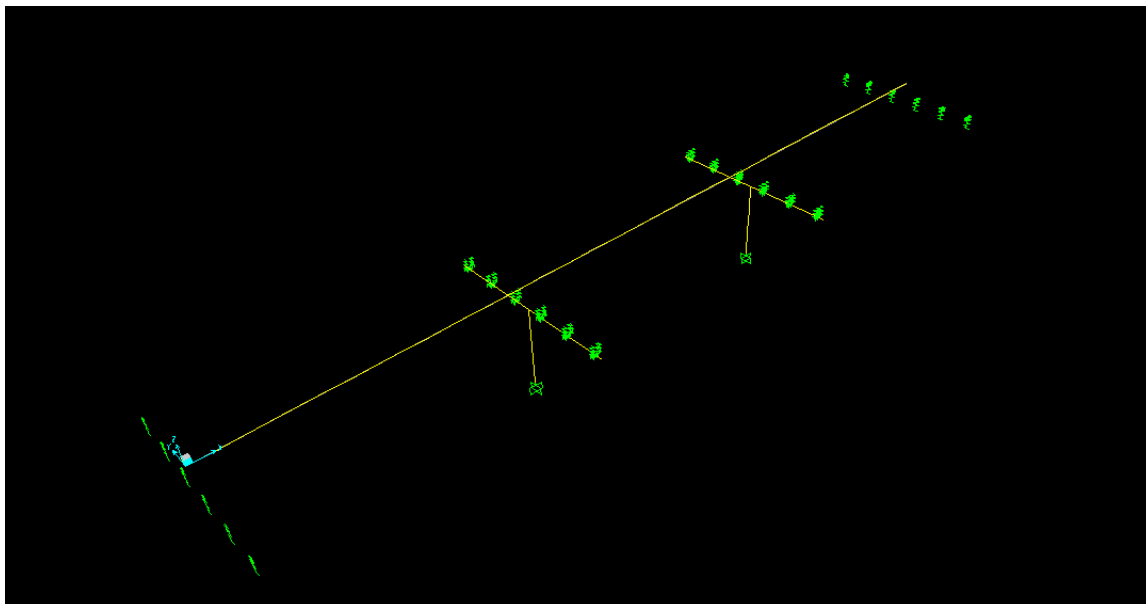




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης σαν μέθοδος  
σεισμικής αναβάθμισης υφιστάμενης γέφυρας»**

ΑΡΣΙΝΟΗ Α. ΔΑΣΚΑΛΑΝΤΩΝΑΚΗ

Επιβλέπων

Ιωάννης Ν. Σιγάλας

Επιστημονικός Συνεργάτης Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2009

# ΣΥΝΟΨΗ

---

Η σεισμική μόνωση είναι μέθοδος τροποποίησης της απόκρισης ενός συστήματος που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις περιπτώσεις αναβάθμισης υπαρχουσών γεφυρών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος αναλύεται η σεισμική μόνωση ως μέθοδος αντισεισμικού σχεδιασμού, με έμφαση στις γέφυρες. Στο δεύτερο μέρος μελετάται η εφαρμογή σεισμικής μόνωσης στα πλαίσια αναβάθμισης της σεισμικής συμπεριφοράς της γέφυρας του Σύθα, που αποτελεί τμήμα του οδικού άξονα Κορίνθου- Πατρών. Πιο συγκεκριμένα, διερευνώνται και αναλύονται οι παράγοντες που καθιστούν σκόπιμη τη σεισμική αναβάθμιση της γέφυρας με τη μέθοδο της σεισμικής μονώσεως, επιλέγεται το σύστημα αυτής ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της και τις εδαφικές συνθήκες της περιοχής. Η σεισμική συμπεριφορά της γέφυρας πριν και μετά την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης μελετάται με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων SAP2000. Τέλος, γίνεται μια πρώτη απόπειρα αναφοράς και επίλυσης κατασκευαστικών προβλημάτων που θα προκύψουν κατά την αναβάθμιση/ενίσχυση της γέφυρας.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

---

## A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### ΣΥΝΟΨΗ

#### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τυπικές βλάβες γεφυρών σε πρόσφατους σεισμούς

1.1.1 Ο ελαστικός σχεδιασμός

1.1.2 Κυριότερες αστοχίες

#### 2. Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ

2.1 Ορισμός σεισμικής μόνωσης

2.2 Πλεονεκτήματα της μεθόδου

2.3 Ιστορική αναδρομή

2.4 Εφαρμογές σε κτίρια

2.5 Εφαρμογές σε γέφυρες

#### 3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

3.1 Απλή αρμονική ταλάντωση

3.2 Μη κανονική ταλάντωση

3.3 Ιδιοπερίοδος και ιδιοσυχνότητα μονοβάθμιου και πολυβάθμιου συστήματος

3.4 Ακαμψία και απόσβεση

3.5 Μαθηματική περιγραφή της σεισμικής διέγερσης

3.6 Μέτρα ελαστικότητας

#### 4. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

4.1 Κατηγορίες

4.2 Απαιτούμενες ιδιότητες

4.2.1 Απαίτηση για οριζόντια ευκαμψία

#### 4.2.2 Απαίτηση για κατανάλωση ενέργειας

4.2.2.1 Κατανάλωση ενέργειας από τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα

4.2.2.2 Κατανάλωση ενέργειας από τα εφέδρανα ολίσθησης

4.2.2.3 Κατανάλωση ενέργειας από τους αποσβεστήρες

4.2.3 Απαίτηση για επαρκή στιβαρότητα για φορτία σε Ο.Κ.Λ.

### **5. ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ**

5.1 Υλικά κατασκευής

5.2 Ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης

5.3 Ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης

5.4 Ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου

### **6. ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ**

6.1 Υλικά κατασκευής

6.2 Επίπεδα εφέδρανα ολίσθησης

6.3 Εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς

6.4 Tass System

6.5 Eradiquake isolator

### **7. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ**

7.1 Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων ελαστομεταλλικών εφεδράνων

7.2 Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων εφεδράνων ολίσθησης

7.3 Σύγκριση ελαστομεταλλικών εφεδράνων και εφεδράνων ολίσθησης

### **8. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ**

### **9. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

9.1 Η ανάγκη για εισαγωγή πρόσθετης απόσβεσης

9.2 Παθητικά συστήματα απόσβεσης

9.2.1 Συσσκευές μη εξαρτώμενες από την ταχύτητα και τη συχνότητα

9.2.2 Συσσκευές εξαρτώμενες από την ταχύτητα και τη συχνότητα

9.2.3 Άλλες συσκευές

9.3 Ενεργητικά συστήματα απόσβεσης

9.4 Βασικές διαφορές παθητικών-ενεργητικών συστημάτων απόσβεσης

## **10.ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΚΟΠΙΜΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**

10.1 Ευνοϊκές συνθήκες για εφαρμογή σεισμικής μονώσεως

10.2 Οικονομικοί παράγοντες

10.3 Επιλογή κατάλληλων συσκευών

## **11. ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ**

11.1 Μέθοδοι ανάλυσης

11.1.1 Μέθοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος

11.1.2 Μέθοδος φασματικής απόκρισης

11.2 Ανάλυση με χρονοϊστορία

11.2.1 Επεξεργασία επιταχυνσιογραφημάτων

11.2.2 Επιλογή επιταχυνσιογραφημάτων

11.2.2.1 Αριθμός επιταχυνσιογραφημάτων

11.2.2.2 Είδος διέγερσης

11.2.3 Γενική διαδικασία ανάλυσης με χρονοϊστορία

11.3 Ανάλυση της γέφυρας του Σύθα

## **12. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ**

12.1 Εργασίες αντικατάστασης εφεδράνων

12.1.1 Γενικά

12.1.2 Πορεία εργασιών

12.1.3 Εξοπλισμός

12.2 Άλλα κατασκευαστικά θέματα

## **13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ**

### **B. ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

#### **1.ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ**

##### 1.1 Γενικά

##### 1.1.1 Σκοπός

##### 1.1.2 Περιγραφή της γέφυρας

##### 1.1.3 Σχετικά έγγραφα για το σχεδιασμό

##### 1.1.4 Σχετικά πρότυπα για το σχεδιασμό

##### 1.1.5 Φωτογραφίες

##### 1.1.6 Σχέδια υπάρχουσας γέφυρας

##### 1.1.7 Τομές εφεδράνων

##### 1.2 Παραδοχές σχεδιασμού

##### 1.2.1 Υλικά

##### 1.2.2 Φορτία

##### 1.2.3 Σεισμικές δράσεις

##### 1.2.4 Λογισμικό

##### 1.2.5 Άνω και κάτω όρια για τις ιδιότητες των συσκευών

##### 1.2.5.1 Ακαμψίες ελαστομεταλλικών εφεδράνων

##### 1.2.5.2 Νόμος δύναμης-ταχύτητας αποσβεστήρων

##### 1.3 Σεισμική εκτίμηση της γέφυρας

##### 1.4 Λύση σεισμικής μόνωσης

#### **2.ΕΚΘΕΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ**

##### 2.1 Προκαταρκτικές εκτιμήσεις

2.1.1 Φάσμα σχεδιασμού

2.1.2 Υπολογισμός συνολικής μάζας

2.1.3 Οριζόντιες σεισμικές δυνάμεις για τις οποίες έχει υπολογιστεί η κατασκευή

2.1.4 Οριζόντιες σεισμικές δυνάμεις τις οποίες πρέπει να αναλαμβάνει σήμερα η κατασκευή

2.1.5 Υπολογισμός ακαμψίας μεσοβάθρων

2.1.6 Απαιτούμενη ιδιοπερίοδος σεισμικής μόνωσης

2.1.7 Απαιτούμενη ακαμψία τεμαχίου εφεδράνου

2.1.8 Απαιτούμενος συντελεστής απόσβεσης αποσβεστήρα

2.2 Αποτελέσματα ανάλυσης

2.3 Περιγραφή της λύσης - Συμπεράσματα

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Στην εισαγωγή γίνεται αναφορά στις βλάβες που προκάλεσαν πρόσφατοι σεισμοί, στα κυριότερα είδη αστοχιών και στα αίτια αυτών. Οι ζημιές που προκάλεσαν οι σεισμοί αυτοί, πολύ συχνά σε κατασκευές σχεδιασμένες να συνάδουν με τους υπάρχοντες κανονισμούς, πυροδότησαν την επιστημονική έρευνα στον τομέα της σεισμικής μόνωσης, αφού κατέδειξαν την ανάγκη δημιουργίας μιας νέας φιλοσοφίας, μιας νέας αντίληψης για τον αντισεισμικό σχεδιασμό.

Εν συνεχεία, δίνεται ο ορισμός της σεισμικής μόνωσης, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής της έναντι των συμβατικών μεθόδων αντισεισμικού σχεδιασμού και παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή που καταδεικνύει ότι αν και η μέθοδος θεωρείται ακόμα μη συμβατική και ανατρεπτική, χρονολογείται από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Ακολουθεί η αναφορά διαφόρων εφαρμογών της μεθόδου τόσο σε κτίρια όσο και σε γέφυρες, παγκοσμίως.



## 1.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΣΕ ΠΡΟΣΦΑΤΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ

### 1.1.1 Ο ΕΛΑΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Από ανάλυση των ζημιών που προκλήθηκαν σε γέφυρες σε πρόσφατους σεισμούς (Loma Prieta 1989, Northridge 1994, Kobe 1995 ) είναι δυνατό να αποδοθούν τρία σφάλματα στο σχεδιασμό τους. Σε κάθε περίπτωση τα λάθη οφείλονται στη λογική του ελαστικού σχεδιασμού που χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά στις γέφυρες έως και το 1970. [1]

Τα υπολογιστικά λάθη που οδήγησαν σε αστοχίες μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις κατηγορίες:

- Χρήση της ακαμψίας πλήρους διατομής αντί για την ακαμψία ρηγματωμένης διατομής (τέμνουσα ακαμψία) ,που οδηγεί σε υποτίμηση των σεισμικών παραμορφώσεων.
- Η εκτίμηση χαμηλών σεισμικών φορτίων οδήγησε σε λάθος διαγράμματα ροπών, με αποτέλεσμα τα υπολογισμένα σημεία αλλαγής προσήμου της ροπής να διαφέρουν από τα πραγματικά. Αυτό σημαίνει ότι σε πολλές περιπτώσεις ο δευτερεύων οπλισμός των δοκών δεν είχε το απαραίτητο μήκος.
- Οι πιθανές θέσεις πλαστικών αρθρώσεων δεν είχαν σχεδιαστεί να υφίστανται ανελαστικές παραμορφώσεις , διατηρώντας αμείωτη την αντοχή τους και η αντοχή σε διάτμηση των μελών δεν ήταν υψηλότερη από την αντοχή σε κάμψη ,οπότε δεν αποκλειόταν η ψαθυρή αστοχία. Με άλλα λόγια δεν είχαν εφαρμοστεί οι αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού.

## 1.1.2 ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ

### A) Πτώση ανοιγμάτων

Άμεση συνέπεια της υποτίμησης των σεισμικών δυνάμεων λόγω ανάλυσης με αρηγμάτωση διατομή είναι τα ανεπαρκή πλάτη έδρασης και οι ανεπαρκείς αρμοί. Τα ανοίγματα μπορεί να παρουσιάσουν διαφορετικές μετατοπίσεις με αποτέλεσμα να ξεκαβαλήσουν από τα βάθρα αν το πλάτος έδρασης δεν είναι επαρκές. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί σε γέφυρες πολλών ανοιγμάτων με ψηλά και εύκαμπτα βάθρα τα οποία μπορούν και ταλαντώνονται και με διαφορά φάσης. Το φαινόμενο εντείνεται όταν ο άξονας των βάθρων σχηματίζει γωνία με το διαμήκη άξονα της γέφυρας.

### B) Ενίσχυση μετακινήσεων λόγω ενδοσιμότητας του εδάφους

Αν τα εδάφη είναι μαλακά ή υπόκεινται σε ρευστοποίηση το πρόβλημα περιπλέκεται, γιατί αυτά τα εδάφη, όπως οι άργιλοι υψηλού δείκτη πλαστιμότητας, τείνουν να μεγεθύνουν τη σεισμική διέγερση. Για το λόγο αυτό σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ. αυτά κατατάσσονται στην εδαφική κατηγορία Δ, για την οποία το φάσμα απόκρισης είναι ενισχυμένο (πιο μεγάλες επιταχύνσεις, μετατόπιση προς τα δεξιά του μεσαίου κλάδου) σε σχέση με τα καλύτερης ποιότητας εδάφη όπως οι βράχοι. Παράδειγμα πτώσης ανοίγματος εξαιτίας μεγέθυνσης των μετακινήσεων από τη ρευστοποίηση του εδάφους αποτελεί η γέφυρα Nishinomiya-ko στο Kobe.



Figure 1: Η γέφυρα Nishinomiya-ko, πτώση ανοίγματος, Kobe 1995

### Γ) Σύγκρουση κατασκευών που αποτελούν τη γέφυρα

Η μη σωστή πρόβλεψη της απαραίτητης απόστασης ανάμεσα σε κατασκευές της ίδιας γέφυρας, οδηγεί σε σύγκρουση αυτών ,με πιθανό αποτέλεσμα την κατάρρευση. Για παράδειγμα το χαμηλότερο κατάστρωμα μιας γέφυρας ,κατά την ταλάντωσή του, μπορεί να συγκρουστεί με τα βάθρα του ψηλότερου καταστρώματος. Ωστόσο, έχουν υπάρξει και περιπτώσεις όπου η σύγκρουση κατασκευών ίδιου ύψους (και όχι ανωδομής με υποδομή) αποδείχθηκε ευεργετική, καθώς περιόρισε το εύρος της ταλάντωσης.

### Δ) Στροφική καθίζηση των ακροβάθρων

Η σύγκρουση καταστρώματος και ακροβάθρων οδηγεί σε αύξηση των πιέσεων στο ακρόβαθρο με αποτέλεσμα το υλικό επίχωσης, ειδικά αν είναι ανεπαρκώς συμπυκνωμένο, να ολισθαίνει προς τα κάτω και προς τη γέφυρα. Ταυτόχρονα η επαφή και το βάρος της ανωδομής εμποδίζουν την κίνηση προς τα μέσα οπότε το ακρόβαθρο εκτελεί περιστροφή. Πάντως τέτοιου είδους αστοχίες σπανίως οδηγούν σε ολική αστοχία της γέφυρας.

### Ε) Καμπτικές αστοχίες μεσοβάθρων

Οι αστοχίες μεσοβάθρων που παρουσιάστηκαν οφείλονται συνήθως στη λογική του ελαστικού σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, τα βάθρα είτε δεν είχαν αρκετή καμπτική αντοχή, γιατί οι σεισμικές δράσεις ήταν σοβαρά υποτιμημένες, είτε η καμπτική τους αντοχή δεν ήταν αξιόπιστη, γιατί ο διαμήκης οπλισμός είχε ανεπαρκές μήκος παράθεσης, είτε παρουσίαζαν ανεπαρκή καμπτική πλαστιμότητα.

### Στ) Διατμητική αστοχία μεσοβάθρων

Η παραλαβή της διάτμησης είναι ιδιαίτερα σύνθετος μηχανισμός που περιλαμβάνει τη συμβολή του σκυροδέματος, την αλληλεμπλοκή των αδρανών κατά μήκος των λοξών ρωγμών, τη δράση βλήτρου του διαμήκους οπλισμού και τους συνδετήρες. Ιδιαίτερα επιρρεπή σε διατμητική αστοχία είναι τα κοντά βάθρα σαν συνέπεια της μεγάλης διάτμησης σε σύγκριση με το μέγεθος της ροπής που

αναπτύσσουν. Υπενθυμίζεται ότι η διατμητική αστοχία δεν είναι επιθυμητή γιατί είναι ψαθυρή.

#### Ζ)Αστοχίες δοκών εδράσεως

Οφείλονται κυρίως στον πρόωρο τερματισμό του διαμήκους οπλισμού και στην ανεπαρκή αγκύρωση του οπλισμού στις περιοχές των κόμβων.

#### Η)Αστοχίες κόμβων

Οι κόμβοι δοκών εδράσεως- υποστυλωμάτων συχνά υπόκεινται σε διατμητικές δυνάμεις που είναι μεγαλύτερες από αυτές που καταπονούν τα μέλη της γέφυρας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι οι διατμητικές δυνάμεις δεν αποτελούσαν αντικείμενο μελέτης στις γέφυρες παλαιότερα, οδήγησε σε πολυάριθμες αστοχίες κόμβων, ειδικά στο σεισμό Loma Prieta του 1989.

#### Θ)Αστοχίες θεμελίωσης

Οι αστοχίες στη θεμελίωση δεν ήταν συχνές, επειδή συνήθως προηγούνταν η θραύση των βάθρων. Έως και σήμερα ο ικανοτικός σχεδιασμός επιβάλλει η πλαστική άρθρωση να σχηματίζεται στα βάθρα αμέσως πάνω από τη θεμελίωση. Υπάρχουν ωστόσο έρευνες που καταδεικνύουν ότι ο σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης εντός του εδάφους, σε σημείο της θεμελίωσης, είναι ευεργετικός γιατί αξιοποιεί την αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής. Μάλιστα στην Ιαπωνία έχουν ήδη αναπτυχθεί συσκευές σεισμικής μόνωσης για τον κεφαλόδεσμο πασσάλων. [2]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ

---

### 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Η σεισμική μόνωση είναι μέθοδος τροποποίησης της σεισμικής απόκρισης ενός συστήματος.

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού, που αυξάνουν την αντοχή της κατασκευής ώστε να ανταποκριθεί στις σεισμικές δυνάμεις, η σεισμική μόνωση έχει σαν στόχο όχι την αύξηση της αντοχής της κατασκευής αλλά τη μείωση των σεισμικών δυνάμεων που προκαλούν ένταση στο έργο απομονώνοντας (αποδεσμεύοντας) κατά το δυνατό την κατασκευή από την εδαφική κίνηση.

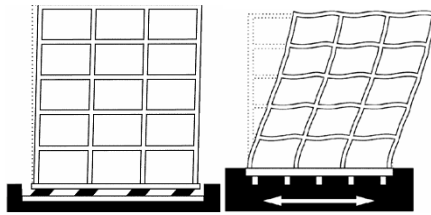


Figure 2: Σεισμική απόκριση πολυώροφου κτιρίου με σεισμική μόνωση και χωρίς

Η απόκριση της κατασκευής εξαρτάται από την ιδιοπερίοδο της, που είναι συνάρτηση της μάζας και της ακαμψίας της, αλλά και της απόσβεσής της, που εξαρτάται από το υλικό και το σχήμα της (αεροδυναμικότητα). Επομένως τα συστήματα ελέγχου της απόκρισης παρεμβαίνουν στη μάζα, την ακαμψία ή την απόσβεση της κατασκευής.

Σκοπός είναι η αντισεισμικότητα της κατασκευής, δηλαδή αυτή, με την ελάχιστη δυνατή δαπάνη να είναι ασφαλής και να συνεχίζει να λειτουργεί για ορισμένα επίπεδα σεισμού, ενώ δεν καταρρέει, ούτε μέλος της ούτε ολόκληρη, σε μεγαλύτερους σεισμούς. Υπό το σεισμό σχεδιασμού η αντισεισμική κατασκευή θα υποστεί τις ελάχιστες και επιδιορθώσιμες

ζημιές, μέσω της μείωσης των σεισμικών δυνάμεων και παραμορφώσεων, με έμφαση συνήθως στις οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής σεισμικής διέγερσης.

Στην περίπτωση των γεφυρών, η ανεξαρτητοποίηση της κατασκευής από το σεισμικό μέγεθος επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση συσκευών με πολύ χαμηλή οριζόντια ακαμψία, συνήθως μεταξύ ανωδομής και υποδομής. Τις περισσότερες φορές ασχολούμαστε αποκλειστικά με την οριζόντια ακαμψία γιατί αγνοούμε την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού η οποία είναι έντονη μόνο αν η κατασκευή βρίσκεται πολύ κοντά στο επίκεντρο. Ειδικά όμως για συστήματα σεισμικής μόνωσης που περιλαμβάνουν εφέδρανα ολίσθησης συνιστάται αυτή να λαμβάνεται υπόψη. (βλ. κεφ. σχεδιασμού) Οι συσκευές σεισμικής μόνωσης είναι τα εφέδρανα και οι μονωτήρες τριβής, για τη μείωση των σεισμικών δυνάμεων, και ακόμα κι αν τα ίδια περιλαμβάνουν μηχανισμό απόσβεσης, χρησιμοποιούνται συνήθως σε συνδυασμό με τις συσκευές απόσβεσης για τη μείωση των σεισμικών μετακινήσεων και την περαιτέρω μείωση των σεισμικών δράσεων.

## **2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ**

Με τη χρησιμοποίηση συστημάτων σεισμικής μόνωσης οι τυχούσες βλάβες θα εμφανιστούν στα ίδια τα συστήματα και όχι στην κατασκευή. Αυτό σημαίνει πρώτον ότι το κόστος αποκατάστασης είναι μικρότερο σε σχέση με την αποκατάσταση βλαβών στα φέροντα στοιχεία του έργου, αλλά κυρίως ,όπως γίνεται φανερό, δεν επηρεάζει τη στατική της λειτουργία. Τα συστήματα απόκρισης που υπέστησαν βλάβες μπορούν να αφαιρεθούν και να επισκευαστούν χωρίς η κατασκευή να διακόψει την λειτουργία της, εφόσον αυτά δεν έχουν σχεδιαστεί να αναλαμβάνουν φορτία βαρύτητας. Σε όλο τον κόσμο, οι κατασκευές που έχουν μονωθεί σεισμικά είναι κυρίως κτίρια και έργα που η

λειτουργία τους δεν πρέπει να διακοπεί ούτε προσωρινά, όπως νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, αεροδρόμια, κτίρια που στεγάζουν δημόσια γραφεία, γέφυρες σε αυτοκινητοδρόμους κτλ. . Αλλά και για την περίπτωση των κατοικιών η σεισμική μόνωση ενδείκνυται γιατί μετά από σεισμούς δεν απαιτείται η εκκένωσή τους.

Τα πλεονεκτήματα της σεισμικής μόνωσης δε συνοψίζονται μόνο στη βελτίωση της αντισεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής και στο χαμηλό κόστος εφαρμογής της μεθόδου αλλά περιλαμβάνουν και τη δυνατότητα αναβάθμισης της αντισεισμικής λειτουργίας παλαιότερων κατασκευών που δεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών. Η συμβατική μέθοδος ενίσχυσης κατασκευών που έχουν πληγεί από σεισμούς ή απλά δεν ανταποκρίνονται στους νέους κανονισμούς περιλαμβάνει μανδύες, πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος, ελάσματα, επιπλέον περίσφιξη των οπλισμών, συνδέσμους δυσκαμψίας κ.ά. που γενικά έχουν σαν στόχο τη δημιουργία ενός ελαστοπλαστικού μηχανισμού ικανού να απορροφήσει τη σεισμική ενέργεια. Ο δεύτερος τρόπος είναι η σεισμική μόνωση. Η βασική διαφορά της σεισμικής μονώσεως είναι ότι εφαρμόζεται σε μία μόνο στάθμη (επίπεδο) της κατασκευής οπότε δεν παρεμβαίνει στην εμφάνιση. Αυτό την καθιστά ιδανική μέθοδο παρέμβασης σε κτίρια με αξία αρχιτεκτονική, ιστορική και πολιτισμική.

Όσον αφορά το χρόνο που απαιτείται για να εφαρμοστεί η σεισμική μόνωση σαν μέθοδος ενίσχυσης, αυτός μπορεί να είναι ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Ενδεικτικά για ένα κτίριο, είναι γύρω στον ένα χρόνο, όταν ενίσχυση με συμβατικές μεθόδους θα απαιτούσε το διπλάσιο. [3]

Το κόστος είναι σημαντικά μικρότερο από τις κλασικές μεθόδους ,γύρω στα 2/3 λιγότερο. Ενδεικτικά αναφέρεται ένα πολυλειτουργικό κτίριο στην Ιταλία (Rione Traiano): συνολικό κόστος επέμβασης: 2,5εκ€ = 80€/m<sup>2</sup> = μόλις 3% της συνολικής αξίας του κτιρίου. Πιο συγκεκριμένα: μονωτήρες και κοπή υποστρωμάτων: 1,3εκ.€, χαλύβδινο δάπεδο: 0,6εκ.€, τοίχοι αντιστήριξης και

κατασκευαστικά διάκενα: 0,5εκ€, εξαρτήματα: 0,1εκ.€. Το συγκεκριμένο κτίριο ήταν η πρώτη εφαρμογή της τεχνικής στην Ευρώπη. [4],[5]

## **2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Παρόλο που η σεισμική μόνωση ξεκίνησε να χρησιμοποιείται επίσημα σαν μέθοδος σχεδιασμού των κατασκευών πριν από τέσσερις περίπου δεκαετίες, η ιδέα της τροποποίησης της απόκρισης των κατασκευών σε δυναμικές φορτίσεις χρονολογείται από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα.

Ο Βρετανός σεισμολόγος John Milne, ο «πατέρας της σύγχρονης σεισμολογίας», ο οποίος διετέλεσε καθηγητής του Πανεπιστημίου του Τόκιο από το 1876 έως το 1895, έκανε εκτεταμένη έρευνα για τα σεισμικά φαινόμενα και ανέπτυξε πρωτοποριακά για την εποχή συστήματα για την παρακολούθηση τους, όπως σειμοσκόπια και σειμογράφους. Ο Milne ,ενόσω βρισκόταν στο Τόκιο, ενδιαφέρθηκε ιδιαίτερα για το σχεδιασμό κτιρίων σε σεισμογενείς περιοχές και στα πλαίσια της έρευνάς του πάνω στον αντισεισμικό σχεδιασμό, κατασκεύασε ένα σεισμικά μονωμένο κτίριο θεμελιωμένο σε πασσάλους πάνω από τους οποίους τοποθέτησε μπάλες και πάνω από τις μπάλες, ελαφρώς κυρτές πλάκες από χάλυβα. Το σύστημα αυτό με τις μπάλες και τις κυρτές πλάκες χάλυβα είναι ο πρόδρομος της σεισμικής μόνωσης όπως την γνωρίζουμε σήμερα.

Πολλοί μηχανισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί στη διάρκεια του τελευταίου αιώνα με σκοπό την απομόνωση του κτιρίου από την καταστροφική δράση των σεισμών, όπως κυλίσεις, μπάλες, καλώδια, και στρώσεις άμμου. Κτίρια έχουν κτιστεί πάνω σε μπάλες όπως ένα πενταώροφο σχολείο στο Μεξικό, ή πάνω σε στρώσεις άμμου ανάμεσα στη θεμελίωση και την ανωδομή, ειδικά σχεδιασμένες να κινούνται πλευρικά σε περίπτωση σεισμού, όπως ο τετραώροφος κοιτώνας του State Seismological Observatory στο Πεκίνο. [6]



## 2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

Στη δεκαετία του '30 εμφανίστηκε για πρώτη φορά η θεωρία του εύκαμπτου πρώτου ορόφου και τρεις δεκαετίες αργότερα η θεωρία του μαλακού πρώτου ορόφου. Το στατικό σύστημα των κτιρίων που κατασκευάστηκαν σύμφωνα με αυτές τις θεωρήσεις έχει σκοπό να συγκεντρώσει τις σεισμικές μετακινήσεις στα ισόγεια.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κτιρίου που κατασκευάστηκε με βάση τη θεωρία του εύκαμπτου πρώτου ορόφου είναι το Δημαρχείο του Σαν Φρανσίσκο.

Οικοδομήθηκε το 1912 για να αντικαταστήσει το κτίσμα που προϋπήρχε αλλά καταστράφηκε από το σεισμό του 1906 και το 1998 μονώθηκε σεισμικά με 530 ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου ακριβώς πάνω από τη θεμελίωση και στη βάση των υποστυλωμάτων και των εξωτερικών φερόντων τοίχων. [7]



Figure 3: Όψη του Δημαρχείου του San Francisco



Figure 4: Τοποθέτηση μονωτήρων στη βάση των υποστυλωμάτων

Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής έχουν συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη και καθιέρωση της μεθόδου της σεισμικής μόνωσης με εκτεταμένες έρευνες σε πολλά πανεπιστήμια. Ειδικά στην Καλιφόρνια, κατασκευάστηκαν τα πρώτα σεισμικά μονωμένα κτίρια και ακόμα και σήμερα μεγάλο μέρος των εφαρμογών της σεισμικής μόνωσης βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή. Το διάσημο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα διατρέχει όλη την πολιτεία, έχει έκταση 800 μίλια και δίνει πολύ μεγάλους σεισμούς σε τακτά χρονικά διαστήματα. Είναι υπεύθυνο για το σεισμό του 1857 στο Fort Tejon(μέγεθος 8.0), το σεισμό του 1906 στο Σαν Φρανσίσκο(7.8), του 1989 στο Loma Prieta(7.1) και του 1994 στο Northridge (6.7), ο οποίος προκάλεσε δεκάδες ανθρώπινες απώλειες αλλά και ζημιές 20 δισεκατομμυρίων δολαρίων, και κατατάσσεται έτσι στις πιο επιζήμιες φυσικές καταστροφές στην ιστορία των Η.Π.Α.

Το πρώτο υφιστάμενο κτίριο στον κόσμο που ενισχύθηκε με σεισμική μόνωση βρίσκεται στο Salt Lake City της Γιούτα (City and County Building). Κατασκευάστηκε το 1893 και ενισχύθηκε το 1989 με 208 ελαστικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου και 239 ελαστομεταλλικά. Χρησιμοποιήθηκαν ειδικές διατάξεις για την τοποθέτησή τους κάτω από τους φέροντες τοίχους. [6]

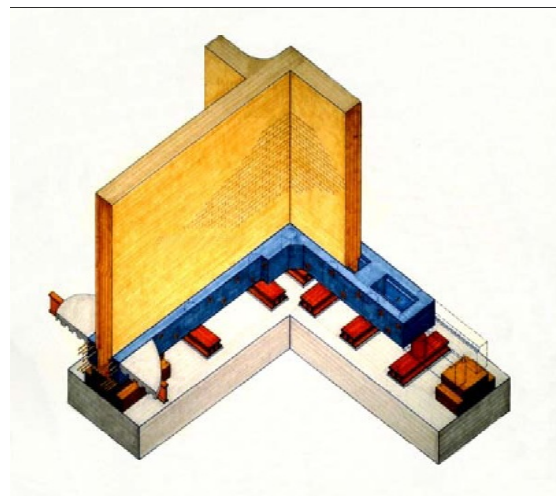


Figure 5: Όψη κτιρίου (City and County Building)

Figure 6 : Ειδική διάταξη μόνωσης σε φέροντα τοίχο

Το κτίριο Court of Appeals στο San Francisco που κατασκευάστηκε το 1905 ενισχύθηκε με εφέδρανα εκκρεμούςς τριβής (FPS). Όταν ολοκληρώθηκε η ενίσχυση το 1994 ήταν το μεγαλύτερο υπάρχον κτίριο στον κόσμο με σεισμική μόνωση. Η κατασκευή αποτελείται από 4 ορόφους και ένα υπόγειο και έχει πολύ σημαντική αρχιτεκτονική και ιστορική σημασία. Τα 256 FPS που τοποθετήθηκαν του δίνουν τη δυνατότητα να μετακινείται κατά 35εκ. [8]



Figure 7: Όψη Court of Appeals, Σαν Φρανσίσκο

Το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο που κατασκευάστηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι το Κέντρο Foothill ( Foothill Communities Law and Justice Center) στην ευρύτερη περιοχή του Λος Άντζελες, μια περιοχή μεγάλης σεισμικής επικινδυνότητας. Το κτίριο βρίσκεται σε απόσταση μόλις 21 χλμ. από το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα. Πρόκειται για το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο στις Ηνωμένες Πολιτείες αλλά και το πρώτο παγκοσμίως που για την σεισμική του μόνωση χρησιμοποιήθηκαν ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης, 98 στον αριθμό. Το κτίριο είναι τετραώροφο με υπόγειο και σχεδιάστηκε να αντέχει σεισμό μεγέθους 8.3 της κλίμακας Ρίχτερ. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1985 με συνολικό κόστος 38 εκατ. δολάρια. [6],[9]

Άλλες εφαρμογές στις Η.Π.Α. περιλαμβάνουν νοσοκομεία, δημόσια κτίρια, κτίρια γραφείων και οι συσκευές που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα. Χρήση συνδυασμένου συστήματος με ελαστομεταλλικά εφέδρανα και μονωτήρες τριβής έγινε για τη σεισμική αποκατάσταση κτιρίων του Πανεπιστημίου της Νεβάδα, το 1992.

Το δημαρχείο του Όκλαντ, στην Καλιφόρνια αποκαταστάθηκε σεισμικά με σεισμική μόνωση και για χρόνια ήταν το υψηλότερο σεισμικά μονωμένο κτίριο παγκοσμίως, έχασε όμως αυτή την πρωτιά μετά την ολοκλήρωση της σεισμικής αποκατάστασης του δημαρχείου του Λος Άντζελες, το οποίο είναι ως και σήμερα το υψηλότερο σεισμικά μονωμένο κτίριο στον κόσμο. Έχει ύψος 132 μέτρα, 28 ορόφους και σχεδιάστηκε να αντέχει σε σεισμό μεγέθους 8.2 της κλίμακας Ρίχτερ. Στο σεισμό του 1994, το κτίριο υπέστη εκτεταμένες ζημιές, ιδιαίτερα στους μαλακούς ορόφους, τον 25ο και τον 26ο. Η σεισμική μόνωση περιλαμβάνει 475 ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης, σε συνδυασμό με 60 μονωτήρες τριβής και 52 ιξώδεις αποσβεστήρες στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης. Επιπλέον 12 ιξώδεις αποσβεστήρες θα τοποθετηθούν ανάμεσα στον 24ο και τον 26ο όροφο για να μειωθούν οι σχετικές μετακινήσεις (interstory drifts) των μαλακών ορόφων. Το συνολικό κόστος της αποκατάστασης εκτιμήθηκε στα 150 εκατ. δολάρια.



Figure 8: Όψη του Δημαρχείου του Λος Άντζελες

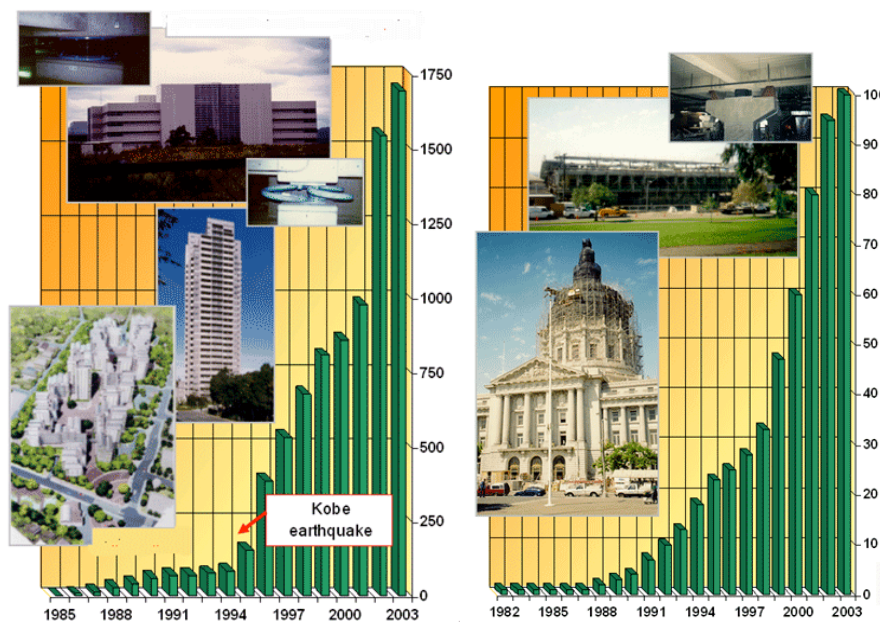
Το Διεθνές Αεροδρόμιο του Σαν Φρανσίσκο είναι σήμερα το μεγαλύτερο σεισμικά μονωμένο κτίριο παγκοσμίως και σχεδιάστηκε για σεισμό μεγέθους 8 Ρίχτερ. Η χρήση μονωτήρων τριβής FPS επέτρεψε τη μείωση των διαστάσεων των υποστυλωμάτων και των δοκών. Υπολογίστηκε ότι με συμβατική μέθοδο κατασκευής θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν επιπλέον 680 τόνοι δομικού χάλυβα.

Εκτός από τις Η.Π.Α. άλλες χώρες στις οποίες εφαρμόζεται η σεισμική μόνωση είναι η Ιαπωνία, η Κίνα, η Νέα Ζηλανδία, η Ινδονησία, η Ελλάδα και η Ιταλία, όλες περιοχές μεγάλης σεισμικής επικινδυνότητας.

Στην Ιαπωνία, ο αντισεισμικός σχεδιασμός υπήρξε ανέκαθεν προτεραιότητα των μηχανικών, οι οποίοι συχνά δοκιμάζουν ακριβείς και εξεζητημένες λύσεις. Η σεισμική μόνωση εφαρμοζόταν περιορισμένα στην αρχή γιατί η κατασκευή με σεισμική μόνωση απαιτούσε ειδική άδεια από το Υπουργείο Κατασκευών (Ministry of Construction-MOC).[6] Το πρώτο σύγχρονο σεισμικά μονωμένο κτίριο στην Ιαπωνία ολοκληρώθηκε το 1986. Μετά το σεισμό του Κοβέ ο αριθμός των αδειών από το Υπουργείο για κατασκευή σεισμικά μονωμένων κτιρίων

αυξήθηκε κατακόρυφα και σήμερα πολλά από αυτά έχουν δοκιμαστεί σε σεισμούς. Έτσι, η Ιαπωνία συμβάλλει σημαντικά στη συλλογή στατιστικών στοιχείων για τη συμπεριφορά σεισμικά μονωμένων και μη κτιρίων σε πραγματικούς σεισμούς. Σε κάθε περίπτωση, η σύγκριση είναι υπέρ των σεισμικά μονωμένων κατασκευών, ιδιαίτερα για εδαφικές δονήσεις με υψηλές επιταχύνσεις.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο αριθμός των κατασκευών κατασκευάζονταν εκ νέου ή ενισχύονταν με σεισμική μόνωση κάθε χρόνο, από το 1985 έως το 2003 στην Ιαπωνία και από το 1982 έως το 2003 στις Η.Π.Α. Είναι φανερή η κατακόρυφη αύξηση στην εφαρμογή της μεθόδου στην Ιαπωνία αμέσως μετά το σεισμό του Kobe το 1995. [10]



**Table 1: Αριθμός σεισμικά μονωμένων κατασκευών ετησίως, αριστερά η Ιαπωνία, δεξιά οι Η.Π.Α.**

Ως και το 2003 στις Ηνωμένες Πολιτείες τα σεισμικά μονωμένα κτίρια ήταν περισσότερα από 200, σύμφωνα με έκθεση του Οργανισμού NEHRP (Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 2: Commentary (FEMA 450-2/2003 edition)). [11]

Η Νέα Ζηλανδία, αν και χώρα μέτριας σεισμικότητας, έχει αναπτύξει ιδιαίτερα την αντισεισμική τεχνολογία και φιλοσοφία, με κανονισμούς που εφαρμόζονται παγκοσμίως. Η μέθοδος της σεισμικής μόνωσης έχει εφαρμοστεί στη χώρα σε αρκετές περιπτώσεις, όπως κτίρια διατηρητέα, μεγάλης ιστορικής και πολιτιστικής αξίας. Το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο στη Νέα Ζηλανδία είναι και το πρώτο παγκοσμίως στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου. Πρόκειται για το William Clayton Building στο Wellington, η κατασκευή του οποίου ολοκληρώθηκε το 1981. Η Βουλή της Νέας Ζηλανδίας, κτίριο του 1922 έχει αναβαθμιστεί σεισμικά με περισσότερα από 514 ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου. Ιδιαίτερη περίπτωση σεισμικά μονωμένου κτιρίου αποτελεί και το τυπογραφείο στην περιοχή Petone κοντά στο Wellington, όπου σκοπός είναι να προστατευθούν οι πρέσες του τυπογραφείου, μηχανήματα ογκώδη και με ύψος ίσο με ένα τετραώροφο κτίριο.

Από τις ευρωπαϊκές χώρες, η σεισμική μόνωση μελετάται πιο ενεργά στην Ιταλία υπό την αιγίδα του Εθνικού Κέντρου Εργασιών για τη Σεισμική Μόνωση (Gruppo di Lavoro Isolamento Sismico –GLIS). Στα σεισμικά μονωμένα κτίρια συμπεριλαμβάνονται δημόσια κτίρια, όπως το Υπουργείο Αμύνης και ο Εθνικός Οργανισμός Τηλεπικοινωνιών στην Ανκόνα αλλά και μεσαιωνικά κτίρια με μεγάλη ιστορική σημασία, όπως ο καθεδρικός ναός του Αγίου Πέτρου στο Φριτζέντο.

Στην Ελλάδα, οι διάσημες εφαρμογές της σεισμικής μόνωσης είναι πολλές.

Η πρώτη που θα αναφερθεί είναι παγκοσμίως γνωστή, οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) στη νήσο Ρεβυθούσα των Μεγάρων. Πρόκειται για τα μεγαλύτερα και βαρύτερα σεισμικά μονωμένα σιλό παγκοσμίως. Τα σιλό περιέχουν 152 εκατομμύρια τόνους φυσικού αερίου και έχουν διάμετρο 69m και ύψος 33m. Εκτός από τις υψηλές αντισεισμικές απαιτήσεις της κατασκευής λόγω του εξαιρετικά εύφλεκτου υλικού και της υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής οι κατασκευαστές έπρεπε να λάβουν υπόψη τις θερμοκρασιακές μεταβολές και τη γήρανση σε παραθαλάσσιο περιβάλλον. Για τη σεισμική μόνωση χρησιμοποιήθηκαν 212 μονωτήρες

εκκρεμούς-τριβής (FPS) και υπολογίζεται ότι για το σεισμό σχεδιασμού το σύστημα σεισμικής μόνωσης μειώνει τις τέμνουσες δυνάμεις κατά 80%. [12],[13]



Figure 9: Δεξαμενή αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου



Figure 10 : Άποψη δεξαμενής στη Ρεβυθούσα

Στην περίπτωση της Ωνασείου Στέγης Γραμμάτων και Τεχνών οι αρχιτεκτονικές απαιτήσεις και οι υψηλές σεισμικές προδιαγραφές του έργου οδήγησαν στην εφαρμογή σεισμικής μόνωσης. Οι σεισμικές απαιτήσεις συνοψίζονται σε: εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού  $\alpha = 0.24$ , διπλάσια από την προβλεπόμενη από τον Ε.Α.Κ. για την περιοχή, σπουδαιότητα έργου  $\gamma I = 1.15$ , οιονεί ελαστική συμπεριφορά με συντελεστή συμπεριφοράς  $q = 1.50$ . Η σεισμική μόνωση υλοποιείται με 46 εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς που διατάσσονται σε ενιαία στάθμη κάτω από την πλάκα του υπογείου πάχους 1.50m. Έτσι διαχωρίζεται οριζόντια η ανωδομή από το υπόγειο. Τα εφέδρανα ολίσθησης τοποθετήθηκαν σε ανεστραμμένη διάταξη, με τη σφαιρική επιφάνεια ολίσθησης προς τα πάνω, ώστε οι πρόσθετες ροπές από τη μετακίνηση σε σεισμό να μην καταπονούν τα υποστυλώματα στα οποία εδράζονται αλλά την υπερκείμενη πλάκα. Η μέγιστη οριζόντια μετακίνησή τους είναι  $\pm 255\text{mm}$  και διαστασιολογήθηκαν για φορτία λειτουργικότητας 11000 kN και σεισμικά φορτία 25000 kN. Στο σχεδιασμό λήφθηκε υπόψη και η κατακόρυφη συνιστώσα, ως παράμετρος ελέγχου της πιθανής ανύψωσης των εφεδράνων. [14],[15]



Για το νέο μουσείο της Ακρόπολης, το οποίο θα ανοίξει τις πύλες του στο κοινό τον Ιούλιο του 2009, η σεισμική μόνωση θεωρήθηκε ως η κατάλληλη μέθοδος για την προστασία του κτιρίου. Οι λόγοι είναι προφανείς. Η σπουδαιότητα του κτιρίου ως χώρος μαζικής συγκέντρωσης και η τεράστια ιστορική αξία των εκθεμάτων δεν αφήνει περιθώρια για βλάβες στο σκελετό του κτιρίου, ενώ το αρχιτεκτονικό σχέδιο προέβλεπε μεγάλους ανοιχτούς χώρους στο εσωτερικό, ώστε να υπάρχει απρόσκοπτη θέα προς την Ακρόπολη. Κάτι τέτοιο δε θα ήταν εφικτό με χρήση παραδοσιακών μεθόδων αντισεισμικού σχεδιασμού, που θα περιελάμβαναν ογκώδεις κολώνες και πολλά μεγάλων διαστάσεων τοιχία στο εσωτερικό. Το σύστημα σεισμικής μόνωσης περιλαμβάνει 94 εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς, από τον ίδιο προμηθευτή, όπως και στην Ωνάσειο Στέγη Γραμμάτων και Τεχνών ( Maurer- Soehne Structural Protection). Το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης βρίσκεται κάτω από την πλάκα σκυροδέματος διαστάσεων 110m x 70m που στηρίζει το ύψους 40m τετραώροφο κτίριο, το οποίο σε μερικά χρόνια θα στεγάζει τα μάρμαρα του Παρθενώνα. Τα εφέδρανα είναι σχεδιασμένα να αναλαμβάνουν κατακόρυφο φορτίο 16000 kN, και έχουν δυνατότητα μέγιστης μετακίνησης +/-250mm. [15]



Figure 11: Εφέδρανα ολίσθησης στο Μουσείο της Ακρόπολης

## 2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ

Η γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου ( γέφυρα Χαριλάου Τρικούπη ) αποτελεί την πιο διάσημη εφαρμογή σεισμικής μόνωσης σε γέφυρα στην Ελλάδα. Η γέφυρα διασχίζει εγκάρσια τον Κορινθιακό Κόλπο και οι εδαφικές και γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εμπόδιζαν για πολλά χρόνια την κατασκευή της. Η περιοχή είναι έντονα σεισμογενής (ζώνη 2, 0.24g σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ. ) και έχει δώσει αρκετούς σεισμούς μεσαίου έως μεγάλου μεγέθους τις τελευταίες δεκαετίες. Ο μεγαλύτερος από αυτούς, ο σεισμός του Αιγίου το 1995 είχε μέγεθος 6.2 βαθμούς της κλίμακας Ρίχτερ. Στην ευρύτερη υποθαλάσσια περιοχή υπάρχουν ρήγματα, επιπλέον οι όχθες του Κορινθιακού εκτιμώνται ως αβέβαιης σταθερότητας από τους Γεωτεχνικούς. Η επιτυχής πραγμάτωση της γέφυρας οφείλεται αφενός στη βαθιά θεμελίωση και αφετέρου στη σεισμική μόνωση.

Η γέφυρα έχει μήκος 2.880m ,είναι καλωδιωτή, αποτελείται από 5 ανοίγματα και έχει δύο καταστρώματα με δύο λωρίδες κυκλοφορίας ανά διεύθυνση

κυκλοφορίας και πεζοδρόμιο. Στα ακρόβαθρα έχουν τοποθετηθεί 6 ελαστομεταλλικά εφέδρανα ολίσθησης, με μέγιστο φορτίο σχεδιασμού 4.600kN. Επίσης, τοποθετήθηκαν αντίβαρα στα ακρόβαθρα για να εξαιρεθεί κάθε πιθανότητα ανύψωσης των εφεδράνων υπό οποιοδήποτε συνδυασμό φορτίων. Σε καθένα από τα μεσόβαθρα τοποθετήθηκε ένα εφέδρανο ολίσθησης με μέγιστο φορτίο σχεδιασμού 60.400kN. Οι αρμοί διαστολής σχεδιάστηκαν να έχουν τη μεγαλύτερη δυνατότητα διαμήκους και εγκάρσιας μετακίνησης παγκοσμίως, περισσότερο από 5000mm. Επίσης έχουν τοποθετηθεί αποσβεστήρες σε διάφορα σημεία σύνδεσης καταστρώματος και βάθρων για μείωση των μετακινήσεων και απορρόφηση ενέργειας.

Έχει σχεδιαστεί για σεισμό μεγέθους 7 Ρίχτερ, σύγκρουση με τάνκερ 18.000 τόνων με ταχύτητα 18 knots και ανέμους 250 km/h. [16],[17],[18]

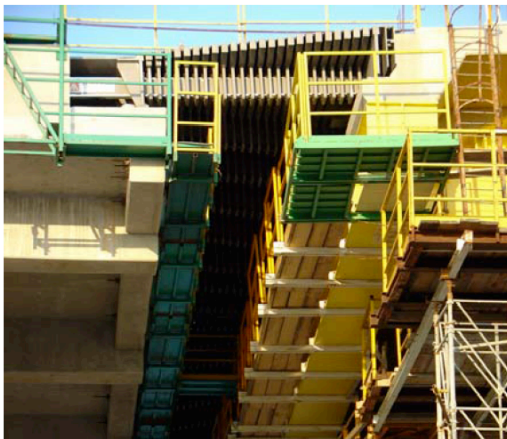


Figure 12: Αρμός διαστολής στο ακρόβαθρο, Ρίο-Αντίρριο



Figure 13: Αποσβεστήρες, Ρίο - Αντίρριο

Ιδιαίτερα απαιτητική ήταν και η κατασκευή του συστήματος σεισμικής μόνωσης στην κοιλαδογέφυρα της περιοχής Bolu στην Τουρκία (Bolu Viaduct).

Το 1999 δύο μεγάλοι σεισμοί, γειτονικοί και με μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους χτύπησαν την Τουρκία προκαλώντας 15,000 θανάτους και πολυάριθμους

τραυματισμούς. Ο πρώτος σεισμός προκλήθηκε από θραύση κατά μήκος του ρήγματος της Ανατολίας, χτύπησε τον Αύγουστο του 1999 και είχε μέγεθος 7.4 και ο δεύτερος το Νοέμβρη με μέγεθος 7.2 επίσης από ένα παρακλάδι του ίδιου ρήγματος. Πολύ κοντά στο επίκεντρο της δεύτερης σεισμικής δόνησης έτυχε να βρίσκεται η κοιλαδογέφυρα Bolu, τμήμα του αυτοκινητόδρομου Trans-European Motorway.

Όταν χτύπησε ο σεισμός η κοιλαδογέφυρα ήταν έτοιμη κατά 95%,υπολείπονταν μόνο οι αρμοί(expansion joints) και είχε κατασκευαστεί με μέθοδο σεισμικής μόνωσης. Συγκεκριμένα οι κατασκευαστές επέλεξαν ένα υβριδικό σύστημα σεισμικής μόνωσης με ιξώδεις αποσβεστήρες και μονωτήρες τριβής στα βάρθρα, το οποίο υπέστη σοβαρότατες ζημιές εξαιτίας της διάδοσης της επιφανειακής ρήξης ανάμεσα στα βάρθρα. Ο λόγος που η γέφυρα υπέστη τόσο σοβαρές ζημιές ήταν η κοντινή απόσταση του επικέντρου και η έντονη κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού, για την οποία η σεισμική μόνωση δεν είναι αποτελεσματική.



**Figure 14: Bolu Viaduct, Turkey**

Μετά τη μεγάλη φυσική καταστροφή η σεισμικότητα της περιοχής μελετήθηκε εκ νέου και οι κανονισμοί προσαρμόστηκαν αναλόγως. Η σεισμική ένταση σχεδιασμού αυξήθηκε από 0.54g σε 0.81g. Αυτό σημαίνει ότι δεν ήταν αρκετή η

επιαναφορά της γέφυρας στην αρχική της θέση αλλά έπρεπε να αναβαθμιστεί σεισμικά για να ανταποκρίνεται στις νέες απαιτήσεις των κανονισμών.

Η νέα γέφυρα σχεδιάστηκε με περίοδο επιαναφοράς 500 ετών, σύμφωνα με τους κανονισμούς AASHTO του 1992. Χρησιμοποιήθηκαν 536 εφέδρανα ολίσθησης με ικανότητα πλευρικής μετατόπισης 500-700mm.

Τα στάδια αποκατάστασης και αναβάθμισης της γέφυρας ήταν :

- Επιαναφορά στην αρχική της θέση
- Αποκατάσταση ανωδομής
- Αποκατάσταση βάθρων
- Αποκατάσταση θεμελίωσης
- Τοποθέτηση εφεδράνων εκκρεμούς-τριβής (FPS)

Η καταστροφή της κοιλαδογέφυρας Bolu κατέδειξε τη σημασία της σχεδίασης ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης με ικανότητα επιαναφοράς, ειδικά για κατασκευές που βρίσκονται πολύ κοντά ή πάνω σε ενεργά ρήγματα. [17],[19],[20]

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

Μία από τις μεγαλύτερες σε μήκος σεισμικά μονωμένες γέφυρες παγκοσμίως είναι η γέφυρα Benicia- Martinez στον Κόλπο του Σαν Φρανσίσκο. Έχει μήκος περίπου 3.110m και εξυπηρετεί καθημερινά περισσότερα από 10.000 οχήματα κατά μέσο όρο. Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, πρόκειται για περιοχή μεγάλης σεισμικής επικινδυνότητας και στη γειτονία της γέφυρας υπάρχουν επιφανειακά ρήγματα. Η επιτάχυνση σχεδιασμού ήταν μεγαλύτερη από 7g, γεγονός που καθιστούσε αδύνατο τον ελαστικό σχεδιασμό, χωρίς την εφαρμογή σεισμικής μόνωσης. Τελικά για το σύστημα αυτής επιλέχθηκαν εφέδρανα

ολίσθησης τύπου εκκρεμούς, που τοποθετήθηκαν στην κορυφή των βάθρων, ακριβώς κάτω από την πλάκα του καταστρώματος. Πρόκειται για τα μεγαλύτερα εφεδράνα αυτού του τύπου που έχουν ποτέ κατασκευαστεί. Έχουν διάμετρο περίπου 6.50m και βάρος περισσότερο από 18 τόνους. Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετακίνηση είναι +/-1300mm και αναλαμβάνουν πλευρικό φορτίο 2.270.000kg. [17],[21]



**Figure 15:** Άποψη της γέφυρας Benicia-Martinez



**Figure 16:** Το μέγεθος των εφεδράνων ολίσθησης τύπου εκκρεμούς, Benicia-Martinez

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

---

### 3.1 ΑΠΛΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ

Για τη μελέτη του σεισμού και της απόκρισης των κατασκευών σε σεισμό είναι απαραίτητη η κατανόηση βασικών εννοιών που σχετίζονται με τις ταλαντώσεις.

Ταλάντωση ονομάζεται η περιοδική κίνηση ενός σώματος. Η απλή περίπτωση της μονοδιάστατης περιοδικής κίνησης ενός σωματιδίου που ταλαντώνεται κατά μήκος μιας ευθείας ονομάζεται απλή αρμονική ταλάντωση. Γενικότερα, η ταλάντωση είναι απλή αρμονική ή ημιτονική αν η θέση συναρτήσει του χρόνου έχει τη μορφή :

$$x = A \cos(\omega t + \delta)$$

Η ποσότητα  $A$  ονομάζεται πλάτος ή εύρος της κίνησης, και είναι η απόσταση ανάμεσα στο σημείο ισορροπίας και ενός από τα σημεία αναστροφής. Η ποσότητα  $\omega$  ονομάζεται γωνιακή συχνότητα ( ή κυκλική συχνότητα ) και σχετίζεται ευθέως με την περίοδο και τη συχνότητα της κίνησης, σύμφωνα με τη σχέση :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

Η ποσότητα  $\delta$  ονομάζεται σταθερά φάσης και ορίζει πότε το σωματίδιο φτάνει στη μέγιστη απομάκρυνση.

Οι σεισμικές διεγέρσεις και άρα οι διεγέρσεις των σημείων στήριξης της κατασκευής, είναι μη κανονικές ταλαντώσεις, οι οποίες δεν μπορούν να εκφραστούν σε απλή μαθηματική μορφή. Με ανάλυση Fourier ωστόσο, οποιαδήποτε συνάρτηση της μετακίνησης με το χρόνο  $x(t)$  μπορεί να αναπτυχθεί ως άθροισμα αρμονικών συναρτήσεων (σειρές Fourier). Γενικά, όσες περισσότερες αρμονικές αθροίζονται, τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η εδαφική διέγερση.

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k e^{i(\omega_k t - \varphi_k)}$$

Το φάσμα Fourier εκφράζει το συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης, αφού δείχνει ποιες συχνότητες είναι πιο έντονες σε αυτήν.

### 3.3 ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Περίοδος ονομάζεται το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ώστε να λάβει το ταλαντούμενο σώμα ή σύστημα δύο ίδιες ή ομοιόθετες θέσεις σε ελεύθερη ταλάντωση. Με τον όρο ιδιοπερίοδο αναφερόμαστε στην περίοδο ελεύθερης ταλάντωσης ενός συστήματος.

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Για ένα σύστημα με  $N$  βαθμούς ελευθερίας οι ιδιοπερίοδοι  $T_N$  δηλώνουν τις ιδιοπερίόδους των  $N$  ανεξάρτητων μονοβαθμίων συστημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται για να μελετηθεί η δυναμική απόκριση ενός πολυβάθμιου συστήματος.

Η ιδιοσυχνότητα  $\omega$  μονοβαθμίου είναι η συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης της κατασκευής. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από τη μάζα και την ακαμψία της κατασκευής, δηλαδή από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτής.



$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από την εξίσωση κίνησης της μάζας για το μονοβάθμιο ταλαντωτή που εκτελεί ελεύθερη ταλάντωση χωρίς απόσβεση:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -k \cdot x$$

Τα πολυβάθμια συστήματα N βαθμών ελευθερίας αναλύονται με τη μέθοδο της επαλληλίας σε N μονοβάθμια. Οι ιδιότητες  $\omega_N$  ενός ν-βάθμιου συστήματος αποτελούν τις ιδιοσυχνότητες των μονοβαθμίων αυτών συστημάτων και προσδιορίζονται από την εξίσωση συχνοτήτων ,

$$||k - m\omega^2|| = 0$$

από την οποία προκύπτει ένα πολυώνυμο της μεταβλητής  $\omega^2$ . Κάθε  $\omega_i$  αντιστοιχεί σε μια κανονική μορφή ταλάντωσης.

Η ιδιομορφή ή αλλιώς κανονική μορφή (normal mode) ορίζεται από ένα ιδιοσχήμα και μια ιδιοπερίοδο ( ή ιδιοσυχνότητα) .Ένα ταλαντούμενο σύστημα έχει τόσες ιδιομορφές όσους και βαθμούς ελευθερίας. Η φυσική σημασία της ιδιομορφής είναι η εξής : όταν το σύστημα ταλαντώνεται σε μια ιδιομορφή, ο λόγος των μετακινήσεων δύο οποιωνδήποτε βαθμών ελευθερίας παραμένει σταθερός, που σημαίνει ότι η μορφή ταλάντωσης παραμένει σταθερή με το χρόνο. Πρακτικά, η σημασία εύρεσης των ιδιομορφών έγκειται στο ότι η συνολική κίνηση ενός πολυβάθμιου συστήματος μπορεί να αναλυθεί στις επιμέρους κινήσεις ,κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί στην απόκριση μίας και μόνο ιδιομορφής. Στην περίπτωση των γεφυρών, επειδή η κατασκευή προσομοιάζεται με μονοβάθμιο ταλαντωτή, έχουμε την απλή περίπτωση μιας ιδιοπεριόδου και μιας ιδιομορφής.

### 3.4 ΑΚΑΜΨΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΣΒΕΣΗ

Αν προσομοιάσουμε τον απλό αρμονικό ταλαντωτή με μια συγκεντρωμένη μάζα συζευγμένη σε ένα ιδανικό, αβαρές ελατήριο για το οποίο ισχύει ο νόμος

του Hooke, η δύναμη  $F$  που ασκείται από το ελατήριο πάνω στη μάζα ισούται με :

$$F = -k \cdot x$$

Όπου  $k$  είναι η σταθερά του ελατηρίου, και στην περίπτωση της γέφυρας που προσομοιώνεται με μονοβάθμιο (απλό αρμονικό ταλαντωτή) είναι η ακαμψία της κατασκευής.

Με στατική θεώρηση, ως ακαμψία μέλους ή κατασκευής είναι η μετακίνηση που θα προκύψει με εφαρμογή μοναδιαίας δύναμης στο μέλος ή την κατασκευή, σύμφωνα με τη σχέση :

$$F = k \cdot \delta$$

Η υπόθεση ότι σε ένα ταλαντωτή δρα μόνο η δύναμη επαναφοράς, οπότε ο ταλαντωτής εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση, είναι ιδεατή. Στην πραγματικότητα, υπάρχει κάποια πρόσθετη δύναμη τριβής. Η μετατόπιση ενός ταλαντωτή με τριβές συναρτήσει του χρόνου χαρακτηρίζεται σαν ταλάντωση με απόσβεση και περιγράφεται από τη σχέση :

$$x = A_0 \cdot e^{-\gamma t/2} \cdot \cos(\omega t + \delta')$$

Όπου  $\gamma$  είναι μια σταθερά που αντιπροσωπεύει την επίδραση των τριβών.

Ο εκθετικός παράγοντας  $A = A_0 \cdot e^{-\gamma t/2}$  είναι το ,εξαρτώμενο πλέον από το χρόνο, εύρος της κίνησης. Παρεμπιπτόντως, η συχνότητα  $\omega$  δεν είναι ακριβώς η ίδια με τη συχνότητα  $\sqrt{\frac{k}{m}}$  αλλά κάπως μικρότερη, τη διαφορά αυτή ωστόσο δεν τη λαμβάνουμε υπόψη. Η απόσβεση  $c$  δρα αποτελεσματικά στο φαινόμενο του συντονισμού και λειτουργεί ως μηχανισμός κατανάλωσης ενέργειας. Η ύπαρξή της εμποδίζει τη δημιουργία απείρων βελών όταν  $\omega' = \omega$ , όπου  $\omega'$  η συχνότητα επιβολής του εξωτερικού φορτίου.

Πιο αναλυτικά, όταν η περίοδος της εξωτερικής διέγερσης συμπίπτει, ή έστω είναι πολύ κοντά στην ιδιοπερίοδο του ταλαντωτή, τότε ακόμα κι αν το

πλάτος. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι κάτω από αυτές τις συνθήκες, η εξωτερική δύναμη τροφοδοτεί σταθερά ενέργεια, με αποτέλεσμα το πλάτος των ταλαντώσεων συνεχώς να αυξάνεται, έως ότου οι τριβές αυξηθούν τόσο ώστε να εμποδίσουν την περαιτέρω αύξηση. Συνεπώς το τελικό πλάτος εξαρτάται από τις τριβές. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συντονισμός ή συμπαθητική ταλάντωση.[22]

Τέτοια επικίνδυνα φαινόμενα μπορούν να συμβούν ακόμα και σε κατασκευές που θεωρούνται στατικές. Ένα πολύ γνωστό δυστύχημα που οφείλεται στο φαινόμενο του συντονισμού συνέβη το 1850 στο Angers της Γαλλίας ,όπου ο βηματισμός των στρατιωτών πάνω σε κρεμαστή γέφυρα, διέγειρε τη γέφυρα σε συντονισμό με το ρυθμό του βηματισμού, με αποτέλεσμα το πλάτος της ταλάντωσης να γίνει τόσο μεγάλο ώστε η γέφυρα να σπάσει και να σκοτωθούν 226 στρατιώτες.[23]

Αυτή είναι και η μοναδική περίπτωση ,εκτός του σεισμού, που μια γέφυρα μπορεί να υποβάλλεται σε κατακόρυφη δυναμική διέγερση, η περίπτωση του ανθρωποσυνωστισμού, που μπορεί να οδηγήσει στο συντονισμό της.

Στην περίπτωση του συντονισμού είναι ζωτικής σημασίας η λειτουργία των αποσβεστήρων γιατί εξαλείφει τις αιχμές στα μεγέθη αποκρίσεως της γέφυρας(για το συντονισμό, χωρίς απόσβεση, τα μεγέθη αυτά τείνουν στο άπειρο!)

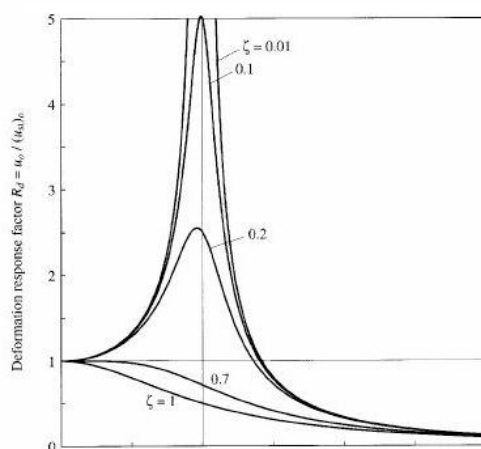


Figure 17: Διάγραμμα δυναμικού συντελεστή μεγέθυνσης συναρτήσει του λόγου συχνοτήτων

Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται οι τιμές του δυναμικού συντελεστή μεγέθυνσης A και στον οριζόντιο ο λόγος της συχνότητας εξωτερικού φορτίου  $\omega$  διά την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, που συνήθως συμβολίζεται β.

Στο διάγραμμα διακρίνονται τρεις περιοχές:

- Περιοχή 1 : με μικρές τιμές του β, π.χ. μικρότερες από 0.50. Σε αυτήν την περιοχή  $A=1$  και επομένως η απόκριση μπορεί να θεωρηθεί στατική. Αυτό σημαίνει ότι το επιβαλλόμενο φορτίο μεταβάλλεται πολύ αργά σε σύγκριση με την ταχύτητα που το σύστημα θα «ήθελε» να αποκριθεί. Η απόκριση εξαρτάται κυρίως από την ακαμψία.
- Περιοχή 2:Συντονισμός,  $\beta=1$ . Σε περιοχές συχνοτήτων διεγέρσεως περί την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής έχουμε τις μέγιστες τιμές της απόκρισης. Στην περιοχή του συντονισμού, όλες οι παράμετροι του ταλαντωτή (αδράνεια, ακαμψία, απόσβεση) έχουν σημαντική επίδραση στην απόκριση.
- Περιοχή 3: περιοχή με μεγάλες τιμές του β, π.χ. μεγαλύτερες από 1.50. Στην περίπτωση αυτή το φορτίο μεταβάλλεται πολύ γρήγορα σε σχέση με το ρυθμό με τον οποίο θα «ήθελε» να αποκριθεί το σύστημα. Η αδράνεια είναι δυσανάλογα μεγάλη και από αυτήν εξαρτάται κυρίως η απόκριση.[24]

Ως λόγος απόσβεσης ορίζεται η ποσότητα ζ. Δύο κατασκευές μπορούν να έχουν διαφορετική απόσβεση c αλλά ίδιο λόγο απόσβεσης ζ. Οπότε με το λόγο απόσβεσης επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομαδοποίηση συντελεστών απόσβεσης. Το ζ δεν εξαρτάται από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής αλλά μόνο από το υλικό και το σχήμα της (δηλαδή την αεροδυναμικότητά της). Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι:

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega}$$

- Για  $\zeta=1 \Rightarrow c=c_{cr}$  και έχουμε κρίσιμη απόβεση. Η κίνηση τότε δεν είναι ταλάντωση αλλά το σύστημα επανέρχεται στην κατάσταση ηρεμίας ακολουθώντας εκθετικό νόμο. Η τιμή  $c_{cr}=2m\omega$  ονομάζεται κρίσιμη διότι αποτελεί την οριακή τιμή του  $c$  που χαρακτηρίζει το είδος της κίνησης. Για  $c \geq c_{cr}$  η κίνηση δεν είναι ταλάντωση.
- Για  $\zeta > 1 \Rightarrow c > c_{cr}$  η κίνηση δεν είναι ταλάντωση αλλά συχνά χαρακτηρίζεται ως υπερκρίσιμη ταλάντωση.
- Για  $\zeta < 1 \Rightarrow c < 2m\omega$  και η κίνηση ονομάζεται υποκρίσιμη ταλάντωση. Το σύστημα εκτελεί αρμονική ταλάντωση με κυκλική συχνότητα  $\omega_D$  και περίοδο  $T_D = \frac{2\pi}{\omega_D}$  της οποίας το εύρος φθίνει εκθετικά. Το εύρος φθίνει γρηγορότερα όσο μεγαλύτερη είναι η απόσβεση  $\zeta$  και όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος  $t$ .

$$T_D = \frac{T}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$

### 3.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Ο μηχανισμός δημιουργίας των σεισμών εξηγείται με τη θεωρία της ελαστικής ανάπαλσης, σύμφωνα με την οποία, κατά τη μετακίνηση των τεκτονικών πλακών συσσωρεύεται ελαστική ενέργεια με την αύξηση των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων στην επιφάνεια ανάμεσα στα δύο τμήματα του ρήγματος. Όταν οι διατμητικές τάσεις υπερβούν τη φύσει και θέσει αντοχή του πετρώματος θα προκληθεί διάρρηξη που συνοδεύεται από έκλυση θερμικής και κινητικής ενέργειας με τη μορφή διαμήκων P και εγκάρσιων S κυμάτων. [25] Επομένως είναι λάθος ο σεισμός να θεωρείται φόρτιση της κατασκευής. Το γεγονός όμως ότι διεγείρει τα σημεία στήριξης της κατασκευής την οδηγεί σε εξαναγκασμένη ταλάντωση, με συχνότητα «εξωτερικού» φορτίου τη συχνότητα μετάδοσης των κυμάτων. Η ενέργεια που εισάγεται τελικά στην κατασκευή είναι μειωμένη σε σχέση με την ενέργεια που εκλύθηκε από τη διάρρηξη. Λόγω της απόσβεσης του εδάφους κατά τη μετάδοση των κυμάτων.

Προφανώς όσο μεγαλύτερο το εστιακό βάθος και όσο μεγαλύτερη η απόσταση του επικέντρου από την κατασκευή τόσο μικρότερη η ενέργεια της σεισμικής διέγερσης που εισάγεται στην κατασκευή.

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την ταλάντωση λόγω διέγερσης των σημείων στήριξης είναι:

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = -m\ddot{v}_g(t)$$

Όπου  $v(t)$  η σχετική μετατόπιση εδάφους-ανωδομής και  $v_g(t)$  η εδαφική μετακίνηση. Η εξίσωση προέκυψε άμεσα από την διαφορική εξίσωση ελεύθερης ταλάντωσης μονοβάθμιου ταλαντωτή με απόσβεση. Η ποσότητα του δεύτερου μέλους ονομάζεται ισοδύναμο φορτίο διέγερσης, δηλαδή το φαινόμενο μελετάται σαν η κατασκευή να υπόκειται σε δυναμική φόρτιση με :

$$P_{eff} = -m\ddot{v}_g(t)$$

### 3.6 ΜΕΤΡΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το μέτρο ελαστικότητας είναι η μαθηματική περιγραφή της τάσης ενός σώματος να παραμορφώνεται ελαστικά. Γενικά ορίζεται ως πηλίκο της τάσης προς την παραμόρφωση που αυτή προκαλεί και για αυτό υπολογίζεται γραφικά από την αντίστοιχη καμπύλη, σαν την εφαπτομένη της γωνίας της με τον οριζόντιο άξονα. Ανάλογα με το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης διακρίνονται τα τρία είδη μέτρων ελαστικότητας.

- Μέτρο ελαστικότητας του Young, E (Modulus of elasticity, Young's modulus)

Ορίζεται ως ο λόγος της ορθής τάσεως δια της αντίστοιχης ανηγμένης μηκύνσεως στην περίπτωση του απλού εφελκυσμού σε ελαστικά σώματα , δηλαδή :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

- Μέτρο ολισθήσεως/διάτμησης G ( shear modulus )

Ο λόγος της τάσεως διατμήσεως δια της αντίστοιχης ολίσθησης στην περίπτωση της απλής διατμήσεως σε ελαστικά σώματα

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

Συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό μέσω της σχέσης:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

- Μέτρο συμπίεσεως K ( bulk modulus )

Ο λόγος της μέσης ορθής τάσης  $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  δια της αντίστοιχης ανηγμένης διογκώσεως  $e = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  στην περίπτωση του ισότροπου ελαστικού σώματος :

$$K = \frac{\sigma_m}{e}$$

Συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό μέσω της σχέσης:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Για την περιγραφή των ιδιοτήτων των υλικών χρησιμοποιείται και ο λόγος του Poisson  $\nu$ , ο οποίος ορίζεται σαν το πηλίκο της εγκάρσιας συστολής δια της μηκύνσεως, στην περίπτωση του απλού εφελκυσμού. Για την περίπτωση ισοτροπικών, γραμμικά ελαστικών υλικών ο λόγος του Poisson παίρνει τιμές από 0.10 έως 0.50. Λόγω της απλότητας αυτής της οριστικής έκφρασης, η

έχουν θετικές τιμές. Για τα περισσότερα υλικά το εύρος τιμών είναι από 0.00 έως 0.50, όπου 0.50 σημαίνει ότι το υλικό είναι πρακτικά ασυμπίεστο, όπως για παράδειγμα το καουτσούκ. Υποθέτοντας συμπίεση του υλικού κατά τη διαμήκη ( $\chi$ ) διεύθυνση :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}$$

Η ογκομετρική μεταβολή συναρτήσει του λόγου του Poisson υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\nu) \frac{\Delta L}{L}$$

Ανάμεσα στα  $E, G, \nu$  υπάρχει κυκλική σχέση, δηλαδή γνωρίζοντας τις δύο από τις τρεις παραμέτρους η Τρίτη μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

---

Τα μέσα σεισμικής μόνωσης ονομάζονται αλλιώς και συστήματα ελέγχου απόκρισης των κατασκευών (*structural control systems*) και σκοπός τους είναι αφενός η απομόνωση της κατασκευής από την κίνηση του εδάφους, αφετέρου ο έλεγχος των ταλαντώσεων, δηλαδή η ελεγχόμενη απόκρισή της σε μια δυναμική φόρτιση.[23]

### 4.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

Τα συστήματα αποκρίσεως διακρίνονται ανάλογα με το σημείο τοποθέτησής τους σε :

- Εξωτερικά, που συνήθως είναι συστήματα σεισμικής μόνωσης, που τοποθετούνται ανάμεσα στο κατάστρωμα και τα βάθρα της κατασκευής
- Και σε εσωτερικά, που συνήθως είναι συστήματα απορροφήσεως ενέργειας και τοποθετούνται εντός του καταστρώματος.

Διακρίνονται επίσης ανάλογα με το αν απαιτούν προσφορά εξωτερικής ενέργειας για τη λειτουργία τους, οπότε έχουμε :

- Τα συστήματα παθητικού ελέγχου(*passive control devices*),που δεν απαιτούν προσφορά ενέργειας
- Τα συστήματα ενεργητικού ελέγχου(*active control devices*),που απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλες ποσότητες εξωτερικής ενέργειας
- Τα συστήματα ημιενεργητικού ελέγχου(*semi-active control devices*),που απαιτούν πολύ λιγότερη εξωτερική ενέργεια, σε σχέση με τα προηγούμενα
- Τα υβριδικά συστήματα (*hybrid control devices*),που λειτουργούν κυρίως παθητικά και χρησιμοποιούν ενεργητικούς μηχανισμούς για διορθώσεις με σκοπό τη βέλτιστη απόκριση.

Φυσικά, τα συστήματα ελέγχου απόκρισης κατηγοριοποιούνται και ανάλογα με το χαρακτηριστικό που μεταβάλλουν, το οποίο μπορεί να είναι η ακαμψία, η μάζα, η απόσβεση ή κάποιος συνδυασμός τους.

Συνοπτικά λειτουργούν ως εξής :

- Αυξάνοντας τη μάζα της κατασκευής, αυξάνεται η ιδιοπερίοδος, άρα μειώνονται οι επιταχύνσεις και οι σεισμικές δυνάμεις.
- Μειώνοντας την ακαμψία (αυξάνοντας την ευκαμψία) του συστήματος, αυξάνεται η ιδιοπερίοδος, άρα μειώνονται οι επιταχύνσεις και οι σεισμικές δυνάμεις.
- Αυξάνοντας την απόσβεση, δηλαδή την απορρόφηση εισερχόμενης ενέργειας, το σύστημα εμφανίζει πολύ μειωμένες δυναμικές μετακινήσεις ,ενώ δευτερευόντως μειώνονται και οι επιταχύνσεις και σεισμικές δυνάμεις.
- Διαθέτοντας επαρκή στιβαρότητα, ανταποκρίνονται επαρκώς στα φορτία λειτουργίας.

Θα ασχοληθούμε με **συστήματα σεισμικής μονώσεως**, που είναι συνήθως παθητικά και εξωτερικά τοποθετούμενα, συνήθως ανάμεσα στο κατάστρωμα και τα βάθρα, για την περίπτωση των γεφυρών. Αυτά τα συστήματα επιδιώκουν την αύξηση της ιδιοπεριόδου μέσω μείωσης της ακαμψίας του συστήματος και την αύξηση της απόσβεσης. Αφήνουν αμετάβλητη τη μάζα της κατασκευής.

Στην περίπτωση της σεισμικής διέγερσης αγνοείται η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού, οπότε χρησιμοποιούνται διατμητικά εφέδρανα (shear bearings) για να αντιμετωπίσουν τη διέγερση που είναι παράλληλη στην επιφάνεια του εδάφους.

Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα σεισμικής μονώσεως είναι:

1. Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με χαμηλής, υψηλής απόσβεσης ή με πυρήνα μολύβδου (elastomeric bearings).
2. Τα εφέδρανα ολισθήσεως σε διάφορες παραλλαγές (sliders).
3. Τα συστήματα απόσβεσης/ κατανάλωσης ενέργειας (dissipators).
4. Οι αρμοί διαστολής (expansion joints)

Είναι προφανές ότι αν ο χρησιμοποιούμενος τύπος εφεδράνου δεν έχει την επιθυμητή απόσβεση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με κάποιο σύστημα απορρόφησης ενέργειας, δηλαδή αποσβεστήρα (συνήθως ιξώδη) .

## 4.2 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι 3 βασικές ιδιότητες που πρέπει να πληρούν τα εφέδρανα είναι η ευκαμψία (για μείωση ακαμψίας της κατασκευής),μεγάλη απόσβεση για κατανάλωση ενέργειας (άρα και για μείωση σχετικών μετακινήσεων),και η επαρκής στιβαρότητα ( για παραλαβή φορτίων στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας).Πιο αναλυτικά:

### 4.2.1 ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΓΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΥΚΑΜΨΙΑ :

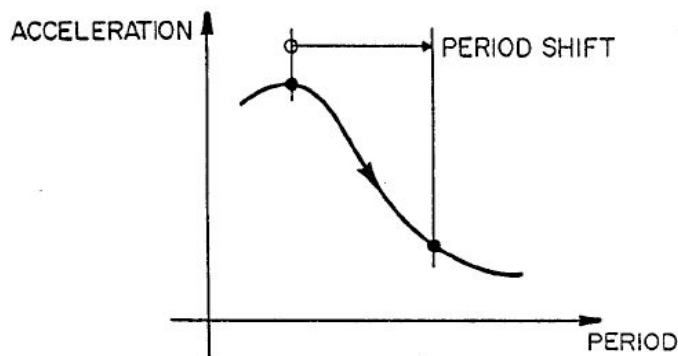
Χάρη στην πολύ μικρή οριζόντια ακαμψία, το σύνολο των σεισμικών διεγέρσεων παραμορφώσεων εκδηλώνεται σχεδόν αποκλειστικά στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης, ενώ περιορίζονται σημαντικά τόσο η ένταση όσο και η παραμόρφωση που μεταβιβάζεται στα μέλη της υποδομής (βάθρα και θεμελίωση).

Αυξημένη ευκαμψία σημαίνει μείωση της ακαμψίας  $k$  και άρα αύξηση της ιδιοπεριόδου  $T$ , σύμφωνα με τη σχέση :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Η ιδιοπερίοδος της κατασκευής πριν τη σεισμική μόνωση, δηλαδή πριν την τοποθέτηση εφεδράνων και αποσβεστήρων, ονομάζεται fixed-base period.

Η επίδραση της αύξησης της ιδιοπεριόδου στις φασματικές επιταχύνσεις για μια συγκεκριμένη απόσβεση και συγκεκριμένο εδαφικό τύπο φαίνεται ξεκάθαρα στο φάσμα ψευδοεπιταχύνσεων.



Αύξηση της ιδιοπεριόδου συνήθως σημαίνει μείωση των επιταχύνσεων και μάλιστα επιδιώκεται η νέα ιδιοπερίοδος να ανήκει στην περιοχή σταθερών φασματικών μετακινήσεων, όπου η φασματική επιτάχυνση συγκλίνει σε συγκεκριμένη (χαμηλή) τιμή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ανεξάρτητα από το μέγεθος του σεισμού η απόκριση της κατασκευής είναι συγκεκριμένη και άρα προβλέψιμη.

Χαμηλότερη τιμή επιτάχυνσης σημαίνει μείωση των σεισμικών δράσεων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$F = m \cdot a$$

Από το φάσμα ψευδομετακινήσεων ωστόσο φαίνεται ότι αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής οδηγεί σε γραμμική αύξηση των μετακινήσεων, γεγονός μη επιθυμητό, που αντιμετωπίζεται με εισαγωγή πρόσθετης απόσβεσης στο σύστημα.

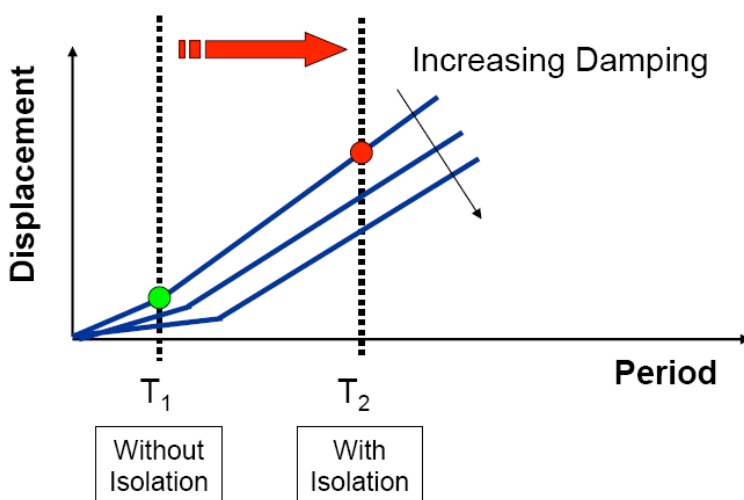


Figure 19: Φάσμα μετακινήσεων

#### 4.2.2 ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΓΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ:

Η αύξηση των μετακινήσεων ως αποτέλεσμα της αύξησης της ιδιοπεριόδου οδηγεί στην ανάγκη εισαγωγής πρόσθετης απόσβεσης στο σύστημα. Γενικά, η απόσβεση δρα αποτελεσματικά στην περίπτωση που η συχνότητα της εξωτερικής φόρτισης συμπίπτει με την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, δηλαδή στο φαινόμενο του συντονισμού, που οδηγεί σε άπειρα βέλη. Επίσης μειώνει σημαντικά τις σεισμικές μετακινήσεις.

Η αύξηση της απόσβεσης, πέρα από τη σημαντική μείωση των μετακινήσεων, υποβιβάζει το φάσμα των ψευδοεπιταχύνσεων, με αποτέλεσμα για την ιδιοπερίοδο του συστήματος με μόνωση, οι επιταχύνσεις να μειώνονται περαιτέρω με την αυξημένη απόσβεση, για συγκεκριμένο πάντα εδαφικό τύπο. Μείωση των επιταχύνσεων σημαίνει μείωση των σεισμικών δράσεων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

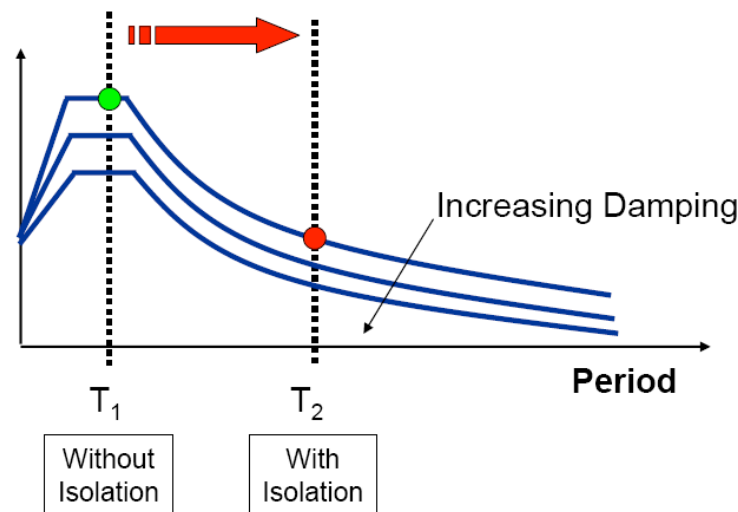
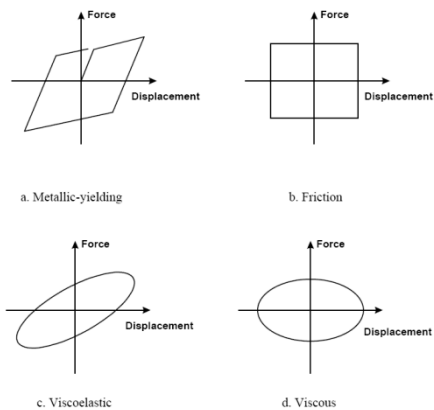


Figure 20: Περαιτέρω μείωση επιταχύνσεων και σεισμικών δράσεων με την αύξηση της απόσβεσης

Η απόσβεση μπορεί να εισαχθεί σε ένα σύστημα με τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικούς τρόπους. Με ιξώδη υλικά (ιξώδης απόσβεση), μέσω τριβής, σαν υστέρηση του υλικού (εσωτερικό έργο), ή με ακτινοβολία (radiation). Σε κάθε περίπτωση ορίζεται η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση για λόγους απλοποίησης της προσομοίωσης.[1]

Ο βρόχος υστέρησης είναι η γραφική παράσταση δύναμης- μετατόπισης σε κυκλική φόρτιση και το εμβαδό που περικλείεται από την καμπύλη του βρόχου είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης. Ανάλογα με το είδος της απόσβεσης (ιξώδης, υστερητική κτλ. ) ο βρόχος έχει διαφορετικό σχήμα και συνήθως πρόκειται για κάποιο συνδυασμό αυτών. Παρατίθενται κάποιοι χαρακτηριστικοί, ιδεατοί βρόχοι που χρησιμοποιούνται σαν προσομοιώματα κατά περίπτωση:



**Figure 21: Μηχανισμοί κατανάλωσης ενέργειας: α. διαρροή μετάλλου, β. τριβή , γ. ιξοελαστική απόσβεση, δ. ιξώδης απόσβεση**

#### 4.2.2.1 Κατανάλωση ενέργειας από τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα

Η οριζόντια ευκαμψία των εφεδράνων μειώνει τις σεισμικές δράσεις στην ανωδομή αλλά ταυτόχρονα οδηγεί σε αύξηση των μετακινήσεων, για την αντιμετώπιση των οποίων θα απαιτούνταν πολύ μεγάλοι αρμοί και ασυνήθιστα μεγάλα πλάτη έδρασης. Για τη μείωση των μετακινήσεων τα εφέδρανα κατασκευάζονται από υλικά με μεγάλη υστερητική απόσβεση, που σημαίνει ότι μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης υπάρχει κατανάλωση ενέργειας που αποδίδεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Στηριζόμαστε δηλαδή στην υστερητική απόσβεση του χάλυβα ή του μολύβδου.

Ο βρόχος υστέρησης των ελαστομεταλλικών εφεδράνων είναι γραμμικός ή διγραμμικός και το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη δράσεων-μετατοπίσεων δίνει την καταναλισκόμενη ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης.

#### 4.2.2.2 Κατανάλωση ενέργειας από τα εφέδρανα ολίσθησης

Στην περίπτωση των εφεδράνων ολίσθησης η ενέργεια καταναλώνεται μέσω της τριβής. Οι δυνάμεις τριβής οφείλονται στη συνοχή που αναπτύσσεται ανάμεσα στα δύο υλικά που έρχονται σε επαφή. Η τριβή μεταξύ δύο επιφανειών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση ονομάζεται κινητική τριβή (τριβή ολίσθησης). Η δύναμη κινητικής τριβής είναι :

$$F_k = \mu_k N$$

Όπου  $\mu_k$  ο συντελεστής κινητικής τριβής, σταθερά των δύο υλικών και  $N$  η κάθετος προς την επιφάνεια επαφής.

Η τριβή ανάμεσα σε επιφάνειες που ηρεμούν ονομάζεται στατική τριβή. Το μέγιστο μέτρο στατικής τριβής, δηλαδή η μέγιστη δύναμη αμέσως πριν το σώμα ξεκινήσει να κινείται είναι:

$$F_s = \mu_s N$$



Όπου  $\mu_s$  ο συντελεστής στατικής τριβής.

Οι συντελεστές κινητικής και στατικής τριβής εξαρτώνται σημαντικά από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα της κίνησης στη διεπιφάνεια, το βαθμό φθοράς των επιφανειών (wear) και την καθαρότητα των επιφανειών.

#### 4.2.2.3 Κατανάλωση ενέργειας από τους αποσβεστήρες

Η ιξώδης απόσβεση είναι ο συνηθέστερος μηχανισμός κατανάλωσης ενέργειας των αποσβεστήρων. Ο βρόχος υστέρησης είναι μια έλλειψη, το εμβαδό της οποίας δίνει την καταναλισκόμενη ενέργεια.

### 4.2.3 ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΓΙΑ ΕΠΑΡΚΗ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΑ ΣΕ Ο.Κ.Λ.

Φορτία όπως ο άνεμος και οι δυνάμεις πεδήσεως απαιτούν την πλευρική ακαμψία των εφεδράνων, πράγμα που φαινομενικά αντικρούεται στην πρώτη και βασικότερη απαίτηση της μεγάλης οριζόντιας ευκαμψίας. Το παράδοξο αυτό αντιμετωπίζεται σχεδιάζοντας τις συσκευές μόνωσης να αποκρίνονται ελαστικά για τα φορτία λειτουργίας της κατασκευής και πλαστικά για το σεισμό. Για το λόγο αυτό οι συσκευές τριβής είναι αρκετά δημοφιλείς, επειδή ο συντελεστής τριβής μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε η συσκευή να μην ενεργοποιείται για φορτία ανέμου αλλά για φορτία από σεισμό, με την προϋπόθεση βέβαια τα φορτία ανέμου να είναι μικρότερα από αυτά του σεισμού, όπως συνήθως συμβαίνει στις γέφυρες. Η παρεμβολή μονωτήρων μεταξύ ανωδομής και βάθρων βελτιώνει και τη συμπεριφορά της ανωδομής σε λικνισμό.

Οι κανονισμοί αναφέρουν επίσης ότι το σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει υποχρεωτικά να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Να παραμένει σταθερό για τις απαιτούμενες μετακινήσεις
2. Να αυξάνει την αντοχή του με την αύξηση της μετακίνησης
3. Τα μηχανικά του χαρακτηριστικά να μην υποβαθμίζονται σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση
4. Να έχει μετρήσιμα μηχανικά χαρακτηριστικά, για τα οποία να υπάρχει σχετική βεβαιότητα.

#### **4.2.4 ΕΠΑΡΚΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ**

Η απαίτηση για δυσκαμψία στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι προφανής για τη στατική λειτουργία του φορέα. Τα εφέδρανα πρέπει να φέρουν επαρκώς το ίδιο βάρος του φορέα και τα φορτία κυκλοφορίας. Αυτή η απαίτηση θεωρείται ότι ικανοποιείται όταν η οριζόντια μετακίνηση του κέντρου μάζας της ανωδομής, που οφείλεται στην ευκαμψία των μονωτήρων στην κατακόρυφη διεύθυνση, είναι μικρότερη από το 5% της μετακίνησης σχεδιασμού. Ο έλεγχος της συνθήκης αυτής δεν απαιτείται αν στη διεπιφάνεια μόνωσης το κατακόρυφο φορτίο αναλαμβάνουν εφέδρανα ολίσθησης ή συνήθη ελαστομεταλλικά εφέδρανα (χαμηλής απόσβεσης) ή ελαστομεταλλικά με πυρήνα μολύβδου. [34]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ

---

Τα ελαστομεταλλικά εφεδράνα μονώσεως χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία 50 χρόνια κυρίως για την αντιμετώπιση των επιδράσεων των θερμοκρασιακών μεταβολών. Για σεισμική μόνωση, η εφαρμογή τους περιορίζεται στην τελευταία δεκαετία και εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η ανεκτικότητα σε οριζόντιες μετακινήσεις και η ελάχιστες απαιτήσεις για συντήρηση.

Τα κυριότερα είδη ελαστομεταλλικών εφεδράνων σεισμικής μονώσεως είναι :

5. Ελαστομεταλλικά από καουτσούκ χαμηλής απόσβεσης, χρησιμοποιούμενα πάντα σε συνδυασμό με ιξώδεις αποσβεστήρες.
6. Ελαστομεταλλικά με πυρήνα μολύβδου, ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος τύπος εφεδράνου σε γέφυρες.
7. Ελαστομεταλλικά από καουτσούκ υψηλής απόσβεσης, με περιορισμένη εφαρμογή λόγω αβεβαιότητας για τη συμπεριφορά τους σε ερπυσμό.

### 5.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά για τη κατασκευή των ελαστομεταλλικών εφεδράνων είναι:

#### 1) Καουτσούκ

Το καουτσούκ ανήκει στην οικογένεια των πολυμερών.

Τα πολυμερή είναι μεγάλα μόρια που σχηματίζονται από την επαναλαμβανόμενη διασύνδεση πολλών εκατοντάδων ή χιλιάδων μονομερών μονάδων, που παρασκευάζονται από την αντίδραση απλών αλκενίων με έναν εκκινητή ριζών, σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση.

Χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, τα θερμοπλαστικά, που μαλακώνουν με την αύξηση της θερμοκρασίας, τα thermosetting plastics, που σκληραίνουν με την

ιδιότητα να αντέχουν σε υψηλές παραμορφώσεις χωρίς διάρρηξη. Το καουτσούκ ανήκει στην τρίτη κατηγορία.[28]

Στην πραγματικότητα καουτσούκ ονομάζεται το μονομερές cis-1,4-isoprene από το οποίο αποτελείται βασικά το πολυμερές στο οποίο αναφερόμαστε, με χημική ονομασία cis-1,4-polyisoprene. Σήμερα κατασκευάζονται διάφορα συνθετικά υλικά με παραπλήσιες ιδιότητες, και από αυτά πιο κοντά στο φυσικό προϊόν είναι τα trans-polyisoprene και cis-polybutadiene. Ωστόσο, η χρήση των συνθετικών είναι περιορισμένη, γιατί τα μηχανικά και χημικά τους χαρακτηριστικά δεν είναι ανώτερα από το φυσικό προϊόν, ενώ ταυτόχρονα έχουν αυξημένο κόστος παραγωγής.[27]

Το φυσικό καουτσούκ παράγεται από τουλάχιστον 400 διαφορετικά φυτά. Κυριότερη πηγή του όμως είναι το καουτσουκόδεντρο, η *Hevea Brasiliensis*, από την οποία περισυλλέγεται η ακατέργαστη πρώτη ύλη. Ο πρώτος εξαγωγέας ακατέργαστου καουτσούκ στον κόσμο είναι η Μαλαισία.[17]

Η πρώτη ύλη, το ακατέργαστο καουτσούκ περισυλλέγεται από τα δέντρα σε υδαρή μορφή, υφίσταται έκπλυση, ξήρανση και στερεοποίηση με θέρμανση στον αέρα. Αυτό το ακατέργαστο στερεοποιημένο υλικό είναι τόσο μαλακό και κολλώδες, ώστε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, παρά μόνο όταν υποστεί σκλήρυνση, αφού αναμιχθεί με 25%wt στοιχειακό θείο και θερμανθεί στους 150 °C σε ένα καλούπι από χάλυβα.

Αυτή η κατεργασία αποτελείται βουλκανισμός και επινοήθηκε το 1839 από τον Charles Goodyear. Ο βουλκανισμός (vulcanisation) μέσω μιας σειράς μηχανισμών που δεν είναι ακόμα απόλυτα κατανοητοί, προκαλεί σταυροειδείς δεσμούς ανάμεσα στις αλυσίδες του καουτσούκ, σχηματίζοντας μεταξύ τους δεσμούς άνθρακα-θείου, οπότε το πολυμερές γίνεται σκληρό και δύσκαμπτο, με ιδιαίτερα βελτιωμένη συμπεριφορά στις φθορές και τα γδαρσίματα. Ο ακριβής βαθμός σκληρότητας ποικίλλει ανάλογα τη χρήση για την οποία προορίζεται το υλικό.

Κατά τη διαδικασία του βουλκανισμού προστίθενται αντιοξειδωτικά και άλλα πρόσθετα για τη διαμόρφωση των επιθυμητών ιδιοτήτων, αν απαιτείται, όπως συμβαίνει συνήθως στην παραγωγή καουτσούκ που θα χρησιμοποιηθεί σε

εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Το σημαντικότερο από αυτά τα πρόσθετα είναι ο άνθρακας (blacks-carbon) που συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής και της ακαμψίας. Για τα εφέδρανα η περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να ανέρχεται ακόμα και στο 1/3 του συνολικού προϊόντος. Ο άνθρακας μπορεί να είναι είτε ενισχυτικός (reinforcing), που βελτιώνει την αντοχή σε απόξεση και αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας, αυξάνει το βρόχο υστέρησης και το συντελεστή ερπυσμού, είτε μη ενισχυτικός, ο οποίος συμβάλλει ελάχιστα στα παραπάνω. Για αυτό όταν προστίθεται ο μη ενισχυτικός άνθρακας αναμιγνύεται σε μεγαλύτερη αναλογία σε σχέση με τον ενισχυτικό.[17],[28]

Συνοπτικά, οι ιδιότητες του φυσικού καουτσούκ είναι οι εξής :

- 1.Καλές διηλεκτρικές ιδιότητες
- 2.Άριστη ανθεκτικότητα
- 3.Καλή απόσβεση
8. Καλή αντοχή σε σκίσιμο, γδαρσίματα (tear)
9. Χημική αντοχή σε μη οξειδωτικά διαλυτά άλατα και αλκάλια
- 10.Ελάχιστη χημική αντοχή σε οξειδωτικά όπως οξυγόνο, όζον, έλαια, βενζίνη, κετόνες και στα παράγωγα του πετρελαίου
- 11.Ευαίσθητα στην υπεριώδη ακτινοβολία

Η έκθεση στο οξυγόνο της ατμόσφαιρας και στην ηλιακή ακτινοβολία οδηγούν σε υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων και σε γρήγορη εμφάνιση φαινομένων ερπυσμού και χαλάρωσης. Η έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα. Η προσθήκη αντιοξειδωτικών και άνθρακα μπορεί να αποτελέσει μια μετριοπαθή λύση για τα παραπάνω ενώ για την προστασία από το όζον τα εφέδρανα κερώνονται. Η επαφή με παράγωγα του πετρελαίου είναι απίθανη, οπότε δε λαμβάνονται προληπτικά μέτρα. Αν όμως κάποιο βυτιοφόρο εκτραπεί από τη γέφυρα και τα εφέδρανα εμποτιστούν με πετρέλαιο ή παράγωγά του , αυτά θα πρέπει να καθαριστούν άμεσα. Οι σχετικά μεγάλες διαστάσεις τους δίνουν ένα χρονικό περιθώριο για τον

καθαρισμό πριν προλάβουν να διογκωθούν και ουσιαστικά να καταστούν μη χρησιμοποιήσιμα.

Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών[26]:

Όνομασία	Natural rubber
Κοινή ονομασία	καουτσούκ
Ακρωνύμιο	NR
Κατηγορία	Ελαστομερές
Πυκνότητα	920-1037 kg/m <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας E (σε εφελκυσμό)	3.3-5.9 GPa
Μέτρο διάτμησης G	E/3-E/4
Μέτρο ελαστικότητας Ec (σε θλίψη)	2.2 GPa - περίπου το ίδιο με του εφελκυσμού
Λόγος Poisson ν	0.5 (πρακτικά ασυμπίεστο)
Τάση διαρροής σε εφελκυσμό	14-28 MPa
Ultimate tensile strength	29 MPa
Elongation at break	660-850 %
Ultimate compressive strength	160 MPa
Σκληρότητα Rockwell/Shore	30-95, SHA
Θερμοκρασία αλλαγής χημικής σύστασης	+350°C
Θερμοκρασία κρυστάλλωσης	-70°C

## 2) ΧΑΛΥΒΑΣ

Χαλύβδινες πλάκες τοποθετούνται στο άνω και κάτω μέρος του εφεδράνου αλλά και πλευρικά για προστασία του ελαστομερούς. Στο εσωτερικό του

ελαστομερούς τοποθετούνται λεπτές πλάκες χάλυβα παράλληλες στο οριζόντιο επίπεδο αλλά και στο εξωτερικό του κομμάτι, πάνω και κάτω.

Ο χάλυβας είναι κράμα με βασικό συστατικό το σίδηρο (Fe) και διάφορα άλλα μη μεταλλικά στοιχεία σε μικρή αναλογία ,όπως άνθρακας ( C ) ,μαγγάνιο (Mn), πυρίτιο (Si) . Η ποσοστιαία συμμετοχή αυτών επηρεάζει τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του χάλυβα (αντοχή, συγκολλησιμότητα, ευαισθησία στη διάβρωση, ολκιμότητα κ.ά.) και μικρή μεταβολή στην αναλογία τους οδηγεί σε δημιουργία διαφορετικού είδους χάλυβα.[29]

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του χάλυβα είναι :

- Μεγάλη αντοχή ή μεγάλος λόγος αντοχής προς ίδιο βάρος
- Ομογένεια υλικού
- Μονιμότητα
- Ελαστικότητα
- Ολκιμότητα
- Μικρό βάρος
- Ευχέρεια διάνοιξης οπών

### 3) ΜΟΛΥΒΔΟΣ

Ο μόλυβδος (Pb) είναι ένα από τα βαρέα μέταλλα. Έχει μεγάλη πυκνότητα, είναι ελατό, όλκιμο, πολύ μαλακό και με χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Λόγω της μεγάλης ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση, χρησιμοποιείται συχνά στις κατασκευές, ενώ συχνά σκληρύνεται με προσθήκη άλλων στοιχείων, όπως είναι το αντιμόνιο.[17],[26]

Σπανίως συναντάται καθαρός στη φύση αλλά εξάγεται από σιδηρομεταλλεύματα ή ανακυκλώνεται από παλιοσίδερα. Οι εφαρμογές του είναι πολλές και συναντάται συχνά σε προϊόντα καθημερινής χρήσης, όπως μπαταρίες και καλώδια.

Οι βασικές του ιδιότητες είναι :

- Όπως όλα τα μέταλλα ξαναπαίρνει το αρχικό του σχήμα (recrystallises) μετά από παραμόρφωση σχεδόν αμέσως αλλά είναι από τα ελάχιστα που το κάνει σε θερμοκρασία δωματίου.
- Δεν αστοχεί σε κόπωση πρακτικά ποτέ.
- Διατηρεί αμετάβλητες τις ιδιότητές του με το πέρασμα του χρόνου.
- Έχει υψηλό συντελεστή ερπυσμού. Αυτό σημαίνει ότι παραμορφώνεται χωρίς αντίσταση λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών οπότε δεν αναπτύσσει ένταση.

## **5.2 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ**

Ο πιο απλός τύπος ελαστομεταλλικού εφεδράνου είναι το κυλινδρικό η ορθογωνικό εφέδρανο από καουτσούκ που κλείνεται πλευρικά από πλάκες χάλυβα. Επειδή όμως η απόσβεση του είναι αμελητέα ( max 5% ) , είναι ασταθές υπό μη σεισμικές δράσεις και παρουσιάζει υψηλή παραμορφωσιμότητα υπό μη σεισμικά φορτία δε χρησιμοποιείται.

Ο απλούστερος χρησιμοποιούμενος τύπος ελαστομεταλλικού εφεδράνου είναι παραλλαγή του προηγούμενου. Η διαφορά είναι ότι προστίθενται λεπτές πλάκες χάλυβα στο εσωτερικό. Οι λεπτές εσωτερικές χαλύβδινες πλάκες παρέχουν την απαραίτητη κατακόρυφη ακαμψία και φέρουσα ικανότητα για



σεισμικές δράσεις, όπως ο άνεμος, ενώ μειώνουν τόσο την κατακόρυφη όσο και την πλευρική παραμορφωσιμότητα υπό στατικά φορτία.

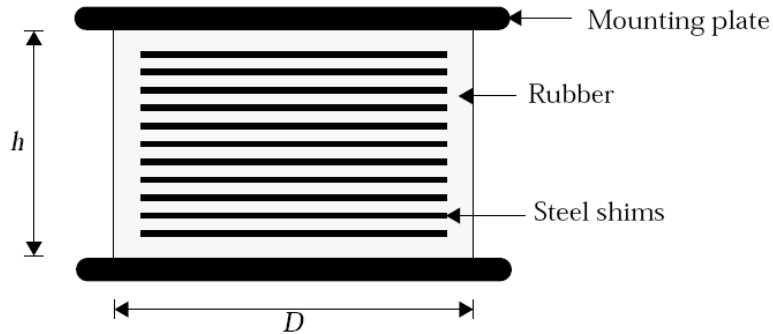


Figure 22 : Τομή απλού ελαστομεταλλικού εφεδράνου. Mounting plate : χαλύβδινη πλάκα  
Rubber: ελαστομερές , Steel Shims: λεπτές εσωτερικές πλάκες χάλυβα.

Η τιμή της απόσβεσης κυμαίνεται από 2% έως 6% αλλά εξαρτάται και από την ταχύτητα. Η απόκριση είναι γραμμική και εξαρτάται αποκλειστικά από το ελαστομερές.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους είναι :

Κατακόρυφη φέρουσα ικανότητα :

$$W < A'GS\gamma_{xz}$$

Όπου W το βάρος που αναλαμβάνει το εφεδράνο, A' το επικαλυπτόμενο εμβαδό σε κατάσταση μέγιστης παραμόρφωσης, S ο συντελεστής σχήματος,  $\gamma_{xz}$  η επιτρεπόμενη διαμητική παραμόρφωση.

Συντελεστής σχήματος S :

$$S = \frac{D}{4t}$$

Όπου D η διάμετρος του εφεδράνου (για κυκλικό εφεδράνο), t το πάχος μιας στρώσης ελαστομερούς.

$$K_b = \frac{GA}{h}$$

Ιδιοπερίοδος εφεδράνου :

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_b}}$$

Αν αντικαταστήσουμε τη μάζα και την ακαμψία από τις παραπάνω σχέσεις η ιδιοπερίοδος είναι :

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{A'Sh\gamma_{xz}}{gA}}$$

Κατακόρυφη ακαμψία:

$$K_z = \frac{6GS^2AK}{(6GS^2 + K)h}$$

Όπου K το μέτρο συμπίεσεως του ελαστομερούς.

Επιτρεπόμενη σεισμική μετακίνηση:

$$\Delta_b = B(1 - \frac{A'}{A})$$

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ελαστομεταλλικών εφεδράνων χαμηλής απόσβεσης είναι η απλή κατασκευή, τα σταθερά και αναλλοίωτα μηχανικά χαρακτηριστικά, που δεν επηρεάζονται από το χρόνο, τη θερμοκρασία και την ιστορία της φόρτισης. Μειονεκτούν όμως στο ότι πρέπει να συνδυάζονται απαραίτητως με συστήματα απόσβεσης, συνήθως ιξώδεις αποσβεστήρες οι οποίοι απαιτούν λεπτομερείς συνδέσεις και συχνά είναι ευαίσθητοι σε κόπωση. [6],[17],[30]

### **5.3 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ**

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά από τον Ερευνητικό Οργανισμό των Μαλαισιανών Παραγωγών καουτσούκ του Ηνωμένου Βασιλείου (Malaysian Rubber Producers' Research Association). Γεωμετρικά δε διαφέρουν σε τίποτα από τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης με εσωτερικές πλάκες χάλυβα. Η βασική διαφορά τους έγκειται στη σύσταση του καουτσούκ, το οποίο αποκτά αυξημένη υστερητική απόσβεση με την προσθήκη άνθρακα (carbon blocks), ελαίων και ρητινών. Με τον τρόπο αυτό, και με πανομοιότυπη τη διαδικασία κατασκευής του εφεδράνου, επιτυγχάνεται απόσβεση 10-20% σε 100% διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή περίπου 4 φορές υψηλότερη της συμβατικής τιμής. Ο βρόχος υστέρησης είναι το ενδιαμέσο μεταξύ των βρόχων ιζώδους απόσβεσης, που είναι τετραγωνικός, και υστερητικής που είναι γραμμικός.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των ελαστομεταλλικών εφεδράνων υψηλής απόσβεσης είναι η «βολική» μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού ανάλογα με τη διατμητική παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, αν  $\gamma \leq 20\%$  (οριακή κατάσταση λειτουργικότητας) το υλικό είναι μη γραμμικό, έχει αυξημένη ακαμψία και αυξημένη απόσβεση. Έτσι, φιλοτάσει μείζουσινες δυνάμεις από

την κυκλοφορία ή από κοντινούς σιδηροδρόμους. Για τις διατμητικές παραμορφώσεις στο εύρος 20-120% (σεισμός σχεδιασμού) το μέτρο διάτμησης είναι πιο χαμηλό και σταθερό. Η ακαμψία είναι μειωμένη και η σταθερότητα των τιμών καθιστά πιο ακριβή την προσομοίωση. Για  $\gamma \geq 120\%$  (δηλαδή για αναπάντεχα μεγάλες δυναμικές φορτίσεις) το μέτρο διάτμησης αυξάνει και πάλι λόγω του φαινομένου κρυστάλλωσης του καουτσούκ, παρέχοντας την απαραίτητη σταθερότητα στην κατασκευή.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα των ελαστομεταλλικών εφεδράνων υψηλής απόσβεσης είναι η αβεβαιότητα στην προσομοίωσή τους και η αδύνατη πρόβλεψη της απόκρισής τους. Αυτό συμβαίνει γιατί η απόκριση εξαρτάται από την ιστορία της φόρτισης, το μέτρο της ακαμψίας δίνεται με ακρίβεια  $\pm 50\%$ , και μέχρι στιγμής η έρευνα δεν μας παρέχει αρκετά στοιχεία για να προβλέψουμε με ακρίβεια τις επιδράσεις της χρονοϊστορίας και της θερμοκρασίας.[17],[30]

## **5.4 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΜΕ ΠΥΡΗΝΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ**

### **( LEAD-RUBBER BEARINGS – LRB)**

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου εφευρέθηκαν στη Νέα Ζηλανδία και είναι τα πιο συνηθισμένα σε περιπτώσεις σεισμικής μόνωσης γεφυρών.[6] Συναντώνται ορθογωνικά και κυλινδρικά. Το ύψος του εφεδράνου είναι συνήθως λιγότερο από το μισό της διαμέτρου ή της πλευράς, επειδή με την αύξηση του ύψους το εφέδρανο κινδυνεύει και από λυγισμό. Στο εμπόριο διατίθενται διάμετροι έως και 1m. Κατασκευάζονται από βουλκανισμένο καουτσούκ και στο κέντρο τους περιέχουν τον πυρήνα μολύβδου, που είναι κυλινδρικός και συμπαγής. Σε κάποιες περιπτώσεις περιέχουν παραπάνω από έναν πυρήνα. Οι διαστάσεις του πυρήνα είναι σύμφωνα με τον AASHTO :

$$\frac{B}{6} \leq dL \leq \frac{B}{3}$$

Όπου  $dL$  η διάμετρος του πυρήνα μολύβδου και  $B$  το πλάτος (ή η διάμετρος) του εφεδράνου.

Ο ρόλος του πυρήνα μολύβδου είναι ο εξής :

- αυξάνει την απορρόφηση ενέργειας (την απόσβεση) στις οριζόντιες μετατοπίσεις λόγω σεισμού
- αναλαμβάνει φορτία ανέμου και πεδησεως
- ελαχιστοποιεί τις μετακινήσεις στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας
- ο υψηλός συντελεστής ερπυσμού επιτρέπει στην κατασκευή να μην επηρεαστεί ουσιαστικά στην περίπτωση θερμοκρασιακών μεταβολών, και κάθε άλλου είδους αργά επιβαλλόμενης φόρτισης.
- διαρρέει σε σχετικά χαμηλή τιμή (  $\approx 9$  MPa) και απορροφά ενέργεια από σεισμικά φορτία. Μετά τη διαρροή η πλευρική δυσκαμψία μειώνεται σημαντικά. Επομένως, οι διαστάσεις του εφεδράνου και του πυρήνα επιλέγονται τέτοιες κατά το σχεδιασμό, ώστε να συμπεριφέρεται ελαστικά για τα φορτία της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας και να διαρρέει για σεισμικά φορτία.

Πειράματα έχουν δείξει ότι η ενεργός δύναμη διαρροής του πυρήνα μολύβδου είναι στην πραγματικότητα υπερδιπλάσια και υπερτριπλάσια της τιμής που δίνει ο κατασκευαστής/προμηθευτής.[31]

Στο εσωτερικό του εφεδράνου τοποθετούνται λεπτές πλάκες χάλυβα(steel shims). Η βασική τους λειτουργία είναι ότι αυξάνουν την κατακόρυφη δυσκαμψία, παραλαμβάνοντας καλύτερα τα κατακόρυφα φορτία και μειώνοντας την καθίζηση του εφεδράνου και την πλευρική διόγκωση. Στην περίπτωση του πυρήνα μολύβδου, δεν τον τέμνουν αλλά ο πυρήνας είναι ενιαίος και οι πλάκες τον περιορίζουν και είναι αυτές που αναγκάζουν τον πυρήνα να παραμορφωθεί πλευρικά. Για αυτό και είναι απαραίτητο ο πυρήνας μολύβδου να εφάπτεται ακριβώς στις εσωτερικές πλάκες χάλυβα. Για να επιτευχθεί αυτό ο όγκος του είναι ελάχιστα μεγαλύτερος από τον όγκο της οπής, στην οποία στη συνέχεια σφηνώνεται. Το εφέδρανο επικαλύπτεται πλευρικά από κοιτοστάκ επικαλύψεις για την προστασία των εσωτερικών

πλακών χάλυβα και του εσωτερικού καουτσούκ από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Πάνω και κάτω κλείνεται από πλάκες χάλυβα που προστατεύουν τον πυρήνα μολύβδου και επιτρέπουν τη σύνδεση του εφεδράνου με την ανωδομή και την υποδομή αντίστοιχα.

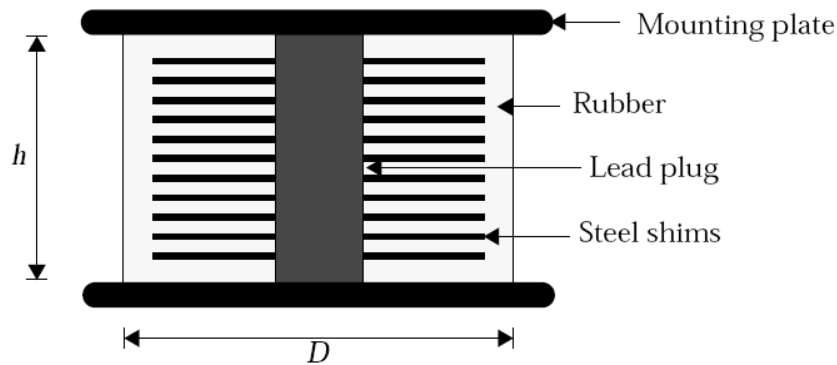


Figure 23 : Τομή ελαστομεταλλικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου

Ο πυρήνας μολύβδου σχεδιάζεται ώστε να διαρρεύσει υπό σεισμικά φορτία. Μόλις πραγματοποιηθεί η διαρροή η πλευρική δυσκαμψία του εφεδράνου μειώνεται αισθητά, ενώ οι στρώσεις του ελαστομερούς μπορούν πλέον να παραμορφωθούν αρκετά ώστε να επιμηκύνουν την ιδιοπερίοδο της κατασκευής και να απορροφήσουν την σεισμική ενέργεια.

Το εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου προσομοιώνεται ως εξής :

Θεωρείται ότι αποτελείται από δύο στοιχεία, ένα γραμμικό βισκοελαστικό υλικό, που αντιστοιχεί στο ελαστομερές και ένα γραμμικό-ιδεωδώς πλαστικό υλικό, που αντιστοιχεί στον πυρήνα μολύβδου. Το μοντέλο θεωρεί ότι η απόκριση του συστήματος είναι διγραμμική.

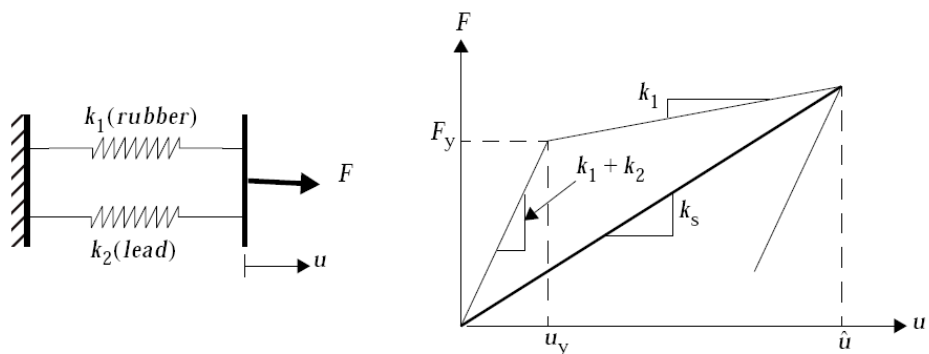


Figure 24 : Προσομοίωση του ελαστομεταλλικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου

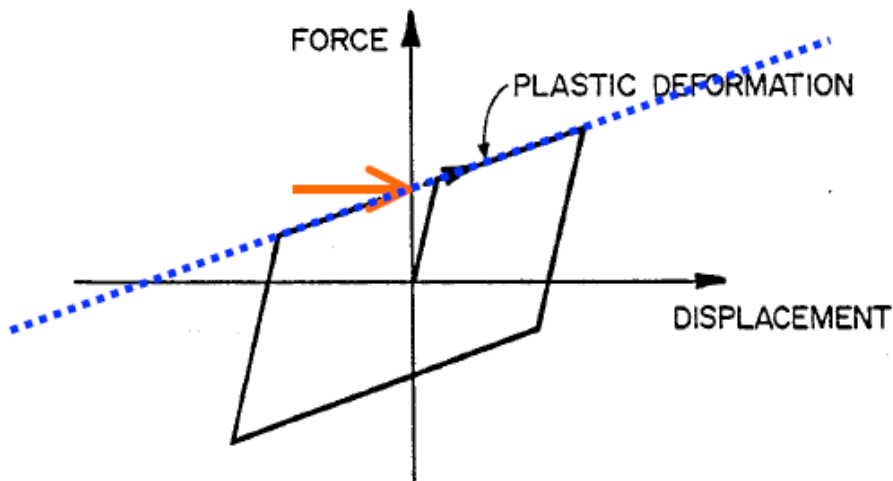


Figure 25 : Υστερητικός βρόχος ελαστομεταλλικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου

$Q_d$  : η χαρακτηριστική αντοχή του εφεδράνου

$F_y$  : η τάση διαρροής του εφεδράνου

$F_{yL}$  : η τάση διαρροής του μολύβδου σε τέμνουσα

Επειδή το ελαστομερές έχει χαμηλή αντοχή και απόσβεση, γίνεται φανερό ότι τα παραπάνω μεγέθη καθορίζονται από τον πυρήνα μολύβδου.

$$Q_d = F_y \left(1 - \frac{K_d}{K_{21}}\right)$$

$$E_y = \frac{1}{\psi} f_{yL} \frac{\pi d_L^2}{4}$$

Όπου  $\psi$  = συντελεστής φόρτισης που σχετίζεται με τον ερπυσμό του μολύβδου και παίρνει τιμές 1.0 για δυναμικά φορτία, 2.0 για φορτία λειτουργικότητας και 3.0 για αργά επιβαλλόμενα φορτία.

### ΑΚΑΜΨΙΕΣ

- Πλευρική(οριζόντια) ακαμψία :

Η ελαστική ακαμψία και η μετελαστική ακαμψία συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση :

$$K_u = n K_d$$

Όπου  $K_u$  : η ακαμψία ελαστικής φόρτισης και αποφόρτισης

$K_d$  : η μετελαστική ακαμψία

$n = 10$  για δυναμικά φορτία,  $8$  για φορτία Ο.Κ.Λ. ,  $5$  για αργά επιβαλλόμενα φορτία

Η τιμή της μετελαστικής ακαμψίας καθορίζεται κυρίως από τη μετελαστική ακαμψία του ελαστομερούς και συγκεκριμένα από τον αριθμό των στρώσεων του ελαστομερούς και από το πάχος αυτών. Αυξάνοντας οποιαδήποτε από αυτές τις ποσότητες, αυξάνεται η πλευρική ευκαμψία του εφεδράνου. Συνήθως ο μελετητής δουλεύει με συγκεκριμένο πάχος στρώσεων και αυξομειώνει τον αριθμό τους.

Η ελαστική ακαμψία του ελαστομερούς είναι :

$$K_T = \frac{G A_b}{T_r}$$

Η ελαστική ακαμψία του μολύβδου είναι :



$$K_{\text{ισαμ}} = \frac{A_{\text{ισαμ}} G_{\text{ισαμ}}}{h_{\text{ισαμ}}}$$

Ορίζοντας την πλαστιμότητα μ ως

$$\mu = \frac{u}{u_p}$$

Προκύπτει ότι

$$K_d = K_r + \frac{K_{\text{ισαμ}}}{\mu}$$

Μια τυπική τιμή για την πλαστιμότητα είναι :

$$\mu = \frac{u}{u_p} = \frac{\gamma}{\gamma_y} = \frac{0.5}{5 \times 10^{-3}} \approx 100$$

Οπότε

$$k_r = 0.1 k_{\text{ισαμ}}$$

$$K_d = 1.10 K_r$$

Δηλαδή η μετελαστική πλευρική ακαμψία του ελαστομερούς υπολογίζεται προσαυξάνοντας κατά 10% την ελαστική ακαμψία του ελαστομερούς, ώστε να συμπεριλάβει και την επίδραση του μολύβδου.

- Κατακόρυφη ακαμψία

Καθορίζεται από τα στρώματα του ελαστομερούς και θεωρείται ανεξάρτητη της φόρτισης, δηλαδή για όλο το εύρος παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην πράξη υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση :

$$k_c = \frac{E_c A_b}{T_r}$$

- Στοιχειώδη ακαμψία

Υπολογίζεται με βάση τη συντηρητική θεώρηση ότι ολόκληρο το εφέδρανο αποτελείται από το ελαστομερές, και θεωρείται ανεξάρτητη της φόρτισης ,σύμφωνα με την εξίσωση :

$$k_T = \frac{GJ}{I_T}$$

Όπου J η πολική ροπή αδράνειας

$$\text{Για κυκλικό εφέδρανο } J = \frac{\pi d^4}{32}$$

Για την ελαστική ανάλυση γίνεται χρήση της γραμμικοποιημένης(τέμνουσας) ακαμψίας και της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης. Τα  $K_{eff}$  και  $\beta_{eff}$  υπολογίζονται ως εξής :

$$K_{eff} = \frac{Q_d}{D} + K_d$$

$$\beta_{eff} = \frac{4Q_d(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{2Q_d(D - D_y)}{\pi D(Q_d + K_d D)}$$

### ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

$$\gamma_c \leq 2.5$$

$$\gamma_c + \gamma_{s,s} + \gamma_T \leq 5.0$$

$$\gamma_c + \gamma_{s,eu} + 0.5\gamma_T \leq 5.5$$

Δείκτες :

c:compression για την παραμόρφωση λόγω κατακόρυφων φορτίων

s: shear για την εγκάρσια παραμόρφωση

r: rotation για τη στροφική παραμόρφωση ως αποτέλεσμα κατακόρυφων φορτίων και

πλευρικών μετακινήσεων.

Διατμητική παραμόρφωση 100% είναι σύνηθες κριτήριο σχεδιασμού.

Συντελεστής σχήματος(S) : ορίζεται σαν το πηλίκο της κατόψεως του εφεδράνου δια την περίμετρο που είναι ελεύθερη να διογκωθεί.

Για τα ελαστομεταλλικά εφεδράνα που περιλαμβάνουν πλάκες χάλυβα πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις πριν τον υπολογισμό του συντελεστή σχήματος:[32]

-Όλες οι πλάκες χάλυβα πρέπει να έχουν το ίδιο πάχος

-Το πάχος των καλυμμάτων δεν πρέπει να υπερβαίνει το 70% του πάχους των εσωτερικών πλακών.

Συντελεστής σχήματος για μια εσωτερική στρώση:

$$S_i = \frac{LW}{2t_i(L + W)}$$

Συντελεστής σχήματος για το κάλυμμα:

$$S_{cov} = \frac{LW}{2t_{cov}(L + W)}$$

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ελαστομεταλλικών εφεδράνων πυρήνα μολύβδου είναι:

- Για μεγάλο εύρος συχνοτήτων, που περιλαμβάνει και τις συνήθεις σεισμικές συχνότητες έχουν little strain-rate dependence.
- Παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Για παράδειγμα, μετά από 20 κύκλους φόρτισης η καταναλισκόμενη ενέργεια μειώνεται μόλις 20%.
- Δεν εξαρτώνται ουσιαστικά από τη θερμοκρασία. 30% force variation για μεταβολή θερμοκρασίας κατά 60°C.
- Έχουν καλή συμπεριφορά σε «ερπυστικές» φορτίσεις και το ελαστομερές διατηρεί την ελαστική δυνατότητα επαναφοράς του εφεδράνου στην αρχική του θέση.

- Αποτελούν μια οικονομική λύση γιατί χρησιμοποιείται μία συσκευή τόσο για την αύξηση της περιόδου όσο και για την αύξηση της απόσβεσης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

---

Ιστορικά η ολίσθηση είναι η πρώτη μέθοδος σεισμικής μόνωσης που προτάθηκε στις αρχές του 20ού αιώνα. Η αρχική ιδέα ήταν η στήριξη του κτιρίου πάνω σε στρώση ταλκ ή άμμου που βρισκόταν ανάμεσα στην ανωδομή και τη θεμελίωση. Η σημερινή μορφή της ενιαίας στρώσης υλικού πάνω στο οποίο ολισθαίνει η κατασκευή είναι τα εφέδρανα ολίσθησης.

Οι πιο χαρακτηριστικοί τύποι εφεδράνων ολίσθησης είναι :

- Flat sliding bearings – επίπεδα εφέδρανα ολίσθησης
- Friction Pendulum Bearing – Εφέδρανο ολίσθησης τύπου εκκρεμούς
- TASS System
- Earthquake isolator

### 6.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Σε κάθε περίπτωση τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των εφεδράνων ολίσθησης είναι :

1) Ανοξειδωτος χάλυβας :

Πρόκειται για κράμα χάλυβα το οποίο παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση σε οξειδωση και διάβρωση. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη τουλάχιστον 11% w/w χρωμίου, το οποίο σχηματίζει μια παθητική στρώση οξειδίου του χρωμίου ( $Cr_2O_3$ ) όταν εκτίθεται στο οξυγόνο και προστατεύει έτσι το υλικό, τόσο από την ατμόσφαιρα όσο και από την υγρασία. Στην περίπτωση των εφεδράνων ολίσθησης μπορεί να είναι λιπασμένο ή όχι, ανάλογα το συντελεστή τριβής που έχει επιλεγεί κατά το σχεδιασμό. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ανοξειδωτου χάλυβα που χρησιμοποιείται είναι ο austenitic, είτε ο τύπος 304 είτε ο 316 που περιέχει και μόλυβδο και έχει βελτιωμένες ιδιότητες έναντι διάβρωσης.

## 2)PTFE/Teflon:

Το Teflon (πολυτετραφθοροαιθυλένιο) είναι ένα αδρανές πολυμερές πλαστικό με μοναδικές ιδιότητες ,όπως μεγάλο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (-200°C έως +250°C ), ανθεκτικότητα σε όλα σχεδόν τα διαβρωτικά χημικά, άριστες μονωτικές ιδιότητες σε ηλεκτρισμό, είναι άφλεκτο, δεν απορροφά υγρασία, ανθεκτικό στην υπεριώδη ακτινοβολία και με πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής. Αυτή η τελευταία ιδιότητά του το καθιστά κατάλληλο για την εφαρμογή του ως επικάλυμμα του ολισθαίνοντος σώματος του εφεδράνου ολίσθησης.[26]

## 6.2 ΕΠΙΠΕΔΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

### (FLAT SLIDING BEARINGS)

Ο απλούστερος τύπος εφεδράνου ολίσθησης είναι ο επίπεδος. Αυτό σημαίνει ότι η χαλύβδινη πλάκα πάνω στην οποία ολισθαίνει το ολισθαίνον σώμα είναι επίπεδη. Εμφανίζεται όμως σε διάφορες παραλλαγές. Το ολισθαίνον σώμα μπορεί να είναι κι αυτό μια λεπτή επίπεδη πλάκα, ή μπορεί να είναι ένα ημισφαιρικό σώμα, επίπεδο στην πλευρά που εφάπτεται με την επίπεδη πλάκα και σφαιρικό από την άλλη. Είναι πάντα επικαλυμμένο με PTFE για χαμηλό συντελεστή τριβής. Από τις παραλλαγές αυτές προτιμάται περισσότερο αυτή με το ημισφαιρικό ολισθαίνον σώμα γιατί έχει τη μικρότερη στρεπτική αντίσταση και εμφανίζει έτσι την πιο ευνοϊκή διανομή πίεσης στη διεπιφάνεια ολίσθησης.

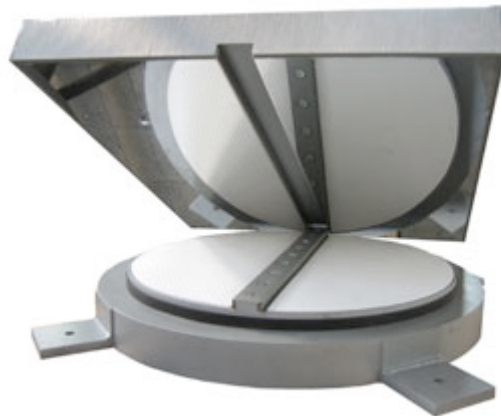


Figure 26: Παράδειγμα επίπεδου εφεδράνου ολίσθησης

Σε κάθε περίπτωση, το βασικό τους μειονέκτημα είναι η έλλειψη δύναμης επαναφοράς που σε πολλές περιπτώσεις οδήγησε σε μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις. Για αυτό χρησιμοποιούνται πλέον αποκλειστικά σε συνδυασμό με ελαστομεταλλικά εφέδρανα δημιουργώντας έτσι υβριδικά συστήματα με μεγάλη γκάμα ακαμψιών και αποσβέσεων ανάλογα με τις ανάγκες κάθε έργου.

### 6.3 ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΥΠΟΥ ΕΚΚΡΕΜΟΥΣ (FRICTION PENDULUM SLIDERS - FPS)

Το εφέδρανο ολίσθησης τύπου εκκρεμούς ονομάζεται αλλιώς και σφαιρικό εφέδρανο (spherical bearing) . Τα βασικά μέρη του FPS είναι μια κοίλη πλάκα από χάλυβα, το αρθρωτό εφέδρανο (articulated slider) και μια δεύτερη πλάκα που ονομάζεται housing plate.

Το στοιχείο που περιστρέφεται είναι κατά το ήμισυ σφαιρικό και κατά το ήμισυ κυρτό, από ανοξείδωτο χάλυβα. Η κυρτή πλευρά, επικαλυμμένη πάντα με συνθετικό υλικό χαμηλής τριβής, εφάπτεται στην κοίλη πλάκα σχηματίζοντας τη διεπιφάνεια ολίσθησης. Η κοίλη πλάκα από χάλυβα μπορεί να βρίσκεται είτε στο κάτω είτε στο άνω μέρος του εφεδράνου. Η σφαιρική πλευρά του στοιχείου επικαλύπτεται με ανοξείδωτο χάλυβα και σφηνώνεται σε μια κοιλότητα που βρίσκεται στο μέσον της housing plate, η οποία είναι επικαλυμμένη με υλικό με χαμηλό συντελεστή τριβής.

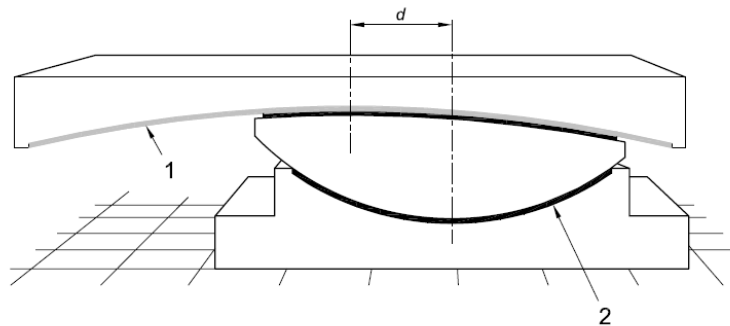


Figure 27 : Εφέδρανο ολίσθησης τύπου εκκρεμούς

Επειδή είναι κατασκευασμένο από χάλυβα, μπορεί να παραλαμβάνει πολύ μεγάλα αξονικά (κατακόρυφα) φορτία και άρα παραλαμβάνει με επιτυχία το ίδιο βάρος και τα φορτία της ανωδομής.

Είναι προφανές ότι η πλευρική του ευκαμψία είναι η αποτέλεσμα της δυνατότητας περιστροφής του πάνω στη σφαιρική διεπιφάνεια, όπως συμβαίνει με όλους τους τύπους εφεδράνων ολίσθησης. Το εύρος της



δυνατής πλευρικής μετακίνησης εξαρτάται από τις διαστάσεις του σφαιρικού εφεδράνου.

Η γεωμετρία του παρέχει τη δύναμη επαφής καταργώντας έτσι το βασικό μειονέκτημα των επίπεδων εφεδράνων ολίσθησης. Κατά την κίνηση, η μάζα ανυψώνεται και έτσι ενεργοποιείται η δύναμη επαφής, η βαρύτητα, που τείνει να επαναφέρει το εφέδρανο σε κατάσταση ευσταθούς ισορροπίας, ακριβώς όπως το εκκρεμές επανέρχεται πάντα στην αρχική του θέση. Επιπλέον, η αντίσταση της τριβής λειτουργεί επικουρικά σαν δύναμη επαφής.

Βαρύτητα :  $F_g = W \sin \theta$

Αντίσταση τριβής :  $F_f = \mu W \cos \theta$

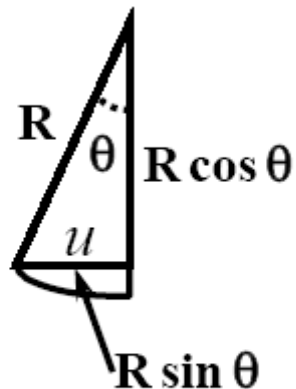


Figure 28 : Μοντέλο εκκρεμούς

Αν η μετακίνηση  $D$  είναι πολύ μικρή, τότε  $\cos \theta = 1$  και  $\sin \theta = \frac{D}{r}$

Οπότε η συνολική δύναμη επαναφοράς  $F$  είναι (Naeim and Kelly, 1999) :

$$F = \mu W + \frac{W}{r} D$$

Η περίοδος του FPS εξαρτάται αποκλειστικά από την ακτίνα και όχι από τη μάζα του εφεδράνου, όπως συμβαίνει με τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα. Έτσι ο μελετητής επιλέγοντας την ακτίνα  $r$ , επιλέγει και καθορίζει την περίοδο αλλά και την ακαμψία του εφεδράνου .

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r}{g}}$$

$$k = \frac{W}{r}$$

Όπου  $r$  η ακτίνα καμπυλότητας,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $W$  το βάρος του εφεδράνου.

Ο συντελεστής τριβής για διεπιφάνεια PTFE- ανοξείδωτου χάλυβα είναι 0.02-0.03 για χαμηλές ταχύτητες κίνησης (θερμοκρασιακές μεταβολές, ερπυσμός) και 0.10-0.15 για σεισμικές ταχύτητες. Οι διακυμάνσεις του συντελεστή τριβής λοιπόν διαφοροποιούν την απόκριση του εφεδράνου ανάλογα το είδος της φόρτισης. Αν το οριζόντιο φορτίο είναι μικρότερο από το συντελεστή στατικής τριβής του εφεδράνου αυτό παραμένει ακίνητο, ενώ αν ξεπεράσει αυτή την τιμή αυτό ταλαντώνεται (ολισθαίνει).

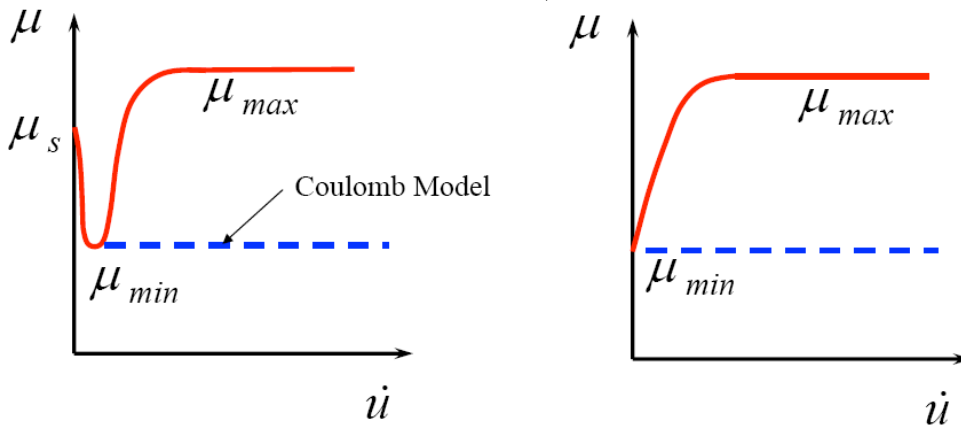
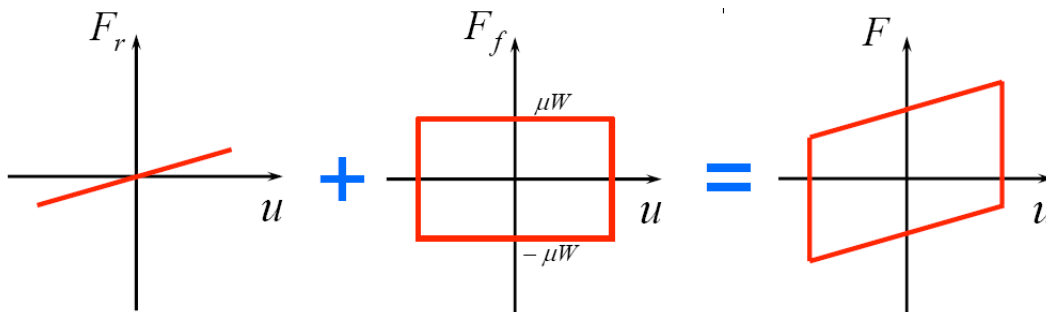


Figure 29 : Πραγματική και προσεγγιστική μεταβολή του συντελεστή τριβής  $\mu$  συναρτήσει της ταχύτητας

Η απόσβεση του εφεδράνου εξαρτάται από το συντελεστή τριβής που επιλέγεται στη διεπιφάνεια. Για να έχουμε αξιόλογη κατανάλωση ενέργειας, η επιφάνεια PTFE δεν πρέπει να είναι λιπασμένη. Ο βρόχος υστέρησης είναι απολύτως πλαστικός υστερητικός, που σημαίνει ότι καταναλώνεται μεγάλο ποσοστό ενέργειας.



Ο βρόχος, ακριβώς όπως και η δύναμη επαφής, οφείλεται σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι η βαρύτητα ( $F_r$ ) και η δεύτερη η αντίσταση της τριβής ( $F_f$ ). Η κλίση της καμπύλης  $F_r - u$  είναι  $W/r$ . Σε περίπτωση που  $F_r < F_f$  το εφέδρανο δε θα επανέλθει στην αρχική του θέση. Αυτό είναι πιο πιθανό να συμβεί όταν το εφέδρανο σχεδιάζεται με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας.[30]

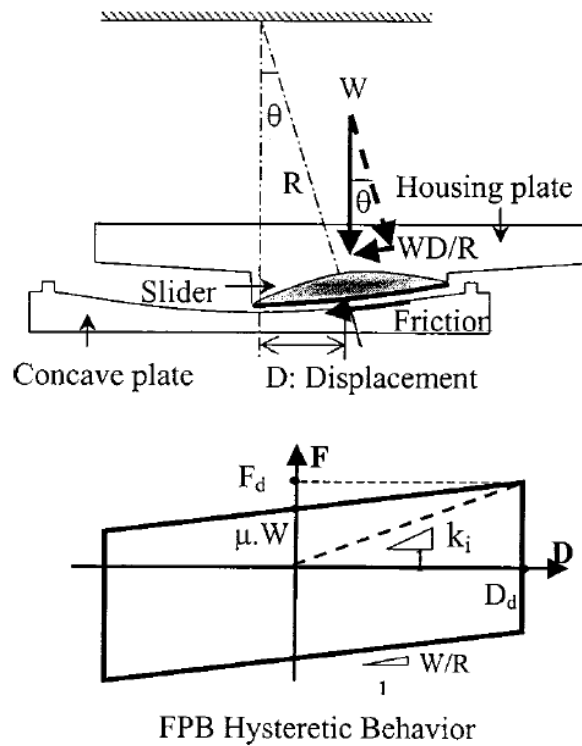


Figure 30 : Τελικός βρόχος υστέρησης εφεδράνου ολίσθησης τύπου εκκρεμούς

Η ισοδύναμη ακαμψία του εφεδράνου υπολογίζεται αν διαιρέσουμε την οριζόντια δύναμη με την αντίστοιχη μετακίνηση  $D$ .

$$K_{eff} = \frac{\mu W}{D} + \frac{W}{r}$$

Το εμβαδό του υστερητικού βρόχου είναι  $Area = 4Mwd$  οπότε η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση είναι (Naeim and Kelly, 1999) :

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\mu}{\mu + \frac{r}{D}} \right)$$

## 6.4 TASS SYSTEM

Το σύστημα TASS αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία. Η εφαρμογή αυτή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε τα κατακόρυφα φορτία να φέρονται από τα στοιχεία που είναι κατασκευασμένα από PTFE και ανοξείδωτο χάλυβα. Το εφέδρανο περιλαμβάνει όμως και έναν κυλινδρικό ή τετραγωνικό όγκο από νεοπρέν με εσωτερικά ενσωματωμένες πλάκες χάλυβα, που δε φέρει φορτία αλλά παρέχει την απαραίτητη δύναμη επαναφοράς. Ο συντελεστής τριβής κυμαίνεται από 0.05 έως 0.15 ανάλογα με την ταχύτητα ολίσθησης, με την τιμή του να αυξάνεται όταν αυξάνεται και η ταχύτητα. Το μεγάλο εύρος του συντελεστή τριβής καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη της απόκρισης του εφεδράνου. Επιπλέον, το γεγονός ότι το ελαστομερές τμήμα του εφεδράνου δε φέρει κατακόρυφα φορτία το κάνει να καταπονείται εφελκυστικά ,με κίνδυνο τη θραύση του.[6]

## 6.5 ERADIQUAKE ISOLATOR

Ένας δεύτερος τρόπος εισαγωγής μιας δύναμης επαναφοράς είναι το εφέδρανο Eradiquake. Ένας κυλινδρικός δίσκος κλείνεται από δύο επίπεδες χαλύβδινες πλάκες άνω και κάτω. Περιβάλλεται από τέσσερα ελατήρια ουρεθάνης που χρησιμοποιούνται για να επαναφέρουν το μονωτήρα στην αρχική του θέση μετά από μια πλευρική μετατόπιση. Έως σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως σε ζώνες χαμηλής ή μέτριας σεισμικότητας.

Όπως και στην περίπτωση του εφεδράνου ολίσθησης τύπου εκκρεμούς, η δύναμη επαναφοράς οφείλεται σε δύο μηχανισμούς.

Ο πρώτος είναι η αντίσταση της τριβής :

$$F_f = \mu N$$

Και ο δεύτερος είναι η δύναμη επαναφοράς των ελατηρίων :

$$F_s = k_d D$$

Όπου  $k_d$  η ακαμψία των ελατηρίων.

Η συνολική δύναμη επαναφοράς είναι το άθροισμα των παραπάνω :

$$F = \mu W + k_d D$$

Εικονίζεται ο υστερητικός βρόχος του εφεδράνου Eradiquate :

Η ισοδύναμη ακαμψία είναι :

$$K_{eff} = \frac{\mu W}{D} + k_d$$

Το εμβαδό του υστερητικού βρόχου είναι Area= 4μWD

Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση είναι :

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\mu}{\mu + \frac{k_d W}{D}} \right)$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ

---

### 7.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ

Απλά ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης δεν επαρκούν για την αποτελεσματική σεισμική μόνωση γεφυρών. Ο πρώτος λόγος είναι ότι ελλείπει πρόσθετης απόσβεσης, η επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής οδηγεί σε μεγάλες σεισμικές μετακινήσεις στις διεπιφάνειες εφεδράνων-κατασκευής που μπορούν να αποδειχθούν επιζήμιες για την κατασκευή. Απαιτούν επομένως συνδυασμό με αποσβεστήρες και έτσι αυξάνουν το κόστος. Επιπλέον, τα απλά ελαστομεταλλικά εφέδρανα αστοχούν σε χαμηλότερες γωνιακές παραμορφώσεις(150%) από αυτές που τίθενται ως στόχος από τον κανονισμό(200%).[31]

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης και με πυρήνα μολύβδου αποτελούν πιο οικονομικές λύσεις αφού αυξάνουν και την απόσβεση, πέρα από την ιδιοπερίοδο και την ευκαμψία. Τα υψηλής απόσβεσης έχουν εκτεταμένη χρήση, παρά το γεγονός ότι είναι δύσκολη η ακριβής γνώση των ιδιοτήτων και των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, ειδικά η πρόβλεψη της επίδρασης που έχουν η ιστορία της φόρτισης και οι μεταβολές της θερμοκρασίας.

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου προσφέρουν αποτελεσματικότερη σεισμική μόνωση, λόγω αυξημένης απόσβεσης της τάξης του 16% της κρίσιμης και λόγω της υψηλότερης γωνιακής παραμόρφωσης αστοχίας της τάξης του 170%, πάλι όμως χαμηλότερη από την τιμή των κανονισμών.[31] Επιπλέον, η σταθερότητα των χαρακτηριστικών τους σε μεταβολές θερμοκρασίας, σε ερπυστικές φορτίσεις και σε επαναλαμβανόμενη

φόρτιση παρέχουν σιγουριά στο μελετητή κατά το σχεδιασμό της σεισμικής μόνωσης.

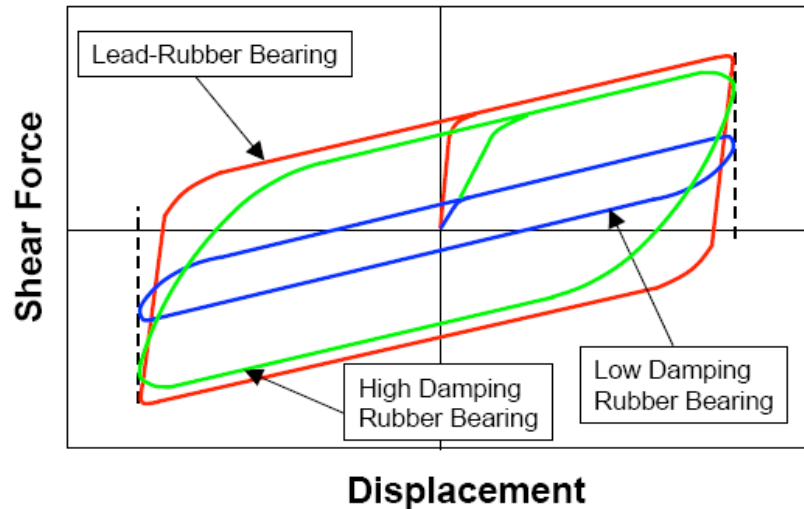


Figure 31 : Συγκριτική θεώρηση βρόχων υστέρησης απλού ελαστομεταλλικού εφεδράνου, υψηλής απόσβεσης και με πυρήνα μολύβδου.

## 7.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Η έλλειψη δύναμης επαναφοράς στα επίπεδα εφέδρανα ολίσθησης και ο απαραίτητος συνδυασμός τους είτε με συστήματα απόσβεσης είτε με ελαστομεταλλικά εφέδρανα καθιστά την επιλογή τους αντιοικονομική. Αντίθετα, τα εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς παρέχουν ικανή δύναμη επαναφοράς αλλά και καλή απόσβεση για αυτό η χρήση τους είναι περισσότερο διαδεδομένη.



### **7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ**

Θα ασχοληθούμε με τη σύγκριση των χρησιμοποιούμενων τύπων εφεδράνων από κάθε κατηγορία, δηλαδή με τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα πυρήνα μολύβδου και με τα εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς.

Από τα παραπάνω έγινε φανερό ότι η ακαμψία και η απόσβεση στην περίπτωση των εφεδράνων ολίσθησης τύπου εκκρεμούς εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και είναι εξαρχής γνωστά και καθορισμένα από το μελετητή. Αντίθετα στην περίπτωση των ελαστομεταλλικών εφεδράνων η ακαμψία και η απόσβεση εξαρτώνται από το υλικό, γεγονός που εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα. Πρώτον γιατί τα στοιχεία που δίνει ο κατασκευαστής μπορεί να μην είναι ακριβή και δεύτερον γιατί με την πάροδο των χρόνων οι ιδιότητες του υλικού μεταβάλλονται.

Όσον αφορά στη φέρουσα ικανότητα κατακόρυφων φορτίων, την οριζόντια ευκαμψία και την ιδιοπερίοδο, εφέδρανα LRB και FPS παρόμοιων διαστάσεων δίνουν ίδιες τάξεις μεγέθους.[1]

Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετακίνηση καθορίζει τις διαστάσεις κατόψεως του εφεδράνου ολίσθησης και του ελαστομεταλλικού. Στην περίπτωση των ελαστομεταλλικών το όριο για την επιτρεπόμενη μετακίνηση είναι περίπου το  $1/5$  της πλευράς, ενώ για τα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς είναι το  $1/5$  της ακτίνας καμπυλότητας.[1]

Στις περιπτώσεις όπου το κατάστρωμα της γέφυρας είναι σχετικά ελαφρύ, η αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής μέσω μείωσης της ακαμψίας δεν είναι αποτελεσματική. Συγκεκριμένα, η fixed-base period βρίσκεται στο πρώτο τμήμα (περιοχή σταθερών φασματικών επιταχύνσεων) και αύξηση της σημαίνει

μετακίνηση στο δεύτερο τμήμα της καμπύλης (περιοχή σταθερών φασματικών ταχυτήτων) οπότε αύξηση των μετακινήσεων αντί για μείωσή τους. Στις περιπτώσεις αυτές η χρήση των ελαστομεταλλικών εφεδράνων δεν ενδείκνυται, γιατί η ιδιοπερίοδός τους εξαρτάται από τη μάζα της ανωδομής. Τα εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς λύνουν το πρόβλημα αφού η ιδιοπερίοδός τους δεν εξαρτάται από τη μάζα αλλά μόνο από την ακτίνα καμπυλότητας δηλαδή από τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

## ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

---

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης στην περίπτωση των γεφυρών βρίσκεται συνήθως ανάμεσα στο κατάστρωμα και τα βάθρα. Δηλαδή τα εφέδρανα τοποθετούνται στην κορυφή των βάθρων. Αυτό επιλέγεται συνήθως για κατασκευαστικούς και οικονομικούς λόγους αλλά συνάδει και με τις απαιτήσεις του στατικού συστήματος. Είναι προφανές ότι για τα ακρόβαθρα δεν υπάρχει άλλη λύση παρά η τοποθέτηση των συσκευών ακριβώς κάτω από την πλάκα του καταστρώματος. Για τα μεσόβαθρα ωστόσο, η εναλλακτική είναι η τοποθέτηση της σεισμικής μόνωσης στο επίπεδο της θεμελίωσης.

Η τοποθέτηση στην κορυφή των βάθρων είναι ιδανική στην περίπτωση που το μεγαλύτερο μέρος της μάζας της γέφυρας είναι συγκεντρωμένο στο κατάστρωμα και τα βάθρα έχουν μικρό και μεσαίο ύψος.[1] Αυτή είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση. Έτσι τα βάθρα είναι πακτωμένα στο κάτω μέρος τους και αρθρωμένα στο άνω. Στην περίπτωση όμως που τα βάθρα είναι πολύ υψηλά και μεγάλου βάρους, η απόκρισή τους μπορεί να είναι καθοριστική για τη σεισμική απόκριση των ίδιων και της θεμελίωσης. Στις περιπτώσεις αυτές ο μελετητής πρέπει να διερευνήσει τις δυνατότητες τοποθέτησης της σεισμικής μόνωσης στο επίπεδο της θεμελίωσης. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται *rocking* και μέχρι σήμερα έχει εφαρμοστεί ελάχιστα σε γέφυρες. Ενδείκνυται για γέφυρες με βάθρα μεγάλου ύψους και λυγηρότητας ,όπως στην περίπτωση της γέφυρας South Rangitikei River Bridge στη Νέα Ζηλανδία. Στην περίπτωση αυτή ,τα βάθρα έχουν σχεδιαστεί να ανασηκώνονται σε περίπτωση σεισμικών δράσεων και στη βάση τους τοποθετήθηκαν συσκευές κατανάλωσης ενέργειας που παρέχουν τις κατάλληλες δυνάμεις επαναφοράς.

Στην περίπτωση αναβάθμισης γεφυρών, είναι φανερό ότι η τοποθέτηση της μόνωσης στην κορυφή των βάθρων παρουσιάζει πολύ λιγότερες δυσκολίες σε σχέση με την τοποθέτηση στη θεμελίωση και αποτελεί τον κανόνα έως σήμερα.

Όσον αφορά τη σύνδεση των συσκευών σεισμικής μόνωσης με την κατασκευή, για τα εφεδράνα αυτή πραγματοποιείται κοχλιωτά (αναπτύσσεται τέμνουσα και ροπή) ή με πείρους(αναπτύσσεται μόνο τέμνουσα) , και οι οπές διανοίγονται όχι στο σώμα του εφεδράνου αλλά στα άκρα των χαλύβδινων πλακών που το κλείνουν στο πάνω και στο κάτω μέρος. Εναλλακτικά, οι πλάκες μπορούν να συγκολληθούν στην ανωδομή και τα βάθρα ή να εφαρμοστούν σε εγκοπές.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

## ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ/ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### DISSIPATORS / DAMPING SYSTEMS / SYSTEM CONTROL DEVICES

#### 9.1 Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

Αναφέρθηκε στα προηγούμενα ο ευεργετικός ρόλος της απόσβεσης στην κατασκευή, τόσο για την λειτουργικότητά της υπό συνηθισμένα δυναμικά φορτία, όπως η κυκλοφορία των οχημάτων, όσο και σε εξαιρετικές περιπτώσεις δυναμικής φόρτισης όπως είναι ο ανθρωποσυνωστισμός, ο άνεμος και ο σεισμός. Η απόσβεση μειώνει τις μετακινήσεις και προστατεύει την κατασκευή από αστοχία σε κόπωση, επιπλέον δρα καταλυτικά υπέρ της στην περίπτωση του συντονισμού.

Απόσβεση υπάρχει έμφυτη στο σύστημα (inherent damping) γιατί αποτελεί χαρακτηριστικό όλων των υλικών αλλά προκύπτει και από την αλληλεπίδραση της κατασκευής με το περιβάλλον λειτουργίας της. Ο παράγοντας αυτός αμελείται για κατασκευές που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους αλλά είναι σημαντικός στις κατασκευές που λειτουργούν κατά ένα μέρος ή ολόκληρες μέσα σε θαλάσσιο περιβάλλον. Η έμφυτη απόσβεση της κατασκευής οφείλεται κατά 90% στην απόσβεση που προκύπτει στα σημεία των συνδέσεων, γιατί τα δομικά στοιχεία κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα και σκυρόδεμα, υλικά με μικρό συντελεστή απωλειών  $n$  (loss factor). Σύμφωνα με τους κανονισμούς NEHRP του 2003, κεφ.15, η έμφυτη απόσβεση της κατασκευής δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερη από 5% της κρίσιμης απόσβεσης για όλες τις ιδιομορφές.

Υλικό	n (loss factor)
Δομικός χάλυβας	0.001-0.008
Σκυρόδεμα	0.01-0.06

Η έμφυτη απόσβεση είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό της απαιτούμενης για τη σωστή συμπεριφορά της κατασκευής. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορες συσκευές που στόχο έχουν την εισαγωγή πρόσθετης απόσβεσης (added damping) στο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι η σεισμική ενέργεια δεν απορροφάται από το φέροντα οργανισμό της κατασκευής οπότε αυτός δεν υφίσταται βλάβες. Έτσι μετά από σεισμικά γεγονότα η κατασκευή δε διακόπτει τη λειτουργία της. Οι βλάβες, αν υπάρχουν, εντοπίζονται στις συσκευές πρόσθετης απόσβεσης και το κόστος αποκατάστασής τους είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το κόστος αποκατάστασης δομικών στοιχείων, όπως οι πλάκες και οι δοκοί.

Οι κύριες απαιτήσεις του πρόσθετου συστήματος απόσβεσης είναι :

1. Απορρόφηση της ενέργειας που εισάγεται στο σύστημα
2. Μείωση της απαίτησης για κατανάλωση ενέργειας από τα κύρια δομικά στοιχεία της κατασκευής
3. Μείωση των σχετικών μετακινήσεων των μελών της κατασκευής
4. Παροχή επιπλέον ακαμψίας (προαιρετική, αν είναι ευεργετική)
5. Εύκολη αντικατάσταση σε περίπτωση βλαβών

Όλες οι συσκευές εισαγωγής πρόσθετης απόσβεσης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το αν απαιτούν προσφορά εξωτερικής ενέργειας για τη λειτουργία τους. Έτσι διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά συστήματα απόσβεσης. Τα τελευταία είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο σήμερα σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Η διεθνής βιβλιογραφία αναφέρει ξεκάθαρα ότι η χρήση παθητικών συστημάτων απόσβεσης ενέργειας μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη δυναμική απόκριση της κατασκευής (Hanson et al.1993, Soong and Constantinou 1994, Sadek et al. 1996, Soong and Dargush 1997).

## 9.2 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

Τα παθητικά συστήματα απόσβεσης δεν απαιτούν προσφορά εξωτερικής ενέργειας για τη λειτουργία τους. Συνήθως αποτελούνται από ένα ελατήριο που αμβλύνει τις δονήσεις και έναν ιξώδη αποσβεστήρα που τερματίζει την ταλάντωση και σχεδιάζονται να παρέχουν συγκεκριμένη απόσβεση, ανάλογα με τις δυναμικές φορτίσεις που ο μελετητής κρίνει ότι θα εμφανιστούν στη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Οι βασικές αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία των περισσότερων παθητικών συστημάτων απόσβεσης είναι :

Αρχή λειτουργίας	Συσκευή
Παραμόρφωση ιξοελαστικών υλικών	Στερεοί, Υγροί ιξοελαστικοί αποσβεστήρες
Ροή υγρού μέσα από κοιλότητες	Ιξώδεις αποσβεστήρες
Διαρροή μετάλλου	Αποσβεστήρες μεταλλικής διαρροής
Τριβή	Αποσβεστήρες τριβής

Μια συνήθης κατηγοριοποίηση των παθητικών συστημάτων απόσβεσης ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους εξετάζει το αν η καμπύλη δύναμης-μετακίνησης εξαρτάται από την ταχύτητα ή από τη μετακίνηση. Συναντώνται έτσι συχνά οι όροι *velocity-dependent devices* (συσκευές εξαρτώμενες από την ταχύτητα) και *displacement-dependent devices* (συσκευές εξαρτώμενες από τη μετακίνηση).

Επειδή όμως πολλές συσκευές εξαρτώνται και από τις δύο αυτές παραμέτρους, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η συχνότητα της κίνησης, η επικρατέστερη θεωρία είναι η κατηγοριοποίηση των συσκευών σε :

- Μη εξαρτώμενες από την ταχύτητα και τη συχνότητα της κίνησης (*rate independent devices*)
- Εξαρτώμενες είτε από την ταχύτητα, είτε από τη συχνότητα (*rate dependent devices*)
- Άλλες

## 9.2.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΗ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

### *Rate independent devices*

Στην περίπτωση που ο βρόχος υστέρησης της συσκευής, δηλαδή η καμπύλη δύναμης- μετακίνησης σε κυκλική φόρτιση δεν εξαρτάται ούτε από την ταχύτητα ούτε από τη συχνότητα της κίνησης, η παράμετρος που καθορίζει τη μορφή του είναι η μετακίνηση. Οι συσκευές αυτές ονομάζονται και υστερητικές. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αποσβεστήρες τριβής και οι αποσβεστήρες μεταλλικής διαρροής.

- Αποσβεστήρες τριβής

Η λειτουργία των αποσβεστήρων τριβής στηρίζεται στην απορρόφηση ενέργειας μέσω της τριβής κατάλληλα διαμορφωμένων διεπιφανειών που αποδίδεται με μορφή θερμότητας. Οι δυνάμεις τριβής ενεργοποιούνται με κύλιση ή στροφή των επιφανειών σε αντίθετες διευθύνσεις.

Ένας τέτοιος αποσβεστήρας αποτελείται από δύο ή περισσότερες (συνήθως τρεις) χαλύβδινες πλάκες που στρέφονται σε διαφορετικές διευθύνσεις. Οι χαλύβδινες πλάκες διαχωρίζονται από λεπτές πλάκες από υλικό με υψηλό συντελεστή τριβής.

Συνήθως εμφανίζουν βρόχο (rigid plastic) απολύτως πλαστικό. Για την απόκριση γίνεται χρήση του μοντέλου Coulomb και οι βρόχοι υστέρησης είναι ορθογωνικοί. Η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγάλη ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες. Δυστυχώς η ισοδύναμη ακαμψία τους είναι μεγάλη όταν οι κινήσεις είναι μικρές και η μη γραμμική τους απόκριση περιπλέκει το σχεδιασμό.

Τοποθετούνται συνήθως στους συνδέσμους (bracing systems) ή στη διασταύρωση των συνδέσμων.



- Αποσβεστήρες μεταλλικής διαρροής

Η ενέργεια απορροφάται μέσω της διαρροής του μεταλλικού στοιχείου στο εσωτερικό του αποσβεστήρα. Τα μέταλλα εμφανίζουν σταθερή υστερητική συμπεριφοράς αλλά η απόκρισή τους σε κυκλική φόρτιση είναι συνήθως διγραμμική ή τριγραμμική και περιπλέκει το σχεδιασμό.

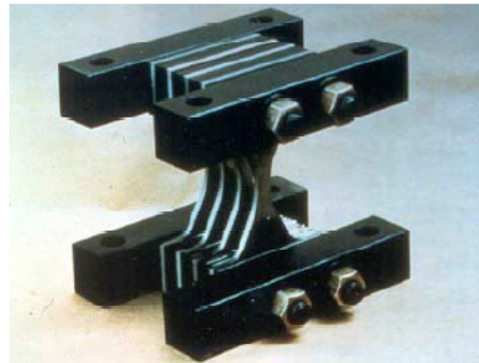


Figure 32 : Μεταλλικός αποσβεστήρας

Τα πλεονεκτήματα των αποσβεστήρων μεταλλικής διαρροής είναι η σταθερή υστερητική απόκριση, η μη εξάρτηση από τη θερμοκρασία και η εύκολη και φθηνή κατασκευή και παραγωγή. Βασικό μειονέκτημά τους είναι ο περιορισμένος αριθμός κύκλων φόρτισης, λόγω κινδύνου αστοχίας από κόπωση. Αυτό σημαίνει ότι μετά από μεγάλα σεισμικά γεγονότα απαιτείται συνήθως αντικατάστασή τους. Επιπλέον, η σύνδεση τους πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτη ώστε να εξασφαλίζεται ίση μετακίνηση του αποσβεστήρα και του στοιχείου με το οποίο συνδέεται. Πολλές φορές μια τέτοια σύνδεση κοστίζει περισσότερο από την ίδια τη συσκευή.

Μια παραλλαγή του μεταλλικού αποσβεστήρα είναι το unbonded brace.(μη δεσμευμένη δοκός). Ο τύπος αυτός αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία στα μέσα της δεκαετίας του '80 (Kimura et al. 1976, Watanabe et al. 1988) και έχει βρει πολλές εφαρμογές. Σκοπός ήταν η ανάπτυξη μιας συσκευής που καταναλώνει ενέργεια αλλά δεν κινδυνεύει σε λυγισμό. Αποτελείται από μια σταυροειδή χαλύβδινη δοκό εγκιβωτισμένη σε ένα τετραγωνικό χαλύβδινο σωλήνα. Το κενό συμπληρώνεται με ειδικό κονίαμα. Η αξονική δύναμη παραλαμβάνεται από το σταυροειδή πυρήνα ενώ το κονίαμα και το εξωτερικό περίβλημα αποκλείουν την εμφάνιση

λυγισμού. Στη διεπιφάνεια πυρήνα και κονιάματος μια λεπτή στρώση υλικού εξουδετερώνει τις διατμητικές δυνάμεις, έτσι ο πυρήνας μπορεί να θλίβεται και να εφελκύεται απαλλαγμένος από τριβές. Σχεδιάζεται να έχει ίσες αντοχές σε θλίψη και εφελκυσμό.

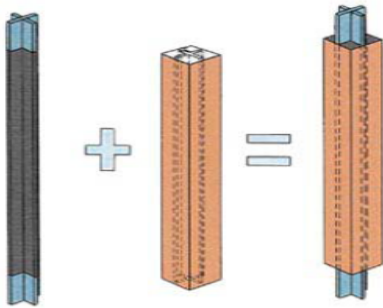


Figure 33: Unbonded brace

## 9.2.2 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

### *Rate dependent devices*

Ο βρόχος υστέρησης εξαρτάται είτε από την ταχύτητα είτε από τη συχνότητα της κίνησης. Το γεγονός αυτό όμως δεν αποκλείει να εξαρτάται και από τη μετακίνηση. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν solid viscoelastic , fluid viscoelastic, viscous fluid ).

Το κοινό χαρακτηριστικό των συσκευών που εξαρτώνται από την σχετική ταχύτητα των άκρων τους είναι ότι κατασκευάζονται από ιξώδη ή ιξοελαστικά υλικά. Στην κατηγορία των ιξοελαστικών υλικών ανήκουν τα περισσότερα πολυμερή. Η ικανότητα απόσβεσης ενέργειας προκύπτει από τη μορφή του μοριακού δικτύου των πολυμερών μετά την παραμόρφωσή τους. Η μοριακή δομή

εξαρτάται έντονα από τη συχνότητα της κίνησης και τη θερμοκρασία, επομένως οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της απόσβεσης.

Σήμερα υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής μεγάλης ποικιλίας ισοελαστικών υλικών, όσον αφορά τις ιδιότητες της απόσβεσης, τις αντοχές και τη συμπεριφορά σε ερπυσμό, για λειτουργία σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων και θερμοκρασιών.

- Υγροί ιξώδεις αποσβεστήρες (fluid viscous dampers)

Ονομάζονται αλλιώς και υδραυλικοί αποσβεστήρες. Πρόκειται για τον πιο συνηθισμένο τύπο αποσβεστήρα που χρησιμοποιείται στις γέφυρες από το 1970 είτε αυτές είναι σεισμικά μονωμένες είτε όχι.

Καθαρή ιξώδης απόσβεση μπορεί να παραχθεί μέσω εξαναγκαζόμενης ροής υγρού μέσα από κοιλότητες (Constantinou and Symans 1993, Soong and Constantinou 1994). Η διάταξη περιλαμβάνει ένα έμβολο από ανοξείδωτο χάλυβα με κεφαλή από χαλκό. Η κεφαλή του εμβόλου αξιοποιεί ειδικά διαμορφωμένα μονοπάτια που οδηγούν/αλλάζουν τη ροή του υγρού και έτσι μεταβάλλουν την αντίσταση του αποσβεστήρα. Κατά τη διάρκεια της δόνησης το υγρό κινείται από τη μία πλευρά του εμβόλου στην άλλη. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν διάφοροι τύποι υγρών με βάση τη σιλικόνη (silicon based fluids) ,παρουσίαζαν όμως προβλήματα λόγω της διόγκωσής τους με την αύξηση της θερμοκρασίας και λόγω του ότι η σιλικόνη τείνει να σχηματίζει φυσαλίδες υπό αρνητική πίεση.

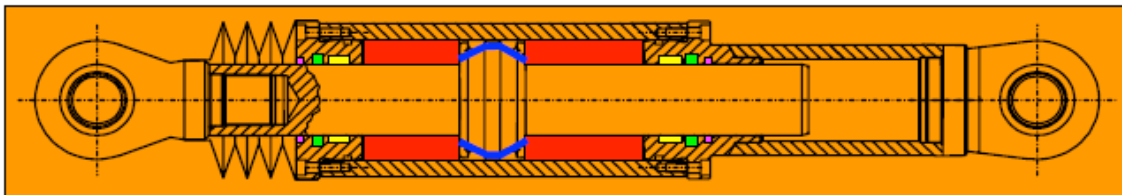


Figure 34: Διατομή ιξώδους αποσβεστήρα της εταιρίας Maurer Soehne

Από άποψη λειτουργίας αλλά και κατασκευής οι ιξώδεις αποσβεστήρες έχουν συγγένεια με το σύστημα απορρόφησης κραδασμών των αυτοκινήτων (αναρτήσεις και ελατήρια). Το έμβολο μεταφέρει την εισαγόμενη από το σεισμό ενέργεια στο υγρό του αποσβεστήρα, προκαλώντας την κίνησή του στο εσωτερικό. Η ροή του υγρού απορροφά την κινητική ενέργεια αποδίδοντας θερμότητα.

Πρώτος στόχος της τοποθέτησης υδραυλικών αποσβεστήρων είναι η μείωση της επιρροής των θερμοκρασιακών μεταβολών και του ερπυσμού στην κατασκευή. Στην περίπτωση που η σχετική μετακίνηση των άκρων του αποσβεστήρα είναι αποτέλεσμα των παραπάνω, αυτός αναπτύσσει αμελητέα αντίδραση στην κατασκευή. Αλλά και στην περίπτωση έντονων δυναμικών φορτίσεων η μέγιστη αντίδραση του αποσβεστήρα είναι γνωστή και ανεξάρτητη από τη συχνότητα της επιβαλλόμενης φόρτισης.

Η δύναμη που αναπτύσσει ο υδραυλικός αποσβεστήρας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$F = C\Delta^\alpha \dot{\Delta}$$

Όπου  $\alpha$  είναι εκθέτης με εύρος τιμών από 1.0 έως 2.0, με τιμή 1.0 για γραμμικούς υδραυλικούς αποσβεστήρες.

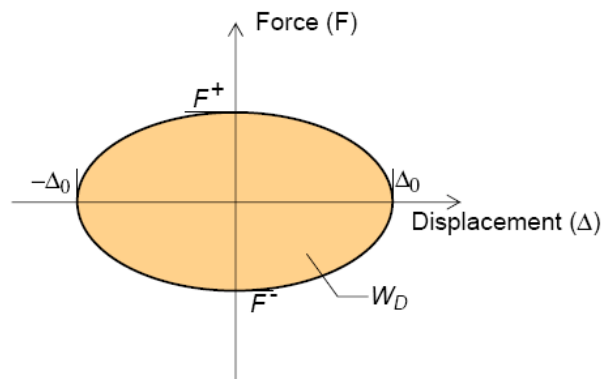


Figure 35 : Βρόχος υστέρησης γραμμικού ιξώδους αποσβεστήρα

Οι ιξώδεις αποσβεστήρες σχεδιάζονται είτε σαν ιδανικοί αποσβεστήρες, που παράγουν δηλαδή μόνο δύναμη απόσβεσης, είτε σαν συνδυασμός ελατηρίου-αποσβεστήρα, οπότε σε υψηλές συχνότητες αναπτύσσουν και ακαμψία.

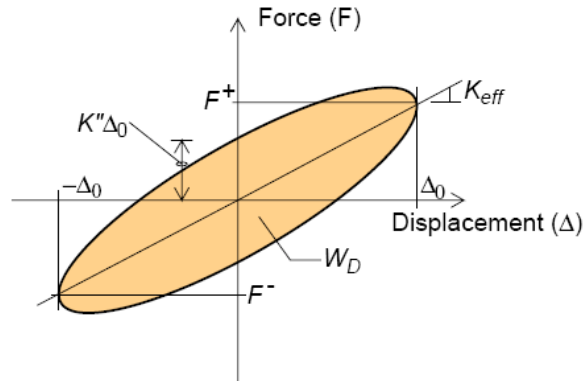
Η διάρκεια ζωής τους περιορίζεται αποκλειστικά από τη φθορά των καπακιών τους (seals) και πολλοί κατασκευαστές εγγυώνται διάρκεια ζωής περίπου 40 έτη χωρίς απαίτηση συντήρησης. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους έχει μεγάλο εύρος, από  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $70^{\circ}\text{C}$ . Δεν υπάρχει κίνδυνος διαρροής του υγρού, η

εγκατάσταση είναι σχετικά απλή και οι διαστάσεις σχετικά μικρές. Τυπικές διαστάσεις υδραυλικών αποσβεστήρων είναι 170-700mm για τη διάμετρο του εμβόλου και 800-4500mm για το μήκος.

- Στερεοί ιξοελαστικοί αποσβεστήρες (solid viscoelastic dampers)

Οι στερεοί ιξοελαστικοί αποσβεστήρες αποτελούνται από συμπιεσμένες στρώσεις ακρυλικών πολυμερών. Η ενέργεια καταναλώνεται μέσω της διατμητικής παραμόρφωσης των στερεών πολυμερών. Αυτά κατά την παραμόρφωση τους επιδεικνύουν συμπεριφορά ανάμεσα σε ελαστικό στερεό και ιξώδες υγρό. Η προσομοίωσή τους γίνεται με το μοντέλο Kelvin που περιλαμβάνει ελατήριο και αποσβεστήρα συνδεδεμένα παράλληλα. Η ακρίβεια της προσομοίωσης με το μοντέλο Kelvin είναι ικανοποιητική στις περισσότερες περιπτώσεις.

Οι μηχανικές τους ιδιότητες εξαρτώνται από τη συχνότητα, τη θερμοκρασία και το εύρος της κίνησης. Εικονίζεται ο βρόχος δύναμης-μετατόπισης ενός στερεού ιξοελαστικού αποσβεστήρα υπό ημιτονοειδή κίνηση με εύρος  $\Delta_0$  και συχνότητα  $\omega$ .



Η δύναμη  $F$  του αποσβεστήρα μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την εξίσωση :

$$F = K_{eff}\Delta + C\dot{\Delta}$$

Όπου  $K_{eff}$  η ισοδύναμη ακαμψία ,  $\Delta$  η σχετική μετακίνηση και  $\dot{\Delta}$  η σχετική ταχύτητα των άκρων του αποσβεστήρα.

Ο συντελεστής απόσβεσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση :

$$c = \frac{W_D}{\pi\omega\Delta_0^2}$$

Όπου  $W_D$  το εμβαδό του βρόχου.

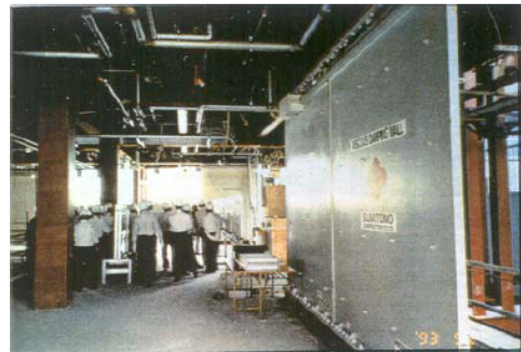
Αποτελούν οικονομική και αποτελεσματική λύση ιδιαίτερα για την περίπτωση των ανεμοφορτίσεων αλλά παρουσιάζουν ένα βασικό μειονέκτημα, την έντονη εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Αυτό περιλαμβάνει και τη θερμοκρασία λειτουργίας τους αλλά και την αύξηση της θερμοκρασίας τους κατά τη διέγερση. Για το λόγο αυτό δεν ενδείκνυται η χρήση τους σε γέφυρες.

- Υγροί ισοελαστικοί αποσβεστήρες (fluid viscoelastic dampers)

Όπως και στην περίπτωση των στερεών ισοελαστικών αποσβεστήρων, η αρχή λειτουργίας είναι η διατμητική παραμόρφωση των ισοελαστικών υγρών.

Διαφέρουν όμως στο ότι η ισοδύναμη ακαμψία τους υπό στατικά φορτία είναι μηδενική. Επίσης, ο λόγος  $K^*/K_{eff}$  δηλαδή ο λόγος απολεσθείσας ακαμψίας προς ισοδύναμης ακαμψίας στους υγρούς ιξοελαστικούς αποσβεστήρες τείνει στο άπειρο ενώ στους στερεούς τείνει στο μηδέν για πολύ μικρές συχνότητες διέγερσης. Προσομοιώνονται με μοντέλο Maxwell το οποίο περιλαμβάνει ελατήριο και αποσβεστήρα συνδεδεμένα σε σειρά.

Figure 36 : Ένα γνωστό παράδειγμα υγρού ιξοελαστικού αποσβεστήρα είναι ο ιξώδης τοίχος απόσβεσης (viscous damping wall).



### **9.2.3 ΑΛΛΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ**

Υπάρχουν αποσβεστήρες που δεν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την εξάρτηση του βρόχου υστέρησής τους από την ταχύτητα και τη συχνότητα. Τέτοιοι είναι για παράδειγμα τα κράματα με μνήμη σχήματος (shape memory alloys) τα οποία υφίστανται μια αναστρέψιμη παραμόρφωση κατά την οποία επιδεικνύουν υπερελαστική συμπεριφορά.

Μια σχετικά νέα συσκευή που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των μηχανισμών καθαρής τριβής και των ιξοελαστικών υλικών είναι ο ιξοελαστικός αποσβεστήρας τριβής (friction – viscoelastic damper device F-VEDD ). Η συσκευή αποτελείται από χαλύβδινες πλάκες που διαχωρίζονται από πλάκες πολυμερών (ιξοελαστικών) υλικών. Ένας προεντεταμένος κοχλίας σε συνδυασμό με ελατήρια-δίσκους χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των πλακών όπως και στην κλασική περίπτωση των αποσβεστήρων τριβής.

### **9.3 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ**

Τα ενεργητικά συστήματα απόσβεσης απαιτούν προσφορά εξωτερικής ενέργειας για τη λειτουργία τους. Αυτό συμβαίνει γιατί περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά όργανα. Η διάταξή τους αποτελείται από ένα ή περισσότερα επιταχυνσιόμετρα τα οποία καταγράφουν την κίνηση στο σημείο τοποθέτησης του συστήματος απόσβεσης. Το σήμα τους ενεργοποιείται από ένα πιεζοηλεκτρικό δίσκο και εισάγεται σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα. Όπως και στην περίπτωση των παθητικών συστημάτων υπάρχει πάλι ένα ελατήριο για την άμβλυση των δονήσεων αλλά ο ιξώδης αποσβεστήρας με τα καθορισμένα από το μελετητή χαρακτηριστικά της απόσβεσης αντικαθίσταται από έναν ενεργοποιητή (actuator). Αυτός ενεργοποιείται από ένα σήμα ανάλογο της απόλυτης ταχύτητας της υπερκείμενης μάζας και παράγει την κατάλληλη δύναμη για την απόσβεση της συγκεκριμένης δόνησης. Σε κάθε έργο που περιλαμβάνει ενεργητικά συστήματα απόσβεσης υπάρχει σταθμός για την παρακολούθησή τους.

Η διάταξη κατασκευάζεται με τρόπο ώστε μετράται η εισαγόμενη στον ενεργοποιητή δόνηση και συγκρίνεται με τη δύναμη που αυτός ανέπτυξε. Έτσι το



σύστημα «αυτό-ελέγχεται» συνεχώς και σε περίπτωση βλάβης στέλνει μήνυμα σφάλματος στα όργανα παρακολούθησής του.

#### **9.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ – ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ**

Βασικές διαφορές ενεργητικών και παθητικών συστημάτων απόσβεσης

ΠΑΘΗΤΙΚΑ	ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ
Δεν απαιτούν προσφορά ενέργειας	Απαιτούν προσφορά ενέργειας
Έχουν σταθερή απόσβεση (αλλάζει μόνο με την πάροδο των χρόνων – ageing)	Η απόσβεση ανταποκρίνεται στο εκάστοτε ερέθισμα
Ιξώδης αποσβεστήρας	Actuator - Ενεργοποιητής
Οι συσκευές ελέγχονται από συνεργείο σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα	Το σύστημα «αυτο – ελέγχεται»
Μία συσκευή αποκρίνεται σε όλους του βαθμούς ελευθερίας	Ένας ενεργοποιητής για κάθε βαθμό ελευθερίας

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ενεργητικών συστημάτων απόσβεσης είναι η δυνατότητα να λειτουργήσουν σε όλο το εύρος της μεσαίας περιοχής ιδιοπεριόδων , όπου υπάρχει μεγάλο ενδεχόμενο εμφάνισης του φαινομένου του συντονισμού. Αντίθετα, τα παθητικά συστήματα απόσβεσης σχεδιάζονται συνήθως σε υψηλές ιδιοπεριόδους , περίπου 0.2-0.5 sec.

Επιπλέον, ενώ μια συσκευή παθητικού ελέγχου, όπως ένας ιξώδης αποσβεστήρας αποκρίνεται σε μετακίνηση οποιασδήποτε διεύθυνσης, ο ενεργοποιητής του συστήματος ενεργητικής απόσβεσης παράγει δύναμη απόσβεσης σε μία μόνο μετακίνηση. Αυτό σημαίνει ότι για τους 6 βαθμούς ελευθερίας απαιτούνται έξι ενεργοποιητές σε κάθε διάταξη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

## ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΚΟΠΙΜΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

---

Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης εξαρτάται από το κατά πόσο είναι αναγκαία, από το αν η προτεινόμενη κατασκευή είναι κατάλληλη για να μονωθεί σεισμικά και από το αν είναι οικονομικά συμφέρουσα συγκρινόμενη με εναλλακτικές λύσεις (Mayes et al. 1990).

### **10.1 ΕΥΝΟΪΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ**

Η λύση της σεισμικής μόνωσης είναι ιδανική σε περιπτώσεις περιοχών υψηλής σεισμικότητας, στην περίπτωση έργων με αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας όπου απαιτείται δυνατότητα άμεσης λειτουργίας μετά από σεισμό, όταν είναι επιθυμητές μειωμένες πλευρικές δυνάμεις και όταν η κατασκευή είναι παλαιότερη και δε συνάδει με τους τρέχοντες κανονισμούς.

Μια κατασκευή θεωρείται κατάλληλη να μονωθεί σεισμικά αν πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις :

- Αν οι συνθήκες του εδάφους δεν οδηγούν σε μεγάλες περιόδους σεισμικής διέγερσης, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος εξίσωσης της μεγάλης περιόδου της σεισμικής διέγερσης με την αυξημένη ιδιοπερίοδο της κατασκευής, γεγονός που οδηγεί σε συντονισμό και άπειρα βέλη (πρόκειται για τα εδάφη τύπου Δ σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ. το φάσμα των οποίων είναι μεγεθυμένο).
- Αν η κατασκευή έχει ύψος μικρότερο από 10-15 ορόφους και λόγο ύψους προς πλάτος τέτοιο που να μην κινδυνεύει από ανατροπή (για κτίρια).
- Η τοποθεσία εδαφικά επιτρέπει το απαιτούμενο μέγεθος κίνησης στη βάση σχετικά με το έδαφος.
- Το σχήμα του φάσματος απόκρισης του αναμενόμενου σεισμικού κραδασμού πρέπει να ελέγχεται όσον αφορά το συχνοτικό του περιεχόμενο. Στην περίπτωση το φάσμα απόκρισης δίνει υψηλές τιμές

επιτάχυνσης σε μεγάλες ιδιοπεριόδους, η τεχνητή επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου π.χ. μέσω σεισμικής μόνωσης μπορεί να αποδειχθεί καταστροφική για την κατασκευή. Στις περιπτώσεις αυτές η μέθοδος της σεισμικής μόνωσης εφαρμόζεται αλλά όχι με σκοπό την επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου.

- Τα μη σεισμικά πλευρικά φορτία, όπως αυτά του ανέμου υπολογίζονται λιγότερο από 10% του βάρους της κατασκευής. Αυτό ισχύει σχεδόν πάντα στην περίπτωση των γεφυρών, αλλά είναι αντικείμενο μελέτης για τα πολυώροφα κτίρια. Γενικά, για τη σωστή λειτουργία των συσκευών σεισμικής μόνωσης είναι βασική προϋπόθεση του σχεδιασμού τα φορτία του ανέμου να είναι μικρότερα από τα σεισμικά, ώστε για τον άνεμο οι συσκευές να συμπεριφέρονται ελαστικά αλλά σε περίπτωση σεισμού να διαρρέουν.

Σύμφωνα με τους Calvi, Priestley [1], τα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει μια γέφυρα για να θεωρηθεί κατάλληλη να μονωθεί σεισμικά είναι :

- Άκαμπτα βάθρα και μικρή περίοδο ελεύθερης ταλάντωσης (fixed-base period).
- Έντονη μη κανονικότητα στη γεωμετρία της, για παράδειγμα τα βάθρα που αναλαμβάνουν τις σεισμικές δυνάμεις είτε είναι πολύ δύσκαμπτα είτε παρουσιάζουν έντονες διαφορές δυσκαμψίας (π.χ. βάθρα διαφορετικού ύψους).
- Να βρίσκεται σε τοποθεσία όπου τα φάσματα απόκρισης δίνουν μεγάλες τιμές σε μικρές ιδιοπεριόδους. Αυτό συνήθως σημαίνει μικρά εστιακά βάθη, κοντινά ρήγματα και θεμελίωση σε βράχο.

## 10.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Όσο για το αν η σεισμική μόνωση μιας κατασκευής είναι οικονομικά συμφέρουσα, πρέπει να εκτιμηθούν διάφοροι παράγοντες. Πρώτον, το αρχικό κόστος για την προμήθεια των συσκευών, τη μελέτη και την εγκατάσταση, που μπορεί να περιλαμβάνει αλλαγές στην κατασκευή. Έπειτα, η συντήρηση του συστήματος, τακτική και μετά από σεισμικά γεγονότα, και η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του, το κόστος πιθανής αντικατάστασης και όλα αυτά σε μελλοντικές τιμές, με βάση τα στοιχεία του πληθωρισμού.

Στην περίπτωση των κτιρίων και άλλων κατασκευών πλην των γεφυρών, το έργο έχει χαμηλότερο αρχικό κόστος ως στατικό σύστημα, μειωμένο χρόνο κατασκευής, κινδυνεύει λιγότερο από σεισμούς οπότε είναι λιγότερο πιθανό να αντιμετωπίσει τραυματισμούς, θανάτους και ζημιές και ο κύριος του έργου πληρώνει χαμηλότερα ασφάλιστρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι αυτοκινητόδρομοι, όπου η ασφάλεια αστικής ευθύνης από τον κύριο του έργου είναι υποχρεωτική. Ειδικά για τις γέφυρες, η μείωση του κόστους κατασκευής δεν αφορά το κατάστρωμα που σχεδιάζεται πάντα ελαστικά. Αφορά όμως τα βάθρα για τα οποία δεν είναι απαραίτητη η πρόβλεψη σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στην κεφαλή και τον πόδα. Η επικρατέστερη αντίληψη είναι ότι η σεισμική μόνωση παρέχει το χαμηλότερο δυνατό κόστος για να επιτευχθεί η επιθυμητή σεισμική απόκριση.

Γενικά είναι προτιμότερο, για οικονομικούς και κατασκευαστικούς λόγους, να προβλέπεται από το μελετητή και να τοποθετείται εξ αρχής στην κατασκευή. Η τοποθέτηση συσκευών σεισμικής μόνωσης σε γέφυρες με μονολιθική σύνδεση καταστρώματος και βάθρων είναι δαπανηρή και σπανίως επιλέγεται ως τρόπος αναβάθμισης της σεισμικής απόκρισης. Στις περιπτώσεις αναβάθμισης παλαιών κατασκευών, ώστε αυτές να συμμορφώνονται με τους τρέχοντες κανονισμούς, προκύπτουν επιπλέον και κατασκευαστικά θέματα που περιορίζουν το μηχανικό όσον αφορά την επιλογή των συσκευών και αυξάνουν το κόστος.

Ειδικά στην περίπτωση των γεφυρών, το οικονομικό ζήτημα δεν είναι αυτό που πρωταρχικά θα καθορίσει αν θα γίνει χρήση συστήματος σεισμικής μόνωσης, γιατί συνήθως απαιτείται απλή αντικατάσταση των συμβατικών εφεδράνων, που αντιμετωπίζουν τις θερμοκρασιακές μεταβολές, με εφέδρανα σεισμικής μονώσεως. Επειδή το κόστος των εφεδράνων είναι περίπου το 1-2% του συνολικού κόστους κατασκευής μιας γέφυρας, το αυξημένο κόστος τοποθέτησης εφεδράνων σεισμικής μονώσεως αντί των συμβατικών δε θεωρείται σημαντικό (Billings et al. ,1985).

### **10.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ**

Όσον αφορά το είδος των συσκευών σεισμικής μόνωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, πρέπει να ληφθούν υπόψη κυρίως οι επόμενοι παράγοντες :

- Το αξονικό φορτίο που θα πρέπει να παραληφθεί από τα εφέδρανα. Συνήθως τα εφέδρανα ολίσθησης έχουν μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα κατακόρυφου αξονικού φορτίου σε σχέση με τα ελαστομεταλλικά.
- Η παραμορφωσιμότητα υπό τα μη σεισμικά φορτία (πχ. αρχική κατακόρυφη ακαμψία).
- Η απαιτούμενη τάση και μετακίνηση διαρροής.
- Η μετακίνηση θραύσεως και η συμπεριφορά στη μετελαστική περιοχή.
- Η δυνατότητα επαναφοράς και το μέγεθος της δύναμης αυτής.
- Ο υπάρχων ελεύθερος χώρος μεταξύ πέρατος κατ και θωρακίου, μεταξύ κάτω πέλματος κατ και δοκού εδράσεως. Τα διαθέσιμα διάκενα. Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με μεγάλη απόσβεση, όπως αυτά που περιλαμβάνουν πυρήνα μολύβδου, έχουν μικρότερες απαιτήσεις μετακίνησης σε σχέση με τα εφέδρανα ολίσθησης.

- Ο διαθέσιμος χώρος για έδραση(διαθέσιμο ύψος και κάτοψη βάθρων) των εφεδράνων. Τα εφέδρανα ολίσθησης έχουν μειωμένες απαιτήσεις σε πλάτος έδρασης σε σχέση με τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα.
- Τα φορτία σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας για τα οποία οι συσκευές σεισμικής μόνωσης πρέπει να συμπεριφέρονται ελαστικά, δηλαδή να μη διαρρέουν. Αυτά τα φορτία είναι ο άνεμος, οι δυνάμεις πέδησης, οι παραμορφώσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, ο ερπυσμός, η συστολή ξηράνσεως κ.ά. .Η τάση διαρροής του επιλεχθέντος εφεδράνου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τα φορτία αυτά.
- Η αξιοπιστία του συστήματος στις περιβαλλοντικές συνθήκες υπό τις οποίες θα πρέπει να λειτουργήσει, όπως η θερμοκρασία, τα επίπεδα υγρασίας κ.ά. για όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής.
- Ειδικά για τη επιλογή μεταξύ διαφορετικών συσκευών απόσβεσης, αυτή εξαρτάται από τη θέση τοποθέτησης, το διαθέσιμο χώρο, τη δυνατότητα σύνδεσης με την κατασκευή και την απαιτούμενη αντοχή. Για την περίπτωση των γεφυρών πρέπει να επιτρέπει μεγάλες μετακινήσεις και να επιτρέπει την απόσβεση προς όλες τις κατευθύνσεις.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ

---

### 11.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Σύμφωνα με τις οδηγίες για μελέτη γεφυρών με σεισμική μόνωση επιτρέπεται η ανάλυση της κατασκευής με τις ακόλουθες μεθόδους:

- Μέθοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (uniform load method)
- Μέθοδος φασματικής απόκρισης (response spectrum analysis)
- Γραμμική ή μη γραμμική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας ( linear/elastic or non-linear/inelastic time-history analysis)

#### 11.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η πιο συνηθισμένη παραλλαγή της μεθόδου είναι η ανάλυση που βασίζεται στις παραμορφώσεις (displacement based analysis method) . Σε κάθε περίπτωση ο φορέας προσομοιώνεται με ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή. Η μέθοδος προϋποθέτει τη διαφραγματική λειτουργία της ανωδομής και θεωρεί ότι η ανωδομή είναι άκαμπτη σε σχέση με τους μονωτήρες. Αυτό ισχύει για τις πιο συνηθισμένες διατομές γεφυρών, όπως είναι οι κιβωτιοειδείς, οι πλακοδοκοί με ή χωρίς διαφράγματα κτλ. Η υστερητική απόσβεση ενέργειας προσομοιώνεται με την ισοδύναμη ιξώδη απόσβεση και το φάσμα απόκρισης κλιμακώνεται για διαφορετικούς συντελεστές απόσβεσης.

#### 11.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Η μέθοδος φασματικής απόκρισης είναι είτε δυναμική (multimode) είτε απλοποιημένη(single mode). Με τη δυναμική φασματική μέθοδο υπολογίζονται οι πιθανές ακραίες τιμές τυχόντος μεγέθους απόκρισης με τετραγωνική επαλληλία των ιδιομορφικών τιμών του υπόψη μεγέθους (SRSS).

Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός των ιδιομορφών ταλάντωσης του συστήματος και οι αντίστοιχες ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες. Έπειτα υπολογίζονται για κάθε συνιστώσα του σεισμού οι πιθανές ακραίες τιμές για κάθε ιδιομορφή ταλάντωσης, χωρίς καθορισμένο πρόσημο και με τη μέθοδο επαλληλίας των κανονικών μορφών (mode superposition) υπολογίζεται μία πιθανή ακραία τιμή για το μέγεθος που ενδιαφέρει. Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι η ελεύθερη ή εξαναγκασμένη ταλάντωση συντίθεται από τις ιδιομορφές και ισχύει για ελαστική συμπεριφορά και σχετικά μικρή απόσβεση. Σε τελευταίο στάδιο, γίνεται χωρική επαλληλία, κατά την οποία υπολογίζεται η πιθανή ακραία τιμή του μεγέθους απόκρισης για ταυτόχρονη δράση των τριών συνιστωσών του σεισμού.

Στην ιδιομορφική ανάλυση επιτρέπεται η χρήση σταθερού ποσοστού κρίσιμης απόσβεσης  $\zeta$  για όλες τις ιδιομορφές ταλάντωσης.

Η απλοποιημένη φασματική μέθοδος αποτελεί απλοποιημένη εφαρμογή της δυναμικής φασματικής ανάλυσης, αφού κάνει προσεγγιστική θεώρηση μόνο της θεμελιώδους ιδιομορφής για κάθε διεύθυνση υπολογισμού.

Το πεδίο εφαρμογής της απλοποιημένης φασματικής μεθόδου περιλαμβάνει κανονικά κτίρια μέχρι 10 ορόφους, μη κανονικά κτίρια έως 5 ορόφους με εξασφαλισμένη τη διαφραγματική λειτουργία των πλακών και γενικά κατασκευές που κατατάσσονται σε κατηγορία σπουδαιότητας Σ1 και Σ2.

## **11.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ**

Γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση της αναβάθμισης της σεισμικά μονωμένης γέφυρας του Σύθα, με συντελεστή σπουδαιότητας 1.30 (κατηγορία Σ3) ενδείκνυται ανάλυση της κατασκευής με χρονοϊστορία.

Οι Calvi, Priestley [1] συνιστούν την ανάλυση με χρονοϊστορία για σεισμικά μονωμένες γέφυρες. Η μέθοδος αυτή είναι πολύπλοκη σε σχέση με τις προηγούμενες αλλά δεν παρουσιάζει περιορισμούς στην εφαρμογή της. Αντίθετα, για τη φασματική ανάλυση, ο Ευρωκώδικας 8 καταγράφει συγκεκριμένα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για την εφαρμογή της. Αυτά είναι :



1. Η απόσταση της γέφυρας από γνωστά ενεργά ρήγματα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 15km.
2. Το έδαφος δεν είναι μαλακό.
3. Η ιδιοπερίοδος της μονωμένης γέφυρας δεν ξεπερνά τα 3sec και είναι τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερη από τη fixed-base ιδιοπερίοδο της γέφυρας (την ιδιοπερίοδο χωρίς σεισμική μόνωση).
4. Η γέφυρα είναι περίπου ευθύγραμμη και η συνολική μάζα των μεσοβάθρων είναι λιγότερο από το 1/5 της μάζας του καταστρώματος.
5. Το Keff του συστήματος σεισμικής μόνωσης στη μετακίνηση σχεδιασμού είναι τουλάχιστον 50% της τέμνουσας ακαμψίας στο 20% της μετακίνησης σχεδιασμού.
6. Η απόκριση του συστήματος σεισμικής μόνωσης δεν εξαρτάται από αξονικές δυνάμεις και το ρυθμό επιβολής του φορτίου.
7. Το σύστημα σεισμικής μόνωσης παρέχει τέτοια δύναμη επαναφοράς ώστε η επαύξησή της μεταξύ 0,5 και 1 της μετακίνησης σχεδιασμού να είναι τουλάχιστον 0,025 φορές το ίδιο βάρος της ανωδομής.
8. Η γέφυρα είναι πλήρως σεισμικά μονωμένη.

Σε κάθε άλλη περίπτωση πρέπει υποχρεωτικά να γίνεται ανάλυση με χρονοϊστορία.

Η ανάλυση με χρονοϊστορία μπορεί να είναι γραμμική/ελαστική ή μη γραμμική/ανελαστική. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση οι πραγματικές μη γραμμικές ιδιότητες των μονωτήρων είτε οι ισοδύναμες γραμμικές ιδιότητές τους. Η ανελαστική ανάλυση ενδείκνυται για κατασκευές με πολύ μεγάλη απόσβεση συνήθως μεγαλύτερη από 30%. [17]

Σε κάθε περίπτωση, απαιτούνται σεισμικές καταγραφές, όχι λιγότερες από 3 ζεύγη (N-S και E-W) και κάθε ζεύγος επιβάλλεται ταυτόχρονα στο τρισδιάστατο μοντέλο.

Η διαδικασία επιλογής των κατάλληλων επιταχυνσιογραφημάτων για κάθε περίπτωση είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και περιλαμβάνει την επεξεργασία των πραγματικών καταγραφών, την επιλογή των καταλληλότερων σεισμών με βάση

συγκεκριμένα κριτήρια και την επιλογή του ελάχιστου αριθμού σεισμών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν.

### **11.2.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ**

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός στοχεύει στην ανάπτυξη της ικανότητας της κατασκευής (capacity) να αναλάβει τις σεισμικές δράσεις που προβλέπονται για τη συγκεκριμένη εδαφική θέση της. Για τον υπολογισμό των σεισμικών αυτών δράσεων χρησι-μοποιούνται διάφορες μέθοδοι, όλες όμως έχουν κοινό παρονομαστή τα επιταχυνσιογραφήματα. Οι πρώτες καταγραφές σεισμικών γεγονότων προέρχονται από το Λόνγκ Μπητς της Καλιφόρνια το 1933 και έκτοτε η παγκόσμια βάση επιταχυνσιογραφήματων εμπλουτίζεται με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό.

Τα όργανα καταγραφής των σεισμικών κραδασμών ονομάζονται επιταχυνσιογράφοι και τα χαρακτηριστικά τους (απόσβεση, ιδιοπερίοδος, καμπύλη μεγεθύνσεων, συχνοτήτων) είναι γνωστά, ώστε να είναι δυνατή η σωστή επεξεργασία των εγγραφών τους. Αυτές ονομάζονται επιταχυνσιογραφήματα και δείχνουν την επιτάχυνση του σημείου παρατηρήσεως συναρτήσεως του χρόνου. Με ανάλυση Fourier εξάγεται το φάσμα Fourier το οποίο εκφράζει το συχνотικό περιεχόμενο της κίνησης (επιτάχυνση συναρτήσεως συχνότητας) και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη μετέπειτα ανάλυση. Βασικές παράμετροι του σχεδιασμού που εξάγονται από τα επιταχυνσιογραφήματα είναι τα φάσματα απόκρισης της ταχύτητας και της μετακίνησης και τα μεγέθη ψευδο-φασματική επιτάχυνση, ψευδο-φασματική ταχύτητα και ψευδο-φασματική μετακίνηση.

Οι πρώτοι επιταχυνσιογράφοι ήταν αναλογικοί και οι κατέγραφαν τις δονήσεις σε φιλμ ή χαρτί. Οι εγκατεστημένοι αναλογικοί επιταχυνσιογράφοι δεν αντικαταστάθηκαν απαραίτητα από ψηφιακούς, οπότε ακόμα και σήμερα πολλά επιταχυνσιογραφήματα προέρχονται από αναλογικές συσκευές. Οι νέες κατασκευές ψηφιακοί επιταχυνσιογράφοι χρησιμοποιήθηκαν για την πύκνωση του δικτύου καταγραφής των σεισμικών κραδασμών και έτσι τα δεδομένα προέρχονται και από τους δύο τύπους συσκευών.

Οι αναλογικοί επιταχυνσιογράφοι παρουσιάζουν τρία βασικά μειονεκτήματα. Πρώτον, λειτουργούν σε αναμονή γιατί αλλιώς θα κατανάλωναν τεράστιες ποσότητες χαρτιού. Έτσι, πολύ συχνά οι πρώτες δονήσεις δεν καταγράφονται. Το δεύτερο μειονέκτημά τους σχετίζεται με τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους, πιο συγκεκριμένα, για να είναι η μετακίνηση του εκκρεμούς ανάλογη της επιταχύνσεως πρέπει η ιδιοσυχνότητα του εκκρεμούς να είναι μεγαλύτερη από αυτή της σεισμικής δόνησης. Από την άλλη, αν το εκκρεμές έχει μεγάλη συχνότητα είναι πολύ άκαμπτο, γεγονός που θα οδηγούσε σε μικρές μετακινήσεις και άρα η καταγραφή δε θα ήταν ευκρινής. Η περιοχή ιδιοσυχνοτήτων στην οποία ικανοποιούνται οι παραπάνω αντικρουόμενοι περιορισμοί είναι γύρω στα 25Hz. Το τρίτο και σημαντικότερο μειονέκτημα είναι ότι για την επεξεργασία των καταγραφών και την εξαγωγή των απαραίτητων παραμέτρων για τη δυναμική ανάλυση είναι απαραίτητη η ψηφιοποίηση των μετρήσεων, διαδικασία χρονοβόρα κατά την οποία είναι πιθανό να συμβούν λάθη.

Οι ψηφιακοί επιταχυνσιογράφοι δεν παρουσιάζουν τα παραπάνω μειονεκτήματα, λειτουργούν συνεχώς, το εύρος των ιδιοσυχνοτήτων τους κυμαίνεται από 50 έως 100 Hz και η ψηφιοποίηση γίνεται αυτόματα και με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Και στις δύο περιπτώσεις οι καταγραφές δεν είναι απαλλαγμένες από το «θόρυβο» που αλλοιώνει τα πραγματικά δεδομένα. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στις καταγραφές αναλογικών επιταχυνσιογράφων. Σε κάθε περίπτωση εφαρμόζονται τεχνικές για την προσαρμογή των καταγραφών. Στη βιβλιογραφία ο όρος προσαρμογή θεωρείται καταλληλότερος από τον όρο διόρθωση, γιατί η διόρθωση θα σήμαινε ότι γνωρίζουμε τη σωστή καταγραφή, κάτι που προφανώς δε συμβαίνει. Ο όρος προσαρμογή ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα, γιατί δηλώνει ότι η καταγραφή προσαρμόζεται ώστε οι παράμετροι που προκύπτουν από την επεξεργασία της (ταχύτητες, μετακινήσεις, φάσματα απόκρισης) να είναι αληθοφανείς.

Πραγματικά, πολλές φορές τα μη επεξεργασμένα επιταχυνσιογραφήματα μετά την ολοκλήρωσή τους δίνουν μη αληθοφανείς χρονοϊστορίες ταχύτητας και

μετακίνησης. Εκεί επιδρά κατεξοχήν ο θόρυβος των επιταχυνσιογραφημάτων. Αντίθετα, στη χρονοϊστορία της επιτάχυνσης ο θόρυβος δεν είναι κατανοητός και οι τιμές συνάδουν με τη φυσική του φαινομένου, γνωρίζουμε όμως με βεβαιότητα ότι ο θόρυβος πάντα υπάρχει.

Ο θόρυβος οφείλεται σε διάφορες αιτίες οι οποίες μπορεί να μην είναι πάντα ξεκάθαρες. Συχνές αιτίες είναι η ατελής ρύθμιση των οργάνων καταγραφής, ενώ ο θόρυβος μεγάλων περιόδων μπορεί να οφείλεται σε πλευρικές κινήσεις του χαρτιού κατά την καταγραφή.

Οι διαδικασίες αφαίρεσης του θορύβου από τις καταγραφές αφαιρούν πάντα και τμήμα της πραγματικής καταγραφής. Στην ουσία απομονώνονται οι περιοχές του επιταχυνσιογραφήματος όπου ο λόγος πραγματικής καταγραφής προς το θόρυβο είναι ανεπίτρεπτα μικρός και απομένουν οι περιοχές εκείνες όπου ο λόγος αυτός είναι αποδεκτός.

Η διαδικασία προσαρμογής των καταγραφών περιλαμβάνει το φιλτράρισμά τους. Με τον όρο φίλτρο εννοούμε μια συνάρτηση η οποία στην περιοχή των συχνοτήτων που ο αναλυτής θέλει να διατηρήσει έχει τιμή 1 (ή τιμή που τείνει στο 1), ενώ στην περιοχή των συχνοτήτων που ο αναλυτής θέλει να αποκλείσει έχει την τιμή 0 (ή τιμή που τείνει στο 0). Το φίλτρο μπορεί να εφαρμοστεί είτε απευθείας στην χρονοϊστορία των επιταχύνσεων είτε στο φάσμα Fourier της χρονοϊστορίας (Fourier amplitude Spectrum – FAS) και στη συνέχεια από το φιλτραρισμένο φάσμα Fourier να ληφθεί με την αντίστροφη διαδικασία η φιλτραρισμένη χρονοϊστορία. Οι δύο μέθοδοι πρέπει να δίνουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα.

Τα φίλτρα διακρίνονται σε low-cut (high pass) και high-cut (low pass). Όπως δηλώνει η ονομασία τους, τα πρώτα εξουδετερώνουν χαμηλές συχνότητες και επιτρέπουν τη διέλευση των υψηλών συχνοτήτων. Το αντίθετο συμβαίνει με τα high-cut (low pass) φίλτρα. Σε κάθε περίπτωση πάντως υπάρχει μια συχνότητα όριο που ορίζεται από τον αναλυτή ως όριο. Για παράδειγμα στην περίπτωση εφαρμογής ενός high-cut φίλτρου, ο αναλυτής πρέπει να λάβει υπόψη του ως

ανώτατο όριο τη συχνότητα Nyquist, που ισούται με το  $\frac{1}{2}$  του βήματος  $\Delta t$  της καταγραφής. Οι συχνότητες που θα εξαλειφθούν πρέπει να είναι χαμηλότερες από τη Nyquist γιατί εξάλειψη υψηλότερων δε θα έχει κανένα αποτέλεσμα στη διόρθωση των καταγραφών.

Επίσης μικρής σημασίας είναι η επιλογή του είδους του φίλτρου. Υπάρχουν πολλά διαθέσιμα φίλτρα, όπως τα Ormsby, Butterworth, Chebychev, Bessel, το ελλειπτικό κ.ά. που δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Η βασική απόφαση του αναλυτή είναι αν θα επιλέξει φίλτρο causal ή acausal. Προτείνεται πάντως να επιλέγονται acausal φίλτρα γιατί δεν προκαλούν αλλαγή φάσης στην καταγραφή.

Ένα σημαντικό θέμα συζήτησης είναι το κατά πόσο πρέπει να χρησιμοποιούνται τα ίδια φίλτρα στην προσαρμογή των επιταχυνσιογραφημάτων της ίδιας σεισμικής δόνησης στις τρεις διευθύνσεις. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ο ίδιος τύπος φίλτρου για όλες τις διευθύνσεις, αυτός θα καθοριστεί από την καταγραφή στην κατακόρυφη διεύθυνση, γιατί αυτή η καταγραφή παρουσιάζει το μικρότερο ποσοστό θορύβου σε σχέση με τις οριζόντιες συνιστώσες. Πάντως, η χρήση του ίδιου φίλτρου δε συνιστάται γιατί αυξάνει τις απώλειες πραγματικών καταγραφών.

### **11.2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ**

Το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός ενός σεισμικού σεναρίου το οποίο εξάγεται από πιθανοτική ανάλυση του σεισμικού κινδύνου για την κατασκευή (seismic hazard analysis). Σαν σεισμικός κίνδυνος (seismic hazard) ορίζεται το φυσικό γεγονός με μετρούμενα μεγέθη τα οποία μας ενδιαφέρουν ανάλογα με την περίπτωση πχ. μέγεθος σεισμού, επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετακίνηση στο βραχώδες υπόβαθρο. Η ορθή εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου είναι ουσιαστική για τον αντισεισμικό σχεδιασμό.

Στο NEAK ο σεισμικός κίνδυνος λαμβάνεται υπόψη με την εκτίμηση ενός σεισμικού συντελεστή, δηλαδή μιας εδαφικής επιτάχυνσης που θεωρείται χαρακτηριστική για κάθε περιοχή και αντιστοιχεί σε κάποια οριακή κατάσταση σχεδιασμού (άμεση λειτουργία, ασφάλεια ζωής ή εξασφάλιση έναντι αστοχίας).

Στην Ελλάδα η επιτάχυνση αυτή αντιστοιχεί στην ασφάλεια ζωής και χαρακτηρίζεται από μια πιθανότητα να μην ξεπεραστεί που ισούται με 10% στα 50 χρόνια, όσο δηλαδή είναι ο μέσος όρος ζωής μιας σύγχρονης τυπικής κατασκευής.

Σε περίπτωση κατασκευών υψηλού κινδύνου που δεν καλύπτονται από το ΝΕΑΚ, το σενάριο αυτό περιλαμβάνει συνήθως το μέγεθος σεισμικής ροπής του σεισμού σχεδιασμού (πιθανότητα εμφάνισης στα χρόνια) και του μέγιστου αναμενόμενου σεισμού (πιθανότητα εμφάνισης στα χρόνια), απόσταση κατασκευής και επικέντρου ή ρήγματος, το είδος της διάρρηξης και κατάταξη του εδάφους ανάλογα με τους ισχύοντες κανονισμούς. Το σύνολο των επιταχυνσιογραφημάτων που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να συνάδει με το προκαθορισμένο σεισμικό σενάριο (consistency). Η επιλογή γίνεται άλλες φορές με βάση τα σεισμολογικά χαρακτηριστικά και άλλοτε με βάση το μέγεθος σεισμικής ροπής και το σχήμα του φάσματος απόκρισης.

Για την πιθανοτική εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου είναι απαραίτητη η θεώρηση της κατανομής που ακολουθεί η σεισμικότητα, δηλαδή να προσδιορισθεί η σχέση πιθανοτικής κατανομής της εμφάνισης των σεισμικών γεγονότων. Η πιο συνηθισμένη παραδοχή είναι ότι τα σεισμικά γεγονότα ακολουθούν την κατανομή Poisson, δηλαδή θεωρείται ότι η χρονική εμφάνιση ενός μελλοντικού σεισμού είναι ανεξάρτητη από προηγούμενα γεγονότα. [36]

#### **11.2.2.1 ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ**

Ο μελετητής καλείται να επιλέξει έναν αριθμό κατάλληλων επιταχυνσιογραφημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της κατασκευής. Μέχρι σήμερα δεν έχουν διατυπωθεί ολοκληρωμένες θεωρίες σχετικά με το ποιος είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός επιταχυνσιογραφημάτων.

Για το λόγο αυτό και οι κανονισμοί ποικίλλουν στις συστάσεις τους όσον αφορά τον αριθμό των επιταχυνσιογραφημάτων. Η πλειοψηφία των κανονισμών παγκοσμίως βασίζεται συνήθως στους κανονισμούς του 1994 του Uniform

Building Code, ο οποίος προβλέπει ότι πρέπει να λαμβάνεται η μέγιστη απόκριση όταν χρησιμοποιούνται 3 καταγραφές, που είναι και ο ελάχιστος αριθμός, και η μέση απόκριση όταν χρησιμοποιούνται 7 ή περισσότερες καταγραφές. Όπως είναι λογικό, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των καταγραφών τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια της ανάλυσης. Ο συγκεκριμένος κανονισμός προτείνει ως ελάχιστο αριθμό χρησιμοποιούμενων επιταχυνσιογραφημάτων τα 3 θεωρώντας ότι είναι ένας «λογικός» αριθμός για ανάλυση στο περιβάλλον ενός γραφείου, δεν βασίζει όμως την επιλογή αυτή σε επιστημονικά δεδομένα.

Ο Shome et al. [Shome N, Cornell AC, Bazzurro P, Carballo JE, Earthquakes, Records and nonlinear responses, Earthquake Spectra 1998;14:469-500] απέδειξε ότι ο κατάλληλος αριθμός των επιταχυνσιογραφημάτων που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση εξαρτάται τόσο από τη μέθοδο επιλογής τους και τη μέθοδο με την οποία καλιμπράρονται, όσο και από τη φύση της απόκρισης που επιδιώκεται να προβλεφθεί. Μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν είναι η μέγιστη μετακίνηση οροφής, η μέγιστη σχετική μετακίνηση ορόφων, η στροφική κόπωση μέλους, η απορρόφηση ενέργειας κ.ά. Τα μεγέθη που αποτελούν δείκτες της κόπωσης και της ενέργειας απαιτούν εισαγωγή μεγαλύτερου αριθμού επιταχυνσιογραφημάτων σε σχέση με τα μεγέθη μέγιστης απόκρισης. Απέδειξε επίσης ότι η χρήση γραμμικής μεθόδου για την προσαρμογή ως προς τη φασματική απόκριση στην αρχική ιδιοπερίοδο της κατασκευής μπορεί να μειώσει τον αριθμό των επιταχυνσιογραφημάτων σε τέσσερα. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, όπως τμηματική επεξεργασία ανάλογα με τη συχνοτική περιοχή (Naeim and Lew, Carballo) ώστε να συνάδουν με τα φάσματα απόκρισης-στόχους (target spectra), που έχουν στόχο να μειώσουν τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων καταγραφών.

Οι οδηγίες για μελέτη γεφυρών με σεισμική μόνωση υποδεικνύουν τη χρήση τουλάχιστον τριών ζευγών οριζοντίων συνιστωσών χρονοϊστοριών της εδαφικής διέγερσης. Ως συνολικό φάσμα της ομάδας των σεισμών λαμβάνεται ο μέσος όρος των φασμάτων SRSS των επιμέρους σεισμών.

### **11.2.2.2 ΕΙΔΟΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ**

Στην περίπτωση που για την κατασκευή πραγματοποιείται ειδική εδαφοδυναμική μελέτη προσδιορισμού της σεισμικής δράσης στην περιοχή του έργου, τα είδη των διεγέρσεων που επιλέγονται θα πρέπει, στο μέτρο του δυνατού, να παρουσιάζουν ομοιότητες όσον αφορά το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση της πηγής και το μηχανισμό γένεσης με το σενάριο σεισμικού κινδύνου που έχει συνταχθεί.

Γενικά, συνιστάται να συμπεριληφθεί στις χρησιμοποιούμενες καταγραφές και μία διέγερση παλμικού τύπου, με έντονο το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Οι παλμικού τύπου διεγέρσεις που έχουν λάβει χώρα τα προηγούμενα χρόνια σε όλο τον κόσμο έχουν προκαλέσει σημαντικές καταστροφές στις κατασκευές. Όταν η κίνηση του εδάφους που προκαλεί τη διέγερση βρίσκεται πολύ κοντά στη διάρρηξη του ρήγματος τότε η σεισμική διέγερση χαρακτηρίζεται συνήθως από ένα παλμό [35] ο οποίος επιβάλλει στις κατασκευές υψηλή εσωτερική ενέργεια στην αρχή της διέγερσης. Η παλμικού τύπου κίνηση είναι έντονη σε θέσεις προς τις οποίες κατευθύνεται η διάρρηξη και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίδια με την ταχύτητα του διατμητικού κύματος (Singh, 1985). Οι παλμικού τύπου διεγέρσεις μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά υψηλότερες φασματικές επιταχύνσεις σε σχέση με διεγέρσεις χωρίς φαινόμενα κατευθυντικότητας (Somerville et al.). Η διέγερση του ενός παλμού οδηγεί σε πολύ μικρό αριθμό μεγάλων μετατοπίσεων ενώ η συνήθης διέγερση οδηγεί σε μεγάλο αριθμό ταλαντώσεων μικρότερου μεγέθους μετακίνησης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ασυνήθης συμπεριφορά της κατασκευής.

### **11.2.3 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ**

Αφού έχει γίνει η επιλογή των ζευγών επιταχυνσιογραφημάτων που θα χρησιμοποιηθούν η γενική διαδικασία είναι η εξής:

1. Υπολογίζεται το φάσμα απόκρισης για συντελεστή απόσβεσης 5% για κάθε συνιστώσα της εδαφικής κίνησης, για κάθε επιλεγμένο σεισμό.



2. Υπολογίζεται το φάσμα SRSS για κάθε σεισμό, λαμβάνοντας το φάσμα SRSS των δύο οριζοντίων συνιστωσών αυτού.
3. Υπολογίζεται το «μέσο» φάσμα, λαμβάνοντας το μέσο όρο των SRSS κάθε σεισμού.
4. Το «μέσο» φάσμα συγκρίνεται με το φάσμα σχεδιασμού και υπολογίζεται ο κατάλληλος συντελεστής κλιμάκωσης με την κατάλληλη μέθοδο.\*
5. Κλιμακώνονται οι καταγραφές κάθε συνιστώσας των επιλεγμένων σεισμών με το συντελεστή που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα.

\*Όπως φάνηκε από την προηγούμενη παράγραφο έχουν διατυπωθεί πολλές θεωρίες σχετικά με το ποια είναι η σωστή κλιμάκωση του «μέσου» φάσματος. Οι Buckle, Constantinou, Dicleli και Ghasemi προτείνουν η κλιμάκωση να είναι τέτοια ώστε στην περιοχή των ιδιοπεριόδων από  $0,5T_{eff}$  έως  $1,5T_{eff}$  το «μέσο» φάσμα απόκρισης για  $\zeta=5\%$  να μην είναι κάτω από 1,3 φορές του φάσματος σχεδιασμού. Τα παραπάνω συμπίπτουν με τις Οδηγίες για μελέτη γεφυρών με σεισμική μόνωση, στις οποίες διευκρινίζεται επιπλέον ότι αν η γέφυρα έχει διαφορετικό  $T_{eff}$  στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, η χαμηλότερη  $T_{eff}$  θα χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του χαμηλότερου ορίου, το οποίο γίνεται τώρα  $0,2 T_{eff}$  και η υψηλότερη για τον καθορισμό του άνω ορίου, που παραμένει  $1,5 T_{eff}$ .

### 11.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΘΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και χωρίς διαθέσιμη εδαφοδυναμική μελέτη για την περιοχή της γέφυρας του Σύθα, χρησιμοποιούνται καταγραφές από τρεις σεισμούς, που λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων του Berkeley (PEER STRONG MOTION DATABASE), για την ανάλυση της γέφυρας με χρονοϊστορίες.

- Σεισμός Imperial Valley 1951  
EL CENTRO ARRAY 9, 000 (USGS STATION 117)  
FILTER POINTS: HP=0.4 Hz LP=13.0 Hz
- Σεισμός Kobe 1995  
TAKATORI(CUE)  
FILTER POINTS: HP=unknown LP=unknown
- Σεισμός Kocaeli 1999  
AMBARLI (KOERI)  
FILTER POINTS: HP=0.03 Hz LP=50.0 Hz

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

## ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

---

### 12.1 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ

#### 12.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ανύψωση-αντικατάσταση εφεδράνων είναι μία μοναδική διαδικασία εξαιρετικά ειδικευμένη και απαιτεί ξεχωριστή προσέγγιση για κάθε τεχνικό και τύπο εφεδράνου-διάταξης.

Βασικό αντικείμενο της αντικατάστασης των εφεδράνων, πέρα από την επισκευή ή αλλαγή ενός κατεστραμμένου εφεδράνου, είναι και η αναβάθμιση υφισταμένων τεχνικών έργων στα πλαίσια της τρέχουσας τεχνογνωσίας και των απαιτήσεων των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών, γεγονός το οποίο βελτιώνει τη σεισμική θωράκιση και επιμηκύνει την τεχνική ζωή των έργων. Όλα τα νέας τεχνολογίας εφέδρανα έχουν δυνατότητα αντικατάστασης. Η αντικαταστασιμότητα αποτελεί πλέον και συμβατικό όρο. Όμως, η αντικατάσταση εφεδράνων σε περιορισμένο χώρο και με δυσκολίες στην πρόσβαση, προϋποθέτει σημαντικές ικανότητες και εφευρετικότητα. Για αυτό είναι σημαντικό κατά την φάση της σχεδίασης & κατασκευής του τεχνικού, όλα αυτά τα προβλήματα να έχουν μελετηθεί και οι προτεινόμενες λύσεις να έχουν δυνατότητα ρεαλιστικής εφαρμογής. Επίσης απαιτείται διαρκής παρουσία Εξειδικευμένου Μηχανικού- Συμβούλου Επιθεώρησης- Συντήρησης- Αντικατάστασης (ΣΕΣΑ) καθώς και Τεχνικού Συνεργείου, με πολύ καλή γνώση της τεχνολογίας των εφεδράνων και συνεργασία με τον οίκο κατασκευής εφεδράνων.

Γενικά, σε μία ανύψωση-αντικατάσταση θα πρέπει να προσεχθούν:

1. Η μέγιστη ανύψωση να μην υπερβεί την μέγιστη επιτρεπτή βάσει μελέτης.
2. Να χρησιμοποιηθεί σύστημα γρύλλων (υδραυλικά συνδεδεμένων με την αντλία) ικανό να αναλάβει το φορτίο της ανύψωσης βάσει μελέτης και με κατάλληλες διαστάσεις-συνδεσμολογία και πάντοτε με διασφάλιση του υδραυλικού κυκλώματος (προστασία από απώλεια υδραυλικών).
3. Η επιφανειακή πίεση και η ποιότητα της επιφάνειας έδρασης πρέπει να ελεγχθούν , καθώς και η δυνατότητα χρήσης πλακών διάχυσης φορτίων.
4. Πρέπει να υπάρχει επαρκής χώρος για την τοποθέτηση των γρύλλων, των προσωρινών εφεδράνων και των πλακών διάχυσης φορτίων.
5. Οι γρύλλοι ανύψωσης και τα προσωρινά εφέδρανα (εφόσον απαιτούνται), να τοποθετηθούν σε συγκεκριμένα και προκαθορισμένα από το μελετητή σημεία.
6. Να διευκρινισθεί η διαδικασία της ανύψωσης (ταυτόχρονη ή σε φάσεις) ανάλογα και με τον τύπο του τεχνικού.
7. Κατά τη φάση της ανύψωσης να περιορίζονται όσο το δυνατόν τα λειτουργικά φορτία (διακοπή κυκλοφορίας αν είναι δυνατόν). Αυτό είναι επιβεβλημένο σε σιδηροδρομικές γέφυρες.
8. Η διαδικασία της επαναφοράς να είναι όσο το δυνατόν σταδιακή για την αποφυγή φαινομένων κρούσης και υπερφόρτισης των υδραυλικών του εξοπλισμού.
9. Να υπάρχει συνεχής παρουσία Μηχανικού Συμβούλου Επιθεώρησης Συντήρησης Αντικατάστασης, με ιδιαίτερες γνώσεις πάνω στα εφέδρανα

και εξειδικευμένου συνεργείου με πολύ καλή γνώση της τεχνολογίας των εφεδράνων.

10. Η αποτύπωση των υψομέτρων πρέπει να είναι λεπτομερής (χρήση ειδικών οργάνων laser) κι αυτό διότι η γέφυρα θα πρέπει να επανέλθει στην αρχική της θέση.
11. Η αντικατάσταση των εφεδράνων ή μερών τους θα πραγματοποιείται έτσι ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε καταστροφή του τεχνικού. Ως καταστροφή του τεχνικού δε νοείται η επισκευή των επιφανειών έδρασης.
12. Τα επιτρεπτά φορτία εισαγωγής από τους γρύλλους καθώς και οι προκαθορισμένες ανυψώσεις δε θα παραβιάζονται.
13. Εάν υπάρχει πιθανότητα να συμβούν μετακινήσεις του τεχνικού κατά τη διάρκεια της αντικατάστασης ή της επισκευής ενός εφεδράνου όταν το τεχνικό είναι ανυψωμένο, αυτές οι μετακινήσεις θα πρέπει να παραληφθούν μέσω ολίσθησης ή ελαστικής παραμόρφωσης. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να προβλεφθεί προσωρινή στήριξη σε προσωρινά εφέδρανα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον κίνδυνο που προέρχεται από το γεγονός ότι σημαντικά οριζόντια φορτία (π.χ. φορτία από ανεμοπίεση, συστολοδιαστολές κτλ.) εξασκούνται επί του εφεδράνου λόγω της μετακίνησης της ανωδομής. Αυτός ο κίνδυνος πρέπει να διερευνηθεί πριν την έναρξη των εργασιών και να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες.
14. Επειδή οι γρύλλοι έχουν περιορισμένη δυνατότητα παραλαβής οριζόντιων φορτίων συνιστάται διακοπή της κυκλοφορίας, εφόσον κάτι τέτοιο είναι εφικτό και για όσο χρόνο διαρκεί η διαδικασία ανύψωσης και επαναφοράς της κατασκευής. Αλλιώς, οι εργασίες θα πρέπει να εκτελούνται σε ώρες περιορισμένου κυκλοφοριακού φόρτου με ανάλογες κυκλοφοριακές ρυθμίσεις (εκτροπές κυκλοφορίας κτλ).

15. Παράλληλες και επίπεδες/λείες επιφάνειες έδρασης των γρύλλων και των προσωρινών στηρίξεων είναι εξαιρετικής σημασίας για την ορθή και γρήγορη εκτέλεση των εργασιών αντικατάστασης (ανύψωση με περιορισμένο αριθμό φάσεων, αποφυγή τραυματισμού/καταστροφής εξοπλισμού).

### **12.1.2 ΠΟΡΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ**

Οι εργασίες αποκατάστασης αγκυρούμενων εφεδράνων ακολουθούν συνήθως την εξής πορεία:

1. Γίνεται αποτύπωση του τεχνικού και σε περίπτωση επισκευής και όχι αντικατάστασης, λεπτομερής αποτύπωση του προς επισκευή εφεδράνου. Η αποτύπωση των υψομέτρων γίνεται με χρήση αποστασιόμετρων (laser) για να υπάρξει αρχείο με τα υψόμετρα της ανωδομής από σταθερό σημείο ώστε να είναι εφικτή η επανατοποθέτηση της γέφυρας στο αρχικό υψόμετρο με ακρίβεια χιλιοστού.
2. Ακολουθεί έλεγχος του αρμού για να διαπιστωθεί η δυνατότητα ανύψωσης και το ελεύθερο κατασκευαστικό διάκενο.
3. Πραγματοποιείται επιμελής καθαρισμός του εφεδράνου και της γύρω περιοχής για να απομακρυνθούν μπάζα, ακαθαρσίες, σκόνη, ήλοι, ξένα αντικείμενα κτλ. Οι εργασίες εξομάλυνσης στην επιφάνεια της ανωδομής είναι απαραίτητες, ειδικά στα σημεία επαφής με τους γρύλους και τις προσωρινές στηρίξεις, ειδικά οι γρύλοι και τα προσωρινά εφέδρανα δε θα μπορούν να τοποθετηθούν ορθά. Ο καθαρισμός γίνεται είτε με επίπλυση είτε με χρήση αεροσυμπιεστή (στεγνός καθαρισμός).
4. Τοποθετούνται γρύλλοι εκατέρωθεν του προς επισκευή εφεδράνου και όχι σε όλο το πλάτος της δοκού έδρασης. Ο μελετητής είναι αυτός που πρέπει να καθορίσει την ακριβή θέση των γρύλων.
5. Τοποθετούνται προσωρινά εφέδρανα – στηρίξεις. Η χρήση προσωρινών στηρίξεων είναι απαραίτητη για την παραλαβή των λειτουργικών φορτίσεων της γέφυρας (θερμοκρασιακές συστολοδιαστολές, κυκλοφορία

- κτλ.) ακόμα και αν οι γρύλοι φέρουν ειδικές διατάξεις ασφαλείας. Αυτό συμβαίνει επειδή οι διατάξεις αυτές δεν έχουν δυνατότητα παραλαβής οριζοντίου φορτίου μεγαλύτερου από 2% του κατακόρυφου.
6. Η γέφυρα ανυψώνεται. Πραγματοποιούνται διαδοχικές ανυψώσεις έως την επίτευξη του επιθυμητού ύψους. Για την διασφάλιση από την αστοχία των υδραυλικών των γρύλλων, στο ελεύθερο διάκενο τοποθετούνται πλάκες διάχυσης φορτίου, έτσι ώστε ο φορέας να εδράζεται συνεχώς σε προσωρινές στηρίξεις. Επισημαίνεται ότι οι γρύλλοι ανύψωσης πρέπει να φέρουν ειδικό δακτυλίδι ασφαλείας το οποίο και ενεργοποιήθηκε για τον ίδιο λόγο (προστασία από απώλεια υδραυλικών). Επίσης φέρουν σφαιρική κεφαλή με δυνατότητα παραλαβής οριζοντίου φορτίου  $\pm 2\%$  του αντίστοιχου αξονικού φορτίου για όποιες λειτουργικές μικρομετακινήσεις της ανωδομής.
  7. Απομακρύνεται ο τάκος έδρασης (μαξιλάρι). Αυτό απαιτεί συνήθως σημαντική καθαίρεση της υπόβασης πέραν του τάκου έδρασης, έως το επίπεδο του οπλισμού. Σε αυτήν την περίπτωση, επειδή δε συνίσταται η κοπή του οπλισμού, προτείνεται η κοπή των βλήτρων της κάτω πλάκας αγκύρωσης. Η κοπή των βλήτρων θα λάβει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε να μη μειωθεί το ενεργό μήκος των βλήτρων της κάτω πλάκας αγκύρωσης.
  8. Αν πρόκειται για επισκευή γίνονται οι απαραίτητες εργασίες αν πρόκειται για αντικατάσταση στη φάση αυτή τοποθετείται το σώμα του νέου εφεδράνου και η νέα κάτω πλάκα αγκύρωσης.
  9. Γίνεται έλεγχος υψομέτρων.
  10. Σκυροδετείται η υποδομή (τάκος έδρασης) με ισχυρή τσιμεντοκονία.
  11. Μετά από 24 – 48 ώρες μπορούν να απομακρυνθούν οι γρύλοι και οι προσωρινές εδράσεις. Η επαναφορά της κατασκευής γίνεται όσο το δυνατόν πιο αργά προς αποφυγή φαινομένων κρούσης και υπερφόρτωσης των υδραυλικών του εξοπλισμού.

### 12.1.3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

- Κατασκευαστικά σχέδια, εγχειρίδια, προδιαγραφές υλικών, λοιπές τεχνικές πληροφορίες,
- τεχνικός φάκελος κτλ.
- Μικροεργαλεία - πλήρης εργαλειοθήκη
- Φωτισμός και λοιπός ηλεκτρικός εξοπλισμός για νυχτερινή εργασία (δεν απαιτήθηκε)
- Ικρίωμα και εξέδρα εργασίας
- Ανυψωτικό μέσο (παπαγάλος)
- Μέσα προστασίας (κράνη, γάντια, γυαλιά, μάσκες, κυτίο πρώτων βοηθειών κτλ)
- Καθρέπτης
- Κανόνας & μετροταινία
- Παχύμετρο
- Μέσα καθαρισμού (σκούπες, πανιά κτλ)
- Μετρητικά όργανα πάχους στρώσεων (φίλερ)
- Όργανο μέτρησης θερμοκρασίας/σχετικής υγρασίας
- Κανόνας με αιχμηρές πλευρές
- Αλφάδι και Γωνιόμετρο-Μοιρογνωμόνιο
- Διαβήτη βερνιέρου
- Φωτογραφική μηχανή
- Λοιπός ειδικός μικρο-εξοπλισμός ακριβείας (αποστασιόμετρα-χωροστάτες laser)
- GPS & πυξίδα για τον προσδιορισμό θέσης
- Αναδευτήρας κονιαμάτων και ρητινών
- Κρουστικά δρέπανα
- Θερμοπίστολο
- Καλούπια και στηρίξεις
- Γεννήτρια ηλεκτρικού



- Πολύπριζα και προεκτάσεις
- Λοστοί και υπομόχλια
- Εξέδρα μεταφοράς βαρέως τύπου
- Βαρούλκα, ιμάντες
- Ηλεκτρικός φυσητήρας
- Τροχός κοπής & δισκάκια
- Τροχός λείανσης
- Ειδικό πλαίσιο μεταφοράς και προπαραμόρφωσης εφεδράνου
- Γρύλλοι ανύψωσης
- Γρύλλοι προπαραμόρφωσης
- Σωλήνες υψηλής πίεσης
- Βαλβίδες διανομής
- Αντλίες γρύλλων
- Μανόμετρα
- Βαριά
- Μικρή δεξαμενή νερού
- Πλάκες διάχυσης φορτίου (σε διάφορα πάχη και διαστάσεις)
- Προσωρινά εφέδρανα (εάν απαιτούνται)
- Μικρός φορητός δονητής

## 12.2 ΑΛΛΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

- 1) Οξειδωμένες μεταλλικές επιφάνειες στις πλάκες αγκύρωσης:

Σε περίπτωση που οι μεταλλικές επιφάνειες των πλακών αγκύρωσης είναι οξειδωμένες σε μικρό βαθμό, η αντικατάστασή τους με νέες θα μπορούσε να αποφευχθεί με απομάκρυνση της οξείδωσης, καθαρισμό και επάλειψη με διφασική εποξειδική βαφή πάχους τουλάχιστον 200μm χρωματισμού (πχ RAL 7042 medium grey).

- 2) Διάκενα (εσοχές) στην ανωδομή, μη ορθή επιφάνεια έδρασης.
- 3) Αστοχία βουλκανισμού περιμετρικά του εφεδράνου, πιθανή παραμόρφωση/θραύση εσωτερικής μεταλλικής βουλκανισμένης πλάκας και γενικά μη ορθή έδραση ανωδομής.
- 4) Διατμητική παραμόρφωση στον διαμήκη άξονα.



Figure 1 : Ανυψωτικοί γρύλοι



Figure 2 : Αστοχία βουλκανισμού και διάκενα

# Βιβλιογραφικός κατάλογος

---

[1] Seismic Design and Retrofit of Bridges, M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi , John Wiley & Sons Inc. , 1996

[2] Σεισμική αλληλεπίδραση Εδάφους – Θεμελιώσεως- Ανωδομής , Επιζήμιος ή Ευεργετικός ο Ρόλος της ; ,Δρ. Νίκος Γερόλυμος, Διάλεξη

[3] Ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών με σεισμική μόνωση , Κωνσταντίνος Παπανίκος

[4] Mikayel Melkumyan "The Behavior of Retrofitted Buildings During Earthquakes: New Technologies" [www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd46/cap20-beha.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd46/cap20-beha.pdf)

[5] Alessandro Martelli "Development and application of modern anti-seismic technologies in Italy" <http://protprev.casaccia.enea.it/Ineris%20-%20Martelli%20-%202005-01-26.pdf>

[6] Design of Seismic Isolated Structures-From Theory To Practice, Farzad Naeim, James M. Kelly, Wiley Interscience

[7] Simin Naaseh, San Francisco "Practical Solutions for Seismic Isolation, Lessons Learned" 5th World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures ,Rome, Italy, 7-11 October 2001

[8] Michael D. Symans PhD "Seismic Protective Systems: Seismic Isolation"  
E:\Topic15-7-SeismicIsolationHandouts.pdf

[9] THE SEISMIC RETROFIT OF THE OAKLAND CITY HALL  
Mason Walters, S.E., Principal  
[http://www.consrv.ca.gov/cgs/smip/docs/seminar/SMIP03/Paper10\\_Walters.pdf](http://www.consrv.ca.gov/cgs/smip/docs/seminar/SMIP03/Paper10_Walters.pdf)

[10] <http://www.edilio.it/img/IsolamentoSisimicoCina.gif>

[11] NEHRP (Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 2: Commentary (FEMA 450-2/2003 edition))

[12] Fundamentals of Seismic Base Isolation, Wang, Yen-Po , from the International Training Program for Seismic Design of Building Structures, Hosted by National Center for Research on Earthquake Engineering, Sponsored by Department of International Programs, National Science Council.

[13] <http://www.earthquakeprotection.com/pdf/GreeceLNGTanks.pdf>

[14] Ωνάσιος Στέγη Γραμμάτων και Τεχνών: Δυναμική Συμπεριφορά Σεισμικώς Μονωμένου Κτιρίου, Χρήστος Γιαρλέλης , Χρίστος Κωστίκας ,Ευλαλία Λαμπρινού , Μαίρη Δαλακιουρίδου, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου, 2008, Άρθρο 1824

[15] Maurer-Soehne Press Release – July 2005, Seismic Protection for Buildings, Onassis House and Akropolis Museum, Innovative Sliding Isolation Pendulum Bearings pass seismic tests.

[http://www.maurer-soehne.com/files/bauwerkschutzsysteme/pdf/en/infos/press\\_releases/DL\\_PRES\\_S\\_Seismic\\_protection\\_for\\_buildings\\_Onassis-House\\_and\\_Acropolis-Museum.pdf](http://www.maurer-soehne.com/files/bauwerkschutzsysteme/pdf/en/infos/press_releases/DL_PRES_S_Seismic_protection_for_buildings_Onassis-House_and_Acropolis-Museum.pdf)

[16] Maurer- Soehne Structural Systems, Press Release dd. August 21, 2003

[17] Seismic Isolation of Highway Bridges, Ian Buckle, Michael Constantinou, Murat Dicleli, Hamid Ghasemi , MCEER for the Federal Highway Administration.

[18] Maurer- Soehne Structural Systems , Project Info, No. 06 VBA / 02\_2005, Bridge Rion- Antirion/ Harilaos Trikoupi Bridge.

[19] <http://www.earthquakeprotection.com/pdf/TurkeyViaductJuly2006.pdf>

[20] Maurer- Soehne Structural Systems, Project-info, Trans- European Motorway Viaducts, Bolu, Turkey

[21] Maurer- Soehne Structural Systems, Project-info, Seismic Isolation of Benicia-Martinez, Benicia, California

[22] Ohanian Physics, Τόμος α', Μηχανική-Θερμοδυναμική, Εκδόσεις Συμμετρία,1991

[23] Γεώργιου Θ. Μιχάλτσου, Προβλήματα δυναμικής των σιδηρών γεφυρών, εκδ. Συμμετών,2005

[24] Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής , Γκαζέτας Γ.

[25] Παραδόσεις Τεχνικής Σεισμολογίας 2006-2007, Π.Γ. Καρύδης, Ι. Μ. Ταφλαμπάς , εκδόσεις Ε.Μ.Π. , Μάιος 2007.

[26] Materials Handbook, A concise desktop Reference ,Francois Cardarelli

[27]Οργανική Χημεία, John McMurry, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης

[28] Polymer Networks, Principles of their Formation structure and properties, edited by RFT Stepto, Blackie Academic and professionals

[29] Κατασκευές από χάλυβα Ε.Μ.Π., εκδ. Συμείων

[30] Seismic Protective Systems-Seismic Isolation, Michael D. Symans, Rensselaer Polytechnic Institute.

[31] Πειραματική και αναλυτική έρευνα σεισμικής μόνωσης με ή χωρίς πρόσθετη απόσβεση. Συστάσεις για το σχεδιασμό και προδιαγραφές.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, Συγγραφείς:

Ευστάθιος Μπούσιας, Ξενοφών Παλιός, Μιχαήλ Φαρδής, Ηλίας Στρεπελιάς, Χαράλαμπος Αλεξάκης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Κατασκευών.

[32] Introduction to Structural Motion Control, Base Isolation Systems, Chapter 5

[33] Linear Procedures for Structures with Velocity-Dependent Dampers ,J. Struct. Engrg. Volume 126, Issue 8, pp. 887-895 (August 2000)

[34] Οδηγίες για μελέτη γεφυρών με σεισμική μόνωση, Ιούνιος 2007 , ΥΠΕΧΩΔΕ , ΓΔΔΕ , ΔΜΕΟ.

[35] Γκαζέτας Γ. «Εδαφοδυναμική και Σεισμική Μηχανική, ιστορικά περιστατικά», Εκδόσεις Συμείων 1996

[36] Βοηθητικές Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Δ. Παπασταματίου, Ι. Ψυχάρης, Αθήνα 2005

[37] Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας ,Π. Καρύδης, Αθήνα 1996

[38] Αντισεισμικές Κατασκευές, Ειδικά Θέματα, Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής σε σεισμό, των Κ. Σπυράκου, Γ. Νικολέττου, Δεκέμβριος 1997, ΣΠΜΕ