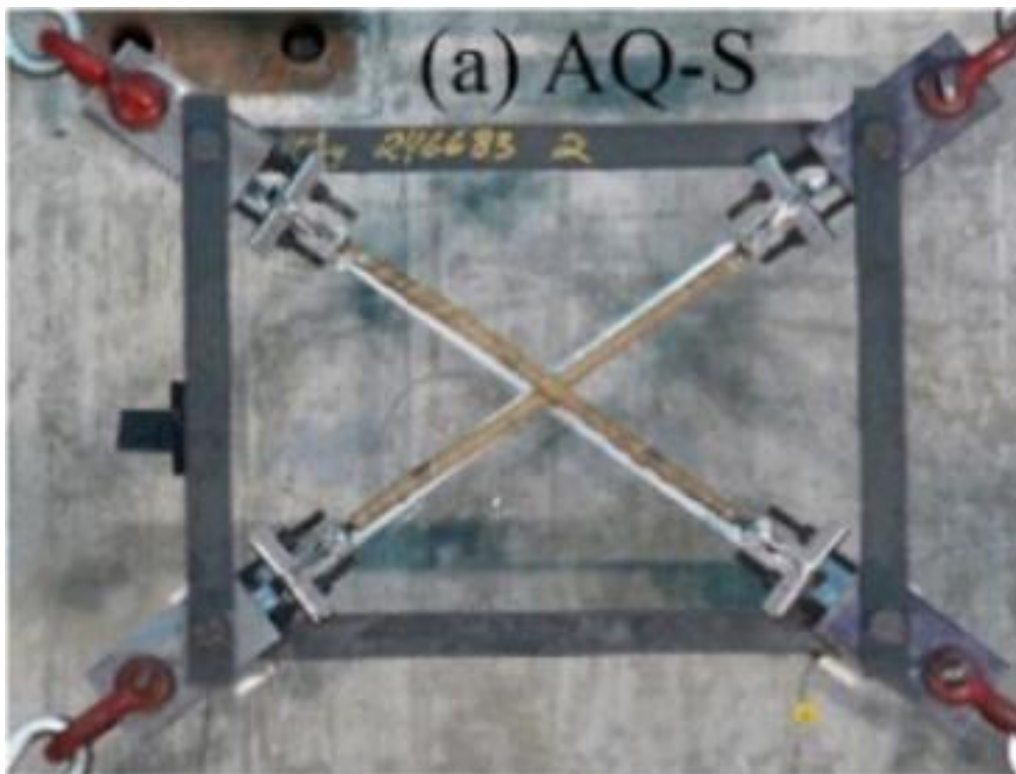




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΜΗΜΗ
ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**



Διπλωματική Εργασία

Ιωάννα Αγγέλου

Αριθμός μητρώου: 01112508

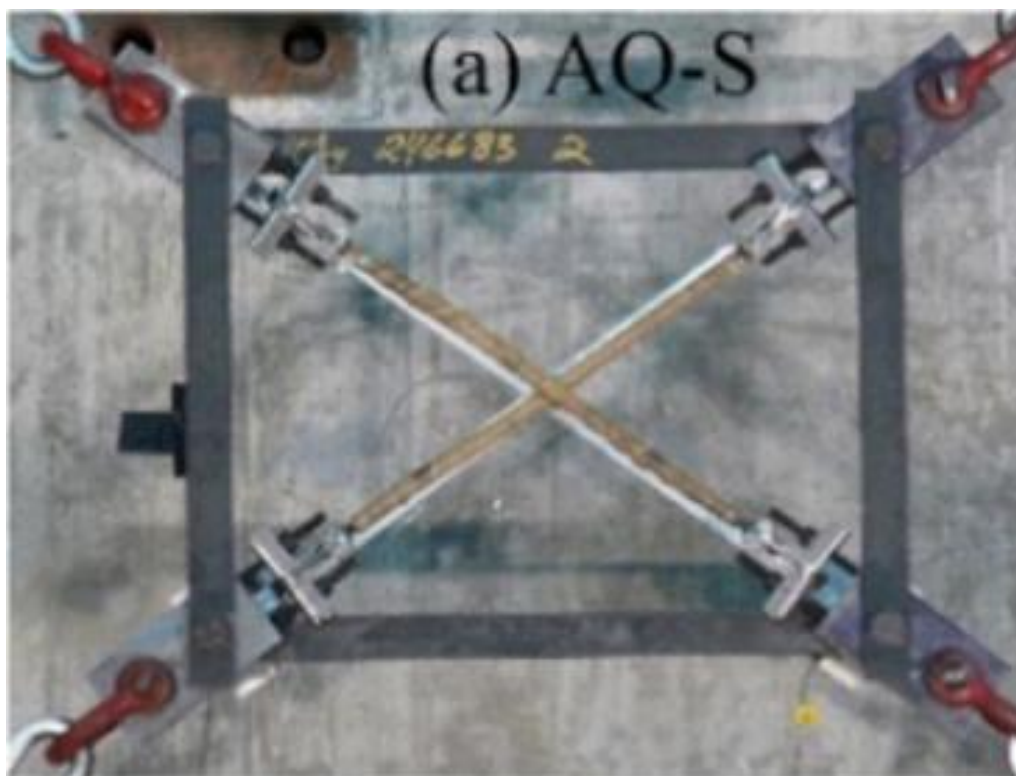
Επιβλέπων: Καθηγητής Μιχάλης Φραγκιαδάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΜΗΜΗ
ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**



Διπλωματική Εργασία

Ιωάννα Αγγέλου

Αριθμός μητρώου: 01112508

Επιβλέπων: Καθηγητής Μιχάλης Φραγκιαδάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Copyright © Ιωάννα Αγγέλου, 2018
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, 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 στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Ioanna Angelou, 2018
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ιωάννα Αγγέλου (2018)
Διπλωματική Εργασία
" ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ "
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ioanna Angelou (2018)
Diploma Thesis
"CONTRIBUTION OF SHAPE MEMORY ALLOYS TO THE ANTI-SEISMIC PROTECTION OF
STRUCTURES"
Laboratory of Earthquake Engineering, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται η φοίτησή μου στο Τμήμα των Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2017 και έλαβε τέλος 1 χρόνο μετά, τον Οκτώβριο του 2018. Κατά τον χρόνο αυτόν δεν ήταν λίγοι εκείνοι που συνέβαλαν και με στήριξαν σε αυτό το έργο.

Πρώτον από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Μιχάλη Φραγκιαδάκη για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Κατά τη διάρκεια της εργασίας αποδείχτηκε ένας πολύ συνεργάσιμος καθηγητής με διάθεση να με βοηθήσει σε όποια δυσκολία αντιμετώπιζα και να μου μεταλαμπαδεύσει τις γνώσεις του με όποιον τρόπο ήταν δυνατόν. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω θερμά για την στήριξη που μου προσέφερε και για την στάση του, όχι μόνο ως εκπαιδευτικός/καθηγητής, μα πάνω από όλα ως άνθρωπος.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδακτορικό φοιτητή Σπύρο Διαμαντόπουλο, για τη συνεισφορά του στην εκμάθηση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος OpenSees, καθώς και τον επίσης διδακτορικό φοιτητή Αμβρόσιο Σαββίδη, για τη βοήθειά του στην εκμάθηση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab.

Στην πορεία όλων αυτών των χρόνων στάθηκε δίπλα μου και η καθηγήτρια της σχολής κα. Μαρία Νεραντζάκη. Πρόκειται για έναν άνθρωπο «γεμάτο». Γεμάτο με διάθεση να ασχοληθεί όχι μόνο με προβληματισμούς των φοιτητών σε επίπεδο σχολής, αλλά και σε επίπεδο ζωής. Την ευχαριστώ πολύ.

Δεν ξεχνάω και τη βοήθεια που είχα όλα αυτά τα χρόνια της πορείας μου από καλούς μου φίλους, συμφοιτητές και συγγενείς. Η υποστήριξή τους κάθε στιγμή μου έδινε δύναμη και κίνητρο για να συνεχίζω την προσπάθειά μου και να πλησιάζω κάθε φορά το «παραπέρα».

Τέλος, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τα άτομα που δεν έλειψαν στιγμή από το πλευρό μου, τα οποία δεν είναι άλλα από την οικογένειά μου. Θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου, τα αδέρφια μου και τη γιαγιά μου τη Σταματίνα για την στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Η συμβολή τους ήταν καθοριστική όχι μονάχα για την διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, αλλά και για να τα καταφέρω να φτάσω στο σημείο που βρίσκομαι τώρα και να «χτίσω» την προσωπικότητα που έχω σήμερα ως άνθρωπος.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, θα ήθελα να εκφράσω τις από καρδιάς και πιο θερμές μου ευχαριστίες στα άτομα που μόλις ανέφερα.

Στην οικογένειά μου και στη γιαγιά μου την Σταματίνα...



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συμβολή των κραμάτων αλουμινίου με μνήμη σχήματος στην αντισεισμική προστασία των κατασκευών

Αγγέλου Ιωάννα

Επιβλέπων: Καθηγητής Μιχάλης Φραγκιαδάκης
Οκτώβριος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η έρευνα και η μελέτη της συμπεριφοράς των κραμάτων μνήμης σχήματος σε εφαρμογές του Πολιτικού Μηχανικού. Τα υλικά αυτά ή διαφορετικά, «έξυπνα» υλικά όπως αλλιώς ονομάζονται, χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς της σύγχρονης κοινωνίας, καθώς διακρίνονται από δύο αξιοσημείωτες ιδιότητες. Η μία εξ αυτών είναι η θερμική μνήμη μορφής και η δεύτερη η υπερελαστικότητα.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται ένας πλήρης ορισμός των εν λόγω υλικών και μία συνοπτική περιγραφή των ιδιοτήτων τους. Ακόμη, επισημαίνεται η συμβολή τους και η χρήση τους σε ποικίλους τομείς και ιδιαίτερα στις εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού.

Εν συνεχεία του πρώτου κεφαλαίου, στο δεύτερο γίνεται μία πλήρης περιγραφή της κρυσταλλικής δομής των κραμάτων με μνήμη σχήματος, η οποία είναι υπεύθυνη και για τις ιδιότητές τους. Κατόπιν, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των ιδιοτήτων τους ώστε εκείνες να γίνουν πλήρως κατανοητές και αντιληπτές.

Το τρίτο κεφάλαιο είναι κυρίως μαθηματικής φύσεως και έχει να κάνει με μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν την υπερελαστική συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα κράματα μνήμης σχήματος σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Παρατίθενται συστατικά μοντέλα προσομοίωσης αναφορικά με την υπερελαστικότητα των «έξυπνων» υλικών, καθώς και το διγραμμικό κινηματικό μοντέλο με το οποίο γίνεται σύγκριση σε επόμενα κεφάλαια.

Το τέταρτο κεφάλαιο πραγματεύεται τη συμπεριφορά ενός μονοβάθμιου μη γραμμικού ταλαντωτή υπό δυναμικές φορτίσεις. Γίνεται η υπόθεση ό,τι το υλικό του ταλαντωτή είναι είτε από δομικό χάλυβα είτε από «έξυπνο» υλικό και μέσα από τις δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται εξάγονται συμπεράσματα για τη χρήση και τη συμβολή των κραμάτων με μνήμη σχήματος στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού.

Στην ολοκλήρωση αυτής της μελέτης έρχεται να συμβάλλει και το πέμπτο κεφάλαιο στο οποίο γίνεται στατική υπερωθητική και δυναμική ανάλυση (Pushover & Dynamic Analysis) επίπεδων πλαισιακών φορέων. Οι φορείς αυτοί είναι μονώροφα, διώροφα και εξάωροφα κτήρια αποτελούμενοι σε κάθε όροφο από διαγώνιους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Για το υλικό των χιαστί συνδέσμων γίνεται η υπόθεση ό,τι αποτελούνται σε μία εκ των περιπτώσεων από κοινό δομικό χάλυβα και στην άλλη από υλικό νιτινόλης («έξυπνο» υλικό). Γίνονται επίσης διάφορες υποθέσεις για το εμβαδόν διατομής τους.

Τέλος, το έκτο κεφάλαιο αποτελεί το κεφάλαιο ολοκλήρωσης την παρούσας διπλωματικής εργασίας καταγράφοντας τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στις διάφορες κατασκευές που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
LABORATORY OF EARTHQUAKE ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Contribution of Shape Memory Alloys to the anti-seismic protection of structures

Ioanna Angelou

Supervisor: Professor Michalis Fragkiadakis
October 2018

ABSTRACT

The aim of the present diploma thesis is the research and study of the behavior of shape memory alloys in civil engineering applications. These materials also known as "smart" materials are used in various domains of contemporary society as they are characterized by two main properties. One of them is the "shape memory effect" and the other the "superelasticity".

The first chapter refers to a complete definition of those materials and a brief description of the properties. Furthermore, their contribution and use in various applications of civil engineering is analyzed.

The second chapter contains complete description of crystalize structure of shape memory alloys which at the same time is responsible for their properties. Afterwards an analytical description of these properties is given so that they can be understandable and defined.

The third chapter is mainly mathematical and deals with models which simulate the behavior of superelasticity which have the shape memory alloys in recharging. Model simulators referring to the superelasticity of the "smart" materials are presented as well as the two lined kinetic motion model with which they are compared in the following chapters.

The fourth chapter studies the behavior of a single-degree of freedom oscillator under dynamic loads. Hypothetically the material of the oscillator is made either by structural steel or by "smart" materials and through dynamic analysis that take place,

we come to conclusions for the use and contribution of shape memory alloys in the civil engineer's construction.

The fifth chapter contributes to the integration of this survey by presenting the "static pushover" and dynamic analysis of two dimensions frameworks. These frameworks are single floor, two floor and six floor buildings consisting of diagonal x-shaped stiffness links. For the materials of the x-shaped links it is supposed that they consist in one of the occasions of common structural steel and in another occasion of material nitinol (smart material). Various suppositions also take place about their cross-sectional area.

Lastly, the sixth chapter is the chapter of the completion of the present diploma thesis noting the conclusions from the analysis which took place in various constructions that were presented and analyzed in previous chapters.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 «Αυτοπροσαρμοζόμενα» ή «έξυπνα υλικά»	2
1.1.1 Ορισμός και συνοπτική περιγραφή των ιδιοτήτων τους.....	2
1.1.2 Ιστορική ανακάλυψη και εξέλιξή τους.....	2
1.2 Εφαρμογές των SMAs	3
1.2.1 Χρήση τους σε ποικίλους τομείς	3
1.2.2 Χρήση τους στο αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	7
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ SMAs.....	7
2.1 Κρυσταλλική δομή κραμάτων αλουμινίου με μνήμη σχήματος.....	8
2.2 Ιδιότητες κραμάτων μνήμης σχήματος	9
2.2.1 Μνήμη σχήματος ή θερμική μνήμη μορφής (Shape Memory Effect)	9
2.2.2 Υπερελαστικότητα (superelasticity) ή ψευδοελαστικότητα (pseudoelasticity).....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	16
3.1 Συστατικά μοντέλα συμπεριφοράς των SMAs αναφορικά με την υπερελαστικότητά τους.....	17
3.1.1 Πρότυπο μοντέλο για υπερελαστικότητα	17
3.1.2 Βελτιστοποιημένο μοντέλο Graesser and Cozzarelli's.....	19
3.2 Περιγραφή του διγραμμικού κινηματικού μοντέλου και παρουσίαση του υστερητικού βρόγχου.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	24
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ «ΕΞΥΠΝΟ» ΥΛΙΚΟ Ή ΔΟΜΙΚΟ ΧΑΛΥΒΑ.....	24
4.1 Περιγραφή του μονοβάθμιου συστήματος.....	25
4.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονοβάθμιου ταλαντωτή.....	25
4.1.2 Αριθμητική επίλυση του συστήματος.....	26
4.1.3 Παρουσίαση των δεδομένων και αποτελεσμάτων των αριθμητικών δοκιμών	26
4.1.4 Συμπεράσματα από την ανάλυση του μονοβάθμιου ταλαντωτή για τη χρήση «έξυπνων» υλικών	36

4.2 Ανάλυση μονοβάθμιου συστήματος από υπερελαστικό υλικό	36
4.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονοβάθμιου συστήματος.....	37
4.2.3 Αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης του μονοβάθμιου συστήματος....	39
4.2.4 Συμπεράσματα από τη δυναμική ανάλυση του μονοβάθμιου συστήματος	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	42
ΑΝΑΛΥΣΗ PUSHOVER ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΤΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΔΙΑΓΩΝΙΟΥΣ ΧΙΑΣΤΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΑΠΟ ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ Ή ΑΠΟ ΔΟΜΙΚΟ ΧΑΛΥΒΑ.....	42
5.1 Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς επίπεδου μονώροφου πλαισίου με διαγώνιους χιαστί συνδέσμους από Shape Memory Alloys ή από Δομικό Χάλυβα.....	43
5.1.1 Περιγραφή του μονώροφου πλαισίου	43
5.1.2 Υποβολή του μονώροφου πλαισίου σε ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (Modal Pushover Analysis) και σε στατική υπερωθητική ανάλυση (Pushover Analysis)	46
5.1.3 Δυναμική ανάλυση του μονώροφου πλαισιακού φορέα υπό καταγεγραμμένες σεισμικές διεγέρσεις	54
5.2 Μελέτη της συμπεριφοράς επίπεδου διώροφου πλαισίου σε δυναμική φόρτιση	65
5.2.1 Περιγραφή της γεωμετρίας και της κατασκευής του διώροφου πλαισίου ..	65
5.2.2 Υποβολή του διώροφου πλαισίου σε ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (Modal Pushover Analysis) και σε στατική υπερωθητική ανάλυση (Pushover Analysis)	67
5.2.3 Απόκριση του διώροφου επίπεδου πλαισίου υπό δυναμικά φορτία (σεισμικές διεγέρσεις).....	72
5.3 Μελέτη της συμπεριφοράς επίπεδου εξάωροφου μεταλλικού πλαισίου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.....	79
5.3.1 Περιγραφή της γεωμετρίας και της κατασκευής του επίπεδου εξάωροφου πλαισίου	79
5.3.2 Υποβολή και μελέτη του επίπεδου εξάωροφου πλαισίου σε ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (Modal Pushover Analysis) και σε στατική υπερωθητική ανάλυση (Pushover Analysis)	82
5.3.3 Υποβολή του εξάωροφου επίπεδου πλαισίου σε ανακυκλική φόρτιση (σεισμικές διεγέρσεις) και μελέτη της δυναμικής απόκρισής του.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	101
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	104
Παράρτημα.....	1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 «Αυτοπροσαρμοζόμενα» ή «έξυπνα υλικά»

Στην παρούσα ενότητα δίνεται ο ορισμός και μία συνοπτική περιγραφή των κραμάτων αλουμινίου με μνήμη σχήματος. Αναφέρονται οι δύο σημαντικές ιδιότητές τους συνοπτικά και παρουσιάζεται η ιστορική ανακάλυψη και εξέλιξή τους.

1.1.1 Ορισμός και συνοπτική περιγραφή των ιδιοτήτων τους

Με τον όρο «αυτοπροσαρμοζόμενα» ή «έξυπνα υλικά» (smart materials) γίνεται αναφορά σε ένα ευρύ φάσμα υλικών τα οποία έχουν μία ή περισσότερες ιδιότητες (φυσικές, χημικές ή/και μηχανικές) οι οποίες δύνανται να μεταβληθούν σημαντικά με ελεγχόμενο τρόπο εξαιτίας κάποιας εξωτερικής διεγέρσεως. Παραδείγματα τέτοιων διεγέρσεων είναι η αλλαγή των τάσεων επιβολής στα υλικά, της θερμοκρασίας, η διαφορά δυναμικού, η ύπαρξη ή μη ηλεκτρικών ή μαγνητικών πεδίων, η αλλαγή της υγρασίας και του PH του περιβάλλοντος κλπ.

Στην κατηγορία των «έξυπνων υλικών» υπάγονται τα λεγόμενα κράματα μνήμης σχήματος γνωστά ως shape memory alloys (SMAs). Τα υλικά αυτά ξεχωρίζουν, διότι είναι μία μοναδική κατηγορία από κράματα μετάλλων, που μπορούν να ανακτούν εμφανείς μόνιμες παραμορφώσεις και να επανευρίσκουν το αρχικό τους σχήμα όταν υποστούν το κατάλληλο εξωτερικό ερέθισμα, όπως είναι παραδείγματος χάριν η αύξηση της θερμοκρασίας.

Τα SMAs παρουσιάζουν δύο αξιοσημείωτες ιδιότητες, τη μνήμη σχήματος (shape memory effect, SME) και την υπερελαστικότητα (superelasticity) ή αλλιώς ψευδοελαστικότητα (pseudoelasticity). Επεξήγηση και εκτενέστερη αναφορά των ιδιοτήτων αυτών γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Συνήθως, τα SMAs απαντώνται στην αγορά με τη μορφή συρμάτων/καλωδίων.

1.1.2 Ιστορική ανακάλυψη και εξέλιξή τους

Ιστορικά, η ανακάλυψη τους σημειώνεται τη δεκατία του 1930. Συγκεκριμένα, το 1932 οι Chang and Read παρατήρησαν με μεταλλογραφικές σημειώσεις την αναστρεψιμότητα του μετασχηματισμού που είχε λάβει μέρος σε ένα δείγμα χρυσού-καδμίου AuCd, δηλαδή την ψευδοελαστικότητα του κράματος αυτού, ενώ το 1951 παρατηρήθηκε το φαινόμενο μνήμης σχήματος σε μια λυγισμένη δοκό από κάδμιο και χρυσό AuCd. Το ίδιο φαινόμενο είχε σημειωθεί και στον ορείχαλκο (brass, χαλκός – ψευδάργυρος) το 1938. Ωστόσο, η έρευνα για την κατανόηση της συμπεριφοράς των κραμάτων αυτών ξεκίνησε σημαντικά περί το 1962, όταν ο Buehler και οι συνεργάτες του παρατήρησαν ένα πλήρες φαινόμενο μνήμης σχήματος σε μια σειρά από κράματα νικελίου-τιτανίου NiTi. Έκτοτε έχουν κατασκευασθεί και μελετηθεί πολλά κράματα μετάλλων που έχουν να επιδείξουν συμπεριφορά μνήμης σχήματος.

Εμπορικά, τη μεγαλύτερη επιτυχία τη σημειώνουν τα κράματα από νικέλιο και τιτάνιο NiTi και τα κράματα που βασίζονται στον χαλκό Cu. Τα πιο κοινά κράματα που βασίζονται στον χαλκό Cu είναι το κράμα χαλκού-αργιλίου-νικελίου Cu-Al-Ni και χαλκού-ψευδαργύρου-αργιλίου Cu-Zn-Al. Παρόλο που τα κράματα νικελίου-τιτανίου

NiTi έχουν μεγαλύτερο κόστος για να τηχθούν και να επιδράσουν αποτελεσματικά στις διάφορες εφαρμογές συγκριτικά με αυτά από χαλκό Cu, προτιμώνται έναντι των τελευταίων. Οι αιτίες είναι τα σημαντικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν, όπως η ολκιμότητα, η σταθερότητα στη συμπεριφορά τους, η αντοχή στη διάβρωση και η μεγάλη ηλεκτρική τους αντίσταση. Έτσι, τελικά κατακτούν την πρώτη θέση. Τα κράματα από χαλκό παρουσιάζουν μικρή θερμική υστέρηση και προτιμώνται για αυτήν και την προσαρμοστικότητά τους στην αμφίδρομη μνήμη σχήματος (επεξηγείται πρακάτω).

Τέλος, υπάρχουν πολυμερή και σύνθετα υλικά που εμφανίζουν μνήμη σχήματος, τα οποία όμως δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας έρευνας.

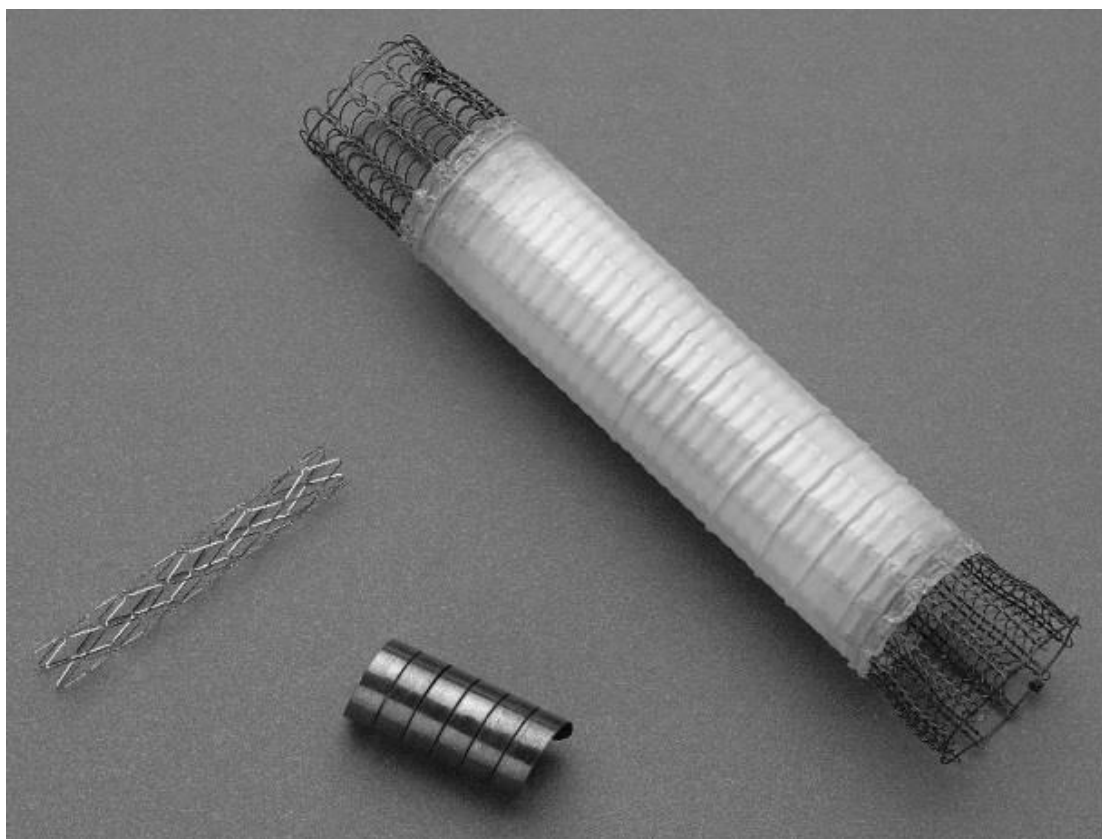
1.2 Εφαρμογές των SMAs

Είναι πολλοί οι τομείς που τα «έξυπνα» υλικά βρίσκουν εφαρμογή στη σύγχρονη εποχή. Στις παρακάτω ενότητες, γίνεται αναφορά σε κάποιους από αυτούς και περιγράφεται συνοπτικά η χρήση των κραμάτων με μνήμη σχήματος σε αυτούς. Επίσης, γίνεται αναφορά και στη συμβολή των συγκεκριμένων υλικών στις κατασκευές του πολιτικού μηχανικού.

1.2.1 Χρήση τους σε ποικίλους τομείς

Οι μοναδικές ιδιότητες των υλικών με μνήμη σχήματος, φυσικά, δε θα μπορούσαν να μείνουν ανεκμετάλλευτες, με αποτέλεσμα τα SMAs να βρίσκουν εφαρμογή σε πολυάριθμους καθημερινούς και επιστημονικούς ή μη τομείς. Ενδεικτικά, κάποιοι από αυτούς είναι ο τομέας της ιατρικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροπορικής βιομηχανίας, της διαστημικής, της ρομποτικής και άλλοι.

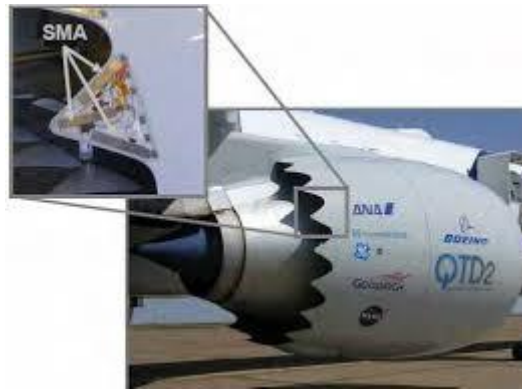
Στον ιατρικό κλάδο τα κράματα μνήμης μορφής εφαρμόζονται ως συσκευές σταθεροποίησης για οστεοτομές σε ορθοπεδική χειρουργική, ως ορθοδοντικές συσκευές και ορθοπαιδικά εμφυτεύματα. Παράδειγμα τέτοιας χρήσης σε ορθοπεδική χειρουργική είναι τα χειρουργικά ενδοπροσθετικά stents, δηλαδή κυλινδρικά εξαρτήματα που συντελούν στην υποστήριξη των τοιχωμάτων ροής και άλλων διόδων του ανθρώπινου αίματος, ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση και να επιδιορθωθούν τυχόν αλλοιώσεις. Συνηθισμένες θέσεις τοποθέτησης αυτών είναι η αρτηρία της καρωτίδας, του οισοφάγου και του χοληδόχου πόρου. Μορφές τέτοιων stents φαίνονται παρακάτω στην Εικόνα 1.1. Στην ορθοδοντική χρησιμεύουν για την επιδιόρθωση της οδοντοστοιχίας, ενώ παραδείγματα ορθοπεδικών εμφυτευμάτων είναι οι προτεταμένες πλάκες SMAs για τη θεραπεία καταγμάτων των οστών, SMAs σε στερεά μορφή ράβδου για τη θεραπεία της κύρτωσης της σπονδυλικής στήλης κ.α.



Εικόνα 1.1: Stents από Νιτινόλη

Στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται ως επενεργητές για τον έλεγχο ρευστών μετάδοσης και καθώς αποτελούν παράγοντα για την κατασκευή εξαρτημάτων μικρού βάρους και όγκου χρησιμοποιούνται και για την αντικατάσταση βαρύτερων κινητήρων. Παράλληλα, τα μηχανικά μέρη ενός αυτοκινήτου, όπως είναι το κιβώτιο ταχυτήτων, συχνά αποτελούνται από πολλά ανόμοια μέταλλα. Όταν αυξάνεται ραγδαία η θερμοκρασία (διάρκεια κανονικής λειτουργίας οχήματος), παρατηρείται χαλάρωση των συνδέσεων τους εξαιτίας της διαφοράς στο επίπεδο θερμικής διαστολής και κατά συνέπεια θόρυβος. Στη μείωση αυτού του φαινομένου και των κραδασμών έρχονται να συνεισφέρουν οι ροδέλες κατασκευασμένες από SMAs.

Στον τομέα της αεροπορικής βιομηχανίας, διερευνώνται για τον ίδιο λόγο, αλλά και ως αποσβεστήρες κραδασμών. Η μεγάλη ποσότητα της υστέρησης που παρατηρείται εξαιτίας της υπερελαστικής ιδιότητας του υλικού συμβάλλει στη διάχυση της ενέργειας και στη μείωση των κραδασμών στις εμπορικές μηχανές αεριοθωμένων. Επίσης, σύνθετες δομές που περιέχουν SMAs ενσωματώνονται στα αεροπλάνα στα πτερύγια, ώστε να μεταβάλλουν το σχήμα αυτών είτε για να επιτευχθεί απορρόφηση δονήσεων είτε για να επιτευχθεί με την αλλαγή αυτή βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά. Το παραπάνω φαίνεται στην Εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2: SMAs ενσωματωμένα στα πτερύγια αεροπλάνου Boeing

Τα SMAs μελετώνται ώστε να φέρουν ανάλογα αποτελέσματα και στο χώρο της διαστημικής, αφού η δυνατότητα κατασκευής εξαρτημάτων μικρού βάρους και όγκου σε συνδυασμό με τις αξιοσημείωτες ιδιότητές τους και την υπόσχεση για απόσβεση των κραδασμών κατά τη διάρκεια εκτόξευσης καθιστούν τα υλικά με μνήμη σχήματος βασική κατηγορία υλικών και για τον τομέα της διαστημικής.

Επιπλέον, στην καθημερινότητα υπάρχει πληθώρα αντικειμένων χρήσης τους, όπως είναι οι σκελετοί γυαλιών οράσεως στους οποίους προσδίδουν ανθεκτικότητα σε τυχαία καταστροφή τους, οι κεραιές κινητών τηλεφώνων που πλέον κατασκευάζονται από υπερελαστικό κράμα νιτινόλης, εξαιτίας της υψηλής αντίστασης που προσφέρει σε μόνιμη κάμψη και καταστροφή λόγω ατυχήματος, διάφορες χειροτεχνίες, όπως βραχιόλια όπου υπάρχει απώλεια πρόσφυσης.

1.2.2 Χρήση τους στο αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού

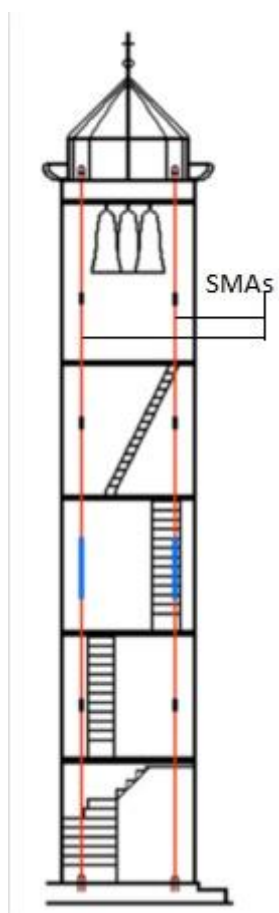
Είναι συνεπώς εμφανής η ευρεία χρήση τους. Ωστόσο, θα ήταν μεγάλη παράλειψη να μην αναφερθεί η βαρυσήμαντη συμβολή των κραμάτων μνήμης σχήματος στις εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού.

Συγκεκριμένα, τα SMAs χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση και την ενίσχυση των κατασκευών αντισεισμικά, παραδείγματος χάριν τοποθέτηση καλωδίων νιτινόλης σε κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων, περιοχές δηλαδή κρίσιμες που χρήζουν ειδικής διαχείρισης και υποφέρουν περισσότερο έναντι σεισμού, χιαστί συνδέσμων σε πλαίσια κλπ.

Οι δε ισχυρές υστερητικές επιδράσεις που παρουσιάζουν στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης και η διάχυση ενέργειας κατά τη διάρκεια αυτών των κύκλων τα κατατάσσουν ως κορυφαία υλικά για την ενσωμάτωσή τους σε αντισεισμικές συσκευές και κατ'επέκταση για την εξασφάλιση της σεισμικής μόνωσης των κατασκευών. Προκύπτει έτσι η κατασκευή μονωτήρων αποτελούμενοι από SMAs, οι οποίοι τοποθετούμενοι ανάμεσα στην ανωδομή και τη θεμελίωση στοχεύουν στη μείωση της μετάδοσης ενέργειας από το έδαφος στην ανωδομή, στην απορρόφηση της ενέργειας των κραδασμών, στην αποκατάσταση της

κατασκευής μετά την αποφόρτιση και στη μείωση της δυναμικής απόκρισης αυτής μέσω απώλειας ενέργειας.

Τέλος, σημαντική είναι και η χρήση τους ως τένοντες σε κατασκευές που πρόκειται να υποστούν προένταση ή σε κατασκευές που έχουν υποστεί σημαντικές βλάβες και εμφανείς μόνιμες παραμορφώσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της τελευταίας περίπτωσης είναι η αποκατάσταση της εκκλησίας του Αγίου Γεωργίου στην περιοχή Trignano της Ιταλίας, του οποίου το καμπαναριό υπέστη σοβαρές βλάβες μετά τον σεισμό της 15^{ης} Οκτωβρίου 1996. Υπερελαστικές ράβδοι από SMAs που τοποθετήθηκαν ώστε να διατρέχουν τον ναό καθ' ύψος (Εικόνα 1.3) και οι οποίες αγκυρώνονται στη θεμελίωσή του, με κατάλληλη θέρμανση επανέφεραν την κατασκευή στο αρχικό της σχήμα και πλέον εξακολουθούν να την ενισχύουν κατ' αυτόν τον τρόπο. Αδιαμφισβήτητη απόδειξη της αποτελεσματικότητας των SMAs είναι το γεγονός ό,τι ο ναός έμεινε ανεπηρέαστος μετά από έναν παρόμοιας κλίμακας σεισμό που έλαβε χώρα το 2000.



Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση της ανακατασκευής του καμπαναριού της εκκλησίας του Αγίου Γεωργίου στην περιοχή Trignano της Ιταλίας με χρήση SMA ελκυστήρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ SMA_s

2.1 Κρυσταλλική δομή κραμάτων αλουμινίου με μνήμη σχήματος

Τα «έξυπνα υλικά» αναπτύσσουν δύο φάσεις και τρεις κρυσταλλικές δομές (πλακοειδή μαρτενσιτική, βελονοειδή μαρτενσιτική και ωστενιτική). Μία εκ των δύο είναι η φάση υψηλών θερμοκρασιών όπου η δομή τους αποτελείται από ωστενίτη και η δεύτερη είναι η φάση χαμηλών θερμοκρασιών όπου η δομή τους αποτελείται από μαρτενσίτη.

Ο ωστενίτης είναι αλλοτροπική μορφή σιδήρου και είναι σταθερός σε υψηλές θερμοκρασίες. Κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (Εικόνα 2.1) , σχηματίζει ευμεγέθεις κρυστάλλους (κόκκους) και σε ορισμένες περιπτώσεις έχει τη μορφή λεπτών στρωμάτων στο χώρο ανάμεσα στους επιμήκεις κόκκους του μαρτενσίτη. Κατ'επέκταση, λόγω της κρυσταλλικής δομής του έχει έναν πιθανό μετασχηματισμό και εμφανίζει σχετικά υψηλή αντίσταση σε εξωτερική φόρτιση, ενώ χαρακτηρίζεται και από ολκιμότητα.

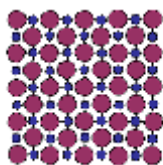
Από την άλλη, ο μαρτενσίτης είναι σταθερός σε χαμηλές θερμοκρασίες και η δομή του έχει σχήμα παραλληλόγραμμο και είναι ασύμμετρη. Έχει δύο δυνατές κρυσταλλικές δομές, την πλακοειδή μαρτενσιτική (twinned martensite) και τη βελονοειδή μαρτενσιτική (detwinned martensite) .

Η πλακοειδής μαρτενσιτική δομή είναι μετασταθής φάση η οποία λαμβάνει χώρα όταν ένας χάλυβας υποβάλλεται σε απότομη ψύξη και κατόπιν θερμανθεί σε υψηλή θερμοκρασία, ώστε να σχηματιστεί ωστενίτης. Ο μετασχηματισμός αυτός, εν προκειμένω, προέρχεται με διάτμηση της ωστενιτικής φάσης του υλικού. Επιπροσθέτως, έτσι και πραγματοποιείται το φαινόμενο μνήμης σχήματος (shape memory effect) .

Η βελονοειδής μαρτενσιτική φάση προέρχεται από αύξηση της τάσης φόρτισης του υλικού. Εξαιτίας της ασύμμετρης κρυσταλλικής δομής του ο μαρτενσίτης είναι ασθενέστερος και μπορεί εύκολα να παραμορφωθεί (Εικόνα 2.2) . Όταν υπόκειται σε εξωτερική φόρτιση παραμορφώνεται και η δομή του μετασχηματίζεται με έναν συγκεκριμένο τρόπο, ώστε να μπορεί να αναλάβει τη μέγιστη δυνατή επιμήκυνση. Μετά την αποφόρτιση εξαιτίας των μετατοπίσεων των ατόμων του συγκεκριμένου κρυσταλλικού πλέγματος, η παραμένουσα παραμόρφωση είναι δυνατό να αναιρεθεί (φαινόμενο υπερελαστικότητας) .

Η μορφή του μαρτενσίτη είναι λωρίδες και λεπτά πλακίδια. Συγκριτικά με τους μητρικούς κόκκους του ωστενίτη, οι λωρίδες και τα πλακίδια του έχουν πολύ μικρό μέγεθος.

Επομένως, οι κρυσταλλικές δομές των SMAs και η ωστενιτική και μαρτενσιτική φάση που μπορούν να αναπτύξουν είναι εκείνες που “ευθύνονται” για τη συμπεριφορά και τις ιδιότητές τους.



Εικόνα 2.1: Ωστενίτης (φάση υψηλών θερμοκρασιών) και εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα κρυσταλλικής δομής



Εικόνα 2.2: Μαρτενσίτης (φάση χαμηλών θερμοκρασιών) και μονοκρυσταλλική δομή. Αριστερά φαίνεται η πλακοειδής κρυσταλλική δομή (twinned martensite) και δεξιά η βελονοειδής κρυσταλλική δομή (detwinned martensite)

2.2 Ιδιότητες κραμάτων μνήμης σχήματος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται εκτενώς οι δύο πολύ σημαντικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου με μνήμη σχήματος, οι οποίες είναι η θερμική μνήμη μορφής και η ψευδοελαστικότητα.

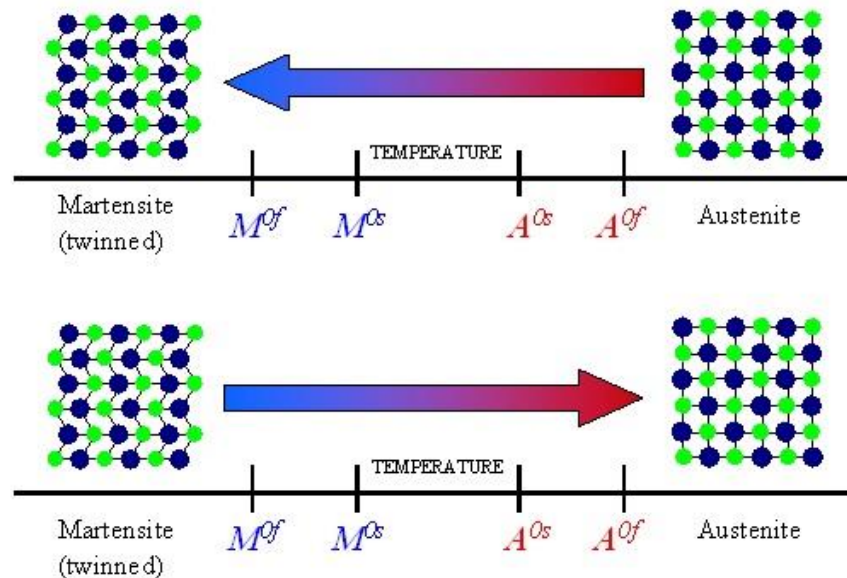
2.2.1 Μνήμη σχήματος ή θερμική μνήμη μορφής (Shape Memory Effect)

Όπως έχει ήδη σημειωθεί, μία εξαιρετική ιδιότητα των «έξυπνων υλικών» είναι η μνήμη σχήματος ή θερμική μνήμη μορφής. Θερμική μνήμη μορφής, ονομάζεται η ικανότητα του υλικού (μετάλλου) να επανέρχεται στην αρχική του μορφή, παρά τις όποιες παραμορφώσεις έχει υποστεί, όταν η θερμοκρασία του ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή, που ονομάζεται "θερμοκρασία μετασχηματισμού".

Η αναλυτική περιγραφή του φαινομένου προϋποθέτει αρχικά τον ορισμό κάποιων χαρακτηριστικών θερμοκρασιών στις οποίες αλλάζει η κρυσταλλογραφική δομή των SMAs. Αυτές είναι, η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει ο μετασχηματισμός από μαρτενσίτη σε ωστενίτη (Austenite start, A_s), η θερμοκρασία στην οποία ολοκληρώνεται ο μετασχηματισμός από μαρτενσίτη σε ωστενίτη (Austenite finish, A_f), η θερμοκρασία που η δομή ξεκινά να αλλάζει από ωστενίτη σε μαρτενσίτη (Martensite start, M_s) και η θερμοκρασία που ο μετασχηματισμός αυτός ολοκληρώνεται (Martensite finish, M_f).

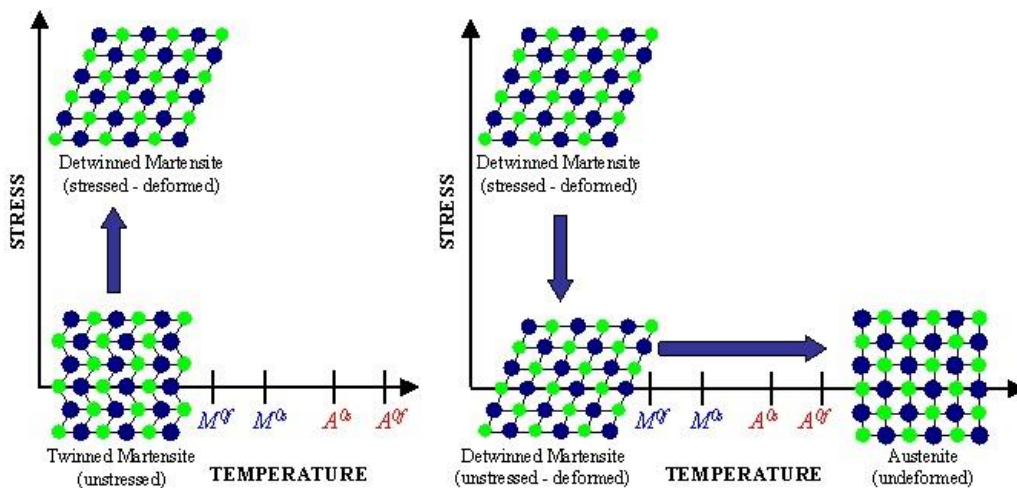
Κατά την ψύξη, και θεωρώντας απώλεια φόρτισης η κρυσταλλική δομή των υπό μελέτη υλικών μετασχηματίζεται από ωστενίτη σε πλακοειδή μαρτενσίτη (twinned martensite). Ως αποτέλεσμα αυτού του μετασχηματισμού, μακροσκοπικά, δε συμβαίνει καμία αισθητή αλλαγή σχήματος. Κατά τη θέρμανση του υλικού στη μαρτενσιτική φάση, ένας αντίστροφος μετασχηματισμός λαμβάνει χώρα και ως εκ

τούτου η δομή του υλικού αλλάζει σε ωστενιτική. Η περιγραφούσα διαδικασία σε συνδυασμό με τις θερμοκρασίες που ορίστηκαν παραπάνω, απεικονίζεται στην Εικόνα 2.3.

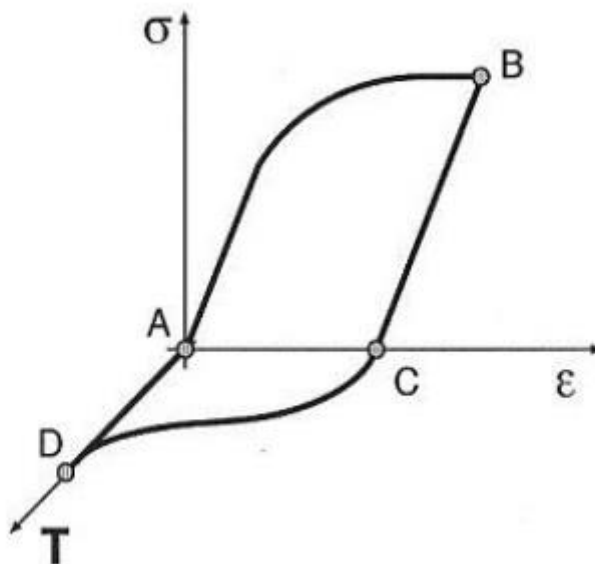


Εικόνα 2.3: Μετασχηματισμός φάσης SMA, επαγόμενος από θερμοκρασία χωρίς μηχανική φόρτιση.

Επιπλέον, με την ύπαρξη μηχανικής φόρτισης όταν το υλικό βρίσκεται ήδη σε πλακοειδή μαρτενσιτική φάση (θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας που ο μετασχηματισμός σε μαρτενσίτη ολοκληρώνεται) , τότε ένας μετασχηματισμός σε βελονοειδή μαρτενσιτική (detwinned martensite) φάση είναι πιθανός. Το υλικό είναι πλήρως μαρτενσιτικό και παρουσιάζει ψευδοελαστική συμπεριφορά παραμόρφωσης, δηλαδή είναι ικανό να υφίσταται μεγάλες ψευδοελαστικές παραμορφώσεις. Όταν σε τέτοιες συνθήκες υπόκειται σε συνεχής πίεση, αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις. Κατόπιν αποφόρτισης, μόνο οι ελαστικές παραμορφώσεις ανακτώνται και οι υπόλοιπες εναπομείνουσες μπορούν να ανακτηθούν με μεταγενέστερη θέρμανσή του με θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας στην οποία η αλλαγή της φάσης από μαρτενσιτική σε ωστενιτική ολοκληρώνεται. Ως εκ τούτου, ένας αντίστροφος μετασχηματισμός πραγματοποιείται και οδηγεί σε μία πλήρη ανάκτηση του σχήματος ενός SMA. Το φαινόμενο αυτό είναι το λεγόμενο φαινόμενο μνήμης σχήματος SME και απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 2.4 και 2.5.



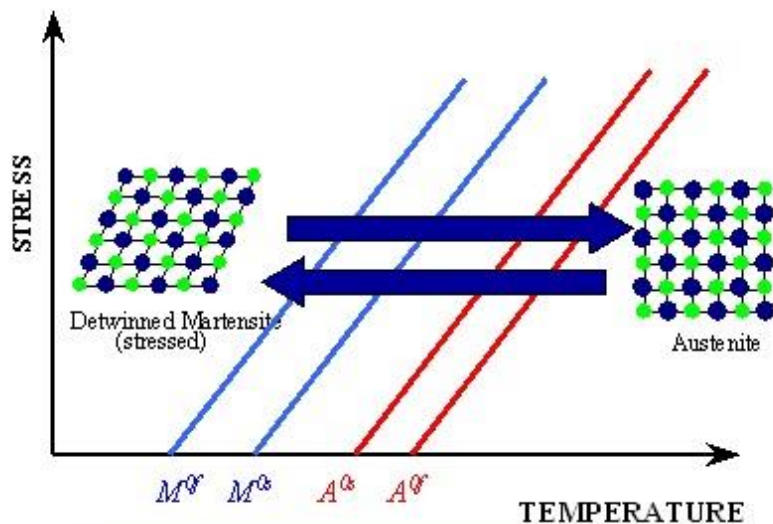
Εικόνα 2.4: Φαινόμενο μνήμης σχήματος SMA (Shape Memory Effect)



Εικόνα 2.5: Shape memory effect. Στο τέλος μίας διαδικασίας φόρτισης-αποφόρτισης (ABC) σε σταθερά χαμηλή θερμοκρασία, το υλικό παρουσιάζει παραμένουσα παραμόρφωση (AC), η οποία μπορεί να εξαλειφθεί μέσω θέρμανσης του υλικού (CDA)

Εκτός όμως από τη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι επίσης ενδεχόμενο να συμβεί απευθείας μετασχηματισμός από ωστενιτική σε βελονοειδή μαρτενσιτική φάση. Αυτό δύναται να προκύψει εάν η φόρτιση εφαρμοστεί όταν το υλικό έχει ωστενιτική δομή και ψυχθεί. Τότε θα προκύψει ο βελονοειδής μαρτενσιτικός σχηματισμός, και ως εκ τούτου μεγάλες παραμορφώσεις, της τάξεως του 5%-8% μπορούν να παρατηρηθούν. Με τη θέρμανση και πάλι του υλικού είναι εφικτή η αναστρεψιμότητα του σχηματισμού. Η μόλις προαναφερθείσα περίπτωση φαίνεται στην Εικόνα 2.6.

Οι θερμοκρασίες μετασχηματισμού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της φόρτισης στην οποία υποβάλλεται το υλικό. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές φόρτισης, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι θερμοκρασίες μετασχηματισμού. Συνήθως, υιοθετείται μία γραμμική συσχέτιση των δύο μεταβλητών.



Εικόνα 2.6: Απευθείας μετασχηματισμός από ωστενιτική σε βελονοειδή μαρτενσιτική φάση με την επιβολή φόρτισης

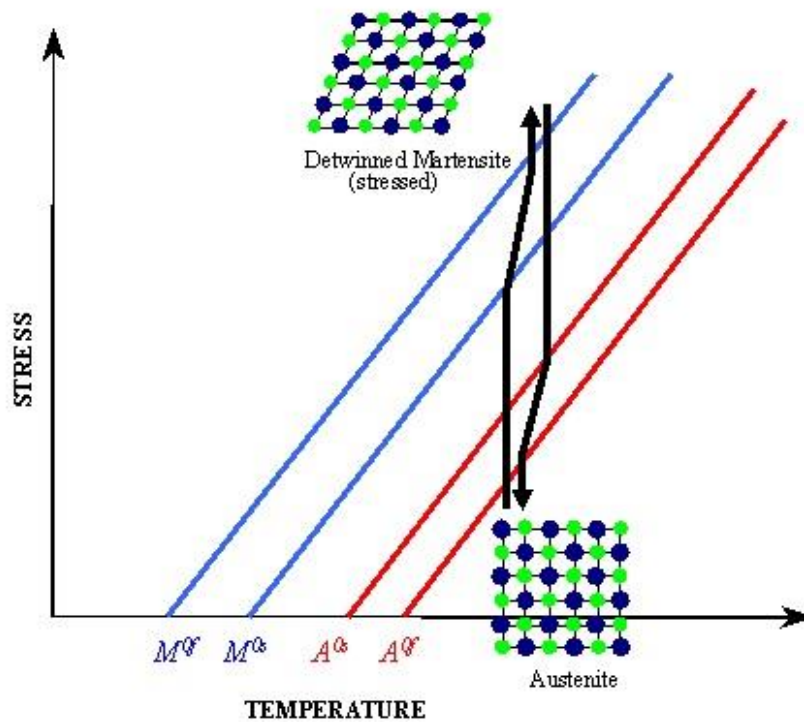
2.2.2 Υπερελαστικότητα (superelasticity) ή ψευδοελαστικότητα (pseudoelasticity)

Υπερελαστικότητα ή ψευδοελαστικότητα είναι το φαινόμενο όπου τα SMAs υπό συνεχείς τάσεις μπορούν να υφίστανται μεγάλα μεγέθη ανελαστικών παραμορφώσεων και να ανακτούν το σχήμα τους μετά την αποφόρτιση. Εμφανίζεται σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας ολοκλήρωσης του μετασχηματισμού σε ωστενίτη (A_f) και μικρότερη μιας κρίσιμης θερμοκρασίας (M_d όπου $M_d > A_f$), δηλαδή θερμοκρασία στην οποία το υλικό δε χρειάζεται πρόσθετη θερμότητα για να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση και παρουσιάζει ελαστικές ιδιότητες έως 30 φορές μεγαλύτερες από ένα συνηθισμένο μέταλλο.

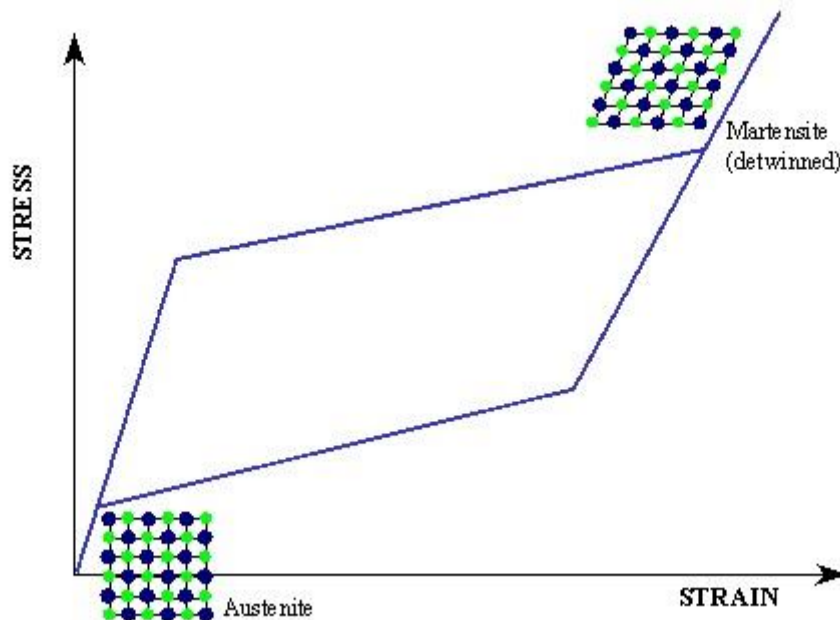
Αναλυτικά, στην περίπτωση επιβολής τάσης σε ωστενιτικό δείγμα και δεδομένων των παραπάνω θερμοκρασιών ($A_f < T < M_d$), υπάρχει μία κρίσιμη τιμή τάσης μετασχηματισμού πέραν της οποίας έχω αλλαγή της δομής του SMA από ωστενίτη σε βελονοειδή μαρτενσίτη και εμφανείς μεγάλες παραμορφώσεις. Αφού ολοκληρωθεί ο μετασχηματισμός, περαιτέρω παραμόρφωση προκαλεί ελαστική φόρτιση στον μαρτενσίτη. Κατά την αποφόρτιση, εάν $A_f < T < M_d$ δεν έχω παραμένουσα παραμόρφωση. Εάν όμως, $T < A_f$, τότε έχω μετασχηματισμό σε ωστενίτη μόνο ενός μέρους του μαρτενσίτη, άρα έχω και παραμένουσα παραμόρφωση η οποία εξαλείφεται με θέρμανση. Εάν κατά τη φόρτιση έχω $T > M_d$, το υλικό χάνει την υπερελαστικότητά του.

Η κρίσιμη τιμή τάσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και η θερμοκρασία είναι αυτή που καθορίζει κατά την αποφόρτιση την παραμένουσα παραμόρφωση.

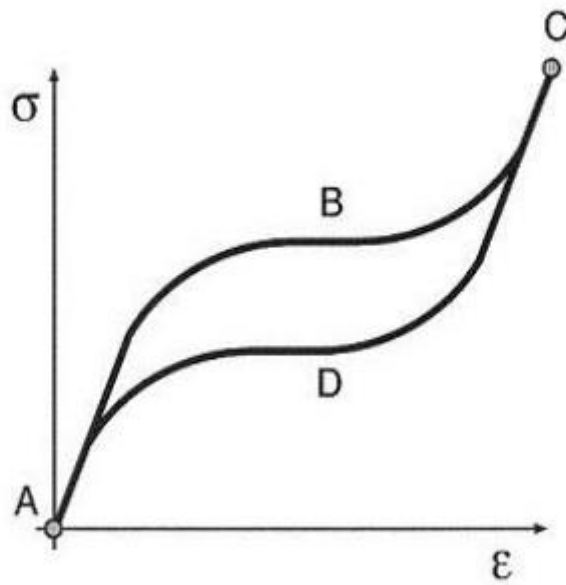
Όλα τα παραπάνω γίνονται ακόμα περισσότερο κατανοητά και αντιληπτά παρατηρώντας τις εικόνες 2.7, 2.8 και 2.9.



Εικόνα 2.7: Επιβολή φόρτισης και αποφόρτιση ενός SMA σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της A_f και το φαινόμενο της ψευδοελαστικότητας

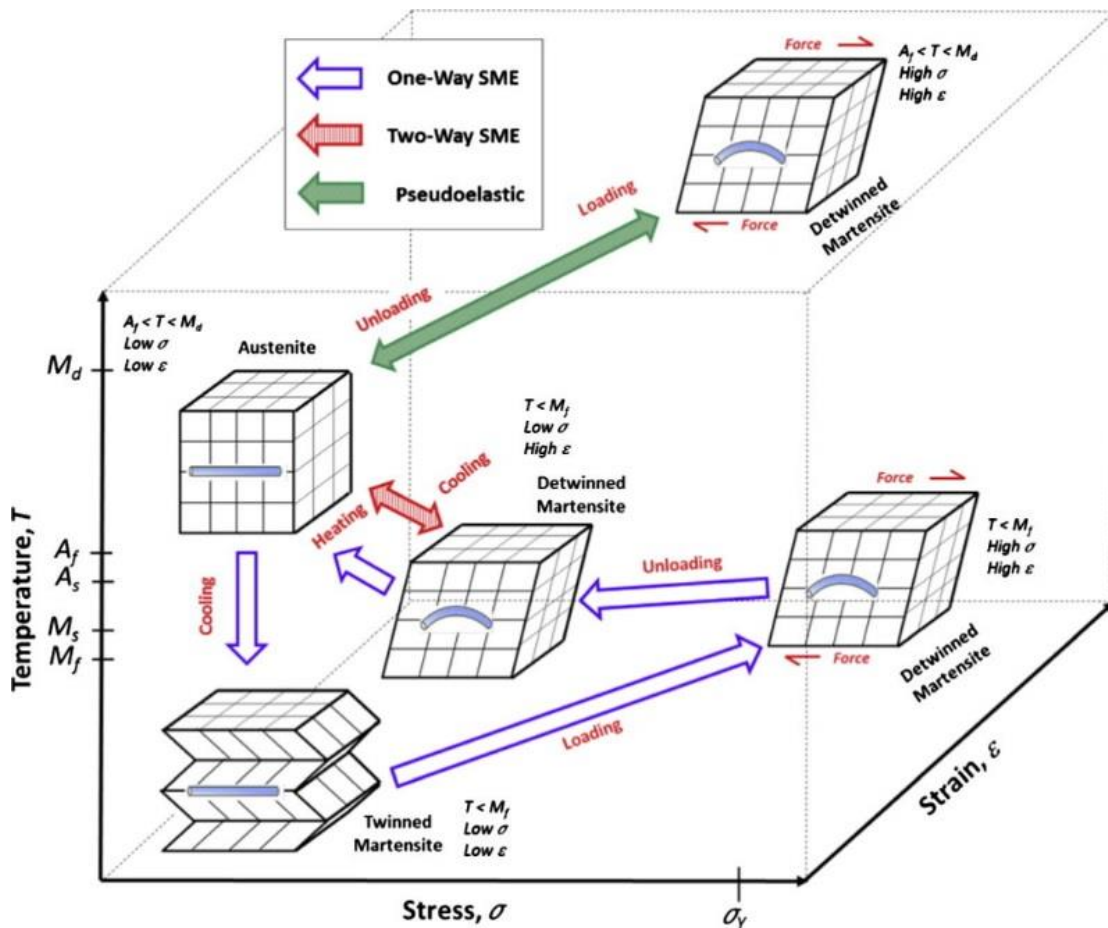


Εικόνα 2.8: Ψευδοελαστικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης ενός SMA



Εικόνα 2.9: Ιδιότητα υπερελαστικότητας (υστερητικός βρόχος). Σε σταθερή υψηλή θερμοκρασία, το υλικό είναι ικανό να υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις με μηδενική τελική μόνιμη παραμόρφωση.

Τέλος, όλες οι διαδικασίες μετασχηματισμού (μονής και διπλής κατεύθυνσης) της κρυσταλλικής δομής ενός SMA φαίνονται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.10: Μετασχηματισμοί κρυσταλλικής δομής ενός SMA, μονής και διπλής κατεύθυνσης επαγόμενη είτε από τάση είτε από θερμοκρασιακή μεταβολή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΤΗΣ ΥΠΕΡΕΛΑΣΤΙΚΗΣ

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ SMA_s ΣΕ

ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΤΟ

ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ

ΜΟΝΤΕΛΟ

3.1 Συστατικά μοντέλα συμπεριφοράς των SMAs αναφορικά με την υπερελαστικότητα τους

Υπάρχουν πολλά μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν τις συμπεριφορές των «έξυπνων» υλικών. Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της υπερελαστικής συμπεριφοράς των κραμάτων αλουμινίου με μνήμη μνήμης από την

3.1.1 Πρότυπο μοντέλο για υπερελαστικότητα

Από μία μακροσκοπική άποψη, οι μηχανισμοί μετασχηματισμού φάσης που εμπλέκονται στην υπερελαστική συμπεριφορά είναι ο μετασχηματισμός από ωστενίτη σε μαρτενσίτη, ο μετασχηματισμός από μαρτενσίτη σε ωστενίτη και ο μετασχηματισμός από μαρτενσίτη σε μαρτενσίτη.

Οι δύο πρώτοι αφορούν στην ιδιότητα που μελετάται στην παρούσα ενότητα. Κατά συνέπεια, εισάγονται δύο εσωτερικές μεταβλητές, το κλάσμα μαρτενσίτη (ξ_S) και το κλάσμα ωστενίτη (ξ_A). Η μία από αυτές είναι εξαρτημένη μεταβλητή και γίνεται η υπόθεση ότι και οι δύο μαζί ικανοποιούν την παρακάτω σχέση:

$$\xi_S + \xi_A = 1$$

Η ανεξάρτητη μεταβλητή εδώ επιλέγεται να είναι το κλάσμα μαρτενσίτη ξ_S .

Για τη συμπεριφορά του υλικού γίνεται η υπόθεση ό,τι είναι ιστροπική. Η εξάρτηση από την πίεση του μετασχηματισμού φάσης μοντελοποιείται με την εισαγωγή της συνάρτησης φόρτισης Drucker-Prager, όπως εκείνη διατυπώνεται παρακάτω:

$$F = q + 3ap$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}S:S}$$

$$S = \sigma - p1$$

$$p = \frac{1}{3}\sigma:1$$

όπου a είναι παράμετρος υλικού, σ είναι η πίεση και 1 είναι ο ταυτοτικός ή μοναδιαίος ταυστής.

Η εξέλιξη του κλάσματος του μαρτενσίτη, ξ_S , ορίζεται εν συνεχεία ως εξής:

$$\dot{\xi}_S = \begin{cases} -H^{AS}(1 - \xi_S) \frac{F}{F - R_f^{AS}} \\ H^{SA} \xi_S \frac{F}{F - R_f^{SA}} \end{cases}$$

όπου η πρώτη εξίσωση ισχύει για τον μετασχηματισμό από ωστενίτη σε μαρτενσίτη και η δεύτερη για τον μετασχηματισμό από μαρτενσίτη σε ωστενίτη, καθώς επίσης και

$$R_f^{AS} = \sigma_f^{AS}(1 + a)$$

$$R_f^{SA} = \sigma_f^{SA}(1 + a)$$

σ_f^{AS} και σ_f^{SA} είναι παράμετροι υλικού οι οποίες φαίνονται στην εικόνα 3.1. Οι συναρτήσεις H^{AS} και H^{SA} είναι συναρτήσεις Heaviside ή μοναδιαίου βήματος και ισούνται με:

$$H^{AS} = \begin{cases} 1 & \text{if } \begin{cases} R_S^{AS} < F < R_f^{AS} \\ \dot{F} > 0 \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$H^{SA} = \begin{cases} 1 & \text{if } \begin{cases} R_f^{SA} < F < R_S^{SA} \\ \dot{F} < 0 \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R_S^{AS} = \sigma_S^{AS}(1 + a)$$

$$R_S^{SA} = \sigma_S^{SA}(1 + a)$$

σ_S^{AS} και σ_S^{SA} είναι παράμετροι υλικού οι οποίες επίσης φαίνονται στην εικόνα 3.1.

Η παράμετρος a του υλικού χαρακτηρίζει την απόκριση του υλικού σε εφελκυσμό και θλίψη. Εάν, η συμπεριφορά του υλικού σε θλίψη και εφελκυσμό είναι η ίδια, τότε $a=0$. Για μία μονοαξονική δοκιμή σε εφελκυσμό-θλίψη, το a μπορεί να σχετίζεται με την αρχική τιμή του ωστενίτη σε μετασχηματισμό μαρτενσιτικής φάσης σε εφελκυσμό και θλίψη (σ_c^{AS} και σ_t^{AS} αντίστοιχα) και υπολογίζεται ως ακολούθως:

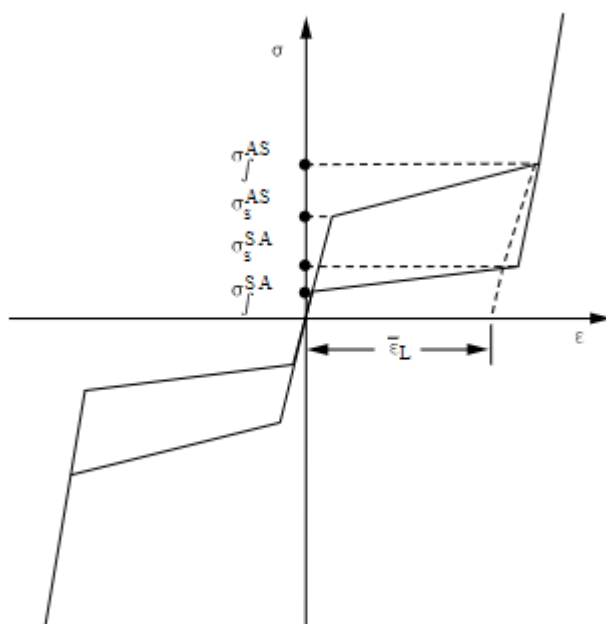
$$a = \frac{\sigma_c^{AS} - \sigma_t^{AS}}{\sigma_c^{AS} + \sigma_t^{AS}}$$

Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης είναι:

$$\sigma = D: (\varepsilon - \varepsilon_{tr})$$

$$\dot{\varepsilon}_{tr} = \xi \bar{\varepsilon}_L \frac{\partial F}{\partial \sigma}$$

όπου D είναι ο τανυστής ελαστικής δυσκαμψίας, ε_{tr} είναι ο τανυστής παραμόρφωσης μετασχηματισμού και $\bar{\varepsilon}_L$ είναι παράμετρος υλικού που απεικονίζεται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Εξιδανικευμένο διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης υπερελαστικής συμπεριφοράς.

3.1.2 Βελτιστοποιημένο μοντέλο Graesser and Cozzarelli's

Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ένα καταστατικό μοντέλο το οποίο έχει ως βάση το μοντέλο των Graesser και Cozzarelli's και το οποίο αναπτύχθηκε για να αποδώσει την επιρροή του ρυθμού επιβολής της τάσης καταπόνησης σε διαφορετικά επίπεδα παραμόρφωσης των υπερελαστικών κραμάτων μνήμης σχήματος.

Βασισμένο στο μοντέλο του Ozdemir, οι Graesser και Cozzarelli πρότειναν ένα μονοδιάστατο υστερητικό μοντέλο που παρήγαγε τα γενικά μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τάσης-παραμόρφωσης για τα κράματα μνήμης σχήματος. Η εξίσωση δίνεται ως εξής:

$$\dot{\sigma} = E \left[\dot{\varepsilon} - |\dot{\varepsilon}| \left(\frac{\sigma - \beta}{\gamma} \right)^n \right],$$

όπου σ είναι η μονοαξονική τάση καταπόνησης, ε η παραμόρφωση, E το μέτρο ελαστικότητας, γ η τάση μετασχηματισμού, n μία σταθερά που θεωρείται ότι έχει μία οποιαδήποτε θετική περιττή πραγματική τιμή που ελέγχει την ορθότητα της μετάβασης από την ελαστική κατάσταση στη φάση μετασχηματισμού, $\dot{\sigma}$ και $\dot{\varepsilon}$, οι χρονικές παράγωγοι της τάσης και της παραμόρφωσης, όπως συνηθίζεται, αντίστοιχα και β μία μονοδιάστατη ανακτώμενη τάση, η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\beta = E\alpha \{ \varepsilon_{in} + f_T |\varepsilon|^c \operatorname{erf}(ae) [u(-\varepsilon\dot{\varepsilon})] \},$$

όπου f_T , a , και c είναι σταθερές υλικού που ελέγχουν το είδος και το μέγεθος της υστέρησης, την ποσότητα της ελαστικής ανάκτησης κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης και την κλίση της τάσης αποφόρτισης έως το όριο αντίστοιχα. α είναι

μία σταθερά που ελέγχει την κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης στην ανελαστική περιοχή και δίνεται από τη σχέση

$$\alpha = \frac{E_y}{E - E_y}$$

όπου E_y είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης στην ανελαστική περιοχή.

ε_{in} είναι η ανελαστική παραμόρφωση, η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon_{in} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E}$$

$u(x)$ είναι μοναδιαία βηματική συνάρτηση η οποία ορίζεται ως

$$u(x) = \begin{cases} +1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

$\text{erf}(x)$ είναι η συνάρτηση σφάλματος η οποία δίνεται από την έκφραση

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Το μοντέλο των Graesser και Cozzarelli στηρίζεται σε μία σχετικά απλή εξίσωση με παραμέτρους που μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν και να εφαρμοστούν. Αν και, οι μαθηματικές σχέσεις είναι γραμμένες σε διαφορική μορφή το μοντέλο είναι ουσιαστικά ανεξάρτητο του ρυθμού καταπόνησης, ενώ έρευνες έχουν δείξει ό,τι υπάρχει ισχυρή εξάρτηση από αυτό. Κατά συνέπεια, το μοντέλο των Graesser και Cozzarelli επιδέχεται περαιτέρω βελτιώσεις, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή του ρυθμού καταπόνησης.

Για τον σκοπό αυτόν γίνονται οι εξής υποθέσεις:

(i) Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι σταθερή

(ii) Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στις ιδιότητες των κραμάτων μνήμης σχήματος μπορεί να αγνοηθεί όταν είναι κάτω από $\dot{\varepsilon}_0$ ($\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}/s$).

Βασισμένη στις παραπάνω υποθέσεις, η τάση υπό δυναμική φόρτιση μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη και διατυπώνεται ακολούθως ως:

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_k$$

όπου σ , σ_s και σ_k είναι η τάση υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης, σχεδόν σταθερής φόρτισης και η αλλαγή στην τάση εξαιτίας της επιρροής του ρυθμού παραμόρφωσης αντίστοιχα.

Παραγωγίζοντας ως προς το χρόνο την παραπάνω σχέση προκύπτει η ακόλουθη διαφορική ισότητα:

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma}_s + \dot{\sigma}_k$$

όπου

$$\dot{\sigma}_s = E \left[\dot{\varepsilon} - |\dot{\varepsilon}| \left| \frac{\sigma_s - \beta}{Y} \right|^{n-1} \left(\frac{\sigma_s - \beta}{Y} \right) \right].$$

Οι παράμετροι της τελευταίας σχέσης έχουν ήδη ορισθεί παραπάνω και μπορούν να ληφθούν πειραματικά από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης υπό συνθήκες σχεδόν σταθερής φόρτισης.

Η μεταβλητή σ_k εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ των ε και ε_0 . Οι εξισώσεις που καταγράφουν τη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών σ_k και ε , όπως επίσης ε_0 και $\dot{\varepsilon}_0$ έχουν εξαχθεί από πειραματικές δοκιμές που βασίζονται σε μαθηματικές στατιστικές και σε αριθμητικά προσαρμοσμένη μέθοδο. Η παράμετρος σ_k ορίζεται ως εξής:

Για $-\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0$,

$$\sigma_k = 0$$

Για $\varepsilon > \varepsilon_0$,

$$\sigma_k = p \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \sqrt{\varepsilon} = p (\ln \dot{\varepsilon} - \ln \dot{\varepsilon}_0) \sqrt{\varepsilon},$$

όπου p είναι μία σταθερά υλικού. Εάν $R = -\ln(\dot{\varepsilon}_0)$, τότε

$$\sigma_k = p (\ln \dot{\varepsilon} + R) \sqrt{\varepsilon}.$$

Παραγωγίζοντας προκύπτει

$$\dot{\sigma}_k = p \left[(\ln \dot{\varepsilon} + R) \frac{\dot{\varepsilon}}{2\sqrt{\varepsilon}} + \frac{\ddot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}} \sqrt{\varepsilon} \right]$$

Για $\varepsilon < -\varepsilon_0$

$$\sigma_k = q \ln \left(\frac{|\dot{\varepsilon}|}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \varepsilon^2 = q (\ln |\dot{\varepsilon}| - \ln \dot{\varepsilon}_0) \varepsilon^2 = q (\ln |\dot{\varepsilon}| + R) \varepsilon^2$$

Επομένως, η παράγωγος του χρόνου γράφεται ως ακολούθως:

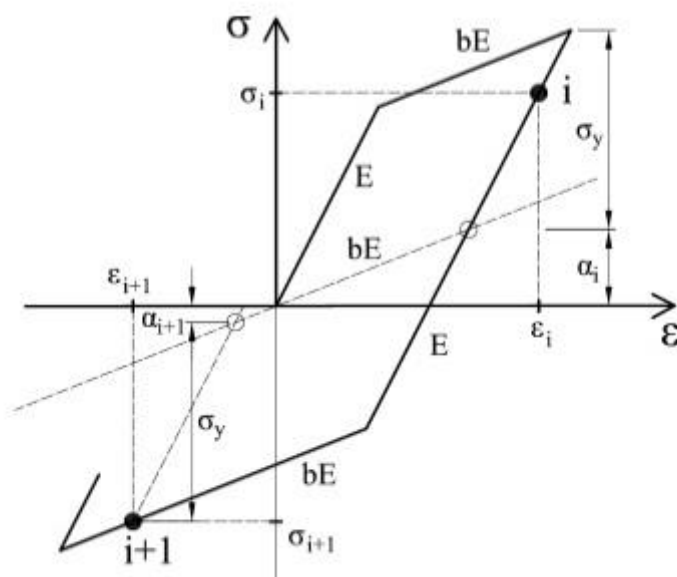
$$\dot{\sigma}_k = q \left[2(\ln |\dot{\varepsilon}| + R) |\dot{\varepsilon}| \varepsilon + \frac{\ddot{\varepsilon}}{|\dot{\varepsilon}|} \varepsilon^2 \right],$$

όπου q είναι μία παράμετρος υλικού η οποία αναφέρεται στη μέγιστη παραμόρφωση, ε_{max} .

3.2 Περιγραφή του διγραμμικού κινηματικού μοντέλου και παρουσίαση του υστερητικού βρόγχου

Το διγραμμικό κινηματικό μοντέλο υπό ανακυκλική φόρτιση αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διότι σε επόμενα κεφάλαια ερευνώνται οι διαφορές που προκύπτουν στην περίπτωση της ανάλυσης ενός στοιχείου/φορέα σύμφωνα με το μοντέλο αυτό και συγκριτικά με κάποιο που προσομοιάζει την υπερελαστική συμπεριφορά των SMAs. Αυτό γίνεται για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της χρήσης SMAs σε κατασκευές.

Το εν λόγω μοντέλο λαμβάνει υπόψη του το φαινόμενο Bauschinger. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, όταν ένα υλικό είναι στην ελαστική περιοχή, $|\varepsilon| \leq \varepsilon_y$, όλες οι παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα είναι αναστρέψιμες, το οποίο συνεπάγεται ό,τι η αποφόρτιση είναι επίσης ελαστική και ακολουθεί την καμπύλη φόρτισης. Ωστόσο, κατόπιν διαρροής μόνο το ελαστικό μέρος των παραμορφώσεων θα μπορεί να αναιρεθεί. Τούτο σημαίνει ό,τι κατά την αποφόρτιση το υλικό θα παράγει καμπύλη παράλληλη της ελαστικής με κλίση E . Επιπλέον, κάποια επιπρόσθετη φόρτιση με διεύθυνση αντίθετη της αρχικής θα προκαλέσει διαρροή του υλικού, αλλά σε τάση μικρότερη της αρχικής τάσης διαρροής. Το φαινόμενο αυτό αποκαλείται Bauschinger effect και αποτελεί μία από τις θεωρήσεις για την εξαγωγή του υστερητικού βρόγχου συμπεριφοράς ενός υλικού με βάση το διγραμμικό κινηματικό μοντέλο. Ο αναφερόμενος βρόγχος απεικονίζεται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση του διγραμμικού μοντέλου με κινηματική κράτυνση.

Στο μοντέλο αυτό, σε κάθε κύκλο φόρτισης η τάση διαρροής $\bar{\sigma}_y$ εξαρτάται από το τελευταίο σημείο αναστροφής σ_r .

$$\bar{\sigma}_y = \sigma_r - 2\sigma_{y0}$$

Επιπλέον, η ελαστική περιοχή παραμένει σταθερή και το κέντρο της κινείται σε μία ευθεία παράλληλη με την ευθεία με κλίση ίση με την κράτυνση. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές τάσης βρίσκονται σε δύο γραμμές παράλληλες με τη γραμμή που έχει κλίση ίση με bE . Αυτό συνεπάγεται ό,τι το μέγεθος και το σχήμα του υστερητικού βρόγχου δε μεταβάλλονται. Το κέντρο της ελαστικής περιοχής ορίζεται με τη βοήθεια μιας τάσης η οποία συμβολίζεται με α και η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \text{sgn}(\eta_i) H \Delta \varepsilon_{pl,i} = \alpha_i + \text{sgn}(\eta_i) \frac{bE}{1-b} \Delta \varepsilon_{pl,i}$$

Μπορούμε επίσης, να υπολογίσουμε την τιμή της τάσης α ως το σημείο τομής δύο ευθειών. Μίας που θα έχει κλίση bE και περνάει από το κέντρο των αξόνων και μίας που θα έχει κλίση E . Υποθέτοντας, ότι το υλικό είναι πλαστικό η τιμή της τάσης α μπορεί να βρεθεί από τη σχέση

$$\alpha_i = \max \left[\sigma_i - \sigma_{y,0}, \frac{b}{b-1} (\sigma_i - E \varepsilon_i) \right]$$

Επιπρόσθετα, για να προσδιορισθεί εάν το υλικό έχει διαρρεύσει ή όχι, ορίζεται η τάση η μέσω της σχέσης

$$\eta = \sigma_i - \alpha_i$$

ενώ η συνθήκη της διαρροής διατυπώνεται με την βοήθεια της τάσης η ως εξής:

$$q = |\eta_i + 1| - \sigma_{y0}$$

Στην αρχή κάθε βήματος προσδιορίζεται η ελαστική τάση και κατόπιν εξετάζεται εάν το υλικό έχει διαρρεύσει με τη βοήθεια της εξίσωσης $\eta = \sigma_{el,i} - \alpha_i$. Εάν το υλικό είναι ελαστικό, τότε $\sigma_i = \sigma_{el,i}$ και $E_i = E$, διαφορετικά η τάση βρίσκεται από τη σχέση

$$\sigma_i = \sigma_{el,i} - E \Delta \varepsilon_{pl}$$

όπου

$$\Delta \varepsilon_{pl} = \frac{q(1-b)}{E}$$

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας μπορεί κάθε φορά να επαναυπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης

$$E_m = \begin{cases} E, & q \leq 0 \\ bE, & q > 0 \end{cases}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

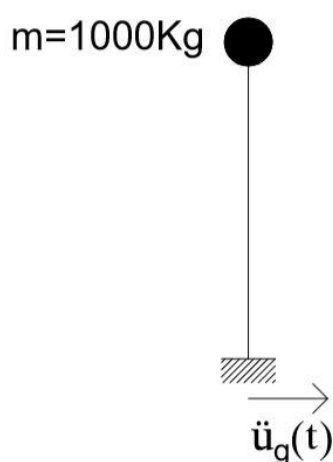
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ «ΕΞΥΠΝΟ» ΥΛΙΚΟ Ή ΔΟΜΙΚΟ ΧΑΛΥΒΑ

4.1 Περιγραφή του μονοβάθμιου συστήματος

Στην παρούσα ενότητα γίνεται ανάλυση ενός μονοβάθμιου συστήματος, ώστε να μελετηθεί η δυναμική του απόκριση όταν εκείνο αποτελείται στη μία περίπτωση από «έξυπνο» υλικό και στην άλλη από δομικό χάλυβα. Αυτό ερευνάται για να συγκριθούν τα αποτελέσματα και να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης κάθε υλικού. Το μονοβάθμιο σύστημα είναι ένας μη γραμμικός μονοβάθμιος ταλαντωτής.

4.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονοβάθμιου ταλαντωτή

Το μοντέλο που υιοθετείται για να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά των «έξυπνων» υλικών υπό δυναμική φόρτιση είναι ένα μονο-αξονικό μοντέλο πρόβολου. Το μονοβάθμιο αυτό σύστημα είναι ένας απλός ταλαντωτής, ο οποίος παραμορφώνεται μονοαξονικά, και ο οποίος φέρει μάζα στο ελεύθερο άκρο του. Η δεσμευμένη άκρη-στήριξη του ταλαντωτή και η μάζα του συνδέονται μεταξύ τους με ένα στοιχείο, το οποίο στη μία υπόθεση είναι από δομικό χάλυβα και στην άλλη από «έξυπνο» υλικό, άρα υπερελαστικό υλικό. Συγκεκριμένα, η διαμόρφωση του συστήματος έχει ως εξής: Η μάζα στην άκρη του ταλαντωτή ισούται με 1000 κιλά (kg), ο συντελεστής απόσβεσης ξ με 5%, ενώ το μήκος του στοιχείου με 1000 mm. Επίσης, γίνεται η απλοποιημένη αλλά πολύ συχνή υπόθεση, ό,τι το μέλος από shape memory alloy είναι ένα σύρμα με διάμετρο 1 mm και παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά σε θλίψη και εφελκυσμό, αγνοώντας έτσι διάφορα προβλήματα συμπεριλαμβανομένου του λυγισμού. Η απεικόνιση του συστήματος φαίνεται στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση μονοβάθμιου μη γραμμικού ταλαντωτή υπό δυναμική φόρτιση.

4.1.2 Αριθμητική επίλυση του συστήματος

Μαθηματικά, η σχέση που πρέπει να επιλυθεί είναι η μη γραμμική εξίσωση κίνησης του ταλαντωτή

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f_s = -m\ddot{u}_g$$

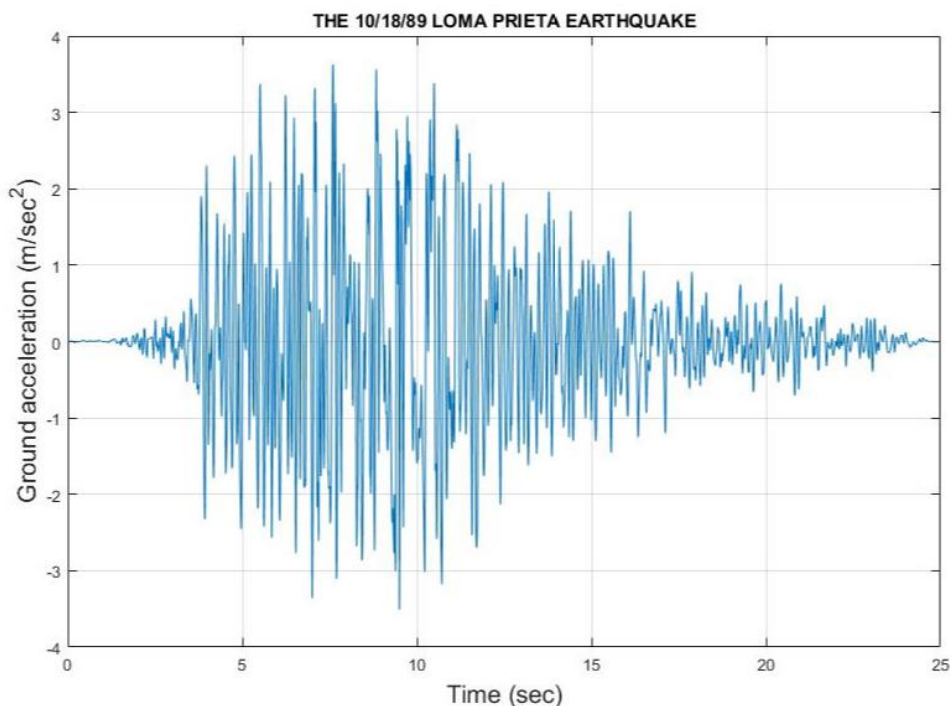
όπου m η μάζα του συστήματος, c η ιξώδης απόσβεση ($c = 2m\xi\omega$, ω η συχνότητα ταλάντωσης), f_s η δύναμη επαναφοράς του στοιχείου και \ddot{u}_g η εδαφική επιτάχυνση βάσει της οποίας ταλαντώνεται το σύστημα. Η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να λυθεί μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας που συσχετίζει τη μέθοδο Newton-Raphson με μία αριθμητική μέθοδο που προσομοιώνει την απόκριση ενός μονοβάθμιου συστήματος από άποψη μετακινήσεων, ταχυτήτων και επιταχύνσεων.

Όλα τα παραπάνω έχουν διατυπωθεί σε μία σειρά από αλγόριθμους μεταξύ των οποίων υπάρχει αλληλουχία και οι οποίοι έχουν γραφεί στα προγραμματιστικά περιβάλλοντα του MatLab και του OpenSees. Οι αλγόριθμοι δεν προσομοιάζουν βέβαια μόνο τη συμπεριφορά ενός υπερελαστικού υλικού, αλλά και του κοινού χάλυβα (διγραμμικό μοντέλο) σύμφωνα με τα αποτελέσματα του οποίου θα γίνουν οι όποιες συγκρίσεις.

4.1.3 Παρουσίαση των δεδομένων και αποτελεσμάτων των αριθμητικών δοκιμών

Η δύναμη διαρροής των δύο υλικών από τα οποία αποτελείται ο μονοβάθμιος ταλαντωτής κατά περίπτωση θεωρείται ως ένα ποσοστό του συνολικού βάρους της κατασκευής και η κράτυση που παρουσιάζουν τα δύο υλικά είναι κοινή και ίση με 0,001. Επίσης, το σύρμα Νιτινόλης έχει συντελεστή διάχυσης ενέργειας $\beta=0,5$. Ο συντελεστής β πολλαπλασιαζόμενος με τη δύναμη διαρροής, ορίζει την ενέργεια που θα διαχυθεί και όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο περισσότερη ενέργεια διαχέεται. Από πειράματα που έχουν διεξαχθεί έχει προκύψει ό,τι ο συντελεστής β λαμβάνει στις περισσότερες των περιπτώσεων, εξαιτίας καλής σύγκλισης μεταξύ πραγματικής και εξιδανικευμένης συμπεριφοράς των SMAs, την τιμή 0,5, ως εκ τούτου και στη δική μας.

Από καταγραφές 30 σεισμών επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα 1 σεισμικής καταγραφής. Άλλωστε, είναι περιττό να παρουσιαστούν οι αναλύσεις από περισσότερες καταγραφές. Το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού που επιλέχθηκε φαίνεται στην εικόνα 4.2 και αναφέρεται στο σεισμό που έπληξε την Καλιφόρνια στις 18 Οκτωβρίου (τοπική ημερομηνία: 17 Οκτωβρίου) του 1989 και οι συνέπειες του οποίου ήταν 63 άνθρωποι να χάσουν τη ζωή τους και 3757 να τραυματιστούν. Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίστηκε 7km Νότια της περιοχής Loma Prieta.



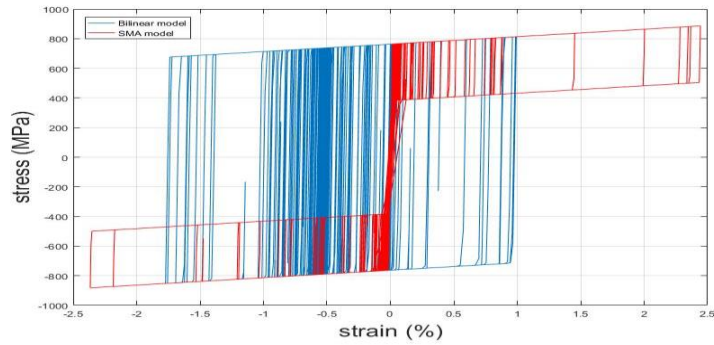
Εικόνα 4.2: Επιταχυνσιόγραφο σεισμού που συνέβη στην περιοχή Loma Prieta στις 18/10/1989

Για την εν λόγω σεισμική καταγραφή και για υποδιπλασιασμό της έντασης του επιταχυνσιογραφήματος έγιναν δυναμικές αναλύσεις του μονοβάθμιου ταλαντωτή για τις παρακάτω περιπτώσεις:

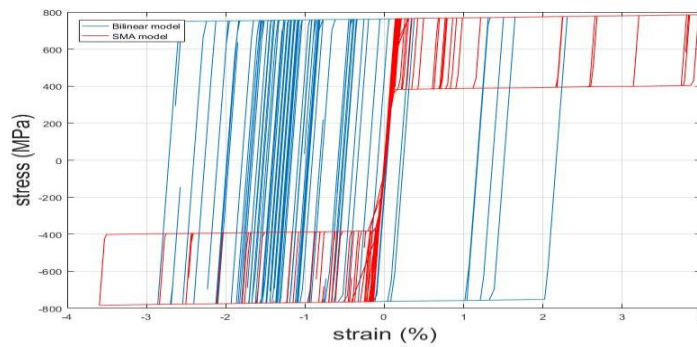
Δύναμη διαρροής F_y (ποσοστό του συνολικού βάρους της κατασκευής)	Ιδιοπερίοδος T κατασκευής (sec)			
0,4	0,1	0,3	0,6	1,2
0,6	0,1	0,3	0,6	1,2

Εικόνα 4.3: Δεδομένα περιπτώσεων δυναμικών αναλύσεων

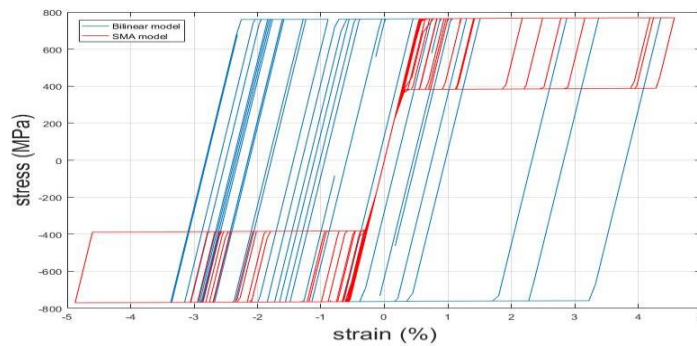
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των περιπτώσεων αυτών, δηλαδή τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων και χρονοϊστοριών μετακίνησης. Απεικονίζονται με τη σειρά, πρώτα τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων που προέκυψαν από το πραγματικό επιταχυνσιόγραφο, για $f_y=0,6$ και για όλες τις ιδιοπεριόδους της κατασκευής, ξεκινώντας από την πιο δύσκαμπτη κατασκευή ($T=0,1$ sec, πολύ δύσκαμπτη κατασκευή) και πηγαίνοντας στην πιο εύκαμπτη κατασκευή ($T=1,2$ sec, πολύ εύκαμπτη κατασκευή), και κατόπιν το ίδιο γίνεται για $f_y=0,4$. Ακολούθως, απεικονίζονται τηρώντας την ίδια σειρά οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες μετακινήσεων. Τέλος, γίνεται και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για υποδιπλασιασμό των τιμών του επιταχυνσιογραφήματος.



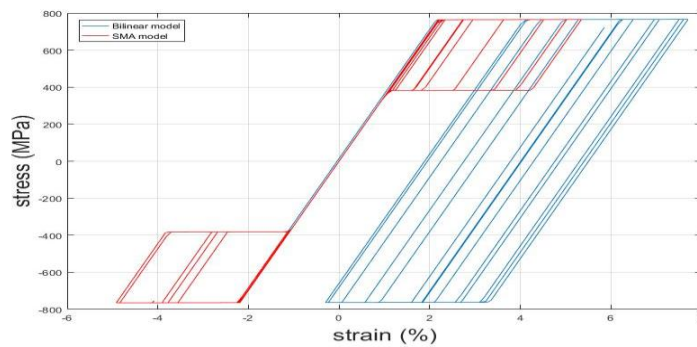
Εικόνα 4.4: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,6$, $T=0,1s$



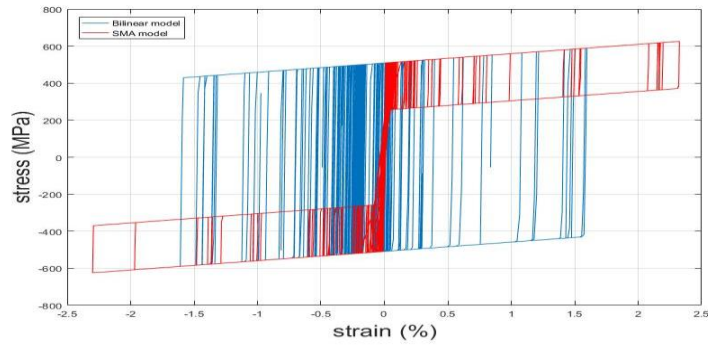
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,6$, $T=0,3s$



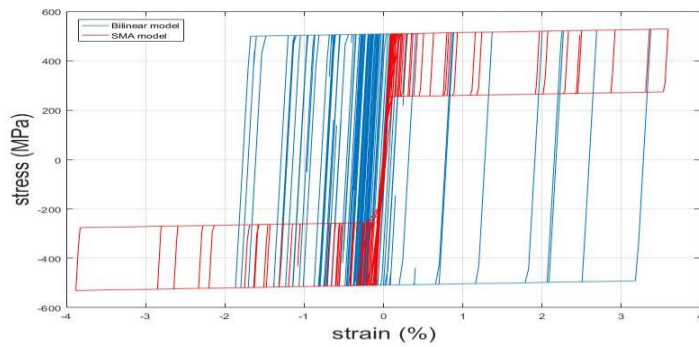
Εικόνα 4.6: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,6$, $T=0,6s$



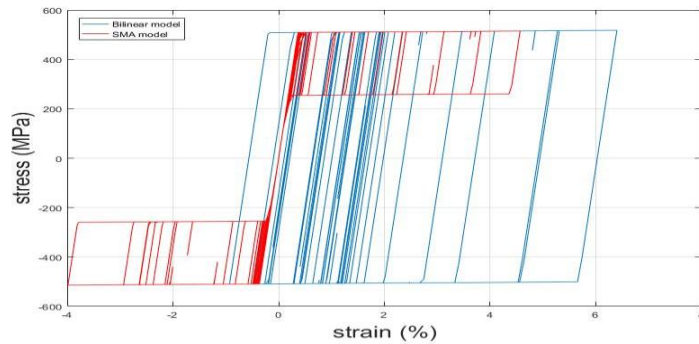
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,6$, $T=1,2s$



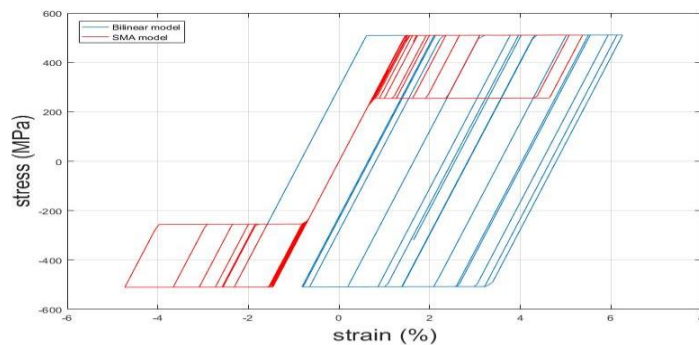
Εικόνα 4.8: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,4$, $T=0,1s$



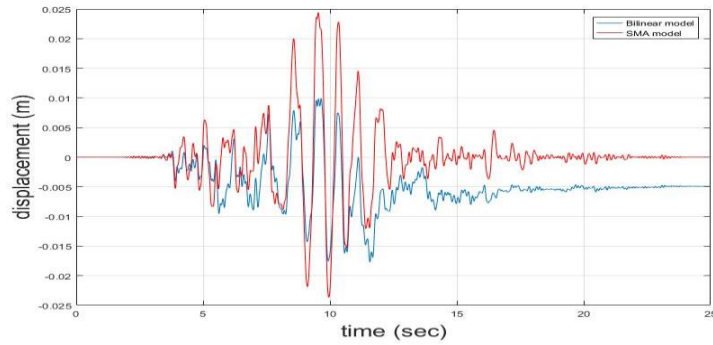
Εικόνα 4.9: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,4$, $T=0,3s$



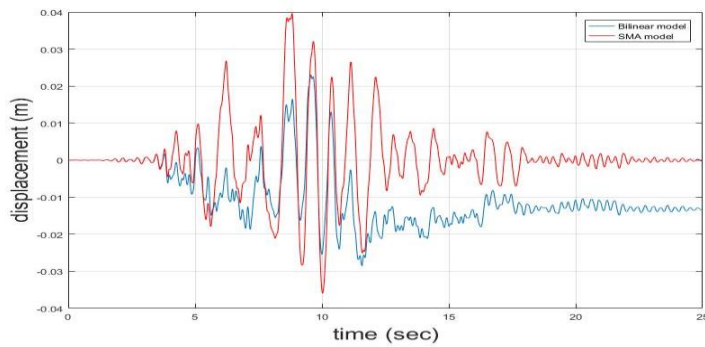
Εικόνα 4.10: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,4$, $T=0,6s$



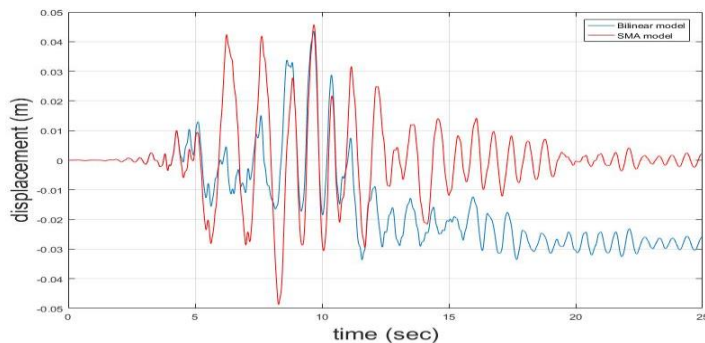
Εικόνα 4.11: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,4$, $T=1,2s$



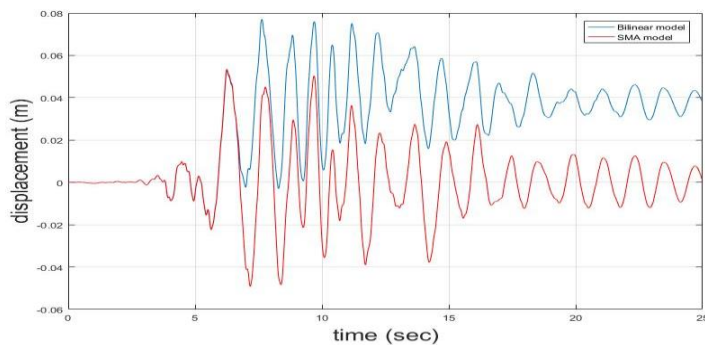
Εικόνα 4.12: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,6$, $T=0,1s$



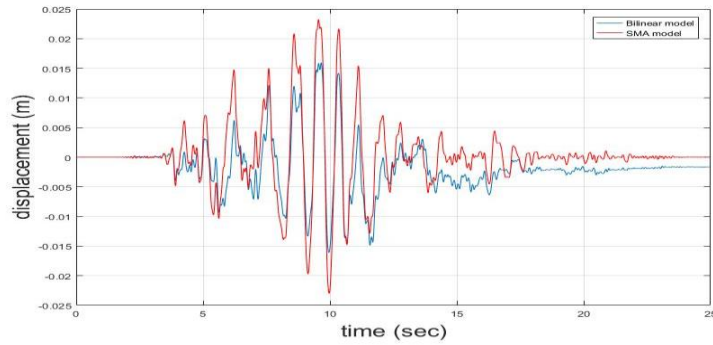
Εικόνα 4.13: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,6$, $T=0,3s$



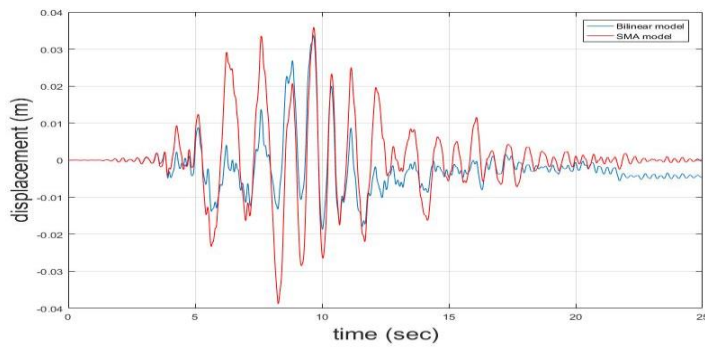
Εικόνα 4.14: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,6$, $T=0,6s$



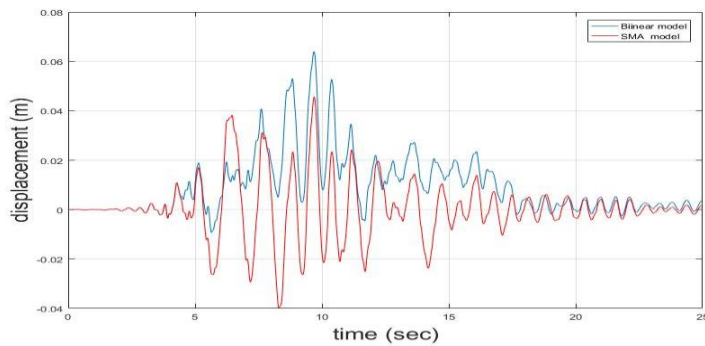
Εικόνα 4.15: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,6$, $T=1,2s$



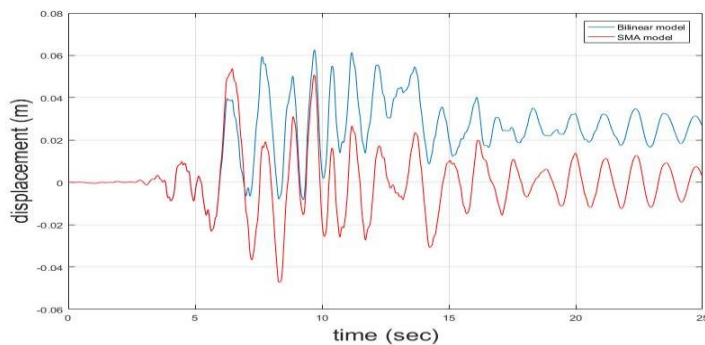
Εικόνα 4.16: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,4$, $T=0,1s$



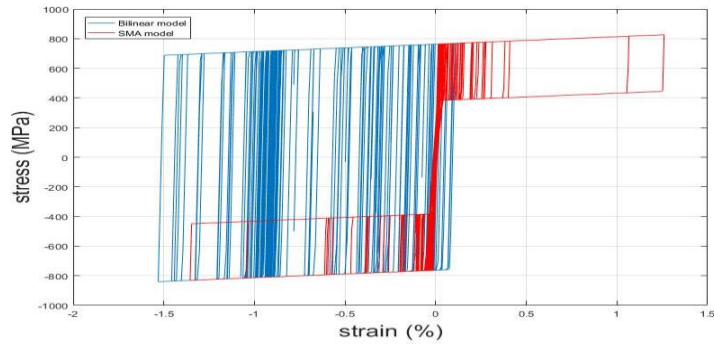
Εικόνα 4.17: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,4$, $T=0,3s$



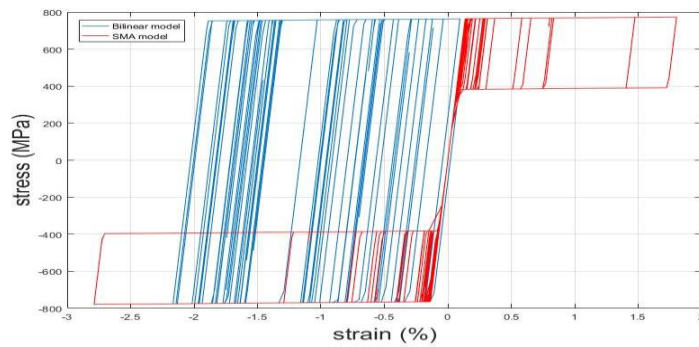
Εικόνα 4.18: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,4$, $T=0,6s$



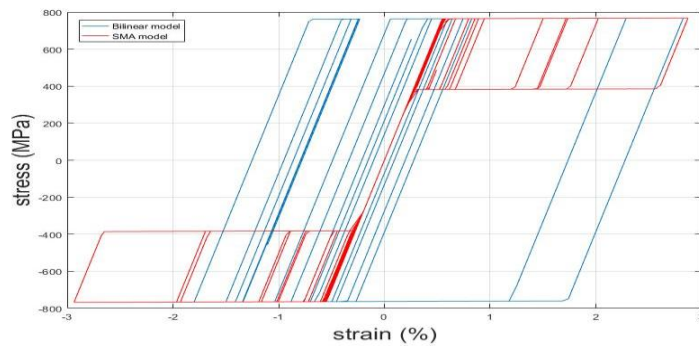
Εικόνα 4.19: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για πραγματικό $\ddot{u}_g(t)-t$, $f_y=0,6$, $T=1,2s$



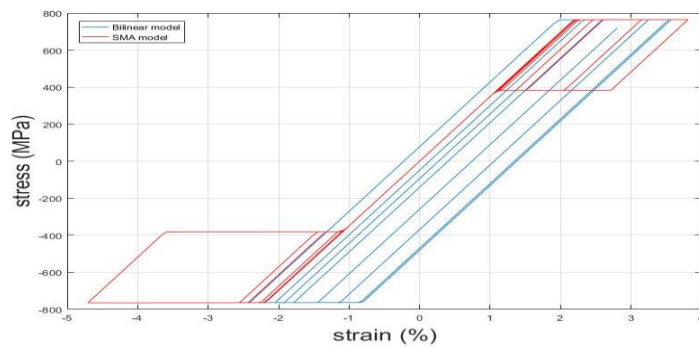
Εικόνα 4.20: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,6$, $T=0,1s$



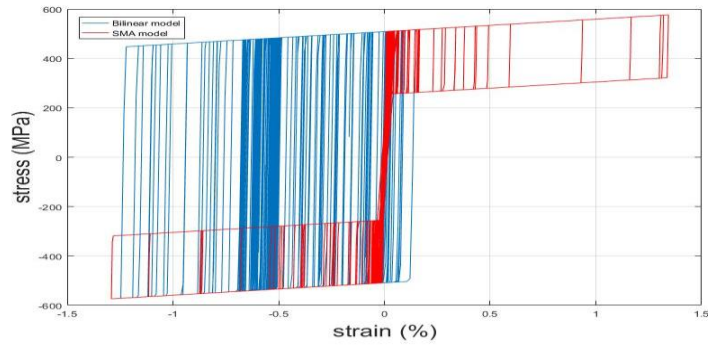
Εικόνα 4.21: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,6$, $T=0,3s$



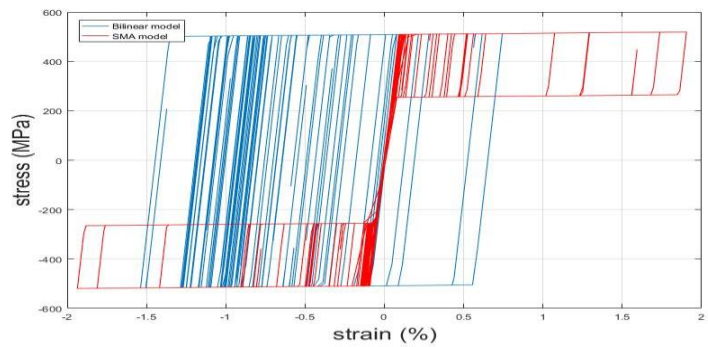
Εικόνα 4.22: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,6$, $T=0,6s$



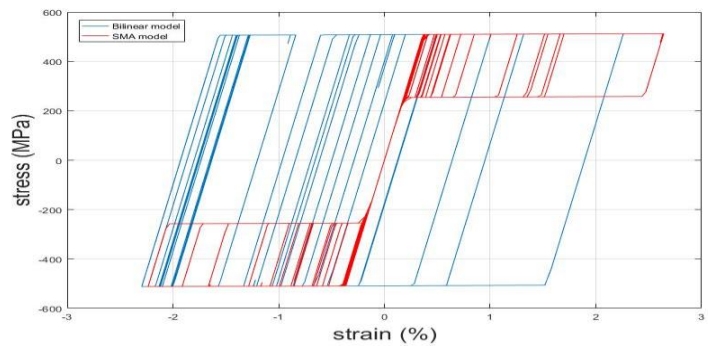
Εικόνα 4.23: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,6$, $T=1,2s$



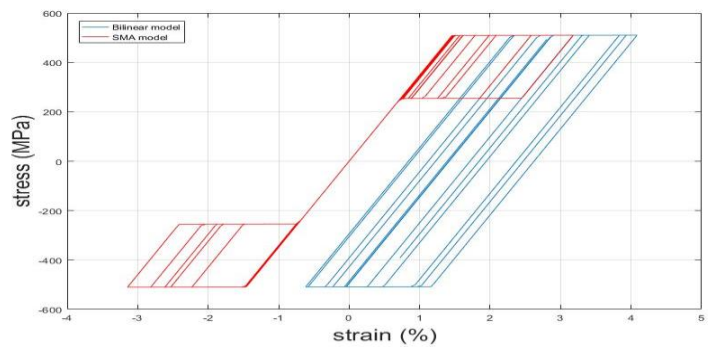
Εικόνα 4.24: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,4$, $T=0,1s$



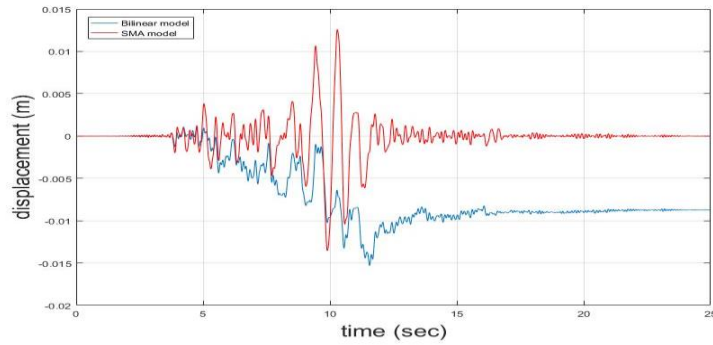
Εικόνα 4.25: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,4$, $T=0,3s$



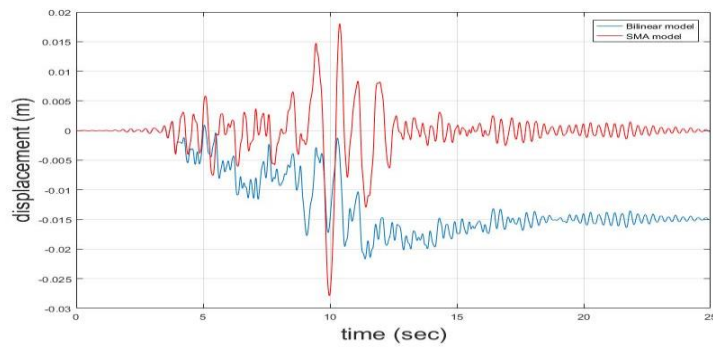
Εικόνα 4.26: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,4$, $T=0,6s$



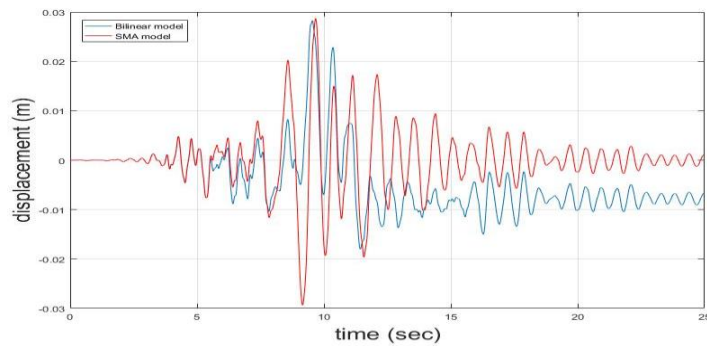
Εικόνα 4.27: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,4$, $T=1,2s$



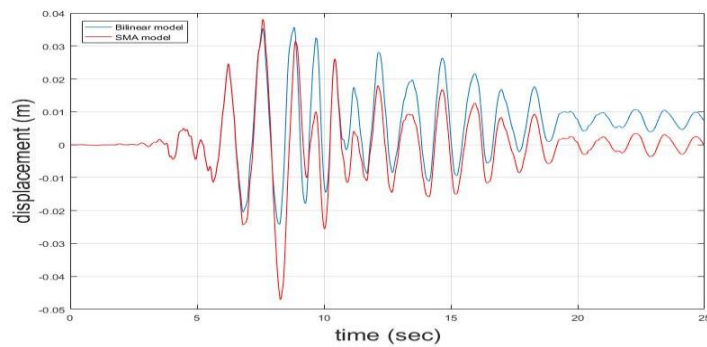
Εικόνα 4.28: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,6$, $T=0,1s$



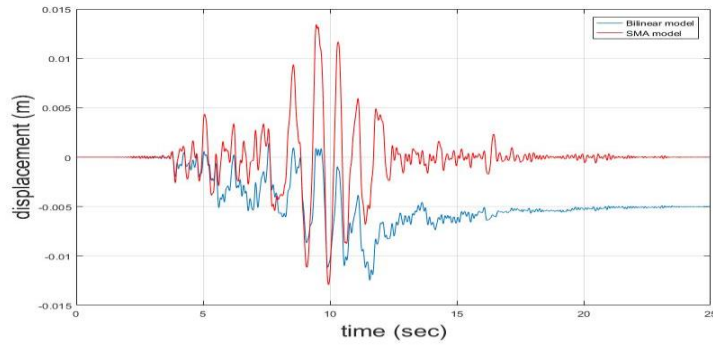
Εικόνα 4.29: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,6$, $T=0,3s$



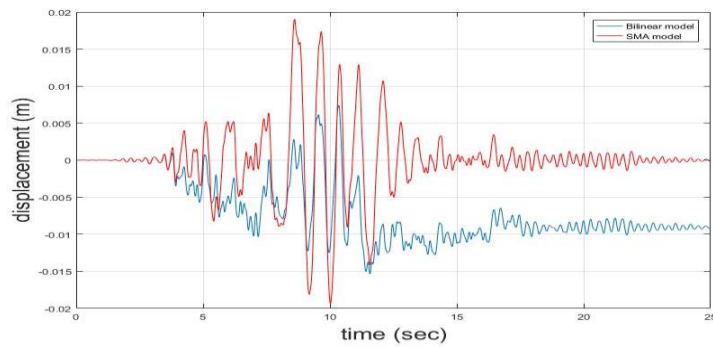
Εικόνα 4.30: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,6$, $T=0,6s$



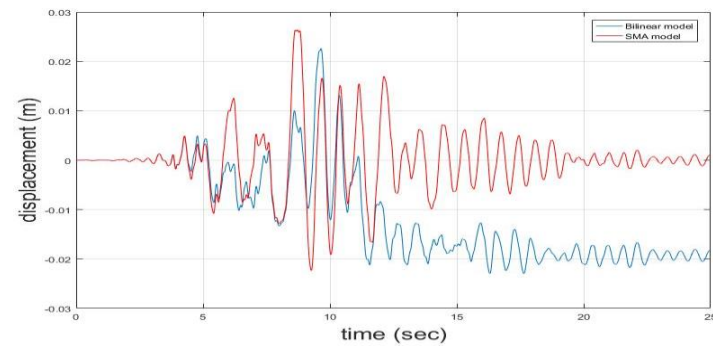
Εικόνα 4.31: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,6$, $T=1,2s$



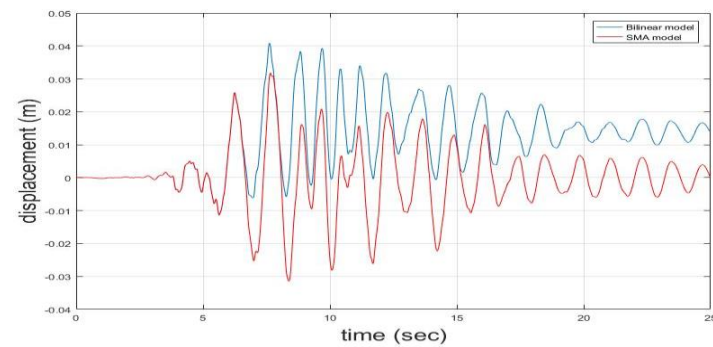
Εικόνα 4.32: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,4$, $T=0,1s$



Εικόνα 4.33: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,4$, $T=0,3s$



Εικόνα 4.34: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,4$, $T=0,6s$



Εικόνα 4.35: Χρονοϊστορία μετακινήσεων για $0,5*(\ddot{u}_g(t)-t)$, $f_y=0,4$, $T=1,2s$

4.1.4 Συμπεράσματα από την ανάλυση του μονοβάθμιου ταλαντωτή για τη χρήση «έξυπνων» υλικών

Από τη δυναμική ανάλυση του μονοβάθμιου ταλαντωτή, η οποία προηγήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, και από τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων και μετακίνησης-χρόνου που προέκυψαν για αυτόν, διεξήχθησαν σημαντικά αποτελέσματα, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

Καταρχάς, από τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων είναι εμφανές, ό,τι για σταθερή δύναμη διαρροής και για αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής, οι παραμορφώσεις και άρα οι μετακινήσεις της κατασκευής αυξάνονται, εκτός και εάν η κατασκευή είναι πολύ εύκαμπτη οπότε και ανήκει στο φθίνοντα κλάδο της φασματικής επιτάχυνσης και αναπτύσσει μικρότερες επιταχύνσεις. Το συμπέρασμα αυτό είναι απόλυτα λογικό και αναμενόμενο αν σκεφτεί κανείς, ότι τυχόν αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής συνεπάγεται ό,τι η δυσκαμψία έχει μειωθεί εφόσον η μάζα παραμένει σταθερή. Κατέπεκταση, η αντίσταση της κατασκευής σε σεισμική διέγερση μειώνεται, επομένως οι επαναφέρουσες δυνάμεις δεν είναι τόσο ισχυρές και οι μετακινήσεις μεγεθύνονται.

Ειδικότερα, σε επίπεδο σύγκρισης των δύο υλικών, του κοινού χάλυβα και της Νιτινόλης, προκύπτει το εξής αξιοσημείωτο συμπέρασμα. Εξαιρουμένου των πολύ δύσκαμπτων κατασκευών, αυτών δηλαδή που η ιδιοπερίοδός τους τείνει στο μηδέν, (στις περιπτώσεις μας ο ταλαντωτής με ιδιοπερίοδο 0,1 sec), στις υπόλοιπες παρατηρείται ό,τι ο μονοβάθμιος ταλαντωτής αποτελούμενος από υπερελαστικό σύρμα Νιτινόλης παρουσιάζει τελικώς μηδενικές παραμένουσες παραμορφώσεις σε οποιαδήποτε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ακόμα και εάν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή είναι πολύ μεγάλες και ο φορέας πολύ εύκαμπτος (στις περιπτώσεις μας ο ταλαντωτής με ιδιοπερίοδο ίση με 1,2 sec). Εν αντιθέτως, ο ταλαντωτής από κοινό χάλυβα παρουσιάζει εμφανείς μόνιμες παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα όμως, πρέπει να σημειωθεί ό,τι η κατασκευή από σύρμα Νιτινόλης αναπτύσσει μεγαλύτερες δυνάμεις από την αντίστοιχη από δομικό χάλυβα, αλλά και οι μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα είναι μεγαλύτερες.

Παρόλα αυτά, το τελικό αποτέλεσμα μηδενικής παραμένουσας παραμόρφωσης και η αναστρεψιμότητα μεγάλων παραμορφώσεων ακόμα και της τάξεως του 7,5% με τη χρήση των shape memory alloys κάνουν τα υλικά αυτά τόσο ξεχωριστά για τις κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού.

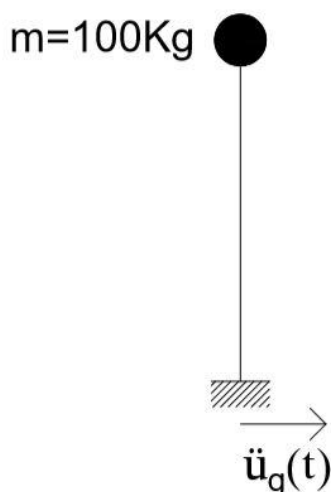
4.2 Ανάλυση μονοβάθμιου συστήματος από υπερελαστικό υλικό

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται η δυναμική συμπεριφορά ενός μονοβάθμιου συστήματος το οποίο κάθε φορά αποτελείται από υπερελαστικό υλικό με διαφορετική δυνατότητα διάχυσης ενέργειας.

4.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονοβάθμιου συστήματος

Το συγκεκριμένο μονοβάθμιο σύστημα είναι ένας απλός μη γραμμικός ταλαντωτής. Ο εν λόγω ταλαντωτής μπορεί να παραμορφώνεται μονο-αξονικά και στο ελεύθερο άκρο του φέρει μάζα 100 κιλών (kg). Η μάζα αυτή συνδέεται με τη δεσμευμένη άκρη του ταλαντωτή με ένα υπερελαστικό στοιχείο το οποίο έχει μήκος 1000 χιλιοστά (mm) και διάμετρο ίση με 1 χιλιοστό (mm). Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σύρμα Νιτινόλης. Το μονοβάθμιο σύστημα έχει συντελεστή απόσβεσης $\xi=5\%$ και γίνεται η απλοποιημένη αλλά πολύ συχνή υπόθεση, ό,τι το μέλος από Νιτινόλη παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά σε θλίψη και εφελκυσμό, αγνοώντας έτσι διάφορα προβλήματα συμπεριλαμβανομένου του λυγισμού. Επίσης, η ιδιοπερίοδος του συστήματος είναι ίση με $T=0,317$ sec.

Τα είδη κραμάτων μνήμης σχήματος που χρησιμοποιούνται έχουν ίδια τάση όταν ξεκινάει ο μετασχηματισμός από ωστενίτη σε μαρτενσίτη και διαφορετική τάση ολοκλήρωσης του μετασχηματισμού από μαρτενσίτη σε ωστενίτη. Και οι δύο αυτοί κλάδοι μετασχηματισμού παρουσιάζουν μηδενική κράτυνση. Πιο ειδικά, μελετώνται shape memory alloys με τάση μετασχηματισμού από ωστενίτη σε μαρτενσίτη 500 MPa και με τάση αντίστροφου μετασχηματισμού 100 MPa και 300 MPa (SMA 100-500, SMA 300-500) και μέγιστη δυνατή παραμόρφωση $\varepsilon_L = 8\%$. Η απεικόνιση του ταλαντωτή φαίνεται στην εικόνα 4.36.



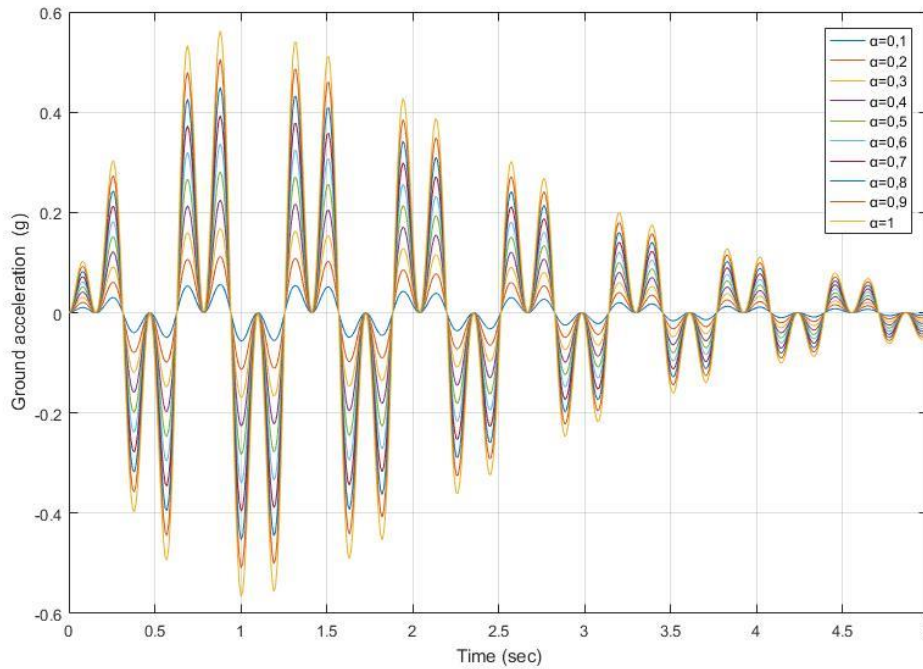
Εικόνα 4.36: Απεικόνιση μονοβάθμιου μη γραμμικού ταλαντωτή

4.2.2 Φόρτιση του μονοβάθμιου συστήματος

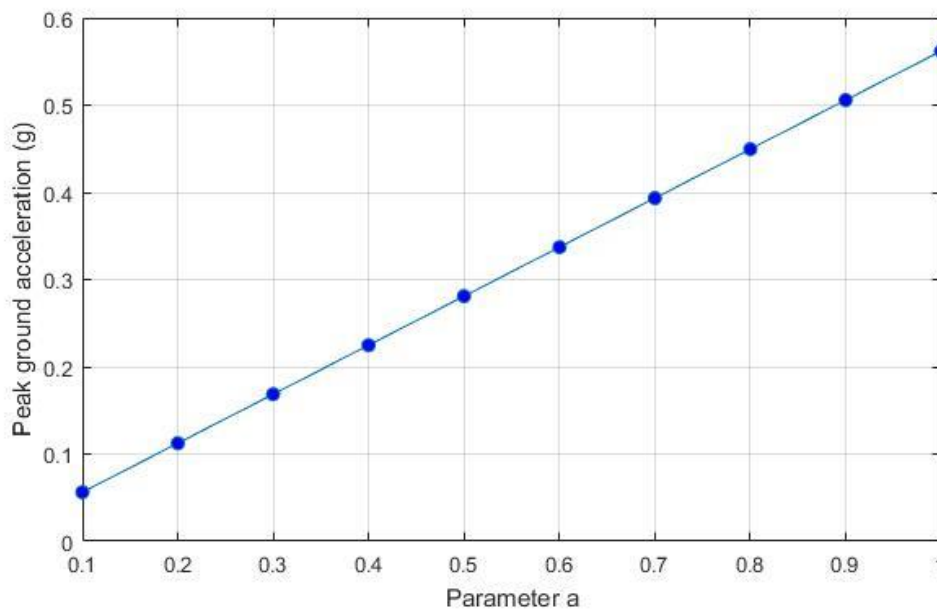
Η φόρτιση του μονοβάθμιου ταλαντωτή που αντιπροσωπεύει και τη σεισμική διέγερση είναι μια εκθετική ημιτονοειδής φόρτιση με μεταβλητό πλάτος φορτίου. Συγκεκριμένα, η εξίσωση κίνησης του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$\ddot{u}_g = ag(\sin\omega_1 t + \sin\omega_2 t)\text{exp}(-\lambda t)$$

με ιδιοσυχνότητα $\omega_1=10$ rad/sec, $\omega_2=30$ rad/sec, $\lambda=5/T$ και $T=5$ seconds. Η παράμετρος a είναι μία αδιάστατη παράμετρος η οποία παίρνει τιμές από 0,1 μέχρι 1 με επαυξητικό βήμα 0,1. Το διάγραμμα της επιτάχυνσης εδάφους για όλες τις τιμές της παραμέτρου a και οι τιμές της παραμέτρου a συναρτήσεως των αντίστοιχων μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων απεικονίζονται ακολούθως,

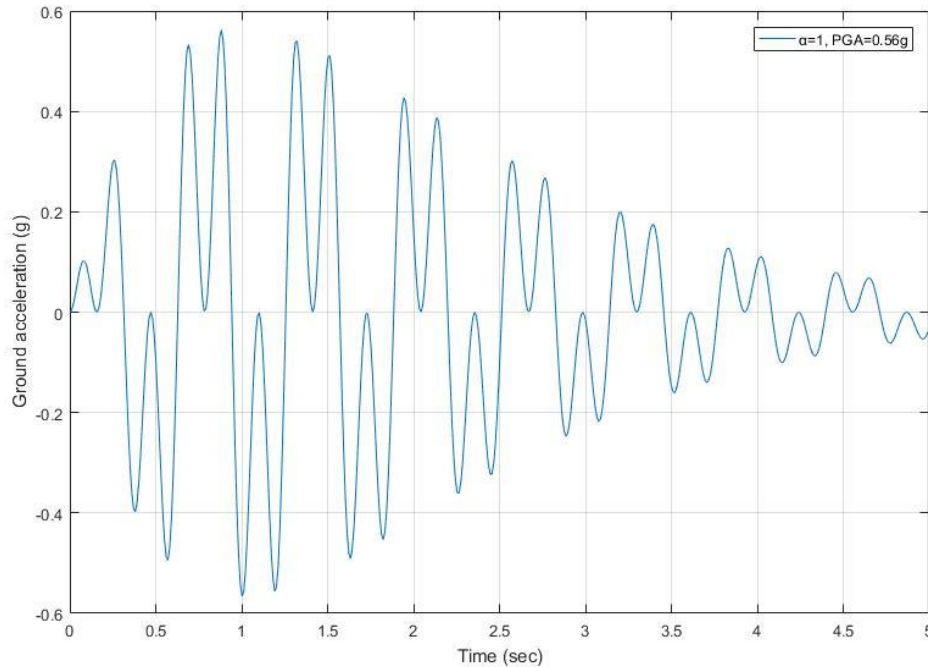


Εικόνα 4.37: Χρονοϊστορία εδαφικής επιτάχυνσης για όλες τις τιμές της παραμέτρου a .



Εικόνα 4.38: Διάγραμμα μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων συναρτήσεως όλων των αντίστοιχων τιμών της παραμέτρου a .

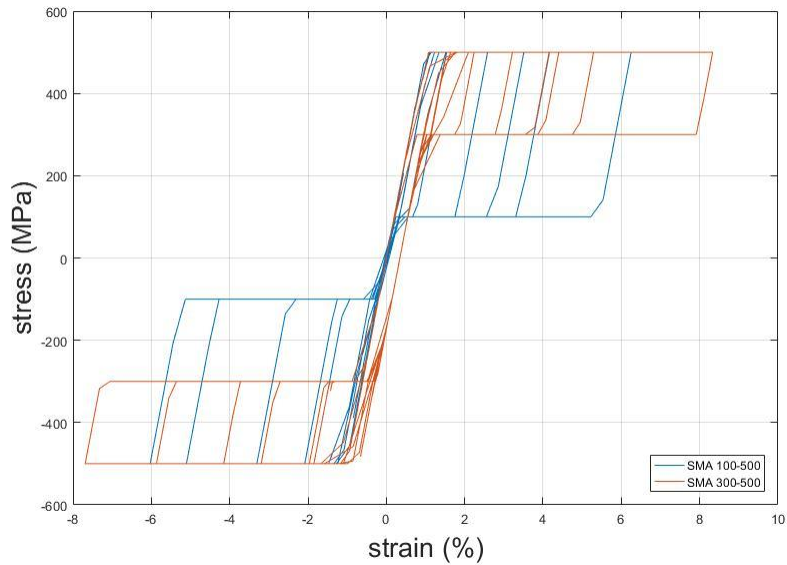
Γίνεται δυναμική ανάλυση του μονοβάθμιου ταλαντωτή για τη χρονοϊστορία εδαφικής επιτάχυνσης που αντιστοιχεί σε τιμή της παραμέτρου $\alpha=1$ με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση με $0,56g$.



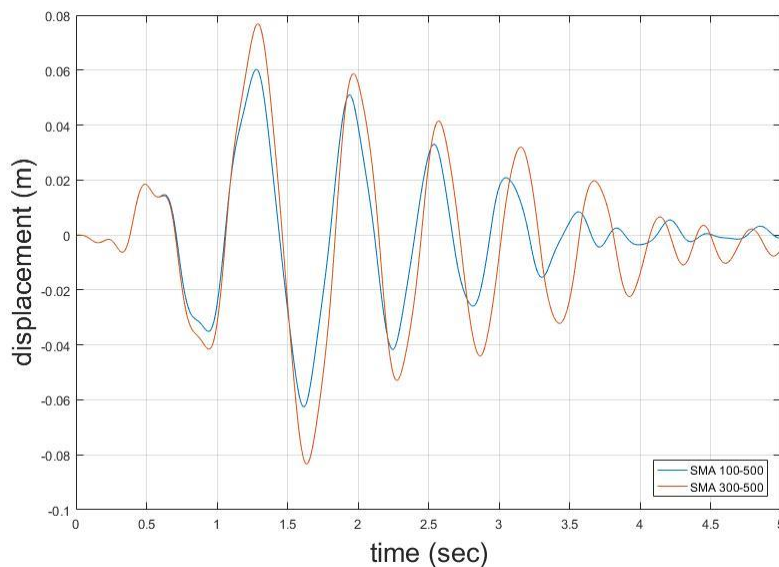
Εικόνα 4.39: Χρονοϊστορία εδαφικής επιτάχυνσης για τιμή της παραμέτρου $\alpha=1$

4.2.3 Αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης του μονοβάθμιου συστήματος

Από τις δυναμικές αναλύσεις που έγιναν για τον μονοβάθμιο ταλαντωτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, τα οποία είναι τα ακόλουθα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων και χρονοϊστοριών μετακίνησης.



Εικόνα 4.40: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του μονοβάθμιου ταλαντωτή για εκθετική-ημιτονοειδή φόρτιση με $\alpha=1$



Εικόνα 4.41: Χρονοϊστορία μετακίνησης του μονοβάθμιου ταλαντωτή για εκθετική-ημιτονοειδή φόρτιση με $\alpha=1$

4.2.4 Συμπεράσματα από τη δυναμική ανάλυση του μονοβάθμιου συστήματος

Από τη δυναμική ανάλυση του μονοβάθμιου ταλαντωτή προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το μονοβάθμιο σύστημα σε χαμηλές φορτίσεις δεν έχει παραμένουσα παραμόρφωση και η συμπεριφορά του είναι γραμμική, αφού δεν έχει ξεκινήσει η φάση του μετασχηματισμού από ωστενίτη σε μαρτενσίτη.

- Όσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη δυνατή παραμόρφωση που μπορεί να αναλάβει ένα κράμα μνήμης σχήματος, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μετατόπιση του φορέα.
- Τα shape memory alloys που έχουν μεγαλύτερη διασπορά ενέργειας, δηλαδή εν προκειμένω το SMA 100-500 όπου ο μετασχηματισμός από μαρτενσίτη σε ωστενίτη συμβαίνει σε μικρότερη τάση, έχουν μικρότερη απαίτηση σε πλαστιμότητα. Αυτό συμβαίνει, διότι εξαιτίας αυτού του μηχανισμού διασποράς ενέργειας που τα χαρακτηρίζει, μεταβιβάζονται στην κατασκευή μικρότερες δυνάμεις και άρα και οι παραμορφώσεις της κατασκευής είναι μικρότερες.
- Τα κράματα μνήμης σχήματος είναι σίγουρα αποτελεσματικά είτε σε υψηλές είτε σε χαμηλές φορτίσεις. Σε χαμηλές φορτίσεις όλη η παραμόρφωση του φορέα είναι αναστρέψιμη, ενώ σε υψηλές φορτίσεις η συμπεριφορά του υλικού είναι όμοια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

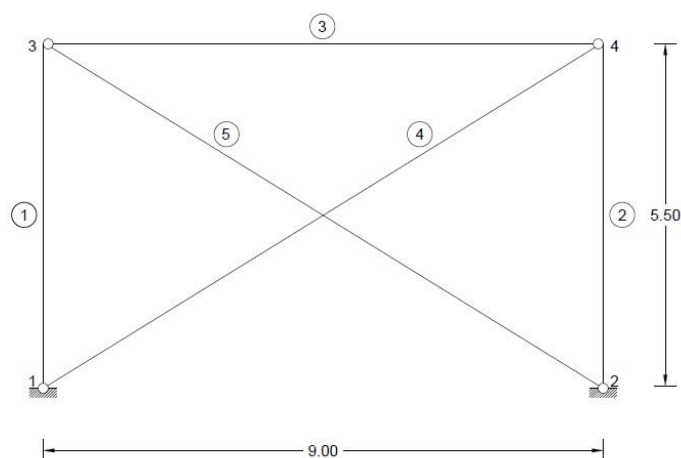
ΑΝΑΛΥΣΗ PUSHOVER ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΤΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΔΙΑΓΩΝΙΟΥΣ ΧΙΑΣΤΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΑΠΟ ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ Ή ΑΠΟ ΔΟΜΙΚΟ ΧΑΛΥΒΑ

5.1 Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς επίπεδου μονώροφου πλαισίου με διαγώνιους χιαστί συνδέσμους από Shape Memory Alloys ή από Δομικό Χάλυβα

Στην παρούσα ενότητα μελετάται από δυναμικής απόψης ένα μονώροφο πλαίσιο που φέρει διαγώνιους χιαστί συνδέσμους. Τα διαγώνια στοιχεία του πλαισίου αποτελούνται είτε από shape memory alloys είτε από κοινό δομικό χάλυβα και γίνονται διάφορες υποθέσεις για τις διατομές τους. Η έρευνα αυτή γίνεται για να αξιολογηθεί η επίδραση της χρήσης των «έξυπνων» υλικών στις κατασκευές του Πολιτικού Μηχανικού.

5.1.1 Περιγραφή του μονώροφου πλαισίου

Το επίπεδο πλαίσιο του οποίου γίνεται η μελέτη σε αυτό το κεφάλαιο είναι μία μεταλλική συμμετρική μονώροφη κατασκευή, συγκεκριμένα ένας πλαισιωτός φορέας που φέρει διαγώνιους χιαστί συνδέσμους. Η εν λόγω κατασκευή της οποίας ο σχεδιασμός έχει εξετασθεί και υλοποιηθεί από άλλους μελετητές, έχει άνοιγμα $L=9.0$ m, ύψος ορόφου $H_1=5.50$ m και στο ζύγωμα φέρει ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο ίσο με 20 kN/m. Επιπλέον, εξασφαλίζεται η διαφραγματική λειτουργία του πλαισίου, ενώ σκεπτόμενοι ό,τι ο φορέας είναι συμμετρικός και η σεισμική μάζα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, δε λαμβάνεται υπόψη η στρέψη από τις εδαφικές διεγέρσεις. Τα διαγώνια μέλη της κατασκευής, είναι ελκυστήρες-θλιπτήρες και είναι αρθρωτά συνδεδεμένα με τη δοκό. Επίσης, οι συνδέσεις των υποστυλωμάτων στη δοκό είναι αρθρωτές. Κατά συνέπεια, οι ροπές κάμψης που μεταβιβάζονται μεταξύ των υποστυλωμάτων και της δοκού είναι πολύ μικρές και τα μέλη αυτά σχεδιάζονται ώστε να αναλαμβάνουν κυρίως αξονικά φορτία. Οι συνθήκες στήριξης της κατασκευής στο έδαφος είναι αρθρώσεις και χωρίς τα διαγώνια μέλη η κατασκευή είναι μηχανισμός. Με τα διαγώνια μέλη, η κατασκευή αποτελεί πλέον έναν υπερστατικό φορέα. Ο φορέας φαίνεται στην εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση του επίπεδου μονώροφου πλαισίου

Αναλυτικότερα, τα υποστυλώματα της κατασκευής είναι διατομής W14×132 και αποτελούνται από κοινό χάλυβα ASTM A992. Ο συγκεκριμένος χάλυβας έχει τάση διαρροής 345 MPa και γίνεται η υπόθεση ό,τι παρουσιάζει κράτυνση ίση με 0,003. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι ίσο με $E_s=210$ Gpa. Η δοκός είναι διατομής W14×38 και αποτελείται επίσης από δομικό χάλυβα ASTM A992 με ίδια κράτυνση. Τα χαρακτηριστικά των παραπάνω διατομών (εμβαδόν και ύψος διατομής, πάχος κορμού, πάχος και πλάτος πέλματος) φαίνονται στον πίνακα 5.2.

Element	Designation	Area A cm ²	Depth D cm	Web	Flange	
				Thickness t _w cm	Width b _f cm	Thickness t _f cm
Columns	W14x132	98.552	37.236	1.638	37.402	2.616
Beans	W14x38	28.448	35.814	0.787	17.196	1.308

Πίνακας 5.2: Διατομές υποστυλωμάτων και δοκών του μονώροφου κτηρίου

Για τους χιαστί συνδέσμους τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στον πίνακα 5.3.

Floor	Διατομή ελκυστήρων (mm ²)					
	Ίδια διατομή A		Ίδια διατομή A/2		Ίδια δυστένεια	
	Steel	SMA	Steel	SMA	Steel	SMA
1	2276,3	2276,3	1138,15	1138,15	2276,3	504,1

Πίνακας 5.3: Εμβαδόν διατομής των χιαστί συνδέσμων

Γίνονται τρία διαφορετικά σενάρια για το εμβαδόν διατομής τους και σε κάθε σενάριο δύο διαφορετικές υποθέσεις για το υλικό κατασκευής τους. Στη μία υπόθεση αποτελούνται από κοινό δομικό χάλυβα ίδιο με αυτόν των υποστυλωμάτων και της δοκού (ASTM A992) και στην άλλη από υλικό με μνήμη σχήματος (Shape Memory Alloy) και συγκεκριμένα από κράμα Νιτινόλης. Επίσης, τα σενάρια που εξετάστηκαν είναι ένα σενάριο όπου το εμβαδόν της διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων ανεξαρτήτως υλικού είναι σταθερό και ίσο με A, ένα σενάριο όπου το εμβαδόν διατομής είναι ίδιο και για τα δύο υλικά και ίσο με A/2 και ένα τρίτο σενάριο όπου οι ελκυστήρες στις 2 περιπτώσεις έχουν διαφορετικό εμβαδόν διατομής αλλά ίδια δυστένεια.

Στην περίπτωση όπου οι διαγώνιοι χιαστί σύνδεσμοι αποτελούνται από σύρματα νιτινόλης, το υλικό δεν τοποθετείται σε όλο το μήκος τους. Πιο ειδικά, τα σύρματα Νιτινόλης που χρησιμοποιούνται έχουν μήκος 1,05 μέτρα (m) σε κάθε χιαστί σύνδεσμο.

Ο «ενισχυμένος» χιαστί σύνδεσμος απεικονίζεται στην εικόνα 5.4(α). Όπως φαίνεται και από την εικόνα 5.4(α) το διαγώνιο στοιχείο αποτελείται από δύο μέρη. Το μέρος (1) το οποίο είναι ο πυρήνας και είναι ένας αποσβεστήρας που βασίζει τη λειτουργία του στη χρήση αυτοπροσαρμοζόμενων υλικών, δηλαδή στα καλώδια Νιτινόλης, και

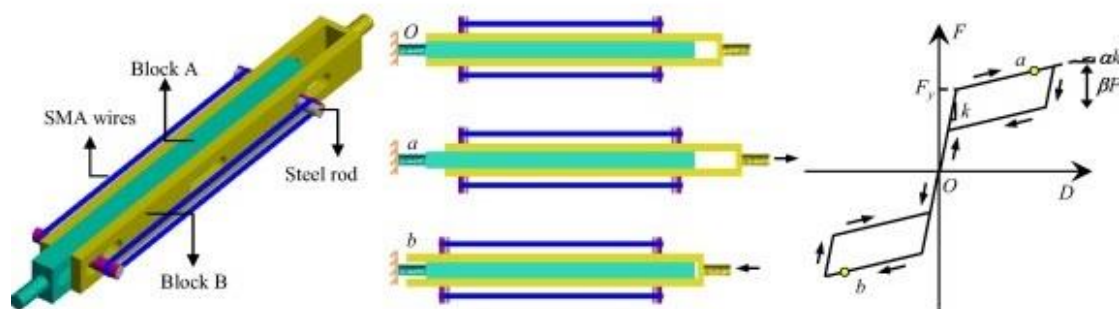
στη δυνατότητά τους να διαχέουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας και στο μέρος (2) που είναι τα τμήματα επέκτασης, τα οποία είναι δύο χαλύβδινοι σωλήνες που επεκτείνουν το στοιχείο στο επιθυμητό μήκος.

Ο μηχανισμός του αποσβεστήρα βασισμένου στη χρήση των Shape Memory Alloys φαίνεται στην εικόνα 5.4(β). Ο εν λόγω αποσβεστήρας αποτελείται από δύο χαλύβδινα τεμάχια (steel blocks) που ολισθαίνουν το ένα ενάντια στο άλλο, δύο χαλύβδινες ράβδους (steel rods) και δύο δέσμες από καλώδια Νιτινόλης περιτυλιγμένα γύρω από τις χαλύβδινες ράβδους. Εξαιτίας του μηχανισμού αυτού τα καλώδια Νιτινόλης είναι πάντα επιμηκυμένα ανεξάρτητα από το εάν ο βραχίονας είναι υπό θλίψη ή εφελκυσμό. Τυχούσα αξονική μετατόπιση κινεί τις χαλύβδινες ράβδους στις σχισμές των χαλύβδινων τεμαχίων και τεντώνει τα καλώδια από «έξυπνο» υλικό (SMA) επίσης ανεξάρτητα από το εάν ο αποσβεστήρας βρίσκεται υπό συνθήκες εφελκυσμού ή θλίψης.

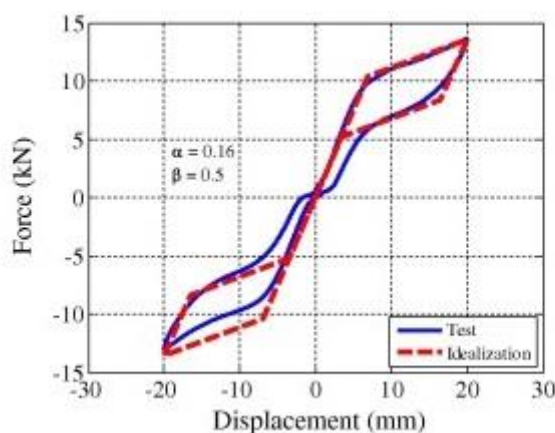
Στην εικόνα 5.4(γ) απεικονίζεται η συμπεριφορά ενός «ενισχυμένου» στοιχείου από κράματα μνήμης σχήματος σε ανακυκλική φόρτιση, όπως εκείνη προσδιορίστηκε κατόπιν πειραματικών δοκιμών και όπως εξιδανικεύθηκε και υιοθετήθηκε στις έρευνες. Η υστερητική συμπεριφορά που παρατηρείται να έχει το στοιχείο με μέτρια κατανάλωση ενέργειας και μηδενική παραμένουσα παραμόρφωση κατά την αποφόρτιση, προσομοιάζει σε μία συμπεριφορά τύπου «σημαία» και αυτή η συμπεριφορά των κραμάτων με μνήμη σχήματος υιοθετήθηκε σε ποικίλες μελέτες. Μία τέτοια συμπεριφορά τάσης καταπόνησης-παραμόρφωσης είναι δυνατό να χαρακτηριστεί με τέσσερις παραμέτρους. Αυτές είναι το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του υλικού E_{SMA} , η «τάση διαρροής» του υλικού σ_y , η παράμετρος α η οποία πολλαπλασιάζεται με το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του υλικού (E_{SMA}) ορίζει την κλίση της μετελαστικής περιοχής και ο συντελεστής απορρόφησης ενέργειας β . Οι τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν στην εικόνα 5.4(γ) και υποτέθηκαν και στην παρούσα έρευνα, χάρη στη μεγάλη σύγκλιση μεταξύ της πειραματικής και εξιδανικευμένης συμπεριφοράς σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, είναι $\alpha=0,16$, $\beta=0,5$, $E_{SMA}=46,5$ GPa και $\sigma_y=500$ MPa.



(α) Απεικόνιση του «ενισχυμένου» από κράματα μνήμης σχήματος χιαστί συνδέσμου



(β) Απεικόνιση του μηχανισμού λειτουργίας του αποσβεστήρα βασισμένου σε χρήση καλωδίων Νιτινόλης και η εξιδανικευμένη συμπεριφορά των έξυπνων υλικών σε ανακυκλική φόρτιση



(γ) Πραγματική και εξιδανικευμένη συμπεριφορά των «έξυπνων» υλικών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τιμή των παραμέτρων $\alpha=0,16$ και $\beta=0,5$. Πολύ καλή σύγκλιση

Εικόνα 5.4

Ο φορέας προσομοιάστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του OpenSees και η στατική υπερωθητική ανάλυση καθώς και η δυναμική του ανάλυση υλοποιήθηκαν επίσης μέσω του ίδιου προγράμματος. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ό,τι η μη γραμμική συμπεριφορά των δοκών και υποστυλωμάτων μοντελοποιήθηκε ορίζοντας τη συμπεριφορά του δομικού χάλυβα με τον τύπο υλικού Steel01 του OpenSees, ενώ η μη γραμμική συμπεριφορά των διαγώνιων συνδέσμων στην περίπτωση χρήσης συρμάτων Νιτινόλης μοντελοποιήθηκε και ορίστηκε μέσω του υλικού SelfCentering του OpenSees. Τέλος, έγινε χρήση και του προγράμματος Matlab.

5.1.2 Υποβολή του μονώροφου πλαισίου σε ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (Modal Pushover Analysis) και σε στατική υπερωθητική ανάλυση (Pushover Analysis)

Στην παρούσα ενότητα μελετάται η συμπεριφορά της μονώροφης κατασκευής με τη μέθοδο της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης, γνωστή και ως Pushover ανάλυση. Προτού όμως, έχει προηγηθεί ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση του φορέα

(Modal Pushover Analysis) προκειμένου να προσδιορισθούν οι δύο ιδιοπερίοδοι του για κάθε σενάριο και για κάθε υποπερίπτωση.

Στον πίνακα 5.5 φαίνεται η τιμή των ιδιοπεριόδων της κατασκευής για όλες τις υποθέσεις.

Models		T1 (sec)	T2 (sec)
1-storey	Common Steel	0.105	0.032
	SMA	0.215	0.033

(α) Ιδιοπερίοδοι της μονώροφης κατασκευής για ίδια διατομή A

Model		T1 (sec)	T2 (sec)
1-storey	Common Steel	0.15	0.03
	SMA	0.29	0.03

(β) Ιδιοπερίοδοι της μονώροφης κατασκευής για ίδια διατομή A/2

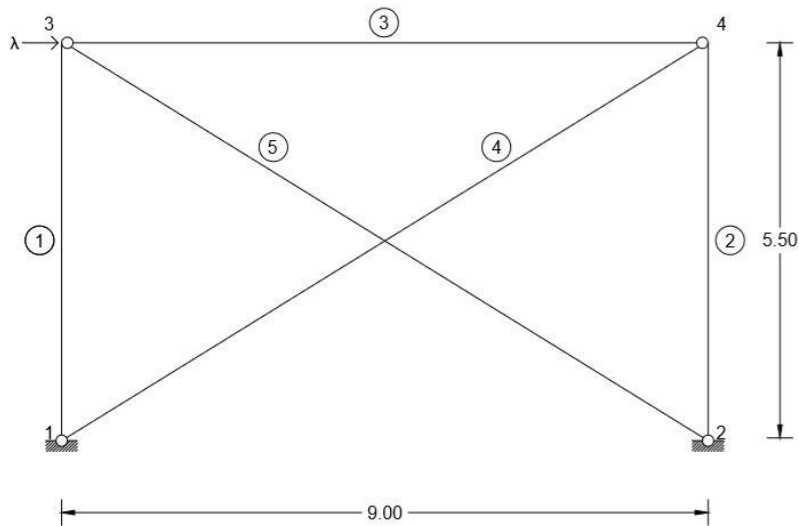
Models		T1 (sec)	T2 (sec)
1-storey	Common Steel	0.215	0.033
	SMA	0.215	0.033

(γ) Ιδιοπερίοδοι της μονώροφης κατασκευής για ίδια δυστένεια των ελκυστήρων

Πίνακας 5.5

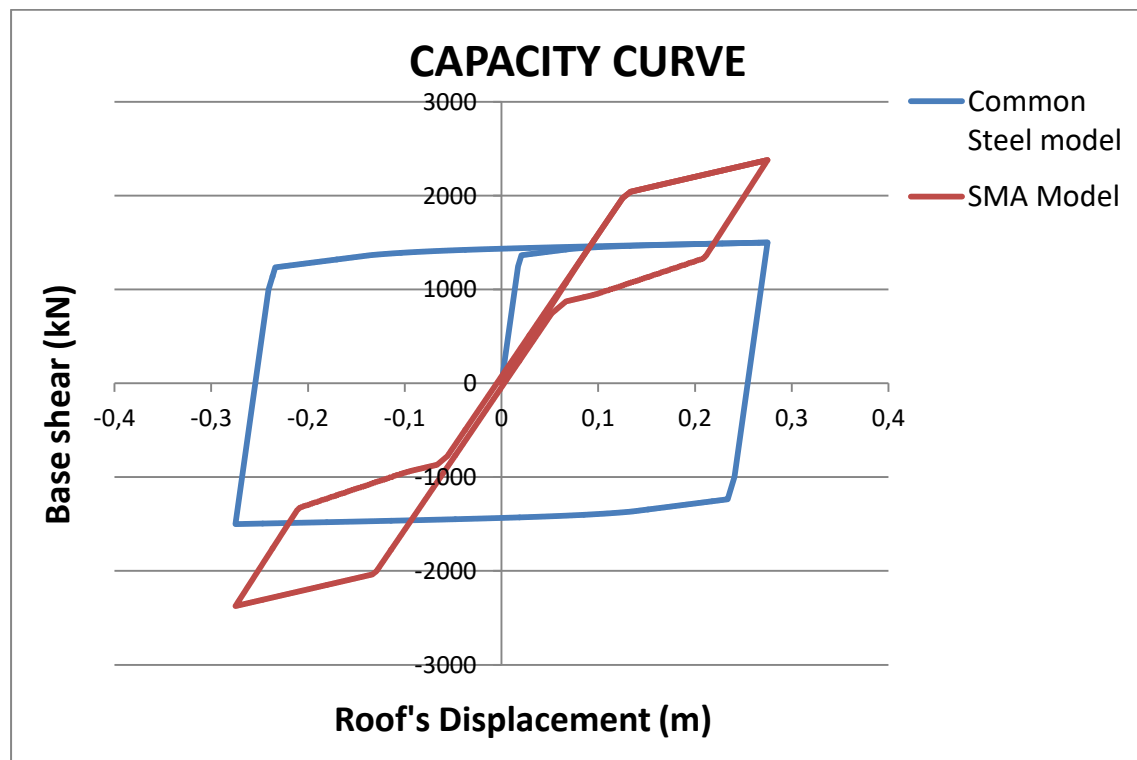
Στο σενάριο του αμετάβλητου εμβαδού διατομής, οι ιδιοπερίοδοι του πλαισίου με χρήση «έξυπνου» υλικού είναι σχεδόν διπλάσιες του αντίστοιχου με χρήση κοινού χάλυβα. Αυτό δείχνει τη μικρότερη συμβολή που προσφέρουν τα shape memory alloys στη δυσκαμψία του φορέα συγκριτικά με τον κοινό δομικό χάλυβα κάτι απολύτως λογικό και αναμενόμενο αφού το μέτρο ελαστικότητας των shape memory alloys είναι αρκετά μικρότερο από του χάλυβα (4,5 φορές μικρότερο). Στην περίπτωση της σταθερής δυστένειας οι δύο φορείς έχουν ίδια ιδιοπερίοδο, όπως και αναμένεται καθώς η συνολική τους δυσκαμψία είναι ίση.

Στην ανάλυση Pushover επιβάλλεται στον κόμβο 3 του κάθε φορέα με βήμα ανάλυσης 0,0001 οριζόντιο και επαυξητικό φορτίο προς τα δεξιά έως την τιμή που η μετακίνηση της οροφής αντιστοιχεί σε drift 5%. Κατόπιν ακολουθεί αποφόρτιση της κατασκευής και ακολούθως φόρτιση προς την αντίθετη πλευρά και ξανά αποφόρτιση και φόρτιση. Το οριζόντιο φορτίο που ασκείται στον κόμβο 3 ισούται κάθε στιγμή με την τέμνουσα βάσης της κατασκευής. Η φόρτιση του φορέα φαίνεται στην εικόνα 5.6.

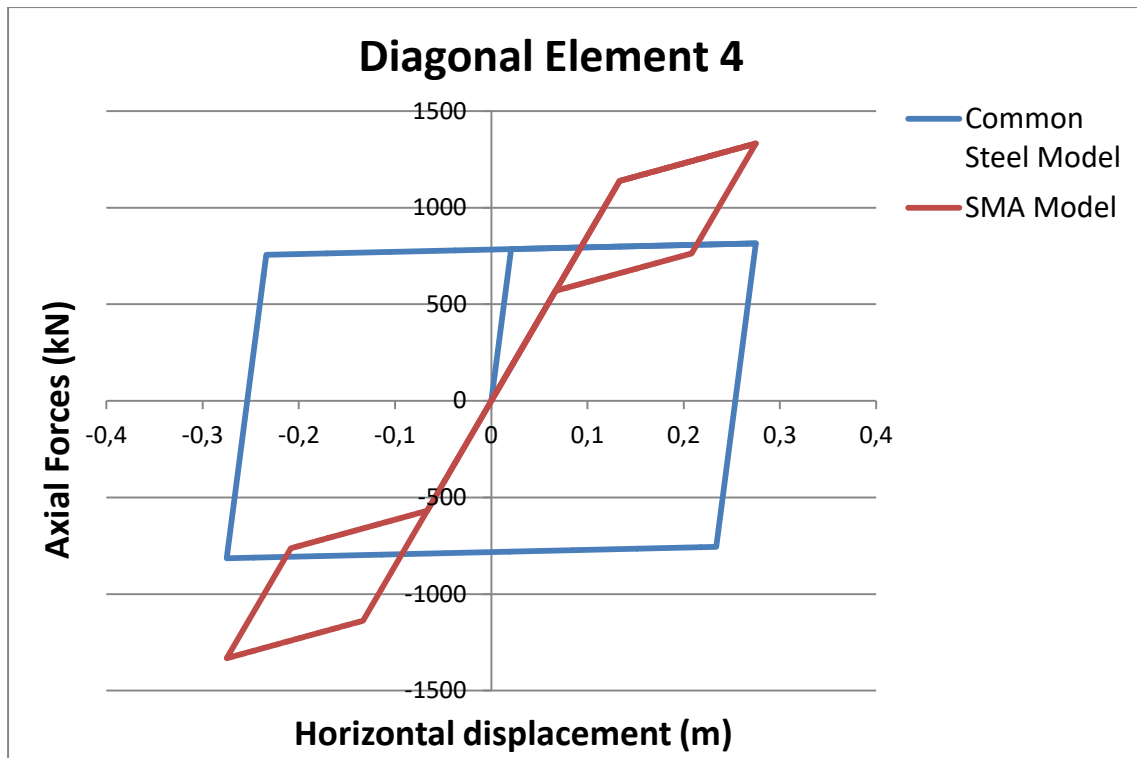


Εικόνα 5.6: Απεικόνιση του επίπεδου μονώροφου πλαισίου σε στατική υπερωθητική ανάλυση

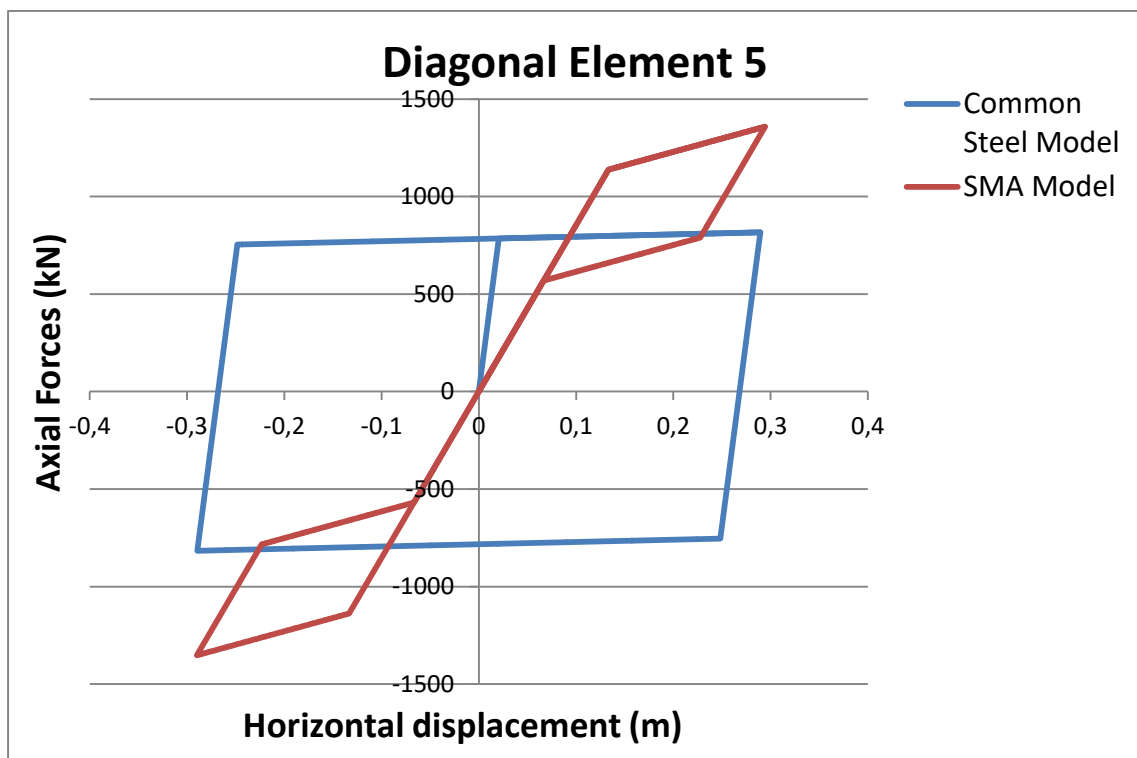
Από την Pushover ανάλυση προκύπτουν οι επόμενες καμπύλες ικανότητας του φορέα για κάθε περίπτωση και οι καμπύλες αξονικής δύναμης – οριζόντιας μετακίνησης των χιαστί συνδέσμων.



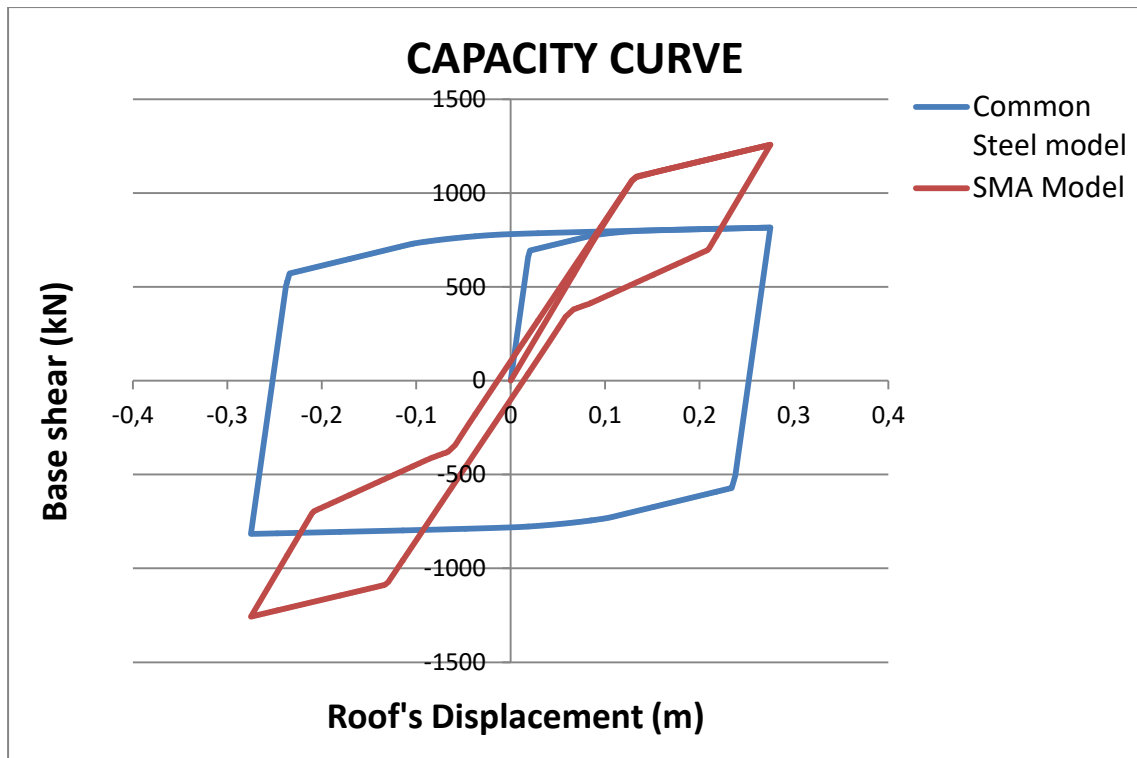
Διάγραμμα 5.7α: Ικανοτικές καμπύλες κατασκευών για εμβαδόν διατομής χιαστί συνδέσμων A



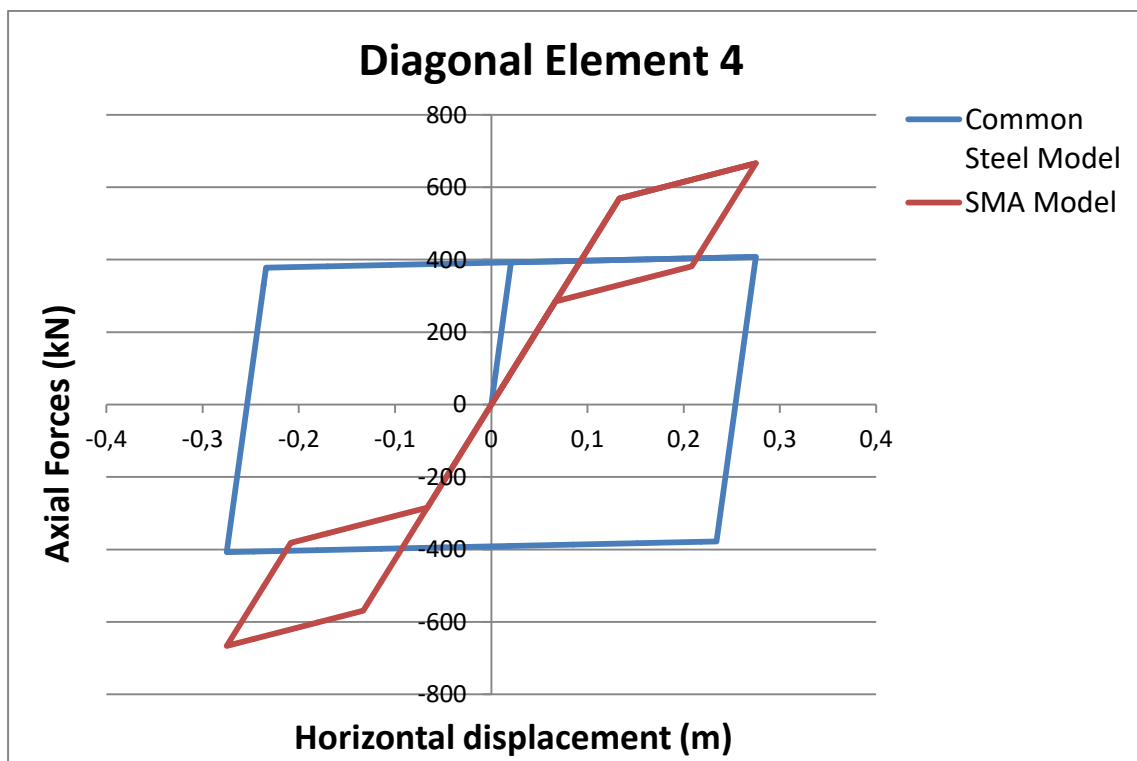
Διάγραμμα 5.7β: Αξονικές δυνάμεις – οριζόντια μετακίνηση τους ενός χιαστί συνδέσμου εμβαδού διατομής A (στοιχείου 4, από τον κόμβο 1 στον 4)



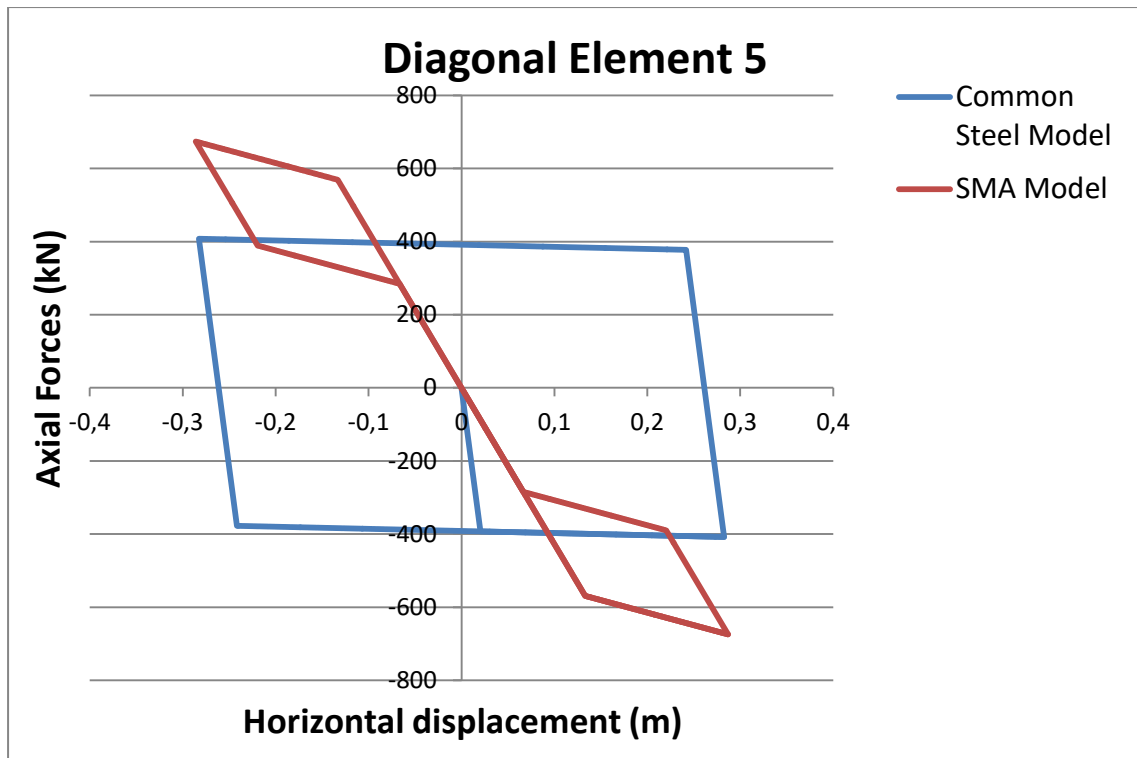
Διάγραμμα 5.7γ: Αξονικές δυνάμεις – οριζόντια μετακίνηση τους ενός χιαστί συνδέσμου εμβαδού διατομής A (στοιχείου 5, από τον κόμβο 2 στον 3)



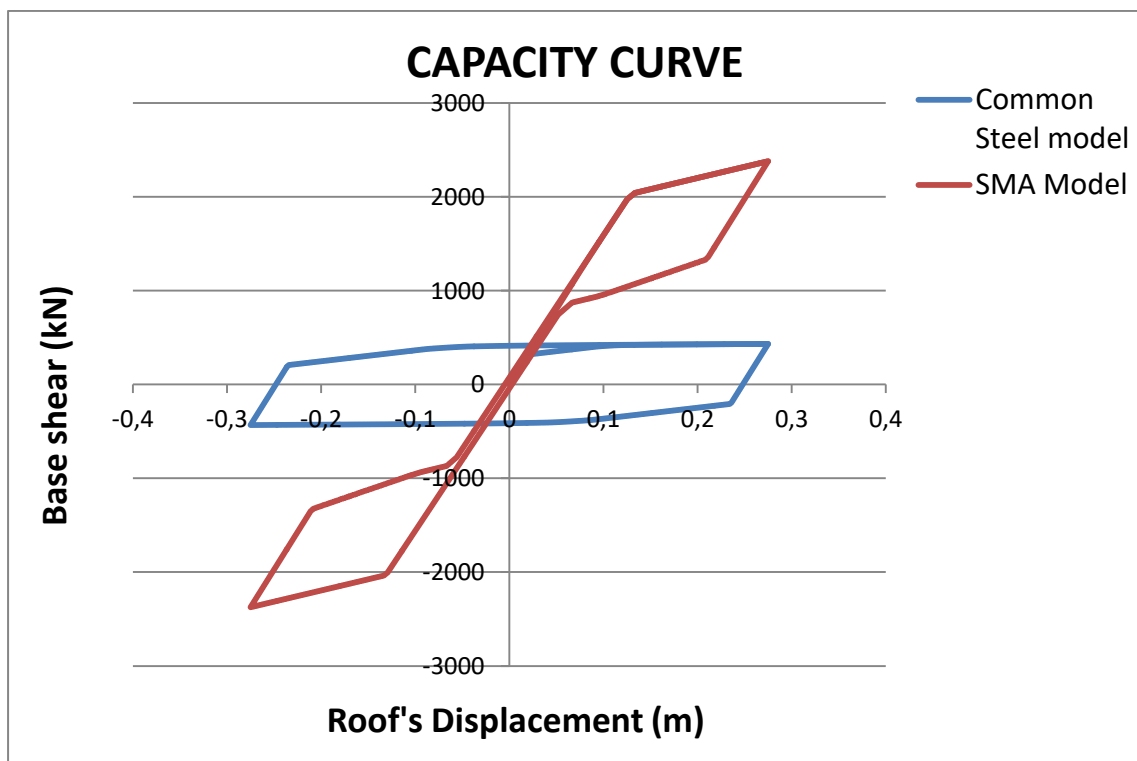
Διάγραμμα 5.8α: Ικανοτικές καμπύλες κατασκευών για εμβαδόν διατομής χιαστί συνδέσμων A/2



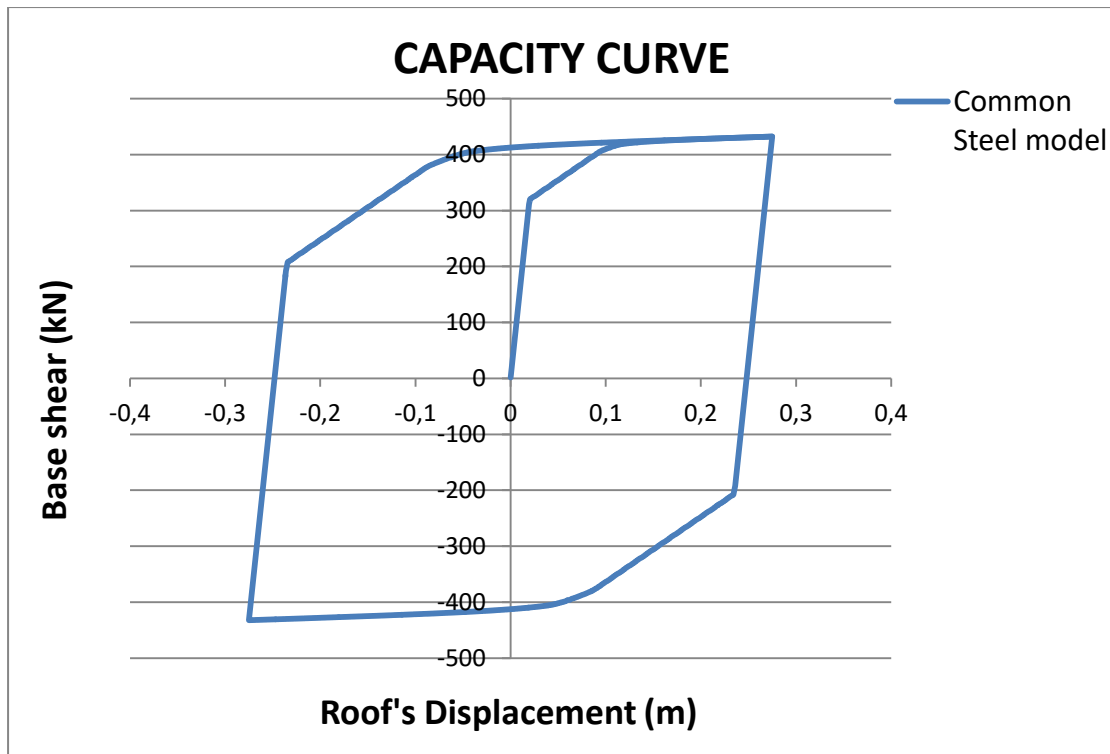
Διάγραμμα 5.8β: Αξονικές δυνάμεις – οριζόντια μετακίνηση τους ενός χιαστί συνδέσμου εμβαδού διατομής A/2 (στοιχείου 4, από τον κόμβο 1 στον 4)



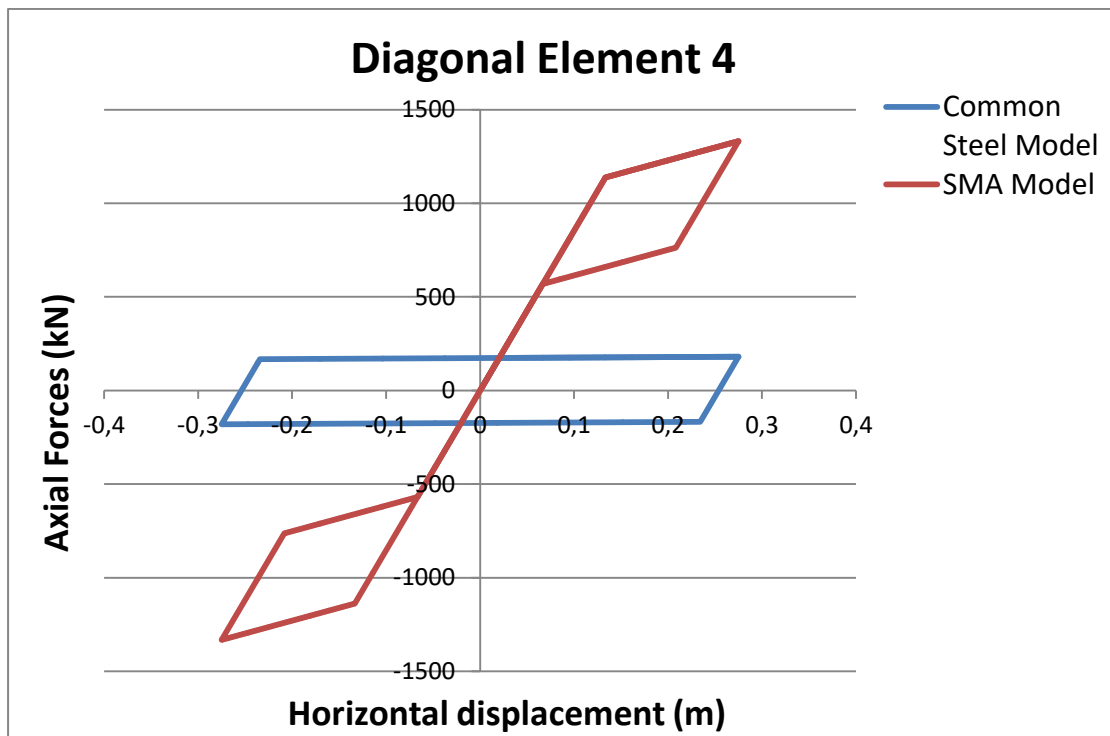
Διάγραμμα 5.8γ: Αξονικές δυνάμεις – οριζόντια μετακίνηση τους ενός χιαστί συνδέσμου εμβαδού διατομής A/2 (στοιχείου 5, από τον κόμβο 2 στον 3)



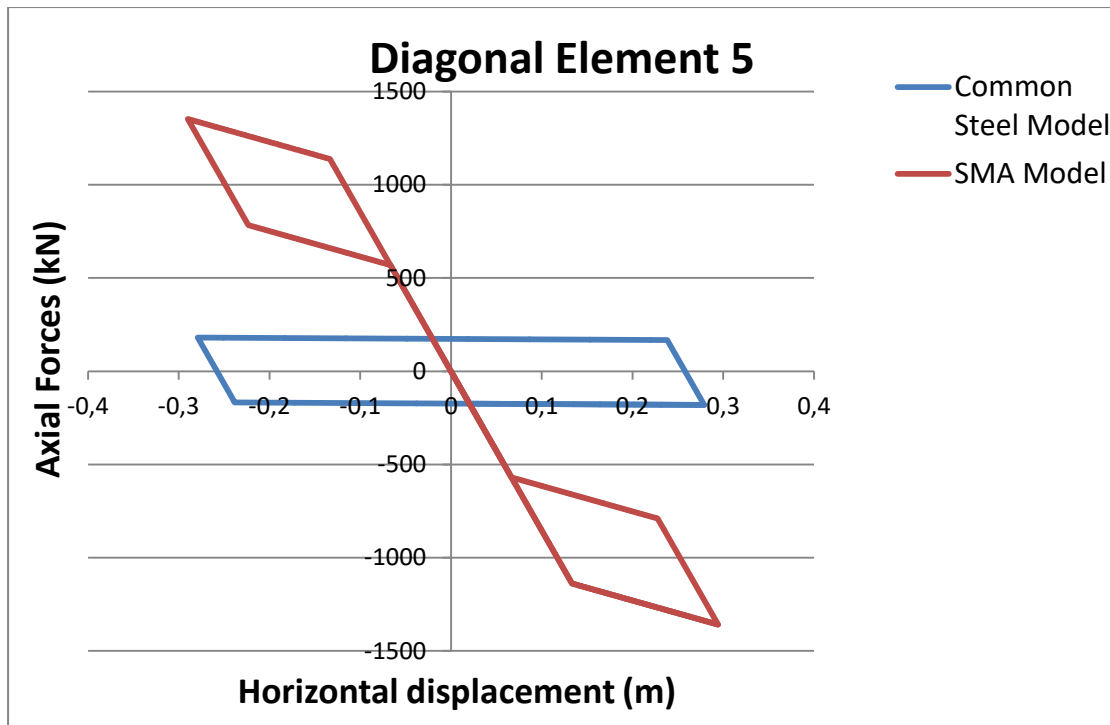
Διάγραμμα 5.9α: Ικανοτικές καμπύλες κατασκευών με ίδια δυστένεια χιαστί συνδέσμων



Διάγραμμα 5.9β: Σενάριο ίδιας δυστένειας: Ικανοτική καμπύλη κατασκευής με χρήση κοινού δομικού χάλυβα στους χιαστί συνδέσμους



Διάγραμμα 5.9γ: Σενάριο ίδιας δυστένειας: Αξονικές δυνάμεις – οριζόντια μετακίνηση τους ενός χιαστί συνδέσμου (στοιχείου 4, από τον κόμβο 1 στον 4)



Διάγραμμα 5.9δ: Σενάριο ίδιας δυστένειας: Αξονικές δυνάμεις – οριζόντια μετακίνηση τους ενός χιαστί συνδέσμου (στοιχείου 5, από τον κόμβο 2 στον 3)

Από τα διαγράμματα παραπάνω γίνεται εμφανής η καθοριστική επίδραση της χρήσης των «έξυπνων» υλικών στην κατασκευή. Σημειώνονται οι εξής παρατηρήσεις:

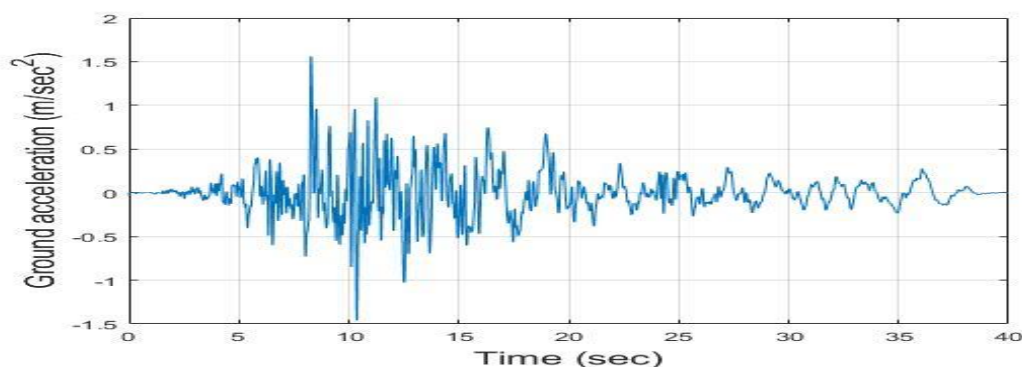
Για την υπόθεση που το εμβαδόν διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων είναι σταθερό και ίσο με A , τότε κατά τη φόρτιση και μετατόπιση της κατασκευής προς τα δεξιά και προτού η κατασκευή με μοναδικό υλικό τον κοινό δομικό χάλυβα διαρρεύσει, η μετατόπιση της κατασκευής με χρήση «έξυπνων» υλικών είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μετατόπιση της κατασκευής με αποκλειστική χρήση του κοινού δομικού χάλυβα. Αυτό οφείλεται στη μικρότερη δυσκαμψία της κατασκευής με shape memory alloys. Η ίδια συνθήκη ισχύει και μετά τη διαρροή της κατασκευής αποτελούμενη μόνο από χάλυβα έως και το σημείο τομής των δύο ικανοτικών καμπυλών των κατασκευών, με τη διαφορά ότι στο διάστημα εκείνο ο φορέας με μοναδικό υλικό τον χάλυβα λαμβάνει την επιπλέον μετατόπιση ανελαστικά, ενώ ο φορέας με τα SMAs ελαστικά. Μετά το σημείο εκείνο και έως τη μετακίνηση οροφής που αντιστοιχεί σε drift 5% των κατασκευών, για κάθε ίδια μετακίνηση ο φορέας με χρήση συρμάτων νιτινόλης αναπτύσσει μεγαλύτερες δυνάμεις, απόρροια της μεγαλύτερης τιμής της τάσης διαρροής του συγκεκριμένου υλικού. Κατά την αποφόρτιση, το πλαίσιο με χρήση «έξυπνων υλικών» επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα, ενώ στη δεύτερη υπόθεση ανακτά μόνο την ελαστική παραμόρφωση. Για να επανέλθει στο αρχικό του σχήμα συνεπάγεται ότι έχουν αναπτυχθεί δυνάμεις σχεδόν ίσες και αντίθετες με τις μέγιστες της φόρτισης. Η τελευταία αυτή παρατήρηση είναι η κύρια αιτία για την οποία ερευνάται η χρήση «έξυπνων» υλικών και η συμβολή τους στη σεισμική απόκριση των κατασκευών.

Οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για την περίπτωση του υποδιπλασιασμού του εμβαδού διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων. Οι διαφορές σε αυτήν την περίπτωση είναι οι μικρότερες τιμές των δυνάμεων διαρροής των κατασκευών, αφού μειώθηκε η δυσκαμψία τους και κάποια μικρή παραμένουσα παραμόρφωση που εμφανίζει το κτήριο με τα σύρματα νιτινόλης.

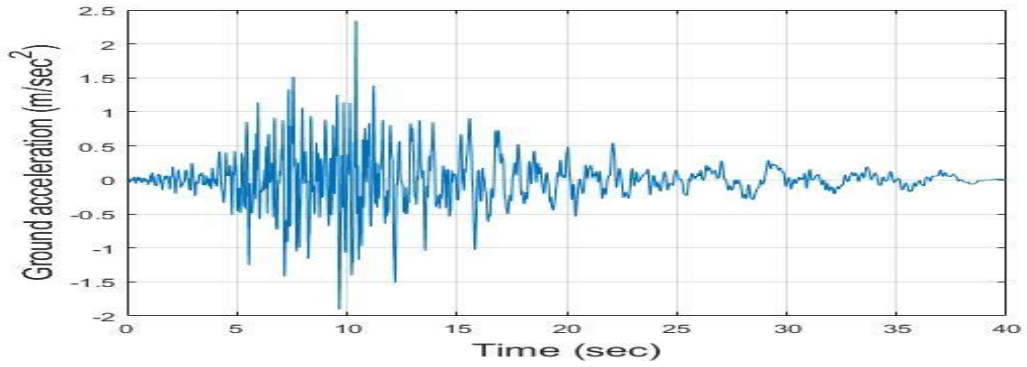
Για το σενάριο της μεταβολής της διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων ανάλογα το υλικό ώστε να έχουν την ίδια δυστένεια (εμβαδόν διατομής με SMA A, με κοινό δομικό χάλυβα υπολογίζεται), οι επίπεδοι πλαισιακοί φορείς παρουσιάζουν την ίδια συνολική δυσκαμψία, επακόλουθο της υπόθεσης που έγινε με μεγάλη διαφορά όμως στη δύναμη διαρροής των κατασκευών από «έξυπνο» υλικό, αφού τα «έξυπνα» υλικά έχουν μεγαλύτερη τάση διαρροής, άρα και στις δυνάμεις που μπορούν να αναλάβουν οι δύο κατασκευές. Οι μετατοπίσεις με χρήση κραμάτων μνήμης σχήματος είναι μηδενικές κάτι το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση χρήσης χάλυβα όπου ανακτώνται μονάχα οι ελαστικές παραμορφώσεις.

5.1.3 Δυναμική ανάλυση του μονώροφου πλαισιακού φορέα υπό καταγεγραμμένες σεισμικές διεγέρσεις

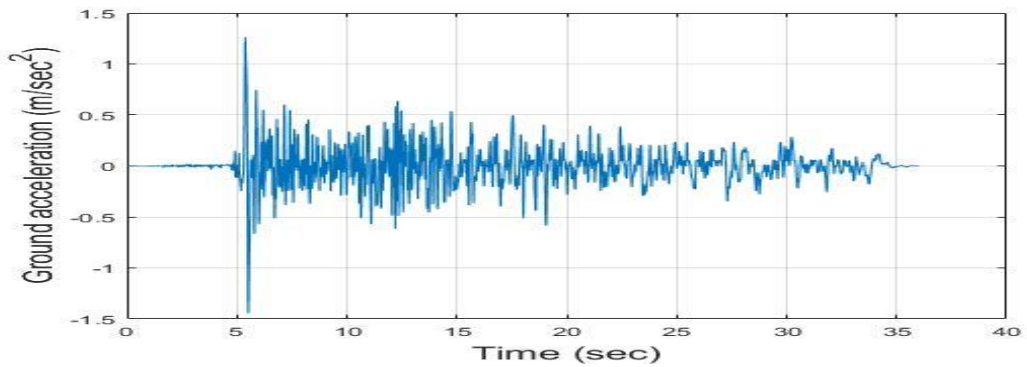
Κατόπιν ανάλυσης των διαφόρων μονώροφων κατασκευών με τη μέθοδο της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης, γίνεται και η μελέτη της συμπεριφοράς τους υπό δυναμική φόρτιση. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται 30 διαφορετικές δυναμικές αναλύσεις με φορτίο 30 σεισμικές δονήσεις που έχουν συμβεί στο παρελθόν ποικίλης κλίμακας. Τα επιταχυνσιογραφήματα των αναφερόμενων σεισμικών καταγραφών παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες. Για την περίπτωση της διατομής A/2, η εδαφική επιτάχυνση των επιταχυνσιογραφημάτων αυτών διπλασιάστηκε.



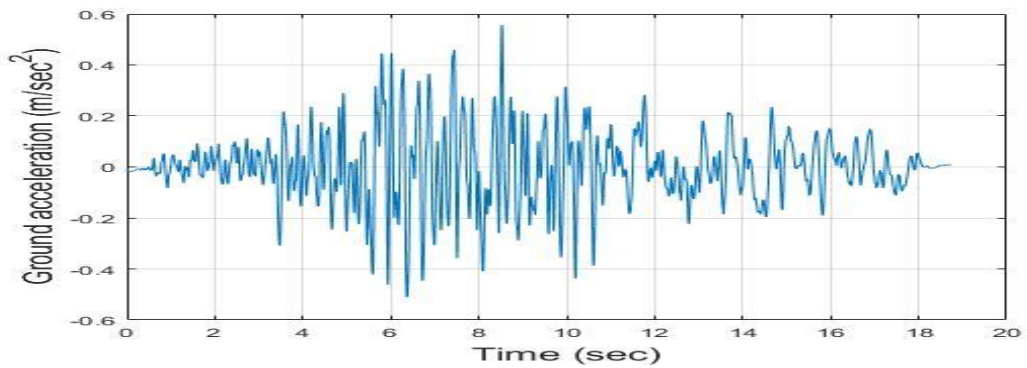
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, AGNEWS STATE HOSPITAL, 090



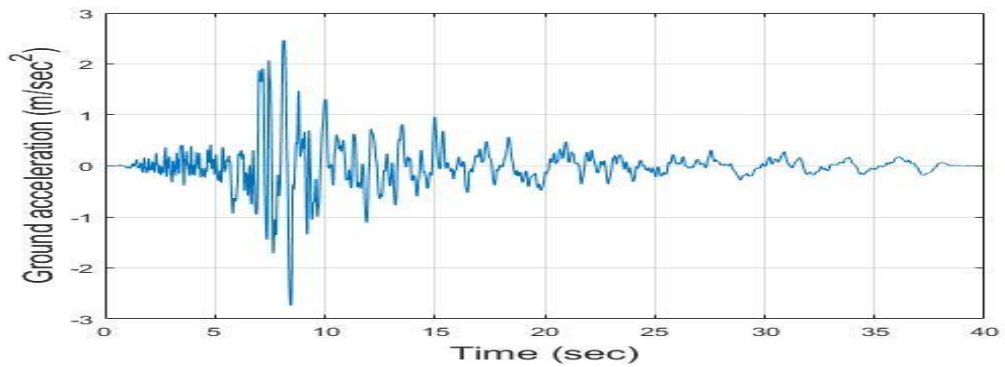
NORTHRIDGE 01/17/94 1231, LA - BALDWIN HILLS, 090



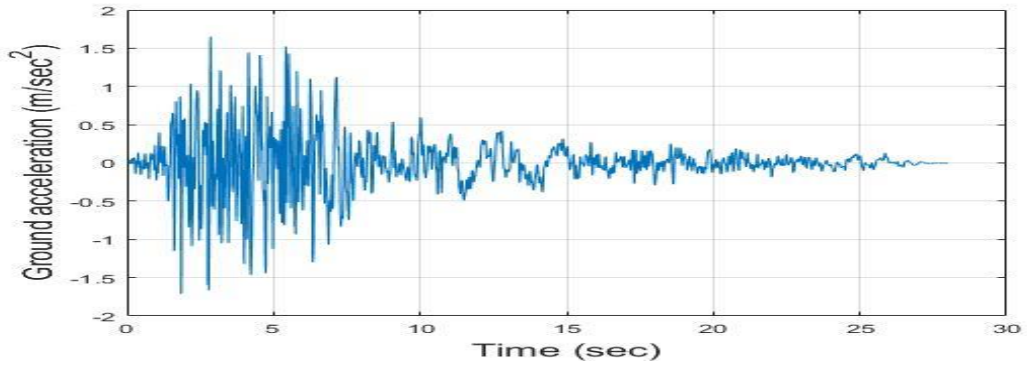
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, COMPUERTAS, 285



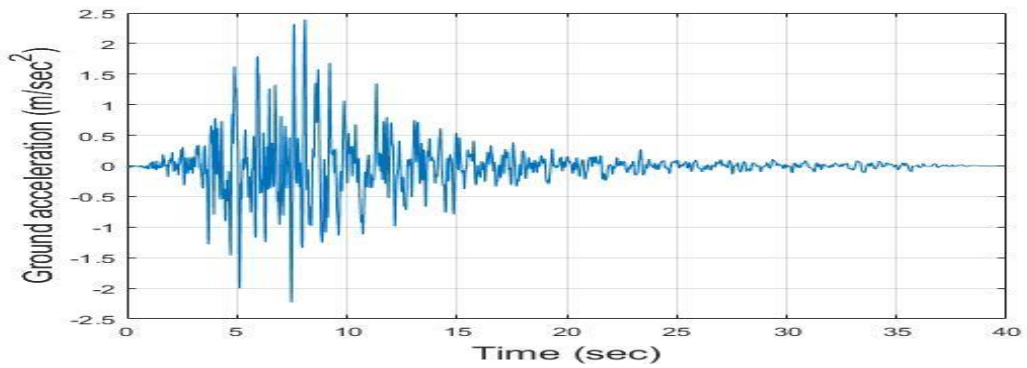
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, PLASTER CITY, 135



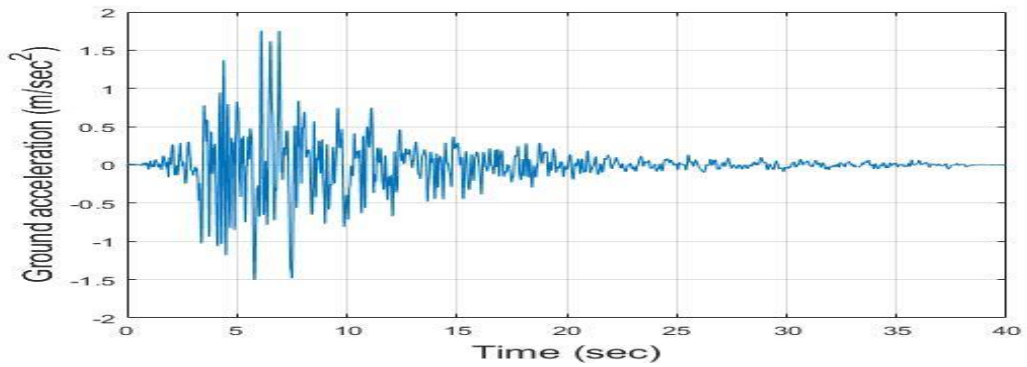
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, HOLLISTER DIFF ARRAY, 255



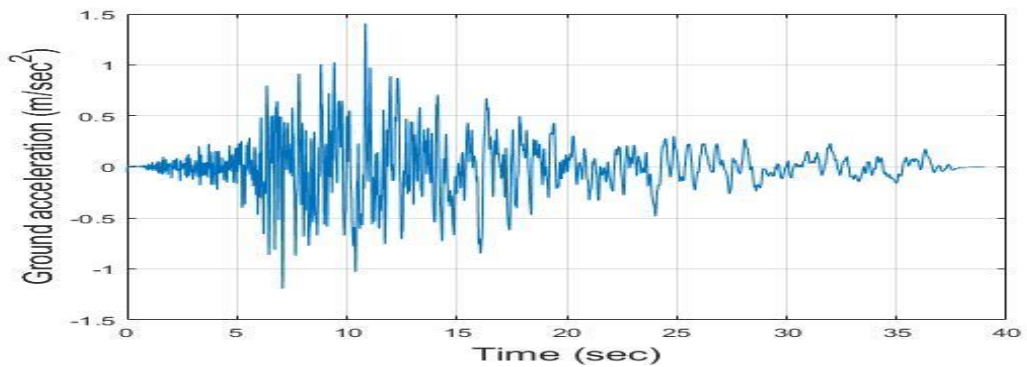
SAN FERNANDO 02/09/71 14:00, LA HOLLYWOOD STOR LOT, 180



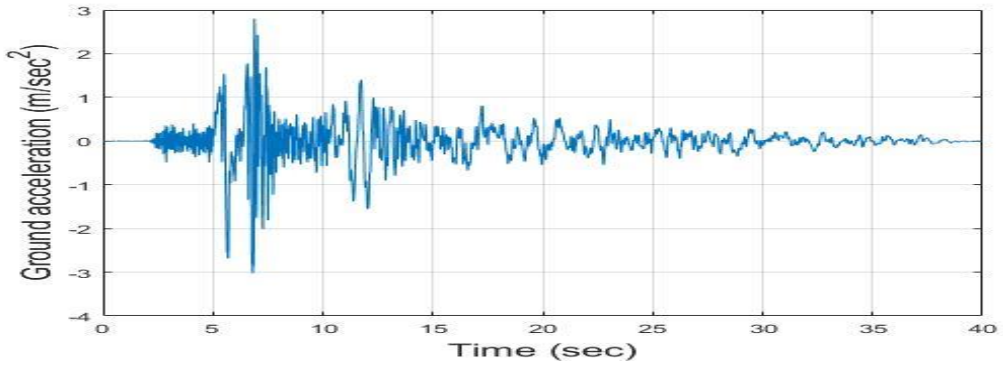
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, ANDERSON DAM DOWNSTREAM, 270



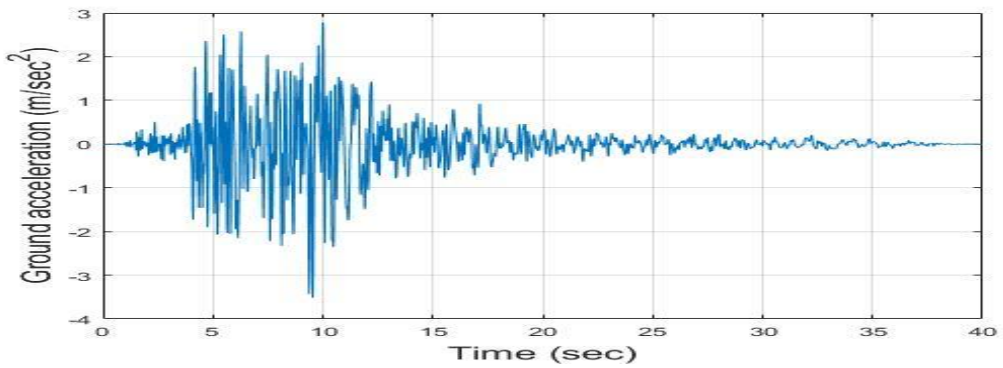
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, COYOTE LAKE DAM DOWNST, 285



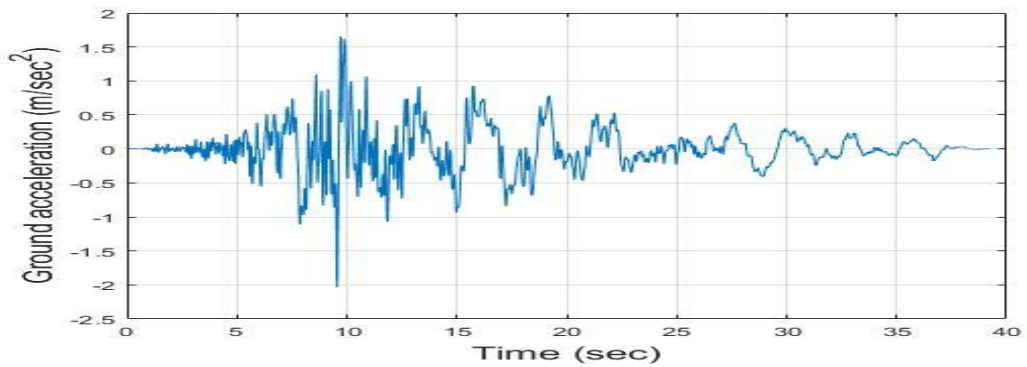
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, EL CENTRO ARRAY #12, 140



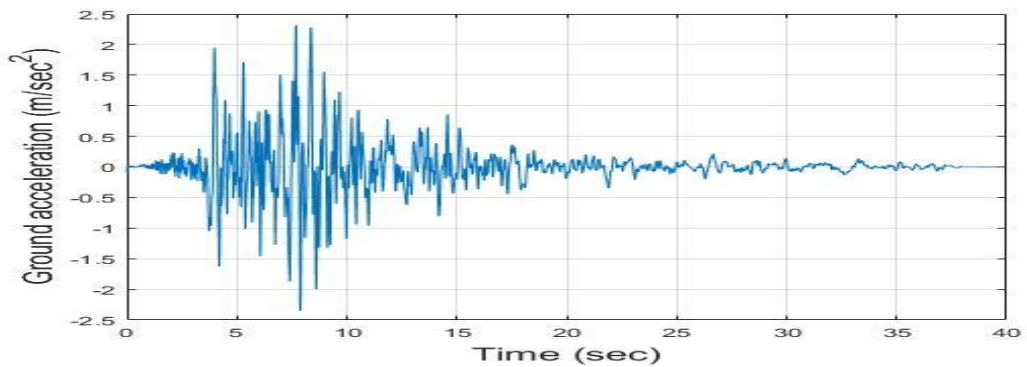
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, CUCAPAH, 085



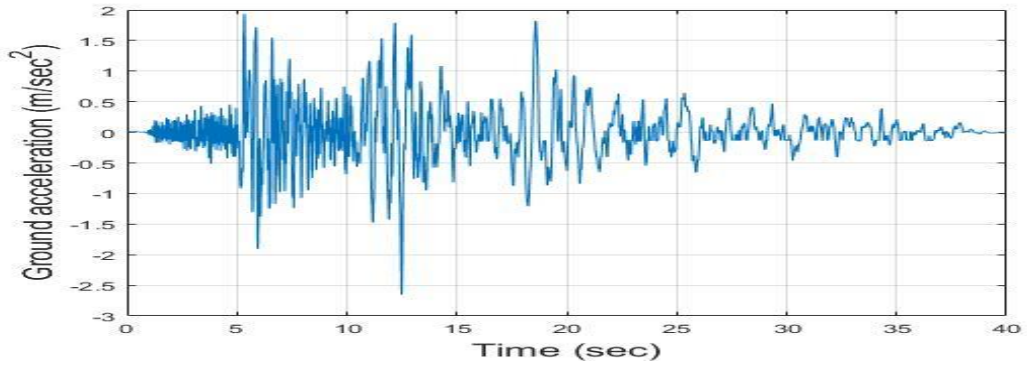
NORTHRIDGE 01/17/94 12:31, LA - HOLLYWOOD STORAGE FF, 360



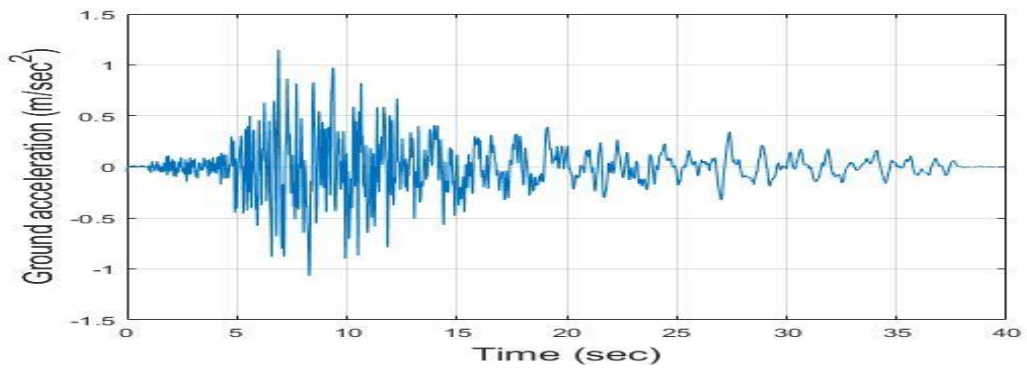
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, SUNNYVALE COLTON AVE, 270



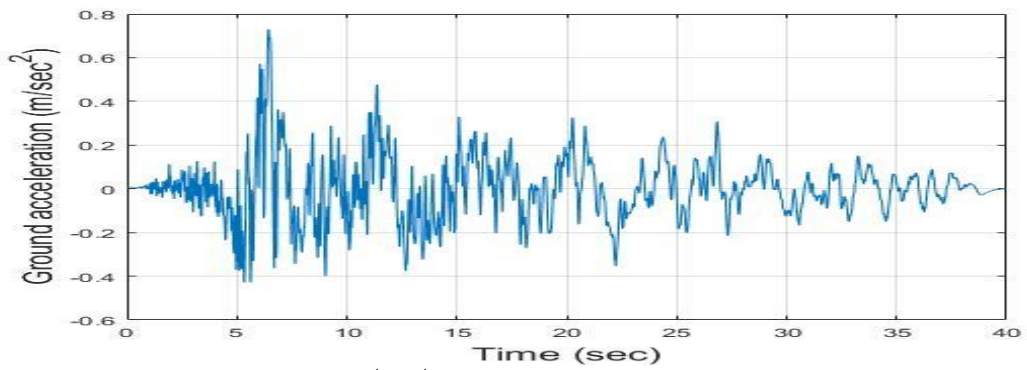
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, ANDERSON DAM DOWNSTREAM, 360



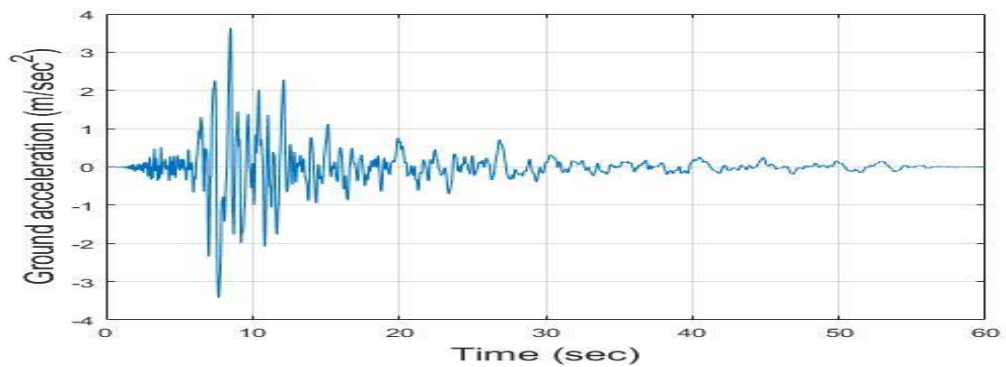
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, CHIHUAHUA, 012



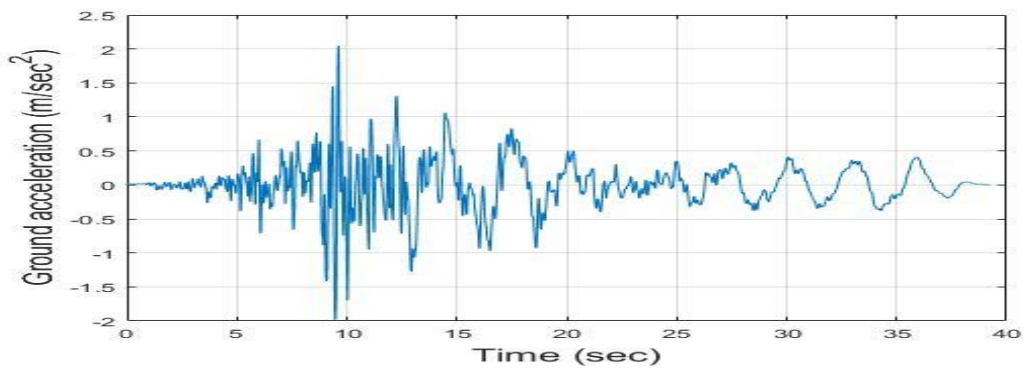
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, EL CENTRO ARRAY #13, 140



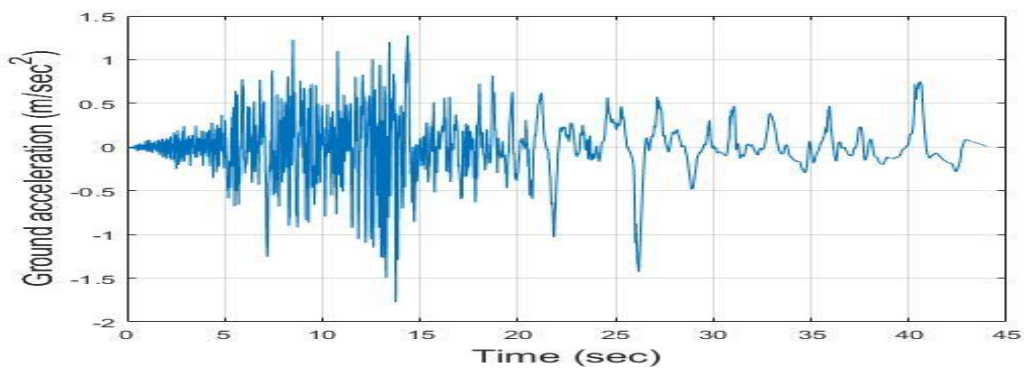
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, WESTMORELAND FIRE STA, 090



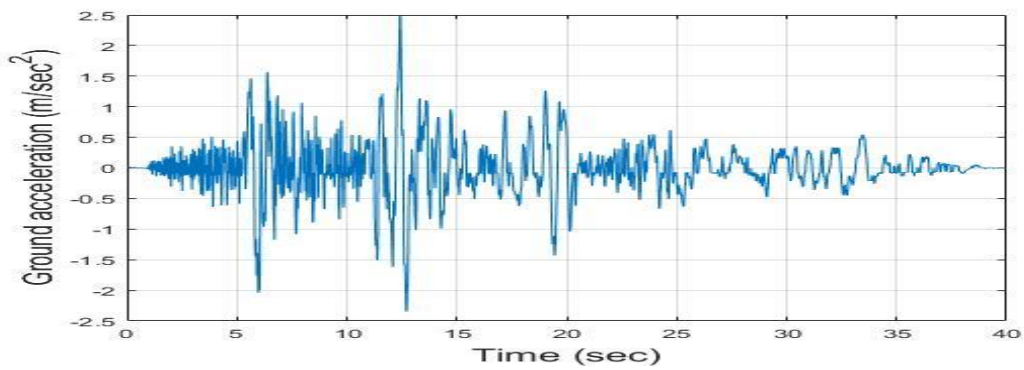
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, HOLLISTER SOUTH & PINE, 000



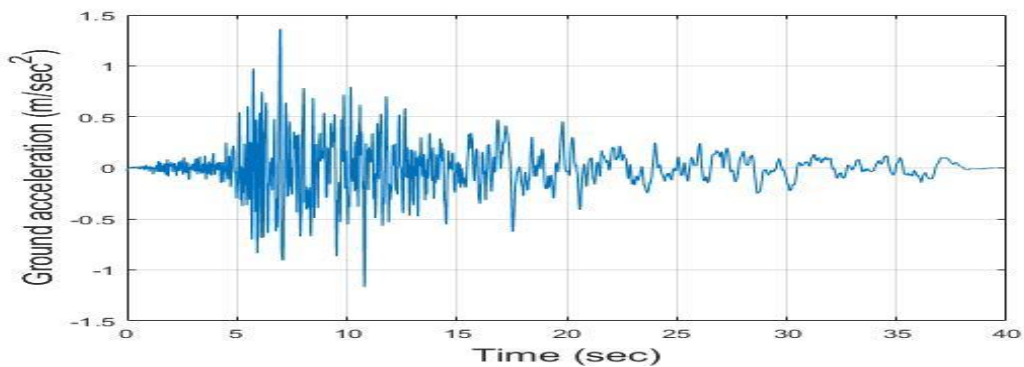
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, SUNNYVALE COLTON AVE, 360



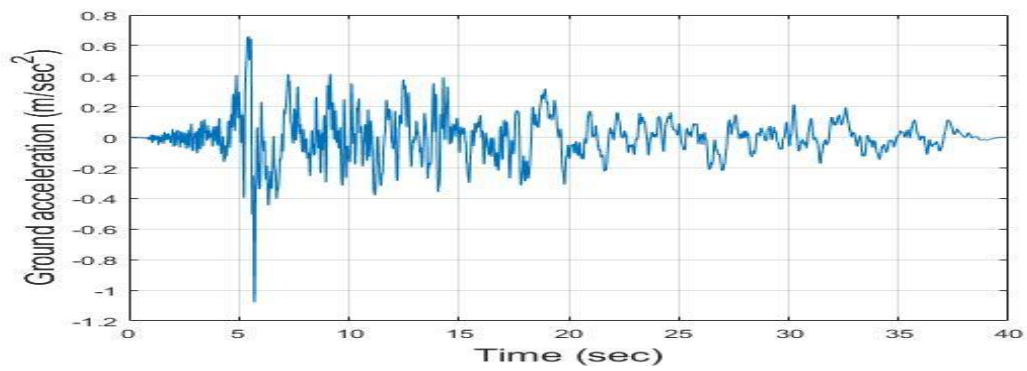
SUPERSTITION HILLS 11/24/87 13:16, WILDLIFE LIQUEFACTION ARRAY, 090



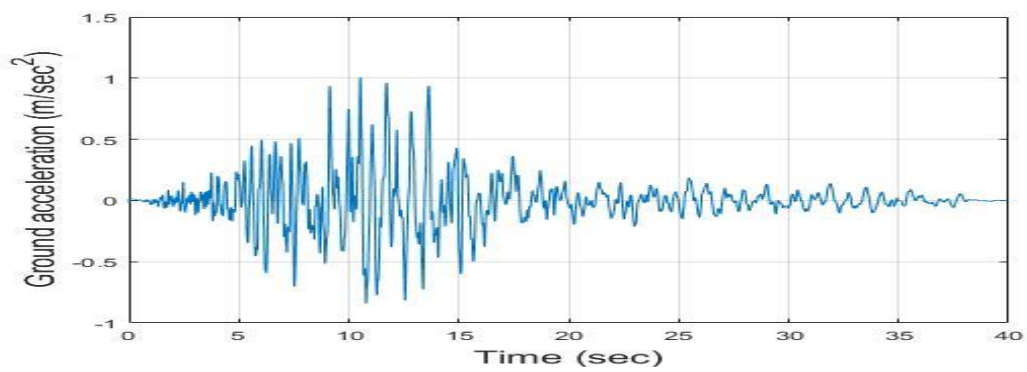
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, CHIHUAHUA, 282



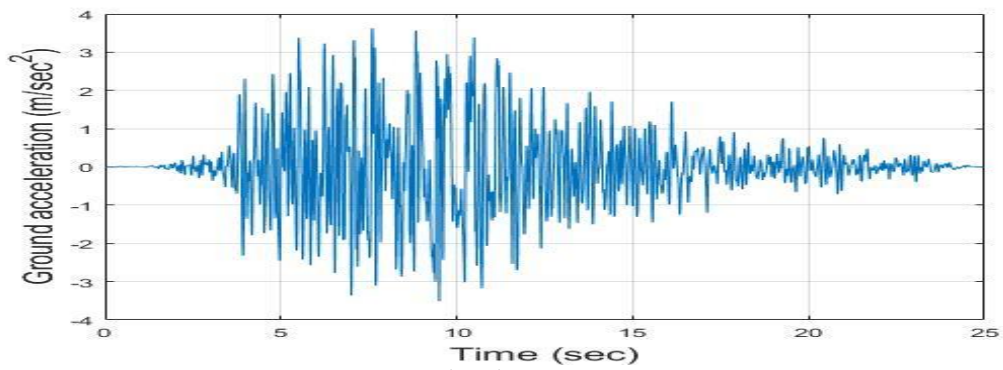
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, EL CENTRO ARRAY #13, 230



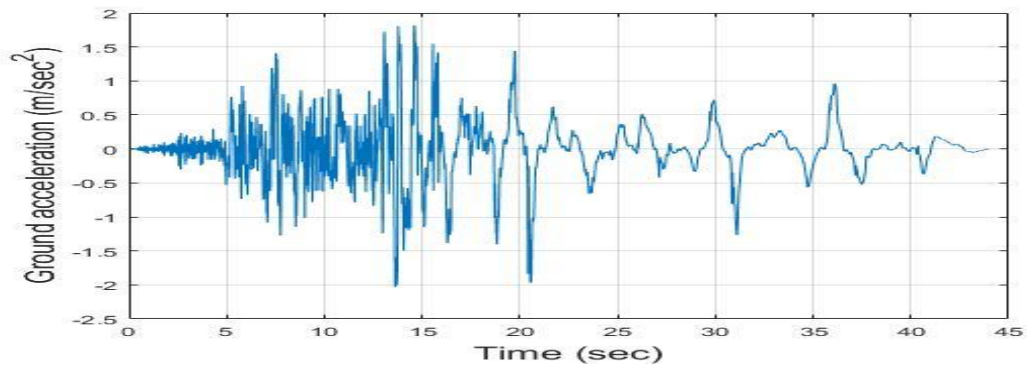
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, WESTMORELAND FIRE STA, 180



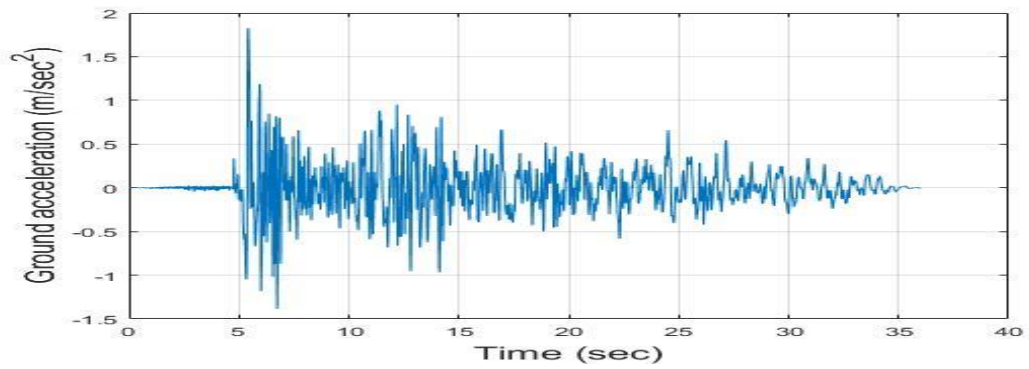
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, HALLS VALLEY, 090



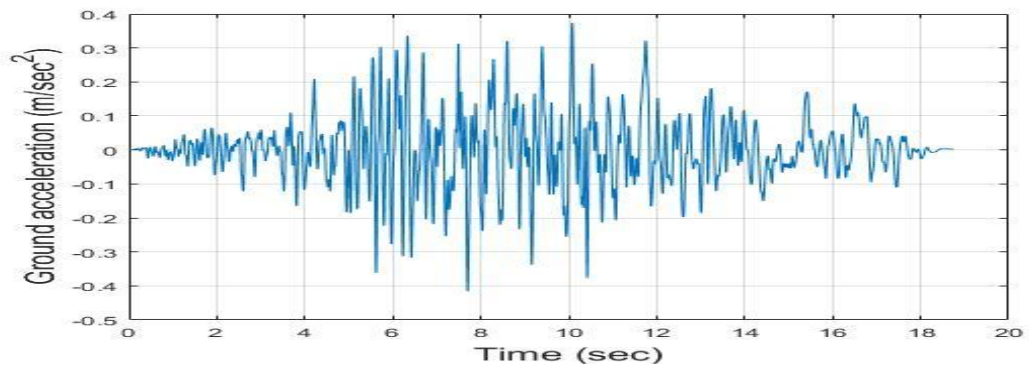
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, WAHO, 000



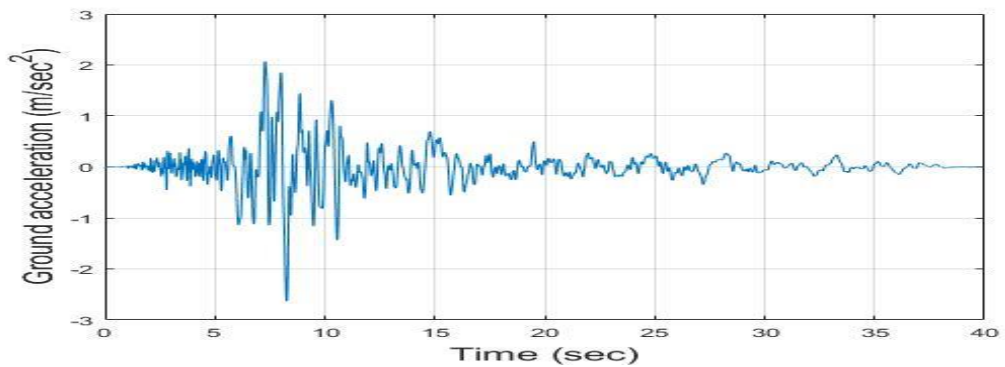
SUPERSTITION HILLS 11/24/87 13:16, WILDLIFE LIQUEFACTION ARRAY, 360



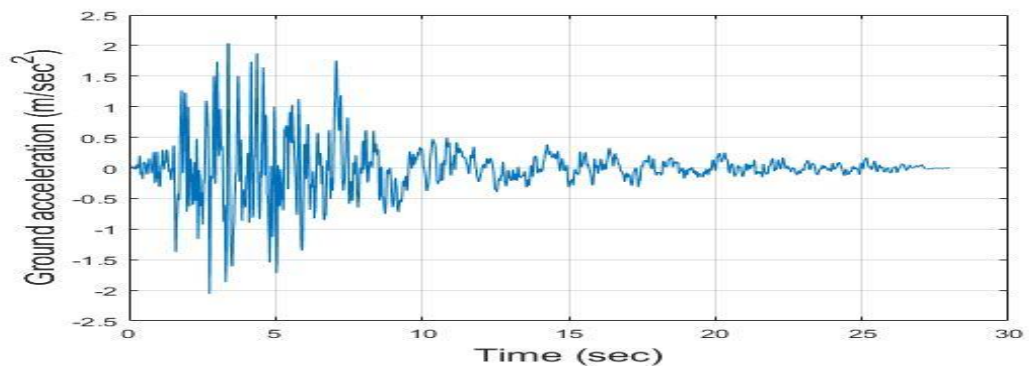
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, COMPUERTAS, 015



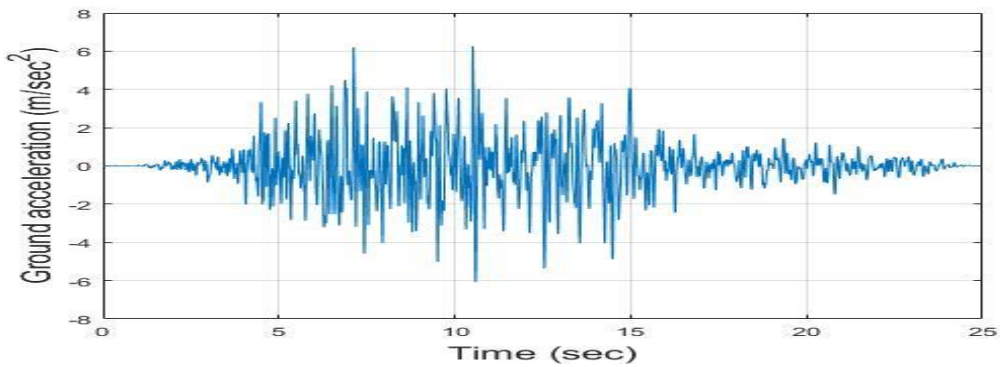
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, PLASTER CITY, 045



LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, HOLLISTER DIFF ARRAY, 165



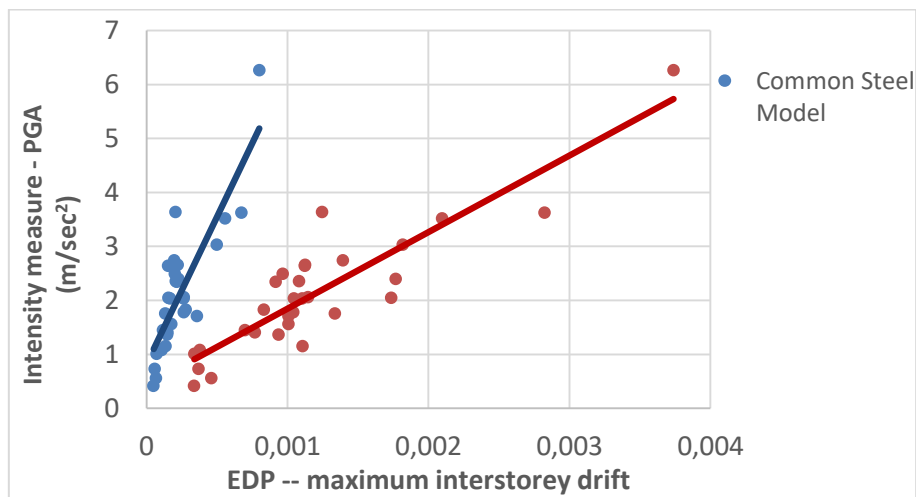
SAN FERNANDO 02/09/71 14:00, LA HOLLYWOOD STOR LOT, 090



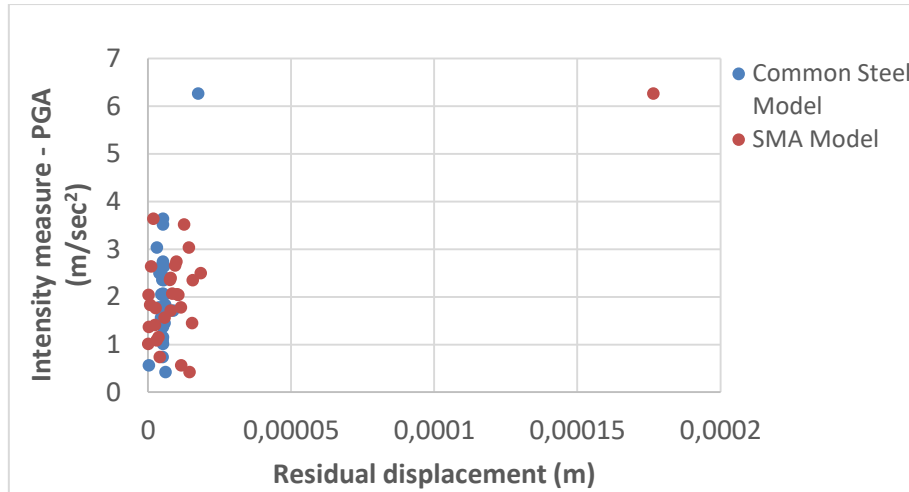
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, WAHO, 090

Εικόνα 5.10: Επιταχυνσιογραφήματα σεισμών με τα οποία έγιναν οι δυναμικές αναλύσεις των κατασκευών

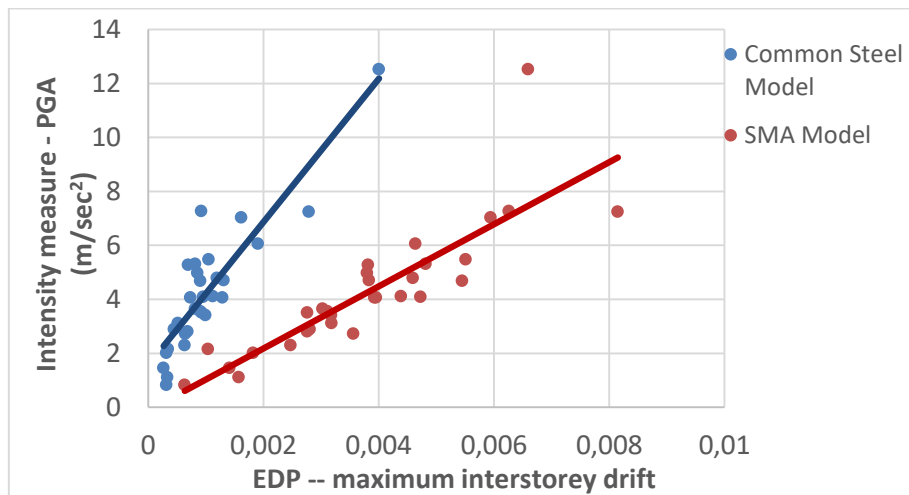
Από τις δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν υπολογίσθηκε για κάθε σεισμική καταγραφή και για κάθε υπόθεση και υποπερίπτωση κατασκευής το μέγιστο drift αυτής, καθώς και η μετακίνηση που αντιστοιχεί στην τελευταία τιμή του κάθε επιταχυνσιογραφήματος. Παρακάτω απεικονίζονται τα μεγέθη αυτά, ως μέτρο εκτίμησης της βλάβης σε ένα κτήριο, συναρτήσει των μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων (peak ground acceleration, PGA). Η σειρά που παρατίθενται τα διαγράμματα είναι πρώτα για το σενάριο της ίδιας διατομής A των ελκυστήρων σε κάθε περίπτωση, έπειτα για τον υποδιπλασιασμό αυτής A/2 και τέλος για την υπόθεση της ίδιας δυστένειας των ελκυστήρων.



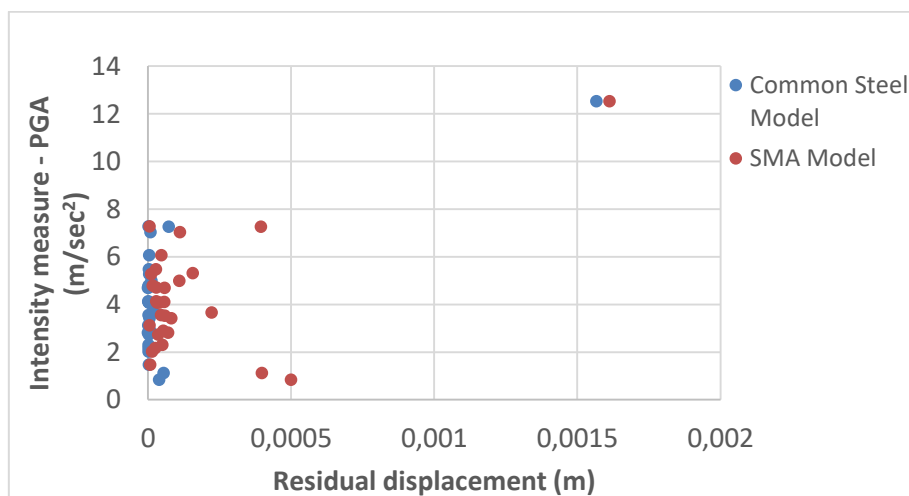
Εικόνα 5.11: Διάγραμμα μέγιστου drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή A



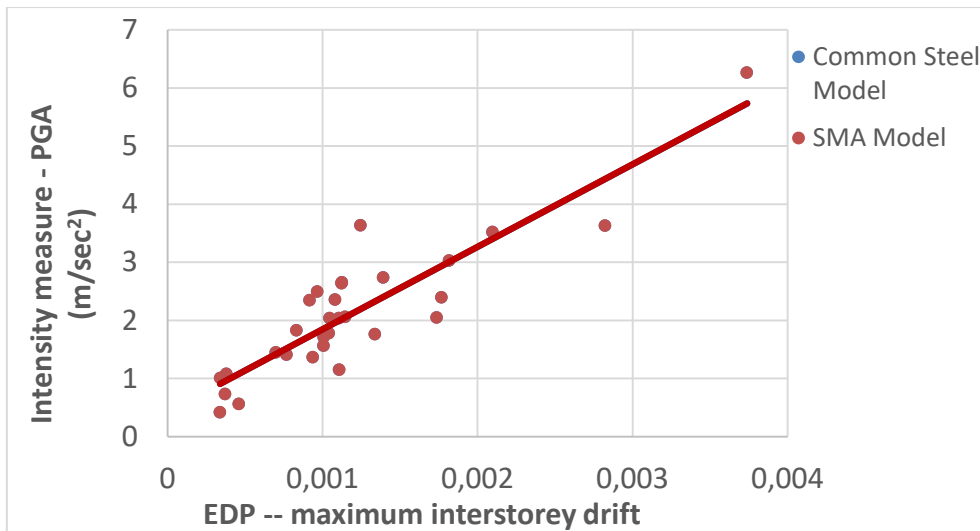
Εικόνα 5.12: Διάγραμμα παραμένουσας μετακίνησης (απόλυτες τιμές) – Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, Διατομή Α



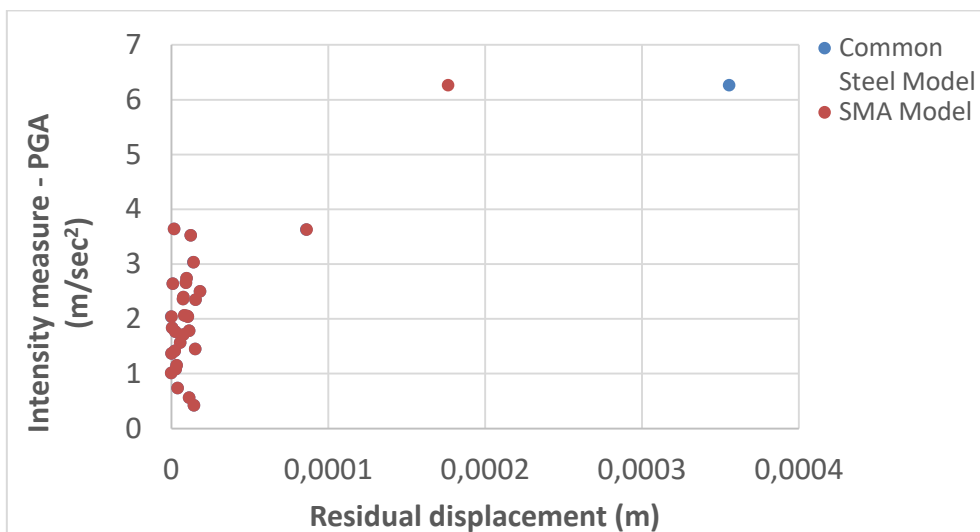
Εικόνα 5.13: Διάγραμμα μέγιστου drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή Α/2



Εικόνα 5.14: Διάγραμμα παραμένουσας μετακίνησης (απόλυτες τιμές) – Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, Διατομή Α/2



Εικόνα 5.15: Διάγραμμα μέγιστου drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Ίδια Δυστένεια



Εικόνα 5.16: Διάγραμμα παραμένουσας μετακίνησης (απόλυτες τιμές) – Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, Ίδια δυστένεια

Από τα διαγράμματα που παράχθηκαν από τη μελέτη απόκρισης των διαφόρων φορέων στα επιβαλλόμενα δυναμικά φορτία (σεισμικές καταγραφές) προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Στις κατασκευές με ίδιο εμβαδόν διατομής στους χιαστί συνδέσμους οι τελικές μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες χρησιμοποιώντας shape memory alloys. Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ό,τι όλες οι κατασκευές είναι αρκετά δύσκαμπτες και δε διαρρέουν, οπότε οι αποκλειστικά χαλύβδινες κατασκευές έχουν μικρότερες μετακινήσεις. Επίσης όμως, πρέπει να σημειωθεί ό,τι η διαφορά είναι κάποια κλάσματα του χιλιοστού, σχεδόν απόλυτα μηδενική. Επιπλέον, τα μέγιστα drifts που αναπτύσσονται στους φορείς με «έξυπνο» υλικό είναι μεγαλύτερα εξαιτίας της ευκαμψίας που προσδίδουν τα υλικά αυτά στις κατασκευές. Και πάλι όμως η διαφορά είναι σχεδόν μηδενική.

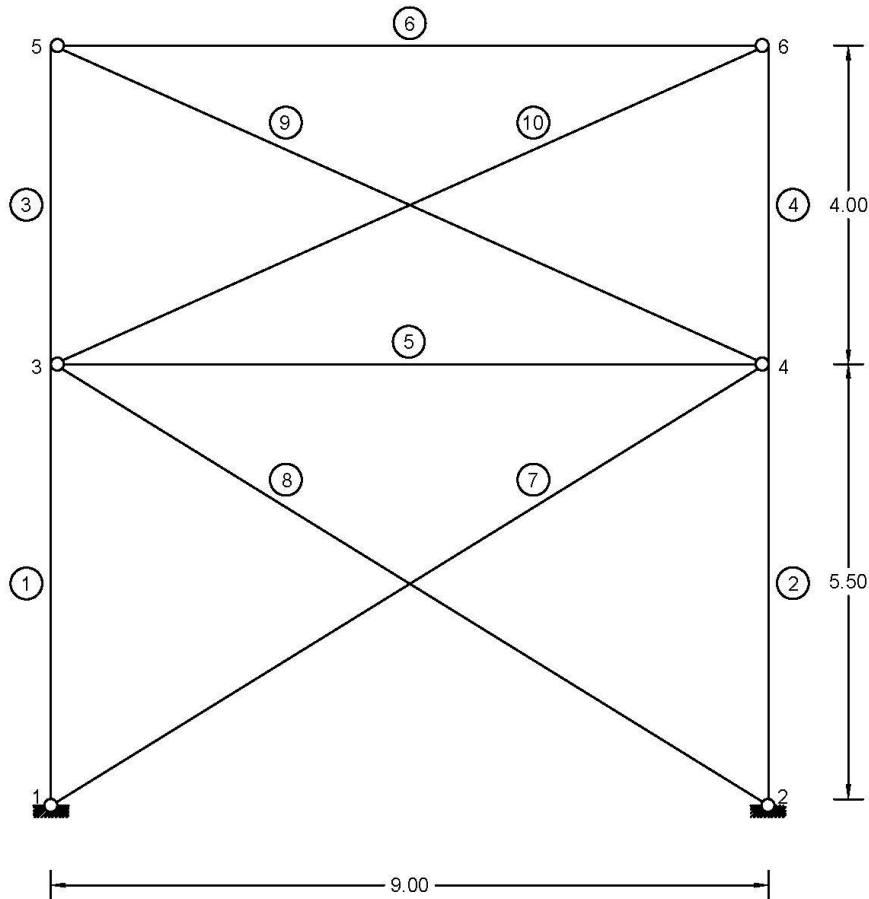
Από την άλλη, στους φορείς με ίδια δυστένεια χιαστί συνδέσμων και επειδή οι κατασκευές έχουν ίδια συνολική δυσκαμψία και δε διαρρέουν ποτέ (πλην μίας περιπτώσεως), τα μέγιστα drifts και οι τελικές μετακινήσεις ταυτίζονται σε κάθε περίπτωση (εκτός από μία).

5.2 Μελέτη της συμπεριφοράς επίπεδου δώροφου πλαισίου σε δυναμική φόρτιση

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται σε συνέχεια της έρευνας που ξεκίνησε στην προηγούμενη ενότητα τη μελέτη ενός δώροφου αυτή τη φορά πλαισίου. Όπως και προηγουμένως, γίνονται τρεις υποθέσεις για τη διατομή των χιαστί συνδέσμων (σταθερή διατομή A , σταθερή διατομή $A/2$ και μεταβλητή διατομή, αλλά ίδια δυστένεια) και υπάρχουν δύο υποπεριπτώσεις σε κάθε υπόθεση, στη μία υποπερίπτωση οι χιαστί σύνδεσμοι της κατασκευής αποτελούνται από κοινό χάλυβα και στην άλλη από κράματα μνήμης σχήματος.

5.2.1 Περιγραφή της γεωμετρίας και της κατασκευής του δώροφου πλαισίου

Όπως και προηγουμένως, η «πρότυπη» κατασκευή είναι ένας μεταλλικός συμμετρικός φορέας και συγκεκριμένα ένα δώροφο πλαίσιο που φέρει διαγώνιους χιαστί συνδέσμους σε κάθε όροφο. Η εν λόγω κατασκευή της οποίας ο σχεδιασμός έχει εξετασθεί και υλοποιηθεί σε προηγούμενες μελέτες, έχει άνοιγμα $L=9.0$ m (σταθερό άνοιγμα σε κάθε όροφο), ύψος 1ου ορόφου $H_1=5.50$ m, ύψος 2ου ορόφου $H=4.0$ m και στο κάθε ζύγωμα φέρει ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο ίσο με 20 kN/m. Επιπλέον, εξασφαλίζεται η διαφραγματική λειτουργία του πλαισίου, ενώ σκεπτόμενοι ό,τι ο φορέας είναι συμμετρικός και η σεισμική μάζα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, δε λαμβάνεται υπόψη η στρέψη από τις εδαφικές διεγέρσεις. Τα διαγώνια μέλη της κατασκευής, είναι ελκυστήρες-θλιπτήρες και είναι αρθρωτά συνδεδεμένα με τη δοκό. Επίσης, οι συνδέσεις των υποστυλωμάτων στη δοκό είναι αρθρωτές. Κατά συνέπεια, οι ροπές κάμψης που μεταβιβάζονται μεταξύ των υποστυλωμάτων και της δοκού είναι πολύ μικρές και τα μέλη αυτά σχεδιάζονται ώστε να αναλαμβάνουν κυρίως αξονικά φορτία. Οι συνθήκες στήριξης της κατασκευής στο έδαφος είναι αρθρώσεις και χωρίς τα διαγώνια μέλη η κατασκευή είναι μηχανισμός. Με τα διαγώνια μέλη, η κατασκευή αποτελεί πλέον έναν υπερστατικό φορέα. Ο φορέας φαίνεται στην εικόνα 5.17.



Εικόνα 5.17: Απεικόνιση του επίπεδου δώροφου υπερστατικού πλαισίου

Αναλυτικότερα, τα υποστυλώματα της κατασκευής και των δύο ορόφων είναι διατομής W14×132 και αποτελούνται από κοινό χάλυβα ASTM A992. Ο συγκεκριμένος χάλυβας έχει τάση διαρροής 345 MPa και γίνεται η υπόθεση ό,τι παρουσιάζει κράτυνση ίση με 0,003. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι ίσο με $E_s=210 \text{ Gra}$. Οι δοκοί είναι διατομής W14×38 και αποτελούνται επίσης από δομικό χάλυβα ASTM A992 με ίδια κράτυνση. Τα χαρακτηριστικά των παραπάνω διατομών, (εμβαδόν και ύψος διατομής, πάχος κορμού, πάχος και πλάτος πέλματος) φαίνονται στον πίνακα 5.18.

Element	Designation			Web		Flange	
		Area	Depth	Thickness	Width	Thickness	
		A	D	t_w	b_f	t_f	
		cm ²	cm	cm	cm	cm	cm
Columns	W14x132	98.552	37.236	1.638	37.402	2.616	
Beans	W14x38	28.448	35.814	0.787	17.196	1.308	

Πίνακας 5.18: Διατομές υποστυλωμάτων και δοκών της δώροφης κατασκευής

Οι χιαστί σύνδεσμοι του πρώτου και του δευτέρου ορόφου έχουν μήκος 10,55 μέτρα (m) και 9,85 μέτρα (m) αντίστοιχα, ενώ υπάρχουν τρεις περιπτώσεις για τη διατομή τους και σε κάθε περίπτωση γίνονται δύο διαφορετικές υποθέσεις για το υλικό κατασκευής τους. Στη μία περίπτωση αποτελούνται από κοινό δομικό χάλυβα ίδιο με αυτόν των υποστυλωμάτων και της δοκού και στην άλλη από υλικό με μνήμη σχήματος (Shape Memory Alloy) και συγκεκριμένα από κράμα νιτινόλης. Επίσης, η πρώτη περίπτωση είναι να παραμένει σταθερή η διατομή τους σε κάθε υποπερίπτωση, η δεύτερη να υποδιπλασιάζεται και η τρίτη να μεταβάλλεται η διατομή με κριτήριο η δυστένειά τους να είναι ίση. Τα χαρακτηριστικά τους για κάθε σενάριο παρατίθενται στον πίνακα 5.19.

Floor	Διατομή ελκυστήρων (mm ²)					
	Ίδια διατομή A		Ίδια διατομή A/2		Ίδια δυστένεια	
	Steel	SMA	Steel	SMA	Steel	SMA
1	2276,3	2276,3	1138,15	1138,15	2276,3	504,1
2	1843,4	1843,4	921,7	921,7	1843,4	408,2

Πίνακας 5.19: Εμβαδόν διατομής ελκυστήρων σε κάθε όροφο

Όταν οι χιαστί σύνδεσμοι αποτελούνται από σύρματα νιτινόλης, εκείνα έχουν μήκος για τα χιαστί μέλη του πρώτου και δευτέρου ορόφου 1,05 μέτρα (m) και 0,90 μέτρα (m) αντίστοιχα. Η κατασκευή και η συμπεριφορά ενός τέτοιου χιαστί συνδέσμου αποτελούμενου από κράμα μνήμης σχήματος έχει πλήρως περιγραφεί και επεξηγηθεί στην ενότητα 5.1.1 και έχει πλήρως απεικονισθεί στην εικόνα 5.4.

Οι τιμές των παραμέτρων σύμφωνα με τις οποίες περιγράφεται η συμπεριφορά των κραμάτων νιτινόλης και υποτέθηκαν και στην παρούσα έρευνα (χάρη στη μεγάλη σύγκλιση μεταξύ της πειραματικής και εξιδανικευμένης συμπεριφοράς σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση) είναι $\alpha=0,16$, $\beta=0,5$, $E_{SMA}=46,5$ GPa και $\sigma_y=500$ MPa.

Η προσομοίωση του δώροφου πλαισίου έγινε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του OpenSees και οι αναλύσεις που «έλαβαν χώρα» (στατική υπερωθητική ανάλυση και δυναμική ανάλυση) υλοποιήθηκαν επίσης μέσω του ίδιου προγράμματος. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ό,τι η συμπεριφορά του δομικού χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, προσδιορίστηκε με τον τύπο υλικού Steel01 του OpenSees, ενώ η συμπεριφορά του «έξυπνου υλικού» μοντελοποιήθηκε και ορίστηκε μέσω του υλικού SelfCentering του OpenSees. Τέλος, έγινε χρήση και του προγράμματος Matlab.

5.2.2 Υποβολή του δώροφου πλαισίου σε ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (Modal Pushover Analysis) και σε στατική υπερωθητική ανάλυση (Pushover Analysis)

Στην παρούσα υποενότητα ερευνάται η συμπεριφορά της δώροφης κατασκευής με τη μέθοδο της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης (Pushover Analysis), αφού όμως έχει προηγηθεί ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση του φορέα (Modal Pushover Analysis) προκειμένου να προσδιορισθούν οι δύο πρώτες ιδιοπερίοδοι της κατασκευής για κάθε υπόθεση (εμβαδό διατομής ελκυστήρων A, A/2 και ίδια δυστένεια) και κάθε

περίπτωση (που οι χιαστί σύνδεσμοι είναι από υλικό δομικού χάλυβα και από shape memory alloy).

Στον πίνακα 5.20 φαίνονται οι τιμές των 2 πρώτων ιδιοπεριόδων της κατασκευής για όλες τις υποθέσεις. Παρατίθενται και οι ιδιοπερίοδοι της μονώροφης κατασκευής προς σύγκριση.

Models		T1 (sec)	T2 (sec)
2-storey	Common Steel	0.171	0.060
	SMA	0.346	0.104
1-storey	Common Steel	0.105	0.032
	SMA	0.215	0.033

(α) Ιδιοπερίοδοι των κατασκευών για ίδια διατομή A

Model		T1 (sec)	T2 (sec)
2-storey	Common Steel	0.24	0.08
	SMA	0.47	0.12
1-storey	Common Steel	0.15	0.03
	SMA	0.29	0.03

(β) Ιδιοπερίοδοι των κατασκευών για ίδια διατομή A/2

Models		T1 (sec)	T2 (sec)
2-storey	Common Steel	0.346	0.104
	SMA	0.346	0.104
1-storey	Common Steel	0.215	0.033
	SMA	0.215	0.033

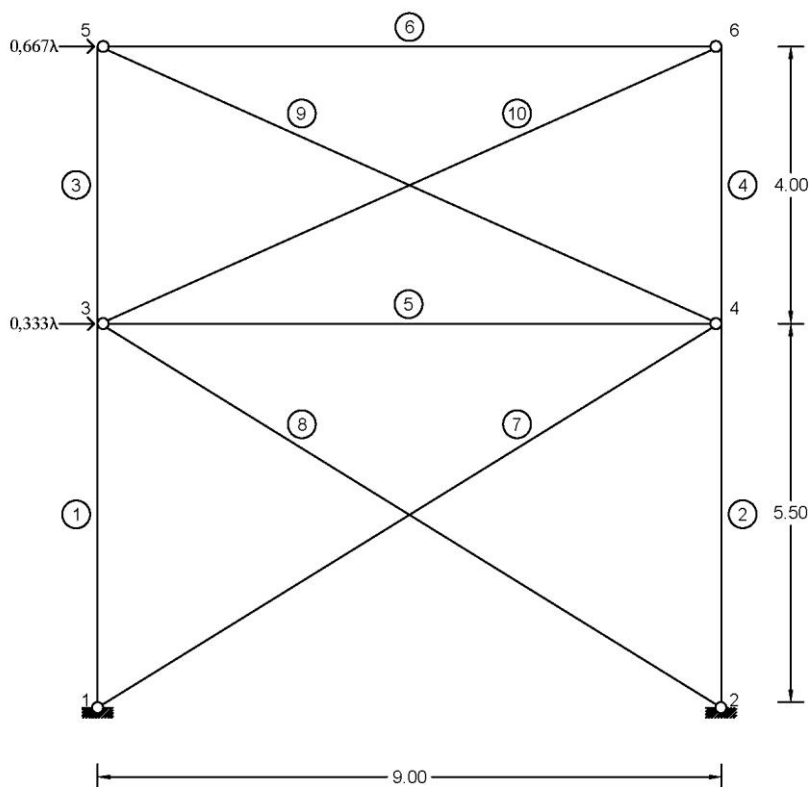
(γ) Ιδιοπερίοδοι των κατασκευών για ίδια δυστένεια των ελκυστήρων

Πίνακας 5.20

Στο σενάριο του αμετάβλητου εμβαδού διατομής, οι ιδιοπερίοδοι του πλαισίου με χρήση «έξυπνου» υλικού είναι σχεδόν διπλάσιες του αντίστοιχου με χρήση κοινού χάλυβα. Συνεπώς, ο φορέας γίνεται πιο εύκαμπτος στην περίπτωση της χρήσης «έξυπνου υλικού» δηλαδή η συμβολή που προσφέρουν τα shape memory alloys στη δυσκαμψία του φορέα συγκριτικά με τον κοινό δομικό χάλυβα είναι αρκετά μικρότερη. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απολύτως λογικό και αναμενόμενο εάν σκεφτεί κανείς ό,τι το μέτρο ελαστικότητας των κραμάτων μνήμης σχήματος είναι αρκετά μικρότερο από του χάλυβα (4,5 φορές μικρότερο). Στην περίπτωση της σταθερής δυστένειας οι δύο φορείς έχουν ίδια ιδιοπερίοδο, όπως και αναμένεται καθώς η συνολική τους δυσκαμψία είναι ίση.

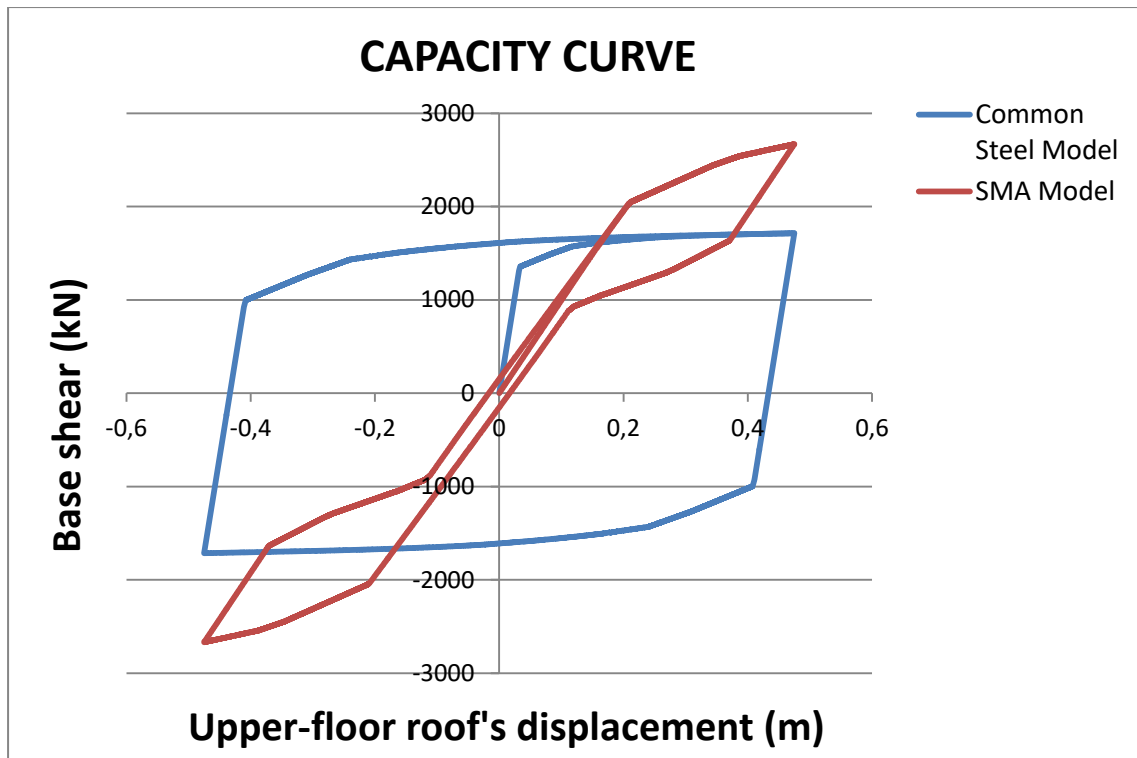
Στην ανάλυση Pushover επιβάλλονται επαυξητικά στους κόμβους 3 και 5 του φορέα με βήμα ανάλυσης 0,0001 οριζόντια φορτία προς τα δεξιά έως την τιμή που η

μετακίνηση της οροφής του δεύτερου ορόφου αντιστοιχεί σε drift 5%. Κατόπιν ακολουθεί αποφόρτιση της κατασκευής και ακολούθως ίδια φόρτιση αλλά προς την αντίθετη πλευρά και ξανά ομοίως αποφόρτιση και φόρτιση. Η κατανομή των οριζόντιων φορτίων είναι τριγωνική και ο συντελεστής του φορτίου για τον πρώτο όροφο έχει τιμή 0,333 και για τον δεύτερο όροφο 0,667. Επίσης, το άθροισμα των οριζόντιων φορτίων που ασκούνται στους κόμβους 3 και 5 ισούται κάθε στιγμή με την τέμνουσα βάσης της κατασκευής. Η φόρτιση του φορέα φαίνεται στην εικόνα 5.21.

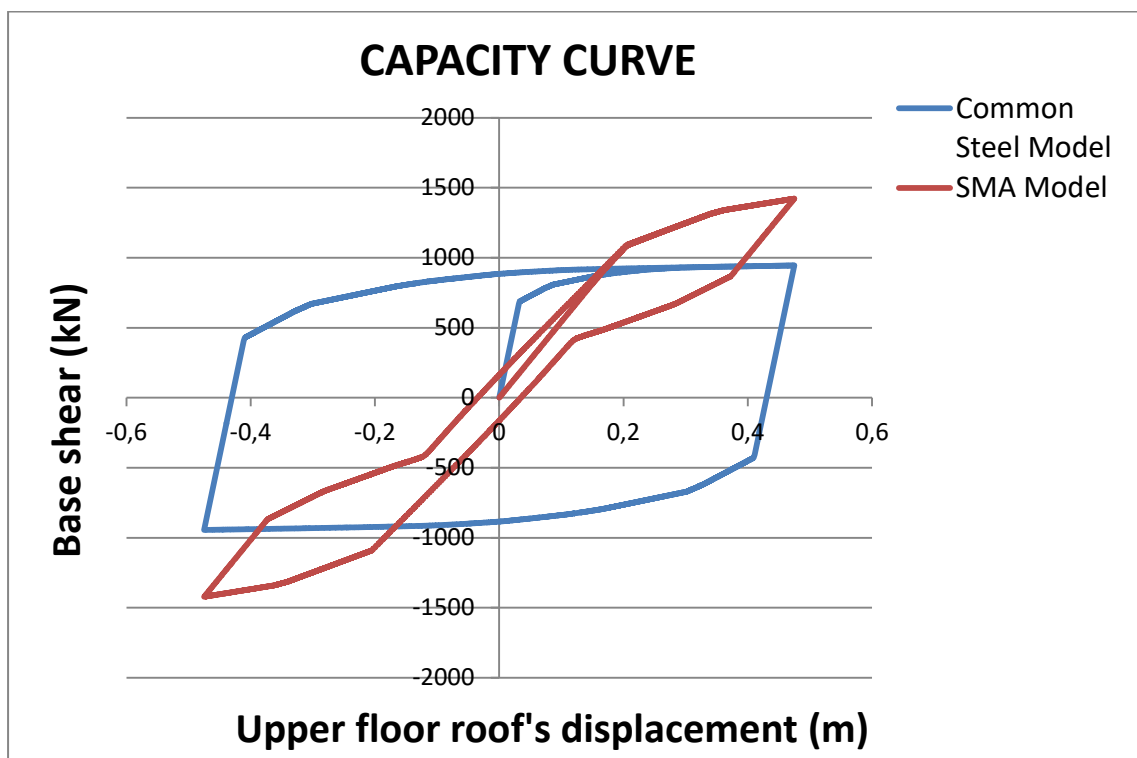


Εικόνα 5.21: Απεικόνιση του επίπεδου δώροφου πλαισίου σε στατική υπερωθητική ανάλυση

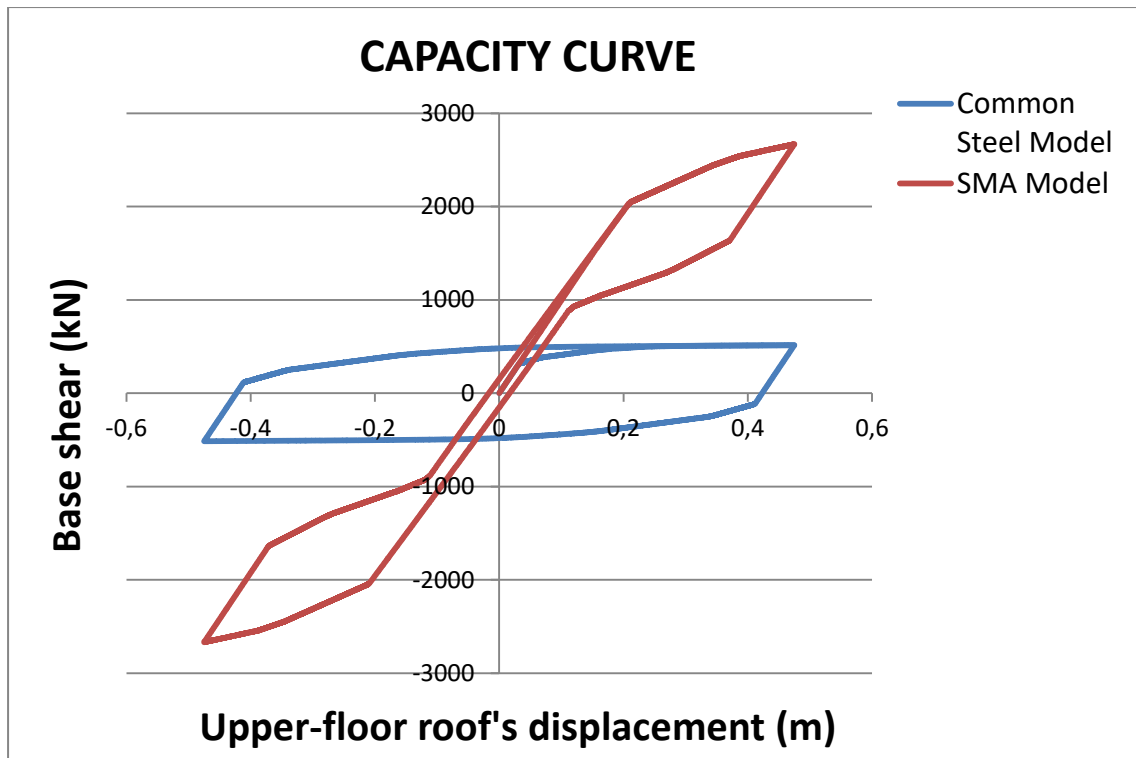
Από την Pushover ανάλυση προκύπτουν οι επόμενες καμπύλες ικανότητας των φορέων και τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων – οριζόντιας μετακίνησης των χιαστί συνδέσμων.



Διάγραμμα 5.22: Ικανοτικές καμπύλες κατασκευών για εμβαδόν διατομής χιαστί συνδέσμων A



Διάγραμμα 5.23: Ικανοτικές καμπύλες κατασκευών για εμβαδόν διατομής χιαστί συνδέσμων A/2



Διάγραμμα 5.24: Ικανοτικές καμπύλες κατασκευών με ίδια δυστένεια χιαστί συνδέσμων

Από τα διαγράμματα παραπάνω γίνεται για μία ακόμη φορά εμφανής η καθοριστική επίδραση της χρήσης των «έξυπνων» υλικών στην κατασκευή. Σημειώνονται οι εξής παρατηρήσεις:

Για την υπόθεση που το εμβαδόν διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων είναι σταθερό και ίσο με A, τότε κατά τη φόρτιση και μετατόπιση της κατασκευής προς τα δεξιά και προτού η κατασκευή με μοναδικό υλικό τον κοινό δομικό χάλυβα διαρρεύσει, η μετατόπιση της κατασκευής με χρήση «έξυπνων» υλικών είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μετατόπιση της κατασκευής με αποκλειστική χρήση δομικού χάλυβα. Αυτό οφείλεται στη μικρότερη δυσκαμψία που προσφέρουν τα shape memory alloys στην κατασκευή. Η ίδια συνθήκη ισχύει και μετά τη διαρροή της κατασκευής αποτελούμενη μόνο από χάλυβα έως και το σημείο τομής των δύο ικανοτικών καμπυλών των κατασκευών, με τη διαφορά ότι στο διάστημα εκείνο ο φορέας με μοναδικό υλικό τον χάλυβα λαμβάνει την επιπλέον μετατόπιση ανελαστικά, ενώ ο φορέας με τα SMAs ελαστικά. Μετά το σημείο εκείνο και έως τη μετακίνηση οροφής που αντιστοιχεί σε drift 5% των κατασκευών, για κάθε ίδια μετακίνηση ο φορέας με χρήση συρμάτων νιτινόλης αναπτύσσει μεγαλύτερες δυνάμεις, απόρροια της μεγαλύτερης τιμής της τάσης διαρροής του συγκεκριμένου υλικού, ενώ για κάθε ίδια δύναμη έως τη μεγαλύτερη τιμή της δύναμης που αναπτύσσεται στο αποκλειστικά χαλύβδινο πλαίσιο, οι μετακινήσεις της κατασκευής με SMAs είναι μικρότερες. Κατά την αποφόρτιση, το πλαίσιο με χρήση «έξυπνων υλικών» επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα, ενώ στη δεύτερη υπόθεση ανακτά μόνο την ελαστική παραμόρφωση. Για να επανέλθει στο αρχικό του σχήμα συνεπάγεται ότι έχουν αναπτυχθεί δυνάμεις σχεδόν ίσες και αντίθετες με τις μέγιστες της φόρτισης. Η

τελευταία αυτή παρατήρηση είναι η κύρια αιτία για την οποία ερευνάται η χρήση «έξυπνων» υλικών και η συμβολή τους στη σεισμική απόκριση των κατασκευών.

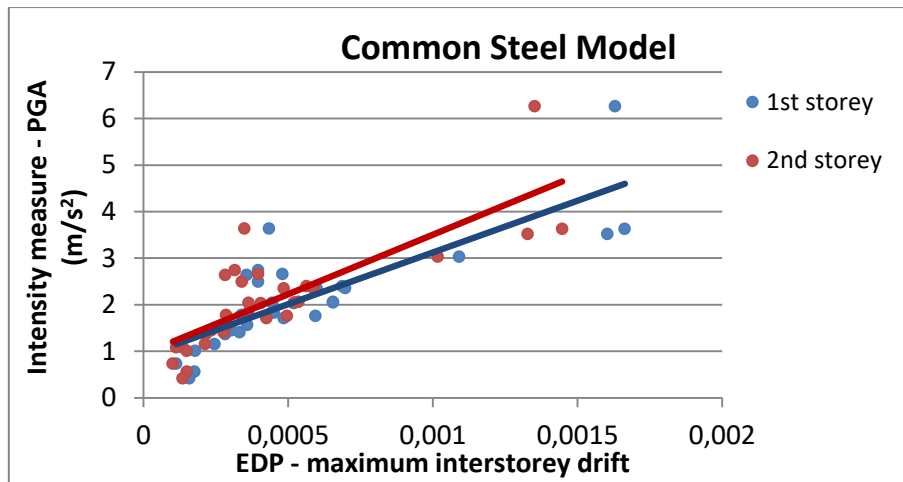
Οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για την περίπτωση του υποδιπλασιασμού του εμβαδού διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων. Οι διαφορές σε αυτήν την περίπτωση είναι οι μικρότερες τιμές των δυνάμεων διαρροής των κατασκευών, αφού μειώθηκε η δυσκαμψία τους και κάποια μικρή παραμένουσα παραμόρφωση που εμφανίζει το κτήριο με τα σύρματα νιτινόλης.

Για το σενάριο της μεταβολής της διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων ανάλογα το υλικό ώστε να έχουν την ίδια δυστένεια (εμβαδόν διατομής με SMA A, με κοινό δομικό χάλυβα υπολογίζεται), οι επίπεδοι πλαισιακοί φορείς παρουσιάζουν την ίδια συνολική δυσκαμψία, επακόλουθο της υπόθεσης που έγινε με μεγάλη διαφορά όμως στη δύναμη διαρροής των κατασκευών από «έξυπνο» υλικό, αφού τα «έξυπνα» υλικά έχουν μεγαλύτερη τάση διαρροής, άρα και στις δυνάμεις που μπορούν να αναλάβουν οι δύο κατασκευές. Οι μετατοπίσεις με χρήση κραμάτων μνήμης σχήματος είναι μηδενικές κάτι το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση χρήσης χάλυβα όπου ανακτώνται μονάχα οι ελαστικές παραμορφώσεις.

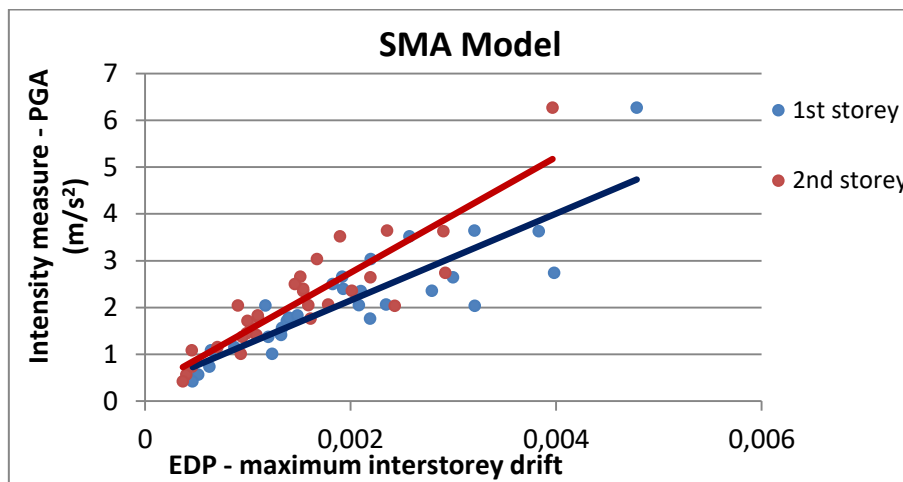
5.2.3 Απόκριση του δώροφου επιπέδου πλαισίου υπό δυναμικά φορτία (σεισμικές διεγέρσεις)

Κατόπιν αναλύσεως των διαφόρων δώροφων κατασκευών με στατική υπερωθητική ανάλυση και μελέτη των συμπεριφορών τους σε κάθε περίπτωση, πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση των κατασκευών. Τα δυναμικά φορτία που επιβάλλονται στις κατασκευές είναι 30 σεισμικές καταγραφές οι ίδιες με αυτές που υποβλήθηκαν και τα μονώροφα επίπεδα πλαίσια της προηγούμενης ενότητας. Τα επιταχυνσιογραφήματα των εν λόγω σεισμικών διεγέρσεων φαίνονται στην εικόνα 5.10. Να σημειωθεί ό,τι η ένταση των επιταχυνσιογραφήματων διπλασιάστηκε για την περίπτωση που το εμβαδόν διατομή των ελκυστήρων είναι A/2.

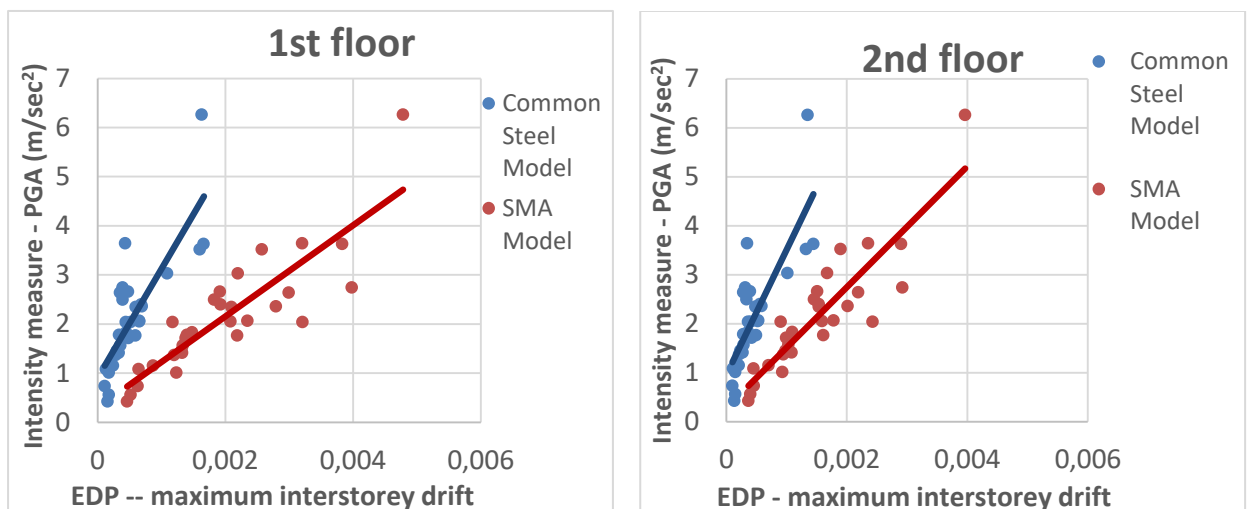
Όπως έγινε και προηγουμένως έτσι και τώρα, από τις δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν υπολογίστηκε για κάθε σεισμική καταγραφή το μέγιστο drift κάθε ορόφου των κατασκευών, καθώς και η μετακίνηση κάθε ορόφου που αντιστοιχεί στην τελευταία τιμή του κάθε επιταχυνσιογραφήματος. Παρακάτω απεικονίζονται τα μεγέθη αυτά, ως μέτρο εκτίμησης της βλάβης σε ένα κτήριο, συναρτήσει των μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων (peak ground acceleration, PGA). Η σειρά που παρατίθενται τα διαγράμματα είναι πρώτα για το σενάριο της ίδιας διατομής A των ελκυστήρων σε κάθε περίπτωση, έπειτα για τον υποδιπλασιασμό αυτής A/2 και τέλος για την υπόθεση της ίδιας δυστένειας των ελκυστήρων.



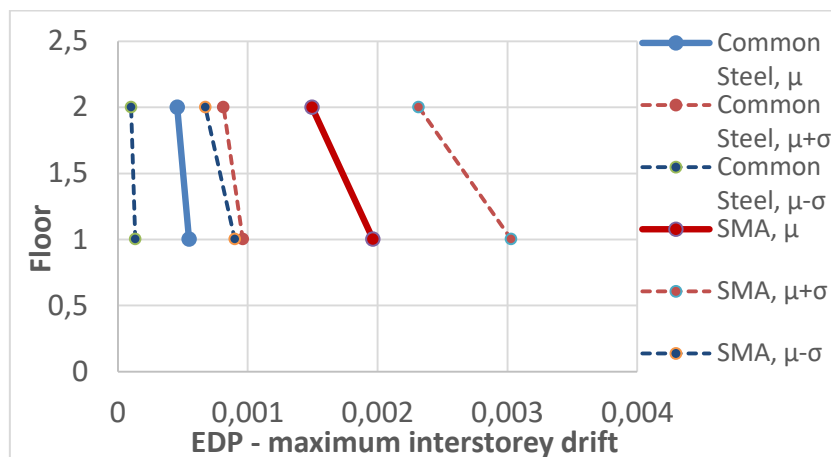
Εικόνα 5.25α: Διάγραμμα μέγιστου drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή Α



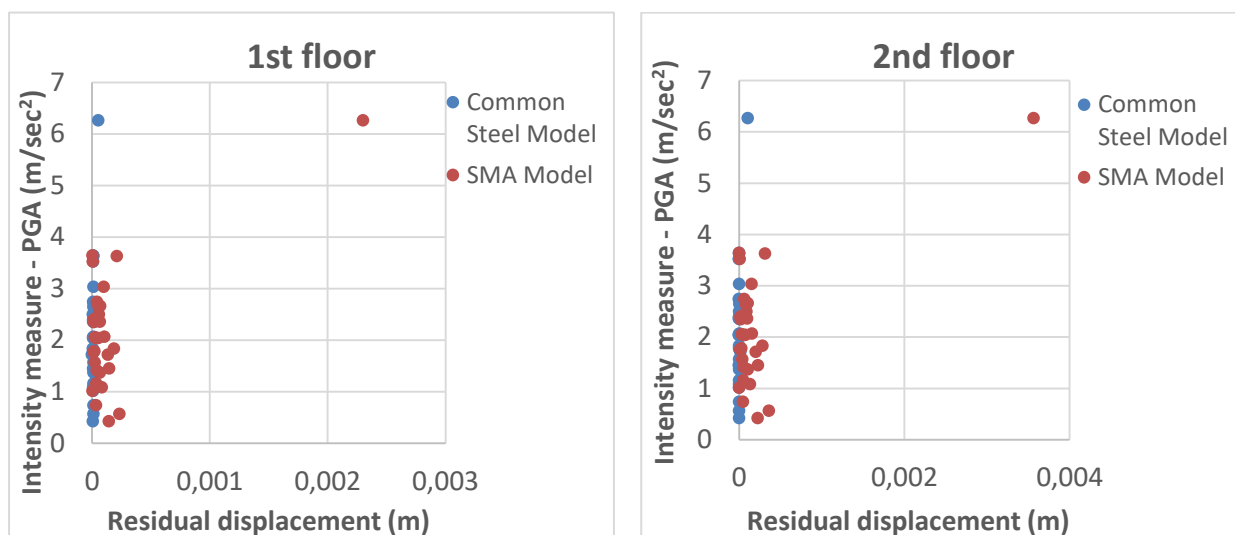
Εικόνα 5.25β: Διάγραμμα μέγιστου drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή Α



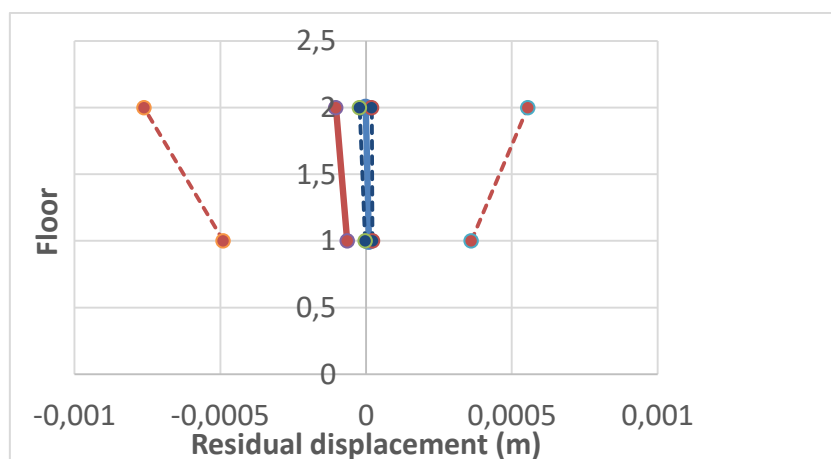
Εικόνα 5.25γ: Διάγραμμα μέγιστου drift 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή Α



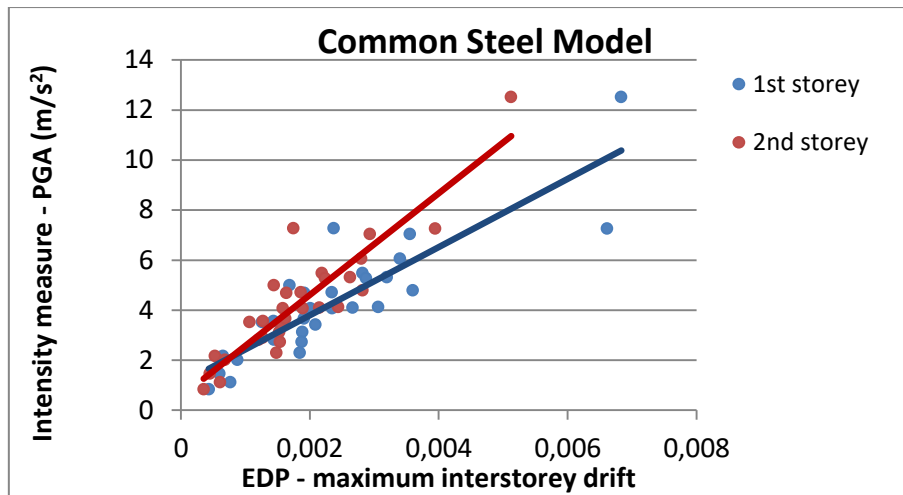
Εικόνα 5.25δ: Διάγραμμα Ορόφων - Μέσης τιμής μέγιστων drift, Διατομή Α



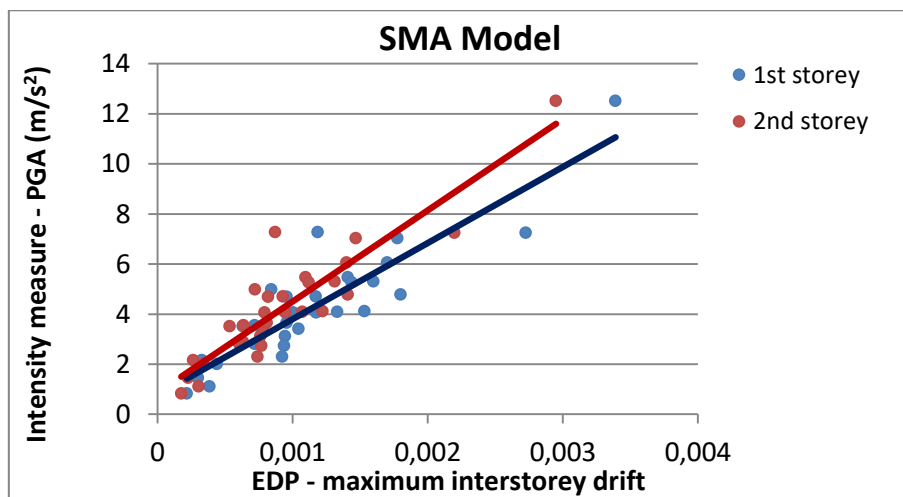
Εικόνα 5.26α: Διάγραμμα παραμένουσας μετακίνησης 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου (απόλυτες τιμές) – Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, Διατομή Α



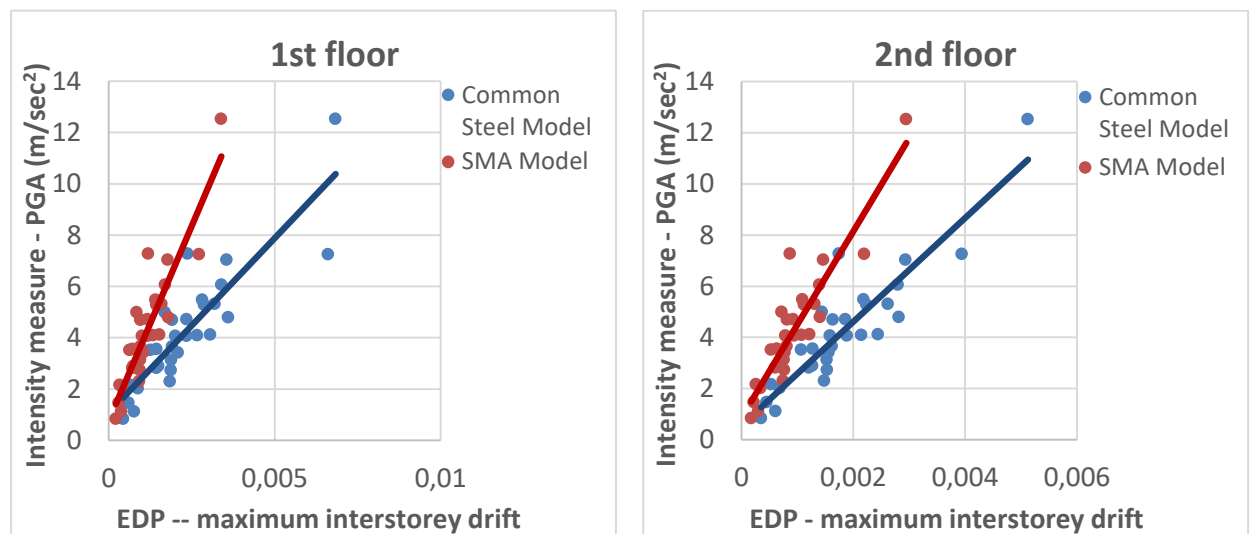
Εικόνα 5.26β: Διάγραμμα Ορόφων – Μέσης τιμής παραμένουσας μετακίνησης, Διατομή Α



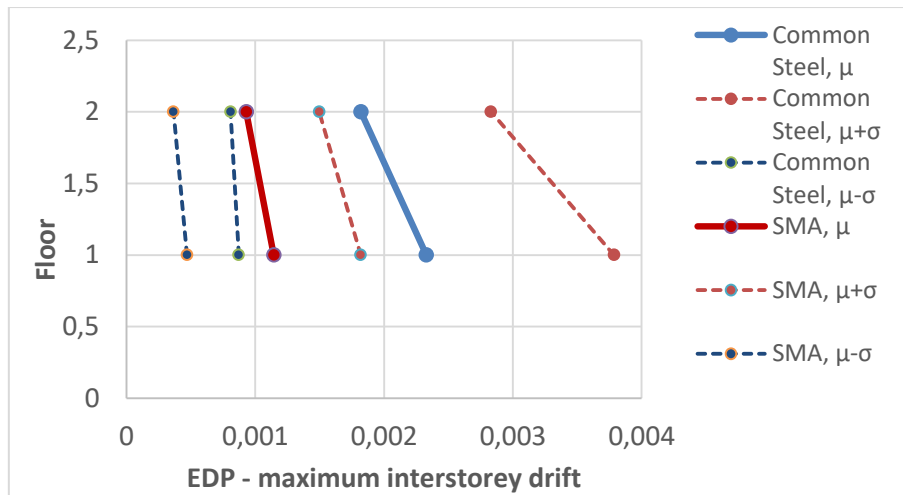
Εικόνα 5.27α: Διάγραμμα μέγιστου drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή A/2



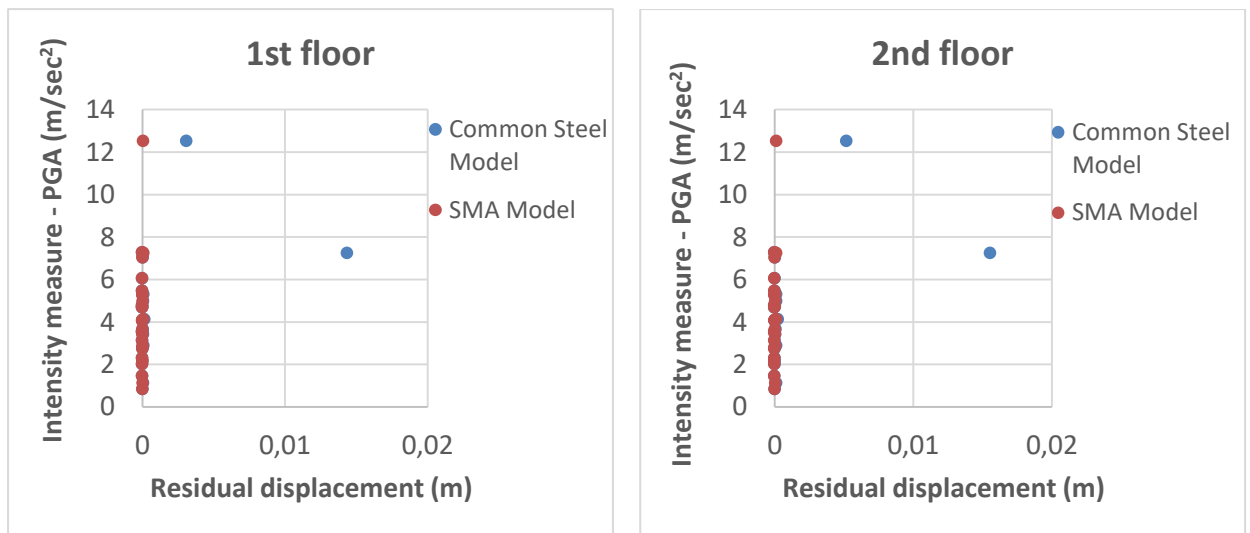
Εικόνα 5.27β: Διάγραμμα μέγιστου drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή A/2



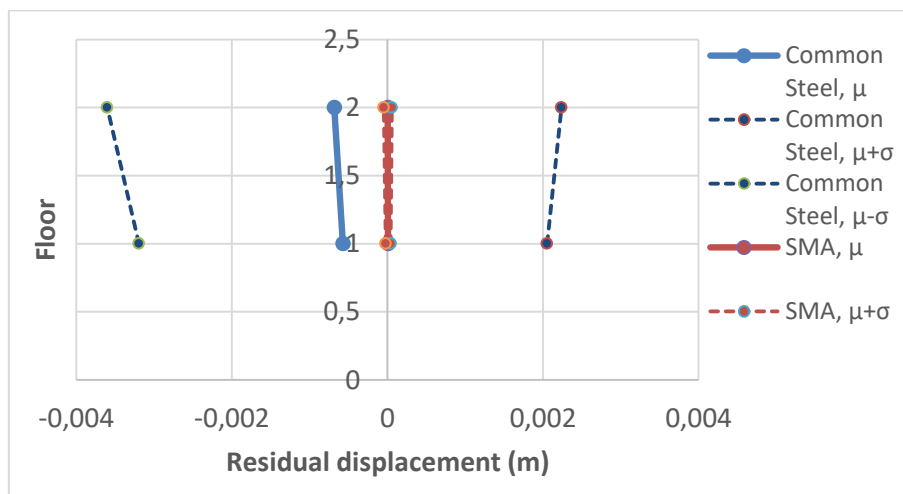
Εικόνα 5.27γ: Διάγραμμα μέγιστου drift 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή A/2



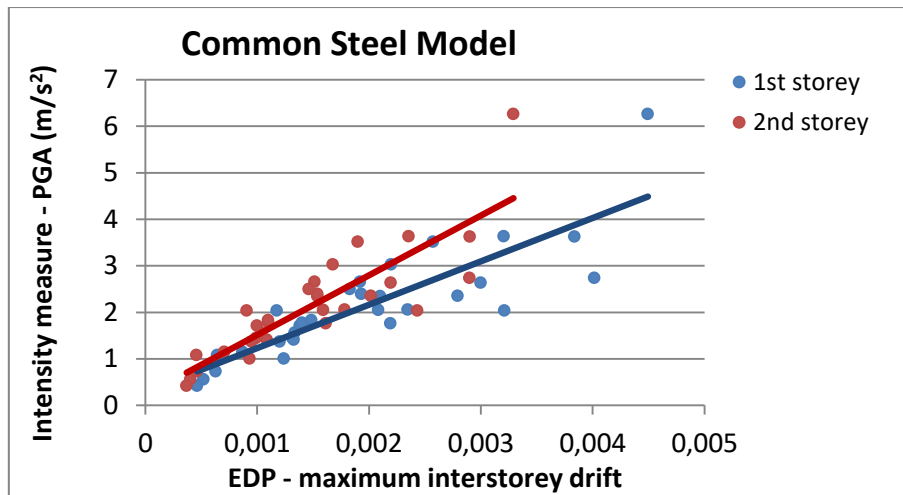
Εικόνα 5.27δ: Διάγραμμα Ορόφων - Μέσης τιμής μέγιστων drift, Διατομή A/2



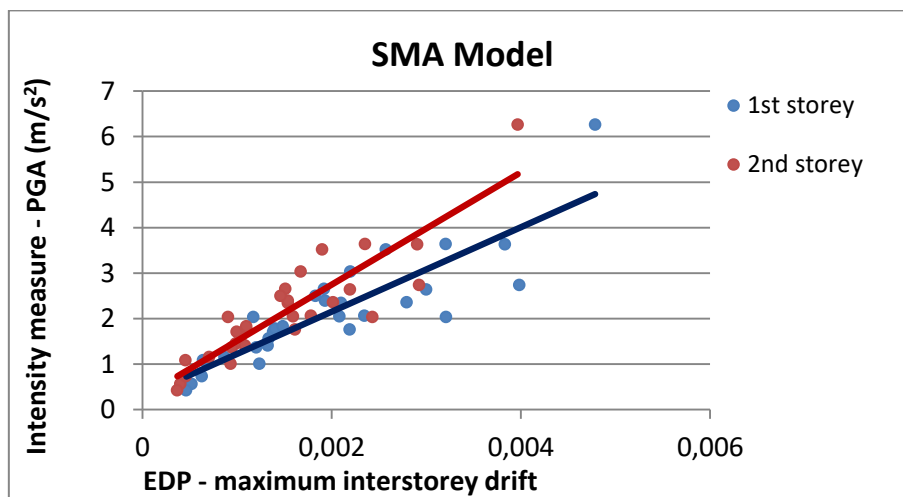
Εικόνα 5.28α: Διάγραμμα παραμένουσας μετακίνησης 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου (απόλυτες τιμές) – Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, Διατομή A/2



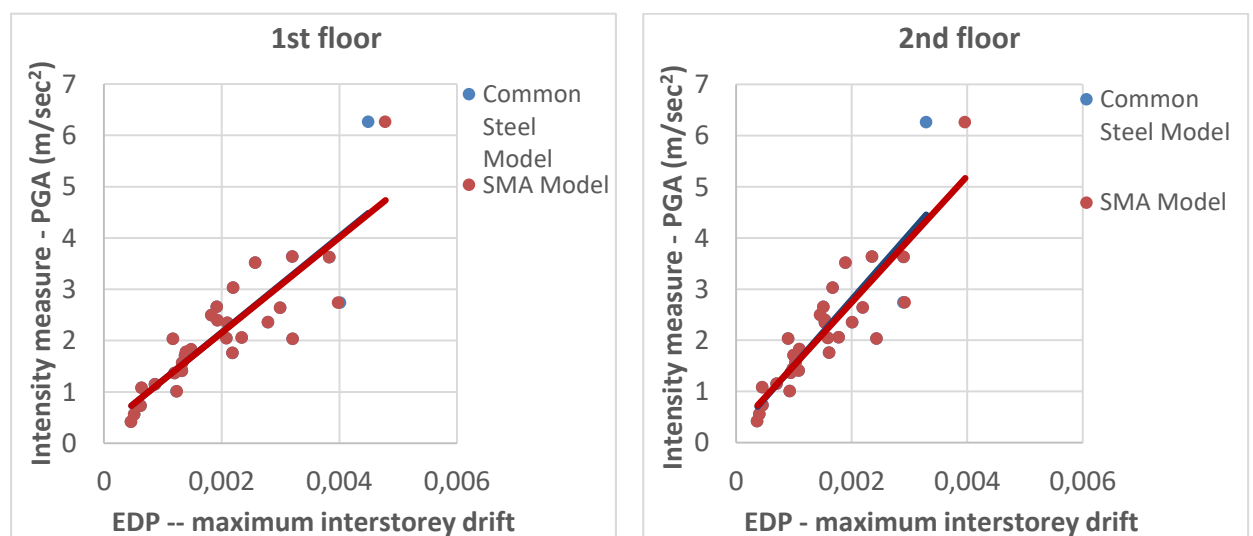
Εικόνα 5.28β: Διάγραμμα Ορόφων – Μέσης τιμής παραμένουσας μετακίνησης, Διατομή A/2



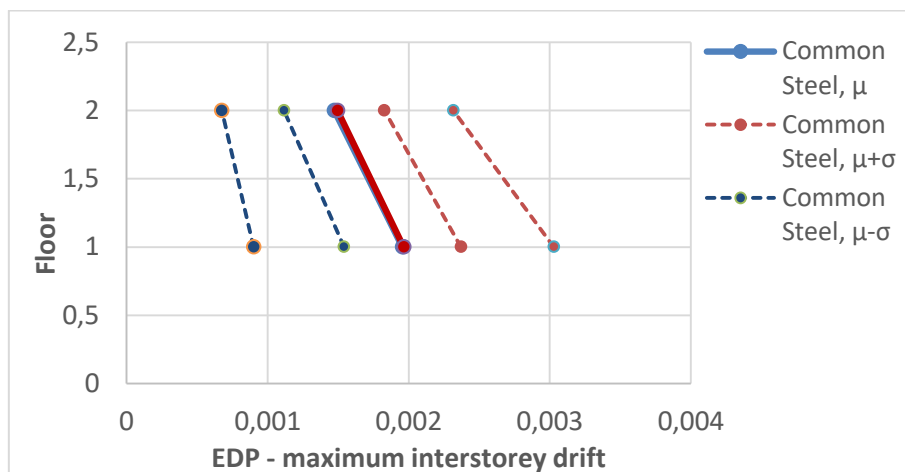
Εικόνα 5.29α: Διάγραμμα μέγιστου drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Ίδια δυστένεια



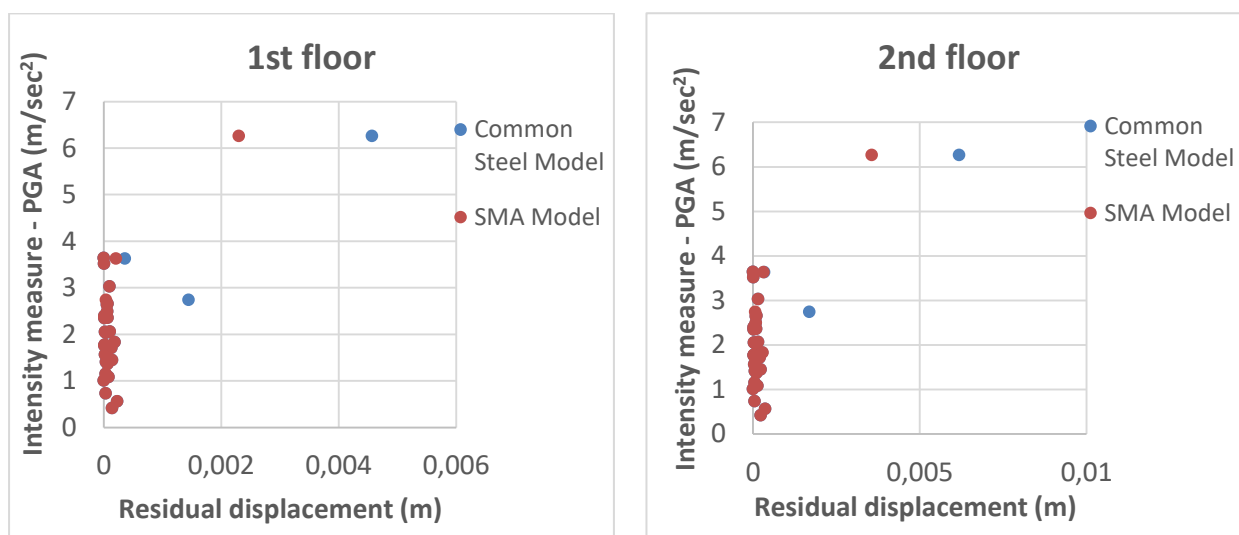
Εικόνα 5.29β: Διάγραμμα μέγιστου drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Ίδια δυστένεια



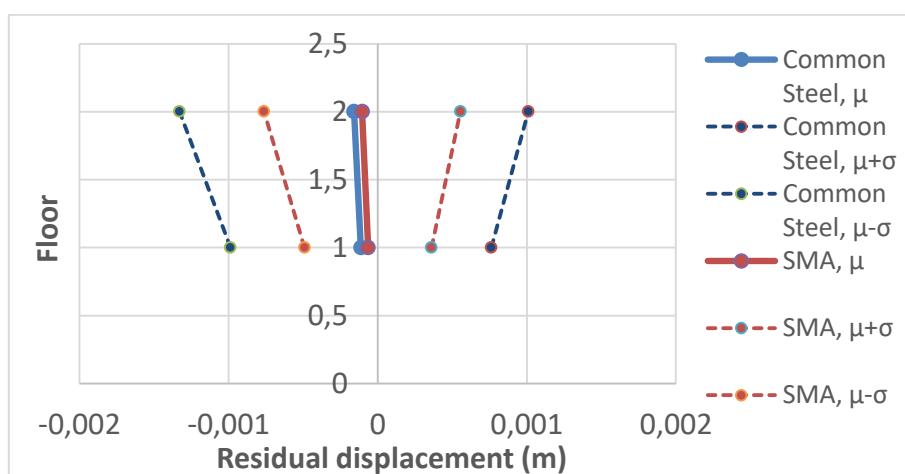
Εικόνα 5.29γ: Διάγραμμα μέγιστου drift 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Ίδια δυστένεια



Εικόνα 5.29δ: Διάγραμμα Ορόφων - Μέσης τιμής μέγιστων drift, Ίδια δυστένεια



Εικόνα 5.30α: Διάγραμμα παραμένουσας μετακίνησης 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου (απόλυτες τιμές) – Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, Ίδια δυστένεια



Εικόνα 5.30β: Διάγραμμα Ορόφων – Μέσης τιμής παραμένουσας μετακίνησης, Ίδια δυστένεια

Από τα παραπάνω διαγράμματα που παράχθηκαν από τη μελέτη απόκρισης στα επιβαλλόμενα δυναμικά φορτία (σεισμικές καταγραφές) των φορέων όλων των περιπτώσεων και υποπεριπτώσεων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Για τις κατασκευές με ίδιο εμβαδόν διατομής στους ελκυστήρες-θλιπτήρες οι τελικές μετακινήσεις των ορόφων είναι μεγαλύτερες χρησιμοποιώντας «έξυπνο» υλικό. Ωστόσο, η διαφορά τους στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι κάποια κλάσματα του χιλιοστού και η μεγαλύτερη διαφορά δεν ξεπερνά τα 2 χιλιοστά. Επομένως, η διαφορά είναι σχεδόν μηδενική και οφείλεται στην μεγαλύτερη δυσκαμψία που έχουν οι φορείς με μοναδικό υλικό τον δομικό χάλυβα. Επίσης, παρατηρείται ό,τι οι κατασκευές δε διαρρέουν με την ένταση των περισσότερων σεισμικών καταγραφών για αυτό και είναι τόσο μικρή η διαφορά τους και ο χάλυβας έχει τις μικρότερες μετακινήσεις. Επιπλέον, τα μέγιστα drifts που αναπτύσσονται στους φορείς με «έξυπνο» υλικό είναι μεγαλύτερα εξαιτίας της ευκαμψίας που προσδίδουν τα υλικά αυτά στις κατασκευές. Και πάλι όμως η διαφορά είναι σχεδόν μηδενική, μικρότερη της τάξεως του 0,2%. Ακόμη, μεταξύ των ορόφων πρέπει να σημειωθεί ό,τι ο πρώτος όροφος εμφανίζει μεγαλύτερα drifts από τον δεύτερο ανεξαρτήτως υλικού.

Από την άλλη, στους φορείς με ίδια δυστένεια χιαστί συνδέσμων και επειδή οι κατασκευές έχουν ίδια συνολική δυσκαμψία και η αποκλειστικά χαλύβδινη κατασκευή διαρρέει σε λίγες περιπτώσεις, τα μέγιστα drifts και οι τελικές μετακινήσεις που προκύπτουν από τις περισσότερες καταγραφές είναι ίδιες, ενώ στις περιπτώσεις που η ένταση αυξάνεται οι κατασκευές με χαλύβδινη διατομή στους ελκυστήρες εμφανίζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

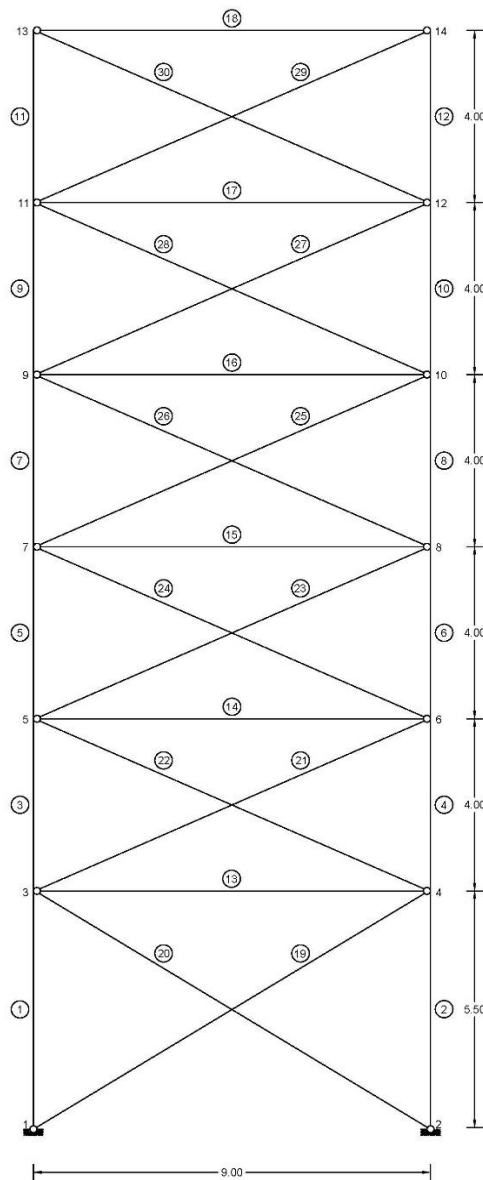
5.3 Μελέτη της συμπεριφοράς επίπεδου εξαώροφου μεταλλικού πλαισίου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Στην παρούσα ενότητα ερευνάται η συμπεριφορά ενός εξαώροφου επίπεδου μεταλλικού φορέα σε ανακυκλική φόρτιση. Όπως συνέβη και στις προηγούμενες 2 ενότητες, για το δώροφο επίπεδο μεταλλικό πλαίσιο καθώς και για το μονώροφο, γίνονται τρεις υποθέσεις για τη διατομή των χιαστί συνδέσμων (σταθερή διατομή A , σταθερή διατομή $A/2$ και μεταβλητή διατομή, αλλά ίδια δυστένεια). Επίσης, υπάρχουν δύο υποπεριπτώσεις σε κάθε υπόθεση. Στη μία υποπερίπτωση οι χιαστί σύνδεσμοι της κατασκευής αποτελούνται από δομικό χάλυβα και στην άλλη από κράματα μνήμης σχήματος.

5.3.1 Περιγραφή της γεωμετρίας και της κατασκευής του επίπεδου εξαώροφου πλαισίου

Η κατασκευή για την οποία γίνεται λόγος σε αυτήν την ενότητα είναι ένα μεταλλικό συμμετρικό εξαώροφο πλαίσιο, το οποίο σε κάθε όροφο φέρει διαγώνιους χιαστί συνδέσμους. Η εν λόγω κατασκευή της οποίας ο σχεδιασμός έχει εξετασθεί και υλοποιηθεί σε προηγούμενες μελέτες, έχει άνοιγμα $L=9.0$ m (σταθερό άνοιγμα σε

κάθε όροφο), ύψος 1ου ορόφου $H_1=5.50$ m, ύψος λοιπών ορόφων $H=4.0$ m και στα ζυγώματα φέρει ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο ίσο με 20 kN/m. Επιπλέον, εξασφαλίζεται η διαφραγματική λειτουργία του φορέα, ενώ ταυτόχρονα σκεπτόμενοι ό,τι είναι συμμετρικός και η σεισμική μάζα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, δε λαμβάνεται υπόψη η στρέψη από τις εδαφικές διεγέρσεις. Τα διαγώνια μέλη της κατασκευής, είναι ελκυστήρες-θλιπτήρες και είναι αρθρωτά συνδεδεμένα με τη δοκό. Επίσης, αρθρωτές είναι και οι συνδέσεις των υποστυλωμάτων στη δοκό. Κατά συνέπεια, οι ροπές κάμψης που μεταβιβάζονται μεταξύ των υποστυλωμάτων και της δοκού είναι πολύ μικρές και τα μέλη αυτά σχεδιάζονται ώστε να αναλαμβάνουν κυρίως αξονικά φορτία. Οι συνθήκες στήριξης της κατασκευής στο έδαφος είναι αρθρώσεις και χωρίς τα διαγώνια μέλη η κατασκευή είναι μηχανισμός. Με τα διαγώνια μέλη, η κατασκευή αποτελεί πλέον έναν υπερστατικό φορέα. Ο φορέας φαίνεται στην εικόνα 5.31.



Εικόνα 5.31: Απεικόνιση του επίπεδου εξάώροφου πλαισίου

Αναλυτικότερα, τα υποστυλώματα της κατασκευής του πρώτου, δεύτερου και τρίτου ορόφου είναι διατομής W14×132, ενώ του τέταρτου, πέμπτου και έκτου ορόφου είναι διατομής W14×53. Και στις δύο περιπτώσεις ο χάλυβας που χρησιμοποιείται στα υποστυλώματα είναι ASTM A992. Ο συγκεκριμένος χάλυβας έχει τάση διαρροής 345 MPa και γίνεται η υπόθεση ό,τι παρουσιάζει κράτυνση ίση με 0,003. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι ίσο με $E_s=210 \text{ GPa}$. Αναφορικά με τις δοκούς, στον πρώτο, δεύτερο και τρίτο όροφο έχουν διατομή W14×38, στον τέταρτο, πέμπτο και έκτο όροφο διατομή W14×30 και αποτελούνται επίσης από δομικό χάλυβα ASTM A992 με ίδια κράτυνση. Τα χαρακτηριστικά των παραπάνω διατομών, (εμβαδόν και ύψος διατομής, πάχος κορμού, πάχος και πλάτος πέλματος) φαίνονται στον πίνακα 5.32.

Element	Floor	Designation	Area A cm ²	Depth D cm	Web	Flange	
					Thickness t _w cm	Width b _f cm	Thickness t _f cm
Columns	1-3	W14x132	98.552	37.236	1.638	37.402	2.616
	4-6	W14x53	39.624	35.357	0.940	20.472	1.676
Beans	1-3	W14x38	28.448	35.814	0.787	17.196	1.308
	4-6	W14x30	22.479	35.154	0.686	17.094	0.978

Πίνακας 5.32: Διατομές υποστυλωμάτων και δοκών της εξώροφης κατασκευής

Οι χιαστί σύνδεσμοι του πρώτου ορόφου έχουν μήκος 10,55 μέτρα (m) και των λοιπών ορόφων 9,85 μέτρα (m), ενώ γίνονται τρεις υποθέσεις για τη διατομή τους και σε κάθε περίπτωση δίνονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις για το υλικό κατασκευής τους. Στη μία περίπτωση αποτελούνται από κοινό δομικό χάλυβα ίδιο με αυτόν των υποστυλωμάτων και της δοκού και στην άλλη από κράμα μνήμης σχήματος και συγκεκριμένα από νιτινόλη. Επίσης, η πρώτη υπόθεση είναι να παραμένει σταθερή η διατομή των ελκυστήρων-θλιπτήρων σε κάθε υποπερίπτωση, η δεύτερη να υποδιπλασιάζεται και η τρίτη να μεταβάλλεται η διατομή με κριτήριο η δυστένεια που προσφέρουν στην κατασκευή να είναι η ίδια. Τα χαρακτηριστικά τους για κάθε σενάριο παρατίθενται στον πίνακα 5.33.

Floor	Διατομή ελκυστήρων (mm ²)					
	Ίδια διατομή A		Ίδια διατομή A/2		Ίδια δυστένεια	
	Steel	SMA	Steel	SMA	Steel	SMA
1	2276,3	2276,3	1138,15	1138,15	2276,3	504,1
2	1843,4	1843,4	921,7	921,7	1843,4	408,2
3	1693,6	1693,6	846,8	846,8	1693,6	375
4	1472,4	1472,4	736,2	736,2	1472,4	326,1
5	1166,4	1166,4	583,2	583,2	1166,4	258,3
6	743,7	743,7	371,85	371,85	743,7	164,7

Πίνακας 5.33: Εμβαδόν διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων

Όταν οι ελκυστήρες αποτελούνται από σύρματα νιτινόλης, εκείνα δεν έχουν μήκος όσο οι ελκυστήρες, αλλά το μήκος τους για τα χιαστί μέλη του πρώτου ορόφου είναι 1,05 μέτρα (m) και για των λοιπών ορόφων 0,90 μέτρα (m). Η κατασκευή και η συμπεριφορά ενός τέτοιου μέλους αποτελούμενου από κράμα μνήμης σχήματος έχει πλήρως περιγραφεί και εξηγηθεί στην ενότητα 5.1.1 και έχει πλήρως απεικονισθεί στην εικόνα 5.4.

Οι τιμές των παραμέτρων σύμφωνα με τις οποίες περιγράφεται η συμπεριφορά των κραμάτων νιτινόλης και υποτέθηκαν και στην παρούσα έρευνα (χάρη στη μεγάλη σύγκλιση μεταξύ της πειραματικής και εξιδανικευμένης συμπεριφοράς σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση) είναι $\alpha=0,16$, $\beta=0,5$, $E_{SMA}=46,5$ GPa και $\sigma_y=500$ MPa.

Η προσομοίωση του δώροφου πλαισίου έγινε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του OpenSees και οι αναλύσεις που «έλαβαν χώρα», στατική υπερωθητική ανάλυση και δυναμική ανάλυση, υλοποιήθηκαν επίσης μέσω του ίδιου προγράμματος. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ό,τι η συμπεριφορά του δομικού χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, προσδιορίστηκε με τον τύπο υλικού Steel01 του OpenSees, ενώ η συμπεριφορά του «έξυπνου υλικού» μοντελοποιήθηκε και ορίστηκε μέσω του υλικού SelfCentering του OpenSees. Τέλος, έγινε χρήση και του προγράμματος Matlab και για την ακρίβεια συνδυασμός των δύο προγραμμάτων.

5.3.2 Υποβολή και μελέτη του επίπεδου εξαώροφου πλαισίου σε ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (Modal Pushover Analysis) και σε στατική υπερωθητική ανάλυση (Pushover Analysis)

Στην παρούσα υποενότητα ερευνάται η συμπεριφορά της εξαώροφης κατασκευής με τη μέθοδο της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης (Pushover Analysis), αφού όμως έχει προηγηθεί ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (Modal Pushover Analysis) προκειμένου να προσδιορισθούν οι δύο πρώτες ιδιοπερίοδοι της κατασκευής για κάθε υπόθεση (εμβαδό διατομής ελκυστήρων A, A/2 και ίδια δυστένεια) και κάθε περίπτωση (που οι χιαστί σύνδεσμοι είναι από υλικό δομικού χάλυβα και από shape memory alloy).

Στον πίνακα 5.34 φαίνονται οι τιμές των 2 πρώτων (σημαντικότερων) ιδιοπεριόδων της κατασκευής για όλες τις υποθέσεις. Παρατίθενται και οι ιδιοπερίοδοι των μονώροφων και δώροφων πλαισίων προς σύγκριση.

Models		T1 (sec)	T2 (sec)
6-storey	Common Steel	0.497	0.182
	SMA	0.932	0.340
2-storey	Common Steel	0.171	0.060
	SMA	0.346	0.104
1-storey	Common Steel	0.105	0.032
	SMA	0.215	0.033

(α) Ιδιοπερίοδοι κατασκευών για ίδια διατομή A

Model		T1 (sec)	T2 (sec)
6-storey	Common Steel	0.66	0.24
	SMA	1.23	0.44
2-storey	Common Steel	0.24	0.08
	SMA	0.47	0.12
1-storey	Common Steel	0.15	0.03
	SMA	0.29	0.03

(β) Ιδιοπερίοδοι της εξαώροφης κατασκευής για ίδια διατομή A/2

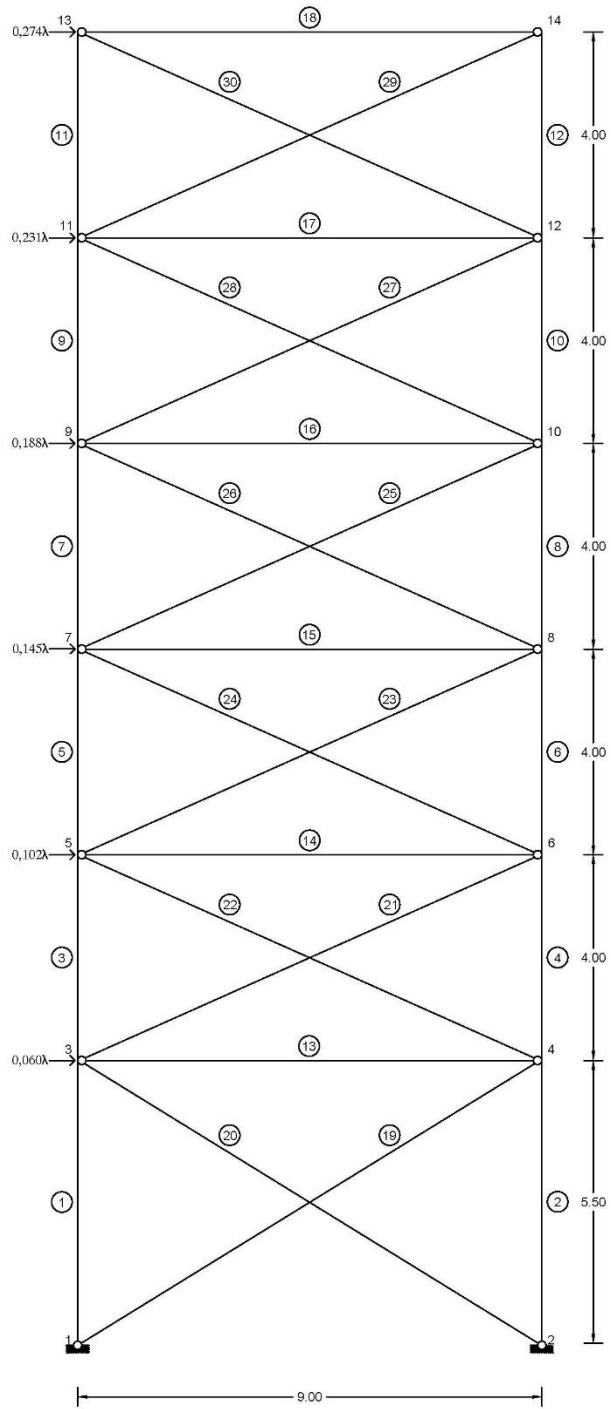
Models		T1 (sec)	T2 (sec)
6-storey	Common Steel	0.932	0.340
	SMA	0.932	0.340
2-storey	Common Steel	0.346	0.104
	SMA	0.346	0.104
1-storey	Common Steel	0.215	0.033
	SMA	0.215	0.033

(γ) Ιδιοπερίοδοι της εξαώροφης κατασκευής για ίδια δυστένεια των ελκυστήρων

Πίνακας 5.34

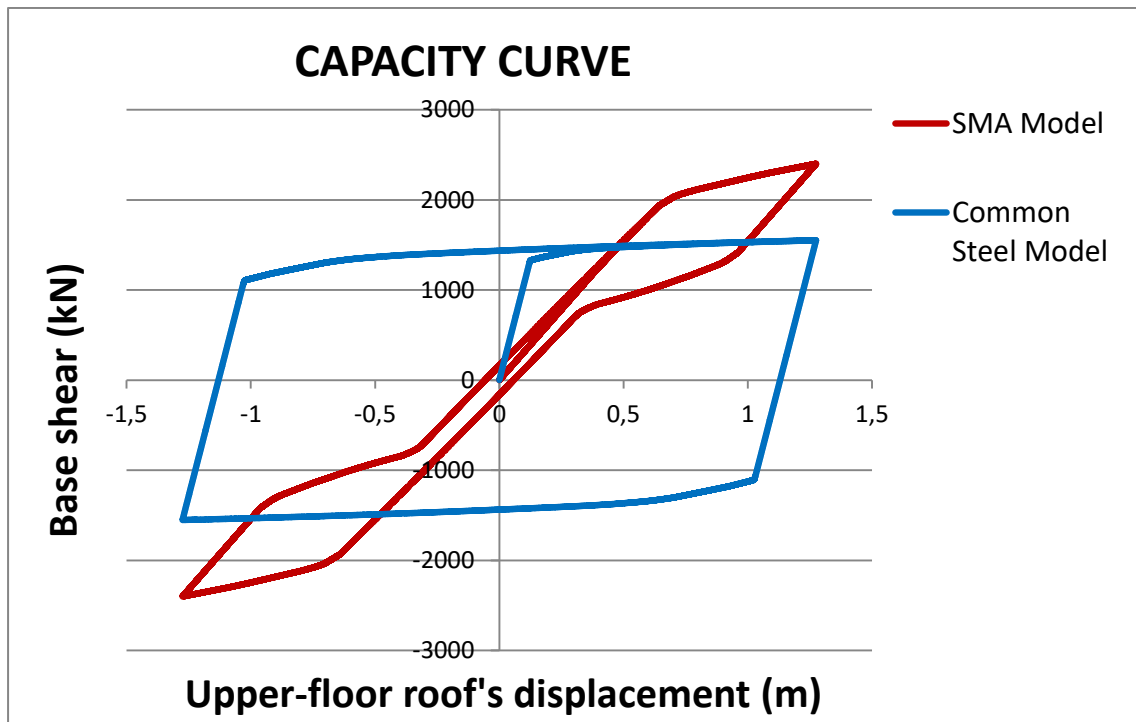
Στις περιπτώσεις όπου το εμβαδόν διατομής δε μεταβάλλεται, οι ιδιοπερίοδοι του πλαισίου με χρήση «έξυπνου» υλικού είναι σχεδόν διπλάσιες του αντίστοιχου με χρήση κοινού χάλυβα. Συνεπώς, ο φορέας είναι πιο εύκαμπτος στην περίπτωση της χρήσης shape memory alloy. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απολύτως λογικό και αναμενόμενο εάν σκεφτεί κανείς ό,τι το μέτρο ελαστικότητας των κραμάτων μνήμης σχήματος είναι αρκετά μικρότερο από του χάλυβα (4,5 φορές μικρότερο). Από την άλλη, στην περίπτωση της σταθερής δυστένειας οι δύο φορείς έχουν ίδια ιδιοπερίοδο, όπως και αναμένεται καθώς η συνολική τους δυσκαμψία είναι ίση.

Στην ανάλυση Pushover επιβάλλονται στους κόμβους 3, 5, 7, 9, 11 και 13 του φορέα με βήμα ανάλυσης 0,0001 οριζόντια και επαυξητικά φορτία προς τα δεξιά έως την τιμή που η μετακίνηση της οροφής του ανώτερου ορόφου αντιστοιχεί σε drift 5%. Κατόπιν ακολουθεί αποφόρτιση της κατασκευής και ακολούθως ίση και αντίθετη φόρτιση και ξανά ομοίως αποφόρτιση και φόρτιση. Η κατανομή των οριζόντιων φορτίων είναι τριγωνική και η τιμή του συντελεστή του φορτίου για όλους τους ορόφους ξεκινώντας από τον πρώτο και καταλήγοντας στον έκτο είναι κατά σειρά 0.060, 0.102, 0.145, 0.188, 0.231 και 0.274. Επίσης, το άθροισμα των οριζόντιων φορτίων που ασκούνται στους παραπάνω κόμβους ισούται κάθε στιγμή με την τέμνουσα βάση της κατασκευής. Η φόρτιση του φορέα που μόλις περιγράφηκε φαίνεται στην εικόνα 5.35.

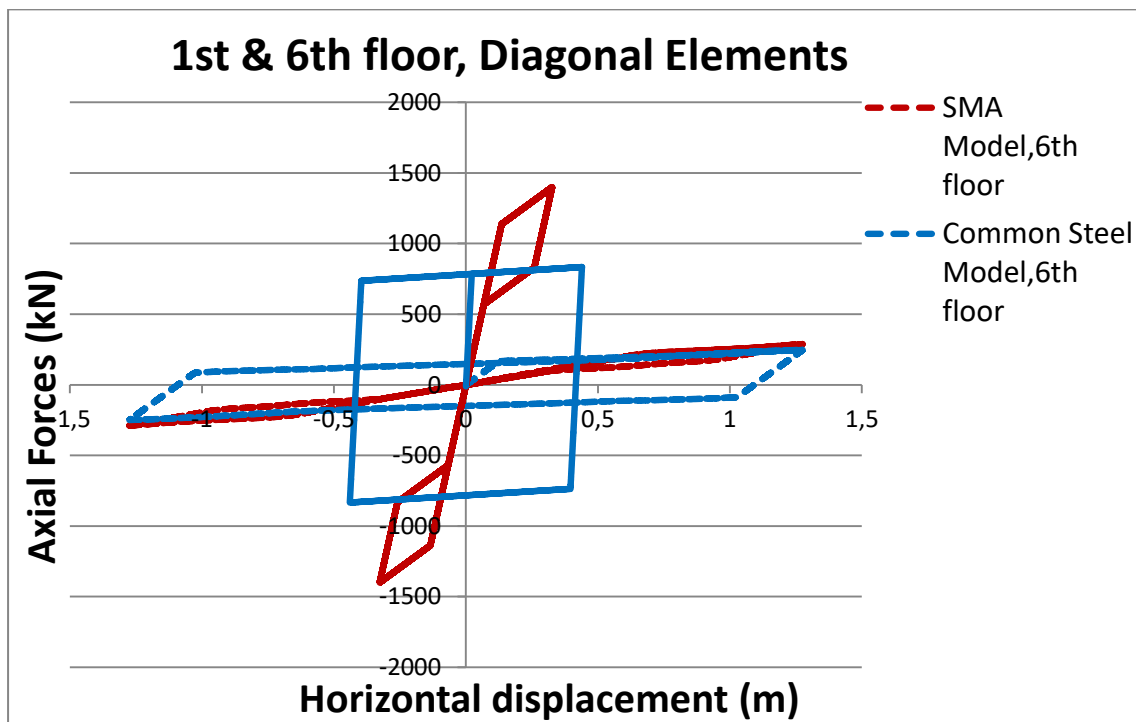


Εικόνα 5.35: Απεικόνιση του επίπεδου εξάρωρου πλαισίου σε στατική υπερωθητική ανάλυση

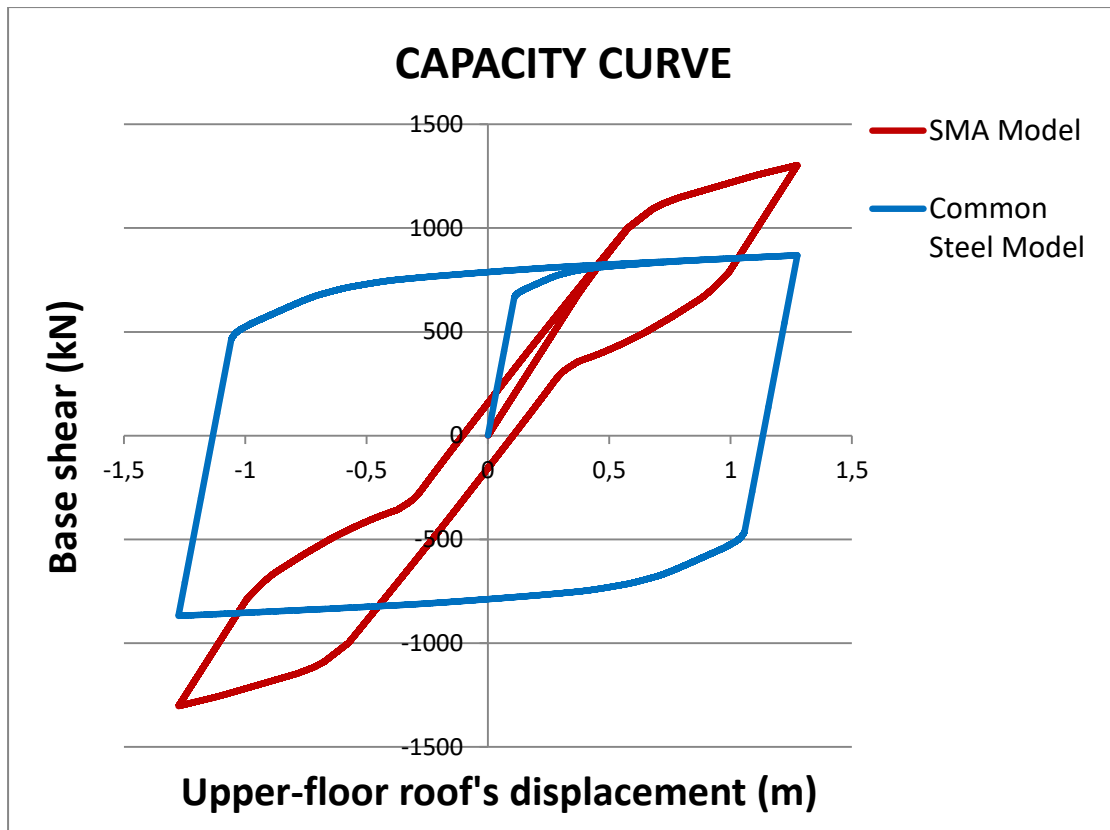
Από την Pushover ανάλυση προκύπτουν οι επόμενες καμπύλες ικανότητας των διαφόρων φορέων και τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων – οριζόντιας μετακίνησης των χιαστί συνδέσμων.



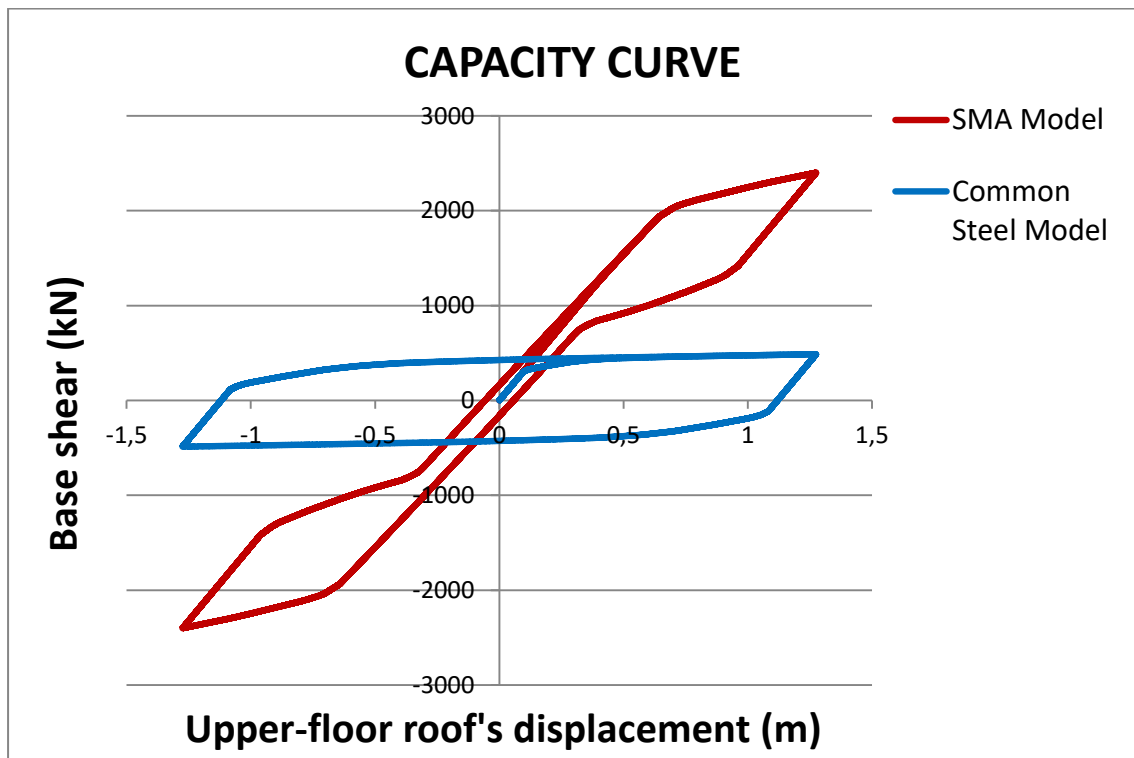
Διάγραμμα 5.36α: Ικανοτικές καμπύλες κατασκευών για εμβαδόν διατομής χιαστί συνδέσμων Α



Διάγραμμα 5.36β: Αξονικές δυνάμεις – οριζόντια μετακίνηση χιαστί συνδέσμων 1^{ου} και 6^{ου} ορόφου εμβαδού διατομής Α



Διάγραμμα 5.37: Ικανοτικές καμπύλες κατασκευών για εμβαδόν διατομής χιαστί συνδέσμων A/2



Διάγραμμα 5.38: Ικανοτικές καμπύλες κατασκευών με ίδια δυστένεια χιαστί συνδέσμων

Από τα διαγράμματα που μόλις προηγήθηκαν γίνεται για μία ακόμη φορά εμφανής η συμβολή της χρήσης των shape memory alloys για την προστασία των κατασκευών αντισεισμικά.

Αρχικά, σημειώνεται ό,τι για την υπόθεση που το εμβαδόν διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων είναι σταθερό και ίσο με A, τότε κατά τη φόρτιση και μετατόπιση της κατασκευής προς τα δεξιά και προτού η κατασκευή με μοναδικό υλικό τον δομικό χάλυβα διαρρεύσει, η μετατόπισή της είναι μικρότερη από την αντίστοιχη μετατόπιση της κατασκευής χρησιμοποιώντας «έξυπνο» υλικό. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη δυσκαμψία που εμφανίζει η πρώτη κατασκευή έναντι της δεύτερης. Η ίδια συνθήκη ισχύει και μετά τη διαρροή της κατασκευής έως και το σημείο τομής των δύο ικανοτικών καμπυλών των κατασκευών, με τη διαφορά ότι στο διάστημα εκείνο ο φορέας με μοναδικό υλικό τον χάλυβα λαμβάνει την επιπλέον μετατόπιση ανελαστικά, ενώ ο φορέας με shape memory alloys εξακολουθεί να τη λαμβάνει ελαστικά. Από το σημείο εκείνο και μετά έως και τη μετακίνηση οροφής του ανώτερου ορόφου που αντιστοιχεί σε drift 5%, για κάθε ίδια μετακίνηση ο φορέας με χρήση συρμάτων νιτινόλης αναπτύσσει μεγαλύτερες δυνάμεις, συνεπακόλουθο της μεγαλύτερης τιμής της τάσης διαρροής του συγκεκριμένου υλικού.

Οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για την περίπτωση του υποδιπλασιασμού του εμβαδού διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων. Η διαφορά σε αυτήν την περίπτωση είναι η μικρότερη τιμή της δύναμης διαρροής των κατασκευών, αφού μειώθηκε η δυσκαμψία τους και οι μεγαλύτερες τελικές παραμένουσες παραμορφώσεις της κατασκευής με shape memory alloys.

Για το σενάριο της μεταβολής της διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων αναλόγως του υλικού, ώστε να έχουν την ίδια δυστένεια (εμβαδόν διατομής με SMA A, με κοινό δομικό χάλυβα υπολογίζεται), οι επίπεδοι πλαισιακοί φορείς παρουσιάζουν την ίδια συνολική δυσκαμψία, επακόλουθο της υπόθεσης που έγινε, με μεγάλη διαφορά όμως στη δύναμη διαρροής των κατασκευών από «έξυπνο» υλικό, καθώς τα «έξυπνα» υλικά έχουν μεγαλύτερη τάση διαρροής.

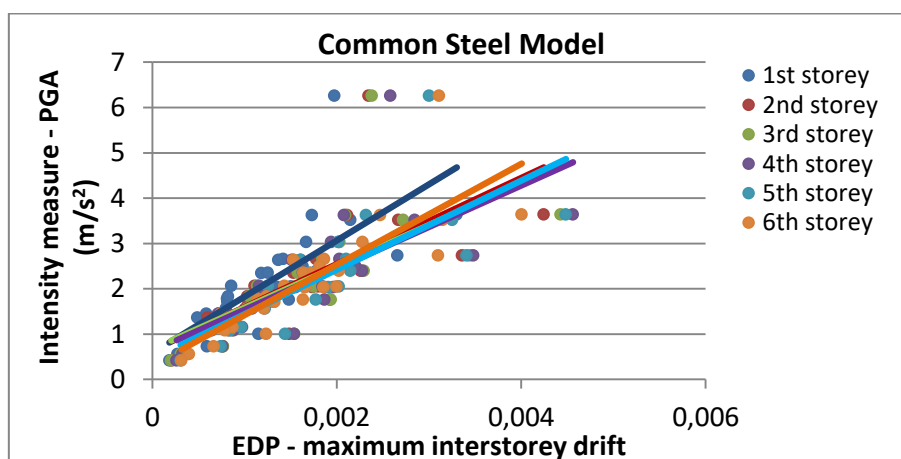
Τέλος, αναφορικά με τις τελικές μετακινήσεις των φορέων, επειδή στο εξάωρο κτήριο η ιδιοπερίοδος της κατασκευής όπως αναμένεται αυξάνεται αρκετά, ειδικά με τη χρήση συρμάτων νιτινόλης, παρατηρείται σε όλους τους φορείς που εξετάστηκαν παραμένουσα παραμόρφωση. Η διαφορά είναι ότι με τη χρήση υλικού νιτινόλης η παραμένουσα παραμόρφωση είναι υποπολλαπλάσια από αυτήν με αποκλειστική χρήση χάλυβα και είναι της τάξεως των 5-10 εκατοστών.

5.3.3 Υποβολή του εξαώροφου επίπεδου πλαισίου σε ανακυκλική φόρτιση (σεισμικές διεγέρσεις) και μελέτη της δυναμικής απόκρισής του

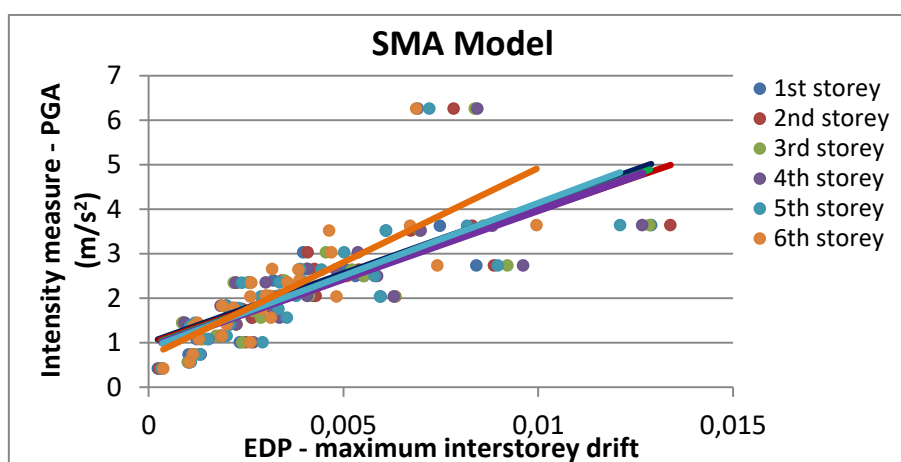
Αφού προηγήθηκε η στατική υπερωθητική ανάλυση των εξαώροφων κατασκευών και μελετήθηκαν οι συμπεριφορές τους σε κάθε περίπτωση, ακολουθεί η μελέτη των κατασκευών σε δυναμική φόρτιση. Τα δυναμικά φορτία στα οποία υποβλήθηκαν οι κατασκευές είναι 30 σεισμικές καταγραφές οι ίδιες με αυτές που υποβλήθηκαν και τα

αντίστοιχα μονώροφα και διώροφα επίπεδα πλαίσια των προηγούμενων ενοτήτων. Τα επιταχυνσιογραφήματα των εν λόγω σεισμικών διεγέρσεων φαίνονται στην εικόνα 5.10. Να επισημανθεί ό,τι όπως και με τα προηγούμενα κτήρια οι εδαφικές επιταχύνσεις των επιταχυνσιογραφημάτων διπλασιάστηκαν για την περίπτωση που οι χιαστί σύνδεσμοι αποτελούνται από εμβαδόν διατομής A/2.

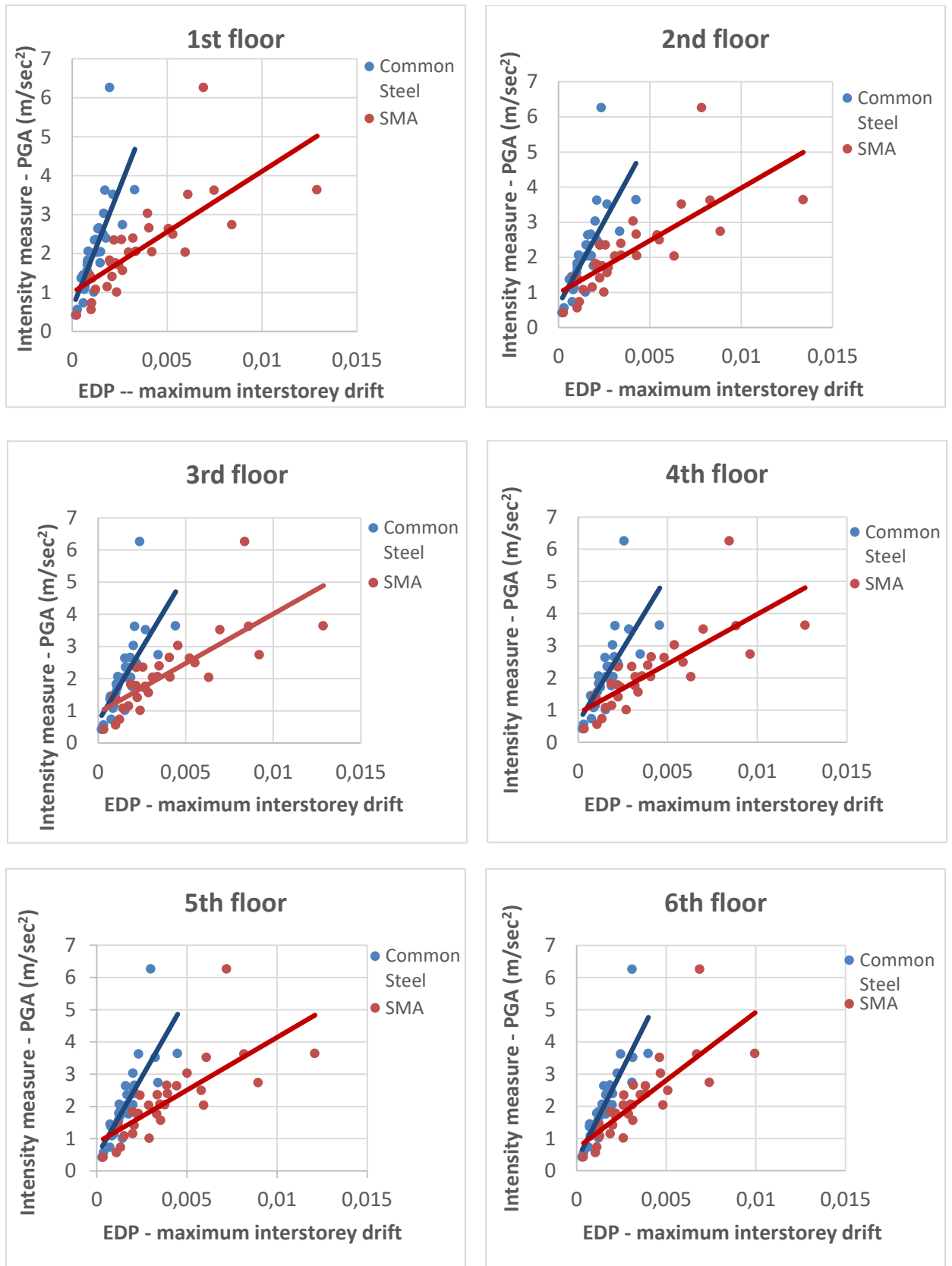
Αντίστοιχα με τις προηγούμενες ενότητες, από τις δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν υπολογίστηκε για κάθε σεισμική καταγραφή το μέγιστο drift κάθε ορόφου των κατασκευών, το μέγιστο drift από τα μέγιστα των ορόφων καθώς και η μετακίνηση κάθε ορόφου που αντιστοιχεί στην τελευταία τιμή του κάθε επιταχυνσιογραφήματος. Παρακάτω απεικονίζονται τα μεγέθη αυτά, ως μέτρο εκτίμησης της βλάβης σε ένα κτήριο, συναρτήσει των μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων. Η σειρά που παρατίθενται τα διαγράμματα είναι πρώτα για το σενάριο της ίδιας διατομής A των ελκυστήρων σε κάθε περίπτωση, έπειτα για τον υποδιπλασιασμό αυτής A/2 και τέλος για την υπόθεση της ίδιας δυστένειας των ελκυστήρων.



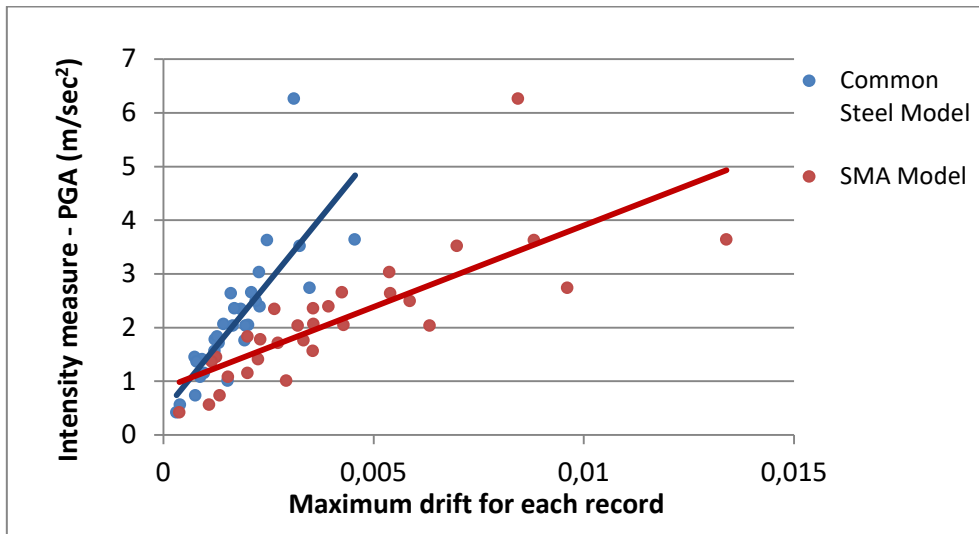
Εικόνα 5.39α: Διάγραμμα μέγιστων drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή A



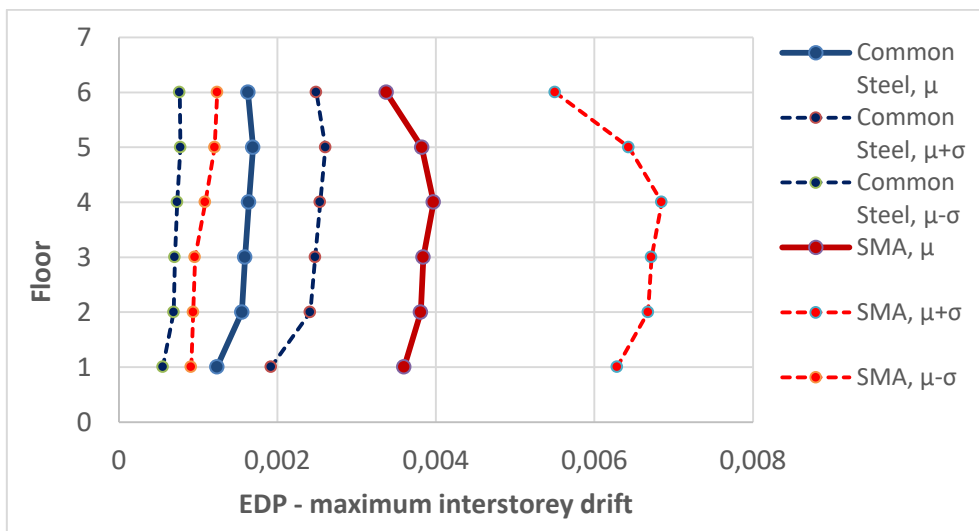
Εικόνα 5.39β: Διάγραμμα μέγιστων drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή A



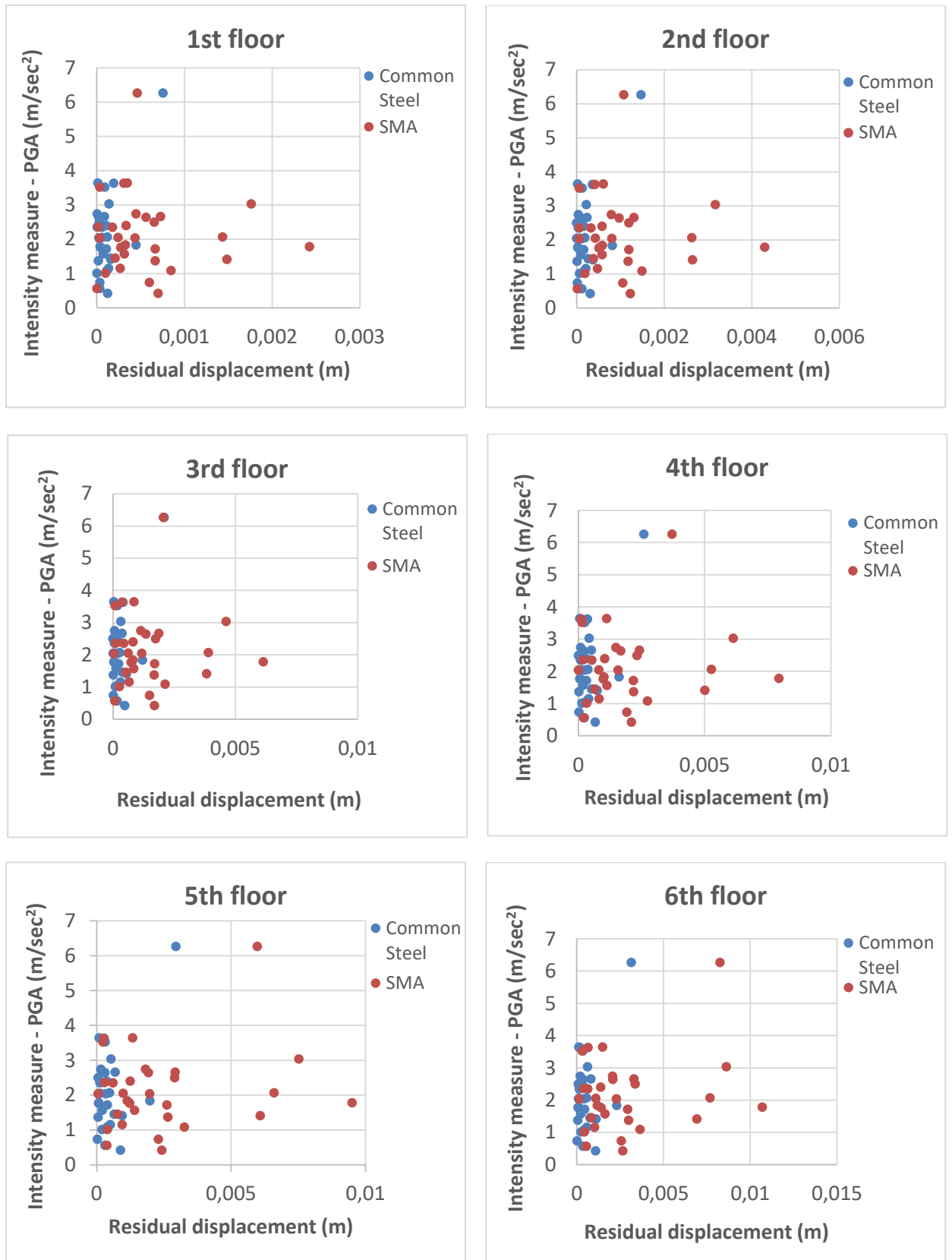
Εικόνα 5.39γ: Διάγραμμα μέγιστων drift ορόφων - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή Α



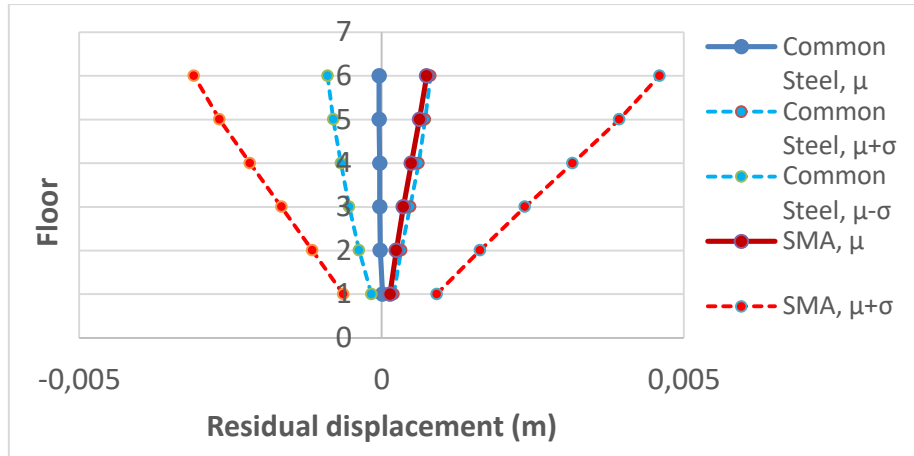
Εικόνα 5.39δ: Διάγραμμα μέγιστου drift ορόφων - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή Α



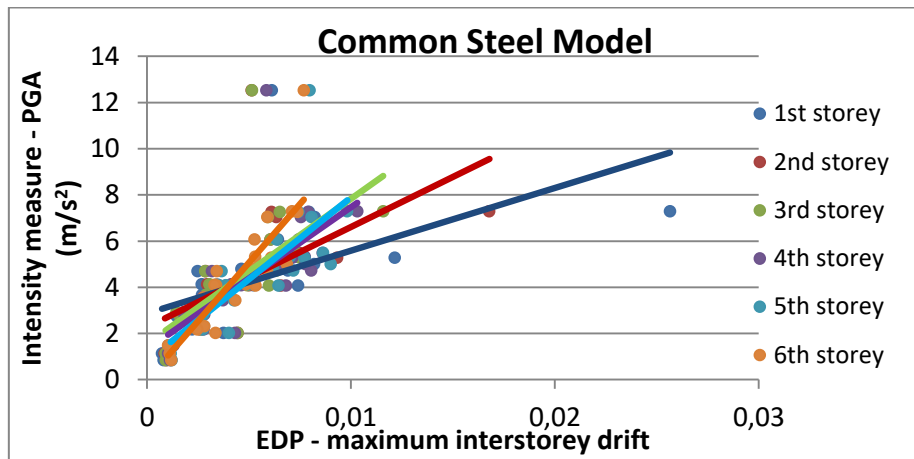
Εικόνα 5.39ε: Διάγραμμα Ορόφων - Μέσης τιμής μέγιστων drift, Διατομή Α



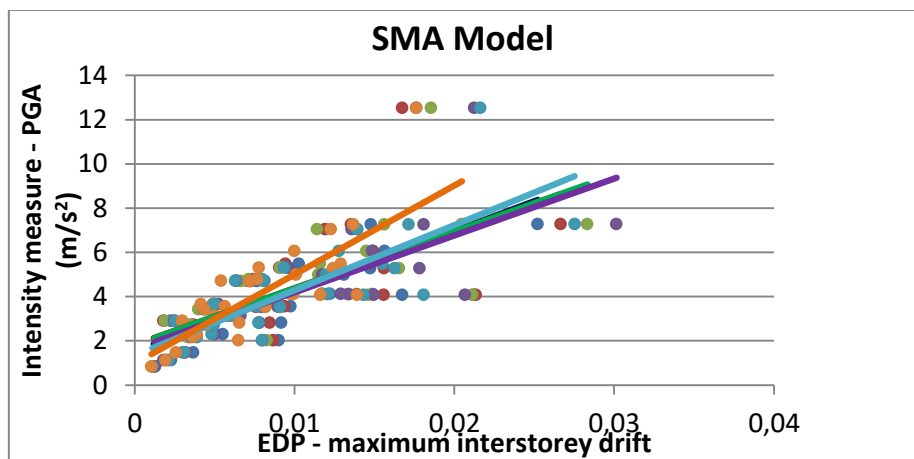
Εικόνα 5.40α: Διάγραμμα παραμένουσας μετακίνησης ορόφων (απόλυτες τιμές) – Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, Διατομή Α



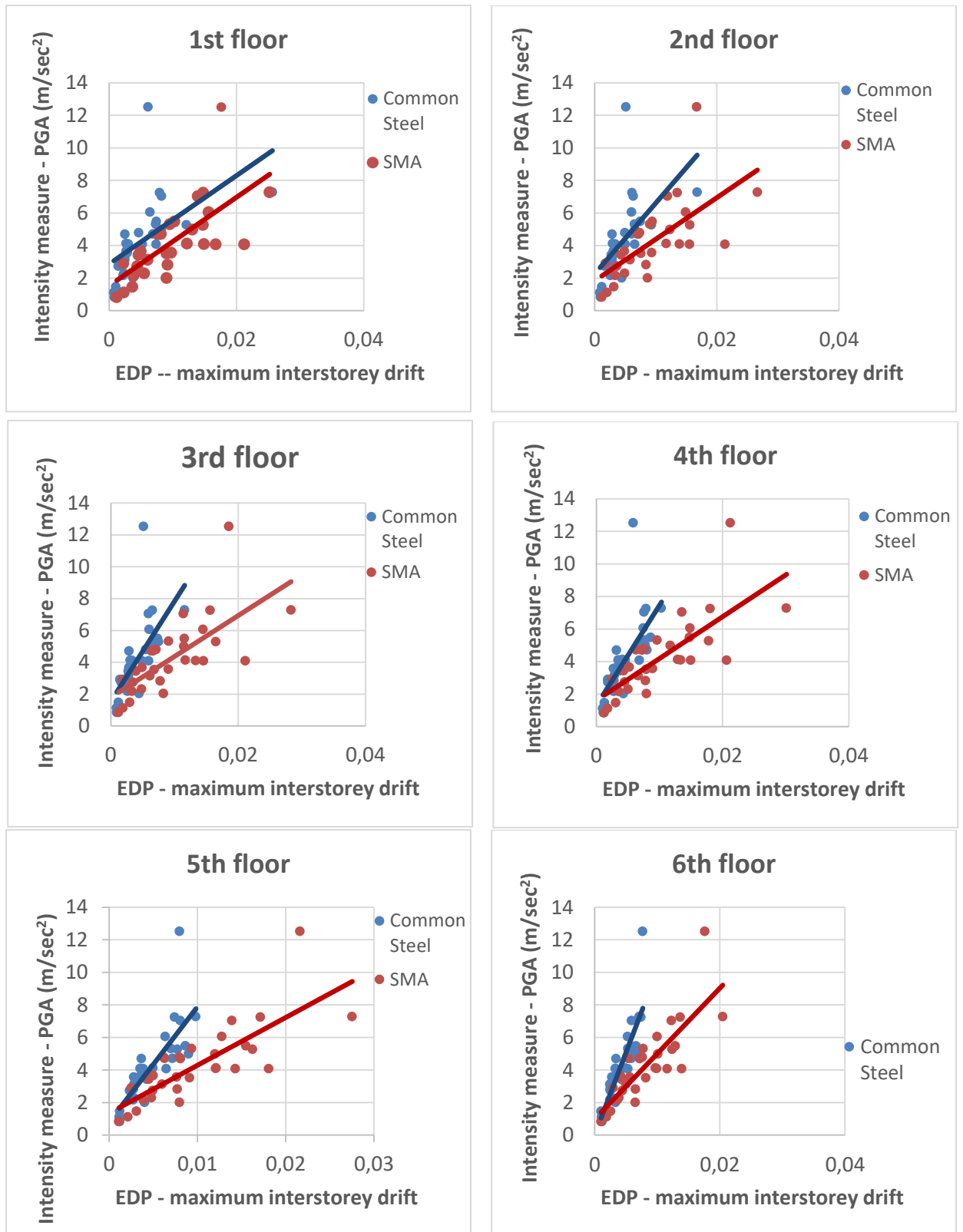
Εικόνα 5.40β: Διάγραμμα Ορόφων – Μέσης τιμής παραμένουσας μετακίνησης, Διατομή Α



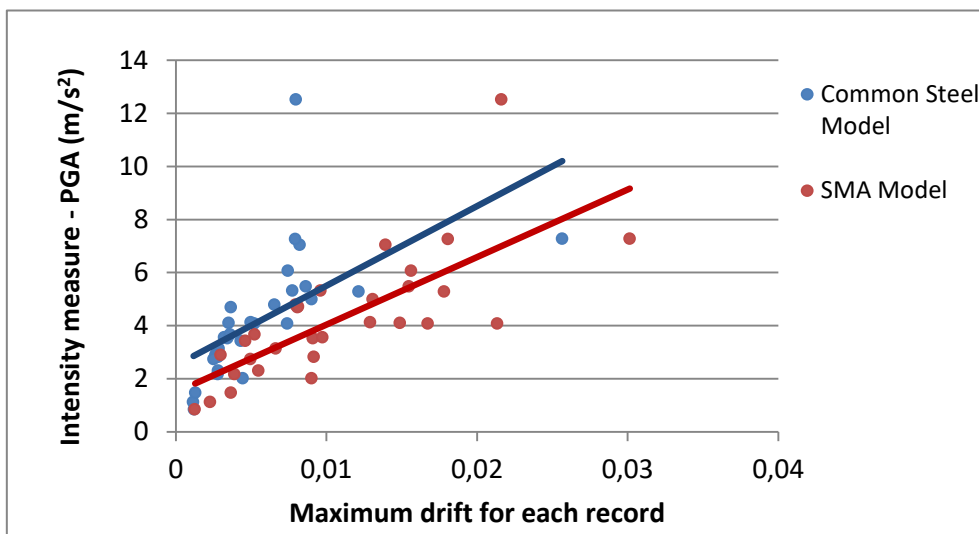
Εικόνα 5.41α: Διάγραμμα μέγιστων drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή Α/2



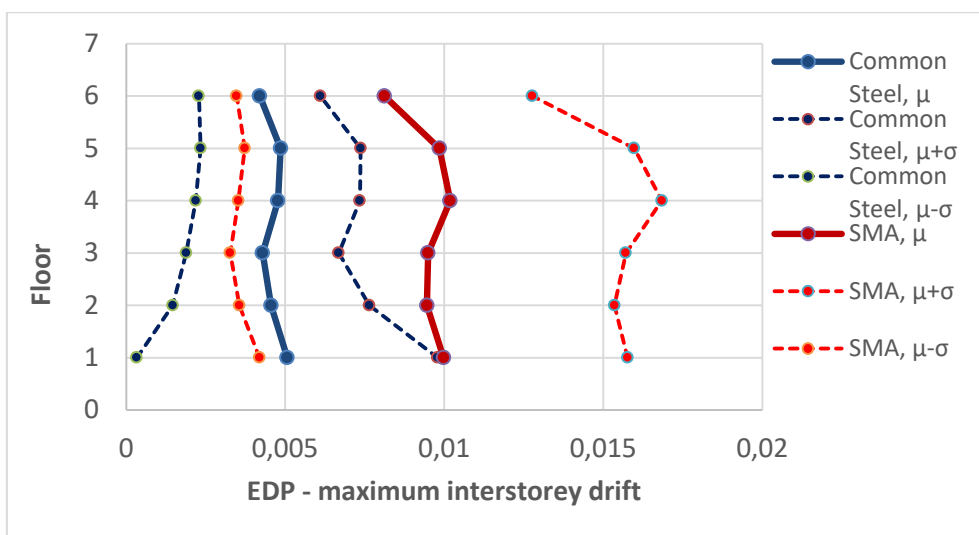
Εικόνα 5.41β: Διάγραμμα μέγιστων drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή Α/2



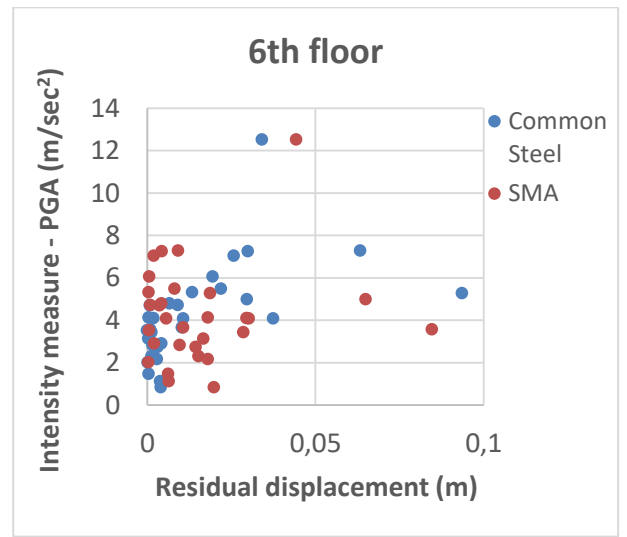
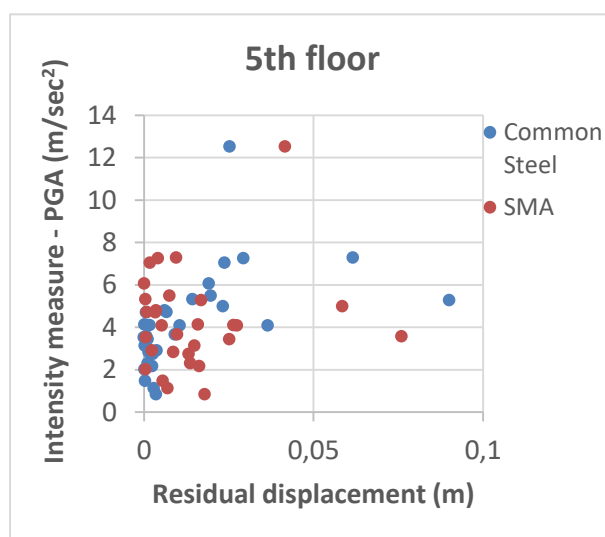
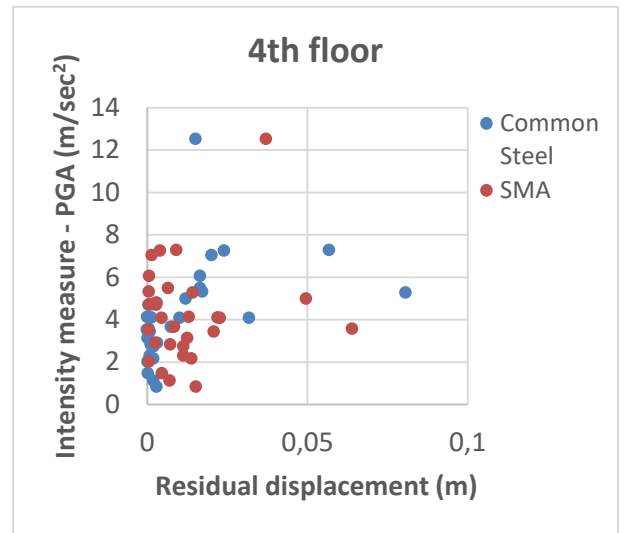
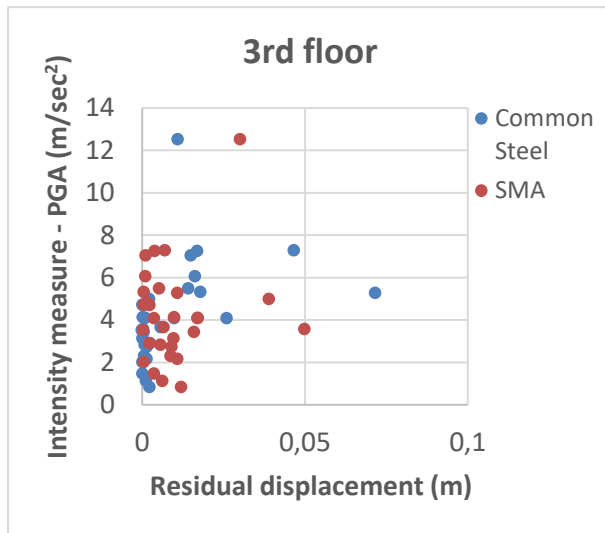
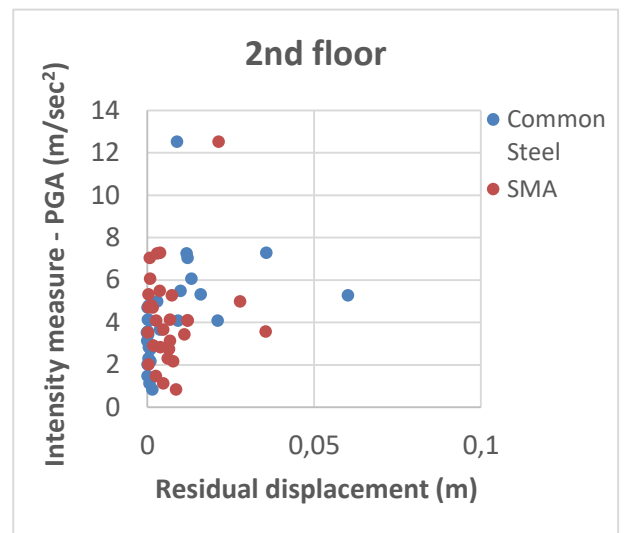
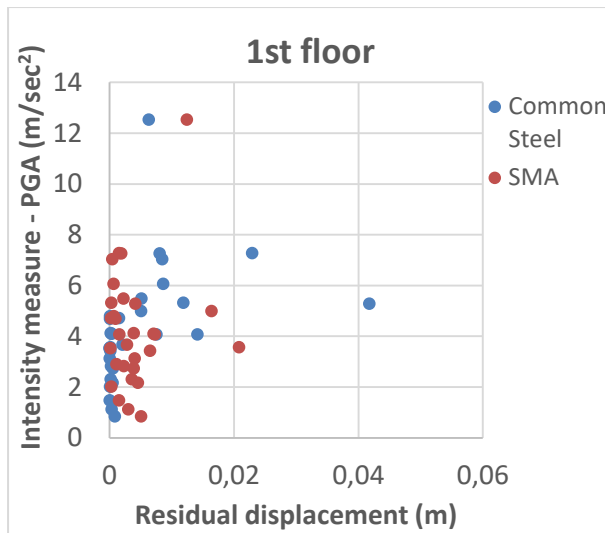
Εικόνα 5.41γ: Διάγραμμα μέγιστων drift ορόφων - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή A/2



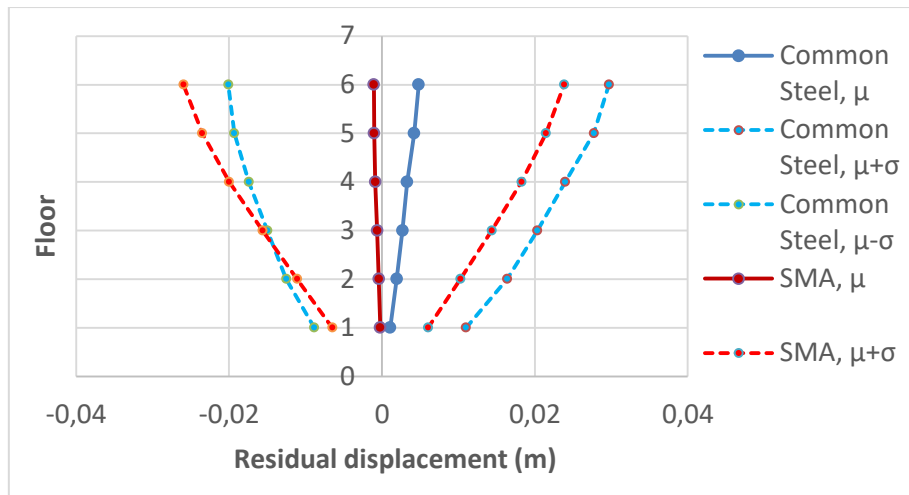
Εικόνα 5.41δ: Διάγραμμα μέγιστου drift ορόφων - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Διατομή A/2



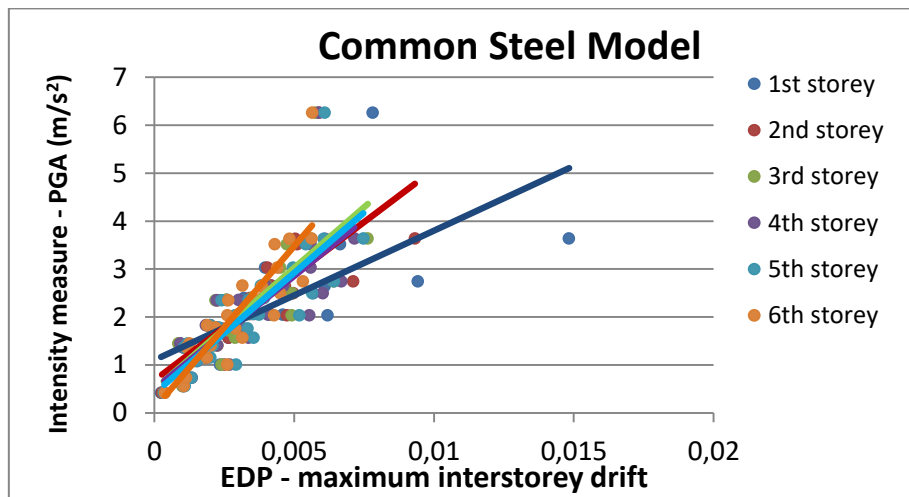
Εικόνα 5.41ε: Διάγραμμα Ορόφων - Μέσης τιμής μέγιστων drift, Διατομή A/2



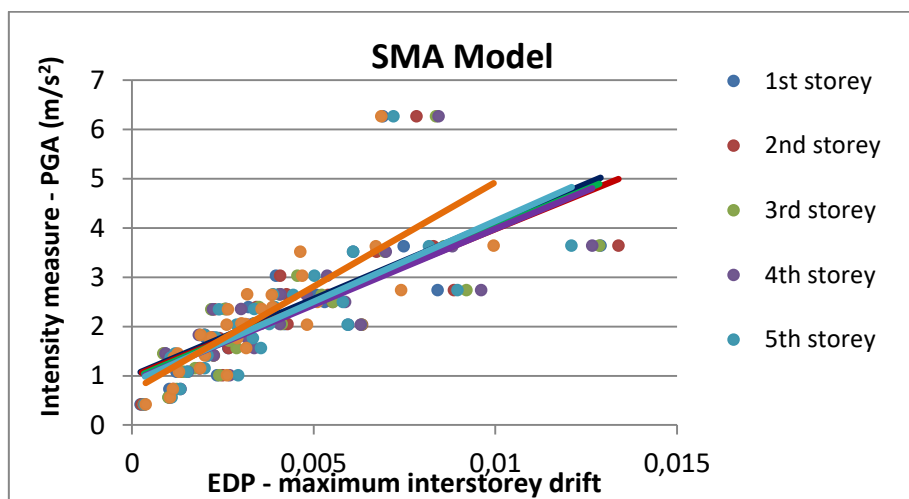
Εικόνα 5.42α: Διάγραμμα παραμένουσας μετακίνησης ορόφων (απόλυτες τιμές) – Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, Διατομή A/2



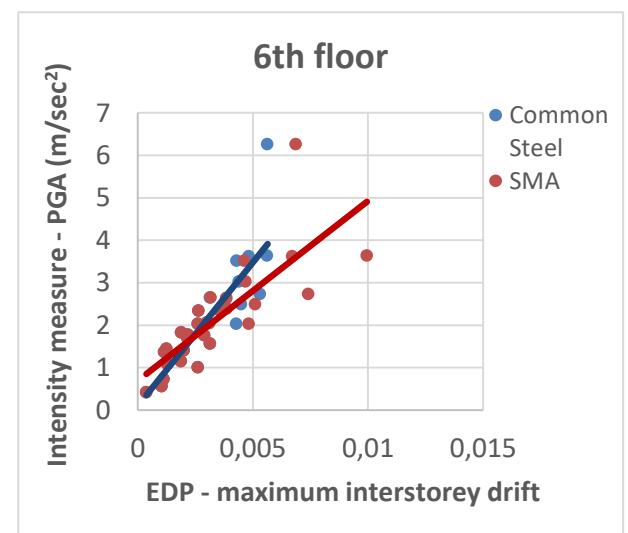
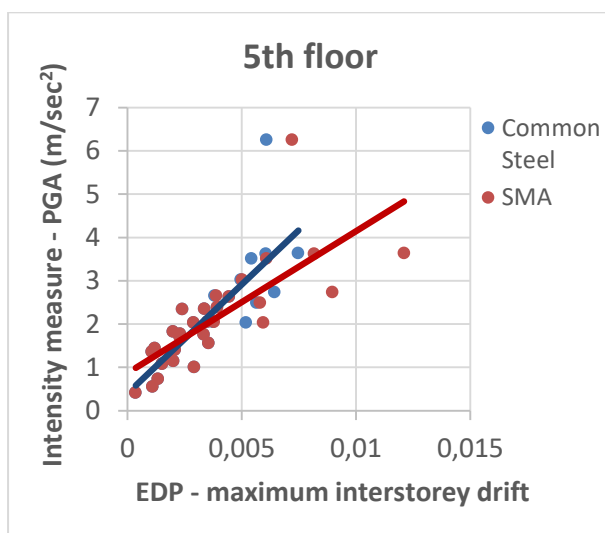
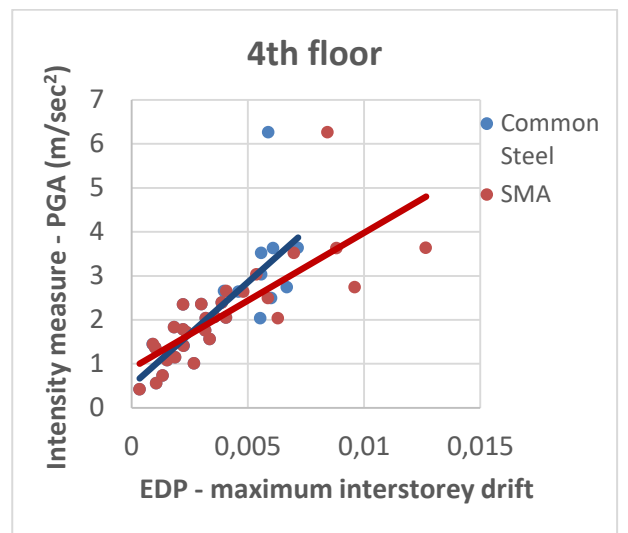
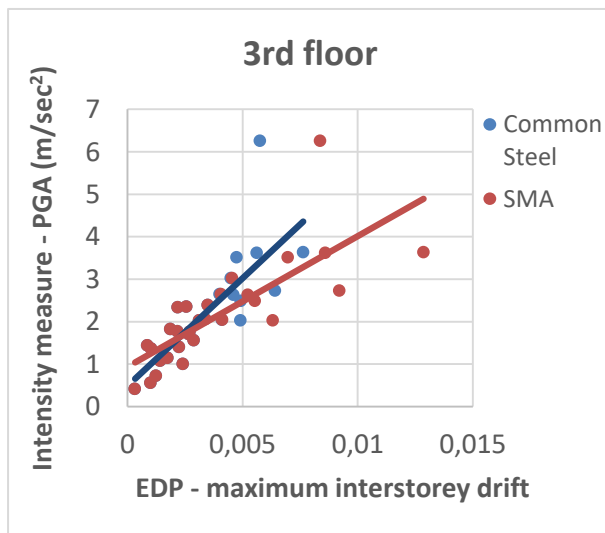
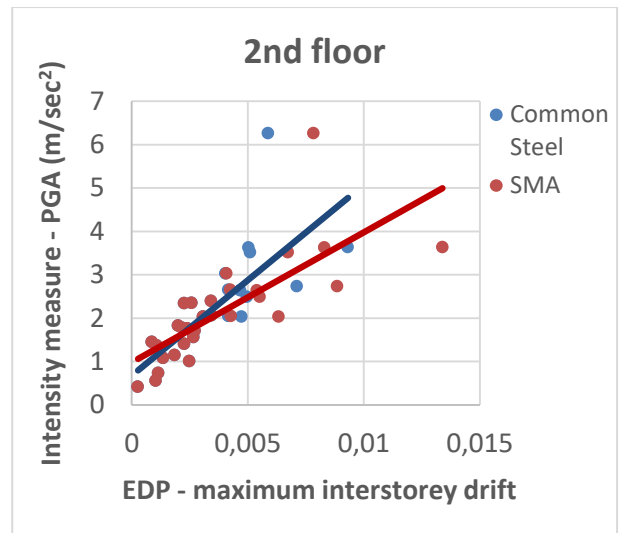
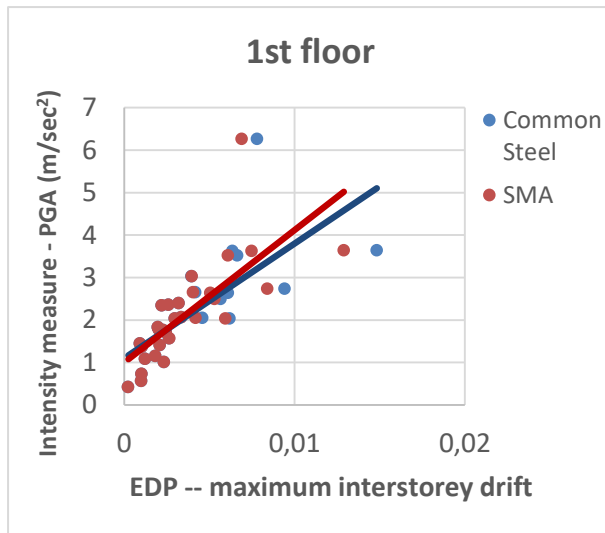
Εικόνα 5.42β: Διάγραμμα Ορόφων – Μέσης τιμής παραμένουσας μετακίνησης, Διατομή A/2



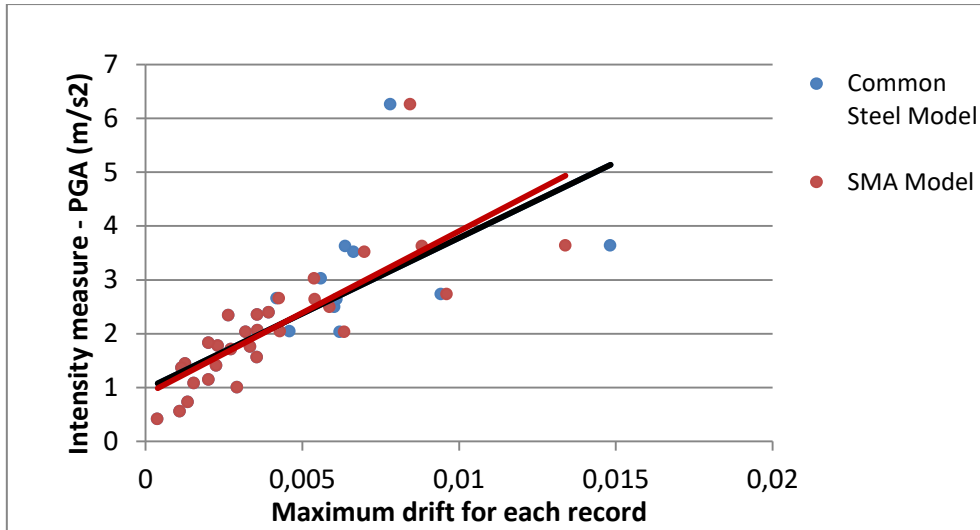
Εικόνα 5.43α: Διάγραμμα μέγιστων drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Ίδια δυστένεια



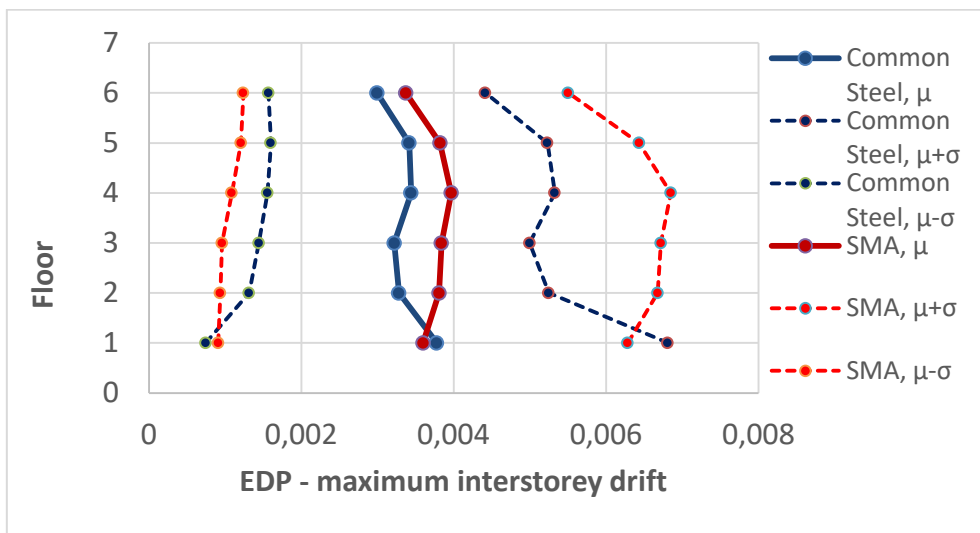
Εικόνα 5.43β: Διάγραμμα μέγιστων drift - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Ίδια δυστένεια



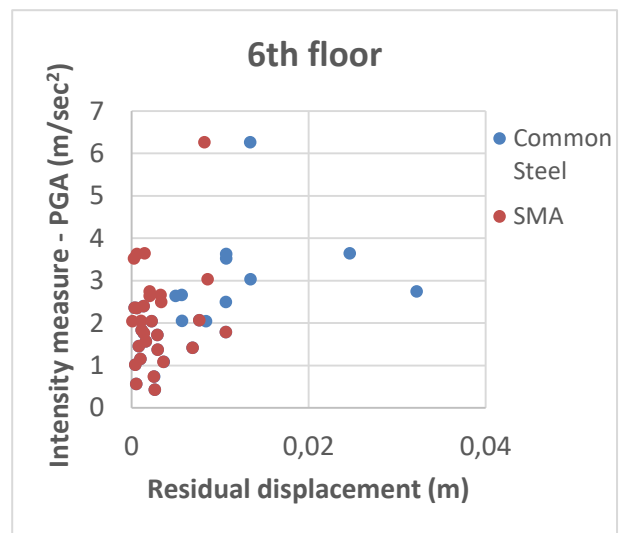
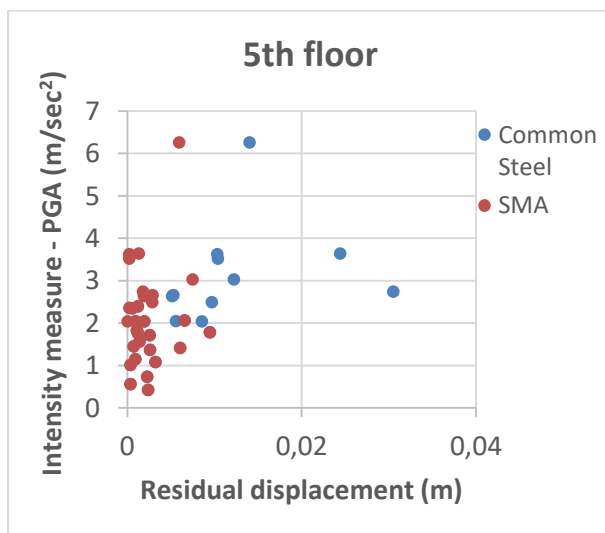
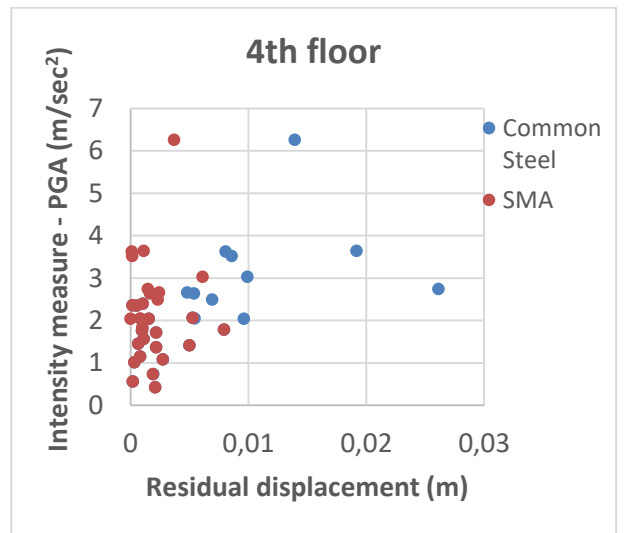
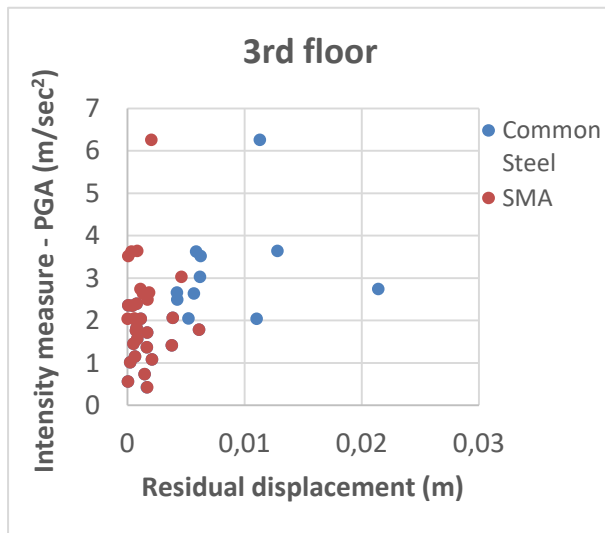
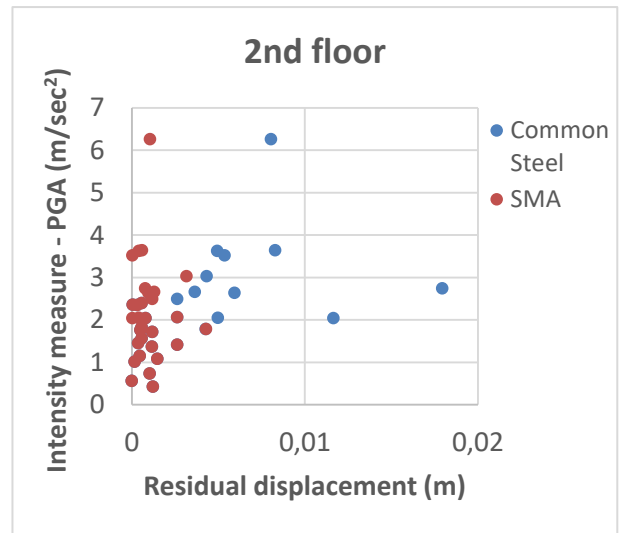
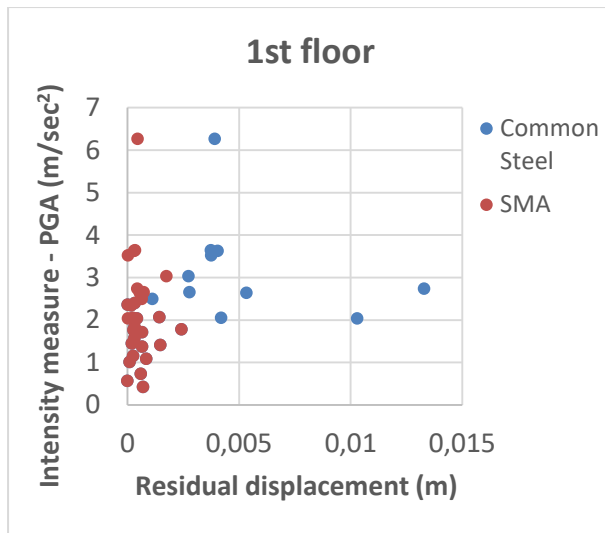
Εικόνα 5.43γ: Διάγραμμα μέγιστων drift ορόφων - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Ίδια δυστένεια



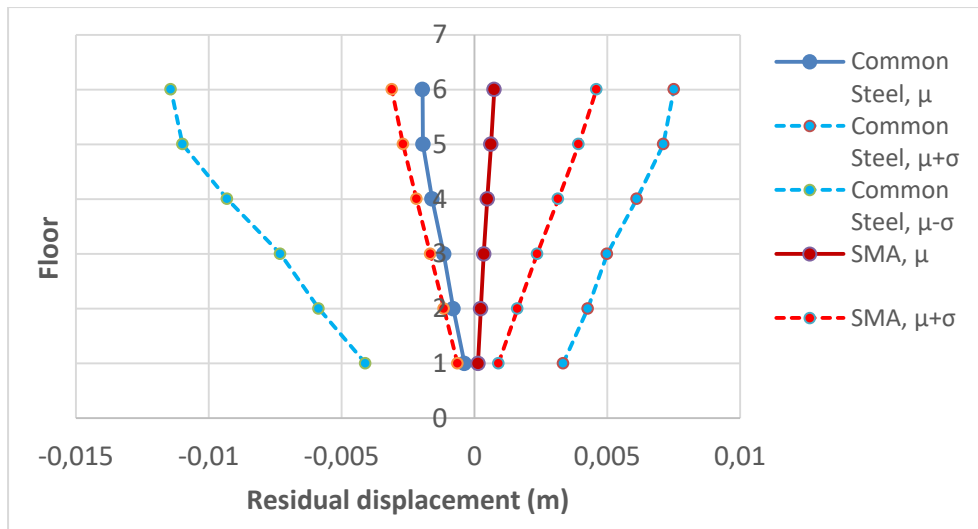
Εικόνα 5.43δ: Διάγραμμα μέγιστου drift ορόφων - Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), Ίδια δυστένεια



Εικόνα 5.43ε: Διάγραμμα Ορόφων - Μέσης τιμής μέγιστων drift, Ίδια δυστένεια



Εικόνα 5.44α: Διάγραμμα παραμένουσας μετακίνησης ορόφων (απόλυτες τιμές) – Μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, Ίδια δυστένεια



Εικόνα 5.44β: Διάγραμμα Ορόφων – Μέσης τιμής παραμένουσας μετακίνησης, Ίδια δυστένεια

Από τα παραπάνω διαγράμματα τα οποία προέκυψαν από δυναμική φόρτιση και ανάλυση όλων των φορέων για τις περιπτώσεις και υποπεριπτώσεις που αναφέρθηκαν εξάγονται τα επόμενα συμπεράσματα:

Όταν το εμβαδόν διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων από κοινό δομικό χάλυβα ισούται με A και το εμβαδόν διατομής των ελκυστήρων-θλιπτήρων από «έξυπνο» υλικό ισούται επίσης με A , τότε παρατηρείται ό,τι στις περισσότερες φορές οι κατασκευές χωρίς χρήση κραμάτων μνήμης σχήματος έχουν μικρότερες μετακινήσεις. Αυτό συμβαίνει επειδή οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στις κατασκευές είναι μικρότερες από την επιτάχυνση διαρροής τους. Παρόλα αυτά, επειδή ακριβώς δεν έχει επέλθει διαρροή των κατασκευών με χρήση μόνο δομικού χάλυβα, άρα ούτε και των φορέων με shape memory alloys (καθώς διαρρέουν σε μεγαλύτερη δύναμη άρα και επιτάχυνση) η διαφορά των τελικών μετακινήσεων είναι σχεδόν μηδενική.

Στην περίπτωση που το εμβαδόν των χιαστί συνδέσμων είναι $A/2$ και έχει γίνει διπλασιασμός της εδαφικής επιτάχυνσης των επιταχυνσιογραφημάτων, τότε υπάρχει διαρροή της κατασκευής από δομικό χάλυβα αποκλειστικά, οπότε και παρατηρούνται μόνιμες παραμορφώσεις μεγαλύτερες των SMAs.

Τέλος, στις κατασκευές όπου η διατομή των χιαστί συνδέσμων έχει υπολογισθεί ώστε να προσδίδει στους συνδέσμους την ίδια δυστένεια με αυτή των χιαστί συνδέσμων με χρήση shape memory alloys, οι παραμένουσες μετακινήσεις και τα μέγιστα drift των ορόφων ταυτίζονται για τις σεισμικές καταγραφές στις οποίες η επιτάχυνση διαρροής της κατασκευής είναι μεγαλύτερη από εκείνη που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια του σεισμού, ενώ όταν η εδαφική επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη από την επιτάχυνση διαρροής τότε η κατασκευή χωρίς χρήση «έξυπνου υλικού» έχει μεγαλύτερες παραμένουσες παραμορφώσεις, ωστόσο το ίδιο δεν ισχύει και για τα drifts. Η κατασκευή με SMAs εξακολουθεί να έχει μεγαλύτερα drifts, αφού συνεχίζει να συμπεριφέρεται ελαστικά σε αντίθεση με την κατασκευή με ελκυστήρες από δομικό χάλυβα που πλέον βρίσκεται στον ανελαστικό κλάδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα «έξυπνα» υλικά ή κράματα μνήμης σχήματος ή shape memory alloys παρουσιάζουν δύο πολύ σημαντικές ιδιότητες για τις οποίες έχει γίνει λόγος στο πρώτο και δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αυτές είναι η θερμική μνήμη μορφής ή μνήμη σχήματος και η υπερελαστικότητα ή ψευδοελαστικότητα. Και οι δύο ιδιότητες είναι εξίσου σημαντικές. Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν η μελέτη της συμβολής της υπερελαστικότητας των «έξυπνων» υλικών στην αντισεισμική προστασία των κατασκευών του πολιτικού μηχανικού.

Αρχικά, μελετήθηκε ένας μονοβάθμιος μη γραμμικός ταλαντωτής σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση για τον οποίο έγινε η υπόθεση ότι το υλικό κατασκευής του ήταν σε μία εκ των περιπτώσεων δομικός χάλυβας και στη δεύτερη shape memory alloy και συγκεκριμένα κράμα νικελίου-τιτανίου. Δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί τιμών ιδιοπεριόδου και δύναμης διαρροής του μονοβάθμιου ταλαντωτή και σύμφωνα με αυτούς έγιναν αλληπάλληλες δυναμικές αναλύσεις. Δυναμικές αναλύσεις έγιναν επίσης και σε μονώροφα, δώροφα και εξώροφα επίπεδα πλαίσια διαφόρων χαρακτηριστικών.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μη γραμμικό μονοβάθμιο ταλαντωτή και τις διαφορές κατασκευές εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

- Καθώς η τάση διαρροής των shape memory alloys είναι υψηλότερη της τάσης διαρροής του κοινού δομικού χάλυβα, οι κατασκευές με χρήση «έξυπνων» υλικών εμφανίζουν υψηλότερη δύναμη διαρροής.
- Τα κράματα μνήμης σχήματος έχουν χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από το δομικό χάλυβα, οπότε και οι κατασκευές γίνονται πιο εύκαμπτες.
- Οι κατασκευές με χρήση κραμάτων αλουμινίου με μνήμη σχήματος παρουσιάζουν αυξημένες παραμορφώσεις, αλλά ταυτόχρονα θα είναι πιο ανθεκτικές και εμφανίζουν λιγότερες φθορές σε υψηλής εντάσεως φορτίσεις.
- Οι κατασκευές αποτελούμενες αποκλειστικά από δομικό χάλυβα αφού διαρρεύσουν αρχίζουν να λαμβάνουν την επιπλέον μετατόπιση ανελαστικά, ενώ οι κατασκευές από κράματα με μνήμη σχήματος εξακολουθούν να συμπεριφέρονται ελαστικά (μέχρι το δικό τους σημείο διαρροής).
- Στις κατασκευές στις οποίες έχει γίνει χρήση «έξυπνων» υλικών κατά την αποφόρτισή τους παρατηρούνται μηδενικές ή πολύ μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις πράγμα το οποίο δε συμβαίνει με τις κατασκευές από δομικό χάλυβα μόνο.
- Επειδή η χρήση κραμάτων μνήμης σχήματος προσφέρει μικρότερη δυσκαμψία στην κατασκευή συγκριτικά με τον δομικό χάλυβα, η χρήση τους δεν προτιμάται εάν η κατασκευή είναι επιθυμητό να έχει μεγάλη δυσκαμψία (η

ιδιοπερίοδος της να τείνει στο μηδέν) ή εάν η κατασκευή θεμελιωθεί σε περιοχή στην οποία δεν αναμένεται να υπάρξουν ισχυρές σεισμικές δονήσεις.

- Τα μέγιστα drifts που αναπτύσσονται στους φορείς με κράματα μνήμης σχήματος είναι σχεδόν πάντοτε μεγαλύτερα από τους αμιγώς κατασκευασμένους από δομικό χάλυβα φορείς. Αυτό συμβαίνει διότι ανεξάρτητα του γεγονότος εάν έχουν διαρρεύσει ή όχι οι τελευταίοι, οι πρώτοι εμφανίζουν μεγαλύτερες μετακινήσεις.
- Τέλος, για περιπτώσεις όπου οι κατασκευές από κοινό δομικό χάλυβα και από shape memory alloys έχουν ίδια συνολική δυσκαμψία οι παραμένουσες μετακινήσεις και τα μέγιστα drift των ορόφων είναι ίδια όσο συμπεριφέρονται ελαστικά και οι δύο κατασκευές. Από την στιγμή που ο χάλυβας διαρρεύσει, οι κατασκευές με κράματα μνήμης σχήματος εμφανίζουν μικρότερες παραμένουσες παραμορφώσεις χάρη στη μοναδική τους ιδιότητα να επιστρέφουν στην αρχική τους θέση κατόπιν αποφόρτισής τους.

Από όλα τα παραπάνω συμπεράσματα γίνεται πλήρως κατανοητή και αντιληπτή η συμβολή των κραμάτων μνήμης σχήματος στις εφαρμογές του Πολιτικού Μηχανικού και ιδιαίτερα στην αντισεισμική προστασία των κατασκευών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "Shape Memory Alloys", Darel E. Hodgson, Shape Memory Applications , Inc., Ming H. Wu, Memry Corporation, and Robert J. Biermann, Harrison Alloys, Inc.
- [2] "Χράματα μνήμης σχήματος, ιδιότητες, κατεργασίες και εφαρμογές", Δημήτριος Δημητρόπουλος, Αθήνα, Ιούλιος 2014
- [3] "Εφαρμογές κραμάτων αλουμινίου με μνήμη σχήματος σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού υπό ανακυκλική φόρτιση", Ευαγγελία Νεκταρία Παλκάνογλου, Αθήνα, Μάρτιος 2018
- [4] "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities", Jaronie Mohd Jani, Martin Leary, Aleksandar Subic, Mark A. Gibson
- [5] "Seismic Response and Evaluation of SDOF Self-Centering Friction Damping Braces Subjected to Severan Earthquake Ground Motions", Jong Wan Hu and Myung-Hyun Noh
- [6] "Self-Centering Seismic Lateral Force Resisting Systems: High Performance Structures fot the Coty of Tomorrow", Nathan Brent Chancellor, Matthew R. Eatherton, David A. Roke and Tugce Akbas
- [7] "Constitutive Modelling and Material Behaviour", Assoc. Prof. Robert Basan, D.Sc, Tea Marohnic, M.Sc., Rijeka, 2016
- [8] "Shape memory alloys and their application in structural oscillations attenuation", Ottavia Corbi
- [9] "Shape Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modelling and Numerical Simulations, Davide Fugazza
- [10] "Design, analysis, and manufacture of a tension-compression self-centering damper based on energy dissipation of pre-stretched superelastic shape memory alloy wires", Amin Alipour, Mahmoud Kadkhodaei, Mohsen Safaei
- [11] "Performance-based seismic desifn of self-centering steel frames with SMA-based braces", Can-Xing Qiu, Songye Zhu
- [12] "A Constitutive Model for Superelastic Shape Memory Alloys Considering the Influence of Strain Rate", Hui Qian, Hongnan Li, Gangbing Song, Wei Guo

[13] "Shape-memory alloys: modeling and numerical simulations of the finite-strain superelastic behavior", Ferdinando Auricchio, Robert L. Taylor

[13] "A one-dimensional model for superelastic shape-memory alloys with different elastic properties between austenite and martensite", F. Auricchio, E. Sacco

[14] "Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars", Reginald DesRoches, M.ASCE, Jason McCormick and Michael Delemont

Παράρτημα

Ενδεικτικά, παρατίθεται το μοντέλο προσομοίωσης του επίπεδου εξαώροφου πλαισίου (από δομικό χάλυβα αποκλειστικά για την περίπτωση της ίδιας δυστένειας).

```
#MODEL GENERATION#
```

```
#Create ModelBuilder (with two-dimensions and 3DOF/node)
```

```
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
```

```
#DESIGN MODEL#STRUCTURE#
```

```
# Units: kN, m, sec
```

```
set pi [expr {2.*asin(1.)}];
```

```
set H1 5.5;
```

```
set H 4.0;
```

```
set L 9.0;
```

```
#isogeio
```

```
node 1 0.0 0.0
```

```
node 2 $L 0.0
```

```
#1os orofos
```

```
node 3 0.0 $H1
```

```
node 4 $L $H1
```

```
node 3001 0.0 $H1
```

```
node 3002 0.0 $H1
```

```
node 3003 0.0 $H1
```

```
node 4001 $L $H1
```

```
node 4002 $L $H1
```

node 4003 \$L \$H1

#2os orofos

node 5 0.0 [expr \$H1+\$H];

node 6 \$L [expr \$H1+\$H];

node 5001 0.0 [expr \$H1+\$H];

node 5002 0.0 [expr \$H1+\$H];

node 5003 0.0 [expr \$H1+\$H];

node 6001 \$L [expr \$H1+\$H];

node 6002 \$L [expr \$H1+\$H];

node 6003 \$L [expr \$H1+\$H];

#3os orofos

node 7 0.0 [expr \$H1+2*\$H];

node 8 \$L [expr \$H1+2*\$H];

node 7001 0.0 [expr \$H1+2*\$H];

node 7002 0.0 [expr \$H1+2*\$H];

node 7003 0.0 [expr \$H1+2*\$H];

node 8001 \$L [expr \$H1+2*\$H];

node 8002 \$L [expr \$H1+2*\$H];

node 8003 \$L [expr \$H1+2*\$H];

#4os orofos

node 9 0.0 [expr \$H1+3*\$H];

node 10 \$L [expr \$H1+3*\$H];

node 9001 0.0 [expr \$H1+3*\$H];

node 9002 0.0 [expr \$H1+3*\$H];

node 9003 0.0 [expr \$H1+3*\$H];

```
node 10001 $L [expr $H1+3*$H];
node 10002 $L [expr $H1+3*$H];
node 10003 $L [expr $H1+3*$H];
```

```
#5os orofos
```

```
node 11 0.0 [expr $H1+4*$H];
node 12 $L [expr $H1+4*$H];
node 11001 0.0 [expr $H1+4*$H];
node 11002 0.0 [expr $H1+4*$H];
node 11003 0.0 [expr $H1+4*$H];
node 12001 $L [expr $H1+4*$H];
node 12002 $L [expr $H1+4*$H];
node 12003 $L [expr $H1+4*$H];
```

```
#6os orofos
```

```
node 13 0.0 [expr $H1+5*$H];
node 14 $L [expr $H1+5*$H];
node 13001 0.0 [expr $H1+5*$H];
node 13003 0.0 [expr $H1+5*$H];
node 14001 $L [expr $H1+5*$H];
node 14003 $L [expr $H1+5*$H];
```

```
#Fix supports at base of columns
```

```
fix 1 1 1 0
```

```
fix 2 1 1 0
```

```
set q 20.; #katanemimeno fortio se kN/m
```

```
set V [expr $q*$L/2.]
```

#PROPERTIES OF MATERIALS#

set E 210000000.; #Young's modulus of steel

set ESMA 46500000.; #Young's modulus of shape memory alloy

set fy 345000.; #Yield stress of steel

set fySMA 500000.; #Yield stress of SMA

set g 9.81

set A1 [expr 2276.3*1.0e-6];

set A2 [expr 1843.4*1.0e-6];

set A3 [expr 1693.6*1.0e-6];

set A4 [expr 1472.4*1.0e-6];

set A5 [expr 1166.4*1.0e-6];

set A6 [expr 743.7*1.0e-6];

set a 0.16

#koinos xalubas

#uniaxialMaterial Steel01 tag fy E0 b

uniaxialMaterial Steel01 1 \$fy \$E 0.003

#yliko gia na apeleytherwnetai h strofh

uniaxialMaterial Steel01 2 0.01 0.01 0.0001

#uniaxialMaterial Steel01 tag fy E0 b

uniaxialMaterial Steel01 3 \$fy \$E 0.003

#uniaxialMaterial SelfCentering \$matTag \$k1 \$k2 \$sigAct \$beta

#uniaxialMaterial SelfCentering 3 \$ESMA [expr \$a*\$ESMA] [expr \$fySMA]
0.5

#ELEMENTS#

geomTransf Linear 1; # columns # full geometric linearity

geomTransf Linear 2; # beams # full geometric linearity

#section WFSection2d \$sec \$mat \$d \$tw \$bf \$tf \$Nfw \$Nff

section WFSection2d 1 1 0.372 0.0164 0.374 0.0262 15 5 ; # Columns
1-3

section WFSection2d 3 1 0.354 0.0094 0.205 0.0168 15 5 ; # Columns
4-6

section WFSection2d 2 1 0.358 0.00787 0.172 0.0131 15 5 ; # Beams
1-3

section WFSection2d 4 1 0.352 0.00686 0.171 0.00978 15 5 ; # Beams
4-6

set np 4

columns

element forceBeamColumn \$eleTag \$iNode \$jNode \$numIntgrPts \$secTag
\$transfTag

element forceBeamColumn 1 1 3 \$np 1 1

element forceBeamColumn 2 2 4 \$np 1 1

element forceBeamColumn 3 3 5 \$np 1 1

element forceBeamColumn 4 4 6 \$np 1 1

element forceBeamColumn 5 5 7 \$np 1 1

element forceBeamColumn 6 6 8 \$np 1 1

element forceBeamColumn 7 7 9 \$np 3 1

element forceBeamColumn 8 8 10 \$np 3 1

element forceBeamColumn 9 9 11 \$np 3 1

element forceBeamColumn 10 10 12 \$np 3 1

element forceBeamColumn 11 11 13 \$np 3 1

element forceBeamColumn 12 12 14 \$np 3 1

#beams

element forceBeamColumn \$eleTag \$iNode \$jNode \$numIntgrPts \$secTag
\$transfTag

element forceBeamColumn	13	3	4	\$np	2	2
element forceBeamColumn	14	5	6	\$np	2	2
element forceBeamColumn	15	7	8	\$np	2	2
element forceBeamColumn	16	9	10	\$np	4	2
element forceBeamColumn	17	11	12	\$np	4	2
element forceBeamColumn	18	13	14	\$np	4	2

#element zeroLength \$eleTag \$iNode \$jNode -mat -dir

element zeroLength	19	3	3001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	20	3	3002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	21	3	3003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	22	4	4001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	23	4	4002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	24	4	4003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	25	5	5001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	26	5	5002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	27	5	5003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	28	6	6001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	29	6	6002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	30	6	6003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	31	7	7001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	32	7	7002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	33	7	7003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	34	8	8001	-mat	2	-dir	3

element zeroLength	35	8	8002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	36	8	8003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	37	9	9001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	38	9	9002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	39	9	9003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	40	10	10001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	41	10	10002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	42	10	10003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	43	11	11001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	44	11	11002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	45	11	11003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	46	12	12001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	47	12	12002	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	48	12	12003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	49	13	13001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	50	13	13003	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	51	14	14001	-mat	2	-dir	3
element zeroLength	52	14	14003	-mat	2	-dir	3

#periorismos dieythnsewn

#equalDOF \$rNodeTag \$cNodeTag \$dof1 \$dof2

equalDOF 3 3001 1 2

equalDOF 3 3002 1 2

equalDOF 3 3003 1 2

equalDOF 4 4001 1 2

equalDOF 4 4002 1 2

equalDOF 4 4003 1 2

equalDOF 5 5001 1 2

equalDOF 5 5002 1 2
equalDOF 5 5003 1 2
equalDOF 6 6001 1 2
equalDOF 6 6002 1 2
equalDOF 6 6003 1 2
equalDOF 7 7001 1 2
equalDOF 7 7002 1 2
equalDOF 7 7003 1 2
equalDOF 8 8001 1 2
equalDOF 8 8002 1 2
equalDOF 8 8003 1 2
equalDOF 9 9001 1 2
equalDOF 9 9002 1 2
equalDOF 9 9003 1 2
equalDOF 10 10001 1 2
equalDOF 10 10002 1 2
equalDOF 10 10003 1 2
equalDOF 11 11001 1 2
equalDOF 11 11002 1 2
equalDOF 11 11003 1 2
equalDOF 12 12001 1 2
equalDOF 12 12002 1 2
equalDOF 12 12003 1 2
equalDOF 13 13001 1 2
equalDOF 13 13003 1 2
equalDOF 14 14001 1 2
equalDOF 14 14003 1 2

element truss 53 1 4001 [expr \$A1/2] 3
element truss 54 2 3001 [expr \$A1/2] 3
element truss 55 3002 6001 [expr \$A2/2] 3
element truss 56 4002 5001 [expr \$A2/2] 3
element truss 57 5002 8001 [expr \$A3/2] 3
element truss 58 6002 7001 [expr \$A3/2] 3
element truss 59 7002 10001 [expr \$A4/2] 3
element truss 60 8002 9001 [expr \$A4/2] 3
element truss 61 9002 12001 [expr \$A5/2] 3
element truss 62 10002 11001 [expr \$A5/2] 3
element truss 63 11002 14001 [expr \$A6/2] 3
element truss 64 12002 13001 [expr \$A6/2] 3

set g 9.81

mass 3 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 4 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 5 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 6 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 7 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 8 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 9 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 10 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 11 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 12 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 13 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0
mass 14 [expr \$V/\$g] [expr \$V/\$g] 0.0

```
set gG 40
```

```
#ANALYSIS#
```

```
set AnalysisType Dynamic
```

```
#MODAL#
```

```
if {$AnalysisType == "Modal"} {
```

```
puts "ok1"
```

```
    source analysis/Rdamping.tcl
```

```
    puts "ok2"
```

```
    set pi 3.141592654
```

```
    set T1 [expr 2*$pi/$omega1]
```

```
set T2 [expr 2*$pi/$omega2]
```

```
file delete 'period.out'
```

```
set PeriodFile [open "out/period0.out" "w"]
```

```
    puts $PeriodFile $T1
```

```
    puts $PeriodFile $T2
```

```
close $PeriodFile
```

```
} elseif {$AnalysisType == "Static"} {
```

```
    puts $qG
```

```
    set qG [expr -$qG]
```

```
    # Fortia
```

```
pattern Plain 1 "Linear" {
```

```
    eleLoad -ele 5 -type -beamUniform $qG
```

```
    eleLoad -ele 6 -type -beamUniform $qG
```

```
}
```

```
system BandSPD
numberer RCM
constraints Plain
integrator LoadControl 1
algorithm Linear
analysis Static
analyze 1
```

```
#PUSHOVER#
```

```
} elseif {$AnalysisType == "Pushover"} {
```

```
# define GRAVITY
```

```
system BandGeneral
```

```
constraints Plain
```

```
numberer RCM
```

```
test NormUnbalance 1.0e-4 10
```

```
algorithm Newton
```

```
pattern Plain 1 "Linear" {
```

```
load 3 0.0 -$V 0.0
```

```
load 4 0.0 -$V 0.0
```

```
load 5 0.0 -$V 0.0
```

```
load 6 0.0 -$V 0.0
```

```
load 7 0.0 -$V 0.0
```

```
load 8 0.0 -$V 0.0
```

```
load 9 0.0 -$V 0.0
```

```
load 10 0.0 -$V 0.0
```

```
load 11 0.0 -$V 0.0
```

```

load 12 0.0 -$V 0.0
load 13 0.0 -$V 0.0
load 14 0.0 -$V 0.0
}

set GravSteps 10
integrator LoadControl [expr 1./$GravSteps];
analysis Static
analyze $GravSteps
loadConst -time 0.0
wipeAnalysis

# define LATERAL load
# Lateral load pattern
set P 1;
set P1 [expr 0.06*$P]
set P2 [expr 0.102*$P]
set P3 [expr 0.145*$P]
set P4 [expr 0.188*$P]
set P5 [expr 0.231*$P]
set P6 [expr 0.274*$P]

pattern Plain 2 Linear {
    load 3 $P1 0.0 0.0;
    load 5 $P2 0.0 0.0;
    load 7 $P3 0.0 0.0;
    load 9 $P4 0.0 0.0;
    load 11 $P5 0.0 0.0;

```



```
load 13 $P6 0.0 0.0;  
}
```

```
#Create a recorder to monitor nodal and element displacements
```

```
recorder Node -file roof14.txt -time -node 14 -dof 1 disp ; #roof's displacement
```

```
recorder Element -file forceSMA14.txt -time -ele 63 localForce ; #axial forces SMA
```

```
recorder Node -file roof12.txt -time -node 12 -dof 1 disp ;
```

```
recorder Element -file forceSMA12.txt -time -ele 61 localForce ;
```

```
recorder Node -file roof10.txt -time -node 10 -dof 1 disp ;
```

```
recorder Element -file forceSMA10.txt -time -ele 59 localForce ;
```

```
recorder Node -file roof8.txt -time -node 8 -dof 1 disp ;
```

```
recorder Element -file forceSMA8.txt -time -ele 57 localForce ;
```

```
recorder Node -file roof6.txt -time -node 6 -dof 1 disp ;
```

```
recorder Element -file forceSMA6.txt -time -ele 55 localForce ;
```

```
recorder Node -file roof4.txt -time -node 4 -dof 1 disp ;
```

```
recorder Element -file forceSMA4.txt -time -ele 53 localForce ;
```

```
# pushover: displacement controlled static analysis
```

```
integrator DisplacementControl 14 1 0.0001;
```

```
initialize
```

```
system BandGeneral
```

```
constraints Plain
```

```
numberer RCM
```

```
test NormUnbalance 1.0e-1 200000  
algorithm Newton  
analysis Static  
analyze 12750; # apply  
12750=5%drift steps of pushover analysis to a displacement of 0.0001
```

```
# pushover: displacement controlled static analysis
```

```
integrator DisplacementControl 14 1 -0.0001;
```

```
initialize
```

```
system BandGeneral
```

```
constraints Plain
```

```
numberer RCM
```

```
test NormUnbalance 1.0e-1 200000
```

```
algorithm Newton
```

```
analysis Static
```

```
analyze 25500;
```

```
# pushover: displacement controlled static analysis
```

```
integrator DisplacementControl 14 1 0.0001;
```

```
initialize
```

```
system BandGeneral
```

```
constraints Plain
```

```
numberer RCM
```

```
test NormUnbalance 1.0e-1 200000
```

```
algorithm Newton
```

```
analysis Static
```

```
analyze 25500;
```

```

} elseif {$AnalysisType == "Dynamic"} {

#DYNAMIC ANALYSIS#

#rayleigh damping

set a [eigen 4];      #kuklikes idiosyxnnotites omega, sto tetragwno

set lamda1 [lindex $a 0]

set lamda2 [lindex $a 1]

#puts $lamda1 $lamda2

set omega1 [expr pow($lamda1,0.5)]

set omega2 [expr pow($lamda2,0.5)]

# C=a1*M+a2*K

set xi [expr 5./100];      # 5% suntelestis aposbasis

set a2 [expr ((2*$xi)/($omega1+$omega2))]

set a1 [expr $omega1*$omega2*$a2]

#rayleigh $alphaM $betaK $betaKinit $betaKcomm

rayleigh $a1 0.0 $a2 0.0

#epilisi mono gia ta fortia varythtas

constraints Transformation

system BandGeneral

numberer RCM

test NormUnbalance 1.0e-4 20

algorithm Newton

pattern Plain 1 "Linear" {

    load 3 0.0 -$V 0.0

    load 4 0.0 -$V 0.0

    load 5 0.0 -$V 0.0

```

```

load 6 0.0 -$V 0.0
load 7 0.0 -$V 0.0
load 8 0.0 -$V 0.0
load 9 0.0 -$V 0.0
load 10 0.0 -$V 0.0
load 11 0.0 -$V 0.0
load 12 0.0 -$V 0.0
load 13 0.0 -$V 0.0
load 14 0.0 -$V 0.0
}

set GravSteps 10
integrator LoadControl [expr 1./$GravSteps];
analysis Static
analyze $GravSteps
loadConst -time 0.0
wipeAnalysis

source params.tcl

recorder Node -file uu14.out -time -node 14 -dof 1 disp ; #roof's displacement
recorder Node -file uu12.out -time -node 12 -dof 1 disp ;
recorder Node -file uu10.out -time -node 10 -dof 1 disp ;
recorder Node -file uu8.out -time -node 8 -dof 1 disp ;
recorder Node -file uu6.out -time -node 6 -dof 1 disp ;
recorder Node -file uu4.out -time -node 4 -dof 1 disp ;

recorder Drift -file Driftt1.out -time -iNode 4 -jNode 2 -dof 1 -perpDirn 2 ; #Drift
of the 1st floor

```

```
recorder Drift -file Drifft2.out -time -iNode 6 -jNode 4 -dof 1 -perpDirn 2 ; #Drift  
of the 2nd floor
```

```
recorder Drift -file Drifft3.out -time -iNode 8 -jNode 6 -dof 1 -perpDirn 2 ; #Drift  
of the 3rd floor
```

```
recorder Drift -file Drifft4.out -time -iNode 10 -jNode 8 -dof 1 -perpDirn 2 ;  
#Drift of the 4th floor
```

```
recorder Drift -file Drifft5.out -time -iNode 12 -jNode 10 -dof 1 -perpDirn 2 ;  
#Drift of the 5th floor
```

```
recorder Drift -file Drifft6.out -time -iNode 14 -jNode 12 -dof 1 -perpDirn 2 ;  
#Drift of the 6th floor
```

```
set npts [expr int($nsteps)]; # to mikos tis katagrafis
```

```
set factor 2.;
```

```
set AccelSeries "Series -dt $dt -filePath $GMfile -factor $factor";
```

```
pattern UniformExcitation 22 1 -accel $AccelSeries; # create Uniform  
excitation
```

```
constraints Transformation
```

```
test NormDispIncr 1.e-10 20
```

```
algorithm Newton
```

```
integrator Newmark 0.5 0.25
```

```
system BandGeneral
```

```
numberer RCM
```

```
analysis Transient
```

```
# analyze $npts $dt
```

```
set tCurrent [getTime]
```

```
set ok 0
```

```
# Perform the transient analysis
```

```
while {$ok == 0 && $tCurrent < $tFinal} {
```

```
    set ok [analyze 1 $dt]
    set tCurrent [getTime]
  }
puts "dynamic analysis is ok"
puts "ok"
puts "all ok"
```