



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΤΗΡΙΩΝ**

Παναγιώτη Κ. Σουμπάκα

Επιβλέπων: Δρ. Αργύρης Γ. Σολδάτος.

Αθήνα 2015

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας μου δίνεται η ευκαιρία να ευχαριστήσω αρχικά τον καθηγητή μου κύριο Σολδάτο Αργύρη για την υποστήριξη που μου προσέφερε όσον αφορά τα ειδικά θέματα της εργασίας αλλά και για τον τρόπο σκέψης που αποκόμισα από εκείνον από τη μεταξύ μας συνεργασία.

Επίσης ευχαριστώ εκ των προτέρων τους καθηγητές, κύριο Βασίλειο Σπιτά και κύριο Παναγιώτη Τσαραμπάρη που δέχθηκαν να είναι μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας.

Σουμπάκας Παναγιώτης

Στην Αναστασία

Abstract

We consider the control of buildings when these are disturbed by undesirable seismic excitations. The control objective is to achieve arbitrarily small motion relative to the initial, prior to the earthquake, configuration of the structure. The focus in this study concerns the implementation of a control law derived from a robust non-linear algorithm using hydraulic actuators which are positioned at the foundation of the building. This consideration uses the dynamic equations modeling the valves and the hydraulic pistons which produce control forces. The present research is divided into two parts: the first relates to horizontal motion in one direction of a building used as a primer, and the second to the complete motion in two horizontal directions and rotation about the vertical axis.

Initially, consideration is given to hydraulic systems which involve a valve and piston combination. Such systems are used on the one-dimensional study and on the more complete motion of the second part. The integration of such systems for the production of the required forces which result from the non-linear algorithm, lead to the consideration of separate control loops. These additional loops incorporate suitable PID controllers to achieve the production of the required forces. The efficacy of the proposed method is demonstrated in a one-dimensional study of a six-story experimental building.

Then, a parallel robot mechanism in the form of a triangle is analyzed, in order to produce the required control forces and torques in the three degree of freedom setting of the second part. Kinematic analysis is followed by dynamic investigation to fully understand the mechanism. The study is applied to a three-story building and this application includes three distinct subsystems with corresponding PID controllers, to be used with three hydraulic servomechanisms at the base of the structure.

Finally, an evaluation of the results is carried out aiming at selecting and designing appropriate hydraulic systems to be used on experimental structures and real buildings.

Περίληψη

Θεωρούμε τον έλεγχο κτηριακών εγκαταστάσεων και κατασκευών όταν αυτές διαταράσσονται από ανεπιθύμητες σεισμικές διεγέρσεις. Στόχος του ελέγχου είναι η αυθαίρετα μικρή κίνηση του κτηρίου από την αρχική του αδιατάραχτη θέση καθ όλη τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης. Το πρόβλημα το οποίο θα μελετήσουμε εδώ αφορά την υλοποίηση ενός νόμου ελέγχου που προκύπτει από έναν εύρωστο, μη γραμμικό αλγόριθμο, κάνοντας χρήση υδραυλικών επενεργητών στη βάση των κτηρίων που δέχονται σεισμική διαταραχή. Αυτή η υλοποίηση γίνεται με χρήση των δυναμικών εξισώσεων που μοντελοποιούν τις βαλβίδες και τα υδραυλικά έμβολα που παράγουν τις δυνάμεις ελέγχου. Η παρούσα μελέτη χωρίζεται σε δύο μέρη: Το πρώτο αφορά ενδεικτικά την κίνηση ενός κτηρίου σε μία οριζόντια διεύθυνση και το δεύτερο τη γενικευμένη κίνηση σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις και στροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.

Αρχικά, γίνεται αναφορά στα υδραυλικά συστήματα που περιλαμβάνουν βαλβίδα και πιστόνι. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται στη μονοδιάστατη κίνηση, αλλά και στην πλήρη κίνηση με τη στροφή. Η ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων για την παραγωγή των απαιτούμενων δυνάμεων που προκύπτουν από τον μη γραμμικό αλγόριθμο οδηγεί στο σχεδιασμό ξεχωριστών κλειστών βρόχων. Αυτά τα επιπλέον συστήματα, με χρήση κατάλληλων PID ελεγκτών, στοχεύουν στην πιστή παραγωγή των απαιτούμενων δυνάμεων. Αυτή η δυνατότητα διερευνάται σε μία μονοδιάστατη μελέτη ενός εξαόροφου κτηρίου με υδραυλικό σύστημα στη βάση του.

Ακολουθώντας, γίνεται ανάλυση ενός παράλληλου τριγωνικού ρομποτικού μηχανισμού στόχος του οποίου είναι η υλοποίηση του ελέγχου σε τρεις βαθμούς ελευθερίας. Παρατίθεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ώστε να σχεδιαστεί αυτός ο επίπεδος παράλληλος ρομποτικός μηχανισμός σε σχέση με την παραγωγή των απαιτούμενων δυνάμεων του εύρωστου ελεγκτή. Έγινε αρχικά η κινηματική ανάλυση του μηχανισμού και στη συνέχεια δυναμική. Η μελέτη εφαρμόστηκε σε τριόροφο κτήριο και η υλοποίηση περιλάμβανε τρία ξεχωριστά υποσυστήματα με PID ελεγκτές για τον έλεγχο δυνάμεων μέσω τριών υδραυλικών σερβομηχανισμών στη βάση του κτηρίου.

Τέλος, γίνεται μια αποτίμηση των αποτελεσμάτων που αποβλέπει στην επιλογή και την κατασκευή κατάλληλων υδραυλικών συστημάτων με στόχο την εφαρμογή σε πειραματικές διατάξεις και σε πραγματικά κτήρια.

Επεξήγηση συμβόλων

${}^B \underline{C}_i$: Διάνυσμα θέσης C_i εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων B

${}^H \underline{C}_i$: Διάνυσμα θέσης C_i εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων H

${}^B \underline{A}_i$: Διάνυσμα θέσης A_i εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων B

${}^B \underline{P}_H$: Διάνυσμα θέσης του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων της κινούμενης πλατφόρμας, H, εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων B.

${}^B_H R$: πίνακας περιστροφής του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων της κινούμενης πλατφόρμας, H, εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων B.

J : Ιακωβιανή Μήτρα

$$\Omega = J^{-1}I$$

$w_i(x, t)$: Καμπτική παραμόρφωση του ενδιάμεσου i link.

$\psi_{ij}(x)$ είναι οι ιδιοσυναρτήσεις (modeshapes) για τη μοντελοποίηση της ελαστικότητας του εύκαμπτου βραχίονα i

$\bar{\eta} = [\eta_{11} \dots \eta_{1r} \eta_{21} \dots \eta_{2r} \eta_{31} \dots \eta_{3r}]$ είναι τα πλάτη των ιδιοσυναρτήσεων $\psi_{ij}(x)$

x : η απόσταση από το B_i ως ένα αυθαίρετο σημείο του i ενδιάμεσου εύκαμπτου συνδέσμου,

l : το μήκος του συνδέσμου

T : Συνολική κινητική ενέργεια του μηχανισμού

T_L : Κινητική ενέργεια του εμβόλου

T_p : Κινητική ενέργεια της πλατφόρμας

T_C : Κινητική ενέργεια του κυλίνδρου

ρ_{Ai} : μάζα ανά μονάδα μήκους του εμβόλου μάζας m

\dot{w}_i : ο ρυθμός μεταβολής της καμπτικής παραμόρφωσης του εμβόλου

$\dot{\rho}_i$: γραμμική ταχύτητα του εμβόλου

\dot{x}_p : γραμμική ταχύτητα της πλατφόρμας στη διεύθυνση x

\dot{y}_p : γραμμική ταχύτητα της πλατφόρμας στη διεύθυνση y

m_p : μάζα της πλατφόρμας

$\dot{\theta}_i$: γωνιακή ταχύτητα του κυλίνδρου

I_p : ροπή αδρανείας της πλατφόρμας γύρω από το κέντρο της

I_c : ροπή αδρανείας του κυλίνδρου γύρω από το A_i

E_i : μέτρο ελαστικότητας

I_i : ροπή αδράνειας i συνδέσμου

P_{xi} : αξονική δύναμη

L:συνάρτηση Lagrange

K:συνολική κινητική ενέργεια του ρομποτικού βραχίονα

P:συνολική δυναμική ενέργεια του ρομποτικού βραχίονα

ρ_i : γενικευμένες συντεταγμένες (μεταβλητές κίνησης) του ρομποτικού βραχίονα

$\dot{\rho}_i$:πρώτη παράγωγος των γενικευμένων συντεταγμένων q_i

τ_i :γενικευμένη δύναμη/ροπή που εφαρμόζεται στην άρθρωση i προκειμένου να κινήσει το σύνδεσμο i

M : μητρώο μάζας του μηχανισμού

K_f : μητρώο δυσκαμψίας

K_p :μητρώο πλευρικής δυσκαμψίας εξαιτίας των αξονικών δυνάμεων

$-M_\theta \ddot{\theta}$: δυνάμεις που ασκούνται στο σχετικά ελαστικό έμβολο από τα στιβαρά μέρη του μηχανισμού, κύλινδρος και πλατφόρμα.

F_{fg} : δυνάμεις που ασκούνται στο σχετικά ελαστικό έμβολο και οφείλεται στην επιτάχυνση Coriolis

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγήστην Αντισεισμική Τεχνολογία και Ρομποτική.....	1
1.1 Αναδρομή στην πρόσφατη συναφή βιβλιογραφία.....	1
1.2 Η Σεισμικά Μονωμένη Βάση.....	9
1.3 Εφαρμογή Ενεργητικού Ελέγχου (Active Control) σε κατασκευές.....	12
1.4 Συνδυασμός Σεισμικά Μονωμένης Βάσης και Ενεργητικού Ελέγχου (Base Isolation and Active Control).....	13
1.5 Σχεδιασμός Συστήματος.....	15
1.6 Επιτεύγματα της ρομποτικής τις τελευταίες δεκαετίες.....	17
2. Μοντελοποίηση Υδραυλικών Επενεργητών.....	21
2.1 Στατικά και δυναμικά φορτία.....	21
2.2 Υδραυλικά συστήματα.....	22
2.3 Υδραυλικοί επενεργητές.....	24
2.4 Υδραυλικός γραμμικός επενεργητής.....	26
2.5 Επιλογή επενεργητή και σερβοβαλβίδας.....	30
3. Παράλληλοι επίπεδοι μηχανισμοί.....	33
3.1 Κριτήρια Σχεδιασμού του μηχανισμού.....	34
3.2 Χώρος εργασίας του Μηχανισμού.....	35
3.3 Κινηματική Ανάλυση.....	36
3.4 Δυναμική Ανάλυση.....	44
4. Σχεδιασμός –Προσομοιώσεις.....	50
5. Συμπεράσματα.....	60
Παράρτημα Α: Εύρωστος Ελεγκτής (RobustController).....	61
Παράρτημα Β: Υδραυλικοί Επενεργητές MTS 244 Series.....	64
Παράρτημα Γ: Δυναμικό Μοντέλο Κτηρίου.....	69
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71

1.Εισαγωγήστην Αντισεισμική Τεχνολογία και Ρομποτική

1.1 Αναδρομή στην πρόσφατη συναφή βιβλιογραφία

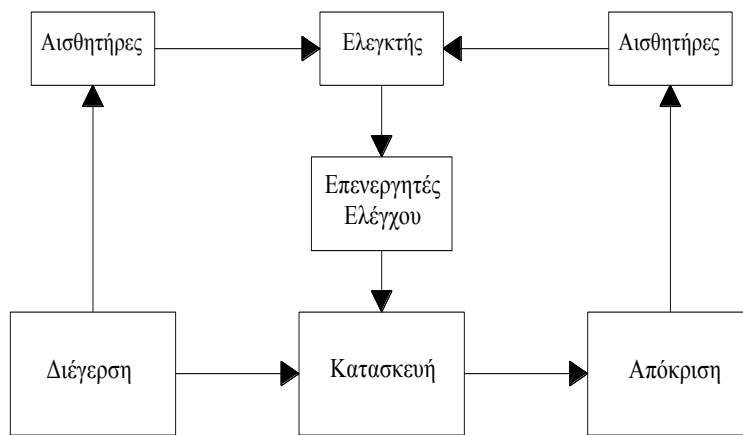
Ακόμα και σήμερα, οι συνηθισμένες μέθοδοι αντισεισμικής προστασίας για κτίρια και κατασκευές, βασίζονται στην αντοχή της κατασκευής και στην ικανότητά της να απορροφά (καταστρέφει) την παραγόμενη ενέργεια από το σεισμό [1], [2]. Αυτή η ικανότητα της απορρόφησης ενέργειας, παράγεται από μη ελαστική κίνηση στην κατασκευαστική δομή, και έπειτα από πολλά φορτία μπορεί να οδηγήσει σε ζημιά – καταστροφή της δομής του κτηρίου καθώς και σε ζημιά μη δομικών στοιχείων και εσωτερικού εξοπλισμού. Η παραπάνω προσέγγιση αποτελεί παθητικό έλεγχο για τη προστασία ενός κτηρίου.

Έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές που αποσκοπούν στη βελτίωση της αντισεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών, μερικές από τις οποίες μάλιστα κρίνονται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες, εξελίξιμες και εφαρμόσιμες. Οι πιο πολλές μάλιστα κάνουν χρήση συστημάτων αυτοματισμού, με αποτέλεσμα να συνδυάζεται έτσι ο ήδη υπάρχον παθητικός έλεγχος, με ενεργητικό έλεγχο.

Οι τεχνικές ενεργητικού ελέγχου μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: Αυτές που χρησιμοποιούν ενεργητικά, υβριδικά και ημι-ενεργητικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου (active, hybridandsemi-activecontrols systems).

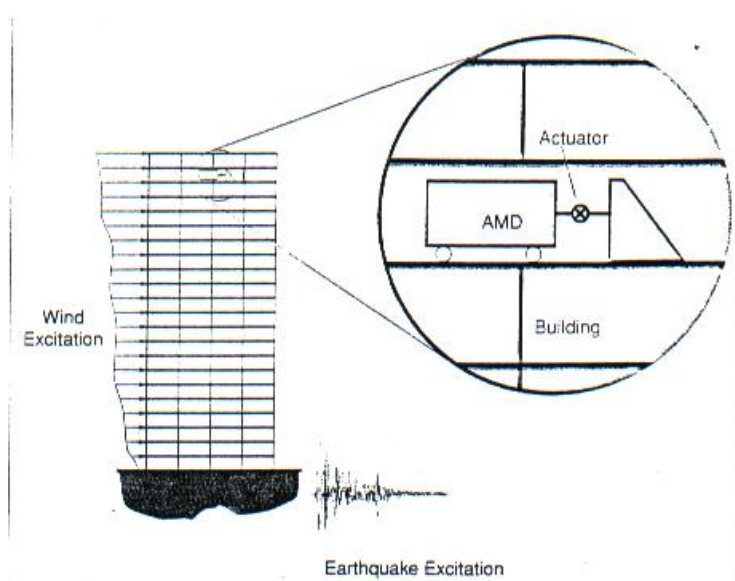
1.1.1. Ενεργητικός Έλεγχος (Active Control)

Το σχήμα 1.1.1 παριστάνει ένα διάγραμμα του κατασκευαστικού προβλήματος ελέγχου. Έχει ιδιαίτερη σημασία ο προσδιορισμός μιας στρατηγικής ελέγχου [3], η οποία χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες αποκρίσεις της κατασκευής, να υπολογίσει ένα κατάλληλο σήμα ελέγχου, που θα σταλεί στον επενεργητή (actuator), με απώτερο στόχο την αύξηση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας του κτηρίου.



Σχήμα 1.1.1 Διάγραμμα κατασκευαστικού προβλήματος ελέγχου

Μία συνήθης μέθοδος στην κατηγορία του ενεργητικού ελέγχου χρησιμοποιεί ενεργητικούς αποσβεστήρες (activemassdampers – AMD). Για να γίνει πιο κατανοητή αυτή η μέθοδος, ας υποθέσουμε το ψηλό κτήριο του σχήματος 1.1.2.

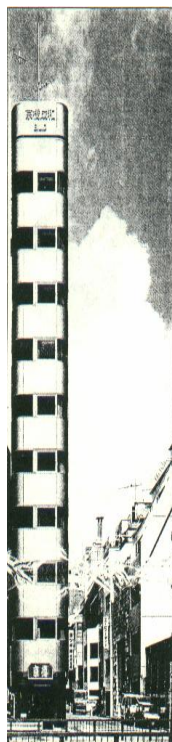


Σχήμα 1.1.2 Ενεργητικοί Αποσβεστήρες AMD

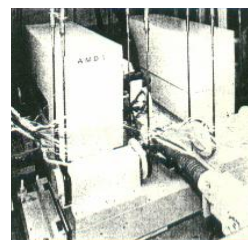
Σε αυτό το σύστημα ελέγχου μικρές βοηθητικές μάζες (που συνήθως δεν υπερβαίνουν το 1% του συνολικού βάρους της κατασκευής), τοποθετούνται σε έναν από τους τελευταίους ορόφους του κτηρίου. Ένας επενεργητής (actuator) π.χ. έμβολο, συνδέει την κατασκευή με τις μάζες. Αισθητήρες μετρούν τις αποκρίσεις και τα φορτία του κτηρίου και τροφοδοτούν τον κεντρικό υπολογιστή ελέγχου. Ο υπολογιστής επεξεργάζεται τις μετρήσεις σύμφωνα με τον αλγόριθμο ελέγχου και στέλνει ένα

κατάλληλο σήμα στον AMD επενεργητή. Ο επενεργητής τότε κινεί τις μάζες σε διεύθυνση αντίθετη από αυτήν της διαταραχής μειώνοντας έτσι την απόκριση της κατασκευής.

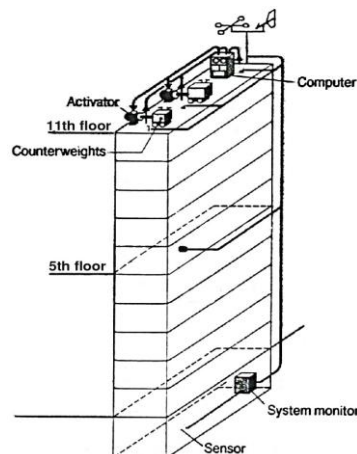
Η πρώτη πλήρης εφαρμογή ενεργητικού ελέγχου σε κτήριο πραγματοποιήθηκε από την εταιρεία Kajima Corporation το 1989 [4], [5]. Το κτήριο εφαρμογής ήταν ένα εντεκαόροφο κτήριο στο Τόκιο της Ιαπωνίας, πολύ περιορισμένου πλάτους, μόλις 4m και μήκους 13,1m. Το κτήριο αυτό (Kyobashi Seiwa building), που φαίνεται στο σχήμα 1.1.3, εφοδιάστηκε με ένα σύστημα ελέγχου αποτελούμενο από δύο AMD από ανθρακούχο χάλυβα. Ο πρώτος, μάζας 4 τόνους, τοποθετήθηκε στο κέντρο του δαπέδου για εγκάρσια κίνηση ώστε να αποσβένουν οι



Το κτήριο Kyobashi Seiwa έχει μόλις 4m πλάτος



AMD με τις βοηθητικές μάζες



Το κτήριο Kyobashi Seiwa με την εφαρμογή AMD

μεγάλες ταλαντώσεις.

Σχήμα 1.1.3

Ο δεύτερος, μάζας ενός τόνου, τοποθετήθηκε στην άκρη του δαπέδου για μείωση της στρεπτικής καταπόνησης. Ο ρόλος του συστήματος είναι να μειώσει την ταλάντωση του κτηρίου υπό την επίδραση ισχυρών ανέμων και μέτριας εντάσεως σεισμών. Η μείωση που επιτυγχάνει ανέρχεται περίπου στο μισό (έως και ένα τρίτο) της αντίστοιχης χωρίς προστασίας ταλάντωση. Σε περίπτωση διακοπής του ηλεκτρικού ρεύματος υπάρχει εφεδρικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με γεννήτρια.

Παρόλο που έχουν περάσει αρκετά χρόνια από την κατασκευή του Kyobashi Seiwabuilding, παραμένουν αρκετά θέματα που πρέπει να εξελιχθούν [6], ώστε η τεχνολογία ελέγχου με ανάδραση να γνωρίσει μεγαλύτερη αναγνώριση στα μηχανολογικά και κατασκευαστικά επαγγέλματα. Αυτά τα θέματα περιλαμβάνουν: 1) μείωση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης, 2) η απαίτηση της εξωτερικής πηγής ενέργειας να εξαλειφθεί, 3) να αυξηθεί η αξιοπιστία και η ρωμαλεότητα του συστήματος, 4) να κερδίσει η μέθοδος περισσότερη αναγνώριση από την ως τώρα τεχνολογία.

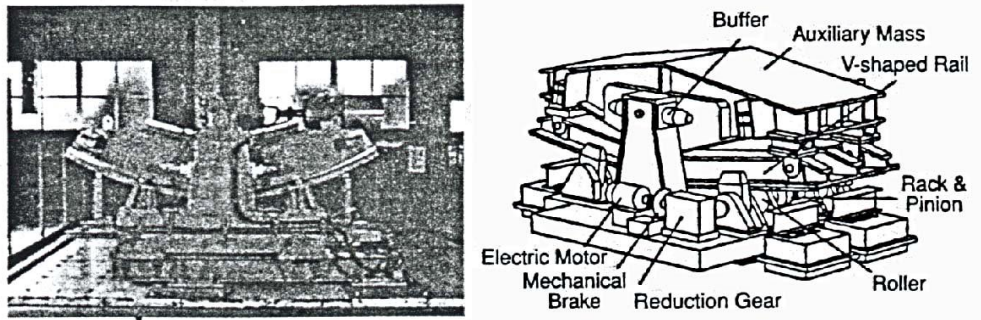
Οι απαιτήσεις αυτές οδήγησαν τους ερευνητές σε συστήματα που συνδυάζουν ενεργητικό και παθητικό έλεγχο, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία και μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις. Έτσι προέκυψαν τα *υβριδικά συστήματα ελέγχου*.

1.1.2. Υβριδικά Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου (HybridControlSystems)

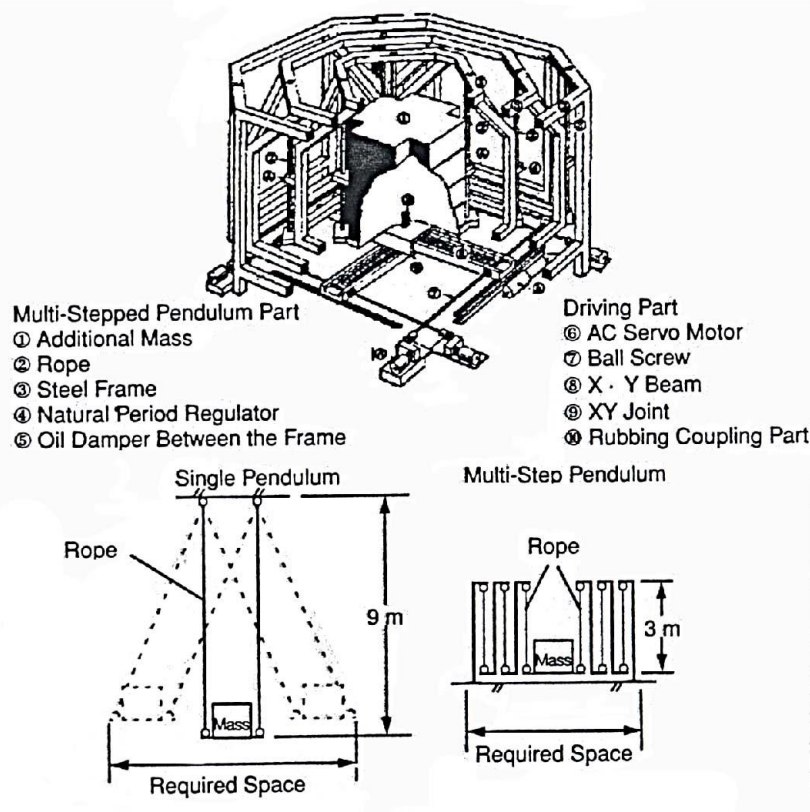
Οι υβριδικές στρατηγικές ελέγχου που εξετάζονται από πολλούς ερευνητές στοχεύουν στην εκμετάλλευση της ικανότητάς τους, προς αύξηση της ολικής αξιοπιστίας και αποτελεσματικότητας της ελεγχόμενης κατασκευής [7]. Τυπικά ένα υβριδικό σύστημα ελέγχου ορίζεται ως ένα σύστημα ελέγχου το οποίο συνδυάζει και ενεργητικό και παθητικό έλεγχο, παρακάμπτοντας έτσι τους περιορισμούς από τη χρήση ενός από τους δύο ελέγχους. Η έρευνα στο πεδίο των υβριδικών συστημάτων αυτομάτου ελέγχου έχει επικεντρωθεί κυρίως σε δύο τύπους συστημάτων. Σε αυτά με υβριδικό αποσβεστήρα και σε αυτά με την υβριδική σεισμική μόνωση βάσης.

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

HMDοι οποίες είναι αποτελεσματικές και πρακτικά υλοποιήσιμες. Για παράδειγμα ο Tanida,εισήγαγε τον αποσβεστήραHMDσχήματος τόξου (σχήμα 1.1.4)



Σχήμα 1.1.4 Αποσβεστήρες HMD (Hybrid Mass Damper) σχήματος τόξου και V ο οποίος χρησιμοποιήθηκε σε ποικίλες εφαρμογές όπως την κατασκευή γεφυρών, τη μείωση της απόκρισης κτηρίων καθώς και τη σταθεροποίηση της γωνίας αζιμουθίου των πλοίων. Στο σχήμα 1.1.4 φαίνεται επίσης και μια άλλη παραλλαγή, ο αποσβεστήρας HMDσχήματος V. Το ‘multi-steppendulumHMD’ είναι ένα είδος αποσβεστήρα πολλαπλού βήματος (σχήμα 1.1.5). Στην συγκεκριμένη διάταξη ο έλεγ-



Σχήμα 1.1.5 Αποσβεστήρας εκκρεμούς πολλαπλού βήματος

χος επεμβαίνει ρυθμίζοντας την ταλάντωση της βοηθητικής μάζας. Δύο τέτοιες διατάξεις έχουν τοποθετηθεί στο υψηλότερο κτήριο της Ιαπωνίας (Yokohama

Landmark Tower). Επίσης έχει προταθεί και η διάταξη DUOX HMD, η οποία επιτυγχάνει υψηλό επίπεδο ελέγχου με μικρή δύναμη επενεργητή. Η απόκριση σε σεισμική διέγερση θα μπορούσε να μειωθεί και χωρίς την προσθήκη μαζών, αλλά με την αλληλεπίδραση που μπορεί να έχει το κτήριο με τα γειτονικά του ή ακόμα και με 'υποσυστήματα' του ιδίου, τα οποία απορροφούν την ταλάντωση, παίζοντας το ρόλο του αποσβεστήρα [11], [12], [13]. Η θεώρηση αυτή είναι εφαρμόσιμη σε μεγάλα σύγχρονα κτίρια, τα οποία μπορούν να χωριστούν σε συνδεδεμένες μεταξύ τους υποκατασκευές (substructures).

Η υβριδική σεισμική μόνωση βάσης αποτελείται από το παθητικό σύστημα μόνωσης βάσης, σε συνδυασμό με έναν επενεργητή ελέγχου, που ασκεί κατάλληλες δυνάμεις ώστε να συμπληρώνει τα αποτελέσματα του συστήματος μονωμένης βάσης. Τα συστήματα μονωμένης βάσης εφαρμόζονται σε κατασκευές παγκοσμίως εδώ και πολλά χρόνια λόγω της ευκολίας, της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητάς τους [14], [15], [16], [17]. Από μόνα τους, τα συστήματα μονωμένης βάσης είναι παθητικά συστήματα και στερούνται ικανότητας προσαρμογής σε διαφορετικές συνθήκες και απαιτήσεις σεισμικής συμπεριφοράς. Με την προσθήκη ενός ενεργητικού συστήματος ελέγχου σε μια κατασκευή με μονωμένη βάση [18], [19], [20], μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά η συμπεριφορά του κτηρίου χωρίς μεγάλη επιβάρυνση στο κόστος [21].

Στην παρούσα εργασία θα αναφερθούμε αναλυτικά στη μέθοδο αυτή.

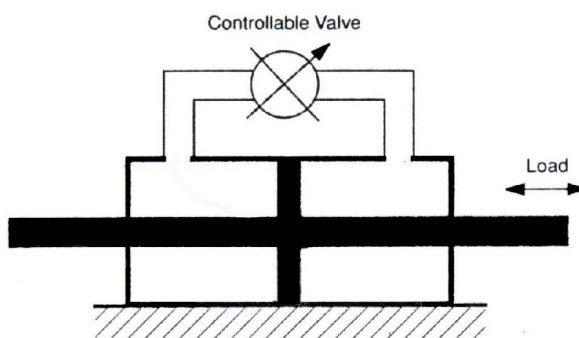
1.1.3. Ημι-Ενεργητικά Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου (Semi – Active Control Systems)

Οι στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται σε ημι-ενεργητικές τεχνικές συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά συστημάτων παθητικού και ενεργητικού ελέγχου. Ενδέχεται στο άμεσο μέλλον να γνωρίσουν μεγάλη αποδοχή στην τεχνολογία ελέγχου, ως ένα βιώσιμο μέσο προστασίας των δομικών κατασκευών από τους σεισμούς και τους ισχυρούς ανέμους. Είναι αξιοσημείωτο ότι στα συστήματα αυτά, μπορούν να προσαρμοστούν συσκευές ενεργητικού ελέγχου, οι οποίες απαιτούν πολύ λιγότερη ενέργεια από ότι σε άλλες περιπτώσεις. Πολλές μάλιστα μπορούν να λειτουργήσουν και με μπαταρίες κάτι που είναι πολύ σημαντικό στις περιπτώσεις σεισμών όπου η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να διακοπεί. Ένα ημι-ενεργητικό σύστημα αυτομάτου ελέγχου έχει σαν βασικό χαρακτηριστικό, ότι δε μεταδίδει ενέργεια στην ελεγχόμενη κατασκευή αλλά έχει ορισμένες ιδιότητες, οι

οποίες μπορούν να μεταβάλλονται με έλεγχο ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή απόκριση του συστήματος. Μελέτες σε τέτοιου είδους συστήματα έδειξαν ότι με κατάλληλο σχεδιασμό μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερη απόκριση των κατασκευών[22], [23], [24]. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μόνα τους αλλά και σε συνδυασμό με τις προηγούμενες κατηγορίες ελέγχου. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των παραπάνω συσκευών.

(i) Αποσβεστήρες μεταβλητού στομίου (*Variable-OrificeDampers*)

Ένας τρόπος για την πραγματοποίηση ρυθμιζόμενης απόσβεσης είναι η χρησιμοποίηση ελεγχόμενης ηλεκτρομηχανικής βαλβίδας με μεταβλητό στόμιο, ώστε να μεταβάλλεται η ροή του υδραυλικού ρευστού μέσα σε ένα αποσβεστήρα (Σχήμα 1.1.6). Τέτοιοι αποσβεστήρες έχουν βρει πρακτική εφαρμογή κυρίως σε γέφυρες, για την απορρόφηση των διαταραχών από διερχόμενα οχήματα, ισχυρούς ανέμους και σεισμικές δονήσεις.



Σχήμα 1.1.6 Αποσβεστήρας μεταβλητού στομίου

(ii) Αποσβεστήρες μεταβαλλόμενης τριβής (*Variable-FrictionDampers*)

Η λειτουργία τους στηρίζεται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ επιφανειών κατά τη διάρκεια του σεισμού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα ένας άξονας τριβής (*frictionshaft*) ο οποίος είναι πακτωμένος στην κατασκευή. Η δύναμη τριβής ελέγχεται επιτρέποντας ελεγχόμενη ολίσθηση πάνω στον άξονα[28], [29], [30].

(iii) Αποσβεστήρες ελεγχόμενου ρευστού (*Controllable-FluidDampers*)

Οι προηγούμενες ημι-ενεργητικές διατάξεις που αναφέρθηκαν απαιτούν ηλεκτρικές βαλβίδες και μηχανισμούς, συστατικά τα οποία μπορεί να αποδειχτούν προβληματικά όσον αφορά την αξιοπιστία και τη συντήρηση. Το πλεονέκτημα των

αποσβεστήρων ελεγχόμενου ρευστού είναι το ότι δεν περιέχουν κινούμενα μέρη, εκτός από το έμβολο.

Οι αποσβεστήρες αυτοί χρησιμοποιούν ως ελεγχόμενο ρευστό δύο είδη ρευστών: α) Τα ηλεκτροροεολογικά (electrorheological – ER) και β) τα μαγνητοροεολογικά (magnetorheological – MR). Το κυριότερο χαρακτηριστικό τους είναι η αντιστρεπτή δυνατότητα τους να μεταβάλλουν σε μεγάλο εύρος το ιξώδες τους μέσα σε milliseconds, όταν εκτεθούν σε ηλεκτρικό (για τα ER) ή μαγνητικό (για τα MR) πεδίο. Παρόλο που και τα ER αλλά και τα MR ρευστά ανακαλύφθηκαν τη δεκαετία του '40 [31],[32],[33], τα ερευνητικά προγράμματα ως τώρα έχουν επικεντρωθεί στα ER ρευστά. Πρόσφατες έρευνες όμως έδειξαν πως και τα MR ρευστά αποτελούν καλή λύση, αφού διαθέτουν την ικανότητα να παρέχουν ένα απλό και σταθερό 'interface', μεταξύ ηλεκτρονικών και μηχανικών μερών.

Ένα τυπικό ρευστό MR αποτελείται από σωματίδια μαλακού σιδήρου 20% έως 40% κατ' όγκο, αιωρούμενα σε κατάλληλο υγρό όπως είναι ορυκτέλαιο, συνθετικό πετρέλαιο, νερό ή γλυκόλη. Σε μαγνητικό πεδίο της τάξης 150-250 kA/m εμφανίζουν τάση διαρροής 50 – 100 kPa. Είναι ανεπηρέαστα από ακαθαρσίες ενώ μπορούν άνετα να προστεθούν σε αυτά αντιδιαβρωτικά και πρόσθετα λιπαντικά, χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή τους ή οι απαιτήσεις σε ισχύ [34], [35].

Ως ελεγχόμενο ρευστό το κυριότερο πλεονέκτημα ενός MR ρευστού είναι η μεγάλη, ελεγχόμενη τάση διαρροής που μπορεί να φτάσει. Τυπικά, η μέγιστη τάση διαρροής ενός MR ρευστού, είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν του καλύτερου ER ρευστού, ενώ το ιξώδες τους είναι σχεδόν ίδιο. Αυτό έχει άμεση επίδραση στο μέγεθος των απαιτούμενων συσκευών, διότι η ελάχιστη ποσότητα ρευστού που απαιτείται σε έναν αποσβεστήρα είναι ανάλογη του ιξώδους και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μέγιστης δυνατής τάσης διαρροής [36], [37]. Αυτό σημαίνει πως για να πετύχουμε την ίδια μηχανική συμπεριφορά χρειαζόμαστε ποσότητα MR ρευστού δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από εκείνη ενός ER ρευστού. Επιπλέον, τα MR ρευστά μπορούν να ελεγχθούν πιο εύκολα από μηχανικά και ηλεκτρονικά μέσα από ότι τα ER ρευστά. Παρόλο που οι απαιτήσεις τους σε ισχύ είναι περίπου οι ίδιες, μόνο οι συσκευές MR μπορούν να τροφοδοτηθούν από κοινές πηγές χαμηλής ισχύος.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των MR ρευστών είναι ότι δεν επηρεάζονται οι ιδιότητές τους από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Οι Carlson και Weiss [38], υπέ-

δειξαν πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες από $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ με πολύ μικρές μεταβολές στην τάση διαρροής. Αυτό συμβαίνει γιατί η μαγνητική πόλωση των σωματιδίων δεν εξαρτάται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Εκτός από τη θερμοκρασία και οι μεταβολές της υγρασίας επηρεάζουν ελάχιστα τις μαγνητικές ιδιότητες του ρευστού.

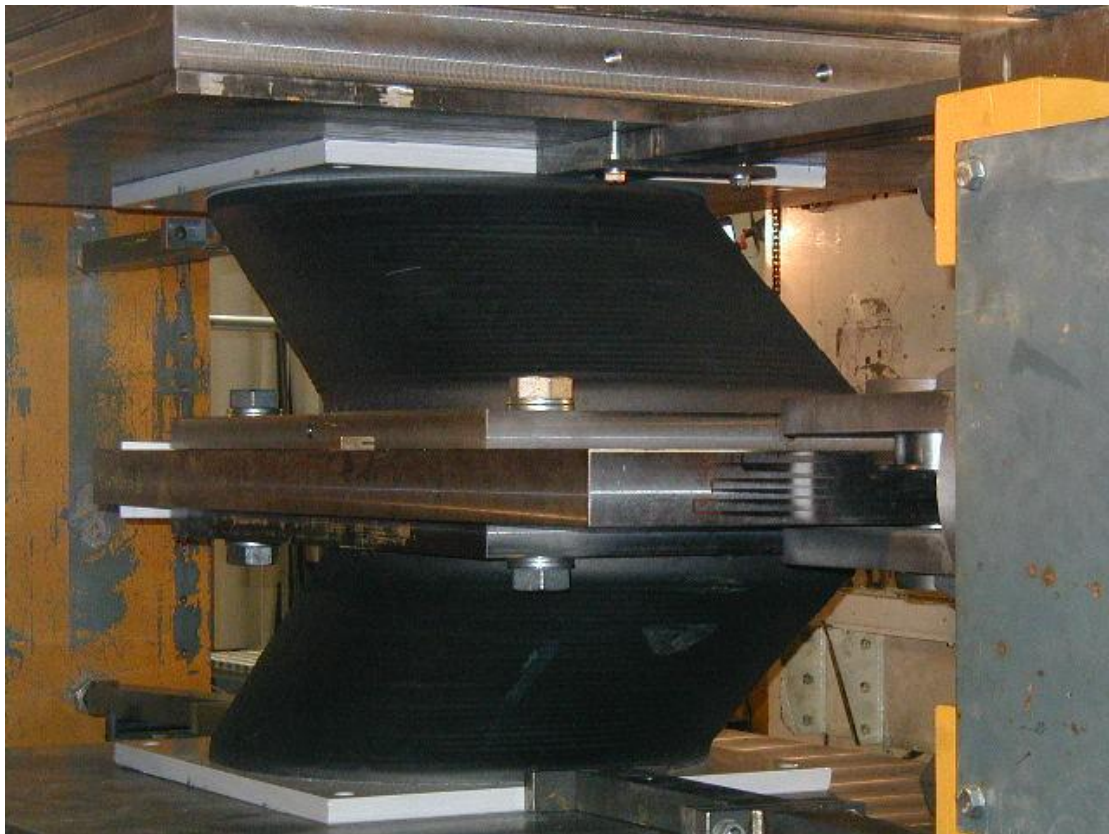
1.2 Η Σεισμικά Μονωμένη Βάση

Οι οριζόντιες συνιστώσες της κίνησης του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμού είναι οι πιο καταστροφικές για ένα κτήριο και το περιεχόμενό του [1]. Σε μια νέα προσέγγιση αντισεισμικής προστασίας, που ονομάζεται σεισμική μόνωση βάσης, το κτήριο τοποθετείται πάνω σε ένα σύστημα από μονωτές, που δρουν έτσι ώστε να αποσυνδέουν το κτήριο από την οριζόντια κίνηση του εδάφους [39]. Το κτήριο δηλαδή μονώνεται στη βάση του και έτσι όχι μόνο τα σεισμικά φορτία, που επιδρούν στο κατασκευαστικό οικοδόμημα μειώνονται, αλλά προφυλάσσονται οι άνθρωποι και το περιεχόμενο. Η ιδέα της σεισμικά μονωμένης βάσης δεν είναι νέα, αλλά έχει πρακτική εφαρμογή τα τελευταία χρόνια, λόγω της μεγάλης ανάπτυξης της τεχνολογίας των ελαστικών (rubber technology), η οποία εφαρμόστηκε επιτυχώς σε εφέδρανα ή μονωτήρες (bearings). Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι εφεδράνων για σεισμική μόνωση [39].

Τα ελαστικά εφέδρανα, που χρησιμοποιούνται ευρύτερα σήμερα, αποτελούν την απλούστερη μέθοδο μόνωσης και είναι σχετικά εύκολα στην κατασκευή. Αυτά περιέχουν φυσικό ή τεχνητό λάστιχο, συνήθως νεοπρένιο [1]. Εμφανίζουν το μηχανικό χαρακτηριστικό να είναι πολύ ευκίνητα και εύκαμπτα κατά την οριζόντια διεύθυνση, έχοντας πολύ μικρή οριζόντια αντίσταση στη σχετική κίνηση μεταξύ εδάφους και κτηρίου και πολύ μεγαλύτερη κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο η κατασκευή αποδεσμεύεται από τις οριζόντιες συνιστώσες της δόνησης, την ενέργεια της οποίας απορροφούν σε μεγάλο ποσοστό οι μονωτήρες. Αντίθετα οι κατακόρυφες συνιστώσες της δόνησης μεταδίδονται αναλλοίωτες στην κατασκευή. Παρόλο αυτά, τα εφέδρανα παρέχουν μόνωση έναντι υψηλότερων συχνοτήτων – μικρών κατακόρυφων ταλαντώσεων του εδάφους, που προέρχονται από π.χ. υπόγειο σιδηρόδρομο ή την κίνηση των οχημάτων.

Ο δεύτερος βασικός τύπος εφεδράνων σεισμικής μόνωσης, που αντιπροσωπεύεται από το σύστημα ολίσθησης, ελαττώνει την μεταφορά οριζοντίων δυνάμεων κατά μήκος της επαπτόμενης επιφάνειας της μόνωσης. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ελάττωση της συχνότητας κίνησης της κατασκευής. Προσφάτως έχουν παρουσιασθεί συνδυασμοί των δύο τύπων μονωτήρων.

Τα σύγχρονα ελαστικά εφέδρανα περιλαμβάνουν ελαστικό στο οποίο έχουν προστεθεί ενισχυτικά ελάσματα χάλυβα με βουλκανισμό. Πειράματα που έχουν γίνει κατά καιρούς στη χρήση τέτοιων μονωτήρων έδειξαν ότι η μείωση της επιτάχυνσης του εδάφους είναι της τάξης του 10, δηλ. πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη μείωση που θα επέφεραν οι συμβατικές μέθοδοι προστασίας. Επιπλέον, πρόκειται για το φθηνότερο ως τώρα τρόπο για την απομόνωση ενός κτηρίου. Μακρά πείρα με μονωτήρες που χρησιμοποιούνται σε γέφυρες εγγυάται τη διάρκεια ζωής τους και την αξιοπιστία τους (Σχήματα 1.2.1, 1.2.2).

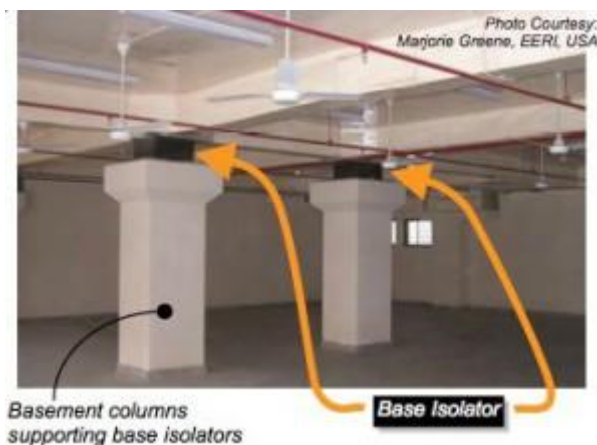


Σχήμα 1.2.1 Πείραμα αντοχής ελαστικού εφέδρανου σε διατμητική φόρτιση



Σχήμα 1.2.2 Ελαστικά εφεδρανα στη βάση ενός υπό ανέγερση κτηρίου

Κτίρια με σεισμικά μονωμένη βάση υπάρχουν σε πολλά μέρη του κόσμου όπως στη Γαλλία, Νέα Ζηλανδία, Ηνωμένες Πολιτείες, Ιαπωνία κτλ. (σχήμα 1.2.3).



Σχήμα 1.2.3 Εγκατεστημένο ελαστικό εφεδρανο σε κτήριο

Τα εργαστήρια πυρηνικής τεχνολογίας μελετούν τη δυνατότητα εφαρμογής ειδικών τύπων μονωτήρων βάσης, σε αντιδραστήρες υγρού μετάλλου, γρήγορης αναπαραγωγής (liquid-metal, fast breeder reactors), στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε συνηθισμένους αντιδραστήρες στην Ιαπωνία [40]. Σήμερα με τις τεχνικές που υπάρχουν μπορούν να κατασκευαστούν μονωτήρες με διάμετρο 1.5m (60"). Ο συνδυασμός του μεγάλου μεγέθους εφεδράνων με τη χρήση ελαστικών νέας γενιάς βελτιώνει την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα της μόνωσης.

Το σύστημα σεισμικά μονωμένης βάσης περιορίζεται σε χαμηλές κατασκευές, εξαιτίας της πιθανότητας εμφάνισης ανατρεπτικής ροπής στους γωνιακούς μονωτήρες, όταν η κατασκευή είναι αρκετά υψηλή. Συγκεκριμένα τα ελαστικά εφέδρανα είναι κατάλληλα για συμπαγή και χαμηλά κτίρια [1], μέχρι 7 ορόφους, όπου πρόβλημα ροπής δεν θα εμφανιστεί αλλά και το φορτίο του αέρα είναι σχετικά μικρό.

Παρόλο που το μονωτικό σύστημα μειώνει την απόλυτη οριζόντια επιτάχυνση της κατασκευής στη βάση, υπάρχει κάποια επιτάχυνση σε κάθε όροφο του κτηρίου και αυτές οι επιταχύνσεις μπορούν (αν το κτήριο είναι υψηλό), να προκαλέσουν ένταση στα ακριανά εφέδρανα.

Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα συνδυάζεται η εφαρμογή σεισμικά μονωμένης βάσης με ενεργητικό έλεγχο (activecontrol).

1.3 Εφαρμογή Ενεργητικού Ελέγχου (Active Control) σε κατασκευές

Η χρήση ενεργητικού ελέγχου για προστασία των κτηρίων και των κατασκευών από την επίδραση των σεισμών, έχει αποτελέσει πεδίο θεωρητικού ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια [1]. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές ελέγχου, που είναι κατάλληλες για το πρόβλημα των σεισμών, παρόλο που οι έρευνες στρέφονταν σε άλλες περιβαλλοντικές διαταραχές (φορτίο αέρα κτλ.).

Το πρόβλημα των σεισμών διακρίνεται από χαρακτηριστικά, τα οποία το διαφοροποιούν σημαντικά από τον έλεγχο άλλων διαταραχών π.χ. φορτίο αέρα. Η σεισμική φόρτιση μπορεί να είναι απύσα για αρκετά χρόνια, ακολουθώντας μια μακριά περίοδο ηρεμίας. Επίσης η φύση της σεισμικής διαταραχής (ένταση, συχνότητα κτλ.) δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια κατά το στάδιο σχεδιασμού. Επιπρόσθετα η δύναμη ελέγχου εφαρμόζεται στη βάση της κατασκευής και για αυτό το λόγο, αρκετές μέθοδοι που έχουν προταθεί ή αναπτυχθεί, οι οποίες παρέχουν δυνάμεις ελέγχου για αέρα ή άλλα είδη διεγέρσεων, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα η χρήση ενός ενεργητικού αποσβεστήρα (active mass damper) AMD, στην κορυφή του κτηρίου δεν είναι κατάλληλη.

Οι μέθοδοι ελέγχου δύναμης που χρησιμοποιούνται με τη χρήση ενεργητικού ελέγχου, αποσκοπούν στον έλεγχο της σχετικής επιτάχυνσης της κατασκευής σε συνάρτηση με το έδαφος. Αν μειωθεί η σχετική επιτάχυνση κάθε ορόφου στο μηδέν, τότε η σχετική ταχύτητα και η σχετική μετατόπιση θα μειωθούν επίσης. Έτσι και οι

διατμητικές τάσεις μεταξύ των ορόφων θα μειωθούν. Όμως τότε το κτήριο θα ακολουθεί επακριβώς την κίνηση του εδάφους, και κάθε όροφος θα υποστεί από τον ελεγκτή μία δύναμη ελέγχου ίση με τη μάζα του επί την επιτάχυνση του εδάφους. Αυτή η επιτάχυνση θα είναι οπωσδήποτε πολύ μικρότερη από την επιτάχυνση του κάθε ορόφου χωρίς έλεγχο.

Επειδή οι δυνάμεις ελέγχου που απαιτούνται είναι της τάξης της μάζας του ορόφου και της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους, ένα πρακτικό σύστημα μπορεί να αδυνατεί να τις επιβάλλει. Για αυτό το λόγο και η εφαρμογή ενεργητικού ελέγχου συνδυάζεται με την εφαρμογή σεισμικά μονωμένης βάσης. Με αυτόν το συνδυασμό η κατασκευή απομονώνεται στη βάση από την επιτάχυνση του εδάφους. Το σύστημα ελέγχου πλέον στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της απόλυτης ταχύτητας και μετατόπισης και οι δυνάμεις ελέγχου χρειάζονται μόνο για να ισοσταθμίσουν τις δυνάμεις που παράγονται από το σύστημα μόνωσης στη βάση της κατασκευής. Μόνο που τώρα αυτές οι δυνάμεις είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερες από αυτές που θα απαιτούνταν στις προηγούμενες περιπτώσεις.

1.4 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 κτηρίου (ισόγειο) [1], [41], [42]. Θεωρητικά η απόλυτη απομόνωση μιας κατά-
σκευής μπορεί να επιτευχθεί εάν στεγασθεί η κατασκευή πάνω σε σφαιρικά εφέδρανα κύλισης (ballbearings). Μια τέτοια διάταξη όμως δεν είναι πρακτική, αφού ακόμη και μικρές διαταραχές π.χ. άνεμος, θα μπορούσαν να προκαλέσουν κίνηση της κατασκευής, με συνέπεια αυτή να έφευγε από τη θέση της. Είναι επομένως απαραίτητη η χρήση ενός συστήματος που θα απομονώνει το κτήριο από τις διαταραχές αλλά ταυτόχρονα θα περιορίζει την κίνηση του εντός αποδεκτών ορίων. Σε αυτό το σημείο εμφανίζεται ο ενεργητικός έλεγχος (activecontrol) [43], [44]-[49], [50], [51]-[56], ο οποίος σε συνδυασμό με την ελαστική μόνωση της βάσης, θα περιορίζει τις ανεπιθύμητες μετατοπίσεις του κτηρίου μέσα σε πολύ μικρά όρια γύρω από την αρχική θέση ισορροπίας. Το τμήμα δηλ. της διαταραχής που δεν θα

απορροφηθεί από την ελαστική βάση, θα αντιμετωπισθεί από το σύστημα ενεργητικού ελέγχου.

Ο ενεργητικός έλεγχος των κατασκευών είχε προταθεί και παλαιότερα [57], [58]. Όμως οι προσπάθειες αυτές είχαν το μειονέκτημα απαίτησης μεγάλων δυνάμεων ελέγχου σε κάθε όροφο του κτηρίου, 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 [59].

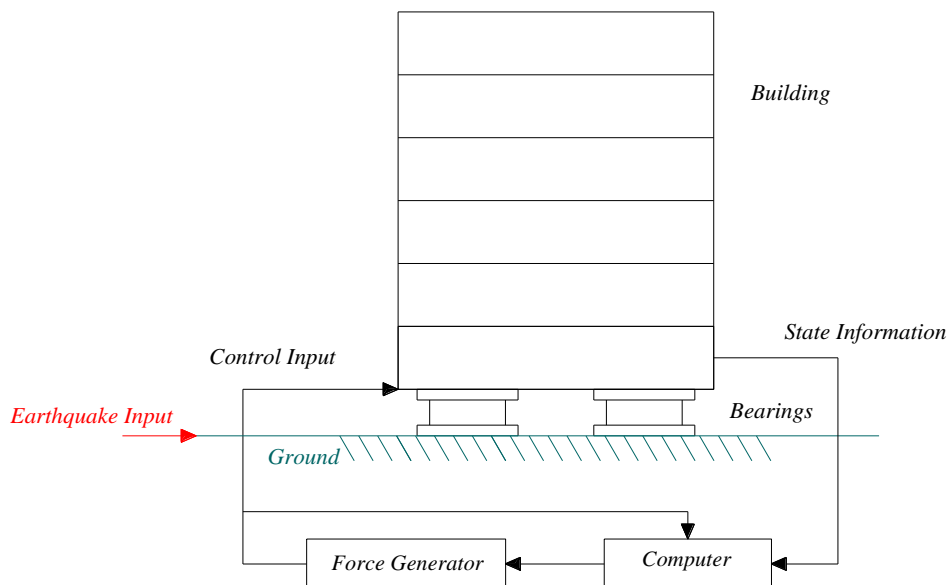
Η φιλοσοφία της σεισμικά μονωμένης βάσης έρχεται να εξαλείψει την παραπάνω απαίτηση. Η σεισμικά μονωμένη βάση προσπαθεί να διατηρήσει όλη την κατασκευή ακίνητη ως προς την αρχική της αδιατάραχτη θέση. Δηλαδή να τη διατηρήσει ακίνητη ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, αφήνοντας το έδαφος από κάτω 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) [1]. 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.

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

1.5 Σχεδιασμός Συστήματος

Στο σχήμα 1.5.1 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).

Κατά την είσοδο της σεισμικής διαταραχής, το σύστημα συλλέγει τις απαραίτητες πληροφορίες για την απόκριση του κτηρίου 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, [60]. 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.

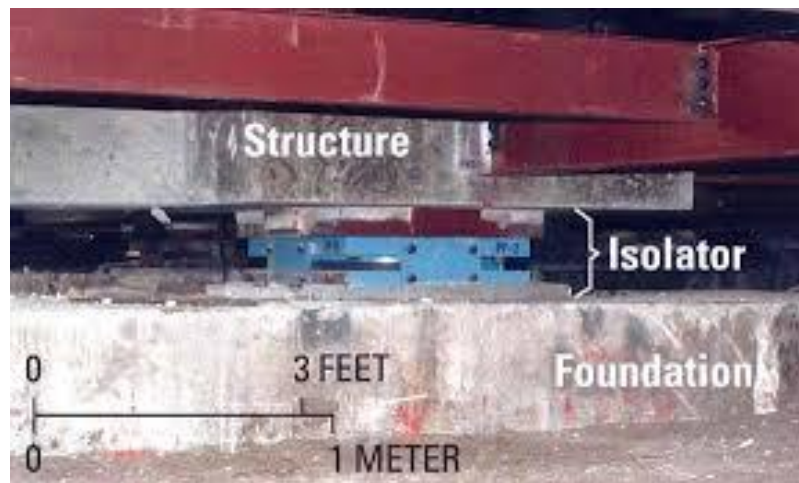


Σχήμα 1.5.1 Διάταξη συστήματος αυτομάτου ελέγχου σε κτήριο

Ουσιαστικά, οι ζητούμενες ποσότητες είναι η απόλυτη ταχύτητα και η απόλυτη μετατόπιση των ορόφων (ως προς ένα αδρανειακό σύστημα), οι οποίες και χρησιμοποιούνται από τον ελεγκτή κατά τον υπολογισμό της δύναμης ελέγχου που πρέπει να εφαρμοστεί στη βάση του κτηρίου.. Η απόλυτη επιτάχυνση μπορεί να μετρηθεί με χρήση επιταχυνσιόμετρων. Η ζητούμενη ταχύτητα και η μετατόπιση

προκύπτουν τότε με ολοκλήρωση, δεδομένου ότι οι αρχικές συνθήκες είναι γνωστές και η επίδραση των θορύβων (από τα όργανα μέτρησης, λανθασμένες εκτιμήσεις, εξωγενείς παράγοντες κτλ.) φιλτράρεται κατάλληλα. Η σωστή εκτίμηση τέτοιων μεταβλητών αποτελεί πεδίο έρευνας, δεδομένου ότι οι ζητούμενες ποσότητες απαιτούνται σε πραγματικό χρόνο. Προς αυτήν την κατεύθυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν π.χ. φίλτρα Kalman ή παρατηρητές κατάστασης.

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 [61], [62]. Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος είναι απλή συγκρινόμενη με άλλα συστήματα που έχουν προταθεί τα οποία απαιτούν σημαντικές εξωτερικές δυνάμεις σε όλους τους ορόφους.



Σχήμα 1.5.2 Μονωτήρας εγκατεστημένος στη βάση κτηρίου

1.6 Επιτεύγματα της ρομποτικής τις τελευταίες δεκαετίες

Η ιστορία της ρομποτικής ξεκίνησε σχεδόν από τις αρχές του 20ου αιώνα όταν είχε αρχίσει να αναπτύσσεται το μηχανολογικό μέρος του σχεδιασμού ενός ρομποτικού μηχανισμού, δηλαδή ο σχεδιασμός της προσομοίωση ενός μηχανικού βραχίονα με δυνατότητα κίνησης σε πολλαπλούς άξονες. Πέρασαν περίπου 60 χρόνια για να χρησιμοποιηθεί το πρώτο robot στη βιομηχανία για να φτάσουμε στη δεκαετία του 1970, όπου τα Robot άρχισαν πλέον να συνιστούν μια ιδιαίτερα δημοφιλή τεχνολογία για τη βελτίωση της παραγωγικότητας πολλών εργοστασίων στα βιομηχανικά αναπτυγμένα κράτη της εποχής.

Τα ρομποτικά συστήματα είναι ως γνωστόν πολύ σύνθετα συστήματα που για να λειτουργήσουν απαιτούν την αξιόπιστη λειτουργία και την καλή συνεργασία μιας ευρείας γκάμας ηλεκτρομηχανολογικών διατάξεων. Αναφορικά με το μηχανολογικό μέρος ενός ρομποτικού συστήματος αυτό που χρειάζεται είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μηχανισμού με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, η κίνηση του οποίου θα είναι ελεγχόμενη και αξιόπιστη με ιδιαίτερα μικρές ανοχές ως προς τις επιθυμητές συντεταγμένες.

Το ηλεκτρολογικό μέρος ενός ρομποτικού συστήματος αναφέρεται κυρίως στη χρησιμοποίηση των κατάλληλων κινητήρων όπου για την παραγωγή συγκεκριμένου μηχανικού έργου θα έχουν δυνατότητα ρύθμισης στροφών και ενός ιδιαίτερου και ακριβούς ελέγχου κατά την εκκίνηση και το σταμάτημα τους.

Το σκέλος που αφορά στον αυτόματο έλεγχο των κινήσεων αναφέρεται κυρίως στην αξιοποίηση των κατάλληλων αισθητηρίων, την άμεση και αξιόπιστη μετάδοση των πληροφοριών σε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου και την επίτευξη της επιθυμητής ανάδρασης μέσω προγραμματισμού ενός κατάλληλου λογισμικού.

Στα επόμενα χρόνια οι τομείς που δείχνουν να αναπτύσσονται συνεχώς και που μπορούν να βελτιώσουν τη λειτουργία ενός ρομποτικού συστήματος είναι ο τομέας των αισθητήρων, ο τομέας των ενεργοποιητών, ο τομέας της επικοινωνίας του ρομποτικού συστήματος με το περιβάλλον εργασίας, αλλά και ο τομέας του λογισμικού προγραμματισμού και ελέγχου του ρομποτικού συστήματος.

Στα σύγχρονα βιομηχανικά robots για την κίνηση τους και τον έλεγχό τους χρησιμοποιούνται σερβοκινητήρες, σερβοενισχυτές κι ελεγκτές θέσης. Υπάρχουν ακόμα και πιο σύγχρονοι μηχανισμοί για να υλοποιούν και τις απλές απαιτήσεις όπως

οι κινήσεις κατά ένα μόνο άξονα. Τέτοιοι είναι τα ηλεκτρομηχανικά έμβολα και οι γραμμικοί και τηλεσκοπικοί οδηγοί με μάντα.

Δύο είναι οι βασικοί τύποι ελέγχου των ρομποτικών συστημάτων , ο σημειακός και ο συνεχής. Τα robots σημειακού ελέγχου προγραμματίζονται να κινούνται σε προκαθορισμένα σημεία στο χώρο, κινούμενα από το ένα σημείο στο άλλο σε μια συνεχή γραμμή και είναι κατάλληλα κυρίως για εργασίες φόρτωσης και αποφόρτωσης εξαρτημάτων είτε σε διάφορες φάσεις μιας παραγωγικής διαδικασίας στη βιομηχανία, είτε σε διάφορες μηχανολογικές κατασκευές μέσω εργαλειομηχανών. Τα robots συνεχούς ελέγχου μπορούν να ακολουθήσουν την πορεία μιας συνεχούς γραμμής. Συγκρίνουν τα δεδομένα τους με τα αποτελέσματα με την πάροδο του χρόνου και αποθηκεύουν πολύ περισσότερες πληροφορίες, ώστε να μπορούν να εκτελούν ομαλές συνεχείς κινήσεις πάνω στην ελεγχόμενη πορεία. Στα μηχανήματα αυτά απαιτείται ένας ξεχωριστός σχεδιασμός του συστήματος οδήγησης. Το σύστημα οδήγησης μπορεί να αποτελείται από έναν κύλινδρο με έμβολο πνευματικό ή υδραυλικό, ή από κοχλία με περικόχλιο. Το σύστημα κυλίνδρου – εμβόλου χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε εργασίες που εμφανίζουν μεγάλους κινδύνους πυρκαγιάς και στις οποίες σχεδόν απαγορεύεται η χρήση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Το πνευματικό σύστημα παρουσιάζει περιορισμένη ακρίβεια και ως προς την ταχύτητα αλλά και ως προς την ακρίβεια μιας μετατόπισης, λόγω της δυσκολίας ελέγχου του αέρα. Από την άλλη πλευρά, τα υδραυλικά συστήματα κατορθώνουν να αναπτύξουν πολύ μεγάλες δυνάμεις αλλά και ισχύεις σε σχετικά μικρές θέσεις. Τα ηλεκτρικά συστήματα χρησιμοποιούνται πιο πολύ σε μικρές μηχανές χωρίς ωστόσο να καταφέρουν να φτάσουν μέχρι σήμερα την υψηλή ακρίβεια που επιτυγχάνουν ανάλογα συστήματα που χρησιμοποιούνται στις εργαλειομηχανές.

Robots χρησιμοποιούνται ακόμα και στη διαστημική έρευνα, τα οποία αξιοποιούν εκτός από την προσομοίωση των ανθρώπινων βραχιόνων και τα συστήματα τεχνητής όρασης. Η αποστολή τους δεν είναι μόνο η προσεδάφιση σε άλλους πλανήτες οχημάτων που διαθέτουν ρομποτικούς βραχίονες, ή ακόμα και αστροναυτών - robots (robonauts)[75], αλλά και η επόπτευση και η συλλογή πληροφοριών μέσω της παρατήρησης του διαστημικού περιβάλλοντος. Μια πολύ ενδιαφέρουσα τελευταία εφαρμογή της ρομποτικής στη διαστημική βιομηχανία αποτελούν τηλεχειριζόμενα οχήματα που ανευρίσκουν το μονοπάτι πρόσβασης σε συγκεκριμένα σημεία του εδάφους υπό εξερεύνηση πλανητών (κυρίως στον Άρη), τα

οποία έχουν κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Είναι φανερό ότι η προσβασιμότητα εξασφαλίζει και τη λήψη δειγμάτων εδάφους από το διαστημικό robot.

Τα robots όμως αξιοποιούνται εκτός από την ιατρική και την επιστημονική έρευνα και σε χρήσεις που αφορούν στον απλό καταναλωτή. Η πιο κοινή περίπτωση είναι τα παιχνίδια – robots. Εδώ έχουμε μια εξέλιξη από τα γνωστά ανθρωπάκια και ζωάκια που περπατάνε και μιλάνε διότι αφενός μεν τα ανθρωπόμορφα παιχνίδια – robots έχουν εξελιχθεί πολύ ως προς την προσομοίωση των ανθρώπινων δυνατοτήτων, αφετέρου δε γιατί τα παιχνίδια έχουν γίνει πιο σύνθετα, αλλά και πιο ενδιαφέροντα με τη χρήση λογισμικών προγραμματισμού, τα οποία παραδοσιακά απευθύνονταν μόνο στις τεχνικές εφαρμογές και όχι στα παιχνίδια – robots. Να σημειωθεί ότι κυρίαρχες στη διεθνή αγορά των παιχνιδιών – robots είναι ιαπωνικές εταιρείες. Για τον απλό καταναλωτή όμως δεν υπάρχουν μόνο τα παιχνίδια – robots, αλλά και τα προσωπικά του robots (τα personal robots κατ' αναλογία με τα PC). Αυτά μπορούν να τον απαλλάξουν από καθημερινές δουλειές όπως το καθάρισμα του δαπέδου του σπιτιού, ή η φροντίδα του κήπου, αλλά επίσης να του παρέχουν πιο προωθημένες υπηρεσίες όπως η τηλεεποπτεία και τηλεπαρακολούθηση κάποιων περιοχών (κι όχι συγκεκριμένων σημείων πράγμα που επιτυγχάνεται και με μια κάμερα παρακολούθησης) του ιδιωτικού του χώρου.

Τα πρώτα ρομπότ, όχι βέβαια ανθρωπόμορφα αλλά ως μια προσομοίωση του ανθρώπινου βραχίονα, άρχισαν να κάνουν την εμφάνισή τους. Συστήματα εντελώς πρωτόγονα σχετικά με τα σημερινά αλλά πολλά υποσχόμενα.

Ουσιαστική εξέλιξη στον συγκεκριμένο κλάδο έχουμε από την δεκαετία του 1990 και μετά, όπου αρχίζουν να εμφανίζονται αρκετά ανθρωπόμορφα ή και ζωόμορφα ρομπότ. Αρχές του 1990 η NASA απέτυχε στην χρήση του Dante, ενός ρομπότ με οχτώ πόδια που είχε ως αποστολή του την συλλογή αερίων και μάγματος από την Ανταρκτική. Ένα χρόνο μετά ο Dante 2 έφερε εις πέρας την αποστολή του. Το 1996, το βιομετρικό ρομπότ Robotuna δημιουργείται από τον φοιτητή David Barrett στο Massachusetts Institute of Technology, με σκοπό να μελετήσει πως κολυμπούν τα ψάρια στο νερό [73],[76],[77].

Το πρώτο ανθρωπόμορφο ρομπότ, το P2 αποτέλεσμα των ερευνών της εταιρείας Honda πάνω στην δημιουργία ανδροειδών (ανθρωπόμορφα ρομπότ που θα μπορούν να μιμούνται τον άνθρωπο σε εμφάνιση και συμπεριφορά). Είχε ύψος 1.80m και οι κινήσεις του ήταν πολύ κοντά στις ανθρώπινες.

Συνεχίζοντας την έρευνά της στην ρομποτική, η Honda παρουσιάζει το 1998 το P3, ενώ ένα χρόνο μετά η Sony «μπαίνει» δυναμικά στο παιχνίδι της ρομποτικής με τον AIBO, έναν ρομποτικό σκύλο ικανό να αλληλεπιδρά με τον άνθρωπο σαν κανονικό κατοικίδιο. Τα πρώτα μοντέλα που κυκλοφόρησαν έγιναν ανάρπαστα σε 20 μόλις λεπτά στην Ιαπωνία.

Το 2000 αποτελεί σταθμό στην επιστήμη της ρομποτικής. Η εταιρεία Honda, παρουσιάζει την πρώτη έκδοση του ASIMO (Advanced Step in Innovative Mobility), ενός ρομπότ που είναι σε θέση να τρέχει, να περπατά, να επικοινωνεί με τους ανθρώπους, να αναγνωρίζει εκφράσεις και περιβάλλοντα και να αλληλεπιδρά με αυτά. Το ύψος του είναι 1.3 μέτρα ενώ ζυγίζει 54. Η όψη του θυμίζει αστρονάυτη και αποτελεί εξέλιξη παλαιότερων ρομποτικών μοντέλων της ίδιας εταιρείας. Την ίδια χρονιά η Sony παρουσιάζει και αυτή με την σειρά της ανθρωπόμορφα ρομπότ με το όνομα Sony Dream Robots, Σύμφωνα με τα Ηνωμένα Έθνη, τον Οκτώβριο του 2000 υπήρχαν 742.500 βιομηχανικά ρομπότ στον κόσμο, με περισσότερο από τα μισά αυτών να χρησιμοποιούνται μόνο στην Ιαπωνία.

Η NASA παρουσιάζει, το Robonaut, ένα τηλεκατευθυνόμενο ρομπότ-αστρονάυτη που θα βοηθήσει αρκετά στην συλλογή στοιχείων από πλανήτες.

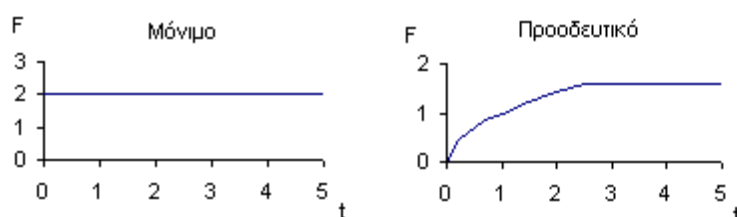
Με αυτές λοιπόν τις ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας, είναι αδύνατον να μην επηρεάσει και η ρομποτική, η οποία πιθανότατα θα στραφεί περισσότερο στην μελέτη για την δημιουργία μηχανών που θα βοηθήσουν τον άνθρωπο στις βασικές του ανάγκες [73],[76],[77].

2. Μοντελοποίηση Υδραυλικών Επενεργητών

2.1 Στατικά και δυναμικά φορτία

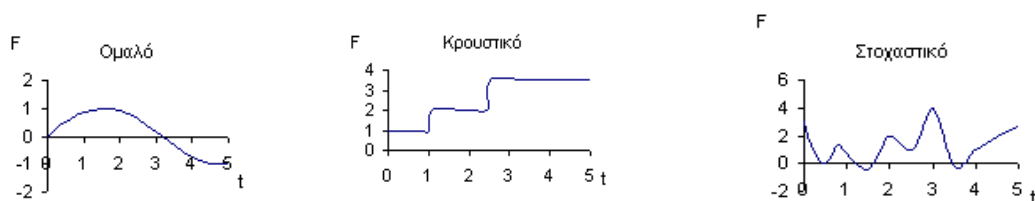
Οι υδραυλικοί επενεργητές μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη δύναμη που παρέχουν. Το κριτήριο είναι τα στατικά ή τα δυναμικά φορτία που αποδίδουν, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά ακολούθως.

α) Στατικά ενεργούσες δυνάμεις είναι εκείνες που δεν μεταβάλλουν κατεύθυνση και μέτρο σχετικά με το σώμα επάνω στο οποίο επιδρούν, σε συνάρτηση με το χρόνο. Αυτό σημαίνει, ότι στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει σχετική κίνηση της δύναμης ως προς το σώμα το οποίο εξετάζεται. Φορτίο και σώμα είναι δυνατό να περιστρέφονται μαζί, αλλά να μην αλλάζει η σχετική τους θέση. Αντίστοιχη περίπτωση αποτελεί ο περιστρεφόμενος αζυγοστάθμητος άξονας που καταπονείται από τη φυγόκεντρο δύναμη. Τα στατικά φορτία διακρίνονται στα μόνιμα φορτία ηρεμίας, τα οποία εξ αρχής έχουν τις οριστικές τιμές τους και στα προοδευτικά επιβαλλόμενα (σχήμα 2.1.1).



Σχήμα 2.1.1 Στατικά Φορτία

β) Δυναμικά ενεργούσες δυνάμεις είναι εκείνες που μεταβάλλουν είτε θέση, είτε διεύθυνση, είτε μέγεθος ως προς το σώμα, σε συνάρτηση με το χρόνο. Αυτό μπορεί να συμβεί ή όταν κινείται το εξάσπνμα ως προς το φορτίο, ή όταν το φορτίο



Σχήμα 2.1.2 Δυναμικά Φορτία

μεταβάλλει το μέτρο του διατηρώντας τα άλλα χαρακτηριστικά του σταθερά. Τα δυναμικά φορτία διακρίνονται κυρίως στα περιοδικά μεταβαλλόμενα και τα στοχαστικά ή 'random'. Τα περιοδικά φορτία διακρίνονται επίσης σε δύο κατηγορίες, τα ομαλά και τα κρουστικά(σχήμα 2.1.2).

Είναι φανερό ότι όλες οι κατασκευές υπόκεινται σε μακρά σειρά φορτίσεων μεταβλητών μεγεθών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η αλληλουχία αυτή των φορτίσεων μπορεί να ονομαστεί 'ιστορία φόρτισης' της κατασκευής. Προφανώς ο σεισμός είναι το κυριότερο δυναμικό φορτίο, για αυτό και θα πρέπει να επικεντρωθούμε σε επενεργητές ή γενικότερα σε υδραυλικά συστήματα που είναι ικανά να αντεπεξέλθουν με γρήγορη απόκριση για άμεση διόρθωση.

2.2 Υδραυλικά συστήματα

Τα υδραυλικά συστήματα είναι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση κίνησης και μεταφορά ισχύος από την κινητήρια στην κινούμενη μηχανή (εργομηχανή) και χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο ένα υδραυλικό ρευστό (υγρό ή αέριο).

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

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

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

Σε ένα υδραυλικό σύστημα ισχύει:

$$\begin{aligned} \text{Ισχύς} &= \text{Δύναμη} \cdot \text{Ταχύτητα} = \text{Πίεση} \cdot \text{Επιφάνεια} \cdot \text{Ταχύτητα} \\ &= \text{Πίεση} \cdot \text{Παροχή Όγκου} \end{aligned}$$

δηλαδή για δεδομένη ισχύ, μια υδραυλική αντλία εργαζόμενη σε υψηλή πίεση χρειάζεται μικρή παροχή υδραυλικού ρευστού και συνεπώς θα έχει μικρές διαστάσεις δηλαδή μικρό μέγεθος.

Όλα τα υδραυλικά συστήματα είναι ουσιαστικά ίδια, ανεξάρτητα από το είδος της εργομηχανής, η οποία μπορεί να είναι ένας κύλινδρος, μια περιστρεφόμενη άτρακτος κτλ.

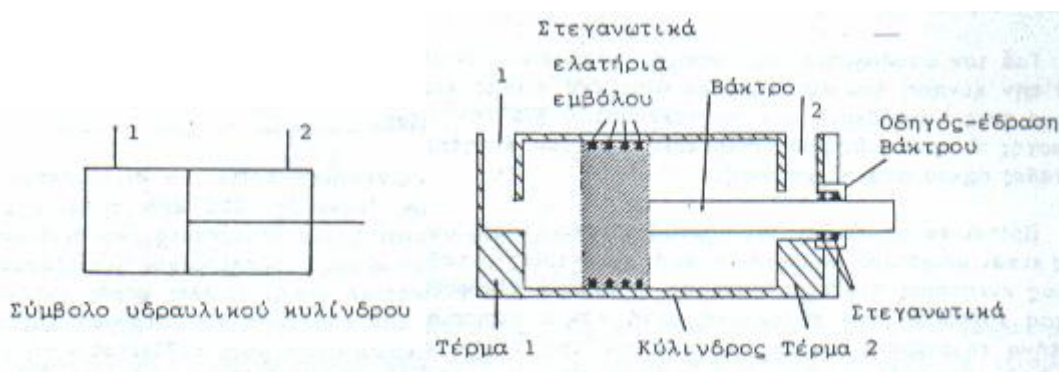
Τα βασικά εξαρτήματα ενός υδραυλικού συστήματος είναι: η αποθήκη εργαζόμενου μέσου, η αντλία που ενεργοποιεί το υδραυλικό ρευστό, ένας ηλεκτρικός κινητήρας για την κίνηση της αντλίας, βαλβίδες για τον έλεγχο της ροής και πίεσης, ένας υδραυλικός κύλινδρος για γραμμική κίνηση στην εργομηχανή ή ένας υδραυλικός κινητήρας για την περιστροφή της άτρακτου της εργομηχανής. Στα υδραυλικά συστήματα, αρχικά η μηχανική ισχύς μετατρέπεται, μέσω της αντλίας, σε υδραυλική ισχύ και μέσω του εργαζόμενου μέσου μεταφέρεται στον κύλινδρο ή στον κινητήρα όπου μετατρέπεται πάλι σε μηχανική ισχύ για την εκτέλεση του έργου στη θέση της εργομηχανής. Το απλούστερο υδραυλικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μία αντλία, μία αποθήκη, μία βαλβίδα και έναν κινητήρα ή κύλινδρο. Μερικά συστήματα μπορεί να περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερες αντλίες, πολλές βαλβίδες διαφόρων τύπων και συνήθως αρκετούς κινητήρες ή κυλίνδρους για ποικίλες θέσεις εργασίας. Το πλήθος και το είδος των εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιηθούν μπορεί

να συνδυαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί ένα υδραυλικό σύστημα για οποιονδήποτε συνδυασμό κινήσεως και δυνάμεως απαιτείται.

2.3 Υδραυλικοί επενεργητές

Οι υδραυλικοί κινητήρες και οι υδραυλικοί κύλινδροι αποτελούν τους υδραυλικούς επενεργητές. Οι μεν υδραυλικοί κινητήρες μετατρέπουν την υδραυλική ισχύ σε μηχανική ισχύ δια της εκτελέσεως έργου μέσω περιστρεφόμενης ατράκτου. Οι δε υδραυλικοί κύλινδροι μετατρέπουν την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική μέσω παλινδρομικής, ευθύγραμμης κίνησης των εμβόλων τους.

Ένας υδραυλικός κύλινδρος αποτελείται από έναν κοίλο κύλινδρο, εντός του οποίου μπορεί να κινείται το έμβολο που χωρίζει το εσωτερικό του κοίλου κυλίνδρου σε δύο μέρη. Το έμβολο συνδέεται μέσω βάκτρου είτε προς την μια πλευρά, είτε και προς τις δύο πλευρές του με τις θέσεις εργασίας. Όσον αφορά την στεγάνωση χρησιμοποιούνται κατάλληλοι δακτύλιοι (ελατήρια) τόσο στο έμβολο όσο και στην έδραση του βάκτρου (σχήμα 2.3.1).

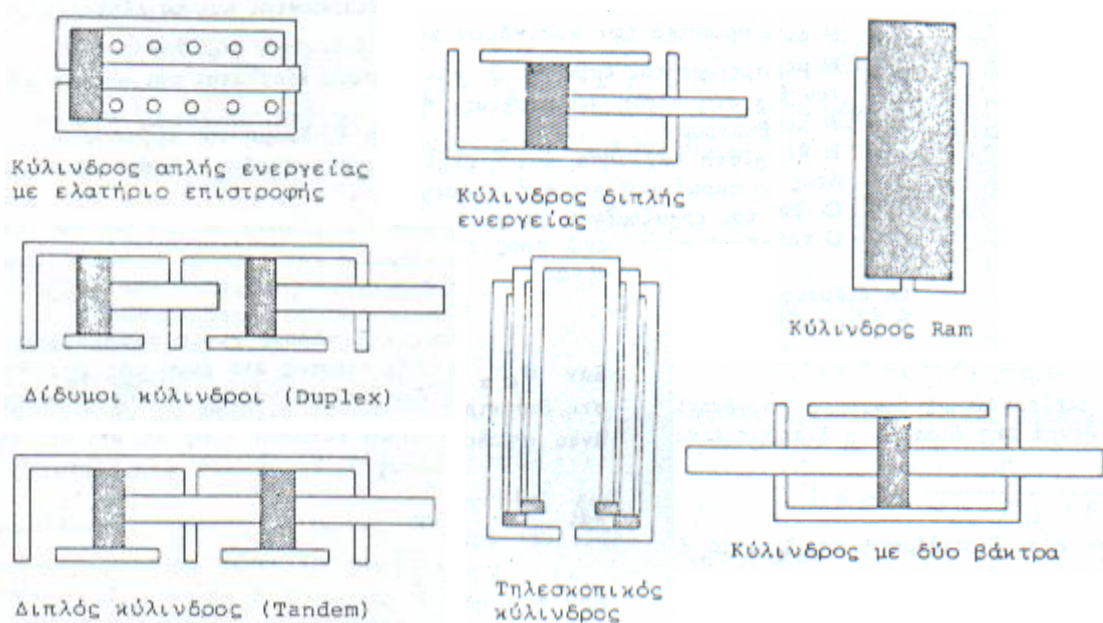


Σχήμα 2.3.1 Υδραυλικός κύλινδρος

Οι κυριότεροι τύποι υδραυλικών κυλίνδρων είναι:

- Κύλινδρος απλής ενεργείας στον οποίο η υδραυλική πίεση ασκείται επί του εμβόλου μόνον προς την μία κατεύθυνση.
- Κύλινδρος 'Ram' όπου το έμβολο και το βάκτρο έχουν την ίδια διάμετρο με την εσωτερική διάμετρο του κυλίνδρου.
- Κύλινδρος διπλής ενεργείας στον οποίο η υδραυλική πίεση μπορεί να ασκείται επί του εμβόλου από την μία ή την άλλη πλευρά.

- Κύλινδρος με ένα βάκτρο είναι ο κύλινδρος που φέρει βάκτρο μόνον από την μία πλευρά του εμβόλου.
- Κύλινδρος με δύο βάκτρα είναι ο κύλινδρος με ένα έμβολο και βάκτρα προς τις δύο πλευρές του.
- Τηλεσκοπικός κύλινδρος όπου διάφοροι κύλινδροι ευρισκόμενοι ο ένας μέσα στον άλλον μπορούν να δημιουργήσουν έναν κύλινδρο μεγάλης διαδρομής όταν επιμηκυνθούν εξαιτίας του υδραυλικού ρευστού.
- Διπλός κύλινδρος (Tandem) όπου δύο κύλινδροι είναι συνδεδεμένοι εν σειρά με τέτοιο τρόπο ώστε το έμβολο καθενός να συνδέεται με το μοναδικό βάκτρο. Παρέχουν αυξημένη δύναμη ωθήσεως.
- Δίδυμοι κύλινδροι όπου δύο κύλινδροι συναρμολογούνται εν σειρά χωρίς να συνδέονται τα βάκτρα τους. Δίδουν τη δυνατότητα τριών θέσεων εργασίας καθώς το βάκτρο του ενός μπορεί να ωθήσει το έμβολο του άλλου.



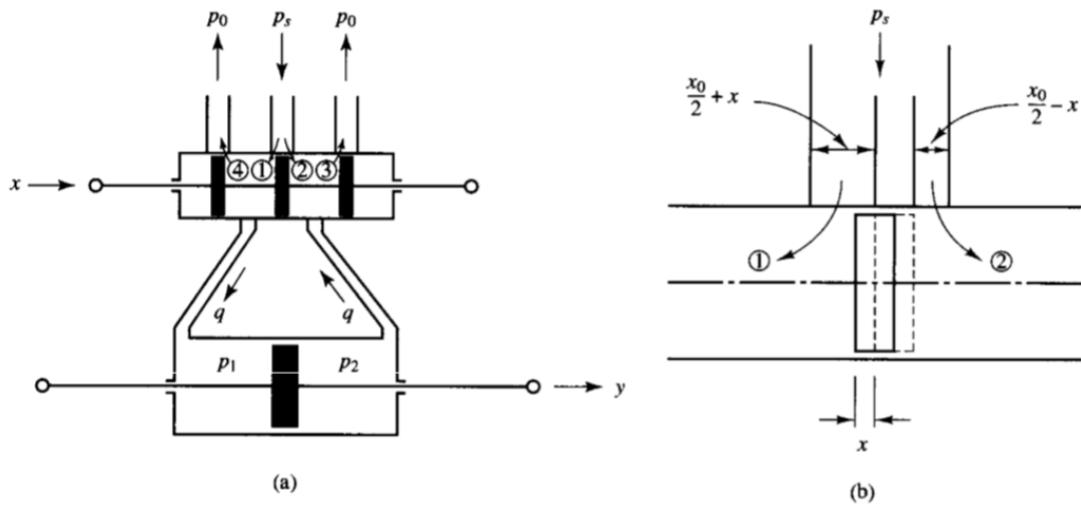
Σχήμα 2.3.2 Κυριότεροι τύποι υδραυλικών κυλίνδρων

2.4 Υδραυλικός γραμμικός επενεργητής

Γραμμικοποίηση του συστήματος Υδραυλικού επενεργητή - σερβοβαλβίδας

Ο υδραυλικός επενεργητής, ως στοιχείο ελέγχου, είναι ουσιαστικά ένας ενισχυτής δύναμης – ωθητήρας που ελέγχεται διαμέσου μιας πιλότου βαλβίδας. Ο υδραυλικός επενεργητής χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές ενίσχυσης δύναμης, αφού με ελάχιστη απαιτούμενη δύναμη μετακίνησης της πιλότου βαλβίδας, είναι δυνατό να ελέγχουμε πολύ μεγάλη δύναμη στην έξοδο του επενεργητή. Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η κίνηση της πιλότου βαλβίδας ρυθμίζει τη ροή του λαδιού, υψηλής πίεσης P_h , σε καθεμιά πλευρά του κεντρικού κυλίνδρου. Μια κίνηση (διέγερση ελάχιστων χιλιοστών της βαλβίδας, έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη εισροή λαδιού. Αν κινηθεί η βαλβίδα δεξιά θα έχουμε εισροή λαδιού στο αριστερό άκρο του κυλίνδρου και αν κινηθεί αριστερά θα έχουμε εισροή στο δεξιό άκρο. Η επακόλουθη διαφορά πιέσεων στο κεντρικό πιστόνι προκαλεί κίνηση του άξονα. Το λάδι που εισρέει, παρέχεται από μία δεξαμενή υψηλής πίεσης ενώ στο άλλο άκρο το λάδι που ωθείται από το κεντρικό πιστόνι και φεύγει από το κύλινδρο με χαμηλή πίεση, αποχετεύεται και επανακυκλοφορεί μέσω μιας αντλίας. Το φορτίο πίεσης Δp που επιβάλλεται στο πιστόνι, είναι η διαφορά μεταξύ των πιέσεων που επικρατούν σε κάθε πλευρά του πιστονιού.

Παρακάτω εφαρμόζεται η τεχνική της γραμμικοποίησης με σκοπό τη γραμμικοποίηση του μοντέλου του υδραυλικού συστήματος εμβόλου - σερβοβαλβίδας. Υποθέτουμε ότι η βαλβίδα τροφοδοτεί με το υδραυλικό ρευστό τον κύλινδρο με σκοπό την παραγωγή της επιθυμητής δύναμης που θα εφαρμοστεί στη μάζα (κτήριο). Για την εξαγωγή των παρακάτω εξισώσεων υποθέτουμε ότι η αδράνεια του φορτίου και η τριβή είναι μικρές συγκρινόμενες με τη δύναμη. Επίσης στην παρακάτω ανάλυση η αδρανειακές δυνάμεις του συστήματος καθώς και η συμπίεστικότητα του υδραυλικού μέσου θεωρούνται αμελητέες σε κάθε μικρή μετατόπιση της βαλβίδας.



(a) Υδραυλικό σύστημα βαλβίδας - εμβόλου (b) Μεγέθυνση στομίου βαλβίδας

Ορίζονται A_1, A_2, A_3, A_4 , οι επιφάνειες που ορίζει το έμβολο της βαλβίδας με τη είσοδο και τις εξόδους της βαλβίδας, όπου $A_1 = A_3$ και $A_2 = A_4$ καθώς επίσης q_1, q_2, q_3, q_4 οι ροές του ρευστού από τις αντίστοιχες περιοχές.

Υποθέτοντας ότι η μετατόπιση x είναι μικρή συνεπάγεται ότι:

$$A_1 = A_3 = k \left(\frac{x_0}{2} + x \right) \quad (2.1)$$

$$A_2 = A_4 = k \left(\frac{x_0}{2} - x \right) \quad (2.2)$$

όπου k είναι σταθερά

Επιπλέον υποθέτουμε ότι η πίεση επιστροφής p_0 είναι πολύ μικρή και θεωρείται αμελητέα. Έτσι οι ροή μέσω των ανοιγμάτων στη βαλβίδα εκφράζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$q_1 = c_1 A_1 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_s - p_1)} = C_1 \sqrt{(p_s - p_1)} \left(\frac{x_0}{2} + x \right) \quad (2.3)$$

$$q_2 = c_2 A_2 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_s - p_2)} = C_2 \sqrt{(p_s - p_2)} \left(\frac{x_0}{2} - x \right) \quad (2.4)$$

$$q_3 = c_1 A_3 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_2 - p_0)} = C_1 \sqrt{(p_2 - p_0)} \left(\frac{x_0}{2} + x \right) = C_1 \sqrt{p_2} \left(\frac{x_0}{2} + x \right) \quad (2.5)$$

$$q_4 = c_2 A_4 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_0)} = C_2 \sqrt{(p_1 - p_0)} \left(\frac{x_0}{2} - x \right) = C_2 \sqrt{p_1} \left(\frac{x_0}{2} - x \right) \quad (2.6)$$

όπου $C_1 = c_1 k \sqrt{\frac{2g}{\gamma}}$ και $C_2 = c_2 k \sqrt{\frac{2g}{\gamma}}$ με γ είναι το ειδικό βάρος του ρευστού.

Έτσι η ροή του ρευστού στο αριστερό μέρος του εμβόλου είναι

$$q = q_1 - q_4 = C_1 \sqrt{p_s - p_1} \left(\frac{x_0}{2} + x \right) - C_2 \sqrt{p_1} \left(\frac{x_0}{2} - x \right) \quad (2.7)$$

και στο δεξί

$$q = q_3 - q_2 = C_1 \sqrt{p_2} \left(\frac{x_0}{2} + x \right) - C_2 \sqrt{p_s - p_2} \left(\frac{x_0}{2} - x \right) \quad (2.8)$$

Σημειώνεται ότι το ρευστό θεωρείται ασυμπύεστο και η βαλβίδα συμμετρική οπότε κατά συνέπεια $q_1 = q_3$ και $q_2 = q_4$ ισχύει και εξισώνοντας $q_1 = q_3$ καταλήγουμε στο ότι $P_s = P_1 + P_2$

Εάν $\Delta p = P_1 - P_2$ η πίεση εκατέρωθεν του εμβόλου τότε ισχύει ότι $P_1 = \frac{P_s + \Delta p}{2}$ και

$$P_2 = \frac{P_s - \Delta p}{2}$$

Για μία συμμετρική βαλβίδα όπως αυτή που έχουμε υποθέσει, η πίεση σε κάθε πλευρά του εμβόλου είναι $\frac{1}{2} P_s$. Καθώς η βαλβίδα μετατοπίζεται η πίεση στη μία πλευρά αυξάνεται όσο η πίεση στην άλλη πλευρά μειώνεται.

Πλέον αντικαθιστώντας τους όρους P_s και Δp καταλήγουμε

$$q = q_1 - q_4 = c_1 \sqrt{\frac{P_s - \Delta p}{2}} \left(\frac{x_0}{2} + x \right) - c_2 \sqrt{\frac{P_s + \Delta p}{2}} \left(\frac{x_0}{2} - x \right) \quad (2.9)$$

$$q = c_1 \sqrt{\frac{P_s - \Delta p}{2}} \left(\frac{x_0}{2} + x \right) - c_2 \sqrt{\frac{P_s + \Delta p}{2}} \left(\frac{x_0}{2} - x \right) = f(x, \Delta p) \quad (2.10)$$

$$q - \bar{q} = a(x - \bar{x}) - b(\Delta p - \Delta \bar{p}) \quad (2.11)$$

όπου

$$\bar{q} = f(\bar{x}, \Delta \bar{p})$$

$$a = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}, \Delta p=\Delta \bar{p}} = c_1 \sqrt{\frac{P_s - \Delta \bar{p}}{2}} + c_2 \sqrt{\frac{P_s + \Delta \bar{p}}{2}}$$

$$b = \left. \frac{\partial f}{\partial \Delta p} \right|_{x=\bar{x}, \Delta p=\Delta \bar{p}} = - \left[\frac{c_1}{2\sqrt{2}\sqrt{P_s - \Delta \bar{p}}} \left(\frac{x_0}{2} + \bar{x} \right) + \frac{c_2}{2\sqrt{2}\sqrt{P_s + \Delta \bar{p}}} \left(\frac{x_0}{2} - \bar{x} \right) \right] < 0$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί το γραμμικοποιημένο μοντέλο της βαλβίδας γύρω από το αρχικό σημείο ($x = 0, q = 0, \Delta p = 0$).

Παρακάτω αναλύεται ένα απλοποιημένο παράδειγμα στο οποίο ένα υδραυλικό σύστημα όπως εκείνο που αναλύθηκε παραπάνω επιδρά σε ένα φορτίο το οποίο αναπαριστά το ρόλο του κτηρίου στην παρούσα μελέτη που εκπονήθηκε.

Στην περίπτωση λοιπόν που οι δυνάμεις από το φορτίο της μάζας (κτήριο) δεν είναι αμελητέες είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν στην ανάλυση η πτώση πίεσης στη βαλβίδα και το έμβολο καθώς επίσης οι διαρροές του υδραυλικού ρευστού στη βαλβίδα και στο έμβολο αλλά και ο συντελεστής συμπίεσης του ρευστού.

Η ροή του ρευστού είναι μια μη γραμμική συνάρτηση της μετατόπισης x και της διαφοράς πίεσης Δp εκατέρωθεν του εμβόλου.

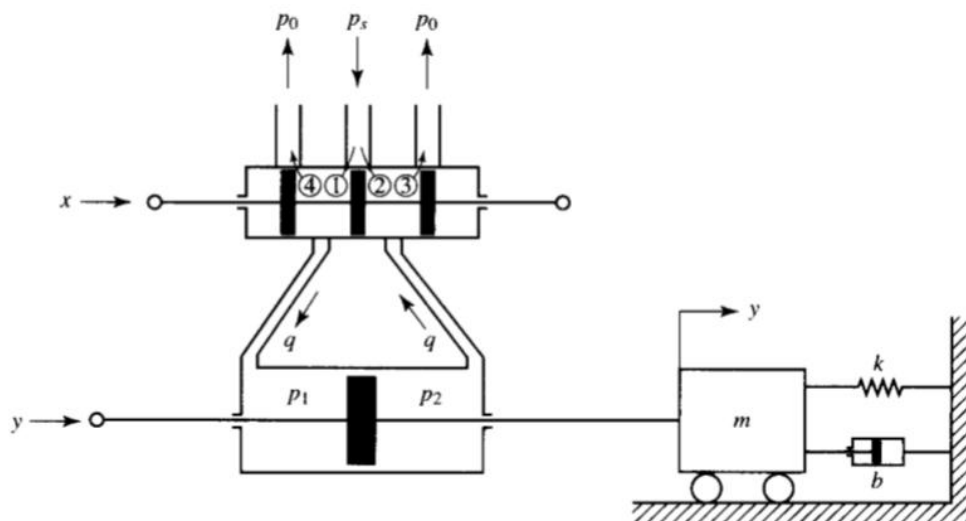
$$q = f(x, \Delta p)$$

Γραμμικοποιώντας το μοντέλο γύρω από το σημείο ($x = 0, q = 0, \Delta p = 0$) καταλήγουμε στην εξίσωση 2.12 για τη ροή

$$q = k_1 x - k_2 \Delta p \quad (2.12)$$

όπου για η ροή q πλέον είναι άθροισμα του ρυθμού ροής που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή δύναμης στο έμβολο, q_o (kg/sec), το ρυθμό διαρροής του ρευστού q_l (kg/sec) και τον ισοδύναμο ρυθμό συμπίεσότητας του ρευστού q_c (kg/sec)

$$q = q_o + q_l + q_c$$



Η ροή $q_o dt$ στην αριστερή πλευρά του εμβόλου προκαλεί την κίνησή του προς τα δεξιά κατά dy σύμφωνα με την εξίσωση

$$A\rho dy = q_o dt \quad (2.13)$$

όπου $A(m^2)$ είναι η επιφάνεια του εμβόλου, $\rho(kg/m^3)$ είναι η πυκνότητα του υδραυλικού λαδιού και $dy(m)$ είναι η μετατόπιση του εμβόλου. Τότε $q_o = A\rho \frac{dy}{dt}$ και $q_i = LP_L$ όπου L είναι ο συντελεστής διαρροής του συστήματος.

Η ισοδύναμη ροή συμπιεστότητας μπορεί να εκφραστεί με όρους bulkmodulus ως $q_c = \rho \frac{V}{K} \frac{d\Delta p}{dt}$ εφόσον $K = \frac{d\Delta p}{-dV/V}$ και $\rho \frac{-dV}{dt} = \rho \frac{V}{K} \frac{d\Delta p}{dt}$ όπου V είναι ο αποτελεσματικός όγκος του ρευστού που βρίσκεται υπό συμπίεση.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις έχουμε

$$q = k_1 x - k_2 \Delta p = A\rho \frac{dy}{dt} + LP_L + \rho \frac{V}{K} \frac{d\Delta p}{dt} \quad (2.14)$$

και καθώς η δύναμη που αναπτύσσεται από το έμβολο και εφαρμόζεται στη μάζα (κτήριο) είναι $A\Delta p$, η εξίσωση κίνησης είναι

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = A\Delta p \quad (2.15)$$

Απαλείφοντας το Δp από τις δύο παραπάνω εξισώσεις καταλήγουμε στη σχέση που τελικά συνδέει τη μετατόπιση της βαλβίδας σε σχέση με τη μετατόπιση του εμβόλου για να αποδώσει τελικά τη δύναμη η οποία προκάλεσε τη κίνηση της μάζας.

$$\frac{\rho m V}{KA} \frac{d^3 y}{dt^3} + \left[\frac{\rho b V}{KA} + \frac{m}{A} (L + k_2) \right] \frac{d^2 y}{dt^2} + \left[A\rho + \frac{\rho k V}{KA} C_b + \frac{b}{A} (L + k_2) \right] \frac{dy}{dt} = k_1 x \quad (2.16)$$

όπου

$$C_b = Dy / q_o$$

2.5 Επιλογή επενεργητή και σερβοβαλβίδας

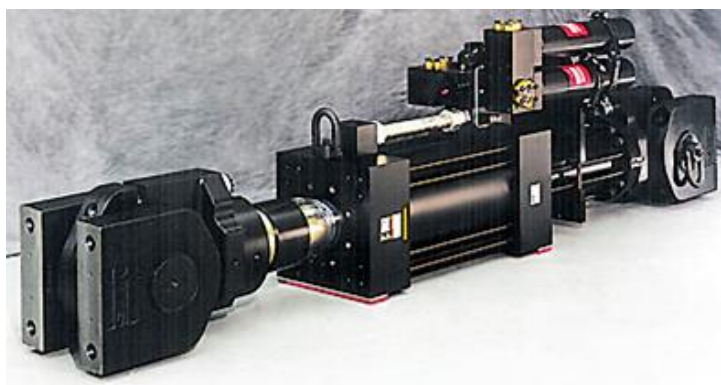
Στην παράγραφο 2.4 εξετάσαμε τις εξισώσεις του υδραυλικού επενεργητή θεωρώντας τον ίδιο τον επενεργητή και τη σερβοβαλβίδα, ως ένα ενιαίο συναρμολόγημα. Κατά την επιλογή τους όμως, επενεργητής και σερβοβαλβίδα

εξετάζονται χωριστά. Η επιλογή του επενεργητή θα καθορίσει κατά ένα μεγάλο ποσοστό και την επιλογή της σερβοβαλβίδας.

Στην δικιά μας προσέγγιση, ως αφετηρία είχαμε προηγούμενες παρόμοιες εργασίες (αντισεισμικής προστασίας), των οποίων οι προσομοιώσεις έδειξαν πως η μέγιστη δύναμη ελέγχου που απαιτείται να εφαρμοστεί στο κτήριο ήταν της τάξης των 18 kNt . Επομένως η επιλογή του υδραυλικού επενεργητή πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μας παρέχει την παραπάνω δύναμη, αλλά και να είμαστε εξασφαλισμένοι σε περιπτώσεις ακόμη πιο ισχυρών σεισμών.

Έπειτα από συλλογή πληροφοριών, επιλέχθηκε ο υδραυλικός επενεργητής 244.23 της Αμερικάνικης εταιρίας MTS

Η εταιρία MTS προτείνει την σειρά επενεργητών 244 (244 Actuator Series, σχήμα 2.5.1), για δυναμικές και μεγάλης απόδοσης και ακρίβειας δοκιμές.



Σχήμα 2.5.1 Σειρά 244 της εταιρίας MTS

Οι συγκεκριμένοι επενεργητές ανταποκρίνονται σε όλα τα είδη δοκιμών (στατικά – δυναμικά) και φημίζονται για την υψηλή αξιοπιστία και ακρίβειά τους. Αποτελούν την πιο διαδεδομένη λύση για όλες τις περιπτώσεις σερβοϋδραυλικών δοκιμών.

Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του υδραυλικού γραμμικού επενεργητή 244.23 της MTS.

Force Rating	Stroke	Rod Diameter	Effective Piston Area
150 kNt	152.4mm	69.9mm	82.13cm^2

όπου Force Rating είναι η δύναμη που μπορεί να αποδώσει ο επενεργητής ($150kN$)
όπου Stroke είναι η μέγιστη μετατόπιση του εμβόλου του επενεργητή (152.4 mm)
όπου Rod Diameter είναι η διάμετρος του βάκτρου ($69.9mm$)
όπου Effective Piston Area είναι η ενεργή επιφάνεια του εμβόλου ($82.13cm^2$)
Περισσότερα χαρακτηριστικά του 244.23 επενεργητή καθώς και σχεδιαγράμματα
αυτού παρατίθενται στο παράρτημα Β.

Η μέτρηση της θέσης του εμβόλου πετυχαίνεται μέσω ενός μετατροπέα LVDT (Linear Variable Differential Transducer), ο οποίος μετρώντας κάθε στιγμή την απόλυτη μετατόπιση του εμβόλου παρέχει το σήμα ανάδρασης (τάση εξόδου) για τον έλεγχο του επενεργητή. Η διάταξη LVDT τοποθετείται αξονοσυμμετρικά στο εσωτερικό του εμβόλου και του βάκτρου.

Επίσης και άλλα στοιχεία (manifolds) είναι μονταρισμένα πάνω στον επενεργητή, τα οποία δρουν ως διασύνδεση ανάμεσα στην υδραυλική τροφοδοσία πίεσης και τον επενεργητή. Αυτό το συναρμολόγημα των στοιχείων αποτελείται από ένα κάλυμμα που καλύπτει τη σερβοβαλβίδα, την βαλβίδα ανακουφίσεως και άλλα προαιρετικά στοιχεία, όπως ένα φίλτρο για τη διατήρηση των απαιτήσεων καθαρότητας της σερβοβαλβίδας του συστήματος κτλ.

Η σερβοβαλβίδα είναι αυτή που καθορίζει την ποσότητα ροής ρευστού και την ταχύτητα και κατεύθυνση του πιστονιού. Ουσιαστικά η σερβοβαλβίδα μετατρέπει τα ηλεκτρικά σήματα που έρχονται από τη διάταξη LVDT, σε υδραυλικά σήματα για την οδήγηση του επενεργητή.

Η επιλογή της σερβοβαλβίδας δεν ήταν κάτι δύσκολο, αφού τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ήδη επιλεγμένου επενεργητή μας καθόρισαν την σειρά 252 σερβοβαλβίδων της MTS. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι η εταιρία MTS δεν ειδικεύεται και δεν κατασκευάζει σερβοβαλβίδες. Στην πραγματικότητα τις προμηθεύεται από μια άλλη Αμερικάνικη εταιρία την Moog, η οποία θεωρείται σήμερα πρωτοπόρος στο αντικείμενο. Τελικά καταλήξαμε στην σερβοβαλβίδα 252.25 για την οποία βρήκαμε λεπτομερές σχέδιο. Η πίεση τροφοδοσίας της 252.25 μπορεί να κυμανθεί από 50 έως $3000psi$. Έχει μετρηθεί ότι με απώλειες πίεσης $1000psi$ μπορεί να δώσει $56lpm$ στο κύλινδρο. Περισσότερα χαρακτηριστικά της σερβοβαλβίδας 252.25 καθώς και σχέδιο αυτής παρατίθενται στο παράρτημα Β.

3. Παράλληλοι επίπεδοι μηχανισμοί

Η έννοια των παράλληλων επενεργητών έγκειται στη σύνδεση σειριακών κινηματικών αλυσίδων σε ένα τελικό σημείο δράσης. Τα ρομπότ παράλληλης κινηματικής χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς όπως ιατρική, διαμορφωτικές κατεργασίες, προσομοιωτές πτήσεων κλπ.

Λόγω της κινηματικής δομής κλειστής αλυσίδας, οι παράλληλοι μηχανισμοί παρουσιάζουν σε σύγκριση με τους σειριακούς μηχανισμούς πλεονεκτήματα όπως μεγαλύτερη ικανότητα φορτίου, υψηλή ακρίβεια, αυξημένες ταχύτητες και επιταχύνσεις, απλή επίλυση του προβλήματος της αντιστρόφου κινηματικής. Όμως έχουν μικρότερο χώρο εργασίας, δυσκολότερη επίλυση του προβλήματος της ευθείας κινηματικής και δυσκολίες στο σχεδιασμό και έλεγχο τους.

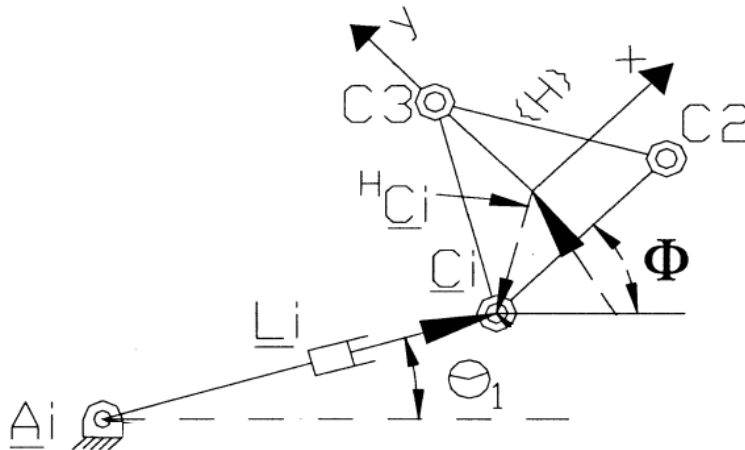
Τα επίπεδα παράλληλα ρομπότ αποτελούν μία κατηγορία παράλληλων ρομπότ όπου τα κινητά μέλη εκτελούν κινήσεις μόνο σε παράλληλα επίπεδα με το επίπεδο x-y.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η μελέτη για την επίλυση της ευθείας και της αντίστροφης κινηματικής ανάλυσης καθώς και της δυναμικής του επίπεδου παράλληλου μηχανισμού τριών βαθμών ελευθερίας 3-RPR με σκοπό τον έλεγχο του μηχανισμού για την αναπαραγωγή επιθυμητών δυνάμεων για την ακύρωση των εξωτερικών φορτίων που ενεργούν στο μηχανισμό κατά την διάρκεια σεισμικής δόνησης.

Ο παράλληλος επίπεδος μηχανισμός ο οποίος εξετάζεται την παρούσα μελέτη αποτελείται από τρεις σειριακές κινηματικές αλυσίδες η καθεμία εκ των οποίων έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας. Καθεμία από τις κινηματικές αλυσίδες αποτελείται από μία περιστροφική (R: Revolute) άρθρωση συνδεδεμένη με το έδαφος, μία πρισματική (P: Prismatic) άρθρωση και στο τέλος μία ακόμη περιστροφική άρθρωση η οποία συνδέεται με την τριγωνική βάση (ισόπλευρο τρίγωνο) της οποίας το κέντρο και θεωρείται το τελικό σημείο δράσης.

Με την έννοια του βαθμού ελευθερίας σε ένα μηχανισμό ορίζεται αριθμός των ανεξαρτήτων μεταξύ τους μεταβλητών, που πέρα από τις γνωστές γεωμετρικές διαστάσεις της κινηματικής δομής, είναι αναγκαίος για την μονοσήμαντη περιγραφή της θέσεως των μελών, σχετικά με το μέλος αναφοράς. Οι μεταβλητές αυτές ονομάζονται και συντεταγμένες αναφοράς.

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό ο μηχανισμός που εξετάζεται καθορίζεται πλήρως από τρεις μεταβλητές. Η πρώτη γωνία των βραχιόνων σε σχέση με το έδαφος, το μήκος του εμβόλου ανά πάσα χρονική στιγμή και η γωνία προσανατολισμού της πλατφόρμας.



Σχήμα 3.1 Βαθμοί ελευθερίας θ, L, Φ του μηχανισμού

3.1 Κριτήρια Σχεδιασμού του μηχανισμού

Τα κριτήρια που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη μελέτη του σχεδιασμού του ρομποτικού μηχανισμού είναι:

- Κριτήριο 1ο : για το σχεδιασμό του ρομποτικού μηχανισμού θα πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη ο σκοπός για τον οποίο προβλέπεται να κατασκευαστεί.
- Κριτήριο 2ο : διάφοροι παράγοντες όπως σχεδιαστικές παράμετροι θα πρέπει να προσδιοριστούν ποιοτικά ώστε να υπάρχει μία σαφής εικόνα του μηχανισμού καθώς επίσης θα πρέπει να υπολογιστούν και αριθμητικά για την υλοποίηση του τελικού σχεδιασμού του μηχανισμού και τη διαστασιολόγηση όλων των μερών του.
- Κριτήριο 3ο : Περιορισμοί. Οι περιορισμοί μπορεί να αφορούν α) κατασκευαστικού τύπου θέματα, β) λειτουργικά ζητήματα όπως για παράδειγμα, όλοι οι επενεργητές δεν δίνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα και έτσι θα πρέπει να επιλέξουμε εκείνους που μας δίνουν τη δυνατότητα να πετύχουμε το στόχο μας, γ) οικονομικά ζητήματα, όπως για

παράδειγμα το κόστος κατασκευής του ρομποτικού μηχανισμού ή ακόμα και το κόστος λειτουργίας του.

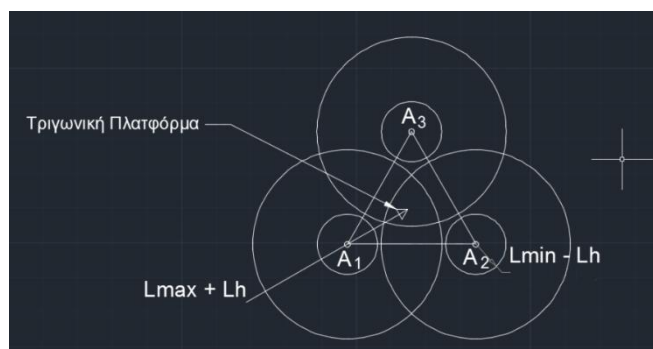
3.2 Χώρος εργασίαςτου Μηχανισμού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως το σημαντικό μειονέκτημα των παράλληλων μηχανισμών, όντας εκείνοι υποσύνολο μηχανισμών με κλειστές κινηματικές αλυσίδες, είναι οι περιορισμοί που δημιουργούνται στο προσπελάσιμο χώρο εργασίας τους.

Ο χώρος εργασίας ενός ρομποτικού μηχανισμού διακρίνεται στον προσπελάσιμο χώρο εργασίας του, ο οποίος αποτελεί το σύνολο των σημείων που ο μηχανισμός μπορεί να βρεθεί έστω με τουλάχιστον έναν προσανατολισμό και στον επιδέξιο χώρο εργασίας του μηχανισμού, ο οποίος αποτελείται από το σύνολο των σημείων εκείνων στα οποία ο μηχανισμός μπορεί να βρεθεί με περισσότερους από έναν προσανατολισμούς. Συνεπώς είναι κατανοητό ότι ο επιδέξιος χώρος εργασίας αποτελεί υποσύνολο του προσπελάσιμου χώρου εργασίας.

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιείται μία γεωμετρική προσέγγιση χώρου εργασίας ο οποίος αποτυπώνεται ως η τομή των τριών κυκλικών δίσκων με κέντρα τα κέντρα των τριών παθητικών περιστροφικών αρθρώσεων της βάσης του μηχανισμού A_1 , A_2 , A_3 και μέγιστες ακτίνες $L_{max}+L_h$, όπου L_{max} είναι η μέγιστη επιμήκυνση του υδραυλικού επενεργητή και L_h το ύψος της τριγωνικής πλατφόρμας.

Είναι φανερό ότι οι θέσεις A_1 , A_2 , A_3 , που εδράζονται οι παθητικές περιστροφικές αρθρώσεις της βάσης καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τριγωνικής πλατφόρμας (ύψος τριγώνου) αλλά και η μέγιστη επιτρεπτή επιμήκυνση που μπορεί να λάβει η ενεργή πρισματική άρθρωση καθορίζει το σύνολο του χώρου εργασίας.



Σχήμα 3.2.1 Χώρος εργασίας της τριγωνικής πλατφόρμας

3.3 Κινηματική Ανάλυση

3.3.1 Εισαγωγή στην κινηματική θεωρία

Κινηματική χρησιμοποιείται με σκοπό τη μελέτη της κίνηση χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις δυνάμεις που την προκαλούν. Στην κινηματική ενδιαφερόμαστε για την θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και όλες τις παραγώγους των μεταβλητών των αρθρώσεων που περιγράφουν τη θέση.

Η κινηματική ανάλυση ενός μηχανισμού αφορά την επίλυση δύο προβλημάτων, του ευθέως και του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος. Το ευθύ κινηματικό πρόβλημα συνίσταται στην εύρεση της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού σημείου δράσης ως προς την βάση του, όταν γνωρίζουμε την θέση κάθε άρθρωσης, ενώ το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα συνίσταται στην εύρεση της θέσης της κάθε άρθρωσης, η οποία τοποθετεί το τελικό σημείο δράσης σε μια συγκεκριμένη θέση και προσανατολισμό σε σχέση με την βάση του. Ο βαθμός δυσκολίας επίλυσης των προβλημάτων αυτών εξαρτάται από την γεωμετρία του μηχανισμού.

Ευθεία Κινηματική

$$q \rightarrow x$$

$$\dot{q} \rightarrow \dot{x}$$

$$\ddot{q} \rightarrow \ddot{x}$$

Αντίστροφη Κινηματική

$$x \rightarrow q$$

$$\dot{x} \rightarrow \dot{q}$$

$$\ddot{x} \rightarrow \ddot{q}$$

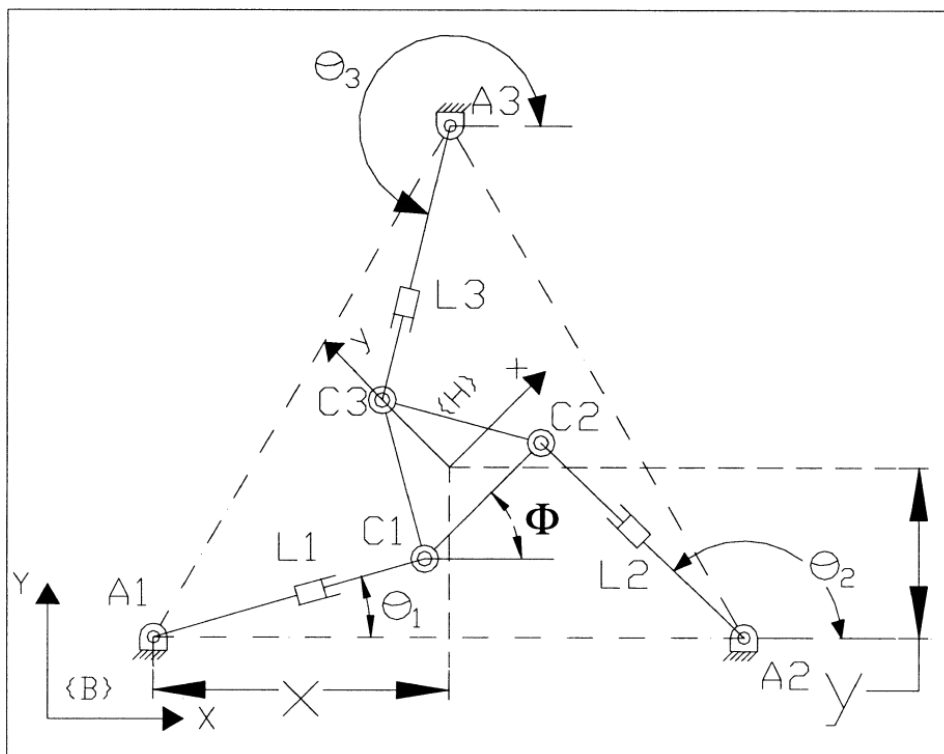
Για την μετακίνηση του άκρου του μηχανισμού από την παρούσα θέση του στην επιθυμητή είναι απαραίτητη η γνώση των γωνιών των αρθρώσεων που αντιστοιχούν στη επιθυμητή θέση. Οι γωνίες αυτές υπολογίζονται επιλύοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα. Η μετάβαση μεταξύ δύο διαδοχικών καταστάσεων του βραχίονα γίνεται μέσω επιθυμητής τροχιάς ώστε να επιτυγχάνεται τόσο η ομαλή κίνηση της κατασκευής όσο και η ταυτόχρονη έναρξη και λήξη της κίνησης όλων των επενεργητών.

3.3.2 Κινηματική Ανάλυση του παράλληλου επίπεδου μηχανισμού 3-dof RPR

Μέσω της κινηματικής ανάλυσης δίδεται ανά πάσα χρονική στιγμή η διάταξη στο επίπεδο κίνησης του μηχανισμού συναρτήση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του.

Όσον αφορά το συγκεκριμένο μηχανισμό ο οποίος και απεικονίζεται στο σχήμα 3.3.1 υπάρχουν τρεις παθητικές περιστροφικές αρθρώσεις οι οποίες εδράζονται στο έδαφος A_i και άλλες τρεις επίσης περιστροφικές και παθητικές C_i στο τέλος του κάθε βραχίονα που συνδέονται με την ισόπλευρη τριγωνική πλατφόρμα. Επίσης κάθε βραχίονας μεταξύ των παθητικών περιστροφικών αρθρώσεων έχει και μία ενεργή πρισματική άρθρωση συνολικού μήκους L_i , έναν υδραυλικό επενεργητή ο οποίος θα είναι και υπεύθυνος σε συνδυασμό με τους υπόλοιπους δύο των άλλων δυο βραχιόνων να αποδώσει την επιθυμητή δύναμη.

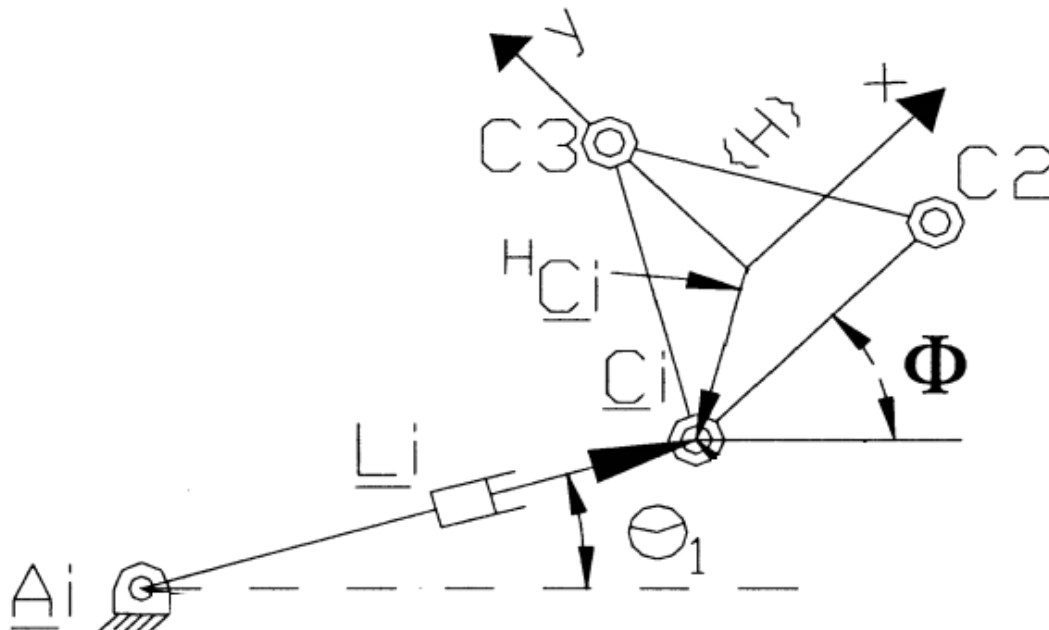
Για την κινηματική ανάλυση δύο συστήματα συντεταγμένων χρησιμοποιούνται, το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων $\{B\}$ καθώς και το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων στο κέντρο της τριγωνικής πλατφόρμας $\{H\}$.



Σχήμα 3.3.1 Απεικόνιση του μηχανισμού σε τυχαία θέση και στροφή στο επίπεδο x-y

3.3.3 Αντίστροφη Κινηματική

Όπως προαναφέρθηκε για την αντίστροφη κινηματική του μηχανισμού ισχύει ότι δεδομένων των συντεταγμένων του τελικού σημείου δράσης (ΤΣΔ) του μηχανισμού αλλά και του προσανατολισμού της τριγωνικής πλατφόρμας $X = \{x, y, \Phi\}^T$, υπολογίζονται τα μήκη L_i των επενεγητών ($i = 1, 2, 3$).



Σχήμα 3.3.2 Βασικά γεωμετρικά μεγέθη του μηχανισμού

Για κάθε βραχίονα RPR όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα ισχύουν τα εξής:

$${}^B \underline{C}_i = {}^B \underline{P}_H + {}^B R^H \underline{C}_i = {}^B \underline{A}_i + L_i \text{ για } (i = 1, 2, 3) \quad (3.1)$$

όπου ${}^B \underline{C}_i$ είναι το διάνυσμα θέσης C_i εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων B,

${}^H \underline{C}_i$ είναι το διάνυσμα θέσης C_i εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων H,

${}^B \underline{A}_i$ είναι το διάνυσμα θέσης A_i εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων B,

${}^B \underline{P}_H = \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}$ είναι το διάνυσμα θέσης του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων της κινούμενης πλατφόρμας, H, εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων B και

$${}^B R^H = \begin{bmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \Phi & -s \Phi \\ s \Phi & c \Phi \end{bmatrix} \text{ είναι ο πίνακας περιστροφής του σωματόδετου}$$

συστήματος συντεταγμένων της κινούμενης πλατφόρμας, H, εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων B.

όπου,

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$$

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$$

Οι ενδιάμεσες γωνίες των παθητικών αρθρώσεων υπολογίζονται ως εξής:

$$\theta_i = a \tan 2({}^B C_{iy} - {}^B A_{iy}, {}^B C_{ix} - {}^B A_{ix}) \quad (3.2)$$

3.3.4 Ευθεία κινηματική

Δεδομένων των μηκών των πρισματικών αρθρώσεων L_i προσδιορίζεται η θέση και ο προσανατολισμός της τριγωνικής πλατφόρμας.

$$\underline{L}_i = {}^B \underline{P}_H + {}^B R^H \underline{C}_i - {}^B \underline{A}_i \quad \text{για } (i=1,2,3) \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} L_i c \theta_i \\ L_i s \theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^H C_{ix} \\ {}^H C_{iy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^B A_{ix} \\ {}^B A_{iy} \end{bmatrix} \quad \text{για } (i=1,2,3) \quad (3.4)$$

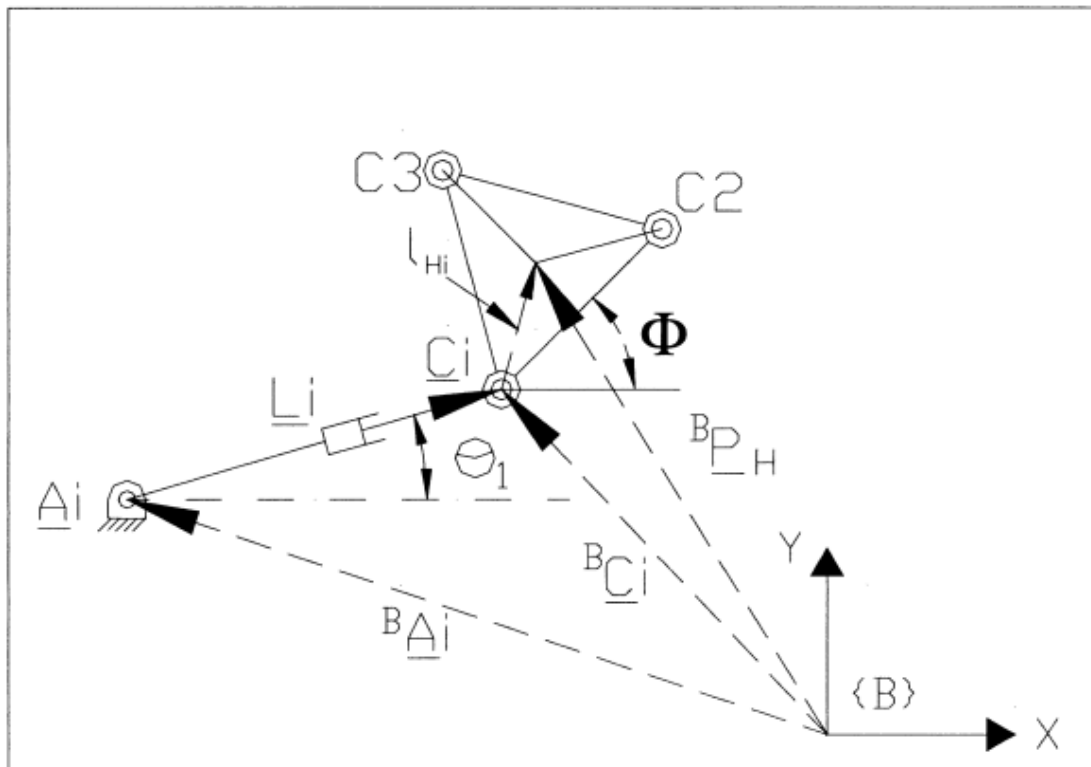
Εφόσον η μεταβλητή θ_i είναι μεταβλητή παθητικής άρθρωσης και δεν απαιτείται για τον έλεγχο του μηχανισμού θα απαλλοιφεί υψώνοντας στο τετράγωνο και αθροίζοντας τις x και y συνιστώσες.

$$\begin{aligned} & x^2 + y^2 + 2x[C_{ix} \cos \Phi - C_{iy} \sin \Phi - A_{ix}] + 2y[C_{ix} \sin \Phi - C_{iy} \cos \Phi - A_{iy}] \\ & - 2[C_{ix} A_{ix} - C_{iy} A_{iy}] \cos \Phi + 2[C_{iy} A_{ix} - C_{ix} A_{iy}] \sin \Phi \\ & + C_{ix}^2 + A_{ix}^2 + C_{iy}^2 + A_{iy}^2 - l_i^2 = 0 \end{aligned}$$

(3.5)

3.3.5 Διαφορική κινηματική

Το αντίστροφο διαφορικό κινηματικό πρόβλημα ορίζεται ως εξής: Δοσμένης της διαμόρφωσης του μηχανισμού, καρτεσιανές συντεταγμένες του ΤΣΔ και προσανατολισμού της πλατφόρμας, καθώς και των ρυθμών μεταβολής αυτών των μεταβλητών, υπολογίζονται οι ρυθμοί μεταβολής των επενεργητών. Δηλαδή, δοσμένων των $X = \{x, y, \Phi\}^T$ και $\dot{X} = \{\dot{x}, \dot{y}, \dot{\Phi}\}^T$ υπολογίζονται $\dot{\rho}_i = \{\dot{\theta}_i, \dot{L}_i, \dot{\beta}_i\}^T$



Σχήμα 3.3.3 Μεγέθη για την έκφραση των συντεταγμένων και της στροφής της πλατφόρμας προς σταθερό σύστημα συντεταγμένων $\{B\}$

Χρησιμοποιώντας τα διανύσματα θέσης όπως φαίνονται στο σχήμα (παραπάνω)

$${}^B \underline{P}_H = {}^B \underline{A}_i + \underline{L}_i + \underline{L}_{Hi} \text{ για } (i=1,2,3) \quad (3.6)$$

$${}^B \underline{P}_H = {}^B \underline{A}_i + \underline{L}_i e^{j\theta_i} + \underline{L}_{Hi} e^{j(\theta_i + \beta_i)} \text{ για } (i=1,2,3) \text{ και } j = \sqrt{-1} \quad (3.7)$$

Και παραγωγίζοντας την (3.6) καταλήγουμε στο ευθύ διαφορικό κινηματικό πρόβλημα το οποίο εκφράζεται από τις εξισώσεις 3.8

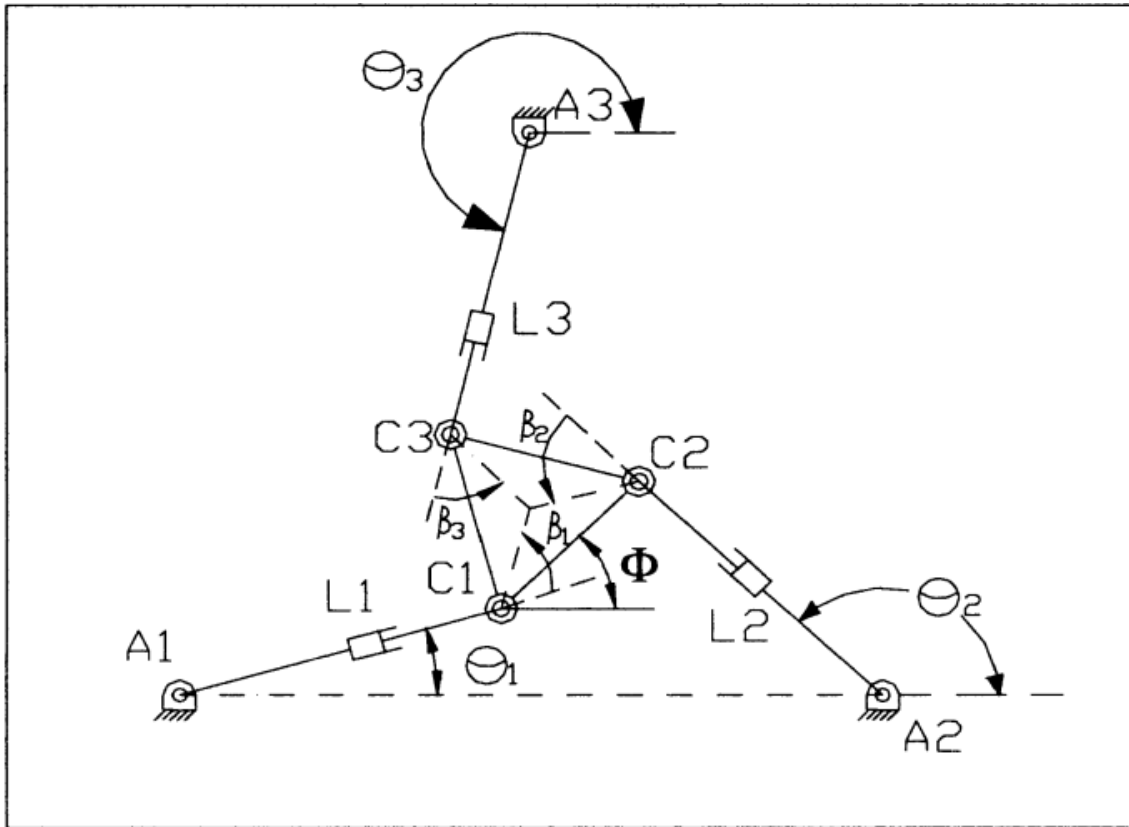
$$\dot{x} = -l_i s \theta_i \dot{\theta}_i + \dot{l}_i c \theta_i - l_{Hi} s(\theta_i + \beta_i)(\dot{\theta}_i + \dot{\beta}_i)$$

$$\dot{y} = l_i c \theta_i \dot{\theta}_i + \dot{l}_i s \theta_i + l_{Hi} c(\theta_i + \beta_i)(\dot{\theta}_i + \dot{\beta}_i)$$

$$\dot{\Phi} = \omega_z = \dot{\theta}_i + \dot{\beta}_i$$

(3.8)

όπου ισχύουν $e^{j\theta_i} = \cos \theta_i + j \sin \theta_i$ και $je^{j\theta_i} = j \cos \theta_i - \sin \theta_i$



Σχήμα 3.3.4 Μεγέθη σχετικά με την έκφραση της Ιακωβιανής μήτρας

Και σε μητρωϊκή μορφή

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_i \\ \dot{l}_i \\ \dot{\beta}_i \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

όπου J είναι η ιακωβιανή μήτρα η οποία συνδέει τις ταχύτητες στο χώρο των αρθρώσεων με εκείνες στον καρτεσιανό χώρο και έχει την παρακάτω μορφή.

$$[J] = \begin{bmatrix} -l_i s \theta_i - l_{Hi} s (\theta_i + \beta_i) & c \theta_i & -l_{Hi} s (\theta_i + \beta_i) \\ l_i c \theta_i + l_{Hi} c (\theta_i + \beta_i) & s \theta_i & l_{Hi} c (\theta_i + \beta_i) \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Αντιστοίχως η αντίστροφη διαφορική κινηματική σε μητρωϊκή μορφή φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \theta_1 & s \theta_1 & l_{H1} s \beta_1 \\ c \theta_2 & s \theta_2 & l_{H2} s \beta_2 \\ c \theta_3 & s \theta_3 & l_{H3} s \beta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

όπου $\Omega = J^{-1}I$

$$\Omega = \begin{bmatrix} c \theta_1 & s \theta_1 & l_{H1} s \beta_1 \\ c \theta_2 & s \theta_2 & l_{H2} s \beta_2 \\ c \theta_3 & s \theta_3 & l_{H3} s \beta_3 \end{bmatrix}$$

με την εξίσωση $\dot{x} = \Omega^{-1} \dot{l}$ να αποτελεί την ευθεία διαφορική κινηματική.

3.3.6 Διαφορική Κινηματική

Παραγωγίζοντας τη σχέση (3.8) εξάγονται οι παρακάτω σχέσεις για τις επιταχύνσεις

$$\begin{aligned} \ddot{x} = & -\dot{l}_i s \theta_i \dot{\theta}_i - l_i c \theta_i \dot{\theta}_i^2 - l_i s \theta_i \ddot{\theta}_i \\ & + \ddot{l}_i c \theta_i - s \theta_i \dot{\theta}_i \dot{l}_i \\ & - l_{Hi} c (\theta_i + \beta_i) (\dot{\theta}_i + \dot{\beta}_i)^2 - l_{Hi} s (\theta_i + \beta_i) (\ddot{\theta}_i + \ddot{\beta}_i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} = & \dot{l}_i c \theta_i \dot{\theta}_i - l_i s \theta_i^2 + l_i c \theta_i \ddot{\theta}_i \\ & + \ddot{l}_i s \theta_i - c \theta_i \dot{\theta}_i \dot{l}_i \\ & - l_{Hi} s (\theta_i + \beta_i) (\dot{\theta}_i + \dot{\beta}_i)^2 + l_{Hi} c (\theta_i + \beta_i) (\ddot{\theta}_i + \ddot{\beta}_i) \end{aligned}$$

$$\ddot{\Phi} = \ddot{\theta}_i + \ddot{\beta}_i$$

3.3.7 Σημεία ιδιομορφίας (Singularities)

Τα σημεία ιδιομορφίας είναι οι σχηματισμοί του ρομποτικού μηχανισμού στους οποίους μειώνονται οι βαθμοί ελευθερίας του με αποτέλεσμα είτε να μην

μπορεί πλέον να κινηθεί είτε να μην μπορεί να ασκήσει τις επιθυμητές ροπές ή δυνάμεις. Τα σημεία ιδιομορφίας αντιστοιχούν είτε σε ακραία σημεία του χώρου εργασίας είτε εμφανίζονται όταν δύο οι περισσότερες αρθρώσεις κινούνται προς εξαρτώμενους σχηματισμούς. Κοντά σε σημεία ιδιομορφίας απαιτούνται σχετικά μεγάλες κινήσεις των αρθρώσεων για να παραχθούν μικρές μετακινήσεις του τελικού σημείου δράσης και συνεπώς οι κινητήρες θα πρέπει να παράγουν μεγαλύτερη ροπή.

Από την αντίστροφη διαφορική κινηματική έχουμε:

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{L}_2 \\ \dot{L}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & l_{H1} \sin(\beta_1) \\ \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) & l_{H2} \sin(\beta_2) \\ \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) & l_{H3} \sin(\beta_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix}$$

όπου,

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & l_{H1} \sin(\beta_1) \\ \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) & l_{H2} \sin(\beta_2) \\ \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) & l_{H3} \sin(\beta_3) \end{bmatrix} = J \text{ η Ιακωβιανή μήτρα}$$

Ιδιόμορφα σημεία καλούμε τα σημεία εκείνα για τα οποία η ορίζουσα της Ιακωβιανής μήτρας είναι ίση με το μηδέν (εξίσωση 3.12):

$$\det \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & l_{H1} \sin(\beta_1) \\ \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) & l_{H2} \sin(\beta_2) \\ \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) & l_{H3} \sin(\beta_3) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.11)$$

Στην παρούσα ανάλυση δε θα ασχοληθούμε με την εύρεση ιδιόμορφων σημείων διότι ο σχεδιασμός έγινε σε χώρος μακριά από τέτοιου είδους σημεία ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα ο μηχανισμός να μην μπορέσει να αποδώσει τις απαιτούμενες δυνάμεις στο προσχεδιασμένο χώρο εργασίας του.

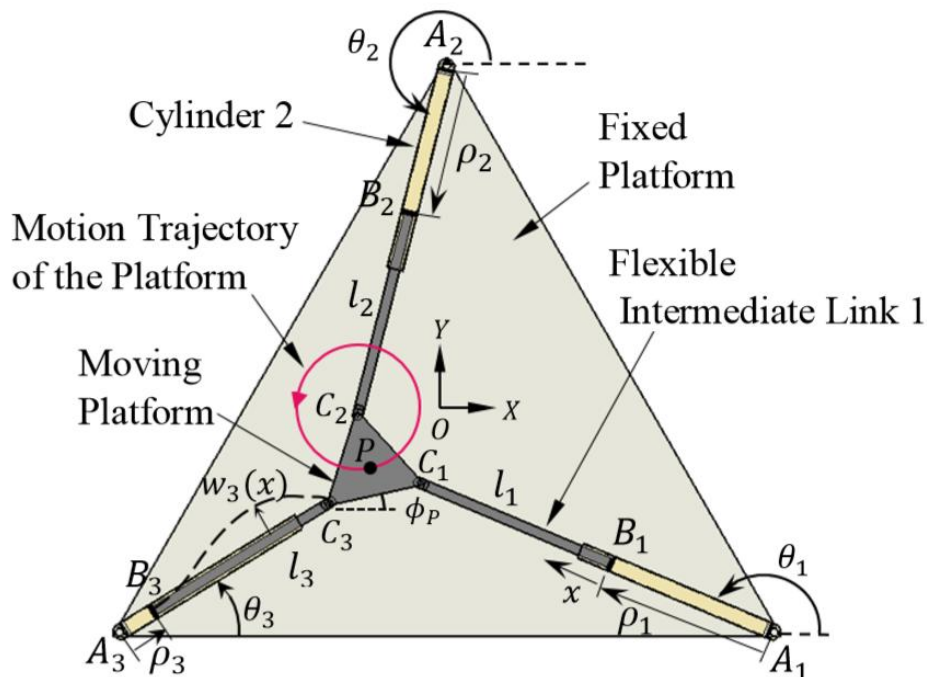
3.4 Δυναμική Ανάλυση

Η μελέτη του δυναμικού μοντέλου ενός μηχανισμού είναι απαραίτητο εργαλείο για το σχεδιασμό, την κατασκευή αλλά και τη χρήση ενός ρομποτικού μηχανισμού στο περιβάλλον λειτουργίας του.

Η δυναμική ασχολείται με την εξαγωγή και τη μελέτη του δυναμικού μοντέλου ενός ρομποτικού μηχανισμού. Το δυναμικό αυτό μοντέλο συνίσταται στις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν αναλυτικά τη σχέση ανάμεσα στις ροπές και τις δυνάμεις των επενεργητών που κινούν τις αρθρώσεις των βραχιόνων και συνδράμουν στη συνολική κίνηση του μηχανισμού.

Οι δυναμικές εξισώσεις είναι δυνατόν να αναπτυχθούν είτε στον τρισδιάστατο χώρο λειτουργίας του ρομποτικού μηχανισμού είτε στο χώρο των μεταβλητών των αρθρώσεων του.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση η ανάπτυξη των εξισώσεων θα γίνει στο χώρο των αρθρώσεων.



Σχήμα 3.3.5 Απεικόνιση μεγεθών απαραίτητων για τη δυναμική ανάλυση του μηχανισμού

Στην παρούσα δυναμική ανάλυση συμπεριλαμβάνεται η δυναμική λόγω παραμόρφωσης των ενδιάμεσων links (εμβόλων)

$$w_i(x,t) = \sum_{j=1}^r \psi_{ij}(x) \eta_{ij}(x) \quad (3.12)$$

όπου $w_i(x,t)$ είναι η καμπτική παραμόρφωση του ενδιάμεσου i link. , είναι οι ιδιοσυναρτήσεις (modeshapes) για τη μοντελοποίηση της ελαστικότητας του εύκαμπτου βραχίονα i , $\bar{\eta} = [\eta_{11} \dots \eta_{1r} \eta_{21} \dots \eta_{2r} \eta_{31} \dots \eta_{3r}]$ είναι τα πλάτη των ιδιοσυναρτήσεων $\psi_{ij}(x)$ και r είναι ο αριθμός των ιδιοδιανυσμάτων που επιλέχθηκαν για τη μοντελοποίηση. [79],[80],[81]

Σύμφωνα με το μοντέλο που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των ιδιοδιανυσμάτων, η μορφή αυτών είναι όπως παρακάτω:

$$\psi_{ij}(\xi) = \cos(\alpha_j \xi) - \cosh(\alpha_j \xi) \quad (3.13)$$

$$- \frac{\cos(\alpha_j) - \cosh(\alpha_j)}{\sin(\alpha_j) - \sinh(\alpha_j)} (\sin(\alpha_j \xi) - \sinh(\alpha_j \xi))$$

όπου $\xi = \frac{x}{l}$, με $0 \leq \xi \leq 1$

x : η απόσταση από το B_i ως ένα αυθαίρετο σημείο του i ενδιάμεσου εύκαμπτου συνδέσμου, l : το μήκος του συνδέσμου και $\alpha_j \approx (j + 0.25)\pi$ όπου $j = 1, 2, 3$

3.4.1 Κινητική ενέργεια

Στόχος είναι η εύρεση της ολικής κινητικής ενέργειας του μηχανισμού η οποία προκύπτει από τη συνεισφορά της κινητικής ενέργειας των συνδέσμων και των επενεργητών λόγω της κίνησης τους.

Έτσι η συνολική κινητική ενέργεια του μηχανισμού αποτελείται από την κινητική ενέργεια του κυλίνδρου T_C , τμήμα $A_i B_i$, την κινητική ενέργεια της πλατφόρμας T_P και την κινητική ενέργεια του εμβόλου T_L

$$T = T_L + T_P + T_C \quad (3.14)$$

$$T_P = \frac{1}{2} m_P (\dot{x}_P + \dot{y}_P) + \frac{1}{2} I_P \dot{\Phi}_P \quad (3.15)$$

$$T_C = \frac{1}{2} I_C \dot{\Theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_C \dot{\Theta}_2^2 + \frac{1}{2} I_C \dot{\Theta}_3^2 \quad (3.16)$$

$$T_L = \frac{1}{2} \int_0^l \rho_{A1} [\dot{\rho}_1^2 + ((x + \rho_1)\dot{\theta}_1)^2] dx + \frac{1}{2} \int_0^l \rho_{A2} [\dot{\rho}_2^2 + ((x + \rho_2)\dot{\theta}_2)^2] dx + \frac{1}{2} \int_0^l \rho_{A3} [\dot{\rho}_3^2 + ((x + \rho_3)\dot{\theta}_3)^2] dx \quad (3.17)$$

Και επομένως η μορφή της συνολικής κινητικής ενέργειας είναι η παρακάτω:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^l \rho_{A1} [\dot{\rho}_1^2 + ((x + \rho_1)\dot{\theta}_1)^2] dx + \frac{1}{2} \int_0^l \rho_{A2} [\dot{\rho}_2^2 + ((x + \rho_2)\dot{\theta}_2)^2] dx + \frac{1}{2} \int_0^l \rho_{A3} [\dot{\rho}_3^2 + ((x + \rho_3)\dot{\theta}_3)^2] dx + \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_p + \dot{y}_p) + \frac{1}{2} I_p \dot{\Phi}_p + \frac{1}{2} I_C \dot{\Theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_C \dot{\Theta}_2^2 + \frac{1}{2} I_C \dot{\Theta}_3^2 \quad (3.18)$$

όπου ρ_{A_i} είναι η μάζα ανά μονάδα μήκους του εμβόλου μάζας m , \dot{w}_i είναι ο ρυθμός μεταβολής της καμπτικής παραμόρφωσης του εμβόλου, $\dot{\rho}_i$ είναι η γραμμική ταχύτητα του εμβόλου, \dot{x}_p είναι η γραμμική ταχύτητα της πλατφόρμας στη διεύθυνση x , \dot{y}_p είναι η γραμμική ταχύτητα της πλατφόρμας στη διεύθυνση y , m_p είναι η μάζα της πλατφόρμας, $\dot{\theta}_i$ είναι η γωνιακή ταχύτητα του κυλίνδρου, I_p είναι η ροπή αδρανείας της πλατφόρμας γύρω από το κέντρο της και I_C είναι η ροπή αδρανείας του κυλίνδρου γύρω από το A_i

3.4.2 Δυναμική ενέργεια

Στόχος είναι η εύρεση της ολικής δυναμικής ενέργειας του μηχανισμού η οποία προκύπτει από τη συνεισφορά της δυναμικής ενέργειας των συνδέσμων και των επενεργητών των αρθρώσεων.

Η συνολική δυναμική ενέργεια στη παρούσα μελέτη είναι άθροισμα της καμπτικής ενέργεια παραμόρφωσης (V_1) καθώς και της δυναμικής ενέργειας εξαιτίας των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος των εμβόλων (V_2).

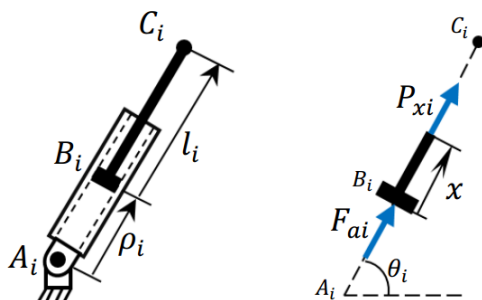
Έτσι η συνολική δυναμική ενέργεια εκφράζεται ως εξής:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_0^l E_i I_i \left(\frac{\partial^2 w_i(x)}{\partial x^2} \right) dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_0^l P_{xi} \left(\frac{\partial w_i(x)}{\partial x} \right)^2 dx = V_1 + V_2 \quad (3.19)$$

όπου E_i , είναι το μέτρο ελαστικότητας, I_i είναι η ροπή αδρανείας του συνδέσμου i και P_{xi} η αξονική δύναμη.

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση (3.19) αναδιατυπώνεται ως εξής:

$$V_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \frac{E_i}{l_i^3} \int_0^1 I_i(\xi) \sum_{j=1}^3 \eta_{ij}^2(t) (\psi''_{ij}(\xi))^2 d\xi + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_0^1 \frac{P_{xi}}{l_i} \sum_{j=1}^3 \eta_{ij}^2(t) (\psi'_{ij}(\xi))^2 d\xi \quad (3.20)$$



Σχήμα 3.3.6 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος του υδραυλικού επενεργητή

Για την εξαγωγή της δυναμικής ενέργειας V_2 και με βάση το παραπάνω διάγραμμα ελευθέρου σώματος εξετάζονται οι αξονικές δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται κατά το φορέα του εμβόλου.

Σημειώνεται ότι οι βαρυντικές δυνάμεις είναι κάθετες στο επίπεδο εργασίας του μηχανισμού με αποτέλεσμα η δυναμική ενέργεια αυτών να είναι μηδενική.

Οι εξισώσεις ισορροπίας για το διάγραμμα ελευθέρου σώματος

$$P_{xi} + F_{ai} = \rho_{Ai} [\ddot{\rho}_i x - \dot{\theta}_i^2 x (\rho_i + \frac{x}{2})] \quad (3.21)$$

$$P_{xi} = -F_{ai} + \rho_{Ai} [\ddot{\rho}_i x - \dot{\theta}_i^2 x (\rho_i + \frac{x}{2})] \quad (3.22)$$

Όπου F_{ai} είναι η δύναμη που εφαρμόζεται από τον υδραυλικό επενεργητή και P_{xi} είναι η δύναμη που εφαρμόζεται σε μία συγκεκριμένη διατομή του εμβόλου όπως απεικονίζονται στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος.

Έτσι η δυναμική ενέργεια λόγω των αξονικών δυνάμεων κατά τον φορέα των εμβόλων είναι όπως παρακάτω.

$$\begin{aligned}
V_2 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_0^l \left\{ -F_{ai} + \rho_{Ai} [\ddot{\rho}_i x - \dot{\theta}_i^2 x (\rho_i + \frac{x}{2})] \right\} \left(\frac{\partial^2 w_i(x,t)}{\partial^2 x} \right)^2 dx \\
&= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{l_i} F_{ai} \int_0^1 \sum_{j=1}^3 \eta_{ij}^2(t) (\psi'_{ij}(x))^2 d\xi + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \rho_{Ai} \ddot{\rho}_i \int_0^1 \xi \sum_{j=1}^3 \eta_{ij}^2(t) (\psi'_{ij}(x))^2 d\xi \quad (3.23) \\
&\quad - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \rho_{Ai} \dot{\theta}_i^2 \int_0^1 \xi (\rho_i + \frac{l_i \xi}{2}) \sum_{j=1}^3 \eta_{ij}^2(t) (\psi'_{ij}(x))^2 d\xi
\end{aligned}$$

3.4.3 Εξισώσεις Lagrange

Με δεδομένες την ολική κινητική και την ολική δυναμική ενέργεια του μηχανισμού προκύπτει η εξίσωση Lagrange $L(\dot{q}, q) = T(\dot{q}, q) - U(q)$ η οποία μέσω των εξισώσεων Euler–Lagrange εξάγει τις τελικές δυναμικές εξισώσεις

Στην παρούσα ανάλυση μελετάται η συμπεριφορά των ενδιάμεσων βραχιόνων που ενώνουν τους υδραυλικούς επενεργητές με την τριγωνική πλατφόρμα, ως εύκαμπτα και όχι ως άκαμπτα σώματα.

Με βάση την παραπάνω υπόθεση η εξίσωση Euler – Lagrange διατυπώνεται όπως παρακάτω.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial(T-V)}{\partial \dot{\eta}_{ij}} \right) - \left(\frac{\partial(T-V)}{\partial \eta_{ij}} \right) = 0 \quad \text{Εξίσωση Euler–Lagrange} \quad (3.24)$$

όπου L είναι η συνάρτηση Lagrange και ισούται με τη διαφορά της κινητικής με τη δυναμική ενέργεια, η_{ij} είναι οι γενικευμένες συντεταγμένες (μεταβλητές κίνησης) του ρομποτικού βραχίονα, $\dot{\eta}_{ij}$ είναι η πρώτη παράγωγος των γενικευμένων συντεταγμένων q_i και τ_i είναι η γενικευμένη δύναμη/ροπή που εφαρμόζεται στην άρθρωση i προκειμένου να κινήσει το σύνδεσμο i

Έτσι αντικαθιστώντας την κινητική και τη δυναμική ενέργεια του μηχανισμού στην λανγκρανζιανή εξίσωση έχουμε:

$$\begin{aligned}
&\left[m_i \int_0^1 \psi_{ij}^2 d\xi \right] \dot{\eta}_{ij} + \left[\frac{E_i I_i}{l_i^3} \int_0^1 \left(\frac{d^2 \psi_{ij}}{d\xi^2} \right) d\xi \right] \eta_{ij} + \left[-\frac{1}{l_i} F_{ai} \int_0^1 \left(\frac{d\psi_{ij}}{d\xi} \right)^2 d\xi - \rho_{Ai} \dot{\rho}_i \int_0^1 \xi \left(\frac{d\psi_{ij}}{d\xi} \right)^2 d\xi + \rho_{Ai} \dot{\theta}_i^2 \int_0^1 \xi (\rho_i + \frac{l_i \xi}{2}) \left(\frac{d\psi_{ij}}{d\xi} \right)^2 d\xi \right] \eta_{ij} = \\
&-m_i \dot{\theta}_i \int_0^1 \psi_{ij} (\xi l_i + \rho_i) \xi d\xi - m_i \dot{\theta}_i \dot{\rho}_i \int_0^1 \psi_{ij} d\xi \quad (3.25)
\end{aligned}$$

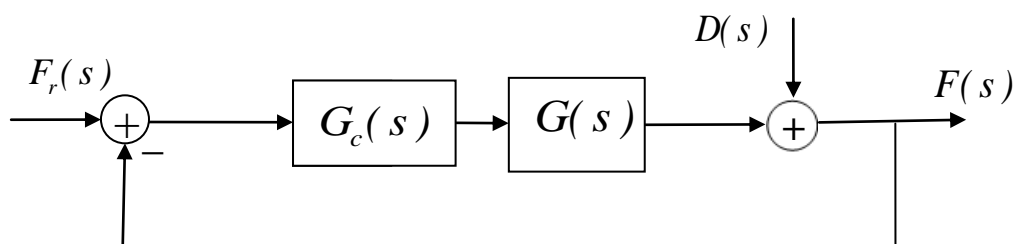
Σε μορφή πινάκων οι τελικές δυναμικές εξισώσεις έχουν την παρακάτω μορφή

$$M\ddot{\eta} + (K_f + K_p)\bar{\eta} = -M_\theta\ddot{\theta} - F_{fg} \quad (3.26)$$

όπου M είναι το μητρώο μάζας του μηχανισμού, K_f είναι το μητρώο δυσκαμψίας, K_p είναι το μητρώο πλευρικής δυσκαμψίας εξαιτίας των αξονικών δυνάμεων, ο όρος $-M_\theta\ddot{\theta}$ συμβολίζει τις δυνάμεις που ασκούνται στο σχετικά ελαστικό έμβολο από τα στιβαρά μέρη του μηχανισμού, κύλινδρος και πλατφόρμα. και ο όρος F_{fg} τις δυνάμεις που ασκούνται στο σχετικά ελαστικό έμβολο και οφείλεται στην επιτάχυνση Coriolis

4. Σχεδιασμός – Προσομοιώσεις

Στην παράγραφο 2.4 περιγράφεται η σχέση μεταξύ της μετακίνησης της βαλβίδας και της απόστασης που διανύει το έμβολο και κατ' επέκταση της παραγόμενης δύναμης. Η σχέση αυτή της ρύθμισης της βαλβίδας ως είσοδο και της προκύπτουσας δύναμης ως έξοδο, μας δίνει τη δυνατότητα να θεωρήσουμε τον ακόλουθο βρόχο:



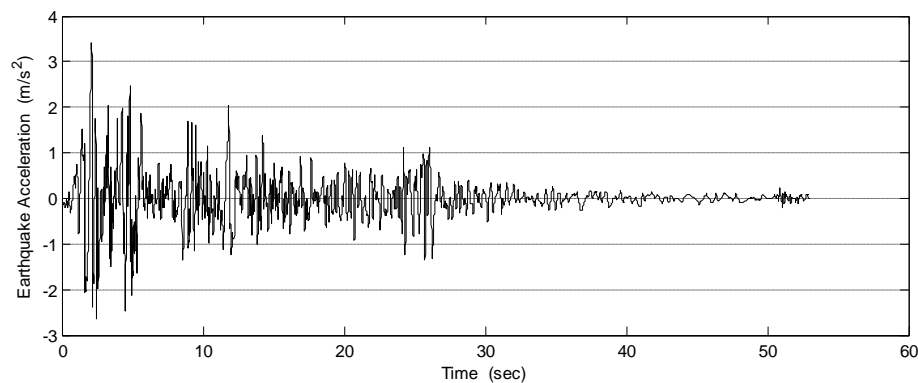
όπου $F_r(s)$ είναι η επιθυμητή δύναμη στον πρώτο όροφο που προσδιορίζεται από τον μη γραμμικό αλγόριθμο ελέγχου (Παράρτημα Α), $F(s)$ είναι η πραγματική δύναμη ελέγχου που παράγεται από τον υδραυλικό σερβομηχανισμό, $G(s)$ αντιστοιχεί στη δυναμική του υδραυλικού συστήματος, $G_c(s)$ ένας PID ελεγκτής και $D(s)$ η διαταραχή που οφείλεται στην σεισμική διέγερση και στην επίδραση του δευτέρου ορόφου στον πρώτο (Παράρτημα Γ).

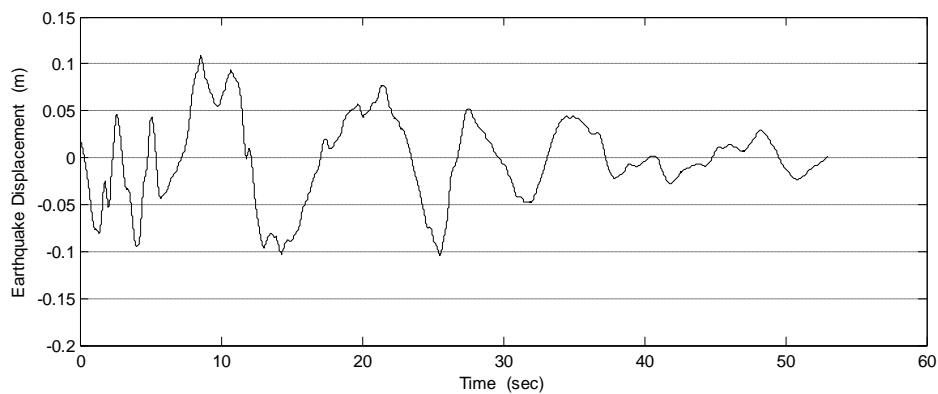
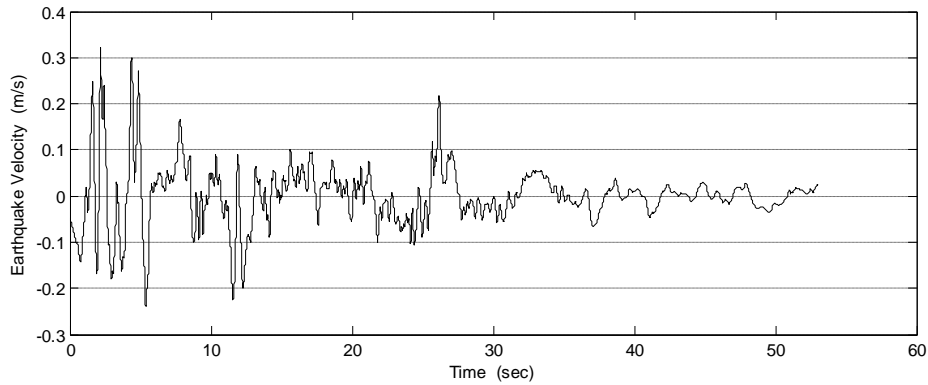
Ο σχεδιασμός του PID ελεγκτή γίνεται με τις μεθόδους Ziegler-Nichols και συνεχή εφαρμογή δοκιμής και σφάλματος. Ικανοποιητικά αποτελέσματα προκύπτουν και με χρήση PI μόνον.

Παράδειγμα 1: Θεωρούμε ένα εξαόροφο κτήριο ($N = 6$, Παράρτημα Γ) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

Floor mass (Kg)	Stiffness coefficient (N/m)	Damping coefficient (Ns/m)
$m_1 = 6800$	$k_0 = 1200 \cdot 10^3$	$c_0 = 2400$
$m_2 = 5897$	$k_1 = 33732 \cdot 10^3$	$c_1 = 67000$
$m_3 = 5897$	$k_2 = 29093 \cdot 10^3$	$c_2 = 58000$
$m_4 = 5897$	$k_3 = 28621 \cdot 10^3$	$c_3 = 57000$
$m_5 = 5897$	$k_4 = 24954 \cdot 10^3$	$c_4 = 50000$
$m_6 = 5897$	$k_5 = 19059 \cdot 10^3$	$c_5 = 38000$

Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ο σεισμός El Centro 1940 του οποίου τα χαρακτηριστικά μεγέθη της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετατόπισης φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα.



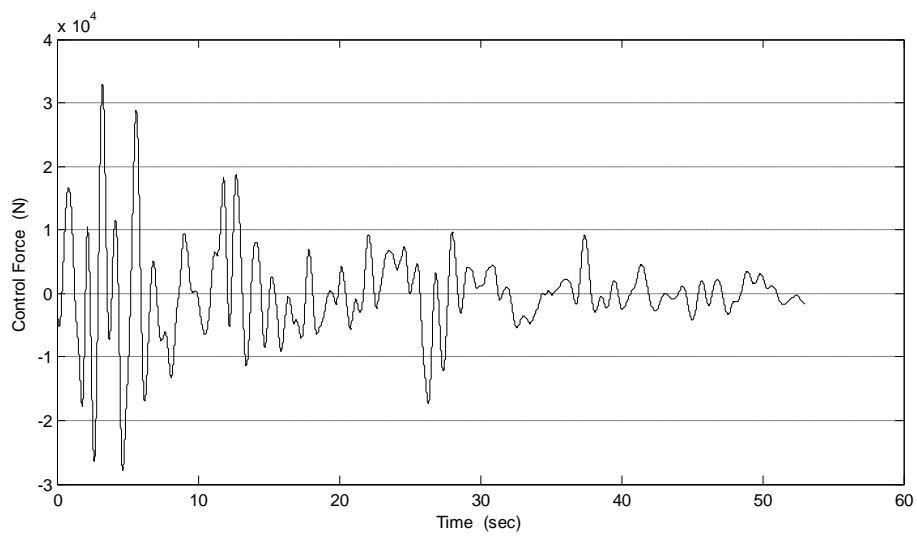
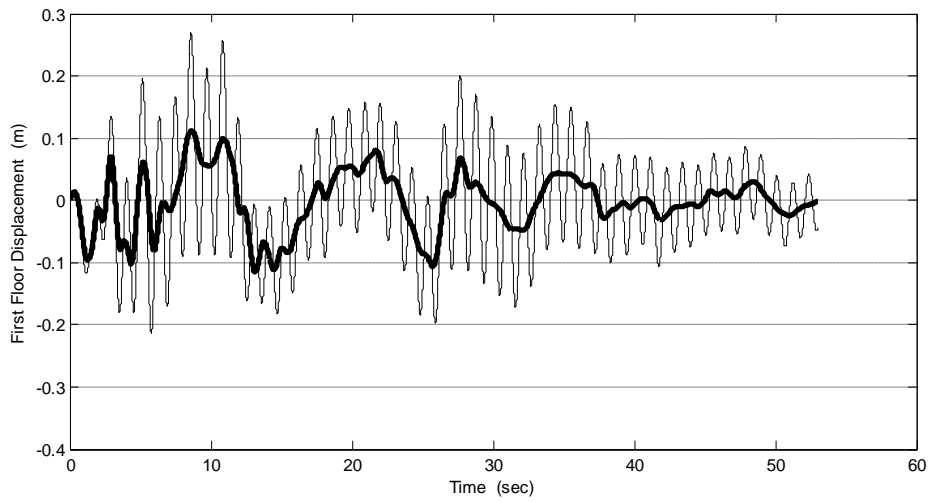
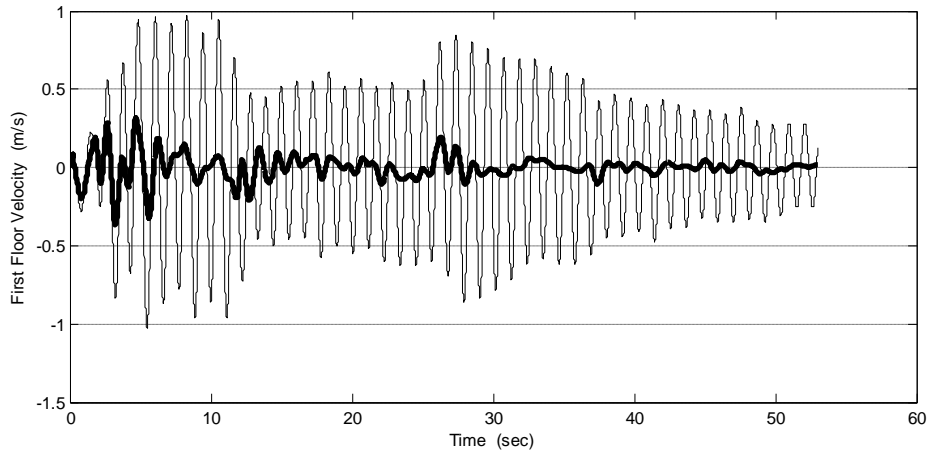


Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστικά σεισμικής δόνησης El Centro 1940(\hat{I} - διεύθυνση)

Στις παρακάτω προσομοιώσεις παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα των χαρακτηριστικών μεγεθών της απόκρισης των κτηρίων πριν και μετά την επίδραση του ελέγχου. Η πιο έντονη μαύρη γραμμή αναπαριστά τα αντίστοιχα μεγέθη μετά την επίδραση του ελεγκτή ενώ η λεπτότερη τα ίδια μεγέθη πριν τον έλεγχο.

Στην πρώτη σειρά προσομοιώσεων που ακολουθεί φαίνεται η απόκριση των μεγεθών της μετατόπισης και της ταχύτητας στη μία διεύθυνση, εκείνη κατά μήκος του φορέα του υδραυλικού επενεργητή, πριν και μετά τον έλεγχο από τον ελεγκτή του παραρτήματος Α που εφαρμόστηκε.

Οι αποκρίσεις των ορόφων είναι παρόμοιες και επομένως παραθέτουμε μόνο τα χαρακτηριστικά του πρώτου ορόφου, [65].



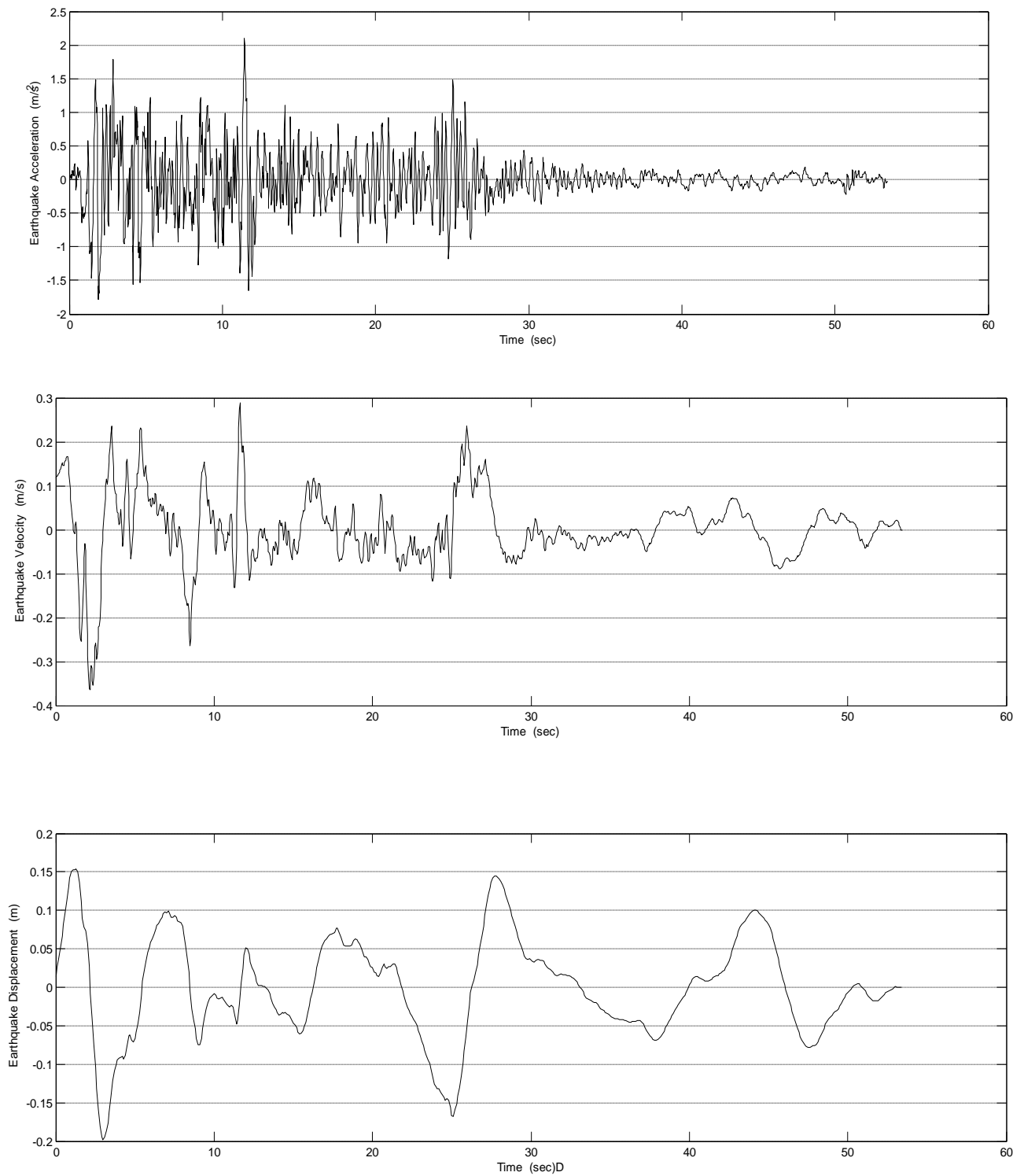
Σχήμα 4.2: Ταχύτητα, Μετατόπιση και δύναμη ελέγχου για τον πρώτο όροφο, $\varepsilon=0.001$

Παράδειγμα2:Σε αυτό το παράδειγμα επεκτείνεται ο έλεγχος από την μία οριζόντια διεύθυνση στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις και στροφή περί τον κατακόρυφο άξονα. Γίνεται χρήση των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 3 και ειδικότερα των παραγράφων 3.3.4 και 3.4.Η μεθοδολογία με τον PID ελεγκτήπου αναπτύχθηκε για το μονοδιάστατο πρόβλημα εφαρμόζεται σε κάθε έναν από τους τρειςσυνδέσμους του τριγωνικού παράλληλου μηχανισμού.

Θεωρούμε ένα τριόροφοκτήριο, $N=3$, όπου η επιφάνεια κάθε ορόφου είναι $8 \cdot 13 \text{ m}^2$. Παρακάτω παρατίθενται κατασκευαστικές παράμετροι που αφορούν τις \hat{I} και \hat{J} οριζόντιες διευθύνσεις, βλέπε παράρτημα Γ, [65] :

Floor Mass (kg)	Moment of Inertia (kg m ²)	\hat{I} -direction		\hat{J} -direction	
		Stiffness coefficient (kN/m)	Damping coefficient (kN s/m)	Stiffness coefficient (kN/m)	Damping coefficient (kN s/m)
$m_1 = 18 \cdot 10^4$	$J_1 = 3495 \cdot 10^3$	$k_{0,1}^I = 1500$	$c_{0,1}^I = 75$	$k_{0,1}^J = 1500$	$c_{0,1}^J = 75$
		$k_{0,2}^I = 1500$	$c_{0,2}^I = 75$	$k_{0,2}^J = 1500$	$c_{0,2}^J = 75$
		$k_{0,3}^I = 1500$	$c_{0,3}^I = 75$	$k_{0,3}^J = 1500$	$c_{0,3}^J = 75$
		$k_{0,4}^I = 1500$	$c_{0,4}^I = 75$	$k_{0,4}^J = 1500$	$c_{0,4}^J = 75$
$m_2 = 15 \cdot 10^4$	$J_2 = 29125 \cdot 10^2$	$k_{1,1}^I = 35556$	$c_{1,1}^I = 71$	$k_{1,1}^J = 80000$	$c_{1,1}^J = 160$
		$k_{1,2}^I = 120000$	$c_{1,2}^I = 240$	$k_{1,2}^J = 120000$	$c_{1,2}^J = 240$
		$k_{1,3}^I = 142917$	$c_{1,3}^I = 286$	$k_{1,3}^J = 59063$	$c_{1,3}^J = 118$
		$k_{1,4}^I = 142917$	$c_{1,4}^I = 286$	$k_{1,4}^J = 59063$	$c_{1,4}^J = 118$
$m_3 = 15 \cdot 10^4$	$J_3 = 29125 \cdot 10^2$	$k_{2,1}^I = 35556$	$c_{2,1}^I = 71$	$k_{2,1}^J = 80000$	$c_{2,1}^J = 160$
		$k_{2,2}^I = 120000$	$c_{2,2}^I = 240$	$k_{2,2}^J = 120000$	$c_{2,2}^J = 240$
		$k_{2,3}^I = 142917$	$c_{2,3}^I = 286$	$k_{2,3}^J = 59063$	$c_{2,3}^J = 118$
		$k_{2,4}^I = 142917$	$c_{2,4}^I = 286$	$k_{2,4}^J = 59063$	$c_{2,4}^J = 118$

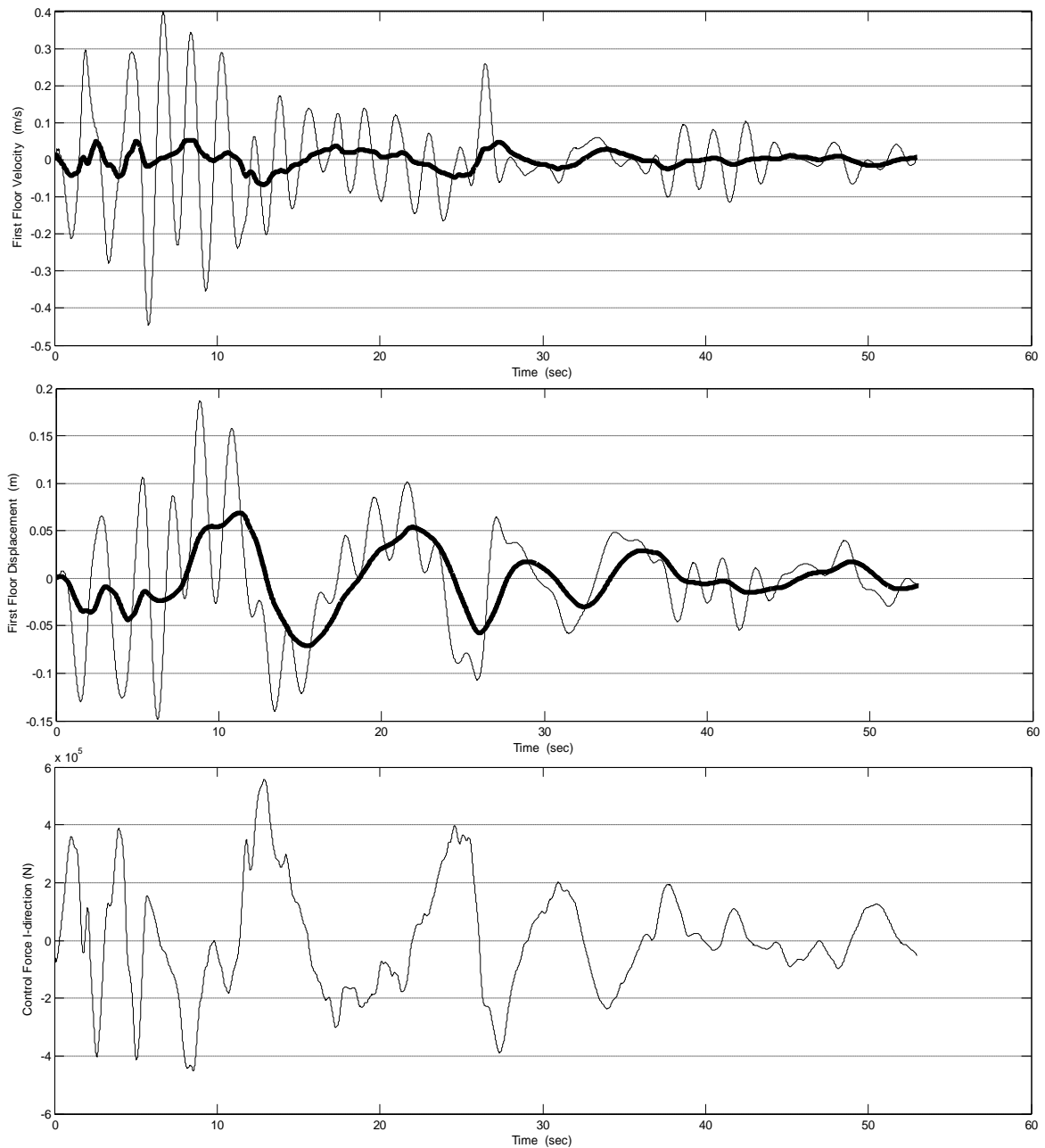
Για τη σεισμική δόνηση στο οριζόντιο επίπεδο, η \hat{I} διεύθυνση είναι όπως στο παράδειγμα 1 και δίνονται παρακάτω τα χαρακτηριστικά του σεισμού στη \hat{J} διεύθυνση.



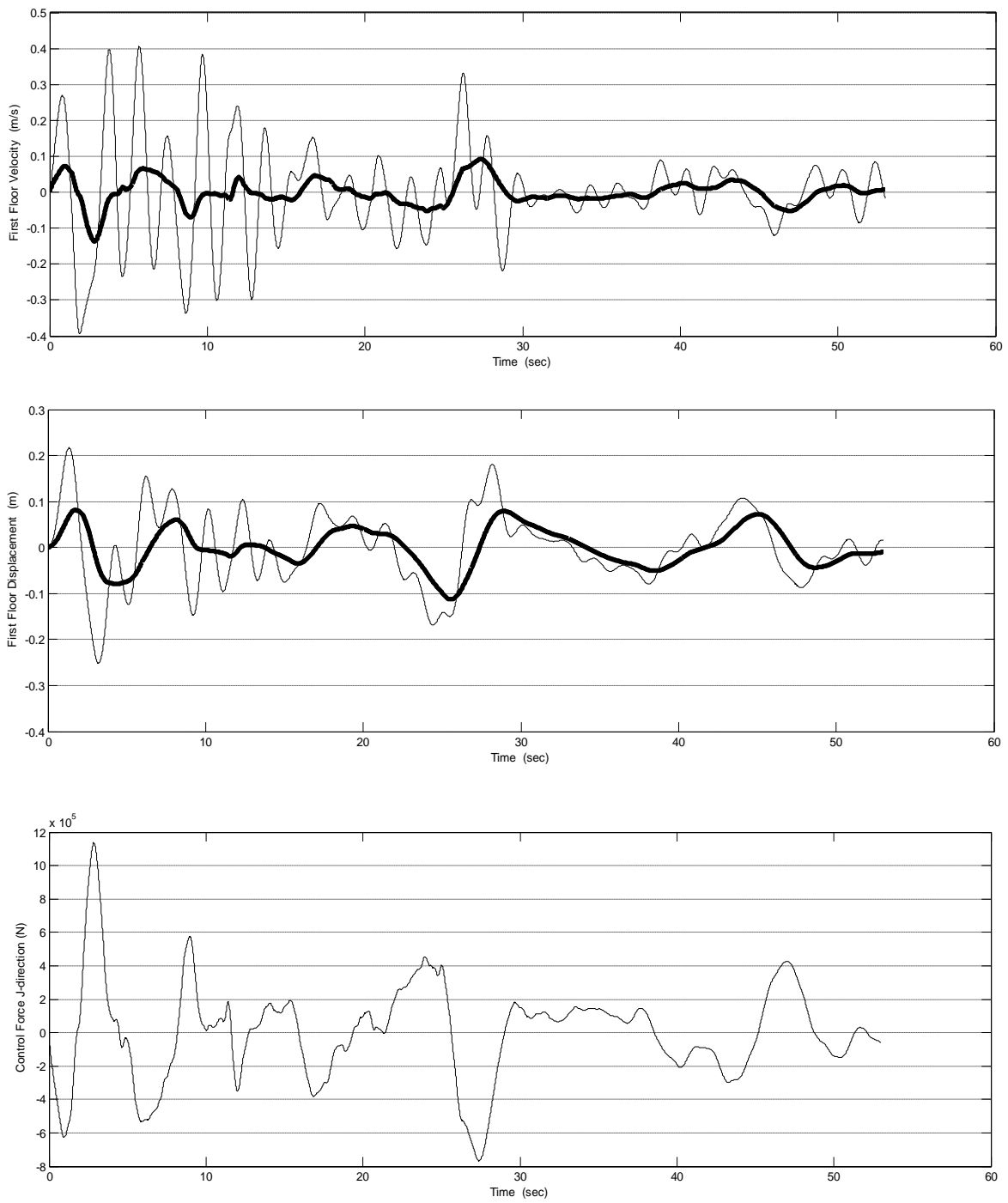
Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστικά σεισμού EL-Centro(\hat{J} - διεύθυνση)

Παρακάτω παρατίθενται αποκρίσεις του συστήματος υπό σεισμική δόνηση εφαρμοζόμενη και στις δύο διευθύνσεις

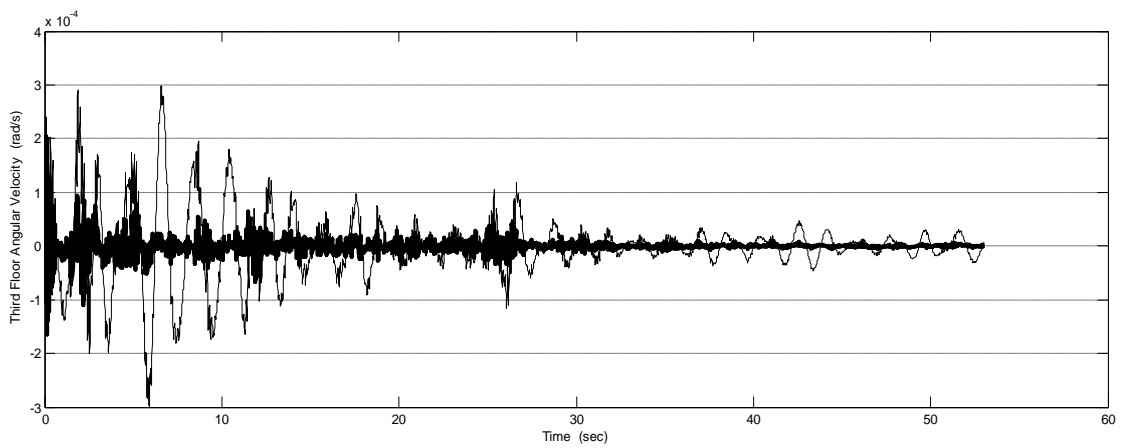
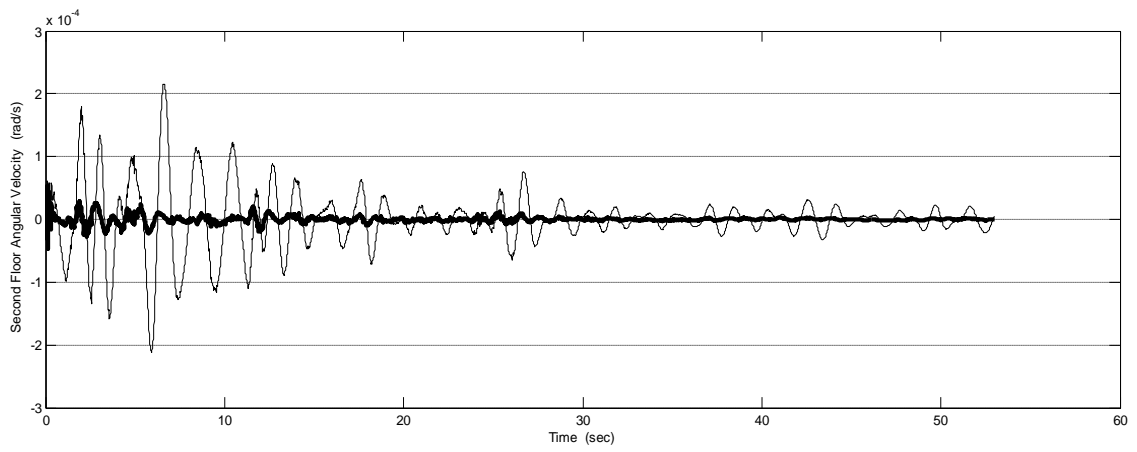
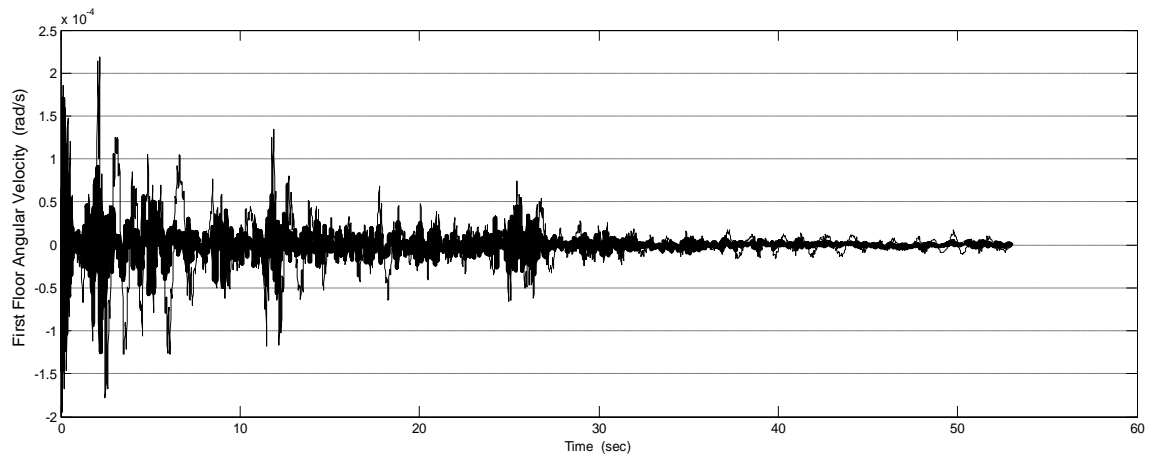
Το προς έλεγχο σύστημα πλέον είναι το τριόροφο κτήριο του οποίου τα χαρακτηριστικά εισήχθησαν στο Simulink. Ο έλεγχος του κτηρίου έγινε από τον 3 DOF RPR παράλληλο επίπεδο μηχανισμό αποτελείται από την τριγωνική πλατφόρμα και τους συνδέσμους της η οποία περιγράφηκε προηγουμένως.



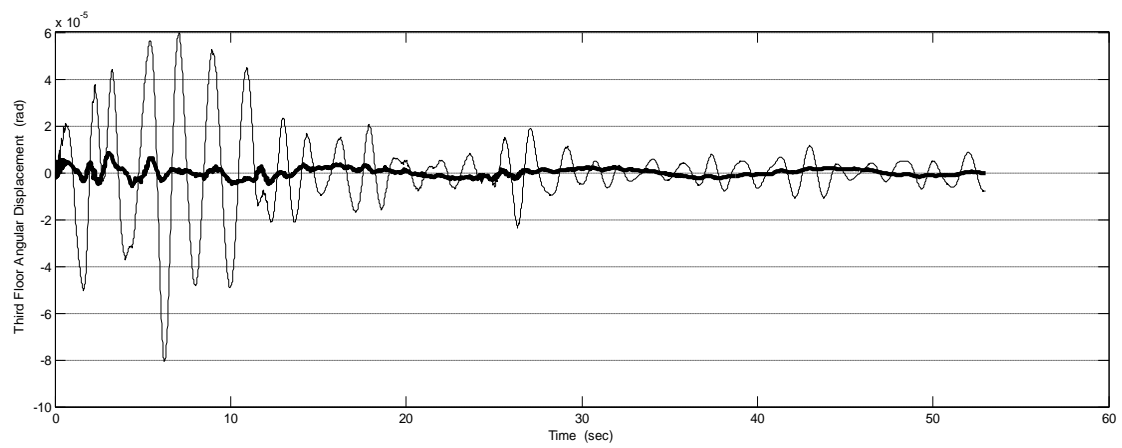
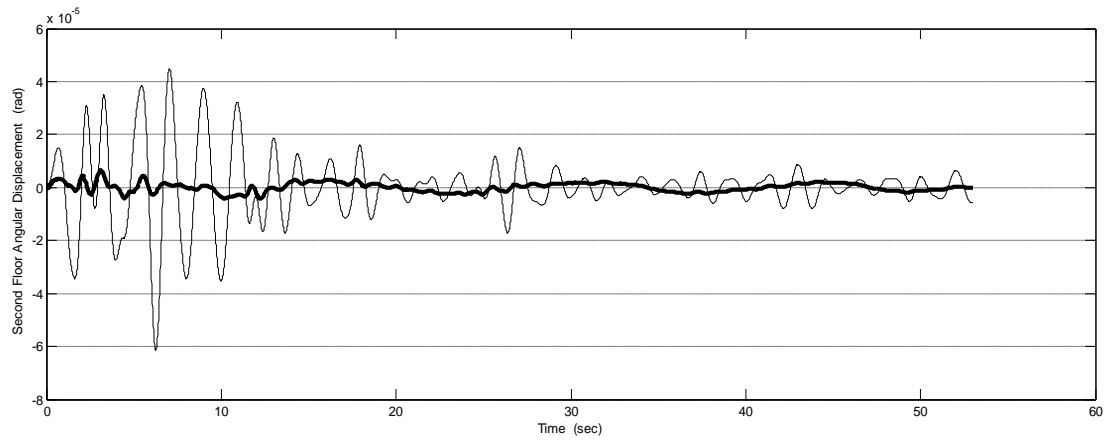
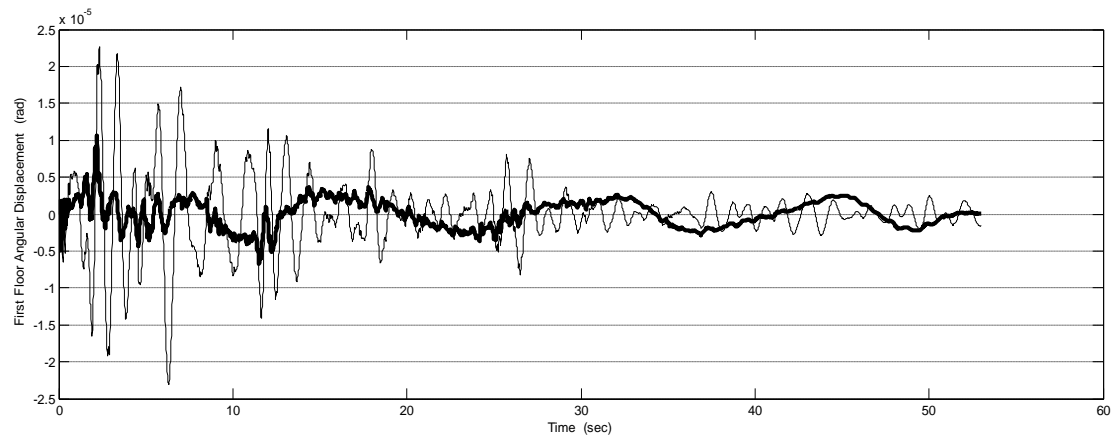
Σχήμα 4.4: Ταχύτητα, Μετατόπιση για τον πρώτο όροφο πριν και μετά τον έλεγχο και δύναμη ελέγχου στην \hat{I} διεύθυνση



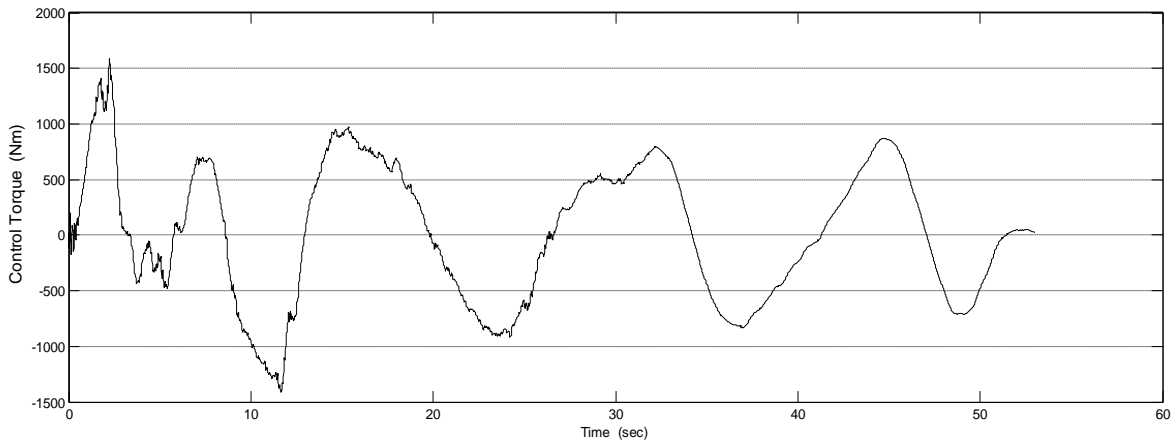
Σχήμα 4.5: Ταχύτητα, Μετατόπιση για τον πρώτο όροφο πριν και μετά τον έλεγχο και δύναμη ελέγχου στην \hat{J} διεύθυνση



Σχήμα 4.6: Γωνιακή Ταχύτητα πριν και μετά τον έλεγχο



Σχήμα 4.7: Γωνιακή Μετατόπιση πριν και μετά τον έλεγχο



Σχήμα 4.8: Παραγόμενη ροπή ελέγχου

5.Συμπεράσματα

Έπειτα από την εφαρμογή του ελεγκτή παρατηρείται σαφής βελτίωση της απόκρισης του συστήματος τόσο στις μετατοπίσεις όσο και στις ταχύτητες που εμφανίζονται λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο σύστημα εξ' αιτίας του σεισμού.

Πιο συγκεκριμένα στη x-διεύθυνση παρατηρείται ότι η μετατόπιση από 0,28 m περίπου, μειώθηκε σε 0,115m περίπου, ενώ στη διεύθυνση y από 0.18m μειώθηκε στα 0,07m. Αντιστοίχως και οι ταχύτητες που αναπτύσσονται έχουν μείωση από 0.95 m/s σε 0.25m/s στη x-διεύθυνση και από 0,41m/s σε 0,067m/s στη y-διεύθυνση.

Τέλος όσον αφορά τις γωνιακές μετατοπίσεις και ταχύτητες οι οποίες είναι ήδη πολύ μικρές ($2,25 \cdot 10^{-4}$ rad και $2,2 \cdot 10^{-4}$ rad/s) η μείωση σημειώνεται στο $1 \cdot 10^{-4}$ rad για τη μετατόπιση και κατά $0,2 \cdot 10^{-4}$ rad/s για την ταχύτητα.

Σε όλες τις περιπτώσεις των παραπάνω μεγεθών, παρατηρείται ότι μετά την εφαρμογή του ελέγχου επιτυγχάνεται εκτός της μείωσης του πλάτους των ταλαντώσεων και μείωση της συχνότητας με δυνάμεις και ροπές ελέγχου τις οποίες οι υδραυλικοί επενεργητές μπορούν εύκολα να παράξουν με βάση τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά.

Με βάση λοιπόν το συνδυασμό του ενεργού ελέγχου μέσω του υδραυλικού συστήματος που εφαρμόστηκε και του παθητικού συστήματος σεισμικής μόνωσης της κατασκευής, επιτεύχθηκε η επιθυμητή αποτελεσματική απόκριση του κτηρίου που είχε ως στόχο την σχεδόν αδιατάραχτη παραμονή του στις αρχικές συνθήκες, έπειτα από την επίδραση της σεισμικής διαταραχής.

ΠαράρτημαΑ: Εύρωστος Ελεγκτής (Robust Controller)

Ας θεωρήσουμε το παρακάτω γενικευμένο δυναμικό σύστημα:

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

$$x(t_0) = x_0 \quad (A2)$$

όπου

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

και

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

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

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:

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

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

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

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

με

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

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: $x(\cdot) : [t_0, t_1) \rightarrow R^n$, $x(t_0) = x_0$

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

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 $x(\cdot) : [t_0, \infty) \rightarrow R^n$, $x(t_0) = x_0$,

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

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

Ας θεωρήσουμε τώρα τον έλεγχο

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

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

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

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

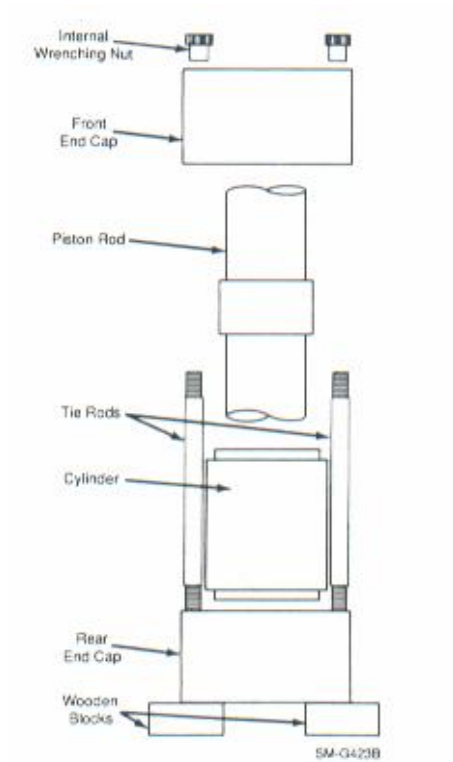
$$\rho(x) = \left[1 - \max_{s \in \mathfrak{S}} \|E(s)\| \right]^{-1} \left[\max_{r \in R} \|D(r)x\| + \max_{s \in \mathfrak{S}} \|E(s)Kx\| + \max_{v \in \mathfrak{N}} \|Fv\| \right] \quad (\text{A8})$$

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 $r(\cdot)$, $s(\cdot)$, $v(\cdot)$.

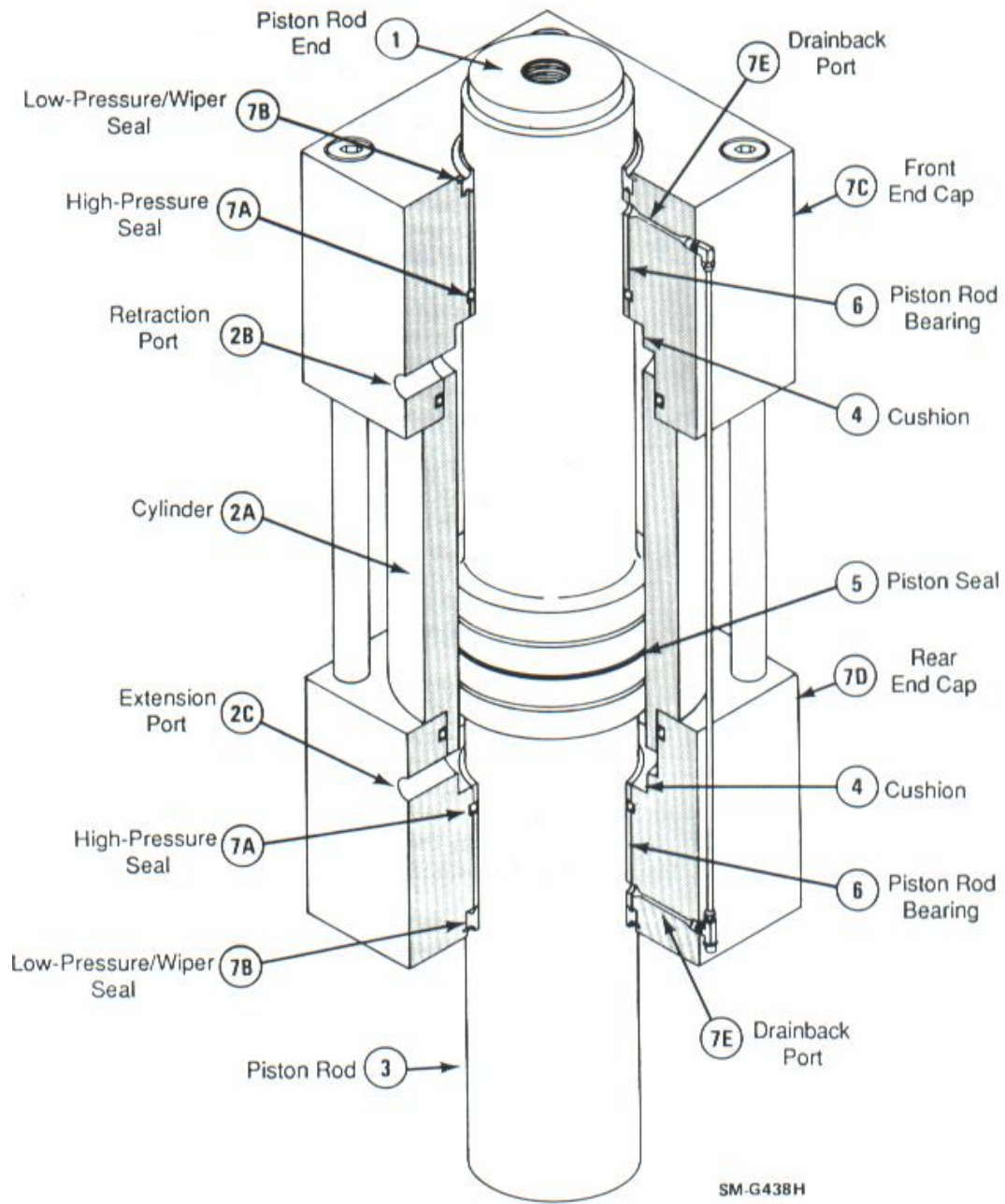
Πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι το $\delta = \delta(\varepsilon)$ και μπορεί να γίνει αυθαίρετα μικρό με κατάλληλη εκλογή του ε . Μειώνοντας δηλαδή το ε , μειώνεται η ακτίνα της φραγμένης περιοχής στην οποία θα εισέλθει τελικά το διάνυσμα κατάστασης x .

Παράρτημα Β: Υδραυλικοί Επενεργητές MTS 244 Series

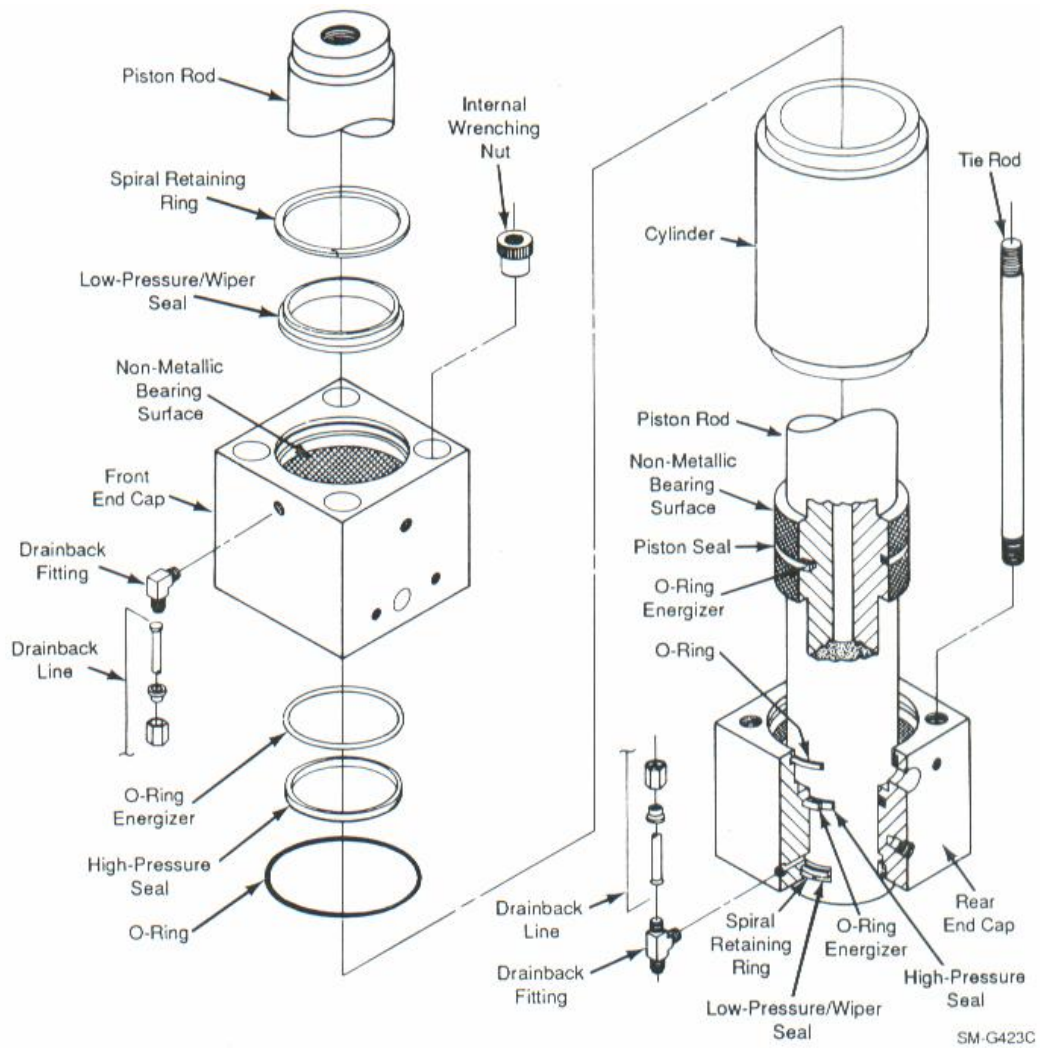
Παρακάτω παρατίθενται τα σχεδιαγράμματα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της σειράς 244 υδραυλικών επενεργητών της Αμερικάνικης εταιρίας MTS.



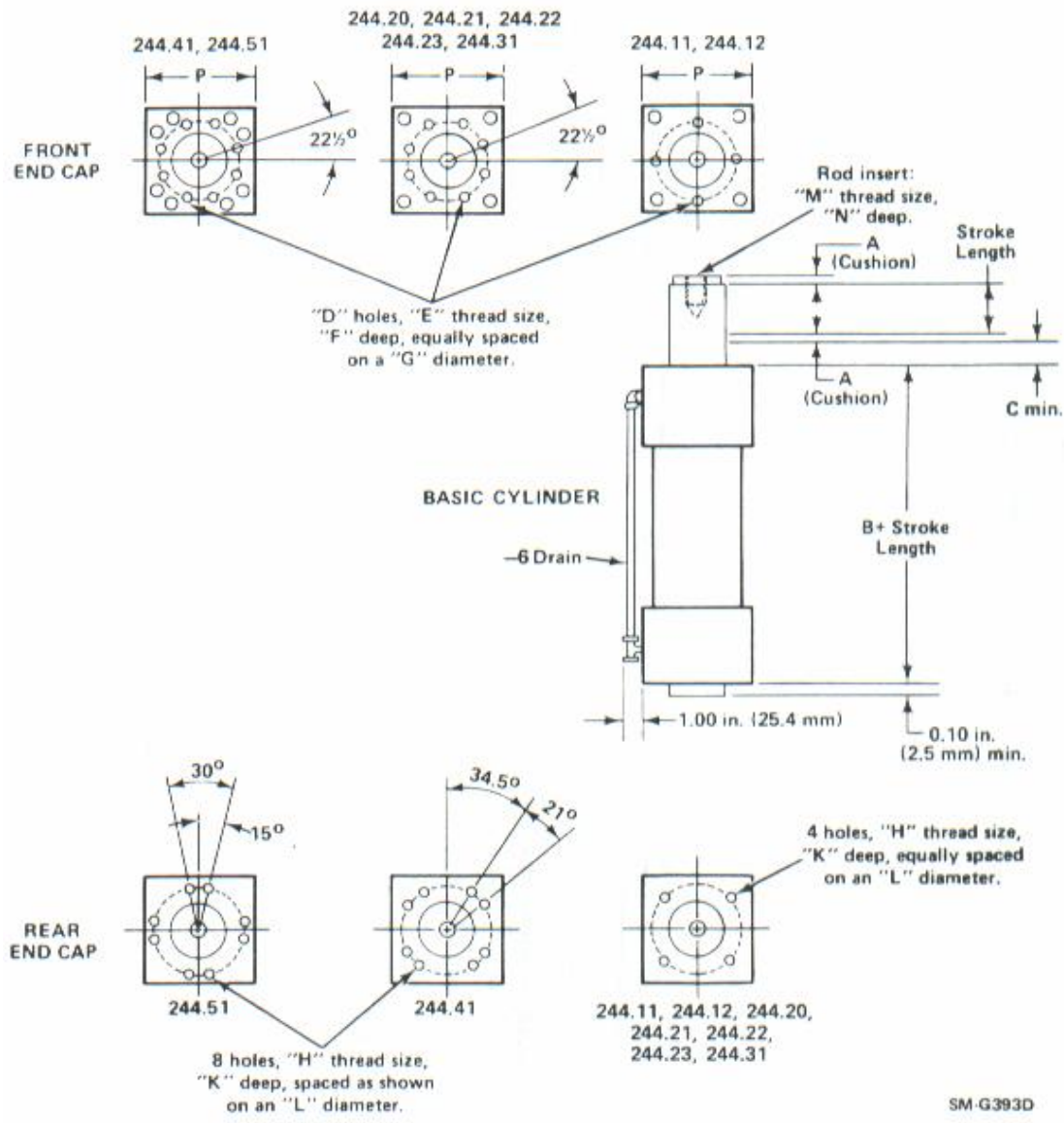
Σχήμα Β2 Σχεδιάγραμμα συναρμολογήματος επενεργητή



Σχήμα Β3 Τομή τυπικού υδραυλικού επενεργητή της σειράς 244



Σχήμα Β4 Εσωτερικό του υδραυλικού επενεργητή



Σχήμα Β5 Σχεδιάγραμμα βασικών κυλινδρικών διαστάσεων

Model	Force Rating ²		Standard Stroke Length ³		Rod Diameter		Effective Piston Area		Cushions (A)		B		C ⁴	
	kip	kN	in.	mm	in.	mm	in. ²	cm ²	in.	mm	in.	mm	in.	mm
244.11	3.3	15	6	152.4	1.75	44.5	1.17	7.50	0.60	15.2	9.38	238.3	1.00	25.4
244.12	5.5	25	6	152.4	1.75	44.5	2.10	13.50	0.60	15.2	9.38	238.3	1.00	25.4
244.21	11	50	6	152.4	2.75	69.9	3.90	25.16	0.40	10.2	9.70	246.4	1.00	25.4
244.20	15	68	6	152.4	2.75	69.9	5.22	33.68	0.40	10.2	9.70	246.4	1.00	25.4
244.22	22	100	6	152.4	2.75	69.9	7.57	48.84	0.30	7.6	9.20	233.7	1.00	25.4
244.23	35	150	6	152.4	2.75	69.9	12.73	82.13	0.25	6.4	9.20	233.7	1.00	25.4
244.31	55	250	6	152.4	3.75	95.3	19.63	126.65	0.20	5.1	10.10	256.5	1.00	25.4
244.41	110	500	6	152.4	5.25	133.4	38.48	248.28	None	None	12.27	311.6	1.12	28.4
244.51	220	1000	6	152.4	6.00	152.4	75.60	487.70	None	None	13.49	342.6	1.50	38.1

Model	D		E		F		G		H		K		L		M		N ⁵		P		
	U.S. Cust.	in.	U.S. Cust.	in.	U.S. Cust.	in.	U.S. Cust.	in.	U.S. Cust.	in.	mm	in.	mm	in.	mm	U.S. Cust.	Si Metric	in.	mm	in.	mm
244.11	4	3/8 - 16	0.75	19.1	3.20	81.3	3/8 - 16	0.75	19.1	3.50	88.9	1/2 - 20	M12 x 1.25 mm	1.75	44.5	4.00	101.6	1.75	44.5	4.00	101.6
244.12	4	3/8 - 16	0.75	19.1	3.20	81.3	3/8 - 16	0.75	19.1	3.50	88.9	1/2 - 20	M12 x 1.25 mm	1.75	44.5	4.00	101.6	1.75	44.5	4.00	101.6
244.21	8	1/2 - 13	0.75	19.1	4.10	104.1	5/8 - 11	1.00	25.4	5.00	127.0	1 - 14	M27 x 2 mm	2.25	57.2	5.00	127.0	2.25	57.2	5.00	127.0
244.20	8	1/2 - 13	0.75	19.1	4.10	104.1	5/8 - 11	1.00	25.4	5.00	127.0	1 - 14	M27 x 2 mm	2.25	57.2	5.50	139.7	2.25	57.2	5.50	139.7
244.22	8	1/2 - 13	0.75	19.1	4.10	104.1	5/8 - 11	1.00	25.4	5.00	127.0	1 - 14	M27 x 2 mm	2.25	57.2	6.00	152.4	2.25	57.2	6.00	152.4
244.23	8	1/2 - 13	0.75	19.1	4.10	104.1	5/8 - 11	1.00	25.4	5.00	127.0	1 - 14	M27 x 2 mm	2.25	57.2	6.50	165.1	2.25	57.2	6.50	165.1
244.31	8	5/8 - 11	1.00	25.4	5.50	139.7	7/8 - 9	1.50	38.1	7.53	191.3	1 1/2 - 12	M36 x 2 mm	2.75	69.9	8.50	215.9	2.75	69.9	8.50	215.9
244.41	8	1 - 8	1.75	44.5	10.37	263.4	7/8 - 9	1.50	38.1	10.00	254.0	2 - 12	M52 x 2 mm	2.75	69.9	11.75	298.5	2.75	69.9	11.75	298.5
244.51	8	1 - 8	1.75	44.5	10.37	263.4	1 - 8	1.75	44.5	11.06	280.9	3 - 12 ⁶	M76 x 2 mm ⁶	4.50 ⁶	114.3 ⁶	15.25	387.4	4.50 ⁶	114.3 ⁶	15.25	387.4

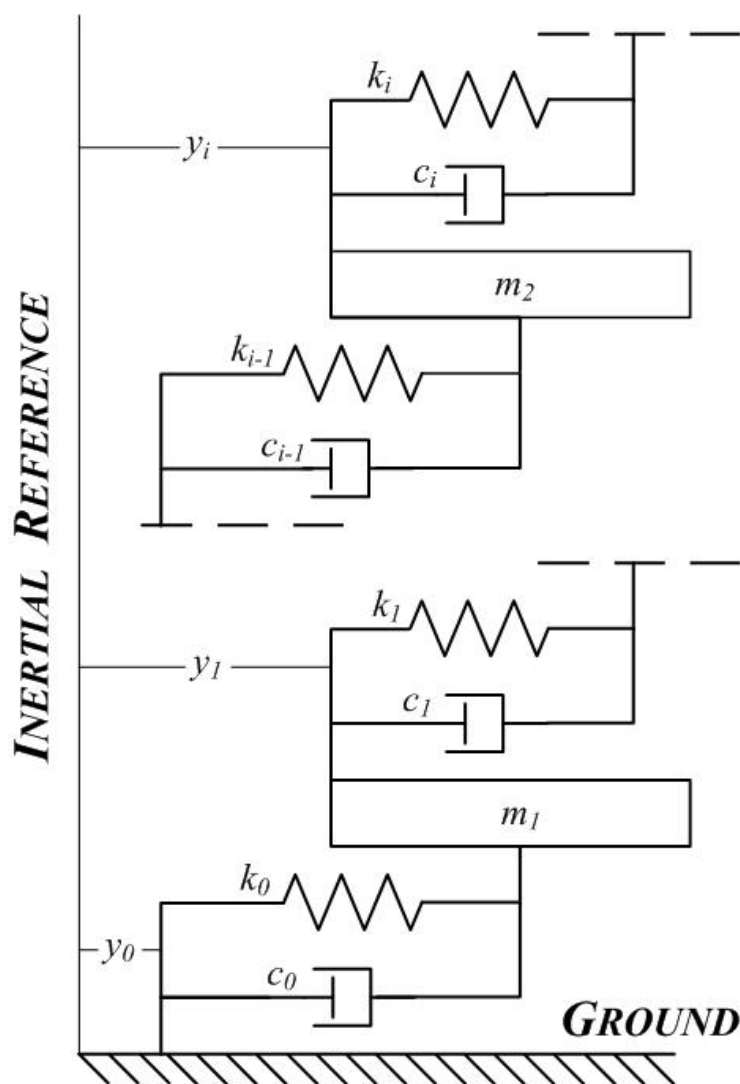
¹ Specifications in this table refer to Figure 1-3.
² Nominal force achieved with 3000 psi (21.0 MPa) hydraulic pressure.
³ Stroke length does not include actuator cushions (specification A).
⁴ This specification applies to standard length piston rod fully retracted.
⁵ Dimension is from end of piston rod to bottom of internal threads.
⁶ The 244.51 does not use a threaded rod insert.

Specifications are subject to change without notice. Contact MTS for verification of specifications critical to your needs.

Σχήμα Β6 Προδιαγραφές βασικών κωνικών διαστάσεων (αναφορικά στο σχήμα Β5)

Παράρτημα Γ: Δυναμικό Μοντέλο Κτηρίου

Εάν $y_0(t)$ είναι η μετατόπιση του εδάφους και $y_i(t)$ είναι η μετατόπιση του i^{th} ορόφου τη χρονική στιγμή t σε σχέση με ένα αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων και m_i είναι η μάζα του i^{th} ορόφου, c_{i-1} είναι ο συντελεστής απόσβεσης, k_{i-1} είναι η σταθερά ελατηρίου η οποία συνδέει τον i^{th} όροφο με τον προηγούμενό του ή τον πρώτο με το έδαφος και οι ποσότητες c_0 και k_0 αντιστοιχούν στη μονωμένη βάση,



Σχήμα Γ1: Απεικόνιση παραμετροποιημένου μοντέλου σε απόλυτες συντεταγμένες

τότε οι εξισώσεις κίνησης του κάθε ορόφου είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 &= -c_0(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - k_0(y_1 - y_0) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_1(y_2 - y_1) \\
 m_2 \ddot{y}_2 &= -c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1(y_2 - y_1) + c_2(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + k_2(y_3 - y_2) \\
 &\vdots \\
 m_i \ddot{y}_i &= -c_{i-1}(\dot{y}_i - \dot{y}_{i-1}) - k_{i-1}(y_i - y_{i-1}) + c_i(\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i) + k_i(y_{i+1} - y_i) \\
 &\vdots \\
 m_N \ddot{y}_N &= -c_{N-1}(\dot{y}_N - \dot{y}_{N-1}) - k_{N-1}(y_N - y_{N-1})
 \end{aligned} \tag{Γ1}$$

και

$$y_i(t_0) = y_i^0, \quad \dot{y}_i(t_0) = \dot{y}_i^0 \tag{Γ2}$$

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

Ωστόσο, στην περιγραφή όπου χρησιμοποιούνται απόλυτες συντεταγμένες, y_i η κίνηση του εδάφους που προκαλεί τη διαταραχή $c_0 \dot{y}_0 + k_0 y_0$ επηρεάζει μόνο τη βάση του κτηρίου (πρώτος όροφος) Αυτή η διαταραχή περιλαμβάνει τη μετατόπιση y_0 και την ταχύτητα του εδάφους \dot{y}_0

Η απεικόνιση του κτηρίου με τρεις βαθμούς ελευθερίας είναι [65]:

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 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.
2. 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.
3. B.F. Spencer Jr and Michael K. Sain *Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback*
4. 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.
5. M. Sakamoto, T. Kobori, T. Yamada, and M. Takahashi, *Practical Applications Of Active And Hybrid Response Control Systems and Their Verifications by Earthquake and Strong Wind Observations*, Proc. 1st World Conference on Structural Control, Los Angeles, CA, pp. WP2: 90-99, August 1994.
6. Seismic Engineering *Active dampers create a stir*
7. T.T. Soong and A.M. Reinhorn, An Overview of Active and Hybrid Structural Control Research in the U.S. *The Struct. Dyn. Design of Tall Buildings*, vol.2, pp.192-209, 1993.
8. 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.
9. K. Tanida, *Active Control of Bridge Towers During Erection*, Proc. 3rd Colloquium on Vib. Control of Structures, JSCE, part A, pp. 173 – 184, 1995 (in Japanese).
10. T. Kobori, *Future Direction on Research and Development of Seismic-Response-Controlled Structures*, Proc. 1st World Conference on Structural Control, Los Angeles, CA, Panel: 19-31, August 1994.
11. W. Chai and M.Q. Feng, *Seismic Performance of Hybrid Controlled Mega-Sub Buildings*, Proc. 11th World Conf. on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, June 1996.

12. 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.
13. A. Mita and M. Kaneko, *Vibration Control of Tall Buildings Utilizing Energy Transfer into Sub-Structural Systems*, Proc. 1st World Conf. on Structural Control, Los Angeles, CA, pp. TA2:31-40, August 1994.
14. 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.
15. J.M. Kelly, *Aseismic Base Isolation*, Shock and Vibration Digest, Vol.17, No.8, 1985.
16. J.M. Kelly, *Base Isolation: Linear Theory and Design*, Earthquake spectra 6, pp. 223-244, 1990.
17. T.T. Soong and M.C. Constantinou, Eds. , *Passive and Active Struct. Vibr. Control in Civil Engineering*, Springer – Verlag, Wien and New York, 1994.
18. 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.
19. 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.
20. K. Yoshida, S. Kang, and T. Kim, *LQG Control and H_∞ Control Of Vibration Isolation for Multi-Degree-Of-Freedom Systems*, proc. 1st World Conf. on Struct. Control, Los Angeles, CA, pp. TP4: 43-52, August 1994.
21. A.M. Reinhorn, T.T. Soong, and C.Y. Wen *Base-Isolated Structures with Active Control*, Proc. ASME PVP Conf., SanDiego, CA, PVP-127, pp. 413-420, 1987.
22. M. Corless and G. Leitmann, *Continous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.AC-26, pp.1139-1144, 1981.
23. S.J. Dyke, B.F. Spencer Jr., M.K. Sain, and J.D. Carlson, *Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers*, Proc. IFAC WorldCongress, SanFrancisco, CA, June 30 – July 5, 1996.

24. 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.
25. 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. 1st World Conf. on Struct. Control, Los Angeles, CA, pp. FA1:30-38, August 1994.
26. Q. Feng and M. Shinozuka, *Use of a Variable Damper for Hybrid Control of Bridge Response Under Earthquake*, Proc. U.S. National Workshop on Struct. Control Research, USC Publication No. CE-9013, 1990.
27. 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.
28. Z. Akbay and H.M. Aktan, *Intelligent Energy Dissipation Devices*, Proc. 4th U.S. National Conf. on Earthquake Engrg., vol. 3, no. 4, pp. 427-435, 1990.
29. Z. Akbay and H.M. Aktan, *Actively Regulated Friction Slip Devices*, Proc. 6th Canadian Conf. on Earthquake Engrg., pp 367-374, 1991.
30. 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.
31. W.M. Winslow, *Method and Means for Translating Electrical Impulses Into Mechanical Force*, U.S. Patent No. 2.417.850.
32. J. Rabinow, *The Magnetic Fluid Clutch*, AIEE Transactions, vol. 67, pp. 1308-1315.
33. W.M. Winslow, *Induced Fibration of Suspensions*, J. Applied Physics, vol. 20, pp. 1137-1140.
34. K.D. Weiss, T.G. Duclos, J.D. Carlson, M.J. Chrzan, and A.J. Margida, *High Strength Magneto-and Electrorheological Fluids*, Society of Automotive Engineers, SAE Paper #932451, 1993.
35. Lord Corporation, *VersaFlo Product Information Sheet*, Lord Corporation Publication #PI02-MRX-135CD, 1995.
36. 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.

37. J.D. Carlson, D.M. Catanzarite, and K.A. St. Clair, *Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices*, Proc. 5th Int. Conf. on ER Fluids, MR Fluids and Associated Technology, U. Sheffield, U.K., 1995.
38. J.D. Carlson and K.D. Weiss, *A Growing Attraction To Magnetic Fluids*, Machine Design, pp. 61-64, August 1994.
39. G.W. Housner et al., *Structural Control: Past, Present and Future*, J. Engrg. Mech., ASCE, September 1997.
40. *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.
41. J.M. Kelly, *Aseismic Base Isolation*, Shock and Vibration Digest, Vol.17, No.8, 1985.
42. J.M. Kelly, *Base Isolation: Linear Theory and Design*, Earthquake spectra 6, pp. 223-244, 1990.
43. 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.
44. A.G. Soldatos and J.A. Inaudi, *Theory and Testing of an Active Control Scheme for Seismic Protection*, under review.
45. 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.
46. T.T. Soong, *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical, Wiley, New York, 1990.
47. 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.
48. T.T. Soong and M.C. Constantinou, Eds. , *Passive and Active Struct. Vibr. Control in Civil Engineering*, Springer – Verlag, Wien and New York, 1994.
49. 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.

50. 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.
51. 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.
52. 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.
53. 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.
54. 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.
55. 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.
56. 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.
57. T.T. Soong, *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical, Wiley, New York, 1990.
58. 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.
59. R.W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1975.
60. J. Tsiniias, *The concept of exponential ISS for stochastic systems and applications to feedback stabilization*, Systems and Control Lett.1999.
61. N. Krikelis, *Eigenstructure Assignment for Descriptor Systems via State Variable Feedback*, International Journal of Systems Science, Vol.23, No.1, 1992.

62. N. Krikelis, *Constrained Regulation Design of Linear Discrete - Time Descriptor Systems*, Control Theory and Advanced Technology, Vol.8, No. 2, pp.257-268, 1992.
63. Π.Α. Μακρής, *Στοιχεία Μηχανών Ι*
64. Θ.Ν. Κωστόπουλος, *Υδραυλικά και Πνευματικά Συστήματα*
65. Argiris G. Soldatos, Themistocles M. Rassias, Panos M. Pardalos, Valery A. Kalyagin *Nonlinear Robust Stability control of Structures* (to be published)
66. Serdar Kucuk, *Kinematics, Singularity and Dexterity Analysis of Planar Parallel Manipulators Based on DH Method*
67. Ilian Alexandrov Bonev, *Geometric Analysis of Parallel Mechanisms*
68. Mohsen Hajebi Kakhi, Saeed Ebrahimi, *Study on the Effect of Axial Forces on Stiffening of a 3-RPR Planar Parallel Manipulator with Flexible Intermediate Links*
69. Anil K. Chopra, *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Third Edition
70. P. Cardou, S. Bouchard, and C. Gosselin, “Kinematic-Sensitivity Indices for Dimensionally Nonhomogeneous Jacobian Matrices,” *Transactions on Robotics IEEE*, vol. 26, no. 1, pp. 166–173, feb. 2010
71. Q. Jiang and C. Gosselin, “Geometric Synthesis of Planar 3-RPR Parallel Mechanisms for Singularity-free Workspace,” *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 667–678, 2009
72. N. Binaud, S. Caro, and P. Wenger, “Sensitivity Comparison of Planar Parallel Manipulators,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, no. 11, pp. 1477–1490, 2010.
73. Lars Westerlund. *The Extended Arm of Man – A History of the Industrial Robot*. Informationsförlaget, Stockholm, Sweden, 2000
74. Lorenzo Sciavicco and Bruno Siciliano. *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Springer Verlag, 2 edition, 2000
75. Isaac Asimov and Karen A. Frenkel. *Robots; Machines in Man’s Image*. Harmony Books, New York, USA, 1985
76. Isaac Asimov. *Runaround*. Astounding Science-Fiction, March 1942
77. .Isaac Asimov. *Robots and Empire*. Grafton Books, London, England
78. Ρομποτική Δ.Μ. Εμίρης – Δ.Ε. Κουλουριώτης

79. A. Eshaghieh, S. Ebrahimi, G. Amirian, “Dynamic characteristics of a 3RPR planar parallel manipulator with flexible intermediate links”, *Robotica*, published online 13 may 2014
80. B. Kang and J. K. Mills, “Dynamic modeling of structurally-flexible planar parallel manipulator”, *Robotica* 20, pp. 329–339, 2002
81. X. Zhang, J. K. Mills and W. L. Cleghorn, “Investigation of axial forces on dynamic properties of a flexible 3-PRR planar parallel manipulator moving with high speed”, *Robotica* 28, pp. 607–619, 2010