

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ & ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αποστολόπουλος Αναστάσιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Ι. Σαπουντζάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Δρ. Κωνσταντίνος Α. Καπασακάλης

ΑΘΗΝΑ 2023

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

**SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF STRUCTURAL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL ANALYSIS & ANTISEISMIC RESEARCH**



**VIBRATION ABSORBERS WITH SHAPE MEMORY ALLOYS
AND NEGATIVE STIFFNESS ELEMENTS**

DIPLOMA THESIS

Apostolopoulos Anastasios

Supervisor: Evangelos J. Sapountzakis

Professor N.T.U.A

Co-supervisor: Dr. Konstantinos A. Kapasakalis

ATHENS 2023

.....
Αναστάσιος Αποστολόπουλος

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π..

Copyright © Αναστάσιος Αποστολόπουλος, 2023.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η σεισμική μόνωση θεωρείται ως η πιο καταξιωμένη μέθοδος αντισεισμικής προστασίας μιας και στοχεύει στον περιορισμό των σεισμικών δράσεων αντί στην ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Πράγματι, αυτή η τόσο απλή ιδέα της δυναμικής αποσύζευξης της ανωδομής από το υπόλοιπο τμήμα δεν αποτελεί πρόσφατο εύρημα. Αντίθετα, μάλιστα φαίνεται ότι ήταν ελκυστική από το μασωλείο του Cygus the Great το 500 π.Χ., τα διπλώματα ευρεσυτεχνίας που κατατέθηκαν τον 20^ο αιώνα, το Imperial Hotel στο Τόκιο έως και τη σημερινή εποχή. Η ωρίμαση αυτής της σκέψης σε συνδυασμό με την εξέλιξη των υλικών οδήγησε στην καθιέρωση αξιόπιστων συστημάτων αντισεισμικής προστασίας. Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύχθηκαν τα ελατήρια αρνητικής στιβαρότητας αλλά και τα κράματα μνήμης σχήματος (Shape Memory Alloys) τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν και ως «έξυπνα» υλικά δίνοντας νέες διαστάσεις στα συστήματα σκέδασης της ενέργειας. Ο ταλαντωτής KDamper αποτελεί μία καινοτόμα ιδέα απορρόφησης κραδασμών η οποία βασίζεται στον βέλτιστο συνδυασμό κατάλληλων στοιχείων στιβαρότητας, ένα από τα οποία διαθέτει αρνητική σταθερά και παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Στην παρούσα εργασία θα διερευνηθεί για πρώτη φορά η απόδοση του KDamper, το οποίο θα αποκαλείται από εδώ και στο εξής KD-SMA μιας και έχουμε προβεί σε αντικατάσταση των γραμμικών συμβατικών ελατηρίων με κράματα μνήμης σχήματος τα οποία διαθέτουν βρόγχο υστέρησης ικανό να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας ενώ παράλληλα οι παραμένουσες παραμορφώσεις κατά την αποφόρτιση είναι μηδενικές.

Όσον αφορά στη δομή που ακολουθείται, αφού γίνει μια εισαγωγή στη σεισμική μόνωση (Κεφάλαιο 1^ο) θα περάσουμε από τα πιο συμβατικά συστήματα απορρόφησης κραδασμών, τα εφέντρανα (Κεφάλαιο 2^ο) στους αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (Κεφάλαιο 3^ο). Έπειτα, θα ακολουθήσει μια σύντομη περιγραφή των ιδιοτήτων των κραμάτων μνήμης σχήματος η οποία θα πλαισιωθεί από μία αριθμητική εφαρμογή, μία διερεύνηση παραμέτρων (Κεφάλαιο 4^ο). Στη συνέχεια, αφού παρουσιάσουμε το πως ορίζεται η αρνητική στιβαρότητα θα θέσουμε τη βασική αρχή λειτουργίας του KDamper (Κεφάλαιο 5^ο), το οποίο θα τροποποιήσουμε κατάλληλα με Shape Memory Alloys δημιουργώντας το KD-SMA, η απόδοση του οποίου θα εξεταστεί εκτενώς σε δύο αριθμητικές εφαρμογές (Κεφάλαιο 6^ο). Κλείνοντας, θα αναφέρουμε επιλεγμένα συμπεράσματα που προέκυψαν (Κεφάλαιο 7^ο), καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα (Κεφάλαιο 8^ο).

Λέξεις Κλειδιά: Σεισμική μόνωση, απορρόφηση κραδασμών, εφέντρανα, αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας, TMD, αρνητική σταθερά, negative stiffness, KDamper, κράματα μνήμης σχήματος, shape memory alloys, SMA.

Abstract

Seismic isolation is considered to be the most established method of earthquake protection since it aims to limit seismic actions rather than to enhance the load-bearing capacity of the structure. Indeed, this simple idea of dynamic decoupling of the superstructure from the rest of the segment is not a recent finding. On the contrary, it even seems to have been attractive from the mausoleum of Cyrus the Great in 500 BC, the patents filed in the 20th century, the Imperial Hotel in Tokyo and even the present day. The maturation of this thought combined with the development of materials led to the establishment of reliable earthquake protection systems. In this context, negative stiffness springs were developed, as well as shape memory alloys (SMA), which can also be characterized as "smart" materials, giving new dimensions to energy dissipation systems. The KDamper oscillator is an innovative shock absorption concept which is based on the optimal combination of suitable robustness elements, one of which has a negative constant and presents significant advantages. This document will investigate the performance of the KDamper, which will be called KD-SMA from now on, since we have replaced the linear conventional springs with shape memory alloys that have a hysteresis loop capable of absorbing a large amount of energy, while at the same time the residual deformations during unloading are zero.

As for the structure followed, the document starts with an introduction to seismic isolation (Chapter 1), following with the most conventional shock absorption systems, the bearings (Chapter 2) and the tuned mass dampers (Chapter 3). Then, a brief description of the properties of shape memory alloys will follow, which will be framed by a numerical application, an investigation of parameters (Chapter 4). After presenting how the negative robustness is defined, we will establish the basic operating principle of the KDamper (Chapter 5), which is modified appropriately with Shape Memory Alloys creating the KD-SMA, whose performance will be extensively examined in two numerical applications (Chapter 6). Finally, selected conclusions that have been reached (Chapter 7), as well as suggestions for future research are reported (Chapter 8).

Key words: Seismic isolation, vibrations absorber, bearings, tuned mass damper, TMD, negative stiffness, KDamper, shape memory alloys, SMA.

Πίνακας Περιεχομένων

1.	Περί σεισμικής μόνωσης	18
1.1	Εισαγωγή	18
1.2	Παθητική προστασία	19
1.3	Μέθοδοι ανάλυσης	20
1.3.1	Φασματική Ανάλυση Θεμελιώδους ιδιομορφής.....	20
1.3.2	Φασματική ιδιομορφική ανάλυση	20
1.3.3	Μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας	21
1.4	Πεδίο και παραδείγματα εφαρμογής	21
1.5	Ιστορική αναδρομή	25
1.6	Πηγές-Βιβλιογραφία	32
2.	Υφιστάμενα συστήματα σεισμική μόνωσης.....	34
2.1	Εισαγωγή.....	34
2.2	Απαιτήσεις.....	34
2.3	Τα συστήματα μόνωσης.....	34
2.4	Ελαστομερή συστήματα.....	35
2.4.1	Ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης.....	36
2.4.2	Ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης	37
2.4.3	Ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου	38
2.5	Συστήματα τριβής	40
2.5.1	Εφέδρανα τριβής με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης.....	40
2.5.2	Εφέδρανα τριβής με σφαιρική επιφάνεια ολίσθησης	41
2.6	Πηγές-Βιβλιογραφία	43
3.	Tuned Mass Dampers	44
3.1	Εισαγωγή.....	44
3.2	Βελτιστοποίηση Den Hartog	45
3.3	Πηγές-Βιβλιογραφία	51
4.	Κράματα μνήμης σχήματος.....	52
4.1	«Ευφυή» συστήματα	52

4.2	Shape Memory Alloys.....	53
4.3	Εφαρμογή στις κατασκευές.....	55
4.4	Διερεύνηση βέλτιστων παραμέτρων ελατηρίου SMA	57
4.4.1	Η σημασία της υπερελαστικότητας	57
4.4.2	Διατύπωση σχέσεων και εξισώσεων.....	58
4.4.3	Παραμετρική ανάλυση.....	60
4.4.3.1	Μεθοδολογία	60
4.4.3.2	Μονοπαραμετρική ανάλυση.....	61
4.4.3.3	Διπαραμετρική ανάλυση.....	66
4.4.3.4	Εφαρμογή στο σεισμό του Kobe	70
4.4.3.5	Συμπεράσματα.....	72
4.5	Πηγές-Βιβλιογραφία	73
5.	Ο ταλαντωτής KDamper	76
5.1	Εισαγωγή.....	76
5.2	Αρνητική Στιβαρότητα.....	76
5.3	Quazi Zero Stiffness.....	77
5.4	Σύστημα αρνητικής στιβαρότητας KDamper	78
5.5	Επισκόπηση KDamper	79
5.6	Extended KDamper	81
5.7	Πηγές-Βιβλιογραφία	83
5.8	Περαιτέρω βιβλιογραφία.....	84
6.	Διευρημένο SMA με στοιχείο αρνητικής στιβαρότητας KD-SMA	86
6.1	Εισαγωγή.....	86
6.2	Διατύπωση εξισώσεων	86
6.3	Εφαρμογή σε εύκαμπτη κατασκευή.....	87
6.3.1	Επιρροή k_N στοιχείου αρνητικής στιβαρότητας	87
6.3.2	Διερεύνηση βέλτιστου ζεύγους τιμών αποσβέσεως-αρνητικής στιβαρότητας για συγκεκριμένες τιμές Transformation Strength	90
6.3.3	Απόκριση σε πραγματικούς σεισμούς	100

6.4	Εφαρμογή σε δύσκαμπτη κατασκευή	105
6.4.1	Επιλογή βέλτιστων παραμέτρων SMA-TMD.....	105
6.4.2	Επιλογή παραμέτρων KD-SMA	109
6.4.3	Απόκριση σε πραγματικούς σεισμούς	110
7.	Συμπεράσματα.....	115
8.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	116

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Πλαστικές αρθρώσεις σε όσο το δυνατόν περισσότερες θέσεις.....	18
Σχήμα 2: Μετακίνηση σε κατασκευή με σεισμική μόνωση ως στερεό σώμα [1].....	19
Σχήμα 3: Η σημασία της μεταβολής ιδιοπεριόδου στην επιτάχυνση των κατασκευών [2]	19
Σχήμα 4: Ισοδύναμη ελαστική συμπεριφορά	21
Σχήμα 5: Επιρροή κατηγορίας εδάφους στην τέμνουσα βάση συναρτήσει της ιδιοπεριόδου	21
Σχήμα 6: Το κτίριο είναι τοποθετημένο σε μία βάση αποτελούμενη από κοίλες σφαιρικές επιφάνειες μέσα στις οποίες καταλήγουν σφαίρες μικρότερης διαμέτρου ώστε να επιστρέφει στην αρχική θέση. Σχέδιο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατέθεσε ο Jules Touaillon το 1870 [13]	26
Σχήμα 7: Το κτίριο διαθέτει μία στερεή πλάκα κάτω από την οποία βρίσκονται χαλίκια για περίπου 4 μέτρα βάθος ώστε η κατασκευή να κινείται ελεύθερα. Σχέδιο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατέθεσε ο J. Bechtold το 1907 για κτίρια που ανθίστανται στον σεισμό [14]	27
Σχήμα 8: Το εκκρεμές Viscardini προτάθηκε για εφαρμογή στη σεισμική μόνωση έπειτα από τους σεισμούς στο Ρέντζιο-Μεσίνα το 1908 [15]	28
Σχήμα 9: Σχέδιο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατέθεσε ο R.W De Montalk το 1932 για την απορρόφηση ενέργειας [19]	29
Σχήμα 10: Περίπτωση τοποθέτησης εφεδράνου σε όροφο.....	34
Σχήμα 11: Αναπτυσσόμενες δράσεις στα εφεδράνα.....	35
Σχήμα 12: Τύποι ελαστομεταλλικών εφεδράνων	36
Σχήμα 13: Συμπεριφορά ελαστομερούς εφεδράνου χαμηλής απόσβεσης.....	37
Σχήμα 14: Συμπεριφορά ελαστομεταλλικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου.....	38
Σχήμα 15: Απλοποιημένο διγραμμικό μοντέλο ανάλυσης	39
Σχήμα 16: Βρόγχοι HDRB LRB.....	39
Σχήμα 17: Βρόγχοι όλων των τύπων ελαστομεταλλικών εφεδράνων	40
Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση FSS	40
Σχήμα 19: Βρόγχος FSS	41
Σχήμα 20: Σχηματική απεικόνιση FPS	41
Σχήμα 21: Βρόγχος FPS	42
Σχήμα 22: Οι δονήσεις αποσβένουν μέσω ενός βοηθητικού σώματος το οποίο συνδέεται με την κατασκευή και έχει όσο το δυνατόν ίδια ιδιοπερίοδο με αυτή .Σχέδιο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατέθεσε ο Frahm το 1909 για την απόσβεση της κίνησης [1]	44
Σχήμα 23: Η διαφορά φάσης κατασκευής-TMD τείνει να επαναφέρει το κτίριο στην αρχική του θέση αναιρώντας τις εξωτερικές δράσεις. [2].....	44
Σχήμα 24: Σχηματική απεικόνιση TMD.....	46
Σχήμα 25: Η μεγιστοποίηση της απόκρισης πραγματοποιείται για q διαφορετικό της μονάδας, ενώ για λόγους απόσβεσης 0 και ∞ η απόκριση τείνει στο άπειρο. Διάγραμμα λόγου απόκρισης-λόγου ιδιοσυχνοτήτων εξαναγκασμένης ταλάντωσης για $\rho=1$ και $\mu=0.05$	48
Σχήμα 26: Όλα τα διαγράμματα του λόγου απόκρισης συναρτήσει του q διέρχονται από δύο σημεία P και Q, ενώ παράλληλα μέσω κατάλληλης εκλογής της παραμέτρου ρ είναι δυνατόν να τα μετακινήσουμε ώστε να έχουν το ίδιο ύψος Επιπλέον, μεταβάλλοντας την τιμή του συντελεστή ζ ελαχιστοποιούμε την απόκριση. Διάγραμμα λόγου απόκρισης-λόγου ιδιοσυχνοτήτων εξαναγκασμένης ταλάντωσης για $\mu=0.05$	50
Σχήμα 27: Τα αποτελέσματα της απόκρισης θα είναι τόσο καλύτερα όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της πρόσθετης μάζας σε σχέση με αυτή της κατασκευής. Ο παράγοντας αυτός είναι τις περισσότερες φορές αρκετά περιοριστικός. Διάγραμμα λόγου απόκρισης-λόγου ιδιοσυχνοτήτων εξαναγκασμένης ταλάντωσης για $\zeta=0.15$. ..	50

Σχήμα 28: Σχηματική απεικόνιση χαρακτηριστικών ενός «ευφούς» συστήματος, [2].....	52
Σχήμα 29: Το φαινόμενο μνήμης σχήματος έγκειται στη δυνατότητα ενός κράματος να ανακτά τις αρχικές του διαστάσεις μέσα από έναν κύκλο που περιλαμβάνει ψύξη-παραμόρφωση-θέρμανση [5]	54
Σχήμα 30: Το φαινόμενο της υπερελαστικότητας έγκειται στην ικανότητα του υλικού να επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα, έχοντας υποστεί μεγάλη παραμόρφωση, μετά την αναίρεση της εξωτερικής φόρτισής του [6].	54
Σχήμα 31: Τα ευεργετικά της οφέλη της υπερελαστικότητας αποκομίζονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 0-40 βαθμών Κελσίου [8].	55
Σχήμα 32: Εφαρμογή SMA σε πλαίσιο κτιρίου.....	56
Σχήμα 33: Εφαρμογή SMA στη θέση εδάφους-κατασκευής.....	56
Σχήμα 34: Εφαρμογή SMA καλωδίων σε εφέντρο γέφυρας [18]	57
Σχήμα 35: Ο βρόγχος υστέρησης είναι ικανός να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας ενώ παράλληλα οι παραμένουσες παραμορφώσεις κατά την αποφόρτιση είναι μηδενικές	58
Σχήμα 36: Το απλοποιημένο μοντέλο του Yan Nie ως προσέγγιση του Graesser-Cozzarelli για την περιγραφή της συμπεριφοράς του ελατηρίου SMA	58
Σχήμα 37: Κατασκευή-TMD συνδεδεμένα με γραμμικό ελατήριο	59
Σχήμα 38: Κατασκευή-TMD συνδεδεμένα με ελατήριο SMA.....	59
Σχήμα 39: Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα σχεδιασμένο στο λογισμικό Seismo Artif [24] έτσι ώστε να είναι συμβατό με το φάσμα του Ευρωκώδικα.....	60
Σχήμα 40: Μεταβολή συναρτήσεων της παραμέτρου a_s : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής	61
Σχήμα 41: Μεταβολή συναρτήσεων της παραμέτρου a : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής	62
Σχήμα 42: Μεταβολή συναρτήσεων του mass ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής	63
Σχήμα 43: Μεταβολή συναρτήσεων του tuning ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής	64
Σχήμα 44: Μεταβολή συναρτήσεων του Transformation Strength: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής	65
Σχήμα 45: Μεταβολή συναρτήσεων της παραμέτρου b : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής	66
Σχήμα 46: Μεταβολή συναρτήσεων tuning ratio-mass ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής	67
Σχήμα 47: Μεταβολή συναρτήσεων transformation strength-mass ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής	68
Σχήμα 48: Μεταβολή συναρτήσεων transformation strength-tuning ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής	69
Σχήμα 49: Χρονοιστορία δύναμης επαναφοράς για Transformation Strength=0.35 στον σεισμό του Kobe PGA=0.27g.....	70
Σχήμα 50: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς του Kobe.....	71
Σχήμα 51: Το προσυμπιεσμένο ελατήριο ενισχύει την κίνηση που προκαλεί η εξωτερική δράση αντί να ανθίσταται σε αυτή. Σχέδιο από τη δημοσίευση του Molyneaux το 1957 για την αρνητική στιβαρότητα [2].....	76
Σχήμα 52: Σύστημα αρνητικής στιβαρότητας Quazi Zero Stiffness και αντίστοιχο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που προτάθηκε από Carrella 2007 [4].	77

Σχήμα 53: Το σύστημα αρνητικής στιβαρότητας KDamper είναι ικανό να εξασφαλίσει σταθερή αρνητική δυσκαμψία για κατάλληλο εύρος μετατοπίσεων καθιστώντας το ικανό να αποτελέσει μέρος συστήματος σεισμικής μόνωσης [5]	78
Σχήμα 54: Quazi Zero Stifness, TMD και KDamper	80
Σχήμα 55: Extended KDamper	81
Σχήμα 56: Αναπαράσταση του ταλαντωτή EKD στην αρχική θέση ισορροπίας	82
Σχήμα 57: Αναπαράσταση του ταλαντωτή EKD στην παραμορφωμένη θέση	82
Σχήμα 58: KD-SMA	86
Σχήμα 59: Μεταβολή συναρτήσεων $kn/ks-kf/k1$: (α),(β) της μετατόπιση της κατασκευής, (γ) της μετατόπισης TMD, (δ) του stoke TMD,(ε) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35 και cns=0. ...	88
Σχήμα 60: Μεταβολή συναρτήσεων $kn/ks-kf/k1$: (α),(β) της μετατόπιση της κατασκευής, (γ) της μετατόπισης TMD, (δ) του stoke TMD,(ε) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35 και cns=0.50c.	89
Σχήμα 61: Μεταβολή συναρτήσεων kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35 και cns=0.	91
Σχήμα 62: Μεταβολή συναρτήσεων kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35 και cns=0.50c.	92
Σχήμα 63: Μεταβολή συναρτήσεων $kn/ks-cns/c$: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35.	93
Σχήμα 64: Μεταβολή συναρτήσεων kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.50 και cns=0.	94
Σχήμα 65: Μεταβολή συναρτήσεων kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.50 και cns=0.50c.	95
Σχήμα 66: Μεταβολή συναρτήσεων $kn/ks-cns/c$: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.50.	96
Σχήμα 67: Μεταβολή συναρτήσεων kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.60 και cns=0.	97
Σχήμα 68: Μεταβολή συναρτήσεων kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.60 και cns=0.50c.	98
Σχήμα 69: Μεταβολή συναρτήσεων $kn/ks-cns/c$: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.60.	99
Σχήμα 70: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς του Kobe	102
Σχήμα 71: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς της Loma Prieta.	103
Σχήμα 72: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος.	104
Σχήμα 73: Μεταβολή συναρτήσεων της παραμέτρου as : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.	105
Σχήμα 74: Μεταβολή συναρτήσεων της παραμέτρου a : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.	106
Σχήμα 75: Μεταβολή συναρτήσεων του tuning ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.	107
Σχήμα 76: Μεταβολή συναρτήσεων του Transformation Strength: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.	108
Σχήμα 77: Μεταβολή συναρτήσεων kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stoke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για cns=0.30c.	109

Σχήμα 78: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς του Kobe.....	112
Σχήμα 79: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς της Loma Prieta.	113
Σχήμα 80: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος.	114

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Η ανάγκη ενίσχυσης του δημαρχείου του San Francisco έπειτα από τον σεισμό της Loma Prieta το 1989 ήταν επιτακτική [8].....	23
Εικόνα 2: Σε περίπτωση που το κτίριο δεν είχε σχεδιασθεί με σύστημα σεισμικής μόνωσης η επιτάχυνση σχεδιασμού θα ήταν 5 φορές μεγαλύτερη και οι διαστάσεις των υποστλωμάτων δεν θα ικανοποιούσαν τις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις.Εικόνα από την ανάλυση της στέγης Ωνάση Γραμμάτων και Τεχνών[9]	23
Εικόνα 3: 8 Εφέδρανο τύπου FPS της στέγης Ωνάση	24
Εικόνα 4: Εικόνα από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία του αγάλματος Ερμή Πραξιτέλους [10]	24
Εικόνα 5: Αρχαιολογικό μουσείο στην Κω έπειτα από σεισμό (21.01.17)	25
Εικόνα 6: Το μασωλείο του Cyrus the Great κατασκευασμένο το 500 π.Χ. αποτελεί την πρώτη εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης στον κόσμο [12]	25
Εικόνα 7: Χαρτονόμισμα στο οποίο απεικονίζεται το μασωλείο	26
Εικόνα 8: Το ξενοδοχείο Imperial (στα αριστερά) στο Τόκυο κατασκευασμένο το 1921 πάνω από ένα στρώμα καλού εδάφους και πιο βαθιά λάσπης αποτελεί το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο στην σύγχρονη εποχή και ανταπεξήλθε στον σεισμό του 1923 [17], [18]	28
Εικόνα 9: Εφέδρανα συγκολλημένου καουτσούκ στην πρώτη εφαρμογή τους	30
Εικόνα 10: Το πρώτο κτίριο στο οποίο εφαρμόστηκαν εφέδρανα από καουτσούκ, ένα σχολείο στα Σκόπια το 1969.[20]	30
Εικόνα 11: Foothill Communities Law and Justice Center, η πρώτη εφαρμογή εφεδράνων υψηλής απόσβεσης 31	
Εικόνα 12: Το 21 Salt Lake City Country Building ένα ιστορικό κτίριο που για λόγους αντισεισμικής προστασίας ενισχύθηκε με 447 εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου.....	31
Εικόνα 13: Τυπική διατομή εφεδράνου με βλήτρα για σύνδεση	37
Εικόνα 14: Τυπική διατομή εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου[7].....	38
Εικόνα 15: Εφέδρανο ολίσθησης επίπεδης επιφάνειας	41
Εικόνα 16: Εφέδρανο ολίσθησης σφαιρικής επιφάνειας	42
Εικόνα 17: Το Ταίρει 101 Tower, η κατασκευή του οποίου ξεκίνησε το 1999 και από την ολοκλήρωσή του το 2004 έως το 2009 ήταν αναγνωρισμένο ως ο πιο υψηλός ουρανοξύστης στον κόσμο με ύψος τα 508.2m [6]. ..	45

Ευρετήριο Πινάκων

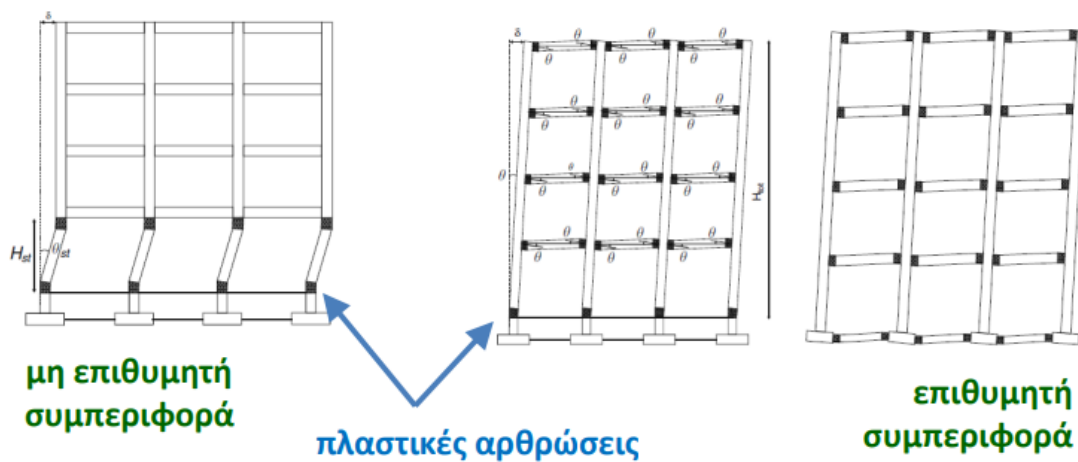
Πίνακας 1: Εκτίμηση ιδιοπεριόδου κτιρίων	22
Πίνακας 2: Ιδιότητες κατασκευής και ελατηρίων [22].....	60
Πίνακας 3: Μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις PGA(g)	100
Πίνακας 4: Μέγιστες τιμές μετατοπίσεων κατασκευής (m)	100
Πίνακας 5: Μέγιστες τιμές επιταχύνσεων κατασκευής (m/sec ²).....	101

Πίνακας 6: Μέγιστες τιμές stoke πρόσθετης μάζας (m).....	101
Πίνακας 7: Μέγιστες τιμές μετατοπίσεων κατασκευής (m)	110
Πίνακας 8: Μέγιστες τιμές επιταχύνσεων κατασκευής (m/sec ²).....	111
Πίνακας 9: Μέγιστες τιμές stoke πρόσθετης μάζας (m).....	111

1. Περί σεισμικής μόνωσης

1.1 Εισαγωγή

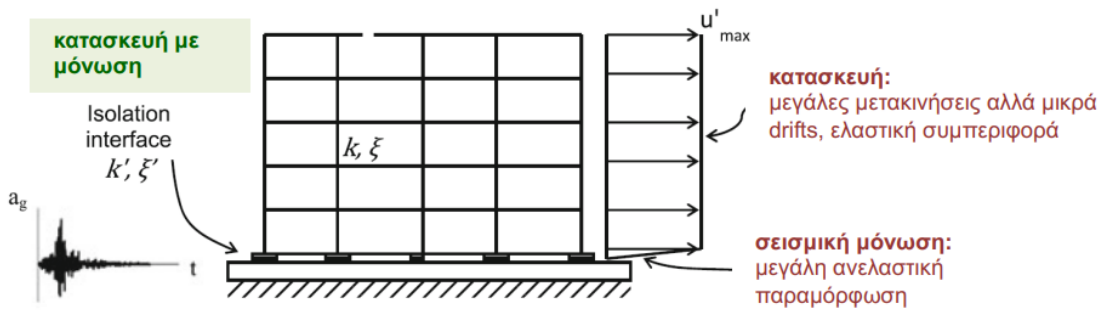
Η φιλοσοφία του συμβατικού αντισεισμικού σχεδιασμού βασίζεται ουσιαστικά στην αύξηση της ικανότητας της κατασκευής να ανταπεξέλθει στις σεισμικές απαιτήσεις σε αντίθεση με τη σεισμική μόνωση η οποία εστιάζει στη μείωση της διέγερσης που θα της επιβληθεί. Στην πρώτη περίπτωση αυτό επιτυγχάνεται μέσω της πλαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής, δηλαδή οι πλαστικές στροφές και μετακινήσεις πρέπει να συμβαίνουν σε όσο το δυνατόν περισσότερες θέσεις, προκειμένου απορροφηθεί μεγάλο ποσοστό ενέργειας.



Σχήμα 1: Πλαστικές αρθρώσεις σε όσο το δυνατόν περισσότερες θέσεις

Παρόλο που αυτή η μέθοδος μας εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό ότι η κατασκευή μας δεν θα καταρρεύσει για το σεισμό σχεδιασμού, η συσσώρευση βλαβών ενδέχεται να καταστήσει την κατασκευή μας σε βάθος χρόνου ή και αιφνίδια μη λειτουργική.

Στη δεύτερη περίπτωση, η κατασκευή μας κινείται σαν στερεό σώμα πράγμα που μειώνει τα drifts και συνεπώς την αναπτυσσόμενη ένταση, αλλά οι μεγάλες μετακινήσεις ενδέχεται να δημιουργήσουν προβλήματα στις ηλεκτρομαγνητικές εγκαταστάσεις, στο σύστημα ύδρευσης, πετρελαίου κλπ., ενώ παράλληλα αυξάνουν την ευαισθησία σε φορτία ανέμου. Επιπρόσθετα, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για να ληφθούν αναγκαίες αποστάσεις μεταξύ των κτιρίων προκειμένου αποφευχθεί η μεταξύ τους σύγκρουση, πράγμα που αν αναλογιστεί κανείς ότι η πλειονότητα τους βρίσκονται σε επαφή καθίσταται αδύνατο.

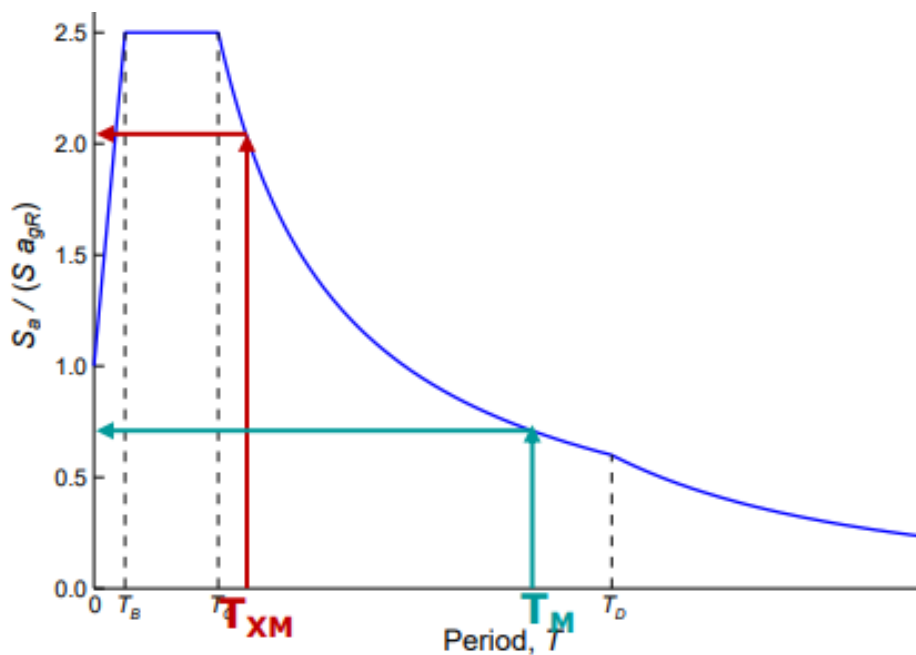


Σχήμα 2: Μετακίνηση σε κατασκευή με σεισμική μόνωση ως στερεό σώμα [1]

1.2 Παθητική προστασία

Η παθητική αντισεισμική προστασία των κατασκευών υλοποιείται μέσω:

- Επιμήκυνσης της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου
- Αύξηση της απόσβεσης
- Συνδυασμός των παραπάνω



Σχήμα 3: Η σημασία της μεταβολής ιδιοπεριόδου στην επιτάχυνση των κατασκευών [2]

Σχετικά με τη μεταβολή της ιδιοπεριόδου T της κατασκευής:

- Στην περίπτωση που η τιμή της T βρίσκεται κοντά στο σημείο έναρξης του φθίνοντα κλάδου των επιταχύνσεων, μικρή αύξησή της συνεπάγεται μεγάλη μείωση των επιταχύνσεων και μικρή αύξηση των μετακινήσεων
- Στην περίπτωση που η τιμή της T είναι εξαρχής μεγάλη, μικρή αύξησή της συνεπάγεται μικρή μείωση των επιταχύνσεων και μεγάλη αύξηση των μετακινήσεων.

Σχετικά με την αύξηση της απόσβεσης χρησιμοποιούνται ειδικοί μηχανισμοί που απορροφούν ενέργεια . Με αύξηση της απόσβεσης είναι εφικτό να μειώσουμε της μετακινήσεις με τίμημα όμως την ανάπτυξη επιταχύνσεων και drift στους ορόφους, καθώς αυξάνεται η συμβολή των ανώτερων ιδιομορφών.[3]

1.3 Μέθοδοι ανάλυσης

1.3.1 Φασματική Ανάλυση Θεμελιώδους ιδιομορφής.

Το τμήμα της κατασκευής πάνω από το σύστημα μόνωσης συμπεριφέρεται ως μονοβάθμιος ταλαντωτής με:

- Μάζα ίση με αυτή της ανωδομής
- Δυσκαμψία ίση με το άθροισμα των δυσκαμψιών των υποστυλωμάτων – βάθρων, δηλαδή $K_{eff} = \sum K_{eff}$
- Απόσβεση ίση με τη συνολικό ενεργή απόσβεση του συστήματος

Προϋποθέσεις εφαρμογής

- Κατηγορία εδάφους A,B,C,E
- Ενεργός απόσβεση μικρότερη από 0.30
- Απόσταση κατασκευής από ενεργό ρήγμα μεγαλύτερη από 10 km

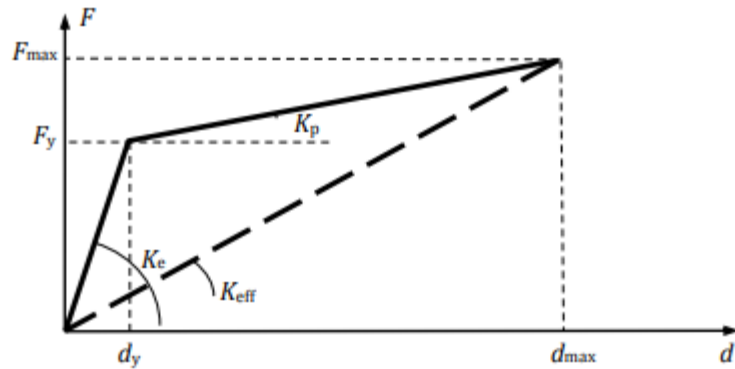
1.3.2 Φασματική ιδιομορφική ανάλυση

- Ακριβές προσομοίωμα της κατασκευής (με τη χωροθέτηση των μονωτήρων)
- Για τις ιδιομορφές με περίοδο μεγαλύτερη από το 80% της θεμελιώδους η απόσβεση υπολογίζεται όπως στην ανάλυση της θεμελιώδους ιδιομορφής. Στις υπόλοιπες ιδιομορφές λαμβάνεται 5%.
- Η μετακίνηση σχεδιασμού όπως επίσης και η τέμνουσα δύναμη δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερες από το 80% των αντίστοιχων μεγεθών που προκύπτουν βάση ανάλυσης θεμελιώδους ιδιομορφής. Σε αντίθετη περίπτωση η μετακίνηση και η τέμνουσα προκύπτουν ως το 80% του λόγου των τιμών που προκύπτουν από την ανάλυση βάση θεμελιώδους ιδιομορφής προς αυτών της ιδιομορφικής.

Προϋποθέσεις εφαρμογής

- Κατηγορία εδάφους A,B,C,E
- Ενεργός απόσβεση μικρότερη από 0.30

Οι παραπάνω φασματικές μέθοδοι υπονοούν ελαστική συμπεριφορά .Συνεπώς σε περιπτώσεις συστημάτων μόνωσης με ανελαστική συμπεριφορά γίνεται προσομοίωση με την αντίστοιχη ισοδύναμη ελαστική όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4: Ισοδύναμη ελαστική συμπεριφορά

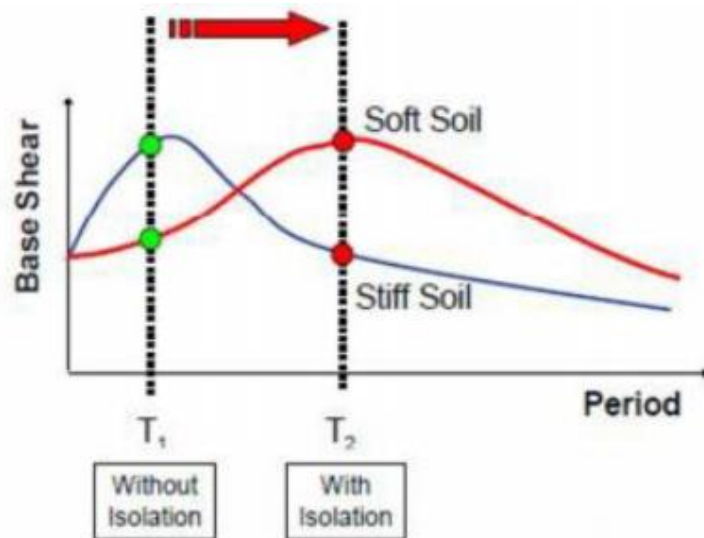
1.3.3 Μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας

- Πλήρης απεικόνιση της απόκρισης μέσω ολοκλήρωσης βήμα προς βήμα του συστήματος των εξισώσεων κίνησης που διέπουν την κατασκευή. Λαμβάνονται υπόψη οι μη γραμμικότητες του υλικού.
- Γίνεται χρήση συγκεκριμένων χρονοϊστοριών και όχι φάσματος.

Εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση.

1.4 Πεδίο και παραδείγματα εφαρμογής

Καθίσταται σαφές από τα παραπάνω ότι η σεισμική μόνωση δεν αποτελεί πανάκεια και η εφαρμογή της καθορίζεται από τεχνοοικονομικά και άλλα κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις όπου το έδαφος είναι μαλακό η αύξηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου δεν είναι σαφές αν θα δράσει ευεργετικά για τις επιταχύνσεις και άρα την τέμνουσα βάση.



Σχήμα 5: Επιρροή κατηγορίας εδάφους στην τέμνουσα βάσης συναρτήσει της ιδιοπεριόδου

Επιπροσθέτως, οι εμπειρικοί τύποι υπολογισμού της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου κτιρίων του Πίνακα 1 καταδεικνύουν ότι για παραπάνω από 8 ορόφους η ιδιοπερίοδος είναι ήδη αρκετά μεγάλη και περαιτέρω αύξηση μέσω τοποθέτησης μονωτήρων θα μειώσει ασύμφορα της επιταχύνσεις ,ενώ οι μετακινήσεις θα αυξηθούν δυσμενέστερα.

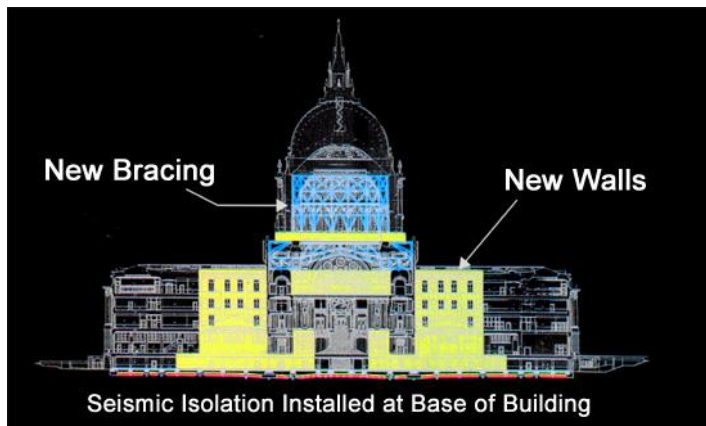
Κανονισμός	Εκτίμηση ιδιοπεριόδου	
Uniform Building Code [4]	$C_t * h^{3/4}$	h:ύψος κτιρίου σε πόδια, $C_t=0.03$
Fema 450 [5]	$C_t * h_n^x$	h_n :ύψος κτιρίου σε πόδια, $C_t=0.016, x=0.9$
Eurocode 8 [6]	$0.075 * H^{3/4}$	H:ύψος κτιρίου σε μέτρα
National Building code of Canada [7]	$0.1 * N$	N:ο αριθμός ορόφων πάνω από το έδαφος

Πίνακας 1: Εκτίμηση ιδιοπεριόδου κτιρίων

Η εφαρμογή της μόνωσης έναντι της φιλοσοφίας του αντισεισμικού σχεδιασμού για πλάστιμη συμπεριφορά καθίσταται αντιοικονομική για συμβατικές πχ διώροφες κτιριακές κατασκευές , ενώ παράλληλα υστερεί στις ελαφρές καθώς οι σεισμικές δυνάμεις είναι ανάλογες τις αδρανειακής μάζας.

Η μόνωση βάσης αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική για κτίρια τα οποία πρέπει οπωσδήποτε να παραμείνουν λειτουργικά μετά από έναν ισχυρό σεισμό (πχ νοσοκομεία , καταφύγια) , όπως επίσης και για ενίσχυση υφιστάμενων ιστορικών κτιρίων με ιδιαίτερη σημασία στα οποία δεν είναι επιθυμητή η αλλοίωση του χαρακτήρα τους μέσα από παρεμβάσεις – προσθήκες νέων φερόντων δομικών μελών.

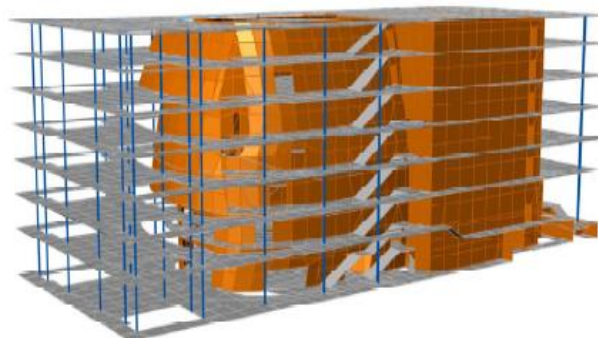
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το δημαρχείο του San Francisco στην Καλιφόρνια [8]. Μετά από τον σεισμό της Loma Prieta το 1989 η ανάγκη ενίσχυσής του ήταν επιτακτική . Η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος με πακτωμένη βάση είναι περίπου 0.9 s .Προκειμένου να διατηρηθεί η δομή του τοποθετήθηκαν 530 μονωτήρες πάνω από τη βάση κάθε υποστυλώματος και τοιχώματος αλλά και νέα τοιχώματα. Η νέα ιδιοπερίοδος ταλάντωσης έγινε ίση με 2.5s και για το σεισμό σχεδιασμού εκτιμάται μια μετατόπιση μεταξύ 46-66cm .Για αυτό ακριβώς το λόγο κατασκευάστηκε γύρω από το κτίριο μια τάφρος και χρησιμοποιήθηκαν εύκαμπτοι σύνδεσμοι για να συμβαδίσουν με την κίνηση αυτή οι ηλεκτρικές και λοιπές εγκαταστάσεις.



Εικόνα 1: Η ανάγκη ενίσχυσης του δημαρχείου του San Francisco έπειτα από τον σεισμό της Loma Prieta το 1989 ήταν επιτακτική [8]

Η στέγη Ωνάση Γραμμάτων και Τεχνών έχει διαστάσεις 28m x 66m, διαθέτει αρχιτεκτονικές απαιτήσεις που επιβάλουν λεπτά υποστυλώματα περιμετρικά προκειμένου να αναδεικνύεται το εσωτερικό ωοειδές κέλυφος. Χρησιμοποιήθηκαν εφένδρανα τύπου FPS.

Σε περίπτωση που το κτίριο δεν είχε σχεδιασθεί με σύστημα σεισμικής μόνωσης τα drifts των ορόφων θα ήταν απαγορευτικά, τα εκθέματα δεν θα μπορούσαν να προστατευτούν και η επιτάχυνση σχεδιασμού θα ήταν 5 φορές μεγαλύτερη, ενώ παράλληλα δεν θα ήταν από αισθητικής άποψης τόσο κομψό.[9]



Εικόνα 2: Σε περίπτωση που το κτίριο δεν είχε σχεδιασθεί με σύστημα σεισμικής μόνωσης η επιτάχυνση σχεδιασμού θα ήταν 5 φορές μεγαλύτερη και οι διαστάσεις των υποστυλωμάτων δεν θα ικανοποιούσαν τις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις. Εικόνα από την ανάλυση της στέγης Ωνάση Γραμμάτων και Τεχνών [9]



Εικόνα 3: 8 Εφέδρανο τύπου FPS της στέγης Ωνάση

Συστήματα σεισμικής μόνωσης μπορούν να εφαρμοσθούν και για την προστασία εκθεμάτων, αγαλμάτων και γενικότερα έργων τέχνης. Το συγκριτικά μικρό τους βάρος σε σχέση με αυτό των κτιρίων και των γεφυρών καθιστά πιο δύσκολη την επιλογή ενός αξιόπιστου συστήματος. Για το άγαλμα του Ερμή του Πραξιτέλους χρησιμοποιήθηκαν FPS.[10]



Εικόνα 4: Εικόνα από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία του αγάλματος Ερμή Πραξιτέλους [10]

Τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κατακόρυφες επιταχύνσεις μπορούν να μειωθούν σημαντικά με έναν συνδυασμό μόνωσης στον κατακόρυφο σεισμό στη βάση των αγαλμάτων και οριζόντιου στη βάση του κτιρίου [11].

Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν κανονισμοί για τη μόνωση των εκθεμάτων πουθενά στον κόσμο και κάθε μουσείο επιλέγει τις δικές του πρακτικές



Εικόνα 5: Αρχαιολογικό μουσείο στην Κω έπειτα από σεισμό (21.01.17)

1.5 Ιστορική αναδρομή

Η ιδέα της αποσύζευξης της ανωδομομής από την υπόλοιπη κατασκευή ήταν ελκυστική ανά τους αιώνες σε διάφορους πολιτισμούς.

Το μασωλείο του Cyrus the Great [12] αποτελεί την πρώτη εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης στον κόσμο. Σύμφωνα με τους αρχαιολόγους κατασκευάστηκε το 500 π.Χ. στο Ιράν(μία από τις πιο σεισμογενείς περιοχές του πλανήτη) ,όπου υπάρχει μέχρι και σήμερα. Αυτός ο ναός από ασβεστόλιθο έχει ουσιαστικά δυο στρώσεις θεμελίων. Η πρώτη αποτελείται από ένα μείγμα από πέτρες ασβέστη και στάχτες ή άμμο. Μόλις αυτό ομογενοποιηθεί δημιουργεί μια λεία επιφάνεια. Η άνω στρώση τοποθετείται ακριβώς από πάνω χωρίς ωστόσο να είναι συνδεδεμένη με κανέναν τρόπο με την κάτω. Αποτελείται από γυαλισμένες πέτρες δεμένες μεταξύ τους με κορμούς δένδρων και με αυτό τον τρόπο στις περιπτώσεις σεισμικής διέγερσης η κάτω στρώση κινείται ενώ η πάνω ολισθαίνει ελεύθερα πάνω στη βάση. Από τα σημερινά δεδομένα έχει γίνει αντιληπτό ότι ο ναός είναι ικανός να ανταπεξέλθει σε έναν σεισμό της τάξεως των 7 Richter.

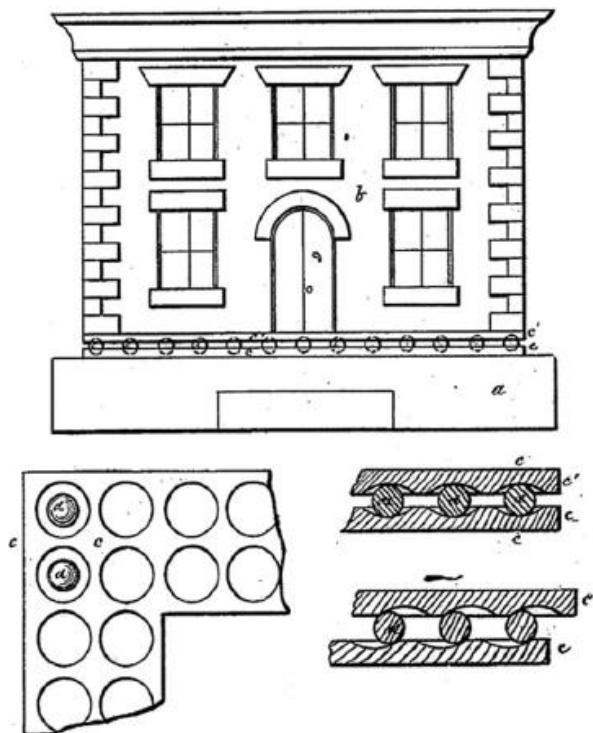


Εικόνα 6: Το μασωλείο του Cyrus the Great κατασκευασμένο το 500 π.Χ. αποτελεί την πρώτη εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης στον κόσμο [12]



Εικόνα 7: Χαρτονόμισμα στο οποίο απεικονίζεται το μασωλείο

Το 1870 ο Jules Touaillon [13] από την Καλιφόρνια εξέδωσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για έναν αποτελεσματικό τρόπο να αντιμετωπίσει τα σεισμικά κύματα. Συγκεκριμένα τα παρακάτω σχέδια δείχνουν ένα σπίτι το οποίο είναι τοποθετημένο σε μία βάση αποτελούμενη από κοίλες σφαιρικές επιφάνειες μέσα στις οποίες καταλήγουν σφαίρες μικρότερης διαμέτρου. Με αυτό τον τρόπο το κτίριο θα ολισθαίνει ελεύθερα ως ένα σώμα και θα επιστρέφει λόγω της βαρύτητας στην αρχική του θέση. Με τα δικά του λόγια ο Touaillon εξηγεί "... The upper face of plate c and the lower face of plate c' are provided with depressions having the form of a segment of sphere with a radius considerably greater than that of the balls ... the aforesaid weight will cause the plates c and c' and the balls to resume their original relative position". Η ιδέα αυτή μας παραπέμπει στα σημερινά εφέδρανα ολίσθησης.

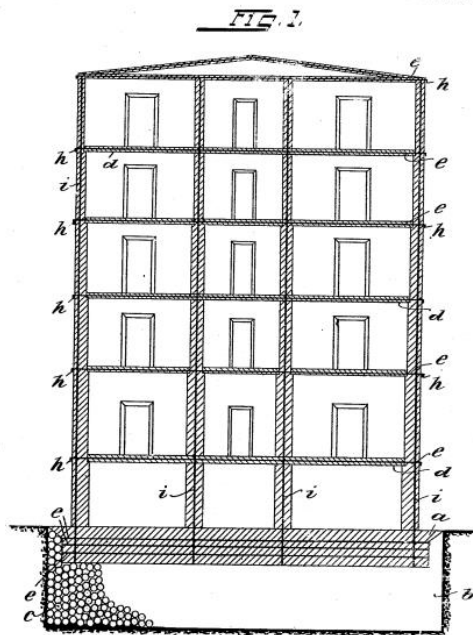


Σχήμα 6: Το κτίριο είναι τοποθετημένο σε μία βάση αποτελούμενη από κοίλες σφαιρικές επιφάνειες μέσα στις οποίες καταλήγουν σφαίρες μικρότερης διαμέτρου ώστε να επιστρέφει στην αρχική θέση. Σχέδιο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατέθεσε ο Jules Touaillon το 1870 [13]

Το 1907 ο J. Bechtold [14] από τη Γερμανία εξέδωσε και αυτός δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για κτίριο το οποίο διαθέτει μία στερεή πλάκα κάτω από την οποία βρίσκονται χαλίκια για

περίπου 4 μέτρα βάθος ώστε η κατασκευή να κινείται ελεύθερα. Τα δικά του λόγια “In the case of earthquakes the danger accrues from the rigid foundation of the buildings, and will be best avoided by standing the whole edifice on a rigid baseplate of suitable carrying power, which base-plate is not in rigid connection with the surface of the earth”.

No. 845,046. PATENTED FEB. 26, 1907.
 J. BECHTOLD.
 EARTHQUAKE PROOF BUILDING.
 APPLICATION FILED MAY 28 '06.
 2 SHEETS-SHEET 1.

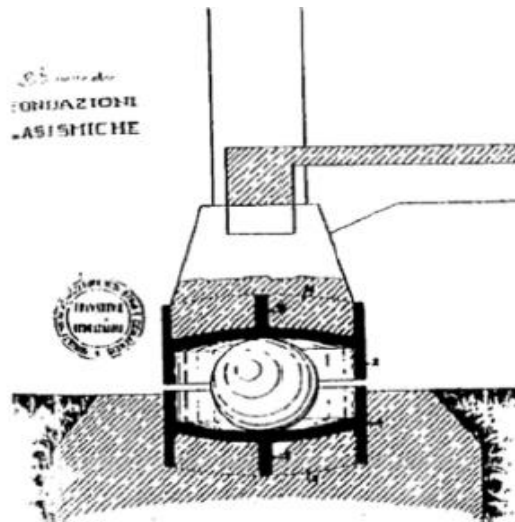


Witnesses:
 E. O. Blidbrand
 W. Repolite
 Inventor:
 J. Bechtold
 by E. O. Blidbrand
 Attorney

Σχήμα 7: Το κτίριο διαθέτει μία στερεή πλάκα κάτω από την οποία βρίσκονται χαλίκια για περίπου 4 μέτρα βάθος ώστε η κατασκευή να κινείται ελεύθερα. Σχέδιο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατέθεσε ο J. Bechtold το 1907 για κτίρια που ανθίστανται στον σεισμό [14]

Το 1908 έπειτα από τους σεισμούς στο Ρέντζιο-Μεσίνα, [15] όπου σκοτώθηκαν περίπου 160000 άνθρωποι οι οποίοι κυρίως καταπλακώθηκαν από τοιχοποιία, συστάθηκε ειδική επιτροπή τόσο από καθηγητές πανεπιστημίων όσο και από μηχανικούς της πράξης. Δύο προτάσεις κατατέθηκαν η πρώτη αφορούσε στην αποσύζευξη της ανωδομής μέσω ενός στρώματος άμμου στη θεμελίωση και η δεύτερη στο εκκρεμές Viscardini με την πρόσθετη απαίτηση η κατασκευή να αντέχει το 8% του βάρους της σε οριζόντια φόρτιση.

Στο σημείο επαφής κατασκευής και εδάφους τοποθετείται μία σφαιρική συσκευή ελεύθερη να περιστρέφει σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Προτείνεται το κτίριο να κατασκευαστεί πάνω σε πολλές αντίστοιχες σφαίρες οι οποίες αρχικά θα συγκρατούνται με συνδέσμους οι οποίοι μετά την ολοκλήρωση του έργου θα αφαιρεθούν. Η δεύτερη πρόταση επικράτησε εντούτοις δεν υλοποιήθηκε ποτέ καθώς η κατασκευασιμότητά της περιοριζόταν από την τεχνολογία της εποχής.



Σχήμα 8: Το εκκρεμές Viscardini προτάθηκε για εφαρμογή στη σεισμική μόνωση έπειτα από τους σεισμούς στο Ρέντζιο-Μεσίνα το 1908 [15]

Τον Αύγουστο του 1909 ο J.A.Calantarients[16], γιατρός από την Αγγλία απευθύνθηκε στο κέντρο αντισεισμικής της Χιλής, καθώς ανακάλυψε ότι “substantial buildings can be put in earthquake countries on his principle with perfect safety since the degree of severity of an earthquake loses its significance through the existence of the lubricated free joint”. Αυτό θα επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας τα κτίρια πάνω από στρώμα άμμου ή μαρμαρυγίας το οποίο θα επέτρεπε στο κτίριο να γλιστρά στο σεισμό, μειώνοντας σημαντικά τις επιβαλλόμενες δυνάμεις. Ο Calantarients αναφέρει ότι διεξήγαγε τα πειράματα αυτά πριν από περίπου 25 χρόνια και συγκεκριμένα πριν αυτά της Ιαπωνίας.

Αυτό βέβαια φαίνεται να αναφέρεται στον Άγγλο John Mile, καθηγητή ορυκτολογίας στο Τόκυο από το 1876 έως το 1895. Τα ερευνητικά ενδιαφέροντα του τελευταίου αποτέλεσαν τα σεισμικά φαινόμενα, όπου πραγματοποίησε πρωτοποριακή έρευνα και συχνά αναφέρεται ως “πατέρας της σύγχρονης σεισμολογίας”.



Εικόνα 8: Το ξενοδοχείο Imperial (στα αριστερά) στο Τόκυο κατασκευασμένο το 1921 πάνω από ένα στρώμα καλού εδάφους και πιο βαθιά λάσπη αποτελεί το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο στην σύγχρονη εποχή και ανταπεξήλθε στον σεισμό του 1923 [17], [18].

Το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο στη σύγχρονη εποχή αποτελεί το Imperial hotel στο Τόκυο το 1921, από τον Frank Lloyd Wright [17]. Στο υποκείμενο έδαφος ήταν τοποθετημένο ένα στρώμα αρκετά καλού εδάφους, όμως κάτω από αυτό στρώσεις μαλακής λάσπης. Για τον Wright η λάσπη αυτή ήταν “good cushion to relieve the terrible shocks” ένα δηλαδή καλό μαξιλάρι. Πάσσαλοι τοποθετήθηκαν μέχρι το πέρασ της στρώσης του ‘καλού’ εδάφους. Το ξενοδοχείο φαίνεται να ανταπεξήλθε στον καταστροφικό σεισμό του Τόκυο το 1923. Καθώς οι στρώσεις από λάσπη προφανώς δεν είναι διαθέσιμες σε κάθε οικοδομικό έργο, οι μηχανικοί έπρεπε να στρέψουν αλλού το ενδιαφέρον τους.

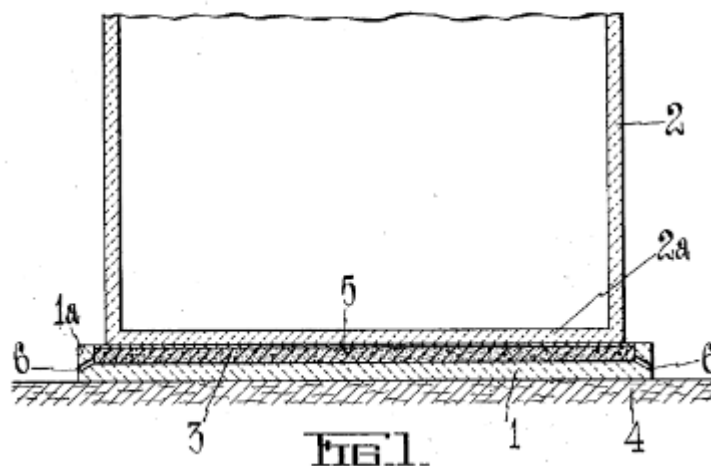
Μέχρι τώρα έχουμε ανακαλύψει δυο απαραίτητα στοιχεία της σεισμικής μόνωσης.

- Το κτίριο πρέπει να πατάει πάνω σε μία στερεή βάση.
- Η βάση αυτή δεν θα πρέπει να είναι μονολιθικά συνδεδεμένη με την επιφάνεια της γης.

Αυτό συνάδει με τις σημερινές αρχές που καλούνται να συμμορφώνονται τα εφάδρανα, δηλαδή της υψηλής δυσκαμψίας στην κατακόρυφη διεύθυνση (ώστε να είναι σε θέση να παραλάβουν τα κατακόρυφα φορτία) και της μειωμένης δυσκαμψίας στην οριζόντια διεύθυνση (ώστε να οδηγούν σε αυξημένη ιδιοπερίοδο). Μένει και ένα τρίτο απαραίτητο συστατικό, αυτό της απορρόφησης ενέργειας.

Πράγματι, την 1^η Μαρτίου 1932, ο R W de Montalk [19] από τη Νέα Ζηλανδία εξέδωσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας με τίτλο “shock absorbing or minimizing means for buildings”, δηλαδή απορρόφηση ή ελαχιστοποίηση κραδασμών για κτίρια. Όπως αναφέρεται “The invention comprises means whereby a bed, which I call a severer, is placed and retained between the base of the building and its solid foundation, the severer being composed of material which will absorb or minimize shocks, thereby saving the building therefrom”.

March 1, 1932. R. W. DE MONTALK 1,847,820
SHOCK ABSORBING OR MINIMIZING MEANS FOR BUILDINGS
Filed June 10, 1930



Σχήμα 9: Σχέδιο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατέθεσε ο R.W De Montalk το 1932 για την απορρόφηση ενέργειας [19]

Κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου υπήρξε μια τεράστια εξέλιξη πάνω σε ζητήματα απορρόφησης κραδασμών για χρήση σε εναέρια και μηχανολογικά μέσα και μέχρι το 1950 είχε γίνει αντιληπτό ότι η μόνη διαφορά από την σεισμική μόνωση ήταν το μέγεθος της κλίμακας.

Η μελέτη των εφεδράνων από καουτσούκ στην Αγγλία αποτέλεσε σημείο ορόσημο για τη σεισμική μόνωση και αρκετά κτίρια, με πρώτο ένα σχολείο στα Σκόπια το 1969[20], άρχισαν να κάνουν δειλά δειλά την εμφάνισή τους. Το σύστημα μόνωσης του σχολείου αποτελείται από 16 εφέδρανα, καθένα από τα οποία αποτελείται από 7 στρώσεις συγκολλημένου άοπλου καουτσούκ.



Εικόνα 9: Εφέδρανα συγκολλημένου καουτσούκ στην πρώτη εφαρμογή τους



Εικόνα 10: Το πρώτο κτίριο στο οποίο εφαρμόστηκαν εφέδρανα από καουτσούκ, ένα σχολείο στα Σκόπια το 1969.[20]

Από 1976 και για μία πενταετία ο JM Kelly καθηγητής στο Berkeley στην Καλιφόρνια σε συνεργασία με το κέντρο ερευνών καουτσούκ της Αγγλίας διεξήγαγαν πληθώρα πειραμάτων με πολύ υποσχόμενα αποτελέσματα τα οποία οδήγησαν στην κατασκευή του πρώτου σεισμικά μονωμένου κτιρίου στην Αμερική(και πρώτου στον κόσμο με εφέδρανα υψηλής απόσβεσης,98 στον αριθμό) το Foothill Communities Law and Justice Center.



Εικόνα 11: Foothill Communities Law and Justice Center, η πρώτη εφαρμογή εφεδράνων υψηλής απόσβεσης

Το 1985 για την προστασία του Salt Lake City Country Building ενός ιστορικού κτιρίου τοποθετήθηκαν 447 εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου.



Εικόνα 12: Το 21 Salt Lake City Country Building ένα ιστορικό κτίριο που για λόγους αντισεισμικής προστασίας ενισχύθηκε με 447 εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου

Με την πάροδο των χρόνων και ιδιαίτερα γύρω στο 1990 η δυσπιστία των μηχανικών συρρικνώθηκε σε μεγάλο βαθμό ενώ παράλληλα η διαθέσιμη τεχνολογία ήταν ικανή να ανταπεξέλθει στην υλοποίηση των αναγκαίων συστημάτων. Μετά από τους σεισμούς του Northridge, του Kobe και της Ιαπωνίας η σεισμική μόνωση απόλαυσε ευρεία αποδοχή ως μέσο προστασίας των κατασκευών [21].

1.6 Πηγές-Βιβλιογραφία

- [1] Μιχαήλ Φραγκιαδάκης , Σημειώσεις για το μάθημα Αντισεισμικός Σχεδιασμός II
- [2] Ιωάννης Ν. Ψυχάρης , Σημειώσεις για το μάθημα Αντισεισμική Τεχνολογία 2
- [3] Kelly JM. The role of damping in seismic isolation Earthq Eng Dyn 1999;28:3 -20.
- [4] International Conference of Building Officials. Uniform building code. California, Wilier. 1997.
- [5] FEMA 450. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. Part 1: Provisions. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency; 2003.
- [6] Eurocode 8- Design of Structures for Earthquakes Resistance Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. Pr-EN 1998-1 Final Draft. Comité Européen de Normalisation. December 2003.
- [7] National Research Council. The National Building Code (NBC). Canada; 1995.
- [8] Anil K.Chopra Dynamic of Structures
- [9] C. Giarlelis, C. Kostikas, E. Lamprinou, M. Dalakiouridou , DYNAMIC BEHAVIOR OF A SEISMIC ISOLATED STRUCTURE IN GREECE, The 14th World Conference on Earthquake Engineering , October 12-17, 2008, Beijing, China
- [10] Vlasis Koumousis. Seismic Isolation of the Statue of Hermes of Praxitelis at the New Museum of Olympia. İstanbul : s.n., 2007
- [11] C.A. Castiglioni¹ and A. Kanyilmaz, Seismic Isolation Methods for Ancient Statues on Display, Proceedings of the 8th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, Bratislava, Slovakia, October 21-22, 2010
- [12] M. BOTIS¹ C. HARBI, A BRIEF HISTORY UPON SEISMIC ISOLATING SYSTEMS, Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series I: Engineering Sciences • Vol. 5 (54) No. 1 – 2012
- [13] Touaillon J. Improvement in buildings, US Patent No .99. 973, 1870.
- [14] Bechtold J. Earthquake-proof building, US Patent No. 845. 046, 1907.
- [15] Paolo M. Calvia,*, Gian Michele Calvib, Historical development of friction-based seismic isolation systems, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 106 (2018) 14–30
- [16] Naeim F, Kelly JM. Design of seismic isolated structures : from theory to practice, John Wiley; 1999

[17] Kelly JM. Aseismic base isolation: review and bibliography, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1986, Vol 5.

[18] Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Imperial_Hotel,_Tokyo

[19] de Montalk RW. Shock absorbing or minimizing means for buildings, US Patent No 1,847,820, 1932.

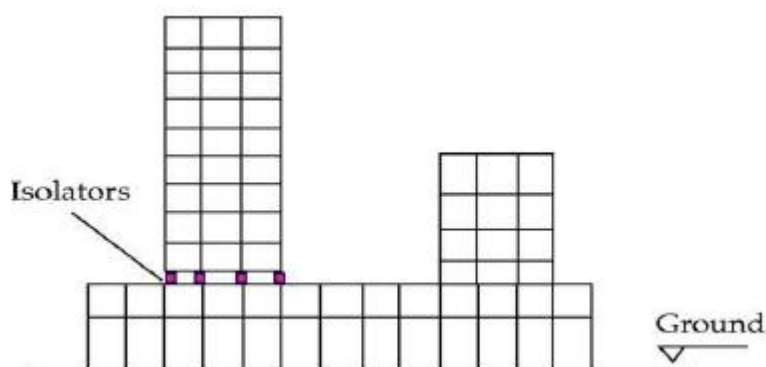
[20] James M Kelly^{1*} and Jiang Jun Lee², Vertical Flexibility in Isolation Systems,
1Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA
2Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, USA, Submission: December 03, 2017; Published: March 19, 2018

[21] Nicos Makris, Seismic Isolation Early History, Earthquake Eng Struct Dyn. 2019; 48: 269-283.

2. Υφιστάμενα συστήματα σεισμική μόνωσης

2.1 Εισαγωγή

Στο τέλος του 1^{ου} Κεφαλαίου παρουσιάστηκε συνοπτικά η ιστορική αναδρομή της σεισμικής μόνωσης, χωρίς ωστόσο να γίνει αναλυτική περιγραφή των ίδιων των συστημάτων. Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται λοιπόν τα σύγχρονα και αξιόπιστα μέσα με τα οποία επιτυγχάνεται αυτή η πολλά υποσχόμενη αποσύζευξη της ανωδομής, χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει ότι τα εφεδράνα τοποθετούνται σε όλες τις περιπτώσεις στην στάθμη του υπογείου.



Σχήμα 10: Περίπτωση τοποθέτησης εφεδράνου σε όροφο

2.2 Απαιτήσεις

Οι απαιτήσεις [1] συμπεριφοράς ενός συστήματος μόνωσης είναι οι ακόλουθες :

- χαμηλή δυσκαμψία ή αντίσταση στην οριζόντια διεύθυνση
- υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας
- αξιόπιστη συμπεριφορά όσο αφορά τις μη σεισμικές λειτουργικές δράσεις
- ικανότητα επαναφοράς μετά το τέλος του σεισμού

Πρόσθετες απαιτήσεις είναι :

- η ανθεκτικότητα σε διάρκεια
- η εύκολη εγκατάσταση και επιθεώρηση
- το περιορισμένο κόστος
- σταθερότητα μηχανικής συμπεριφοράς

2.3 Τα συστήματα μόνωσης

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα σεισμικής μόνωσης είναι δύο:

- 1) Τα ελαστομερή που περιλαμβάνουν τα:

- Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης (Low Damping Rubber Bearings-LDBR)
- Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (High Damping Rubber Bearings-HDBR)
- Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (Lead Rubber Bearings- LRB)

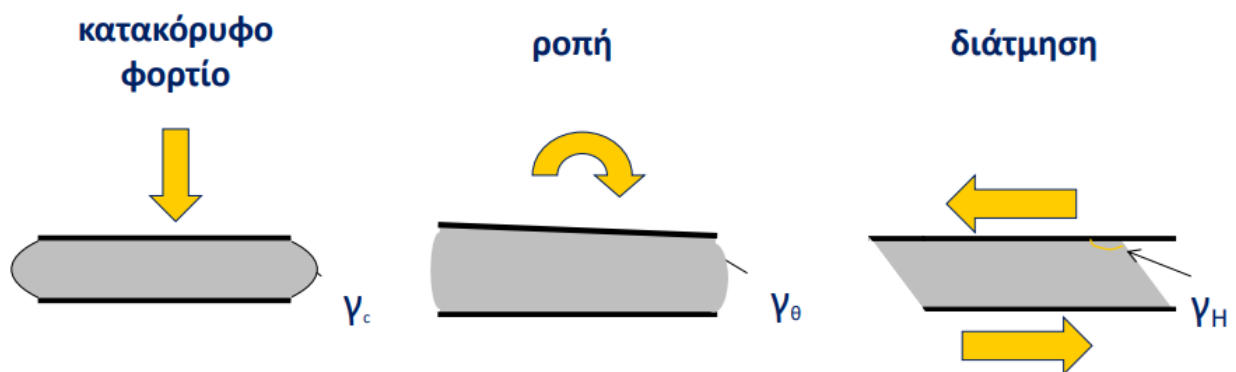
2) Τα συστήματα τριβής που περιλαμβάνουν:

- Μηχανισμούς με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης (Friction Sliding Systems-FSS)
- Μηχανισμούς με σφαιρική επιφάνεια ολίσθησης (Friction Pendulum Systems-FPS)

2.4 Ελαστομερή συστήματα

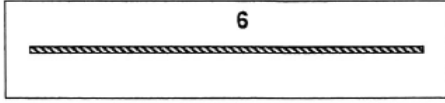
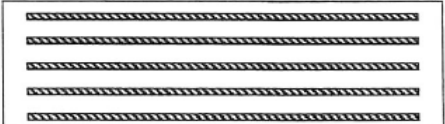
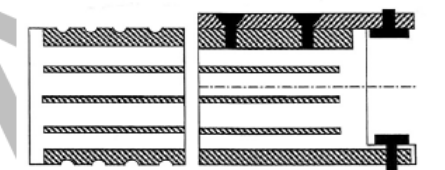

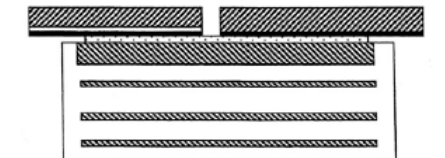

Τα ελαστομερή εφέδρανα είναι κατασκευασμένα από φυσικό(natural rubber) ή τεχνητό(chloroprene rubber) καουτσούκ ή ακόμα και μείγμα των δύο. Το σχήμα τους είναι ορθογωνικό ή κυκλικό. Η ιδέα για την τοποθέτηση λεπτών μεταλλικών πλακών στο εσωτερικό του ελαστομερούς για τον περιορισμό της διόγκωσης του οφείλεται στον Γάλλο μηχανικό Eugene Freyssinet [2] . Αυτά τα ελάσματα από χάλυβα λειτουργούν δηλαδή σαν στοιχεία περίσφιξης [3] μειώνοντας την κατακόρυφη παραμορφωσιμότητα των εφεδράνων.

Οι απαραίτητοι έλεγχοι προσδίδουν στο μέτρο διάτμησης μία μέγιστη τιμή, βάση της οποίας προσδιορίζονται οι μέγιστες δυνάμεις και μία ελάχιστη, βάση της οποίας προσδιορίζονται οι μετακινήσεις. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης το εφέδρανο δεν καταπονείται μόνο από κατακόρυφη τάση αλλά από περιστροφή και διάτμηση. Είναι πιθανό σε περίπτωση κατακόρυφου σεισμού να αναπτυχθεί και εφελκυσμός (κάτι που δεν συνίσταται στους κανονισμούς).Επιτρέπεται ωστόσο σύμφωνα με το EN 1337-3 να παραληφθεί μια μικρή βραχυχρόνια εφελκυστική τάση ως 1Μρα.



Σχήμα 11: Αναπτυσσόμενες δράσεις στα εφέδρανα

Οι 6 τύποι ελαστομεταλλικών εφεδράνων ορίζονται παρακάτω:

<p>Τύπος Α: Ελαστομεταλλικό εφέδρανο με ένα χαλύβδινο ελάσμα πλήρως περιβεβλημένο με ελαστομερές υλικό.</p>	
<p>Τύπος Β: Ελαστομεταλλικό εφέδρανο με δύο τουλάχιστον χαλύβδινα ελάσματα πλήρως περιβεβλημένα με ελαστομερές υλικό.</p>	
<p>Τύπος C: Ελαστομεταλλικά εφέδρανα με εξωτερικά ελάσματα. <i>Σημείωση:</i> Εκτός από τον εμφανιζόμενο στο σχήμα τρόπο αγκύρωσης, δύνανται να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τρόποι σε συμφωνία με τον Κ.Τ.Ε.</p>	
<p>Τύπος D: Όπως ο τύπος Β με φύλλα PTFE συγκολλημένα στο ελαστομερές.</p>	
<p>Τύπος Ε: Όπως ο τύπος C με μία εξωτερική πλάκα βουλκανισμένη με το ελαστομερές υλικό επί της οποίας είναι συγκολλημένο φύλλο PTFE.</p>	
<p>Τύπου F: Ελαστομερή εφέδρανα άοπλα (χωρίς χαλύβδινα ελάσματα) –ελαστομερείς ταινίες.</p>	

Σχήμα 12: Τύποι ελαστομεταλλικών εφεδράνων

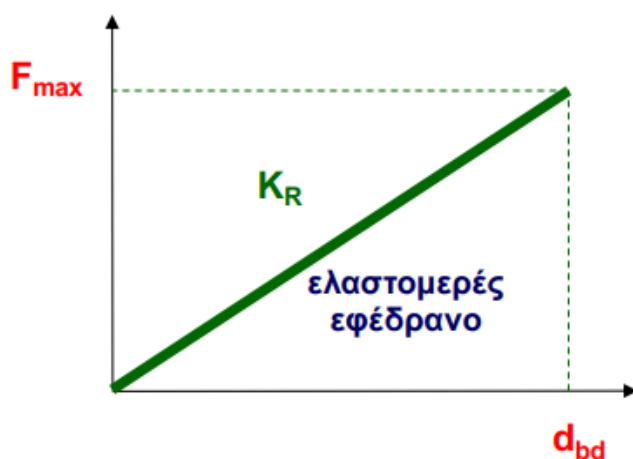
Οι ενσωματωμένες μεταλλικές πλάκες είναι ποιότητας χάλυβα S235 με ελάχιστη επιμήκυνση θραύσεως 18%, ενώ το ελάχιστον πάχος δεν μπορεί να είναι μικρότερο από 2mm[4].

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα εισάγονται στο στατικό προσομοίωμα σαν ακλόνητη στήριξη κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ στην οριζόντια σαν ελατήριο με σταθερά K.[5]

2.4.1 Ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης έχουν ισοδύναμο λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%, ενώ η συμπεριφορά τους κατά την οριζόντια διεύθυνση μπορεί να προσομοιωθεί με γραμμικά ελατήρια, παράγοντας που απλοποιεί τη δυναμική ανάλυση, με σταθερά $K=G \cdot A/T$, όπου :

- G: μέτρο διάτμησης ελαστομερούς
- A: εμβαδόν διατομής εφεδράνου σε κάτοψη
- T: συνολικό πάχος στρώσεων ελαστομερούς

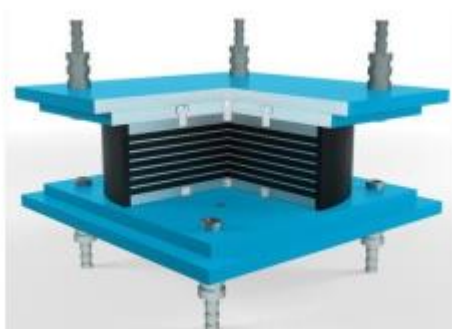


Σχήμα 13: Συμπεριφορά ελαστομερούς εφεδράνου χαμηλής απόσβεσης

Παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως :

- Τυποποίηση στην κατασκευή.
- Χαμηλό κόστος αντικατάστασης
- Απλή προσομοίωση , όπως αναφέρθηκε παραπάνω.
- Ανθεκτικότητα και αναλλοίωτες ιδιότητες σε περιβαλλοντικές επιδράσεις και ιστορία φόρτισης.

Παρόλα αυτά, τα εφέδρανα αυτού του τύπου παρουσιάζουν χαμηλή απορρόφηση ενέργειας με αποτέλεσμα να πρέπει να συνδυάζονται με πρόσθετα μέσα απόσβεσης.



Εικόνα 13: Τυπική διατομή εφεδράνου με βλήτρα για σύνδεση

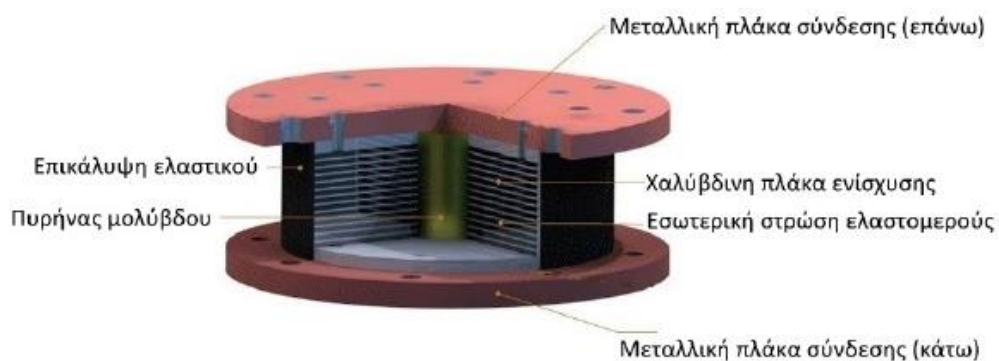
2.4.2 Ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης σχηματικά δεν διαφέρουν σε τίποτε από τα χαμηλής. Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στη σύσταση του καουτσούκ .Πιο συγκεκριμένα, το ελαστομερές διαθέτει έμφυτη απόσβεση κι έτσι οι πρόσθετες συσκευές σκέδασης της ενέργειας καθίστανται περιττές. Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στην ανάμειξη του καουτσούκ με ίνες από άνθρακα ή ρητινών. Τα εφέδρανα αυτά επιτυγχάνουν απόσβεση της τάξης του 10-20%.

Το σημαντικό πλεονέκτημα των εφεδράνων υψηλής απόσβεσης είναι η ευεργετική τους δράση στις λειτουργικές ταλαντώσεις της κατασκευής. Παρόλο που διαθέτουν όπως αναφέρει και το όνομά τους υψηλή απόσβεση δίχως πρόσθετα μέσα ,η προσομοίωση , αλλά και η ίδια τους η απόκριση παρουσιάζει αβεβαιότητες καθώς χαρακτηριστικά όπως η δυσκαμψία και η απόσβεση επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα και τη χρονοϊστορία της φόρτισης.[6]

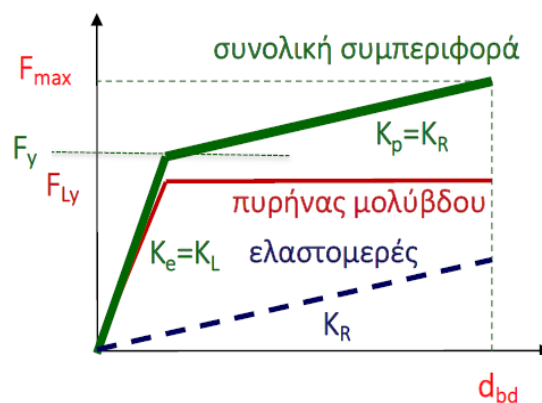
2.4.3 Ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου εφευρέθηκαν στη Νέα Ζηλανδία το 1975. Πρόκειται για κοινά ελαστομεταλλικά εφέδρανα τα οποία διαθέτουν έναν ή σπανιότερα περισσότερους πυρήνες μολύβδου στο εσωτερικό τους, επιτυγχάνοντας απόσβεση της τάξεως του 40%.



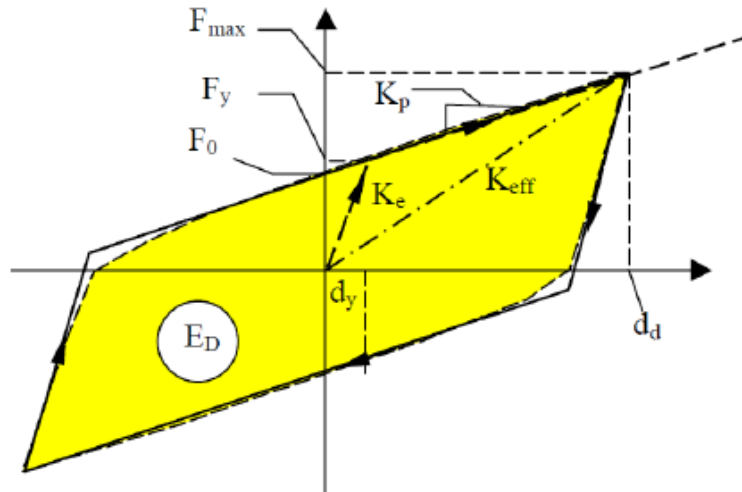
Εικόνα 14: Τυπική διατομή εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου[7]

Ο συγκεκριμένος τύπος εφεδράνου αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα των επί μέρους υλικών του. Ο μολύβδος σχεδιάζεται ώστε να παρέχει υψηλή ακαμψία για τις μη σεισμικές δράσεις ενώ παράλληλα θα διαρρέει για τις σεισμικές. Μετά το σημείο της διαρροής ο μολύβδος παρουσιάζει σχεδόν πλαστική συμπεριφορά και ταυτόχρονα η πλευρική δυσκαμψία της κατασκευής μειώνεται αισθητά και με αυτό τον τρόπο το ελαστομερές μπορεί να παραμορφωθεί πλευρικά επιμηκύνοντας την ιδιοπερίοδο.



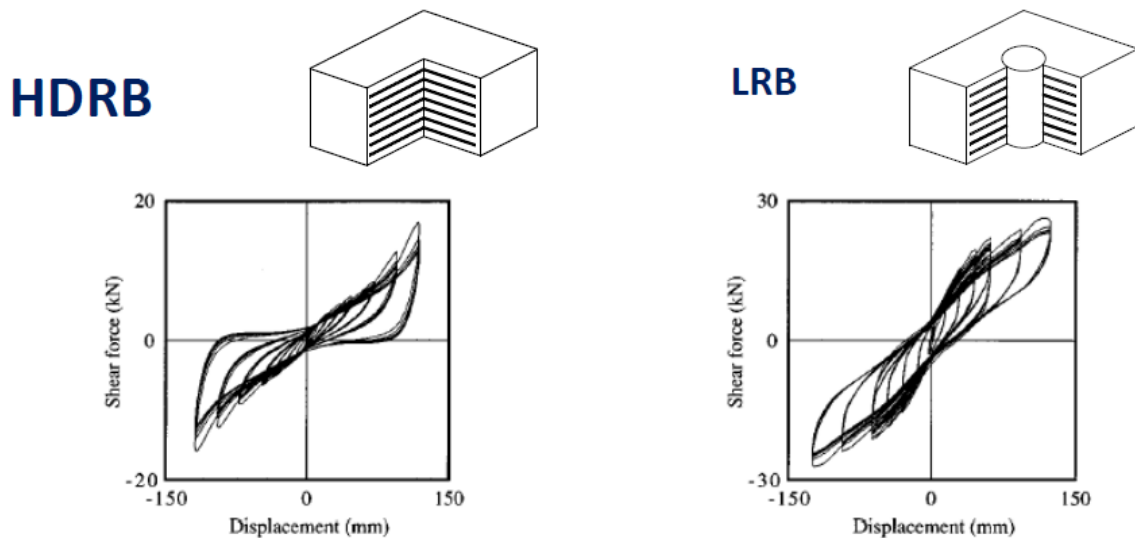
Σχήμα 14: Συμπεριφορά ελαστομεταλλικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου

Όσο λιγότερο αποτελεσματικός καθίσταται ο εγκιβωτισμός του πυρήνα μολύβδου τόσο ο βρόγχος υστέρησης αποκλίνει από το διγραμμικό μοντέλο. Παρόλα αυτά, ο Ευρωκώδικας 8 [1] κρίνει το παρακάτω μοντέλο επαρκές.

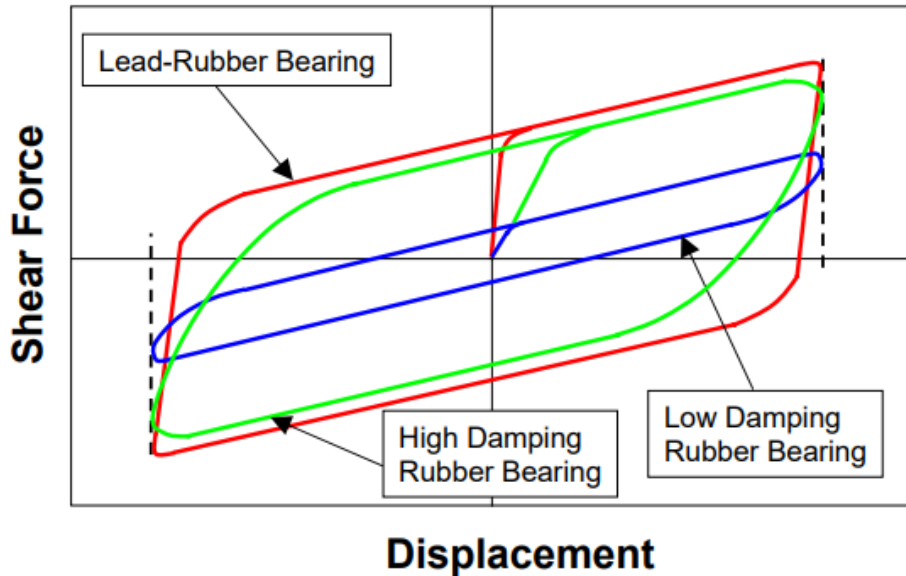


Σχήμα 15: Απλοποιημένο διγραμμικό μοντέλο ανάλυσης

Παρακάτω παρουσιάζεται μία σύγκριση των βρόγχων HDRB με LRB και όλων των ελαστομεταλλικών εφεδράνων μεταξύ τους:



Σχήμα 16: Βρόγχοι HDRB LRB



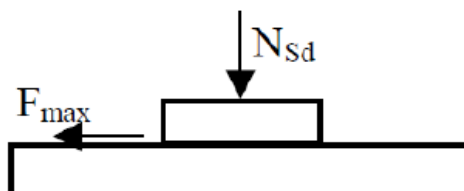
Σχήμα 17: Βρόγχοι όλων των τύπων ελαστομεταλλικών εφεδράνων

2.5 Συστήματα τριβής

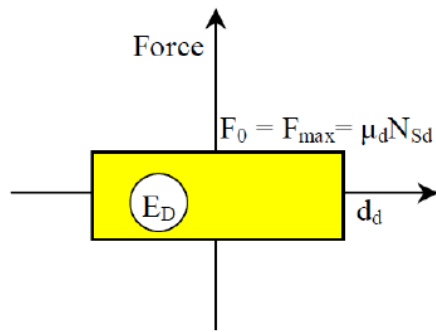
Τα συστήματα τριβής αξιοποιούν τα χαρακτηριστικά χαμηλής τριβής συγκεκριμένων υλικών όπως μεταξύ στιλβωμένου ανοξείδωτου χάλυβα και πολυτετραφθοροαιθυλενίου. Όταν η ασκούμενη δύναμη ξεπεράσει αυτή της τριβής τότε ενεργοποιείται το εφέδρανο και η κατασκευή αρχίζει να ολισθαίνει. Ιστορικά αυτά ακριβώς τα συστήματα (σε μία όχι τόσο ώριμη μορφή) που βασίζονται στην ολίσθηση της κατασκευής πάνω σε μία λεία επιφάνεια περιορίζοντας την αναπτυσσόμενη ένταση ήταν και τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν, όπως είδαμε στο πρώτο κεφάλαιο. (Μαυσωλείο Cygus the Great, Jules Touallion, Imperial Hotel Τόκιο).

2.5.1 Εφέδρανα τριβής με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης

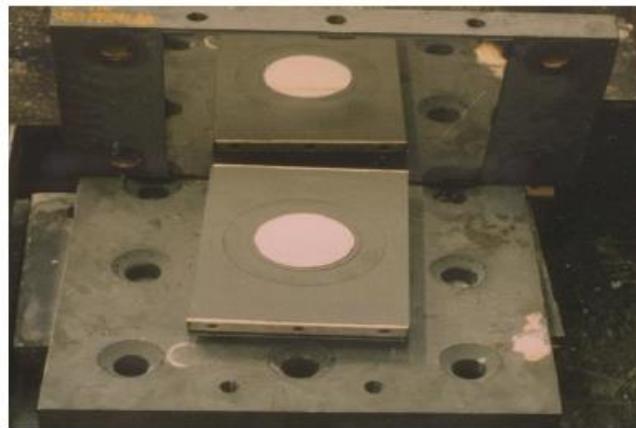
Τα εφέδρανα τριβής με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης δεν επηρεάζουν τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο αλλά τη δύναμη που μεταφέρεται στην ανωδομή. Η κατασκευή ολισθαίνει και με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η σεισμική απαίτηση, αλλά αυτό συνοδεύεται από υψηλές μετακινήσεις. Λόγω της επίπεδης επιφάνειας τους διαθέτουν το σημαντικό μειονέκτημα της έλλειψης δύναμης επαναφοράς και προκειμένου μετριασθεί αυτό το ζήτημα συνδυάζονται με ελαστομεταλλικά εφέδρανα δημιουργώντας υβριδικά συστήματα.



Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση FSS



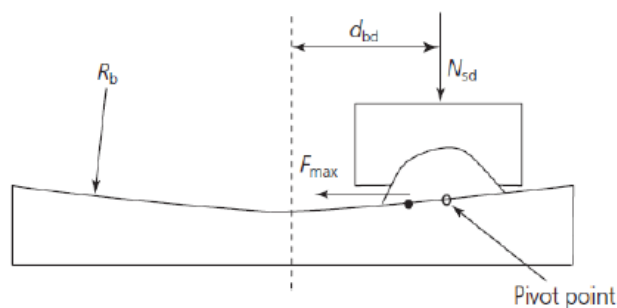
Σχήμα 19: Βρόγχος FSS



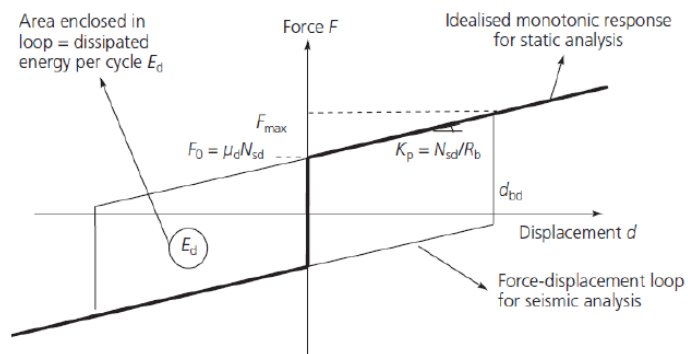
Εικόνα 15: Εφέδρανο ολίσθησης επίπεδης επιφάνειας

2.5.2 Εφέδρανα τριβής με σφαιρική επιφάνεια ολίσθησης

Τα εφέδρανα με σφαιρική επιφάνεια ολίσθησης ονομάζονται αλλιώς τύπου εκκρεμούς. Η οριζόντια δυσκαμψία εξαρτάται από τη μάζα της κατασκευής ενώ η ακτίνα της σφαιρικής επιφάνειας είναι της τάξης των 3-4 m και καθορίζει την ιδιοπερίοδο της ταλάντωσης. Λόγω της συγκεκριμένης γεωμετρίας εξασφαλίζεται η επαναφορά της κατασκευής στην αρχική της θέση έπειτα από σεισμική διέγερση σε αντίθεση με τα εφέδρανα επίπεδης επιφάνειας ολίσθησης.



Σχήμα 20: Σχηματική απεικόνιση FPS



Σχήμα 21: Βρόγχος FPS



Εικόνα 16: Εφέδρανο ολίσθησης σφαιρικής επιφάνειας

2.6 Πηγές-Βιβλιογραφία

[1]CEN (2005). European Standard EN1998-2:2005 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance.

[2]James M. Kelly,Dimitrios A. Konstantinidis, Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation,Wiley Publication 2011.

[3]Οδηγός Σχεδιασμού σύμφωνα με των Ευρωκώδικα 8:Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών,Haig Gulvanessian

[4]Εθνική τεχνική προδιαγραφή ελαστομεταλλικά εφέδρανα, Ε.Λ.Ο.Τ Ελλάδα, Αθήνα, 2009

[5]Ιωάννης Βάγιας,Άρης Ηλιόπουλος,Πάυλος Θανόπουλος,Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών,Εκδόσεις Κλειδάριθμος 2016

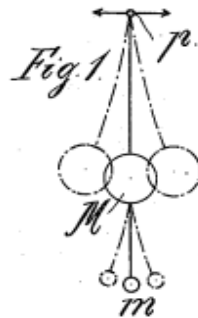
[6][Michael D. Symans,Seismic Protective Systems-Seismic Isolation.

[7]Hebei Zaoqiang Dacheng Rubber Co.,Ltd

3. Tuned Mass Dampers

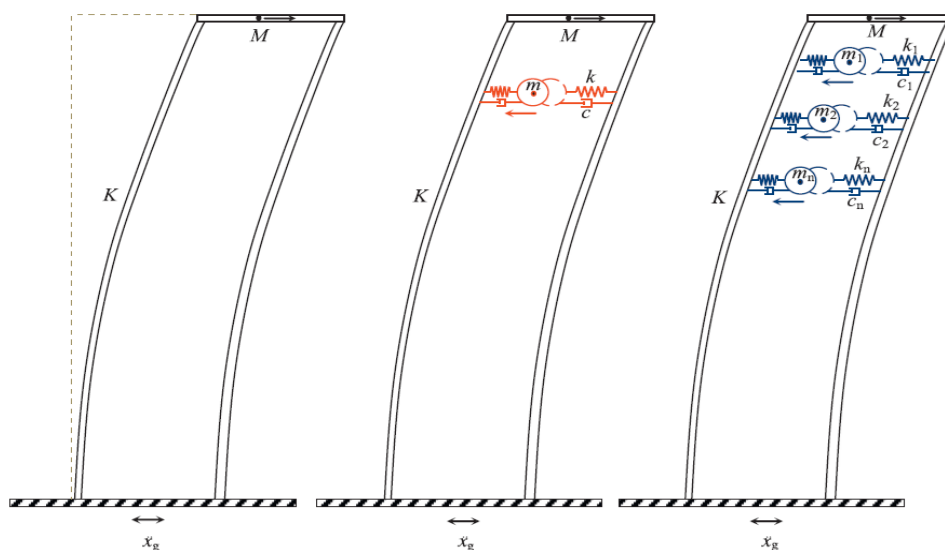
3.1 Εισαγωγή

Η ιδέα πίσω από τους αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (Tuned Mass Dampers) έχει τις ρίζες της στο 1909 όταν ο Frahm [1] προσπάθησε να περιορίσει τις ‘δονήσεις συντονισμού’ που αναπτύσσονται όταν ένα σώμα υπόκειται σε περιοδικές δονήσεις. Εξέδωσε λοιπόν δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στο οποίο οι δονήσεις αυτές αποσβένουν ή ακόμη και αποφεύγονται εντελώς μέσω ενός βοηθητικού σώματος το οποίο συνδέεται με την κατασκευή και έχει όσο το δυνατόν ίδια ιδιοπερίοδο με αυτή.



Σχήμα 22: Οι δονήσεις αποσβένουν μέσω ενός βοηθητικού σώματος το οποίο συνδέεται με την κατασκευή και έχει όσο το δυνατόν ίδια ιδιοπερίοδο με αυτή. Σχέδιο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατέθεσε ο Frahm το 1909 για την απόσβεση της κίνησης [1]

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ‘The member joining the auxiliary to the main body exercises a reaction on the main body owing to the phase difference, which is directed against the primary disturbing impacts on the main body.’ Αυτή ακριβώς η διαφορά φάσης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, στην οποία η πρόσθετη μάζα ασκεί μία αντίδραση στο κτίριο η οποία τείνει να αναιρέσει τη δράση της σεισμικής διέγερσης.



Σχήμα 23: Η διαφορά φάσης κατασκευής-TMD τείνει να επαναφέρει το κτίριο στην αρχική του θέση αναιρώντας τις εξωτερικές δράσεις. [2]

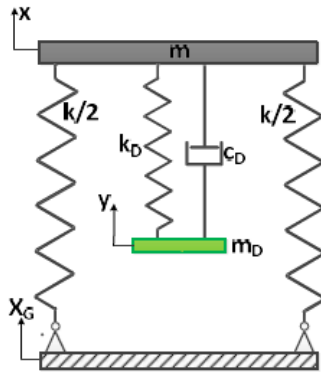
Ο Den Hartog στα βιβλία του [3-4] το 1947 και 1956 αντίστοιχα προτείνει έναν βέλτιστο σχεδιασμό του TMD, ο οποίος έχει εφαρμογή σε αρκετά συστήματα με πιο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις αυτές που αφορούν σε ουρανοξύστες[5]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Ταιρεί 101 Tower, η κατασκευή του οποίου ξεκίνησε το 1999 και από την ολοκλήρωσή του το 2004 έως το 2009 ήταν αναγνωρισμένο ως ο πιο υψηλός ουρανοξύστης στον κόσμο με ύψος τα 508.2m[6]. Παρόλο που το συγκεκριμένο σύστημα TMD είναι καταξιωμένο όσον αφορά στην αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία του διαθέτει σημαντική ευαισθησία των ιδιοτήτων του έναντι περιβαλλοντικών επιδράσεων και εξωτερικών παραγόντων [7]. Ένας ακόμη αξιοσημείωτος περιορισμός των TMD είναι η απαίτηση για σημαντική ταλαντούμενη μάζα το οποίο καθιστά την κατασκευή αλλά και την τοποθέτηση δυσχερή.



Εικόνα 17: Το Ταιρεί 101 Tower, η κατασκευή του οποίου ξεκίνησε το 1999 και από την ολοκλήρωσή του το 2004 έως το 2009 ήταν αναγνωρισμένο ως ο πιο υψηλός ουρανοξύστης στον κόσμο με ύψος τα 508.2m [6].

3.2 Βελτιστοποίηση Den Hartog

Ας θεωρήσουμε το παρακάτω σύστημα το οποίο αποτελείται από το ταλαντούμενο σώμα με μάζα m , δυσκαμψία k , το βοηθητικό με μάζα m_D δυσκαμψία k_D και τον αποσβεστήρα με σταθερά c_d το οποίο υπόκειται σε αρμονική φόρτιση $P(t) = P_0 \exp(j\omega t)$.



Σχήμα 24: Σχηματική απεικόνιση TMD

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του συστήματος είναι οι ακόλουθες:

$$m \cdot \ddot{u}_s + k \cdot u_s + k_D \cdot (u_s - u_D) + c_D \cdot (\dot{u}_s - \dot{u}_D) = P_0 \cdot \exp(j\omega t) \quad (3.1)$$

$$m_D \cdot \ddot{u}_D + k_D \cdot (u_D - u_s) + c_D \cdot (\dot{u}_D - \dot{u}_s) = 0 \quad (3.2)$$

ενώ η εκτιμώμενη απόκριση θα έχει τη μορφή:

$$u_s(t) = \tilde{U}_s \exp(j\omega t), u_D(t) = \tilde{U}_D \exp(j\omega t) \quad (3.3)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις και διαιρώντας με $\exp(j\omega t)$ έχουμε:

$$-m \cdot \omega^2 \cdot \tilde{U}_s + k \cdot \tilde{U}_s + k_D \cdot (\tilde{U}_s - \tilde{U}_D) + i \cdot \omega \cdot c_D \cdot (\tilde{U}_s - \tilde{U}_D) = P_0 \quad (3.4)$$

$$-m_D \cdot \omega^2 \cdot \tilde{U}_D + k_D \cdot (\tilde{U}_D - \tilde{U}_s) + i \cdot \omega \cdot c_D \cdot (\tilde{U}_D - \tilde{U}_s) = 0 \quad (3.5)$$

Διαχωρίζοντας τους όρους προκύπτει αρχικά:

$$[-m \cdot \omega^2 + k + k_D + i \cdot \omega \cdot c_D] \cdot \tilde{U}_s - [k_D + i \cdot \omega \cdot c_D] \cdot \tilde{U}_D = P_0 \quad (3.6)$$

$$-[k_D + i \cdot \omega \cdot c_D] \cdot \tilde{U}_s + [-m_D \cdot \omega^2 + k_D + i \cdot \omega \cdot c_D] \cdot \tilde{U}_D = 0 \quad (3.7)$$

και η τελική έκφραση ως προς \tilde{U}_s είναι:

$$\frac{\tilde{U}_s}{P_0} = \sqrt{\frac{(k_D + \omega \cdot c_D)^2 + (\omega \cdot c_D)^2}{\{(-m \cdot \omega^2 + k)(-m_D \cdot \omega^2 + k_D) - m \cdot \omega^2 k_D\}^2 + \{\omega c_D \cdot (-m \cdot \omega^2 + k - m \cdot \omega^2)\}^2}} \quad (3.8)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι δυνατόν να διατυπωθεί σε μιγαδική μορφή

$\tilde{U}_s = P_0(A + iB)$ αντιπροσωπεύοντας ένα διάνυσμα με το j να δηλώνει τη διαφορά φάσης κατά 90 μοίρες. Το μέτρο του είναι $P_0 \sqrt{A^2 + B^2}$. Με αυτό τον τρόπο η απόκριση της

μορφής $\tilde{U}_s = P_0 \frac{A+iB}{C+iD}$ μπορεί να μετασχηματιστεί σε $\frac{\tilde{U}_s}{P_0} = \sqrt{\frac{A^2+B^2}{C^2+D^2}}$

Κάνοντας πράξη τον παραπάνω μετασχηματισμό και θέτοντας:

$$\bar{U}_{ST} = P_0/k, \text{ στατική μετακίνηση του συστήματος} \quad (3.9)$$

$$\omega_\alpha^2 = k_D/m_D, \text{ ιδιοσυχνότητα του αποσβεστήρα} \quad (3.10)$$

$$\Omega_n^2 = k/m, \text{ ιδιοσυχνότητα της κατασκευής} \quad (3.11)$$

$$\rho = \omega_\alpha/\Omega_n, \text{ λόγος ιδιοσυχνοτήτων} \quad (3.12)$$

$$q = \omega/\Omega_n, \text{ λόγος ιδιοσυχνοτήτων εξαναγκασμένης ταλάντωσης} \quad (3.13)$$

$$\zeta = c_D/2m\Omega_n, \text{ λόγος απόσβεσης} \quad (3.14)$$

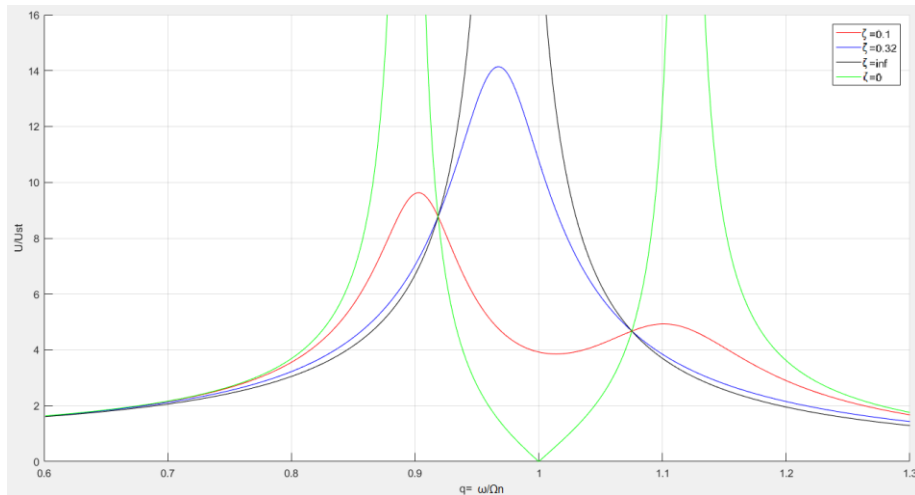
$$\mu = m_D/m, \text{ λόγος μαζών} \quad (3.15)$$

έχουμε:

$$\frac{\bar{U}_s}{\bar{U}_{ST}} = \sqrt{\frac{(2\zeta q\rho)^2 + (q^2 - \rho^2)^2}{(2\zeta q\rho)^2 \cdot (q^2 - 1 + \mu q^2) + [\mu \rho^2 q^2 - (q^2 - 1) \cdot (q^2 - \rho^2)]^2}} \quad (3.16)$$

Η απόκριση της κύριας μάζας είναι συνάρτηση 4 παραμέτρων μ, ρ, q, ζ . Στο Σχήμα 25 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα του λόγου απόκρισης σε σχέση με το q για σταθερές τιμές $\rho=1$, μιας και θέλουμε οι ιδιοπερίοδοι των δύο σωμάτων να έχουν όσο το δυνατόν πιο κοντινές τιμές, και $\mu=1/20$ κάτι που αναφέρεται σε μια σημαντική αλλά αναγκαία πρόσθετη μάζα. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι ενώ για μία συνήθη κατασκευή $q=1$ θα σήμαινε συντονισμό και μεγιστοποίηση της απόκρισης, στην περίπτωση του TMD αυτή παρουσιάζει μέγιστες τιμές για παράμετρο q διαφορετική της μονάδας.

Εντυπωσιακή είναι η περίπτωση για τις ακραίες τιμές του ζ μιας και η απόκριση φαίνεται και στις δύο περιπτώσεις να τείνει στο άπειρο. Η φυσική σημασία για $\zeta=0$ είναι ότι πραγματοποιείται μια εξαναγκασμένη ταλάντωση χωρίς απόσβεση, ενώ για $\zeta=\infty$ και μικρή ακόμη σχετική ταχύτητα ο αποσβεστήρας αναπτύσσει μεγάλη δύναμη με αποτέλεσμα να αναγκάζει τις δύο μάζες να κινούνται ως μία αδρανοποιώντας την απόσβεση.



Σχήμα 25: Η μεγιστοποίηση της απόκρισης πραγματοποιείται για q διαφορετικό της μονάδας, ενώ για λόγους απόσβεσης 0 και ∞ η απόκριση τείνει στο άπειρο. Διάγραμμα λόγου απόκρισης-λόγου ιδιοσυχνοτήτων εξαναγκασμένης ταλάντωσης για $\rho=1$ και $\mu=0.05$.

Επόμενος στόχος είναι ο καθορισμός της βέλτιστης τιμής για την απόσβεση ζ .

Παρατηρούμε ότι όλα τα διαγράμματα του λόγου απόκρισης συναρτήσει του q διέρχονται από δύο σημεία P και Q, ενώ παράλληλα μέσω κατάλληλης εκλογής της παραμέτρου ρ είναι δυνατόν να τα μετακινήσουμε ώστε να έχουν το ίδιο ύψος. Επιπλέον, μεταβάλλοντας την τιμή του συντελεστή ζ η καμπύλη μπορεί μετακινηθεί και με αυτό τον τρόπο να εφάπτεται οριζόντια σε τουλάχιστον ένα από τα παραπάνω σημεία ελαχιστοποιώντας την απόκριση του συστήματος.

Βάση αυτών των στόχων:

$$\frac{\tilde{U}_s}{\tilde{U}_{ST}} = \sqrt{\frac{A \cdot \zeta^2 + B}{C \cdot \zeta^2 + D}} \quad (3.17)$$

και αν θέσουμε $A/C=B/D$ ο λόγος απόκρισης δεν εξαρτάται πλέον από το ζ

$$\left(\frac{1}{q^2 - 1 + \mu \cdot q^2} \right)^2 = \left(\frac{q^2 - \rho^2}{\mu \cdot \rho^2 \cdot q^2 - (q^2 - 1) \cdot (q^2 - \rho^2)} \right)^2 \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{q^2 - 1 + \mu \cdot q^2} = \pm \frac{q^2 - \rho^2}{\mu \cdot \rho^2 \cdot q^2 - (q^2 - 1) \cdot (q^2 - \rho^2)} \quad (3.19)$$

Σε περίπτωση που λάβουμε το αρνητικό πρόσημο προκύπτει $q^2=0$ ενώ για το θετικό:

$$q^4 - 2 \cdot q^2 \cdot \frac{1 + \rho^2 + \mu \cdot \rho^2}{2 + \mu} + \frac{2 \cdot \rho^2}{2 + \mu} = 0 \quad (3.20)$$

Οι δύο ρίζες q_L^2 και q_R^2 που θα προκύψουν από το παραπάνω πολυώνυμο εξαρτώνται από τις τιμές των παραμέτρων μ και ρ και αντιπροσωπεύουν τις τετμημένες των σημείων P και Q. Όπως εύκολα παρατηρούμε οι ρίζες του παραπάνω πολυωνύμου είναι ανεξάρτητες του συντελεστή ζ και προκειμένου απλοποιήσουμε την έκφραση της απόκρισης έτσι ώστε η

διαδικασία εξίσωσης των υψών των τετμημένων υλοποιηθεί ευκολότερα θέτουμε $\zeta=\infty$ και έχουμε ότι:

$$\frac{\bar{U}_s}{\bar{U}_{ST}} = \frac{1}{1-q^2 \cdot (1+\mu)} \quad (3.21)$$

και αντικαθιστώντας τα q_L, q_R

$$\frac{1}{1-q_L^2 \cdot (1+\mu)} = \frac{1}{1-q_R^2 \cdot (1+\mu)} \quad (3.22)$$

Παρόλα αυτά η παραπάνω έκφραση δεν συνάδει με τη μορφή του λόγου απόκρισης ,αφού για q μεγαλύτερο του $1/\sqrt{1+\mu}$ ο λόγος δεν είναι πλέον θετικός. Εφόσον όμως τα σημεία P και Q είναι εκατέρωθεν της συγκεκριμένης τιμής επιτρέπεται να αλλάξουμε το πρόσημο του ενός μέλους.

$$q_L^2 + q_R^2 = \frac{2}{1+\mu} \quad (3.23)$$

Συνδυάζοντας με το άθροισμα της (3.20)

$$q_L^2 + q_R^2 = \frac{2 \cdot (1+\rho^2 + \mu \cdot \rho^2)}{2+\mu} \quad (3.24)$$

Προκύπτει:

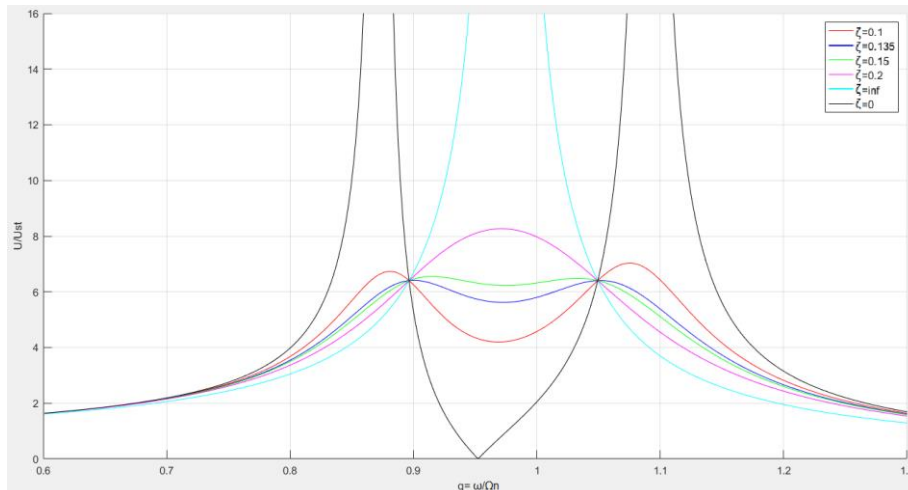
$$\rho = \frac{1}{1+\mu} \quad (3.25)$$

η οποία εξασφαλίζει το βέλτιστο συγχρονισμό του συστήματος. Παρατηρούμε ότι με προσθήκη ελάχιστης μάζας, πρακτικά $\mu=0$, ο συντελεστής ρ τείνει να λάβει μοναδιαία τιμή και η ιδιοσυχνότητα του μονωτήρα να ταυτιστεί με αυτή της κατασκευής. Παράλληλα, από την ίδια έκφραση, είναι εμφανές ότι η αύξηση της τιμής της μάζας πρέπει να συνοδεύεται από μείωση της ιδιοσυχνότητας του μονωτήρα.

Εφαρμόζοντας την (3.25) στην (3.21) ο λόγος απόκρισης του συστήματος στα σημεία του P και Q γίνεται:

$$\frac{\bar{U}_s}{\bar{U}_{ST}} = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}} \quad (3.26)$$

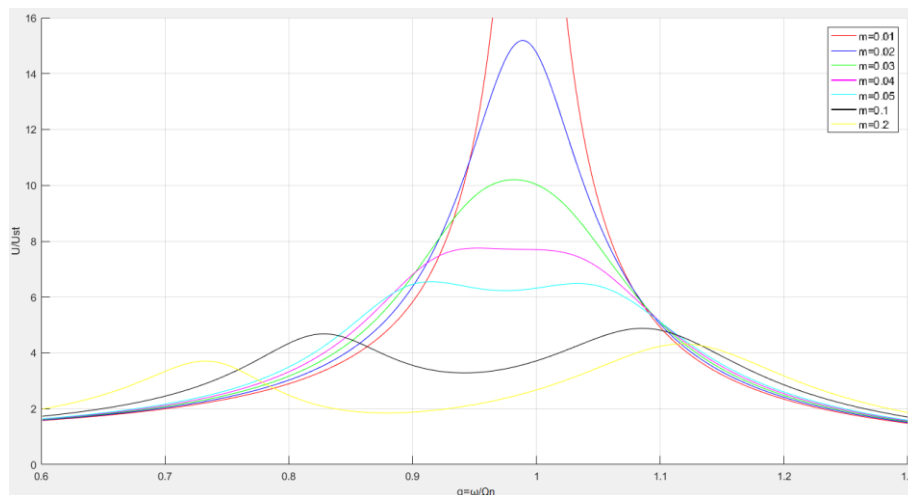
Στο Σχήμα 26 έχουμε ότι για $\mu=0.05$ η τιμή του ρ προκύπτει από (3.25) και για βελτιστοποίηση του ζ τα σημεία P και Q βρίσκονται στην ίδια στάθμη.



Σχήμα 26: Όλα τα διαγράμματα του λόγου απόκρισης συναρτήσει του q διέρχονται από δύο σημεία P και Q, ενώ παράλληλα μέσω κατάλληλης εκλογής της παραμέτρου ρ είναι δυνατόν να τα μετακινήσουμε ώστε να έχουν το ίδιο ύψος. Επιπλέον, μεταβάλλοντας την τιμή του συντελεστή ζ ελαχιστοποιούμε την απόκριση. Διάγραμμα λόγου απόκρισης-λόγου ιδιοσυχνοτήτων εξαναγκασμένης ταλάντωσης για $\mu=0.05$.

Τελικά, βάση του Σχήματος 27 η αύξηση του συντελεστή μ μειώνει αισθητά τα μέγιστα του λόγου απόκρισης.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα θα είναι τόσο καλύτερα όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της πρόσθετης μάζας σε σχέση με αυτή της κατασκευής. Ο παράγοντας αυτός είναι τις περισσότερες φορές αρκετά περιοριστικός, καθώς η προσθήκη μεγάλης επιπλέον μάζας δεν είναι ρεαλιστική αντιμετώπιση και συνδυάζεται με σημαντική καταπόνηση της ίδιας της κατασκευής.



Σχήμα 27: Τα αποτελέσματα της απόκρισης θα είναι τόσο καλύτερα όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της πρόσθετης μάζας σε σχέση με αυτή της κατασκευής. Ο παράγοντας αυτός είναι τις περισσότερες φορές αρκετά περιοριστικός. Διάγραμμα λόγου απόκρισης-λόγου ιδιοσυχνοτήτων εξαναγκασμένης ταλάντωσης για $\zeta=0.15$

3.3 Πηγές-Βιβλιογραφία

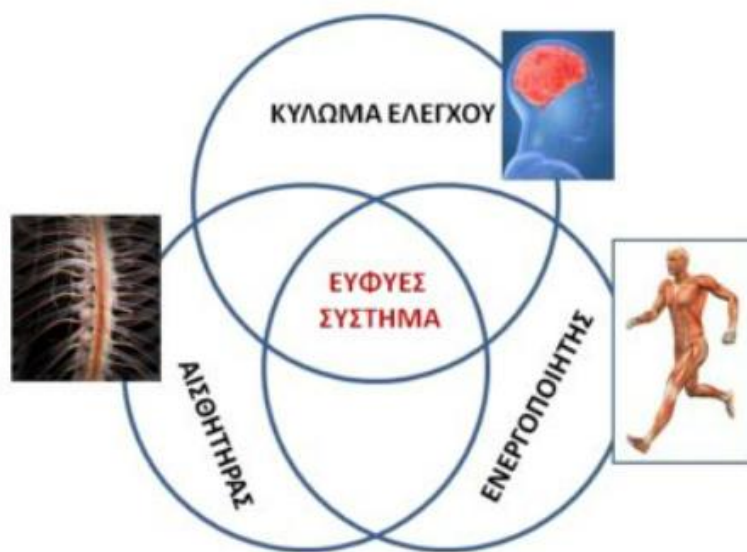
- [1]Frahm, H. (1909). Device for damping vibration of bodies, US Patent, 989958.
- [2]Said Elias , Vasant Matsagar , Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers ,Annual Reviews in Control 44 (2017) 129–156
- [3]Den Hartog, J. P. (1947). Mechanical vibrations (3rd Edition). New York (NY), USA: McGraw-Hill Book Company .
- [4]Den Hartog, J. P. (1956). Mechanical vibrations (4th Edition). New York (NY), USA: McGraw-Hill .
- [5] Luft RW. Optimal tuned mass dampers for buildings. J. of the Str Div, ASCE 1977;103:1985-98.
- [6]Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Taipei_101
- [7]Weber B, Feltrin G. Assessment of long-term behavior of tuned mass dampers by system identification. *Engineering Structures* 2010; **32**(11): 3670–3682. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.08.011.

4. Κράματα μνήμης σχήματος

4.1 «Ευφυή» συστήματα

Η ιστορική εξέλιξη των υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξέλιξη του ανθρώπου και τη μετάβασή του από την προϊστορία στην ιστορία. Μεγάλες χρονικές περίοδοι της ανθρώπινης ιστορίας έχουν πάρει το όνομά τους από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς για την κατασκευή εργαλείων και όπλων, όπως η πέτρα, ο χαλκός ή ο σίδηρος. Έτσι, η ανάπτυξη νέων υλικών και η εξέλιξη υπαρχόντων αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η πρόοδος της ανθρωπότητας σε όλες τις διαστάσεις της, από την καθημερινότητα, την υγεία, τις τέχνες, έως την επιστήμη και την τεχνολογία. Από το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα, κινητήριος μοχλός της τεχνολογικής εξέλιξης είναι η μετάδοση και η διαχείριση της πληροφορίας, έννοιες συνυφασμένες με την ανάπτυξη καινοτόμων υλικών και συστημάτων που απαιτεί τη σύζευξη διαφορετικών τεχνολογιών. Προς την κατεύθυνση αυτή οδηγηθήκαμε στην ανάπτυξη της οικογένειας των «ευφών» συστημάτων (Smart Systems) [1].

Οι ζωντανοί οργανισμοί που απαρτίζουν το φυσικό κόσμο μας διαθέτουν την ικανότητα προσαρμογής στο περιβάλλον τους και μπορούν να αντιδρούν στα εκάστοτε ερεθίσματα που δέχονται από αυτό. Κατ' αναλογία, θα μπορούσαμε να πούμε ότι ένα σύστημα χαρακτηρίζεται ως «ευφές» όταν διαθέτει τη δυνατότητα της «αίσθησης» κάποιας εξωτερικής διέγερσης και της «ενεργοποίησης» με ελεγχόμενο τρόπο. Επιπρόσθετο και επιθυμητό χαρακτηριστικό είναι η ικανότητα επαναφοράς του συστήματος στην αρχική του κατάσταση όταν η διέγερσή του αναιρεθεί. Γενικά, η ανάπτυξη «ευφών» δομών βασίζεται αφενός στη δυνατότητα επεξεργασίας της πληροφορίας (Information Processing) και αφετέρου στη χρήση «ευφών» υλικών που μπορούν να αντιδράσουν σε ερεθίσματα όπως η θερμότητα, η πίεση, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ή η παραμόρφωση, μεταβάλλοντας τη συμπεριφορά τους ή ορισμένα χαρακτηριστικά τους, όπως το σχήμα, την ιδιοσυχνότητα, το συντελεστή απόσβεσης ταλάντωσης κ.α.



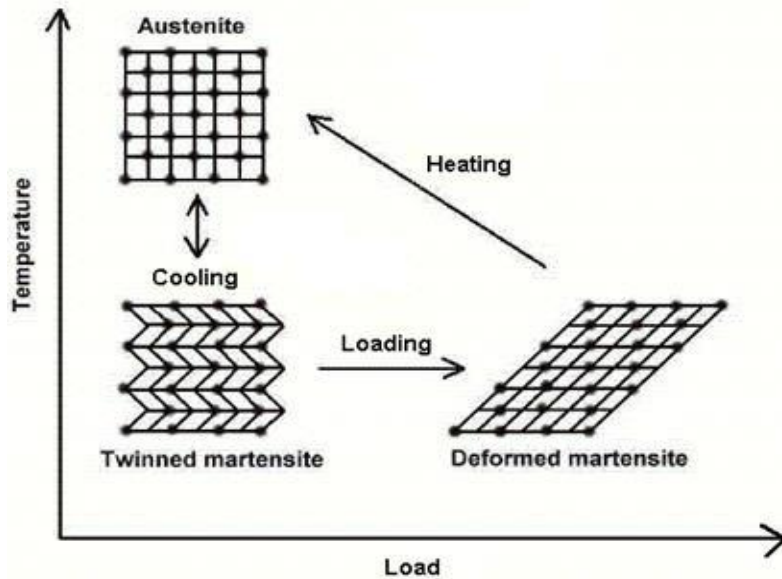
Σχήμα 28: Σχηματική απεικόνιση χαρακτηριστικών ενός «ευφούς» συστήματος, [2]

Οι επικρατέστερες κατηγορίες «ευφών» (ή «ενεργών») υλικών είναι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα ηλεκτρο- και μαγνητο- ρεοστατικά υλικά και τα κράματα μνήμης σχήματος (Shape Memory Alloys – SMA) μαγνητικής ή θερμικής ενεργοποίησης. Τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA's) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ έντονη ερευνητική προσπάθεια καταβάλλεται για την περαιτέρω διερεύνηση της μικροδομής τους. Οι κύριες ιδιότητες των κραμάτων αυτών, που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά στις κατασκευές, είναι η ικανότητά αφενός να ανακτούν πλήρως το σχήμα τους μετά από μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις (Μνήμη Σχήματος) και αφετέρου να εμφανίζουν έντονα υστερητική συμπεριφορά και μηδενικές (ή πολύ μικρές) παραμένουσες παραμορφώσεις σε διαδοχικούς κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης (Υπερελαστικότητα ή Ψευδοελαστικότητα).

4.2 Shape Memory Alloys

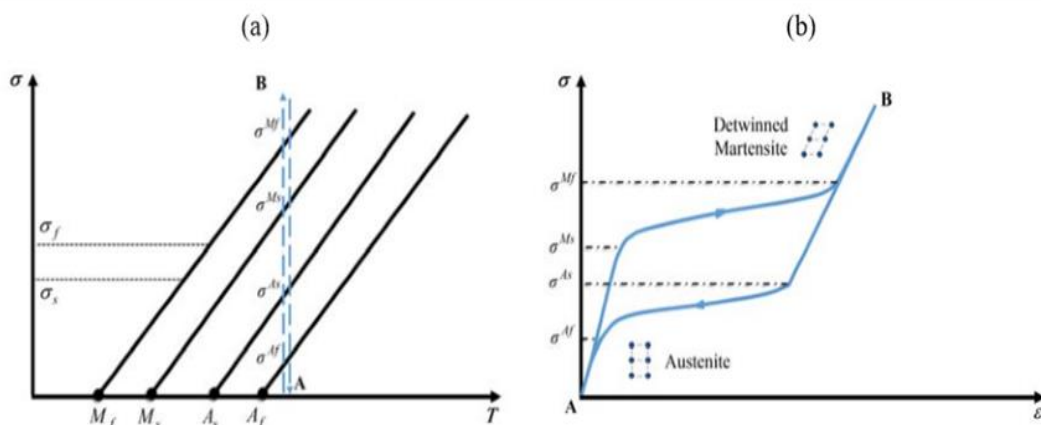
Ο Σουηδός φυσικός Arne Olander, το 1932, εργαζόμενος με ένα κράμα χρυσού (Au) – καδμίου (Cd) ανακάλυψε ότι το κράμα αυτό είχε τη δυνατότητα να παραμορφωθεί πλαστικά σε χαμηλή θερμοκρασία και στη συνέχεια με θέρμανση να επιστρέψει στις αρχικές του διαστάσεις. Τα κράματα που εμφανίζουν αυτή τη συμπεριφορά αναφέρονται ως κράματα μνήμης σχήματος (Shape Memory Alloys, SMAs). Μια από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις στο πεδίο των SMAs έγινε το 1958, από ομάδα ερευνητών του αμερικανικού Naval Ordnance Laboratory με επικεφαλής τον William Beuhler, καθώς μελετούσαν την αντίσταση στη θέρμανση και τη διάβρωση κράματος Νικελίου-Τιτανίου (NiTi). Βρέθηκε ότι το κράμα αυτό παρουσίαζε το φαινόμενο μνήμης σχήματος [3]. Άλλα κράματα που εμφανίζουν το φαινόμενο μνήμης σχήματος είναι τα κράματα του χαλκού Cu, όπως Cu-Zn, Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Ga, Cu-Zn-Si, Cu-Zn-Ni, Cu-Au-Zn, Cu-Sn, Au-Cd και Fe-Pt. Τα κράματα NiTi είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο στις εφαρμογές, ενώ καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για τη χρήση τους ως συστατικά σε «ευφή» σύνθετα υλικά. Τα κράματα NiTi ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα λόγω των συγκριτικών πλεονεκτημάτων τους σε σχέση με τα υπόλοιπα, όπως η μεγάλη τους ολκιμότητα, η υψηλή αντίσταση σε διάβρωση, οι σταθερές θερμοκρασίες μετασχηματισμού, η ικανότητα ανάκτησης των αρχικών τους διαστάσεων για παραμορφώσεις της τάξης του 8%, η υψηλή βιοσυμβατότητά τους και η ικανότητα ηλεκτρικής ενεργοποίησης. Οι ιδιότητες των κραμάτων αυτών βελτιώνονται με προσμίξεις άλλων στοιχείων. Για παράδειγμα, η προσθήκη Cu μειώνει την υστέρηση, μειώνει την τάση διαρροής του ωστενίτη και σταθεροποιεί τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού [4].

Το φαινόμενο μνήμης σχήματος (Shape Memory Effect, SME) έγκειται στη δυνατότητα ενός κράματος να ανακτά τις αρχικές του διαστάσεις μέσα από έναν κύκλο που περιλαμβάνει ψύξη-παραμόρφωση-θέρμανση με την ταυτόχρονη παραγωγή μηχανικού έργου. Το φαινόμενο μνήμης σχήματος βασίζεται σε έναν αντιστρεπτό κρυσταλλογραφικό μετασχηματισμό μεταξύ δύο φάσεων και τα κράματα που το εμφανίζουν βρίσκονται, ανάλογα με τη θερμοκρασία, είτε σε ωστενιτική κρυσταλλική κατάσταση σε υψηλές θερμοκρασίες, είτε σε μαρτενσιτική σε χαμηλές θερμοκρασίες. Με ψύξη μεταπίπτουν από μια σχετικά υψηλής τάξης κρυσταλλογραφική κατάσταση (ωστενιτική) σε μια χαμηλότερης τάξης κρυσταλλογραφική κατάσταση (μαρτενσιτική), ενώ με θέρμανση μεταπίπτουν από τη μαρτενσιτική στην ωστενιτική κατάσταση αφού προηγουμένως έχει προηγηθεί παραμόρφωση του υλικού [5].



Σχήμα 29: Το φαινόμενο μνήμης σχήματος έγκειται στη δυνατότητα ενός κράματος να ανακάτ τις αρχικές του διαστάσεις μέσα από έναν κύκλο που περιλαμβάνει ψύξη-παραμόρφωση-θέρμανση [5]

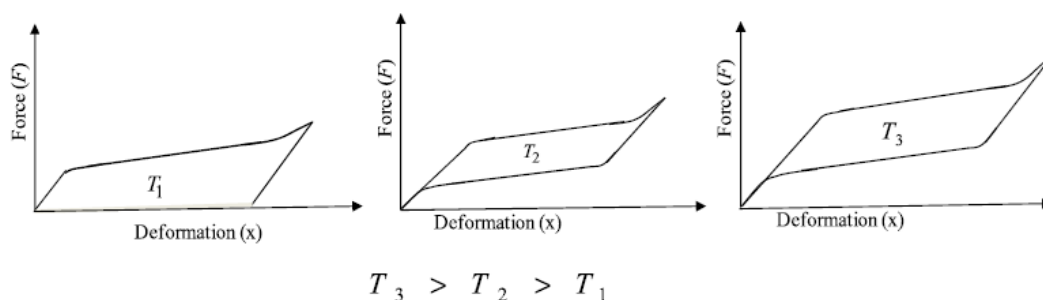
Το φαινόμενο της υπερελαστικότητας (Super-elasticity) είναι η δεύτερη σημαντική ιδιότητα που καθιστά τα κράματα SMA σημαντικά για τις κατασκευές. Η υπερελαστικότητα (ή ψευδοελαστικότητα, Pseudoelasticity) έγκειται στην ικανότητα του υλικού να επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα, έχοντας υποστεί μεγάλη παραμόρφωση, μετά την αναίρεση της εξωτερικής φόρτισής του. Η ιδιότητα αυτή βασίζεται στον μαρτενσιτικό κρυσταλλογραφικό μετασχηματισμό όχι υπό την επίδραση θερμικού πεδίου, αλλά υπό την επίδραση εξωτερικής μηχανικής τάσης (Stress induced martensite) [6]. Το φαινόμενο της υπερελαστικότητας παρατηρείται στο Σχήμα 30 [7] όταν το υλικό φορτίζεται, ενώ βρίσκεται στην ωστενιτική φάση με θερμοκρασία μεγαλύτερη της A_F (σημείο A). Η εφαρμογή φορτίου οδηγεί σε μετασχηματισμό του υλικού στη μαρτενσιτική φάση στο τέλος της φόρτισης (σημείο B). Η εξέλιξη του μετασχηματισμού κατά τη διαδικασία της φόρτισης έχει ως αποτέλεσμα τη μη-γραμμικότητα του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων, ενώ η παραμόρφωση του υλικού αναιρείται πλήρως όταν το φορτίο αφαιρεθεί (σημείο A) χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας.



Σχήμα 30: Το φαινόμενο της υπερελαστικότητας έγκειται στην ικανότητα του υλικού να επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα, έχοντας υποστεί μεγάλη παραμόρφωση, μετά την αναίρεση της εξωτερικής φόρτισής του [6].

Οι χαρακτηριστικές τιμές των τάσεων στο Σχ.54 σ^{Ms} , σ^{Mf} αντιστοιχούν στον ευθύ μαρτενσιτικό μετασχηματισμό (από ωστενιτική σε μαρτενσιτική φάση), ενώ οι τιμές σ^{As} , σ^{Af} αντιστοιχούν στον αντίστροφο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Παρατηρείται στο ίδιο σχήμα ότι σε έναν πλήρη ψευδοελαστικό κύκλο δημιουργείται βρόγχος υστέρησης στο διάγραμμα σ-ε, που αντιστοιχεί στην απορρόφηση ενέργειας λόγω των μετασχηματισμών. Εδώ ακριβώς έγκειται η αξιοποίηση των υλικών αυτών στον έλεγχο των ταλαντώσεων κατασκευών μέσω της αναπτυσσόμενης απόσβεσης. Επιπλέον, λόγω της ψευδοελαστικότητας τα υλικά αναπτύσσουν μεγάλες παραμορφώσεις με σχεδόν σταθερή τάση, επιθυμητή ιδιότητα σε πολλές κατασκευές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο της υπερελαστικότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασία, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 31. Τα ευεργετικά της οφέλη αποκομίζονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 0-40 βαθμών Κελσίου [8]. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες παρατηρείται ότι η τιμή της τάσης που ενεργοποιεί τη μετάβαση από τη φάση του ωστενίτη σε αυτή του μαρτενσίτη μειώνεται. Συνεπώς, σε αυτή την περίπτωση διατηρούνται μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις. Στις θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 40 βαθμών Κελσίου η μετάβαση φάσεων αδυνατεί να γίνει δίχως σημαντική μεταβολή της τάσης [9].



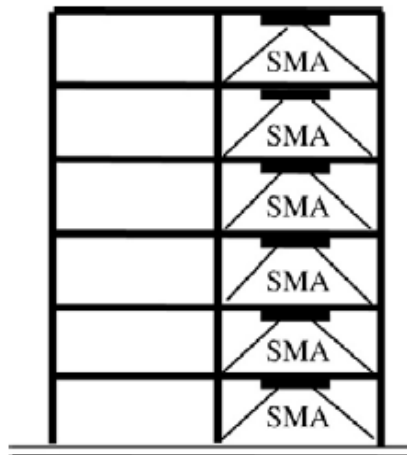
Σχήμα 31: Τα ευεργετικά της οφέλη της υπερελαστικότητας αποκομίζονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 0-40 βαθμών Κελσίου [8].

4.3 Εφαρμογή στις κατασκευές

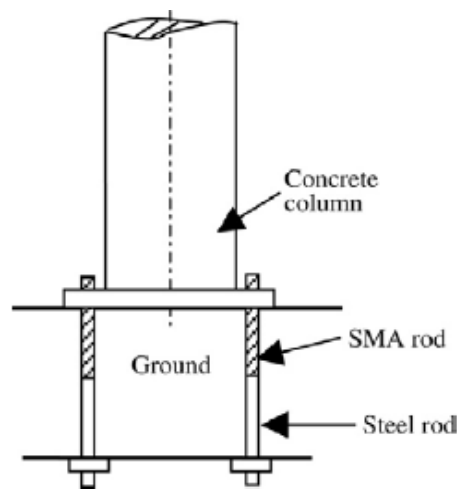
Στον τομέα των κατασκευών τα κράματα μνήμης σχήματος παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη «ευφών» συστημάτων που μπορούν να ενσωματωθούν σε κατασκευές που προσδίδουν ιδιότητες όπως η «αίσθηση» και η «ενεργοποίηση» (sensing and actuation), η απόσβεση και ο έλεγχος του εύρους ταλάντωσης, η κατανάλωση και διάχυση ενέργειας σε κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης, η ικανότητα μακροσκοπικής μεταβολής σχήματος (self-adapting composites) και η ικανότητα αυτο-επισκευής (self-healing) [10]. Τις τελευταίες δεκαετίες η ερευνητική προσπάθεια προσανατολίζεται στην κατεύθυνση χρήσης «ευφών» συστημάτων σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού, με ιδιαίτερη έμφαση στον αντισεισμικό σχεδιασμό τους. Διάφορα καινοτόμα συστήματα έχουν αναπτυχθεί, με χρήση κυρίως κραμάτων NiTi και άλλων με βάση το Cu, με σκοπό την απορρόφηση μέρους της σεισμικής ενέργειας και τη μείωση των σεισμικών φορτίων που εισάγονται στις κατασκευές. Τα κράματα SMA ενσωματώνονται στα σύνθετα αυτά συστήματα σε διάφορες μορφές, όπως καλώδια, ράβδοι ή δοκοί.

Η μείωση-έλεγχος του εύρους ταλάντωσης των κατασκευών αποκρινόμενων σε εξωτερικές δυναμικές φορτίσεις (όπως π.χ. είναι η ανεμοπίεση, ο σεισμός, η περιστροφική κίνηση

μηχανημάτων, η κίνηση οχημάτων, η έκρηξη) μπορεί να επιτευχθεί με ενεργό τρόπο (active control), με ημι-ενεργό τρόπο (semi-active control) και με παθητικό τρόπο (passive control) [11]. Στην περίπτωση του ενεργού ελέγχου, μια εξωτερική πηγή ενέργειας ελέγχει τη λειτουργία των ενεργοποιητών (SMAs), ώστε να αναπτυχθούν οι απαραίτητες εσωτερικές τάσεις. Στην περίπτωση του παθητικού ελέγχου, δεν απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας και οι τάσεις αναπτύσσονται ως αντίδραση στην κίνηση των κατασκευών. Τέλος, στον ημι-ενεργό έλεγχο, χρησιμοποιείται μεν εξωτερική πηγή ενέργειας, αλλά με πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας προκειμένου να ελεγχθούν οι δομικές ιδιότητες. Ο παθητικός έλεγχος του εύρους των ταλαντώσεων αξιοποιεί την υστερητική συμπεριφορά των SMAs μέσω δύο μηχανισμών: των συστημάτων μόνωσης εδάφους-κατασκευής και των συστημάτων κατανάλωσης-διάχυσης ενέργειας. Με το μηχανισμό μόνωσης, η υπερδομή απομονώνεται από την υπο-δομή με χρήση μονωτήρων με ενσωματωμένα κράματα SMA, περιορίζοντας έτσι την ενέργεια που εισέρχεται στην κατασκευή. Αντίστοιχα, στην περίπτωση των συστημάτων κατανάλωσης-διάχυσης ενέργειας, δομικά στοιχεία με κράματα SMA σε ωστενιτική ή μαρτενιτική φάση εισάγονται στην κατασκευή και καταναλώνουν ενέργεια μέσω της υστερητικής τους συμπεριφοράς.

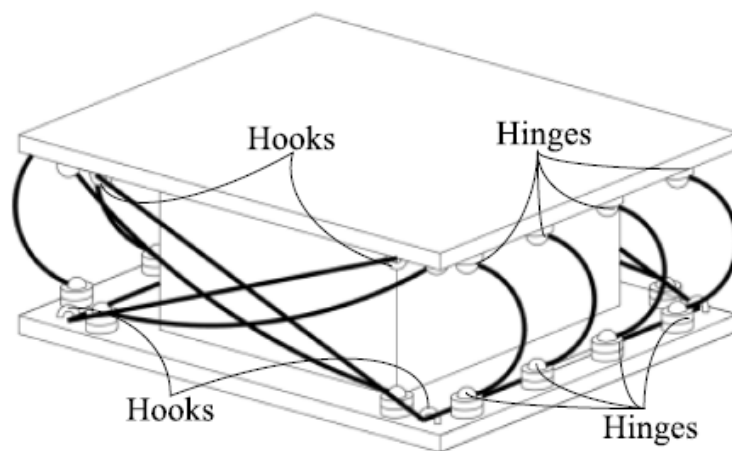


Σχήμα 32: Εφαρμογή SMA σε πλαίσιο κτιρίου



Σχήμα 33: Εφαρμογή SMA στη θέση εδάφους-κατασκευής

Στην περίπτωση των συστημάτων μόνωσης βάσης με χρήση SMAs, πολλές συσκευές έχουν αναφερθεί στη διεθνή βιβλιογραφία [12]. Για αυτές, έχουν πραγματοποιηθεί αριθμητικές αναλύσεις και πειράματα προκειμένου να ελεγχθεί τόσο η απόδοσή τους όσο και η απόκριση της μονωμένης κατασκευής. Μεταξύ άλλων, οι Krumme et al. (1995) [13] ανέπτυξαν συσκευή η οποία περιλαμβάνει ζεύγη τενόντων NiTi, για τη μόνωση πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των σχετικών μετατοπίσεων των ορόφων και οι Choi et al. (2006) [14] μελέτησαν σύστημα μόνωσης το οποίο αποτελείται από ελαστομερές υλικό που περιέχει προτανυσμένα καλώδια SMA. Επιπλέον, συστήματα καταπόνησης ενέργειας συναντώνται στη βιβλιογραφία με τη μορφή υπερελαστικών SMA καλωδίων-συνδέσμων σε πλαισιακές κατασκευές [11], ως αποσβεστήρες σε καλωδιωτές γέφυρες ή σε αμφιέριστες [15], ως στοιχεία σύνδεσης δοκών και στύλων σε πλαίσια [16], και ως συστήματα αποκατάστασης σε ιστορικά κτίρια [17].

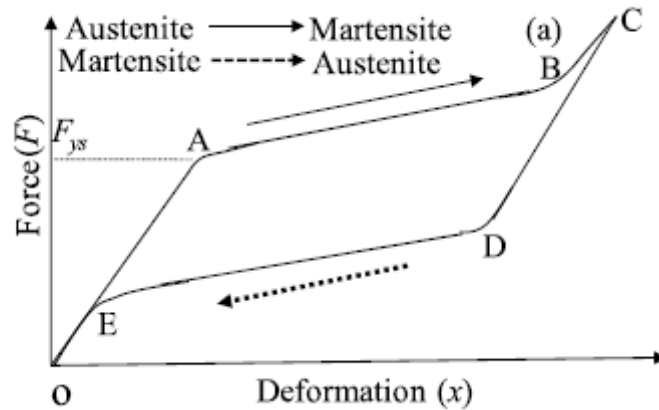


Σχήμα 34: Εφαρμογή SMA καλωδίων σε εφέδρανο γέφυρας [18]

4.4 Διερεύνηση βέλτιστων παραμέτρων ελατηρίου SMA

4.4.1 Η σημασία της υπερελαστικότητας

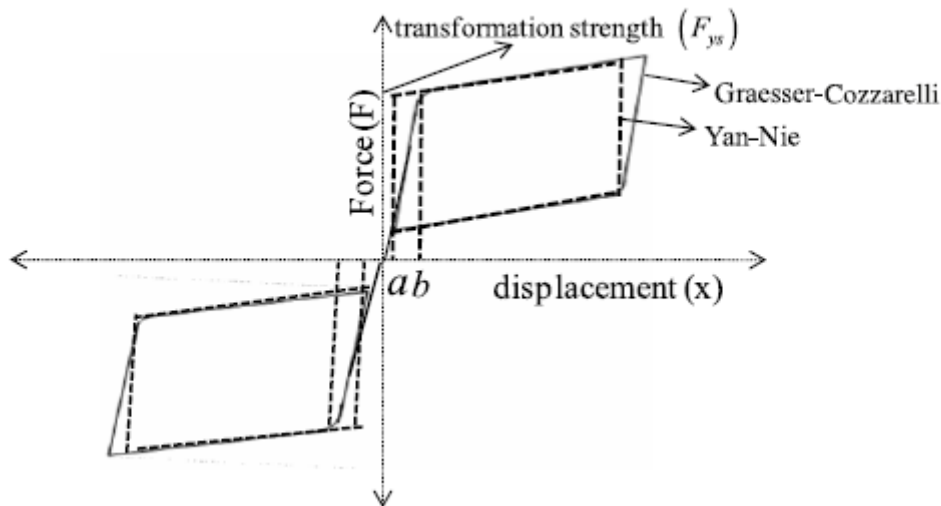
Από τις προαναφερθείσες ιδιότητες των κραμάτων μνήμης σχήματος, αυτή της υπερελαστικότητας και της μνήμης σχήματος, ενδιαφέρον στις εφαρμογές παρουσιάζει η πρώτη. Στο Σχήμα 35 φαίνεται ότι ο βρόγχος υστέρησης έχει σχήμα «σημαίας» και είναι ικανός να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας ενώ παράλληλα οι παραμένουσες παραμορφώσεις κατά την αποφόρτιση είναι μηδενικές.



Σχήμα 35: Ο βρόγχος υστέρησης είναι ικανός να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας ενώ παράλληλα οι παραμένουσες παραμορφώσεις κατά την αποφόρτιση είναι μηδενικές

4.4.2 Διατύπωση σχέσεων και εξισώσεων

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για να περιγράψουν πιστά τα δυναμικά χαρακτηριστικά των συστημάτων που περιλαμβάνουν SMA μεταξύ και εκείνο του Graesser-Cozzarelli [19] αλλά και του Yan Nie [20], το οποίο αποτελεί ουσιαστικά απλοποιημένη εκδοχή του πρώτου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ακολουθήσουμε το δεύτερο.



Σχήμα 36: Το απλοποιημένο μοντέλο του Yan Nie ως προσέγγιση του Graesser-Cozzarelli για την περιγραφή της συμπεριφοράς του ελατηρίου SMA

Η σχέση που περιγράφει την δύναμη επαναφοράς κατά Yan Nie δίνεται ως

$$F_{sh}(x_s, \dot{x}_s) = a_s k_s x_s + (1 - a_s) k_s Z_s \quad (4.1)$$

$$Z_s = [1 - \text{sign}\{\text{sign}(\text{abs}(x_s) - a) + 1\}] x_s + \frac{\{\text{sign}(\text{abs}(x_s) - a) + 1\}}{2} \times \left[\frac{\{\text{sign}(x_s + \dot{x}_s)\}}{2} (b - a) + a \text{sign}(x_s) \right] \quad (4.2)$$

όπου:

x_s : η μετατόπιση

\dot{x}_s : η ταχύτητα

k_s : η αρχική δυσκαμψία στη φάση του ωστενίτη

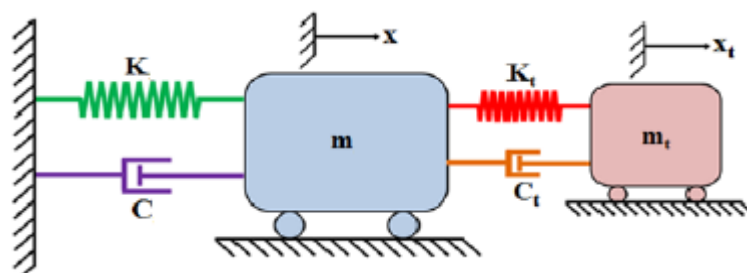
a_s : σταθερά

a: η μετατόπιση που 'κλείνει' ο βρόγχος Σχήμα 36

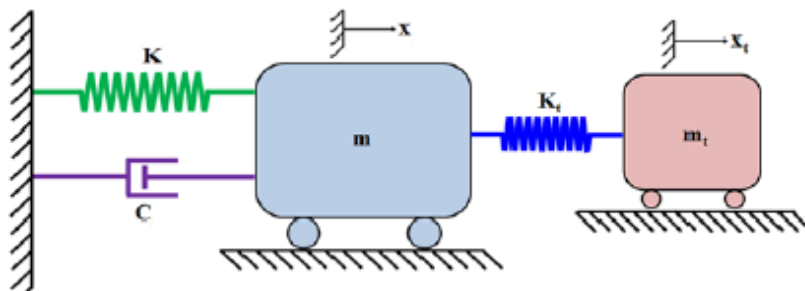
b: η μετατόπιση που προκαλεί τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό Σχήμα 36

sign η συνάρτηση sign

Έστω το παρακάτω σύστημα δυο βαθμών ελευθερίας το οποίο αποτελείται από την κύρια μάζα και μία δευτερεύουσα που αποτελεί το TMD, τα οποία συνδέονται στην πρώτη περίπτωση με γραμμικό ελατήριο και στην δεύτερη με SMA.



Σχήμα 37: Κατασκευή-TMD συνδεδεμένα με γραμμικό ελατήριο



Σχήμα 38: Κατασκευή-TMD συνδεδεμένα με ελατήριο SMA

Οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση του συστήματος με SMA είναι

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx - F_{sh}(x_s, \dot{x}_s) = -m\ddot{x}_G \quad (4.3)$$

$$m_t\ddot{x}_t + F_{sh}(x_s, \dot{x}_s) = -m_t\ddot{x}_G \quad (4.4)$$

Σαν σημείωση στο ελατήριο SMA οι ταχύτητες και οι μετατοπίσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν είναι οι σχετικές.

Όπως είναι προφανές το παραπάνω σύστημα διαφορικών εξισώσεων είναι μη γραμμικό λόγω της δύναμης του ελατηρίου SMA και για την επίλυση του χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Runge Kutta 4ης και 5ης τάξης μέσω της συνάρτησης ode45 του matlab, όπως προτείνεται στις σημειώσεις του μαθήματος Μέθοδοι Επίλυσης με Η/Υ [21] με προσαρμογή ώστε να ανταποκρίνεται σε 2 βαθμούς ελευθερίας.

4.4.3 Παραμετρική ανάλυση

Εμπνευστήκαμε από τη δημοσίευση SMA-TMD του Mishra [22] όπου παρατηρήθηκε ότι με χρήση ελατηρίου SMA αντί γραμμικού

- Η μετατόπιση του TMD μειώνεται σημαντικά.
- Το απαιτούμενο mass ratio ελαχιστοποιείται.
- Λόγω του βρόχου του SMA οι παραμένουσες παραμορφώσεις εξουδετερώνονται.

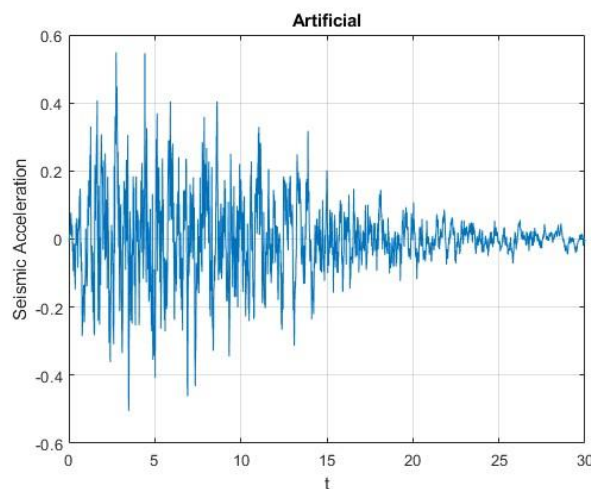
Σημαντική μείωση του stroke του TMD παρατηρείται και σε ανεμογενήτρια [23] (0.13m για ελατήριο SMA - 0.77m για γραμμικό)

Properties of the structure	Properties of the TMD	
	Linear TMD	SMA TMD
Time period = 1.5s Damping ration = 3%	Tuning ratio = 0.96 Damping ratio = 7% Mass ratio = 2.5%	Tuning ratio = 0.885 Transformation strength = 0.35 Mass ratio = 2.5% Hysteresis of SMA $\alpha_s = 0.10 ; a = 0.005m$

Πίνακας 2: Ιδιότητες κατασκευής και ελατηρίων [22]

4.4.3.1 Μεθοδολογία

Στην παρούσα ενότητα θα κάνουμε μια διερεύνηση των μεταβολών που επιφέρει η εναλλαγή των τιμών του ελατηρίου SMA του Πίνακα 2 στις εξισώσεις κίνησης (4.3) και (4.4). Αρχικά θα μεταβάλουμε μονοπαραμετρικά τις τιμές αυτές και όπου είναι εφικτό θα το αντιπαραβάλουμε με τα αποτελέσματα του γραμμικού ελατηρίου. Ακολούθως, αφού καταλήξουμε στις κρίσιμες παραμέτρους, αυτές δηλαδή που επηρεάζουν περισσότερο την δυναμική της κίνησης, θα προβούμε σε διπαραμετρική ανάλυση. Η κατασκευή θα υποβληθεί σε ένα τεχνητό επιταχυνσιογράφημα σχεδιασμένο στο λογισμικό Seismo Artif [24] έτσι ώστε να είναι συμβατό με το φάσμα του Ευρωκώδικα.

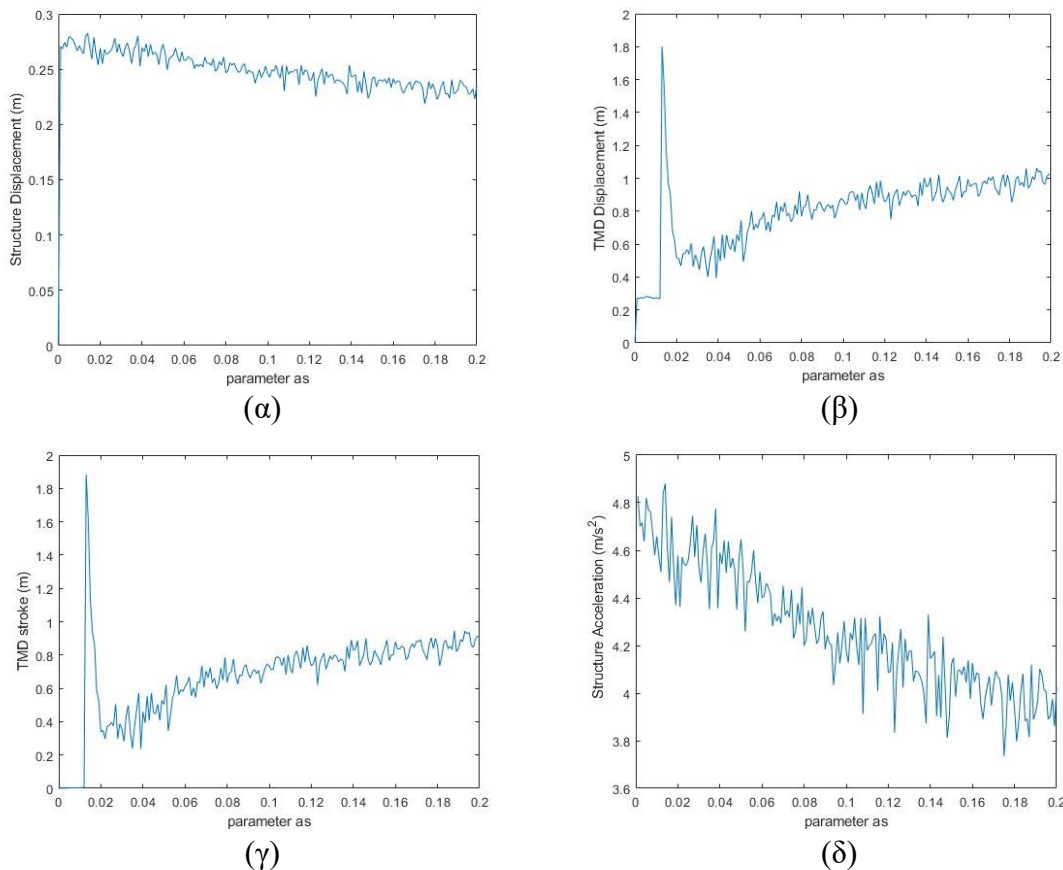


Σχήμα 39: Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα σχεδιασμένο στο λογισμικό Seismo Artif [24] έτσι ώστε να είναι συμβατό με το φάσμα του Ευρωκώδικα

4.4.3.2 Μονοπαραμετρική ανάλυση

Παράμετρος a_s

Στο Σχήμα 40 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου a_s : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



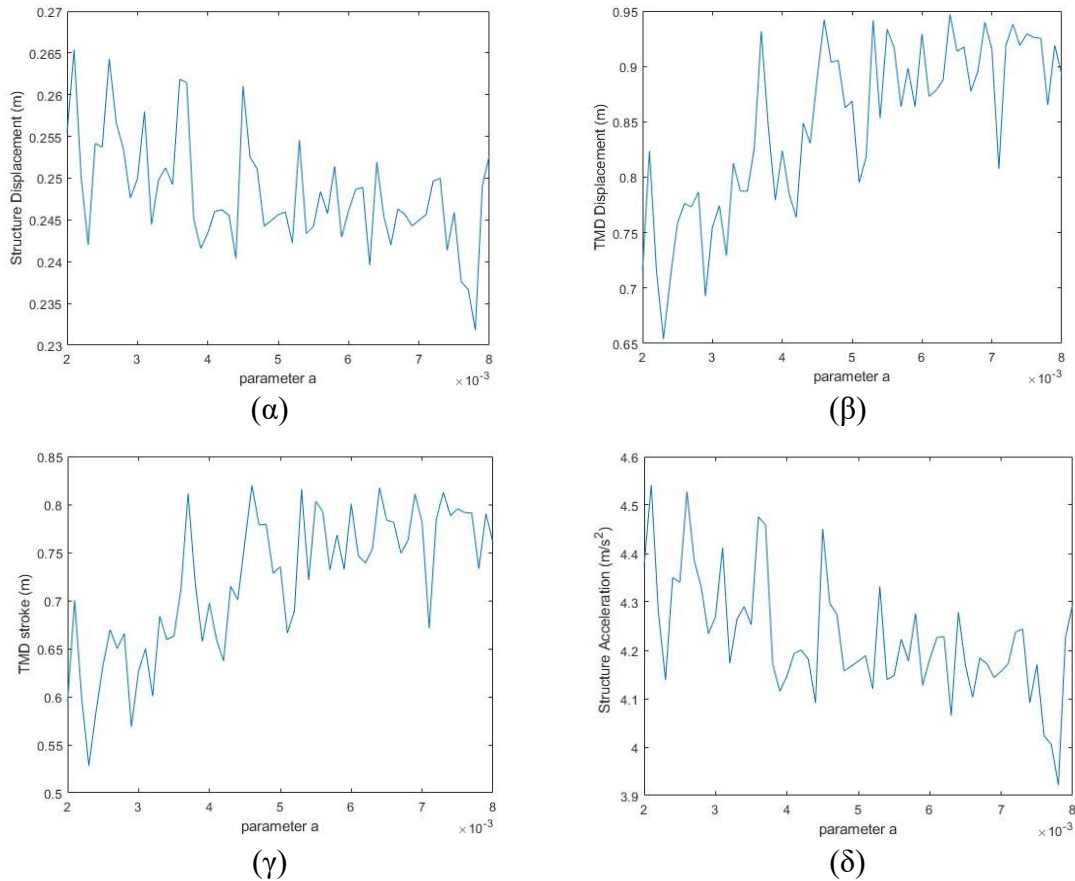
Σχήμα 40: Μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου a_s : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής

Η μετατόπιση της κατασκευής πέρα από την αστάθεια που προκαλείται πολύ κοντά στο 0 παρουσιάζει μείωση όσο αυξάνεται η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου. Σχετικά με την μετατόπιση και το stroke του TMD ,πέρα από την αστάθεια που δημιουργείται για πολύ μικρές τιμές της παραμέτρου ,παρατηρούμε αύξηση των τιμών όσο πλησιάζει το a_s στην τιμή 0.2. Τέλος, η επιτάχυνση της κατασκευής φθίνει με την αύξηση του a_s .

Θα υιοθετηθεί η τιμή $a_s=0.10$

Παράμετρος α

Στο Σχήμα 41 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου α : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



Σχήμα 41: Μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου α : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής

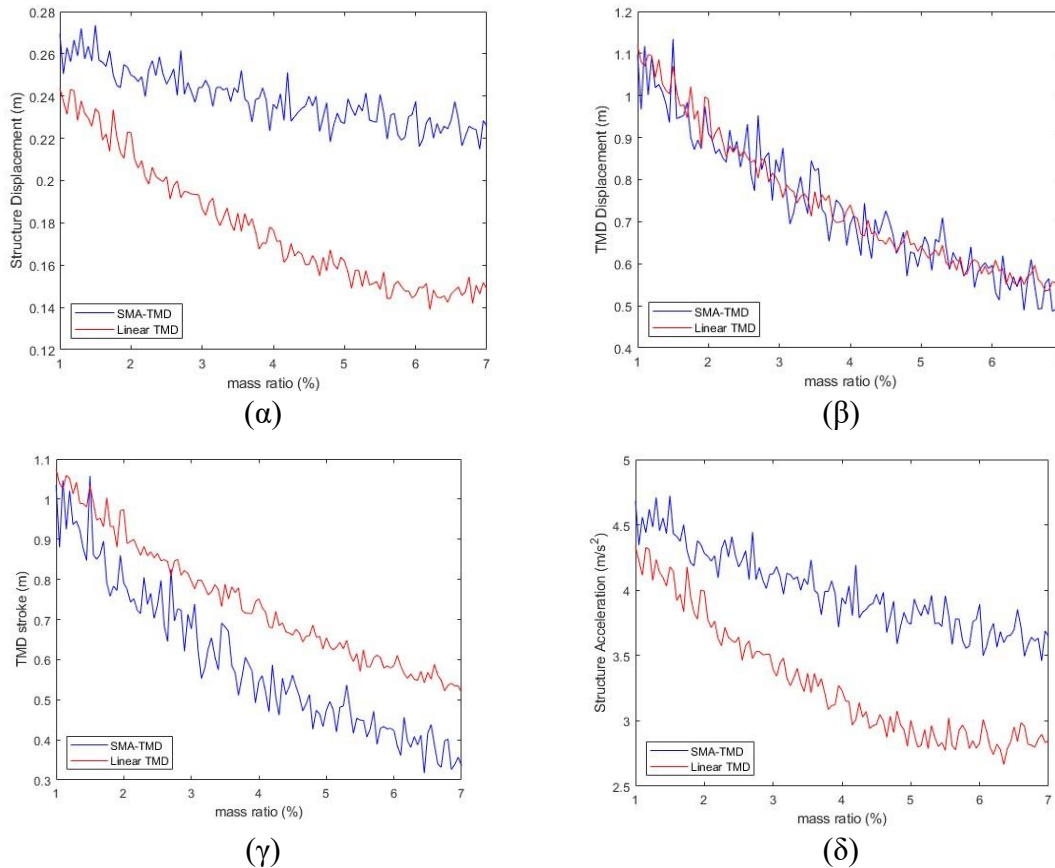
Πρέπει να σημειώσουμε ότι η τιμή της παραμέτρου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη ώστε το ελατήριο να μπαίνει όσο το δυνατόν γρηγορότερα στο βρόγχο ,ενώ παράλληλα στον κύκλο αποφόρτισης να μην οδηγούμαστε σε παραμένουσες παραμορφώσεις.

Η μετατόπιση αλλά και η επιτάχυνση της κατασκευής παρουσιάζει γενικώς φθίνουσα συμπεριφορά με την αύξηση του α . Η μετατόπιση και το stroke του TMD γενικώς αυξάνονται με τη μεταβολή της παραμέτρου α .

Θα υιοθετηθεί η τιμή $\alpha=0.005$

Mass ratio

Στο Σχήμα 42 παρουσιάζεται η συγκριτική μεταβολή συναρτήσεων του mass ratio για SMA-TMD και Linear TMD: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



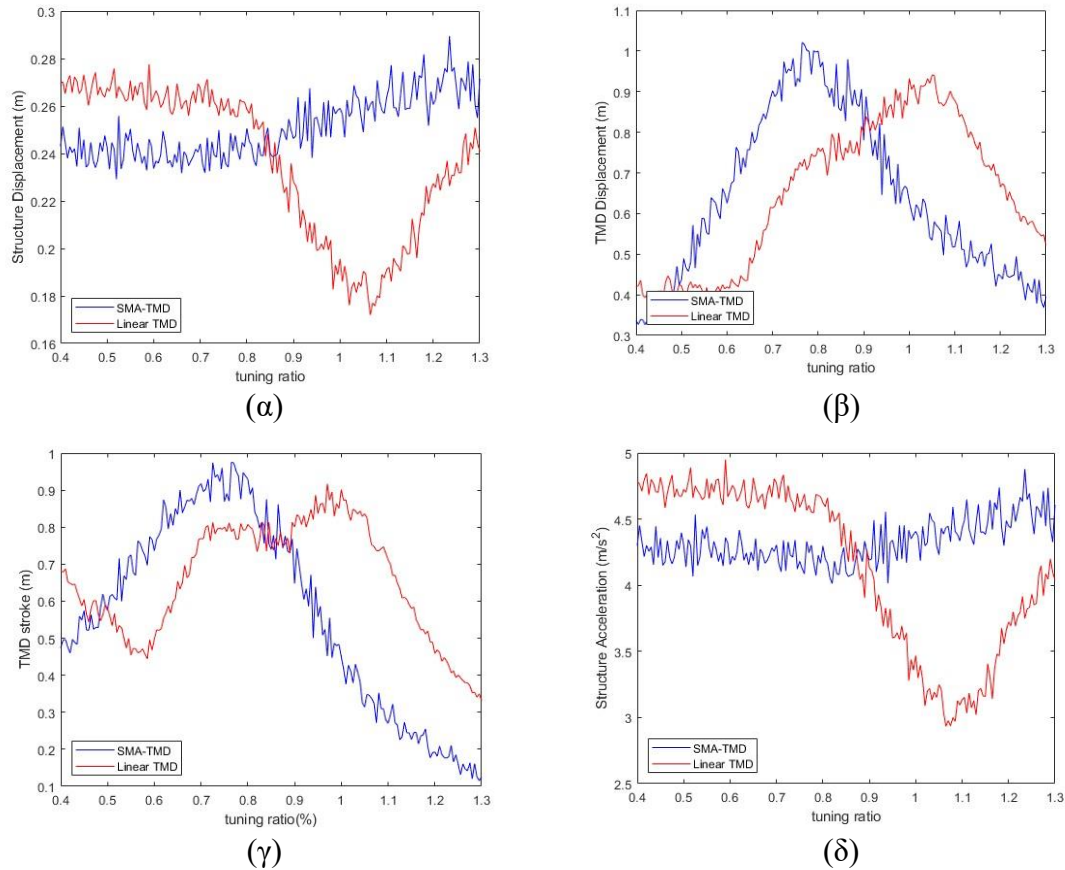
Σχήμα 42: Μεταβολή συναρτήσεων του mass ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής

Όπως αναμέναμε και από τα γραμμικά ελατήρια συνδεδεμένα με TMD η αύξηση της τιμής του mass ratio δρα ευεργετικά στην κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται σημαντική μείωση του stroke του TMD και της επιτάχυνσης της κατασκευής και μικρή μείωση της μετατόπισης της τελευταίας.

Το mass ratio κρίνεται σημαντικός παράγοντας, αλλά όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3 υπάρχει περιορισμός. Παρόλα αυτά, θα αναλυθεί περαιτέρω ώστε να διερευνηθεί αν αμελητέα μεταβολή της τιμής του προκαλεί πρωτοφανή ευεργετικά αποτελέσματα.

Tuning ratio

Στο Σχήμα 43 παρουσιάζεται η συγκριτική μεταβολή συναρτήσεων του tuning ratio για SMA-TMD και Linear TMD: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



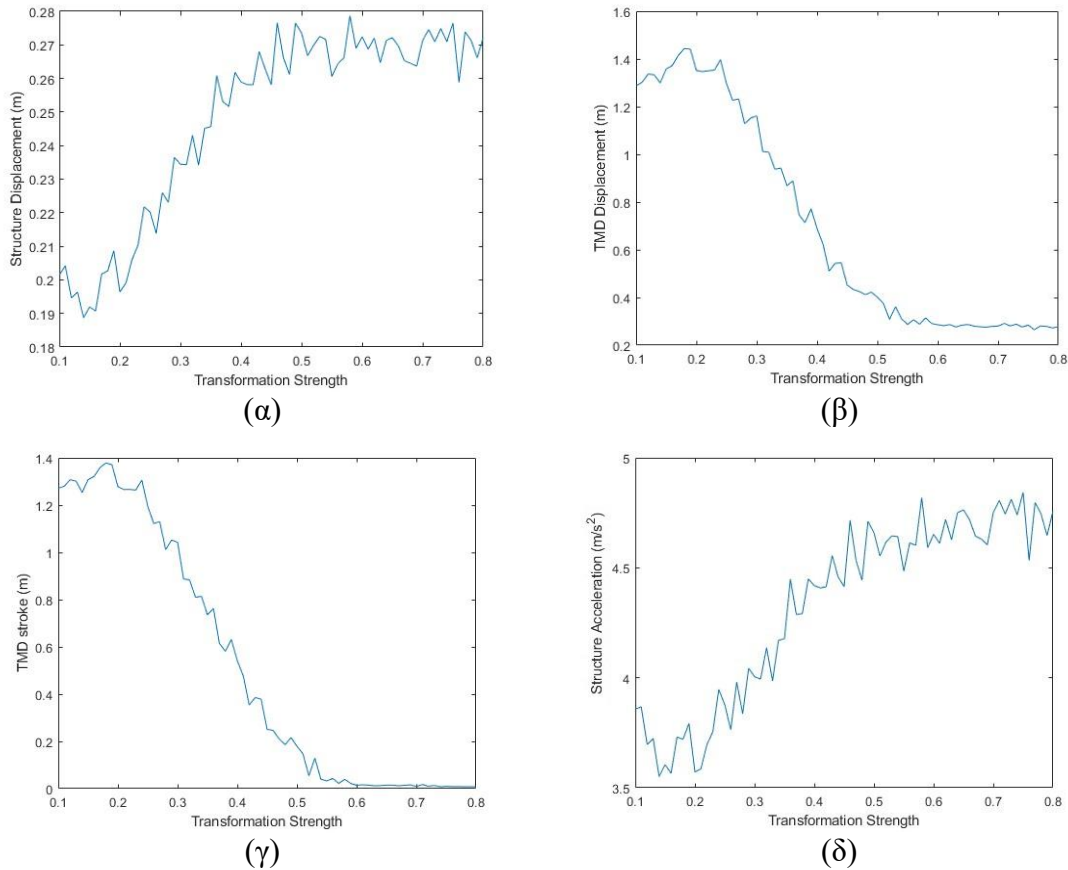
Σχήμα 43: Μεταβολή συναρτήσεων του tuning ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής

Η μετατόπιση και η επιτάχυνση της κατασκευής δεν καθίστανται ευαίσθητες στην μεταβολή του tuning ratio κάτι που δρα ευεργετικά σε φαινόμενα αποσυντονισμού. Αντίθετα, η συμπεριφορά του TMD βελτιώνεται απότομα για τιμές λίγο μεγαλύτερες της μονάδας.

Το tuning ratio κρίνεται σημαντικό και θα αναλυθεί περαιτέρω για την εκλογή της βέλτιστης τιμής.

Transformation Strength

Στο Σχήμα 44 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του Transformation Strength : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



Σχήμα 44: Μεταβολή συναρτήσει του Transformation Strength: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής

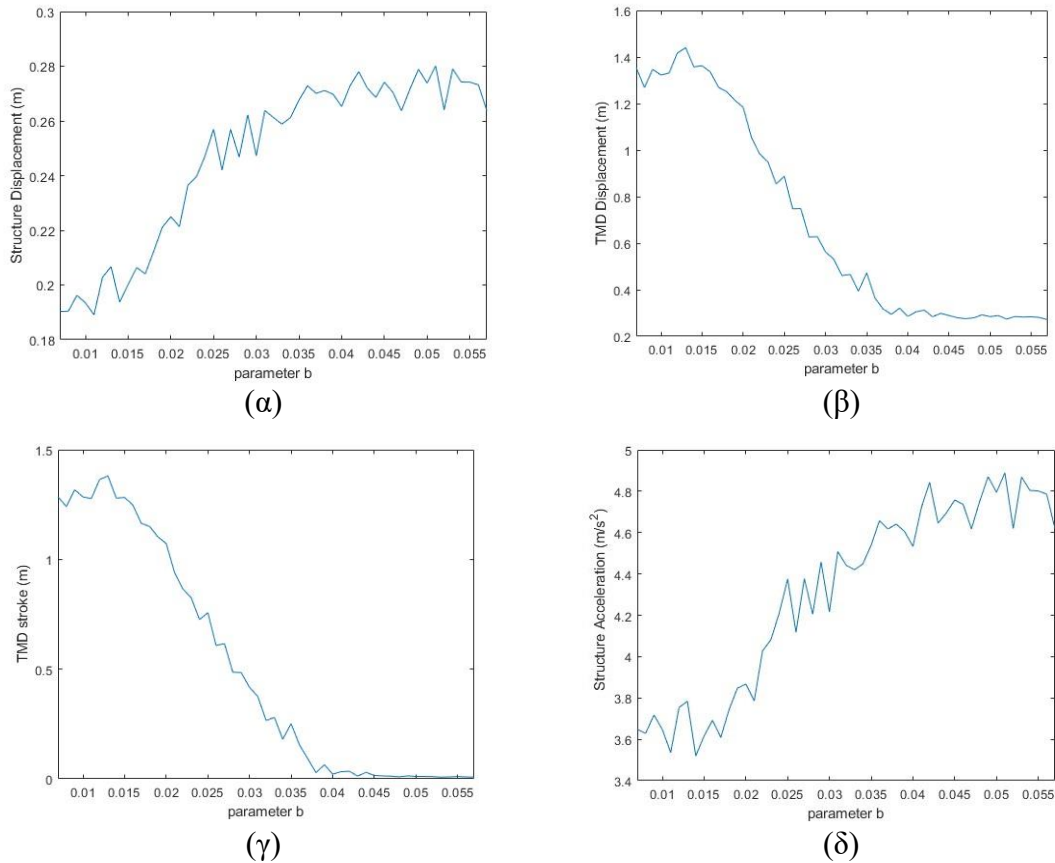
Η μετατόπιση και η επιτάχυνση της κατασκευής παρουσιάζουν μια μικρή μείωση για τιμές του Transformation Strength κοντά στο 0.15 και ύστερα αυξάνονται σημαντικά. Αντίθετα, οι μετατοπίσεις και τα stroke του TMD είναι δυνατόν να φτάσουν σε μηδενικά επίπεδα για τιμές του Transformation Strength λίγο μεγαλύτερες του 0.5.

Το Transformation Strength κρίνεται σημαντικό και θα αναλυθεί περαιτέρω για την εκλογή της βέλτιστης τιμής.

Η μεταβολή της τιμής του Transformation Strength λόγω του τρόπου με τον οποίο έχει οριστεί είναι ταυτόσημη με μεταβολή της τιμής της παραμέτρου b . Για λόγους πληρότητας θα παρουσιάσουμε τα παρακάτω διαγράμματα για να παρακολουθήσουμε και την εξέλιξη της τιμής του b .

Παράμετρος b

Στο Σχήμα 45 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου b (η οποία ταυτίζεται με Transformation Strength) : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



Σχήμα 45: Μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου b : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής

4.4.3.3 Διπαραμετρική ανάλυση

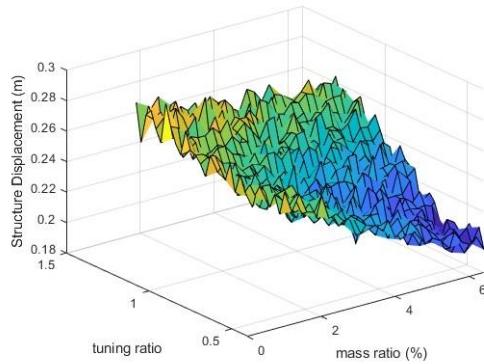
Οι κρίσιμοι παράμετροι όπως αυτοί προκύπτουν από την μονοπαραμετρική ανάλυση είναι τρεις:

- Tuning ratio
- Mass ratio
- Transformation Strength

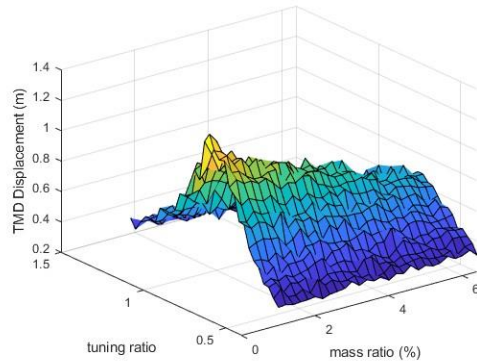
Θα αναλυθούν ανά δύο.

Tuning ratio-Mass ratio

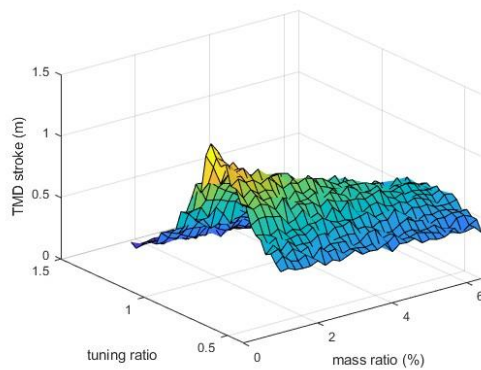
Στο Σχήμα 46 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του Tuning ratio και του Mass ratio: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



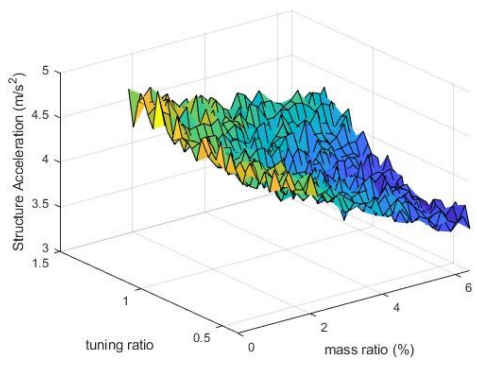
(α)



(β)



(γ)



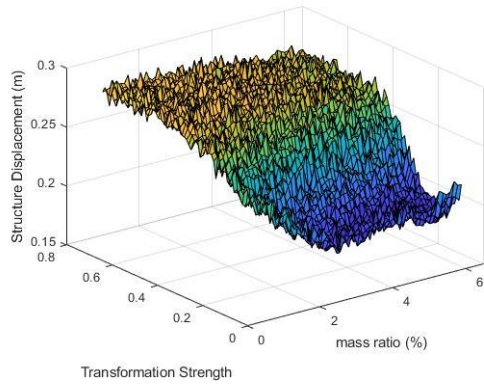
(δ)

Σχήμα 46: Μεταβολή συναρτήσει tuning ratio-mass ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής

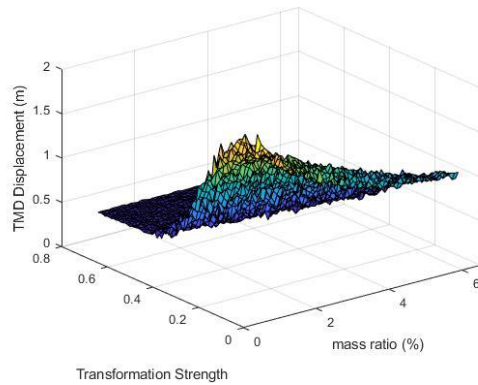
Η μετατόπιση και η επιτάχυνση της κατασκευής φαίνεται να αυξάνονται με την αύξηση του tuning ratio, ενώ στα αντίστοιχα μεγέθη δρα ευεργετικά το μεγαλύτερο ποσοστό πρόσθετης μάζας. Οι μετατοπίσεις και τα stroke του TMD φαίνεται να είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα λόγω αποκλειστικής μεταβολής της τιμής του tuning ratio.

Transformation Strength-Mass ratio

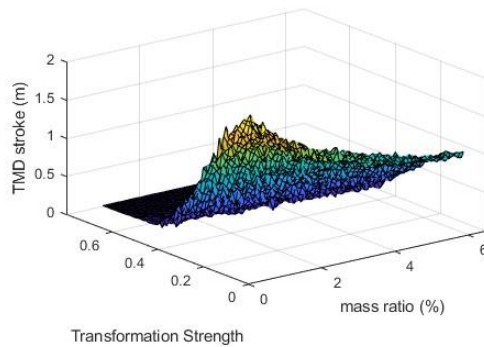
Στο Σχήμα 47 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσεων του Transformation Strength και του mass ratio: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



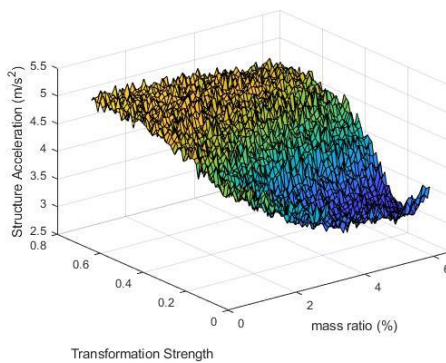
(α)



(β)



(γ)



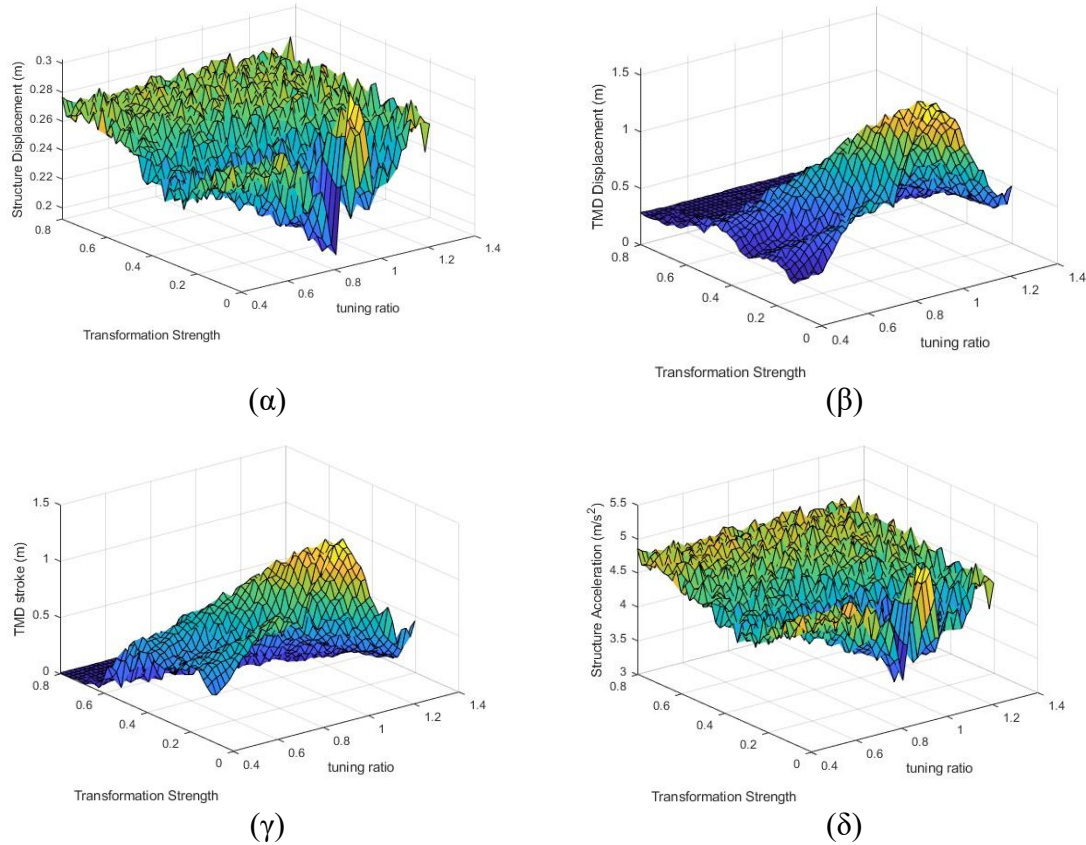
(δ)

Σχήμα 47: Μεταβολή συναρτήσεων transformation strength-mass ratio: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής

Όλα τα μεγέθη της ανάλυσης εξαρτώνται σχεδόν αποκλειστικά από το Transformation Strength. Πιο συγκεκριμένα, η μετατόπιση και η επιτάχυνση της κατασκευής αυξάνονται όσο αυξάνεται η τιμή του Transformation Strength. Οι μετατοπίσεις και τα stroke του TMD είναι δυνατόν να φτάσουν σε μηδενικά επίπεδα για τιμές του Transformation Strength λίγο μεγαλύτερες του 0.5.

Transformation Strength-Tuning ratio

Στο Σχήμα 48 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσεων του Transformation Strength και του Tuning ratio: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

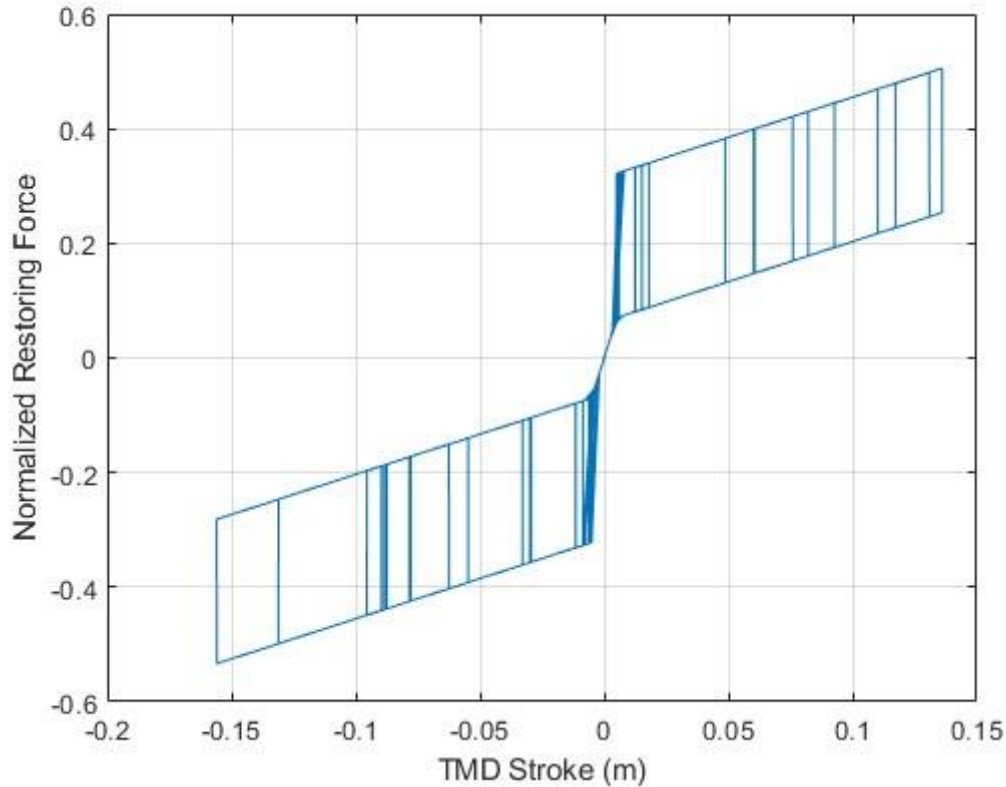


Σχήμα 48: Μεταβολή συναρτήσεων transformation strength-tuning ratio: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής

Οι μετατοπίσεις και η επιτάχυνση της κατασκευής γενικώς αυξάνονται με την αύξηση του Transformation Strength πέρα από μια απότομη άνοδο για τιμή του τελευταίου περίπου 0.1 και για τιμές tuning ratio κοντά στη μονάδα. Οι μετατοπίσεις και τα stroke του TMD είναι δυνατόν να φτάσουν σε μηδενικά επίπεδα για τιμές του Transformation Strength λίγο μεγαλύτερες του 0.5.

4.4.3.4 Εφαρμογή στο σεισμό του Kobe

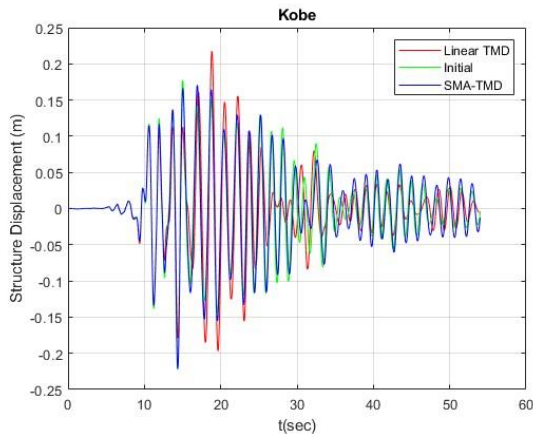
Στο Σχήμα 49 παρουσιάζεται η χρονιοιστορία δύναμης επαναφοράς για Transformation Strength=0.35 για τον σεισμό του Kobe PGA=0.27g



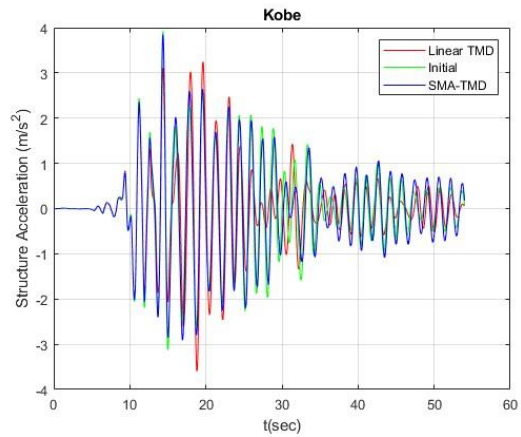
Σχήμα 49: Χρονιοιστορία δύναμης επαναφοράς για Transformation Strength=0.35 στον σεισμό του Kobe PGA=0.27g

Παρατηρούμε ότι και στο μοντέλο μας ο βρόγχος υστέρησης έχει σχήμα «σημαίας» και είναι ικανός να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας ενώ παράλληλα οι παραμένουσες παραμορφώσεις κατά την αποφόρτιση είναι μηδενικές.

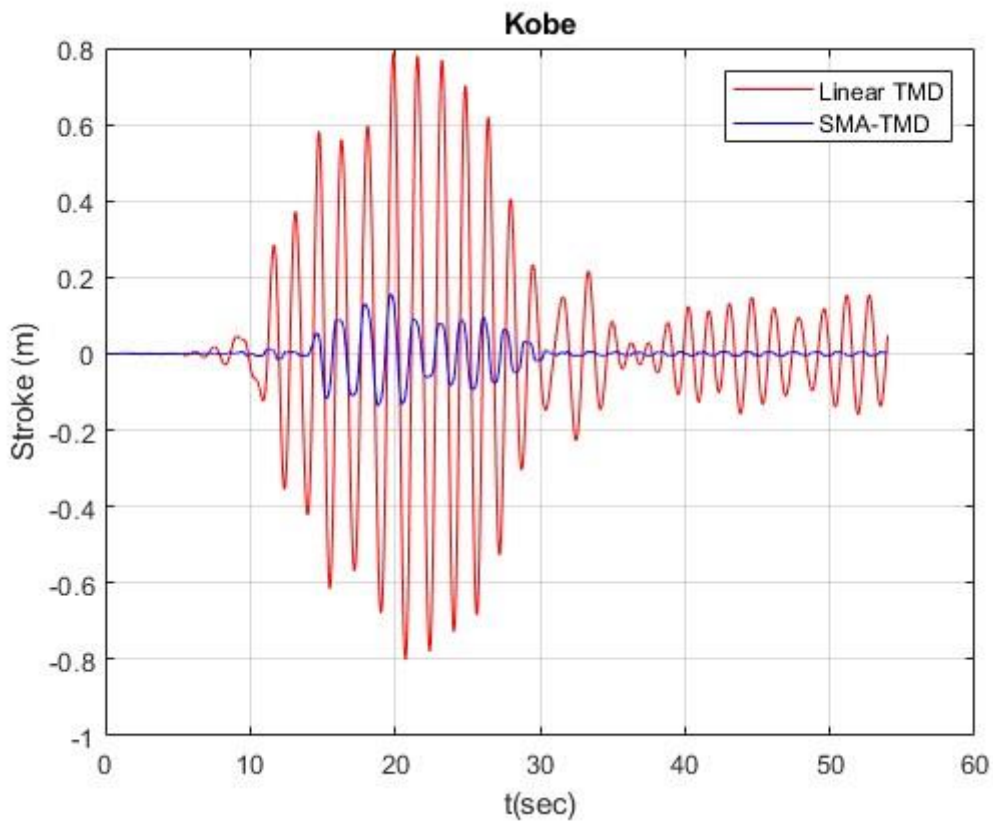
Στο Σχήμα 50 παρουσιάζονται χρονιοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς του Kobe.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 50: Χρονιοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς του Kobe.

Παρατηρούμε ότι οι αποκρίσεις είναι βελτιωμένες σε σχέση με την αρχική κατασκευή. Μεγάλο πλεονέκτημα καθίσταται το stroke, το οποίο συγκριτικά με το γραμμικό TMD είναι περίπου 4 φορές μικρότερο.

4.4.3.5 Συμπεράσματα

Οι σημαντικοί παράμετροι οι οποίοι καθορίζουν την επίδοση του SMA-TMD κρίνεται μέσα από τις αναλύσεις ότι είναι :

- Transformation Strength
- Tuning ratio

Οι παράμετροι αυτοί φαίνεται να μειώνουν δραματικά τα strokes της πρόσθετης μάζας. Παρόλα αυτά για λόγους αποσυντονισμού θα μελετήσουμε μόνο τη μεταβολή του Transformation Strength. Η αύξηση όμως της τιμής της παραμέτρου αυτής προκειμένου να μειώσουμε τα strokes της πρόσθετης μάζας συνεπάγεται αύξηση των μετακινήσεων (και επιταχύνσεων της κατασκευής). Θα προσπαθήσουμε να μετριάσουμε αυτό τον περιορισμό με προσθήκη ενός στοιχείου αρνητικής στιβαρότητας στο Κεφάλαιο 6.

4.5 Πηγές-Βιβλιογραφία

[1] Παππάς Π.-Ν. Δ. (2009) «Ευφυή» σύνθετα υλικά με ενσωματωμένα κράματα μνήμης σχήματος. Διδακτορική διατριβή, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

[2] Μπόλλας, Δημήτριος (2007) Έξυπνα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με ενσωματωμένα σύρματα με μνήμη σχήματος. Διδακτορική διατριβή, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

[3] Mavroidis C., Pfeiffer C., Michaud M. (1999) Conventional actuators, shape memory alloys and electrological fluids. Invited chapter in Automation, Miniature Robotics and Sensors for Non-Destructive Testing and Evaluation, Y. Bar-Cohen, Technical Editor.

[4] Duerig T.W., Melton K.N., Stockel D. Wayman M.C. (1990) Engineering aspects of shape memory alloys. Butterworth Heinmann, London.

[5] Πέταλης Π.Ε. (2007) Κράματα με μνήμη σχήματος (Shape Memory Alloys): Μελέτη των κρυσταλλογραφικών μετασχηματισμών υπό συνθήκες παρεμπόδισης ανάκτησης σχήματος. Διατριβή ειδίκευσης στην Επιστήμη των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

[6] Johnagallada K., Kline G.E. and Sottos N.R. (1997) Local displacements and load transfer in shape memory alloy composites. *Experimental Mechanics*, 37: 78-86.

[7] Solomou A. (2016) Development and Validation of Thermo-Mechanically Coupled Finite Elements for the Simulation of the Nonlinear Time Response of Multi-Layered Shape Memory Alloy Beams. Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics University of Patras, Greece.

[8] Dolce M, Cardone D and Marnetto R 2000 Implementation and testing of passive control devices based on shape-memory alloys *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 29 945–68

[9] Ozbulut O E, Hurlebaus S and Desroches R 2011 Seismic response control using shape memory alloys a review *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 22 1531–49

[10] Menna C., Auricchio F., Asprone D. (2015) Applications of Shape Memory Alloys in Structural Engineering. Invited chapter in Shape Memory Alloy Engineering for Aerospace, Structural and Biomedical Applications. Edited by: Lecce L. and Concilio A.

[11] Song G., Ma N., Li H.N. (2006) Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures*, 28:1266-1274.

[12] Menna C., Auricchio F., Asprone D. (2015) Applications of Shape Memory Alloys in Structural Engineering. Invited chapter in Shape Memory Alloy Engineering for Aerospace, Structural and Biomedical Applications. Edited by: Lecce L. and Concilio A.

[13] Krumme R., Hayes J., Sweeney S. (1995) Structural damping with shape-memory

alloys: one class of devices. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2445: 225-240.

[14]Choi E., Nam T.H., Oh J.T., Cho B.S. (2006) An isolation bearing for highway bridges using shape memory alloys. Materials Science and Engineering A, 438-440:1081-1084.

[15]DesRoches R., Delemont M. (2002) Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. Engineering Structures, 24:324-32.

[16]Alam M.S., Nehdi M., Youssef A. (2008) Shape Memory Alloy-Based Smart RC Bridges: Overview of State-of-The-Art. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, N6A 5B9.

[17]Indrili M. (2001) Demo application of shape memory alloy devices: the rehabilitation of S. Georgio Church Bell Tower. Proceedings of SPIE, 4330:262-72.

[18]Sasa Cao, Osman E Ozbulut, Suiwen Wu, Zhuo Sun and Jiangdong Deng, Multi-level SMA/lead rubber bearing isolation system for seismic protection of bridges, Smart Mater. Struct. 29 (2020) 055045.

[19]Graesser E J and Cozzarelli F A 1991 Shape memory alloys as new materials for a seismic isolation J. Eng. Mech., ASCE 117 2590–608

[20]Yan X and Nie J 2000 Response of SMA superelastic systems under random excitation J. Sound Vib. 238 893–901

[21] Αθανάσιος Στάμος, Σημειώσεις για το μάθημα Μέθοδοι Επίλυσης με H/Y.

[22]Sudib K Mishra, Sourav Gur , Subrata Chakraborty, An improved tuned mass damper (SMA-TMD) assisted by a shape memory alloy spring.

[23] Haoran Zuo , Kaiming Bi , Hong Hao , Chao Li , Numerical study of using shape memory alloy-based tuned mass dampers to control seismic responses of wind turbine tower ,Engineering Structures 250 (2022) 113452

[24]Seismosoft [2018]. SeismoArtif - A computer program for generating artificial earthquake accelerograms matched to a specific target response spectrum 2018. <http://www.seismosoft.com>.

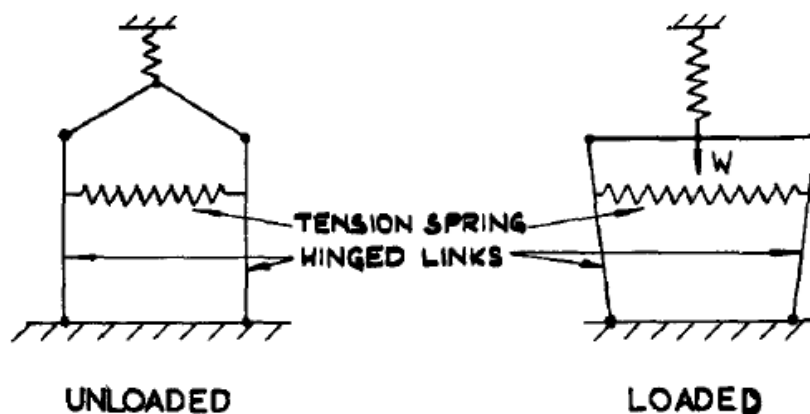
5. Ο ταλαντωτής KDamper

5.1 Εισαγωγή

Ο ταλαντωτής KDamper ,όπως αρχικά προτάθηκε από τον Antoniadis [1] είναι μία καινοτόμα ιδέα απορρόφησης κραδασμών η οποία βασίζεται στον βέλτιστο συνδυασμό κατάλληλων στοιχείων στιβαρότητας, ένα από τα οποία διαθέτει αρνητική σταθερά (Negative Stiffness). Παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο έναντι των συμβατικών συσκευών μόνωσης ,των TMD,αλλά και των ταλαντωτών μηδενικής δυσκαμψίας» (Quazi Zero Stiffness).Προκειμένου γίνει αντιληπτός ο μηχανισμός λειτουργίας του KDamper θα πρέπει πρώτα να ορίσουμε την αρνητική στιβαρότητα.

5.2 Αρνητική Στιβαρότητα

Είναι γνωστό ότι στα συμβατικά ελατήρια το σύστημα αντιτίθεται στην οποιαδήποτε κίνηση επιβάλλει η εισαγωγή κάποιας εξωτερικής φόρτισης ($[P]=[K][U]$).Όταν κάνουμε λόγο για αρνητική στιβαρότητα αναφερόμαστε σε συστήματα τα οποία αντί να προσπαθούν να αναιρέσουν τη μετατόπιση που τους έχει επιβληθεί , την ενισχύουν.



Σχήμα 51: Το προσυμπιεσμένο ελατήριο ενισχύει την κίνηση που προκαλεί η εξωτερική δράση αντί να ανθίσταται σε αυτή. Σχέδιο από τη δημοσίευση του Molyneaux το 1957 για την αρνητική στιβαρότητα [2].

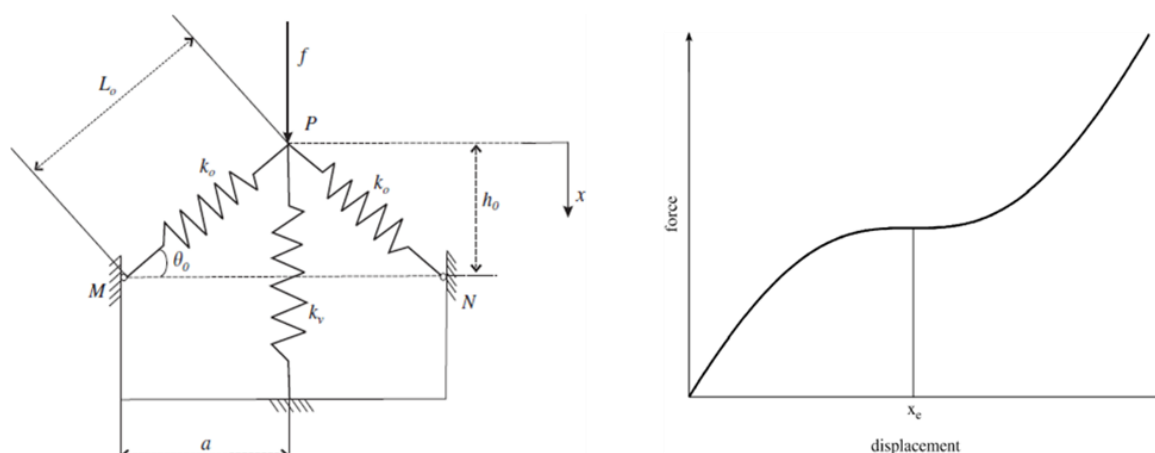
Η διατύπωση της έννοιας αυτής διατυπώθηκε αρχικά από τον Molyneaux (1957) [2] και αργότερα από τον Platus (1992) [3] . Οι προσεγγίσεις αυτές αποσκοπούσαν στην μείωση της συχνότητας του συστήματος (αύξηση της ιδιοπεριόδου) μέσω σημαντικής μείωσης της δυσκαμψίας σε σχεδόν μηδαμινά επίπεδα όπως περιγράφεται στον ταλαντωτή μηδενικής δυσκαμψίας Carrella 2007 [4].

Η ενδιαφέρουσα αυτή «αντισυμβατική» συμπεριφορά επιτυγχάνεται με χρήση μηχανικών διατάξεων που περιλαμβάνουν προ συμπιεσμένα ελατήρια θετικής στιβαρότητας διατεταγμένα σε κατάλληλες γεωμετρίες.

Θα αναλύσουμε αρχικά τη διάταξη αρνητικής στιβαρότητας που αναπτύχθηκε από τον Carrella και έπειτα θα προχωρήσουμε στο σύστημα που προτάθηκε από τον Sarpountzakis [5] για τον ‘επίμαχο’ ταλαντωτή KDamper.

5.3 Quazi Zero Stiffness

Το εν λόγω σύστημα αρνητικής στιβαρότητας αποτελείται από μια συστοιχία τριών ελατηρίων, από τα οποία τα δύο είναι κεκλιμένα ενώ το υπολειπόμενο κατακόρυφο. Σε περίπτωση που επιβληθεί κατάλληλη εξωτερική δύναμη f τα κεκλιμένα ελατήρια θα οριζοντιωθούν και ολόκληρη η ένταση θα αναλαμβάνεται πλήρως από το κατακόρυφο.



Σχήμα 52: Σύστημα αρνητικής στιβαρότητας Quazi Zero Stiffness και αντίστοιχο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που προτάθηκε από Carrella 2007 [4].

Η συγκεκριμένη παραμορφωμένη εικόνα αποτελεί και το σημείο στατικής ισορροπίας του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση καθαίρεσης αυτής της γεωμετρίας η θετική στιβαρότητα του κατακόρυφου ελατηρίου εξουδετερώνεται από την ‘αρνητική δράση’ των συμπιεσμένων(πλέον λίγο έως πολύ κεκλιμένων) ελατηρίων.

Το τυπικό διάγραμμα δύναμης μετατόπισης δίνεται στο Σχήμα 52, στο οποίο η μετατόπιση x_e υποδεικνύει τη θέση στατικής ισορροπίας. Όπως γίνεται αντιληπτό για μικρές μετατοπίσεις γύρω από τη θέση αυτή η δυναμική στιβαρότητα παραμένει σε μηδενικά επίπεδα, κάτι που υποδεικνύει και ο όρος Quazi Zero Stiffness. Παράλληλα όμως για μεγάλες αποκλίσεις η δυσκαμψία παρουσιάζει απότομη αύξηση σε επίπεδα ακόμη μεγαλύτερα από τη μεμονωμένη δράση του κατακόρυφου ελατηρίου με πιθανή αλλοίωση της επιθυμητής συμπεριφοράς.

Η αδιάστατη δυσκαμψία $K^{\wedge}QZS$ και η γεωμετρική διάσταση a υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις,

$$\widehat{K}_{QZS} = 1 + \frac{\gamma_{QZS}}{1-\gamma_{QZS}} \left[1 - \frac{\gamma_{QZS}^2}{(\hat{x}^2 - 2\sqrt{1-\gamma_{QZS}^2}\hat{x} + 1)^{3/2}} \right] \quad (5.1)$$

$$a = \frac{\gamma_{QZS}}{2(1-\gamma_{QZS})} \quad (5.2)$$

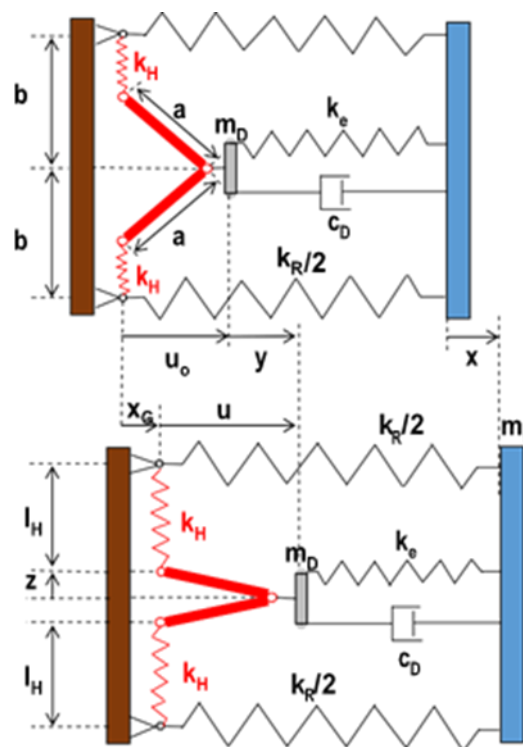
όπου \hat{x} είναι η αδιάστατη μετατόπιση του συστήματος από τη θέση ισορροπίας και γ_{QZS} είναι μια γεωμετρική παράμετρος.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης για τα όρια απόκλισης από τη θέση ισορροπίας, το οποίο αποσκοπεί στο να διατηρήσει την αδιάστατη δυσκαμψία $K^{\wedge}QZS$ σε χαμηλότερα επίπεδα από την αρχική K ορίζει στο γ την βέλτιστη τιμή

$$\gamma_{opt} \approx \left(\frac{2}{3}\right)^{(\bar{k}_o/2)+1} \quad (5.3)$$

5.4 Σύστημα αρνητικής στιβαρότητας KDamper

Μια εναλλακτική διάταξη η οποία προτείνεται για το KDamper ακολουθεί στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 53: Το σύστημα αρνητικής στιβαρότητας KDamper είναι ικανό να εξασφαλίσει σταθερή αρνητική δυσκαμψία για κατάλληλο εύρος μετατοπίσεων καθιστώντας το ικανό να αποτελέσει μέρος συστήματος σεισμικής μόνωσης [5]

Αυτός ο μηχανισμός αρνητικής στιβαρότητας, σε αντίθεση με του Carrella, είναι ικανός να εξασφαλίσει σταθερή αρνητική δυσκαμψία για κατάλληλο εύρος μετατοπίσεων καθιστώντας το ικανό να αποτελέσει μέρος συστήματος σεισμικής μόνωσης. Αποτελείται από δύο συμμετρικά προ συμπιεσμένα ελατήρια σταθεράς k_H τα οποία στηρίζουν μια πρόσθετη μάζα m_D .

Μέσω της παρακάτω διαδικασίας καθίσταται ικανός ο υπολογισμός της τιμής της αρνητικής στιβαρότητας.

Αρχικά, υπολογίζουμε την δυναμική ενέργεια λόγω της παραμόρφωσης των ελατηρίων

$$U_N(u) = 2 \frac{1}{2} k_H (l_H - l_{HI})^2 \quad (5.4)$$

Όπου

$$l_H = b - (a^2 - u^2)^{1/2} \quad (5.5)$$

Ακολουθώντας, η μη γραμμική δύναμη παρουσιάζεται ως

$$f_N(u) = \frac{\partial U_N}{\partial u} = \frac{\partial U_N}{\partial u_D} = -2k_H \left(1 + \frac{l_{HI} - b}{\sqrt{a^2 - u^2}}\right) u = -2k_H \left[1 + c_I \frac{1}{(1 - \frac{u^2}{a^2})^{1/2}}\right] u \quad (5.6)$$

Όπου:

$$u = u_o + u_D \quad (5.7)$$

$$c_I = (l_{HI} - b) / a \quad (5.8)$$

Τέλος, η τιμή της αρνητικής στιβαρότητας δίνεται από:

$$k_N = \frac{\partial f_N}{\partial u} = \frac{\partial f_N}{\partial u_D} = -2k_H \left[1 + c_I \frac{1}{(1 - \frac{u^2}{a^2})^{3/2}}\right] u \quad (5.9)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι προκειμένου ο σχεδιασμός αυτός, των προσημασμένων ελατηρίων, να είναι ρεαλιστικός θα πρέπει το εύρος της απόλυτης τιμής της μετατόπισης της εσωτερικής μάζας m_D να μην υπερβαίνει τα 70 cm. Αυτό είναι δυνατόν να υλοποιηθεί με παράλληλους παρόμοιους μηχανισμούς προκειμένου επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

5.5 Επισκόπηση KDamper

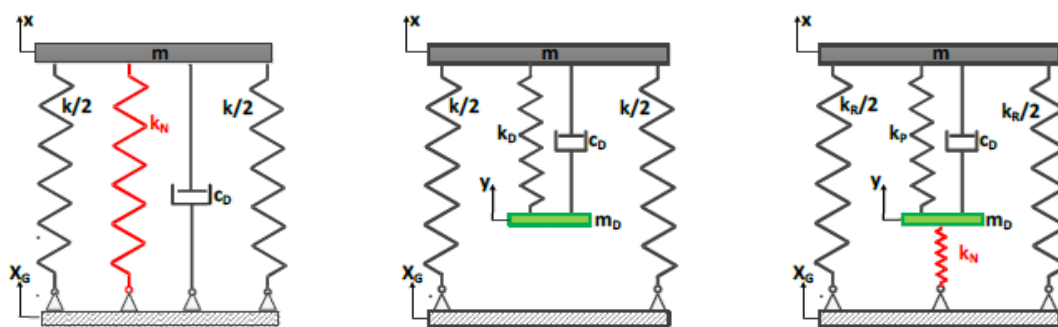
Ο εν λόγω ταλαντωτής παρουσιάζεται στο σχήμα 54, σε συνδυασμό με τον Quazi Zero Stiffness και τον TMD. Όλα τα παραπάνω συστήματα είναι σχεδιασμένα ώστε να ελαχιστοποιούν την απόκριση $x(t)$ ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή υπό σεισμική διέγερση $xg(t)$.

Όπως θα προκύψει από την επιμέρους σύγκριση ο KDamper εμπνέεται από τα δυο αυτά συστήματα και αξιοποιεί τα πλεονεκτήματά τους.

Ο KDamper διατηρεί τη συνολική στιβαρότητα του συστήματος:

$$k_R + \frac{k_P k_N}{k_P + k_N} = (2\pi f_0)^2 (m + m_D) \quad (5.10)$$

εισάγοντας σε κατάλληλη διάταξη το στοιχείο αρνητικής στιβαρότητας και με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζει το μειονέκτημα των QZS οι οποίοι περιορίζουν τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής μιας και $k_{new}=k+k_N < k$, μιας και k_N λαμβάνει αρνητική τιμή.



Σχήμα 54: Quazi Zero Stifness, TMD και KDamper

Οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση του KDamper προκύπτουν:

$$m\ddot{u}_s + c_D(\dot{u}_s - \dot{u}_D) + k_P(u_s - u_D) + k_R u_s = -m\ddot{x}_G \quad (5.11)$$

$$m_D\ddot{u}_D - c_D(\dot{u}_s - \dot{u}_D) + k_P(u_s - u_D) + k_N u_D = -m_D\ddot{x}_G \quad (5.12)$$

Όπου:

$$u_s = x - x_G \quad (5.13)$$

$$u_D = y - x_G \quad (5.14)$$

Υποθέτοντας αρμονική φόρτιση της μορφής:

$$\ddot{x}_G = A_G \exp(j\omega t) \quad (5.15)$$

και αποκρίσεις

$$u_s(t) = \tilde{U}_s \exp(j\omega t), u_D(t) = \tilde{U}_D \exp(j\omega t) \quad (5.16)$$

οι εξισώσεις δυναμικής ισορροπίας μετασχηματίζονται σε:

$$-\omega^2 m \tilde{U}_s + j\omega c_D(\tilde{U}_s - \tilde{U}_D) + k_P(\tilde{U}_s - \tilde{U}_D) + k_R \tilde{U}_s = -m \ddot{A}_G \quad (5.17)$$

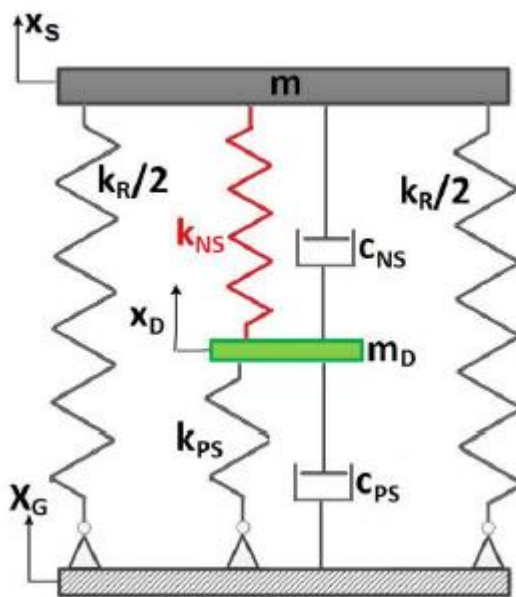
$$-\omega^2 m_D \tilde{U}_D - j\omega c_D(\tilde{U}_s - \tilde{U}_D) - k_P(\tilde{U}_s - \tilde{U}_D) + k_N \tilde{U}_D = -m_D \ddot{A}_G \quad (5.18)$$

Εξετάζοντας προσεκτικά τη εξίσωση 5.18 παρατηρούμε ότι η δύναμη της πρόσθετης μάζας και εκείνη του στοιχείου αρνητικής στιβαρότητας είναι σε φάση μεταξύ τους λόγω της αρνητικής τιμής k_N . Συνεπώς, ο ταλαντωτής μπορεί να θεωρηθεί μία έμμεση προσέγγιση για την αύξηση της αδρανειακής μάζας. Επιπλέον, ο ταλαντωτής KDamper ξεπερνά το πρόβλημα ευαισθησία των κλασσικών TMD μιας και ο συντονισμός τους καθορίζεται πλέον από τις παραμέτρους του στοιχείου αρνητικής στιβαρότητας.

Το καινοτόμο αυτό σύστημα απορρόφησης κραδασμών και σεισμικής μόνωσης φαίνεται να παρουσιάζει εντυπωσιακή συμπεριφορά απόσβεσης σε εφαρμογές γεφυροποιίας [6], πολυόροφων κτιρίων [7] και σε ανεμογεννήτριες [8] .

5.6 Extended KDamper

Στο Σχήμα 55 παρουσιάζεται η διευρυμένη εκδοχή του ταλαντωτή KDamper ή αλλιώς EKD, η οποία συνίσταται στην εναλλαγή θέσης του στοιχείου αρνητικής στιβαρότητας και στην προσθήκη ενός ακόμη αποσβεστήρα. Η συνολική στιβαρότητα παραμένει σταθερή και ίδια με την κλασική εκδοχή.



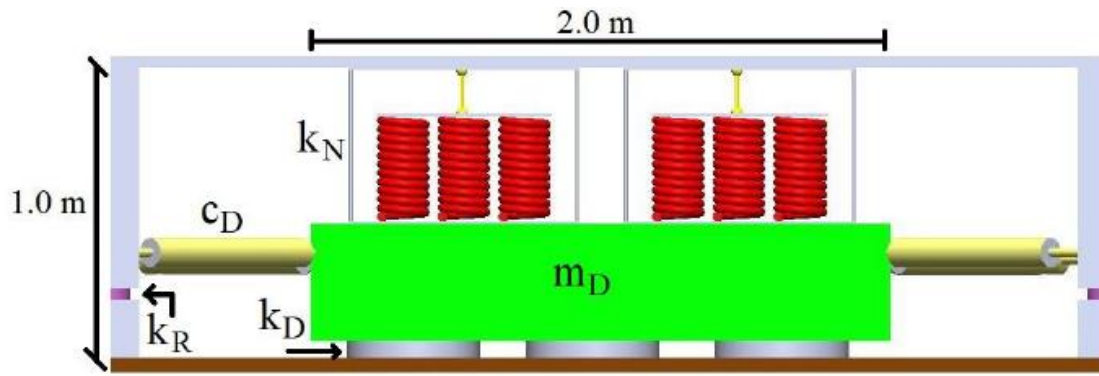
Σχήμα 55: Extended KDamper

Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι

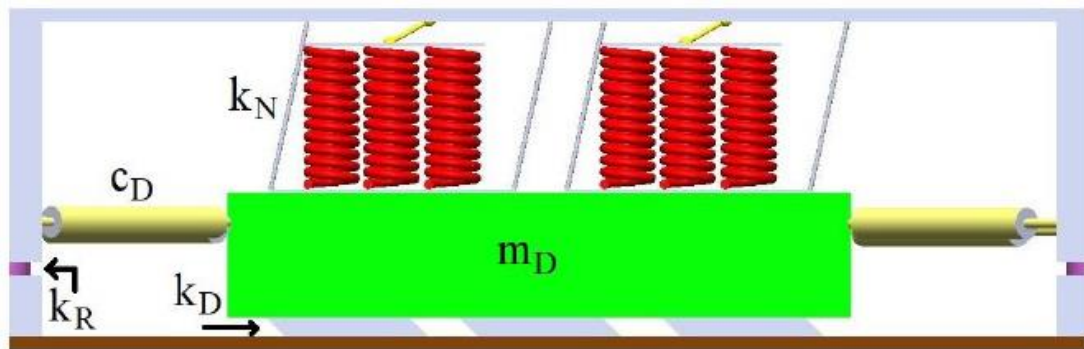
$$m\ddot{u}_s + c_{NS}(\dot{u}_s - \dot{u}_D) + k_{NS}(u_s - u_D) + k_R u_s = -m\ddot{x}_G \quad (5.19)$$

$$m_D\ddot{u}_D - c_{NS}(\dot{u}_s - \dot{u}_D) - k_{NS}(u_s - u_D) + c_{PS}\dot{u}_D + k_{PS}u_D = -m_D\ddot{x}_G \quad (5.20)$$

Η διάταξη αυτή οφείλεται σε τεχνικούς λόγους. Πιο συγκεκριμένα σε αυτή την περίπτωση στο στοιχείο αρνητικής στιβαρότητας δεν επιβάλλεται καμία εξωτερική ένταση όπως στο KDamper το οποίο επιβαρύνεται από το ίδιο βάρος της πρόσθετης μάζας m_D .Αντίθετα, στον EKD το βάρος αυτό παραλαμβάνεται αποκλειστικά από τα στοιχεία θετικής στιβαρότητας τα οποία μπορούν να υλοποιηθούν με συμβατικά ελαστομεταλλικά εφέδρανα. Επιπλέον, με την προσθήκη επιπλέον στοιχείων απόσβεσης επιτυγχάνεται περαιτέρω βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς ενώ παράλληλα η σχετική μετατόπιση του στοιχείου αρνητικής στιβαρότητας οδηγείται σε πιο χαμηλά επίπεδα, παράγοντας καθοριστικός για τον ρεαλιστικό σχεδιασμό του.



Σχήμα 56: Αναπαράσταση του ταλαντωτή ΕΚΔ στην αρχική θέση ισορροπίας



Σχήμα 57: Αναπαράσταση του ταλαντωτή ΕΚΔ στην παραμορφωμένη θέση

5.7 Πηγές-Βιβλιογραφία

- [1]Antoniadis I, Chronopoulos D, Spitas V, Koulocheris D. Hyper-damping properties of a stiff and stable linear oscillator with a negative stiffness element. *J Sound Vib* 2015.
- [2]Molyneaux W (1957) Supports for Vibration Isolation. G. Britain: ARC/CP-322, Aer Res Council.
- [3]Platus DL and L.Platus D (1992) Negative-stiffness-mechanism vibration isolation systems. In: Proc. of SPIE, 1992, pp. 44–54.
- [4]Carrella A, Brennan MJ and Waters TP (2007) Static analysis of a passive vibration isolator with quasi-zero-stiffness characteristic. *Journal of Sound and Vibration* 301(3–5): 678–689. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.10.011.
- [5]Sapountzakis, E.J., Syrimi, P.G., Pantazis, I.A. and Antoniadis, I.A, (2017), “KDamper Concept in Seismic Isolation of Bridges with Flexible Piers”. *Engineering Structures*, 153, 525-539.
- [6]P. G. Syrimi, E. J. Sapountzakis, G. C. Tsiatas, I. A. Antoniadis, "Parameter Optimization of the KDamper Concept in Seismic Isolation of Bridges Using Harmony Search Algorithm", *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2017)*, Rhodes Island, Greece, 15-17 June, 2017.
- [7] Konstantinos A. Kapasakalis, Ioannis A. Antoniadis and Evangelos J Sapountzakis
PERFORMANCE ASSESSMENT OF THE KDAMPER AS A SEISMIC ABSORPTION
BASE
- [8]K. A.Kapasakalis, "Contribution to Vibration of Wind Turbine Towers" Master Thesis, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Greece, 2017

5.8 Περαιτέρω βιβλιογραφία

Περαιτέρω βιβλιογραφία σχετικά με το σύστημα απορρόφησης κραδασμών KDamper μπορεί να αναζητηθεί στις παρακάτω δημοσιεύσεις.

Kapasakalis, K.A., Mantakas, A.G., Kalderon, M., Antoniou, M. and Sapountzakis, E.J., “Performance Evaluation of Distributed Extended KDamper Devices for Seismic Protection of Mid-Rise Building Structures”, *Journal of Earthquake Engineering*, DOI: <https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2226227>, 2023.

Mantakas, A.G., Kapasakalis, K.A., Alvertos, A.E., Antoniadis, I.A. and Sapountzakis, E.J., “A Negative Stiffness Dynamic Base Absorber for Seismic Retrofitting of Residential Buildings”, *Structural Control and Health Monitoring*, DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.3127>, 2022.

Kapasakalis, K.A. and Sapountzakis, E.J., “Vibration Absorption using KDamper-based Devices with Extreme Geometric Nonlinearity”, *International Journal of Mechanics*, vol. 16, pp. 15-27, DOI: 10.46300/9104.2022.16.3, 2022.
[https://npublications.com/journals/mechanics/2022/a062003-003\(2022\).pdf](https://npublications.com/journals/mechanics/2022/a062003-003(2022).pdf)

Kalogerakou, M.E., Kapasakalis, K.A., Antoniadis, I.A. and Sapountzakis, E.J., “Vertical Seismic Protection of Structures with Inerter-Based Negative Stiffness Absorbers”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01284-w>, 2022.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01284-w>

Kampitsis, A., Kapasakalis, K.A. and Via-Estrem, L., “An Integrated FEA-CFD Simulation of Offshore Wind Turbines with Vibration Control Systems”, *Engineering Structures*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113859>, 2022.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622000207?via%3Dihub>

Kapasakalis, K.A., Antoniadis, I.A. and Sapountzakis, E.J., “Feasibility Assessment of Stiff Seismic Base Absorbers”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, DOI: 10.1007/s42417-021-00362-2, 2021.
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs42417-021-00362-2>

Kapasakalis, K.A., Antoniadis, I.A. and Sapountzakis, E.J., “A Soil-Dependent Approach for the Design of Novel Negative Stiffness Seismic Protection Devices”, *Applied Sciences*, DOI: <https://doi.org/10.3390/app11146295>, 2021.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/14/6295>

Kapasakalis, K.A., Antoniadis, I.A., Sapountzakis, E.J. and Kampitsis, A., “Vibration Mitigation of Wind Turbine Towers Using Negative Stiffness Absorbers”, *Journal of Civil Engineering and Construction*, DOI: <https://doi.org/10.32732/jcec.2021.10.3.123>, 2021.
<http://www.xpublication.com/index.php/jcec/article/view/594>

Kapasakalis, K.A., Antoniadis, I.A. and Sapountzakis, E.J., “Stiff Vertical Seismic Absorbers”, *Journal of Vibration and Control*, DOI: <https://doi.org/10.1177/10775463211001624>, 2021.
<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/10775463211001624>

Kapasakalis, K.A., Antoniadis, I.A. and Sapountzakis, E.J., “Constrained Optimal Design of Seismic Base Absorbers Based on an Extended KDamper Concept”, *Engineering Structures*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111312>, 2020.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029620339134?via%3Dihub>

Kapasakalis, K.A., Antoniadis, I.A. and Sapountzakis, E.J., “Implementation of the KDamper as a Stiff Seismic Absorption Base: A Preliminary Assessment”, *Vibration and Acoustics Research Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-26, 2019.

<http://www.cansrg.com/journals/varj/2019/Kapasakalis-et-al/index.html>

Kapasakalis, K.A., Antoniadis, I.A. and Sapountzakis, E.J., “Performance Assessment of the KDamper as a Seismic Absorption Base”, *Structural Control and Health Monitoring*, DOI: 10.1002/stc.2482, 2019. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/stc.2482>

6. Διευρημένο SMA με στοιχείο αρνητικής στιβαρότητας KD-SMA

6.1 Εισαγωγή

Εμπνευσμένοι από την κλασική συσκευή KDamper (από το Κεφάλαιο 5) αποφασίσαμε να αντικαταστήσουμε το γραμμικό ελατήριο με εκείνο του SMA (από το Κεφάλαιο 4) και να προσθέσουμε έναν αποσβεστήρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 58. Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο θα εξετάσουμε:

- Την επιρροή της τιμής k_N του στοιχείου αρνητικής στιβαρότητας σε συνδυασμό με την προσθήκη επιπλέον στιβαρότητας k .
- Την επιλογή του βέλτιστου ζεύγους τιμών απόσβεσης-αρνητικής στιβαρότητας για τιμές Transformation Strength $F_o=0.35$, 0.50 και 0.60 .

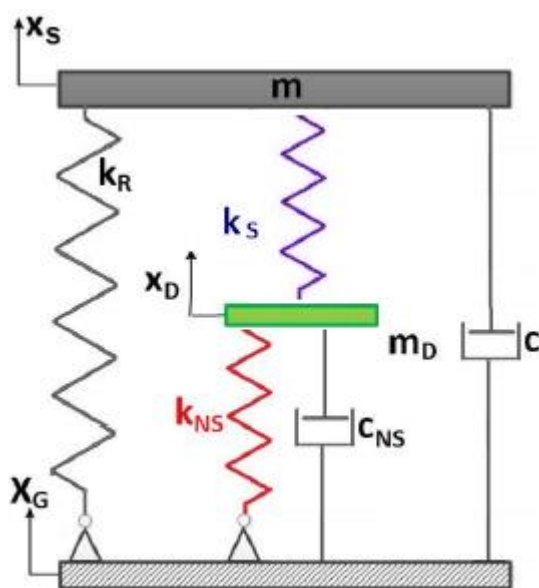
υπό το πρίσμα του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος που είναι συμβατό με το φάσμα του Ευρωκώδικα.

Τέλος, θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της κατασκευής σε πραγματικούς σεισμούς :

- Χωρίς σύστημα σεισμικής μόνωσης
- Με TMD
- Με SMA-TMD
- Με KD-SMA για $F_o=0.35$ και βέλτιστο ζεύγος αποσβέσεως-αρνητικής στιβαρότητας
- Με KD-SMA για $F_o=0.50$ και βέλτιστο ζεύγος αποσβέσεως-αρνητικής στιβαρότητας
- Με KD-SMA για $F_o=0.60$ και βέλτιστο ζεύγος αποσβέσεως-αρνητικής στιβαρότητας

6.2 Διατύπωση εξισώσεων

Το σύστημα όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 58: KD-SMA

Οι εξισώσεις του προτεινόμενου συστήματος είναι οι ακόλουθες:

$$m\ddot{u}_s - F_{sh}(x_s, \dot{x}_s) + k_R u_s + c\dot{u}_s = -m\ddot{x}_G \quad (6.1)$$

$$m_D \ddot{u}_D + c_{NS} \dot{u}_D + F_{sh}(x_s, \dot{x}_s) + k_{NS} u_D = -m_D \ddot{x}_G \quad (6.2)$$

Προκειμένου ο σχεδιασμός της απόσβεσης c_{ns} να είναι ρεαλιστικός η τιμή της θα κυμαίνεται από 0-50 % της απόσβεσης c της κατασκευής. Το άνω όριο για το c_{ns} προκύπτει ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} c = 2\zeta \sqrt{mk} \\ c_{NS} = 2\zeta_{NS} \sqrt{m_D k_{NS}} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \zeta = 5\% \\ \zeta_{NS} = 0:25\% \\ |k_{NS}| = 0:10\%k \\ m_D = 2.5:10\%m \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{c}{c_{NS,MAX}} = \frac{2\zeta}{2\zeta_{NS}} \sqrt{\frac{mk}{m_D k_{NS}}} = \frac{2 \times 0.05}{2 \times 0.25} \sqrt{\frac{mk}{0.10m \cdot 0.10k_{NS}}} \Rightarrow$$

$$c_{NS,MAX} = 0.50c$$

6.3 Εφαρμογή σε εύκαμπτη κατασκευή

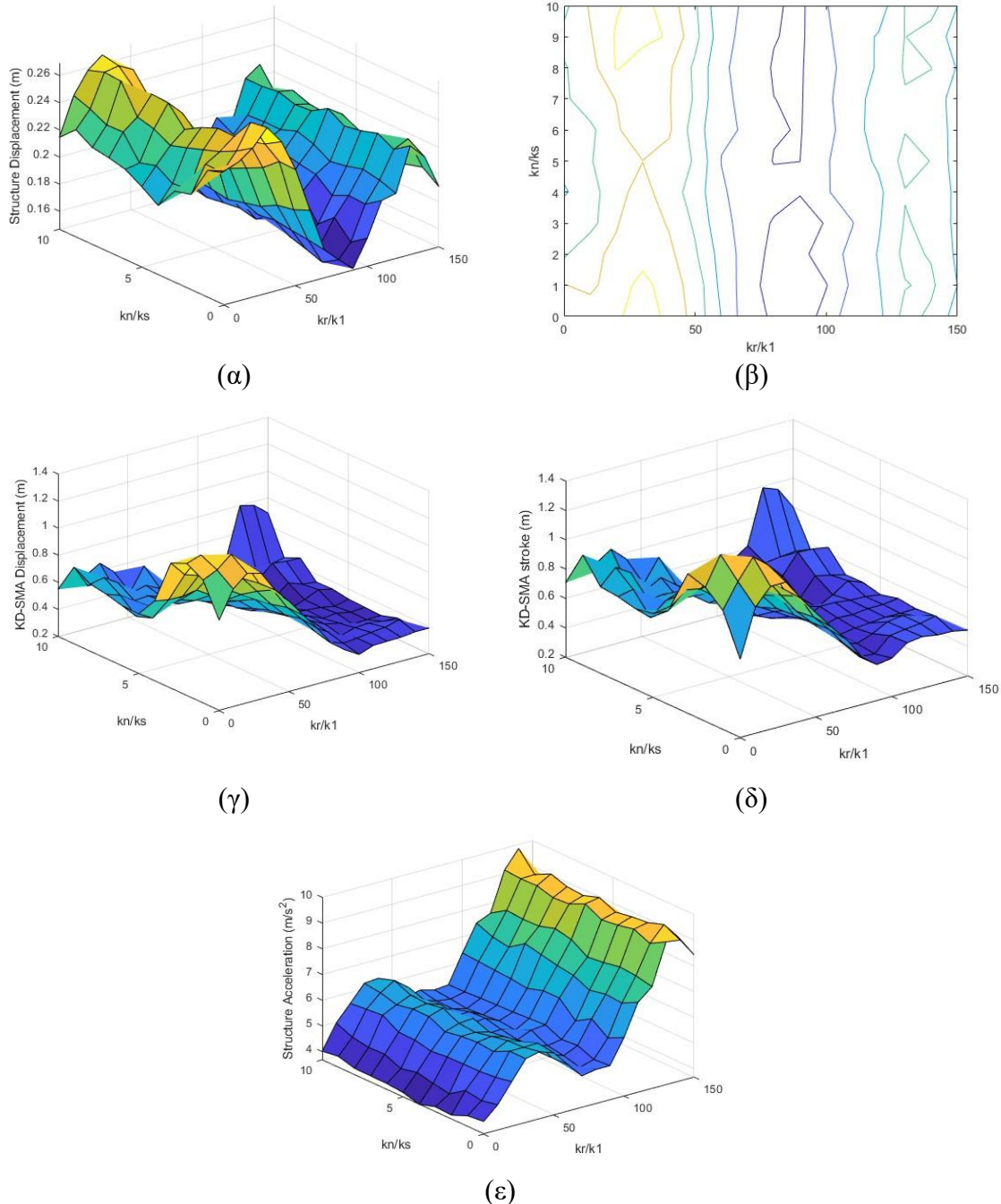
Θα εξεταστεί η κατασκευή του Πίνακα 2 με ιδιοπερίοδο $T=1.5s$

6.3.1 Επιρροή k_N στοιχείου αρνητικής στιβαρότητας

Οι τιμές που θα λάβουμε υπόψιν για την πρόσθετη στιβαρότητα κυμαίνονται από 0-150 % της στιβαρότητας της κατασκευής. Αξίζει να τονίσουμε ότι για τιμές k_N μεγαλύτερες περίπου (εξαρτάται και από τις τιμές που λαμβάνει το c_{ns}) του 10% του k_s (αρχικής στιβαρότητας ελατηρίου SMA) το σύστημα μας μετατρέπεται σε μηχανισμό με αποτέλεσμα τα μεγέθη των μετατοπίσεων, των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων να τείνουν στο άπειρο.

Transformation Strength=0.35, $c_{ns}=0$

Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 59 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει των λόγων k_n/k_s και k_r/k_1 για Transformation Strength=0.35 και $c_{ns}=0$: (α), (β) της μετατόπισης της κατασκευής, (γ) της μετατόπισης KD-SMA, (δ) του stroke KD-SMA, (ε) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

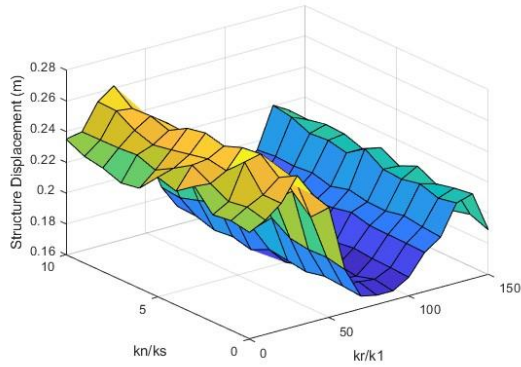


Σχήμα 59: Μεταβολή συναρτήσει k_n/k_s - k_r/k_1 : (α),(β) της μετατόπιση της κατασκευής, (γ) της μετατόπισης TMD, (δ) του stroke TMD,(ε) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35 και $c_{ns}=0$.

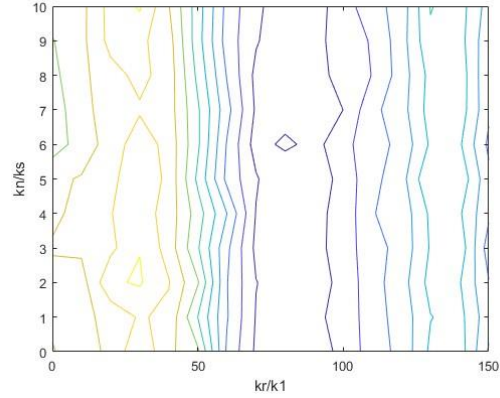
Παρατηρούμε ότι η μετατόπιση είναι σχεδόν ανεξάρτητη της μεταβολής της τιμής του στοιχείου αρνητικής σιβαρότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 58 (β).

Transformation Strength=0.35, $c_{ns}=0.50c$

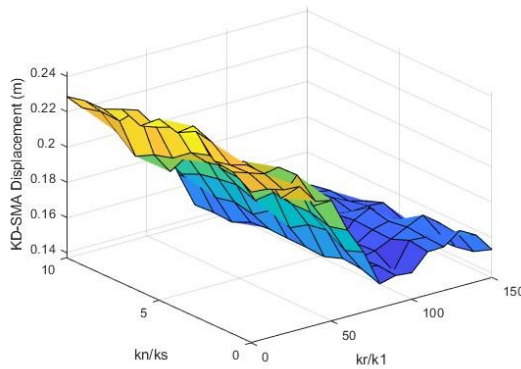
Στο Σχήμα 60 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει των λόγων k_n/k_s και k_r/k_1 για Transformation Strength=0.35 και $c_{ns}=0.50c$: (α), (β) της μετατόπισης της κατασκευής, (γ) της μετατόπισης KD-SMA, (δ) του stroke KD-SMA, (ε) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



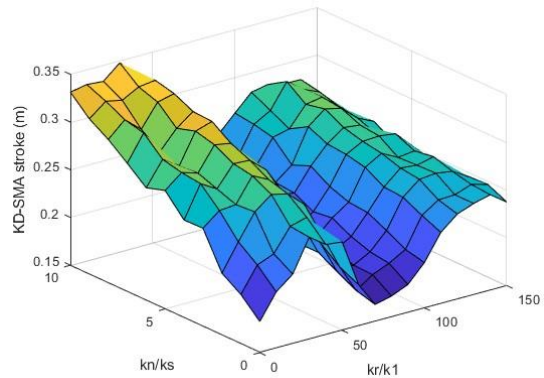
(α)



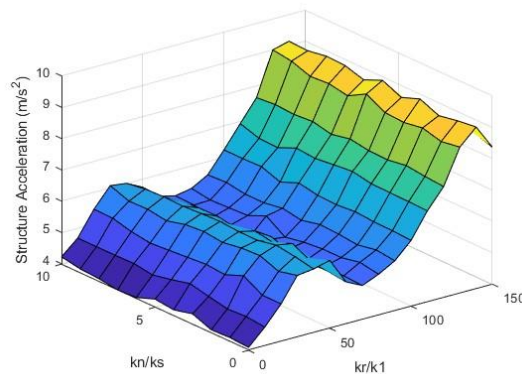
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 60: Μεταβολή συναρτήσει k_n/k_s - k_r/k_1 : (α),(β) της μετατόπιση της κατασκευής, (γ) της μετατόπισης TMD, (δ) του stroke TMD,(ε) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35 και $c_{ns}=0.50c$.

Παρατηρούμε ότι και σε αυτή την περίπτωση η μετατόπιση είναι σχεδόν ανεξάρτητη της μεταβολής της τιμής του στοιχείου αρνητικής στιβαρότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 59 (β).

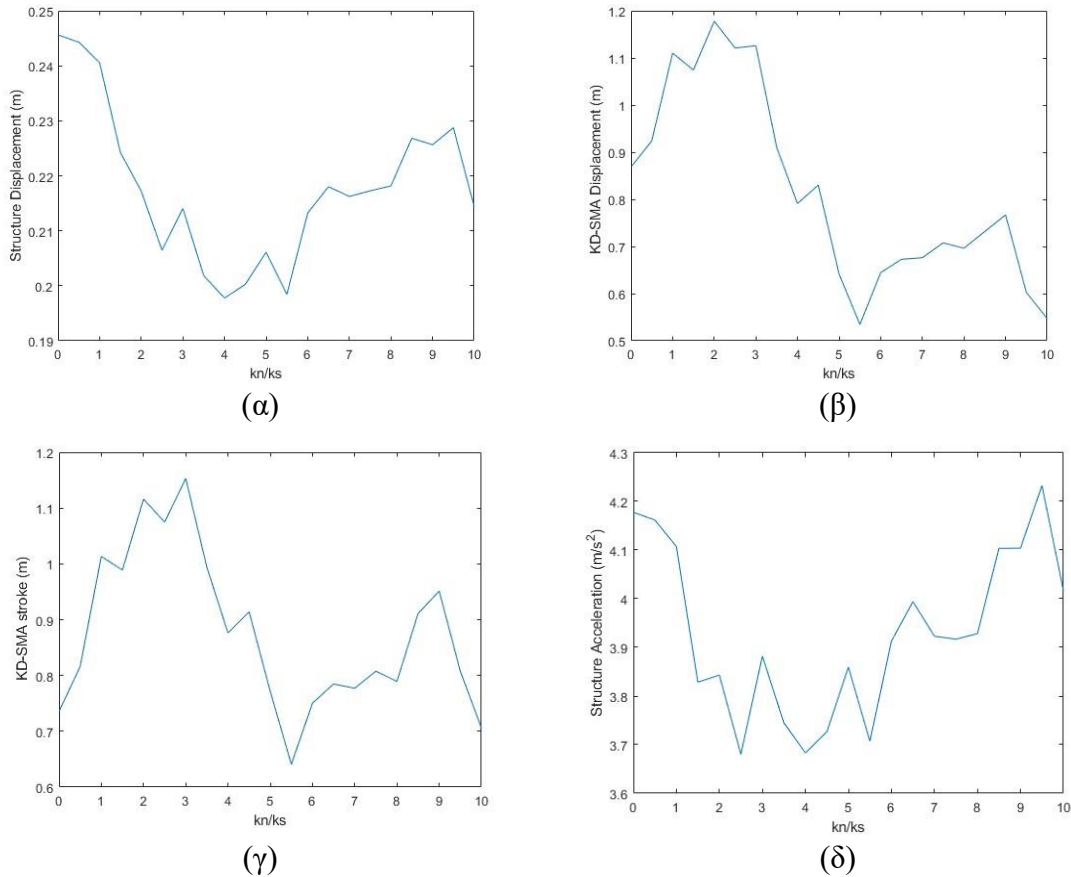
Οι παραπάνω αναλύσεις πιστοποιούν ότι αφού πλαστικοποιηθεί το ελατήριο SMA η δυσκαμψία εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από το προστιθέμενο k_R (το οποίο θα μπορούσε να μεταφραστεί σε προσθήκη επιπλέον υποστυλώματος στο κτίριο) με αποτέλεσμα όσο αυτό αυξάνεται η κατασκευή να ανταποκρίνεται καλύτερα. Η συμπεριφορά αυτή παρόλα αυτά είναι ανεξάρτητη της τιμής του ελατηρίου αρνητικής στιβαρότητας ή μάλλον σε ορισμένες περιπτώσεις επιφέρει δυσμενή αποτελέσματα.

6.3.2 Διερεύνηση βέλτιστου ζεύγους τιμών αποσβέσεως-αρνητικής στιβαρότητας για συγκεκριμένες τιμές Transformation Strength

Μέσα από τις παρακάτω αναλύσεις θα βρούμε την βέλτιστη τιμή αποσβέσεως για τιμές Transformation Strength 0.35 ,0.50 και 0.60. Σε κάθε μία από τις 3 περιπτώσεις θα παρουσιάσουμε αρχικά τις αναλύσεις για $c_{ns}=0c$ και $c_{ns}=0.50c$ για καλύτερη εποπτεία και έπειτα τα τρισδιάστατα διαγράμματα.

Transformation Strength=0.35, $c_{ns}=0$

Στο Σχήμα 61 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του λόγου k_n/k_s για Transformation Strength=0.35 και $c_{ns}=0$: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

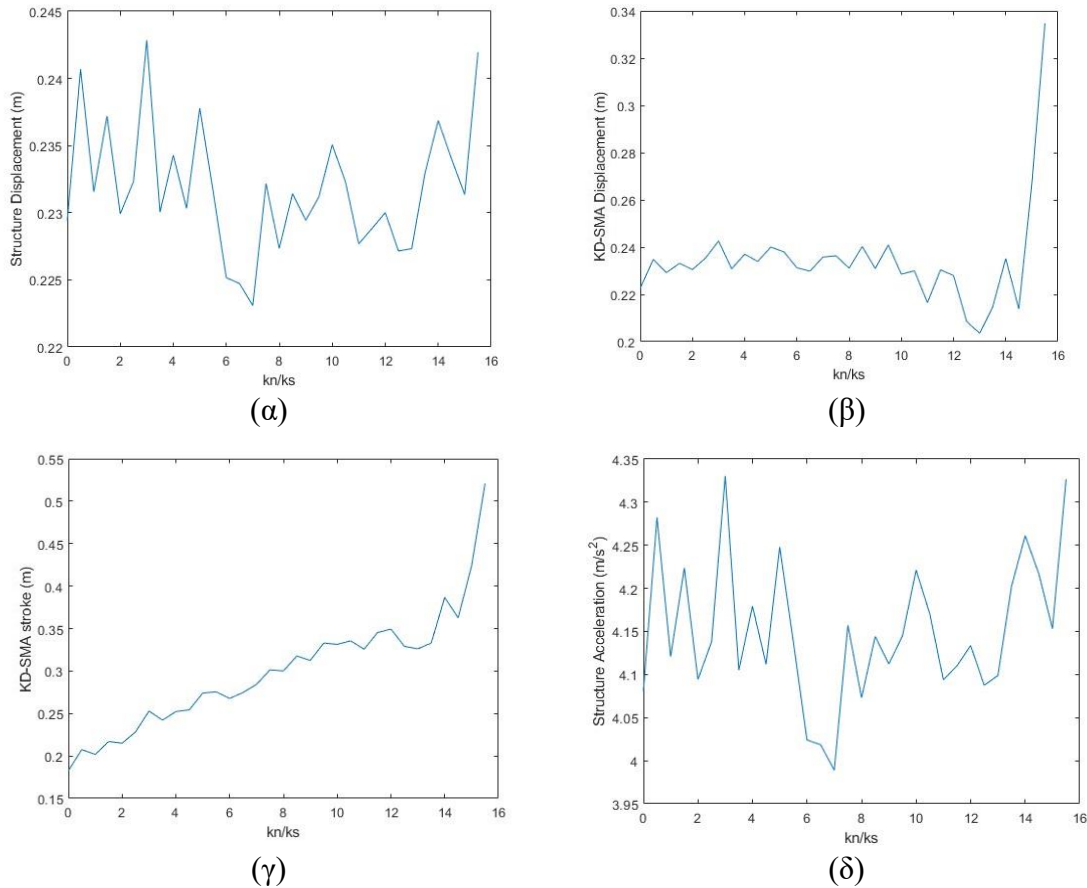


Σχήμα 61: Μεταβολή συναρτήσει k_n/k_s : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35 και $c_{ns}=0$.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία βέλτιστη τιμή του λόγου k_n/k_s περίπου στο 5.5% το οποίο ελαχιστοποιεί όλα τα δυναμικά μεγέθη της κίνησης.

Transformation Strength=0.35, $c_{ns}=0.50c$

Στο Σχήμα 62 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του λόγου kn/ks για transformation strength=0.35 και $c_{ns}=0.50c$: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

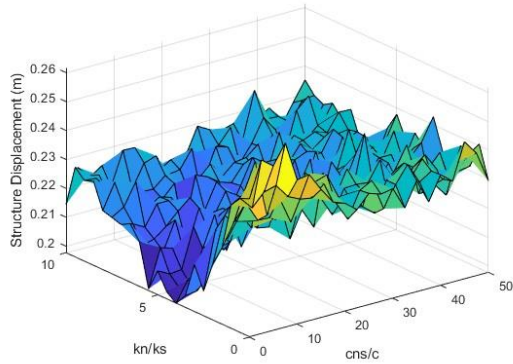


Σχήμα 62: Μεταβολή συναρτήσει kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35 και $c_{ns}=0.50c$.

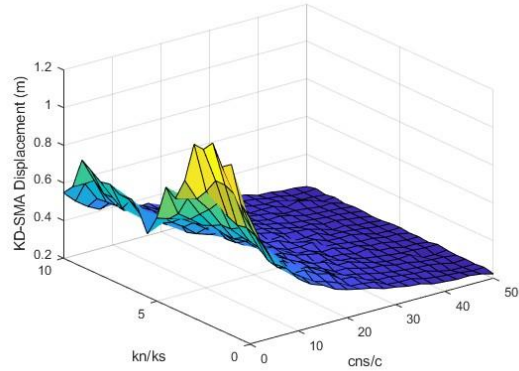
Παρατηρούμε ότι η τιμή του λόγου kn/ks που ελαχιστοποιεί τις μετακινήσεις και τις επιταχύνσεις της κατασκευής είναι περίπου στο 7%,όμως όσο αυτός αυξάνεται τα strokes του KD-SMA αυξάνονται.

Transformation Strength=0.35

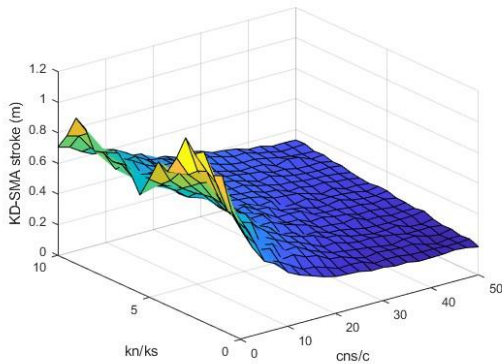
Στο Σχήμα 63 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσεων των λόγων kn/ks και cns/c για Transformation Strength=0.35: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



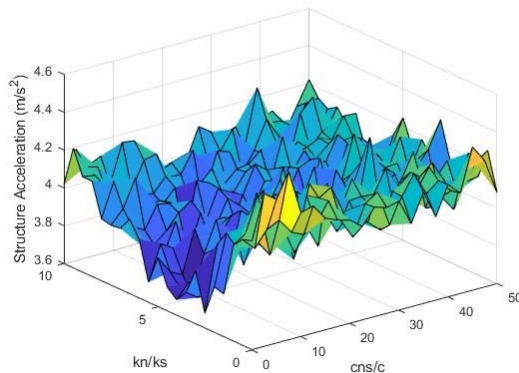
(α)



(β)



(γ)



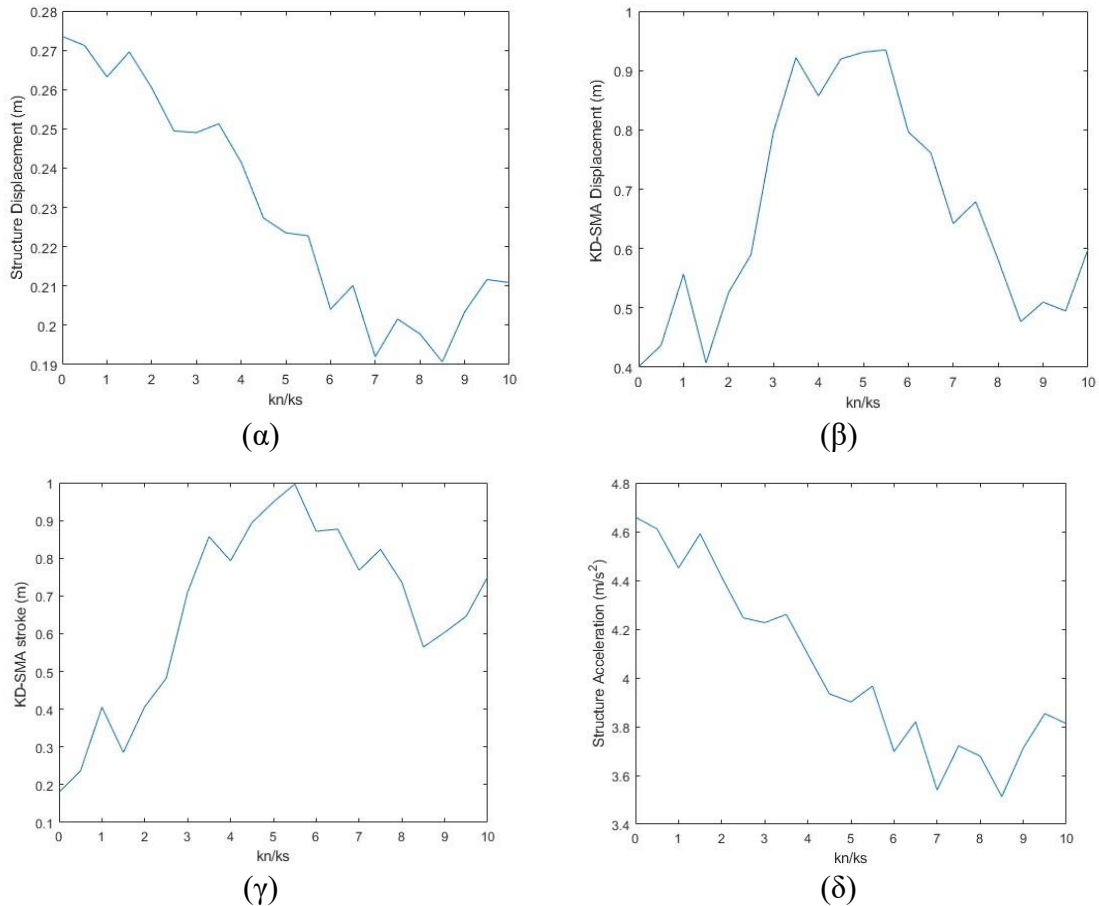
(δ)

Σχήμα 63: Μεταβολή συναρτήσεων kn/ks - cns/c : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.35.

Η αύξηση του λόγου cns/c μειώνει δραματικά τα strokes και τις μετατοπίσεις του KD-SMA. Η επιρροή του λόγου kn/ks δεν είναι σε κάθε περίπτωση ξεκάθαρη.

Transformation Strength=0.50, $c_{ns}=0$

Στο Σχήμα 64 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του λόγου kn/ks για Transformation Strength=0.50 και $c_{ns}=0$: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

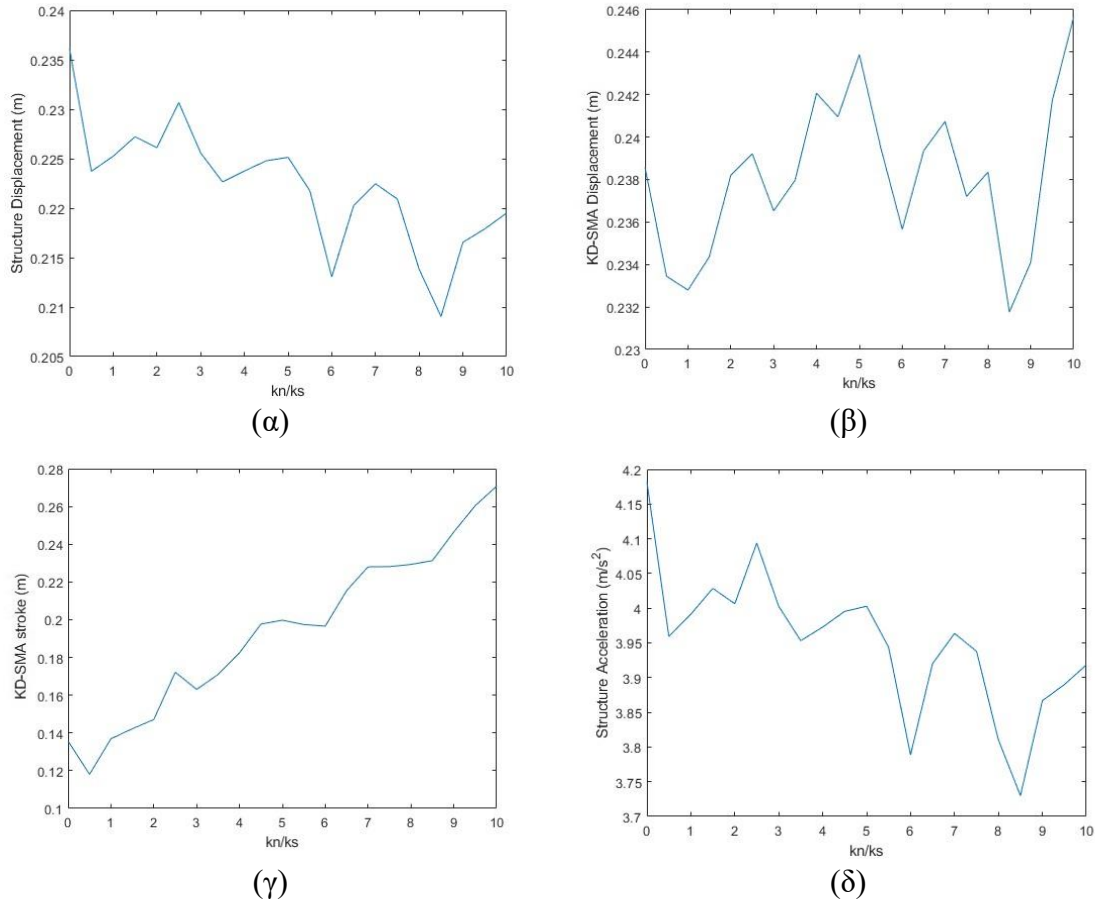


Σχήμα 64: Μεταβολή συναρτήσει kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.50 και $c_{ns}=0$.

Παρατηρούμε ότι η τιμή του λόγου kn/ks που ελαχιστοποιεί τις μετακινήσεις και τις επιταχύνσεις της κατασκευής είναι περίπου στο 8.5%, όμως όσο αυτός αυξάνεται τα strokes του KD-SMA αυξάνονται.

Transformation Strength=0.50, $c_{ns}=0.50c$

Στο Σχήμα 65 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του λόγου kn/ks για Transformation Strength=0.50 και $c_{ns}=0.50c$: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

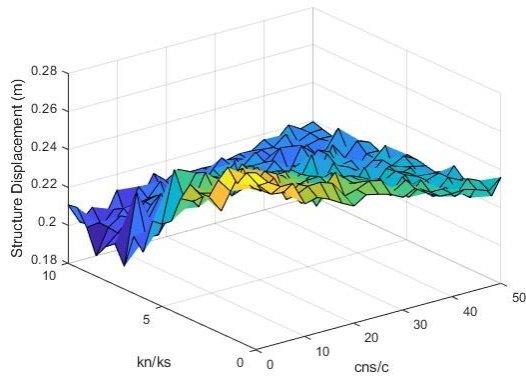


Σχήμα 65: Μεταβολή συναρτήσει kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.50 και $c_{ns}=0.50c$.

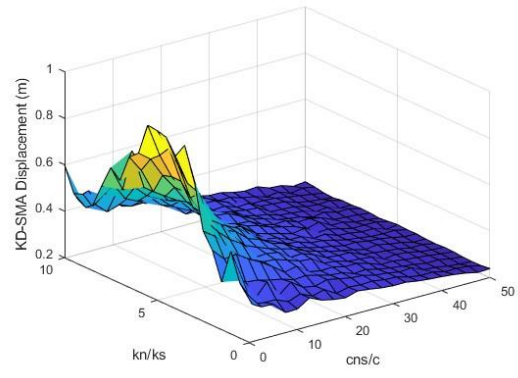
Παρατηρούμε ότι η τιμή του λόγου kn/ks που ελαχιστοποιεί τις μετακινήσεις και τις επιταχύνσεις της κατασκευής είναι και σε αυτή την περίπτωση περίπου στο 8.5%, όμως όσο αυτός αυξάνεται τα strokes του KD-SMA αυξάνονται.

Transformation Strength=0.50

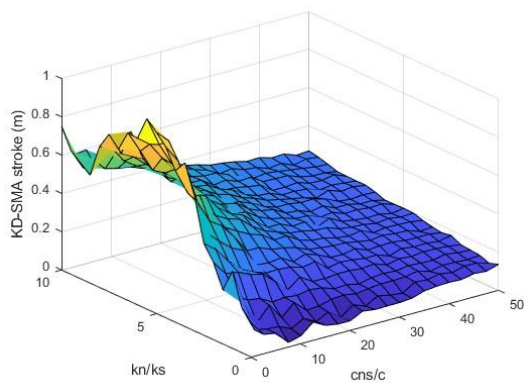
Στο Σχήμα 66 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσεων των λόγων kn/ks και cns/c για Transformation Strength=0.50: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



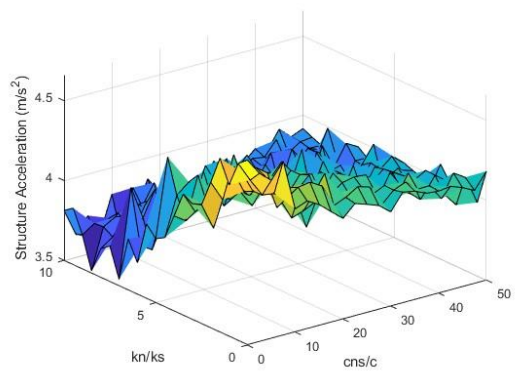
(α)



(β)



(γ)



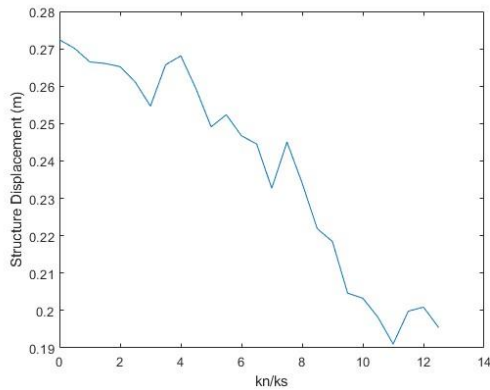
(δ)

Σχήμα 66: Μεταβολή συναρτήσεων kn/ks - cns/c : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.50.

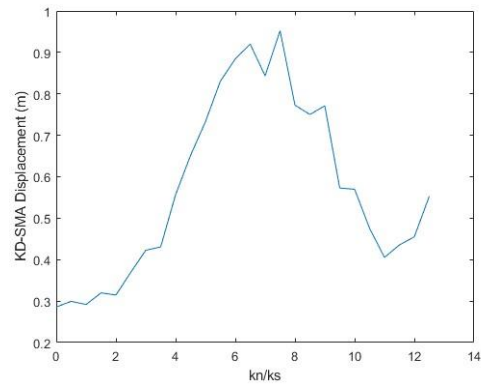
Η αύξηση του λόγου cns/c μειώνει δραματικά τα strokes και τις μετατοπίσεις του KD-SMA. Γενικά, η αύξηση του λόγου kn/ks δρα ευεργετικά στις μετατοπίσεις και στις επιταχύνσεις της κατασκευής και δυσμενώς στα strokes του KD-SMA.

Transformation Strength=0.60 , $c_{ns}=0$

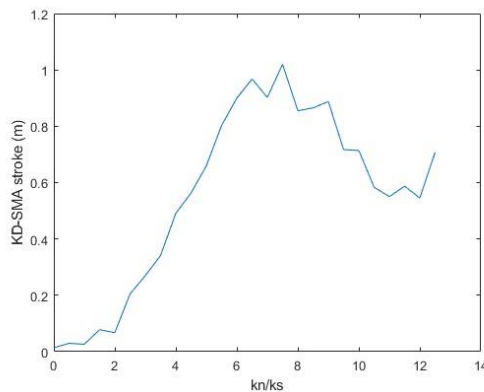
Στο Σχήμα 67 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του λόγου kn/ks για Transformation Strength=0.60 και $c_{ns}=0$: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



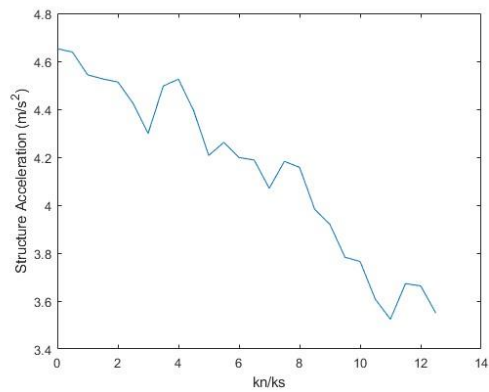
(α)



(β)



(γ)



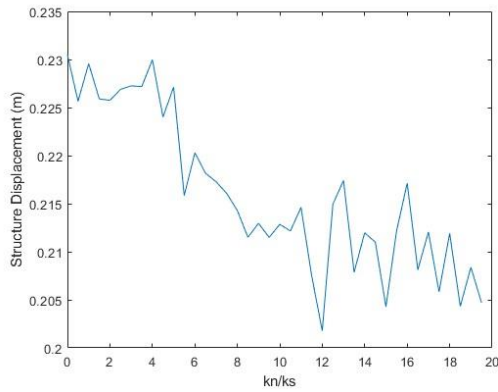
(δ)

Σχήμα 67: Μεταβολή συναρτήσει kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.60 και $c_{ns}=0$.

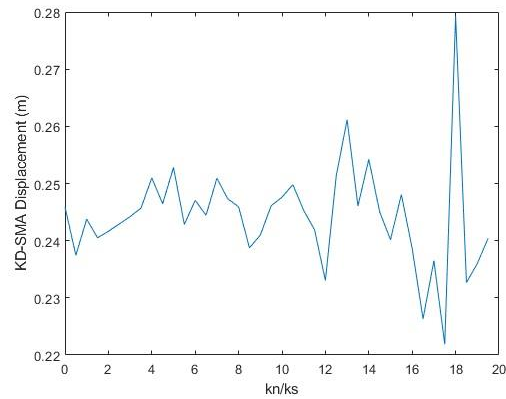
Παρατηρούμε ότι η τιμή του λόγου kn/ks που ελαχιστοποιεί τις μετακινήσεις και τις επιταχύνσεις της κατασκευής είναι περίπου στο 11%,όμως όσο αυτός αυξάνεται τα strokes του KD-SMA αυξάνονται.

Transformation Strength=0.60 , $c_{ns}=0.50c$

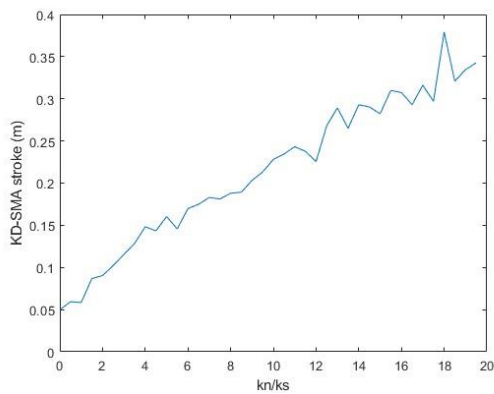
Στο Σχήμα 68 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του λόγου kn/ks για Transformation Strength=0.60 και $c_{ns}=0.50c$: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



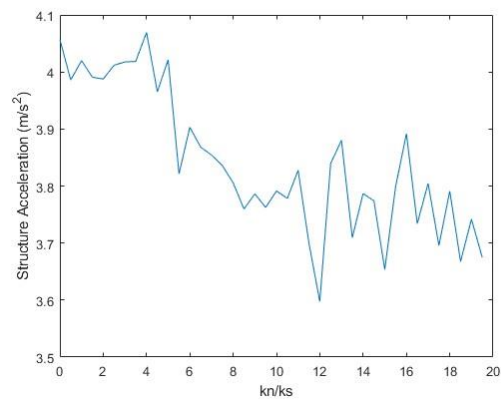
(α)



(β)



(γ)



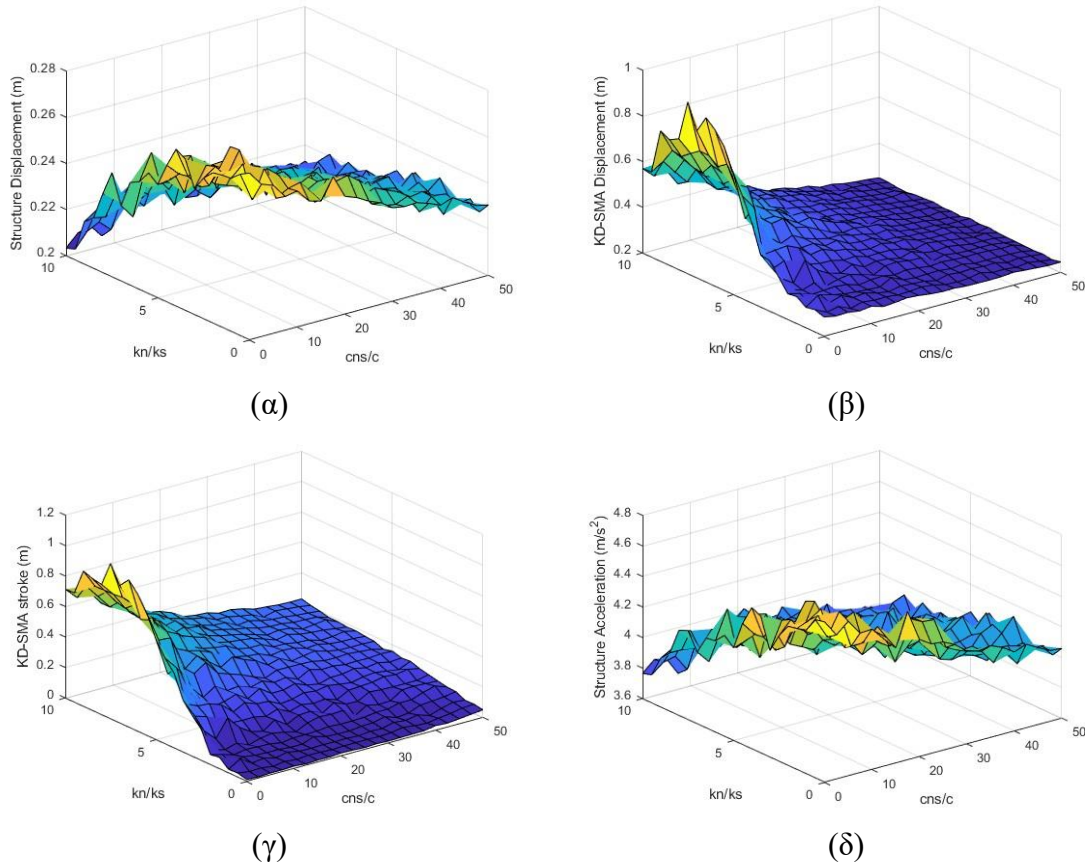
(δ)

Σχήμα 68: Μεταβολή συναρτήσει kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.60 και $c_{ns}=0.50c$.

Παρατηρούμε ότι η τιμή του λόγου kn/ks που ελαχιστοποιεί τις μετακινήσεις και τις επιταχύνσεις της κατασκευής είναι περίπου στο 12%,όμως όσο αυτός αυξάνεται τα strokes του KD-SMA αυξάνονται.

Transformation Strength=0.60

Στο Σχήμα 69 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσεων των λόγων k_N/k_S και c_{NS}/c για Transformation Strength=0.60: (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



Σχήμα 69: Μεταβολή συναρτήσεων k_N/k_S - c_{NS}/c : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για transformation strength=0.60.

Η αύξηση του λόγου c_{NS}/c μειώνει δραματικά τα strokes και τις μετατοπίσεις του KD-SMA. Γενικά, η αύξηση του λόγου k_N/k_S δρα ευεργετικά στις μετατοπίσεις και στις επιταχύνσεις της κατασκευής και δυσμενώς στα strokes του KD-SMA.

Οι παραπάνω αναλύσεις πιστοποιούν ότι:

- Η προσθήκη αρνητικής στιβαρότητας k_N περιορίζει σημαντικά τις μετατοπίσεις και τις επιταχύνσεις της κατασκευής.
- Η προσθήκη απόσβεσης με λόγο $c_{NS}/c > 20\%$ περιορίζει δραματικά τις μετατοπίσεις και τα strokes της πρόσθετης μάζας.

Τα τρία σετ βέλτιστων παραμέτρων KD-SMA:

1. $F_0=0.35$, $c_{NS}/c=50\%$, $k_N/k_S=-7\%$
2. $F_0=0.50$, $c_{NS}/c=50\%$, $k_N/k_S=-8.5\%$
3. $F_0=0.60$, $c_{NS}/c=50\%$, $k_N/k_S=-12\%$

6.3.3 Απόκριση σε πραγματικούς σεισμούς

Γίνεται διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου συστήματος KD-SMA ως σεισμική βάση απορρόφησης κραδασμών με πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις. Θα εξεταστούν τα 12 επιταχυνσιογραφήματα του Πίνακα 3.

ChiChi	Duzce	Friuli	Kobe	Kocaeli	Kozani
0,35	0,15	0,36	0,27	0,16	0,20
Landers	LAquila	Loma Prieta	Niigata	Northridge	Tabas
0,27	0,40	0,64	0,37	0,30	0,85

Πίνακας 3: Μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις PGA(g)

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις της κατασκευής για τις 6 περιπτώσεις συστημάτων: κατασκευή χωρίς σύστημα σεισμικής μόνωσης, με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με το σύστημα SMA-TMD και με τα τρία σετ KD-SMA.

	Initial	TMD	SMA-TMD	KD-SMA1	KD-SMA2	KD-SMA3
ChiChi	0,168	0,142	0,169	0,153	0,152	0,151
Duzce	0,028	0,025	0,028	0,024	0,025	0,030
Friuli	0,077	0,077	0,077	0,075	0,074	0,074
Kobe	0,223	0,217	0,226	0,196	0,200	0,199
Kocaeli	0,140	0,113	0,147	0,126	0,131	0,131
Kozani	0,037	0,036	0,038	0,035	0,034	0,035
Landers	0,138	0,113	0,141	0,122	0,124	0,125
LAquila	0,104	0,100	0,105	0,099	0,098	0,097
Loma Prieta	0,126	0,102	0,116	0,103	0,104	0,104
Niigata	0,078	0,079	0,078	0,070	0,069	0,069
Northridge	0,101	0,113	0,106	0,101	0,101	0,103
Tabas	0,326	0,323	0,332	0,320	0,313	0,308

Πίνακας 4: Μέγιστες τιμές μετατοπίσεων κατασκευής (m)

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι μέγιστες απόλυτες επιταχύνσεις της κατασκευής για τις 6 περιπτώσεις συστημάτων: κατασκευή χωρίς σύστημα σεισμικής μόνωσης, με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με το σύστημα SMA-TMD και με τα τρία σετ KD-SMA.

	Initial	TMD	SMA-TMD	KD-SMA1	KD-SMA2	KD-SMA3
ChiChi	2,96	2,51	2,89	2,72	2,61	2,53
Duzce	0,48	0,45	0,47	0,42	0,43	0,42
Friuli	1,36	1,35	1,35	1,32	1,31	1,30
Kobe	3,92	3,59	3,88	3,49	3,54	3,45
Kocaeli	2,46	1,92	2,56	2,23	2,18	2,27
Kozani	0,66	0,64	0,65	0,60	0,59	0,60
Landers	2,43	1,98	2,45	2,12	2,07	2,09
LAquila	1,83	1,75	1,82	1,71	1,70	1,69
Loma Prieta	2,21	1,76	2,02	1,79	1,81	1,81
Niigata	1,37	1,38	1,35	1,20	1,20	1,19
Northridge	1,78	1,98	1,84	1,75	1,75	1,79
Tabas	5,72	5,59	5,67	5,73	5,56	5,49

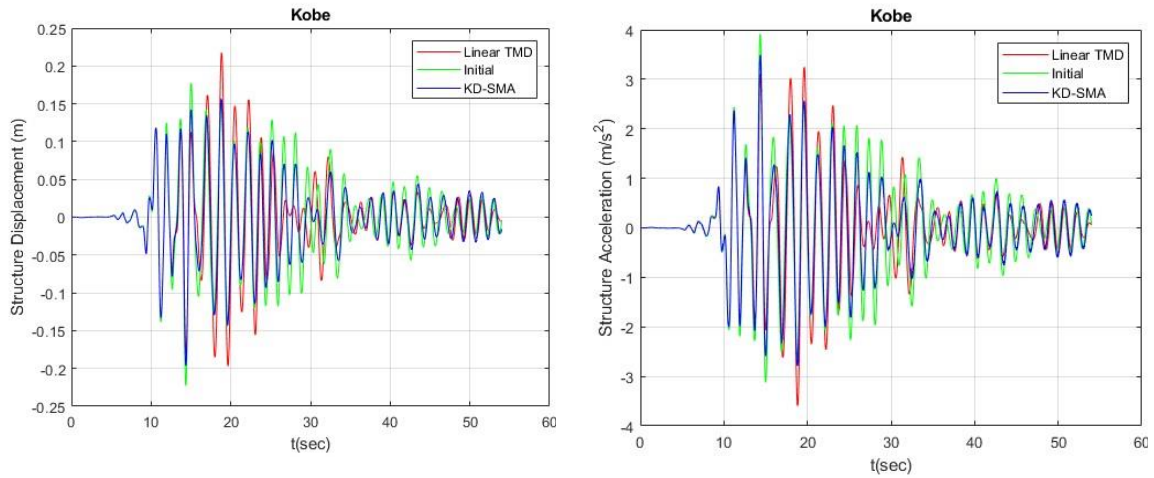
Πίνακας 5: Μέγιστες τιμές επιταχύνσεων κατασκευής (m/sec²)

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές stroke της πρόσθετης μάζας για τις 5 περιπτώσεις συστημάτων: κατασκευή με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με το σύστημα SMA-TMD και με τα τρία σετ KD-SMA.

	TMD	SMA-TMD	KD-SMA1	KD-SMA2	KD-SMA3
ChiChi	0,472	0,013	0,142	0,061	0,037
Duzce	0,08	0,005	0,005	0,005	0,005
Friuli	0,240	0,006	0,016	0,009	0,009
Kobe	0,801	0,156	0,222	0,196	0,176
Kocaeli	0,496	0,011	0,097	0,020	0,016
Kozani	0,101	0,005	0,005	0,005	0,005
Landers	0,414	0,010	0,065	0,013	0,010
LAquila	0,320	0,008	0,026	0,009	0,010
Loma Prieta	0,382	0,012	0,049	0,017	0,017
Niigata	0,234	0,007	0,010	0,007	0,007
Northridge	0,300	0,008	0,039	0,013	0,011
Tabas	1,057	0,939	0,505	0,499	0,524

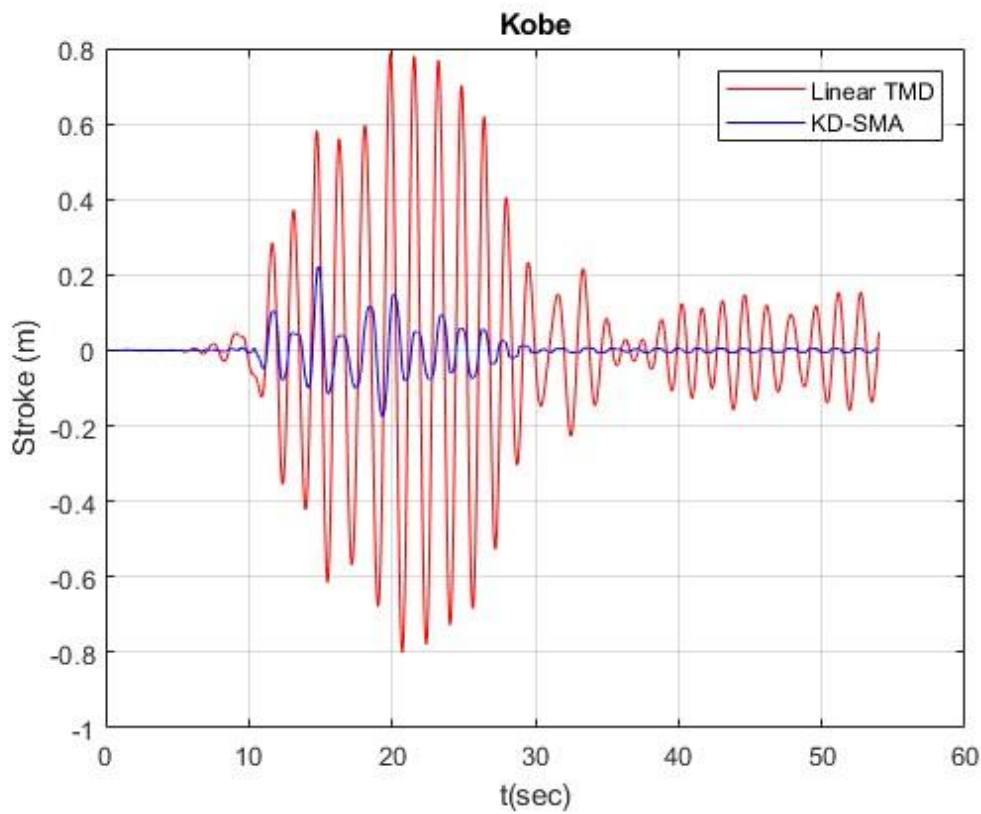
Πίνακας 6: Μέγιστες τιμές stroke πρόσθετης μάζας (m)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι χρονοιστορίες των αποκρίσεων της μετακίνησης, της απόλυτης επιτάχυνσης και του stroke για τους σεισμούς του Kobe, της Loma Prieta και του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος.



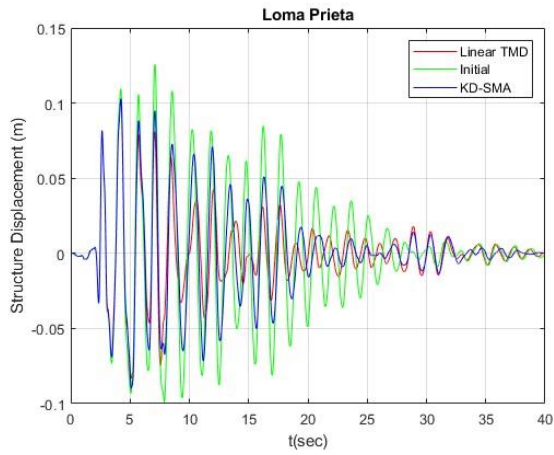
(α)

(β)

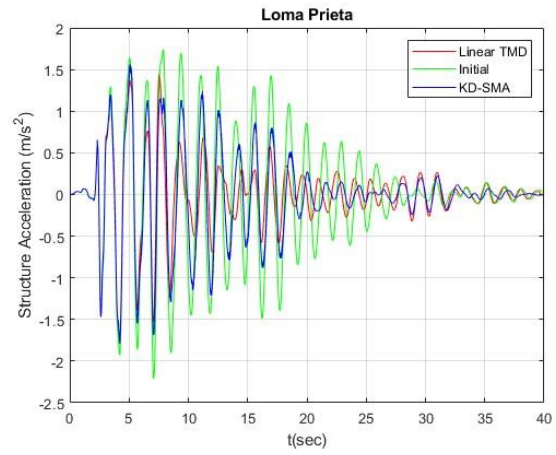


(γ)

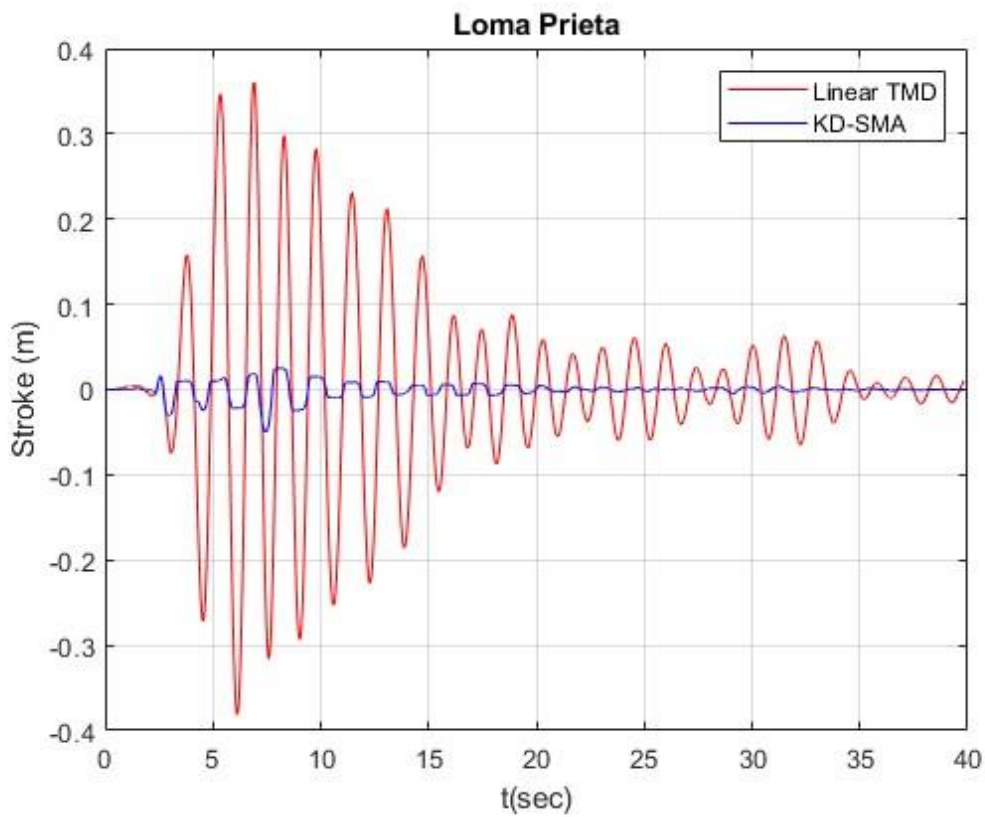
Σχήμα 70: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stroke για τους σεισμούς του Kobe.



(α)

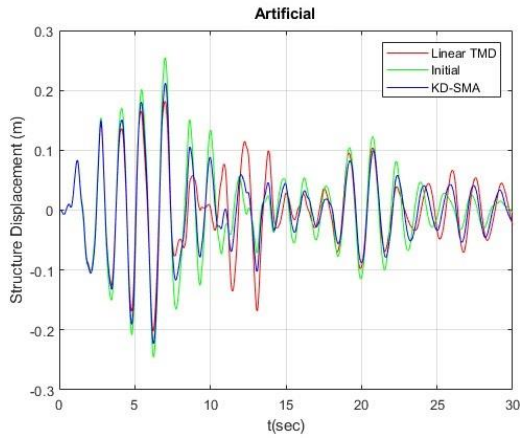


(β)

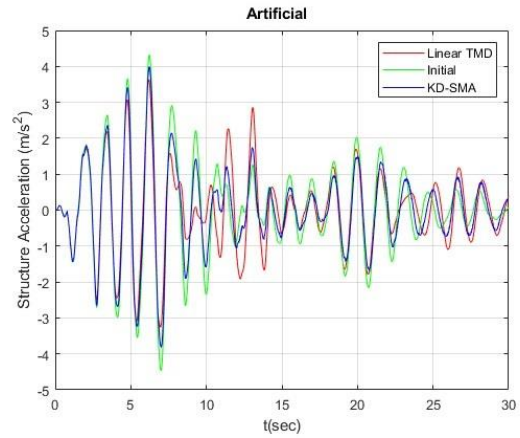


(γ)

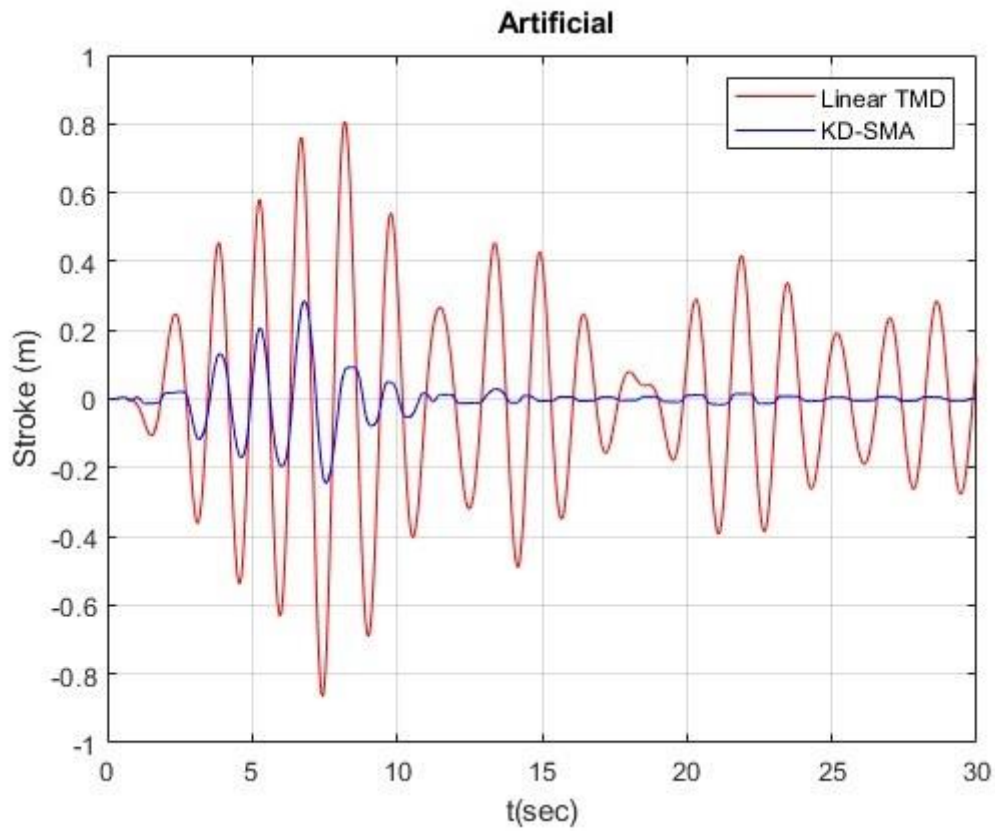
Σχήμα 71: Χρονιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stroke για τους σεισμούς της Loma Prieta.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 72: Χρονιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stroke για τους σεισμούς του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος.

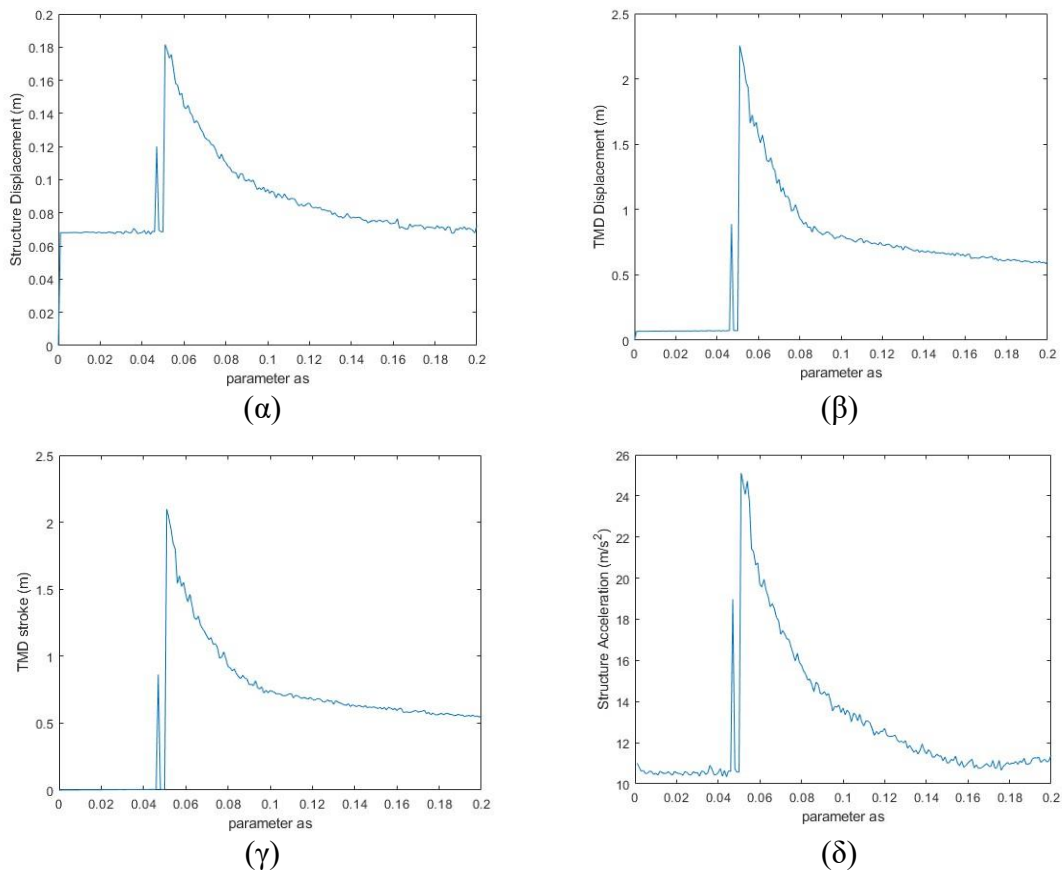
6.4 Εφαρμογή σε δύσκαμπτη κατασκευή

Θα εξεταστεί η κατασκευή του Πίνακα 2 με τη διαφορά ότι η ιδιοπερίοδος θα γίνει $T=0.5s$. Οι βέλτιστοι παράμετροι του ελατηρίου SMA επηρεάζονται από την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Έτσι, θα κάνουμε μία διερεύνηση για την επιλογή τους με το σύστημα SMA-TMD. Έπειτα, θα προσθέσουμε ελατήριο αρνητικής σταθεράς και απόσβεση, δηλαδή θα έχουμε το σύστημα KD-SMA.

6.4.1 Επιλογή βέλτιστων παραμέτρων SMA-TMD

Παράμετρος a_s

Στο Σχήμα 73 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου a_s : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

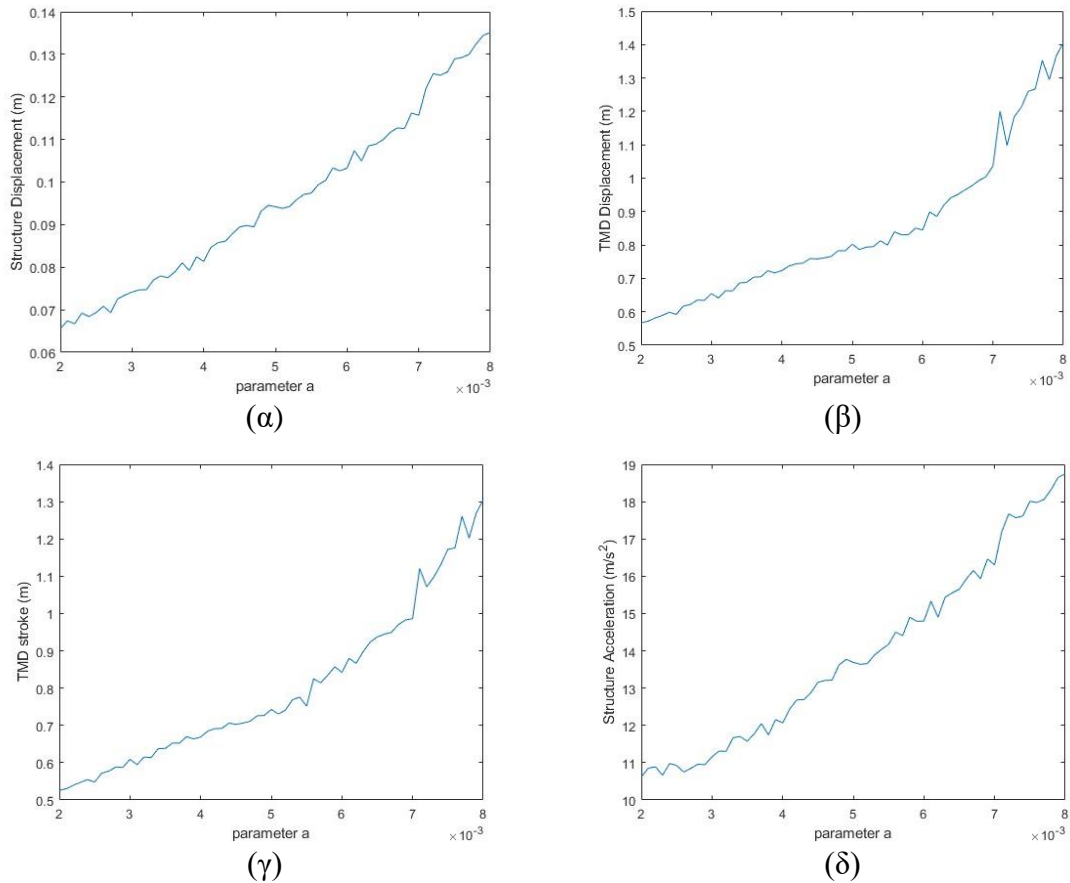


Σχήμα 73: Μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου a_s : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

Παρατηρούμε ότι οι βέλτιστες τιμές της παραμέτρου βρίσκονται στο διάστημα από 0 μέχρι 0.04. Έπειτα δημιουργείται μια αστάθεια. Θα επιλέξουμε την τιμή $a_s=0.02$.

Παράμετρος α

Στο Σχήμα 74 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου α : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

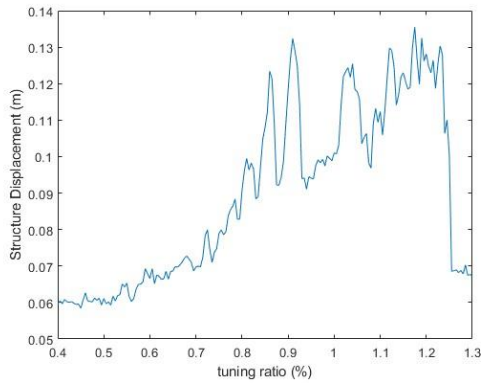


Σχήμα 74: Μεταβολή συναρτήσει της παραμέτρου α : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

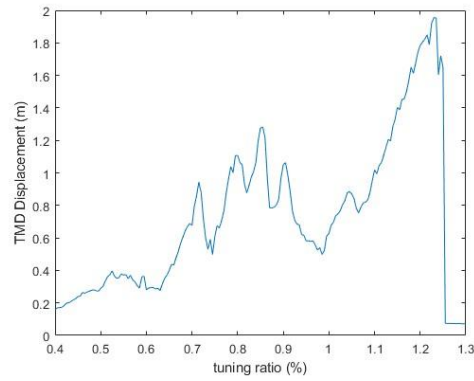
Η αύξηση της παραμέτρου προκαλεί δυσμενή αποτελέσματα σε όλα τα δυναμικά μεγέθη του συστήματος. Συνεπώς, θα επιλέξουμε την μικρότερη τιμή, δηλαδή $\alpha=0.002$.

Tuning ratio

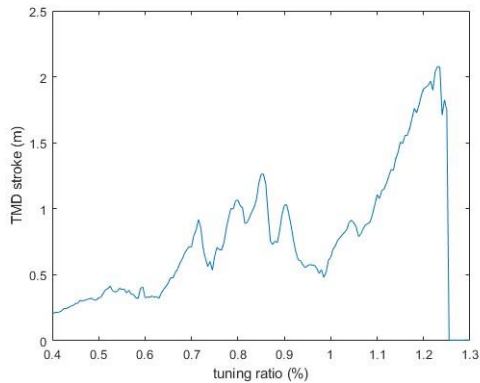
Στο Σχήμα 75 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του tuning ratio για SMA-TMD : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



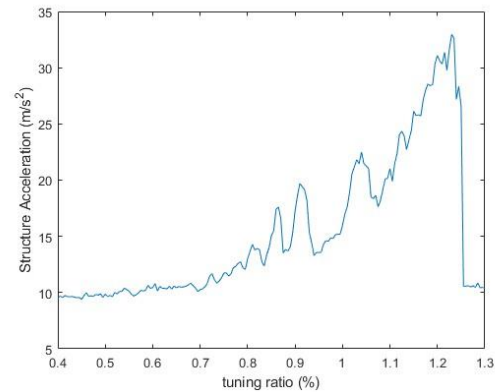
(α)



(β)



(γ)



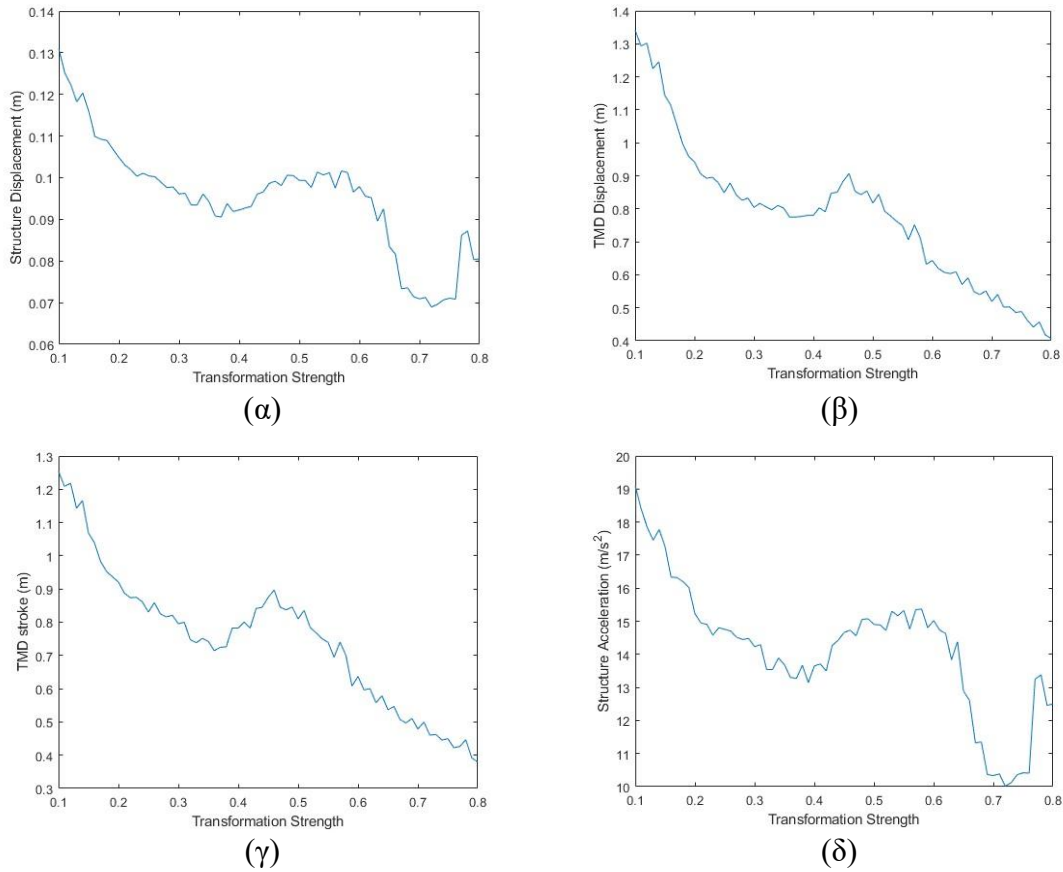
(δ)

Σχήμα 75: Μεταβολή συναρτήσει του tuning ratio: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

Η αύξηση της παραμέτρου προκαλεί δυσμενή αποτελέσματα σε όλα τα δυναμικά μεγέθη του συστήματος. Θα διατηρήσουμε παρόλα αυτά την τιμή 0.885.

Transformation Strength

Στο Σχήμα 76 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του Transformation Strength : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



Σχήμα 76: Μεταβολή συναρτήσει του Transformation Strength: (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD,(δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.

Η αύξηση της παραμέτρου προκαλεί ευμενή αποτελέσματα σε όλα τα δυναμικά μεγέθη του συστήματος. Συνεπώς, θα επιλέξουμε την τιμή 0.71.

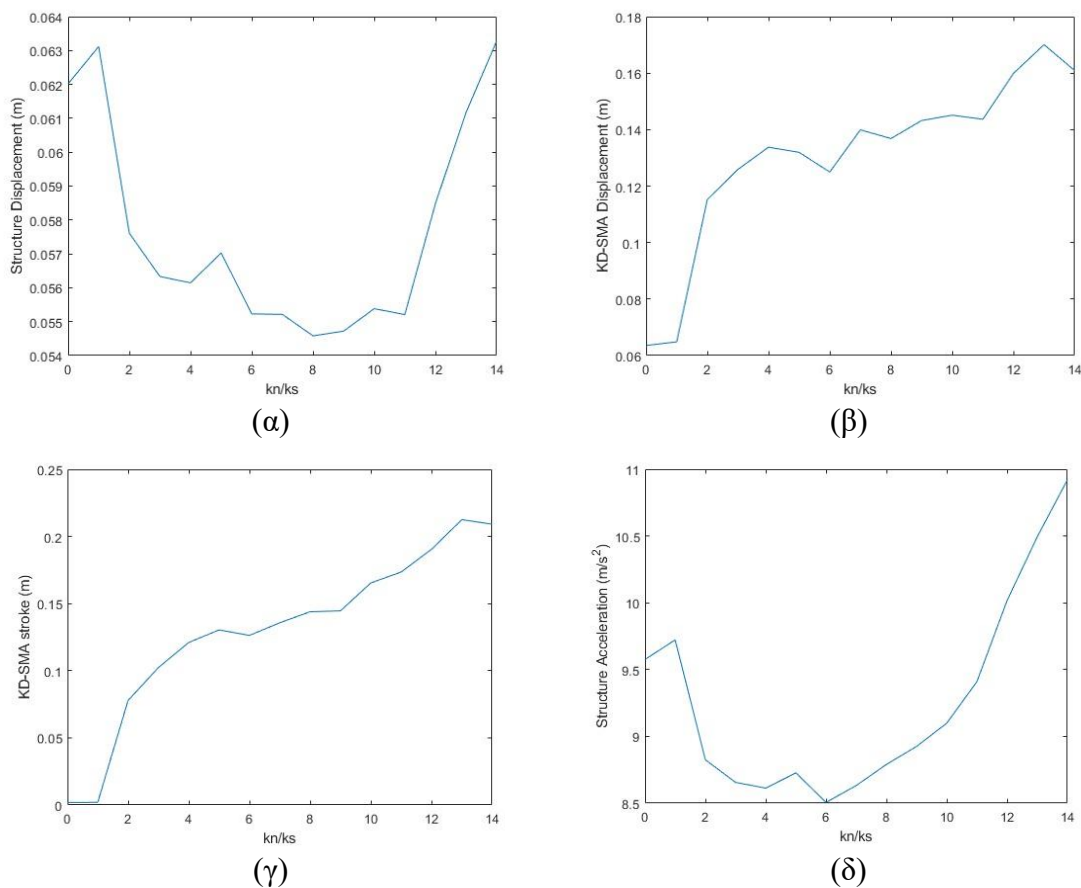
6.4.2 Επιλογή παραμέτρων KD-SMA

Θα προσθέσουμε το ελατήριο αρνητικής σταθεράς και απόσβεση $c_{ns}/c=30\%$.

Να σημειώσουμε ότι ο λόγος kn/ks έχει κανονικοποιηθεί ώστε να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα των τιμών της αρνητικής στιβαρότητας μιας και στο εύκαμπτο σύστημα είχαμε $\alpha_s=0.10$ ενώ στο δύσκαμπτο $\alpha_s=0.02$.

$c_{ns}/c=30\%$

Στο Σχήμα 77 παρουσιάζεται η μεταβολή συναρτήσει του λόγου kn/ks για $c_{ns}/c=30\%$. : (α) της μετατόπισης της κατασκευής, (β) της μετατόπισης KD-SMA, (γ) του stroke KD-SMA, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής.



Σχήμα 77: Μεταβολή συναρτήσει kn/ks : (α) της μετατόπιση της κατασκευής, (β) της μετατόπισης TMD, (γ) του stroke TMD, (δ) της επιτάχυνσης της κατασκευής για $c_{ns}=0.30c$.

Παρατηρούμε ότι για λόγο $kn/ks=8\%$ έχουμε τα καλύτερα αποτελέσματα.

6.4.3 Απόκριση σε πραγματικούς σεισμούς

Γίνεται διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου συστήματος KD-SMA ως σεισμική βάση απορρόφησης κραδασμών με πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις. Θα εξεταστούν τα 12 επιταχυνσιογραφήματα του Πίνακα 3, όπως και στην περίπτωση της εύκαμπτης κατασκευής.

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις της κατασκευής για τις 4 περιπτώσεις συστημάτων: κατασκευή χωρίς σύστημα σεισμικής μόνωσης, με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με το σύστημα SMA-TMD και με το KD-SMA.

	Initial	TMD	SMA-TMD	KD-SMA
ChiChi	0,0669	0,0540	0,0657	0,0610
Duzce	0,0135	0,0112	0,0143	0,0130
Friuli	0,0617	0,0301	0,0691	0,0480
Kobe	0,0680	0,0582	0,0686	0,0559
Kocaeli	0,0347	0,0230	0,0373	0,0320
Kozani	0,0083	0,0089	0,0089	0,0089
Landers	0,0523	0,0362	0,0500	0,0439
LAquila	0,0222	0,0226	0,0230	0,0231
Loma Prieta	0,0963	0,0992	0,1062	0,0882
Niigata	0,0305	0,0286	0,0329	0,0303
Northridge	0,0246	0,0193	0,0249	0,0232
Tabas	0,0994	0,0830	0,1096	0,0911

Πίνακας 7: Μέγιστες τιμές μετατοπίσεων κατασκευής (m)

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι μέγιστες απόλυτες επιταχύνσεις της κατασκευής για τις 4 περιπτώσεις συστημάτων: κατασκευή χωρίς σύστημα σεισμικής μόνωσης, με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με το σύστημα SMA-TMD και με το KD-SMA.

	Initial	TMD	SMA-TMD	KD-SMA
ChiChi	10,57	8,69	10,13	9,46
Duzce	2,14	1,77	2,21	2,03
Friuli	9,76	4,83	11,69	7,70
Kobe	10,75	9,26	10,57	9,46
Kocaeli	5,48	3,35	5,76	4,92
Kozani	1,31	1,33	1,37	1,30
Landers	8,26	5,90	7,78	6,66
LAquila	3,52	3,47	3,56	3,49
Loma Prieta	15,25	14,47	15,34	14,13
Niigata	4,81	4,50	5,00	4,75
Northridge	3,89	2,88	3,84	3,53
Tabas	15,73	13,06	16,57	15,04

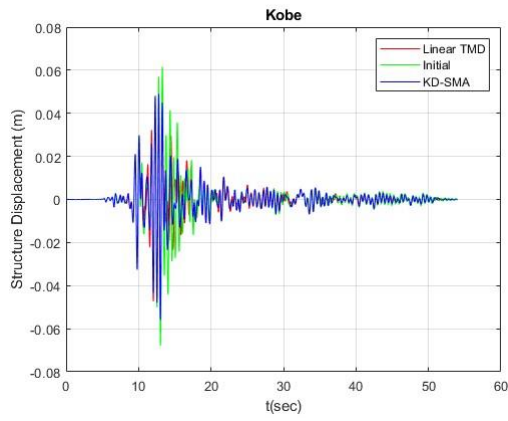
Πίνακας 8: Μέγιστες τιμές επιταχύνσεων κατασκευής (m/sec²)

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές stroke της πρόσθετης μάζας για τις 3 περιπτώσεις συστημάτων: κατασκευή με αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας, με το σύστημα SMA-TMD και με το KD-SMA.

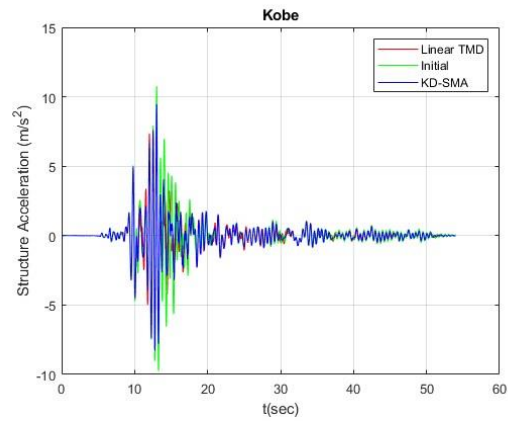
	TMD	SMA-TMD	KD-SMA
ChiChi	0,1828	0,0018	0,1000
Duzce	0,0486	0	0
Friuli	0,1869	0,4752	0,1400
Kobe	0,2554	0,0019	0,1500
Kocaeli	0,1126	0,0011	0,0014
Kozani	0,0376	0	0
Landers	0,1555	0,0016	0,002
LAquila	0,0661	0	0,001
Loma Prieta	0,3065	0,7513	0,2323
Niigata	0,1017	0,0010	0,0014
Northridge	0,0875	0	0,0011
Tabas	0,3373	0,6368	0,2553

Πίνακας 9: Μέγιστες τιμές stroke πρόσθετης μάζας (m)

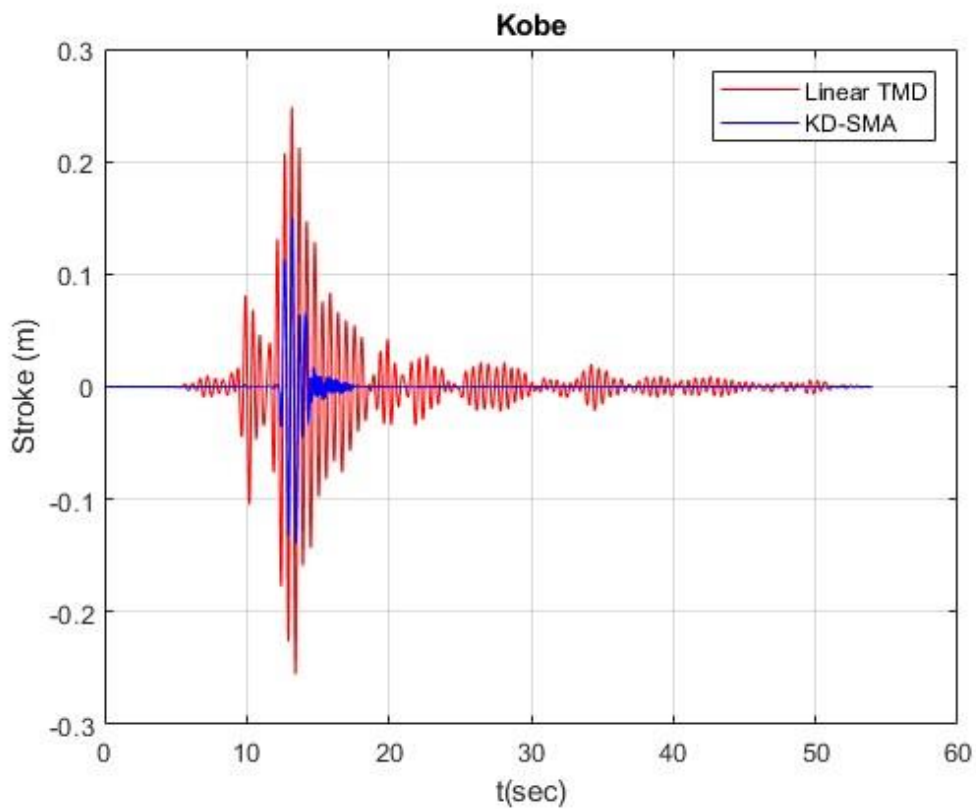
Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι χρονοιστορίες των αποκρίσεων της μετακίνησης, της απόλυτης επιτάχυνσης και του stroke για τους σεισμούς του Kobe, της Loma Prieta και του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος.



(α)

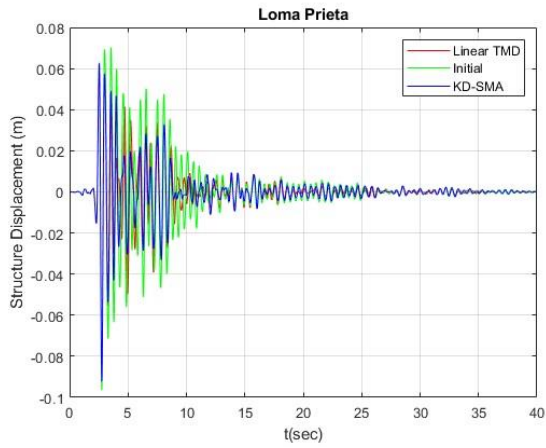


(β)

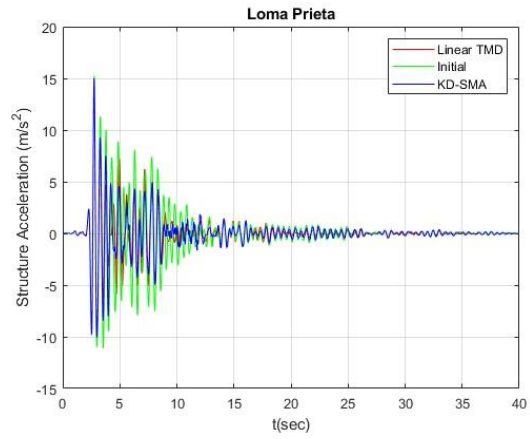


(γ)

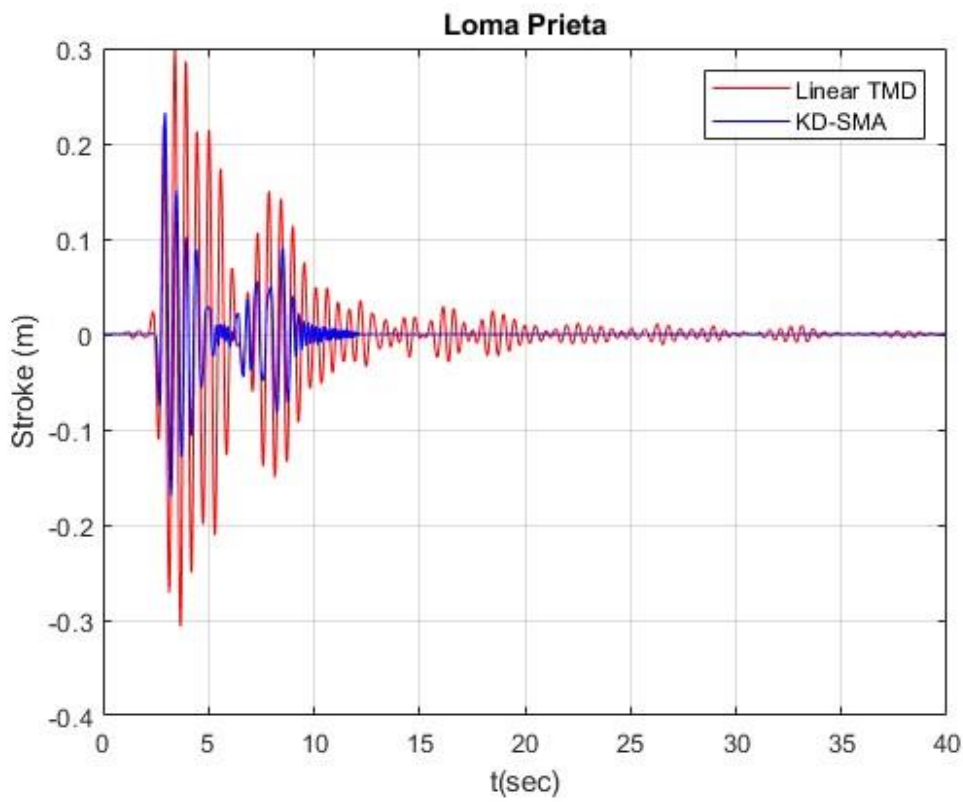
Σχήμα 78: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς του Kobe.



(α)

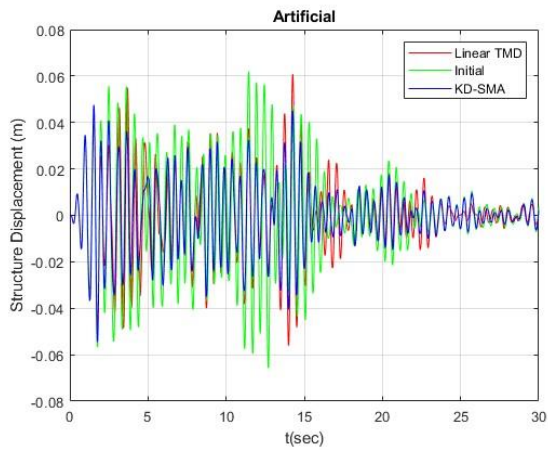


(β)

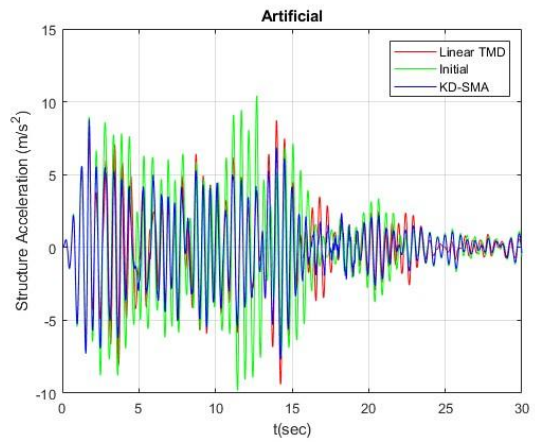


(γ)

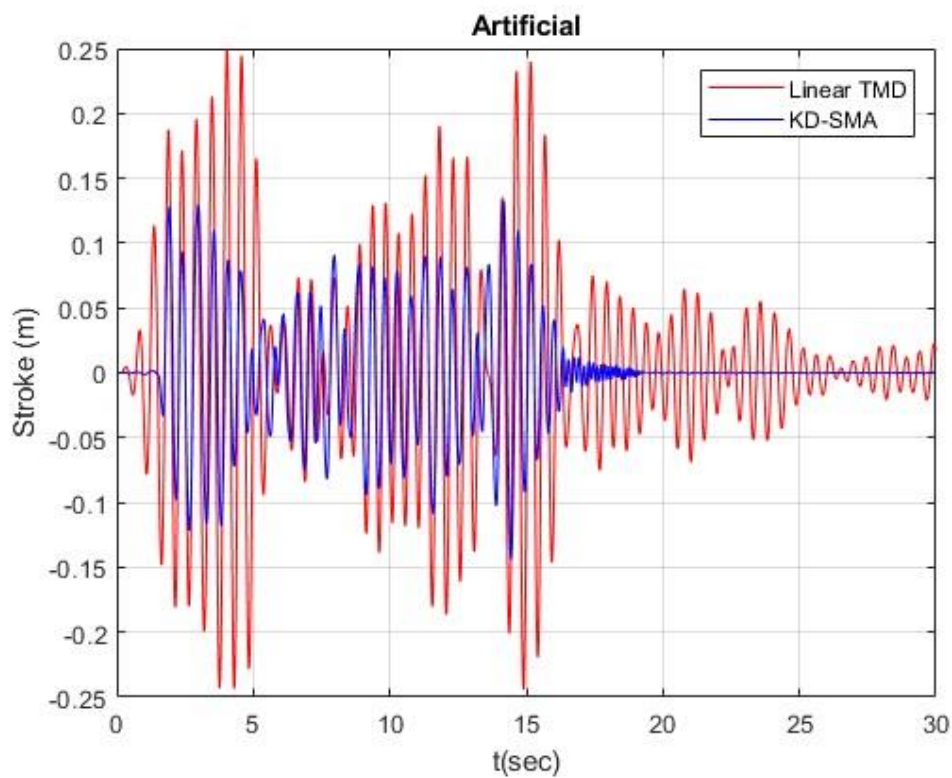
Σχήμα 79: Χρονοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stroke για τους σεισμούς της Loma Prieta.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 80: Χρονιοιστορίες των αποκρίσεων : (α) της μετακίνησης, (β) της απόλυτης επιτάχυνσης και (γ) του stoke για τους σεισμούς του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος.

7. Συμπεράσματα

Η σεισμική μόνωση μέσω του συστήματος KD-SMA έχει πλέον αναλυθεί. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η αρχή λειτουργίας του παρουσιάσαμε το θεωρητικό υπόβαθρο των επί μέρους μελών που το απαρτίζουν, τα ελατήρια αρνητικής σταθεράς και τα κράματα μνήμης σχήματος.

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων αλλά και όλων των πληροφοριών της παρούσας διπλωματικής προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η εξέλιξη των συστημάτων σεισμικής μόνωσης τα τελευταία 100 χρόνια είναι ραγδαία.
- Πολλά συστήματα από τα συμβατικά εφεδρανα έως πιο σύνθετα, όπως αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας, έχουν εφαρμοστεί.
- Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης βελτιώνει εξαιρετικά τα δυναμικά μεγέθη της κατασκευής.
- «Έξυπνα» υλικά και πιο συγκεκριμένα κράματα μνήμης σχήματος και στοιχεία αρνητικής στιβαρότητας προσφέρουν νέες διαστάσεις στα συστήματα απορρόφησης κραδασμών.
- Ο KDamper λόγω της διάταξης του διατηρεί τη συνολική στιβαρότητα του συστήματος ενώ λόγω του ελατηρίου αρνητικής σταθεράς η απαιτούμενη πρόσθετη μάζα είναι περιορισμένη.
- Ο βρόγχος υστέρησης των κραμάτων μνήμης σχήματος έχει σχήμα «σημαίας» και είναι ικανός να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας ενώ παράλληλα οι παραμένουσες παραμορφώσεις κατά την αποφόρτιση είναι μηδενικές. (Φαινόμενο Υπερελαστικότητας).
- Η απόδοση του ελατηρίου SMA καθορίζεται από 2 παράγοντες, το Tuning ratio και το Transformation Strength.
- Η αντικατάσταση των στοιχείων θετικής στιβαρότητας του TMD από ένα SMA διατηρεί την απόδοση του συστήματος και παράλληλα ελαχιστοποιεί τα strokes. Η ιδιότητα αυτή καθίσταται πολύ σημαντική καθώς η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση της πρόσθετης μάζας καθορίζεται και από το διαθέσιμο χώρο.
- Διερευνήθηκε η εισαγωγή στοιχείου SMA στη διάταξη KDamper και παρατηρήθηκε περαιτέρω βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς και στις δυναμικές αποκρίσεις της κατασκευής και στα αναπτυσσόμενα strokes.

8. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνεισφέρει στην σεισμική προστασία κατασκευών με καινοτόμα συστήματα απορρόφησης ταλαντώσεων. Οι παρακάτω ερευνητικές κατευθύνσεις θα βελτιώσουν περαιτέρω την παρούσα εργασία και θα προσφέρουν ακόμα πιο ρεαλιστικές διατάξεις για την προστασία κατασκευών Πολιτικού Μηχανικού έναντι σεισμικών διεγέρσεων.

- Η έμφυτη μη-γραμμική φύση της αρνητικής στιβαρότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να προσφέρει περαιτέρω πλεονεκτήματα στο σύστημα KD-SMA.
- Η προσομοίωση του εξεταζόμενου συστήματος σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με χρήση ρεαλιστικών καταστατικών μοντέλων.
- Η εκτέλεση πειραμάτων σε ρεαλιστικά και υπό κλίμακα δομικά συστήματα με την εφαρμογή των προτεινόμενων συστημάτων απορρόφησης ταλαντώσεων.
- Η εφαρμογή των προτεινόμενων συσκευών απορρόφησης ταλαντώσεων ως ρεαλιστικές επιλογές ενίσχυσης/προσθήκης σε υφιστάμενες κατασκευές.