



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
*Πολυτεχνική Σχολή*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΕΝΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ  
ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕΣΩ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ  
ΜΕΘΟΔΩΝ

INVESTIGATION OF THE USE OF TUNED MASS DAMPER IN HIGH  
STRUCTURES THROUGH NUMERICAL METHODS

ΚΟΥΡΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

AEM 1654

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΡΑΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Κοζάνη, Ιούλιος 2024

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται διερεύνηση της χρήσης συντονισμένων αποσβεστήρων μάζας σε υψηλές κατασκευές. Συγκεκριμένα ο αναγνώστης εισάγεται σε βασικά φαινόμενα που διέπουν ένα σύστημα που διενεργεί ταλάντωση. Αναφέρονται οι τρόποι αντιμετώπισης των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων συμπεριλαμβανομένου του συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας. Ακολουθεί εκτενής παράθεση της θεωρίας των ταλαντώσεων και της δυναμικής που περιγράφουν το πρόβλημα. Εν συνεχεία παρουσιάζεται μεθοδολογία κατάστρωσης μοντέλων ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος ερμηνεύονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων καθώς δίνεται και πρόταση για περαιτέρω έρευνα.

## Abstract

In this thesis the use of tuned mass dampers in high structures is investigated. In particular, the reader is introduced to basic phenomena governing a system that carries out oscillation. Ways of dealing with unwanted oscillations including the tuned mass damper are discussed. This is followed by an extensive discussion of the theory of oscillations and the dynamics describing the problem. Subsequently, a methodology for finite element analysis modeling is presented. Finally, the results of the analyses are interpreted and a proposal for further research is given.

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αραϊλόπουλο Αλέξανδρο αλλά και τον κ. Γιαγκόπουλο Δημήτριο, για την συνεχή υποστήριξη καθ'όλη την εκπόνηση της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, και τους συμφοιτητές μου διότι χωρίς αυτούς το όνειρο δεν θα γινόταν ποτέ πραγματικότητα.

## Περιεχόμενα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	1
Abstract.....	3
Ευχαριστίες.....	4
1. Εισαγωγή.....	6
1.1 Βασικά χαρακτηριστικά ενός ταλαντούμενου συστήματος.....	6
1.1.1 Φυσικές συχνότητες ή Ιδιοσυχνότητες.....	6
1.1.2 Συντονισμός.....	7
1.2 Σημασία του ελέγχου των δονήσεων σε υψηλές κατασκευές.....	8
1.2.1 Πηγές δονήσεων σε κτίρια υψηλών ορόφων.....	10
1.3 Στρατηγικές αντιμετώπισης κατά την ιστορία.....	11
1.4 Περιορισμοί των παραδοσιακών μεθόδων ελέγχου δονήσεων.....	14
1.5 Εισαγωγή στους συντονισμένους αποσβεστήρες μάζας (TMD).....	16
1.5.1 Πλεονεκτήματα των συντονισμένων αποσβεστήρων μάζας.....	18
1.5.2 Εφαρμογές.....	19
2. Ταλαντώσεις και δυναμική.....	21
2.1 Λόγος απόσβεσης.....	21
2.2 Ιδιοτιμές και Ιδιομορφές.....	22
2.2.1 Ιδιοπρόβλημα.....	22
2.3 Συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας.....	23
2.4 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	30
3. Μεθοδολογία.....	32
3.1 1 <sup>η</sup> Περίπτωση: Πειραματική διάταξη.....	32
3.2. 2 <sup>η</sup> Περίπτωση: Πολυώροφο Κτίριο Υπό Διέγερση Ανέμου.....	36
3.3 3 <sup>η</sup> Περίπτωση: Πολυώροφο κτίριο υπο διεγερση σεισμού.....	40
4. Αποτελέσματα.....	41
4.1 1 <sup>η</sup> Περίπτωση.....	42
4.2 2 <sup>η</sup> Περίπτωση.....	44
4.3 3 <sup>η</sup> Περίπτωση.....	47
4.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	49
5. Βιβλιογραφία & Πηγές.....	50

# 1. Εισαγωγή

Στη σφαίρα της σύγχρονης μηχανικής, ο σχεδιασμός και η κατασκευή πολυώροφων κτιρίων παρουσιάζουν μοναδικές προκλήσεις που απαιτούν σχολαστική εστίαση στον έλεγχο των δονήσεων. Οι υψηλές κατασκευές είναι εγγενώς ευάλωτες σε δυναμικές δυνάμεις όπως ο άνεμος, η σεισμική δραστηριότητα και τα φορτία που προκαλούνται από τον άνθρωπο, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν δονήσεις που, αν δεν ληφθούν υπ' όψη, μπορεί να οδηγήσουν σε κόπωση του υλικού, δομική βλάβη, ακόμη και καταστροφική αστοχία. Επιπλέον, οι αισθητές δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν σημαντική δυσφορία στους ενοίκους, επηρεάζοντας την ευημερία και την παραγωγικότητά τους, ενώ η υπερβολική ταλάντωση μπορεί να δημιουργήσει κινδύνους για την ασφάλεια κατά τη διάρκεια εκκενώσεων έκτακτης ανάγκης. Ως εκ τούτου, η ολοκληρωμένη κατανόηση και η εφαρμογή αποτελεσματικών μέτρων ελέγχου των δονήσεων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ανθεκτικότητας, της λειτουργικότητας και της βιωσιμότητας των πολυώροφων κτιρίων, καθιστώντας την έναν κρίσιμο τομέα εστίασης για τους μηχανικούς στην επίδιωξη μιας ανθεκτικής και βιώσιμης αστικής ανάπτυξης.

## 1.1 Βασικά χαρακτηριστικά ενός ταλαντούμενου συστήματος.

Ο μηχανικός που θα μελετήσει την οποιαδήποτε κατασκευή θα πρέπει να γνωρίζει τα φαινόμενα που διαίπουν οποιοδήποτε ταλαντούμενο σύστημα. Έτσι ακολουθεί σύντομη γνωριμία με αυτά μιας και θα αναφέρονται καθόλη την έκταση της παρούσας εργασίας.

### 1.1.1 Φυσικές συχνότητες ή Ιδιοσυχνότητες.

Οι φυσικές συχνότητες, επίσης γνωστές ως ιδιοσυχνότητες, είναι εγγενείς ιδιότητες μιας δομής που υπαγορεύουν τις συγκεκριμένες συχνότητες στις οποίες τείνει φυσικά να ταλαντώνεται όταν διαταράσσεται. Αυτές οι συχνότητες καθορίζονται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της δομής, συμπεριλαμβανομένης της κατανομής της μάζας, της δυσκαμψίας και της συνολικής γεωμετρίας της. Η κατανόηση των φυσικών συχνοτήτων είναι ζωτικής σημασίας για τους μηχανικούς, καθώς τους βοηθά να προβλέψουν πώς ένα κτίριο θα ανταποκριθεί σε διάφορα δυναμικά φορτία, όπως ο άνεμος, η σεισμική δραστηριότητα και η ανθρώπινη κίνηση.

Για να προσδιορίσουν τις φυσικές συχνότητες μιας κατασκευής, οι μηχανικοί χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό αναλυτικών μεθόδων, προσομοιώσεων στον υπολογιστή και πειραματικών τεχνικών. Οι αναλυτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν την επίλυση των εξισώσεων κίνησης που προέρχονται από τις αρχές της μηχανικής, ενώ οι προσομοιώσεις σε υπολογιστή,

όπως η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA), επιτρέπουν τη λεπτομερή μοντελοποίηση πολύπλοκων κατασκευών. Επιπλέον, πειραματικές τεχνικές, όπως οι δοκιμές διαμορφώσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση των πραγματικών δονητικών χαρακτηριστικών μιας δομημένης κατασκευής. Προσδιορίζοντας και αναλύοντας αυτές τις φυσικές συχνότητες, οι μηχανικοί μπορούν να σχεδιάσουν κτίρια που είναι πιο ανθεκτικά, ασφαλή και άνετα για τους ενοίκους, μετριάζοντας αποτελεσματικά τις δυσμενείς επιπτώσεις των ανεπιθύμητων δονήσεων.

### 1.1.2 Συντονισμός

Ο συντονισμός εμφανίζεται όταν μια δομή ή ένα σύστημα υποβάλλεται σε εξωτερικές δονήσεις σε συχνότητα που αντιστοιχεί στη φυσική του συχνότητα. Αυτή η ταύτιση των συχνοτήτων οδηγεί σε σημαντική αύξηση του πλάτους των ταλαντώσεων, καθώς το σύστημα απορροφά περισσότερη ενέργεια από την εξωτερική δύναμη. Όταν εμφανίζεται συντονισμός, ακόμη και μικρές περιοδικές δυνάμεις μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες ταλαντώσεις. Στην περίπτωση της γέφυρας, οι δονήσεις που προκλήθηκαν από τον άνεμο ταίριαζαν με τη φυσική συχνότητα της γέφυρας, οδηγώντας σε δραματικές ταλαντώσεις που τελικά προκάλεσαν την κατάρρευσή της το 1940 <sup>[1]</sup>. Κατά την λειτουργία δομών μπορεί να προκληθεί συντονισμός ακόμη και από ανθρώπινη δραστηριότητα. Η γέφυρα Millennium στο Λονδίνο παρουσίασε υπερβολικές πλευρικές δονήσεις λόγω συντονισμού που προκλήθηκε από τους πεζούς λίγο μετά το άνοιγμά της <sup>[2]</sup>.



*Εικόνες 1 & 2: Η κατάρρευση της γέφυρας Τακόμα (αριστερά)<sup>[3]</sup> και η γέφυρα Μιλένιουμ (δεξιά)<sup>[4]</sup>*

Ο συντονισμός είναι ένα ισχυρό φαινόμενο που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ασφάλεια και την απόδοση των κατασκευών. Με την κατανόηση και τον μετριασμό των επιδράσεων του συντονισμού, οι μηχανικοί μπορούν να σχεδιάζουν ανθεκτικές κατασκευές που αντέχουν σε δυναμικές δυνάμεις, εξασφαλίζοντας τόσο την ασφάλεια όσο και την άνεση.

## 1.2 Σημασία του ελέγχου των δονήσεων σε υψηλές κατασκευές

Ο έλεγχος των δονήσεων σε υψηλές κατασκευές είναι απαραίτητος για διάφορους λόγους, που συνδέονται κυρίως με τη δομική ακεραιότητα, την άνεση των επιβατών και τη συνολική ασφάλεια. Ακολουθεί μια λεπτομερής εξήγηση του γιατί η διαχείριση αυτών των δονήσεων είναι τόσο σημαντική:

### Δομική ακεραιότητα

Η δομική ακεραιότητα αναφέρεται στην ικανότητα ενός κτιρίου να αντέχει το προβλεπόμενο φορτίο του χωρίς να παρουσιάσει αστοχία ή σημαντική βλάβη. Οι ανεξέλεγκτες δονήσεις μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο αυτή την ακεραιότητα με διάφορους τρόπους:

- **Κόπωση υλικού:** Οι επαναλαμβανόμενες ή υπερβολικές δονήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε κόπωση των δομικών υλικών, προκαλώντας μικρορωγμές που μπορούν να διαδοθούν με την πάροδο του χρόνου. Αυτό μπορεί να αποδυναμώσει τη δομή και ενδεχομένως να οδηγήσει σε καταστροφική αστοχία.
- **Θεμελίωση και καταπόνηση συνδέσμων:** Οι δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν πρόσθετα φορτία στα θεμέλια και τους αρμούς, τα οποία αποτελούν κρίσιμα σημεία του δομικού συστήματος. Με την πάροδο του χρόνου, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε χαλάρωση των συνδέσεων, σε προβλήματα καθίζησης ή ακόμη και σε δομική αστοχία.

### Άνεση χρηστών

Η άνεση των ενοίκων ενός πολυώροφου κτιρίου αποτελεί σημαντικό μέλημα, καθώς επηρεάζει την ευημερία και την παραγωγικότητά τους. Ο έλεγχος των κραδασμών είναι απαραίτητος για τη διατήρηση ενός άνετου περιβάλλοντος:

- **Αισθητή κίνηση:** Η ανθρώπινη ευαισθησία στην κίνηση σημαίνει ότι ακόμη και σχετικά μικρές δονήσεις μπορούν να γίνουν αισθητές, ειδικά στους ανώτερους ορόφους



πολυώροφων κτιρίων. Αυτό μπορεί να προκαλέσει δυσφορία, άγχος και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ναυτία λόγω κίνησης.

- **Παραγωγή θορύβου:** Οι δονήσεις μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία δευτερογενούς θορύβου, όπως τρίξιμο, κροτάλισμα ή ακόμη και ενισχυμένα ηχητικά κύματα σε ορισμένα δομικά στοιχεία. Αυτός ο θόρυβος μπορεί να είναι ενοχλητικός και να επηρεάσει την ποιότητα ζωής και εργασίας εντός του κτιρίου.
- **Ψυχολογικός αντίκτυπος:** Αυτό είναι ιδιαίτερα προβληματικό σε κτίρια κατοικιών και γραφείων όπου οι άνθρωποι περνούν σημαντικό χρόνο.

## Ασφάλεια

Η ασφάλεια είναι υψίστης σημασίας σε κάθε σχεδιασμό κτιρίου και ο έλεγχος των δονήσεων αποτελεί βασική πτυχή της ασφάλειας της κατασκευής και των ενοίκων της:

- **Σεισμική ασφάλεια:** Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, οι ανεξέλεγκτες δονήσεις μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές ή κατάρρευση. Οι αποτελεσματικοί μηχανισμοί ελέγχου των δονήσεων, όπως τα συστήματα απομόνωσης της βάσης ή απόσβεσης, είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία του κτιρίου και των ενοίκων του κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων. «Ο EN 1998<sup>[5]</sup>, γνωστός ως **Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός**, είναι μία σειρά Ευρωπαϊκών Προτύπων και γνωστοί ως Ευροκώδικες. Εφαρμόζεται στη μελέτη και κατασκευή κτιρίων και άλλων έργων Πολιτικού Μηχανικού σε περιοχές με σεισμικότητα. Στόχος του Ευρωκώδικα είναι να διασφαλίσει σε περίπτωση σεισμού ότι θα παρέχεται προστασία της ανθρώπινης ζωής, οι βλάβες στα δομήματα θα πρέπει να είναι περιορισμένες στην περίπτωση του σεισμικού γεγονότος»<sup>[6]</sup>.
- **Δονήσεις που προκαλούνται από τον άνεμο:** Οι ισχυροί άνεμοι μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές πλευρικές δυνάμεις και ταλαντώσεις σε ψηλά κτίρια. Εάν δεν ελεγχθούν, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δομικές βλάβες ή ακόμη και σε αστοχία. Ο κατάλληλος έλεγχος των κραδασμών εξασφαλίζει ότι το κτίριο παραμένει σταθερό και ασφαλές κατά τη διάρκεια των ανεμογενών φαινομένων.
- **Καταστάσεις έκτακτης ανάγκης:** Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως η εκκένωση κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς ή άλλου κινδύνου, οι υπερβολικές δονήσεις μπορεί να εμποδίσουν την ασφαλή και ομαλή εκκένωση. Η εξασφάλιση ελάχιστων δονήσεων συμβάλλει στη διατήρηση καθαρών και ασφαλών οδών διαφυγής.

Συνοπτικά, ο έλεγχος των δονήσεων σε υψηλές κατασκευές είναι κρίσιμος για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας, την εξασφάλιση της άνεσης των χρηστών και την εγγύηση της συνολικής ασφάλειας. Καθώς τα κτίρια συνεχίζουν να φτάνουν σε νέα ύψη και να ενσωματώνουν πιο πολύπλοκους σχεδιασμούς, η σημασία των προηγμένων τεχνικών ελέγχου των δονήσεων γίνεται ακόμη πιο έντονη, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συνεχή έρευνα και καινοτομία στον τομέα αυτό.

### 1.2.1 Πηγές δονήσεων σε κτίρια υψηλών ορόφων

Τα πολώροφα κτίρια, λόγω του ύψους και της λεπτότητάς τους, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε διάφορους τύπους δονήσεων. Οι δονήσεις αυτές μπορεί να προέρχονται από τον **άνεμο**, τη **σεισμική δραστηριότητα** και τις **δυνάμεις που προκαλούνται από τον άνθρωπο**.

Οι δονήσεις που προκαλούνται από τον άνεμο αποτελούν μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις για τα πολώροφα κτίρια. Ο άνεμος που ρέει γύρω από ένα κτίριο δημιουργεί διαφορές πίεσης, που οδηγούν σε αποκόλληση ροής και σε κυμαινόμενες αεροδυναμικές δυνάμεις που προκαλούν δονήσεις.

Η σεισμική δραστηριότητα αποτελεί κρίσιμο κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα των πολώροφων κτιρίων. Οι οριζόντιες εδαφικές επιταχύνσεις προκαλούν τέμνουσες δυνάμεις βάσης και ροπές ανατροπής, καταπονούν τη θεμελίωση και τη δομή του κτιρίου. Τα πολώροφα κτίρια έχουν συχνά πολλαπλές φυσικές συχνότητες και ιδιομορφές. Οι σεισμοί δημιουργούν εδαφικές κινήσεις που διεγείρουν την βάση του κτιρίου σε ένα εύρος συχνοτήτων όπου συχνά περιλαμβάνονται σε αυτό και οι ιδιοσυχνότητες του.

Τέλος, οι δονήσεις που προκαλούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες μπορούν επίσης να προκαλέσουν δονήσεις σε πολώροφα κτίρια. Δραστηριότητες όπως το περπάτημα, το τρέξιμο ή ακόμη και οι ρυθμικές κινήσεις (π.χ. χορός ή άσκηση) μπορούν να δημιουργήσουν δονήσεις. Σε πολώροφα κτίρια με εύκαμπτες δομές, οι δονήσεις αυτές μπορούν να διαδοθούν στους ορόφους. Μηχανικά συστήματα όπως θέρμανση, εξαερισμός, κλιματισμός (HVAC), ανελκυστήρες και αντλίες μπορούν να προκαλέσουν δονήσεις. Η κατάλληλη απομόνωση και απόσβεση είναι απαραίτητες για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων. Οι μεγάλες συγκεντρώσεις ή εκδηλώσεις, ειδικά σε κτίρια με δημόσιους χώρους όπως αμφιθέατρα ή στάδια, μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά δυναμικά φορτία από συγχρονισμένες κινήσεις.

### 1.3 Στρατηγικές αντιμετώπισης κατά την ιστορία

Ο έλεγχος των κραδασμών στην πολιτική μηχανική έχει εξελιχθεί σημαντικά με την πάροδο των αιώνων, με γνώμονα την ανάγκη να διασφαλιστεί η ασφάλεια, η λειτουργικότητα και η άνεση των κατασκευών που υπόκεινται σε δυναμικά φορτία. Ακολουθεί μια χρονολογική επισκόπηση των βασικών εξελίξεων στις μεθόδους ελέγχου δονήσεων:

#### Αρχαία και Μεσαιωνική περίοδος

- **Πρώιμη ευαισθητοποίηση:** Οι ιστορικές κατασκευές, όπως ο Παρθενώνας στην Ελλάδα και τα ρωμαϊκά υδραγωγεία, δείχνουν μια πρώιμη κατανόηση της ανάγκης για στιβαρή κατασκευή που να αντέχει στις φυσικές δυνάμεις. Οι οικοδόμοι χρησιμοποίησαν ογκώδεις πέτρινους όγκους και προσεκτική τοποθέτηση για να μετριάσουν τις επιπτώσεις των δονήσεων από τους σεισμούς και τον άνεμο.
- **Σεισμικός σχεδιασμός στην αρχαία Ιαπωνία:** Η παραδοσιακή ιαπωνική ξύλινη αρχιτεκτονική, με τις εύκαμπτες κατασκευές της, έδειξε μια πρώιμη μορφή σεισμικού σχεδιασμού. Η κατασκευή με δοκούς και στύλους επέτρεπε στα κτίρια να απορροφούν και να διαχέουν τη σεισμική ενέργεια.

#### 19ος αιώνας

- **Βιομηχανική Επανάσταση:** Η έλευση των σιδερένιων και αργότερα των χαλύβδινων πλαισίων επέτρεψε υψηλότερες κατασκευές, αλλά ανέδειξε επίσης την ανάγκη για καλύτερο έλεγχο των κραδασμών. Οι πρώιμοι ουρανοξύστες σε πόλεις όπως το Σικάγο και η Νέα Υόρκη αντιμετώπισαν τις δονήσεις που προκαλούσε ο άνεμος με αυξημένη ακαμψία και μάζα.
- **Ο Πύργος του Άιφελ (1889):** Ένα πρώιμο παράδειγμα σχεδιασμού για δυναμικά φορτία.

#### Αρχές 20ου αιώνα

- **Αρχές σεισμικού σχεδιασμού (δεκαετία 1920-1930):** Μετά τον μεγάλο σεισμό του Καντο στην Ιαπωνία το 1923, οι συστηματικές μελέτες των σεισμικών επιπτώσεων οδήγησαν στην ανάπτυξη αρχών σεισμικού σχεδιασμού. Οι μηχανικοί άρχισαν να κατανοούν τη σημασία της ευελιξίας και της διάχυσης της ενέργειας στα κτίρια.

- **Εισαγωγή της απόσβεσης:** Η ιδέα της προσθήκης απόσβεσης στις κατασκευές για τον έλεγχο των δονήσεων άρχισε να διαμορφώνεται. Οι πρώτες μέθοδοι απόσβεσης περιλάμβαναν την προσθήκη τριβής ή τη χρήση υλικών με εγγενείς ιδιότητες απόσβεσης.

### Μέσα 20ου αιώνα

- **Σύγχρονοι σεισμικοί κώδικες (δεκαετία 1960-1970):** Ο σεισμός της Αλάσκας το 1964 και ο σεισμός του Σαν Φερνάντο το 1971 οδήγησαν σε σημαντικές εξελίξεις στους κώδικες σεισμικού σχεδιασμού στις Ηνωμένες Πολιτείες. Οι κώδικες αυτοί ενσωμάτωσαν τις αρχές της δυναμικής ανάλυσης και της διάχυσης ενέργειας.
- **Απομόνωση βάσης (δεκαετία 1970):** Η ανάπτυξη της τεχνολογίας απομόνωσης της βάσης σηματοδότησε μια σημαντική πρόοδο. Οι μονωτήρες βάσης, συνήθως κατασκευασμένοι από καουτσούκ και χάλυβα, αποσυνδέουν το κτίριο από τις εδαφικές κινήσεις, μειώνοντας σημαντικά τις σεισμικές δυνάμεις που μεταδίδονται στην κατασκευή.

### Τέλη 20ου αιώνα

- **Συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας (TMD):** Οι TMD έγιναν μια εξέχουσα μέθοδος για τον έλεγχο των ανεμογενών και σεισμικών δονήσεων. Η πρώτη σημαντική εφαρμογή έγινε στον πύργο John Hancock (1976) στη Βοστώνη, ο οποίος χρησιμοποίησε TMD για να μετριάσει την ταλάντωση που προκλήθηκε από τον άνεμο. Θα ακολουθήσουν περισσότερα για τις TMD.
- **Ενεργά συστήματα ελέγχου:** που χρησιμοποιούν αισθητήρες και ενεργοποιητές για την αντιμετώπιση των δονήσεων σε πραγματικό χρόνο. Αυτά τα συστήματα είναι πιο πολύπλοκα και ακριβά, αλλά μπορούν να παρέχουν ανώτερο έλεγχο των κραδασμών.

### 21ος αιώνας

- **Προηγμένα υλικά και τεχνολογίες:** Η χρήση προηγμένων υλικών, όπως οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες, οι συντονισμένοι αποσβεστήρες υγρών σπηλών (TLCD) και οι μαγνητορολογικοί αποσβεστήρες (MR), έχει βελτιώσει τις δυνατότητες ελέγχου των κραδασμών. Αυτά τα υλικά και οι συσκευές προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και αποτελεσματικότητα στη διάχυση της δονητικής ενέργειας.

- **Έξυπνες δομές:** Η ενσωμάτωση έξυπνων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και των μηχανισμών προσαρμοστικού ελέγχου, έχει βελτιώσει την ανταπόκριση και την αποτελεσματικότητα των μέτρων ελέγχου των κραδασμών. Τα συστήματα αυτά μπορούν να προσαρμόζουν τις ιδιότητες απόσβεσης σε πραγματικό χρόνο με βάση τις ανιχνευόμενες δονήσεις.
- **Σχεδιασμός βάσει επιδόσεων:** όπου οι κατασκευές σχεδιάζονται και προσαρμόζονται ώστε να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης υπό δυναμικά φορτία. Η προσέγγιση αυτή συνδυάζει προηγμένες υπολογιστικές μεθόδους με εμπειρικά δεδομένα για τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών ελέγχου των κραδασμών.

Η ιστορία των μεθόδων ελέγχου των δονήσεων στην πολιτική μηχανική αντικατοπτρίζει μια συνεχή εξέλιξη που οφείλεται στην τεχνολογική πρόοδο και στη βαθύτερη κατανόηση των δυναμικών δυνάμεων. Από τις αρχαίες κατασκευαστικές τεχνικές έως τις σύγχρονες έξυπνες κατασκευές, οι μηχανικοί έχουν αναπτύξει όλο και πιο εξελιγμένες μεθόδους για να εξασφαλίσουν την ασφάλεια, την αντοχή και την άνεση των κτιρίων και των υποδομών. Καθώς τα πολυώροφα κτίρια και οι πολύπλοκες κατασκευές γίνονται όλο και πιο συνηθισμένες, η σημασία του αποτελεσματικού ελέγχου των δονήσεων συνεχίζει να αυξάνεται, αναδεικνύοντας την ανάγκη για συνεχή καινοτομία και έρευνα σε αυτόν τον κρίσιμο τομέα.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων χρησιμοποιούνται διάφορες στρατηγικές μετριασμού. Παραδοσιακά, αυτές είναι:

- **Απομόνωση βάσης:** Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την εγκατάσταση ρουλεμάν ή μονωτήρων μεταξύ της θεμελίωσης του κτιρίου και της ανωδομής του για την αποσύνδεση του κτιρίου από τις εδαφικές κινήσεις κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.
- **Αεροδυναμικές τροποποιήσεις:** Η αλλαγή του σχήματος του κτιρίου ή η προσθήκη αεροδυναμικών χαρακτηριστικών, όπως πτερύγια ή ανοίγματα, μπορεί να συμβάλει στη μείωση των δυνάμεων που προκαλούνται από τον άνεμο.
- **Συστήματα απόσβεσης:** Πρόσθετα συστήματα απόσβεσης, όπως ιξώδεις αποσβεστήρες, αποσβεστήρες τριβής ή ιξωδοελαστικά υλικά, μπορούν να ενσωματωθούν στη δομή για τη διάχυση της ενέργειας δόνησης.

## 1.4 Περιορισμοί των παραδοσιακών μεθόδων ελέγχου δονήσεων.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι ελέγχου των δονήσεων, όπως η δομική ακαμψία και η απομόνωση της βάσης, έχουν συμβάλει καθοριστικά στην ενίσχυση της σταθερότητας και της ασφάλειας των κτιρίων. Ωστόσο, οι τεχνικές αυτές συνοδεύονται από ορισμένους περιορισμούς που μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική αποτελεσματικότητα και εφαρμογή τους.

### Δομική ακαμψία

Η δομική ακαμψία περιλαμβάνει την αύξηση της ακαμψίας ενός κτιρίου για να μειωθεί η ευαισθησία του σε δονήσεις. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει συνήθως την προσθήκη περισσότερων δομικών στοιχείων ή τη χρήση υλικών με μεγαλύτερη ακαμψία. Αν και αποτελεσματική σε ορισμένα σενάρια, η δομική δυσκαμψία έχει αρκετούς περιορισμούς:

- **Αυξημένο βάρος και κόστος:** Η προσθήκη πρόσθετων δομικών στοιχείων ή η χρήση πιο δύσκαπτων υλικών έχει συχνά ως αποτέλεσμα την αύξηση του βάρους και του κόστους κατασκευής. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα προβληματικό για τα πολυώροφα κτίρια, όπου οι εκτιμήσεις για το βάρος είναι κρίσιμες.
- **Μειωμένη ευελιξία:** Οι υπερβολικά άκαμπτες δομές μπορεί να γίνουν πολύ άκαμπτες, μειώνοντας την ικανότητά τους να απορροφούν και να διαχέουν ενέργεια. Αυτό μπορεί να τις καταστήσει πιο επιρρεπείς σε ζημιές κατά τη διάρκεια ακραίων φαινομένων, όπως οι σεισμοί, όπου κάποια ευελιξία είναι ευεργετική.
- **Περιορισμοί χώρου:** Η προσθήκη στοιχείων δυσκαμψίας μπορεί να καταναλώσει πολύτιμο χώρο μέσα στο κτίριο, μειώνοντας δυνητικά την ωφέλιμη επιφάνεια του δαπέδου και επηρεάζοντας τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.
- **Μειούμενες αποδόσεις:** Πέρα από ένα ορισμένο σημείο, η περαιτέρω ακαμψία αποδίδει φθίνουσα απόδοση στη μείωση των κραδασμών, καθιστώντας την αναποτελεσματική λύση για την αντιμετώπιση υψηλότερων επιπέδων δυναμικών δυνάμεων.

### Απομόνωση βάσης

Η απομόνωση της βάσης είναι μια τεχνική που περιλαμβάνει την αποσύνδεση του κτιρίου από τις κινήσεις του εδάφους με τη χρήση μονωτήρων που τοποθετούνται μεταξύ της θεμελίωσης του

κτιρίου και της ανωδομής του. Ενώ η απομόνωση βάσης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στη μείωση των σεισμικών δονήσεων, έχει επίσης τους δικούς της περιορισμούς:

- **Υψηλό αρχικό κόστος:** Η εγκατάσταση των μονωτήρων βάσης μπορεί να είναι δαπανηρή, τόσο από πλευράς υλικών όσο και από πλευράς εργασίας. Αυτό μπορεί να καταστήσει την απομόνωση βάσης απαγορευτική από πλευράς κόστους για μικρότερα έργα ή κτίρια με περιορισμένο προϋπολογισμό.
- **Απαιτήσεις συντήρησης:** Οι μονωτήρες βάσης απαιτούν τακτική συντήρηση και επιθεώρηση για να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητά τους με την πάροδο του χρόνου. Αυτό μπορεί να αυξήσει το μακροπρόθεσμο λειτουργικό κόστος του κτιρίου.
- **Περιορισμένη εφαρμογή:** Η απομόνωση της βάσης είναι πιο αποτελεσματική για κτίρια χαμηλής έως μέτριας στάθμης και μπορεί να μην είναι κατάλληλη για πολύ ψηλές κατασκευές λόγω της πολυπλοκότητας και της κλίμακας των απαιτούμενων μονωτήρων.
- **Συμβατότητα θεμελίωσης:** Η αποτελεσματικότητα της απομόνωσης βάσης μπορεί να διακυβευθεί εάν η τοποθεσία του κτιρίου έχει δύσκολες εδαφικές συνθήκες ή εάν ο υπάρχων σχεδιασμός του θεμελίου δεν είναι συμβατός με την εγκατάσταση του απομονωτή.
- **Απόδοση σε ακραία γεγονότα:** Ενώ η απομόνωση της βάσης είναι εξαιρετική για τυπικά σεισμικά γεγονότα, η απόδοσή της μπορεί να είναι λιγότερο προβλέψιμη σε ακραίους σεισμούς ή σε σεισμούς κοντά σε σφάλμα, όπου οι εδαφικές κινήσεις μπορεί να είναι εξαιρετικά ακανόνιστες και έντονες.

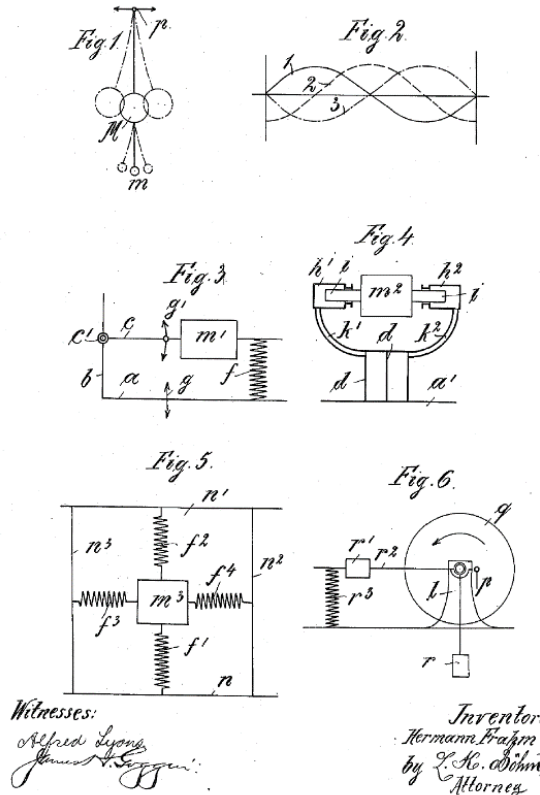
Ενώ οι παραδοσιακές μέθοδοι ελέγχου των δονήσεων, όπως η δομική ακαμψία και η απομόνωση της βάσης, έχουν αποδείξει την αξία τους για την ενίσχυση της σταθερότητας και της ασφάλειας των κτιρίων, δεν είναι χωρίς περιορισμούς. Αυτές οι μέθοδοι μπορεί να είναι δαπανηρές, μπορεί να μειώσουν τη δομική ευελιξία και μερικές φορές έχουν περιορισμένη εφαρμογή ανάλογα με τον ειδικό σχεδιασμό του κτιρίου και τις συνθήκες του χώρου. Η αναγνώριση αυτών των περιορισμών είναι απαραίτητη για τους μηχανικούς προκειμένου να αναπτύξουν πιο αποτελεσματικές, αποδοτικές και ευέλικτες στρατηγικές ελέγχου των δονήσεων, οι οποίες συχνά ενσωματώνουν σύγχρονες τεχνολογίες και καινοτόμες προσεγγίσεις για την ικανοποίηση των εξελισσόμενων απαιτήσεων της σύγχρονης αρχιτεκτονικής και της αστικής ανάπτυξης.

## 1.5 Εισαγωγή στους συντονισμένους αποσβεστήρες μάζας (TMD)

Ο συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας (Tuned Mass Damper) ή TMD είναι προηγμένες διατάξεις ελέγχου κραδασμών που χρησιμοποιούνται για την μείωση ανεπιθύμητων ταλαντώσεων σε κατασκευές, ιδίως σε πολώροφα κτίρια, γέφυρες και πύργους. Στην πιο απλή μορφή του αποτελείται από μια μάζα συνδεδεμένη σε μια δομή μέσω ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα. Το σύστημα "συντονίζεται" με τη φυσική συχνότητα της κατασκευής, επιτρέποντάς του να απορροφά κινητική ενέργεια και να τη διαχέει αποτελεσματικά.

Η ιδέα αυτή φαίνεται να απασχολεί τον Hermann Frahm, γερμανό μηχανικό, ο οποίος σχεδιάζει έναν δυναμικό απορροφητήρα ταλαντώσεων για την αντιμετώπιση της κυλιόμενης κίνησης των πλοίων, και όχι μόνο. Στις 30 Οκτωβρίου 1909, καταχωρεί την πατέντα του για μηχανικές διαμορφώσεις που σκοπό έχουν να αποσβένουν ταλαντώσεις σε κρίσιμες συχνότητες. Στα σχεδιαγράμματα που παραθέτει βλέπουμε διάφορες διατάξεις στις οποίες η επιπρόσθετη μάζα έχει διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας ανάλογα με την περίπτωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για την ρύθμιση της συχνότητας με την οποία θα ταλαντώνεται η επιπρόσθετη μάζα ο Frahm χρησιμοποιεί κυρίως ελατήρια, ώστε να είναι όσο το δυνατόν ταυτόσημη με την ιδιοσυχνότητα της κύριας μάζας. Έτσι από μία εξωτερική διέγερση που θα προκαλούσε συντονισμό στη κύρια μάζα, προκαλείται με διαφορά φάσης, συντονισμός στην επιπρόσθετη μάζα. Η διαφορά φάσης μεταξύ αυτών των ταλαντώσεων είναι που προκαλεί και την ακύρωση της πρώτης.





Εικόνα 3: Σχεδιαγράμματα από την πατέντα που κατέθεσε ο H.Frahm<sup>[7]</sup>.

Τα τελευταία χρόνια, μαζί με την εξέλιξη της τεχνολογίας υλικών έχουν αναπτυχθεί προηγμένοι υπολογιστικοί μέθοδοι με αποτέλεσμα οι κατασκευές να είναι πιο ανθεκτικές, ελαφρύτερες και πιο περίπλοκες από ποτέ. Όπως είναι φυσικό αυτή η αυξημένη κατασκευαστική ποιότητα συναντάται και με αύξηση των απαιτήσεων ασφαλείας, λειτουργικότητας και άνεσης. Συνεπώς, το επιστημονικό ενδιαφέρον στράφηκε στην ανάπτυξη των ονομαζόμενων **συστημάτων ελέγχου της αποκρίσεως των κατασκευών** (structural control systems), αναλύοντας την επιρροή της μάζας όσο και της δυσκαμψίας των κατασκευών, ως βασικά δυναμικά χαρακτηριστικά τους.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της χρήσης συστημάτων απόσβεσης είναι ότι μπορούν να εγκατασταθούν και μετά το πέρας της ανέγερσης της κατασκευής, ως επιπρόσθετο σύστημα. Επιπλέον σε περίπτωση αστοχίας ή βλάβης ένα σύστημα απόσβεσης ταλαντώσεων μπορεί να απομακρυνθεί και να αντικατασταθεί χωρίς να διακοπεί η χρήση της κατασκευής μιας και δεν φέρουν βαρυτικά φορτία αφού δεν είναι δομικά στοιχεία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του κόστους αποκατάστασης.

Πρακτικά, η μάζα ενός TMD μπορεί να κυμαίνεται από αρκετούς τόνους σε ουρανοξύστες έως μικρότερα βάρη σε μηχανικά συστήματα. Ο αποσβεστήρας μπορεί να είναι ένα απλό ιξώδες ρευστό ή πιο σύνθετα συστήματα όπως μαγνητο-ρεολογικά ρευστά ή μηχανισμοί που βασίζονται στην τριβή. Το ελατήριο μπορεί να είναι ένα μεταλλικό σπειροειδές ελατήριο για να παρέχουν την απαραίτητη δύναμη επαναφοράς ή ένα εκκρεμές του οποίου το μήκος καθορίζει την συχνότητα ταλάντωσης.

Με βάση τα δυναμικά χαρακτηριστικά και τον τρόπο δράσης τους, τα συστήματα απόσβεσης μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- **Συστήματα παθητικού ελέγχου (passive control devices).** Τα συστήματα αυτά λειτουργούν αυτόνομα χωρίς προσφορά ενέργειας. Πρόκειται για τα πιο απλά συστήματα και συνεπώς τα χαμηλότερα σε κόστος. Αυτές οι συσκευές λειτουργούν με βάση τις αρχές που διέπουν την τριβή ολίσθησης, τη διαρροή των μετάλλων, τον μετασχηματισμό φάσης των μετάλλων και την παραμόρφωση ιξωδοελαστικών στερεών και ρευστών.
- **Συστήματα ενεργητικού ή ημι-ενεργητικού ελέγχου (active or semiactive control systems).** Εδώ η προσφορά ενέργειας είναι απαραίτητη για την λειτουργία τους. Αισθητήρες, εγκέφαλοι επεξεργασίας πληροφοριών και ενεργοποιητές λειτουργούν έτσι ώστε να αντιδράσουν με προσαρμοστικό χαρακτήρα στις εξωτερικές συνθήκες. Αποκαλούνται και ως «έξυπνα συστήματα».
- **Υβριδικά συστήματα (hybrid control systems).** Όπως μπορούμε να καταλάβουμε και από το όνομα πρόκειται για έναν συνδυασμό των προηγούμενων δύο. Συνήθως μιλάμε για παθητικά συστήματα που με προσφορά ενέργειας η απόδοσή τους μπορεί να βελτιωθεί<sup>[8]</sup>

### 1.5.1 Πλεονεκτήματα των συντονισμένων αποσβεστήρων μάζας

Οι TMD προτιμώνται έναντι των παραδοσιακών μεθόδων ελέγχου των δονήσεων για διάφορους λόγους:

- **Αποτελεσματικότητα:** Παρέχοντας σημαντική απόσβεση με σχετικά μικρή προστιθέμενη μάζα σε σύγκριση με τη συνολική μάζα της κατασκευής.
- **Προσαρμοστικότητα:** Τα ενεργά και υβριδικά TMD μπορούν να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δόνησης σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας ανώτερες επιδόσεις σε ένα ευρύ φάσμα δυναμικών σεναρίων.

- **Εξοικονόμηση χώρου:** Αυτό επιτρέπει την πιο ευέλικτη και αποδοτική χρήση των εσωτερικών χώρων των κτιρίων.
- **Κόστος-αποτελεσματικότητα:** Ενώ η αρχική επένδυση σε TMD μπορεί να είναι σημαντική, η ικανότητά τους να παρέχουν στοχευμένο έλεγχο των κραδασμών μπορεί να μειώσει την ανάγκη για εκτεταμένες δομικές τροποποιήσεις, μειώνοντας δυνητικά το συνολικό κόστος του έργου.
- **Ελάχιστες επιπτώσεις στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό:** Σε αντίθεση με ορισμένες παραδοσιακές μεθόδους που μπορεί να απαιτούν σημαντικές αλλαγές στη δομή.

Οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας αποτελούν μια εξελιγμένη και ευέλικτη λύση για τον έλεγχο των δονήσεων στις σύγχρονες κατασκευές. Αξιοποιώντας τις αρχές της συντονισμένης μάζας και της απόσβεσης, οι TMD προσφέρουν αποτελεσματικό, προσαρμόσιμο και οικονομικά αποδοτικό μετριασμό των κραδασμών σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, όπως η δομική δυσκαμψία και η απομόνωση της βάσης. Στην μηχανολογία συχνά θέτονται ως παράμετροι το κόστος, η αποτελεσματικότητα και η καινοτομία και τις περισσότερες φορές ο μηχανικός διαλέγει να εστιάσει σε μία από τις τρεις. Σπάνια έχει την πολυτέλεια να συνδυάσει δύο, όμως όσον αφορά την απόσβεση διεγέρσεων σε ψηλά κτίρια, ο συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας μέσω εκκρεμούς τα πετυχαίνει και τα τρία. Ένα εξαιρετικό παράδειγμα κομψότητας στη μηχανική [9].

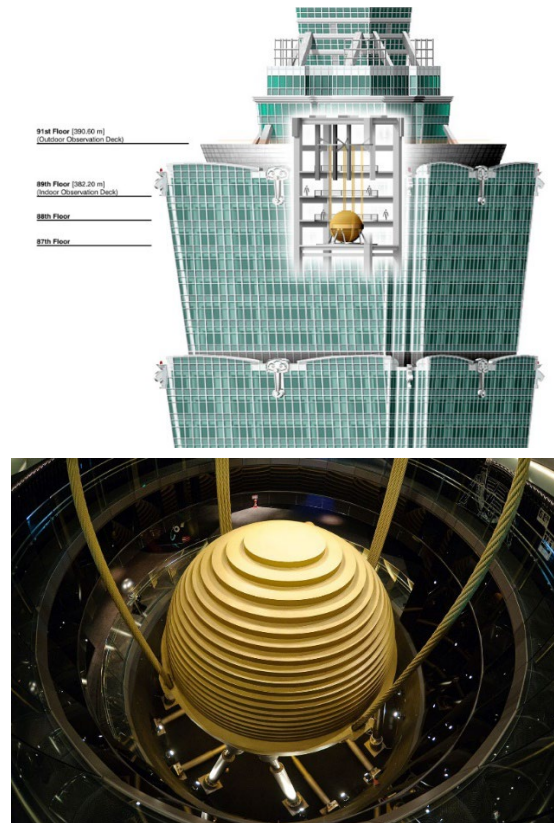
## 1.5.2 Εφαρμογές

### Taipei 101, Taiwan

Κατασκευάστηκε από την εταιρία Rowan Williams Davies & Irwin Inc. (RWDI) ξεκινώντας το 1999 και ολοκληρώθηκε το 2005. Το συγκεκριμένο κτίριο κατασκευάστηκε για να αντέχει τυφώνες και σεισμούς που πλήττουν κατά κόρων την ανατολική περιοχή της Ταϊβάν. Η Evergreen Consulting Engineering, ως πολιτικός μηχανικός του έργου, σχεδίασε το Taipei 101 να αντέχει θύελλες ανέμων που ανέρχονται στα 60 μέτρα το δευτερόλεπτο (216 χλμ/ώρα), καθώς και τους ισχυρότερους σεισμούς που έχουν καταγραφεί σε κύκλο 2.500 χρόνων [10]

Η RWDI σχεδίασε ένα εκκρεμές από χάλυβα, βάρους 660 τόνων, σε κόστος NT\$132 εκατομμυρίων (US\$4 εκατ.) Το εκκρεμές κρέμεται από τον 92° όροφο μέχρι τον 87°. Η «μπάλα», αποτελείται από 41 χαλύβδινες πλάκες κυκλικής διατομής (μεταβαλλόμενης διαμέτρου) και πάχους 125mm, συγκολλημένες η μία πάνω στην άλλη για να διαμορφώσουν μία σφαιρική μάζα διαμέτρου 5,5 μέτρων. Δύο επιπρόσθετοι συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας έχουν εγκατασταθεί

στην κορυφή, βάρους 6 τόνων ο καθένας, συγκεκριμένα για την αντιμετώπιση φορτίων που οφείλονται στις ριπές αέρα. Η μεγαλύτερη μετατόπιση μάζας του κύριου αποσβεστήρα είναι 1 μέτρο και σημειώθηκε στις 8 Αυγούστου του 2015, εξαιτίας του τυφώνα Soudelor [12].



Εικόνες 4, 5 & 6: Ουρανοξήστης Ταιpei 101, και ο συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας του<sup>[11]</sup>.

Ο συγκεκριμένος συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας με εκκρεμές, είναι τόσο δημοφιλής ώστε ο καλλιτέχνης Sanrio να δημιουργήσει προς τιμή του μία μασκότ, η λεγόμενη «Damper Baby». Υπάρχει σε διάφορες αποχρώσεις, ενώ πωλείται σε φιγούρες από το gift shop. Αποτελεί τοπικό είδωλο αφού έχει δική του ιστοσελίδα και βιβλία comic.



Εικόνα 7: Είσοδος στο Ταιpei 101 με το Damper baby<sup>[11]</sup>.

## 2. Ταλαντώσεις και δυναμική

Στο παρόν κεφάλαιο ακολουθεί συνοπτική περιγραφή βασικών όρων και σχέσεων που διέπουν ένα ταλαντούμενο σώμα. Στην συνέχεια παραθέτονται παραδείγματα σχεδίασης αποσβεστήρων μάζας, και τέλος η θεωρία της μεθόδου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (FEM).

### 2.1 Λόγος απόσβεσης

Ο λόγος απόσβεσης, που συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα  $\zeta$ , είναι ένα μέτρο χωρίς διαστάσεις που περιγράφει την ποσότητα απόσβεσης σε ένα σύστημα σε σχέση με την κρίσιμη απόσβεση. Η κρίσιμη απόσβεση είναι το ελάχιστο ποσό απόσβεσης που επιτρέπει σε ένα σύστημα να επιστρέψει στη θέση ισορροπίας του χωρίς να ταλαντώνεται.

Τύποι απόσβεσης με βάση τον λόγο απόσβεσης:

#### 1. Υποκρίσιμη Απόσβεση ( $0 \leq \zeta < 1$ ):

- Συμπεριφορά: Το σύστημα ταλαντώνεται με σταδιακά μειούμενο πλάτος με την πάροδο του χρόνου. Οι ταλαντώσεις διατηρούνται αλλά μειώνονται λόγω της ενέργειας που χάνεται σταδιακά.
- Παράδειγμα: Το σύστημα ανάρτησης ενός αυτοκινήτου είναι συνήθως υποαποσβεσμένο για να παρέχει ομαλή οδήγηση χωρίς υπερβολικές ταλαντώσεις.

#### 2. Κρίσιμη αποσβεσμένο ( $\zeta=1$ ):

- Συμπεριφορά: Το σύστημα επιστρέφει στην ισορροπία όσο το δυνατόν γρηγορότερα χωρίς ταλάντωση. Αυτή είναι η βέλτιστη απόσβεση για συστήματα όπου απαιτείται γρήγορη επιστροφή στην ευστάθεια.
- Παράδειγμα: Πόρτες, ντουλάπια, πορτοπαγκάζ αυτοκινήτου, συχνά σχεδιάζονται για να έχουν κρίσιμη απόσβεση, ώστε να εξασφαλίζεται ότι κλείνουν γρήγορα αλλά χωρίς να χτυπάνε.

#### 3. Υπερκρίσιμη απόσβεση ( $\zeta > 1$ ):

- Συμπεριφορά: Το σύστημα επιστρέφει στην ισορροπία χωρίς ταλάντωση, αλλά πιο αργά από ό,τι στην περίπτωση της κρίσιμης απόσβεσης. Αυτό είναι χρήσιμο σε συστήματα όπου οι ταλαντώσεις

πρέπει να αποφεύγονται εντελώς, ακόμη και αν αυτό σημαίνει βραδύτερη επιστροφή στην ισορροπία<sup>[13]</sup>.

## 2.2 Ιδιοτιμές και Ιδιομορφές

Για μία ταλάντωση, οι ιδιοτιμές και τα σχήματα ιδιομορφών είναι θεμελιώδεις έννοιες που χαρακτηρίζουν την απόκριση του συστήματος.

**Ιδιοτιμές:** Πρόκειται για τιμές που καθορίζουν τις φυσικές συχνότητες του συστήματος. Οι ιδιοσυχνότητες υποδεικνύουν σε ποιες συχνότητες θα ταλαντώνεται φυσικά το σύστημα εάν διαταραχθεί. Οι συχνότητες αυτές είναι εγγενείς ιδιότητες του συστήματος, οι οποίες καθορίζονται από την κατανομή της μάζας και της δυσκαμψίας του.

**Ιδιομορφές:** Δείχνουν πώς κινούνται τα διάφορα μέρη του συστήματος σε σχέση μεταξύ τους σε κάθε φυσική συχνότητα. Παρέχουν κρίσιμη εικόνα της συμπεριφοράς του συστήματος υπό δυναμική φόρτιση.

### 2.2.1 Ιδιοπρόβλημα

Οι ιδιοτιμές προκύπτουν από τις εξισώσεις κίνησης του συστήματος. Για ένα σύστημα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας, η εξίσωση κίνησης σε μητρική μορφή είναι:

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}\} + \mathbf{C}\{\dot{x}\} + \mathbf{K}\{x\} = f(t) \quad (1)$$

Όπου  $[\mathbf{M}]$  το μητρώο μάζας,  $[\mathbf{C}]$  το μητρώο απόσβεσης,  $[\mathbf{K}]$  το μητρώο στιβαρότητας,  $x$  το διάνυσμα αποκρίσεων και  $f$  το διάνυσμα διέγερσης του συστήματος. Ο προσδιορισμός των ιδιοτιμών και των ιδιομορφών προκύπτει από την επίλυση του ιδιοπροβλήματος:

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}\} + \mathbf{K}\{x\} = 0 \quad (2)$$

Οι ιδιοτιμές  $\omega^2$  βρίσκονται με την επίλυση της χαρακτηριστικής εξίσωσης:

$$\det(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M}) = 0 \quad (3)$$

Οι λύσεις στην εξίσωση (4),  $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$ , είναι οι ιδιοτιμές του συστήματος όπου  $n$  ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας. Αυτές οι ιδιοτιμές αντιστοιχούν στα τετράγωνα των ιδιοσυχνωτήτων  $\omega_i$  όπου  $i = 1, 2, \dots, n$

Υποθέτοντας λύσεις της μορφής  $x(t)=\Phi e^{i\omega t}$ , τις αντικαθιστούμε στην εξίσωση (2) και απλοποιώντας καταλήγουμε στη μορφή:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \Phi_i = 0 \quad (4)$$

Όπου η ιδιομορφή  $\Phi_i$  είναι το διάνυσμα που περιγράφει την τη σχετική κίνηση των μαζών του συστήματος σε μια συγκεκριμένη ιδιοσυχνότητα. Κάθε στοιχείο του πίνακα  $\Phi_i$  αντιπροσωπεύει το πλάτος κίνησης μιας συγκεκριμένης μάζας σε σχέση με τις άλλες.

### 2.3 Συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας

Η έννοια του συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας ή TMD (κατά το Tuned Mass Damper), παρουσιάζεται με τη χρήση του συστήματος δύο μαζών που φαίνεται στο *Σχήμα 1*. Εδώ, ο δείκτης  $d$  αναφέρεται στον συντονισμένο αποσβεστήρα μάζας. – ενός βαθμού ελευθερίας (SDOF).

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (5)$$

$$c = 2\zeta\omega m \quad (6)$$

$$\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d} \quad (7)$$

$$c_d = 2\zeta_d\omega_d m_d \quad (8)$$

Ορίζοντας ως λόγο μαζών το:

$$\bar{m} = \frac{m_d}{m} \quad (9)$$

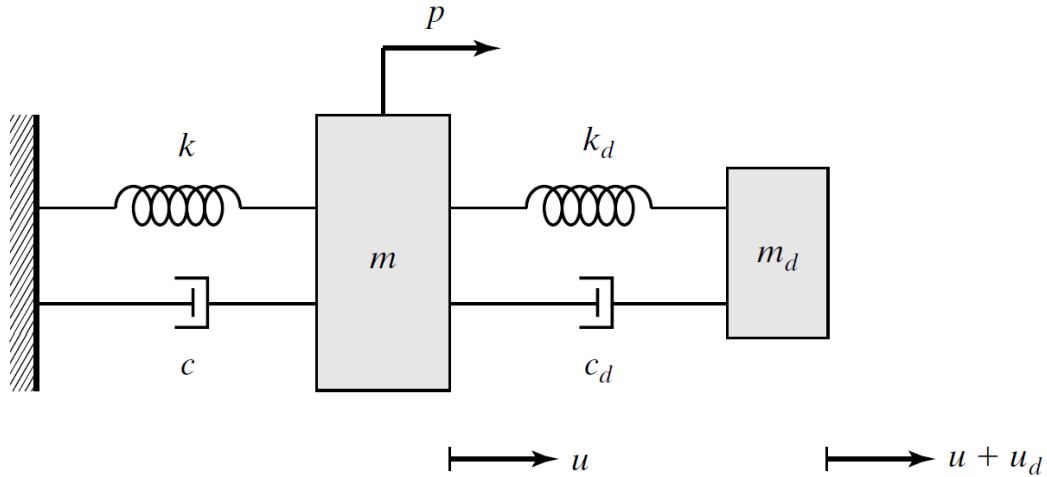
Οι εξισώσεις κίνησης είναι:

Κύρια μάζα:

$$(1 + \bar{m})\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2 u = \frac{p}{m} - \bar{m}\ddot{u}_d \quad (10)$$

Μάζα του TMD:

$$\ddot{u}_d + 2\xi_d\omega_d\dot{u}_d + \omega_d^2 u_d = -\ddot{u} \quad (11)$$



Σχήμα 1

Ο σκοπός της προσθήκης του αποσβεστήρα μάζας είναι να περιορίσει την κίνηση της κατασκευής όταν αυτή υπόκειται σε μια συγκεκριμένη διέγερση. Ο σχεδιασμός του αποσβεστήρα μάζας περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της μάζας  $m_d$ , της δυσκαμψίας  $k_d$  και του συντελεστή απόσβεσης  $c_d$ . Σε αυτό το παράδειγμα, η βέλτιστη ρύθμιση για τη συχνότητα του αποσβεστήρα, είναι:

$$\omega_d = \omega \quad (12)$$

Ενώ το μέτρο στιβαρότητας:

$$k_d = \bar{m}k \quad (13)$$

Η εξίσωση (12) αντιστοιχεί στον συντονισμό του αποσβεστήρα με τη φυσική περίοδο της κατασκευής.

Θεωρώντας μια περιοδική διέγερση,

$$p = \hat{p} \sin \Omega t \quad (14)$$

η απόκριση δίνεται:

$$u = \hat{u} \sin(\Omega + \delta_1) \quad (15)$$



$$u_d = \hat{u}_d \sin(\Omega t + \delta_1 + \delta_2) \quad (16)$$

Όπου  $\hat{u}_d$  και  $\delta$  δηλώνουν το πλάτος της ταλάντωσης και τη διαφορά φάσης, αντίστοιχα. Το κρίσιμο σενάριο φόρτισης είναι η κατάσταση συντονισμού,  $\Omega = \omega$ . Η λύση για την περίπτωση αυτή έχει την μορφή:

$$\hat{u} = \frac{\hat{p}}{k\bar{m}} \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{2}{\bar{m}} + \frac{1}{2\zeta_d}\right)^2}} \quad (17)$$

$$\hat{u}_d = \frac{1}{2\zeta_d} \hat{u} \quad (18)$$

$$\tan \delta_1 = - \left[ \frac{2\zeta}{\bar{m}} + \frac{1}{2\zeta_d} \right] \quad (19)$$

$$\tan \delta_2 = -\frac{\pi}{2} \quad (20)$$

Η απόκριση της συντονισμένης μάζας είναι  $90^\circ$  εκτός φάσης με την απόκριση της πρωτογενούς μάζας. Σε αυτή τη διαφορά φάσης οφείλεται η διάχειση της ενέργειας που απορροφάται στη συνέχεια από τον αποσβέστη.

Η απόκριση για την απουσία του αποσβέστη είναι:

$$\hat{u} = \frac{\hat{p}}{k} \left( \frac{1}{2\zeta} \right) \quad (21)$$

$$\delta_1 = \left( -\frac{\pi}{2} \right) \quad (22)$$

Για να συγκρίνουμε το πριν και το μετά την εγκατάσταση του εκφράζουμε την εξίσωση (17) ως προς έναν ισοδύναμο λόγος απόσβεσης:

$$\hat{u} = \frac{\hat{p}}{k} \left( \frac{1}{2\zeta_e} \right) \quad (23)$$

Όπου:

$$\zeta_e = \frac{\bar{m}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2\zeta}{\bar{m}} + \frac{1}{2\zeta_d}\right)^2} \quad (24)$$

Η εξίσωση (24) δείχνει τη σχετική συμβολή των παραμέτρων του αποσβεστήρα στη συνολική απόσβεση. Ενώ παρατηρούμε ότι η αύξηση του λόγου μάζας μεγεθύνει την απόσβεση υπάρχει ένα πρακτικό όριο. Η μείωση του συντελεστή απόσβεσης για τον αποσβεστήρα αυξάνει την συνολική απόσβεση. Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (19), η σχετική μετατόπιση αυξάνεται παρουσιάζοντας ακόμη ένα πρακτικό όριο στη σχετική μετακίνηση του αποσβεστήρα. Ο τελικός σχεδιασμός του TMD απαιτεί συμβιβασμό μεταξύ αυτών των δύο περιορισμών.

#### Παράδειγμα σχεδιασμού ενός TMD για ένα σύστημα SDOF

Ας υποθέσουμε ότι  $\zeta = 0$  και θέλουμε να προσθέσουμε έναν συντονισμένο αποσβεστήρα μάζας έτσι ώστε ο ισοδύναμος λόγος απόσβεσης να είναι 10%. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (24) και θέτοντας  $\zeta_e = 0,1$ , προκύπτει η ακόλουθη σχέση μεταξύ  $\bar{m}$  και  $\zeta_d$ :

$$\frac{\bar{m}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2\zeta}{\bar{m}} + \frac{1}{2\zeta_d}\right)^2} = 0.1 \quad (25)$$

Ο περιορισμός της σχετικής μετατόπισης δίνεται από την σχέση (18):

$$\hat{u}_d = \left(\frac{1}{2\zeta_d}\right) \hat{u} \quad (26)$$

Συνδιάζοντας τις εξισώσεις (25) και (26) και θέτοντας  $\zeta = 0$ :

$$\frac{\bar{m}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\hat{u}_d}{\hat{u}}\right)^2} = 0.1 \quad (27)$$

Συνήθως, το  $\hat{u}_d$  λαμβάνεται ως μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από του  $\hat{u}$ .

$$\frac{\bar{m}}{2} \left(\frac{\hat{u}_d}{\hat{u}}\right) \approx 0.1$$

Εισάγοντας τον όρο  $\zeta_e$  από την (24):

$$\bar{m} \approx 2\zeta_e \left( \frac{1}{\hat{u}_d/\hat{u}} \right)$$

Τέλος παίρνοντας για  $\hat{u}_d = 10\hat{u}$  έχουμε μια εκτίμηση για το  $\bar{m}$ :

$$\bar{m} = \frac{2(0.1)}{10} = 0.02$$

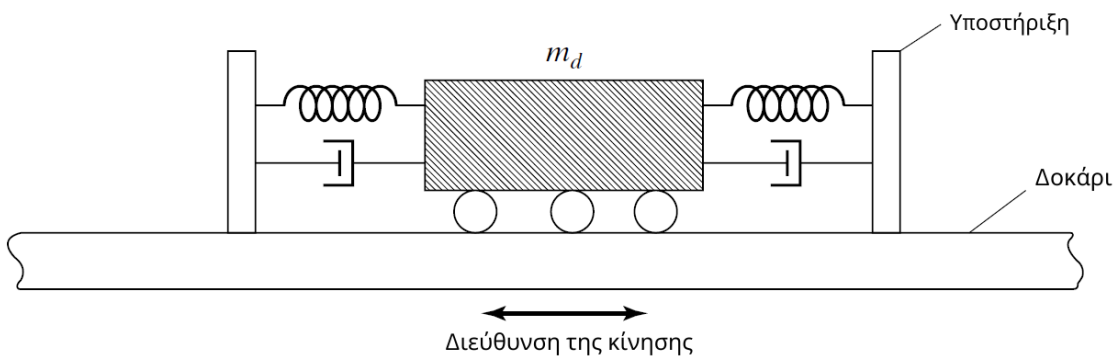
Μία τυπική δηλαδή τιμή για το  $\bar{m}$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι:

$$\zeta_d = \frac{1}{2} \left( \frac{\hat{u}}{\hat{u}_d} \right) = 0.05$$

και:

$$k_d = mk = 0.02k$$

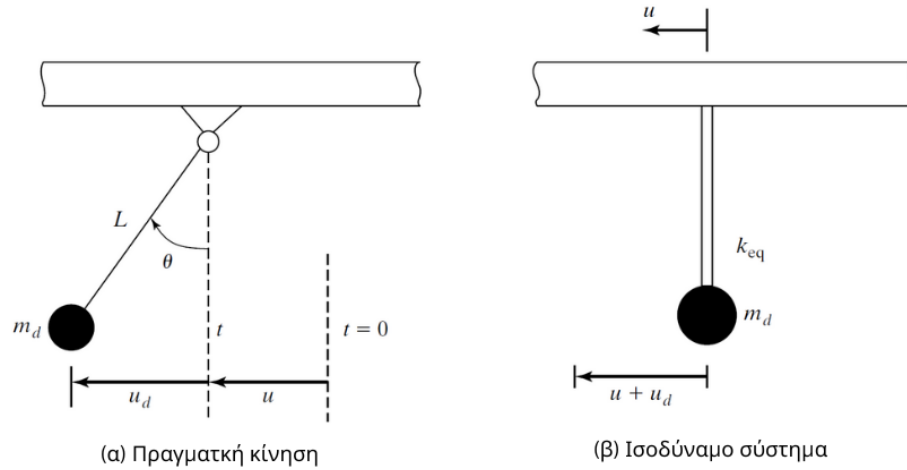
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι με την προσθήκη μόνο 2% της πρωτογενούς μάζας, λαμβάνουμε έναν αποτελεσματικό λόγο απόσβεσης της τάξης του 10%. Το αρνητικό σε αυτή την περίπτωση είναι το μέγεθος της σχετικής μετατόπισης της μάζας του αποσβεστήρα με την κύρια μάζα όπου το πήραμε να είναι 10 φορές μεγαλύτερη. Το πως μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτή η κίνηση προσαρμοσμένη σε ένα κτήριο φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2

Τα προβλήματα που σχετίζονται με τα έδρανα μπορούν να εξαλειφθούν με τη στήριξη της μάζας με καλώδια που επιτρέπουν στο σύστημα να συμπεριφέρεται ως εκκρεμές. Το Σχήμα 3(a) δείχνει ένα απλό εκκρεμές συνδεδεμένο σε ένα δάπεδο. Η κίνηση του δαπέδου διεγείρει το

εκκρεμές. Η σχετική κίνηση του εκκρεμούς παράγει μια οριζόντια δύναμη που αντιτίθεται στην κίνηση του δαπέδου. Αυτή η δράση μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ισοδύναμο σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας που είναι προσαρτημένο στο δάπεδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3(β).



(Σχήμα 3 α/β)

Η εξίσωση κίνησης για την οριζόντια κατεύθυνση είναι:

$$T \sin \theta + \frac{W_d}{g} (\ddot{u} + \ddot{u}_d) = 0 \quad (28)$$

όπου  $T$  τάση του καλωδίου. Όταν  $\theta \ll 1$ , ακολουθούμε τις ακόλουθες παραδοχές:

$$u_d = L \sin \theta \approx L\theta \quad (29)$$

$$T \approx W_d \quad (30)$$

Εισάγοντας τις παραδοχές στη σχέση (28):

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{W_d}{L} u_d = -m_d \ddot{u} \quad (31)$$

Ακολουθώς το ισοδύναμο μέτρο στιβαρότητας είναι:

$$k_{eq} = \frac{W_d}{L} \quad (32)$$

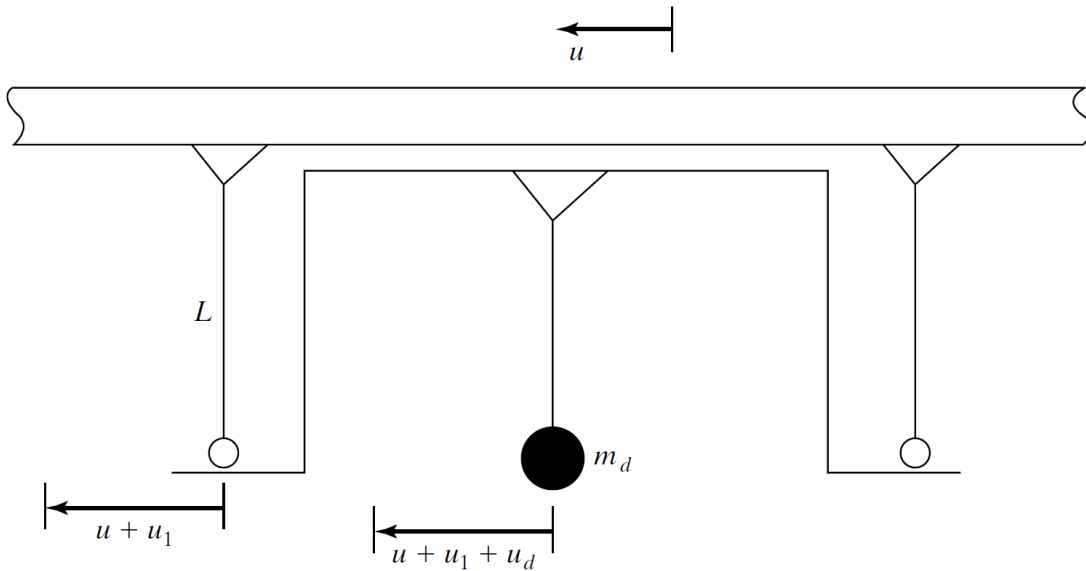
Ενώ η φυσική συχνότητα του εκκρεμούς εκφράζεται ως:

$$\omega_d^2 = \frac{k_{eq}}{m_d} = \frac{g}{L} \quad (33)$$

Αντίστοιχα η φυσική περίοδος του εκκρεμούς είναι:

$$T_d = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (34)$$

Από την στιγμή που η συχνότητα (και η περίοδος) ταλάντωσης ενός εκκρεμούς εξαρτάται μόνο από το μήκος του κέντρου μάζας του, από το σημείο περιστροφής του, διατρέχει σε πρακτικές εφαρμογές έναν σχεδιαστικό κίνδυνο. Όταν μία κατασκευή και συγκεκριμένα ένα πολυόροφο κτίριο απαιτεί μεγάλη περίοδο (ή μικρή συχνότητα) από το εκκρεμές το μήκος του μπορεί να ξεπαιρνάει το τυπικό ύψος ενός ορόφου. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να εξαλειφθεί με την προσφυγή στο Σχήμα 4. Ο εσωτερικός άκαμπτος σύνδεσμος μεγεθύνει την κίνηση στήριξης για το εκκρεμές και οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας:



Σχήμα 4

$$m_d(\ddot{u} + \ddot{u}_1 + \ddot{u}_d) + \frac{W_d}{L} u_d = 0 \quad (35)$$

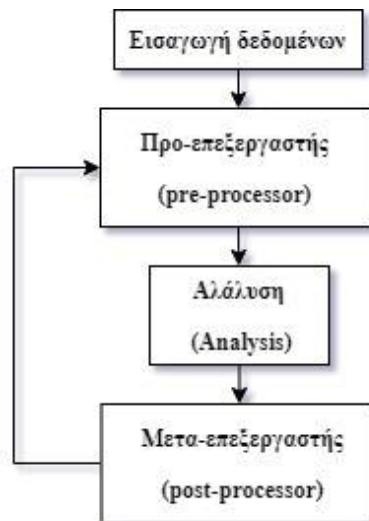
Ο άκαμπτος σύνδεσμος κινείται σε φάση με τον αποσβεστήρα και έχει το ίδιο πλάτος μετατόπισης. Τότε, για  $u_d = u_1$  στην εξίσωση (35) οδηγεί στην εξίσωση:

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{W_d}{2L} u_d = -\frac{m_d}{2} \ddot{u} \quad (36)$$

Το ισοδύναμο μέτρο στιβαρότητας είναι  $W_d/2L$ , και έτσι το πρακτικό ύψος είναι ίσο με  $2L$ . Κάθε επιπρόσθετος σύνδεσμος αυξάνει το πρακτικό ύψος του εκκρεμούς κατά  $L$ .<sup>[14]</sup>

## 2.4 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι μια ισχυρή αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται για την εύρεση προσεγγιστικών λύσεων σε πολύπλοκα μηχανικά και μαθηματικά προβλήματα. Χρησιμοποιείται εκτενώς σε προβλήματα δομικής ανάλυσης, μεταφοράς θερμότητας, ρευστοδυναμικής και ηλεκτρομαγνητικού δυναμικού. Η δομή ενός λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται στην εικόνα (8).

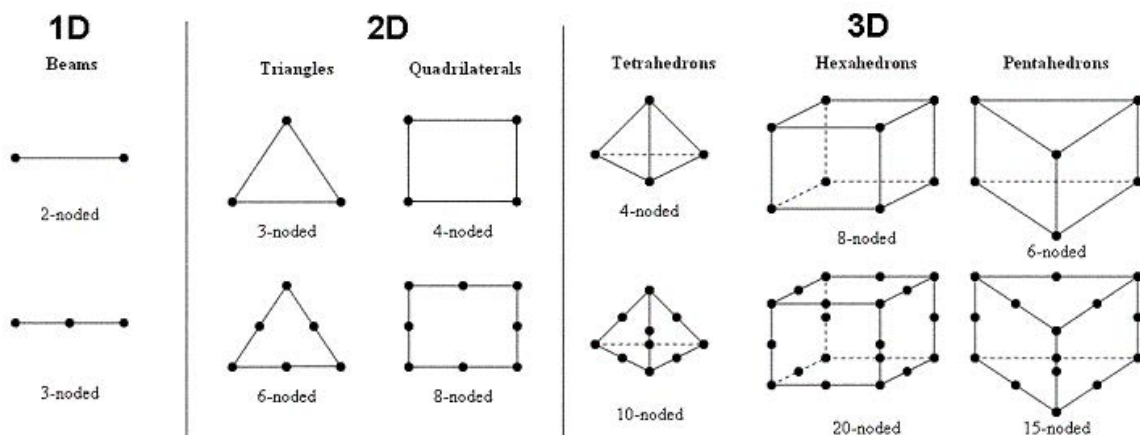


Εικόνα 8: Διάγραμμα ροής λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων

Η FEM περιλαμβάνει την υποδιαίρεση ενός μεγάλου συστήματος σε μικρότερα, απλούστερα μέρη, γνωστά ως πεπερασμένα στοιχεία. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να αναλυθούν και να επιλυθούν μεμονωμένα και οι λύσεις τους συγκεντρώνονται για να δώσουν μια προσεγγιστική λύση για ολόκληρο το πρόβλημα<sup>[15]</sup>. Οι τύποι των στοιχείων χωρίζονται βάση τον αριθμό διαστάσεών τους, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 9*

- Μονοδιάστατα: Η χρήση τους περιορίζεται σε περιπτώσεις δοκαριών ή αντίστοιχης αναλογίας μήκους/επιφάνεια διατομής.
- Δισδιάστατα: Γνωστά και ως επιφανειακά, μπορούν επαρκώς να περιγράψουν γεωμετρίες όπου ο λόγος επιφάνειας/πάχους είναι πολύ υψηλός.

- Τρισδιάστατα: Ή αλλιώς χωρικά, χρησιμοποιούνται κατά κόρων όταν οι προηγούμενοι δύο τύποι δεν επαρκούν να περιγράψουν το πρόβλημα.



Εικόνα 9: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων

Τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ένας μηχανικός-αναλυτής, σε οποιαδήποτε λογισμικό είναι τα ακόλουθα:

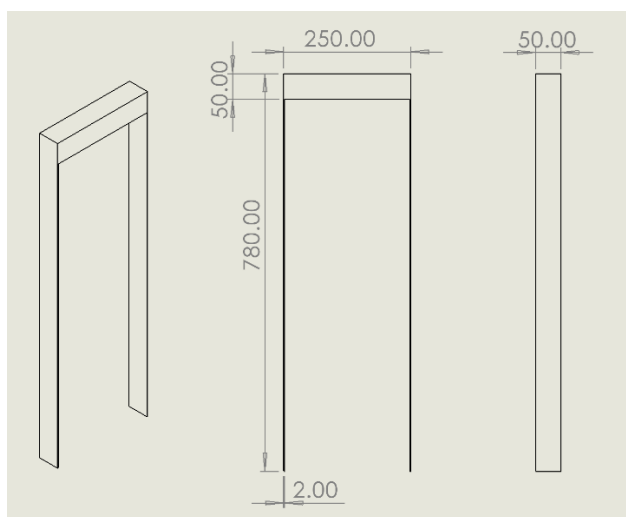
1. Εισαγωγή γεωμετρίας: Σχέδιο που έχει παραχθεί από λογισμικό τύπου CAD, σκαναρισμένη γεωμετρία με κάμερες τύπου LIDAR, κλπ
2. Διακριτοποίηση: Εδώ βάση της γεωμετρίας γίνεται επιλογή του κατάλληλου στοιχείου με το οποίο θα κατακερματιστεί.
3. Δημιουργία πλέγματος: Το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων θα αναπαριστούν επαρκώς το πρόβλημα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων τόσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, και έτσι έναντι υπολογιστικού κόστους αποκτούμε μεγαλύτερη ακρίβεια.
4. Επιλογή υλικού: Προσδιορίζονται οι ιδιότητες των υλικών (πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, κλπ) που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο.
5. Ορισμός οριακών συνθηκών: Καθορίζονται οι οριακές συνθήκες που διέπουν την προσομοίωση.
6. Επιλογή τύπου ανάλυσης: Ανάλογα με το ζητούμενο, εφαρμόζονται διαφορετικές λύσεις είτε στο πεδίο της συχνότητας είτε στο πεδίο του χρόνου.
7. Ερμηνεία αποτελεσμάτων: Παραγωγή γραφημάτων και ερμηνεία αυτών.

### 3. Μεθοδολογία

Στο παρών κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα ενός TMD. Στήνονται δύο διαφορετικά μοντέλα κάνοντας χρήση του λογισμικού SOLIDWORKS για το σχέδιο της γεωμετρίας και του λογισμικού Altair HyperWorks (με solver Optistruct) για την επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων. Από την σκοπιά των οριακών συνθηκών πρόκειται για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις.

#### 3.1 1<sup>η</sup> Περίπτωση: Πειραματική διάταξη

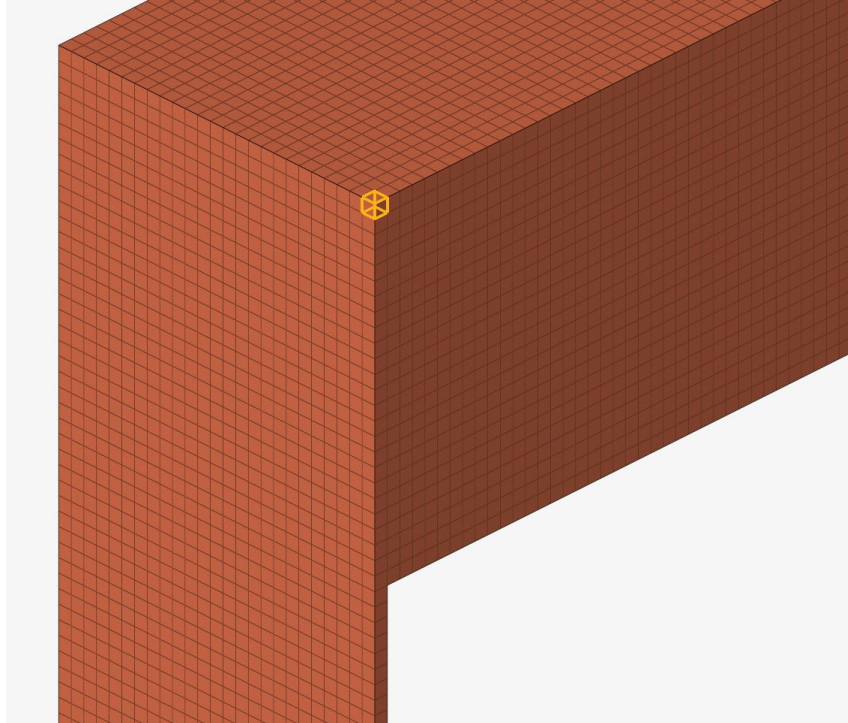
Συχνά, σε πειραματικές διατάξεις επίδειξης της χρήσης του TMD, προτιμάται μία κατασκευή με ψηλό κέντρο βάρους σε σχήμα Π. Η κατασκευή αυτή αναπαριστά ένα ψηλό κτίριο και απαρτίζεται τόσο από κατακόρυφα στοιχεία που συμβολίζουν τις κολόνες ή τους τοίχους του κτιρίου όσο και από οριζόντια στοιχεία που συγκεντρώνουν τη μάζα του. Μία τέτοια διάταξη τείνει να ταλαντωθεί σε χαμηλές σχετικά συχνότητες ως προς έναν άξονα μετατόπισης. Ο άξονας αυτός είναι παράλληλα με τα οριζόντια στοιχεία και έτσι είναι εφικτό για τον παρατηρητή του πειράματος να διαπιστώσει εύκολα την εφαρμογή των TMD. Σε τέτοιες περιπτώσεις, καλό είναι ο μελετητής να θέσει εξ αρχής μία φυσική συχνότητα ως στόχο, καθώς αυτό θα καθορίσει γεωμετρικά το κατά πόσο είναι εφικτό να κατασκευαστεί σε περιβάλλον εργαστηρίου. Έτσι λοιπόν θέτοντας ως στόχο την πρώτη ιδιοσυχνότητα να είναι κοντά στα 1,3Hz , και επιλέγοντας ως υλικό τον χάλυβα (steel) καταλήγουμε στην ακόλουθη γεωμετρία.



Σχήμα 5: Αξονομετρικό, Πρόσοψη και πλαϊνή όψη γεωμετρίας. Οι μονάδες μέτρησης είναι σε mm



Εισάγοντας την παραπάνω γεωμετρία στο λογισμικό HyperWorks, επιλέγουμε την χρήση των τρισδιάστατων στοιχείων για την διακριτοποίηση. Συγκεκριμένα εξάεδρα (hexahedrons, βλ. *Εικόνα 9*), διάστασης 2mm.



*Εικόνα 10: Το πλέγμα (mesh)*

Στην συνέχεια, φτιάχνουμε τις κατάλληλες καρτέλες για να εκφράσουμε τις ιδιότητες των στοιχείων (Properties → PSOLID). Το πεδίο που μας ενδιαφέρει είναι αυτό του υλικού (Material). Έτσι θα χρειαστεί να φτιάξουμε και την καρτέλα του υλικού (MAT1). Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για το μέτρο ελαστικότητας E, μέτρο διάτμησης G, λόγος Poisson NU, και πυκνότητας RHO είναι οι ακόλουθες:

Defined:	<input checked="" type="checkbox"/>
Card Image:	MAT1
User Comments:	Hide In Menu/E...
E:	210000.0
G:	80769.2
NU:	0.3
RHO:	7.85e-09

*Εικόνα 11: Ιδιότητες χάλυβα*

Να σημειωθεί ότι στο παρόν μοντέλο οι μονάδες μέτρησης έχουν παρθεί ως:

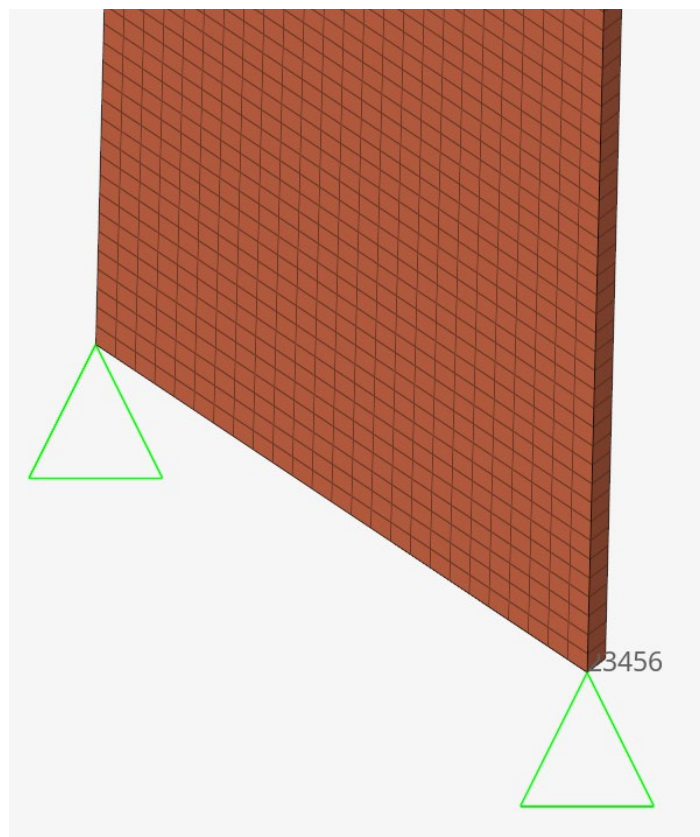
- Μάζα σε Megagrams
- Απόσταση σε mm

Ενδεικτικά οι τιμές της κατασκευής για τον όγκο και την μάζα είναι:

Volume: 771000.00

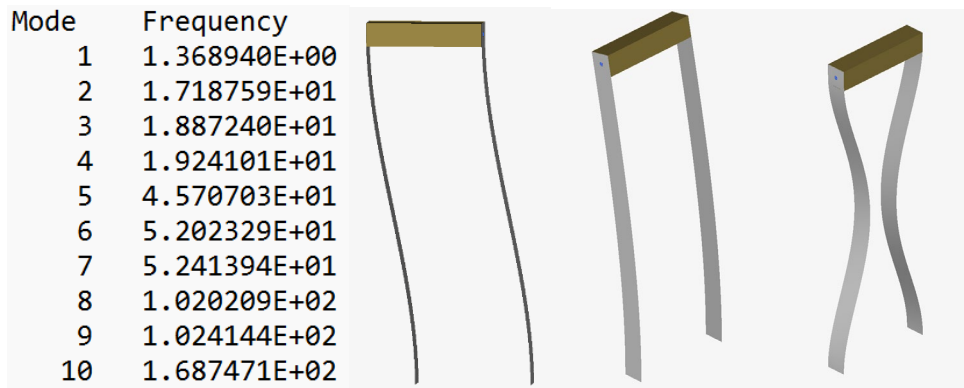
Mass: 6.05e-03

Εν συνεχεία ορίζουμε τις οριακές συνθήκες. Όπως σε ένα κτίριο δημιουργούμε πακτώσεις στην βάση της κατασκευής.



Εικόνα 12: BCs με όλους τους βαθμούς ελευθερίας κλειδωμένους

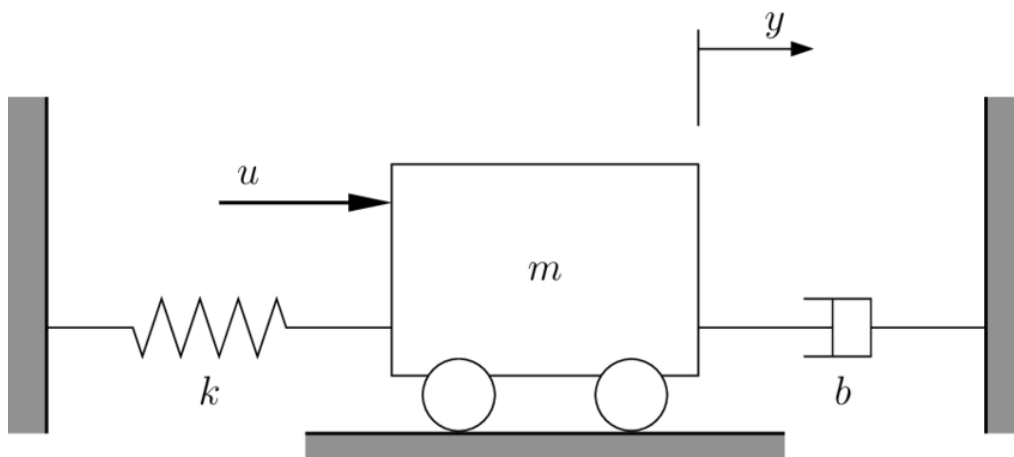
Είμαστε σε θέση να στήσουμε μία μελέτη ιδιομορφών (normal modes) για να επαληθεύσουμε τις αρχικές μας υποθέσεις στο σχέδιο. Οι πρώτες δέκα ιδιοτιμές είναι:



Εικόνα 13: Οι πρώτες 10 ιδιοσυχνότητες σε Hz και τα αντίστοιχα σχήματα στις 3 πρώτες

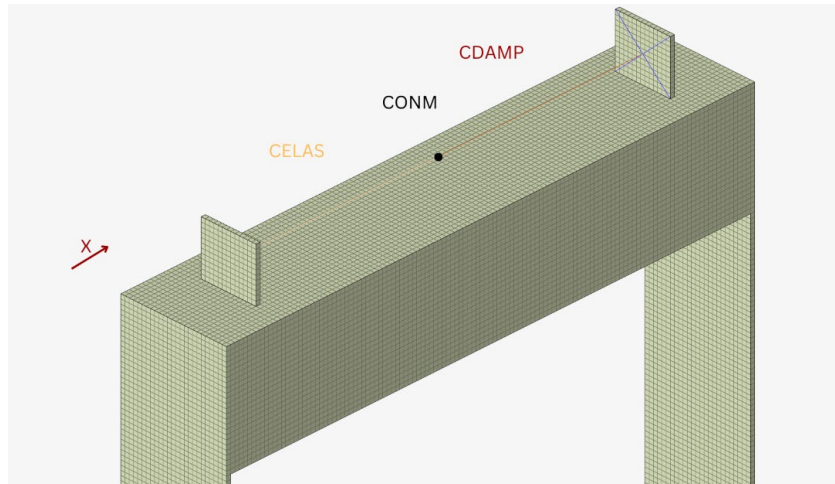
Σχόλιο: Πετύχαμε την πρώτη ιδιοσυχνότητα στα 1,37Hz.

Στην προκειμένη περίπτωση θα σχεδιάσουμε έναν συντονισμένο αποσβεστήρα μάζας σε διάταξη ελατήριο-μάζα-αποσβέστης.



Εικόνα 14: Διάταξη συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας

Η διάταξη αυτή θα τοποθετηθεί στο πάνω μέρος της κατασκευής εφόσον εκεί αναμένουμε και τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Σχεδιάζεται η υποστήριξη ενώ με στοιχεία ελατηρίου (CELAS) και αποσβέστη (CDAMP) συνδέουμε την επιπρόσθετη μάζα (σημειακή, CONM1) στην υπόλοιπη κατασκευή. Τα στοιχεία ελατηρίου και αποσβέστη περιορίζουν την κίνηση της επιπρόσθετης μάζας στον x άξονα.



Εικόνα 15: Σύνδεση επιπρόσθετης μάζας με την κόρια

Το μέτρο ελαστικότητας του ελατηρίου πάρθηκε  $K = 0.03987$  ενώ το  $B = 0,01$  ενώ η μάζα του ταλαντωτή είναι στο 10% της συνολικής.

Σκόπιμο είναι να θεωρηθεί και μία φυσική απόσβεση της κίνησης από την κατασκευή. Μία τυπική τιμή του λόγου απόσβεσης για μεταλλικές κατασκευές είναι 3%.

Εφόσον έχουμε επιτρέψει την κύλιση στον  $x$  άξονα και στις βάσεις, μπορούμε να διαταράξουμε την κατασκευή, με παρόμοιο τρόπο που θα διαταρασσόταν και πειραματικά. Στην προκειμένη περίπτωση επιβάλλεται κίνηση (SPCD) στις βάσεις της κατασκευής να κινηθούν κατά 25mm στην θετική πλευρά του  $x$  στα πρώτα 0,1 δευτερόλεπτα και να επιστρέψουν στην αρχική τους θέση στα επόμενα 0,2 δευτερόλεπτα. Αυτή η βίαιη διαταραχή θα διεγείρει την κατασκευή στην φυσική της ιδιοσυχνότητα.

### 3.2. 2<sup>η</sup> Περίπτωση: Πολυώροφο Κτίριο Υπό Διέγερση Ανέμου.

Στην περίπτωση που θέλουμε να μελετήσουμε ένα υπαρκτό κτίριο, θα χρειαστεί να αλλάξουμε κλίμακα και να αποτυπώσουμε με παραδοχές τα δομικά του στοιχεία και την κατανομή της μάζας του. Συνίσταται τις κολόνες και τα δοκάρια να παραστούν ως μονοδιάστατα στοιχεία (CBEAM), ενώ οι τοίχοι με δισδιάστατα (CQUAD4).

Σημαντικό είναι στην αποτύπωση ενός ψηλού κτιρίου, όπως ένα ουρανοξύστης 30 ορόφων, να δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στον πυρήνα του κτιρίου και το εξωτερικό περίβλημα.

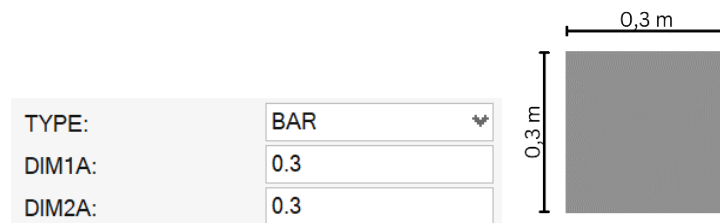
Για το υλικό των κολόνων και των δοκαριών χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν και στην 1<sup>η</sup> περίπτωση μόνο που οι τιμές αλλάζουν μιας και οι

μονάδες μέτρησης της απόστασης πλέον είναι σε m και η μάζα σε kg. Για τους τοίχους που απαρτίζουν τον πυρήνα του κτιρίου επιλέχθηκε τσιμέντο με τις αντίστοιχες ιδιότητες. Συγκεκριμένα οι τιμές στις καρτέλες των υλικών είναι:

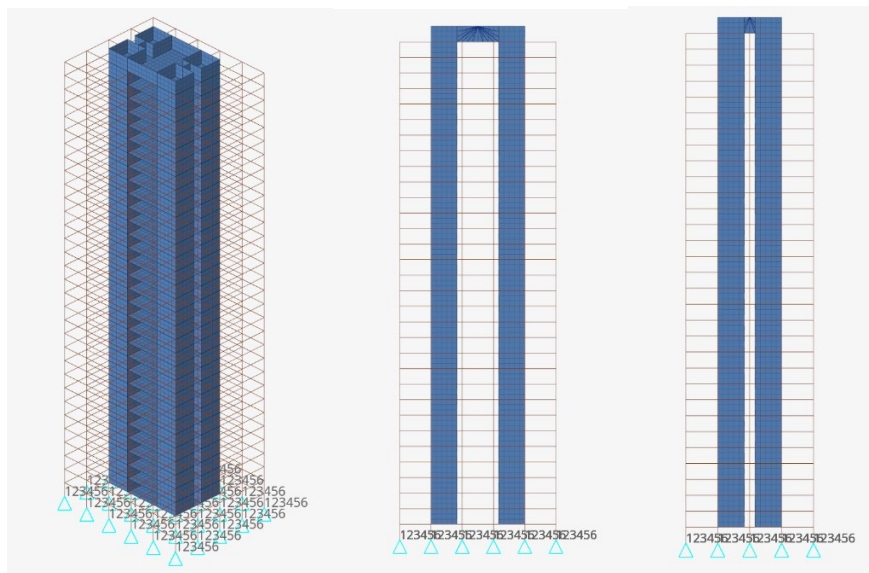
E:	210000000000	E:	22500000000
G:	80769230769.23	G:	
NU:	0.3	NU:	0.21
RHO:	7850.0	RHO:	2400.0

Εικόνα 16: Τιμές για τις ιδιότητες του χάλυβα (αριστερά) και του τσιμέντου (δεξιά)

Αφού επιλεγθούν τα υλικά μένει να εκφραστούν και οι κατάλληλες ιδιότητες των στοιχείων. Για την διακριτοποίηση των τοίχων του εσωτερικού πυρήνα, χρησιμοποιήθηκαν δισδιάστατα (PSHELL) επιφάνειας 1x1m και πάχους 0.2m. Για τα δοκάρια και τις κολόνες έγινε χρήση μονοδιάστατων (PBEAML) τετράγωνης διατομής (τύπου BAR) με επιφάνεια 0,3x0.3m.



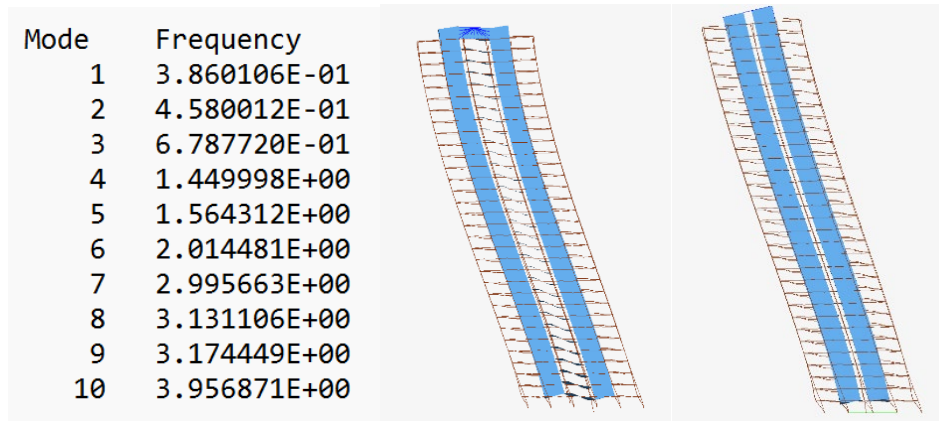
Εικόνα 17: Ιδιότητες (PBEAML) μονοδιάστατων στοιχείων



Εικόνα 18: Αξονομετρική, πρόσοψη και πλάγια όψη κτιρίου 30 ορόφων

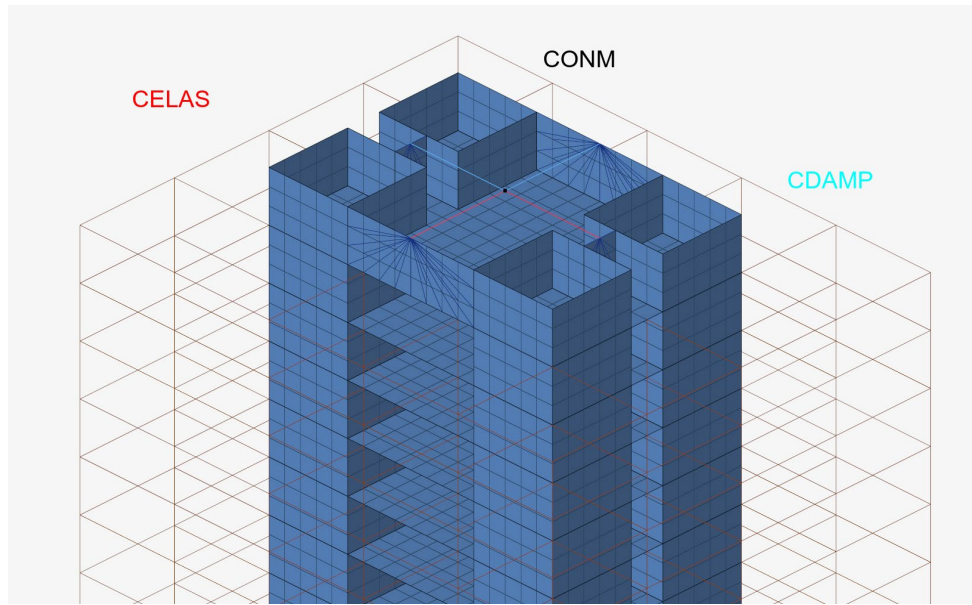
Η πρόσθετη μάζα του ταλαντωτή ορίζεται στο 5% της κύριας. Εδώ να σημειωθεί ότι με την πρόσθεση της έξτρα μάζας μένεται να αλλάξει η πρώτη ιδιοσυχνότητα και συγκεκριμένα να μειωθεί. Επομένως, για την βέλτιστη σχεδίαση του TMD καλό θα είναι να προστεθεί εξ αρχής και να συνδεθεί με την κύρια μάζα, με αβαρείς και άκαμπτους συνδέσμους (RBE2) προτού προβούμε στην ανάλυση των ιδιομορφών. Όπως και στην πρώτη περίπτωση η έξτρα μάζα θα συνδεθεί πάνω από τον τελευταίο όροφο χρησιμοποιώντας ως στήριξη την ίδια γεωμετρία του κτιρίου. Στο παρών μοντέλο θα εξετάσουμε την απόκρισή του σε δύο σενάρια ανέμου, το ένα στην κατεύθυνση του x και το άλλο στην κατεύθυνση του y. Λόγω της ασυμμετρίας του κτιρίου περιμένουμε διαφορετικές ιδιοτιμές για την πρώτη ιδιοσυχνότητα στην κάθε περίπτωση.

Λύνοντας το ιδιοπρόβλημα παίρνουμε τις ακόλουθες τιμές με τα αντίστοιχα σχήματα:



Εικόνα 19: Οι πρώτες 10 ιδιομορφές και τα σχήματα που αντιστοιχούν στις 2 πρώτες.

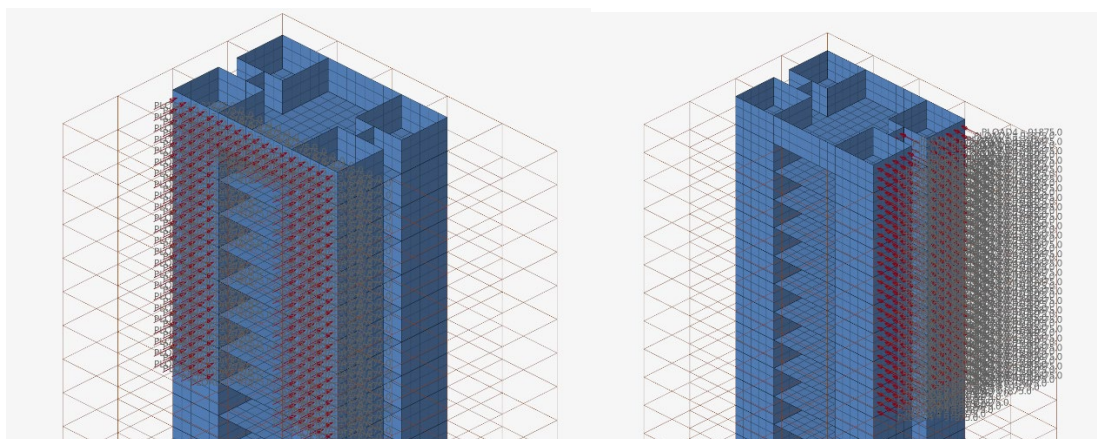
Παρατηρούμε ότι οι δύο πρώτες ιδιομορφές βρίσκονται περίπου στα 0,39Hz και στα 0,46Hz με καμπτική συμπεριφορά ως προς τον x και y αντίστοιχα.



Εικόνα 20: Σύνδεση πρόσθετης μάζας στην κύρια

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για τα ελατήρια είναι  $K = 4910232,1$  για το  $x$  και  $K = 3848685,9$  για την διεύθυνση του  $y$ . Το μέτρο απόσβεσης είναι  $B = 358104,7$

Τη ρυπή αέρα θα την αναπαραστήσουμε με μία επιφανειακή πίεση (PLOAD). Θα αρχίσει να ασκείται το 1<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο θα κλιμακωθεί στο 2<sup>ο</sup> και θα ξαναμηδενίσει γραμμικά στο 3<sup>ο</sup>. Το σημείο άσκησης αυτής της πίεσης θα είναι στους τελευταίους ορόφους του κτιρίου, μιας και η ταχύτητα του ανέμου είναι αναλογική με το υψόμετρο, συνεπώς και περιμένουμε εκεί τις μεγαλύτερες δυνάμεις.



Εικόνα 21: Η κατανομή της πίεσης στον  $x$  (αριστερά) και στον  $y$  (δεξιά)

Κρατώντας τις βάσεις κλειδωμένες (SPCs) ως προς όλους του βαθμούς ελευθερίας είμαστε σε θέση να τρέξουμε ανάλυση απόκρισης στο φάσμα του χρόνου, υποθέτοντας και εδώ ένα

συνολικό μέτρο απόσβεσης (TABDMP1) για ολόκληρη την κατασκευή στο 3% της κρίσιμης (CRIT).

### 3.3 3<sup>η</sup> Περίπτωση: Πολυώροφο κτίριο υπο διέγερση σεισμού

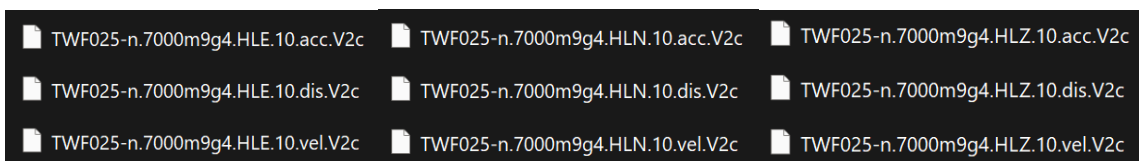
Το μοντέλο αυτής της περίπτωσης δεν διαφέρει σε τίποτα από την προηγούμενη με εξαίρεση τις οριακές συνθήκες. Μέχρι στιγμής η διέγερση συμβαίνει μόνο σε έναν άξονα. Εδώ θα δοκιμαστεί η κατασκευή με διέγερση στο επίπεδο.

Για τα στοιχεία της μετατόπισης της βάσης, θα πρέπει να ανατρέξουμε σε καταγεγραμμένους σεισμούς με τα αντίστοιχα επιταχυνσιογραφήματα. Ενδεικτικά πηγές τέτοιων δεδομένων, αποτελούν οι παρακάτω φορείς:

- PEER Ground Motion Database
- COSMOS Virtual Data Center
- USGS Earthquake Hazards Program
- EMSC

Για την συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του σεισμού που σενέβησε στις 3 Απριλίου 2024, στις 07:58:11 NST (23:58:11 UTC στις 2 Απριλίου), 15 χιλιόμετρα νότια της πόλης Χουαλιέν, στην Ταϊβάν. Η δύναμη του σεισμού καταγράφηκε στα Mw 7,4 και δυστυχώς, τουλάχιστον 18 άνθρωποι σκοτώθηκαν και πάνω από 1.100 τραυματίστηκαν από τον σεισμό. Είναι ο ισχυρότερος σεισμός στην Ταϊβάν από τον σεισμό Τζίτζι του 1999, με τρεις μετασεισμούς άνω των Mw 6,0.

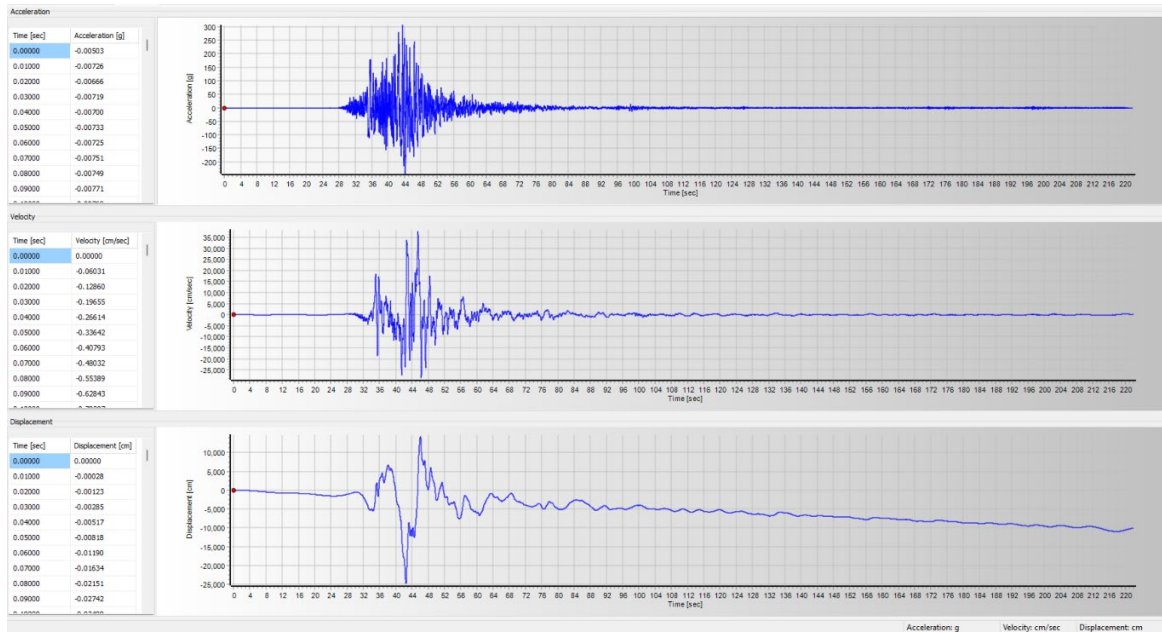
Η πηγή των δεδομένων ήταν η ιστοσελίδα του EMSC<sup>[9]</sup>. Η μορφή του αρχείου ήταν ένα .zip και αν κανείς το ανοίξει διαπιστώνει ότι έχει στα χέρια του μια πληθώρα αρχείων. Τα αρχεία αυτά συχνά θα είναι είτε .V2c ή .V3c, και η διαφορά τους έγκυται στο κατά πόσο έχουν επεξεργαστεί. Στα αρχεία .V2c βρίσκουμε τα δεδομένα για την επιτάχυνση (.acc), την μετατόπιση (.dis) και την ταχύτητα (.vel) ενώ τα γράμματα E, N και Z καθορίζουν τον προσανατολισμό του σειсмоγράφου. Το E σημαίνει ότι η καταγραφή γίνεται στον άξονα Ανατολή-Δυση, το N στον Βορά-Νότο και το Z στην κατακόρυφη διεύθυνση.



Εικόνα 22: Ονομασία αρχείων .V2c



Αν κανείς τα ανοίξει ως text αρχεία μπορεί να διαπιστώσει εύκολα σε τι μορφή έχει τις τιμές αλλά και την εκάστοτε διακριτοποίηση αυτών. Συνίσταται η χρήση του λογισμικού Seismosoft για περαιτέρω επεργασία.

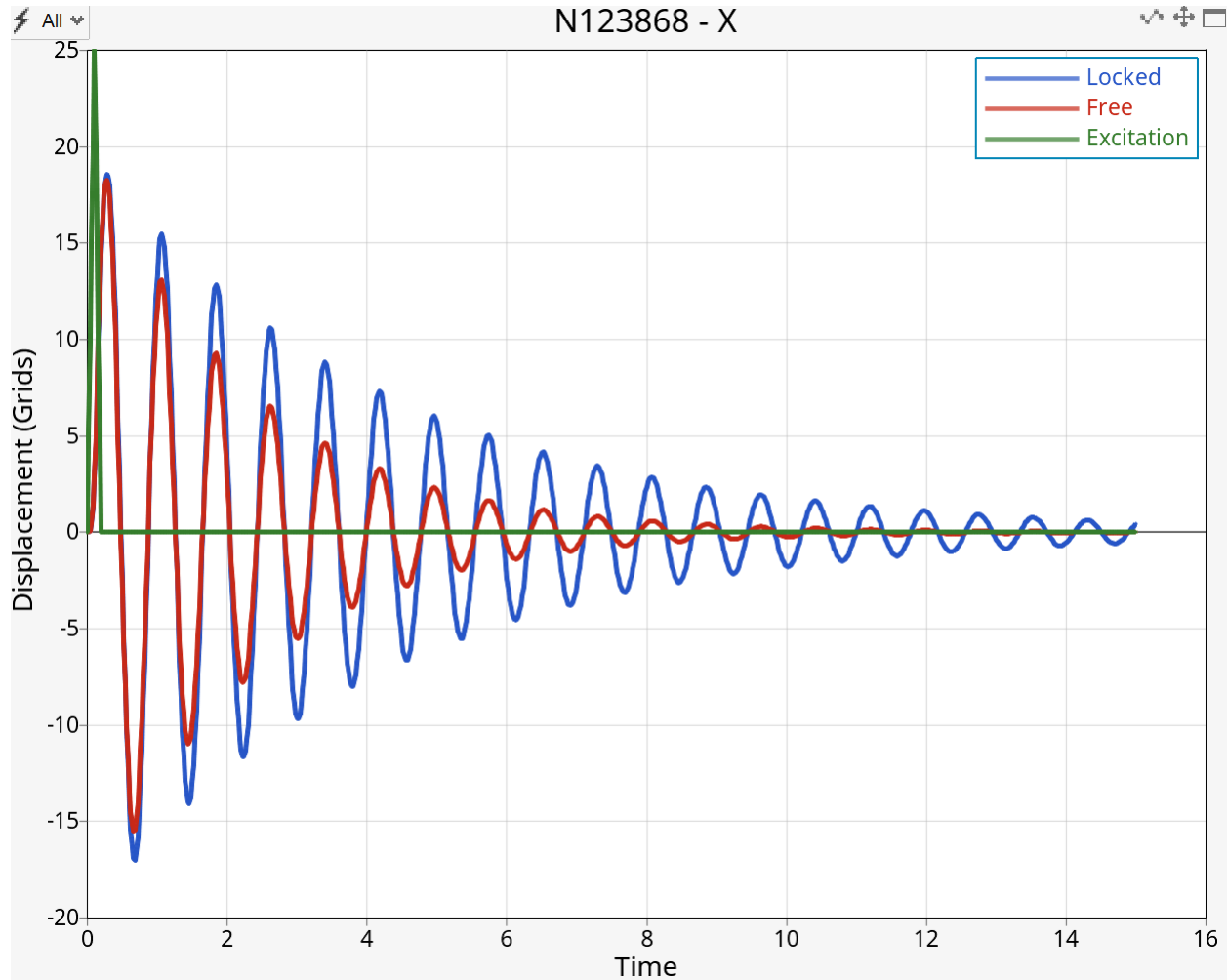


Εικόνα 23: Επιταχυνσιογράφημα στον άξονα Ανατολή-Δύση μέσω του λογισμικού Seismosoft

## 4. Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις απόκρισης που διεξήχθησαν στο φάσμα του χρόνου. Σε κάθε περίπτωση, παρατίθενται γραφήματα που δείχνουν την μετατόπιση ενός σημείου της εκάστοτε κατασκευής, με τον ταλαντωτή σε ανενεργή (Locked) και ενεργή (Free) κατάσταση. Επίσης φαίνονται και στιγμιότυπα της ανάλυσης σε διάφορες χρονικές στιγμές. Τέλος γίνεται πρόταση για περαιτέρω έρευνα πάνω στο θέμα.

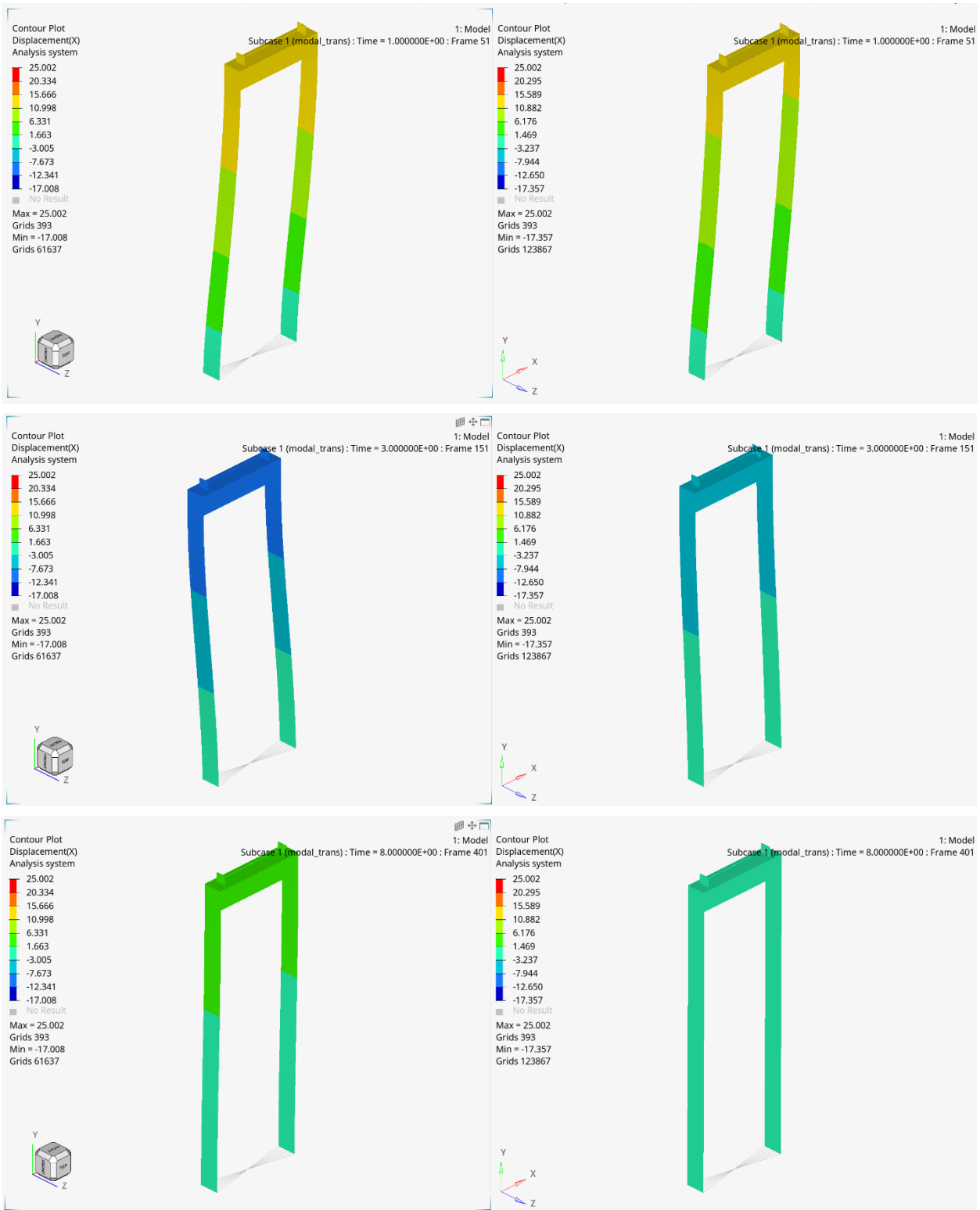
## 4.1 1<sup>η</sup> Περίπτωση



Εικόνα 24: Γράφημα Μετατόπισης/Χρόνου για το node 61596 στον x άξονα

Στο παραπάνω γράφημα βλέπουμε την απόκριση του συστήματος με την μάζα του συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας (TMD) να μην μπορεί να κινηθεί με το μπλε χρώμα ενώ με κόκκινο να μπορεί. Με το πράσινο είναι η διέγερση εδάφους. Είναι σαφές ότι ο συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας που σχεδιάσαμε λειτουργεί και μειώνει αισθητά την ταλαντωτική κίνηση καθώς το σύστημα επιστρέφει στην ισορροπία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν βλέπουμε αισθητή μείωση στο μέγιστο πλάτος μετατόπισης, γεγονός που δικαιολογείται αν αναλογιστεί κανείς ότι και η μάζα του ταλαντωτή ξεκινά από την ηρεμία. Αυτό σημαίνει ότι στην πρώτη κάμψη του κτιρίου, ο TMD δεν καταφέρνει να έχει επίδραση στο υπόλοιπο κτίριο μιας και δεν έχει προλάβει να βρεθεί εκτός φάσης με αυτό.

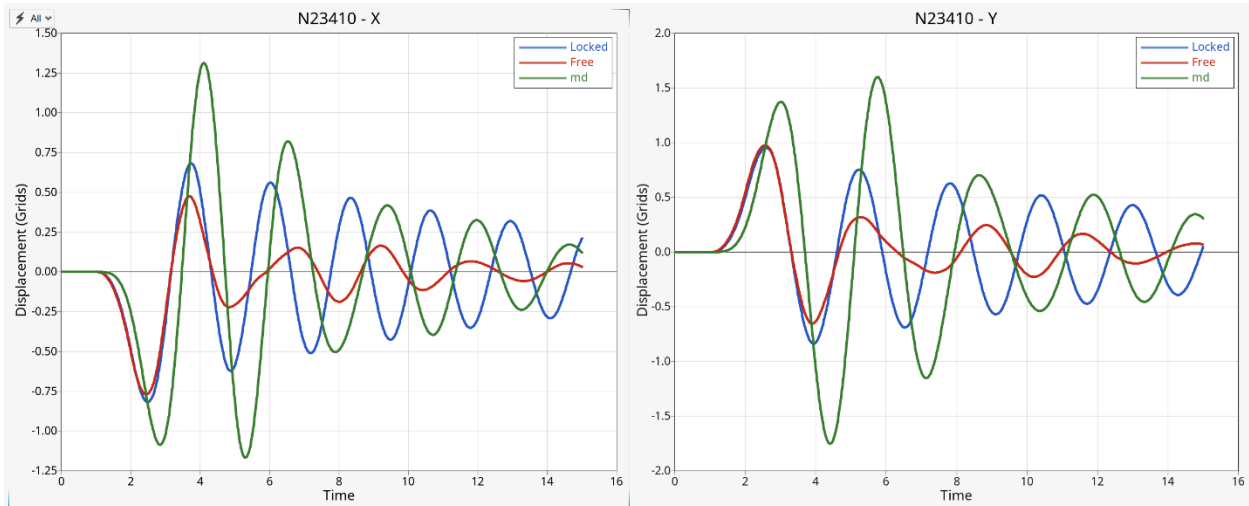


Εικόνα 25: Στιγμιότυπα στα 1, 3, και 8 δευτερόλεπτα.

Στην Εικόνα 25 η απεικόνιση της παραμόρφωσης είναι μεγεθυμένη με συντελεστή 5. Ο χρόνος επιστροφής σε αποδεκτά επίπεδα ηρεμίας ( $disp < 1mm$ ) στην ενεργή περίπτωση είναι 9s

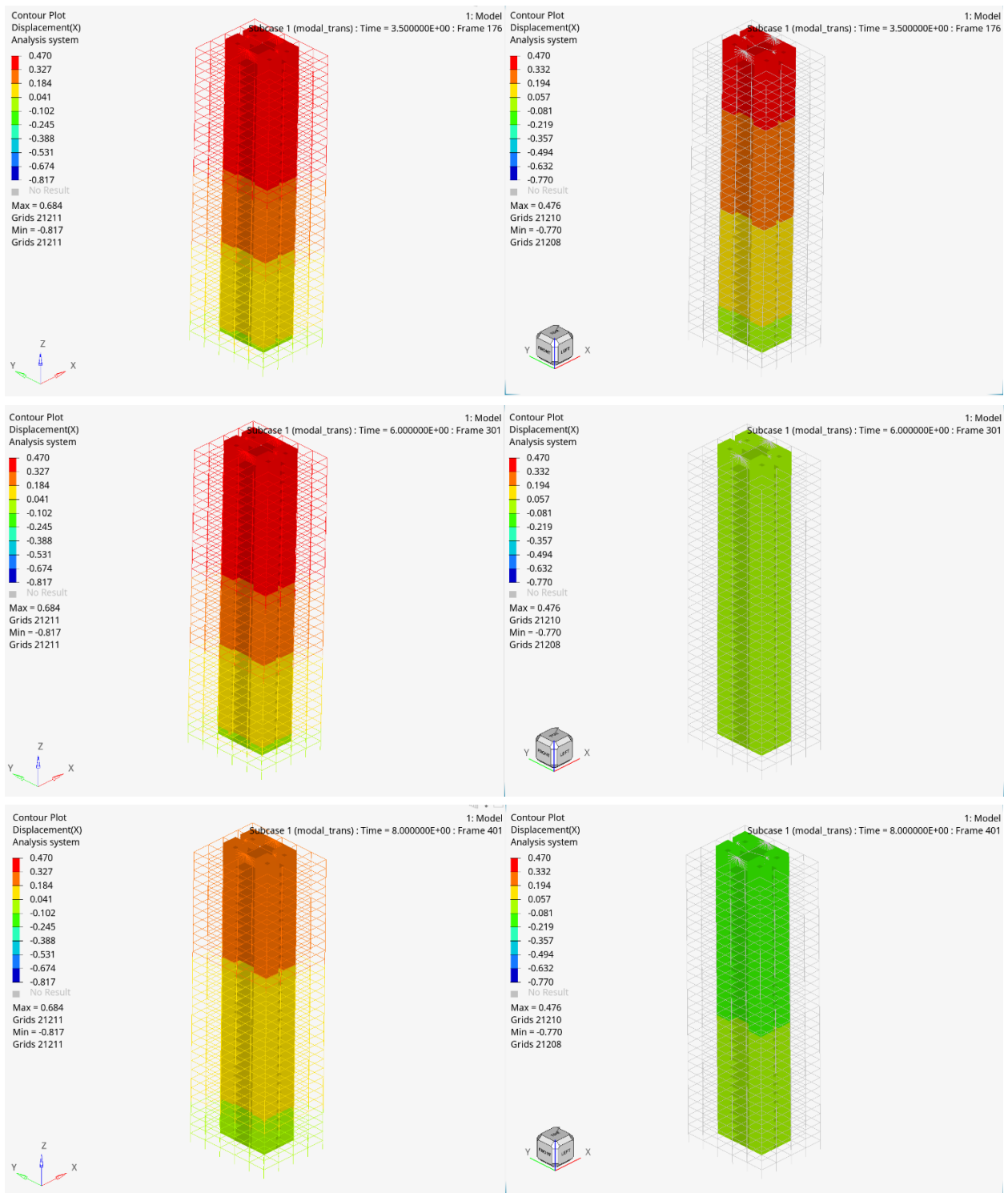
ενώ για την ανενεργή 15s. Εκεί φαίνεται και η αξία ενός τέτοιου παθητικού συστήματος απόσβεσης ταλαντώσεων σε υψηλές κατασκευές.

## 4.2 2<sup>η</sup> Περίπτωση

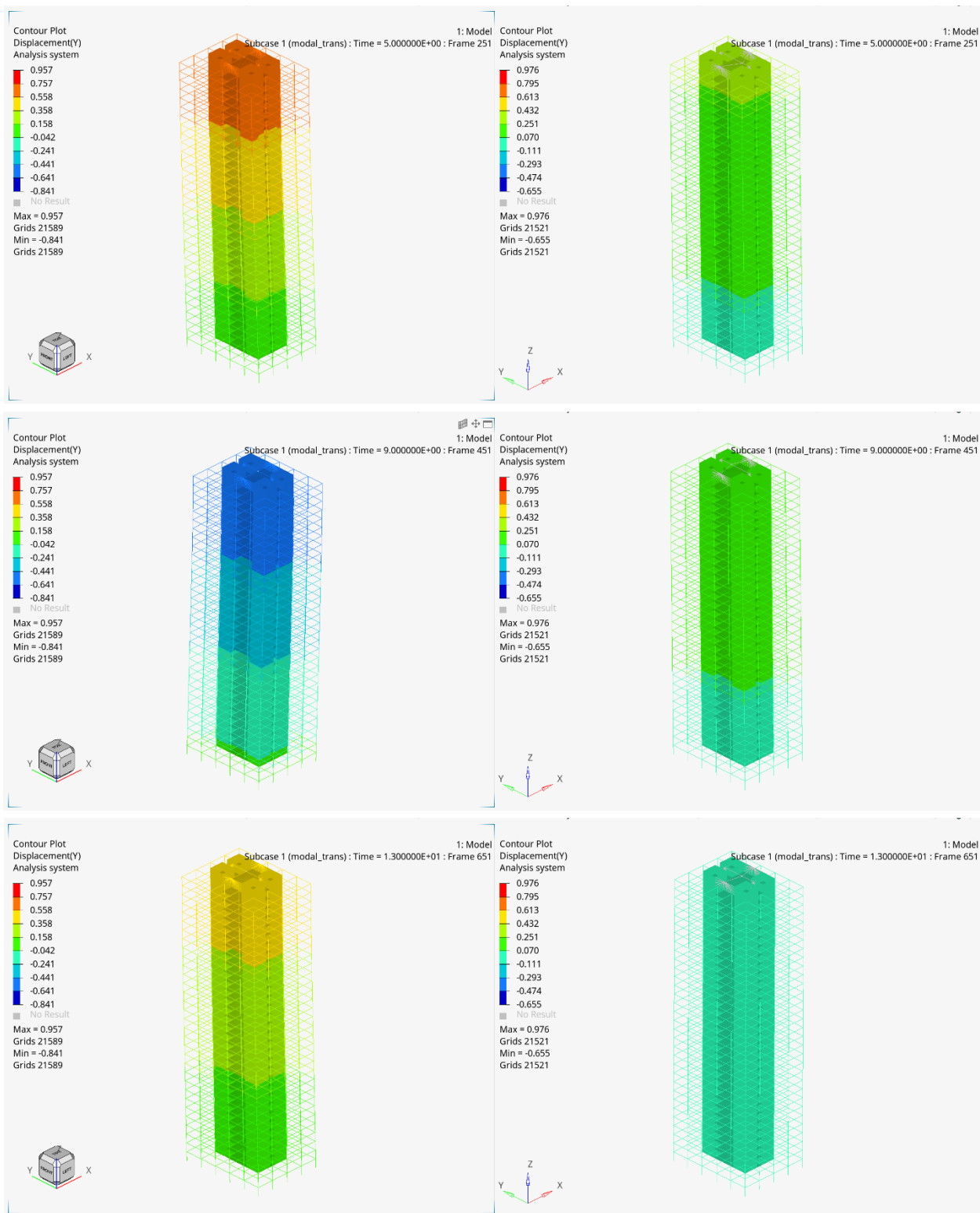


Εικόνα 26: Γράφημα Μετατόπισης/Χρόνου για το στον x άξονα (αριστερά) και y (δεξιά)

Στην Εικόνα 26 βλέπουμε τα γραφήματα μετατόπισης/χρόνου, στον x και y άξονα. Όπως και στην 1<sup>η</sup> περίπτωση έτσι και εδώ, είναι εμφανές ότι ο συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας έχει ρυθμιστεί επαρκώς για την απόσβεση της ταλάντωση που βιώνει το πολυώροφο κτίριο. Στο συγκεκριμένο γράφημα παρατηρούμε και την κίνηση της μάζας του TMD με το πράσινο χρώμα, και πως βρίσκεται εκτός φάσης με την κύρια μάζα στην ανενεργή (Locked) περίπτωση.



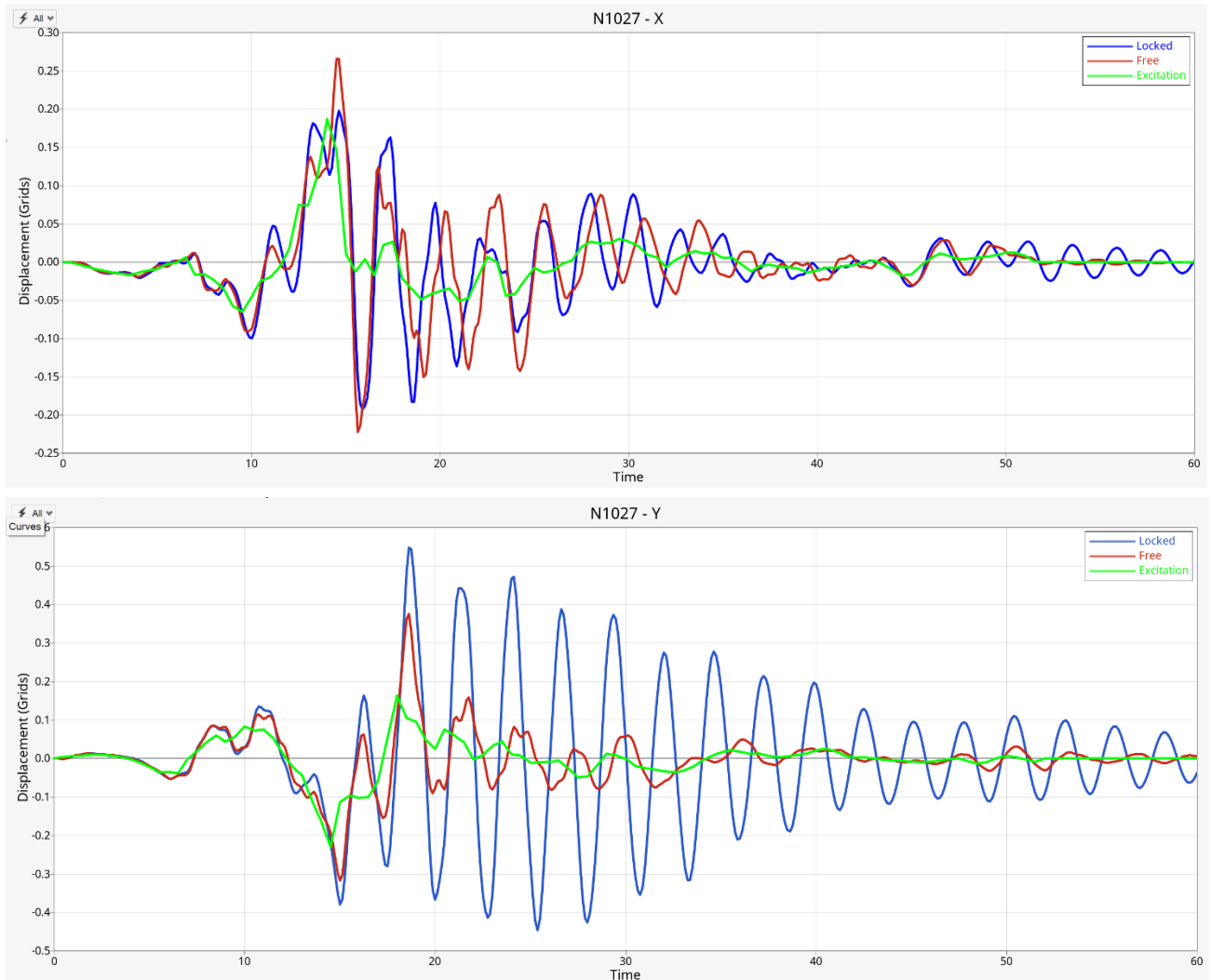
Εικόνα 27: Στιγμιότυπα στα 3,5 , 6 , και 8 δευτερόλεπτα για μετατόπιση στον x.



Εικόνα 28: Στιγμιότυπα στα 5, 9, και 13 δευτερόλεπτα για μετατόπιση στον y.

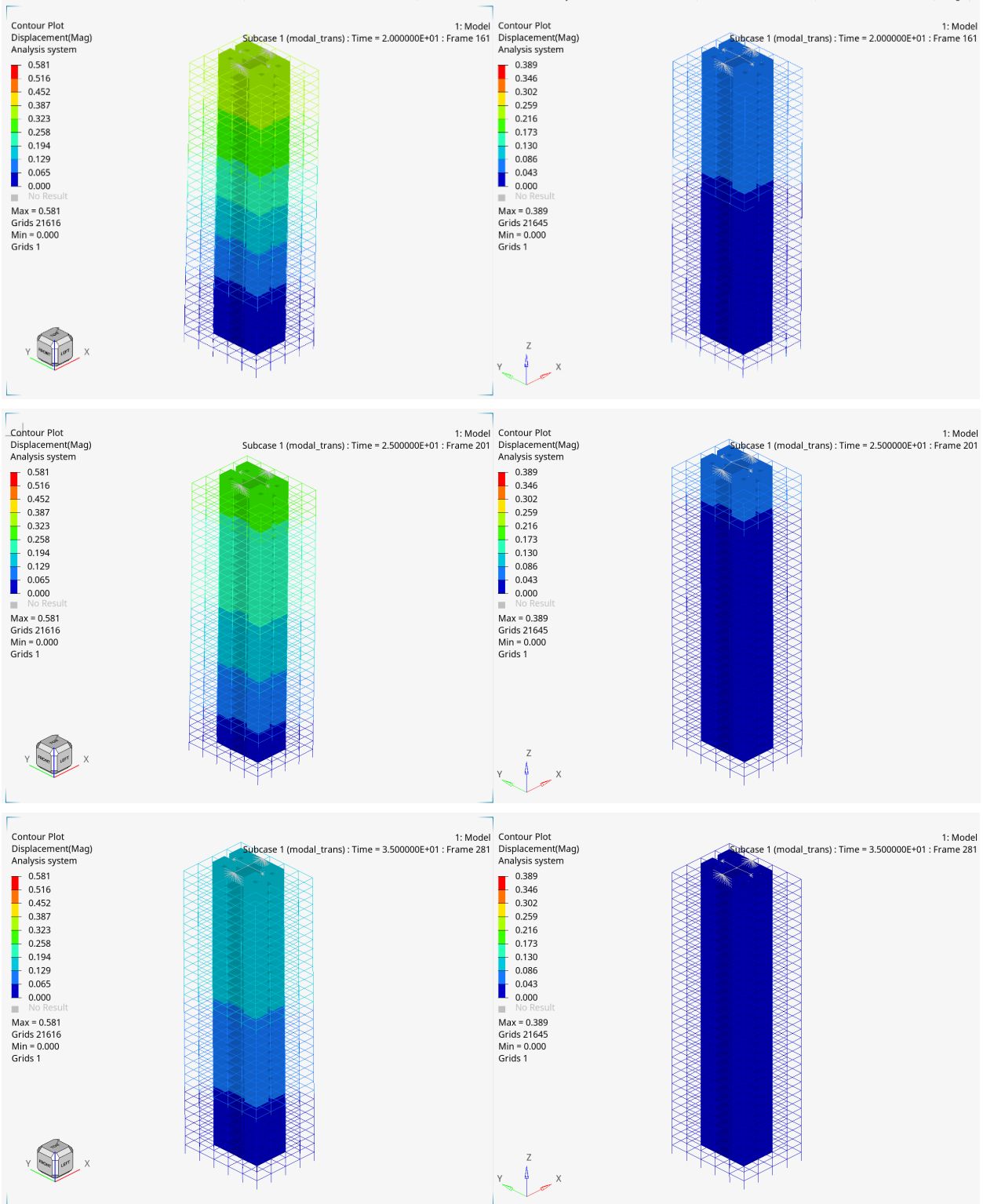
Σε κάθε περίπτωση, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 25 & 26 το κτίριο με το ενεργό TMD (δεξιά) βιώνει μικρότερες μετατοπίσεις σε σχέση με την ανενεργή περίπτωση (αριστερά).

### 4.3 3<sup>η</sup> Περίπτωση



Εικόνα 27: Γράφημα Μετατόπισης/Χρόνου από διέγερση στον x άξονα (πάνω) και y (κάτω)

Στην Εικόνα 29 , μπορούμε να δούμε την μετατόπιση σημείου στο ανώτατο επίπεδο του πολυώροφου κτιρίου σε ενεργή (κόκκινο) και ανενεργή (μπλε) κατάσταση του TMD και την διέγερση του σεισμού (πράσινο). Παρατηρούμε ότι ως προς τον άξονα y ο TMD αποδίδει περισσότερο. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η διέγερση από τον σεισμό σε αυτόν τον άξονα εμπεριέχει συχνότητες κοντύτερα στην ιδιοσυχνότητα του κτιρίου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται φαινόμενα συντονισμού, όπου και ο συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας τα εξουδετερώνει. Ακόμη και στον x άξονα πάντως η λειτουργία του γίνεται εμφανής στα τελευταία δευτερόλεπτα που το κτίριο προσπαθεί να επανέλθει στην ισορροπία.



Εικόνα 30: Στιγμιότυπα στα 20, 25, και 30 δευτερόλεπτα

Στην Εικόνα 30 φαίνεται πως στα δεξιά όπου η μάζα του συντονισμένου αποσβεστήρα κινείται ελεύθερα στο επίπεδο xy καταφέρνει να ακινητοποιεί.

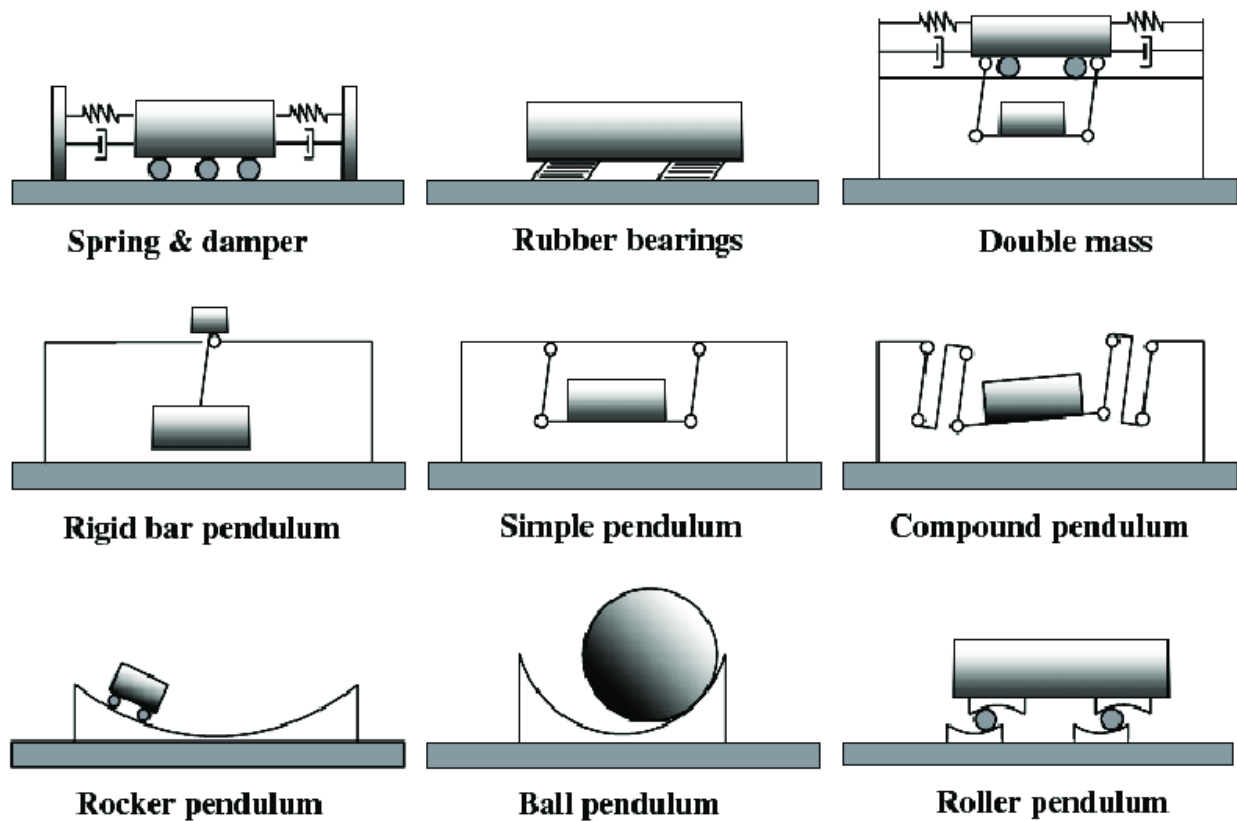


#### 4.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα παραπάνω μοντέλα έδειξαν πως μέσω αριθμητικών μεθόδων μπορεί να προσεγγιστεί η ανάλυση της χρήσης συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας. Είδαμε πως μπορεί αυτό να γίνει για μικρές κατασκευές οι οποίες μπορούν να αναπαραχθούν σε εργαστηριακό περιβάλλον αλλά και προσεγγίσεις για αληθινά σενάρια διέγερσης σε υφιστάμενα κτίρια.

Αξίζει να διασταυρωθεί η παραπάνω μέθοδος με πειραματικά δεδομένα. Μια τέτοια προσέγγιση θα ήταν αρκετά ενημερωτική για την προσομοίωση. Θα αναδείκνυε τα αδύναμα σημεία της, και θα φτιαχόντουσαν μοντέλα τα οποία θα λάμβαναν υπ'όψη και άλλες παραμέτρους.

Στο κομμάτι πάντως της προσομοίωσης δεν ολοκληρώνεται εδώ. Υπάρχει χώρος για μελέτη άλλων διατάξεων όπως αυτή του εκκρεμούς ή και ενός δοχείου με υγρό μέσο. Ειδικά στην περίπτωση του δοχείου χρειάζονται αναλύσεις ρευστοδυναμικής για την ακριβή συμπεριφορά του μέσου.



Εικόνα 31: Διαφορετικά είδη συντονισμένων αποσβεστήρων μάζας

## 5. Βιβλιογραφία & Πηγές

- [1] J., Terrence, Klopčič. Tacoma Narrows Bridge. The Physics Teacher, (2007)
- [2] P, Dallard., T, Fitzpatrick., A, Low., R, Ridsill, Smith., A, Flint. The millennium bridge, london: problems and solutions. The Structural engineer, (2001)
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma\\_Narrows\\_Bridge\\_\(1940\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_(1940))
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Millennium\\_Bridge,\\_London](https://en.wikipedia.org/wiki/Millennium_Bridge,_London)
- [5] [https://www.teetas.gr/sites/default/files/seminaria/hronopoylos\\_ec8\\_-\\_sholia.pdf](https://www.teetas.gr/sites/default/files/seminaria/hronopoylos_ec8_-_sholia.pdf)
- [6] [https://el.wikipedia.org/wiki/EN\\_1998](https://el.wikipedia.org/wiki/EN_1998)
- [7] <https://patents.google.com/patent/US989958A/en>
- [8] Γρηγόρης Σεβαστός, Συνοπτική παρουσίαση και αξιολόγηση των σπουδαιότερων συσκευών απορρόφησης ενέργειας δομοστατικών κατασκευών, (2009)
- [9] <https://practical.engineering/blog/2016/2/14/tuned-mass-dampers-in-skyscrapers>
- [10] Observatory brochure, Floor 89, Taipei 101. (17 August 2007)
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Taipei\\_101](https://en.wikipedia.org/wiki/Taipei_101)
- [12] "Damper at Taipei 101 records biggest movement ever". Focus Taiwan. Retrieved 9 August (2015)
- [13] Σ. Νατσιάβας, ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, (2001)
- [14] Connor JJ, Klink BSA, Kelly JM. Introduction to Motion Based Design. (1997)
- [15] Χ. Γ. Προβατίδης, ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ, Εκδόσεις Τζιόλα, (2016)