

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΙΩΑΝΝΗΣ ΔΑΚΤΥΛΙΔΗΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής,
civ232017053@uniwa.gr

Περίληψη

Στην εργασία αυτή διερευνάται η επιρροή του ελέγχου στην απόκριση μεταλλικών κατασκευών που υπόκεινται σε σεισμική διέγερση. Η δυναμική φασματική ανάλυση είναι μία περίπτωση ανάλυσης κατασκευών που υπόκεινται σε σεισμό. Σε περιπτώσεις όμως που ο σεισμός υπερβαίνει το φάσμα σχεδιασμού η μόνη γραμμή άμυνας που διαθέτει η κατασκευή είναι η δυσκαμψία και η πλαστιμότητά της. Το αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις είναι σοβαρές υλικές ζημιές που καθιστούν το κόστος επαναλειτουργίας του κτηρίου μη βιώσιμο. Η λύση που προτείνεται σε αυτή την εργασία είναι η προσθήκη συσκευών αυτομάτου ελέγχου για την μείωση της απόκρισης της κατασκευής στα σημεία όπου αυτή υπερβαίνει το φάσμα σχεδιασμού. Η συσκευή ελέγχου που χρησιμοποιείται στην κατασκευή είναι ο ενεργός αποσβεστήρας μάζας (Active Mass Damper, AMD). Πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις και διερευνάται η επιρροή της συσκευής ελέγχου τόσο σε συμμετρικές όσο και σε μη συμμετρικές μεταλλικές κατασκευές. Επιπλέον διερευνάται και η διαφορετική προσέγγιση της τοποθέτησης των συσκευών ελέγχου καθ' ύψος της κατασκευής σε διαφορετικούς προσανατολισμούς.

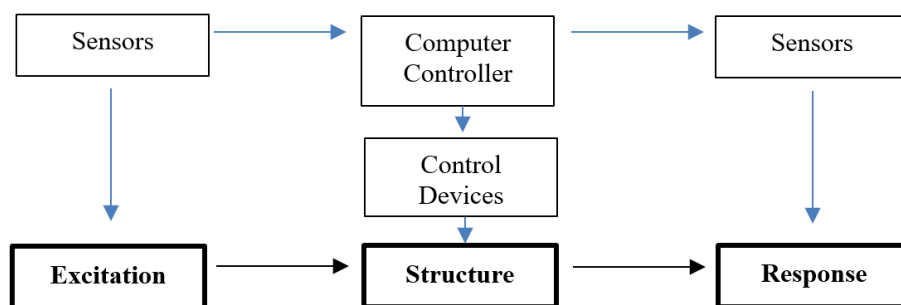
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν άρθρο πραγματεύεται την εφαρμογή συσκευών αυτομάτου ελέγχου σε μεταλλικές κατασκευές. Στις εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού, η θεωρία ελέγχου εφαρμόζεται κυρίως μέσω συσκευών οι οποίες ενισχύουν την κατασκευή έναντι δυναμικών φορτίσεων και σεισμικών ερεθισμάτων. Ο στόχος αυτών των συσκευών, δεν είναι άλλος από την μείωση των μεγεθών της απόκρισης και πιο συγκεκριμένα των σχετικών μετακινήσεων, ταχυτήτων και επιταχύνσεων [1]. Οι συσκευές που μπορούν να εφαρμοστούν δύναται να ασκήσουν ενεργό και παθητικό έλεγχο. Ως συσκευές παθητικού ελέγχου, ορίζουμε τις συσκευές οι οποίες δεν απαιτούν παροχή ενέργειας για να λειτουργήσουν. Στην περίπτωση αυτή, η συσκευή και η κατασκευή χρησιμοποιούν αμφότερες τα ίδια δυναμικά τους χαρακτηριστικά με σκοπό να αντισταθούν στο δυναμικό ερέθισμα. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα παθητικού ελέγχου είναι η εφαρμογή σεισμικής μόνωσης, οι tuned liquid dampers (TLDs), οι tuned mass dampers (TMDs), οι metallic yield dampers, οι viscous fluid dampers και οι friction dampers. Ως συσκευές ενεργού ελέγχου, ορίζουμε τις συσκευές οι οποίες υιοθετούν ένα σύστημα αποσβεστήρα μάζας-ελατηρίου ενισχυόμενο μηχανικά, μέσω υδραυλικών εμβόλων ή ηλεκτρομαγνητών. Η πιο κοινή συσκευή ενεργού ελέγχου είναι ο ενεργός αποσβεστήρας μάζας (Active Mass Damper, AMD). Ο ίδιος αποτελείται από έναν επενεργητή ο οποίος κινεί μία μάζα με σκοπό να αυξήσει την απόσβεση και το συχνοτικό εύρος επέμβασης της συσκευής κατά το δοκούν. Σε αυτό το άρθρο, εφαρμόζονται αλγόριθμοι ελέγχου σε μοντέλα μεταλλικών κατασκευών μέσω του λογισμικού AMDesign το οποίο αναπτύχθηκε από την ιταλική εταιρία τεχνολογίας ISAAC. Το θεωρητικό υπόβαθρο και η εφαρμογή τέτοιων αλγορίθμων περιγράφεται καλύτερα από τους Πνευματικό [2].

2. ΕΝΕΡΓΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Οι αλγόριθμοι ενεργού ελέγχου αναπτύχθηκαν την δεκαετία του 1990 από τους Soong [3], Housner [4], Kobori [5] και Spencer [6]. Κάποιοι άλλοι καλά καθιερωμένοι αλγόριθμοι οεριγράφονται από τους Yang [7], [8] και Abdel-Rohman [9], όπως και από τους Kose [10] και Ζαχαρενάκη [11].

Στην εκάστοτε κατασκευή, εφαρμόζονται επιταχυνσιογράφοι στο κατώτερο και ανώτερο επίπεδο. Αυτοί οι αισθητήρες λαμβάνουν το σεισμικό ερέθισμα και με την σειρά τους το διοχετεύουν σε μία κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Σε αυτή τη φάση, ο υπολογιστής με την χρήση αλγορίθμων ελέγχου υπολογίζει την δύναμη που απαιτείται για να μειωθεί η απόκριση της κατασκευής, η δύναμη εφαρμόζεται μέσω των επενεργητών στην κατασκευή και η ίδια αποκρίνεται. Τα νέα μεγέθη της απόκρισης μετρώνται από τους ίδιους αισθητήρες οι οποίοι επαναλαμβάνουν την διαδικασία μέχρι το πέρας του σεισμικού φαινομένου. Η όλη διαδικασία απεικονίζεται σχηματικά παρακάτω στο Σχ.1.



Σχήμα 1. Κατασκευή εξοπλισμένη με συστήματα ενεργού αυτομάτου ελέγχου

Η θεωρία ελέγχου στις κατασκευές εφαρμόζεται με μετασχηματισμό της διαφορικής εξίσωσης κίνησης. Η ίδια με σκοπό να μπορεί να εισαχθεί και να επιλυθεί με την βοήθεια των αλγορίθμων ελέγχου μετασχηματίζεται στον αποκαλούμενο «χώρο κατάστασης». Η μετασχηματισμένη εξίσωση κίνησης στον χώρο κατάστασης έχει ως εξής :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_g a_g + \mathbf{B}_f \mathbf{F} \quad (1)$$

Τα μητρώα \mathbf{X} , \mathbf{A} , \mathbf{B}_g και \mathbf{B}_f δίνονται από :

$$\mathbf{B}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ -\mathbf{E} \end{bmatrix}_{2nx1}, \mathbf{B}_f = \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_f \end{bmatrix}_{2nx1} \quad (2)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \dot{\mathbf{U}} \end{bmatrix}_{2nx1}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2nx2n}$$

Τα μητρώα \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} , είναι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας αντίστοιχα. Το μητρώο \mathbf{F} είναι το μητρώο των ζητούμενων δυνάμεων ελέγχου. Τα μητρώα \mathbf{E} , \mathbf{E}_f είναι τα μητρώα θέσης, τα οποία δείχνουν σε ποιους βαθμούς ελευθερίας επιβάλλεται ο σεισμός και οι δυνάμεις ελέγχου στην κατασκευή αντίστοιχα. Η υπολογιζόμενη δύναμη ελέγχου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που η εκάστοτε συσκευή μπορεί να δώσει, *Fallowable*. Σε αυτή την περίπτωση στην εξίσωση κίνησης με έλεγχο θα πρέπει να επιβάλλεται στο σύστημα η μέγιστη δυνατή δύναμη ελέγχου *Fallowable*. Το φαινόμενο αυτό λέγεται κορεσμός της συσκευής και κατ' επέκταση έχουμε κορεσμένο έλεγχο. Σε αυτή την περίπτωση η δύναμη ελέγχου επιλέγεται βάσει των κριτηρίων της (3).

$$\text{sat}\mathbf{F}(t-t_d) = \begin{cases} \mathbf{F}(t-t_d) & |\mathbf{F}(t-t_d)| < \mathbf{F}_{\text{allowable}} \\ \mathbf{F}_{\text{allowable}} & |\mathbf{F}(t-t_d)| > \mathbf{F}_{\text{allowable}} \end{cases} \quad (3)$$

Στα συστήματα αυτομάτου ενεργού ελέγχου στις κατασκευές, ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που εγείρονται είναι αυτό της χρονικής καθυστέρησης. Ως χρονική καθυστέρηση ορίζουμε τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών υπολογισμών της δύναμης ελέγχου από τον αλγόριθμο ελέγχου. Η ίδια δεν αποτελεί πρόβλημα κάτω από ένα όριο, παρόλα αυτά σε περιπτώσεις που το ξεπερνάει μπορεί να επιφέρει εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα από τα αναμενόμενα. Περισσότερα για αυτή καθώς και καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος με τρόπους αντιμετώπισης έχουν προτείνει οι Πνευματικός και Γαντές [12].

Από αυτό το σημείο και έπειτα εισάγεται η έννοια των αλγορίθμων ελέγχου. Επομένως ως αλγόριθμο ελέγχου ορίζουμε την αλληλουχία των ενεργειών, χρησιμοποιώντας τα άνωθεν μητρώα, που θα ακολουθηθεί με σκοπό να βρεθεί το μητρώο ανάδρασης ή μητρώο της δύναμης ελέγχου F . Κάποιοι από τους πιο γνωστούς αλγορίθμους ελέγχου είναι οι :

- Αλγόριθμος εύρεσης πόλων (Pole Placement)
- Αλγόριθμος γραμμικώς τετραγωνικού ρυθμιστή (Linear Quadratic Regulator)
- Αλγόριθμος Fuzzy Logic
- Αλγόριθμος H2/H ∞

Με την έννοια εύρεση πόλων αναφερόμαστε στην τοποθέτηση των ιδιοτιμών του πίνακα A της εξίσωσης (1) σε επιθυμητές θέσεις σε ένα επίπεδο πραγματικών και μιγαδικών αριθμών. Για αυτόν τον αλγόριθμο, πρέπει να υπολογιστούν οι ιδιομορφές και ιδιοπερίοδοι του μη ελεγχόμενου συστήματος και να λυθεί το ακόλουθο πρόβλημα ιδιοτιμών:

$$\left[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} \right]_{n \times n} \boldsymbol{\Phi} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{T}_i = \frac{2\pi}{\omega_i}, \quad \mathbf{f}_i = \frac{\omega_i}{2\pi}, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad \begin{aligned} \mathbf{C}_n &= \boldsymbol{\Phi}_n^T \mathbf{C} \boldsymbol{\Phi}_n \\ \mathbf{M}_n &= \boldsymbol{\Phi}_n^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Phi}_n \\ \xi_i &= 2\mathbf{C}_n \mathbf{M}_n \omega_n \end{aligned} \quad (4)$$

Οι ιδιοτιμές του συστήματος προκύπτουν κατευθείαν από τις ιδιοτιμές του μητρώου A , όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις :

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \rightarrow \lambda_i, \quad \lambda_i = -2\pi f_i \xi_i \pm j2\pi f_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (5)$$

Το μητρώο της δύναμης ελέγχου εκφράζεται στον χώρο κατάστασης ως το γινόμενο του μητρώου G που προκύπτει από τις υπολογισμένες ιδιοτιμές, του μητρώου των μετατοπίσεων και των ταχυτήτων :

$$\mathbf{F} = -\mathbf{G}_1 \mathbf{U} - \mathbf{G}_2 \dot{\mathbf{U}} = -\mathbf{G} \mathbf{X} \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας το μητρώο της δύναμης F στην εξίσωση (1) προκύπτει το νέο μητρώο στον χώρο κατάστασης :

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}_f \mathbf{G}) \mathbf{X} + \mathbf{B}_g a_g \quad (7)$$

Οι νέες ιδιοτιμές λ_{ic} του ελεγχόμενου συστήματος ικανοποιούν την παρακάτω σχέση :

$$\det[\lambda \mathbf{I} + \mathbf{B}_f \mathbf{G} - \mathbf{A}] = 0 \quad (8)$$

Έτσι μορφώνεται το μητρώο \mathbf{G} έτσι ώστε οι ρίζες (ιδιοτιμές) της εξίσωσης (10) να βρίσκονται στις επιθυμητές θέσεις. Οι επιθυμητές ιδιοτιμές λ_{ic} του ελεγχόμενου συστήματος ικανοποιούν επίσης την εξίσωση:

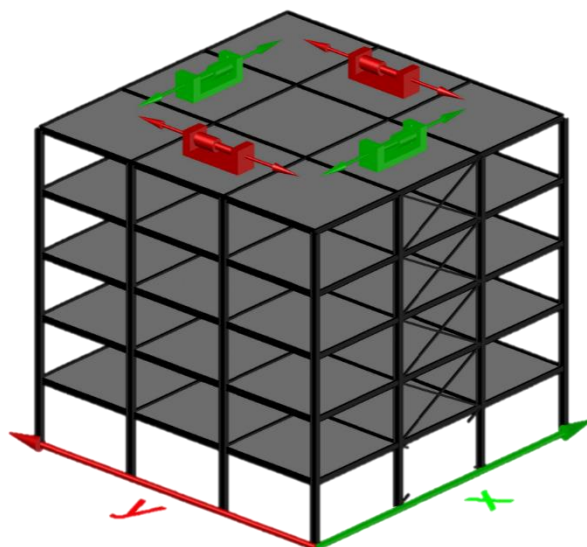
$$(\lambda - \lambda_{1c})(\lambda - \lambda_{2c}) \dots (\lambda - \lambda_{nc}) = 0 \quad (9)$$

Μορφώνοντας το μητρώο \mathbf{G} με τέτοιον τρόπο ώστε η εξίσωση (9) να ισούται με την εξίσωση (110) επιβάλλεται στο σύστημα να έχει τις επιθυμητές ιδιοτιμές. Αυτή η διαδικασία δεν είναι εφαρμόσιμη σε συστήματα με παραπάνω βαθμούς ελευθερίας, όπου άλλες προτάσεις και τεχνικές έχουν αναφερθεί από τους Kautsky και Nichols N.K. [13], Laub και Wette [14].

3. ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Ο παραπάνω αλγόριθμος ελέγχου εφαρμόστηκε σε δύο βασικές μελέτες περίπτωσης. Για την πρώτη περίπτωση δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πενταώροφου διπλά συμμετρικού μεταλλικού κτιρίου με πλάκες σκυροδέματος. Για την δεύτερη περίπτωση, δημιουργήθηκε ομοίως ένα μοντέλο πενταώροφου μη συμμετρικού κτιρίου με πλάκες σκυροδέματος, με οκτώ υποπεριπτώσεις.

Για την πρώτη περίπτωση μετά από μια σειρά παραμετρικών αναλύσεων, η τοποθέτηση δύο αποσβεστήρων ενεργής μάζας (AMDs) στην κορυφή του κτιρίου έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Η ιδανική περίπτωση θα ήταν να τοποθετηθεί μια συσκευή ελέγχου σε κάθε όροφο, ωστόσο αυτό θα προκαλούσε πιθανώς εργονομικά προβλήματα όσον αφορά την καθημερινή χρήση του κτιρίου. Η μάζα του μη ελεγχόμενου κτιρίου είναι 232 τόνοι και ο περίοδος του μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι 0.55 δευτερόλεπτα. Ο αλγόριθμος ελέγχου εφαρμόστηκε μέσω λογισμικού ανάλυσης που αναπτύχθηκε από την ιταλική εταιρεία ISAAC. Η συσκευή ελέγχου που εφαρμόστηκε στα μοντέλα είναι το ISAAC I-Pro 1 v1.0 με δυνατότητα άσκησης δύναμης 50 kN, πράγμα που σημαίνει ότι εάν η δύναμη ελέγχου F υπερβεί αυτό το όριο, η συσκευή δεν είναι ικανή να το εφαρμόσει στο κτίριο. Έτσι η ελεγχόμενη απόκριση αναμένεται μικρότερη. Το επιταχυνσιογράφημα που χρησιμοποιήθηκε ως ερέθισμα στα μοντέλα είναι αυτό του σεισμού του El-Centro της Καλιφόρνια, 1940 σε κλίμακα 1:1. Η διάρκεια του σήματος είναι 53,76 δευτερόλεπτα και η μέγιστη επιτάχυνση $PGA=0.348g$.



Σχήμα 2. Μελέτη περίπτωσης No 1.

	Sections	Material
Columns	HEB 400	S235
Beams	HEA 300	S235
Slabs	20cm thickness	C30/37
Wind beams	TUBO 180X180X10	S235

Πίνακας 1. Υλικά και διατομές

Η απόκριση του μοντέλου έδειξε σημαντική μείωση στα όλα τα μεγέθη. Η ποσοστιαία μείωση για κάθε όροφο, για τις διευθύνσεις x και y φαίνεται παρακάτω στους πίνακες 2, 3 :

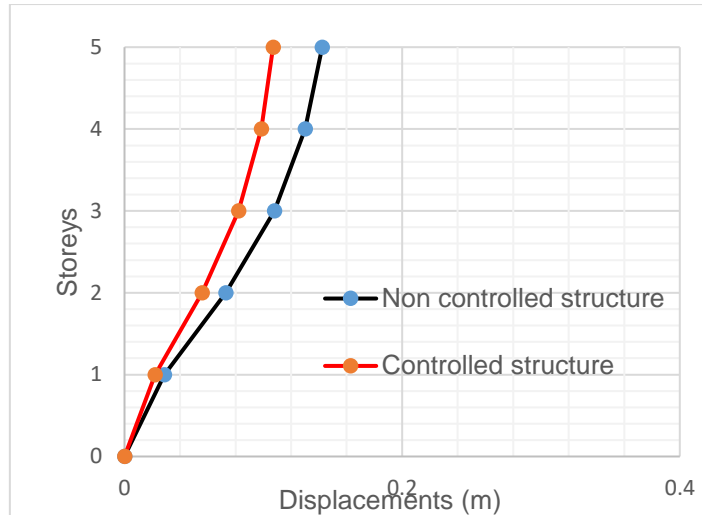
Floor Level	Displacements	Velocities	Accelerations
0	0%	0%	0%
1	22%	28%	1%
2	23%	26%	2%
3	26%	22%	5%
4	28%	17%	9%
5	29%	15%	17%

Πίνακας 2. Ποσοστιαία μείωση των μεγεθών απόκρισης κατά μήκος του άξονα x

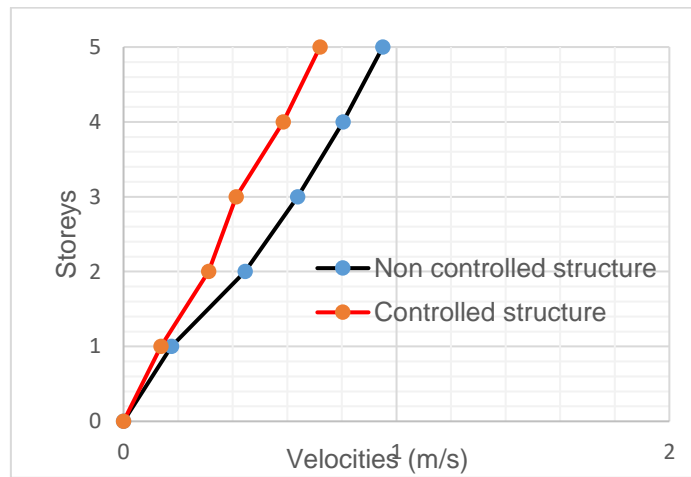
Floor Level	Displacements	Velocities	Accelerations
0	0%	0%	0%
1	30%	28%	7%
2	31%	43%	10%
3	31%	55%	14%
4	32%	38%	29%
5	33%	32%	29%

Πίνακας 3. Ποσοστιαία μείωση των μεγεθών απόκρισης κατά μήκος του άξονα y

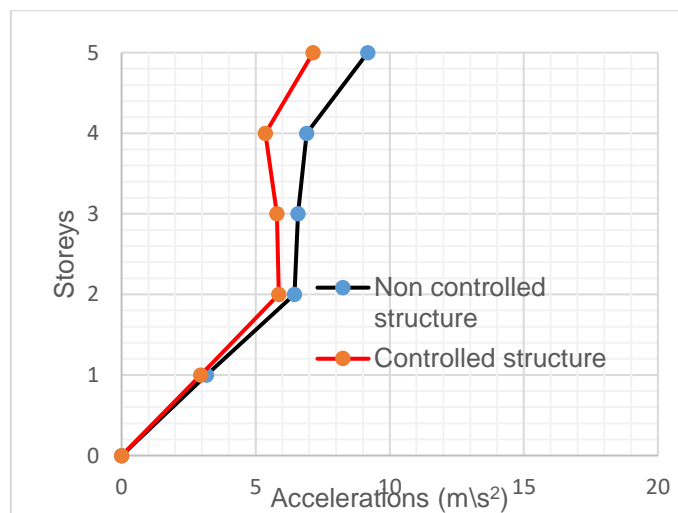
Τα μεγέθη απόκρισης καθ' ύψος της κατασκευής για το ελεγχόμενο και το μη ελεγχόμενο κτίριο φαίνονται παρακάτω στα σχήματα 3, 4 :



Σχήμα 3. Σχετικές μετακινήσεις καθ' ύψος για σεισμικό ερέθισμα στη διεύθυνση χ

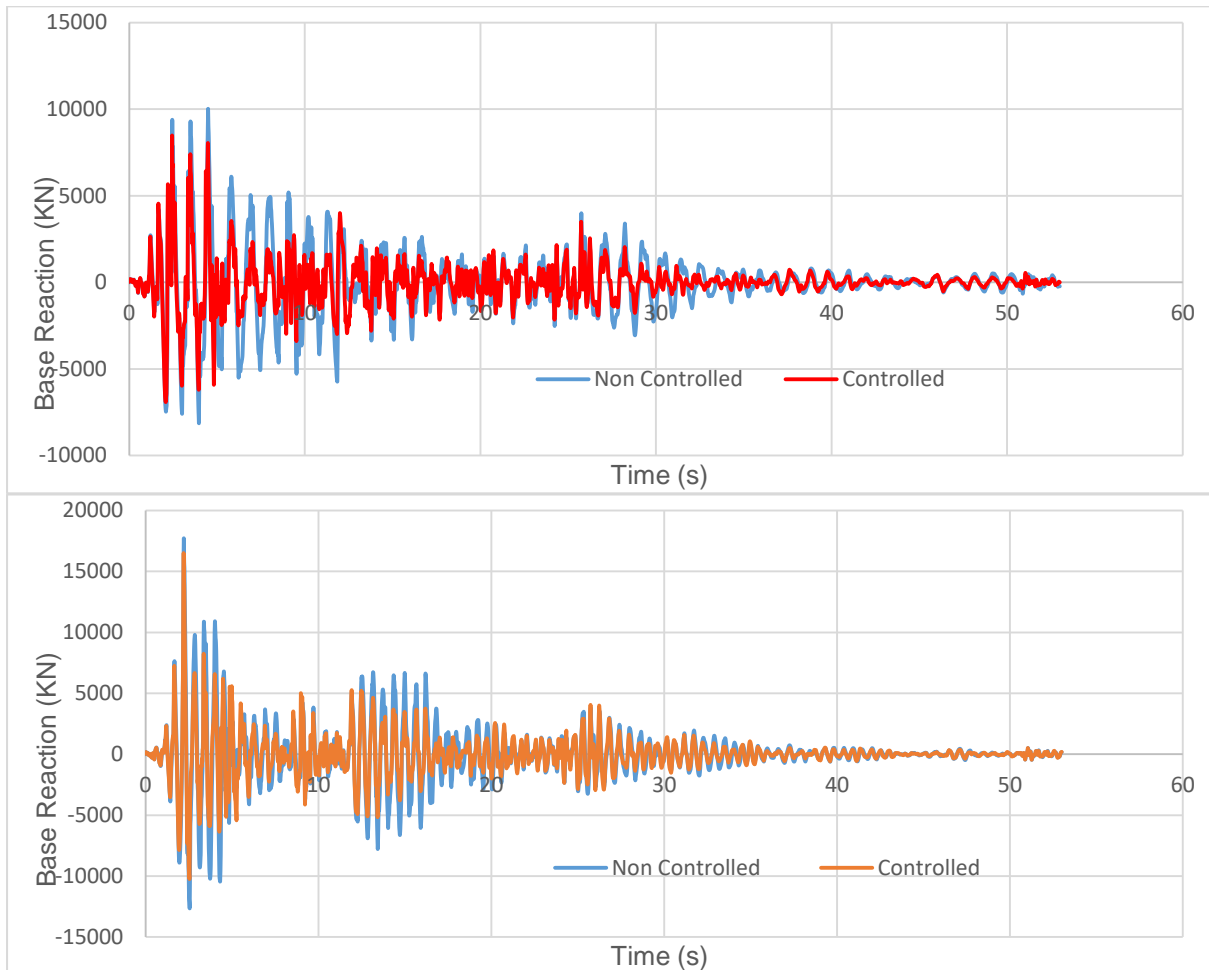


Σχήμα 4. Σχετικές ταχύτητες καθ' ύψος για σεισμικό ερέθισμα στη διεύθυνση χ



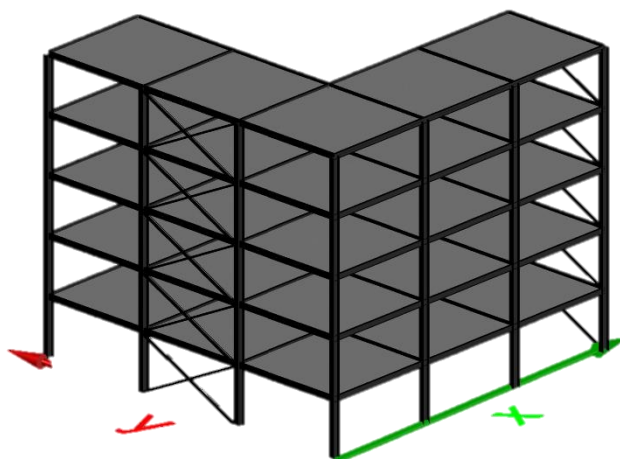
Σχήμα 5. Σχετικές επιταχύνσεις καθ' ύψος για σεισμικό ερέθισμα στη διεύθυνση χ

Η τέμνουσα βάση μειώθηκε κατά 15% κατά μήκος του y άξονα και 7% κατά μήκος του x άξονα. Τα διαγράμματα χρονοϊστορίας για την τέμνουσα βάση κατά μήκος των δύο αξόνων φαίνονται στο σχήμα 6.



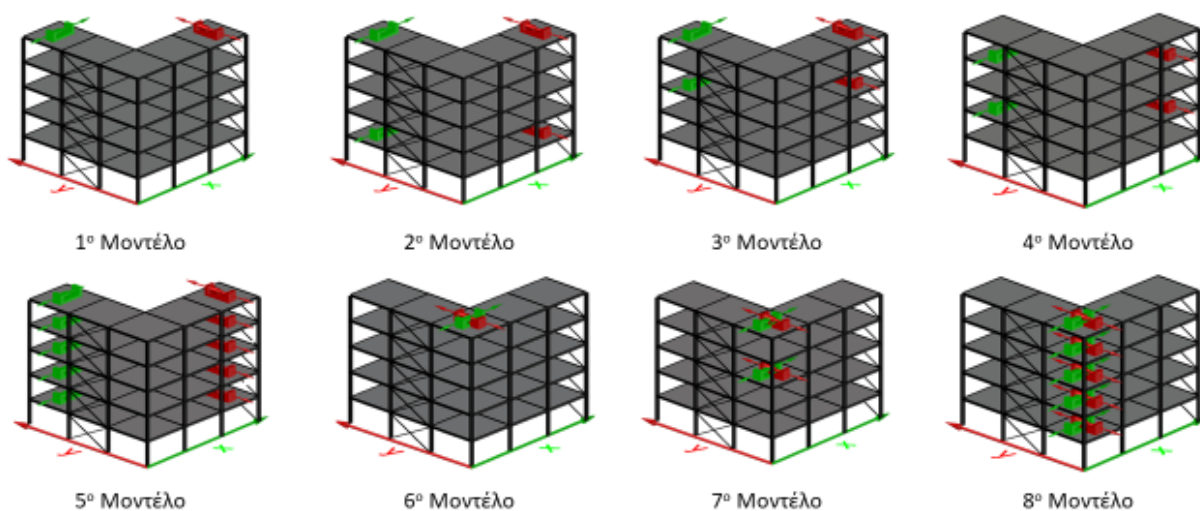
Σχήμα 6. Διαγράμματα χρονοϊστορίας της τέμνουσας βάσης κατά μήκος των αξόνων y και x αντίστοιχα.

Η δεύτερη μελέτη περίπτωσης περιλαμβάνει την διερεύνηση της εφαρμογής των συσκευών σε μη κανονικό μεταλλικό κτίριο. Διενεργήθησαν παραμετρικές αναλύσεις με ενδιαφέροντα αποτελέσματα αναφορικά με την αποδοτικότητα των διαφορετικών συνδυασμών.



Σχήμα 7. Μελέτη περίπτωσης Νο 2

Η μάζα του μη ελεγχόμενου κτιρίου είναι 129 τόνοι και η ιδιοπερίοδος του μονοβαθμίου ταλαντωτή είναι 0,53 δευτερόλεπτα. Διενεργήθηκαν αναλύσεις σε οκτώ διαφορετικά μοντέλα αναφορικά με συνδυασμούς και προσανατολισμούς τοποθέτησης καθώς και διαφορετικές φιλοσοφίες ελέγχου.



32

Σχήμα 8. Συνδυασμοί τοποθέτησης συσκευών ελέγχου για την μελέτη περίπτωσης Νο 2.

Για το πρώτο μοντέλο, δύο συσκευές τοποθετήθηκαν στον πέμπτο όροφο με προσανατολισμό ο οποίος βοηθά στην αντιμετώπιση και των δύο συνιστωσών του σεισμικού φαινομένου. Τα σημεία ελέγχου σε αυτό το μοντέλο επιλέχθηκαν με τη φιλοσοφία του ελέγχου των σημείων του κτιρίου με τη μικρότερη δυσκαμψία λόγω της μη κανονικότητάς του.

Για το δεύτερο μοντέλο, οι συσκευές τοποθετήθηκαν στους πέμπτο και πρώτο όροφο. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται εάν ο έλεγχος των κόμβων που έρχονται σε επαφή πρώτοι και τελευταίοι με το δυναμικό ερέθισμα έχει καλύτερο αποτέλεσμα.

Το τρίτο μοντέλο, αποτελεί επέκταση του δευτέρου. Οι συσκευές τοποθετήθηκαν στους τρίτο και πέμπτο όροφο. Ως αποτέλεσμα η απόκριση έδειξε σημαντική μείωση σχετικά με το πρώτο και το δεύτερο μοντέλο πράγμα που υποδεικνύει ότι ο έλεγχος των κόμβων που συναντώνται τα μεγαλύτερα μεγέθη απόκρισης είναι πιο αποτελεσματικός.

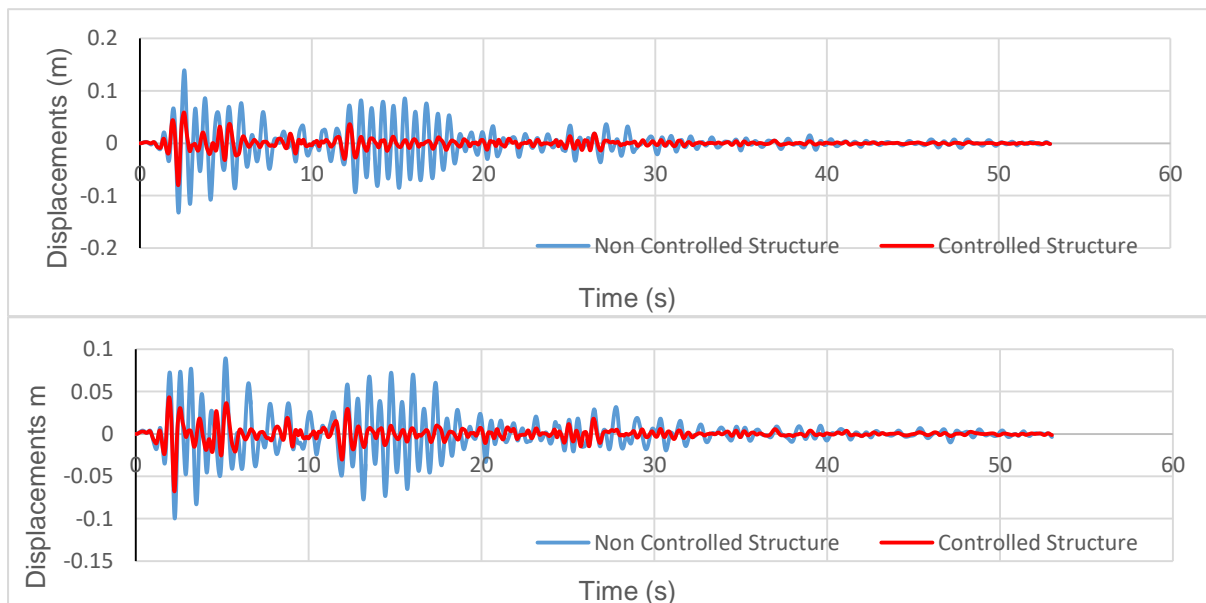
Στην περίπτωση του τέταρτου μοντέλου, επιχειρήθηκε να εξεταστεί ο έλεγχος των μεσαίων ορόφων. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλύτερη απόδοση από τα προηγούμενα μοντέλα, γεγονός από το οποίο μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο έλεγχος των μεσαίων κόμβων ίσως αποτελεί καλύτερη λύση.

Στο πέμπτο μοντέλο, επιχειρήθηκε να εξομοιωθεί ο πλήρης έλεγχος όλων των ορόφων τοποθετώντας συσκευές σε όλους τους ορόφους και στις δύο διευθύνσεις. Ως ήταν αναμενόμενο, η απόδοση είναι η καλύτερη όλων αποδεικνύοντας έτσι την έννοια της ελεγχιμότητας, στην θεωρία ελέγχου, σύμφωνα με την οποία όσα περισσότερα σημεία, σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας, ελέγχονται τόσο αποδοτικότερο είναι το σύστημα.

Το έκτο μοντέλο περιλαμβάνει τη δοκιμή του ελέγχου στα σημεία που συναντάται η αλλαγή συμμετρίας η οποία χαρακτηρίζει το κτίριο ως μη κανονικό. Τα αποτελέσματα δείχνουν μικρότερη απόδοση σε σχέση με τον έλεγχο των πιο εύκαμπτων φανωμάτων της κατασκευής.

Στο έβδομο μοντέλο δοκιμάζεται η συστοιχία τεσσάρων συσκευών με διάταξη «σταυρού» σε πέμπτο και τρίτο όροφο. Με αυτό τον τρόπο η προσομοίωση πιστεύεται ότι θα πετύχει τα αντίστοιχα καλύτερα αποτελέσματα του δευτέρου μοντέλου από το πρώτο. Στην πραγματικότητα όμως, το κτίριο δεν συμπεριφέρεται κατά αυτόν τον τρόπο.

Τέλος, στο πνεύμα της μέγιστης ελεγχιμότητας δοκιμάζεται ο έλεγχος όλων των ορόφων χρησιμοποιώντας την προαναφερθείσα διάταξη του «σταυρού». Τα αποτελέσματα είναι καλύτερα από τις δύο περιπτώσεις παρόλα αυτά ο έλεγχος των πιο εύκαμπτων φανωμάτων των μοντέλων ένα έως πέντε φαίνεται πιο αποδοτικός.



Σχήμα 9. Διαγράμματα χρονοϊστορίας των σχετικών μετακινήσεων για το όγδοο μοντέλο κατά μήκος των αξόνων y και χ αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τις ποσοστιαίες μειώσεις των αποκρίσεων των μοντέλων 5 και 8 παρατηρήθηκε ότι περί των ισχυρό άξονα των μεταλλικών διατομών, ο έλεγχος των τμημάτων της κατασκευής με τη μικρότερη δυσκαμψία είναι πιο αποδοτικός, ενώ για τον μη ισχυρό άξονα ο έλεγχος των τμημάτων της κατασκευής με τη μεγαλύτερη δυσκαμψία είναι πιο

αποδοτικός. Αυτό παρατηρείται στους παρακάτω πίνακες όπου αφαιρώντας την απόκριση του μοντέλου 5 από το μοντέλο 8 τα ποσοστά είναι αρνητικά για τον έλεγχο κατά μήκος του άξονα x και ως επί το πλείστον θετικά για τον έλεγχο κατά μήκος του άξονα y.

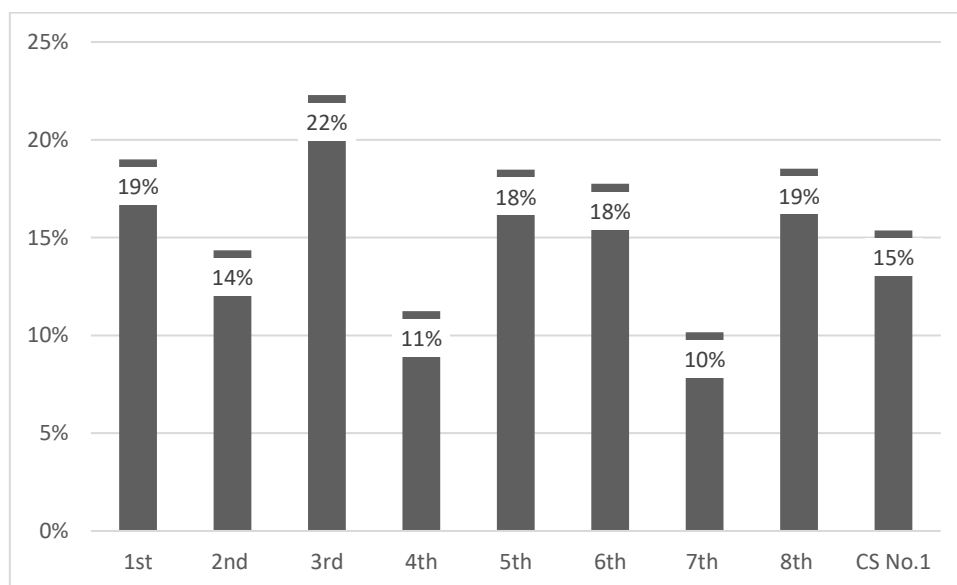
Floor Level	Displacements	Velocities	Accelerations
0	0%	0%	0%
1	26%	24%	-1%
2	26%	21%	-2%
3	26%	16%	-5%
4	25%	18%	-2%
5	23%	13%	6%

Πίνακας 4. Διαφορά στην ποσοστιαία μείωση των αποκρίσεων αφαιρώντας το πέμπτο από το όγδοο μοντέλο για τον άξονα y.

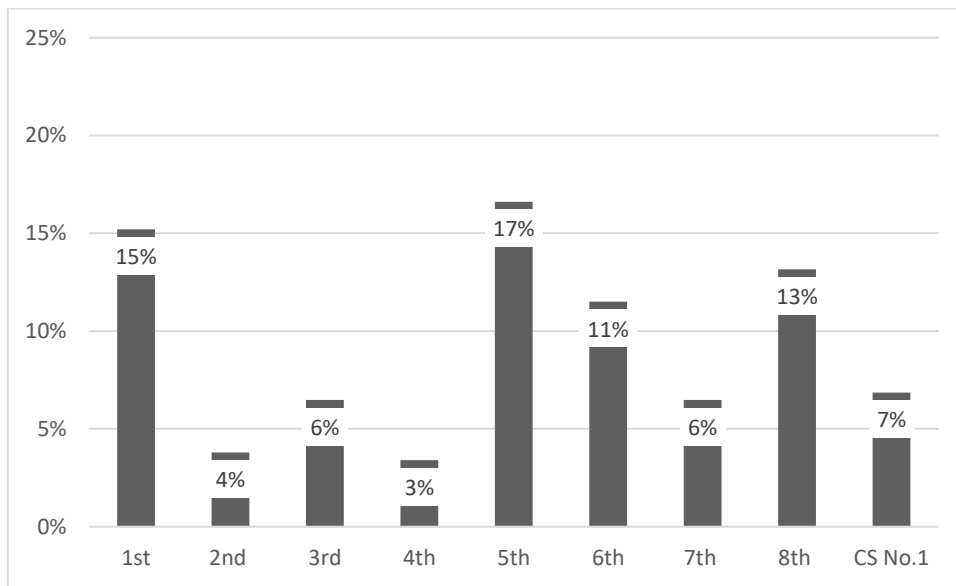
Floor Level	Displacements	Velocities	Accelerations
0	0%	0%	0%
1	-16%	-1%	-3%
2	-12%	-1%	-3%
3	-8%	-4%	-9%
4	-3%	-11%	-13%
5	0%	-13%	-26%

Πίνακας 5. Διαφορά στην ποσοστιαία μείωση των αποκρίσεων αφαιρώντας το πέμπτο από το όγδοο μοντέλο για τον άξονα x.

Ο κύριος στόχος της τοποθέτησης συσκευών ενεργού ελέγχου στις κατασκευές είναι η τέμνουσα βάσης. Σε κατασκευές όπου η μείωση αυτή είναι αμελητέα η τοποθέτηση των συσκευών δεν έχει νόημα. Παρακάτω βλέπουμε τη ποσοστιαία μείωση των μέγιστων τεμνουσών βάσης για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις για τους άξονες x και y.



Σχήμα 10. Ποσοστιαία μείωση των μέγιστων τεμνουσών βάσης για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις για τον άξονα χ.



Σχήμα 11. Ποσοστιαία μείωση των μέγιστων τεμνουσών βάσης για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις για τον άξονα y.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Παρουσιάστηκαν οι στρατηγικές ελέγχου για μεταλλικές κατασκευές που υπόκεινται σε δυναμικά ερεθίσματα.
2. Διεξήχθησαν παραμετρικές αναλύσεις αναφορικά με την βέλτιστη διάταξη και προσανατολισμό τοποθέτησης των αποσβεστήρων ενεργής μάζας (AMDs).
3. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μεγέθη απόκρισης και η τέμνουσα βάσης μειώνονται σημαντικά και ότι ο έλεγχος των κόμβων που συναντώνται τα μεγαλύτερα μεγέθη απόκρισης είναι πιο αποτελεσματικός.
4. Χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση αναφορικά με την εγκατάσταση των συσκευών σε μη συμμετρικά κτίρια. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι με σκοπό τη βέλτιστη μείωση της τέμνουσας βάσης οι συσκευές θα πρέπει να τοποθετούνται συνδυαστικά στις πιο εύκαμπτες και δύσκαμπτες περιοχές της κατασκευής.
5. Πρέπει να μελετηθεί και να συγκριθεί από οικονομοτεχνικής πλευράς το κόστος εγκατάστασης συσκευών ελέγχου με το κόστος επισκευής και ενίσχυσης.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Abdel-Rohman M., Quintana V.H., Leipholz H. 1980. «Optimal control of civil engineering structures.» *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE* 57-73.
- [2] Emmanouil Ioannis Daktylidis, Aikaterini Koursari, Constantinos Repapis, Nikolaos Pnevmatikos. 2023. «Active mass damper application in steel structures.» 10th National Conference on Steel Structures. Athens: Steel Structures Research Society.
- [3] Housner G. W., Marsi S.F., Chassiakos A.G. 1997. «Structural Control: Past, Present, and Future.» 1st World Conference on Structural Control. California.
- [4] Kautsky, J., και Nichols N.K. 1985. «Robust Pole Assignment in Linear State Feedback.» *International Journal of Control* (41): 1129-1155.
- [5] Kobori T., Inoue Y., Seto K., Iemura H. Nishitani A. 1998. 2nd World Conference on Structural Control. New York.
- [6] Kose I.E., Chmitendorf W.E., Yang J.N. 1995. «H control for seismic-excited building with acceleration feedback.» *Journal of Engineering Mechanics ASCE* 994-1002.
- [7] Laub, A.J., και M. Wette. 1984. «Algorithms and Software for Pole Assignment and Observers.» Στο UCRL-15646 Rev.1, μοντάζ: EE Dept. California: University of California Santa Barbara.
- [8] Nikos G. Pnevmatikos, George A. Papagiannopoulos, George Hatzigeorgiou. 2016. «Control of structures subjected to earthquake excitation based on non resonance theory.» Sheffield: 6th European Conference of Structural Control.
- [9] Nikos Pnevmatikos, Charis Gantes. 2014. «Actively and Semi-actively Controlled Structures Under Seismic Actions - Modeling and Analysis.» *Springer Encyclopedia of Earthquake Engineering*.
- [10] Ogata, K. 1997. *Modern Control Engineering*. 3rd. Prentice Hall International Inc.
- [11] Pnevmatikos N, Gantes C. 2011. «Influence of time delay and saturation capacity to the response of.» *Smart Struct Syst Int J* 449–470.
- [12] Pnevmatikos, Nikos. 2016. «Control of structures subjected to earthquake excitation based on non resonance theory.» 6th European Conference of Structural Control. Sheffield.
- [13] Pnevmatikos, Nikos G. 2007. Σχεδιασμός μεταλλικών κατασκευών με μεθόδους αυτομάτου ελέγχου. PhD Thesis, Athens: National Technical University of Athens.
- [14] Soong, T.T. 1990. *Active structural control: Theory and practice*. London/New York: Longman Scientific&Technical Wiley.
- [15] Spencer B.F., Dyke S.J., Sain M.K., Carlson J.D. 1997. «Phenomenological model for megnetorheological dampers.» *Journal of engineering mechanics* 230-238.
- [16] Tasarv, Mustafa. 2019. «Solving Equation of Motion using Newmark Methods.» *Response of a Linear SDOF to an Earthquake Ground Motion*, June.
- [17] Yang J.N., Wu J.C., Agrawal A.K., Hsu S.Y. 1995. «Sliding mode control of seismically excited linear structures.» *Journal of Engineering Mechanics ASCE* 1386-1390.
- [18] Yang, J.N. 1975. «Application of optimal control theory to civil engineering structures.» *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE* 819-838.
- [19] Zacharenakis E.C., Arvanitis K.G., Soldatos A.G., Stavroulakis G.E. 2001. «LQR, and H2 optimal structural control in antiseismic design.» Thessaloniki: National Mechanics Congress.

6. ΕΠΙΒΛΕΨΗ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Πνευματικού Νικολάου. Ευχαριστίες απεύθυνονται επίσης στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ρεπαπή Κωνσταντίνο για την πολύτιμη βοήθειά του.

