



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΨΗΛΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ ΣΥΝΟΤΟΝΙΣΜΕΝΗΣ
ΜΑΖΑΣ**

ΠΑΠΠΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2025

Πρόλογος

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Μυστακίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Παναγούλη και Παντούσα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Ανδρέα και Γεωργία για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΨΗΛΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΕΝΗΣ ΜΑΖΑΣ

ΠΑΠΠΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2025

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευριπίδης Μυστακίδης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη συμβολή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας (Tuned Mass Damper – TMD) στη σεισμική απόκριση κατασκευών μέσω θεωρητικής ανάλυσης και αριθμητικών προσομοιώσεων. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών, η σημασία των ιδιοπεριοδών και οι τρόποι με τους οποίους ο συντονισμός μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες παραμορφώσεις. Στη συνέχεια, αναλύεται η λειτουργία του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε εφαρμοσμένο επίπεδο, με αναφορές σε πραγματικές κατασκευές και στο υφιστάμενο κανονιστικό πλαίσιο. Ακολουθεί αριθμητική ανάλυση μέσω του λογισμικού ETABS21, όπου εξετάζονται διάφορες ιδιοπερίοδοι και διαφορετικοί λόγοι μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Η ανάλυση περιλαμβάνει τόσο τη μελέτη μέγιστων μετατοπίσεων όσο και την παρουσίαση κανονικοποιημένων διαγραμμάτων, επιτρέποντας συγκρίσεις ως προς την αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα. Η έρευνα επεκτείνεται και σε πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις, όπου τα ευρήματα παραμένουν συνεπή, καθώς ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας προσφέρει σταθερή μείωση των μετατοπίσεων σε όλες τις περιπτώσεις. Τέλος, γίνεται μία σύγκριση για όλες τις ιδιοπεριόδους του συστήματος.

OPTIMIZATION OF THE SEISMIC PERFORMANCE OF HIGH-RISE BUILDINGS USING THE TUNED MASS DAMPER METHOD

PAPPAS GEORGIOS

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2025

Supervisor: Eyripidis Mystakidis

Abstract

The present thesis investigates the contribution of the Tuned Mass Damper (TMD) to the seismic response of structures through theoretical analysis and numerical simulations. Initially, the fundamental principles of the dynamic behaviour of structures are presented, highlighting the importance of natural periods and the ways in which resonance can lead to increased deformations. Subsequently, the operation of the TMD is analysed both at a theoretical and an applied level, including references to real structures and the existing design code framework. A numerical analysis is then carried out using ETABS21 software, examining various natural periods and mass ratios of the tuned mass damper. The analysis includes both the study of maximum displacements and the presentation of normalized response diagrams, allowing comparisons regarding the damper's effectiveness. The research is further extended to real seismic excitations, where the findings remain consistent, as the TMD provides a steady reduction in displacements across all cases. Finally, a comparison is made for all natural periods of the system, confirming the overall efficiency and reliability of the TMD in improving the seismic performance of structures.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1: Βασικές Έννοιες Δυναμικής Κατασκευών

1.1 Συστήματα Ενός και Πολλών Βαθμών Ελευθερίας

1.2 Σχέση Μάζας – Δυσκαμψίας – Ιδιοσυχνότητας

1.3 Φυσικές Συχνότητες και Ιδιομορφές

1.4 Σημασία στη Σεισμική Μηχανική

Κεφάλαιο 2: Συντονισμένος Αποσβεστήρας Μάζας (TMD)

2.1 Θεμελιώδης Αρχή και Σκοπός

2.2 Εφαρμογές σε Κατασκευές

2.3 Μαθηματική Διατύπωση

2.4 Ιστορικά Σεισμικά Γεγονότα και Επίδραση στον Σχεδιασμό

2.5 Αντισεισμικοί Κανονισμοί – Ευρωκώδικας 8

2.6 Ιστορική Αναδρομή στη Χρήση TMDs

2.7 Ενεργά και Ημιενεργά Συστήματα (ATMD, STMD)

2.8 Η έννοια του συντονισμού

2.9 Πραγματικές αστοχίες λόγω συντονισμού

2.10 Τρόποι αποφυγής συντονισμού

2.11 Λόγοι απόσβεσης

2.12 Επιρροή της απόσβεσης στην απόκριση και στις ιδιοσυχνότητες

Κεφάλαιο 3: Θεωρία Σεισμικής Διέγερσης και Ιδιομορφών

3.1 Σεισμική Διέγερση και Απόκριση Κατασκευών

3.2 Η έννοια του Ιδιοπροβλήματος

3.3 Μέθοδοι Επίλυσης του Ιδιοπροβλήματος

3.4 Παραδείγματα σε κατασκευές

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση μονοπακτού υποστρώματος με και χωρίς την χρήση TMD

4.1 Προσομοίωση με Λογισμικό ETABS21

4.1.1 Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.5\text{sec}$

4.1.1.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.5\text{sec}$

4.1.2 Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.8\text{sec}$

4.1.2.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.8\text{sec}$

4.1.3 Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=1\text{sec}$

4.1.3.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=1\text{sec}$

4.1.4 Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{sec}$

4.1.4.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{sec}$

4.2 Συγκριτική Αξιολόγηση Ιδιοπεριόδων (0.3, 0.5, 0.8, 1 sec)

Κεφάλαιο 5: Προσομοιώσεις Πραγματικών Σεισμών

5.1 Επιλογή και Εισαγωγή Σεισμικών Καταγραφών

5.1.1. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.5\text{sec}$

5.1.1.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.5\text{sec}$

5.1.2. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.8\text{sec}$

5.1.2.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.8\text{sec}$

5.1.3. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=1\text{sec}$

5.1.3.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=1\text{sec}$

5.1.4. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{sec}$

5.1.4.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{sec}$

5.2 Συγκρίσεις μεταξύ Διαφορετικών Σεισμών

5.3 Προσομοίωση πραγματικών σεισμών (ITSAK, ENEA, KINE)

5.3.1. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.1.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.2. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.2.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.3. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.3.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.4. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.4.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.5. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.5.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.6. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.6.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.7. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.7.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.8. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.3.8.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

5.4 Συνολική Αξιολόγηση

Συμπεράσματα – Συζήτηση

Βιβλιογραφία

Παραρτήματα

Εισαγωγή

Η σεισμική δράση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό και την ασφάλεια των κατασκευών. Η δυναμική απόκριση ενός κτιρίου υπό σεισμική διέγερση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ιδιοπερίοδο του και τη σχέση αυτής με το φάσμα του σεισμού. Σε περιπτώσεις συντονισμού, οι μετακινήσεις και οι παραμορφώσεις μπορεί να αυξηθούν σημαντικά, οδηγώντας σε σοβαρές βλάβες ή ακόμη και σε κατάρρευση. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη και εφαρμογή συστημάτων ελέγχου ταλαντώσεων αποτελεί βασικό πεδίο έρευνας στη σύγχρονη αντισεισμική μηχανική.

Ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας (Tuned Mass Damper – TMD) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές παθητικού ελέγχου ταλαντώσεων. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην τοποθέτηση μιας πρόσθετης μάζας στην κατασκευή, η οποία συντονίζεται κατάλληλα ώστε να απορροφά μέρος της εισαγόμενης σεισμικής ενέργειας. Ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας έχει εφαρμοστεί σε πληθώρα κατασκευών διεθνώς, τόσο σε ουρανοξύστες και γέφυρες όσο και σε ειδικές κατασκευές, προσφέροντας ουσιαστική μείωση των μετακινήσεων και αύξηση της σεισμικής αντοχής.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζεται η απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων σε κτιριακό φορέα, αξιοποιώντας το λογισμικό ETABS21. Αρχικά αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της δυναμικής των κατασκευών και η βασική λειτουργία του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με θεωρητικά φάσματα και με πραγματικές σεισμικές καταγραφές, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση διαφορετικών ιδιοπεριόδων και λόγων μαζών στην αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Η εργασία αποσκοπεί στη συγκριτική αποτίμηση της απόδοσης του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας υπό διαφορετικά σενάρια σεισμικής διέγερσης, αναδεικνύοντας τις βέλτιστες παραμέτρους σχεδιασμού και επιβεβαιώνοντας τον ρόλο του ως αξιόπιστη λύση για τη βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών.

Κεφάλαιο 1: Βασικές Έννοιες Δυναμικής Κατασκευών

1.1 Συστήματα ενός και Πολλών Βαθμών Ελευθερίας

Η δυναμική των κατασκευών στηρίζεται στην διατύπωση των εξισώσεων κίνησης, οι οποίες δείχνουν την συμπεριφορά ενός φορέα όταν αυτός υπόκειται σε εξωτερικές διεγέρσεις, όπως σεισμούς, δυνάμεις ανέμου αλλά και δυναμικά φορτία. Η μαθηματική διατύπωση της κίνησης εξαρτάται από τον αριθμό των ελευθερίας του συστήματος.

Τα συστήματα ενός βαθμού ελευθερίας, (Single Degree of Freedom – SDOF), αποτελούν την απλούστερη ιδεατή μορφή δυναμικής ανάλυσης. Αποτελούνται, από μια μάζα m , ένα ελατήριο δυσκαμψίας k και έναν αποσβεστήρα απόσβεσης c . Η εξίσωση κίνησης ενός μονοβάθμιου συστήματος είναι η εξής :

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) \quad (1)$$

όπου, $u(t)$, η μετακίνηση

$\dot{u}(t)$, η ταχύτητα

$\ddot{u}(t)$, η επιτάχυνση

$p(t)$, η εξωτερική δυναμική φόρτιση

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση είναι 2^{ης} τάξης και η λύση της δίνει τις ιδιοσυχνότητες και την συμπεριφορά απόσβεσης του συστήματος, (Chopra, 2017).

Πέρα από τα μονοβάθμια συστήματα, υπάρχουν και συστήματα πολλών βαθμών ελευθερίας, (Multi Degree of Freedom – MDOF). Οι κατασκευές στην πράξη δεν συμπεριφέρονται ως απλά μονοβάθμια συστήματα, αλλά ως συστήματα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας. Η γενική μορφή των εξισώσεων κίνησης ενός πολυβάθμιου συστήματος είναι η εξής :

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = p(t) \quad (2)$$

όπου, M , το μητρώο μάζας

C , το μητρώο απόσβεσης

K , το μητρώο απόσβεσης

$u(t)$, το διάνυσμα μετακινήσεων

$p(t)$, το διάνυσμα εξωτερικών φορτίων

Η λύση ενός πολυβαθμιού συστήματος είναι πολύ πιο συνθέτη από αυτή ενός μονοβάθμιου συστήματος, καθώς εντάσσει ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες, (Chopra, 2017).

Οι εξισώσεις κίνησης είναι πολύ σημαντικές και καθοριστικές στον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών, καθώς βοηθάνε στην εκτίμηση των μετακινήσεων και επιταχύνσεων, κατά την διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης και καθιστούν δυνατή την χρήση φασματικής ανάλυσης, η οποία είναι βασικό εργαλείο στον Ευρωκώδικα 8. Οι συντονισμένοι αποσβέστηρες μάζας βασίζονται σε αυτή τη θεωρία, καθώς είναι συστήματα πολλών βαθμών ελευθερίας, αλλά προσομοιώνονται ως μονοβάθμια συστήματα, όταν σχεδιάζονται σε προγράμματα.

1.2 Σχέση Μάζας – Δυσκαμψίας – Ιδιοσυχνότητας

Η ιδιοσυχνότητα ενός φορέα, είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα του φορέα, η οποία εξαρτάται άμεσα από την μάζα και την δυσκαμψία της κατασκευής. Για ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας, (SDOF), η θεμελιώδης σχέση δίνεται από την εξής εξίσωση :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

όπου, ω_n , η γωνιακή συχνότητα (rad/s)

k , η δυσκαμψία του συστήματος (N/m)

m , η μάζα (kg)

Η ιδιοπερίοδος, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για μια πλήρη ταλάντωση, αποτελεί θεμελιώδη και πολύ σημαντική ιδιότητα, καθώς γνωρίζοντας την τιμή της ξέρουμε αν η κατασκευή είναι σε συντονισμό με τις συχνότητες από τις εξωτερικές διεγέρσεις και ακόμη πολλές σημαντικές ιδιότητες. Με την εξής σχέση ορίζεται η ιδιοπερίοδος :

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η ιδιοσυχνότητα αυξάνεται με την αύξηση της δυσκαμψίας και μειώνεται με την αύξηση της μάζας.

Όσο αφορά, τα συστήματα πολλαπλών βαθμών ελευθέριας, (MDOF), η συσχέτιση μάζας – δυσκαμψίας – ιδιοσυχνότητα προκύπτει μέσω της ιδιομορφικής ανάλυσης, δηλαδή με την επίλυση του ιδιοπροβλήματος :

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (5)$$

Η επίλυση οδηγεί σε ένα σύνολο ιδιοσυχνοτήτων ω_i , και αντίστοιχων ιδιομορφών ϕ_i . Οι ιδιοσυχνότητες εκφράζουν τον τρόπο με τον οποίο η κατασκευή ταλαντώνεται φυσικά, ενώ οι ιδιομορφές αντιστοιχούν στα σχήματα παραμόρφωσης κάθε ταλάντωσης.

Η σχέση μεταξύ αυτών των μεγεθών είναι ιδιαίτερα κρίσιμη και σημαντική για τον αντισεισμικό σχεδιασμό, καθώς όπως θα μελετηθεί και στα πλαίσια της διπλωματικής, επηρεάζει την επιλογή και παραμετροποίηση των αποσβεστήρων μάζας, τα οποία σκοπός είναι να συντονιστούν με την κύρια ιδιοπερίοδο της κατασκευής, (Chopra, 2017).

1.3 Φυσικές Συχνότητες και Ιδιομορφές

Οι φυσικές συχνότητες ή ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές ταλάντωσης, αφορούν σημαντικές και θεμελιώδεις έννοιες στη δυναμική ανάλυση των κατασκευών και στον αντισεισμικό σχεδιασμό, (Chopra, 2017). Κάθε φέρον σύστημα, παρουσιάζει ορισμένες ιδιοσυχνότητες, δηλαδή φυσικές συχνότητες, στις οποίες έχει την τάση να ταλαντώνεται το σύστημα όταν επιβληθεί σε διέγερση. Αυτές οι ιδιοσυχνότητες, προκύπτουν λόγω της μάζας και της δυσκαμψίας που χαρακτηρίζουν το σύστημα. Επίσης, καθορίζονται αποκλειστικά από τα φυσικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και είναι ανεξάρτητες από το είδος της εξωτερικής διέγερσης, (Chopra, 2017). Η πρώτη ιδιοσυχνότητα είναι η πιο σημαντική για την ανάλυση, καθώς δείχνει την πιο εύκαμπτη μορφή ταλάντωσης και αναδεικνύει την μεγαλύτερη μετακίνηση του φορέα.

Οι ιδιομορφές είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για τον αντισεισμικό σχεδιασμό, καθώς η πρώτη και κυριώς ιδιομορφή, έχει μεγάλα πλάτη μετακίνησης στην κορυφή, (Chopra, 2017), ενώ πιο ψηλές ιδιομορφές της κατασκευής μπορεί να συμπίπτουν με τοπικές ταλαντώσεις ή στρεπτικές

παραμορφώσεις, (Clough & Penzien, 2003). Γενικότερα, η διερεύνηση των ιδιοσυχνοτήτων βοηθάει στην εκτίμηση της δημιουργίας συντονισμού, λόγω της ταύτισης των συχνοτήτων από εξωτερικές διεγέρσεις με τις ιδιοσυχνότητες μια κατασκευής. Σε περίπτωση συντονισμού, οι αποκρίσεις μπορεί να αυξηθούν δραματικά. (Chopra, 2017).

Για αυτό τον λόγο ο προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων αποτελεί βασικό εργαλείο στην προσομοίωση αποσβεστήρων μάζας, καθώς στηρίζονται στην αρχή της προσαρμογής σε συγκεκριμένες ιδιοπεριόδους της κατασκευής. Στην πράξη, πρέπει η ιδιοσυχνότητα από τον αποσβέστηρα μάζας να ταυτίζεται με την κύρια ιδιοσυχνότητα της κατασκευής και να βρίσκεται όλο το σύστημα σε συντονισμό, για να μειωθούν οι μέγιστες αποκρίσεις του συστήματος, (Soong & Dargush, 1997).

1.4 Σημασία στη Σεισμική Μηχανική

Η σεισμική μηχανική επικεντρώνεται στη μελέτη και πρόβλεψη της απόκρισης των κατασκευών σε σεισμικές διεγέρσεις, με βασικό σκοπό την διασφάλιση της ασφάλειας, της αντοχής, λειτουργικότητας της κατασκευής και της αίσθησης της άνεσης των ενοίκων της, από εξωτερικές διεγέρσεις, (Chopra, 2017). Η θεμελιώδης αρχή στηρίζεται στο ότι οι σεισμοί είναι τυχαία και ιδιαίτερα σύνθετα δυναμικά φαινόμενα, τα οποία προκαλούν πλευρικές δράσεις στη βάση των κατασκευών. Οι δράσεις αυτές ενισχύονται λόγω της αλληλεπίδρασής τους με τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές της κατασκευής.

Ένα σημαντικό και κάποιες φορές επικίνδυνο φαινόμενο για τις κατασκευές, είναι ο συντονισμός. Το φαινόμενο, προκύπτει όταν η κύρια ιδιοσυχνότητα της κατασκευής βρεθεί κοντά στην συχνότητα των κυρίαρχων συχνοτήτων του σεισμού και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνη αύξηση των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών της κατασκευής, (Soong & Dargush, 1997). Η αποφυγή αυτού του φαινομένου, επιτυγχάνεται μέσω ενισχύσεων ή μέσω συστημάτων ταλαντώσεων, όπως οι αποσβέστηρες συντονισμένης μάζας.

Ακόμη, η σεισμική μηχανική έχει αναπτύξει διάφορες μεθόδους, οι οποίες αφορούν δυναμικές αναλύσεις. Κάποιες από αυτές είναι η ισοδύναμη στατική ανάλυση ή αλλιώς ιδιομορφική ανάλυση, η φασματική ανάλυση και η ανάλυση χρονοιστορίας. Αυτές οι μεθοδολογίες αποσκοπούν στον υπολογισμό των αποκρίσεων, μετατοπίσεων ή επιταχύνσεων για διάφορα σεισμικά σενάρια, (Chopra, 2017). Ακόμη, μέσω αυτών των μεθόδων οι μηχανικοί αξιολογούν την συμπεριφορά μιας κατασκευής τόσο στην ελαστική όσο στη μη-γραμμική περιοχή και έτσι εξασφαλίζουν την λειτουργικότητα και προστασία της ανθρώπινης ζωής από σεισμικά φαινόμενα.

Τέλος, η σημασία της σεισμικής μηχανικής, γενικά γίνεται αντιληπτή σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας. Κάποιες περιοχές όπως η Μεσόγειος, η Ασία αλλά και η Ελλάδα, όπου έχουν καταγραφεί ιστορικά γεγονότα σεισμών, έχουν αναδείξει την ανάγκη για την δημιουργία αυστηρών αντισεισμικών κανονισμών, αλλά και σύγχρονες τεχνολογικές λύσεις. Μια αποδεδειγμένα αποτελεσματική και ευρέως χρησιμοποιημένη λύση, αποτελούν οι αποσβέστηρες συντονισμένης μάζας, όμως υπάρχουν και άλλες χρήσιμες λύσεις, όπως τα συστήματα απομόνωσης βάσης και κάποια προηγμένα υλικά, (Nagarajaiah & Varadarajan, 2000).

Κεφάλαιο 2: Συντονισμένος Αποσβεστήρας Μάζας (TMD)

2.1 Θεμελιώδης Αρχή και Σκοπός

Η αυξημένη ανάγκη για τη βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών, και ιδιαίτερα των ευέλικτων και πολυώροφων κτιρίων, έχει οδηγήσει στη συστηματική εφαρμογή τεχνολογιών δομικού ελέγχου. Οι τεχνικές αυτές στοχεύουν στον περιορισμό των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων που προκύπτουν από πλευρικά δυναμικά φορτία, όπως είναι οι σεισμοί και οι άνεμοι, ενισχύοντας τη συνολική αντοχή και λειτουργικότητα των κατασκευών πέρα από τα όρια του παραδοσιακού στατικού σχεδιασμού. Οι στρατηγικές δομικού ελέγχου κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: παθητικά, ημιενεργητικά και ενεργητικά συστήματα.

Μεταξύ των παραπάνω, τα παθητικά συστήματα έχουν ευρεία εφαρμογή λόγω της απλής λειτουργίας τους, της αξιοπιστίας τους και της έλλειψης ανάγκης για εξωτερική τροφοδοσία ή πολύπλοκο σύστημα ελέγχου. Οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην απόσβεση ανεμογενών ταλαντώσεων σε υψηλές κατασκευές, όπως ουρανοξύστες, γέφυρες και τηλεπικοινωνιακοί πύργοι, λόγω της απλής κατασκευής τους και των χαμηλών απαιτήσεων συντήρησης. Επίσης, είναι μια οικονομική λύση για την παροχή ασφάλειας των κατοίκων και για την μείωση των αποκρίσεων και επιταχύνσεων μιας ευαίσθητης κατασκευής. Οι κατασκευές αυτές υπόκεινται σε δυναμικά φορτία που προέρχονται από την τύρβη του ανέμου και το φαινόμενο αποκόλλησης δινών. Όταν η συχνότητα αυτών των φαινομένων συμπίπτει με την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, παρατηρείται συντονισμός που μπορεί να προκαλέσει έντονες ταλαντώσεις, κυρίως στα ανώτερα επίπεδα του φορέα (Naderpour et al., 2024).

Ο Αποσβεστήρας Συντονισμένης Μάζας (Tuned Mass Damper – TMD) αποτελεί μία παθητική τεχνολογία ελέγχου ταλαντώσεων, που χρησιμοποιείται ευρέως για τη μείωση των δυναμικών αποκρίσεων (όπως μετακινήσεις και επιταχύνσεις) σε κατασκευές, κυρίως σε υψηλά κτίρια και γέφυρες (Naderpour et al., 2024). Ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας βασίζεται στην αρχή της συντονισμένης ταλάντωσης, κατά την οποία μία δευτερεύουσα μάζα συντονίζεται με την κύρια ιδιοπερίοδο του φορέα και απορροφά την ενέργεια των ταλαντώσεων, συμβάλλοντας στη μείωση της απόκρισης του φορέα (Soong & Dargush, 1997; Kareem & Kline, 1995). Ο πρωταρχικός στόχος κατά την εφαρμογή ενός αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι η επίτευξη συντονισμού της μάζας του αποσβεστήρα με την πρώτη (θεμελιώδη) ιδιοπερίοδο του κύριου φορέα, η οποία αποτελεί συνήθως την πιο ενεργή μορφή δόνησης κατά τη σεισμική διέγερση (Warburton, 1982). Όσο πιο κοντά βρίσκεται η συχνότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας στην κύρια ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, τόσο αποτελεσματικότερη είναι η απόσβεση των ταλαντώσεων που προκαλούνται από σεισμικά ή ανεμογενή φορτία (Nagarajaiah & Varadarajan, 2000). Ο σωστά ρυθμισμένος συντονισμός έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των μετακινήσεων, των επιταχύνσεων και της σχετικής στροφής (drift) μεταξύ των ορόφων, βελτιώνοντας τη συνολική σεισμική συμπεριφορά και τη λειτουργικότητα της κατασκευής ακόμη και μετά από έντονη διέγερση (Pinkaew et al., 2003; Naderpour et al., 2024).

Κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, λαμβάνονται υπόψη κρίσιμες παράμετροι, όπως η μάζα του αποσβεστήρα, η δυσκαμψία και ο συντελεστής απόσβεσης, ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος δυναμικός συντονισμός με την πρώτη ιδιομορφή της κατασκευής.

Συνήθως, η μάζα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας επιλέγεται μεταξύ 5% και 15% της συνολικής μάζας του φορέα, τιμή που θεωρείται αποδοτική για παθητικά συστήματα απόσβεσης (Farooqui et al., 2024). Η ιδιοπερίοδος του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας προσαρμόζεται κατάλληλα μέσω της ρύθμισης της δυσκαμψίας και της μάζας του, ώστε να συμπίσει με τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του φορέα, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή απορρόφηση ενέργειας και συνεπώς τη βελτιστοποίηση της σεισμικής απόκρισης με ελάχιστο κόστος και κατασκευαστική πολυπλοκότητα.

Η κατασκευή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας περιλαμβάνει μία δευτερεύουσα μάζα, η οποία στηρίζεται σε ελατήρια και αποσβεστήρες, επιτρέποντάς της να ταλαντώνεται ελεγχόμενα με φάση αντίθετη από την ταλάντωση του κύριου φορέα. Η μάζα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας δημιουργεί αντίθετες δυνάμεις που μειώνουν τις ταλαντώσεις της κατασκευής, ενώ το ελατήριο παρέχει την απαραίτητη ελαστικότητα ώστε να επιτευχθεί η συντονισμένη ταλάντωση. Ο αποσβεστήρας απορροφά την κινητική ενέργεια, μειώνοντας το πλάτος και τη διάρκεια των ταλαντώσεων, αποτρέποντας έτσι τη διαρκή δόνηση του συστήματος. Η μαθηματική περιγραφή του συστήματος γίνεται μέσω δύο βαθμών ελευθερίας, όπου οι μετατοπίσεις της κατασκευής και της μάζας περιγράφονται από εξισώσεις κίνησης που λαμβάνουν υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων και την εξωτερική δύναμη.

2.2 Εφαρμογές σε Κατασκευές

Taipei 101, Taiwan

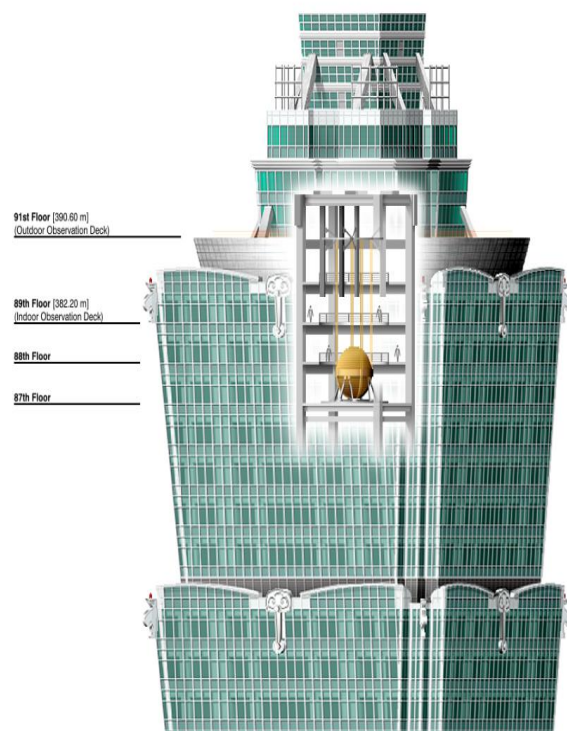
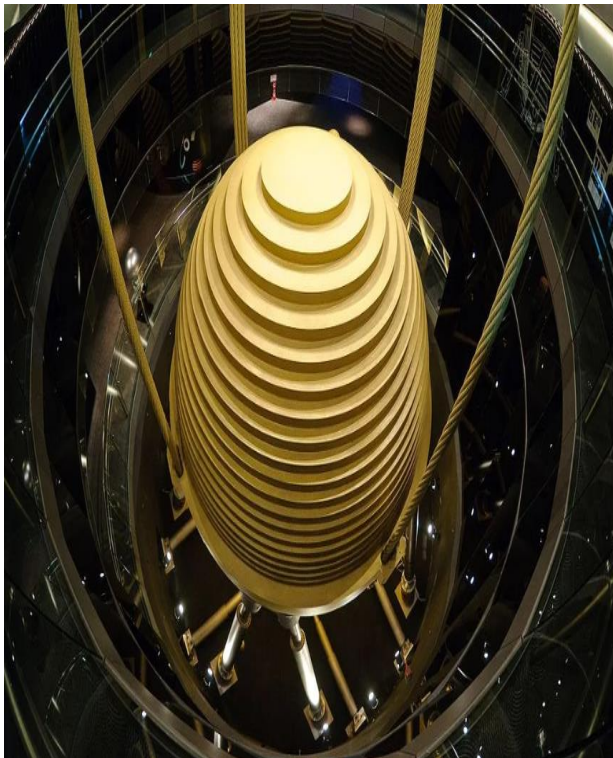
Μια πολύ σημαντική εφαρμογή πάνω στους αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας αποτελεί η κατασκευή του ουρανοξύστη Taipei 101, καθώς αφορά μια πολύ απαιτητική αλλά ζωτικής σημασίας κατασκευή για τον κατασκευαστικό τομέα. Η κατασκευή του Taipei 101 ανατέθηκε στην εταιρεία Rowan Williams Davies & Irwin Inc. (RWDI), με τις εργασίες να ξεκινούν το 1999 και να ολοκληρώνονται το 2005. Το κτίριο σχεδιάστηκε ώστε να ανταποκρίνεται στις ιδιαίτερα απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες της ανατολικής Ταϊβάν, όπου η συχνή εμφάνιση τυφώνων και σεισμών αποτελεί σημαντική πρόκληση για κάθε υψηλή κατασκευή.

Η κατασκευή αποτελείται από 101 ορόφους, έχει συνολικό ύψος 508 μετρά και έχει 5 υπόγεια επίπεδα, τα οποία έχουν κυρίως λειτουργίες στάθμευσης και υποστήριξης του κτιρίου. Το στοιχείο που κάνει τόσο ιδιαίτερη και σημαντική αυτή την κατασκευή είναι η ενσωμάτωση ενός αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας TMD βάρους 660 τόνων, ο οποίος βρίσκεται μεταξύ του 87^{ου} και 92^{ου} ορόφου και συμβάλλει στην μείωση των ταλαντώσεων από άνεμο και σεισμό.

Ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας αποτελείται από 41 χαλύβδινες πλάκες, οι οποίες είναι συγκολλημένες ή μια πάνω στην άλλη και διαμορφώνουν μια σφαιρική μάζα, δηλαδή ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας. Επίσης, υπάρχουν και 2 επιπρόσθετοι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στην κορυφή της κατασκευής και αποσκοπούν στην αντιμετώπιση φορτίων που μπορεί να προέρχονται από τις δυνάμεις του ανέμου.



Εικόνα 1 : Ουρανοξύστης Ταρει 101.



Εικόνα 2,3 : Αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας του Ταρει 101.

John Hancock Tower, Boston

Εξαιρετικά σημαντική είναι και η κατασκευή του John Hancock Tower το οποίο βρίσκεται στην Βοστώνη των Ημερωμένων Πολιτειών. Το John Hancock Tower, γνωστό και ως 200 Clarendon Street, είναι ο ψηλότερος ουρανοξύστης στη συγκεκριμένη πολιτεία με συνολικό ύψος 241 μέτρων και 60 ορόφους. Η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1976 και σχεδιάστηκε από το αρχιτεκτονικό και κατασκευαστικό γραφείο I. M. Pei & Partners, (Smith & Coull, 1991). Η πρόσοψη του κτιρίου αποτελείται από ανακλαστικό γυαλί, το οποίο καθιστά την κατασκευή ευαίσθητη και ευάλωτη σε δυνάμεις ανέμου, (Soong & Dargush, 1997).

Η κατασκευή έχει ενσωματωμένους δυο αποσβέστηρες συντονισμένης μάζας 300 τόνων, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι κοντά στο κορυφή του κτιρίου και από αποσκοπούν στον έλεγχο των ανεμογενών δονήσεων και των σεισμικών διεγέρσεων, (Kareem & Kline, 1995). Οι αποσβέστηρες είναι ρυθμισμένοι τόσο στην δυσκαμψία, όσο και στην μάζα τους, ώστε να συντονίζονται με την κύρια ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, (Soong & Dargush, 1997). Με αυτό τον τρόπο, θα μειωθούν αποτελεσματικά οι μετατοπίσεις στην κορυφή του κτιρίου, όπως και αλλά σημαντικά μεγέθη. Κατά την δράση ισχυρών δυνάμεων ανέμου, οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας ταλαντώνονται και απορροφούν κινητική ενέργεια, καθώς μειώνουν το πλάτος των μετακινήσεων έως και 40%, (Kareem & Kline, 1995).

Το παράδειγμα του John Hancock Tower θεωρείται ορόσημο στην πρακτική εφαρμογή των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας σε ψηλά κτίρια, επηρεάζοντας τον σχεδιασμό πολλών μεταγενέστερων ουρανοξυστών διεθνώς, καθώς βελτίωσε σημαντικά την άνεση των ενοίκων, μειώνοντας σημαντικά το πλάτος των μετακινήσεων των ταλαντώσεων. (Kareem & Kline, 1995).



Εικόνα 4 : Ουρανοξύστης John Hancock Tower .



Εικόνα 5: Αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας του John Hancock Tower.

Citigroup Center, New York

Άλλη μια πολύ σημαντική κατασκευή και από τις πρώτες που ένταξαν αποσβέστηρα συντονισμένης μάζας είναι το Citigroup Center. Το Citigroup Center είναι ένας ουρανοξύστης συνολικού ύψους 279 μέτρων και αποτελείται από 59 ορόφους. Ολοκληρώθηκε το 1977 και βρίσκεται στην Νέα Υόρκη, (Smith & Coull, 1991).

Η περιοχή στην οποία βρίσκεται η κατασκευή, έχει υψηλές δυνάμεις ανεμοφορτίσεων, οι οποίες εντείνουν ακόμα περισσότερο την αύξηση των μεταποιήσεων, λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας της κατασκευής, (Soong & Dargush, 1997). Λύση σε αυτό το ζήτημα έφερε η τοποθέτηση ενός αποσβέστηρα συντονισμένης μάζας, βάρους περίπου 400 τόνων, ο οποίος τοποθετήθηκε στον τελευταίο όροφο του κτιρίου. Ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας αποτελείται από μια μεγάλη χαλύβδινη μάζα, αναρτημένη σε καλώδια και συνδεδεμένη με υδραυλικούς αποσβεστήρες, σχεδιασμένη να συντονίζεται με την πρώτη ιδιοσυχνότητα του κτιρίου (Soong & Dargush, 1997).

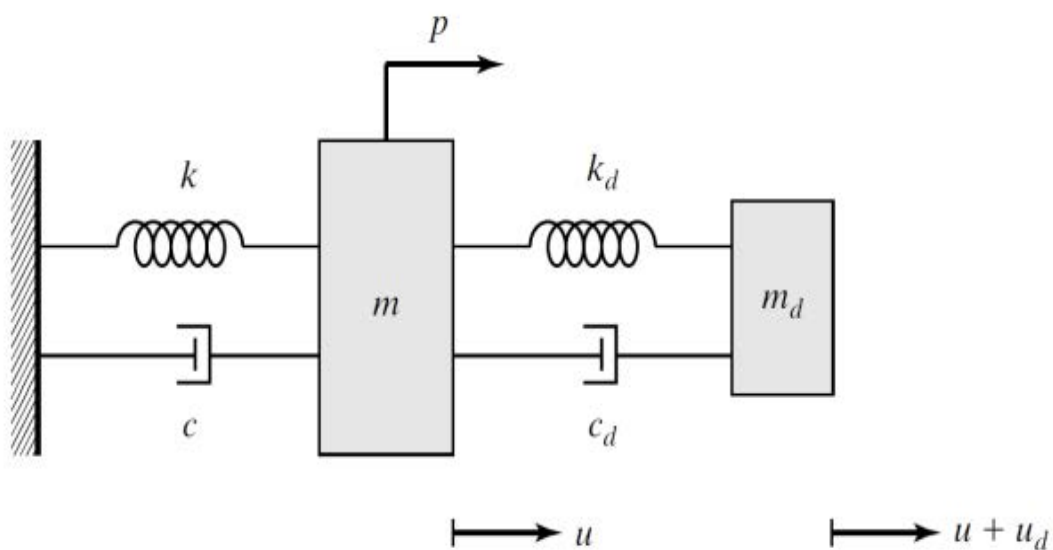
Η λειτουργία του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, η οποία αποδεικνύεται να είναι αποτελεσματική μειώνει τις πλευρικές μετακινήσεις έως και 50%, δημιουργώντας μια αίσθηση άνεσης στους ενοίκους, (Kareem & Kline, 1995). Η δημιουργία του Citigroup Center, άνοιξε τον δρόμο για την εφαρμογή πολλών κατασκευών με ενσωματωμένο αποσβέστηρα συντονισμένης μάζας τόσο τις ΗΠΑ, όσο και σε κτίρια σε παγκόσμια κλίμακα.



Εικόνα 6: Αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας του Citigroup Center.

2.3 Μαθηματική Διατύπωση

Η έννοια του συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας, αναφέρεται σε ένα σύστημα δυο μαζών, εκ των οποίων η μια είναι η κύρια μάζα ή αλλιώς η μάζα της κατασκευής και η άλλη η μάζα του αποσβεστήρα μάζας ή TMD. Στο Σχήμα (1) φαίνεται το σύστημα των δυο μαζών, το οποίο είναι ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθέριας ή αλλιώς μονοβάθμιο σύστημα, (SDOF). Ο δείκτης d αναφέρεται στον συντονισμένο αποσβεστήρα μάζας.



Σχήμα 1: Αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας

Η προσθήκη του συντονισμένου αποσβέστηρα μάζας έχει σαν στόχο να περιορίζει όσο περισσότερο και αποτελεσματικά είναι εφικτό, την κίνηση της κατασκευής όταν αυτή υπόκειται σε μια συγκεκριμένη διέγερση, όπως είναι οι σεισμικές δυνάμεις ή οι ανεμοπιέσεις. Τα βασικά μεγέθη για τον σχεδιασμό ενός αποσβέστηρα μάζας είναι η μάζα m_d , η δυσκαμψία k_d και ο συντελεστής αποσβέσης C_d . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα βέλτιστα αποτελέσματα για την κίνηση του συστήματος, δίνονται όταν η ιδιοσυχνότητα της κύριας μάζας, ταυτιστεί με την ιδιοσυχνότητα του αποσβέστηρα μάζας, δηλαδή $\omega_d = \omega$.

Όταν η κατασκευή υπόκειται σε διέγερση κοντά στη συχνότητα του κυρίου φορέα, η μάζα του αποσβέστηρα μάζας ταλαντώνεται σε αντίθεση φάση με τις κινήσεις της κύριας κατασκευής. Έτσι, αναπτύσσονται δυνάμεις, οι οποίες μειώνουν τις μετακινήσεις και τις επιταχύνσεις του κύριου συστήματος. Η ενέργεια που θα απορροφηθεί από την διέγερση διαχέεται μέσω του αποσβέστηρα.

Το μηχανικό μοντέλο ενός μονοβάθμιου συστήματος με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας περιγράφεται από το εξής σύστημα εξισώσεων, (Chopra, 2017) :

$$m_s \ddot{x}_s + C_s \dot{x}_s + k_s x_s + C_t (\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_t (x_s - x_t) = F(t) \quad (6)$$

$$m_t \ddot{x}_t + C_t (\dot{x}_t - \dot{x}_s) + k_t (x_t - x_s) = 0 \quad (7)$$

όπου : m_s, C_s, k_s , μάζα, δυσκαμψία και απόσβεση του κύριου φορέα

m_t, C_t, k_t , μάζα, δυσκαμψία και αποσβεση του αποσβέστηρα μάζας

x_s, x_t , μετακινήσεις του κύριου φορέα και του αποσβεστήρα μάζας

αντίστοιχα

$F(t)$, εξωτερική δυναμική διέγερση

Η επιλογή των μεγεθών της δυσκαμψίας, της μάζας και της απόσβεσης του αποσβέστηρα μάζας είναι καθοριστική στο σχεδιασμό και στην προσομοίωση του αποσβέστηρα μάζας. Η τιμή σε κάθε μέγεθος αντίστοιχα είναι πολύ σημαντική, καθώς αυτό θα καθορίσει την συμπεριφορά του αποσβέστηρα μάζας σε συγκεκριμένες διεγέρσεις και στην μείωση των μετατοπίσεων και επιταχύνσεων της κατασκευής.

2.4 Ιστορικά Σεισμικά Γεγονότα και Επίδραση στον Σχεδιασμό

Η σεισμική δραστηριότητα αποτελεί ένα από τα πλέον πιο καταστροφικά φυσικά φαινόμενα και ευθύνεται για την καταστροφή αμέτρητων κατασκευών, επηρεάζοντας όλο και περισσότερο την ανάπτυξη των κανονισμών και τεχνικών αντισεισμικού σχεδιασμού. Με το πέρασμα των ετών οι αντισεισμικοί κανονισμοί γίνονται όλο και πιο αυστηροί, ώστε να είναι περισσότερο ασφαλής και ισχυρές οι κατασκευές, καθώς και να παρέχουν μια αίσθηση άνεσης στους ενοίκους της.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο σεισμός του Σαν Φρανσίσκο του έτους 1906, ο οποίος ήταν της τάξης των 7.9 στην κλίμακα ρίχτερ. Ο συγκεκριμένος σεισμός ήταν πολύ καταστροφικός, καθώς κατέστρεψε μεγάλο μέρος της πόλης, αποκαλύπτοντας την αδυναμία των τότε κατασκευών να αντέξουν ισχυρές οριζόντιες φορτίσεις (Bolt, 2004). Ωστόσο, ήταν ένα σημαντικό γεγονός, καθώς αποτέλεσε αφετηρία για την εισαγωγή στοιχειωδών αντισεισμικών κριτηρίων στον σχεδιασμό κατασκευών στις ΗΠΑ.

Αντίστοιχα, ένας σεισμός μεγάλης κλίμακας ρίχτερ είναι του Μεγάλου Κάντο στην Ιαπωνία το 1923, ο οποίος κατέστρεψε πάνω το 60% των κτιρίων του Τόκιο και της Γιοκοχάμα, οδηγώντας έτσι στην ανάπτυξη της Ιαπωνίας όσο αφορά το κομμάτι των αντισεισμικών σχεδιασμών, (Housner, 1997). Η ενίσχυση των κατασκευών με οπλισμένο σκυρόδεμα και η εφαρμογή αυστηρότερων προτύπων θεμελίωσης αποτέλεσαν άμεσες συνέπειες του γεγονότος.

Ακόμη πιο πρόσφατοι, είναι ο σεισμός του Northridge το 1994 και ο σεισμός του Kobe το 1995, οι οποίοι ανέδειξαν τις αδυναμίες και τις ανεπαρκείς γνώσεις στις μεταλλικές συνδέσεις που υπήρχαν εκείνη την εποχή. Όλες αυτές οι βλάβες, οι οποίες προήλθαν από τους σεισμούς οδήγησαν σε βελτιωμένες τεχνικές συγκόλλησης και σε κάποιες αναθεωρήσεις, όσο αφορά τα πρότυπα σχεδιασμού, (FEMA 350, 2000; SAC Joint Venture, 2000).

Όσο αφορά και την Ελλάδα, ορόσημο αποτελούν οι σεισμοί του 1978 στην Θεσσαλονίκη και του 1999 στην Αθήνα, για την ενίσχυση και επικαιροποίηση του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού. Οι συγκεκριμένοι σεισμοί ήταν πολύ καταστροφικοί, όσο αφορά την καταστροφή των κατασκευών και την απώλεια ανθρωπίνων ζωών. Ο σεισμός της Αθήνας ειδικότερα, οδήγησε σε ευρεία εφαρμογή προγραμμάτων ενίσχυσης υφιστάμενων κτιρίων, τα οποία εφαρμόζονται ακόμη και σήμερα. Πιο σημαντικό όμως ήταν, η υιοθέτηση και επικαιροποίηση πιο αυστηρών απαιτήσεων για τον έλεγχο πλαστιμότητας και ασφάλειας των κατασκευών.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που αντλούν οι μηχανικοί μέσω αυτού του φυσικού φαινομένου, είναι τα δεδομένα που προέρχονται από κάθε σεισμικό γεγονός και στη συνέχεια η κατάλληλη μοντελοποίηση των σεισμικών κανονισμών. Η καταγραφή και ανάλυση των ζημιών οδηγεί στη συνεχή εξέλιξη των κανονισμών, όπως ο Ευρωκώδικας 8 και στην ανάπτυξη σύγχρονων τεχνολογιών αντισεισμικής προστασίας, όπως τα συστήματα απόσβεσης ενέργειας και οι απομονωτές βάσης.

2.5 Αντισεισμικοί Κανονισμοί – Ευρωκώδικας 8

Ως γνωστόν, η Ελλάδα θεωρείται η πιο σεισμογενής χώρα της Ευρώπης και μια από τις πιο σεισμογενείς στον κόσμο. Η σεισμική αντοχή και η ασφάλεια των κατασκευών είναι θεμελιώδης και πολύ καθοριστικοί στόχοι της πολιτικής μηχανικής, ειδικά σε χώρες όπως είναι η Ελλάδα. Για τον λόγο αυτό, έχουν δημιουργηθεί και επικαιροποιηθεί διεθνώς αλλά και στην Ελλάδα, αντισεισμικοί κανονισμοί, οι οποίοι καθορίζουν τις απαιτήσεις που θα έχει η κατασκευή για να κατασκευασθεί και την διαστασιολόγηση των κτιρίων, με σκοπό να αντέχουν σε συγκεκριμένες διεγέρσεις, όπως είναι οι σεισμικές δυνάμεις και οι ανεμοπιέσεις.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ο βασικός κανονισμός και αυτός που έχει ευρεία χρήση για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών είναι ο Ευρωκώδικας 8, (EN 1998), ο οποίος περιέχει πλαίσιο κανόνων για τον υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης. Ο Ευρωκώδικας 8, γενικά έχει σαν φιλοσοφία τον σχεδιασμό με βάση την ικανότητα της κατασκευής. Αυτό σημαίνει, ότι τα κτίρια

σχεδιάζονται με τρόπο ώστε να εμφανίζουν πλαστικές αρθρώσεις σε συγκεκριμένες θέσεις, δηλαδή στοιχεία όπως οι δοκοί πρέπει να έχουν χαμηλότερη αντοχή, ώστε να παραλάβουν τις πλαστικές παραμορφώσεις και να δημιουργηθούν εκεί οι πλαστικές αρθρώσεις, από τα στοιχεία που πρέπει να παραμείνουν ελαστικά, όπως είναι τα υποστυλώματα, (Fardis, 2009).

Συγκεκριμένα, στα πλαίσια του Ευρωκώδικα 8 προσδιορίζονται, οι τιμές σχεδιασμού της σεισμικής επιτάχυνσης αναφοράς ανάλογα με τη σεισμική ζώνη, τα φάσματα σχεδιασμού, οι μέθοδοι ανάλυσης και πιο συγκεκριμένα η ισοδύναμη στατική, η δυναμική φασματική και ανάλυση χρονοιστορίας και τέλος καθορίζονται οι απατήσεις πλαστιμότητας.

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο συντελεστής συμπεριφοράς q , ο οποίος είναι πολύ καθοριστικός και σημαντικός για τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Ο συντελεστής q είναι μια θεμελιώδης παράμετρος και εκφράζει την ικανότητα μιας κατασκευής να απορροφά και να διαχέει την ενέργεια, που προέρχεται από ένα σεισμικό γεγονός χωρίς να καταρρεύσει. Επίσης, εκφράζει τον λόγο της ελαστικής σεισμικής δύναμης που θα απαιτούνταν, ώστε να είναι η κατασκευή πλήρως ελαστική, προς την μειωμένη δύναμη σχεδιασμού από τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Ο συντελεστής q μειώνει τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού σε σχέση με εκείνα που θα προέκυπταν από μια πλήρως ελαστική ανάλυση, (Chopra, 2017).

Ακόμη, ο Ευρωκώδικας 8 παρέχει προδιαγραφές για διάφορες κατηγορίες κατασκευών, όπως είναι οι γέφυρες, τοίχοι αντιστήριξης και μη δομικά στοιχεία. Αυτό δείχνει πως ο Ευρωκώδικας 8, είναι καθοριστικός και μεγάλης σημασίας για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών.

2.6 Ιστορική Αναδρομή στη Χρήση TMDs

Η χρήση αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας (Tuned Mass Dampers – TMDs) ως μέσου παθητικής προστασίας έναντι ταλαντώσεων έχει τις ρίζες της στις αρχές του 20ού αιώνα. Η θεμελιώδης αρχή παρουσιάστηκε το 1909 από τον H. Frahm, ο οποίος ανέπτυξε και κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ένα σύστημα αντίβαρου για την εξουδετέρωση των ταλαντώσεων σε πλοία (Frahm, 1909). Στα επόμενα έτη, η θεωρητική θεμελίωση της τεχνολογίας αναπτύχθηκε περαιτέρω από τους Ormondroyd & Den Hartog (1928) και στη συνέχεια επεκτάθηκε στο κλασικό έργο του Den Hartog *Mechanical Vibrations* (1940).

Η πρώτη πρακτική εφαρμογή αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας σε ψηλό κτίριο καταγράφηκε στη δεκαετία του 1970, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον ουρανοξύστη John Hancock Tower στη Βοστώνη, όπου τοποθετήθηκαν παθητικά συστήματα για τη μείωση των ανεμογενών ταλαντώσεων (Purdue University, n.d.; Miyamoto International, 2024).

Ένα από τα πλέον εμβληματικά και τεχνικά προηγμένα παραδείγματα αποτελεί ο ουρανοξύστης Taipei 101 στην Ταϊβάν, όπου εγκαταστάθηκε ένας σφαιρικός αποσβεστήρας μάζας βάρους 660 τόνων στον 88ο όροφο. Ο συγκεκριμένος αποσβεστήρας έχει σχεδιαστεί ώστε να μειώνει τόσο τις σεισμικές όσο και τις ανεμογενείς ταλαντώσεις, λειτουργώντας εντός εύρους $\pm 1,5$ m (Taipei 101, n.d.; Business Insider, 2024).

Από τα τέλη του 20ού αιώνα έως και σήμερα, οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε υψηλά κτίρια, πύργους τηλεπικοινωνιών, καλωδιωτές γέφυρες και στάδια, με περισσότερα από 100 επιβεβαιωμένα έργα εφαρμογής παγκοσμίως (ResearchGate,

n.d.; Wikipedia, 2024). Η τεχνολογία θεωρείται πλέον ώριμη και ενσωματώνεται ήδη στα πρώτα στάδια σχεδιασμού σύγχρονων κατασκευών.

Η πρόοδος της υπολογιστικής τεχνολογίας και των μεθόδων προσομοίωσης επέτρεψε την εξέλιξη των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας από απλά μηχανικά συστήματα σε παραμετρικά βελτιστοποιημένες διατάξεις, οι οποίες ενισχύουν την αντισεισμική ανθεκτικότητα, περιορίζουν τη δυναμική απόκριση και αυξάνουν τη λειτουργικότητα των κατασκευών μετά από έντονα σεισμικά γεγονότα (Wired, 2010; Miyamoto International, 2024).

Η ένταξη των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας (Tuned Mass Dampers – TMD) στην κατασκευή αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και συνεργασία μεταξύ αρχιτεκτόνων, στατικών μηχανικών και μηχανολόγων (Farooqui et al., 2024). Η συνήθης πρακτική υπαγορεύει την τοποθέτηση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας στον ανώτατο όροφο ή στην οροφή του κτηρίου, καθώς σε αυτό το σημείο καταγράφονται οι μεγαλύτερες μετακινήσεις κατά την κυρίαρχη ιδιομορφή, μεγιστοποιώντας έτσι την απορρόφηση ενέργειας μέσω της σχετικής κίνησης.

2.7 Ενεργά και Ημιενεργά Συστήματα (ATMD, STMD)

Παρά τα σημαντικά τους πλεονεκτήματα, η χρήση των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας υπό σεισμικά φορτία εμφανίζει ορισμένους περιορισμούς εξαιτίας της απρόβλεπτης και πολύπλοκης φύσης των σεισμών. Ως αποτέλεσμα, η ερευνητική κοινότητα έχει στραφεί σε πιο εξελιγμένες μορφές αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας, όπως οι ενεργητικοί αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (ATMD), τα οποία χρησιμοποιούν αισθητήρες και ενεργοποιητές για την άμεση ρύθμιση των χαρακτηριστικών τους, καθώς και οι ημιενεργητικοί αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (STMD), που συνδυάζουν στοιχεία παθητικού και προσαρμοζόμενου ελέγχου για αποτελεσματικότερη απόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης. Τα παθητικά συστήματα, όπως οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (Tuned Mass Dampers – TMD) λειτουργούν χωρίς εξωτερική παροχή ενέργειας, αξιοποιώντας τις κινήσεις του ίδιου του φορέα για την ενεργοποίηση του μηχανισμού απόσβεσης (DEICON, n.d.; Naderpour et al., 2024).

Επιπλέον, έχει μελετηθεί η χρήση πολλαπλών ή κατανεμημένων αποσβεστήρων (MTMD), οι οποίοι τοποθετούνται σε διάφορα επίπεδα της κατασκευής, βελτιώνοντας τη συνολική της απόδοση. Η εφαρμογή αυτών των καινοτόμων τεχνολογιών αποτελεί πεδίο εντατικής μελέτης και αναμένεται να συμβάλει ουσιαστικά στην ενίσχυση της σεισμικής αντοχής υφιστάμενων και νέων κατασκευών, ειδικά σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, (Saeid Khorsand, Fayaz R. Rofooei, 2024).

Στη σύγχρονη αντισεισμική μηχανική, τα Active Tuned Mass Dampers (ATMD) και Semi-Active Tuned Mass Dampers (STMD) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματική μείωση των δυναμικών αποκρίσεων. Τα ATMD ενσωματώνουν ελεγχόμενους ενεργοποιητές, επιτρέποντας υψηλής απόδοσης απόσβεση με μικρότερη μάζα σε σχέση με τα παθητικά TMDs (Koutsoloukas et al. 2022; Maślanka 2023). Αντίστοιχα, τα ημιενεργητικά TMDs χρησιμοποιούν ρυθμιζόμενους αποσβεστήρες και δυναμική ρύθμιση δυσκαμψίας, χωρίς να απαιτούν συνεχές εξωτερικό ρεύμα (Owji et al. 2011; Sabetahd et al. 2022).

Οι παθητικοί και ενεργοί Tuned Mass Dampers (TMD) διαφέρουν σημαντικά ως προς τη λειτουργία, την ευελιξία και το κόστος (Chandra, 2018). Οι παθητικοί TMD βασίζονται σε μηχανικά μέσα, όπως

ελατήρια, μάζες και αποσβεστήρες, και λειτουργούν χωρίς την ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας ή συστημάτων ελέγχου, καθιστώντας τους απλούς, αξιόπιστους και οικονομικούς στην εγκατάσταση και συντήρησή τους (Smith, 2006). Ωστόσο, η στατικότητα και η λιγότερη προσαρμοστικότητα τους περιορίζουν την αποτελεσματικότητά τους σε μεταβαλλόμενες φορτίσεις ή διαφορετικές συχνότητες, καθώς σχεδιάζονται για συγκεκριμένες καταστάσεις (Den Hartog, 1956). Αντίθετα, οι ενεργοί TMD ενσωματώνουν αισθητήρες και ελεγκτές, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή της συμπεριφοράς τους σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που τους καθιστά πολύ πιο αποτελεσματικούς σε πολύπλοκα και μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα (Soong, 1990). Παρόλο που παρέχουν υψηλότερη απόδοση στη μείωση των δονήσεων και βελτιστοποιούνται συνεχώς, έχουν υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων τους και της ανάγκης για ηλεκτρική ενέργεια και τεχνική υποστήριξη (Chandra, 2018). Συνολικά, η επιλογή μεταξύ παθητικών και ενεργών TMD εξαρτάται από τις απαιτήσεις του έργου, το διαθέσιμο προϋπολογισμό και τις ανάγκες ευελιξίας και αποτελεσματικότητας, με τα ενεργά συστήματα να προσφέρουν μεγαλύτερη απόδοση σε αντάλλαγμα του αυξημένου κόστους και της τεχνικής πολυπλοκότητας (Smith, 2006).

Η μάζα, (md) του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι ένα σημαντικό στοιχείο, τοποθετημένη συνήθως σε σημείο όπου οι ταλαντώσεις της κατασκευής είναι μέγιστες, ώστε να μεγιστοποιείται η αποτελεσματικότητα του συστήματος (Smith, 2006). Η κίνηση αυτής της μάζας παράγει μια αντίθετη δύναμη που συμβάλλει στην απόσβεση των δομικών ταλαντώσεων. (Den Hartog, 1956). Το ελατήριο, (kd) παρέχει την αναγκαία ελαστικότητα για την ταλάντωση της μάζας. Η δυσκαμψία του ελατηρίου καθορίζει τη φυσική συχνότητα του συστήματος μάζας-ελατηρίου, η οποία πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να συμπίπτει με τη συχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής για βέλτιστη απόδοση. (Soong, 1990). Ο αποσβεστήρας, (cd) έχει ως ρόλο την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας μέσω της απόσβεσης, μειώνοντας τη διάρκεια και το πλάτος των ταλαντώσεων (Smith, 2006). Χωρίς αποσβεστήρα, το σύστημα θα συνέχιζε να ταλαντώνεται για μεγάλο χρονικό διάστημα, μειώνοντας την αποτελεσματικότητά του TMD (Den Hartog, 1956).

Σε αντίθεση με πιο σύνθετα ενεργητικά ή υβριδικά συστήματα, οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας έχουν το πλεονέκτημα της απλότητας στον σχεδιασμό, τη συντήρηση και την εγκατάσταση, ενώ δεν απαιτούν εξωτερική πηγή ενέργειας για τη λειτουργία τους, γεγονός που μειώνει το λειτουργικό κόστος σε βάθος χρόνου (Soong & Dargush, 1997). Η οικονομικότητα ενός αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας εξαρτάται κυρίως από τη μάζα της διάταξης, που συχνά κυμαίνεται μεταξύ 5–15% της συνολικής μάζας της κατασκευής, τον τύπο απόσβεσης, καθώς και την τοποθέτησή του, η οποία γίνεται συνήθως στον τελευταίο όροφο. Από πλευράς πρακτικότητας, οι TMDs προσαρμόζονται εύκολα στην αρχιτεκτονική και δομική διαμόρφωση του κτηρίου και μπορούν να ενσωματωθούν χωρίς ιδιαίτερες παρεμβάσεις στο λειτουργικό ή αισθητικό κομμάτι της κατασκευής. Συνεπώς, οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας θεωρούνται μια οικονομικά βιώσιμη και τεχνικά αποδοτική λύση για την αναβάθμιση της σεισμικής ανθεκτικότητας νέων αλλά και υφιστάμενων υψηλών κατασκευών, ιδίως σε περιοχές με μέτρια ή υψηλή σεισμικότητα.

2.8 Η έννοια του συντονισμού

Όταν η συχνότητα της εξωτερικής φόρτισης προσεγγίζει ή συμπίπτει με μία από τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, τότε το σύστημα εισέρχεται σε κατάσταση συντονισμού, κατά την οποία οι αποκρίσεις των μετακινήσεων και επιταχύνσεων αυξάνονται σημαντικά. Η απόκριση αυτή είναι

μεγαλύτερη για τις χαμηλές ιδιομορφές, ειδικά για την πρώτη, καθώς αυτές είναι πιο ευαίσθητες σε διέγερση χαμηλών συχνοτήτων όπως είναι τα περισσότερα σεισμικά φαινόμενα. Η κατανόηση του συντονισμού είναι καθοριστικής σημασίας για το σεισμικό σχεδιασμό, καθώς η ανεξέλεγκτη συντονισμένη απόκριση μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του φορέα. Για τον λόγο αυτό, πολλές τεχνικές ελέγχου όπως οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (TMD) στοχεύουν ακριβώς στην παρέμβαση στον συντονισμό, με σκοπό τη μείωση της ενέργειας που μεταδίδεται στο σύστημα σε κρίσιμες συχνότητες, (Chopra, 2020).

Η φυσική ερμηνεία του συντονισμού είναι ότι η ενέργεια που προέρχεται από την εξωτερική διέγερση, δηλαδή κάποιον σεισμό ή κάποια δύναμη ανέμου, να συσσωρεύεται συνεχώς στο σύστημα, καθώς οι ταλαντώσεις του συστήματος και οι εξωτερικές διεγέρσεις βρίσκονται σε φάση. Όμως, η συσσώρευση αυτή της ενέργειας οδηγεί την κατασκευή να αναπτύσσει μέγιστες αποκρίσεις, οι οποίες μπορούν περιοριστούν με την παρουσία απόσβεσης.

Ο συντονισμός μπορεί να οδηγήσει αρχικά σε υπερβολικές μετακινήσεις της κατασκευής, το οποίο μπορεί να επηρεάσει την άνεση των ενοίκων και την λειτουργικότητα του κτιρίου. Ακόμη, μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση των εντατικών μεγεθών, για παράδειγμα ροπές, τέμνουσες και αξονικά φορτία. Αυτό, προκαλεί διαρροές στα υλικά και αστοχίες διατομών, (Soong & Dargush, 1997).

Οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας έχουν αποδειχθεί διαχρονικά ιδιαίτερα αποτελεσματικοί και σημαντικοί στην μείωση των αποκρίσεων, όπως είναι οι μετακινήσεις και οι επιταχύνσεις. Η ρύθμιση των αποσβεστήρων να συντονίζονται με την κυρίαρχη ιδιομορφή της κατασκευής είναι τεράστιας σημασίας, καθώς οδηγεί στην μείωση των αποκρίσεων και απορροφάνε την ενέργεια που προέρχεται από τις ταλαντώσεις των διεγέρσεων.

2.9 Πραγματικές αστοχίες λόγω συντονισμού

Ιστορικά το φαινόμενο του συντονισμού έχει οδηγήσει σε σοβαρές αστοχίες σε διάφορες κατασκευές, όπως κτίρια και γέφυρες, αποδεικνύοντας την κρισιμότητα της κατανόησης και της αντιμετώπισής του στη μηχανική.

Από τις πιο γνωστές περιπτώσεις αστοχίας λόγω συντονισμού είναι η γέφυρα Tacoma Narrows, στις ΗΠΑ, το 1940. Η κατάρρευση της γέφυρας, οφείλεται στις ισχυρές ανεμοπιέσεις που αναπτυχθήκαν στην γέφυρα και λόγω της μικρής της απόσβεσης. Αυτή η διέγερση, προκάλεσε έντονες ταλαντώσεις σε συντονισμό με την φυσική συχνότητα του φορέα. Το φαινόμενο αυτό, οδήγησε στην πλήρη κατάρρευση της γέφυρας, (Billah & Scanlan, 1991).

Άλλη μια περίπτωση είναι η γέφυρα Millennium, όταν παρουσίασε πλευρικάλαντώσεις από την πρώτη ημέρα λειτουργίας της. Αυτό προκλήθηκε, από τα βήματα των πεζών που διέσχιζαν την γέφυρα, τα οποία συγχρονίστηκαν με μια από τις ιδιοσυχνότητες του καταστρώματος. Έτσι, κρίθηκε ότι πλέον δεν ήταν ασφαλή η διέλευση στη συγκεκριμένη γέφυρα και το περιστατικό οδήγησε στο κλείσιμο της γέφυρας, (Dallard et al., 2001).

Μια ιδιαίτερη περίπτωση είναι του John Hancock Tower, ο οποίος βρίσκεται στην Βοστώνη. Ο συγκεκριμένος πολυώροφος ουρανοξύστης, ήταν πολύ ευαίσθητος στην διέγερση που προέρχεται από τις δυνάμεις ανέμου, η οποία παρουσίασε ταλαντώσεις, που αποδοθήκαν στον συντονισμό με τις φυσικές συχνότητες της κατασκευής. Το συγκεκριμένο φαινόμενο συντονισμού, προκάλούσε δυσφορία και αίσθηση κίνδυνου στους ενοίκους των υψηλών οροφών. Λύση, στο συγκεκριμένο

πρόβλημα έδωσε η εγκατάσταση δυο μεγάλων αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας, τεράστιου βάρους, οι οποίοι εξασφάλισαν στην μείωση των αποκρίσεων μετατοπίσεων και επιταχύνσεων, (Connor, 2003).

Ακόμη μια περίπτωση είναι του Citigroup Center, στην Νέα Υόρκη, το οποίο αντιμετώπιζε σοβαρή πρόβλημα ευστάθειας εξαιτίας της δυναμικής ενίσχυσης από τον άνεμο, καθώς και μεγάλο πρόβλημα ήταν η ιδιαίτερη γεωμετρία και αυτό οδηγούσε αρκετά μεγάλες μετατοπίσεις, λόγω των ταλαντώσεων. Το πρόβλημα, λύθηκε με την εγκατάσταση ενός αποσβέστηρα μάζας βάρους 400 τόνων στην κορυφή της κατασκευής, που βελτίωσε θεαματικά την δυναμική συμπεριφορά του φορέα, (Keller, 2003).

2.10 Τρόποι αποφυγής συντονισμού

Για την αποφυγή του φαινομένου του συντονισμού υπάρχουν κάποιες αποτελεσματικές μέθοδοι, οι οποίες αποσκοπούν στην μείωση των μετακινήσεων, των εντατικών καταπονήσεων και σε αστοχία του φορέα.

Μια πολύ βασική στρατηγική και πιο άμεση είναι η μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του φορέα. Όταν η κύρια ιδιοσυχνότητα του φορέα ταυτίζεται με τις συχνότητες των διεγερτικών φορτίων, όπως ο σεισμός και οι ανεμοπιέσεις, η κατασκευή βρίσκεται σε συντονισμό. Αυτή η μέθοδος, αποσκοπεί στην απομάκρυνση της κύριας ιδιοσυχνότητας της κατασκευής, από τις συχνότητες των εξωτερικών διεγέρσεων. Αυτό, μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας ή μειώνοντας την δυσκαμψία της κατασκευής, μέσω τοιχωμάτων ή διαγώνιων μεταλλικών συνδέσμων και μέσω της μεταβολής της συνολικής μάζας, καθώς η ιδιοσυχνότητα εξαρτάται από την δυσκαμψία και από την μάζα της κατασκευής, (Chopra, 2017).

Άλλη μια αποτελεσματική μέθοδος είναι η αύξηση της απόσβεσης της κατασκευής. Αυτό, βοηθά στην μείωση του πλάτους των ταλαντώσεων, που προέρχονται από τις εξωτερικές διεγέρσεις, κοντά στην συχνότητα συντονισμού. Μια πολύ αποτελεσματική και διεθνώς σε χρήση μέθοδος, για την αύξηση της απόσβεσης, είναι η ενσωμάτωση αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας, οι οποίοι απορροφούν και διαχέουν ενέργεια, (Soong & Dargush, 1997).

Εκτός από παθητικούς αποσβέστηρες μάζας, έχουν αναπτυχθεί και ημιενεργητικά συστήματα, αλλά και ενεργητικά συστήματα αποσβεστήρων μάζας, τα οποία αποσκοπούν με τον δικό τους τρόπο στην μείωση των ταλαντώσεων και στην αύξηση της απόσβεσης της κατασκευής.

Άλλη μια ευρέως χρησιμοποιημένη στην μηχανική των κατασκευών, είναι η χρήση αντισεισμικής μόνωσης, (base isolation). Αυτή η μέθοδος, αφορά την τοποθέτηση μονωτήρων στην θεμελίωση της κατασκευής, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από καουτσούκ και μέταλλο. Έτσι, μειώνεται η μεταφορά της σεισμικής ενέργειας στον φορέα, απομακρύνοντας την κύρια ιδιοπερίοδο του από τις συχνότητες διέγερσης, (Chopra, 2017).

2.11 Λόγοι απόσβεσης

Η απόσβεση αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την πλήρη και σωστή ρύθμιση των TMD στις κατασκευές. Η τιμή της απόσβεσης που θα επιλεγεί για τον καθορισμό των παραμέτρων του αποσβέστηρα συντονισμένης μάζας είναι μεγάλης σημασίας, καθώς μειώνεται και η διάρκεια και το πλάτος των ταλαντώσεων που δέχεται η κατασκευή. Παράλληλα, μειώνονται και οι τιμές των

αποκρίσεων, όσο αφορά τις μετακινήσεις και τις επιταχύνσεις που προκύπτουν μέσω των ταλαντώσεων σεισμικών δυνάμεων και δυνάμεις ανέμου. Ο λόγος απόσβεσης είναι καθοριστικός στην απόκριση του φορέα, καθώς επηρεάζει τη μέγιστη μετακίνηση, τη συχνότητα συντονισμού. Σε σεισμικό σχεδιασμό, συνήθως επιλέγεται 5% κρίσιμη απόσβεση σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, (Chopra, 2017).

Ο λόγος απόσβεσης ορίζεται από την εξής εξίσωση : $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

όπου : **c**: ο συντελεστής απόσβεσης,

k: η δυσκαμψία του συστήματος,

m: η μάζα.

Ανάλογα με το μέγεθος του ζ , οι ταλαντώσεις ενός συστήματος κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

Υποκρίσιμη αποσβεση ($0 < \zeta < 1$). Το σύστημα ταλαντώνεται φθίνοντα. Αυτή είναι η πιο συχνή περίπτωση στις κατασκευές.

Κρίσιμη απόσβεση ($\zeta = 1$). Το σύστημα επιστρέφει στην ισορροπία χωρίς ταλάντωση, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Υπερκρίσιμη απόσβεση ($\zeta > 1$). Η απόκριση είναι αργή, χωρίς ταλαντώσεις.

2.12 Επιρροή της απόσβεσης στην απόκριση και στις ιδιοσυχνότητες

Ο μηχανισμός της απόσβεσης, αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους μηχανισμούς στην σύγχρονη δυναμική απόκριση των κατασκευών, καθώς επηρεάζει άμεσα την ένταση και τη διάρκεια των ταλαντώσεων, από εξωτερικές διεγέρσεις, όπως σεισμούς και ανεμοπιέσεις. Πρακτικά, εκφράζει την απώλεια ενέργειας του συγκεκριμένου συστήματος, λόγω φαινομένων τριβής, ανελαστικές παραμορφώσεις ή συσχέτιση με το περιβάλλον, (Chopra, 2017).

Στα γραμμικά συστήματα ενός βαθμού ελευθερίας (SDF), η παρουσία απόσβεσης δεν μεταβάλλει τη φυσική ιδιοσυχνότητα του φορέα χωρίς απόσβεση, αλλά εισάγει την έννοια της αποσβεσμένης συχνότητας. Η συχνότητα αυτή είναι λίγο χαμηλότερη από την αντίστοιχη του ιδανικού, μη αποσβεσμένου συστήματος και εξαρτάται από τον λόγο απόσβεσης ζ . Όσο αυξάνεται η τιμή του ζ , τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η μείωση στη συχνότητα ταλάντωσης, (Chopra, 2017).

Η αποσβεση έχει ακόμα μεγαλύτερη επίδραση στην απόκριση της κατασκευής, καθώς η ύπαρξη της απόσβεσης σε ένα σύστημα μειώνει το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης, καθώς περιορίζει τις σχετικές μετακινήσεις μετά την λήξη της διέγερσης. Στην περίπτωση κάποιου ισχυρού σεισμικού γεγονότος, η απόσβεση μπορεί να παίξει τεράστιο και καθοριστικό ρόλο στον περιορισμό των εντατικών καταπονήσεων και της λειτουργικότητας της κατασκευής, μετά την διέγερση.

Στα συστήματα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας (MDF), η αποσβεση επιδρά σε κάθε ιδιομορφή ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει, ότι κάθε ιδιομορφή χαρακτηρίζεται από την δική της φαινόμενη αποσβεσμένη ιδιοσυχνότητα, οπότε οι υψηλότερες ιδιομορφές, επηρεάζονται διαφορετικά από τις χαμηλότερες, (Chopra, 2017).

Τέλος, η απόσβεση επηρεάζει σημαντικά και το φαινόμενο του συντονισμού. Σε κατασκευές, με πολύ χαμηλή αποσβεση, η απόκριση μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, άμα συμπέσουν η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, με την συχνότητα των διεγέρσεων. Αντίθετα, η αύξηση του λόγου απόσβεσης οδηγεί σε μείωση του μέγιστου πλάτους απόκρισης, καθιστώντας το σύστημα, μη εκτεθειμένο σε δυναμικές διεγέρσεις, (Graff, 1975).

Κεφάλαιο 3: Θεωρία Σεισμικής Διέγερσης και Ιδιομορφών

3.1 Σεισμική Διέγερση και Απόκριση Κατασκευών

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, η αποδέσμευση σεισμικής ενέργειας από μια τεκτονική ασυνέχεια (ρήγμα) προκαλεί την εκπομπή ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται μέσω του φλοιού της γης. Αυτά τα κύματα – γνωστά ως P (διαμήκη), S (εγκάρσια) και επιφανειακά – φτάνουν στη θεμελίωση της κατασκευής και μετατρέπονται σε εδαφικές κινήσεις (μετατοπίσεις, ταχύτητες και επιταχύνσεις). Οι κατασκευές ανταποκρίνονται σε αυτήν τη διέγερση μέσω ταλαντώσεων, οι οποίες εξαρτώνται από τις δυναμικές τους ιδιότητες, όπως η μάζα, η δυσκαμψία και η απόσβεση. Για την ακριβή αποτύπωση της σεισμικής συμπεριφοράς μιας δομής, ο σεισμός μοντελοποιείται μέσω της εφαρμογής εδαφικής επιτάχυνσης στη βάση της κατασκευής, μετατρέποντας το πρόβλημα σε ένα σύστημα ενός ή περισσότερων βαθμών ελευθερίας που διεγείρεται δυναμικά στη βάση του (Chopra, 2017). Αυτή η μορφοποίηση επιτρέπει την ανάλυση της σεισμικής απόκρισης μέσω μεθόδων όπως η ακριβής ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης ή η φασματική ανάλυση.

Κάθε δομικό σύστημα, όταν υποβάλλεται σε ταλαντώσεις χωρίς εξωτερική διέγερση, εμφανίζει συγκεκριμένα πρότυπα κίνησης και συχνότητες, γνωστά ως ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες αντίστοιχα. Οι ιδιομορφές εκφράζουν το σχετικό τρόπο με τον οποίο παραμορφώνεται η κατασκευή κατά την ταλάντωση, ενώ οι ιδιοσυχνότητες αντιστοιχούν στις φυσικές συχνότητες ελεύθερης ταλάντωσης του συστήματος, εξαρτώμενες αποκλειστικά από τις ιδιότητες μάζας και δυσκαμψίας. Σε πολύπλοκα συστήματα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, όπως τα πολυώροφα κτίρια, προκύπτει ένα φάσμα ιδιομορφών και συχνοτήτων. Η πρώτη ιδιομορφή, συνήθως, παρουσιάζει τις μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το δυναμικό σχεδιασμό, καθώς η συντονισμένη απόκριση σε αυτή μπορεί να οδηγήσει σε έντονες καταπονήσεις. Γι' αυτό, σε συστήματα παθητικής απόσβεσης όπως οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας, στόχος είναι η ρύθμιση της ιδιοπεριόδου του αποσβεστήρα έτσι ώστε να συμπίπτει ή να πλησιάζει την πρώτη ιδιοπερίοδο του φορέα, προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη απόσβεση και ενεργειακή απορρόφηση (Chopra, 2017). Η τροποποίηση της απόκρισης μπορεί να γίνει μέσω της και modal response spectrum analysis, με στόχο την εκτίμηση της απόκρισης όταν ενεργοποιηθούν πολλές ιδιομορφές υπό σεισμική διέγερση (Chopra, 2017).

Όταν η συχνότητα της εξωτερικής φόρτισης προσεγγίζει ή συμπίπτει με μία από τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, τότε το σύστημα εισέρχεται σε κατάσταση συντονισμού, κατά την οποία η απόκριση είτε είναι μετακίνηση είτε επιτάχυνση, αυξάνεται σημαντικά. Η απόκριση αυτή είναι μεγαλύτερη για τις χαμηλές ιδιομορφές, ειδικά για την πρώτη, καθώς αυτές είναι πιο ευαίσθητες σε διέγερση χαμηλών συχνοτήτων, όπως είναι τα περισσότερα σεισμικά φαινόμενα, (Chopra, 2017). Η ανεξέλεγκτη συντονισμένη απόκριση μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του φορέα και για τον λόγο αυτό, πολλές τεχνικές ελέγχου, όπως οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (TMD),

στοχεύουν ακριβώς στην παρέμβαση στον συντονισμό, με σκοπό τη μείωση της ενέργειας που μεταδίδεται στο σύστημα σε κρίσιμες συχνότητες.

Οι ιδιομορφές έχουν επίδραση στη συνολική συμπεριφορά του φορέα, καθώς ο Ευρωκώδικας 8 απαιτεί η συνολική συμμετοχή μάζας να είναι μεγαλύτερη σε ποσοστό 90%. (EN 1998-1 §4.3.3.3 Chopra, 2017). Η σωστή εφαρμογή της μεθόδου αυτής επιτρέπει την αναγνώριση κρίσιμων ιδιομορφών (πρώτη, δεύτερη κ.λπ.) και τη στοχευμένη ενίσχυση των στοιχείων που υπερφορτώνονται.

Η υποθετική πλήρης πάκτωση που χρησιμοποιείται συχνά σε ψηλές δομές θεωρείται συντηρητική, καθώς μεταφέρει όλες τις σεισμικές επιταχύνσεις στον φορέα χωρίς ελαστικά στοιχεία από το έδαφος. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερη ακαμψία αλλά και υψηλότερες εντάσεις στον κορυφαίο φορέα (Chopra, 2016).

3.2 Η έννοια του Ιδιοπροβλήματος

Ο όρος ιδιοπρόβλημα αναφέρεται στην διαδικασία εύρεσης των ιδιοσυχνοτήτων και των αντίστοιχων ιδιομορφών που προκύπτουν από ένα γραμμικό και ελαστικό σύστημα πολλών βαθμών ελευθέριας. Η θεμελιώδης εξίσωση κίνησης που περιγράφει ένα τέτοιο σύστημα χωρίς αποσβесеση είναι :

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = 0 \quad (8)$$

,όπου M είναι το μητρώο μαζών, K το μητρώο δυσκαμψίας και $u(t)$ το διάνυσμα μετατοπίσεων. Με την υπόθεση της αρμονικής λύσης της μορφής, $u(t) = \phi e^{i\omega t}$, όπου ϕ είναι το ιδιοδιάνυσμα ή αλλιώς ιδιομορφή και ω η κυκλική ιδιοσυχνότητα η εξίσωση κίνησης παίρνει την μορφή :

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (9)$$

Η ύπαρξη μη τετριμμένης λύσης προϋποθέτει η ορίζουσα του συστήματος να μηδενίζεται, οπότε η εξίσωση μετατρέπεται σε :

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (10)$$

Η επίλυση αυτής της εξίσωσης παρέχει τις ιδιοτιμές ω_i^2 , από τις οποίες προκύπτουν και οι φυσικές συχνότητες $f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$, όπως και οι αντίστοιχες ιδιομορφές ϕ_i . Κάθε ιδιοσυχνότητα αντιπροσωπεύει μια χαρακτηριστική συχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής. Οι συχνότητες αυτές καθορίζουν την ευαισθησία του φορέα σε φαινόμενα συντονισμού υπό δυναμικές διεγέρσεις, όπως σεισμούς ή ανεμοπιέσεις.

Στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 8, οι πρώτες ιδιομορφές και οι αντίστοιχες συμμετοχές μάζας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης μέσω της μεθόδου φασματικής ανάλυσης, (Chopra, 2017; Clough & Penzien, 2003).

3.3 Μέθοδοι Επίλυσης του Ιδιοπροβλήματος

Η επίλυση των ιδιοπροβλημάτων σε κατασκευές είναι θεμελιώδης διαδικασία στη δυναμική ανάλυση. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του συστήματος, εφαρμόζονται είτε ακριβείς μέθοδοι, είτε προσεγγιστικές μέθοδοι, (Chopra, 2017).

Η ακριβείς μέθοδοι, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο βασίζονται στην άμεση επίλυση της εξίσωσης :

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (11)$$

όπου, K , το μητρώο δυσκαμψίας, M , το μητρώο μάζας και ω , οι ιδιοσυχνότητες. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται περισσότερο σε συστήματα, τα οποία αποτελούνται από μικρό αριθμό βαθμών ελευθέριας, όπου η επίλυση της εξίσωσης είναι εφικτή, (Clough & Penzien, 2003). Σε αυτή την περίπτωση, οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές, προκύπτουν με μαθηματική ακρίβεια, χωρίς αριθμητικές προσεγγίσεις.

Όσο αφορά, τις προσεγγιστικές μεθόδους, όπου αποτελούνται από μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθέριας, δεν αρκεί η απευθείας επίλυση με την βοήθεια της εξίσωσης (11), αλλά με την βοήθεια προσεγγιστικών μεθόδων. Για τον λόγο αυτό, σε πραγματικές κατασκευές χρησιμοποιούνται αυτές οι μέθοδοι, οι οποίες επιτρέπουν τον υπολογισμό μόνο των πρώτων ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων, οι οποίες έχουν και την μεγαλύτερη σημασία στη σεισμική απόκριση, (Chopra, 2017). Οι προσεγγιστικές μέθοδοι είναι απαραίτητες στην αντισεισμική μηχανική, καθώς τα πραγματικά κτίρια αποτελούνται από εκατοντάδες ή μπορεί και χιλιάδες βαθμούς ελευθέριας, οπότε είναι απαραίτητη η χρήση τους.

Κλασσικές προσεγγιστικές μέθοδοι, αποτελούν η μέθοδος Rayleigh, η οποία βασίζεται στην παραδοχή ότι η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα ενός φορέα μπορεί να υπολογιστεί από τον λόγο της δυναμικής ενέργειας, προς τη μάζα και την δυσκαμψία του, (Chopra, 2017).

3.4 Παραδείγματα σε κατασκευές

Οι φυσικές συχνότητες και οι αντίστοιχες ιδιομορφές μιας κατασκευής, είναι εργαλεία για την καθιέρωση και εντοπισμό φαινομένων συντονισμού από εξωτερικές διεγέρσεις, τα οποία πρέπει να αποφεύγονται.

Όσο αφορά, πολυώροφα κτίρια, σε ουρανοξύστες όπως το Ταιρεί 101 ή το John Hancock Tower, η ιδιομορφική ανάλυση που εφαρμόστηκε ανέδειξε ότι οι χαμηλότερες ιδιομορφές, είναι και οι κυρίαρχες στην πλευρική απόκριση. Συγκεκριμένα, το Ταιρεί 101, εμφάνισε μια ιδιαίτερη ευαισθησία σε ανεμογενείς φορτίσεις, λόγω του ύψους του αλλά και της γεωμετρίας του. Αυτό το γεγονός, οδήγησε στην τοποθέτηση αποσβέστηρα συντονισμένης μάζας στην κορυφή του κτιρίου, για την αποφυγή μεγάλων ταλαντώσεων, (Smith & Coull, 1991).

Άλλο ένα σημαντικό παράδειγμα στην αντισεισμική μηχανική, το οποίο οδήγησε και στην μεγαλύτερη αυστηρότητα και στην ανάγκη συστηματικής ιδιομορφικής ανάλυσης, αποτελεί η Tacoma Narrows (1940). Η συγκεκριμένη γέφυρα κατέρρευσε, λόγω δημιουργίας συντονισμού με τις δυνάμεις ανέμου, (Billah & Scanlan, 1991).

Οι ιδιομορφές σε συνδυασμό με την χαμηλή δυσκαμψία πύργων τηλεπικοινωνιών, μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλές ιδιοσυχνότητες, οι οποίες υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να συμπίσουν με τις διεγέρσεις από ανέμους. Σε αυτή τη περίπτωση, η χρήση ιδιομορφικής ανάλυσης είναι απαραίτητη για να γίνει η πρόβλεψη μεγάλων ταλαντώσεων και να ληφθούν μετρά ενίσχυσης ή η ένταξη απόσβεσης στο σύστημα.

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση μονοπακτού υποστυλώματος με και χωρίς την χρήση TMD

4.1 Προσομοίωση με Λογισμικό ETABS21

Η συγκεκριμένη προσομοίωση αφορά ένα μονόπακτο υποστυλωμα πάνω στο οποίο έγινε η σύγκριση των φασμάτων αποκρίσεων μετατοπίσεων και επιταχύνσεων, σε δυο ξεχωριστά μοντέλα πάνω στο λογισμικό ETABS, μέσω αναλύσεων χρονιστορίας για σταθερή ιδιοπερίοδο, διάφορες περιόδους διέγερσης και διάφορες μάζες του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Το πρώτο μοντέλο αποτελείται από το υποστυλωμα χωρίς τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, ενώ το άλλο ομοίως το υποστυλωμα με τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Τα δεδομένα του πειράματος είναι η ιδιοπερίοδος του συστήματος η οποία είναι 0.5sec και η μάζα η οποία είναι συγκεντρωμένη στην κορυφή του υποστυλώματος και έχει τιμή 10000Kg. Μέσω αυτών των δεδομένων υπολογίστηκε η δυσκαμψία του υποστυλώματος με την χρήση της σχέσης ($T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$), για δεδομένη ιδιοπερίοδο και μάζα. Μετά από αυτό, μέσω της σχέσης ($k = \frac{3EI}{L^3}$), υπολογίστηκε η τετραγωνική διατομή του υποστυλώματος, η οποία κατά την ιδιομορφική ανάλυση στο ETABS, θα δίνει ως αποτέλεσμα ιδιοπερίοδο 0.5sec.

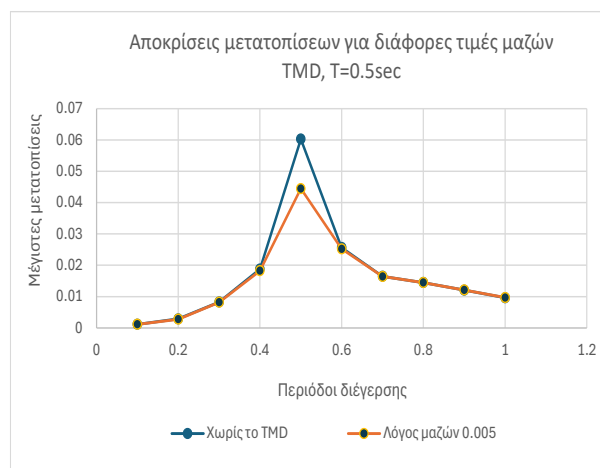
Όσο αφορά την διαδικασία της προσομοίωσης, αρχικά ορίστηκε η τετραγωνική διατομή του υποστυλώματος μέσω του ETABS, η οποία προκύπτει (320X320 mm²), βάση των δεδομένων της προσομοίωσης. Υστέρα, σχεδιάστηκε το υποστυλωμα ύψους 3 μέτρων και στην συνέχεια πακτώθηκε στη βάση του, καθώς θα μελετηθούν οι μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων στην κορυφή του. Στο μοντέλο χωρίς τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας τοποθετήθηκε στην κορυφή του υποστυλώματος συγκεντρωμένη μάζα 10000 Kg, κατά τις διευθύνσεις X και Y.

Όσο αφορά το μοντέλο με τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, ορίστηκαν link elements, για τις διάφορες τιμές μαζών των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας, τα οποία θα λειτουργήσουν σαν TMD. Αρχικά, τα όλα τα links ορίστηκαν να είναι linear και έπειτα προσδιορίστηκαν οι δυσκαμψίες για κάθε μάζα των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας μέσω της σχέσης ($T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$). Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν μάζες του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας από 50 έως 300Kg, με σκοπό να προσδιορισθεί η μέγιστη αποδοτικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας στην μείωση των μετατοπίσεων, σε σχέση με το ποσοστό μάζας της κατασκευής, με την μάζα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Οι δυσκαμψίες που προέκυψαν από τους υπολογισμούς ορίστηκαν στις διευθύνσεις Y, Z, ενώ στην διεύθυνση X, ανατέθηκε μια πολύ μεγάλη τιμή δυσκαμψίας για να μην μετακινείται σε αυτή την διεύθυνση. Το μήκος του link,

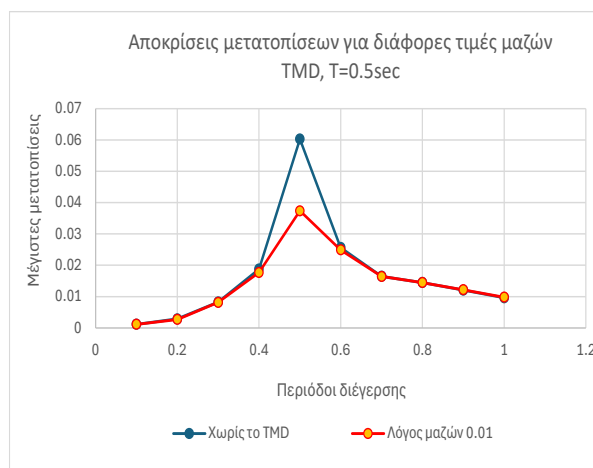
καθορίστηκε ίσο με 0.1m και στο άνω άκρο του link τοποθετήθηκαν οι διάφορες μάζες των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας.

Μετά από αυτό ορίστηκαν συναρτήσεις χρονιοιστορίας και στα δύο μοντέλα, για διαφορετικές περιόδους διέγερσης, συγκεκριμένα από 0.1 έως 1sec και για σταθερό time-step 0.005sec. Για κάθε συνάρτηση χρονιοιστορίας προσαρμόστηκε καταλληλά ο αριθμός των κύκλων της ταλάντωσης, ώστε να επιτευχθεί σταθερό time-step 0.005sec. Ομοίως για κάθε συνάρτηση χρονιοιστορίας, ορίστηκαν τα load cases για nonlinear modal τύπο και προσαρμόστηκε καταλληλά ο αριθμός των time-steps για κάθε load case. Πραγματοποιήθηκαν όλες οι αναλύσεις για τις διάφορες περιόδους διεγέρσεων και έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα δυο μοντέλα. Τέλος, έγινε σύγκριση μέγιστων μετατοπίσεων και για διάφορες ιδιοπεριόδους της κατασκευής, με διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας.

4.1.1 Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.5\text{sec}$



Διάγραμμα 1 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.005.

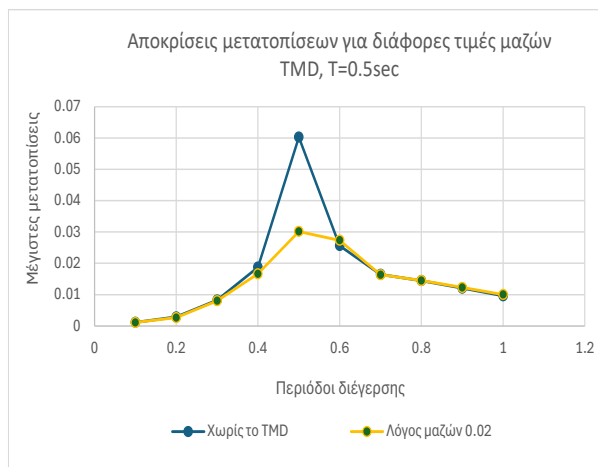


Διάγραμμα 2 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.01.

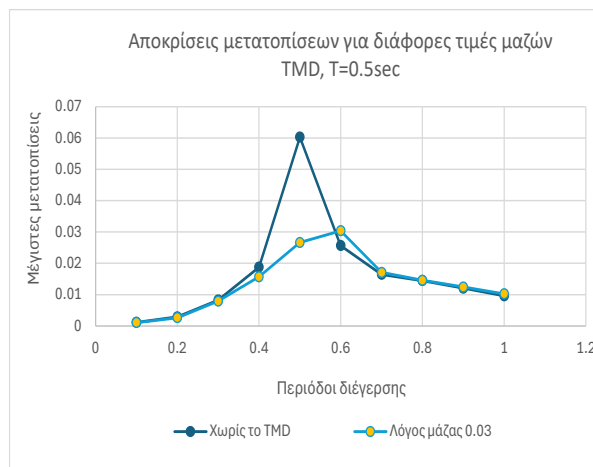
Στο Διάγραμμα 1 και 2 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις του μονοπακτού υποστυλώματος για διάφορες περιόδους διέγερσης, με και χωρίς την παρουσία αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για λόγους μαζών 0.005 και 0.01 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι στην περιοχή του συντονισμού (περίπου στα 0.5 sec), οι μέγιστες μετατοπίσεις χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας φτάνουν περίπου τα 0.060 mm, ενώ με την παρουσία του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνονται σε περίπου 0.044 mm, για λόγο μαζών 0.005. Αντίστοιχα για τον λόγο μαζών 0.01, παρατηρούνται ακόμα μεγαλύτερες μειώσεις της μετατόπισης στην περιοχή του συντονισμού, καθώς η μέγιστη μετατόπιση φτάνει περίπου στα 0.04 mm. Αυτό δείχνει ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας επιτυγχάνει μείωση της απόκρισης της κατασκευής κατά περίπου 27%, για λόγο μαζών 0.005 και 38% για λόγο μαζών 0.01.

Εκτός της κορυφής συντονισμού, η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι μικρότερη, καθώς οι δύο καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί αποτελεσματικά κυρίως

κοντά στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του φορέα, περιορίζοντας σημαντικά την ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα μέσω συντονισμού. Έτσι, βελτιώνεται η δυναμική συμπεριφορά του υποστυλώματος, με σαφή μείωση των μέγιστων μετακινήσεων στην κρίσιμη περιοχή.



Διάγραμμα 3 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.02.



Διάγραμμα 4 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.03.

Στα παραπάνω διαγράμματα καταγράφεται η απόκριση του συστήματος με και χωρίς την παρουσία αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για λόγο μαζών 0.02 και 0.03. Είναι σαφές ότι και στις δύο τις περιπτώσεις, η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται γύρω από την ιδιοπερίοδο της κατασκευής $T=0.5$ sec, όπου και εκδηλώνεται το φαινόμενο του συντονισμού. Η τοποθέτηση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε σαφή μείωση των μετατοπίσεων στην κρίσιμη αυτή περιοχή, με το αποτέλεσμα να γίνεται εντονότερο όσο αυξάνεται ο λόγος μάζας. Συγκεκριμένα, για λόγο μαζών 0.03 η μείωση είναι πιο αισθητή σε σχέση με τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας με λόγο μαζών 0.02, γεγονός που καταδεικνύει τη σημασία της σωστής επιλογής της μάζας του αποσβεστήρα. Σε μεγαλύτερες ή μικρότερες περιόδους διέγερσης, οι καμπύλες συγκλίνουν, δείχνοντας ότι η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι περιορισμένη εκτός περιοχής συντονισμού. Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας στη μείωση των αποκρίσεων μετακίνησης, ιδιαίτερα σε λόγους μαζών που υπερβαίνουν το 0.02.

Στα διαγράμματα που παρουσιάζουν τις αποκρίσεις μετατοπίσεων για διαφορετικούς λόγους μαζών (0.005–0.05), παρατηρείται ότι η αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της μάζας του. Σε όλες τις περιπτώσεις, η μέγιστη απόκριση εμφανίζεται γύρω από την ιδιοπερίοδο της κατασκευής (περίπου 0.5 sec), γεγονός που συνδέεται με την εμφάνιση συντονισμού.

Για μικρούς λόγους μαζών (π.χ. 0.005 και 0.01), η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι περιορισμένη, με τις καμπύλες να εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις από το αρχικό σύστημα χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Αυτό δείχνει ότι πολύ μικρές μάζες δεν επαρκούν για να απορροφήσουν σημαντικά ποσά ενέργειας από τις ταλαντώσεις.

Καθώς ο λόγος μαζών αυξάνεται (0.02–0.03), η μείωση των μετατοπίσεων γίνεται πιο εμφανής, ιδιαίτερα στην περιοχή του συντονισμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας επιτυγχάνει καλύτερη σύζευξη με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος και αποσβένει αποτελεσματικά την ενέργεια των ταλαντώσεων.

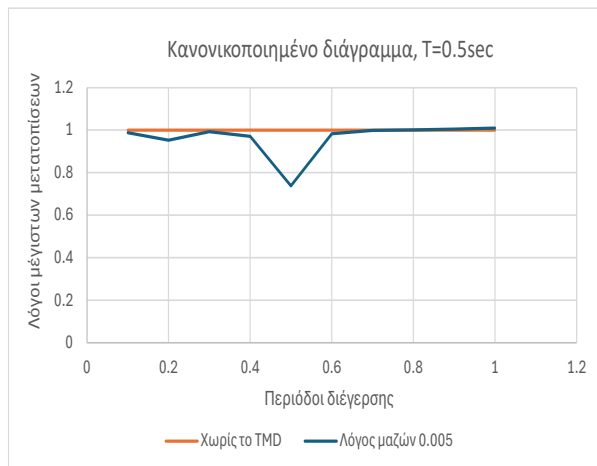
Συμπερασματικά, η ανάλυση των διαγραμμάτων αποκρίσεων για διάφορους λόγους μαζών ανέδειξε την επίδραση της μάζας του αποσβεστήρα στη σεισμική συμπεριφορά του συστήματος. Στην περιοχή του συντονισμού, περίπου στα $T=0.5$ sec, οι μετατοπίσεις χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας φτάνουν τη μέγιστη τιμή των 0.060–0.065 mm. Με λόγο μαζών 0.005, η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται κατά περίπου 20%, στα 0.047 mm. Με λόγο 0.01 οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση, της τάξης του 40%, με τις μετατοπίσεις να περιορίζονται γύρω στα 0.035 mm. Τέλος, για λόγο 0.02, η μείωση είναι η πιο εντυπωσιακή, καθώς οι μετατοπίσεις περιορίζονται στα 0.030 mm, δηλαδή περίπου 54% μικρότερες σε σχέση με το αρχικό μοντέλο, όπως και με λόγο 0.03.

Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η μάζα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, τόσο μεγαλύτερη είναι η αποτελεσματικότητά του στην απόσβεση των κρίσιμων μετακινήσεων στην περιοχή συντονισμού. Ωστόσο, εκτός της περιοχής αυτής, οι αποκρίσεις με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι λίγο μεγαλύτερες μετά την περιοχή του συντονισμού με την αύξηση του λόγου μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, το οποίο σημαίνει ότι, όσο αυξάνεται ο λόγος μάζας του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας προς την μάζα της κατασκευής, τόσο μη αποτελεσματική γίνεται η μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων, σε μεγαλύτερες περιόδους διέγερσης.

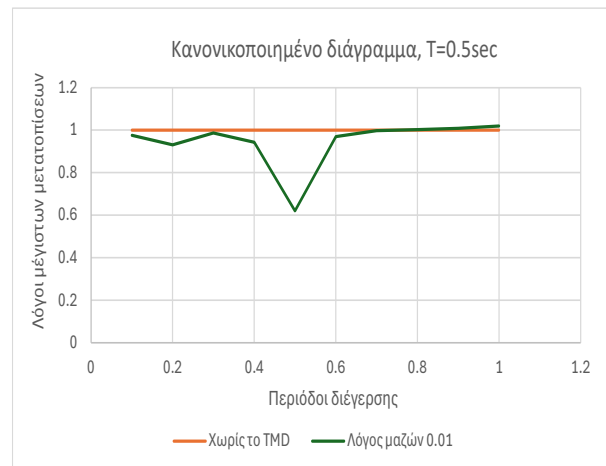
Συνολικά, η ανάλυση δείχνει ότι η τοποθέτηση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε σημαντική μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων στην κρίσιμη περιοχή συντονισμού, με την αποτελεσματικότητα να αυξάνεται όσο μεγαλώνει ο λόγος μαζών. Έτσι, η σωστή επιλογή του μεγέθους του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής.

4.1.1.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.5$ sec

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε η κανονικοποίηση των μέγιστων μετατοπίσεων και ο υπολογισμός των λόγων μέγιστων μετατοπίσεων των μοντέλο με τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, προς το μοντέλο χωρίς τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και έπειτα έγινε η σύγκριση των διαγραμμάτων που προκύπτουν για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και διάφορες περιόδους διέγερσης.

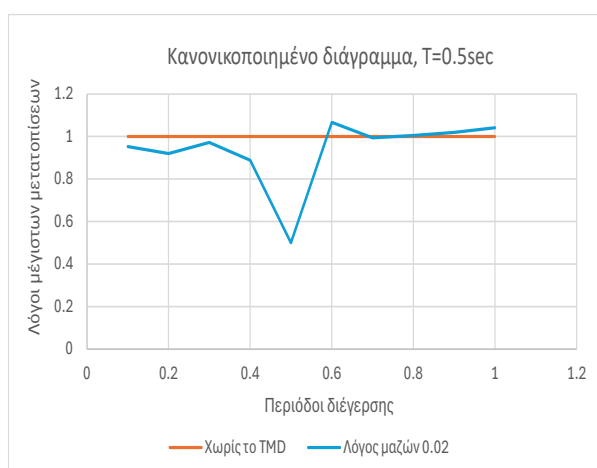


Διάγραμμα 5 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.005.

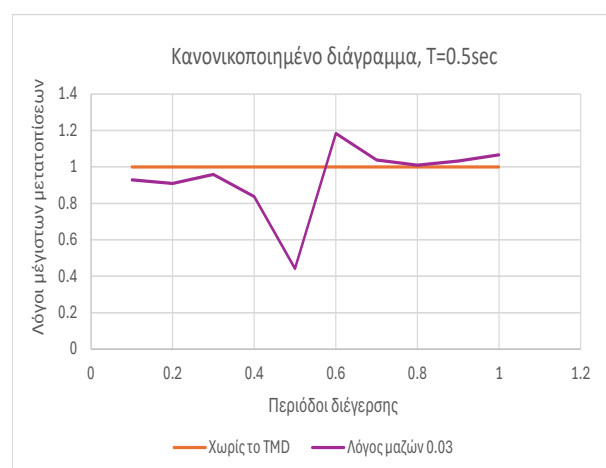


Διάγραμμα 6 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.01.

Στα Διαγράμματα 5 και 6 παρουσιάζονται οι καμπύλες των κανονικοποιημένων μέγιστων μετατοπίσεων για λόγους μαζών 0.005 και 0.01 αντίστοιχα, σε ιδιοπερίοδο $T=0.5\text{sec}$. Διαπιστώνεται εύκολα, ότι η ύπαρξη του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας (Tuned Mass Damper) μειώνει τις μετατοπίσεις του κύριου συστήματος, ιδιαίτερα στην περιοχή όπου εμφανίζεται συντονισμός, δηλαδή κοντά στις ιδιοπεριόδους του συστήματος. Συγκεκριμένα, η καμπύλη με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παρουσιάζει εμφανή βύθιση σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, γεγονός που καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα της διάταξης στην απορρόφηση ενέργειας. Επιπλέον, καθώς αυξάνεται ο λόγος μαζών (από 0.005 σε 0.01), η απόσβεση των μετατοπίσεων γίνεται πιο έντονη, δείχνοντας ότι μεγαλύτερη μάζα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται σημαντικά η απόκριση εκτός της περιοχής συντονισμού. Συνεπώς, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τον ρόλο του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας ως αποτελεσματικού μέσου μείωσης μετακινήσεων, με την απόδοσή του να εξαρτάται άμεσα από τον λόγο μαζών.



Διάγραμμα 7 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μάζας 0.02.

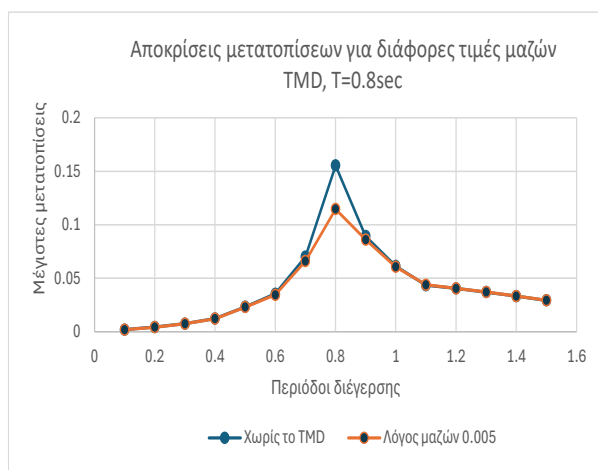


Διάγραμμα 8 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μάζας 0.03.

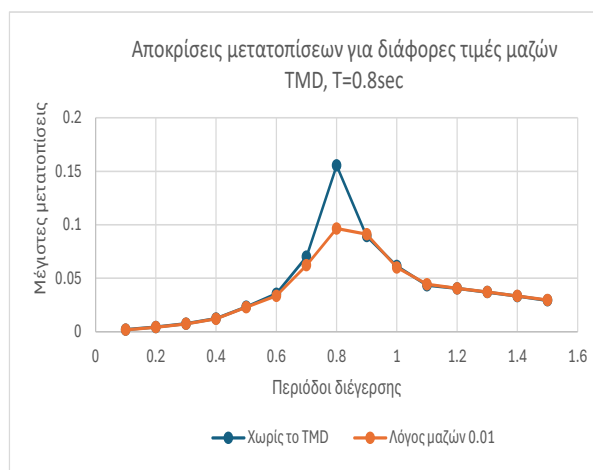
Στα Διαγράμματα 7 και 8 παρουσιάζεται η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας για μεγαλύτερους λόγους μαζών (0.02 και 0.03). Διαπιστώνεται ότι η ύπαρξη του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας συνεχίζει να μειώνει σημαντικά τις μετατοπίσεις στην περιοχή του συντονισμού, με τη χαρακτηριστική βύθιση των καμπυλών να γίνεται πιο έντονη σε σχέση με μικρότερους λόγους μαζών. Όσο αυξάνεται η μάζα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, η αποτελεσματικότητα της διάταξης βελτιώνεται, επιτυγχάνοντας ακόμη μεγαλύτερη μείωση των μέγιστων μετακινήσεων. Ωστόσο, γίνεται εμφανές ότι για σχετικά υψηλούς λόγο μαζών (π.χ. 0.03), οι καμπύλες τείνουν να παρουσιάζουν και αυξήσεις μετατοπίσεων σε περιοχές εκτός του κυρίως συντονισμού, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αύξηση της μάζας του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας δεν οδηγεί πάντοτε σε γραμμική βελτίωση της συμπεριφοράς. Συνεπώς, αν και η απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας ενισχύεται με την αύξηση της μάζας, απαιτείται προσεκτική επιλογή του λόγο μαζών ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες επιδράσεις σε άλλα φάσματα συχνοτήτων.

Συμπερασματικά, όπως φαίνεται όταν αυξάνεται σημαντικά η μάζα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, αυξάνεται και η ιδιοπερίοδος του συστήματος, με αποτέλεσμα την αύξηση των λόγων μέγιστων μετατοπίσεων μετρά την περιοχή του συντονισμού. Μεγάλης σημασίας, είναι επίσης η μείωση του λόγου μαζών στην περιοχή συντονισμού με την αύξηση της μάζας του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Η μείωση είναι πολύ σημαντική καθώς στο μοντέλο με λόγο μαζών 0.005, ο λόγος μετατοπίσεων στην περιοχή του συντονισμού είναι περίπου 0.73, ενώ για λόγο μάζας 0.03, ο λόγος είναι περίπου 0.45.

4.1.2 Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.8\text{sec}$



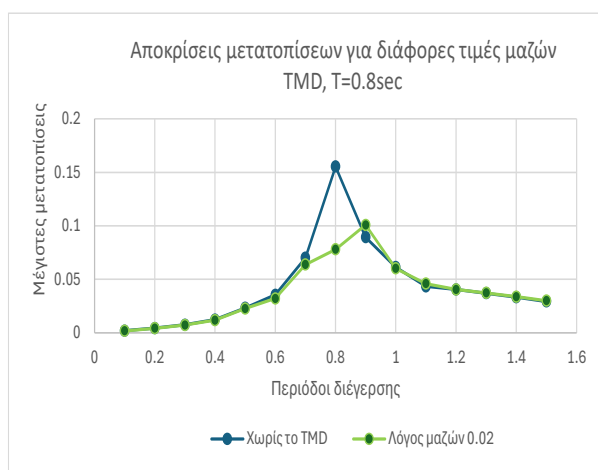
Διάγραμμα 9 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.005.



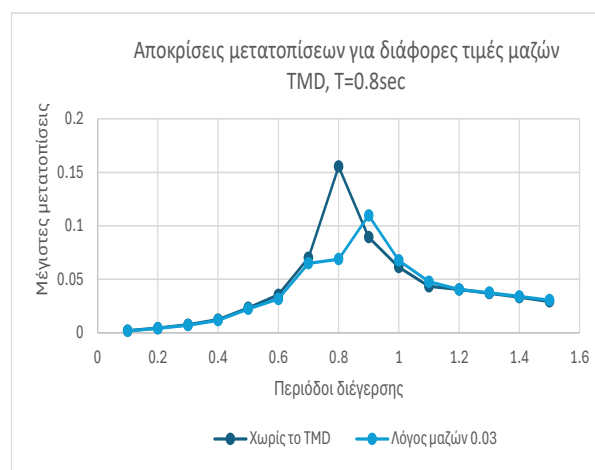
Διάγραμμα 10 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.01.

Τα Διαγράμματα 9 και 10 απεικονίζονται τα φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων για διαφορετικές περιόδους διέγερσης, με και χωρίς τη χρήση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για λόγους μαζών 0.005 και 0.01 αντίστοιχα $T=0.8\text{sec}$. Παρατηρείται ότι χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας το σύστημα εμφανίζει έντονη κορυφή στην περιοχή συντονισμού, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες

μετατοπίσεις. Με την εισαγωγή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων μειώνονται αισθητά, επιβεβαιώνοντας την ικανότητα της διάταξης να περιορίζει τις δυναμικές αποκρίσεις. Επιπλέον, η αύξηση του λόγου μαζών από 0.005 σε 0.01 βελτιώνει περαιτέρω την απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, καθώς η μείωση των αποκρίσεων στην περιοχή του συντονισμού είναι πιο έντονη. Ωστόσο, η μορφή των καμπυλών δείχνει ότι η θετική επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας εστιάζεται κυρίως γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, ενώ εκτός αυτής η επίδρασή του είναι περιορισμένη. Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι ακόμη και μικροί λόγοι μάζας μπορούν να επιφέρουν σημαντική μείωση αποκρίσεων, με τη βελτίωση να ενισχύεται όσο αυξάνεται η μάζα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας.



Διάγραμμα 11 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.02.



Διάγραμμα 12 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.03.

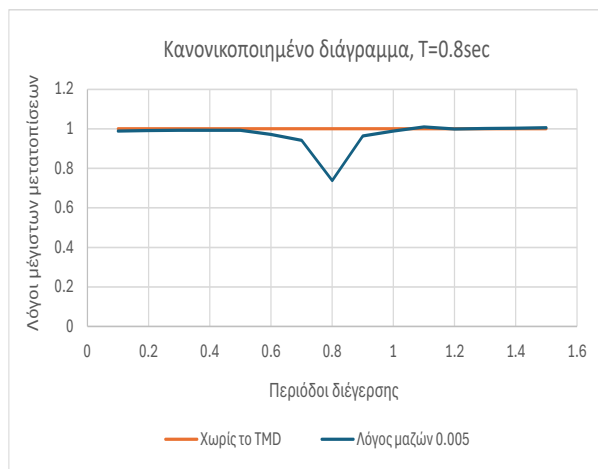
Στα Διαγράμματα 11 και 12 παρουσιάζονται τα φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας για λόγους μαζών 0.02 και 0.03 αντίστοιχα $T=0.8\text{sec}$. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας εμφανίζεται σαφής κορυφή στην περιοχή συντονισμού, με τις μετατοπίσεις να αυξάνονται σημαντικά. Η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνει αισθητά τις αποκρίσεις κοντά στη συχνότητα συντονισμού, επιβεβαιώνοντας τη λειτουργικότητά του. Όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών, η μείωση γίνεται πιο έντονη, με τον λόγο 0.03 να επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη καταστολή της απόκρισης στην περιοχή συντονισμού. Παράλληλα, παρατηρείται ότι σε τιμές περιόδων εκτός συντονισμού οι καμπύλες με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας τείνουν να ταυτίζονται με αυτές χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, γεγονός που δείχνει ότι η επίδραση του αποσβεστήρα είναι κυρίως τοπική. Συνεπώς, η αύξηση του λόγου μάζας ενισχύει την αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με την επίδραση να επικεντρώνεται στην κρίσιμη περιοχή του συντονισμού.

Συμπερασματικά, στα Διαγράμματα 9–12 παρουσιάζονται τα φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς τη χρήση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορους λόγους μαζών (0.005, 0.01, 0.02 και 0.03) και περίοδο αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας ίση με 0.8sec. Διαπιστώνεται ότι χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας το σύστημα εμφανίζει έντονη κορυφή στην περιοχή

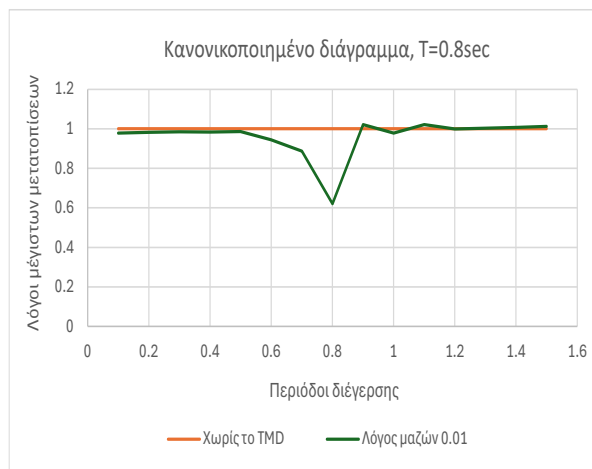
συντονισμού, οδηγώντας σε σημαντικές αυξήσεις μετακινήσεων. Η εισαγωγή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας περιορίζει σημαντικά τις μέγιστες αποκρίσεις στην κρίσιμη αυτή περιοχή, με την αποτελεσματικότητα της διάταξης να βελτιώνεται όσο αυξάνεται ο λόγος μάζας. Συγκεκριμένα, ακόμη και για μικρούς λόγους μαζών (π.χ. 0.005) παρατηρείται σαφής μείωση των μετατοπίσεων, ενώ για μεγαλύτερες τιμές (0.02–0.03) η καταστολή της απόκρισης γίνεται ιδιαίτερα έντονη. Παράλληλα, οι καμπύλες δείχνουν ότι η θετική επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας εντοπίζεται κυρίως γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, ενώ εκτός αυτής η συμπεριφορά του συστήματος παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Συνεπώς, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ο αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός στη μείωση των δυναμικών αποκρίσεων, με την αύξηση του λόγου μάζας να ενισχύει την απόδοσή του, χωρίς όμως να επηρεάζει σημαντικά τη συνολική συμπεριφορά εκτός συντονισμού.

Στην περιοχή του συντονισμού, περίπου στα 1 sec, οι μετατοπίσεις χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας φτάνουν τη μέγιστη τιμή των 0.242mm. Με λόγο μάζας 0.005, η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται κατά περίπου στα 0.18mm. Με λόγο μαζών 0.01 οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση, της τάξης του ,με τις μετατοπίσεις να περιορίζονται γύρω στα 0.15mm. Τέλος, για λόγο 0.02, η μείωση είναι η πιο εντυπωσιακή, καθώς οι μετατοπίσεις περιορίζονται στα 0.12mm, δηλαδή περίπου 50% μικρότερες σε σχέση με το αρχικό μοντέλο, όπως και με τον λόγο 0.03.

4.1.2.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.8\text{sec}$



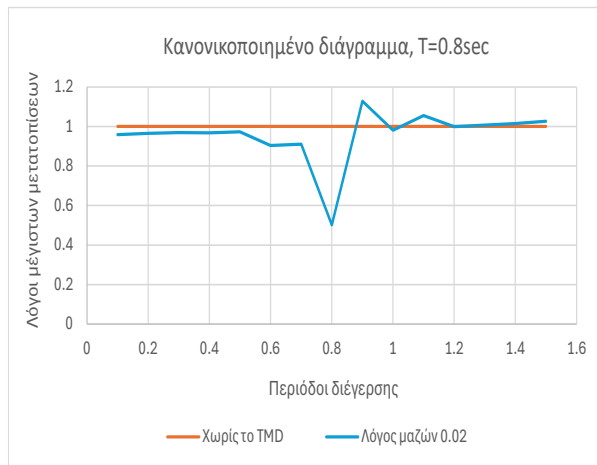
Διάγραμμα 13 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.005.



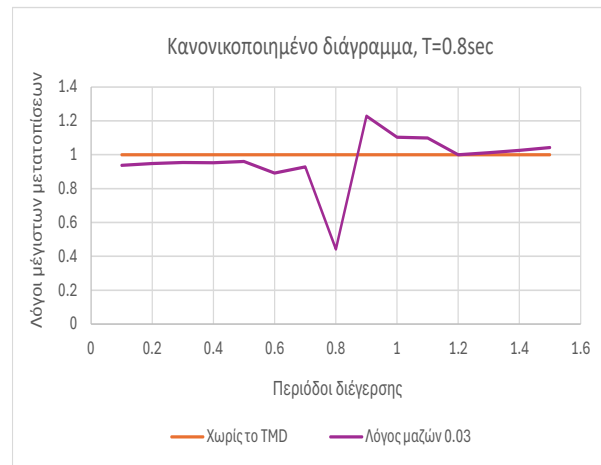
Διάγραμμα 14 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.01.

Στα Διαγράμματα 13 και 14 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα μέγιστων μετατοπίσεων για λόγους μαζών 0.005 και 0.01 αντίστοιχα, με ιδιοπερίοδο $T=0.8\text{sec}$. Όπως φαίνεται, χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οι μετατοπίσεις παραμένουν σχετικά υψηλές στην περιοχή συντονισμού, ενώ με την εισαγωγή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παρατηρείται αισθητή μείωση, η οποία εκφράζεται με τη χαρακτηριστική βύθιση των καμπυλών. Ακόμη και για μικρό λόγο μαζών (0.005) επιτυγχάνεται αξιοσημείωτη μείωση των αποκρίσεων, ενώ με την αύξηση του λόγου μαζών σε 0.01 η απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας

βελτιώνεται περαιτέρω. Σε περιοχές εκτός συντονισμού, οι καμπύλες με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, γεγονός που καταδεικνύει ότι η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας επικεντρώνεται κυρίως στη μείωση των μετατοπίσεων γύρω από τη συχνότητα συντονισμού. Συνεπώς, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας ακόμα και για σχετικά μικρούς λόγους μάζας, με την αύξησή του να ενισχύει περαιτέρω τη λειτουργία του.



Διάγραμμα 15 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μάζας 0.02.



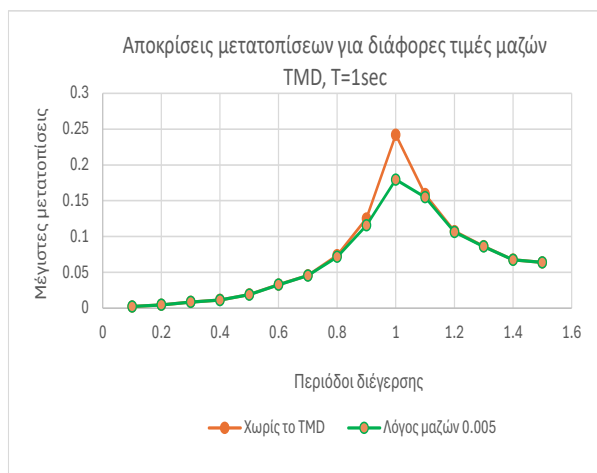
Διάγραμμα 16 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μάζας 0.03.

Στα Διαγράμματα 15 και 16 απεικονίζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα μέγιστων μετατοπίσεων για λόγους μαζών 0.02 και 0.03, με ιδιοπερίοδο $T=0.8\text{sec}$. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος μάζας, η συμβολή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας γίνεται πιο έντονη, οδηγώντας σε μεγαλύτερη μείωση των μετακινήσεων στην κρίσιμη ζώνη του συντονισμού. Ειδικά στο διάγραμμα με λόγο μαζών 0.02, η καμπύλη με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παρουσιάζει σαφή υποχώρηση συγκριτικά με την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, γεγονός που υποδεικνύει αποτελεσματική καταστολή των αποκρίσεων. Στην περίπτωση λόγου 0.03 η καταστολή εξακολουθεί να είναι ισχυρή, ωστόσο εμφανίζονται και τοπικές αυξήσεις μετατοπίσεων σε ορισμένα σημεία εκτός συντονισμού, κάτι που δείχνει ότι η αύξηση της μάζας πέρα από ένα επίπεδο δεν οδηγεί πάντα σε πλήρη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς. Συμπερασματικά, η αύξηση του λόγου μάζας ενισχύει σε γενικές γραμμές την αποδοτικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, αλλά απαιτείται προσεκτική επιλογή της βέλτιστης τιμής ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες επιδράσεις.

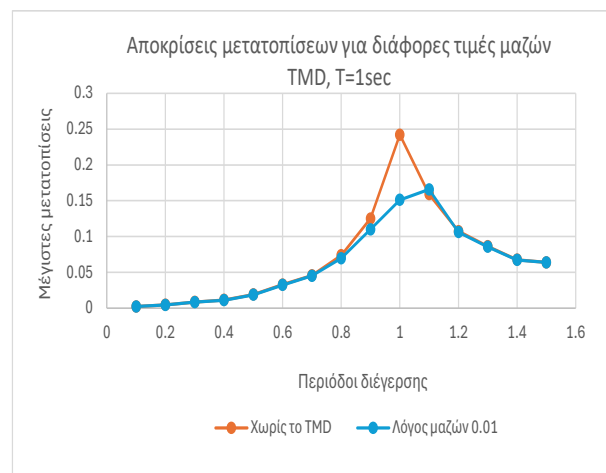
Συγκρίνοντας τα κανονικοποιημένα διαγράμματα μέγιστων μετατοπίσεων για $T=0.5\text{sec}$ και $T=0.8\text{sec}$, προκύπτουν ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα. Και στις δύο περιπτώσεις η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε μείωση των αποκρίσεων στην περιοχή συντονισμού, με την ένταση του φαινομένου να αυξάνεται όσο μεγαλώνει ο λόγος μαζών. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας διαφέρει ανάλογα με την ιδιοπερίοδο του συστήματος. Στην περίπτωση $T=0.5\text{sec}$, οι καμπύλες παρουσιάζουν πιο απότομες βυθίσεις γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, γεγονός που δείχνει ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στη συγκεκριμένη χρονική κλίμακα. Αντίθετα, στα διαγράμματα με $T=0.8\text{sec}$ η μείωση των μετακινήσεων παραμένει εμφανής αλλά

είναι πιο ομαλή και λιγότερο έντονη, κάτι που υποδηλώνει ότι η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι πιο ήπια για μεγαλύτερες ιδιοπεριόδους. Επιπλέον, για υψηλότερους λόγους μαζών (π.χ. 0.03), παρατηρούνται και στα δύο σετ τοπικές αυξήσεις εκτός συντονισμού, με το φαινόμενο να είναι πιο αισθητό στην περίπτωση $T=0.8\text{sec}$. Συνεπώς, το αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας λειτουργεί αποτελεσματικά και στις δύο περιπτώσεις, αλλά η βελτίωση είναι πιο έντονη για μικρότερη ιδιοπερίοδο ($T=0.5\text{sec}$), γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της συσχέτισης ανάμεσα στη φυσική περίοδο του συστήματος και στη ρύθμιση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας.

4.1.3 Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=1\text{sec}$

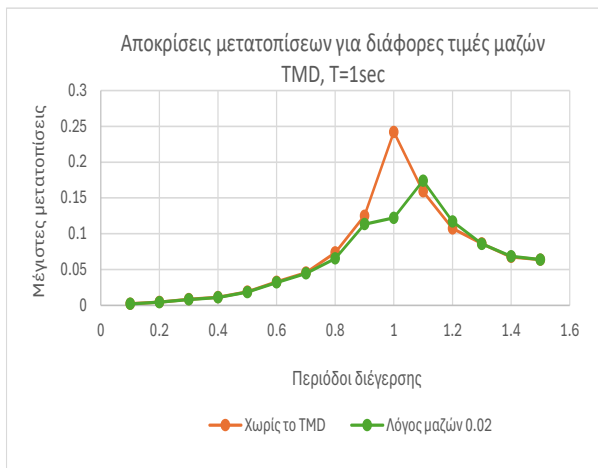


Διάγραμμα 17 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.005.

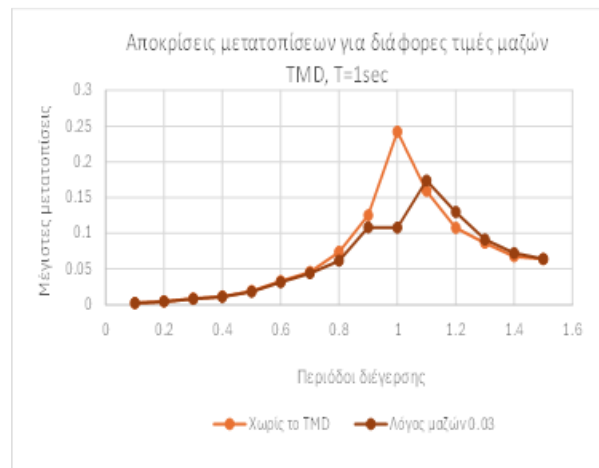


Διάγραμμα 18 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.01.

Στα Διαγράμματα 17 και 18 φαίνονται τα φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων για λόγους μαζών 0.005 και 0.01, με ιδιοπερίοδο ίση με 1sec. Στην περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παρατηρείται έντονη κορυφή γύρω από την περίοδο διέγερσης 1.0–1.1sec, που υποδηλώνει συντονισμό και οδηγεί σε σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων. Με την εισαγωγή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οι κορυφές αυτές μειώνονται αισθητά, δείχνοντας την αποτελεσματικότητα του συστήματος στη συγκράτηση των δυναμικών αποκρίσεων. Η σύγκριση μεταξύ λόγου μαζών 0.005 και 0.01 καταδεικνύει ότι ακόμη και μικρή μάζα προσφέρει βελτίωση, ενώ με την αύξηση της μάζας το όφελος γίνεται πιο ξεκάθαρο, με πιο έντονη μείωση της κορυφής. Επιπλέον, η μορφή των καμπυλών δείχνει πως η δράση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παραμένει εντοπισμένη στην περιοχή του συντονισμού, με περιορισμένη επιρροή στις αποκρίσεις εκτός αυτής. Συνολικά, η αύξηση του λόγου μάζας ενισχύει την καταστολή, με αποτέλεσμα να περιορίζεται πιο αποτελεσματικά το μέγεθος των μετατοπίσεων.



Διάγραμμα 19 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διεγερσης, για λόγο μαζών 0.02.

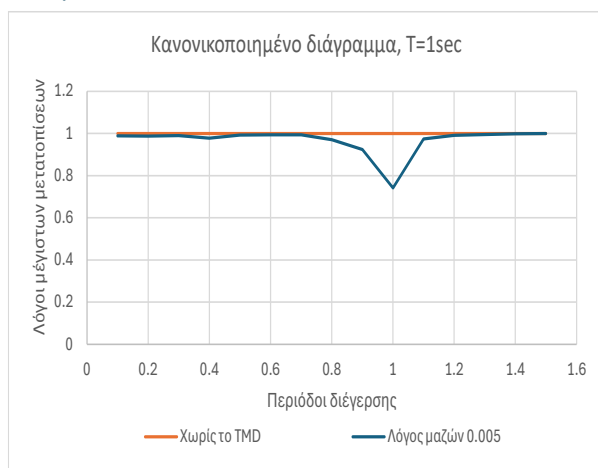


Διάγραμμα 20 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διεγερσης, για λόγο μαζών 0.03.

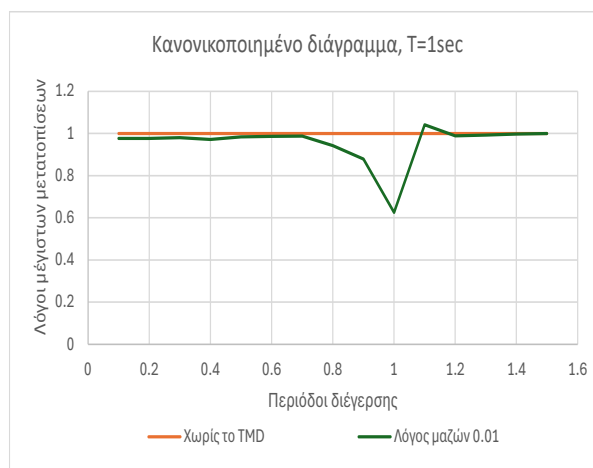
Στα Διαγράμματα 19 και 20 παρουσιάζονται τα φάσματα αποκρίσεων για λόγους μαζών 0.02 και 0.03 με περίοδο του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας ίση με $T=1\text{sec}$. Παρατηρείται ότι χωρίς TMD το σύστημα εμφανίζει έντονο συντονισμό γύρω από την περίοδο 1sec, με πολύ αυξημένες μετατοπίσεις. Η εισαγωγή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνει αισθητά το μέγεθος της κορυφής, με το αποτέλεσμα να είναι πιο έντονο όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών. Για λόγο 0.02 διακρίνεται μια καθαρή μείωση σε σχέση με την αρχική καμπύλη, ενώ για λόγο 0.03 η απόσβεση γίνεται ακόμη πιο αποτελεσματική, φανερώνοντας τη συμβολή της μεγαλύτερης μάζας στην καταστολή των αποκρίσεων. Ωστόσο, στο διάγραμμα με λόγο 0.03 διαφαίνεται ότι η καμπύλη του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας πλησιάζει περισσότερο στην περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας σε περιοχές εκτός συντονισμού, κάτι που δείχνει ότι το όφελος περιορίζεται κυρίως στη ζώνη της κρίσιμης διεγερσης. Συνεπώς, η αύξηση της μάζας οδηγεί σε καλύτερη μείωση των κορυφών, αλλά η δράση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παραμένει στοχευμένη κυρίως στον συντονισμό.

Στα Διαγράμματα 17–20 απεικονίζονται τα φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας για λόγους μαζών 0.005, 0.01, 0.02 και 0.03. Σε όλες τις περιπτώσεις η παρουσία του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνει τις κορυφές που εμφανίζονται στην περιοχή συντονισμού, επιβεβαιώνοντας την ικανότητά του να περιορίζει τις δυναμικές αποκρίσεις. Η επίδραση αυτή γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών, για τις χαμηλότερες τιμές (0.005 και 0.01) η μείωση είναι σαφής αλλά σχετικά περιορισμένη, ενώ για μεγαλύτερους λόγους (0.02 και 0.03) η καταστολή του συντονισμού είναι πολύ πιο έντονη. Παράλληλα, παρατηρείται ότι εκτός της ζώνης συντονισμού οι καμπύλες με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας συγκλίνουν, γεγονός που δείχνει πως η δράση του συστήματος εστιάζει αποκλειστικά στην κρίσιμη περιοχή της διεγερμένης ιδιοσυχνότητας. Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας λειτουργεί αποτελεσματικά για την απομείωση των μετατοπίσεων, με την αποδοτικότητά του να ενισχύεται καθώς αυξάνεται η μάζα του, χωρίς όμως να μεταβάλλει σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος σε άλλες περιοχές συχνοτήτων.

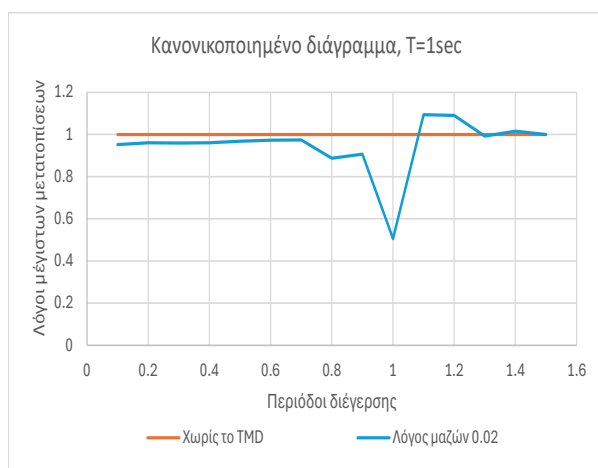
4.1.3.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=1\text{sec}$



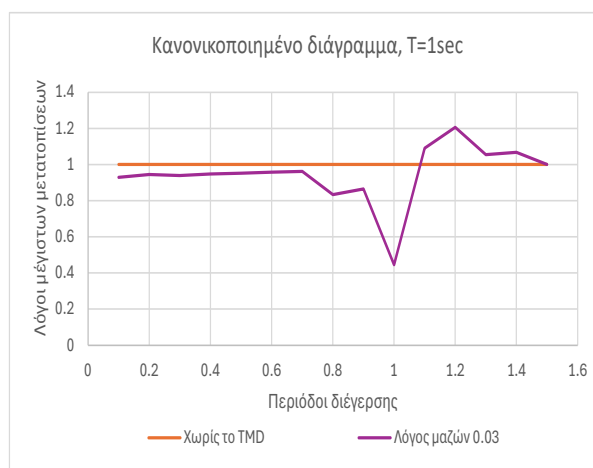
Διάγραμμα 21 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.005.



Διάγραμμα 22 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.01.



Διάγραμμα 23 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.02.

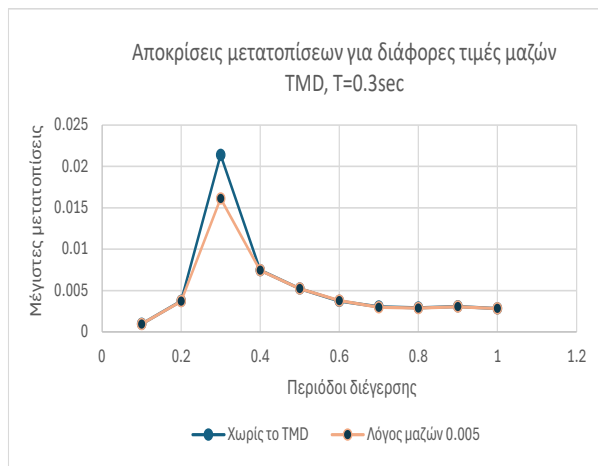


Διάγραμμα 24 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.03.

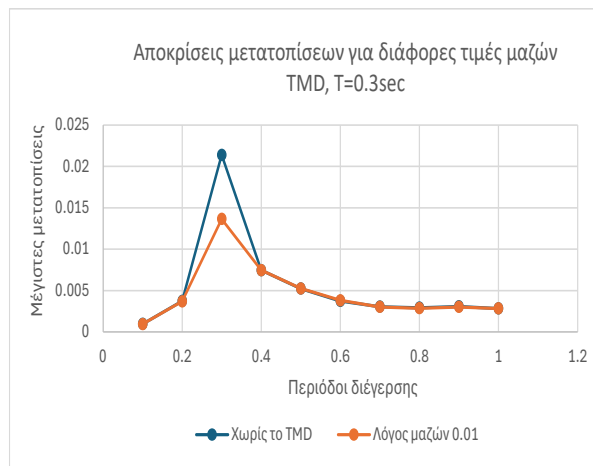
Τα Διαγράμματα 21–24 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα μέγιστων μετατοπίσεων για λόγους μαζών 0.005, 0.01, 0.02 και 0.03, με ιδιοπερίοδο $T=1\text{sec}$. Η γενική εικόνα δείχνει ότι η παρουσία του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας επιφέρει μείωση των μετατοπίσεων στην περιοχή συντονισμού, με τη χαρακτηριστική βύθιση των καμπυλών να γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών. Στις χαμηλότερες τιμές (0.005 και 0.01) η μείωση είναι ορατή αλλά σχετικά περιορισμένη, ενώ για μεγαλύτερους λόγους (0.02 και 0.03) η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι σαφώς πιο ισχυρή, οδηγώντας σε πιο έντονη καταστολή των αποκρίσεων. Παράλληλα, παρατηρείται ότι για τις υψηλότερες τιμές μάζας εμφανίζονται και τοπικές αυξήσεις σε περιοχές εκτός του κυρίως συντονισμού, στοιχείο που δείχνει ότι η αύξηση της μάζας δεν συνεπάγεται απαραίτητα συνολική βελτίωση της απόκρισης. Συνολικά, τα διαγράμματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας εξαρτάται

άμεσα από το μέγεθος της μάζας του, με τη βέλτιστη απόδοση να επιτυγχάνεται σε ισορροπία μεταξύ επαρκούς καταστολής στον συντονισμό και αποφυγής ανεπιθύμητων επιδράσεων.

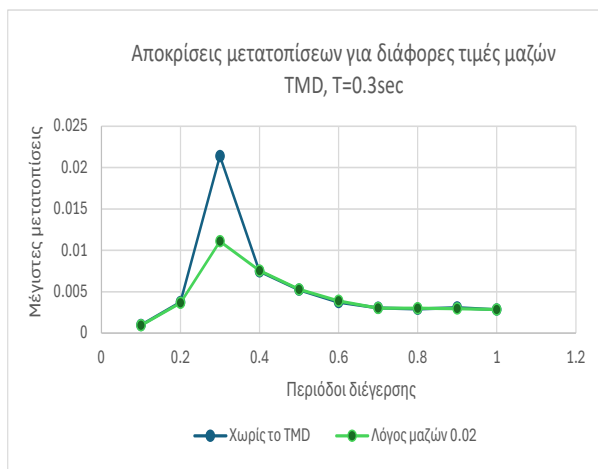
4.1.4 Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{sec}$



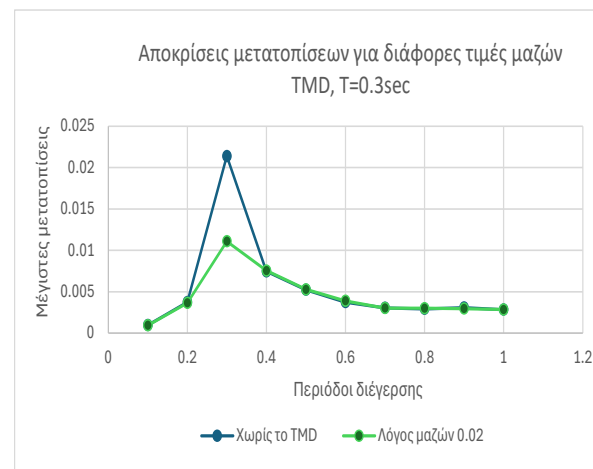
Διάγραμμα 25 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.005.



Διάγραμμα 26 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.01.



Διάγραμμα 27 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.02.

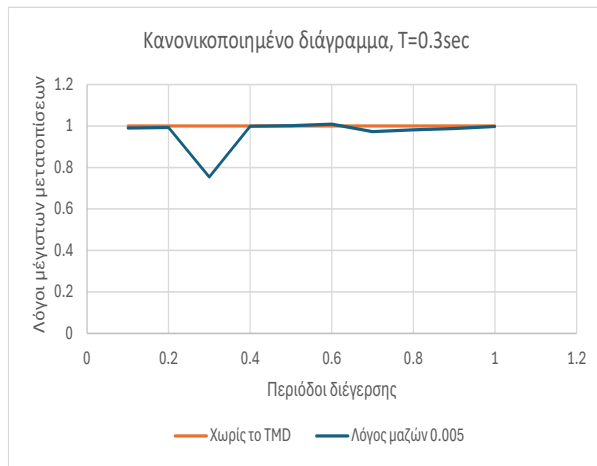


Διάγραμμα 28 : Φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, για διάφορες περιόδους διέγερσης, για λόγο μαζών 0.03.

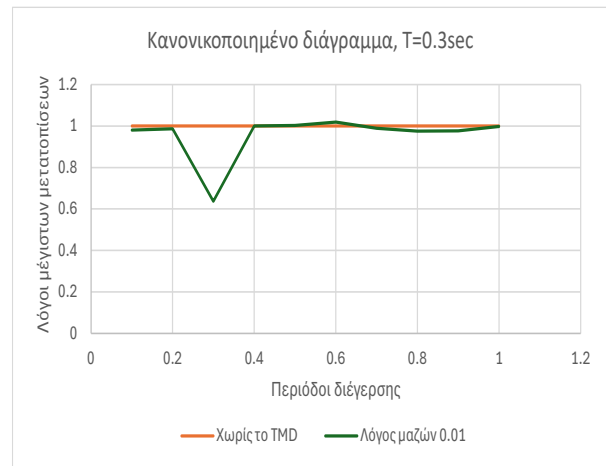
Στα Διαγράμματα 25–28 παρουσιάζονται τα φάσματα αποκρίσεων μετατοπίσεων για λόγους μαζών 0.005, 0.01, 0.02 και 0.03, με περίοδο του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας ίση με $T=0.3\text{sec}$. Όπως φαίνεται, χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας το σύστημα εμφανίζει έντονη κορυφή γύρω από την περίοδο συντονισμού (περίπου 0.3–0.4sec), με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση των μετακινήσεων. Με την εισαγωγή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παρατηρείται αισθητή μείωση των αποκρίσεων στην κρίσιμη αυτή περιοχή, με την αποτελεσματικότητα να ενισχύεται όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών. Στις χαμηλές τιμές (0.005 και 0.01) η μείωση είναι σαφής

αλλά συγκρατημένα, ενώ για μεγαλύτερους λόγους (0.02 και 0.03) η καταστολή του συντονισμού γίνεται ιδιαίτερα έντονη, μειώνοντας σημαντικά το ύψος της κορυφής. Επιπλέον, σε περιοχές εκτός συντονισμού, οι καμπύλες με και χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας συγκλίνουν, γεγονός που δείχνει πως η δράση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παραμένει στοχευμένη και δεν αλλοιώνει τη συνολική απόκριση του συστήματος. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για $T=0.3\text{sec}$ ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας είναι ιδιαίτερα αποδοτικός στον περιορισμό των μέγιστων μετατοπίσεων, με την αύξηση του λόγου μάζας να ενισχύει την αποτελεσματικότητά του.

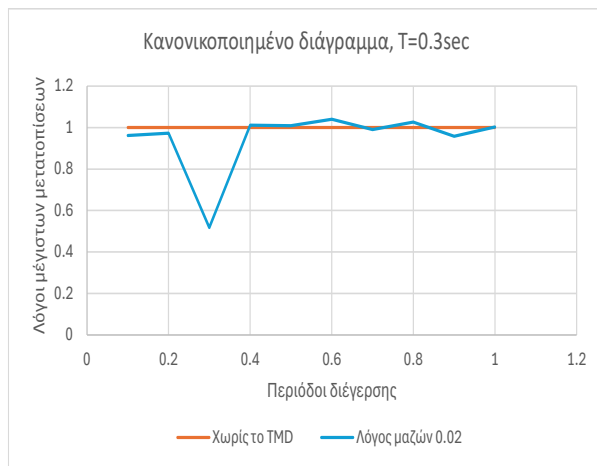
4.1.4.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιόδους διέγερσης και ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{sec}$



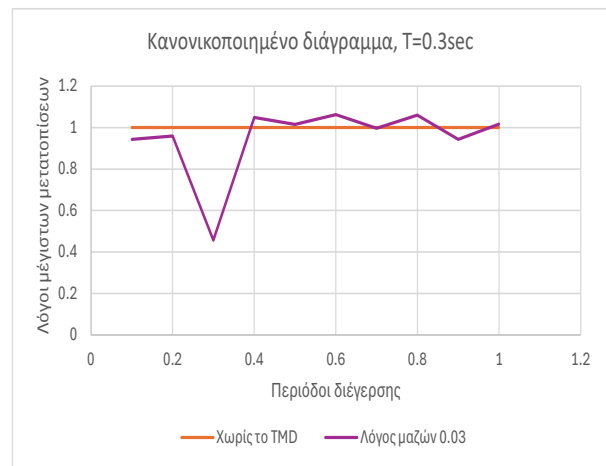
Διάγραμμα 29 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.005.



Διάγραμμα 30 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.01.



Διάγραμμα 31 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.02.



Διάγραμμα 32 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για λόγο μαζών 0.03.

Στα Διαγράμματα 29–32 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα μέγιστων μετατοπίσεων για λόγους μαζών 0.005, 0.01, 0.02 και 0.03, με ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{sec}$. Διαπιστώνεται ότι η εισαγωγή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας επιφέρει μείωση των μετακινήσεων στην περιοχή του συντονισμού, με το αποτέλεσμα να γίνεται πιο εμφανές καθώς αυξάνεται ο λόγος μάζας. Για μικρούς λόγους (0.005 και 0.01) η μείωση είναι σαφής αλλά σχετικά περιορισμένη, ενώ

στις μεγαλύτερες τιμές (0.02 και 0.03) η επίδραση είναι πιο έντονη, με τις καμπύλες να παρουσιάζουν βαθύτερες βυθίσεις γύρω από την περίοδο διέγερσης 0.3–0.4sec. Ωστόσο, για τον λόγο μαζών 0.03 εντοπίζονται τοπικές αυξήσεις σε ορισμένες περιοχές εκτός συντονισμού, γεγονός που δείχνει ότι η αύξηση της μάζας πέρα από κάποιο όριο μπορεί να έχει μεικτές επιδράσεις. Συνολικά, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας είναι αποτελεσματικό στη μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων για $T=0.3\text{sec}$, με την απόδοσή του να βελτιώνεται με την αύξηση της μάζας, αρκεί αυτή να επιλέγεται προσεκτικά ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες αποκλίσεις εκτός της κρίσιμης περιοχής.

4.2 Συγκριτική Αξιολόγηση Ιδιοπεριόδων (0.3, 0.5, 0.8, 1 sec)

Συνολικά, η ανάλυση των αποτελεσμάτων για όλες τις ιδιοπεριόδους ($T=0.3\text{s}$, $T=0.5\text{s}$, $T=0.8\text{s}$ και $T=1\text{s}$) δείχνει ότι η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας επιτυγχάνει σημαντική μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων στην περιοχή του συντονισμού, με την απόδοσή του να ενισχύεται όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών. Στην περίπτωση $T=0.3\text{s}$ παρατηρείται πολύ αποτελεσματική καταστολή των αποκρίσεων, με έντονες βυθίσεις στα κανονικοποιημένα διαγράμματα και καθαρή μείωση των κορυφών στα φάσματα. Για $T=0.5\text{s}$ η απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παραμένει υψηλή, με τις καμπύλες να παρουσιάζουν χαρακτηριστικές βυθίσεις, δείχνοντας ότι ο αποσβεστήρας είναι ιδιαίτερα αποδοτικός σε αυτή την περιοχή. Αντίθετα, στις μεγαλύτερες ιδιοπεριόδους ($T=0.8\text{s}$ και $T=1\text{s}$) η μείωση των αποκρίσεων εξακολουθεί να είναι εμφανής, αλλά εμφανίζεται πιο ήπια και συνοδεύεται σε ορισμένες περιπτώσεις από τοπικές αυξήσεις εκτός συντονισμού, ειδικά για μεγάλους λόγους μαζών. Συγκρίνοντας τις τέσσερις περιπτώσεις, προκύπτει ότι η αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι μεγαλύτερη για μικρότερες ιδιοπεριόδους (0.3s–0.5s), όπου η καταστολή των μετατοπίσεων είναι πιο καθαρή και άμεση, ενώ για μεγαλύτερες ιδιοπεριόδους η δράση του είναι μεν θετική αλλά λιγότερο έντονη και πιο επιλεκτική. Συνεπώς, η προτιμότερη ιδιοπερίοδος για τη βέλτιστη λειτουργία του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι στην περιοχή των 0.3–0.5 δευτερολέπτων, όπου επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη μείωση των αποκρίσεων με περιορισμένες ανεπιθύμητες παρενέργειες.

Κεφάλαιο 5: Προσομοιώσεις Πραγματικών Σεισμών

5.1 Επιλογή και Εισαγωγή Σεισμικών Καταγραφών

Η συγκεκριμένη προσομοίωση αφορά το ίδιο μονόπακτο υποστύλωμα από το προηγούμενο κεφάλαιο, με την μονή διάφορα η σύγκριση των μέγιστων αποκρίσεων μετατοπίσεων για πραγματικούς σεισμούς, στο μοντέλο χωρίς τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και στο μοντέλο με ενσωματωμένο τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Επιλέχθηκαν αρχικά 11 πραγματικοί σεισμοί, οι οποίοι είχαν ως επίκεντρο την πόλη της Αθήνας.

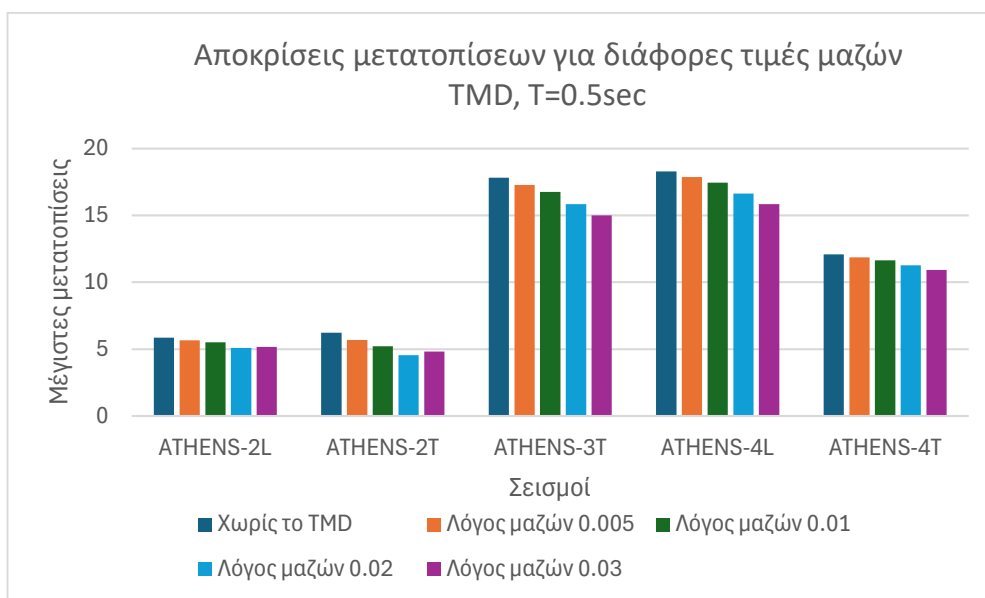
Αρχικά, έγινε η εισαγωγή των πραγματικών σεισμών στο λογισμικό ETABS. Ακολούθως, όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση ορίστηκε για κάθε σεισμό σταθερό time-step 0.005sec στο load case, για συναρτήσεις χρονοιστορίας.

Μετρήθηκαν οι μέγιστες μετατοπίσεις και μετά το πέρας των αναλύσεων έγινε η σύγκριση για διάφορους λόγους μαζών των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας, αναμεσά στα δύο μοντέλα.

Τέλος, έγινε σύγκριση μέγιστων μετατοπίσεων και για διάφορες ιδιοπεριόδους της κατασκευής, με διάφορες μάζες του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας.

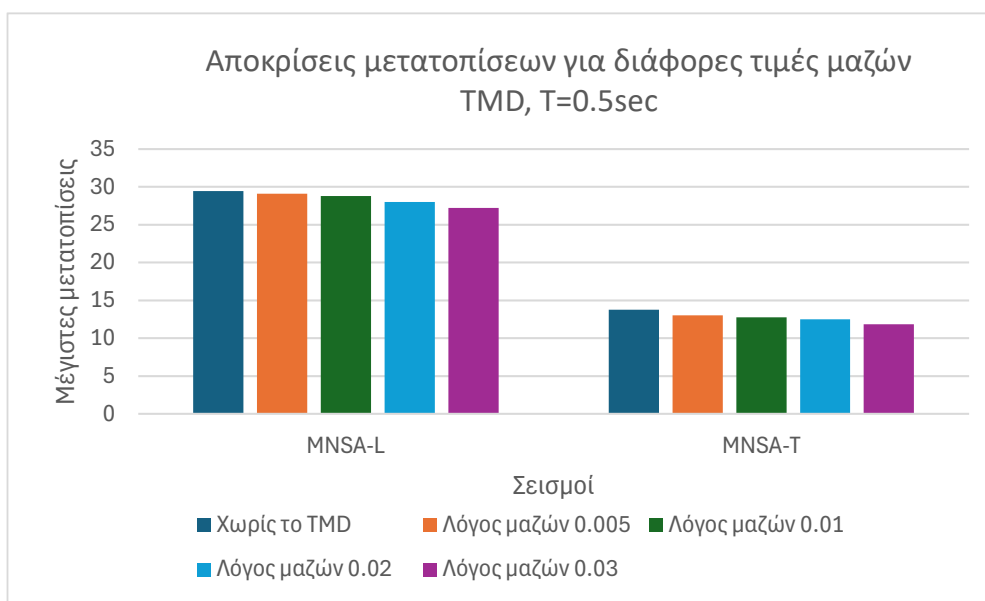
Επιπλέον, ενσωματωθήκαν κάποιοι σεισμοί στα δυο μοντέλα, όμως σε αυτή την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν σεισμοί από τα σειсмоγραφήματα του ινστιτούτου ΙΤΣΑΚ, ΚΙΝΕ, ΕΝΕΑ. Χρησιμοποιήθηκαν, οι ιδίες διατομές όπως με την προηγούμενη προσομοίωση των πραγματικών σεισμών. Ακολούθως, για τις διάφορες ιδιοπεριόδους της κατασκευής και διάφορους λόγους μαζών των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας, έγινε η σύγκριση των μέγιστων μετατοπίσεων για το μοντέλο χωρίς τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με το μοντέλο, το οποίο έχει ενσωματωμένο τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Τέλος, έγινε η σύγκριση των κανονικοποιημένων διαγραμμάτων, ακριβώς όπως στο κεφάλαιο 3.2.

5.1.1. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.5\text{sec}$



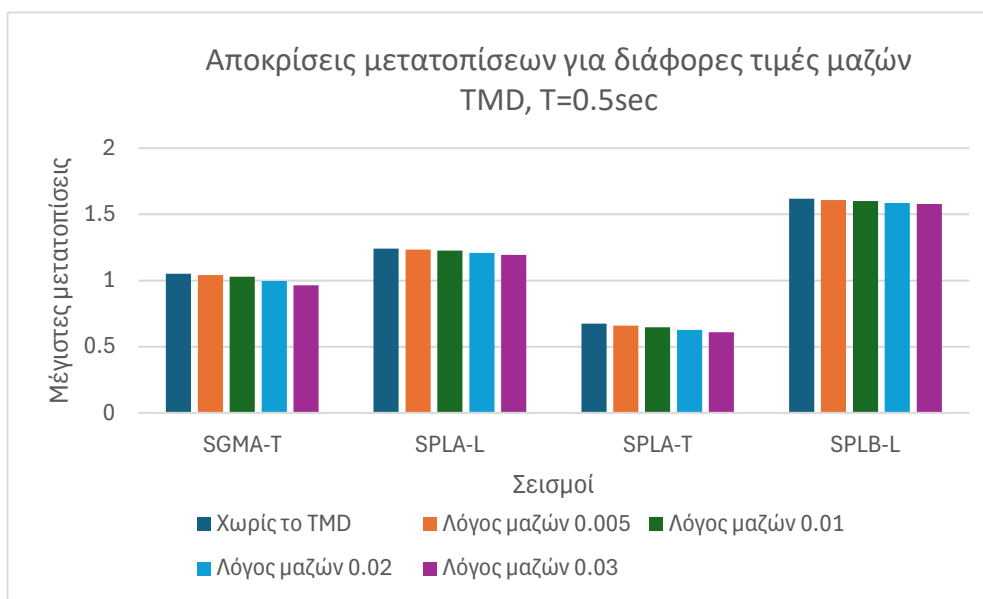
Διάγραμμα 33 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

Στο σύνολο των διεγέρσεων (ATHENS-2L/2T/3T/4L/4T) η προσθήκη αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνει συστηματικά τις μέγιστες μετατοπίσεις σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Η μείωση εντείνεται όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών από 0.005 σε 0.03, με τη διαφορά να γίνεται πιο ορατή στα ισχυρότερα φάσματα (ιδίως στα ATHENS-3T και ATHENS-4L), όπου οι απαιτήσεις είναι υψηλότερες. Για τα πιο ήπια αρχεία (ATHENS-2L/2T) η ωφέλεια παραμένει, αλλά είναι πιο περιορισμένη, στοιχείο που δείχνει ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας με $T=0.5\text{s}$ στοχεύει αποτελεσματικά τις περιόδους κοντά στον κυρίως συντονισμό. Συνολικά, το σενάριο επιβεβαιώνει ότι η ρύθμιση $T=0.5\text{s}$ παραμένει αποτελεσματική και υπό πραγματικά σεισμικά σήματα, με την απόδοση να κλιμακώνεται με τον λόγο μαζών.



Διάγραμμα 34 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

Το Διάγραμμα 34 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για τα σεισμικά αρχεία MNSA-L και MNSA-T, με ιδιοπερίοδο ίση με $T=0.5\text{s}$ και για διαφορετικούς λόγους μαζών. Παρατηρείται ότι η εισαγωγή του TMD οδηγεί σε μείωση των αποκρίσεων και στις δύο διευθύνσεις, με το αποτέλεσμα να γίνεται πιο αισθητό όσο αυξάνεται ο λόγος μάζας. Στη διεύθυνση L, όπου οι μετατοπίσεις είναι υψηλότερες, η διαφορά μεταξύ χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι ξεκάθαρη, με τον λόγο μαζών 0.03 να επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη καταστολή. Στη διεύθυνση T οι αποκρίσεις είναι συνολικά χαμηλότερες, ωστόσο η θετική επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παραμένει παρούσα, μειώνοντας σταδιακά τις κορυφές. Η συμπεριφορά δείχνει ότι το σύστημα διατηρεί την αποδοτικότητά του τόσο σε ισχυρές όσο και σε ηπιότερες διεγέρσεις, ενώ η αύξηση του λόγου μάζας οδηγεί σε σταθερή βελτίωση της απόδοσης χωρίς ανεπιθύμητες παρενέργειες.

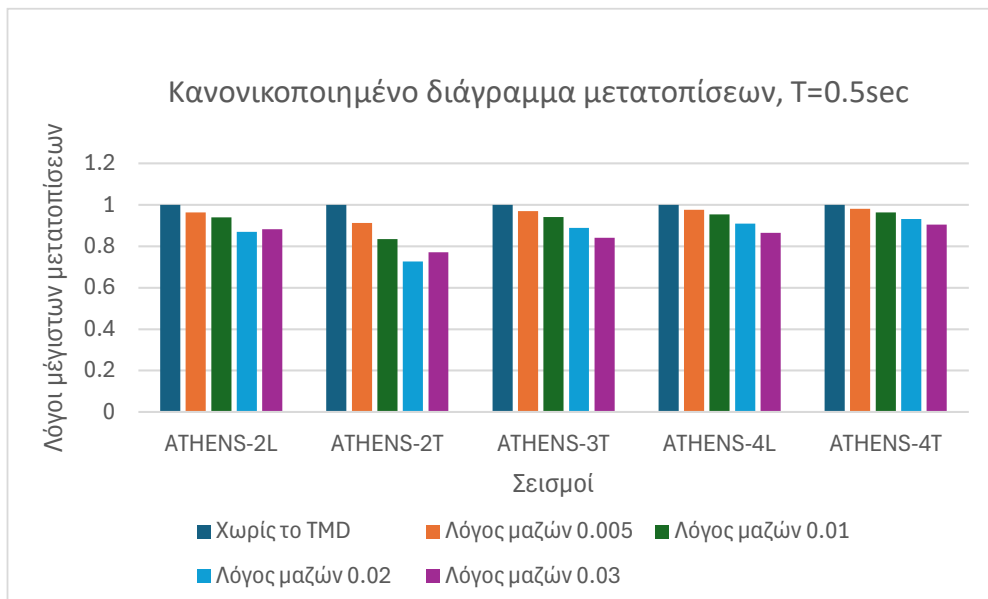


Διάγραμμα 35 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

Στο Διάγραμμα 35 φαίνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για τα σεισμικά αρχεία SGMA-T, SPLA-L, SPLA-T και SPLB-L, με ιδιοπερίοδο ίση με $T=0.5s$. Η σύγκριση δείχνει ότι σε όλες τις περιπτώσεις η προσθήκη του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε μείωση των αποκρίσεων, με την απόδοση να βελτιώνεται καθώς αυξάνεται ο λόγος μάζας. Στο σενάριο SGMA-T οι διαφορές είναι σχετικά μικρές, καθώς οι αποκρίσεις είναι γενικά περιορισμένες, ωστόσο η τάση μείωσης παραμένει σαφής. Στα SPLA-L και SPLA-T το όφελος γίνεται πιο αισθητό, με τις μετατοπίσεις να περιορίζονται σταθερά για όλους τους λόγους μάζας, ενώ η μεγαλύτερη βελτίωση παρατηρείται στη διεύθυνση T. Τέλος, στο SPLB-L, όπου οι απαιτήσεις είναι υψηλότερες, ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας επιτυγχάνει την πιο καθαρή μείωση, ιδιαίτερα για λόγο μαζών 0.03. Το σύνολο των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνει ότι η αποδοτικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας διατηρείται ανεξαρτήτως του σεισμικού αρχείου, με το όφελος να γίνεται εντονότερο όσο αυξάνεται η δυσμενής διέγερση.

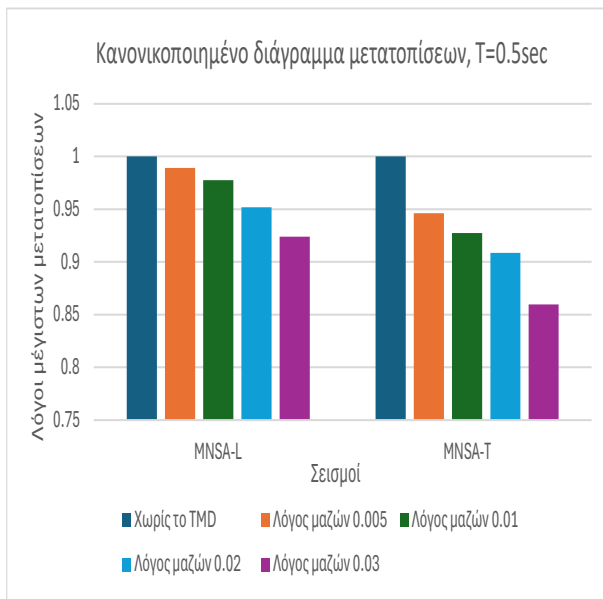
Συνολικά, τα Διαγράμματα 33–35 παρουσιάζουν τις μέγιστες μετατοπίσεις υπό την επίδραση διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων (ATHENS, MNSA, SGMA, SPLA, SPLB) για ιδιοπερίοδο ίση με $T=0.5s$ και διάφορους λόγους μάζας. Η ανάλυση δείχνει ότι η προσθήκη του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε σταθερή μείωση των αποκρίσεων σε όλα τα σενάρια, με την αποτελεσματικότητα να αυξάνεται όσο μεγαλώνει ο λόγος μαζών. Το όφελος είναι πιο έντονο σε σεισμούς που προκαλούν υψηλότερες μετατοπίσεις (π.χ. ATHENS-3T, ATHENS-4L, MNSA-L, SPLB-L), ενώ σε περιπτώσεις με ηπιότερες αποκρίσεις η διαφορά παραμένει υπαρκτή αλλά λιγότερο αισθητή. Επιπλέον, δεν παρατηρούνται ανεπιθύμητες αυξήσεις εκτός συντονισμού, γεγονός που δείχνει ότι η ρύθμιση $T=0.5s$ είναι ιδιαίτερα αποδοτική και σταθερή ανεξαρτήτως του σεισμικού αρχείου. Συνεπώς, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η χρήση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας με κατάλληλο λόγο μαζών (ιδίως 0.02–0.03) μπορεί να μειώσει ουσιαστικά τις σεισμικές μετακινήσεις, προσφέροντας μια αξιόπιστη στρατηγική βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης κατασκευών.

5.1.1.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.5\text{sec}$

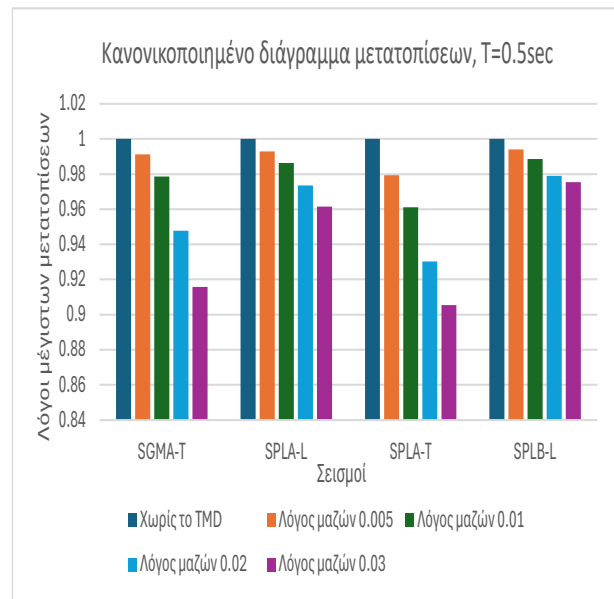


Διάγραμμα 36 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στο κανονικοποιημένο Διάγραμμα για τα σεισμικά αρχεία ATHENS (2L, 2T, 3T, 4L, 4T) φαίνεται καθαρά η θετική επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας στην απόκριση του συστήματος. Σε όλες τις περιπτώσεις οι λόγοι μέγιστων μετατοπίσεων είναι μικρότεροι με την παρουσία αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, ενώ η μείωση ενισχύεται όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών. Η αποτελεσματικότητα είναι πιο έντονη στα σενάρια ATHENS-2T και ATHENS-3T, όπου οι απαιτήσεις είναι υψηλότερες και η δράση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας περιορίζει σημαντικά τις αποκρίσεις. Στα υπόλοιπα σεισμικά σενάρια η μείωση παραμένει σταθερή, με τις καμπύλες να δείχνουν συνεπή βελτίωση χωρίς ανεπιθύμητες αυξήσεις. Γενικότερα, το διάγραμμα επιβεβαιώνει ότι για περίοδο $T=0.5\text{s}$ η χρήση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε αξιόπιστη μείωση των μετακινήσεων, με τις βέλτιστες αποδόσεις να επιτυγχάνονται για λόγους μαζών 0.02–0.03.



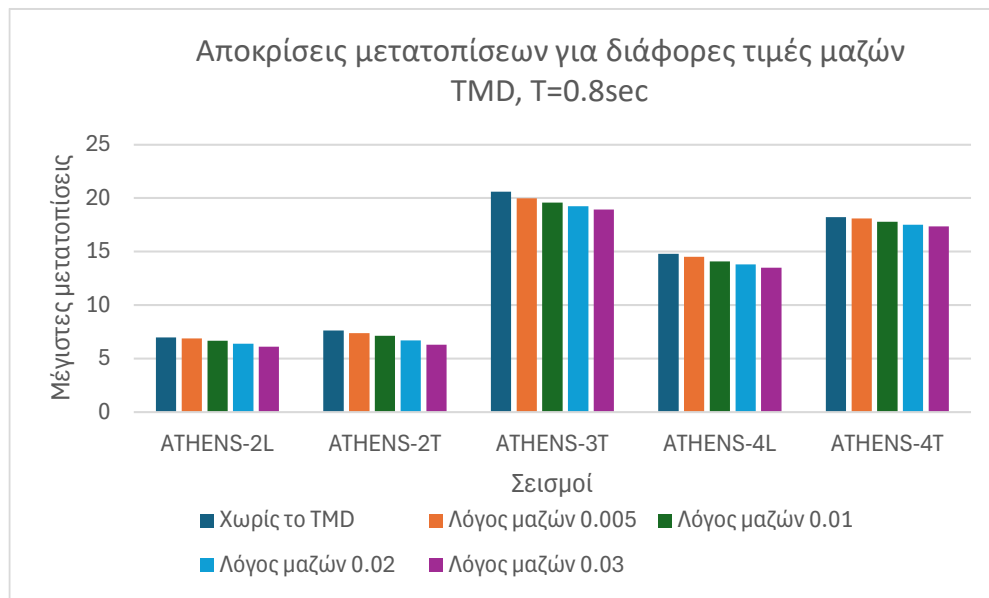
Διάγραμμα 37 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



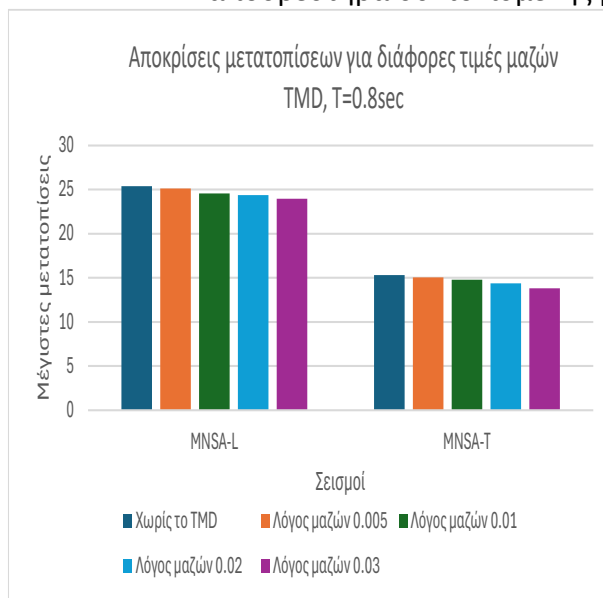
Διάγραμμα 38 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα Διαγράμματα 37 και 38 παρουσιάζονται οι λόγοι μέγιστων μετατοπίσεων για διαφορετικούς σεισμούς (MNSA-L, MNSA-T, SGMA-T, SPLA-L, SPLA-T, SPLB-L) με ιδιοπερίοδο ίση με $T=0.5s$. Σε όλα τα σεισμικά αρχεία η εισαγωγή αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε μείωση των μετακινήσεων σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, ενώ η βελτίωση γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών. Στα σενάρια MNSA-L και MNSA-T παρατηρείται σαφής πτώση των λόγων με την αύξηση της μάζας, με τις μεγαλύτερες μειώσεις να καταγράφονται για λόγο 0.03. Στους σεισμούς SGMA και SPLA η μείωση είναι σταθερή, με τις πιο έντονες βελτιώσεις να εμφανίζονται στη διεύθυνση T, όπου οι αποκρίσεις χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας ήταν πιο αυξημένες. Τέλος, στο SPLB-L, όπου οι μετακινήσεις είναι υψηλότερες, ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας επιτυγχάνει σταθερή και καθαρή μείωση, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του ακόμη και σε πιο δυσμενή σενάρια. Συνολικά, τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα δείχνουν ότι η απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παραμένει συνεπής ανεξαρτήτως του σεισμικού αρχείου, με το όφελος να είναι εντονότερο για μεγαλύτερους λόγους μάζας και σε καταστάσεις με υψηλές απαιτήσεις απόκρισης.

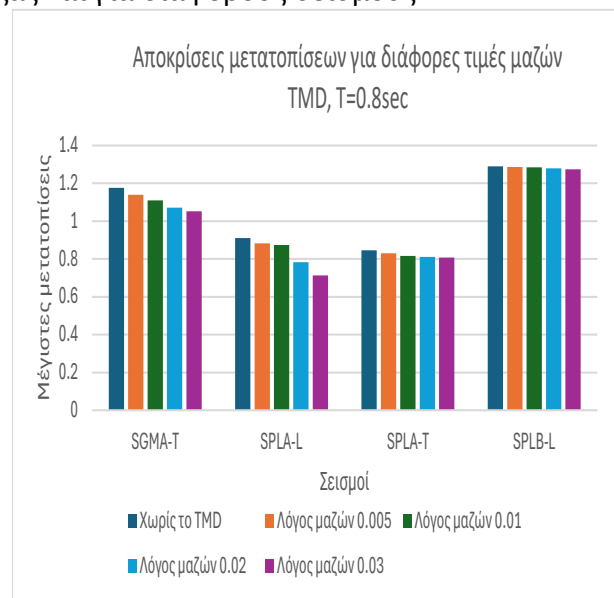
5.1.2. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.8\text{sec}$



Διάγραμμα 39 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 40 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

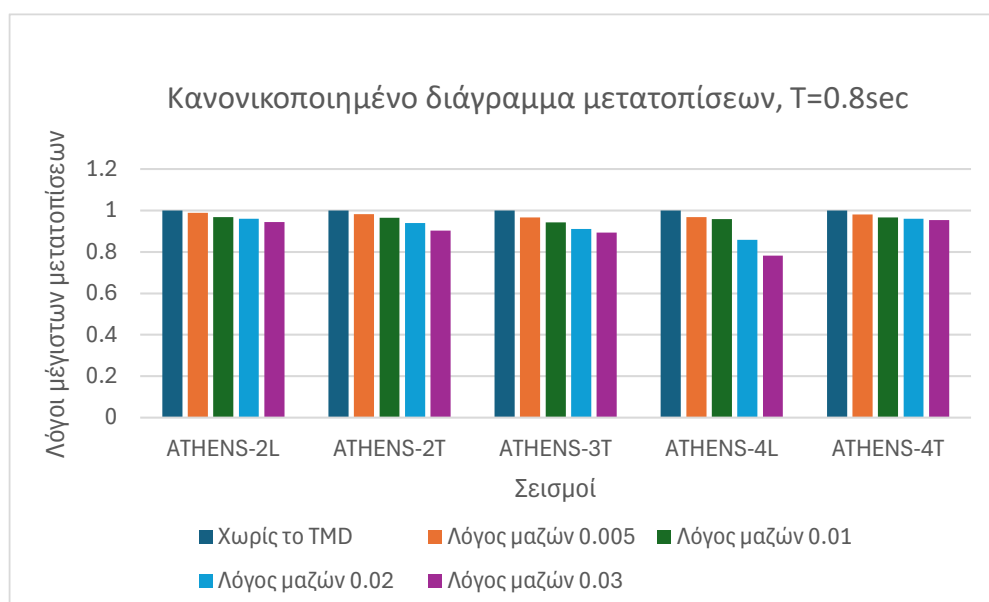


Διάγραμμα 41 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

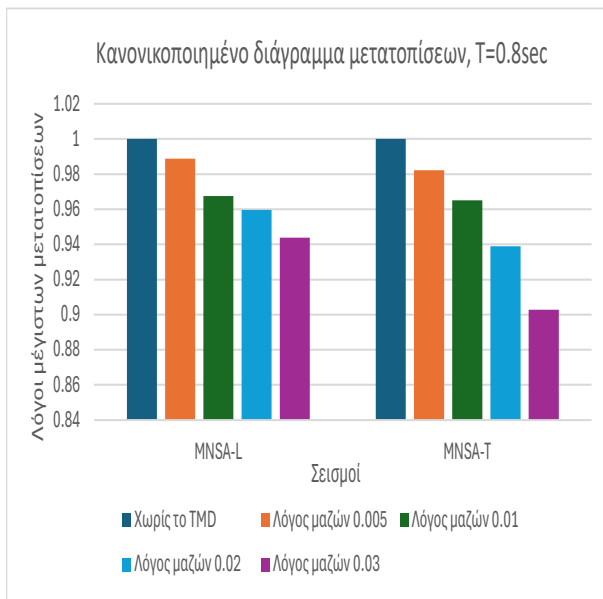
Στα Διαγράμματα 39–41 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για διαφορετικά σεισμικά αρχεία (ATHENS, MNSA, SGMA, SPLA, SPLB) με ιδιοπερίοδο ίση με $T=0.8\text{sec}$ και διάφορους λόγους

μάζας. Σε όλες τις περιπτώσεις η εισαγωγή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνει τις αποκρίσεις σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, αν και η ένταση της μείωσης εξαρτάται από το είδος της σεισμικής διέγερσης. Στους σεισμούς ATHENS, οι αποκρίσεις χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι ιδιαίτερα αυξημένες στα σενάρια 3T και 4L, όπου ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας καταφέρνει να επιτύχει σημαντική μείωση, ειδικά για λόγους μαζών 0.02 και 0.03. Στα σεισμικά αρχεία MNSA, η μείωση παραμένει σαφής, αν και πιο ήπια σε σχέση με την περίπτωση $T=0.5s$, δείχνοντας ότι η αποτελεσματικότητα διαφοροποιείται με την περίοδο του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Στο σετ SGMA–SPLA–SPLB, όπου οι απαιτήσεις ποικίλλουν, ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας αποδεικνύεται και πάλι χρήσιμος, περιορίζοντας σταθερά τις μέγιστες μετατοπίσεις, με πιο έντονο όφελος στις πιο δυσμενείς διεγέρσεις. Συνολικά, η περίοδος $T=0.8sec$ εξακολουθεί να προσφέρει θετικά αποτελέσματα, αλλά η καταστολή των αποκρίσεων είναι λιγότερο έντονη σε σχέση με μικρότερες περιόδους (0.3–0.5s), γεγονός που υποδηλώνει μειωμένη αποδοτικότητα του συστήματος για μεγαλύτερες ιδιοπερίοδους.

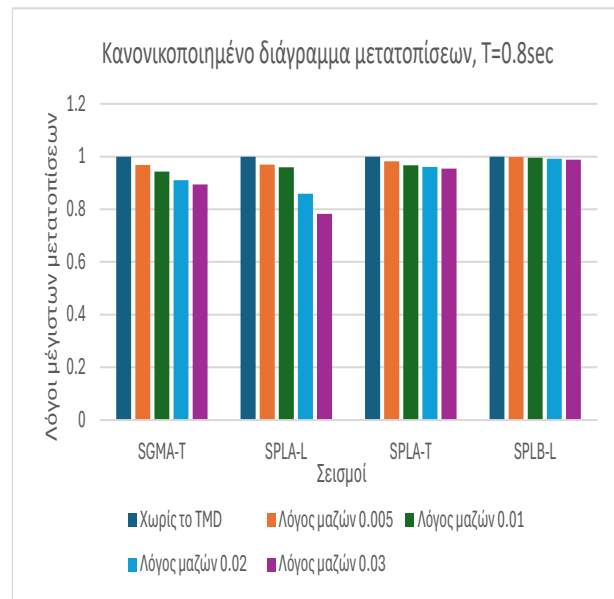
5.1.2.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.8sec$



Διάγραμμα 42 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



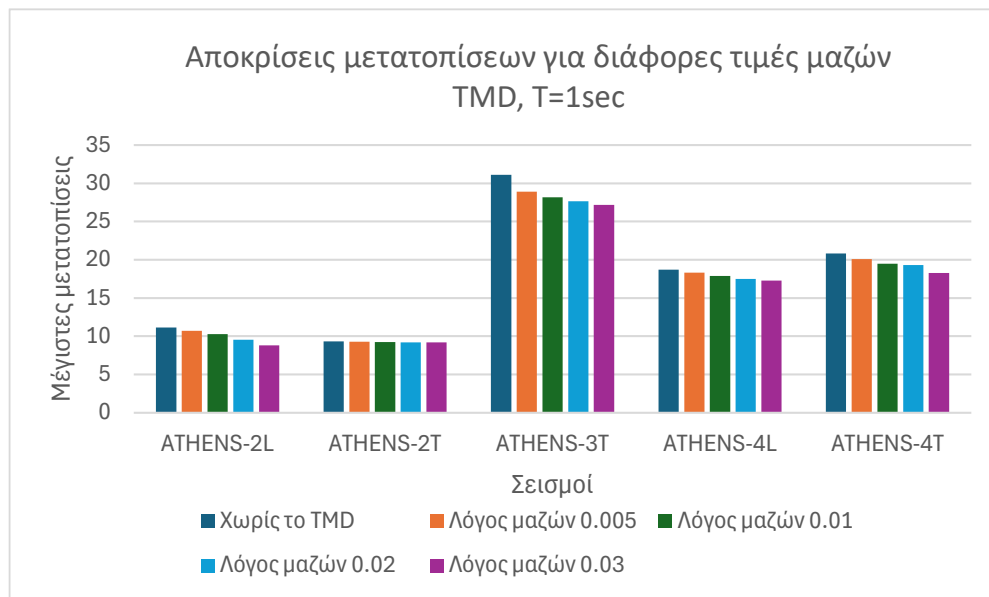
Διάγραμμα 43 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



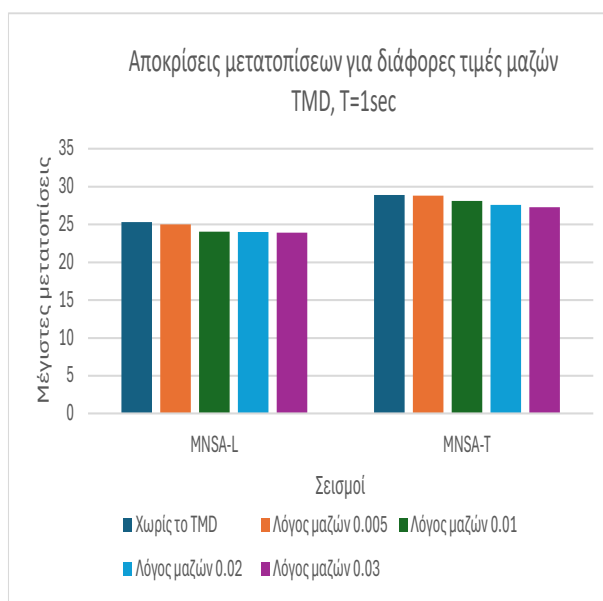
Διάγραμμα 44 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα Διαγράμματα 42–44 παρουσιάζονται οι λόγοι μέγιστων μετατοπίσεων για διαφορετικά σεισμικά αρχεία (ATHENS, MNSA, SGMA, SPLA, SPLB) με ιδιοπερίοδο ίση με $T=0.8\text{sec}$. Σε όλες τις περιπτώσεις η χρήση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε μείωση των μετακινήσεων σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, αν και η μείωση αυτή είναι γενικά πιο ήπια συγκριτικά με την αντίστοιχη για $T=0.5\text{sec}$. Στους σεισμούς ATHENS παρατηρείται σταθερή βελτίωση με την αύξηση του λόγου μάζας, με τα σενάρια ATHENS-2T και ATHENS-3T να εμφανίζουν το μεγαλύτερο όφελος. Στα σεισμικά αρχεία MNSA η μείωση είναι πιο αισθητή, ιδίως στη διεύθυνση T, όπου οι λόγοι μαζών 0.02 και 0.03 οδηγούν σε καθαρή μείωση των αποκρίσεων. Αντίθετα, στα αρχεία SGMA και SPLA η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι πιο περιορισμένη, με τις καμπύλες να συγκλίνουν προς την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Τέλος, στο SPLB η θετική επίδραση παραμένει, αλλά σε χαμηλότερο βαθμό σε σχέση με άλλες περιπτώσεις. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για $T=0.8\text{sec}$ ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας εξακολουθεί να συμβάλλει θετικά, αλλά η αποδοτικότητά του είναι μικρότερη από ό,τι σε μικρότερες ιδιοπεριόδους, γεγονός που τονίζει τη σημασία της επιλογής κατάλληλης περιόδου ρύθμισης.

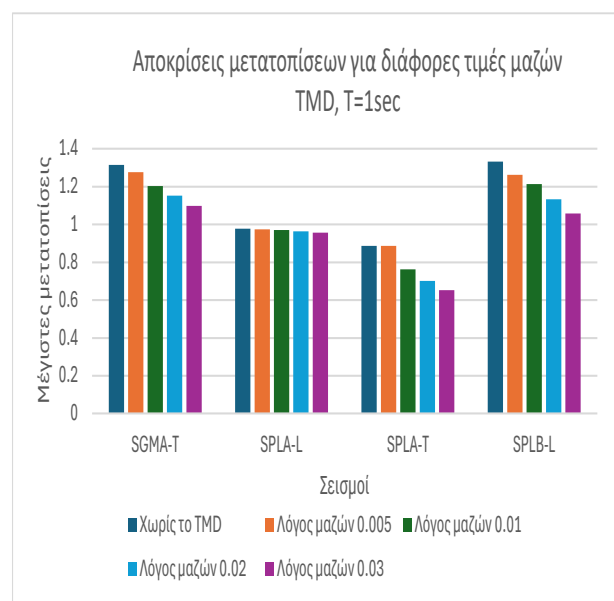
5.1.3. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=1\text{sec}$



Διάγραμμα 45 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



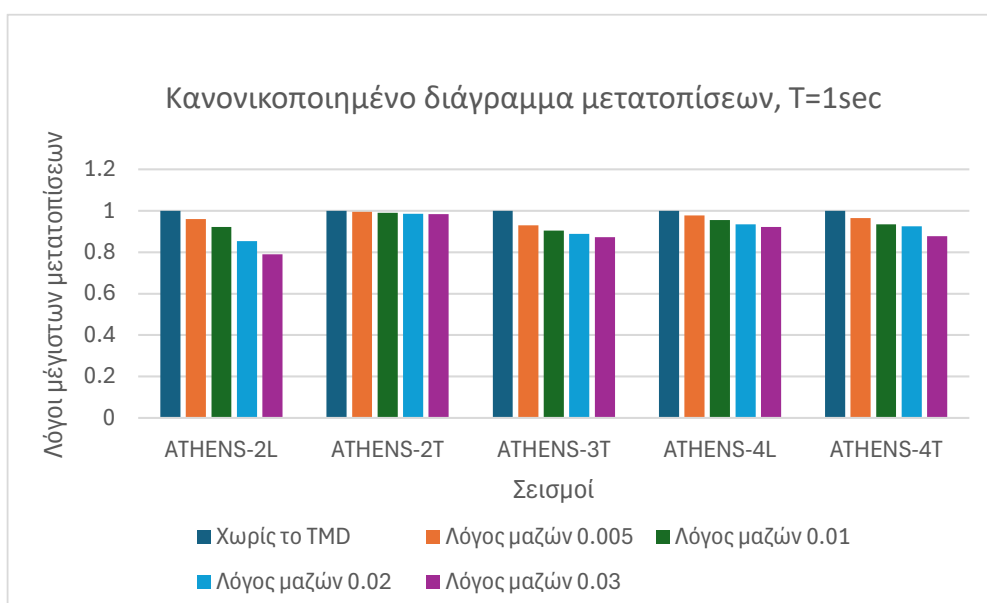
Διάγραμμα 46 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



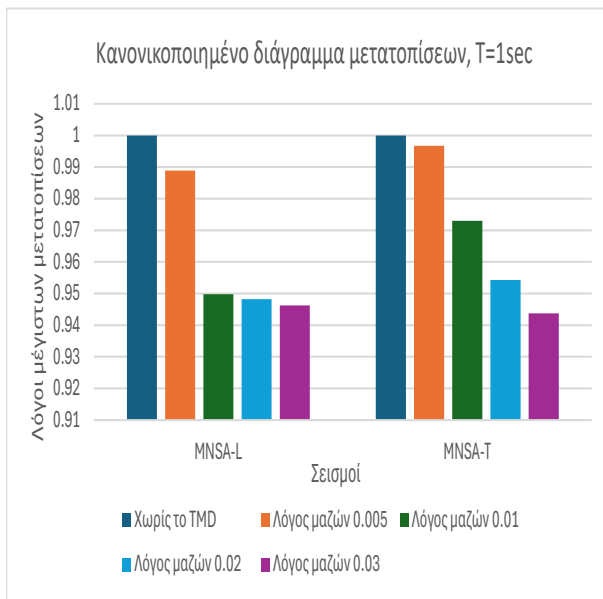
Διάγραμμα 47 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

Στα Διαγράμματα 45–47 φαίνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για διαφορετικά σεισμικά αρχεία με ιδιοπερίοδο ίση με $T=1\text{sec}$. Η γενική εικόνα δείχνει ότι η αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας σε αυτήν την περίοδο είναι πιο περιορισμένη σε σχέση με μικρότερες περιόδους ($0.3\text{s}–0.5\text{s}$). Στους σεισμούς ATHENS (Διάγραμμα 45), οι αποκρίσεις παραμένουν υψηλές, ιδιαίτερα στα σενάρια 3T και 4L, με τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας να επιτυγχάνει μόνο μερική μείωση και η διαφορά μεταξύ διαφορετικών λόγων μαζών να είναι σχετικά μικρή. Στα σεισμικά αρχεία MNSA (Διάγραμμα 46) οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται, δείχνοντας ότι ο αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας δεν προσφέρει ουσιαστική βελτίωση. Αντίθετα, στα σενάρια SGMA, SPLA και SPLB (Διάγραμμα 47) διακρίνεται κάποια μείωση, ειδικά για υψηλότερους λόγους μάζας, ωστόσο το όφελος παραμένει περιορισμένο. Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι για $T=1\text{sec}$ η αποδοτικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας υποχωρεί αισθητά, γεγονός που υποδηλώνει πως η συγκεκριμένη ρύθμιση δεν αποτελεί την προτιμότερη επιλογή για την καταστολή των σεισμικών αποκρίσεων.

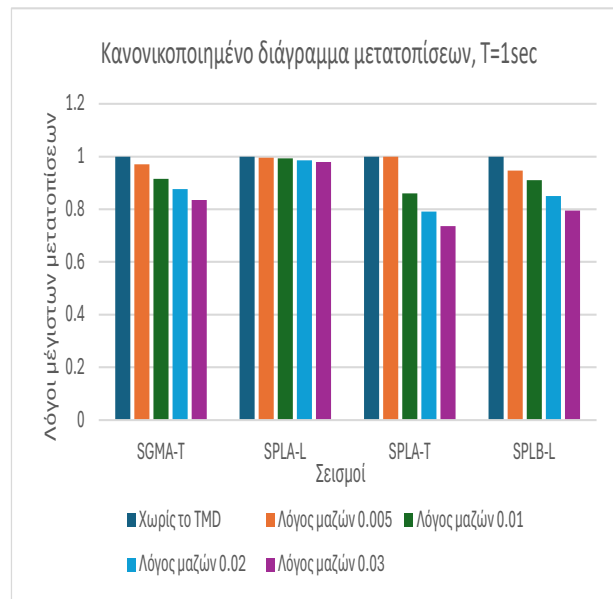
5.1.3.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=1\text{sec}$



Διάγραμμα 48 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



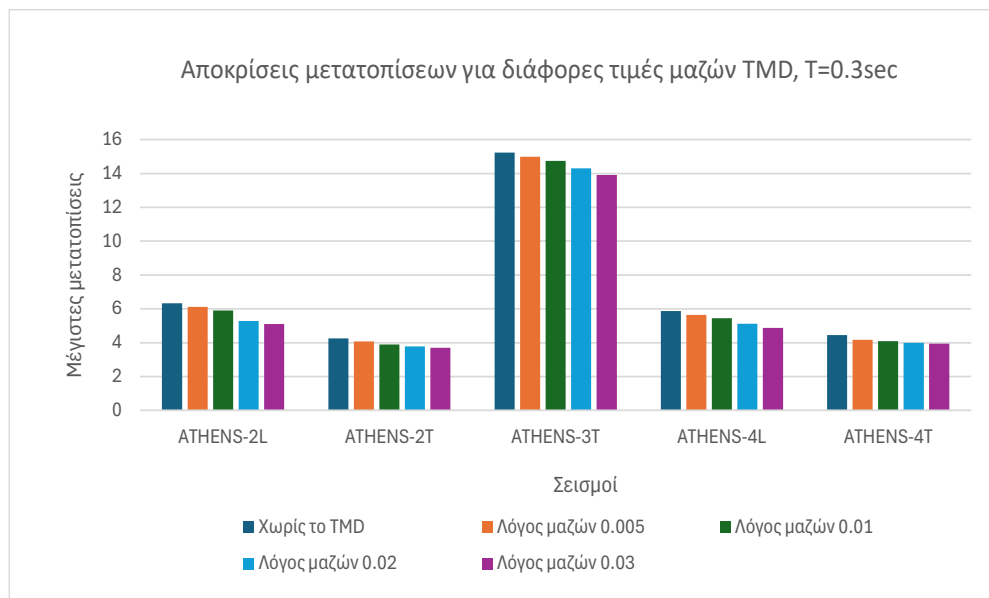
Διάγραμμα 49 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



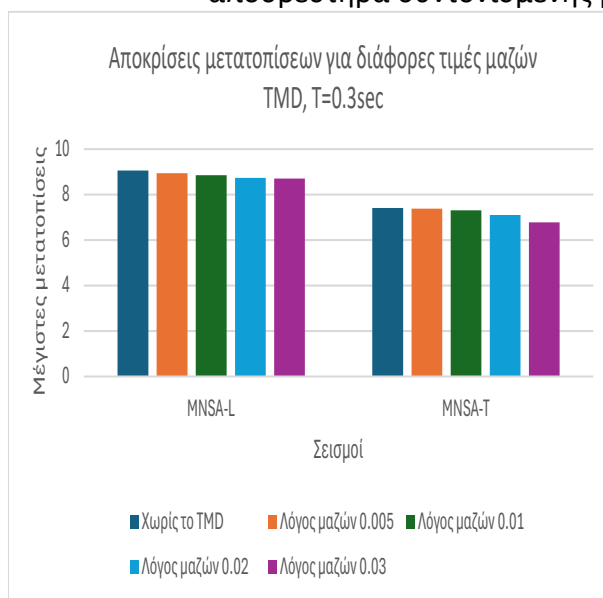
Διάγραμμα 50 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα Διαγράμματα 48–50 παρουσιάζονται οι λόγοι μέγιστων μετατοπίσεων για διαφορετικά σεισμικά αρχεία (ATHENS, MNSA, SGMA, SPLA, SPLB) με ιδιοπερίοδο ίση με $T=1\text{sec}$. Σε γενικές γραμμές, η εισαγωγή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας εξακολουθεί να μειώνει τις αποκρίσεις σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, αλλά η αποτελεσματικότητα εμφανίζεται σαφώς μειωμένη σε σύγκριση με μικρότερες ιδιοπεριόδους. Στους σεισμούς ATHENS (Διάγραμμα 48) καταγράφεται κάποια μείωση, κυρίως για λόγους μαζών 0.02–0.03, αλλά η βελτίωση είναι περιορισμένη και όχι τόσο έντονη όσο στα αντίστοιχα διαγράμματα με $T=0.5\text{s}$. Στα σεισμικά αρχεία MNSA (Διάγραμμα 49) παρατηρείται μικρή αλλά καθαρή μείωση των λόγων μετατοπίσεων, κυρίως στη διεύθυνση T, ωστόσο η διαφορά μεταξύ των διαφορετικών λόγων μάζας παραμένει μικρή. Τέλος, στο σετ SGMA–SPLA–SPLB (Διάγραμμα 50) οι αποκρίσεις μειώνονται με την παρουσία αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με το όφελος να γίνεται πιο σαφές για τους μεγαλύτερους λόγους μαζών, αλλά συνολικά το εύρος βελτίωσης παραμένει μέτριο. Συνολικά, τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι για $T=1\text{sec}$ ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας διατηρεί μεν θετική επίδραση, αλλά η αποδοτικότητά του υπολείπεται σε σύγκριση με τις περιπτώσεις μικρότερων περιόδων, επιβεβαιώνοντας ότι η βέλτιστη ρύθμιση βρίσκεται σε χαμηλότερα χρονικά διαστήματα (0.3–0.5s).

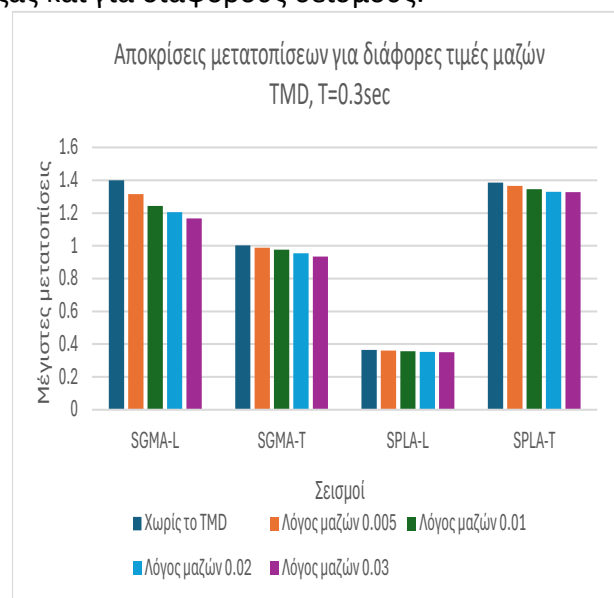
5.1.4. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορες περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{sec}$



Διάγραμμα 51 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 52 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

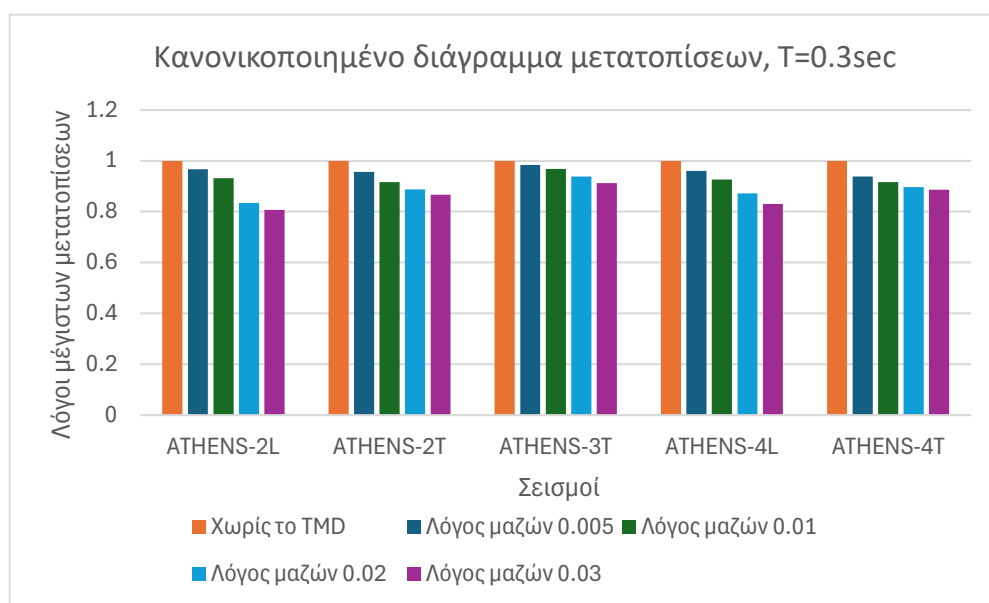


Διάγραμμα 53 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

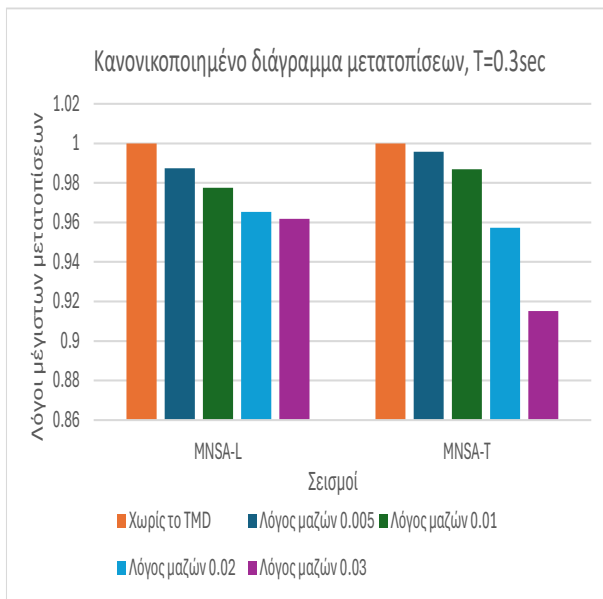
Στα Διαγράμματα 51–53 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για διάφορα σεισμικά αρχεία με ιδιοπερίοδο ίση με $T=0.3\text{sec}$. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης

μάζας είναι ιδιαίτερα αποδοτικός σε αυτή την περίπτωση, καθώς επιτυγχάνει σημαντική μείωση των αποκρίσεων σε όλα τα σεισμικά σενάρια. Στους σεισμούς ATHENS, (Διάγραμμα 51), η μείωση είναι εμφανής τόσο στις μικρότερες (2L, 2T) όσο και στις δυσμενέστερες διεγέρσεις (3T, 4L), με τους λόγους μαζών 0.02 και 0.03 να εξασφαλίζουν τη μεγαλύτερη βελτίωση. Στα σεισμικά αρχεία MNSA (Διάγραμμα 52) η επίδραση είναι σαφέστατη, με τις μετατοπίσεις να περιορίζονται σταθερά για όλους τους λόγους μαζών, ενώ στα σενάρια SGMA–SPLA, (Διάγραμμα 53), η θετική επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι επίσης ξεκάθαρη, ιδιαίτερα στις διευθύνσεις όπου οι απαιτήσεις χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι υψηλότερες. Συνολικά, για $T=0.3\text{sec}$ ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας προσφέρει την πιο καθαρή και συνεπή μείωση μετακινήσεων, με το όφελος να γίνεται εντονότερο όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών, επιβεβαιώνοντας ότι μικρότερες ιδιοπερίοδοι ευνοούν την αποτελεσματικότητά του.

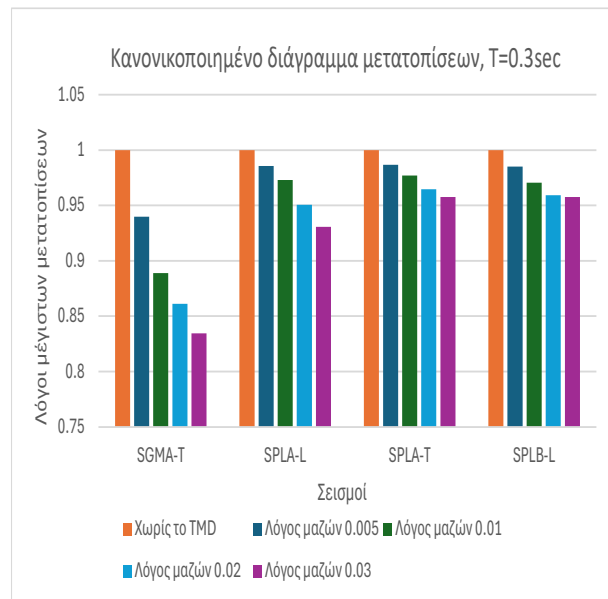
5.1.4.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περιπτώσεις σεισμών και ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{sec}$



Διάγραμμα 54 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 55 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 56 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα Διαγράμματα 54–56 παρουσιάζονται οι λόγοι μέγιστων μετατοπίσεων για διαφορετικά σεισμικά αρχεία (ATHENS, MNSA, SGMA, SPLA, SPLB) με ιδιοπερίοδο ίση με $T=0.3\text{sec}$. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι η συγκεκριμένη ρύθμιση είναι από τις πιο αποδοτικές, καθώς η μείωση των αποκρίσεων είναι σαφής και συστηματική σε όλα τα σενάρια. Στους σεισμούς ATHENS (Διάγραμμα 54) οι λόγοι μετατοπίσεων μειώνονται σταθερά με την αύξηση του λόγου μαζών, με τα σενάρια ATHENS-2T και ATHENS-3T να εμφανίζουν τη μεγαλύτερη βελτίωση. Στα σεισμικά αρχεία MNSA (Διάγραμμα 55) η μείωση είναι επίσης εμφανής, ιδιαίτερα για λόγους μαζών 0.02 και 0.03, που επιτυγχάνουν αισθητή καταστολή των αποκρίσεων. Στα SGMA–SPLA–SPLB (Διάγραμμα 56) παρατηρείται ομοιόμορφη βελτίωση, με τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας να περιορίζει σημαντικά τις αποκρίσεις ακόμα και σε δυσμενέστερα σενάρια, χωρίς να εμφανίζονται ανεπιθύμητες αυξήσεις. Συνολικά, για $T=0.3\text{sec}$ ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας επιδεικνύει την υψηλότερη αποδοτικότητα συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιόδους, επιβεβαιώνοντας ότι μικρές ιδιοπερίοδοι μεγιστοποιούν την αποτελεσματικότητά του.

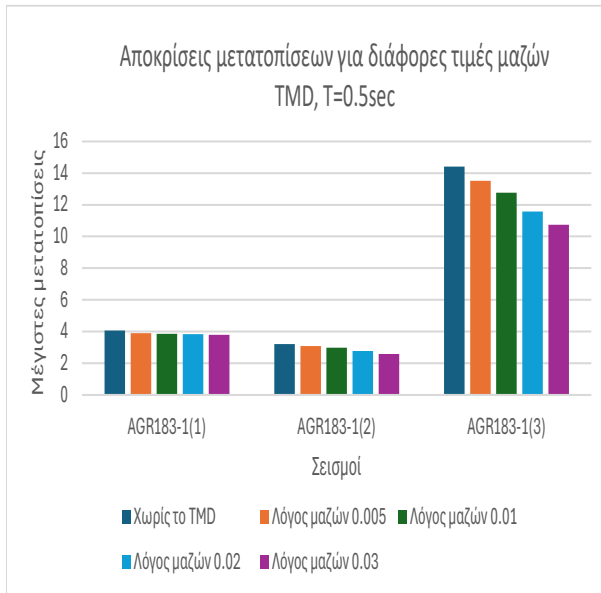
5.2 Συγκρίσεις μεταξύ Διαφορετικών Σεισμών

Συμπερασματικά, η διερεύνηση της απόδοσης του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας για διαφορετικές ιδιοπεριόδους υπό πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις στην αποτελεσματικότητά του. Στις μικρότερες περιόδους (0.3s–0.5s) ο αποσβεστήρας πέτυχε τη μεγαλύτερη και πιο σταθερή μείωση μετατοπίσεων, προσφέροντας αξιόπιστη καταστολή ακόμη και σε δυσμενείς συνθήκες και για όλα τα σεισμικά αρχεία. Στην περίπτωση $T=0.8\text{s}$ η συνεισφορά του παραμένει θετική, αλλά με σαφώς ηπιότερη και ανομοιόμορφη δράση, ενώ για $T=1\text{s}$ η αποτελεσματικότητα υποχωρεί περαιτέρω, με τις βελτιώσεις να είναι μικρής κλίμακας. Με βάση τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι οι ιδιοπερίοδοι 0.3–0.5s αποτελούν την προτιμότερη περιοχή ρύθμισης του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, καθώς

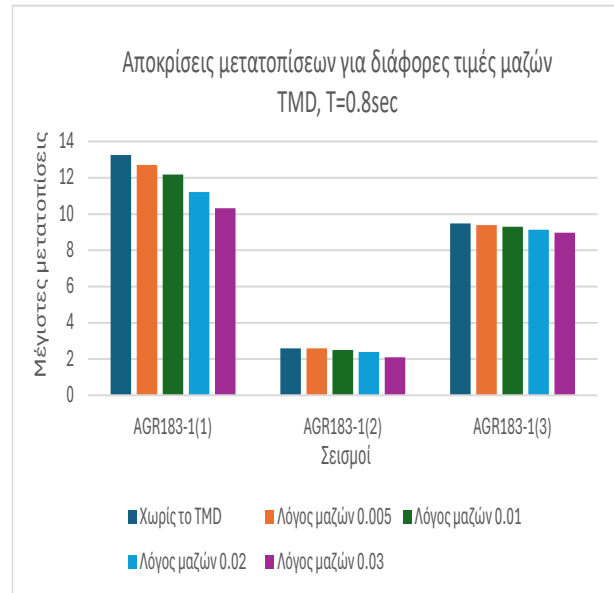
εξασφαλίζουν τη μέγιστη μείωση των σεισμικών αποκρίσεων με συνέπεια και χωρίς ανεπιθύμητες παρενέργειες.

5.3 Προσομοίωση πραγματικών σεισμών (ITSAK, ENEA, KINE)

5.3.1. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)

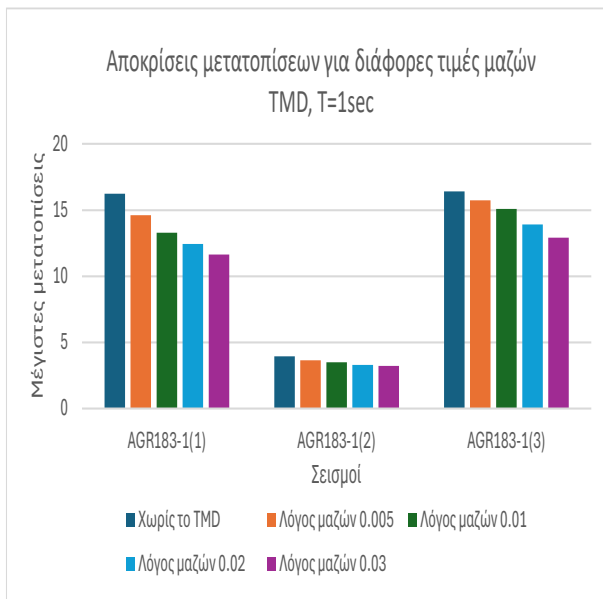


Διάγραμμα 57 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

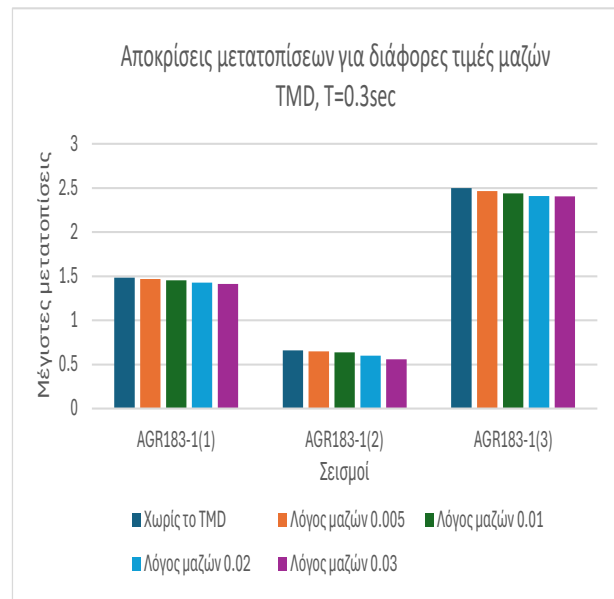


Διάγραμμα 58 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

Στα Διαγράμματα 57 και 58 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για τον σεισμό ΑΓΡ183 σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, με ιδιοπερίοδο ίση με $T=0.5\text{s}$ και $T=0.8\text{s}$ αντίστοιχα. Στην περίπτωση $T=0.5\text{s}$ (Διάγραμμα 57), ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματικός, καθώς οι μετατοπίσεις μειώνονται σταθερά με την αύξηση του λόγου μαζών, ιδίως στις περιπτώσεις με μεγαλύτερες απαιτήσεις χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Στην περίπτωση $T=0.8\text{s}$ (Διάγραμμα 58), η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παραμένει θετική αλλά είναι πιο περιορισμένη, με τις μειώσεις να εμφανίζονται ηπιότερες συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας είναι πιο αποδοτικός όταν η περίοδος ρύθμισής του βρίσκεται πιο κοντά στις κυρίαρχες περιόδους του συστήματος, ενώ για μεγαλύτερες τιμές η ικανότητα καταστολής των μετακινήσεων μειώνεται. Συνολικά, ο σεισμός ΑΓΡ183 επιβεβαιώνει ότι οι χαμηλότερες ιδιοπερίοδοι ($0.3-0.5\text{s}$) αποτελούν την πιο αποδοτική επιλογή.



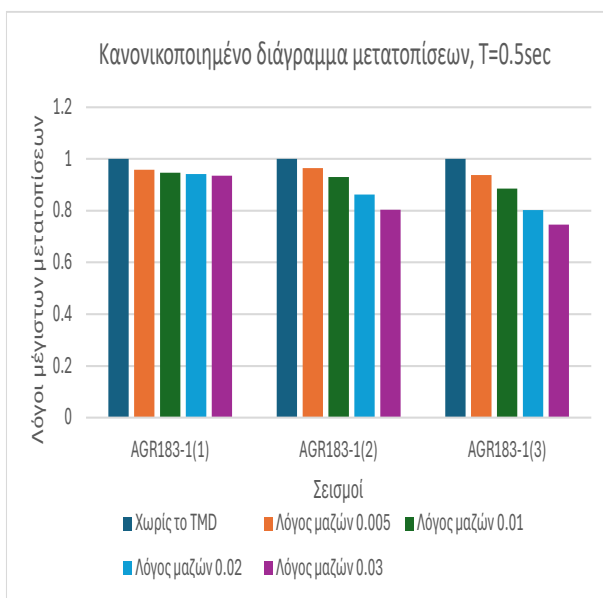
Διάγραμμα 59 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



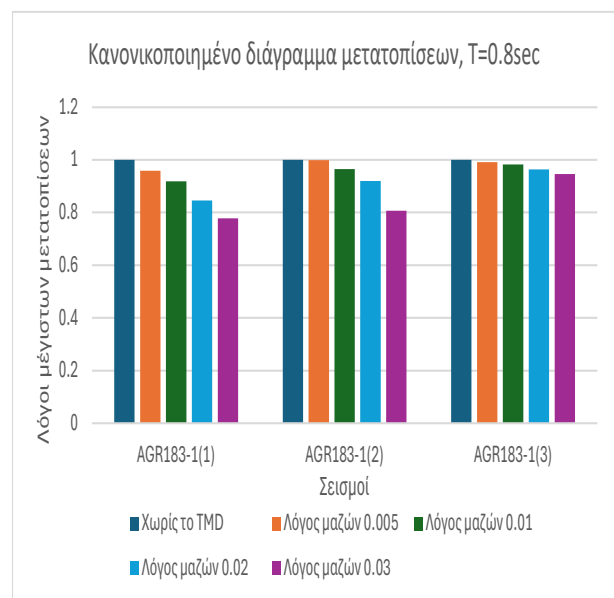
Διάγραμμα 60 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

Ομοίως για τα Διαγράμματα 59 και 60 φαίνεται ότι η αύξηση του λόγου μαζών δείχνει μεγάλη αποτελεσματικότητα στην μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων.

5.3.1.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους (T=0.3,T=0.5,T=0.8,T=1sec)

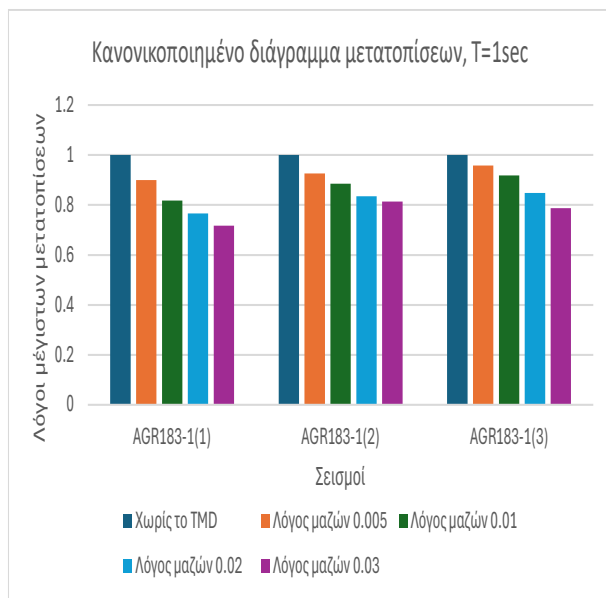


Διάγραμμα 61 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

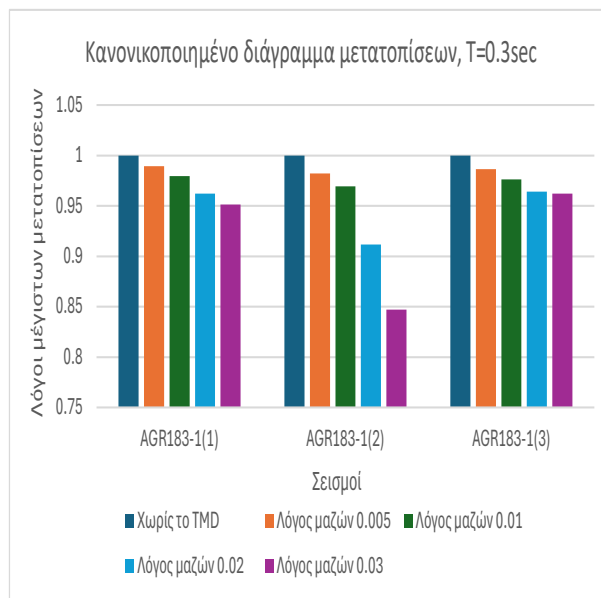


Διάγραμμα 62 Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα Διαγράμματα 61–62 φαίνεται η σύγκριση των λόγων μέγιστων μετατοπίσεων για τις τρεις περιπτώσεις του σεισμού AGR183. Για $T=0.5s$ παρατηρείται σταθερή μείωση με την αύξηση του λόγου μαζών, με το όφελος να είναι πιο έντονο στις περιπτώσεις με μεγαλύτερες αρχικές αποκρίσεις. Στην περίπτωση $T=0.8s$ η μείωση παραμένει παρούσα, αλλά είναι σαφώς πιο περιορισμένη και λιγότερο ομοιόμορφη. Συνεπώς, και σε αυτήν την ανάλυση επιβεβαιώνεται ότι η περίοδος $T=0.5s$ προσφέρει υψηλότερη αποδοτικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας συγκριτικά με την $T=0.8s$.



Διάγραμμα 63 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 64 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Από τα κανονικοποιημένα διαγράμματα (61–64) παρατηρείται ότι η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε συστηματική μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων σε όλες τις περιπτώσεις του σεισμού AGR183. Η αποτελεσματικότητα της απόσβεσης εξαρτάται έντονα από την ιδιοπερίοδο του συστήματος:

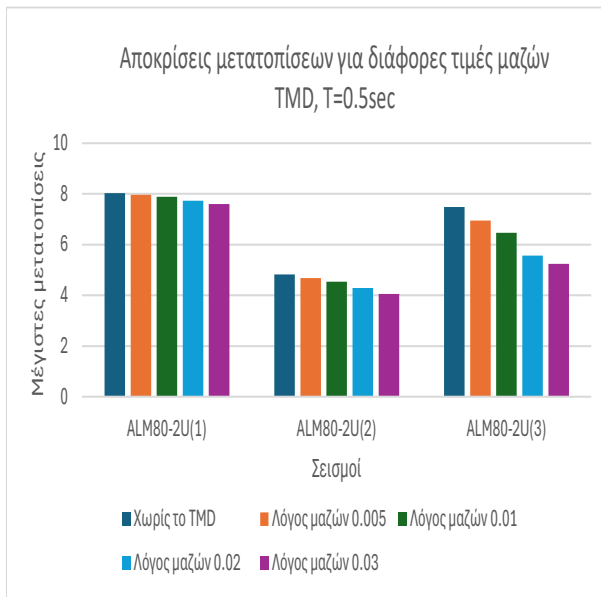
Για $T=0.5s$, η μείωση είναι πιο σημαντική και εμφανίζεται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, με το όφελος να ενισχύεται όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών.

Στα $T=0.8s$ και $T=1.0s$ το όφελος παραμένει μεν υπαρκτό, αλλά είναι λιγότερο έντονο και πιο ασταθές, καθώς η καμπύλη δείχνει μικρότερη διαφοροποίηση σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας.

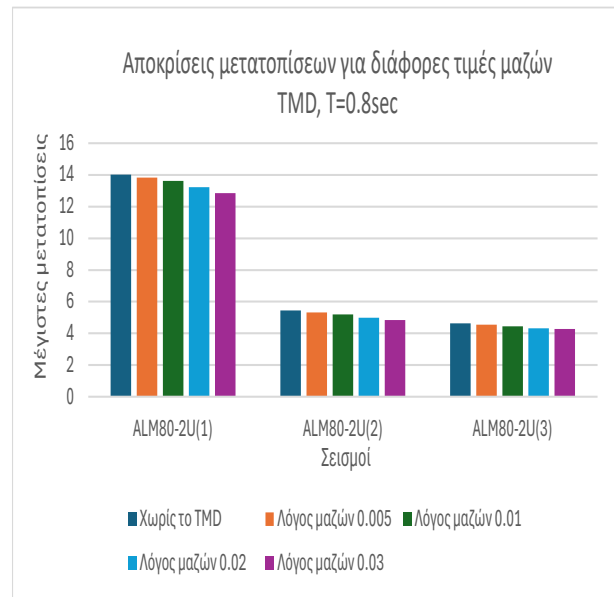
Για $T=0.3s$ παρατηρείται μια περιορισμένη βελτίωση, αλλά σαφώς κατώτερη σε σχέση με την $T=0.5s$, γεγονός που δείχνει ότι οι πολύ μικρές περίοδοι δεν αξιοποιούν πλήρως τη δράση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας.

Συνολικά, ο σεισμός AGR183 επιβεβαιώνει το γενικό συμπέρασμα ότι η περίοδος $T=0.5s$ αποτελεί την πιο αποδοτική επιλογή για τον αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, προσφέροντας τη μεγαλύτερη μείωση μετατοπίσεων, ενώ οι υπόλοιπες ιδιοπερίοδοι παρέχουν μεν όφελος, αλλά σε μικρότερο βαθμό.

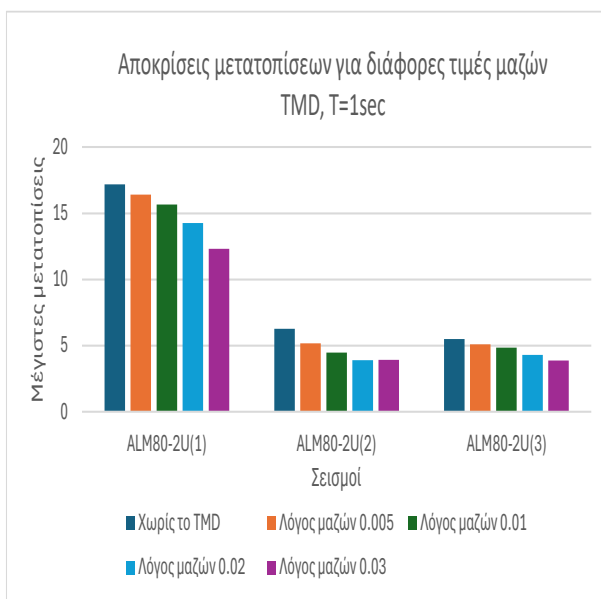
5.3.2. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)



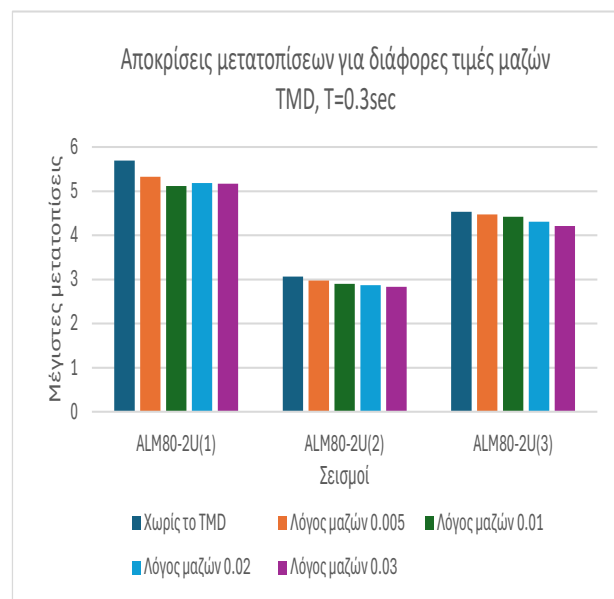
Διάγραμμα 65 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 66 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 67 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

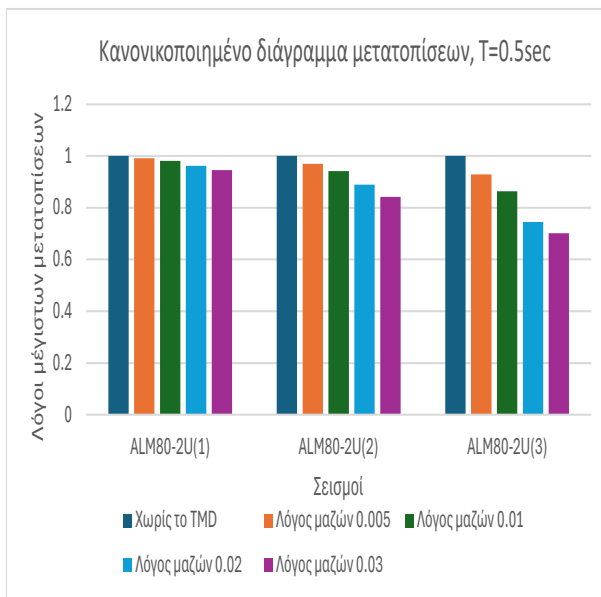


Διάγραμμα 68 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

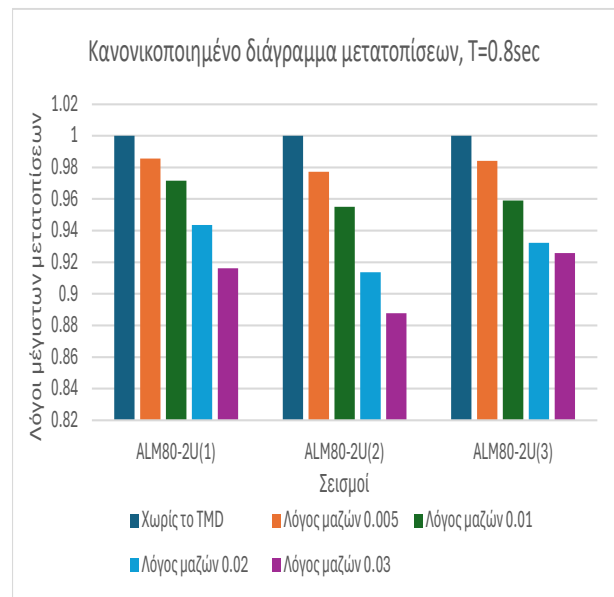
Στα Διαγράμματα 65–68, που αφορούν τον σεισμό ALM80, παρατηρείται ότι η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνει σταθερά τις μέγιστες μετατοπίσεις για όλες τις

ιδιοπεριόδους. Για $T=0.5s$ η μείωση είναι ιδιαίτερα εμφανής, ειδικά στις περιπτώσεις με τις μεγαλύτερες αποκρίσεις, γεγονός που επιβεβαιώνει την υψηλή αποδοτικότητα αυτής της ιδιοπεριόδου. Στην περίπτωση $T=0.8s$ οι μειώσεις εξακολουθούν να υπάρχουν, αλλά είναι πιο ήπιες και λιγότερο σταθερές μεταξύ των διαφορετικών διεγέρσεων. Για $T=1.0s$ η βελτίωση παραμένει αισθητή, αν και σε πιο περιορισμένο βαθμό συγκριτικά με το $T=0.5s$. Τέλος, στην περίπτωση της πολύ μικρής ιδιοπεριόδου $T=0.3s$ η δράση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας αποδεικνύεται πιο περιορισμένη, με τα οφέλη να είναι σαφώς μικρότερα. Συνολικά, ο σεισμός ALM80 δείχνει ότι η περίοδος $T=0.5s$ είναι η πλέον αποδοτική, ενώ οι υπόλοιπες ιδιοπεριόδοι προσφέρουν μεν μείωση των αποκρίσεων, αλλά σε μικρότερο βαθμό.

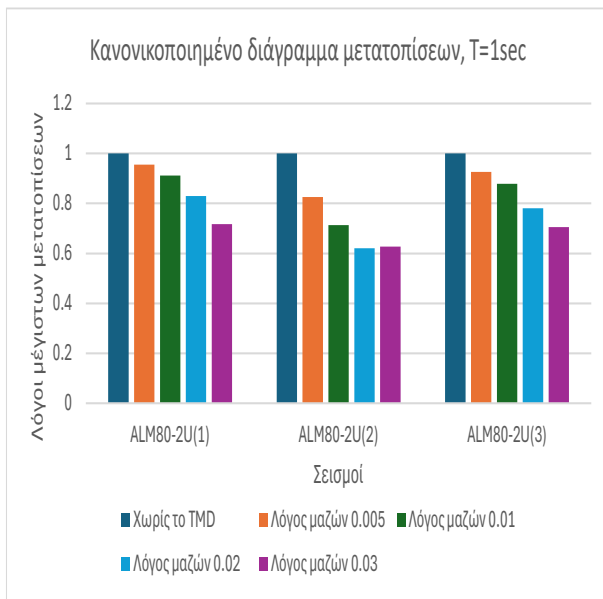
5.3.2.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1sec$)



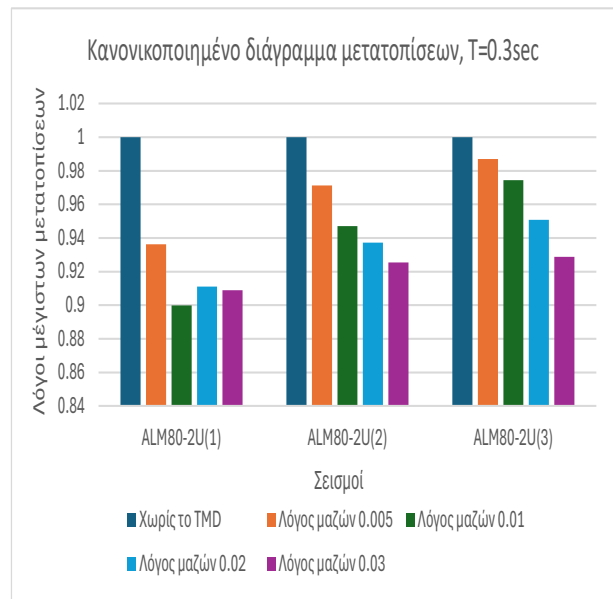
Διάγραμμα 69 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 70 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



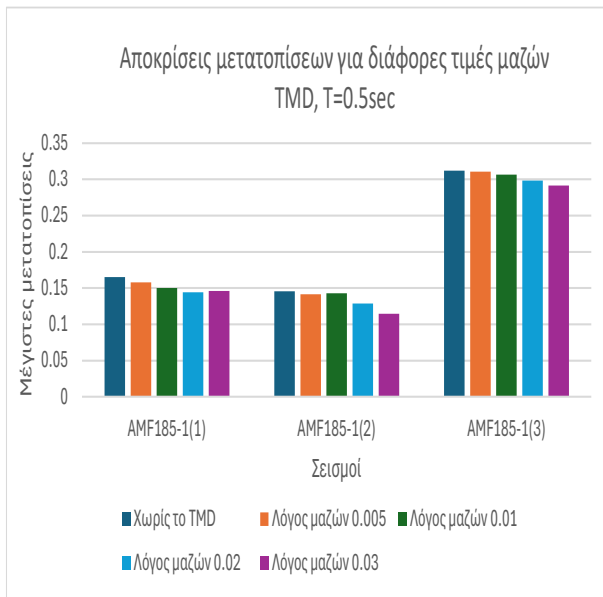
Διάγραμμα 71 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



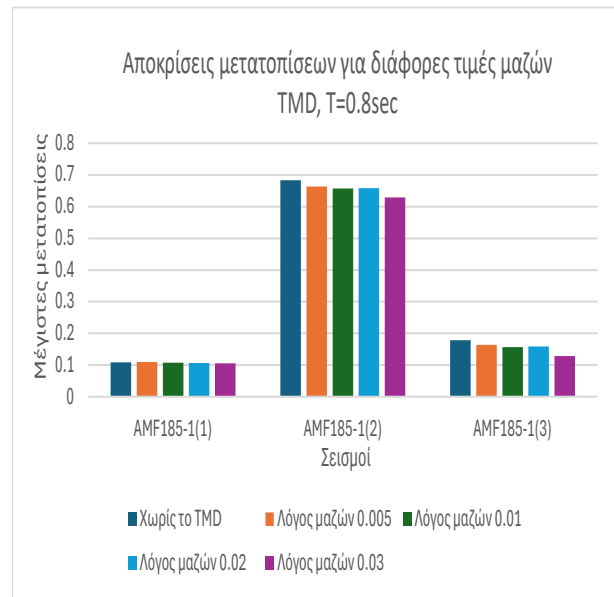
Διάγραμμα 72 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα κανονικοποιημένα διαγράμματα 69–72 για τον σεισμό ALM80 φαίνεται καθαρά ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας μειώνει τις σχετικές μετατοπίσεις σε όλες τις ιδιοπεριόδους. Για $T=0.5\text{s}$ η μείωση είναι η πιο έντονη και συστηματική, ιδιαίτερα όταν αυξάνεται ο λόγος μαζών, γεγονός που αναδεικνύει την αποδοτικότητα αυτής της περίπτωσης. Στην περίπτωση $T=0.8\text{s}$ η απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παραμένει θετική αλλά πιο περιορισμένη, με μικρότερη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών. Για $T=1.0\text{s}$ παρατηρείται επίσης μείωση, αν και όχι τόσο έντονη όσο στο $T=0.5\text{s}$. Τέλος, στην ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{s}$ η βελτίωση είναι πιο περιορισμένη και λιγότερο σταθερή, γεγονός που δείχνει ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας δεν αποδίδει εξίσου ικανοποιητικά σε τόσο μικρές περιόδους. Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το $T=0.5\text{s}$ αποτελεί την προτιμητέα ιδιοπερίοδο για τον συγκεκριμένο σεισμό, προσφέροντας τη μεγαλύτερη μείωση μετατοπίσεων σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

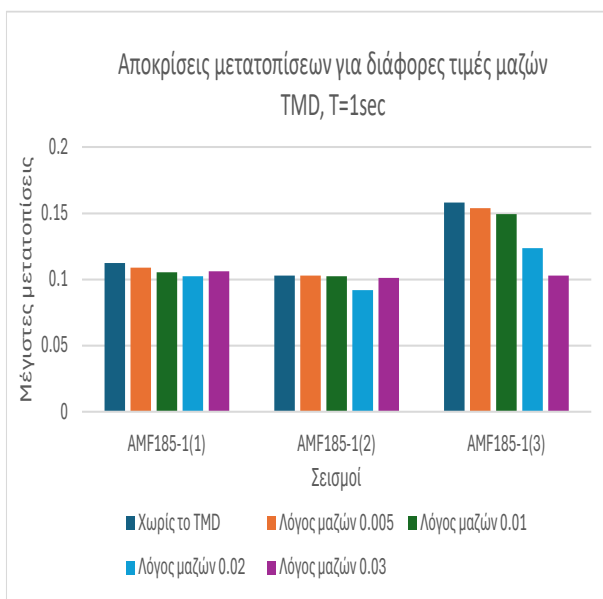
5.3.3. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)



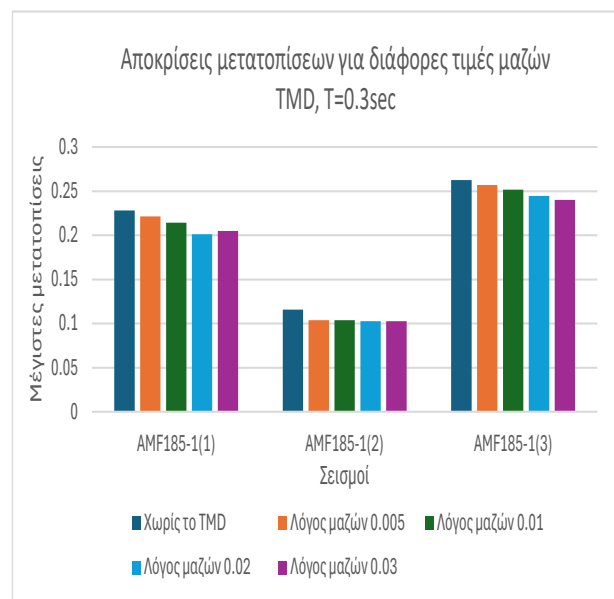
Διάγραμμα 73 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 74 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 75 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

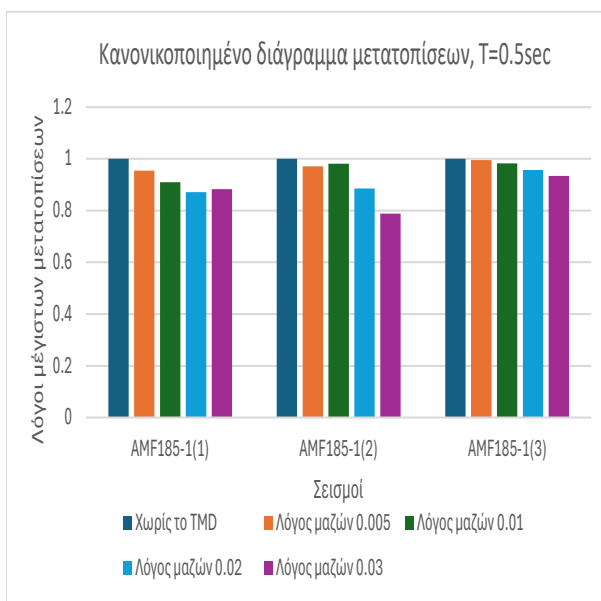


Διάγραμμα 76 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

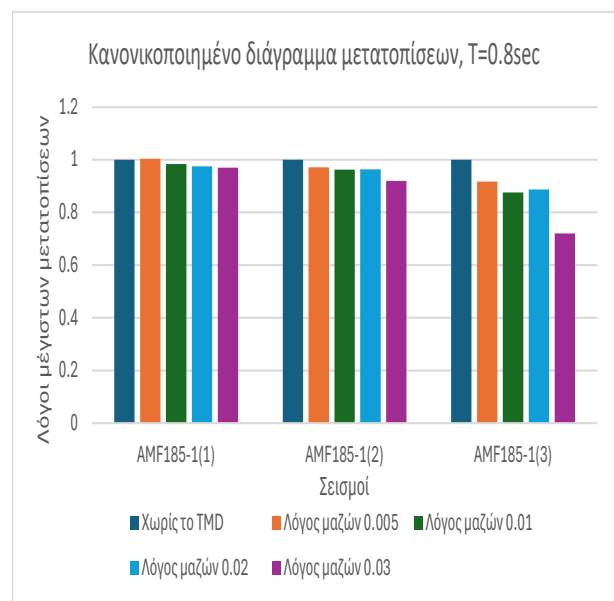
Στα Διαγράμματα 73–76, που αφορούν τον σεισμό AMF185, παρατηρείται ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας οδηγεί σε μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων για όλες τις περιπτώσεις, αν

και η ένταση της βελτίωσης διαφέρει ανάλογα με την ιδιοπερίοδο. Για $T=0.5s$ η μείωση είναι πιο σαφής και συστηματική, δείχνοντας την αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα σε αυτήν την ιδιοπερίοδο. Στην περίπτωση $T=0.8s$ το όφελος παραμένει παρόν, αλλά είναι πιο περιορισμένο και λιγότερο σταθερό. Για $T=1.0s$ οι μειώσεις εξακολουθούν να εμφανίζονται, αν και σε πιο μικρή κλίμακα, ενώ για $T=0.3s$ η δράση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι η πιο περιορισμένη, με ελάχιστη διαφοροποίηση σε σχέση με την απόκριση χωρίς τον αποσβεστήρα. Συνεπώς, και για τον σεισμό AMF185 η περίοδος $T=0.5s$ φαίνεται να αποτελεί την πιο αποδοτική επιλογή, καθώς προσφέρει τη μεγαλύτερη μείωση των μετατοπίσεων σε σχέση με τις υπόλοιπες ιδιοπεριόδους.

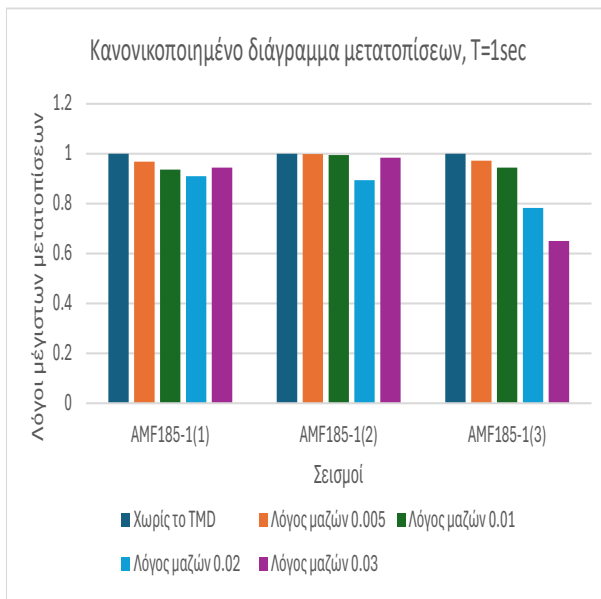
5.3.3.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1sec$)



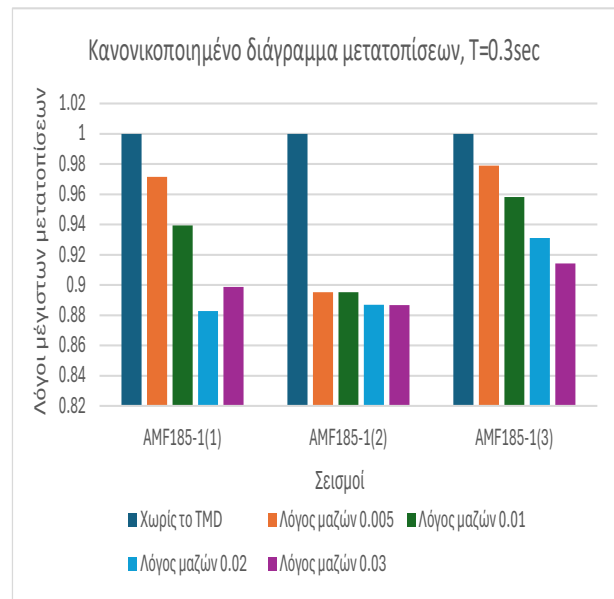
Διάγραμμα 77 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 78 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



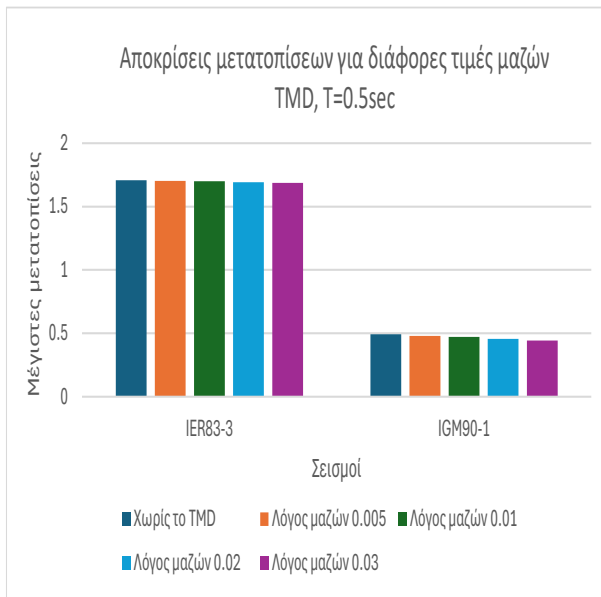
Διάγραμμα 79 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



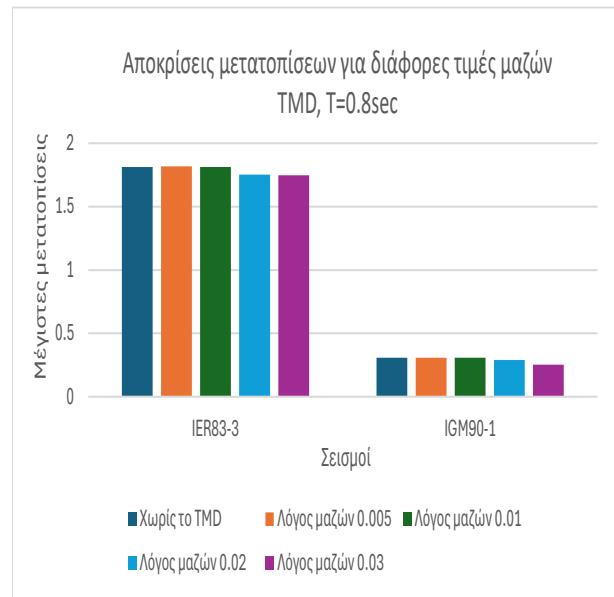
Διάγραμμα 80 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα κανονικοποιημένα διαγράμματα 77–80 για τον σεισμό AMF185 παρατηρείται ότι η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας επιφέρει μείωση των λόγων μέγιστων μετατοπίσεων σε όλες τις ιδιοπεριόδους, αν και η ένταση της μείωσης διαφοροποιείται. Για $T=0.5\text{s}$ το όφελος είναι πιο εμφανές και σταθερό, ειδικά όταν αυξάνεται ο λόγος μάζας, γεγονός που υποδεικνύει την υψηλή αποδοτικότητα αυτής της ιδιοπεριόδου. Στην περίπτωση $T=0.8\text{s}$ η βελτίωση είναι πιο περιορισμένη, με μικρότερες διαφορές μεταξύ των καμπυλών. Για $T=1.0\text{s}$ η εικόνα παραμένει παρόμοια, με ορισμένα σημεία να δείχνουν μόνο οριακή μείωση. Τέλος, στην ιδιοπερίοδο $T=0.3\text{s}$ το όφελος είναι μικρότερο και λιγότερο σταθερό, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις εξακολουθεί να παρατηρείται αισθητή μείωση των μετατοπίσεων. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και για τον σεισμό AMF185 η περίοδος $T=0.5\text{s}$ αποτελεί την προτιμητέα επιλογή, καθώς προσφέρει την πιο ουσιαστική μείωση σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

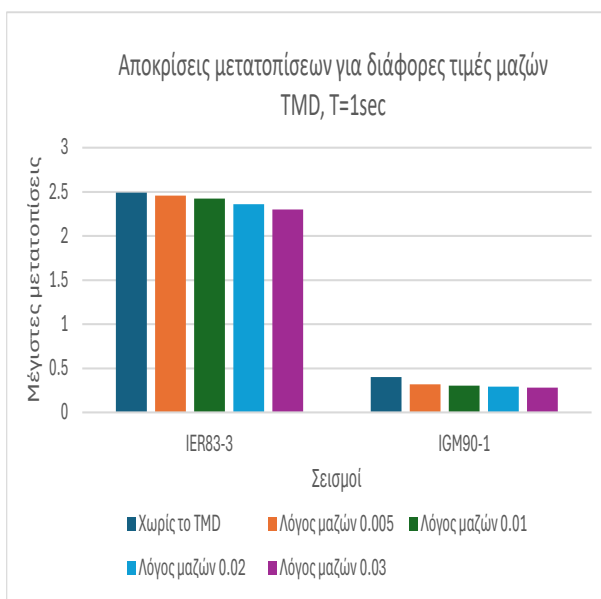
5.3.4. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)



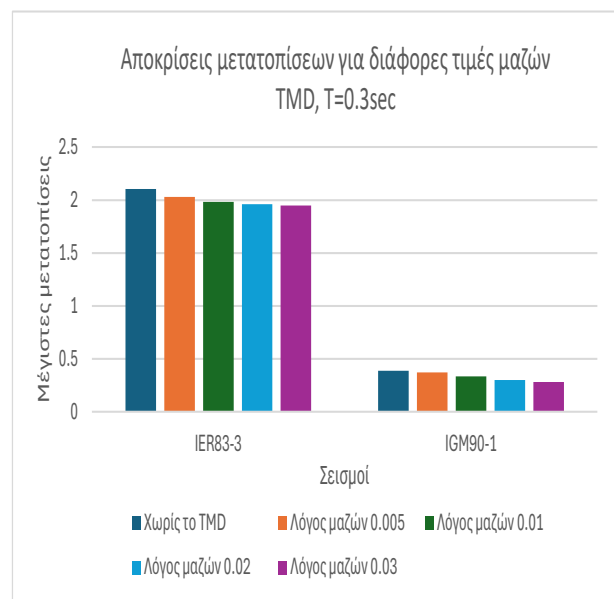
Διάγραμμα 81 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 82 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



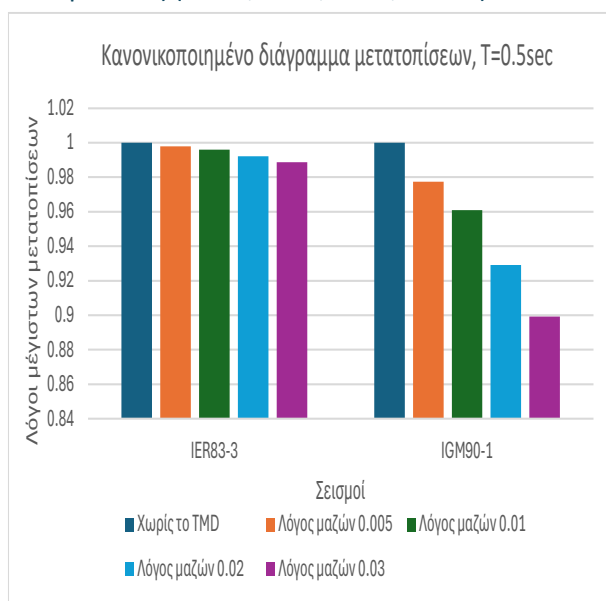
Διάγραμμα 83 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



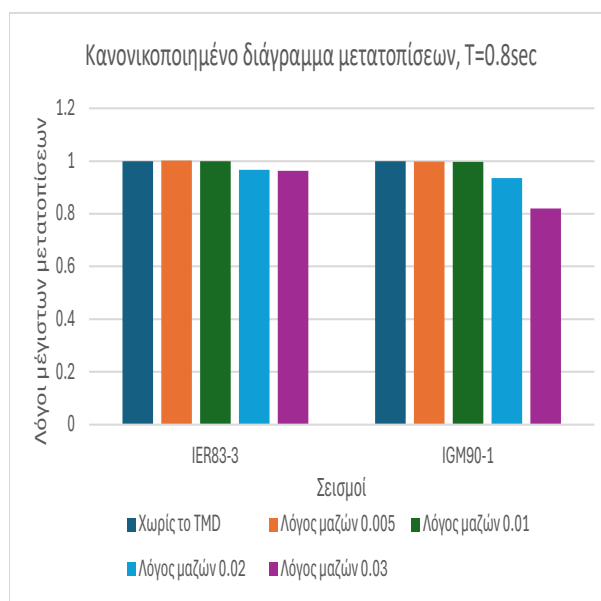
Διάγραμμα 84 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

Στα διαγράμματα 81–84 φαίνεται ότι η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνει τις μέγιστες μετατοπίσεις για τους σεισμούς IER33 και IGM91 σε όλες τις ιδιοπεριόδους. Για $T=0.5s$ παρατηρείται σταθερή και εμφανής μείωση, γεγονός που καταδεικνύει την υψηλή αποδοτικότητα του αποσβεστήρα. Στην περίπτωση $T=0.8s$ το όφελος εξακολουθεί να είναι παρόν αλλά σε μικρότερη κλίμακα, ενώ για $T=1.0s$ η μείωση είναι πιο ήπια και λιγότερο συνεπής. Στην ιδιοπερίοδο $T=0.3s$ η απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι πιο περιορισμένη, με ορισμένες περιπτώσεις να παρουσιάζουν μόνο οριακή βελτίωση. Συνεπώς, και για αυτούς τους σεισμούς, η ιδιοπερίοδος $T=0.5s$ φαίνεται να αποτελεί την πιο αποδοτική επιλογή, ενώ οι υπόλοιπες ιδιοπερίοδοι παρέχουν μεν μείωση αλλά σε μικρότερο βαθμό.

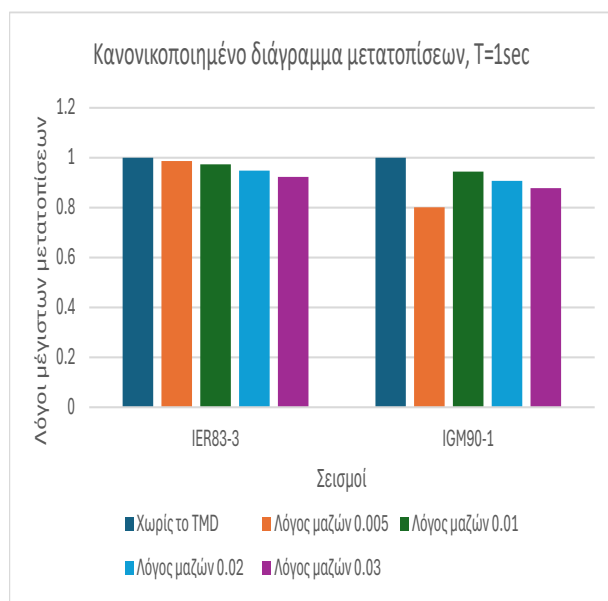
5.3.4.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1sec$)



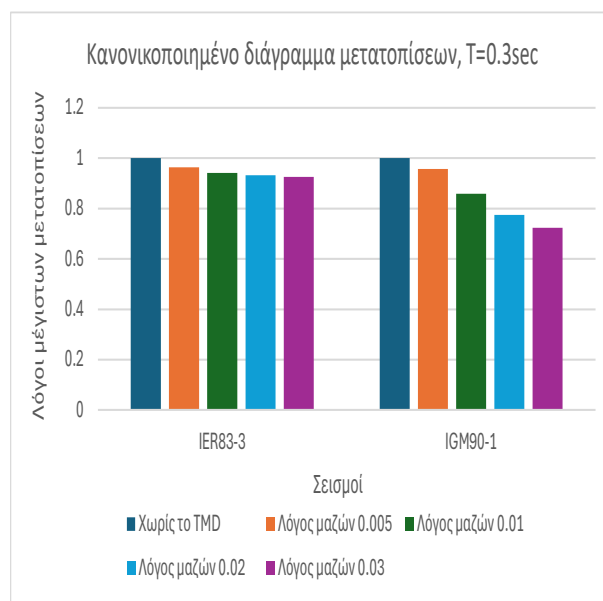
Διάγραμμα 85 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 86 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



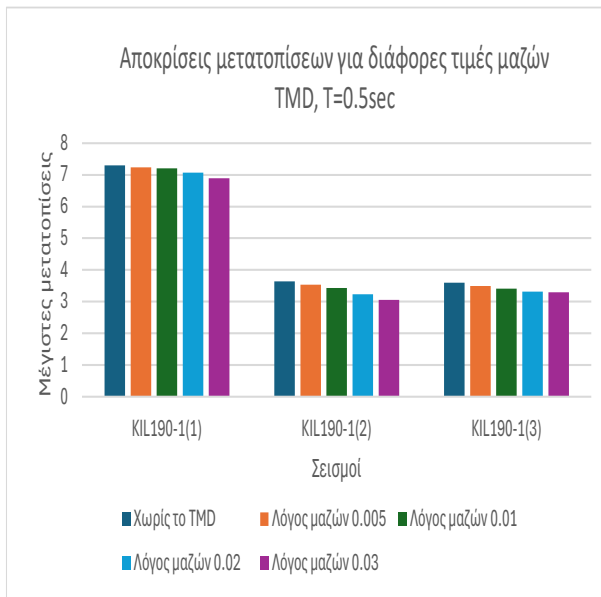
Διάγραμμα 87 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



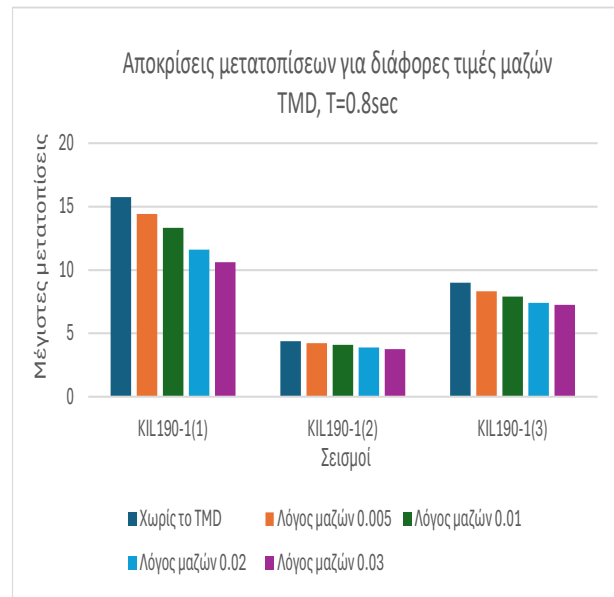
Διάγραμμα 88 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα κανονικοποιημένα διαγράμματα 85–88 για τους σεισμούς IER33 και IGM91 φαίνεται ότι η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε μείωση των λόγων μέγιστων μετατοπίσεων, με το όφελος να είναι πιο έντονο στην ιδιοπερίοδο $T=0.5s$. Στην περίπτωση αυτή η μείωση είναι συστηματική και αυξάνεται με τον λόγο μάζας, γεγονός που επιβεβαιώνει την αποδοτικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Στην ιδιοπερίοδο $T=0.8s$ η βελτίωση είναι μικρότερη, ενώ για $T=1.0s$ παρατηρείται μια πιο ήπια και σταθερή μείωση. Τέλος, για $T=0.3s$ η δράση του αποσβεστήρα είναι περιορισμένη, με μόνο οριακές βελτιώσεις στις αποκρίσεις. Συνεπώς, και για αυτούς τους σεισμούς, το $T=0.5s$ παραμένει η πιο αποδοτική επιλογή, ενώ οι υπόλοιπες ιδιοπερίοδοι εμφανίζουν θετική αλλά μειωμένη απόδοση.

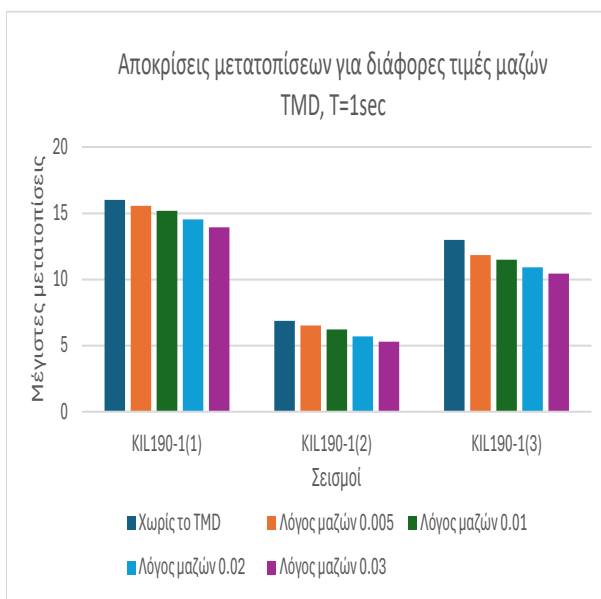
5.3.5. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)



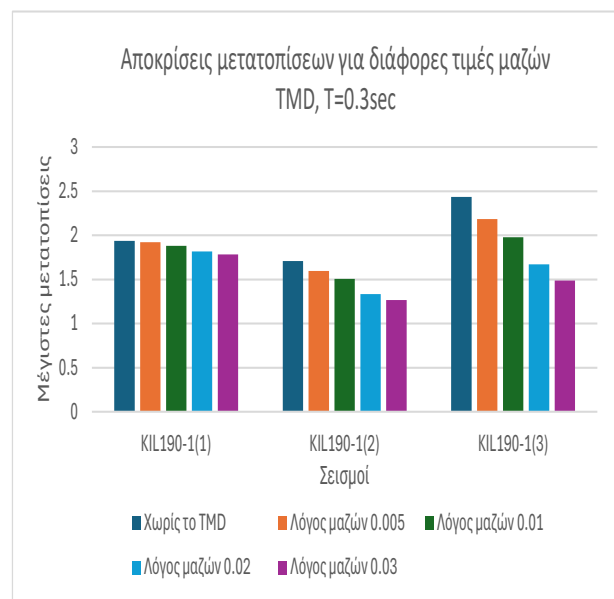
Διάγραμμα 89 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 90 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 91 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

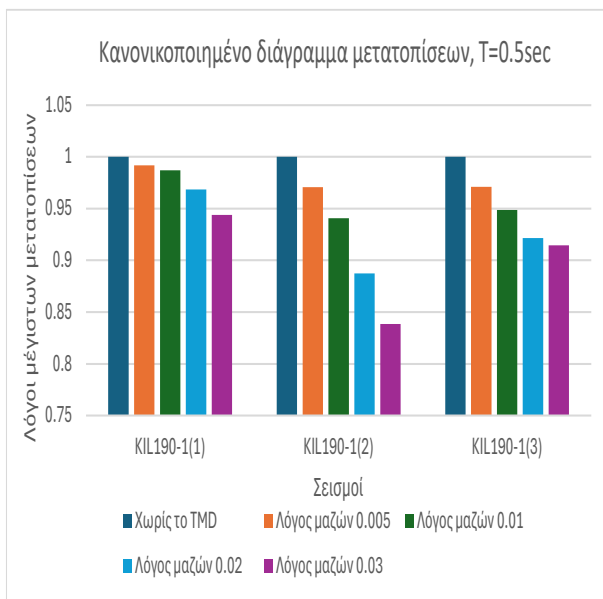


Διάγραμμα 92 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

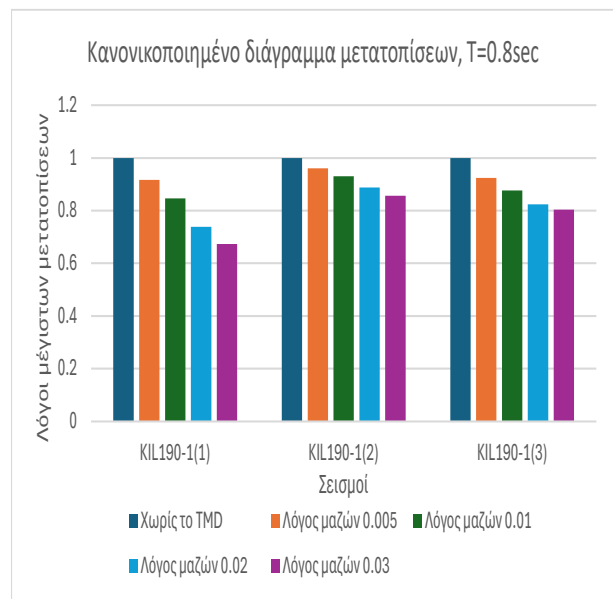
Στα διαγράμματα 89–92 που αντιστοιχούν στον σεισμό KIL190, παρατηρείται ότι η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνει αισθητά τις μέγιστες μετατοπίσεις σε όλες τις

ιδιοπεριόδους. Για $T=0.5s$ η μείωση είναι σταθερή και αρκετά εμφανής, γεγονός που καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα αυτής της περίπτωσης. Στην ιδιοπερίοδο $T=0.8s$ η βελτίωση είναι ακόμη πιο έντονη, καθώς οι αποκρίσεις χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι μεγαλύτερες και η δράση του αποσβεστήρα συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των μετακινήσεων. Για $T=1.0s$ παρατηρείται μείωση σε μικρότερο βαθμό, ενώ για $T=0.3s$ η απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι πιο περιορισμένη, με λιγότερο καθαρή διαφοροποίηση. Συνολικά, στον σεισμό KIL190 οι ιδιοπερίοδοι 0.5s και 0.8s αναδεικνύονται ως οι πιο αποδοτικές για τη λειτουργία του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με την $T=0.8s$ να παρουσιάζει την πιο ισχυρή επίδραση.

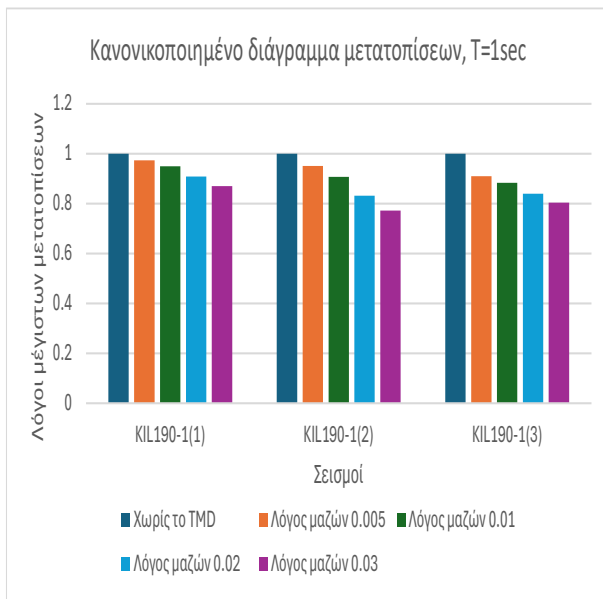
5.3.5.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1sec$)



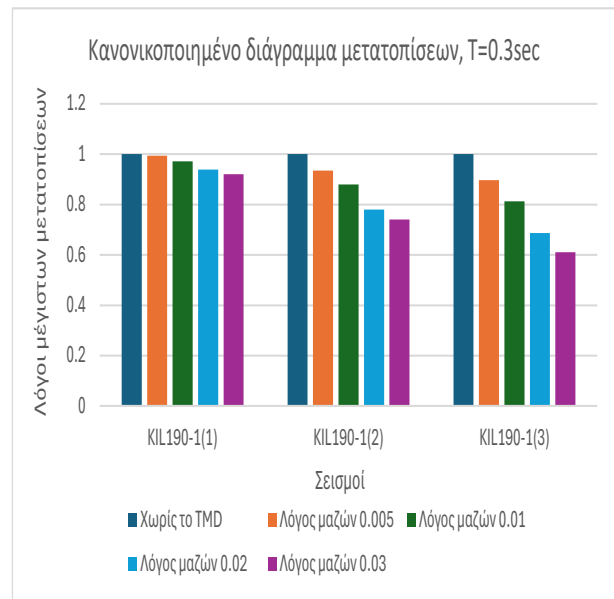
Διάγραμμα 93 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 94 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



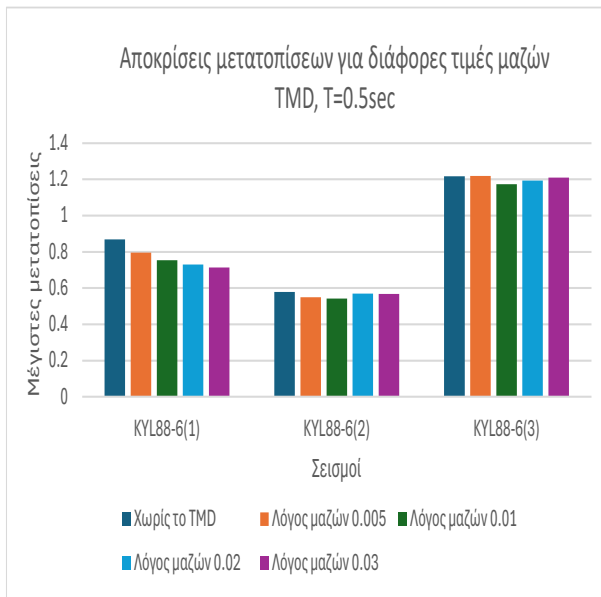
Διάγραμμα 95 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



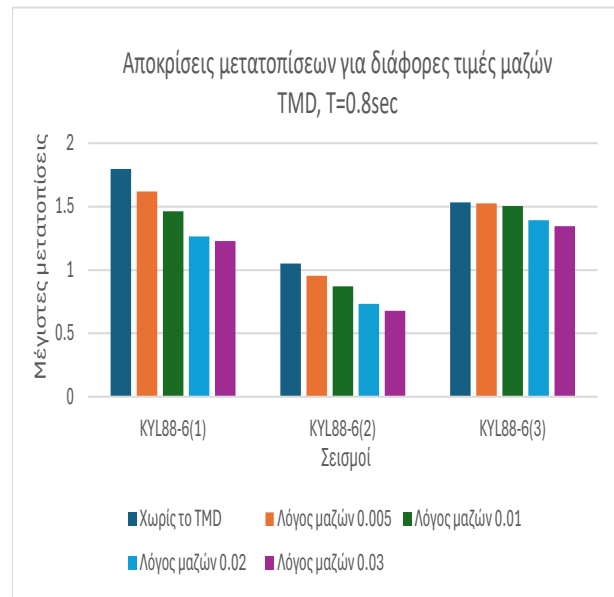
Διάγραμμα 96 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Συνοπτικά, τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εφαρμογή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε σημαντική μείωση των μετατοπίσεων, με την αποτελεσματικότητα να ενισχύεται όσο αυξάνει ο λόγος μαζών. Για ιδιοπεριόδους γύρω στο $T=0.5\text{ sec}$ και $T=1\text{ sec}$, η μείωση είναι πιο έντονη, φτάνοντας σε λόγους που πλησιάζουν το 0.7–0.8 για τις υψηλότερες τιμές μάζας, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σταθερή συμβολή του συστήματος στον έλεγχο των ταλαντώσεων. Στις μικρότερες ιδιοπεριόδους $T=0.3\text{ sec}$ τα αποτελέσματα είναι πιο ήπια, με λόγους κοντά στη μονάδα, κάτι που υποδηλώνει περιορισμένη απόδοση.

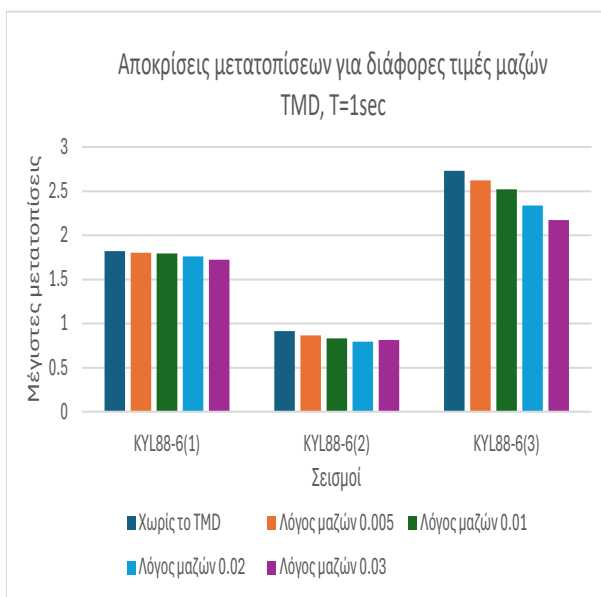
5.3.6. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)



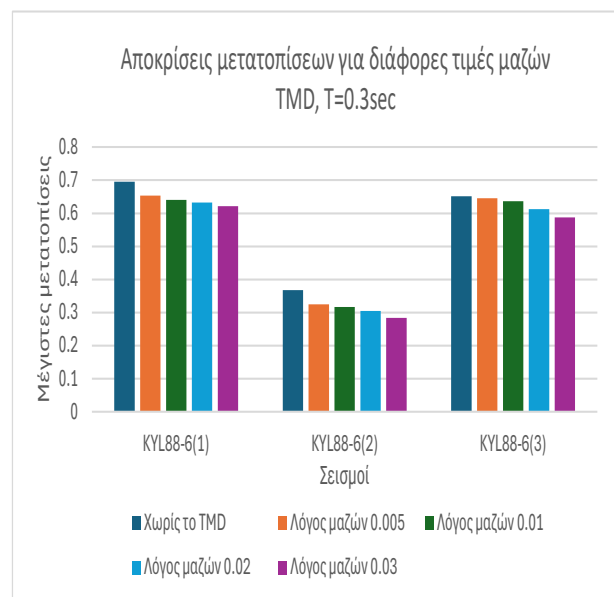
Διάγραμμα 97 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 98 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 99 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

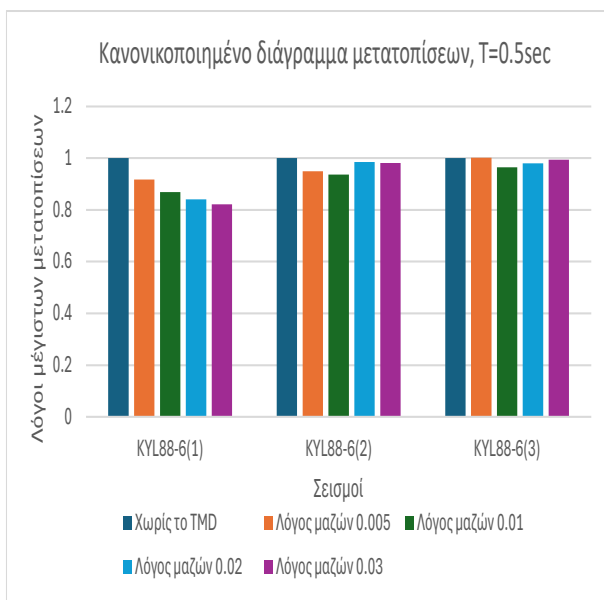


Διάγραμμα 100 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

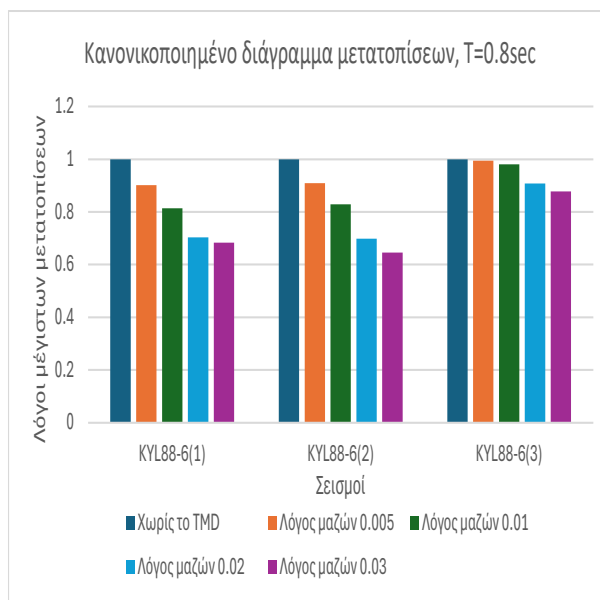
Για $T = 0.5\text{ sec}$ και $T = 0.8\text{ sec}$ οι μετατοπίσεις χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι αυξημένες, ενώ με την εφαρμογή του αποσβεστήρα παρατηρείται αισθητή μείωση, ιδίως για

μεγαλύτερους λόγους μαζών (0.02 και 0.03). Στην ιδιοπερίοδο $T = 1 \text{ sec}$ η μείωση είναι ακόμη πιο ξεκάθαρη, με τις καμπύλες να δείχνουν έως και 20–25% βελτίωση σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Στην πολύ μικρή ιδιοπερίοδο $T = 0.3 \text{ sec}$ η συμβολή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας παραμένει περιορισμένη, με τις αποκλίσεις να είναι μικρές.

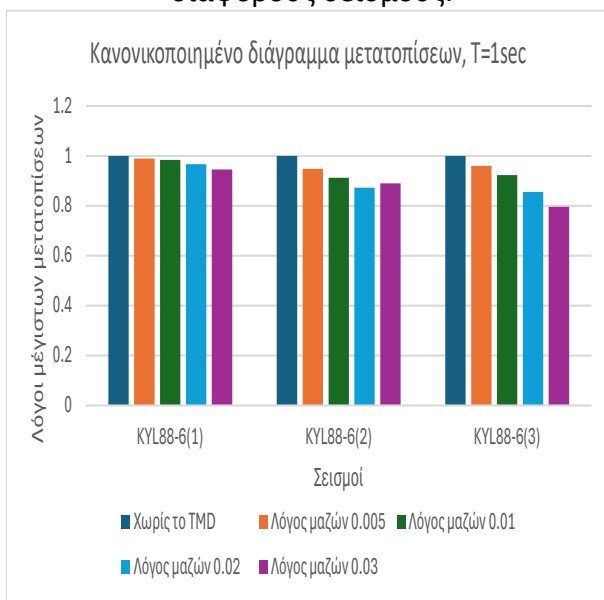
5.3.6.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1 \text{ sec}$)



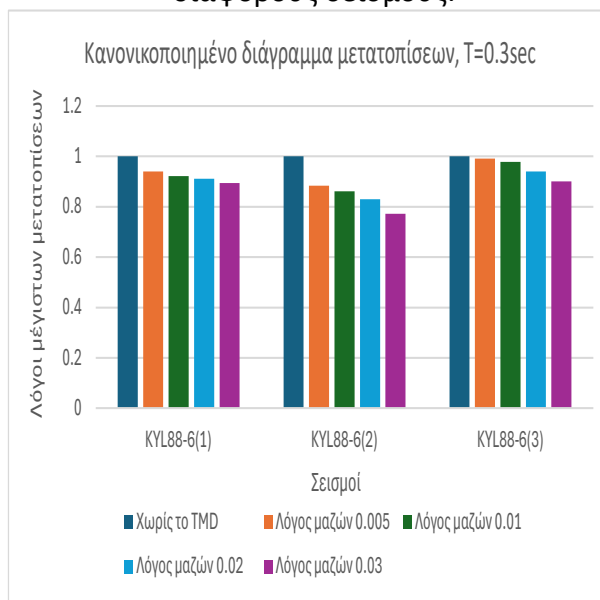
Διάγραμμα 101 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 102 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 103 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



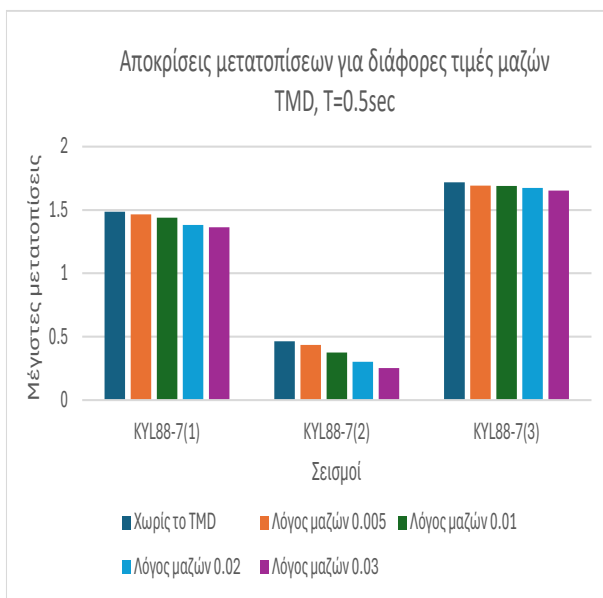
Διάγραμμα 104 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα Διαγράμματα 101–104 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα των αποκρίσεων για την περίπτωση σεισμού KYL88, σε τέσσερις ιδιοπεριόδους $T=0.5 \text{ s}$, $T=0.8 \text{ s}$, $T=1 \text{ s}$ και $T=0.3 \text{ s}$. Η

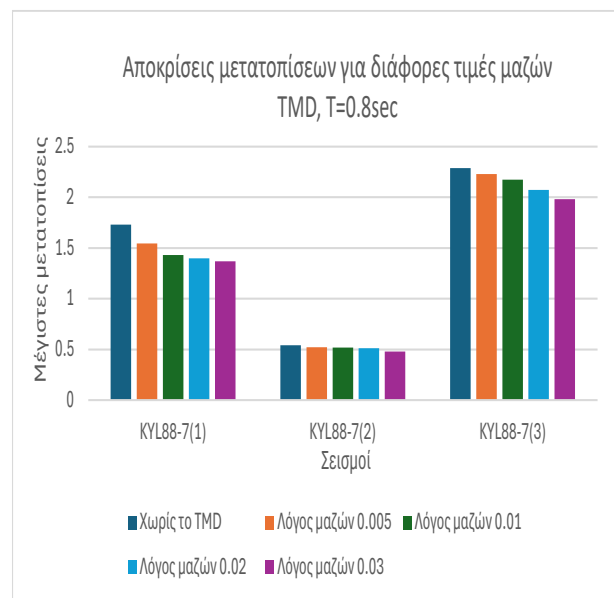
σύγκριση δείχνει ότι η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε αισθητή μείωση των λόγων μετατοπίσεων, με τη βελτίωση να γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών. Για τις περιπτώσεις με $T=0.5s$ και $T=1s$, η απόδοση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι σταθερή και προοδευτική, ενώ για $T=0.8s$ και $T=0.3s$ παρατηρούνται ακόμη πιο σαφείς διαφορές, με το λόγο μάζας 0.03 να προσφέρει τη μεγαλύτερη μείωση των αποκρίσεων.

Συνολικά, τα κανονικοποιημένα διαγράμματα αναδεικνύουν ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας βελτιώνει την αποδοτικότητα της απόκρισης σε όλες τις περιπτώσεις, με μεγαλύτερη συνέπεια σε χαμηλές και ενδιάμεσες ιδιοπεριόδους. Η τάση υποδεικνύει ότι οι υψηλότεροι λόγοι μαζών (0.02–0.03) είναι πιο αποτελεσματικοί, ενώ οι χαμηλότεροι (0.005–0.01) παρουσιάζουν περιορισμένη συνεισφορά.

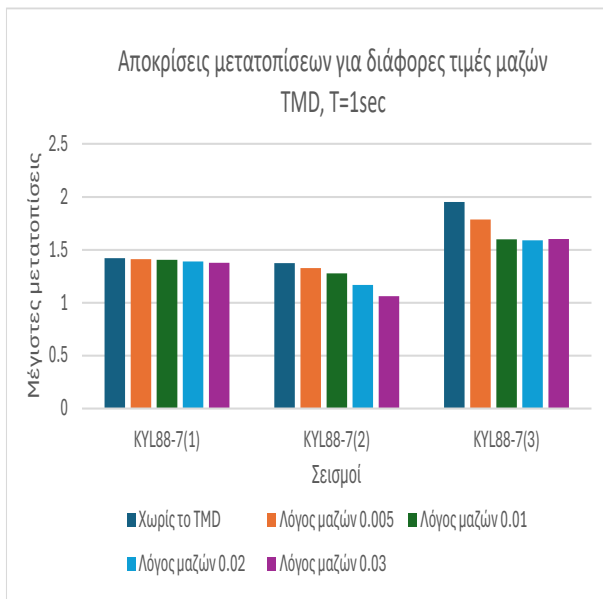
5.3.7. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1sec$)



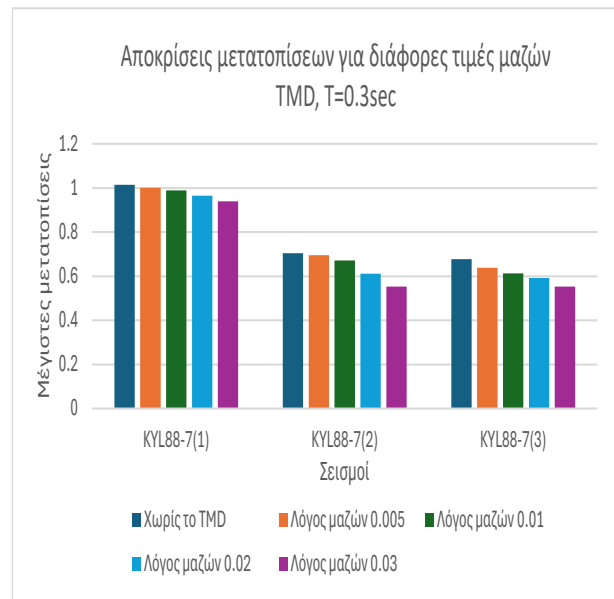
Διάγραμμα 105 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 106 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



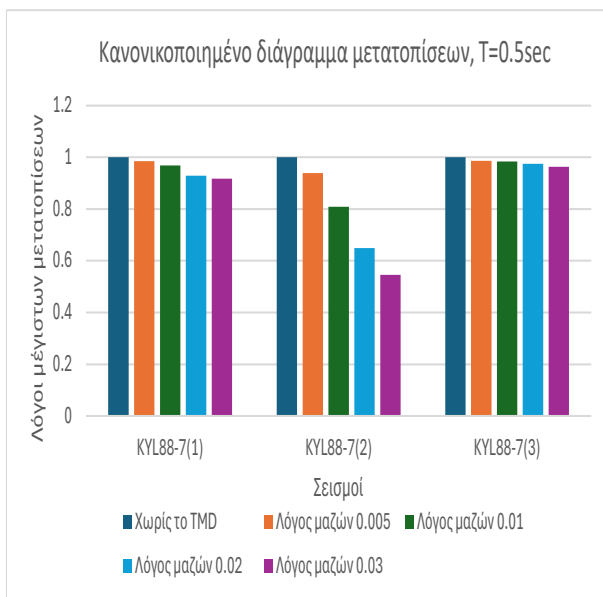
Διάγραμμα 107 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



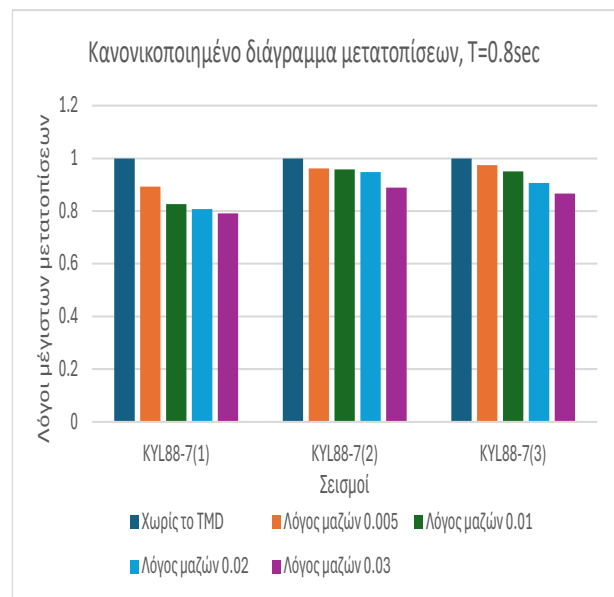
Διάγραμμα 108 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

Παρατηρείται ότι η εφαρμογή αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας μειώνει σταθερά τις μετατοπίσεις, με το αποτέλεσμα να είναι πιο έντονο όσο αυξάνεται ο λόγος μαζών. Για $T=0.5s$ και $T=1s$ οι μειώσεις είναι μεσαίου μεγέθους και πιο ομαλές, ενώ για $T=0.8s$ και $T=0.3s$ οι διαφορές είναι πιο καθαρές, ειδικά για λόγο μάζας 0.02–0.03.

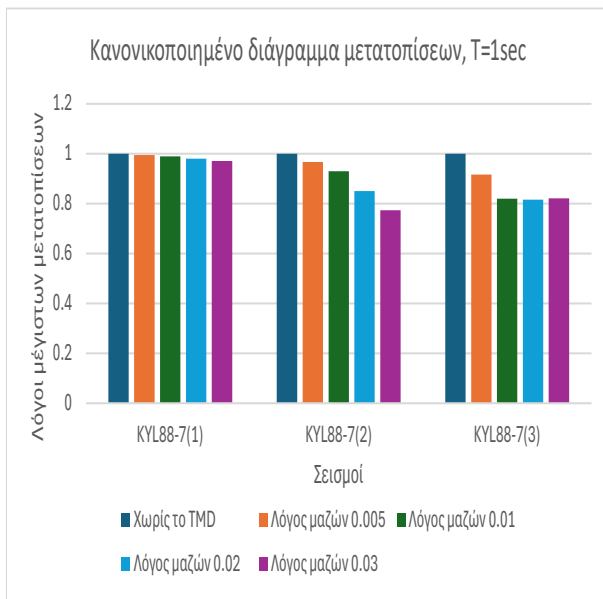
5.3.7.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1sec$)



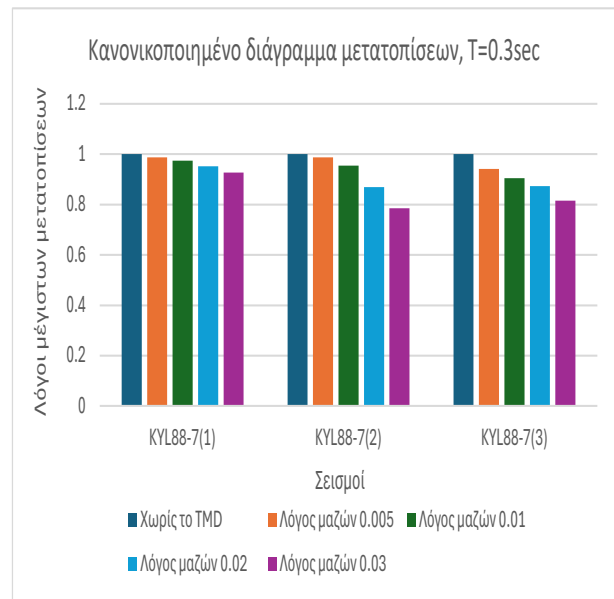
Διάγραμμα 107 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 108 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



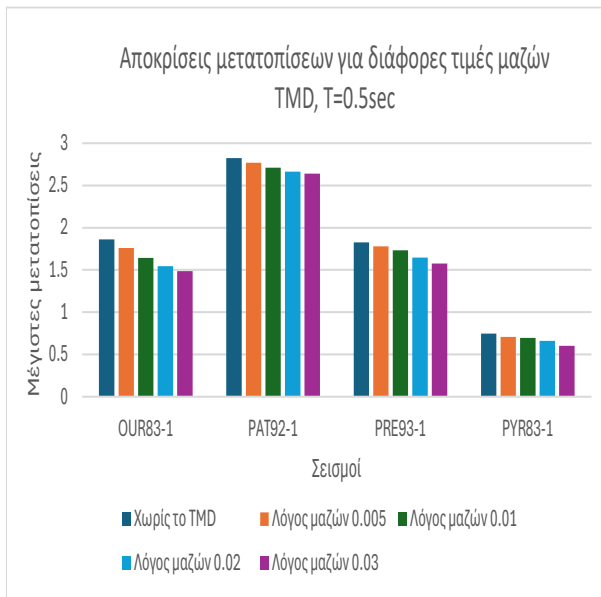
Διάγραμμα 111 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



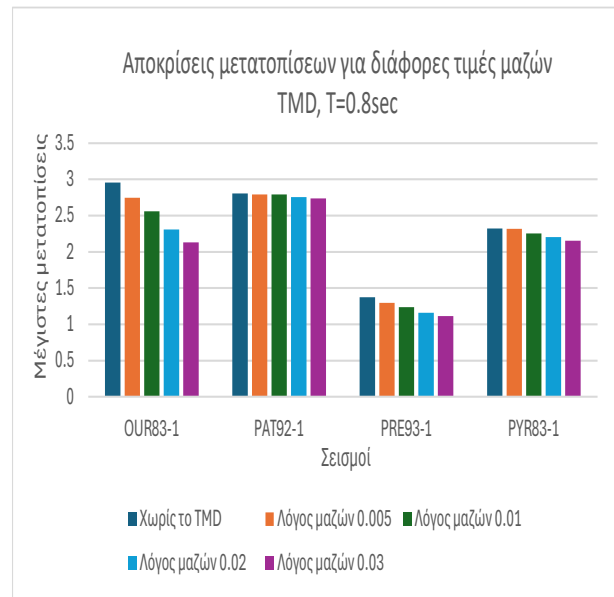
Διάγραμμα 112 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Σε όλες τις περιπτώσεις, η εφαρμογή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε μείωση των λόγων μέγιστων μετατοπίσεων, με την απόδοση να είναι εντονότερη για μεγαλύτερους λόγους μαζών (0.02 και 0.03), όπου οι καμπύλες αποκλίνουν περισσότερο από την περίπτωση χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Στις χαμηλότερες ιδιοπεριόδους $T=0.3-0.5\text{ sec}$, η μείωση είναι πιο συγκρατημένη αλλά παρατηρήσιμη, ενώ στις μεγαλύτερες $T=0.8-1\text{ sec}$ η συνεισφορά του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας γίνεται πιο σαφής, προσφέροντας αισθητή απόσβεση. Συνολικά, επιβεβαιώνεται ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας λειτουργεί αποτελεσματικά σε όλο το εύρος των ιδιοπεριόδων, με βέλτιστη απόδοση για μεγαλύτερους λόγους μάζας.

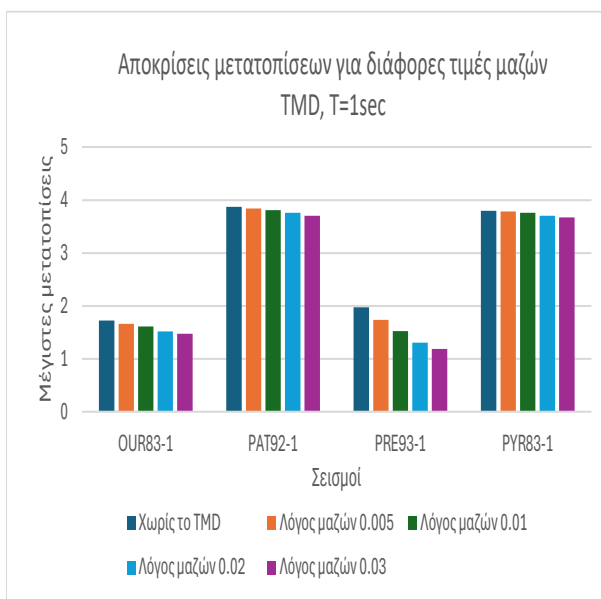
5.3.8. Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1\text{sec}$)



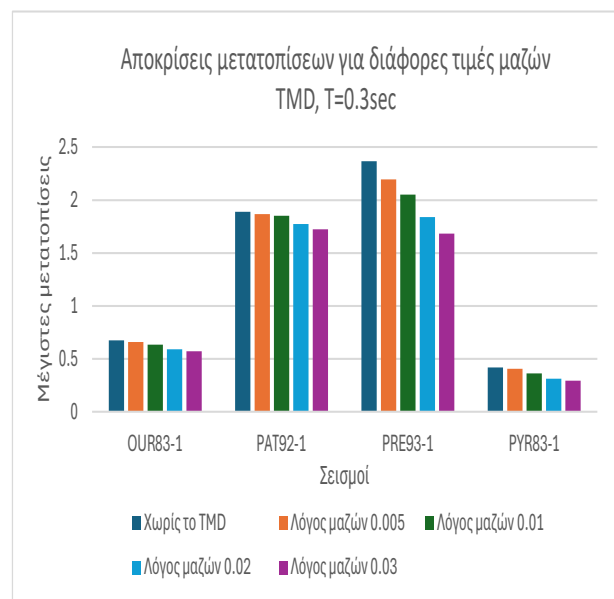
Διάγραμμα 113 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 114 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 115 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

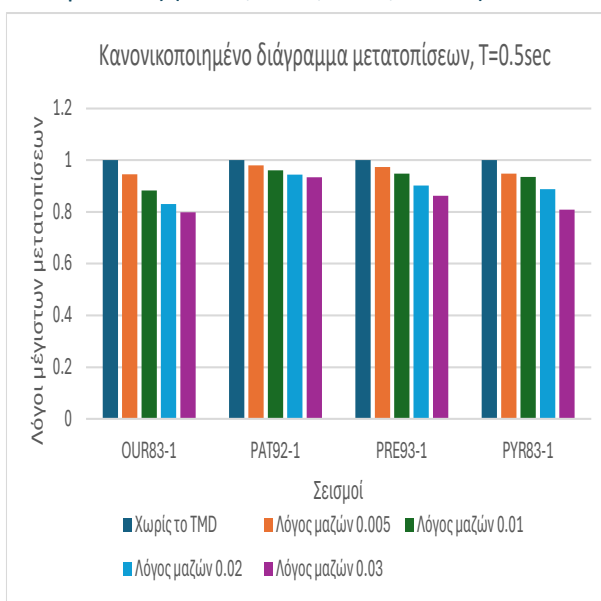


Διάγραμμα 116 : Μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για διάφορους λόγους μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για διάφορους σεισμούς.

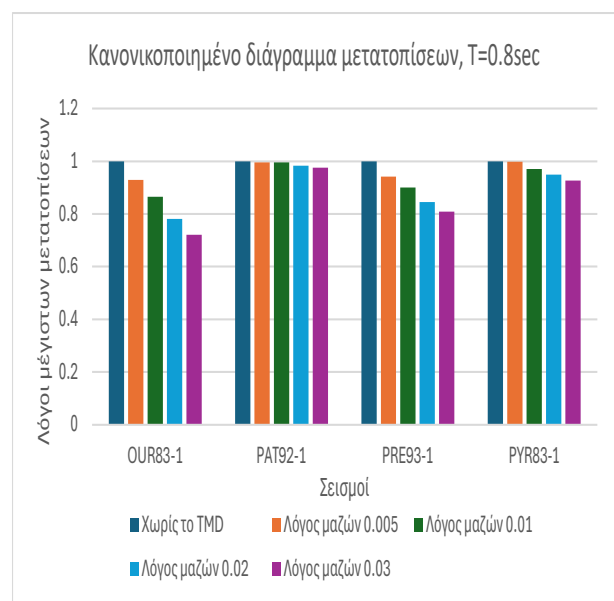
Στα διαγράμματα 113–116 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για διάφορους λόγους μαζών αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και για τέσσερις ιδιοπεριόδους $T=0.5\text{ sec}$, $T=0.8\text{ sec}$, $T=1\text{ sec}$

και $T=0.3$ sec). Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας συμβάλλει σε μείωση των μετατοπίσεων, με το ποσοστό βελτίωσης να εξαρτάται τόσο από την ιδιοπερίοδο όσο και από τον λόγο μαζών. Στην ιδιοπερίοδο $T=0.3$ sec η απόσβεση είναι πιο έντονη, ειδικά για μεγαλύτερους λόγους μάζας, γεγονός που δείχνει την αυξημένη αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας κοντά στις χαμηλότερες περιόδους. Στις υψηλότερες ιδιοπεριόδους $T=0.8$ sec και $T=1$ sec η μείωση είναι μεν μικρότερη αλλά παραμένει σαφής και σταθερή, με πιο εμφανή συνεισφορά για λόγους μαζών 0.02 και 0.03. Η γενική τάση είναι ότι η χρήση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας βελτιώνει την απόκριση της κατασκευής ανεξάρτητα από τον σεισμό και την ιδιοπερίοδο, με τη βελτίωση να γίνεται πιο αποτελεσματική όσο αυξάνεται ο λόγος μάζας.

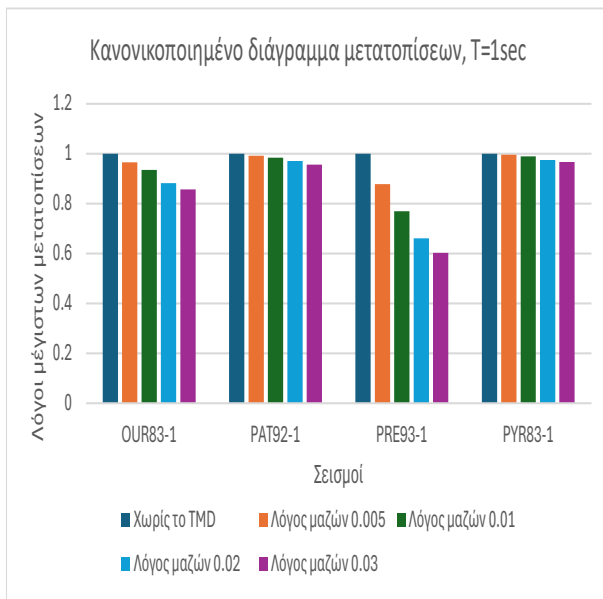
5.3.8.1 Κανονικοποιημένες μέγιστες αποκρίσεις μετατοπίσεων για περίπτωση πραγματικού σεισμού και ιδιοπεριόδους ($T=0.3, T=0.5, T=0.8, T=1$ sec)



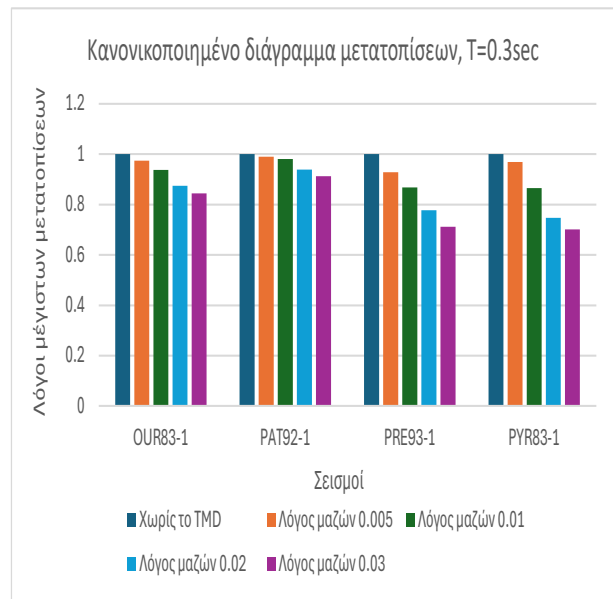
Διάγραμμα 117 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 118 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 119 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.



Διάγραμμα 120 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέγιστων μετατοπίσεων, για διάφορους σεισμούς.

Στα κανονικοποιημένα διαγράμματα μετατοπίσεων (117–120), τα οποία αφορούν τέσσερις διαφορετικές ιδιοπεριόδους $T=0.5$ sec, $T=0.8$ sec, $T=1$ sec και $T=0.3$ sec, παρατηρείται ξεκάθαρα ότι η χρήση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας οδηγεί σε μείωση των αποκρίσεων σε όλες τις περιπτώσεις, με την αποδοτικότητα να διαφοροποιείται ανάλογα με τον λόγο μαζών. Στην ιδιοπερίοδο $T=0.5$ sec (διάγραμμα 117), η μείωση είναι παρούσα αλλά σχετικά περιορισμένη, ενώ οι υψηλότεροι λόγοι μαζών (0.02–0.03) προσφέρουν σταθερά καλύτερη απόδοση. Στην ιδιοπερίοδο 0.8 sec (διάγραμμα 118), η θετική επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας γίνεται πιο έντονη, με τις καμπύλες να κατεβαίνουν πιο χαμηλά σε σχέση με την αναφορά χωρίς αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Στην ιδιοπερίοδο $T=1$ sec (διάγραμμα 119), παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση των μετατοπίσεων, κάτι που υποδηλώνει ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας είναι πιο αποτελεσματικός όταν συντονίζεται σε μεγαλύτερη περίοδο. Τέλος, στην ιδιοπερίοδο $T=0.3$ sec (διάγραμμα 120), η μείωση είναι αισθητή αλλά σαφώς μικρότερη σε σχέση με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις.

Συνολικά, τα διαγράμματα 117–120 δείχνουν πως ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας είναι αποδοτικός σε όλες τις ιδιοπεριόδους, με την απόδοση να αυξάνεται όσο μεγαλώνει ο λόγος μαζών και να κορυφώνεται στην περιοχή $T=1$ sec, ενώ και η ιδιοπερίοδος $T=0.8$ sec παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά.

5.4 Συνολική Αξιολόγηση

Η μελέτη των διαγραμμάτων δείχνει ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας επιδρά θετικά σε όλες τις περιπτώσεις, μειώνοντας τις μέγιστες μετατοπίσεις σε διαφορετικούς σεισμούς και για διάφορες ιδιοπεριόδους. Η αποδοτικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας συνδέεται άμεσα με τον λόγο μαζών, με τις μεγαλύτερες τιμές (0.02–0.03) να οδηγούν σε πιο αισθητές μειώσεις συγκριτικά με τους μικρότερους λόγους (0.005–0.01). Στους σεισμούς AGR και ALM, παρατηρήθηκε ότι η απόσβεση ήταν πιο έντονη στις ιδιοπεριόδους γύρω από $T=0.8$ sec και $T=1$

sec, όπου οι μειώσεις ήταν σημαντικές και σταθερές για όλα τα σενάρια. Στον σεισμό AMF, οι μετατοπίσεις ήταν ήδη χαμηλότερες, ωστόσο ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας εξακολουθούσε να συμβάλλει σε μείωση, κυρίως για λόγους μάζας άνω του 0.01, με την καλύτερη συμπεριφορά να εμφανίζεται στην ιδιοπερίοδο του $T=1$ sec. Στους σεισμούς IER και KGM, η εικόνα είναι παρόμοια, με τις μεγαλύτερες ωφέλειες να καταγράφονται σε μεγαλύτερες περιόδους $T=0.8-1$ sec. Ειδικά στον σεισμό KIL, η επίδραση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας ήταν εμφανής σε όλες τις ιδιοπεριόδους, με τη μείωση να γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται ο λόγος μάζας, αναδεικνύοντας για ακόμη μια φορά τη σημασία της μάζας του αποσβεστήρα. Τέλος, στους σεισμούς KYLB και OURB-PAT-PRE-PYR, ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας λειτούργησε σταθερά αποδοτικά, με την περιοχή γύρω από το 1 sec να ξεχωρίζει ως η βέλτιστη, ενώ σε μικρότερες περιόδους $T=0.3-0.5$ sec οι μειώσεις υπήρχαν αλλά ήταν περιορισμένες.

Συνοψίζοντας, σε όλους τους σεισμούς που εξετάστηκαν, ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας συνεισφέρει ουσιαστικά στη μείωση των μετατοπίσεων, με πιο αποτελεσματικές τις ιδιοπεριόδους $T=0.8$ sec και 1 sec, ενώ η απόδοσή του κλιμακώνεται ανάλογα με τον λόγο μάζας, ο οποίος όσο μεγαλύτερος είναι τόσο καλύτερη απόσβεση προσφέρει. Έτσι, η ιδιοπερίοδος $T=1$ sec και οι υψηλοί λόγοι μαζών (0.02–0.03) μπορούν να θεωρηθούν ως οι προτιμητέες επιλογές για μέγιστη αποτελεσματικότητα.

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη της αποτελεσματικότητας του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας (Tuned Mass Damper – TMD) στη βελτίωση της σεισμικής απόκρισης κτιριακών κατασκευών. Μέσα από ένα συνδυασμό θεωρητικής ανάλυσης, αριθμητικών προσομοιώσεων και εφαρμογών σε πραγματικές σεισμικές καταγραφές, αναδείχθηκαν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του συστήματος, καθώς και οι βέλτιστες παράμετροι σχεδιασμού του.

Αρχικά, μέσω της θεωρητικής διερεύνησης παρουσιάστηκε η βασική δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών και η κρίσιμη σημασία της ιδιοπεριόδου στη σεισμική απόκριση. Διαπιστώθηκε ότι ο συντονισμός μεταξύ ιδιοπεριόδου κατασκευής και περιόδου διεγέρσεως αποτελεί τον πλέον καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη μεγάλων μετακινήσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, ο TMD λειτουργεί ως παθητικό μέσο απόσβεσης που επιτρέπει τη διάχυση μέρους της εισαγόμενης ενέργειας, μειώνοντας σημαντικά τις μέγιστες μετατοπίσεις.

Οι αριθμητικές αναλύσεις με το λογισμικό ETABS21 έδειξαν ότι η αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας εξαρτάται ισχυρά τόσο από την ιδιοπερίοδο του φορέα όσο και από τον λόγο μάζας του συστήματος. Συγκεκριμένα, στις μικρές ιδιοπεριόδους $T=0.3$ sec και $T=0.5$ sec, η μείωση των μετατοπίσεων ήταν μεν θετική αλλά περιορισμένη, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας έχει μικρότερη συνεισφορά σε πιο άκαμπτες κατασκευές.

Στις μεγαλύτερες ιδιοπεριόδους $T=0.8$ sec και κυρίως $T=1$ sec η απόδοση ήταν ιδιαίτερα σημαντική, με μείωση μετατοπίσεων που σε αρκετές περιπτώσεις ξεπέρασε το 30%. Η συγκεκριμένη παρατήρηση δείχνει ότι οι πιο εύκαμπτες κατασκευές επωφελούνται περισσότερο από την εφαρμογή του συστήματος.

Ο λόγος μαζών του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας αποδείχθηκε καθοριστικός: για μικρές τιμές (0.01) η βελτίωση ήταν περιορισμένη, ενώ για μεγαλύτερες (0.02–0.03) η απόδοση αυξήθηκε αισθητά, με τις μεγαλύτερες μειώσεις να επιτυγχάνονται στο άνω άκρο του φάσματος.

Η εφαρμογή του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας σε προσομοιώσεις πραγματικών σεισμών επιβεβαίωσε τα παραπάνω ευρήματα. Παρά τις διαφοροποιήσεις φαίνεται πως ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας προσφέρει αξιόπιστη μείωση μετατοπίσεων, με την αποτελεσματικότητα να αυξάνεται όσο μεγαλώνει η ιδιοπερίοδος και ο λόγος μαζών.

Συνολικά, η εργασία ανέδειξε ότι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας αποτελεί ένα αποδοτικό, παθητικό σύστημα ελέγχου ταλαντώσεων, το οποίο μπορεί να ενσωματωθεί σε κατασκευές με σχετικά απλό τρόπο και χωρίς την απαίτηση ενεργής παρέμβασης. Η προτιμητέα ιδιοπερίοδος για μέγιστη αποτελεσματικότητα εντοπίζεται στο $T=1$ sec, σε συνδυασμό με λόγο μαζών μεγαλύτερο ή ίσο του 0.02. Η χρήση μικρότερων ιδιοπεριόδων και χαμηλότερων λόγων μαζών προσφέρει οφέλη, αλλά σε σαφώς περιορισμένο βαθμό.

Εν κατακλείδι, ο αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας αποδεικνύεται ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο της σύγχρονης αντισεισμικής μηχανικής, που μπορεί να ενισχύσει ουσιαστικά την ασφάλεια, την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα των κατασκευών έναντι σεισμικών διεγέρσεων.

Βιβλιογραφία

Chopra, A. K. (2016), *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 5th Edition, Prentice Hall.

Chopra, A. K. (2017), *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 4th Edition, Prentice Hall.

Chopra, A. K. (2020), *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 6th Edition, Pearson.

Farooqui, M. U., Haider, R., & Khan, M. S. (2024), Performance evaluation of tuned mass dampers in tall buildings under seismic loading, *Journal of Building Engineering*, 76, 107385.

Heinemeyer, C., Butz, C., Keil, A., & Rüdinger, F. (2009), Passive vibration control of civil structures by tuned mass dampers: design and experimental verification, *Engineering Structures*, 31(12), pp. 2930–2937.

Kareem, A., & Kline, S. (1995), Performance of multiple tuned mass dampers under random loading, *Journal of Structural Engineering*, 121(2), pp. 348–361.

Naderpour, H., Fakharian, P., & Mirrashid, M. (2024), Recent developments on tuned mass dampers for vibration control of tall buildings: A state-of-the-art review, *Structures*, 54, pp. 2529–2553.

Nagarajaiah, S., & Varadarajan, N. (2000), Short time Fourier transform algorithm for wind response control of buildings with variable stiffness tuned mass dampers, *Engineering Structures*, 22(9), pp. 1177–1191.

Pinkaew, T., Fujino, Y., & Nagashima, I. (2003), Effectiveness of a variable tuned mass damper for suppression of harmonic response of structures, *Engineering Structures*, 25(1), pp. 39–46.

Smith, B. S., & Coull, A. (1991), *Tall Building Structures: Analysis and Design*, John Wiley & Sons.

Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1997), *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons.

Warburton, G. B. (1982), Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(3), pp. 381–401.

Koutsoloukas, L., Nikitas, N., & Aristidou, P. (2022). Passive, semi-active, active and hybrid mass dampers: A literature review with associated applications on building-like structures, *Engineering Structures*, 257.

Maślanka, M. (2023). Calibration of viscous damping–stiffness control force in active and semi-active tuned mass dampers for reduction of harmonic vibrations, *Applied Sciences*, 13(21).

Owji, H. R., Shafieezadeh, A., & Ghaffarzadeh, H. (2011). A comparison between a new semi-active tuned mass damper and an active tuned mass damper, *Procedia Engineering*, 14,

