ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Παπανικολάου Θωμά

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού

ΤΙΤΛΟΣ

Μοντελοποίηση και Αυτόματος Έλεγχος ταλαντώσεων σε Δυναμικά Συστήματα

Επιβλέπων : Δρ. Αργύρης Γ. Σολδάτος

ΑΘΗΝΑ 2012

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται η ανάπτυξη διαφόρων εύρωστων ελεγκτών βασισμένων σε μεθόδους H_∞ (H – infinity) και Lyapunov σε συνδυασμό με μια τεχνική μείωσης της τάξης του συστήματος που ονομάζεται μέθοδος των ιδιόμορφων διαταραχών (Singular Perturbations). Το υπό έλεγχο σύστημα αφορά ένα κτίριο N – ορόφων το οποίο υπόκειται σε σεισμική καταπόνηση. Απώτερος σκοπός είναι η κατά το δυνατόν ελάττωση των μετατοπίσεων που υφίσταται το κτίριο εξαιτίας της σεισμικής αυτής διέγερσης.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στους τρόπους και στις μεθόδους αντισεισμικής προστασίας, με ιδιαίτερη μνεία στα ενεργητικά συστήματα ελέγχου και στη χρήση σεισμικής μόνωσης βάσης, καθώς και μια αναδρομή στην πρόσφατη ερευνητική δραστηριότητα και βιβλιογραφία.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο πραγματοποιείται η εξαγωγή των δυναμικών μοντέλων των κυριότερων συνιστωσών του υπό μελέτη συστήματος (κτίριο, υδραυλικός επενεργητής) και πραγματοποιείται και ο χωρισμός του συστήματος σε υποσυστήματα, με τη χρήση δύο τεχνικών μείωσης της τάξης του μοντέλου. Τέλος, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών τεχνικών.

Το Τρίτο Κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου. Συγκεκριμένα, μελετώνται τρείς διαφορετικοί τρόποι ελέγχου, ξεκινώντας από τον πιο απλό στην υλοποίηση και καταλήγοντας στον πιο εξειδικευμένο. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των τριών αυτών τεχνικών ελέγχου και προκύπτουν τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Τέλος, το Τέταρτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συνολικά συμπεράσματα από τις προτεινόμενες τεχνικές ελέγχου και δίνονται στοιχεία για πιθανή μελλοντική έρευνα.

Τμήματα της θεωρίας που σχετίζεται με τις προτεινόμενες τεχνικές καθώς και λεπτομέρειες για την υλοποίηση των ελεγκτών δίνονται σε δύο παραρτήματα.

Abstract

The main purpose of this dissertation is the development of robust controllers based on H_∞ (H – infinity) and Lyapunov techniques combined with a model-reduction method, called “Singular Perturbation”. The system to be controlled is a N-story building, which is excited by an earthquake input. The major objective is to achieve an arbitrarily small motion of the building from its undisturbed configuration.

In Chapter 1, the main methods of earthquake protection are described, with special mention to the active control and base isolation systems, along with a reference to the recent relative research activity and bibliography.

In Chapter 2, dynamical models of a building controlled by a hydraulic actuator are developed. In addition, two model-reduction methods are being presented and compared. Corresponding simulation studies of the uncontrolled structures are reported.

In the Chapter 3, three different control techniques (Partial State Feedback, Full State Feedback and H – infinity control) are developed and tested. Simulation results are presented.

Finally, in Chapter 4, some useful remarks are given regarding the whole design and simulation process. Some interesting directions for future research related to this project are presented.

Ευχαριστίες

Κρίνω επιτακτική την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κύριο Δρ. Αργύριο Γ. Σολδάτο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για το άρτιο κλίμα συνεργασίας που αναπτύξαμε κατά την υλοποίηση της εργασίας.

Τέλος, αφιερώνω την παρούσα εργασία στην οικογένειά μου και κυρίως στους γονείς μου, Δημήτρη και Αγλαΐα, ως το μικρότερο «ευχαριστώ» για την αμέριστη στήριξη, κυρίως ηθική, που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης, ευχαριστώ την Μαίρη Παΐδα, Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π. (MSc) για τη βοήθεια της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας και για όλη την ηθική στήριξη και όχι μόνο, που μου παρέχει όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή και βιβλιογραφική επισκόπηση 11

1.1 Σκοπός της εργασίας 11

1.2 Εισαγωγή στην αντισεισμική προστασία 11

1.3 Συστήματα ελέγχου 13

1.3.1 Παθητικός έλεγχος 13

1.3.2 Ενεργητικά συστήματα ελέγχου 14

1.3.3 Υβριδικά συστήματα ελέγχου 19

1.3.4 Ημι-ενεργητικά συστήματα Αυτόματου Ελέγχου (Semi – Active Control Systems) 21

1.4 Σεισμική μόνωση βάσης 23

1.4.1 Τύποι Διατάξεων Σεισμικής Μόνωσης και Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αυτών 25

1.4.2 Σύγχρονες Εφαρμογές της Σεισμικά Μονωμένης Βάσης 27

1.5 Συνδυασμός Σεισμικά Μονωμένης Βάσης και Ενεργητικού Ελέγχου 33

2. Μοντελοποίηση συστήματος 37

2.1 Σχεδιασμός συστήματος 37

2.2 Δυναμικό (πλήρες) σύστημα κτιρίου 38

2.3 Χωρισμός σε υποσυστήματα 41

2.3.1 Πρώτη μέθοδος – Χωρισμός με κατάτμηση καταστατικών εξισώσεων 41

2.3.2 Δεύτερη μέθοδος – Χρήση τεχνικών ιδιόμορφων διαταραχών (Singular Perturbations) 42

2.4 Προσομοίωση χωρίς έλεγχο 45

2.4.1 Πρώτη μέθοδος 45

2.4.2 Δεύτερη μέθοδος – Singular Perturbation 47

2.5 Ο υδραυλικός επενεργητής 54

2.5.1 Εισαγωγή - Ορισμός 54

2.5.2 Βασικά μέρη – Λειτουργία 55

2.5.3 Μοντελοποίηση γραμμικού υδραυλικού επενεργητή 56

3. Τεχνικές ελέγχου 59

3.1 Ελεγκτής ανατροφοδότησης μειωμένης κατάστασης 59

3.1.1 Θεωρία 59

3.1.2 Εφαρμογή 61

3.2 Ελεγκτής ανατροφοδότησης πλήρους κατάστασης 62

3.2.1 Θεωρία 62

3.2.2 Εφαρμογή 63

3.3 Ευρωστος έλεγχος $\boldsymbol{H}\infty$ (H – infinity) 64

3.3.1 Θεωρία 64

3.3.2 Εφαρμογή 67

4. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία 73

4.1 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις 73

4.2 Μελλοντική εργασία - Προτάσεις 75

Βιβλιογραφία 77

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 81

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 85

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Όψη και κάτοψη του πύργου τηλεόρασης στην Κίνα 16

Εικόνα 2 : Μαγνητικός επενεργητής 16

Εικόνα 3 : Τυπική εφαρμογή επενεργητών από περιστρεφόμενες μάζες 18

Εικόνα 4 : Όψη του Kyobashi Seiwa building (Tokyo, Japan) 18

Εικόνα 5 : Τυπικό παράδειγμα υβριδικού αποσβεστήρα 20

Εικόνα 6 : Τυπικό παράδειγμα υβριδικής σεισμικής μόνωσης βάσης 20

Εικόνα 7 : Τρισδιάστατη απεικόνιση του LRB 26

Εικόνα 8 : Διάτμηση Βάσης για την Περίπτωση των Σεισμών με και χωρίς Μόνωση Βάσης 30

Εικόνα 9 : Μετακίνηση πρώτου ορόφου (El Centro) 31

Εικόνα 10 : Μετακίνηση πρώτου ορόφου (Northridge) 31

Εικόνα 11 : Μετακίνηση πρώτου ορόφου (Hanchnone) 32

Εικόνα 12 : Μετακίνηση πρώτου ορόφου για διάφορες σεισμικές διεργέσεις 32

Εικόνα 13 : Επιτάχυνση τελευταίου ορόφου για διάφορες σεισμικές διεργέσεις 33

Εικόνα 14 : Διαγράμματα ταχύτητας και μετατόπισης εδάφους (El Centro) 46

Εικόνα 15 : Ταχύτητα και μετατόπιση 1ου ορόφου χωρίς έλεγχο 47

Εικόνα 16 : Μετατόπιση 1ου ορόφου χωρίς χρήση σεισμικής μόνωσης (SP) 51

Εικόνα 17 : Μετατόπιση 1^{ου} ορόφου χωρίς χρήση σεισμικής μόνωσης (FO) 52

Εικόνα 18 : Μετατόπιση 1^{ου} ορόφου με χρήση σεισμικής μόνωσης (SP) 53

Εικόνα 19 : Μετατόπιση 1^{ου} ορόφου με χρήση σεισμικής μόνωσης (FO) 53

Εικόνα 20 : Ταχύτητα και μετατόπιση 1ου ορόφου και διάγραμμα απαιτούμενης δύναμης από τον επενεργητή 62

Εικόνα 21 : Ταχύτητα και μετατόπιση 1ου ορόφου και διάγραμμα απαιτούμενης δύναμης από τον επενεργητή 64

Εικόνα 22 : Μετατόπιση 1ου ορόφου με έλεγχο $\boldsymbol{H}\infty$ 69

Εικόνα 23 : Μετατόπιση 1ου ορόφου με έλεγχο $\boldsymbol{H}\infty$ σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας 69

Εικόνα 24 : Μετατόπιση 1ου ορόφου με έλεγχο χωρίς έλεγχο 70

Εικόνα 25 : Διάγραμμα μετατόπισης της βαλβίδας ελέγχου του επενεργητή 70

Εικόνα 26 : Διάγραμμα απαιτούμενης δύναμης του επενεργητή 71

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Κριτήρια Επίδοσης για τους σεισμούς El Centro και Kobe 30

Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά υδραυλικών επενεργητών της εταιρίας TMS 85

1. Εισαγωγή και βιβλιογραφική επισκόπηση

1.1 Σκοπός της εργασίας

Στην παρούσα εργασία, προτείνεται μια υβριδική μεθοδολογία που αφορά τη χρήση ενεργητικού και παθητικού συστήματος ελέγχου. Ο παθητικός έλεγχος αναφέρεται στη χρήση της σεισμικής μόνωσης της βάσης του κτιρίου, δηλαδή στη χρήση ελαστικών εφεδράνων που προκαλούν την απορρόφηση ενός μέρους της σεισμικής ενέργειας που αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι, ελαττώνεται εξαρχής η σεισμική επίδραση στο κτίριο. Παράλληλα, επεμβαίνει και ο ενεργητικός έλεγχος, ο οποίος με την άσκηση κατάλληλων εξωτερικών δυνάμεων περιορίζει τη μετατόπιση σε μικρά επιθυμητά επίπεδα.

1.2 Εισαγωγή στην αντισεισμική προστασία

Οι σεισμοί ανέκαθεν αποτελούσαν ένα από τα πιο ενδιαφέροντα γεωλογικά φαινόμενα που απασχολούσαν και συνεχίζουν να απασχολούν την ανθρωπότητα. Ως σεισμός χαρακτηρίζεται γενικά μια απότομη διαταραχή στο εσωτερικό της Γής, που εκδηλώνεται στην επιφάνεια της με αντίστοιχη κίνηση του εδάφους. Το σημείο στο οποίο παράγονται οι δονήσεις ονομάζεται εστία του σεισμού. Οι σεισμοί προκαλούνται από την απότομη απελευθέρωση ενέργειας μέσα σε έναν περιορισμένο χώρο εντός των πετρωμάτων της γης. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από ελαστική παραμόρφωση, χημικές αντιδράσεις, βαρυτικό δυναμικό ή μετακίνηση μαζών. Από τις παραπάνω μορφές, η απελευθέρωση ενέργειας ελαστικής παραμόρφωσης θεωρείται η σημαντικότερη, αφού αυτή είναι η μόνη μορφή ενέργειας που συσσωρεύεται στο εσωτερικό της γης σε ποσότητες ικανές να προκαλέσουν μεγάλους σεισμούς. Οι σεισμοί που συνδέονται με αυτόν τον τύπο απελευθέρωσης ενέργειας ονομάζονται τεκτονικοί σεισμοί (tectonic earthquakes) και είναι οι πιο ισχυροί και οι πιο καταστροφικοί.

Αρκετές φορές, όταν οι σεισμοί είναι ισχυροί και η εστία τους βρίσκεται κοντά σε κατοικημένες περιοχές, έχουμε δυσάρεστα αποτελέσματα, από υλικές ζημιές, μέχρι και σοβαρούς τραυματισμούς και ανθρώπινες απώλειες. Μεγάλο μέρος του πληθυσμού της γης κατοικεί σε περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας. Τα πετρώματα στο όριο της Αφρικανικής με την Ευρασιατική πλάκα παρουσιάζουν έντονη σεισμικότητα. Έτσι δικαιολογείται και η σεισμικότητα της χώρας μας. Τα τελευταία χρόνια έχουν

γίνει συστηματικές προσπάθειες να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των σεισμών με διάφορους τρόπους, όπως είναι η πρόγνωσή τους, η προστασία των κτιρίων, η ενημέρωση και η εκπαίδευση των πολιτών. Η ελπίδα είναι πως με κατάλληλη προετοιμασία και μελέτη τα δυσάρεστα αποτελέσματα θα μειωθούν ή θα εξαλειφθούν τελείως.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται σε μια ερευνητική κατεύθυνση η οποία ξεκίνησε στη δεκαετία του ’90 στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία και αφορά στην προστασία των κτιρίων από σεισμούς με χρήσης της τεχνολογίας της Σεισμικής μόνωσης βάσης (Base isolation), σε συνδυασμό φυσικά με την εφαρμογή της τεχνολογίας του Αυτόματου Ελέγχου. Ειδικότερα ο συνδυασμός αυτών των περιορισμών έχει ως στόχο τον κατά το δυνατόν αποτελεσματικότερο περιορισμό των μετατοπίσεων ενός κτιρίου από την αρχική του θέση μέσα σε πολύ μικρά όρια και ιδανικά, την επίτευξη πλήρους ακινησίας του κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης.

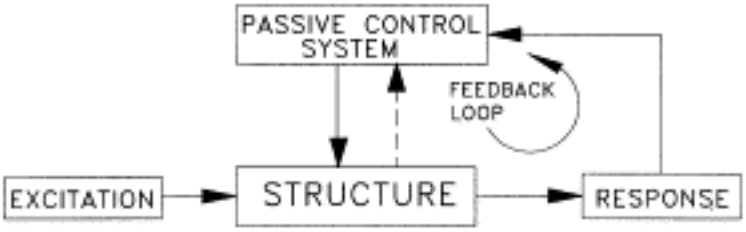
Ο έλεγχος της συμπεριφοράς των κατασκευών διακρίνεται σε παθητικό (passive), ο οποίος αφορά τον τρόπο σχεδιασμού της κατασκευής και περιλαμβάνει τη διάταξη του φέροντα οργανισμού καθώς και τον οπλισμό του, όπως και την διατομή των φερόντων στοιχείων, τα οποία αποτελούν αντικείμενο μελέτης των Πολιτικών Μηχανικών και σε ενεργητικό (active), ο οποίος προϋποθέτει μια εξωτερική πηγή ενέργειας για τη λειτουργία του συστήματος προστασίας, ενώ ο παθητικός δεν απαιτεί κάποια αντίστοιχη πηγή. Επιπλέον, ο ενεργητικός έλεγχος μας παρέχει τη δυνατότητα να ελέγξουμε ένα ευρύ φάσμα ειδικών χαρακτηριστικών, κάτι που είναι δύσκολο έως αδύνατο με τα αμιγώς παθητικά συστήματα.

Η φιλοσοφία της ‘σεισμικής μόνωσης βάσης’ είναι να διατηρείται η κατασκευή ακίνητη σε σχέση με την αρχική αδιατάρακτη θέση, ενώ το έδαφος κινείται δεχόμενο την προερχόμενη από το σεισμό ενέργεια. Έτσι, σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, μπορούμε να ασκήσουμε εξωτερικές δυνάμεις και να ελέγξουμε το κτίριο, μόνο μέσω της βάσης του. Συνεπώς, αναλύοντας τη δυναμική της κατασκευής και σχεδιάζοντας τον κατάλληλο ελεγκτή, επιτυγχάνουμε το σκοπό που αναφέρθηκε προηγουμένως. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι θεωρούμε την κίνηση του κτιρίου μονοδιάστατη. Αυτό σημαίνει ότι δε λαμβάνουμε υπόψη ενδεχόμενες στρεπτικές ροπές που επενεργούν στο κτίριο, κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης.

1.3 Συστήματα ελέγχου

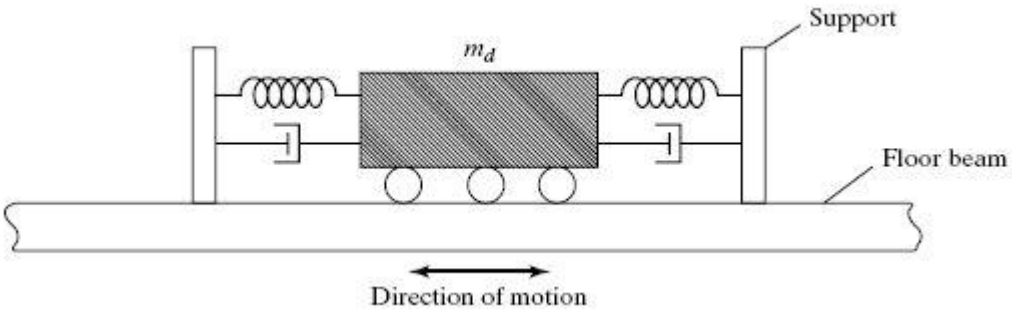
1.3.1 Παθητικός έλεγχος

Οι συνηθισμένες μέθοδοι αντισεισμικής προστασίας κτιρίων και κατασκευών, βασίζονται στην αντοχή της κατασκευής και στην ικανότητα που αυτή αποκτά να απορροφά την παραγόμενη από το σεισμό ενέργεια. Η ικανότητα αυτή, παράγεται από μη ελαστική κίνηση στην κατασκευαστική δομή, και έπειτα από πολλά φορτία μπορεί να οδηγήσει σε ζημιά – καταστροφή της δομής του κτιρίου καθώς και σε ζημιά μη δομικών στοιχείων και εσωτερικού εξοπλισμού. Η παραπάνω προσέγγιση αφορά τον παθητικό έλεγχο των κατασκευών. Παρακάτω, φαίνεται ένα δομικό διάγραμμα ενός παθητικού συστήματος αντισεισμικής προστασίας :



Σχήμα 1 : Σχηματικό διάγραμμα παθητικού ελέγχου

Τα παθητικά συστήματα ελέγχου μπορεί να έχουν ορισμένα προβλήματα τα οποία μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την χρήση τέτοιων συσκευών. Για παράδειγμα, οι TMDs είναι ουσιαστικά χρήσιμοι σε περιπτώσεις που είναι δυνατόν να συνδεθούν διαφορετικά σημεία της δομής που χαρακτηρίζονται από σημαντική μετατόπιση με την εφαρμογή κάποιας διέγερσης. Ακόμα και όταν είναι πρακτικώς δυνατό η εφαρμογή τέτοιων κατασκευών, στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις υπάρχουν σημαντικοί αρχιτεκτονικοί περιορισμοί που μπορεί να περιορίσουν αυτή τη λύση. Οι TMDs είναι επίσης ευπρόσβλητοι σε ορισμένα προβλήματα, ιδίως στη ρύθμιση της συχνότητας. Έχει καλά μελετηθεί, ότι σχετικά μικρές αποκλίσεις συχνότητας της δομής μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της αποδοτικότητας. Επιπλέον, οι TMDs είναι σχεδιασμένα για να ελέγχουν μια συγκεκριμένη διέγερση, γεγονός που σημαίνει ότι θα χρειάζονται τόσοι TMDs όσες και οι μορφές δόνησης που πρέπει να ελέγχονται [3].



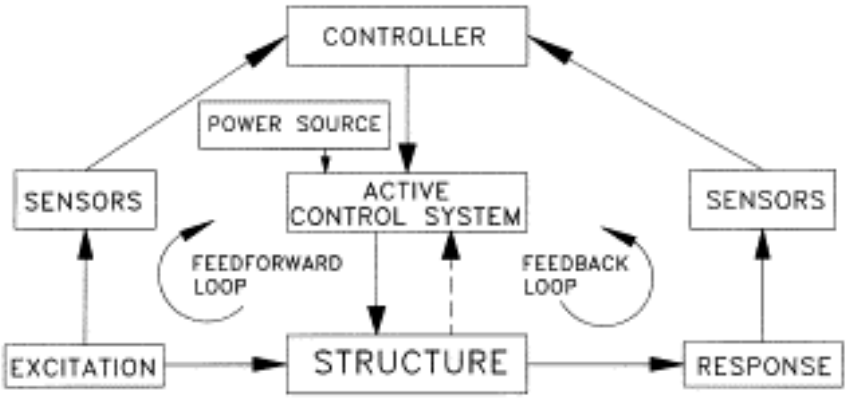
Σχήμα 2 : Σχέδιο λειτουργίας TMD

Έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές που αποσκοπούν στη βελτίωση της αντισεισμικής προστασίας των κατασκευών. Οι περισσότερες από αυτές συνδυάζουν τις μεθόδους παθητικού ελέγχου που αναφέρθηκαν προηγουμένως, με τεχνικές αυτόματου ελέγχου και συστημάτων αυτοματισμού, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν τα λεγόμενα υβριδικά συστήματα, τα οποία κρίνονται ιδιαίτερα ενδιαφέροντα, εξελίξιμα και εφαρμόσιμα.

Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χωριστούν σε τρείς κατηγορίες : Αυτές που χρησιμοποιούν ενεργητικά, υβριδικά και ημι-ενεργητικά συστήματα αυτόματου ελέγχου (active, hybrid and semi-active control systems).

1.3.2 Ενεργητικά συστήματα ελέγχου

Στο παρακάτω σχήμα παριστάνεται ένα διάγραμμα ενός κατασκευαστικού προβλήματος ελέγχου:



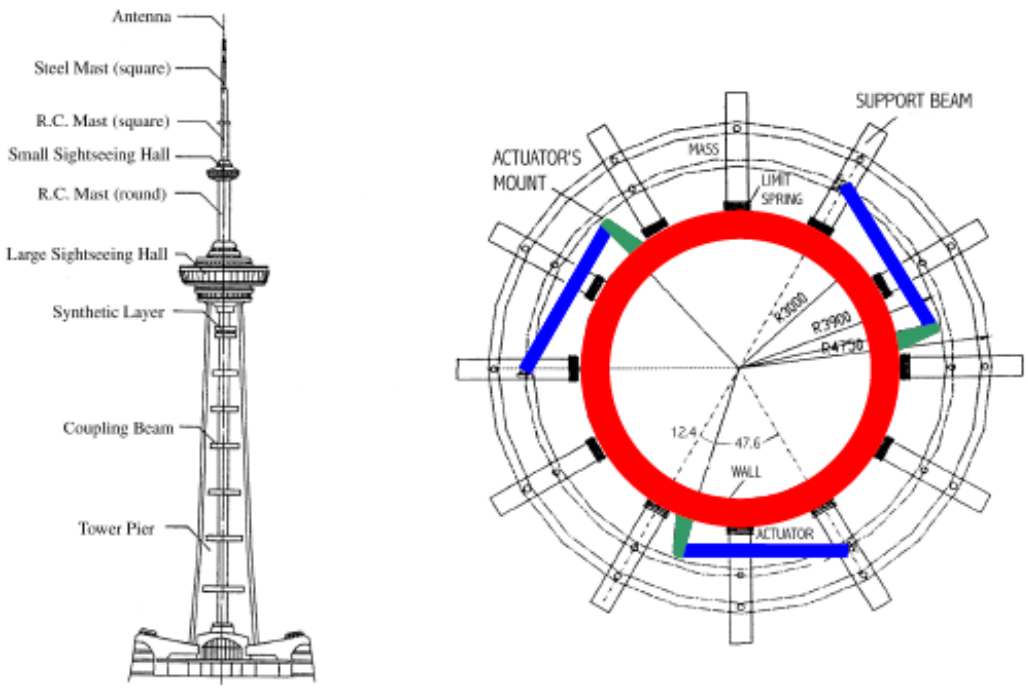
Σχήμα 3 : Σχηματικό διάγραμμα ενεργητικού ελέγχου

Όπως φαίνεται στο σχήμα, το σύστημα ελέγχου, χρησιμοποιεί τις μετρούμενες αποκρίσεις της κατασκευής, να υπολογίσει ένα κατάλληλο σήμα ελέγχου, που θα σταλεί στον επενεργητή (actuator), με απώτερο σκοπό την αύξηση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας του κτιρίου. Επιπλέον, γίνεται

φανερό στο παραπάνω σχήμα ότι το σύστημα ελέγχου, αλληλεπιδρά με την κατασκευή, το οποίο προφανώς μπορεί να εξηγηθεί φυσικά.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος στην κατηγορία του ενεργητικού ελέγχου είναι οι ενεργητικοί αποσβεστήρες (active mass dampers – AMD). Σε αυτό το σύστημα ελέγχου, τοποθετούνται βοηθητικές μάζες (που συνήθως δεν υπερβαίνουν το 1% του συνολικού βάρους της κατασκευής) σε επιλεγμένα σημεία της κατασκευής. Η σύνδεση με την κατασκευή πραγματοποιείται με ειδικά έμβολα, τα οποία αποτελούν φυσικά τους επενεργητές του συστήματος. Ως αισθητήρια όργανα, χρησιμοποιούμε κάποιους αισθητήρες που ανιχνεύουν τα φορτία και την επιτάχυνση του κτιρίου λόγω της σεισμικής διέγερσης. Τα δεδομένα αυτά στέλνονται σε έναν κεντρικό υπολογιστή, ο οποίος περιλαμβάνει τον αλγόριθμο ελέγχου, μέσω του οποίου υπολογίζονται τα κατάλληλα σήματα ελέγχου, τα οποία με τη σειρά τους στέλνονται στον επενεργητή (AMD).

Η πρώτη ουσιαστική εφαρμογή του ενεργητικού συστήματος ελέγχου κατασκευών πραγματοποιήθηκε το 1998 με τη συνεργασία της Κίνας και των Ηνωμένων πολιτειών Αμερικής, κατά τη διάρκεια κατασκευής του κτιρίου τηλεόρασης Nanjing TV Tower, ώστε να ελέγξουν την επίδραση του ανέμου και να εξουδετερώσουν τις κινήσεις που αυτός προκαλεί στην κατασκευή. Επενεργητές του συστήματος αποτελούσαν συμβατικά, υδραυλικά AMD. Παρακάτω φαίνεται μια Εικόνα που δείχνει τον πύργο της τηλεόρασης στην Κίνα καθώς και μια κάτοψη όπου φαίνονται οι επενεργητές του συστήματος :

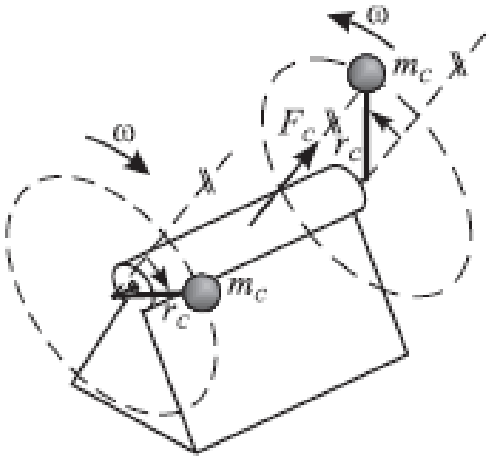


Εικόνα 1 : Όψη και κάτοψη του πύργου τηλεόρασης στην Κίνα

Το 2002 ο Our, προχώρησε σε μια καινοτομία που αφορούσε τους επενεργητές. Συγκεκριμένα, ανέπτυξε επενεργητή που βασίζεται, όχι στα συμβατικά υδραυλικά συστήματα, αλλά σε μαγνητική οδήγηση. Ένας τέτοιος επενεργητής φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα :

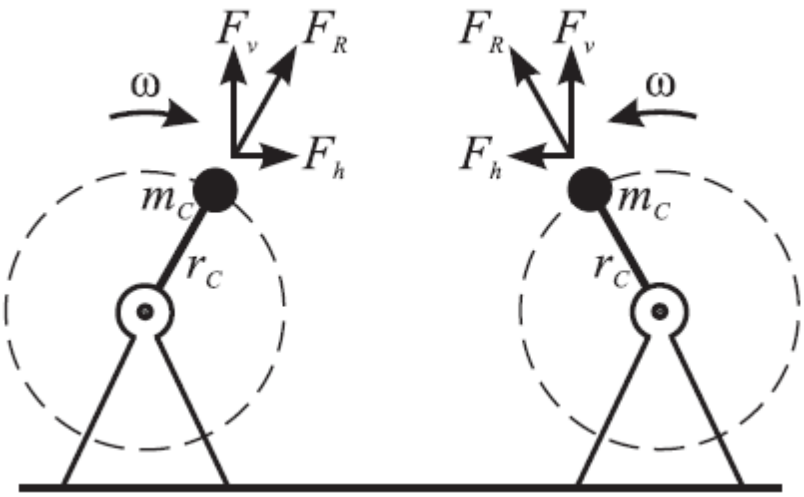
Εικόνα 2 : Μαγνητικός επενεργητής

Ένα καινοτόμο σύστημα επενεργητών παρουσιάσθηκε το 2010 από τους Jorn Scheller και Uwe Starossek από το πανεπιστήμιο του Αμβούργου και αφορά ένα σύστημα επενεργητών, σαν και αυτόν που φαίνεται παρακάτω :



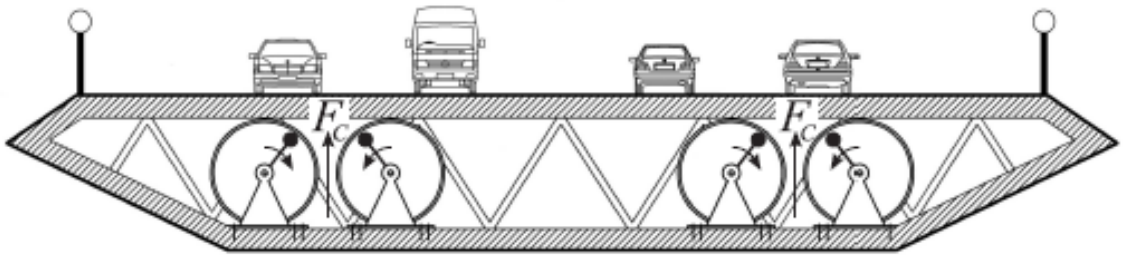
Σχήμα 4 : Καινοτόμο σύστημα επενεργητών (Αμβούργο, 2010)

Οι μάζες αυτές που διακρίνονται στο παραπάνω Σχήμα, μπορούν, αφού περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα, να δημιουργούν δυνάμεις και ροπές, όπως φαίνονται παρακάτω :



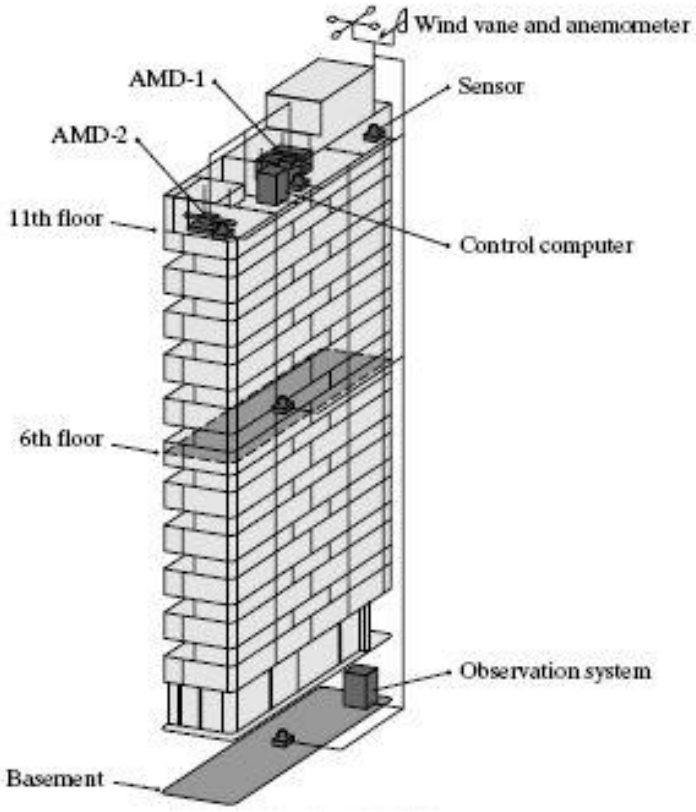
Σχήμα 5 : Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας περιστρεφόμενων μαζών

Κατά συνέπεια, όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, μπορούμε να παράγουμε κατάλληλες ροπές, μέσω της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης αυτών των μαζών. Παρακάτω, μπορούμε να διακρίνουμε ένα σύστημα τέτοιων επενεργητών, που χρησιμοποιείται κυρίως σε έλεγχο γεφυρών ή κινητών οδοστρωμάτων, καθώς μπορούν να τοποθετηθούν με τέτοιο προσανατολισμό, ώστε να προσφέρουν πολυδιάστατο έλεγχο, τόσο σε σεισμική διέγερση, όσο και σε διέγερση λόγω ανέμου :



Εικόνα 3 : Τυπική εφαρμογή επενεργητών από περιστρεφόμενες μάζες

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια όψη του 11-όροφου Kyobashi Seiwa building, στο Τόκιο της Ιαπωνίας. Το κτίριο αυτό, εφοδιάστηκε με δύο AMD από ανθρακούχο χάλυβα. Ο πρώτος, όπως βλέπουμε και στο σχήμα, τοποθετήθηκε στο κέντρο του δαπέδου, ώστε να αποσβένονται οι μεγάλες ταλαντώσεις. Ο δεύτερος, μικρότερης μάζας, τοποθετήθηκε στην άκρη του κτιρίου για μείωση της στρεπτικής καταπόνησης. Ο ρόλος λοιπόν του συγκεκριμένου συστήματος ήταν διπλός : Να μειώσει αφενός την ταλάντωση του συστήματος λόγω επίδρασης ισχυρών ανέμων και αφετέρου την ταλάντωση της κατασκευής λόγω σεισμικής διέγερσης.



Εικόνα 4 : Όψη του Kyobashi Seiwa building (Tokyo, Japan)

Παρόλη την πρωτόγνωρη εμπορική επιτυχία που σημείωσε και σημειώνει το σύστημα αυτό, προέκυψαν κάποια μηχανολογικά και κατασκευαστικά ζητήματα, τα οποία έχρηζαν αντιμετώπισης και περαιτέρω έρευνας. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι :

- Η μείωση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης
- Η απαίτηση εξωτερικής ενέργειας
- Η περιορισμένη αξιοπιστία και σθεναρότητα του συστήματος

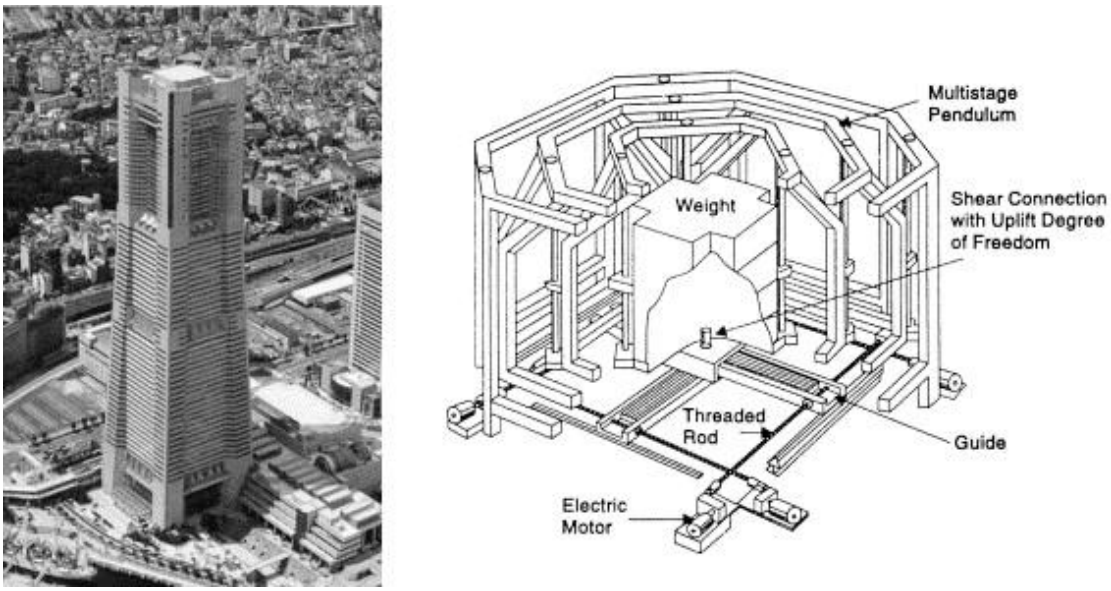
Οι απαιτήσεις αυτές οδήγησαν τους ερευνητές σε συστήματα που συνδυάζουν ενεργητικό και παθητικό έλεγχο, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία και μειώνοντας τις απαιτήσεις σε ενέργεια. Με βάση αυτή τη λογική, προέκυψαν τα υβριδικά συστήματα ελέγχου.

1.3.3 Υβριδικά συστήματα ελέγχου

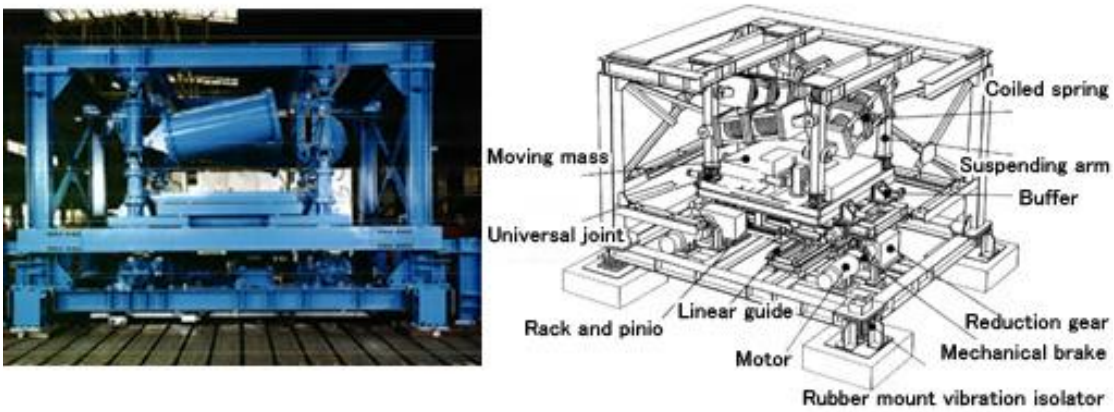
Οι υβριδικές τεχνικές ελέγχου που εξετάζονται από πολλούς ερευνητές στοχεύουν στην εκμετάλλευση της ικανότητας τους, προς αύξηση της ολικής αξιοπιστίας και αποτελεσματικότητας της ελεγχόμενης κατασκευής. Τυπικά ένα υβριδικό σύστημα ελέγχου ορίζεται ως ένα σύστημα ελέγχου το οποίο συνδυάζει και ενεργητικό και παθητικό έλεγχο, παρακάμπτοντας έτσι τους περιορισμούς από τη χρήση ενός από τους δύο ελέγχους. Η έρευνα στο πεδίο των υβριδικών συστημάτων αυτομάτου ελέγχου έχει εστιαστεί κυρίως σε δύο τύπους συστημάτων. Σε αυτά με υβριδικό αποσβεστήρα και σε αυτά με την υβριδική σεισμική μόνωση βάσης.

Ο υβριδικός αποσβεστήρας είναι η πιο συνηθισμένη διάταξη ελέγχου που χρησιμοποιείται σε κατασκευαστικές και μηχανολογικές εφαρμογές. Το HMD είναι ένας συνδυασμός αποσβεστήρα με κινούμενες μάζες (TMD)(παθητικός έλεγχος) και ενός επενεργητή (ενεργητικός έλεγχος). Η ικανότητα αυτής της διάταξης στο να μειώνει τις αποκρίσεις της κατασκευής βασίζεται κυρίως στη φυσική κίνηση του TMD. Οι δυνάμεις που εφαρμόζονται από τον επενεργητή ελέγχου αυξάνουν την αποτελεσματικότητα του HMD αλλά και τη ρωμαλεότητα του σε αλλαγές δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής. Η ενέργεια και οι δυνάμεις που απαιτούνται για τη λειτουργία ενός τυπικού HMD, είναι κατά πολύ μικρότερες από αυτές που απαιτούνται σε σχέση με ένα αμιγώς ενεργητικό σύστημα ελέγχου συγκρινόμενης απόδοσης. Επιπλέον, πολλές παραλλαγές του υβριδικού αυτού αποσβεστήρα είναι αποτελεσματικές και πρακτικά υλοποιήσιμες.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υβριδικών συστημάτων, φαίνονται στις παρακάτω εικόνες :



Εικόνα 5 : Τυπικό παράδειγμα υβριδικού αποσβεστήρα



Εικόνα 6 : Τυπικό παράδειγμα υβριδικής σεισμικής μόνωσης βάσης

Η υβριδική σεισμική μόνωση βάσης αποτελείται από το παθητικό σύστημα μόνωσης βάσης, σε συνδυασμό με έναν επενεργητή ελέγχου, που ασκεί κατάλληλες δυνάμεις ώστε να συμπληρώνει τα αποτελέσματα του συστήματος μονωμένης βάσης. Τα συστήματα μονωμένης βάσης εφαρμόζονται σε κατασκευές παγκοσμίως εδώ και πολλά χρόνια λόγω της ευκολίας εγκατάστασης, της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητάς τους. Από μόνα τους, τα συστήματα αυτά θεωρούνται παθητικά και συνεπώς στερούνται ικανότητας προσαρμογής σε διαφορετικές συνθήκες και απαιτήσεις σεισμικής

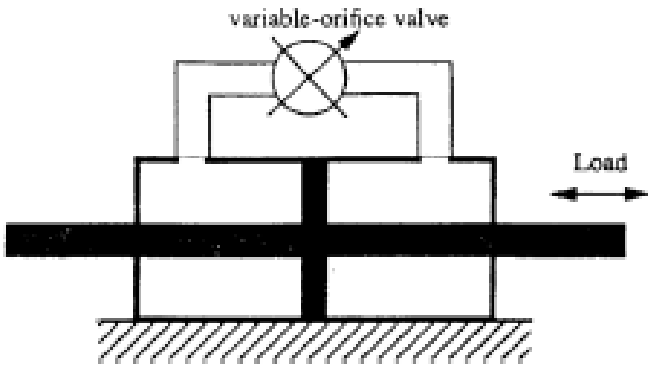
συμπεριφοράς. Με την προσθήκη ενός ενεργητικού συστήματος ελέγχου σε μια κατασκευή με μονωμένη βάση, μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά η συμπεριφορά του κτιρίου χωρίς μεγάλη επιβάρυνση στο κόστος.

1.3.4 Ημι-ενεργητικά συστήματα Αυτόματου Ελέγχου (Semi – Active Control Systems)

Οι στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται σε ημι-ενεργητικές τεχνικές συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά συστημάτων παθητικού και ενεργητικού ελέγχου. Ενδέχεται στο άμεσο μάλλον να γνωρίσουν μεγάλη αποδοχή στην τεχνολογία ελέγχου, ως ένα βιώσιμο μέσο προστασίας των δομικών κατασκευών από τους σεισμούς και από τους ισχυρούς ανέμους. Είναι αξιοσημείωτο ότι στα συστήματα αυτά, μπορούν να προσαρμοστούν συσκευές ενεργητικού ελέγχου, οι οποίες απαιτούν πολύ λιγότερη ενέργεια από ότι σε άλλες περιπτώσεις. Πολλές μάλιστα μπορούν να λειτουργήσουν και με μπαταρίες κάτι που είναι πολύ σημαντικό στις περιπτώσεις σεισμών όπου η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να διακοπεί. Ένα ήμι-ενεργητικό σύστημα ελέγχου έχεις ως βασικό χαρακτηριστικό ότι δε μεταδίδει ενέργεια στην ελεγχόμενη κατασκευή αλλά έχει ορισμένες ιδιότητες, οι οποίες μπορεί να μεταβάλλονται με έλεγχο ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη απόκριση του συστήματος. Μελέτες σε τέτοιου είδους συστήματα έδειξαν ότι με κατάλληλο σχεδιασμό μπορούν πράγματι να οδηγήσουν σε καλύτερη απόκριση κατασκευών. Τα συστήματα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνα τους αλλά και σε συνδυασμό τις προηγούμενες τεχνικές ελέγχου. Τα κυριότερα ημι-ενεργούμενα συστήματα είναι :

Α. Ο αποσβεστήρας μεταβλητού στομίου (Variable – Orifice Dampers)

Ένας τρόπος για την πραγματοποίηση ρυθμιζόμενης απόσβεσης είναι η χρησιμοποίηση ελεγχόμενης ηλεκτρομηχανικής βαλβίδας με μεταβλητό στόμιο, ώστε να μεταβάλλεται η ροή του υδραυλικού ρευστού μέσα σε ένα αποσβεστήρα. Τέτοιοι αποσβεστήρες βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε γέφυρες, με σκοπό την απορρόφηση των διαταραχών από διερχόμενα οχήματα, ισχυρούς ανέμους και σεισμικές δονήσεις. Παρακάτω φαίνεται ένας τέτοιος αποσβεστήρας :



Σχήμα 6 : Αποσβεστήρας μεταβλητού στομίου

Β. Αποσβεστήρας μεταβαλλόμενης τριβής (Variable – Friction Dampers)

Η λειτουργία τους στηρίζεται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ επιφανειών κατά τη διάρκεια τους σεισμού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα ένας άξονας τριβής ο οποίος είναι πακτωμένος στην κατασκευή. Η δύναμη τριβής είναι φυσικά ελεγχόμενη, επιτρέποντας ελεγχόμενη ολίσθηση πάνω στον άξονα.

Γ. Αποσβεστήρας ελεγχόμενου ρευστού (Controllable – Fluid Dampers)

Οι προηγούμενες ημι-ενεργητικές διατάξεις που αναφέρθηκαν απαιτούν ηλεκτρικές βαλβίδες και μηχανισμούς, συστατικά τα οποία μπορεί να αποδειχτούν προβληματικά σχετικά με την αξιοπιστία και τη συντήρησή τους. Το πλεονέκτημα των αποσβεστήρων ελεγχόμενου ρευστού είναι το ότι δεν περιέχουν κινούμενα μέρη, εκτός από το έμβολο.

Οι αποσβεστήρες αυτοί χρησιμοποιούν ως ελεγχόμενο ρευστό δύο είδη ρευστών :

- Τα ηλεκτροreολογικά (electroreological – ER) και
- Τα μαγνητορεολογικά (megnetoreological – MR)

Το κυριότερο χαρακτηριστικό τους είναι η αντιστρεπτή δυνατότητα τους να μεταβάλλουν σε μεγάλο εύρος το ιξώδες τους μέσα σε milliseconds, όταν εκτεθούν σε ηλεκτρικό (ER) ή μαγνητικό (MR) πεδίο. Έως τώρα, το ερευνητικό ενδιαφέρον μονοπωλούσαν τα ER, αλλά πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι

και τα MR ρευστά έχουν πολύ καλή απόδοση, αφού διαθέτουν την ικανότητα να παρέχουν ένα απλό και σταθερό ‘interface’ μεταξύ ηλεκτρονικών και μηχανικών μερών.

Ως ελεγχόμενο ρευστό ,το κυριότερο πλεονέκτημα ενός MR ρευστού είναι η μεγάλη, ελεγχόμενη τάση διαρροής που μπορεί να φτάσει. Τυπικά, η μέγιστη τάσης διαρροής ενός MR ρευστού, είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν του καλύτερου ER ρευστού, ενώ το ιξώδες του είναι σχεδόν το ίδιο. Αυτό επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των απαιτούμενων συσκευών, διότι η ελάχιστη ποσότητα ρευστού που απαιτείται σε έναν αποσβεστήρα είναι ανάλογη του ιξώδους και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μέγιστης πιθανής τάσης διαρροής. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, για να μπορέσουμε να πετύχουμε την ίδια μηχανική συμπεριφορά, χρειαζόμαστε ποσότητα MR ρευστού δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από εκείνη ενός ER ρευστού. Επιπλέον, τα MR ρευστά μπορούν να ελεγχθούν πιο εύκολα από μηχανικά και ηλεκτρονικά μέσα από ότι τα ER ρευστά. Παρόλο που οι απαιτήσεις σε ισχύ είναι περίπου ίδιες, μόνο οι συσκευές MR μπορούν να τροφοδοτηθούν από κοινές πηγές χαμηλής τάσης.

Ένα ακόμη μειονέκτημα των MR ρευστών είναι ότι δεν επηρεάζονται οι ιδιότητες τους από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι Carlson και Weiss, υπέδειξαν πως τα MR ρευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες από -40°C μέχρι 150°C με πολύ μικρές μεταβολές στην τάση διαρροής. Αυτό συμβαίνει γιατί η μαγνητική πόλωση των σωματιδίων δεν εξαρτάται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Εκτός από τη θερμοκρασία και οι μεταβολές της υγρασίας επηρεάζουν ελάχιστα τις μαγνητικές ιδιότητες του ρευστού.

Το ερευνητικό έργο σε θέματα σχετικά με τον αντισεισμικό σχεδιασμό, σε συνδυασμό με συστήματα ελέγχου, έχει απασχολήσει την ερευνητική κοινότητα από το 1980 περίπου σε θεωρητικό επίπεδο. Οι πρώτες πειραματικές προσεγγίσεις πραγματοποιήθηκαν από τον Soong μόλις το 1996, μέσω της δοκιμής της τεχνικής αυτής σε ένα μεταλλικό πλαίσιο 5 ορόφων με χρήση AMD.

1.4 Σεισμική μόνωση βάσης

Η φιλοσοφία της σεισμικής μόνωσης στην βάση των κατασκευών βασίζεται στη μείωση των σεισμικών αδρανειακών δυνάμεων που μεταφέρονται στην άνω δομή κατά την διάρκεια του σεισμού, με την τοποθέτηση ειδικών στοιχείων (εφεδράνων) μεταξύ του φέροντα οργανισμού της άνω δομής και της

θεμελίωσης, τα οποία χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη οριζόντια ευκαμψία τους. Η μείωση των σεισμικών επιταχύνσεων επιτυγχάνεται με την αύξηση της ιδιοπεριόδου καθώς και της δυνατότητας απόσβεσης σεισμικής ενέργειας στην κατασκευή. Αν και η αύξηση της ιδιοπεριόδου οδηγεί σε παράλληλη αύξηση των οριζόντιων σεισμικών μετακινήσεων, οι μεγάλες σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις λαμβάνουν χώρα στο σύστημα σεισμικής μόνωσης, ενώ οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις των ορόφων της κατασκευής παραμένουν χαμηλές. Τα παραπάνω καθιστούν τη σεισμική μόνωση στη βάση των κατασκευών ως μία από τις καλύτερες λύσεις βελτίωσης της απόκρισής τους στις σεισμικές κινήσεις.

Μπορεί να γίνει διαχωρισμός σε δυο μεθοδολογίες – φιλοσοφίες αντισεισμικού σχεδιασμού. Η πρώτη στοχεύει στο να προσδώσει στην κατασκευή την απαιτούμενη αντοχή ώστε να μπορεί να φέρει τα αναμενόμενα σεισμικά φορτία σχεδιασμού. Συνήθως, επειδή τα φορτία που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης είναι αρκετά μεγάλα σε μέγεθος, καθιστώντας την ελαστική απόκριση της κατασκευής από μη οικονομική έως και ανέφικτη, σημεία της κατασκευής σχεδιάζονται ώστε να διαρρέουν προσφέροντας έτσι μηχανισμούς απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο η κατασκευή θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά και πρέπει να εξασφαλιστεί μέσω του σχεδιασμού της, η απαιτούμενη πλαστικότητα. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω πρέπει οι παραμένουσες πλαστικές παραμορφώσεις της κατασκευής να παραμένουν εντός κάποιων ορίων ώστε να περιορίζονται οι ζημίες σε μη δομικά στοιχεία και να διατηρεί τη λειτουργικότητα της και μετά το σεισμικό γεγονός. Όλα αυτά είναι ενταγμένα σε μεγάλο αριθμό αντισεισμικών κανονισμών με διάφορες μορφές όπως η απαίτηση ελάχιστου αριθμού τοιχωμάτων και η απαίτηση οπλισμού περίσφιγξης.

Σε αντίθεση με την πρώτη αυτή θεώρηση που έχει ως στόχο να εξασφαλίσει επαρκή αντοχή σε μια κατασκευή, σε συνδυασμό με την απαιτούμενη πλαστικότητα, η προαναφερθείσα δεύτερη φιλοσοφία σχεδιασμού στοχεύει στην μείωση των δράσεων, δηλαδή των δυναμικών και αδρανειακών φορτιών που δέχεται η κατασκευή κατά τη διάρκεια του σεισμού. Με την μείωση των σεισμικών φορτίων οι απαιτήσεις σε αντοχή και πλαστικότητα των φερόντων στοιχείων μπορούν να μειωθούν σε σημαντικό βαθμό. Αυτή η μείωση είναι δυνατόν να επιτευχτεί με τη χρήση σεισμικών μονωτήρων οι οποίοι είναι

εύκαμπτα στοιχεία κατά την οριζόντια διεύθυνση που είναι σε θέση να παραλάβουν το σημαντικότερο μέρος των επιβαλλόμενων σεισμικών παραμορφώσεων. Οι σεισμικοί μονωτήρες πρέπει να έχουν τέτοια ευκαμψία και να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να απορροφούν σημαντικό μέρος της σεισμικής ενέργειας και να παραλαμβάνουν μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς βλάβες και χωρίς να χάνουν την ακαμψία τους στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Οι σεισμικοί μονωτήρες συνήθως εγκαθίσταται σε μια συγκεκριμένη στάθμη της κατασκευής. Με αυτόν τον τρόπο οι απαιτήσεις αντισεισμικότητας στην συγκεκριμένη αυτή στάθμη, οι επιβαλλόμενες σεισμικές μετακινήσεις παραλαμβάνονται από τους μονωτήρες, ενώ η υπόλοιπη κατασκευή μετακινείται από αυτή την στάθμη και άνω, ως οιονεί άκαμπτο στερεό σώμα, χωρίς να προκαλείται σε αυτή επιπλέον ένταση. Στην ουσία οι μονωτήρες λειτουργούν σαν μια ελαστική στήριξη που απορροφά το σεισμικό κραδασμό, μην αφήνοντας τον να εισέρθει στην κατασκευή και μειώνοντας παράλληλα την συνολική τέμνουσα βάσης που ασκείται στην κατασκευή.

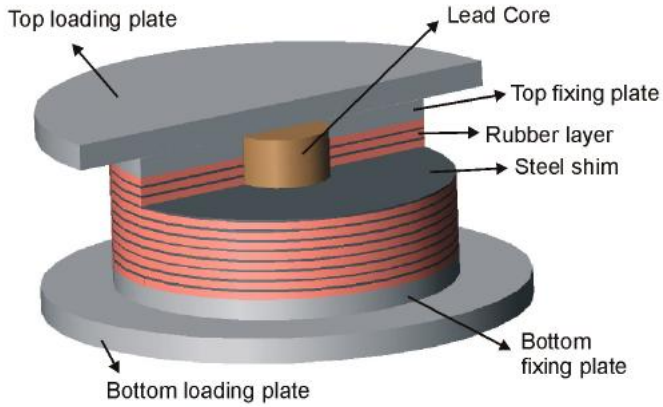
1.4.1 Τύποι Διατάξεων Σεισμικής Μόνωσης και Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αυτών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι σεισμικοί μονωτήρες είναι συσκευές με μεγάλη ευκαμψία και ελαστικότητα κατά τις πλευρικές οριζόντιες διευθύνσεις, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τη σημαντική απορρόφηση σεισμικής ενέργειας, χωρίς να μεταφέρεται καταπόνηση στο υπόλοιπο κτήριο. Στην κατακόρυφη διεύθυνση ωστόσο έχουν σημαντική ακαμψία και αντοχή ώστε να είναι σε θέση να φέρουν όλα τα φορτία βαρύτητας και λειτουργίας της κατασκευής. Διάφοροι τύποι σεισμικών μονωτήρων, με διαφορετικό τρόπο λειτουργίας, χρησιμοποιούνται στην πράξη για τη σεισμική μόνωση κατασκευών.

Οι ελαστομεταλλικοί μονωτήρες με πυρήνα μολύβδου είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους μονωτήρων και αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων ελαστικού (φυσικού ή συνθετικού) υλικού και χάλυβα. Ο πυρήνας τους είναι συμπαγής, κατασκευασμένος από μόλυβδο. Στο Σχήμα 1.14 φαίνεται ένας σεισμικός μονωτήρας τέτοιου τύπου [52].

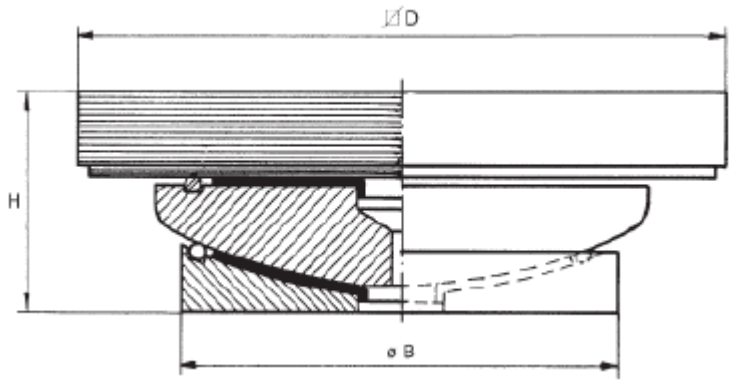
Η επιτυχής λειτουργία των ελαστομεταλλικών μονωτήρων (LRB) επιτυγχάνεται χάρη στο ελαστικό υλικό τους, το οποίο μπορεί να δέχεται σημαντικές πλευρικές παραμορφώσεις, απορροφώντας

σε σημαντικό βαθμό τη σεισμική ενέργεια. Οι ενδιάμεσες στρώσεις χάλυβα προσδίδουν αντοχή στο μονωτήρα και υψηλή δυνατότητα αποδοχής κατακόρυφων φορτίων. Ο πυρήνας μόλυβδου συντελεί στην απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας, ελέγχοντας τις πλευρικές μετακινήσεις ενώ αποτρέπει το κτήριο από το να κινηθεί πλευρικά όταν υποβάλλεται σε φορτία ανέμου ή άλλα μικρά σε μέγεθος οριζόντια φορτία λειτουργίας [86].



Εικόνα 7 : Τρισδιάστατη απεικόνιση του LRB

Οι σεισμικοί μονωτήρες ολίσθησης αποτελούνται από δυο καμπύλες ή επίπεδες επιφάνειες ολίσθησης που επιτρέπουν τις πλευρικές μετακινήσεις χάρη στη πολύ μικρή τριβή που έχουν ανάμεσα τους. Συνήθως κατασκευάζονται από PTFE (πολυτετραφθοαιθυλένιο), το οποίο είναι υλικό με πολύ μικρό συντελεστή τριβής. Στην Σχήμα 7 φαίνεται σχηματικά ένας σεισμικός μονωτήρας τέτοιου τύπου [86].



Σχήμα 7 : Σεισμικός μονωτήρας ολίσθησης

Όταν η ασκούμενη πλευρική δύναμη ξεπεράσει την τιμή της στατικής τριβής μεταξύ των δυο επιφανειών του μονωτήρα, τότε οι δυο πλάκες μετακινούνται σχετικά, αναγκάζοντας και την άνω δομή

να μετακινηθεί χωρίς να εντείνεται. Το βάρος της κατασκευής αναγκάζει το μονωτήρα να επανέλθει στην αρχική κατάσταση μετά το περάς της οριζόντιας φόρτισης. Ωστόσο σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων μετακινήσεων οι δυο επιφάνειες μπορεί να οδηγηθούν η μια στην άκρη της άλλης δημιουργώντας προβλήματα στην επαναφορά του μονωτήρα και στη λειτουργία του.

Οι σεισμικοί μονωτήρες υψηλής απόσβεσης πρόκειται για μονωτήρες από ελαστομερή υλικά με πολύ μεγάλη ελαστικότητα και ευκαμψία, συνήθως με παρουσία πυρήνα μολύβδου ο οποίος συνεισφέρει στη κατακόρυφη ακαμψία και συγκρατεί το μονωτήρα άλλα χωρίς τις εναλλακτικές μεταλλικές ή χαλύβδινες στρώσεις. Αυτοί οι μονωτήρες έχουν πολύ μεγάλες δυνατότητες πλευρικής μετακίνησης και δίνουν στην κατασκευή πολύ μεγάλη απόσβεση μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό το εύρος των σεισμικών μετακινήσεων.

1.4.2 Σύγχρονες Εφαρμογές της Σεισμικά Μονωμένης Βάσης

Η σεισμική μόνωση μπορεί να επιτευχθεί με την επιμήκυνση της φυσικής περιόδου ταλάντωσης μιας κατασκευής μέσω της χρήσης των ελαστικών εφεδράνων ανάμεσα στις κολόνες και τα θεμέλια όπως συζητήθηκε στη προηγούμενη ενότητα. Κατά συνέπεια, οι σεισμικές επιπτώσεις μειώνονται, το οποίο οδηγεί σε σημαντικές μειώσεις των μεταβλητών σεισμικής απόκρισης, όπως η επιτάχυνση του δαπέδου και η διάτμηση της βάσης. Από την άλλη πλευρά, όσο η ευκαμψία του συστήματος μόνωσης αυξάνεται, οι μετατοπίσεις της βάσης αυξάνονται. Δεδομένου ότι όλα τα συστήματα απομόνωσης έχουν την ικανότητα παραμόρφωσης, η μέγιστη παραμόρφωση του μονωτήρα δεν πρέπει να υπερβεί μια ορισμένη τιμή σχεδιασμού. Σε περίπτωση που η ικανότητα παραμόρφωσης των μονωτήρων υπερβεί αυτή την τιμή, μπορεί να συμβεί ρήξη ή και κύρτωση των μονωτήρων που θα ήταν ένα σημαντικό πρόβλημα ασφάλειας. [16]

Έτσι, είναι ζωτικής σημασίας να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι μέγιστες μετακινήσεις της βάσης σε περίπτωση μεγάλων σεισμών, ειδικά αν το κτίριο μόνωσης βάσης είναι πιθανόν να πληγεί από σεισμούς που βρίσκοντας κοντά σε ρήγμα (near-faultearthquakes). Τέτοιοι σεισμοί μπορεί να περιέχουν μεγάλης περιόδου παλμούς ταχύτητας που μπορεί να συμπίπτουν με την περίοδο των κατασκευών μόνωσης βάσης. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο μονωτήρας ενδέχεται να παραμορφωθεί υπερβολικά. Ο

UniformBuildingCode (UBC97) είναι ένας σεισμικός κωδικός που χρησιμοποιείται ευρέως στο σχεδιασμό των συστημάτων μόνωσης βάσης, ο οποίος περιέχει ειδικές διατάξεις που αφορούν τις επιπτώσεις των σεισμών που βρίσκονται κοντά σε ρήγμα, ανάλογα με την πλησιέστερη απόσταση από ένα ενεργό ρήγμα.[16]

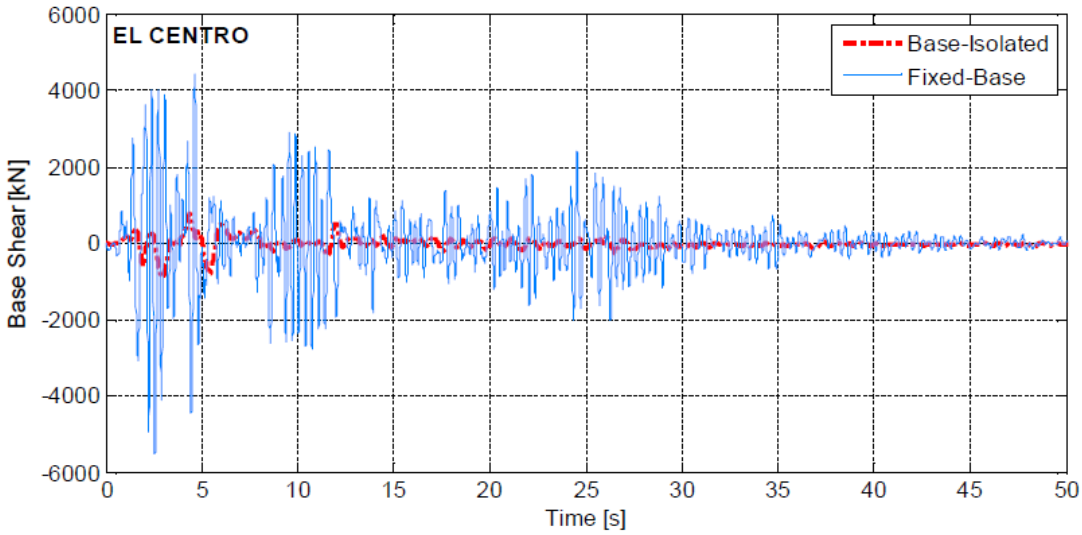
Σε μια μελέτη που έγινε από τους Cenk Alhan και Metin Altun, από το τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Κωνσταντινούπολης, πραγματοποιήθηκε μη-γραμμική ανάλυση του χρονικού ιστορικού - σε δυο διευθύνσεις - ενός 4-οροφου κτηρίου μόνωσης βάσης με στόχο τη διερεύνηση της απόδοσης του συστήματος μόνωσης βάσης, σχεδιασμένο με βάση τον UBC97. Έγινε η υπόθεση ότι το κτήριο βρίσκονταν κοντά σε ένα ενεργό ρήγμα και οι μετατοπίσεις σχεδιασμού των υψηλής απόσβεσης ελαστικών εφεδράνων υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας παραμέτρους που ορίζονται στον UBC97. Το κτίριο υποβλήθηκε στον σεισμό του 1940, El Centro, που μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ένας σεισμός μακριά από ρήγμα και στον σεισμού του 1996 στο Kobe, ο οποίος μπορεί να ταξινομηθεί ως σεισμός πλησίον ρήγματος.

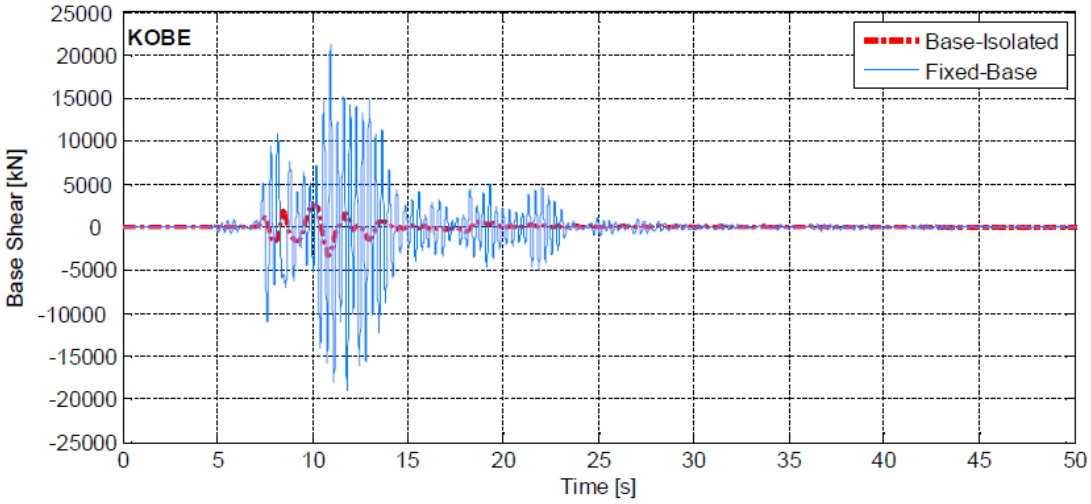
Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται το ιστορικό χρόνου της διάτμησης βάσης στην Χ-διεύθυνση ενός κτηρίου μόνωσης βάσης και το αντίστοιχο με σταθερή βάση για τους δύο σεισμούς, τον El Centro και τον Kobe. Όπως μπορεί να δει κανείς από την Εικόνα 8, η περίοδος του κτηρίου μόνωσης βάσης είναι πολύ μεγαλύτερη και η διάτμηση βάσης είναι πολύ μικρότερη. Προφανώς, οι σεισμικές επιδράσεις έχουν μειωθεί σημαντικά. [16]

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της κατασκευής όταν εκτίθενται σε σεισμούς κοντά ή μακριά από ρήγμα (Kobe Earthquake και El Centro Earthquake), έχουν δημιουργηθεί κάποια κριτήρια επιδόσεως. Αυτά περιλαμβάνουν την μέγιστη μετατόπιση της βάσης (peakbasedisplacement (P1)), το roof-drift ratio (P_2) που είναι ίσο με την διαφορά της μετατόπισης του $3^{ου}$ ορόφου (roof) από την μετατόπιση της βάσης διαιρούμενο με το ύψος του κτηρίου, την μέγιστη επιτάχυνση του τρίτου ορόφου (peak 3rdflooracceleration (P3)), και την μέγιστη διάτμηση της βάσης (peakbaseshear (P4)). Μια πλήρης λίστα των κριτηρίων επίδοσης παρουσιάζεται στο Πίνακα 1, όπου οι μετατοπίσεις, οι επιταχύνσεις και διατμήσεις βάσης που αναγράφονται, αναφέρονται στην διεύθυνση Χ. Φαίνεται καθαρά από τα

αποτελέσματα του πίνακα η επιτυχία της μόνωσης στην μείωση των μέγιστων διατμήσεων βάσης αλλά και στις επιταχύνσεις του τρίτου ορόφου για κάθε σεισμό αντίστοιχα. Μάλιστα η μέγιστη επιτάχυνση του τρίτου ορόφου είναι το 60% και 37% της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους στην περίπτωση του El Centro και τουKobe αντίστοιχα. Η ίδια περίπου μείωση επιτυγχάνεται και στην μέγιστη μετατόπιση της βάσης στην περίπτωση του σεισμού El Centro, η οποία φτάνει μόλις στα 6,51cm, λόγω του γεγονότος ότι αυτός ο σεισμός είναι μακριά από ενεργό ρήγμα, ενώ στην περίπτωση του σεισμούKobe παρατηρείται μια απογείωση της μετατόπισης στα 25,34 cm, το οποίο είναι το 91% του συνολικής σχεδιαστικής μετατόπισης που υπολογίστηκε σύμφωνα με τον UBC97 και δείχνει την σημασία που έχει να ληφθεί υπόψιν το γεγονός ότι αυτός ο σεισμός είναι κοντά σε ενεργό ρήγμα.[16]

Πρόσφατα προτάθηκε ένα νέο είδος συστήματος ημι-ενεργητικού ελέγχου μόνωσης βάσης που ενσωματώνει Μαγνητο-Ρεολογικά Ελαστομερή (Magneto-RheologicalElastormers) - (MREs) σε συστήματα μονωσης βάσης. Τα MREs περιέχουν σε μέγεθος μικρό, μαγνητιζόμενα σωματίδια που αιωρούνται σε ελαστομερή ή φτιαγμένα από καουτσούκ στερεά (π.χ., σιλικόνη ή φυσικό καουτσούκ). Η εφαρμογή μαγνητικού πεδίου στα ελαστομερή αυξάνει τον συντελεστή ελαστικότητας της ακαμψίας. Επιπλέον, τα MREs μπορούν να ξεπεράσουν πολλές δυσκολίες που έχουν τα υγρά MR, όπως η απόθεση, η μόλυνση του περιβάλλοντος και προβλήματα αλιείας, λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών τους.[16]



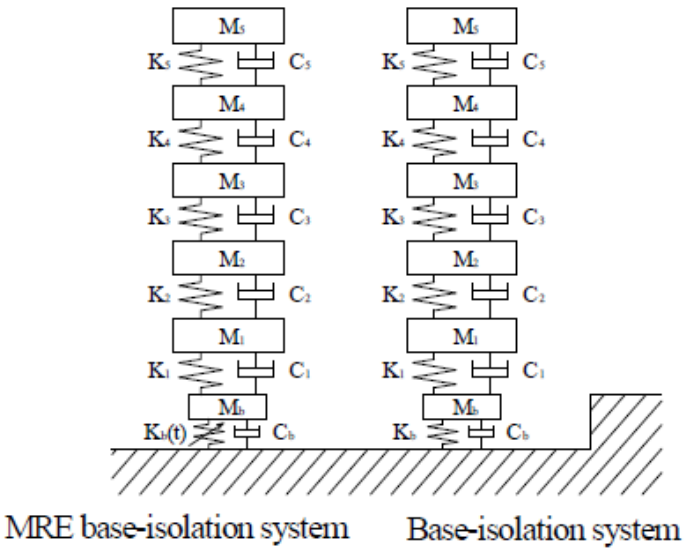


Εικόνα 8 : Διάτμηση Βάσης για την Περίπτωση των Σεισμών με και χωρίς Μόνωση Βάσης

Performance Criteria	EL CENTRO		KOBE	
	Fixed-base	*Base-isolated*	*Fixed-base*	*Base-isolated*
P_1 [cm]	-	6.51	-	25.34
P_2 (x10^{-3}) [-]	2.57	0.60	9.74	1.25
P_3 [m/s^2]	8.24	2.06	29.56	3.02
P_4 [kN]	5532	878	21206	3399
P_3/a_g [-]	2.41	0.60	3.61	0.37

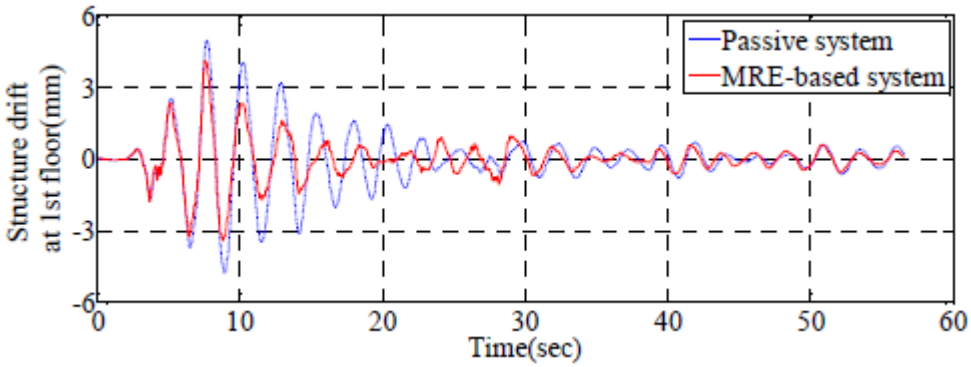
Πίνακας 1 : Κριτήρια Επίδοσης για τους σεισμούς El Centro και Kobe

Ο Hwang πραγματοποίησε μια εννοιολογική μελέτη για την εφαρμογή των MREs σε συστήματα μονωσης βάσης για κατασκευή κτηρίων. Ωστόσο, η εφαρμοσημότητα των MREs σε κατασκευές μονωσης βάσης δεν έχει πλήρως διερευνηθεί. ωστόσο διερευνάται η εφαρμογή ενός ευφυούς συστήματος μονωσης βάσης που χρησιμοποιεί τα MREs με τη διεξαγωγή αριθμητικών προσομοιώσεων. Για ένα δυναμικό μοντέλο από MREs, χρησιμοποιείται από τον Gandhi ένα ημι-ενεργητικό μοντέλο συσκευής ακαμψίας. Στις αριθμητικές προσομοιώσεις, θεωρείται το έξι βαθμών ελευθερίας κατασκευαστικό μοντέλο που φαίνεται στο Σχήμα 8 σε συνδυασμό με το σύστημα μονωσης βάσης και τρεις κλιμακούμενοι ιστορικοί σεισμοί (El Centro, Northridge και Hachinohe) χρησιμοποιούνται ως είσοδοι σαν εδαφικές διεργέσεις [29].

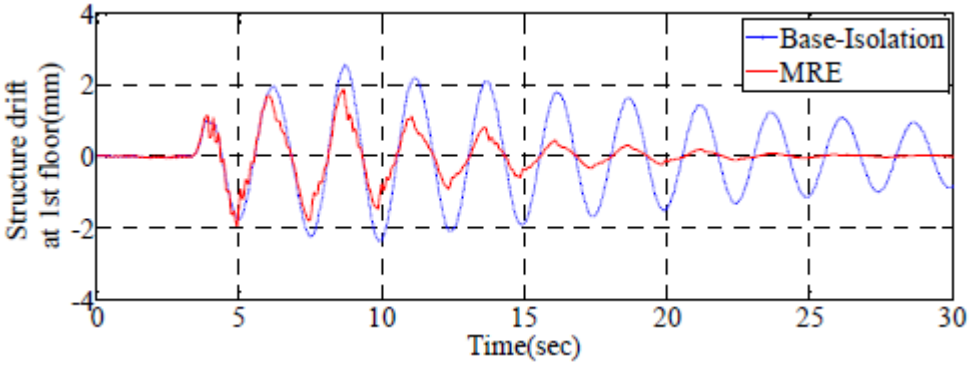


Σχήμα 8 : Το κτήριο που θεωρείται ότι είναι ένα σύστημα 5 βαθμών ελευθερίας

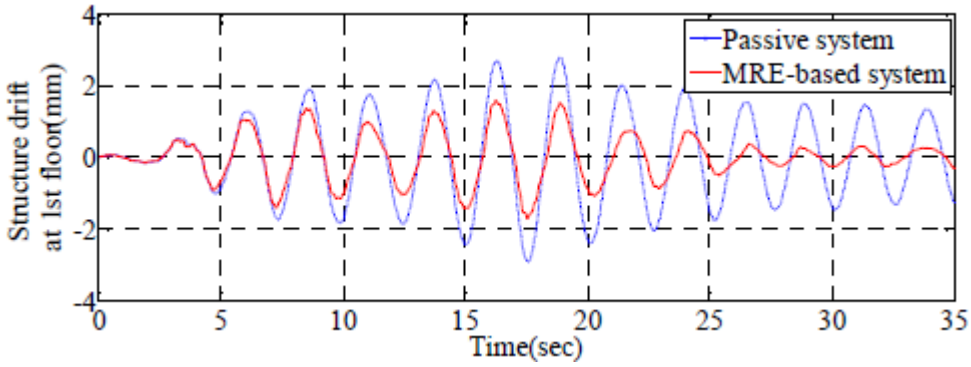
Για την επαλήθευση της εφαρμοσιμότητας του βασιζόμενου στα MRE, ευφυούς συστήματος μόνωσης βάσης, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης του υβριδικού συστήματος που χρησιμοποιεί MREs συγκρίθηκαν με εκείνα ενός παθητικού τύπου συστήματος μόνωσης βάσης, χρησιμοποιώντας εφέδρανα καουτσούκ (RB). Οι εικόνες 9,10 και 11 δείχνουν τη μετακίνηση του πρώτου για κάθε σύστημα για διάφορους σεισμούς [29].



Εικόνα 9 : Μετακίνηση πρώτου ορόφου (El Centro)

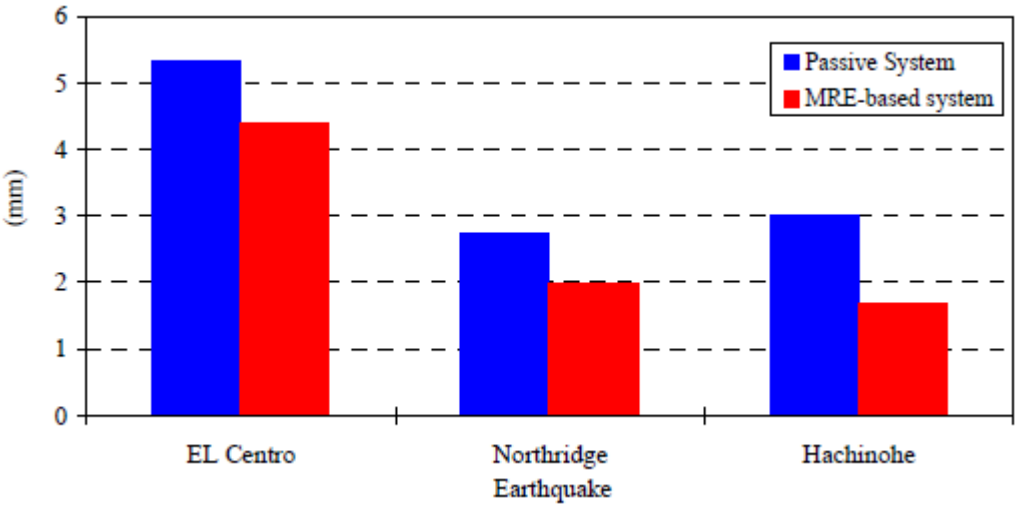


Εικόνα 10 : Μετακίνηση πρώτου ορόφου (Northridge)

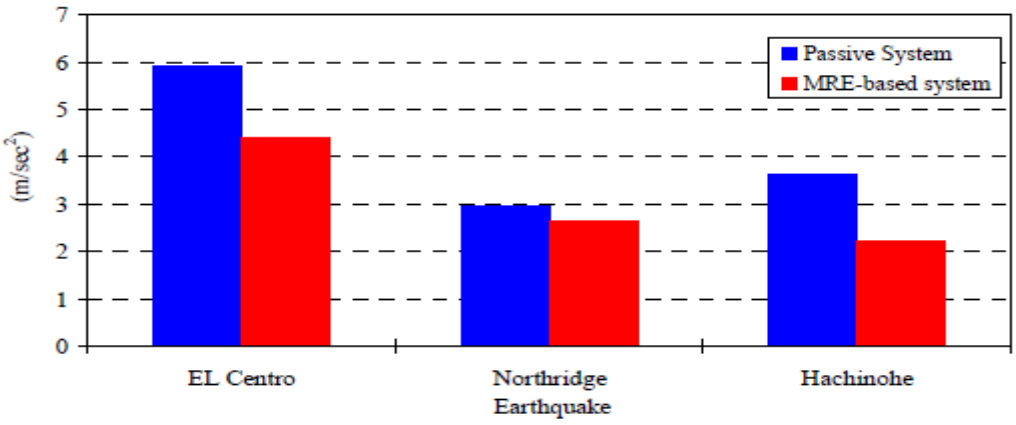


Εικόνα 11 : Μετακίνηση πρώτου ορόφου (Hanchnone)

Όπως φαίνεται στο σχήμα, το ευφυές σύστημα μόνωσης βάσης που χρησιμοποιεί MREs μειώνει σημαντικά την απόκριση σε σχέση με το παθητικό σύστημα τύπου μόνωσης βάσης για διάφορες διεγέρσεις. Οι εικόνες 12 και 13 συγκρίνουν τη μέγιστη μετατόπιση του πρώτου ορόφου και τη μέγιστη επιτάχυνση του υψηλότερου ορόφου για κάθε σεισμό, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η με MRE υπερτερεί του συμβατικό συστήματος μόνωση βάσης [29],[18].



Εικόνα 12 : Μετακίνηση πρώτου ορόφου για διάφορες σεισμικές διεργέσεις



Εικόνα 13 : Επιτάχυνση τελευταίου ορόφου για διάφορες σεισμικές διεργέσεις

1.5 Συνδυασμός Σεισμικά Μονωμένης Βάσης και Ενεργητικού Ελέγχου

Όπως ειπώθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, η σεισμικά μονωμένη βάση ελαττώνει σημαντικά τις διαταραχές που μεταδίδονται από το έδαφος στη βάση ενός κτιρίου (ισόγειο). Θεωρητικά, ο μόνος τρόπος για να επιτευχτεί η απόλυτη απομόνωση μιας κατασκευής είναι η στέγαση της κατασκευή πάνω σε σφαιρικά εφέδρανα κύλισης (ballbearings). Μια τέτοια διάταξη όμως δεν είναι πρακτική, αφού ακόμη και μικρές διαταραχές π.χ. άνεμος, θα μπορούσαν να προκαλέσουν κίνηση της κατασκευής, με συνέπεια αυτή να έφευγε από τη θέση της. Είναι επομένως απαραίτητη η χρήση ενός συστήματος που θα απομονώνει το κτίριο από τις διαταραχές αλλά ταυτόχρονα θα περιορίζει την κίνηση του εντός αποδεκτών ορίων. Σε αυτό το σημείο εμφανίζεται ο ενεργητικός έλεγχος, ο οποίος σε συνδυασμό με την ελαστική μόνωση της βάσης, θα περιορίζει τις ανεπιθύμητες μετατοπίσεις του κτιρίου μέσα σε πολύ μικρά όρια γύρω από την αρχική θέση ισορροπίας. Το τμήμα δηλαδή της διαταραχής που δεν θα απορροφηθεί από την ελαστική βάση, θα αντιμετωπισθεί από το σύστημα ενεργητικού ελέγχου [44].

Ο ενεργητικός έλεγχος των κατασκευών είχε προταθεί και παλαιότερα. Όμως οι προσπάθειες αυτές είχαν το μειονέκτημα απαίτησης μεγάλων δυνάμεων ελέγχου σε κάθε όροφο του κτιρίου, κάτι που οπωσδήποτε είναι μη πρακτικό. Η απαίτηση αυτή πηγάζει από το γεγονός ότι θέλουμε να διατηρήσουμε την κίνηση (μετατόπιση και ταχύτητα) κάθε ορόφου μικρή, ως προς το έδαφος καθώς και ως προς τους

γειτονικούς του ορόφους. Εάν οι σχετικές μετατοπίσεις και ταχύτητες είναι μικρές, θα είναι μικρές και οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των ορόφων. Δηλαδή στις παλαιότερες περιγραφές ο ενεργητικός έλεγχος αποσκοπούσε στο να κινήσει όλη την κατασκευή, έτσι ώστε να ακολουθεί την κίνηση του εδάφους. Χρησιμοποιώντας σχετικές συντεταγμένες η επιτάχυνση του εδάφους επιδρά σαν διαταραχή σε κάθε όροφο, για αυτό απαιτούνται δυνάμεις ελέγχου σε κάθε όροφο. [44].

Η φιλοσοφία της σεισμικά μονωμένης βάσης έρχεται να εξαλείψει την παραπάνω απαίτηση. Η σεισμικά μονωμένη βάση προσπαθεί να διατηρήσει όλη την κατασκευή ακίνητη ως προς την αρχική της αδιατάραχτη θέση. Δηλαδή να τη διατηρήσει ακίνητη ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, αφήνοντας το έδαφος από κάτω της να κινείται. Επομένως, η καταλληλότερη περιγραφή του συστήματος είναι με απόλυτες συντεταγμένες, δηλαδή ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο η διαταραχή από το έδαφος, υπό μορφή μετατόπισης και ταχύτητας του εδάφους, επιδρά μόνο στη βάση (ισόγειο). Οπότε και δύναμη ελέγχου εφαρμόζεται μόνο στη βάση. Επίσης το μέγιστο μέγεθος της δύναμης ελέγχου δεν χρειάζεται να ξεπερνά το μέγιστο μέγεθος της δύναμης διαταραχής που διαβιβάζεται στη βάση, ώστε να εξασφαλισθεί μικρή κίνηση (απόλυτη μετατόπιση και ταχύτητα) της βάσης. Γίνεται λοιπόν κατανοητό πως η σεισμικά μονωμένη βάση είναι πολύ σημαντική αφού διατηρεί τη μέγιστη διαταραχή όσο μικρή επιθυμούμε .

Είναι γνωστό ότι η σεισμικά μονωμένη βάση ελαττώνει σημαντικά τις διαταραχές που μεταδίδονται από το έδαφος σε ένα κτίριο. Θεωρητικά, "τέλεια απομόνωση" από οριζόντιες διαταραχές μπορεί να επιτευχθεί εάν ένα κτίριο εδράζεται σε εφέδρανα κύλισης (roller bearings). Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι πρακτικό, διότι μικρές εξωτερικές διαταραχές, για παράδειγμα ο άνεμος, θα έθεταν το κτίριο σε ανεπιθύμητες κινήσεις. Απομόνωση του κτιρίου από κάθε είδους διαταραχές μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ελαστικών εφεδράνων και ενεργητικού αυτόματου έλεγχου, διότι οι τυχόν μετατοπίσεις λόγω εφεδράνων μπορούν να εξουδετερωθούν με χρήση ενεργοποιητών και ειδικών ελεγκτών.

Ελεγκτές κατασκευών με εφαρμογή δυνάμεων σε κάθε όροφο, έχουν προταθεί στο παρελθόν. Η εφαρμογή αυτών των δυνάμεων μπορεί να επιτευχθεί με επιτάχυνση μεγάλων μαζών. Οι ελεγκτές αυτοί έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν σχετικά μεγάλες δυνάμεις ανά όροφο κτιρίου ή ανά ιδιομορφή της

κατασκευής. Επίσης, χρησιμοποιούν ενεργητικό αυτόματο έλεγχο για να αποτρέψουν την καταστροφή του κτιρίου μετακινώντας το συγχρόνως με το έδαφος. Επειδή η περιγραφή του συστήματος δίδεται σχετικά με το έδαφος, η σεισμική επιτάχυνση εμφανίζεται σαν διαταραχή για κάθε όροφο και επομένως, οι δυνάμεις πρέπει να εφαρμοσθούν σε κάθε όροφο. Η υλοποίηση της μεθόδου αυτής είναι κατασκευαστικά προβληματική και έχει μεγάλο κόστος.

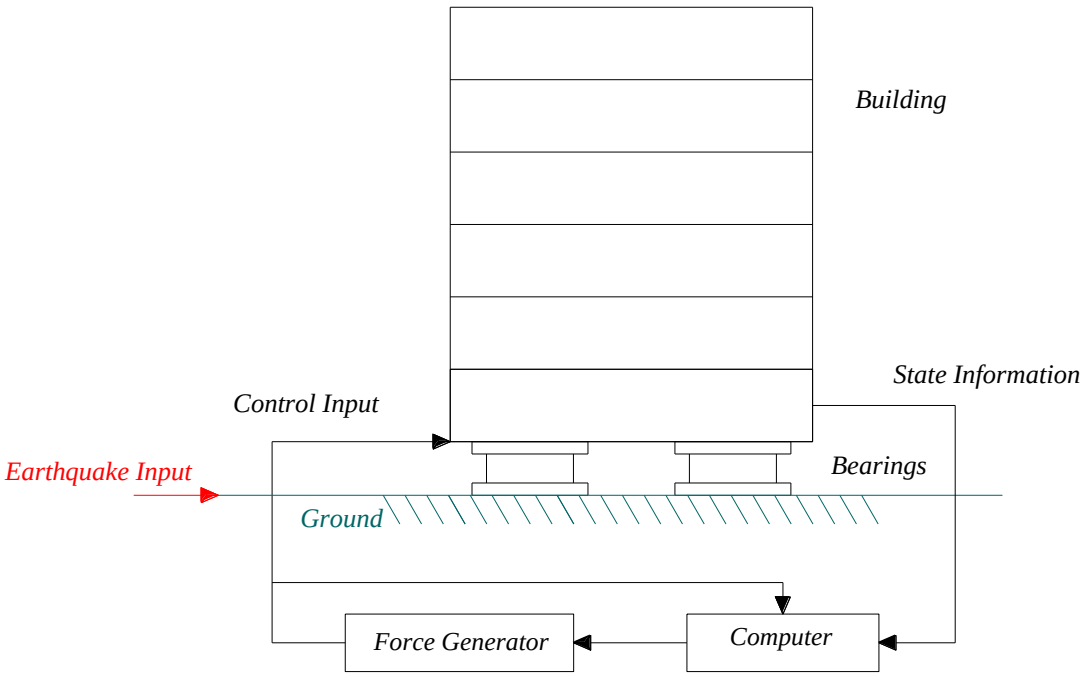
Η δύναμη ελέγχου εφαρμόζεται από ένα υδραυλικό έμβολο (επενεργητή). Με αυτήν την τοποθέτηση θα διερευνήσουμε το πρόβλημα σε μοντέλα κτιρίων με σεισμικά μονωμένη βάση, περιγραφόμενα σε αδρανειακές συντεταγμένες.

2. Μοντελοποίηση συστήματος

2.1 Σχεδιασμός συστήματος

Στο Σχήμα 22 απεικονίζεται μια πιθανή διάταξη του προτεινόμενου συστήματος αυτομάτου ελέγχου. Η σεισμική διαταραχή σε ένα μοντέλο που περιγράφεται σε αδρανειακό σύστημα αναφοράς εισέρχεται μόνο στον πρώτο όροφο (ισόγειο) [44].

Κατά την είσοδο της σεισμικής διαταραχής, το σύστημα συλλέγει τις απαραίτητες πληροφορίες για την απόκριση του κτιρίου με αισθητήρες που υπάρχουν στους ορόφους του. Από τις μετρήσεις, με κατάλληλη επεξεργασία προκύπτουν οι μεταβλητές κατάστασης (state variables) του συστήματος, οι οποίες επεξεργάζονται από τον κεντρικό υπολογιστή. Η αναγνώριση των μεταβλητών κατάστασης είναι ιδιαίτερα δύσκολη όταν υπάρχει ανάμιξη θορύβων ή διαταραχών και αβεβαιότητες. Ο υπολογιστής δίνει στην έξοδό του το σήμα για την εφαρμογή της κατάλληλης δύναμης ελέγχου (control input). Η δύναμη αυτή υλοποιείται μέσω ξεχωριστού αυτομάτου συστήματος [44].



Σχήμα 9 : Διάταξη Συστήματος Αυτομάτου Ελέγχου σε Κτίριο

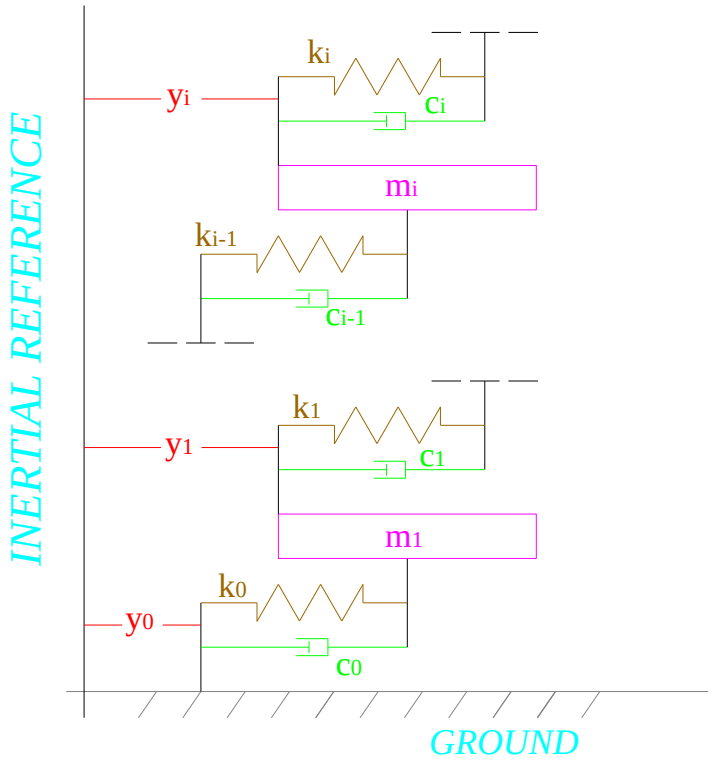
Ουσιαστικά, οι ζητούμενες ποσότητες είναι η απόλυτη ταχύτητα και η απόλυτη μετατόπιση των ορόφων (ως προς ένα αδρανειακό σύστημα). Η απόλυτη επιτάχυνση μπορεί να μετρηθεί με χρήση

επιταχυνσιόμετρων. Η ζητούμενη ταχύτητα και η μετατόπιση προκύπτουν τότε με ολοκλήρωση, δεδομένου ότι οι αρχικές συνθήκες είναι γνωστές και η επίδραση των θορύβων (από τα όργανα μέτρησης, λανθασμένες εκτιμήσεις, εξωγενείς παράγοντες κτλ.) φιλτράρεται κατάλληλα. Η σωστή εκτίμηση τέτοιων μεταβλητών αποτελεί πεδίο έρευνας, δεδομένου ότι οι ζητούμενες ποσότητες απαιτούνται σε πραγματικό χρόνο. Προς αυτήν την κατεύθυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν π.χ. φίλτρα Kalman ή παρατηρητές κατάστασης. Τις τιμές της ταχύτητας και μετατόπισης τις χρησιμοποιεί ο ελεγκτής κατά τον υπολογισμό της δύναμης ελέγχου που πρέπει να εφαρμοστεί στη βάση του κτιρίου [44].

Οι επενεργητές (υδραυλικά έμβολα) είναι τοποθετημένοι στο έδαφος το οποίο κατά τη διάρκεια του σεισμού δεν αποτελεί σταθερό σημείο στήριξης. Με τη βοήθεια ανεξάρτητου αυτομάτου συστήματος, οι επενεργητές εξασκούν τις απαιτούμενες δυνάμεις στους κατάλληλους χρόνους. Πρέπει λοιπόν η απαιτούμενη ενέργεια του ρυθμιστή να εξασφαλίζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές ανεξάρτητα από την κίνηση του εδάφους. Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος είναι απλή συγκρινόμενη με άλλα συστήματα που έχουν προταθεί τα οποία απαιτούν σημαντικές εξωτερικές δυνάμεις σε όλους τους ορόφους [44].

2.2 Δυναμικό (πλήρες) σύστημα κτιρίου

Η καταλληλότερη περιγραφή του συστήματος είναι με απόλυτες συντεταγμένες, δηλαδή ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Στην περίπτωση αυτή, η διαταραχή που μεταδίδεται από το έδαφος, παρουσιάζεται με μορφή εδαφικής μετατόπισης και ταχύτητας στο ισόγειο του κτιρίου μόνο. Έτσι, το αυτόματο σύστημα πρέπει να εφαρμόσει τις δυνάμεις ελέγχου μόνον στο επίπεδο του ισογείου. Έχουμε έτσι τη σωστή μαθηματική παρουσίαση για ένα υλοποιήσιμο αντισεισμικό σύστημα, που οδηγεί στο ζητούμενο: να παραμείνει το κτίριο κοντά στην αρχική του, αδιατάρακτη θέση κατά τη διάρκεια του σεισμού.



Σχήμα 10 : Μοντελοποιημένο κτίριο N ορόφων σε απόλυτες συντεταγμένες

Το φυσικό σύστημα που μελετάται παρακάτω είναι ένα κτίριο N ορόφων με σεισμικά μονωμένη βάση, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Για την παρούσα ανάλυση και σχεδιασμό, θεωρούμε ότι το φυσικό σύστημα μπορεί να παρασταθεί από ένα γραμμικό μοντέλο. Ο κάθε όροφος i παριστάνεται με μία άκαμπτη μάζα m_i. Ο όροφος i συνδέεται μέσω ελατηρίου και αποσβεστήρα με τον υποκείμενο (i-1) όροφο με τις σταθερές k_{i-1}, c_{i-1} ή στην περίπτωση του πρώτου ορόφου με το έδαφος. Η κίνηση θεωρούμε ότι λαμβάνει χώρα σε μία οριζόντια διεύθυνση [87].

Έστω ότι $y_0(t)$ είναι η μετατόπιση του εδάφους και $y_i(t)$ η μετατόπιση του i ορόφου ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς (Σχήμα 10) [87].

Οι εξισώσεις κίνησης του κτιρίου είναι:

$$
\begin{aligned}
&m_1\ddot{y}_1 = -c_0(\dot{y}_1-\dot{y}_0)-k_0(y_1-y_0)+c_1(\dot{y}_2-\dot{y}_1)+k_1(y_2-y_1)\\
&m_2\ddot{y}_2 = -c_1(\dot{y}_2-\dot{y}_1)-k_1(y_2-y_1)+c_2(\dot{y}_3-\dot{y}_2)+k_2(y_3-y_2)\\
&\ldots\ldots\\
&m_i\ddot{y}_i = -c_{i-1}(\dot{y}_i-\dot{y}_{i-1})-k_{i-1}(y_i-y_{i-1})+c_i(\dot{y}_{i+1}-\dot{y}_i)+k_i(y_{i+1}-y_i)\\
&\ldots\ldots\\
&m_N\ddot{y}_N = -c_{N-1}(\dot{y}_N-\dot{y}_{N-1})-k_{N-1}(y_N-y_{N-1})
\end{aligned}
\qquad (2.1\alpha)
$$

και

$$y_i(t_0) = y_i^0 \,,\ \dot{y}_i(t_0) = \dot{y}_i^0 \qquad (2.1\beta)$$

για $i = 1,2,\ldots,N$ είναι οι αρχικές συνθήκες την χρονική στιγμή $t = t_0$.

Για την παράσταση των εξισώσεων (2.1α), (2.1β) στο χώρο κατάστασης επιλέγουμε το διάνυσμα κατάστασης $x = (x_1, x_2, ..., x_{2N})^T$ όπου $x_i = \dot{y}_i$, $x_{i+N} = y_i$, $i = 1,2,\ldots,N$

Οι εξισώσεις του γραμμικού μοντέλου στο χώρο κατάστασης είναι:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Cv(t) \qquad (2.2\alpha)$$

$$x(t_0) = x_0 \qquad (2.2\beta)$$

$$A = \left[\begin{array}{ccccccc|ccccccc}
\frac{(-c_0 - c_1)}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} & 0 & \ldots & \ldots & \ldots & 0 & \frac{(-k_0 - k_1)}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & 0 & \ldots & \ldots & \ldots & 0 \\
\frac{c_1}{m_2} & \frac{(-c_1 - c_2)}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & 0 & \ldots & \ldots & 0 & \frac{k_1}{m_2} & \frac{(-k_1 - k_2)}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & 0 & \ldots & \ldots & 0 \\
\ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\
0 & \ldots & \frac{c_{i-1}}{m_i} & \frac{(-c_{i-1} - c_i)}{m_i} & \frac{c_i}{m_i} & \ldots & 0 & 0 & \ldots & \frac{k_{i-1}}{m_i} & \frac{(-k_{i-1} - k_i)}{m_i} & \frac{k_i}{m_i} & \ldots & 0 \\
\ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\
0 & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \frac{c_{N-1}}{m_N} & \frac{-c_{N-1}}{m_N} & 0 & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \frac{k_{N-1}}{m_N} & \frac{-k_{N-1}}{m_N} \\
\hline
\multicolumn{7}{c|}{I_{NxN}} & \multicolumn{7}{c}{O_{NxN}}
\end{array}\right]$$

$$C = \left[\begin{array}{cc}
\frac{c_o}{m_1} & \frac{k_o}{m_1} \\
\multicolumn{2}{c}{O_{(N-1)\,x\,2}} \\
\hline
\multicolumn{2}{c}{O_{N\,x\,2}}
\end{array}\right]$$

και $v = \begin{bmatrix} \dot{y}_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$ είναι η αβεβαιότητα (απόλυτη ταχύτητα και μετατόπιση του εδάφους) με γνωστό φράγμα, όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Α [87].

2.3 Χωρισμός σε υποσυστήματα

Βασικός στόχος της μεθόδου αυτής, είναι να απλοποιηθεί όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά η μαθηματική παράσταση του συστήματος. Το συγκεκριμένο πρόβλημα ενέχει πολλές «κρυφές» δυναμικές, οι οποίες υπό ορισμένες συνθήκες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά του συστήματος. Έτσι, προτείνονται δύο μέθοδοι χωρισμού του συστήματος σε υποσυστήματα, με απώτερο στόχο να απλοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο και η διαδικασία σχεδιασμού του συστήματος ελέγχου, όπως θα γίνει στη συνέχεια.

2.3.1 Πρώτη μέθοδος – Χωρισμός με κατάτμηση καταστατικών εξισώσεων

Με την τεχνική αυτή, το σύστημα χωρίζεται σε δύο υποσυστήματα :

- Το *υποσύστημα 1*, που αποτελεί τον πρώτο όροφο και
- Το *υποσύστημα 2*, που αποτελεί όλους τους υπόλοιπους ορόφους (στη συγκεκριμένη περίπτωση το δεύτερο και τελευταίο όροφο)

Το συνολικό σύστημα περιγράφεται έτσι με δύο ξεχωριστές δυναμικές εξισώσεις, οι οποίες δίνονται παρακάτω :

Υποσύστημα 1 :

$$\dot{\boldsymbol{z}}_1 = A_1\boldsymbol{z}_1 + B_1u_1 + D_1\boldsymbol{z}_0 + C_1\boldsymbol{z}_2$$

$$\boldsymbol{z}_1(t_0) = \boldsymbol{z}_1^0$$

Υποσύστημα 2 :

$$\dot{\boldsymbol{z}}_2 = A_2\boldsymbol{z}_2 + C_2\boldsymbol{z}_1$$

$$\boldsymbol{z}_2(t_0) = \boldsymbol{z}_2^0$$

Όπου τα διανύσματα z και οι πίνακες A, B, C και D ορίζονται ως εξής :

$$\boldsymbol{z}_1 = (\dot{y}_1, y_1)^T, \quad \boldsymbol{z}_0 = (\dot{y}_0, y_0)^T, \; \boldsymbol{z}_2 = (\dot{y}_2, \ldots, \dot{y}_N, y_2, \ldots, y_N)^T$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} (-c_0 - c_1)/m_1 & (-k_0 - k_1)/m_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1/m_1 & , & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C_1 = \left[\begin{array}{c:c:c:c} c_1/m_1 & & k_1/m_1 & \\ & O_{2x(N-2)} & & O_{2x(N-2)} \\ 0 & & 0 & \end{array}\right]$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} c_0/m_1 & k_0/m_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \left[\begin{array}{ccc:ccc} (-c_1 - c_2)/m_2 & c_2/m_2 & \ldots\ldots O & (-k_1 - k_2)/m_2 & k_2/m_2 & \ldots\ldots O \\ O..c_{i-1}/m_i & (-c_{i-1} - c_i)/m_i & c_i/m_i..O & O..k_{i-1}/m_i & (-k_{i-1} - k_i)/m_i & k_i/m_i..O \\ O\ldots\ldots\ldots & c_{N-1}/m_N & -c_{N-1}/m_N & O\ldots\ldots\ldots & k_{N-1}/m_N & -k_{N-1}/m_N \\ \hdashline & I_{(N-1)x(N-1)} & & & O_{(N-1)x(N-1)} & \end{array}\right]$$

$$C_2 = \left[\begin{array}{c:c} c_1/m_2 & \\ & O_{2x(2N-3)} \\ k_1/m_2 & \end{array}\right]^T$$

Όπως είναι εύκολα κατανοητό, η δυναμική του πρώτου συστήματος επηρεάζει τη δυναμική του δεύτερου συστήματος και αντίστροφα. Συγκεκριμένα, η δυναμική του πρώτου ορόφου επηρεάζεται από την κίνηση του εδάφους και τη δυναμική του δεύτερου υποσυστήματος, ενώ η δυναμική του δεύτερου υποσυστήματος επηρεάζεται από τη δυναμική μόνο του πρώτου ορόφου. Σκοπός είναι να σχεδιαστεί ένα σύστημα ελέγχου, ώστε οι μετατοπίσεις z1 και z2 να ελαχιστοποιούνται.

2.3.2 Δεύτερη μέθοδος – Χρήση τεχνικών ιδιόμορφων διαταραχών (Singular Perturbations)

Στη μοντελοποίηση του «πραγματικού» συστήματος, πολλές φορές δε λαμβάνονται υπόψη οι πολύπλοκες δυναμικές του συστήματος, ώστε να προκύψει ένα μοντέλο πιο εύχρηστο. Η αποφυγή τέτοιων πολύπλοκων δυναμικών οδηγεί σε ένα μοντέλο μειωμένης τάξης απ' ότι ένα μοντέλο στο οποίο

αυτές οι δυναμικές είναι υπαρκτές. Ένα απλό παράδειγμα είναι ένα παραμορφώσιμο μηχανικό μέρος μιας μηχανής να μοντελοποιηθεί ως απαραμόρφωτο. Το σημαντικότερο ζήτημα για τους μηχανικούς είναι εάν και κατά πόσο μπορεί κάποιος να προβλέψει σωστά τη συμπεριφορά του δυναμικού συστήματος πλήρους τάξης, έχοντας στη διάθεση του το δυναμικό σύστημα μειωμένης τάξης.

Γι' αυτό το σκοπό, πρώτοι οι Kokotovic και Khalil (1986) διατύπωσαν την έννοια του *ιδιόμορφα διαταραγμένου* συστήματος, με σκοπό να περιγράψουν το σύστημα πλήρους τάξης, σε σχέση με το σύστημα μειωμένης τάξης. Ως ένα ιδιόμορφα διαταραγμένο σύστημα ορίζεται ένα σύστημα του οποίου η συμπεριφορά εξαρτάται από μια παράμετρο μ με τέτοιο τρόπο, ώστε, σε περίπτωση που η παράμετρος αυτή είναι 0, το σύστημα να γίνεται μειωμένης τάξης, σε σχέση με διαφορετικές από το 0 τιμές αυτής της παραμέτρου. Έτσι, γίνεται διαχωρισμός του συστήματος πλήρους τάξης, σε δύο συστήματα : Το σύστημα μειωμένης τάξης (το οποίο λαμβάνεται αν θέσουμε μ=0) και το σύστημα οριακών συνθηκών.

Το σημαντικότερο θέμα για έναν μηχανικό ελέγχου, είναι το σύστημα που θα διαχειριστεί να είναι ευσταθές. Στο συγκεκριμένο σημείο θα επιχειρηθεί μια ανάλυση της ασυμπτωτικής ευστάθειας, καθώς και οι βασικές προϋποθέσεις που θα πρέπει να ικανοποιούνται, ώστε το σύστημα πλήρους τάξης να είναι ασυμπτωτικά ευσταθές, μελετώντας μόνο την ευστάθεια του συστήματος μειωμένης τάξης, για σχετικά μικρές τιμές της παραμέτρου μ.

Ξεκινώντας λοιπόν την ανάλυση, θεωρούμε το ιδιόμορφα διαταραγμένο σύστημα μας ως εξής :

$$\dot{x} = A_{11}(\mu)x + A_{12}(\mu)y + \mu^{1/2}A_{13}(\mu)\dot{y}$$

$$\mu\ddot{y} = A_{31}(\mu)x + A_{32}(\mu)y + \mu A_{33}(\mu)\dot{y}$$

, όπου $t \in \mathbb{R}$ είναι η μεταβλητή του χρόνου, $x \in \mathbb{R}^n$ και $y \in \mathbb{R}^m$ τα διανύσματα που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος και $\mu \in [0, \infty)$ είναι η παράμετρος των ιδιόμορφων διαταραχών.

Το σύστημα μειωμένης τάξης

Το σύστημα μειωμένης τάξης προκύπτει, όπως ειπώθηκε πριν, αν στο παραπάνω σύστημα θέσουμε μ=0. Έτσι, θα προκύψει το παρακάτω σύστημα :

$$\dot{x} = A_{11}(0)x + A_{12}(0)y$$

$$0 = A_{31}(0)x + A_{32}(0)y$$

Το σύστημα που προέκυψε, αποτελεί ένα νέο σύστημα της μορφής :

$$\dot{x} = \bar{A}x$$

$$y = Hx$$

Όπου :

$$\bar{A} \triangleq A_{11}(0) - A_{12}(0)A_{32}(0)^{-1}A_{31}(0)$$

$$H \triangleq -A_{32}(0)^{-1}A_{31}(0)$$

Υπόθεση : Υποθέτουμε, όπως έχει ήδη ειπωθεί, ότι το παραπάνω σύστημα είναι ευσταθές.

Βασισμένοι στη θεωρία του M. Corless, η οποία απαιτεί το σύστημα μειωμένης τάξης να ικανοποιεί δύο προϋποθέσεις, ώστε, εάν το σύστημα αυτό είναι ευσταθές, τότε και το σύστημα πλήρους τάξης είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Παρακάτω, παρουσιάζονται, χωρίς τις αποδείξεις τους, οι δύο προαναφερθείσες προϋποθέσεις :

Προϋπόθεση 1

Να υπάρχει μια θετικά ορισμένη μήτρα $S \in \mathbb{R}^{mxm}$ τέτοια ώστε :

1. $SA_{32}(0)$ *να είναι συμμετρική και θετικά ορισμένη*
2. $S\bar{C}$ *να είναι συμμετρική και θετικά ορισμένη*

, όπου :

$$\bar{C} \triangleq A_{33}(0) + A_{32}(0)^{-1}A_{31}(0)A_{12}(0)$$

Προϋπόθεση 2

Κάθε μήτρα $A_{ij}(\cdot), i = 1,2,3$ *και* $j = 1,2,3$ πρέπει να είναι συνεχής στο 0 και να ισχύουν τα παρακάτω :

1. $\lim_{\mu \to 0} \mu^{-1/2}[A_{31}(\mu) - A_{31}(0)] = 0$
2. $\lim_{\mu \to 0} \mu^{-1/2}[A_{32}(\mu) - A_{32}(0)] = 0$

Αν το σύστημα μειωμένης τάξης, ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις και είναι ευσταθές, τότε και το σύστημα πλήρους τάξης είναι ασυμπτωτικά ευσταθές.

2.4 Προσομοίωση χωρίς έλεγχο

2.4.1 Πρώτη μέθοδος

Παρακάτω παρουσιάζεται μια εφαρμογή της πρώτης τεχνικής για ένα κτίριο 2 ορόφων (N=2). Οι εξισώσεις για την περίπτωση του διώροφου κτιρίου γράφονται ως εξής:

$$m_1\ddot{y}_1 = -c_0(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - k_0(y_1 - y_0) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_1(y_2 - y_1)$$
$$m_2\ddot{y}_2 = -c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1(y_2 - y_1) + c_2(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + k_2(y_3 - y_2)$$

Όπου y_0 και $\dot{y}_0$ η μετατόπιση και η ταχύτητα του εδάφους, όπου y_1, y_2 οι μετατοπίσεις, $\dot{y}_1$, οι ταχύτητες και $\ddot{y}_1, \ddot{y}_2$ οι επιταχύνσεις των ορόφων 1,2 αντίστοιχα.

Για το υπό εξέταση κτίριο, οι μάζες των ορόφων είναι:

$$m_1 = 20000kg \text{ και } m_2 = 10000\ kg$$

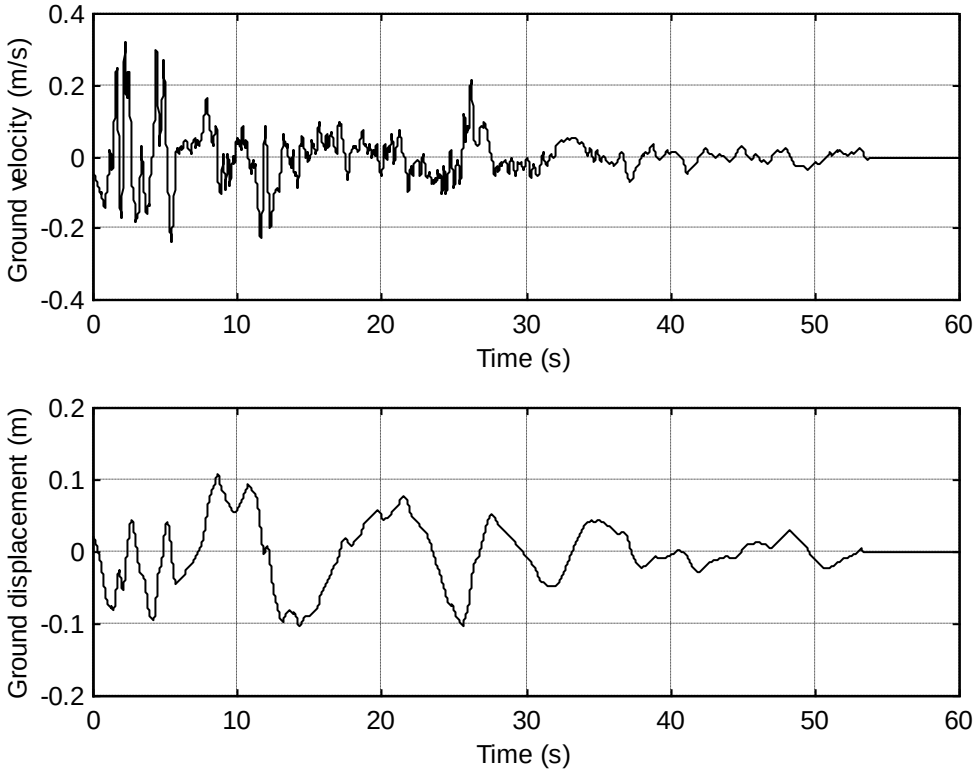
Οι σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης, λόγω της σεισμικής μόνωσης βάσης, είναι

$$k_0 = 2000\,N/m,\ c_o = 200\,Ns/m.$$

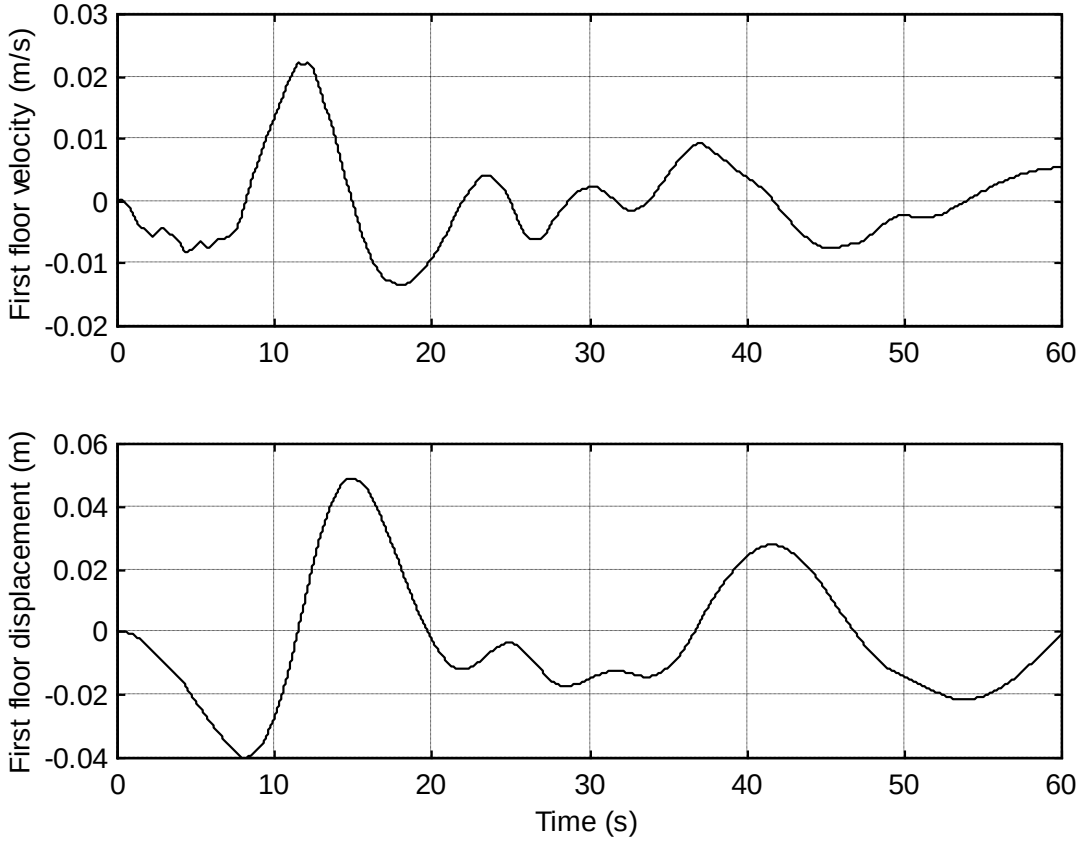
Αντίστοιχα, για τους δύο ορόφους, οι κοινές σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης, επιλέχθηκαν να είναι ίσες με :

$$k_1 = 100000\ N/m\ ,\ c_1 = 10000\ Ns/m\ .$$

Κατά την προσομοίωση του συστήματος στο λογισμικό Matlab – Simulink, λήφθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα που αφορούν τα μεγέθη της σεισμικής δόνησης, καθώς και τη συμπεριφορά του πρώτου ορόφου του υπό εξέταση κτιρίου:



Εικόνα 14 : Διαγράμματα ταχύτητας και μετατόπισης εδάφους (El Centro)



Εικόνα 15 : Ταχύτητα και μετατόπιση 1ου ορόφου χωρίς έλεγχο

2.4.2 Δεύτερη μέθοδος – Singular Perturbation

Βασικό τμήμα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η ανάλυση με τη μέθοδο των ιδιόμορφων διαταραχών, ενός 3-όροφου κτιρίου. Θεωρούμε ότι το κτίριο αυτό αποτελείται από τον πρώτο όροφο, με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης) και από τους άλλους δυο ορόφους, οι οποίοι θεωρείται ότι έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά.

Για την ανάλυση του δυναμικού αυτού συστήματος, θα θεωρήσουμε, ότι κατά τη διάρκεια κίνησης του κτιρίου, αλλάζει η ελαστική συμπεριφορά του κάθε ορόφου. Γι' αυτό το λόγο, θεωρούμε ότι η παράμετρος των ιδιόμορφων διαταραχών υπεισέρχεται και επηρεάζει τη σταθερά ελατηρίου K_i του κάθε ορόφου. Συνεπώς, η ανάλυση του 3-όροφου κτιρίου ξεκινάει γράφοντας τις εξισώσεις κίνησης του κτιρίου, όπως αυτές προκύπτουν από το 2^{ο} νόμο του Νεύτωνα :

$$m_1\ddot{y}_1 = -c_0(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - k_0(y_1 - y_0) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_1(y_2 - y_1)$$
$$m_2\ddot{y}_2 = -c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1(y_2 - y_1) + c_2(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + k_2(y_3 - y_2)$$
$$m_3\ddot{y}_3 = -c_2(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) - k_2(y_3 - y_2$$

Όπως είπαμε, θεωρούμε τις σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης για τους δύο πάνω ορόφους ίσες. Επομένως, θα ισχύει :

$$c_1 = c_2 = c = 10000\ Ns/m$$

$$k_1 = k_2 = k = 100000\ N/m$$

Για τον έδαφος, υποθέτοντας χρήση σεισμικής μόνωσης βάσης, οι τιμές που λαμβάνουν οι σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης είναι :

$$k = 2000\ N/m \text{ και } c = 200\ Ns/m$$

Για να εξάγουμε το μοντέλο του συστήματος, υπό μορφή ιδιόμορφων διαταραχών, θεωρούμε τις παρακάτω μεταβλητές :

$$\mu = k^{-1}$$

$$x_1 = y_1$$

$$x_2 = \dot{y}_1$$

$$z_1 = k\,(y_2 - y_1)$$

$$z_2 = k\,(y_3 - y_2)$$

$$u = \begin{bmatrix} y_0 \\ \dot{y}_0 \end{bmatrix}$$

Το δυναμικό μοντέλο του συστήματος, προκύπτει ως εξής :

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -\dfrac{k_0}{m_1} & -\dfrac{c_0}{m_1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ \dfrac{1}{m_1} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_1\\ z_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ \dfrac{\mu c}{m_1} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{z}_1\\ \dot{z}_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ \dfrac{k_0}{m_1} & \dfrac{c_0}{m_1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}y_0\\ \dot{y}_0\end{bmatrix}$$

$$\mu\begin{bmatrix}\ddot{z}_1\\ \ddot{z}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dfrac{k}{m_1} & \dfrac{c}{m_1}\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}-\dfrac{1}{m_2}-\dfrac{1}{m_1 m_2} & \dfrac{1}{m_2}\\ \dfrac{1}{m_2} & -1-\dfrac{1}{m_2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_1\\ z_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}-\dfrac{c}{m_2}-\dfrac{c}{m_1} & \dfrac{c}{m_2}\\ \dfrac{c}{m_2} & -\dfrac{c}{m_3}-\dfrac{c}{m_2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{z}_1\\ \dot{z}_2\end{bmatrix}$$

Επομένως για το παραπάνω μοντέλο, οι μήτρες που μας ενδιαφέρουν είναι :

$$A_{11}(\mu) \triangleq \begin{bmatrix}0 & 1\\ -\dfrac{k_0}{m_1} & -\dfrac{c_0}{m_1}\end{bmatrix}$$

$$A_{12}(\mu) \triangleq \begin{bmatrix}0 & 0\\ \dfrac{1}{m_1} & 0\end{bmatrix}$$

$$A_{13}(\mu) \triangleq \begin{bmatrix}0 & 0\\ \dfrac{\mu c}{m_1} & 0\end{bmatrix}$$

$$B \triangleq \begin{bmatrix}0 & 0\\ \dfrac{k_0}{m_1} & \dfrac{c_0}{m_1}\end{bmatrix}$$

$$A_{31}(\mu) \triangleq \begin{bmatrix}\dfrac{k}{m_1} & \dfrac{c}{m_1}\\ 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$A_{32}(\mu) \triangleq \begin{bmatrix}-\dfrac{1}{m_2}-\dfrac{1}{m_1 m_2} & \dfrac{1}{m_2}\\ \dfrac{1}{m_2} & -1-\dfrac{1}{m_2}\end{bmatrix}$$

$$A_{33}(\mu) \triangleq \begin{bmatrix} -\frac{c}{m_2} - \frac{c}{m_1} & \frac{c}{m_2} \\ \frac{c}{m_2} & -\frac{c}{m_3} - \frac{c}{m_2} \end{bmatrix}$$

Εξαγωγή του μοντέλου μειωμένης τάξης

Αν στο σύστημα των εξισώσεων που προέκυψε, θέσουμε, όπως προαναφέρθηκε, **μ=0**, προκύπτει το σύστημα μειωμένης τάξης :

$$\dot{x} = A_{11}(0)x + A_{12}(0)y + Bu$$

$$0 = A_{31}(0)x + A_{32}(0)y$$

Το σύστημα που προέκυψε, αποτελεί ένα νέο σύστημα της μορφής :

$$\dot{x} = \bar{A}x + Bu$$

Όπου :

$$\bar{A} \triangleq A_{11}(0) - A_{12}(0)A_{32}(0)^{-1}A_{31}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.4999 & -0.75 \end{bmatrix}$$

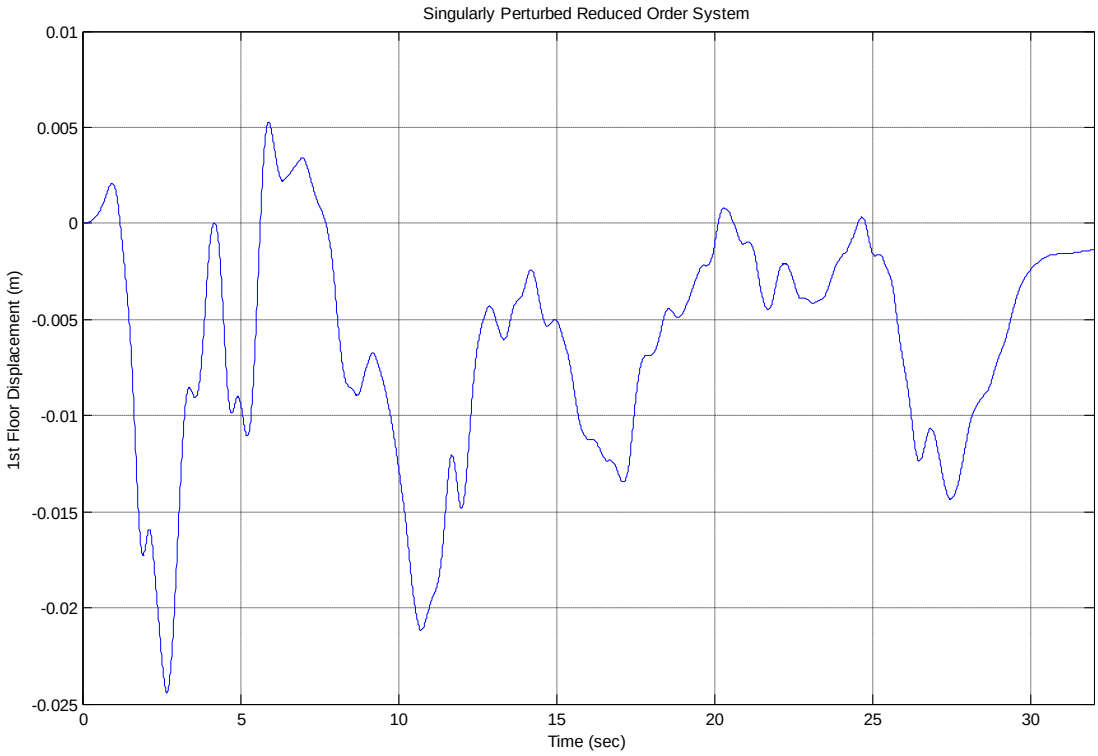
Άρα τελικά το σύστημα μας γίνεται :

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{-1.4999} & \mathbf{-0.75} \end{bmatrix} \boldsymbol{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{4} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \boldsymbol{u}$$

Οι ιδιοτιμές του πίνακα $\bar{A}$ είναι οι *-0.3750 + 1.1659i και -0.3750 - 1.1659i*. Έχουν τα πραγματικά τους μέρη αρνητικά, οπότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι *το σύστημα μειωμένης τάξης είναι ευσταθές* .

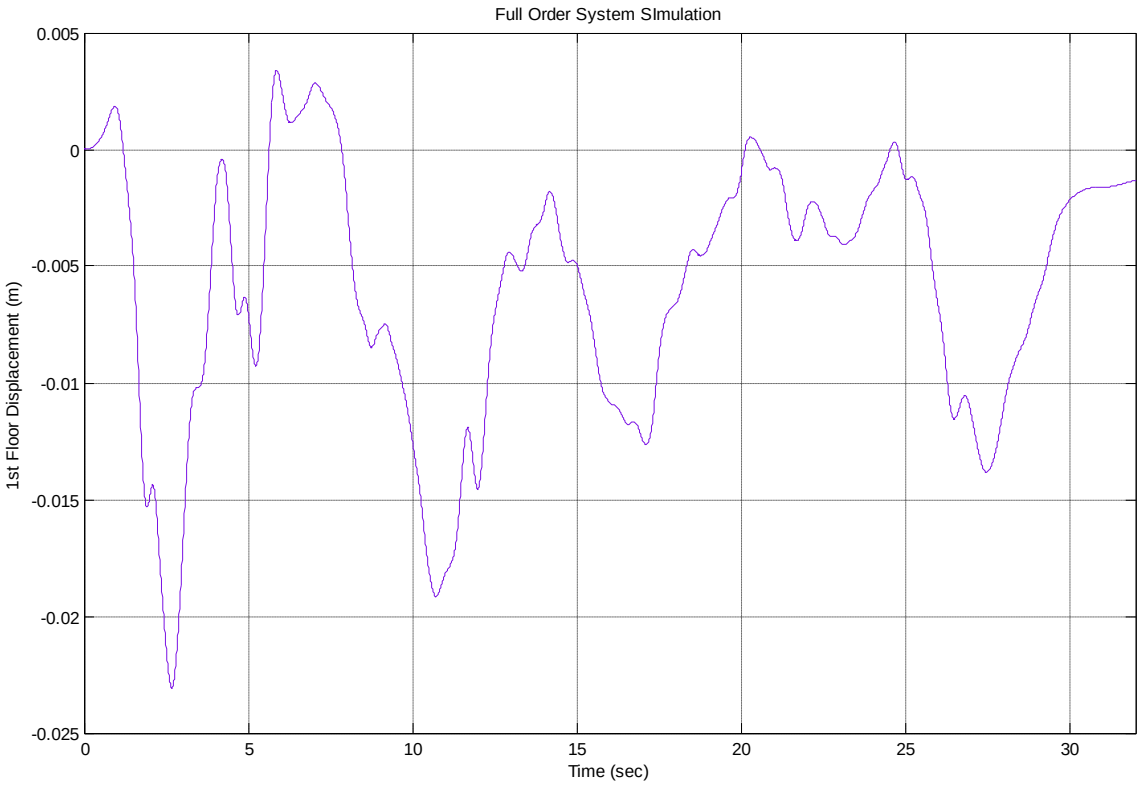
Κατά την προσομοίωση του συστήματος στο λογισμικό Matlab – Simulink, λήφθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα που αφορούν τη συμπεριφορά του πρώτου ορόφου του υπό εξέταση κτιρίου, με τη δεύτερη μέθοδο και στην περίπτωση του πλήρους μοντέλου αντίστοιχα, στην περίπτωση της ύπαρξης ή όχι σεισμικής μόνωσης βάσης.

Στην προσομοίωση λοιπόν του συστήματος με την τεχνική Singular Perturbation (SB) χωρίς τη χρήση σεισμικής μόνωσης βάσης, ελήφθησαν τα παρακάτω διαγράμματα :



Εικόνα 16 : Μετατόπιση 1ου ορόφου χωρίς χρήση σεισμικής μόνωσης (SP)

Για καλύτερη κατανόηση, παρατίθεται παρακάτω το αποτέλεσμα της προσομοίωσης στην περίπτωση του δυναμικού μοντέλου πλήρους τάξης (Full Order – FO), πάλι χωρίς τη χρήση σεισμικής μόνωσης βάσης :

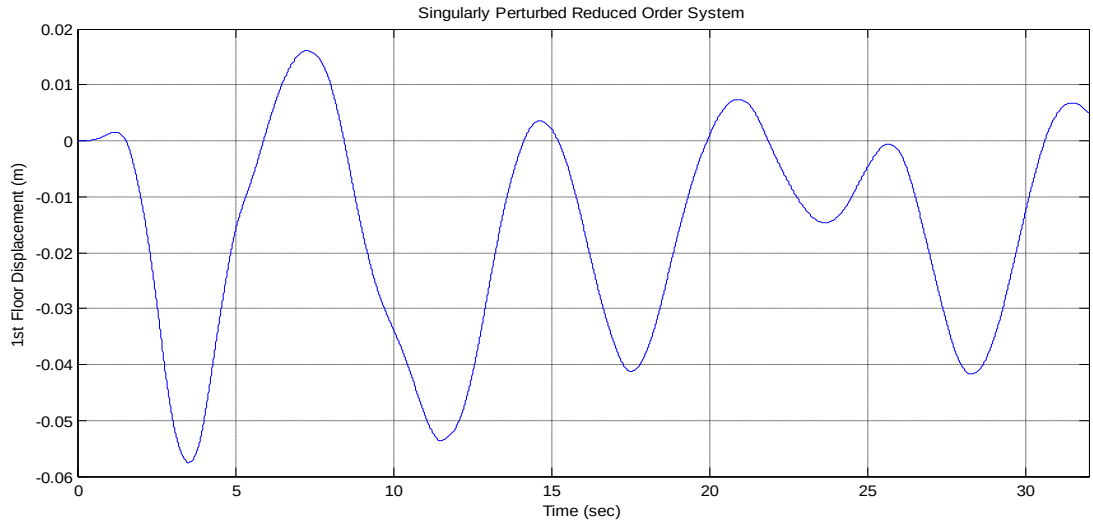


Εικόνα 17 : Μετατόπιση 1^{ου} ορόφου χωρίς χρήση σεισμικής μόνωσης (FO)

Παρατήρηση

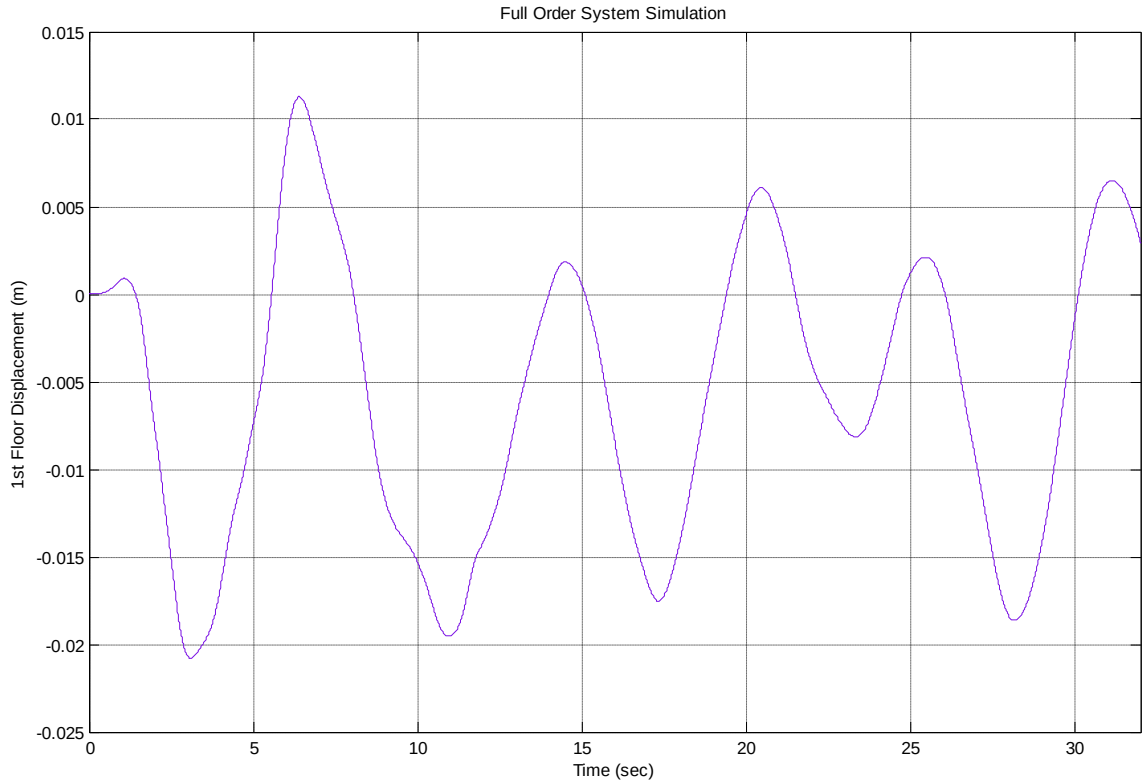
Εκ πρώτης όψεως, η συμπεριφορά των δύο μοντέλων είναι ποιοτικά και ποσοτικά σχεδόν η ίδια. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι παρατηρείται μια πολύ καλή συμπεριφορά του μειωμένου μοντέλου σε γρήγορες δυναμικές, όπως αυτή. Αυτό είναι και το μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής, όπως θα γίνει κατανοητό και στη συνέχεια.

Στην προσομοίωση του συστήματος πάλι χωρίς την εφαρμογή κάποιου ελέγχου αλλά με τη *χρήση σεισμικής μόνωσης βάσης*, ελήφθησαν τα παρακάτω διαγράμματα :



Εικόνα 18 : Μετατόπιση 1ου ορόφου με χρήση σεισμικής μόνωσης (SP)

Για λόγους κατανόησης, παρατίθεται παρακάτω το διάγραμμα που ελήφθη κατά την προσομοίωση του συστήματος, σύμφωνα με την πρώτη θεώρηση, δηλαδή χρησιμοποιώντας το δυναμικό μοντέλο πλήρους τάξης :



Εικόνα 19 : Μετατόπιση 1ου ορόφου με χρήση σεισμικής μόνωσης (FO)

Παρατήρηση

Παρατηρούμε ότι τα δύο διαγράμματα, παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια ποιοτική συμπεριφορά, με τη μόνη ουσιαστική διαφορά να εντοπίζεται στην πρώτη αρνητική κορυφή του σήματος. Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η τεχνική των ιδιόμορφων διαταραχών προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος πλήρους τάξης.

Βασικός στόχος των παραπάνω προσομοιώσεων ήταν να αποδειχτεί η αποτελεσματικότητα της τεχνικής των ιδιόμορφων διαταραχών (singular perturbations) στο να αποτυπώνει σωστά τη δυναμική ενός συστήματος, ακόμη και όταν το μοντέλο είναι μειωμένης τάξης. Αυτός είναι και ο βασικός σκοπός αυτής της τεχνικής, να απλοποιήσει δηλαδή τη δυναμική του μοντέλου με τέτοιον τρόπο, ώστε να μην «χάνεται» σημαντική πληροφορία για τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.

2.5 Ο υδραυλικός επενεργητής

2.5.1 Εισαγωγή - Ορισμός

Όπως προαναφέρθηκε, ο επενεργητής που θα ασκήσει την κατάλληλη δύναμη στον πρώτο όροφο του υπό έλεγχο κτιρίου είναι υδραυλικό σύστημα. Τα υδραυλικά συστήματα είναι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση κίνησης και μεταφορά ισχύος από την κινητήρια στην κινούμενη μηχανή (εργομηχανή) και χρησιμοποιούνται ως εργαζόμενο μέσο ένα υδραυλικό ρευστό (υγρό ή αέριο).

Η υδραυλική ισχύς είναι στην υπηρεσία του ανθρώπου εδώ και πολλούς αιώνες. Χρησιμοποιήθηκε για την προώθηση πλοίων, κίνηση ανεμόμυλων και νεροτροχών. Ακόμη και σήμερα η υδραυλική ισχύς χρησιμοποιείται στους υδραυλικούς σταθμούς ή στους ανεμόμυλους αιολικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στα ανωτέρω παραδείγματα πρωτεύοντα ρόλο έχει η κινητική ενέργεια του ρευστού. Η υδραυλική ισχύς, όπως χρησιμοποιείται σήμερα, δεν περιλαμβάνει αυτά τα παραδείγματα και είθισται να σημαίνει τη μεταφορά ισχύος και ενέργειας μέσω ρευστών, ευρισκόμενων υπό πίεση, εις τα οποία η ενέργεια είναι δυναμική και όχι κινητική όπως στις παραπάνω περιπτώσεις.

Η ανάπτυξη του αντικειμένου άρχισε από τον Pascal το 1648, τη θεωρία του οποίου εφάρμοσε ο Braham έναν αιώνα αργότερα. Η υδραυλική μετάδοση ισχύος βρήκε πολύ γρήγορα πολλές εφαρμογές όπως βιομηχανικά υδραυλικά, πρέσσες, βαριά βιομηχανία, εργαλειομηχανές, ανυψωτικά μηχανήματα καθώς και σε πολλές άλλες περιπτώσεις που συναντά κανείς ακόμη και σήμερα (φρένα αυτοκινήτων, κ.α).

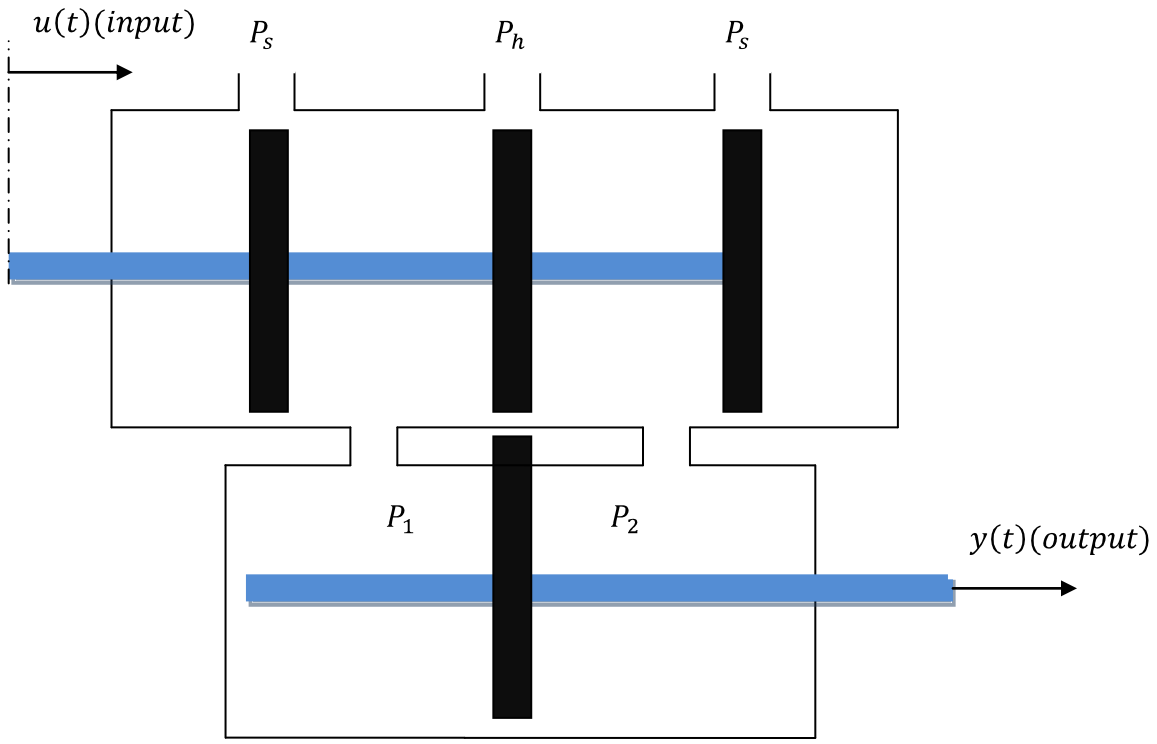
Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των υδραυλικών συστημάτων είναι η ικανότητά τους για δημιουργία πολύ μεγάλων δυνάμεων. Επίσης ένα ακόμη πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι ο υψηλός λόγος δύναμης προς το βάρος. Έτσι οι υδραυλικές συσκευές βρίσκονται σε πλεονεκτική θέση έναντι των άλλων συσκευών όταν απαιτείται ελαχιστοποίηση του βάρους της κατασκευής όπως αεροπλάνα, βλήματα και πυραύλους. Οι υδραυλικές αντλίες, για παράδειγμα, είναι πολύ μικρότερες των ηλεκτρικών κινητήρων για την ίδια ονομαστική ισχύ. Αυτή η διαφορά μεγέθους και βάρους οφείλεται στις υψηλές πιέσεις των υδραυλικών συστημάτων όπου πιέσεις μέχρι 300 bar είναι συνήθεις, ενώ ο μαγνήτης ενός ηλεκτρικού κινητήρα μπορεί να ασκήσει ελκτική δύναμη που αντιστοιχεί σε πίεση μέχρι 20 bar.

2.5.2 Βασικά μέρη – Λειτουργία

Τα βασικά εξαρτήματα ενός υδραυλικού συστήματος είναι : η αποθήκη εργαζόμενου μέσου, η αντλία που ενεργοποιεί το υδραυλικό ρευστό, ένας ηλεκτρικός κινητήρας για την κίνηση της αντλίας, βαλβίδες για τον έλεγχο της ροής και της πίεσης, ένας υδραυλικός κύλινδρος για γραμμική κίνηση στην εργομηχανή ή ένας υδραυλικός κινητήρας για την περιστροφή της ατράκτου της εργομηχανής. Το απλούστερο υδραυλικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μια αντλία, μία αποθήκη, μια βαλβίδα και έναν κινητήρα ή κύλινδρο. Μερικά συστήματα μπορεί να περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερες αντλίες, πολλές βαλβίδες διαφόρων τύπων και συνήθως αρκετούς κινητήρες ή κυλίνδρους για ποικίλες θέσεις εργασίας. Το πλήθος και το είδος των εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιηθούν μπορεί να συνδυαστεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε να δημιουργηθεί ένα υδραυλικός σύστημα για οποιονδήποτε συνδυασμό κινήσεως και δυνάμεως απαιτείται.

Σε ένα υδραυλικό σύστημα ισχύει : Ισχύς = Δύναμη · Ταχύτητα = Πίεση · Επιφάνεια · Ταχύτητα = Πίεση · Παροχή Όγκου, δηλαδή για δεδομένη ισχύ, μια υδραυλική αντλία εργαζόμενη σε υψηλή πίεση χρειάζεται μικρή παροχή υδραυλικού ρευστού και συνεπώς μπορεί να έχει μικρές διαστάσεις. Στην παρούσα εργασία, θέλουμε να παράγουμε δύναμη προς μια κατεύθυνση γραμμικά, γι' αυτό και θα χρησιμοποιήσουμε γραμμικό υδραυλικό επενεργητή.

2.5.3 Μοντελοποίηση γραμμικού υδραυλικού επενεργητή



Ο υδραυλικός επενεργητής είναι, ως στοιχείο ελέγχου, ένας ενισχυτής δύναμης που ελέγχεται μέσω μιας βαλβίδας. Η βαλβίδα αυτή είναι ισοζυγισμένη, δηλαδή όλες οι δυνάμεις πίεσης που ασκούνται πάνω της είναι ισοζυγισμένες. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, η κίνηση της βαλβίδας ελέγχου ρυθμίζει τη ροή του λαδιού υψηλής πίεσης (P_h), σε κάθε μία από τις πλευρές του κυλίνδρου. Μια κίνηση ($x(t)$) της βαλβίδας, έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη εισροή λαδιού. Αν η βαλβίδα κινηθεί δεξιά, θα έχουμε εισροή λαδιού στο αριστερό άκρο του κυλίνδρου και αν κινηθεί αριστερά θα έχουμε εισροή στο δεξί άκρο. Η επακόλουθη διαφορά πιέσεων στο κεντρικό πιστόνι προκαλεί κίνηση($y(t)$) του άξονα. Το λάδι που εισρέει, παρέχεται από τη δεξαμενή υψηλής πίεσης, ενώ στο άλλο άκρο το λάδι που ωθείται από το κεντρικό πιστόνι και φεύγει από τον κύλινδρο, αποχετεύεται και επανακυκλοφορεί μέσω μιας αντλίας.

Το φορτίο πίεσης P_L που επιβάλλεται στο πιστόνι, είναι η διαφορά πιέσεων που υπάρχουν σε κάθε πλευρά του πιστονιού. Δηλαδή θα ισχύει :

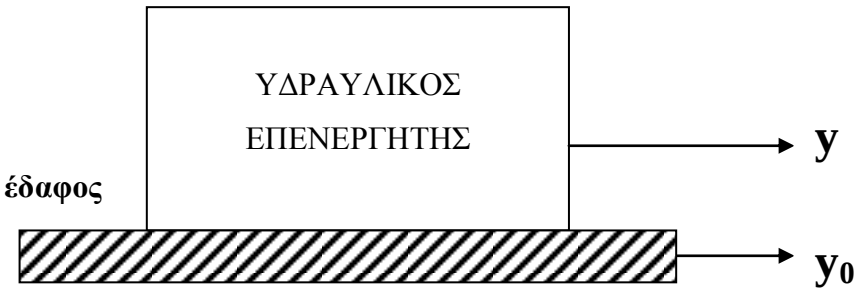
$$P_{LOAD} = P_L = P_1 - P_2$$

Γενικά για τη ροή ενός ρευστού διαμέσου ενός στομίου ισχύει η εξίσωση :

$$q = ca\sqrt{2g\frac{\Delta P}{w}}$$

Όπου c ο συντελεστής στομίου, α το εμβαδόν του στομίου, w το ειδικό βάρος του ρευστού, ΔP η πτώση πίεσης στο στόμιο, g η επιτάχυνση της βαρυτητάς και q ο ρυθμός ροής του ρευστού.

Στην παρούσα εργασία, ο επενεργητής θα βρίσκεται πακτωμένος στο έδαφος και ταυτόχρονα καρφωμένος στον πρώτο όροφο του κτιρίου. Το παρακάτω σχήμα αποσαφηνίζει τη θέση του επενεργητή στο σύστημα μας :



Τελικά, μετά από συνδυασμό εξισώσεων του υδραυλικού επενεργητή, προκύπτει ότι η δύναμη που ασκεί το πιστόνι σε σχέση με τη μετατόπιση της βαλβίδας ελέγχου, είναι :

$$F = A \cdot P_L = A\frac{C_x x - A(\frac{dy}{dt} - \frac{dy_0}{dt})}{C_p}$$

Όπου A είναι η ενεργή επιφάνεια του κυλίνδρου (από κατασκευαστή)και C_x και C_p σταθερές που υπολογίζονται ως εξής :

$$C_x = C_d w \sqrt{\frac{1}{p}(P_s - P_L)}$$

$$C_p = \frac{C_d w x_u \sqrt{\frac{1}{p}(P_s - P_L)}}{2(P_s - P_L)}$$

Όπου :

- C_d συντελεστής φορτίου ίσος με 0.61
- w είναι το μήκος του στόμιου εισόδου της ροής μέσα στον κύλινδρο (από κατασκευαστή)
- x_u είναι η μέγιστη μετατόπιση της βαλβίδας (από κατασκευαστή)
- p είναι η πυκνότητα του υδραυλικού υγρού SAE-16 και είναι ίση με $0.823 \cdot 10^{-4} \frac{lb \cdot sec^2}{\text{in}^4}$
- $P_s - P_L$ η πτωση πίεσης (από κατασκευαστή)

3. Τεχνικές ελέγχου

3.1 Ελεγκτής ανατροφοδότησης μειωμένης κατάστασης

3.1.1 Θεωρία

Για τον έλεγχο ανατροφοδότησης μειωμένης κατάστασης, υπάρχουν δύο βασικά θεωρήματα, τα οποία εξασφαλίζουν την ευστάθεια του συστήματος με τη χρήση του συγκεκριμένου νόμου ελέγχου. Τα θεωρήματα αυτά, για λόγους συντομίας, βρίσκονται στο παράρτημα.

Ο εύρωστος νόμος ελέγχου (παράρτημα) που χρησιμοποιήθηκε είναι λοιπόν ο παρακάτω :

$$u_1 = K\boldsymbol{z_1} + p_1(\boldsymbol{z_1})$$

Όπου για ε>0, θα έχουμε :

$$p_1(\boldsymbol{z_1}) = \begin{cases} \dfrac{-B_1^T P_1 \boldsymbol{z_1}}{\left|B_1^T P_1 \boldsymbol{z_1}\right|} \cdot \rho_1 \quad , & if \ \left|B_1^T P_1 \boldsymbol{z_1}\right| \geq \varepsilon \\ \dfrac{-B_1^T P_1 \boldsymbol{z_1}}{\varepsilon} \cdot \rho_1 \quad , & if \ \left|B_1^T P_1 \boldsymbol{z_1}\right| < \varepsilon \end{cases}$$

Όπου η μήτρα P1 είναι η θετικά ορισμένη λύση της εξίσωσης :

$$\overline{A}_1^T P_1 + P_1 A_1 = -Q_1$$

για Q1 θετικά ορισμένη μήτρα και :

$$\rho_1 = \max_{z_0} \left|E_1 \boldsymbol{z_0}\right| \geq e_1$$

όπου :

$$e_1 = E_1 \boldsymbol{z_0}$$

Διερεύνηση της ευστάθειας με χρήση συναρτήσεων Lyapunov

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στην εξίσωση *(3.4α), θα έχουμε :*

$$\dot{\boldsymbol{z}}_1 = \bar{A}_1 \boldsymbol{z}_1 + B_1 p_1(\boldsymbol{z}_1) + B_1 e_1 + C_1 \boldsymbol{z}_2$$

Αν η P2 είναι η θετικά ορισμένη μοναδική λύση της εξίσωσης :

$$A_2^T P_2 + P_2 A_2 = -Q_2$$

Όπου Q2 είναι θετικά ορισμένη μήτρα και η μήτα A2 ευσταθής. Οι συναρτήσεις Lyapunov που χρησιμοποιούνται για τα δύο υποσυστήματα είναι οι παρακάτω:

$$V_1 = \boldsymbol{z}_1^T P_1 \boldsymbol{z}_1 \ , \ V_2 = \boldsymbol{z}_2^T P_2 \boldsymbol{z}_2$$

Παραγωγίζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, λαμβάνουμε :

$$\dot{V}_1 = -\boldsymbol{z}_1^T Q_1 \boldsymbol{z}_1 + 2B_1^T P_1 \boldsymbol{z}_1 (p_1(\boldsymbol{z}_1) + e_1) + 2\boldsymbol{z}_1^T P_1 C_1 \boldsymbol{z}_2$$

$$\leq -\lambda_{min}(Q_1) \|\boldsymbol{z}_1\|^2 + (\varepsilon / 2)\rho_1 + 2\|\boldsymbol{z}_1\| \cdot \|\boldsymbol{z}_2\| \cdot \|P_1 C_1\|$$

Επίσης, για τη δεύτερη συνάρτηση, ισχύει :

$$\dot{V}_2 = -\boldsymbol{z}_2^T Q_2 \boldsymbol{z}_2 + 2\boldsymbol{z}_2^T P_2 C_2 \boldsymbol{z}_1 \leq -\lambda_{min}(Q_2) \|\boldsymbol{z}_2\|^2 + 2\|\boldsymbol{z}_1\| \cdot \|\boldsymbol{z}_2\| \cdot \|P_2 C_2\|$$

Αν τώρα θεωρήσουμε :

$$W = V_1 + V_2$$

ως την ολική συνάρτηση Lyapunov του ολικού συστήματος, οπότε θα έχουμε :

$$\dot{W} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leq -\lambda_{min}(Q_1) \|\boldsymbol{z}_1\|^2 - \lambda_{min}(Q_2) \|\boldsymbol{z}_2\|^2 + (\varepsilon / 2)\rho_1 + 2\left(\|P_1 C_1\| + \|P_2 C_2\|\right) \cdot \|\boldsymbol{z}_1\| \cdot \|\boldsymbol{z}_2\|$$

Ουσιαστικά, θα έχουμε :

$$\dot{W} \leq -\langle \boldsymbol{h}, G\boldsymbol{h} \rangle + (\varepsilon / 2)\rho_1$$

όπου

$$\boldsymbol{h} = \left(\|\boldsymbol{z}_1\| \quad \|\boldsymbol{z}_2\| \right)^T$$

και

$$G = \begin{bmatrix} \lambda_{min}(Q_1) & -\left(\|P_1C_1\| + \|P_2C_2\| \right) \\ -\left(\|P_1C_1\| + \|P_2C_2\| \right) & \lambda_{min}(Q_2) \end{bmatrix}$$

Αν δηλαδή

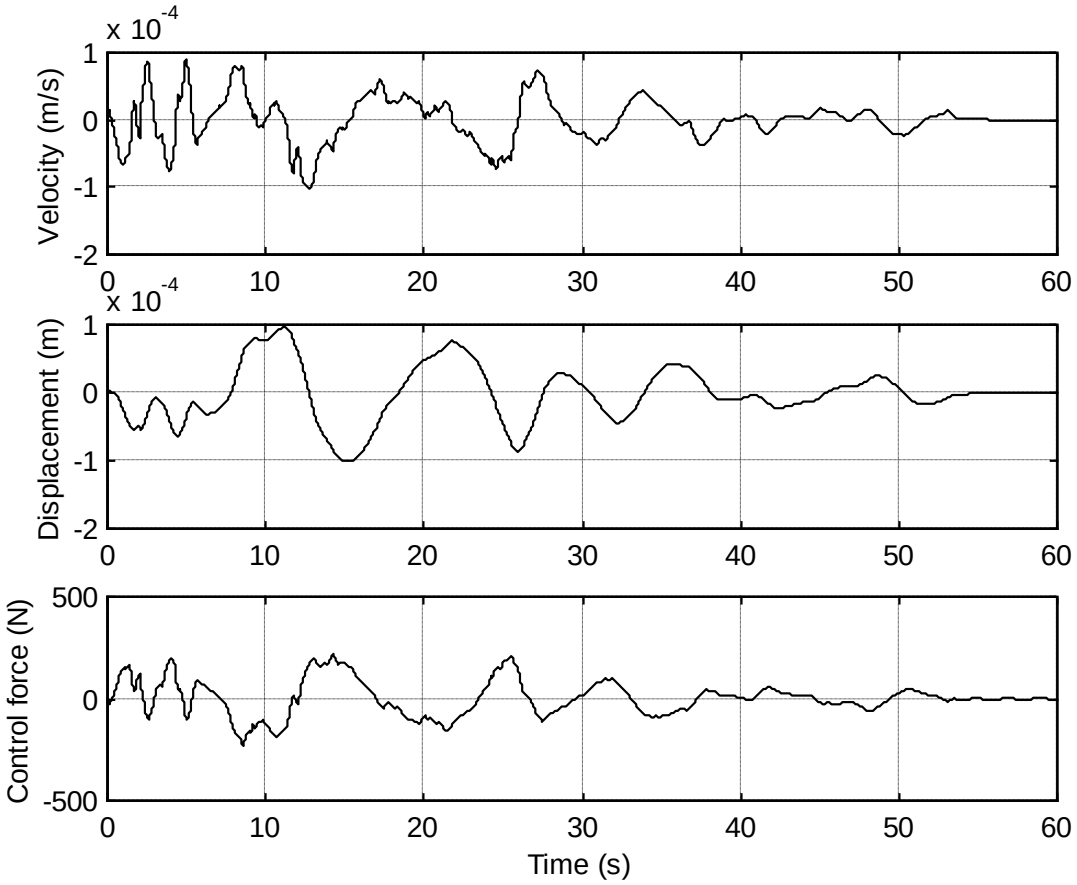
$$\lambda_{min}(Q_1) \cdot \lambda_{min}(Q_2) - \left(\|P_1C_1\| + \|P_2C_2\| \right)^2 > 0$$

Τότε η μήτρα G είναι θετικά ορισμένη και η συνάρτηση $\dot{W}$ είναι αρνητικά ορισμένη έχω από μια αυθαίρετα μικρή κυκλική περιοχή (επιλέγεται ανάλογα με την τιμή του ε) σύγκλισης γύρω από την αρχή των αξόνων. Επομένως, η συγκεκριμένη μορφή της εισόδου, δε διαταράσσει την ευστάθεια του συστήματος.

Επομένως, προκύπτει ότι για ένα σύστημα που περιγράφεται από τις εξισώσεις 3.4a-3.4b και 3.5a-3.5b, υπάρχει μήτρα $K \in R^{1x2}$ τέτοια ώστε ο νόμος ελέγχου που χρησιμοποιείται να οδηγεί σε ευσταθές σύστημα.

3.1.2 Εφαρμογή

Για το σύστημα μας, όπως αναφέρθηκε, θα εφαρμοστεί έλεγχος ανατροφοδότησης κατάστασης στον πρώτο μόνο όροφο. Για την προσομοίωση, που δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, χρησιμοποιήθηκε η μήτρα $Q_1 = diag\ [\ 170\ ,170\ ]$ και για την τιμή του ε επιλέχτηκε η ε=0.01. Παρακάτω φαίνεται η συμπεριφορά του πρώτου ορόφου με την εφαρμογή του συγκεκριμένου νόμου ελέγχου :



Εικόνα 20 : Ταχύτητα και μετατόπιση 1ου ορόφου και διάγραμμα απαιτούμενης δύναμης από τον επενεργητή

Συμπεράσματα

Το αποτέλεσμα που διατυπώνεται στα παραπάνω διαγράμματα είναι το αναμενόμενο. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μεγάλη μείωση της ταλάντωσης του κτιρίου (έως 1000 φορές). Στο τελευταίο γράφημα, φαίνεται η απαιτούμενη δύναμη (σε kN) του υδραυλικού συστήματος που αποτελεί τον επενεργητή στο σύστημα αυτό.

3.2 Ελεγκτής ανατροφοδότησης πλήρους κατάστασης

3.2.1 Θεωρία

Στην περίπτωση αυτή το κτίριο θεωρείται σα μια ενιαία μάζα, με τιμή το σύνολο των μαζών των ορόφων του κτιρίου. Δηλαδή, θεωρούμε :

$$M = \sum_{i=1}^{N} m_i$$

όπου N ο αριθμός των ορόφων και $\boldsymbol{m_i}$ η μάζα του κάθε ορόφου. Επομένως, αν θεωρήσουμε ότι $\boldsymbol{y_1}$ είναι η μετατόπιση του κτιρίου σε σχέση με ένα αρχικό σύστημα αναφοράς, η δυναμική του συστήματος περιγράφεται από την παρακάτω διαφορική εξίσωση :

$$\ddot{y}_1(t) = -\frac{c_0}{M}\left(\dot{y}_1(t) - \dot{y}_0(t)\right) - \frac{k_0}{M}\left(y_1(t) - y_0(t)\right) + \frac{1}{M}u_1(t)$$

3.2.2 Εφαρμογή

Στο συγκεκριμένο σύστημα $\boldsymbol{u_1}$ είναι η είσοδος, δηλαδή η απαιτούμενη δύναμη από τον επενεργητή. Το σύστημα, μπορεί να παρασταθεί και με την παρακάτω μορφή :

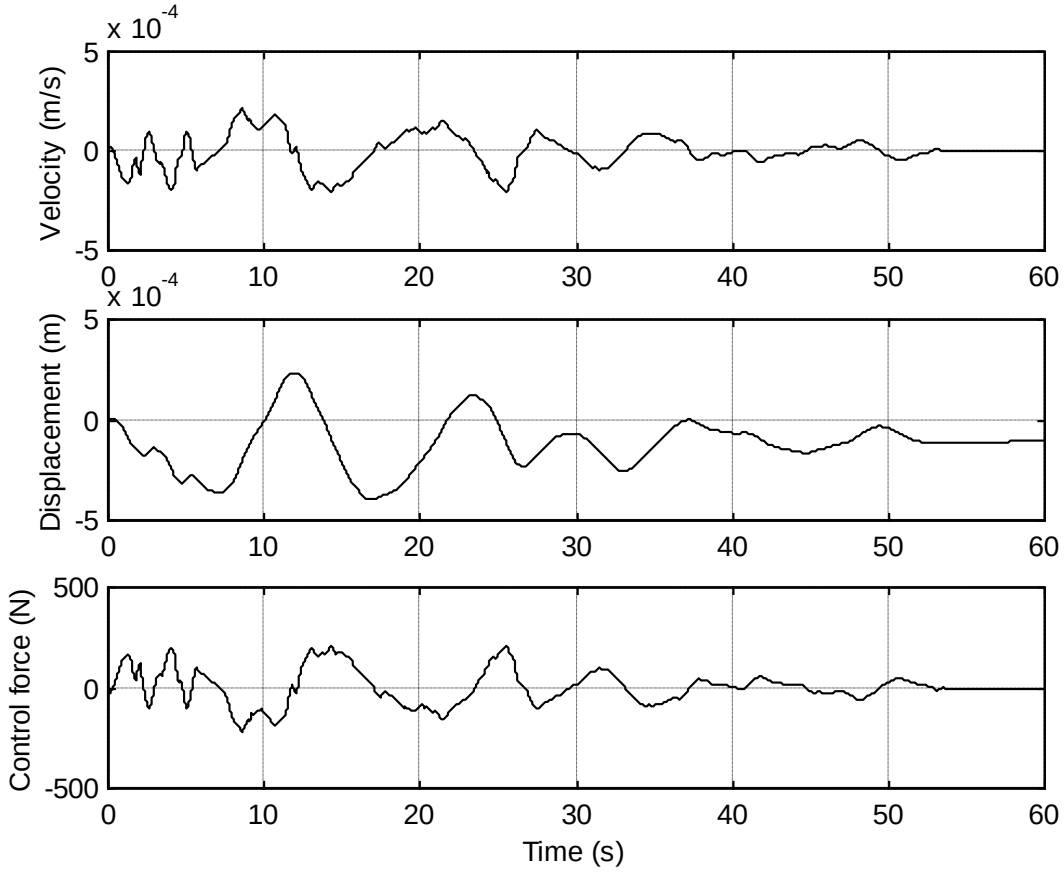
$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = A\,\boldsymbol{x}(t) + B\,u_1(t) + C\,\boldsymbol{v}(t)$$

Όπου, το διάνυσμα και οι πίνακες κατάστασης είναι :

$$\boldsymbol{x}(t) = \left(\dot{y}_1(t), y_1(t)\right)^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} -c_0/M & -k_0/M \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \qquad B = \left[1/M \quad , \quad 0\right]^T, \qquad C = \begin{bmatrix} c_0/M & k_0/M \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο σύστημα αυτό, όπου ο έλεγχος τώρα είναι ανατροφοδότησης πλήρους κατάστασης :



Εικόνα 21 : Ταχύτητα και μετατόπιση 1ου ορόφου και διάγραμμα απαιτούμενης δύναμης από τον επενεργητή

Συμπεράσματα

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα είναι ακριβώς τα ίδια. Αυτό συμβαίνει διότι και στις δυο περιπτώσεις θεωρήσαμε ότι ο έλεγχος ασκείται στον πρώτο όροφο. Έτσι, ο έλεγχος ανατροφοδότησης μειωμένης κατάστασης στον πρώτο όροφο, ισοδυναμεί με τον έλεγχο ανατροφοδότησης πλήρους κατάστασης, λαμβάνοντας το κτίριο ως ενιαία μάζα. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια τεχνική εύρωστου ελέγχου βασισμένη στις μεθόδους H-infinity ($H_\infty\ control$), η οποία οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα, συνδυασμένη με την προαναφερθείσα τεχνική για την ανάλυση του μοντέλου σε υποσυστήματα.

3.3 Ευρωστος έλεγχος H_∞ (H – infinity)

3.3.1 Θεωρία

Για συστήματα με μη δομημένες αβεβαιότητες, που περιγράφονται στο πεδίο της συχνότητας, οι μέθοδοι H – infinity αποτελούν ένα ισχυρό σχεδιαστικό εργαλείο εύρωστου ελέγχου. Ειδικότερα, σκοπός της μεθόδου $\boldsymbol{H}_\infty$ είναι ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή, ο οποίος θα μπορεί να ανταπεξέλθει ικανοποιητικά

ακόμη και στη χειρότερη δυνατή κατάσταση στην οποία μπορεί να βρεθεί ένα γραμμικό σύστημα. Αποτελεί ουσιαστικά μια μέθοδος βελτιστοποίησης του ελεγκτή. Βασικότερο συστατικό του ελέγχου $\boldsymbol{H}_\infty$ είναι η νόρμα $\boldsymbol{H}_\infty$.

Η νόρμα $\boldsymbol{H}_\infty$ ενός συστήματος με συνάρτηση μεταφοράς H(s) ορίζεται ως εξής :

$$\|\boldsymbol{H}(\boldsymbol{s})\|_\infty = \boldsymbol{sup}_{\boldsymbol{\omega}}\overline{\boldsymbol{\sigma}}(\boldsymbol{H}(\boldsymbol{j\omega}))$$

Όπου $\overline{\boldsymbol{\sigma}}(\boldsymbol{M})$ είναι η μέγιστη ιδιόρρυθμη τιμή του μιγαδικού πίνακα M. Συνήθως ισχύει $\overline{\boldsymbol{\sigma}}(\boldsymbol{M}) = \|\boldsymbol{M}\|$, δηλαδή είναι ίση με τη συνήθη Ευκλείδεια νόρμα του μιγαδικού πίνακα M (ή φασματική νόρμα).

Στη συνέχεια περιγράφεται ένας γενικότερος τρόπος σχεδιασμού βασισμένος στην ελαχιστοποίηση της $\boldsymbol{H}_\infty$ ενός συστήματος. Απώτερος σκοπός είναι να βρεθεί ένας ελεγκτής $\boldsymbol{K}(\boldsymbol{s})$, ο οποίος εγγυάται στο κλειστό σύστημα ένα φράγμα $\boldsymbol{H}_\infty -$ νόρμας και έστω γ το φράγμα αυτό. Το πρόβλημα αυτό ανάγεται στην επίλυση δυο εξισώσεων Riccati, όπως γίνεται φανερό στη συνέχεια.

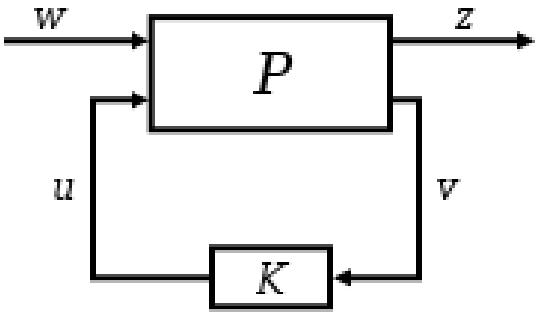
Έστω ότι ένα γραμμικό σύστημα περιγράφεται από τις δυναμικές εξισώσεις :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t)$$

$$z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t)$$

$$y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t)$$

Όπου $x(t)$ είναι η κατάσταση του συστήματος, $w(t)$ είναι το εξωγενές σήμα (σήμα αναφοράς, σήμα διαταραχής, κ.λ.π.), $u(t)$ είναι η είσοδος ελέγχου, $z(t)$ είναι η ρυθμισμένη έξοδος και $v(t)$ είναι η μετρούμενη έξοδος ,όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 11 : P-K διάταξη συστήματος

Σκοπός του ελέγχου είναι η εύρεση ενός αντισταθμιστή με συνάρτηση μεταφορας K(s) από το u(t) στο v(t), έτσι ώστε :

$$\|\boldsymbol{H}(\boldsymbol{s})\|_\infty < \gamma$$

Όπου H(s) είναι η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου από το w(t) στο z(t). Η συνάρτηση μεταφοράς του ολικού συστήματος μπορεί να παρασταθεί ως εξής :

$$P(s) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}$$

Ουσιαστικά, προκύπτει ένα νέο σύστημα του οποίου οι μήτρες κατάστασης είναι :

$$\tilde{A} = A\,, \tilde{B} = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \end{bmatrix}, \tilde{C} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}, \tilde{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}$$

Επομένως η νέα συνάρτηση μεταφοράς ορίζεται ως :

$$P(s) = \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ \tilde{C} & \tilde{D} \end{bmatrix}$$

Εάν ισχύουν οι δύο παρακάτω προϋποθέσεις, δηλαδή εάν :

$${D_{12}}^T \begin{bmatrix} C_1 & D_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix}$$

Και

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ D_{12} \end{bmatrix} {D_{21}}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$$

Υπάρχει ελεγκτής ώστε το κλειστό σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς $\boldsymbol{H(s)}$, για την οποία θα ισχύει :

$$\|\boldsymbol{H(s)}\|_\infty < \gamma$$

Εάν φυσικά υπάρχουν θετικά ημιορισμένες λύσεις των δύο εξισώσεων Riccati :

$$A^T X + XA + X\left(\gamma^{-2} B_1 {B_1}^T - B_2 {B_2}^T\right) X + C_1 {C_1}^T = 0$$

$$YA^T + AY + Y\left(\gamma^{-2} C_1 {C_1}^T - C_2 {C_2}^T\right) Y + B_1 {B_1}^T = 0$$

Δηλαδή εάν υπάρχουν μήτρες $X \geq 0$ και $Y \geq 0$, τέτοιες ώστε $\rho(XY) < \gamma^2$, όπου ρ είναι η φασματική ακτίνα. Όταν ισχύουν οι παραπάνω συνθήκες ύπαρξης, ο ελεγκτής που προκύπτει έχει συνάρτηση μεταφοράς :

$$\hat{K}(s) := \begin{bmatrix} \hat{A} & -ZL \\ K & 0 \end{bmatrix}$$

Όπου :

$$\hat{A} = A + \gamma^{-2} B_1 {B_1}^T X + B_2 K + ZLG_2$$

$$K = {B_2}^T X$$

$$L = -Y {C_2}^T$$

$$Z = (I - \gamma^{-2}YX)$$

Όπως παρατηρούμε, η διαδικασία εύρεσης του κατάλληλου ελεγκτή είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία, η οποία απαιτεί αρκετές μαθηματικές γνώσεις. Γι' αυτό το λόγο, έχει αναπτυχθεί αλγόριθμος στο λογισμικό Matlab, ο οποίος ελέγχει την ευστάθεια του συστήματος, την ύπαρξη των $X \geq 0$ και $Y \geq 0$, όπως αναφέρθηκε και υπολογίζει τον κατάλληλο ελεγκτή K που θα πρέπει να εισαχθεί στο σύστημα μας, υπό μορφή ανατροφοδότησης κατάστασης. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι η εξής :

[k,cl,gfin] = ***hinfsyn*** *(Partitioned plant,MeasuredOutputs,ControlSignals)*

Όπου :

$$Partitioned\ plant : P(s) = \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ \tilde{C} & \tilde{D} \end{bmatrix}$$

$$MeasuredOutputs : \text{Αριθμός μετρούμενων εξόδων και}$$

$$ControlSignals : \text{Αριθμός εισόδων ελέγχου}$$

3.3.2 Εφαρμογή

Για το συγκεκριμένο σύστημα που εξετάζεται σε αυτή την περίπτωση, ισχύουν τα παρακάτω :

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{-1.4999} & \mathbf{-0.75} \end{bmatrix} \boldsymbol{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{4} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \boldsymbol{u} + \boldsymbol{F}$$

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{P_L} = \boldsymbol{A} \frac{\boldsymbol{C_x x} - \boldsymbol{A}(\dot{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{1}} - \dot{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{0}})}{\boldsymbol{C_p}}$$

Για το συγκεκριμένο επενεργητή που επιλέχτηκε, η δύναμη προκύπτει, όπως φαίνεται στο επόμενο κεφάλαιο, ότι είναι :

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{P_L} = \mathbf{8.1068} \cdot \mathbf{10^6} \boldsymbol{x_v} - \mathbf{8.8071} \cdot \mathbf{10^5} (\dot{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{1}} - \dot{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{0}})$$

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{x} = \boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{y_1} \\ \dot{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{1}} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{x_v}$$

$$\boldsymbol{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{y_0} \\ \dot{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{0}} \end{bmatrix}$$

Όπου :

$\boldsymbol{F}$: *Η δύναμη που ασκεί ο υδραυλικός επενεργητής*

$\boldsymbol{y_1}, \boldsymbol{\dot{y}_1}$: *Η μετατόπιση και η ταχύτητα του 1ου ορόφου*

$\boldsymbol{x_v}$: *Η μετατόπιση της βαλβίδας ελέγχου του υδραυλικού επενεργητή*

$\boldsymbol{y_0}, \boldsymbol{\dot{y}_0}$: *Η μετατόπιση και η ταχύτητα του εδάφους λόγω σεισμικής δόνησης*

Για το σύστημα μας λοιπόν, θα ισχύει :

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{-1.4999} & \mathbf{-0.75 - 8.8071 \cdot 10^5} \end{bmatrix} \boldsymbol{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{4} & \mathbf{1 + 8.8071 \cdot 10^5} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \boldsymbol{w} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{8.1068 \cdot 10^6} \end{bmatrix} \boldsymbol{u}$$

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \boldsymbol{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \boldsymbol{w} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \boldsymbol{u}$$

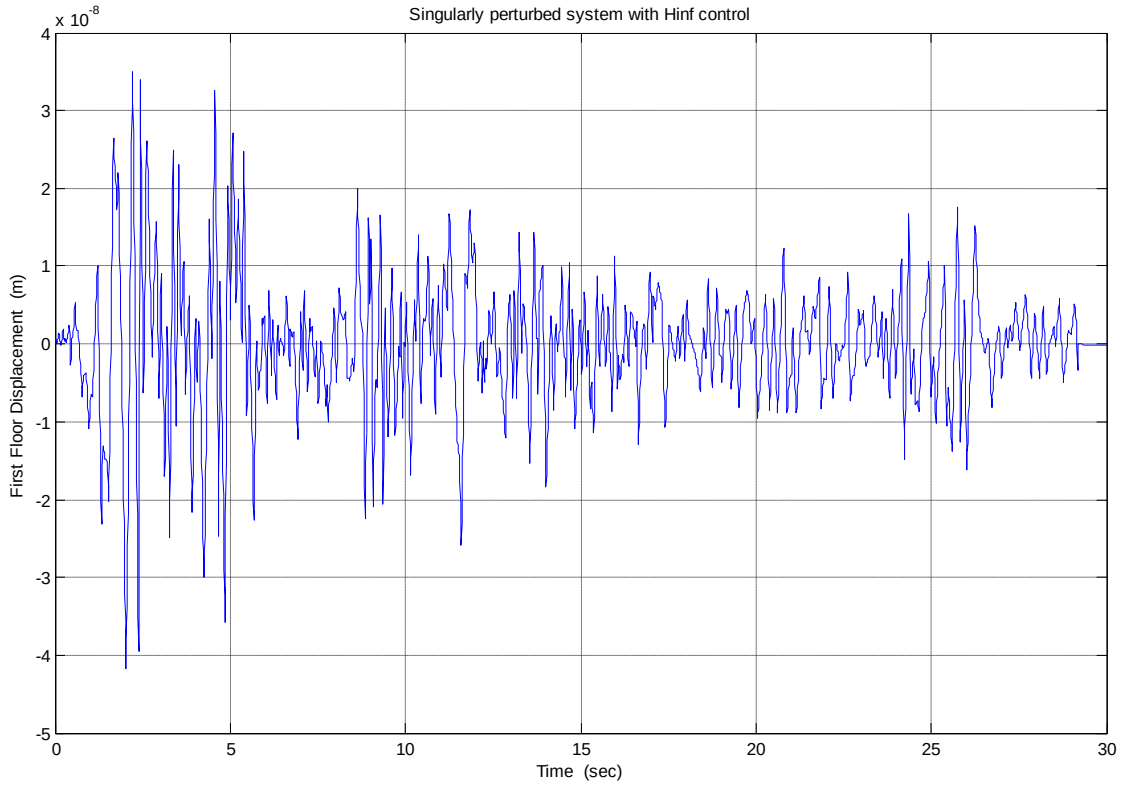
$$\boldsymbol{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \boldsymbol{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \boldsymbol{w} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \boldsymbol{u}$$

Επομένως το κατανεμημένο σύστημα μας υπό μορφή μητρών κατάστασης είναι :

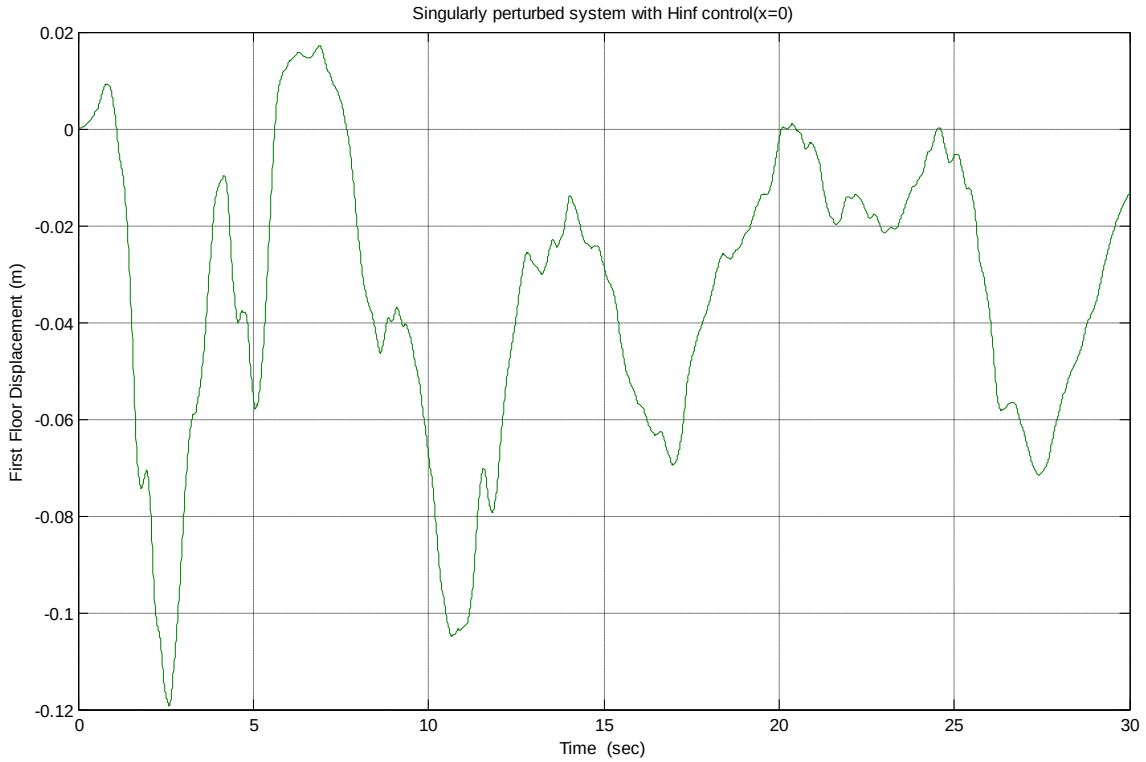
$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{-1.4999} & \mathbf{-0.75 - 8.8071 \cdot 10^5} \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{4} & \mathbf{1 + 8.8071 \cdot 10^5} & \mathbf{0} & \mathbf{8.1068 \cdot 10^6} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \tilde{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

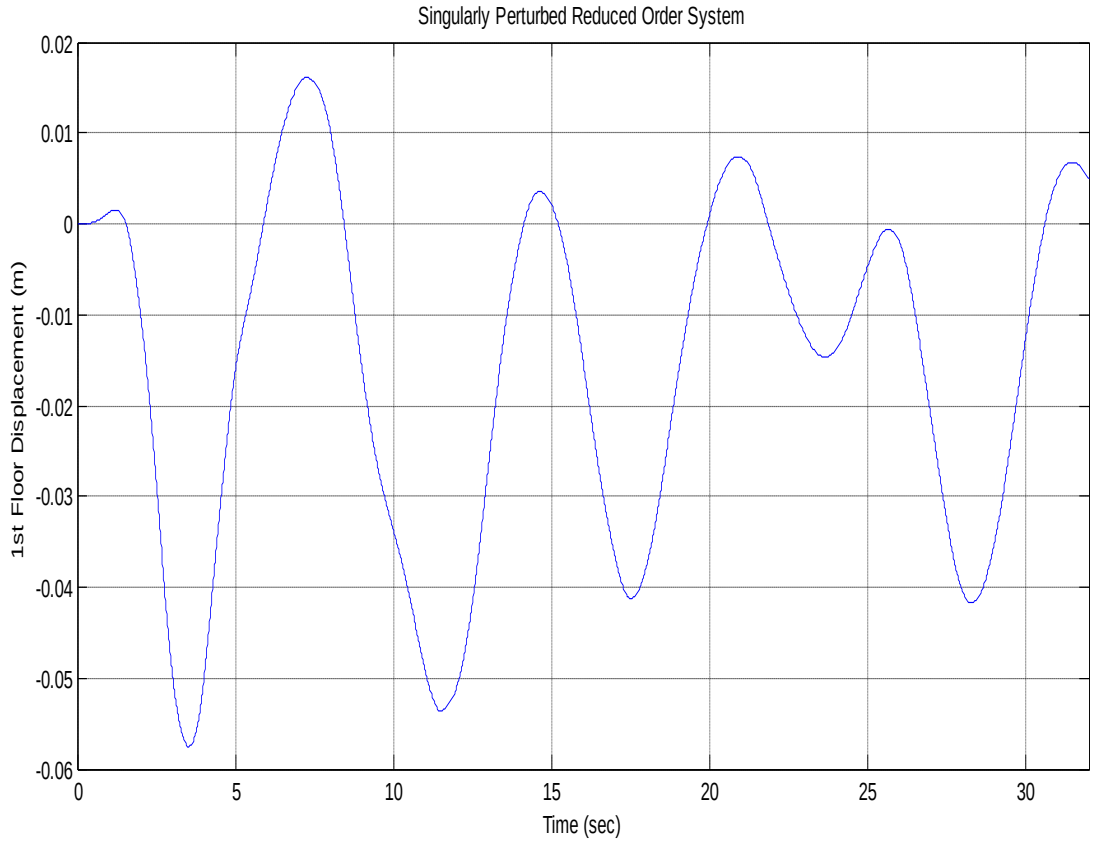
Επομένως, εκτελώντας την εντολή στο λογισμικό *Matlab*, με όρισμα MeasuredOutputs : 2 και ControlSignals : 1, ελήφθησαν τα παρακάτω διαγράμματα, που αφορούν τη συμπεριφορά του κτιρίου σε έλεγχο με χρήση τεχνικών $\boldsymbol{H}_\infty$:



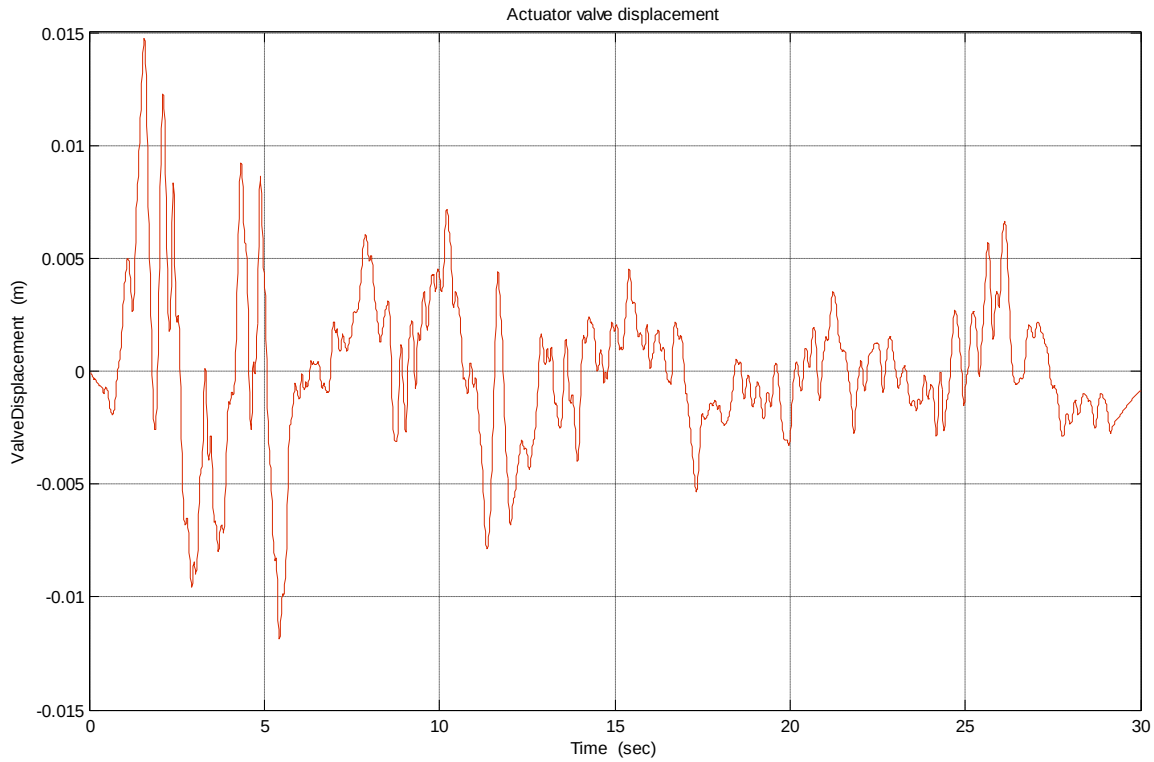
Εικόνα 22 : Μετατόπιση 1ου ορόφου με έλεγχο H_∞



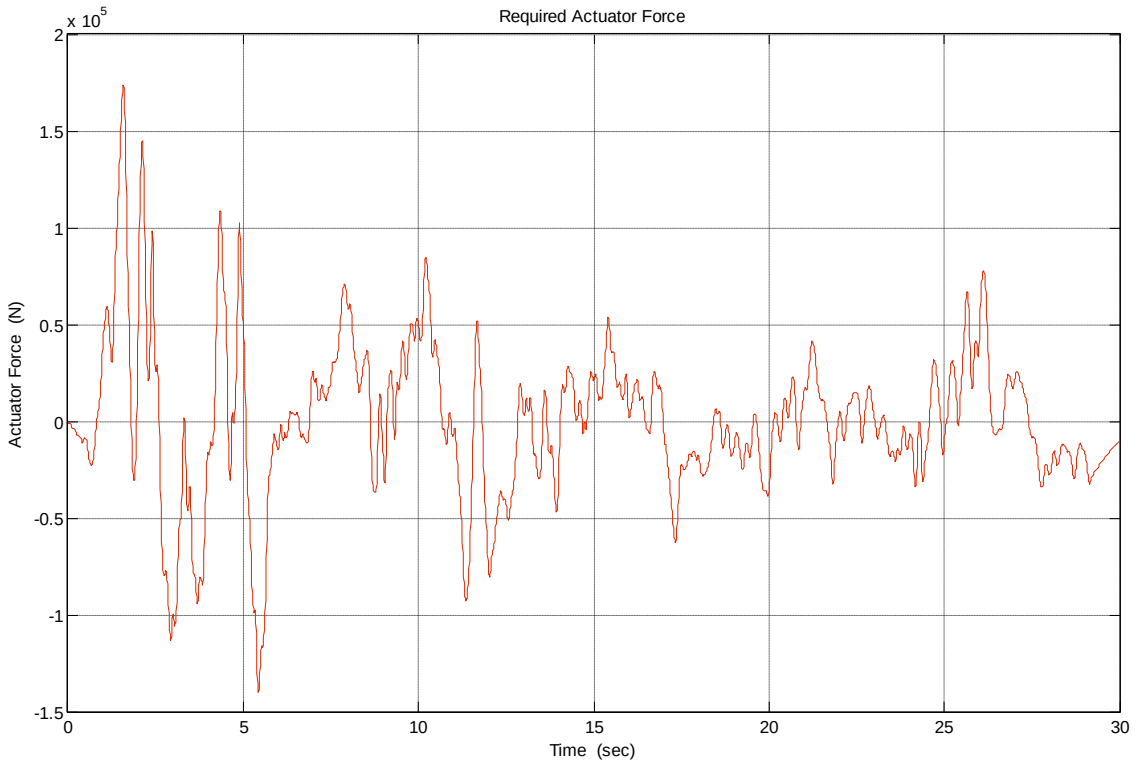
Εικόνα 23 : Μετατόπιση 1ου ορόφου με έλεγχο H_∞ σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας



Εικόνα 24 : Μετατόπιση 1ου ορόφου με έλεγχο χωρίς έλεγχο



Εικόνα 25 : Διάγραμμα μετατόπισης της βαλβίδας ελέγχου του επενεργητή



Εικόνα 26 : Διάγραμμα απαιτούμενης δύναμης του επενεργητή

4. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

4.1 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο σχεδιασμός ενός δυναμικού αντισεισμικού συστήματος ελέγχου, που περιλαμβάνει ένα κτίριο για έλεγχο σε μια διάσταση και την επιβολή σεισμών, το επίκεντρο των οποίων βρίσκεται πολύ κοντά στο υπό έλεγχο κτίριο. Στόχος της ενέργειας είναι η χρήση μιας μόνο δυνάμεως στην βάση του κτιρίου ώστε να κρατηθεί, όσο το δυνατόν, ακίνητο το κτίριο κατά τη διάρκεια μιας άγνωστης σεισμικής φόρτισης.

Έγινε χρήση ενός δυναμικού μοντέλου, στο οποίο οι όροφοι συνδέονται μεταξύ τους με ελατήρια και αποσβέσεις. Η βάση του κτιρίου είναι συνδεδεμένη με το έδαφος μέσω της σεισμικής μόνωσης βάσης, που μοντελοποιείται και αυτή σαν ένα ελατήριο με απόσβεση. Σημαντική υπόθεση για το σχεδιασμό ήταν η θεώρηση ότι οι υπόλοιποι όροφοι του κτιρίου έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, όσων αφορά στις σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης.

Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη του ελέγχου H-infinity υπάρχει αισθητή βελτίωση στη συμπεριφορά του κτιρίου τόσο από πλευράς πλάτους ταλάντωσης όσο και συχνότητας. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε μια πολύ σημαντική μείωση της τάξης του 10^{-4} στη μετατόπιση του κτιρίου. Ακόμη και στην περίπτωση που το σύστημα αδυνατεί να λειτουργήσει (αν πχ συμβεί διακοπή της τάσης λειτουργίας – δεύτερο διάγραμμα) παρατηρούμε ότι το σύστημα ελέγχου ανταποκρίνεται πολύ ικανοποιητικά, χωρίς να συμβούν καταστροφικές μετατοπίσεις.

Τέλος, τόσο η μετατόπιση της βαλβίδας όσο και η απαιτούμενη δύναμη αποκτούν φυσιολογικές τιμές και μάλιστα τιμές που επέτρεψαν την επιλογή ενός φτηνού σχετικά υδραυλικού επενεργητή. Τελικό συμπέρασμα είναι ότι, με τη χρήση εύρωστων τεχνικών ελέγχου βασισμένων στην τεχνική H_∞, σχεδιάστηκε ένα σύστημα το οποίο είναι υλοποιήσιμο, σχετικά προσιτό, χωρίς να υστερεί σε απόδοση. Αντιθέτως, η απόδοση του ήταν πολύ καλύτερη, συγκρινόμενη με πιο παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου, όπως ο έλεγχος ανατροφοδότησης μερικής ή πλήρους κατάστασης σε συνδυασμό με μη-γραμμικό εύρωστο ελεγκτή.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της νέας αυτής μεθόδου είναι:

- Διασφαλίζει κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες την ασφάλεια των δομημάτων. Οι ντετερμινιστικές περιγραφές των αγνώστων ποσοτήτων αντιστοιχούν σε κάθε πιθανή υλοποίησή τους. Για παράδειγμα, η μόνη απαιτούμενη γνώση για την σεισμική δόνηση είναι το μέγιστο προσδοκώμενο εύρος της. Αυτό είναι γνωστό ή υπολογίσιμο από προηγούμενες περιπτώσεις σεισμικών διαταραχών. Ειδικότερα, δεν απαιτείται σεισμική πρόβλεψη.

- Το αυτόματο σύστημα είναι σχετικά απλό και ο προσδιορισμός του στηρίζεται σε πληροφορίες γνωστές πρίν από την έναρξη της δόνησης. Μόνο η κατάσταση του συστήματος (απόλυτη ταχύτητα και μετατόπιση) χρειάζονται κατά την διάρκεια της λειτουργίας του.

- Λόγω της ύπαρξης των εφεδράνων, το μέγιστο μέγεθος της απαιτούμενης δύναμης του ελεγκτή δεν υπερβαίνει αυτό της διαταραχής που μεταδίδεται στην βάση των κατασκευών. Επομένως, η σεισμική μόνωση της βάσης διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο καθόσον επιτρέπει την ελάττωση αυτής της διαταραχής. Η σεισμική μόνωση συνεπάγεται επίσης ελάττωση στη συχνότητα κίνησης της κατασκευής και ακολούθως, στη συχνότητα των δυνάμεων του ελεγκτή. Αυτό είναι χρήσιμο εν όψει των χρονικών καθυστερήσεων που εισάγονται από αισθητήρες και ενεργοποιητές και που συνήθως παραλείπονται στα μαθηματικά μοντέλα.

- Ενδεχόμενες δυσκολίες από τη διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια του σεισμού μπορούν να αποφευχθούν εύκολα. Λόγω των χαμηλών απαιτήσεων του προτεινόμενου σχήματος, η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για αντλίες και υπολογιστές μπορεί να παραχθεί τοπικά. Σημειώνεται ότι και η παντελής απώλεια ενεργητικού ελέγχου μπορεί να αντιμετωπιστεί, ως ένα βαθμό, από τη σεισμικά μονωμένη βάση (fail – safe system).

- Οι αναγκαίες δυνάμεις από τον ελεγκτή εφαρμόζονται μόνον στην βάση της κατασκευής. Τα υδραυλικά έμβολα προσαρμόζονται στο έδαφος και με την βοήθεια σερβοβαλβίδων εξασκούν τις απαιτούμενες δυνάμεις στον κατάλληλο χρόνο. Η υλοποίηση είναι απλή συγκρινόμενη με

άλλα συστήματα που έχουν προταθεί τα οποία απαιτούν σημαντικές εξωτερικές δυνάμεις σε όλους τους ορόφους.

- Το κόστος της τοποθέτησης αλλά και της λειτουργίας του αυτομάτου συστήματος είναι σχετικά χαμηλό. Εάν δε ληφθεί υπόψη ότι η κατασκευή θα μπορεί να έχει μειωμένη απαίτηση σε δομικά υλικά, το όφελος θα είναι ιδιαίτερα μεγάλο.

4.2 Μελλοντική εργασία - Προτάσεις

Το συγκεκριμένο σύστημα που υλοποιήθηκε αποτελεί ένα πολύ σημαντικό αντικείμενο μελέτης, με πολλές προεκτάσεις. Οι βασικότεροι τομείς στους οποίους θα μπορούσε να υπάρξει έρευνα, αποτελούν οι παρακάτω :

- *Μοντελοποίηση συστήματος* : Μπορούν να μελετηθούν νέες τεχνικές για την μοντελοποίηση του κτιρίου, οι οποίες θα οδηγήσουν σε καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ύπαρξη διαταραχών, όσο και την ύπαρξη «κρυφών» δυναμικών και χρονικών καθυστερήσεων.
- *Νέες τεχνικές ελέγχου* : Ήδη πολλοί μηχανικοί εργάζονται σε προς αυτή την κατεύθυνση, δηλαδή προς τη χρήση νέων, σύγχρονων τεχνικών ελέγχου, όπως ο προβλεπτικός έλεγχος και τα νευρωνικά δίκτυα.
- *Είδη επενεργητών* : Είναι σημαντικό να μελετηθούν και άλλες μορφές επενεργητών, οι οποίες θα οδηγήσουν σε εξίσου αποτελεσματικά συστήματα με μικρότερο κόστος εγκατάστασης και λείτουργίας (πνευματικοί, ηλεκτρικοί). Παρόλα αυτά, οι υδραυλικοί έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα, εξαιτίας της δυνατότητάς τους να παράγουν μεγάλες δυνάμεις.

Βιβλιογραφία

1. A. Chopra, *Dynamics Of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 2000.
2. A. Mita and M. Kaneko, *Vibration Control of Tall Buildings Utilizing Energy Transfer into Sub–Structural Systems*, Proc. 1st World Conf. on Structural Control, Los Angeles, CA, pp. TA2:31-40, August 1994.
3. A.G. Soldatos and J.A. Inaudi, *Theory and Testing of an Active Control Scheme for Seismic Protection*, under review.
4. A.G. Soldatos and P.N. Paraskevopoulos, *Modern Techniques of Automatic Control for Antiseismic Protection of Buildings*, Proceedings of Second TEE Workshop on Automatic Control, Athens, Greece, 1995.
5. A.G. Soldatos, *An Investigation on Antiseismic Base Isolation and Control*, Proceedings of the Fourth Workshop on Control Mechanics, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Verlag, pp. 232-247, 1992.
6. A.G. Soldatos, C. Chung and D. Auslander, *A New Tool for Robust Control*, Proceedings of the 5th Workshop on Control Mechanics, Mechanics and Control, Plenum Press, New York, pp. 63-79, 1994.
7. A.G. Soldatos, *Output Feedback Control of Seismically Excited Structures*, under review.
8. B. F. Spencer Jr., J. Suhardjo and M.K. Sain, *Frequency Domain Optimal Control Strategies for Aseismic Protection*, J. Engrg. Mech., ASCE, Vol.120, No. 1, pp.135-159, 1994.
9. B.F. Spencer Jr., J.D. Carlson, M.K. Sain, and G. Yang, *On the Current Status of Magnetorheological Dampers: Seismic Protection of Full-Scale Structures*, Proc. American Control Conf., Albuquerque, NM, pp. 458-462, 1997.
10. B.F. Spencer, Jr and T. T. Soong, *New Applications and Development of Active, Semi-Active and Hybrid Control Techniques for Seismic and Non-Seismic Vibration in the USA*, Proceedings of International Post SMiRT Conference on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures, Cheju, Korea, August 23-25, 1999.
11. C.R. Martin and T.T. Soong, *Modal Control of Multistory Structures*, Journal of the Engineering Mechanics Division of the ASCE, Vol. 102, pp. 613-623, 1976.

12. Cenk Alhan and Metin Altun, *Performance of Base Isolation Systems Designed According to Uniform Building Code*, 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), May 13-15, 2009 Karabuk, Turkey, Department of Civil Engineering, Istanbul University, Istanbul, Turkey.

13. D. Benedetti, P.G. Carydis and P. Pezzoni, P, *Shaking Table Tests on 24 Simple Masonry Buildings* Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, 67-90, 1998.

14. Dynamic Isolation Systems, www.dis-inc.com.

15. European Standard EN 1998-1:2004: Eurocode 8: *Design of structure for earthquake resistance*.

16. F. Gordaninejad and R. Bindu, *The Effect of Scale Factor on the Performance of ERF Dampers*, Proc. 5th Int. Conf. on ERF, MR Suspensions and Associated Tech., Sheffield, England, pp. 318 – 326, 1995.

17. F. Jabbari, W.E. Schmitendorf and J.N. Yang, *H Control for Seismic-Excited Buildings with Acceleration Feedback*, J. Engrg. Mech., ASCE, vol. 21, no. 9, pp. 994 - 1002, 1995.

18. G. Leitmann, *Deterministic control of uncertain systems*, Acta Astronautica, vol. 7, pp. 1457, 1980.

19. G. Leitmann, E. P. Ryan, A. Steinberg, *Feedback control of uncertain systems: robustness with respect to neglected actuator and sensor dynamics*. Int. J. Control, vol. 43, p. 1243, 1986.

20. G. Leitmann, *Feedback and Adaptive Control for Uncertain Dynamical Systems*, New Mathematical Advances in Economic Dynamics, Edited by D.F. Batten and P.F. Lesse, Croom Helm, London, England, 1944.

21. G.W. Housner et all.,*Structural Control: Past, Present and Future*, J. Engrg. Mech., ASCE, September 1997.

22. H. Irschik, K. Schlacher, A. Kugi, *Control of earthquake excited nonlinear structures using Liapunov's theory*, Computers and Structures 67 (1998), 83-90.

23. H.P. Gavin, R.D. Hanson, and F.E. Filisko, *Electrorheological Dampers, Part I: Analysis and Design*, J. Appl. Mech., ASME, vol. 63, no. 3, pp. 669-675, 1996.

24. J. Suhardjo, B.F. Spencer and M.K. Sain, *Feedback - Feedforward Control of Seismic Structures*, Proc. 4th U.S. natl. conf. earthquake eng., Palm Springs, CA, 3, pp. 437-446, 1990.

25. J. Tsinias, *The concept of exponential ISS for stochastic systems and applications to feedback stabilization*, Systems and Control Lett.1999.

26. J.N. Yang, *Control of Tall Buildings under Earthquake Excitation*, Journal of the Engineering Mechanics Division of the ASCE, Vol.108, pp. 833-849, 1982.

27. J.N. Yang, J.C. Wu, A.M. Reinhorn, and M. Riley, *Control of Sliding-Isolated Buildings Using Sliding-Mode Control*, J. Struct. Engrg., ASCE, vol. 122, no. 2, pp. 179-186, 1996.

28. J.N. Yang, M.J. Lin and S. Sae-Ung, *Optimal Open-Loop Control of Tall Buildings under Earthquake Excitation*, Proceedings of the Third International Conference on Structural Safety and Reliability, Trondheim, Norway, 1981.

29. J.N. Yang, Z. Li and S. C. Liu, *Stable Controllers for Instantaneous Optimal Control*, Journal of the Engineering Mechanics Division of the ASCE, Vol. 118, pp.1612-30, 1992.

30. J.N. Yang, Z. Li and S. Vongchavalitkul, *Generalization of Optimal Control Theory: Linear and Non-Linear Control*, Journal of the Engineering Mechanics Division of the ASCE, Vol.120, pp.266-83, 1994.

31. K. Tanida, *Active Control of Bridge Towers During Erection*, Proc. 3rd Colloquium on Vib. Control of Structures, JSCE, part A, pp. 173 – 184, 1995 (in Japanese).

32. K. Tanida, Y. Koike, K. Mutaguchi, and N. Uno, *Development of Hybrid Active - Passive Damper*, Active and Passive Damping, ASME, PVP – vol. 211, pp.21 – 26, 1991.

33. K. Yoshida, S. Kang, and T. Kim, *LQG Control and H_∞ Control Of Vibration Isolation for Multi-Degree-Of-Freedom Systems*, proc. 1st World Conf. on Struct. Control, Los Angeles, CA, pp. TP4: 43-52, August 1994.

34. K.D. Weiss, T.G. Duclos, J.D. Carlson, M.J. Chrzan, and A.J. Margida, *High Strength Magneto- and Electrorheological Fluids*, Society of Automotive Engineers, SAE Paper #932451, 1993.

35. M. Corless and G. Leitmann, *Continous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.AC-26, pp.1139-1144, 1981.

36. M. Sakamoto, T. Kobori, T. Yamada, and M. Takahashi, *Practical Applications Of Active And Hybrid Response Control Systems and Their Verifications by Earthquake and Strong Wind Observations*, Proc. 1st World Conference on Structural Control, Los Angeles, CA, pp. WP2: 90-99, August 1994.

37. R.W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1975.

38. S. Gutman and G. Leitmann, *Stabilizing Feedback Control for Dynamical Systems with Bounded Uncertainty*, Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, Gainesville, Florida 1976.

39. S. Kannan, H.M. Uras, and H.M. Aktan, *Active Control of Building Seismic Response by Energy Dissipation*, Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., vol. 24, no. 5, pp 747-759, 1995.

40. S. Yamazaki, N. Nagata, and H. Abiru, Tuned Active Dampers Installed in the Minato Mirai (MM) 21 Landmark Tower in Yokohama, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 43, pp. 1937-1948, 1992.

41. T.T. Soong and M.C. Constantinou, Eds. ,*Passive and Active Struct. Vibr. Control in Civil Engineering*, Springer – Verlag, Wien and New York, 1994.

42. T.T. Soong, *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical, Wiley, New York, 1990.

43. T.T. Soong, *State of the Art of Structural Control in U.S.A.*, Proc. U.S. nat. workshop struct. control res. Los Angeles, CA, 1990.

44. Βλάχος Κων/νος, Μεταπτυχιακή Εργασία στα Συστήματα Αυτοματισμού, "*Προστασία κτιρίων με σεισμική μόνωση χρησιμοποιώντας εύρωστο και προσαρμοστικό έλεγχο*", Οκτώβριος 2000.

45. Μάκιος Κων/νος, Σύγχρονες Τεχνικές Αυτομάτου Ελέγχου για την Αντισεισμική Προστασία Κτιρίων, Οκτώβριος 2001.

46. Π.Ν. Παρασκευόπουλος, *Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο*, Αθήνα, 1991.

47. Π.Ν. Παρασκευόπουλος, *Αναγνώριση Συστημάτων και Προσαρμοστικός Έλεγχος*, Αθήνα, 1992.

48. Π.Ν. Παρασκευόπουλος, *Έλεγχος συστημάτων με Υπολογιστές*, Αθήνα, 1991.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΕΥΡΩΣΤΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ (ROBUST CONTROLLER)

Ας θεωρήσουμε το παρακάτω γενικευμένο δυναμικό σύστημα:

$$\dot{x}(t) = A+\Delta A\,(r(t))\;\; x(t)+\; B+\Delta B\,(s(t))\;\; u(t)+Cv(t) \qquad \text{(A1)}$$

$$x(t_0) = x_0 \qquad \text{(A2)}$$

όπου

$x \in R^n$, $u \in R^m$, $\nu \in R^l$, $r \in R^p$, $s \in R^q$

και

$A \in R^{n\times n}$, $B \in R^{n\times m}$, $C \in R^{n\times l}$ είναι γνωστοί σταθεροί πίνακες και

$\Delta A(\cdot) : R^p \to R^{n\times n}$, $\Delta B(\cdot) : R^l \to R^{n\times m}$ είναι γνωστές συνεχείς συναρτήσεις.

Οι αβεβαιότητες στον πίνακα του συστήματος, στον πίνακα εισόδου και στην είσοδο αντίστοιχα, μοντελοποιούνται με τις άγνωστες μετρήσιμες συναρτήσεις Lebesque:

$\mathrm{r}(\cdot) : R \to \Re$, $s(\cdot) : R \to \Im$, $\nu(\cdot) : R \to \aleph$

όπου $\Re$, $\Im$, $\aleph$ είναι γνωστά υποσύνολα των κατάλληλων χώρων.

Για το σύστημα (A1) – (A2) υποθέτουμε ότι οι αβεβαιότητες ανήκουν στο χώρο που παράγουν οι στήλες του *B*, δηλαδή υποθέτουμε ότι υπάρχουν συνεχείς συναρτήσεις:

$D(\cdot) : R^p \to R^{n\times n}$, $E(\cdot) : R^p \to R^{n\times n}$ και ο σταθερός πίνακας $F \in R^{m\times l}$ έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες (matchingconditions):

$$\Delta A(r) = BD(r), \qquad \forall r \in R \qquad \text{(A3 a)}$$

$$\Delta B(s) = BE(s), \qquad \forall s \in \Im \qquad \text{(A3 b)}$$

$$C = BF, \qquad \text{(A3 c)}$$

με

$$\max_{s\in\Im} \|E(s)\| < 1 \qquad \text{(A4)}$$

Επιπλέον, υποθέτουμε ότι το ζεύγος πινάκων *(A, B)* είναι σταθεροποιήσιμο (stabilizable).Υπάρχει δηλαδή ένας σταθερός πίνακας $K \in R^{m \times n}$ ώστε ο πίνακας $\overline{A} = A + BK$ να είναι ευσταθής. Βέβαια, το ζεύγος *(A, B)* είναι σταθεροποιήσιμο εάν είναι ελέγξιμο.

Είναι επιθυμητό να βρεθεί έλεγχος *u(t)* που επιτυγχάνει τις παρακάτω δύο βασικές ιδιότητες:

I1:Ιδιότητα του Ομοιόμορφα Φραγμένου (UniformBoundedness):

Δοθέντος $x_0 \in R^n$, υπάρχει θετικός αριθμός $d(x_0) < \infty$ τέτοιος ώστε για όλες τις λύσεις: $x(\cdot):\ t_0, t_1\ \rightarrow R^n,\ x(t_0) = x_0$

$\|x(t)\| < d(x_0),\ \forall t \in\ t_0\, t_1$

I2:Ιδιότητα του Ομοιόμορφα Τελικά Φραγμένου (UniformUltimateBoundedness):

Δοθέντος $x_0 \in R_n$ και $S = \{x \in R^n\ \ \|x\| \le \delta > 0\}$, υπάρχει μη αρνητικός $T(x_0, S) < \infty$ τέτοιος ώστε για όλες τις λύσεις $x(\cdot):\ t_0, \infty\ \rightarrow R^n,\ x(t_0) = x_0$,

$x(t) \in S,\ \forall t \ge t_0$+T($x_0$,S)

Ομοιόμορφα φραγμένη λύση σημαίνει ότι κάθε λύση με αρχική συνθήκη x_0 παραμένει εντός μιας φραγμένης περιοχής, η ακτίνα της οποίας μπορεί να εξαρτάται από το x_0 . Ομοιόμορφα τελικά φραγμένη λύση σημαίνει ότι κάθε λύση με αρχική συνθήκη x_0 θα εισέλθει και θα παραμείνει εντός μιας περιοχής με προκαθορισμένη ακτίνα, *δ*, μετά από μία πεπερασμένη χρονική στιγμή, η οποία μπορεί να εξαρτάται από το x_0 και το *δ*. Οι δύο αυτές ιδιότητες αποτελούν τα κύρια χαρακτηριστικά της *πρακτικήςευστάθειας.*

Ας θεωρήσουμε τώρα τον έλεγχο

$$u = Kx + p_e x \qquad \text{(A5)}$$

έτσι ώστε για δεδομένο *ε > 0* να ισχύει:

$$p_e(x) = \begin{cases} \dfrac{-B^T P\, x}{\|B^T P\, x\|} \times \rho(x) \ , & \varepsilon\acute{\alpha}\nu\ \ \|B^T P\, x\| < \varepsilon \\[2ex] \dfrac{-B^T P\, x}{\varepsilon} \times \rho(x) \ , & \varepsilon\acute{\alpha}\nu\ \ \|B^T P\, x\| < \varepsilon \end{cases} \qquad \text{(A6)}$$

όπου ο συμμετρικός θετικά ορισμένος πίνακας $P \in R^{n \times n}$ αποτελεί λύση της εξίσωσης:

$$P\overline{A} + \overline{A}^T P + Q = 0 \quad \text{(A7)}$$

για δεδομένο $Q \in R^{n \times n}$ και

$$\rho(x) = \left[1 - \max_{s \in \Im} \|E(s)\|\right]^{-1} \left[\max_{r \in R} \|D(r)x\| + \max_{s \in \Im} \|E(s)Kx\| + \max_{\nu \in \aleph} \|Fv\|\right] \quad \text{A(8)}$$

Με τις παραπάνω υποθέσεις, ο έλεγχος (A5)*εξασφαλίζει πρακτική ευστάθεια* για το αβέβαιο σύστημα A(1) και ειδικότερα τις ιδιότητες **I1** και **I2** για κάθε δυνατό συνδυασμό αβεβαιοτήτων $r(\cdot)$, $s(\cdot)$, $v(\cdot)$.

Πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι το $\delta = \delta(\varepsilon)$ και μπορεί να γίνει αυθαίρετα μικρό με κατάλληλη εκλογή του ε. Μειώνοντας δηλαδή το ε, μειώνεται η ακτίνα της φραγμένης περιοχής στην οποία θα εισέλθει τελικά το διάνυσμα κατάστασης x.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΗ

Για το συγκεκριμένο σύστημα, μελετήθηκε και επιλέχτηκε, με βάση προσομοιώσεις παλαιότερων εργασιών, ο κατάλληλος υδραυλικός επενεργητής, που καλύπτει τις ανάγκες του ελέγχου σχετικά με την παροχή της κατάλληλης δύναμης στον πρώτο όροφο. Όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο, η απαιτούμενη δύναμη με βάση τις αρχικές προσομοιώσεις ήταν της τάξης των 200 – 250 kN. Για αυτό το σκοπό, θα έπρεπε να επιλεγεί ένας υδραυλικός επενεργητής, ικανός να παρέχει αυτή τη δύναμη υπό κανονική λειτουργία.

Η έρευνα αγοράς περιορίστηκε φυσικά στους υδραυλικούς επενεργητές μεγάλης κλίμακας, οι οποίοι είναι ικανοί να παρέχουν δυνάμεις του εύρους 100 – 1000 kN. Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται συγκεντρωμένα τα μοντέλα μεγάλης κλίμακας της Αμερικάνικης εταιρίας MTS, η οποία θεωρείται από τις καλύτερες στο αντικείμενο των γραμμικών, μεγάλης κλίμακας επενεργητών για εφαρμογές σερβοϋδραυλικού ελέγχου.

244 Actuator Specifications

Model	Force Rating		Stroke		Rod Threads		Hydraulic Connection
	KN	lbs	mm	inches	Metric	English	
244.11	15	3,300	150 250	6 10	M12x1.25	1/2"-20	**Pressure & Return** – Pressure and return line connections depend on the servovalve. Configurations with Series 252 Servovalve Manifolds have SAE -16 fittings. Series 256 Servovalve Manifolds have SAE -20 fittings. **Drain** – All 244 Actuators have a SAE -6 drain connection.
244.12	25	5,500	150 250	6 10	M12x1.25	1/2"-20	
244.21	50	11,000	150 250	6 10	M27x2	1"-14	
244.22	100	22,000	150 250	6 10	M27x2	1"-14	
244.23	150	35,000	150 250	6 10	M27x2	1"-14	
244.31	250	55,000	150 250	6 10	M36x2	1 1/2"-12	
244.41	500	110,000	150 250	6 10	M52x2	2"-12	
244.51	1000	220,000	150 250	6 10	M76x2	3"-12	

Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά υδραυλικών επενεργητών της εταιρίας TMS

Έτσι, μετά από προσεκτική μελέτη των χαρακτηριστικών λειτουργίας, επιλέχτηκε ο επενεργητής MTS 244.31, ο οποίος, σύμφωνα με την εν λόγω εταιρία, έχει τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά :

Force Rating (kN)	**Stroke (mm)**	**Rod Diameter (mm)**	**Effective Piston Area (cm^2)**
250	150	69.9	82.13

Υπολογισμός των συντελεστών της σερβοβαλβίδας

Το επόμενο και τελευταίο βήμα είναι να επιλέξουμε τη σερβοβαλβίδα. Έτσι, επιλέχτηκε με υπολογισμός των απαιτούμενων χαρακτηριστικών, η βαλβίδα 252.25 της ίδιας εταιρίας, ως εξής :

- Ο συντελεστής φορτίου C_d, όπως αναφέρθηκε, είναι ίσος με $C_d = 0.61$
- Το μήκος του στόμιου εισόδου της ροής μέσα στον κύλινδρο w για την 252.25 είναι w = 1.4 mm
- Η μέγιστη μετατόπιση της βαλβίδας δίνεται ίση με $x_u = 14.22\ mm$
- p είναι η πυκνότητα του υδραυλικού υγρού SAE-16 και είναι ίση με $0.823 \cdot 10^{-4}\,\frac{lb \cdot sec^2}{\text{in}^4}$
- $P_s - P_L$ η πτωση πίεσης η οποί δίνεται και είναι περίπου ίση με 1000 psi

Επομένως οι C_x και C_p σταθερές που μας χρησιμεύουν στη μοντελοποίηση υπολογίζονται ως εξής :

$$C_x = C_d w \sqrt{\frac{1}{p}(P_s - P_L)} = 0.0756\frac{m^2}{sec}$$

$$C_p = \frac{C_d w x_u \sqrt{\frac{1}{p}(P_s - P_L)}}{2(P_s - P_L)} = 7.659 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^2}{N \cdot sec}$$