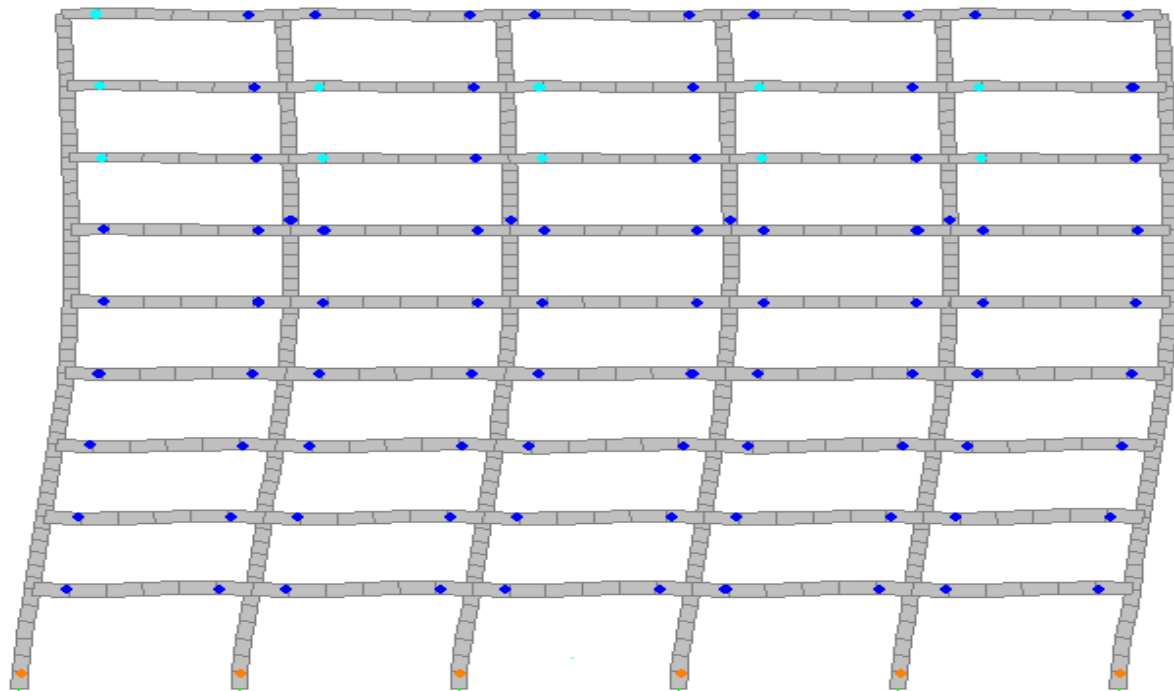




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

**Διερεύνηση της συμμετοχής ανώτερων ιδιομορφών στην  
απόκριση εννιαώροφου μεταλλικού κτηρίου σε σεισμούς  
εγγύς πεδίου**



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΝΔΡΕΟΥ ΕΛΕΝΗ

Επιβλέπων : Ι. Ψυχάρης. Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Συνεπιβλέπων : Ι. Ταφλαμπάς, Dr, Πολιτικός μηχανικός

ΑΘΗΝΑ 2011

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Ι. Ψυχάρη για την πολύτιμη συμβολή του στην περάτωση της παρούσας εργασίας, με την εποπτεία και τις συμβουλές που μου παρείχε. Επίσης, σημαντική ήταν η συνεισφορά του κ. Ι. Ταφλαμπά, με τη συνεργασία και τη συμπαράσταση του οποίου η εργασία αποπερατώθηκε ανεμπόδιστα. Ευχαριστώ αμφότερους για όσα μου προσέφεραν.*

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

| Κεφάλαια   | σελίδες |
|--|---------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1   |         |
| Εισαγωγή.....  | 1       |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2   |         |
| Χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης σε σεισμική διέγερση κοντινού πεδίου |         |
| 2.1 Εισαγωγή.....  | 3       |
| 2.1.1 Οι επιδράσεις του κοντινού πεδίου.....                             | 3       |
| 2.1.2 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου.....         | 7       |
| 2.2 Επιδράσεις κατευθυντικότητας της διάρρηξης - Διαθέσιμα μοντέλα.....  | 17      |
| 2.3 Επιδράσεις της παραμένουσας μετακίνησης (fling step).....            | 25      |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3   |         |
| Αναλυτική παρουσίαση του φορέα   |         |
| 3.1 Γενική περιγραφή.....  | 29      |
| 3.2 Περιγραφή αρχικού κτηρίου.....                                       | 30      |
| 3.3 Περιγραφή φορέα που χρησιμοποιήθηκε.....                             | 34      |
| 3.4 Υλικά.....   | 35      |
| 3.5 Εισαγωγή του φορέα στο πρόγραμμα SAP2000.....                        | 36      |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4   |         |
| Θεωρητικό υπόβαθρο   |         |
| 4.1 Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας.....           | 37      |
| 4.2 Ιδιομορφική ανελαστική στατική ανάλυση.....                          | 39      |
| 4.3 Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα.....                                    | 40      |

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 4.4 Περιγραφή της ΜΡΑ σε βήματα..... | 43 |
|--------------------------------------|----|

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Παρουσίαση αναλύσεων – αποτελεσμάτων

|   |     |
|---|-----|
| 5.1 Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας.....  | 45  |
| 5.2 Υπολογισμός ιδιοπεριόδων – ιδιομορφών κατασκευής.....       | 46  |
| 5.3 Εύρεση καμπύλης αντίστασης κατασκευής.....                  | 48  |
| 5.4 Υπολογισμός μεγεθών ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος ..... | 49  |
| 5.5 Υπολογισμός μεγεθών.....                                    | 52  |
| Σεισμική φόρτιση ERZ-000.....                                   | 53  |
| Σεισμική φόρτιση ERZ-090.....                                   | 56  |
| Σεισμική φόρτιση ELC-090.....                                   | 59  |
| Σεισμική φόρτιση TAB-074.....                                   | 62  |
| Σεισμική φόρτιση TAB-344.....                                   | 65  |
| Σεισμική φόρτιση E04-130.....                                   | 68  |
| Σεισμική φόρτιση E04-230.....                                   | 71  |
| Σεισμική φόρτιση E05-140.....                                   | 74  |
| Σεισμική φόρτιση E05-230.....                                   | 77  |
| Σεισμική φόρτιση E06-230.....                                   | 80  |
| Σεισμική φόρτιση E08-230.....                                   | 83  |
| Σεισμική φόρτιση SCH-281.....                                   | 86  |
| Σεισμική φόρτιση RRS-228.....                                   | 89  |
| Σεισμική φόρτιση RRS-318.....                                   | 92  |
| Σεισμική φόρτιση NWS-046.....                                   | 95  |
| Σεισμική φόρτιση JFA-022.....                                   | 98  |
| Σεισμική φόρτιση SCG-052.....                                   | 101 |
| Σεισμική φόρτιση SYH-090.....                                   | 104 |
| Σεισμική φόρτιση TAK-000.....                                   | 107 |
| Σεισμική φόρτιση TAK-090.....                                   | 110 |
| Σεισμική φόρτιση EMO-000.....                                   | 114 |
| Σεισμική φόρτιση EMO-090.....                                   | 117 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| Σεισμική φόρτιση GA6-230..... | 120 |
|-------------------------------|-----|

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Σύνοψη - Συμπεράσματα

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 6.1 Γενικά.....       | 123 |
| 6.2 Μεθοδολογία.....  | 123 |
| 6.3 Αποτελέσματα..... | 125 |
| 6.4 Συμπεράσματα..... | 130 |

## Παράρτημα Ι

### Σεισμικές διεγέρσεις

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **Εισαγωγή**

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς μίας κατασκευής σε σεισμούς εγγύς πεδίου. Τη δυνατότητα αυτή δίνουν οι διάφορες μέθοδοι ανάλυσης. Η πιο ακριβής μέθοδος φαίνεται να είναι η ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας. Παρόλ'αυτά, ο μεγάλος υπολογιστικός φόρτος και ο χρόνος που απαιτεί αυτού του είδους η ανάλυση αναγκάζει τους μελετητές να στραφούν σε άλλες μεθόδους. Η πιο προσφάτως ανεπτυγμένη μέθοδος είναι η ιδιομορφική ανελαστική στατική ανάλυση, η οποία λαμβάνει υπόψη περισσότερες από την επικρατούσα ιδιομορφές.

Το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμμετοχής ανώτερων ιδιομορφών στην απόκριση ενός εννιαώροφου φορέα σε σεισμικές διεγέρσεις εγγύς πεδίου και η αξιολόγηση της ιδιομορφικής ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης, μιας παραλλαγής της ιδιομορφικής ανελαστικής στατικής ανάλυσης ως προς τα αποτελέσματα της σε σχέση με την ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας.

Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένα εννιαώροφο μεταλλικό επίπεδο πλαίσιο. Το πλαίσιο αυτό είναι σχεδιασμένο για το Seattle της Αμερικής σύμφωνα με τις Post-Northridge οδηγίες των ΗΠΑ..

Η εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια τα οποία συμπληρώνονται από τρία παραρτήματα στο τέλος του τόμου.

Το πρώτο κεφάλαιο είναι η εισαγωγή όπου αναφέρεται συνοπτικά το περιεχόμενο ολόκληρης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και του κάθε κεφαλαίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης κατά τη σεισμική φόρτιση εγγύς πεδίου. Δίνονται κάποιοι βασικοί ορισμοί για το φαινόμενο του κοντινού πεδίου, όπως η κατευθυντικότητα της διάρρηξης και η παραμένουσα μετακίνηση καθώς και κάποια μαθηματικά μοντέλα που έχουν προταθεί για την παραμετροποίηση των μεγεθών που χρησιμοποιούνται στη μελέτη ενός σεισμικού γεγονότος.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο φορέας που χρησιμοποιήθηκε. Δίνονται τομές της κατασκευής, στοιχεία των διατομών των μελών (σχήμα, διαστάσεις) καθώς και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν (χάλυβας). Τέλος περιγράφεται ο τρόπος προσομοίωσης του κτιρίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχθηκε η παρούσα εργασία. Αναλύεται η φιλοσοφία του σχεδιασμού με στάθμες επιτελεσματικότητας, δίνονται οι ορισμοί των μεγεθών του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και περιγράφεται η ιδιομορφική ανελαστικής δυναμική ανάλυση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των αναλύσεων που έγιναν στο φορέα. Δίνονται τα διαγράμματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων της μεθόδου της ιδιομορφικής ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από τη δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας στον πολυβάθμιο φορέα.

Στο έκτο κεφάλαιο σχολιάζονται τα αποτελέσματα του πέμπτου κεφαλαίου. Εκτιμάται η συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών στην απόκριση του φορέα και αξιολογείται η μέθοδος της ιδιομορφικής ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΙΚΗ

#### ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

##### **2.1 Εισαγωγή**

###### **2.1.1 Οι επιδράσεις του κοντινού πεδίου**

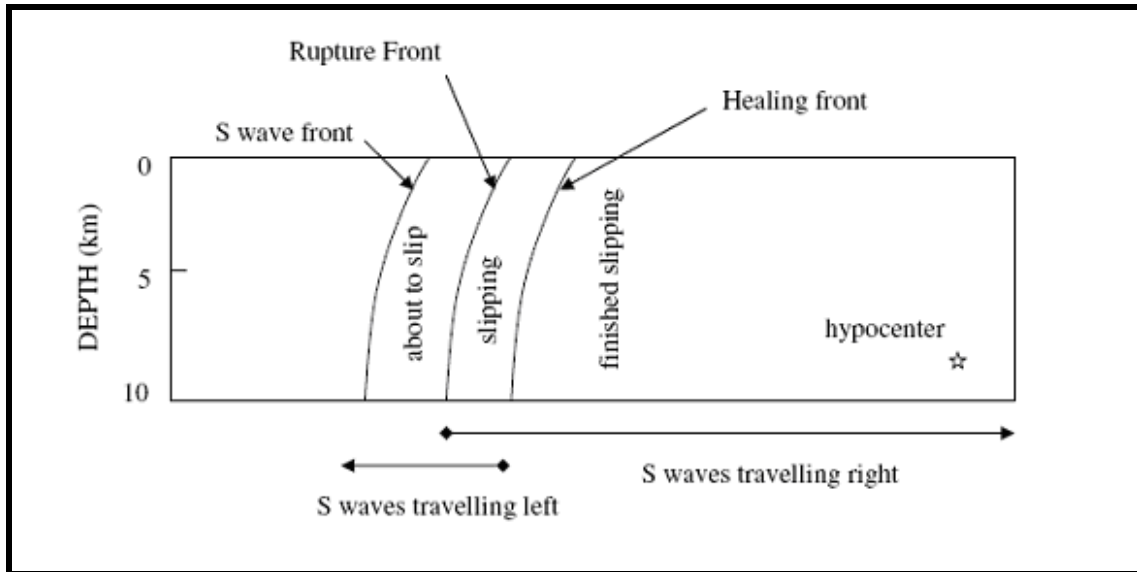
Οι εδαφικές κινήσεις κοντά σε ένα ρήγμα μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικές από εκείνες που βρίσκονται μακριά από τη σεισμική πηγή. Η ζώνη κοντινού πεδίου ρηγμάτων θεωρητικά είναι μέσα σε μια απόσταση περίπου 20-60 km από ένα ρήγμα. Μέσα σε αυτήν την ζώνη κοντινού πεδίου, οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται σημαντικά από το μηχανισμό διάρρηξης, την κατεύθυνση της διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με την περιοχή, και τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις ως αποτέλεσμα της ολίσθησης του ρήματος. Αυτοί οι παράγοντες οδηγούν στα αποτελέσματα που καλούνται ως "κατευθυντικότητα της διάρρηξης" και "παραμένουσα μετακίνηση" (fling step).

Η εμπρόσθια κατευθυντικότητα (forward directivity) εμφανίζεται όταν η διάδοση της διάρρηξης γίνεται προς μια περιοχή και η κατεύθυνση της ολίσθησης στο ρήγμα είναι επίσης προς την περιοχή. Αυτό εμφανίζεται επειδή η ταχύτητα της διάρρηξης στο ρήγμα είναι κοντά (γενικά λίγο μικρότερη) στην ταχύτητα διατμητικών κυμάτων του βράχου κοντά στην πηγή. Για έναν μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης (σχήμα 2.1), όπου το μέτωπο διάρρηξης διαδίδεται μακριά από το υπόκεντρο και προς μια περιοχή, η ενέργεια συσσωρεύεται κοντά στο μέτωπο διάρρηξης από κάθε διαδοχική ζώνη της ολίσθησης κατά μήκος του ρήματος. Το μέτωπο των κυμάτων φθάνει ως ένας μεγάλος παλμός της κίνησης. Ο παλμός της κίνησης χαρακτηρίζεται από το μεγάλο εύρος ενδιάμεσα στις μεγάλες περιόδους και τη μικρή διάρκεια.

Εάν μια περιοχή βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο, δηλαδή, η διάρρηξη διαδίδεται μακριά από την περιοχή, η άφιξη κάθε παλμού επιμέρους σεισμικής διάρρηξης γίνεται στο τέλος του προηγούμενου του. Αυτός ο όρος, καλούμενος ως "οπίσθια κατευθυντικότητα" (backward directivity), χαρακτηρίζεται από κινήσεις με σχετικά μεγάλη διάρκεια και μικρό εύρος. Η "ουδέτερη κατευθυντικότητα" (neutral



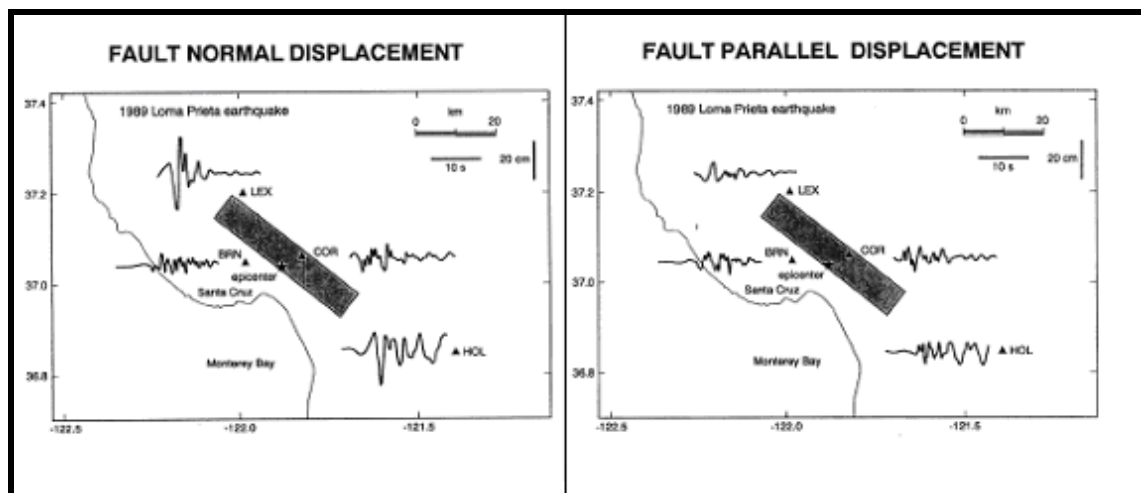
directivity) εμφανίζεται όταν η ρήξη δεν είναι ούτε προς ούτε μακριά από την περιοχή.



Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για ένα οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με μια ταχύτητα που είναι περίπου 80% της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου ρήξης σε μια δεδομένη στιγμή (από Somerville et al 1997a).

Οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις εδαφικές μετατοπίσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού στο Loma Prieta του 1989 παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2. Το επίκεντρο του σεισμού είναι κοντά στο Corralitos και Branciforte Drive, όπου οι οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις είναι μέτριες και στις κάθετες και στις παράλληλες με το ρήγμα συνιστώσες. Αυτό αποδίδεται στην οπίσθια κατευθυντικότητα. Στα άκρα του ρήματος εντούτοις, στο Lexington Dam και το Hollister, η εμπρόσθια κατευθυντικότητα αναγκάζει τις οριζόντιες εδαφικές κινήσεις στην κάθετη διεύθυνση του ρήματος να είναι παλμικές και πολύ μεγαλύτερες από τις κινήσεις των παράλληλων συνιστωσών του ρήματος, οι οποίες είναι παρόμοιες με εκείνες κοντά στο επίκεντρο. Οι μεγάλες παλμικές κινήσεις εμφανίζονται μόνο στην κάθετη με το ρήγμα συνιστώσα (fault normal) και μόνο μακριά από το επίκεντρο.

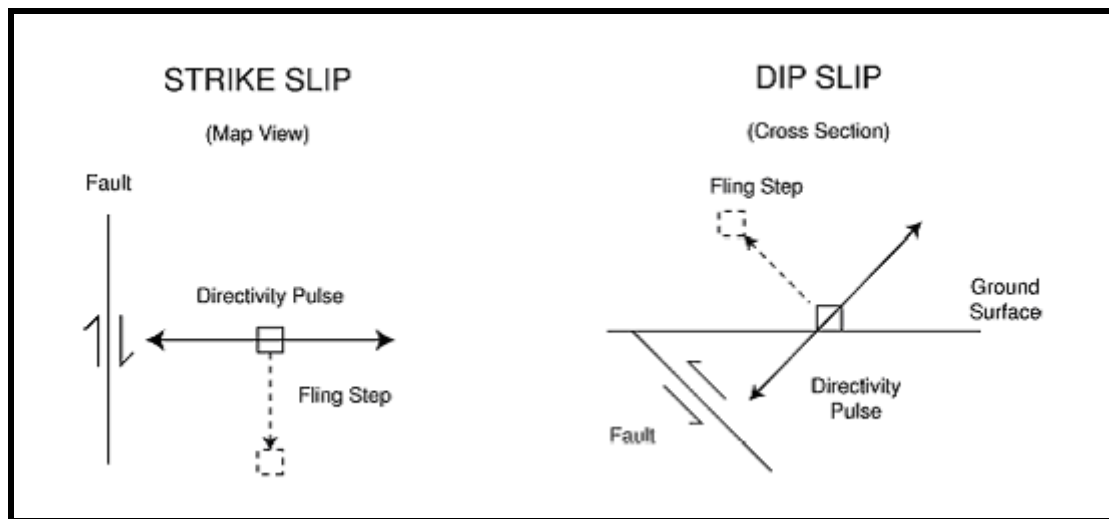
Τα φαινόμενα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης μπορούν να παρουσιαστούν τόσο σε ρήγματά οριζόντιας ολίσθησης, όσο και σε κατακόρυφης ολίσθησης - βύθισης. Στις περιπτώσεις ρήγματος κατακόρυφης βύθισης, οι συνθήκες εμπρόσθιας κατευθυντικότητας εμφανίζονται για περιοχές κοντά στην προβολή του επάνω-τεμάχους του ρήγματος. Σε μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης, ο τρόπος εκπομπής ενέργειας λόγω διάτμησης σε ένα ανάστροφο ρήγμα αναγκάζει τον παλμό της κίνησης να είναι προσανατολισμένος κάθετα στα οριζόντια ρήγματα (Somerville et al, 1997a).



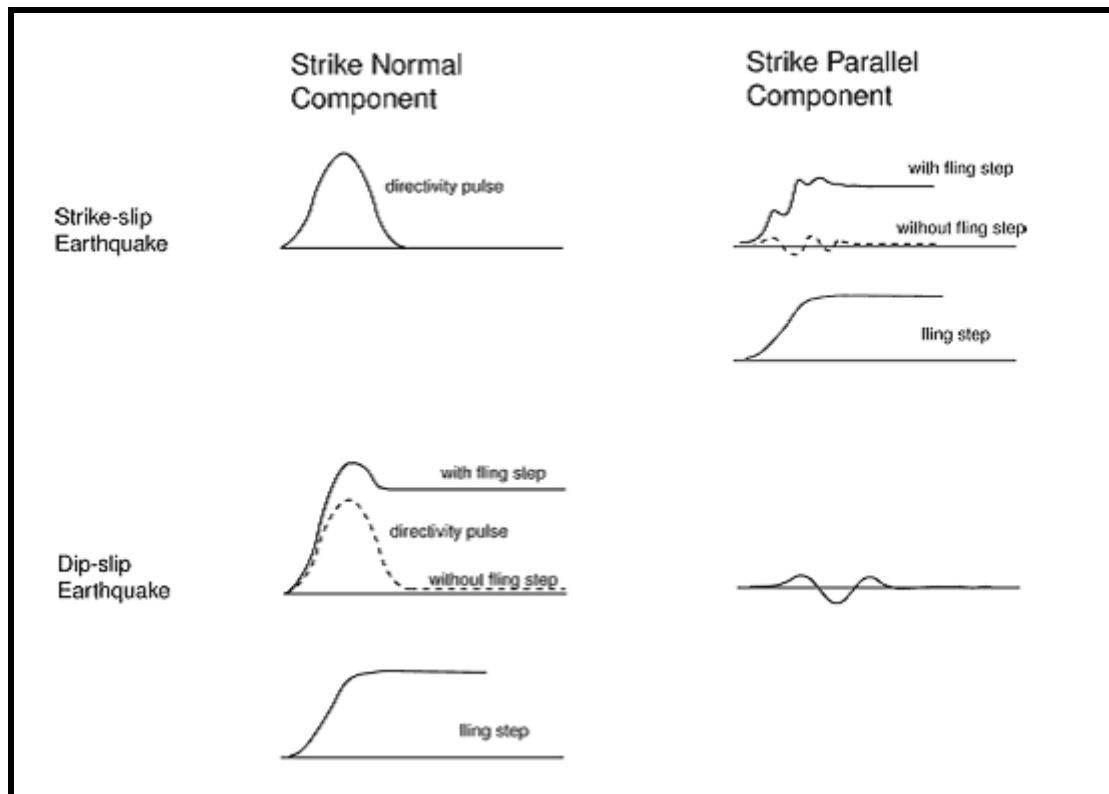
Σχήμα 2.2: Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγραμμένες χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989, για τις κάθετες (αριστερά) και παράλληλες (δεξιά) στο ρήγμα συνιστώσες. Πηγή: EERI, 1995.

Οι σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου περιέχουν μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις λόγω του στατικού πεδίου παραμόρφωσης του σεισμού. Αυτές οι στατικές μετατοπίσεις, που καλούνται "παραμένουσες μετακινήσεις" (fling step) εμφανίζονται μετά από ένα χρονικό διάστημα αρκετών δευτερολέπτων καθώς η ολίσθηση του ρήγματος προχωρά. Οι παραμένουσες μετακινήσεις (fling step) εμφανίζονται παράλληλες στην διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος, και επομένως δεν συνδέονται άμεσα με τις προαναφερθείσες δυναμικές μετακινήσεις που καλούνται "παλμός κατευθυντικότητας της διάρρηξης". Στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζεται στην κάθετη συνιστώσα ενώ η παραμένουσα μετακίνηση εμφανίζεται στην παράλληλη

συνιστώσα. Στα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης, τόσο η παραμένουσα μετακίνηση όσο και ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζονται στην κάθετη συνιστώσα. Οι προσανατολισμοί της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και κατακόρυφης βύθισης παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3, και οι χρονοϊστορίες στις οποίες αυτές οι συνεισφορές εμφανίζονται μαζί και χωριστά, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τους προσανατολισμούς της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα κατακόρυφης βύθισης.



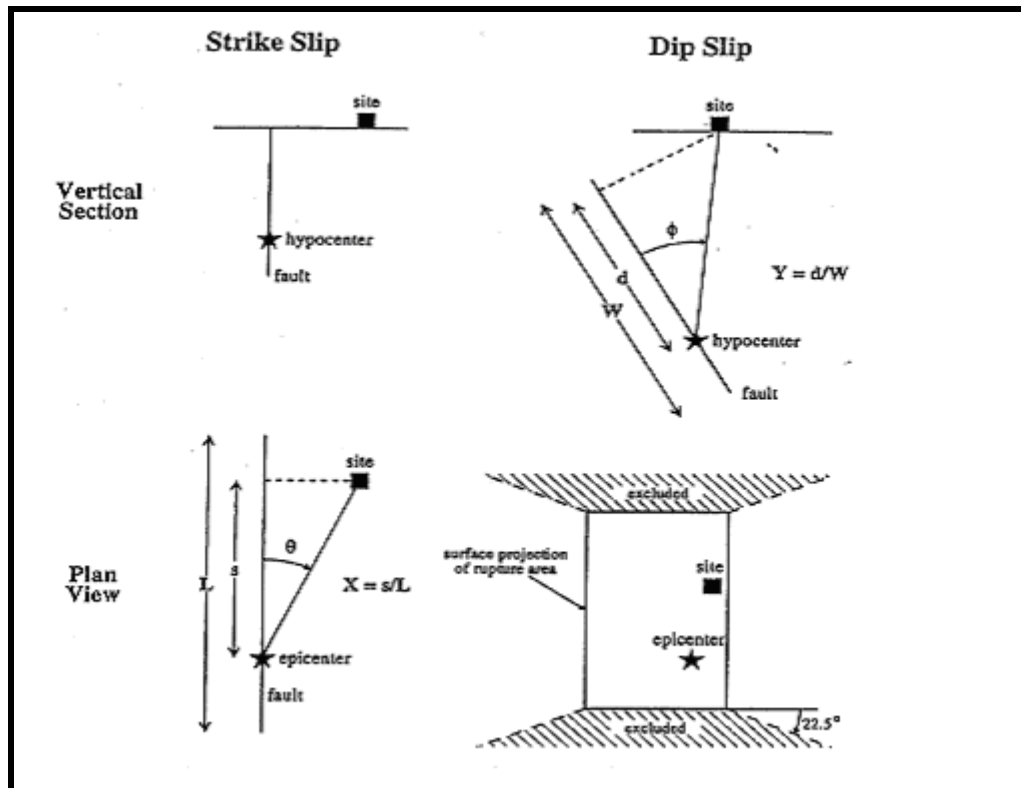
Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα των χρονοϊστοριών για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κατακόρυφης βύθισης στο οποίο η παραμένουσα μετακίνηση και ο παλμός κατευθυντικότητας δείχνονται μαζί και χωριστά.

Τα διαθέσιμα στοιχεία κινήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρηθούν οι επιδράσεις του κοντινού πεδίου είναι περιορισμένα. Ωστόσο, οι πρόσφατοι σεισμοί στην Τουρκία και την Ταϊβάν έχουν συμπληρώσει σημαντικά τη βάση δεδομένων εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας της διάρρηξης, με έμφαση στην εμπρόσθια κατευθυντικότητα. Ακολούθως γίνεται μικρή αναφορά στις επιδράσεις της παραμένουσας μετακίνησης στο κοντινό πεδίο του ρήγματος.

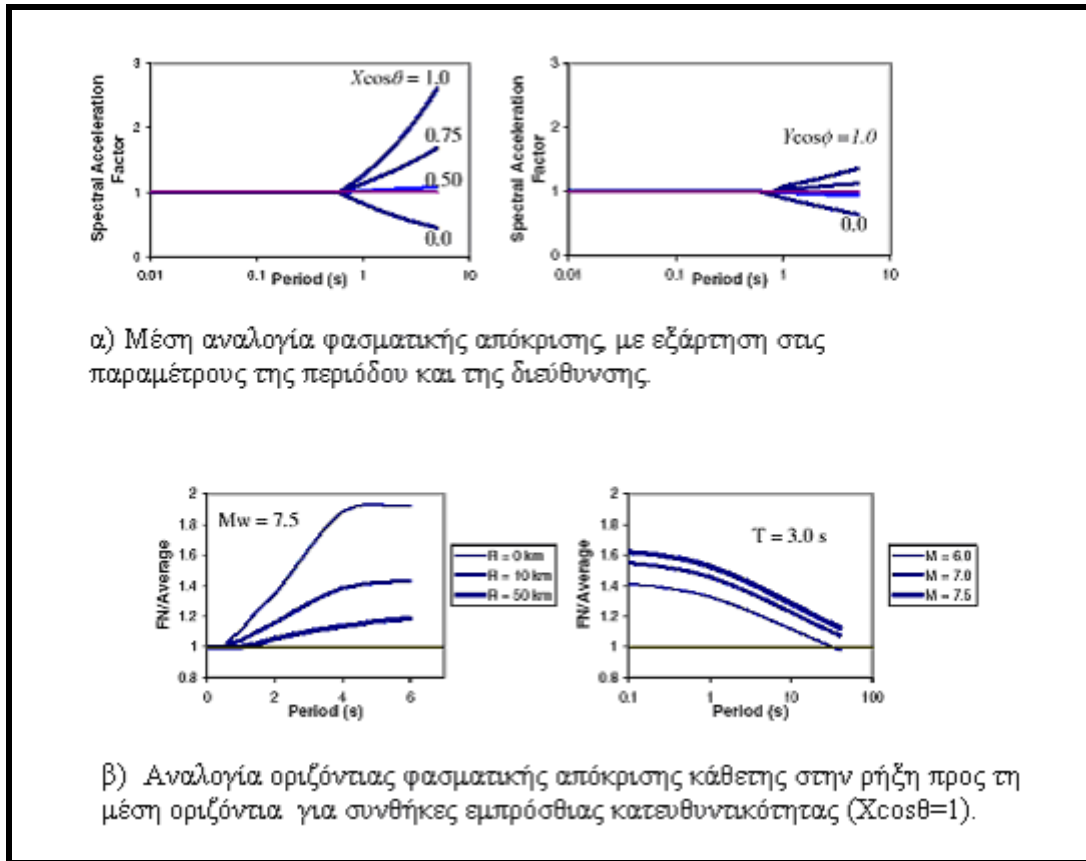
### 2.1.2 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου.

Οι Somerville et al (1997a) παραμετροποίησαν τις συνθήκες που οδηγούν σε εμπρόσθια και οπίσθια κατευθυντικότητα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5, η διαφοροποίηση στο χώρο, των επιδράσεων της κατευθυντικότητας εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της διάδοσης ρήξης και της κατεύθυνσης των κυμάτων που ταξιδεύουν από το ρήγμα στην περιοχή ( $\theta$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, και  $\phi$  για τα ρήγματα ολίσθησης βύθισης), και στο μέρος της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της εξεταζόμενης περιοχής ( $X$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $Y$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης). Τα σημαντικότερα αποτελέσματα εμπρόσθιας κατευθυντικότητας προκύπτουν από τις μικρότερες γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης περιοχής και του ρήγματος και για τα μεγαλύτερα μέρη του διερρηγμένου ρήγματος μεταξύ της θέσης και υποκέντρου. Πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και όταν ικανοποιούνται οι γεωμετρικές συνθήκες για την εμπρόσθια κατευθυντικότητα, τα αποτελέσματα της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας μπορούν να μην εμφανιστούν. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί εάν ένας σταθμός είναι στο τέλος ενός ρήγματος και η διάρρηξη εμφανίζεται προς το σταθμό αλλά η ολίσθηση συγκεντρώνεται προς το τέλος του ρήγματος όπου ο σταθμός βρίσκεται.

Για να ληφθούν υπ όψιν τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας, οι Somerville et al (1997a) συσχέτισαν τις ανηγμένες προς ένα μέσο φάσμα, τιμές των φασμάτων απόκρισης (με 5% απόσβεση) με τις γεωμετρικές παραμέτρους που καθορίζονται στο σχήμα 2.5, και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.6. Οι παράμετροι εδαφικής κίνησης που τροποποιούνται είναι τα μέσα οριζόντια φάσματα απόκρισης και ο λόγος των φασμάτων απόκρισης για την κάθετη και την παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα. Οι παράγοντες κοντινής πηγής καθορίζονται για αποστάσεις μικρότερες από 15km και για τρεις διαφορετικούς τύπους σεισμικών πηγών (πίνακας 2.1). Οι παράγοντες κοντινής πηγής από τον κανονισμό UBC (1997) είναι συμβατοί με το μέσο όρο των καθέτων και των παράλληλων στο ρήγμα συνιστωσών στο μοντέλο Somerville et al (1997a), και ως εκ τούτου, οι διατάξεις του κανονισμού δεν εξετάζουν τη μεγαλύτερη κάθετη συνιστώσα της κίνησης Somerville (1998).



Σχήμα 2.5: Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες της κατευθυντικότητας της διάρρηξης από Somerville et al (1997).



Σχήμα 2.6: Προβλέψεις από την σχέση των Somerville et al (1997 a) μεταξύ διαφορετικών συνθηκών κατευθυντικότητας.

α) Παράγοντας μικρής περιόδου ( $N_{\alpha}$ )

| Seismic Source Type | Closest Distance to Known Seismic Source <sup>1</sup> |      |         |
|---------------------|---|------|---------|
|                     | ≤ 2 km  | 5 km | ≥ 10 km |
| A                   | 1.5   | 1.2  | 1.0     |
| B                   | 1.3   | 1.0  | 1.0     |
| C                   | 1.0   | 1.0  | 1.0     |

β) Παράγοντας ενδιάμεσης περιόδου ( $N_{\nu}$ )

| Seismic Source Type | Closest Distance to Known Seismic Source <sup>1</sup> |      |       |         |
|---------------------|---|------|-------|---------|
|                     | ≤ 2 km  | 5 km | 10 km | ≥ 15 km |
| A                   | 2.0   | 1.6  | 1.2   | 1.0     |
| B                   | 1.6   | 1.2  | 1.0   | 1.0     |
| C                   | 1.0   | 1.0  | 1.0   | 1.0     |

γ) Περιγραφή των τύπων σεισμικής πηγής

| Seismic Source Type | Description  | Seismic Source Definition                 |                               |
|---------------------|--|---|-------------------------------|
|                     |  | Maximum Moment Magnitude, $m$             | Slip Rate, $s$ (mm/year)      |
| A                   | Faults that are capable of producing large magnitude events and that have a high rate of seismic activity                    | $m \geq 7.0$                              | $s \geq 5$                    |
| B                   | All faults other than Types A and C  | $m \geq 7.0$<br>$m < 7.0$<br>$m \geq 6.5$ | $s > 5$<br>$s > 2$<br>$s < 2$ |
| C                   | Faults that are not capable of producing large magnitude earthquakes and that have a relatively low rate of seismic activity | $m < 6.5$                                 | $s \leq 2$                    |

<sup>1</sup> : Η πλησιέστερη απόσταση στην σεισμική πηγή θα πρέπει να λαμβάνεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της εξεταζόμενης θέσης και της προβολής του επιπέδου του ρήγματος στην επιφάνεια ( $R_{J-B}$ ). Η επιφανειακή προβολή δεν χρειάζεται να περιλαμβάνει μέρη της πηγής σε βάθη των 10 km ή μεγαλύτερα

**Πίνακας 2.1: Παράγοντες κοντινής πηγής από UBC (1997)**

Η έρευνα για την απόκριση των κατασκευών στις κινήσεις κοντινού πεδίου έχει οδηγήσει στην εύρεση μιας αντιπροσωπευτικής χρονοϊστορίας των κινήσεων που είναι προτιμητέα για μια αντιπροσώπευση ενός φάσματος απόκρισης (π.χ. Somerville, 1998 Alavi και Krawinkler, 2000 Sasani και Bertero, 2000 Rodriguez-Marek, 2000). Μια παρουσίαση χρονοϊστορίας είναι προτιμητέα επειδή ο χαρακτηρισμός στο πεδίο συχνοτήτων της εδαφικής κίνησης (δηλ. μέσω ενός

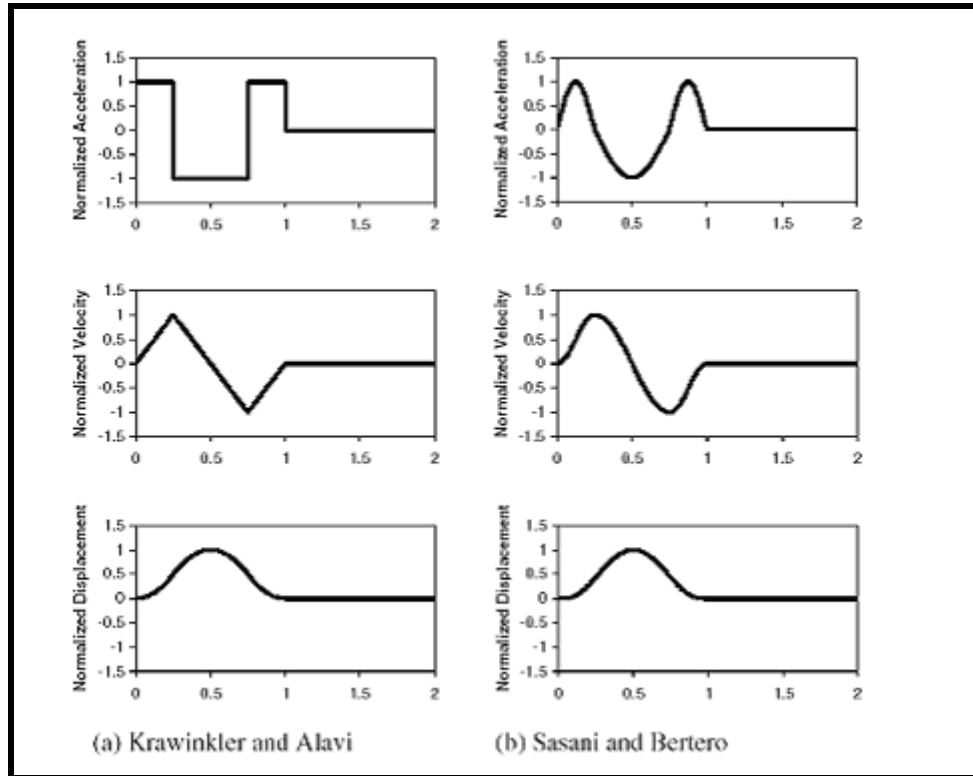


φάσματος απόκρισης) υπονοεί μια πιθανοτική διαδικασία που έχει μια σχετικά ομοιόμορφη διανομή της ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της κίνησης. Όταν η ενέργεια συγκεντρώνεται σε λίγους παλμούς κίνησης, το φαινόμενο συντονισμού που το φάσμα απόκρισης αντιλαμβάνεται για να παρουσιάσει μπορεί να έχει ανεπαρκή χρόνο να αναπτυχθεί (Somerville, 1998).

Οι μελέτες από Krawinkler και Alavi (1998) και Sasani και Bertero (2000) έχουν δείξει ότι οι απλουστευμένες θεωρήσεις του παλμού ταχύτητας μπορούν να «συλλάβουν» τα εμφανή χαρακτηριστικά γνωρίσματα απόκρισης των κατασκευών που υποβάλλονται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Μερικοί απλουστευμένοι παλμοί παρουσιάζονται στο σχήμα 2.7. Για να αναπαρασταθεί μια δόνηση δύο διευθύνσεων, απαιτείται μια αναπαράσταση ημιτονικού παλμού της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας μαζί με τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ της έναρξης της κάθετης και της παράλληλης με το ρήγμα συνιστώσας. Ο πίνακας 2.2 παρέχει τους ορισμούς συνηθισμένων παραμέτρων εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, και αυτές οι παράμετροι είναι διευκρινισμένες στο σχήμα 2.8. Ένας απλός χαρακτηρισμός είναι δυνατός με τη χρήση της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας ( $PHV$ ), της κατά προσέγγιση περιόδου δεσπόζοντος παλμού ( $T_v$ ), και του αριθμού σημαντικών ημιπαλμών της κίνησης στη (μεγαλύτερη) κάθετη διεύθυνση στο ρήγμα.

Ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού χρησιμοποιεί είτε το χρόνο μηδενισμού των τιμών (zero crossing time) είτε το χρόνο στον οποίο η ταχύτητα είναι ίση με 10% της μέγιστης ταχύτητας για αυτόν τον παλμό. Αυτό είναι απαραίτητο για τους παλμούς στους οποίους έχει προηγηθεί απόκλιση από το μηδενικό άξονα στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Ένας βαθμός αβεβαιότητας υφίσταται σε αυτόν τον προσδιορισμό και μπορεί να οδηγήσει σε παραλλαγές στις εκτιμήσεις της  $T_v$ . Εντούτοις, η αβεβαιότητα που συνδέεται με την πρόβλεψη της  $T_v$  από τις σεισμολογικές μεταβλητές είναι πολύ μεγαλύτερη από τα λάθη στον υπολογισμό του από τα σημεία μηδενισμού. Οι Krawinkler και Alavi (1998) προσδιορίζουν τον παλμό ταχύτητας από μια σαφή και σφαιρική κορυφή αιχμής στο φάσμα απόκρισης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Ως εκ τούτου, αυτή η εκτίμηση της ισοδύναμης περιόδου παλμού ( $T_{v-p}$ ) είναι σχετικά σαφής. Για τις μονοπαλμικές κινήσεις, αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί της περιόδου του παλμού παρέχουν κατά προσέγγιση ισοδύναμα αποτελέσματα. Συνολικά, ο λόγος μεταξύ της  $T_v$  και της  $T_{v-p}$  είναι 0.84 με

για μια τυπική απόκλιση 0.28 (Rodriguez- Marek 2000). Η σύμπτωση της  $T_v$  και της  $T_{v-p}$  για μια εδαφική κίνηση σεισμού δείχνει ότι ο παλμός ταχύτητας περιέχει την ενέργεια σε μια συγκεκριμένη ζώνη περιόδων.



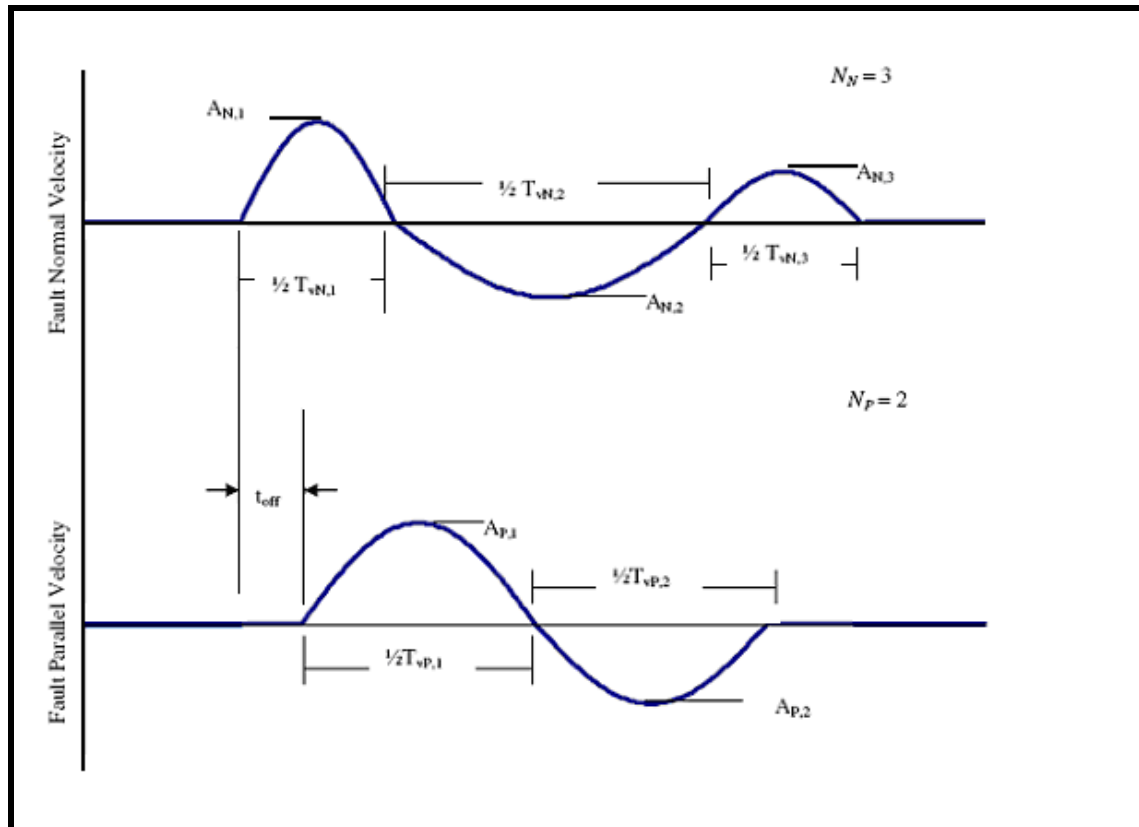
Σχήμα 2.7: Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές

Οι μελέτες απόκρισης των κατασκευών στις κινήσεις κοντινού πεδίου έχουν εστιάσει στα αποτελέσματα της μεγαλύτερης κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (π.χ. Alavi και Krawinkler 2000). Εντούτοις, υπάρχουν εφαρμογές για τις οποίες η παράλληλη συνιστώσα στο ρήγμα μπορεί επίσης να είναι σημαντική. Μη γραμμικές αναλύσεις εδαφικής απόκρισης από τον Rodriguez-Marek (2000) δείχνουν ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες μπορούν να έχουν επιπτώσεις στις τιμές της  $PHV$  και της  $T_v$  και στις δύο διευθύνσεις. Δύο κινήσεις κοντινού πεδίου με τις σημαντικά διαφορετικές κινήσεις της παράλληλης συνιστώσας στο ρήγμα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.9. Επιπρόσθετη έρευνα επιτρέπει να διακριθούν τα αποτελέσματα της δόνησης δύο διευθύνσεων στην απόκριση του εδάφους και των κατασκευών στη

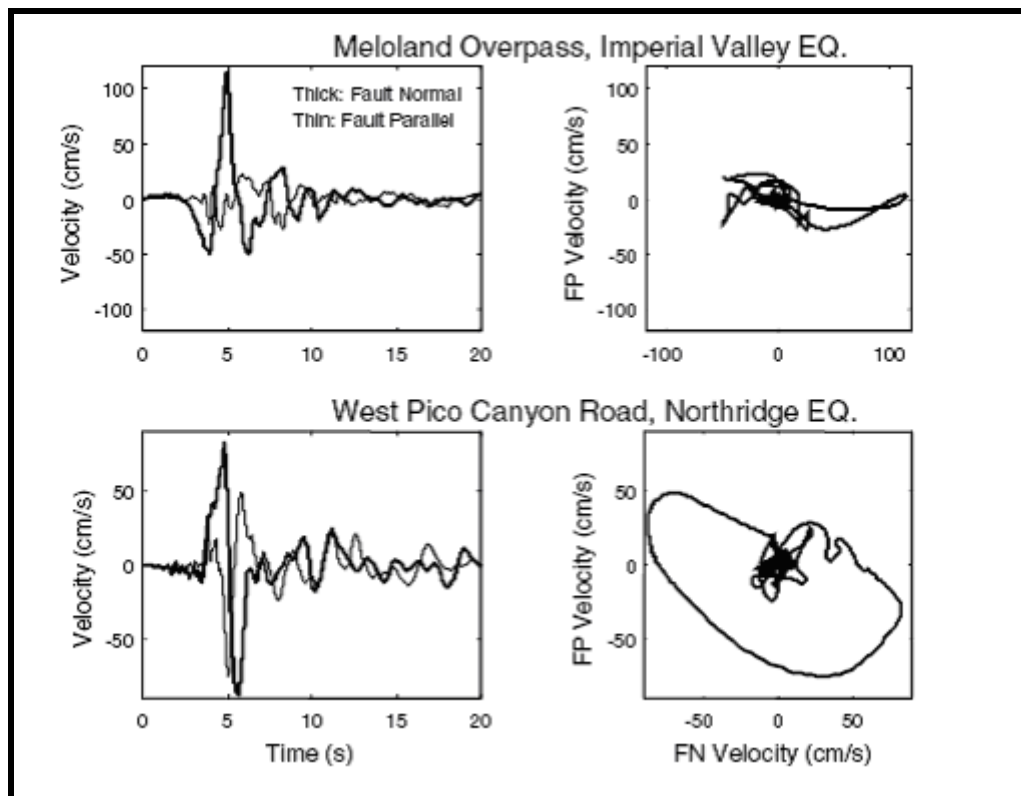
ζώνη κοντινού ρήγματος όπου οι δύο συνιστώσες της οριζόντιας εδαφικής κίνησης μπορούν να διαφέρουν σημαντικά. Από μια εξέταση καταγραμμένων κινήσεων κοντινού πεδίου που παρουσιάζουν την εμπρόσθια κατευθυντικότητα από τον Rodriguez-Marek (2000), διαπιστώθηκε ότι οι απλουστευμένες κινήσεις που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 2.10 θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να ερευνήσουν τη σημασία της δόνησης δύο διευθύνσεων στις μελλοντικές μελέτες. Εάν είναι σημαντικές στη συμπεριφορά των κατασκευών, οι κατακόρυφες κινήσεις στη ζώνη κοντινού πεδίου μπορεί να πρέπει να υπολογιστούν επίσης.

| Parameter   | Abbreviation | Methodology to obtain parameter  |
|---|--------------|--|
| Number of significant pulses.                             | $N$          | Number of half-cycle pulses in the velocity-time history with amplitudes at least 50% of the peak ground velocity of the record.   |
| Pulse period.   | $T_{v,i}$    | For each half sine pulse, $T_{v,i} = 2(t_2 - t_1)$ , where $t_1$ and $t_2$ are either the zero-crossing time, or the time at which velocity is equal to 10% of the peak velocity for the pulse if this time is significantly different than the zero crossing time. $T_v$ corresponding to the pulse with maximum amplitude is the overall representative velocity pulse period. |
| Predominant period from pseudo-velocity response spectra. | $T_{p-v}$    | Period corresponding to a clear and global peak in the pseudo-velocity response spectra at 5% damping.   |
| Pulse amplitude.  | $A_i$        | For each half sine pulse, the peak ground velocity in the time interval $[t_1, t_2]$ .   |
| Peak ground velocity                                      | PHV          | Maximum velocity, defined by the maximum value of $A_i$ . Note, however, that in very few exceptions, the maximum value of $A_i$ in the fault parallel direction does not occur concurrently with the fault normal pulse.  |
| Ratio of fault parallel to fault normal amplitude         | $PHV_{P/N}$  | Defined by the ratio of maximum $A_P$ divided by maximum $A_N$ , where the subscripts $P$ and $N$ denote fault-parallel and fault-normal motions respectively.   |
| Time delay between fault normal and fault parallel pulse  | $t_{off}$    | Time of initiation of fault parallel pulse minus the time of initiation of fault normal pulse.   |

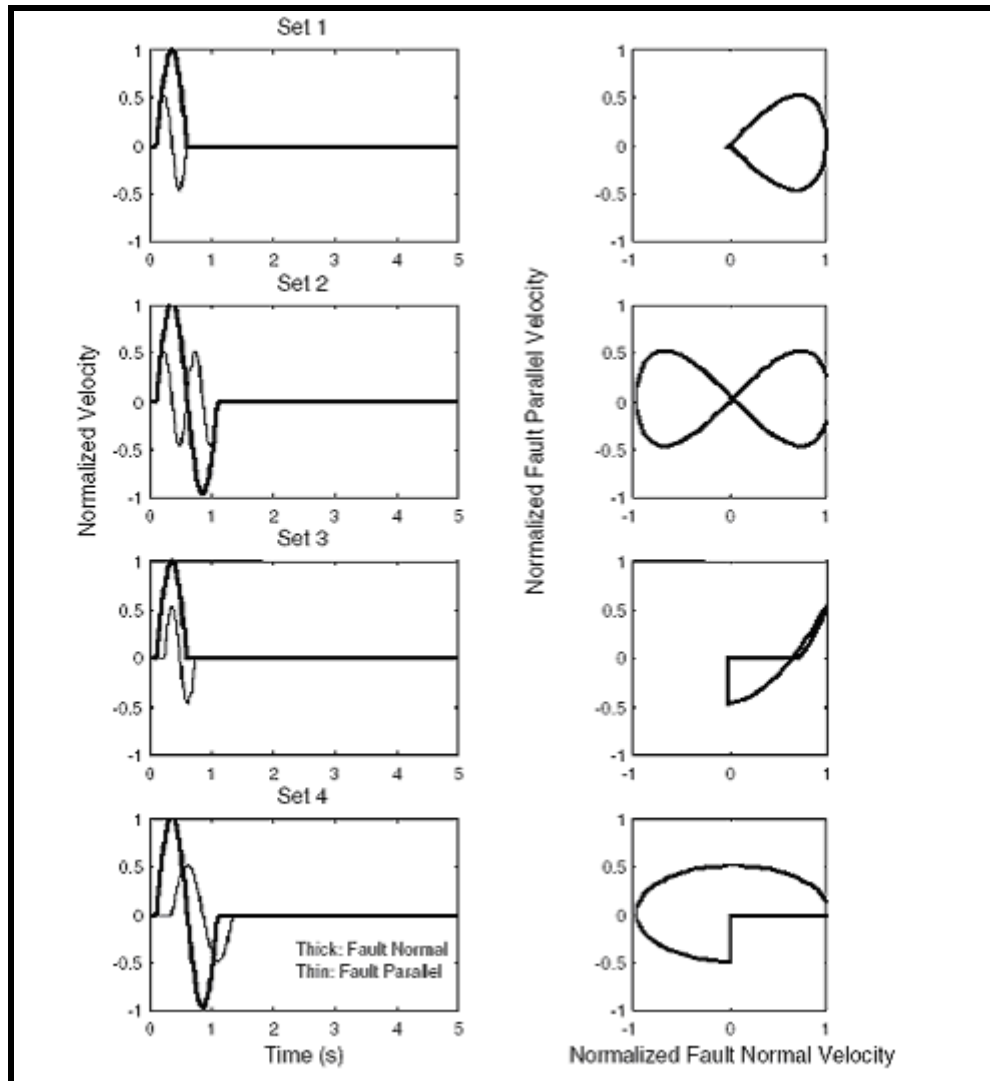
Πίνακας 2.2: Παράγοντες που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις απλοποιημένες εδαφικές κινήσεις ημτονικού παλμού (από Rodriguez-Marek 2000)



Σχήμα 2.8: Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα N, P αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγματος, αντίστοιχα (Rodriguez-Marek 2000).



Σχήμα 2.9: Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια για κάθετη (FN) και παράλληλη (FP) στο ρήγμα συνιστώσα για δύο καταγραφές κοντινού πεδίου. Και οι δύο καταγραφές παρουσιάζουν σημαντικές «κάθετες» ταχύτητες, αλλά το Meloland έχει σχετικά μικρότερες «παράλληλες» ταχύτητες.



Σχήμα 2.10: Απλοποιημένη αναπαράσταση ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η PHV (μέγιστη οριζόντια ταχύτητα) για παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντιστοιχεί στο 50% της PHV κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Rodriguez-Marek 2000).

## 2.2 Επιδράσεις κατευθυντικότητας της διάρρηξης - Διαθέσιμα μοντέλα

### (α) Η φασματική επιτάχυνση

Οι Somerville et al (1997a) και ο Abrahamson (2000) έχουν παρουσιάσει μοντέλα για την τροποποίηση των φασμάτων απόκρισης με απόσβεση  $\zeta = 5\%$  μέσω της σχέσης απόσβεσης Abrahamson και Silva (1997). Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν με παλινδρόμηση μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2.5. Τα μοντέλα παρουσιάζονται για την τροποποίηση του γεωμετρικού μέσου των δύο οριζόντιων συνιστωσών και του λόγου της κάθετης προς τη μέση οριζόντια φασματική συνιστώσα. Οι λεπτομέρειες των μοντέλων φαίνονται στις δύο κορυφαίες σειρές του πίνακα 2.3.

### (β) Διάρκεια και ισοδύναμος αριθμός ομοειδών κύκλων

Οι Somerville et al (1997a) παρουσίασαν ένα μοντέλο για την τροποποίηση του 5-75% της σημαντικής διάρκειας από τη σχέση απόσβεσης Abrahamson και Silva (1996). Το μοντέλο αναπτύχθηκε με παλινδρόμηση μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος (σχήμα 2.5). Το μοντέλο ισχύει για τη διάρκεια του γεωμετρικού μέσου και των δύο οριζόντιων συνιστωσών. Ένα παρόμοιο μοντέλο αναπτύχθηκε από το Liu (2001) για τον ισοδύναμο αριθμό ομοειδών κύκλων ( $N$ ). Οι λεπτομέρειες των μοντέλων διάρκειας και αριθμού ( $N$ ) φαίνονται στις κατώτατες δύο σειρές του πίνακα 2.3.

| Ground Motion Parameter (Reference)  | Description   | Equation  | Range of Applicability   |
|--|---|---|--|
| Spectral Acceleration: Ratio of data/model (Somerville et al., 1997a; Abrahamson, 2000)    | $y$ =Bias in average horizontal response spectral acceleration (ln units) with respect to Abrahamson and Silva (1997) | Strike-Slip faults:<br>$y = c_1 + 1.88c_2 X \cos \theta$<br>$(X \cos \theta \leq 0.4)$<br>$y = c_1 + 0.75c_2$<br>$(X \cos \theta > 0.4)$<br><br>Dip-Slip faults:<br>$y = c_1 + c_2 Y \cos \phi$ | $m > 6.5$<br>For $m < 6.5$ , replace $y$ with $T_m \times y$<br>Where $T_m = 0$ for $m \leq 6$ and<br>$T_m = 1 + (m - 6.5) / 0.5$ for $6.5 > m > 6$<br><br>$r < 30$ km<br>For $r > 30$ , replace $y$ with $T_d \times y$<br>Where $T_d = 0$ for $r > 60$ and<br>$T_d = 1 - (r - 30) / 30$ for $60 > r > 30$ km |
| Spectral Acceleration: Ratio of Strike Normal/Average Amplitude (Somerville et al., 1997a) | Natural logarithm of the ratio of strike normal to average horizontal spectral acceleration                           | $y = \cos 2\xi [C_1 + C_2 \ln(r + 1) + C_3(m - 6)]$   | $6.0 \leq m \leq 7.5$<br>$0 \leq r \leq 50$ km<br>$\xi = \theta$ for strike-slip, $\phi$ for dip-slip. $0 < \xi < 90^\circ$<br>$C_1, C_2, C_3$ function of period. Given separately for cases in which dependence on $\xi$ is included, and cases in which dependence on $\xi$ is ignored.                     |
| 5-75% sig. duration: Ratio of data/model (Somerville et al., 1997a)                        | Bias in duration of acceleration with respect to Abrahamson and Silva (1996)  | Strike-Slip faults:<br>$y = C_1 + C_2 X \cos \theta$<br><br>Dip-Slip faults:<br>$y = C_1 + C_2 Y \cos \phi$   | $6.5 \leq m \leq 7.5$<br>$0 \leq r \leq 20$ km   |
| Number of Cycles ( $N$ ): Ratio of data/model (Liu et al., 2001)                           | Bias in $N$ with respect to Liu et al. (2001)   | Strike-Slip faults:<br>$y = C_1 + C_2 X \cos \theta$<br><br>Dip-Slip faults:<br>$y = C_1 + C_2 Y \cos \phi$   | $6.5 \leq m \leq 7.5$<br>$0 \leq r \leq 20$ km   |

Πίνακας 2.3: Τροποποίηση παραμέτρων εδαφικής κίνησης για την εκτίμηση επιδράσεων κατευθυντικότητας. Οι παράμετροι  $X$ ,  $Y$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  ορίστηκαν στο Σχήμα 2.5. Οι τροποποιήσεις στα φάσματα φαίνονται στο Σχήμα 2.6

### (γ) Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα ( $PHV$ )

Η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (peak horizontal velocity,  $PHV$ ) επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος, την απόσταση, και τις εδαφικές συνθήκες της εξεταζόμενης περιοχής. Ο Somerville (1998) πρότεινε τη χρήση μιας διγραμμικής σχέσης μεταξύ του λογαρίθμου  $PHV$ , του μεγέθους, και του λογαρίθμου της απόστασης. Ο Somerville (1998) εκτέλεσε μια ανάλυση παλινδρόμησης



χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από 15 καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες που αυξήθηκαν από 12 τεχνητές χρονοϊστορίες. Οι καταγραφές αντιστοιχούν σε μεγέθη  $m = 6.2-7.5$  και απόσταση  $r = 0-10\text{km}$ . Για να αποφύγει τις μη ρεαλιστικές προβλέψεις της  $PHV$  στις μικρές αποστάσεις, ο Somerville (1998) χρησιμοποίησε μια ελάχιστη απόσταση των 3km. Η σχέση του Somerville (1998) για την  $PHV$  στη ζώνη κοντά στο ρήγμα είναι:

$$\ln(PHV) = - 2.31 + 1.15 m - 0.5 \ln(r) \quad (2.1)$$

όπου το  $r$  είναι η ελάχιστη απόσταση από το ρήγμα αλλά περιορίζεται τουλάχιστον στα 3km.

Μια παρόμοια μελέτη που συσχετίζει την  $PHV$  το μέγεθος και την απόσταση παρουσιάστηκε από τους Alavi και Krawinkler (2000) βασισμένα στο ίδιο σύνολο στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε από Somerville (1998). Η σχέση της  $PHV$  των Alavi και Krawinkler (2000) είναι:

$$\ln(PHV) = - 5.11 + 1.59 m - 0.58 \ln(r) \quad (2.2)$$

Ο Rodriguez - Marek (2000) εκτέλεσε τις αναλύσεις παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας 48 χρονοϊστορίες ταχύτητας από 11 γεγονότα. Τα στοιχεία ήταν για περιοχές με αποστάσεις  $r < 20\text{km}$  και  $m = 6.1-7.4$ . Χωριστές αναλύσεις εκτελέστηκαν για τις κινήσεις που καταγράφηκαν επί βράχου και εδάφους. Με βάση την ανάλυση αυτών των καταγραφών, η ακόλουθη σχέση για την  $PHV$  προτάθηκε:

$$\ln(PHV) = a + b m + c \ln (r^2 + d^2) + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.3)$$

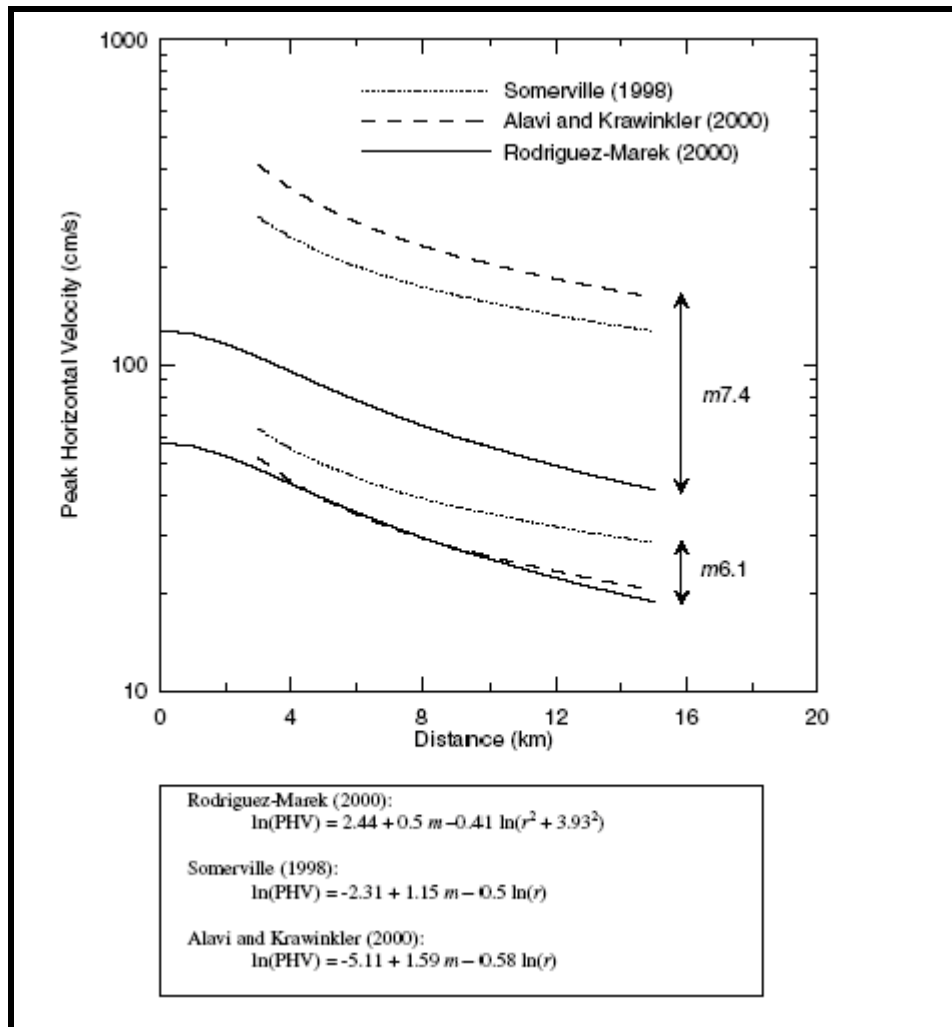
όπου η  $PHV$  είναι σε μονάδες cm/s, το  $a$ , το  $b$ , το  $c$  και το  $d$  είναι οι παράμετροι, το  $r$  είναι η ελάχιστη απόσταση από το ρήγμα, το  $m$  είναι μέγεθος,  $\eta_i$  και  $\varepsilon_{ij}$  είναι όροι σφάλματος.

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Rodriguez- Marek (2000) παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4.

| Data Set    | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| All Motions | 2.44     | 0.50     | -0.41    | 3.93     |
| Rock        | 1.46     | 0.61     | -0.38    | 3.93     |
| Soil        | 3.86     | 0.30     | -0.42    | 3.93     |

Πίνακας 2.4: Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez - Marek (2000) για την PHV.

Το **σχήμα 2.11** συγκρίνει τη σχέση που πρόσφατα προτάθηκε από τον Rodriguez-Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) και τους Alani και Krawinkler (2000). Οι σχέσεις διαφέρουν κυρίως στην επίδραση του μέγεθος  $m$ . Οι διαφορές οφείλονται πιθανώς στο μεγαλύτερο ποσό στοιχείων που περιλαμβάνεται στην πρόσφατη μελέτη.



Σχήμα 2.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης για εκτίμηση του PHV με σχέσεις προτεινόμενες από διάφορους ερευνητές με στοιχεία από βάσεις δεδομένων σεισμών κοντινού πεδίου και με το φαινόμενο της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας (Rodriguez- Marek 2000)

**(δ) Περίοδος παλμού**

Η σχέση του Somerville (1998) για την περίοδο παλμού είναι:

$$\log_{10} T_v = -2.5 + 0.425 m \tag{2.4}$$

όπου η  $T_v$  είναι η περίοδος του μεγαλύτερου κύκλου της κίνησης και  $m$  είναι το μέγεθος. Σε μια μεγαλύτερη μελέτη των διανομών ολίσθησης που χρησιμοποιούν τα

μοντέλα ολίσθησης για 15 σεισμούς, οι Somerville et al (1999) παρέχουν την εξίσωση:

$$\log_{10} T_v = -3.0 + 0.5 m \quad (2.5)$$

Η περίοδος του παλμού της ταχύτητας συνδέεται με το χρονική διάρκεια της ολίσθησης στο ρήγμα  $t_R$ , η οποία μετρά τη διάρκεια της ολίσθησης σε συγκεκριμένο σημείο στο ρήγμα. Η σχέση μεταξύ της περιόδου του παλμού και της χρονικής διάρκειας  $t_R$  είναι (Somerville 1998):

$$T_v = 2.2 t_R \quad (2.6)$$

Η σχέση μεταξύ της περιόδου του παλμού και της χρονικής διάρκειας  $t_R$  μπορούν επίσης να προκύψουν από τη φυσική του φαινομένου των διαρρήξεων. Εάν ένα ρήγμα διαμορφώνεται ως σημείο (σημειακή πηγή) και οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας αγνοούνται, η διάρκεια της κίνησης θα είναι ίση με τη χρονική διάρκεια  $t_R$  (Somerville 1998). Οι πεπερασμένες διαστάσεις του ρήγματος και οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας συμβάλλουν στη διεύρυνση του παλμού. Η χρονική διάρκεια της ολίσθησης στο ρήγμα  $t_R$  είναι τότε, στην ουσία, ένα κάτω όριο της περιόδου του παλμού.

Οι Alavi και Krawinkler (2000) καθόρισαν την περίοδο παλμού ως δεσπόζουσα περίοδο σε φάσμα απόκρισης ταχύτητας ( $T_{v-p}$ ). Η σχέση τους που χρησιμοποιεί αυτόν τον ορισμό για την περίοδο παλμού είναι:

$$\log_{10} T_{v-p} = -1.76 + 0.31 m \quad (2.7)$$

Ο Rodriguez- Marek (2000) ανέπτυξε την ακόλουθη σχέση για την περίοδο παλμού :

$$\ln(T_v)_{ij} = a + bm + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.8)$$

όπου  $(T_v)_{ij}$  είναι η περίοδος του παλμού της καταγραφής  $j$  από το γεγονός  $i$ , το  $a$  και το  $b$  είναι οι παράμετροι του μοντέλου,  $\eta_i$  και  $\varepsilon_{ij}$  είναι όροι σφάλματος.

Εκτιμήσεις παρέχονται για τη περίοδο του παλμού,  $T_v$ , και τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος ταχύτητας,  $T_{v-p}$ . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5. Η σχέση ισχύει για  $m = 6.1-7.4$  και για  $r < 20\text{km}$ .

(a)  $T_v$ 

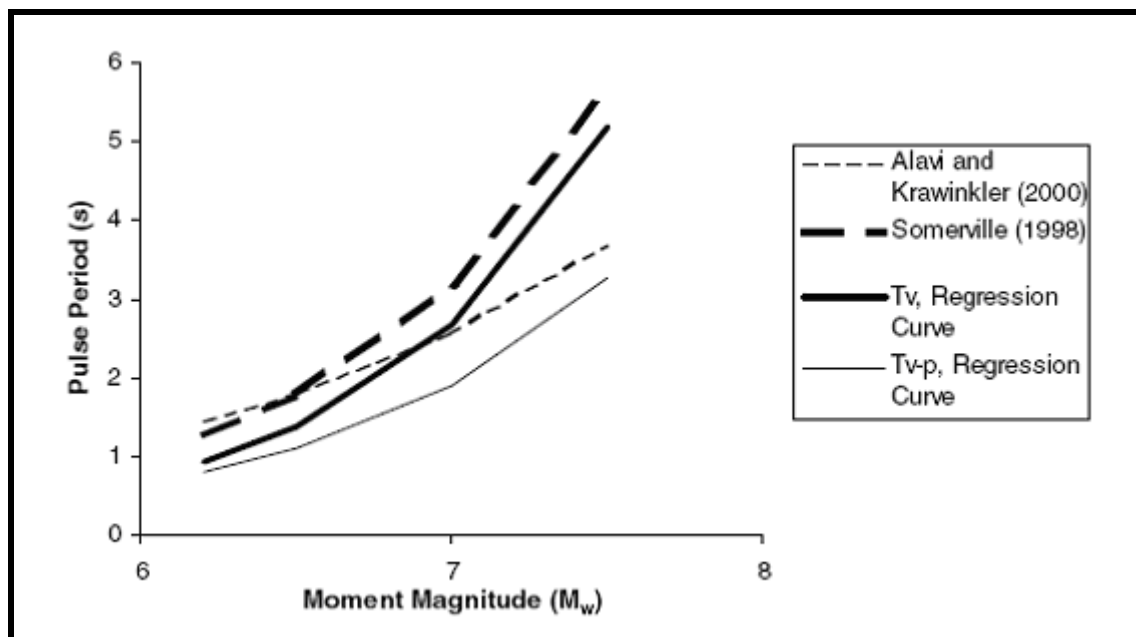
| Data Set    | $a$    | $b$  |
|-------------|--------|------|
| All Motions | -8.33  | 1.33 |
| Rock        | -11.10 | 1.70 |
| Soil        | -5.81  | 0.97 |

(b)  $T_{v-p}$ 

| Data Set    | $a$   | $b$  |
|-------------|-------|------|
| All Motions | -6.92 | 1.08 |
| Rock        | -9.53 | 1.42 |
| Soil        | -5.66 | 0.91 |

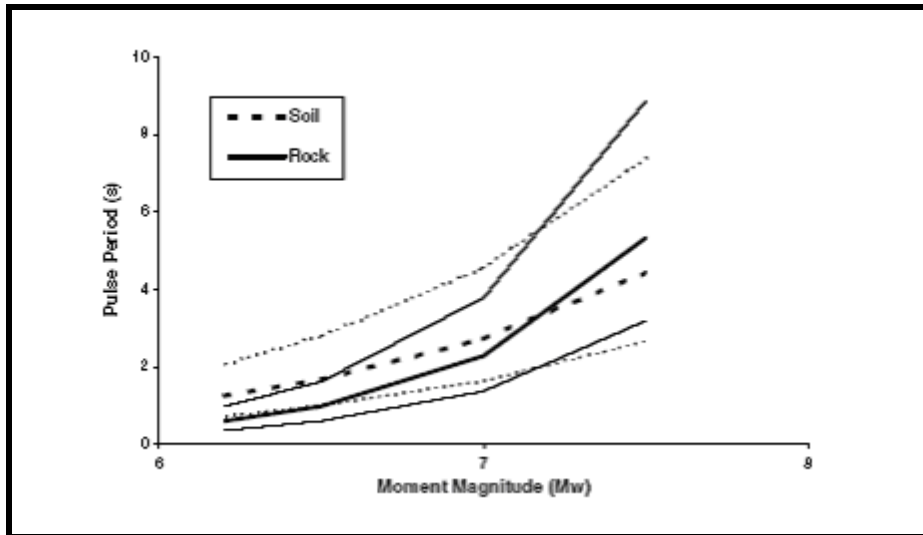
Πίνακας 2.5: Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez - Marek (2000) για την περίοδο του παλμού

Το σχήμα 2.12 συγκρίνει τη σχέση που πρόσφατα προτάθηκε από τον Rodriguez-Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) και τους Alani και Krawinkler (2000). Οι σχέσεις του Rodriguez - Marek (2000) για τις  $T_v$  και  $T_{v-p}$  δίνουν μικρότερες περιόδους παλμού από τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) για το  $T_v$  και από τους Alani και Krawinkler (2000) για  $T_{v-p}$ . Οι διαφορές δεν είναι τόσο μεγάλες για μεγάλα μεγέθη σεισμού  $m > 7$ , όπου υπάρχουν αβεβαιότητες στην εκτίμηση της περιόδου του παλμού.



Σχήμα 2.12.: Σύγκριση μοντέλου Rodriguez - Marek με σχέσεις που αναπτύχθηκαν από Somerville (1998) για τη  $T_v$  και από Alavi και Krawinkler (2000) για τη  $T_{v-p}$ . (Rodriguez- Marek 2000).

Η επίδραση των εδαφικών συνθηκών μπορεί να ερευνηθεί μέσω της χρήσης των σχέσεων του Rodriguez - Marek (2000) για περίοδο του παλμού για το βράχο και το έδαφος (Σχήμα 2.13). Η διαφορά μεταξύ των τιμών της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος είναι μικρή για τα μεγάλα μεγέθους γεγονότα ( $m > 7$ ), αλλά η περίοδος του παλμού είναι μεγαλύτερη επί εδαφών απ' ό,τι για περιοχές βράχου για τα γεγονότα με χαμηλότερα μεγέθη. Η εξέταση των ταξινομημένων κατά ζεύγη σταθμών βράχου και εδάφους και τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων απόκρισης επιβεβαιώνουν αυτήν την παρατήρηση (Rodriguez - Marek 2000).



Σχήμα 2.13: Μοντέλο Rodriguez - Marek για εκτίμηση της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος. Οι έντονες καμπύλες αναπαριστούν τη μέση τιμή και οι λεπτές τις τυπικές αποκλίσεις (Rodriguez - Marek 2000)

### (ε) Αριθμός σημαντικών παλμών

Ο αριθμός των παλμών της κίνησης (καλούμενος ως αριθμός σημαντικών παλμών,  $N_v$ ) ορίζεται ως ο αριθμός ημικύκλων ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 50% της μέγιστης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης (πίνακας 2.3). Για τον υπολογισμό του αριθμού σημαντικών παλμών ταχύτητας, μόνο η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της κίνησης εξετάζεται. Ο αριθμός σημαντικών παλμών στη κάθετη συνιστώσα 48 καταγραφών παρουσιάζεται στον πίνακα 2.6. Οι περισσότερες καταγραφές περιέχουν δύο σημαντικούς παλμούς (π.χ., ένας πλήρης κύκλος της εδαφικής κίνησης). Ο Somerville (1998) προτείνει ότι ο αριθμός παλμών ημιτόνου στη χρονοϊστορία της ταχύτητας να συνδεθεί με τον αριθμό ασυνεχειών (asperities) σε ένα ρήγμα, ο οποίος στη συνέχεια συνδέεται με τη διανομή ολίσθησης ρήγματος. Δεν υπάρχει κανένα μοντέλο διαθέσιμο σήμερα για την πρόβλεψη του αριθμού σημαντικών παλμών στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Για τις περισσότερες περιπτώσεις ο  $N_v$  θα ποικίλει μεταξύ 1 και 3, με  $N_v = 2$  να είναι μια καλή τιμή που χρησιμοποιείται για σεισμούς.

| Earthquake            | Year | Number of Records | Number of Records with given number of half-cycle pulses ( $N_p$ ) |          |          |            |
|-----------------------|------|-------------------|--|----------|----------|------------|
|                       |      |                   | 1 pulse  | 2 pulses | 3 pulses | > 3 pulses |
| Parkfield             | 66   | 2                 | 0 (0)  | 1 (1)    | 0 (0)    | 1 (1)      |
| San Fernando          | 71   | 1                 | 1 (0)  | 0 (0)    | 0 (1)    | 0 (0)      |
| Imperial Valley       | 79   | 13                | 1 (0)  | 10 (1)   | 1 (7)    | 1 (5)      |
| Morgan Hill           | 84   | 2                 | 0 (0)  | 0 (0)    | 1 (0)    | 1 (2)      |
| Superstition Hills(B) | 87   | 2                 | 1 (0)  | 1 (1)    | 0 (0)    | 0 (1)      |
| Loma Prieta           | 89   | 8                 | 0 (0)  | 4 (0)    | 1 (1)    | 3 (7)      |
| Erzincan, Turkey      | 92   | 1                 | 0 (0)  | 0 (0)    | 1 (1)    | 0 (0)      |
| Landers               | 92   | 1                 | 1 (0)  | 0 (1)    | 0 (0)    | 0 (0)      |
| Northridge            | 94   | 10                | 3 (0)  | 4 (4)    | 3 (2)    | 0 (4)      |
| Kobe                  | 95   | 4                 | 0 (0)  | 1 (0)    | 0 (1)    | 3 (3)      |
| Kocaeli, Turkey       | 99   | 4                 | 0 (0)  | 3 (2)    | 0 (0)    | 1 (2)      |
| <b>Totals</b>         |      | 48                | 7 (0)  | 24 (10)  | 7 (13)   | 10 (25)    |

Πίνακας 2. 6: Αριθμός παλμών ( $N_p$ ) από γεγονός για 48 κοντινού πεδίου κινήσεις (κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα). Οι τιμές στις παρενθέσεις είναι οι αριθμοί των ημι-κύκλων του παλμού της ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 33% της PHV. (Rodriguez - Marek 2000)

### 2.3 Επιδράσεις της παραμένουσας μετακίνησης (fling step)

Οι επιδράσεις της παραμένουσας μετακίνησης (fling step) της εδαφικής κίνησης στην απόκριση των κατασκευών εθεωρείτο ότι είχαν λιγότερη σημασία από τις επιδράσεις της κατευθυντικότητας. Οι πρόσφατοι σεισμοί στην Τουρκία (1999) και στην Ταϊβάν (1999), τόνισαν τη σημασία της παραμένουσας παραμόρφωσης που συνδέεται με τη ρήξη επιφάνειας στην απόκριση των κτιρίων. Οι ευδιάκριτες εδαφικές μεταθέσεις, οι διαφορικές καθιζήσεις και η παραμόρφωση του εδάφους, είναι μερικές εκφάνσεις αυτού του φαινομένου.

Η παραμένουσα μετακίνηση, που είναι αποτέλεσμα στατικής μετατόπισης του εδάφους, χαρακτηρίζεται γενικά από έναν παλμό ταχύτητας μονής κατεύθυνσης και ένα μονοτονικό βήμα στη χρονοϊστορία των μετατοπίσεων. Το βήμα στη χρονοϊστορία μετατοπίσεων εμφανίζεται παράλληλα στην διεύθυνση της ολίσθησης ρήγματος (δηλ., κατά μήκος της διάρρηξης).



Για όλους τους τύπους ρηγμάτων, η μέγιστη μετατόπιση ( $MD$ ) ρήγματος σε  $m$ , μπορεί συσχετισθεί με το μέγεθος σεισμού ( $m$ ) του γεγονότος μέσω της εξίσωσης:

$$\log_{10}(MD) = -5.46 + 0.82 m \quad (2.9)$$

Ισχύει για εύρος μεγέθους σεισμού  $m = 5.2-8.1$ , και για εύρος  $MD$  από  $0.01m$  σε  $14.6m$ .

Η μέση μετατόπιση ( $AD$ ) ρήγματος για όλους τους τύπους ρηγμάτων είναι:

$$\log_{10}(AD) = -4.80 + 0.69 m \quad (2.10)$$

Ισχύει για εύρος μεγέθους σεισμού  $m = 5.6-8.1$

Η παραμένουσα μετακίνηση επιφάνειας ως αποτέλεσμα της διάρρηξης ρηγμάτων μπορεί να ποικίλει σημαντικά με την απόσταση από το ίχνος του ρήγματος. Η τεκτονική μετατόπιση μακριά από το ρήγμα μπορεί να εντοπιστεί σε ίχνη δευτεροβάθμιων ρηγμάτων και σε άλλες ασυνέχειες.

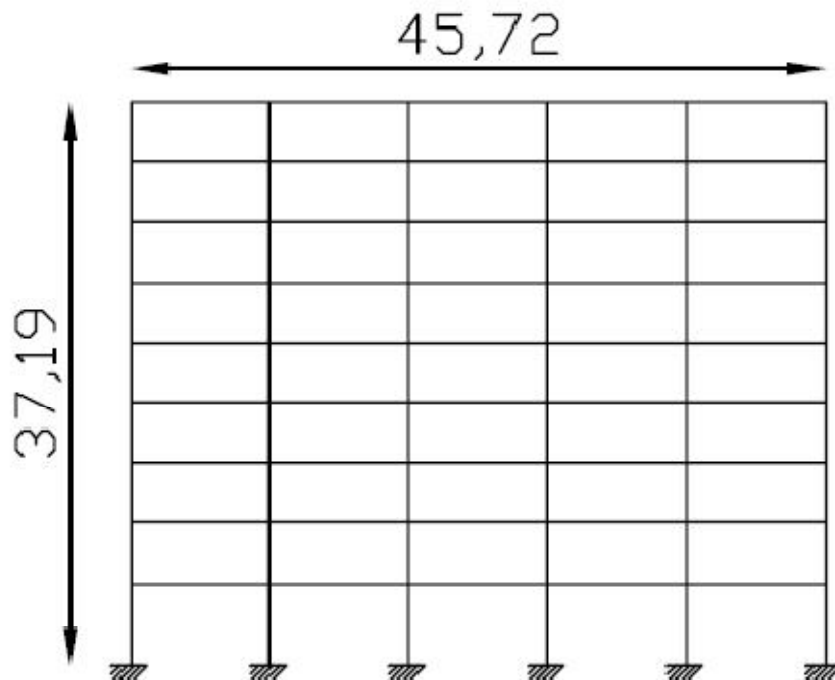
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΦΟΡΕΑ

#### 3.1 Γενική περιγραφή

Ο φορέας που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία είναι ένας εννιαόροφος επίπεδος μεταλλικός πλαισιωτός φορέας. Ο φορέας αυτός είναι μια παραλλαγή του εννιαόροφου μεταλλικού κτηρίου με υπόγειο, που σχεδιάστηκε για το Seattle της Αμερικής σύμφωνα με τις Post-Northridge οδηγίες των ΗΠΑ. Για το σχεδιασμό του κτηρίου έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι ισχύουσες απαιτήσεις για φορτία βαρύτητας, φορτία ανέμου και σεισμικά φορτία σχεδιασμού.

Ο φορέας αποτελείται από εννέα ορόφους και πέντε ζυγώματα. Έχει συνολικό ύψος 122ft (37,19 m) με το ύψος κάθε ορόφου να φτάνει τα 13 ft εκτός από τον πρώτο όροφο που έχει ύψος 18ft. Το μήκος του φορέα είναι 150ft (45,72 m), με μήκος ζυγώματος 30ft (9,14m). Παρακάτω φαίνεται η κατασκευή (σχήμα 4.1).



Σχήμα 3.1: Τομή κτηρίου (διαστάσεις σε m)

### 3.2 Περιγραφή αρχικού κτηρίου

Ο πρωτότυπος φορέας έχει διαστάσεις κάτοψης 30\*30 ft<sup>2</sup>.

Οι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τα φορτία που καταπονούν το αρχικό κτήριο είναι οι ακόλουθες:

- Μεταλλικός σκελετός: Όπως σχεδιάστηκε
- Δάπεδο οροφής και στέγης: 3 ίντσες ο φέρων μεταλλικός οργανισμός του δαπέδου, εκ των οποίων οι 2.5 να αντιστοιχούν σε πλήρωση σκυροδέματος και σε υλικά πυροπροστασίας.
- Επικάλυψη στέγης: Κατά μέσο όρο 7 psf.
- Δάπεδο οροφής και στέγης: Κατά μέσο όρο 3 psf, λαμβάνοντας υπόψη και την πυροπροστασία.
- Μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις: 7 psf κατά μέσο όρο για όλους τους ορόφους, ενώ έχουμε πρόσθετα 40 psf στο δώμα για εξοπλισμό.
- Χωρίσματα: Όπως ορίζεται από τον ισχύοντα κανονισμό ( 10 psf για τα σεισμικά φορτία και 20 psf για τα φορτία σχεδιασμού βαρύτητας.)
- Εξωτερικοί τοίχοι: 25 psf για την επιφάνεια των τοίχων συμπεριλαμβανομένου και του δώματος.
- Κινητά φορτία: Έχουν χρησιμοποιηθεί οι τυπικές τιμές φορτίων που δίνονται από τον κανονισμό για χρήση του κτιρίου, ως κτήριο γραφείων (50 psf σε όλη την έκταση της κάτοψης του κτιρίου)
- Φορτία ανέμου: Όπως ορίζεται από τον κανονισμό και σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή.
- Σεισμικά φορτία: Όπως ορίζονται από τον κανονισμό.

Ο κανονισμός Post - Northridge που εφαρμόστηκε στο συγκεκριμένο κτήριο, προσθέτει στο κανονισμό της FEMA 267 (1995) νέες προσαρμοσμένες παροχές και οι σχεδιαστές επιλέγουν την χρήση ελασμάτων ενίσχυσης στα δοκάρια με στόχο να εξασφαλίσουν την μεταφορά της θέσης της πλαστικής άρθρωσης από το μέτωπο των υποστυλωμάτων στα δοκάρια.

Τα φορτία που αναφέρθηκαν παραπάνω υπολογίζονται ως εξής για κάθε όροφο του κτιρίου:

- Μόνιμα φορτία για κάθε όροφο για τον υπολογισμό του βάρους, 96 psf
- Μόνιμα φορτία για κάθε όροφο φορτία για τον υπολογισμό της μάζας, 86 psf
- Μόνιμο φορτίο για τη στέγη χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη του δώματος, 83 psf
- Μόνιμα φορτία λόγω του δώματος, 116 psf
- Μειωμένα κινητά φορτία ανά όροφο και για τη στέγη, 20 psf όπου η μονάδα psf αντιστοιχεί σε 48 Pa.

Το κτήριο σχεδιάστηκε με βάση τις Post - Northridge οδηγίες, για τα σεισμικά φορτία, καθώς αυτά επικράτησαν έναντι των φορτίων ανέμου. Το παρόν κτήριο παρουσιάζει αρκετά μεγάλη αντοχή έναντι των σεισμικών φορτίσεων που του εφαρμόστηκαν, γεγονός που εν μέρει δικαιολογείται από τις Post - Northridge οδηγίες που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό του. Έχει σχεδιαστεί με τρόπο τέτοιο ώστε τα τελευταία ζυγώματα σε κάθε πλευρά του κτηρίου να μην αναλαμβάνουν φορτία.



Σχήμα 3.2: Θέση των πλαισίων που αναλαμβάνουν τα φορτία.

Οι Post - Northridge οδηγίες αποτελούν μια συνέχεια των Pre - Northridge, που έως τότε εφαρμόζονταν στις κατασκευές. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τόσο οι κατασκευές του Seattle αλλά και αυτές του LA που σχεδιαστήκαν με τις Post - Northridge οδηγίες παρουσιάζουν αναμφισβήτητα καλύτερες συμπεριφορές σε σχέση με άλλες που σχεδιάστηκαν στις ίδιες περιοχές με βάση τις Pre - Northridge.

Το πρώτο στοιχείο που διαφοροποιεί τις δύο αυτές οδηγίες είναι οι επιλεγόμενες διατομές των μελών της κατασκευής. Με βάση τις Post - Northridge οδηγίες οι διατομές που επιλέγονται είναι αρκετά μεγαλύτερων διαστάσεων έναντι αυτών που προβλέπονται από τις Pre - Northridge. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να αναφέρουμε ότι για τις δοκούς, με βάση τις Post - Northridge οδηγίες επιλέγεται διατομή μέλους με διαστάσεις 30\*108, ενώ για την ίδια διατομή με βάση τις Pre - Northridge οδηγίες οι διαστάσεις είναι 27\*114, παρατηρείται δηλαδή μια ουσιαστική αύξηση του ύψους της διατομής.

Τα μεγέθη των νέων μελών που προβλέπονται με τον Post - Northridge σχεδιασμό είναι μεγαλύτερα εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη καμπτική αντοχή της κατασκευής.

Μια δεύτερη και ουσιαστική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι σύμφωνα με τον Post – Northridge σχεδιασμό προβλέπεται η χρήση ελασμάτων ενίσχυσης στη θέση του κόμβου σύνδεσης δοκού – υποστυλώματος, κάτι που δεν ίσχυε στον Pre - Northridge κανονισμό. Η κύρια αιτία της χρήσης των ελασμάτων αυτών από τους σχεδιαστές ήταν η επιθυμία τους να μεταφέρουν την αστοχία εκτός του κόμβου σύνδεσης. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, στόχος τους, ήταν η μεταφορά της θέσης της πλαστικής άρθρωσης από το μέτωπο του υποστυλώματος στην δοκό και εκτός του κόμβου συνδέσεως τους, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο και μεγαλύτερη καμπτική αντοχή του μέλους. Τα ελάσματα ενίσχυσης επομένως αποτελούν μια πρόσθετη τροποποίηση του Pre - Northridge κανονισμού. Οι διαστάσεις των ελασμάτων ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο κτίριο που μελετάμε θα δοθούν στον πίνακα 5.3 που ακολουθεί.

TOP AND BOTTOM FLANGE COVER PLATE DETAILS

|                |             |                   |                 |                     |                |
|----------------|-------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------------|
| Girder Section |             | W21X62            | W24X76          | W24X84              | W24X103        |
| Top Plate      | L x W1 x T1 | 11 x 8 1/4 x 3/4  | 12 x 9 x 3/4    | 12 x 9 x 7/8        | 12 x 9 x 1 1/8 |
| Bottom Plate   | L x W2 x T2 | 11 x 10 1/4 x 5/8 | 12 x 11 x 5/8   | 12 x 11 x 3/4       | 12 x 11 x 1    |
| Girder Section |             | W27X94            | W27X129         | W33X141             |                |
| Top Plate      | L x W1 x T1 | 14 x 10 x 7/8     | 14 x 10 x 1-1/4 | 17 x 11-1/2 x 1-1/8 |                |
| Bottom Plate   | L x W2 x T2 | 14 x 12 x 3/4     | 14 x 12 x 1-1/8 | 17 x 13-1/2 x 1     |                |

**Πίνακας 3.1. Διαστάσεις των ελασμάτων ενίσχυσης όπως αυτές επιλέχθηκαν με βάση τον Post – Northridge σχεδιασμό**

Οι λεπίδες που χρησιμοποιούνται είναι δύο μια στο πάνω μέρος της δοκού (top plate) και μια στο κάτω της (bottom plate).

Στον παραπάνω πίνακα τώρα οι τιμές με ένδειξη L αντιστοιχούν στο μήκος του ελάσματος ενίσχυσης, με W στο πλάτος της λεπίδας και με T στο πάχος της. Η λεπίδα που βρίσκεται στο κάτω μέρος της δοκού έχει αμείωτη ορθογωνική διατομή ενώ η λεπίδα στο πάνω μέρος έχει πλάτος που μειώνεται ομοιόμορφα. Πιο συγκεκριμένα για την επάνω λεπίδα, το πλάτος W, που δίνεται από τον πίνακα 5.3, διατηρείται σταθερό από το μέτωπο του υποστυλώματος και για ένα μήκος ίσο με 2-1/2 ίντσες από το σημείο αυτό, ενώ από εκεί και πέρα και μέχρι το τέλος του ελάσματος το

πλάτος αρχίζει να μειώνεται ομοιόμορφα. Η τιμή του πλάτους στο τέλος του ελάσματος μπορεί να είναι μειωμένη έως και 3-1/2 ίντσες από την αρχική τιμή.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει βέβαια να αναφέρουμε ότι τα είδη των διατομών που δίνονται στον πίνακα 4.2 είναι αποτέλεσμα μελέτης που έχει γίνει, καθώς πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την τελική επιλογή της διατομής. Ενδεικτικά θα αναφέρουμε δύο από αυτούς τους παράγοντες, πρώτον είναι ότι το μήκος των ελασμάτων ενίσχυσης θα πρέπει να αντιστοιχεί στο μισό του ύψους της δοκού και δεύτερον ότι το πάχος του ελάσματος πρέπει να είναι ίσο με το πάχος του πέλματος της δοκού. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι και το γεγονός ότι παρά τις μεταβολές που έγιναν ανάμεσα στον Post – Northridge και τον Pre – Northridge σχεδιασμό για το κτήριο, η ολική ακαμψία του κτιρίου παρέμεινε πρακτικά σταθερή, καθώς αυτό που κατόρθωσαν να επηρεάσουν κυρίως ήταν η τοπική κατανομή των απαιτήσεων στην περιοχή της σύνδεσης.

### 3.3 Περιγραφή φορέα που χρησιμοποιήθηκε

Οι διαφορές του αρχικού κτηρίου με το φορέα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία εντοπίζονται κυρίως στις διατομές. Ενώ στο αρχικό κτήριο υπάρχει διαφοροποίηση των διατομών μεταξύ των ζυγωμάτων που αναλαμβάνουν και αυτών που δεν αναλαμβάνουν φορτία, στο φορέα της εργασίας οι διατομές είναι ίδιες κατά μήκος των ορόφων. Επίσης, στον επίπεδο φορέα, τα φορτία αναλαμβάνονται από όλα τα ζυγώματα.

Όσον αφορά στη μάζα του φορέα, αυτή επιλέχθηκε να είναι ίδια με τη μάζα του τρισδιάστατου κτηρίου ώστε τα δυναμικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν για το φορέα να έχουν το νόημα ενός πραγματικού εννιαόροφου μεταλλικού κτηρίου και τα αποτελέσματα να μπορούν να γενικευθούν και για την περίπτωση κτηρίων. Οπότε τα φορτία που ασκούνται στο φορέα συνολικά είναι ίδια με το άθροισμα των φορτίων που είχαν υπολογιστεί από τους σχεδιαστές του κτηρίου του Seattle.

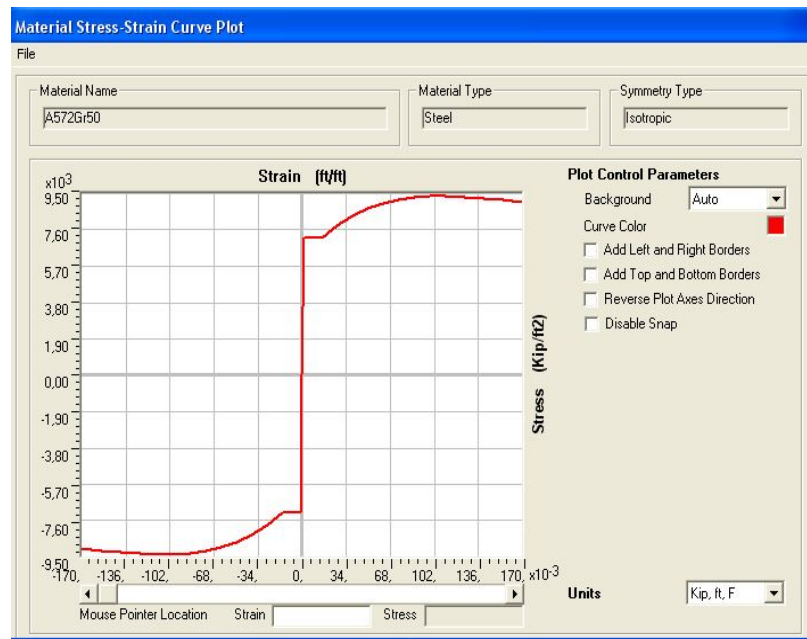
Οι διατομές του φορέα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

|            | ΔΟΚΟΙ   | ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ |
|------------|---------|--------------|
| 1ος όροφος | W27*114 | W24*229      |
| 2ος όροφος | W27*114 | W24*229      |
| 3ος όροφος | W27*114 | W24*229      |
| 4ος όροφος | W27*94  | W24*229      |
| 5ος όροφος | W27*94  | W24*207      |
| 6ος όροφος | W24*76  | W24*207      |
| 7ος όροφος | W21*62  | W24*162      |
| 8ος όροφος | W21*62  | W24*162      |
| 9ος όροφος | W21*62  | W24*131      |

**Πίνακας 3.2. Διατομές φορέα**

### 3.4 Υλικά

Ο χάλυβας που έχει χρησιμοποιηθεί σε όλα τα μέλη της κατασκευής είναι, όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο A572 Gr. 50 με ονομαστική τιμή διαρροής στα 50 ksi και αναμενόμενη αντοχή διαρροής στα 57.6 ksi. Το μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με 200 GPa. Το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα μας δίνεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για τον χάλυβα A572 Gr. 50.



### **3.5 Εισαγωγή του φορέα στο πρόγραμμα SAP2000**

Η προσομοίωση της κατασκευής στο πρόγραμμα έγινε με ένα μοντέλο 2 διαστάσεων. Ο φορέας είναι πακτωμένος στη βάση του, στο έδαφος.

Οι δοκοί και τα υποστυλώματα εισάγονται στο πρόγραμμα ως στοιχεία δοκού

Τα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή είναι κατανεμημένα στις δοκούς.

Τέλος, για να ολοκληρωθεί η προσομοίωση του φορέα εισήχθησαν οι θέσεις των πιθανών πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα. Για τις μεν δοκούς οι θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων είναι η αρχή και το πέρας κάθε δοκού. Για τα δε υποστυλώματα, θέσεις πιθανών πλαστικών αρθρώσεων τοποθετήθηκαν στη βάση των υποστυλωμάτων σε κάθε όροφο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Θεωρητικό υπόβαθρο

#### 4.1 Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας

Τα τελευταία χρόνια εκδηλώνεται σημαντικό ενδιαφέρον για τον ορισμό στόχων της σεισμικής ικανότητας μίας κατασκευής. Με βάση αυτή τη φιλοσοφία σχεδιασμού, σε κάθε κατασκευή καθορίζεται ένα αποδεκτό επίπεδο ζημιών (σημείο επιτελεστικότητας) ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης του σεισμού σχεδιασμού. Η προσπάθεια αυτή περιγράφεται στο “*Vision 2000*”, ως συσχέτιση της επιθυμητής στάθμης επιτελεστικότητας με την αναμενόμενη σεισμική κίνηση του εδάφους, στο οποίο θεωρούνται τέσσερις στάθμες επιτελεστικότητας και τέσσερα επίπεδα σεισμικής διέγερσης. Οι στάθμες επιτελεστικότητας που ορίζονται είναι οι εξής:

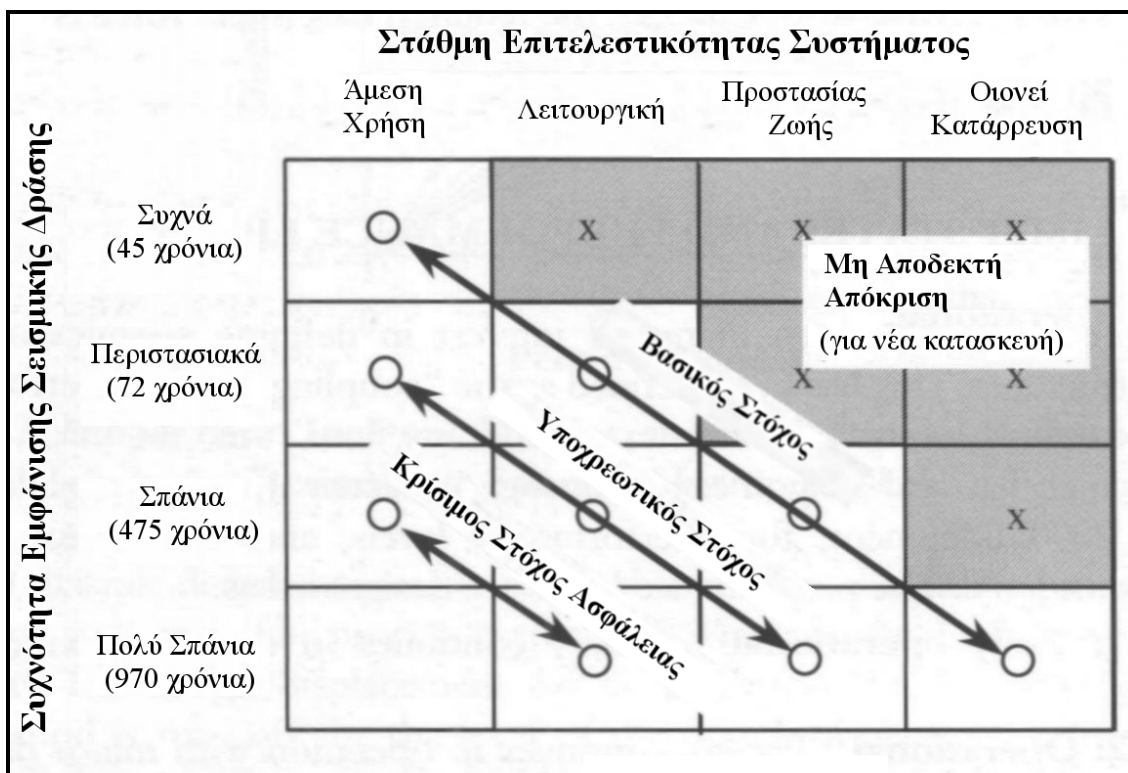
- **Στάθμη 1 (Άμεση χρήση)** : Η κατασκευή συνεχίζει τη λειτουργία της με αμελητέες ζημιές.
- **Στάθμη 2 (Λειτουργική)** : Η κατασκευή συνεχίζει να λειτουργεί με λίγες ζημιές και διακοπή μόνο μερικών ασήμαντων λειτουργιών της.
- **Στάθμη 3 (Προστασία ζωής)** : Σ’ αυτή τη στάθμη παρέχεται η προστασία ζωής, ενώ οι ζημιές είναι από μέτριες έως και σημαντικές.
- **Στάθμη 4 (Οιωνεί κατάρρευση)** : Υπάρχει κίνδυνος για την προστασία ζωής, οι ζημιές είναι σοβαρές και αποφεύγεται η κατάρρευση.

Οι σχέσεις ανάμεσα στα τέσσερα επίπεδα σεισμικών δράσεων και στην ετήσια πιθανότητα υπέρβασης της κάθε στάθμης, θα διαφέρουν ανάλογα με τη σεισμικότητα της κάθε περιοχής και τη σπουδαιότητα της κατασκευής:

- **EQ-I:** 87% πιθανότητα σε 50 χρόνια: 33% του EQ-III
- **EQ-II:** 50 % πιθανότητα σε 50 χρόνια: 50 % πιθανότητα του EQ-III
- **EQ-III:** Περίπου 10% πιθανότητα σε 50 χρόνια.

- EQ-IV: Περίπου 2% πιθανότητα σε 50 χρόνια: 150 % του EQ-III

Η σχέση ανάμεσα στις στάθμες επιτελεστικότητας και στα επίπεδα σεισμικών δράσεων σχεδιασμού απεικονίζεται στο σχήμα 5.1. Η γραμμή “Βασικός στόχος” προσδιορίζει μία σειρά από επίπεδα επιτελεστικότητας για συνήθεις κατασκευές, ενώ οι γραμμές “Υποχρεωτικός στόχος” και “Κρίσιμος στόχος ασφαλείας” αφορούν κατασκευές με αυξημένη σπουδαιότητα, όπως για παράδειγμα νοσοκομεία.



Σχήμα 4.1: Σχέση σεισμού σχεδιασμού και στάθμης επιτελεστικότητας (Vision 2000)

Στον Ευρωκώδικα ορίζονται μόνο τρεις στάθμες επιτελεστικότητας: Άμεση χρήση, Προστασία ζωής και Οιονεί κατάρρευση.

Το πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής σε σχέση με την κλασική μεθοδολογία σχεδιασμού των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών, όπου το ελάχιστο επίπεδο ασφάλειας εξασφαλίζεται μόνο μέσω του συντελεστή

συμπεριφοράς, είναι ότι εξετάζει τη συμπεριφορά της κατασκευής ακόμα και μετά το σημείο όπου αρχίζουν να εμφανίζονται ζημιές (στην πλαστική δηλαδή περιοχή).

Ως εκ τούτου, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος, είναι απαραίτητη η γνώση της συμπεριφοράς της κατασκευής και μετά την ελαστική περιοχή. Ο προσδιορισμός αυτής της συμπεριφοράς γίνεται με ανελαστικές μεθόδους ανάλυσης, είτε στατικές (static-pushover analysis), είτε δυναμικές (ανάλυση χρονοϊστορίας).

#### **4.2 Ιδιομορφική ανελαστική δυναμική ανάλυση**

Η ιδιομορφική ανελαστική δυναμική ανάλυση, είναι μία παραλλαγή της μεθόδου της ιδιομορφικής ανελαστικής στατικής ανάλυσης. Είναι και αυτή μια μέθοδος υπολογισμού της ικανότητας της κατασκευής όπου το αποτέλεσμα της σεισμικής δράσης προσομοιώνεται με οριζόντια στατικά φορτία, τα οποία μπορεί να είναι είτε δυνάμεις είτε μετατοπίσεις, σταδιακά αυξανόμενα μέχρι το σημείο της κατάρρευσης. Έτσι λοιπόν, σε αυτού του τύπου τη μέθοδο διεξάγονται διαδοχικές γραμμικές βήμα προς βήμα αναλύσεις με σκοπό την προσέγγιση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μείωση της δυσκαμψίας των μελών που έχουν διαρρεύσει.

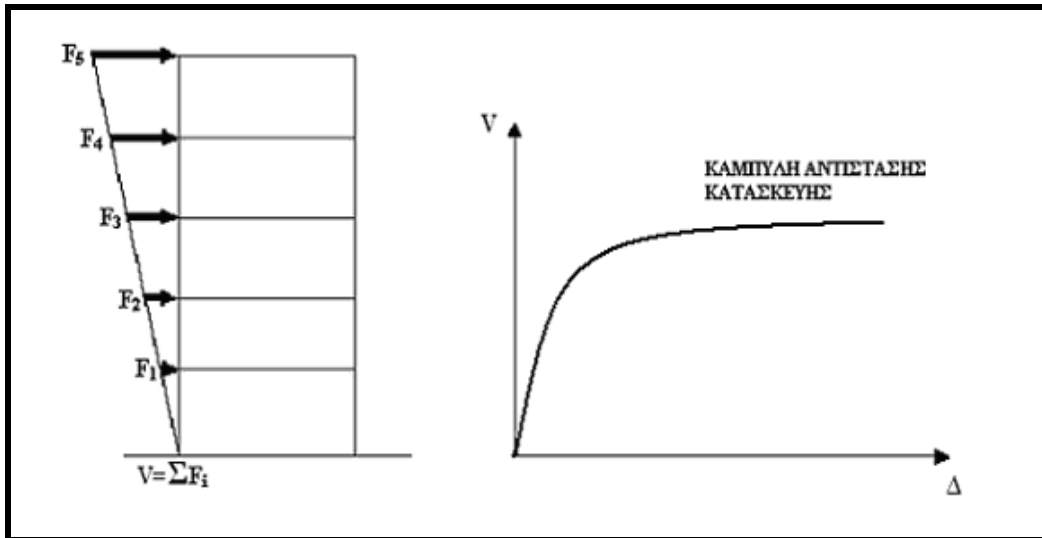
Η κατανομή της φόρτισης καθ' ύψος της κατασκευής είναι κατανομή σύμφωνα με κάθε ιδιομορφή της κατασκευής. Γίνονται, λοιπόν, τόσες αναλύσεις όσες και οι ιδιομορφές που θεωρούμε ότι επηρεάζουν την απόκριση της κατασκευής. Όσο περισσότερες ιδιομορφές λάβει υπ' όψιν ο μελετητής, τόσο ακριβέστερη θα είναι η προσέγγιση της πραγματικής απόκρισης. Το αρχικό σχήμα της φόρτισης παραμένει σταθερό σε κάθε βήμα της ανάλυσης.

Η ικανότητα της κατασκευής παριστάνεται από την καμπύλη αντίστασης. Ο συνηθέστερος τρόπος απεικόνισης μίας τέτοιας καμπύλης είναι δημιουργώντας ένα διάγραμμα τέμνουσας βάσης ( $V$ ) – μετακίνησης κορυφής ( $\Delta$ ). Πιο συγκεκριμένα, για δεδομένη κατανομή φορτίων στους ορόφους του κτιρίου, με σταδιακή επαύξηση

της τιμής αυτών των φορτίων σε κάθε βήμα, υπολογίζεται η ανελαστική μετακίνηση κορυφής του βήματος. Έτσι με διαδοχικές στατικές επιλύσεις υπολογίζεται η καμπύλη αντίστασης της κατασκευής.

Σχηματικά η διαδικασία αυτή παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου φαίνεται η κατανομή φορτίων στους ορόφους ενός κτιρίου και η μορφή που έχει η καμπύλη αντίστασης.

Τα βήματα της μεθόδου περιγράφονται σε επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 4.2: Κατασκευή καμπύλης αντίστασης της κατασκευής

### 4.3 Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα

Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση της διατιθέμενης ικανότητας της κατασκευής με την απαιτούμενη από τους κανονισμούς, όπως προκύπτει μέσα από τα φάσματα σχεδιασμού απαιτείται η μετατροπή του πολυβάθμιου συστήματος σε ένα ισοδύναμο ιδεατό μονοβάθμιο σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση ενός τέτοιου ιδεατού συστήματος αποτελεί μία παραδοχή με σημαντικές αβεβαιότητες

Γενικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κατανομή των φορτίων στους ορόφους της κατασκευής ακολουθεί τον παρακάτω τύπο:

$$F_i = V (m_i \Phi_i) / (\sum_j m_j \Phi_j) \quad (4.1)$$

όπου,  $V = \sum F_i$  η τέμνουσα βάσης. Το διάνυσμα  $\Phi$  δηλώνει την κατανομή των μετακινήσεων των ορόφων και λαμβάνει τις τιμές της  $n$  ιδιομορφής στην περίπτωση της ιδιομορφικής ανελαστικής στατικής ανάλυσης. Συνήθως το διάνυσμα  $\Phi$  κανονικοποιείται ώστε η τιμή που αντιστοιχεί στη μετακίνηση της κορυφής να είναι ίση με τη μονάδα ( $\Phi_{top}=1$ ). Εάν η κατανομή των φορτίων ακολουθεί την παραπάνω εξίσωση και  $\Phi_{top}=1$  τότε η αντιστοιχία οποιουδήποτε μεγέθους (δύναμη, μετακίνηση, ενέργεια, κλπ) μεταξύ του πολυβάθμιου και του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος γίνεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$Q = \Gamma n Q^* \quad (4.2)$$

όπου:

$Q^*$  = μέγεθος στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα.

$Q$  = αντίστοιχο μέγεθος στο πολυβάθμιο σύστημα

$\Gamma_n$  = συντελεστής συμμετοχής ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\Gamma_n = (\sum m_i \Phi_i) / (\sum m_i \Phi_i^2) \quad (4.3)$$

Η μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος είναι:

$$m^* = \sum m_i \Phi_i \quad (4.4)$$

Καθ' ότι τόσο οι δυνάμεις όσο και οι μετακινήσεις ακολουθούν τη σχέση μετασχηματισμού 5.2, η ακαμψία του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος ισούται με αυτή του πολυβάθμιου. Ωστόσο η ιδιοπερίοδος του μονοβάθμιου συστήματος δεν είναι ίση με την ιδιοπερίοδο του πολυβάθμιου ακόμα και αν το διάνυσμα  $\Phi$  είναι ίσο με το ιδιοδιάνυσμα.

Για τη μετατροπή της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής σε φάσμα αντίστασης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{F_{sn}}{L_n} = \frac{V_{bn}}{M_n} \tag{4.5}$$

$$D_n = \frac{U_{rn}}{\Gamma_n \Phi_n} \tag{4.6}$$

όπου:

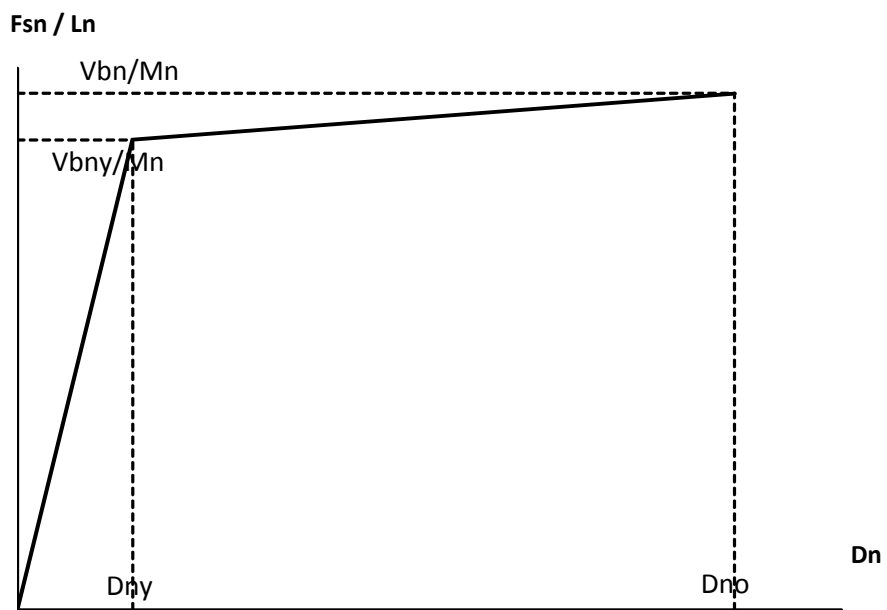
$L_n$  : η μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, ίση με:

$$L_n = \sum m_i \varphi_i^2$$

$M_n^*$  : η ενεργός ιδιομορφική μάζα της κατασκευής, ίση με;

$$M_n = L_n \Gamma_n$$

Το διάγραμμα που προκύπτει περιγράφει τη συμπεριφορά του μονοβάθμιου ταλαντωτή



Σχήμα 4.3: Ιδεατό διγραμμικοποιημένο φάσμα αντίστασης μονοβάθμιου ταλαντωτή

#### 4.4 Περιγραφή της ΜΡΑ σε βήματα

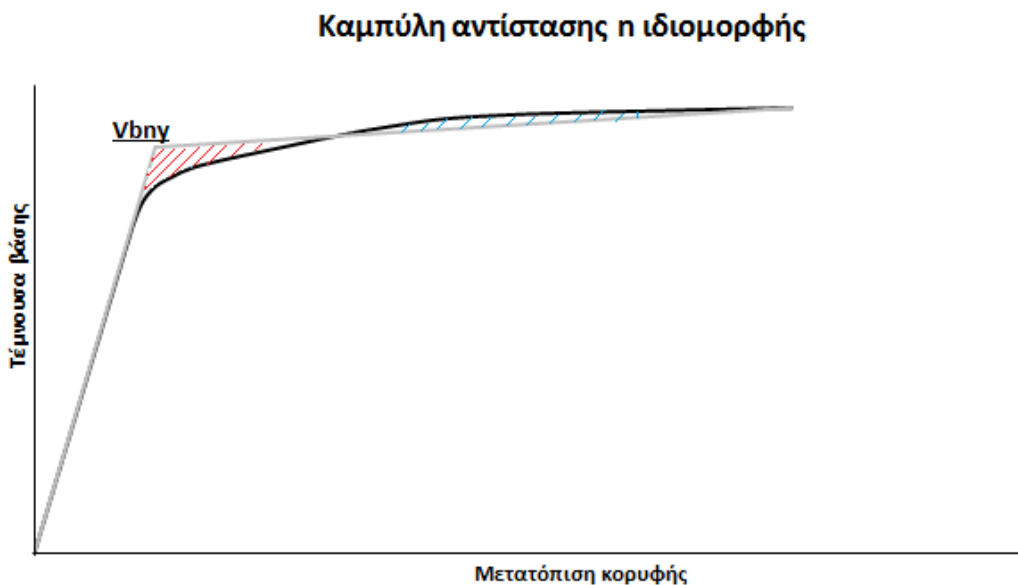
Η μέθοδος συνοπτικά σε βήματα περιγράφεται ως εξής:

**Βήμα 1:** Υπολογισμός των διοσυχνοτήτων  $\omega_n$  και των ιδιομορφών  $\phi_n$  με ιδιομορφική ελαστική ανάλυση.

**Βήμα 2:** Για την  $n$  ιδιομορφή κατασκευάζεται η καμπύλη αντίστασης της κατασκευής με υπολογισμό της μετακίνησης κορυφής για διάφορες τιμές της τέμνουσας βάσης θεωρώντας κατανομή φορτίων καθ' ύψος της κατασκευής συμβατή με την  $n$  ιδιομορφή. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην παράγραφο 5.2

**Βήμα 3:** Κατασκευή του ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος αντίστασης. Το διάγραμμα συνήθως κατασκευάζεται με κλίση ελαστικού κλάδου ίση με την τέμνουσα δυσκαμψία που αντιστοιχεί στο 60% της επιτάχυνσης διαρροής και έτσι ώστε τα εμβαδά που περικλείουν τα δύο διαγράμματα να είναι ίσα. Η διαδικασία είναι επαναληπτική μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση των δύο χωρίων.

Μετά το πέρας των επαναλήψεων, είναι γνωστή η τέμνουσα βάσης στη διαρροή  $V_{bny}$  και η μετακίνηση διαρροής  $u_{rny}$ .



**Σχήμα 4.4:** Διγραμμικοποιημένη καμπύλη αντίστασης



**Βήμα 4:** Μετατροπή της διγραμμοποιημένης καμπύλης αντίστασης σε διγραμμικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για την n-ιδιομορφή του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Η διαδικασία περιγράφηκε στην ενότητα .3

Από το διγραμμικό διάγραμμα αντίστασης καθορίζονται η επιτάχυνση διαρροής  $S_{ay}$  και η μετακίνηση διαρροής  $S_{dy}$

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η ιδιοπερίοδος του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος από τη σχέση:

$$T^* = 2\pi(S_{dy} / S_{ay})^{1/2} \quad (4.7)$$

**Βήμα 5:** Υπολογίζεται η τιμή της παραμόρφωσης  $D_n$  της n-ιδιομορφής από δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας του αντίστοιχου μονοβάθμιου συστήματος.

**Βήμα 6:** Υπολογίζεται η μετακίνηση κορυφής του πολυβάθμιου φορέα από τη μετακίνηση του μονοβάθμιου ως εξής:

$$\Delta_n = \Gamma_n \varphi_m D_n. \quad (4.8)$$

**Βήμα 7:** Υπολογίζονται τα υπόλοιπα μεγέθη που ενδιαφέρουν το μελετητή από τα αποτελέσματα της ανάλυσης χρονοϊστορίας μονοβάθμιου και ανάγονται στο πολυβάθμιο σύστημα.

Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται για όσες ιδιομορφές είναι απαραίτητο. Συνήθως οι δύο ή οι τρεις πρώτες ιδιομορφές είναι επαρκείς.

Η συνολική απόκριση προκύπτει από τη σύνθεση των αποτελεσμάτων για κάθε ιδιομορφή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Παρουσίαση αναλύσεων – αποτελεσμάτων

#### 5.1 Γενική περιγραφή της διαδικασίας

Η παρούσα εργασία αξιολογεί την ακρίβεια της ιδιομορφικής ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης στον υπολογισμό των σεισμικών απαιτήσεων και η σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας σε σεισμούς κοντινού πεδίου.

Η διαδικασία ξεκινά με την ιδιομορφική ανάλυση, με την οποία υπολογίζονται οι ιδιοπερίοδοι της κατασκευής καθώς και οι ιδιομορφές της. Στη συνέχεια γίνεται ανελαστική στατική ανάλυση (pushover analysis) με κατανομή φορτίων σύμφωνα με την κατανομή των μετακινήσεων για τις σημαντικότερες ιδιομορφές καθ' ύψος του φορέα απ' όπου προκύπτει η καμπύλη αντίστασης της κατασκευής, για κάθε ιδιομορφή. Οι καμπύλες αυτές μετατρέπονται σε φάσμα αντίστασης ADRS (Acceleration – Displacement Response Spectrum) του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος κάθε ιδιομορφής και ύστερα στο ιδεατό διγραμμικό διάγραμμα του μονοβάθμιου συστήματος, με χρήση της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Προκύπτει έτσι η μετακίνηση και η επιτάχυνση διαρροής του μονοβάθμιου συστήματος και εν συνεχεία η ιδιοπερίοδός του.

Στη συνέχεια γίνονται αναλύσεις χρονοϊστορίας του φορέα για σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου με χρήση του προγράμματος SAP και ανελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας των μονοβάθμιων συστημάτων με το πρόγραμμα Bispec.

Συγκρίσεις γίνονται μεταξύ των μεγεθών που προκύπτουν από τις αναλύσεις χρονοϊστορίας και αυτών που προκύπτουν από σύνθεση των χρονοϊστοριών των ισοδύναμων μονοβάθμιων συστημάτων με βάση τις ιδιομορφές με διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι μετακινήσεις που προκύπτουν από τις δύο αναλύσεις, τα αδρανειακά φορτία κάθε ορόφου και οι τέμνουσες δυνάμεις.

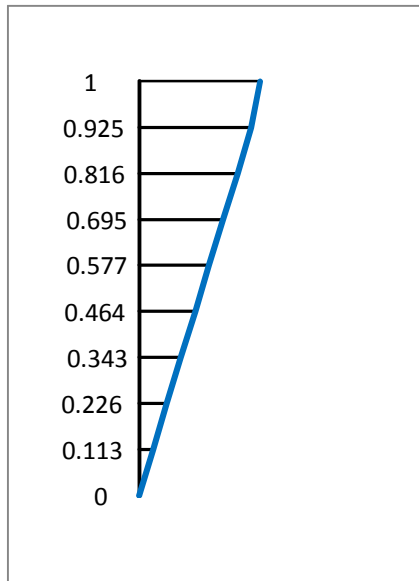
## 5.2 Υπολογισμός ιδιοπεριόδων – ιδιομορφών κατασκευής

Η πρώτη ανάλυση που διεξάγεται στο φορέα με το πρόγραμμα SAP είναι αυτή της ιδιομορφικής ανάλυσης απ' όπου προκύπτουν οι ιδιοπερίοδοι του φορέα καθώς και οι ιδιομορφές του.

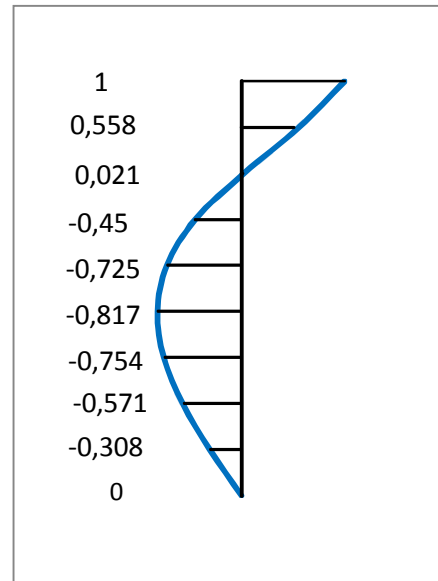
|           |          |
|-----------|----------|
| $T_1=$    | 3.235563 |
| $T_2=$    | 1.184441 |
| $T_3=$    | 0.631988 |
| $T_4=$    | 0.407379 |
| $T_5=$    | 0.306938 |
| $T_6=$    | 0.300977 |
| $T_7=$    | 0.293176 |
| $T_8=$    | 0.286452 |
| $T_9=$    | 0.283711 |
| $T_{10}=$ | 0.223888 |
| $T_{11}=$ | 0.214337 |
| $T_{12}=$ | 0.213853 |

Η προσέγγιση των αποτελεσμάτων της ανελαστικής ανάλυσης χρονοϊστορίας του πολυβάθμιου φορέα θα επιχειρηθεί να γίνει με τις δύο πρώτες ιδιομορφές καθώς βλέπουμε ότι οι υπόλοιπες ιδιομορφές έχουν πολύ μικρές ιδιοπεριόδους σε σχέση με την πρώτη, οπότε συμπεραίνουμε ότι η συμμετοχή τους θα είναι πρακτικά μηδενική. Αυτό το συμπέρασμα ισχυροποιείται μέσω μιας παρόμοιας εργασίας του Anil K. Chopra , ο οποίος είχε κάνει αναλύσεις για μια πλειάδα σεισμών στο ίδιο και σε άλλα κτήρια και συμπέρανε ότι στο συγκεκριμένο κτήριο η τρίτη ιδιομορφή παρέμενε στην ελαστική περιοχή σε όλους τους σεισμούς.

Τα σχήματα των ιδιομορφών που προκύπτουν για αυτές τις ιδιοπεριόδους δίνονται παρακάτω:



Σχήμα 5.1. Σχήμα πρώτης ιδιομορφής



Σχήμα 5.2. Σχήμα δεύτερης ιδιομορφής

### 5.3 Εύρεση καμπύλης αντίστασης κατασκευής

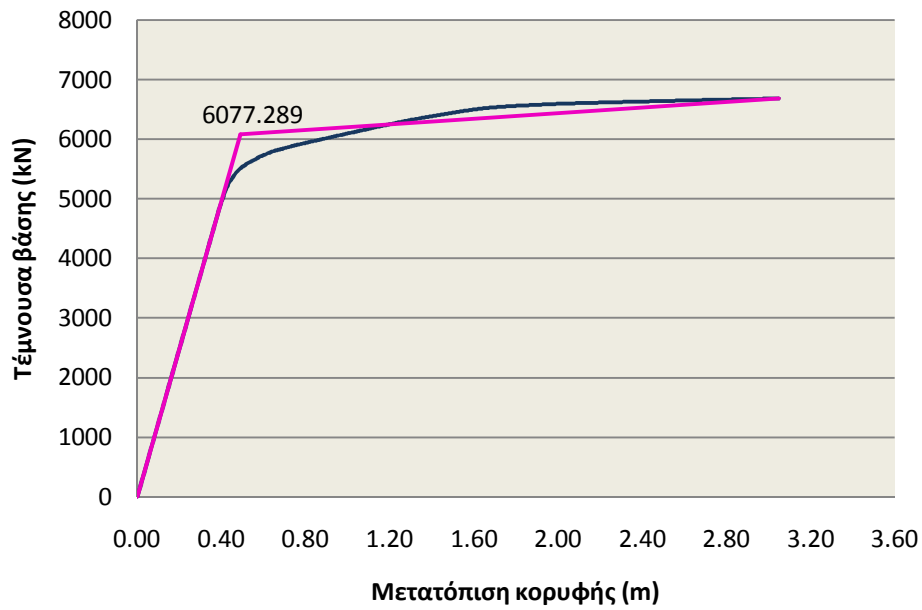
Μετά την ιδιομορφική ανάλυση, ακολουθεί η ιδιομορφική ανελαστική στατική ανάλυση (ανάλυση pushover) προκειμένου να κατασκευαστεί η καμπύλη αντίστασης της κατασκευής (τέμνουσα βάσης – μετακίνηση κορυφής) για καθεμία από τις δύο ιδιομορφές. Η κατανομή των φορτίων στους ορόφους του φορέα γίνεται σύμφωνα με τη σχέση

$$F_i = V (m_i \Phi_i) / (\sum m_j \Phi_j)$$

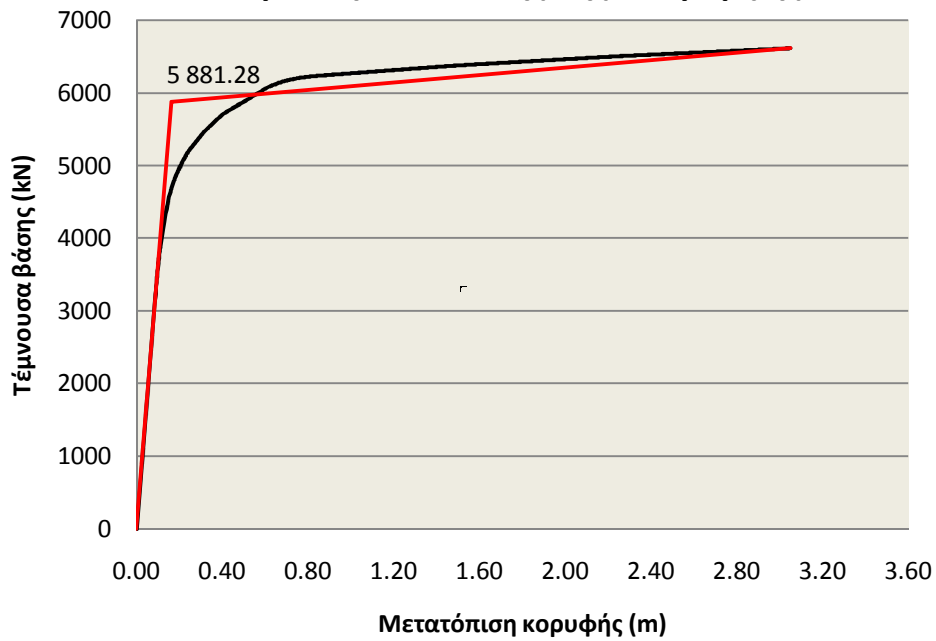
όπου  $\Phi$  το διάνυσμα κατανομής των μετακινήσεων στην  $i$  ιδιομορφή.

Οι καμπύλες αντίστασης για καθεμία από τις δύο ιδιομορφές είναι οι εξής:

**Καμπύλη αντίστασης 1ης ιδιομορφής**



**Καμπύλη αντίστασης 2ης ιδιομορφής**



Σχήμα 5.4: Καμπύλη αντίστασης της κατασκευής

### 5.4 Υπολογισμός μεγεθών ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος

Στη συνέχεια της διαδικασίας, έχοντας πλέον κατασκευάσει την καμπύλη αντίστασης του κτιρίου, μετατρέπουμε αυτή την καμπύλη σε φάσμα αντίστασης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος σε μορφή ADRS (Acceleration – Displacement Response Spectrum). Τα μεγέθη που απαιτούνται εδώ είναι η επιτάχυνση  $S_a$  και η μετακίνηση  $S_d$  του συστήματος, τα οποία δίνονται από τις σχέσεις:

$$S_a = V / (\alpha m_{ολ}) \quad \text{και}$$

$$S_d = \Delta / \Gamma$$

Η επεξήγηση των συμβόλων που χρησιμοποιούνται, καθώς και η γενικότερη περιγραφή της διαδικασίας μετατροπής της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής σε φάσμα αντίστασης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 4.3 και 4.4 του κεφαλαίου 4.

Η συνολική μάζα του κάθε ορόφου προκύπτει από τα φορτία, όλα τα μόνιμα και τα κινητά με συντελεστή  $\psi_2=0,3$ , και τα ίδια βάρη των στοιχείων :  $m_{op} = 617,22$  τόνοι. Συνεπώς το μητρώο μάζας της κατασκευής είναι ένα διαγώνιο μητρώο  $8 \times 8$  στοιχείων με διαγώνια στοιχεία τη μάζα κάθε ορόφου.

Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζονται οι συντελεστές  $\Gamma$  και  $\alpha$ :

$$\Gamma = (\sum m_i \Phi_i) / (\sum m_i \Phi_i^2) \quad \text{και} \quad \alpha = \Gamma (\sum m_i \Phi_i) / m_{ολ}$$

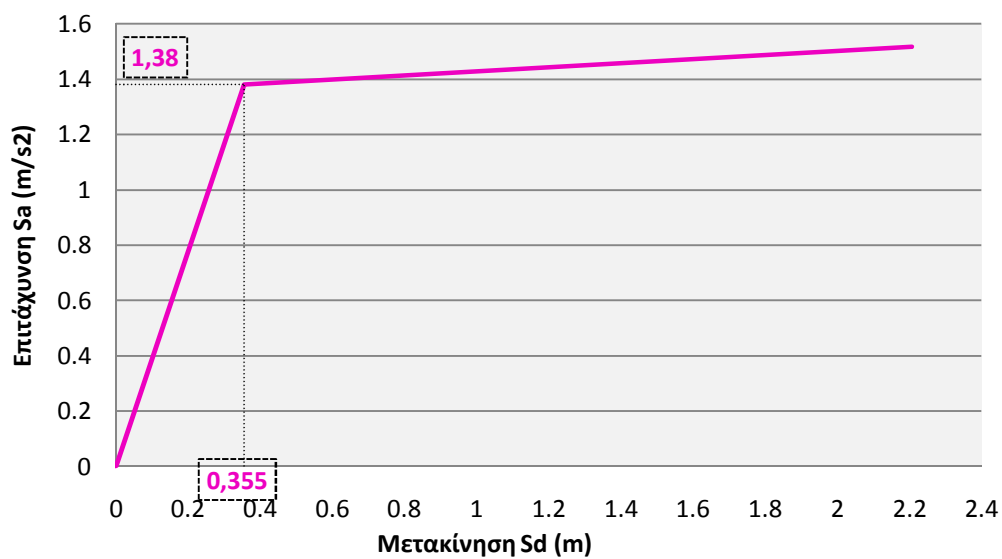
$$\alpha_1 = 0.792026, \quad \Gamma_1 = 1.38171$$

$$\text{και} \quad \alpha_2 = 0.125793, \quad \Gamma_2 = -0.55339$$

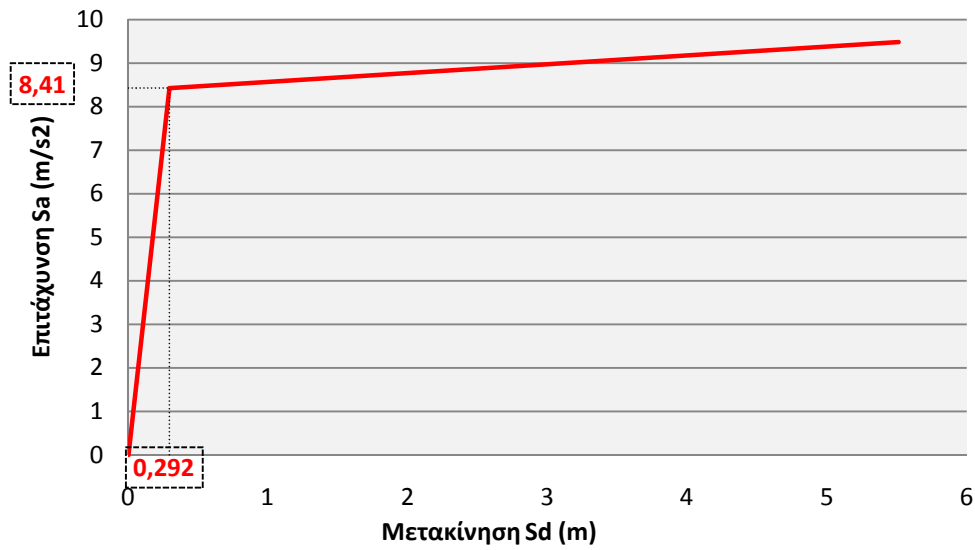
όπου  $m_{ολ}$  η ολική μάζα της κατασκευής με  $m_{ολ} = 9 \cdot 617,22 = 5554,98$  τόνοι.

Έτσι λοιπόν υπολογίζονται τα μεγέθη  $S_a$  και  $S_d$ , με τους τύπους που αναφέρθηκαν παραπάνω και κατασκευάζεται το φάσμα αντίστασης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται το ιδεατό διγραμμικό (ελαστικό – τελείως πλαστικό) διάγραμμα αντίστασης. Το διάγραμμα αυτό πρέπει να περικλείει εμβαδόν ίσο με το εμβαδόν που περικλείει το διάγραμμα που απεικονίζει το φάσμα αντίστασης του μονοβάθμιου συστήματος ώστε η ενέργεια που απορροφούν τα δύο αυτά ισοδύναμα συστήματα να είναι ίδια. Από το διγραμμικό διάγραμμα βρίσκουμε τα μεγέθη επιτάχυνση διαρροής ( $S_{ay}$ ) και μετακίνηση διαρροής ( $S_{dy}$ ), του μονοβάθμιου συστήματος.



Σχήμα 5.5: Ιδεατό διγραμμικό διάγραμμα αντίστασης ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος σύμφωνα με την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή



Σχήμα 5.6: Ιδεατό διγραμμικό διάγραμμα αντίστασης ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος σύμφωνα με την 2<sup>η</sup> ιδιομορφή

Τελικά προκύπτει:

$$S_{dy\ 1} = 0,355\ \text{m} \quad \text{και} \quad S_{ay\ 1} = 1,38\ \text{m/sec}^2$$

$$S_{dy\ 2} = 0,292\ \text{m} \quad \text{και} \quad S_{ay\ 2} = 8,41\ \text{m/sec}^2$$

Τέλος, οι ιδιοπερίοδοι των ισοδύναμων μονοβάθμιων συστημάτων, οι οποίες υπολογίζονται από τη σχέση  $T^* = 2\pi(S_{dy} / S_{ay})^{1/2}$  με αντικατάσταση των μεγεθών  $S_{dy}$  και  $S_{ay}$ , προκύπτουν:

$$T_1^* = 3,183\ \text{sec} \quad \text{και}$$

$$T_2^* = 1,17\ \text{sec}$$



### **5.5 Υπολογισμός μεγεθών**

Με γνωστά πλέον τα μεγέθη του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος μπορούμε να υπολογίσουμε τις μετακινήσεις, τα αδρανειακά φορτία και τις τέμνουσες δυνάμεις για κάθε ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα. Αυτό θα γίνει με τη βοήθεια του προγράμματος Bispec.

Αρχικά, διεξάγουμε ελαστικές αναλύσεις για κάθε σεισμό προκειμένου να βρούμε το συντελεστή συμπεριφοράς για κάθε σεισμική διέγερση σε κάθε ιδιομορφή. Με αυτό ως δεδομένο, διεξάγουμε ανελαστικές αναλύσεις από τις οποίες λαμβάνουμε τις μετακινήσεις και τις επιταχύνσεις. Οι τιμές που επιλέγουμε από τις ιστορίες των μονοβαθμίων είναι σχεδόν ταυτόχρονες με τη μέγιστη μετακίνηση που προκύπτει από την ανελαστική ανάλυση ιστορίας του πολυβάθμιου συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, για την πρώτη ιδιομορφή λαμβάνουμε το κοντινότερο τοπικό μέγιστο των μετακινήσεων ως προς τη χρονική στιγμή που παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή μετακίνησης στην ανάλυση ιστορίας του πολυβάθμιου συστήματος και οι τιμές της επιτάχυνσης λαμβάνονται την ίδια χρονική στιγμή με τη μετακίνηση. Για τις υπόλοιπες ιδιομορφές οι τιμές που λαμβάνονται είναι οι ταυτόχρονες, δηλαδή τη χρονική στιγμή που πήραμε για την πρώτη ιδιομορφή.

Προκειμένου να γίνει σύγκριση αυτών με τις τιμές που προκύπτουν από τις αναλύσεις του SAP, γίνεται αναγωγή των μετακινήσεων και επιταχύνσεων στο πολυβάθμιο σύστημα. Δηλαδή, οι τιμές πολλαπλασιάζονται με το συντελεστή συμμετοχής της κάθε ιδιομορφής και με την τιμή του ιδιοσχήματος σε κάθε όροφο.

Όσον αφορά τις αδρανειακές δυνάμεις, αυτές προκύπτουν με πολλαπλασιασμό των επιταχύνσεων με τη μάζα ορόφου και οι τέμνουσες προκύπτουν με την άθροιση των αδρανειακών καθ' ύψος του κτηρίου.

Από τις ανελαστικές αναλύσεις ιστορίας του πολυβάθμιου φορέα, λαμβάνουμε τις τιμές μετακίνησης καθ' ύψος του κτηρίου για τη χρονική στιγμή όπου εμφανίζεται η μέγιστη μετακίνηση στον ανώτερο όροφο. Για την ίδια χρονική στιγμή λαμβάνουμε και τις τιμές επιτάχυνσης καθ' ύψος των ορόφων.

Στη συνέχεια, γίνεται η σύνθεση των τιμών που προκύπτουν από τις αναλύσεις των μονοβάθμιων, με απλή πρόσθεση των τιμών αφού πρόκειται για ταυτόχρονες τιμές, και η σύγκριση αυτών με τις τιμές που προκύπτουν από τις αναλύσεις του πολυβάθμιου φορέα.

Παρακάτω γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε σεισμική διέγερση.

**Σεισμική φόρτιση ERZ-000**

Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

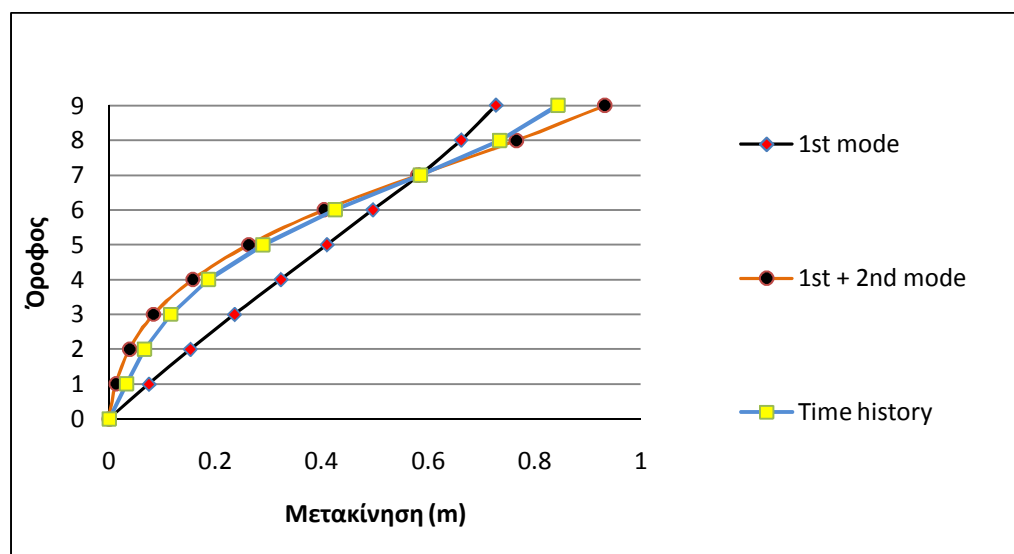
|              | $S_{a_{el}}$ ( $m/s^2$ ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$ |
|--------------|--------------------------|-------|------------|----------|-----------|-------|
| 1η ιδιομορφή | 2.91                     | 2.105 | -0.5112    | -0.71337 | 2.28      | 3.158 |
| 2η ιδιομορφή | 8.96                     | 1.065 | 0.276434   | -0.16048 | -7.21     | 3.99  |

Η ελαστική επιτάχυνση  $S_{a_{el}}$  προκύπτει με ελαστική ανάλυση από το πρόγραμμα Bispec. Έχοντας ως δεδομένες τις τιμές των επιταχύνσεων διαρροής υπολογίζεται ο συντελεστής συμπεριφοράς της κατασκευής για κάθε ιδιομορφή και στη συνέχεια γίνονται ανελαστικές αναλύσεις από όπου προκύπτουν οι χρονοϊστορίες μετακίνησης και επιτάχυνσης των μονοβαθμίων.

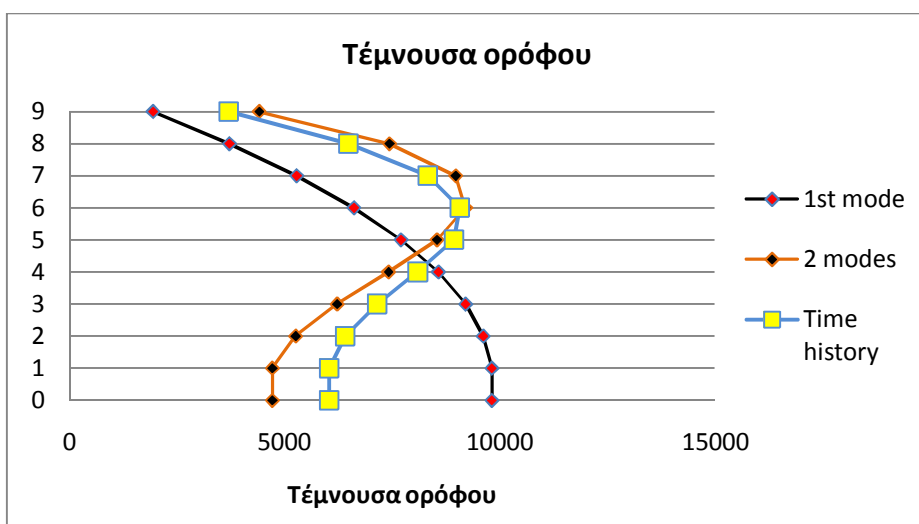
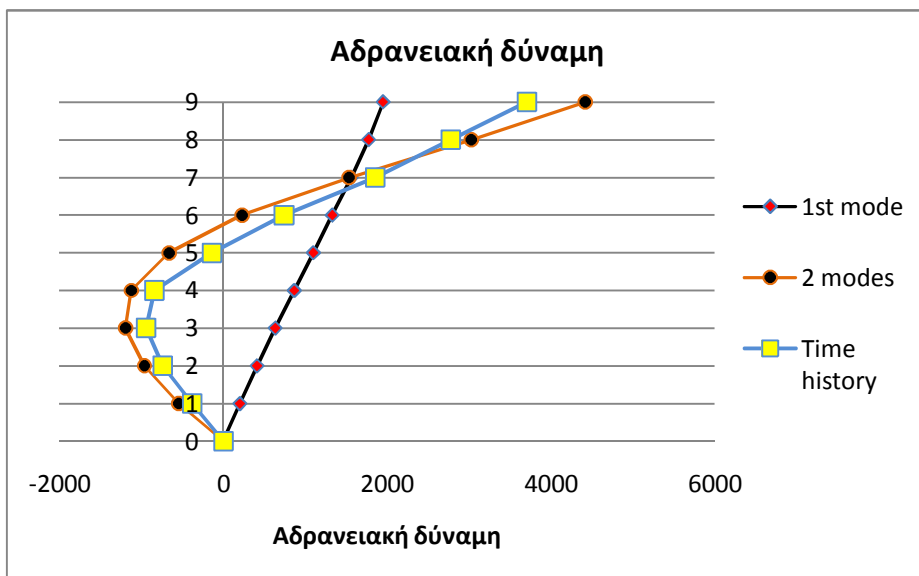
Η μετακίνηση του μονοβάθμιου ταλαντωτή ( $\delta^*$ ) που προκύπτει από το πρόγραμμα Bispec πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή συμμετοχής και την τιμή της ιδιομορφής σε κάθε όροφο για να αναχθεί σε μετακίνηση του πολυβάθμιου συστήματος ( $\Delta$ ). Ομοίως γίνεται με τις επιταχύνσεις.

Η αδρανειακή δύναμη προκύπτει από την επιτάχυνση πολλαπλασιασμένη επί τη μάζα του ορόφου ( $m=617,22$  Mg).

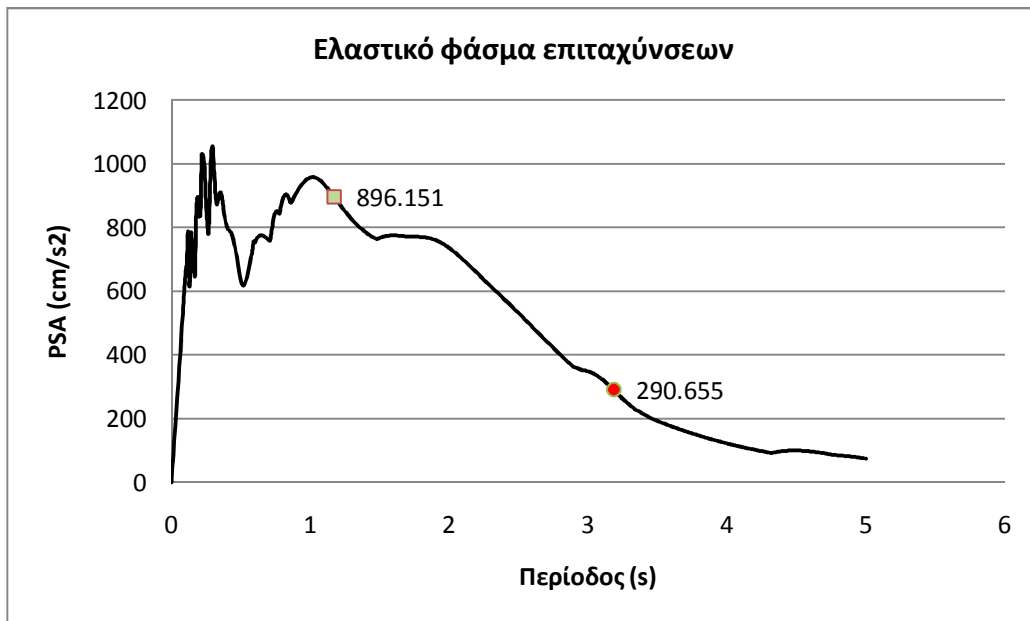
Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.8: Σύγκριση αδραμειακών και τεμνουσών δυνάμειων



Σχήμα 5.9: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

Όπως φαίνεται, από το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων, και οι δύο ιδιομορφές μπαίνουν στην πλαστική περιοχή και μάλιστα η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται στην περιοχή ενός τοπικού μεγίστου. Βλεπουμε ότι οι φασματικές τιμές έχουν πολύ μεγάλη διαφορά, η τιμή για τη δεύτερη ιδιομορφή είναι τριπλάσια αυτής για την πρώτη ιδιομορφή. Συνεπώς, είναι αναμενόμενη η τόσο μεγάλη επιρροή της δεύτερης ιδιομορφής στην κατανομή των δυνάμεων του φορέα.

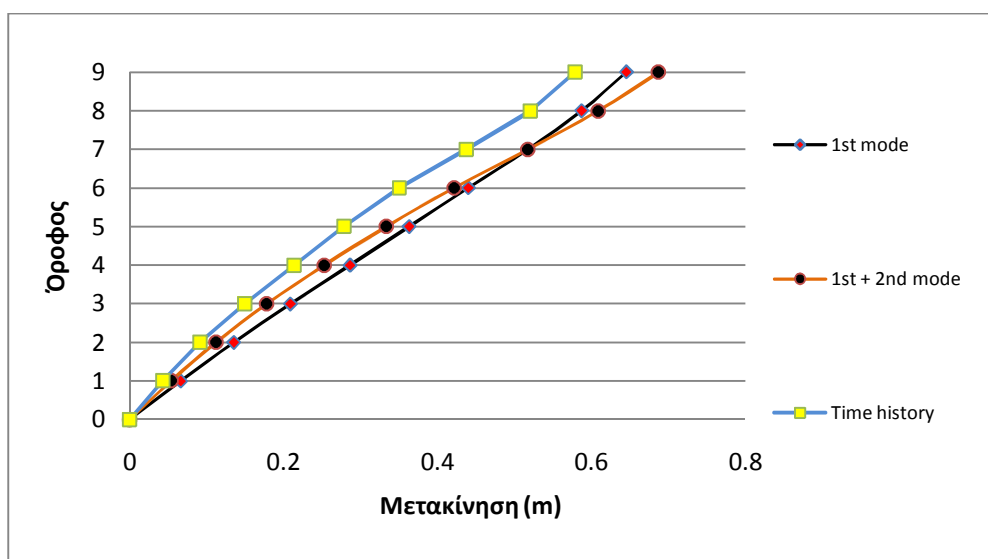
Επιπλέον, η μέθοδος φαίνεται να προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την πραγματική απόκριση της κατασκευής, δηλαδή τη λύση που προκύπτει από το SAP.

**Σεισμική φόρτιση ERZ-090**

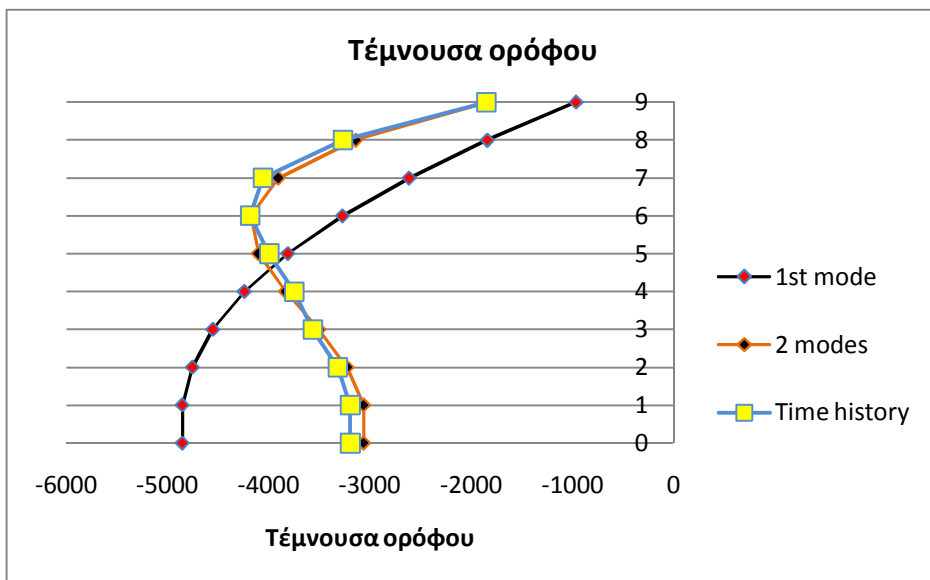
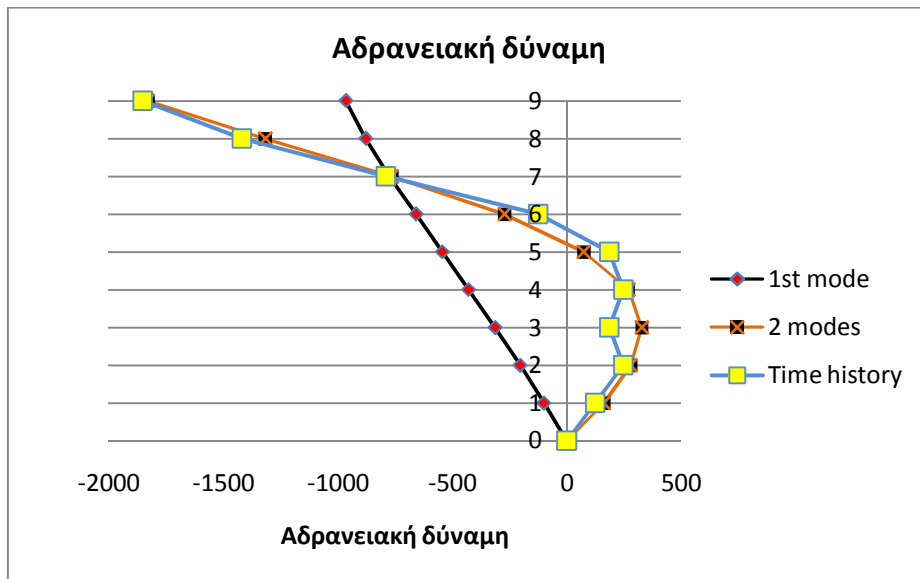
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_{\gamma}$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|--------------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 2.49                             | 1.808        | 0.462146   | 0.644917 | -1.13033  | -1.56179 |
| 2η ιδιομορφή | 5.48                             | 0.652        | -0.07207   | 0.041837 | 2.53082   | -1.40052 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.11: Σύγκριση αδραμειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.12: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

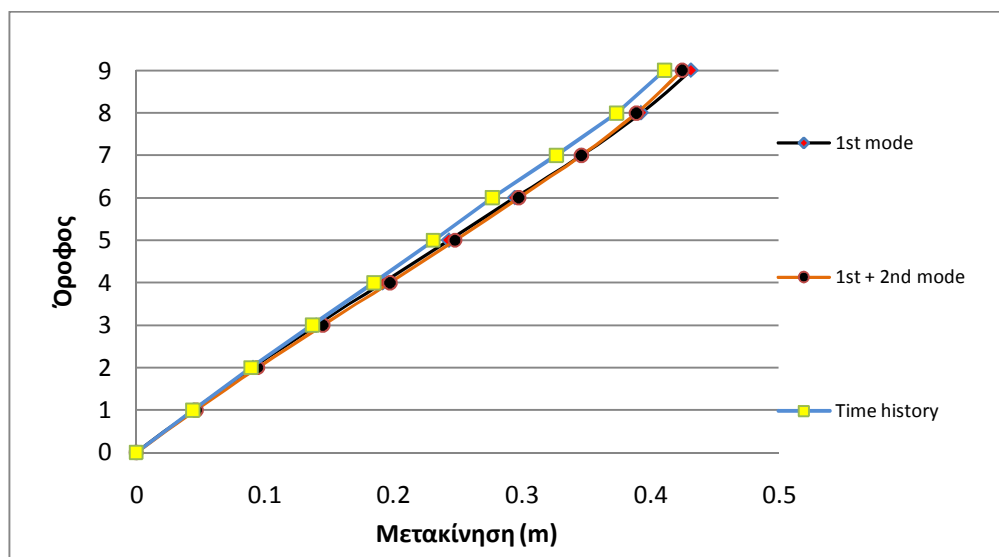
Όπως φαίνεται, από το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων, η πρώτη ιδιομορφή μπαίνει στην πλαστική περιοχή αλλά βρίσκεται σε ομαλή περιοχή, πολύ μετά την περιοχή της φασματικής ενίσχυσης. Η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται στην ελαστική περιοχή όμως έχει μεγαλύτερη φασματική τιμή, υπερδιπλάσια της πρώτης. Συνεπώς, είναι αναμενόμενη η τόσο μεγάλη επιρροή της δεύτερης ιδιομορφής στην κατανομή των δυνάμεων του φορέα.

**Σεισμική φόρτιση ELC-090**

Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

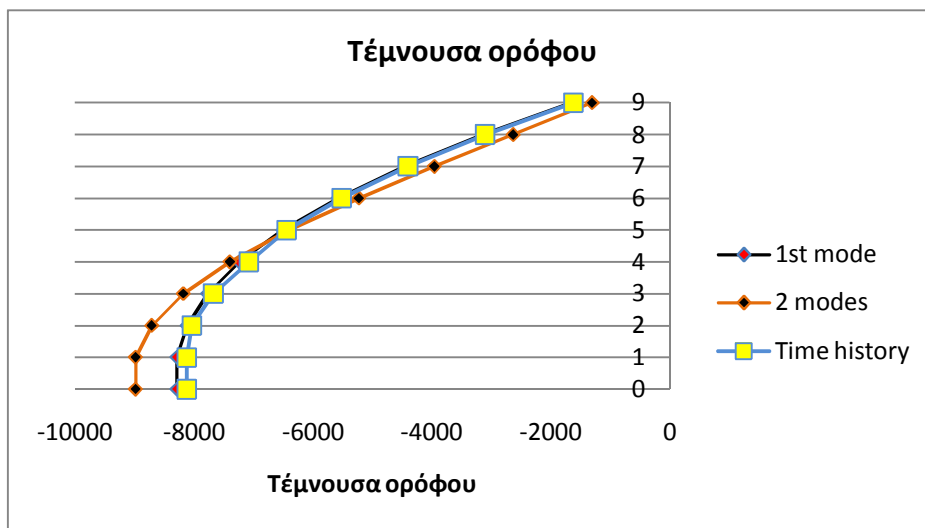
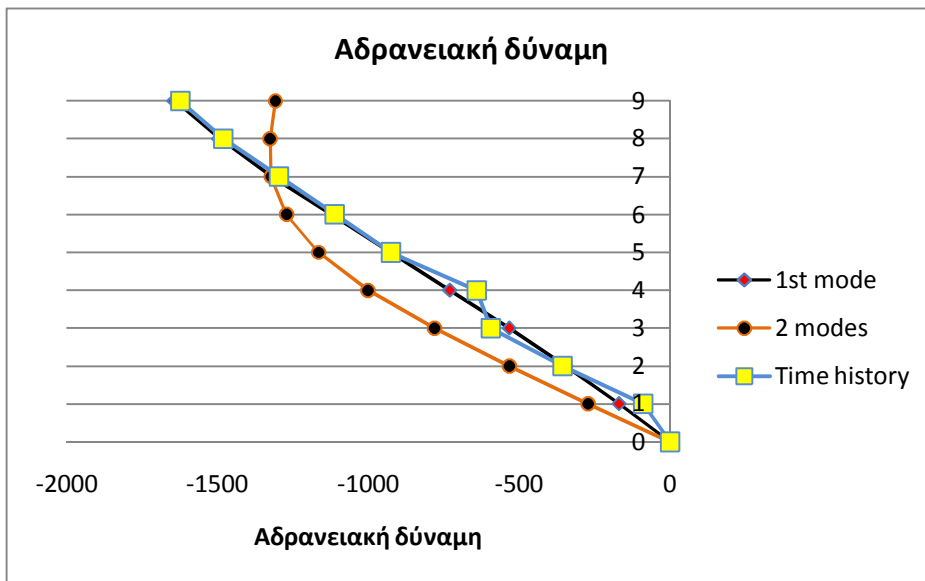
|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 1.214                            | 0.880 | 0.309407   | 0.431772 | -1.92737  | -2.66307 |
| 2η ιδιομορφή | 3.945                            | 0.469 | 0.011902   | -0.00691 | -0.98267  | 0.5438   |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.13: Σύγκριση μετακινήσεων





Σχήμα 5.14: Σύγκριση αδραμειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5. 15: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

Όπως φαίνεται, από το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων, και οι δύο ιδιομορφές παραμένουν στην ελαστική περιοχή. Συνεπώς, είναι αναμενόμενο η κατανομή των δυνάμεων του φορέα να είναι ελαστική, δηλαδή γραμμική.

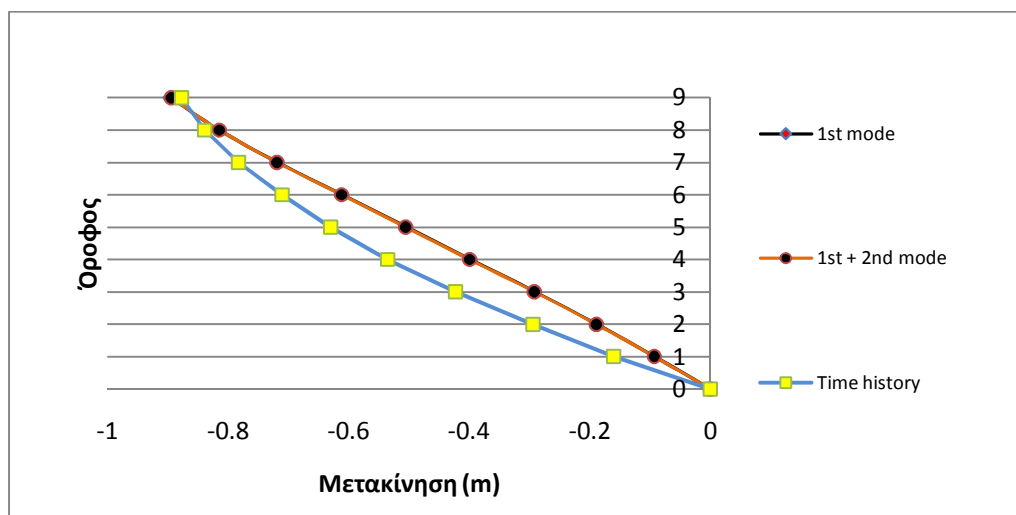
Επιπλέον, η μέθοδος φαίνεται να έχει απόκλιση από την πραγματική απόκριση της κατασκευής, καθώς στα διαγράμματα των δυνάμεων το αποτέλεσμα της σύνθεσης των δύο ιδιομορφών δείχνει ότι ο φορέας επηρεάζεται αρκετά από τη δεύτερη ιδιομορφή.

**Σεισμική φόρτιση TAB-074**

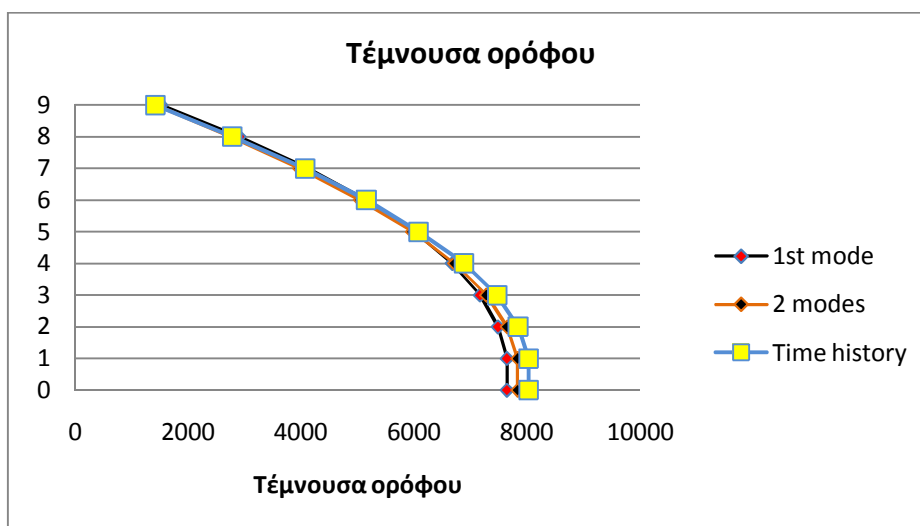
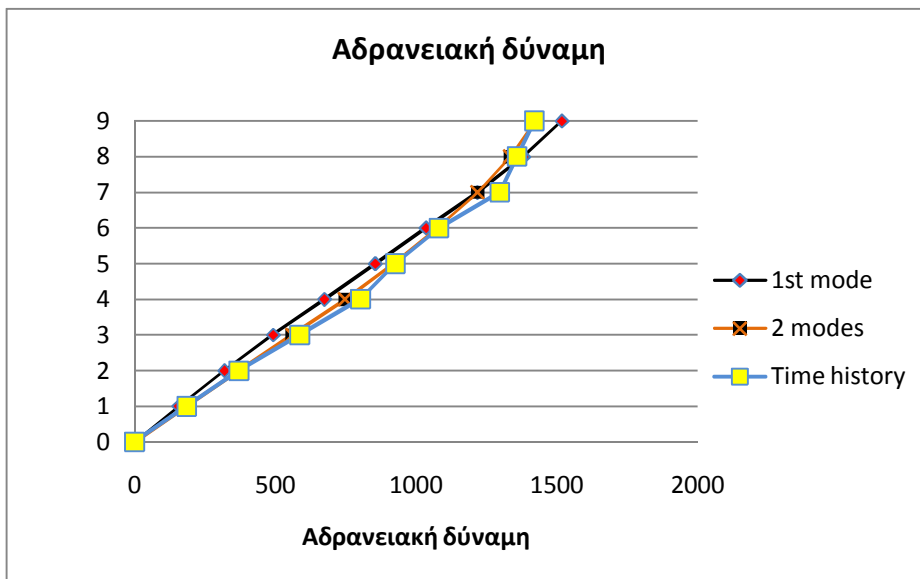
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 2.94                             | 2.133 | -0.6421    | -0.89604 | 1.77872   | 2.457676 |
| 2η ιδιομορφή | 8.54                             | 1.017 | -0.00304   | 0.001765 | 0.268336  | -0.14849 |

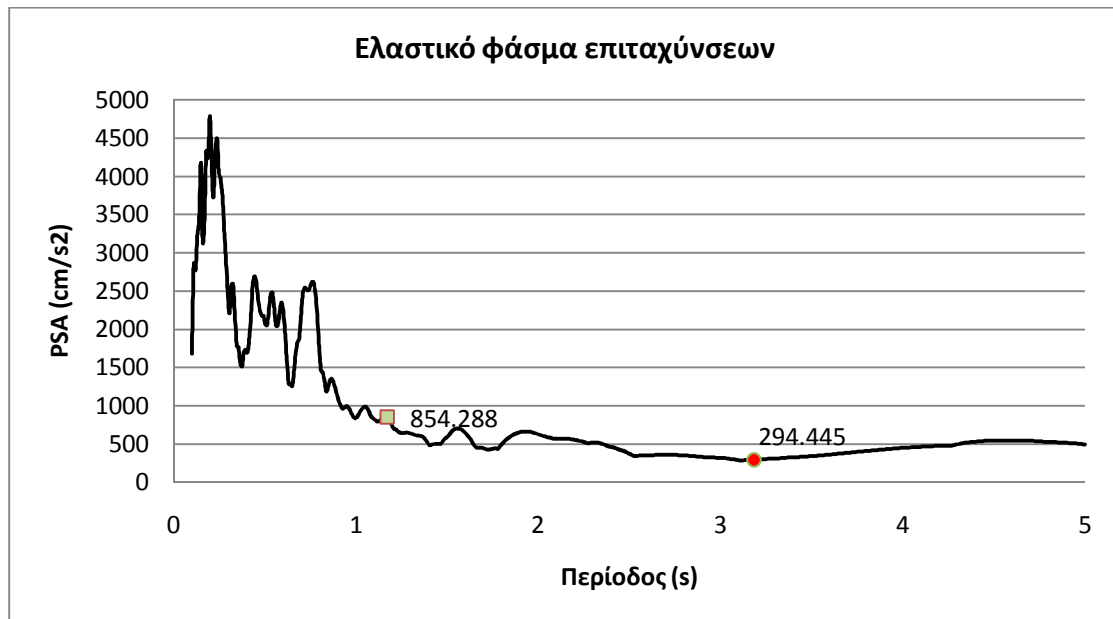
Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.16: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.17: Σύγκριση αδραμειακών και τέμνουσών δυνάμειων



Σχήμα 5.18: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

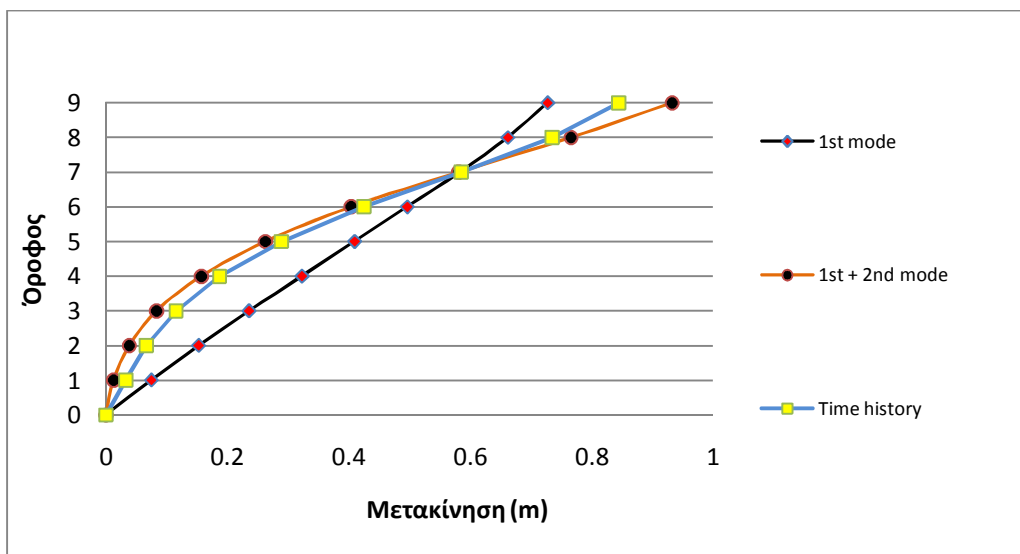
Όπως φαίνεται, από το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων, και οι δύο ιδιομορφές εισέρχονται στην πλαστική περιοχή. Όμως, βρίσκονται στην περιοχή όπου είναι ομαλή, μετά τη φασματική ενίσχυση. Συνεπώς, δεν μπορούμε να πούμε σαφώς ποια είναι η ιδιομορφή που επηρεάζει την κατανομή των δυνάμεων.

**Σεισμική φόρτιση TAB-344**

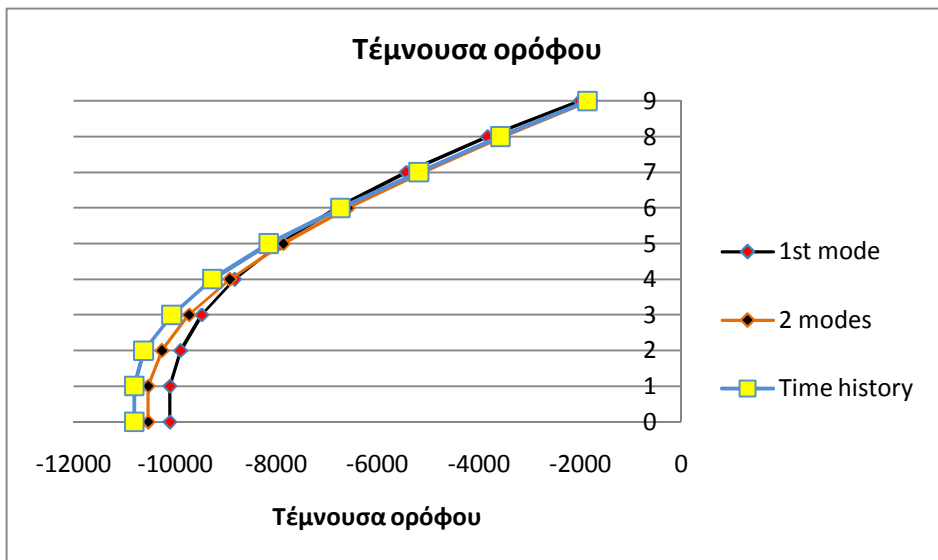
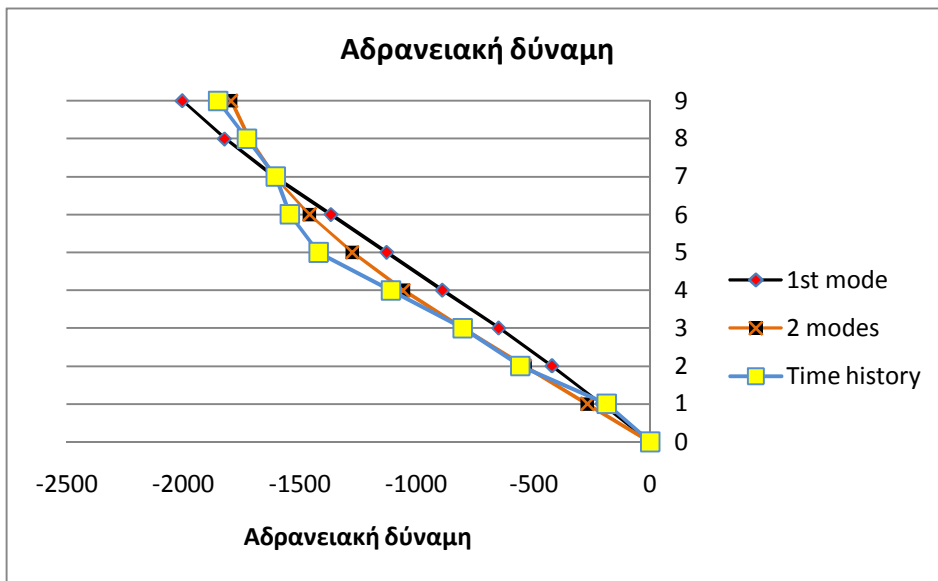
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_{\gamma}$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|--------------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 3.11                             | 2.253        | 0.521049   | 0.727115 | -2.34947  | -3.24629 |
| 2η ιδιομορφή | 9.94                             | 1.181        | -0.35354   | 0.205239 | -0.60801  | 0.336467 |

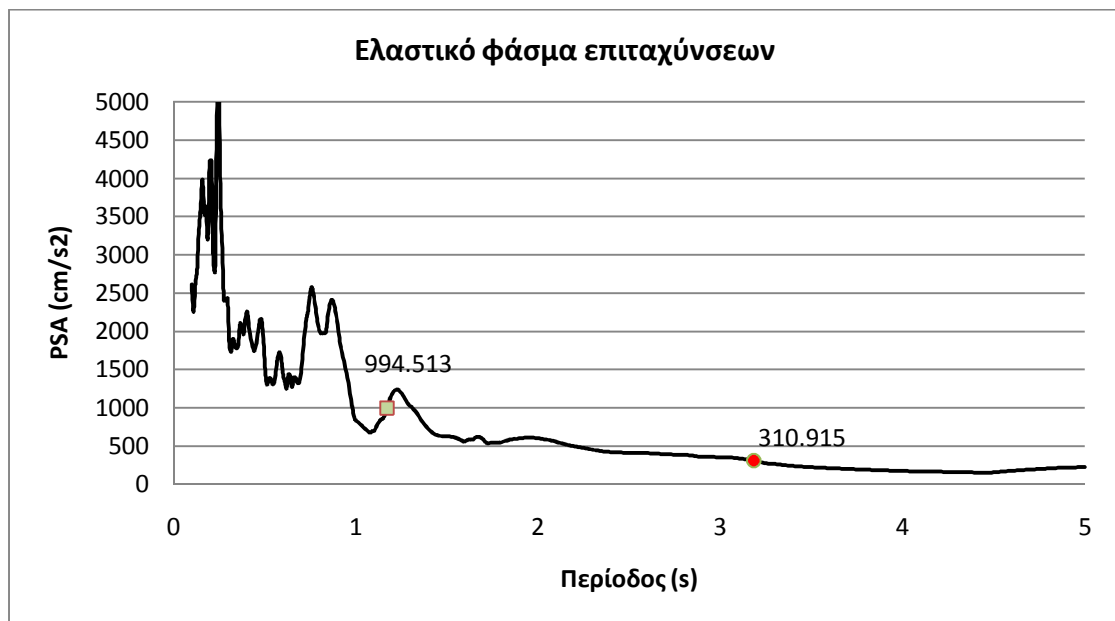
Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.19: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.20: Σύγκριση αδρανηιακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.21: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, βλέπουμε ότι και οι δύο ιδιομορφές βρίσκονται στην ίδια περιοχή φάσματος. Ίσως να επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό η δεύτερη ιδιομορφή καθώς βρίσκεται σε ανοδικό κλάδο με ένα τοπικό μέγιστο κοντά της. Παρόλ'αυτά, η δεύτερη ιδιομορφή δεν αλλάζει πολύ το αποτέλεσμα σε σχέση με αυτό που δίνει η πρώτη ιδιομορφή.

Επιπλέον, η μέθοδος φαίνεται να προσεγγίζει την πραγματική απόκριση της κατασκευής, καθώς στα διαγράμματα των δυνάμεων το αποτέλεσμα της σύνθεσης των δύο ιδιομορφών δείχνει ότι ο φορέας επηρεάζεται από τη δεύτερη ιδιομορφή.

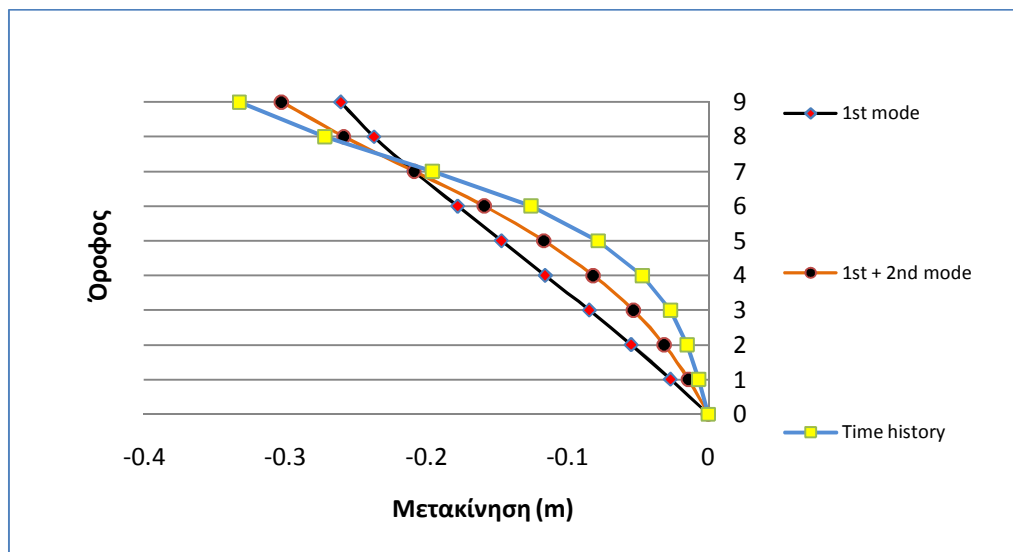


**Σεισμική φόρτιση E04-140**

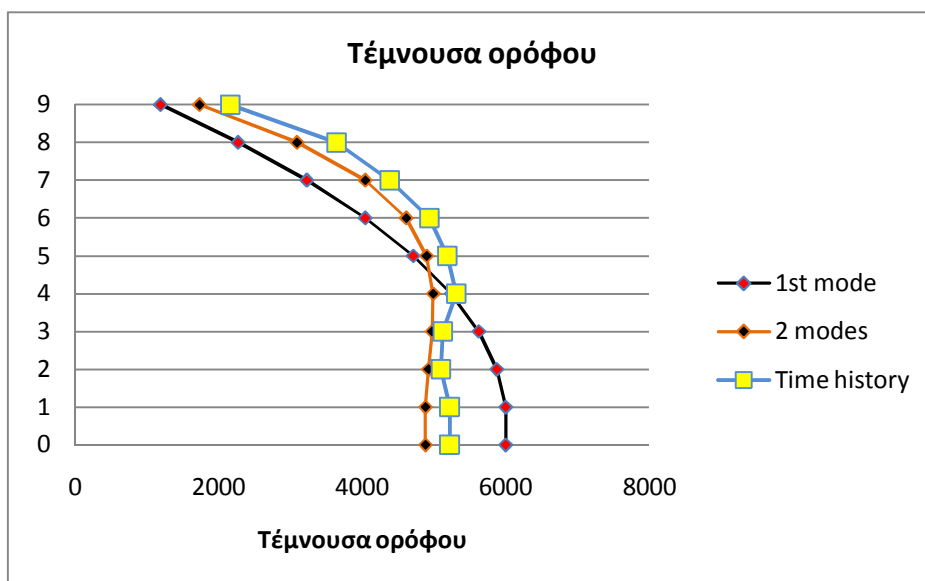
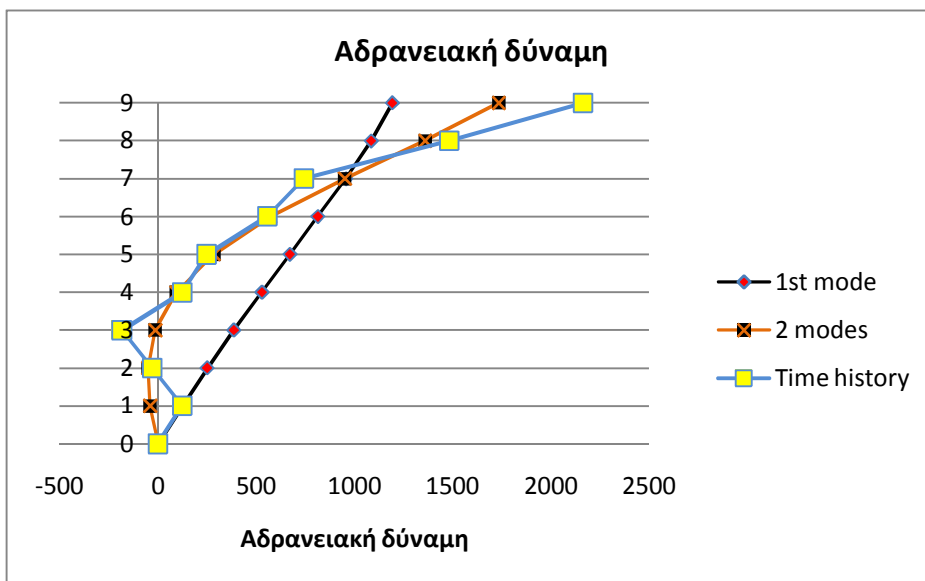
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 0.886                            | 0.642 | -0.18676   | -0.26062 | 1.39664   | 1.929752 |
| 2η ιδιομορφή | 4.648                            | 0.552 | 0.072325   | -0.0042  | -1.58618  | 0.877772 |

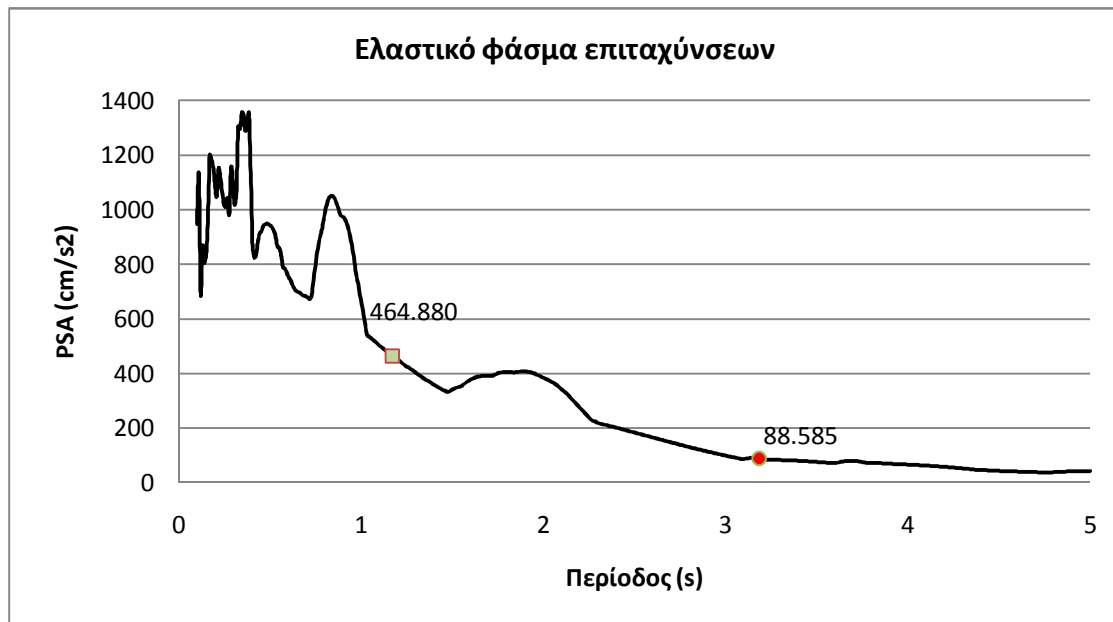
Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.22: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.23: Σύγκριση αδραμειακών και τέμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.24: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

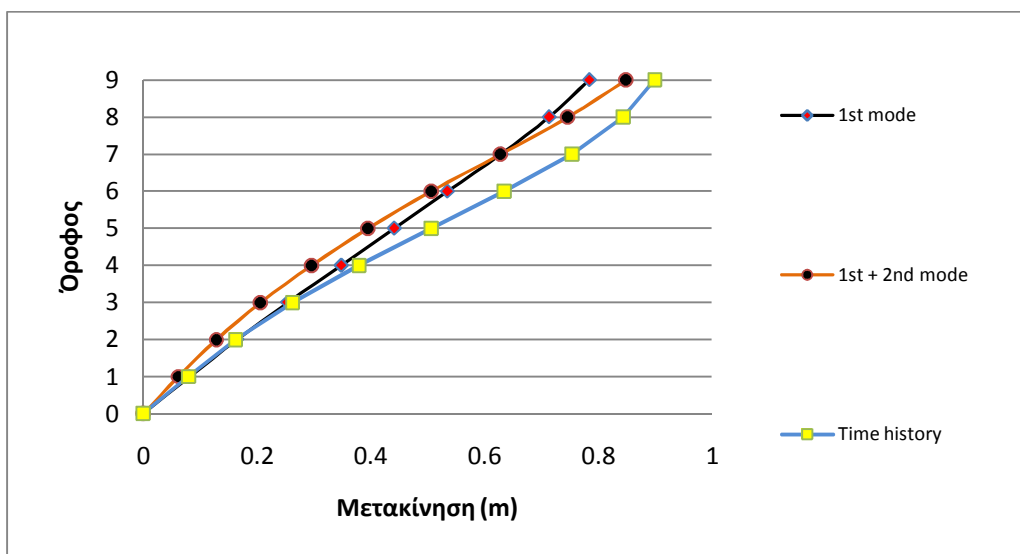
Όπως φαίνεται, από το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων, οι δύο ιδιομορφές παραμένουν στην ελαστική περιοχή. Όμως παρατηρούμε ότι η πρώτη ιδιομορφή βρίσκεται στην περιοχή όπου φθίνουν προς το μηδέν οι τιμές της επιτάχυνσης, ενώ η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται κοντά στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης και έχει τιμή επιτάχυνσης πενταπλάσια της πρώτης. Οπότε, ίσως να μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αυτό είναι το γεγονός που επηρεάζει την απόκριση και την παρεκκλίνει τόσο από την κατανομή της πρώτης ιδιομορφής, δηλαδή υπάρχει μεγάλη συμμετοχή της δεύτερης.

**Σεισμική φόρτιση E04-230**

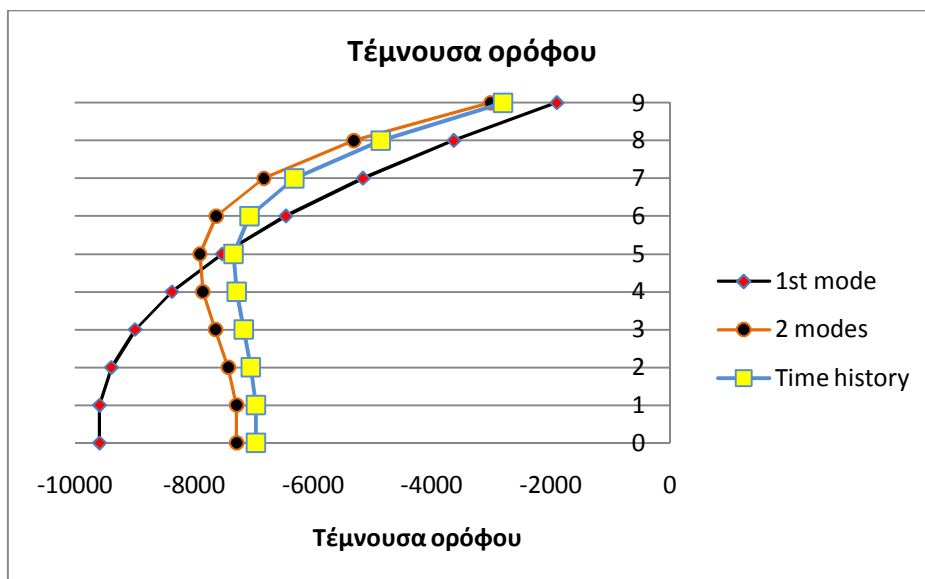
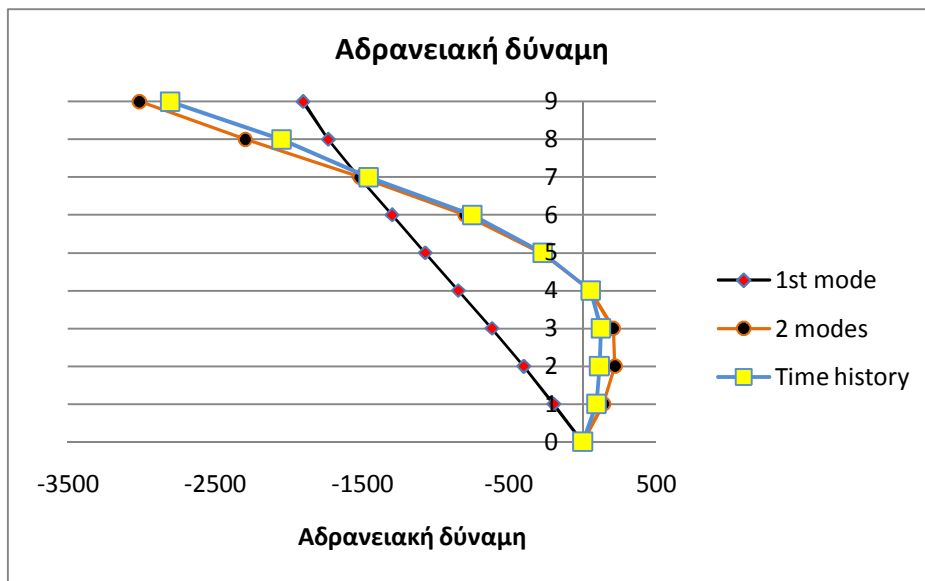
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 3.78                             | 1.668 | 0.561758   | 0.783924 | -2.2299   | -3.08108 |
| 2η ιδιομορφή | 6.14                             | 0.616 | -0.11128   | 0.064602 | 3.25377   | -1.8006  |

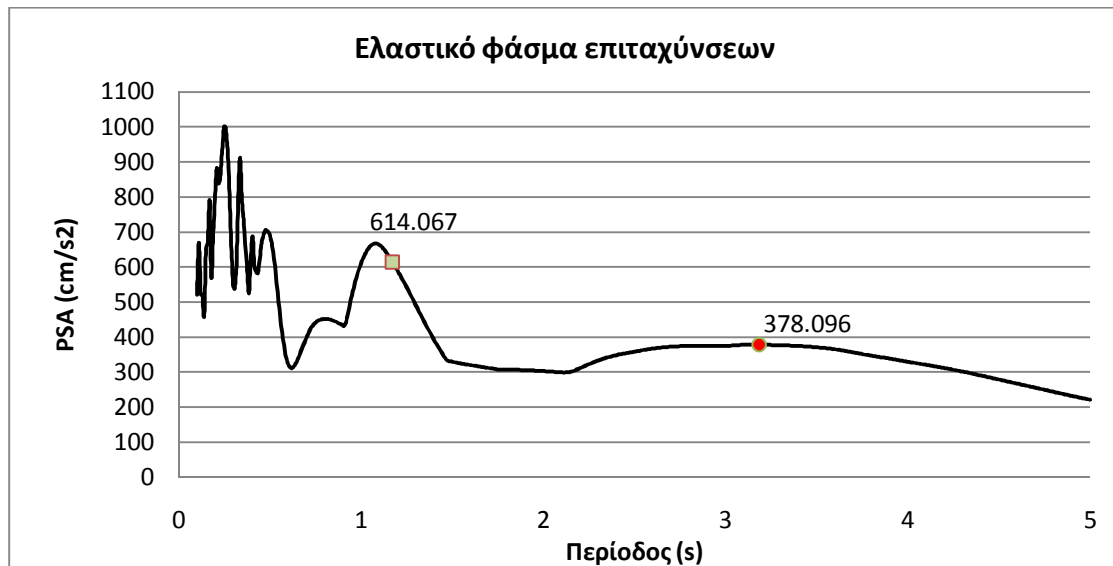
Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.25: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.26: Σύγκριση αδραμειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.27: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

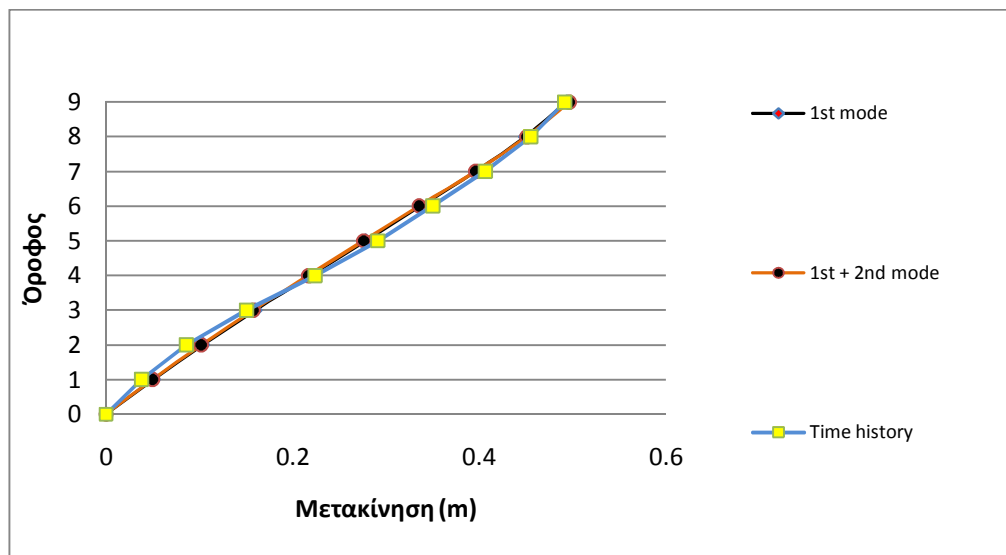
Στην περίπτωση αυτού του σεισμού, η πρώτη ιδιομορφή εισέρχεται στην πλαστική περιοχή ενώ η δεύτερη παραμένει ελαστική. Όμως η απόκριση του φορέα γίνεται σύμφωνα με τη σύνθεση των δύο ιδιομορφών. Αυτό εξηγείται απλά από το φάσμα επιταχύνσεων όπου βλέπουμε, όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις, τη δεύτερη ιδιομορφή να βρίσκεται πολύ πιο ψηλά στο φάσμα και κοντά στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης, σε σχέση με την πρώτη ιδιομορφή που βρίσκεται σε χαμηλότερες τιμές και σε περιοχή ομαλή, μακριά από τη φασματική ενίσχυση.

**Σεισμική φόρτιση E05-140**

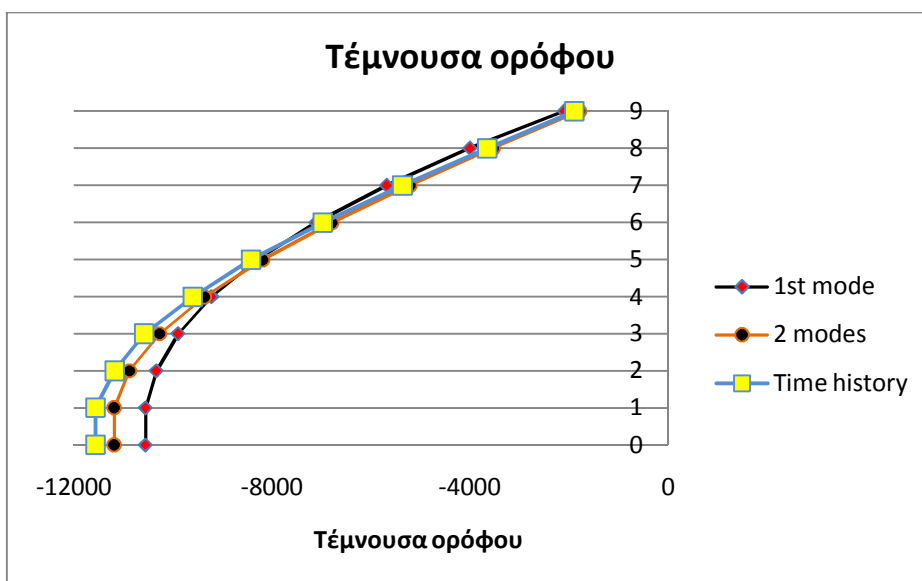
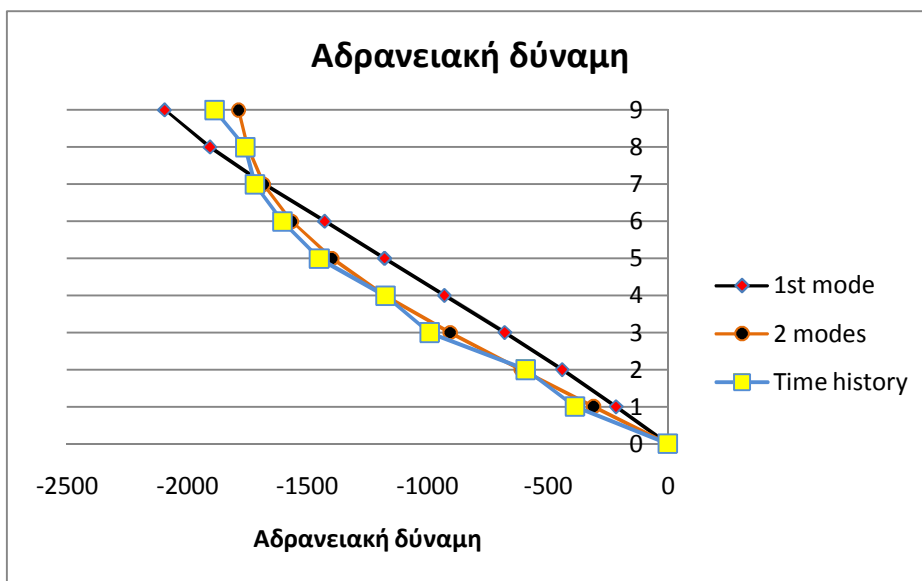
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 2.305                            | 1.668 | 0.353825   | 0.493757 | -2.45482  | -3.39185 |
| 2η ιδιομορφή | 5.186                            | 0.616 | 0.00493    | 0.00286  | -0.90043  | 0.498288 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.28: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.29: Σύγκριση αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων





Σχήμα 5.30: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

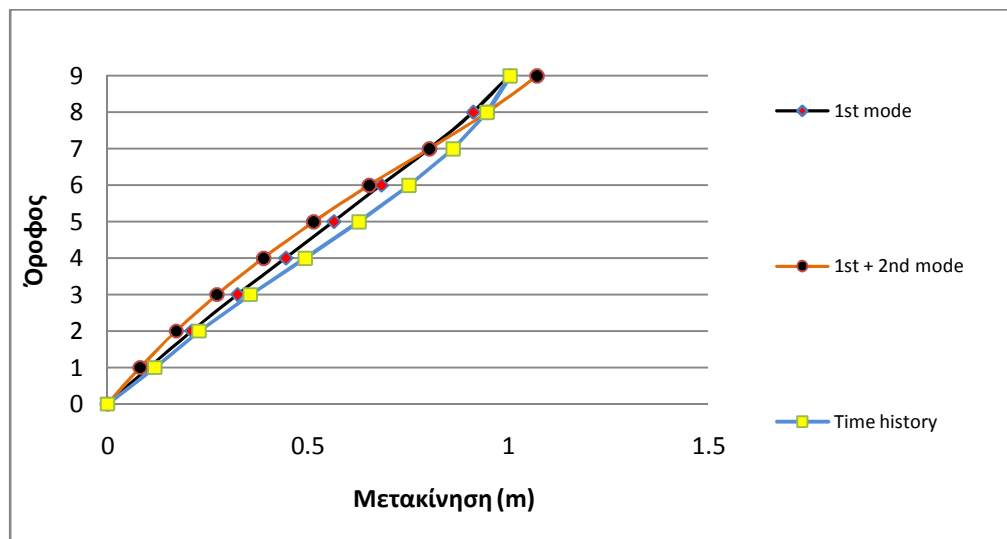
Ομοίως με την προηγούμενη σεισμική διέγερση, η τιμή της επιτάχυνσης της δεύτερης ιδιομορφής είναι διπλάσια της πρώτης. Όμως, σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε ότι και η δεύτερη ιδιομορφή είναι σε χαμηλά σημεία στο φάσμα, συνεπώς είναι αναμενόμενο να επηρεάζει και αυτή την κατανομή των δυνάμεων, αλλά επιφέρει μικρή αλλαγή από την κατανομή της πρώτης ιδιομορφής.

**Σεισμική φόρτιση E05-230**

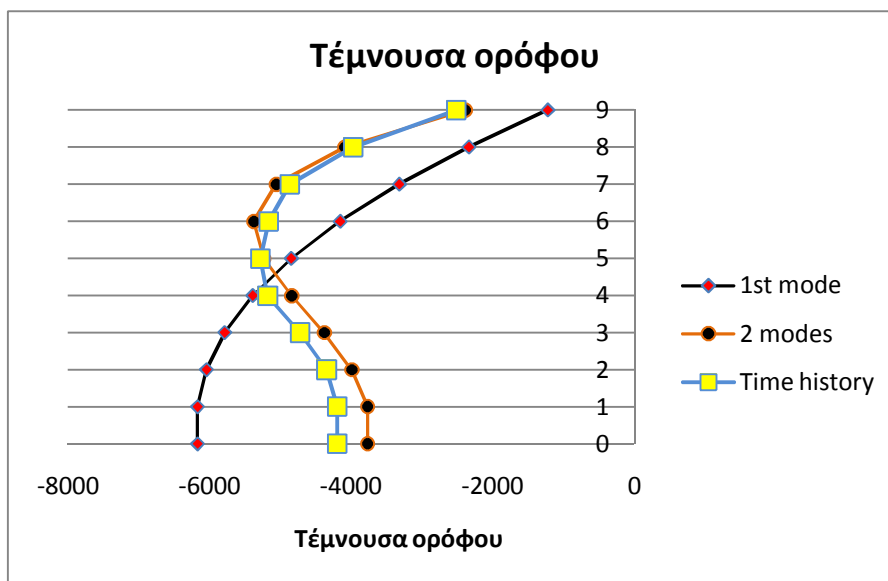
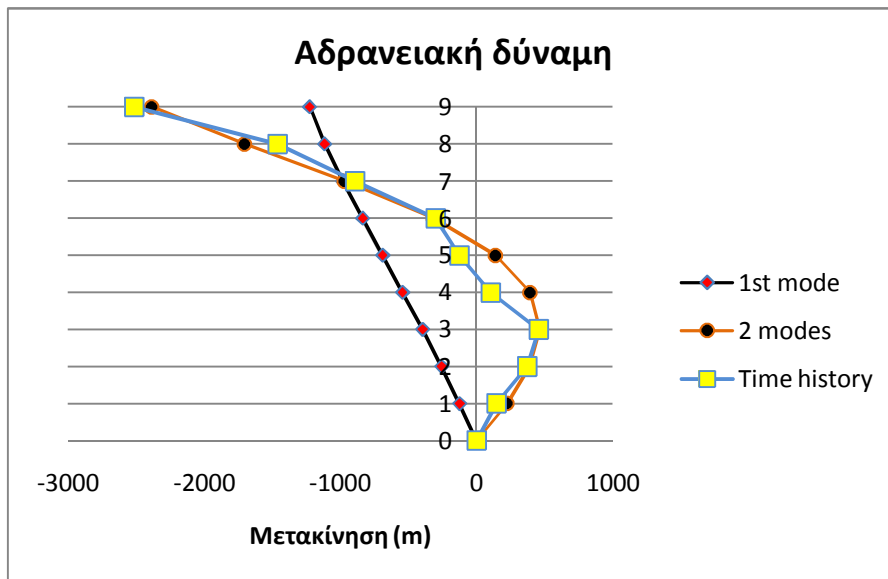
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 4.914                            | 3.557 | 0.718894   | 1.003205 | -1.43615  | -1.98434 |
| 2η ιδιομορφή | 5.407                            | 0.642 | -0.11928   | 0.069247 | 3.39708   | -1.8799  |

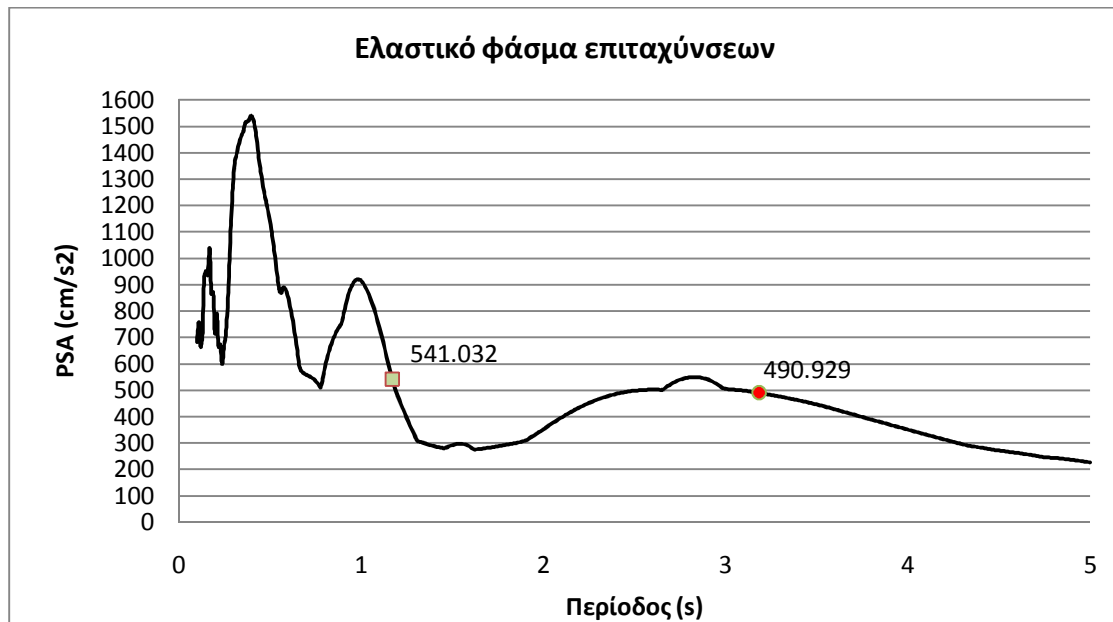
Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.31: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.32: Σύγκριση αδραμειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.33: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

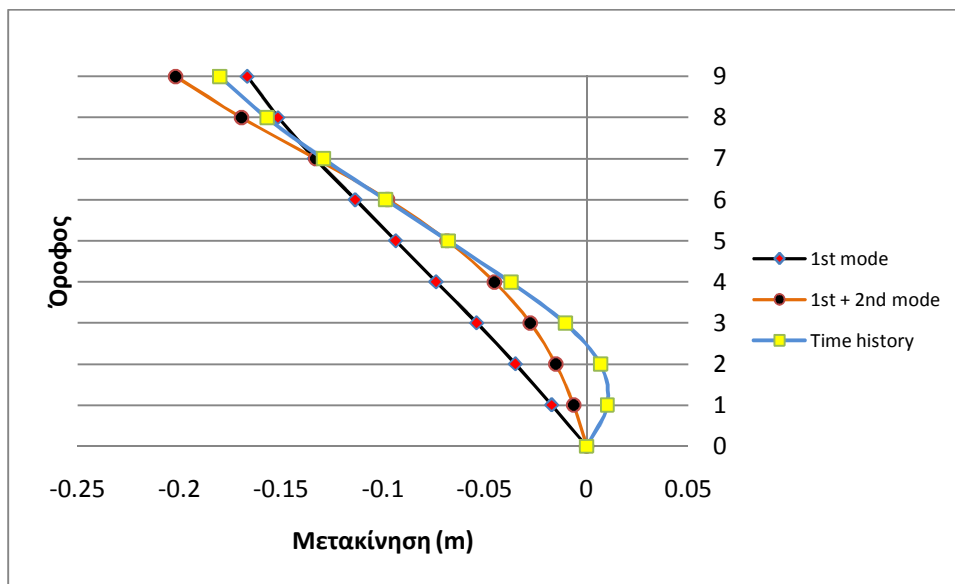
Σε αυτή τη σεισμική διέγερση, η δεύτερη ιδιομορφή επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των δυνάμεων. Οι φασματικές τιμές είναι παραπλήσιες. Το γεγονός της μεγάλης συμμετοχής της δεύτερης ιδιομορφής ίσως μπορεί να αιτιολογηθεί από το ότι η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται στο τέλος της φασματικής ενίσχυσης, ενώ η πρώτη βρίσκεται σε φθίνοντα κλάδο.

**Σεισμική φόρτιση E06-230**

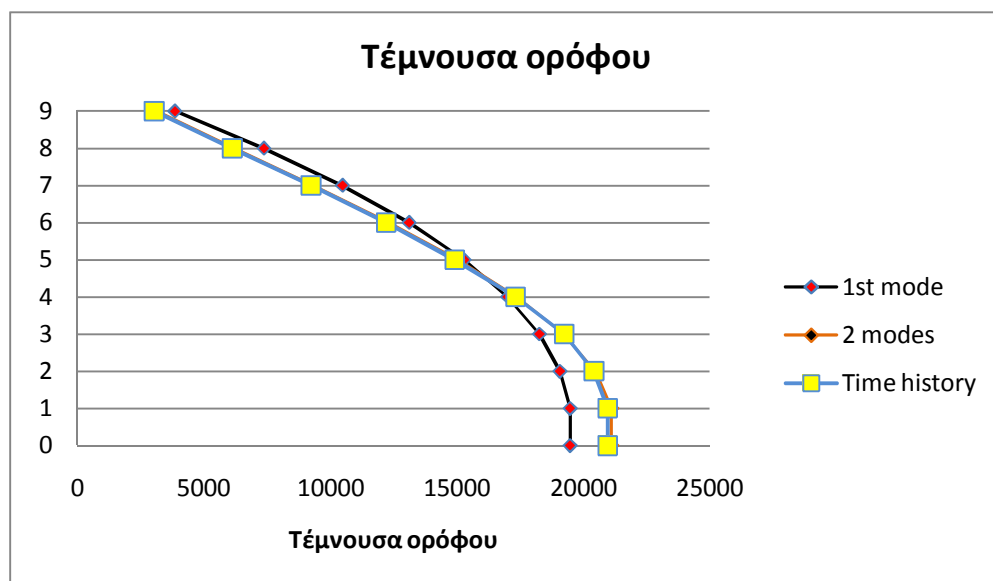
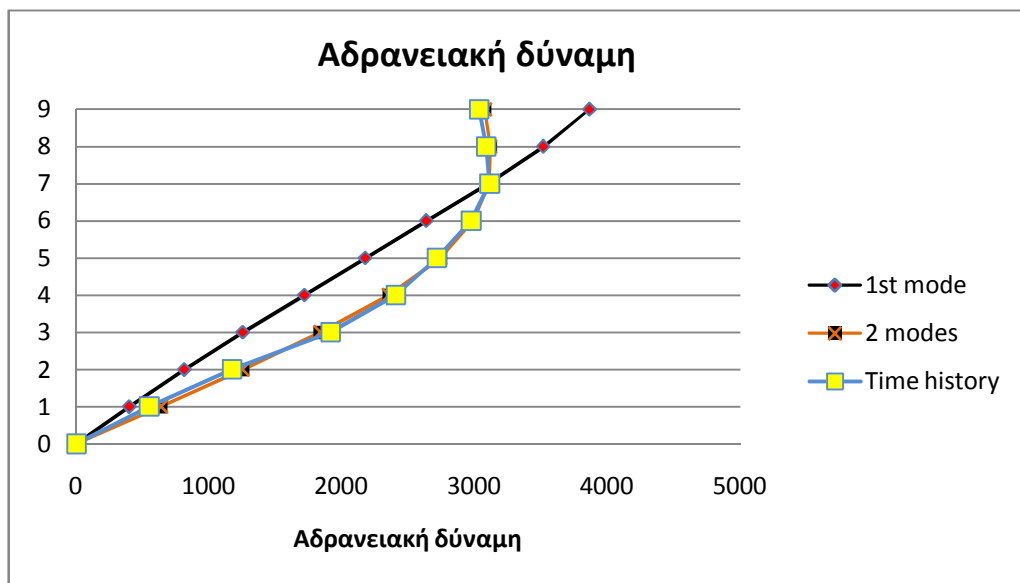
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 5.91                             | 4.279 | -0.11942   | -0.16664 | 4.53176   | 6.261579 |
| 2η ιδιομορφή | 4.92                             | 0.585 | 0.060963   | -0.03539 | 2.31267   | -1.2798  |

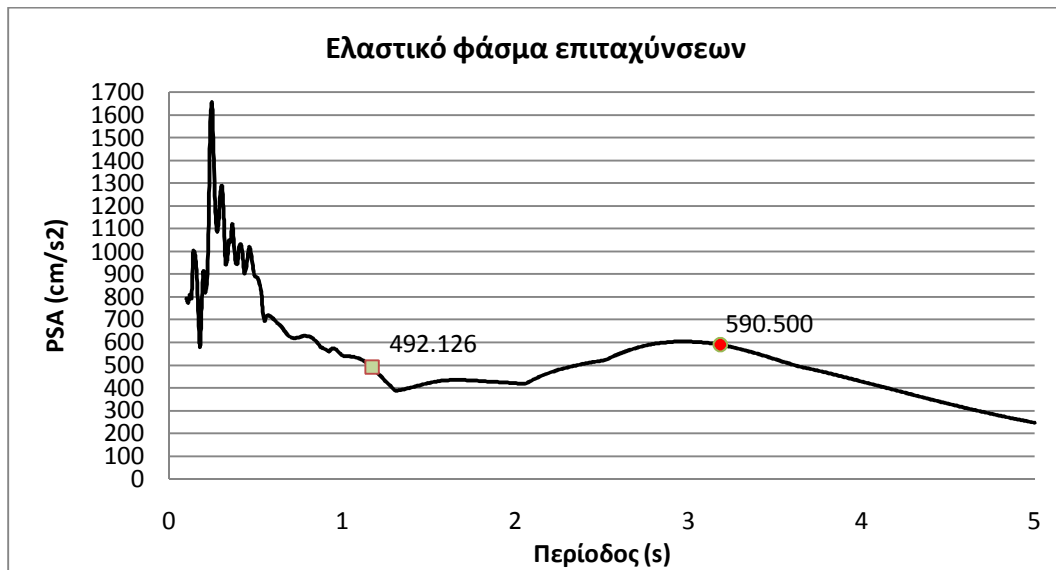
Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.34: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.35: Σύγκριση αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.36: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

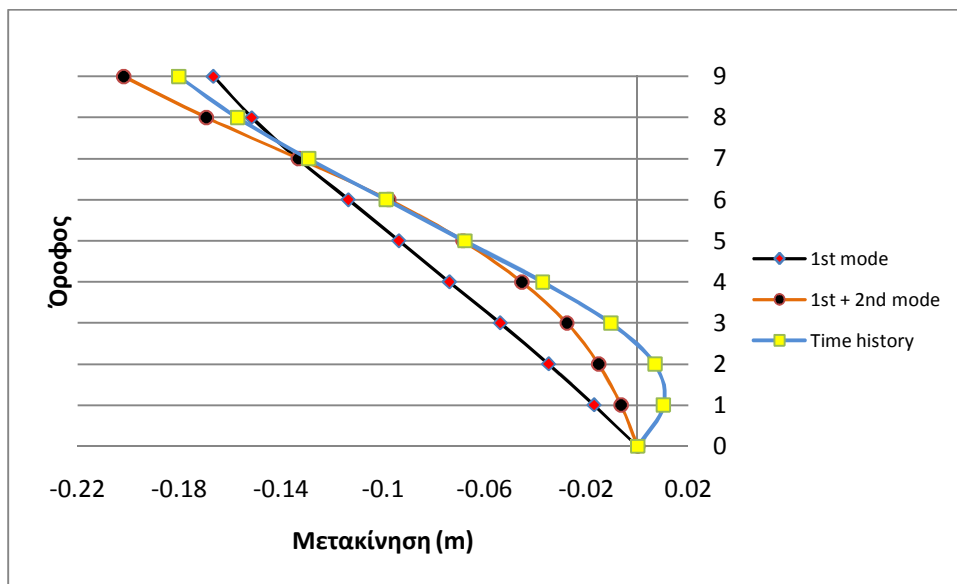
Ομοίως, οι δυνάμεις καθ' ύψος του φορέα κατανέμονται σύμφωνα με τη δεύτερη ιδιομορφή, ενώ αυτή παραμένει στην ελαστική περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι ξεκάθαρη η αιτία της συμμετοχής της δεύτερης ιδιομορφής.

**Σεισμική φόρτιση E08-230**

Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

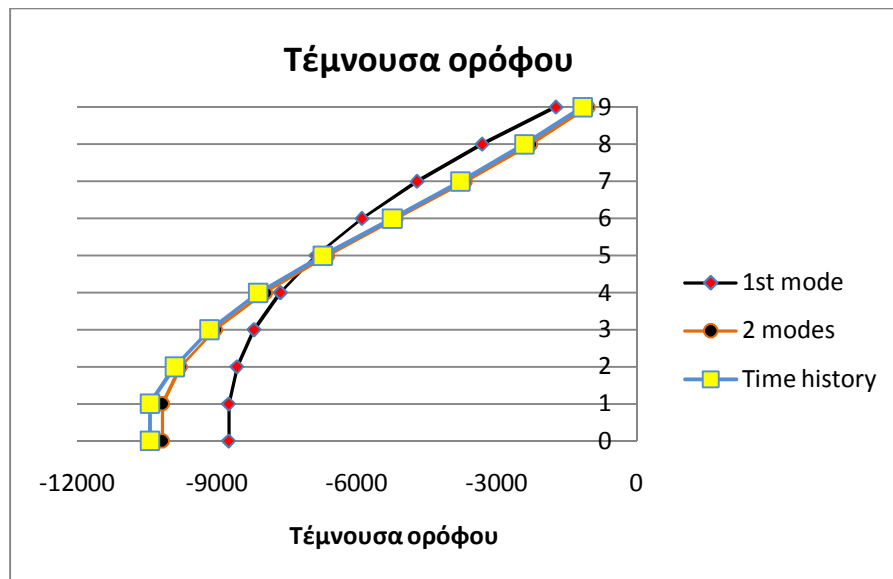
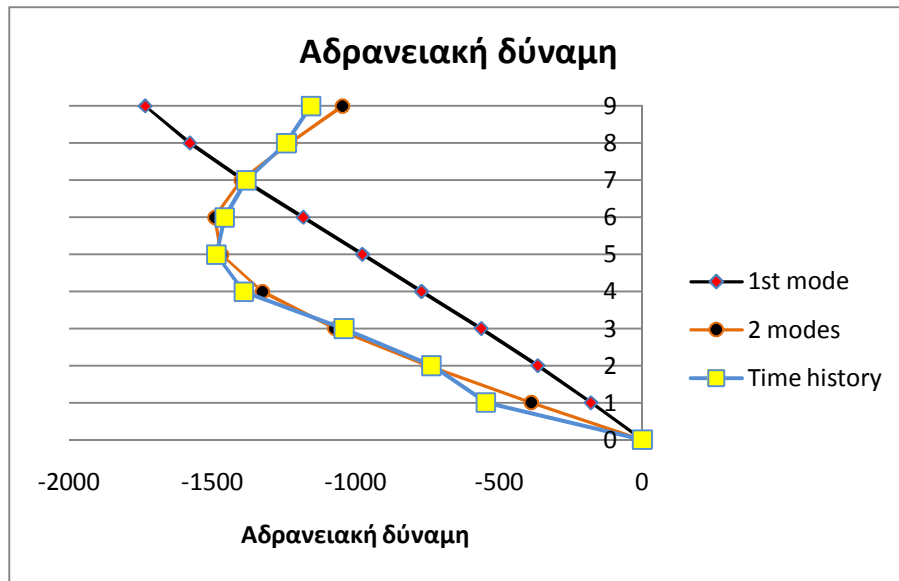
|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | R <sub>y</sub> | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | S <sub>a</sub> |
|--------------|----------------------------------|----------------|------------|----------|-----------|----------------|
| 1η ιδιομορφή | 2.12                             | 1.5            | 0.374072   | 0.522011 | -2.03529  | -2.81218       |
| 2η ιδιομορφή | 4.56                             | 0.543          | 0.0498     | -0.02891 | -2.01842  | 1.116968       |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.37: Σύγκριση μετακινήσεων





Σχήμα 5.38: Σύγκριση αδρανηιακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.39: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

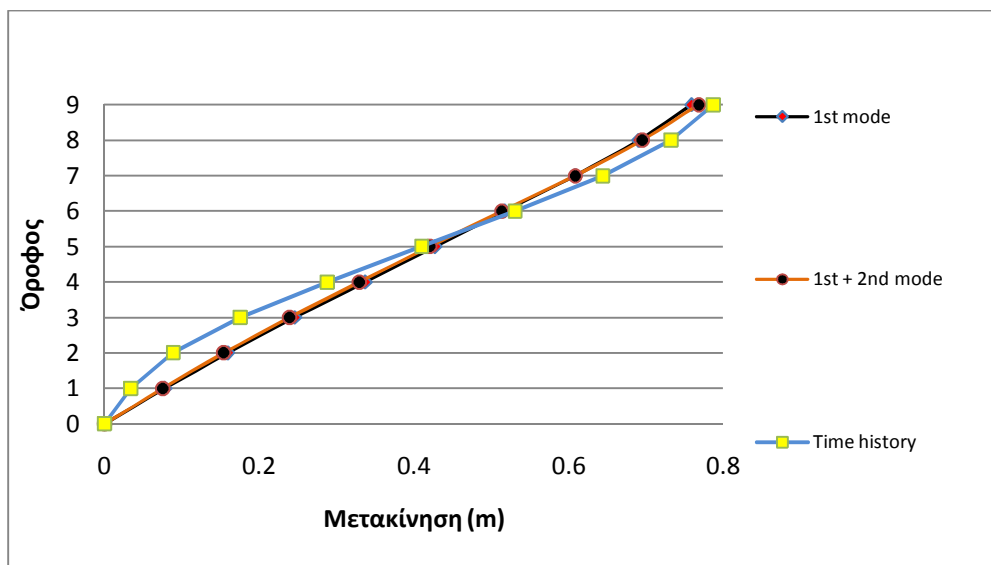
Σε αυτή την περίπτωση, βλέπουμε ότι η δεύτερη ιδιομορφή επηρεάζει σημαντικά την κατανομή των δυνάμεων και αυτό αιτιολογείται από το φάσμα επιτάχυνσης, όπου φαίνεται η πρώτη ιδιομορφή να βρίσκεται στον κλάδο που είναι ομαλός ενώ η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται σε τοπικό μέγιστο, κοντά στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης και επίσης η τιμή της είναι υπερδιπλάσια από αυτή της πρώτης.

**Σεισμική φόρτιση SCH-281**

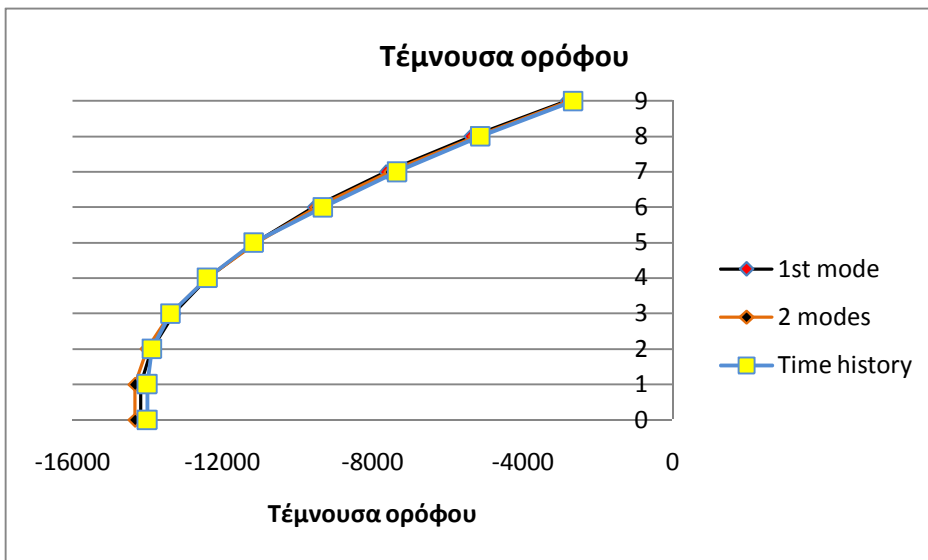
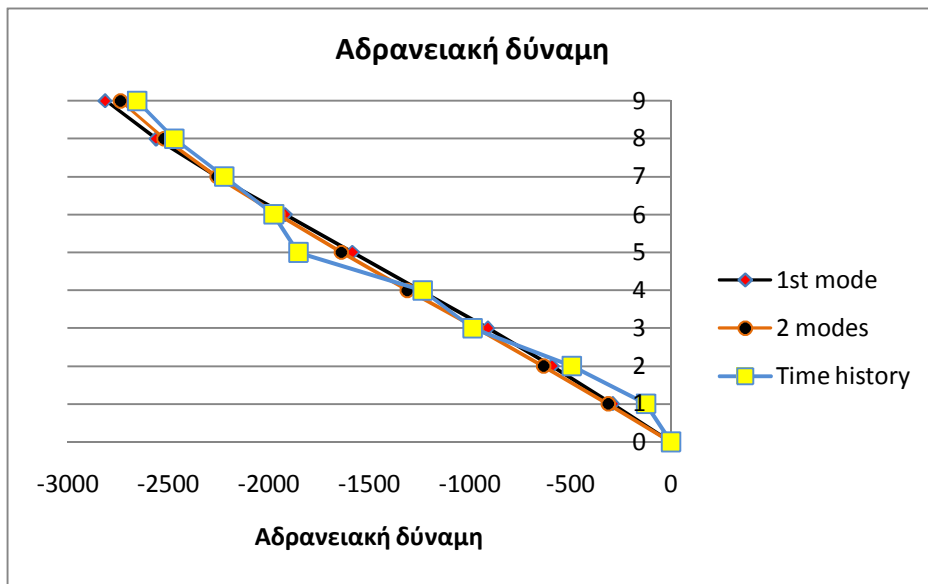
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_{\gamma}$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|--------------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 2.683                            | 1.943        | 0.543939   | 0.759058 | -3.29912  | -4.55843 |
| 2η ιδιομορφή | 9.261                            | 1.100        | -0.01581   | 0.009181 | -0.22272  | 0.123251 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.40: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.41: Σύγκριση αδραμειακών και τέμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.42: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

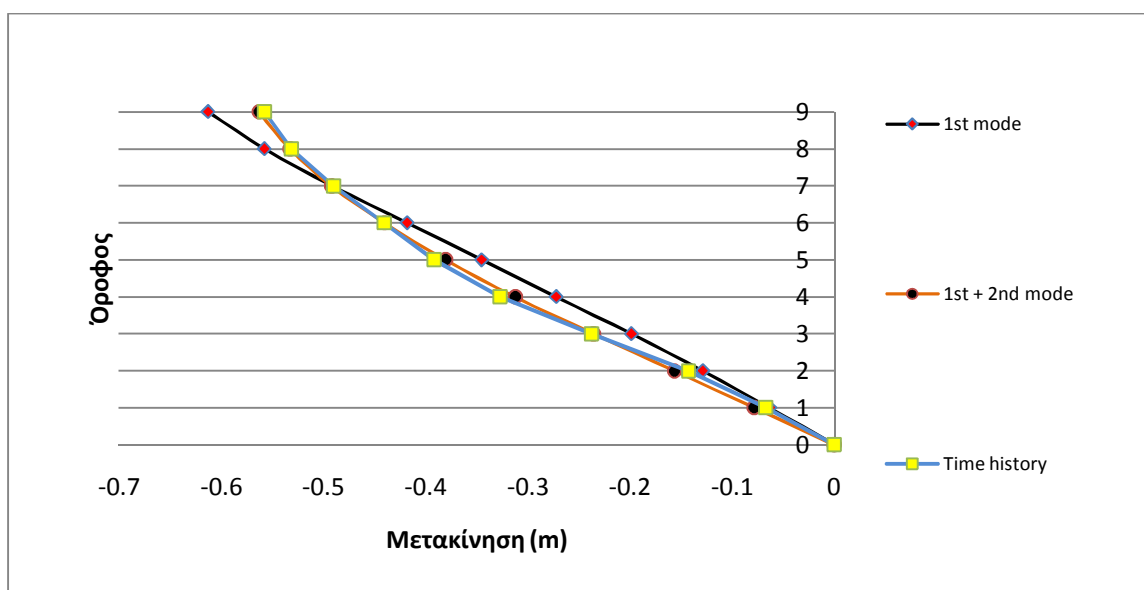
Στη συγκεκριμένη σεισμική διέγερση η δεύτερη ιδιομορφή δεν επηρεάζει την κατανομή των δυνάμεων παρότι εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Αυτό είναι αναμενόμενο όμως αφού η δεύτερη ιδιομορφή εισέρχεται οριακά στην πλαστική περιοχή, με συντελεστή διαρροής  $R_y = 1,1$ , δηλαδή πρακτικά έχει ελαστική συμπεριφορά. Επιπλέον, βλέπουμε ότι στο φάσμα επιταχύνσεων η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται μετά το τοπικό μέγιστο, οπότε βρίσκεται στην περιοχή αποτόνωσης του φαινομένου.

**Σεισμική φόρτιση RRS-228**

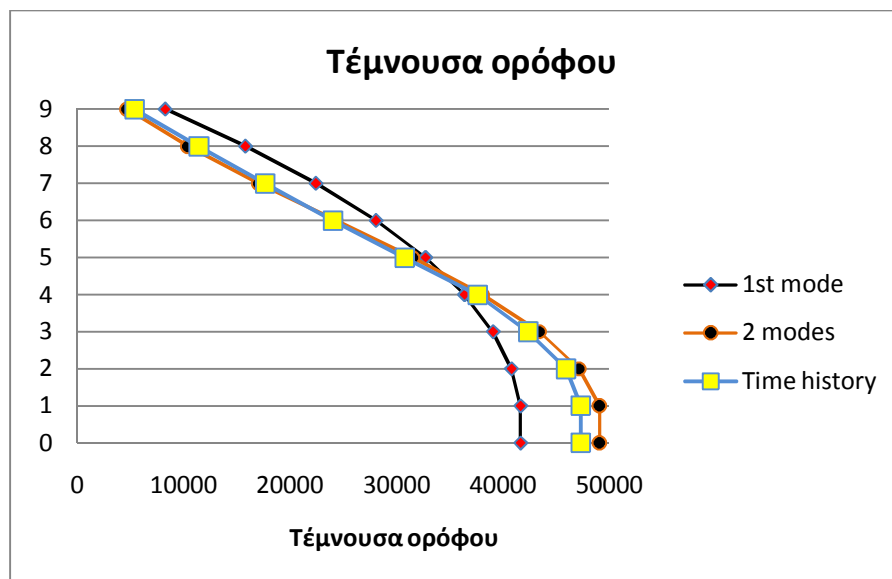
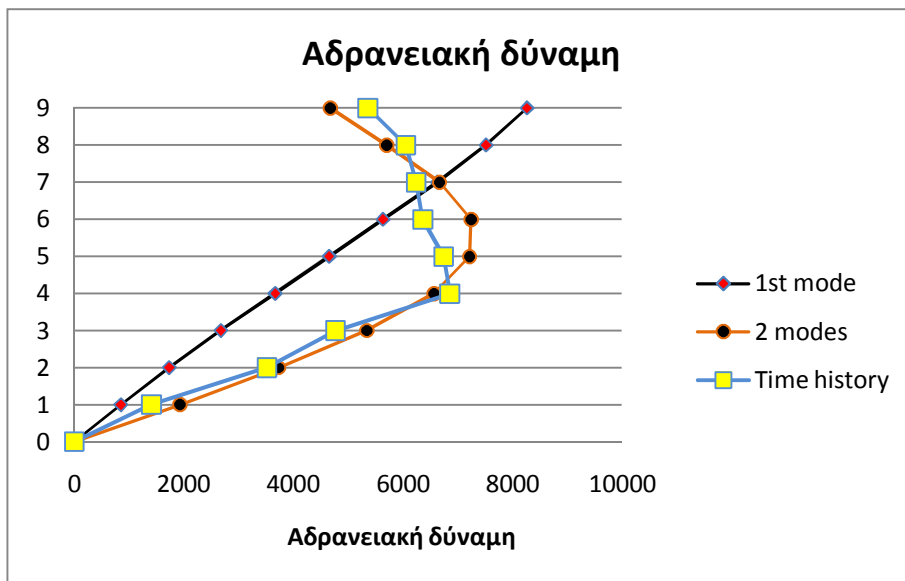
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | R <sub>γ</sub> | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | S <sub>a</sub> |
|--------------|----------------------------------|----------------|------------|----------|-----------|----------------|
| 1η ιδιομορφή | 2.50                             | 1.817          | -0.43916   | -0.61284 | 9.68954   | 13.38814       |
| 2η ιδιομορφή | 17.2                             | 2.046          | -0.08585   | 0.049836 | 10.5079   | -5.81494       |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.43: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.44: Σύγκριση αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.45: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

Όπως φαίνεται, από το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων, και οι δύο ιδιομορφές εισέρχονται στην πλαστική περιοχή. Η δεύτερη ιδιομορφή αναπτύσσει μεγάλο συντελεστή διαρροής  $R_y=2$  ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγάλη φασματική τιμή, κοντά στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης. Η πρώτη ιδιομορφή έχει μεν συντελεστή διαρροής  $R_y=1,87$  αλλά βρίσκεται σε περιοχή πολύ χαμηλών φασματικών τιμών και συνεπώς η επιρροή της φθίνει. Συνεπώς, είναι αναμενόμενο η κατανομή των δυνάμεων να επηρεάζεται σημαντικά από τη δεύτερη ιδιομορφή.

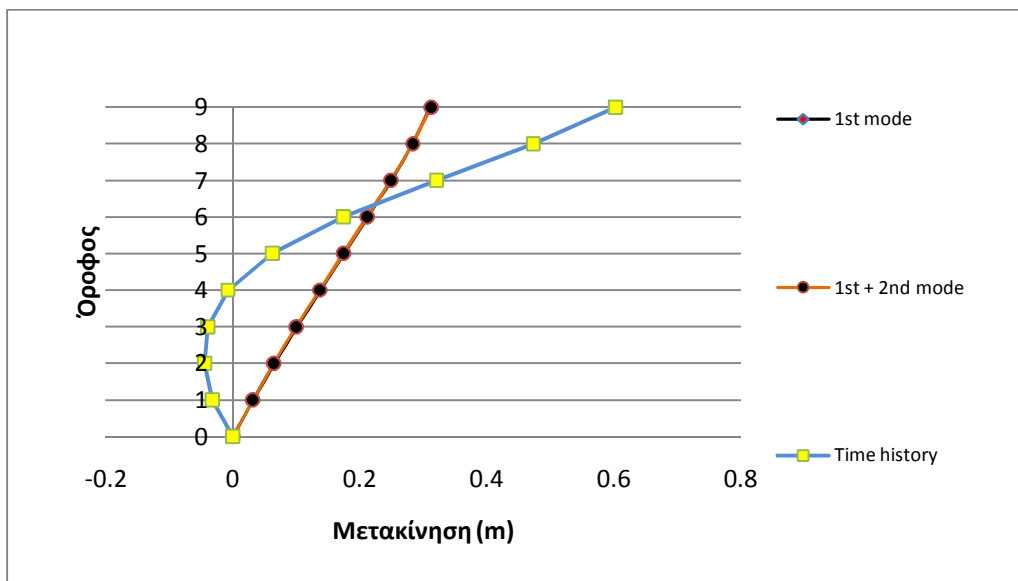


**Σεισμική φόρτιση RRS-318**

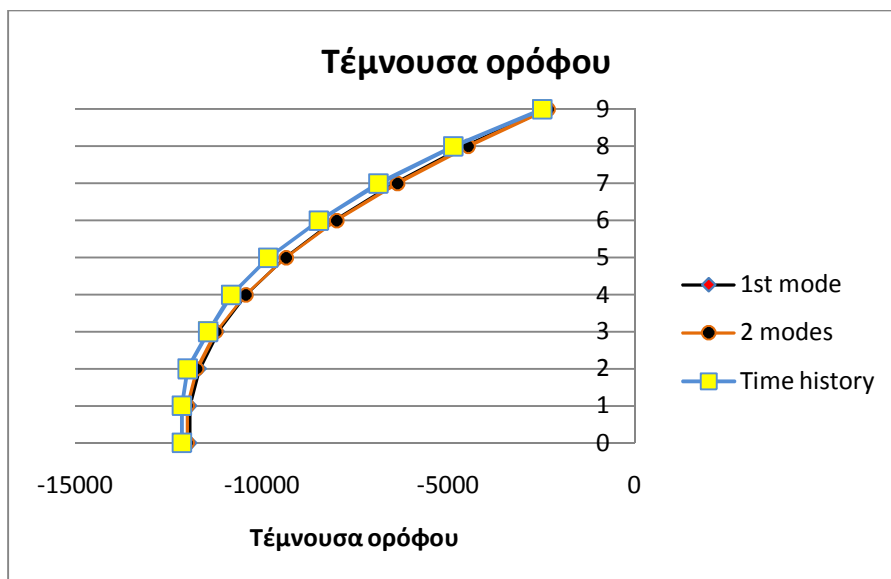
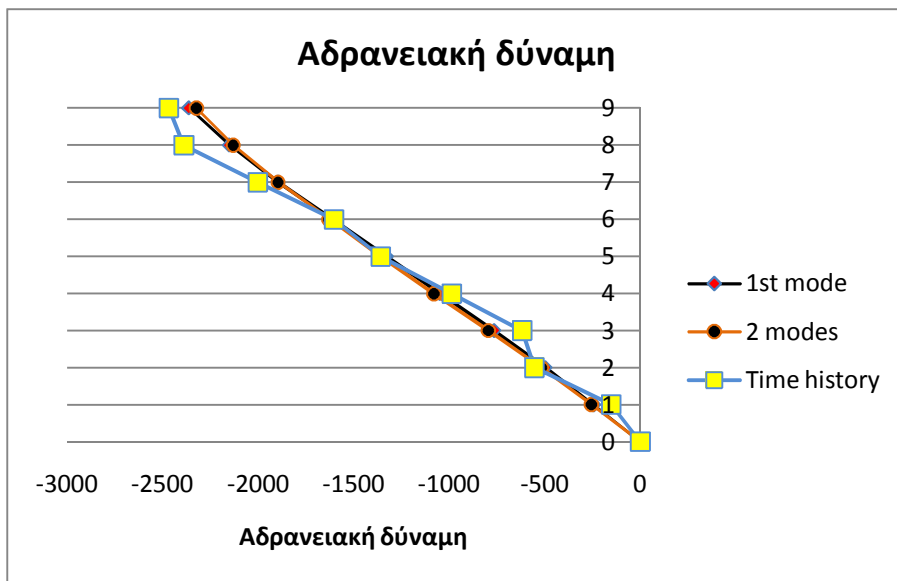
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | Ry    | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | Sa       |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 2.12                             | 1.5   | 0.222649   | 0.310703 | -2.77262  | -3.83096 |
| 2η ιδιομορφή | 9.77                             | 1.162 | -0.0026    | 0.001507 | -0.11582  | 0.064091 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.46: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.47: Σύγκριση αδρανηιακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.48: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

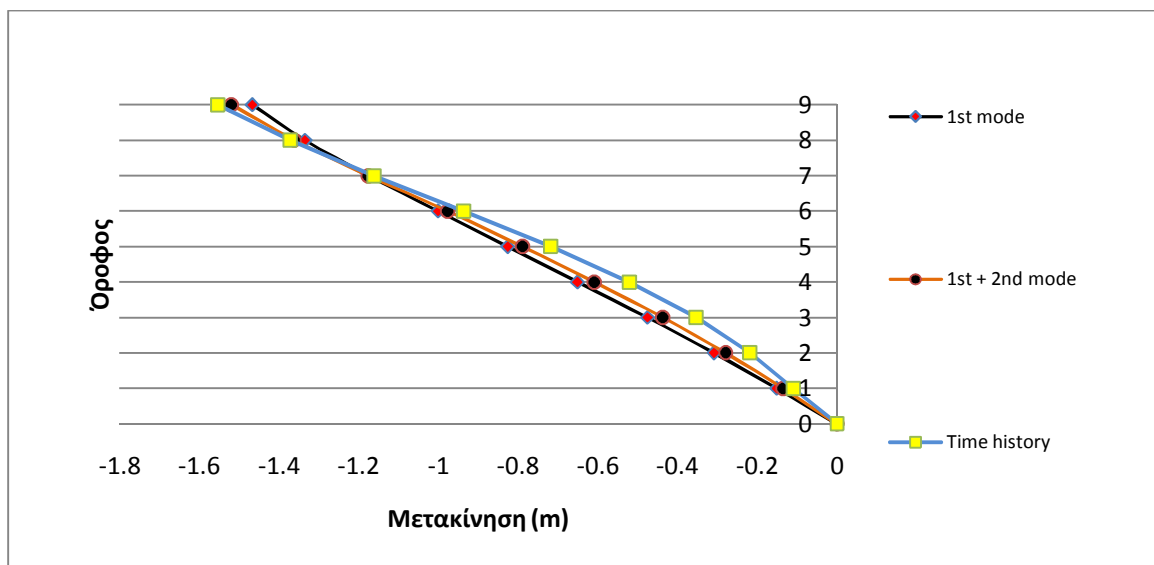
Καθώς και οι δύο ιδιομορφές έχουν χαμηλές φασματικές τιμές και είναι σε περιοχή όπου το φάσμα φθίνει, είναι δύσκολό να αποφανθούμε ποια ιδιομορφή επηρεάζει την κατανομή των δυνάμεων. Και οι δύο έχουν εισέλθει στην πλαστική περιοχή όμως βρίσκονται σε χαμηλές τιμές επιτάχυνσης.

**Σεισμική φόρτιση NWS-046**

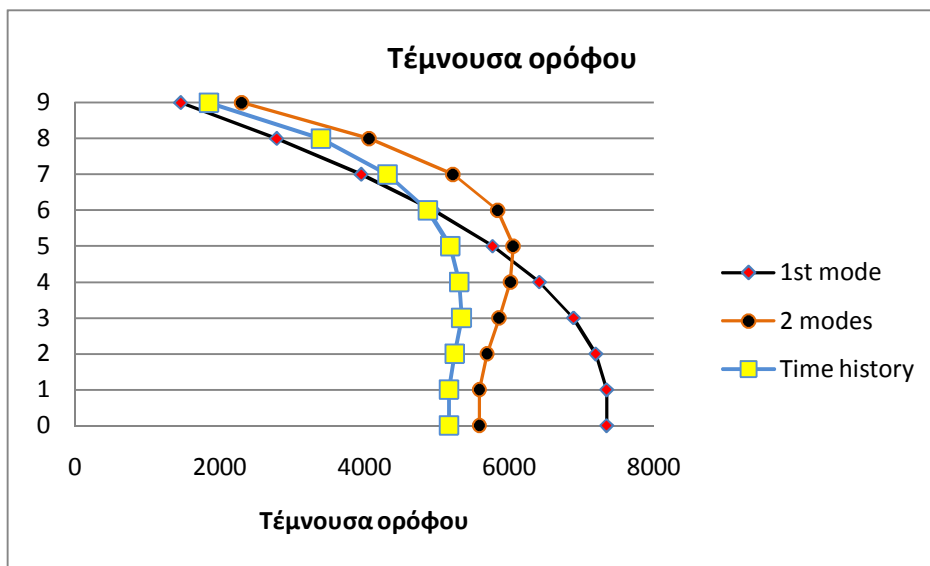
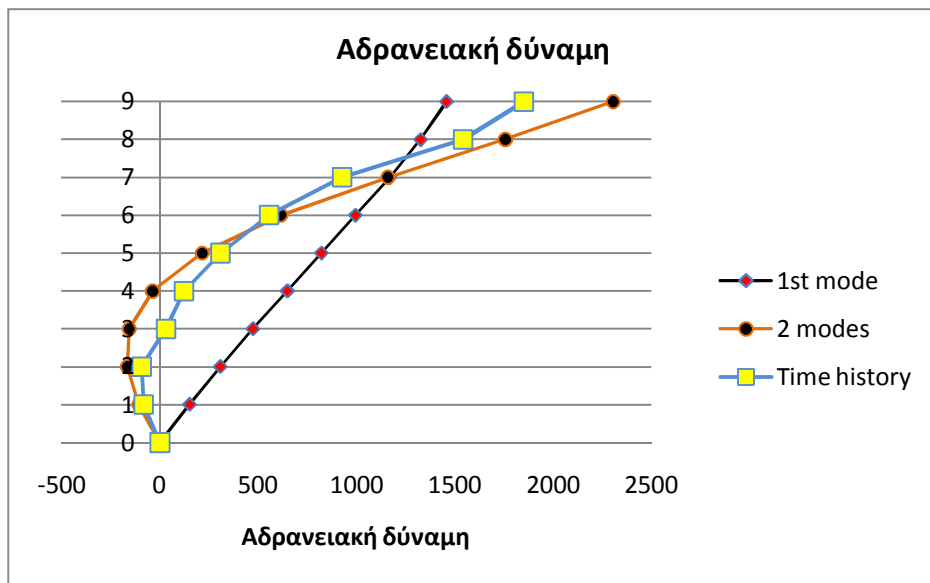
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_{\gamma}$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|--------------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 3.46                             | 2.508        | -1.0516    | -1.46749 | 1.70904   | 2.361398 |
| 2η ιδιομορφή | 9.19                             | 1.092        | 0.089239   | 0.05181  | -2.48252  | 1.373796 |

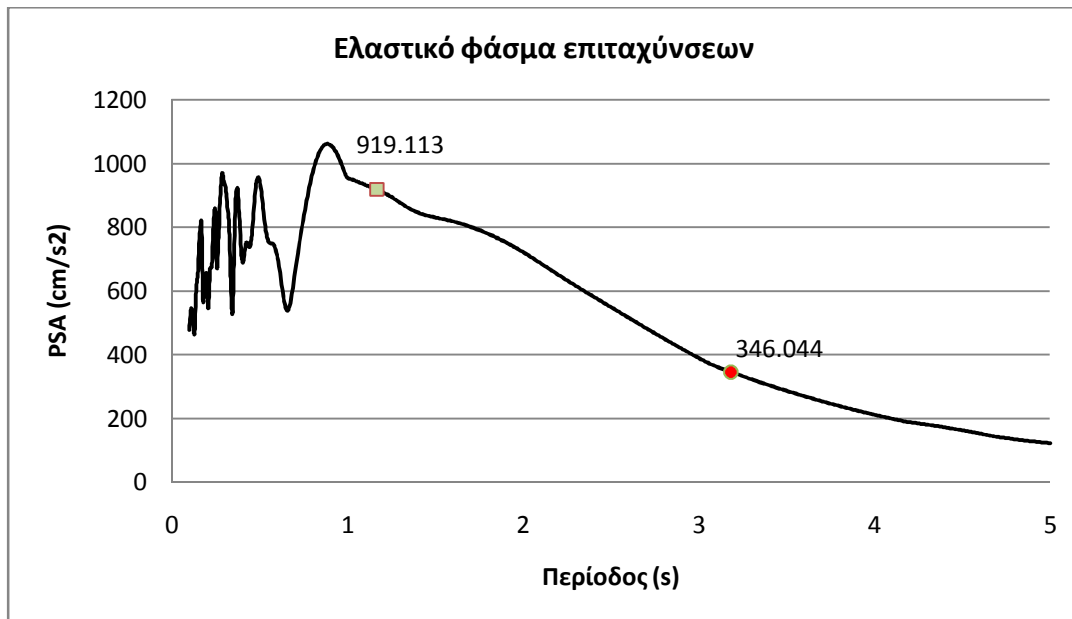
Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.49: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.50: Σύγκριση αδρανηιακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.51: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

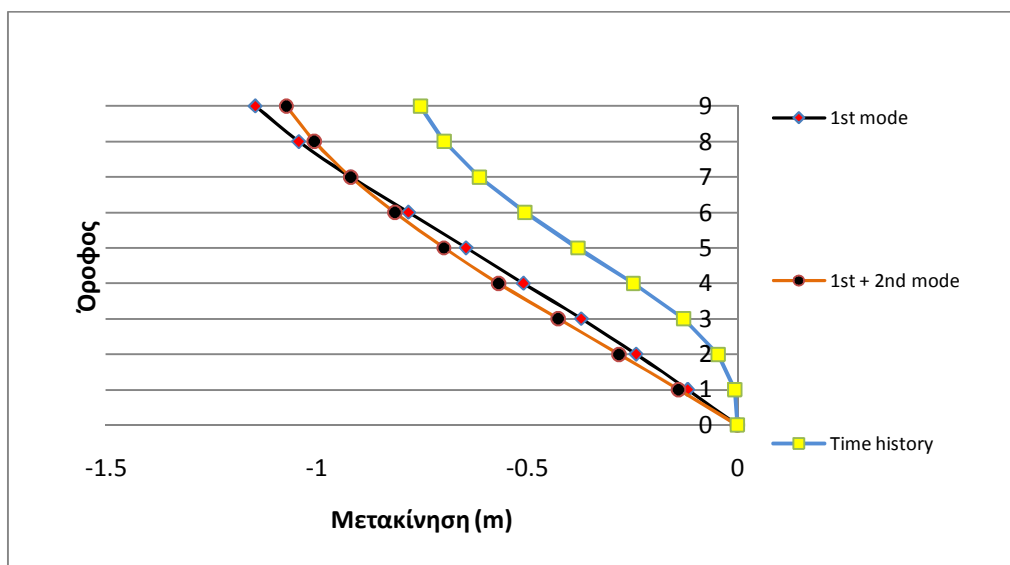
Σε αυτή τη σεισμική διέγερση, οι δύο ιδιομορφές εισάγονται στην πλαστική περιοχή. Παρατηρώντας το φάσμα των επιταχύνσεων, θα δούμε ότι η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης, ενώ η πρώτη ιδιομορφή βρίσκεται στο φθίνοντα κλάδο και σε χαμηλή φασματική τιμή. Οπότε, είναι εμφανής ο λόγος της συμμετοχής της δεύτερης ιδιομορφής στην κατανομή των δυνάμεων.

**Σεισμική φόρτιση JFA-022**

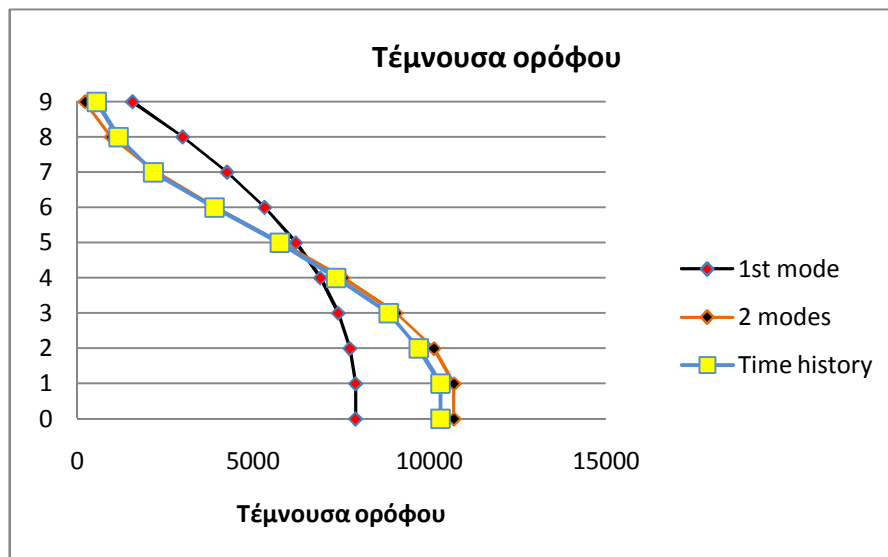
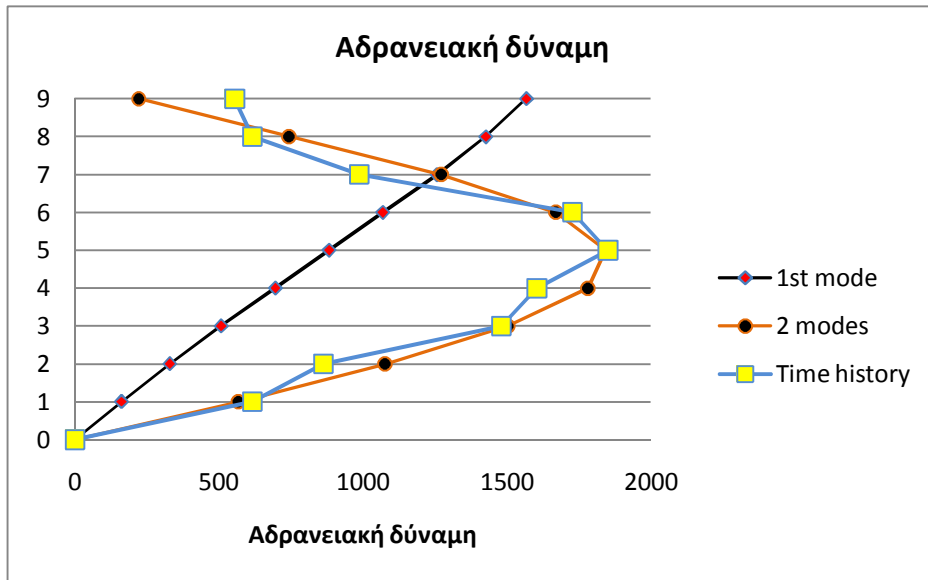
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 5.010                            | 3.627 | -0.82074   | -1.14533 | 1.83796   | 2.539528 |
| 2η ιδιομορφή | 8.655                            | 1.028 | -0.1273    | 0.073899 | 3.93933   | -2.17998 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.52: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.53: Σύγκριση αδραμειακών και τέμνουσών δυνάμεων





Σχήμα 5.54: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

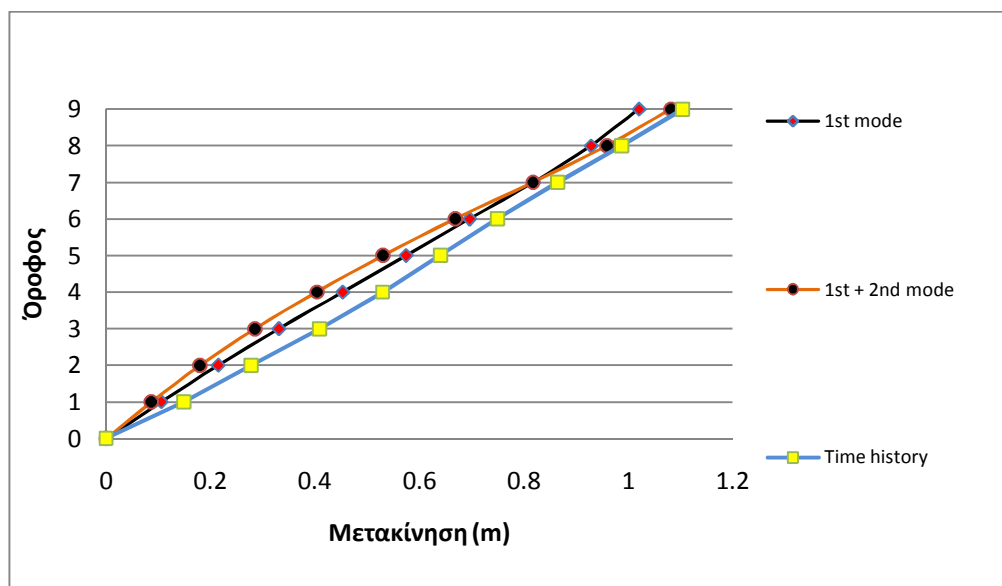
Η περίπτωση αυτής της σεισμικής διέγερσης παρουσιάζει κάποιες χονδροειδείς ομοιότητες με την προηγούμενη. Πιο συγκεκριμένα, στο φάσμα επιταχύνσεων φαίνεται ότι η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται κοντά στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης ενώ η πρώτη ιδιομορφή, αν και εμφανίζει μεγάλη τιμή του συντελεστή διαρροής  $R_y$ , βρίσκεται στο ομαλό φθίνον τμήμα του φάσματος. Ως εκ τούτου, η πρώτη ιδιομορφή επικαλύπτεται από τη μεγάλη συμμετοχή της δεύτερης ιδιομορφής.

**Σεισμική φόρτιση SCG-052**

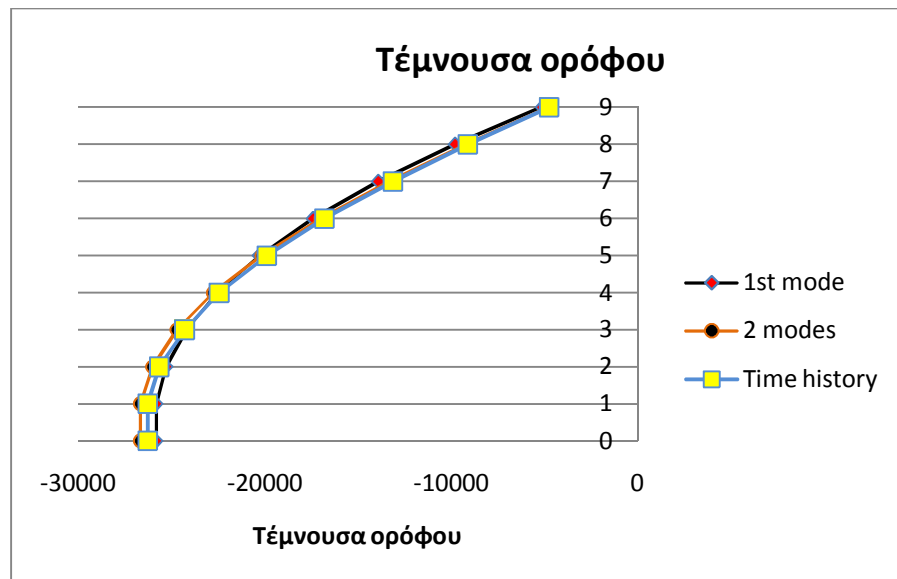
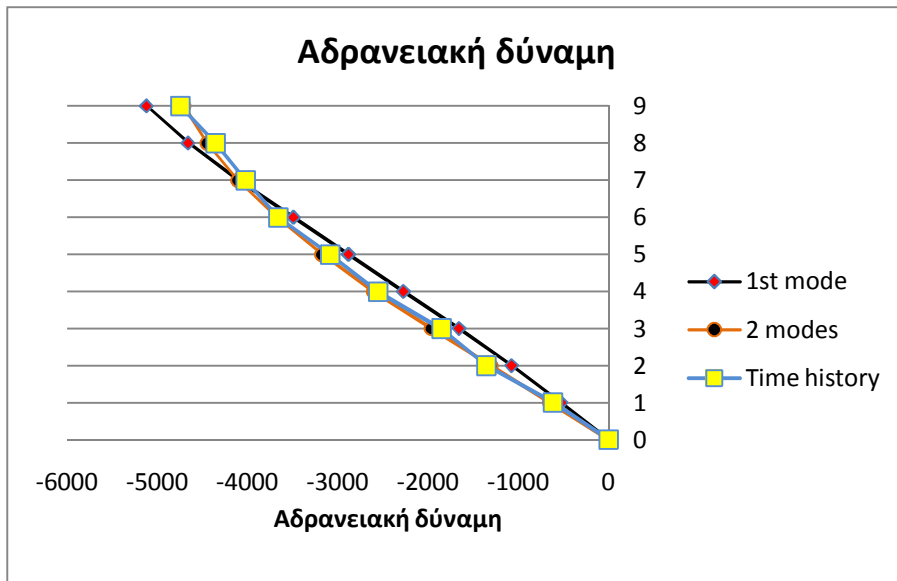
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 6.42                             | 4.653 | 0.731289   | 1.020502 | -6.00485  | -8.29696 |
| 2η ιδιομορφή | 15.94                            | 1.896 | -0.10579   | 0.061415 | -1.20641  | 0.667612 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.55: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.56: Σύγκριση αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.57: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

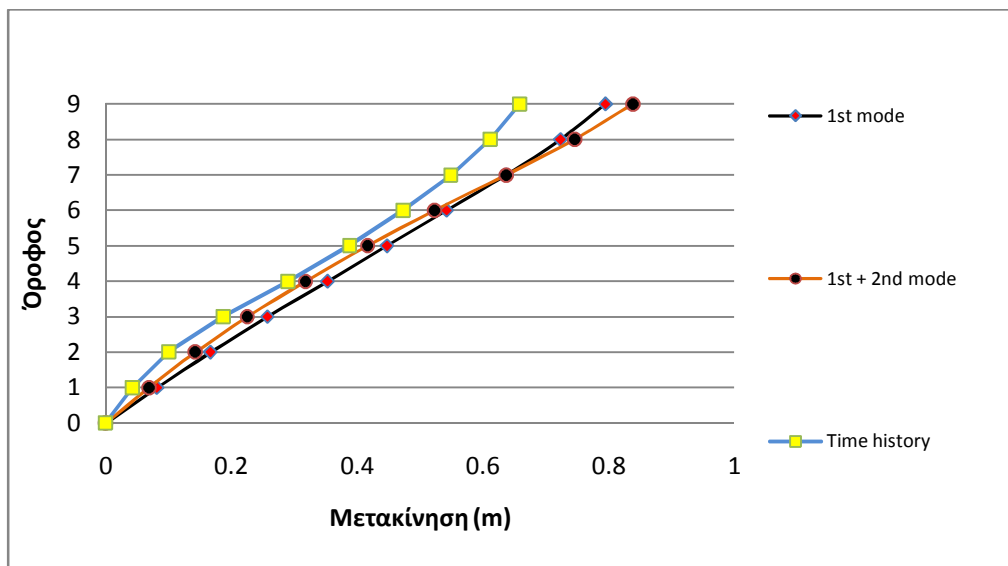
Σε αυτή τη σεισμική διέγερση βλέπουμε ότι και οι δύο ιδιομορφές έχουν εισέλθει στην πλαστική περιοχή. Συνεπώς είναι αναμενόμενο η απόκριση του φορέα να επηρεάζεται από τη δεύτερη ιδιομορφή. Από την κατανομή των δυνάμεων βλέπουμε ότι αυτό ισχύει. Παρατηρούμε όμως ότι η δεύτερη ιδιομορφή έχει μικρή συμβολή στο αποτέλεσμα, δηλαδή έχει μικρές τιμές σε σχέση με αυτές της πρώτης, γεγονός που μπορεί να αιτιολογηθεί από το ότι η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται σε ένα έντονα φθίνοντα κλάδο.

**Σεισμική φόρτιση SYH-090**

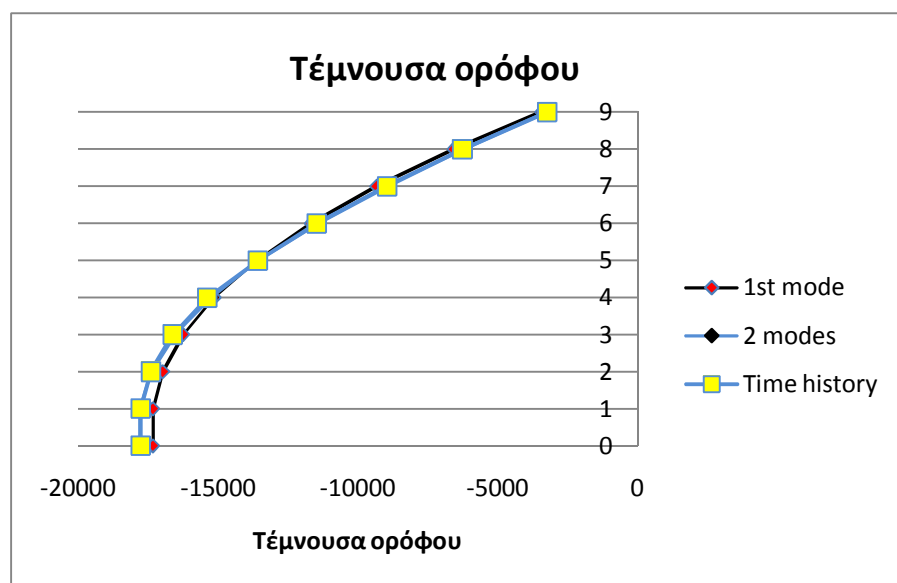
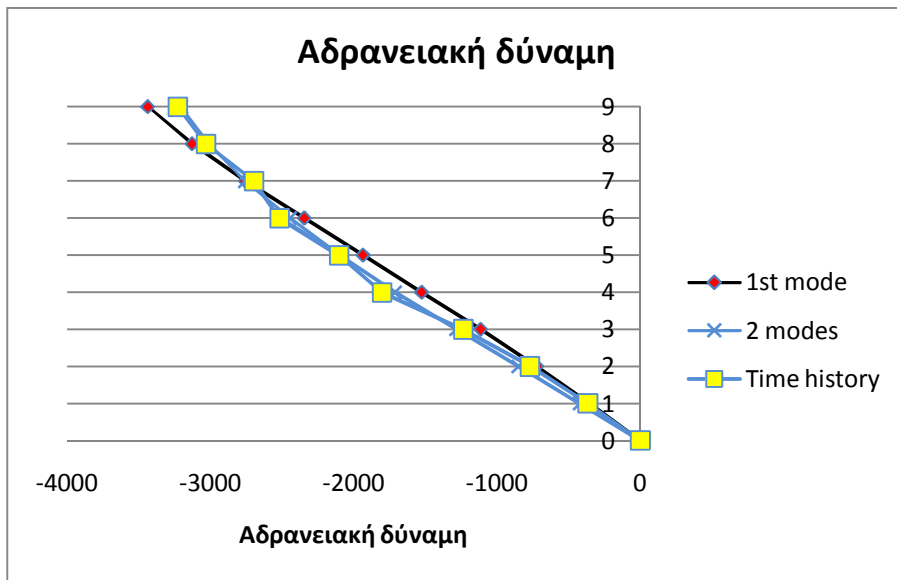
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 2.467                            | 1.786 | 0.569776   | 0.795113 | -4.03157  | -5.57046 |
| 2η ιδιομορφή | 4.551                            | 0.541 | -0.07504   | 0.043561 | -0.67364  | 0.372781 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.58: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.59: Σύγκριση αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.60: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

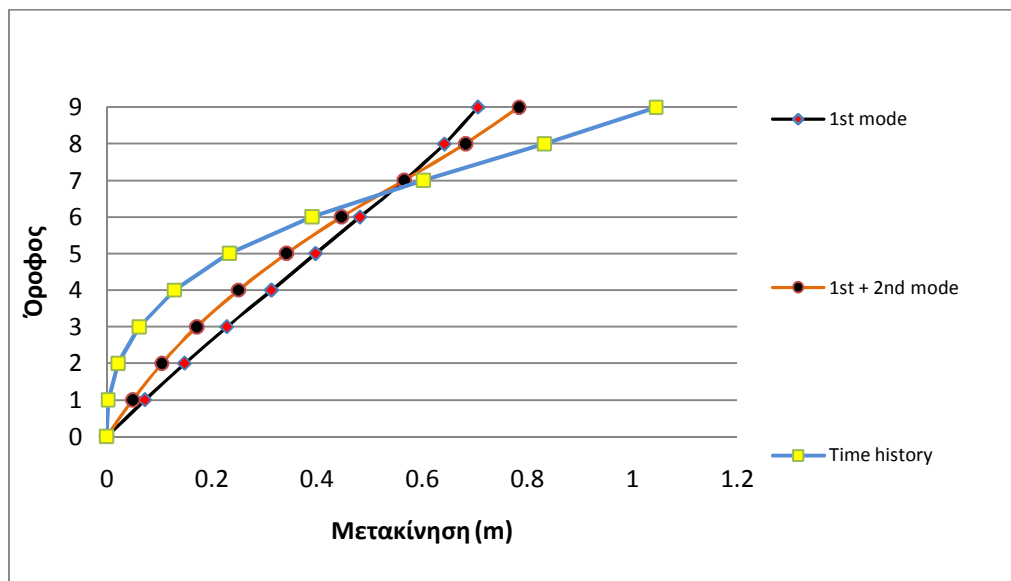
Σε αυτή την περίπτωση, οι δύο ιδιομορφές έχουν χαμηλές φασματικές τιμές, με την πρώτη ιδιομορφή να βρίσκεται στο φθίνοντα κλάδο ενώ η δεύτερη ιδιομορφή να είναι κοντά στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης. Δεν είναι ξεκάθαρο ποια ιδιομορφή επηρεάζει την κατανομή των δυνάμεων καθ' ύψος του φορέα αν και βλέπουμε στο φάσμα επιταχύνσεων ότι η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται σε ανοδικό κλάδο και ίσως αυτό να εξηγεί την τελική μορφή των δυνάμεων, που παρεκκλίνουν από την κατανομή της πρώτης ιδιομορφής.

**Σεισμική φόρτιση TAK-000**

Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

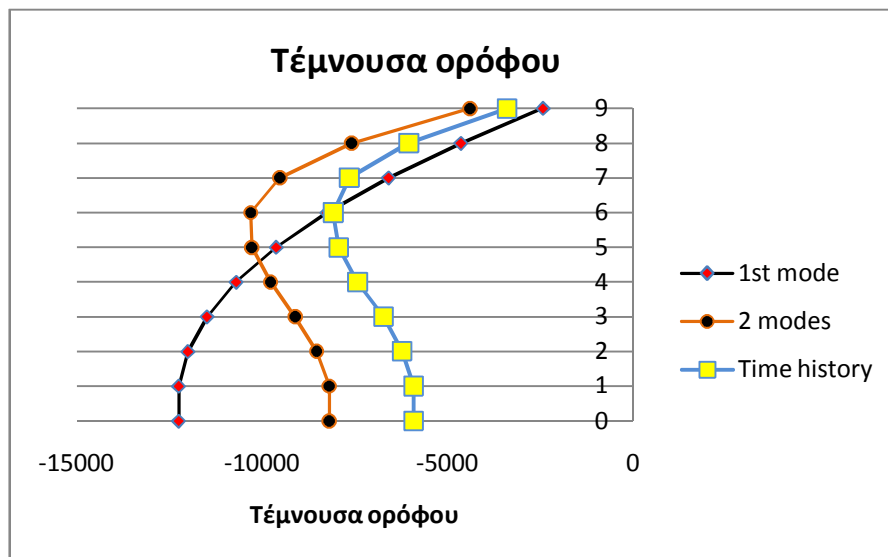
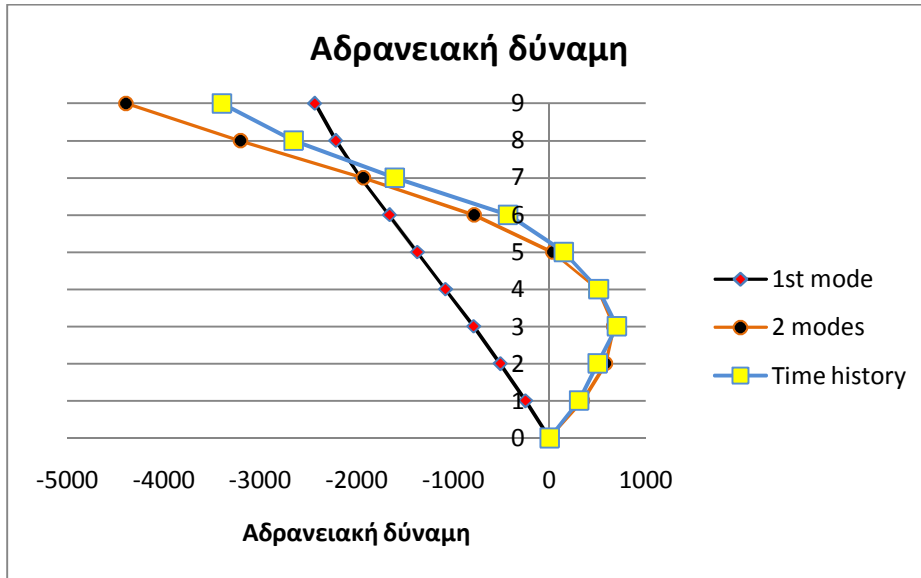
|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 2.553                            | 1.848 | 0.506471   | 0.706772 | -2.85192  | -3.94053 |
| 2η ιδιομορφή | 26.620                           | 3.163 | -0.13464   | 0.078163 | 5.73989   | -3.17638 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.

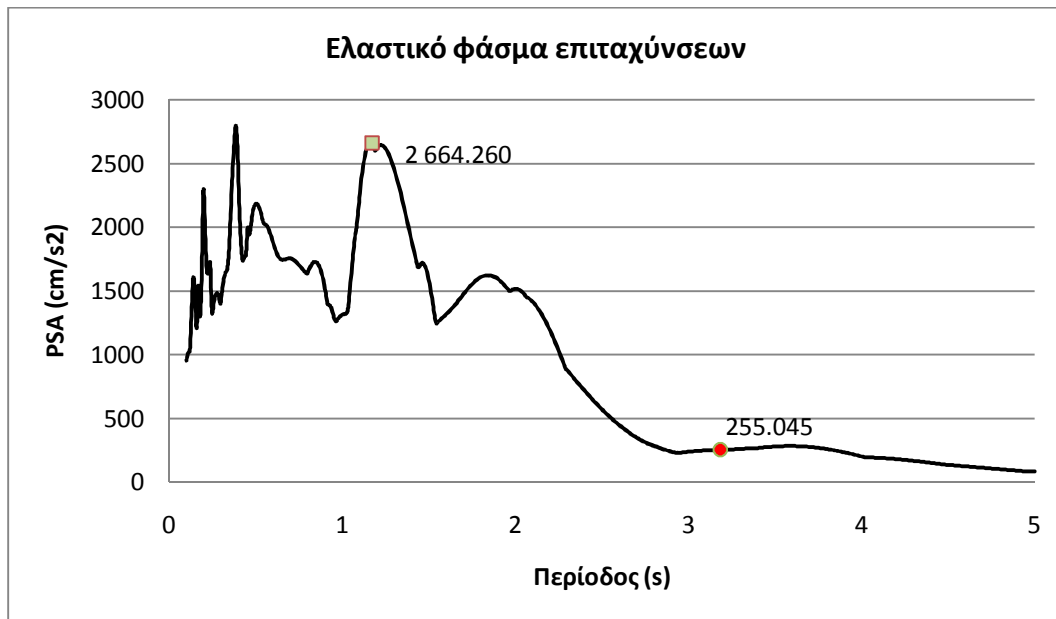


Σχήμα 5.61: Σύγκριση μετακινήσεων





Σχήμα 5.62: Σύγκριση αδρανηιακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.63: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

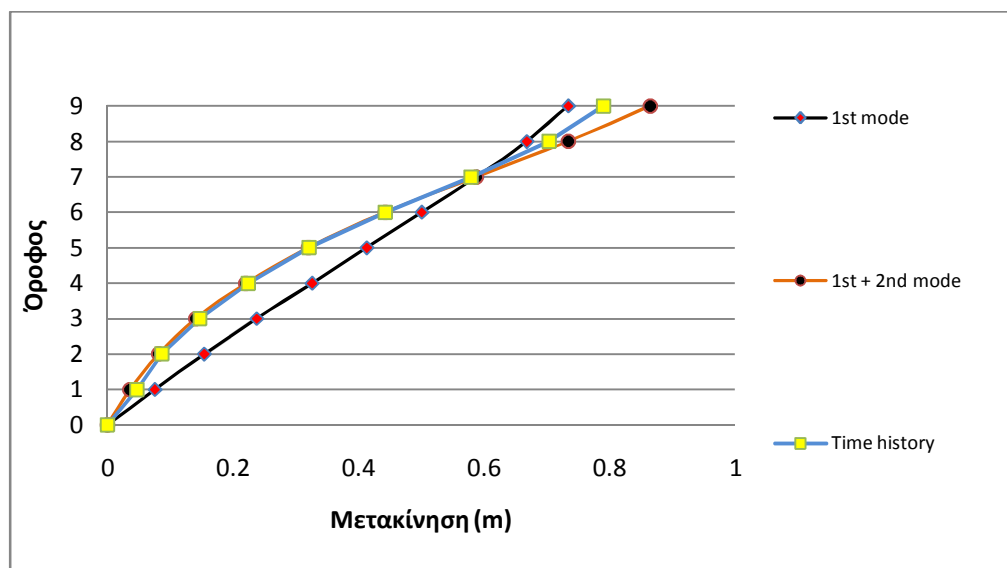
Σε αυτή τη σεισμική διέγερση φαίνεται καθαρά η συμμετοχή της δεύτερης ιδιομορφής στην κατανομή των δυνάμεων καθ' ύψος του φορέα. Αυτή η μορφή απόκρισης είναι αναμενόμενη αφενός επειδή και οι δύο ιδιομορφές εισάγονται στην πλαστική περιοχή, οπότε το αποτέλεσμα θα είναι σύμφωνο με τη σύνθεση των δύο ιδιομορφών. Αφετέρου, παρατηρώντας το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων, είναι φανερό ότι η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης ενώ η πρώτη ιδιομορφή βρίσκεται στον φθίνοντα κλάδο του φάσματος.

**Σεισμική φόρτιση TAK-090**

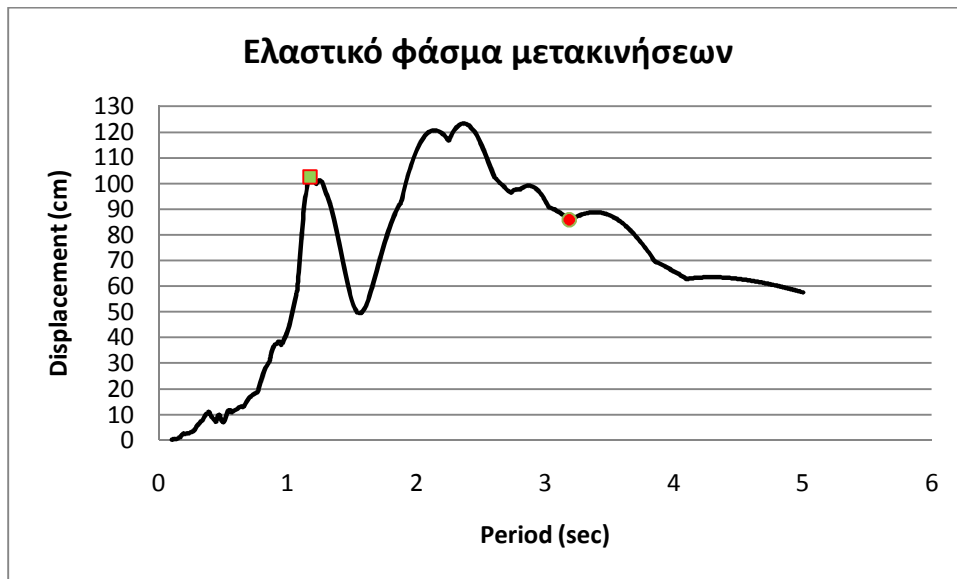
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 3.347                            | 2.423 | 0.526065   | 0.734115 | -1.21947  | -1.68495 |
| 2η ιδιομορφή | 29.53                            | 3.522 | -0.2245    | 0.130328 | 3.19926   | -1.77043 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.

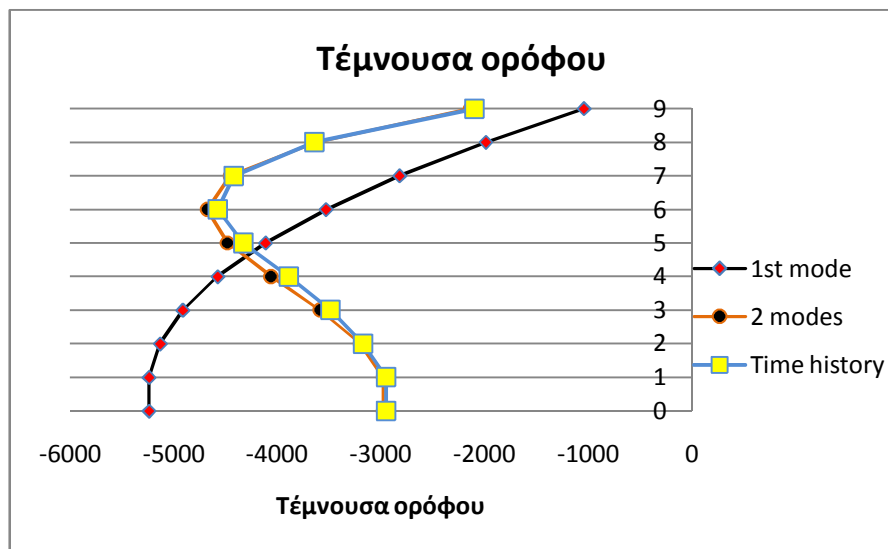
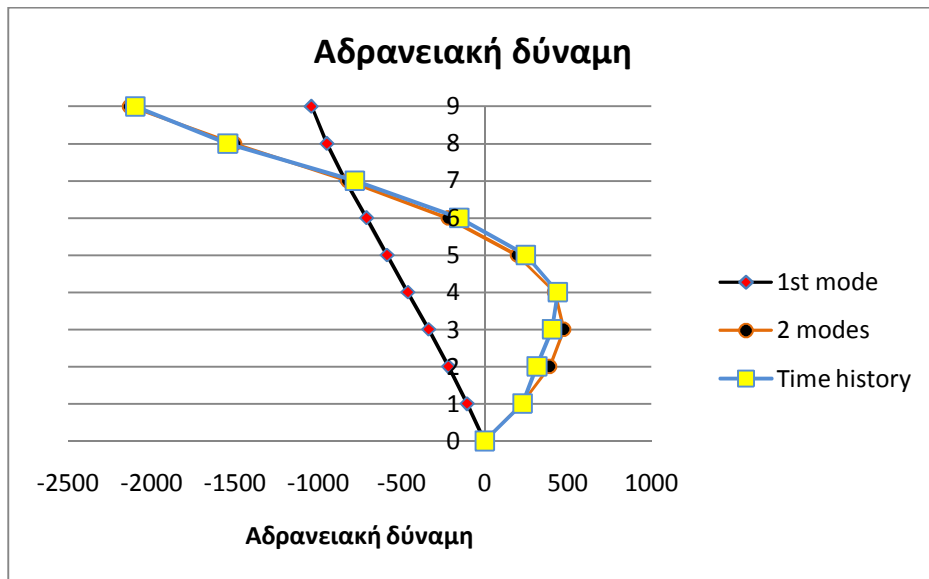


Σχήμα 5.64: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.65 Ελαστικό φάσμα μετακινήσεων

Βλέπουμε εδώ μια χαρακτηριστική περίπτωση όπου το φάσμα μετακινήσεων δικαιολογεί τη μορφή της απόκρισης του φορέα. Η μετακίνηση του φορέα επηρεάζεται σημαντικά από τη δεύτερη ιδιομορφή, γεγονός που αιτιολογείται από το ότι στη δεύτερη ιδιομορφή υπάρχει συντονισμός ενώ η πρώτη ιδιομορφή βρίσκεται στη φθίνουσα περιοχή του φάσματος.



Σχήμα 5.66: Σύγκριση αδραμειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.67: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

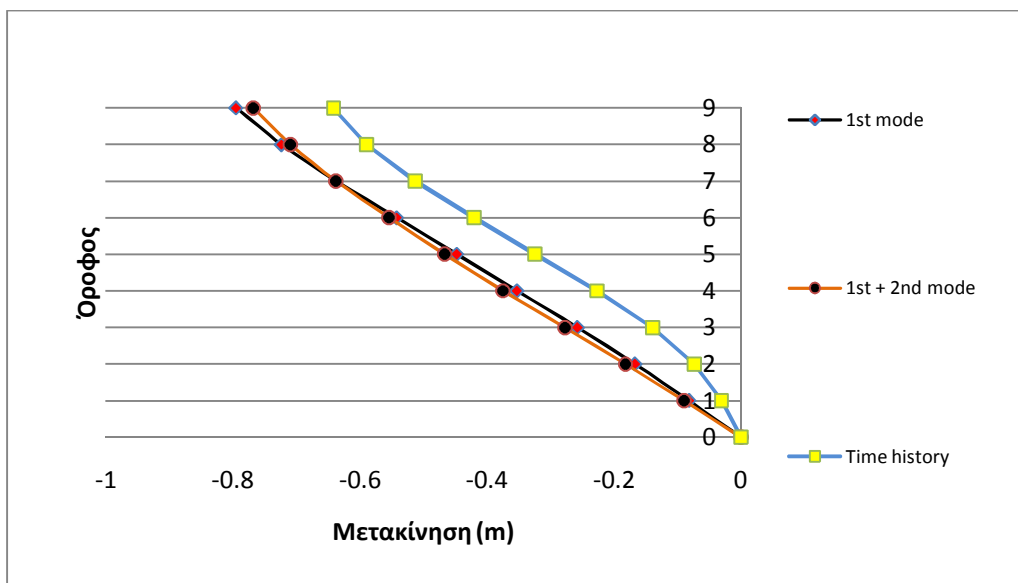
Ομοίως με την προηγούμενη σεισμική διέγερση, η επιρροή της δεύτερης ιδιομορφής είναι φανερά αιτιολογημένη από το φάσμα επιταχύνσεων.

**Σεισμική φόρτιση ΕΜΟ-000**

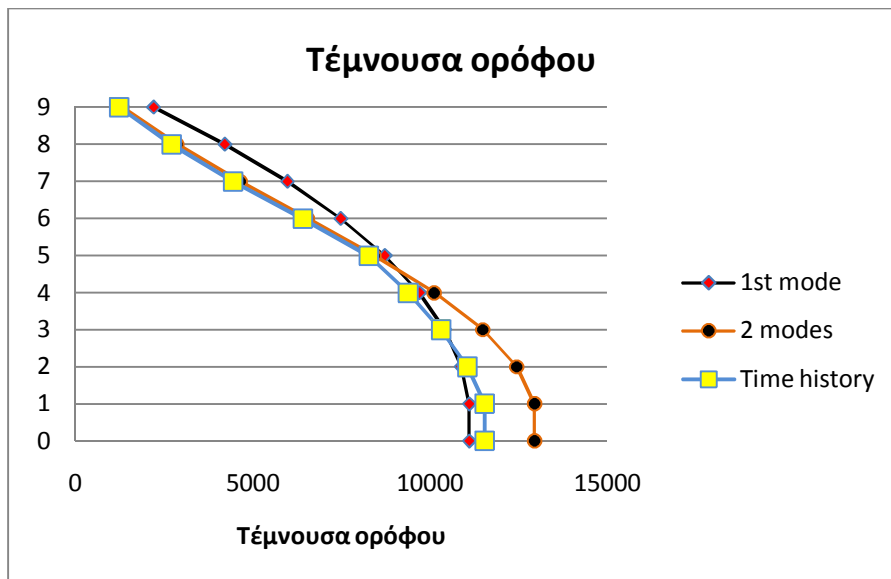
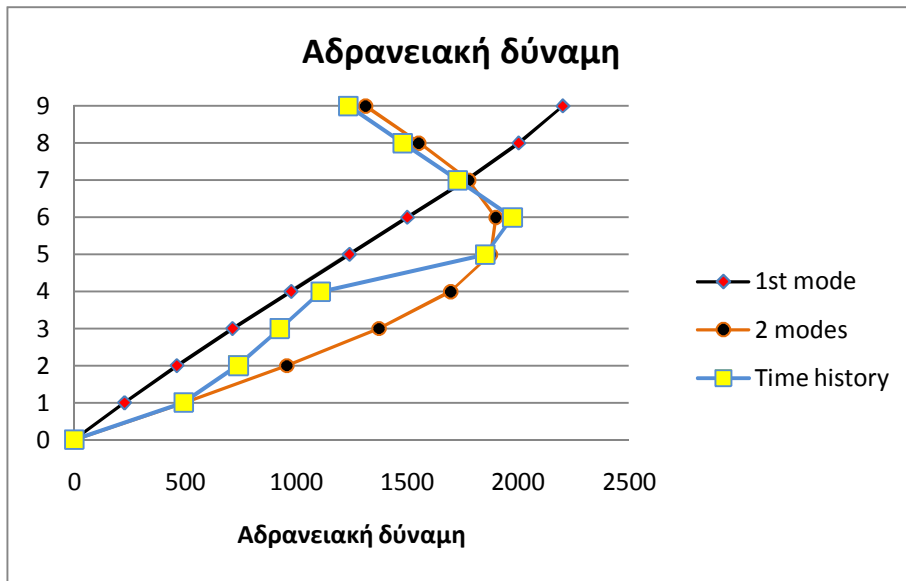
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | R <sub>γ</sub> | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|----------------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 2.24                             | 1.6            | -0.56951   | -0.79473 | -4.65945  | -6.43801 |
| 2η ιδιομορφή | 3.77                             | 0.449          | -0.0465    | 0.026997 | -5.12019  | 2.833449 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.68: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.69: Σύγκριση αδρανηϊακών και τεμνουσών δυνάμεων





Σχήμα 5.70: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

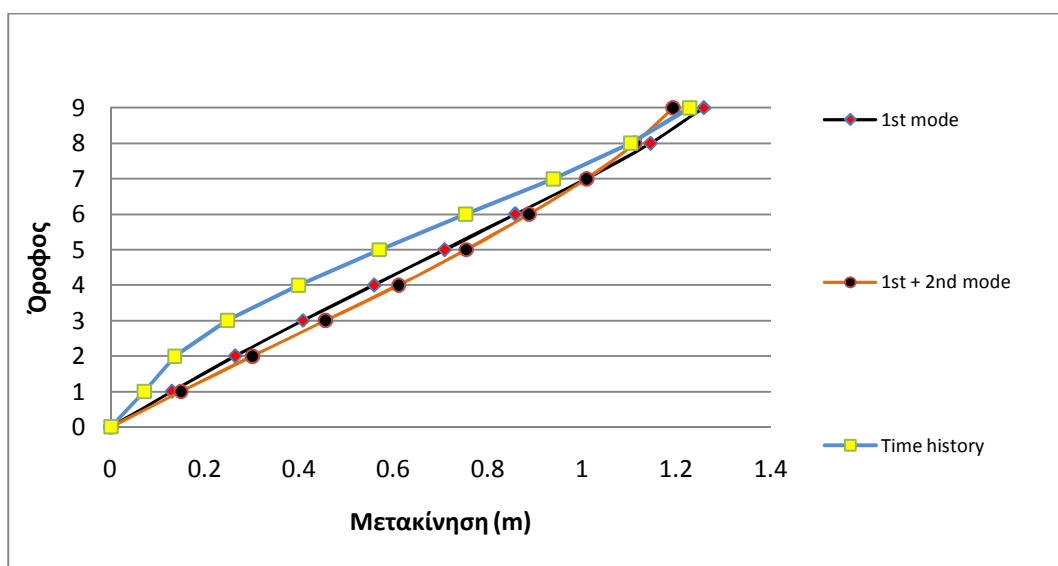
Σε αυτή τη σεισμική διέγερση παρατηρείται ότι η πρώτη ιδιομορφή εισέρχεται στην πλαστική περιοχή, ενώ η δεύτερη παραμένει ελαστική. Φαίνεται επίσης από το φάσμα επιταχύνσεων ότι και οι δύο ιδιομορφές βρίσκονται στην ίδια περιοχή του φάσματος, στη φθίνουσα. Επομένως δεν είναι σαφώς ορισμένο ποια ιδιομορφή επηρεάζει την κατανομή των δυνάμεων, όπως επίσης δεν φαίνεται ξεκάθαρα από τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων.

**Σεισμική φόρτιση ΕΜΟ-090**

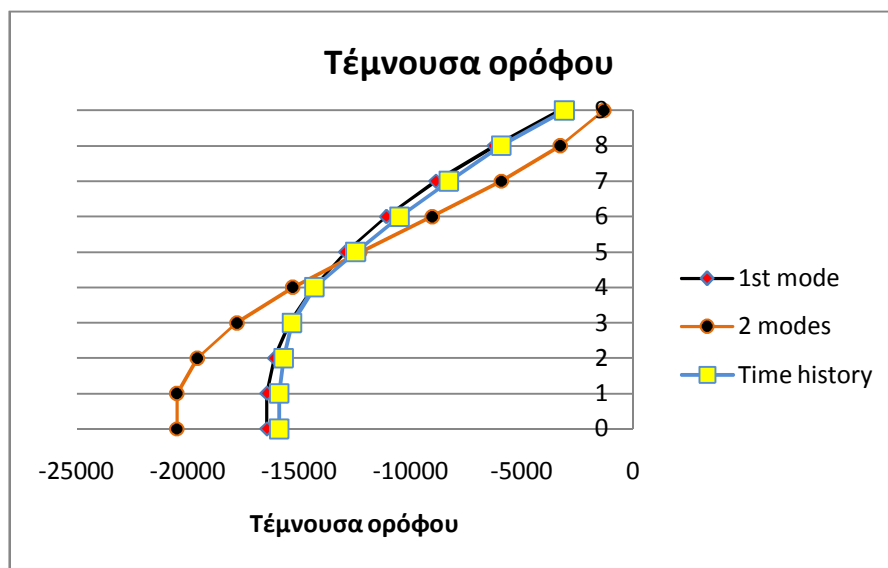
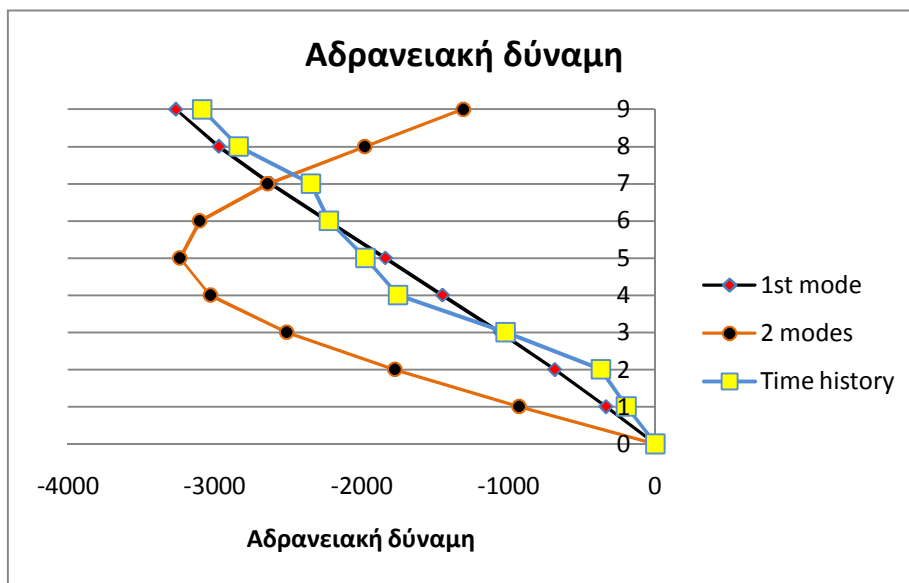
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_{\gamma}$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|--------------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 5.19                             | 3.763        | 0.901172   | 1.257571 | -3.82976  | -5.29162 |
| 2η ιδιομορφή | 5.34                             | 0.636        | 0.111614   | -0.06479 | -5.73413  | 3.173196 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.71: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.72: Σύγκριση αδρανηιακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.73: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

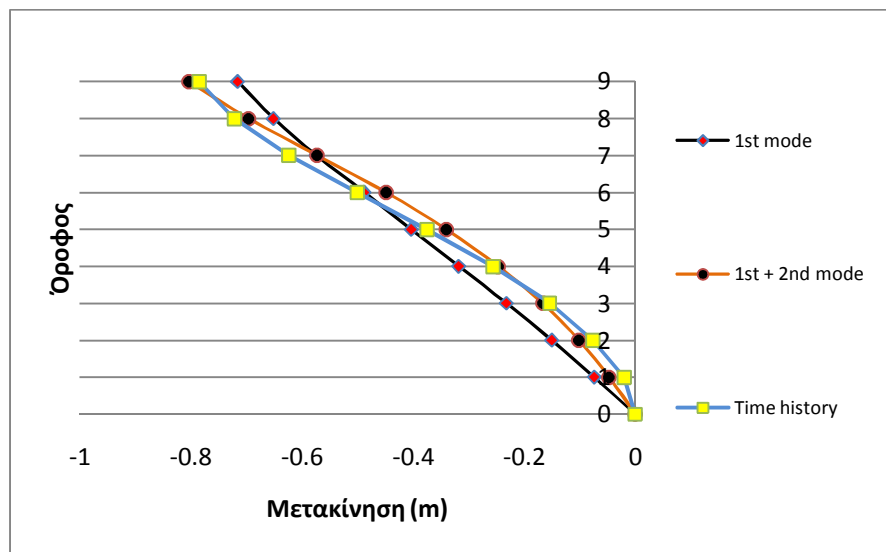
Σε αυτή τη σεισμική διέγερση, η κατανομή των δυνάμεων καθ' ύψος των ορόφων του φορέα γίνεται σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή. Αυτό είναι δικαιολογημένο από το φάσμα επιταχύνσεων αφού οι φασματικές τιμές είναι πρακτικά ίσες, με την πρώτη ιδιομορφή να πλαστικοποιείται ενώ τη δεύτερη να παραμένει στην ελαστική περιοχή.

**Σεισμική φόρτιση GA6-230**

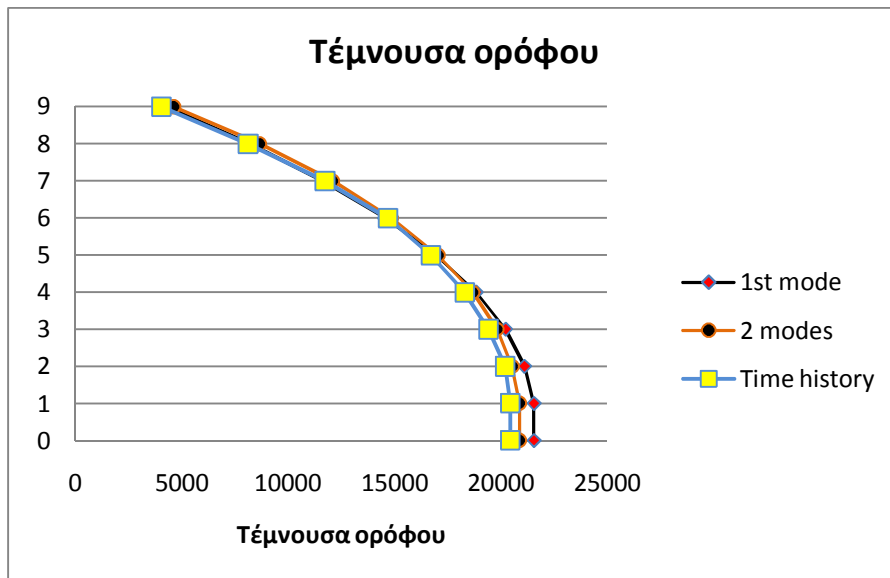
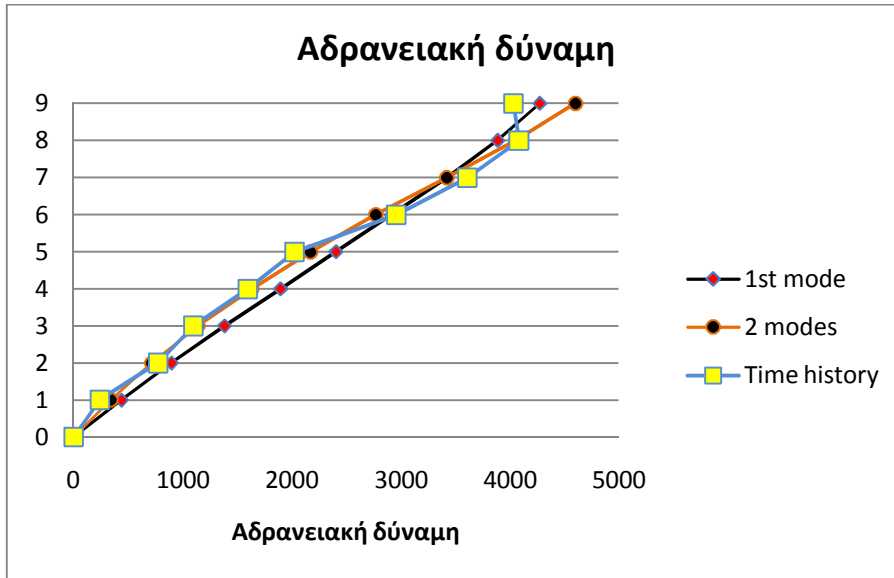
Η ανάλυση χρονοϊστορίας του μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

|              | $S_{a_{el}}$ (m/s <sup>2</sup> ) | $R_y$ | $\delta^*$ | $\Delta$ | $S_{a^*}$ | $S_a$    |
|--------------|----------------------------------|-------|------------|----------|-----------|----------|
| 1η ιδιομορφή | 2.371                            | 1.71  | -0.51259   | -0.71531 | 5.01265   | 6.926029 |
| 2η ιδιομορφή | 8.478                            | 1.01  | 0.151911   | -0.08819 | -0.95708  | 0.529638 |

Η κατανομή των μετακινήσεων και των αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων στους ορόφους φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.74: Σύγκριση μετακινήσεων



Σχήμα 5.75: Σύγκριση αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 5.76: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

Σε αυτή τη σεισμική διέγερση παρατηρούμε ότι η κατανομή των δυνάμεων ακολουθεί τη δεύτερη ιδιομορφή. Παρατηρώντας το φάσμα των επιταχύνσεων, βλέπουμε ότι η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης, ενώ η πρώτη ιδιομορφή βρίσκεται στο φθίνοντα κλάδο. Οπότε, ομοίως με πολλές άλλες περιπτώσεις που είδαμε παραπάνω, η δεύτερη ιδιομορφή συμμετέχει στην κατανομή των δυνάμεων. Ίσως η μικρή τιμή του συντελεστή διαρροής να εξηγεί το γεγονός ότι η δεύτερη ιδιομορφή δεν εκτρέπει αρκετά την κατανομή από τη μορφή της πρώτης ιδιομορφής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Σύνοψη - Συμπεράσματα

#### 6.1 Γενικά

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της συμμετοχής ανώτερων ιδιομορφών στην απόκριση ενός εννιαώροφου φορέα σε σεισμικές διεγέρσεις εγγύς πεδίου και η αξιολόγηση της ιδιομορφικής ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης ως προς τα αποτελέσματα της σε σχέση με την ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας. Η πιο ακριβής μέθοδος μέχρι σήμερα φαίνεται να είναι η ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας. Παρόλ'αυτά, ο μεγάλος υπολογιστικός φόρτος και ο χρόνος που απαιτεί αυτού του είδους η ανάλυση αναγκάζει τους μελετητές να στραφούν σε άλλες μεθόδους. Η πιο προσφάτως ανεπτυγμένη μέθοδος είναι η ιδιομορφική υπερωθητική ανάλυση, η οποία λαμβάνει υπ'όψη περισσότερες από την επικρατούσα ιδιομορφές.

#### 6.2 Μεθοδολογία

Προκειμένου να διερευνηθεί η συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών εφεαρμόστηκαν δύο μέθοδοι, η ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας του πολυβάθμιου φορέα και η ιδιομορφική ανελαστική δυναμική ανάλυση. Ο φορέας που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα εννιαώροφο μεταλλικό πλαίσιο, σχεδιασμένο για το Seattle της Αμερικής, με βάση τις Post-Northridge οδηγίες.

Αρχικά, γίνεται η ανάλυση του πολυβάθμιου φορέα, υπολογίζονται οι ιδιοπερίοδοι και ιδιομορφές και στη συνέχεια διεξάγονται ανελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας. Από αυτές υπολογίζονται οι μετακινήσεις και οι επιταχύνσεις. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνονται οι μετακινήσεις και οι επιταχύνσεις καθ'ύψος των ορόφων, τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετακίνησης στον ανώτερο όροφο.



Στη συνέχεια ακολουθεί η ιδιομορφική ανελαστική δυναμική ανάλυση για τον υπολογισμό των μεγεθών. Τα βήματα αυτής είναι τα εξής:

1. Για την n-ιδιομορφή κάνουμε pushover analysis και βρίσκουμε την καμπύλη αντίστασης.
2. Μετατροπή της καμπύλης αντίστασης σε ιδεατό διγραμμικό διάγραμμα αντίστασης.
3. Μετατροπή του ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος σε ιδεατό διγραμμικό διάγραμμα αντίστασης ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Βρίσκουμε επιτάχυνση και μετακίνηση διαρροής ισοδύναμου μονοβάθμιου.
4. Ελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας ισοδύναμου μονοβάθμιου με το πρόγραμμα Bispec. Υπολογισμός του συντελεστή διαρροής  $R_y$  της n-ιδιομορφής.
5. Ανελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας ισοδύναμου μονοβάθμιου με δεδομένους συντελεστές  $R_y$ , στο Bispec από όπου λαμβάνουμε τις τιμές για την πρώτη ιδιομορφή :
  - Μετακίνηση, τη χρονική στιγμή όπου εμφανίζεται τοπικό μέγιστο, κοντά στη χρονική στιγμή όπου εμφανίζεται η μέγιστη μετακίνηση από την ανάλυση χρονοϊστορίας του πολυβάθμιου συστήματος στο SAP.
  - Επιτάχυνση, την ίδια χρονική στιγμή.Για τις υπόλοιπες ιδιομορφές λαμβάνουμε τις ταυτόχρονες τιμές, δηλαδή τις τιμές για τη χρονική στιγμή που πήραμε στην πρώτη ιδιομορφή.
6. Σύνθεση των τιμών για όλες τις ιδιομορφές με απλή πρόσθεση, διατηρώντας τα πρόσημα.
7. Σύγκριση των αποτελεσμάτων σε διάγραμμα όπου φαίνονται:
  - Οι τιμές της πρώτης ιδιομορφής καθ' ύψος του κτηρίου
  - Οι τιμές της σύνθεσης της πρώτης με τη δεύτερη ιδιομορφή καθ' ύψος του κτηρίου.
  - .....
  - Οι τιμές της σύνθεσης όλων των ιδιομορφών καθ' ύψος του κτηρίου.
  - Οι τιμές που προκύπτουν από την ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας του πολυβάθμιου συστήματος.

Οι ιδιομορφές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είναι οι δύο πρώτες, καθώς θεωρήθηκε ότι οι ανώτερες δεν συμμετέχουν στην απόκριση του κτηρίου λόγω της πολύ μικρής ιδιοπεριόδου τους.

### **6.3 Αποτελέσματα**

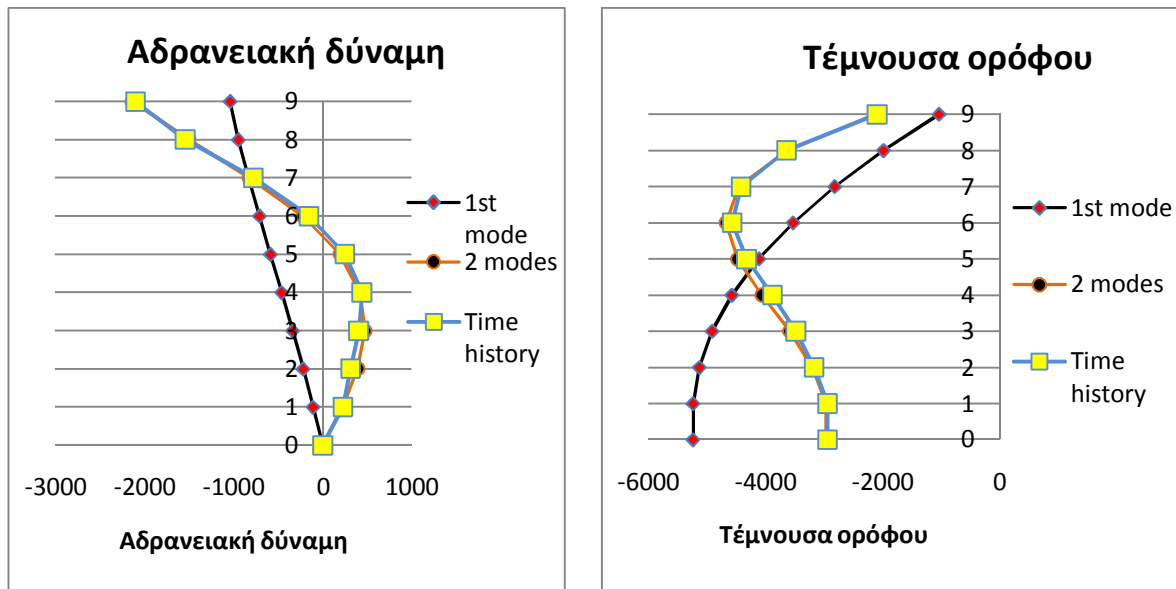
Από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν, προέκυψαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα που καταδεικνύουν τη σημαντική επιρροή της δεύτερης ιδιομορφής στην απόκριση του φορέα, κυρίως όσο αφορά στις δυνάμεις. Θα αναφερθούν κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Όσον αφορά στις μετακινήσεις, τα αποτελέσματα δεν δίνουν μια σαφή απάντηση για τη συμμετοχή της δεύτερης ιδιομορφής στην απόκριση της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, η δεύτερη ιδιομορφή συμμετέχει στην απόκριση του φορέα σε 12 από τους 23 σεισμούς που αναλύθηκαν.

Οι κατανομές των αδρανειακών φορτίων και των τεμνουσών δυνάμεων καθ' ύψος του φορέα δείχνουν με σαφήνεια την ενεργή συμμετοχή της δεύτερης ιδιομορφής στα αποτελέσματα των σεισμικών διεγέρσεων. Αναλυτικότερα, σε 19 από τους 23 σεισμούς που αναλύθηκαν, η δεύτερη ιδιομορφή συμμετέχει στην κατανομή των δυνάμεων.

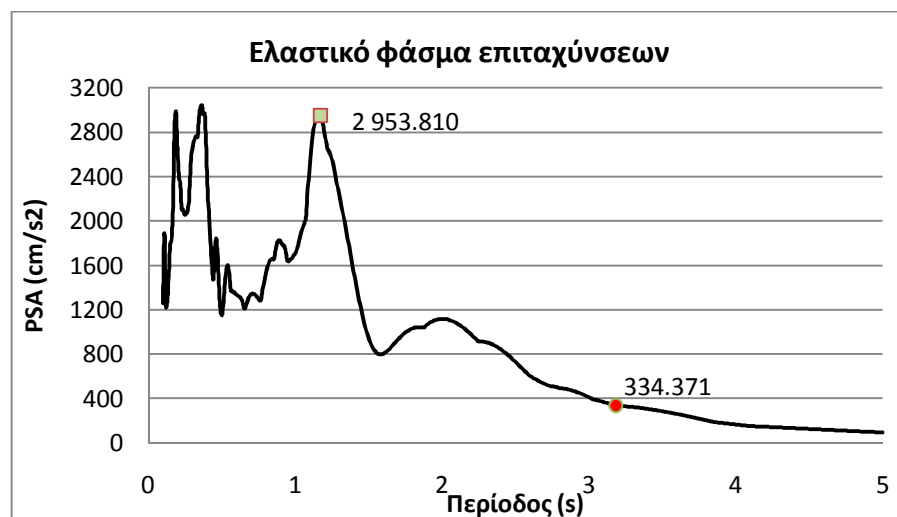
Αρχικά, θα αναφερθούμε σε σεισμικές διεγέρσεις στις οποίες οι δύο ιδιομορφές εισέρχονται στην πλαστική περιοχή με μεγάλους συντελεστές διαρροής. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η σεισμική διέγερση στην πόλη Kobe της Ιαπωνίας, στο σταθμό Takatori, TAK-090. Σε αυτή τη σεισμική διέγερση, οι δύο ιδιομορφές εισάγονται στην πλαστική περιοχή με συντελεστές  $R_y$  ίσους με 2,42 και 3,52

για την πρώτη και δεύτερη ιδιομορφή. Οι κατανομές των δυνάμεων, όπως είδαμε και στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων (κεφάλαιο 5) είναι:



Σχήμα 6.1: Σύγκριση αδρανηϊακών και τεμνουσών δυνάμεων

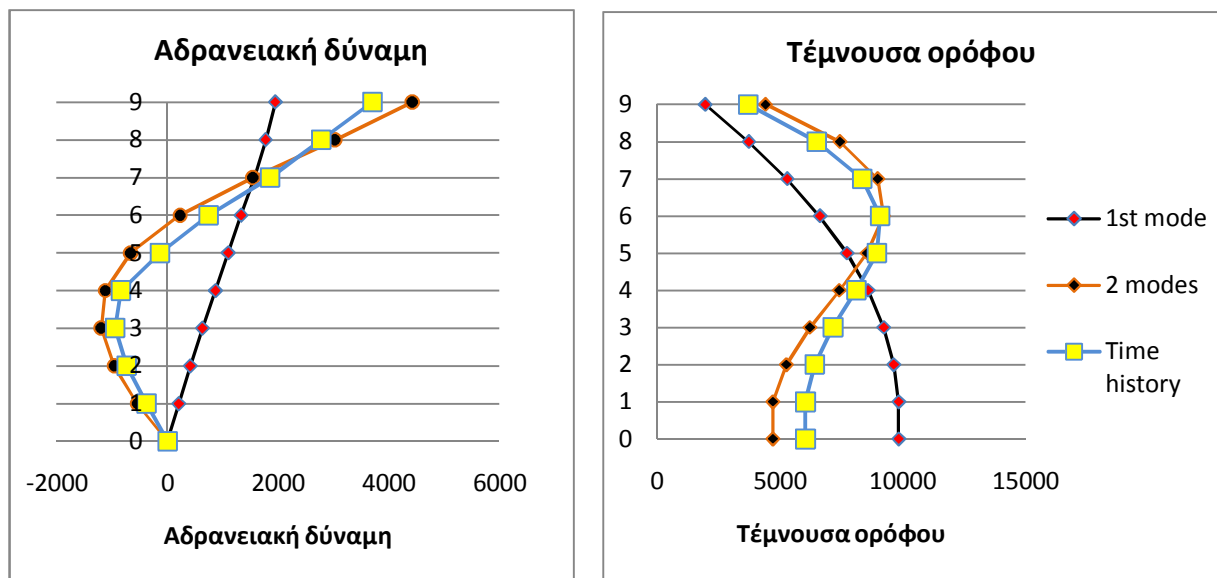
Από το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων είναι φανερή η αιτία της μεγάλης συμμετοχής της δεύτερης ιδιομορφής στην απόκριση του φορέα.



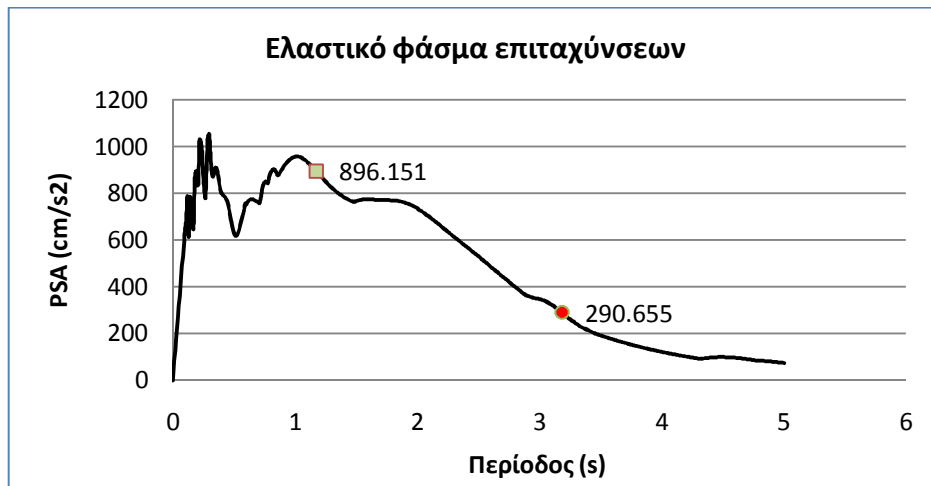
Σχήμα 6.2: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

Βλέπουμε ότι η πρώτη ιδιομορφή βρίσκεται στο φθίνοντα κλάδο του φάσματος επιταχύνσεων ενώ η δεύτερη ιδιομορφή είναι στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης. Είναι λοιπόν φανερό ότι η δεύτερη ιδιομορφή συμμετέχει, επηρεάζει και υπερισχύει της πρώτης ιδιομορφής ως προς την κατανομή των δυνάμεων καθ' ύψος των ορόφων.

Σε άλλες σεισμικές διεγέρσεις, η πρώτη ιδιομορφή εισέρχεται στην πλαστική περιοχή με ικανοποιητικό συντελεστή διαρροής  $R_y$ , μεγαλύτερο του 1,5, και η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται στο όριο της πλαστικής περιοχής με συντελεστές κοντά στη μονάδα. Μια χαρακτηριστική σεισμική διέγερση αυτής της κατηγορίας είναι αυτή που έγινε στην πόλη Erzincan της Τουρκίας και καταγράφηκε από το σταθμό ERZ-000. Σε αυτό το σεισμό, οι συντελεστές διαρροής για την πρώτη και τη δεύτερη ιδιομορφή είναι 2,105 και 1,065 αντίστοιχα.



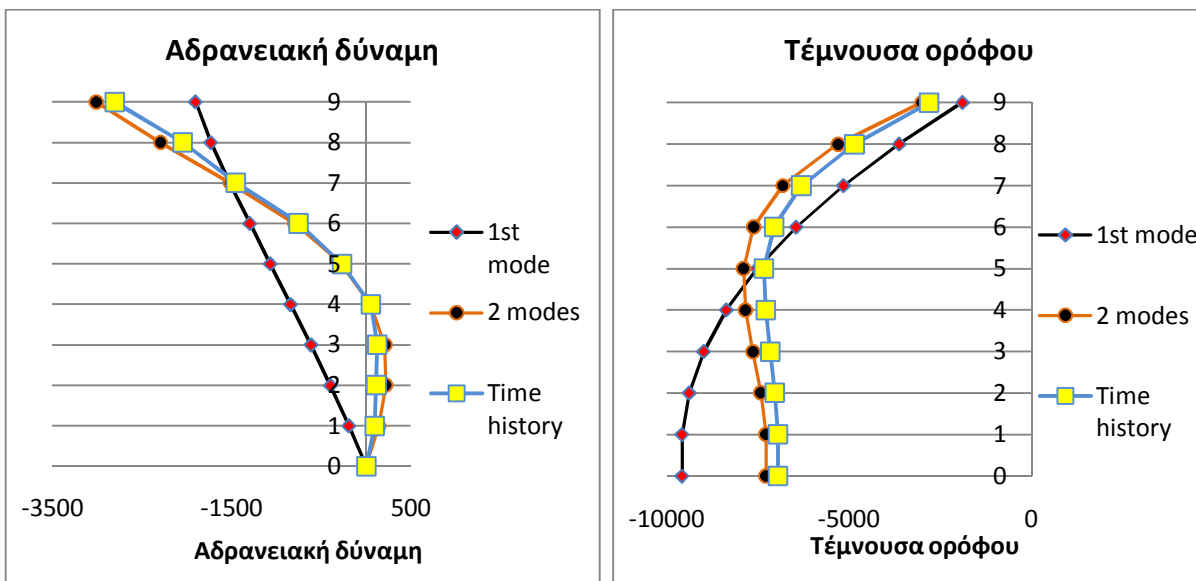
Σχήμα 6.3: Σύγκριση αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων



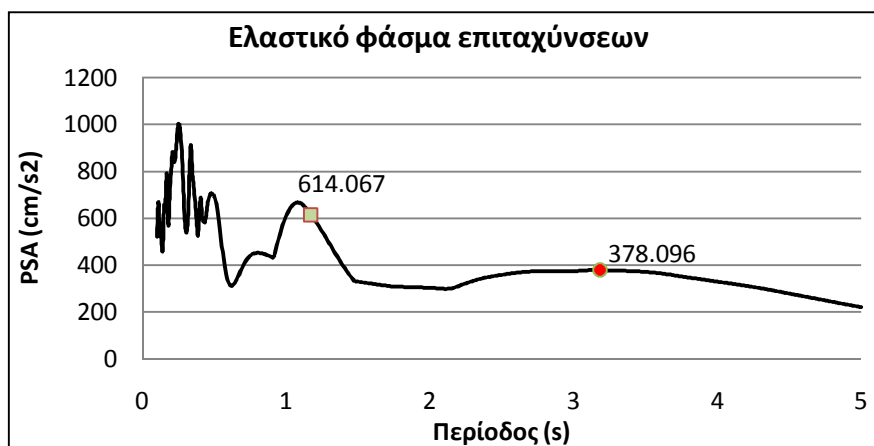
Σχήμα 6.4: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

Το φάσμα επιταχύνσεων δικαιολογεί τη συμμετοχή της δεύτερης ιδιομορφής καθώς είναι φανερό ότι η δεύτερη ιδιομορφή βρίσκεται στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης και επίσης η φασματική τιμή της είναι τριπλάσια της τιμής της πρώτης ιδιομορφής. Επομένως είναι αιτιολογημένη η μεγάλη συμμετοχή της δεύτερης ιδιομορφής στην κατανομή των δυνάμεων.

Μία άλλη περίπτωση που αναλύθηκε ήταν σεισμοί στους οποίους η πρώτη ιδιομορφή εισέρχεται στην πλαστική περιοχή ενώ η δεύτερη παραμένει ελαστική ενώ συμμετέχει ενεργά στην απόκριση του φορέα. Επί παραδείγματι, στη σεισμική διέγερση του Imperial Valley στις Η.Π.Α., στο σταθμό E04-230 η δεύτερη ιδιομορφή συμμετέχει στην κατανομή των δυνάμεων του φορέα ενώ δεν εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Συγκεκριμένα, οι συντελεστές διαρροής είναι 1,67 και 0,616 για την πρώτη και τη δεύτερη ιδιομορφή αντίστοιχα. Οι κατανομές των δυνάμεων φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 6.5: Σύγκριση αδρανειακών και τεμνουσών δυνάμεων



Σχήμα 6.6: Ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων

Βλέπουμε ότι και πάλι είναι φανερό ότι η δεύτερη ιδιομορφή υπερτερεί σε σχέση με την πρώτη. Είναι φανερή η αιτία του φαινομένου καθώς η φασματική τιμή της δεύτερης ιδιομορφής είναι αρκετά μεγαλύτερη της πρώτης οπότε και η συμμετοχή της θα είναι σημαντική στην κατανομή των δυνάμεων.

Τέλος υπάρχουν και κάποιες σεισμικές διεγέρσεις στις οποίες οι φασματικές τιμές των ιδιομορφών είναι παραπλήσιες και εκεί επικρατεί η πρώτη ιδιομορφή.

Συνολικά, από τις 23 σεισμικές διεγέρσεις, οι 19 ακολουθούν τη μορφή της σύνθεσης των δύο ιδιομορφών. Δηλαδή, σε ποσοστό 83% των σεισμικών διεγέρσεων, η δεύτερη ιδιομορφή έχει σημαντική συμμετοχή στην κατανομή των δυνάμεων του φορέα.

#### **6.4 Συμπεράσματα**

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα και τα φάσματα επιταχύνσεων των σεισμικών διεγέρσεων καταλαβαίνουμε ότι η δεύτερη ιδιομορφή συμμετέχει σημαντικά στην απόκριση του εννιαώροφου φορέα. Οι παράγοντες που καθορίζουν τη συμμετοχή της, σύμφωνα με αυτά που αναλύθηκαν παραπάνω είναι οι φασματικές τιμές των δύο ιδιομορφών καθώς επίσης και η περιοχή του φάσματος στην οποία βρίσκονται οι ιδιομορφές.

Αναλυτικότερα, είδαμε ότι σε σεισμικές διεγέρσεις όπου η δεύτερη ιδιομορφή είχε μεγάλη συμμετοχή, η φασματική τιμή αυτής ήταν πολλαπλάσια της φασματικής τιμής της πρώτης ιδιομορφής, τόσο μεγαλύτερη που ξεπερνά και τη διαφορά των συντελεστών συμμετοχής των δύο ιδιομορφών. Είναι λοιπόν αναμενόμενη η συμμετοχή της δεύτερης ιδιομορφής. Συνεπώς, ένας δείκτης που καθορίζει τη συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών είναι ο συντελεστής  $R_y$  καθώς και η φασματική τιμή της ιδιομορφής σε σχέση με τη φασματική τιμή της πρώτης ιδιομορφής.

Ο άλλος παράγοντας, που είδαμε παραπάνω ότι επηρεάζει το αποτέλεσμα, είναι η περιοχή του φάσματος στην οποία βρίσκεται η κάθε ιδιομορφή. Δηλαδή, ενδιαφέρει εάν η ιδιομορφή πέφτει στην περιοχή του φάσματος όπου γίνεται η φασματική ενίσχυση ή στην ομαλή περιοχή του φάσματος όπου φθίνουν οι τιμές των επιταχύνσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η δεύτερη ιδιομορφή βρισκόταν στην περιοχή φασματικής ενίσχυσης ενώ η πρώτη βρισκόταν στο φθίνοντα κλάδο του ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων. Αυτό συμβαίνει καθώς η ιδιοπερίοδος της πρώτης ιδιομορφής είναι αρκετά μεγάλη, οπότε σχεδόν πάντα βρίσκεται σε πολύ χαμηλές φασματικές τιμές, στο φθίνοντα κλάδο του φάσματος. Αντιθέτως, ιδιοπερίοδος της δεύτερης ιδιομορφής είναι υποδιπλάσια της πρώτης, με συνέπεια να βρίσκεται στην περιοχή σταθερής φασματικής ταχύτητας ( φασματικής ενίσχυσης).

Γενικεύοντας λοιπόν τα συμπεράσματα, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι τα πολυώροφα κτήρια είναι αναμενόμενο να έχουν μεγάλες ιδιοπεριόδους, με συνέπεια να βρίσκονται σε περιοχές με χαμηλές φασματικές τιμές και να αυξάνεται η συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών που έχουν μικρότερες ιδιοπεριόδους. Βλέπουμε δηλαδή ότι,

ανεξάρτητα σχεδόν από το αν πλαστικοποιείται ή όχι μία ιδιομορφή, είναι δυνατόν να συμμετέχει στην απόκριση της κατασκευής ανάλογα με την ιδιοπερίοδό της.

Όσον αφορά τη μέθοδο ιδιομορφικής ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, φαίνεται να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων αυτής με τα αποτελέσματα της ανελαστικής ανάλυσης χρονοϊστορίας του πολυβάθμιου φορέα.

Αναλυτικότερα, σε 20 από τους 23 σεισμούς, η μέθοδος υπολογίζει την κατανομή των δυνάμεων στους ορόφους με μικρές αποκλίσεις. Στις μετακινήσεις, τα αποτελέσματα δεν ήταν τόσο ενθαρρυντικά καθώς η μέθοδος προέβλεψε τις ορθές αποκρίσεις του φορέα σε 12 από τις 23 σεισμικές διεγέρσεις. Συνεπώς, μπορούμε να πούμε ότι όσον αφορά την κατανομή των δυνάμεων, η μέθοδος αυτή έχει σύγκλιση με τα πραγματικά αποτελέσματα, με μικρές συνήθως αποκλίσεις.

Το συμπέρασμα αυτό είναι αρκετά ενθαρρυντικό καθώς αρχίζει να φαίνεται η πιθανότητα αξιοποίησης της μεθόδου αυτής ή κάποιας ακόμη περισσότερο βελτιωμένης από αυτήν, η οποία είναι αρκετά πιο γρήγορη από την ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας πολυβάθμιων συστημάτων. Επίσης έχει μικρότερο υπολογιστικό φόρτο και προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια. Είναι γνωστό βέβαια ότι γίνονται προσπάθειες βελτίωσης της ίδιας με σκοπό την μεγαλύτερη ακρίβεια.

Οι σκέψεις επίσης θα πρέπει να στραφούν στην ανάγκη θεώρησης της συμμετοχής των ανώτερων ιδιομορφών. Πιο συγκεκριμένα, είναι φανερό, μέσω αυτής της εργασίας, ότι η συμμετοχή της δεύτερης ιδιομορφής συγκεκριμένα, σε πολυώροφα κτήρια, δεν πρέπει να αμελείται. Όπως φάνηκε παραπάνω, η δεύτερη ιδιομορφή είναι αναμενόμενο να επηρεάσει σημαντικά την απόκριση του φορέα. Συνεπώς, οι μελετητές θα πρέπει να λαμβάνουν υπ' όψη τη συμμετοχή αυτής ή και άλλων ιδιομορφών. Ίσως, η χρήση διαφορετικού συντελεστή συμπεριφοράς για κάθε ιδιομορφή να πρέπει να εξεταστεί σαν πιθανή λύση ώστε να λαμβάνονται υπ' όψη οι ιδιομορφές και να υπολογίζεται ορθότερα η συμβολή των ανώτερων ιδιομορφών στον υπολογισμό της αναμενόμενης απόκρισης πολυώροφων κτηρίων.



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

| A/A | Σταθμός-Οριζόντια συνιστώσα | Σεισμικό γεγονός          | Mw  | Sdmax  |
|-----|-----------------------------|---------------------------|-----|--------|
| 1   | ERZ-000                     | Erzincan, Turkey          | 6.6 | 56.46  |
| 2   | ERZ-090                     | Erzincan, Turkey          | 6.6 | 71.02  |
| 3   | ELC-090                     | Superstition Hills,CA,USA | 6.4 | 103.15 |
| 4   | TAB-074                     | Tabas, Iran               | 7.1 | 243.73 |
| 5   | TAB-344                     | Tabas, Iran               | 7.1 | 131.32 |
| 6   | E04-140                     | Imperial Valley, CA, USA  | 6.4 | 68.96  |
| 7   | E04-230                     | Imperial Valley, CA, USA  | 6.4 | 123.84 |
| 8   | E05-140                     | Imperial Valley, CA, USA  | 6.4 | 112.33 |
| 9   | E05-230                     | Imperial Valley, CA, USA  | 6.4 | 127.06 |
| 10  | E06-230                     | Imperial Valley, CA, USA  | 6.4 | 155.55 |
| 11  | E08-230                     | Imperial Valley, CA, USA  | 6.4 | 85.67  |
| 12  | SCH-281                     | Northridge, Ca, USA       | 6.7 | 69.41  |
| 13  | RRS-228                     | Northridge, Ca, USA       | 6.7 | 58.09  |
| 14  | RRS-318                     | Northridge, Ca, USA       | 6.7 | 66.95  |
| 15  | NWS-046                     | Northridge, Ca, USA       | 6.7 | 83.66  |
| 16  | JFA-022                     | Northridge, Ca, USA       | 6.7 | 109.88 |
| 17  | SCG-052                     | Northridge, Ca, USA       | 6.7 | 131.88 |
| 18  | SYH-090                     | Northridge, Ca, USA       | 6.7 | 59.99  |
| 19  | TAK-000                     | Hanshin, Japan - Takatori | 6.8 | 114.89 |
| 20  | TAK-090                     | Hanshin, Japan - Takatori | 6.8 | 95.42  |
| 21  | EMO-000                     | Imperial Valley, CA, USA  | 6.4 | 51.06  |
| 22  | EMO-090                     | Imperial Valley, CA, USA  | 6.4 | 111.05 |
| 23  | GA6-230                     | Coyote Lake, CA, USA      | 5.6 | 58.51  |

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel 'Modal Pushover Analysis of SAC buildings'.

Hugo Bobadilla, Anil K. Chopra "Evaluation of the MPA Procedure for estimating seismic demands: RC-SMRF buildings", *Earthquake Spectra*, Volume 24, No. 4, pages 827–845, November 2008; © 2008, Earthquake Engineering Research Institute

Chatpan Chintanapakdee, Anil K. Chopra, 'Evaluation of modal pushover analysis using generic frames' Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 707 Davis Hall, Berkeley, CA 94720; U.S.A.

Anil K. Chopra, 'Δυναμική των κατασκευών- θεωρία και εφαρμογές στη σεισμική μηχανική', 3<sup>η</sup> Αμερικάνικη έκδοση 2007, Επιμέλεια επιστημονικής απόδοσης και μετάφρασης Σταύρος Α. Αναγνωστόπουλος, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας.

Ψυχάρης, Γ., 'Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας', Αθήνα, 2007.

Ταφλαμπάς Ι., Καρύδης Π. "Σημειώσεις Τεχνικής Σεισμολογίας", Αθήνα, Μάιος 2007.

Σκόνδρα Σπυριδούλα - Ελένη, 'Διερεύνηση ανελαστικής συμπεριφοράς εννιαώροφου μεταλλικού κτηρίου σε σεισμούς εγγύς πεδίου', διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010