ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



Διδακτορική διατριβή του Νικολάου Γ. Πνευματικού

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ

ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2007

Στη Sylvia και στον Οδυσσέα

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής αυτής εργασίας, ολοκληρώνεται και ο κύκλος σπουδών μου ως Πολιτικός Μηχανικός στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Θεωρώ προσωπική ανάγκη αλλά και χρέος μου να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Χάρη Γαντέ, Αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π., όχι μόνο γιατί χάρις σε αυτόν διεκπεραιώθηκε αυτή η διατριβή, αλλά γιατί στο πρόσωπο του διδάχτηκα τον ορισμό της ολοκληρωμένης προσωπικότητας. Το ήθος, η υπομονή και η συνεργατικότητα που τον χαρακτηρίζουν αποτελούν για μένα ένα πρότυπο συμπεριφοράς. Είναι μεγάλη τιμή για μένα που υπήρξα μαθητής του. Επίσης ευχαριστώ τα υπόλοιπα δυο μέλη της τριμελούς επιτροπής μου του Καθηγητές κ. Β. Κουμούση και Ε. Παπαδόπουλο για τις οδηγίες και κατευθύνσεις που μου έδιναν για να αντιμετωπίσουμε τα προβλήματα που ανέκυπταν κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας.

Στο πρόσωπο των κ. Μ. Πολιτόπουλο, προϊστάμενου της Υπηρεσίας Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων, ΥΑΣ, ΥΠΕΧΩΔΕ και της κ. Α. Γραίκα, Τμηματάρχη, θέλω να ευχαριστώ τους συναδέλφους μου και την υπηρεσία μου για την αμέριστη στήριξη και διευκόλυνση που μου παρείχε για να ανταποκρίνομαι στις δύσκολες υποχρεώσεις της διδακτορικής διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης τους συναδέλφους μου στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών και των υπολοίπων εργαστηρίων του Δομοστατικου τομέα όπου με τις συνεχείς συζητήσεις που κάναμε προχωρούσα ένα βήμα παραπέρα στο δρόμο της διατριβής μου.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την σύντροφο μου Συλβια για την αμέριστη υπομονή, κατανόηση και στήριξη που έδειξε όλα αυτά τα χρόνια που είμαστε μαζί. Και θα ήθελα να της αφιερώσω τη διατριβή αυτή, θέλοντας να εκφράσω το σεβασμό και την αγάπη μου απέναντι της.

Νικόλαος Γ. Πνευματικός

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Τομέας Δομοστατικής Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Διδακτορική Διατριβή Νίκου Πνευματικού

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι να συμβάλει στην εξέλιξη της επιστημονικής περιοχής του ελέγχου των κατασκευών και συγκεκριμένα στη σύνθεση της φιλοσοφίας του αντισεισμικού σχεδιασμού κτιριακών κατασκευών και της θεωρίας αυτομάτου ελέγχου. Προσπαθεί δηλαδή να συνδέσει στοιχεία από αυτούς τους δυο χώρους και να προτείνει μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία ελέγχου για την αντισεισμική προστασία κτιριακών κατασκευών.

Σε αυτά τα πλαίσια διερευνώνται, τροποποιούνται, και προσαρμόζονται σε προβλήματα ελέγχου της σεισμικής απόκρισης κτιρίων, υπάρχοντες αλγόριθμοι ελέγχου που έχουν αναπτυχθεί κυρίως για μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές κατασκευές. Οι ηλεκτρομηχανολογικές κατασκευές διαφέρουν από τις κτιριακές ως προς το στατικό τους σύστημα (μηχανισμοί και υπερστατικοί φορείς αντίστοιχα) και ως προς τη 'φύση' τους (ηλεκτρικά κυκλώματα και κτίρια με πολύ μεγάλη μάζα και δυσκαμψία). Έτσι απαιτείται μια επιλογή και τροποποιήση εκείνων των αλγόριθμων, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για τον έλεγχο των κτιριακών κατασκευών. Επιπλέον, για τον έλεγχο τον Η/Μ κατασκευών η φόρτιση είναι συνήθως εκ των προτέρων γνωστή, ενώ για τις κτιριακές κατασκευές η σεισμική φόρτιση είναι άγνωστη. Επομένως, η κοινή παράμετρος όλων των προτεινόμενων αλγορίθμων είναι η σε πραγματικό χρόνο ανίχνευση των συχνοτικών χαρακτηριστικών του εισερχόμενου σεισμού, και η προσπάθεια αποφυγής του συντονισμού της κατασκευής με τη σεισμική διέγερση.

Ο πρώτος αλγόριθμος ελέγχου που διερευνάται είναι ο αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων. Ο αλγόριθμος αυτός προϋποθέτει να είναι γνωστή η επιθυμητή θέση των πόλων, δηλαδή των ιδιοτιμών, της ελεγχόμενης κατασκευής. Εάν οι διεγέρσεις που θα εφαρμοστούν στην κατασκευή και τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους (π.χ. συχνοτικό περιεχόμενο) είναι γνωστά, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τους επιθυμητούς πόλους της ελεγχόμενης κατασκευής με στόχο την αποφυγή συντονισμού. Αυτό που συμβαίνει όμως στην πράξη είναι ότι η κάθε σεισμική διέγερση που πρόκειται να επιβληθεί στην κατασκευή έχει διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά από την προηγουμένη, ενώ ακόμη και για την ίδια διέγερση τα δυναμικά χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της επιβολής της. Επομένως, δεν μπορούμε να προεπιλέξουμε τις επιθυμητές θέσεις των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής. Αυτή την αδυναμία έρχεται να καλύψει η παρούσα διατριβή, προτείνοντας μια συστηματική και αυτόματη διαδικασία για τον υπολογισμό των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής, που να βασίζεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά της εισερχομένης, κάθε φορά, δυναμικής διέγερσης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, μετασχηματίζει τόσο τη φόρτιση όσο και την κατασκευή στο μιγαδικό επίπεδο, όπου, με βάση συγκεκριμένους κανόνες, υπολογίζονται οι πόλοι της ελεγχόμενης κατασκευής, για κάθε διαδοχικό τμήμα της σεισμικής διέγερσης. Το σήμα που διεγείρει την κατασκευή μετράται συνεχώς, με τη βοήθεια αισθητήρων και αναγνωρίζονται τα δυναμικά του χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά και την προτεινομένη

μεθοδολογία, υπολογίζουμε τους επιθυμητούς πόλους της ελεγχόμενης κατασκευής. Με στόχο την επίτευξη αυτών των πόλων και με χρήση του αλγορίθμου τοποθέτησης πόλων υπολογίζουμε το μητρώο ανάδρασης και με αυτό τις ισοδύναμες δυνάμεις ελέγχου που πρέπει να ασκηθούν από τις συσκευές ελέγχου οι οποίες είναι εγκατεστημένες στην κατασκευή.

Στη συνέχεια μελετήθηκε ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης, σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζεται αρχικά η επιθυμητή επιφάνεια ολίσθησης, δηλαδή μια επιφάνεια στο χώρο κατάστασης, επί της οποίας αν βρεθεί ένα σημείο της τροχιάς του συστήματος (ταχύτητα και επιτάχυνση) θα οδηγηθεί στο σημείο ισορροπίας και το σύστημα θα είναι ευσταθές. Στη συνέχεια υπολογίζεται η δύναμη ελέγχου, ώστε να οδηγήσει την τροχιά πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης. Στην παρούσα διατριβή, εφαρμόστηκε και για την εύρεση της επιθυμητής επιφάνειας ολίσθησης, η προτεινομένη διαδικασία για τον υπολογισμό των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής, ενώ η δύναμη ελέγχου υπολογίστηκε από τη θεωρία ευστάθειας κατά Lyapunov.

Επιπλέον, στη διατριβή προτείνεται ένας αλγόριθμος ελέγχου για συστήματα μεταβλητής δυσκαμψίας. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ρυθμίζει τη λειτουργία των συσκευών μεταβλητής δυσκαμψίας που τοποθετούνται στην κατασκευή. Οι συσκευές μεταβλητής δυσκαμψίας, μέσω του ελέγχου της βαλβίδας τους, επιτρέπουν τη σύνδεση ή όχι των μεταλλικών διαγώνιων στοιχείων με το φέροντα οργανισμό, μεταβάλλοντας έτσι τη δυσκαμψία της κατασκευής, και κατ' επέκταση τα δυναμικά της χαρακτηριστικά. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος στηρίζεται επίσης στα χαρακτηριστικά της εισερχόμενης διέγερσης. Δηλαδή, καταγράφεται το εισερχόμενο σήμα σε πραγματικό χρόνο, αναλύεται και βρίσκεται το συχνοτικό του περιεχόμενο και, με βάση τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, λαμβάνεται η απόφαση για το άνοιγμα ή κλείσιμο των βαλβίδων, με στόχο την αποφυγή συντονισμού και τη μείωση της απόκρισης της κατασκευής.

Για καθέναν από τους παραπάνω αλγόριθμους τεκμηριώθηκε η προτεινόμενη διαδικασία ελέγχου με μια σειρά αναλύσεων μονοβάθμιων και πολυβάθμιων συστημάτων. Οι προσομοιώσεις έγιναν για ένα ευρύ φάσμα δυναμικών φορτίσεων, σεισμικών διεγέρσεων, απλών και σύνθετων αρμονικών σημάτων και παλμών. Από τα αποτελέσματα προέκυψε η αποτελεσματικότητα, σε όρους απόκρισης της κατασκευής (μετακίνησης και επιτάχυνσης), των προτεινόμενων στρατηγικών ελέγχου, χωρίς υψηλά επίπεδα απαιτούμενων, ισοδύναμων, δυνάμεων ελέγχου.

Ακόμη, διερευνήθηκαν πρακτικά θέματα που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν οι θέσεις των συσκευών ελέγχου που είναι τοποθετημένες στην κατασκευή. Η επιλογή των θέσεων των συσκευών ελέγχου είναι ένα θέμα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, και διερευνήθηκε μέσω παραμετρικής αλλαγής του μητρώου θέσης των δυνάμεων ελέγχου στην εξίσωση που περιγράφει τη συμπεριφορά της ελεγχόμενης κατασκευής. Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκε η θεωρητική αρχή, ότι όταν έχουμε τόσες θέσεις ελέγχου όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος, τότε έχουμε πλήρη έλεγχο του συστήματος, και η κατασκευή θεωρητικά συμπεριφέρεται σαν στερεό σώμα, χωρίς σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων. Επίσης διαπιστώθηκε ότι με μειωμένο αριθμό συσκευών ελέγχου, που είναι η συνήθης περίπτωση στις κατασκευές, μπορούμε να πετύχουμε επαρκή μείωση της απόκρισης.

Επιπλέον πρακτικά θέματα, λόγω των τεχνολογικών αδυναμιών των συσκευών, που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων αλγορίθμων, είναι η χρονική καθυστέρηση και ο κορεσμός της δύναμης ελέγχου. Οι παράμετροι αυτές ελήφθησαν υπόψη, περιγράφοντας τις εξισώσεις κίνησης της ελεγχόμενης κατασκευής ως διαφορικές εξισώσεις με χρονική καθυστέρηση, όπου για την περιγραφή της δύναμης ελέγχου χρησιμοποιείται η συνάρτηση κορεσμού, και στη συνέχεια πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, επιβεβαιώθηκε η δυσμενής επιρροή που έχουν στον έλεγχο οι παραπάνω παράγοντες, αλλά και η αναγκαιότητα να λαμβάνονται υπόψη στις αριθμητικές αναλύσεις ελέγχου πριν από την εγκατάσταση του συστήματος ελέγχου στην κατασκευή.

National Technical University of Athens School of Civil Engineering Department of Structural Engineering Metal Structures Laboratory



STRUCTURAL CONTROL DESIGN OF STEEL STRUCTURES

Doctoral dissertation thesis of Nikos Pnevmatikos Supervisor: Charis Gantes, Associate Professor

Abstract

The purpose of this thesis is to contribute to the scientific area of structural control, and more specifically, to the combination of earthquake engineering and control theory. It is attempted to bring together these two scientific areas, and to make appropriate modifications, where needed, in order to have an integrated control procedure suitable to control civil structures.

Existing control algorithms, which were developed from researchers in other fields, like electrical or mechanical engineering, are investigated. The electrical and mechanical devices are different from buildings as far as the static behavior is concerned. The first, in most cases, are mechanisms, while the second ones are constructions with a high degree of redundancy. Thus, there is a need of selecting, and then modifying, algorithms that are suitable for the control of buildings. Also, in the control of electromechanical devices, the loading is known a priory, while for buildings the earthquake loading is unknown. Thus, a common feature of all control strategies that are proposed in this thesis, is that they are based on the on-line monitoring of the incoming earthquake signal, recognizing its dynamic characteristics, and modifying the corresponding dynamic characteristics of the building, in an attempt to avoid resonance between the structure and the loading.

The pole placement algorithm is the first algorithm that is investigated. This algorithm assumes that the desired poles (eigenvalues) of the controlled structure are a priori known. If the loading and its dynamic characteristics is known in advance, then we can apply the pole placement algorithm with predefined constant poles, in order to avoid the resonance. This is not the case in the control of structures subjected to earthquakes. The frequency content changes from one earthquake to the other, or even within the duration of the same earthquake. Therefore, we are not able to apply the pole assignment algorithm with predefined constant poles. This shortcoming is addressed by the present thesis, by proposing a systematic, adaptive procedure for the calculation of the desired poles of the controlled structure. This procedure is based on the dynamic characteristics of the incoming earthquake signal. The signal is measured on-line by sensors, and its frequency content is recognized by FFT or wavelet analysis. The proposed methodology transforms each consecutive part of this signal, as well as the structure, to the complex plane and, depending on their relative positions, and following specific rules, the desired poles of the controlled structure are calculated and adjusted during the earthquake. According to those poles, and using the pole placement algorithm, the

feedback matrix is estimated, and then the equivalent forces that should be applied to the structure by the control devices, which are installed on the building, are calculated.

The sliding mode control algorithm is also investigated. In the sliding mode control algorithm the sliding surface, which is a surface on which an orbit of the phase state remains while moving towards the equilibrium point, is firstly calculated, followed then by the calculation of the control forces. In the present thesis, the proposed procedure of the calculation of the desired poles is also applied for the estimation of the sliding surface, while the control forces are obtained based on Lyapunov stability theory.

Furthermore, a new control algorithm for active variable stiffness systems is proposed. The proposed algorithm controls the function of the active variable stiffness devices that are located into the structure. These devices are equipped with a valve, which activates or deactivates the connection between braces and beams, thus changing the dynamic characteristics of the building. The proposed algorithm is also based on the frequency content of the incoming earthquake signal. The dynamic control procedure consists of monitoring the signal, calculating its frequency content, and deciding whether to open or close the valves, in order to avoid resonance and to reduce the response of structure.

The verification of the above control algorithms has been carried out by means of numerical simulations. Dynamic control analysis for single and multi degree of freedom systems subjected to sinusoidal, earthquake and pulse loading were performed. From the numerical results it is shown that the above algorithms are efficient in reducing the response (displacements and accelarations) of building structures.

Furthermore, practical issues that influence the effectiveness and the reliability of the proposed control algorithms are investigated. First, the effect of the position of the control forces is examined. Selecting the position of the control forces, which is an issue of optimizing the design process, is investigated by parametric variation of the location matrix of the control force in the equation that describes the controlled structure. The simulation results confirm the already known principle of controllability, that if the number of control positions is equal to the number of degrees of freedom of the structure, then full control of the system is achieved. In that case, the building then performs a rigid body motion, following the imposed ground motion, without relative displacements between the floors. It was also shown that with reduced number of control forces, positioned at appropriate locations, which is a more realistic choice for real buildings, the response can be reduced at a satisfactory level.

Finally, two more practical issues that influence the effectiveness and the reliability of the proposed control algorithms, namely time delay and saturation of the control force, have been also investigated. Those parameters come into consideration, by solving the differential equation of motion as a delay differential equation with saturation effects. The expected negative influence of those parameters is verified. Thus, there is a need to take them into account in the numerical simulations before the installation of the control system on the real building.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	l
1.1 Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών	2
1.2 Θεωρία ελέγχου: Ιστορική αναδρομή, βασικές αρχές)
1.3 Έλεγχος στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού1	8
2. ΣΤΟΧΟΣ, ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	7
2.1 Στόχος της διατριβής3	7
2.2 Περιεχόμενα διατριβής4	2
3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΟΛΩΝ-ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΟΛΩΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ4	5
3.1 Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων4	5
3.1.1 Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων όταν η τάξη του συστήματος είναι μικρή	
και έχουμε μία δύναμη ελέγχου5	4
3.1.2 Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων με τη μέθοδο Ackermans5	5
3.1.3 Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων όταν τάξη του συστήματος είναι μεγάλη	
και έχουμε μία δύναμη ελέγχου5	7
3.2 Τρόποι επιλογής τοποθέτησης πόλων του ελεγχόμενου συστήματος5)
3.3 Λογισμικό για τον έλεγχο των κατασκευών με συστήματα ελέγχου, (Δυναμικ	ή
ανάλυση ελέγχου, Dynamic Control Analysis, DCA)77	
3.4 Παραδείγματα και αριθμητικές εφαρμογές8	4
3.4.1 Μονώροφο κτήριο8	5
3.4.2 Τριώροφο κτήριο10	1
3.4.3 Οκταώροφο κτήριο11	8

Ι

3.5 По	ραμετρική διερεύνηση της χρονικής καθυστέρησης ta και του κορεσμού της
δύν	αμης ελέγχου152
3.5.1	Επιρροή της χρονικής καθυστέρησης152
3.5.2	Επιρροή του κορεσμού της δύναμης ελέγχου157
3.5.3	Αλληλεπίδραση της χρονικής καθυστέρησης και του κορεσμού της δύναμης
	ελέγχου160
3.6 Συ	μπεράσματα162
4. АЛГО	ΡΙΘΜΟΣ ΜΟΡΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ162
4.1 Θε	ωρητικό υπόβαθρο αλγορίθμου μορφής ολίσθησης162
4.1.1	Σχεδιασμός επιφανείας ολίσθησης164
4.1.2	Σχεδιασμός ελεγκτή (δύναμης ελέγχου)165
4.2 Πρ	οτεινόμενη επιλογή επιφάνειας ολίσθησης με βάση το συχνοτικό
πε	οιεχόμενο του σεισμού169
4.3 По	ραδείγματα και αριθμητικές εφαρμογές172
4.3.1	Μονώροφο κτήριο176
4.3.2	Τριώροφο κτήριο190
4.3.3	Οκταώροφο κτήριο205
4.4 Συ	μπεράσματα237
5. АЛГО	ΡΙΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ241
5.1 Έλ	εγχος μεταβλητής δυσκαμψίας241
5.2 Пр	οτεινόμενος αλγόριθμος μεταβλητής δυσκαμψίας
5.2.1	Στάδιο σχεδιασμού243
5.2.2	Στάδιο λειτουργίας248
5.3 По	ραδείγματα και αριθμητικές εφαρμογές253
5.3.1	Μονώροφο κτήριο254

5.3.2 Τριώροφο κτήριο	
5.3.3 Οκταώροφο κτήριο	276
5.4 Συμπεράσματα	292
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	294
6.1 Συμπεράσματα	294
6.2 Πρωτότυπη συμβολή της διατριβής	298
6.3 Προτάσεις για περεταίρω διερεύνηση	299
7. ПАРАРТНМА А	
7.1 Μοντέλα προσομοίωσης	
8. ПАРАРТНМА В	
8.1 Δυναμικές διεγέρσεις	
9. ВІВЛІОГРАФІА	

ΣΥΜΒΟΛΑ

- ε: Σεισμικός συντελεστής παλιότερων κανονισμών
- ΝΕΑΚ: Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός
- ΕΑΚ: Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός
- *R_d(T)*: Σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού
- Α: Αναμενόμενη επιτάχυνση εδάφους
- q: Συντελεστής συμπεριφοράς
- γι: Συντελεστής σπουδαιότητας
- θ: Συντελεστής θεμελίωσης
- Π: Τελεστής του συστήματος
- y(t): Εξοδος του συστήματος
- α(t): Είσοδος του συστήματος
- $y_{des}(t)$: Επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος
- T_1 : Αντισταθμιστής ή ρυθμιστής ή ελεγκτής.
- $T_2(t)$: Διαταραχές του συστήματος
- U :μετακίνηση
- F: δύναμη ελέγχου
- t_d: Χρονική καθυστέρηση
- Μ : Μητρώο μάζας
- C: Μητρώο απόσβεσης

Κ: Μητρώο δυσκαμψίας

- Ρ Μητρώο των μόνιμων φορτίων στην κατασκευή
- $\mathbf{F}_{allowable}$. : Μέγιστη δυνατή δύναμη συσκευής ελέγχου
- Ε: Μητρώο θέσης σεισμού
- \mathbf{E}_{f} : Μητρώο θέσης δύναμης ελέγχου
- Χ: Μητρώο κατάστασης του συστήματος
- Α: Μητρώο συστήματος
- \mathbf{B}_{f} : Μητρώο θέσης δύναμης ελέγχου στο χώρο κατάστασης
- Υ: Μητρώο μεταβλητών εξόδου
- **C:** Μητρώο εξόδου
- **D:** Μητρώο μεταβίβασης
- $\mathbf{B}_{\mathbf{g}}$: Μητρώο θέσης εξωτερικής διέγερσης στο χώρο κατάστασης
- **V:** Μητρώο θορύβου
- Τι: Ιδιοπερίοδοι
- f_i : Idiosucuóthtes
- ω: Κυκλικές ιδιοσυχνότητες
- Φ_i : Ιδιομορφές
- ζι: Συντελεστές απόσβεσης
- **K**_f.: Μητρώο ανάδρασης
- K_{fl}: Υπομητρώο του μητρώου ανάδρασης συσχετισμένο με της μετακινήσεις

 K_{f2} : Υπομητρώο του μητρώου ανάδρασης συσχετισμένο με της ταχύτητες

- λι: Ιδιοτιμές ή πόλοι του αρχικού συστήματος
- λ_{ci}: Ιδιοτιμές ή πόλοι του ελεγχόμενου συστήματος
- Τ: Μητρώο μετασχηματισμού
- $\hat{\mathbf{X}}$: Метабх
ηματισμένο μητρώο κατάστασης του συστήματος
- $\hat{\mathbf{A}}$: Μετασχηματισμένο μητρώο συστήματος
- $\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{f}}$: Μετασχηματισμένο μητρώο θέσης δύναμης ελέγχου
- $\hat{\mathbf{K}}_{\mathrm{f}}$: Μετασχηματισμένο μητρώο ανάδρασης
- S: Μητρώο ελεγξιμότητας
- $\phi(\lambda)$: Χαρακτηριστικό πολυώνυμο
- W: Μητρώο μετασχηματισμού κανονικής μορφής
- a; Συντελεστές χαρακτηριστικού πολυωνύμου του συστήματος
- af: Εύρος του παράθυρου των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού
- f_L : Μικρότερη συχνότητα του παραθύρου a_f
- f_h : Μεγαλύτερη συχνότητα του παραθύρου a_f
- s: Εύρος 'κοιλάδας' του φάσματος του σεισμού
- a_p : Ποσοστό μείωσης επί τη μέγιστη τιμή του φάσματος του σήματος
- $\omega_{s,i}$: Εύρος της ζώνης της μη ασφαλούς περιοχής
- ζ_c : Ισοδύναμο ποσοστό απόσβεσης ελεγχόμενου συστήματος
- I_p : Ποσοστό συμμετοχής επιλεγμένων συχνοτήτων στη συνολική ισχύ του σήματος.

u_{o,max}.: Μέγιστη απόκριση κατά το συντονισμό με αρμονική διέγερση

umax.: Μέγιστη απόκριση μονοβαθμίου συστήματος κάθε θέση του πόλου εκτός συντονισμού

ω_{min} : Ελάχιστη απόσταση από την αρχή των αξόνων, μέσα στην οποία δεν θα πρέπει να τοποθετηθούν οι πόλοι.

x: Ο λόγος $(u_{max}/u_{o,max})$ της επιθυμητής απόκρισης προς την απόκριση συντονισμού

 $u_{o,R',max}$: H mégisth timú th
ς apókrishz sto shmeío R'

 x_d : Ο λόγος $(u_{max}/u_{o,R',max})$

 F_{max} : Μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου για μετακίνηση του πόλου σε μια θέση

 $F_{max,o}$: Μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου για μετακίνηση του πόλου στη χειρότερη θέση

 n_i : Νέες τιμές των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής

DCA : Dynamic Control Analysis

 U_d : Επιθυμητή απόκριση

s: Χρονικά μεταβαλλόμενη επιφάνεια ολίσθησης

λ: Συμμετρικό θετικά ορισμένο μητρώο

Ps: Μητρώο καθορισμού της επιφάνειας ολίσθησης

V: Συναρτηση Lyapunov

δ: Μητρώο περιθωρίου ολίσθησης.

 δ_g : Ένα άνω όριο της διαταραχής

 \mathbf{K}^{I} : Μητρώο δυσκαμψίας κατασκευής χωρίς τα διαγώνια στοιχεία (τύπος I)

Κ^{II}: Μητρώο δυσκαμψίας κατασκευής με τα διαγώνια στοιχεία να συμμετέχουν (τύπος II)

 $f_i^{\rm I}$: Ιδιοσυχνότητα τύπου Ι

- Τ_i^I: Ιδιοπεριόδος τύπου Ι
- $T^{\rm II}_i$: Ιδιοπεριόδος τύπου ΙΙ
- b_f : Διαφορά της τελευταίας από την πρώτη ιδιοσυχνότητα του τύπου I
- c_f : Διαφορά της τελευταίας από την πρώτη ιδιοσυχνότητα του τύπου Π

 $a_{f,quake}$: Το εύρος του παράθυρου των σημαντικών συχνοτήτων του συγκεκριμένου σεισμού

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1. Αρχαίο σύστημα αυτομάτου ελέγχου, ο ρυθμιστής του Ήρωνος του Αλεξανδρέως11
Σχήμα 1.2 Το σύστημα, η διέγερση και η απόκριση του15
Σχήμα 1.3 Ανοιχτό σύστημα αυτομάτου ελέγχου με διαταραχές16
Σχήμα 1.4 Κλειστό σύστημα αυτομάτου ελέγχου με διαταραχές16
Σχήμα 1.5. Συστήματα ανοιχτού ελέγχου στις κατασκευές, (α) παραδοσιακή προσέγγιση συμβατικής κατασκευής και (β) προσέγγιση με συστήματα παθητικού ελέγχου22
Σχήμα 1.6. Σχηματική περιγραφή κατασκευής με κλειστό σύστημα ελέγχου
Σχήμα 1.7. Συσκευές ενεργού ελέγχου: (α) αποσβεστήρας ενεργής μάζας, (β) αποσβεστήρας ενεργού υγρού. Συσκευές ημι-ενεργού ελέγχου: (γ) αποσβεστήρας ελεγχόμενης ροής, (δ) μαγνετορεολογικός αποσβεστήρας και (ε) αποσβεστήρας ελεγχόμενης τριβής26
Σχήμα 1.8. Ελεγχόμενη κατασκευή με σύστημα υβριδικού ελέγχου27
Σχήμα 1.9. (α) Το κτίριο Sendagaya INTES στο Τόκιο (β) το σύστημα αυτομάτου ελέγχου και (γ) το σύστημα των δύο HMD που εγκαταστάθηκε στην κορυφή του κτιρίου30
Σχήμα 1.10. (α) Το κτίριο Hankyu Chayamachi στην Οσάκα της Ιαπωνίας (β) Το ελικοδρόμιο και το σύστημα αυτομάτου ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε31
Σχήμα 1.11. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου αποσβεστήρα ενεργής μάζας (Active Mass Damper, AMD)32
Σχήμα 1.12. (α) Το κτίριο Kyobashi Seiwa στο Τόκιο και το σύστημα ελέγχου που αποτελείται από δύο AMD. (β) Οι δύο συσκευές AMD με περισσότερες λεπτομέρειες
Σχήμα 1.13. Πραγματική εφαρμογή του υδραυλικού εφαρμοστή με ελεγχόμενο άνοιγμα σε γέφυρα34
Σχήμα 1.14. Το κτίριο Kajima Research Lab., στο Τόκιο και η εφαρμογή της συσκευής μεταβλητής δυσκαμψίας μεταξύ των διαγώνιων στοιχείων και των δοκών
Σχήμα 3.1 Το εύρος του παραθύρου σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού με την χαμηλότερη f_L και υψηλότερη f_h του συχνότητα. Οι ιδιοσυχνότητες του αρχικού συστήματος f_1 , f_2 f_n και οι νέες θέσεις των ιδιοσυχνοτήτων, f_{c1} , f_{c2} f_{cn} (α) για χαμηλόσυχνη διέγερση (μακρινός σεισμός) και (β) υψίσυχνη διέγερση (κοντινός σεισμός)
Σχήμα 3.2 Το εύρος του παραθύρου σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού με την χαμηλότερη f_L και υψηλότερη f_h του συχνότητα. Οι ιδιοσυχνότητες του αρχικού συστήματος f_1 , f_2 f_n και οι νέες θέσεις των ιδιοσυχνοτήτων, f_{c1} , f_{c2} f_{cn}
Σχήμα 3.3 Σχέση μεταξύ θέση του πόλου στο μιγαδικό επίπεδο και δυναμικών χαρακτηριστικών (ιδιοσυχνότητα, απόσβεση) της κατασκευής64
Σχήμα 3.4 Μετασχηματισμός αρμονικής και σεισμικής φόρτισης στο μιγαδικό επίπεδο65
Σχήμα 3.5 Διαδικασία επιλογής των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής,(•), σε σχέση με τους πόλους της κατασκευής χωρίς έλεγχο, (°), με βάση τους κύκλους συχνοτήτων του σεισμού
Σχήμα 3.6 Αντιπροσωπευτικά σχήματα φασμάτων όπου η επιλογή συχνοτήτων του σεισμού με βάση μόνο το ποσοστό συμμετοχής στο μέγιστο του φάσματος (α) δεν καλύπτει αρκετό ποσοστό ισχύος, και (β) καλύπτει αρκετό ποσοστό ισχύος του σήματος
Σχήμα 3.7 Τα φάσματα ισχύος (α) του σεισμού του Μεξικού και (β) της Loma Prieta69
Σχήμα 3.8 Σχέση ποσοστού a _p και ποσοστού ισχύος I _p , για τους σεισμούς (α) του Μεξικού και (β) της Loma Prieta70
Σχήμα 3.9 Σχέση μεταξύ a_p και I_p για διάφορους σεισμούς και ο μέσος όρος τους71

Σχήμα 3.10 (α) Οι θέσεις του πόλου του μονοβαθμίου πάνω σε μια ευθεία σταθερής απόσβεσης, (β) ο λόγος u _{max} /u _{o,max} και (γ) η μέγιστη δύναμη που απαιτείται για κάθε θέση του πόλου
Σχήμα 3.11 (α) Η προβολή της απόκρισης του μονοβαθμίου στο μιγαδικό επίπεδο, και η εύρεση του εύρους ω _{si} σε σχέση με το ποσοστό μείωσης της απόκρισης, x, και (β) η εύρεση του ισοδύναμου ποσοστού απόσβεσης ξ _c σε σχέση με το επιπλέον ποσοστό μείωσης x _d 73
Σχήμα 3.12 Παραμετρικά αποτελέσματα (α) του λόγου u _{max} /u _{o,max} και (β) της μέγιστης δύναμης που απαιτείται για κίνηση του πόλου στην ευθεία σταθερής απόσβεσης74
Σχήμα 3.13 Παραμετρικά αποτελέσματα (α) του λόγου u _{max} /u _{o,max} και (β) της μέγιστης δύναμης που απαιτείται για κίνηση του πόλου στην ευθεία σταθερής απόσβεσης75
Σχήμα 3.14 Παραμετρικά αποτελέσματα (α) του λόγου u _{max} /u _{o,max} και (β) της μέγιστης δύναμης που απαιτείται για κίνηση του πόλου στην ευθεία σταθερής απόσβεσης75
Σχήμα 15 (α) Κίνηση του πόλου στο τόξο R'R'', (β) ο λόγος u _{max} /u _{o,max} και (γ) ή μέγιστη δύναμη που απαιτείται για την κίνηση στο τόξο R'R''78
Σχήμα 3.16. (α) ο λόγος $u_{max}/u_{o,max}$ και (β) $F_{max}/F_{max,o}$ για διάφορα ποσοστά απόσβεσης και διάφορες συχνότητες του ελεγχόμενου συστήματος για αρμονική φόρτιση80
Σχήμα 3.17 (α) ο λόγος u _{max} /u _{o,max} και (β) F _{max} /F _{max,o} για διάφορες θέσεις των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος στο μιγαδικό επίπεδο81
Σχήμα 3.18 Βασικά αρχεία και η ροή του προγράμματος δυναμικής ανάλυσης ελέγχου (Dynamic Control Analysis, DCA) για κτιριακές κατασκευές84
Σχήμα 3.19 Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου βασισμένο στο συχνοτικό περιεχόμενο του εισερχομένου σεισμικού σήματος
Σχήμα 3.20. Διαδικασία ελέγχου για το μονώροφο κτήριο, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας: (α) το εισερχόμενο σήμα, (β) χαρακτηριστικά τμήματα του εισερχομένου σήματος, (γ) το αντίστοιχο συχνοτικό τους περιεχόμενο, (δ) η επιλογή των θέσεων των πόλων, (ε) η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος και (στ) η συνολική απόκριση
Σχήμα 3.21. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου μονώροφου κτηρίου υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας93
Σχήμα 3.22. Δύναμη ελέγχου και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας93
Σχήμα 3.23. Διαδικασία ελέγχου για το τριώροφο κτήριο, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας: (α) το εισερχόμενο σήμα, (β) χαρακτηριστικά τμήματα του εισερχομένου σήματος, (γ) το αντίστοιχο συχνοτικό τους περιεχόμενο, (δ) η επιλογή των θέσεων των πόλων, (ε) η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος και (στ) η συνολική απόκριση
Σχήμα 3.24. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου τριώροφου κτηρίου υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας109
Σχήμα 3.25. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της (Power Spectral Density, PSD) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας110
Σχήμα 3.26. Διαδικασία ελέγχου για το οκταώροφο κτήριο, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας: (α) το εισερχόμενο σήμα, (β) χαρακτηριστικά τμήματα του εισερχομένου σήματος, (γ) το αντίστοιχο συχνοτικό τους περιεχόμενο, (δ) η επιλογή των θέσεων των πόλων, (ε) η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος και (στ) η συνολική απόκριση
Σχήμα 3.27. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας130
Σχήμα 3.28. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας
Σχήμα 3.29 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση του μονώροφου κτηρίου για ημιτονική φόρτιση

Σχήμα 3.30 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση του μονώροφου κτηρίου για σεισμική φόρτιση (σεισμός Αθήνας)157
Σχήμα 3.31 Διάγραμμα μεταξύ περιόδου και χρονικής καθυστέρησης για απόκριση του συστήματος ελέγχου μικρότερη του 50% από την απόκριση χωρίς έλεγχο158
Σχήμα 3.32 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση του τριώροφου κτηρίου για ημιτονική φόρτιση
Σχήμα 3.33 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση του τριώροφου κτηρίου για σεισμική φόρτιση (Σεισμός της Αθήνας 1999)159
Σχήμα 3.34 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου του μονώροφου κτηρίου για αρμονική φόρτιση
Σχήμα 3.35 Μεταβολή της απόκρισης του συστήματος σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου του μονώροφου κτηρίου για σεισμική φόρτιση (Σεισμός της Αθήνας 1999)
Σχήμα 3.36 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου του τριώροφου κτηρίου για αρμονική φόρτιση
Σχήμα 3.37 Μεταβολή της απόκρισης του συστήματος σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου του τριώροφου κτηρίου για σεισμική φόρτιση της Αθήνας
Σχήμα 3.38 Μεταβολή της απόκρισης του 1 ορόφου, του τριώροφου κτηρίου, σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου και τη χρονική καθυστέρηση του συστήματος για τη σεισμική φόρτιση της Αθήνας163
Σχήμα 3.39 Προβολή της απόκρισης του 1 ορόφου, του τριώροφου κτηρίου, στο επίπεδο της κορεσμένης δύναμης ελέγχου και της χρονικής καθυστέρησης του συστήματος για τη σεισμική φόρτιση της Αθήνας163
Σχήμα 4.1. Η κίνηση της φάσης του συστήματος προς την επιφάνεια ολίσθησης, η παραμονή της σε αυτή και η κατεύθυνση της προς το σημείο ισορροπίας170
Σχήμα 4.2. Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης: α) δύναμη ελέγχου υπολογισμένη με τη σχέση (4.12), β) δύναμη ελέγχου υπολογισμένη με τη σχέση (4.16) και γ) δύναμη ελέγχου υπολογισμένη με τη σχέση (4.19)175
Σχήμα 4.3. Βασικά αρχεία και η ροή του προγράμματος δυναμικής ανάλυσης ελέγχου (Dynamic Control Analysis, DCA) για κτιριακές κατασκευές178
Σχήμα 4.4. Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου βασισμένο στο συχνοτικό περιεχόμενο του εισερχομένου σεισμικού σήματος
Σχήμα 4.5 Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου μονώροφου κτηρίου, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας
Σχήμα 4.6. Δύναμη ελέγχου και το φάσμα ισχύος της, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, του μονώροφου κτηρίου για σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας184
Σχήμα 4.7. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, τριώροφου κτηρίου υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας
Σχήμα 4.8 Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της (Power Spectral Density, PSD), με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας
Σχήμα 4.9. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας
Σχήμα 4.10. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της, για το οκταώροφο κτήριο, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας220
Σχήμα 4.11. Η μεταβολή της κλίσης της απόκρισης για το μονοβάθμιο (συνεχής γραμμή) και το πολυβάθμιο σύστημα (διακεκομμένη γραμμή)243
Σχήμα 5.1. Περιοχές, α _ε υπέρβασης του φάσματος απόκρισης δυο σεισμών από το φάσμα σχεδιασμού247

Σχήμα 5.2.15 (α) Συσκευή μεταβλητής δυσκαμψίας, VSD, (β) η βαλβίδα είναι κλειστή και τα διαγώνια μεταλλικά στοιχεία λειτουργούν και συνεισφέρουν στη δυσκαμψία (γ) η βαλβίδα είναι ανοιχτή και τα διαγώνια στοιχεία μένουν ανενεργά (Φωτο. Kajima corp.)248
Σχήμα 5.3. Ο τύπος δυσκαμψίας Ι και ΙΙ και οι αντίστοιχες ιδιοπερίοδοι Τ _i και ιδιοσυχνότητες f _i 249
Σχήμα 5.4. (a) Χαρακτηριστικά σεισμικά σήματα από τους σεισμούς της Αθήνας,1999 και της πόλης του Μεξικού 1995 (β) τα αντίστοιχα φάσματα τους250
Σχήμα 5.5. Πιθανές θέσεις του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού και των ιδιοσυχνοτήτων των δυο τύπων δυσκαμψίας
Σχήμα 5.6. Αλγόριθμος μεταβλητής δυσκαμψίας και δύο ενδεικτικές περιπτώσεις επιλογής τύπου δυσκαμψίας
Σχήμα 5.7. Επιταχύνσεις και τα αντίστοιχα φάσματα από ολόκληρο το σήμα και κάποια επιμέρους τμήματα του. (α) καταγραφή του σεισμού της πόλης του Μεξικού , (β) και (γ) καταγραφές του σεισμού της Αθήνας255
Σχήμα 5.8. Ολοκληρωμένη σχηματική περιγραφή της στρατηγικής ελέγχου του συστήματος μεταβλητής δυσκαμψίας
Σχήμα 5.9. Βασικά αρχεία και η ροή του προγράμματος δυναμικής ανάλυσης ελέγχου (Dynamic Control Analysis, DCA) για κτιριακές κατασκευές που υπόκεινται σε σεισμικές φορτίσεις και ελέγχονται με σύστημα μεταβλητής δυσκαμψίας
Σχήμα 5.10. (α) αρμονική φόρτιση και (β) χρονική επιλογή του τύπου δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια της αρμονικής φόρτισης
Σχήμα 5.11. Επιλογή του τύπου δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια του σεισμού της Καλαμάτας
Σχήμα 5.12. (α) Μετακίνηση και (β) επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου μονώροφου κτηρίου για σεισμική διέγερση στο σεισμό της Καλαμάτας. Επιλογή του τύπου δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια του χρόνου261
Σχήμα 5.13. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου τριώροφου κτηρίου υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας271
Σχήμα 5.14 Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας285

<u>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ</u>

Πίνακας 3.1. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.2. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.3. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού με έλεγχο και χωρίς έλεγχο89
Πίνακας 3.4. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της καλαμάτας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.5. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.6. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.7. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο96
Πίνακας 3.8. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.9. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.10. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό Imperial Valley με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.11. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο100
Πίνακας 3.12. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.13. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.14. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο103
Πίνακας 3.15. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο

Πίνακας 3.16. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο105
Πίνακας 3.17. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο106
Πίνακας 3.18. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκιωνύδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο11
Πίνακας 3.19. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο112
Πίνακας 3.20. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο113
Πίνακας 3.21. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο114
Πίνακας 3.22. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.23. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valey, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο116
 Πίνακας 3.24. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
 Πίνακας 3.25. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Τ΄ Πίνακας 3.26. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce με έλεγχο και χωρίς έλεγγο
Τ΄ Πίνακας 3.27. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγγο
Πίνακας 3.28. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και γωρίς έλεγγο
Πίνακας 3.29. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγγο
 Πίνακας 3.30. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
 Πίνακας 3.31. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο

Πίνακας 3.32. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.33. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.34. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.35. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.36. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.37. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 3.38. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο151
Πίνακας 3.39. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο153
Πίνακας 4.1 Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο180
Πίνακας 4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές με έλεγχο και χωρίς έλεγχο181
Πίνακας 4.340. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 4.4. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο183
Πίνακας 4.5. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο185
Πίνακας 4.6. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο186
Πίνακας 4.7. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 4.8. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο188

Πίνακας 4.941. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο189
Πίνακας 4.10. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό Imperial Valley με έλεγχο και χωρίς έλεγχο190
Πίνακας 4.11. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο191
Πίνακας 4.12. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe με έλεγχο και χωρίς έλεγχο192
Πίνακας 4.13. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο193
Πίνακας 4.14. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 4.15. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο195
Πίνακας 4.16. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο196
Πίνακας 4.17. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο197
Πίνακας 4.18. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκιωνύδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο200
Πίνακας 4.19. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο201
Πίνακας 4.20. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο202
Πίνακας 4.21. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης με έλεγχο και χωρίς έλεγχο203
Πίνακας 4.22. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta με έλεγχο και χωρίς έλεγχο204
Πίνακας 4.23. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valey, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο205
Πίνακας 4.24. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City με έλεγχο και χωρίς έλεγχο206

Πίνακας 4.25. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο207
Πίνακας 4.26. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce με έλεγχο και χωρίς έλεγχο208
Πίνακας 4.27. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο209
Πίνακας 4.28. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο212
Πίνακας 4.29. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 4.30. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο216
Πίνακας 4.31. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο224
Πίνακας 4.32. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο226
Πίνακας 4.33. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο228
Πίνακας 4.34. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο230
Πίνακας 4.35. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο232
Πίνακας 4.36. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο234
Πίνακας 4.37. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο236
Πίνακας 4.38. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο238
Πίνακας 4.39. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο240
Πίνακας 5.1. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο259
Πίνακας 5.2. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές με έλεγχο και χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.3. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.4. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.5. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.6. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.7. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.8. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.9. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.10. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό Imperial Valley με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.11. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.12. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe με έλεγχο και χωρίς έλεγχο265
Πίνακας 5.13. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.14. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με έλεγχο και χωρίς έλεγχο267
Πίνακας 5.15. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.16. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο269
Πίνακας 5.17. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.18. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκιωνύδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.19. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.20. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.21. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.22. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.23. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valey, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.24. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City με έλεγχο και χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.25. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.26. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.27. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.28. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.29. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.30. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.31. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.32. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.33. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.34. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.35. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.36. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.37. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.38. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο
Πίνακας 5.39. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος από τα πρώτα χρόνια της δημιουργίας του, είχε την τάση να εξερευνά και να ανακαλύπτει τους λόγους της εκδήλωσης διαφόρων φυσικών φαινομένων. Θαύμαζε, απορούσε και προσπαθούσε να ελέγξει και να υποτάξει τα στοιχεία της φύσης, τις καιρικές συνθήκες και τα άγρια ζώα. Στη συνέχεια ήθελε να ελέγχει και να θεσπίζει διαδικασίες για τη λειτουργία της ομάδας μέσα στην οποία ανήκει, αλλά ακόμη και να μπορεί να έχει τον έλεγχο και άλλων ομάδων. Όσο περνούσε ο καιρός, αυτή η τάση για έλεγχο έμενε αμετάβλητη, ώστε, φτάνοντας στις μέρες μας, ο άνθρωπος να βρίσκεται σε ένα περιβάλλον κατεξοχήν ελεγχόμενο. Στη σημερινή εποχή δηλαδή, ο άνθρωπος προσπαθεί να έχει τον έλεγχο τόσο των στοιχείων της φύσης, των καιρικών συνθηκών και φυσικών καταστροφών, όσο και του τρόπου ζωής και του τρόπου λειτουργίας του μέσα στην ομάδα στην οποία βρίσκεται.

Ακόμη, πέρα από την ομάδα του, θέλει να έχει και τον έλεγχο άλλων ομάδων. Για να ελέγχει όμως κανείς οτιδήποτε πρέπει να έχει και τα κατάλληλα μέσα ελέγχου. Για παράδειγμα, για τον έλεγχο μιας κοινωνικής ομάδας τα μέσα ελέγχου που πρέπει να έχει κάποιος είναι τα μέσα μαζικής ενημέρωσης, που με τη σειρά τους χωρίζονται στο ραδιόφωνο, στην τηλεόραση στο γραπτό ή ηλεκτρονικό τύπο. Άλλο μέσο ελέγχου μπορεί να θεωρηθεί ο πόλεμος, που υποδιαιρείται σε έλεγχο οπλικών συστημάτων, τηλεπικοινωνιών και άλλων πολλών υποκατηγοριών. Για τον έλεγχο θερμοκρασίας ενός δωματίου τα μέσα ελέγχου είναι ένας θερμοστάτης και μια συσκευή που ζεσταίνει ή κρυώνει το χώρο (air-condition). Βλέπουμε λοιπόν, ότι για να ελέγξουμε οτιδήποτε χρειαζόμαστε κατάλληλα μέσα ελέγχου, τα οποία λειτουργούν με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο. Πολλές φορές βέβαια, λόγω της ανικανότητας αναγνώρισης των κινδύνων που ελλοχεύει ένα συμβάν, δεν το ελέγχουμε απευθείας, αλλά το αναγνωρίζουμε ή το προβλέπουμε, με σκοπό να το αποφύγουμε. Ένα συχνό παράδειγμα αποτελούν τα διάφορα φυσικά φαινόμενα. Επειδή δεν μπορούμε να αποτρέψουμε μια πλημμύρα, την προβλέπουμε, και προσπαθούμε να μειώσουμε τις απώλειες που ενδεχομένως θα προκληθούν. Το ίδιο συμβαίνει και με έναν σεισμό. Επειδή ο άνθρωπος δεν μπορεί να ελέγξει αυτόν κάθε αυτόν το σεισμό και να τον σταματήσει, μπορεί να τον προβλέψει και να λάβει μέτρα, εκ των προτέρων ή κατά τη διάρκεια του, τέτοια ώστε, όταν συμβεί ο σεισμός, να περιοριστούν οι συνέπειες του. Τα μέτρα που λαμβάνονται εκ των προτέρων για την αντιμετώπιση του σεισμού είναι η κατασκευή αντισεισμικών κτιρίων, βασισμένων στην υπάρχουσα αντισεισμική γνώση και τεχνολογία. Μέτρα που μπορούν να λαμβάνονται κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι η ανίχνευση του σεισμού και ενεργοποίηση ενός συστήματος ελέγχου, με σκοπό την αντισεισμική προστασία της κατασκευής. Άρα, για την αντιμετώπιση μιας δυναμικής φόρτισης, όπως ο σεισμός, εισέργονται αρχικά δυο έννοιες, ο αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών και ο έλεγχος των συστημάτων.

Στη συνέχεια της εισαγωγής, θα δούμε κάποια στοιχεία για την εξέλιξη της φιλοσοφίας του αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών. Θα δούμε επίσης κάποια στοιχεία για τα συστήματα ελέγχου, πως αναπτύχθηκαν αυτά ιστορικά, και ποιες είναι οι αρχές λειτουργίας τους. Τέλος, θα δούμε τι προσπάθεια έγινε για να ενοποιηθούν αυτές οι δυο περιοχές και να οδηγήσουν σε ελεγχόμενες πλέον κατασκευές, ικανές να αντιμετωπίσουν τη σεισμική διέγερση.

1.1 Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών

Η φιλοσοφία σχεδιασμού είναι ένας όρος που χρησιμοποιούμε, όταν αναφερόμαστε στις θεμελιώδεις αρχές του σχεδιασμού. Οι βάσεις αυτές καλύπτουν: θέματα επιλογής φορτίων και δυνάμεων σχεδιασμού, αναλυτικές τεχνικές και διαδικασίες σχεδιασμού, τις προτιμήσεις μας για συγκεκριμένες διαμορφώσεις δομικών συστημάτων και υλικών και τους στόχους μας για μια οικονομική βελτιστοποίηση. Εισαγωγή

Η ενσωμάτωση διαδικασιών αντισεισμικού σχεδιασμού στη μελέτη κτιρίων υιοθετήθηκε για πρώτη φορά τις δεκαετίες 1920 και 1930, όταν άρχισε να εκτιμάται η σημασία των αδρανειακών φορτίσεων στα κτίρια. Ελλείψει αξιόπιστων μετρήσεων των εδαφικών επιταχύνσεων και της λεπτομερειακής γνώσης της δυναμικής απόκρισης των κατασκευών, το μέγεθος των σεισμικών αδρανειακών δυνάμεων δεν μπορούσε να εκτιμηθεί με αξιοπιστία. Τυπικά είχε υιοθετηθεί σχεδιασμός για οριζόντιες δυνάμεις που αντιστοιχούσαν στο 10% του βάρους του κτιρίου. Αφού ο ελαστικός σχεδιασμός με επιτρεπόμενες τάσεις χρησιμοποιείτο αδιακρίτως, οι πραγματικές αντοχές του κτιρίου σε οριζόντιες δυνάμεις ήταν, γενικά, κάπως μεγαλύτερες.

Στη διάρκεια της δεκαετίας του 60 άρχισαν να είναι διαθέσιμα τα επιταχυνσιογραφήματα, που έδιναν λεπτομερείς πληροφορίες για την εδαφική επιτάχυνση. Η έλευση των φιλοσοφιών σχεδιασμού με τη μέθοδο της συνολικής αντοχής και η ανάπτυξη περίπλοκων αναλυτικών διαδικασιών με ηλεκτρονικούς υπολογιστές, διευκόλυνε μια λεπτομερέστερη εξέταση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών με πολλούς βαθμούς ελευθερίας κινήσεων.

Σύντομα έγινε γνωστό ότι σε πολλές περιπτώσεις ο αντισεισμικός σχεδιασμός, με το μέγεθος των οριζοντίων δυνάμεων που καθορίζονταν στους κανονισμούς, ήταν ανεπαρκής να εξασφαλίσει ότι η ένταση μιας ισχυρής δόνησης δεν θα υπερέβαινε την αντοχή της κατασκευής. Την ίδια στιγμή, οι παρατηρήσεις των αποκρίσεων των κτιρίων σε πραγματικούς σεισμούς έδειχναν ότι η έλλειψη αντοχής δεν είχε πάντοτε αποτέλεσμα την αστοχία, αλλά ούτε ακόμη και τη σοβαρή βλάβη. Εφόσον η αντοχή του κτιρίου μπορούσε να διατηρηθεί χωρίς υπερβολική αποδιοργάνωση, καθώς αναπτύσσονταν οι μετελαστικές παραμορφώσεις, η κατασκευή μπορούσε να επιβιώσει στο σεισμό και συχνά να επισκευαστεί οικονομικά. Ωστόσο, όταν οι μετελαστικές παραμορφώσεις είχαν αποτέλεσμα σοβαρή μείωση της αντοχής, όπως για παράδειγμα συμβαίνει σε περίπτωση διατμητικής αστοχίας στοιχείων σκυροδέματος ή τοιχοποιίας, τότε ήταν συνηθισμένες οι σοβαρές βλάβες, ακόμη και η κατάρρευση του οικοδομήματος.

Με αυξανόμενη την επίγνωση ότι η πλεονάζουσα αντοχή δεν είναι ουσιώδης και ούτε απαραίτητα επιθυμητή, η έμφαση στο σχεδιασμό μετατέθηκε από την αντίσταση στις μεγάλες δυνάμεις στην «αποφυγή αυτών των δυνάμεων. Η μετελαστική συμπεριφορά των κατασκευών έγινε μια αναγκαία πραγματικότητα στο σχεδιασμό των κατασκευών για σεισμικές δυνάμεις. Η διαπίστωση ότι όλες οι μετελαστικές παραμορφώσεις δεν είναι βιώσιμες, έχει γίνει πλέον αποδεκτή. Μερικές οδηγούν στην αστοχία (διατμητικές μετελαστικές παραμορφώσεις) και άλλες παρέχουν πλαστιμότητα, που μπορεί να θεωρηθεί το βασικό χαρακτηριστικό διατήρησης της αντοχής, όταν η κατασκευή υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενες μετελαστικές παραμορφώσεις λόγω σεισμικής καταπόνησης.

Έγινε αποδεκτό σήμερα ότι ο αντισεισμικός σχεδιασμός πρέπει να ενθαρρύνει περισσότερο τη χρήση μορφών κατασκευών που είναι πιθανότερο να διαθέτουν πλαστιμότητα, παρά αυτών που δε τη διαθέτουν. Γενικά, αυτό σχετίζεται με θέματα κανονικότητας της κατασκευής και προσεκτικής επιλογής των θέσεων, όπου μπορούν να αναπτυχθούν μετελαστικές παραμορφώσεις (πλαστικές αρθρώσεις). Σε συνδυασμό με την επιλογή της διαμόρφωσης της κατασκευής, αυξάνουν εκούσια οι αντοχές για τις ανεπιθύμητες μορφές μετελαστικών παραμορφώσεων σε σχέση με αυτές των επιθυμητών. Έτσι, για κατασκευές από σκυρόδεμα, φέρουσα τοιχοποιία και χάλυβα, η απαιτούμενη διατμητική αντοχή πρέπει να υπερβαίνει την απαιτούμενη καμπτική, ώστε να εξασφαλίζεται ότι δε θα συμβούν μετελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις που συνδυάζονται με μεγάλη μείωση της δυσκαμψίας και της αντοχής, και μπορεί να οδηγήσουν στην αστοχία.

Η επιλογή, λοιπόν, κατάλληλης μορφής δομικού συστήματος για μετελαστική απόκριση, η επιλογή κατάλληλων και σωστά κατανεμημένων θέσεων πλαστικών αρθρώσεων, για τη συγκέντρωση των μετελαστικών παραμορφώσεων, και η εξασφάλιση, με τη διαφοροποίηση των αντοχών, ότι η μετελαστική παραμόρφωση δε θα συμβεί σε ανεπιθύμητες θέσεις ή σε ανεπιθύμητες στατικές καταστάσεις, αποτελούν τις βάσεις της φιλοσοφίας του ικανοτικού σχεδιασμού. Ας δούμε όμως αναλυτικά την εξέλιξη του αντισεισμικού σχεδιασμού στη χώρα μας και διεθνώς.

Στην αρχή, σύμφωνα με τον Ελληνικό αντισεισμικό κανονισμό του 1959, επικρατούσε η αντίληψη ότι ο σεισμός πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μια δύναμη που δρα στο κέντρο μάζας της πλάκας του κάθε ορόφου. Η δύναμη αυτή ορίζεται ως το γινόμενο των κατακόρυφων φορτίων επί κάποιον σεισμικό συντελεστή, ε. Η τιμή του σεισμικού συντελεστή εξαρτάται από τη ζώνη σεισμικότητας και την κατηγορία του εδάφους της περιοχής που γίνεται η κατασκευή. Υπάρχουν τρεις ζώνες σεισμικότητας και τέσσερις κατηγορίες εδάφους. Ο συντελεστής ε παίρνει τιμές από 0.04 έως 0.16, ανάλογα με τη σεισμικότητα και την επικινδυνότητα του εδάφους.

Η κατανομή του σεισμικού φορτίου στα υποστυλώματα γίνεται σύμφωνα με τη θεωρία του μονώροφου ελαστικού σχηματισμού με στροφή, με την παραδοχή ότι η κατασκευή διαθέτει διαφραγματική λειτουργία (κάθε πλάκα δεν παραμορφώνεται στο επίπεδο της). Το κέντρο ελαστικής στροφής υπολογίζεται από τη γεωμετρία και τη δυσκαμψία των υποστυλωμάτων. Από τη δυσκαμψία κάθε υποστυλώματος υπολογίζονται επίσης, η συνολική δυσκαμψία του συστήματος για μετακίνηση x, y και στροφή ω, γύρω από το κέντρο ελαστικής στροφής. Με βάση τη συνολική δυσκαμψία και το σεισμικό φορτίο υπολογίζονται οι συνολικές μετακινήσεις σε κάθε σημείο της πλάκας, άρα και στα σημεία κορυφής των υποστυλωμάτων. Με βάση τις μέγιστες μετακινήσεις και τη δυσκαμψία κάθε υποστυλώματος προκύπτουν οι τέμνουσες δυνάμεις στα υποστυλώματα. Ο έλεγχος επάρκειας των δομικών στοιχείων γίνεται με βάση τις επιτρεπόμενες τάσεις.

Στη συνέχεια, το 1984, υπάρχουν κάποιες πρόσθετες μεταβολές. Ο σεισμικός συντελεστής, ε, προσαυξάνεται με βάση τους συντελεστές σπουδαιότητας. Το σεισμικό φορτίο του ορόφου βρίσκεται από μία τριγωνική καθ' ύψος του κτιρίου κατανομή, με μέγιστη τιμή στην κορυφή. Η σεισμική τέμνουσα ορόφου κατανέμεται στα υποστυλώματα ανάλογα με τη δυσκαμψία τους (θεωρία μονώροφου) ή με επίλυση πλαισίου στο επίπεδο ή στο χώρο. Υπάρχουν κάποιες διατάξεις για κτίρια με pilotis, δηλαδή αν σε κάποιο όροφο γίνεται μείωση των τοίχων πλήρωσης σε ποσοστό μεγαλύτερο του 25%, τότε γίνεται αύξηση της σεισμικής δύναμης υπολογισμού κάθε κατακόρυφου στοιχείου του υπόψη ορόφου, ίση με το ποσοστό μείωσης των τοίχων πλήρωσης και τοποθετούνται πυκνοί συνδετήρες στα υποστυλώματα σε όλο το ύψος του ορόφου. Επίσης, εφαρμόζονται κάποιες κατασκευαστικές διατάξεις για τα τοιχία, υποστυλώματα και τις δοκούς. Η πλέον σημαντική αλλαγή είναι ότι εισέρχεται πλέον, η λογική του ικανοτικού σχεδιασμού, μέσω του ικανοτικού ελέγχου των κόμβων.

Το άλμα στην αλλαγή της φιλοσοφίας του αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών έρχεται δέκα χρόνια μετά, το 1995, με το Νέο Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (NEAK), και την μετέπειτα εξέλιξη αυτού σε Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (EAK), με τις πρόσθετες τροποποιήσεις. Η φιλοσοφία αυτού του κανονισμού είναι ότι δέχεται περιορισμένες και επιδιορθώσιμες βλάβες σε στοιχεία του φέροντος οργανισμού για το σεισμό σχεδιασμού και ελαχιστοποίηση της βλάβης για σεισμούς μικρότερης έντασης. Επίσης, υπάρχει μικρή πιθανότητα κατάρρευσης για το σεισμό σχεδιασμού, και διασφαλίζεται μια ελάχιστη στάθμη λειτουργιών, ανάλογα με τη χρήση και τη σημασία του οικοδομήματος. Η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού, $R_d(T)$, (αντίστοιχος συντελεστής, ε, προηγουμένων κανονισμών) εξαρτάται από περισσότερους παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, αυτοί οι παράγοντες είναι: η αναμενόμενη επιτάχυνση εδάφους, A, η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας (τρεις ζώνες I, II, III), η ιδιοπερίοδος της κατασκευής, T, ο συντελεστής μετελαστικής συμπεριφοράς, q, (υλικό, υπερστατικότητα, στατικό συστημα), ο συντελεστής σπουδαιότητας, γ_I (τέσσερεις κατηγορίες Σ_I , Σ_2 , Σ_3 , Σ_4) και ο συντελεστής θεμελίωσης, θ . Με βάση τους παραπάνω παράγοντες μορφώνεται το φάσμα σχεδιασμού και υπολογίζεται η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού, $R_d(T)$.

Οι μέθοδοι υπολογισμού των εντατικών μεγεθών εξαιτίας των σεισμικών δράσεων είναι: (α) η δυναμική φασματική μέθοδος που εφαρμόζεται γενικά σε όλες τις περιπτώσεις, (β) η απλοποιημένη φασματική μέθοδος (ισοδύναμη στατική) που εφαρμόζεται υπό προϋποθέσεις, ανάλογα με την κανονικότητα του κτιρίου, των αριθμό των ορόφων, τη σπουδαιότητα και τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας και (γ) σε ειδικές περιπτώσεις, υπό μορφή πρόσθετων ελέγχων, και προς την πλευρά της ασφάλειας, επιτρέπεται η χρήση άλλων μεθόδων υπολογισμού, όπως η γραμμική ή μη γραμμική ανάλυση με ολοκλήρωση στο χρόνο.

Κατά τη δυναμική φασματική μέθοδο υπολογίζεται το μητρώο μάζας και δυσκαμψίας της κατασκευής. Για τον υπολογισμό της μάζας λαμβάνονται υπόψη τα μόνιμα φορτία και ένα ποσοστό των κινητών φορτίων ανάλογα με τη χρήση του κτηρίου. Η προσομοίωση της δυσκαμψίας γίνεται από ένα γραμμικό ελαστικό προσομοίωμα. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ιδιοπερίοδοι Τ_i, οι ιδιοσυχνότητες ω_i, και οι ιδιομορφές φ_i της κατασκευής. Για κάθε ιδιομορφή υπολογίζεται ο συντελεστής συμμετοχής ψ_i, και η δρώσα ιδιομορφική μάζα, η οποία δηλώνει το ποσοστό της ταλαντούμενης μάζας στην εξεταζόμενη διεύθυνση διέγερσης που συμμετέχει στην ταλάντωση της ιδιομορφής. Απαιτείται να λαμβάνονται υπόψη μόνο οι κ πρώτες ιδιομορφές, με την προϋπόθεση ότι το άθροισμα των ιδιομορφικών μαζών τους είναι τουλάχιστον ίσο με το 90% της ταλαντούμενης μάζας στην εξεταζόμενη διεύθυνση. Κατόπιν, από το φάσμα σχεδιασμού, υπολογίζεται η επιτάχυνση σχεδιασμού $R_d(T_i)$, για την ιδιοπερίοδο της ιδιομορφής, καθώς και τα σεισμικά φορτία στους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος. Γίνεται στατική επίλυση του συστήματος για τα σεισμικά φορτία που προκύπτουν, και υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην κατασκευή.

Επίλυση απαιτείται για κάθε ιδιομορφή και για κάθε διεύθυνση σεισμικής δράσης. Επειδή η χρήση του φάσματος σχεδιασμού δίνει μέγιστες τιμές στα εντατικά μεγέθη, οι οποίες δεν συμβαίνουν ταυτόχρονα και έχουν και διαφορετικό πρόσημο, τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από κάθε ιδιομορφή συνδυάζονται μεταξύ τους για να προκύψει η τελική συνολική τιμή τους. Ο συνδυασμός τους μπορεί να γίνει με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων (Square Root of the Sum of Squares, SRSS) ή, σε περίπτωση που οι διαδοχικές ιδιοπερίοδοι έχουν μικρή διαφορά στη τιμή τους, χρησιμοποιείται ο πλήρης τετραγωνικός συνδυασμός (Complete Quadratic Combination, CQC).

Με την απλοποιημένη φασματική μέθοδο υπολογίζεται η συνολική σεισμική δύναμη και η κατανομή της καθ' ύψος του κτιρίου, μόνο με βάση την πρώτη ιδιομορφή. Γίνεται επίλυση και για τις δυο διευθύνσεις της σεισμικής φόρτισης και υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη.

Με τη γραμμική ή μη γραμμική ανάλυση με εν χρόνω ολοκλήρωση, γίνεται απευθείας αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων κίνησης και υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη σε συνάρτηση με το χρόνο. Αν κάνουμε γραμμική ανάλυση, τότε επιλύουμε ένα γραμμικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων, ενώ αν κάνουμε μη γραμμική ανάλυση, είτε υλικού με μεταβαλλόμενο μητρώο δυσκαμψίας, είτε γεωμετρίας με εξισώσεις ισορροπίας στην παραμορφωμένη θέση, τότε επιλύουμε αριθμητικά ένα μη γραμμικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Θα πρέπει να επιλεγούν τουλάχιστον πέντε επιταχυνσιογραφήματα, τα οποία θα ικανοποιούν κάποιους όρους. Οι όροι αυτοί είναι: (α) τα σεισμογραφήματα να αντιπροσωπεύουν κατά το δυνατόν τις σεισμοτεκτονικές, γεωλογικές, εδαφοδυναμικές και εν γένει τις τοπικές συνθήκες της περιοχής του δομήματος, (β) να είναι ψηφιοποιημένα το πολύ ανά 0.02 sec, (γ) να έχουν διάρκεια σύμφωνη με τις σεισμοτεκτονικές, γεωλογικές, εδαφοδυναμικές και εν γένει τις τοπικές συνθήκες της περιοχής του έργου, (δ) το μέσο φάσμα (μέσος όρος των επιταχυνσιογραφημάτων) να είναι ισοδύναμο με το φάσμα σχεδιασμού για απόσβεση 5%. Ένα ίσες των αντίστοιχων του φάσματος σχεδιασμού, για περιόδους μέχρι 0.20 sec, ενώ για περιόδους άνω των 0.20 sec επιτρέπεται 10% των τιμών του φάσματος, να είναι κατώτερες μέχρι 5% από το φάσμα σχεδιασμού), (ε) οι τεταγμένες των φασμάτων των επιταχυνσιογραφημάτων να υπολογίζονται κατ' ελάχιστο στις περιόδους που προκύπτουν από 18 ίσα βήματα μεταξύ 0.01 και 1 sec, από 10 ίσα βήματα μεταξύ 1 και 2 sec και από 8 ίσα βήματα μεταξύ 2 και 4 sec. Πέρα από τα επιταχυνσιογραφήματα (φυσικές καταγραφές) που ικανοποιούν τους παραπάνω όρους, επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν και συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα, εφόσον το φάσμα τους περιβάλει το φάσμα σχεδιασμού.

Στην καινούρια αυτή προσέγγιση του αντισεισμικού σχεδιασμού λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της αθέλητης εκκεντρότητας της σεισμικής δράσης και εμπλουτίζεται ο ικανοτικός σχεδιασμός, όπου πέρα από τους κόμβους έχουμε και τον ικανοτικό σχεδιασμό δοκών και υποστυλωμάτων, σε κάμψη και διάτμηση καθώς και θεμελιώσεων. Τέλος, λαμβάνεται υπόψη η ταυτόχρονη δράση σεισμικών δυνάμεων σε τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, όχι όμως ταυτόχρονα με τη μέγιστη τιμή τους.

Στα ίδια παραπάνω πλαίσια αντισεισμικού σχεδιασμού κινείται και ο Ευροκώδικας 8, ο οποίος όμως κάνει ένα βήμα πιο πέρα. Υιοθετεί την αντίληψη της απορρόφησης ενέργειας και της αλλαγής της περιόδου της κατασκευής μέσω συσκευών που τοποθετούνται στη βάση της κατασκευής (σεισμική μόνωση). Βλέπουμε εδώ ότι αρχίζει να διαμορφώνεται μια φιλοσοφία, η οποία περνάει και στους κανονισμούς, ότι πέρα από τον εκ των προτέρων σχεδιασμό της κατασκευής ώστε να έχει καλή συμπεριφορά κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, μπορούμε να προσθέσουμε «κάτι» στην κατασκευή, το οποίο θα λειτουργήσει κατά τη διάρκεια του σεισμού και θα προσπαθήσει να τον αντιμετωπίσει. Αυτή η σκέψη είναι και η βάση της φιλοσοφίας του ελέγχου των κατασκευών.

Η παραπάνω εξέλιξη των αντισεισμικών κανονισμών, τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό, ακολουθούσε και αποτύπωνε την πρόοδο και την εξέλιξη της θεωρίας της δυναμικής και του αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών. Ενδεικτική βιβλιογραφία για την εξέλιξη της δυναμικής των κατασκευών είναι τα κλασικά βιβλία των [Biggs (1964), Wilson, Farhoomand and Bathe (1973), Blevins (1979), Kiureghian (1980), Nashif, Jones and Henderson (1985), Gyril (1987), Smith (1988), Berg (1989), Hummar (1990), Chopra (1990), Clough & Penzien

(1993), Soong, T.T. & Grigoriu (1993), Paz (1995), Chen & Scawthorn (2003), Paz & Leigh (2006)] ενώ για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών θα μπορούσε κανείς να ανατρέξει στους [Blume, Newmark and Corning (1961), Housner (1970), Popov and Bertero (1980), Hart and Englekirk (1982), Wakabayashi (1986), Key (1988), Naeim (1989), Paulay & Priestley (1992), Penelis & Kappos (1996), Booth (2005), Hori (2006), Erdey (2007)].

Σήμερα, ύστερα από την εμπειρία αρκετών σεισμών και των αντίστοιχων συνεπειών τους, υπάρχει προβληματισμός γύρω από το γεγονός αν συμφέρει τελικά να επιτρέπουμε στην κατασκευή να απορροφήσει ενέργεια σε συγκεκριμένα σημεία με συνέπεια την μετέπειτα επισκευή της. Η εμπειρία έχει δείξει ότι το κόστος επισκευής μιας κατασκευής που έχει υποστεί σοβαρές βλάβες από το σεισμό μπορεί να φτάσει έως και το 40% του κόστους κατασκευής της.

Επίσης, παρατηρείται το γεγονός ότι συχνά το φάσμα απόκρισης ενός συγκεκριμένου σεισμού που έγινε στην φύση υπερβαίνει σημαντικά το φάσμα σχεδιασμού του κανονισμού. Άρα, φαίνεται ότι η κατασκευή μας είναι απροστάτευτη στη σεισμική διέγερση και σίγουρα θα παρουσιάσει βλάβες, με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος για την επισκευή της ή την ενίσχυσης της να είναι αναπόφευκτο.

Ας δούμε όμως πως μπορεί να συνδυαστεί η θεωρία ελέγχου με τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών, με σκοπό να προκύψουν στρατηγικές ελέγχου των κατασκευών, οι οποίες θα επιτρέψουν στην κατασκευή να δουλεύει εντός των ελαστικών της ορίων. Το αποτέλεσμα θα είναι να μην παρουσιάζει βλάβες η κατασκευή, ενώ θα είναι διαστασιολογημένη με τη σύγχρονη αντίληψη του αντισεισμικού σχεδιασμού.

1.2 Θεωρία ελέγχου: Ιστορική αναδρομή, βασικές αρχές

Ο αυτόματος έλεγχος έχει επινοηθεί από την αρχαιότητα. Ένα αρχαίο σύστημα αυτομάτου ελέγχου ήταν το ρολόι νερού που επινοήθηκε από τον Έλληνα μηχανικό Κτησίβιο, ο οποίος υπηρετούσε στην Αλεξάνδρεια τον βασιλιά της Αιγύπτου, Πτολεμαίο Β. Μετά από τρεις αιώνες συναντούμε συστήματα αυτομάτου ελέγχου κατασκευασμένα από τον Ήρωνα τον Αλεξανδρέα. Στο βιβλίο του 'Πνευματικά', υπάρχουν σε πρωτόγονη μορφή πολλές αυτόματες συσκευές ελέγχου. Μεταξύ των άλλων περιγράφει με λεπτομέρεια πολλούς αυτόματους ρυθμιστές που

στηρίζονται στην ιδέα του πλωτήρα. Από τα γνωστότερα συστήματα αυτομάτου ελέγχου του Ήρωνος ήταν το αυτόματο σύστημα διανομής του οίνου και το αυτόματο άνοιγμα της πόρτας του Ναού. Το δεύτερο σύστημα φαίνεται στο σχήμα 1.1. Ο ρυθμιστής αυτός είχε σχεδιαστεί έτσι ώστε η πύλη ενός ναού να άνοιγε αυτόματα όταν άναβε η φωτιά στο ναό και να έκλεινε όταν έσβηνε η φωτιά.

Η λειτουργία του συστήματος ήταν ως εξής: Η φωτιά ζέσταινε τον αέρα κάτω από το βωμό, ο δε ζεστός αέρας έσπρωχνε το νερό από το δοχείο 1 στο δοχείο 2. Τα δοχεία ήταν κρεμασμένα με σκοινιά, τα οποία ήταν τυλιγμένα κατάλληλα σε ένα μηχανισμό με ένα αντίβαρο W. Όταν το δοχείο 2 ήταν άδειο, ο μηχανισμός αυτός κάτω από το βάρος W κρατούσε την πύλη κλειστή. Όταν στο δοχείο 2 έμπαινε αρκετό νερό από το δοχείο 1, τότε κατέβαινε προς τα κάτω, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός με τα σκοινιά να ανοίγει την πύλη. Όταν έσβηνε η φωτιά, το νερό από το δοχείο 2 επέστρεφε στο δοχείο 1 και το δοχείο 2 ανέβαινε προς τα πάνω, με αποτέλεσμα να κλείνει η πύλη. Ο ρυθμιστής αυτός χρησιμοποιείτο για να εντυπωσιάζει τους πιστούς, δεδομένου ότι το σύστημα αυτοματισμού ήταν κρυμμένο μέσα στο έδαφος.

Κατά τον 9° αιώνα, μετά από 800 χρόνια, συναντάμε στην Αραβική χερσόνησο το ρυθμιστή με το σύστημα του πλωτήρα στο βιβλίο "Kitab al hiyal" («Επί των νοητικών μηχανών»). Τα πρώτα γραπτά κείμενα σχετικά με τον αυτόματο έλεγχο κατά τον 9° αιώνα αποδίδονται σε έναν ανώνυμο συγγραφέα γνωστό ως «Ψευδοαρχιμήδη». Τον 13° αιώνα συναντούμε δυο συγγράμματα από τους Ibn – Sacati και Al – Jazari. Μετά τον 13° αιώνα η χρήση του πλωτήρα εκλείπει παντελώς, και δεν υπάρχει καμία σχετική πηγή που να χρονολογείται στο Μεσαίωνα ή στην Αναγέννηση.

Στα μέσα του 18^{ου} αιώνα ο William Salmon ασχολείται εκ νέου με τον αυτοματισμό μέσω του πλωτήρα. Το 1758 κατασκευάζεται μια ατμομηχανή, η οποία χρησιμοποιούσε βαλβίδα για τη ρύθμιση της στάθμης του νερού στο βραστήρα. Μετά από λίγα χρόνια στη Ρωσία, ο Polzunov κατασκεύασε μια νέα ατμομηχανή. Το 1784 ο Sutton Thomas Wood κατασκεύασε στην Αγγλία μια νέα μηχανή αυτομάτου ελέγχου, στηριζόμενος στις ιδέες του Ήρωνος.

Μια άλλη κατασκευή αυτομάτου ελέγχου, ο θερμοστάτης, έχει τις ρίζες του στο Γερμανό μηχανικό, Cornelius Drebbel. Ο Drebbel θα ήταν σήμερα πολύ γνωστός, αν έγραφε για τις κατασκευές του. Αναφέρεται, από τον Francis Bacon, ότι ο Drebbel κατασκεύασε τον
θερμοστάτη εντελώς τυχαία. Πίστευε, ο Drebbel, στα πλαίσια της αλχημείας, ότι θα μετέτρεπε το κοινά μέταλλα σε χρυσό, εάν κατόρθωνε να διατηρήσει σταθερή τη θερμοκρασία μιας διεργασίας για μακρύ χρονικό διάστημα. Το 1783, ο Γάλλος Bonnemian κατασκεύασε ένα ρυθμιστή πυρός και τον χρησιμοποιούσε σε έναν μεγάλο αγρό, ο οποίος τροφοδοτούσε με κότες τη βασιλική αυλή και την αγορά των Παρισίων.



Σχήμα 1.1. Αρχαίο σύστημα αυτομάτου ελέγχου, ο ρυθμιστής του Ήρωνος του Αλεξανδρέως

Μια τρίτη κατεύθυνση στους μηχανισμούς ανατροφοδότησης και ελέγχου έχει την αρχή της στις συσκευές αυτομάτου ελέγχου των ανεμόμυλων. Τέτοιες συσκευές κατασκευάστηκαν στην Αγγλία και στη Σκωτία, κατά τον 18° αιώνα. Ο πρώτος αυτόματος ανεμόμυλος με ανατροφοδότηση κατασκευάστηκε το 1745 από τον Edmund Lee, ο οποίος έστρεφε την πρόσοψη του πάντοτε προς την κατεύθυνση του ανέμου. Ο ανεμόμυλος του Lee περιείχε κατάλληλο σύστημα ελέγχου, το οποίο διατηρούσε σταθερή τη γωνιακή ταχύτητα του μύλου, παρά τις διαρκείς αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου. Η ρύθμιση της ταχύτητας του ανεμόμυλου ήταν απαραίτητη για τη προφύλαξη των λίθινων τροχών από υπερβολική φθορά και για την παραγωγή αλευριού ομοιόμορφης ποιότητας. Το 1787 ο Thomas Mead κατασκεύασε τον πρώτο ανεμόμυλο, ο οποίος περιείχε ανασύζευξη ταχύτητας με τη χρήση φυγοκεντρικού εκκρεμούς.

Ο James Watt και ο συνάδελφος του Matthew Boulton κατασκεύασαν ένα μεγάλο μύλο, για να δείξουν τη δυνατότητα της νέας περιστρεφόμενης μηχανής του Watt. Το 1769 υποπροϊόν της προσπάθειας αυτής ήταν η κατασκευή του πρώτου φυγοκεντρικού ρυθμιστή ταχύτητας. Ο ρυθμιστής του Watt έχει μεγάλη σπουδαιότητα στην ιστορία της τεχνολογίας. Ο Watt όμως δεν έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το ρυθμιστή του, γιατί τον θεωρούσε απλή προσαρμογή του φυγοκεντρικού εκκρεμούς. Μετά από την παρέλευση λίγων ετών, ο ρυθμιστής του Watt χρησιμοποιήθηκε ευρέως στη βιομηχανία για τον αυτόματο έλεγχο των ατμομηχανών.

Η περίοδος μέχρι το 1869 χαρακτηρίζεται ως μια περίοδος όπου ο αυτοματισμός αναπτύχθηκε αρκετά, αλλά μόνο διαισθητικά, χωρίς καμιά θεωρητική μαθηματική βάση. Το κενό αυτό συμπλήρωσαν ο Maxwell to 1868 και ο Wischnegradnsky το 1877. Ο Maxwell το 1868 έκανε μια αναλυτική μελέτη της ευστάθειας του ρυθμιστή του Watt. Το 1877 ακολούθησε μια πλέον λεπτομερής ανάλυση της ευστάθειας τρίτης τάξεως απ' τον Ρώσο μηχανικό Wischnegradnsky. Ο Minorsky κατά τη μελέτη του για την αυτόματη καθοδήγηση πλοίων, το 1922, έκανε μια από τις πρώτες εφαρμογές των μη γραμμικών συστημάτων ελέγχου.

Το πρώτο μισό του εικοστού αιώνα, έως το 1945, χαρακτηρίζεται από μια πληθώρα αυτόματων μηχανών και οργάνων, όπως πυρόμετρα, βολτόμετρα και συσκευές μνήμης. Το 1900 εισήχθη ο αυτοματισμός στην Αμερικανική βιομηχανία χάλυβα. Το 1912 ο Henry Ford χρησιμοποιώντας την αρχή της αυτόματης μαζικής παραγωγής πέτυχε την παραγωγή 1000 αυτοκινήτων την ημέρα, σε μια εποχή όπου το αυτοκίνητο ήταν είδος πολυτελείας. Το 1924 η εταιρία Morris στο Coventry της Αγγλίας κατασκεύασε την πρώτη αυτόματη μεταφορική μηχανή. Εν γένει σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας ο αυτοματισμός υποβοηθήθηκε από την ανάπτυξη του ηλεκτρισμού και της ηλεκτρονικής.

Σημαντικό σταθμό στην πορεία αυτή αποτέλεσαν οι δεκαετίες του 1920 και 1930, κατά τις οποίες εμφανίστηκαν αξιόλογα θεωρητικά και πρακτικά ευρήματα, όπως αυτά των Minorsky, Hazen, Niquist και Black. Το έτος 1934 αποτελεί ένα σημαντικό σταθμό για την ιστορία του αυτομάτου ελέγχου με τη δημοσίευση του άρθρου του Haren με τον τίτλο *«Theory of Servomechanisms»* στο περιοδικό *«Journal of the Franklin Institute»*. Ο όρος *«servomechanisms»* προέρχεται από το «servant» που θα πει υπηρέτης και το mechanism που σημαίνει μηχανισμός, έχει δηλαδή την έννοια ενός «μηχανισμού εξυπηρέτησης». Το ίδιο έτος

εμφανίστηκε και η εργασία του Black για τους ενισχυτές ανατροφοδότησης (feedback amplifiers).

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου αναπτύχθηκαν ραγδαία τα τελευταία 60 χρόνια. Τα επόμενα έτη, μέχρι το 1957, σημειώθηκε περαιτέρω αξιόλογη έρευνα που χαρακτηρίζεται σήμερα ως κλασική θεωρία αυτομάτου ελέγχου. Τα σημαντικότερα επιτεύγματα της περιόδου αυτής οφείλονται στον Nichols, στον Bode, στον Wiener, και στον Evans. Τα διάφορα επιτεύγματα, από το 1957 μέχρι σήμερα, έδωσαν μια νέα διάσταση και μια μεγάλη ώθηση στον αυτοματισμό, και χαρακτηρίζονται ως κλασική θεωρία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της τελευταίας αυτής περιόδου οφείλονται κατά κύριο λόγο στον Kalman. Σημαντική είναι επίσης η συμβολή και άλλων ερευνητών όπως π.χ. των Athans, Astrom, Brockett, Rosenbrock και Wonham.

Στη συνέχεια του χρόνου άλλα παραδείγματα εφαρμογών αυτομάτου ελέγχου αποτελούν το αντιαεροπορικό σύστημα παρακολούθησης με ραντάρ, το σύστημα ενός πυρηνικού αντιδραστήρα και η κεραία ενός μεγάλου ραδιοτηλεσκόπιου.

Η εξέλιξη της θεωρίας του αυτομάτου ελέγχου περιλαμβάνει δυο κατηγορίες, τον κλασικό και τον μοντέρνο έλεγχο. Οι μέθοδοι απόκρισης στο πεδίο των συχνοτήτων και ο γεωμετρικός τόπος των ριζών είναι η καρδιά του κλασικού ελέγχου. Αυτές οι μέθοδοι οδηγούν μεν σε ευσταθή συστήματα που ικανοποιούν ένα σύνολο περιορισμών, αλλά δεν είναι βέλτιστες. Επίσης, ο κλασικός έλεγχος αντιμετωπίζει συστήματα με μια είσοδο και μία έξοδο (μονοβάθμια συστήματα). Στα σύγχρονα συστήματα με πολλές εισόδους και πολλές εξόδους τα εργαλεία του κλασικού ελέγχου λύση. Έτσι, από το 1960 και μετά, εξαιτίας του στόχου για κατάκτηση του διαστήματος και της ικανότητας των ψηφιακών υπολογιστών, αναπτύχθηκε η θεωρία του μοντέρνου ελέγχου, η οποία χρησιμοποιεί τις μεταβλητές κατάστασης και στηρίζεται σε μεθόδους ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ της κλασικής και της μοντέρνας θεωρίας των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου είναι οτι ο κλασικός έλεγχος αναφέρεται κυρίως σε απλά συστήματα που έχουν μία είσοδο και μία έξοδο, οι δε μέθοδοι σχεδίασης είναι συνήθως γραφικές και δεν απαιτούν πολλά μαθηματικά (γεωμετρικός τόπος ριζών, διαγράμματα Niquist, διαγράμματα Bode), ενώ ο μοντέρνος έλεγχος αναφέρεται σε πολύπλοκα συστήματα με πολλές εισόδους και εξόδους, οι δε μέθοδοι σχεδίασης είναι ως επί το πλείστον αναλυτικές, γεγονός που απαιτεί επίπονη μαθηματική επεξεργασία (χώρος κατάστασης, βέλτιστος και στοχαστικός έλεγχος, προσαρμοστικός και ψηφιακός έλεγχος).

Είναι προφανές ότι ο κλασικός έλεγχος, σε σχέση με τον μοντέρνο έλεγχο, είναι σχετικά πιο εύκολος, τόσο από θεωρητικής πλευράς, όσο και από πλευράς εφαρμογών. Ο μηχανικός, σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις σχεδιασμού είναι μικρές, πρέπει να εφαρμόζει τις κλασικές τεχνικές ελέγχου, ενώ σε περιπτώσεις που οι απαιτήσεις σχεδιασμού είναι μεγάλες πρέπει να εφαρμόζει τις σύγχρονες τεχνικές ελέγχου.

Μια μεγάλη κατηγορία αλγορίθμων στηρίζεται στην ευστάθεια κατά Liapunov. Από το 1960 έως το 1980 έχει διερευνηθεί ο βέλτιστος έλεγχος τόσο για ντετερμινιστικά, όσο και για στοχαστικά συστήματα. Από το 1980 μέχρι σήμερα έχει αναπτυχθεί ο προσαρμοστικός και ο εύρωστος έλεγχος. Ακόμη, ο έλεγχος ασαφούς λογικής και ο έλεγχος με νευρωνικά δίκτυα, είναι σύγχρονα πεδία του μοντέρνου ελέγχου.

Σήμερα που οι ψηφιακοί υπολογιστές είναι οικονομικά προσιτοί και εύκολα προσβάσιμοι, χρησιμοποιούνται ως ένα τμήμα του συστήματος ελέγχου μέσω του ψηφιακού ελέγχου. Μια ματιά στα μηχανήματα που κατασκευάζει ο άνθρωπος θα μας πείσει ότι σχεδόν όλα λειτουργούν εν μέρει ή εξ ολοκλήρου αυτόματα. Ως παραδείγματα αναφέρουμε το ψυγείο, το θερμοσίφωνο, τον υπολογιστή, τον πυρηνικό αντιδραστήρα, το ρομπότ, το διαστημόπλοιο. Οι διάφορες βιομηχανίες λειτουργούν επίσης, εν μέρει ή εξ ολοκλήρου, αυτόματα, όπως π.χ. βιομηχανίες παραγωγής ζάχαρης, χάρτου, τσιμέντου, αυτοκινήτων. Από τα παραδείγματα αυτά εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο αυτόματος έλεγχος είναι ευρέως διαδεδομένος στον τεχνικό κόσμο.

Ο αυτοματισμός είναι μία πρακτική που δεν συναντάται μόνο στην τεχνολογία αλλά και στην οικονομία, στη διοίκηση, στις ανθρωπιστικές επιστήμες, στη βιολογία και αλλού. Ειδικά για τη βιολογία μπορούμε να πούμε ότι τόσο ο φυτικός όσο και ο ζωικός κόσμος οφείλουν την ύπαρξη τους στον αυτοματισμό. Ας δούμε για παράδειγμα τον άνθρωπο. Ο άνθρωπος είναι ένα πολύπλοκο σύστημα, όπου ένας μεγάλος αριθμός διαδικασιών ρυθμίζεται αυτόματα, π.χ. η πέψη, η διατήρηση της θερμοκρασίας του σώματος, η κυκλοφορία του αίματος, η αναπνοή, η αναπαραγωγή κυττάρων, η επούλωση μίας πληγής κ.τ.λ.

Ο έλεγχος των συστημάτων πραγματοποιείται δια μέσου της θεμελιώδους διαδικασίας της ανατροφοδότησης (ανάδραση, ανασύζευξη) του σήματος εξόδου στην είσοδο του συστήματος. Ο έλεγχος συστημάτων με ανατροφοδότηση παρατηρείται σε πολλά συστήματα, από τους κατώτερους οργανισμούς μέχρι τις αναπτυγμένες οικονομίες. Η συστηματική μελέτη του όρου της ανατροφοδότησης θεμελιώθηκε από τον Norbert Wiener και τους συνεργάτες του, την δεκαετία του 1950.

Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Μηχανολόγων Μηχανικών αναφέρει: «Ένα σύστημα ελέγχου με ανατροφοδότηση είναι ένα σύστημα, το οποίο προσπαθεί να διατηρεί μια προκαθορισμένη σχέση μιας μεταβλητής του συστήματος προς μια άλλη χρησιμοποιώντας τη διαφορά τους ως μέσο ελέγχου»

Σύστημα είναι ένα σύνολο στοιχείων, τα οποία είναι κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους για να επιτελέσουν κάποιο έργο. Για να φέρει ένα σύστημα σε πέρας ένα έργο θα πρέπει να του δοθεί κάποια διέγερση. Το σχήμα 1. 2 δίνει μια εποπτική εικόνα της παραπάνω έννοιας.



Σχήμα 1.2 Το σύστημα, η διέγερση και η απόκριση του

Αν συμβολίσουμε το σύστημα με τον τελεστή Π, τότε η έξοδος του, y(t), συνδέεται με την είσοδο του, α(t), με την σχέση:

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}) = \Pi\left(\alpha(\mathbf{t})\right) \tag{1.1}$$

Σύστημα αυτομάτου ελέγχου είναι ένα σύστημα που τα διάφορα μέρη του είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους, έτσι ώστε να συμπεριφέρονται αυτόματα κατά ένα προκαθορισμένο, επιθυμητό τρόπο.

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου είναι το πρόβλημα κατά το οποίο δίδεται το σύστημα Π και η επιθυμητή συμπεριφορά y_{des}(t) και ζητείται να βρεθεί μια είσοδος α(t), τέτοια ώστε, αν αυτή εφαρμοστεί στο σύστημα, η έξοδος του συστήματος y(t) να είναι η

προδιαγεγραμμένη επιθυμητή συμπεριφορά. Σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου η είσοδος α(t) δεν παράγεται απευθείας από μια γεννήτρια, αλλά είναι η έξοδος ενός πρόσθετου συστήματος, T₁, το οποίο το ονομάζουμε *αντισταθμιστή* ή *ρυθμιστή* ή *ελεγκτή*.

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες στα συστήματα ανοιχτού και κλειστού βρόχου. *Σύστημα ανοιχτού βρόχου* είναι ένα σύστημα, όπου η είσοδος α(t) δεν είναι συνάρτηση της εξόδου y(t). *Σύστημα κλειστού βρόχου* είναι ένα σύστημα όπου η είσοδος α(t) είναι συνάρτηση της εξόδου y(t). Αυτό επιτυγχάνεται με το να μετράμε την έξοδο y(t), να την συγκρίνουμε με μια επιθυμητή έξοδο και να οδηγούμε τη διαφορά τους στην είσοδο του συστήματος. Αυτή η διαδικασία αποτελεί την έννοια της ανάδρασης. Σχηματικά το ανοιχτό και το κλειστό σύστημα φαίνονται στα σχήματα 1.3 και 1.4, αντίστοιχα.



Σχήμα 1.3 Ανοιχτό σύστημα αυτομάτου ελέγχου με διαταραχές



Σχήμα 1.4 Κλειστό σύστημα αυτομάτου ελέγχου με διαταραχές

Η έξοδος του συστήματος ελέγχου ανοιχτού βρόχου y(t) συνδέεται με την είσοδο του α(t) με τη σχέση:

$$y(t) = \Pi\left(\alpha(t) + T_2(t)\right)$$
(1.2)

όπου T2(t) είναι οι διαταραχές του συστήματος. Όμως επειδή:

$$\alpha(t) = T_1(y_{des}(t))$$
(1.3)

τελικά θα έχουμε:

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}) = \Pi \left(\mathbf{T}_{1} \left(\mathbf{y}_{des} \left(\mathbf{t} \right) \right) + \mathbf{T}_{2} \left(\mathbf{t} \right) \right)$$
(1.4)

Για ένα σύστημα κλειστού βρόχου η σχέση που συνδέει την είσοδο με την έξοδο θα είναι:

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}) = \Pi \left(\mathbf{T}_1 \left(\mathbf{E} \left(\mathbf{t} \right) \right) + \mathbf{T}_2 \left(\mathbf{t} \right) \right) \tag{1.5}$$

όπου εξαιτίας της ανάδρασης θα έχουμε:

$$E(t) = y_{des}(t) - K_{f}y(t)$$
(1.6)

Αν αντικαταστήσουμε την (1.6) στην (1.5), παίρνουμε τελικά τη ζητούμενη σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου:

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}) = \Pi \left(\mathbf{T}_{1} \left(\mathbf{y}_{des} \left(\mathbf{t} \right) - \mathbf{K}_{f} \mathbf{y}(\mathbf{t}) \right) + \mathbf{T}_{2} \left(\mathbf{t} \right) \right)$$
(1.7)

Παραπάνω δόθηκε απλά η έννοια της ανάδρασης και του ανοιχτού και κλειστού συστήματος. Υπάρχει πληθώρα ελληνικής και ξένης βιβλιογραφίας, όπου αυτές οι έννοιες αναλύονται με περισσότερη λεπτομέρεια. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα βιβλία των [Evans (1954), Timothy & Bona (1954), Clark (1962), Gibson (1963), Kalman, (1963), Wohman & Johnson (1964), Brockett (1965), Athans & Falb (1966), Wohman (1967), Pontryagin (1968), Aderson & Moore (1971), Atkinson (1972), Anand (1974), Brewer (1974), Dorf (1974), Weyrick (1975), Fuller (1976), Paraskevopoulos & Tzafestas (1976), Leipholz & Abdel-Rohman (1986), Friedland (1987), Skelton (1988), Brogan (1991), K.Ogata (1997), Vincent & Walter (2001), Τζαφέστα (1999), Παρασκευόπουλου (1991), Κρικέλη (2000), Καλλιγεροπούλου (1991), Καρυμπάκα & Σερβετά (1978), Μπιτσιώρη (1989), Πετρίδη (1987)].

Η παραπάνω θεώρηση συστήματος ανοιχτού και κλειστού βρόχου εφαρμόζεται και στις κατασκευές, οδηγώντας σε ελεγχόμενες κατασκευές με ανοιχτό ή κλειστό βρόχο. Ας δούμε στη συνέχεια πως τα παραπάνω στοιχεία ελέγχου προσαρμόζονται στις κατασκευές, με στόχο τον ελεγχό τους σε δυναμικές φορτίσεις.

1.3 Έλεγχος στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού

Στην προσπάθεια τους να σχεδιάσουν αντισεισμικές κατασκευές, οι μηχανικοί οδηγούνταν παλιότερα σε φορείς με μεγάλες διατομές, μικρά ανοίγματα, λύσεις συντηρητικές που ήταν και αντιοικονομικές και συνάμα αναποτελεσματικές. Στη συνέχεια οδηγήθηκαν σε σχεδιασμούς, όπως είδαμε στην ενότητα 1.1, όπου η απορρόφηση ενέργειας του σεισμού κατευθύνεται σε συγκεκριμένα σημεία στην κατασκευή, όπου θα εμφανίζονται βλάβες, χωρίς βέβαια καταρρεύσεις και απώλεια της ανθρώπινης ζωής.

Βέβαια, όσον αφορά στον οικονομικό παράγοντα, αυτό οδήγησε σε ελαφρύτερες κατασκευές. Από την άλλη μεριά, η ικανοποίηση των ικανοτικών ελέγχων αύξησε τον οπλισμό των στοιχείων και, αν υπολογιστεί και το κόστος επισκευής των στοιχείων που αναμένεται να πάθουν βλάβες κατά τη διάρκεια της ζωής του έργου, είναι αμφίβολο αν τελικά οι κατασκευές αυτές είναι οικονομικές ή όχι. Μία πιθανή λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι να σχεδιάζονται οι κατασκευές, έτσι ώστε να συμπεριφέρονται όπως οι μηχανές ή ο άνθρωπος. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει οι κατασκευές να μπορούν να προσαρμόζονται και να γίνονται κατάλληλες ρυθμίσεις στα χαρακτηριστικά απόκρισής τους, καθώς το περιβάλλον των εξωτερικών δυναμικών φορτίων, σεισμού ή ανέμου, αλλάζει.

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί τους νευρώνες ως αισθητήρες, για να αντιληφθεί τις αλλαγές του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται, και με το μυαλό του αποφασίζει πως θα ενεργήσει για να αντιμετωπίσει αυτές τις αλλαγές, εκτελώντας κάποια πράξη με τους μυς του. Έτσι και μία ελεγχόμενη κατασκευή είναι εφοδιασμένη με αισθητήρες για να αντιλαμβάνεται τις εξωτερικές φορτίσεις και τις μετατοπίσεις της, με μια υπολογιστική μονάδα, που παίζει το ρόλο του μυαλού,

όπου εκτελείται ένας αλγόριθμος ανάλογα με τα δεδομένα που παίρνει από τους αισθητήρες που παίζουν το ρόλο των νευρώνων, και με κάποιες συσκευές, που παίζουν το ρόλο των μυών, οι οποίες λειτουργούν με βάση τις εντολές της υπολογιστικής μονάδας και αντιμετωπίζουν έτσι τις εξωτερικές δυναμικές φορτίσεις.

Ο έλεγχος στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού άρχισε στις αρχές του 1970 σε επίπεδο θεωρητικής προσέγγισης και σήμερα είναι σε φάση, όπου γίνονται πειράματα σε μεγάλη κλίμακα, καθώς συστήματα ελέγχου έχουν πλέον μελετηθεί και εγκατασταθεί σε πραγματικές κατασκευές. Ο λόγος για τον οποίο ο έλεγχος στις κατασκευές έχει αποκτήσει αυξημένο ενδιαφέρον έχει να κάνει με τις ραγδαίες εξελίξεις που συμβαίνουν σε συναφείς επιστήμες. Η πρόοδος στον έλεγχο των κατασκευών είναι συνδεδεμένη με την ανάπτυξη των υπολογιστών, των ηλεκτρονικών συσκευών, την επεξεργασία των σημάτων και των τεχνικών αναγνώρισης. Ακόμη, στην ανάπτυξη του ελέγχου των κατασκευών συντελεί η πρόοδος στον τομέα των συσκευών ελέγχου, των αισθητήρων και των υλικών.

Σήμερα, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο, βρισκόμαστε σε μια κατάσταση, όπου ο έλεγχος των κατασκευών δεν έχει γενική αποδοχή από τους πολιτικούς μηχανικούς και τους κατασκευαστές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο έλεγχος των κατασκευών έχει δυο περιοχές-πυλώνες : ο ένας είναι η θεωρία ελέγχου και ο άλλος είναι ο αντισεισμικός σχεδιασμός και η δυναμική των κατασκευών. Αυτές οι δυο περιοχές κινούνται περισσότερο παράλληλα, παρά διασταυρώνονται μεταξύ τους, όπως θα έπρεπε. Σ' αυτό συντελεί κυρίως το γεγονός ότι η θεωρία ελέγχου που αναπτύχθηκε για μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές εφαρμογές δεν ήταν τόσο οικεία στους πολιτικούς μηχανικούς. Από την άλλη, οι ερευνητές που έχουν αναπτύξει και επεκτείνει τη θεωρία ελέγχου σε θεωρητικό επίπεδο, δεν έχουν το κατάλληλο υπόβαθρο γνώσεων αντισεισμικού σχεδιασμού και αντίστροφα. Η προσπάθεια αυτής της διδακτορικής διατριβής είναι να φέρει πιο κοντά αυτούς τους δυο χώρους και να υπάρξει μία όσμωση αυτών των δύο περιοχών.

Εύλογη είναι η ερώτηση πώς η παραπάνω γενική προσέγγιση και περιγραφή ελέγχου συστημάτων της ενότητας 1.2, μεταφράζεται στον έλεγχο των κατασκευών του πολιτικού μηχανικού. Ο κλασικός σχεδιασμός, έναντι τόσο αντοχής όσο και ελέγχου των μετατοπίσεων, προϋποθέτουν να είναι δεδομένες οι ιδιότητες των υλικών, των μελών και της τοπολογίας του

φορέα. Από τη στιγμή που η κατασκευή διαστασιολογηθεί, δε μπορεί να μεταβάλλει τη δυσκαμψία ή τη μάζα της, άρα πως θα μπορούσαμε να την ελέγξουμε; Για την απάντηση αυτού του ερωτήματος, τα τελευταία τριάντα χρόνια άρχισε να διαμορφώνεται μία άλλη αντίληψη που βασική της ιδέα ήταν να προστεθεί «κάτι» στην κατασκευή, που να αντιδρά κατά τη διάρκεια της διέγερσης και να βελτιώνει την απόκριση της. Αυτό το «κάτι» είναι διάφορες συσκευές, οι οποίες αντιδρούν, είτε αλλάζοντας τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, είτε επιβάλλοντας δυνάμεις απευθείας για να αντιμετωπίσουν την εξωτερική διέγερση και να προστατέψουν την κατασκευή.

Έτσι άρχισαν να χρησιμοποιούνται διάφορες συσκευές που τοποθετούνται πάνω και περιμετρικά στην όψη της κατασκευής, οι λεγόμενες συσκευές αποσβεστήρων. Οι αποσβεστήρες μπορεί να είναι αποσβεστήρες τριβής ή βισκοελαστικοί αποσβεστήρες [Soong & Dargush (1999), Constantinou (1998), ATC 17-1 (1993), Syrmakezis (2002), Tsirilakis & Koumousis (2004)]. Για μεταλλικά κυρίως κτίρια μπορεί να είναι διάφορα μεταλλικά στοιχεία με χαμηλό όριο διαρροής ή μεταλλικές συνδέσεις οι οποίες απορροφούν ενέργεια [Fitzgerald, Anagnos, Goodson & Zsutty (1992), Θανόπουλος & Βάγιας (2006)]. Αυτές οι συσκευές τοποθετούνται στην κατασκευή και προσπαθούν να απορροφήσουν ένα μεγάλο κομμάτι της εισερχόμενης ενέργειας, παρά να απορροφηθεί αυτή από τα στοιχεία της κατασκευής. Άρα μπαίνουμε στη λογική να ελέγχουμε τη ροή της ενέργειας και να την οδηγούμε εκεί που εμείς θέλουμε.

Επίσης, χρησιμοποιούνται συσκευές οι οποίες τοποθετούνται στη βάση της κατασκευής και παρέχουν τη λεγόμενη σεισμική μόνωση [Naeim & Kelly (1999), Komodromos (2000), Skinner & Robinson (1993), Kelly (1997), Malhotra (1997), Nagarajaiah & Xiaohong (2001), Pantelides & Ma (1997), Narasimhan, Nagarajaiah, Gavin & Johnson (2002), Koumousis και άλλοι (2003-2004)]. Με τη σεισμική μόνωση αλλάζουμε τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οικοδομήματος, με σκοπό αυτό να «αποφύγει» το σεισμό, και επιπλέον απορροφούμε και ένα κομμάτι της εισερχόμενης ενέργειας, ανάλογα με τον τύπο των εφεδράνων που χρησιμοποιούμε.

Άλλος τρόπος είναι η τοποθέτηση μιας μεγάλης μάζας στην οροφή της κατασκευής, που να μπορεί να κινείται κατά την οριζόντια διεύθυνση ενεργοποιώντας κάποια δυσκαμψία και απόσβεση. Το σύστημα μάζας, ελατηρίου και αποσβεστήρα ονομάζεται αποσβεστήρας συγχρονισμένης μάζας (Tuned Mass Damper, TMD). Ο TMD διαστασιολογείται έτσι, ώστε η

περίοδος του να είναι ίση με μία από τις ιδιοπεριόδους της κατασκευής, και έτσι ώστε η κινούμενη μάζα να βρίσκεται σε διαφορά φάσης 90° με την απόκριση της κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο η κινούμενη μάζα αντιτίθεται στην κίνηση της κατασκευής συνεχώς, με αποτέλεσμα να της μειώνει τις μετακινήσεις κάτω από απρόσμενες φορτίσεις, όπως ο σεισμός και ο άνεμος. Μία παραλλαγή του παραπάνω συστήματος είναι η χρήση πολλαπλών μαζών, η μια πάνω στην άλλη, για να συντονίζονται με περισσότερες συχνότητες του κτιρίου [Singh, Singh & Moreschi (2002), Tsai & Lin (1993), Kareem & Kline (2000), Mattei & Ricciardelli (2002), Pinkaew, Lukkunaprasit & Chatupote (2003)].

Επίσης, αντί για μία μάζα στην οροφή της κατασκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας σωλήνας γεμάτος νερό που έχει σχήμα ανεστραμμένου π. Το νερό, το οποίο κινείται στο σωλήνα αντίθετα από την κίνηση του κτιρίου, προκαλεί μια αντίδραση στη βάση του, η οποία αντιστέκεται στην κίνηση του κτιρίου. Το όλο αυτό σύστημα ονομάζεται αποσβεστήρας συγχρονισμένου υγρού [Sadek (1992), Haroun, Pires & Won (1994)].

Ακόμη μπορεί να κατασκευαστεί ένα πλαίσιο στην οροφή, το οποίο και αυτό να είναι έτσι διαστασιολογημένο, ώστε η ιδιοπερίοδος του να είναι ίση με την πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής, και το οποίο θα αντιτίθεται στην κίνηση του κτιρίου [Johnson, Reaveley & Pantelides (2005), Villaverde, (1998)].

Όλα τα παραπάνω συστήματα αποτελούν ανοιχτά συστήματα ελέγχου των κατασκευών και φαίνονται στο σχήμα 1.5, το οποίο είναι το αντίστοιχο του σχήματος 1.3, που δείχνει τον έλεγχο ανοιχτών συστημάτων σε γενική θεώρηση. Τα ανοιχτά συστήματα ελέγχου, επειδή δεν επεμβαίνουμε στο σύστημα και στις συσκευές που έχουμε τοποθετήσει στην κατασκευή κατά τη διάρκεια της φόρτισης, λέγονται και παθητικά, και οι συσκευές λέγονται παθητικές συσκευές ελέγχου, ο δε έλεγχος ονομάζεται παθητικός έλεγχος. Στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού οι διαταραχές μας είναι συνήθως ο σεισμός και ο άνεμος και η επιθυμητή απόκριση ω(t) θέλουμε να είναι μηδενική.

Τα παθητικά συστήματα παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα. Στην περίπτωση της σεισμικής μόνωσης παρατηρούνται μεγάλες μόνιμες μετατοπίσεις όλης της κατασκευής και επίσης δεν αντιμετωπίζεται επαρκώς το πρόβλημα της ανατροπής και της υψίσυχνης διέγερσης που προέρχεται κυρίως από κοντινούς σεισμούς. Οι κλασικοί αποσβεστήρες δεν απορροφούν αρκετή

ενέργεια, όταν η διέγερση έχει υψηλό συχνοτικό περιεχόμενο ή όταν το κτίριο περιστρέφεται. Η κατάσταση με τους αποσβεστήρες περιπλέκεται ακόμη περισσότερο, διότι η θέση και η διεύθυνση αυτών των συσκευών μέσα στην κατασκευή, μπορεί να έχει σημαντική επιρροή στην αποτελεσματικότητα τους.

Ο αποσβεστήρας συγχρονισμένης μάζας έχει επιρροή στη μείωση της μετακίνησης μόνο στην περίπτωση που τα χαρακτηριστικά του σεισμού σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, δηλαδή όταν η πρωτεύουσα ιδιοπερίοδος του σεισμού βρίσκεται κοντά σε μία από τις πρώτες ιδιοπεριόδους της κατασκευής. Σε άλλη περίπτωση, είτε δεν συνεισφέρει αρκετά στη μείωση της μετατόπισης, είτε την αυξάνει.

Γίνεται αρκετή έρευνα για την αντιμετώπιση των παραπάνω αδυναμιών των παθητικών συστημάτων. Παρ' όλες τις αδυναμίες τους, τα παθητικά συστήματα βελτιώνονται, αντιμετωπίζουν τα προβλήματα τους και βρίσκουν όλο και περισσότερο εφαρμογή σε πραγματικές κατασκευές.





Τα τελευταία 20 χρόνια μια άλλη νοοτροπία, εξέλιξη της φιλοσοφίας του παθητικού ελέγχου, άρχισε να παίρνει τη θέση της στον έλεγχο των κατασκευών. [Spencer & Soong (1999), Housner, Bergman, Caughey, Chassiakos, Claus, Masri, Skelton, Soong, Spencer & Yao (1997), Yao (1972)] Η ιδέα είναι ότι οι συσκευές που τοποθετούνται στην κατασκευή λειτουργούν και την ελέγχουν με την βοήθεια κάποιας εξωτερικής παροχής ενέργειας. Οι συσκευές αυτές λειτουργούν με βάση τις μετακινήσεις της κατασκευής και κάποια εξωτερική εντολή που δίδεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Έτσι σχηματίζεται ένα κλειστό σύστημα ελέγχου το οποίο φαίνεται στο σχήμα 1.6 και είναι το αντίστοιχο του σχήματος 1.4.



Σχήμα 1.6. Σχηματική περιγραφή κατασκευής με κλειστό σύστημα ελέγχου

Το όλο σύστημα του ελέγχου των κατασκευών αποτελείται από τρία υποσυστήματα:

- Το πρώτο υποσύστημα είναι ένα σύστημα παρακολούθησης και καταγραφής κάποιων μεγεθών που θέλουμε να ελέγξουμε, όπως για παράδειγμα των μετατοπίσεων στην κατασκευή. Αυτό το σύστημα κάνει μια καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real time acquisition and signal processing). Το σύστημα αυτό αποτελείται από:
 - Τους αισθητήρες οι οποίοι καταγράφουν τις εδαφικές διεγέρσεις και τις επιταχύνσεις ή τις ταχύτητες σε διάφορα σημεία του κτιρίου.
 - Διάφορα φίλτρα τα οποία μεγεθύνουν το σήμα που καταγράφουν οι αισθητήρες και αφαιρούν διάφορες συχνότητες του σήματος, οι οποίες οφείλονται σε τυχαίο θόρυβο.

• Τους μετατροπείς, οι οποίοι μετατρέπουν το συνεχές σήμα σε διακριτό (A/D converters).

Ο αριθμός των μετατροπέων εξαρτάται από τον αριθμό των θέσεων που επιλέγονται στην κατασκευή για να μετράμε την απόκριση.

- Το δεύτερο υποσύστημα είναι ένα υπολογιστικό σύστημα (Digital Signal Processor, DSP System) το οποίο αποτελείται από:
 - Έναν υπολογιστή, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με έναν επεξεργαστή διακριτού σήματος (Digital Signal Processor) και την απαραίτητη μνήμη (RAM).
 - Έναν αριθμό μετατροπέων, οι οποίοι μετατρέπουν το διακριτό σήμα σε συνεχές (D/A converter) και το στέλνουν στον επενεργητή (actuator) που θα ενεργήσει πάνω στην κατασκευή. Ο αριθμός των μετατροπέων εξαρτάται από το πόσες θέσεις ελέγχου (π.χ. αριθμός δυνάμεων ελέγχου) θέλουμε να επιβάλλουμε στην κατασκευή.
 - Έναν αλγόριθμο ελέγχου που περιγράφει πόσο και πώς θα μεταβληθεί η ιδιότητα του επενεργητή (actuator) που τοποθετήσαμε στην κατασκευή. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος ελέγχου ρυθμίζει πότε θα ανοίξει ή θα κλείσει μια βαλβίδα μιας συσκευής, η οποία συνδέει τα διαγώνια στοιχεία με τη δοκό στην οποία συντρέχουν, μεταβάλλοντας έτσι τη δυσκαμψία του συστήματος. Επίσης, ο αλγόριθμος δίνει π.χ. την τιμή της απαιτούμενης επιβαλλόμενης δύναμης από ένα σερβομηχανισμό, ή το δυναμικό που θα επιβληθεί στο μαγνετορεολογικό υγρό ενός μαγνετορεολογικου αποσβεστήρα, που είναι τοποθετημένος πάνω στην κατασκευή, και κατ' επέκταση την τιμή της έμμεσης επιβαλλόμενης δύναμης που θα επιβληθεί στην κατασκευή.
- 3. Το τρίτο υποσύστημα είναι ένα σύστημα που αποτελείται από διάφορους επενεργητές (actuators), οι οποίοι εκτελούν τις εντολές και εφαρμόζουν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου. Παράδειγμα αποτελούν ένας εφαρμοστής δύναμης, μία υδραυλική συσκευή που ενώνει ή αποσυνδέει τα διαγώνια στοιχεία με τη δοκό στην οποία συντρέχουν, ή ένας μαγνετορεολογικός αποσβεστήρας, όπου ο αλγόριθμος υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο που θα έχει η συσκευή, ώστε να έχουμε ένα επιθυμητό επίπεδο έμμεσης επιβολής δύναμης στην κατασκευή.

Στο σύστημα κλειστού ελέγχου χρησιμοποιούνται διαφορές συσκευές. Μια κατηγορία είναι οι συσκευές όπου η επιβολή δυνάμεων γίνεται άμεσα, με παροχή μεγάλης εξωτερικής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση λέμε ότι έχουμε ενεργό έλεγχο και οι συσκευές ονομάζονται συσκευές ενεργού ελέγχου. Παράδειγμα αποτελεί ένας αποσβεστήρας ενεργής μάζας (Active Mass Damper, AMD), όπου το έμβολο, το οποίο κινείται με τη βοήθεια μίας βαλβίδας και ενός σερβοκινητήρα με παροχή ενέργειας εξωτερικά, κινεί τη μάζα, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω στην κατασκευή [Kobori, Koshika, Yamada & Ikeda (1991), Spencer, Dyke & Deoskar (1998), Battaini, Casciati & Faravelli (1997), Hrovat, Barak & Rabins (1983)].

Μια άλλη κατηγορία συσκευών για τον έλεγχο κλειστού συστήματος είναι οι συσκευές οι οποίες μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά τους με τη βοήθεια πολύ μικρής εξωτερικής παροχής ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά αυτών των συσκευών, επιτυγχάνεται έμμεση επιβολή δυνάμεων πάνω στην κατασκευή. Τότε λέμε ότι έχουμε ημι-ενεργό έλεγχο και οι συσκευές ονομάζονται συσκευές ημι-ενεργού ελέγχου. Ο έλεγχος που είναι βασισμένος σε ημι-ενεργές συσκευές συνδυάζει τα θετικά χαρακτηριστικά από τα παθητικά και τα ενεργά συστήματα. Το ενδιαφέρον που απέκτησαν αυτά τα συστήματα τα τελευταία χρόνια μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός, ότι προσφέρουν ότι και τα ενεργά συστήματα, χωρίς να χρειάζεται να καταναλώσουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Στην πραγματικότητα μπορούν να λειτουργούν με μια γεννήτρια, όταν η κύρια πηγή παροχής ενέργειας κατά την διάρκεια του σεισμικού γεγονότος ενδεχομένως αστοχήσει. Υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, τα ημι-ενεργητικά συστήματα συμπεριφέρονται πολύ καλύτερα από τα παθητικά, και έχουν την ικανότητα να επιτυγχάνουν συμπεριφορά της κατασκευής όμοια με αυτή των πλήρως ενεργών συστημάτων. Έτσι, μειώνεται η απόκριση της κατασκευής, όταν αυτή φορτίζεται από ευρύ φάσμα δυναμικών φορτίσεων. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών αποτελούν οι αποσβεστήρες ελεγγόμενης ροής, οι αποσβεστήρες ελεγγόμενης τριβής και οι αποσβεστήρες ελεγγόμενου υγρού, όπως μαγνετορεολογικοί (MR dampers), ή ηλεκτρορεολογικοί (ER dampers), αποσβεστήρες. Συσκευές ενεργού και ημι- ενεργού ελέγχου φαίνονται στο σχήμα 1.7 [Akbay & Aktan (1995), Auricchio, Faravelli, Magonette & Torra (2001), Dyke, Spencer, Sain, & Carlson (1996), Faravelli & Casciati (2002), Gavin & Hanson (1996), Inaudi (1997), Kobori, Takahashi, Nasu & Niwa (1993), Kurata, Kobori, Takahashi, Niwa & Midorikawa (1999), Makris, Burton, Hill & Jordan (1996), Renzi (2001), Symans & Constantinou (1999), Xu, Qu & Chen (2001), Yi, Dyke & Caicedo (2001), Yoshida (2003)].



Σχήμα 1.7. Συσκευές ενεργού ελέγχου: (α) αποσβεστήρας ενεργής μάζας, (β) αποσβεστήρας ενεργού υγρού. Συσκευές ημι-ενεργού ελέγχου: (γ) αποσβεστήρας ελεγχόμενης ροής, (δ) μαγνετορεολογικός αποσβεστήρας και (ε) αποσβεστήρας ελεγχόμενης τριβής

Ένας έλεγχος με συνδυασμό παθητικών και ενεργών ή ημι-ενεργών συστημάτων λέγεται υβριδικός έλεγχος (hybrid control) και φαίνεται στο σχήμα 1.8. Στα υβριδικά συστήματα ένα μεγάλο μέρος του στόχου (μείωση της απόκρισης) επιτυγχάνεται από ένα σύστημα παθητικού ελέγχου που συνυπάρχει στην κατασκευή με ένα σύστημα ενεργού ή ημι-ενεργού ελέγχου. Αποτέλεσμα αυτής της διαμόρφωσης είναι να απαιτείται μικρότερο ποσό ενέργειας για τον έλεγχο και το σύστημα ενεργού ή ημι-ενεργού ελέγχου να διορθώνει την κατάσταση της απόκρισης της κατασκευής, εκεί όπου δεν μπορεί να αποδώσει το παθητικό σύστημα [Nagarajaiah (1994), Spencer & Sain (1997), Symans, Madden & Wongprasert (2000), Yoshida

& Fujio (2000), Ciampi, De Angelis & Renzi (2000), Hu, Agrawal & Yang (2000), Σολδάτος, Παπαδόπουλος, Αρβανίτης, Σταυρουλάκης & Ζαχαρενάκης (2002), Ramallo, Johnson & Spencer (2002), Spencer & Nagarajaiah (2003)].



Σχήμα 1.8. Ελεγχόμενη κατασκευή με σύστημα υβριδικού ελέγχου

Ένας ακόμη ορισμός που βοηθά να συνδέσουμε έννοιες από την κλασική θεωρία ελέγχου με τον έλεγχο των κτιρίων είναι αυτός του ελέγχου ανάδρασης. Πιο συγκεκριμένα, όταν μετράμε μόνο τις μεταβλητές απόκρισης του συστήματος, και με βάση αυτές και με κάποιον αλγόριθμο ελέγχου υπολογίζουμε τις δυνάμεις που πρέπει να επιβάλουμε στην κατασκευή σε κάθε χρονική στιγμή, τότε μιλάμε για *έλεγχο ανάδρασης (feedback control)*. Όταν όμως υπολογίζουμε και διορθώνουμε τις δυνάμεις ελέγχου με δεδομένο μόνο τη διέγερση που εισάγεται στην κατασκευή από σεισμό ή άνεμο, μετρώντας για παράδειγμα με τους αισθητήρες την επιτάχυνση στη βάση της κατασκευής, τότε μιλάμε για *έλεγχο τροφοδότησης (feed forward control)*.

Μπορούμε ακόμη να έχουμε και συνδυασμό των δύο περιπτώσεων, όπου δυνάμεις ελέγχου υπολογίζονται με δεδομένα από τις μετρήσεις των αισθητήρων που βρίσκονται πάνω στην κατασκευή και δείχνουν την απόκριση της, και των αισθητήρων που βρίσκονται στην βάση της κατασκευής και δείχνουν τη διέγερση του σεισμού.

Ακόμη, όταν έχουμε αισθητήρες με τους οποίους μετράμε όλες τις μεταβλητές κατάστασης (π.χ. μετακινήσεις και ταχύτητες σε όλους τους ορόφους) και ο υπολογισμός των δυνάμεων ελέγχου βασίζεται στις μετρήσεις όλων των μεταβλητών κατάστασης, τότε λέμε ότι έχουμε *έλεγχο με* ολόκληρη την κατάσταση του συστήματος (full state control). Αν έχουμε ένα περιορισμένο αριθμό αισθητήρων, από τους οποίους μετράμε μόνο μερικές μεταβλητές κατάστασης, και με βάση μια τεχνική υπολογίζουμε τη συνολική κατάσταση του συστήματος, και στη συνέχεια υπολογίζουμε τις δυνάμεις ελέγχου, τότε λέμε ότι έχουμε *έλεγχο με παρατηρητή (control with observer*).

Αυτό λοιπόν που κάνει γενικότερα ο έλεγχος στις κατασκευές είναι να προσπαθεί να περιορίσει τις επιπλέον μετακινήσεις της κατασκευής, ώστε αυτή να μην ξεπεράσει τα ελαστικά της όρια και παρατηρηθούν εκτεταμένες βλάβες. Αυτό επιτυγχάνεται είτε κατευθύνοντας τη ροή της εισερχόμενης ενέργειας σε συσκευές ή σε βοηθητικά στοιχεία που την απορροφούν, είτε αλλάζοντας τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, ώστε να αποφευχθεί ο συντονισμός της, και να έχουμε ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων, είτε με επιβολή αυτοισορροπούμενων εσωτερικών δυνάμεων, οι οποίες αντιτίθεται στην κίνηση της κατασκευής.

Αυτές οι τρεις αρχές μπορούν να υλοποιηθούν με τη χρήση συσκευών που λειτουργούν χωρίς παροχή ενέργειας εξωτερικά, ανεξάρτητα της απόκρισης της κατασκευής και της διέγερσης που κάθε φορά διεγείρει την κατασκευή (παθητικός έλεγχος). Όμως μπορεί να χρησιμοποιηθούν και συσκευές οι οποίες λειτουργούν με την παροχή εξωτερικής ενέργειας, με βάση την απόκριση της κατασκευής και τη διέγερση που διεγείρει την κατασκευή (ενεργός έλεγχος) ή συσκευές που μεταβάλουν τα χαρακτηριστικά τους και λειτουργούν με ελάχιστη παροχή ενέργειας (ημιενεργός έλεγχος). Τέλος, αν χρησιμοποιηθεί και κάποιος συνδυασμός των παραπάνω, δηλαδή παθητικός με ενεργό έλεγχο ή ενεργός με ημι-ενεργό έλεγχο ή κυρίως παθητικός με οτι έχουμε υβριδικό έλεγχο.

Αρχίζει να διαφαίνεται ότι η ολοκληρωμένη εφαρμογή του αυτομάτου ελέγχου στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού είναι μία πρόκληση, η οποία απαιτεί μία σύνθεση πολλών επιστημονικών πεδίων. Σε αυτά τα πεδία συμπεριλαμβάνονται: η θεωρία ελέγχου (control theory), η δυναμική των κατασκευών και η σεισμική μηχανική, η επιστήμη των υπολογιστών, η επεξεργασία δεδομένων (data processing), η αναγνώριση συστημάτων (system identification), οι

μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές κατασκευές, η επιστήμη των υλικών (material science), η τεχνολογία των αισθητήρων.

Η ανάπτυξη των συστημάτων αυτόματου ελέγχου έχει φτάσει σήμερα σε ένα στάδιο εφαρμογής σε πραγματικές κατασκευές, τόσο σε κτίρια όσο και σε γέφυρες. Οι περισσότερες από αυτές τις κατασκευές δοκιμάστηκαν από πραγματικά φορτία ανέμου και ισχυρές σεισμικές κινήσεις που έλαβαν χώρα μετά την εγκατάσταση των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου στις κατασκευές. Οι παρατηρούμενες αποκρίσεις των κατασκευών αυτών υπό την επίδραση των παραπάνω φορτίων παρείχαν επαρκείς πληροφορίες για τη σύγκριση της πραγματικής συμπεριφοράς της κατασκευής, και αυτής που προέκυψε με τη διαδικασία προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για να προβλέψει αριθμητικά την πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής με έλεγχο. Επίσης, επαληθεύτηκε η αξιοπιστία πολύπλοκων ηλεκτρονικών, ψηφιακών και σερβουδραυλικών συστημάτων κάτω από πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Επιπλέον, επαληθεύτηκε και η ικανότητα όλου του συστήματος ελέγχου να λειτουργεί ή να σταματά κάτω από εξαιρετικά ακραίες πραγματικές συνθήκες φόρτισης σεισμού ή ανέμου. Στη συνέχεια φαίνονται ενδεικτικά κάποιες πρακτικές εφαρμογές ελέγχου σε κτίρια.

Στο σχήμα 1.9 φαίνεται ένας υβριδικός αποσβεστήρας μάζας (Hybrid Mass Damper, HMD) που εγκαταστάθηκε στο κτίριο Sendagaya INTES, στο Τόκιο, το 1992. Ο HMD τοποθετήθηκε στον 11° και τελευταίο όροφο, και αποτελείται από δύο μάζες, οι οποίες ελέγχουν την πλευρική μετακίνηση και τη στρέψη. Όταν οι μάζες κινούνται σε φάση, τότε ελέγχουν την πλευρική μετακίνηση, ενώ όταν είναι σε διαφορά φάσης ελέγχουν τη στρέψη. Ο HMD είναι ένας συνδυασμός παθητικού αποσβεστήρα συγχρονισμένης μάζας (TMD), και ενός ενεργού εφαρμοστή δύναμης ελέγχου.

Μία άλλη εφαρμογή του HMD είναι στο κτίριο Hankyu Chayamachi στην Οσάκα της Ιαπωνίας που φαίνεται στο σχήμα 1.10. Το κτίριο αυτό έχει 160 μέτρα ύψος και αποτελείται από 34 ορόφους. Σε αυτή την περίπτωση το ελικοδρόμιο που υπήρχε στην οροφή και ζυγίζει 480 τόνους, 3.5% του συνολικού βάρους του κτιρίου, χρησιμοποιήθηκε ως κινούμενη μάζα. Το ελικοδρόμιο στηρίζεται πάνω σε 6 πολυεπίπεδα ελαστομερή εφέδρανα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο αυτόματοι εφαρμοστές δυνάμεων, 5 τόνων ο καθένας, κάθετοι μεταξύ τους στην οριζόντια διεύθυνση. Το όλο σύστημα μαζί με τον ψηφιακό ελεγκτή φαίνεται στο σχήμα 1.10 (β). Έλεγχος για στρέψη δε

λήφθηκε υπόψη. Η ιδιοπερίοδος του συστήματος του ελικοδρομίου με τα ελαστομερή εφέδρανα είναι 3.6 s, λίγο μικρότερη από την πρώτη ιδιοπερίοδο του κτιρίου που είναι 3.8 s.



Σχήμα 1.9. (α) Το κτίριο Sendagaya INTES στο Τόκιο (β) το σύστημα αυτομάτου ελέγχου και (γ) το σύστημα των δύο HMD που εγκαταστάθηκε στην κορυφή του κτιρίου



Σχήμα 1.10. (α) Το κτίριο Hankyu Chayamachi στην Οσάκα της Ιαπωνίας (β) Το ελικοδρόμιο και το σύστημα αυτομάτου ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε

Διάφοροι περιορισμοί κατά το σχεδιασμό, όπως για παράδειγμα η έλλειψη επαρκούς χώρου, μπορούν να αποκλείσουν την επιλογή εφαρμογής HMD ή TMD. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται το σύστημα αποσβεστήρα ενεργής μάζας (Active Mass Damper, AMD) ή

αλλιώς οδηγός ενεργής μάζας (Active Mass Driver, AMD). Η διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο σύστημα ελέγχου, HMD, είναι ότι σε αυτό το σύστημα η μάζα κινείται εξ ολοκλήρου με αυτόματο έλεγχο, δια μέσου ενός εμβόλου που εφαρμόζει τη δύναμη πάνω στη μάζα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.11. Ένα σύστημα AMD εγκαταστάθηκε στο κτίριο Kyobashi Seiwa στο Τόκιο και φαίνεται στο σχήμα 1.12. Το κτίριο Kyobashi Seiwa είναι ένα 11-όροφο μεταλλικό κτίριο με επιφάνεια κάθε ορόφου 423 m². Όπως φαίνεται από την εικόνα 1.12 (α) το σύστημα ελέγχου αποτελείται από δύο AMD: το αρχικό σύστημα AMD χρησιμοποιείται για τη μείωση της οριζόντιας μετακίνησης και έχει βάρος 4 τόνων περίπου, ενώ το δεύτερο AMD χρησιμοποιείται για να ελαττώσει τη στρεπτική κίνηση του κτιρίου και έχει βάρος 1 τόνου. Στο σχήμα 1.12 (β) φαίνεται αναλυτικά το σύστημα των δύο AMDs.



Σχήμα 1.11. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου αποσβεστήρα ενεργής μάζας (Active Mass Damper, AMD)

Οι Sack και Patten (1993) διεξήγαγαν πειράματα μικρής κλίμακας, στα οποία ένας υδραυλικός εφαρμοστής με ελεγχόμενο άνοιγμα εφαρμόστηκε σε ένα μοντέλο γέφυρας για την απορρόφηση της ενέργειας που εισαγόταν από τα φορτηγά που κυκλοφορούσαν. Στη συνέχεια, για να πιστοποιηθεί αυτή η τεχνολογία, ακολούθησε πραγματική εφαρμογή στη γέφυρα (σχήμα 1.13). Αυτό το πείραμα αποτελεί και την πρώτη εφαρμογή σε πραγματική κλίμακα με αυτόματο έλεγχο και πραγματοποιήθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.





(α)



Σχήμα 1.12. (α) Το κτίριο Kyobashi Seiwa στο Τόκιο και το σύστημα ελέγχου που αποτελείται από δύο AMD. (β) Οι δύο συσκευές ΑΜD με περισσότερες λεπτομέρειες



Σχήμα 1.13. Πραγματική εφαρμογή του υδραυλικού εφαρμοστή με ελεγχόμενο άνοιγμα σε γέφυρα

Μία εφαρμογή του συστήματος μεταβλητής δυσκαμψίας πραγματοποιήθηκε το 1990, στο κτίριο Kajima Research Lab., στο Τόκιο. Το κτίριο αυτό είναι μία μεταλλική τριώροφη κατασκευή συνολικού βάρους 400 τόνων περίπου (σχήμα 1.14). Συσκευές μεταβλητής δυσκαμψίας, VSD, τοποθετήθηκαν μεταξύ των διαγωνίων και των δοκών. Όταν όλες οι συσκευές είναι κλειδωμένες η πρώτη ιδιοσυχνότητα του κτιρίου είναι 2.5 Hz (ιδιοπερίοδο 0.4 s), ενώ όταν τα διαγώνια δε συμμετέχουν (δηλαδή η βαλβίδα της συσκευής είναι ανοιχτή), η ιδιοσυχνότητα του κτιρίου γίνεται 1.0 Hz (ιδιοπερίοδο 1 s). Επιπρόσθετα διαγώνια στοιχεία εγκαταστάθηκαν στη διαμήκη διεύθυνση για να αυξήσουν τη δυσκαμψία του κτιρίου, και έτσι ο έλεγχος να εκτελείται με την ελάχιστη στρέψη. Το σύστημα που εγκαταστάθηκε στο κτίριο συμπληρώνει μία βοηθητική πηγή ενέργειας, η οποία επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί για τουλάχιστον 30 λεπτά μετά από ξαφνική διακοπή της κανονικής πηγής παροχής ενέργειας. Επιπλέον, μετά τη διακοπή παροχής ενέργειας ο μηχανισμός προκαλεί το κλείδωμα των VSD, αυξάνοντας τη δυσκαμψία του κτιρίου.



Σχήμα 1.14. Το κτίριο Kajima Research Lab., στο Τόκιο και η εφαρμογή της συσκευής μεταβλητής δυσκαμψίας μεταξύ των διαγώνιων στοιχείων και των δοκών

Αρκετές συσκευές από ER ρευστά μικρής κλίμακας [Ehrgot & Marsi (1992), Gavin & Hanson (1994), Makris (1996)] και μία συσκευή μεγάλης κλίμακας [Gavin & Hanson (1994)] έχουν μελετηθεί, κατασκευαστεί και ελεγχθεί, για να ερευνηθεί η ικανότητά τους στον έλεγχο των κατασκευών. Η κρίσιμη ερώτηση που παραμένει είναι εάν οι συσκευές από ER ρευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ώστε να δημιουργούν δυνάμεις ελέγχου που απαιτούνται για τον έλεγχο των κατασκευών σε πραγματική κλίμακα. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα πρέπει να αναμένει μία καλύτερη κατανόηση της πολυπλοκότητας και της πραγματικής, μη γραμμικής συμπεριφοράς του ER ρευστού από τη μία πλευρά και την ανάπτυξη καταλλήλων συσκευών από την άλλη.

Τα μαγνετορεολογικά (MR) υγρά είναι το μαγνητικό ανάλογο των ηλεκτρορεολογικών ρευστών. Η αντίσταση στη ροή των μαγνετορεολογικών υγρών οφείλεται στην επιβολή μαγνητικού πεδίου. Από τη σύγκριση των ιδιοτήτων τυπικών ηλεκτρορεολογικών και μαγνετορεολογικών ρευστών, προκύπτει ότι οι συσκευές από μαγνετορεολογικά ρευστά μπορούν να προσφέρουν αρκετά ελκυστικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η υψηλή τάση διαρροής, το χαμηλό ιξώδες και η ευσταθής υστερητική συμπεριφορά για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας. Ερευνητές [Carlson & Weiss (1994)] απέδειξαν ότι η μεγάλη τάση διαρροής μαγνετορεολογικών υγρών μπορεί να διατηρηθεί ακόμη και όταν τα ρευστά βρίσκονται σε θερμοκρασία της τάξης των 40° με 150° βαθμών Κελσίου. Η μελέτη για την εφαρμογή των μαγνετορεολογικών ρευστών σε κατασκευές άρχισε από την ερευνητική ομάδα των [Spencer & Dyke (1996)]. Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μια εισαγωγή στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών, στη θεωρία αυτομάτου ελέγχου και στις δυνατότητες και προοπτικές να συνδυαστούν αυτές οι δυο περιοχές. Επιπλέον παρουσιάστηκαν κάποια αντιπροσωπευτικά παραδείγματα ελέγχου των κατασκευών. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι στόχοι και η δομή της παρούσας διατριβής.

Κεφάλαιο 2

ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

2.1 Στόχος της διατριβής

Ο έλεγχος των κατασκευών εμπεριέχει δυο βασικές επιστημονικές περιοχές: τη θεωρία ελέγχου από την μία πλευρά και τον αντισεισμικό σχεδιασμό με τη δυναμική των κατασκευών από την άλλη. Αυτές οι δυο περιοχές κινούνται περισσότερο παράλληλα, παρά διασταυρώνονται μεταξύ τους, όπως θα έπρεπε. Σε αυτό συντελεί κυρίως το γεγονός ότι η θεωρία ελέγχου, που αναπτύχθηκε για μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές εφαρμογές, δεν ήταν τόσο οικεία στους πολιτικούς μηχανικούς, ενώ από την άλλη οι ερευνητές που ανέπτυξαν και επέκτειναν τη θεωρία ελέγχου σε θεωρητικό επίπεδο δεν είχαν το κατάλληλο αντισεισμικό υπόβαθρο.

Η μεγάλη πρόκληση στη θεωρία ελέγχου των κατασκευών είναι η σύνθεση της φιλοσοφίας του αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών και της θεωρίας αυτομάτου ελέγχου. Αυτός είναι και ο γενικότερος στόχος της παρούσας διατριβής, να φέρει πιο κοντά αυτούς τους δυο χώρους και να συμβάλει στην όσμωση τους. Στόχος της είναι δηλαδή, να συνθέσει αυτές τις δύο περιοχές και να κάνει τις κατάλληλες τροποποιήσεις, όπου χρειαστεί, για να προτείνει μία ολοκληρωμένη διαδικασία ελέγχου προσαρμοσμένη κατάλληλα σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού, και συγκεκριμένα σε πολυώροφα κτίρια που υποβάλλονται σε σεισμικές διεγέρσεις.

Όπως ειπώθηκε, στο κεφάλαιο 1 ο έλεγχος των κατασκευών στηρίζεται κυρίως στην ανάδραση. Μετράται η απόκριση και με βάση αυτή ελέγχουμε την κατασκευή. Η παρούσα διατριβή στοχεύει, μέσα από την κατανόηση της δυναμικής των κατασκευών και των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης, να προσαρμόσει ή να προτείνει αλγορίθμους ελέγχου, οι οποίοι θα βασίζονται όχι μόνον στην ανάδραση της απόκρισης, αλλά και στα

χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης που διεγείρει κάθε φορά την κατασκευή. Δηλαδή ο έλεγχος θα «βλέπει» τα χαρακτηριστικά της διέγερσης και θα προσαρμόζει κάθε φορά, ανάλογα, το μητρώο ανάδρασης.

Ακόμη και αν μπορούσαμε να επιτύχουμε μια τέλεια διαδικασία ελέγχου, αλλά αυτή δεν στηριζόταν στα χαρακτηριστικά της εκάστοτε εξωτερικής φόρτισης που διεγείρει την κατασκευή, αυτή η διαδικασία ελέγχου θα ήταν καταδικασμένη να αποτύχει. Ακόμη και αν ο έλεγχος στηρίζεται σε μία περιβάλλουσα χαρακτηριστικών των σεισμών που πιθανόν θα διεγείρουν την κατασκευή, και έχουμε υπολογίσει εκ των προτέρων, πάλι θα είναι αναποτελεσματικός. Αυτό συμβαίνει γιατί πάντα θα υπάρχει εκείνη η διέγερση, η οποία θα έχει ελαφρώς διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά από την περιβάλλουσα για την οποία έχουμε σχεδιάσει το σύστημα, και έτσι ο έλεγχος δεν θα μπορέσει να ικανοποιήσει τις προσδοκίες μας.

Συνεπώς, απαραίτητη προϋπόθεση για αποτελεσματικό έλεγχο έναντι σεισμού είναι να μετράμε συνεχώς το σήμα το οποίο διεγείρει την κατασκευή, να αναγνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του, και στη συνέχεια με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, να λαμβάνουμε τις κατάλληλες αποφάσεις και να κάνουμε τις σωστές επιλογές, όσον αφορά τον τρόπο που θα δουλέψουν οι συσκευές ελέγχου, οι οποίες είναι εγκατεστημένες στην κατασκευή.

Οι κλασικές διεγέρσεις και φορτίσεις που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο των ηλεκτρομηχανολογικών κατασκευών είναι αρμονικές χρονικές συναρτήσεις, παλμοί, όπως επίσης και κρουστικές, βηματικές ή συναρτήσεις αναρρίχησης. Στα κτίρια οι δυναμικές φορτίσεις που επιβάλλονται είναι κυρίως η σεισμική φόρτιση με κάποιο εύρος συχνοτικού περιεχομένου, η πίεση του ανέμου, η φόρτιση λόγω μιας έκρηξης, η πρόσκρουση ενός αντικειμένου στην κατασκευή, ένας παλμός και η δυναμική διέγερση από τη λειτουργία κάποιας συσκευής που είναι τοποθετημένη μέσα στην κατασκευή.

Στην παρούσα διατριβή θα ασχοληθούμε κυρίως με σεισμικές και αρμονικές διεγέρσεις καθώς και φορτίσεις παλμών. Βέβαια, αν μπορεί κανείς να ελέγχει ένα σύστημα για μια διέγερση που προσομοιάζεται από μια συνάρτηση κρούσης η οποία έχει επίπεδο φάσμα, τότε εύκολα μπορεί να ελέγξει και ένα σύστημα το οποίο υπόκειται σε μία σεισμική διέγερση, της οποίας το συχνοτικό περιεχόμενο κυμαίνεται εντός κάποιου εύρους. Όμως, η σεισμική φόρτιση έχει μια ιδιαιτερότητα και τα χαρακτηριστικά της μπορεί να τροποποιούν ή πολλές φορές να κατευθύνουν τη διαδικασία ελέγχου.

Η σεισμική διέγερση, στην πραγματικότητα, είναι ένα μη στάσιμο σήμα. Αυτό σημαίνει ότι το συχνοτικό περιεχόμενο μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια επιβολής της σεισμικής διέγερσης και άρα θα πρέπει αυτό να μετράται σε πραγματικό χρόνο και ο αλγόριθμος να στηρίζεται στο εκάστοτε μετρούμενο κομμάτι της σεισμικής διέγερσης. Επομένως, στην παρούσα διατριβή τα γενικότερα χαρακτηριστικά και η πορεία του ελέγχου των κατασκευών που θα ακολουθηθεί θα είναι:

- α) Η συνεχής μέτρηση του σήματος διέγερσης σε πραγματικό χρόνο.
- β) Η αναγνώριση των χαρακτηριστικών της διέγερσης.
- γ) Η λειτουργία του αλγορίθμου με βάση τα χαρακτηριστικά της διέγερσης.
- δ) Η απόφαση λειτουργίας των συσκευών ελέγχου με βάση και τη μετρούμενη απόκριση της κατασκευής.
- ε) Η επιβολή αυτής της απόφασης στην κατασκευή με έμμεσο ή άμεσο τρόπο, ανάλογα με τη συσκευή ελέγχου που θα χρησιμοποιήσουμε.

Άμεσος τρόπος επιβολής σημαίνει απευθείας επιβολή δυνάμεων στην κατασκευή με τη βοήθεια ενός εμβόλου, επενεργητή, του οποίου η κίνηση ρυθμίζεται μέσω μιας βαλβίδας (αποσβεστήρας ενεργής μάζας), ενώ έμμεσος τρόπος επιβολής δυνάμεων γίνεται μέσω της αλλαγής των χαρακτηριστικών των συσκευών ελέγχου, της ελεγχόμενης μεταβολής της δυσκαμψίας, της απόσβεσης, της εισαγωγής ελεγχόμενης τριβής κ.α.

Στη διδακτορική αυτή διατριβή αρχικά διερευνώνται, βιβλιογραφικά, υπάρχοντες αλγόριθμοι ελέγχου που έχουν αναπτυχθεί από διάφορες άλλες επιστήμες. Η θεωρία και οι αλγόριθμοι ελέγχου έχουν αναπτυχθεί κυρίως για μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές κατασκευές και έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος όσον αφορά τον έλεγχο σε αυτούς τους τομείς. Αφού μελετηθούν οι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για αυτές τις περιοχές, στη συνέχεια επιλέγονται εκείνοι οι αλγόριθμοι, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για τον έλεγχο των κατασκευών πολιτικού μηχανικού και κυρίως για κτίρια.

Τα κτίρια ως υπερστατικοί φορείς με μεγάλη μάζα και δυσκαμψία διαφέρουν από τις ηλεκτρομηχανολογικές κατασκευές, αφού οι δεύτερες είναι κυρίως μηχανισμοί με μικρότερη μάζα. Επίσης, ο έλεγχος εκεί επιβάλλεται με τη βοήθεια εξωτερικής δύναμης μέσω εμβόλου και τη ρύθμιση κάποιας βαλβίδας, με σκοπό ο μηχανισμός να ακολουθήσει μια προδιαγεγραμμένη πορεία (π.χ. έλεγχος θέσης). Στις κατασκευές η εξωτερική διέγερση υπάρχει από την ίδια τη φύση (σεισμός) και προσπαθούμε με τον έλεγχο να μειωσουμε τις

συνέπειες της και συγκεκριμένα να μειώσουμε τις σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων. Αυτό μπορεί να γίνει με απευθείας ή με έμμεσο τρόπο.

Στον απευθείας τρόπο ο έλεγχος πραγματοποιείται με επιβολή ίσων και αντίθετων δυνάμεων, κάτι όμως που αποφεύγουμε συνήθως, διότι η μεγάλη μάζα και δυσκαμψία κάνουν απαγορευτική τη χρήση εμβόλων και βαλβίδων. Στον έμμεσο τρόπο ο έλεγχος πραγματοποιείται αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά της κατασκευής ή τα χαρακτηριστικά των συσκευών που είναι τοποθετημένες στην κατασκευή. Εξαιτίας λοιπόν των διαφορών των κτιρίων και των ηλεκτρομηχανολογικών κατασκευών πρέπει να επιλεγούν και να προσαρμοστούν κατάλληλα οι υπάρχοντες αλγόριθμοι ελέγχου.

Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διδακτορική διατριβή ασχολείται αρχικά με τον έλεγχο τοποθέτησης πόλων (Pole Placement Control) ή αλλιώς και έλεγχο των ιδιοτιμών, και διαπιστώνεται ότι μπορεί να αποτελέσει έναν αλγόριθμο ελέγχου για τις κατασκευές. Η αδυναμία του αλγορίθμου είναι ότι προϋποθέτει τους πόλους της ελεγγόμενης κατασκευής εκ των προτέρων γνωστούς. Εάν οι διεγέρσεις που θα εφαρμοστούν στην κατασκευή και τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. συχνοτικό περιεχόμενο) είναι εκ των προτέρων γνωστά, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε εκ των προτέρων και τους πόλους της ελεγχόμενης κατασκευής. Αυτό που συμβαίνει όμως στην πράξη είναι ότι η κάθε σεισμική διέγερση που πρόκειται να επιβληθεί στην κατασκευή έχει διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά (π.χ. συχνοτικό περιεχόμενο) από την προηγουμένη, ενώ ακόμη και για την ίδια διέγερση τα δυναμικά χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια επιβολής της (μη στάσιμο κύμα). Επομένως, δε μπορούμε να δώσουμε εκ των προτέρων κάποιες τιμές στους πόλους της ελεγχόμενης κατασκευής. Στην αντιμετώπιση αυτής της αδυναμίας έρχεται να επέμβει η παρούσα διατριβή και να προτείνει μια συστηματική και αυτόματη διαδικασία για τον υπολογισμό των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής, που βασίζεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά της εισερχομένης κάθε φορά, σεισμικής διέγερσης και στοχεύει στην αποφυγή του συντονισμού μεταξύ κατασκευής και διέγερσης.

Στην συνέχεια η διατριβή ασχολείται με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης (Sliding Mode Control), ο οποίος επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των κατασκευών που υπόκεινται σε δυναμικές φορτίσεις. Σύμφωνα με τον έλεγχο μορφής ολίσθησης υπολογίζεται αρχικά η επιφάνεια ολίσθησης και στη συνέχεια υπολογίζεται η δύναμη ελέγχου. Η επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να υπολογιστεί είτε με τον βέλτιστο τετραγωνικό ρυθμιστή (Linear Quadratic Regulator, LQR), είτε με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων (Pole

Placement). Αυτό είναι και πάλι το σημείο στο οποίο επεμβαίνει η παρούσα διατριβή, που προτείνει τον υπολογισμό της επιφάνειας ολίσθησης με βάση τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων. Οι πόλοι της ελεγχόμενης κατασκευής πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης υπολογίζονται με μια συστηματική και αυτόματη διαδικασία, η οποία βασίζεται κάθε φορά στα χαρακτηριστικά της εξωτερικής διέγερσης, ενώ δύναμη ελέγχου υπολογίζεται από τη θεωρία ευστάθειας κατά Lyapunov.

Τέλος, η διατριβή συμβάλει στο σχεδιασμό κατασκευών με διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας, οι οποίοι μπορεί να συμμετέχουν ή όχι στη δυσκαμψία της κατασκευής, μέσω συσκευών μεταβλητής δυσκαμψίας με τις οποίες είναι εφοδιασμένοι. Οι συσκευές μεταβλητής δυσκαμψίας, μέσω του ελέγχου μιας βαλβίδας, επιτρέπουν ή όχι τη σύνδεση των μεταλλικών διαγώνιων στοιχείων με το φέροντα οργανισμό. Μεταβάλλουν έτσι, μέσω του ελέγχου της βαλβίδας, τη δυσκαμψία της κατασκευής, και κατ' επέκταση τα δυναμικά της χαρακτηριστικά. Στόχος της διατριβής είναι η λειτουργία και ο έλεγχος αυτών των συσκευών να γίνεται με έναν προτεινόμενο αλγόριθμο ελέγχου μεταβλητής δυσκαμψίας, ο οποίος βασίζεται και πάλι στα χαρακτηριστικά της διέγερσης που καταπονεί κάθε φορά την κατασκευή και έχει σαν αποτέλεσμα την αποφυγή του συντονισμού μεταξύ κατασκευής και διέγερσης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποφασίζει για τη λειτουργία των συσκευών μεταβλητής δυσκαμψίας (αν δηλαδή πρέπει να ανοίγουν ή να κλείνουν οι βαλβίδες) που βρίσκονται τοποθετημένες στην κατασκευή. Ο κυρίαρχος στόχος και εδώ είναι ο αλγόριθμος ελέγχου μεταβλητής δυσκαμψίας να στηρίζεται στα χαρακτηριστικά της εισερχόμενης διέγερσης, δηλαδή να μετράται το εισερχόμενο σήμα σε πραγματικό χρόνο, να αναλύεται και να βρίσκεται το συχνοτικό του περιεχόμενο και, με βάση τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, να λαμβάνεται η απόφαση για το άνοιγμα ή κλείσιμο των βαλβίδων, με στόχο την αποφυγή του συντονισμού και τη μείωση της απόκρισης.

Και οι τρεις παραπάνω αλγόριθμοι διέπονται από έναν κοινό άξονα. Αυτός ο άξονας στηρίζεται στην αντίληψη ότι ο έλεγχος εξαρτάται από την εκάστοτε διέγερση που επιβάλλεται στην κατασκευή, και προσαρμόζεται κάθε φορά με διαφορετικό τρόπο, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εισερχόμενης κίνησης στη βάση της κατασκευής.

Ένας άλλος στόχος της διατριβής είναι, οι προτεινόμενες τροποποιήσεις των αλγορίθμων τοποθέτησης πόλων και μορφής ολίσθησης, καθώς και ο προτεινόμενος αλγόριθμος μεταβλητής δυσκαμψίας να είναι ρεαλιστικές και να μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη. Ένας σημαντικός παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η πραγματική εφαρμογή του ελέγχου,

είναι η χρονική καθυστέρηση. Δηλαδή, αν το σύστημα ελέγχου «προλαβαίνει» να μετρήσει το σήμα, να βρει τα χαρακτηριστικά του, να «δουλέψει» ο αλγόριθμος, να στείλει την εντολή στην εκάστοτε συσκευή και να εκτελεστεί η εντολή από τη συσκευή. Ο χρόνος που απαιτείται για να γίνουν όλες οι παραπάνω διαδικασίες ονομάζεται χρονική καθυστέρηση.

Για να αντιμετωπίσουμε τη χρονική καθυστέρηση δεν θα πρέπει να περιμένουμε να τελειώσει η διέγερση και μετά να δράσει ο αλγόριθμος, αλλά να έχουμε μια συνεχή καταγραφή, να ανιχνεύουμε δηλαδή κομμάτι-κομμάτι τη διέγερση, οι αποφάσεις να λαμβάνονται για κάθε κομμάτι της και οι δυνάμεις να επιβάλλονται μετά την έλευση κάποιου χρονικού διαστήματος στην κατασκευή. Στη διατριβή λαμβάνεται υπόψη κατά την προσομοίωση της ελεγχόμενης κατασκευής και των αλγορίθμων η παράμετρος της χρονικής καθυστέρησης.

Στα πλαίσια της ρεαλιστικότητας του αλγορίθμου ελέγχου λαμβάνεται επίσης υπόψη και η μέγιστη δυνατότητα λειτουργίας της κάθε συσκευής ελέγχου. Αν δηλαδή ο αλγόριθμος υπολογίζει μια δύναμη, η οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί από τη συσκευή ελέγχου λόγω υπέρβασης των ορίων της, τότε στις εξισώσεις κίνησης με έλεγχο θα πρέπει να υπεισέρχεται η μειωμένη μέγιστη δύναμη της συσκευής ελέγχου. Στη διατριβή αυτό αντιμετωπίζεται περιγράφοντας τις εξισώσεις κίνησης της κατασκευής με έλεγχο, ως διαφορικές εξισώσεις με χρονική καθυστέρηση, όπου για την περιγραφή της δύναμης ελέγχου εφαρμόζεται η συνάρτηση κορεσμού.

Ένα άλλο θέμα βελτιστοποίησης και σχεδιασμού του συστήματος ελέγχου είναι και ο αριθμός των συσκευών ελέγχου σε σχέση με τον αριθμό των δυναμικών βαθμών ελευθερίας του συστήματος. Συνήθως στις κατασκευές, όπου ο αριθμός των ορόφων είναι μεγάλος, οι συσκευές ελέγχου είναι λιγότερες από τον αριθμό των ορόφων. Στη διατριβή διερευνάται και το ζήτημα του μειωμένου αριθμού των συσκευών ελέγχου σε σχέση με τους δυναμικούς βαθμούς ελευθερίας του συστήματος.

2.2 Περιεχόμενα διατριβής

Για την παρουσίαση των παραπάνω θεμάτων η διδακτορική διατριβή χωρίζεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, την εισαγωγή, παρατίθενται στοιχεία από τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών, την εξέλιξη του μέσα στο χρόνο, και αποτυπώνεται η σημερινή φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού. Κατόπιν δίνονται κάποια στοιχεία και ορισμοί από τη θεωρία συστημάτων ελέγχου και τέλος, περιγράφονται οι βασικές αρχές και έννοιες του ελέγχου των κατασκευών σε δυναμικές φορτίσεις. Το κεφάλαιο κλείνει με κάποια αντιπροσωπευτικά παραδείγματα πραγματικών κατασκευών στις οποίες εφαρμόστηκε έλεγχος.

Στο παρόν δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται ο στόχος και το αντικείμενο αυτής της διδακτορικής διατριβής. Επισημαίνονται κάποιες αδυναμίες στον έλεγχο των κατασκευών και τα σημεία συμβολής της διδακτορικής διατριβής. Ακόμη, σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η δομή της διατριβής.

Το τρίτο κεφάλαιο πραγματεύεται τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων και την προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος. Αρχικά, περιγράφονται ο αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων και οι εξισώσεις που διέπουν την ελεγχόμενη κατασκευή. Στη συνέχεια, αναλύεται η προτεινόμενη διαδικασία εύρεσης των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής. Ακολουθεί η τεκμηρίωση της παραπάνω διαδικασίας και κάποιες εφαρμογές. Εκτελούνται δυναμικές αναλύσεις ελέγχου σε ένα σύστημα με έναν, τρεις και οκτώ βαθμούς ελευθερίας, αντίστοιχα. Στο κάθε σύστημα εφαρμόζονται δεκατρείς δυναμικές φορτίσεις, δέκα σεισμικές διεγέρσεις από φυσικές καταγραφές, δυο αρμονικές διεγέρσεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά και μια διέγερση παλμού, που φαίνονται αναλυτικά στα παραρτήματα Α και Β. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις παραπάνω αναλύσεις με την προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των πόλων του ελεγχόμενος.

Το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου περιγράφεται ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης και οι εξισώσεις που διέπουν το ελεγχόμενο σύστημα με το συγκεκριμένο αλγόριθμο. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου εξηγείται σε ποιο σημείο του αλγορίθμου μορφής ολίσθησης επεμβαίνουμε, με αποτέλεσμα να προκύψει ένας τροποποιημένος αλγόριθμος μορφής ολίσθησης. Η επέμβαση μας και εδώ έγκειται στη χρήση της προτεινόμενης διαδικασίας υπολογισμού των πόλων του συστήματος για την εύρεση της επιφάνειας ολίσθησης. Η προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των πόλων του συστήματος είναι η ίδια που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3. Δηλαδή σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης, όπου η επιφάνεια ολίσθησης υπολογίζεται από τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων και οι πόλοι της ελεγχόμενης κατασκευής πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης υπολογίζονται με την προτεινόμενη διαδικασία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, τεκμηριώνεται ο τροποποιημένος αλγόριθμος μορφής ολίσθησης με μια σειρά από παραδείγματα και εφαρμογές. Τα μοντέλα προσομοίωσης και οι διεγέρσεις είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων ακολουθούν κάποια συμπεράσματα που εξήχθησαν με βάση τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων ελέγχου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο προτείνεται ένας αλγόριθμος ελέγχου για συστήματα μεταβλητής δυσκαμψίας. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου αναπτύσσεται ο αλγόριθμος και οι εξισώσεις που τον διέπουν. Περιγράφεται η διαδικασία ελέγχου, τόσο στη φάση σχεδιασμού, όσο και στη φάση λειτουργίας της κατασκευής. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος τεκμηριώνεται με παραδείγματα και εφαρμογές, των οποίων παρατίθενται τα αποτελέσματα. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων εξάγονται κάποια συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο διατυπώνονται τα γενικά συμπεράσματα της διατριβής για τον έλεγχο των κατασκευών με τους συγκεκριμένους αλγόριθμους. Περιγράφονται τόσο τα θετικά όσο και τα αρνητικά τους σημεία. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται επίσης με συνοπτικό τρόπο η συμβολή της διδακτορικής και δίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή του ελέγχου στις κατασκευές.

Η διατριβή κλείνει με τα παραρτήματα και τις βιβλιογραφικές αναφορές. Στο παράρτημα Α φαίνονται οι σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές εφαρμογές και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους, όπως το επιταχυνσιογράφημα, το φάσμα απόκρισης και το φάσμα του σήματος. Επίσης, δίνονται τα χαρακτηριστικά από τα αρμονικά σήματα και το σήμα του παλμού. Οι παραπάνω δυναμικές φορτίσεις χρησιμοποιήθηκαν για την τεκμηρίωση και των τριών αλγορίθμων ελέγχου. Στο παράρτημα Β περιγράφονται τα μοντέλα προσομοίωσης και τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους που χρησιμοποιήθηκαν για τις δυναμικές αναλύσεις ελέγχου. Τέλος, η διδακτορική διατριβή κλείνει με τις βιβλιογραφικές αναφορές από τον ελληνικό και τον διεθνή χώρο.

Κεφάλαιο 3

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΟΛΩΝ-ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΟΛΩΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.1 Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων

Μεγάλος αριθμός φυσικών συστημάτων περιγράφεται με γραμμικές ή μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις n τάξης. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν είτε να διατυπωθούν απευθείας με την κλασική τους μορφή όπως στην παρακάτω εξ. (3.1):

$$\ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{g}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}, \mathbf{F}, \mathbf{t}) \tag{3.1}$$

είτε να μετασχηματιστούν στο χώρο κατάστασης:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{h}(\mathbf{X}, \mathbf{F}, \mathbf{t}) \tag{3.2}$$

Όπου U, Ü είναι η μετακίνηση και η ταχύτητα του συστήματος, X το διάνυσα κατάστασης του συστήματος και F είναι η δύναμη ελέγχου Aν η παραπάνω εξίσωση γραμμικοποιηθεί ως προς ένα σημείο λειτουργίας του συστήματος, τότε θα έχουμε το χρονικά μεταβαλλόμενο σύστημα:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{X} + \mathbf{B}_{t}(t)\mathbf{F}$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}(t)\mathbf{X} + \mathbf{D}(t)\mathbf{F}$$
(3.3)

Αν τα μητρώα **A**, **B**_f, **C**, **D** είναι ανεξάρτητα του χρόνου, τότε το σύστημα λέγεται χρονικά αμετάβλητο ή αυτόνομο σύστημα και θα είναι:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_{\mathrm{f}}\mathbf{F}$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{F}$$
(3.4)

Ας δούμε τώρα τη διαφορική εξίσωση κίνησης μιας ελεγχόμενης κατασκευής με n βαθμούς ελευθερίας, η οποία προσομοιώνεται με ένα μοντέλο συγκεντρωμένων μαζών και συγκεντρωμένων

δυσκαμψίων, αντίστοιχη της εξ. (3.1), και υπόκειται σε σεισμική διέγερση a_g . Αυτή θα δίνεται από την παρακάτω εξ. (3.5):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{E}a_{g}(t) + \mathbf{E}_{f}sat\mathbf{F}(t-t_{d}) + \mathbf{B}_{p}\mathbf{P}$$
(3.5)

όπου M, C, K είναι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας του μοντέλου αντίστοιχα. Τα μητρώα P και B_p είναι τα μητρώα των μόνιμων φορτίων στην κατασκευή και των θέσεων τους αντίστοιχα. Το μητρώο F είναι το μητρώο των ζητούμενων δυνάμεων ελέγχου. Τα μητρώα E, E_f είναι τα μητρώα θέσης, τα οποία δείχνουν σε ποιους βαθμούς ελευθερίας επιβάλλεται ο σεισμός και οι δυνάμεις ελέγχου στην κατασκευή αντίστοιχα. Ακόμη, στην εξίσωση ελέγχου, (3.5) λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι η δύναμη ελέγχου επιβάλλεται στην κατασκευή μετά την έλευση κάποιου μικρού χρονικού διαστήματος t_d από τη χρονική στιγμή που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο ελέγχου.

Η δύναμη ελέγχου $\mathbf{F}(t)$ δίδεται από τη συνάρτηση κορεσμού:

$$sat\mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) = \begin{cases} \mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) & \mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) < \mathbf{F}_{allowable} \\ \mathbf{F}_{allowable} sign(\mathbf{F}) & \mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) > \mathbf{F}_{allowable} \end{cases}$$
(3.6)

Οι δυνάμεις ελέγχου υπολογίζονται με βάση κάποιον αλγόριθμο ελέγχου και επιβάλλονται στην κατασκευή με άμεσο ή έμμεσο τρόπο. Η επιβολή τους με άμεσο τρόπο γίνεται με τη λειτουργία ενός εμβόλου το οποίο κινεί μια μάζα (επενεργητής), ενώ με έμμεσο τρόπο γίνεται με τη χρήση ημι-ενεργών συσκευών, όπως για παράδειγμα γίνεται με τους ελεγχόμενους μαγνετορεολογικούς αποσβεστήρες. Η υπολογιζόμενη δύναμη ελέγχου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που η εκάστοτε συσκευή μπορεί να δώσει, $\mathbf{F}_{allowable}$. Σε αυτή την περίπτωση στην εξίσωση κίνησης με έλεγχο, σχέση (3.5), θα πρέπει να επιβάλλεται στο σύστημα η μέγιστη δυνατή δύναμη ελέγχου $\mathbf{F}_{allowable}$. Το φαινόμενο αυτό λέγεται κορεσμός της συσκευής και κατ' επέκταση έχουμε κορεσμένο έλεγχο. Σε αυτή την περίπτωση (3.6).

Στο χώρο κατάστασης η παραπάνω εξίσωση (3.5) μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_{g}a_{g}(t) + \mathbf{B}_{f}sat\mathbf{F}(t_{d}-t) + \mathbf{B}_{p}\mathbf{P}$$

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{F}(t_{d}-t) + \mathbf{v}$$
(3.7)

Τα μητρώα \mathbf{X} , \mathbf{A} , \mathbf{B}_{g} , \mathbf{B}_{f} ορίζονται ως :
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \dot{\mathbf{U}} \end{bmatrix}_{2nx1} , \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2nx2n} , \quad \mathbf{B}_{g} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ -\mathbf{E} \end{bmatrix}_{2nx1} , \quad \mathbf{B}_{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_{f} \end{bmatrix}_{2nx1}$$
(3.8)

Τα μητρώα Y, C, D και v είναι οι μεταβλητές εξόδου, το μητρώο εξόδου, το απευθείας μητρώο μεταβίβασης και το μητρώο του θορύβου, αντίστοιχα. Θεωρούμε ότι οι μεταβλητές εξόδου είναι οι ίδιες με τις μεταβλητές κατάστασης και ότι οι δυνάμεις ελέγχου δεν επιδρούν απευθείας στην έξοδο του συστήματος. Επομένως, στην περίπτωση μας, τα μητρώα C, D είναι το μοναδιαίο και το μηδενικό μητρώο αντίστοιχα. Ακόμη, στην εξίσωση (3.7) το σήμα του σεισμού είναι αυτό που προκύπτει από τις καταγραφές, αλλά φιλτραρισμένο, για να μην εμπεριέχει το θόρυβο που εισάγεται κατά την μέτρηση του. Τέλος, το μητρώο θορύβου v εξαρτάται από τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για να μετρήσουμε την απόκριση του συστήματος.

Η σχέση (3.7) μπορεί να λυθεί σύμφωνα με τη θεωρία των διαφορικών εξισώσεων με χρονική καθυστέρηση (delayed deferential equation), όπως περιγράφεται στη εργασία των L.F. Shampine and S. Thompson, (2001), ή μπορεί να λυθεί με τον παρακάτω μετασχηματισμό, (3.9), ο οποίος περιγράφεται στην εργασία των Kwon και Pearson, 1980.

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{X}(t) + \int e^{-\mathbf{A}(\eta + t_d)} \mathbf{B}_f \mathbf{F}(t + \eta) d\eta$$
(3.9)

Σε αυτή την περίπτωση θα έχουμε:

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}_{g}a_{g}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{A})\mathbf{F}(t)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{A}) = e^{-\mathbf{A}t_{g}}\mathbf{B}_{f}$$
(3.10)

Οι ιδιοπερίοδοι T_i, οι ιδιοσυχνότητες f_i, οι ιδιομορφές Φ_i και οι συντελεστές απόσβεσης ζ_i, για κάθε ιδιομορφή προκύπτουν από τη λύση του κλασικού προβλήματος ιδιοτιμών (3.11):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} \end{bmatrix}_{nxn} \mathbf{\Phi} = 0 \implies \left| \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} \right| = 0 \implies \begin{cases} \mathbf{\Phi}_1, \mathbf{\Phi}_2, ..., \mathbf{\Phi}_n \\ \omega_1, \omega_2, ..., \omega_n \end{cases} \implies$$

$$\mathbf{T}_i = \frac{2\pi}{\omega_i}, \quad \mathbf{f}_i = \frac{\omega_i}{2\pi}, \quad i = 0, ..., n - 1$$
(3.11)

$$\mathbf{C}_{n} = \boldsymbol{\Phi}_{n}^{\mathrm{T}} \mathbf{C} \boldsymbol{\Phi}_{n}, \quad \mathbf{M}_{n} = \boldsymbol{\Phi}_{n}^{\mathrm{T}} \mathbf{M} \boldsymbol{\Phi}_{n}, \quad \zeta_{n} = 2 \mathbf{C}_{n} \mathbf{M}_{n} \boldsymbol{\omega}_{n}$$
(3.12)

Οι ιδιοτιμές του συστήματος, οι οποίες αποτελούν ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης της διαφορικής εξίσωσης (3.5) για υποκρίσιμη απόσβεση ζ<1, δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda_i = -2\pi f_i \zeta_i \pm j 2\pi f_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}$$
(3.13)

Εάν χρησιμοποιηθεί η περιγραφή στο χώρο κατάστασης, τότε οι ιδιοτιμές του συστήματος είναι οι ιδιοτιμές του πίνακα **A**:

$$det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \rightarrow \lambda_i = \alpha_i \pm \beta_i = -2\pi f_i \zeta_i \pm j 2\pi f_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}$$
(3.14)

Οι ιδιοτιμές του συστήματος λέγονται και πόλοι του συστήματος.

Η δύναμη ελέγχου F μπορεί να ληφθεί ως γραμμική ανάδραση της κατάστασης του συστήματος και θα είναι:

$$\mathbf{F} = -\mathbf{K}_{f1}\mathbf{U} - \mathbf{K}_{f2}\dot{\mathbf{U}} = -\begin{bmatrix}\mathbf{K}_{f1} & \mathbf{K}_{f2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{U}\\\dot{\mathbf{U}}\end{bmatrix} = -\mathbf{K}_{f}\mathbf{X}$$
(3.15)

Το ζητούμενο είναι να βρούμε τη δύναμη ελέγχου ή κατ' επέκταση το μητρώο $\mathbf{K}_{\rm f}$. Για τον υπολογισμό του μητρώου ανάδρασης $\mathbf{K}_{\rm f}$ υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι ελέγχου. Από τη μεγάλη γκάμα αλγορίθμων που υπάρχουν, οι δυο πιο κλασικοί είναι ο βέλτιστος γραμμικός τετραγωνικός ρυθμιστής (LQR) και ο αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων (Pole placement).

Αν η δύναμη ελέγχου, εξ. (3.15), αντικατασταθεί στην εξ. (3.5) τότε το ελεγχόμενο σύστημα θα περιγράφεται ως εξής:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + (\mathbf{E}_{f}\mathbf{K}_{2} + \mathbf{C})\dot{\mathbf{U}}(t) + (\mathbf{E}_{f}\mathbf{K}_{n} + \mathbf{K})\mathbf{U}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{E}a_{g}(t)$$
(3.16)

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται, ότι με τον έλεγχο επιτυγχάνουμε με έμμεσο τρόπο να μεταβάλλουμε τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος, δηλαδή, τη δυσκαμψία και την απόσβεση του. Με κατάλληλο υπολογισμό της δύναμης ελέγχου **F**, δηλαδή των υπομητρώων $\mathbf{K}_{\rm fl}$ και $\mathbf{K}_{\rm f2}$ και κατ' επέκταση του μητρώου $\mathbf{K}_{\rm f}$, μπορούμε να εισαγάγουμε με έμμεσο τρόπο ισοδύναμη απόσβεση ή δυσκαμψία, μειώνοντας έτσι την απόκριση της κατασκευής και ικανοποιώντας συγκεκριμένες προδιαγραφές.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο τρόπος υπολογισμού της δύναμης ελέγχου, ή αλλιώς του μητρώου ανάδρασης **K**_f, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων, το μητρώο κέρδους ή ανάδρασης K_f υπολογίζεται με βάση τις επιθυμητές τιμές των ιδιοτιμών (πόλων) του ελεγχόμενου συστήματος. Αντικαθιστώντας τη δύναμη F στην εξίσωση (3.7), η εξίσωση που περιγράφει το ελεγχόμενο σύστημα κλειστού βρόχου γίνεται:

$$\dot{\mathbf{X}} = \left(\mathbf{A} - \mathbf{B}_{f}\mathbf{K}_{f}\right)\mathbf{X} + \mathbf{B}_{g}a_{g} + \mathbf{B}_{p}\mathbf{P}$$
(3.17)

ή

$$\dot{\mathbf{X}} = \overline{\mathbf{A}}\mathbf{X} + \mathbf{B}_{g}a_{g} + \mathbf{B}_{p}\mathbf{P}, \qquad \overline{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{B}_{f}\mathbf{K}_{f}$$
(3.18)

Οι νέες ιδιοτιμές λ_{ci} ή πόλοι του ελεγχόμενου συστήματος θα είναι :

$$\lambda_{ci} = -2\pi f_{ci}\zeta_{ci} \pm j2\pi f_{ci}\sqrt{1-\zeta_{ci}^2} \rightarrow \lambda_{ci} = \alpha_{ci} \pm \beta_{ci}$$
(3.19)

και θα ικανοποιούν την παρακάτω σχέση:

$$\det\left(\left[\lambda_{c}\mathbf{I}+\mathbf{B}_{f}\mathbf{K}_{f}-\mathbf{A}\right]\right)=0$$
(3.20)

Ο αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων έχει στόχο να υπολογίσει το μητρώο ανάδρασης $\mathbf{K}_{\rm f}$. Η εύρεση του μητρώου ανάδρασης $\mathbf{K}_{\rm f}$ γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε οι ιδιοτιμές ή οι λύσεις της (3.20) να έχουν συγκεκριμένη θέση στο μιγαδικό επίπεδο. Αν γνωρίζουμε τις επιθυμητές θέσεις των ιδιοτιμών της ελεγχόμενης κατασκευής και τις συμβολίσουμε με $\lambda_{\rm ci}$, τότε αυτές θα ικανοποιούν και την ακόλουθη σχέση:

$$(\lambda - \lambda_{c1})(\lambda - \lambda_{c2n}) = 0 \iff \lambda^{2n} + a_{1,d}\lambda^{2n-1} + \dots + a_{2n-1,d}\lambda + a_{2n,d} = 0$$

$$(3.21)$$

Οι ερευνητές εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων επιλέγουν μέχρι τώρα τις θέσεις των πόλων με βάση τη διαίσθηση και την εμπειρία, (Soong 1990). Ο πυρήνας αυτής της διδακτορικής διατριβής είναι να προτείνει ένα συστηματικό και αυτόματο τρόπο επιλογής αυτών των θέσεων των ιδιοτιμών της ελεγχόμενης κατασκευής. Η επιλογή αυτή στηρίζεται κάθε φορά στη σεισμική διέγερση που επιβάλλεται στην κατασκευή.

Πριν περάσουμε να δούμε τον προτεινόμενο τρόπο επιλογής των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος, ας δούμε πως θα υπολογίζεται το μητρώο ανάδρασης $\mathbf{K}_{\rm f}$, με βάση τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων. Η παρακάτω διαδικασία εύρεσης του μητρώου ανάδρασης για τον έλεγχο των κατασκευών πολιτικού μηχανικού διατυπώνεται για συνεχή περιγραφή, και στηρίζεται στην εργασία του (Ogata 1997), η οποία περιγράφει τη διαδικασία εύρεσης του μητρώου ανάδρασης για τον άλορασης για διακριτά συστήματα πολλών βαθμών ελευθερίας. Παρόμοια διαδικασία εύρεσης του μητρώου ανάδρασης διατυπώνεται και στην εργασία του (Soong 1990), ο οποίος στηρίζεται στην έρευνα του (Brogan 1974) για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων.

Αν θεωρήσουμε το μετασχηματισμό:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\hat{\mathbf{X}} \tag{3.22}$$

το μετασχηματισμένο σύστημα θα περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{f}\mathbf{F} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{g}\mathbf{a}_{g} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{p}\mathbf{P}$$
(3.23)

Αν αντικαταστήσουμε τη δύναμη ελέγχου

$$\mathbf{F} = -\mathbf{K}_{f} \mathbf{X} (t) = -\mathbf{K}_{f} \mathbf{T} \hat{\mathbf{X}}$$
(3.24)

θα έχουμε:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} - \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{f}\mathbf{K}_{f}\mathbf{T})\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{g}\mathbf{a}_{g} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{p}\mathbf{P}$$
(3.25)

ή

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}} = \left(\hat{\mathbf{A}} - \hat{\mathbf{B}}_{\mathrm{f}}\hat{\mathbf{K}}_{\mathrm{f}}\right)\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{\mathrm{g}}\mathbf{a}_{\mathrm{g}} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{\mathrm{p}}\mathbf{P}$$
(3.26)

όπου:

$$\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T}, \qquad \hat{\mathbf{B}}_{\mathrm{f}} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{\mathrm{f}}, \qquad \hat{\mathbf{K}}_{\mathrm{f}} = \mathbf{K}_{\mathrm{f}}\mathbf{T}$$
(3.27)

Στη συνέχεια θα βρούμε το μητρώο μετασχηματισμού **T.** Έστω ότι το 2nxr μητρώο $\mathbf{B}_{\rm f}$ της θέσης επιβολής της δύναμης ελέγχου είναι βαθμού r

$$rank(\mathbf{B}_{f}) = \mathbf{r}$$
(3.28)

Οπότε θα έχει r γραμμικώς ανεξάρτητα διανύσματα, τα οποία θα έχουν τη μορφή:

$$\mathbf{B}_{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{1} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \beta_{n} \end{bmatrix}_{2nxr}, \quad \mathbf{B}_{i} = \begin{bmatrix} \beta_{1} \\ \beta_{2} \\ \vdots \\ \beta_{n} \end{bmatrix}_{2nx1}$$
(3.29)

Το μητρώο ελεγξιμότητας S, βαθμού 2n, θα είναι:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{f} : \mathbf{A}\mathbf{B}_{f} : \dots : \mathbf{A}^{2n-1}\mathbf{B}_{f} \end{bmatrix}_{(2n)x(2nxr)}, \qquad rank(\mathbf{S}) = 2n \qquad (3.30)$$

Και με τη βοήθεια της σχέσης (3.29) γίνεται:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_2 \\ \vdots \\ \dots \\ \vdots \\ \mathbf{B}_r \\ \vdots \\ \mathbf{AB}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{AB}_2 \\ \vdots \\ \dots \\ \vdots \\ \mathbf{AB}_r \\ \vdots \\ \dots \\ \vdots \\ \mathbf{A}^{2n-1} \\ \mathbf{B}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{A}^{2n-1} \\ \mathbf{B}_2 \\ \vdots \\ \dots \\ \vdots \\ \mathbf{A}^{2n-1} \\ \mathbf{B}_r \end{bmatrix}$$
(3.31)

Επειδή ο βαθμός του μητρώου S είναι 2n, μπορούμε να επιλέξουμε 2n γραμμικώς ανεξάρτητα διανύσματα, από τα οποία, αν τα αναδιατάξουμε κατάλληλα, θα μορφώσουμε το μητρώο L:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{A}\mathbf{B}_1 \\ \vdots \\ \dots \\ \vdots \\ \mathbf{A}^{n_1 - 1}\mathbf{B}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_2 \\ \vdots \\ \dots \\ \vdots \\ \mathbf{A}^{n_2 - 1}\mathbf{B}_2 \\ \vdots \\ \dots \\ \vdots \\ \mathbf{B}_r \\ \vdots \\ \mathbf{A}\mathbf{B}_r \\ \vdots \\ \dots \\ \vdots \\ \mathbf{A}^{n_r - 1}\mathbf{B}_r \end{bmatrix}_{2nx2n}$$
(3.32)

με

$$n_1 + n_2 + \dots + n_r = 2n \tag{3.33}$$

Είναι φανερό, ότι μπορούμε να κάνουμε τυχαία και άλλη επιλογή για τα 2n γραμμικώς ανεξάρτητα διανύσματα. Το μητρώο L μπορεί, τώρα, να αντιστραφεί και να γίνει:

$$\mathbf{L}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{2n} \end{bmatrix}_{2nx2n}$$
(3.34)

Από το αντίστροφο αυτό μητρώο παίρνουμε τα k-στα διανύσματα γραμμές f_{ki} και μορφώνουμε τα μητρώα NS_i ως εξής:

$$k_i = n_1 + n_2 + \dots + n_i, \quad i = 1, 2, \dots, r \implies \mathbf{f}_{k_i}$$
 (3.35)

$$\mathbf{NS}_{i} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{k_{i}} \\ \mathbf{f}_{k_{i}} \mathbf{A} \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{k_{i}} \mathbf{A}^{n_{i}-1} \end{bmatrix}_{k_{i}x2n}$$
(3.36)

Και το ζητούμενο μητρώο μετασχηματισμού θα είναι:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{NS}_1 \\ \mathbf{NS}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{NS}_r \end{bmatrix}_{2nx2n}^{-1}$$
(3.37)

Αφού εκτελέσουμε το μετασχηματισμό και το σύστημα έρθει σε μια πιο απλοποιημένη μορφή, στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το μητρώο ανάδρασης **K**_f. Έστω ότι :

$$\hat{\mathbf{K}}_{f} = \mathbf{K}_{f}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \delta_{1,1} & \delta_{1,2} & \dots & \delta_{1,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{r,1} & \delta_{r,3} & \dots & \delta_{r,2n} \end{bmatrix}_{r_{X}2n}$$
(3.38)

Για να έχουν οι ιδιοτιμές ή οι πόλοι του μητρώου $(\hat{\mathbf{A}} - \hat{\mathbf{B}}_f \hat{\mathbf{K}}_f)$ του ελεγχόμενου συστήματος τις επιθυμητές τιμές λ_{ci} , τις οποίες θα επιλέξουμε με βάση τον σεισμό που θα διεγείρει την κατασκευή, θα πρέπει:

$$\det\left(\left[\lambda\mathbf{I} - \hat{\mathbf{A}} + \hat{\mathbf{B}}_{f}\hat{\mathbf{K}}_{f}\right]\right) = (\lambda - \lambda_{c1})(\lambda - \lambda_{c2})...(\lambda - \lambda_{c2n})$$
(3.39)

Εξαιτίας του μετασχηματισμού, η ορίζουσα του πρώτου μέλος της εξ. (3.39), μπορεί εύκολα να υπολογιστεί. Η ορίζουσα είναι ένα πολυώνυμο βαθμού 2n με συντελεστές που περιέχουν τις άγνωστες ποσότητες δ_{i,j}. Το δεύτερο μέλος της εξ. (3.39) είναι και αυτό ένα πολυώνυμο βαθμού

2n με συντελεστές γνωστές ποσότητες. Εξισώνοντας τους αντίστοιχους συντελεστές των δύο μελών θα έχουμε:

$$\lambda^{2n} + f_{1}(\hat{a}_{i,j}, b_{i,j}, \delta_{i,j})\lambda^{2n-1} + \dots + f_{2n-1}(\hat{a}_{i,j}, b_{i,j}, \delta_{i,j})\lambda + f_{2n}(\hat{a}_{i,j}, b_{i,j}, \delta_{i,j}) = \lambda^{2n} + a_{1,d}\lambda^{2n-1} + \dots + a_{2n-1,d}\lambda + a_{2n,d} \Leftrightarrow$$

$$f_{1}(\hat{a}_{i,j}, \hat{b}_{i,j}, \delta_{i,j}) = a_{1,d}$$

$$\vdots$$

$$f_{2n-1}(\hat{a}_{i,j}, \hat{b}_{i,j}, \delta_{i,j}) = a_{2n-1,d}$$

$$f_{2n}(\hat{a}_{i,j}, \hat{b}_{i,j}, \delta_{i,j}) = a_{2n,d}$$
(3.40)

Οι άγνωστες ποσότητες, δ_{i,j}, είναι rx2n, ενώ οι ο αριθμός των διαθέσιμων εξισώσεων είναι 2n. Επομένως, οι τιμές των δ_{i,j} δε μπορούν να οριστούν κατά μοναδικό τρόπο. Υπάρχουν αρκετοί πιθανοί συνδυασμοί τιμών δ_{i,j}, που ικανοποιούν το σύστημα των εξισώσεων και οι οποίοι είναι αποδεκτοί. Έτσι, επιλέγουμε (r-1)2n τιμές των δ_{i,j} και κατόπιν με βάση τις εξισώσεις (3.40) υπολογίζουμε και τις υπόλοιπες. Αυτή η ευελιξία επιλογής τιμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ικανοποιηθούν και άλλες επιπλέον απαιτήσεις σχεδιασμού στο ελεγχόμενο σύστημα, όπως για παράδειγμα, να ρυθμίσουμε τα υπομητρώα \mathbf{K}_{f1} και \mathbf{K}_{f2} , έτσι ώστε ο έλεγχος να επηρεάζει, έμμεσα, περισσότερο την απόσβεση ή τη δυσκαμψία του συστήματος.

Αφού υπολογιστούν οι τιμές των $\delta_{i,j}$ και το μετασχηματισμένο μητρώο ανάδρασης $\hat{\mathbf{K}}_{f}$, τότε το αρχικό, μη μετασχηματισμένο, μητρώο ανάδρασης \mathbf{K}_{f} υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbf{K}_{f} = \hat{\mathbf{K}}_{f} \mathbf{T}^{-1} \tag{3.41}$$

Τεχνικές για την εφαρμογή του αλγορίθμου τοποθέτησης πόλων μπορεί να βρει κανείς στις εργασίες των (Kautsky και Nichols 1985), όπως και στους (Laub και Wette 1984).

Κατόπιν, οι ισοδύναμες δυνάμεις ελέγχου υπολογίζονται από τη σχέση (3.24). Αυτές μπορεί να εφαρμοστούν άμεσα στην κατασκευή, μέσω μιας συσκευής ελέγχου (επενεργητής), όπως είναι για παράδειγμα ο αποσβεστήρας ενεργής μάζας, ή με έμμεσο τρόπο, μέσω μιας συσκευής ημιενεργού ελέγχου π.χ. ενός μαγνετορεολογικού αποσβεστήρα. Κάθε συσκευή, ανάλογα με το πώς είναι κατασκευασμένη, έχει μια χαρακτηριστική σχέση μεταξύ της ποσότητας με την οποία λειτουργεί και του αποτελέσματος του οποίου δίνει. Για παράδειγμα, ο μαγνετορεολογικός αποσβεστήρας έχει μια σχέση μεταξύ της διατμητικής δυσκαμψίας του υγρού και κατ' επέκταση της δύναμης ελέγχου που θα επιβληθεί, και του μαγνητικού πεδίου του πηνίου του ή του επιβαλλόμενου ρεύματος. Επομένως, αν υπολογίσουμε τις ισοδύναμες δυνάμεις ελέγχου από τον αλγόριθμο, θα έχουμε υπολογίσει τον τρόπο λειτουργίας της συσκευής.

Η παραπάνω διαδικασία απλουστεύεται, όταν η τάξη του συστήματος είναι μικρή. Στη συνέχεια ακολουθούν πιο απλοποιημένες περιγραφές εύρεσης του μητρώου ανάδρασης για διάφορες περιπτώσεις τάξης του συστήματος και αριθμού δυνάμεων ελέγχου.

3.1.1 Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων όταν η τάξη του συστήματος είναι μικρή και έχουμε μία δύναμη ελέγχου.

Αν η δύναμη ελέγχου στην εξ. (3.15) αντικατασταθεί στην πρώτη από τις εξ. (3.7), τότε το ελεγχόμενο σύστημα θα περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{\mathbf{X}} = \left(\mathbf{A} - \mathbf{B}_{\mathrm{f}}\mathbf{K}_{\mathrm{f}}\right)\mathbf{X} + \mathbf{B}_{g}a_{g}$$
(3.42)

Βασική προϋπόθεση της εφαρμογής του αλγορίθμου τοποθέτησης πόλων είναι ότι οι ιδιοτιμές, ή αλλιώς πόλοι του ελεγχόμενου συστήματος, πρέπει να είναι γνωστές. Με βάση αυτές τις ιδιοτιμές υπολογίζουμε το μητρώο ανάδρασης. Οι ιδιοτιμές του ελεγχόμενου συστήματος θα ικανοποιούν την εξίσωση:

$$\det \left[\lambda \mathbf{I} + \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} - \mathbf{A} \right] = 0 \tag{3.43}$$

Οι επιθυμητές ιδιοτιμές, λ_{ci}, του ελεγχόμενου συστήματος θα ικανοποιούν την ακόλουθη σχέση:

$$(\lambda - \lambda_{c1})(\lambda - \lambda_{c2})...(\lambda - \lambda_{c2n}) = 0$$
(3.44)

Για να έχει το ελεγχόμενο σύστημα τις επιθυμητές ιδιοτιμές, θα πρέπει οι δύο εξισώσεις (3.43) και (3.44) να ταυτίζονται. Εξισώνοντας τους αντίστοιχους συντελεστές αυτών των εξισώσεων προκύπτουν τα στοιχεία του μητρώου ανάδρασης **K**_f.

Αντί της παραπάνω διαδικασίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για μικρής τάξης συστήματα και η λεγόμενη μέθοδος Ackerman.

3.1.2 Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων Ackermans.

Όταν έχουμε μία δύναμη ελέγχου, μια εναλλακτική προσέγγιση εύρεσης του μητρώου ανάδρασης \mathbf{K}_{f} είναι η μέθοδος Ackermann. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, κάνουμε χρήση της πρότασης Cayley-Hamilton, ότι δηλαδή κάθε πίνακας ικανοποιεί τη χαρακτηριστική του εξίσωση. Από τη σχέση (3.21) η χαρακτηριστική εξίσωση του ελεγχόμενου συστήματος είναι:

$$\lambda^{2n} + a_{1,d}\lambda^{2n-1} + \dots + a_{2n-1,d}\lambda + a_{2n,d} = 0 = \phi(\lambda)$$
(3.45)

εξαιτίας της πρότασης Cayley-Hamilton θα έχουμε:

$$\phi(\bar{\mathbf{A}}) = \bar{\mathbf{A}}^{2n} + a_{1,d}\bar{\mathbf{A}}^{2n-1} + \dots + a_{2n-1,d}\bar{\mathbf{A}} + a_{2n,d}\mathbf{I} = 0$$
(3.46)

Ακόμη ισχύει ότι:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}$$

$$\overline{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f}$$

$$\overline{\mathbf{A}}^{2} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f})^{2} = \mathbf{A}^{2} - \mathbf{A} \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}}$$

$$\overline{\mathbf{A}}^{3} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f})^{3} = \mathbf{A}^{3} - \mathbf{A}^{2} \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} - \mathbf{A} \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}} - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}}^{2}$$

$$\vdots$$

$$\overline{\mathbf{A}}^{2n} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f})^{2n} = \mathbf{A}^{2n} - \mathbf{A}^{2n-1} \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} - \dots - \mathbf{A} \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}} - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}}^{2} - \dots - \mathbf{B}_{f} \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}}^{2n-1}$$

$$(3.47)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε τις προηγούμενες εξισώσεις με τους συντελεστές $a_{2n,d}$, $a_{2n-1,d}$, $...a_{1,d}$, $a_{0,d}$ με $(a_{0,d}=1)$ και τις προσθέσουμε, θα πάρουμε:

$$\phi(\bar{\mathbf{A}}) = \phi(\mathbf{A}) - \mathbf{B}_{f} \left(a_{2n-1,d} \mathbf{K}_{f} + a_{2n-2,d} \mathbf{K}_{f} \bar{\mathbf{A}} + \dots + \mathbf{K}_{f} \bar{\mathbf{A}}^{2n-1} \right) - \mathbf{A} \mathbf{B}_{f} \left(a_{2n-2,d} \mathbf{K}_{f} + a_{2n-3,d} \mathbf{K}_{f} \bar{\mathbf{A}} + \dots + \mathbf{K}_{f} \bar{\mathbf{A}}^{2n-2} \right) - (3.48) - \mathbf{A}^{2} \mathbf{B}_{f} \left(a_{2n-3,d} \mathbf{K}_{f} + a_{2n-4,d} \mathbf{K}_{f} \bar{\mathbf{A}} + \dots + \mathbf{K}_{f} \bar{\mathbf{A}}^{2n-3} \right) \bar{\mathbf{A}}^{2n} - \dots - \mathbf{A}^{2n-2} \mathbf{B}_{f} \left(a_{1,d} \mathbf{K}_{f} + \mathbf{K}_{f} \bar{\mathbf{A}} \right) - \mathbf{A}^{2n-1} \mathbf{B}_{f} \left(\mathbf{K}_{f} \right)$$

όπου:

$$\phi(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^{2n} + a_{1,d} \mathbf{A}^{2n-1} + \dots + a_{2n-1,d} \mathbf{A} + a_{2n,d} \mathbf{I} \neq 0$$
(3.49)

Από τις σχέσεις (3.46), (3.48) και (3.49) προκύπτει:

$$\phi(\mathbf{A}) = \mathbf{S} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{2n-1,d} \mathbf{K}_{f} + \mathbf{a}_{2n-2,d} \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}} + \dots + \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}}^{2n-1} \\ \mathbf{a}_{2n-2,d} \mathbf{K}_{f} + \mathbf{a}_{2n-3,d} \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}} + \dots + \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}}^{2n-2} \\ \mathbf{a}_{2n-3,d} \mathbf{K}_{f} + \mathbf{a}_{2n-4,d} \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}} + \dots + \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}}^{2n-3} \\ \vdots \\ \mathbf{a}_{1,d} \mathbf{K}_{f} + \mathbf{K}_{f} \overline{\mathbf{A}} \\ \mathbf{K}_{f} \end{bmatrix}$$
(3.50)

Πολλαπλασιάζοντας τη σχέση (3.50) από αριστερά με τον αντίστροφο του πίνακα ελεγξιμότητας S θα έχουμε:

$$\mathbf{S}^{-1}\phi(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{2n-1,d}\mathbf{K}_{f} + \mathbf{a}_{2n-2,d}\mathbf{K}_{f}\overline{\mathbf{A}} + \dots + \mathbf{K}_{f}\overline{\mathbf{A}}^{2n-1} \\ \mathbf{a}_{2n-2,d}\mathbf{K}_{f} + \mathbf{a}_{2n-3,d}\mathbf{K}_{f}\overline{\mathbf{A}} + \dots + \mathbf{K}_{f}\overline{\mathbf{A}}^{2n-2} \\ \mathbf{a}_{2n-3,d}\mathbf{K}_{f} + \mathbf{a}_{2n-4,d}\mathbf{K}_{f}\overline{\mathbf{A}} + \dots + \mathbf{K}_{f}\overline{\mathbf{A}}^{2n-3} \\ \vdots \\ \mathbf{a}_{1,d}\mathbf{K}_{f} + \mathbf{K}_{f}\overline{\mathbf{A}} \\ \mathbf{K}_{f} \end{bmatrix}$$
(3.51)

Πολλαπλασιάζοντας και τα δυο μέλη της σχέσης (3.51) με το μητρώο $\begin{bmatrix} 0 & ... & 0 \end{bmatrix}$ θα πάρουμε:

$$\mathbf{K}_{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \ \mathbf{0} \dots \mathbf{0} \ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{S}^{-1} \boldsymbol{\phi}(\mathbf{A})$$
(3.52)

Από την εξ. (3.52) φαίνεται ότι για να είναι ένα σύστημα ελέγξιμο πρέπει να υπάρχει ο αντίστροφος του μητρώου ελεγξιμότητας S:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \vdots \mathbf{A} \mathbf{B} \vdots \dots \vdots \mathbf{A}^{2n-1} \mathbf{B} \end{bmatrix}$$
(3.53)

η αλλιώς να ισχύει η συνθήκη ελεγξιμότητας:

$$rank \begin{bmatrix} \mathbf{B} \vdots \mathbf{AB} \vdots \dots \vdots \mathbf{A}^{2n-1} \mathbf{B} \end{bmatrix} = 2n \tag{3.54}$$

3.1.3 Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων όταν η τάξη του συστήματος είναι μεγάλη και έχουμε μια δύναμη ελέγχου.

Μια άλλη ευρέως γνωστή διαδικασία (Shampine και Thompson 2001), όπως και των (Kwon και Pearson 1980), αλλά περισσότερη αυτοματοποιημένη και εφαρμόσιμη στο λογισμικό, είναι η παρακάτω. Θεωρούμε τον μετασχηματισμό:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\hat{\mathbf{X}}, \qquad \mathbf{T} = \mathbf{S}\mathbf{W} \tag{3.55}$$

όπου S είναι το μητρώο ελεγξιμότητας εξ. (3.53) και W είναι ο πίνακας:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} a_{2n-1} & a_{2n-2} & \cdots & a_1 & 1 \\ a_{2n-2} & a_{2n-3} & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(3.56)

όπου ai είναι οι συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου του συστήματος χωρίς έλεγχο.

$$|\mathbf{sI} - \mathbf{A}| = a_1 s^{2n} + a_2 s^{2n-1} + \dots + a_{2n-2} s + a_{2n-1}$$
(3.57)

Το μετασχηματισμένο σύστημα και η δύναμη ελέγχου θα είναι:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{f}\mathbf{F} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{g}\mathbf{a}_{g} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{p}\mathbf{P}$$
(3.58)

$$\mathbf{F} = -\mathbf{K}_{f} \mathbf{X}(t) = -\mathbf{K}_{f} \mathbf{T} \hat{\mathbf{X}} = -\hat{\mathbf{K}}_{f} \hat{\mathbf{X}}$$
(3.59)

Αντικαθιστώντας τη δύναμη ελέγχου στο μετασχηματισμένο σύστημα θα πάρουμε:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}} = \left(\mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} - \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{\mathrm{f}}\mathbf{G}\mathbf{T}\right)\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{\mathrm{g}}\mathbf{a}_{\mathrm{g}} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{\mathrm{p}}\mathbf{P}$$
(3.60)

Αυτό έχει χαρακτηριστική εξίσωση την:

$$\left|\mathbf{s}\mathbf{I} - \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{\mathrm{f}}\mathbf{K}_{\mathrm{f}}\mathbf{T}\right| = 0 \tag{3.61}$$

Επειδή ισχύουν :

$$\mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -\mathbf{a}_{2n} & -\mathbf{a}_{2n-1} & -\mathbf{a}_{2n-2} & \cdots & -\mathbf{a}_{1} \end{bmatrix}, \ \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{f} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{K}_{f}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \delta_{2n} & \delta_{2n-1} & \cdots & \delta_{1} \end{bmatrix}$$
(3.62)

αντικαθιστώντας στην εξ. (3.61) θα πάρουμε:

$$s^{2n} + (a_1 + \delta_1)s^{2n-1} + \dots + (a_{2n-1} + \delta_{2n-1})s + (a_{2n} + \delta_{2n}) = 0$$
(3.63)

Οι επιθυμητές ιδιοτιμές, λ_{ci} του ελεγχόμενου συστήματος θα ικανοποιούν την ακόλουθη σχέση:

$$(s-\lambda_{c,1})(s-\lambda_{c,2})...(s-\lambda_{c,2n}) = 0 \iff s^{2n} + \mu_1 s^{2n-1} + ... + \mu_{2n-1} s + \mu_{2n} = 0$$
(3.64)

Εξισώνοντας τους αντίστοιχους συντελεστές του πρώτου μέλους των εξ. (3.63) και (3.64) προκύπτουν οι συντελεστές δ_i

$$\delta_i = \mu_i - a_i \tag{3.65}$$

οπότε από τη σχέση (3.62) προκύπτει ότι το ζητούμενο μητρώο ανάδρασης θα είναι:

$$\mathbf{K}_{f} = \begin{bmatrix} \delta_{2n} & \delta_{2n-1} & \dots & \delta_{1} \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1}$$
(3.66)

Είναι φανερό λοιπόν ότι με το παραπάνω μητρώο ανάδρασης $\mathbf{K}_{\mathbf{f}}$, το μετασχηματισμένο σύστημα έχει τις επιθυμητές ιδιοτιμές λ_{ci} . Το μετασχηματισμένο και το αρχικό σύστημα ελέγχου έχουν την ίδια χαρακτηριστική εξίσωση, αφού ισχύει:

$$\begin{vmatrix} \mathbf{s}\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{B}_{f}\mathbf{K}_{f} \end{vmatrix} = 0 \iff \begin{vmatrix} \mathbf{T}^{-1}\left(\mathbf{s}\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{B}_{f}\mathbf{K}_{f}\right)\mathbf{T} \end{vmatrix} = 0 \iff \\ \begin{vmatrix} \mathbf{s}\mathbf{I} - \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}_{f}\mathbf{K}_{f}\mathbf{T} \end{vmatrix} = 0 \qquad (3.67)$$

Επομένως και το αρχικό ελεγχόμενο σύστημα θα έχει τις ίδιες επιθυμητές ιδιοτιμές (πόλους) λ_{ci} , με το μετασχηματισμένο, και συνεπώς και το ίδιο μητρώο ανάδρασης \mathbf{K}_{f} .

59

Από τα παραπάνω φαίνεται, ότι το μητρώο ανάδρασης, και κατ' επέκταση οι δυνάμεις ελέγχου, εξαρτάται από τις ιδιοτιμές (πόλους) του ελεγγόμενου συστήματος. Όταν οι ιδιοτιμές και κατ' επέκταση οι ιδιοσυχνότητες και οι συντελεστές απόσβεσης του ελεγχόμενου συστήματος είναι γνωστές, τότε χρησιμοποιώντας μια από τις προηγούμενες μεθοδολογίες μπορεί να προκύψει το μητρώο ανάδρασης K_f, και στη συνέχεια οι δυνάμεις ελέγχου. Η επιτυχία λοιπόν του αλγορίθμου τοποθέτησης πόλων εξαρτάται από τις ιδιοτιμές, δηλαδή τις ιδιοσυχνότητες, και τους συντελεστές απόσβεσης που θα επιλέξουμε για την ελεγγόμενη κατασκευή μας. Σε αυτό το σημείο επικεντρώνεται η συμβολή της παρούσας διατριβής, όπου προτείνεται ένας συστηματικός τρόπος υπολογισμού των ιδιοτιμών (πόλων) του ελεγχόμενου συστήματος, ώστε να τροφοδοτηθεί ο αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων και να δώσει ένα κατάλληλο μητρώο ανάδρασης, με το οποίο θα υπολογίσουμε τις δυνάμεις ελέγχου. Η προτεινόμενη διαδικασία επιλογής των ιδιοτιμών (πόλων) του ελεγχόμενου συστήματος, στηρίζεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά της εισερχόμενης κάθε φορά διέγερσης, έτσι ώστε να αποφύγουμε το συντονισμό, και να πετύχουμε τη μέγιστη δυνατή μείωση των μετακινήσεων και επιταχύνσεων με την ελάχιστη προσπάθεια. Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή της προτεινομένης μεθοδολογίας υπολογισμού των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος.

3.2 Βασικές αρχές τοποθέτησης πόλων σε κτήρια

Από όλα τα παραπάνω είναι φανερό ότι με τον έλεγχο, και συγκεκριμένα με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων, υπάρχει δυνατότητα επέμβασης στο σύστημα, ώστε να έχει τα επιθυμητά δυναμικά χαρακτηριστικά, λ_{c,i}, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σχεδιασμού. Το ερώτημα που τίθεται είναι, ποια θα είναι τα επιθυμητά δυναμικά χαρακτηριστικά για το ελεγχόμενο σύστημα και πως αυτά θα υπολογίζονται με μία αυτοματοποιημένη και συστηματική διαδικασία, κατάλληλη για προγραμματισμό σε Η/Υ. Σε αυτά τα ερωτήματα προσπαθεί να απαντήσει η παρούσα διατριβή. Μία γενική απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα είναι, ότι τα επιθυμητά δυναμικά χαρακτηριστικά πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να μη συντονίζουν την κατασκευή με την εκάστοτε δυναμική φόρτιση. Επιπλέον, αφού κάθε φορά η φόρτιση θα είναι διαφορετική, τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ελεγχόμενου συστήματος θα πρέπει να υπολογίζονται με μια διαδικασία, που να στηρίζεται στα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης φόρτισης και να εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια επιβουλής της στην κατασκευή. Από την πλευρά του μελετητή, η επιτυχής εφαρμογή του αλγορίθμου τοποθέτησης πόλων απαιτεί σωστή επιλογή των ιδιοτιμών-πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής. Ο παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην καθιέρωση ενός συστηματικού τρόπου επιλογής των πόλων, λ_{ci}, του ελεγχόμενου συστήματος, κατάλληλου για υπολογισμό σε πραγματικό χρόνο.

Βασική αρχή του υπολογισμού των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος είναι, ότι αυτός στηρίζεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά του σήματος που διεγείρει την κατασκευή, και πιο συγκεκριμένα στο συχνοτικό του περιεχόμενο. Ο τρόπος επιλογής των πόλων στηρίζεται αρχικά στο φάσμα του εισερχομένου σήματος, στη συνέχεια στην απεικόνιση του φάσματος του σήματος στο μιγαδικό επίπεδο, και τέλος στην εύρεση των θέσεων των πόλων με βάση συγκεκριμένους κανόνες. Η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη και επαναλαμβάνεται για κάθε διαδοχικό τμήμα της εισερχόμενης διέγερσης.

Το κάθε τμήμα του εισερχόμενο σήματος αναλύεται με ταχύ μετασχηματισμό Fourier, FFT, ή με ανάλυση μικροκυματιδίων (wavelets), και αναγνωρίζεται το συχνοτικό του περιεχόμενο. Με βάση το φάσμα του κομματιού του εισερχόμενου σήματος, οριοθετείται μια περιοχή συχνοτήτων που η συνεισφορά τους στο σήμα είναι σημαντική. Υπολογίζεται ένα παράθυρο σημαντικών συχνοτήτων, στο οποίο δεν πρέπει να βρίσκονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά (ιδιοσυχνότητες) της ελεγχόμενης κατασκευής.

Αφού καθοριστεί αυτό το παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού, εύρους $a_{f,}$, θα πρέπει οι ιδιοσυχνότητες της ελεγχόμενης κατασκευής να βρίσκονται έξω από αυτό. Εάν f_L και f_h είναι η μικρότερη και η μεγαλύτερη συχνότητα του παραθύρου, τότε θα πρέπει οι ιδιοσυχνότητες $f_{c,i}$ του ελεγχόμενου συστήματος να είναι έξω από το διάστημα [f_L f_h]. (σχήμα 3.1). Πέρα από αυτή τη γενική αρχή, υπάρχει και η περίπτωση, όπου η κατασκευή μπορεί να έχει τις ιδιοσυχνοτητές της μέσα στο παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων, $a_{f,}$, και να αποφύγει το συντονισμό. Αυτό συμβαίνει όταν το παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων, $a_{f,}$, και να αποφύγει το συντονισμό. Αυτό συμβαίνει όταν το παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων, $a_{f,}$ της διέγερσης έχει αρκετές 'κοιλάδες'. Τέτοια περιοχή είναι η περιοχή s του σχήματος 3.1 (α). Στη συνέχεια θα δούμε πως μπορούμε να ανιχνεύουμε τέτοιες περιοχές, και πότε θα μπορούμε να τοποθετούμε τους πόλους σε τέτοιες περιοχές.

Από τις συχνότητες του αρχικού συστήματος, μετακινούμε μόνο αυτές που είναι μέσα στο παράθυρο σημαντικών συχνοτήτων, ενώ τις υπόλοιπες που είναι έξω από αυτό, τις αφήνουμε αμετακίνητες. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ο τρόπος αποφυγής του παραθύρου των σημαντικών

συχνοτήτων, προκειμένου να μην έχουμε συντονισμό σε διαφόρους τύπους σεισμών και εδαφικών συνθηκών. Αν για παράδειγμα το σήμα από ένα σεισμό που θα φτάσει στη βάση της κατασκευής θα είναι χαμηλόσυχνο θα επηρεάσει εκείνα τα κτίρια που έχουν μεγάλη περίοδο, δηλαδή τα ψηλά κτίρια. Αυτά θα πρέπει να μετατοπίσουν τις ιδιοσυχνότητες τους δεξιά του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 (α). Αν έχουμε ένα σήμα από κάποιον άλλο σεισμό, ο οποίος έχει υψηλές συχνότητες θα επηρεάσει τα δύσκαμπτα κτίρια, τα οποία έχουν μικρή περίοδο, δηλαδή τα χαμηλά κτίρια. Αυτά θα πρέπει να μετατοπίσουν τις ιδιοσυχνότητες τους αριστερά του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 (β).

Η μορφή του φάσματος που θα έχουμε στη βάση της κατασκευής εξαρτάται και από τον τύπο του εδάφους που βρίσκεται στην περιοχή του δομήματος. Ο βράχος, για παράδειγμα, επιτρέπει τη διέλευση των υψίσυχνων σημάτων και έτσι έχουμε φάσματα της μορφής 3.1 (β), ενώ τα χαλαρά εδάφη επιτρέπουν τη διέλευση των χαμηλόσυχνων σημάτων και έχουμε φάσματα της μορφής 3.1 (α). Μεταξύ των δύο αυτών ακραίων σεναρίων υπάρχουν πολλά ενδιάμεσα, που πιθανόν να συμβούν, και που εξαρτώνται από το μέγεθος, την απόσταση του σεισμού, τη σύσταση και την ποιότητα του εδάφους που υπάρχει κάτω από την κατασκευή.

Το πώς θα δουλέψει ο αλγόριθμος και θα αντιμετωπίσει όλα αυτά τα πιθανά σενάρια, θα εξαρτηθεί από τη σεισμική διέγερση και τις σημαντικές συχνότητες οι οποίες θα φτάσουν στη βάση της κατασκευής. Αυτή η διέγερση υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο και οι σημαντικές συχνότητες της συγκρίνονται με τις αρχικές ιδιοσυχνότητες τις κατασκευής. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, ο αλγόριθμος αλλάζει ή δεν αλλάζει τις θέσεις των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής, έτσι ώστε να μη βρίσκονται μέσα στο παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού, καθώς αυτή δεν είναι ασφαλής περιοχή.

Η διαδικασία μετακίνησης των ιδιοσυχνοτήτων έξω από το παράθυρο των σημαντικών ιδιοσυχνοτήτων της σεισμικής διέγερσης γίνεται χωρίς να ενδιαφέρει τον αλγόριθμο αν ο σεισμός είναι μακρινός ή κοντινός, ή τι εδαφικές συνθήκες υπάρχουν κάτω από την κατασκευή, αφού η επιλογή στηρίζεται στο τελικό σήμα που φτάνει στη βάση της κατασκευής. Αυτή η ενδιάμεση κατάσταση φαίνεται στο σχήμα 3.2.



(β)

Σχήμα 3.1 Το εύρος του παραθύρου σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού με τη χαμηλότερη f_L και υψηλότερη f_h του συχνότητα. Οι ιδιοσυχνότητες του αρχικού συστήματος f_1 , f_2 ... f_n και οι νέες θέσεις των ιδιοσυχνοτήτων, f_{c1} , f_{c2} ... f_{cn} (a) για χαμηλόσυχνη διέγερση (μακρινός σεισμός) και (β) υψίσυχνη διέγερση (κοντινός σεισμός).

Με τον παραπάνω τρόπο, επιλέγοντας κατάλληλες συχνότητες, μπορούμε να αποφύγουμε το συντονισμό. Όμως μία διέγερση μπορεί να μη συντονίσει το σύστημα, αλλά να το κάνει να

ξεπεράσει την ελαστική του περιοχή και να μπει στη διαρροή, με αποτέλεσμα να προκαλέσει ζημιές. Επομένως, εκτός από την αποφυγή του συντονισμού, ο έλεγχος θα πρέπει να συνεχίζει να προστατεύει την κατασκευή. Σε αυτή την περίπτωση, όπλο για τη μείωση των μετατοπίσεων της κατασκευής είναι το ισοδύναμο ποσοστό απόσβεσης ζ_i. Μεταβάλλοντας το συντελεστή ζ_i, μεταβάλουμε ξανά τις ιδιοτιμές (πόλους) του ελεγχόμενου συστήματος, σύμφωνα με τη σχέση (3.19), και κατ' επέκταση μειώνουμε την απόκριση του, ακόμα και όταν αυτό δε συντονίζεται με τη διέγερση.



Σχήμα 3.2 Το εύρος του παραθύρου σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού με τη χαμηλότερη f_L και υψηλότερη f_h του συχνότητα. Οι ιδιοσυχνότητες του αρχικού συστήματος f_1 , f_2 ... f_n και οι νέες θέσεις των ιδιοσυχνοτήτων, f_{c1} , f_{c2} ... f_{cn} .

Στο πεδίο συχνοτήτων, ενώ υπάρχει μια σαφής εικόνα για τις ιδιοσυχνότητες του δομήματος σε σχέση με τις συχνότητες της διέγερσης και τις θέσεις των ιδιοσυχνοτήτων της ελεγχόμενης κατασκευής, δεν υπάρχει σαφής εικόνα για την επιρροή του συντελεστή απόσβεσης στη διαμόρφωση των ιδιοσυχνοτήτων της ελεγχόμενης κατασκευής. Ακόμη, επειδή οι ιδιοτιμές είναι μιγαδικοί αριθμοί, που τόσο το πραγματικό όσο και το φανταστικό τους μέρος διαμορφώνονται από τη συχνότητα και το συντελεστή απόσβεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, μπορούν να παρασταθούν και στο μιγαδικό επίπεδο. Μπορούμε δηλαδή, με κατάλληλους μετασχηματισμούς, τόσο της φόρτισης όσο και της κατασκευής, να αναχθούμε στο μιγαδικό επίπεδο, και με μία συστηματική διαδικασία να επιλέγουμε τις ιδιοσυχνότητες (πόλους) της ελεγχόμενης

κατασκευής, ώστε και ο συντονισμός να αποφεύγεται, αλλά και να έχουμε ικανοποιητικά ποσοστά απόσβεσης της ελεγχόμενης κατασκευής, με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζει με επάρκεια τη σεισμική διέγερση που της επιβάλλεται.



Σχήμα 3.3 Σχέση μεταξύ θέσης του πόλου στο μιγαδικό επίπεδο και δυναμικών χαρακτηριστικών (ιδιοσυχνότητα, απόσβεση) της κατασκευής.

Γενικά, ο μετασχηματισμός της φόρτισης στο μιγαδικό επίπεδο γίνεται ως εξής: εκτελείται ένας ταχύς μετασχηματισμός Fourier FFT και αναγνωρίζεται το συχνοτικό της περιεχόμενο. Στην περίπτωση μιας αρμονικής φόρτισης υπολογίζεται μόνο μια συχνότητα, ενώ στην περίπτωση ενός σεισμού η διαδικασία FFT δίνει αρκετές συχνότητες. Κατόπιν, με βάση τις συχνότητες του φάσματος, εγγράφονται κύκλοι στο μιγαδικό επίπεδο με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνες ίσες με τις συχνότητες που επιλέχθηκαν. Όλα τα σημεία καθενός από αυτούς τους κύκλους ισαπέχουν από το κέντρο και αντιστοιχούν στην περίπτωση της αρμονικής φόρτισης εγγράφεται ένας κύκλος, ενώ στην περίπτωση του σεισμού εγγράφονται αρκετοί κύκλοι. Η διαδικασία μετασχηματισμού της φόρτισης στο μιγαδικό επίπεδο το μιγαδικό επίπεδο, τόσο για αρμονική φόρτιση, όσο και για σεισμική, φαίνεται στο σχήμα 3.4. Μετά τη γενική περιγραφή του μετασχηματισμού της κατασκευής και της φόρτισης στο μιγαδικό επίπεδο ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμού των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής.



Σχήμα 3.4 Μετασχηματισμός αρμονικής και σεισμικής φόρτισης στο μιγαδικό επίπεδο.

Αρχικά μετασχηματίζεται το παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων του φάσματος του σήματος πάνω στο μιγαδικό επίπεδο. Αναλύεται ένα αρχικό τμήμα του σήματος και βρίσκεται το φάσμα του. Επιλέγονται εκείνες οι συχνότητες του σήματος που πρέπει να αποφευχθούν, με βάση το ποσοστό συμμετοχής τους στο φάσμα και στην ισχύ του σήματος. Κατόπιν δημιουργούνται κύκλοι στο μιγαδικό επίπεδο, με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνες ίσες με τις συχνότητες που επιλέχθηκαν. Όλα τα σημεία καθενός από αυτούς τους κύκλους ισαπέχουν από το κέντρο και αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοσυχνότητα. Επομένως, κάθε σημείο του κύκλου θα πρέπει να αποφεύγεται ως πιθανή θέση του πόλου της ελεγχόμενης κατασκευής, διότι σε αντίθετη περίπτωση ο πόλος θα συντονίζεται με την αντίστοιχη συχνότητα του σεισμού που αντιστοιχεί στον κύκλο αυτό. Στη συνέχεια, δημιουργείται μία ζώνη μέσα και μία έξω από κάθε κύκλο, που ορίζεται ως ζώνη μη ασφαλούς περιοχής. Μετά την περιγραφή του σεισμού και των σημαντικών συχνοτήτων του στο μιγαδικό επίπεδο, τοποθετούνται οι πόλοι της αρχικής κατασκευής, σχέση (3.13), στο μιγαδικό επίπεδο. Οι ιδιοσυχνότητες και τα ποσοστά απόσβεσης της αρχικής κατασκευής, που απαιτούνται προκειμένου να υπολογιστούν οι πόλοι από τη σχέση (3.13), μπορούν να προκύψουν είτε υπολογιστικά, από το μητρώο μάζας Μ, απόσβεσης C και δυσκαμψίας K, επιλύοντας ένα πρόβλημα ιδιοτιμών, είτε πειραματικά από ένα σύστημα ενόργανης παρακολούθησης (monitoring system).

Στη συνέχεια, ελέγχεται η θέση των πόλων της αρχικής κατασκευής σε σχέση με τις ζώνες μη ασφαλούς περιοχής. Εάν κάποιος πόλος είναι μέσα σε μια ζώνη μη ασφαλούς περιοχής, τότε θα πρέπει να μετακινηθεί έξω από αυτήν, ενώ εάν είναι έξω, τότε αφήνεται προσωρινά όπου είναι. Στην περίπτωση που πρέπει να μετακινηθεί ο πόλος, μετακινείται πάνω σε μία ευθεία που ενώνει τον πόλο με την αρχή των αξόνων. Η φορά της κίνησης του πόλου θα είναι προς τα έξω, αν είναι στην προς τα έξω περιοχή της ζώνης της μη ασφαλούς περιοχής σε σχέση με τον αντίστοιχο κύκλο,

ή προς τα μέσα (προς την αργή των αξόνων), αν βρίσκεται στην προς τα μέσα ζώνη μη ασφαλούς περιοχής σε σχέση με τον αντίστοιχο κύκλο. Αυτές οι κινήσεις φαίνονται στο σχήμα 3.5, και είναι οι κινήσεις ΑΒ και Α'Β' αντίστοιχα. Κατόπιν, με βάση ένα επιθυμητό ποσοστό ισοδύναμης απόσβεσης του αντίστοιχου πόλου, ο πόλος μετακινείται πάνω σε μια περιφέρεια κύκλου, με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνα ίση με το μέτρο της καινούργιας του θέσης. Η φορά της κίνησης γίνεται προς τον άξονα των πραγματικών αριθμών. Αυτές οι κινήσεις είναι οι κινήσεις ΒΓ, ´ô και Α΄ Γ΄΄ του σχήματος 3.5. Η μετακίνηση σε αυτή την τροχιά γίνεται, για να μη μεταβληθεί η καινούρια συγνότητα του πόλου, αλλά να μεταβληθεί μόνο ο ισοδύναμος λόγος απόσβεσής του. Με βάση αυτή την καινούργια θέση των πόλων (θέσεις Γ, Γ΄ και Γ΄΄), υπολογίζουμε το μητρώο ανάδρασης $K_{f_{r}}$ κάνοντας χρήση του αλγόριθμου τοποθέτησης πόλων και από αυτό τις δυνάμεις ελέγχου. Αυτές οι δυνάμεις ελέγχου μπορούν να εφαρμοστούν στην κατασκευή με έμμεσο (μαγνετορεολογικοί αποσβεστήρες, MRD) ή άμεσο τρόπο (αποσβεστήρας ενεργής μάζας, AMD). Όταν αυτές οι δυνάμεις ελέγχου εφαρμοστούν στην κατασκευή, τότε το ολοκληρωμένο σύστημα της κατασκευής και των συσκευών ελέγχου συμπεριφέρεται ως μία κατασκευή, η οποία έχει δυναμικά χαρακτηριστικά (ιδιοσυχνοτητες και ποσοστά απόσβεσης) που αντιστοιχούν στις νέες θέσεις των πόλων, Γ, Γ΄ και Γ΄΄. Δηλαδή, το σύστημα της κατασκευής και των συσκευών ελέγχου αποφεύγει το συντονισμό και αποκρίνεται όπως μια άλλη κατασκευή χωρίς έλεγχο, ή οποία έχει ιδιοσυγνότητες και ποσοστό απόσβεσης τις ιδιοσυγνότητες και το ισοδύναμο ποσοστό απόσβεσης που αντιστοιχεί στη νέα θέση των πόλων (θέσεις Γ, Γ΄ και Γ΄΄). Η απόκριση του συστήματος κατασκευής-συσκευών ελέγχου είναι πολύ μικρότερη από την απόκριση της κατασκευής χωρίς τις συσκευές ελέγχου. Στη συνέχεια η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για το επόμενο τμήμα του σεισμού. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται σχηματικά όλη η παραπάνω διαδικασία.

Από την παραπάνω ποιοτική περιγραφή προκύπτουν μερικά ερωτήματα ποσοτικής κυρίως φύσεως. Το πρώτο είναι πόσες σημαντικές συχνότητες του σήματος που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ώστε να μην συντονιστούν με το ελεγχόμενο σύστημα. Δηλαδή, ποιο είναι το παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων και πόσοι κύκλοι θα σχεδιαστούν στο μιγαδικό επίπεδο. Ένα δεύτερο ερώτημα που ανακύπτει, είναι πόσο πρέπει να είναι το εύρος της ζώνης της μη ασφαλούς περιοχής, ω_{s,i}, δηλαδή πόση θα είναι ή απόσταση ΑΒ ή Α΄Β΄. Τέλος, πόσο πρέπει να είναι το ισοδύναμο ποσοστό απόσβεσης, ζ_c,, δηλαδή πόσο είναι το μήκος του τόξου ΒΓ, ΒΤ΄ ή Α΄Τ΄΄.



Είδλοι της ελεγχόμενης κατασκευής
 Πόλοι της κατασκευής χωρίς έλεγχο
 Σχήμα 3.5 Τρόπος επιλογής των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής.

Όσον αφορά το πρώτο ερώτημα, δηλαδή τον αριθμό των συχνοτήτων που λαμβάνονται υπόψη από το φάσμα της διέγερσης, προτείνεται να λαμβάνονται υπόψη εκείνες οι συχνότητες που συνεισφέρουν σε κάποιο ποσοστό, a_p, στη μέγιστη τιμή του φάσματος. Δηλαδή, λαμβάνονται υπόψη, για να παρασταθούν με αντιστοίχους κύκλους στο μιγαδικό επίπεδο, όλες οι συχνότητες που έχουν εύρος στο φάσμα του σήματος διέγερσης πάνω από ποσοστό a_p της μέγιστης τιμής του φάσματος. Αυτό το κριτήριο είναι ενδεικτικό, αλλά πολλές φορές δεν είναι αρκετό, και αυτό εξαρτάται από το σχήμα του φάσματος. Για το φάσμα που φαίνεται στο σχήμα 3.6(α) είναι φανερό ότι οι συχνότητες που συμμετέχουν στο φάσμα σε ποσοστό a_p της μέγιστης τιμής του φάσματος, δεν καλύπτουν και αρκετό ποσοστό της ισχύος του σήματος, ενώ για το φάσμα στο σχήμα 3.6 (β) οι συχνότητες που συμμετέχουν στο φάσμα σε ποσοστό a_p της μέγιστης τιμής του φάσματος και πάνω, καλύπτουν ένα αρκετό ποσοστό της ισχύος του σήματος. Επομένως η επιλογή με βάση μόνο το ποσοστό συμμετοχής, a_p , της μέγιστης τιμής του φάσματος σε κάποιες περιπτώσεις δεν είναι επαρκής. Έτσι το κριτήριο επιλογής συχνοτήτων επεκτείνεται και οι συχνότητες επιλέγονται τόσο με βάση το ποσοστό συμμετοχής τους, I_p , στη συνολική ισχύ του σήματος.



Σχήμα 3.6 Αντιπροσωπευτικά σχήματα φασμάτων όπου η επιλογή συχνοτήτων του σεισμού με βάση μόνο το ποσοστό συμμετοχής στο μέγιστο του φάσματος (α) δεν καλύπτει αρκετό ποσοστό ισχύος, και (β) καλύπτει αρκετό ποσοστό ισχύος του σήματος.

Δύο πραγματικές περιπτώσεις διεγέρσεων που αποδεικνύουν το παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 3.7, όπου στην περίπτωση του σεισμού της πόλης του Μεξικού 1995, η επιλογή των συχνοτήτων μόνο με το ποσοστό συμμετοχής, a_p, στη μέγιστη τιμή του φάσματος είναι αρκετή για να

ληφθούν υπόψη αρκετές σημαντικές συχνότητες, ενώ αντίθετα για την περίπτωση του σεισμού της Loma Prieta 1989, για την επιλογή των συχνοτήτων εκτός από το ποσοστό συμμετοχής a_p στη μέγιστη τιμή του φάσματος απαιτείται και ικανοποιητικό ποσοστό ισχύος από τις επιλεγμένες συχνότητες στη συνολική ισχύ του φάσματος. Η επιλογή των συχνοτήτων του σεισμού γίνεται αρχικά με βάση ένα επιθυμητό ποσοστό συμμετοχής, a_p, της μέγιστης τιμή του φάσματος. Αν το ποσοστό συμμετοχής, επιλέγονται κάποιες συχνότητες και στη συνέχεια υπολογίζεται το ποσοστό τους, I_p, ως προς τη συνολική ισχύ του σήματος. Αν το ποσοστό, I_p, είναι ικανοποιητικό, τότε αυτές οι συχνότητες αποτελούν και την τελική επιλογή. Σε αντίθετη περίπτωση μειώνεται το ποσοστό συμμετοχής, a_p, ώστε να επιλεγούν και άλλες συχνότητες, οι οποίες έχουν μεγαλύτερο ποσοστό στη συνολική ισχύ του σήματος, και να μπορέσει έτσι να ικανοποιηθεί και το κριτήριο της ισχύος.

Στο σχήμα 3.8 φαίνεται η σχέση μεταξύ ποσοστού συμμετοχής, a_p, στη μέγιστη τιμή του φάσματος και του αντίστοιχου ποσοστού συμμετοχής, I_p, στη συνολική ισχύ του σήματος για τους δύο χαρακτηριστικούς σεισμούς της πόλης του Μεξικού και της Loma Prieta. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται η σχέση μεταξύ a_p και I_p για διάφορους σεισμούς, και ο μέσος όρος των καμπυλών. Με μια προσαρμογή του μέσου όρου υπολογίζεται η ακόλουθη σχέση πολυωνύμικού χαρακτήρα :



Σχήμα 3.7 Τα φάσματα ισχύος (α) του σεισμού του Μεξικού και (β) της Loma Prieta.



Σχήμα 3.8 Σχέση ποσοστού a_p και ποσοστού ισχύος I_p, για τους σεισμούς (α) του Μεξικού και (β) της Loma Prieta.

$$I_{p} = -1.6810^{-7} a_{p}^{4} + 6.23910^{-5} a_{p}^{3} - 0.01135 a_{p}^{2} - 0.1278 a_{p} + 100.7$$
(3.68)

ενώ καλή προσαρμογή επιτυγχάνεται και με την ακόλουθη σχέση:

$$I_{p} = \frac{-1.669a_{p}^{2} + 86.11a_{p} + 12580}{a_{p} + 125}$$
(3.69)

Αφού επιλέγουν οι σημαντικές συχνότητες και σχεδιαστούν οι αντίστοιχοι κύκλοι στο μιγαδικό επίπεδο, θα πρέπει να απαντηθεί το δεύτερο ερώτημα, δηλαδή, πόσο πρέπει να είναι το περιθώριο ασφαλείας, $ω_{s,i}$, ή αλλιώς το εύρος της ζώνης της μη ασφαλούς περιοχής. Έστω ένα μονοβάθμιο σύστημα $ω_o$, το οποίο, όταν συντονίζεται με μία αρμονική διέγερση, έχει μία μέγιστη απόκριση $u_{o,max}$. Μετατοπίζοντας τον πόλο του μονοβαθμίου, από την αρχή των αξόνων, πάνω σε μια ευθεία σταθερής απόσβεσης, για κάθε θέση του πόλου υπάρχει μια συχνότητα, $ω_i$, και μια μέγιστη απόκριση, u_{max} . Η θέση συντονισμού είναι η θέση στην οποία ο πόλος βρίσκεται πάνω στον κύκλο με ακτίνα $ω_o$ και σε αυτή τη θέση του πόλου υπολογίζεται το διάγραμμα μεταξύ $ω_i$ και του λόγου $u_{max}/u_{o,max}$, στο οποίο φαίνεται η μείωση της απόκρισης για κάθε θέση

του πόλου πάνω στην ευθεία σταθερής απόσβεσης. Έτσι, εξάγεται μια σχέση μεταξύ της απόστασης του πόλου από τη θέση συντονισμού, και της μείωσης της απόκρισης. Αυτή η σχέση δίνει και το περιθώριο ασφαλείας, ω_s , σε σχέση με τη μείωση της απόκρισης του συστήματος από το συντονισμό. Στο σχήμα 3.10 (α) φαίνεται η κίνηση του πόλου πάνω σε μια ευθεία σταθερής απόσβεσης στο μιγαδικό επίπεδο. Στο σχήμα 3.10 (β) φαίνεται ο λόγος u_{max}/u_{o,max} για κάθε θέση του πόλου και στο σχήμα 3.10 (γ) φαίνεται η μέγιστη δύναμη που απαιτείται, για να επιτευχθεί αυτή η κίνηση του πόλου σε σχέση με την αρχική του θέση.



Σχήμα 3.9 Σχέση μεταξύ ap και Ip για διάφορους σεισμούς και ο μέσος όρος τους.

Από τα σχήματα 3.10 (β) και 3.10 (γ) φαίνεται, ότι θέσεις του πόλου κοντά στην αρχή των αξόνων δίνουν πολύ μεγαλύτερη απόκριση σε σχέση με την απόκριση συντονισμού και πολύ μεγάλη δύναμη, άρα απαιτείται μια ελάχιστη απόσταση από την αρχή των αξόνων ω_{min}, μέσα στην οποία δεν θα πρέπει να τοποθετηθούν οι πόλοι. Το εύρος της ζώνης της μη ασφαλούς περιοχής, ω_s σχετίζεται με την επιθυμητή μείωση της απόκρισης του ελεγχόμενου συστήματος από την απόκριση συντονισμού. Επίσης, το εύρος, ω_s, έχει να κάνει και με το πόση δύναμη έχουμε τη δυνατότητα να επιβάλουμε με άμεσο η έμμεσο τρόπο στη κατασκευή.



Σχήμα 3.10 (α) Οι θέσεις του πόλου του μονοβαθμίου πάνω σε μια ευθεία σταθερής απόσβεσης, (β) ο λόγος u_{max}/u_{o,max} και (γ) η μέγιστη δύναμη που απαιτείται για κάθε θέση του πόλου.

Με μία προσαρμογή του δεξιού κλάδου του σχήματος 3.10 (β) (προς τα 'έξω' κλάδος) βρίσκεται η σχέση για το ω_{s1}:

$$\omega_{s1} = \frac{-2.62x^2 - 1.98x + 4.63}{x + 0.05} \qquad \qquad 0 < x < 1 \tag{3.70}$$

Αντίστοιχα με μία προσαρμογή του αριστερού κλάδου του σχήματος 3.10 (β) (προς τα 'μέσα' κλάδος) βρίσκεται η σχέση για το ω_{s2}:

$$\omega_{s2} = \frac{-4.85x^2 + 2.36x + 2.54}{x - 0.22} \qquad \qquad 0.25 < x < 1 \tag{3.71}$$

Στις σχέσεις αυτές, x $(u_{max}/u_{o,max})$ είναι ο λόγος της επιθυμητής απόκρισης προς την απόκριση συντονισμού, η οποία συμβαίνει στη θέση R. Συνήθως, σε μια σεισμική διέγερση οι συχνότητες που θέλουμε να αποφύγουμε είναι αρκετές, οπότε έχουμε πολλούς κύκλους, όπου

αλληλοκαλύπτονται οι μη ασφαλείς περιοχές μεταξύ τους, οπότε η κίνηση γίνεται συνεχώς προς τα έξω, με αποτέλεσμα η πιο χρήσιμη από τις παραπάνω σχέσεις να είναι η σχέση (3.70).

Στο σχήμα 3.11 φαίνεται η προβολή του διαγράμματος του σχήματος 3.10 (α) κατά μήκος μιας ευθείας σταθερής απόσβεσης στο μιγαδικό επίπεδο. Ακόμη φαίνεται πως προκύπτει γραφικά η περιοχή ασφαλείας ω_s.





Η ίδια εργασία γίνεται για ένα αρμονικό σήμα με δυο σημαντικές συχνότητες, $ω_1$ και $ω_2$, όπου το μονοβάθμιο σύστημα συντονίζεται με την $ω_1$ ή την $ω_2$, και έχει μία μέγιστη απόκριση $u_{o,max}$. Μετατοπίζοντας τον πόλο του μονοβαθμίου πάνω σε μια ευθεία σταθερής απόσβεσης από την αρχή των αξόνων, σε κάθε θέση του πόλου αντιστοιχεί μια συχνότητα $ω_i$ και μια μέγιστη απόκριση u_{max} . Μετά από αρκετές δυναμικές αναλύσεις για κάθε θέση του πόλου, προκύπτουν τα διαγράμματα μεταξύ $ω_i$ και του λόγου $u_{max}/u_{o,max}$, καθώς και της απαιτούμενης δύναμης ελέγχου, τα οποία φαίνονται στα σχήματα 3.12 και 3.13 . Τα σχήματα 3.12 και 3.13 αντιστοιχούν στην περίπτωση που το σύστημα συντονίζεται με τη συχνότητα $ω_1$ και $ω_2$, αντίστοιχα. Αν αντί για αρμονικό σήμα είχαμε ένα σεισμικό σήμα, τότε θα παίρναμε την εικόνα που φαίνεται στο σχήμα 3.14.

Από αναλύσεις που έχουμε κάνει για πολυβάθμια συστήματα που υπόκεινται σε σεισμική φόρτιση, προέκυψε ότι η τιμή του $ω_s$ θα πρέπει να ληφθεί μεγαλύτερη, σχεδόν διπλάσια, για να επιτευχθεί το ίδιο ποσοστό μείωσης της απόκρισης. Για παράδειγμα, αν η σχέση (3.70) δίνει μία απόσταση ασφαλείας $ω_s$ γύρω στα 5 rad/sec, για να μειωθεί η απόκριση κατά 80% από την απόκριση συντονισμού για μονοβάθμιο σύστημα, για ένα πολυβάθμιο σύστημα θα πρέπει να διπλασιάσουμε αυτή την απόσταση ασφαλείας για την ίδια μείωση της απόκρισης από την απόκριση συντονισμού.



Σχήμα 3.12 Παραμετρικά αποτελέσματα όταν το σύστημα συντονίζεται με την ιδιοσυχνότητα $ω_1$ της αρμονικής διέγερσης, (α) του λόγου $u_{max}/u_{o,max}$ και (β) της μέγιστης δύναμης που απαιτείται για κίνηση του πόλου στην ευθεία σταθερής απόσβεσης.



Σχήμα 3.13 Παραμετρικά αποτελέσματα όταν το σύστημα συντονίζεται με την ιδιοσυχνότητα ω₂ της αρμονικής διέγερσης, (α) του λόγου u_{max}/u_{o,max} και (β) της μέγιστης δύναμης που απαιτείται για κίνηση του πόλου στην ευθεία σταθερής απόσβεσης.

Ακόμη, φαίνεται από τα διαγράμματα, ότι οι πόλοι δε θα πρέπει να τοποθετούνται πολύ κοντά στην αρχή των αξόνων, διότι τότε το ελεγχόμενο σύστημα γίνεται πιο εύκαμπτο και αρχίζουν πάλι οι μετατοπίσεις να αυξάνουν.



Σχήμα 3.14 Παραμετρικά αποτελέσματα για σεισμική διέγερση, (α) του λόγου u_{max}/u_{o,max} και (β) της μέγιστης δύναμης που απαιτείται για κίνηση του πόλου στην ευθεία σταθερής απόσβεσης.

Μετά την αποφυγή του συντονισμού και τον υπολογισμό του εύρους της μη ασφαλούς περιοχής, το ερώτημα που μένει να απαντηθεί αφορά την επιπλέον μείωση της απόκρισης του συστήματος μέσω του συντελεστή απόσβεσης. Μία φόρτιση μπορεί να μη συντονίσει το σύστημα, αλλά μπορεί να του προκαλέσει αρκετή μετακίνηση, ώστε να ξεπεράσει το όριο διαρροής του και να παρατηρηθούν σημαντικές βλάβες. Με την παραπάνω περιγραφή στο μιγαδικό επίπεδο, η

75

απόκριση μπορεί να μειωθεί επιπλέον, με την κίνηση του πόλου σε ένα τόξο κύκλου με φορά προς τον άξονα των πραγματικών αριθμών. Μετά την κίνηση πάνω στη ευθεία AB και την αποφυγή του συντονισμού, πραγματοποιείται η κίνηση πάνω στην καμπύλη BΓ, του σχήματος 3.5. Για την κίνηση του πόλου στο τόξο και τις συνέπειες της κίνησης αυτής, υπολογίζεται η απόκριση του συστήματος και γίνεται το διάγραμμα της ισοδύναμης απόσβεσης ζ_c με το λόγο x_d (u_{max}/u_{o,R',max}), όπου u_{max} η μέγιστη τιμή της απόκρισης σε κάθε σημείο του τόξου BΓ και u_{o,R',max} η μέγιστη τιμή της απόκρισης στο σημείο R' του σχήματος 3.15. Από το σχήμα 3.15(β) φαίνεται ότι για κίνηση του πόλου προς τον άξονα των πραγματικών αριθμών, η απόκριση εξακολουθεί να μειώνεται πέραν της μείωσης που έχει υποστεί εξαιτίας αποφυγής του συντονισμού. Η δύναμη ελέγχου μειώνεται λίγο, σε σχέση με τη δύναμη που χρειάστηκε για να απομακρύνουμε το σύστημα από το συντονισμού. Επομένως, αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι πέραν της θέσης αποφυγής συντονισμού μπορεί να επιτευχθεί πρόσθετη μείωση της απόκρισης, όταν ο πόλος κινείται προς το σημείο R'' του σχήματος 3.15 (α) ή προς το σημείο Γ του σχήματος 3.5.

Αν κάνουμε μια προσαρμογή στον κλάδο του σχήματος 3.15 (β), θα πάρουμε τη σχέση:

$$\zeta_{\rm c} = \frac{-0.2195 x_{\rm d}^2 + 0.3023 x_{\rm d} - 0.04465}{x_{\rm d}^2 - 0.0931 x_{\rm d} - 0.01383}, \qquad 0.2 < x_{\rm d} < 1$$
(3.72)

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η απόσβεση που υπολογίζεται για την κίνηση του πόλου στη θέση R'', είναι μια ισοδύναμη απόσβεση, που αντιστοιχεί σε μια θέση του πόλου του ελεγχόμενου συστήματος στο μιγαδικό επίπεδο. Αν οι δυνάμεις ελέγχου, που υπολογιστούν με βάση αυτή τη θέση, εφαρμοστούν στην κατασκευή, τότε το σύστημα ελέγχου και η κατασκευή θα αποκρίνονται όπως ένα ισοδύναμο σύστημα, χωρίς έλεγχο, που έχει την απόσβεση και τη συχνότητα που αντιστοιχεί στη θέση R''.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, ως κριτήρια εύρεσης της θέσης των πόλων ορίστηκαν, πρώτον, η επιθυμητή (από τον χρήστη – μελετητή μηχανικό) μείωση της σχετικής μετακίνησης ορόφων από την μετακίνηση συντονισμού x, και στη συνέχεια η επιπλέον επιθυμητή μείωση της απόκρισης λόγω προσθήκης ισοδύναμης απόσβεσης, x_d. Με χρήση αυτών των κριτηρίων αποδείχθηκε η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου και η ικανότητά του να απομειώνει επαρκώς την απόκριση της κατασκευής, όταν αυτή υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση. Καταλληλότερο βεβαίως κριτήριο εύρεσης της θέσης των πόλων, ώστε να μπορεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος να ενταχθεί στη διαδικασία σχεδιασμού θα ήταν η απαίτηση τόσης μείωσης της απόκρισης της ελεγχόμενης κατασκευής, ώστε αυτή να μην υπερβαίνει τα καθοριζόμενα από τους ισχύοντες κανονισμούς όρια αστοχίας ή λειτουργικότητας. Προσαρμογή του αλγορίθμου σε κριτήρια αυτού του τύπου θα αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας

θα μπορούσε άλλο κριτήριο για την εύρεση της θέσης των πόλων να είναι η επιθυμητή μείωση της επιτάχυνσης. Σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία θα ήταν η ίδια μόνο που στα διαγράμματα 3.10 (α) και 3.15 (α) θα υπολογίζαμε την επιτάχυνση αντί της μετακίνησης.

Αν για διάφορα ποσοστά απόσβεσης και ιδιοσυχνότητες του ελεγχόμενου σήματος, υπολογιστεί ο λόγος $u_{max}/u_{o,max}$ και $F_{max}/F_{max,o}$, θα προκύψουν τα διαγράμματα των σχημάτων 3.16 (α) και 3.16 (β), όπου φαίνεται η μείωση της απόκρισης, λόγω αποφυγής συντονισμού και προσθήκης ισοδύναμης απόσβεσης στο σύστημα. Η θέση του σημείου Γ τελικής τοποθέτησης των πόλων του σχήματος 3.5, φαίνεται επίσης και στα σχήματα 3.16 (α) και 3.16 (β).

Κάνοντας ένα μετασχηματισμό των διαγραμμάτων του σχήματος 3.16, με βάση τη σχέση (3.19), οδηγούμαστε στο μιγαδικό επίπεδο και προκύπτουν τα διαγράμματα του σχήματος 3.17. Στο σχήμα 3.18 (α) βλέπουμε για κάθε θέση του πόλου της ελεγχόμενης κατασκευής στο μιγαδικό επίπεδο, το λόγο απόκρισης της θέσης προς την απόκριση συντονισμού. Έτσι, με βάση το κριτήριο της μειωμένης απόκρισης, μπορεί να φανεί γραφικά η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των πόλων. Το κόστος για την επίτευξη αυτής της μείωσης το βλέπουμε στο σχήμα 3.17 (β), όπου φαίνεται, για κάθε θέση, ο λόγος της δύναμης που απαιτείται για να μετακινηθεί η απόκριση από τη θέση συντονισμού σε αυτή τη θέση, ως προς τη μέγιστη δύναμη της δυσμενέστερης θέσης.

Όλα τα παραπάνω δείχνουν πως η κίνηση του πόλου στο μιγαδικό επίπεδο μεταφράζεται σε μια ισοδύναμη αλλαγή της ιδιοσυχνότητας και της απόσβεσης της ελεγχόμενης κατασκευής. Ακόμη, φαίνονται οι απαιτήσεις σε ισοδύναμη δύναμη που έχει αυτή η κίνηση. Επιπλέον, δίδεται και κάποια εικόνα για την τιμή των διαφόρων συντελεστών που θα χρησιμοποιήσουμε για τον καθορισμό της καλύτερης θέσης την καλύτερη θέση των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος.



Σχήμα 3.15 (α) Κίνηση του πόλου στο τόξο R'R'', (β) ο λόγος $u_{max}/u_{o,max}$ και (γ) ή μέγιστη δύναμη που απαιτείται για την κίνηση στο τόξο R'R''.

Τέλος, το χρονικό διάστημα του κάθε κομματιού του εισερχομένου σήματος, που αναλύεται, είναι το μέγιστο χρονικό διάστημα που υπαγορεύεται από τις εξής παραμέτρους: i) Από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής που ελέγχουμε, δηλαδή να είναι τουλάχιστον ίσο ή μεγαλύτερο από την πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής, ώστε αν υπάρχουν συχνότητες στο σήμα με περίοδο περίπου την περίοδο της κατασκευής να μπορέσουν να αποτυπωθούν και να ληφθούν, υπόψη ώστε να μπορέσουμε να τις αποφύγουμε, ii) Από το ίδιο το σήμα, το οποίο θα πρέπει να είναι αρκετό για να καταγραφούν κάποιες συχνότητες, και iii) Από τη δυνατότητα της συσκευής ανάλυσης φάσματος (spectrum analyzer, parallel spectrum analyzer). Η διαδικασία εύρεσης της θέσης των πόλων μπορεί να εκτελείται παράλληλα για διάφορα χρονικά διαστήματα του σήματος και να ανιχνεύονται έτσι οι πολύ χαμηλές ή οι πολύ υψηλές συχνότητες που μπορεί να περιέχονται σε αυτό. Βέβαια, αν για την εύρεση του χρονικού διαστήματος που θα επιλέξουμε, ακολουθηθεί το κριτήριο των δυναμικών χαρακτηριστικών του κτηρίου, τότε τόσο οι πολύ υψηλές όσο και οι πολύ χαμηλές συχνότητες, σε σχέση με τις συχνότητες του κτηρίου, θα αποτυπώνονται στο μιγαδικό επίπεδο από κύκλους με μεγάλη και μικρή ακτίνα αντίστοιχα, οι οποίοι θα είναι μακριά από τους πόλους της κατασκευή και δεν θα την συντονίζουν.

3.3 Λογισμικό για τον έλεγχο των κατασκευών με συστήματα ελέγχου, (Δυναμική ανάλυση ελέγχου, Dynamic Control Analysis, DCA).

Η σύνθεση της παραπάνω διαδικασίας υπολογισμού των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής με βάση τα χαρακτηριστικά της εισερχόμενης διέγερσης, ο υπολογισμός του μητρώου ανάδρασης με βάση τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων, ο υπολογισμός των ισοδυνάμων δυνάμεων ελέγχου, ο κορεσμός αυτών των δυνάμεων και η επιβολή τους στην κατασκευή, με κάποια χρονική καθυστέρηση, η δυναμική ανάλυση της κατασκευής για το τμήμα της εισερχομένης διέγερσης, προγραμματίστηκαν και προέκυψε ένα λογισμικό κατάλληλο για να εκτελεί δυναμική ανάλυση σε ελεγχόμενες κατασκευές που υπόκεινται σε δυναμικά φορτία, (δυναμική ανάλυση ελέγχου Dynamic Control Analysis, DCA). Η ροή του προγράμματος, τα βασικά αρχεία, η λειτουργία του καθενός από αυτά, καθώς και η σύνδεση μεταξύ τους, φαίνεται στο σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.16. (α) ο λόγος $u_{max}/u_{o,max}$ και (β) $F_{max}/F_{max,o}$ για διάφορα ποσοστά απόσβεσης και διάφορες συχνότητες του ελεγχόμενου συστήματος για αρμονική φόρτιση.

81



Σχήμα 3.17 (α) ο λόγος $u_{max}/u_{o,max}$ και (β) $F_{max}/F_{max,o}$ για διάφορες θέσεις των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος στο μιγαδικό επίπεδο.

Στο σχήμα 3.18 φαίνεται το αρχείο Control on line.m στο οποίο καθορίζονται οι παράμετροι του συστήματος, δίνονται δηλαδή το μητρώο μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας **M**, **C** και **K**, αντίστοιχα. Η κατασκευή προσομοιώνεται σαν ένα σύστημα συγκεντρωμένων μάζων και δυσκαμψιών. Κατόπιν, με βάση την εξίσωση (3.8) μετασχηματίζεται το σύστημα στο χώρο

ξ

κατάστασης, υπολογίζοντας τα μητρώα **A** και **B**. Υπολογίζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος T_i, ω_i, ζ_i. Αν υπάρχει κάποιο σύστημα αναγνώρισης, τότε υπολογίζονται με τη βοήθεια του τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και χρησιμοποιούνται αυτές οι τιμές για τις παραμέτρους T_i, ω_i, ξ_i, αντί των υπολογιζόμενων από τα μητρώα **M**, **C** και **K**. Κατόπιν, καθορίζονται οι παράμετροι για τη σωστή τοποθέτηση των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής, οι οποίες είναι:

α) Το επιθυμητό ποσοστό συμμετοχής συχνοτήτων στη μέγιστη τιμή του φάσματος του σήματος,
 a_p, και το ποσοστό συμμετοχής των επιλεγμένων συχνοτήτων στην ισχύ του σήματος I_p.

β) Ο επιθυμητός λόγος, x, της απόκρισης που θέλουμε σε σχέση με την απόκριση συντονισμού, και το εύρος της ζώνης της μη ασφαλούς περιοχής, από τις σχέσεις (3.70) και (3.71)

γ) Ο επιθυμητός λόγος, x_d, της επιπλέον μειωμένης απόκρισης σε σχέση με την απόκριση στη θέση αποφυγής του συντονισμού, και το ισοδύναμο ποσοστό απόσβεσης του πόλου της ελεγχόμενης κατασκευής, από τη σχέση (3.72)

Επιπλέον, στην αρχή του αρχείου Control on line.m δίνονται το σήμα της διέγερσης και ο αριθμός των κομματιών, στα οποία θα τεμαχιστεί το σήμα. Τέλος, δίνονται και οι αρχικές συνθήκες ταλάντωσης της κατασκευής.

Στη συνέχεια, για το i^o τμήμα της διέγερσης ενεργοποιείται το αρχείο Selection of poles.m, όπου πραγματοποιείται ανάλυση Fourier (FFT) για το συγκεκριμένο σήμα. Με βάση το ποσοστό συμμετοχής στη μέγιστη τιμή του φάσματος επιλέγονται οι συχνότητες της διέγερσης που θα πρέπει να αποφευχθούν. Κατόπιν, ελέγχεται, αν οι συχνότητες που επιλέχθηκαν ικανοποιούν και το κριτήριο της ισχύος. Αν το ικανοποιούν, τότε συνεχίζεται η διαδικασία, αν όχι, με μια εσωτερική επαναληπτική διαδικασία μειώνεται το ποσοστό συμμετοχής στη μέγιστη τιμή του φάσματος το ποσοστό τους στην ισχύ. Αν το νέο ποσοστό ισχύος I_p είναι ίσο με το επιθυμητό, τότε ενεργοποιείται η διαδικασία εύρεσης των πόλων, ενώ αν όχι η παραπάνω επαναληπτική διαδικασία και το κριτήριο της ισχύος.

Στη συνέχεια, αφού επιλεγούν οι συχνότητες της διέγερσης, σχεδιάζονται οι κύκλοι στο μιγαδικό επίπεδο, με ακτίνες ίσες με τις τιμές των συχνοτήτων που επιλέχθηκαν. Με βάση τη
σχέση (3.70), υπολογίζεται το εύρος της μη ασφαλούς ζώνης ω_s, και γίνεται ο σχεδιασμός της στο μιγαδικό επίπεδο. Στη συνέχεια, τοποθετούνται οι πόλοι-ιδιοτιμές του αρχικού συστήματος στο μιγαδικό επίπεδο. Κατόπιν, γίνεται η επιλογή των θέσεων των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος με βάση τη διαδικασία που φαίνεται στο σχήμα 3.5 και τους παρακάτω κανόνες:

- Αν οι πόλοι είναι μέσα στη ζώνη της μη ασφαλούς περιοχής, τότε τοποθετούνται έξω από αυτή, σε μια κίνηση πάνω στην ευθεία που συνδέει τον πόλο με την αρχή των αξόνων (ευθεία σταθερής απόσβεσης). Η φορά της κίνησης είναι προς την αρχή των αξόνων, αν ο πόλος που είναι μέσα στη μη ασφαλή περιοχή είναι εσωτερικά του κύκλου που αντιστοιχεί στη συχνότητα της διέγερσης, ενώ αντίθετα είναι προς την αρχή των αξόνων, αν ο πόλος είναι εξωτερικά του κύκλου που αντιστοιχεί στη συχνότητα της διέγερσης.
- Με βάση το επιθυμητό ποσοστό της πρόσθετης μείωσης της απόκρισης, x_d, υπολογίζεται η ισοδύναμη απόσβεση, σύμφωνα με τη σχέση (3.72). Με βάση αυτό το ποσοστό απόσβεσης, από τη θέση που ήμασταν μετά την αποφυγή του συντονισμού, κινούμαστε σε μια περιφέρεια κύκλου σταθερής συχνότητας με φορά προς τον άξονα των πραγματικών αριθμών.
- Αν οι πόλοι του αρχικού συστήματος είναι έξω από τις ζώνες της μη ασφαλούς περιοχής,
 τότε είτε δε μεταβάλλουμε τη θέση τους, είτε τους δίνουμε μόνον ισοδύναμη απόσβεση.
- Αν το σήμα είναι πολύ μικρό σε μέγεθος, τότε δε γίνεται τοποθέτηση πόλων και κατ' επέκταση δεν πραγματοποιείται ο έλεγχος.

Με βάση τις παραπάνω τελικές θέσεις των πόλων στο μιγαδικό επίπεδο υπολογίζονται για την ελεγχόμενη κατασκευή οι νέες τιμές των πόλων της, $n_i = \alpha_i + j\beta_i$, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του μητρώου ανάδρασης με τη μέθοδο τοποθέτησης πόλων.

Κατόπιν, επιστρέφουμε στο αρχείο Control on line.m και υπολογίζουμε το μητρώου ανάδρασης K_f, με τη μέθοδο τοποθέτησης πόλων. Στη συνέχεια εκτελείται, στο SIMULINK του MATLAB, το αρχείο pole_place_mdof_on_line.mdl και πραγματοποιείται, για αυτό το τμήμα της διέγερσης, δυναμική ανάλυση ελέγχου δηλαδή, γίνεται η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων κίνησης με έλεγχο, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική καθυστέρηση και τον κορεσμό της δύναμης ελέγχου.



Σχήμα 3.18 Βασικά αρχεία και η ροή του προγράμματος δυναμικής ανάλυσης ελέγχου (Dynamic Control Analysis, DCA) για κτιριακές κατασκευές.

Στο πέρας της επίλυσης, αποθηκεύονται τα αποτελέσματα, μετατοπίσεις και δυνάμεις ελέγχου, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το επόμενο τμήμα του σεισμού.

Η παραπάνω υπολογιστική διαδικασία υλοποιείται στην πράξη, σύμφωνα με το σχήμα 3.19. Η κατασκευή είναι εφοδιασμένη με τις συσκευές ελέγχου και τους αισθητήρες. Οι αισθητήρες στη βάση της κατασκευής ανιχνεύουν το εισερχόμενο σήμα και αναγνωρίζεται το συχνοτικό του περιεχόμενο. Στη συνέχεια, με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία, υπολογίζονται οι πόλοι του ελεγχόμενου συστήματος. Με βάση αυτούς τους πόλους και τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων, υπολογίζονται οι ισοδύναμες δυνάμεις που πρέπει να εφαρμοστούν στη κατασκευή, είτε με άμεσο, είτε με έμμεσο τρόπο. Με την εφαρμογή αυτών των δυνάμεων η ελεγχόμενη κατασκευή με τις συσκευές ελέγχου θα έχει συμπεριφορά όμοια με ένα ισοδύναμο σύστημα, που έχει τους συντελεστές απόσβεσης και τις ιδιοσυχνότητες που αντιστοιχούν στους πόλους που επιλέξαμε με την προτεινόμενη διαδικασία.



Σχήμα 3.19 Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου βασισμένο στο συχνοτικό περιεχόμενο του εισερχομένου σεισμικού σήματος.

Η παραπάνω στρατηγική ελέγχου τεκμηριώθηκε υπολογιστικά σε μονώροφα και πολυώροφα συστήματα που υπόκεινται σε ένα μεγάλο αριθμό φορτίσεων. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομέρειες για τις εφαρμογές που έγιναν, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

3.4 Παραδείγματα και αριθμητικές εφαρμογές

Εφαρμόστηκε η παραπάνω μεθοδολογία για ένα μονώροφο, ένα τριώροφο και ένα οκταώροφο κτίριο. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά καθώς και οι θέσεις ελέγχου, καθενός από τα παραπάνω κτήρια φαίνονται στο παράρτημα Α. Η κάθε κατασκευή υπόκειται σε δέκα σεισμικές διεγέρσεις από πραγματικούς σεισμούς, πέντε από τον Ελλαδικό χώρο και πέντε από το εξωτερικό. Επιλέχθηκαν καταγραφές τόσο κοντά, όσο και μακριά από το επίκεντρο, καλύπτοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Τα χαρακτηριστικά των σεισμικών κραδασμών φαίνονται στο παράρτημα Β, φαίνονται η χρονοϊστορία της κάθε διέγερσης, το φάσμα της και το φάσμα αποκρισής της. Τέλος, τα κτίρια υπόκεινται σε δυο αρμονικές κινήσεις και ένα παλμό. Τα χαρακτηριστικά, τα φάσματα, καθώς και τα φάσματα απόκρισης των αρμονικών διεγέρσεων και του παλμού, φαίνονται επίσης στο παράρτημα Β. Στη συνέχεια, παρουσιαζονται τα αποτελέσματα για το μονώροφο, το τριώροφο και το οκταώροφο κτήριο, στις ενότητες 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 αντίστοιχα.

3.4.1 Μονώροφο κτήριο

3.4.1.1 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση T=0.2s.

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων:1.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για $x_d=0.20$ βρίσκουμε ζ= 0.95.

Πίνακας 3.1. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	30.40	0.92
ů 1	(m/sec)	0.91	0.03
ü	(m/sec^2)	30.19	3.08
F	(kN)		133
W	(kW)		117
W/N	1 (kW/t)		2,6

3.4.1.2 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές $T_1=0.2s$ και $T_2=0.1s$

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων:2.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.2. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	30.40	1.70
ů,	(m/sec)	0.918	0.055
ü	(m/sec^2)	30.19	5.06
F	(kN)		135.80
W (kW)			116
W/M (kW/t)			2.58

3.4.1.3 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε παλμική φόρτιση

Παράμετροι

$$a = \omega_{p} u_{p} \cos\left(\omega_{p} t_{p} + \phi\right), \quad 0 \le t \le \left(n + \frac{1}{2} - \frac{\phi}{\pi}\right) T_{p},$$

Tp=0.8 s, ω_p =2 π / Tp, up=1.75 m/s, ϕ =0.0697

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: Ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για $x_d = 0.20$ βρίσκουμε ζ= 0.95.

1 1

Πίνακας 3.3. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	4.20	0.3
ū 1	(m/sec)	0.13	0.02
ü,	(m/sec^2)	8.15	3.19
F	(kN)		248
W	(kW)		27
W/M	(kW/t)		0.60

3.4.1.4 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Πίνακας 3.4. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της καλαμάτας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	5.7	0.20
$\dot{\mathbf{u}}_{_{1}}$	(m/sec)	0.14	0.03
ü,	(m/sec^2)	4.93	2.99
F	(kN)		126
W	(kW)		13
W/M (kW/t)			0.3



Σχήμα 3.20. Διαδικασία ελέγχου για το μονώροφο κτήριο, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας: (a) το εισερχόμενο σήμα, (β) χαρακτηριστικά τμήματα του εισερχομένου σήματος, (γ) το αντίστοιχο συχνοτικό τους περιεχόμενο, (δ) η επιλογή των θέσεων των πόλων, (ε) η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος και (στ) η συνολική απόκριση.



Σχήμα 3.20 Διαδικασία ελέγχου για το μονώροφο κτήριο, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας: (α) το εισερχόμενο σήμα, (β) χαρακτηριστικά τμήματα του εισερχομένου σήματος, (γ) το αντίστοιχο συχνοτικό τους περιεχόμενο, (δ) η επιλογή των θέσεων των πόλων, (ε) η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος και (στ) η συνολική απόκριση.



Σχήμα 3.21. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου μονώροφου κτηρίου υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 3.22. Δύναμη ελέγχου και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.

3.4.1.5 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Πίνακας 3.5. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	7.10	1.30
ū 1	(m/sec)	0.20	0.03
ü,	(m/sec^2)	5.51	3.03
F	(kN)		98.44
W	(kW)		16
W/M	1 (kW/t)		0.37

3.4.1.6 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	6.70	0.96
ů ₁	(m/sec)	0.13	0.04
ü	(m/sec^2)	5.60	3.03
F	(kN)		119.27
W	(kW)		10
W/M	(kW/t)		0.23

Πίνακας 3.6. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

3.4.1.7 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.7. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	6.30	0.91
\dot{u}_1 (m/sec)	0.18	0.02
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	7.89	2.97
F (kN)		136.51
W (kW)		21
W/M (kW/t)		0.48

3.4.1.8 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.8. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστ	ημα Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	7.00	0.91
\dot{u}_1 (m/se	c) 0.20	0.01
\ddot{u}_1 (m/se	c ²) 6.66	2.82
F (kN	D)	166.43
W (kW	/)	31.54
W/M (kW	//t)	0.70

3.4.1.9 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.9. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	5.40	1.70
ů ₁	(m/sec)	0.10	0.03
ü,	(m/sec^2)	3.74	2.02
F	(kN)		92.55
W	(kW)		15
W/M	1 (kW/t)		0.34

3.4.1.10 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Imperial Valley

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για $x_d = 0.20$ βρίσκουμε ζ= 0.95.

Πίνακας 3.10. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό Imperial Valley με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	4.70	1.80
u ₁	(m/sec)	0.07	0.02
ü,	(m/sec^2)	4.17	2.30
F	(kN)		74.53
W	(kW)		3
W/M	(kW/t)		0.08

 \setminus

3.4.1.11 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Mexico City

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$, Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.11. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	3.6	1.90
ů,	(m/sec)	0.03	0.01
ü,	(m/sec^2)	3.87	2.05
F	(kN)		40.14
W	(kW)		0.80
W/M	1 (kW/t)		0.01

3.4.1.12 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Kobe

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.12. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (r	nm)	8.30	1.30
u ₁ (1	m/sec)	0.25	0.02
ü ₁ (r	m/sec ²)	8.70	2.95
F	(kN)		106.06
W	(kW)		24
W/M	(kW/t)		0.54

3.4.1.13 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Duzce

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.13. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο	σύστημα Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm	n) 7.40	2.05
u ₁ (m/s	sec) 0.17	0.02
ü ₁ (m/s	sec ²) 5.53	2.93
F (k	xN)	72.82
W (k	W)	10
W/M (k	W/t)	0.24

3.4.2 Τριώροφο κτήριο

3.4.2.1 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, T₁=0.2s.

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$. Λόγω μορφής φόρτισης επιλογή μίας συχνότητας.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για $x_d = 0.20$ βρίσκουμε ζ= 0.95.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	όμενο σύσ	τημα
_		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	419	4.20	9.90	12.90
ü,	(m/sec^2)	81.55	3.13	3.60	8.02
F ₁	(kN)		4.36		15.28
u ₂	(mm)	756	7.58	17.10	17.20
ü,	(m/sec^2)	146.85	3.34	4.46	4.57
F ₂	(kN)		4.31		
u ₃	(mm)	943	9.34	20.90	20.70
ü,	(m/sec^2)	183.09	3.28	5.67	4.91
F ₃	(kN)		4.08	6.64	

Πίνακας 3.14. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

3.4.2.2 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές $T_1=0.2s$ και $T_2=0.1s$.

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$. Λόγω μορφής φόρτισης επιλογή δύο συχνοτήτων.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.15. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁	(mm)	413	10.40	10.00	13.10
ü	(m/sec^2)	80.30	3.08	7.21	13.65
F_1	(kN)		4.63		16.79
u ₂	(mm)	744	18.70	17.10	17.40
$\ddot{\mathbf{u}}_{_2}$	(m/sec^2)	144.60	3.13	9.87	6.78
F ₂	(kN)		4.71		
u ₃	(mm)	928	19.70	20.90	20.90
ü,	(m/sec^2)	180.29	5.30	8.46	8.61
F ₃	(kN)		4.41	6.64	

3.4.2.3 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε παλμική φόρτιση

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.16. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	4.00	0.20	3.40	2.80
ü	(m/sec^2)	7.04	3.20	6.88	13.97
F ₁	(kN)		3.24		15.22
u ₂	(mm)	6.10	0.20	5.70	3.00
ü,	(m/sec^2)	7.53	3.20	8.89	5.11
F ₂	(kN)		3.40		
u ₃	(mm)	6.70	0.20	5.30	4.60
ü,	(m/sec^2)	6.56	3.20	8.70	7.53
F ₃	(kN)		3.40	5.77	

3.4.2.4 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$.

Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκου
με $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.17. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		τημα
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	37.10	1.60	10.50	11.20
ü,	(m/sec^2)	9.39	2.90	4.81	4.85
F ₁	(kN)		2.63		14.46
u ₂	(mm)	66.80	1.40	17.80	14.80
ü2	(m/sec^2)	14.56	2.92	6.41	5.06
F ₂	(kN)		3.59		
u ₃	(mm)	83.40	1.80	21.30	18.80
ü,	(m/sec^2)	17.71	2.89	6.32	6.48
F ₃	(kN)		3.31	6.78	



Σχήμα 3.23. Διαδικασία ελέγχου για το τριώροφο κτήριο, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας: (α) το εισερχόμενο σήμα, (β) χαρακτηριστικά τμήματα του εισερχομένου σήματος, (γ) το αντίστοιχο συχνοτικό τους περιεχόμενο, (δ) η επιλογή των θέσεων των πόλων, (ε) η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος και (στ) η

συνολική απόκριση.



Σχήμα 3.23. Διαδικασία ελέγχου για το τριώροφο κτήριο, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας: (α) το εισερχόμενο σήμα, (β) χαρακτηριστικά τμήματα του εισερχομένου σήματος, (γ) το αντίστοιχο συχνοτικό τους περιεχόμενο, (δ) η επιλογή των θέσεων των πόλων, (ε) η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος και (στ) η συνολική απόκριση.



Σχήμα 3.24. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου τριώροφου κτηρίου υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 3.25. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της (Power Spectral Density, PSD) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.

3.4.2.5 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.18. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκιωνύδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο		Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	35.00	1.30	8.50	8.50
ü,	(m/sec^2)	7.11	3.04	4.26	4.24
F ₁	(kN)		2.26		9.86
u ₂	(mm)	62.60	1.10	14.20	10.80
ü2	(m/sec^2)	12.32	3.04	6.01	4.54
F ₂	(kN)		3.65		
u ₃	(mm)	77.80	1.40	16.60	14.20
ü,	(m/sec^2)	15.44	3.93	6.42	5.94
F ₃	(kN)		2.78	5.91	

3.4.2.6 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.19. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	30.10	1.10	9.40	9.90
ü	(m/sec^2)	7.12	3.06	5.01	5.95
F ₁	(kN)		2.69		13.13
u ₂	(mm)	54.80	1.00	15.90	12.50
ü,	(m/sec^2)	11.61	3.07	6.75	5.65
F ₂	(kN)		3.91		
u ₃	(mm)	68.80	1.80	19.00	16.10
ü,	(m/sec^2)	14.86	3.02	7.40	6.79
F ₃	(kN)		3.13	6.35	

3.4.2.7 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.20. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	16.00	0.60	4.60	5.10
ü	(m/sec^2)	5.90	3.05	5.24	6.88
F ₁	(kN)		2.78		17.10
u ₂	(mm)	28.70	.1.19	6.50	3.50
ü,	(m/sec^2)	8.12	2.97	4.90	4.52
F ₂	(kN)		3.27		
u ₃	(mm)	36.00	0.50	7.30	5.50
ü,	(m/sec^2)	8.92	2.96	8.68	5.62
F ₃	(kN)		3.24	7.53	

3.4.2.8 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.21. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	20.50	0.90	6.60	6.60
ü	(m/sec^2)	5.46	2.14	3.87	5.80
F ₁	(kN)		2.45		11.02
u ₂	(mm)	37.20	0.80	10.50	5.10
ü ₂	(m/sec^2)	8.61	2.94	5.76	4.38
F ₂	(kN)		3.16		
u ₃	(mm)	46.60	0.70	11.40	9.40
ü,	(m/sec^2)	11.18	2.94	6.38	5.22
F ₃	(kN)		3.32	5.06	

3.4.2.9 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.22. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	όμενο σύσ	τημα
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	20.60	2.10	11.20	18.10
ü,	(m/sec^2)	3.60	1.85	3.21	5.19
F ₁	(kN)		2.40		15.24
u ₂	(mm)	36.70	2.50	19.40	23.10
ü2	(m/sec^2)	5.99	2.83	4.04	3.69
F ₂	(kN)		2.64		
u ₃	(mm)	45.60	2.30	24.50	26.40
ü,	(m/sec^2)	7.78	2.84	4.01	4.31
F ₃	(kN)		3.32	5.22	

3.4.2.10 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valey

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.23. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valey, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	27.00	1.60	11.70	16.90
ü	(m/sec^2)	4.93	2.07	3.26	3.80
F_1	(kN)		1.92		13.32
u ₂	(mm)	48.00	1.30	20.40	22.20
ü ₂	(m/sec^2)	7.93	3.12	4.15	3.70
F ₂	(kN)		4.03		
u ₃	(mm)	59.50	2.00	25.80	25.70
ü,	(m/sec^2)	9.73	3.10	4.32	4.29
F ₃	(kN)		2.79	5.21	

3.4.2.11 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.24. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο		Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	17.80	5.00	10.70	16.30
ü,	(m/sec^2)	4.34	2.12	3.19	3.03
F ₁	(kN)		3.85		21.82
u ₂	(mm)	31.10	3.60	18.40	26.40
ü2	(m/sec^2)	5.74	3.16	3.25	3.05
F ₂	(kN)		4.95		
u ₃	(mm)	38.20	4.20	23.00	29.60
ü,	(m/sec^2)	6.41	3.21	3.21	3.11
F ₃	(kN)		2.98	2.47	

3.4.2.12 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.25. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	27.40	1.10	6.80	6.30
ü	(m/sec^2)	7.77	2.93	4.52	6.36
F ₁	(kN)		1.95		11.82
u ₂	(mm)	47.80	0.80	10.80	6.40
ü ₂	(m/sec^2)	10.49	2.94	5.31	3.72
F ₂	(kN)		3.54		
u ₃	(mm)	58.20	1.00	12.00	9.60
ü,	(m/sec^2)	13.53	2.94	4.77	5.34
F ₃	(kN)		2.96	5.20	
3.4.2.13 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Πίνακας 3.26. Αριθμητι	κά αποτελέσματα	(μέγιστη μετατα	όπιση και επιτά	χυνση και μέγιστ	η απαιτούμενη
δύναμη ελέγχου) για το	τριώροφο κτήριο 1	υποβαλλόμενο σ	στο σεισμό του Γ	Duzce με έλεγχο κ	αι χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		τημα
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	13.20	1.30	8.70	8.20
ü,	(m/sec^2)	4.42	2.94	3.22	5.93
F_1	(kN)		1.99		9.13
u ₂	(mm)	23.6	1.20	14.60	11.00
ü,	(m/sec^2)	5.09	2.94	3.88	3.98
F ₂	(kN)		3.51		
u ₃	(mm)	29.50	1.6	17.20	14.40
ü,	(m/sec^2)	6.23	2.94	4.57	3.58
F ₃	(kN)		2.94	4.73	

3.4.3 Οκταώροφο κτήριο

3.4.3.1 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση T=0.2s

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$. Λόγω μορφής σήματος, επιλογή μιας συχνότητας

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε $ω_s$ = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του $ω_s$ και τελικά θα έχουμε $ω_s$ =20 rad/s.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁	(mm)	195.10	1.00	75.50	118.50
ü,	(m/sec^2)	13.28	3.31	8.92	10.92
F_1	(kN)		600.50	1000	1000
u ₂	(mm)	383.60	1.30	146.30	233.45
ü,	(m/sec^2)	25.88	3.60	12.65	16.65
F ₂	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	559.00	1.70	209.30	340.97
ü,	(m/sec^2)	37.42	3.78	15.84	21.67
F ₃	(kN)		1000	1000	
u4	(mm)	715.40	1.80	265.50	436.56
ü,	(m/sec^2)	48.65	3.59	21.94	28.89
F ₄	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	847.50	1.90	308.60	517.60
ü,	m/sec ²)	57.03	3.59	23.53	33.78
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	950.00	2.00	340.30	582.45
ü,	(m/sec^2)	63.38	3.93	21.35	40.78
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	1021.00	2.00	359.90	627.56
ü,	m/sec ²)	68.79	3.62	24.36	43.67
F ₇	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	1057	2.10	368.80	649.52
ü _s	(m/sec^2)	71.23	3.82	26.24	45.67
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 3.27. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο

3.3.4.2 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$. Λόγω μορφής σήματος, επιλογή δύο συχνότητων

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

Πίνακας 3.28. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη	
δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχ	0
και χωρίς έλεγχο.	

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	195.10	1.00	75.50	118.30
ü,	(m/sec^2)	26.28	5.31	18.92	20.08
F_1	(kN)		871.50	1000	1000
u ₂	(mm)	383.60	1.30	147.30	233.00
ü,	(m/sec^2)	46.88	5.45	24.65	32.93
F ₂	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	559.00	1.70	211.30	340.50
ü,	(m/sec^2)	56.63	5.87	30.84	41.85
F ₃	(kN)		1000	1000	
u4	(mm)	715.40	1.80	266.50	436.36
ü,	(m/sec^2)	55.03	5.28	31.94	48.66
F_4	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	847.50	2.00	309.60	517.80
ü,	m/sec ²)	57.03	5.85	31.53	53.72
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	950.80	2.10	341.30	582.40
ü,	(m/sec^2)	63.99	5.67	30.35	55.17
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	1021.70	2.00	360.90	627.30
ü,	m/sec^2)	82.73	5.16	31.36	63.69
F ₇	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	1057.70	2.20	369.80	649.90
ü,	(m/sec^2)	95.23	5.62	36.24	75.61
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

3.4.3.3 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε παλμική φόρτιση

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	3.00	0.10	1.50	3.30
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	6.02	3.20	5.37	7.08
F ₁ (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	5.10	0.10	2.00	4.60
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	8.14	3.20	5.44	7.53
F_2 (kN)		1000		
u ₃ (mm)	6.00	0.10	2.50	5.10
\ddot{u}_3 (m/sec ²)	7.68	3.20	8.09	8.15
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	6.30	0.10	3.40	5.80
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	6.56	3.20	6.10	6.9
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	6.30	0.10	4.30	6.10
\ddot{u}_{5} m/sec ²)	6.10	3.20	7.95	7.52
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	6.40	0.10	2.43	7.40
\ddot{u}_{6} (m/sec ²)	6.01	3.20	5.92	6.13
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	6.20	0.20	1.30	9.30
\ddot{u}_7 m/sec ²)	6.00	3.20	6.25	7.49
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	6.60	0.20	1.90	9.90
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	5.99	3.20	4.01	9.61
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 3.29. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

3.4.3.4 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

Πίνακας 3.30. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη
δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς
έλεγχο.

		Μη ελεγγγάμενο	Ελεγχόμενο σύστημα			
		τά στη τη τ	С	s1	cs2	cs3
		ουοτημα	Χωρίς Κορε σ μό	Κορεσμός 1000 kN		
u_1	(mm)	29.80	0.90	0.80	6.50	17.50
ü,	(m/sec^2)	4.32	2.97	3.05	4.27	5.45
F_1	(kN)		1100	1000	1000	1000
u ₂	(mm)	58.40	1.10	1.30	11.70	32.40
ü2	(m/sec^2)	6.21	2.95	2.88	3.88	5.90
F_2	(kN)		1080	1000		
u_3	(mm)	84.70	0.80	1.70	14.70	45.90
ü,	(m/sec^2)	7.87	2.97	3.17	5.21	8.60
F ₃	(kN)		1362	1000	1000	
u_4	(mm)	108.00	1.10	2.10	20.70	56.50
$\ddot{\mathbf{u}}_{_{4}}$	(m/sec^2)	8.82	2.95	3.09	6.50	10.70
F ₄	(kN)		1050	1000		
u ₅	(mm)	127.40	0.90	2.50	24.80	66.30
ü₅	(m/sec^2)	9.83	2.97	3.13	7.07	11.50
F ₅	(kN)		1315	1000	1000	1000
u ₆	(mm)	142.60	1.10	2.70	29.90	74.20
ü,	(m/sec^2)	10.37	2.96	3.26	7.30	11.07
F ₆	(kN)		978	1000		
u ₇	(mm)	153.00	1.00	2.70	32.80	79.40
ü,	(m/sec^2)	10.75	2.95	3.14	7.56	12.60
F_7	(kN)		1342	1000	1000	
u ₈	(mm)	158.20	1.30	2.80	35.20	81.90
ü _s	(m/sec^2)	11.15	2.92	3.08	8.78	13.60
F ₈	(kN)		1055	1000	1000	1000



Σχήμα 3.26. Διαδικασία ελέγχου για το οκταώροφο κτήριο, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας: (α) το εισερχόμενο σήμα, (β) χαρακτηριστικά τμήματα του εισερχομένου σήματος, (γ) το αντίστοιχο συχνοτικό τους περιεχόμενο, (δ) η επιλογή των θέσεων των πόλων, (ε) η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος και (στ) η συνολική απόκριση.



Σχήμα 3.26. Διαδικασία ελέγχου για το οκταώροφο κτήριο, υποβαλλόμενο στο σεισμό της σεισμό της Καλαμάτας: (α) το εισερχόμενο σήμα, (β) χαρακτηριστικά τμήματα του εισερχομένου σήματος, (γ) το αντίστοιχο συχνοτικό τους περιεχόμενο, (δ) η επιλογή των θέσεων των πόλων, (ε) η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος και (στ) η συνολική απόκριση.



Σχήμα 3.27. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 3.27. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 3.27. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 3.28. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας



Σχήμα 3.28. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας



Σχήμα 3.28. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.

3.4.3.5 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

Πίνακας 3.31. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη
δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς
έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
\mathbf{u}_1	(mm)	14.70	0.40	2.30	11.50
ü,	(m/sec^2)	3.96	3.06	5.21	15.45
F_1	(kN)		792	1000	1000
u ₂	(mm)	18.10	0.40	5.10	12.40
ü ₂	(m/sec^2)	6.52	3.20	5.00	21.90
F ₂	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	39.50	0.40	6.40	27.90
ü,	(m/sec^2)	7.97	3.07	6.65	8.70
F ₃	(kN)		1000	1000	
u_4	(mm)	48.70	0.40	7.50	34.50
ü ₄	(m/sec^2)	7.78	3.06	6.30	20.70
F ₄	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	56.03	0.40	7.40	36.30
ü₅	m/sec^2)	8.43	3.26	7.47	11.50
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	66.40	0.50	7.60	46.20
ü,	(m/sec^2)	9.16	3.18	8.01	15.07
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	74.50	0.50	6.60	50.40
ü,	m/sec^2)	9.69	3.07	6.17	17.60
F ₇	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	79.10	0.50	6.20	53.90
ü _s	(m/sec^2)	9.92	3.08	6.56	16.60
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

3.4.3.6 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	όμενο σύσ	τημα
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	13.90	0.40	8.30	11.80
ü	(m/sec^2)	4.28	3.08	5.21	6.28
F_1	(kN)		900	1000	1000
u ₂	(mm)	27.20	0.50	13.10	21.30
ü ₂	(m/sec^2)	5.66	3.06	5.10	5.56
F_2	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	39.70	0.50	15.80	30.90
ü,	(m/sec^2)	6.97	3.19	6.85	6.90
F ₃	(kN)		1000	1000	
u ₄	(mm)	50.60	0.50	18.70	39.50
ü4	(m/sec^2)	8.12	3.27	7.37	10.70
F ₄	(kN)		1000		
u 5	(mm)	59.90	0.60	21.40	47.30
ü,	m/sec ²)	8.56	3.15	7.87	10.47
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	68.70	0.60	23.60	54.10
ü,	(m/sec^2)	8.78	3.09	7.81	8.67
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	75.80	0.60	22.60	58.40
ü,	m/sec ²)	9.06	3.08	8.47	9.62
F ₇	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	79.80	0.60	22.20	59.90
ü ₈	(m/sec^2)	9.29	3.09	7.77	11.30
F_8	(kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 3.32. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

3.4.3.7 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	19.00	1.30	6.00	7.90
ü,	(m/sec^2)	5.79	3.53	4.25	5.82
F_1	(kN)		900	1000	1000
u ₂	(mm)	36.90	1.30	10.10	12.00
ü,	(m/sec^2)	8.04	3.32	5.21	5.77
F ₂	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	53.20	1.40	13.70	16.10
ü,	(m/sec^2)	8.76	4.90	6.36	5.17
F ₃	(kN)		1000	1000	
u_4	(mm)	67.6	1.10	13.30	19.40
ü,	(m/sec^2)	9.49	3.60	5.18	7.73
F ₄	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	80.90	1.50	11.40	21.50
ü₅	m/sec^2)	9.00	4.87	5.27	7.37
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	92.10	1.40	10.80	24.80
ü,	(m/sec^2)	8.64	3.66	5.15	5.81
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	99.90	1.90	9.60	28.70
ü,	m/sec^2)	8.43	5.54	4.88	6.30
F ₇	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	103.90	1.50	9.10	31.50
ü ₈	(m/sec^2)	9.50	3.68	5.14	9.52
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 3.33. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

3.4.3.8 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

Πίνακας 3.34. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη
δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς
έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	9.30	0.90	3.70	9.50
ü,	(m/sec^2)	3.75	2.94	7.25	8.82
F_1	(kN)		754	1000	1000
u ₂	(mm)	18.60	0.90	6.10	14.00
ü,	(m/sec^2)	5.03	3.14	4.21	7.77
F ₂	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	27.70	0.80	8.70	16.10
ü,	(m/sec^2)	5.86	3.31	5.36	7.17
F ₃	(kN)		1000	1000	
u_4	(mm)	36.50	0.80	10.30	15.40
ü,	(m/sec^2)	6.45	2.98	5.18	10.73
F_4	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	80.90	0.80	11.40	16.50
ü₅	m/sec ²)	9.00	3.13	5.27	6.37
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	92.10	0.80	12.80	16.80
ü,	(m/sec^2)	8.64	3.09	6.15	6.81
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	99.90	0.90	11.60	23.70
ü,	m/sec ²)	8.43	3.22	6.88	8.30
F ₇	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	103.90	0.80	11.10	27.50
ü _s	(m/sec^2)	9.50	2.94	8.14	10.52
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

3.4.3.9 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

Πίνακας 3.35. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη με	τατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη
δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλό	ιενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς
έλεγχο.	

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁	(mm)	48.30	1.90	8.90	21.50
ü,	(m/sec^2)	4.46	3.01	5.25	7.12
F ₁	(kN)		708	1000	1000
u ₂	(mm)	94.60	2.10	17.10	40.00
ü,	(m/sec^2)	7.52	3.14	4.34	8.11
F ₂	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	137.30	2.20	23.70	61.10
ü,	(m/sec^2)	10.45	3.49	6.96	7.19
F ₃	(kN)		1000	1000	
u4	(mm)	174.80	2.40	28.30	81.40
ü,	(m/sec^2)	12.63	3.47	6.18	8.73
F ₄	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	205.90	2.40	33.40	98.50
ü₅	m/sec ²)	14.00	3.56	8.16	12.37
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	229.70	2.20	37.80	112.80
ü,	(m/sec^2)	15.51	3.38	6.87	12.81
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	245.80	2.10	40.40	121.30
ü,	m/sec^2)	16.43	3.28	8.72	13.12
F ₇	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	253.90	2.00	42.10	124.50
ü ₈	(m/sec^2)	16.78	3.00	9.60	12.91
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

3.4.3.10 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

Πίνακας 3.36. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμεντ
δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley, με έλεγχο και
χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	46.40	0.80	7.90	21.50
ü,	(m/sec^2)	4.01	3.18	3.34	7.12
F_1	(kN)		1000	1000	1000
u ₂	(mm)	91.20	1.10	13.10	38.00
ü,	(m/sec^2)	6.21	3.35	3.89	7.11
F_2	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	133.10	1.70	19.40	54.10
ü,	(m/sec^2)	8.60	3.24	6.13	6.75
F ₃	(kN)		1000	1000	
u_4	(mm)	170.50	2.10	24.00	68.40
ü,	(m/sec^2)	11.05	3.43	4.18	8.22
F ₄	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	202.20	2.60	29.40	80.50
ü,	m/sec ²)	13.13	3.46	4.16	9.37
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	227.10	2.90	33.00	91.80
ü,	(m/sec^2)	14.81	3.28	4.87	7.51
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	244.20	3.00	36.40	99.10
ü,	m/sec ²)	16.23	3.06	5.50	9.01
F ₇	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	252.90	3.00	37.60	102.50
ü ₈	(m/sec^2)	17.08	3.25	5.24	12.58
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

3.4.3.11 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

Πίνακας 3.37. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη
δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς
έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	24.20	1.70	9.80	15.60
ü,	(m/sec^2)	3.47	3.00	3.34	3.38
F_1	(kN)		1000	1000	1000
u ₂	(mm)	46.70	2.10	19.50	27.60
ü,	(m/sec^2)	4.66	3.22	3.66	3.40
F ₂	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	67.10	2.20	27.60	37.40
ü,	(m/sec^2)	5.56	3.14	3.40	3.21
F ₃	(kN)		1000	1000	
u4	(mm)	85.10	2.50	32.00	45.60
ü,	(m/sec^2)	6.38	3.37	3.35	3.36
F ₄	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	100.10	2.80	35.60	52.50
ü₅	m/sec ²)	7.22	3.45	3.56	3.81
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	111.70	3.30	38.50	57.80
ü,	(m/sec^2)	7.90	3.50	3.79	3.95
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	119.60	3.80	39.80	61.30
ü,	m/sec ²)	8.31	3.40	4.24	4.11
F ₇	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	123.60	4.10	39.80	62.40
ü ₈	(m/sec^2)	8.40	3.41	5.49	5.94
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

3.4.3.12 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
\mathbf{u}_1	(mm)	12.80	0.60	6.60	7.70
ü,	(m/sec^2)	4.93	2.95	5.03	11.11
F_1	(kN)		680	1000	1000
u ₂	(mm)	24.50	0.70	9.10	12.60
ü2	(m/sec^2)	6.18	3.15	5.03	10.70
F ₂	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	37.10	0.70	10.20	16.20
ü,	(m/sec^2)	7.05	2.96	5.97	7.21
F ₃	(kN)		1000	1000	
u_4	(mm)	49.40	0.80	11.30	20.10
ü4	(m/sec^2)	7.53	3.28	5.32	8.36
F ₄	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	60.60	0.70	11.70	25.50
ü,	m/sec ²)	8.01	2.99	6.48	11.81
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	70.70	0.70	11.40	28.80
ü,	(m/sec^2)	8.19	3.21	5.20	7.65
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	79.00	0.07	10.00	32.30
ü,	m/sec ²)	10.39	2.97	7.17	8.11
F_7	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	83.80	0.70	9.20	34.40
ü _s	(m/sec^2)	12.65	3.13	6.16	12.94
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 3.38. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

3.4.3.13 Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce

Παράμετροι

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.69) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Για πολυβάθμια συστήματα διπλασιάζουμε την τιμή του ω_s και τελικά θα έχουμε ω_s =20 rad/s.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
\mathbf{u}_1	(mm)	33.30	0.60	6.80	14.20
ü,	(m/sec^2)	4.97	2.91	4.81	7.24
F_1	(kN)		680	1000	1000
u ₂	(mm)	64.70	1.30	10.50	25.90
ü,	(m/sec^2)	6.30	3.51	4.57	4.02
F ₂	(kN)		1000		
u ₃	(mm)	94.00	1.70	12.60	37.50
ü,	(m/sec^2)	8.43	3.50	5.52	4.61
F ₃	(kN)		1000	1000	
u_4	(mm)	120.10	2.00	16.10	47.10
ü,	(m/sec^2)	9.64	3.01	4.79	5.98
F ₄	(kN)		1000		
u ₅	(mm)	142.50	1.90	19.20	54.70
ü,	m/sec^2)	9.93	3.31	5.36	9.58
F ₅	(kN)		1000	1000	1000
u ₆	(mm)	160.70	1.70	19.50	60.50
ü,	(m/sec^2)	10.19	3.49	5.32	7.11
F ₆	(kN)		1000		
u ₇	(mm)	173.00	1.50	19.10	63.20
ü,	m/sec^2)	11.51	3.40	6.53	7.57
F_7	(kN)		1000	1000	
u ₈	(mm)	179.80	1.30	19.80	63.80
ü _s	(m/sec^2)	12.69	3.14	7.10	11.50
F ₈	(kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 3.39. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

3.5 Παραμετρική διερεύνηση της χρονικής καθυστέρησης t_d και του κορεσμού της δύναμης ελέγχου.

3.5.1 Επιρροή της χρονικής καθυστέρησης

Η χρονική καθυστέρηση υπάρχει εξαιτίας του γεγονότος, ότι χρειάζεται κάποιος χρόνος για να μετρηθεί το σήμα διέγερσης και η απόκριση από τους αισθητήρες. Επίσης, χρειάζεται κάποιος χρόνος για την επεξεργασία και για τον υπολογισμό των απαιτούμενων δυνάμεων ελέγχου. Τέλος, χρειάζεται κάποιος χρόνος για να σταλεί η εντολή λειτουργίας στις συσκευές ελέγχου και κάποιος χρόνος ενεργοποίησης των συσκευών ελέγχου για να εφαρμόσουν την απαιτούμενη εντολή. Όταν υπολογίζεται το μητρώο των δυνάμεων ελέγχου τη χρονική στιγμή t, αυτές θα εφαρμοστούν στην κατασκευή τη χρονική στιγμή t+t_d, επομένως θα πρέπει να ληφθεί αυτό υπόψη στο πρόγραμμα προσομοίωσης.

Η χρονική καθυστέρηση επηρεάζει το συγχρονισμό μεταξύ της δύναμης ελέγχου και της απόκρισης και μπορεί να επιφέρει αστάθεια. Τιμές της χρονικής καθυστέρησης για την εκτέλεση των παραπάνω εργασιών, είναι της τάξης των δέκατων του δευτερολέπτου και εξαρτώνται κάθε φορά από την τεχνολογία των αισθητήρων, της συσκευής ελέγχου, της καλωδίωσης κ.τ.λ. Μια αναλυτική αντιμετώπιση της χρονικής καθυστέρησης μπορεί να γίνει σε επίπεδο μονοβαθμίου συστήματος, ενώ για πολυβάθμια συστήματα θα πρέπει να γίνονται πάντα αριθμητικές προσομοιώσεις, για να ποσοτικοποιηθεί η επιρροή της στην απόκριση του συστήματος.

Η δύναμη ελέγχου, λαμβανομένης υπόψη και της χρονικής καθυστέρησης, περιγράφεται ως εξής:

$$\mathbf{F}(t) = -\left[\mathbf{k}_{f1} \ \mathbf{k}_{f2}\right] \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t-t_d) \\ \dot{\mathbf{u}}(t-t_d) \end{bmatrix} = -\mathbf{K}_f \mathbf{X}(t-t_d)$$
(3.73)

Το t_d αντιπροσωπεύει τη χρονική καθυστέρηση. Γενικά, η χρονική καθυστέρηση εισάγει επιπρόσθετους όρους στις ιδιοτιμές του πίνακα **A**, και κάτω από κανονικές συνθήκες μπορεί το πραγματικό μέρος της ιδιοτιμής να γίνει θετικό και κατά συνέπεια το σύστημα να γίνει ασταθές. Έτσι, παρόλο που ο ιδανικός έλεγχος (ακαριαία εφαρμογή της δύναμης) είναι ευσταθής χωρίς καμία προϋπόθεση, χρειάζεται πάντα να γίνεται μελέτη ευστάθειας του συστήματος, εξαιτίας αυτής της χρονικής καθυστέρησης που μπορεί να προκαλέσει αστάθεια.
Η διαφορική εξίσωση ελέγχου που περιγράφει την απόκριση με έλεγχο, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική καθυστέρηση, για την περίπτωση του μονοβαθμίου, γίνεται:

όπου έγινε η αντικατάσταση

$$\frac{F(t)}{m} = -\frac{k_{f1}}{m}u(t-t_d) - \frac{k_{f2}}{m}u(t-t_d) = -g_du(t-t_d) - g_vu(t-t_d)$$
(3.75)

Από τη μελέτη της εξίσωσης (3.74), Connor 2002, (εύρεση της λύσης της χαρακτηριστικής εξίσωσης και διερεύνηση του πραγματικού μέρους της) προκύπτει ότι αν δεν έχουμε καθόλου απόσβεση και ανάδραση ταχύτητας (ζ=0 και g_v =0) τότε βρίσκουμε το πραγματικό μέρος της λύσης της χαρακτηριστικής εξίσωσης θετικό και το σύστημα είναι πάντα ασταθές. Αν είχαμε μόνο ανάδραση ταχύτητας δηλαδή g_d =0 τότε το σύστημα θα ήταν ευσταθές όταν ισχύει:

$$\frac{\mathbf{k}_{t2}\mathbf{t}_{d}}{\mathbf{m}} < 1 \tag{3.76}$$

Υπάρχει μια οριακή τιμή t_d, που εξαρτάται κάθε φορά από το συγκεκριμένο σύστημα, πέρα από την οποία το σύστημα μεταπηδά από την ευσταθή στη ασταθή περιοχή. Η οριακή αυτή τιμή της παραμέτρου t_d είναι:

$$t_{d}\big|_{max} = \frac{2}{\Omega} \tan^{-1} \left(\frac{-g_{d} \mp \sqrt{g_{d}^{2} + g_{v}^{2} \Omega^{2} - 4\zeta^{2} \omega^{2} \Omega^{2}}}{(g_{v} - 2\zeta \omega) \Omega} \right)$$
(3.77)

όπου

$$\Omega_{1,2} = \mp \sqrt{\frac{4\zeta^2 \omega^2 - 2\omega^2 - g_v^2}{2}} \mp \sqrt{\frac{(4\zeta^2 \omega^2 - 2\omega^2 - g_v^2)^2}{4} - (\omega^4 - g_d^2)}$$
(3.78)

Φαίνεται λοιπόν, πως η χρονική καθυστέρηση επηρεάζει την ευστάθεια του συστήματος και κατ' επέκταση την απόκρισή του. Πέρα από την παραπάνω ποιοτική διερεύνηση, θα δούμε στη συνέχεια ποσοτικά πως επηρεάζεται η απόκριση σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση, τόσο για

μονώροφο όσο και για το πολυώροφο κτήριο, τα οποία υπόκεινται σε αρμονική και σεισμική φόρτιση. Όταν λαμβάνουμε υπόψη τη χρονική καθυστέρηση τότε η δύναμη ελέγχου δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) = -\mathbf{K}_{f}\mathbf{X}(\mathbf{t}) \tag{3.79}$$

Για το μονώροφο κτήριο του παραρτήματος Α επιλύεται η εξίσωση κίνησης με έλεγχο, για μια ημιτονική φόρτιση, η οποία το συντονίζει. Μεταβάλλοντας κάθε φορά τη χρονική καθυστέρηση, υπολογίζεται η απόκριση και διαιρείται με την απόκριση που έχουμε χωρίς έλεγχο. Έτσι λαμβάνεται το διάγραμμα του σχήματος 3.29 (α) στο οποίο φαίνεται ο λόγος της μέγιστης απόκρισης προς την απόκριση χωρίς έλεγχο, σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση t_d. Στο σχήμα 3.29 (β) το οποίο είναι μία μεγέθυνση του αρχικού τμήματος του σχήματος 3.29 (α), φαίνεται ότι η χρονική καθυστέρηση επηρεάζει αρνητικά την απόκριση. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 3.29 (β) φαίνεται, ότι χωρίς χρονική καθυστέρηση το ελεγχόμενο σύστημα έχει μειωμένη απόκριση κατά 90% από την απόκριση του συστήματος χωρίς έλεγχο. Επίσης, για χρονική καθυστέρηση που συστήματος χωρίς έλεγχο, δηλαδή η χρονική καθυστέρηση αναιρεί τα πλεονεκτήματα του ελέγχου. Επίσης, για χρονική καθυστέρηση μετά από 40 ms η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος βρίσκεται κάτω από το 50% της απόκρισης του συστήματος χωρίς έλεγχο. Τέλος, για χρονική καθυστέρηση και διαιρτάρηση το 30% της απόκριση του αρχικό του συστήματος του συστήματος χωρίς έλεγχο. Επίσης, για χρονική καθυστέρηση μετά από 40 ms η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος βρίσκεται κάτω από το 50% της απόκριση διατηρείται σε αρκετά χαμηλό επίπεδο.



Σχήμα 3.29 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση του μονώροφου κτηρίου για ημιτονική φόρτιση.

Στο σχήμα 3.30 φαίνεται πάλι ο λόγος της μέγιστης απόκρισης προς την απόκριση χωρίς έλεγχο του μονοβαθμίου συστήματος, σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση t_d, για το σεισμό της Αθήνας 1999. Πάλι βλέπουμε διάφορες περιοχές χρονικής καθυστέρησης και επιπέδων απόκρισης ως προς την απόκριση χωρίς έλεγχο.



Σχήμα 3.30 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση του μονώροφου κτηρίου για σεισμική φόρτιση (σεισμός Αθήνας).

Το όριο της χρονικής καθυστέρησης, για να ξεπεράσει η απόκριση κάποιο ποσοστό της απόκρισης χωρίς έλεγχο, εξαρτάται και από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως την ιδιοπερίοδο της. Αυτό διαπιστώνεται αν προσομοιωθεί ένα μονώροφο κτήριο, το οποίο κάθε φορά συντονίζεται με μια αρμονική φόρτιση και μεταβάλλεται η ιδιοπερίοδος του. Υπολογίζοντας τη χρονική καθυστέρηση, για την οποία η απόκριση γίνεται ίση με το 50% της απόκρισης χωρίς έλεγχο, προκύπτει το σχήμα 3.31, όπου φαίνεται για διάφορες ιδιοπεριόδους η χρονική καθυστέρηση που απαιτείται για να έχει το ελεγχόμενο σύστημα απόκριση στο 50% της απόκρισης του συστήματος χωρίς έλεγχο.

Αν πάρουμε το τριώροφο κτήριο, που περιγράφεται στο παράρτημα Α, και κάνουμε προσομοιώσεις για ημιτονική φόρτιση, μεταβάλλοντας τη χρονική καθυστέρηση, τότε προκύπτει το σχήμα 3.32, όπου φαίνεται η απόκριση για κάθε βαθμό ελευθερίας σε σχέση με την απόκριση χωρίς έλεγχο, για διάφορες τιμές της χρονικής καθυστέρησης. Στο σχήμα 3.33 φαίνονται τα ίδια μεγέθη, αλλά για σεισμική φόρτιση.



Σχήμα 3.31 Διάγραμμα μεταξύ περιόδου και χρονικής καθυστέρησης για απόκριση του συστήματος ελέγχου μικρότερη του 50% από την απόκριση χωρίς έλεγχο.



Σχήμα 3.32 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση του τριώροφου κτηρίου για ημιτονική φόρτιση.



Σχήμα 3.33 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με τη χρονική καθυστέρηση του τριώροφου κτηρίου για σεισμική φόρτιση (Σεισμός της Αθήνας 1999).

3.5.2 Επιρροή του κορεσμού της δύναμης ελέγχου

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος είναι η δυνατότητα της συσκευής ελέγχου να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που θέτει ο αλγόριθμος ελέγχου. Αν ο αλγόριθμος υπολογίζει μια δύναμη και η συσκευή δεν μπορεί να τη δώσει στο σύστημα, τότε έχουμε φαινόμενα κορεσμού της δύναμης ελέγχου που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάλυση και το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου. Δηλαδή, όταν επιλύουμε την εξίσωση κίνησης με έλεγχο, θα πρέπει να συγκρίνουμε την τιμή της δύναμης ελέγχου που προκύπτει από τον αλγόριθμο, με τη μέγιστη δυνατότητα της συσκευής, $\mathbf{F}_{\text{allowable}}$. Αν η απαιτούμενη δύναμη υπερβαίνει τη δυναμικότητα της συσκευής, τότε θα πρέπει να υπεισέρχεται στην εξίσωση κίνησης με έλεγχο η μέγιστη τιμή που μπορεί να δώσει η συσκευή και όχι η τιμή που προκύπτει από τον αλγόριθμο. Σε αυτή την περίπτωση η δύναμη ελέγχου θα δίνεται από την παρακάτω συνάρτηση κορεσμού:

 $sat\mathbf{F}(t) = \begin{cases} \mathbf{F}(t) & \mathbf{F}(t) < \mathbf{F}_{allowable} \\ \mathbf{F}_{allowable} & \mathbf{F}(t) > \mathbf{F}_{allowable} \end{cases}$

Στη συνέχεια θα δούμε κάποιες εφαρμογές για τις επιπτώσεις του κορεσμού της δύναμης ελέγχου στην απόκριση των κατασκευών.

Εάν έχουμε σταθερή και πάρα πολύ μικρή τη χρονική καθυστέρηση, πρακτικά ίση με μηδέν, και επιλύσουμε την εξίσωση ελέγχου για διάφορα επίπεδα κορεσμού της δύναμης, το μονώροφο κτήριο, τόσο για την αρμονική φόρτιση, όσο και για το σεισμό της Αθήνας, τότε θα πάρουμε τα σχήματα 3.34 και 3.35 αντίστοιχα. Από τα σχήματα προκύπτει ότι ανάλογα με το επίπεδο κορεσμού της δύναμης ελέγχου, έχουμε και αντίστοιχη απόδοση, σε όρους μετακίνησης, του συστήματος ελέγχου.



Σχήμα 3.34 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου του μονώροφου κτηρίου για αρμονική φόρτιση.



Σχήμα 3.35 Μεταβολή της απόκρισης του συστήματος σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου του μονώροφου κτηρίου για σεισμική φόρτιση (Σεισμός της Αθήνας 1999).

Επιλύοντας παραμετρικά το τριώροφο κτήριο του παραρτήματος Α για διάφορα επίπεδα κορεσμού της δύναμης, τόσο για αρμονική φόρτιση, όσο και για τη σεισμική φόρτιση, θα πάρουμε τα σχήματα 3.36 και 3.37, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.36 Μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου του τριώροφου κτηρίου για αρμονική φόρτιση.



Σχήμα 3.37 Μεταβολή της απόκρισης του συστήματος σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου του τριώροφου κτηρίου για σεισμική φόρτιση της Αθήνας.

3.5.3 Αλληλεπίδραση της χρονικής καθυστέρησης και του κορεσμού της δύναμης ελέγχου

Όταν λαμβάνουμε υπόψη ταυτόχρονα τη χρονική καθυστέρηση και τον κορεσμό της δύναμης ελέγχου τότε η δύναμη ελέγχου που υπεισέρχεται στη διαφορική εξίσωση ελέγχου δίδεται από τις σχέσεις:

$$\mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) = -\mathbf{K}_{f}\mathbf{X}(t) \tag{3.80}$$

$$sat\mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) = \begin{cases} \mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) & \mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) < \mathbf{F}_{allowable} \\ \mathbf{F}_{allowable} & \mathbf{F}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_{d}) > \mathbf{F}_{allowable} \end{cases}$$
(3.81)

Αν τώρα στο τριώροφο κτήριο μεταβάλουμε τόσο τη χρονική καθυστέρηση, όσο και το επίπεδο κορεσμού της δύναμης, και δούμε πως μεταβάλλεται η απόκριση του πρώτου ορόφου, θα πάρουμε το σχήμα 3.38, ενώ στο σχήμα 3.39 φαίνεται η προβολή των σημείων της επιφάνειας που έχουν την ίδια απόκριση, στο επίπεδο της χρονικής καθυστέρησης και της στάθμης κορεσμού της δύναμης ελέγχου.



Σχήμα 3.38 Μεταβολή της απόκρισης του 1 ορόφου, του τριώροφου κτηρίου, σε σχέση με την κορεσμένη δύναμη ελέγχου και τη χρονική καθυστέρηση του συστήματος για τη σεισμική φόρτιση της Αθήνας.



Σχήμα 3.39 Προβολή της απόκρισης του 1 ορόφου, του τριώροφου κτηρίου, στο επίπεδο της κορεσμένης δύναμης ελέγχου και της χρονικής καθυστέρησης του συστήματος για τη σεισμική φόρτιση της Αθήνας.

Από τα δυο τελευταία σχήματα φαίνεται ότι υπάρχει μια περιοχή που μπορεί να κινηθούμε, όπου για δεδομένη χρονική καθυστέρηση και δεδομένη στάθμη κορεσμού της δύναμης ελέγχου, η απόκριση μας να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα.

Τέλος, επειδή η εξίσωση κίνησης με έλεγχο, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική καθυστέρηση και τον κορεσμό της δύναμης ελέγχου, είναι μια εντόνως μη γραμμική εξίσωση, δεν μπορούμε να βγάλουμε γενικά συμπεράσματα για τα όρια της χρονικής καθυστέρησης και του επιπέδου

κορεσμού της δύναμης, ώστε να κρατάμε την απόκριση του συστήματος ελέγχου σε μειωμένα επίπεδα. Θα πρέπει κάθε φορά να πραγματοποιούμε παραμετρικές αναλύσεις για να βρίσκουμε τα όρια της χρονικής καθυστέρησης και τα επίπεδα κορεσμού της δύναμης ελέγχου για μια δεδομένη μείωση της απόκρισης ελέγχου σε σχέση με την απόκριση χωρίς έλεγχο.

3.6 Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω αναλύσεις προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

Οσον αφορά τις σχετικές μετακινήσεις ορόφων της ελεγχόμενης κατασκευής, στην περίπτωση που οι θέσεις ελέγχου είναι όσοι οι βαθμοί ελευθερίας, αυτές μειώνονται από 65% έως 100 % σε σχέση με τις μετακινήσεις της κατασκευής χωρίς έλεγχο. Όταν οι θέσεις ελέγχου μειώνονται σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας τότε αυτή η μείωση για το τριώροφο κτήριο είναι της τάξης του 60% έως 90%. Έντονη διαφοροποίηση παρατηρείται για τη φόρτιση παλμού στο τριώροφο κτήριο με μία θέση ελέγχου όπου η μείωση είναι της τάξης του 20% με 30%. Για το οκταώροφο κτήριο με πέντε θέσεις ελέγχου τα ποσοστά μείωσης είναι της τάξης του 30% έως 90%. Η παλμική φόρτιση, στο οκταώροφο κτήριο με μειωμένες θέσεις ελέγχου, διαφοροποιείται και πάλι από τα προηγούμενα ποσοστά και η μείωση κυμαίνεται από 0% έως 10%.

Η παραπάνω θετική επιρροή του ελέγχου στη μετακίνηση μειώνεται όταν λαμβάνουμε υπόψη την επιρροή της χρονικής καθυστέρησης και του κορεσμού της δύναμης ελέγχου. Διερευνάται η επιρροή των δυο αυτών παραγόντων, είτε ανεξάρτητα ο καθένας, είτε όταν αλληλοεπιδρούν και οι δυο μαζί. Επειδή το πρόβλημα επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης ελέγχου, λόγω χρονικής καθυστέρησης και κορεσμού της δύναμης ελέγχου γίνεται εντόνως μη γραμμικό δεν μπορούν να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα για το ποσοστό μείωσης της απόκρισης λόγω χρονικής καθυστέρησης και του κορεσμού της δύναμης ελέγχου. Υπάρχουν περιοχές, όρια, χρονικής καθυστέρησης και του κορεσμού της δύναμης ελέγχου. Υπάρχουν περιοχές, όρια, χρονικής καθυστέρησης διατηρείται στα προηγούμενα ποσοστά αλλά αυτές εξαρτώνται από το κτήριο το οποίο εξετάζουμε και τη φόρτιση που το διεγείρει. Από τις παραμετρικές αναλύσεις που έγιναν, σχεδιάστηκαν γραφικές παραστάσεις όπου δίνουν τα όρια της χρονικής καθυστέρησης, του κορεσμού της δύναμης ελέγχου σε σχέση με την μείωση της απόκρισης των συγκεκριμένων κτηρίων για αρμονική και σεισμική διέγερση. Οι τιμές που προκύπτουν δεν μπορούν όμως να γενικευτούν για κάθε κτήριο και για κάθε φόρτιση. Γενικά θα μπορούσε να λεχθεί ότι η επιρροή της χρονικής καθυστέρησης είναι μεγαλύτερη στο μονώροφο κτήριο από ότι στο τριώροφο και στο οκταώροφο. Δηλαδή, στα πολυώροφα κτήρια τα όρια της χρονικής καθυστέρησης αυξάνονται σε σχέση με το μονώροφο για το ίδιο ποσοστό μείωσης της απόκρισης. Τέλος για το ίδιο κτήριο και για το ίδιο ποσοστό μείωσης της απόκρισης, η σεισμική διέγερση απαιτεί μικρότερη χρονική καθυστέρηση από ότι η αρμονική φόρτιση.

Οσον αφορά την απόλυτη επιτάχυνση ορόφων αυτή μειώνεται από 45% έως και 95% στην περίπτωση που έχουμε ίσο αριθμό θέσεων ελέγχου και βαθμών ελευθερίας. Ενώ για την περίπτωση όπου έχουμε λιγότερες θέσεις ελέγχου από τους βαθμούς ελευθερίας τότε παρατηρείται μια μείωση της τάξεως από 10% έως 60% για το τριώροφο κτήριο με μια δύναμη ελέγχου. Στην παλμική διέγερση το τριώροφο με μια δύναμη ελέγχου δεν παρατηρήθηκε μείωση της επιτάχυνσης. Για το οκταώροφο κτήριο με πέντε θέσεις ελέγχου παρατηρείται μια μείωση της τάξης των 10% έως 60% και μηδενική μείωση για την περίπτωση της παλμικής φόρτισης ενώ με τρεις δυνάμεις ελέγχου έχουμε αμελητέα μείωση της επιτάχυνσης αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις αύξηση αυτής. Για την περίπτωση που έχουμε λιγότερες θέσεις ελέγχου από τους βαθμούς ελευθερίας τα ελάχιστα ποσοστά μείωσης της επιτάχυνσης παρατηρούνται στις θέσεις ελέγχου. Τέλος όσον αφορά την επιτάχυνση παρατηρήθηκε ότι η ημιτονική φόρτιση με μία αρμονική.

Τα παραπάνω ποσοστά μείωσης της επιτάχυνσης μειώνονται όταν λαμβάνουμε υπόψη την επιρροή της χρονικής καθυστέρησης και τον κορεσμό της δύναμης ελέγχου. Όπως και στην περίπτωση της μετακίνησης υπάρχουν περιοχές, όρια, χρονικής καθυστέρησης και επίπεδα κορεσμού της δύναμης ελέγχου όπου η μείωση της επιτάχυνσης διατηρείται στα προηγούμενα ποσοστά αλλά αυτές εξαρτώνται από το κτήριο το οποίο εξετάζουμε.

Γενικά ο έλεγχος, όταν οι συσκευές είναι όσοι οι βαθμοί ελευθερίας, τείνει να κάνει την κατασκευή να συμπεριφέρεται σαν στερεό σώμα. Δηλαδή, έχουμε πολύ μικρές σχετικές μετακινήσεις ορόφων, και η απόλυτη επιτάχυνση σε κάθε όροφο είναι περίπου όση και η

εδαφική επιτάχυνση. Όσο ο αριθμός των συσκευών μειώνεται σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας, τόσο αυτή η κίνηση στερεού σώματος της κατασκευής διαφοροποιείται. Από τα παραδείγματα φαίνεται, ότι είναι πιο αποτελεσματικό να χρησιμοποιούνται πολλές συσκευές ελέγχου, σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας, έστω και μειωμένης δυνατότητας απόδοσης ισοδύναμης δύναμης ελέγχου.

- Κατά την πραγματοποίηση του ελέγχου με περιορισμένες θέσεις ελέγχου τόσο στο τριώροφο όσο και στο οκταώροφο, παρατηρήθηκαν αριθμητικές αστάθειες, οι οποίες ξεπεράστηκαν, είτε αυξάνοντας τον αριθμό των τμημάτων του σεισμού, είτε παίρνοντας περισσότερα σημεία για την περιγραφή της σεισμικής καταγραφής (resolution) και κατά συνέπεια μικρότερο βήμα ολοκλήρωσης.
- Κατά την αλλαγή των πόλων από τμήμα σε τμήμα της διέγερσης δεν παρατηρήθηκαν αστάθειες.
- Οι μέγιστες ισοδύναμες δυνάμεις ελέγχου για την πραγματοποίηση των παραπάνω ποσοστών μείωσης της απόκρισης κυμαίνονται μεταξύ 40 kN και 165 kN για το μονώροφο κτήριο, 2.5 kN έως 5 kN για το τριώροφο κτήριο και 700 kN έως 1000 kN για το οκταώροφο κτήριο. Πέραν του υπολογισμού των δυνάμεων έγινε και υπολογισμός της ισχύος. Οι τιμές που δίνονται στους πίνακες αποτελούν άνω όρια και είναι εφικτά για την πρακτική εφαρμογή χωρίς απαγορευτικό κόστος.
- Το εύρος της μη ασφαλούς περιοχής που δίδεται από τις σχέσεις (3.70) και (3.71) για την πραγματοποίηση των παραπάνω ποσοστών μείωσης της απόκρησης, για το τριώροφο και το οκταώροφο κτήριο, πρέπει να διπλασιάζεται. Αυτό γίνεται ώστε να υπάρχει αλληλοεπικάλυψη των ζωνών και να τοποθετούνται όλοι οι πόλοι έξω από τον πιο απομακρυσμένο κύκλο, διότι σε αντίθετη περίπτωση αν οι πόλοι μείνουν μεταξύ των ζωνών τότε μπορεί να διεγερθούν από τις αντίστοιχες συχνότητες του σήματος και να συμβάλουν στην αύξηση της απόκρισης.

Σε αυτό το κεφάλαιο διατυπώθηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία υπολογισμού των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος και φάνηκε πως αυτή η μεθοδολογία εφαρμόζεται με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων για τον έλεγχο των κατασκευών. Τεκμηριώθηκε η μεθοδολογία με μια σειρά από εφαρμογές. Διερευνήθηκε ακόμη η επιρροή κάποιων πρακτικών ζητημάτων όπως η χρονική καθυστέρηση και ο κορεσμός της δύναμης ελέγχου.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΜΟΡΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο αλγορίθμου μορφής ολίσθησης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία βελτιωμένη εκδοχή του αλγορίθμου μορφής ολίσθησης (Sliding Mode Control, SMC). Μεταξύ άλλων αλγορίθμων, ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης έχει δείξει ότι μπορεί να είναι ένας από τους βασικούς αλγορίθμους για τον έλεγχο των κατασκευών. Στην εργασία του Utkin (1992), ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης αναπτύχθηκε για τον εύρωστο έλεγχο μη γραμμικών συστημάτων, με πολλές αβεβαιότητες. Άλλα θέματα, όπως ο αλγόριθμου σε συσκευές μεταβλητής απόσβεσης, ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης με πλήρη ανάδραση της κατάστασης του συστήματος ή με μερική ανάδραση με τη χρήση παρατηρητών, είναι μερικά θέματα που αναπτύχθηκαν το 1995, από την ερευνητική ομάδα του Yang.

Ο Yang (1995) διαπραγματεύεται επίσης τον κορεσμένο έλεγχο μορφής ολίσθησης, όπου η μέγιστη δύναμη κορεσμού λαμβάνεται ως ένα ποσοστό του βάρος του κτιρίου, ενώ ο Cai (1997) δίνει αυτή τη μέγιστη δύναμη κορεσμού ως ποσοστό της σεισμικής δράσης. Ο Lee (2004) συμπεριλαμβάνει και το σχεδιασμό της κατασκευής με τον κορεσμένο έλεγχο μορφής ολίσθησης, αφού η δύναμη κορεσμού υπολογίζεται πλέον από το φάσμα σχεδιασμού. Επίσης, πειράματα σε πραγματική κατασκευή, ελεγχόμενη με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, έχουν γίνει από τον Wu (1997).

Οι Lee και Wang (2002) προτείνουν τον ασαφή αλγόριθμο μορφής ολίσθησης (fuzzy sliding mode control), βασισμένο στους γενετικούς αλγορίθμους, ενώ ο Cai (1997) διερευνά το συνδυασμό μεταξύ αλγορίθμου μορφής ολίσθησης και ελέγχου τύπου bang-bang. Τέλος, ο μη γραμμικός έλεγχος μορφής ολίσθησης διερευνάται από τον Sarbjeet (2000). Όλα τα παραπάνω δείχνουν το ευρύ φάσμα έρευνας και εφαρμογής του αλγορίθμου μορφής ολίσθησης.

Ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης περιλαμβάνει δυο στάδια. Αρχικά γίνεται ο σχεδιασμός της ευσταθούς επιφάνειας ολίσθησης. Ευσταθής επιφάνεια ολίσθησης είναι η επιφάνεια που προκύπτει, όταν το τροχιακό της φάσης (phase portrait) του συστήματος (διάγραμμα μετακίνησης-ταχύτητας) προσεγγίσει αυτή την επιφάνεια και παραμείνει μέσα σε αυτή. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τον υπολογισμό της δύναμης ελέγχου, η οποία θα εξαναγκάσει το τροχιακό της φάσης να οδηγηθεί στην επιφάνεια ολίσθησης και να παραμείνει εκεί στο μετέπειτα χρόνο.

Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή η δύναμη ελέγχου υπολογίζεται με τη θεωρία ευστάθειας κατά Lyapunov. Ο καθορισμός της επιφάνειας ολίσθησης υπολογίζεται είτε με τον αλγόριθμο του βέλτιστου τετραγωνικού ρυθμιστή (Linear Quadratic Regulator, LQR), είτε με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων. Ο δεύτερος αλγόριθμος απαιτεί προκαθορισμένες τιμές των πόλων του συστήματος πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης.

Σε αυτή τη διατριβή επιλέχτηκε ο σχεδιασμός της επιφάνειας ολίσθησης με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων, όπου όμως οι πόλοι καθορίστηκαν με βάση το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού και την παραστασή του στο μιγαδικό επίπεδο. Ας δούμε όμως αναλυτικά τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης και τις εξισώσεις που διέπουν το ελεγχόμενο σύστημα. Η εξίσωση κίνησης του συστήματος στο χώρο κατάστασης δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_{s}a_{s}(t) + \mathbf{B}_{f}sat\mathbf{F}(t_{d}-t)$$

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{F}(t_{d}-t) + \mathbf{v}$$
(4.1)

όπου A, B, C, D και F είναι τα αντίστοιχα μητρώα που έχουν αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 3.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου μορφής ολίσθησης είναι να σχεδιαστεί ένας ελεγκτής που ασκώντας μια δύναμη ελέγχου θα οδηγήσει την φαση του συστήματος πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης. Η κίνηση πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης θα πρέπει να είναι ευσταθής, δηλαδή αν οδηγηθεί εκεί να παραμείνει εκεί και να κινηθεί προς το σημείο ισορροπίας. Το πρώτο βήμα είναι ο σχεδιασμός μιας ευσταθούς επιφάνειας ολίσθησης και στη συνέχεια καθορίζεται η δύναμη ελέγχου που θα οδηγήσει το σύστημα στην επιφάνεια ολίσθησης.

Μία σχηματική περιγραφή των δυο βημάτων του αλγορίθμου μορφής ολίσθησης, φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Η κίνηση της φάσης του συστήματος προς την επιφάνεια ολίσθησης, η παραμονή της σε αυτή και η κατεύθυνση της προς το σημείο ισορροπίας.

4.1.1 Σχεδιασμός επιφανείας ολίσθησης

Στις περισσότερες εργασίες η επιφάνεια ολίσθησης είναι ένας γραμμικός συνδυασμός του διανύσματος κατάστασης. Στην εργασία του Slotin (1991) προτείνεται μία πιο γενική προσέγγιση για τον ορισμό της επιφάνειας ολίσθησης.

Έστω ότι \mathbf{U}_d είναι η επιθυμητή απόκριση. Στον έλεγχο των κτιρίων η ποσότητα αυτή είναι μηδέν. Επίσης, η \mathbf{U}_d θα μπορούσε να είναι η απόκριση ενός μοντέλου αναφοράς που θα θέλαμε να ακολουθήσει το συστημά μας.

Έστω ότι U είναι η διαφορά της απόκρισης από την επιθυμητή που ορίζεται ως εξής:

$$\overline{\mathbf{U}} = \mathbf{U} - \mathbf{U}_{\mathrm{d}} \tag{4.2}$$

Η χρονικά μεταβαλλόμενη επιφάνεια s ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{s}(\overline{\mathbf{U}},t)=0,$$
 ó $\pi \circ \mathbf{v}$ $\mathbf{s}(\overline{\mathbf{U}},t) = \left(\frac{d}{dt}+\lambda\right)^{m-1}\overline{\mathbf{U}}$ (4.3)

λ είναι ένα συμμετρικό θετικά ορισμένο μητρώο. Εάν m=2, τότε η επιφάνεια s είναι το σταθμισμένο άθροισμα της σχετικής θέσης και της ταχύτητας ως προς τη θέση και τη ταχύτητα αναφοράς:

$$\mathbf{s} = \dot{\overline{\mathbf{U}}} + \lambda \overline{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \lambda & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{U}} \\ \dot{\overline{\mathbf{U}}} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{\mathbf{s}} \mathbf{X}$$
(4.4)

Αν m=3 η επιφάνεια γίνεται ως ακολούθως:

$$\mathbf{s} = \mathbf{\ddot{U}} + 2\lambda\mathbf{\dot{U}} + \lambda^2\mathbf{\overrightarrow{U}}$$
(4.5)

Αν έχουμε δυο μεταβλητές κατάστασης (μονοβάθμιο σύστημα), τότε η επιφάνεια ολίσθησης είναι μια γραμμή, ενώ αν έχουμε τρεις μεταβλητές κατάστασης, τότε η επιφάνεια ολίσθησης είναι μια γεωμετρική επιφάνεια και αν οι μεταβλητές κατάστασης είναι περισσότερες από τρεις, τότε η επιφάνεια ολίσθησης είναι μία υπερεπιφάνεια.

Επομένως από την εξίσωση (4.3) φαίνεται ότι το πρόβλημα να έχει το σύστημα μας ίδια συμπεριφορά με τη συμπεριφορά του μοντέλου αναφοράς ή να έχει μηδενική απόκριση, είναι ισοδύναμο με το να βρίσκεται και να παραμένει το σύστημα, πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης **s**.

Στην περίπτωση, όπου η επιφάνεια ολίσθησης είναι γραμμικός συνδυασμός του διανύσματος κατάστασης, το μητρώο P_s της σχέσης (4.4) υπολογίζεται είτε με τη μέθοδο του βέλτιστου τετραγωνικού ρυθμιστή (Linear Quadratic Regulator, LQR), είτε με τον αλγόριθμο της τοποθέτησης πόλων. Στη διδακτορική αυτή διατριβή χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο του σεισμού που διεγείρει την κατασκευή.

4.1.2 Σχεδιασμός ελεγκτή (υπολογισμός δύναμης ελέγχου)

Για την εύρεση της δύναμης ελέγχου ακολουθείται η θεωρία ευστάθειας κατά Lyapunov. Από την κλασική θεωρία της μηχανικής γνωρίζουμε ότι ένα ταλαντώμενο σύστημα είναι ευσταθές, όταν η συνολική του ενέργεια (μια θετικά ορισμένη συνάρτηση) μειώνεται συνεχώς, δηλαδή η παράγωγος της ως προς το χρόνο είναι αρνητική.

Η δεύτερη μέθοδος ευστάθειας κατά Lyapunov βασίζεται στη γενίκευση του παραπάνω γεγονότος. Για τα καθαρά μαθηματικά συστήματα δεν υπάρχει απλός και ενιαίος τρόπος για να οριστεί η «συνάρτηση ενέργειας» και για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία ο Lyapunov, εισήγαγε τη συνάρτηση Lyapunov. Η συνάρτηση Lyapunov είναι μια εικονική συνάρτηση της κατάστασης του συστήματος, η οποία είναι θετικά ορισμένη, και η παράγωγος της ως προς το χρόνο είναι αρνητική.

Αν λοιπόν για ένα σύστημα μπορεί να βρεθεί μια συνάρτηση Lyapunov, τότε το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπωτικά ευσταθές. Το θετικό της μεθόδου αυτής, είναι ότι μπορεί να φανεί αν ένα σύστημα είναι ευσταθές, χωρίς να χρειαστεί να επιλυθεί. Το αρνητικό όμως είναι ότι αν δεν μπορεί να βρεθεί η συνάρτηση Lyapunov δεν μπορεί να προσδιοριστεί εάν το σύστημα μας είναι ευσταθές ή όχι. Εκμεταλλευόμενοι την παραπάνω συνθήκη ο Yang και η ομάδα του (1995) με σκοπό να υπολογίσουν τη δύναμη ελέγχου, επέλεξαν μία υποψήφια θετικά ορισμένη συνάρτηση V της μορφής:

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \mathbf{s}^{\mathrm{T}} \mathbf{s} \tag{4.6}$$

Για να είναι ευσταθές το σύστημα θα πρέπει η παράγωγος της συνάρτησης Lyapunov να είναι μικρότερη του μηδενός, δηλαδή :

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{s}^{\mathrm{T}} \dot{\mathbf{s}} \le \mathbf{0} \tag{4.7}$$

Για να ισχύει η παραπάνω σχέση θα πρέπει **s**=0, δηλαδή το σύστημα να κινείται πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης.

Η σχέση (4.7), λόγω της σχέσης (4.4), γίνεται:

$$\mathbf{s}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_{\mathbf{s}}\dot{\mathbf{X}} \le 0 \tag{4.8}$$

Αν αντικαταστήσουμε την παράγωγο της κατάστασης του συστήματος, από τη σχέση (4.1), θα πάρουμε:

$$\mathbf{s}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_{\mathbf{s}}\left(\mathbf{A}\mathbf{X}+\mathbf{B}_{g}a_{g}+\mathbf{B}_{f}\mathbf{F}\right)\leq0$$

Κάνοντας τις πράξεις θα έχουμε:

$$\dot{\mathbf{V}} = \boldsymbol{\lambda} \left(\mathbf{F} - \mathbf{G} \right) \le 0 \tag{4.9}$$

όπου

$$\mathbf{G} = -(\mathbf{P}_{s}\mathbf{B}_{f})^{-1}\mathbf{P}_{s}(\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_{g}\mathbf{a}_{g})$$
(4.10)

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{s}^{\mathrm{T}} \mathbf{P}_{\mathbf{s}} \mathbf{B}_{\mathrm{f}} \tag{4.11}$$

Για να ικανοποιείται η σχέση (4.9) επιλέγουμε ως δύναμη ελέγχου την εξής :

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} - \boldsymbol{\delta} \cdot \boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}} \quad , \tag{4.12}$$

όπου δ ένα διαγώνιο μητρώο rxr, με στοιχεία $\delta_i \ge 0$, τα οποία ονομάζονται και περιθώριο ολίσθησης.

Αντικαθιστώντας τη δύναμη ελέγχου στην παράγωγο της συνάρτησης Lyapunov θα έχουμε:

$$\dot{\mathbf{V}} = -\lambda \boldsymbol{\delta} \cdot \boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}} \le 0 \tag{4.13}$$

Αφού η παράγωγος της συνάρτησης Lyapunov είναι αρνητική, έχουμε ένα ασυμπτωτικά ευσταθές ελεγχόμενο σύστημα. Η δύναμη ελέγχου της σχέσης (4.12) είναι ικανή να οδηγήσει το σύστημα στην επιφάνεια ολίσθησης και από εκεί στο σημείο ισορροπίας. Εάν η δύναμη ελέγχου αντικατασταθεί στην εξίσωση (4.1) που περιγράφει τη συμπεριφορά του συστήματος, θα έχουμε:

$$\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{B}\boldsymbol{\delta}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_{\mathbf{s}}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_{\mathbf{s}}\mathbf{X} = -\mathbf{A}_{\mathrm{c}}\mathbf{X}$$
(4.14)

Οι πόλοι του ελεγχόμενου συστήματος είναι οι ιδιοτιμές του μητρώου \mathbf{A}_c . Το τελευταίο βήμα είναι να δούμε αν οι παραπάνω ιδιοτιμές του μητρώου \mathbf{A}_c έχουν θετικό ή αρνητικό πραγματικό μέρος και αν αντιστοιχούν ή όχι σε συχνότητες που βρίσκονται μέσα στο παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων του εισερχομένου σεισμικού σήματος. Ή αλλιώς, το τελευταίο βήμα είναι να δούμε αν οι πόλοι του ελεγχόμενου συστήματος είναι κοντά στους πόλους του σεισμού ή όχι.

Ο Yang και η ομάδα του (1995) απέδειξαν ότι, αν εφαρμοστεί μία συσκευή σε κάθε βαθμό ελευθερίας, τότε μπορεί η εξωτερική σεισμική διέγερση να αντιμετωπιστεί και να μην υπάρχει σχετική κίνηση ορόφων, η οποία θα προκαλεί και την καταπόνηση στην κατασκευή. Σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή κινείται σαν στερεό σώμα. Παρόλα αυτά όμως, επειδή το μητρώο **G** εμπεριέχει δυνάμεις επαναφοράς, απόσβεσης, αδρανειακές και σεισμικές δυνάμεις, η τιμή του **G**, και κατ' επέκταση της σεισμικής φόρτισης, είναι πολύ μεγάλη για συμβατικές κατασκευές. Έτσι, η δύναμη ελέγχου πρέπει να περιοριστεί σε κάποια επίπεδα που καθορίζονται από τη μέγιστη ικανότητα της συσκευής, η οποία χρησιμοποιείται για να γίνει ο έλεγχος.

Έτσι, για την προσομοίωση του συστήματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο κορεσμένος έλεγχος. Σε αυτή την περίπτωση δεν μπορεί να υπάρξει απόλυτη αντιμετώπιση των μετακινήσεων (δηλαδή να μην υπάρχουν σχετικές μετακινήσεις). Εάν η μέγιστη δύναμη ελέγχου είναι φραγμένη από μία μέγιστη τιμή ± $f_{allowable}$, η δύναμη του κορεσμένου ελέγχου \mathbf{F}_{sat} θα δίνεται ως εξής:

$$sat\mathbf{F} = \begin{cases} \mathbf{F} & \mathbf{F} \le \mathbf{F}_{allowable} \\ \mathbf{F}_{allowable} sign(\mathbf{F}) & \mathbf{F} \ge \mathbf{F}_{allowable} \end{cases}$$
(4.15)

Η τιμή $f_{allowable}$ καθορίζεται από τη μέγιστη δυνατότητα της συσκευής ελέγχου.

Μια άλλη προσέγγιση για τη δύναμη ελέγχου που περιγράφεται στην εργασία του Wang (2002), δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{eq} + \mathbf{F}_{hit} \tag{4.16}$$

$$\mathbf{F}_{eq} = -(\mathbf{P}_{s}\mathbf{B}_{f})^{-1}\mathbf{P}_{s}\mathbf{A}\mathbf{X} , \qquad \mathbf{F}_{hit} = -(\mathbf{P}_{s}\mathbf{B}_{f})^{-1}(\gamma + \sigma)sign(\mathbf{P}_{s}\mathbf{X})$$
(4.17)

$$\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\delta}_{g} \left\| \mathbf{P}_{s} \right\| \mathbf{F}_{eq}, \qquad \left\| \boldsymbol{a}_{g}(t) \right\| \leq \boldsymbol{\delta}_{g}, \quad \boldsymbol{\sigma} > 0$$
(4.18)

ópou δ_g eínai éna ána ório th
ς diataracióc (seismiký diégers
h $a_g).$

Μια άλλη προσέγγιση, μέσα από τον αλγόριθμο της επιφάνειας ολίσθησης, περιγράφεται στην εργασία του Qing (2003), είναι κατάλληλη για ημι-ενεργές συσκευές ελέγχου, και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{F} = -(\mathbf{P}_{\mathbf{s}}\mathbf{B}_{\mathrm{f}})^{-1} \left(\mathbf{P}_{\mathbf{s}}\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{P}_{\mathbf{s}}\mathbf{B}_{g}a_{g} + k \|\mathbf{P}_{\mathbf{s}}\mathbf{X}\|^{a} sig(\mathbf{P}_{\mathbf{s}}\mathbf{X}) \right)$$
(4.19)

όπου k≥0 και 0<a<1.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής σχεδιάστηκαν στο Simulink του Matlab τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης που φαίνονται στο σχήμα 4.2. Το μοντέλο της δύναμης ελέγχου που επιλέχθηκε είναι αυτό που περιγράφεται από την εξίσωση (4.12).







Σχήμα 4.2. Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης: α) δύναμη ελέγχου υπολογισμένη με τη σχέση (4.12), β) δύναμη ελέγχου υπολογισμένη με τη σχέση (4.16) και γ) δύναμη ελέγχου υπολογισμένη με τη σχέση (4.19)

4.2 Προτεινόμενη επιλογή επιφάνειας ολίσθησης με βάση το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού

Η αποτελεσματικότητα των παραπάνω αλγορίθμων, που εκφράζονται από τις σχέσεις (4.12), (4.16) και (4.19), εξαρτάται από το σχεδιασμό της επιφάνειας ολίσθησης ή αλλιώς από τον υπολογισμό του μητρώου P_s . Η συνεισφορά της διατριβής σε όλα τα παραπάνω, είναι ότι αυτός ο υπολογισμός του μητρώου P_s βασίζεται στο εισερχόμενο σήμα και στα συχνοτικά του χαρακτηριστικά. Το μητρώο P_s υπολογίζεται με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων, αλλά η επιτυχής εφαρμογή του αλγορίθμου απαιτεί σωστή κρίση για τη θέση των πόλων του συστήματος στην επιφάνεια ολίσθησης. Αυτή η θέση των πόλων βρίσκεται με βάση τους κύκλους συχνοτήτων του σήματος που διεγείρει την κατασκευή και αναπτύχθηκε λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η ολοκληρωμένη διαδικασία ελέγχου με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης εφοδιασμένο με την προτεινόμενη επιλογή της επιφάνειας ολίσθησης, έχει ως εξής:

Αρχικά καθορίζουμε τις παραμέτρους του συστήματος, δίνουμε δηλαδή το μητρώο μάζας απόσβεσης και δυσκαμψίας **M**, **C** και **K** αντίστοιχα. Θεωρούμε την κατασκευή ως ένα σύστημα συγκεντρωμένης μάζας και δυσκαμψίας. Μετασχηματίζουμε το σύστημα στο χώρο κατάστασης υπολογίζοντας τα μητρώα **A** και **B**, αντίστοιχα. Υπολογίζουμε τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος T_i, ω_i και ζ_i. Αν έχουμε κάποιο σύστημα ενόργανης παρακολούθησης εγκατεστημένο στην κατασκευή, τότε υπολογίζουμε τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής με κάποια τεχνική αναγνώρισης, και χρησιμοποιούμε αυτές τις τιμές, παρά τις υπολογίζομενες από τα μητρώα **M**, **C** και **K**.

Στη συνέχεια καθορίζουμε τις παραμέτρους για τη σωστή τοποθέτηση των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής στην επιφάνεια ολίσθησης. Αυτές οι παράμετροι είναι το εύρος της μη ασφαλούς περιοχής $ω_s$ και το ισοδύναμο ποσοστό απόσβεσης ζ_c.. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων γίνεται με τον τρόπο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3. Κατόπιν καθορίζουμε τα περιθώρια ολίσθησης, δηλαδή την παράμετρο δ_i. Επιπλέον, έχουμε το σήμα της διέγερσης και τον αριθμό των τμημάτων στα οποία θα χωρίσουμε το σήμα. Τέλος, για το ξεκίνημα του ελέγχου θα πρέπει να γνωρίζουμε τις αρχικές συνθήκες της κατασκευής.

Στη συνέχεια για το τμήμα i της διέγερσης πραγματοποιείται ανάλυση FFT και ελέγχεται αν οι συχνότητες που επιλέχθηκαν ικανοποιούν και το κριτήριο της ισχύος. Αν το ικανοποιούν, τότε συνεχίζεται η διαδικασία, αν όμως όχι, με μια εσωτερική επαναληπτική διαδικασία μειώνεται το ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος, έτσι ώστε να επιλεγούν περισσότερες συχνότητες και επανυπολογίζεται το ποσοστό τους στην ισχύ. Αν το καινούργιο ποσοστό ισχύος I_f είναι ίσο με το επιθυμητό τότε προχωρεί η διαδικασία, αν όμως όχι, η παραπάνω επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται, μέχρι να ικανοποιηθεί και το κριτήριο της ισχύος.

Κατόπιν, αφού επιλεγούν οι συχνότητες, σχεδιάζονται οι κύκλοι στο μιγαδικό επίπεδο. Με βάση το εύρος της μη ασφαλούς ζώνης, ω_s, γίνεται ο σχεδιασμός της στο μιγαδικό επίπεδο. Ύστερα από πολλές αναλύσεις για πολυβάθμια συστήματα, προέκυψε ότι, στην περίπτωση ελέγχου με μορφή ολίσθησης, το εύρος της μη ασφαλούς ζώνης, ω_s, που δίνουν οι σχέσεις (3.70) και (3.71) του κεφαλαίου 3, θα πρέπει να εξαπλασιαστεί. Στα συμπεράσματα του κεφαλαίου δίνεται μια ποιοτική εξήγηση, γιατί θα πρέπει να αυξηθεί στα πολυβάθμια συστήματα η τιμή της παραμέτρου ω_s.

Στη συνέχεια τοποθετούνται οι πόλοι-ιδιοτιμές του αρχικού συστήματος στο μιγαδικό επίπεδο. Κατόπιν γίνεται η επιλογή των θέσεων των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος με βάση τη διαδικασία και τους κανόνες που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 3.

Με βάση τις παραπάνω τελικές θέσεις των πόλων στο μιγαδικό επίπεδο υπολογίζεται το μητρώο \mathbf{P}_{s} της επιφάνειας ολίσθησης και από τη σχέση (4.4) υπολογίζεται η επιφάνεια ολίσθησης. Με βάση τη σχέση (4.12) και το τρέχον διάνυσμα κατάστασης του συστήματος (μετακίνηση, ταχύτητα) υπολογίζεται η δύναμη ελέγχου που θα πρέπει να εφαρμοστεί στην κατασκευή εκείνη τη χρονική στιγμή. Συγκρίνεται αυτή η δύναμη με το μέγιστο όριο της δύναμης της συσκευής, $\mathbf{F}_{allowable}$, και εφαρμόζεται η επίλυση των εξισώσεων κίνησης με έλεγχο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το επόμενο τμήμα της διέγερσης.

Η σύνθεση της παραπάνω διαδικασίας υπολογισμού της επιφάνειας ολίσθησης με βάση τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων όπου οι πόλοι της ελεγχόμενης κατασκευής υπολογίζονται με βάση τα χαρακτηριστικά της εισερχόμενης διέγερσης, ο υπολογισμός των ισοδυνάμων δυνάμεων ελέγχου με βαση τη σχέση (4.12), ο κορεσμός αυτών των δυνάμεων και η επιβολή τους στην κατασκευή, με κάποια χρονική καθυστέρηση, η δυναμική ανάλυση της κατασκευής για το τμήμα της εισερχομένης διέγερσης, προγραμματίστηκαν και προέκυψε ένα λογισμικό κατάλληλο για να εκτελεί δυναμική ανάλυση σε ελεγχόμενες κατασκευές που υπόκεινται σε δυναμικά φορτία, (δυναμική ανάλυση ελέγχου Dynamic Control Analysis, DCA). Η ροή του προγράμματος, τα βασικά αρχεία, η λειτουργία του καθενός από αυτά, καθώς και η σύνδεση μεταξύ τους, φαίνεται στο σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3 Βασικά αρχεία και η ροή του προγράμματος δυναμικής ανάλυσης ελέγχου (Dynamic Control Analysis, DCA) για κτιριακές κατασκευές.

Η παραπάνω υπολογιστική διαδικασία υλοποιείται στην πράξη σύμφωνα με το σχήμα 4.4. Η κατασκευή είναι εφοδιασμένη με τις συσκευές ελέγχου και τους αισθητήρες. Οι αισθητήρες στη βάση της κατασκευής ανιχνεύουν το εισερχόμενο σήμα και αναγνωρίζεται το συχνοτικό του περιεχόμενο. Στη συνέχεια, με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία υπολογίζεται η επιφάνεια ολίσθησης και οι ισοδύναμες δυνάμεις που πρέπει να εφαρμοστούν στη κατασκευή, είτε με άμεσο είτε με έμμεσο τρόπο.



Σχήμα 4.4. Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου βασισμένο στο συχνοτικό περιεχόμενο του εισερχομένου σεισμικού σήματος.

Μετά την περιγραφή της διαδικασίας ελέγχου με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης και την εύρεση της επιφάνειας ολίσθησης με βάση το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού, διερευνήθηκε υπολογιστικά η αποτελεσματικότητα της μεθόδου με αριθμητικά παραδείγματα, τόσο σε μονοβάθμια όσο και σε πολυβάθμια συστήματα, τα οποία υπόκεινται σε αρμονικές αλλά και σε πολύπλοκες σεισμικές φορτίσεις και παλμούς. Τα αποτελέσματα προυσιαζονται στην επόμενη ενοτητα.

4.3 Παραδείγματα και αριθμητικές εφαρμογές

Ο προτεινόμενος τρόπος υπολογισμού της επιφάνειας ολίσθησης και η επιβολή της δύναμης ελέγχου, σχέση (4.12) που χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, εφαρμόζονται για τα κτίρια και τις σεισμικές φορτίσεις που περιγράφονται στο παράρτημα Α και Β, αντίστοιχα. Στη συνέχεια βλέπουμε τα αποτελέσματα για το μονοβάθμιο σύστημα.

4.3.1 Μονώροφο κτήριο

4.3.1.1 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση T=0.2s

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων:

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: 1 συχνότητα

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων:

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.1. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	30.40	5.10
\dot{u}_1 (m/sec)	0.91	0.08
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	30.19	3.01
F (kN)		168
W (kW)		149
W/M (kW/t)		3.27

4.3.1.2 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές $T_1=0.2s$ και $T_2=0.1s$

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων:

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: 2 συχνότητες

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.2. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	30.40	4.30
\dot{u}_1 (m/sec)	0.91	0.08
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	30.19	3.68
F (kN)		178.42
W (kW)		147
W/M (kW/t)		3.23

4.3.1.3 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε παλμική φόρτιση

$$a=\omega_{p}u_{p}\cos\left(\omega_{p}t_{p}+\phi\right), \quad 0 \le t \le \left(n+\frac{1}{2}-\frac{\phi}{\pi}\right)T_{p}$$
$$T_{p}=0.8 \text{ s, } \omega_{p}=2\pi/T_{p}, u_{p}=1.75 \text{ m/s, } \phi=0.0697$$

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων:

Μέρη φόρτισης: 1

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων:

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.3. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	4.20	2.01
\dot{u}_{1} (m/sec)	0.13	0.06
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	8.15	3.02
F (kN)		153
W (kW)		10
W/M (kW/t)		0.21

4.3.1.4 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων:

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων:

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.4. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της καλαμάτας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	5.7	4.60
ů,	(m/sec)	0.14	0.12
ü	(m/sec^2)	4.93	3.11
F	(kN)		169
W	(kW)		3
W/N	A (kW/t)		0.07



Σχήμα 4.5. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου μονώροφου κτηρίου, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας.



Σχήμα 4.6. Δύναμη ελέγχου και το φάσμα ισχύος της, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, του μονώροφου κτηρίου για σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας.

4.3.1.5 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.5. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	7.10	4.30
ů,	(m/sec)	0.20	0.17
ü	(m/sec^2)	5.51	2.98
F	(kN)		220
W	(kW)		6
W/N	M (kW/t)		0.14

4.3.1.6 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.6. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	6.70	3.60
u ₁	(m/sec)	0.13	0.10
ü	(m/sec^2)	5.60	2.99
F	(kN)		135
W	(kW)		4
W/N	A (kW/t)		0.08

4.3.1.7 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.7. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	6.30	2.30
\dot{u}_1 (m/sec)	0.18	0.14
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	7.89	3.00
F (kN)		249
W (kW)		10
W/M (kW/t)		0.21

4.3.1.8 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.8. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	7.00	4.20
\dot{u}_1 (m/sec)	0.20	0.11
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	6.66	3.77
F (kN)		270
W (kW)		24
W/M (kW/t)		0.54

187

4.3.1.9 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.9. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	5.40	0.20
ů,	(m/sec)	0.10	0.06
ü	(m/sec^2)	3.74	3.00
F	(kN)		140
W	(kW)		5
W/N	Λ (kW/t)		0.12

4.3.1.10 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \ 10^{-6}$

Πίνακας 4.10. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό Imperial Valley με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	4.70	0.14
u ₁	(m/sec)	0.07	0.04
ü,	(m/sec^2)	4.17	3.00
F	(kN)		140
W	(kW)		4
W/N	A (kW/t)		0.09

4.3.1.11 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.11. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	3.6	0.30
ů,	(m/sec)	0.03	0.02
ü,	(m/sec^2)	3.87	3.00
F	(kN)		138
W	(kW)		1
W/N	A (kW/t)		0.02
4.3.1.12 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων:

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.12. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	8.30	0.02
ů,	(m/sec)	0.25	0.09
ü	(m/sec^2)	8.70	3.00
F	(kN)		137
W	(kW)		22
W/N	A (kW/t)		0.48

4.3.1.13 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 16.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s.

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.13. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	7.40	1.9
ů,	(m/sec)	0.17	0.05
ü	(m/sec^2)	5.53	3.03
F	(kN)		147
W	(kW)		18
W/N	A (kW/t)		0.38

4.3.2. Τριώροφο κτήριο

4.3.2.1. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση T=0.2s

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: 1 συχνότητα.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.14. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο		Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	419	0.01	6.20	6.90
ü,	(m/sec^2)	81.55	3.20	3.15	5.57
F_1	(kN)		3.00		15.38
u ₂	(mm)	756	0.01	9.40	4.70
ü,	(m/sec^2)	146.85	3.20	3.85	3.70
F_2	(kN)		3.00		
u ₃	(mm)	943	0.01	10.30	3.42
ü,	(m/sec^2)	183.09	3.20	4.29	7.60
F ₃	(kN)		3.00	6.66	

4.3.2.2. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές $T_1=0.2s$ και $T_2=0.1s$

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων:

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: 2 συχνότητες.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.15. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο		Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3	
\mathbf{u}_1	(mm)	413	0.10	6.20	9.20	
ü,	(m/sec^2)	80.30	3.20	5.24	35.46	
F_1	(kN)		3.00		2.50	
u ₂	(mm)	744	0.10	9.40	4.7	
$\ddot{u}_{_2}$	(m/sec^2)	144.60	3.20	7.69	7.87	
F_2	(kN)		3.00			
u ₃	(mm)	928	0.10	10.70	7.60	
ü,	(m/sec^2)	180.29	3.20	25.53	5.46	
F ₃	(kN)		3.00	2.64		

4.3.2.3. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε παλμική φόρτιση

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.16. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁	(mm)	4.00	0.002	3.40	4.50
ü,	(m/sec^2)	7.04	2.99	3.88	11.50
F_1	(kN)		3.00		13.61
u ₂	(mm)	6.10	0.002	5.70	10.50
ü,	(m/sec^2)	7.53	2.99	4.89	2.99
F ₂	(kN)		3.00		
u ₃	(mm)	6.70	0.002	5.30	13.60
ü,	(m/sec^2)	6.56	2.99	8.70	3.05
F ₃	(kN)		3.00	15.77	

4.3.2.4. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.17. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	37.10	0.003	4.40	8.05
\ddot{u}_1 (m/se	c^2) 9.39	2.99	2.92	5.02
F ₁ (kN)		3.00		13.87
u ₂ (mm)	66.80	0.003	5.90	10.10
ü ₂ (m/sec	c ²) 14.56	2.99	4.23	4.31
F_2 (kN)		3.00		
u ₃ (mm)	83.40	0.003	6.90	13.70
ü ₃ (m/se	c^2) 17.71	2.99	7.93	5.75
F ₃ (kN)		3.00	6.10	



Σχήμα 4.7. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, τριώροφου κτηρίου υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 4.8 Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της (Power Spectral Density, PSD), με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.

4.3.2.5. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων : $\delta_i {=}5 \ 10^{-6}$

Πίνακας 4.18. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκιωνύδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	εγχόμενο Ελεγχόμενο		σύστημα	
		σύστημα	cs1	cs2	cs3	
u_1	(mm)	35.00	0.003	8.50	6.70	
ü,	(m/sec^2)	7.11	2.99	4.26	12.92	
F_1	(kN)		2.99		15.37	
u ₂	(mm)	62.60	0.003	14.20	3.10	
$\ddot{u}_{_2}$	(m/sec^2)	12.32	2.99	6.01	4.31	
F ₂	(kN)		3.00			
u ₃	(mm)	77.80	0.003	16.60	5.10	
ü,	(m/sec^2)	15.44	2.99	6.42	3.23	
F ₃	(kN)		3.00	5.91		

4.3.2.6. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων : $\delta_i=5 \ 10^{-6}$

Πίνακας 4.19. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁	(mm)	30.10	0.004	6.20	7.20
ü,	(m/sec^2)	7.12	3.00	3.89	9.04
F_1	(kN)		2.99		17.13
u ₂	(mm)	54.80	0.003	9.40	4.70
ü,	(m/sec^2)	11.61	3.00	5.02	3.88
F ₂	(kN)		3.00		
u ₃	(mm)	68.80	0.003	10.40	7.70
ü,	(m/sec^2)	14.86	3.00	8.09	4.29
F ₃	(kN)		3.00	8.30	

4.3.2.7. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.20. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο		Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3	
u_1	(mm)	16.00	0.03	3.70	5.10	
ü,	(m/sec^2)	5.90	2.99	5.24	7.88	
F_1	(kN)		2.98		10.10	
u ₂	(mm)	28.70	0.03	5.00	4.50	
ü ₂	(m/sec^2)	8.12	2.99	4.91	4.52	
F_2	(kN)		3.00			
u ₃	(mm)	36.00	0.03	6.30	5.50	
ü,	(m/sec^2)	8.92	2.99	8.68	4.72	
F ₃	(kN)		3.00	11.71		

4.3.2.8. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων:

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων : $\delta_i {=}5 \ 10^{-6}$

Πίνακας 4.21. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο		Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	20.50	0.03	3.60	5.67
ü,	(m/sec^2)	5.46	2.99	3.87	8.80
F_1	(kN)		2.97		13.02
u ₂	(mm)	37.20	0.03	4.50	5.60
ü ₂	(m/sec^2)	8.61	2.99	5.76	5.42
F ₂	(kN)		3.00		
u ₃	(mm)	46.60	0.03	6.40	5.48
ü,	(m/sec^2)	11.18	2.99	8.38	4.27
F ₃	(kN)		3.00	14.06	

4.3.2.9. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.22. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο		Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
u_1	(mm)	20.60	0.20	7.20	19.78
ü,	(m/sec^2)	3.60	2.98	2.82	7.12
F_1	(kN)		2.88		16.25
u ₂	(mm)	36.70	0.20	11.40	27.23
$\ddot{u}_{_2}$	(m/sec^2)	5.99	2.98	3.50	4.69
F ₂	(kN)		2.98		
u ₃	(mm)	45.60	0.20	12.90	30.40
ü,	(m/sec^2)	7.78	2.98	3.74	5.45
F ₃	(kN)		3.00	5.30	

4.3.2.10. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valey

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή <συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.23. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valey, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο		Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3	
u_1	(mm)	27.00	0.005	7.70	18.45	
ü,	(m/sec^2)	4.93	3.00	2.98	5.80	
F_1	(kN)		3.00		16.32	
u ₂	(mm)	48.00	0.003	12.40	21.98	
ü2	(m/sec^2)	7.93	3.00	3.65	5.67	
F_2	(kN)		3.00			
u ₃	(mm)	59.50	0.004	14.80	23.70	
ü,	(m/sec^2)	9.73	3.00	3.79	3.29	
F ₃	(kN)		3.00	4.93		

4.3.2.11. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.24. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3	
u ₁	(mm)	17.80	0.20	8.50	13.60	
ü,	(m/sec^2)	4.34	2.99	3.22	14.07	
F_1	(kN)		2.86		17.82	
u ₂	(mm)	31.10	0.20	14.00	17.40	
ü,	(m/sec^2)	5.74	2.99	3.26	3.34	
F ₂	(kN)		2.98			
u ₃	(mm)	38.20	0.20	16.40	30.64	
ü,	(m/sec^2)	6.41	2.99	4.92	3.26	
F ₃	(kN)		3.01	4.95		

4.3.2.12. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.25. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3	
u_1	(mm)	27.40	1.10	7.78	16.43	
ü,	(m/sec^2)	7.77	3.00	5.72	7.33	
F_1	(kN)		2.95		15.87	
u ₂	(mm)	47.80	1.10	15.67	16.34	
$\ddot{\mathbf{u}}_{_2}$	(m/sec^2)	10.49	3.00	8.02	6.24	
F ₂	(kN)		3.02			
u ₃	(mm)	58.20	1.10	17.34	19.86	
ü,	(m/sec^2)	13.53	3.00	8.77	6.53	
F ₃	(kN)		3.02	18.82		

4.3.2.13. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την πενταπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 50

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 $\delta_i = 5 \, 10^{-6}$

Πίνακας 4.26. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
		σύστημα	cs1	cs2	cs3
\mathbf{u}_1	(mm)	13.20	0.04	5.70	9.72
ü,	(m/sec^2)	4.42	2.99	4.52	7.69
F_1	(kN)		2.98		15.13
u ₂	(mm)	23.6	0.03	7.60	15.00
$\ddot{u}_{_2}$	(m/sec^2)	5.09	2.99	4.01	4.79
F_2	(kN)		3.01		
u ₃	(mm)	29.50	0.03	12.52	24.54
ü,	(m/sec^2)	6.23	2.99	5.57	6.58
F ₃	(kN)		3.00	14.73	

4.3.3. Οκταώροφο κτήριο

4.3.3.1. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση T=0.2s

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: μία συχνότητα.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε $ω_s$ = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με $ω_s$ = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	195.10	2.00	105.50	179.50
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	13.28	4.31	9.49	14.79
F_1 (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	383.60	4.30	186.30	333.45
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	25.88	5.56	14.56	26.55
F_2 (kN)		1000		
u ₃ (mm)	559.00	5.70	309.23	490.79
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	37.42	5.78	18.48	29.76
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	715.40	6.80	465.53	636.65
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	48.65	5.55	31.49	44.98
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	847.50	7.90	408.64	817.50
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	57.03	5.95	43.35	53.87
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	950.00	7.06	540.34	782.48
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	63.38	3.97	51.38	60.71
F_6 (kN)		1000		
u ₇ (mm)	1021.00	7.00	659.90	927.56
\ddot{u}_7 m/sec ²)	68.79	6.25	44.66	63.74
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	1057	2.15	668.85	949.65
\ddot{u}_{8} (m/sec ²)	71.23	4.28	46.45	75.76
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 4.27. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο

4.3.3.2. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές T_1 =0.2s και T_2 =0.1s

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων:

Μέρη φόρτισης: 8.

Επιλογή συχνοτήτων: δυο συχνότητες.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε $ω_s$ = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με $ω_s$ = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για $x_d=0.20$ βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
	σύστημα			
-		CSI	CS2	CS3
u ₁ (mm)	195.10	2.07	85.55	158.32
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	26.28	5.21	10.62	25.12
F_1 (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	383.60	3.40	157.38	333.10
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	46.88	5.45	26.65	42.93
F_2 (kN)		1000		
u ₃ (mm)	559.00	4.68	311.39	440.45
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	56.63	5.72	28.78	47.81
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	715.40	5.83	356.50	636.33
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	55.03	6.38	38.78	49.23
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	847.50	5.10	409.65	717.76
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	57.03	6.82	41.45	59.67
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	950.80	6.15	461.32	882.45
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	63.99	6.62	40.43	65.45
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	1021.70	6.10	560.92	927.33
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	82.73	5.14	41.33	73.66
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	1057.70	5.25	769.70	949.96
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	95.23	5.22	56.44	85.51
F_8 (kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 4.28. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

4.3.3.3. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε παλμική φόρτιση

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων:

Μέρη φόρτισης: 1.

Διακριτοποίηση του σήματος σε Ts =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	3.00	0.01	1.45	3.14
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	6.02	3.21	6.73	9.12
F_1 (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	5.10	0.01	1.38	4.67
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	8.14	3.12	4.34	11.44
F_2 (kN)		1000		
u ₃ (mm)	6.00	0.01	2.46	5.12
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	7.68	3.10	7.11	7.13
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	6.30	0.01	2.56	4.18
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	6.56	3.10	4.64	9.89
F ₄ (kN)	1	1000		
u ₅ (mm)	6.30	0.01	2.39	5.12
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	6.10	3.10	5.88	7.48
F ₅ (kN)	<u> </u>	1000	1000	1000
u ₆ (mm)	6.40	0.01	3.78	5.34
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	6.01	3.10	4.98	8.17
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	6.20	0.01	4.66	6.29
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	6.00	3.10	6.31	8.54
F_7 (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	6.60	0.01	5.93	7.96
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	5.99	3.15	6.12	9.56
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 4.29. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

4.3.3.4. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε Ts =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε $ω_s$ = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με $ω_s$ = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

 δ_i =5 10 ⁻⁶

Πίνακας 4.30. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη	Ελεγχόμενο σύστημα				
		ελεγχόμενο	cs	1	cs2	cs3	
		σύστημα	Χωρίς Κορε σ μό	Κορεσμός 1000 kN			
\mathbf{u}_1	(mm)	29.80	0.03	0.10	16.50	36.50	
ü,	(m/sec^2)	4.32	2.99	3.03	5.31	8.39	
F_1	(kN)		1014	1000	1000	1000	
u_2	(mm)	58.40	0.03	0.32	30.67	67.45	
ü,	(m/sec^2)	6.21	2.99	3.08	6.88	12.90	
F ₂	(kN)		1039	1000			
u ₃	(mm)	84.70	0.03	0.30	42.67	93.89	
ü,	(m/sec^2)	7.87	2.99	3.09	8.32	15.56	
F ₃	(kN)		1039	1000	1000		
\mathbf{u}_4	(mm)	108.00	0.03	0.30	54.68	112.45	
ü,	(m/sec^2)	8.82	2.99	3.11	8.54	14.67	
F ₄	(kN)		1039	1000			
u 5	(mm)	127.40	0.03	0.30	64.82	126.28	
ü₅	(m/sec^2)	9.83	2.99	3.09	8.12	11.55	
F ₅	(kN)		1038	1000	1000	1000	
u ₆	(mm)	142.60	0.03	0.30	71.89	133.24	
ü,	(m/sec^2)	10.37	2.99	3.09	8.34	11.12	
F ₆	(kN)		1037	1000			
u ₇	(mm)	153.00	0.03	0.30	75.84	141.45	
ü,	(m/sec^2)	10.75	2.99	3.10	9.66	15.65	
$\overline{F_7}$	(kN)		1041	1000	1000		
u ₈	(mm)	158.20	0.03	0.40	78.25	145.93	
ü,	(m/sec^2)	11.15	2.99	3.09	10.76	18.62	
F ₈	(kN)		1037	1000	1000	1000	



Σχήμα 4.8. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 4.8. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 4.9. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, με τον αλγόριθμο μορφ ολίσθησης, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 4.10. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της, για το οκταώροφο κτήριο, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 4.10. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της, για το οκταώροφο κτήριο, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 4.10. Η δύναμη και το φάσμα πυκνότητας ισχύος της, για το οκταώροφο κτήριο, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.

221

4.3.3.5. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε T
s =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		τημα
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	14.70	0.10	2.33	12.52
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	3.96	3.09	4.18	8.39
F_1 (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	18.10	0.10	4.20	17.20
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	6.52	3.06	3.07	10.93
F_2 (kN)		1000		
u ₃ (mm)	39.50	0.10	6.45	25.92
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	7.97	3.06	4.59	7.71
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	48.70	0.10	6.55	34.53
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	7.78	3.06	4.30	10.70
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	56.03	0.10	6.44	46.39
\ddot{u}_{5} m/sec ²)	8.43	3.06	5.42	12.55
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	66.40	0.10	5.65	46.22
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	9.16	3.06	3.08	8.03
F_6 (kN)		1000		
u ₇ (mm)	74.50	0.10	4.63	60.45
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	9.69	3.06	3.19	9.61
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	79.10	0.10	4.28	63.95
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	9.92	3.06	4.53	11.62
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 4.31. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

4.3.3.6. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε T
s =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε $ω_s$ = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με $ω_s$ = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σύστημα		τημα
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	13.90	0.01	4.35	8.86
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.28	3.00	3.26	6.21
F ₁ (kN)		900	1000	1000
u ₂ (mm)	27.20	0.10	8.12	11.35
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	5.66	3.09	4.09	5.52
F ₂ (kN)		1000		
u ₃ (mm)	39.70	0.10	11.85	21.91
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	6.97	3.08	5.89	6.96
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	50.60	0.10	12.72	29.55
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	8.12	3.08	5.44	11.77
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	59.90	0.10	13.43	36.38
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	8.56	3.08	5.91	9.42
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	68.70	0.10	14.64	42.12
\ddot{u}_{6} (m/sec ²)	8.78	3.11	4.89	8.63
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	75.80	0.10	15.63	46.39
\ddot{u}_7 m/sec ²)	9.06	3.07	5.51	9.59
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	79.80	0.10	15.22	50.95
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	9.29	3.08	5.71	10.29
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 4.32. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

4.3.3.7. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας

Παράμετροι:

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε T
s =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :
	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	χόμενο σύσ	τημα
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	19.00	0.03	6.06	8.96
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	5.79	3.00	5.21	6.79
F ₁ (kN)		900	1000	1000
u ₂ (mm)	36.90	0.03	10.15	15.08
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	8.04	3.08	5.19	9.71
F ₂ (kN)		1000		
u ₃ (mm)	53.20	0.03	14.70	26.10
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	8.76	3.05	7.41	9.21
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	67.6	0.03	16.30	31.39
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	9.49	3.05	5.21	11.69
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	80.90	0.03	19.45	41.51
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	9.00	3.06	6.31	9.42
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	92.10	0.03	21.80	45.80
\ddot{u}_{6} (m/sec ²)	8.64	3.05	7.15	11.81
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	99.90	0.03	24.65	51.71
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	8.43	3.06	7.91	12.28
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	103.90	0.03	27.13	54.48
\ddot{u}_{8} (m/sec ²)	9.50	3.06	6.09	13.58
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 4.33. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

4.3.3.8. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης

Παράμετροι:

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε T
s =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

Πίνακας 4.34. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	όμενο σύσ	τημα
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	9.30	0.04	3.09	9.55
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	3.75	3.02	4.22	7.88
F_1 (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	18.60	0.10	4.15	14.04
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	5.03	3.07	4.25	11.73
F_2 (kN)		1000		
u ₃ (mm)	27.70	0.10	6.69	17.09
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	5.86	3.08	5.41	9.21
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	36.50	0.10	6.28	25.45
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	6.45	3.07	4.21	12.78
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	80.90	0.10	7.45	27.52
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	9.00	3.07	5.25	15.31
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	92.10	0.10	6.88	29.81
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	8.64	3.08	3.12	14.85
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	99.90	0.10	6.62	33.71
\ddot{u}_7 m/sec ²)	8.43	3.07	6.91	26.35
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	103.90	0.10	7.12	33.55
\ddot{u}_{8} (m/sec ²)	9.50	3.07	3.16	15.57
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

4.3.3.9. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε T
s =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	ζόμενο σύσ	τημα
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	48.30	2.91	11.89	30.49
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.46	5.08	8.22	13.15
F ₁ (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	94.60	5.15	21.15	45.05
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	7.52	6.12	7.29	12.18
F_2 (kN)		1000		
u ₃ (mm)	137.30	7.25	35.72	71.15
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	10.45	8.52	9.91	15.13
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	174.80	7.45	44.36	93.38
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	12.63	8.42	11.21	16.78
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	205.90	7.49	49.42	105.55
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	14.00	9.52	12.17	17.33
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	229.70	7.21	61.85	128.81
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	15.51	9.32	13.84	18.89
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	245.80	8.15	70.45	155.36
\ddot{u}_7 m/sec ²)	16.43	8.27	14.78	17.11
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	253.90	9.05	74.12	164.57
$\ddot{u}_{_8}$ (m/sec ²)	16.78	4.03	14.64	19.96
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 4.35. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

-

Г

Т

4.3.3.10. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε T
s =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε $ω_s$ = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με $ω_s$ = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	όμενο σύσ	τημα
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	46.40	0.20	4.95	31.56
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.01	3.00	4.35	7.13
F ₁ (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	91.20	0.30	6.15	58.06
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	6.21	3.00	5.92	9.15
F_2 (kN)		1000		
u ₃ (mm)	133.10	0.40	9.45	59.11
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	8.60	2.98	6.61	8.71
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	170.50	0.50	12.09	69.39
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	11.05	2.99	6.23	12.26
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	202.20	0.50	15.45	93.52
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	13.13	3.00	7.11	14.29
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	227.10	0.60	16.00	101.80
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	14.81	3.01	6.82	13.55
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	244.20	0.60	18.45	119.09
\ddot{u}_7 m/sec ²)	16.23	3.01	7.53	17.00
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	252.90	0.60	19.69	130.48
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	17.08	3.00	9.19	19.61
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

Πίνακας 4.36. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

4.3.3.11. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε T
s =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων:

Πίνακας 4.37. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη
δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο
σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	όμενο σύσ	τημα
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	24.20	0.30	8.87	16.65
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	3.47	3.08	7.31	10.32
F ₁ (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	46.70	0.50	15.55	29.68
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	4.66	3.09	10.64	15.37
F ₂ (kN)		1000		
u ₃ (mm)	67.10	0.70	22.58	47.38
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	5.56	3.17	11.38	14.18
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	85.10	0.90	28.09	52.580
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	6.38	3.15	11.32	17.41
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	100.10	1.10	32.65	61.55
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	7.22	3.16	11.51	18.79
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	111.70	1.20	36.51	59.70
\ddot{u}_{6} (m/sec ²)	7.90	3.09	10.62	13.85
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	119.60	1.30	40.74	67.35
\ddot{u}_7 m/sec ²)	8.31	3.09	11.28	16.16
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	123.60	1.30	39.85	75.39
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	8.40	3.11	7.55	14.83
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

4.3.3.12. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe

Παράμετροι :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε T
s =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων:

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων

Πίνακας 4.38. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	όμενο σύσ	τημα
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	12.80	0.10	10.65	65.73
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.93	3.00	4.12	6.09
F_1 (kN)		987	1000	1000
u ₂ (mm)	24.50	0.10	19.15	127.75
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	6.18	3.00	6.13	11.71
F_2 (kN)		1000		
u ₃ (mm)	37.10	0.20	25.25	185.21
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	7.05	3.01	8.88	13.29
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	49.40	0.20	29.26	230.13
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	7.53	3.01	8.26	17.42
F_4 (kN)		1000		
u ₅ (mm)	60.60	0.20	32.75	277.59
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	8.01	3.02	8.53	20.78
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	70.70	0.20	37.45	310.81
\ddot{u}_{6} (m/sec ²)	8.19	3.01	9.31	21.57
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	79.00	0.20	42.08	332.39
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	10.39	3.01	9.27	21.15
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	83.80	0.20	46.25	344.41
\ddot{u}_{8} (m/sec ²)	12.65	3.01	10.22	22.89
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

4.3.3.13. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce

<u>Παράμετροι</u> :

Για τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων :

Μέρη φόρτισης: 8.

Διακριτοποίηση του σήματος σε Ts =0.0001

Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$. Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$. Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

Ποσοστό μείωσης απόκρισης από την απόκριση συντονισμου:70%, από τη σχέση (3.70) για x=0.30 βρίσκουμε ω_s = 10.85 rad/s. Την εξαπλασιάζουμε και επιλύουμε με ω_s = 60

Ποσοστό πρόσθετης μείωσης απόκρισης από την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος: 80%, από τη σχέση (3.72) για x_d =0.20 βρίσκουμε ζ= 0.95.

Για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης τοποθέτησης πόλων :

Πίνακας 4.39. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο	Ελεγχ	όμενο σύσ	τημα
	σύστημα	cs1	cs2	cs3
u ₁ (mm)	33.30	0.10	4.25	31.19
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.97	3.10	4.41	5.32
F_1 (kN)		1000	1000	1000
u ₂ (mm)	64.70	0.10	6.05	63.86
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	6.30	3.10	3.45	7.11
F ₂ (kN)		1000		
u ₃ (mm)	94.00	0.10	7.95	96.51
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	8.43	3.10	4.47	7.59
F ₃ (kN)		1000	1000	
u ₄ (mm)	120.10	0.10	10.08	116.16
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	9.64	3.10	4.12	8.89
F ₄ (kN)		1000		
u ₅ (mm)	142.50	0.10	12.25	140.77
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	9.93	3.10	4.56	9.51
F ₅ (kN)		1000	1000	1000
u ₆ (mm)	160.70	0.10	12.31	156.59
\ddot{u}_{6} (m/sec ²)	10.19	3.10	4.15	10.19
F ₆ (kN)		1000		
u ₇ (mm)	173.00	0.10	12.32	167.26
\ddot{u}_7 m/sec ²)	11.51	3.10	5.58	11.51
F ₇ (kN)		1000	1000	
u ₈ (mm)	179.80	0.10	13.45	174.78
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	12.69	3.10	5.52	11.47
F ₈ (kN)		1000	1000	1000

4.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης. Η εύρεση της επιφάνειας ολίσθησης έγινε με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων και την προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής. Η δύναμη ελέγχου υπολογίστηκε από τη θεωρία ευστάθειας κατά Lyapunov. Η μεθοδολογία τεκμηριώθηκε με μια σειρά από εφαρμογές. Από τις παραπάνω αναλύσεις προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα για τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης:

- Όσον αφορά τις σχετικές μετακινήσεις ορόφων της ελεγχόμενης κατασκευής, στην περίπτωση που οι θέσεις ελέγχου είναι όσοι οι βαθμοί ελευθερίας, αυτές μειώνονται από 90% έως 100 % σε σχέση με τις μετακινήσεις της κατασκευής χωρίς έλεγχο. Όταν οι θέσεις ελέγχου μειώνονται σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας, τότε αυτή η μείωση για το τριώροφο κτήριο, με μία θέση ελέγχου, είναι της τάξης του 55% έως 98% για όλες τις διεγέρσεις, εκτός της παλμικής διέγερσης, όπου παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση και η μείωση είναι της τάξης του 15-25%. Για το οκταώροφο κτήριο με πέντε θέσεις ελέγχου τα ποσοστά μείωσης είναι της τάξης του 45% έως 80%, ενώ για τρεις θέσεις ελέγχου τα ποσοστά μείωσης είναι της τάξης του 55% έως 15%. Η παλμική φόρτιση, στο οκταώροφο κτήριο με μειωμένες θέσεις ελέγχου, διαφοροποιείται και πάλι από τα προηγούμενα ποσοστά και η μείωση της απόκρισης κυμαίνεται από 0% έως 10%.
- Όσον αφορά την απόλυτη επιτάχυνση ορόφων, αυτή μειώνεται από 20% έως και 95% στην περίπτωση που έχουμε ίσο αριθμό θέσεων ελέγχου και βαθμών ελευθερίας. Για την περίπτωση που έχουμε λιγότερες θέσεις ελέγχου από τους βαθμούς ελευθερίας, παρατηρείται μια μείωση από 20% έως 60% για το τριώροφο κτήριο με μια δύναμη ελέγχου, για όλες τις διεγέρσεις, εκτός της παλμικής, όπου παρατηρήθηκε μείωση της επιτάχυνσης από 0% έως 30%. Για το οκταώροφο κτήριο με πέντε θέσεις ελέγχου παρατηρείται μια μείωση 5% έως 30% για όλες τις φορτίσεις, εκτός της παλμικής φόρτισης, όπου έχουμε μηδενική μείωση, ενώ με τρεις δυνάμεις ελέγχου, για όλες τις φορτίσεις έχουμε αμελητέα μείωση της επιτάχυνσης, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις αύξηση αυτής. Για την περίπτωση που έχουμε λιγότερες

θέσεις ελέγχου από τους βαθμούς ελευθερίας τα ελάχιστα ποσοστά μείωσης της επιτάχυνσης παρατηρούνται στις θέσεις ελέγχου.

- Όπως και στην περίπτωση του αλγορίθμου τοποθέτησης πόλων, έτσι και εδώ ο έλεγχος μορφής ολίσθησης, όταν οι συσκευές είναι όσοι οι βαθμοί ελευθερίας, τείνει να κάνει την κατασκευή να συμπεριφέρεται σαν στερεό σώμα. Δηλαδή, έχουμε πολύ μικρές σχετικές μετακινήσεις ορόφων, και η απόλυτη επιτάχυνση σε κάθε όροφο είναι περίπου όση και η εδαφική επιτάχυνση. Όσο ο αριθμός των συσκευών μειώνεται σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας, τόσο αυτή η κίνηση στερεού σώματος της κατασκευής διαφοροποιείται. Από τα παραδείγματα φαίνεται, ότι είναι πιο αποτελεσματικό να χρησιμοποιούνται πολλές συσκευές ελέγχου, σε σχέση με τους βαθμούς δυνατότητας απόδοσης ισοδύναμης δύναμης ελέγχου.
- Για τα πολυβάθμια συστήματα και για την περίπτωση που έχουμε δυνάμεις ελέγχου σε κάθε βαθμό ελευθερίας, ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων, όσον αφορά τις μετακινήσεις, αλλά χειρότερα όσον αφορά τις επιταχύνσεις. Όσο οι δυνάμεις ελέγχου γίνονται λιγότερες από τους βαθμούς ελευθερίας, τόσο ο αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την απόκριση του κτηρίου.
- Με τον αλγόριθμο, μορφής ολίσθησης, οι μετατοπίσεις και επιταχύνσεις μειώνονται πολύ γρήγορα σε σχέση με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων, λόγω του ότι οδηγούνται γρήγορα στην επιφάνεια ολίσθησης και από εκεί, αμέσως, στο σημείο ισορροπίας.
- Οι μέγιστες ισοδύναμες δυνάμεις ελέγχου για την πραγματοποίηση των παραπάνω ποσοστών μείωσης της απόκρισης κυμαίνονται μεταξύ 125 kN και 140 kN για το μονώροφο κτήριο, 3 kN έως 17 kN για το τριώροφο κτήριο, ενώ φθάνουν την τιμή κορεσμού των 1000 kN για το οκταώροφο κτήριο. Πέραν του υπολογισμού των δυνάμεων έγινε και υπολογισμός της ισχύος. Οι τιμές ισχύος για το μονώροφο κτήριο, που δίνονται στους πίνακες, αποτελούν άνω όρια και είναι εφικτά για την πρακτική εφαρμογή χωρίς απαγορευτικό κόστος.

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για το τριώροφο και το οκταώροφο ٠ κτήριο προέκυψε ότι το εύρος της ζώνης της μη ασφαλούς περιοχής δεν αρκεί να είναι αυτό που δίνουν οι σχέσεις 3.70 και 3.71, οι οποίες προέκυψαν από παραμετρική ανάλυση του μονώροφου κτηρίου. Για να πετύχουμε το ίδιο ποσοστό μείωσης της απόκρισης, με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης, θα πρέπει το εύρος της ζώνης της μη ασφαλούς περιοχής που προκύπτει από τις σχέσεις 3.70 και 3.71 να πενταπλασιαστεί για το τριώροφο κτήριο και να εξαπλασιαστεί για το οκταώροφο κτήριο. Στην περίπτωση του ελέγχου με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων αυτό το ποσοστό έπρεπε να διπλασιαστεί και για τα δυο κτήρια για να πετύχουμε ίδια ποσοστά μείωσης της απόκρισης. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτή η τροποποίηση είναι ότι στο μονοβάθμιο σύστημα η μείωση της απόκρισης μετά το συντονισμό είναι πιο έντονη από ότι στο σύστημα με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας και την ίδια απόσβεση. Η μεταβολή της κλίσης της απόκρισης για το μονοβάθμιο και το πολυβάθμιο, φαίνεται στο σχήμα 4.10. Από το σχήμα βλέπουμε ότι για το μονοβάθμιο σύστημα (συνεχής γραμμή) εάν θέλουμε να μειώσουμε την απόκριση του συστήματός μας, σε σύγκριση με την απόκριση συντονισμού, κατά ένα ποσοστό a_{p} , τότε θα χρειαστεί να μετατοπίσουμε τη συχνότητα του συστήματος μας, ω_{1} , κατά μία τιμή ίση με ω_{s.} Όμως, για το πολυβάθμιο σύστημα, για το ίδιο ποσοστό μείωσης της απόκρισης $a_{\rm p}$, θα χρειαστεί να μετατοπίσουμε τη συχνότητα του συστήματος μας, $ω_3$, κατά μια μεγαλύτερη ποσότητα από $ω_s$.



Σχήμα 4.11. Η μεταβολή της κλίσης της απόκρισης για το μονοβάθμιο (συνεχής γραμμή) και το πολυβάθμιο σύστημα (διακεκομμένη γραμμή)

Η τιμή της παραμέτρου δ για να έχουμε ευστάθεια διαφοροποιείται για τα διάφορα σχήματα ελέγχου και για διαφορετικό σεισμό. Η τιμή της παραμέτρου δ για τα παραπάνω αποτελέσματα είναι η ελάχιστη δυνατή για όλα τα σχήματα ελέγχου και για όλες τις φορτίσεις. Μία προτεινόμενη τιμή για την παράμετρο δ, για οποιαδήποτε σεισμική διέγερση, είναι δ=5 10⁻⁶.

Κεφάλαιο 5

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

5.1 Έλεγχος μεταβλητής δυσκαμψίας

Ο ημι-ενεργός έλεγχος κτιρίων που υπόκεινται σε δυναμική φόρτιση που έχει προσελκύσει την προσοχή είναι ο έλεγχος μεταβλητής δυσκαμψίας. Εκτός από την επιθυμία για το σχεδιασμό κτιρίων, ικανών να αντιμετωπίσουν ισχυρούς σεισμούς, τα ημι-ενεργά συστήματα ελέγχου, τροφοδοτούνται από τις σημαντικές προόδους και την τεχνολογία των ημι-ενεργών συσκευών, με δυνατότητα να αλλάζουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Δηλαδή οι συσκευές ελέγχου έχουν τη δυνατότητα να τροποποιήσουν τα χαρακτηριστικά τους σε χρόνο πολύ μικρότερο από τη διάρκεια διέγερσης της κατασκευής από τη δυναμική φόρτιση

Υπάρχουν πολλοί τρόποι και αντίστοιχοι αλγόριθμοι για τον έλεγχο μιας κατασκευής. Ένας τρόπος ελέγχου στηρίζεται στην αποφυγή συντονισμού μεταξύ της κατασκευής και της δυναμικής φόρτισης. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να είναι γνωστά αφενός τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής (ιδιοπερίοδοι, ιδιομορφές, λόγοι απόσβεσης) και αφετέρου τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εισερχόμενου σήματος (συχνοτικό του περιεχόμενο). Από τη σύγκριση των δυναμικών χαρακτηριστικών και με τη βοήθεια κάποιου αλγορίθμου ελέγχου, ενεργοποιούνται ή όχι κάποιες συσκευές, οι οποίες είναι τοποθετημένες στην κατασκευή και μπορούν με κάποιο έμμεσο τρόπο να αλλάξουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Επομένως, είναι απαραίτητο να μετράμε με αισθητήρες το εισερχόμενο σήμα και να έχουμε εκ των προτέρων υπολογίσει με ακρίβεια τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής.

Συστήματα ελέγχου μεταβλητής δυσκαμψίας, τόσο σε επίπεδο αλγορίθμων όσο και σε επίπεδο συσκευών, έχουν μελετηθεί από διάφορους ερευνητές. Θεμελιώδεις εργασίες είναι αυτές των Kobori (1993) και Nasu (2001), όπου προτείνεται ένας αλγόριθμος για σύστημα

μεταβλητής δυσκαμψίας, στηριζόμενος στη θεωρία μη συντονισμού. Η μέθοδος επιλογής του τύπου δυσκαμψίας της κατασκευής στηρίζεται σε δείκτες καλύτερης συμπεριφοράς, οι οποίοι υπολογίζονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης, εκτελώντας παράλληλες πολλαπλές δυναμικές αναλύσεις. Η ερευνητική αυτή ομάδα εφάρμοσε τον έλεγχο μεταβλητής δυσκαμψίας σε ένα πραγματικό κτίριο και παρατηρήθηκαν πολύ καλά αποτελέσματα όσον αφορά στην απόκριση του. Άλλοι ερευνητές όπως οι Nemer (1994), Loh και Ma (1994) και Yamada και Kobori (1995) χρησιμοποιούν την απευθείας μέθοδο Lyapunov και υπολογίζουν τη μεταβαλλόμενη στο χρόνο απόσβεση των συσκευών, αντί της δυσκαμψίας, ενώ ο Yang (1996) χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης (Sliding Mode Control), ο οποίος περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την επιλογή του τύπου της δυσκαμψίας της ελεγχόμενης κατασκευής.

Στην παρούσα διατριβή θα προτείνουμε έναν αλγόριθμο ελέγχου για συστήματα μεταβλητής δυσκαμψίας, όπου ο τύπος δυσκαμψίας επιλέγεται με βάση το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού που διεγείρει κάθε φορά την κατασκευή.

5.2 Προτεινόμενος αλγόριθμος μεταβλητής δυσκαμψίας

Έστω ότι μία δεδομένη κατασκευή διαστασιολογείται σύμφωνα με τον ισχύοντα αντισεισμικό κανονισμό, και είναι ικανή να αντέχει το ελαστοπλαστικό φάσμα σχεδιασμού, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 5.1. Αρκετές φορές όμως, μετά από κάποιο σεισμικό γεγονός, παρατηρείται ότι το φάσμα απόκρισης της κατασκευής υπερβαίνει το φάσμα σχεδιασμού, όπως φαίνεται επισης στο σχήμα 5.1. Αν λοιπόν η κατασκευή έχει τις ιδιοσυχνοτητές της μέσα σε αυτή την περιοχή υπέρβασης, τότε θα παρουσιάσει προβλήματα. Αυτή την αδυναμία έρχεται να καλύψει ο έλεγχος της κατασκευής, βασισμένος στη θεωρία μη συντονισμού. Εάν η κατασκευή βρίσκεται μέσα στο παράθυρο σημαντικών συχνοτήτων της διέγερσης, εύρους α_f, στόχος του ελέγχου είναι να 'βγάζει' πάντα την κατασκευή έζω από αυτό το παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ενεργοποιώντας κάποιες συσκευές, οι οποίες μεταβάλουν τη δυσκαμψία της κατασκευής και κατ' επέκταση τα δυναμικά της χαρακτηριστικά. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι να αποφεύγονται φαινόμενα συντονισμού μεταξύ κατασκευής και διέγερσης.



Σχήμα 5.1. Περιοχές, α. υπέρβασης του φάσματος απόκρισης δυο σεισμών από το φάσμα σχεδιασμού

Η διαδικασία ελέγχου περιλαμβάνει δυο στάδια: Το στάδιο σχεδιασμού και το στάδιο λειτουργίας. Στο στάδιο σχεδιασμού, σχεδιάζεται η κατασκευή και επιλέγεται ο αριθμός και η θέση των συσκευών και κατ' επέκταση τα εναλλακτικά συστήματα δυσκαμψίας ή αλλιώς οι τύποι δυσκαμψίας. Σε αυτό το στάδιο εξετάζονται αρκετά σεισμικά γεγονότα, τόσο υψίσυχνα όσο και χαμηλόσυχνα, και αναγνωρίζεται το συχνοτικό τους περιεχόμενο, από το οποίο προκύπτει ένα παράθυρο σημαντικών συχνοτήτων, το οποίο συμμετέχει σε μεγάλο ποσοστό στην ενέργεια του σήματος. Αυτές οι συχνότητες είναι υποψήφιες να έρθουν σε συντονισμό με την κατασκευή, και το εύρος των συχνοτήτων αυτών μας βοηθά να σχεδιάσουμε τα εναλλακτικά συστήματα δυσκαμψίας για την κατασκευή.

Στο στάδιο λειτουργίας το εισερχόμενο σήμα διεγείρει την κατασκευή. Εκτελείται σε πραγματικό χρόνο ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier, με σκοπό να αναγνωριστούν οι σημαντικές συχνότητες του συγκεκριμένου εισερχομένου σήματος, και μπαίνει σε εφαρμογή ο αλγόριθμος ελέγχου για τον τρόπο λειτουργίας των συσκευών. Τέλος, γίνεται η επιλογή του καλύτερου συστήματος δυσκαμψίας για τη μείωση της απόκρισης της κατασκευής.

Στη συνέχεια ακολουθεί μία λεπτομερής περιγραφή των δυο σταδίων, σχεδιασμού και λειτουργίας.

5.2.1 Στάδιο σχεδιασμού

Στο στάδιο αυτό, αρχικά διαστασιολογείται η κατασκευή σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς. Στη συνέχεια θεωρούμε κάποιες συσκευές μεταβλητής δυσκαμψίας, όπως π.χ. αυτές που φαίνονται στο σχήμα 5.2. Αυτές οι συσκευές, δια μέσου μιας βαλβίδας, επιτρέπουν

τη σύνδεση ή όχι των διαγώνιων στοιχείων με τη δοκό, και έτσι οδηγούν τα διαγώνια στοιχεία να συμμετέχουν ή όχι στη δυσκαμψία της κατασκευής, και κατ' επέκταση να μεταβάλουν τις ιδιοπεριόδους της.



(α)



Σχήμα 5.2 (α) Συσκευή μεταβλητής δυσκαμψίας, VSD, (β) η βαλβίδα είναι κλειστή και τα διαγώνια μεταλλικά στοιχεία λειτουργούν και συνεισφέρουν στη δυσκαμψία (γ) η βαλβίδα είναι ανοιχτή και τα διαγώνια στοιχεία μένουν ανενεργά (Φωτο. Kajima corp.).

Έστω ότι για μία δεδομένη κατασκευή έχουμε δυο τύπους δυσκαμψίας, τον τύπο Ι και τον τύπο ΙΙ. Στον τύπο δυσκαμψίας Ι, οι βαλβίδες σε όλες τις συσκευές είναι ανοιχτές και κανένα διαγώνιο στοιχείο δε συμμετέχει στη δυσκαμψία της κατασκευής και κατ' επέκταση στα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Στον τύπο δυσκαμψίας ΙΙ, οι βαλβίδες σε όλες τις συσκευές είναι ανοιχτές και κανένα διαγώνιο στοιχείο δε συμμετέχει στη δυσκαμψία της κατασκευής και κατ' επέκταση στα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Στον τύπο δυσκαμψίας ΙΙ, οι βαλβίδες σε όλες τις συσκευές είναι κλειστές, επομένως τα διαγώνια στοιχεία συμμετέχουν στη δυσκαμψία της κατασκευής και επηρεάζουν τα δυναμικά της χαρακτηριστικά. Οι δυο τύποι δυσκαμψίας φαίνονται στο σχήμα 5.3. Χωρίς να χάνεται η γενικότητα, η διαδικασία που περιγράφεται εδώ μπορεί να

εφαρμοστεί και για περισσότερους τύπους δυσκαμψίας, στους οποίους κάποιες συσκευές είναι ανοιχτές και κάποιες κλειστές.

Εάν **M** είναι το μητρώο μάζας, **K**^I το μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής χωρίς τα διαγώνια στοιχεία να συμμετέχουν και **K**^{II} το μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής με τα διαγώνια στοιχεία να συμμετέχουν, αντίστοιχα, τότε η λύση του προβλήματος ιδιοτιμών για κάθε τύπο δυσκαμψίας I και II, που δίνει τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες f_i^I , f_i^{II} και ιδιοπεριόδους T_i^I , T_i^{II} , δίνεται από τη σχέση (5.1):



Σχήμα 5.3 Ο τύπος δυσκαμψίας Ι και ΙΙ και οι αντίστοιχες ιδιοπερίοδοι T_i και ιδιοσυχνότητες f_i .

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} \end{bmatrix}_{n \times n} \mathbf{\Phi} = 0 \Rightarrow \left| \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} \right| = 0 \Rightarrow \omega_0, \omega_2, \dots, \omega_{n-1} \Rightarrow$$

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i}, \quad f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}, \quad i = 0, \dots, n-1,$$
(5.1)

όπου Φ είναι οι ιδιομορφές του συστήματος. Επειδή ο τύπος δυσκαμψίας ΙΙ είναι πιο δύσκαμπτος από το τύπο Ι, θα έχουμε :

$$f_0^I < f_0^{II} \tag{5.2}$$

Αν εκτελεστεί ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (FFT) για μία διέγερση, τότε θα βρεθεί το φάσμα συχνοτήτων της συγκεκριμένης διέγερσης. Με βάση το ποσοστό συμμετοχής των συχνοτήτων στη μέγιστη τιμή του φάσματος του σήματος της διεγερσης a_p , ορίζουμε το παράθυρο σημαντικών συχνοτήτων, το οποίο έχει εύρος a_f :

$$\alpha_f = f_h - f_L \tag{5.3}$$

όπου f_L και f_h το κάτω και πάνω όριο του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων, αντίστοιχα.

Στο σχήμα 5.4 φαίνονται τα χαρακτηριστικά σεισμών που καταγράφηκαν από τον σεισμό της Αθήνας το 1999, και από την πόλη του Μεξικού το 1985. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται το αντίστοιχο εύρος a_f του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων τους, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4 (a) Χαρακτηριστικά σεισμικά σήματα από τους σεισμούς της Αθήνας,1999 και της πόλης του Μεξικού 1995 (β) τα αντίστοιχα φάσματα τους.

Για να αποφευχθεί ο συντονισμός μεταξύ της διέγερσης και της κατασκευής, όπου τα διαγώνια δεν θα συμμετέχουν (τύπος δυσκαμψίας Ι), θα πρέπει:

$$f_i^I \notin \begin{bmatrix} f_L & f_h \end{bmatrix} \quad i=1,2 \dots \text{ndof}$$
(5.4)

όπου ndof είναι ο αριθμός των δυναμικών βαθμών ελευθερίας της κατασκευής. Αν δεν ικανοποιείται η παραπάνω σχέση, για να αποφευχθεί ο συντονισμός μεταξύ της διέγερσης και της κατασκευής, όπου τα διαγώνια θα συμμετέχουν (τύπος δυσκαμψίας ΙΙ), θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$f_i^{II} \notin \begin{bmatrix} f_L & f_h \end{bmatrix} \quad i=1,2 \dots \text{ndof}$$
(5.5)

Ορίζουμε τις παραμέτρους b_f και c_f , ως εξής:

$$\mathbf{b}_{\mathrm{f}} = f_{ndof}^{I} - f_{0}^{I} \tag{5.6}$$

$$\mathbf{c}_{\mathrm{f}} = f_{ndof}^{II} - f_{0}^{II} \tag{5.7}$$

όπου f_0^I , f_0^{II} οι πρώτες και f_{ndof}^I , f_{ndof}^{II} οι τελευταίες ιδιοσυχνότητες της αρχικής κατασκευής(τύπος I) και της ελεγχόμενης κατασκευής (τύπος II) αντοίστιχα.

Για να δουλέψει αποτελεσματικά ο προτεινόμενος αλγόριθμος και να αποφευχθεί ο συντονισμός με λειτουργία η όχι των συσκευών, θα πρέπει να πληρούται η παρακάτω προϋπόθεση:

$$f_0^{II} - f_0^I \ge a_f + b_f$$
(5.8)

Η σχέση (5.8) μας βοήθα να σχεδιάσουμε το σύστημα δυσκαμψίας, δηλαδή να επιλέξουμε τον αριθμό και τη θέση των διαγώνιων στοιχείων και των συσκευών. Συγκεκριμένα, η σχέση (5.8) μας οδηγεί στη διαστασιολόγηση ενός επαρκώς ισχυρού συστήματος δυσκαμψίας (τύπος ΙΙ). Η παράμετρος b_f που χρησιμοποιείται, υπολογίζεται από τη σχέση (5.6). Θα μπορούσε αντί να ληφθούν όλες οι συχνότητες στον υπολογισμό της παραμέτρου b_f , να ληφθούν υπόψη μόνο μερικές από αυτές.

Η παράμετρος a_f, στη φάση του σχεδιασμού, είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων των σεισμών που θα διεγείρουν την κατασκευή. Το παράθυρο των σημαντικών συχνοτήτων του συγκεκριμένου σεισμού που θα διεγείρει κάθε φορά την κατασκευή, a_{f,quake}, εξαρτάται από τον αριθμό των συχνοτήτων που συμμετέχουν, με ποσοστό a_p στη μέγιστη τιμή του φάσματος.

Εάν λοιπόν διαστασιολογηθεί το σύστημα δυσκαμψίας (τύπος ΙΙ) σύμφωνα με τη σχέση (5.8) , τότε οι πιθανές θέσεις του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού a_{f, quake} και των ιδιοσυχνοτήτων των δυο τύπων δυσκαμψίας φαίνονται στο σχήμα 5.5.

Η στρατηγική του αλγόριθμου ελέγχου βασίζεται στην ανίχνευση και επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο του εισερχόμενου σήματος και στην αναγνώριση του συχνοτικού του περιεχομένου. Ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής των συχνοτήτων στη μέγιστη τιμή του φάσματος, a_p, υπολογίζεται το πραγματικό παράθυρο σημαντικών συχνοτήτων, a_{f,quake}, και ανάλογα με τη σχέση του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού a_{f,quake} και των ιδιοσυχνοτήτων των δυο τύπων δυσκαμψίας, επιλέγεται εκείνο το σύστημα δυσκαμψίας που βρίσκεται έξω από το παράθυρο a_{f, quake}.

Ας εξετάσουμε τώρα λεπτομερειακά πως λειτουργεί ο αλγόριθμος όταν ενεργοποιείται κατά τη φάση λειτουργίας.



Σχήμα 5.5 Πιθανές θέσεις του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού και των ιδιοσυχνοτήτων των δυο τύπων δυσκαμψίας

5.2.2 Στάδιο λειτουργίας

Κατά τη φάση λειτουργίας, το εισερχόμενο σήμα μετριέται από τους αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στη βάση της κατασκευής. Στη συνέχεια, με έναν παράλληλο αναλυτή φάσματος, αναγνωρίζεται το συχνοτικό περιεχόμενο του εισερχομένου σήματος (εκτελώντας τον ταχύ μετασχηματισμό Fourier). Αφού αναγνωριστεί το συχνοτικό περιεχόμενο του πρώτου τμήματος του εισερχομένου σήματος, τότε το παράθυρο σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού a_{f,quake} είναι γνωστό, και η απόφαση για το ποιο σύστημα δυσκαμψίας είναι συνετό να επιλέξουμε, μπορεί να γίνει σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

Ο

Αρχικά το κτίριο μας είναι στην πιο δύσκαμπτη μορφή, τύπος ΙΙ. Εάν η μεγαλύτερη συχνότητα του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού, f_h , είναι μικρότερη από την πρώτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής με τον τύπο δυσκαμψίας ΙΙ, f_0^{II} , τότε παραμένει ο τύπος δυσκαμψίας ΙΙ. Αυτή η απόφαση αντιστοιχεί στις περιπτώσεις 5, 6 και 7 του σχήματος 5.5. Εάν η μεγαλύτερη συχνότητα του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων του σεισμού, f_h , είναι μεγαλύτερη από την πρώτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής με τον τύπο δυσκαμψίας Ι. Αυτή η απόφαση αντιστοιχεί στις περιπτώσεις 5, 6 και 7 του σχήματος 5.5. Εάν η μεγαλύτερη από την πρώτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής με τον τύπο δυσκαμψίας ΙΙ, f_0^{II} , τότε επιλέγεται ο τύπος δυσκαμψίας Ι. Αυτή η απόφαση αντιστοιχεί στις περιπτώσεις 1 έως 4 του σχήματος 5.5. Η διαδικασία επιλογής φαίνεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 5.6. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται και δυο χαρακτηριστικές περιπτώσεις επιλογής συστήματος δυσκαμψίας.



Σχήμα 5.6 Αλγόριθμος μεταβλητής δυσκαμψίας και δύο ενδεικτικές περιπτώσεις επιλογής τύπου δυσκαμψίας

Αν αναλογιστούμε ότι ο χρόνος εκτέλεσης (FFT) της επιλογής του συστήματος δυσκαμψίας, και της επιβολής της απόφασης αυτής (άνοιγμα ή κλείσιμο της βαλβίδας) διαρκεί ελάχιστα ms, το σύστημα προλαβαίνει να αλλάξει τα χαρακτηριστικά του και να μην συντονιστεί. Επίσης, αν λάβουμε υπόψη ότι το συχνοτικό περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου σεισμού αλλάζει μεν αλλά συνήθως όχι και τόσο δραματικά κατά τη διάρκεια του, ή αλλιώς το εύρος a_t του πρώτου τμήματος (μέχρι και λίγο μετά την άφιξη των s κυμάτων) δε μετακινείται τόσο πολύ, ώστε να επηρεάσει την επιλογή της δυσκαμψίας, η αρχική επιλογή μπορεί και να μην αλλάζει κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος. Μια ένδειξη αυτού του γεγονότος φαίνεται στο σχήμα 5.7, όπου τα φάσματα των τμημάτων τριών σεισμικών γεγονότων, δε μετατοπίζουν αρκετά το συχνοτικό τους περιεχόμενο.

Στο σχήμα 5.8 φαίνεται σχηματικά και ολοκληρωμένα η στρατηγική ελέγχου του συστήματος μεταβλητής δυσκαμψίας. Αρχικά αναλύεται ένα τμήμα του εισερχομένου σήματος και εκτελείται ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (FFT) ή η ανάλυση μικροκυματιδίων (wavelets). Αποτέλεσμα της προηγούμενης ανάλυσης είναι η εύρεση του συχνοτικού περιεχομένου του σεισμού και ο καθορισμός του παραθύρου σημαντικών συχνοτήτων του, με εύρος a_f.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του παραθύρου των σημαντικών συχνοτήτων f_L και f_h , αντίστοιχα. Με βάση το αποτέλεσμα της σύγκρισης των συχνοτήτων της μέγιστης τιμής του παραθύρου f_h και της πρώτης ιδιοσυχνότητας του πλέον δύσκαμπτου τύπου ΙΙ της κατασκευής, επιλέγεται ο τύπος δυσκαμψίας που θα έπρεπε να έχουμε για την αποφυγή συντονισμού. Αφού γίνει η πιο κατάλληλη επιλογή του τύπου δυσκαμψίας, δίνεται εντολή στη βαλβίδα να κλείσει ή να ανοίξει επιτρέποντας ή όχι τη σύνδεση των διαγώνιων στοιχείων με τη δοκό, πραγματοποιώντας έτσι την επιθυμητή δυσκαμψία.

Για την εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό για να εκτελεί δυναμική ανάλυση σε ελεγχόμενες κατασκευές με σύστημα μεταβλητής δυσκαμψίας που υπόκεινται σε δυναμικά φορτία, (δυναμική ανάλυση ελέγχου Dynamic Control Analysis, DCA). Η ροή του προγράμματος, τα βασικά αρχεία, η λειτουργία του καθενός από αυτά, καθώς και η σύνδεση μεταξύ τους, φαίνεται στο σχήμα 5.9

Το θετικό με τα συστήματα μεταβλητής δυσκαμψίας είναι ότι δεν εισαγάγουν δυνάμεις στη κατασκευή και, ως εκ τούτου, σε περίπτωση αστοχίας δεν επηρεάζουν δυσμενώς την κατασκευή. Επιπλέον, χρειάζονται ελάχιστη ενέργεια για να λειτουργήσουν.

Από την άλλη πλευρά, στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το γεγονός ότι αυτή η απότομη μεταβολή της δυσκαμψίας δημιουργεί τοπικά αύξηση της επιτάχυνσης.



Σχήμα 5.7 Επιταχύνσεις και τα αντίστοιχα φάσματα από ολόκληρο το σήμα και κάποια επιμέρους τμήματα του. (α) καταγραφή του σεισμού της πόλης του Μεξικού , (β) και (γ) καταγραφές του σεισμού της Αθήνας



Σχήμα 5.8 Ολοκληρωμένη σχηματική περιγραφή της στρατηγικής ελέγχου του συστήματος μεταβλητής δυσκαμψίας

Τα συστήματα μεταβλητής δυσκαμψίας αντιμετωπίζουν με επιτυχία διεγέρσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται ως μη στάσιμα κύματα που αλλάζουν τα χαρακτηριστικά τους (μέση τιμή, συχνοτικό περιεχόμενο) κατά τη διάρκεια επιβολής τους. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.10, όπου επιβάλλεται στο σύστημα μια ημιτονική φόρτιση η οποία για κάποιο χρόνο έχει μια συχνότητα και στη συνέχεια μια αλλη. Τη στιγμή της αλλαγής της συχνότητας του σήματος, ο αλγόριθμος ανιχνεύει αυτή την αλλαγή και αλλάζει τον τύπο δυσκαμψίας της κατασκευής.



Σχήμα 5.9 Βασικά αρχεία και η ροή του προγράμματος δυναμικής ανάλυσης ελέγχου (Dynamic Control Analysis, DCA) για κτιριακές κατασκευές που υπόκεινται σε σεισμικές φορτίσεις και ελέγχονται με σύστημα μεταβλητής δυσκαμψίας.



Σχήμα 5.10 (α) αρμονική φόρτιση και (β) χρονική επιλογή του τύπου δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια της αρμονικής φόρτισης

Στη συνέχεια, θα δούμε κάποια παραδείγματα στα οποία τεκμηριώνεται η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου ελέγχου για το σύστημα μεταβλητής δυσκαμψίας.

5.3 Παραδείγματα και αριθμητικές εφαρμογές

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιλογής δυσκαμψίας τεκμηριώθηκε για την ομάδα των δυναμικών φορτίων που φαίνονται στο παράρτημα Α. Οι φορτίσεις αυτές εφαρμόστηκαν σε μονώροφο, τριώροφο και οκταώροφο κτίριο των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο παράρτημα Β. Από τις δυναμικές αναλύσεις με έλεγχο δυσκαμψίας που έγιναν, ελήφθησαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

5.3.1 Μονώροφο κτήριο

5.3.1.1 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση T=0.2s <u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων: Μία συχνότητα

 $a_f=5$ Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f,\;quake}\approx 0 Hz \; (Tιμή της συγκεκριμένης φόρτισης)$

 $b_f=0$

Διαστασιολόγηση:

 $f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^{I} = 10 Hz$ $\mathbf{K}_{\text{new}} = 4\mathbf{K}$

Πίνακας 5.1. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
\mathbf{u}_1	(mm)	30.40	1.30
ü,	(m/sec^2)	30.19	3.51

5.3.1.2 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές $T_1=0.2s$ και $T_2=0.1s$

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16 Επιλογή συχνοτήτων : Δύο συχνότητες $a_f=5$ Hz (Τιμή σχεδιασμού) $a_{f, quake} ≈ 0$ Hz (Τιμή της συγκεκριμένης φόρτισης) $b_f=0$ Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^I = 10$ Hz

 $\mathbf{K}_{new}=4\mathbf{K}$

Πίνακας 5.2. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
\mathbf{u}_1	(mm)	30.40	20.00
ü	(m/sec^2)	30.19	37.20

5.3.1.3 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε παλμική φόρτιση

$$a = \omega_{p} u_{p} \cos\left(\omega_{p} t_{p} + \phi\right), \quad 0 \le t \le \left(n + \frac{1}{2} - \frac{\phi}{\pi}\right) T_{p} \text{ , } T_{p} = 0.2 \text{ s}, \ \omega_{p} = 2\pi/T_{p}, \ u_{p} = 1.75 \text{ m/s}, \ \phi = 0.0697$$

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16 Επιλογή συχνοτήτων: Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος a_p =0.80% Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος I_p =80% Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε a_p =40%, I_p =80%. a_f =5 Hz (Tιμή σχεδιασμού) $a_{f, quake} ≈$ 5Hz (Tιμή της συγκεκριμένης φόρτισης) b_f =0

i U

Διαστασιολόγηση:

 $f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^I = 10 \, Hz$

$$\mathbf{K}_{new} = 4\mathbf{K}$$

Πίνακας 5.3. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
\mathbf{u}_1	(mm)	7.60	5.10
$\ddot{\mathbf{u}}_{_{1}}$	(m/sec^2)	8.80	13.02

5.3.1.4 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας <u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων :

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$.

 $a_f = 8 Hz$ (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =2.93 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 $b_f = 0$

Διαστασιολόγηση:

$$f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^I = 13 Hz$$

$$\mathbf{K}_{\text{new}} = 6\mathbf{K}$$

Πίνακας 5.4. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της καλαμάτας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	5.7	0.58
ü	(m/sec^2)	4.93	3.70



Σχήμα 5.11. Επιλογή του τύπου δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια του σεισμού της Καλαμάτας



Σχήμα 5.12. (a) Μετακίνηση και (β) επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου μονώροφου κτηρίου για σεισμική διέγερση στο σεισμό της Καλαμάτας. Επιλογή του τύπου δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια του χρόνου

5.3.1.5 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων

<u>Παράμετροι</u> :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & \text{I}_p=80\%. \\ & a_f=8 \text{ Hz} \\ & (\text{Τιμή σχεδιασμού}) \\ & a_{f, quake}=3.88 \text{ Hz} \\ & (\text{Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού}) \\ & \text{b}_f=0 \end{split}$$

Διαστασιολόγηση:

$$f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^I = 13 Hz$$

Πίνακας 5.5. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
\mathbf{u}_1	(mm)	7.10	0.50
ü,	(m/sec^2)	5.51	3.37

5.3.1.6 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων :

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f = 8 Hz$ (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =2.86 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 $b_f = 0$

Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^I = 13 Hz$

$$\mathbf{K}_{\text{new}} = 6\mathbf{K}$$

Πίνακας 5.6. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
\mathbf{u}_1	(mm)	6.70	0.80
ü,	(m/sec^2)	5.60	3.61
Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων :Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$ $a_f=8$ Hz(Τιμή σχεδιασμού) $a_{f, quake}=7.51$ Hz(Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 $b_f = 0$

Διαστασιολόγηση:

$$f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^I = 13 Hz$$

Πίνακας 5.7. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
\mathbf{u}_1	(mm)	6.30	0.80
ü,	(m/sec^2)	7.89	5.50

5.3.1.8 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων :

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f = 8 Hz$ (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =3.93 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 $b_f = 0$

Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^I = 13 Hz$

$$\mathbf{K}_{\text{new}} = 6\mathbf{K}$$

Πίνακας 5.8. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
\mathbf{u}_1	(mm)	7.00	1.20
ü,	(m/sec^2)	6.66	4.67

5.3.1.9 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$

 $a_f = 8 Hz$ (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =1.30 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 $b_f = 0$

Διαστασιολόγηση:

$$f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^I = 13 \, Hz$$

 $\mathbf{K}_{new}=6\mathbf{K}$

Πίνακας 5.9. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
\mathbf{u}_1	(mm)	5.40	1.10
ü,	(m/sec^2)	3.74	3.10

5.3.1.10 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων :

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f = 8 Hz$ (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =2.12 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 $b_f=0$

Διαστασιολόγηση:

$$f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^I = 13 Hz$$

 $\mathbf{K}_{new} = 6\mathbf{K}$

Πίνακας 5.10. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό Imperial Valley με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	4.70	0.7
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.17	3.09

5.3.1.11 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City Παράμετροι :

Μέρη φόρτισης =16

 $b_f = 0$

Διαστασιολόγηση:

$$f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^I = 13 Hz$$

Πίνακας 5.11. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
\mathbf{u}_1	(mm)	3.6	0.50
ü,	(m/sec^2)	3.87	3.05

5.3.1.12 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων :

Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f = 8 Hz$ (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =4.84 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 $b_f = 0$

Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^I = 13 Hz$ $\mathbf{K}_{new} = 6\mathbf{K}$

Πίνακας 5.12. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	8.30	0.70
ü,	(m/sec^2)	8.70	3.31

5.3.1.13 Μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce

Παράμετροι :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος a_p=0.80%} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος I_p=80%} \\ & \text{Mε επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε a_p=40%, I_p=80% \\ & \text{a_f=8 Hz} \\ & \text{(Tιμή σχεδιασμού)} \\ & \text{a_f, quake=4.66 Hz} \\ & \text{(Tιμή του συγκεκριμένου σεισμού)} \\ & \text{b_f=0} \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 13 \, Hz \end{split}$$

Πίνακας 5.13. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση και μέγιστη απαιτούμενη δύναμη ελέγχου) για το μονώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	7.40	0.60
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	5.53	3.04

5.3.2. Τριώροφο κτήριο

5.3.2.1. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση T=0.2s

Παράμετροι :

Μέρη φόρτισης =16 Επιλογή συχνοτήτων : Μία συχνότητα $a_f=8$ Hz (Τιμή σχεδιασμού) $a_{f, quake} ≈ 0$ Hz (Τιμή της συγκεκριμένης φόρτισης) $b_f=6.76$ Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97$ Hz $\mathbf{K}_{new}=55$ K

Πίνακας 5.14. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	419	0.20
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	81.55	3.17
u ₂ (mm)	756	0.30
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	146.85	3.31
u ₃ (mm)	943	0.40
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	183.09	3.41

5.3.2.2. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές T_1 =0.2s και T_2 =0.1s

Παράμετροι :

Μέρη φόρτισης =16 Επιλογή συχνοτήτων : Δύο συχνότητες $a_f=8$ Hz (Τιμή σχεδιασμού) $a_{f, quake} ≈ 0$ Hz (Τιμή της συγκεκριμένης φόρτισης) $b_f=6.76$ Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^I = 16.97$ Hz $K_{new}=55$ K

Πίνακας 5.15. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	413	69.60
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	80.30	19.20
u ₂ (mm)	744	125.10
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	144.60	30.20
u ₃ (mm)	928	157.10
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	180.29	36.20

5.3.2.3. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε παλμική φόρτιση

Παράμετροι :

Mέρη φόρτισης =16 Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος a_p =0.80% Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος I_p =80% Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε a_p =40%, I_p =80% a_f =8 Hz (Τιμή σχεδιασμού) $a_{f, quake} \approx 5$ Hz (Τιμή της συγκεκριμένης φόρτισης) b_f =6.76 Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97$ Hz K_{new} =55K

Πίνακας 5.16. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	4.00	0.40
ü,	(m/sec^2)	7.04	5.99
u ₂	(mm)	6.10	0.70
ü2	(m/sec^2)	7.53	6.00
u ₃	(mm)	6.70	0.80
ü,	(m/sec^2)	6.56	7.41

5.3.2.4. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας

<u>Παράμετροι</u> :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Me επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & \text{I}_p=80\% \\ & a_f=8 \text{ Hz} \\ & (\text{Τιμή σχεδιασμού}) \\ & a_{f, quake}=2.93 \text{ Hz} \\ & (\text{Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού}) \\ & \text{b}_f=6.76 \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97 \text{ Hz} \\ & \textbf{K}_{new}=55\textbf{K} \end{split}$$

Πίνακας 5.17. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	37.10	2.00
ü	(m/sec^2)	9.39	3.69
u ₂	(mm)	66.80	3.70
ü ₂	(m/sec^2)	14.56	4.29
u ₃	(mm)	83.40	4.60
ü,	(m/sec^2)	17.71	4.62

0.1

0.08 0.06 0.04 0.02 8

Œ





Σχήμα 5.13. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου τριώροφου κτηρίου υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.

5.3.2.5. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων

<u>Παράμετροι</u> :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Mε επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & I_p=80\% \\ & a_f=8 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή σχεδιασμού)} \\ & a_{f, quake}=3.88 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)} \\ & b_f=6.76 \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97 \text{ Hz} \\ & \textbf{K}_{new}=55\textbf{K} \end{split}$$

Πίνακας 5.18. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκιωνύδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	35.00	0.20
ü,	(m/sec^2)	7.11	2.97
u ₂	(mm)	62.60	0.30
ü,	(m/sec^2)	12.32	3.26
u ₃	(mm)	77.80	0.40
ü,	(m/sec^2)	15.44	3.43

5.3.2.6. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου

Παράμετροι :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Mε επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & \text{I}_p=80\% \\ & \text{a}_f=8 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή σχεδιασμού)} \\ & \text{a}_{f, quake}=2.86 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)} \\ & \text{b}_f=6.76 \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97 \text{ Hz} \\ & \textbf{K}_{new}=55 \textbf{K} \end{split}$$

Πίνακας 5.19. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	30.10	0.20
ü,	(m/sec^2)	7.12	3.15
u ₂	(mm)	54.80	0.40
ü ₂	(m/sec^2)	11.61	4.84
u ₃	(mm)	68.80	0.50
ü,	(m/sec^2)	14.86	5.79

5.3.2.7. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%,$ $I_p=80\%$

 $a_f=8 Hz$

 $b_f = 6.76$

Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^I = 16.97 Hz$ $\mathbf{K}_{new} = 55 \mathbf{K}$

Πίνακας 5.20. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	16.00	0.40
ü,	(m/sec^2)	5.90	5.45
u ₂	(mm)	28.70	0.80
ü ₂	(m/sec^2)	8.12	8.01
u ₃	(mm)	36.00	1.00
ü,	(m/sec^2)	8.92	9.97

5.3.2.8. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης

Παράμετροι :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Mε επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & I_p=80\% \\ & a_f=8 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή σχεδιασμού)} \\ & a_{f, quake}=3.93 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)} \\ & b_f=6.76 \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97 \text{ Hz} \\ & \textbf{K}_{new}=55\textbf{K} \end{split}$$

Πίνακας 5.21. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	20.50	0.20
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	5.46	3.09
u ₂ (mm)	37.20	0.30
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	8.61	3.31
u ₃ (mm)	46.60	0.40
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	11.18	3.46

5.3.2.9. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta

Παράμετροι :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Mε επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & \text{I}_p=80\% \\ & a_f=8 \text{ Hz} \\ & (\text{Τιμή σχεδιασμού}) \\ & a_{f, quake}=1.30 \text{ Hz} \\ & (\text{Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού}) \\ & \text{b}_f=6.76 \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97 \text{ Hz} \\ & \textbf{K}_{new}=55\textbf{K} \end{split}$$

Πίνακας 5.22. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	20.60	0.20
ü	(m/sec^2)	3.60	3.40
u ₂	(mm)	36.70	0.30
ü,	(m/sec^2)	5.99	3.75
u ₃	(mm)	45.60	0.40
ü,	(m/sec^2)	7.78	3.91

5.3.2.10. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valey

Παράμετροι :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Mε επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & I_p=80\% \\ & a_f=8 \text{ Hz} \\ & (\text{Τιμή σχεδιασμού}) \\ & a_{f, quake}=2.12 \text{ Hz} \\ & (\text{Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού}) \\ & b_f=6.76 \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97 \text{ Hz} \\ & \textbf{K}_{new}=55\textbf{K} \end{split}$$

Πίνακας 5.23. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valey, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u_1	(mm)	27.00	0.20
ü,	(m/sec^2)	4.93	3.36
u ₂	(mm)	48.00	0.30
ü,	(m/sec^2)	7.93	3.71
u ₃	(mm)	59.50	0.40
ü,	(m/sec^2)	9.73	3.91

5.3.2.11. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City

Παράμετροι :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Mε επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & I_p=80\% \\ & a_f=8 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή σχεδιασμού)} \\ & a_{f, quake}=0.15 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)} \\ & b_f=6.76 \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97 \text{ Hz} \\ & \textbf{K}_{new}=55\textbf{K} \end{split}$$

Πίνακας 5.24. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (m	m)	17.80	0.20
ü, (n	n/sec ²)	4.34	3.14
u ₂ (m	m)	31.10	0.30
ü ₂ (m	/sec ²)	5.74	3.56
u ₃ (m	m)	38.20	0.40
ü ₃ (m	n/sec ²)	6.41	4.04

5.3.2.12 Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe

Παράμετροι :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Mε επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & I_p=80\% \\ & a_f=8 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή σχεδιασμού)} \\ & a_{f, quake}=4.84 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)} \\ & b_f=6.76 \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97 \text{ Hz} \\ & \textbf{K}_{new}=55\textbf{K} \end{split}$$

Πίνακας 5.25. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

		Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁	(mm)	27.40	0.20
ü,	(m/sec^2)	7.77	3.75
u ₂	(mm)	47.80	0.40
ü2	(m/sec^2)	10.49	4.51
u ₃	(mm)	58.20	0.50
ü ₃	(m/sec^2)	13.53	5.20

5.3.2.13. Τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce

<u>Παράμετροι</u> :

$$\begin{split} & \text{Mέρη φόρτισης =16} \\ & \text{Επιλογή συχνοτήτων :} \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος } a_p=0.80\% \\ & \text{Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος } I_p=80\% \\ & \text{Mε επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε } a_p=40\%, \\ & I_p=80\% \\ & a_f=8 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή σχεδιασμού)} \\ & a_{f, quake}=4.66 \text{ Hz} \\ & \text{(Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)} \\ & b_f=6.76 \\ & \text{Διαστασιολόγηση:} \\ & f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 16.97 \text{ Hz} \\ & \textbf{K}_{new}=55\textbf{K} \end{split}$$

Πίνακας 5.26. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το τριώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	13.20	0.20
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.42	3.29
u ₂ (mm)	23.6	0.30
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	5.09	3.54
u ₃ (mm)	29.50	0.40
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	6.23	3.68

5.3.3. Οκταώροφο κτήριο

5.3.3.1. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση T=0.2s

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Μία συχνότητα

af=2 Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake} \approx 0 Hz$ (Τιμή της συγκεκριμένης φόρτισης)

 $b_f\!\!=\!\!2.56$ (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι τέσσερις πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 2 + 2.56 + 1.30 = 5.86 Hz$ $K_{new} = 20K$

Πίνακας 5.27. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	195.10	0.80
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	13.28	3.31
u ₂ (mm)	383.60	1.30
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	25.88	3.60
u ₃ (mm)	559.00	2.70
\ddot{u}_3 (m/sec ²)	37.42	3.78
u ₄ (mm)	715.40	2.80
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	48.65	3.59
u ₅ (mm)	847.50	2.90
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	57.03	3.59
u ₆ (mm)	950.00	3.30
\ddot{u}_{6} (m/sec ²)	63.38	3.93
u ₇ (mm)	1021.00	3.00
\ddot{u}_7 m/sec ²)	68.79	3.62
u ₈ (mm)	1057	3.10
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	71.23	3.82

5.3.3.2. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε ημιτονική φόρτιση με δύο αρμονικές $T_1=0.2s$ και $T_2=0.1s$

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Δύο συχνότητες

af=2 Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, \text{ quake}} \approx 0 \text{Hz}$ (Τιμή της συγκεκριμένης φόρτισης)

 $b_f\!\!=\!\!2.56$ (Gia ton upologismó tou b_f elýqqusan upóyu móun oi tésseric prátec idiosucnóthtes tou ktiríou)

Διαστασιολόγηση:

 $f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^{I} = 2 + 2.56 + 1.30 = 5.86 Hz$ $\mathbf{K}_{new} = 20\mathbf{K}$

Πίνακας 5.28. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε αρμονική φόρτιση με δύο αρμονικές, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	195.10	4.00
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	26.28	4.31
u ₂ (mm)	383.60	6.30
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	46.88	7.45
u ₃ (mm)	559.00	8.70
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	56.63	8.87
u ₄ (mm)	715.40	10.80
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	55.03	11.28
u ₅ (mm)	847.50	13.00
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	57.03	12.85
u ₆ (mm)	950.80	12.10
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	63.99	10.67
u ₇ (mm)	1021.70	10.00
\ddot{u}_7 m/sec ²)	82.73	6.16
u ₈ (mm)	1057.70	11.20
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	95.23	6.62

5.3.3.3. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε παλμική φόρτιση

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16 Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f=2 Hz$

 $a_{f, quake} \approx 5 Hz$ (Τιμή της συγκεκριμένης φόρτισης)

 b_f =2.56 (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι τέσσερις πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

Πίνακας 5.29. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο σε διέγερση παλμού, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	3.00	1.01
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	6.02	8.12
u ₂ (mm)	5.10	2.01
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	8.14	9.10
u ₃ (mm)	6.00	2.01
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	7.68	10.10
u ₄ (mm)	6.30	2.21
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	6.56	11.10
u ₅ (mm)	6.30	2.20
\ddot{u}_{5} m/sec ²)	6.10	13.10
u ₆ (mm)	6.40	2.20
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	6.01	12.10
u ₇ (mm)	6.20	2.20
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	6.00	8.10
u ₈ (mm)	6.60	2.20
$\ddot{u}_{_8}$ (m/sec ²)	5.99	10.10

5.3.3.4. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας Παράμετροι :

<u>Μέρη</u> φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f=2$ Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake} = 2.93 \text{ Hz}$ (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 b_f =2.56 (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι τέσσερις πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση: $f_0^{II} = a_f + b_f + f_0^{I} = 2 + 2.56 + 1.30 = 5.86 Hz$ $K_{new} = 20K$

Πίνακας 5.30. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	29.80	1.30
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.32	3.66
u ₂ (mm)	58.40	2.60
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	6.21	4.73
u ₃ (mm)	84.70	3.70
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	7.87	5.65
u ₄ (mm)	108.00	4.80
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	8.82	6.46
u ₅ (mm)	127.40	5.70
\ddot{u}_{5} (m/sec ²)	9.83	7.52
u ₆ (mm)	142.60	6.30
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	10.37	8.43
u ₇ (mm)	153.00	6.80
\ddot{u}_7 (m/sec ²)	10.75	9.07
u ₈ (mm)	158.20	7.10
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	11.15	9.40



Σχήμα 5.14 Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, υποβαλλόμενο στο σευ της Καλαμάτας



Σχήμα 5.14. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.



Σχήμα 5.14. Μετακίνηση και επιτάχυνση του ελεγχόμενου και μη ελεγχόμενου οκταώροφου κτηρίου, υποβαλλόμενο στο σεισμό της Καλαμάτας.

5.3.3.5. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16 Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f=3Hz$ (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =3.88 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 b_f =2.56 (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

Πίνακας 5.31. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό των Αλκυονίδων, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	14.70	0.80
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	3.96	3.21
u ₂ (mm)	28.10	1.50
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	6.52	3.43
u ₃ (mm)	39.50	2.20
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	7.97	3.60
u ₄ (mm)	48.70	2.80
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	7.78	3.93
u ₅ (mm)	56.03	3.30
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	8.43	4.40
u ₆ (mm)	66.40	3.70
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	9.16	5.43
u ₇ (mm)	74.50	4.10
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	9.69	6.25
u ₈ (mm)	79.10	4.10
\ddot{u}_{8} (m/sec ²)	9.92	6.76

5.3.3.6. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

a_f=3 Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake} = 2.86 \text{ Hz}$ (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 b_f =2.56 (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

Πίνακας 5.32. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Αιγίου, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	13.90	0.90
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.28	3.17
u ₂ (mm)	27.20	1.80
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	5.66	3.79
u ₃ (mm)	39.70	260
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	6.97	4.93
u ₄ (mm)	50.60	3.40
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	8.12	5.87
u ₅ (mm)	59.90	4.10
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	8.56	6.81
u ₆ (mm)	68.70	4.50
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	8.78	7.69
u ₇ (mm)	75.80	4.80
\ddot{u}_7 m/sec ²)	9.06	8.07
u ₈ (mm)	79.80	5.00
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	9.29	8.64

Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας

Παράμετροι :

Μέρη φόρτισης =16 Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f=3$ Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake} = 7.51 \text{ Hz}$ (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 b_f =2.56 (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

Πίνακας 5.33. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Αθήνας, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	19.00	1.73
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	5.79	3.90
u ₂ (mm)	36.90	3.30
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	8.04	6.46
u ₃ (mm)	53.20	4.80
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	8.76	9.23
u ₄ (mm)	67.6	6.03
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	9.49	11.05
u ₅ (mm)	80.90	7.03
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	9.00	13.06
u ₆ (mm)	92.10	8.03
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	8.64	12.05
u ₇ (mm)	99.90	8.03
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	8.43	13.06
u ₈ (mm)	103.90	9.03
\ddot{u}_{8} (m/sec ²)	9.50	14.06

5.3.3.8. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

a_f=3 Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =3.93 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 $b_f{=}2.56$ (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

Πίνακας 5.34. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Κοζάνης, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	9.30	1.0
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	3.75	3.92
u ₂ (mm)	18.60	2.30
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	5.03	4.47
u ₃ (mm)	27.70	2.90
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	5.86	5.08
u ₄ (mm)	36.50	3.10
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	6.45	6.07
u ₅ (mm)	80.90	4.10
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	9.00	7.07
u ₆ (mm)	92.10	4.10
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	8.64	8.08
u ₇ (mm)	99.90	5.10
\ddot{u}_7 m/sec ²)	8.43	9.07
u ₈ (mm)	103.90	5.10
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	9.50	9.07

5.3.3.9. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta

Παράμετροι :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f = 8 Hz$ (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake} = 1.30 \text{ Hz}$ (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 b_f =2.56 (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

Πίνακας 5.35. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Loma Prieta, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	48.30	0.60
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.46	3.01
u ₂ (mm)	94.60	1.10
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	7.52	3.14
u ₃ (mm)	137.30	1.70
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	10.45	3.49
u ₄ (mm)	174.80	2.40
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	12.63	3.47
u ₅ (mm)	205.90	2.40
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	14.00	4.56
u ₆ (mm)	229.70	2.20
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	15.51	4.38
u ₇ (mm)	245.80	3.10
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	16.43	4.99
u ₈ (mm)	253.90	3.00
\ddot{u}_{8} (m/sec ²)	16.78	5.09

5.3.3.10. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό της Imperial Valley Παράμετροι :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f=3$ Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =2.12 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 b_f =2.56 (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

Πίνακας 5.36. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Imperial Valley, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	46.40	0.70
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.01	6.00
u ₂ (mm)	91.20	1.30
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	6.21	6.00
u ₃ (mm)	133.10	1.70
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	8.60	9.98
u ₄ (mm)	170.50	2.50
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	11.05	11.99
u ₅ (mm)	202.20	2.50
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	13.13	7.00
u ₆ (mm)	227.10	2.60
\ddot{u}_{6} (m/sec ²)	14.81	11.01
u ₇ (mm)	244.20	3.10
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	16.23	8.01
u ₈ (mm)	252.90	3.20
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	17.08	10.00

5.3.3.11. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City

Παράμετροι :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f=3$ Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake} = 0.15 \text{ Hz}$ (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 b_f =2.56 (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

 $f_0^{II} = \mathbf{a}_f + \mathbf{b}_f + f_0^{I} = 3 + 2.56 + 1.30 = 6.86 \, Hz$ $\mathbf{K}_{new} = 25 \, \mathbf{K}$

Πίνακας 5.37. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Mexico City, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	24.20	0.60
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	3.47	3.08
u ₂ (mm)	46.70	1.10
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	4.66	3.43
u ₃ (mm)	67.10	1.70
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	5.56	3.67
u ₄ (mm)	85.10	2.00
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	6.38	3.85
u ₅ (mm)	100.10	2.10
\ddot{u}_{s} m/sec ²)	7.22	4.16
u ₆ (mm)	111.70	2.60
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	7.90	4.29
u ₇ (mm)	119.60	2.80
\ddot{u}_7 m/sec ²)	8.31	4.39
u ₈ (mm)	123.60	2.90
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	8.40	4.41

5.3.3.12. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe Παράμετροι :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

a_f=3 Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =4.84 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 $b_f{=}2.56$ (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

Πίνακας 5.38. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Kobe, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχομενο συστημα	Ελεγχομενο συστημα
u ₁ (mm)	12.80	1.10
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.93	4.00
u ₂ (mm)	24.50	2.10
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	6.18	5.00
u ₃ (mm)	37.10	3.20
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	7.05	5.41
u ₄ (mm)	49.40	4.20
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	7.53	6.01
u ₅ (mm)	60.60	4.90
\ddot{u}_{5} m/sec ²)	8.01	8.02
u ₆ (mm)	70.70	5.20
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	8.19	9.01
u ₇ (mm)	79.00	6.20
\ddot{u}_7 m/sec ²)	10.39	10.01
u ₈ (mm)	83.80	6.20
\ddot{u}_{8} (m/sec ²)	12.65	10.01

5.3.3.13. Οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce

<u>Παράμετροι</u> :

Μέρη φόρτισης =16

Επιλογή συχνοτήτων : Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στο φάσμα του σήματος $a_p=0.80\%$ Αρχικό ποσοστό συμμετοχής στην ισχύ του σήματος $I_p=80\%$ Με επαναληπτική διαδικασία με βάση τη σχέση (3.86) βρίσκουμε $a_p=40\%$, $I_p=80\%$

 $a_f=3$ Hz (Τιμή σχεδιασμού)

 $a_{f, quake}$ =4.66 Hz (Τιμή του συγκεκριμένου σεισμού)

 b_f =2.56 (Για τον υπολογισμό του b_f ελήφθησαν υπόψη μόνο οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου)

Διαστασιολόγηση:

Πίνακας 5.39. Αριθμητικά αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση) για το οκταώροφο κτήριο υποβαλλόμενο στο σεισμό του Duzce, με έλεγχο και χωρίς έλεγχο.

	Μη ελεγχόμενο σύστημα	Ελεγχόμενο σύστημα
u ₁ (mm)	33.30	0.60
\ddot{u}_1 (m/sec ²)	4.97	2.90
u ₂ (mm)	64.70	1.10
\ddot{u}_2 (m/sec ²)	6.30	2.99
u ₃ (mm)	94.00	1.80
\ddot{u}_{3} (m/sec ²)	8.43	3.10
u ₄ (mm)	120.10	2.10
\ddot{u}_4 (m/sec ²)	9.64	4.10
u ₅ (mm)	142.50	2.70
\ddot{u}_{5} m/sec ²)	9.93	4.90
u ₆ (mm)	160.70	3.10
\ddot{u}_6 (m/sec ²)	10.19	5.30
u ₇ (mm)	173.00	3.30
\ddot{u}_{7} m/sec ²)	11.51	5.60
u ₈ (mm)	179.80	3.40
\ddot{u}_{s} (m/sec ²)	12.69	5.70

5.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο είδαμε, πώς ελέγχοντας τη βαλβίδα μιας συσκευής, μπορούμε να μεταβάλουμε την δυσκαμψία και κατ' επέκταση τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Μετρώντας και αναλύοντας το εισερχόμενο σήμα αποφεύγουμε το συντονισμό, κάνοντας κατάλληλη επιλογή δυσκαμψίας, με τη χρήση του προτεινόμενου αλγορίθμου μεταβλητής δυσκαμψίας. Η μεθοδολογία τεκμηριώθηκε με μια σειρά από εφαρμογές. Από τις παραπάνω αναλύσεις προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα για τον αλγόριθμο μεταβλητής δυσκαμψίας:

- Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μεταβλητής δυσκαμψίας μειώνει τις μετακινήσεις του συστήματος, δεν είναι όμως τόσο αποτελεσματικός όσον αφορά στις επιταχύνσεις.
- Όσον αφορά τις σχετικές μετακινήσεις ορόφων της ελεγχόμενης κατασκευής, αυτές μειώνονται κατά από 60% έως 100 % σε σχέση με τις μετακινήσεις της κατασκευής χωρίς έλεγχο. Εξαίρεση αποτελούν η παλμική και η ημιτονική διέγερση με δυο αρμονικές, όπου τα ποσοστά μείωσης είναι της τάξης των 32% έως 80%.
- Όσον αφορά την απόλυτη επιτάχυνση ορόφων, αυτή μειώνεται από 25% έως και 75% για όλες τις φορτίσεις, εκτός της παλμικής και της ημιτονικής με δυο αρμονικές, όπου η επιτάχυνση δε μειώνεται συστηματικά, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις αυξάνεται.
- Ο αλγόριθμος μεταβλητής δυσκαμψίας αντιμετωπίζει διεγέρσεις, οι οποίες είναι μη στάσιμα κύματα, δηλαδή κύματα που μεταβάλουν τα χαρακτηριστικά τους (μέση τιμή, συχνοτικό περιεχόμενο) κατά τη διάρκεια του χρόνου. Αυτό αναδεικνύεται από τα αποτελέσματα που έχουμε για το αρμονικό σήμα με δυο συχνότητες.
- Το σύστημα μεταβλητής δυσκαμψίας δεν εισαγάγει δυνάμεις στη κατασκευή και ως
 εκ τούτου δεν επηρεάζει δυσμενώς την κατασκευή σε περίπτωση αστοχίας.
- Το σύστημα μεταβλητής δυσκαμψίας χρειάζεται ελάχιστη ενέργεια για να λειτουργήσει, αφού το μόνο που απαιτείται είναι να ανοίγει ή να κλείνει μια βαλβίδα και να επιτρέπεται ή όχι η σύνδεση των διαγώνιων στοιχείων με τη δοκό.
- Η δυσκαμψία του κτηρίου με τη συνεισφορά των διαγώνιων συνδέσμων προκύπτει πέντε φορές μεγαλύτερη της δυσκαμψίας του κτηρίου χωρίς τους συνδέσμους για το μονώροφο κτήριο, 55 φορές για το τριώροφο και 25 φορές για το οκταώροφο κτήριο.

Οι τιμές της δυσκαμψίας, που προκύπτουν για την διαστασιολόγηση του συστήματος των διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας, είναι πραγματοποιήσιμες και εφικτές.

 Η παραπάνω στρατηγική ελέγχου εντάσσεται και αυτή μέσα στη γενικότερη φιλοσοφία ελέγχου μη συντονισμού. Είναι βέβαια πιο ειδική περίπτωση σε σχέση με τον έλεγχο τοποθέτησης πόλων και τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, αλλά και οι τρεις στρατηγικές ελέγχου έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: ο έλεγχος στηρίζεται κάθε φορά στη μέτρηση και στην ανάλυση των χαρακτηριστικών (συχνοτικό περιεχόμενο) του συγκεκριμένου σεισμικού σήματος που διεγείρει την κατασκευή. Είναι δηλαδή στρατηγικές ελέγχου που προσαρμόζονται κάθε φορά στη συγκεκριμένη διέγερση και βοηθούν την κατασκευή όταν και όπως αυτή το έχει ανάγκη.
Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

6.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή την διδακτορική διατριβή έγινε μια προσπάθεια να συνδυαστούν δυο επιστημονικές περιοχές, αυτές της δυναμικής συμπεριφοράς και αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών και της θεωρίας ελέγχου. Μέσα από αυτή την προσπάθεια σύνθεσης προέκυψαν αλγόριθμοι ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν για τον έλεγχο και τον περιορισμό των μετακινήσεων και επιταχύνσεων, και κατ' επέκταση των βλαβών, σε ένα κτίριο που καταπονείται από μια σεισμική διέγερση. Προέκυψε δηλαδή μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία ελέγχου για την αντισεισμική προστασία κτιριακών κατασκευών.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων. Πιο συγκεκριμένα, στη διατριβή αυτή προτάθηκε μια διαδικασία υπολογισμού των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής που βασίζεται στα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης που την καταπονεί και συγκεκριμένα στο συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού. Η φόρτιση και η κατασκευή μετασχηματίζονται στο μιγαδικό επίπεδο, που αποτελεί κοινό πλέον επίπεδο αναφοράς, όπου εφαρμόζονται απλοί κανόνες και υπολογίζονται οι πόλοι της ελεγχόμενης κατασκευής για κάθε διαδοχικό τμήμα της εισερχόμενης σεισμικής διέγερσης. Ο υπολογισμός των πόλων γίνεται με στόχο, η ελεγχόμενη κατασκευή αφενός να αποφύγει τον συντονισμό και αφετέρου να έχει ικανό ισοδύναμο ποσοστό απόσβεσης για την περαιτέρω μείωση των μετακινήσεων. Το σήμα που διεγείρει την κατασκευή μετράται συνεχώς, με τη βοήθεια αισθητήρων, και αναγνωρίζονται τα δυναμικά του χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά και την προτεινομένη

το μητρώο ανάδρασης και με αυτό τις ισοδύναμες δυνάμεις ελέγχου που πρέπει να ασκηθούν από τις συσκευές ελέγχου, οι οποίες είναι εγκατεστημένες στην κατασκευή. Η διαδικασία επιλογής είναι κατάλληλη για μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και άμεσα εφαρμόσιμη.

Έγιναν αριθμητικές προσομοιώσεις για δεκατρείς διεγέρσεις, δέκα αντιπροσωπευτικές σεισμικές διεγέρσεις (πέντε από τον ελλαδικό χώρο και πέντε από το εξωτερικό), δυο ημιτονικές φορτίσεις και έναν παλμό, και διερευνήθηκαν τρεις πλαισιακοί φορείς, ένας μονώροφος, ένας τριώροφος και ένας οκταώροφος. Από τις δυναμικές αναλύσεις ελέγχου, τεκμηριώθηκε η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης διαδικασίας υπολογισμού των πόλων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούμε να επιτύχουμε μείωση τόσο της μετακίνησης, όσο και της επιτάχυνσης των ελεγχόμενων κατασκευών, όταν αυτές είναι εφοδιασμένες με κατάλληλες συσκευές που ελέγχονται από τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων και την προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των πόλων.

Επίσης, μελετήθηκε ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης. Η εύρεση της επιφάνειας ολίσθησης έγινε με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων. Σε αυτή τη διατριβή δοκιμάστηκε η παραπάνω προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των πόλων, για τον υπολογισμό της επιθυμητής επιφάνειας ολίσθησης. Με την προτεινόμενη διαδικασία εύρεσης της επιφάνεια ολίσθησης καθορίζουμε πλήρως τη δυναμική του συστήματος μας στην πορεία του προς το σημείο ισορροπίας. Η δύναμη ελέγχου υπολογίστηκε από τη θεωρία ευστάθειας κατά Lyapunov

Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις για κατασκευές, ελεγχόμενες με τον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης και με υπολογισμό της επιφάνειας ολίσθησης με την προτεινόμενη διαδικασία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, όταν η επιφάνεια ολίσθησης υπολογιστεί με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων και οι πόλοι της κατασκευής υπολογιστούν με την προτεινόμενη διαδικασία, μπορούμε να επιτύχουμε μειωμένη απόκριση των κατασκευών.

Επίσης, στη διατριβή προτάθηκε μια στρατηγική ελέγχου και ένας αλγόριθμος στηριζόμενος σε συστήματα και συσκευές μεταβλητής δυσκαμψίας. Οι συσκευές μεταβλητής δυσκαμψίας, μέσω του ελέγχου της βαλβίδας τους, επιτρέπουν τη σύνδεση ή όχι κάποιων μεταλλικών διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας με το φέροντα οργανισμό, μεταβάλλοντας έτσι τη δυσκαμψία της κατασκευής και κατ' επέκταση τα δυναμικά της χαρακτηριστικά. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος στηρίζεται επίσης στα χαρακτηριστικά της εισερχόμενης διέγερσης. Με βάση το συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης ο αλγόριθμος αποφασίζει για τη λειτουργία των συσκευών, με αποτέλεσμα να υπάρχει ή να μην υπάρχει συμμετοχή των μεταλλικών διαγώνιων στοιχείων στη δυσκαμψία του συστήματος, και κατ' επέκταση να μεταβάλλονται τα δυναμικά του χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να αποφεύγεται ο συντονισμός και να μειώνεται η απόκριση της κατασκευής.

Η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου μεταβλητής δυσκαμψίας τεκμηριώθηκε με αριθμητικά προσομοιώματα και δυναμικές αναλύσεις ελέγχου. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν ότι ο έλεγχος με τον προτεινόμενο αλγόριθμο για συστήματα μεταβλητής δυσκαμψίας μειώνει την απόκριση της κατασκευής και αντιμετωπίζει διεγέρσεις οι οποίες μπορεί να μεταβάλουν το συχνοτικό περιεχόμενο κατά τη διάρκεια επιβολής τους, όπως είναι τα μη στάσιμα σήματα.

Ακόμη, διερευνήθηκαν πρακτικά θέματα που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν οι θέσεις των συσκευών ελέγχου που είναι τοποθετημένες στην κατασκευή. Οι θέσεις των συσκευών ελέγχου είναι ένα θέμα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, και διερευνήθηκε με την παραμετρική αλλαγή του μητρώου θέσης των δυνάμεων ελέγχου, στην εξίσωση που περιγράφει τη συμπεριφορά της ελεγχόμενης κατασκευής. Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκε η θεωρητική αρχή, ότι όταν έχουμε τόσες θέσεις ελέγχου, όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος, τότε έχουμε πλήρη έλεγχο του συστήματος, και η κατασκευή θεωρητικά συμπεριφέρεται σαν στερεό σώμα χωρίς διαφορικές μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων. Επίσης διαπιστώθηκε ότι με μειωμένο αριθμό συσκευών ελέγχου, που είναι η συνήθης περίπτωση στις κατασκευές, μπορούμε να πετύχουμε επαρκή μείωση της απόκρισης.

Επιπλέον πρακτικά θέματα, λόγω των τεχνολογικών αδυναμιών των συσκευών, που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων αλγορίθμων, είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ υπολογισμού της ισοδύναμης δύναμης με τον αλγόριθμο ελέγχου και της επιβολής της στην κατασκευή, με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, και ο κορεσμός της δύναμης ελέγχου. Οι παράμετροι αυτές ελήφθησαν υπόψη, περιγράφοντας τις εξισώσεις κίνησης της ελεγχόμενης κατασκευής, ως διαφορικές εξισώσεις με χρονική καθυστέρηση ούν και στη συνέχεια πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, φάνηκε η δυσμενής επιρροή που έχουν

στον έλεγχο οι παραπάνω παράγοντες, αλλά και η αναγκαιότητα να λαμβάνονται υπόψη στις αριθμητικές αναλύσεις ελέγχου πριν και κατά την εγκατάσταση του συστήματος ελέγχου στην κατασκευή. Αναδείχθηκε το γεγονός ότι κατά το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου θα πρέπει να γίνονται εκ των προτέρων αριθμητικές προσομοιώσεις και να βρίσκεται μια οριακή τιμή της χρονικής καθυστέρησης, η οποία θα αποτελεί και την απαραίτητη προδιαγραφή για την επιλογή και το συνολικό σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου (χρόνος συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, χρόνος ενεργοποίησης των συσκευών ελέγχου). Επίσης, θα πρέπει να γίνονται και παραμετρικές δυναμικές αναλύσεις ελέγχου, για διάφορα επίπεδα κορεσμού της δύναμης, τα οποία να ανταποκρίνονται στις πρακτικές τεχνολογικές δυνατότητες των συσκευών ελέγχου.

Επιπλέον, από την παρούσα διατριβή προέκυψε ένα λογισμικό απαραίτητο για την υπολογιστική προσομοίωση και πραγματοποίηση της δυναμικής ανάλυσης με συστήματα ελέγχου. Η ανάπτυξη του λογισμικού μπορεί να αποτελέσει μια αρχή για την αγορά λογισμικού, στην οποία σήμερα δεν υπάρχουν κατάλληλα εργαλεία για την αριθμητική προσομοίωση κατασκευών που υπόκεινται σε δυναμική φόρτιση και είναι εφοδιασμένες με συστήματα ενεργού ή ημι ενεργού ελέγχου.

Επισημαίνεται ότι και οι τρεις προσεγγίσεις που έγιναν με τους αντιστοίχους αλγορίθμους ελέγχου συνδέονται από ένα κοινό χαρακτηριστικό. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ότι η στρατηγική ελέγχου και στις τρεις προσεγγίσεις στηρίζεται κάθε φορά στα δυναμικά χαρακτηριστικά του σήματος το οποίο διεγείρει την κατασκευή.

Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο έλεγχος των κατασκευών δεν αντικαθιστά τον αντισεισμικό σχεδιασμό, όπως αυτός αποτυπώνεται στους τελευταίους κανονισμούς, αλλά εισαγάγει μία εναλλακτική φιλοσοφία αντιμετώπισης του προβλήματος, προσπαθώντας να περιορίσει τις αναμενόμενες βλάβες και να αποφευχθεί η ανάγκη επισκευής της κατασκευής. Εάν ο έλεγχος αστοχήσει, τότε το δεύτερο επίπεδο ασφάλειας που έρχεται μέσα από την κλασική φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού (απορρόφηση ενέργειας σε συγκεκριμένες θέσεις της κατασκευής) μπορεί πάλι να τεθεί σε λειτουργία και να αποφευχθεί η απώλεια ανθρώπινης ζωής. Η διδακτορική διατριβή τελειώνει με την ελπίδα ότι συνεισέφερε στην όσμωση μεταξύ της δυναμικής των κατασκευών και της θεωρίας ελέγχου συστημάτων και φυσικά αναγνωρίζοντας ότι μένουν ακόμη πολλά βήματα να γίνουν μέχρι να επιτευχθεί ένας τέλειος συγκερασμός.

6.2 Πρωτότυπη συμβολή της διδακτορικής διατριβής

Η συμβολή αυτής της διδακτορικής διατριβής στον έλεγχο των κατασκευών συνοψίζεται στα εξής:

- Προτείνεται μία συστηματική και αυτόματη διαδικασία υπολογισμού των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής. Αυτή η διαδικασία στηρίζεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά της εισερχομένης διέγερσης και, όταν συνδυαστεί με το αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων, αποτελεί έναν προσαρμοστικό αλγόριθμο, ο οποίος προσαρμόζεται κάθε φορά στα χαρακτηριστικά της διέγερσης που καταπονεί την κατασκευή. Τα βασικά στοιχεία της προτεινόμενης διαδικασίας επιλογής των πόλων είναι ο μετασχηματισμός της κατασκευής και της φόρτισης στο μιγαδικό επίπεδο, η χρήση απλών κανόνων που διαμορφώθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για αποφυγή συντονισμού και προσθήκη ισοδύναμης απόσβεσης, και ο τελικός υπολογισμός της θέσης των πόλων της ελεγχόμενης κατασκευής. Η νέα θέση των πόλων, έχει σαν αποτέλεσμα την αποφυγή συντονισμού της κατασκευής με τη διέγερση και την επαρκή ισοδύναμη απόσβεση του συστήματος ελέγχου.
- Τροποποιείται ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης, συμπεριλαμβάνοντας την προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των πόλων ως στοιχείο στον αλγόριθμο μορφής ολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, η εύρεση της επιφάνειας ολίσθησης γίνεται με την προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των πόλων. Με βάση τη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης καθορίζεται η δυναμική του συστήματος και ο δρόμος του προς το σημείο ισορροπίας.
- Προτείνεται μια στρατηγική ελέγχου για συστήματα μεταβλητής δυσκαμψίας. Βασικό στοιχείο της στρατηγικής ελέγχου αποτελεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος ελέγχου μεταβλητής δυσκαμψίας. Ο αλγόριθμος αυτός στηρίζεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά του εισερχόμενου σήματος και στη σχέση τους με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της

κατασκευής, με η χωρίς τη λειτουργία των συσκευών μεταβλητής δυσκαμψίας. Επεκτείνεται η έννοια του μη συντονισμού, σύμφωνα με την οποία η ελεγχόμενη κατασκευή δεν αποφεύγει συγκεκριμένες συχνότητες της διέγερσης, αλλά ένα παράθυρο σημαντικών συχνοτήτων. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος δυσκαμψίας.

Τέλος, με βάση τα παραπάνω, προτείνεται μια γενικότερη στρατηγική ελέγχου, η οποία προσαρμόζεται κάθε φορά στα χαρακτηριστικά της διέγερσης που επιβάλλεται στην κατασκευή. Για την υλοποίηση της στρατηγικής ελέγχου, απαραίτητο εργαλείο είναι η δυναμική ανάλυση ελέγχου, όπου οι εξισώσεις ισορροπίας είναι διαφορικές εξισώσεις με χρονική καθυστέρηση, οι οποίες εμπεριέχουν και τη μη γραμμική συνάρτηση της δύναμης ελέγχου (συνάρτηση κορεσμού, on-off κτλ). Για την επίλυση των εξισώσεων αυτών και την αριθμητική προσομοίωση της δυναμικής ανάλυσης ελέγχου, αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό, που αποτελεί απαραίτητο εργαλείο, πριν την πειραματική ή πρακτική εφαρμογή του συστήματος ελέγχου σε μια κατασκευή.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Οι προτεινόμενες στη διατριβή στρατηγικές ελέγχου τεκμηριώθηκαν σε υπολογιστικό επίπεδο με χρήση προσομοιωμάτων επίπεδων πλαισίων, με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το επόμενο βήμα πρέπει να είναι να προσομοιωθούν κατασκευές με συστήματα ελέγχου στο χώρο. Οι δυναμικοί βαθμοί ελευθερίας κίνησης και στροφής του συστήματος θα είναι εντός και εκτός επιπέδου. Έτσι θα μπορεί να προσομοιωθεί η επιρροή του ελέγχου και σε μη συμμετρικά κτίρια, τα οποία είναι η πλειονότητα των υπαρχόντων κτιρίων.

Ένα επόμενο βήμα πρέπει να είναι η πειραματική τεκμηρίωση των παραπάνω στρατηγικών ελέγχου. Με την πειραματική τεκμηρίωση θα προκύψει μια ολοκληρωμένη εικόνα της αποτελεσματικότητας των αλγορίθμων, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί το μεθεπόμενο βήμα για την πρακτική εφαρμογή των προτεινόμενων αλγορίθμων σε πραγματικές κατασκευές. Με την πειραματική εφαρμογή θα μελετηθούν με περισσότερη αξιοπιστία πρακτικά ζητήματα, όπως αυτά της χρονικής καθυστέρησης, κορεσμού της δύναμης, ύπαρξη θορύβων και χρήση κατάλληλων φίλτρων.

Ακόμη, πρέπει να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων με τη χρήση λιγότερων αισθητήρων, σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος, με τη βοήθεια ενός παρατηρητή (observer). Επίσης, με την πειραματική εφαρμογή μπορούμε να έχουμε μια καλύτερη εικόνα της αξιοπιστίας του συνολικού συστήματος ελέγχου εφαρμόζοντας διάφορα σενάρια αστοχίας των στοιχείων που αποτελούν το σύστημα (αστοχία συσκευών, μετρήσεων).

Σε θεωρητικό επίπεδο θα μπορούσε επίσης να εξεταστεί και να ελεγχθεί, για την προτεινόμενη μεθοδολογία υπολογισμού των πόλων του συστήματος, αν οι καινούριες θέσεις των πόλων είναι τέτοιες, ώστε να μην προκληθούν εσωτερικοί συντονισμοί. Δηλαδή, στόχος θα είναι οι πόλοι να έχουν τέτοιες θέσεις, ώστε το σύστημα να αποφύγει τον κλασικό συντονισμό, όπως το πετυχαίνει τώρα, αλλά και να μην δοκιμάσει εσωτερικούς συντονισμούς, δηλαδή να συντονίζεται με συχνότητες διέγερσης μικρότερες ή μεγαλύτερες από τις ιδιοσυχνότητές του. Μια πρώτη σκέψη, προς αυτή την κατεύθυνση η οποία πηγάζει από την θεωρία της μη γραμμικής δυναμικής, είναι να διερευνηθεί εάν ο λόγος των ιδιοσυχνοτήτων που αντιστοιχούν στους πόλους της ελεγχόμενης κατασκευής προς το λόγο των συχνοτήτων του σεισμού, είναι περίπου ακέραιος αριθμός ή όχι.

Επιπλέον, θα μπορούσε να διερευνηθούν εκτενέστερα οι τιμές των παραμέτρων του εύρους της μη ασφαλούς περιοχής και του ισοδυνάμου ποσοστού απόσβεσης. Οι προτεινόμενες σχέσεις που δίνουν τους παραπάνω παραμέτρους προέκυψαν από παραμετρική ανάλυση μονοβαθμίου συστήματος και μπορεί να τροποποιηθούν ύστερα από τη μελέτη πολυβαθμίων συστημάτων.

Άλλο πεδίο μελλοντικής έρευνας είναι τα κριτήρια επιλογής των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος. Στην παρούσα διατριβή ως κριτήρια εύρεσης της θέσης των πόλων ορίστηκαν, πρώτον, η επιθυμητή (από τον χρήστη – μελετητή μηχανικό) μείωση της σχετικής μετακίνησης ορόφων από την μετακίνηση συντονισμού x, και στη συνέχεια η επιπλέον επιθυμητή μείωση της απόκρισης λόγω προσθήκης ισοδύναμης απόσβεσης, x_d. Με χρήση αυτών των κριτηρίων αποδείχθηκε η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου και η ικανότητά του να απομειώνει επαρκώς την απόκριση της κατασκευής, όταν αυτή υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση. Καταλληλότερο βεβαίως κριτήριο εύρεσης της θέσης των πόλων, ώστε να μπορεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος να ενταχθεί στη διαδικασία σχεδιασμού θα ήταν η απαίτηση τόσης μείωσης της απόκρισης της ελεγχόμενης κατασκευής, ώστε αυτή να μην υπερβαίνει τα

καθοριζόμενα από τους ισχύοντες κανονισμούς όρια αστοχίας ή λειτουργικότητας. Προσαρμογή του αλγορίθμου σε κριτήρια αυτού του τύπου θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας

Ακόμη θα μπορούσε να διερευνηθεί ένας ακριβέστερος υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος. Στην παρούσα διατριβή υπολογίστηκε η ισχύς με δυο τρόπους, ο πρώτος ως το γινόμενο της δύναμης ελέγχου επί της ταχύτητας του ελεγχόμενου συστήματος και ο δεύτερος ως το γινόμενο της δύναμης ελέγχου επί τη διαφορά των ταχυτήτων του μη ελεγχόμενου από το ελεγχόμενο σύστημα. Με βάση τους δυο αυτούς τρόπους βρέθηκαν τα κάτω και άνω όρια της απαιτούμενης ισχύος. Ένας άλλος τρόπος που θα μπορούσε να εξεταστεί για τον υπολογισμό της ισχύος είναι ως το γινόμενο της δύναμης ελέγχου με τη διαφορά των ταχυτήτων του μη ελεγχόμενου από το ελεγχόμενου από το ελεγχόμενο συστήματα όπου η ταχύτητα του ελεγχόμενου συστήματος υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα με αρχικές συνθήκες την κατάσταση του μη ελεγχόμενου συστήματος στο τέλος του προηγούμενου χρονικού βήματος.

Η μελλοντική έρευνα στον αυτόματο έλεγχο των κατασκευών πρέπει παράλληλα να κινηθεί και στο τεχνολογικό επίπεδο. Είδαμε ότι ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου αποτελείται από τρία ολοκληρωμένα και συνεργαζόμενα επιμέρους υποσυστήματα, το σύστημα ενόργανης καταγραφής, το σύστημα επεξεργασίας και το σύστημα εφαρμογής κάποιων εντολών. Για την υλοποίηση καθενός από αυτά τα συστήματα απαιτούνται αξιόπιστες συσκευές που να εκτελούν ακαριαία το σκοπό τους με την ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Η ανάπτυξη περισσότερο αποτελεσματικών αισθητήρων και ηλεκτρονικών υπολογιστών που διαχειρίζονται γρήγορα και σε μεγάλο όγκο δεδομένα, καθώς και ο σχεδιασμός καλύτερων συσκευών που εφαρμόζουν με έμμεσο τρόπο δυνάμεις στην κατασκευή, είναι θέματα που θα κρίνουν την πορεία του αυτομάτου ελέγχου στις κατασκευές στο μέλλον.

Η περιοχή του αυτομάτου ελέγχου στις κατασκευές έχει πολύ δρόμο να διανύσει μέχρι να δούμε αξιόπιστα και αποτελεσματικά συστήματα να εφαρμόζονται ευρέως σε κατασκευές πραγματικής κλίμακας. Όμως σημασία έχει το γεγονός ότι, έχει ξεκινήσει να στρέφεται η προσοχή μας, για τον σχεδιασμό των κατασκευών, σε έναν δρόμο όπου κυρίαρχη προτεραιότητα είναι ο έλεγχος των ταλαντώσεων και των μετακινήσεων, παρά ο σχεδιασμός της κατασκευής με βάση την αντίσταση της σε δυναμικές φορτίσεις.

ПАРАРТНМА А

Μοντέλα προσομοίωσης

Προσομοίωματα κτιρίων που χρησιμοποιήθηκαν για την τεκμηρίωση της διδακτορικής διατριβής.

Α.1. Μονώροφο κτήριο

i) Δυναμικά χαρακτηριστικά



Ιδιοπερίοδος	: 0.2s
Ιδιοσυχνότητα	$: 5 \text{ sec}^{-1}$
Ποσοστό απόσβεσης	: ζ=0.05
Πόλοι συστήματος	: n=-2±31.35i

ii) Περιπτώσεις τοποθέτησης συσκευών ελέγχου



Α.2. Τριώροφο κτήριο

i) Δυναμικά χαρακτηριστικά



ii) Περιπτώσεις τοποθέτησης συσκευών ελέγχου



Α.3. Οκταώροφο κτήριο

i) Δυναμικά χαρακτηριστικά



ii) Περιπτώσεις τοποθέτησης συσκευών ελέγχου



ПАРАРТНМА В

Δυναμικές διεγέρσεις

Στο παράρτημα φαίνονται τα χαρακτηριστικά σεισμών, από τον ελληνικό χώρο και το εξωτερικό, καθώς και ημιτονικών σημάτων και παλμών που χρησιμοποιήθηκαν για την τεκμηρίωση της διδακτορικής διατριβής.

ONOMA	Μέγιστη εδ. επιτάχυνση PGA (g)	Μέγιστη εδ. ταχύτητα PGV (cm/s)	Μέγεθος (Richter)	Απόσταση (km)	Σταθμός Συνιστώσα
Καλαμάτα 12-9-1986	0.273	23.6	6.2	4	EW
Αλκυονίδες 24-2-1981	0.30	24.4	6.7	32	Trans
Αίγιο 15-6-1995	0.54	48.1	6.2	18	N150
Αθήνα 7-9-1999	0.53	32.3	6.9	12	ΚΕΔΕ
Κοζάνη 17-5-1995	0.036	1.2	5.3	70	Γρεβενά
Loma Prieta 18-10-1989	0.27	31.2	6.9	22	Outer Harbor Wharf
Imperial Valley 15-10-1979	0.45	112.54	6.6	27	El Centro USGS 5028 32 49 44N, 115 30 14W
Mexico City 19-9-1995	0.89	38.7	8.1		
Kobe 16-1-1995	0.82	81.3	6.9	0.6	KJMA
Duzce 11-12-1999	0.53	83.5	51.59	8.2	Duzce

Πίνακας Β.1. Σεισμικές καταγραφές και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα Β. 1. Σεισμός Καλαμάτας, επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.2. Σεισμός Αλκυονίδων, επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα Β.3. Σεισμός Αιγίου, επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα Β.4. Σεισμός Αθήνας, επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.5. Σεισμός Κοζάνης, επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.6. Σεισμός Loma Prieta, επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.7. Σεισμός Imperial Valley (El Centro), επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.8. Σεισμός Mexico, επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.9. Σεισμός Kobe, επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.10. Σεισμός Duzce, επιταχυνσιογράφημα (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.11. Ημιτονική φόρτιση με T=0.2s, επιτάχυνση (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.12. Ημιτονική φόρτιση με T_1 =0.2s και T_2 =0.1s, επιτάχυνση (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).



Σχήμα B.13. Παλμική φόρτιση με $T_p=0.8$ s, $\omega_p=2\pi/T_p$, $u_p=1.75$ m/s, $\varphi=0.0697$, επιτάχυνση (α), φάσμα του σήματος (β) και φάσμα απόκρισης (γ).

Αναφορές

- 1. Aderson B. D. and Moore J. B., Linear optimal control, Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.
- 2. Akbay Z, Aktan HM. Abating earthquake effects on buildings by active slip brace devices. Shock and Vibration vol.2 pp.133 –142, 1995.
- 3. Anand D. K., Introduction to control systems, Pergamon Press, New York 1974.
- 4. ATC 17-1. (1993) Proceedings of seismic isolation passive energy dissipation and active control. Redwood city, CA .Applied technical council.
- 5. Athans M. and Falb P., Optimal control, McGraw–Hill, New York, 1966.
- 6. AtkinsonP. Feedback control theory for engineers, Heineman educational books, London, 1972.
- 7. Auricchio F, Faravelli L, Magonette G, Torra V. Shape Memory Alloys. Advances in Modelling and Applications. CIMNE: Barcelona, Spain, 2001.
- 8. B. F. Spencer Jr, S. J. Dyke and H. S. Deoskar, "Benchmark problems in structural control. Part I D Active mass driver system", Earthquake Engng Struct. Dyn. Vol.27, pp.1127-1139, 1998.
- 9. Bakalis Dimitrios, "Seismic Isolation of an Existing Building, Design–Analysis– Implementation" Graduate thesis, supervisor Koumousis V., July 2003.
- Battaini, M., Casciati, F., and Faravelli, L. "Implementing a Fuzzy Controller into an Active Mass Damper Device." 16th American Control Conference, Albuquerque, New Mexico, pp.888-892, 1997.
- 11. Berg G. V., Elements of structural dynamics, Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- 12. Biggs J. M., Introduction to structural dynamics, McGraw-Hill, New York, 1964.
- 13. Blevins R.D., Formulas for natural frequency and mode shape, Van Nostrand, New York, 1979.
- 14. Blume J. A., Newmark N. M. and Corning L., Design of multistory reinforced concrete buildings for earthquake motions, Portland cement association, Chicago 1961.

- 15. Booth E.D., Earthquake Design Practice for Buildings, Thomas Telford Ltd; 2Rev Ed edition, 2005.
- Bouckovalas G. D., Papadimitriou (2005), "Multi-variable relations for soil effects on peak seismic motion parameters", Technika Chronika, eds. Technical Chamber Greece, 25(1): 9 – 22, Jan – Apr.
- 17. Brewer J. W., Control systems analysis design and simulation, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1974.
- 18. Brockett R. W., "Poles, zeros and feedback: state space interpretation", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC- 10, pp.129-135, 1965.
- 19. Brogan W. L., "Application of determinant identity to pole-Assignment and observer problems." *IEEE Transactions on automatic control* AC-19: pp.689-692, 1974.
- 20. Brogan W. L., Modern control theory, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- 21. Cai GP, Huang JZ, Sun F, Wang C. Modified sliding mode bang-bang control for seismically excited linear structure. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 29:1647-1657, 1997.
- 22. Casciati S. Computational aspects in retrofitting cracker stone structures by SMA devices. In Proceedings of the 13th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Breitbach E, Campanile LF, Monnier HP (eds), CRC Press: Boca Raton, pp.541–551, 2002.
- 23. Casciati F and Yao T. "Comparison of strategies for the active control of civil structures.", Proceedings first world conference structural control, WA1. 3-12, 1994
- 24. Charles K. Erdey, Earthquake Engineering: Application to Design, John Wiley & Sons Inc, 2007.
- 25. Chen W.F., Charles Scawthorn "Earthquake Engineering Handbook (New Directions in Civil Engineering), CRC Press 2003.
- 26. Chopra A.K, Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1990.
- Ciampi V, De Angelis M, Renzi E. Optimal semi active and passive control of the seismic response of coupled framebracing systems. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering 12WCEE, paper 2288. CD-ROM Auckland, 30 January–4 February 2000.

- 28. Clark R. N., Introduction to automatic control systems, John Wiley, New York, 1962.
- 29. Clough R.W., Penzien J., Dynamics of structures second edition McGraw Hill, 1993.
- 30. Connor J. J., Introduction to Structural Motion Control (Mit-Prentice Hall Series on Civil, Environmental, and System), Prentice Hall, 2002.
- 31. Constantinou M., Soong T. and G.Dargush, Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit, MCEER, Monograph No 1, 1998.
- 32. Damon G. Reigles and Michael D. Symans, Supervisory fuzzy control of a baseisolated benchmark building utilizing a neuro-fuzzy model of controllable fluid viscous dampers Structural Control and Health Monitoring, 2006; 13:724–747
- 33. David E. Key, Earthquake Design Practice for Buildings, Institution of Civil Engineers, 1988.
- 34. Dorf R. C. Modern control system Addison-Wesley, London, 1974.
- Dyke SJ, Spencer BF, Sain MK, Carlson JD. Experimental verification of semi-active structural control strategies using acceleration feedback. Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, 1–6 September 1996, 3:291–296.
- 36. Dyke SJ, Spencer Jr BF, Sain MK, Carlson JD. An experimental study of MR dampers for seismic protection. Smart Materials and Structures 1998; 7:693 –703.
- Dyke SJ, Spencer Jr BF, Sain MK, Carlson JD. Seismic response reduction using magnetorheological dampers. Proceedings of the IFAC World Congress, San Francisco, CA, 30 June–5 July 1996.
- Dyke SJ, Spencer Jr BF. Seismic response control using multiple MR dampers. Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Control, Hong Kong, 1996; 163–173.
- Dyke SJ, Yi F, Carlson JD. Application of magnetorheological dampers to seismically excited structures. Proceedings of the International Modal Analysis Conference, Kissimmee, FL, 8–11 February 1999.
- Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1996c). "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction," *Smart Materials and Structures*, Institute of Physics, Vol. 5, pp. 565–575.

- 41. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K., and Carlson, J.D. (1998). "An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection," *Smart Materials and Structures: Special Issue on*
- 42. Evans W. .R., Control systems dynamics, McGraw-Hill, New York, 1954.
- 43. Faravelli L, Casciati S. Dynamic behavior of shape memory alloy structural devices: numerical and experimental investigation. In Proceedings of the IUTAM Symposium on Dynamics of Advanced Materials and Smart Structures, Watanabe K, Ziegler F (eds), Yonezawa: Japan; Kluwer: Dordrecht, 2002; 63–72.
- 44. Faravelli L, and Yao T. "Applications of an adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) to active structural control.", Proceedings first world conference structural control, WP1. 49-58, 1994
- 45. Fitzgerald TF, Anagnos T, Goodson M, Zsutty T. Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections. Earthquake Spectra; 5(2):383–391, 1992.
- 46. Friedland B. Control system design. An introduction to state space methods, McGraw-Hill, New York, 1987.
- 47. Fujita T., Shimazaki M., Yutaka H., Aizawa S., Higashino M., Haniuda N. Semiactive seismic isolation system using controllable friction damper. *Bulletin of earthquake resistant structure research center*, No 27; 21-31, 1994.
- 48. Fuller A. T. "The early development of control theory", Transactions ASME, Journal of dynamic systems, Measurement & control, Vol. 96G, pp.109-118, 1976.
- 49. Gavin, H. P., Hanson, R. D., and Filisko, F. E. "Electrorheological Dampers, Part I: Analysis and Design." *Journal of Applied Mechanics*, vol.63, pp.669-675, 1996.
- 50. Gavin, H. P., Hanson, R. D., and Filisko, F. E. "Electrorheological Dampers, Part II: Testing and Modeling." *Journal of Applied Mechanics*, vol. 63, pp.676-682, 1996.
- 51. Gibson G. E. Nonlinear automatic control, McGraw-Hill, New York, 1963.
- Gluck N, Reinforn AM, Gluck J, Levy R. Design of supplemental dampers for control of structures. Journal of Structural Engineering, vol.122, pp.1394 –1399, 1996.
- 53. Haroun, M. A., Pires, J. A., and Won, A. Y. J. "Active Orifice Control in Hybrid Liquid Column Dampers." *First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, CA, FA1-69 FA1-78. 1994.

- 54. Harris Gyril, Shock and vibration handbook 3rd ed. McGraw–Hill, New York, 1987.
- 55. Hart, G. C. and Englekirk R. E., Earthquake design of concrete masonry buildings: response spectra analisys and general earthquake modeling consideration, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982.
- 56. Housner G. W., Design spectrum in earthquake engineering, Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1970.
- Housner, G. W., Bergman, L.A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Spencer, Jr. B. F., and Yao, J. T. P., (1997). "Structural Control: Past, Present and Future." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 9, pp. 897–971.
- Hrovat, D., Barak, P., and Rabins, M. "Semi-Active Versus Passive or Active Tuned Mass Dampers for Structural Control." Journal of Engineering Mechanics, vol.109, pp.691-705, 1983.
- Hu Z., A. K. Agrawal, J. N. Yang, 'Semi active and passive control of phase I linear base isolated benchmark building.' Structural Control and health monitoring, vol 13, pp.589-604, 1999.
- 60. Hummar J. L. Dynamics of structures, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.
- 61. Inaudi JA, Hayen JC. Research on variable-structure systems in the US. Proceedings of the International Post-Smirt Conference and Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Control of Structures, Santiago, Chile, August 1995; 591–622.
- 62. Inaudi JA. Modulated homogeneous friction: a semi-active damping strategy. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1997; 26:361–376.
- 63. Jan Holnicki-Szulc, Jacet T. Gierlinski, "Structural Analysis, Design and Control by the Virtual Distortion Method", Wiley 1995.
- 64. Jansen LM, Dyke SJ. Semiactive control strategies for MR dampers: Comparison study. Journal of Engineering Mechanics (ASCE) 2000; 126(8):795–803.
- 65. Johnson J. G., L. D. Reaveley, and C. P. Pantelides 'Rooftop tuned mass damper frame' Proceedings 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Limassol, 29 June 1 July, pp. 257-264, 2005.
- 66. Johnson, E. A., Baker, G. A., Spencer Jr., B. F., and Fujino, Y. "Semiactive Damping of Stay Cables." http://cee.uiuc.edu/sstl/default.html. 2002.

- 67. Johnson, E. A., Christenson, R. E., and Spencer Jr., B. F. "Semiactive Damping of Cables with Sag." *International Conference on Advances in Structural Dynamics*, Hong Kong, pp.327-334, 2000.
- Johnson, E. A., Christenson, R. E., and Spencer Jr., B. F. "Smart Stay Cable Damping - Effects of Sag and Inclination." 8th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'01), Newport Beach, CA. 2001.
- 69. Kalman R. E. "Mathematical description of linear dynamic systems", SIAM, Journal on Control, Vol. 1, pp.152-192, 1963.
- 70. Kareem A. Kline S. Performance of multiple mass dampers under random loading. Journal of structural engineering, ASCE, 121:348-362, 2000.
- 71. Karnopp DC, Crosby MJ, Harwood RA. Vibration control using semi active force generation. Journal of Engineering for Industry (ASME) 1974; 96(2):619–626.
- 72. Kautsky, J. and Nichols N.K, "Robust Pole Assignment in Linear State Feedback", *Int. J. Control*, 41: 1129-1155, 1985.
- 73. Kaynia, A.M., Veneziano, D., Biggs, J.M., "Seismic effectiveness of tuned mass dampers," J. of the Structural Division, ASCE, vol.107, pp. 1465-1484, 1981.
- 74. Kelly JM Earthquake Resistant Design with Rubber, Springer-Verlag, Second Edition, 1997.
- Kiureghian A. D., A response spectrum method for random vibration, Report No. UCB/EERC – 80/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berceley, CA, 1980.
- 76. Kobori T, Takahashi M, Nasu T, Niwa N. Seismic response controlled structure with active variable stiffness systems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1993; 22:925–941.
- 77. Kobori T., Experimental study on active variable stiffness system- active seismic response controlled structure, *Proc.* 4th World Congr. Council on Tall Buildings and Urban Habitat; 561-572, 1990.
- 78. Kobori T., Kamagata S., Active variable stiffness system- active seismic response control, *Proc. U.S.-Italy-Japan Workshop/Symposium on Structural Control and Intelligent Systems*, G.W. Housner, S. F. Marsi, F. Casciati and H. Kameda Editors; 140-153, 1992.

- 79. Kobori T., New philosophy of aseismic design –approach on dynamic intelligent building system, *Proc. Annual Meeting of Architectural Institution of Japan*; 837-838, 1986.
- 80. Kobori, T., Koshika, N., Yamada, K., Ikeda, Y. (1991). "Seismic response controlled structure with active mass driver system Part 1." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **20:2**, 133-149.
- 81. Komodromos P., Seismic Isolation for Earthquake-resistant Structures (Advances in Earthquake Engineering), WIT Press, 2000.
- Koumousis V., Michou, F., "Modelling of Friction Pendulum Isolation Systems to Account for Different Types of Contact of the Articulated Part", Proc. of the 7th Int. Conf. on Computational Structures Technology, B.H.V. Topping and C.A. Mota Soares, (Editors), Civil-Comp Press, Stirling, United Kingdom, paper 268, 2004.
- 83. Kurata N, Kobori T, Takahashi M, Niwa N, Kurino H. Shaking table experiment of active variable damping systems. Proceedings of the 1st World Conference on Structural Control, Los Angeles, 1994; 2:TP2/108–117.
- 84. Kurata, N., Kobori, T., Takahashi, M., Niwa, N., Midorikawa, H. "Actual seismic response controlled building with semi-active damper system." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28:11**, 1427-1447, 1999.
- 85. Kwon WH, Pearson AE. Feedback Stabilization of linear systems with delayed control. IEEE Trans automat Control; AC -25(2):266-269, 1980.
- 86. Laub, A.J. and Wette M. Algorithms and Software for Pole Assignment and Observers. UCRL-15646 Rev. 1, EE Dept., Univ. of Calif., Santa Barbara, C. 1984.
- Lee GC, Liang Z, Tong M. Development of a semi-active structural control system. Research Progress and Accomplishments 1997–1999. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research MCEER, SUNY at Buffalo, NY (USA), July 1999. <u>http://mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/9799/default.asp [19 March 2003]</u>.
- 88. Lee S.H., Min K.W., Lee Y.C., Chung L. Improved design of sliding mode control for civil structures with saturation problem. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 33:1147-1164, 2004.
- 89. Leipholz H. H. E., Abdel-Rohman M. "Control of structures", Martinus Nijhoff Publishers, 1986.
- 90. Lin PY, Chung LL, Loh CH, Cheng CP, Roschke PN, Chang CC. Experimental study of seismic protection for structures using MR dampers. Proceedings of the 12th

European Conference on Earthquake Engineering, London, September 2002, paper 249. CD-ROM.

- Loh C., Ma M., Active damping or active stiffness control for seismic excited buildings. Proceedings of first world conference on structural control, Los Angeles, CA, 1994; TA2:11-20.
- 92. Lyan-Ywan Lu Predictive control of seismic structures with semi-active friction dampers, Earthquake engineering and structural dynamics, vol. 33, pp. 647–668, 2004.
- 93. Lynch, J. P., and Law, K. H. "Formulation of a market-based approach for structural control." *Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference*. Society of Engineering Mechanics, Bethel, CT, pp.921-927, 2001.
- 94. Lynch, J. P., and Law, K. H., "Decentralized Control Techniques for Large-Scale Civil Structural Systems." *Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference*. Society of Engineering Mechanics, Bethel, CT., pp.928-938, 2002.
- 95. Makris N., Hill D., Burton S., Jordan M. Electrorheological fluid damper for seismic protection of structures. *Proceedings of the smart structures and materials*, San Diego CA,; .2443:184-94, 1995.
- Makris N., C. J. Black, 'Evaluation of peak ground velocity as a good intensity measure for near-source ground motions' Journals of engineering mechanics Vol.130; pp1032-1044, 2004.
- 97. Makris, N., Burton, S. A., Hill, D., and Jordan, M. "Analysis and Design of ER Damper for Seismic Protection of Structures." *Journal of Engineering Mechanics*, vol.122, pp.1003-1011, 1996.
- 98. Malhotra PK "Dynamics of seismic impacts in base-isolated buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 797-813, 1997.
- 99. Masahiko Higashino, Shin Okamoto, Taiki Saito, Wei-Qing Liu, Hui Li, Response Control and Seismic Isolation of Buildings (Cib Proceedings), Taylor & Francis, First edition, 2004.
- 100. MATLAB. The Math Works Inc. Natick, Massachusetts, 1994
- 101. Mattei M. Ricciardelli F. Mathematical model for design of Mass Dampers for wind excited structures. Journal of engineering Mechanics, ASCE, 128:979-988, 2002.
- 102. Meirivitch Leonard, Dynamics and control of structures, John Wiley &Sons. Inc. 1990.

- Naeim F., J. M. Kelly 'Design of seismic isolated structures from theory to practice', John Wiley & Sons. Inc. 1999.
- 105. Naeim Farzad, The seismic design handbook Van Nostrand reinhold, New York, 1989.
- 106. Nagarajaiah S, Xiaohong S "Base-Isolated FCC Building: Impact Response in Northridge Earthquake", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 9, pp. 1063-1075, 2001.
- Nagarajaiah S., Semi active control of structures. Proceedings of structures congress XV, ASCE, Portland, OR; 1574-78, 1997.
- Nagarajaiah, S. "Fuzzy Controller for Structures with Hybrid Isolation System." *First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, CA, TA2-67-TA2-76, 1994.
- Narasimhan, S. Nagarajaian, 'Smart base isolated benchmark building. Part II phase I sample controllers for linear isolation systems' Structural Control and health monitoring, vol 13, pp.589-604.
- 110. Narasimhan, S. Nagarajaian, E. A. Jonson, H. P. Gavin 'Smart base isolated benchmark building. Part I problem definition' Structural Control and health monitoring, vol 13, pp.573-588.
- 111. Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Gavin, H., and Johnson, E. A., "Benchmark Problem for Control of Base Isolated Buildings," Proc. of 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, New York, NY, June 2-5. 2002.
- 112. Nashif A. D. Jones D. I. C. and Henderson J. P., Vibration Damping, Wiley, New York, 1985.
- Nasu T., Kobori T., Niwa N., Ogasawara K., "Active variable stiffness system with non-resonant control", Earthquake Engineering and Structural Dynamics; Vol. 30, pp.1597-1614, 2001.
- 114. Nemer D.C., Lin Y., Osegueda R.A., Semiactive motion control using variable stiffness. Journal of structural engineering;22:925-941, 1994.
- 115. Newland D.E. Random vibrations spectral and wavelet analysis; 3rd edn, Longman, London, 1994.
- 116. Ogata K. "Discrete time control systems", Prentice Hall International Inc. 1995.

- 117. Ogata K., *Modern control engineering*, 3rd edition Prentice Hall International Inc. 1997.
- 118. Pantelides CP, Ma X "Linear and nonlinear pounding of structural systems", Computers and Structures, Vol. 66, No. 1, pp. 79-92, 1997.
- 119. Pantelides CP, Tzan SR. Convex model for seismic design of structures—I: Analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.25, pp.927–944, 1996.
- Paraskevopoulos P. N. and Tzafestas S.G. "New results on feedback modal controller design", International Journal on Control, Vol. 24, pp.209-216, 1976.
- 121. Patten WN, Sun J, Li G, Kuehn J, Song G. Field test of an intelligent stiffener for bridges at the I-35 Walnut Creek Bridge. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1999; 28(2):109–126.
- Paulay T., M. J. N. Priesley 'Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα', Εκδόσεις κλειδάριθμος 1999.
- Paulay Thomas, M. J. N. Priestley, Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, Wiley-Interscience, 1992.
- 124. Paz M. William Leigh, Structural Dynamics: Theory and Computation, fifth edition, Springer, 2006.
- 125. Paz Mario, International Handbook of Earthquake Engineering: Codes, programs, and examples Springer; fist edition, 1995.
- 126. Penelis G.G., Kappos A., Earthquake Resistant Concrete Structures, Spon Press, 1996.
- Pinkaew T. Lukkunaprasit P. Chatupote P. Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures. Engineering structures, Elsevier, 25: 39-46, 2003.
- 128. Pnevmatikos N.G., Kallivokas L.F. and Gantes C.J., Feed-forward control of active variable stiffness systems for mitigating seismic hazard in structures. Engineering structures;26: 471-183, 2004.
- 129. Pontryagin L. S., The mathematical theory of optimal processes, Interscience Publishers, New York, 1968.
- 130. Popov E. P. and Bertero V. V., Seismic analysis of some steel building frames, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1980; 106:75-93.
- 131. Qing S., Ling Z., Jinxiong Z., Qingxuan S., Experimental study of the semi-active control of building structures using the shaking table. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 32:2353-2376, 2003.
- 132. Ramallo, J. C., Johnson, E. A., and Spencer, B. F., "'Smart' Base Isolation Systems", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.128, No. 10, pp. 1088-1099, 2002.
- Renzi E, De Angelis M, Ciampi V. Optimal semi-active control of MDOF structures. Proceedings of the 5th European Conference on Structural Dynamics, Munich, 2–5 September 2002; 2:991–996.
- 134. Renzi E. Semi-active control of Structural Vibrations: Theory and Applications. PhD Dissertation, Department of Structural and Geotechnical Engineering, University of Rome 'La Sapienza', December 2001 (in Italian).
- 135. Renzi E. Serino G. Testing and modeling a semi-actively controlled steel frame structure equipped with MR dampers. *Structural Control Health Monitoring* 2004; 11:189–221.
- 136. Ruangrassamee A, Kawashima K. Semi-active control of bridges with use of magnetorheological damper. Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, September 2002, paper 171. CD-ROM.
- 137. Sack R.L., Patten W. Semiactive hydraulic structural control. Proc. International Workshop on structural control USC Publication pp.417-431 Honolulu, Hawaii, 1993.
- 138. Sadek F., B. Mohraz, H. S. Lew, 'Single and multiple liquid column dampers for seismic applications' NISTIR 5920, U.S. Department of commerce, Technology administration and National Institute of standards 1999.
- Sang-Hyun Lee, Dong-In Son, Jinkoo Kim and Kyung-Won Min Optimal design of viscoelastic dampers using eigenvalue assignment, Earthquake engineering and structural dynamics, vol. 33, pp.521–542, 2004.
- 140. Sarbjeet S., Datta T. K. Non linear sliding mode control of seismic response of building frames. Journal of engineering mechanics; 126 (4): 340-347, 2000.
- 141. Serino G, Occhiuzzi A, Georgakis CT. Experimental study and perspectives of semiactive oleodynamic devices for seismic protection of structures. Experimental investigations of semi-active and passive systems for seismic risk mitigation, CAFEEL-ECOEST2/ICONS Report 7, Part 1, June 2001, Franchioni G (ed.), Laborat"orio Nacional de Egenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- 142. Serino G, Spizzuoco M. About the design of passive and semi-active MR dampers for seismic protection of buildings. Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, September 2002, paper 709. CD-ROM.

- Shampine L.F. and S. Thompson, "Solving DDEs in MATLAB," Applied Numerical Mathematics, Vol. 37, pp. 441-458, 2001.
- 144. Shukla AK, Datta TK. Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic response. Journal of Structural Engineering, vol.125, pp.401–409,1999.
- 145. Sigkas Konstantinos, "Investigation of the influence of masonry infills in base isolated buildings" Graduate thesis, supervisor Koumousis V., July 2003.
- 146. Singh M., Singh S., Moreschi L., Tuned mass dampers for response of torsional buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 32:749-769, 2002.
- 147. Singh MP, Moreschi LM. Optimal placement of dampers for passive response control. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.31, pp.955–976, 2002.
- 148. Singh MP, Moreschi LM. Optimal seismic response control with dampers. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.30, pp.553–572, 2001.
- Skelton, R.E, Dynamic Systems Control: Linear Systems Analysis and Synthesis. John Wiley & Sons, New York, 1988.
- 150. Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H., An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons, New York, 1993.
- 151. Sladek, J.R., Klingner, R.E., "Effect of tuned mass dampers on seismic response," J. of Structural Engineering, ASCE vol.109, pp. 2004-2009, 1983.
- 152. Slotin J. J., Li W. Applied non linear control, Prentice Hall, 1991
- 153. Smith J. W., Vibtration of structures: Applications in civil engineering design, Chapman Hall, New York, 1988.
- 154. Soong T.T., Active structural control: Theory and practice. London/New York: Longman Scientific & Technical/Wiley 1990.
- 155. Soong T.T., G. F. Dargush 'Passive energy dissipation systems in structural Engineering' John Wiley & Sons. Inc. 1999.
- 156. Soong, T.T. and Grigoriu, M. Random Vibration of Mechanical and Structural Systems, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- 157. Spencer B.F, Soong T.T., "New applications and developments of active semi active and hybrid control techniques for seismic and non seismic vibration in USA", Proceedings of the INTERNATIONAL post –SmiRT Conference on seismic Isolation

Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures, Korea, August 23-25, pp 354-367, 1999.

- Spencer B.F., Dyke S.J., Sain M.K., Carlson J.D. Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of engineering mechanics*; 123 (3): 230-238 1997.
- 159. Spencer B.F., Dyke S.J.and Deoskar H.S. Benchmark problem in structural control Part I: Active Mass Driver System. *Proc. ASCE Structures Congress*, Portland (1997).
- 160. Spencer Jr., B.F. and Nagarajaiah, S., "State of the Art of Structural Control," *Journal* of Structural Engineering, ASCE, Vol. 239, No. 7, pp. 845-56, 2003.
- 161. Spencer Jr., B.F. and Sain, M.K., "Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback", *IEEE Control Systems Magazine: Special Issue on Emerging Technologies* (Tariq Samad Guest Ed.), Vol. 17, No. 6, pp. 19–35, 1997.
- 162. Spencer, B.F., Dyke, S.J. and Deoskar, H.S. Benchmark problem in structural control Part II: Active Tendon System. *Proc. ASCE Structures Congress*, Portland (1997).
- Symans MD, Constantinou MC. Seismic testing of a building structure with semiactive fluid damper control system. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1997; 26(7):759–777.
- 164. Symans MD, Constantinou MC. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. Engineering Structures 1999; 21(6):469–487.
- Symans MD, Kelly SW. Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semiactive seismic isolation systems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1999; 28(1):37–60.
- 166. Symans MD, Madden GJ, Wongprasert N. Experimental study of an adaptive base isolation system for buildings. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering 12WCEE, Auckland, 30 January–4 February, paper 1965. CD-ROM, 2000.
- 167. Syrmakezis K., A. Sophocleous, '*Passive control techniques for the seismic protection of historical and monumental masonry structures*' Proceedings of the third world conference on structural control, Como, Italy, V.2, p.p 955-960, 2002.
- 168. Syrmakezis C. A., Seismic protection of historical structures and monuments *Structural Control Health Monitoring* 2006; 13: 958–979.
- 169. Takewaki I, Yoshitomi S, Uetani K, Tsuji M. Non-monotonic optimal damper placement via steepest direction search. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.28, pp.655–670, 1999.

- Timothy L. K., Bona B. E., State space analysis: An introduction, McGraw–Hill, New York, 1954.
- 171. Tsai H. G. Lin, Optimun tuned mass dambers for minimizing steadt state response of support excited and damped systems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 22:957-973, 1993.
- 172. Tsirilakis Georgios, "Seismic Design of Multi-Story Buildings with Use of Dampers", Graduate thesis, supervisor Koumousis V., March 2004.
- 173. Utkin V. I. Sliding modes in control optimization, Springel Verlag New York 1992.
- 174. Vassilas Elias, "Cost-Benefit Analysis of Isolated and Conventional Structures", Graduate thesis, supervisor Koumousis V., July 2004.
- 175. Villaverde, R "Roof isolation system to reduce seismic response of buildings: a preliminary assessment," Earthquake Spectra 14, No. 3, pp. 521-532, 1998.
- 176. Vincent Thomas, Grantham Walter, "Μη γραμμικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου και βέλτιστος έλεγχος" Εκδόσεις Τζίολα Θεσσαλονίκη, 2001.
- 177. Wakabayashi M., Design of earthquake resistant buildings, McGraw–Hill, New York, 1986.
- 178. Wang A.P. Lee C.D. Fuzzy sliding mode control for a building structure based on genetic algorithms. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 31:881-885, 2002.
- 179. Weyrick R. C., Funtamentals of automatic control, McGraw-Hill, Ne &w York, 1975.
- Wilson E. L., Farhoomand I. and Bathe K. J., Non linear dynamic analysis in complex structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 1:187-194, 1973.
- 181. Wohman W. M. and Johnson C. D., "Optimal Bang-Bang control with quadratic performance Index", Transactions ASME, series D, Vol. 86, pp.107-115, 1964.
- 182. Wohman W. M., "On pole assignmentin multi input controllable systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC- 12, pp.660-665, 1967.
- 183. Wu JC Experiments on a full scale building model using modified sliding mode control. Journal of engineering mechanics; 129 (4): 363-372, 1997.

- 184. Wu, B., Ou, J.-P., and Soong, T.T. "Optimal Placement of Energy Dissipation Devices for Three Dimensional Structures," *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 19, pp. 113–125, 1997.
- 185. Xu YL, Qu WL, Chen ZH. Control of wind-excited truss tower using semi-active friction damper. Journal of Structural Engineering (ASCE) vol. 127:861–868,2001.
- 186. Xu, Y. L. and Teng, J. "Optimal Design of Active/Passive Control Devices for Tall Buildings under Earthquake Excitation." *The Structural Design of Tall Buildings*, Wiley & Sons, Vol. 11, No. 2, pp. 109-127, 2002.
- Yamada K., Kobori T., Control algorithm for estimating future responses for active variable stiffness structure. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 24:1085-99, 1995.
- Yang J. N., Kim J. H., Agrawal A. K. Resetting semi active stiffness damper for seismic response control. Journal of structural engineering 126:1427-143, 2000.
- 189. Yang J., Agrawal A. Semi-active hybrid control systems for non-linear buildings against near-field earthquakes. *Engineering structures*; 24:271-280, 2002.
- Yang J.N., Wu J.C. Li Z., Control of seismic excited buildings using active variable stiffness. Engineering structures 1996; 18:589-596
- 191. Yang J.N., Wu J.C., Agrawal A.K., Hsu S.Y., Sliding mode control of seismically excited linear structures, Journal of Engineering Mechanics, ASCE; 121:1386-1390, 1995.
- 192. Yang J.N., Wu J.C., Agrawal A.K., Hsu S.Y., Sliding mode control for non linear and hysteretic structures, Journal of Engineering Mechanics, ASCE; 121:1330-1339, 1995.
- 193. Yang J.N., Wu J.C., Agrawal A.K., Hsu S.Y., Sliding mode control of seismically excited linear structures, Journal of Engineering Mechanics, ASCE; 121:1386-1390, 1995.
- 194. Yang JN, Akbarpour A, Ghaemmaghami P. New optimal control algorithms for structural control. Journal of Engineering Mechanics (ASCE) 1987; 113(9):1369– 1387.
- 195. Yao, J. T. P. "Concept of structural control." Journal of Structural Division, vol. 98:7, pp.1567-1574, 1972.
- Yi F, Dyke SJ, Caicedo JM, Carlson JD. Seismic response control using smart dampers. Proceedings of the1999 American Control Conference, San Diego, CA, 23– 25 June 1999; 1022–1026.

- 197. Yi F, Dyke SJ, Caicedo JM. Experimental verification of multi-input seismic control strategies for smart dampers. Journal of Engineering Mechanics (ASCE) 2001; 127(11):1152–1164.
- 198. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M., and Carlson, J.D. (2001), "Experimental Verification of Multi-Input Seismic Control Strategies for Smart Dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 127, No. 11, pp. 1152-1164.
- Yoshida K, Fujio T. Semi-active base isolation control of a building using variable damper oil damper. Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Control; pp. 567–575, Paris, 6–8 July 2000.
- 200. Yoshida, O. (2003). Torsionally Coupled Response Control of Earthquake Excited Asymmetric Buildings: Development and Application of Effective Control Systems Using Smart Dampers, Doctoral Dissertation, Washington University in St. Louis, St. Louis, Missouri, USA.
- 201. Yoshida, O. and Dyke, S.J. (2004). "Seismic Control of a Nonlinear Benchmark Building Using Smart Dampers," *Journal of Engineering Mechanics: Special Issue* on Benchmark Control Problems, ASCE, Vol. 130, No. 4, pp. 386-392.
- 202. Yoshida, O. and Dyke, S.J. (2005) "Response Control in Full Scale Irregular Buildings Using MR Dampers," *Journal of Structural Engineering*, ASCE (in press).
- 203. Yoshida, O., Dyke, S.J., Giacosa, L.M. and Truman, K.Z. (2003). "Experimental Verification on Torsional Response Control of Asymmetric Buildings Using MR Dampers." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No.13, pp. 2085–2105.
- Zhang R. H. and Soong T. T. "Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Application." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp. 1375-1392, 1992.
- 205. Θανόπουλος Π. 'Αντισεισμικός σχεδιασμός μεταλλικών πλαισίων με συστήματα απορρόφησης ενέργειας', Διδακτορική διατριβή 2006.
- 206. Καλλιγεροπούλου Δ. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου, Τόμος 1°ς, Αθήνα 1991.
- 207. Καρυμπάκα Κ. Α., Σερβετά Ε. Κ., Συστήματα αυτομάτου ελέγχου, Τόμοι Α, Β και Γ, Αθήνα 1978.
- 208. Κατσικαδέλης Ι.Θ., "Μαθήματα δυναμικής Ανάλυσης Ραβδωτών Φορέων", Εκδόσεις Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, 1991.

- 209. Κρικέλης Ν., Έισαγωγή στον αυτόματο έλεγχο, θεωρία και εφαρμογές', Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2000.
- 210. Μπιτσίωρη Γ. Γραμμικά δυναμικά συστήματα, Πάτρα 1989.
- 211. Παρασκευόπουλος Π., Έισαγωγή στον αυτόματο έλεγχο', Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- 212. Παρασκευόπουλος Π., Έλεγχο συστημάτων με υπολογιστές', Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- 213. Πετρίδη Β. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου, Τόμοι 1και 2, Θεσσαλονίκη 1987.
- 214. Σολδάτος Α., Ε. Παπαδόπουλος, Κ. Αρβανίτης. Σταυρουλάκης, Ε. Ζαχαρενάκης ⁵Σχεδίαση συστήματος εύρωστου αυτομάτου ελέγχου για αντισεισμική προστασία.^{4th} Greek Association on Computational Mechanics (GRACM) Congress, Patra, Greece, June 27-29, 2002.
- 215. Σολδάτος Α., Ε. Παπαδόπουλος, Κ. Αρβανίτης. Σταυρουλάκης, Ε. Ζαχαρενάκης 'Αντισεισμική προστασία κτιρίων σε οριζόντια και στροφική κίνηση.' 4th Greek Association on Computational Mechanics (GRACM) Congress, Patra, Greece, June 27-29, 2002.
- 216. Τζαφέστας Σ., 'Μαθήματα συστημάτων αυτομάτου ελέγχου τόμος 1, Μοντελοποίηση, Ανάλυση, Σχεδίαση', Εκδόσεις Συμμετρία Αθήνα 1999.