

---

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

---

*Μεταπτυχιακή Εργασία*

***ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΕΥΡΩΣΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ***  
***ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ***

***Χαράλαμπος Ι. Μητρόπουλου***  
*Διπλ. Χημικού Μηχανικού ΕΜΠ*

Επιβλέπων: Δρ. Αργύρης Γ. Σολδάτος

---

**Αθήνα, Νοέμβριος 2010**

*Αφιερώνεται στους Γονείς μου*

*Ιωάννη και Μαρία*

## *Ευχαριστίες*

*Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Δρ. Αργύρη Σολδάτο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της εργασίας καθώς επίσης για την τόσο καθοριστική και πολύτιμη καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας.*

*Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω σε όλους τους καθηγητές μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα των Συστημάτων Αυτοματισμού για τις χρήσιμες και πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχαν.*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....</b>	<b>i</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>ii</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΠΙΟ ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ</b>	
1.1 Διαδικασίες αντισεισμικού σχεδιασμού και ενίσχυσης κατασκευών.....	1
1.1.1 Παθητικός Έλεγχος (Passive Control).....	2
1.1.2 Υβριδικά Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου (Hybrid Control Systems).....	3
1.1.3 Ενεργητικός Έλεγχος (Active Control).....	7
1.1.4 Ημι-Ενεργητικά Συστήματα Αυτομάτου Έλεγχου (Semi-Active Control Systems).....	11
1.2 Σεισμικά Μονωμένη Βαση.....	15
1.2.1 Τύποι Διατάξεων Μονωσης και Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αυτών.....	17
1.2.2 Σύγχρονες Εφαρμογές της Σεισμικά Μονωμένης Βάσης.....	20
1.3 Συνδυασμός Σεισμικά Μονωμένης Βάσης και Ενεργητικού Ελέγχου (Base Isolation and Active Control).....	27
1.3.1 Σχεδιασμός Συστήματος.....	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΤΙΡΙΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ</b>	
2.1 Περιγραφή του Συστήματος.....	32
2.2 Εφαρμογή.....	34
2.3 Έλεγχος.....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕ Η/Υ</b>	
3.1 DCZ-270.....	38
3.2 TAB-074.....	45
3.3 ERZ-000.....	51
3.4 JFA-022.....	58
3.5 Συμπεράσματα.....	65
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>	
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην αντισεισμική προστασία κτιρίων με σύστημα αυτομάτου ελέγχου σε συνδυασμό με την τεχνολογία της "σεισμικά μονωμένης βάσης". Στόχος της μελέτης είναι ο περιορισμός των μετατοπίσεων ενός κτιρίου από την αρχική του θέση μέσα σε πολύ μικρά όρια και οριακά, η επίτευξη πλήρους ακινησίας του κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.

Με τη σεισμική μόνωση βάσης, που αποτελεί μια μέθοδο "παθητικού" ελέγχου κτιρίων, το δόμημα εδράζεται σε ένα σύστημα από απομονωτές (ελαστικά εφεδρανα), έργο των οποίων είναι η αποσύζευξη του από την οριζόντια κίνηση του εδάφους. Με τον τρόπο αυτό, όχι μόνον ελαττώνεται η σεισμική επίδραση στο σκελετό του δομήματος, αλλά προφυλάσσονται οι άνθρωποι και το περιεχόμενο από επιβλαβείς ταλαντώσεις. Η παθητική αυτή προσέγγιση βοηθάει στην προστασία του δομήματος από τις σεισμικές δονήσεις αλλά δεν εξουδετερώνει την κίνηση του.

Ο περιορισμός της μετατόπισης σε μία αυθαίρετα μικρή περιοχή μπορεί να επιτευχθεί με συνδυασμό σεισμικής μόνωσης και ενεργητικού ελέγχου. Ο έλεγχος χρησιμοποιείται για το τμήμα της σεισμικής διέγερσης που δεν απορροφάται από τη μονωμένη βάση. Οι απαιτούμενες δυνάμεις ελέγχου είναι υδραυλικά παραγόμενες και εφαρμόζονται στη βάση του κτιρίου.

Μελετάται η συμπεριφορά ενός εξαώροφου κτιρίου υπό σεισμική διέγερση σε μία μόνο διάσταση και με την προϋπόθεση ότι το κτίριο είναι αρκετά κοντά στο επίκεντρο της σεισμού. Υποθέτουμε δηλαδή ότι η σεισμική δόνηση και η κίνηση του κτιρίου πραγματοποιούνται σε μία μόνο διεύθυνση. Γίνεται μοντελοποίηση, δυναμική ανάλυση και προσομοίωση του ελεγχόμενου συστήματος. Ακολουθεί προσομοίωση και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία περιορίζει την κίνηση του κτιρίου εντός αυθαίρετα μικρών ορίων. Όσο μεγαλύτερες απαιτήσεις στη μείωση της κίνησης του κτιρίου έχουμε, τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις που πρέπει να ασκήσει το σύστημα ελέγχου στην κατασκευή. Σε κάθε περίπτωση, λόγω των χαμηλών απαιτήσεων του προτεινόμενου σχήματος, η δύναμη του ελεγκτή μπορεί να παραχθεί τοπικά από μικρής κλίμακας ηλεκτρική παραγωγή. Ακόμη και παντελής έλλειψη του ενεργητικού ελέγχου μπορεί να αντιμετωπιστεί, από τη σεισμικά μονωμένη βάση (fail – safe system).

Το κόστος της τοποθέτησης αλλά και της λειτουργίας του αυτομάτου συστήματος είναι σχετικά χαμηλό. Δεδομένης και της συντρέχουσας οικονομίας στην όχι τόσο απαιτητική σε δομικά υλικά κατασκευή, το όφελος είναι τεράστιο.

## **ABSTRACT**

The present graduate thesis focuses on the antiseismic protection of buildings using a system of automatic control in conjunction with the technology of base isolation. The objective of this study is the restriction of the movements of a building near its initial configuration within arbitrarily small limits and in the limit the achievement of immobility during an earthquake.

Using the seismic base isolation, which constitutes a method of “passive” control, the building rests on a system of isolators that act to uncouple the building from the horizontal ground motion. This way, there is not only a reduced seismic effect on the skeleton of the structure, but the persons and the content are protected from harmful oscillations. This passive approach helps in the protection of the building from the seismic vibrations but does not neutralize its movement.

The restriction of the movement in an arbitrarily small region can be achieved with the combination of seismic base isolation with active control. The control is used to compensate for the seismic excitation that is not absorbed by the base isolation. The required control forces are hydraulically produced and are applied at the base of the building.

A test six-floor building is being studied while in motion on the horizontal plane and it is assumed that the structure is located close enough to the epicenter of the earthquake. We assume that the seismic vibration and the movement of the building occur in only one direction. After the modeling phase, there follows dynamic analysis and simulation of the controlled system with an analysis of the results.

We observe that the proposed methodology limits the movement of the building within arbitrarily small limits. The smaller the allowable limits of travel, the bigger the forces that are required from the control system. In any case, because of the low

power requirements of the proposed scheme, the force of the controller can be produced locally even during complete power supply interruption. Note that entire lack of active control can be faced to some extent using the seismic base isolation (fail - safe system).

The cost of installation and operation of the automatic control system is relatively low. Given the concurrent savings from the not so demanding structural construction when active control is used, the benefits are enormous.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΠΙΟ ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ

#### 1.1 Διαδικασίες αντισεισμικού σχεδιασμού και ενίσχυσης κατασκευών

Η αντισεισμική θωράκιση κατασκευών ευρισκόμενων σε σειсмоγενείς περιοχές επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο αντισεισμικό σχεδιασμό, είτε στο στάδιο της μελέτης αν πρόκειται για νέες κατασκευές είτε ως μελέτη σεισμικής ενίσχυσης υφιστάμενων κτηρίων. Ο βασικός στόχος κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι να μελετηθεί η κατασκευή ώστε να μπορεί με ασφάλεια να φέρει τα επιβαλλόμενα σεισμικά φορτία σχεδιασμού και την ένταση που αυτά προκαλούν στα φέροντα στοιχεία της κατασκευής καθώς και ο περιορισμός και η ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων και των ζημιών του κτηρίου ανάλογα με την στάθμη επιτελεστικότητας για την οποία σχεδιάζεται [92], [19].

Αυτή η δυνατότητα απορρόφησης της ενέργειας προέρχεται από τη μη ελαστική λειτουργία του σκελετού της κατασκευής αλλά μπορεί, εάν επιδράσουν πολλοί κύκλοι φόρτισης να οδηγήσει σε ζημιές στο σκελετό του κτηρίου. Επιπλέον, θα μπορούσε να έχει καταστροφική επίδραση και σε μη δομικά τμήματα, εσωτερικά ευαίσθητα όργανα, συσκευές και στον άνθρωπο. Τέτοιες προσεγγίσεις αποτελούν παθητικό έλεγχο για την προστασία των κτηρίων.

Σύγχρονοι ερευνητές έχουν προτείνει μια πληθώρα από μεθόδους βελτίωσης της αντισεισμικής συμπεριφοράς των κτηρίων, άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο

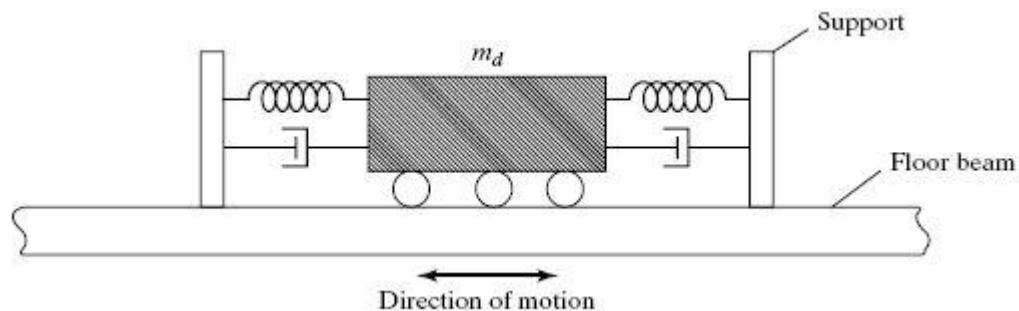
πρακτικά εφαρμόσιμες. Μερικές από αυτές υιοθετούν τη χρήση αυτοματισμών για το μετριασμό της επίδρασης των διαταραχών. Αυτές τις τεχνικές ενεργητικού ελέγχου που είναι η δεύτερη μεγάλη τεχνική προστασίας κτηρίων θα μπορούσαν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: εκείνες που χρησιμοποιούν ενεργητικά, υβριδικά και ημι-ενεργητικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου (active, hybrid και semi-active control systems).

### *1.1.1 Παθητικός Έλεγχος (Passive Control)*

Προκειμένου να μειωθούν οι κραδασμοί σε κτηριακές εγκαταστάσεις, διάφορα είδη συστημάτων ελέγχου έχουν προταθεί και εφαρμοστεί, αποτελούμενα κατά κανόνα από παθητικά συστήματα, τα οποία απαρτίζονται από τους παθητικούς αποσβεστήρες ή Tuned Mass Dampers (TMDs) (Σχήμα 1.1). Αυτό το είδος των συσκευών έχει ως στόχο την προσθήκη απόσβεσης στο σύστημα για τη μείωση της δυναμικής του απόκρισης. Αυτό αποτελεί μια καλή στρατηγική ελέγχου, διότι, σε περίπτωση εμφάνισης προβλημάτων συντονισμού, το εύρος της απόκρισης επηρεάζεται έντονα από τον βαθμό απόσβεσης του συστήματος [13].

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].

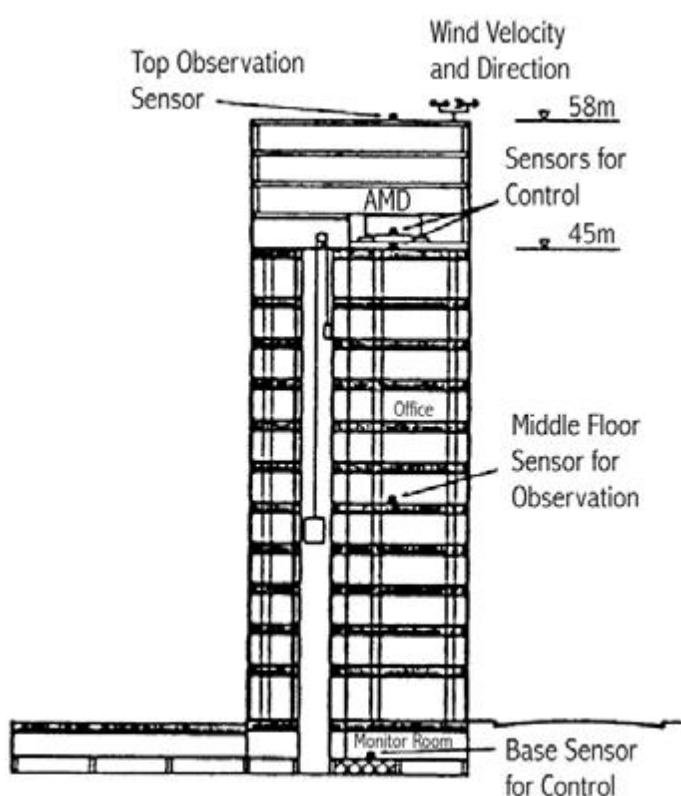


**Σχήμα 1.1 :** TMD (Tuned Mass Damper) : Χρησιμοποιείται για να μειώσει την επιρροή της δυναμικής της κατασκευής. Σημείωση:  $m_d$  = μάζα.

### 1.1.2 Υβριδικά Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου (Hybrid Control Systems)

Υβριδικό σύστημα ελέγχου για μια κατασκευή θεωρείται εκείνο το σύστημα που συνδυάζει συσκευές και μηχανήματα παθητικού και ενεργητικού ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο παρακάμπτονται περιορισμοί από τη χρήση μόνο του ενός από τους δυο ελέγχους. Οι αποσβεστήρες HMD (Hybrid Mass Damper) είναι η πιο συνηθισμένη συσκευή ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε πλήρη κλίμακα σε κατασκευαστικά έργα. Ένας HMD είναι ένας συνδυασμός από έναν παθητικό αποσβεστήρα (TMD), καθώς και έναν ενεργοποιητή ενεργητικού ελέγχου. Η ικανότητα αυτής της διάταξης να μειώνει τις αποκρίσεις της κατασκευής βασίζεται κυρίως στην φυσική κίνηση του

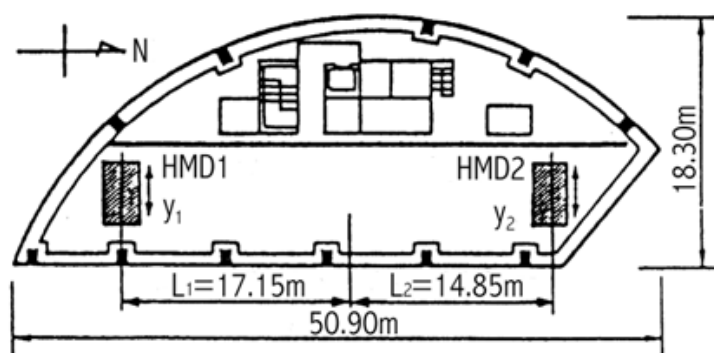
TMD. Οι δυνάμεις από τον ενεργοποιητή ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αποτελεσματικότητας του HMD και για την αύξηση της ευρωστίας του σε αλλαγές των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής. Η ενέργεια και δύναμη που απαιτούνται για τη λειτουργία ενός τυπικού HMD είναι πολύ μικρότερες από εκείνες που αφορούν ένα πλήρες σύστημα ενεργητικού αποσβεστήρα με παρόμοιες συνθήκες [13].



**Σχήμα 1.2 :** Το κτίριο Sendagaya INTES εφοδιασμένο με αποσβεστήρες HMD

Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής είναι το σύστημα αποσβεστήρων HMD που εγκαταστάθηκε στο κτίριο Sendagaya INTES στο Τόκιο το 1991. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, οι αποσβεστήρες HMD έχουν εγκατασταθεί πάνω στον 11ο όροφο και

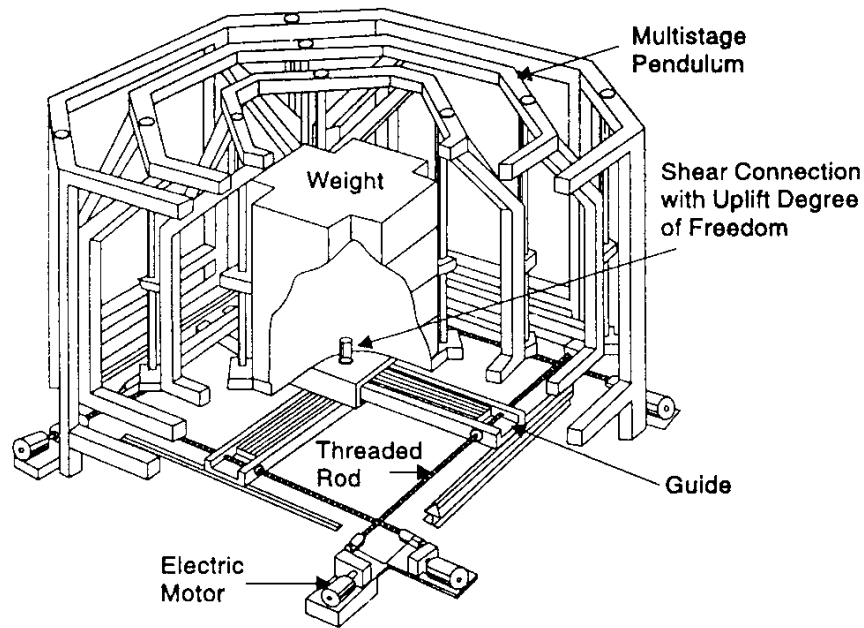
αποτελείται από δύο μάζες για τον έλεγχο της εγκάρσιων και στρεπτικών κινήσεων της κατασκευής, με τους υδραυλικούς ενεργοποιητές να παρέχουν τις δυνατότητες του ενεργητικού ελέγχου. Η κάτοψη του συστήματος ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 1.3, όπου χρησιμοποιούνται θερμικές δεξαμενές αποθήκευσης πάγου ώστε να μην εισαχθεί πρόσθετη μάζα. Οι μάζες στηρίζονται σε πολύ-επίπεδα ελαστικά εφεδρανα που προορίζονται για τη μείωση της ενέργειας ελέγχου που καταναλώνεται στους HMD και για την εξασφάλιση της ομαλής μαζικής κίνησης (Higashino and Aizawa, 1993; Soong et al., 1994) [13].



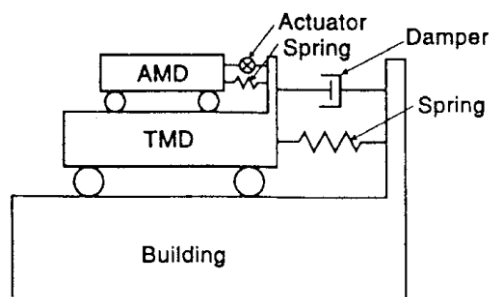
**Σχήμα 1.3 :** Κάτοψη ενός HMD

Παραλλαγές αυτής της διαμόρφωσης των αποσβεστήρων HMD περιλαμβάνουν το εκκρεμές ‘πολλαπλού βήματος’ (multi-step pendulum HMD) (όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4), το οποίο έχει εγκατασταθεί στο υψηλότερο κτήριο της Ιαπωνίας (Yokohama Landmark Tower) και στο TC Tower στο Kaohsiung του Ταϊβάν. Επιπλέον, στις παραλλαγές περιλαμβάνεται και το σύστημα DUOX HMD το οποίο, όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 1.5, αποτελείται από έναν TMD, ενεργητικά

ελεγχόμενο από μια βοηθητική μάζα, ο οποίος έχει τοποθετηθεί στην συγκεκριμένη περίπτωση, στο κτήριο Ando Nishikicho στο Τόκυο [13].



**Σχήμα 1.4 :** Αποσβεστήρας HMD (Hybrid Mass Damper) εκκρεμούς ‘πολλαπλού βήματος’.



**Σχήμα 1.5 :** Σχηματική παράσταση του DUOX System

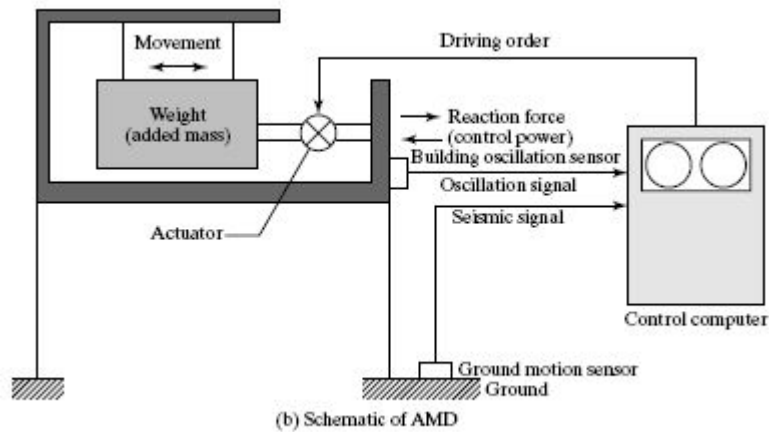
### 1.1.3 Ενεργητικός Έλεγχος (Active Control)

Είναι γενικά αποδεκτό ότι ο ενεργητικός έλεγχος δεν αποτελεί ενδιαφέρουσα λύση για πολλά κατασκευαστικά προβλήματα, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλες κατασκευές. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι ο ενεργητικός έλεγχος απαιτεί περισσότερο προηγμένη τεχνολογία, υψηλότερο κόστος, λιγότερη αντοχή και περισσότερη κατανάλωση ενέργειας. Γι' αυτό υπάρχουν μόνο λίγες πραγματικές εφαρμογές αυτού του είδους του ελέγχου στην κατασκευή αντισεισμικών κτηρίων. Εντούτοις, ως εναλλακτική λύση για τα παθητικά συστήματα ελέγχου που περιγράφηκαν προηγουμένως, ο ενεργητικός έλεγχος μπορεί να αποτελέσει ελκυστική λύση για μικρές δομές, όπως κάποιες πεζογέφυρες. Στην περίπτωση αυτή, τα συστήματα ενεργητικού ελέγχου έχουν κάποια σχετικά πλεονεκτήματα τα οποία πρέπει να εξεταστούν σοβαρά.

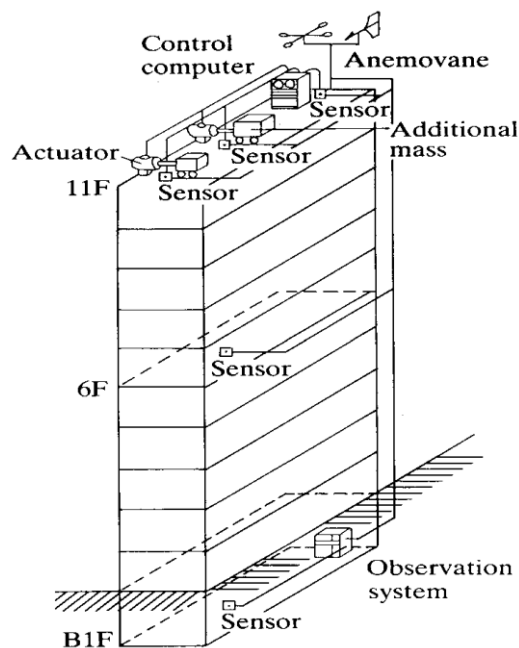
Σχεδιαστικοί περιορισμοί, όπως περιορισμοί χώρου, μπορούν να αποκλείσουν τη χρήση ενός συστήματος HMD. Αυτό ισχύει στην περίπτωση ενός συστήματος ενεργητικής απόσβεσης - (Active Mass Damper) - (AMD), το οποίο σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε στο κτήριο Kyobashi Seiwa Building στο Τόκιο και στο Nanjing Communication Tower, στο Nanjing της Κίνας. Μικρές βοηθητικές μάζες που δεν υπερβαίνουν το 1% του βάρους της κατασκευής, τοποθετούνται σε έναν από τους τελευταίους ορόφους του κτηρίου. Ένας ενεργοποιητής (actuator) π.χ. εμβολο, συνδέει την κατασκευή με τις μάζες (Σχήμα 1.6). Στην οροφή και στο μεσαίο όροφο υπάρχουν αισθητήρες, οι οποίοι μετρούν τις αποκρίσεις τροφοδοτώντας τον κεντρικό υπολογιστή ελέγχου. Ο υπολογιστής στην συνέχεια επεξεργάζεται τις μετρήσεις και στέλνει το κατάλληλο σήμα ελέγχου στα εμβολα. Τα εμβολα κινούν τις μάζες σε

διεύθυνση αντίθετη με εκείνη της διαταραχής, μειώνοντας έτσι την απόκριση της κατασκευής [13].

Το Kyobashi Seiwa Building, η πρώτη πλήρους κλίμακας εφαρμογή της τεχνολογίας ενεργητικού ελέγχου, είναι ένα 11-οροφο κτίριο με συνολικό εμβαδόν 423 m<sup>2</sup>. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7, το σύστημα ελέγχου αποτελείται από δύο AMDs, όπου ο



**Σχήμα 1.6 :** Σχηματική παράσταση δομής ενός ενεργητικού αποσβεστήρα (AMD).

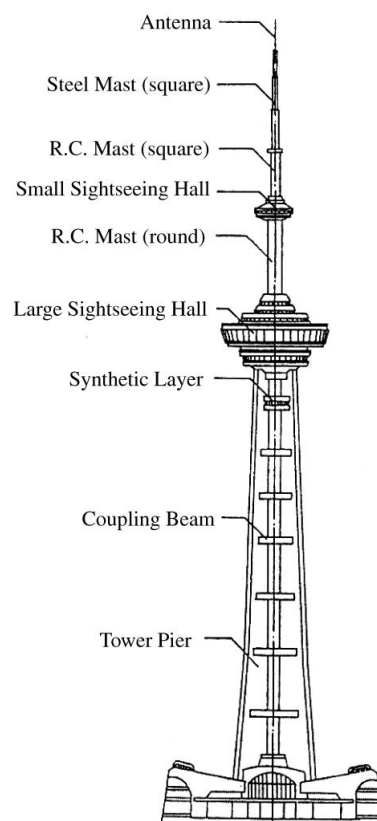


**Σχήμα 1.7 :** Κτίριο 11 ορόφων εφοδιασμένο με ενεργητικούς αποσβεστήρες (AMD).



πρωτεύων AMD χρησιμοποιείται για την εγκάρσια κίνηση και έχει βάρος 4 τόνων, ενώ ο δευτερεύων AMD έχει βάρος 1 τόνο και εφαρμόζεται για τη μείωση της στρεπτικής κίνησης. Ο ρόλος του συστήματος είναι να μειώσει την ταλάντωση του κτηρίου υπό την επίδραση ισχυρών ανέμων και μετρίας εντάσεως σεισμών. Η μείωση που επιτυγχάνει ανέρχεται περίπου στο μισό της αντίστοιχης χωρίς προστασίας ταλάντωση. Σε περίπτωση διακοπής του ηλεκτρικού ρεύματος υπάρχει εφεδρικό σύστημα παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας με γεννήτρια [13].

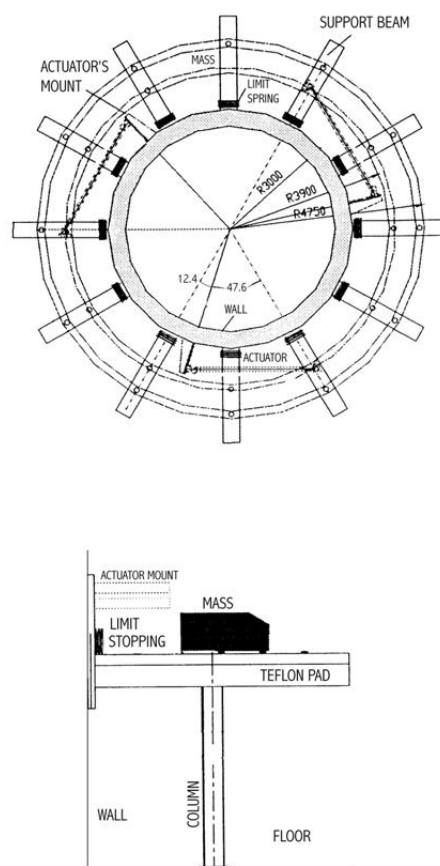
Στην περίπτωση του Nanjing Communication Tower (Σχήμα 1.8), πολλοί φυσικοί περιορισμοί πρέπει να ληφθούν υπόψιν στο σχεδιασμό του συστήματος ενεργητικής απόσβεσης [13].



**Σχήμα 1.8 :** Nanjing Communication Tower

Το φυσικό μέγεθος του αποσβεστήρα περιορίστηκε σε μια περιοχή του ορόφου σχήματος δακτυλίου, με εσωτερική και εξωτερική ακτίνα 3 m και 6,1 m, αντίστοιχα. Ο τελικός σχεδιασμός επέτρεπε στον αποσβεστήρα να μετακινείται  $\pm 750$  mm από τη θέση ισορροπίας του. Προσομοιώσεις δείχνουν ότι αυτή η μετακίνηση είναι επαρκής για τον έλεγχο του πύργου. Η δύναμη της ταράτσας του πύργου περιόρισε το βάρος της απόσβεσης στους 60 τόνους. Η έλλειψη επαρκούς πλευρικού χώρου έκανε ανέφικτη τη χρήση μηχανικών ελατηρίων για τις δυνάμεις επαναφοράς. Έτσι, οι ενεργοποιητές ενεργητικού ελέγχου προσφέρουν δυνάμεις επαναφοράς καθώς και δυνάμεις ελέγχου απόσβεσης [13].

Το τελικό σχέδιο του ενεργητικού αποσβεστήρα φαίνεται στο Σχήμα 1.9, ο οποίος



**Σχήμα 1.9 :** Σχέδιο ενός AMD που χρησιμοποιήθηκε στον Nanjing Communication Tower

χρησιμοποιεί τρεις σέρβο-ελεγχόμενους υδραυλικούς ενεργοποιητές, ο καθένας με συνολική διαδρομή του  $\pm 1,50$  m με μέγιστη δύναμη ελέγχου 50 kN. Αυτοί οι ενεργοποιητές είναι διατεταγμένοι σε γωνιά  $120^\circ$  γύρω από την περιφέρεια του δακτυλίου. Οι ενεργοποιητές ρυθμίζουν τρεις βαθμούς ελευθερίας: δύο ορθογώνιες πλευρικές διευθύνσεις της κίνησης και της στρεπτικής περιστροφής. Δεδομένου ότι η δύναμη τριβής μεταξύ των εφεδράνων Teflon και της μάζας μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στην απόκριση του συστήματος, μια έγινε μια λεπτομερής ανάλυση για την επαλήθευση της απόδοσης του συστήματος κατά την παρουσία αυτής της τριβής.

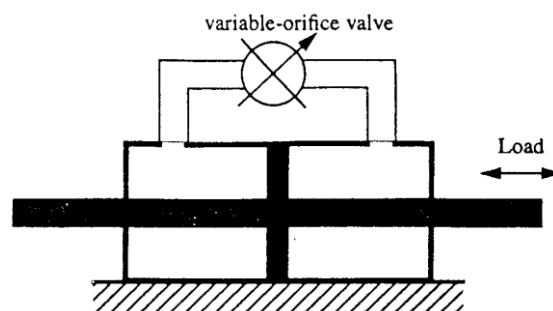
Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν έτυχε ευρύτερης αναγνώρισης, επειδή παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι στηρίζεται αποκλειστικά σε εξωτερικές πηγές ενέργειας. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το αυξημένο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, οδήγησε τους ερευνητές σε συστήματα που συνδυάζουν ενεργητικό και παθητικό έλεγχο, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία και μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις. Έτσι πρόέκυψαν τα υβριδικά συστήματα ελέγχου.

#### *1.1.4 Ημι-Ενεργητικά Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου (Semi-Active Control Systems)*

Οι στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται σε συσκευές ημι-ενεργητικών αποσβεστήρων συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά παθητικής και ενεργητικών συστημάτων ελέγχου. Η μεγάλη προσοχή που δόθηκε σε αυτό τον τομέα τα τελευταία χρόνια μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι συσκευές ελέγχου ημι-ενεργητικών αποσβεστήρων προσφοράς την προσαρμοστικότητα των ενεργητικών συστημάτων ελέγχου χωρίς να απαιτούνται οι σχετιζόμενες μεγάλες πηγές ενέργειας. Στην πραγματικότητα, πολλές μπορούν να λειτουργούν με μπαταρία, το οποίο είναι

σημαντικό κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων, όταν η κύρια πηγή ενέργειας για τη κατασκευή μπορεί να χαθεί. Επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, συσκευές ελέγχου ημι-ενεργητικών αποσβεστήρων δεν έχουν τη δυνατότητα να αποσταθεροποιούν την κατασκευή. Εκτεταμένες μελέτες έχουν δείξει ότι κατάλληλα εφαρμοσμένα ημι-ενεργητικά συστήματα αποδίδουν πολύ καλύτερα από παθητικές συσκευές και έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν την πλειοψηφία των επιδόσεων των πλήρως ενεργητικών συστημάτων, επιτρέποντας έτσι τη δυνατότητα αποτελεσματικής μείωσης της απόκρισης υπό μια μεγάλη ποικιλία δυναμικών φορτίων [13].

Ένας τρόπος για να χρησιμοποιηθεί μια συσκευή ημι-ενεργητικού αποσβεστήρα είναι να χρησιμοποιηθεί μια ελεγχόμενη, ηλεκτρομηχανική, μεταβλητού στομίου βαλβίδα για να μεταβάλει την αντίσταση της ροής ενός συμβατικού υδραυλικού αποσβεστήρα ρευστού. Ένα σχήμα μιας τέτοιας συσκευής δίνεται στο Σχήμα 1.10.



**Σχήμα 1.10 :** Δομή ενός Αποσβεστήρα Μεταβλητού Στομίου

Ο Sack και Patten (1993) διεξήγαγαν πειράματα στα οποία ένας υδραυλικός ενεργοποιητής με ελεγχόμενο στόμιο χρησιμοποιήθηκε σε μια γέφυρα-μοντέλο μόνης-λωρίδας για να απορροφήσει την ενέργεια που προκαλείται από την κυκλοφορία των οχημάτων, ακολουθούμενο από ένα πλήρους κλίμακας πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε ένα γέφυρα στον διεθνή αυτοκινητόδρομο I-35 για να επιδείξει

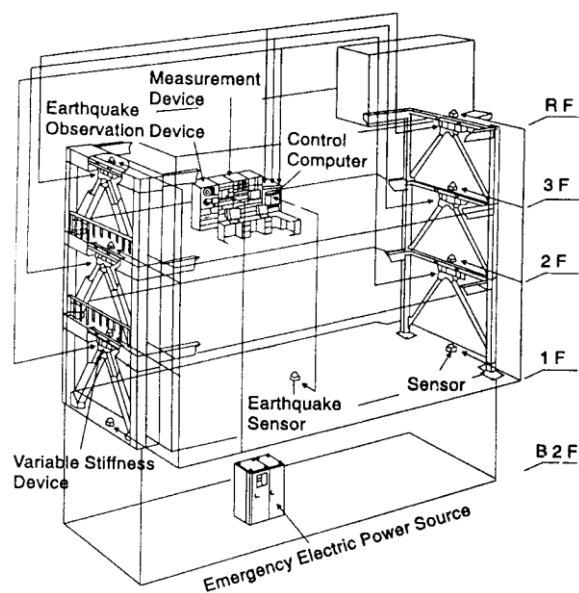
αυτή τη τεχνολογία (Patten, 1998, 1999; Kuehn et al., 1999), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11. Αυτό το πείραμα αποτελεί την πρώτη πλήρους κλίμακας εφαρμογή του κατασκευαστικού ελέγχου στις ΗΠΑ [70].



**Σχήμα 1.11 :** Πρώτη Πλήρους Κλίμακας Εφαρμογή του Κατασκευαστικού Ελέγχου στις ΗΠΑ

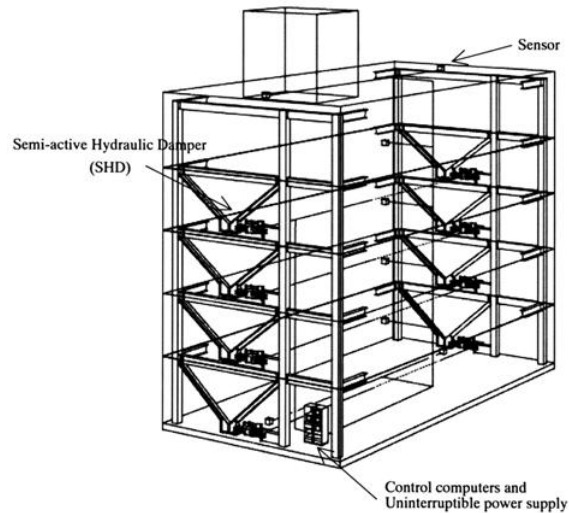
Θεωρώντας την μια συσκευή μεταβλητής δυσκαμψίας, οι Kamagata και Kobori (1994) έθεσαν σε εφαρμογή έναν πλήρους κλίμακας αποσβεστήρα με μεταβλητό στόμιο σε ένα σύστημα ημι-ενεργητικής μεταβλητής δυσκαμψίας – (semi-active variable-stiffness system) - (SAVS) για να διερευνήσουν τον ημι-ενεργητικό έλεγχο στο Kobori Research Complex. Το συνολικό σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 1.12, όπου οι συσκευές SAVS έχουν εγκατασταθεί και στις δύο πλευρές της κατασκευής στη διαμήκη κατεύθυνση. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλυτικών και πειραματικών

μελετών υποδεικνύουν ότι αυτή η συσκευή είναι αποτελεσματική στη μείωση των κατασκευαστικών αποκρίσεων [52].



**Σχήμα 1.12 :** Το σύστημα SAVS

Πρόσφατα, ένα σύστημα ημι-ενεργητικής απόσβεσης εγκαταστάθηκε στο κτίριο Kajima Shizuoka Building στην Shizuoka της Ιαπωνίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13, είναι ημι-ενεργητικοί υδραυλικοί αποσβεστήρες είναι εγκατεστημένοι στο εσωτερικό των τειχών και στις δύο πλευρές του κτιρίου ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση ανακούφισης από καταστροφές σε μετασεισμικές καταστάσεις (Kobori, 1998; Kurata et al., 1999). Κάθε αποσβεστήρας περιέχει μια βαλβίδα ελέγχου ροής, μια βαλβίδα ελέγχου και ένα συσσωρευτή και μπορεί να αναπτύξει μέγιστη δύναμη απόσβεσης των 1000 kN [13].



**Σχήμα 1.13 :** Το κτίριο Kajima Shizuoka Building και ο υδραυλικός ημι-ενεργητικός αποσβεστήρας

## 1.2 Σεισμικά Μονωμένη Βάση

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 καποιων ορίων ώστε να περιορίζονται οι ζημιές 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 φορτίων 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 οιοσδήποτε 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.

### **1.2.1 Τύποι Διατάξεων Σεισμικής Μόνωσης και Τεχνικά Χαρακτηριστικά**

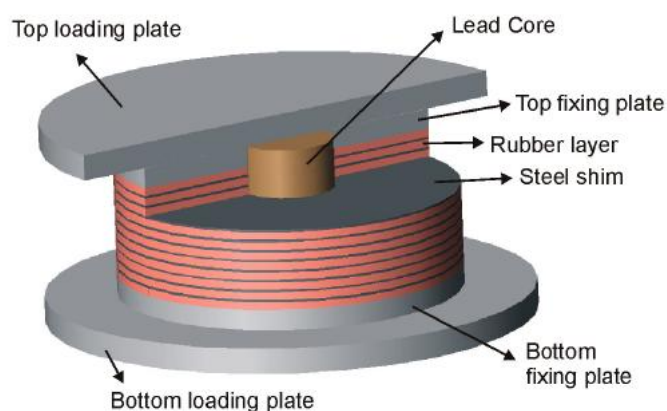
#### **Αυτών**

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.

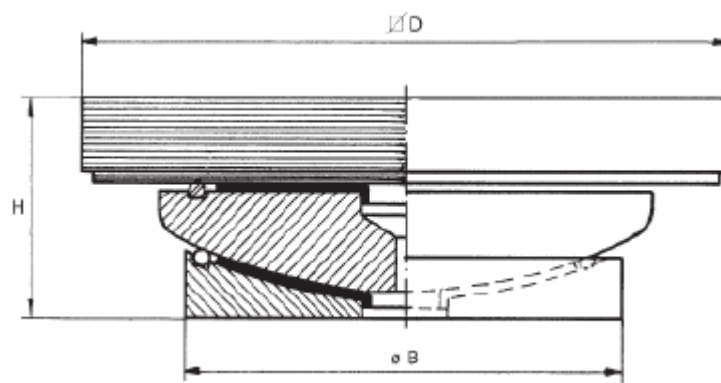
Οι ελαστομεταλλικοί μονωτήρες με πυρήνα μολύβδου είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους μονωτήρων και αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων ελαστικού (φυσικού ή συνθετικού) υλικού και χάλυβα. Ο πυρήνας τους είναι συμπαγής, κατασκευασμένος από μολύβδο. Στο Σχήμα 1.14 φαίνεται ένας σεισμικός μονωτήρας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



**Σχήμα 1.14:** 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. Στο Σχήμα 1.15 φαίνεται σχηματικά ένας σεισμικός μονωτήρας τέτοιου τύπου.[86]



**Σχήμα 1.15 :** 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 πέρας 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.

### **1.2.2 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-fault earthquakes). 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 Uniform Building Code (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]

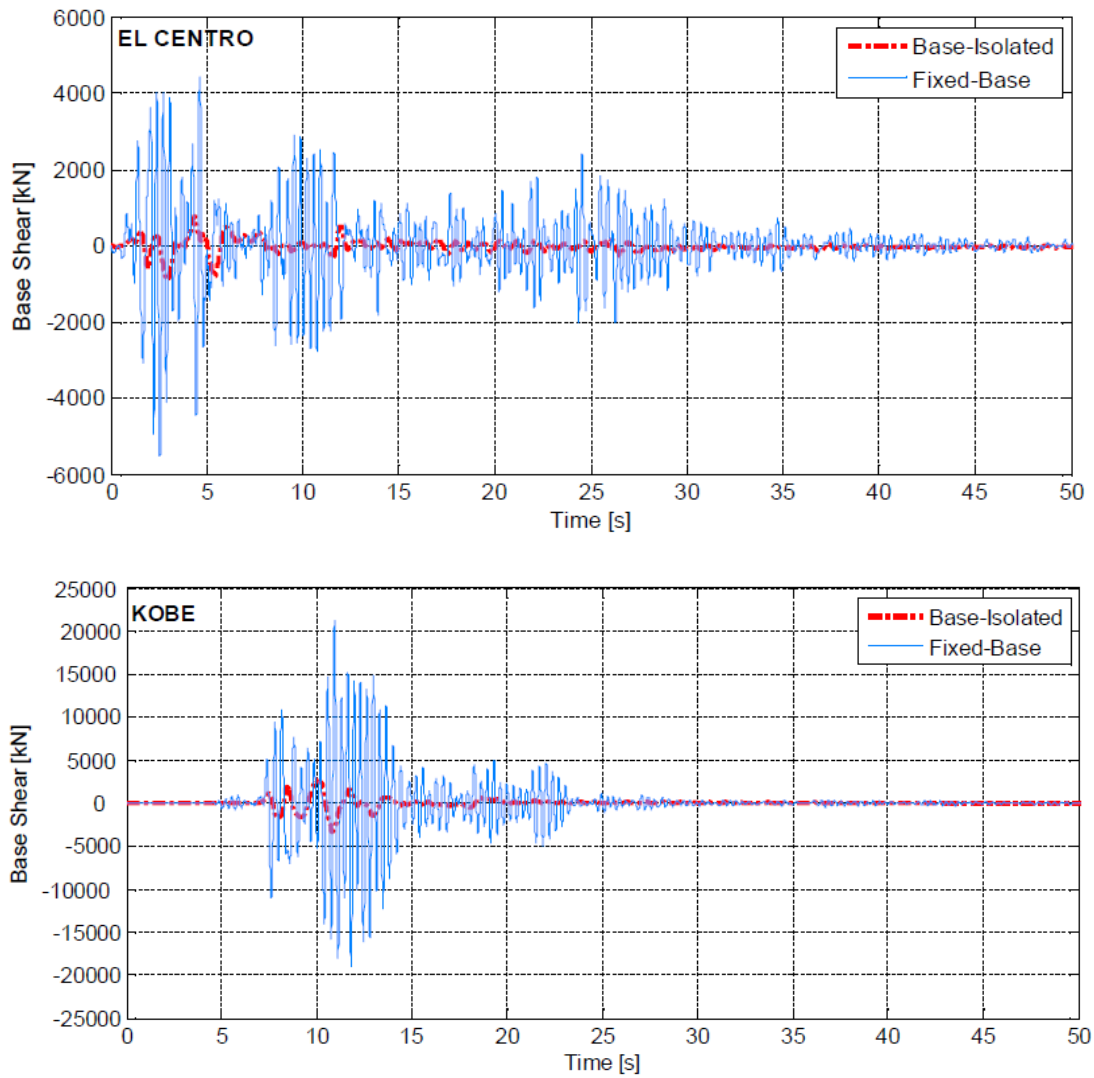
Σε μια μελέτη που έγινε από τους Cenk Alhan και Metin Altun, από το τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Κωνσταντινούπολης, πραγματοποιήθηκε μη-γραμμική ανάλυση του χρονικού ιστορικού - σε δυο διευθύνσεις - ενός 4-οροφου κτηρίου μόνωσης βάσης με στόχο τη διερεύνηση της απόδοσης του συστήματος 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 σεισμό του 1996 στο Kobe, ο οποίος μπορεί να ταξινομηθεί ως σεισμός πλησίον ρήγματος.

Στο Σχήμα 1.16 παρουσιάζεται το ιστορικό χρόνου της διάτμησης βάσης στην X-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 το Σχήμα 1.16, 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 (peak base displacement (P<sub>1</sub>)), το roof-drift ratio (P<sub>2</sub>) που είναι ίσο με την διαφορά της μετατόπισης του 3<sup>ου</sup> ορόφου (roof) από την μετατόπιση της βάσης διαιρούμενο με το ύψος του κτηρίου, την μέγιστη επιτάχυνση του τρίτου

ορόφου (peak 3rd floor acceleration (P3)), και την μέγιστη διάτμηση της βάσης (peak base shear (P4)). Μια πλήρης λίστα των κριτηρίων επίδοσης παρουσιάζεται στο Πίνακα 1.1, όπου οι μετατοπίσεις, οι επιταχύνσεις και διατμήσεις βάσης που αναγράφονται, αναφέρονται στην διεύθυνση X. 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 του Kobe 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 σεισμού Kobe 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-Rheological Elastomers) - (MREs) σε συστήματα μόνωσης 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]

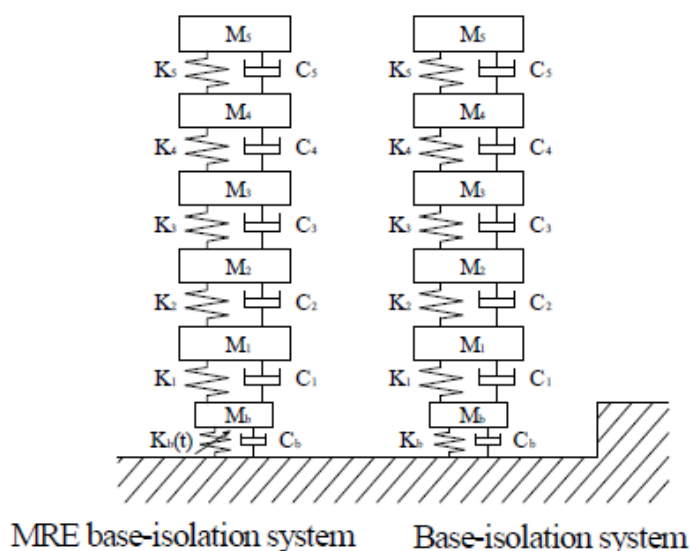


Σχήμα 1.16 : Διάτμηση Βάσης για την Περίπτωση των Σεισμών με και χωρίς Μόνωση Βάσης

Performance Criteria	EL CENTRO		KOBE	
	Fixed-base	Base-isolated	Fixed-base	Base-isolated
$P_1$ [cm]	-	6.51	-	25.34
$P_2$ ( $\times 10^{-3}$ ) [-]	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 1.1 : Κριτήρια Επίδοσης για τους δυο Σεισμούς

Ο Hwang πραγματοποίησε μια εννοιολογική μελέτη για την εφαρμογή των MREs σε συστήματα μονωσης βάσης για κατασκευή κτηρίων. Ωστόσο, η εφαρμοσιμότητα 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 1.17 σε συνδυασμό με το σύστημα μονωσης βάσης και τρεις κλιμακούμενοι ιστορικοί σεισμοί (El Centro, Northridge και Hachinohe) χρησιμοποιούνται ως είσοδοι σαν εδαφικές διεργασίες [29].

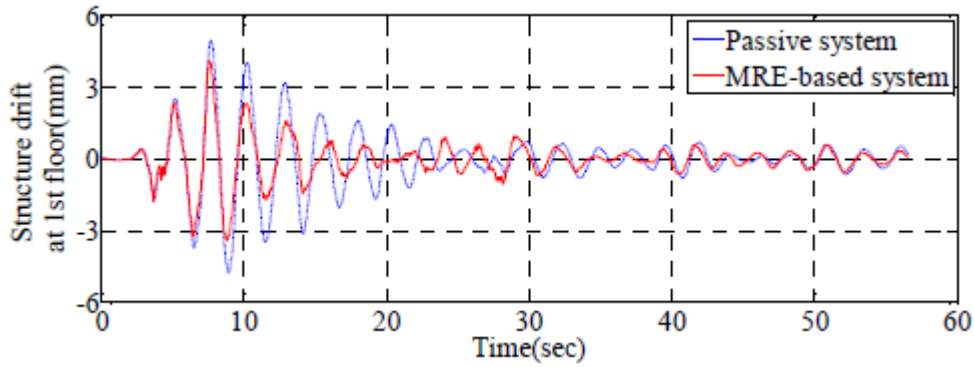


**Σχήμα 1.17 :** Το κτήριο που θεωρείται ότι είναι ένα σύστημα 5 βαθμών ελευθερίας

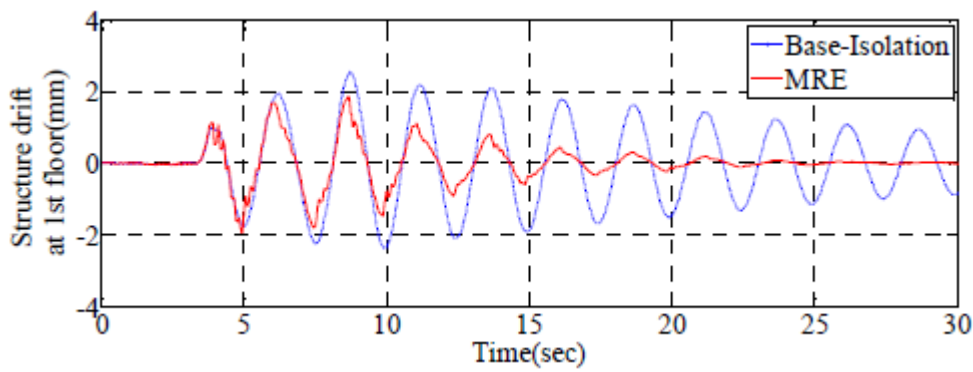
Για την επαλήθευση της εφαρμοσιμότητας του βασιζόμενου στα MRE, ευφυούς συστήματος μονωσης βάσης, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης του υβριδικού συστήματος που χρησιμοποιεί MREs συγκρίθηκαν με εκείνα ενός παθητικού τύπου συστήματος



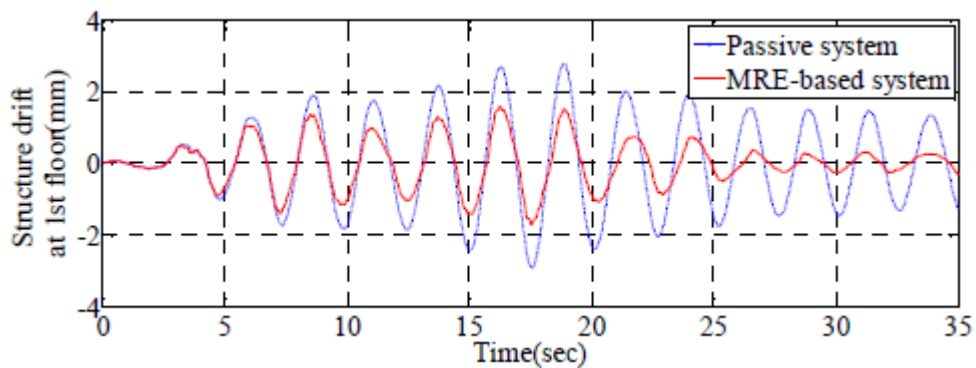
μονωσης βάσης, χρησιμοποιώντας εφεδρανα καουτσούκ (RB). Το Σχήμα 1.18 δείχνει την μετακίνηση του πρώτου για κάθε σύστημα για διάφορους σεισμούς [29].



(α) El Centro



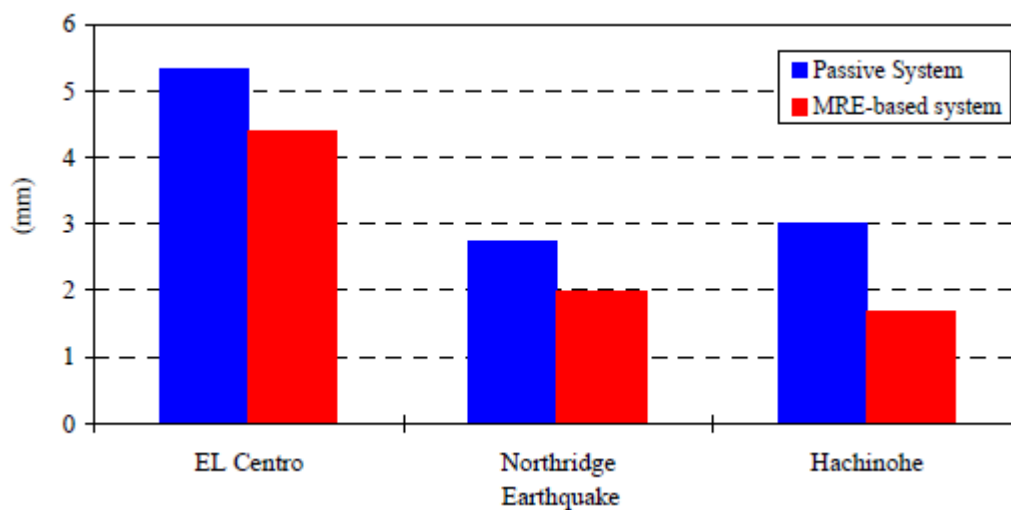
(β) Northridge



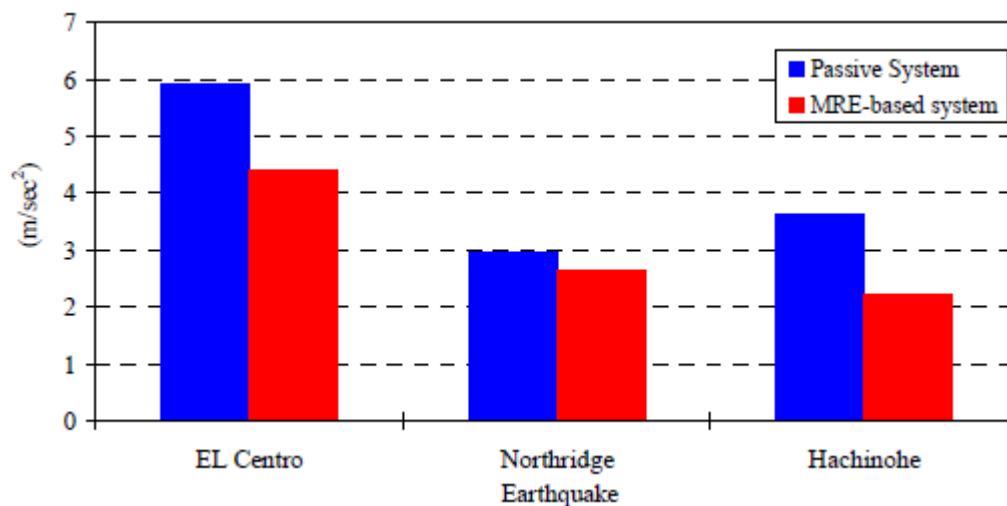
(γ) Hachnohe

**Σχήμα 1.18 :** Μετακίνηση πρώτου ορόφου για διάφορες σεισμικές διεργασίες

Όπως φαίνεται στο σχήμα, το ευφρές σύστημα μόνωσης βάσης που χρησιμοποιεί MREs μειώνει σημαντικά την απόκριση σε σχέση με το παθητικό σύστημα τύπου μόνωσης βάσης για διάφορες διεγέρσεις. Τα Σχήματα 1.19 και 1.20 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 συμβατικού συστήματος μόνωση βάσης [29],[18].



**Σχήμα 1.19 :** Μετακίνηση πρώτου ορόφου για διάφορες σεισμικές διεργασίες



**Σχήμα 1.20 :** Επιτάχυνση τελευταίου ορόφου για διάφορες σεισμικές διεργασίες

### **1.3 Συνδυασμός Σεισμικά Μονωμένης Βάσης και Ενεργητικού Ελέγχου (Base Isolation and Active Control)**

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 κατασκευής πάνω σε σφαιρικά εφέδρανα κύλισης (ball bearings). 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 [85].

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. [85].

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 [85],[91].

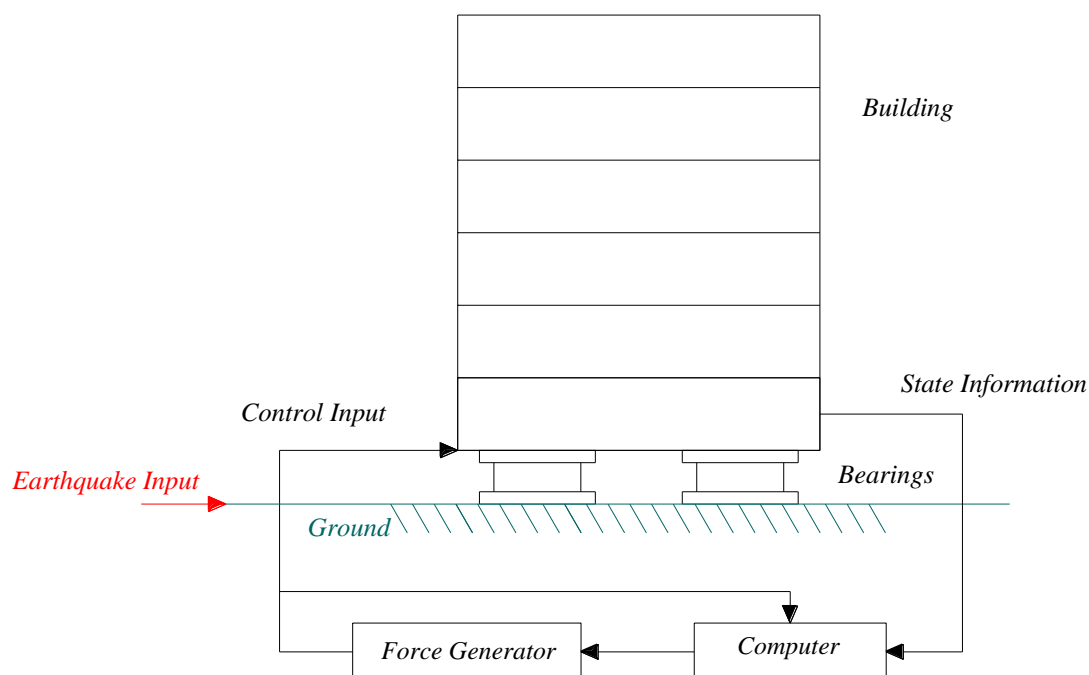
Η δύναμη ελέγχου εφαρμόζεται από ένα υδραυλικό έμβολο (επενεργητή). Με αυτήν την τοποθέτηση θα διερευνήσουμε το πρόβλημα σε μοντέλα κτιρίων με σεισμικά μονωμένη βάση, περιγραφόμενα σε αδρανειακές συντεταγμένες.

### **1.3.1 Σχεδιασμός Συστήματος**

Στο Σχήμα 1.21 απεικονίζεται ένα σχήμα ενός πιθανού σχεδιασμού του συστήματος αυτομάτου ελέγχου που προτείνεται. Η σεισμική διαταραχή σε ένα μοντέλο που

περιγράφεται σε αδρανειακό σύστημα αναφοράς εισέρχεται μόνο στον πρώτο όροφο (ισόγειο) [85].

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 [85].



**Σχήμα 1.21 :** Διάταξη Συστήματος Αυτόματου 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 επιταχυνσιομέτρων. 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 [85].

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 [85].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΤΙΡΙΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ

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 εφεδράνα 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 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. Σε αυτή την περίπτωση, το αυτόματο σύστημα πρέπει να εφαρμόσει τις δυνάμεις ελέγχου μόνον στο επίπεδο του ισόγειου. 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.

## 2.1 Περιγραφή του Συστήματος

Το φυσικό σύστημα που μελετάται παρακάτω είναι ένα κτίριο  $N$  ορόφων με σεισμικά μονωμένη βάση. 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].

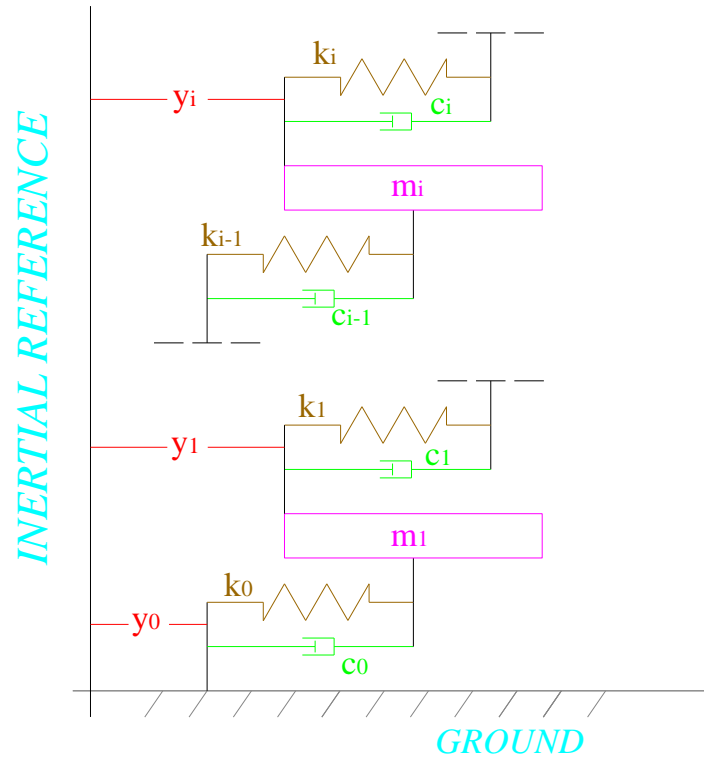
Έστω ότι  $y_0(t)$  είναι η μετατόπιση του εδάφους και  $y_i(t)$  η μετατόπιση του  $i$  ορόφου ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς (Σχήμα 2.1) [87].

Οι εξισώσεις κίνησης του κτιρίου είναι:

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

και





**Σχήμα 2.1:** Μοντελοποιημένο κτίριο  $N$  ορόφων σε απόλυτες συντεταγμένες

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

για  $i = 1, 2, \dots, N$  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  $x = (x_1, x_2, \dots, x_{2N})^T$  όπου  $x_i = \dot{y}_i$ ,  $x_{i+N} = y_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$

Οι εξισώσεις του γραμμικού μοντέλου στο χώρο κατάστασης είναι:

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

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

όπου

$$A = \left[ \begin{array}{cccccccc|cccccccc} \frac{(-c_0 - c_1)}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \frac{(-k_0 - k_1)}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \frac{c_1}{m_2} & \frac{(-c_1 - c_2)}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & 0 & \dots & \dots & 0 & \frac{k_1}{m_2} & \frac{(-k_1 - k_2)}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \frac{c_{i-1}}{m_i} & \frac{(-c_{i-1} - c_i)}{m_i} & \frac{c_i}{m_i} & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{k_{i-1}}{m_i} & \frac{(-k_{i-1} - k_i)}{m_i} & \frac{k_i}{m_i} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{c_{N-1}}{m_N} & \frac{-c_{N-1}}{m_N} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{k_{N-1}}{m_N} & \frac{-k_{N-1}}{m_N} \end{array} \right]$$

$$\begin{array}{c} I_{N \times N} \\ O_{N \times N} \end{array}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{c_o}{m_1} & \frac{k_o}{m_1} \\ O_{(N-1) \times 2} \\ \dots \\ O_{N \times 2} \end{bmatrix}$$

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].

## 2.2 Εφαρμογή

Παρακάτω παρουσιάζεται μια εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου για ένα κτίριο 6 ορόφων ( $N=6$ ). Οι εξισώσεις για την περίπτωση του εξαώροφου κτιρίου γράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
m_1 \ddot{y}_1 &= -c_0(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - k_0(y_1 - y_0) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_1(y_2 - y_1) \\
m_2 \ddot{y}_2 &= -c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1(y_2 - y_1) + c_2(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + k_2(y_3 - y_2) \\
m_3 \ddot{y}_3 &= -c_2(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) - k_2(y_3 - y_2) + c_3(\dot{y}_4 - \dot{y}_3) + k_3(y_4 - y_3) \\
m_4 \ddot{y}_4 &= -c_3(\dot{y}_4 - \dot{y}_3) - k_3(y_4 - y_3) + c_4(\dot{y}_5 - \dot{y}_4) + k_4(y_5 - y_4) \\
m_5 \ddot{y}_5 &= -c_4(\dot{y}_5 - \dot{y}_4) - k_4(y_5 - y_4) + c_5(\dot{y}_6 - \dot{y}_5) + k_5(y_6 - y_5) \\
m_6 \ddot{y}_6 &= -c_5(\dot{y}_6 - \dot{y}_5) - k_5(y_6 - y_5)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Όπου  $y_0$  και  $\dot{y}_0$  η μετατόπιση και η ταχύτητα του εδάφους, όπου  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6$  οι μετατοπίσεις,  $\dot{y}_1, \dot{y}_2, \dot{y}_3, \dot{y}_4, \dot{y}_5, \dot{y}_6$  οι ταχύτητες και  $\ddot{y}_1, \ddot{y}_2, \ddot{y}_3, \ddot{y}_4, \ddot{y}_5, \ddot{y}_6$  οι επιταχύνσεις των ορόφων 1,2,3,4,5,6 αντίστοιχα.

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

$$m_1=6800kg \text{ και } m_2, \dots, m_6=5897kg$$

Οι σταθερές απόσβεσης είναι:

$$c_0=2400 \frac{N \cdot \text{sec}}{m}, c_1=67000 \frac{N \cdot \text{sec}}{m}, c_2=58000 \frac{N \cdot \text{sec}}{m}, c_3=57000 \frac{N \cdot \text{sec}}{m},$$

$$c_4=50000 \frac{N \cdot \text{sec}}{m} \text{ και } c_5=38000 \frac{N \cdot \text{sec}}{m}$$

Οι σταθερές ελατηρίου είναι:

$$k_1=33732 \frac{kN}{m}, k_2=29093 \frac{kN}{m}, k_3=28621 \frac{kN}{m}, k_4=24954 \frac{kN}{m} \text{ και } k_5=19059 \frac{kN}{m}$$

### 2.3 Έλεγχος

Εφαρμόζεται έλεγχος  $u(t)$  με ανάδραση όλης της κατάστασης (Full state feedback control) στην βάση του κτιρίου (πρώτος όροφος), οπότε η εξίσωση του ελεγχόμενου πλέον συστήματος γίνεται:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Cv(t) \quad (2.4\alpha)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (2.4\beta)$$

όπου

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1} \\ \mathbf{O}_{(N-1) \times 1} \\ \dots \\ \mathbf{O}_{N \times 1} \end{bmatrix}$$

Η εξίσωση (2.4α) είναι στη μορφή της εξίσωσης (A1) του Παραρτήματος Α, με  $\Delta A(r) = \Delta B(s) = 0$ . Σύμφωνα λοιπόν με το Παράρτημα Α, το  $v(t) \in V$ , είναι ένα γνωστό συμπαγές σύνολο. Οι μέγιστες τιμές της μετατόπισης και της ταχύτητας του εδάφους  $y_0^{\max}$ ,  $\dot{y}_0^{\max}$  είναι γνωστές. Ισχύει δηλαδή:

$$V = \left\{ v \in \mathbb{R}^2 \mid |v_1| \leq y_0^{\max}, |v_2| \leq \dot{y}_0^{\max} \right\}$$

Επαληθεύεται εύκολα, ότι η συνθήκη (A3 c) του Παραρτήματος A ικανοποιείται με την επιλογή  $F = [c_0 \quad k_0]$ , ενώ το  $\bar{A} = A$  αποτελεί καλή επιλογή εφόσον ο  $A$  είναι ευσταθής. Ο ελεγκτής λοιπόν που παρέχει πρακτική ευστάθεια στο σύστημα δίνεται από την εξίσωση (A6) του Παραρτήματος A:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{-B^T P x(t)}{\|B^T P x(t)\|} \rho, & \|B^T P x(t)\| \geq \varepsilon \\ \frac{-B^T P x(t)}{\varepsilon} \rho, & \|B^T P x(t)\| < \varepsilon \end{cases}$$

όπου ο πίνακας  $P$  αποτελεί λύση της εξίσωσης Lyapunov

$$PA + A^T P + Q = 0$$

για δεδομένο  $Q > 0$ , και

$$\rho = \max_{V \in \mathbb{N}} |FV| = \sqrt{(k_0 y_0^{\max})^2 - (c_0 \dot{y}_0^{\max})^2}$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

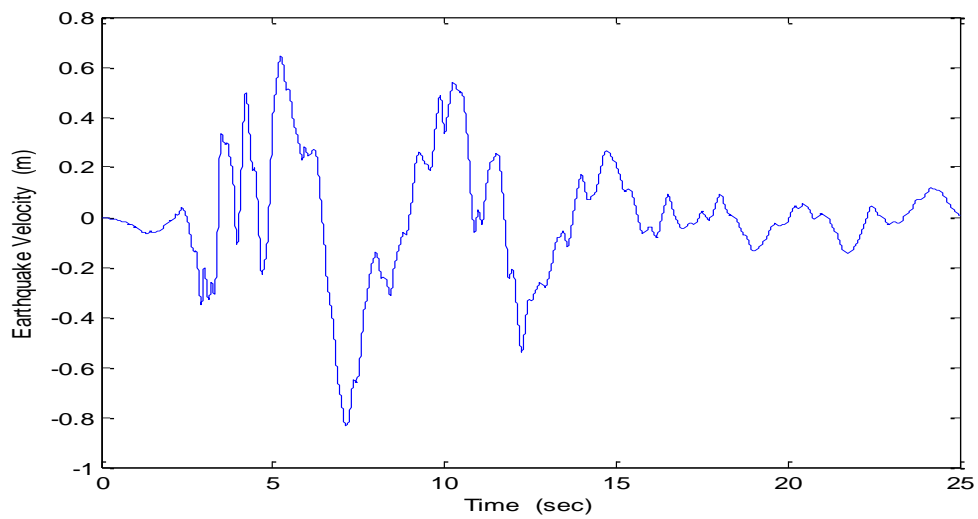
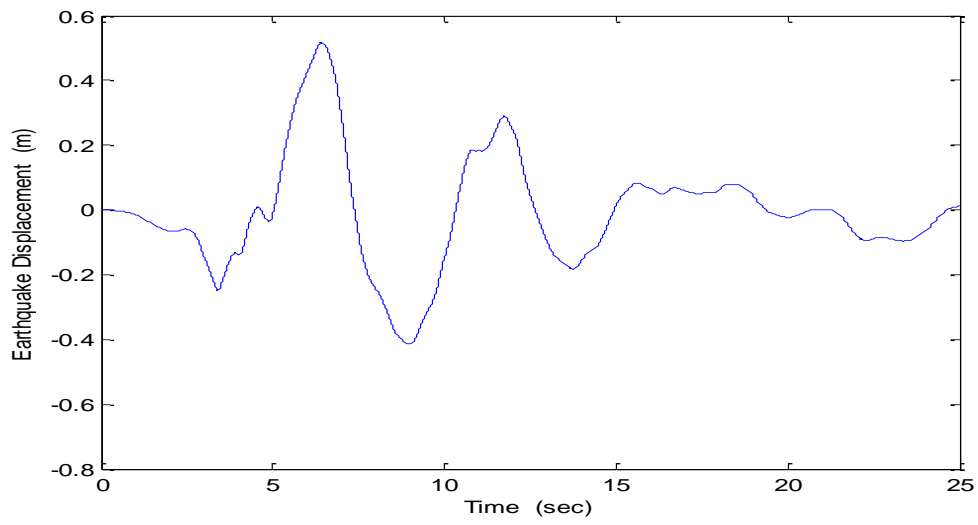
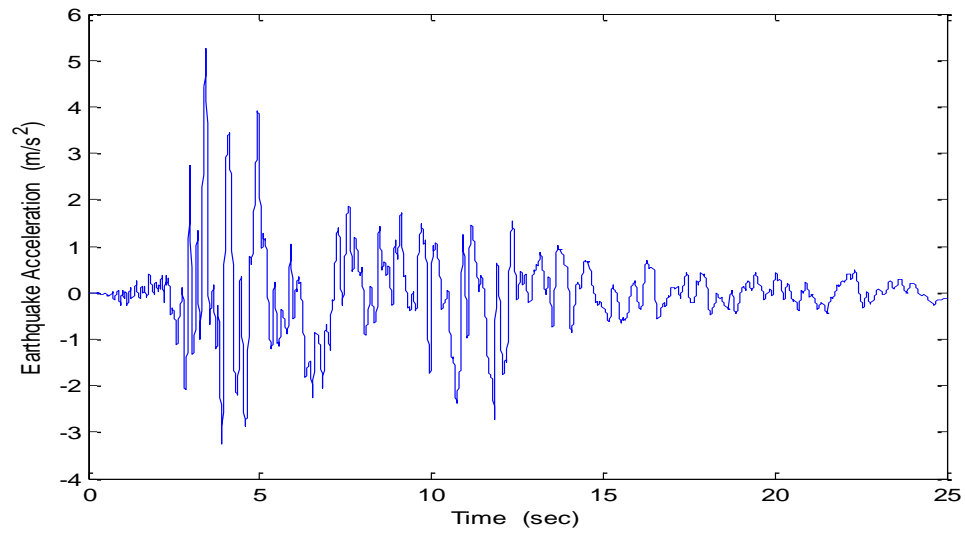
### ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕ Η/Υ

Θα χρησιμοποιηθούν σαν διεργασίες τέσσερις διαφορετικές σεισμικές δονήσεις και θα παρουσιαστούν με διαγράμματα οι αποκρίσεις και των έξι ορόφων του κτιρίου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Οι σεισμικές δονήσεις που θα εφαρμοστούν στο μοντέλο είναι οι DCZ-270, ERZ-000, JFA-022 και TAB-074. Το χαρακτηριστικό αυτών των σεισμών είναι ότι έχουν καταγραφεί κοντά στο επίκεντρο.

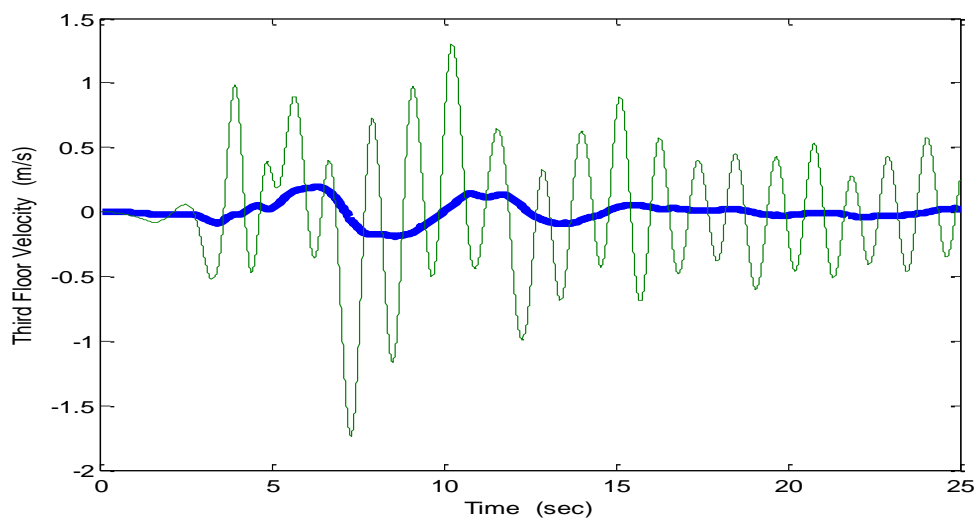
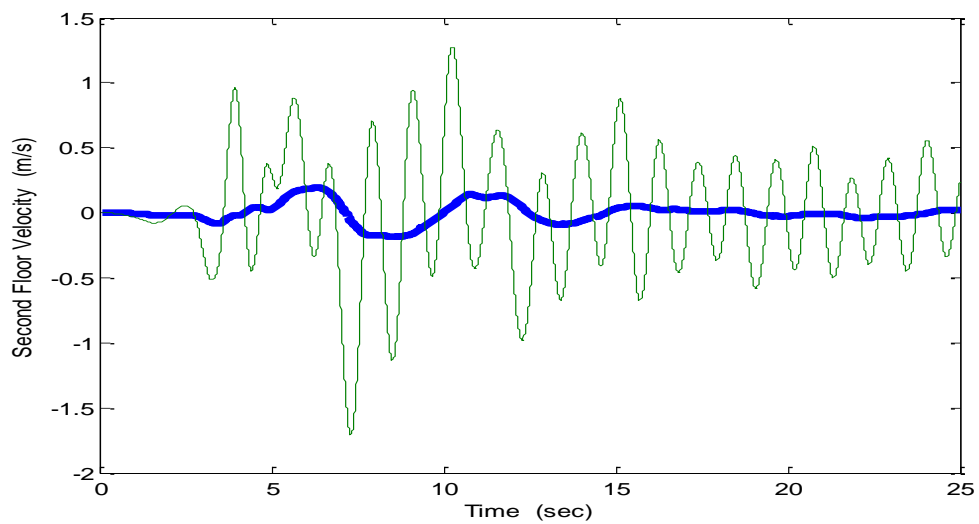
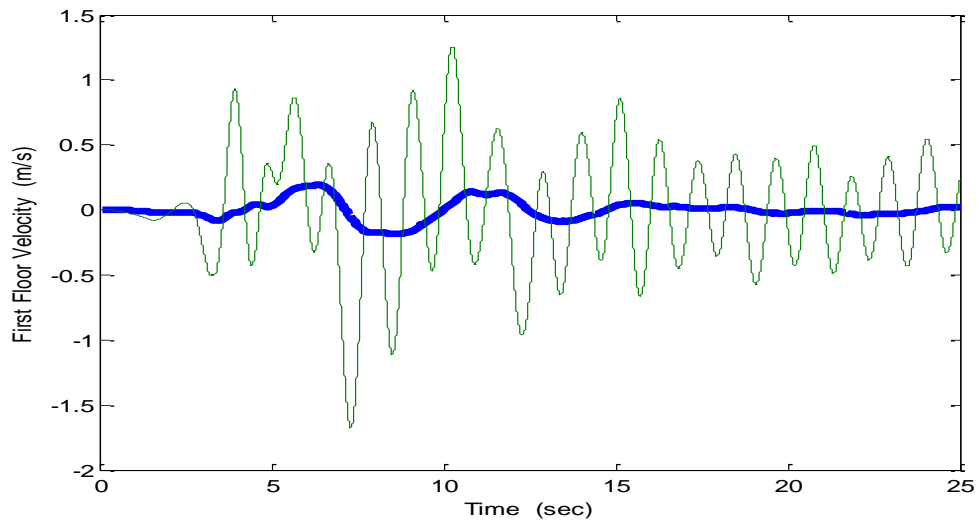
#### 3.1 DCZ-270

Εφαρμόζουμε τον σεισμό DCZ-270 στο εξαώροφο κτίριο της πιο πάνω εφαρμογής. Από το Σχήμα 3.1, οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας και της μετατόπισης του εδάφους είναι :  $y_0^{\max}=0.52$  m και  $\dot{y}_0^{\max}=0.65$  m/s , οι οποίες καθορίζουν την μέγιστη τιμή του ελεγκτή σύμφωνα με τις εξισώσεις (A6) και (A8) του Παραρτήματος Α. Για τον υπολογισμό του πίνακα P της εξίσωσης (A7) του ίδιου παραρτήματος θεωρούμε έναν διαγώνιο πίνακα Q με τα στοιχεία της διαγωνίου του να είναι τα [ 12 11 11 12 12 12 20 20 20 20 20 20 ]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των Σχημάτων 3.2-5 είναι για  $\varepsilon=0.003$ . Η προσομοίωση έγινε για χρονικό διάστημα 25 δευτερολέπτων καθώς σε αυτό διάστημα παρατηρείται έντονη σεισμική δραστηριότητα.

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η επιτάχυνση, η μετατόπιση και η ταχύτητα του εδάφους για τον σεισμό DCZ-270. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές της διαγωνίου του Q και το  $\varepsilon$  βρέθηκαν μετά από πολλές δοκιμές έτσι ώστε να επιτευχθεί μία υλοποιήσιμη μορφή ελέγχου με ικανοποιητικά μικρές αποκρίσεις των ορόφων.

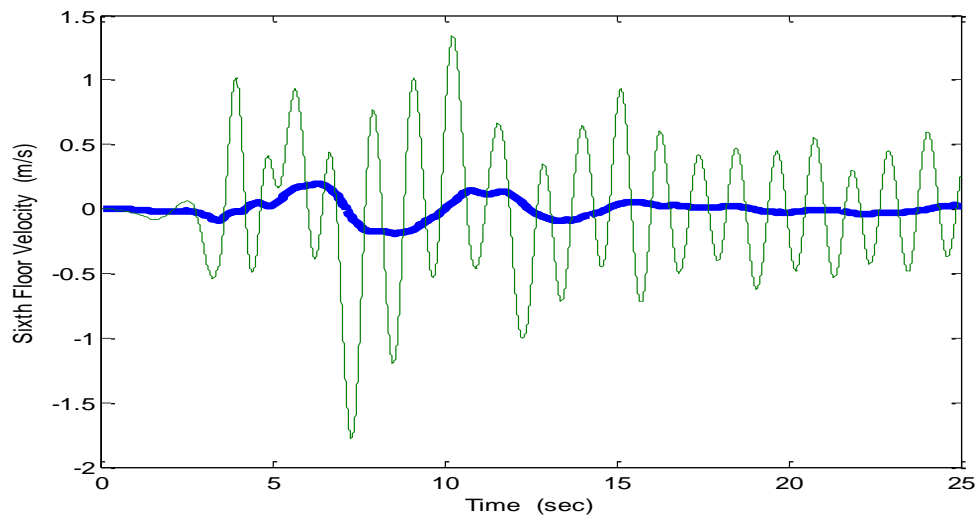
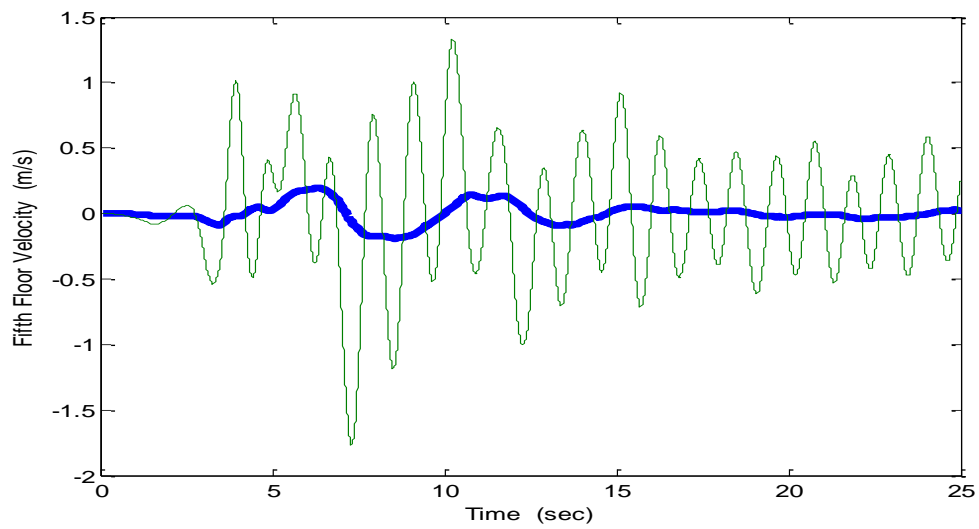
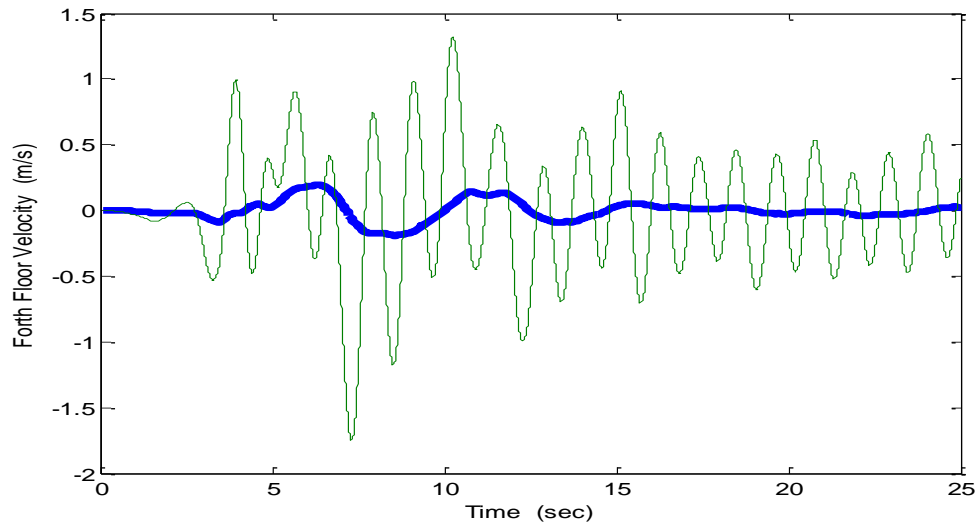


**Σχήμα 3.1 :** Επιτάχυνση, μετατόπιση και ταχύτητα σεισμού DCZ-270

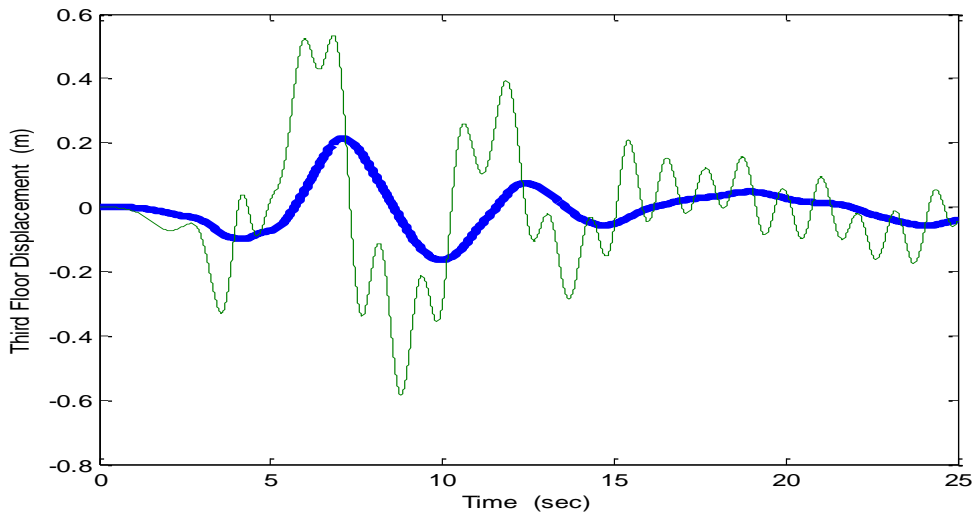
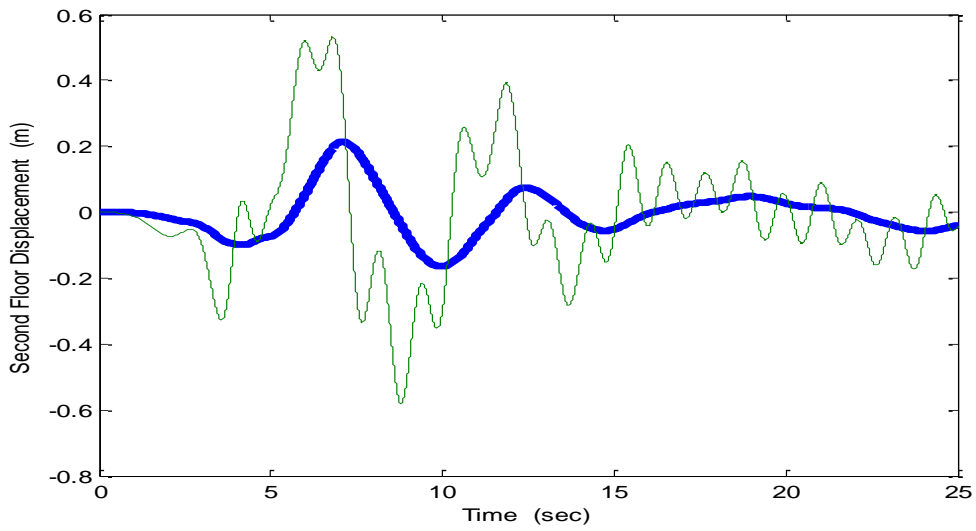
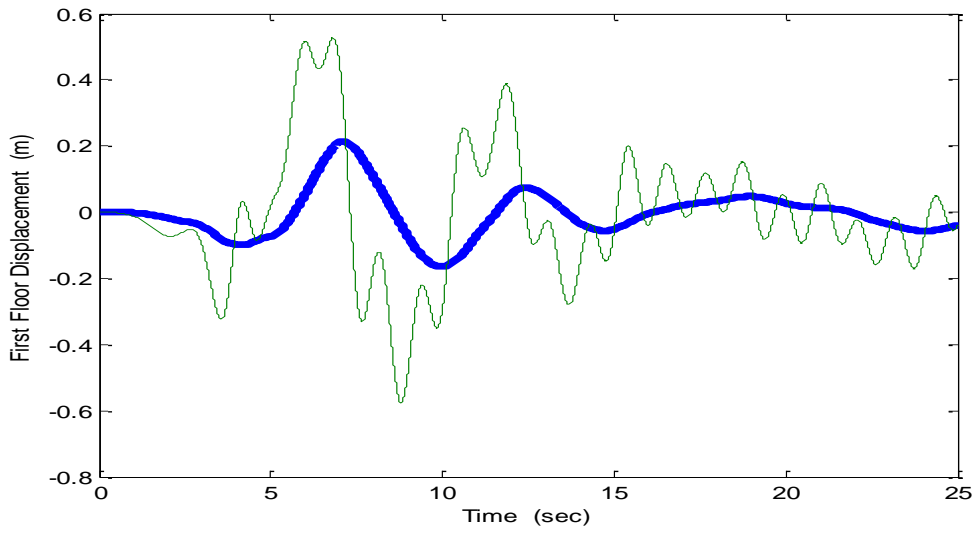


**Σχήμα 3.2 :** Ταχύτητες ορόφων 1,2,3 με και χωρίς έλεγχο

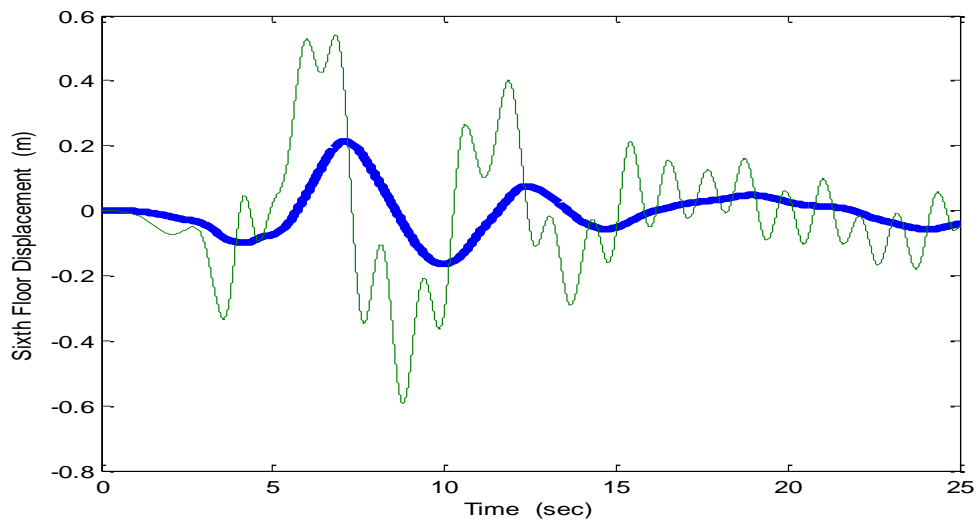
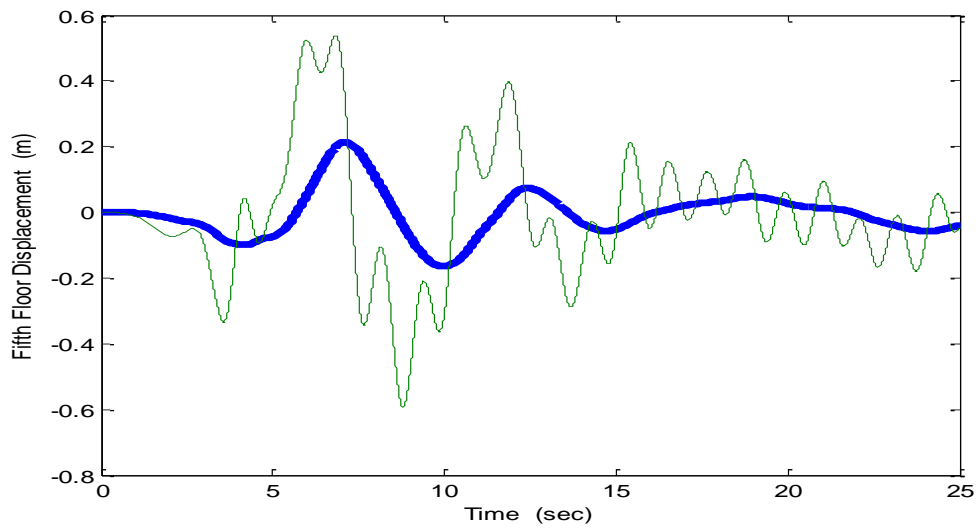
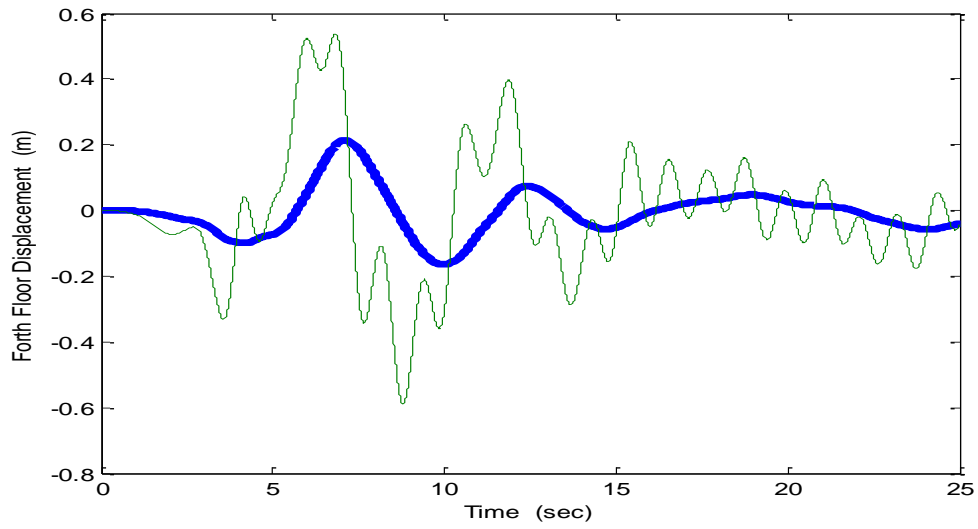




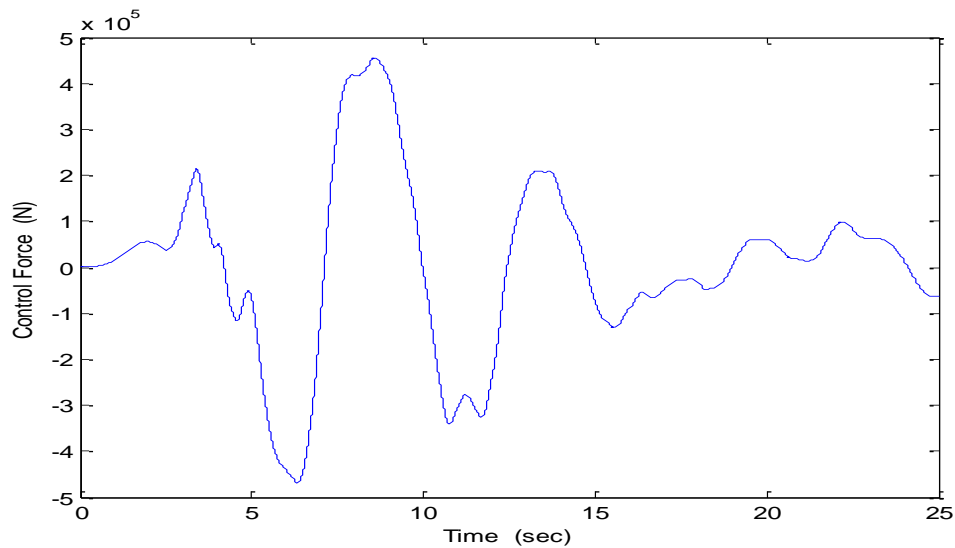
Σχήμα 3.3 : Ταχύτητες ορόφων 4,5,6 με και χωρίς έλεγχο



Σχήμα 3.4 : Μετατοπίσεις ορόφων 1,2,3 με και χωρίς έλεγχο



Σχήμα 3.5 : Μετατοπίσεις ορόφων 4,5,6 με και χωρίς έλεγχο



**Σχήμα 3.6 :** Δύναμη Επενεργητή

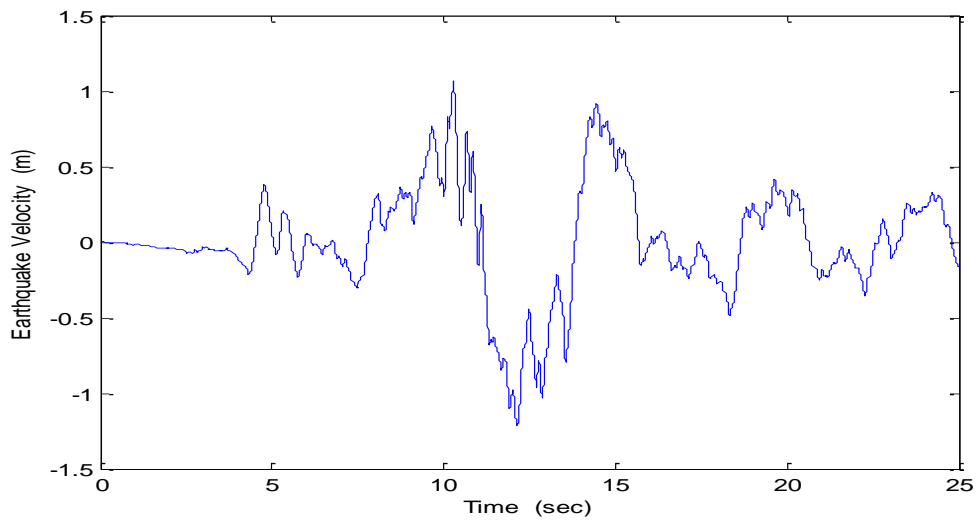
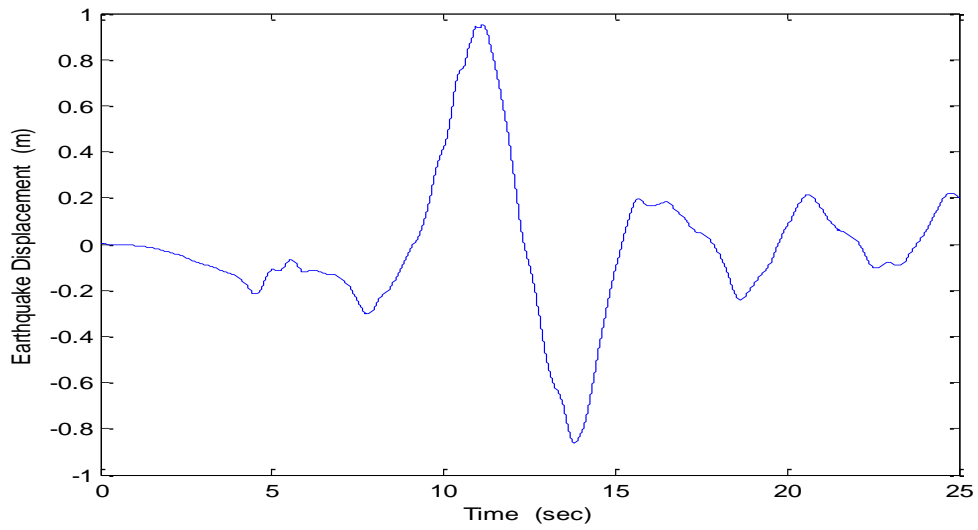
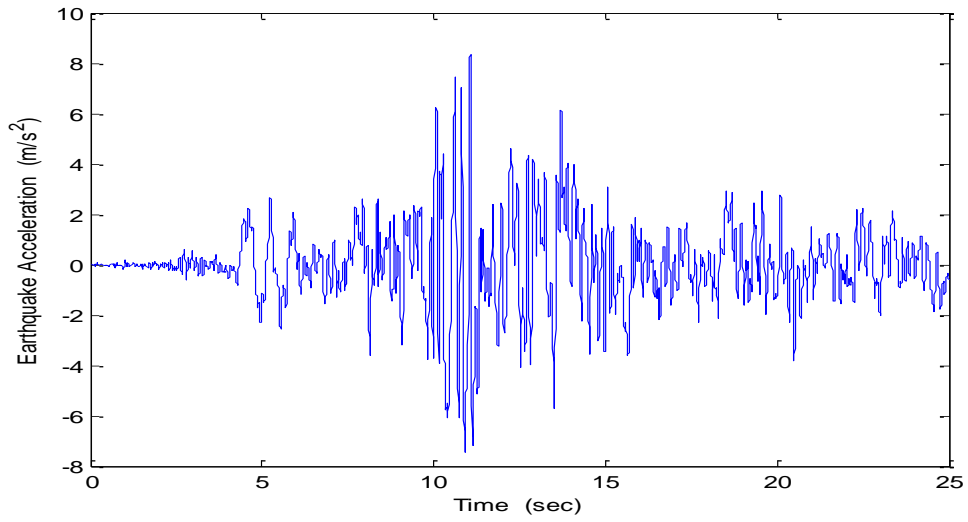
Πιο πάνω δίνονται οι ταχύτητες και οι μετακινήσεις των έξι ορόφων καθώς και η δύναμη του επενεργητή. Πρέπει να τονιστεί ότι σε κάθε σχήμα αναπαριστάται ταυτόχρονα η μετακίνηση ή η ταχύτητα του κάθε ορόφου πριν και μετά την εφαρμογή του ελέγχου. Αυτό γίνεται για να φάνουν συγκριτικά τα αποτελέσματα.

Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή του ελέγχου υπάρχει μια αξιοσημείωτη βελτίωση της απόκρισης του συστήματος. Αυτό αφορά τόσο το εύρος των τιμών στις ταχύτητες των ορόφων και τις μετατοπίσεις τους όσο και την συχνότητα των ταλαντώσεων. Η βελτίωση φυσικά είναι πιο ορατή στις ταχύτητες των ορόφων αλλά και στις μετατοπίσεις παρατηρείται ότι το μέγιστο της μετατόπισης μειώνεται στο μισό μετά την εφαρμογή του ελέγχου. Η βελτίωση αυτή θα ήταν ακόμα μεγαλύτερη αν επιλεγόταν μικρότερες τιμές του  $\varepsilon$  ή μεγαλύτερες τιμές για τα στοιχεία της διαγωνίου του πίνακα  $Q$ . Σε αυτή την περίπτωση οι απαιτούμενες δυνάμεις ελέγχου θα ήταν μεγαλύτερες και θα εμφανιζόντουσαν προβλήματα στην υλοποίησή τους.

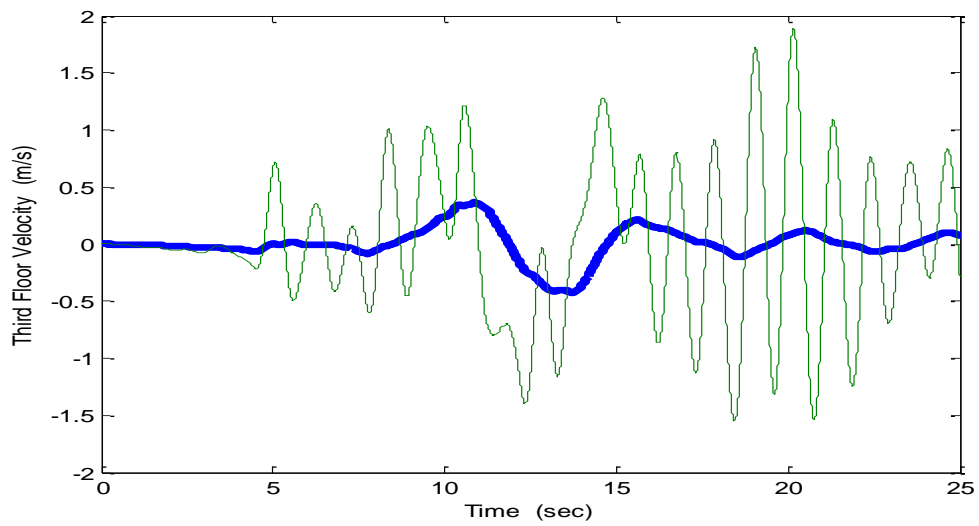
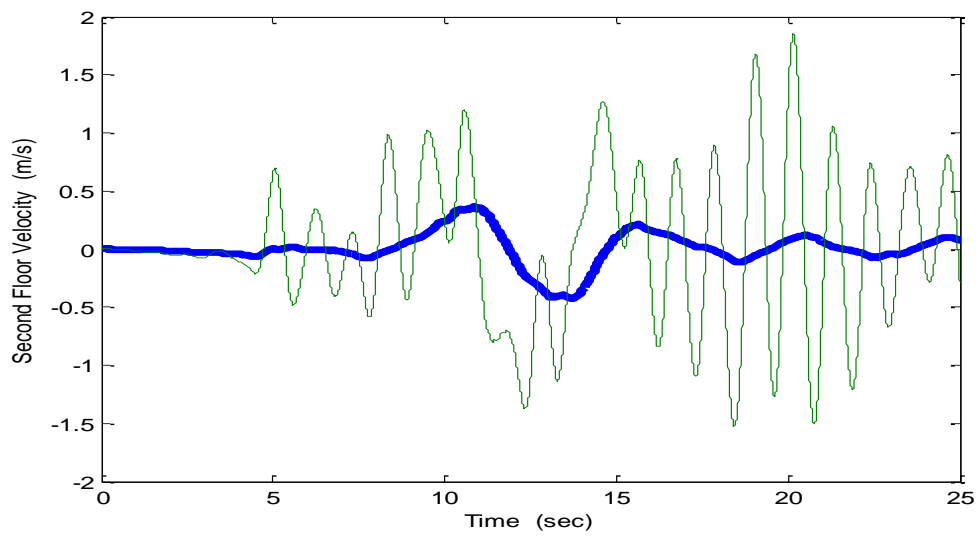
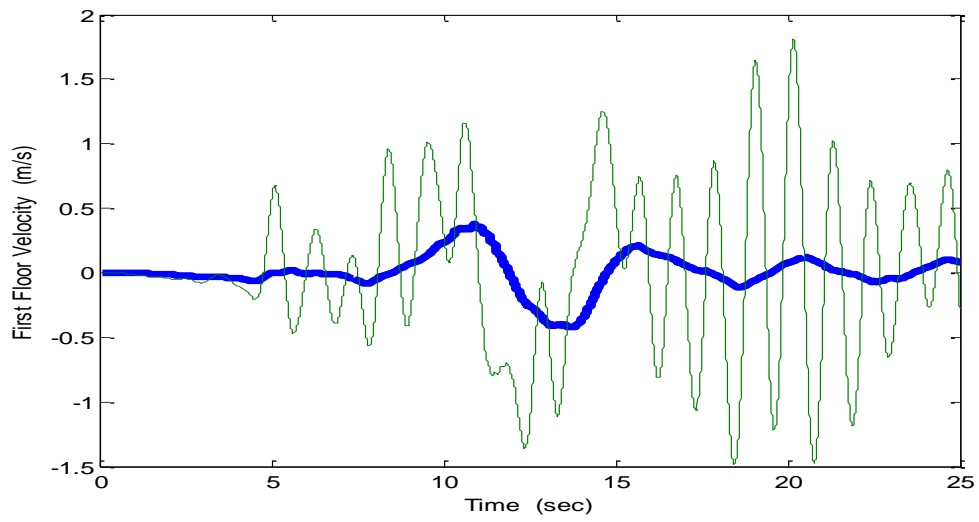
### 3.2 TAB-074

Εφαρμόζουμε τον σεισμό TAB-074 στο εξαώροφο κτίριο της ίδιας πάντα εφαρμογής. Από το Σχήμα 3.7, οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας και της μετατόπισης του εδάφους είναι :  $y_0^{\max}=0.96$  m και  $\dot{y}_0^{\max}=1.07$  m/s , οι οποίες καθορίζουν την μέγιστη τιμή του ελεγκτή σύμφωνα με τις εξισώσεις (A6) και (A8) του Παραρτήματος Α. Για τον υπολογισμό του πίνακα P της εξίσωσης (A7) του ίδιου παραρτήματος θεωρούμε έναν διαγώνιο πίνακα Q με τα στοιχεία της διαγωνίου του να είναι τα [ 8 8 8 8 8 8 10 10 10 10 10 10 ]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των Σχημάτων 3.8-11 είναι για  $\varepsilon=0.0045$ . Η προσομοίωση έγινε για χρονικό διάστημα 25 δευτερολέπτων καθώς σε αυτό διάστημα παρατηρείται έντονη σεισμική δραστηριότητα.

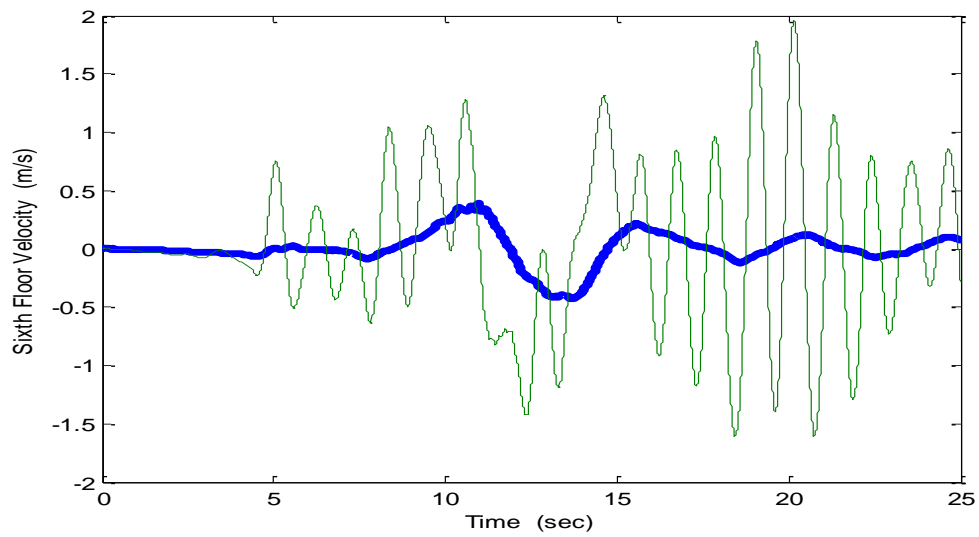
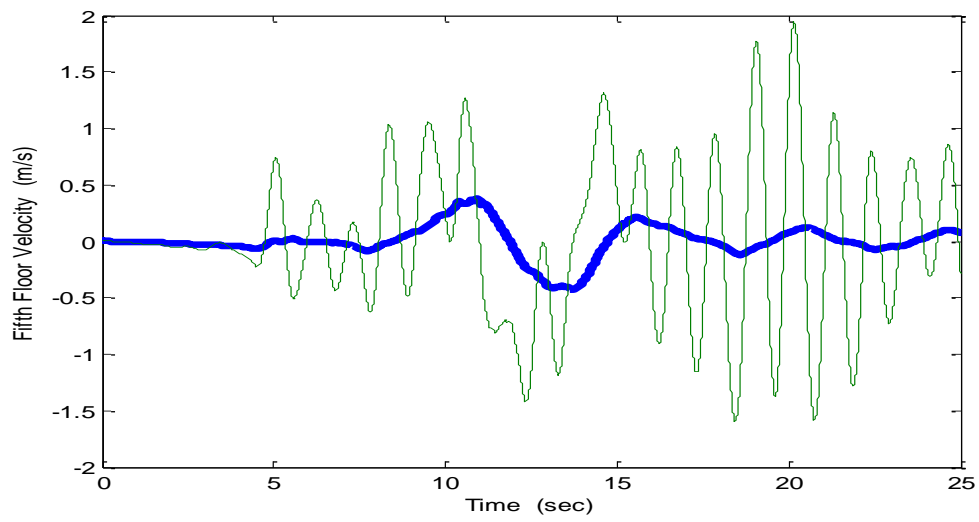
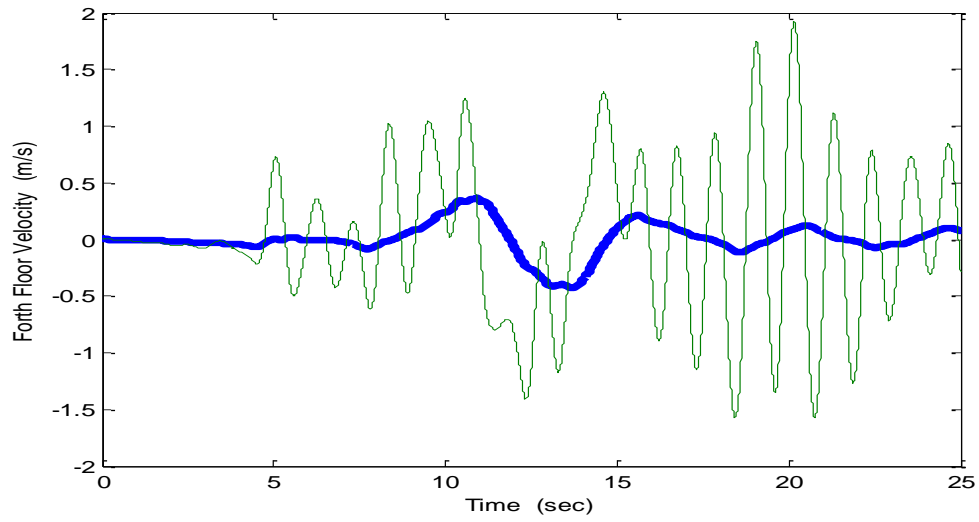
Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται η επιτάχυνση, η μετατόπιση και η ταχύτητα του εδάφους για τον σεισμό TAB-074. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές της διαγωνίου του Q και το  $\varepsilon$  βρέθηκαν μετά από πολλές δοκιμές έτσι ώστε να επιτευχθεί μία υλοποιήσιμη μορφή ελέγχου με ικανοποιητικά μικρές αποκρίσεις των ορόφων.



Σχήμα 3.7 : Επιτάχυνση, μετατόπιση και ταχύτητα σεισμού TAB-074

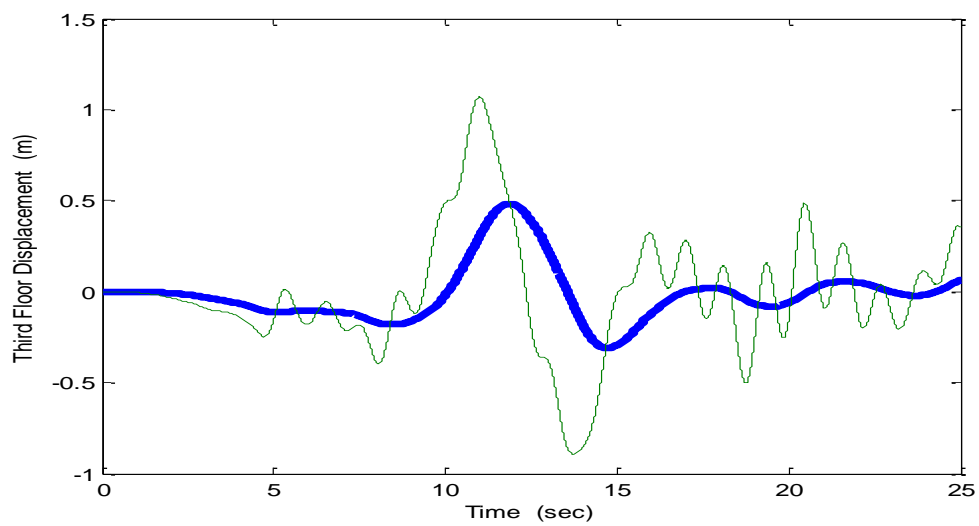
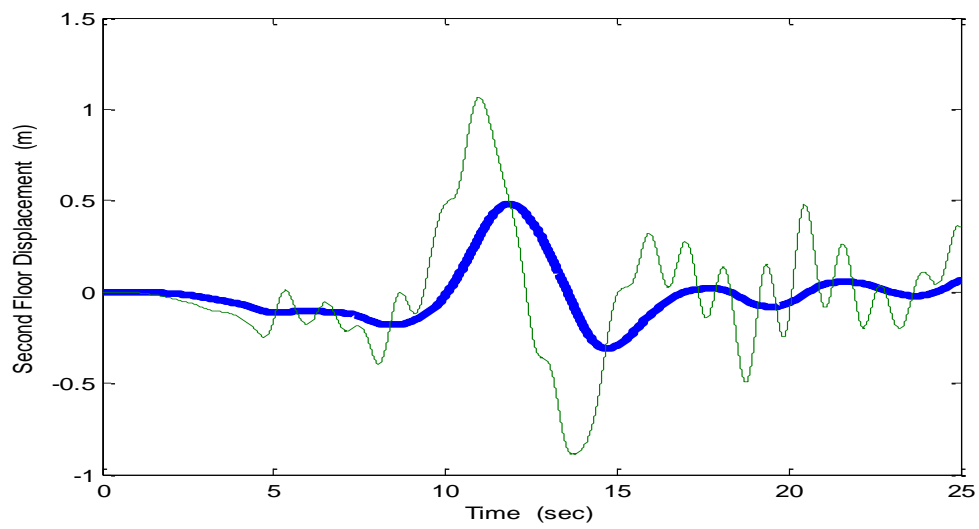
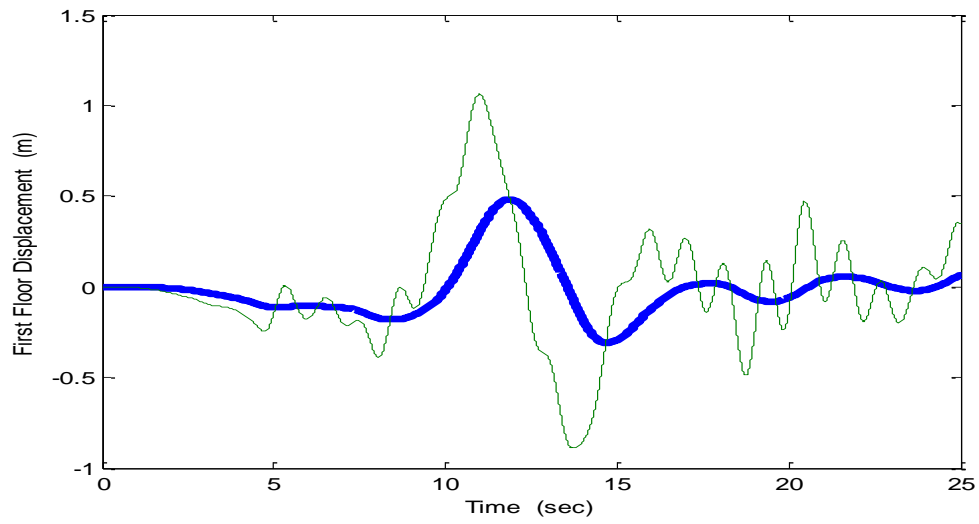


Σχήμα 3.8 : Ταχύτητες ορόφων 1,2,3 με και χωρίς έλεγχο

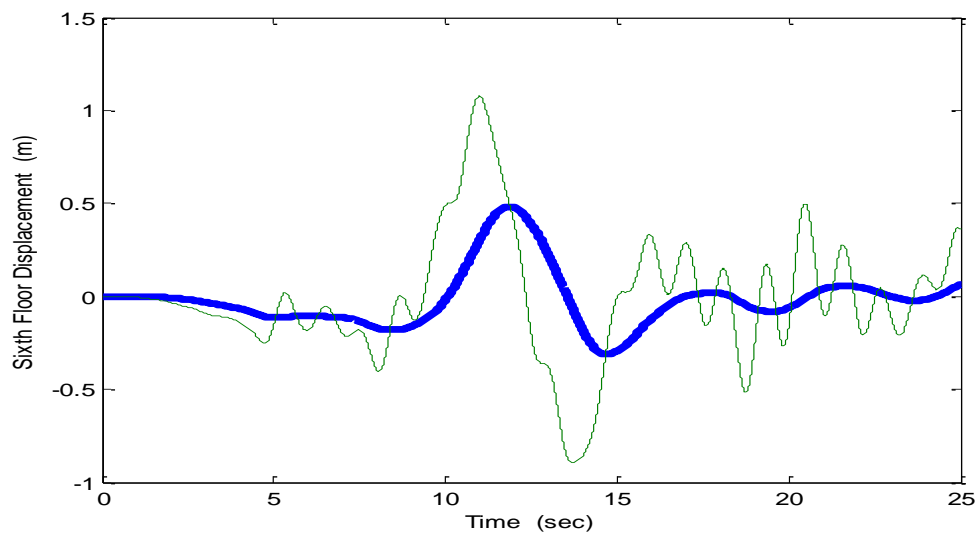
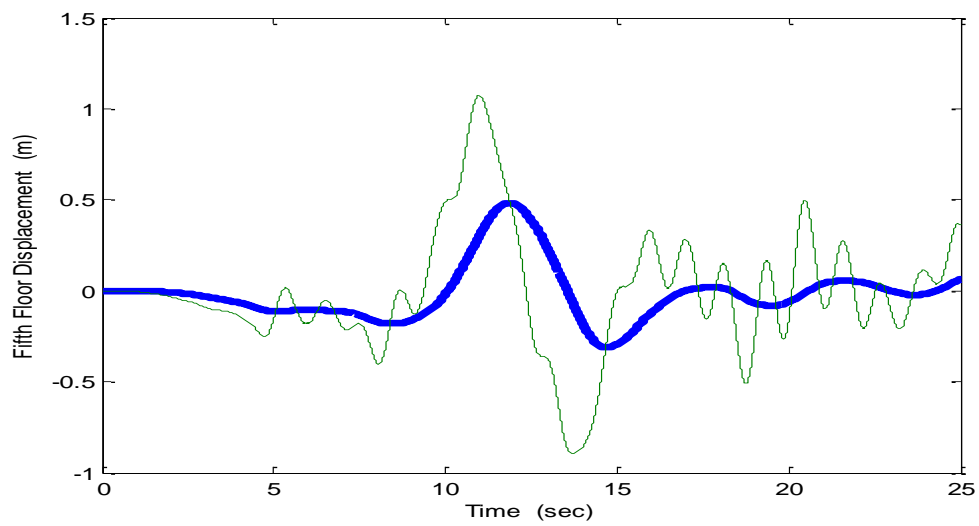
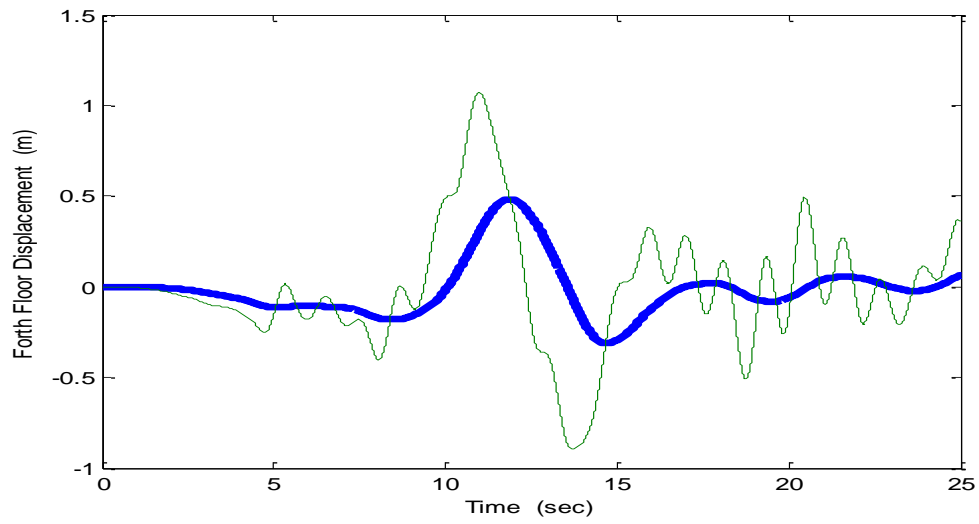


Σχήμα 3.9 : Ταχύτητες ορόφων 4,5,6 με και χωρίς έλεγχο

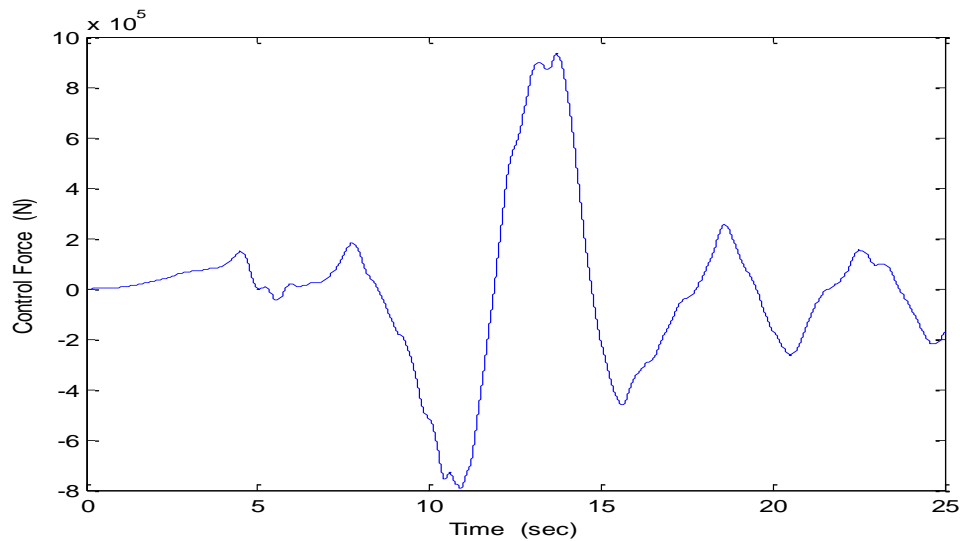




Σχήμα 3.10 : Μετατοπίσεις ορόφων 1,2,3 με και χωρίς έλεγχο



Σχήμα 3.11 : Μετατοπίσεις ορόφων 4,5,6 με και χωρίς έλεγχο



**Σχήμα 3.12 :** Δύναμη Επενεργητή

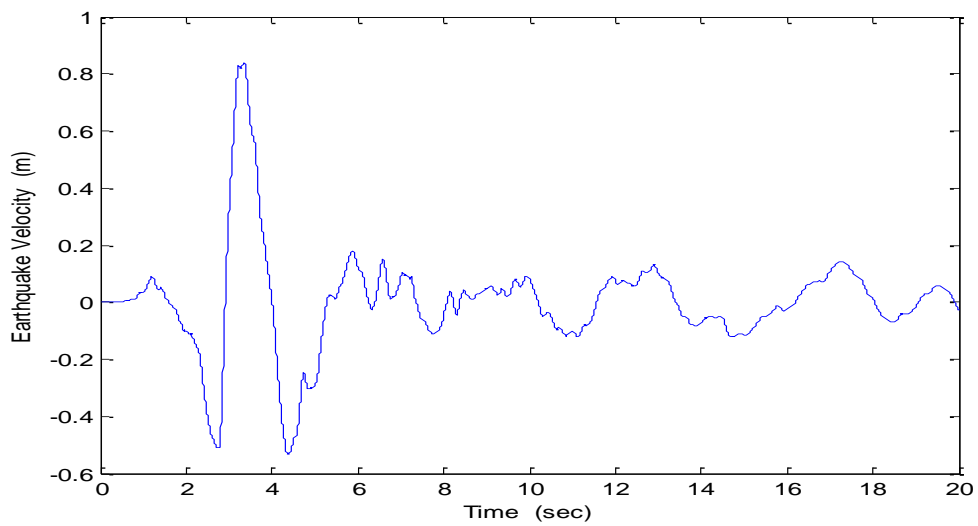
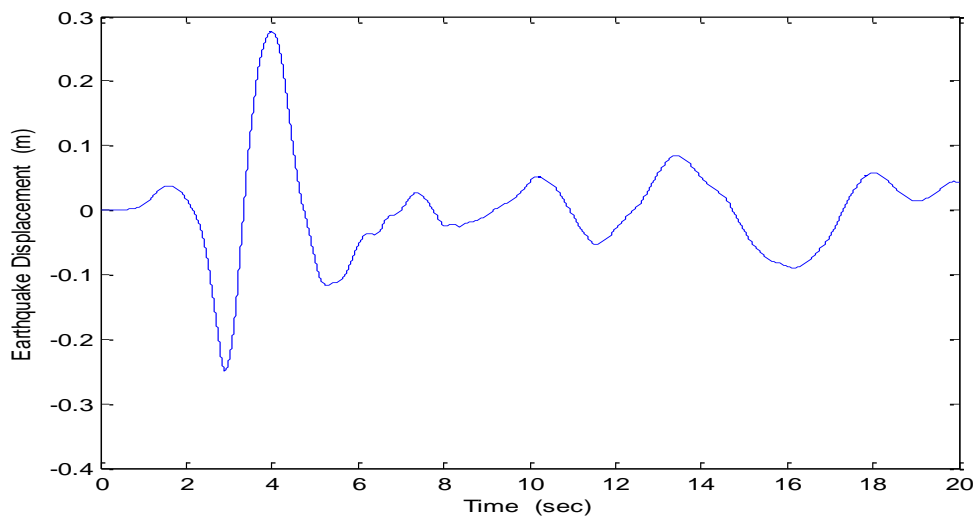
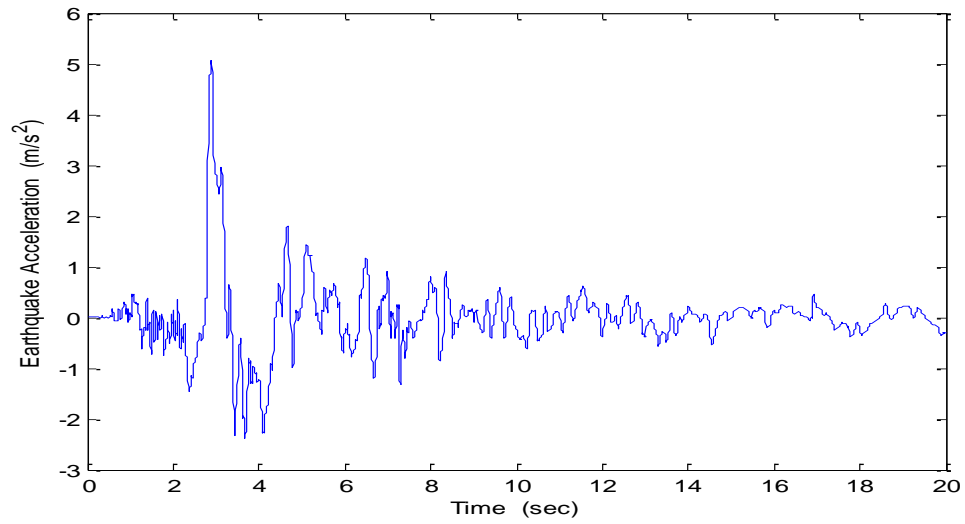
Και σε αυτόν τον σεισμό παρατηρείται αξιοσημείωτη βελτίωση της απόκρισης του συστήματος με την εφαρμογή του ελέγχου. Η βελτίωση αφορά τόσο το εύρος των τιμών στις ταχύτητες των ορόφων και τις μετατοπίσεις τους όσο και την συχνότητα των ταλαντώσεων.

### 3.3 ERZ-000

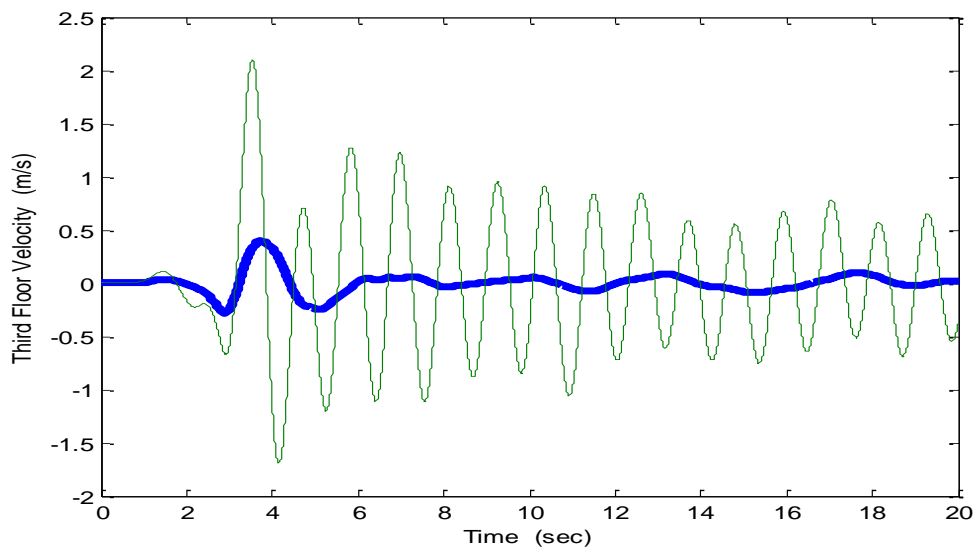
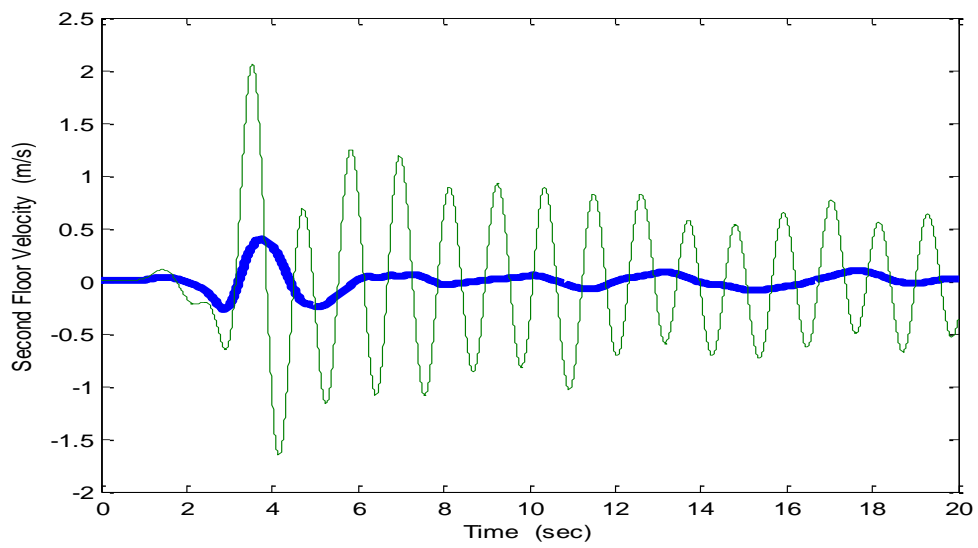
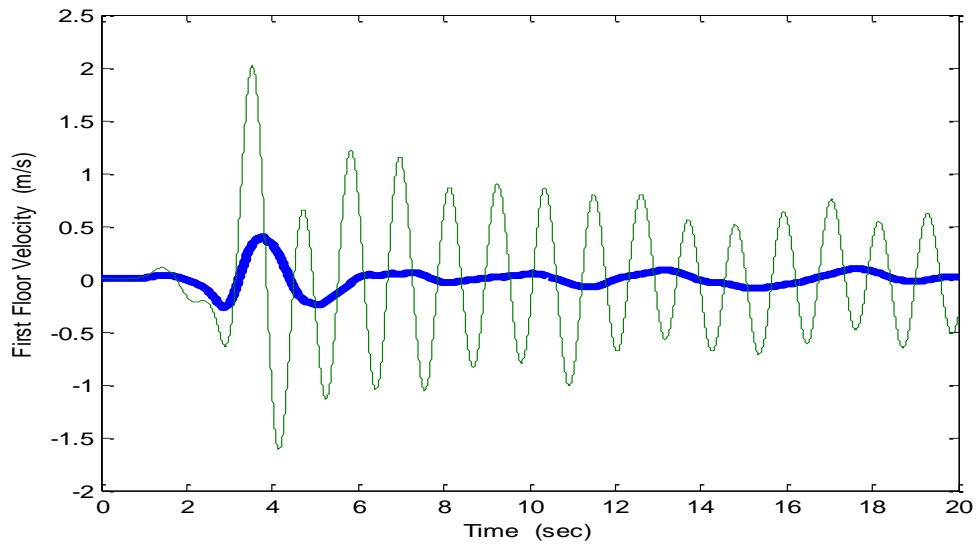
Εφαρμόζουμε τον σεισμό ERZ-000 στο εξάωρο κτίριο της εφαρμογής. Από το Σχήμα 3.13, οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας και της μετατόπισης του εδάφους είναι :  $y_0^{\max}=0,28$  m και  $\dot{y}_0^{\max}=0.84$  m/s, οι οποίες καθορίζουν την μέγιστη τιμή του ελεγκτή σύμφωνα με τις εξισώσεις (A6) και (A8) του Παραρτήματος Α. Για τον υπολογισμό του πίνακα P της εξίσωσης (A7) του ίδιου παραρτήματος θεωρούμε έναν διαγώνιο πίνακα Q με τα στοιχεία της διαγωνίου του να είναι τα [ 11 11 11 11 12 12 20 20 20 20 20 20 ]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των Σχημάτων 3.14-17 είναι για  $\varepsilon$

=0.006. Η προσομοίωση έγινε για χρονικό διάστημα 25 δευτερολέπτων καθώς σε αυτό διάστημα παρατηρείται έντονη σεισμική δραστηριότητα.

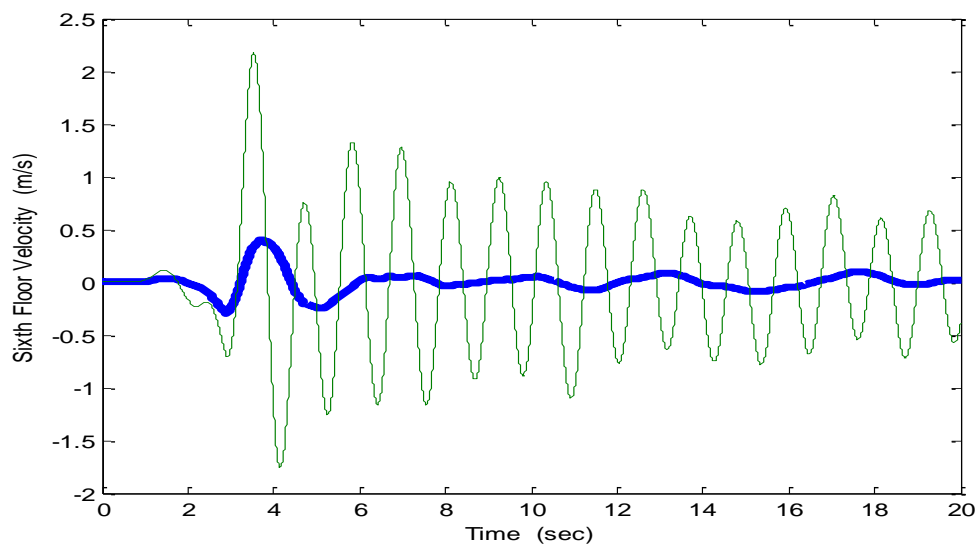
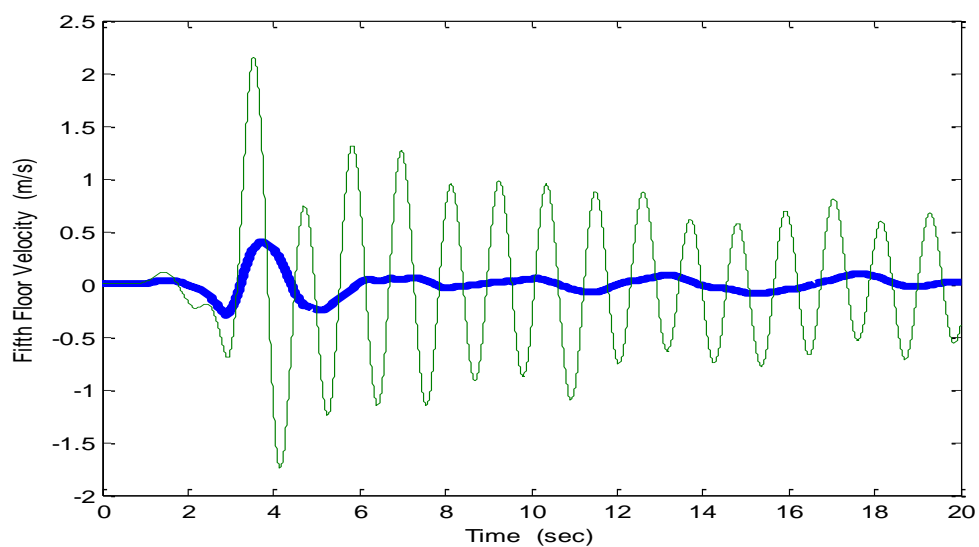
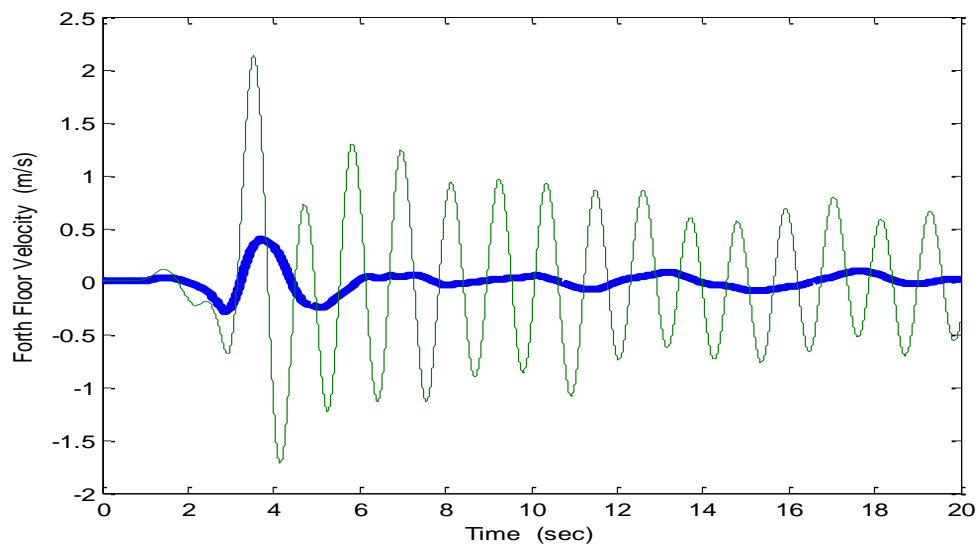
Στο Σχήμα 3.13 φαίνεται η επιτάχυνση, η μετατόπιση και η ταχύτητα του εδάφους για τον σεισμό ERZ-000. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές της διαγωνίου του  $Q$  και το  $\varepsilon$  βρέθηκαν μετά από πολλές δοκιμές έτσι ώστε να επιτευχθεί μία υλοποιήσιμη μορφή ελέγχου με ικανοποιητικά μικρές αποκρίσεις των ορόφων.



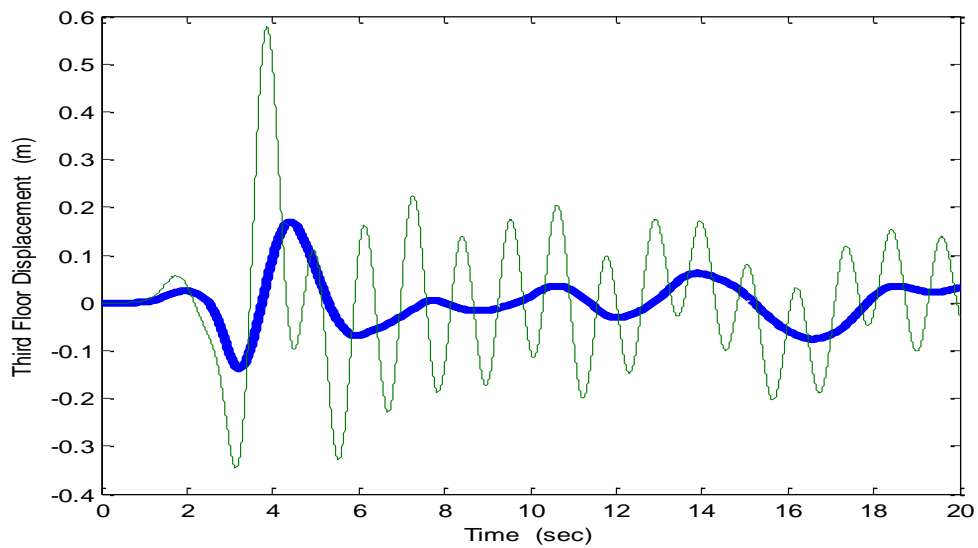
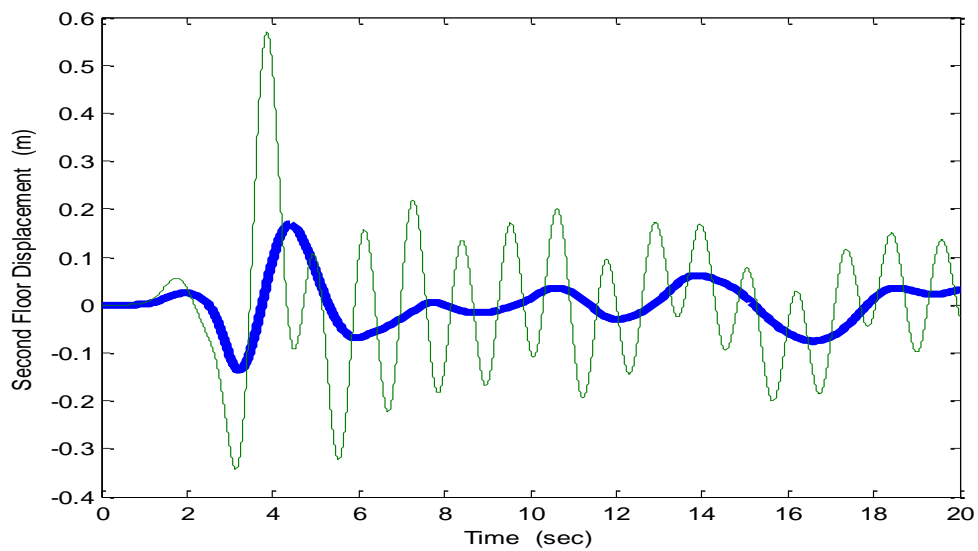
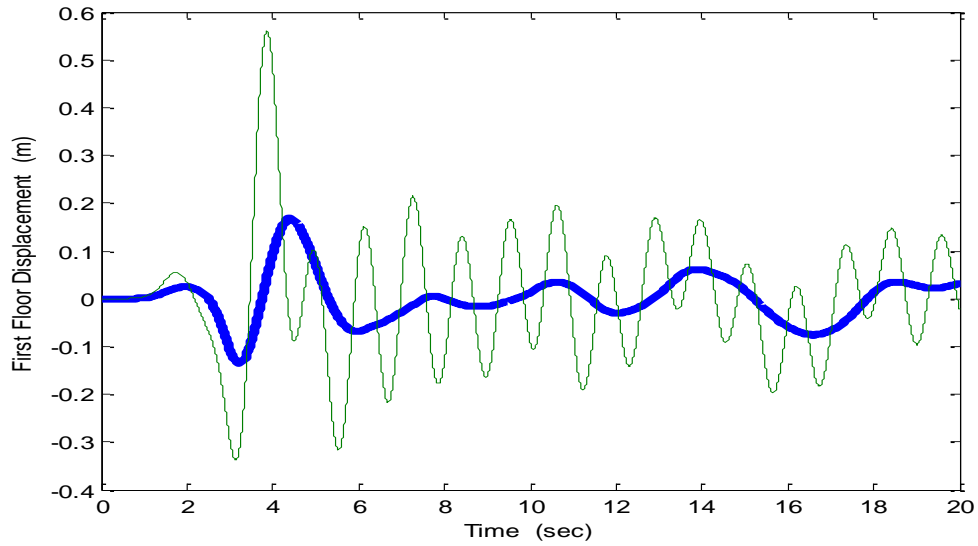
**Σχήμα 3.13 :** Επιτάχυνση, μετατόπιση και ταχύτητα σεισμού ERZ-000



Σχήμα 3.14 : Ταχύτητες ορόφων 1,2,3 με και χωρίς έλεγχο

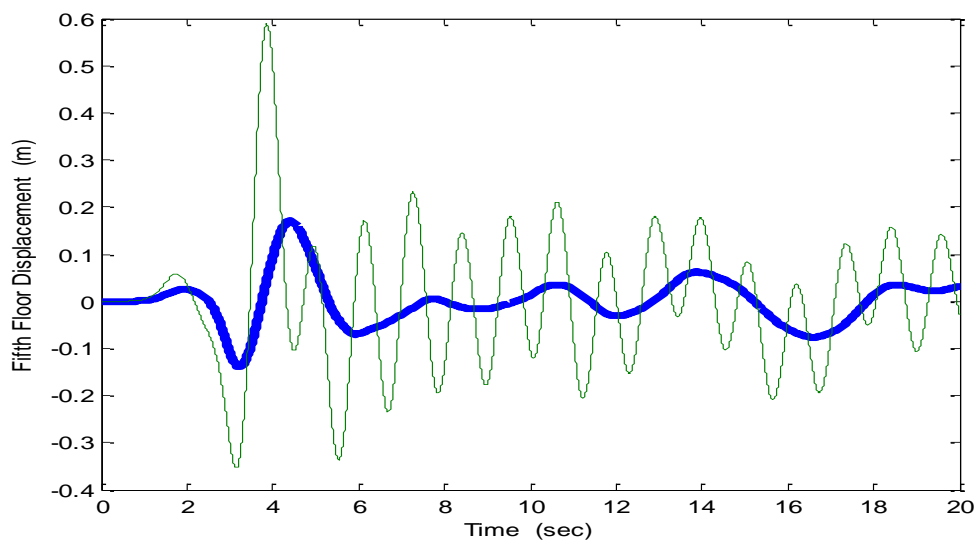
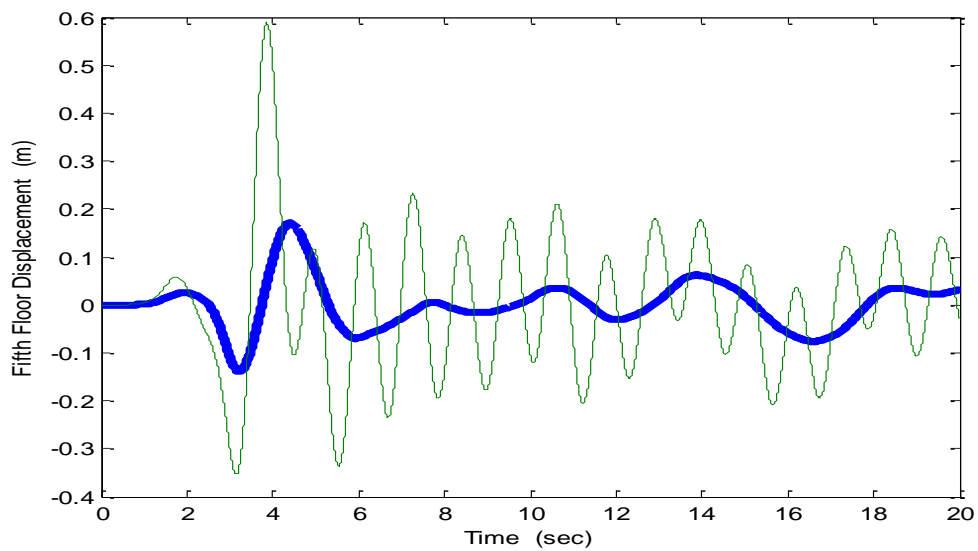
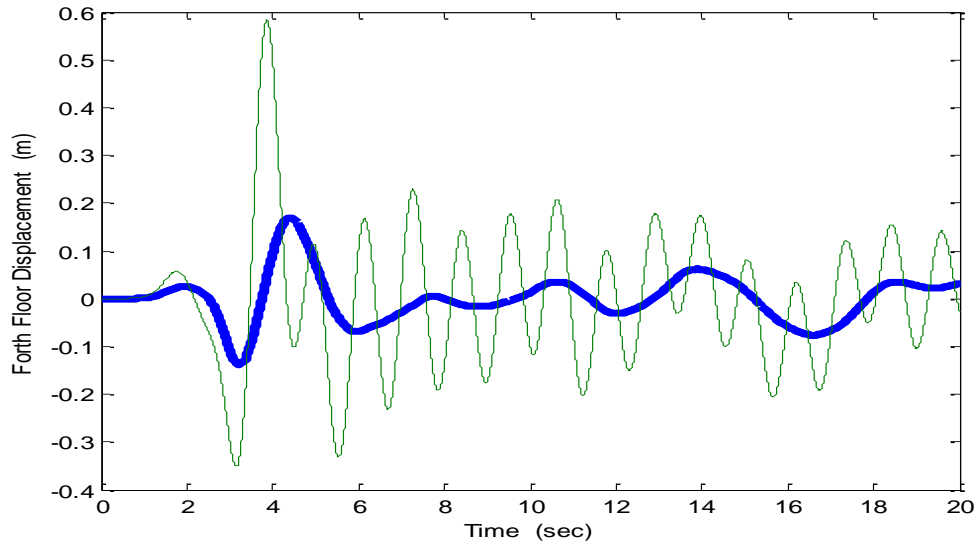


**Σχήμα 3.15 :** Ταχύτητες ορόφων 4,5,6 με και χωρίς έλεγχο

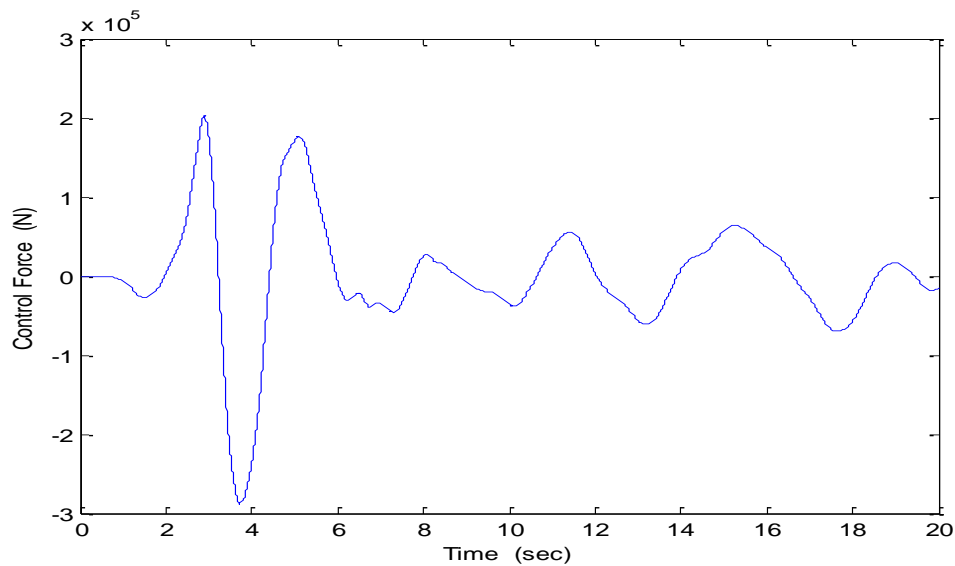


Σχήμα 3.16 : Μετατοπίσεις ορόφων 1,2,3 με και χωρίς έλεγχο





Σχήμα 3.17 : Μετατοπίσεις ορόφων 4,5,6 με και χωρίς έλεγχο



**Σχήμα 3.18 :** Δύναμη Επενεργητή

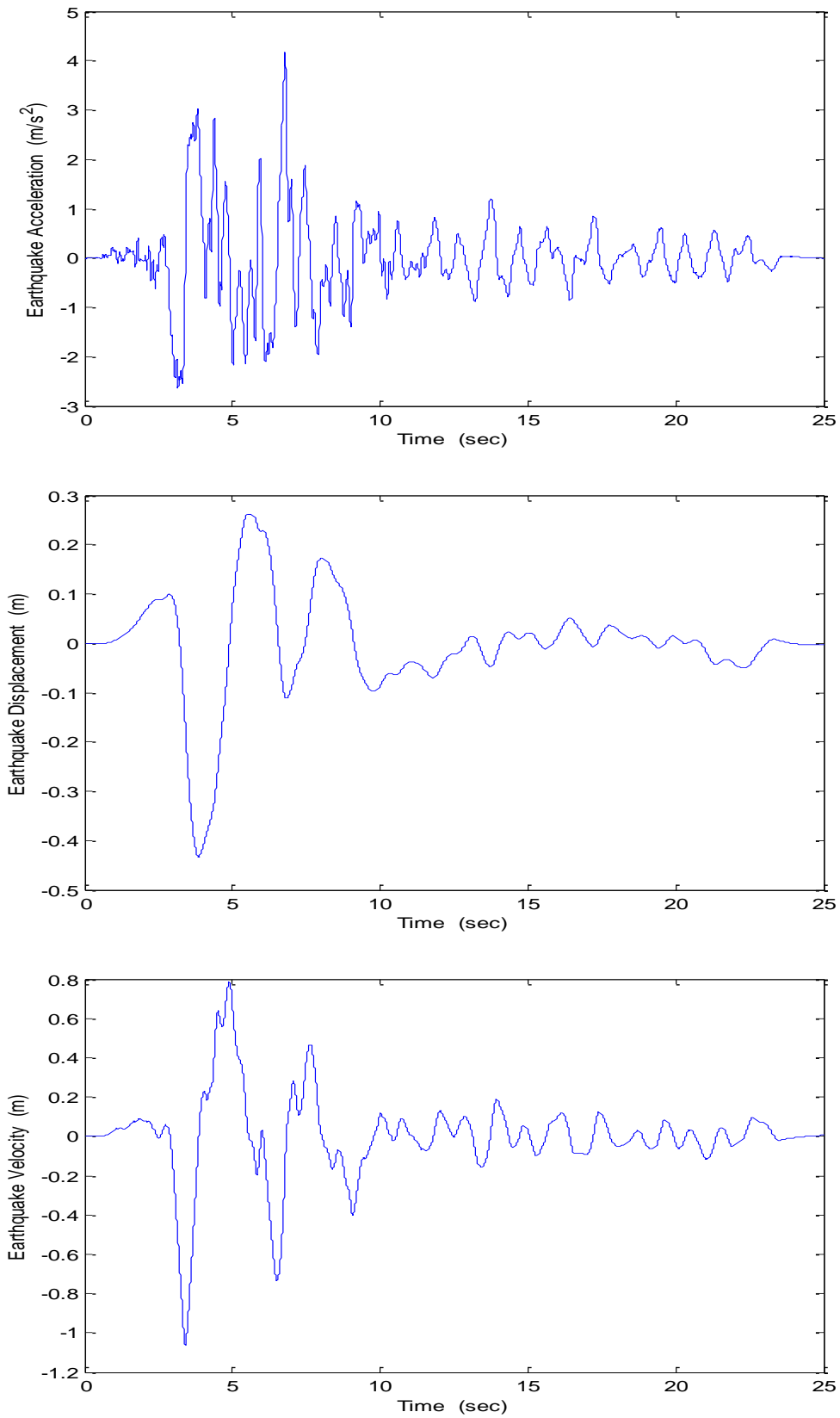
Η βελτίωση της απόκρισης του συστήματος με την εφαρμογή του ελέγχου είναι ορατή και σε αυτή την περίπτωση του σεισμού ERZ-000. Η βελτίωση αφορά τόσο το εύρος των τιμών στις ταχύτητες των ορόφων και τις μετατοπίσεις τους όσο και την συχνότητα των ταλαντώσεων.

### 3.4 JFA-022

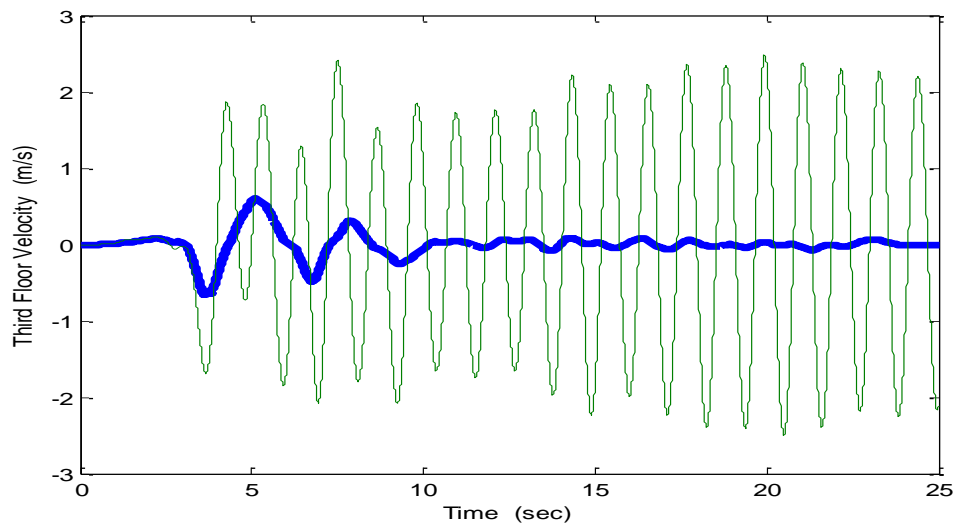
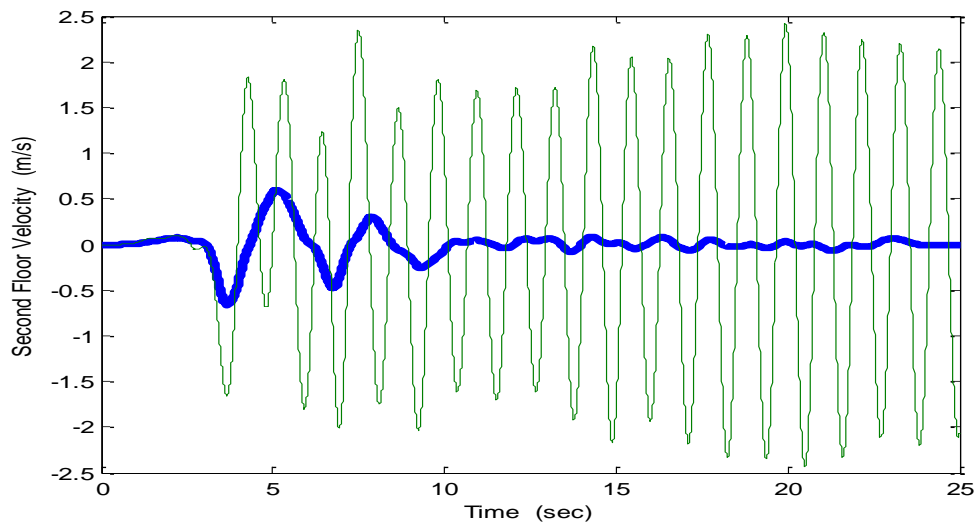
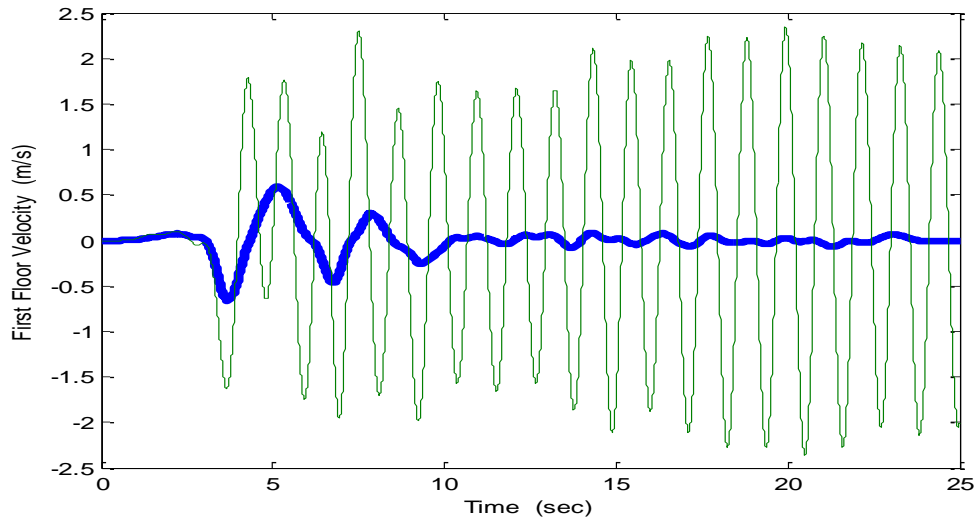
Εφαρμόζουμε τον σεισμό JFA-022 στο εξάωρο κτίριο της εφαρμογής. Από το Σχήμα 3.19, οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας και της μετατόπισης του εδάφους είναι :  $y_0^{\max}=0.27$  m και  $\dot{y}_0^{\max}=0.79$  m/s, οι οποίες καθορίζουν την μέγιστη τιμή του ελεγκτή σύμφωνα με τις εξισώσεις (A6) και (A8) του Παραρτήματος Α. Για τον υπολογισμό του πίνακα P της εξίσωσης (A7) του ίδιου παραρτήματος θεωρούμε έναν διαγώνιο πίνακα Q με τα στοιχεία της διαγωνίου του να είναι τα [ 11 12 12 12 12 12 20 20 20 20 20 20 ]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των Σχημάτων 3.20-23 είναι για  $\varepsilon$

=0.01. Η προσομοίωση έγινε για χρονικό διάστημα 25 δευτερολέπτων καθώς σε αυτό διάστημα παρατηρείται έντονη σεισμική δραστηριότητα.

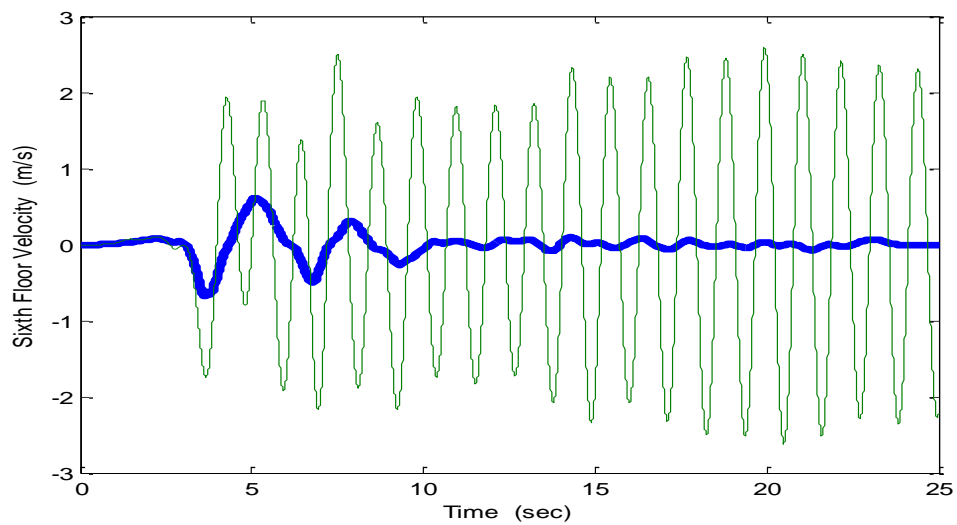
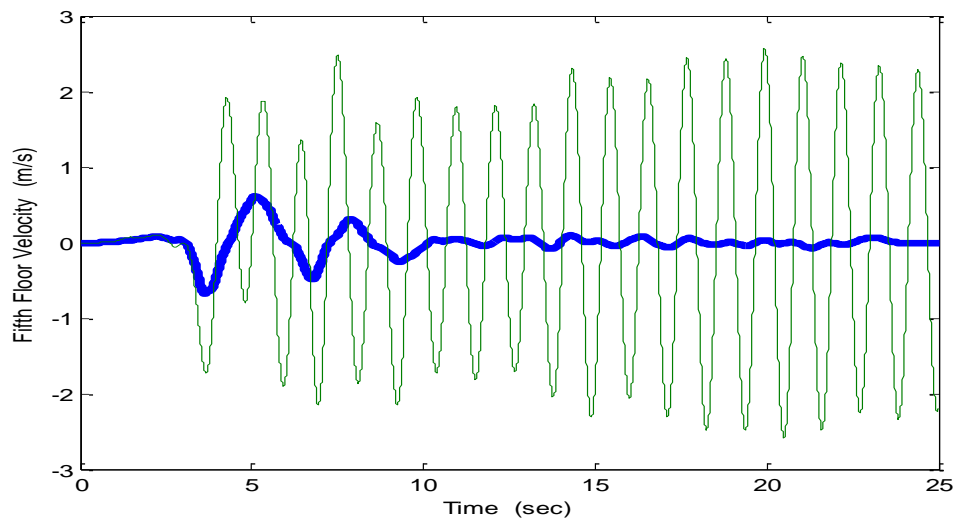
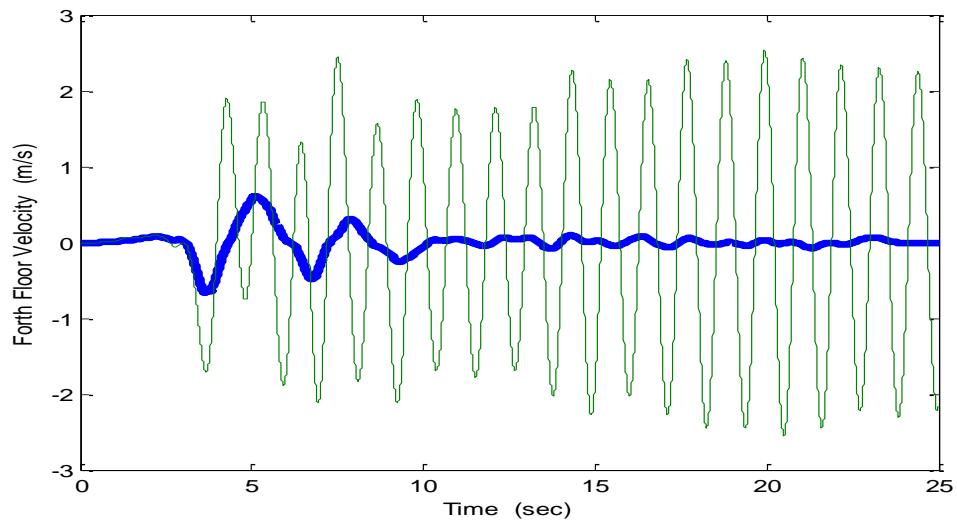
Στο Σχήμα 3.19 φαίνεται η επιτάχυνση, η μετατόπιση και η ταχύτητα του εδάφους για τον σεισμό JFA-022. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές της διαγωνίου του  $Q$  και το  $\varepsilon$  βρέθηκαν μετά από πολλές δοκιμές έτσι ώστε να επιτευχθεί μία υλοποιήσιμη μορφή ελέγχου με ικανοποιητικά μικρές αποκρίσεις των ορόφων.



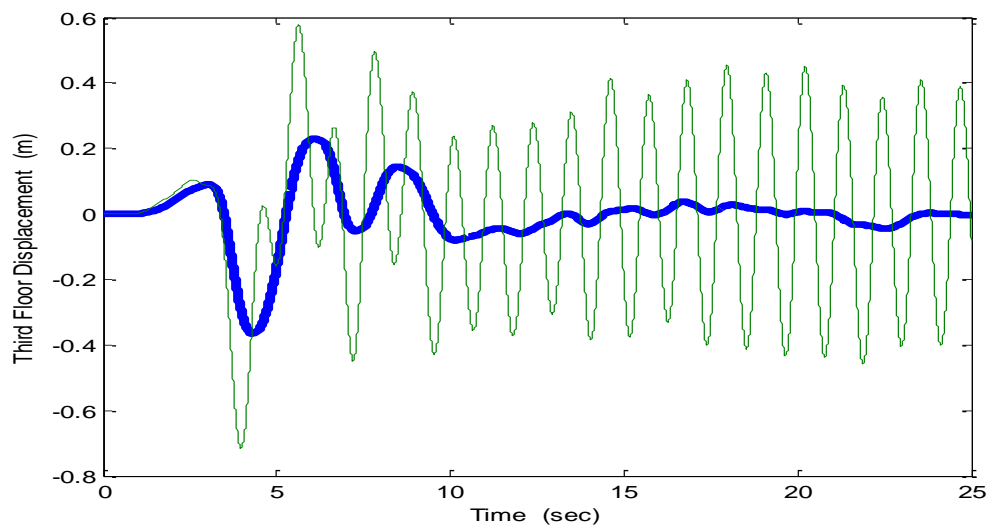
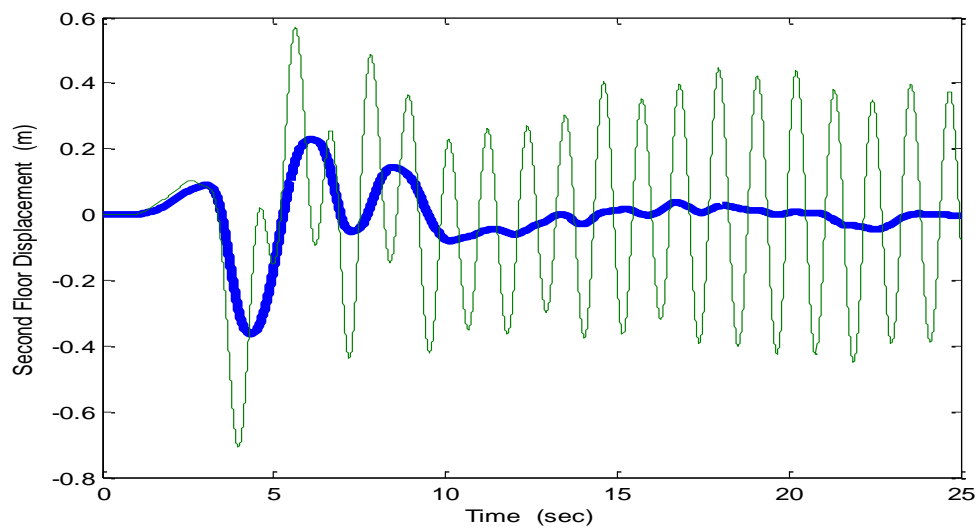
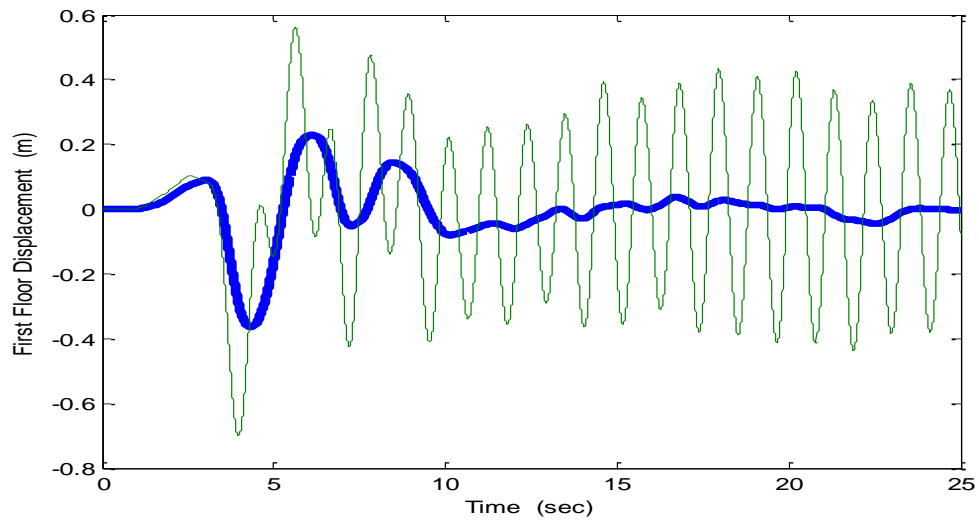
**Σχήμα 3.19 :** Επιτάχυνση, μετατόπιση και ταχύτητα σεισμού JFA-022



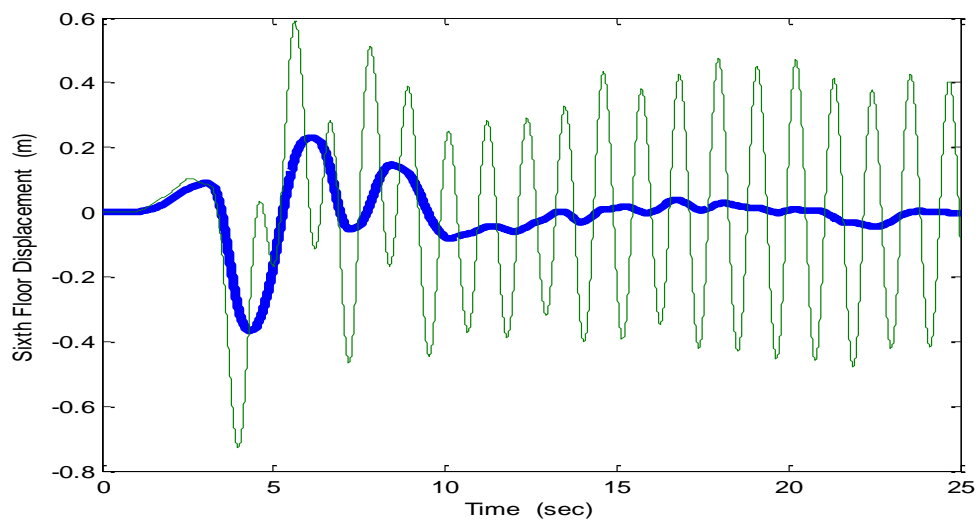
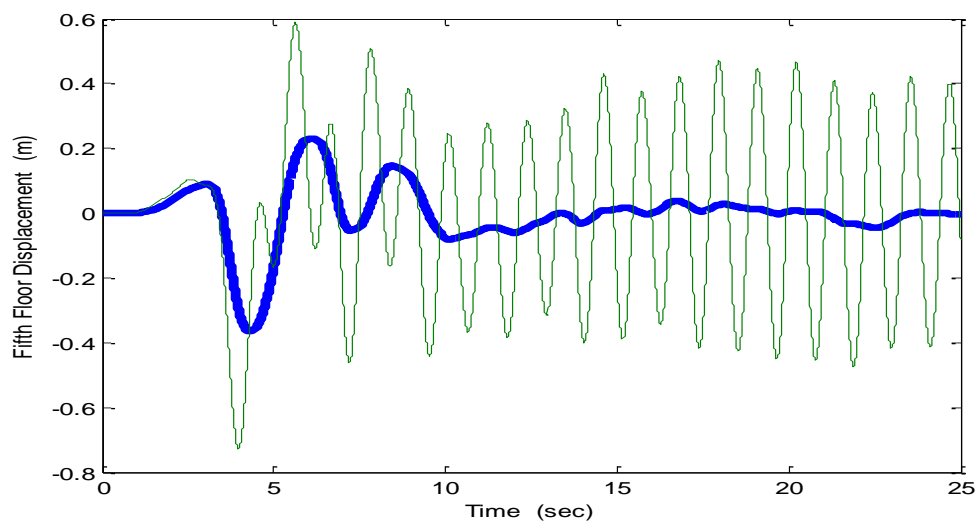
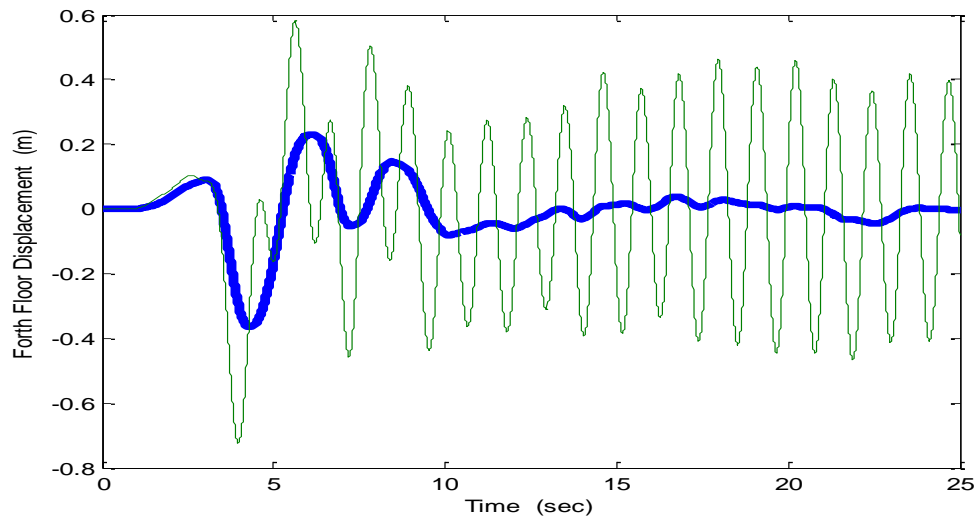
Σχήμα 3.20 : Ταχύτητες ορόφων 1,2,3 με και χωρίς έλεγχο



Σχήμα 3.21 : Ταχύτητες ορόφων 4,5,6 με και χωρίς έλεγχο

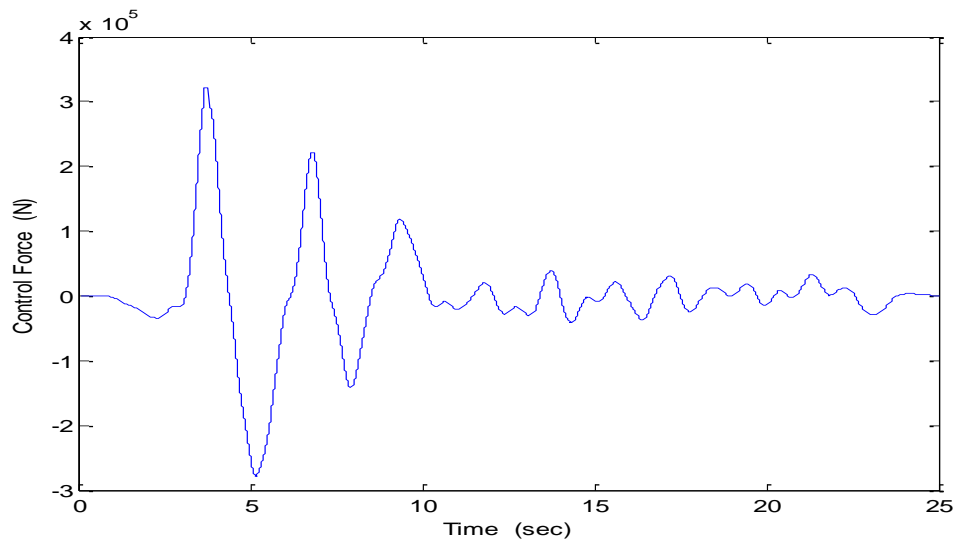


Σχήμα 3.22 : Μετατοπίσεις ορόφων 1,2,3 με και χωρίς έλεγχο



Σχήμα 3.23 : Μετατοπίσεις ορόφων 4,5,6 με και χωρίς έλεγχο





**Σχήμα 3.24 :** Δύναμη Επενεργητή

Όπως και στους προαναφερθέντες σεισμούς έτσι και σε αυτόν, παρατηρείται βελτίωση της απόκρισης του συστήματος με την εφαρμογή του ελέγχου όσον αφορά τόσο το εύρος των τιμών στις ταχύτητες των ορόφων και τις μετατοπίσεις τους όσο και την συχνότητα των ταλαντώσεων.

### **3.5 Συμπεράσματα**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι 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 δύναμης στην βάση του κτιρίου ώστε να κρατηθεί, όσο το δυνατόν, ακίνητο το κτίριο κατά τη διάρκεια μιας άγνωστης σεισμικής φόρτισης.

Έγινε χρήση ενός μοντέλου, όπου 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. Μία παρατήρηση είναι ότι όλοι οι όροφοι του κτιρίου έχουν σχεδόν ταυτόχρονη κίνηση με τα ίδια χαρακτηριστικά.

Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη του ελέγχου υπάρχει αισθητή βελτίωση στη συμπεριφορά του κτιρίου τόσο από πλευράς πλάτους ταλάντωσης όσο και συχνότητας. Οι ζητούμενες δυνάμεις από τον ελεγκτή εφαρμόζονται μονό στην βάση της κατασκευής. Η υλοποίηση είναι απλή συγκρινόμενη με άλλα συστήματα που έχουν προταθεί τα οποία απαιτούν σημαντικές εξωτερικές δυνάμεις. Το κόστος της τοποθέτησης αλλά και της λειτουργίας του αυτόματου συστήματος είναι σχετικά χαμηλό. Δεδομένης και της συντρέχουσας οικονομίας στην όχι τόσο απαιτητική σε δομικά υλικά κατασκευή, το όφελος είναι τεράστιο.

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 πριν 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 καθώς 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.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΕΥΡΩΣΤΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ (ROBUST CONTROLLER)

Ας θεωρήσουμε το παρακάτω γενικευμένο δυναμικό σύστημα:

$$\dot{x}(t) = [A + \Delta A(r(t))]x(t) + [B + \Delta B(s(t))]u(t) + Cv(t) \quad (\text{A1})$$

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

όπου

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

και

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

$$\Delta A(\cdot): R^p \rightarrow R^{n \times n}, \quad \Delta B(\cdot): R^q \rightarrow R^{n \times m} \quad \text{είναι γνωστές συνεχείς συναρτήσεις.}$$

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

$$r(\cdot): R \rightarrow \mathfrak{R}, \quad s(\cdot): R \rightarrow \mathfrak{S}, \quad v(\cdot): R \rightarrow \mathfrak{N}$$

όπου  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{S}$ ,  $\mathfrak{N}$  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:

$$D(\cdot): R^p \rightarrow R^{n \times n}, \quad E(\cdot): R^q \rightarrow R^{n \times n} \quad \text{και ο σταθερός πίνακας } F \in R^{m \times l} \text{ έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες (matching conditions):}$$

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

$$\Delta B(s) = BE(s), \quad \forall s \in \mathfrak{S} \quad (\text{A3 b})$$

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

με

$$\max_{s \in \mathfrak{S}} \|E(s)\| < 1 \quad (\text{A4})$$

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  $\bar{A} = A + BK$  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 (Uniform Boundedness):

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

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

**I2:** Ιδιότητα του Ομοιόμορφα Τελικά Φραγμένου (Uniform Ultimate Boundedness):

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

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

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,  $\delta$ , μετά από μία πεπερασμένη χρονική στιγμή, η οποία μπορεί να εξαρτάται από το  $x_0$  και το  $\delta$ . Οι δύο αυτές ιδιότητες αποτελούν τα κύρια χαρακτηριστικά της *πρακτικής ευστάθειας*.

Ας θεωρήσουμε τώρα τον έλεγχο

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

έτσι ώστε για δεδομένο  $\varepsilon > 0$  να ισχύει:

$$p_e(x) = \begin{cases} \frac{-B^T P x}{\|B^T P x\|} \times \rho(x) , & \text{εάν } \|B^T P x\| < \varepsilon \\ \frac{-B^T P x}{\varepsilon} \times \rho(x) , & \text{εάν } \|B^T P x\| < \varepsilon \end{cases} \quad (\text{A6})$$

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

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

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

$$\rho(x) = \left[ 1 - \max_{s \in \mathfrak{S}} \|E(s)\| \right]^{-1} \left[ \max_{r \in R} \|D(r)x\| + \max_{s \in \mathfrak{S}} \|E(s)Kx\| + \max_{v \in \mathfrak{N}} \|Fv\| \right] \quad (\text{A8})$$

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  $\varepsilon$ . Μειώνοντας δηλαδή το  $\varepsilon$ , μειώνεται η ακτίνα της φραγμένης περιοχής στην οποία θα εισέλθει τελικά το διάνυσμα κατάστασης  $x$ .

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A. Chopra, *Dynamics Of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1995.
2. A. Mita and M. Kaneko, *Vibration Control of Tall Buildings Utilizing Energy Transfer into Sub–Structural Systems*, Proc. 1<sup>st</sup> World Conf. on Structural Control, Los Angeles, CA, pp. TA2:31-40, August 1994.
3. A. Mita and M. Q. Feng, *Response Control Strategy for Tall Buildings Using Interaction Between Mega and Sub-Structures*, Proc. Int. Workshop on Civil Infrastructural Systems, Taipei, Taiwan, Republic of China, pp. 329 – 341, 1994.
4. A.G. Soldatos and J.A. Inaudi, *Theory and Testing of an Active Control Scheme for Seismic Protection*, under review.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. A.G. Soldatos, *Output Feedback Control of Seismically Excited Structures*, under review.
9. A.M. Reinhorn and T.T. Soong, *Full Scale Implementation of Active Bracing for Seismic Control of Structures*, in Structural Control Research, USC Press, Los Angeles, CA, pp. 201-208, 1990.



10. 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.
11. B.F. Spencer Jr. and Michael K. Sain, *Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback*, p.19 IEEE, December 1997.
12. 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.
13. 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.
14. Bouc, R., *Forced Vibration of Mechanical Systems with Hysteresis*, Proc. of the 4<sup>th</sup> Conf. Of Nonlinear Vibration, Prague, 1967.
15. 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.
16. Cenk Alhan and Metin Altun, *Performance of Base Isolation Systems Designed According to Uniform Building Code*, 5<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), May 13-15, 2009 Karabuk, Turkey, Department of Civil Engineering, Istanbul University, Istanbul, Turkey.
17. 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.
18. Dynamic Isolation Systems, [www.dis-inc.com](http://www.dis-inc.com).
19. European Standard EN 1998-1:2004: Eurocode 8: *Design of structure for earthquake resistance*.

20. F. Gordaninejad and R. Bindu, *The Effect of Scale Factor on the Performance of ERF Dampers*, Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on ERF, MR Suspensions and Associated Tech., Sheffield, England, pp. 318 – 326, 1995.
21. 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.
22. G. Leitmann, *Deterministic control of uncertain systems*, Acta Astronautica, vol. 7, pp. 1457, 1980.
23. 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.
24. 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, 1985.
25. G.W. Housner et al., *Structural Control: Past, Present and Future*, J. Engrg. Mech., ASCE, September 1997.
26. H. Irschik, K. Schlacher, A. Kugi, *Control of earthquake excited nonlinear structures using Liapunov's theory*, Computers and Structures 67 (1998), 83-90.
27. 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.
28. H.P. Gavin, R.D. Hanson, and F.E. Filisko, *Electrorheological Dampers, Part II: Testing and Modeling*, J. Appl. Mech., ASME, vol. 63, no. 3, pp. 676-682, 1996.
29. Hwang, I.-H., Lim, J.-H and Lee J.-S. (2006), *A study on base isolation performance of magneto-sensitive rubbers*, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 10, 77-84 (in Korean).

30. I. G. Buckle and R. L. Mayes, *Seismic Isolation History, Application and Performance – A World View*, Earthquake Spectra, vol. 6, no. 2, pp. 161 – 201, 1990.
31. J. N. Yang, J. C. Wu and A. K. Agrawal, *Sliding Mode Control for Seismically Excited Linear Structures*, J. Engrg. Mech., ASCE, Vol.121, No.12, p.1386-1390, 1995.
32. 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.
33. J. Tsiniias, *The concept of exponential ISS for stochastic systems and applications to feedback stabilization*, Systems and Control Lett.1999.
34. J.D. Carlson and K.D. Weiss, *A Growing Attraction To Magnetic Fluids*, Machine Design, pp. 61-64, August 1994.
35. J.D. Carlson, and B.F. Spencer Jr., *Magnetorheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control*, Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Motion and Vib. Control, Chiba, Japan, vol. III, pp. 35-40, 1996.
36. J.D. Carlson, D.M. Catanzarite, and K.A. St. Clair, *Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices*, Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on ER Fluids, MR Fluids and Associated Technology, U. Sheffield, U.K., 1995.
37. J.D. Carlson, *The Promise of Controllable Fluids*, Proc. of Actuator 94 (H. Borgmann and K. Lenz, eds.), AXON Technologie Consult GmbH, pp. 266-270, 1994.
38. J.M. Kelly, *Aseismic Base Isolation*, Shock and Vibration Digest, Vol.17, No.8, 1985.
39. J.M. Kelly, *Base Isolation: Linear Theory and Design*, Earthquake spectra 6, pp. 223-244, 1990.
40. J.M. Kelly, G. Leitmann and A.G. Soldatos, *Robust Control of Base - Isolated Structures under Earthquake Excitation*, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol.53, No.2, pp. 159-180, 1987.

41. J.M. Kelly, G. Leitmann and A.G. Soldatos, *Seismic Protection of Structures Using Base Isolation and Active Control*, Proceedings of the American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, pp. 1885-1889, 1987.
42. J.N. Yang, *Application of Optimal Control Theory to Civil Engineering Structures*, Journal of the Engineering Mechanics Division of the ASCE, Vol. 101, pp. 819-838, 1975.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. K. Tanida, *Active Control of Bridge Towers During Erection*, Proc. 3<sup>rd</sup> Colloquium on Vib. Control of Structures, JSCE, part A, pp. 173 – 184, 1995 (in Japanese).
49. 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.
50. K. Yoshida, S. Kang, and T. Kim, *LQG Control and  $H_\infty$  Control Of Vibration Isolation for Multi-Degree-Of-Freedom Systems*, proc. 1<sup>st</sup>

- World Conf. on Struct. Control, Los Angeles, CA, pp. TP4: 43-52, August 1994.
51. 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.
  52. Kamagata, S. and Kotobi, T., 1994, *Autonomous Adaptive Control of Active Variable Stiffness Systems for Seismic Ground Motion*, Proc. 1<sup>st</sup> World Conf. on Struct. Control, pp. TA4:33-42, Pasadena, CA.
  53. Khalil, H., *Nonlinear Systems*, Macmillan Publishing Company, 1992.
  54. Lord Corporation, *VersaFlo Product Information Sheet*, Lord Corporation Publication #PI02-MRX-135CD, 1995.
  55. M. Corless and G. Leitmann, *Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.AC-26, pp.1139-1144, 1981.
  56. 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. 1<sup>st</sup> World Conference on Structural Control, Los Angeles, CA, pp. WP2: 90-99, August 1994.
  57. N. Krikelis, *Constrained Regulation Design of Linear Discrete - Time Descriptor Systems*, Control Theory and Advanced Technology, Vol.8, No. 2, pp.257-268, 1992.
  58. N. Krikelis, *Eigenstructure Assignment for Descriptor Systems via State Variable Feedback*, International Journal of Systems Science, Vol.23, No.1, 1992.
  59. N.H. Mc Clamroch and H.P. Gavin, *Closed Loop Structural Control Using Electrorheological Dampers*, Proc. American Control Conf., Seattle, Washington, pp. 4173-4177, 1995.
  60. R.C. Ehwgrott and S.F. Masri, *Structural Control Applications of an Electrorheological Device*, Proc. Int. Workshop on Struct. Control, USC Publication Number CE-9311, pp. 115-129, 1994.

61. R.L. Sack and W. Patten, *Semiactive Hydraulic Structural Control*, Proc. Int. Workshop on Struct. Control, USC Publication Number CE-9311, pp. 417-431, 1994.
62. R.W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1975.
63. 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.
64. 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.
65. 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.
66. S.A. Burton, N. Makris, I. Konstantopoulos, and P.J. Antsaklis, *Modeling the Response of ER Damper: Phenomenology and Emulation*, J. Appl. Mech., ASCE, vol. 122, no. 9, pp. 897-906, 1996.
67. S.J. Dyke, B.F. Spencer Jr., M.K. Sain, and J.D. Carlson, *Experimental Verification of Semi-Active Structural Control Strategies Using Acceleration Feedback*, Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Motion and Vib. Control, Chiba, Japan, vol. III, pp. 291-296, 1996.
68. S.J. Dyke, B.F. Spencer Jr., M.K. Sain, and J.D. Carlson, *Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction*, Smart Mat. and Struct., vol. 5, pp. 565-575, 1996.
69. S.J. Dyke, B.F. Spencer Jr., M.K. Sain, and J.D. Carlson, *Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers*, Proc. IFAC World Congress, San Francisco, CA, June 30 – July 5, 1996.
70. Sack, R.L. and Patten, W, 1993, *Semi-Active Hydraulic Structural Control*, Proc. Int. Workshop on Struct. Control, USC Publication No. CE-9311, pp. 417-431, Honolulu, Hawaii.

71. *Seismic Isolation and Response Control for Nuclear and Non-Nuclear Systems Structures*, Special issue for the Exhibition of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT II), Tokyo, Japan, August 1991.
72. Slotine, J. -J. E., Li, W., *Applied Non-Linear Control*. Prentice Hall, 1991.
73. T. Kobori and S. Kamagata, *Dynamic Intelligent Buildings-Active Seismic Response Control*, in Y.K. Wen (ed.) *Intelligent Structures Vol.2*, Elsevier Applied Sciences, New York, N.Y., pp. 279-282, 1991.
74. T. Kobori, *Future Direction on Research and Development of Seismic-Response-Controlled Structured*, Proc. 1<sup>st</sup> World Conference on Structural Control, Los Angeles, CA, Panel: 19-31, August 1994.
75. T.T. Soong and M.C. Constantinou, Eds. , *Passive and Active Struct. Vibr. Control in Civil Engineering*, Springer – Verlag, Wien and New York, 1994.
76. T.T. Soong, *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical, Wiley, New York, 1990.
77. 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.
78. W. Chai and M.Q. Feng, *Seismic Performance of Hybrid Controlled Mega-Sub Buildings*, Proc. 11<sup>th</sup> World Conf. on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, June 1996.
79. W.E. Schmitendorf, F. Jabbari, and J.N. Yang, *Robust Techniques for Buildings Under Earthquake Excitation*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23, pp. 539 – 552, 1994.
80. W.N. Patten, Q. He, C.C. Kuo, L. Liu, and R.L. Sack, *Suppression of Vehicle-Induced Bridge Vibration Via a Semiactive Structural Controller*, Proc. 1<sup>st</sup> World Conf. on Struct. Control, Los Angeles, CA, pp. FA1:30-38, August 1994.
81. Y. Koike, T. Murata, K. Tanida, T. Kobori, K. Ishii, and Y. Takenaka, *Development of V – Shaped Hybrid Mass Damper and Its Application to*

- High – Rise Buildings*, Proc. 1<sup>st</sup> World Conf. on Struct. Control, Los Angeles, CA, pp. FA2:3-12, August 1994.
82. Y. Takashi, Rabins, M.J., and Auslander, D. M., *Control and Dynamics Systems*, Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1970.
83. Z. Akbay and H.M. Aktan, *Actively Regulated Friction Slip Devices*, Proc. 6<sup>th</sup> Canadian Conf. on Earthquake Engrg., pp 367-374, 1991.
84. Z. Akbay and H.M. Aktan, *Intelligent Energy Dissipation Devices*, Proc. 4<sup>th</sup> U.S. National Conf. on Earthquake Engrg., vol. 3, no. 4, pp. 427-435, 1990.
85. Βλάχος Κων/νος, Μεταπτυχιακή Εργασία στα Συστήματα Αυτοματισμού, "Προστασία κτιρίων με σεισμική μόνωση χρησιμοποιώντας εύρωστο και προσαρμοστικό έλεγχο", Οκτώβριος 2000.
86. Δουδούμης Ι. Νικόλαος, *Προδιαστασιολόγηση Συστήματος Σεισμικής Μόνωσης με Ελαστομεταλλικά Εφέδρανα με Πυρήνα Μολύβδου για την Βελτίωση της Σεισμικής Απόκρισης Πολυώροφου Κτιρίου*, 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5-7 Νοεμβρίου, 2008.
87. Μάκιος Κων/νος, Σύγχρονες Τεχνικές Αυτομάτου Ελέγχου για την Αντισεισμική Προστασία Κτιρίων, Οκτώβριος 2001.
88. Π.Ν. Παρασκευόπουλος, *Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο*, Αθήνα, 1991.
89. Π.Ν. Παρασκευόπουλος, *Αναγνώριση Συστημάτων και Προσαρμοστικός Έλεγχος*, Αθήνα, 1992.
90. Π.Ν. Παρασκευόπουλος, *Έλεγχος συστημάτων με Υπολογιστές*, Αθήνα, 1991.
91. Παπανίκος Κων/νος, *Ενίσχυση Υφιστάμενων Κατασκευών με Σεισμική Μόνωση*, 15<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2009.
92. Ψυχογιός Κων/νος, *Επισκευή-Ενίσχυση Κτιρίων με Σεισμική Μόνωση*, 16<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2010.