790	1771.0890
E10-2	0	1.7440	1110.2810	0	2.0210	1373.3080	0	2.4130	1767.6800
E10-3	0	3.2580	1127.4340	0	3.7740	1394.5030	0	4.5060	1794.8750
E10-4	0	4.0580	1301.4780	0	4.7010	1609.7890	0	5.6150	2072.0420
E10-5	0	3.7370	1197.3670	0	4.3280	1480.9960	0	5.1670	1906.1870
E11-1	0	0.1430	2721.9700	0	0.1650	3366.8150	0	0.1940	4333.7260
E11-2	0	0.1260	2395.4460	0	0.1460	2962.9040	0	0.1710	3813.6940

	<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})</i>			<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ</i>			<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})</i>		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x+y / G+Northridge-x+y			Northridge-x+y / G+Northridge-x+y			Northridge-x+y / G+Northridge-x+y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	153.4523	146.5106	0	188.9610	181.2077	0	240.1427	233.5994
E2	0	238.4740	227.5776	0	293.6068	281.4814	0	373.2058	363.0453
E3	0	293.8549	280.4821	0	361.8154	346.9128	0	459.7155	447.2213
E4	0	350.2030	334.3512	0	431.2301	413.5352	0	548.1751	533.1594
E5	0	437.2554	417.4446	0	538.4138	516.3120	0	684.2279	665.7457
E6	0	545.0577	520.3031	0	671.1263	643.5378	0	852.5566	829.6885
E7	0	653.6432	623.9376	0	804.8189	771.7208	0	1022.6790	994.5079
E8	0	927.2152	884.6478	0	1141.4798	1094.2083	0	1449.6318	1410.8871
E9	0	1140.9759	1088.5543	0	1404.6056	1346.4305	0	1781.8190	1734.9478
E10-1	0	1166.0350	1112.5630	0	1435.5390	1376.0890	0	1818.3370	1775.7480
E10-2	0	1163.4820	1110.2880	0	1432.3940	1373.3160	0	1816.6950	1772.9240
E10-3	0	1181.6100	1127.4340	0	1454.6940	1394.5030	0	1847.0050	1795.1740
E10-4	0	1364.2730	1301.4780	0	1679.4670	1609.7900	0	2132.6120	2073.0470
E10-5	0	1255.0790	1197.3700	0	1545.0920	1480.9990	0	1962.0690	1909.9280
E11-1	0	2853.5220	2721.9700	0	3512.6640	3366.8150	0	4448.6090	4334.4510
E11-2	0	2511.3500	2395.4540	0	3091.4530	2962.9130	0	3915.1700	3822.4190

	<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})</i>			<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ</i>			<i>ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})</i>		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Chi-Chi			Chi-Chi			Chi-Chi		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	108.2010	108.0335	0	132.1543	131.9364	0	166.8876	166.6339
E2	0	168.0625	167.9421	0	205.2148	205.0584	0	259.2118	259.0294
E3	0	206.8288	207.1911	0	252.5575	253.0284	0	319.0091	319.5593
E4	0	246.3025	247.1580	0	300.7722	301.8837	0	379.9020	381.2024
E5	0	307.7693	308.4164	0	375.8313	376.6712	0	474.7150	475.6998
E6	0	383.6866	384.4290	0	468.5093	469.4734	0	591.8155	592.9443
E7	0	460.1368	461.0070	0	561.8520	562.9819	0	709.7365	711.0596
E8	0	654.0851	652.4972	0	798.6055	796.5402	0	1008.8252	1006.4112
E9	0	803.4633	804.3582	0	980.8411	982.0042	0	1239.2394	1240.6082
E10-1	0	823.8850	818.9570	0	1006.1250	999.7160	0	1270.6650	1263.1590
E10-2	0	817.7760	822.1090	0	998.2230	1003.8540	0	1261.3960	1268.0030
E10-3	0	834.1240	831.0060	0	1018.4960	1014.4420	0	1286.5200	1281.7610
E10-4	0	963.5130	958.9760	0	1176.4180	1170.5180	0	1486.0460	1479.1240
E10-5	0	887.8010	880.6850	0	1084.1530	1074.9060	0	1369.2330	1358.4060
E11-1	0	2010.8430	2009.9450	0	2454.7450	2453.5790	0	3101.3970	3100.0330
E11-2	0	1773.7330	1764.5130	0	2165.6710	2153.6780	0	2735.5530	2721.4940

▪ **Μέγιστη Τιμή**

Πίνακες 6.59, 6.60, 6.61, 6.62, 6.63, 6.64, 6.65: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών
Εφεδράνων (Μέγιστη Τιμή) 4^{ov}-2^{ov}-5^{ov} Μοντέλου Προσομοίωσης

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	342.6180	1.0360	0	346.5482	0.4475	0	356.9050	0.8790
E2	0	536.5370	1.6280	0	542.3476	0.8418	0	558.1800	1.3800
E3	0	659.1630	1.5560	0	666.5399	0.8231	0	686.0240	1.3190
E4	0	782.7250	1.9490	0	791.5769	1.0781	0	815.2060	1.6530
E5	0	978.0840	2.9540	0	989.1442	1.4303	0	1018.5460	2.5050
E6	0	1221.5480	3.3940	0	1235.2141	1.6425	0	1271.6640	2.8690
E7	0	1465.5580	3.6660	0	1481.9119	1.4812	0	1525.5690	3.0970
E8	0	2093.8670	6.3290	0	2116.2004	2.7811	0	2176.9470	5.3590
E9	0	2579.5160	5.3180	0	2606.6848	2.1366	0	2681.3510	4.4850
E10-1	0	2628.8190	5.4760	0	2657.5100	5.0020	0	2733.6250	4.6410
E10-2	0	2622.9790	6.5620	0	2651.6410	5.9820	0	2727.6300	5.5390
E10-3	0	2665.1260	0.4790	0	2694.1770	0.4460	0	2771.2870	0.4100
E10-4	0	3085.7640	1.2490	0	3118.7510	1.1470	0	3207.1630	1.0650
E10-5	0	2834.9640	4.4120	0	2865.5600	4.0310	0	2947.1700	3.7400
E11-1	0	6465.2850	1.1620	0	6533.4200	1.0810	0	6717.3700	0.9940
E11-2	0	5689.9110	10.2770	0	5749.8830	9.3860	0	5911.7840	8.7050

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-y			RSP-y			RSP-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	2.2670	342.6790	0	1.0278	346.4748	0	1.6820	356.9880
E2	0	3.5500	536.6340	0	1.8572	542.2249	0	2.6310	558.3090
E3	0	4.3630	659.2780	0	1.9948	666.4422	0	3.2340	686.2080
E4	0	5.1790	782.7920	0	2.6427	791.5691	0	3.8420	815.3110
E5	0	5.6080	978.2110	0	2.9798	989.1474	0	4.1530	1018.7230
E6	0	7.0040	1221.7680	0	3.3103	1235.2412	0	5.1850	1271.9600
E7	0	8.4030	1465.7480	0	4.3937	1481.9450	0	6.2200	1525.8340
E8	0	12.0050	2094.1380	0	5.4508	2115.7677	0	8.8760	2177.3250
E9	0	14.7900	2579.6430	0	4.1672	2606.6135	0	10.9330	2681.5680
E10-1	0	0.3260	2627.5980	0	0.3000	2656.1870	0	0.2650	2732.2280
E10-2	0	3.8610	2623.6900	0	3.3140	2652.4840	0	2.8510	2728.6320
E10-3	0	7.1810	2664.5050	0	6.1650	2693.5290	0	5.3070	2770.6290
E10-4	0	8.9520	3084.8950	0	7.6850	3117.8290	0	6.6130	3206.2080
E10-5	0	8.2250	2833.6220	0	7.0610	2864.0930	0	6.0770	2945.5970
E11-1	0	0.8020	6464.3400	0	0.7390	6532.5180	0	0.6500	6716.5770
E11-2	0	0.7060	5687.5200	0	0.6500	5747.3110	0	0.5720	5909.0900

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey G+Ex+0.3Ey / G+Ex-0.3Ey		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	342.6180	102.8080	0	346.5484	103.9436	0	356.9050	107.0990
E2	0	536.5380	160.9970	0	542.3479	162.6701	0	558.1800	167.4980
E3	0	659.1630	197.7860	0	666.5403	199.9350	0	686.0240	205.8640
E4	0	782.7260	234.8430	0	791.5774	237.4734	0	815.2070	244.5970
E5	0	978.0860	293.4740	0	989.1448	296.7484	0	1018.5470	305.6240
E6	0	1221.5490	366.5460	0	1235.2146	370.5770	0	1271.6650	381.5990
E7	0	1465.5600	439.7400	0	1481.9127	444.5871	0	1525.5700	457.7610
E8	0	2093.8700	628.2630	0	2116.2010	634.7386	0	2176.9480	653.2120
E9	0	2579.5190	773.9110	0	2606.6852	781.9882	0	2681.3530	804.4830
E10-1	0	2628.8190	788.2980	0	2657.5100	796.8720	0	2733.6250	819.6810
E10-2	0	2622.9790	787.1340	0	2651.6410	795.7680	0	2727.6300	818.6080
E10-3	0	2665.1270	799.3520	0	2694.1780	808.0590	0	2771.2880	831.1890
E10-4	0	3085.7650	925.4690	0	3118.7520	935.3490	0	3207.1640	961.8630
E10-5	0	2834.9650	850.0980	0	2865.5610	859.2370	0	2947.1710	883.6870
E11-1	0	6465.2850	1939.3020	0	6533.4200	1959.7560	0	6717.3700	2014.9730
E11-2	0	5689.9110	1706.2870	0	5749.8830	1724.2190	0	5911.7840	1772.7480

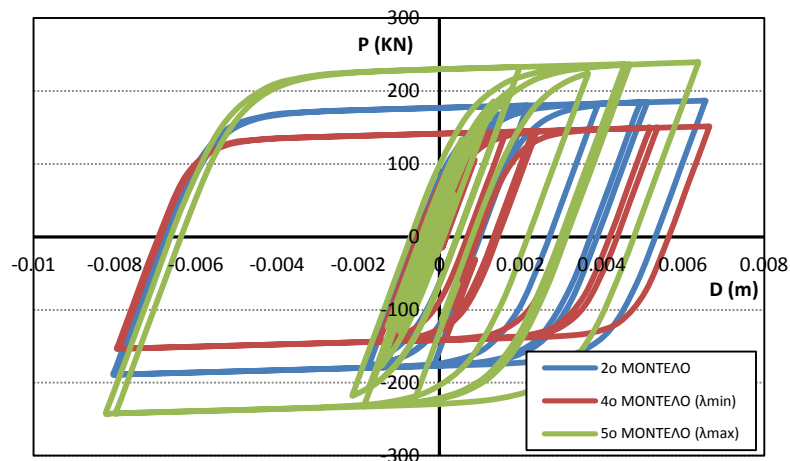
	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x / G+Northridge-x			Northridge-x / G+Northridge-x			Northridge-x / G+Northridge-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	151.5110	0.6320	0	186.7228	0.3387	0	239.4240	0.8830
E2	0	235.4260	0.9940	0	290.0885	0.6401	0	371.9270	1.3880
E3	0	290.0980	0.9500	0	357.4958	0.6253	0	458.3550	1.3270
E4	0	345.7700	1.1900	0	426.1101	0.8111	0	546.3790	1.6620
E5	0	431.7120	1.8030	0	532.0181	1.0645	0	682.1640	2.5180
E6	0	538.1260	1.9170	0	663.1343	1.2129	0	850.2530	2.7130
E7	0	645.3230	2.0720	0	795.2279	1.0797	0	1019.6130	2.9320
E8	0	915.2840	3.8610	0	1127.7423	2.0847	0	1445.7760	5.3920
E9	0	1126.2820	3.0020	0	1387.6726	1.5597	0	1778.9960	4.2490
E10-1	0	1151.0080	3.3360	0	1418.3020	3.8640	0	1818.2580	4.6580
E10-2	0	1148.4940	3.7040	0	1415.2010	4.3670	0	1814.2820	5.2440
E10-3	0	1166.3810	0.2140	0	1437.2230	0.2480	0	1842.4990	0.2990
E10-4	0	1346.6180	0.7200	0	1659.2160	0.8330	0	2126.9960	1.0050
E10-5	0	1238.8690	2.6790	0	1526.4970	3.1030	0	1956.9020	3.7410
E11-1	0	2816.4850	0.5190	0	3470.1820	0.6010	0	4448.4150	0.7260
E11-2	0	2478.7540	6.2490	0	3054.0660	7.2380	0	3914.9990	8.7260

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-y / G+Northridge-y			Northridge-y / G+Northridge-y			Northridge-y / G+Northridge-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	1.0110	146.5260	0	0.6169	181.2075	0	1.3440	233.2420
E2	0	1.5790	227.6050	0	1.1028	281.4804	0	2.1000	362.3580
E3	0	1.9390	280.5050	0	1.1689	346.9121	0	2.5780	446.5380
E4	0	2.3040	334.3750	0	1.5578	413.5344	0	3.0620	532.2600
E5	0	2.5510	417.4720	0	1.7783	516.3106	0	3.5220	664.5530
E6	0	3.1850	520.3370	0	1.9799	643.5362	0	4.3990	828.3360
E7	0	3.8160	623.9750	0	2.6297	771.7196	0	5.2720	993.3260
E8	0	5.4560	884.7250	0	3.2856	1094.2055	0	7.5450	1408.6080
E9	0	6.7100	1088.6110	0	2.4482	1346.4292	0	9.2840	1733.2400
E10-1	0	0.0580	1112.5580	0	0.0670	1376.0830	0	0.0790	1771.0890
E10-2	0	1.7440	1110.2810	0	2.0210	1373.3080	0	2.4130	1767.6800
E10-3	0	3.2580	1127.4340	0	3.7740	1394.5030	0	4.5060	1794.8750
E10-4	0	4.0580	1301.4780	0	4.7010	1609.7890	0	5.6150	2072.0420
E10-5	0	3.7370	1197.3670	0	4.3280	1480.9960	0	5.1670	1906.1870
E11-1	0	0.1430	2721.9700	0	0.1650	3366.8150	0	0.1940	4333.7260
E11-2	0	0.1260	2395.4460	0	0.1460	2962.9040	0	0.1710	3813.6940

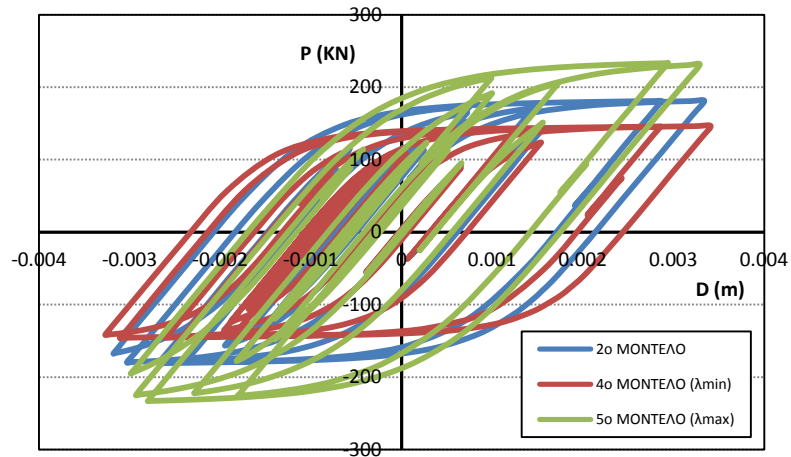
	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Northridge-x+y / G+Northridge-x+y			Northridge-x+y / G+Northridge-			Northridge-x+y / G+Northridge-x+y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	153.4600	146.5280	0	188.9610	181.2077	0	242.3040	233.2430
E2	0	238.4890	227.6070	0	293.6068	281.4814	0	376.4350	362.3600
E3	0	293.8580	280.5050	0	361.8154	346.9128	0	463.8980	446.5390
E4	0	350.2240	334.3760	0	431.2301	413.5352	0	552.9570	532.2620
E5	0	437.2810	417.4740	0	538.4138	516.3120	0	690.3830	664.5560
E6	0	545.0870	520.3410	0	671.1263	643.5378	0	860.5180	828.3420
E7	0	653.6760	623.9790	0	804.8189	771.7208	0	1031.9270	993.3310
E8	0	927.2560	884.7310	0	1141.4798	1094.2083	0	1463.3650	1408.6150
E9	0	1141.0390	1088.6160	0	1404.6056	1346.4305	0	1800.6650	1733.2460
E10-1	0	1166.0350	1112.5630	0	1435.5390	1376.0890	0	1840.3540	1771.0960
E10-2	0	1163.4820	1110.2880	0	1432.3940	1373.3160	0	1836.3210	1767.6890
E10-3	0	1181.6100	1127.4340	0	1454.6940	1394.5030	0	1864.8880	1794.8750
E10-4	0	1364.2730	1301.4780	0	1679.4670	1609.7900	0	2152.9170	2072.0420
E10-5	0	1255.0790	1197.3700	0	1545.0920	1480.9990	0	1980.7170	1906.1900
E11-1	0	2853.5220	2721.9700	0	3512.6640	3366.8150	0	4502.7530	4333.7260
E11-2	0	2511.3500	2395.4540	0	3091.4530	2962.9130	0	3962.8200	3813.7040

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ 4ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{min})			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 2ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ			ΔΥΝΑΜΕΙΣ 5ου ΜΟΝΤΕΛΟΥ (λ_{max})		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Chi-Chi			Chi-Chi			Chi-Chi		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	108.9700	108.4550	0	132.1543	131.9364	0	166.8876	166.6339
E2	0	169.2560	169.1740	0	205.2148	205.0584	0	259.2118	259.0294
E3	0	207.5050	208.3370	0	252.5575	253.0284	0	319.0091	319.5593
E4	0	248.2270	248.2570	0	300.7722	301.8837	0	379.9020	381.2024
E5	0	310.1890	310.0050	0	375.8313	376.6712	0	474.7150	475.6998
E6	0	385.4100	386.1600	0	468.5093	469.4734	0	591.8155	592.9443
E7	0	463.0230	462.6980	0	561.8520	562.9819	0	709.7365	711.0596
E8	0	657.3270	655.9810	0	798.6055	796.5402	0	1008.8252	1006.4112
E9	0	807.9650	806.3410	0	980.8411	982.0042	0	1239.2394	1240.6082
E10-1	0	823.8850	818.9570	0	1006.1250	999.7160	0	1270.6650	1263.1590
E10-2	0	817.7760	822.1090	0	998.2230	1003.8540	0	1261.3960	1268.0030
E10-3	0	834.1240	831.0060	0	1018.4960	1014.4420	0	1286.5200	1281.7610
E10-4	0	963.5130	958.9760	0	1176.4180	1170.5180	0	1486.0460	1479.1240
E10-5	0	887.8010	880.6850	0	1084.1530	1074.9060	0	1369.2330	1358.4060
E11-1	0	2010.8430	2009.9450	0	2454.7450	2453.5790	0	3101.3970	3100.0330
E11-2	0	1773.7330	1764.5130	0	2165.6710	2153.6780	0	2735.5530	2721.4940

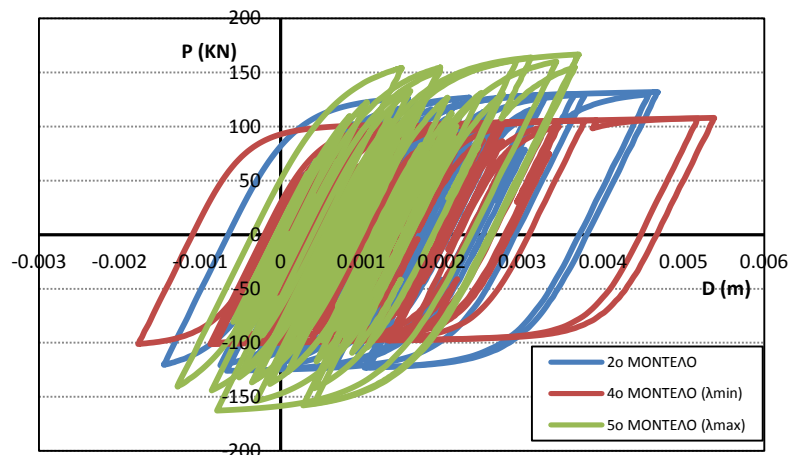
Συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής μ , αυξάνονται οι δυνάμεις και μειώνονται οι μετακινήσεις των εφεδράνων. Ενώ, όσο μειώνεται ο συντελεστής τριβής μ , μειώνονται οι δυνάμεις και αυξάνονται οι μετακινήσεις των εφεδράνων. Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται και γραφικά στα σχήματα που ακολουθούν, στα οποία παρουσιάζονται οι βρόχοι υστέρησης των εφεδράνων υπό την επιβολή σεισμικών καταγραφών.



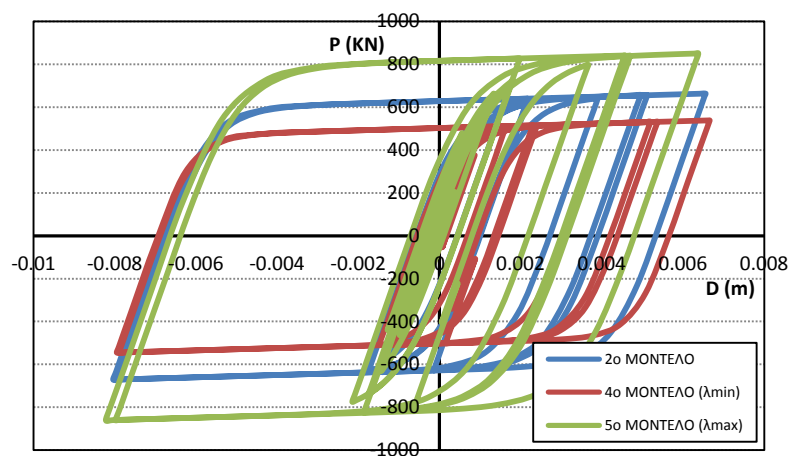
Σχήμα 6.20: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_1 2^{ov}-4^{ov}-5^{ov} Μοντέλου για την Καταγραφή Northridge-x



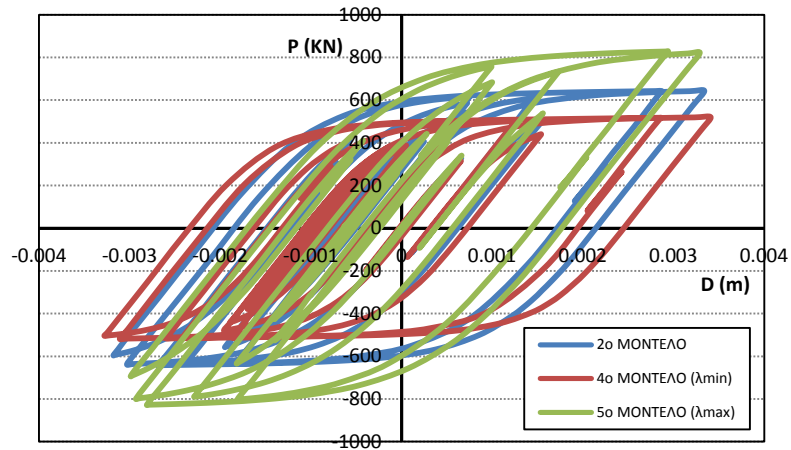
Σχήμα 6.21: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου $E_1 2^{ov}-4^{ov}-5^{ov}$ Μοντέλου για την Καταγραφή Northridge-y



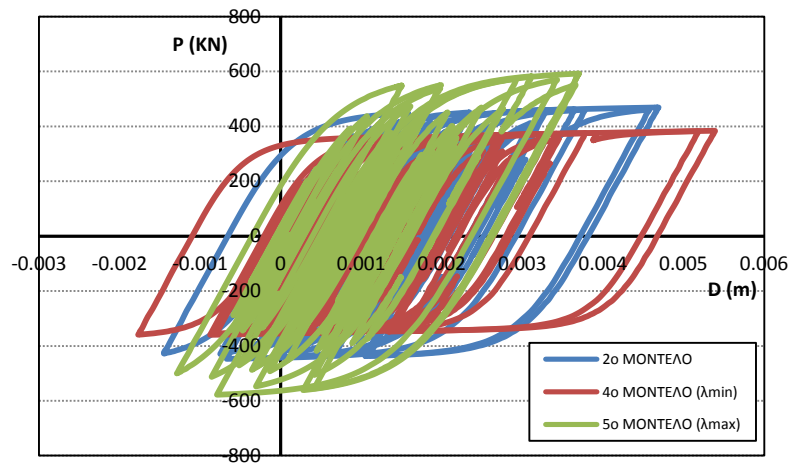
Σχήμα 6.22: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου $E_1 2^{ov}-4^{ov}-5^{ov}$ Μοντέλου για την Καταγραφή Chi-Chi



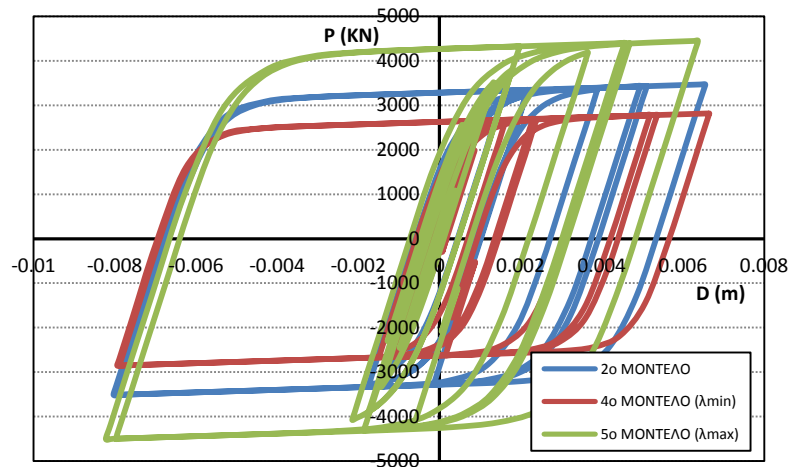
Σχήμα 6.23: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου $E_6 2^{ov}-4^{ov}-5^{ov}$ Μοντέλου για την Καταγραφή Northridge-x



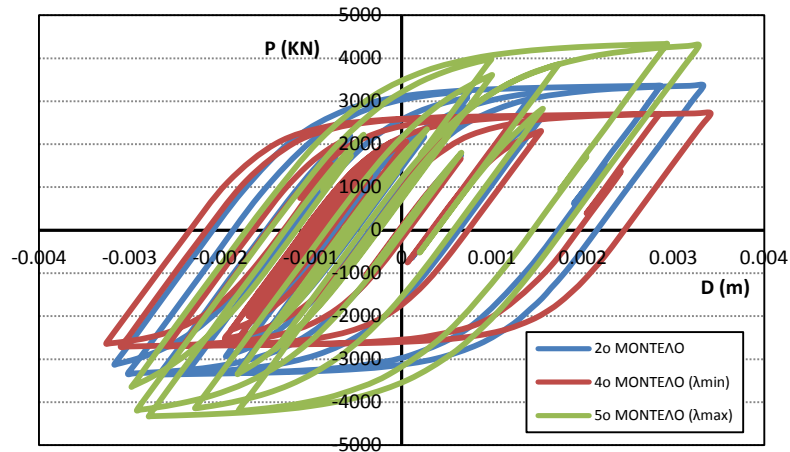
Σχήμα 6.24: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_6 2^{ov}-4^{ov}-5^{ov} Μοντέλου για την Καταγραφή Northridge-y



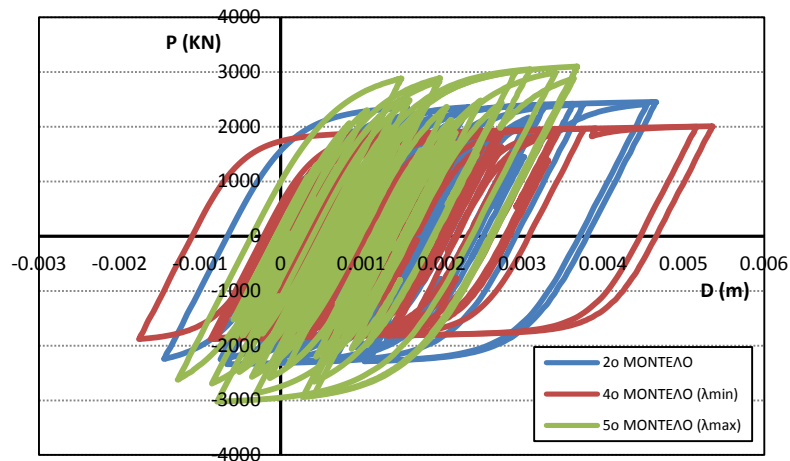
Σχήμα 6.25: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_6 2^{ov}-4^{ov}-5^{ov} Μοντέλου για την Καταγραφή Chi-Chi



Σχήμα 6.26: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_{11-1} 2^{ov}-4^{ov}-5^{ov} Μοντέλου για την Καταγραφή Northridge-x



Σχήμα 6.27: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_{11-1} 2^{ov} - 4^{ov} - 5^{ov} Μοντέλου για την Καταγραφή Northridge-y



Σχήμα 6.28: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS Τύπου E_{11-1} 2^{ov} - 4^{ov} - 5^{ov} Μοντέλου για την Καταγραφή Chi-Chi

6.4 Σύγκριση Στοχαστικής Μεθόδου Με Μέθοδο Συντελεστών λ

Σε μια προσπάθεια να συγκρίνουμε τη στοχαστική μέθοδο (με τη βοήθεια του λογισμικού Microsoft Office Excel και της συνάρτησης $NORMINV(RAND();mean;standard_deviation)$) με τη μέθοδο εισαγωγής των συντελεστών τροποποίησης ιδιοτήτων συστήματος, συντελεστών λ , ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Θεωρήθηκαν 20 διαφορετικές τιμές για τους συντελεστές τριβής για χαμηλή και υψηλή ταχύτητα ολίσθησης, μ_{slow} και μ_{fast} αντίστοιχα, για κάθε τύπο εφεδράνου, οι

οποίες προέκυψαν ως σειρά τυχαίων αριθμών από την κανονική κατανομή με μέση τιμή 4% και τυπική απόκλιση 15%, με τη βοήθεια της συνάρτησης $NORMINV(RAND();mean;standard_deviation)$. Έπειτα υπολογίσαμε την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή των συντελεστών τριβής μ_{slow} και μ_{fast} για κάθε τύπο εφεδράνου από το δείγμα των 20 διαφορετικών τιμών. Έτσι προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας (Πίνακας 6.66).

Πίνακας 6.66: Τιμές Συντελεστών Τριβής Στοχαστικής Μεθόδου

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	$\mu_{slow,min}$	$\mu_{slow,max}$	$\mu_{fast,min}$	$\mu_{fast,max}$
E1	0.0263	0.0511	0.0262	0.0538
E2	0.0257	0.0488	0.0217	0.0519
E3	0.0321	0.0458	0.0281	0.0496
E4	0.0278	0.0538	0.0295	0.0489
E5	0.0312	0.0514	0.0315	0.0518
E6	0.0291	0.0531	0.0344	0.0572
E7	0.0319	0.0531	0.0319	0.0500
E8	0.0317	0.0559	0.0272	0.0464
E9	0.0328	0.0502	0.0283	0.0541
E10-1	0.0268	0.0504	0.0270	0.0459
E10-2	0.0265	0.0510	0.0262	0.0504
E10-3	0.0319	0.0518	0.0280	0.0502
E10-4	0.0256	0.0474	0.0247	0.0496
E10-5	0.0292	0.0543	0.0294	0.0568
E11-1	0.0294	0.0499	0.0273	0.0479
E11-2	0.0268	0.0552	0.0297	0.0478
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	0.0290	0.0511	0.0284	0.0509

Οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών τριβής έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τη μέθοδο των συντελεστών λ στην παράγραφο 6.3.4 για το 4^ο και το 5^ο μοντέλο προσομοίωσης και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.67: Τιμές Συντελεστών Τριβής Μεθόδου Συντελεστών λ

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	$\mu_{\text{slow,min}}$	$\mu_{\text{slow,max}}$	$\mu_{\text{fast,min}}$	$\mu_{\text{fast,max}}$
E1			0.0410	0.0666
E2			0.0405	0.0657
E3			0.0406	0.0660
E4			0.0409	0.0664
E5			0.0408	0.0664
E6			0.0407	0.0662
E7			0.0407	0.0661
E8			0.0402	0.0654
E9			0.0402	0.0652
E10-1			0.0403	0.0655
E10-2			0.0403	0.0655
E10-3			0.0403	0.0655
E10-4			0.0401	0.0652
E10-5			0.0402	0.0653
E11-1			0.0400	0.0650
E11-2			0.0400	0.0650
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	0.0320	0.0520	0.0404	0.0657

Παρατηρούμε ότι η διακύμανση των τιμών των συντελεστών τριβής μ_{slow} και μ_{fast} που προκύπτει από τη μέθοδο των συντελεστών λ θα μπορούσε να αντιστοιχηθεί με μια στοχαστική διαδικασία με διακύμανση περίπου 15%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΜΟΝΩΜΕΝΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

7.1 Γενικά

Μονώσαμε σεισμικά με εφέδρανα εκκρεμούς τριβής (FPS) και με ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (LRB) μια υφιστάμενη κατασκευή (προσομοιωμένη ήδη με τη βοήθεια του λογισμικού SAP2000 v15.1.0 της εταιρείας CSI στη μεταπτυχιακή εργασία του φοιτητή Παναγιώτη Ηλία [1]). Έτσι μας δόθηκε η δυνατότητα να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων σεισμικής μόνωσης. Το κτίριο αναλύεται ως χωρικό προσομοίωμα, αγνοώντας την επιρροή της τοιχοποιίας στην ανάληψη οριζόντιας δύναμης και θεωρώντας μόνο την συμβολή των υπολοίπων δομικών στοιχείων (δοκοί, τοιχία, υποστυλώματα). Η προσομοίωση των οριζόντιων και των κατακόρυφων μελών, καθώς επίσης και των πεδιλοδοκών έγινε με ραβδωτά στοιχεία πλαισίου 6 βαθμών ελευθερίας.

Η προσομοίωση των περιμετρικών τοιχωμάτων του υπογείου έγινε με χρήση χιαστή συνδέσμων μεγάλης δυσκαμψίας, ώστε να εξασφαλίζεται με τον καλύτερο τρόπο το απαραμόρφωτο της στάθμης του ισογείου. Ακόμα, η προσομοίωση του εδάφους έγινε με χρήση ενός μετακινησιακού και δύο στροφικών ελατηρίων.

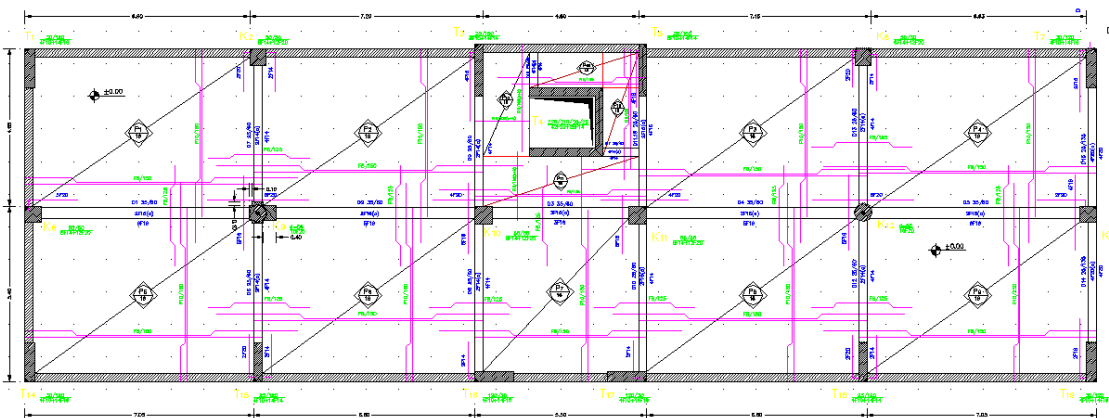
Η προσομοίωση των τοιχωμάτων γίνεται με τη μέθοδο του ισοδύναμου στύλου. Ο ισοδύναμος στύλος περιλαμβάνει:

- ένα γραμμικό κατακόρυφο στοιχείο με διατομή ίδια με αυτή του τοιχώματος
- απολύτως στερεούς, οριζόντιους βραχίονες (άκαμπτα στοιχεία) στις στάθμες των ορόφων, οι οποίοι συνδέουν απαραμόρφωτα τον κεντροβαρικό άξονα του τοιχώματος με τις δοκούς που συμβάλλουν στο τοίχωμα.

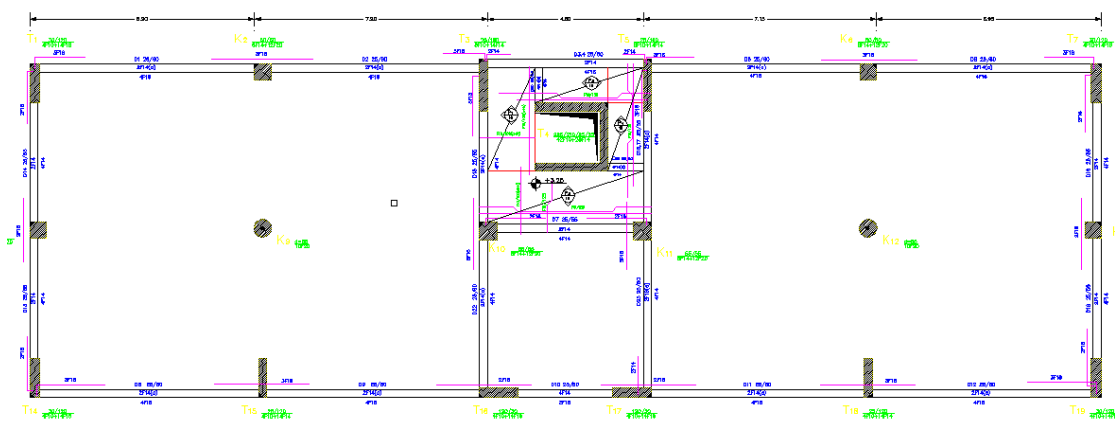
Η κατασκευή υποβλήθηκε σε μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας για γνωστά σεισμικά γεγονότα και σε φασματικές αναλύσεις για το φάσμα του κανονισμού. Έπειτα έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων σεισμικής μόνωσης. Στη συνέχεια προχωρήσαμε σε τροποποιήσεις των συντελεστών τριβής των εφεδράνων τριβής εισάγοντας τους συντελεστές λ και εξετάσαμε την επιρροή της μεταβλητότητας των τιμών των συντελεστών τριβής στη συμπεριφορά των εφεδράνων.

7.2 Μορφολογία Φορέα

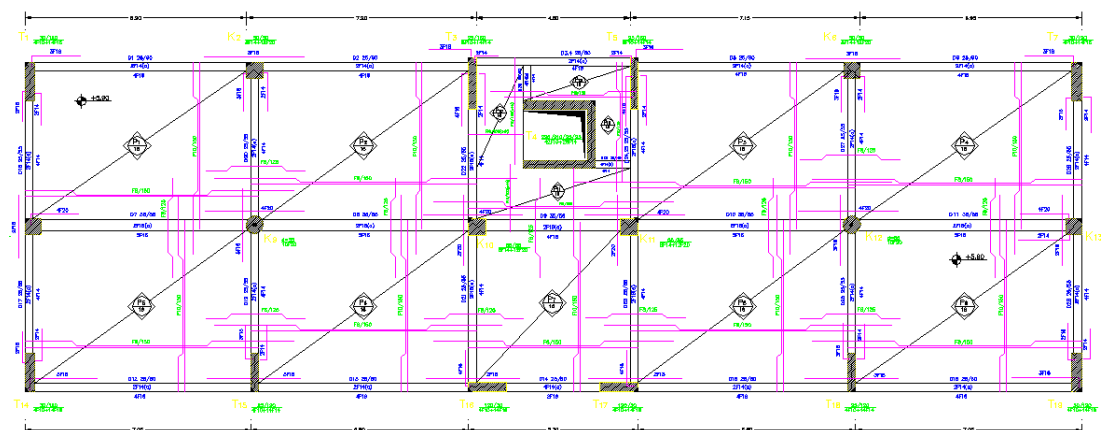
Πρόκειται για υφιστάμενη τετραώροφη κατασκευή η οποία χρησιμοποιείται για ένα κτίριο γραφείων. Στην κορυφή υπάρχει ένα δώμα, ενώ οι στάθμες του πρώτου και δευτέρου ορόφου αποτελούν έναν ενιαίο χώρο όπως φαίνεται και στις κατόψεις που ακολουθούν.



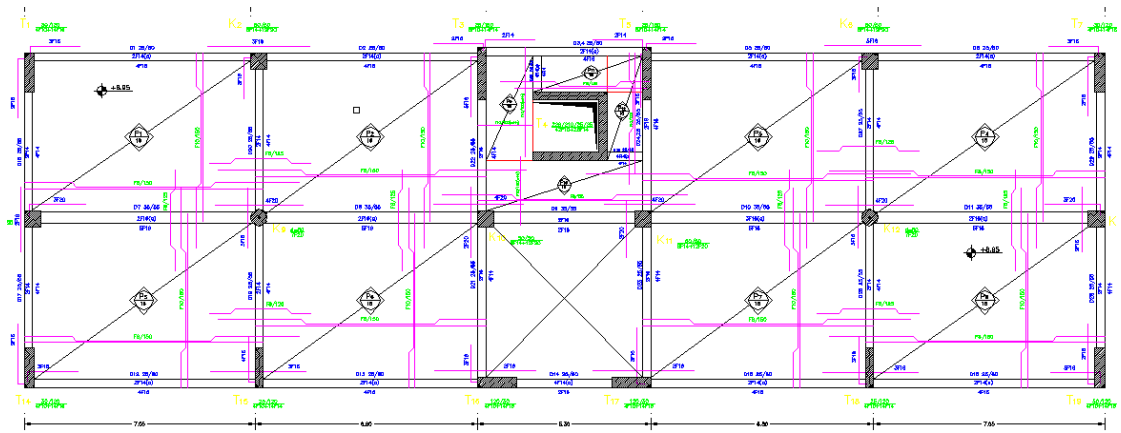
Σχήμα 7.1: Κάτοψη Ισογείου



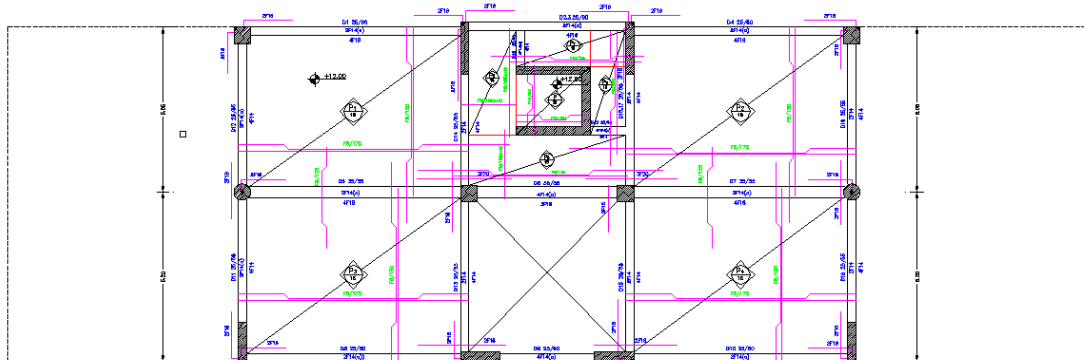
Σχήμα 7.2: Κάτοψη 1^{ου} Ορόφου



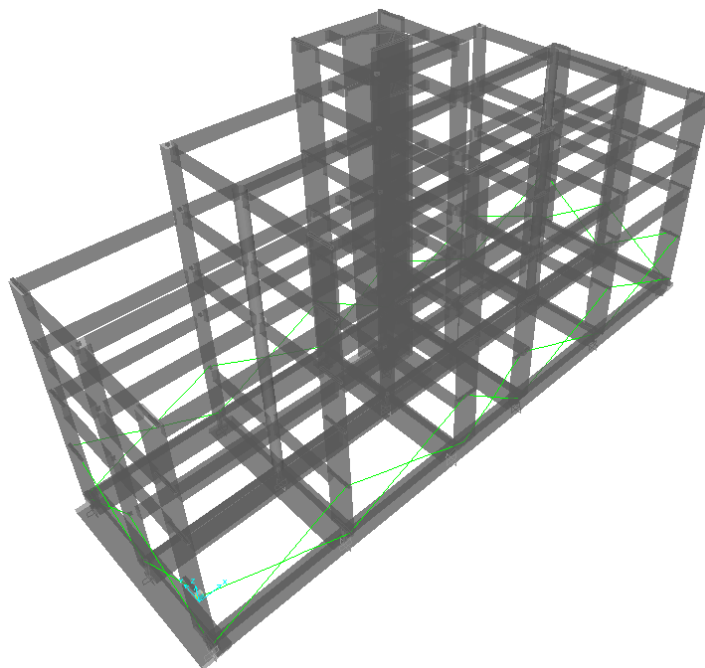
Σχήμα 7.3: Κάτοψη 2^{ου} Ορόφου



Σχήμα 7.4: Κάτοψη 3^ο Ορόφου



Σχήμα 7.5: Κάτοψη 4^ο Ορόφου-Δώματος



Σχήμα 7.6: Χωρικό Προσομοίωμα

Στο επίπεδο κάθε ορόφου θεωρούμε διαφραγματική λειτουργία, ενώ οι στηρίξεις θεωρούνται ως πακτώσεις.

7.3 Προσομοίωση Εφεδράνων LRB

Για τις ακόλουθες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Τα εφέδρανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 7.1: Τύποι Ελαστομεταλλικών Εφεδράνων Ανάλυσης με Πυρήνα Μολύβδου

ΤΥΠΟΣ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
	D_{ext}	D_{int}	n	t_i
Type 1	0.40	0.10	45	0.01
Type 2	0.60	0.15	40	0.01
Type 3	0.80	0.25	30	0.01

Για τους τρεις τύπους εφεδράνων υπολογίστηκε η οριζόντια μετατόπιση που αναλαμβάνει το διάφραγμα για θεώρηση άκαμπτου σώματος. Ο υπολογισμός έγινε βάσει της ισοδύναμης στατικής μεθόδου και από την προκύπτουσα μετατόπιση προσδιορίζονται όλες οι παράμετροι των βρόχων υστέρησης του κάθε εφεδράνου και εν συνεχεία η συνολική απόσβεση που προσφέρεται στο σύστημα.

Τα μεγέθη που απαιτούνται ώστε να γίνει η προσομοίωση των εφεδράνων στο SAP2000 είναι η ενεργός δυσκαμψία, η ενεργός απόσβεση, η ελαστική δυσκαμψία του μονωτήρα, η δύναμη διαρροής του και ο λόγος της μετελαστικής δυσκαμψίας προς την ελαστική. Τα κατακόρυφα φορτία των εφεδράνων προέκυψαν από τις αξονικές δυνάμεις των υποστυλωμάτων του ισογείου για το συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q από το ήδη υπάρχον μοντέλο προσομοίωσης της κατασκευής. Για το σχεδιασμό της μόνωσης θεωρήσαμε της μηχανικές ιδιότητες του υλικού του μονωτήρα αλλά και τα σεισμικά χαρακτηριστικά της περιοχής:

- Μέτρο Διάτμησης Ελαστικού, $G=810 \text{ KN/m}^2$
- Μέτρο Ελαστικότητας, $E=3250 \text{ KN/m}^2$
- Τάση Διαρροής Μολύβδου, $\sigma_y=8000 \text{ KN/m}^2$
- Σταθερά Υλικού, $k=0.64$
- Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας III
- Συντελεστής Σπουδαιότητας, $\gamma=2$

- Τύπος Εδάφους C
- Συντελεστής Συμπεριφοράς $q=1.0$
- Συντελεστής θεμελίωσης $\theta=1.0$

Τα χαρακτηριστικά των τριών ελαστομεταλλικών εφεδράνων με πυρήνα μολύβδου που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις του κεφαλαίου 3.4.3.1 και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7.2: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εφεδράνων LRB

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΦΟΡΤΙΟ P (KN)	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ D_{ext}	ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ D_{int}	ΠΛΗΘΟΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ n	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t_i	ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ D_m (m)	ΜΕΤΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ K_p (KN/m)	ΛΟΓΟΣ ΜΕΤΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑ $r=K_p/K_e$
Type 1	600.227	0.40	0.10	45	0.01	0.230	211.950	0.08
Type 2	1729.694	0.60	0.15	40	0.01	0.230	536.498	0.08
Type 3	4508.904	0.80	0.25	30	0.01	0.280	1224.011	0.08

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΚΑΜΨΙΑ K_e (KN/m)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ Q (KN)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΚΑΜΨΙΑ K_{eff} (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ T_{eff} (sec)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ D_y (m)	ΔΥΝΑΜΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ F_y (KN)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ξ_{eff}	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ C_{eff}
Type 1	2649.375	62.80	484.993	2.232	0.0258	68.261	0.318	92.477
Type 2	6706.230	141.30	1150.846	2.459	0.0229	153.587	0.306	230.779
Type 3	15300.141	392.50	2625.797	2.629	0.0279	426.630	0.306	562.847

Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι επάρκειας των εφεδράνων έναντι των απαιτήσεων του κανονισμού AASHTO, οι οποίοι έγιναν με τη βοήθεια των σχέσεων των παραγράφων 3.4.3.1 και 3.4.3.2 και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7.3: Έλεγχοι Επάρκειας Εφεδράνων Έναντι Απαιτήσεων Κανονισμού

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ S	ΕΝΕΡΓΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ A_r (m ²)	ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΛΟΓΩ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΘΛΙΠΤΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ γ_c για $S \leq 15$	ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΛΟΓΩ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΘΛΙΠΤΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ γ_c για $S > 15$	ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΛΟΓΩ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ γ_s	$\gamma_c + \gamma_s \leq 5.5$
Type 1	9.38	0.0390	2.35 < 2.5		0.51	2.86
Type 2	14.06	0.1482	1.20 < 2.5		0.58	1.86
Type 3	18.05	0.2833		1.81 < 2.5	0.93	2.74

ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ I (m ⁴)	ΥΨΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ h_r (m)	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E_b (KN/m ²)	T	R	Q	ΚΡΙΣΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΣΗ P_{cr}^o (KN)	A_i/A_{ext}	ΚΡΙΣΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΘΕΣΗ P_{cr}^y (KN)	P/P_{cr}^y
Type 1	0.00126	0.582	215198.242	349.751	123.355	5.398	2122.443	0.31	659.38	0.910
Type 2	0.00636	0.517	480133.545	3947.912	277.370	6.077	6221.590	0.52	3262.74	0.530
Type 3	0.02011	0.387	788650.705	20455.225	473.692	8.118	25033.332	0.56	14116.93	0.319

7.4 Προσομοίωση Εφεδράνων FPS

Προκειμένου να γίνει σύγκριση των εφεδράνων LRB-FPS για τη σεισμική μόνωση της κατασκευής δημιουργήθηκε ένα ακόμη μοντέλο προσομοίωσης στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι εφεδράνων εκκρεμούς τριβής (FPS). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 7.4: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Εφεδράνων Εκκρεμούς Τριβής

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΤΗΡΑ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΤΗΡΑ (m ²)
E1	0.15	0.0177
E2	0.2	0.0314
E3	0.25	0.0491

Έπειτα καθορίστηκαν οι ιδιότητες των εφεδράνων, αφού πρώτα προηγήθηκαν υπολογισμοί σύμφωνα με τους τύπους της παραγράφου 3.3.1. Θεωρήθηκαν αρχικά τα εξής μεγέθη:

- Ακτίνα καμπυλότητας κοίλης επιφάνειας ολίσθησης $R=3\text{ m}$
- Οριζόντια μετατόπιση $D=0.25\text{m}$
- Επιτάχυνση βαρύτητας $g=9.81\text{m/s}^2$

Ο συντελεστής τριβής μ_{slow} θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με 4%. Στον πίνακα 7.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών τριβής μ_{fast} και μ . Οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τις σχέσεις (3.40), (3.41) και θεωρώντας σταθερές τιμές των ακόλουθων παραμέτρων, οι οποίες λήφθηκαν από πειραματικές μετρήσεις:

$$f_{\text{max},0}=0.12$$

$$f_{\text{max},p}=0.05$$

$$\varepsilon=0.012\text{ MPa}^{-1}$$

$$\alpha=0.0429\text{ sec/mm} = 42.9\text{ sec/m}$$

Πίνακας 7.5: Τιμές Συντελεστών Τριβής Ολίσθησης Εφεδράνων FPS

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΦΟΡΤΙΟ W (kN)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΤΗΡΑ (m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΤΗΡΑ (m ²)	ΠΙΕΣΗ p(MPa)	$f_{\max}=\mu_{\text{fast}}$	μ
E1	600.227	0.15	0.0177	33.9659	0.0930	0.0922
E2	1729.694	0.2	0.0314	55.0579	0.0795	0.0789
E3	4508.904	0.25	0.0491	91.8546	0.0639	0.0636

Έπειτα παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τριών διαφορετικών τύπων εφεδράνων τριβής.

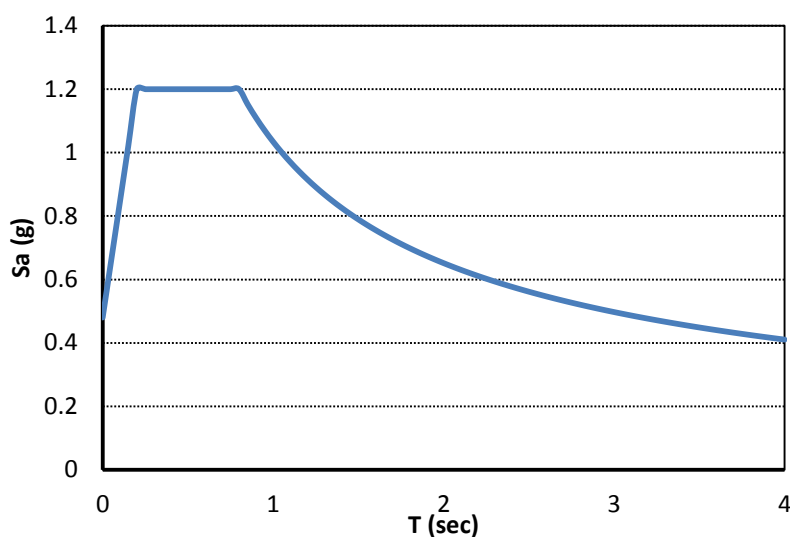
Πίνακας 7.6: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εφεδράνων FPS

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΦΟΡΤΙΟ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ W (KN)	ΜΑΖΑ M (t)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΙΑΝΑΦΟΡΑΣ F _H (KN)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΛΟΓΟ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ K _H (KN/m)	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΟΝΟΤΗΡΑ T (s)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ K _{eff} (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ T (s)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ A _{hys} (KNm)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ξ _{eff}	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ δν (m)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΡΗΤΗΡΙΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ D/R _μ >1	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ K _{εφ} =100*K _H (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ C _{eff}
E1	600.23	61.19	105.37	200.08	3.47	421.50	2.39	55.36	0.334	0.01	0.90	20007.57	91.35
E2	1729.69	176.32	280.69	576.56	3.47	1122.74	2.49	136.54	0.310	0.01	1.06	57656.47	231.09
E3	4508.90	459.62	662.42	1502.97	3.47	2649.69	2.62	286.68	0.276	0.01	1.31	150296.80	497.74

7.5 Δυναμική Φασματική Ανάλυση Κατασκευής

Κατά την ανάλυση αυτή λαμβάνεται υπόψη η συμμετοχή της καμπτικής δυσκαμψίας των ορόφων μέσω των ιδιομορφών ταλάντωσης της κατασκευής. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται το φάσμα σχεδιασμού του αντίστοιχου κανονισμού, όπως αυτό επιλέγεται από τον μελετητή, εφαρμοζόμενο κατά τις κύριες διευθύνσεις κίνησης. Ο συνδυασμός των διαφόρων διευθύνσεων και ποσοστών συμμετοχής της κάθε διεύθυνσης δίνει ένα σύνολο συνδυασμών φόρτισης υπό τους οποίους γίνεται ο τελικός σχεδιασμός.

Για το φάσμα σχεδιασμού του ΕΑΚ2000 σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙΙ, συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_I=2$, απόσβεση $\zeta=5\%$, συντελεστή σεισμικής συμπεριφοράς $q=1$, συντελεστή θεμελίωσης $\theta=1$ και κατηγορία εδάφους C, έχουμε τη παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 7.7: Φάσμα Σχεδιασμού Φασματικής Ανάλυσης

7.6 Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας

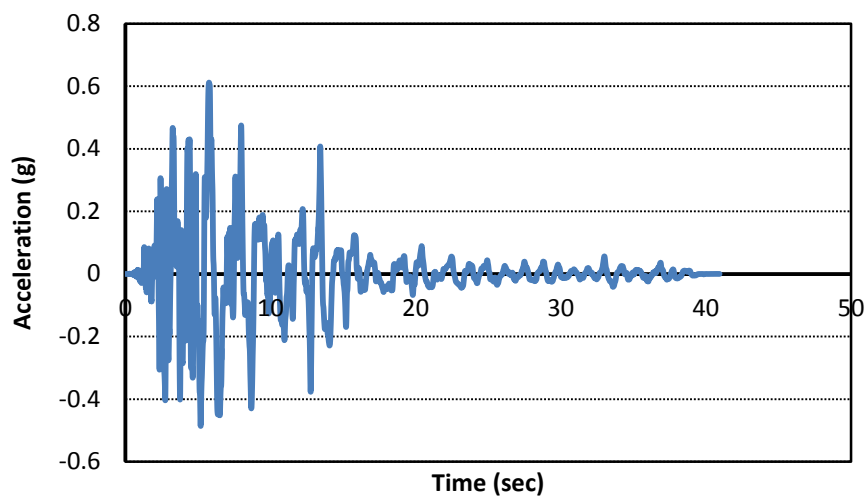
Κατά την ανάλυση αυτή θεωρείται ότι η ανωδομή συμπεριφέρεται ελαστικά ενώ τα εφέδρανα μη γραμμικά (υστερητική συμπεριφορά). Έτσι, στην πραγματικότητα η μη γραμμική συμπεριφορά συγκεντρώνεται στο επίπεδο της μόνωσης, όπου λαμβάνει χώρα και η κατανάλωση ενέργειας.

Για τον υπολογισμό της απόκρισης χρονοϊστορίας της κατασκευής οι συνδυασμοί φόρτισης που επιβάλλονται περιλαμβάνουν τον στατικό συνδυασμό $G+0.3Q$ ο οποίος εισάγεται σταδιακά μέσω μιας συνάρτησης ράμπας συν το σύνολο της φόρτισης κατά την διεύθυνση X συν το 30% της φόρτισης κατά την διεύθυνση Y .

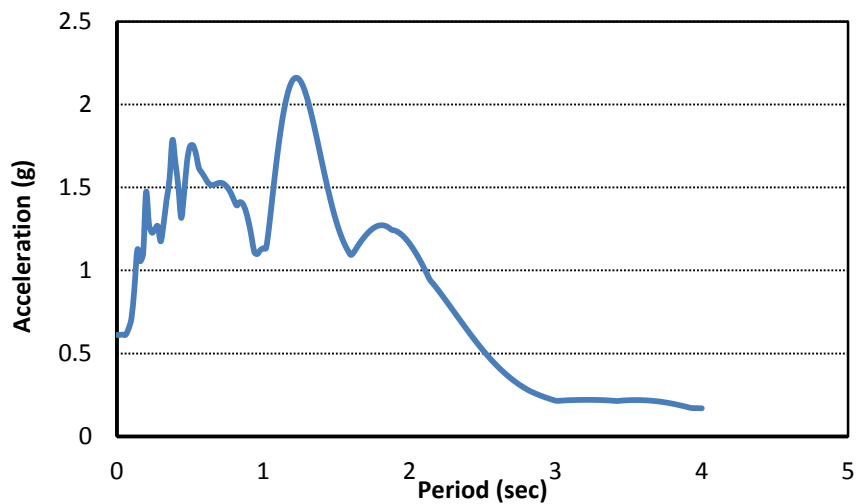
Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων Peer Strong Motion Database του Berkeley και είναι οι εξής:

- η καταγραφή του σεισμού Northridge των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 20/03/1994 και ελήφθη από το σταθμό Rinaldi.
- η καταγραφή του σεισμού Kobe της Ιαπωνίας, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 16/01/1995 και ελήφθη από το σταθμό Takatori.

Ακολουθούν γραφήματα στα οποία παρουσιάζονται τα επιταχυνσιογραφήματα καθώς και τα φάσματα επιταχύνσεων των καταγραφών.



Σχήμα 7.8: Επιταχυνσιογράφημα Καταγραφής Kobe



Σχήμα 7.9: Φάσμα Επιταχύνσεων Καταγραφής Kobe

Τα αντίστοιχα γραφήματα για την καταγραφή Northridge έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 6.3.2 (βλέπε Σχήματα 6.3 έως 6.6).

Οι συνδυασμοί φόρτισης που επιβλήθηκαν στην κατασκευή είναι οι εξής:

- $1.35G+1.5Q$
- $G+0.3Q$
- $E_x+0.3E_y$
- $E_x-0.3E_y$
- $G+0.3Q+\text{Northridge}$
- $G+0.3Q+\text{Kobe}$

7.7 Αποτελέσματα Αναλύσεων - Σύγκριση Σεισμικής Μόνωσης Με Εφέδρανα LRB και FPS

Αρχικά παρουσιάζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής με χρήση εφεδράνων LRB και FPS.

*Πίνακας 7.7: Ιδιομορφές Ταλάντωσης και Ποσοστά Ιδιομορφικών Μαζών Μονωμένης
Κατασκευής με Εφεδρανα FPS και LRB*

ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕ FPS					ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕ LRB				
ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ	ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ (sec)	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ	ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ (sec)	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless
1 ^η	2.1809	0.0461	0.0000	0	1 ^η	2.1129	0.0590	0.0000	0
2 ^η	1.9661	0.1421	0.8440	0	2 ^η	1.9438	0.1021	0.8843	0
3 ^η	1.9647	0.8074	0.1491	0	3 ^η	1.9421	0.8344	0.1088	0

Παρατηρούμε ότι οι ιδιοπερίοδοι της κατασκευής είναι πολύ κοντά για τους δύο διαφορετικούς τύπους σεισμικής μόνωσης.

Στη συνέχεια ακολουθούν πίνακες στους οποίους συγκρίνονται οι μετακινήσεις των δύο τύπων εφεδράνων.

Πίνακας 7.8: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων FPS-LRB (Μέση Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	6.30458E-15	-5.0072E-15	0	5.89058E-14	-4.78E-14
LIVE	0	7.25121E-15	-5.7645E-15	0	6.77463E-14	-5.503E-14
G+0.3Q	0	8.47963E-15	-6.7365E-15	0	7.92284E-14	-6.431E-14
1.35G+1.5Q	0	1.93837E-14	-1.5405E-14	0	1.81153E-13	-1.471E-13
RSP-x	0	0.314355	0.017916	0	0.302797	0.016480
RSP-y	0	0.000352	0.314584	0	0.000415	0.302253
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.314355	0.096760	0	0.302797	0.092779
(Northridge-x) + (Northridge-y) / G+0.3Q+(Northridge-x)+(Northridge-y)	0	0.003064	0.001955	0	0.015162	0.015225
Kobe / G+0.3Q+ Kobe	0	0.012108	0.012060	0	0.070204	0.013217

Πίνακας 7.9: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων FPS-LRB (Μέγιστη Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	6.578E-15	-4.089E-15	0	6.139E-14	-3.945E-14
LIVE	0	7.576E-15	-4.673E-15	0	7.07E-14	-4.512E-14
G+0.3Q	0	8.851E-15	-5.491E-15	0	8.26E-14	-5.299E-14
1.35G+1.5Q	0	2.024E-14	-1.253E-14	0	1.889E-13	-1.209E-13
RSP-x	0	0.319721	0.032993	0	0.308630	0.030244
RSP-y	0	0.000398	0.315116	0	0.000507	0.302843
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.319721	0.100127	0	0.308630	0.095755
(Northridge-x) + (Northridge-y) / G+0.3Q+(Northridge-x)+(Northridge-y)	0	0.003163	0.002272	0	0.015295	0.015673
Kobe / G+0.3Q+ Kobe	0	0.012496	0.013362	0	0.072046	0.016393

Παρατηρούμε ότι οι μετακινήσεις των δύο τύπων εφεδράνων υπό την επιβολή του φάσματος σχεδιασμού είναι πολύ κοντινές ενώ υπό την επιβολή των πραγματικών σεισμικών καταγραφών διαφέρουν αρκετά. Η εξομοίωση των συστημάτων μόνωσης περιέχει τη στατική λογική. Παρόλο που τα χαρακτηριστικά των δύο τύπων εφεδράνων είναι κοντά, οι σεισμικές διεγέρσεις είτε με το περιεχόμενο των συχνοτήτων τους ή και τα άλλα δυναμικά χαρακτηριστικά τους δίνουν αποκρίσεις σημαντικά μικρότερες. Οι συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών τύπων συστημάτων σεισμικής μόνωσης αλλά και μεθόδων ανάλυσης συνήθως δεν οδηγούν σε συστηματικά συμπεράσματα καθόσον διαφοροποιούνται από την διάταξη, την δυσκαμψία, τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος και της διέγερσης.

Ακολουθούν πίνακες στους οποίους συγκρίνονται τα εντατικά μεγέθη των δύο τύπων εφεδράνων.

Πίνακες 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων FPS-LRB (Μέση Τιμή)

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	DEAD / LIVE G+0.3Q/1.35G+1.5Q			DEAD / LIVE G+0.3Q/1.35G+1.5Q		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	0	0	0	0	0
E2	0	0	0	0	0	0
E3	0	0	0	0	0	0

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	133.1128	10.9249	0	229.0479	15.3933
E2	0	351.1427	15.9342	0	569.6878	17.2632
E3	0	831.8778	25.3858	0	395.8234	14.3612

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-y			RSP-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	0.1460	132.5970	0	0.2895	227.3271
E2	0	0.4220	353.1958	0	0.7965	570.9220
E3	0	0.8732	833.5498	0	0.5662	396.7892

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	133.1128	41.5531	0	229.0479	70.2366
E2	0	351.1427	107.3947	0	569.6882	172.6897
E3	0	831.8778	252.1686	0	395.8238	120.3514

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	NORTHRIDGE / G+0.3Q+NORTHRIDGE			NORTHRIDGE / G+0.3Q+NORTHRIDGE		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	51.4230	34.9805	0	65.5376	49.0885
E2	0	131.0520	98.5877	0	168.9138	128.1898
E3	0	282.4554	236.3382	0	116.7136	87.8696

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	ΚΟΒΕ / G+0.3Q+ΚΟΒΕ			ΚΟΒΕ / G+0.3Q+ΚΟΒΕ		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	42.5004	40.0020	0	127.4485	50.3219
E2	0	104.8683	100.2843	0	327.3972	143.8038
E3	0	224.9972	212.9602	0	217.8286	96.6514

Πίνακες 7.16, 7.17, 7.18, 7.19, 7.20: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων FPS-LRB (Μέγιστη Τιμή)

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	134.7630	13.9070	0	795.5970	45.3540
E2	0	358.9640	21.2090	0	795.5970	45.3740
E3	0	833.3590	50.0540	0	795.5970	19.8870

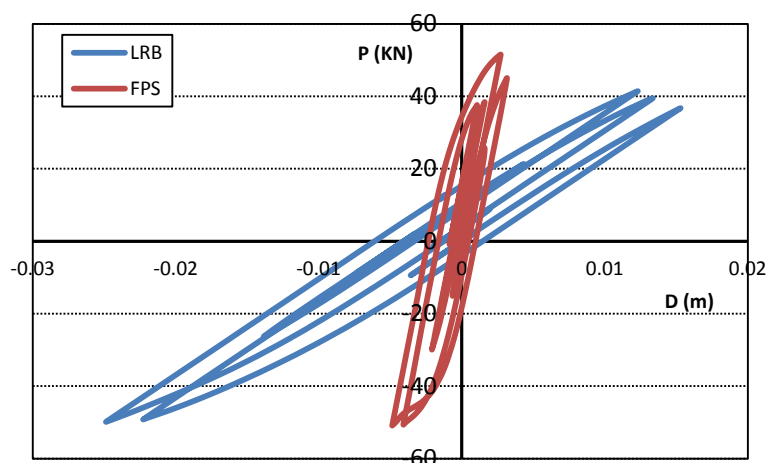
	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-y			RSP-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	0.1680	132.8210	0	1.0240	792.7730
E2	0	0.4460	353.5370	0	1.1700	794.5410
E3	0	0.9380	834.3550	0	1.0240	793.4220

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	134.7630	42.2030	0	795.5970	242.1180
E2	0	358.9640	108.1610	0	795.5970	242.6430
E3	0	833.3590	255.2620	0	795.5970	238.3330

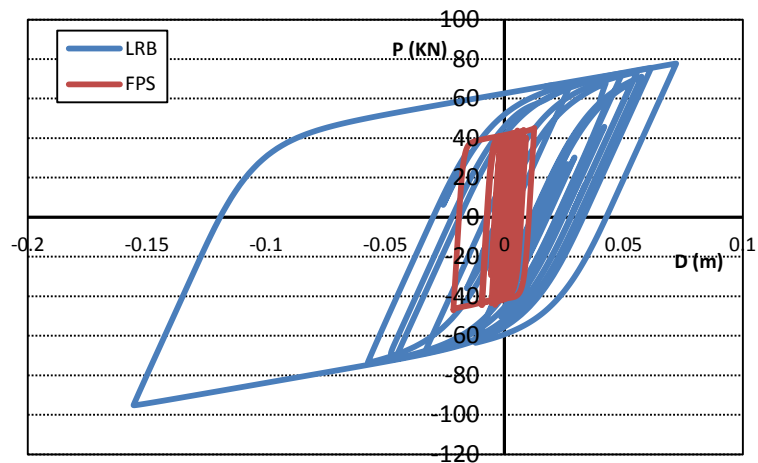
	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	NORTHRIDGE / G+0.3Q+NORTHRIDGE			NORTHRIDGE / G+0.3Q+NORTHRIDGE		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	52.0450	36.6090	0	236.1850	178.2500
E2	0	132.4040	100.8090	0	236.1750	181.1090
E3	0	282.7210	239.3610	0	236.1990	178.9870

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ LRB		
ΦΟΡΤΙΣΗ	KOBE / G+0.3Q+KOBE			KOBE / G+0.3Q+KOBE		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	45.1530	43.0380	0	476.7100	174.4700
E2	0	110.2940	104.7720	0	476.9990	215.9880
E3	0	232.2390	220.3350	0	477.0960	190.1750

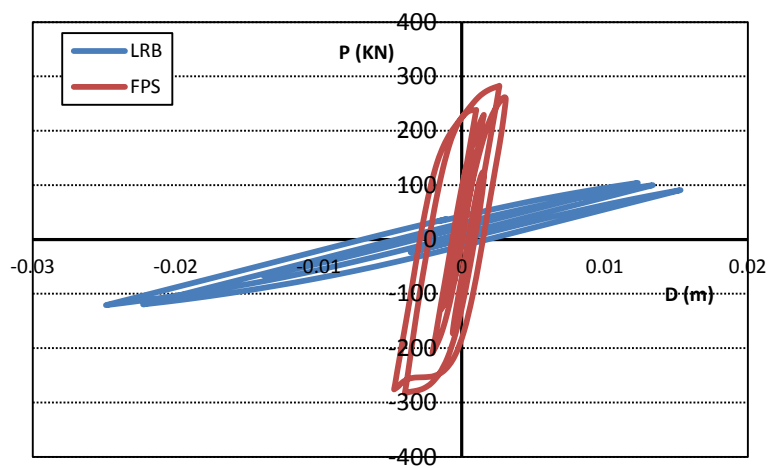
Ακολούθως παρουσιάζονται οι βρόχοι υστέρησης των δύο τύπων εφεδράνων υπό την επιβολή των σεισμικών καταγραφών.



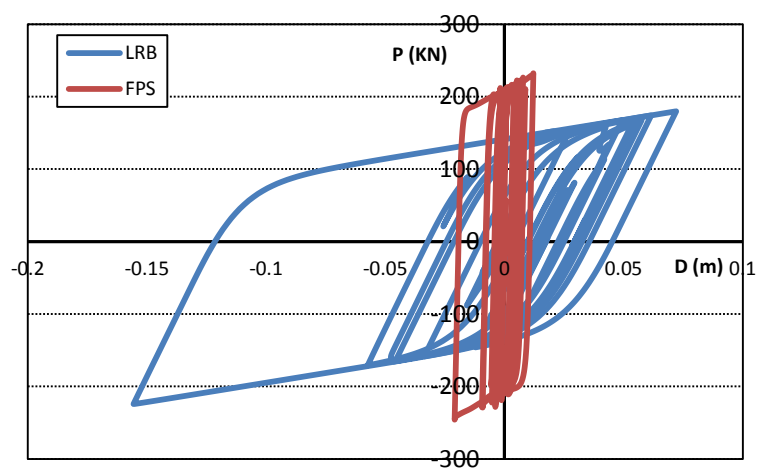
Σχήμα 7.10: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS-LRB Τύπου E₁ για την Καταγραφή Northridge



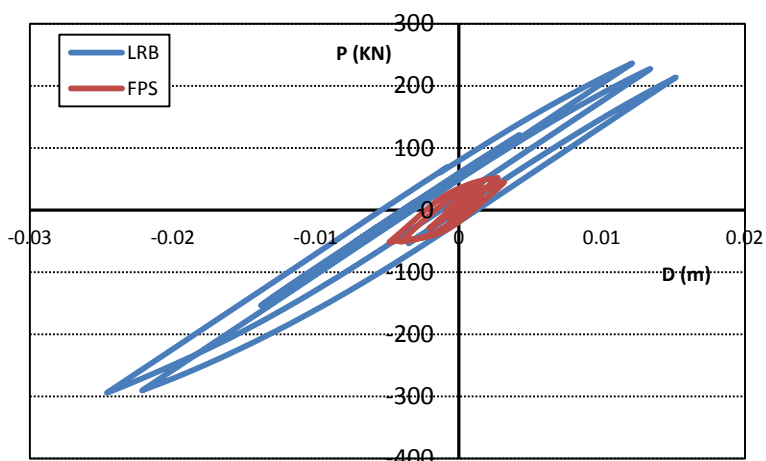
Σχήμα 7.11: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS-LRB Τύπου E_1 για την Καταγραφή Kobe



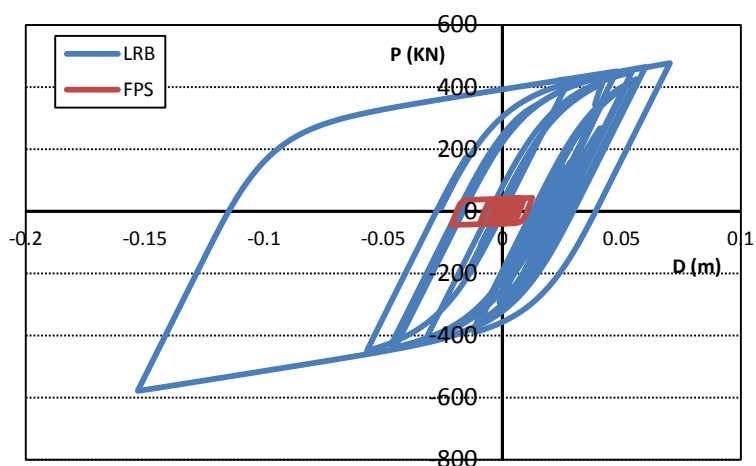
Σχήμα 7.12: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS-LRB Τύπου E_2 για την Καταγραφή Northridge



Σχήμα 7.13: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS-LRB Τύπου E_2 για την Καταγραφή Kobe



Σχήμα 7.14: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS-LRB Τύπου E_3 για την Καταγραφή Northridge



Σχήμα 7.15: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS-LRB Τύπου E_3 για την Καταγραφή Kobe

Η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης όπως παρουσιάζεται για τους παραπάνω σεισμούς καταδεικνύει την σημασία της μόνωσης ενδέχεται όμως να προκύψει και μεγαλύτερη ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας άλλης διέγερσης. Πάντως η απόκριση θα είναι συστηματικά σημαντικά μικρότερη σε σχέση με την συμβατικά σχεδιασμένη κατασκευή.

7.8 Εισαγωγή Συντελεστών Τροποποίησης Ιδιοτήτων Συστήματος

Σε μια προσπάθεια για την εκτενέστερη διερεύνηση της συμπεριφοράς συστημάτων σεισμικής μόνωσης με θεώρηση μεταβαλλόμενων παραμέτρων, όπως η ηλικία, η μόλυνση και η θερμοκρασία, προχωρήσαμε σε τροποποιήσεις των συντελεστών τριβής για χαμηλή και υψηλή ταχύτητα ολίσθησης, μ_{slow} και μ_{fast} αντίστοιχα, των εφεδράνων ολίσθησης (FPS) εισάγοντας τους συντελεστές λ . Με τη χρήση των συντελεστών λ ορίσαμε τα άνω και κάτω όρια των τιμών των συντελεστών τριβής μ_{slow} και μ_{fast} .

Σύμφωνα με τις σχέσεις (6.3), (6.4) και τις τιμές των συντελεστών $\lambda_{max,i}$ και $\lambda_{min,i}$ του Πίνακα 6.45 καταλήξαμε στη μέγιστη και ελάχιστη τιμή των συντελεστών λ , $\lambda_{max}=1.3$ και $\lambda_{min}=0.8$. Γνωρίζοντας τις ονομαστικές τιμές των συντελεστών τριβής μ_{fast} και μ_{slow} των εφεδράνων, $\mu_{fast,n}$ και $\mu_{slow,n}$ αντίστοιχα, (βλέπε παράγραφο 7.4) και σύμφωνα με τους τύπους (6.3) προέκυψαν οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των συντελεστών τριβής μ_{fast} και μ_{slow} . Έπειτα με τη βοήθεια της σχέσης (3.40) υπολογίστηκαν οι τιμές των συντελεστών τριβής μ των εφεδράνων. Ακολουθούν πίνακες στους οποίους παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών αυτών.

Πίνακας 7.21: Ελάχιστες Τιμές Συντελεστών Τριβής μ_{fast} , μ_{slow} , μ

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	$f_{min}=\mu_{slow}$	$f_{max}=\mu_{fast}$	λ_{min}	$\mu_{slow,min}$	$\mu_{fast,min}$	μ_{min}
E1	0.04	0.0930	0.8	0.032	0.0744	0.0738
E2	0.04	0.0795	0.8	0.032	0.0636	0.0632
E3	0.04	0.0639	0.8	0.032	0.0511	0.0509

Πίνακας 7.22: Μέγιστες Τιμές Συντελεστών Τριβής μ_{fast} , μ_{slow} , μ

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	$f_{min}=\mu_{slow}$	$f_{max}=\mu_{fast}$	λ_{max}	$\mu_{slow,max}$	$\mu_{fast,max}$	μ_{max}
E1	0.04	0.0930	1.3	0.052	0.1208	0.1199
E2	0.04	0.0795	1.3	0.052	0.1033	0.1026
E3	0.04	0.0639	1.3	0.052	0.0831	0.0827

Έπειτα υπολογίστηκαν ξανά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των 3 διαφορετικών τύπων εφεδράνων FPS για τις ελάχιστες και για τις μέγιστες τιμές των συντελεστών τριβής και παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 7.23: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εφεδράνων FPS Με Χρήση Συντελεστών λ_{min}

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΦΟΡΤΙΟ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ W (KN)	ΜΑΖΑ M (t)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ F_H (KN)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΛΟΓΩ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ K_H (KN/m)	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΟΝΩΤΗΡΑ T (s)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ K_{eff} (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ T (s)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ A_{hys} (KNm)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ξ_{eff}	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ δv (m)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ $D/R_{\mu} > 1$	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ $K_{eff} = 100^* K_H$ (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ C_{eff}
E1	600.23	61.19	94.30	200.08	3.47	377.21	2.53	44.28	0.299	0.01	1.13	20007.57	75.64
E2	1729.69	176.32	253.38	576.56	3.47	1013.51	2.62	109.24	0.274	0.01	1.32	57656.47	189.77
E3	4508.90	459.62	605.09	1502.97	3.47	2420.34	2.74	229.34	0.241	0.01	1.64	150296.80	403.53

Πίνακας 7.24: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εφεδράνων FPS Με Χρήση Συντελεστών λ_{max}

ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΦΟΡΤΙΟ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ W (KN)	ΜΑΖΑ M (t)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ F_H (KN)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΛΟΓΩ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ K_H (KN/m)	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΟΝΩΤΗΡΑ T (s)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ K_{eff} (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ T (s)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ A_{hys} (KNm)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ξ_{eff}	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ δv (m)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ $D/R_{\mu} > 1$	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ $K_{eff} = 100^* K_H$ (KN/m)	ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ C_{eff}
E1	600.23	61.19	121.98	200.08	3.47	487.93	2.22	71.96	0.376	0.01	0.70	20007.57	112.51
E2	1729.69	176.32	321.65	576.56	3.47	1286.59	2.33	177.51	0.351	0.01	0.81	57656.47	287.04
E3	4508.90	459.62	748.43	1502.97	3.47	2993.70	2.46	372.68	0.317	0.01	1.01	150296.80	626.41

Επαληθεύουμε την παρατήρηση της παραγράφου 6.3.4 ότι όσο μειώνεται ο συντελεστής τριβής μ μειώνεται η δύναμη επαναφοράς F_H , η ενεργός δυσκαμψία K_{eff} , η καταναλισκόμενη ενέργεια σε κάθε κύκλο φόρτισης που αντιπροσωπεύεται από την επιφάνεια υστέρησης του διγραμμικού μοντέλου A_{hys} και ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης ξ_{eff} του εφεδράνου, ενώ αυξάνεται η ενεργός ιδιοπερίοδος του εφεδράνου T . Το αντίθετο συμβαίνει όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής μ του εφεδράνου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των τριών μοντέλων προσομοίωσης.

➤ Μετακινήσεις Εφεδράνων

Πίνακας 7.25: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων FPS (λ_{min}) - FPS – FPS (λ_{max}) (Μέση Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{min}			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{max}		
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	6.333E-15	-5.438E-15	0	6.30458E-15	-5.00716E-15	0	6.36484E-15	-5.03053E-15
LIVE	0	7.284E-15	-6.26032E-15	0	7.25121E-15	-5.76447E-15	0	7.32079E-15	-5.79047E-15
G+0.3Q	0	8.51821E-15	-7.31616E-15	0	8.47963E-15	-6.73653E-15	0	8.56095E-15	-6.768E-15
1.35G+1.5Q	0	1.94747E-14	-1.67316E-14	0	1.93837E-14	-1.54053E-14	0	1.95742E-14	-1.54768E-14
RSP-x	0	0.356200	0.021883	0	0.314355	0.017916	0	0.279819	0.013822
RSP-y	0	0.000371	0.356456	0	0.000352	0.314584	0	0.000218	0.280585
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.356200	0.110067	0	0.314355	0.096760	0	0.279819	0.085777
(Northridge-x) + (Northridge-y) / G+0.3Q+(Northridge-x)+(Northridge-y)	0	0.003382	0.002011	0	0.003064	0.001955	0	0.002830	0.001952
Kobe / G+0.3Q+Kobe	0	0.014377	0.014339	0	0.012108	0.012060	0	0.009710	0.009637

Πίνακας 7.26: Σύγκριση Μετακινήσεων Εφεδράνων FPS (λ_{min}) - FPS – FPS (λ_{max}) (Μέγιστη Τιμή)

	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{min}			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{max}		
	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ			ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ		
ΦΟΡΤΙΣΗ	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
DEAD	0	6.591E-15	-4.573E-15	0	6.578E-15	-4.089E-15	0	6.629E-15	-4.142E-15
LIVE	0	7.591E-15	-5.229E-15	0	7.576E-15	-4.673E-15	0	7.636E-15	-4.732E-15
G+0.3Q	0	8.868E-15	-6.142E-15	0	8.851E-15	-5.491E-15	0	8.92E-15	-5.562E-15
1.35G+1.5Q	0	2.028E-14	-1.402E-14	0	2.024E-14	-1.253E-14	0	2.04E-14	-1.269E-14
RSP-x	0	0.361844	0.040343	0	0.319721	0.032993	0	0.284097	0.025470
RSP-y	0	0.000395	0.357010	0	0.000398	0.315116	0	0.000241	0.281022
Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey	0	0.361844	0.114449	0	0.319721	0.100127	0	0.284097	0.088070
(Northridge-x) + (Northridge-y) / G+0.3Q+(Northridge-x)+(Northridge-y)	0	0.003488	0.002338	0	0.003163	0.002272	0	0.002919	0.002259
Kobe / G+0.3Q+Kobe	0	0.014822	0.015824	0	0.012496	0.013362	0	0.010034	0.010724

➤ Εντατικά Μεγέθη Εφεδράνων

▪ Μέση Τιμή

Πίνακες 7.27, 7.28, 7.29, 7.30, 7.31, 7.32: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Εφεδράνων

FPS (λ_{min}) - FPS – FPS (λ_{max}) (Μέση Τιμή)

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{min}			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{max}		
ΦΟΡΤΙΣΗ	DEAD / LIVE G+0.3Q/1.35G+1.5Q			DEAD / LIVE G+0.3Q/1.35G+1.5Q			DEAD / LIVE G+0.3Q/1.35G+1.5Q		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E3	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{min}			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{max}		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	134.9383	11.9438	0	133.1128	10.9249	0	137.0965	9.7595
E2	0	359.3267	17.5705	0	351.1427	15.9342	0	358.3620	14.0895
E3	0	861.0430	28.2930	0	831.8778	25.3858	0	836.7596	22.0918

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{min}			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{max}		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-y			RSP-y			RSP-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	0.1428	134.4589	0	0.1460	132.5970	0	0.1078	136.9055
E2	0	0.3933	361.2720	0	0.4220	353.1958	0	0.3037	360.9975
E3	0	0.8244	862.7450	0	0.8732	833.5498	0	0.5784	839.9868

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{min}			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{max}		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	134.9383	42.4194	0	133.1128	41.5531	0	137.0965	42.4525
E2	0	359.3267	110.0862	0	351.1427	107.3947	0	358.3620	109.4005
E3	0	861.0430	261.3508	0	831.8778	252.1686	0	836.7596	253.5866

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{min}			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{max}		
ΦΟΡΤΙΣΗ	NORTHBRIDGE / G+0.3Q+NORTHBRIDGE			NORTHBRIDGE / G+0.3Q+NORTHBRIDGE			NORTHBRIDGE / G+0.3Q+NORTHBRIDGE		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	43.4288	34.6884	0	51.4230	34.9805	0	57.7288	34.1249
E2	0	108.3613	92.4222	0	131.0520	98.5877	0	154.2255	100.1802
E3	0	229.4590	208.2312	0	282.4554	236.3382	0	350.9836	260.7076

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{min}			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS			ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ FPS- λ_{max}		
ΦΟΡΤΙΣΗ	KOBE / G+0.3Q+KOBE			KOBE / G+0.3Q+KOBE			KOBE / G+0.3Q+KOBE		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	35.1209	32.9134	0	42.5004	40.0020	0	53.8074	51.0350
E2	0	87.0230	83.7037	0	104.8683	100.2843	0	132.3788	128.0170
E3	0	188.0738	179.6876	0	224.9972	212.9602	0	282.5822	270.1516

▪ **Μέγιστη Τιμή**

Πίνακες 7.33, 7.34, 7.35, 7.36, 7.37: Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών $FPS(\lambda_{min})$ - FPS - $FPS(\lambda_{max})$ (Μέγιστη Τιμή)

	$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{min}$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{max}$		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-x			RSP-x			RSP-x		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	136.4910	15.2180	0	134.7630	13.9070	0	138.6190	12.4280
E2	0	366.7320	23.4260	0	358.9640	21.2090	0	365.5160	18.7670
E3	0	862.4570	55.9420	0	833.3590	50.0540	0	838.0980	43.6670

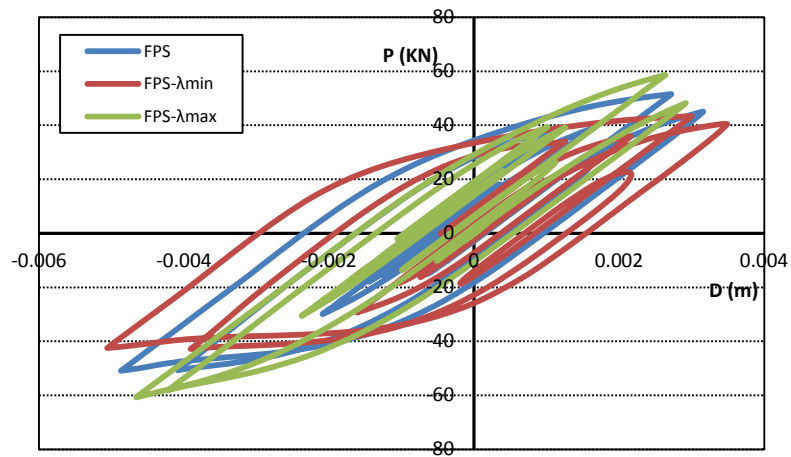
	$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{min}$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{max}$		
ΦΟΡΤΙΣΗ	RSP-y			RSP-y			RSP-y		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	0.1490	134.6680	0	0.1680	132.8210	0	0.1180	137.1190
E2	0	0.4000	361.5930	0	0.4460	353.5370	0	0.3100	361.3190
E3	0	0.8460	863.5110	0	0.9380	834.3550	0	0.6200	840.7350

	$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{min}$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{max}$		
ΦΟΡΤΙΣΗ	Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey			Ex+0.3Ey / Ex-0.3Ey		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	136.4910	43.1710	0	134.7630	42.2030	0	138.6190	42.9720
E2	0	366.7320	110.9780	0	358.9640	108.1610	0	365.5160	110.0080
E3	0	862.4570	265.0250	0	833.3590	255.2620	0	838.0980	255.9730

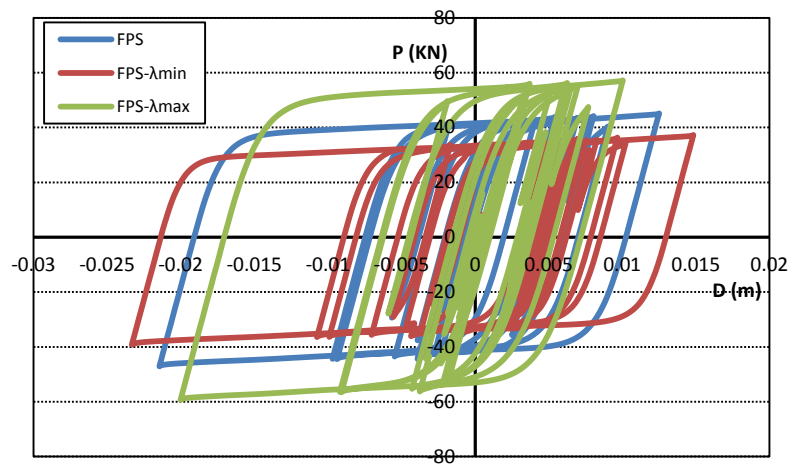
	$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{min}$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{max}$		
ΦΟΡΤΙΣΗ	NORTHBRIDGE / G+0.3Q+NORTHBRIDGE			NORTHBRIDGE / G+0.3Q+NORTHBRIDGE			NORTHBRIDGE / G+0.3Q+NORTHBRIDGE		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	43.6700	35.6910	0	52.0450	36.6090	0	58.6750	36.0740
E2	0	108.6350	93.8640	0	132.4040	100.8090	0	157.7060	103.5610
E3	0	229.7550	210.1500	0	282.7210	239.3610	0	352.0610	264.8380

	$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{min}$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS$			$\Delta YNAMEIS\ MONTELOY\ ME\ FPS-\lambda_{max}$		
ΦΟΡΤΙΣΗ	KOBE / G+0.3Q+KOBE			KOBE / G+0.3Q+KOBE			KOBE / G+0.3Q+KOBE		
ΤΥΠΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)	P (KN)	V ₂ (KN)	V ₃ (KN)
E1	0	37.2900	35.7410	0	45.1530	43.0380	0	57.2270	54.8620
E2	0	91.5500	87.7050	0	110.2940	104.7720	0	139.3570	133.4170
E3	0	193.8820	185.9460	0	232.2390	220.3350	0	291.9260	277.9380

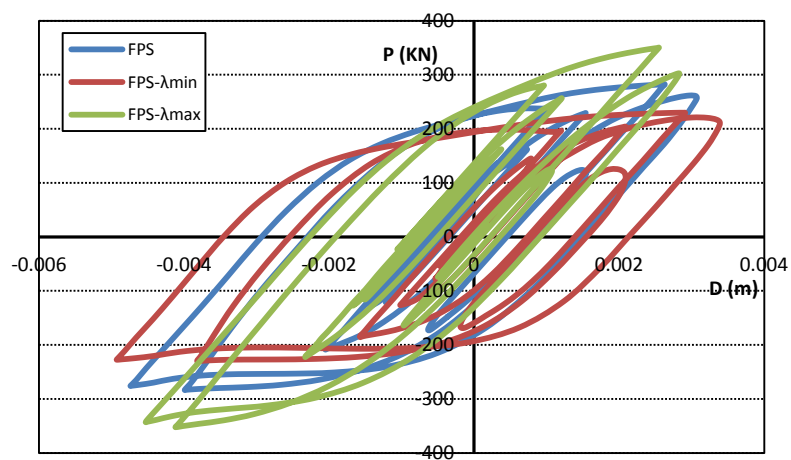
Επαληθεύουμε ξανά το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής μ , αυξάνονται οι δυνάμεις και μειώνονται οι μετακινήσεις των εφεδράνων. Ενώ, όσο μειώνεται ο συντελεστής τριβής μ , μειώνονται οι δυνάμεις και αυξάνονται οι μετακινήσεις των εφεδράνων. Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται και γραφικά στα σχήματα που ακολουθούν, στα οποία παρουσιάζονται οι βρόχοι υστέρησης των εφεδράνων υπό την επιβολή των σεισμικών καταγραφών.



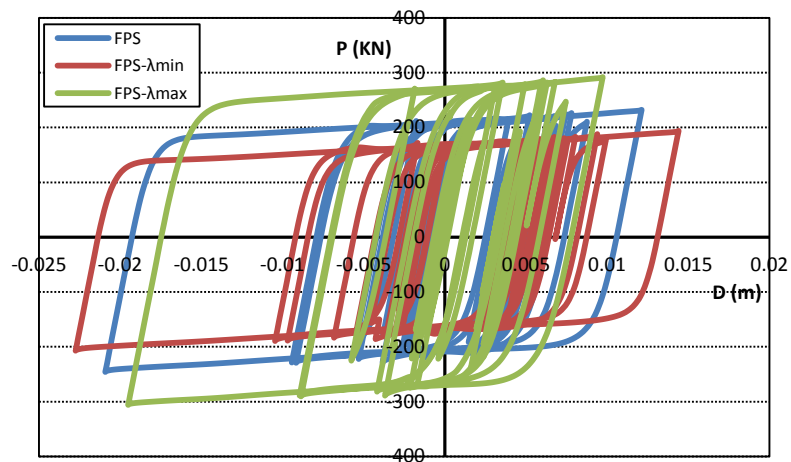
Σχήμα 7.16: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS –FPS (λ_{min}) – FPS (λ_{max}) Τύπου E_1 για την Καταγραφή Northridge



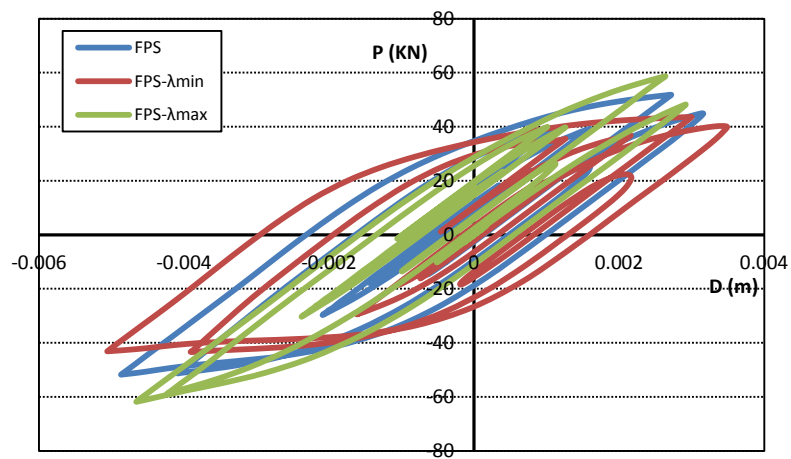
Σχήμα 7.17: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS –FPS (λ_{min}) – FPS (λ_{max}) Τύπου E_1 για την Καταγραφή Kobe



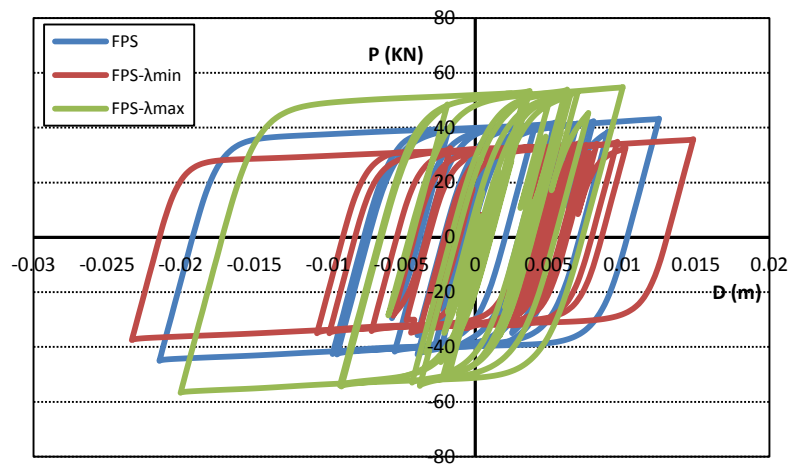
Σχήμα 7.18: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS –FPS (λ_{min}) – FPS (λ_{max}) Τύπου E_2 για την Καταγραφή Northridge



Σχήμα 7.19: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS –FPS (λ_{min}) – FPS (λ_{max}) Τύπου E_2 για την Καταγραφή Kobe



Σχήμα 7.20: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS –FPS (λ_{min}) – FPS (λ_{max}) Τύπου E_3 για την Καταγραφή Northridge



Σχήμα 7.21: Σύγκριση Βρόχων Υστέρησης Εφεδράνων FPS –FPS (λ_{min}) – FPS (λ_{max}) Τύπου E_3 για την Καταγραφή Kobe

Στην εργασία παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία σχεδιασμού και ανάλυσης συστημάτων σεισμικής μόνωσης με εφέδρανα τύπου ολίσθησης FPS και ελαστομεταλλικά τύπου LRB. Ειδική έμφαση δίδεται στη διερεύνηση της μεταβλητότητας των παραμέτρων των εφεδράνων με βάση τη θεώρηση των συντελεστών λ , αλλά και απλής στοχαστικής διαδικασίας. Η στοχαστική διαδικασία πραγματοποιείται εύκολα μέσω εισαγωγής δεδομένων με χρήση του προγράμματος Excel που παρέχει την δυνατότητα ανάθεσης τυχαίων τιμών που ακολουθούν συγκεκριμένη κατανομή με συγκεκριμένη μέση τιμή και διασπορά και την απρόσκοπτη εισαγωγή τους στο πρόγραμμα SAP2000 της CSI. Η μέθοδος των συντελεστών λ προσδιορίζει τα όρια της αναμενόμενης μεταβολής της συμπεριφοράς με όλες τις ιδιότητες συντεταγμένα θεωρούμενες στο άνω και κάτω όριο και κατά συνέπεια και του μέσου όρου να παρακολουθεί τα όρια με μηδενική διασπορά. Η στοχαστική θεώρηση αντίθετα διατηρεί τη μέση τιμή στα όρια των ονομαστικών τιμών και διαφοροποιεί τις παραμέτρους στα επιμέρους εφέδρανα με προκαθορισμένη διασπορά. Στην εργασία λόγω έλλειψης πειραματικών στοιχείων θεωρήθηκε κανονική κατανομή, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλες όπως η κατανομή Rayleigh που συνήθως παρακολουθεί την διακύμανση των παραμέτρων αντοχής. Στα συστήματα σεισμικής μόνωσης με ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου LRB η τυχαιότητα των παραμέτρων ενδέχεται να επηρεάσει εντονότερα την στροφική απόκριση του συστήματος από αυτή της μεθόδου των συντελεστών λ , λόγω ενδεχόμενης δυσμενούς μεγέθυνσης της απόστασης μεταξύ των κέντρων μάζας και ελαστικής στροφής. Η στοχαστική θεώρηση παρέχει επίσης διακυμάνσεις στην εντός του διαφράγματος ένταση στο άνω και κάτω διάφραγμα αν και συνήθως η ατένεια και η αντοχή τους είναι υψηλή. Όπως αναφέρθηκε, ένας κανόνας σχεδιασμού των συστημάτων σεισμικής μόνωσης είναι η κατά το δυνατόν ομογενοποίηση των κατακόρυφων δυνάμεων στα εφέδρανα. Αυτό περιορίζει αντίστοιχα το πλήθος των τύπων των εφεδράνων, αλλά και τις μεταβολές που θα προκληθούν λόγω διαφορετικής απόκρισης της θεμελίωσης. Μία λογική υπέρβαση σε ένα μεγάλο φορτίο-εφέδρανο ενδέχεται να αντιστοιχεί σε σημαντική υπέρβαση σε μικρότερο γειτονικό εφέδρανο μέσω κάμψης του διαφράγματος.

Οι συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών τύπων συστημάτων σεισμικής μόνωσης αλλά και μεθόδων ανάλυσης συνήθως δεν οδηγούν σε συστηματικά συμπεράσματα καθόσον

διαφοροποιούνται από τη διάταξη, τη δυσκαμψία, τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος και της διέγερσης.

Η στοχαστική θεώρηση βασισμένη σε πραγματικά στοιχεία από πειράματα αλλά και μελέτες φθοράς μπορεί να αποτελέσει μια συστηματική μεθοδολογία για το σχεδιασμό αξιόπιστων συστημάτων σεισμικής μόνωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ηλίας Π., “Βέλτιστος Σχεδιασμός Συστημάτων Σεισμικής Μόνωσης Πολυώροφων Κτιρίων ”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα ΕΜΠ 2012
- [2] Κατσικαδέλης Ι. Θ., “Δυναμική των Κατασκευών, Τόμος Ι”, Αθήνα, 2007
- [3] Κατσικαδέλης Ι. Θ., “Δυναμική των Κατασκευών, Τόμος ΙΙ”, Αθήνα, 2007
- [4] Κουμούσης Β., Καθηγητής ΕΜΠ, “Σχεδιασμός Συστημάτων Σεισμικής Μόνωσης”, Αθήνα, 2003
- [5] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ2000), Αθήνα, 2001
- [6] AASHTO 2006, “Standard Specification for Plain and Laminated Elastomeric Bridge Bearings”, 2006
- [7] Chopra A. K., “Dynamics Of Structures (3rd Edition)”, New Jersey, 2007
- [8] Constantinou M.C., Kalpakidis I., Filiatrault A. and Ecker Lay R.A., “LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators”, 2010
- [9] Constantinou M.C., Tsopeles P., Kasalanati A. and Wolff E.D., “Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings”, Buffalo, New York, 1999
- [10] EN 1198-1 : 2004, Eurocode 8: “Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules For Buildings”, 2004
- [11] EN 1337, Eurocode 8: “Structural Bearings - Part 3: Elastomeric Bearings”, 2005
- [12] Kelly T. E., “Base Isolation of Structures – Design Guidelines”, Holmes Consulting Group Ltd, Wellington, 2001
- [13] Kircher C.A., P.E., Ph.D., “NEHRP Recommended Provisions: Design Examples FEMA 451: «Seismically Isolated Structures»”, 2006
- [14] Naeim F. and Kelly J. M., “Design of Seismic Isolated Structures”, New York, 1999
- [15] Popov V.L., “Contact Mechanics and Friction”, 2010
- [16] Skinner I., Kelly T., Robinson W.H., “Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers”, 2008
- [17] Symans M.D., “Instructional Material Complementing FEMA 451: Design Examples: «Seismic Protective Systems: Seismic Isolation»”, 2004
- [18] Warn G., “Response of Seismically Isolated Bridges Considering Variation in the Mechanical Properties of Individual Isolators”, 2004

