



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Δομοστατικής
Εργαστήριο Στατικής & Αντισεισμικών Ερευνών

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΕΚΘΕΜΑΤΩΝ
ΜΟΥΣΕΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

του

ΝΙΚΟΛΑΟΥ Δ. ΠΕΠΠΑ

Επιβλέπων

ΒΛΑΣΗΣ Κ. ΚΟΥΜΟΥΣΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2008

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η σύνταξη κώδικα βελτιστοποίησης συστήματος σεισμικής μόνωσης εκθεμάτων μουσείων και η μελέτη της συμπεριφοράς αυτού. Το σύστημα που εξετάστηκε βασίστηκε στη διάταξη που χρησιμοποιείται στο μουσείο J.P. Getty της Καλιφόρνια, όπως αυτή βελτιώθηκε και τροποποιήθηκε από τον Β. Κουμούση καθώς και στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας (βλ. Κεφαλά 2007).

Ο μονωτήρας αποτελείται από τρεις πλάκες, μη συμπαγούς μεταλλικής διατομής. Οι δύο ανώτερες κυλίνονται επί παραβολικών τροχιών σε δύο κάθετες μεταξύ τους οριζόντιες διευθύνσεις. Οι πλάκες συνδέονται μεταξύ τους μέσω ελαστικών ελατηρίων και ιξωδών αποσβεστήρων τοποθετημένων κάθετα στις δύο διευθύνσεις κίνησης. Η συμπεριφορά του συστήματος προσομοιώνεται με την κίνηση δύο ανεξάρτητων μονοβάθμιων ταλαντωτών.

Για το βέλτιστο σχεδιασμό της παραπάνω διάταξης χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι διαδοχικού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (sequential quadratic programming, SQP) μέσω του προγράμματος Matlab. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της εργασίας και τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης για μια σειρά μεμονωμένων σεισμικών καταγραφών. Χρησιμοποιήθηκαν επιταχυνσιογραφήματα από επτά σεισμικές καταγραφές κατάλληλα επικλιμακούμενα.

Επιπλέον αναπτύσσονται μέθοδοι αντιμετώπισης του καθολικού σχεδιασμού του συστήματος. Διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα μιας σειράς αντικειμενικών συναρτήσεων για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού. Ακόμη εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα του κώδικα για διαφορετική σεισμικά μονωμένη μάζα και η επίδραση της επιρροής της τριβής στη λειτουργία του συστήματος.

Στο κεφάλαιο 4 προτείνεται ο διαχωρισμός των καμπυλών κύλισης των ελατηρίων και των αποσβεστήρων και εξετάζεται η συμπεριφορά του μονωτήρα για τον παραπάνω διαχωρισμό. Εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την γενικότερη λειτουργία και συμπεριφορά του συστήματος. Επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα προηγούμενης εργασίας για τη φύση της συμπεριφοράς σύμφωνα με τις διαφορικές εξισώσεις van der Pol και Duffing και η σημαντική βελτίωση που συνεπάγεται η προσθήκη αποσβεστήρων.

Γενικά ο κώδικας που συντάχθηκε μπορεί με επιτυχία να ολοκληρώσει την διαδικασία βελτιστοποίησης για μια σειρά σεισμικών καταγραφών και να επιλύσει το πρόβλημα του καθολικού σχεδιασμού.

Λέξεις κλειδιά:

Σεισμική μόνωση, βέλτιστος σχεδιασμός, βελτιστοποίηση, διαδοχικός δευτεροβάθμιος προγραμματισμός, προστασία εκθεμάτων μουσείων, εξίσωση van der Pol, εξίσωση Duffing

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is the syntax of an optimization code for a seismic isolation system for museum artifacts. The system to be optimized is based on the isolator developed in J.P. Getty Museum in California as it was modified and improved by V. Koumouisis and in previous diploma thesis (Kefala 2007).

The isolator consists of three, non solid, metal frames. The upper two have the ability to slide on parabolic rails in two vertical horizontal directions. The frames are connected through a system of elastic springs and viscous dampers. Each of the isolator's frames is treated as a single degree of freedom system.

Sequential quadratic programming (SQP) methods were used for the optimum design of the above system. In chapter three the program developed using Matlab is described. Also the results obtained by time history analysis for seven strong ground motion records using the program are discussed. The universal design is approached by two methods. Furthermore the effectiveness of a series of objective functions were examined and the ability of the program to converge to the optimal solution for different seismic isolated mass.

In chapter four distinct sliding curves of the springs and the dampers are proposed and the response of the isolator is investigated. The conclusions of previous research for the behaviour of the isolator according to van der Pol and Duffing equations and the significant improvement of the system through the addition of dampers are affirmed.

Keywords:

Seismic isolation, base isolation, optimum design, optimization, sequential quadratic programming (SQP), protection of museum artifacts, van der Pol equation, Duffing equation

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την διπλωματική εργασία του γράφοντα που εκπονήθηκε για τις ανάγκες της ολοκλήρωσης των σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε χρονικό διάστημα περίπου έξι μηνών από το Απρίλιο του 2008 έως τον Οκτώβριο του ίδιου έτους.

Από το σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της εργασίας, καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Βλάση Κουμούση για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας, τις κατευθυντήριες συμβουλές του καθώς και την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διεξαγωγή της. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που επιδεικνύει για την προστασία των μουσειακών εκθεμάτων αποτέλεσε ένα επιπλέον κίνητρο για να αφιερώσω τις επιπλέον ώρες που χρειάστηκαν για την υλοποίηση των στόχων που είχαμε θέσει εξ αρχής σε δυσκολίες που προέκυψαν. Οι συζητήσεις επί γενικότερων θεμάτων αποτέλεσαν πηγή ευχάριστου προβληματισμού.

Ακόμη μέσα από τις γραμμές αυτές θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που είτε άμεσα είτε έμμεσα βοήθησαν στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Καταρχήν στην οικογένεια μου για την υπομονή, την υλική και κυρίως την ηθική στήριξη που παρείχε όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Χωρίς την αμέριστη συμπαράστασή τους δεν θα μπορούσαν να γραφτούν τούτες εδώ οι γραμμές.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, κ. Σάββα Τριανταφύλλου. Η υπομονή του, η βοήθειά του και κυρίως η σιγουριά ότι στη δύσκολη στιγμή -ακόμη και αν δεν βρεθεί αυτή- υπάρχει κάποιος να συζητήσεις τον προβληματισμό σου αποτέλεσαν απαραίτητο σύμμαχο στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Πάντα με διαθέσιμο χρόνο να σε ακούσει.

Τέλος συντρόφους και φίλους που με συνόδεψαν και τους συνόδεψα όλα αυτά τα χρόνια. Τελειώσαμε παιδιά...

Νικόλαος Δ. Πέππας

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	iii
Abstract	v
Ευχαριστίες	vii
Πίνακας περιεχομένων	ix

Κεφάλαιο 1

Βασικές έννοιες της σεισμικής μόνωσης

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Θεωρητικό υπόβαθρο	2
	1.2.1 Σχεδιαστική λογική	2
	1.2.2 Βασική μεθοδολογία της σεισμικής μόνωσης	5
	1.2.3 Στοιχεία δυναμικής των κατασκευών	8
1.3	Εφαρμογές της σεισμικής μόνωσης	12
	1.3.1 Εφαρμογές σε δομικά έργα	13
	1.3.2 Εφαρμογές στην προστασία εκθεμάτων μουσείων	13
1.4	Είδη σεισμικών μονωτήρων	14
1.5	Το εξεταζόμενο σύστημα	15
	1.5.1 Ο σκοπός της υπάρχουσας διάταξης	15
	1.5.2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά αρχικής διάταξης	16
	1.5.3 Βελτιώσεις προηγούμενων εργασιών	21

Κεφάλαιο 2

Βασικές έννοιες βέλτιστου σχεδιασμού των κατασκευών

2.1	Εισαγωγή	25
2.2	Θεωρητικό υπόβαθρο	27
	2.2.1 Μεταβλητές σχεδιασμού (design variables)	27
	2.2.2 Περιορισμοί σχεδιασμού (design constrains)	28
	2.2.3 Αντικειμενική συνάρτηση (objective function)	28
	2.2.4 Τοπικό και καθολικό ελάχιστο (local and global minimum)	29
	2.2.5 Μαθηματική διατύπωση	30
2.3	Προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς (constrained optimization)	31
	2.3.1 Εισαγωγή	31
	2.3.2 Μέθοδος διαδοχικού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (sequential quadratic programming, SQP)	32

2.3.3	Υποπρόβλημα δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (QP Subproblem)	33
2.3.4	Η εφαρμογή της μεθόδου SQP	34
2.3.4.1	Προσαρμογή του μητρώου Hessian	34
2.3.4.2	Επίλυση του προβλήματος δευτεροβάθμιου προγραμματισμού	35
2.3.4.3	Έρευνα γραμμής	38

Κεφάλαιο 3

Βελτιστοποίηση εξεταζόμενου συστήματος σεισμικής μόνωσης

3.1	Εισαγωγή	41
3.2	Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος	42
3.2.1	Επιλογή μεταβλητών σχεδιασμού	42
3.2.2	Επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης	43
3.2.3	Επιλογή περιορισμών σχεδιασμού	44
3.3	Σεισμικές δράσεις	45
3.3.1	Οι σεισμικές καταγραφές	45
3.3.2	Επικλιμάκωση των καταγραφών	54
3.4	Αποτελέσματα για μεμονωμένες σεισμικές καταγραφές	56
3.4.1	Χωρίς την επιρροή της τριβής	56
3.4.1.1	Σεισμική μόνωση αμορρέα	57
3.4.1.2	Σεισμική μόνωση αγάλματος	79
3.4.2	Με την επιρροή της τριβής	80
3.5	Καθολικός σχεδιασμός	93
3.5.1	Μέθοδος του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος	93
3.5.2	Μέθοδος της επικεφαλής σεισμικής καταγραφής	99
3.5.2.1	Χωρίς τριβή	99
3.5.2.2	Με τριβή	102

Κεφάλαιο 4

Μελέτη συμπεριφοράς εξεταζόμενου συστήματος σεισμικής μόνωσης

4.1	Διαχωρισμός καμπύλης κύλισης αποσβεστήρων – ελατηρίων	107
4.2	Αποτελέσματα	108
4.2.1	Μεμονωμένες σεισμικές καταγραφές	108
4.2.2	Καθολικός σχεδιασμός	110
4.3	Μελέτη συμπεριφοράς	112
4.3.1	Διαγράμματα προσφερόμενης - καταναλισκόμενης ενέργειας	112
4.3.2	Διαγράμματα αλληλεπίδρασης δυσκαμψίας – απόσβεσης και συντελεστή παραβολής α – συντελεστή παραβολής β	116

Κεφάλαιο 5**Συμπεράσματα**

5.1	Γενική σύνοψη	125
5.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	127
	Βιβλιογραφία	129

Κεφάλαιο 1

Βασικές έννοιες της σεισμικής μόνωσης

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

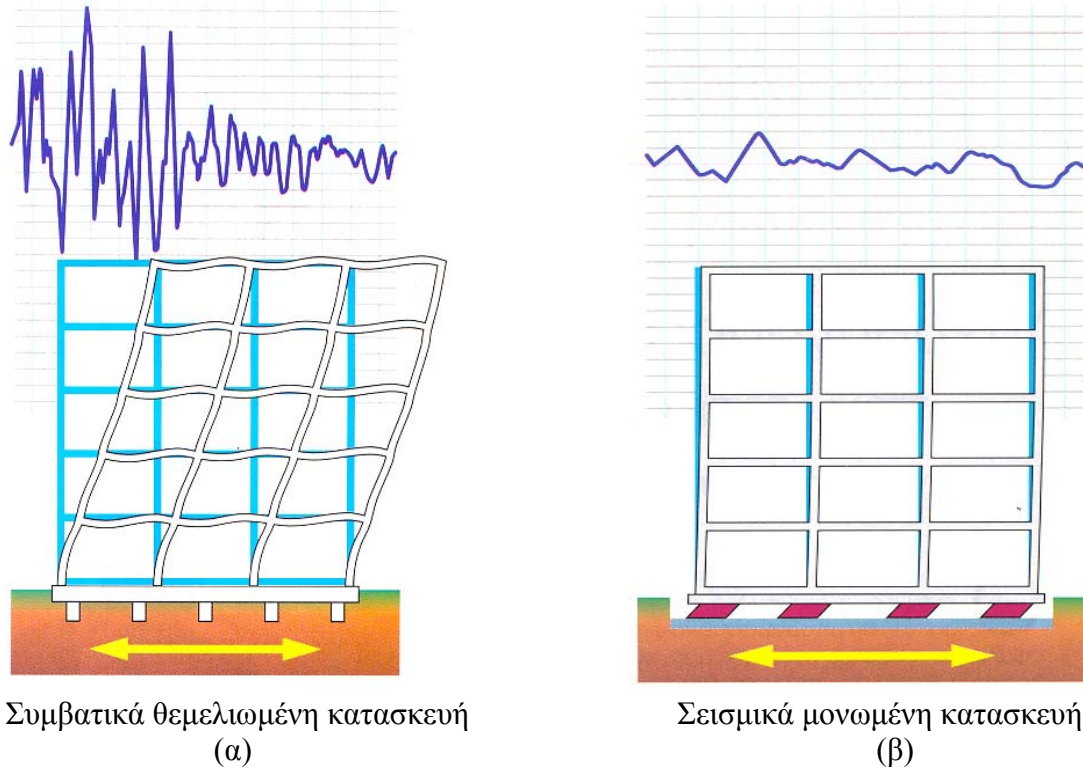
Η σεισμική μόνωση ή αλλιώς μόνωση βάσης αποτελούσε ανέκαθεν αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τους μηχανικούς. Δύο είναι οι βασικοί λόγοι: η απλότητα της σύλληψης και η πιθανότητα «μόνωσης» της κατασκευής έναντι μιας από τις δυσκολότερες φορτίσεις που χρειάζεται να παραλάβει με ασφάλεια. Η βασική ιδέα είναι ιδιαίτερα απλή. Σε ένα σεισμικό γεγονός το έδαφος κινείται και είναι ακριβώς αυτή η κίνηση που προκαλεί πρόσθετες εντάσεις και παραμορφώσεις στην κατασκευή. Επιδίωξη λοιπόν η απομόνωση της ανωδομής από την κίνηση του εδάφους με στόχο την απομείωση των σεισμικών φορτίων που οφείλονται σε αυτή.

Η έννοια της σεισμικής μόνωσης έχει τις ρίζες της αρκετά πίσω στο παρελθόν, περίπου έναν αιώνα πριν. Όμως είναι μόλις τα τελευταία τριάντα χρόνια που αποτελεί έναν από τους τρόπους αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών. Η καλύτερη κατανόηση του σεισμικού φαινομένου, της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών, η ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων σεισμικής μόνωσης και η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών και των υπολογιστικών εργαλείων συνέβαλλαν στην δυνατότητα χρησιμοποίησης της. Εφαρμόζεται κυρίως σε νέα κτήρια και γέφυρες, αλλά βρίσκει εφαρμογή και σε επεμβάσεις σε παλαιότερα κτήρια με στόχο την προστασία και ενίσχυσή τους.

Η σεισμική μόνωση μπορεί να συμπεριληφθεί στους μηχανισμούς παθητικής προστασίας μιας κατασκευής σε αντιδιαστολή με τους μηχανισμούς ενεργητικής προστασίας. Στη δεύτερη κατηγορία συγκαταλέγεται η αύξηση της αντοχής της κατασκευής. Αντίθετα το σκεπτικό που διέπει την λειτουργία των μηχανισμών της πρώτης κατηγορίας είναι η κατανάλωση μεγάλου μέρους της σεισμικής ενέργειας προτού αυτή επηρεάσει την κατασκευή, μειώνοντας έτσι την απαίτηση αντοχής αλλά και τον κίνδυνο καταστροφής οδηγώντας σε οικονομικότερες και ασφαλέστερες κατασκευές.

Είναι πανάκεια λοιπόν. Σαφώς όχι. Η επιλογή της συνδέεται με αυξημένο αρχικό κόστος κατασκευής. Προϋποθέτει βαθύτερη γνώση της δυναμικής συμπεριφοράς των

κατασκευών από τον μελετητή, ιδιαίτερα υπολογιστικά εργαλεία, ιδιαιτερότητες στον σχεδιασμό. Απαιτείται η κρίση του μηχανικού για την βέλτιστη επιλογή ανάμεσα στα οφέλη και τα μειονεκτήματα. Η λύση της σεισμικής μόνωσης εφαρμόζεται συνήθως σε κτήρια μεσαίου ύψους από σκυρόδεμα και γέφυρες.



Σχ. 1.1: Απόκριση συμβατικής (α) και μονωμένης (β) κατασκευής

Αν και στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική αναφορά σε ειδικές εφαρμογές των αρχών της σεισμικής μόνωσης, όπως είναι η σεισμική μόνωση μεμονωμένων αντικειμένων για την προστασία τους έναντι σεισμού, σε πρώτη φάση θα διατυπωθούν οι αρχές αυτές αναφορικά κυρίως σε κτήρια εφόσον το θεωρητικό υπόβαθρο και η ιδέα της προστατευτικής αυτής μεθόδου έναντι σεισμού δεν διαφοροποιείται στις δύο περιπτώσεις.

1.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.2.1 Σχεδιαστική λογική

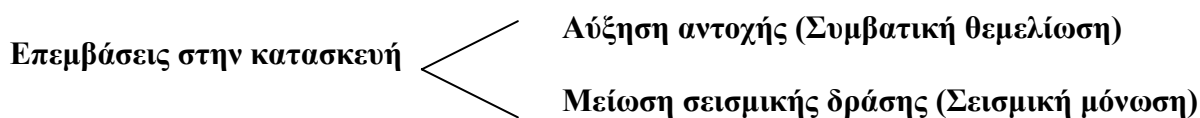
Ο σχεδιασμός-μελέτη μιας κατασκευής αποσκοπεί στο να εξασφαλίσει ότι υπό ορισμένες παραδεκτές πιθανότητες η κατασκευή δεν θα βρεθεί σε μια κατάσταση η οποία έχουμε συμφωνήσει ότι θεωρείται απαράδεκτη. Δεν θα βρεθεί σε μια οριακή κατάσταση. Η παραπάνω απαίτηση μπορεί να γραφεί:

Δράση < Αντίσταση Κατασκευής

ή

S < R

Για την ικανοποίηση της παραπάνω ανίσωσης ασφαλείας κανείς μπορεί να ακολουθήσει δύο δρόμους. Είτε να επιλέξει την αύξηση της αντοχής της κατασκευής, (δεξί μέλος ανίσωσης ασφαλείας) είτε να επιλέξει την μείωση απαίτησης αντοχής (αριστερό μέλος ανίσωσης ασφαλείας, συνήθως οι δράσεις είναι δεδομένες και δεν μπορεί κανείς να παρέμβει σε αυτές άμεσα).

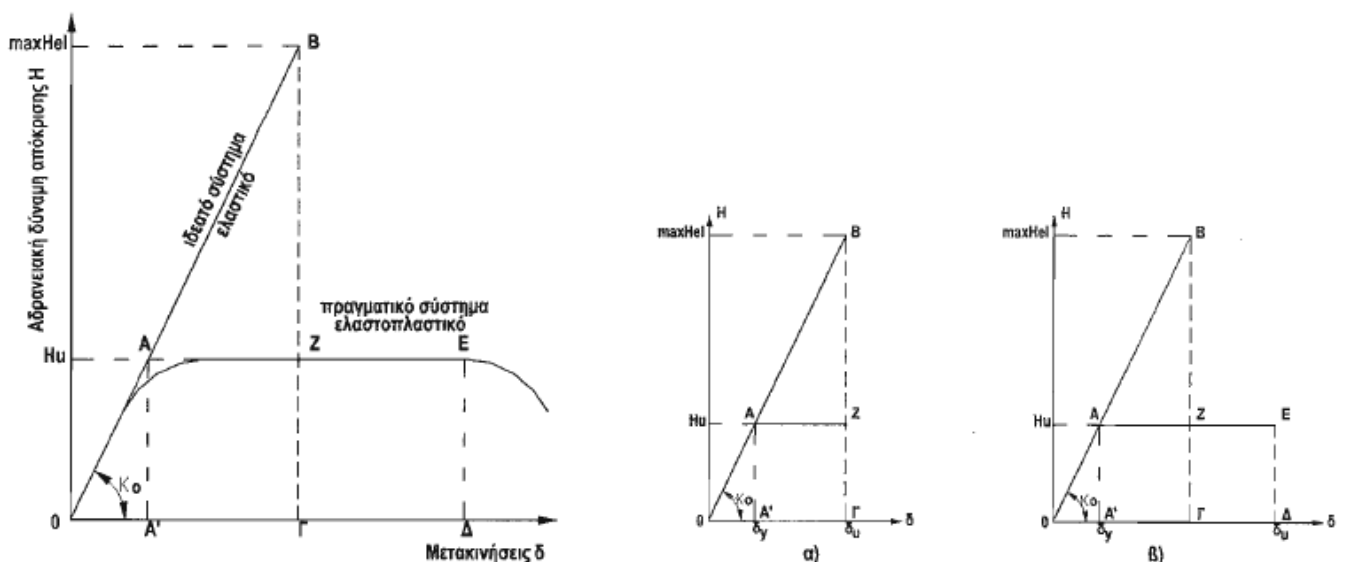


Μια σχεδιαστική λογική που επικεντρώνει στην αύξηση της αντοχής (συμβατική θεώρηση) οδηγεί στις κάτωθι επιλογές:

Συνεχής αύξηση της ελαστικής αντοχής της κατασκευής, ώστε η κατασκευή να συνεχίσει να συμπεριφέρεται ελαστικά υπό οποιαδήποτε φόρτιση. Η επιλογή αυτή πέρα από κάποιο όριο συνεπάγεται μη οικονομικές και συνήθως μη λειτουργικές λύσεις. Επιπλέον οδηγεί σε αυξημένες επιταχύνσεις οι οποίες σε περιπτώσεις ευαίσθητων αντικειμένων στο εσωτερικό των κατασκευών είναι ανεπιθύμητες.

Αντί αυτού έχει καθιερωθεί ο σχεδιασμός με βάση την ικανότητα της κατασκευής να παραμορφωθεί πλαστικά και έχει εισαχθεί ο όρος της πλαστιμότητας. Με τον όρο αυτό περιγράφεται η ικανότητα μιας κατασκευής να παραμορφώνεται πέραν του ορίου διαρροής, δηλαδή με μεγάλες σχετικά παραμορφώσεις, χωρίς σημαντική μείωση της αντοχής της. Για την μέτρηση της πλαστιμότητας χρησιμοποιείται συχνά

ο δείκτης πλαστιμότητας μ , ως ο λόγος της οριακής παραμόρφωσης ως προς την παραμόρφωση διαρροής. Σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο, η οποία είναι κυρίαρχη σε όλους τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς, οι κατασκευές σχεδιάζονται ώστε να αντιμετωπίζουν ασθενείς σεισμούς χωρίς βλάβες, μεσαίους σεισμούς με ελάχιστες βλάβες στα φέροντα στοιχεία και μερικές βλάβες στα μη φέροντα και για τον σεισμό σχεδιασμού επιτρέπεται να υποστούν περιορισμένες αλλά επιδιορθώσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό, με μικρή όμως πιθανότητα κατάρρευσης. Για την αποφυγή κατάρρευσης μιας κατασκευής πρέπει τα μέλη και οι συνδέσεις να σχεδιαστούν κατάλληλα, έτσι ώστε να μπορούν να αναλάβουν μεγάλες ανελαστικές παραμορφώσεις (βλάβες) χωρίς σημαντική μείωση της αντοχής τους, δηλ, πλάστιμα.



Σχ. 1.2: Ελαστική και ελαστοπλαστική απόκριση κατασκευής σε σεισμική δράση
 α) απόκριση με ίδια μέγιστη παραμόρφωση
 β) απόκριση με ίδια απορρόφηση ενέργειας

Στην δεύτερη σχεδιαστική λογική ακολουθείται ο δρόμος της μείωσης απαίτησης αντοχής της κατασκευής. Συγκεκριμένα στην περίπτωση της σεισμικής μόνωσης προφανώς δεν μπορεί να ελεγχθεί το σεισμικό γεγονός μπορεί όμως να περιοριστεί η μετάδοση της εδαφικής κίνησης από την θεμελίωση στην ανωδομή. Μέσω ειδικών μηχανισμών μέρος της σεισμικής ενέργειας καταναλώνεται επιτρέποντας στην υπόλοιπη κατασκευή να παραμένει στην ελαστική περιοχή δεχόμενη μικρά σχετικά σεισμικά φορτία.

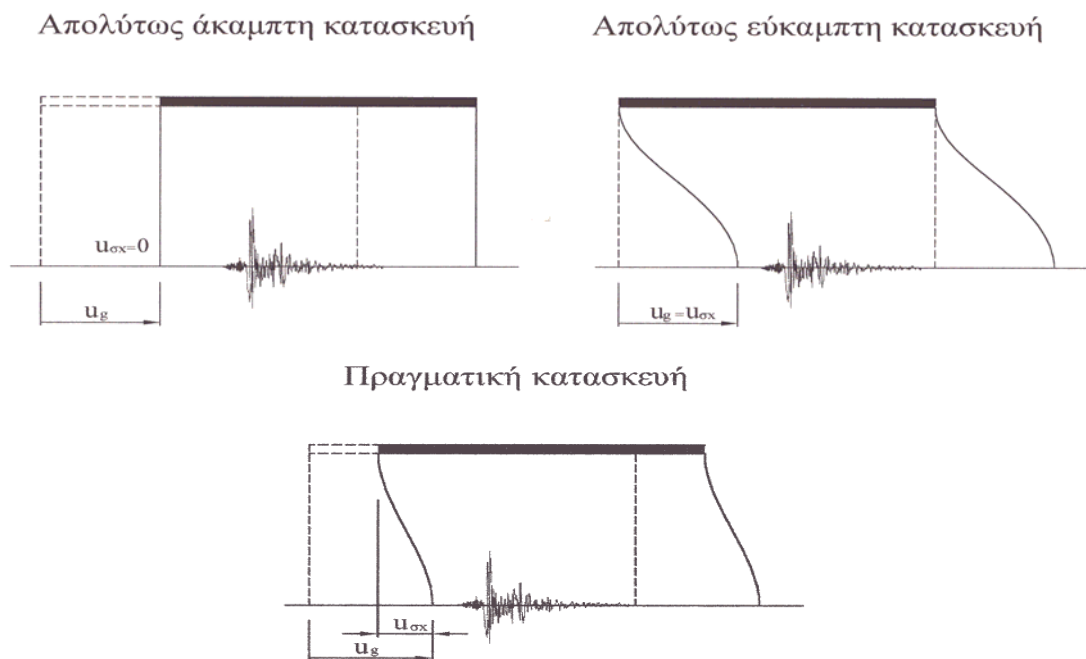
Κοινό χαρακτηριστικό ανάμεσα στην σεισμική μόνωση και τον πλάστιμο σχεδιασμό των κατασκευών είναι ότι επιλέγεται η κατανάλωση της σεισμικής ενέργειας να γίνει

σε προκαθορισμένα στοιχεία της κατασκευής ειδικά σχεδιασμένα επιτρέποντας στα υπόλοιπα τμήματα να παραμορφώνονται ελαστικά ή έστω με πολύ μικρές τιμές πλαστιμότητας.

1.2.2 Βασική μεθοδολογία της σεισμικής μόνωσης

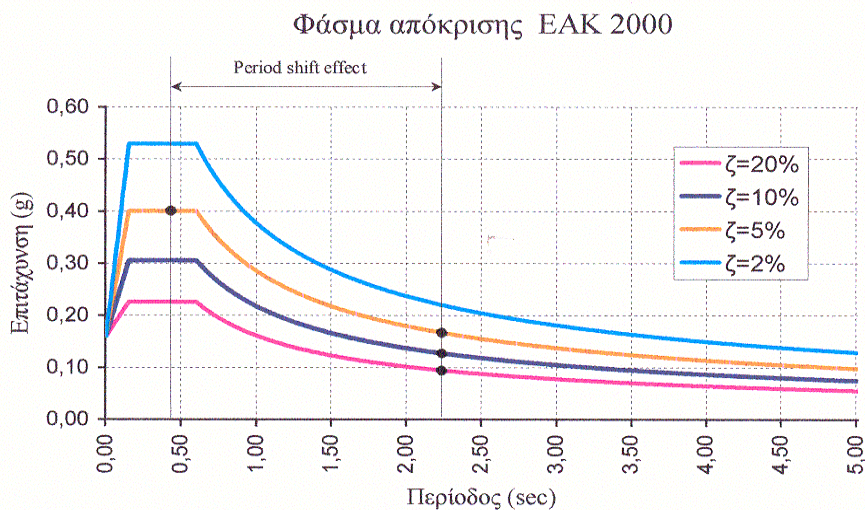
Η βασική μεθοδολογία της σεισμικής μόνωσης είναι η τροποποίηση της απόκρισης της κατασκευής, ώστε η εδαφική κίνηση να μην μεταδίδεται στο εσωτερικό της. Στην ιδανική περίπτωση αυτή αποκοπή θα ήταν ολική. Στην πραγματικότητα απαιτείται κάποιος βαθμός σύνδεσης μεταξύ της κατασκευής και του εδάφους.

Αναφερόμενοι στην μετάδοση των εδαφικών κινήσεων, μία εντελώς άκαμπτη κατασκευή έχει μηδενική περίοδο ταλάντωσης και κατά τη διάρκεια του σεισμού ακολουθεί την κίνηση του εδάφους. Η επιτάχυνση της κατασκευής θα είναι ίδια με την εδαφική ενώ η παραμόρφωσή της, δηλαδή η σχετική μετατόπιση μεταξύ κατασκευής και εδάφους, θα είναι μηδενική. Αντίθετα, η περίοδος ταλάντωσης μίας τελείως εύκαμπτης κατασκευής τείνει στο άπειρο. Η επιτάχυνση της κατασκευής θα είναι μηδενική ενώ η παραμόρφωσή της θα είναι ίση με την εδαφική μετακίνηση. (Σχ. 1.3). Η πραγματική συμπεριφορά αντιστοιχεί σε μια μέση, εκ των δύο παραπάνω κατάσταση.



Σχ. 1.3: Μετάδοση εδαφικών κινήσεων

Η σεισμική μόνωση, όπως προαναφέρθηκε, στοχεύει στην αύξηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου (Σχ. 1.4) των κατασκευών (οι οποίες στην πραγματικότητα δεν είναι ούτε τελείως άκαμπτες αλλά ούτε και εύκαμπτες) και αυτό για να επιτευχθεί μείωση των επιταχύνσεων. Αυτή η επιμήκυνση της περιόδου (period shift effect) συνεπάγεται ακόμη μεγαλύτερη μείωση των επιταχύνσεων όταν συνοδεύεται και από αύξηση της απόσβεσης του συστήματος που μονώνεται σεισμικά. Η μείωση των επιταχύνσεων είναι ιδιαίτερος σημαντική σε κτήρια που στο εσωτερικό τους βρίσκεται ευαίσθητος στις σεισμικές δονήσεις και ιδιαίτερης σημασίας εξοπλισμός που θα πρέπει να παραμείνει λειτουργικός μετά από ένα σεισμό και εν γένει γίνεται φανερό όταν οι ιδιοπερίοδοι των σεισμικά μονωμένων συστημάτων ή κατασκευών από μικρές αρχικές τιμές ($T < 0,5 \text{sec}$) «μετατοπίζονται» σε περιόδους περί τα 2sec ή και παραπάνω. Έχει επιπλέον παρατηρηθεί ότι στα σεισμικά μονωμένα συστήματα δύναται να μειωθούν τα σχετικά με την στρέψη φαινόμενα λόγω εκκεντροτήτων στην ανωδομή, κάτι το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί επιχειρώντας να ταυτιστεί το κέντρο ακαμψίας του συστήματος μόνωσης με το κέντρο βάρους της ανωδομής.



Σχ. 1.4: Επίδραση του “Period shift effect” στις επιταχύνσεις

Διαχωρίζοντας επομένως την ανωδομή από την βάση της, μέσω της εφαρμογής της σεισμικής μόνωσης η βάση της κατασκευής γίνεται περισσότερο εύκαμπτη με αποτέλεσμα την ‘απομάκρυνση’ της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας της κατασκευής από τις δεσπόζουσες συχνότητες των σεισμικών καταγραφών. Σημειώνεται όμως ότι παρά την ευκαμψία στη βάση των συστημάτων σεισμικής μόνωσης, τα τελευταία

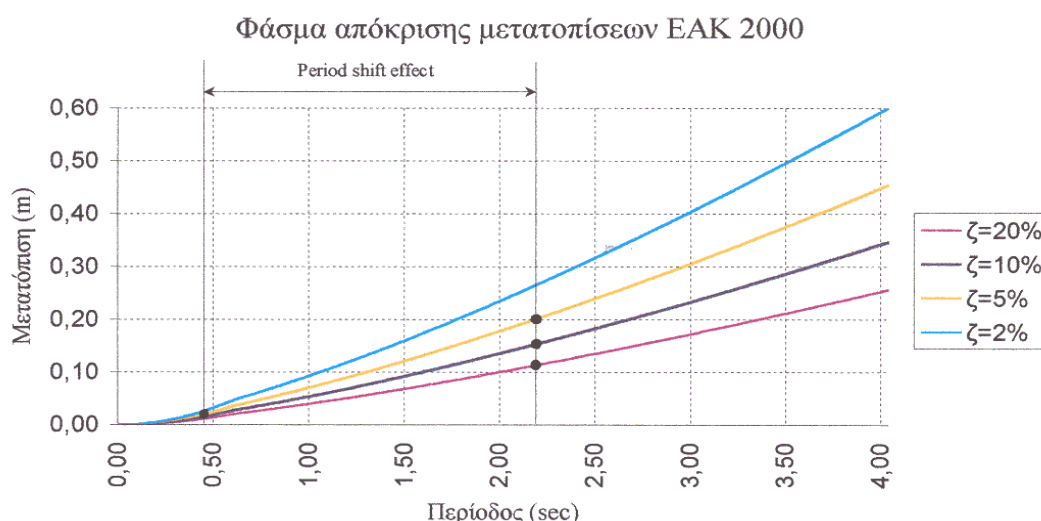
διαθέτουν την απαιτούμενη ακαμψία που πρέπει έναντι πλευρικών φορτίων όπως το φορτίο ανέμου. Ένα ακόμη ‘ευεργετικό’ αποτέλεσμα της σεισμικής μόνωσης είναι η μείωση των τεμνουσών βάσης.(shear force).

Η σεισμική μόνωση επηρεάζει και τις μετατοπίσεις του μονωμένου σώματος εκτός των επιταχύνσεων. Για μετάβαση σε μεγαλύτερες περιόδους παρατηρείται (Σχ. 1) αύξηση των μετατοπίσεων (κάτι που δικαιολογείται λόγω της σχέσης:

$$SD = \frac{SA}{\omega^2} = \frac{SA \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2}$$

όμως είναι γεγονός ότι με την αύξηση της απόσβεσης του

συστήματος επιτυγχάνεται μείωση των μεγίστων μετατοπίσεων. Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι ένας καλός σχεδιασμός ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης συνεπάγεται την βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων που θα επηρεάσουν την νέα απόκριση της κατασκευής έτσι ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές μειωμένες επιταχύνσεις αλλά και μετατοπίσεις εντός επιτρεπτών ορίων.



Σχ. 1.5: Επίδραση του “Period shift effect” στις μετατοπίσεις

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων η σεισμική μόνωση αφορά στην οριζόντια διεύθυνση. Εξάλλου οι κατακόρυφες σεισμικές συνιστώσες δεν είναι επικίνδυνες για τα συνήθη σεισμικά γεγονότα. Εφόσον οι κατασκευές σχεδιάζονται για να αντέχουν έναντι κατακόρυφων φορτίων, είναι λογικό να μην είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε πρόσθετα κατακόρυφα φορτία όπως το πρόσθετο κατακόρυφο σεισμικό φορτίο. Επιπλέον παρατηρείται ότι η μέγιστες κατακόρυφες επιταχύνσεις δεν συμπίπτουν χρονικά με τις μέγιστες οριζόντιες

επιταχύνσεις στις περισσότερες καταγραφές και ως εκ τούτου η δράση τους δεν είναι ταυτόχρονη.

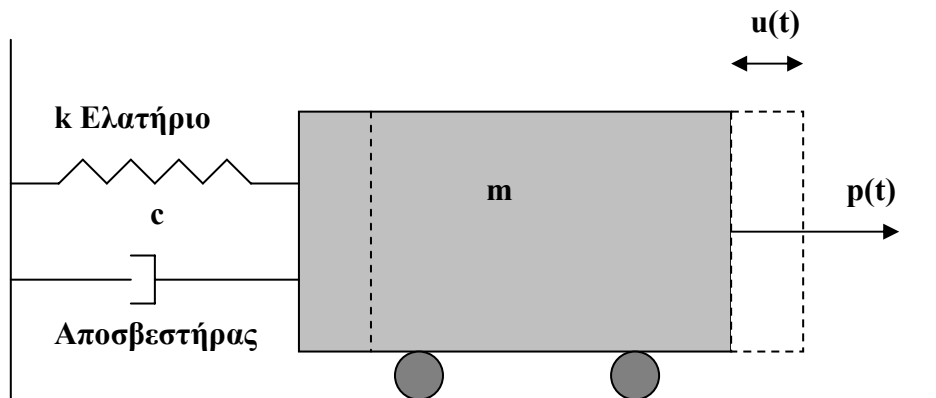
Σχετικά με την δυναμική συμπεριφορά των σεισμικά μονωμένων κατασκευών παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές. Συγκεκριμένα, στις συνήθεις, συμβατικά θεμελιωμένες κατασκευές η πρώτη ιδιομορφή είναι τριγωνικής μορφής και αυτός είναι ο λόγος που παρατηρούνται αδρανειακές δυνάμεις αυξανόμενες καθ' ύψος που συνεπάγονται παραμορφώσεις. Σε μία μονωμένη κατασκευή αντιθέτως η δεσπόζουσα ιδιομορφή είναι ορθογωνικής μορφής καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί η ανωδομή παραμορφώνεται ελάχιστα διότι συμπεριφέρεται ως άκαμπτο στερεό σώμα. Σε αντίθεση με τις συμβατικά θεμελιωμένες κατασκευές όπου οι ιδιομορφές ανώτερης τάξης επηρεάζουν σημαντικά τις παραμορφώσεις, στις σεισμικά μονωμένες η επιρροή είναι μηδαμινή. Στην ορθογωνική αυτή μορφή των ιδιομορφών αποδίδεται η μείωση των αδρανειακών δυνάμεων και επομένως των παραμορφώσεων και των εντάσεων στην κατασκευή.

1.2.3 Στοιχεία δυναμικής των κατασκευών

Το αντικείμενο της δυναμικής ανάλυσης των κατασκευών αλλά και της απόκρισης ενός υποβαλλόμενου σε δυναμικές φορτίσεις σώματος γενικότερα, είναι ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης και της έντασης στο κινούμενο σώμα λόγω αυτών ακριβώς των δυναμικών φορτίσεων. Μία φόρτιση θεωρείται δυναμική όταν το μέγεθος, η διεύθυνση και η θέση της μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ της στατικής και της δυναμικής φόρτισης ενός κινούμενου σώματος στις οποίες και οφείλονται οι μεγάλες αποκλίσεις στην απόκριση. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τα επιβαλλόμενα στατικά φορτία είναι σταθερά με αποτέλεσμα συγκεκριμένη αναπτυσσόμενη ένταση και παραμόρφωση. Αντιθέτως, για δυναμικά φορτία τόσο η ένταση όσο και η παραμόρφωση του σώματος είναι συναρτήσεις του χρόνου, καθώς μεταβάλλονται κάθε χρονική στιγμή. Παραδείγματα αποτελούν οι εκρήξεις, η ανεμοπίεση και φυσικά η σεισμική κίνηση του εδάφους. Η σεισμική κίνηση του εδάφους, που άλλωστε πρέπει να τυγχάνει ιδιαίτερης προσοχής στις μελέτες του πολιτικού μηχανικού, μπορεί να αναχθεί σε ένα ισοδύναμο δυναμικό φορτίο. Μια ακόμα βασική διαφορά των δύο αυτών ειδών φόρτισης είναι ότι κατά τη δυναμική φόρτιση τα κινούμενα φορτία του φορέα αναπτύσσουν ταχύτητα και επιτάχυνση συνέπεια της οποίας και λόγω της μάζας που

έχει ο φορέας είναι η ανάπτυξη αδρανειακών δυνάμεων που αντιτίθενται στην κίνηση (αρχή d’Alembert) και αποτελεί επιμέρους φόρτιση για το σώμα.

Για την πραγματοποίηση μίας ορθής δυναμικής ανάλυσης κύριο ρόλο κατέχει ο προσδιορισμός ενός δυναμικού προσομοιώματος του σώματος. Αποτελεί ίσως το σημαντικότερο μέρος της δυναμικής ανάλυσης, ακριβώς γιατί για λανθασμένη προσομοίωση της κίνησης του σώματος θα προκύψουν οπωσδήποτε μη αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Για τα συστήματα εκείνα στα οποία αρκεί να προσδιοριστεί μία μόνο συνιστώσα μετακίνησης για τον καθορισμό της γεωμετρίας του φορέα (μονοβάθμια συστήματα), το δυναμικό προσομοίωμα είναι αυτό που δίνεται (Σχ. 1.6).



Σχ. 1.6: Δυναμικό προσομοίωμα μονοβάθμιου συστήματος

Το μοντέλο, αν υποθέσουμε ότι κυλίνεται χωρίς τριβή επί του εδάφους, αποτελείται από μία μάζα, ένα ελατήριο και έναν αποσβεστήρα. Η μάζα αντιπροσωπεύει το υλικό σώμα, το ελατήριο τις ελαστικές δυνάμεις και ο αποσβεστήρας τις απώλειες ενέργειας του συστήματος. Για μετατόπιση $u(t)$ του σώματος την χρονική στιγμή t , οι δυνάμεις που θα ασκούνται πάνω στο σώμα θα είναι η εξωτερική δύναμη $p(t)$ που προκάλεσε την μετατόπιση, η ελαστική δύναμη f_s λόγω του ελατηρίου, η δύναμη απόσβεσης f_D λόγω του αποσβεστήρα και τέλος η αδρανειακή δύναμη f_i λόγω της μάζας (και της αναπτυσσόμενης επιτάχυνσης) του σώματος. Η ελαστική δύναμη f_s του ελατηρίου εξαρτάται από την μετατόπιση $u(t)$ και ειδικά για γραμμική συμπεριφορά του κινούμενου σώματος είναι ανάλογη αυτής και ίση με:

$$f_s = k \cdot u \tag{1.1}$$

Η σταθερά k εκφράζει τη δυσκαμψία του ελατηρίου, ουσιαστικά την δύναμη που απαιτείται για μοναδιαία μεταβολή του μήκους του. Μετράται σε kN/m και όπως φαίνεται και στο σχήμα τείνει να επαναφέρει το σώμα στην αρχική του θέση. Στο ίδιο αποσκοπεί και η δύναμη απόσβεσης f_D μέσω της οποίας εκφράζονται οι απώλειες ενέργειας στο σύστημα λόγω εξωτερικών και εσωτερικών τριβών. Η ιξώδης απόσβεση αποτελεί την απλούστερη έκφραση αυτής της δύναμης που συνδέει την δύναμη απόσβεσης με την ταχύτητα μέσω της σχέσης (1.2):

$$f_D = c \cdot \frac{du}{dt} \quad (1.2)$$

όπου η σταθερά c προσδιορίζεται πειραματικά.

Αναφέρεται επίσης ότι η ιξώδης απόσβεση προσομοιώνεται στο μοντέλο με τον αποσβεστήρα, που αποτελείται από ένα δοχείο με υγρό μέσα στο οποίο κινείται ένα διάτρητο έμβολο. Τέλος η δύναμη f_I αποτελεί την δύναμη αδράνειας, εξαρτάται από τη μάζα και την επιτάχυνση του συστήματος και δίνεται σε από τη σχέση (1.3):

$$f_I = m \cdot \frac{d^2u}{dt^2} \quad (1.3)$$

Η δυναμική ισορροπία ενός συστήματος εκφράζεται μέσω της εξίσωσης κίνησής του, η οποία είναι μια διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης ως προς την εξαρτημένη από το χρόνο μεταβλητή $u(t)$. Από την εξίσωση κίνησης λαμβάνουμε την μετατόπιση του συστήματος συναρτήσει του χρόνου.

Με βάση την αρχή του d'Alembert, η εξίσωση ισορροπίας λαμβάνει την μορφή (1.4):

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad (1.4)$$

και όταν η εξωτερική διέγερση είναι η κίνηση του εδάφους με εδαφική επιτάχυνση \ddot{u}_g , θα είναι: $p(t) = m \cdot \ddot{u}_g$ και η διαφορική εξίσωση της μορφής (1.5):

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + K \cdot u(t) = -m \cdot \ddot{u}_g(t) = p(t) \quad (1.5)$$

$$\ddot{u}(t) + 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u = -\ddot{u}_g(t) \quad (1.6)$$

όπου

$$k = m \cdot \omega^2 \quad (1.7)$$

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad (1.8)$$

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1.9)$$

$$c = 2 \cdot m \cdot \xi \cdot \omega = \xi \cdot c_{cr} \quad (1.10)$$

όπου $c_{cr} = 2 \cdot m \cdot \omega$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (1.11)$$

m η μάζα του μονοβάθμιου ($m=W/g$, μονάδες $[kN \cdot sec^2/m]$)

k η ακαμψία του μονοβάθμιου ($k=f_s/d$), μονάδες $[kN/m]$

ξ ο αδιάστατος συντελεστής απόσβεσης ως προς την κρίσιμη απόσβεση c_{cr}

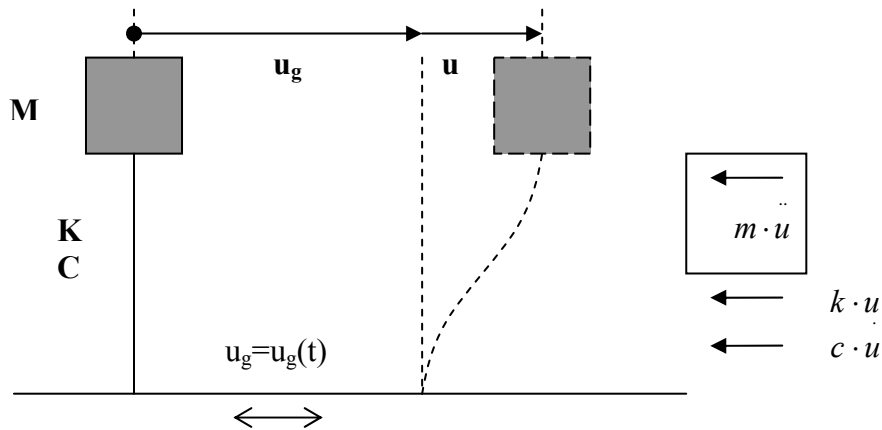
T η ιδιοπερίοδος του σώματος κατά την διέγερση $[sec]$

Τα συστήματα με συμπεριφορά σαν και αυτή του προσομοιώματος ονομάζονται γραμμικά διότι η εξάρτηση των αδρανειακών, των ελαστικών και των δυνάμεων απόσβεσης με το αίτιο που προκαλεί την κάθε δύναμη είναι γραμμική. Η διαφορική εξίσωση είναι γραμμική, δευτέρου βαθμού, αναλύεται δε σε δύο επιμέρους ανεξάρτητες εξισώσεις πρώτου βαθμού ώστε να επιλυθεί. Οι πρωτοβάθμιες εξισώσεις προσδιορίζονται από τις αρχικές συνθήκες την χρονική στιγμή $t=0$, δηλαδή την ταχύτητα και την μετατόπιση του μονοβάθμιου τη δεδομένη στιγμή.

Όπως προαναφέρθηκε, ο σεισμός πρακτικά εξαναγκάζει τη στήριξη της κατασκευής ή του υπό μελέτη σώματος γενικότερα σε ταλάντωση, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο δυναμική καταπόνηση σε αυτό. Στην περίπτωση αυτή επομένως, κίνησης του εδάφους, η συνολική απόκριση του μονοβάθμιου συστήματος ισούται με το άθροισμα της σχετικής μετατόπισης u του ανώτερου σημείου του και της κίνησης του εδάφους u_g , όπου u , u_g χρονικές συναρτήσεις. Είναι δηλαδή σύμφωνα με τη σχέση (1.12):

$$u_{ολ} = u_g + u \quad (1.12)$$

όπως απεικονίζεται (Σχ. 1.7).



Σχ. 1.7: Συνολική απόκριση μονοβάθμιου συστήματος

Η διαφορική εξίσωση κίνησης λαμβάνει πλέον την μορφή της σχέσης:

$$m \cdot (\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = 0 \quad (1.13)$$

ή

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = -m \cdot \ddot{u}_g \quad (1.14)$$

όπου $u_g = u_g(t)$ η εδαφική μετατόπιση (διέγερση), $u = u(t)$ η παραμόρφωση της ανωδομής (σχετική μετατόπιση), c η απόσβεση του συστήματος για την οποία θα γίνει ειδική αναφορά παρακάτω.

Πρόκειται δηλαδή για εξίσωση τύπου εξαναγκασμένης ταλάντωσης, όπου η διεγείρουσα δύναμη είναι: $-(μάζα \times επιτάχυνση \text{ εδάφους}) = -m \cdot \ddot{u}_g = f(t)$

Από την εξίσωση είναι προφανές ότι σε αντίθεση με την αδρανειακή δύναμη του συστήματος που εξαρτάται από την ολική επιτάχυνση του συστήματος, η ελαστική δύναμη επαναφοράς και η δύναμη απόσβεσης εξαρτώνται μόνο από την σχετική μετατόπιση. Επιπλέον, σημειώνεται ότι σχετικά με τη μέγιστη επιτάχυνση ισχύει:

$$(\ddot{u}_{ολ})_{\max} = (\ddot{u} + \ddot{u}_g)_{\max} \quad (1.15)$$

και όχι:

$$(\ddot{u}_{ολ})_{\max} = (\ddot{u})_{\max} + (\ddot{u}_g)_{\max} \quad (1.16)$$

αφού οι μέγιστες τιμές δεν αντιστοιχούν απαραίτητως στις ίδιες χρονικές στιγμές.

Η διαφορική εξίσωση κίνησης δύναται ακόμη να διατυπωθεί ως προς την ολική μετατόπιση $u_{ολ}(t)$ αντί της σχετικής $u(t)$. Στην περίπτωση αυτή θα έχουμε:

$$m \cdot \ddot{u}_{ολ} + c \cdot \dot{u}_{ολ} + k \cdot u_{ολ} = \bar{p}(t) \quad (1.17)$$

με τη φόρτιση να ορίζεται ως:

$$\bar{p}(t) = c \cdot \dot{u}_g + k \cdot u_g \quad (1.18)$$

ενώ την ελαστική δύναμη και τη δύναμη απόσβεσης ως:

$$f_s = k \cdot (u_{ολ} - u_g) \quad (1.19)$$

και

$$f_D = c \cdot (\dot{u}_{ολ} - \dot{u}_g) \quad (1.20)$$

1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Οι πρώτες αναφορές για την προσπάθεια εφαρμογής μεθόδων σεισμικής μόνωσης στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών συναντώνται περίπου πριν έναν αιώνα. Συγκεκριμένα υπάρχουν τέτοιες αναφορές σε ερευνητικό επίπεδο τόσο στην Αγγλία όσο και στην Ιαπωνία στα τέλη του 19^{ου} και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα.

Αρκετοί μηχανισμοί έχουν εφευρεθεί στην προσπάθεια διαχωρισμού του εδάφους από την ανωδομή, όπως κύλινδροι, σφαίρες, καλώδια ή άμμος.

1.3.1 Εφαρμογές σε δομικά έργα

Οι συνηθέστερες εφαρμογές της σεισμικής μόνωσης συναντώνται σε δομικά έργα είτε αυτά είναι κτήρια είτε γέφυρες. Αποτελεί μια εναλλακτική στην συμβατική θεμελίωση και μπορεί να είναι πιο οικονομική για νέες κατασκευές σε περιοχές με ισχυρές σεισμικές καταγραφές. Ακόμη αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική για κατασκευές που απαιτείται να παραμείνουν λειτουργικές αμέσως μετά από έναν ισχυρό σεισμό. Η σεισμική μόνωση έχει χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση ευαίσθητων και ευπαθών δομημάτων. Για παράδειγμα κτήρια από φέρουσα τοιχοποιία ή κτήρια από οπλισμένο σκυρόδεμα σχεδιασμένα με παλαιότερο επίπεδο γνώσης, μειωμένης πλαστιμότητας. Σε αυτές τις κατασκευές η ενίσχυσή τους απαιτεί την προσθήκη νέων δομικών στοιχείων, όπως τοιχίων ή πλαισίων, που αλλοιώνουν το χαρακτήρα τους. Η σεισμική μόνωση μειώνει την ανάγκη λήψης τέτοιων μέτρων καθώς μειώνει της σεισμική ενέργεια που τελικά επηρεάζει την κατασκευή. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο είναι ιδιαίτερα ελκυστική σε περιπτώσεις ενίσχυσης ιστορικών και γενικότερα κτηρίων με αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον που επιθυμούμε την διατήρηση του χαρακτήρα τους.

1.3.2 Εφαρμογές στην προστασία εκθεμάτων μουσείων

Σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας επιβάλλεται η υιοθέτηση απλών ή/και σύνθετων μέτρων για την προστασία των εκθεμάτων μουσείων. Διάφορες απλές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα όπως η έδραση σε μαλακό υλικό ή κερί, το χαμήλωμα του κέντρου βάρους του εκθέματος, π.χ. με την προσθήκη άμμου στο εσωτερικό ενός αμφορέα, η ανάρτηση των εκθεμάτων με διαφανές νήμα σιλικόνης, η στερέωση μέσω ζεύγους μαγνητών κ.α. Σε μεγαλύτερα εκθέματα ιδιαίτερης αξίας όπως μεγάλοι αμφορείς και αγάλματα ενδείκνυται η εφαρμογή συστημάτων σεισμικής μόνωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως τύποι μονωτήρων τριβής ανάλογοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται σε κτήρια και γέφυρες. Παραδείγματα

αποτελούν μία από τις οχτώ χυτεύσεις του μπρούτζινου γλυπτού «Πύλες της Κολάσεως» του Roden στο μουσείο Δυτικής Τέχνης στο Τόκιο, η κρήνη του Ποσειδώνα στο μουσείο της Μεσσίνας στην Ιταλία, αντίγραφο κούρου στο μουσείο J. P. Getty της Καλιφόρνια των ΗΠΑ και ο Ερμής του Πραξιτέλη στο Νέο Μουσείο της Αρχαίας Ολυμπίας.

Ιδιαίτερη αξία έχει να τονιστεί ότι πολλές φορές κατά την κατασκευή των μουσείων δεν λαμβάνεται υπόψη το ευαίσθητο των αντικειμένων που θα φιλοξενήσουν. Έτσι παρατηρείται συχνά το φαινόμενο να εξασφαλίζεται το μουσείο έναντι πολύ ισχυρών σεισμών αλλά να μην λαμβάνεται καμία μέριμνα για τα εκθέματα. Αποτέλεσμα μετά από έναν σεισμό το μουσείο να παραμένει άθικτο ενώ ανυπολόγιστης αξίας εκθέματα να έχουν βλαβεί ανεπανόρθωτα.

1.4 ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ

Όπως ήδη αναφέρθηκε η σεισμική μόνωση ως μέθοδος έχει αναπτυχθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες και αποτέλεσμα αυτού είναι η πληθώρα σεισμικών μονωτήρων που είναι πλέον διαθέσιμοι ώστε να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις του εκάστοτε σχεδιασμού.

Οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται από ένα σύστημα σεισμικής μόνωσης είναι:

- Μικρή οριζόντια ακαμψία για αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής.
- Επαρκή οριζόντια ακαμψία έναντι οριζοντίων φορτίων λειτουργίας όπως ο άνεμος και οι μικροί σεισμοί.
- Επαρκή κατακόρυφη ακαμψία για ασφαλή μεταφορά των κατακόρυφων φορτίων στο έδαφος.
- Αυξημένη απόσβεση για περιορισμό των οριζοντίων μετατοπίσεων.
- Δύναμη επαναφοράς στην αρχική θέση ηρεμίας.

Οι βασικότεροι τύποι σεισμικών μονωτήρων από είναι:

- Ελαστομερή εφέδρανα (Elastomeric Bearings)
- Ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (High Damping Rubber Bearings - HDR)
- Ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (Lead Rubber Bearings - LRB)

- Επίπεδα εφέδρανα ολίσθησης (Flat Slider Bearing)
- Σφαιρικά εφέδρανα ολίσθησης (Friction Pendulum System –FPS)
- Συστήματα λικνισμού
- Σφαιρικές ή κυλινδρικές κυλίσσεις
- Ελατήρια

Για τις περιπτώσεις όπου οι σεισμικοί μονωτήρες δεν διαθέτουν επαρκή ή καθόλου απόσβεση έχουν αναπτυχθεί συστήματα απόσβεσης όπως:

- ❖ Υστερητικοί αποσβεστήρες (βασίζονται στην διαρροή μεταλλικών στοιχείων χάλυβα ή μολύβδου μέσω εφελκυσμού, διάτμησης, στρέψης ή και εξόλκευσης)
- ❖ Ιξώδεις αποσβεστήρες (βασίζονται στην αρχή του αμορτισέρ με χρήση υγρού)
- ❖ Αποσβεστήρες ολίσθησης (βασίζονται στην απορρόφηση ενέργειας μέσω τριβής).

1.5 ΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

1.5.1 Σκοπός της υπάρχουσας διάταξης

Ο εν λόγω μονωτήρας (Σχ 1.7) κατασκευάστηκε για τις ανάγκες σεισμικής μόνωσης ενός Αρχαιοελληνικού Αττικού Παναθήναιου αμφορέα χρονολογημένου περί το 399-340 π.Χ.



Σχ. 1.7: Ο προστατευόμενος αττικός αμφορέας επί της εξεταζόμενης διάταξης σεισμικής μόνωσης

Ο αμφορέας ζυγίζει 7,71kg και η αναγκαιότητα κατασκευής ειδικής διάταξης σεισμικής μόνωσης για την προστασία του προέκυψε από το ίδιο το σχήμα του αμφορέα και την ανομοιόμορφη κατανομή της μάζας του, που έχει ως αποτέλεσμα το κέντρο βάρους του να είναι ψηλά και η αστάθεια να είναι το κύριο χαρακτηριστικό του σώματος. Η ευαισθησία του σε φαινόμενα ανατροπής σχετίζονταν επιπλέον και με τη μικρή -συγκριτικά με την περίμετρο του αμφορέα- βάση του.

Η συγκεκριμένη μορφή μονωτήρα που μελετάται σχεδιάστηκε επιδιώκοντας τόσο να εξυπηρετεί τις βασικές αρχές της σεισμικής μόνωσης, προστατεύοντας το έκθεμα από τις συνέπειες ενός βίαιου σεισμικού γεγονότος, όσο και να υπακούει στις αισθητικές απαιτήσεις που επιβάλλει ο χώρος του μουσείου. Ο τελικός σχεδιασμός επήλθε έπειτα από ικανό αριθμό επαναλήψεων και συνεχών τροποποιήσεων σε παλαιότερες υπάρχουσες μορφές μονωτήρων που είχαν σχεδιαστεί για την εξυπηρέτηση του ίδιου σκοπού.

1.5.2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Η μορφή του μονωτήρα πάνω στον οποίο τοποθετήθηκε ο παραπάνω αμφορέας είναι τετραγωνικού σχήματος και ικανή να τοποθετηθεί επί του βάθρου του εκθέματος χωρίς να αλλοιώνει την αισθητική του.

Αναφερόμενοι στα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν τον μονωτήρα, επισημαίνεται αρχικά ότι αποτελείται από τρία συνδεδεμένα επίπεδα μεταλλικά πλαίσια, τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο, τα οποία επιτρέπουν οριζόντια κίνηση σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Πρόκειται για μία διάταξη από επάλληλα «συρτάρια», της οποίας η επιτυχής λειτουργία έγκειται ακριβώς στη δυνατότητα των πλαισίων να κυλίνουν ανεξάρτητα το καθένα επί του υποκειμένου του (Σχ. 1.8). Η ολίσθηση κάθε πλαισίου επί του υποκειμένου του γίνεται μέσω ειδικών τριβέων κύλισης (sliding bearings). Επιπρόσθετα, οι ράγες κύλισης αποτρέπουν την ανύψωση κατά την εγκάρσια διεύθυνση, προστατεύοντας έτσι από πιθανά φαινόμενα ανατροπής κατά την κίνηση των πλαισίων.

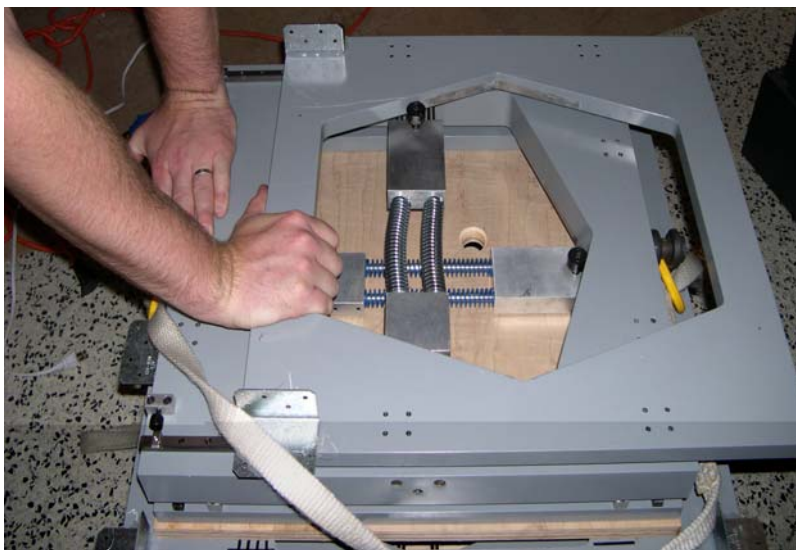
Σχετικά με τις πρόσθετες κατασκευαστικές λεπτομέρειες της διάταξης, αναφέρεται ότι οι εξωτερικές διαστάσεις των πλαισίων είναι 0,625m κατά τις δύο διευθύνσεις του οριζόντιου επιπέδου και 0,122m συνολικό ύψος όπως φαίνεται και στην τομή που παρατίθεται (Σχ. 1.9). Η γωνία κλίσης κάθε τμήματος της καμπύλης κύλισης που βρίσκεται στο εσωτερικό των κινούμενων πλαισίων είναι 20 μοίρες. Ο μονωτήρας (ουσιαστικά τα πλαίσια που έχουν δυνατότητα κίνησης) μπορεί να μετακινηθεί έως

0,235m σε κάθε διεύθυνση κίνησης. Η μάζα που «μονώνεται σεισμικά», αποτελείται από τα πλαίσια, το έκθεμα, τη βιτρίνα του καθώς και κάθε άλλου είδους ερμάρια πάνω από τα πλαίσια της διάταξης. Αναλυτικά, το βάρος του ανώτερου πλαισίου είναι 33,57kg, το βάρος της βιτρίνας και των ερμαρίων 74,84kg, τη στιγμή που ο ίδιος ο αμοφορέας ζυγίζει μόλις 7,71kg. Για το άνω πλαίσιο το «σεισμικά μονωμένο» βάρος ανέρχεται σε 116,12kg και για το κάτω πλαίσιο 180,08kg αντίστοιχα. Το σημαντικά αυξημένο βάρος της συνολικής μάζας που επιδέχεται σεισμικής μόνωσης συγκριτικά με το βάρος του ίδιου του εκθέματος ήταν κάτι που δεν μπορούσε να αποφευχθεί, αφού αποτελούσε έναν περιορισμό που σχετίζονταν με τον ήδη υπάρχοντα σχεδιασμό και την κατασκευή της βιτρίνας.

Η ελαστική λειτουργία του μονωτήρα, οφείλεται στα τοποθετημένα στο εσωτερικό των δύο ανώτερων πλαισίων ελατήρια που έχουν την δυνατότητα συσπείρωσης και αποσυσπείρωσης καθώς κινούνται. Μέσω των ελατηρίων αυτών, το σύστημα εξασφαλίζει την απαιτούμενη δύναμη επαναφοράς ώστε εκτρεπόμενο από την θέση ισορροπίας του κατά τη σεισμική διέγερση να επανέρχεται σε αυτή. Επιχειρείται στη συνέχεια να δοθεί μία πληρέστερη εικόνα της συσκευής ώστε σε συνδυασμό με τις φωτογραφίες που την απεικονίζουν, σε κάτοψη και τομή σε μία χαρακτηριστική θέση (Σχ. 1.9) να γίνει αντιληπτή η λειτουργία της, όταν υποβληθεί σε σεισμική δύναμη. Αρχικά αναφέρεται ότι στη συγκεκριμένη μορφή μονωτήρα τα ελατήρια κάθε διεύθυνσης κίνησης είναι δύο και βρίσκονται επί δύο αντίστοιχα οδηγών ράβδων για το κάθε πλαίσιο. Οι οδηγοί ράβδοι των οποίων τα ελατήρια θα συσπειρωθούν με την κίνηση του άνω πλαισίου είναι αυτές που είναι συγκολλημένες στο εσωτερικό του μεσαίου πλαισίου. Αυτές των οποίων τα ελατήρια θα συσπειρωθούν με την κίνηση του μεσαίου πλαισίου βρίσκονται στο εσωτερικό του πλαισίου της βάσης. Σφαιρικά κύλιστρα που κυλίνουν επί της καμπύλης (στη δεδομένη διάταξη-ευθείας) στην εσωτερική παρειά των πλαισίων, συνδέονται μέσω μεταλλικών στοιχείων ορθογώνιου σχήματος με τις οδηγούς ράβδους του υποκείμενου πλαισίου. Τα ορθογώνια μεταλλικά στοιχεία μπορούν να ολισθαίνουν επί των δύο ράβδων πάνω στις οποίες βρίσκονται τα δύο ελατήρια που αναλογούν στο κάθε πλαίσιο, προκαλώντας επομένως και την παραμόρφωση τους.

Συνοπτικά λοιπόν ο όλος μηχανισμός κίνησης έχει ως εξής: Καθώς μετακινείται, παραδειγματικά, το άνω πλαίσιο του συστήματος, ένας σφαιροτριβέας κυλιέται επί της καμπύλης κύλισης που πρακτικά έχει κατασκευαστεί στην εσωτερική παρειά του πλαισίου. Ένα ορθογωνικό εξάρτημα μόλις το άνω πλαίσιο κινηθεί έστω κατά Δx και

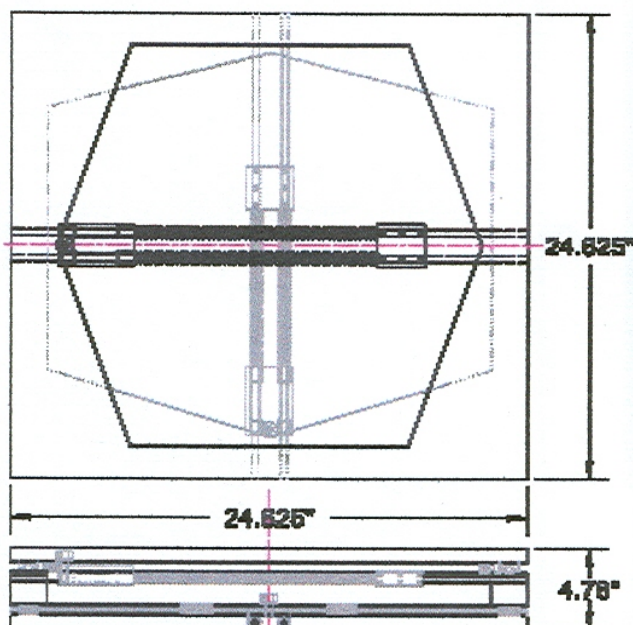
ακριβώς λόγω της κύλισης του σφαιροτριβέα επί της τροχιάς ορισμένης κλίσης, θα ολισθήσει κατά μήκος των δύο οδηγών ράβδων. Θα τείνει να συσπειρώσει επομένως τα εν παραλλήλω τοποθετημένα ελατήρια κατά τμήμα Δy -τόσο δηλαδή όσο είναι και η κατακόρυφη απόσταση που θα απέχει ο τριβέας από την αρχική του (για μηδενική μετατόπιση του πλαισίου) θέση, που ουσιαστικά δεν είναι άλλη από την αιχμή που σχηματίζει το ζεύγος τεμνόμενων ευθειών κύλισης στο εσωτερικό του πλαισίου. Η συσπίρωση των ελατηρίων μέσω του παραπάνω μηχανισμού, προκαλεί την απαιτούμενη δύναμη επαναφοράς ώστε το μετατοπισμένο πλαίσιο να επανέλθει στην αρχική του θέση.



Σχ. 1.8: Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα

Εξαιτίας της εναλλασσόμενης φοράς της σεισμικής δύναμης ο μηχανισμός κίνησης και επαναφοράς του συστήματος επαναλαμβάνεται, με συνεχή εναλλαγή της ευθείας (θετική και αρνητική κλίση) και συνεχίζεται μέχρι να εκτονωθεί η σεισμική ενέργεια. Διευκρινίζεται σε αυτό το σημείο ότι τα ελατήρια έχουν δυνατότητα να συσπειρώνονται από το ένα άκρο τους και μόνο. Στο άλλο άκρο των ελατηρίων -των οποίων το μήκος όπως διαφαίνεται και στην τομή είναι μικρότερο από αυτό των οδηγών ράβδων- είναι τοποθετημένο σταθερό μεταλλικό τμήμα που εξασφαλίζει ότι τα πρώτα δεν θα παραμορφωθούν. Κατά όμοιο τρόπο με το πάνω κινούμενο πλαίσιο θα κινείται και το μεσαίο, σε κάθετη όμως διεύθυνση από αυτή του υπερκείμενού του. Καθώς μετακινείται το μεσαίο πλέον πλαίσιο, συσπειρώνονται τα ελατήρια που

περιβάλλουν τις τοποθετημένες στο πλαίσιο βάσης οδηγούς ράβδους και η διαδικασία απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας επαναλαμβάνεται.

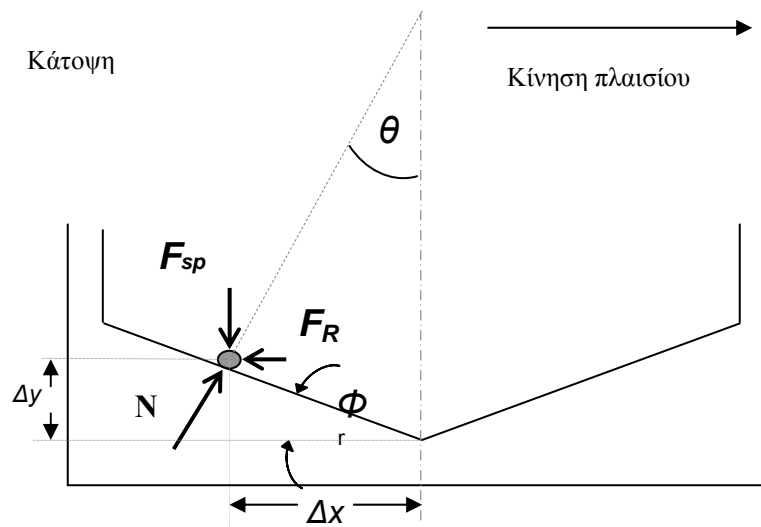


Σχ. 1.9: Κάτοψη και τομή του μονωτήρα

Η θλιπτική δύναμη που παραμορφώνει το κάθε ελατήριο είναι μικρότερη από την αντίστοιχη που θα υπήρχε αν αντί για δύο οδηγούς ράβδους (και συνεπώς ελατήρια) στο σύστημα, υπήρχε μία (με ένα ελατήριο αντίστοιχα). Δικαιολογείται συνεπώς η επιλογή δύο εν παραλλήλω ελατηρίων που θα παραμορφώνονται κατά την κίνηση του κάθε πλαισίου. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των οδηγών ράβδων είναι η δυνατότητα να προσαρμόζονται σε αυτές παραπάνω του ενός ελατήρια ανά ράβδο, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μία επιθυμητή τιμή ακαμψίας του συστήματος εξ' αιτίας της εν σειρά αυτής λειτουργίας των ελατηρίων. Αναφέρεται ακόμη ότι τόσο η δύναμη του ελατηρίου, όσο και η όλη οριζόντια απόκριση του συστήματος γενικότερα, δεν επηρεάζονται από την εγκάρσια συνιστώσα της επιτάχυνσης κατά τον σεισμό. Κατ' επέκταση όμως η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού δεν επιδέχεται σεισμικής μόνωσης μέσω του όλου συστήματος.

Μελετώντας την παραμορφωμένη κατάσταση του μονωτήρα (όπου παραδειγματικά έχει μετακινηθεί το πάνω πλαίσιο κατά τη διεύθυνση κίνησής του), είναι εμφανής ο μηχανισμός εκκρεμούς με τον οποίο μπορεί να προσομοιωθεί η κίνηση του ελατηρίου

επί των καμπυλών κύλισης. Ο μηχανισμός αυτός εξασφαλίζει την επαναφορά του κινούμενου πλαισίου στη θέση ισορροπίας του, που όπως μπορεί να αποδειχτεί



Σχ. 1.10: Μηχανισμός επαναφοράς του συστήματος

και ενεργειακά, είναι η τομή των δύο ευθειών της καμπύλης κύλισης (αναφερόμενοι στην υπάρχουσα μορφή όπου κάθε καμπύλη κύλισης αποτελείται από δύο ευθείες γραμμές). Αναλυτικά, (Σχ 1.10) αν δεχτούμε ότι επί των σφαιροτριβέων ασκείται η δύναμη του ελατηρίου-ίση με την ισοδύναμη δυσκαμψία για σύστημα ελατηρίων πολλαπλασιασμένη με την συσπείρωση Δy του ελατηρίου σε κάθε θέση τότε και λόγω της δυναμικής ισορροπίας στο σύστημα, η ανάλυση της δύναμης αυτής κατά την διεύθυνση κίνησης του πλαισίου είναι η δύναμη F_R που θα τείνει να επαναφέρει το πλαίσιο στην αρχική του θέση.

Η εξίσωση κίνησης που διέπει την συμπεριφορά του μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι η εξής:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = f(t)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στη αδρανειακή δύναμη που οφείλεται στη μάζα, ο δεύτερος στην ελαστική δύναμη του ελατηρίου και ο τρίτος στην εξωτερική δύναμη που για την περίπτωση κίνησης του εδάφους οφείλεται στη σεισμική διέγερση.

Σε μια μετατοπισμένη θέση ισχύει:

$$\tan \varphi = \frac{y(t)}{x(t)}$$

Η ελαστική δύναμη επαναφοράς εκφράζεται από τη σχέση:

$$F_s = F_{sp} \tan \phi$$

Η δύναμη του ελατηρίου είναι:

$$F_{sp} = k_{sp} \Delta y$$

Όπου k_{sp} είναι η δυσκαμψία του ελατηρίου και Δy η μετατόπιση του ελατηρίου στη θέση Δx . Θέτοντας όπου Δy το ισοδύναμο $\Delta y = \Delta x \tan \phi$ η σχέση γίνεται:

$$F_s = k_{sp} \Delta x \tan \phi$$

Επομένως η ελαστική δύναμη επαναφοράς είναι:

$$F_s = k_{sp} \Delta x \tan^2 \phi$$

Η δυσκαμψία του ενός πλαισίου εκφράζεται από τη σχέση

$$k_{iso} = k_{sp} \tan^2 \phi$$

Με αυτόν τον τρόπο η συμπεριφορά του μονοβάθμιου ταλαντωτή ο οποίος προσομοιώνει την όλη λειτουργία του μονωτήρα σε μια διεύθυνση μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει μόνο της μετατόπισης Δx από τη διαφορική εξίσωση:

$$m\ddot{u}(t) + k_{sp} \tan^2 \phi u(t) = f(t)$$

Η ιδιοπερίοδος του ταλαντωτή δίνεται από τη σχέση:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{w}{gk_{iso}}} = 2\pi \sqrt{\frac{w}{g(k_{sp} \tan^2 \phi)}}$$

Όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας, w το βάρος της σεισμικά μονωμένης μάζας, ϕ η κλίση της καμπύλης κύλισης και k_{sp} η δυσκαμψία του ελατηρίου.

1.5.3 Βελτιώσεις προηγούμενων εργασιών

Κατά τη διάρκεια προηγούμενων εργασιών είχαν προταθεί και διερευνηθεί μια σειρά από μετατροπές στο παραπάνω σύστημα. Κυριότερες από αυτές ήταν η προσθήκη αποσβεστήρων ιξώδους συμπεριφοράς και η διαφοροποίηση της χάραξης της καμπύλης κύλισης.

Και οι δύο προαναφερθείσες μετατροπές αποδείχθηκε ότι έχουν ευεργετική επίδραση στη συμπεριφορά του μονωτήρα. Συγκεκριμένα η προσθήκη των αποσβεστήρων μειώνει τις μετακινήσεις χωρίς ιδιαίτερη αύξηση των επιταχύνσεων. Όσον αφορά την διάταξη κύλισης προτείνεται κύλιση επί γενικής συμμετρικής δευτεροβάθμιας καμπύλης. Στην περίπτωση αυτή οι μη γραμμικές εξισώσεις κίνησης λαμβάνουν τη

μορφή των εξισώσεων Duffing για τη δυσκαμψία του συστήματος και τη μορφή των εξισώσεων Van der Pol για την απόσβεση.

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στις παραπάνω βελτιώσεις και επιπλέον διερευνήθηκε η συμπεριφορά του μονωτήρα για κύλιση των αποσβεστήρων και των ελατηρίων σε διαφορετικές καμπύλες.

Η γενική συμμετρική μορφή της δευτεροβάθμιας καμπύλης κύλισης μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$y(x) = ax^2 + b|x| + c$$

Για $a = c = 0$ περιγράφεται ο γραμμικός μονωτήρας της προηγούμενης παραγράφου. Για $c > 0$ εισάγεται μια αρχική θλίψη στο ελατήριο, ενώ για $c < 0$ μια αρχική εφελκυστική δύναμη. Για $b = c = 0$ περιγράφεται ο καθαρά μη γραμμικός μονωτήρας. Για τη γενική έκφραση της καμπύλης η δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου ορίζεται ως εξής:

$$F_s = k_{sp} y(x) y'(x)$$

όπου $y'(x)$ η παράγωγος της καμπύλης κύλισης ως προς x :

$$y(x) = ax^2 + b|x| + c$$

$$y'(x) = 2ax + b \text{sign}(x)$$

όπου $\text{sign}(x)$ το πρόσημο της μετατόπισης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου ορίζεται ως:

$$F_s = k_{sp} (ax^2 + b|x| + c)(2ax + b \text{sign}(x)) \Leftrightarrow$$

$$F_s = k_{sp} [2a^2 x^3 + 3ax^2 b \text{sign}(x) + b^2 x + 2acx + bc \text{sign}(x)]$$

Με την ίδια διαδικασία ορίζεται και η δύναμη απόσβεσης των ιξωδών αποσβεστήρων που εισάγονται στο σύστημα. Για αποσβεστήρες που εισάγονται παράλληλα με τα ελατήρια ισχύει:

$$F_{c1,sp} = c_{d1} \dot{y}(x)$$

όπου c_{d1} ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης.

Επίσης: $\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}$, επομένως

$$F_{c1,sp} = c_{d1} \dot{y}(x) = c_{d1} y'(x) \dot{x} = c_{d1} (2ax + b \text{sign}(x)) \dot{x}$$

Κατά τη διεύθυνση της κίνησης λόγω της γεωμετρίας της καμπύλης κύλισης θα είναι:

$$F_{c1} = F_{c1,sp} y'(x) = c_{d1} (y'(x))^2 \dot{x} = c_{d1} (2ax + b \text{sign}(x))^2 \dot{x} \Leftrightarrow$$

$$F_{c1} = c_{d1} [4a^2 x^2 + 4abx \text{sign}(x) + b^2] \dot{x}$$

Για αποσβεστήρες που εισάγονται παράλληλα με τη διεύθυνση κίνησης ισχύει:

$$F_{c2} = c_{d2} \dot{x}$$

Άρα η συνολική δύναμη απόσβεσης κατά τη διεύθυνση κίνησης παίρνει τη μορφή:

$$F_c = F_{c1} + F_{c2} = c_{d1} [4a^2 x^2 + 4abx \text{sign}(x) + b^2] \dot{x} + c_{d2} \dot{x}$$

Αν επιπλέον ληφθεί υπόψη και η δύναμη τριβής επί των τροχιών τότε αυτή προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_f = \mu mg \cdot \text{sign}(\dot{x})$$

Έτσι η γενική εξίσωση κίνησης δίνεται από τη σχέση:

$$m\ddot{u}(t) + F_s + F_c + F_f = f(t)$$

Η δευτεροβάθμια διαφορική εξίσωση κίνησης διαχωρίζεται σε δύο πρωτοβάθμιες εξισώσεις κατάστασης (state space) και εισάγοντας ως άγνωστη την ταχύτητα παίρνουμε το σύστημα των κάτωθι εξισώσεων:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -a_g - \frac{k_{sp}}{m} [2a^2 x_1^3 + 3abx_1^2 \text{sign}(x_1) + b^2 x_1 + 2acx_1 + bc \text{sign}(x_1)]$$

$$- \frac{c_{d1}}{m} [4a^2 x_1^2 + 4abx_1 \text{sign}(x_1) + b^2] x_2 - \frac{c_{d2}}{m} x_2 - \mu g \cdot \text{sign}(x_2)$$

Με την παραπάνω μορφή δύο πρωτοβάθμιων διαφορικών εξισώσεων, επιλέγοντας τις σταθερές a , b , c και για δεδομένη μάζα, δυσκαμψία ελατηρίων, απόσβεση είναι δυνατή η ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης μη τη μέθοδο Runge-Kutta.

Παρατηρούμε ότι για $b = 0$, οι δευτεροβάθμιοι όροι απαλείφονται ενώ διατηρείται ο γραμμικός και ο κυβικός όρος. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση κίνησης λαμβάνει την μορφή του μη γραμμικού ταλαντωτή Duffing, ενώ για $b = c = 0$ η εξίσωση διατηρεί μόνο το μη γραμμικό κυβικό όρο. Ο δευτεροβάθμιος όρος στη δύναμη απόσβεσης προσδίδει τον χαρακτήρα της εξίσωσης Van der Pol στον ταλαντωτή.

Κεφάλαιο 2

Βασικές έννοιες βέλτιστου σχεδιασμού των κατασκευών

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός των κατασκευών αποτελεί μια σύνθετη επαναληπτική διαδικασία. Μπορεί κανείς να διακρίνει σε αυτή επιμέρους στάδια. Συνήθως η μελέτη ξεκινά με μια ή περισσότερες βασικές ιδέες που αποτελούν την προκαταρκτική μελέτη (conceptual design). Στο επόμενο βήμα οι αρχικές ιδέες υποβάλλονται στον έλεγχο συμμόρφωσης με συγκεκριμένες απαιτήσεις για να καταλήξουν σε αυτό που ονομάζεται προμελέτη (preliminary design). Στο τελικό στάδιο, με βάση την προμελέτη, καταρτίζεται η οριστική μελέτη (detailed design) η οποία περιλαμβάνει πέραν όλων των ελέγχων συμμόρφωσης με συγκεκριμένες απαιτήσεις και όλες τις απαντήσεις σε επιμέρους θέματα δημιουργίας της κατασκευής. Σε πολλές περιπτώσεις ο μελετητής χρειάζεται να διακόψει κάποιο βήμα και να επιστρέψει σε προηγούμενο στάδιο τροποποιώντας είτε την αρχική ιδέα είτε βελτιώνοντας επιμέρους στοιχεία της αρχικής σύλληψης.

Έως σήμερα δεν υπάρχει επεξεργασμένη θεωρία που να καλύπτει την διαδικασία σχεδιασμού των κατασκευών. Η συνθετότητα ακριβώς της διαδικασίας σχεδιασμού που αντανάκλα τη συνθετότητα της ανθρώπινης σκέψης οδηγεί στην αναζήτηση λύσεων σε επιμέρους ζητήματα της διαδικασίας σχεδιασμού.

Ιδιαίτερα μετά το 1940, η μεγαλύτερη πρόοδος έχει επιτευχθεί στη διαδικασία ανάλυσης μιας κατασκευής. Μπορούμε πλέον να αναλύσουμε ταχύτατα και αρκετά ικανοποιητικά μια κατασκευή υπό στατική ή/και δυναμική φόρτιση. Μπορούμε να αναλύσουμε γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα. Η διαδικασία της ανάλυσης αναφέρεται στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς μιας δεδομένης κατασκευής. Τα υπολογιστικά εργαλεία, που διαθέτει στην υπηρεσία του σήμερα ο μηχανικός, επιτρέπουν την ταχύτερη ανάλυση και την εύκολη επέμβαση και τροποποίηση στοιχείων της κατασκευής κατά τη διαδικασία βελτίωσης της συμπεριφοράς της και συμμόρφωσης αυτής προς συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Το επόμενο βήμα στη χρήση των υπολογιστικών εργαλείων είναι η δημιουργία προγραμμάτων που θα μπορούν να κατευθύνουν αυτήν την επαναληπτική διαδικασία

χωρίς την επέμβαση του μηχανικού. Η κατεύθυνση των αλλαγών θα πρέπει να αφορά ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες θα θεωρούνται ως μεταβλητές στη διαδικασία αυτή (design variables). Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί αυτών των μεταβλητών συνθέτουν το χώρο σχεδιασμού (design space). Οι συνδυασμοί που καλύπτουν τους περιορισμούς του προβλήματος (design constraints) ορίζουν το υποσύνολο των αποδεκτών λύσεων (feasible solutions). Όλες οι αποδεκτές λύσεις είναι λύσεις του προβλήματος. Η ιεράρχηση των λύσεων, με σκοπό να επιλεγεί η βέλτιστη δυνατή, προϋποθέτει κάποιο σύστημα βαθμονόμησης των λύσεων με βάση κάποιο κριτήριο. Το κριτήριο αυτό αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματός μας (objective function). Με την ταξινόμηση των λύσεων με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο αυτομάτως προκύπτει η έννοια της βέλτιστης σχεδίασης (optimal design) της κατασκευής ως προς το συγκεκριμένο κριτήριο αναφορικά με τις μεταβλητές που έχουν αρχικά επιλεγεί.

Μια τέτοια καθοδηγούμενη προσπάθεια συστηματικής παραμετρικής διερεύνησης ενός προβλήματος σχεδιασμού είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός των κατασκευών. Από τη φύση του δεν μπορεί να αποτελέσει θεωρία σχεδιασμού των κατασκευών. Εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού, της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών που θα επιλεγούν. Ακόμη η αναγωγή σε μαθηματικό πρόβλημα περιορίζει τη δυνατότητα επιλογής των μεταβλητών σχεδιασμού σε οντότητες που μπορούν παρασταθούν από μια μαθηματική μεταβλητή. Με αυτή την έννοια δεν αποτελεί πανάκεια.

Με βάση τη φύση των μεταβλητών που θα επιλεγούν προκύπτουν τρεις μεγάλες κατηγορίες προβλημάτων βέλτιστου σχεδιασμού των κατασκευών. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει προβλήματα διαστασιολόγησης (sizing optimization). Επιδιώκεται η εύρεση της καταλληλότερης διατομής των μελών του φορέα, ως προς την αντικειμενική συνάρτηση που έχει επιλεγεί. Στα προβλήματα διαμόρφωσης του φορέα (shape optimization) επιδιώκεται η εύρεση των καταλληλότερων συντεταγμένων των κόμβων που ορίζουν ένα γραμμικό ή ένα επιφανειακό φορέα. Τέλος στα προβλήματα τοπολογίας (topology optimization) καθορίζεται η συνδεσμολογία ενός ραβδωτού φορέα ή η ανάγκη ύπαρξης υλικού σε περιοχές ενός επιφανειακού φορέα. Συνήθως η μόρφωση του προβλήματος ανήκει στις δύο πρώτες κατηγορίες οι οποίες είναι και αυτές στις οποίες δίνονται προς το παρόν ευκολότερα απαντήσεις από τη θεωρία βέλτιστου σχεδιασμού. Η τρίτη κατηγορία, παρότι η πιο

ουσιαστική και καθοριστική για τον σχεδιασμό μιας κατασκευής, είναι η πιο δυσχερής στην αντιμετώπιση.

2.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Ο βέλτιστος σχεδιασμός των κατασκευών χρησιμοποιεί μαθηματικά εργαλεία από τη θεωρία βελτιστοποίησης που αρχικά αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην επιχειρησιακή έρευνα (operations research) και σε οικονομικά προβλήματα. Η ανάγκη για τη ανάπτυξη της επιχειρησιακής έρευνας προέκυψε κατά τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο και την προσπάθεια των συμμαχικών και ιδιαίτερα των Αμερικάνικων δυνάμεων να προσδιορίσουν τον πιο αποτελεσματικό τρόπο ώστε να εφοδιάζονται με τα αναγκαία τρόφιμα και πυρομαχικά για (στρατιωτικές) επιχειρήσεις μακριά από τη βάση τους. Έτσι προέκυψε η έννοια της επιχειρησιακής έρευνας συνδεδεμένη κατ' αρχήν με τις στρατιωτικές επιχειρήσεις και όχι με τις οικονομικές επιχειρήσεις. Το τέλος του πολέμου έφερε και το τέλος της χρηματοδότησης της συγκεκριμένης έρευνας. Τα εργαλεία που είχαν ήδη αναπτυχθεί και η έρευνα για την ανάπτυξη νέων βρήκαν πρόσφορο έδαφος στη σφαίρα της οικονομίας. Στη θεωρία βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται κάποιες βασικές έννοιες οι οποίες γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστούν στη συνέχεια

2.2.1 Μεταβλητές σχεδιασμού (design variables)

Το πρόβλημα σχεδιασμού μιας κατασκευής περιγράφεται από μια σειρά παραμέτρους. Όσες από τις παραμέτρους του προβλήματος επιλεγούν ως άγνωστες μεταβλητές που μπορούν να μεταβάλλονται εντός καθορισμένων ορίων ονομάζονται μεταβλητές σχεδιασμού. Οι μεταβλητές αυτές x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ ορίζουν το διάνυσμα των μεταβλητών \mathbf{x} του σχεδιασμού.

Ο καθορισμός των μεταβλητών σχεδιασμού αποτελεί το πρώτο και σημαντικό βήμα στην ορθή κατάστρωση του προβλήματος του βέλτιστου σχεδιασμού μιας κατασκευής. Η ανορθολογική επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού συνήθως οδηγεί είτε σε λάθος συμπεράσματα είτε συχνότερα στη μη λύση του προβλήματος. Μερικές φορές είναι προτιμητέα η αρχική χρησιμοποίηση περισσότερων μεταβλητών από τις απολύτως απαραίτητες για την διατύπωση του προβλήματος. Η παραπάνω επιλογή δίνει μια παραπάνω ευελιξία στην κατάστρωση του προβλήματος. Επιπλέον είναι σημαντικό να επιλέγονται κατά το δυνατόν ανεξάρτητες μεταξύ τους μεταβλητές.

Οι μεταβλητές σχεδιασμού μπορεί να είναι είτε συνεχείς (continuous) είτε διακριτές (discrete) ανάλογα με το πεδίο ορισμού τους. Στην πρώτη περίπτωση πεδίο ορισμού είναι κάποιο υποσύνολο των πραγματικών αριθμών, ενώ στη δεύτερη είναι ένα σύνολο από διακριτές τιμές.

2.2.2 Περιορισμοί σχεδιασμού (design constraints)

Η λύση στο πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού μιας κατασκευής είναι μια σειρά από αριθμητικές τιμές για τις μεταβλητές σχεδιασμού. Ένα συγκεκριμένο διάνυσμα x . Ακόμη και αν η λύση αυτή στερείται φυσικού νοήματος ή είναι αναποτελεσματική για την ικανοποίηση των απαιτήσεων σχεδιασμού παραμένει μία λύση. Όλοι οι περιορισμοί που χρησιμοποιούνται σε ένα πρόβλημα σχεδιασμού και καθιστούν μία λύση αποδεκτή ονομάζονται περιορισμοί σχεδιασμού. Μπορεί να είναι πολύ απλοί όπως τα όρια διακύμανσης των μεταβλητών σχεδιασμού είτε συνθετότεροι που όμως σε κάθε περίπτωση πρέπει να συνδέονται με τις μεταβλητές σχεδιασμού ώστε να επηρεάζουν το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού.

Οι περιορισμοί διακρίνονται ανάλογα με τη φύση τους σε γραμμικούς (linear constraints) ή μη γραμμικούς (nonlinear constraints). Ανάλογα τη φύση των περιορισμών διαφοροποιούνται σημαντικά οι τεχνικές επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Ακόμη οι περιορισμοί διακρίνονται σε περιορισμούς ισότητας (equality constraints) και περιορισμούς ανισότητας (inequality constraints). Είναι ευκολότερη η εύρεση αποδεκτής λύσης σε ένα πρόβλημα που καταστρώνεται μόνο με περιορισμούς ανισότητας.

Χρειάζεται προσοχή κατά τον ορισμό των περιορισμών ώστε να ορίζουν επαρκώς το πεδίο των αποδεκτών λύσεων, ώστε να διευκολύνουν την εύρεση βέλτιστης λύσης, χωρίς όμως να «στραγγαλίζουν» το πρόβλημα ορίζοντας ένα κενό σύνολο ως χώρο λύσεων του προβλήματος.

2.2.3 Αντικειμενική συνάρτηση (objective function)

Όπως προαναφέρθηκε μπορούν να υπάρξουν περισσότερες από μία αποδεκτές λύσεις. Λύσεις οι οποίες θα ικανοποιούν τους περιορισμούς τους προβλήματος. Η επιλογή της βέλτιστης ανάμεσα σε αυτές προϋποθέτει την κατάταξή τους με βάση κάποιο κριτήριο. Το κριτήριο πρέπει να είναι ένα βαθμωτό μέγεθος που θα υπολογίζεται για κάθε διάνυσμα x των μεταβλητών σχεδιασμού. Κάθε τέτοιο κριτήριο αποκαλείται

αντικειμενική συνάρτηση (objective function) του προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού και συμβολίζεται ως f ή $f(\mathbf{x})$ για να τονίζεται η εξάρτηση από το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού. Συνήθως επιλέγεται η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης να αποτελεί τη μέθοδο κατάταξης των αποδεκτών λύσεων, χωρίς βλάβη της γενικότητας καθώς το πρόβλημα μεγιστοποίησης της $f(\mathbf{x})$ μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης της $-f(\mathbf{x})$.

Η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί εξίσου σημαντικό βήμα στη μόρφωση του προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού. Μπορεί είτε να διευκολύνει την επίλυση του προβλήματος είτε σε πολλές περιπτώσεις η μη ορθή επιλογή της οδηγεί σε λάθος συμπεράσματα και συχνά στη μη λύση.

2.2.4 Τοπικό και καθολικό ελάχιστο (local and global minimum)

Ένα στοιχείο δυσκολίας σε κάθε πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού είναι η αδυναμία αργίοι καθορισμού της ύπαρξης ή μη τοπικών ελάχιστων και καθολικού ελάχιστου. Οι ορισμοί του τοπικού και του καθολικού ελάχιστου από μαθηματική σκοπιά δίνονται ως εξής:

Τοπικό ελάχιστο (local minimum). Ένα σημείο \mathbf{x}^* στον χώρο σχεδιασμού θεωρείται τοπικό ή σχετικό ελάχιστο όταν πληροί όλους τους περιορισμούς σχεδιασμού και ισχύει η σχέση $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x})$ για κάθε σημείο εφικτού σχεδιασμού σε μια μικρή ακτίνα γύρω από το σημείο \mathbf{x}^* . Εάν ισχύει μόνο η ανισότητα τότε το σημείο \mathbf{x}^* καλείται αυστηρό (strict) ή μοναδικό (unique) ή ισχυρό (strong) τοπικό ελάχιστο.

Καθολικό ελάχιστο (global minimum). Ένα σημείο \mathbf{x}^* στον χώρο σχεδιασμού θεωρείται καθολικό ή απόλυτο ελάχιστο όταν πληροί όλους τους περιορισμούς σχεδιασμού και ισχύει η σχέση $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x})$ για κάθε σημείο εφικτού σχεδιασμού. Εάν ισχύει μόνο η ανισότητα τότε το σημείο \mathbf{x}^* καλείται αυστηρό (strict) ή μοναδικό (unique) ή ισχυρό (strong) καθολικό ελάχιστο.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν συναρτήσεις περιορισμού τότε ισχύουν οι ίδιοι ορισμοί αλλά σε ολόκληρο το χώρο σχεδιασμού και όχι μόνο στο χώρο των εφικτών σχεδιασμών.

Γενικά εάν η αντικειμενική συνάρτηση είναι συνεχής (continuous) και ο χώρος των εφικτών σχεδιασμών δεν είναι κενός (not empty), είναι κλειστός (closed) και καθορισμένος (bounded), τότε υπάρχει τοπικό ελάχιστο για την $f(\mathbf{x})$. Όταν δεν ισχύουν οι παραπάνω συνθήκες δεν αποκλείεται η ύπαρξη ελαχίστων, απλά δεν μπορεί να τεκμηριωθεί μαθηματικά.

2.2.5 Μαθηματική διατύπωση

Γενικά το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού μιας κατασκευής μπορεί να διατυπωθεί μαθηματικά ως εξής:

Να βρεθεί το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού

$$\mathbf{x}^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

για το οποίο ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση

$$f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

και ικανοποιούνται οι k περιορισμοί ισότητας

$$G_i(\mathbf{x}) = G_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \text{ όπου } i = 1, 2, \dots, k$$

και οι m περιορισμοί ανισότητας

$$G_i(\mathbf{x}) = G_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, \text{ όπου } i = k+1, k+2, \dots, m$$

όπου k και $m-k$ είναι ο συνολικός αριθμός των περιορισμών ισότητας και ανισότητας αντίστοιχα.

(2.1)

Όλα τα προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού των κατασκευών αφής μορφωθούν μπορούν να γραφούν στην παραπάνω μορφή. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι μέθοδοι επίλυσης που έχουν αναπτυχθεί στη θεωρία βελτιστοποίησης.

Μερικές σημαντικές παρατηρήσεις για τη σωστή μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού:

- Οι συναρτήσεις $f(\mathbf{x})$ και $G_i(\mathbf{x})$ πρέπει να εξαρτώνται τουλάχιστον από μία από τις μεταβλητές σχεδιασμού.
- Ο αριθμός των περιορισμών ισότητας πρέπει να είναι μικρότερος ή το πολύ ίσος με τον αριθμό των μεταβλητών σχεδιασμού, δηλ, $k \leq n$. Διαφορετικά το πρόβλημα δεν έχει λύση.
- Δεν υπάρχει αριθμητικός περιορισμός για τους ανισοτικούς περιορισμούς σε αντίθεση με τους περιορισμούς ισότητας.
- Μερικά προβλήματα μπορεί να μην διαθέτουν καθόλου περιορισμούς. Αυτά τα προβλήματα συνηθίζεται να αποκαλούνται προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (unconstrained problems) σε αντίθεση με τα προβλήματα με περιορισμούς (constrained problems).
- Αν όλες οι συναρτήσεις $f(\mathbf{x})$ και $G_i(\mathbf{x})$ είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδιασμού, τότε το πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα γραμμικού

προγραμματισμού (linear programming problem). Στην αντίθετη περίπτωση που έστω και μία συνάρτηση είναι μη γραμμική, τότε το πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού (nonlinear programming problem).

- Ο πολλαπλασιασμός της αντικειμενικής συνάρτησης με μια σταθερά ή η πρόσθεση σε αυτή μιας σταθεράς δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Το ίδιο ισχύει και για τους περιορισμούς. Αλλάζει μόνο η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και όχι το αποτέλεσμα. Δεν επηρεάζεται ο χώρος των αποδεκτών λύσεων, αλλά επηρεάζονται οι διαδικασίες επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης.
- Τα όρια διακύμανσης των μεταβλητών σχεδιασμού μπορούν πολύ εύκολα να γραφούν με τη μορφή ανισοτικών περιορισμών. Παρ' όλα αυτά για αριθμητικούς λόγους είναι προτιμότερο τα όρια διακύμανσης των μεταβλητών σχεδιασμού να δίνονται στην αρχική τους μορφή.

Η ικανοποιητική και ακριβής λύση του παραπάνω προβλήματος εξαρτάται τόσο από τον αριθμό των μεταβλητών σχεδιασμού, όσο και από την κατάλληλη μόνρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης και των συναρτήσεων των περιορισμών.

2.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

2.3.1 Εισαγωγή

Στα προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, ο γενικός στόχος, είναι η μετατροπή του αρχικού προβλήματος σε κάποιο ευκολότερο υποπρόβλημα το οποίο μπορεί να επιλυθεί και χρησιμοποιείται ως βάση μιας επαναληπτικής διαδικασίας σταδιακής προσέγγισης της βέλτιστης λύσης.

Η αρχική αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων βασιζόταν στην μετατροπή του αρχικού προβλήματος με περιορισμούς σε ένα πρόβλημα χωρίς περιορισμούς εισάγοντας μια συνάρτηση ποινής για τους περιορισμούς που παραβιάζονται. Με αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα με περιορισμούς επιλύεται από μια αλληλουχία απλούστερων προβλημάτων χωρίς περιορισμούς, οι λύσεις των οποίων συγκλίνουν στη λύση του αρχικού προβλήματος. Η κατηγορία αυτή απαιτεί πολλές επιλύσεις και δεν ενδείκνυται για προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού.

Αντί των παραπάνω μεθόδων, που θεωρούνται πλέον αναποτελεσματικές, χρησιμοποιούμε μεθόδους που επικεντρώνουν στην επίλυση των εξισώσεων Kuhn – Tucker (KT). Οι εξισώσεις KT είναι αναγκαίες συνθήκες για την ύπαρξη βέλτιστου ενός προβλήματος με περιορισμούς. Στην περίπτωση που η αντικειμενική συνάρτηση $f(\mathbf{x})$ και οι περιορισμοί $G_i(\mathbf{x})$ είναι κυρτές συναρτήσεις τότε οι εξισώσεις KT αποτελούν και ικανή συνθήκη για την ύπαρξη καθολικού ελάχιστου.

Αναφορικά με τη μαθηματική διατύπωση του γενικού προβλήματος βελτιστοποίησης (2.1) οι συνθήκες KT μπορούν να γραφούν ως εξής:

1. Ο σχεδιασμός που αντιστοιχεί στο \mathbf{x}^* είναι επιτρεπτός
2. $\lambda_i G_i(\mathbf{x}^*) = 0, \quad i = k+1, k+2, \dots, m$
3. $\nabla f(\mathbf{x}^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla G_i(\mathbf{x}^*) = 0$

(2.2)

Η πρώτη εξίσωση περιγράφει την απαίτηση ο βέλτιστος σχεδιασμός να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς. Η δεύτερη εξίσωση σημαίνει ότι αν ένας περιορισμός δεν είναι ενεργός (δηλ. $G_i(\mathbf{x}^*) < 0$), τότε ο αντίστοιχος πολλαπλασιαστής Lagrange είναι μηδενικός. Η τελευταία εξίσωση εκφράζει την απαίτηση το διάνυσμα κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης στη βέλτιστη λύση \mathbf{x}^* να έχει αντίθετη φορά από το άθροισμα των διανυσμάτων κλίσεως των ενεργών περιορισμών.

Η επίλυση των συνθηκών KT αποτελεί τη βάση για τους περισσότερους αλγορίθμους μη γραμμικού προγραμματισμού. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιχειρούν να υπολογίσουν τους πολλαπλασιαστές Lagrange απευθείας (direct methods). Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι οι λεγόμενες quasi-Newton. Οι μέθοδοι αυτές, συγκλίνουν διαδοχικά μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας χρησιμοποιώντας πληροφορίες δεύτερης τάξης για την προσέγγιση των συνθηκών KT. Αυτές οι μέθοδοι είναι γνωστές ως μέθοδοι διαδοχικού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (sequential quadratic programming, SQP) διότι ένα υποπρόβλημα δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (QP subproblem) επιλύεται σε κάθε κύρια επανάληψη.

2.3.2 Μέθοδος διαδοχικού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (SQP)

Οι μέθοδοι διαδοχικού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού αποτελούν, τουλάχιστον σήμερα, την καλύτερη επιλογή για την επίλυση προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού. Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν την επίλυση προβλημάτων με

περιορισμούς με τη μέθοδο Newton περίπου όπως γίνεται και κατά την επίλυση προβλημάτων χωρίς περιορισμούς. Σε κάθε επανάληψη γίνεται μια προσέγγιση του μητρώου Hessian της συνάρτησης Lagrange χρησιμοποιώντας μια quasi-Newton μέθοδο. Η προσέγγιση αυτή στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός υποπροβλήματος QP, η λύση του οποίου χρησιμοποιείται για την επιλογή του διανύσματος διεύθυνσης αναζήτησης στο χώρο των λύσεων. Μια γενική μορφή της μεθόδου έχει ως εξής:

Δεδομένου του αρχικού προβλήματος (2.1) η βασική ιδέα είναι η μετατροπή του σε πρόβλημα δευτεροβάθμιου προγραμματισμού βασιζόμενοι σε μια δευτεροβάθμια προσέγγιση των πολλαπλασιαστών Lagrange.

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot g_i(x) \quad (2.3)$$

Ακόμη απλοποιείται η αρχική μορφή του προβλήματος γραμμικοποιώντας τους μη γραμμικούς περιορισμούς ισότητας και ανισότητας.

2.3.3 Υποπρόβλημα δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (QP Subproblem)

Η γενική μορφή του υποπροβλήματος δευτεροβάθμιου προγραμματισμού είναι η εξής:

Να βρεθεί το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού

$$\mathbf{d}^T = (d_1, d_2, \dots, d_n)$$

για το οποίο ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση

$$\frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla f(x_k)^T d$$

και ικανοποιούνται οι k περιορισμοί ισότητας

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, i = 1, 2, \dots, k$$

και οι m-k περιορισμοί ανισότητας

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) \leq 0, i = k+1, k+2, \dots, m$$

όπου k και m-k είναι ο συνολικός αριθμός των περιορισμών ισότητας και ανισότητας αντίστοιχα.

(2.4)

Το παραπάνω υποπρόβλημα μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας μια από τις μεθόδους δευτεροβάθμιου προγραμματισμού. Η λύση χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του επόμενου βήματος της επαναληπτικής διαδικασίας, όπου

$$x_{k+1} = x_k + a_k d_k \quad (2.5)$$

Η παράμετρος a_k ορίζει την απόσταση κίνησης επί της διεύθυνσης αναζήτησης d_k , και υπολογίζεται από μία έρευνα γραμμής ώστε να εξασφαλίζεται μια ικανοποιητική μείωση σε μια συνάρτηση καθόδου (merit function). Το μητρώο H_k είναι ένα θετικά ορισμένο μητρώο το οποίο αποτελεί προσέγγιση του μητρώου Hessian των μερικών παραγώγων δεύτερης τάξης της συνάρτησης Lagrange του προβλήματος. Το H_k μπορεί να προσαρμόζεται σε κάθε επανάληψη με οποιαδήποτε μέθοδο quasi-Newton. Η πιο δημοφιλής είναι η μέθοδος BFGS από τα αρχικά των δημιουργών της Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno.

2.3.4 Η εφαρμογή της μεθόδου SQP

Η μέθοδος του διαδοχικού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού αποτελείται από τρεις κύριες φάσεις.

- ❖ Προσαρμογή του μητρώου Hessian (μητρώο των δεύτερων παραγώγων)
- ❖ Λύση του προβλήματος δευτεροβάθμιου προγραμματισμού για την εύρεση του διανύσματος της διεύθυνσης αναζήτησης
- ❖ Έρευνα γραμμής κατά μήκος του διανύσματος κατεύθυνσης και μείωση της συνάρτησης καθόδου (merit function)

2.3.4.1 Προσαρμογή του μητρώου Hessian

Σε κάθε βήμα της επανάληψης υπολογίζεται μέσω της μεθόδου BFGS ένα θετικά ορισμένο μητρώο H , προσέγγιση του μητρώου Hessian των μερικών παραγώγων δεύτερης τάξης της συνάρτησης Lagrange του προβλήματος, όπου λ_i ($i = 1, 2, \dots, m$) είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange.

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k^T H_k}{s_k^T H_k s_k}$$

όπου

$$s_k = x_{k+1} - x_k$$

$$q_k = \nabla f(x_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_{k+1}) - \left(\nabla f(x_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_k) \right)$$

Η διατήρηση ενός θετικά ορισμένου μητρώου Hessian εξασφαλίζεται εφόσον $q_k^T s_k$ σε κάθε επανάληψη και η αρχική υπόθεση για το H είναι ένα θετικά ορισμένο

μητρώο. Όταν $q_k^T s_k \leq 0$, τότε το q_k τροποποιείται στοιχείο στοιχείο ώστε να εξασφαλίζεται ότι $q_k^T s_k > 0$. Ο στόχος της παραπάνω διαδικασίας είναι να διαταραχθούν το λιγότερο δυνατό τα στοιχεία του q_k , που συνεισφέρουν σε μια θετικά ορισμένη προσαρμογή. Στην αρχική φάση της τροποποίησης, το πιο αρνητικό στοιχείο του γινομένου $q_k^T s_k$ υποδιπλασιάζεται επανειλημμένα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου το γινόμενο $q_k^T s_k$ είναι μεγαλύτερο ή ίσο από μια μικρή αρνητική ποσότητα. Εάν μετά από αυτή τη διαδικασία, το γινόμενο $q_k^T s_k$ είναι ακόμη μη θετικό, τότε ακολουθείτε το δεύτερο βήμα της τροποποίησης. Το διάνυσμα q_k τροποποιείται με την προσθήκη ενός διανύσματος v πολλαπλασιασμένου από μία σταθερά w , δηλ.

$$q_k = q_k + wv_i$$

Όπου

$$v_i = \nabla g_i(x_{k+1}) \cdot g_i(x_{k+1}) - \nabla g_i(x_k) \cdot g_i(x_k)$$

Όταν $(q_k)_i \cdot w < 0$ και $(q_k)_i \cdot (s_k)_i < 0$, διαφορετικά

$$v_i = 0$$

και σταδιακά αυξάνεται το w έως ότου $q_k^T s_k$ γίνει θετικό.

2.3.4.2 Επίλυση του προβλήματος δευτεροβάθμιου προγραμματισμού

Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου διαδοχικού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού, επιλύεται ένα πρόβλημα δευτεροβάθμιου προγραμματισμού της παρακάτω μορφής.

Όπου A_i συμβολίζεται η σειρά i του μητρώου A , διαστάσεων $m \times n$.

Να βρεθεί το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού

$$d^T = (d_1, d_2, \dots, d_n)$$

για το οποίο ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση

$$q(d) = \frac{1}{2} d^T H d + c^T d$$

και ικανοποιούνται οι k περιορισμοί ισότητας

$$A_i d = b_i, i = 1, 2, \dots, k$$

και οι $m - k$ περιορισμοί ανισότητας

$$A_i d \leq b_i, i = k+1, k+2, \dots, m$$

όπου k και $m - k$ είναι ο συνολικός αριθμός των περιορισμών ισότητας και ανισότητας αντίστοιχα.

Η διαδικασία επίλυσης περιλαμβάνει δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση υπολογίζεται ένα αποδεκτό σημείο (εάν υπάρχει). Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας ακολουθίας αποδεκτών σημείων που συγκλίνουν προς τη λύση. Σε αυτή τη μέθοδο διατηρείται ένα ενεργό σύνολο, \overline{A}_k , το οποίο αποτελεί μια εκτίμηση των ενεργών περιορισμών στο σημείο της λύσης.

Το μητρώο \overline{A}_k προσαρμόζεται σε κάθε βήμα k της επαναληπτικής διαδικασίας και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του διανύσματος κατεύθυνσης της έρευνας \hat{d}_k . Ο συμβολισμός \hat{d}_k χρησιμοποιείται για τη διάκριση από την κατεύθυνση d_k των κύριων φάσεων του προβλήματος SQP. Η διεύθυνση της έρευνας \hat{d}_k υπολογίζεται και ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση διατηρώντας τους όποιους ενεργούς περιορισμούς. Ο υποχώρος των αποδεκτών λύσεων για το διάνυσμα \hat{d}_k δημιουργείται από μια βάση Z_k οι στήλες της οποίας είναι ορθογώνιες με την εκτίμηση των ενεργών περιορισμών \overline{A}_k (δηλ. $\overline{A}_k Z_k = 0$). Με αυτόν τον τρόπο η διεύθυνση έρευνας, η οποία δημιουργείται από ένα γραμμικό συνδυασμό των στηλών της Z_k , είναι σίγουρο ότι θα παραμένει στα όρια των ενεργών περιορισμών.

Το μητρώο Z_k μορφώνεται από τις τελευταίες $m - l$ στήλες του άνω τριγωνικού μητρώου \overline{A}_k^T , όπου l είναι ο αριθμός των ενεργών περιορισμών. Προφανώς $l < m$. Δηλαδή το Z_k δίνεται από

$$Z_k = Q[:, l+1 : m], \quad (2.6)$$

Όπου

$$Q^T \overline{A}_k^T = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix}$$

Μόλις το μητρώο Z_k βρεθεί, αναζητείται μια νέα διεύθυνση \hat{d}_k που ελαχιστοποιεί την $q(d)$ όπου το \hat{d}_k είναι στον κενό χώρο των ενεργών περιορισμών. Δηλ., \hat{d}_k είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των στηλών του μητρώου Z_k : $\hat{d}_k = Z_k^T p$ για κάποιο διάνυσμα p .

Έτσι εάν δούμε την τετραγωνική μορφή της συνάρτησης ως συνάρτηση του p , αντικαθιστώντας το \hat{d}_k , έχουμε

$$q(p) = \frac{1}{2} p^T Z_k^T H Z_k p + c^T Z_k^T p$$

Διαφοροποιώντας την παραπάνω έκφραση ως προς p , προκύπτει

$$\nabla q(p) = Z_k^T H Z_k p + Z_k^T c$$

$\nabla q(p)$ είναι η προβολή της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης στον υποχώρο που ορίζεται από το Z_k . Ο όρος $Z_k^T H Z_k$ ονομάζεται projected Hessian. Υποθέτοντας ότι το μητρώο Hessian H είναι θετικά ορισμένο (όπως συμβαίνει στην εφαρμογή της SQP), το ελάχιστο της συνάρτησης $q(p)$ στον υποχώρο με βάση το Z_k βρίσκεται όπου $\nabla q(p) = 0$, το οποίο είναι η λύση του συστήματος γραμμικών εξισώσεων

$$Z_k^T H Z_k p = -Z_k^T c$$

Στη συνέχεια ένα νέο βήμα δημιουργείται ως

$$x_{k+1} = x_k + a_k \hat{d}_k, \text{ όπου } \hat{d}_k = Z_k^T p.$$

Σε κάθε επανάληψη, λόγω της τετραγωνικής φύσης της αντικειμενικής συνάρτησης, υπάρχουν δύο πιθανότητες για το μήκος του βήματος επί της διεύθυνσης \hat{d}_k . Ένα μοναδιαίο βήμα κατά τη διεύθυνση \hat{d}_k είναι το ακριβές βήμα προς το ελάχιστο της συνάρτησης περιοριζόμενης στον κενό χώρο $\overline{A_k}$. Εάν ένα τέτοιο βήμα μπορεί να γίνει χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί, τότε αυτή είναι και η λύση του προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού (2.6). Σε διαφορετική περίπτωση, το βήμα κατά μήκος της διεύθυνσης \hat{d}_k έως τον πλησιέστερο περιορισμό είναι μικρότερο από τη μονάδα και ένας νέος περιορισμός εισάγεται στο μητρώο $\overline{A_k}$ στην επόμενη επανάληψη. Η απόσταση μέχρι τα όρια των περιορισμών προς κάποια κατεύθυνση \hat{d}_k δίνεται από

$$a = \min_i \left\{ \frac{-(A_i x_k - b_i)}{A_i \hat{d}_k} \right\}, i = 1, 2, \dots, m$$

η οποία προσδιορίζεται για τους περιορισμούς οι οποίοι δεν είναι ενεργοί, και όπου η κατεύθυνση \hat{d}_k είναι προς το όριο των περιορισμών, δηλ. $A_i \hat{d}_k > 0, i = 1, 2, \dots, m$.

Όταν n ανεξάρτητοι περιορισμοί περιλαμβάνονται στον συνδυασμό των ενεργών περιορισμών, χωρίς εντοπισμό του ελάχιστου, υπολογίζονται οι πολλαπλασιαστές Lagrange λ_k , έτσι ώστε να ικανοποιείται το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων

$$\bar{A}_k^T \lambda_k = c$$

Εάν όλοι οι πολλαπλασιαστές είναι θετικοί, τότε το σημείο x_k είναι η λύση του προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού. Όμως εάν ένας πολλαπλασιαστής είναι αρνητικός και δεν αντιστοιχεί σε κάποιο περιορισμό ισότητας, τότε το συγκεκριμένο στοιχείο διαγράφεται και μια νέα επανάληψη ξεκινά.

Εκκίνηση – Αρχικές τιμές. Ο αλγόριθμος απαιτεί ένα αποδεκτό σημείο για να ξεκινήσει. Εάν το συγκεκριμένο σημείο που υπολογίζεται από την μέθοδο SQP δεν είναι αποδεκτό, τότε μπορεί να υπολογιστεί ένα σημείο λύνοντας ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού της μορφής

minimize γ
 $\gamma \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{R}^n$

$$A_i x = b_i, i = 1, 2, \dots, k$$

$$A_i x - \gamma \leq b_i, i = k+1, k+2, \dots, m$$

Ο συμβολισμός A_i υποδεικνύει την σειρά i του μητρώου A . Ένα αποδεκτό σημείο (εάν υπάρχει) μπορεί να βρεθεί θέτοντας στο x μια τιμή που να ικανοποιεί τους περιορισμούς ισότητας. Η λύση βρίσκεται από ένα υπο- ή υπερορισμένο σύστημα γραμμικών εξισώσεων που καταστρώνεται από το σύστημα των περιορισμών ισότητας. Εάν υπάρχει λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα τότε η μεταβλητή γ προστίθεται στο μέγιστο ανισοτικό περιορισμό στο συγκεκριμένο σημείο.

2.3.4.3 Έρευνα γραμμής

Η επίλυση του υποπροβλήματος δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (QP subproblem) παράγει ένα διάνυσμα d_k , το οποίο χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί ένα νέο βήμα στην επαναληπτική διαδικασία

$$x_{k+1} = x_k + a_k d_k$$

Ο συντελεστής βήματος a_k προσδιορίζεται ώστε να παράγει μια ικανοποιητική μείωση σε μια συνάρτηση καθόδου (merit function). Πολλές εκφράσεις για την συνάρτηση καθόδου έχουν προταθεί. Μια από αυτές είναι της μορφής

$$\Psi(x) = f(x) + \sum_{i=1}^k r_i \cdot g_{i(x)} + \sum_{i=k+1}^m r_i \cdot \max[0, g_{i(x)}]$$

Στην συγκεκριμένη ο συντελεστής ποινής ορίζεται ως

$$r_i = (r_{k+1})_i = \max\left(\lambda_i \cdot \frac{1}{2} \left((r_k)_i + \lambda_i \right)\right), i = 1, 2, \dots, m$$

Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται θετική συνεισφορά από περιορισμούς που είναι ανενεργοί στη τρέχουσα λύση αλλά ήταν πρόσφατα ενεργοί. Σε αυτήν την εφαρμογή η αρχική τιμή του συντελεστή r_i δίνεται από

$$r_i = \frac{\|\nabla f(x)\|}{\|\nabla g_i(x)\|},$$

όπου $\| \cdot \|$ υποδηλώνεται το ευκλείδειο μέτρο.

Αυτή η έκφραση εξασφαλίζει μεγαλύτερη συνεισφορά στο συντελεστή ποινής από τους περιορισμούς με μικρότερες παραγώγους, το οποίο ισχύει για τους ενεργούς περιορισμούς στη λύση.

Κεφάλαιο 3

Βελτιστοποίηση εξεταζόμενου συστήματος σεισμικής μόνωσης

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε κάθε πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού, αλλά και γενικότερα σε κάθε προσπάθεια περιγραφής ενός φυσικού φαινομένου με τη γλώσσα των μαθηματικών, χρειάζεται ιδιαίτερη φροντίδα διότι από αυτό το βήμα κρίνεται σε μεγάλο βαθμό η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η επιστήμη των μαθηματικών μας παρέχει μια σειρά από μαθηματικά εργαλεία που μπορούν να επιλύσουν ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών προβλημάτων. Όμως η μαθηματική διατύπωση του φυσικού προβλήματος είναι δουλειά του μηχανικού.

Η διαμόρφωση της μαθηματικής έκφρασης του προβλήματος του βέλτιστου σχεδιασμού των κατασκευών συνήθως ξεκινάει με τον προσδιορισμό των μεταβλητών σχεδιασμού. Κανείς θα πρέπει να προσδιορίσει τις ανεξάρτητες μεταβλητές που θα χρησιμοποιήσει για να περιγράψει το σύστημα. Ακολουθεί η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης που θα κατατάξει την αποδοτικότητα του συστήματος. Οφείλει να εξαρτάται από μερικές ή από όλες τις μεταβλητές σχεδιασμού. Διαφορετικός σχεδιασμός προκύπτει ανάλογα την συνάρτηση που θα επιλεγεί. Τελευταίο βήμα ο προσδιορισμός των περιορισμών σχεδιασμού, των απαιτήσεων με τις οποίες πρέπει να συμμορφώνεται η κατασκευή.

Χρειάζεται να είναι ξεκάθαρο ότι όλη η διατύπωση του προβλήματος εξαρτάται από την κατάλληλη επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού. Όλες οι συναρτήσεις του προβλήματος στη συνέχεια θα γραφούν με βάση τις παραπάνω μεταβλητές. Για αυτό είναι κρίσιμος ο ακριβέστερος ορισμός τους.

Συμπερασματικά μέσω των ακόλουθων βημάτων το πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού αποκτά το μαθηματικό του κουστούμι.

1. Αναγνώριση και προσδιορισμός των μεταβλητών σχεδιασμού.
2. Προσδιορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης και διατύπωσή της μέσω των μεταβλητών σχεδιασμού.

3. Προσδιορισμός των περιορισμών σχεδιασμού και διατύπωσή τους μέσω των μεταβλητών σχεδιασμού.

3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ

3.2.1 Επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού

Παρατηρώντας το συγκεκριμένο σύστημα σεισμικής μόνωσης κανείς μπορεί εύκολα να διακρίνει μια σειρά από παραμέτρους που μπορεί να μεταβάλλονται κατά το σχεδιασμό του συστήματος. Η μάζα του εκθέματος, το μήκος του μονωτήρα, οι σταθερές των ελατηρίων και των αποσβεστήρων, οι συντελεστές της παραβολικής χάραξης της καμπύλης, ο συντελεστής της τριβής είναι τα κυριότερα.

Από τα παραπάνω μια πρώτη κατηγορία είναι αυτή των οποίων το μέγεθος καθορίζεται μονοσήμαντα πριν το σχεδιασμό και δεν μπορεί να μεταβάλλονται από τον μελετητή του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν η μάζα του εκθέματος και το μήκος του μονωτήρα, το οποίο συνήθως προς θλίψη του μελετητή περιορίζεται από αισθητικούς λόγους. Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να εισαχθούν στον κώδικα που συντάχθηκε με την εκάστοτε τιμή τους.

Για τα υπόλοιπα μεγέθη θα μπορούσε να ειπωθεί ότι μπορούν και πρέπει να αποτελούν μέρος των μεταβλητών σχεδιασμού καθώς η τιμή τους είναι αντικείμενο του σχεδιασμού. Εντούτοις απορρίφθηκαν αυτές για τις οποίες η είσοδός τους στο μοντέλο προσθέτει περισσότερες αβεβαιότητες παρά εξασφαλίζει την πιστότερη προσομοίωση του συστήματος. Κατ' αρχήν είναι ο συντελεστής c της γενικής δευτεροβάθμιας καμπύλης κύλισης, το φυσικό νόημα του οποίου είναι η προσθήκη κάποιου βαθμού προέντασης στο σύστημα. Επιπλέον είναι ο συντελεστής τριβής, διότι τα μαθηματικά εργαλεία που διαθέτουμε δεν μπορούν να προσομοιώσουν αποτελεσματικά της ιδιαίτερη φύση της τριβής. Παρ' όλα αυτά μια σειρά αναλύσεων πραγματοποιήθηκε θεωρώντας σταθερό συντελεστή τριβής και αναζήτηση του βέλτιστου σχεδιασμού σε αυτήν την περίπτωση.

Τελικά οι μεταβλητές σχεδιασμού που επιλέχθηκαν κατά την παρούσα εργασία είναι με τους συμβολισμούς που παρουσιάζονται και στον κώδικα που συντάχθηκε οι εξής:

k_{sprx} : συντελεστής δυσκαμψίας του ελατηρίου σε kN/m

- a : συντελεστής τετραγωνικού όρου γενικής δευτεροβάθμιας καμπύλης
 b : συντελεστής γραμμικού όρου γενικής δευτεροβάθμιας καμπύλης
- Cdx1 : συντελεστής ιξώδους απόσβεσης αποσβεστήρα κάθετα προς τη διεύθυνση κίνησης σε kNsec/m
 Cdx2 : συντελεστής ιξώδους απόσβεσης αποσβεστήρα παράλληλα με τη διεύθυνση κίνησης σε kNsec/m

Στο κεφάλαιο 4 στο οποίο μελετάται βαθύτερα η συμπεριφορά του μονωτήρα και οι πιθανές βελτιώσεις που προκύπτουν από τη διαφοροποίηση των καμπυλών λειτουργίας των ελατηρίων και των αποσβεστήρων γίνεται μια διάκριση ανάμεσα στους συντελεστές της δευτεροβάθμιας καμπύλης για τα δύο συστήματα, απόσβεσης και δυσκαμψίας.

3.2.2 Επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης

Στην παρούσα εργασία το σύστημα σεισμικής μόνωσης αντιμετωπίζεται ως ένας καταναλωτής σεισμικής ενέργειας. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από το βαθμό στον οποίο περιορίζει την μεταφορά της σεισμικής ενέργειας στο μουσειακό έκθεμα και γενικότερα στην ανωδομή. Όσο μικρότερο είναι το ποσό της ενέργειας αυτής τόσο μικρότερες θα είναι και οι επιταχύνσεις και οι σχετικές μετατοπίσεις που θα αναπτυχθούν στην ανωδομή.

Με αυτήν την έννοια μέτρο της αποτελεσματικότητας του συστήματος σεισμικής μόνωσης είναι η ελαχιστοποίηση της κινητικής ενέργειας που περικλείει τελικά ο μονοβάθμιος ταλαντωτής. Είναι γνωστό ότι $E_k = \frac{1}{2} m \dot{u}^2$, άρα είναι προφανές ότι ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας του συστήματος σεισμικής μόνωσης, εφόσον η μάζα είναι σταθερή, είναι η ποσότητα \dot{u}^2 , δηλ η απόλυτη ταχύτητα που αναπτύσσεται στο έκθεμα.

Είναι γνωστό ότι $\dot{u} = \int \ddot{u} dt$. Άρα τελικά, κριτήριο είναι η ποσότητα που προκύπτει από ολοκλήρωση των απόλυτων επιταχύνσεων που αναπτύσσονται στο έκθεμα. Εντούτοις για λόγους υπολογιστικού φόρτου δεν επιλέχθηκε η αριθμητική ολοκλήρωση της καμπύλης απόλυτων επιταχύνσεων, αλλά προτιμήθηκε μια απλοποιητική έκφραση του ολοκληρώματος της επιτάχυνσης. Προτιμήθηκε το

άθροισμα των απόλυτων τιμών των απόλυτων επιταχύνσεων που αναπτύσσονται στον ταλαντωτή στα διακριτά χρονικά σημεία του επιταχυνσιογραφήματος. Μια παραλλαγή της παραπάνω ποσότητας που επίσης χρησιμοποιήθηκε με εξίσου καλά αποτελέσματα είναι το άθροισμα των τετραγώνων των απόλυτων επιταχύνσεων που αναπτύσσονται στον ταλαντωτή στα διακριτά χρονικά σημεία του επιταχυνσιογραφήματος. Και οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, όπως θα φανεί, συγκλίνουν στην ίδια συμπεριφορά του μονωτήρα από διαφορετικό δρόμο όμως, συγκλίνοντας η καθεμιά σε διαφορετικές τιμές για τις μεταβλητές σχεδιασμού.

3.2.3 Επιλογή περιορισμών σχεδιασμού

Κάθε σύστημα σεισμικής μόνωσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρειάζεται να σχεδιασθεί ώστε να περιορίζει τις απόλυτες επιταχύνσεις της ανωδομής παραμένοντας εντός ανεκτών ορίων σχετικών μετατοπίσεων. Θα μπορούσε κανείς σωστά να ισχυριστεί ότι σχέση αυτών των δύο μεγεθών είναι αντικείμενο ενός πολυκριτηριακού βέλτιστου σχεδιασμού.

Στην περίπτωση μας όμως, όπως και σε άλλες περιπτώσεις σχεδιασμού συστημάτων σεισμικής μόνωσης, για διάφορους λόγους, κυρίως αισθητικούς και λειτουργικούς, είναι καθορισμένο το ανώτατο όριο επιτρεπτών σχετικών μετατοπίσεων. Με αυτήν την έννοια το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού του συστήματος σεισμικής μόνωσης μεταγράφεται: «πώς μπορώ να περιορίσω τις απόλυτες επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή μου δεδομένου του άνω ορίου των σχετικών μετατοπίσεων».

Με βάση αυτήν την γραφή ως περιορισμοί του προβλήματος καθορίστηκαν ο περιορισμός των απόλυτων επιταχύνσεων κάτω του ορίου των $1,50\text{m/s}^2$ για τον σχεδιασμό για μεμονωμένη σεισμική καταγραφή και κάτω του ορίου των $2,00\text{m/s}^2$ για τον καθολικό σχεδιασμό, δηλ. προσαυξημένο κατά 0,30 περίπου. Και στις δύο περιπτώσεις οι σχετικές μετατοπίσεις ζητείται να διατηρηθούν κάτω από το όριο που επιβάλλουν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα, ήτοι το ήμισυ του μήκους του.

Η λύση που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού χρειάζεται ακόμη να έχει φυσικό νόημα. Οι μεταβλητές σχεδιασμού πρέπει να είναι μη αρνητικές. Ο παραπάνω περιορισμός, όπως έχει αναφερθεί για αριθμητικούς λόγους, δόθηκε στην αρχική μορφή και όχι ως ανισοτικός περιορισμός.

3.3 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

3.3.1 Οι σεισμικές καταγραφές

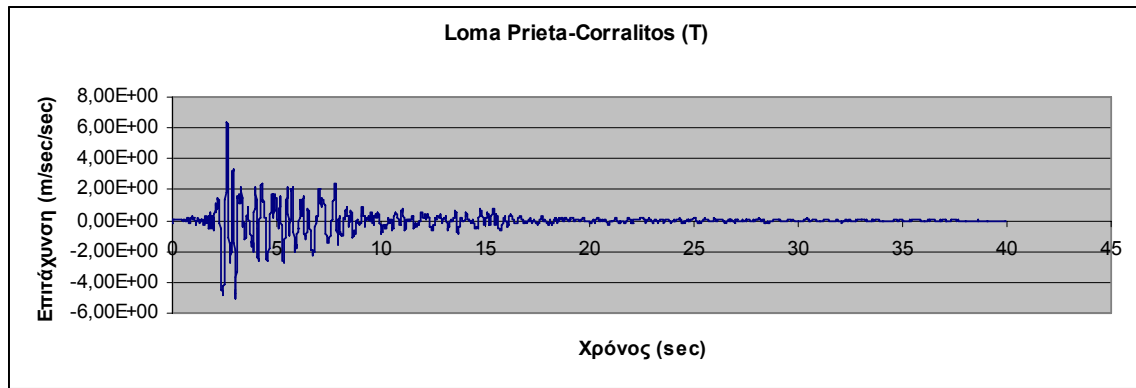
Η αποτελεσματικότητα του συστήματος σεισμικής μόνωσης μελετήθηκε, στην παρούσα εργασία, με την χρήση των επιταχυνσιογραφημάτων που επελέγησαν από τους υπεύθυνους του μουσείου J.Pol Getty για την αρχική μελέτη του συστήματος. Η ίδια ομάδα σεισμικών καταγραφών χρησιμοποιήθηκε και στις μετέπειτα εργασίες που αφορούν το συγκεκριμένο σύστημα. Θεωρείται ότι καλύπτουν τις ανάγκες μελέτης του συστήματος παρότι δεν ανταποκρίνονται στα δεδομένα του ελληνικού χώρου. Για λόγους συνέχειας της έρευνας διατηρήθηκε η συγκεκριμένη επιλογή χρονοϊστοριών. Η ομάδα επιταχυνσιογραφημάτων, για την οποία θα εξεταστεί ο μονωτήρας, περιλαμβάνει τρεις καταγραφές από τον σεισμό Loma Prieta το 1989 μία καταγραφή από το σεισμό του Northridge το 1994 και τρεις του σεισμού Chi-Chi το 1999 στην Taiwan. Υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα εργασία έχει γίνει η παραδοχή ότι το προστατευόμενο έκθεμα δεν δύναται να κινηθεί διαφορετικά από το άνω κινούμενο πλαίσιο της διάταξης, στο οποίο στηρίζεται και δεν εξετάζεται επομένως για φαινόμενα ολίσθησης και ανατροπής. Στους πίνακες που ακολουθούν είναι συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά των καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν και δίνονται τα επιταχυνσιογραφήματα και τα φάσματά των.

Σεισμός	Καταγραφή	Απόσταση από ρήγμα (km)	Κατηγορία εδάφους	Χρονική διάρκεια (sec)
Loma Prieta	Corralitos	3.4	C	39.94
	Gilroy #6	18.3	C	39.95
	Saratoga	8.5	C	39.95
Northridge	Rinaldi	7.1	C	14.945
Chi-Chi	TCU074	13.5	C	89.995
	TCU075	1.5	C	89.995
	TCU129	1.2	C	89.995

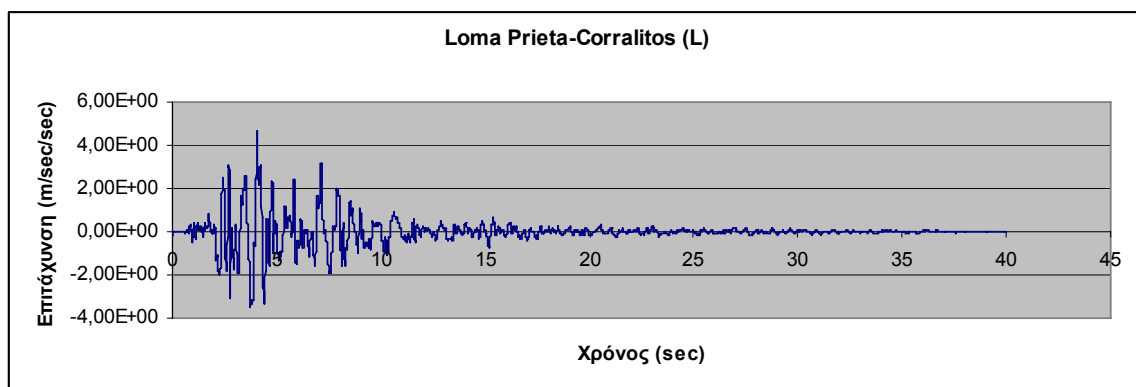
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των χρησιμοποιηθέντων καταγραφών

Χαρακτηριστικά μεγέθη της ομάδας καταγραφών								
Σεισμός	M _w	Καταγραφή		HP(Hz)	LP	PGA(g)	PGV(cm/s)	PGD(cm)
Loma Prieta	7	Corralitos	CLS000	0.2	40	0.644	55.2	10.88
			CLS090	0.2	40	0.479	45.2	11.37
		Gilroy #6	GO6000	0.2	38	0.126	12.8	4.74
			GO6090	0.2	31	0.17	14.2	3.79
		Saratoga	STG000	0.1	38	0.512	41.2	16.21
			STG090	0.1	50	0.324	42.6	27.53
		Northridge	6.7	Rinaldi	RRS228	-	-	0.838
RRS318	-				-	0.472	73	19.76
Chi-Chi (Chi 2001)	7.6	TCU074	TCU074-N	0.1	50	0.349	40.9	15.69
			TCU074-W	0.13	50	0.597	73.3	20.44
		TCU075	TCU075-N	0.04	50	0.264	38.2	33.23
			TCU075-W	0.04	50	0.333	88.3	86.45
		TCU129	TCU129-N	0.03	50	0.634	36.1	28.87
			TCU129-W	0.03	50	1.01	60	50.15

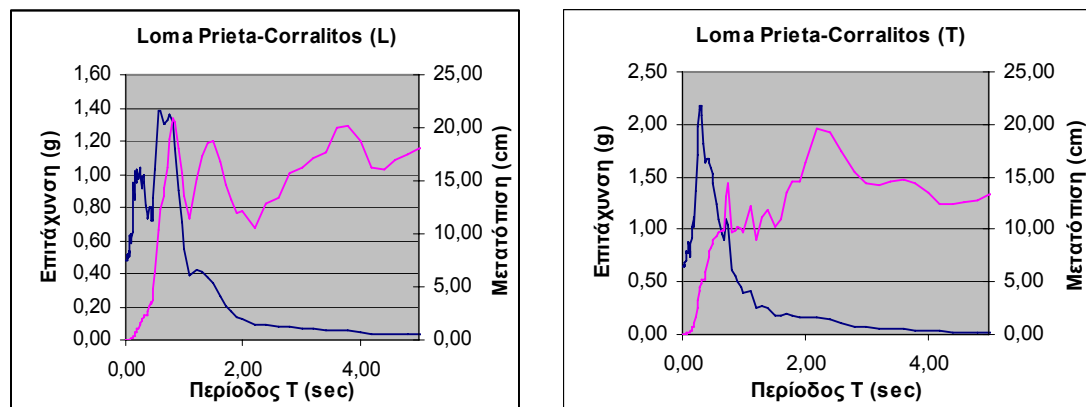
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη της ομάδας καταγραφών



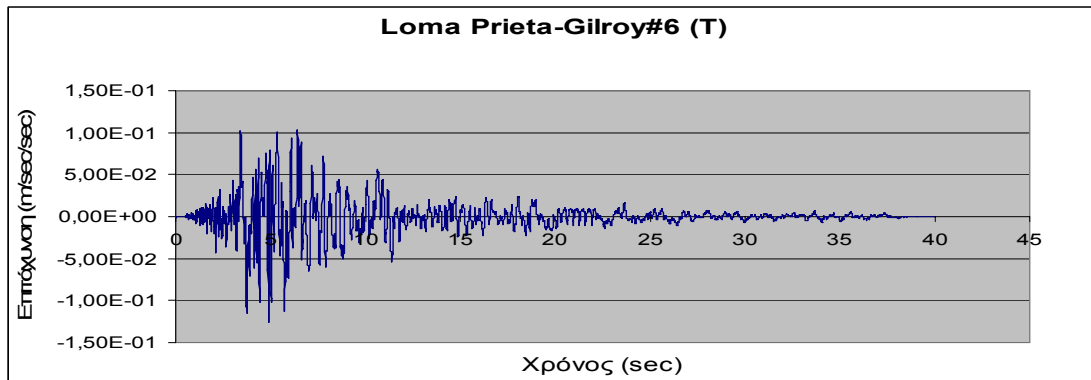
Σχ. 3.1: Εγκάρσια καταγραφή Corralitos (Loma Prieta)



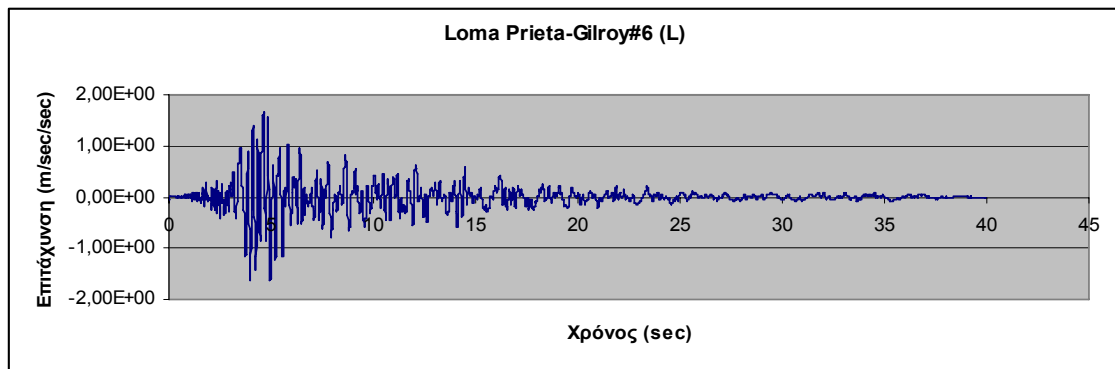
Σχ. 3.2: Διαμήκης καταγραφή Corralitos (Loma Prieta)



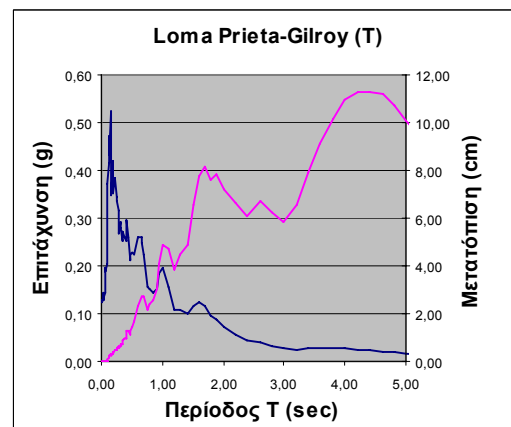
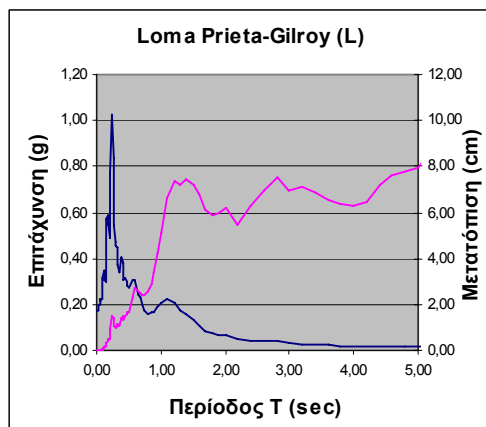
Σχ. 3.3: Φάσματα απόλυτης επιτάχυνσης - σχετικής μετατόπισης καταγραφή Corralitos (Loma Prieta)



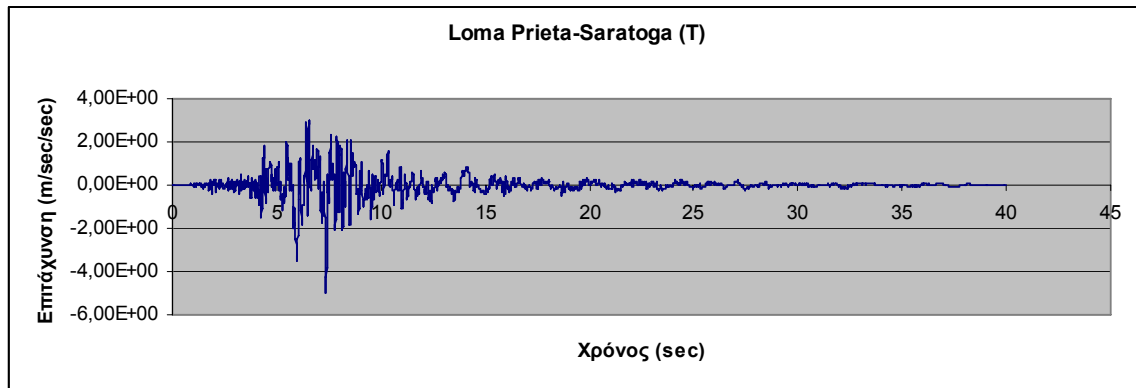
Σχ. 3.4: Εγκάρσια καταγραφή Gilroy#6 (Loma Prieta)



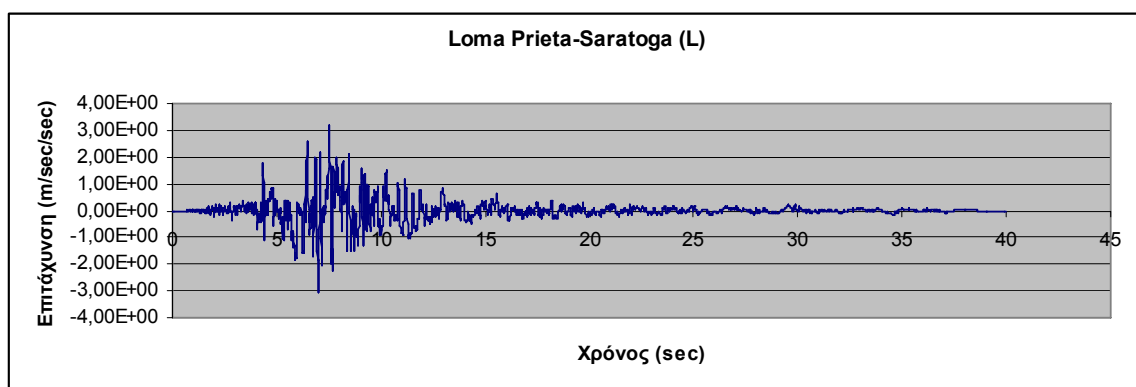
Σχ. 3.5: Διαμήκης καταγραφή Gilroy#6 (Loma Prieta)



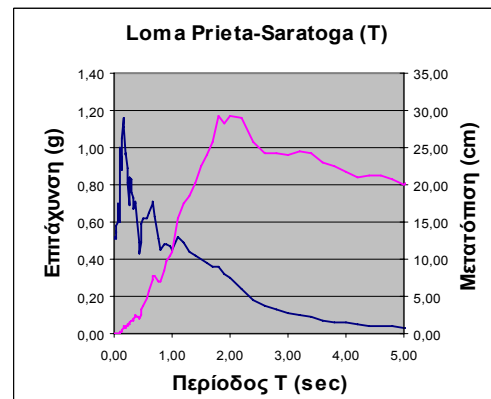
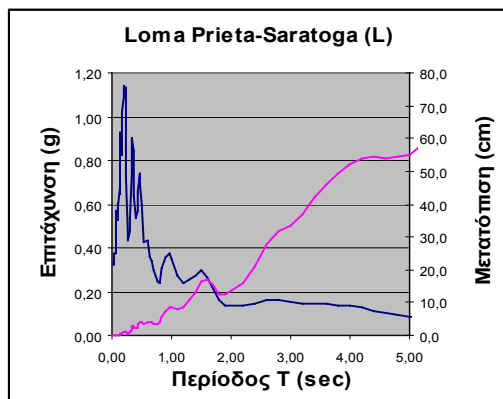
Σχ. 3.6: Φάσματα απόλυτης επιτάχυνσης - σχετικής μετατόπισης καταγραφή Gilroy#6 (Loma Prieta)



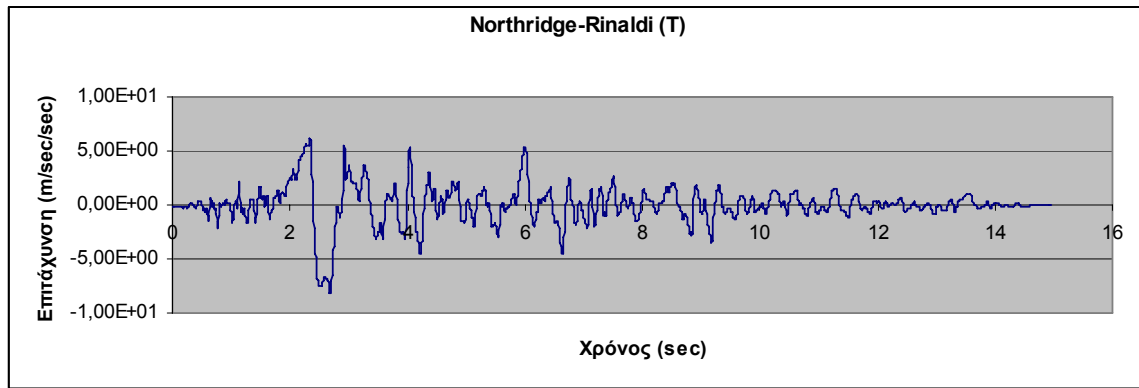
Σχ. 3.7: Εγκάρσια καταγραφή Saratoga (Loma Prieta)



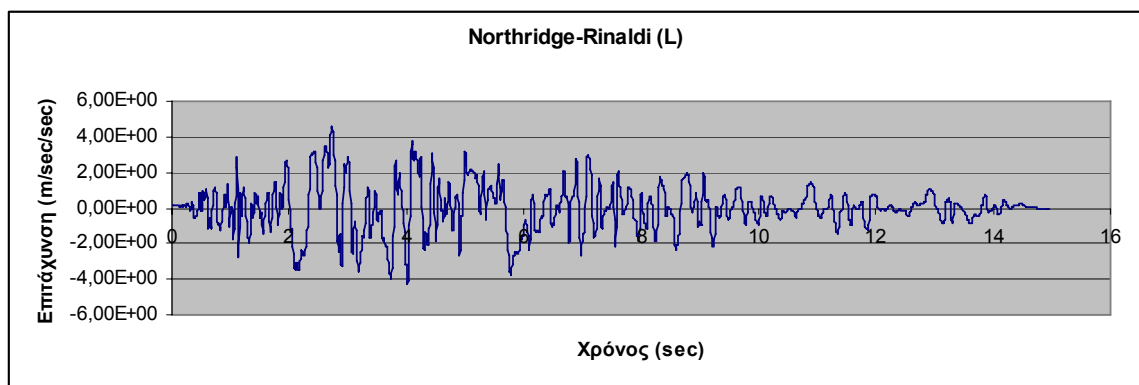
Σχ. 3.8: Διαμήκης καταγραφή Saratoga (Loma Prieta)



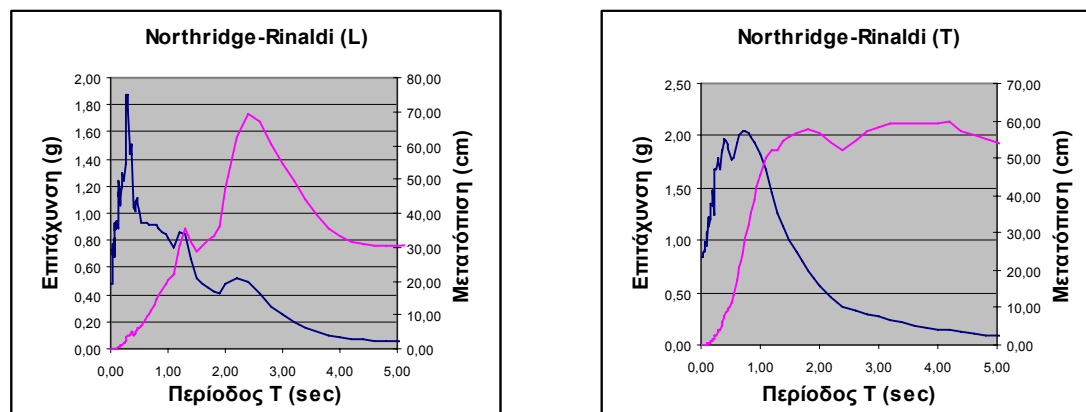
Σχ. 3.9: Φάσματα απόλυτης επιτάχυνσης - σχετικής μετατόπισης καταγραφή Saratoga (Loma Prieta)



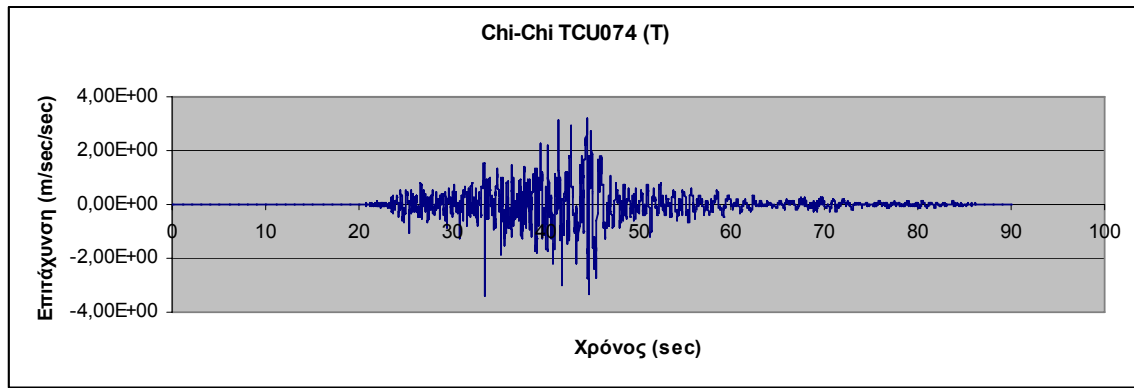
Σχ. 3.50: Εγκάρσια καταγραφή Rinaldi (Northridge)



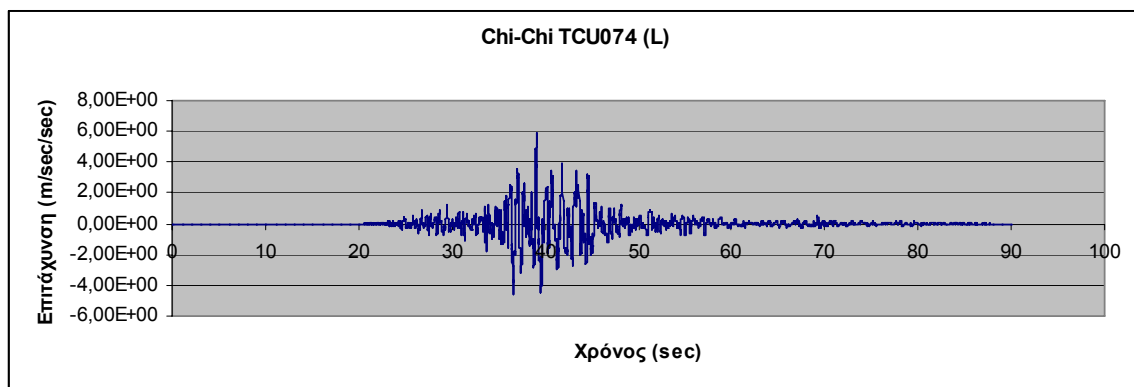
Σχ. 3.61: Διαμήκης καταγραφή Rinaldi (Northridge)



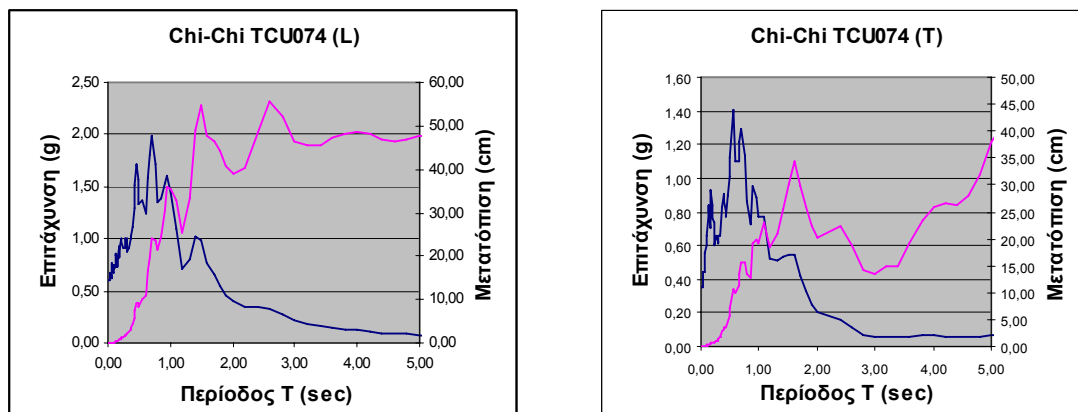
Σχ. 3.72: Φάσματα απόλυτης επιτάχυνσης - σχετικής μετατόπισης καταγραφή Rinaldi (Northridge)



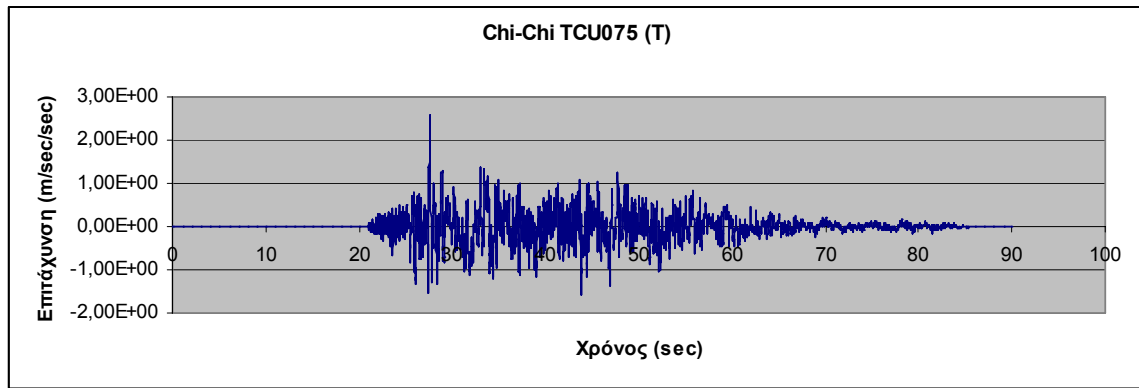
Σχ. 3.83: Εγκάρσια καταγραφή TCU074 (CHI CHI)



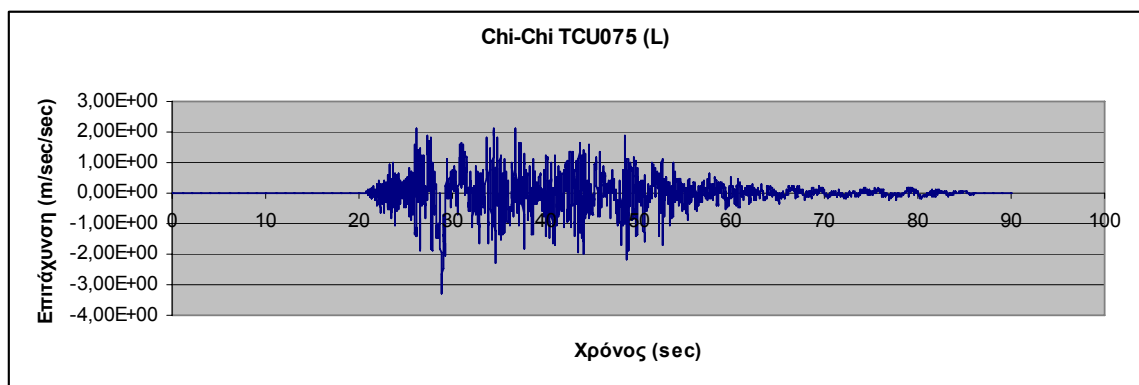
Σχ. 3.94: Διαμήκης καταγραφή TCU074 (CHI CHI)



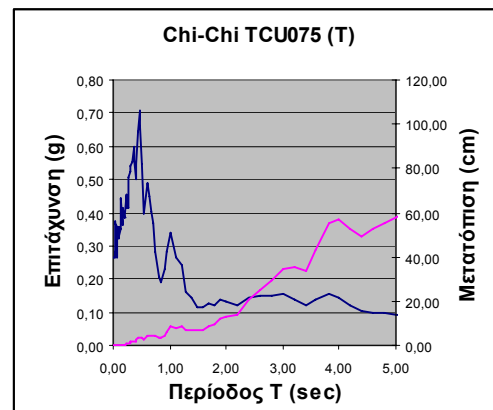
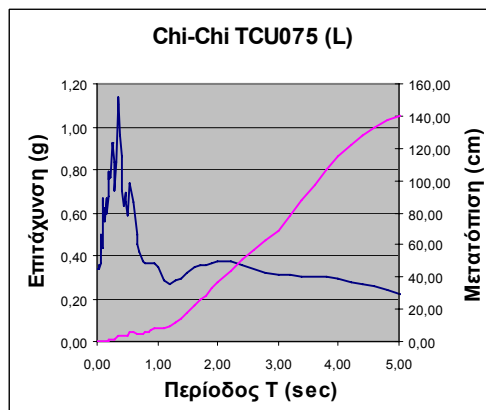
Σχ. 3.105: Φάσματα απόλυτης επιτάχυνσης-σχετικής μετατόπισης-καταγραφή TCU074 (CHI CHI)



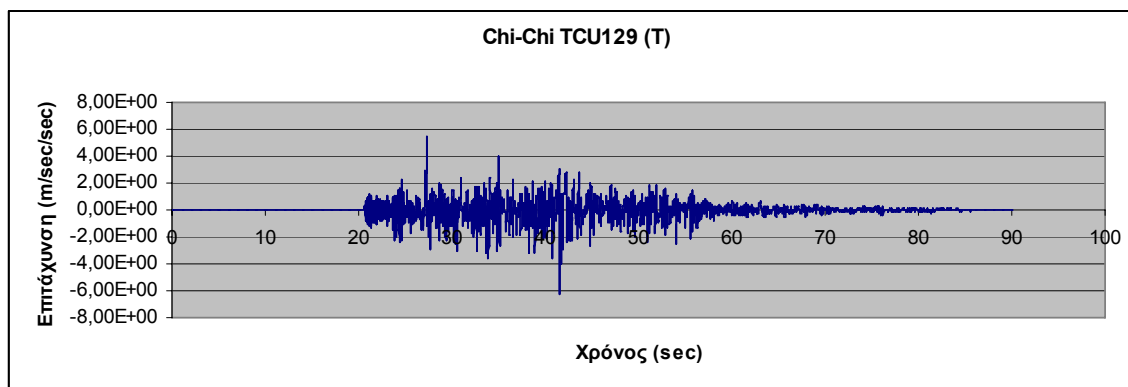
Σχ. 3.116: Εγκάρσια καταγραφή TCU075 (CHI CHI)



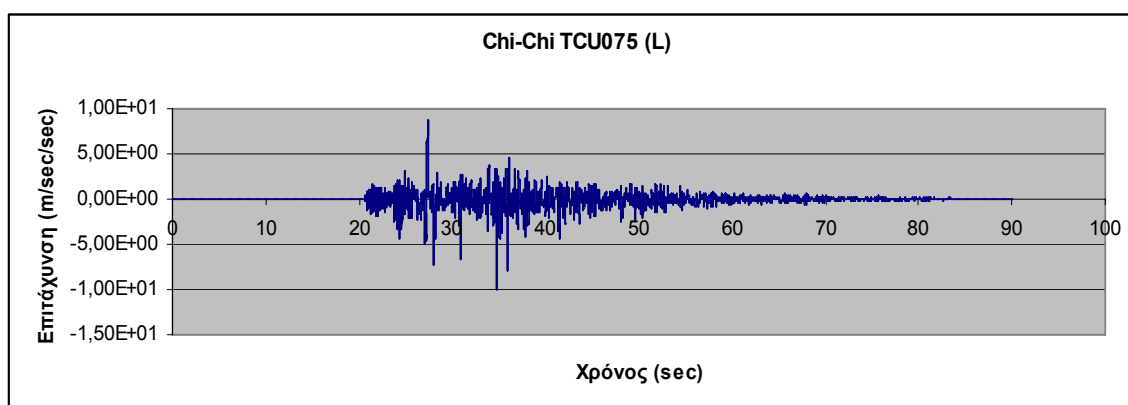
Σχ. 3.127: Διαμήκης καταγραφή TCU075 (CHI CHI)



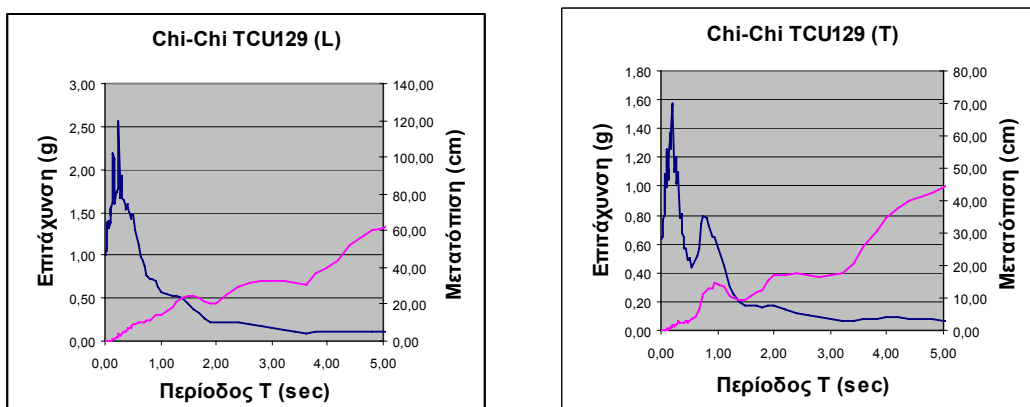
Σχ. 3.18: Φάσματα απόλυτης επιτάχυνσης-σχετικής μετατόπισης-καταγραφή TCU075 (CHI CHI)



Σχ. 3.139: Εγκάρσια καταγραφή TCU129 (CHI CHI)



Σχ. 3.130: Διαμήκης καταγραφή TCU129 (CHI CHI)



Σχ. 3.141: Φάσματα απόλυτης επιτάχυνσης-σχετικής μετατόπισης-καταγραφή TCU075 (CHI CHI)

Από κάθε ζεύγος σεισμικών καταγραφών (διαμήκης και εγκάρσια καταγραφή) επιλέχθηκε μία. Ακολουθούν σχολιασμοί επί των καταγραφών εκείνων που επιλέχθηκαν να εισαχθούν στη μελέτη.

Loma Prieta 1989/10/17

- Η καταγραφή Corralitos (T) (Σχ. 3.11) παρουσιάζει χαμηλές τιμές εδαφικής επιτάχυνσης και σχεδόν σταθερού εύρους για το μεγαλύτερο μέρος της διάρκειας της. Παρατηρούνται υψηλές τιμές απόλυτης επιτάχυνσης για μικρές περιόδους ενώ για περίοδο περί τα 2 sec παρατηρείται χαμηλή επιτάχυνση και όχι απαγορευτικά μεγάλη μετακίνηση.
- Η καταγραφή Gilroy (L) (Σχ. 3.5) είναι λιγότερο 'ισχυρή' από την προηγούμενη και πάλι περί τα 2 sec η μετακίνηση δείχνει να είναι η πλέον επιθυμητή συγκριτικά με εκείνη για περιόδους τόσο μεγαλύτερες των 2 sec όσο και μικρότερες.
- Η καταγραφή Saratoga (T) (Σχ. 3.) αντιθέτως παρουσιάζει αιχμή στο φάσμα σχετικών μετατοπίσεων για περίοδο 2sec ενώ για περίοδο 1-1.5 sec η μετατόπιση είναι συγκριτικά μικρότερες και η επιτάχυνση επίσης μακριά από την αιχμή του αντίστοιχου φάσματος.

Northridge 1994/01/17

- Η καταγραφή Rinaldi (T) (Σχ. 3.10) παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές μετατοπίσεις για περιόδους μεγαλύτερες από 1 sec ενώ η μέγιστη δυνατή μετατόπιση του μονωτήρα δε ξεπερνιέται μόνο για περιόδους μικρότερες από 0.7 sec.

Chi-Chi 2001/09/21

- Η καταγραφές του σεισμού Chi Chi επιφέρουν χαμηλές μετατοπίσεις μόνο για μικρές περιόδους (μικρότερες από 1 sec). Παρατηρείται μια πεπλατυσμένη αιχμή του φάσματος επιταχύνσεων για περιόδους 0.5-1sec για τη καταγραφή TCU074.

3.3.2 Επικλιμάκωση των καταγραφών

Στην αντισεισμική μελέτη μιας κατασκευής επιτρέπεται η χρησιμοποίηση πραγματικών ή/και συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων. Σύμφωνα με τον ΕΑΚ2000 η χρησιμοποίησή τους επιτρέπεται εφόσον πληρούνται οι κάτωθι προϋποθέσεις:

- a) Χρησιμοποιούνται τουλάχιστον 5 διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα. Για οριζόντιες κινήσεις επιλέγονται οριζόντιες συνιστώσες. Τα επιταχυνσιογραφήματα σχεδιασμού για την οριζόντιες κινήσεις επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν και για την κατακόρυφη κίνηση.

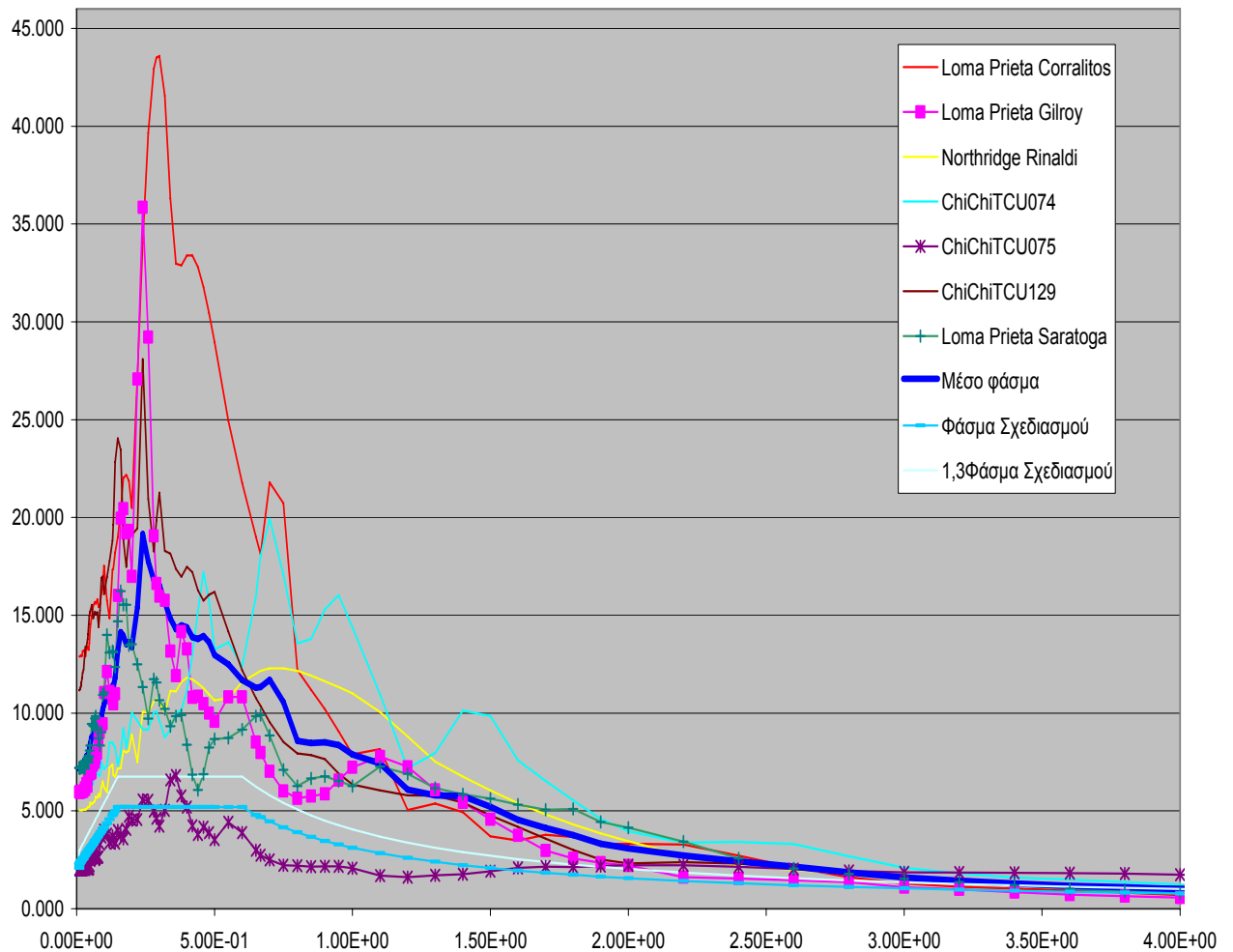
- b) Επιλέγονται ώστε να αντιπροσωπεύουν, κατά το δυνατόν, τις σεισμοτεκτονικές, γεωλογικές, εδαφοδυναμικές συνθήκες της περιοχής του δομήματος.
- c) Είναι ψηφιοποιημένα ανά 0,02sec, το μέγιστο.
- d) Έχουν διάρκεια σύμφωνη με τις σεισμοτεκτονικές, γεωλογικές, εδαφοδυναμικές και εν γένει τοπικές συνθήκες της περιοχής του έργου.
- e) Το μέσο φάσμα, δηλαδή ο μέσος όρος των φασμάτων των επιταχυνσιογραφημάτων, είναι ισοδύναμο με το φάσμα σχεδιασμού κατά ΕΑΚ2000 για απόσβεση 5%. Τα φάσματα θεωρούνται ισοδύναμα αν οι τεταγμένες του μέσου φάσματος ικανοποιούν τις εξής συνθήκες:
- Είναι ανώτερες ή ίσες των αντίστοιχων τεταγμένων του φάσματος ΕΑΚ2000 για περιόδους μέχρι 0,20sec.
 - Για περιόδους πάνω από 0,20sec επιτρέπεται το 10% των τιμών να είναι κατώτερες μέχρι 5%.
- f) Οι τεταγμένες των φασμάτων των επιταχυνσιογραφημάτων σχεδιασμού υπολογίζονται κατά ελάχιστο στις περιόδους που προκύπτουν από:
- 18 ίσα βήματα μεταξύ 0,01 και 1 sec
 - 10 ίσα βήματα μεταξύ 1 και 2 sec
 - 8 ίσα βήματα μεταξύ 2 και 4 sec

Με βάση τα παραπάνω και την διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά σε Κεφαλά 2007 υπολογίζονται οι συντελεστές επικλιμάκωσης των σεισμικών καταγραφών. Στόχος, μέσα από μια διαδικασία βελτιστοποίησης, η εύρεση των κατάλληλων συντελεστών ώστε το μέσο φάσμα να ικανοποιεί τους περιορισμούς του κανονισμού και ταυτόχρονα να μην ξεπερνάει το κατά 1,30 φορές μεγεθυμένο φάσμα σχεδιασμού κατά ΕΑΚ2000 για απόσβεση 5%.

Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν οι συντελεστές επικλιμάκωσης που φαίνονται στον κάτωθι πίνακα:

Σεισμός	Καταγραφή	Συντελεστής επικλιμάκωσης
Loma Prieta	Corralitos	2.3
	Gilroy#6	3.7
	Saratoga	1.6
Northridge	Rinaldi	0.6
Chi-Chi	TCU074	1.0
	TCU075	0.6
	TCU129	1.2

Πίνακας 3.3: Συντελεστές επικλιμάκωσης των καταγραφών



Σχ. 3.22: Φάσματα χρησιμοποιούμενων σεισμών

3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ

3.4.1 Χωρίς την επιρροή της τριβής

3.4.1.1 Σεισμική μόνωση αμοφορέα

Στις παρακάτω διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν θεωρήθηκε μάζα αμοφορέα,

$$m = \frac{w}{9.81} \left[\frac{kN}{m/sec^2} \right] = \frac{1,1612kN}{9,81m/sec^2} \text{ καθώς επίσης συντελεστής τριβής } \mu = 0, \text{ μήκος}$$

μονωτήρα $l = 43,50m$, σταθερός συντελεστής καμπύλης κύλισης $c = 0$.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία από τη διαδικασία βελτιστοποίησης για τις επτά σεισμικές καταγραφές και για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν.

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
ksp _x (kN/m)	1,3191	0,0010	4,0861		3,9358	3,1865	0,9080
a	0,0010	0,0010	0,0010		0,2221	0,9553	0,4969
b	0,0010	0,0010	0,0010		0,0020	0,0010	0,0215
Cdx1 (kNsec/m)	0,7424	0,0010	0,7178		0,0010	1,3981	1,0295
Cdx2 (kNsec/m)	0,0010	0,0010	0,1961		0,0089	0,0767	0,0121
maxreldis (m)	0,17	0,14	0,24		0,24	0,23	0,23
maxrelvel (m/s)	1,00	0,52	0,83		1,29	0,72	0,69
maxabsacc (m/sec ²)	0,01	0,00	1,37		0,09	1,50	0,24
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89		14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	0,17%	0,07%	11,56%		0,63%	25,57%	3,03%

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για κάθε καταγραφή με αντικειμενική sum(abs(acc))

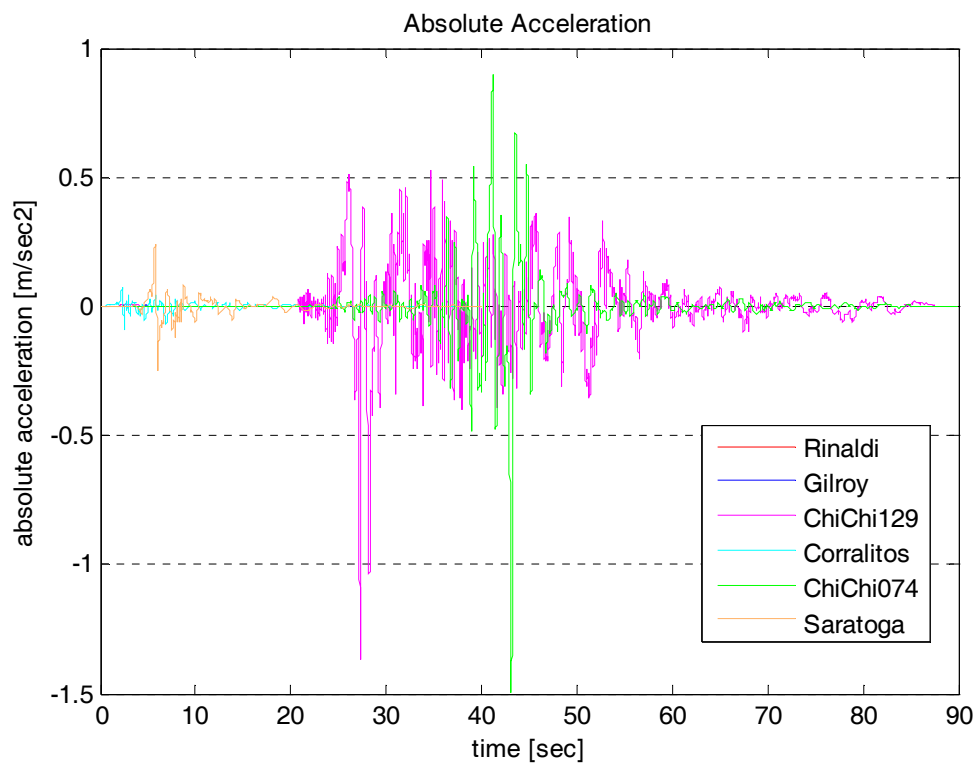
Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
ksp _x (kN/m)	0,0010	0,0010	0,0250		1,2094	0,0010	1,0622
a	0,5383	0,0010	0,0445		0,0010	0,0466	0,4646
b	0,1923	0,0010	0,2543		0,0957	0,0010	0,0264
Cdx1 (kNsec/m)	0,0010	0,0010	0,2631		0,0028	1,0977	0,3827
Cdx2 (kNsec/m)	0,0010	0,0010	0,1799		0,0051	0,0010	0,0208
maxreldis (m)	0,17	0,14	0,24		0,24	0,21	0,23
maxrelvel (m/s)	1,00	0,53	0,83		1,29	0,74	0,70
maxabsacc (m/sec ²)	0,01	0,00	1,38		0,05	0,01	0,17
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89		14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	0,18%	0,07%	11,61%		0,33%	0,11%	2,08%

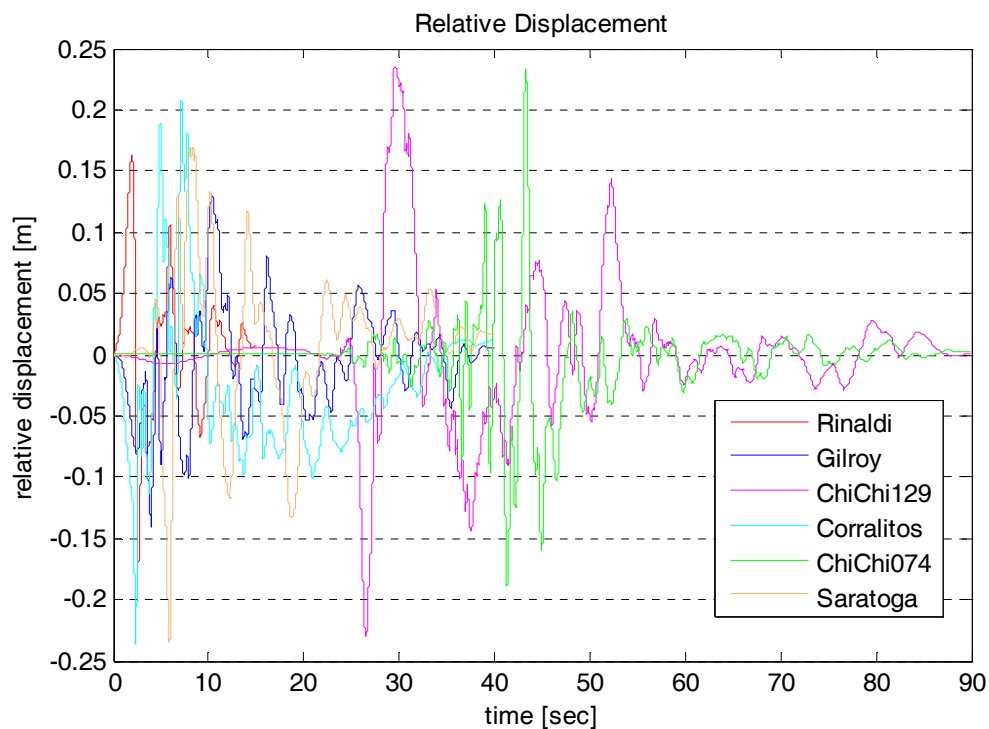
Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για κάθε καταγραφή με αντικειμενική sum(sqr(acc))

Από τους παραπάνω πίνακες μπορεί κανείς εύκολα να διακρίνει:

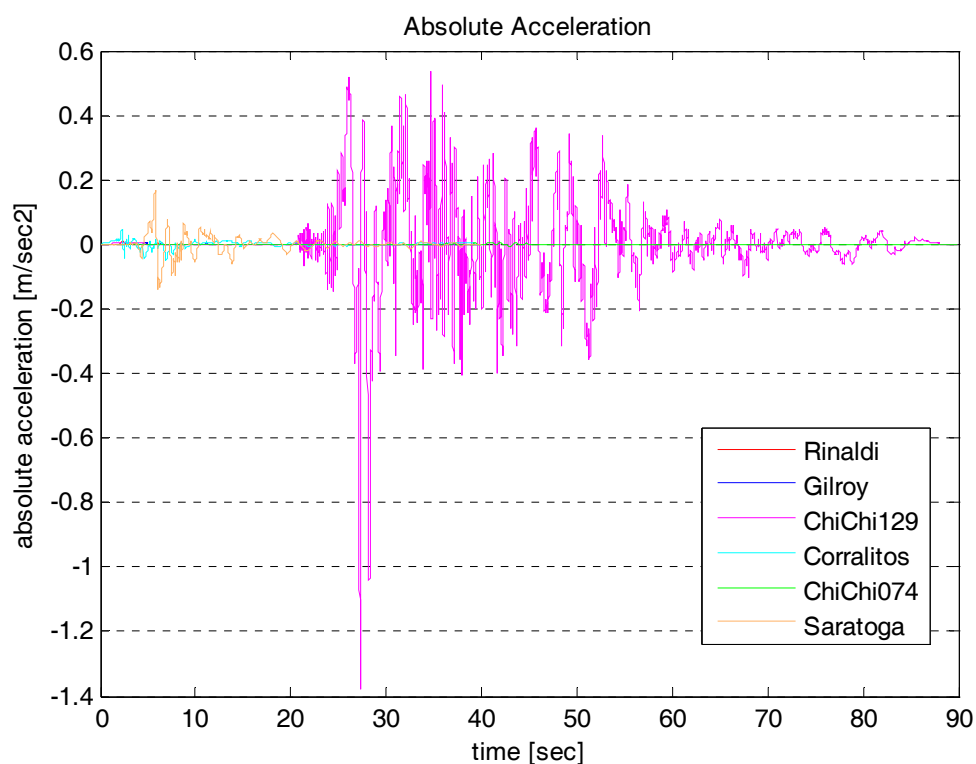
- Δεν ολοκληρώθηκε η διαδικασία βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi075 λόγω αριθμητικών ασταθειών.
- Σε όλες τις υπόλοιπες καταγραφές ολοκληρώθηκε με επιτυχία η διαδικασία βελτιστοποίησης και με τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.
- Παρατηρείται σημαντική μείωση των απόλυτων επιταχύνσεων με περιορισμό των σχετικών μετατοπίσεων εντός των επιτρεπτών ορίων.
- Ενδεικτικό της ορθής μαθηματικής διατύπωσης του προβλήματος είναι ότι για την πλειοψηφία των καταγραφών η βέλτιστη λύση τείνει να εκμεταλλευτεί όλο το επιτρεπόμενο μήκος.
- Ανάλογα την καταγραφή επαρκεί και διαφορετικό επίπεδο ακρίβειας κατά την αριθμητική ολοκλήρωση της δυναμικής εξίσωσης.

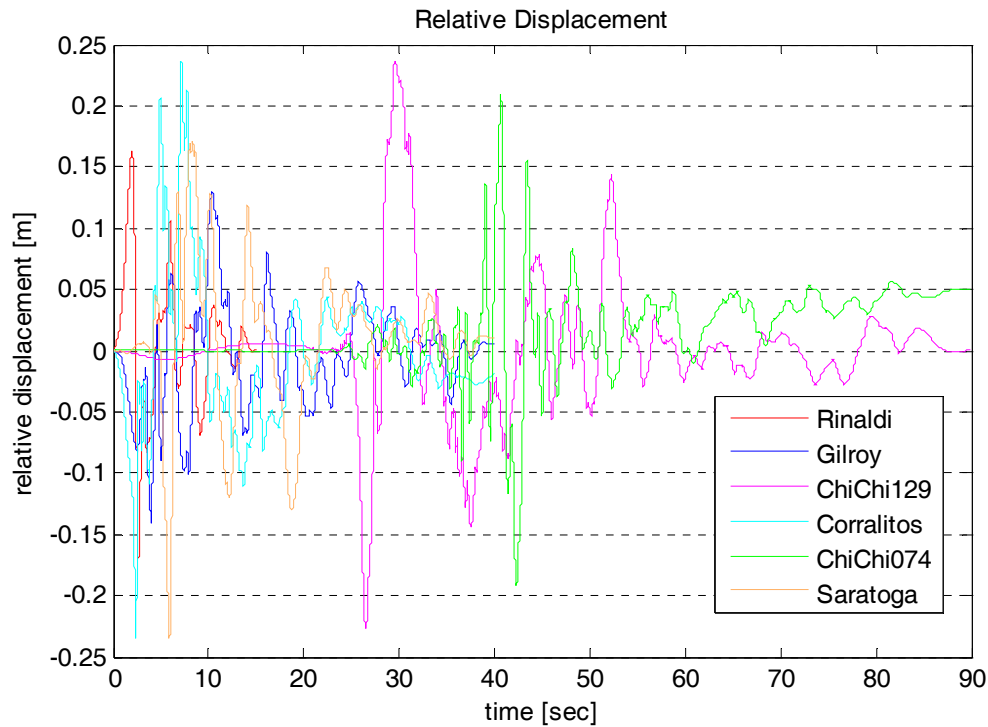
Τα διαγράμματα που ακολουθούν δίνουν τις περιβάλλουσες απόλυτων επιταχύνσεων και σχετικών μετατοπίσεων από όλες τις σεισμικές καταγραφές με τους βέλτιστους για την κάθε περίπτωση συνδυασμούς των μεταβλητών σχεδιασμού.





Σχ. 3.23: Απόκριση του συστήματος για το σύνολο των καταγραφών χωρίς τριβή και αντικειμενική $\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$ i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις





Σχ. 3.24: Απόκριση του συστήματος για το σύνολο των καταγραφών χωρίς τριβή και αντικειμενική $\text{sum}(\text{sqrt}(\text{acc}))$ i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε όλες τις καταγραφές ο σχεδιασμός εκμεταλλεύεται όλο το περιθώριο μετατοπίσεων χωρίς να υπερβαίνει το όριο που έχει ληφθεί υπόψη μειώνοντας σημαντικά το μέγεθος της μέγιστης απόλυτης επιτάχυνσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά διαγράμματα και σχήματα για την συμπεριφορά του συστήματος για κάθε καταγραφή ταυτόχρονα και για τους δύο σχεδιασμούς που προκύπτουν από τις διαφορετικές επιλύσεις από τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.

Northridge-Rinaldi

Καταγραφή	Rinaldi	Rinaldi
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	0,60
k _{spx} (kN/m)	1,3191	0,0010
A	0,0010	0,5383
B	0,0010	0,1923
C _{dx1} (kNsec/m)	0,7424	0,0010
C _{dx2} (kNsec/m)	0,0010	0,0010
maxreldis (m)	0,17	0,17
maxrelvel (m/s)	1,00	1,00
maxabsacc (m/sec ²)	0,01	0,01
PGA (m/sec ²)	4,93	4,93
μείωση PGA στο	0,17%	0,18%

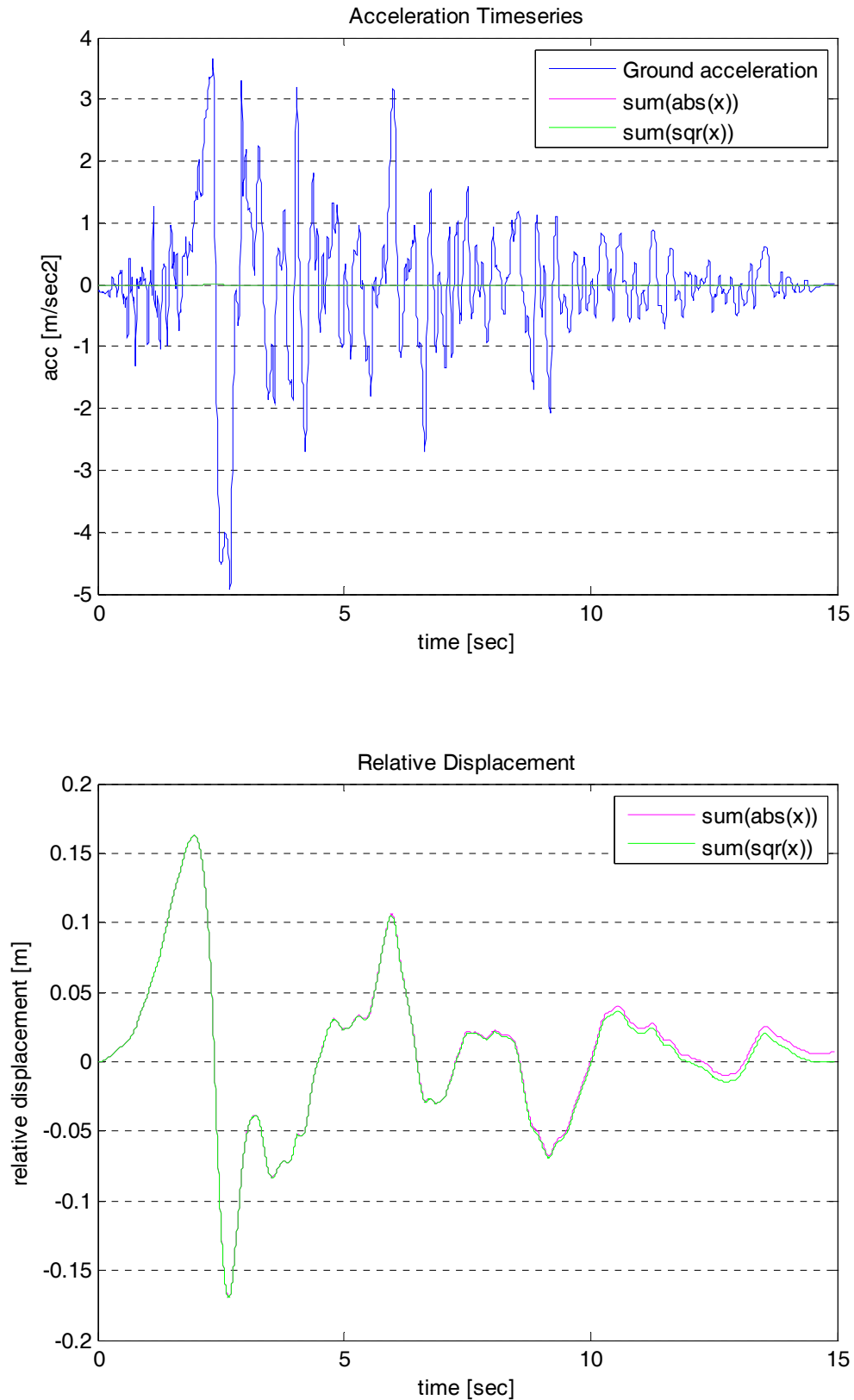
Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή Rinaldi

sum(abs(acc))							
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	698,8	0,7641				Infeasible start point
1	24	763,214	0,7245	0,000244	5,94E+05	1,49E+03	
2	30	127,577	-2,86E-17	1	-785	4,10E+03	
3	36	2,37169	-8,67E-19	1	-68,4	519	Hessian modified
4	42	2,37169	0	1	1,03E-07	0,0326	

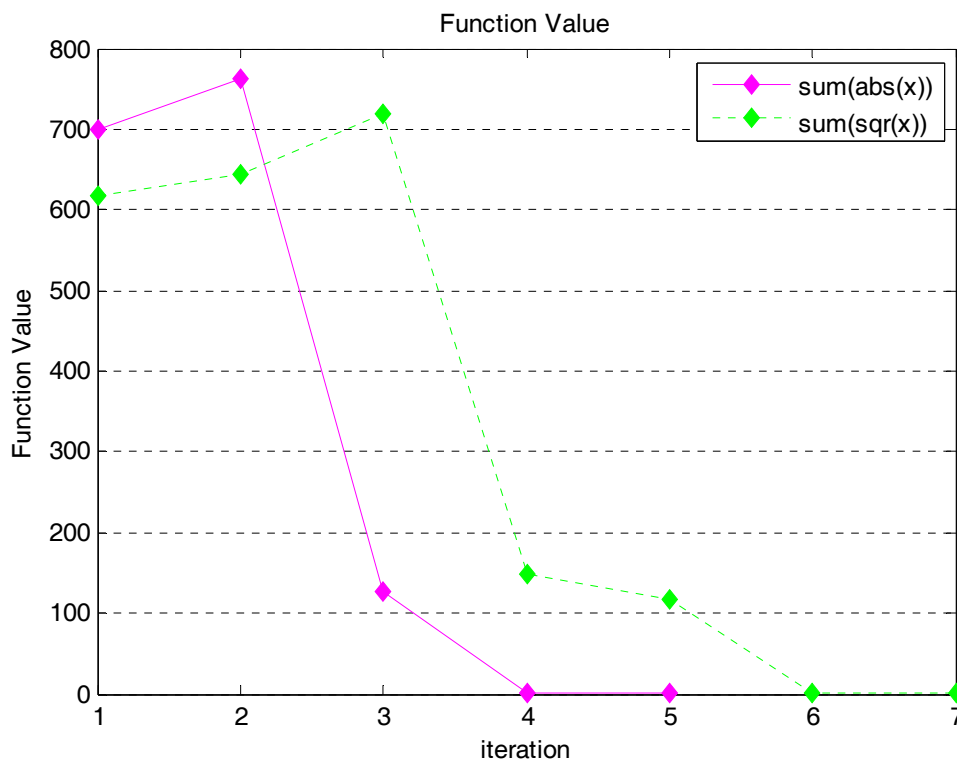
Πίνακας 3.7: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή Rinaldi και αντικειμενική sum(abs(acc))

sum(sqr(acc))							
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	617,34	0,7618				Infeasible start point
1	25	643,47	0,7014	0,000122	6,62E+05	8,57E+05	
2	34	720,147	6,81E-01	0,125	3,03E+04	4,10E+04	
3	40	149,32	-8,67E-19	1	-388	2,24E+03	
4	46	116,502	1,10E-16	1	-31,4	1,34E+03	
5	52	0,006411	0,00E+00	1	-1,84	1,16E+03	
6	58	0,006411	0	1	-2,07E-09	0,00637	

Πίνακας 3.8: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή Rinaldi και αντικειμενική sum(sqr(acc))



Σχ. 3.25: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή Rinaldi χωρίς τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις



Σχ. 3.26: Πρόοδος βελτιστοποίησης σε τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης

Loma Prieta – Gilroy

Καταγραφή	Gilroy	Gilroy
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqrt(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	3,70	3,70
k _{sp} x (kN/m)	0,0010	0,0010
a	0,0010	0,0010
b	0,0010	0,0010
C _{dx1} (kNsec/m)	0,0010	0,0010
C _{dx2} (kNsec/m)	0,0010	0,0010
maxreldis (m)	0,14	0,14
maxrelvel (m/s)	0,52	0,53
maxabsacc (m/sec ²)	0,00	0,00
PGA (m/sec ²)	6,18	6,18
μείωση PGA στο	0,07%	0,07%

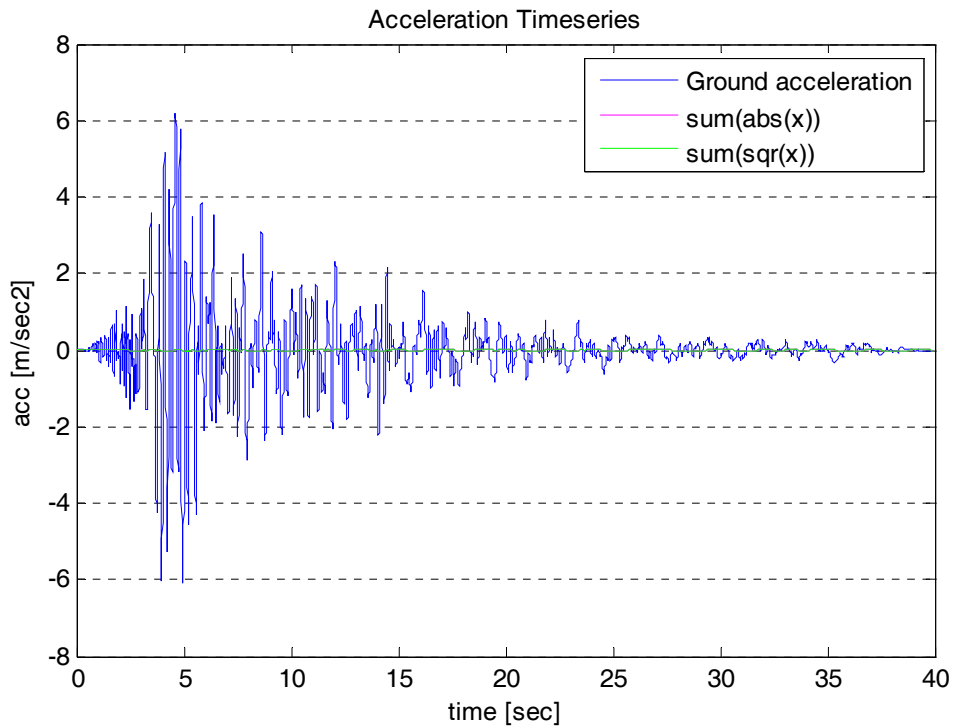
Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή Gilroy

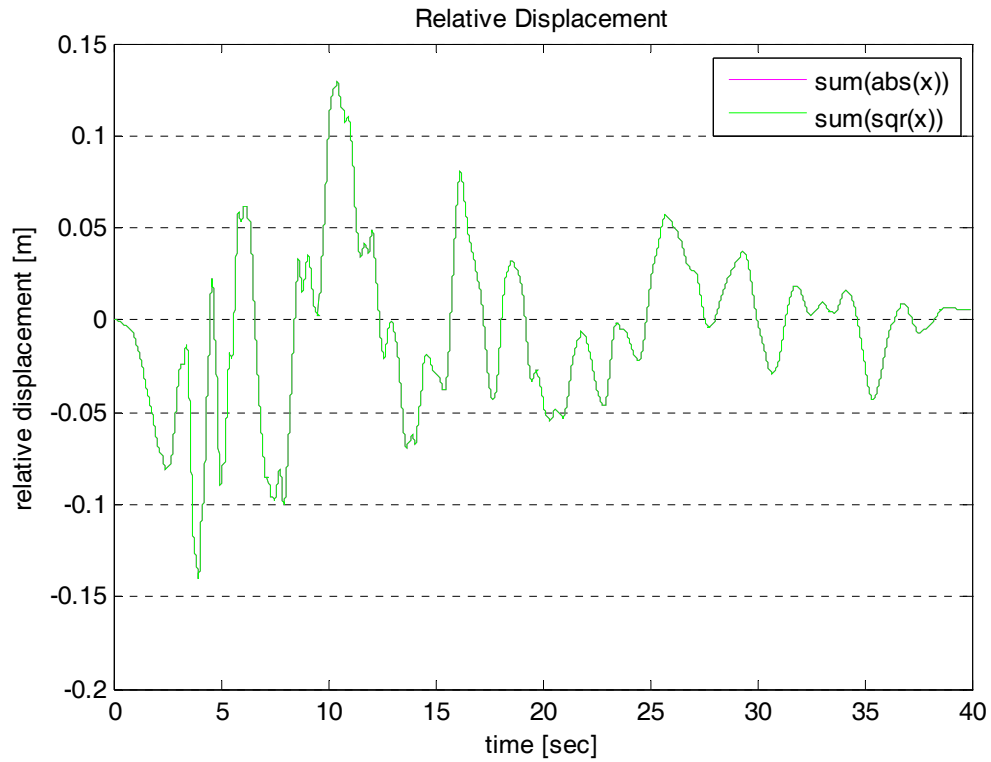
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	1016,56	-0,149				
1	12	4,53498	-8,67E-19	1	-6,75E+02	4,03E+03	
2	18	4,53498	0,00E+00	1	-3,93E-15	3,00E-02	

Πίνακας 3.10: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή Gilroy και αντικειμενική sum(abs(acc))

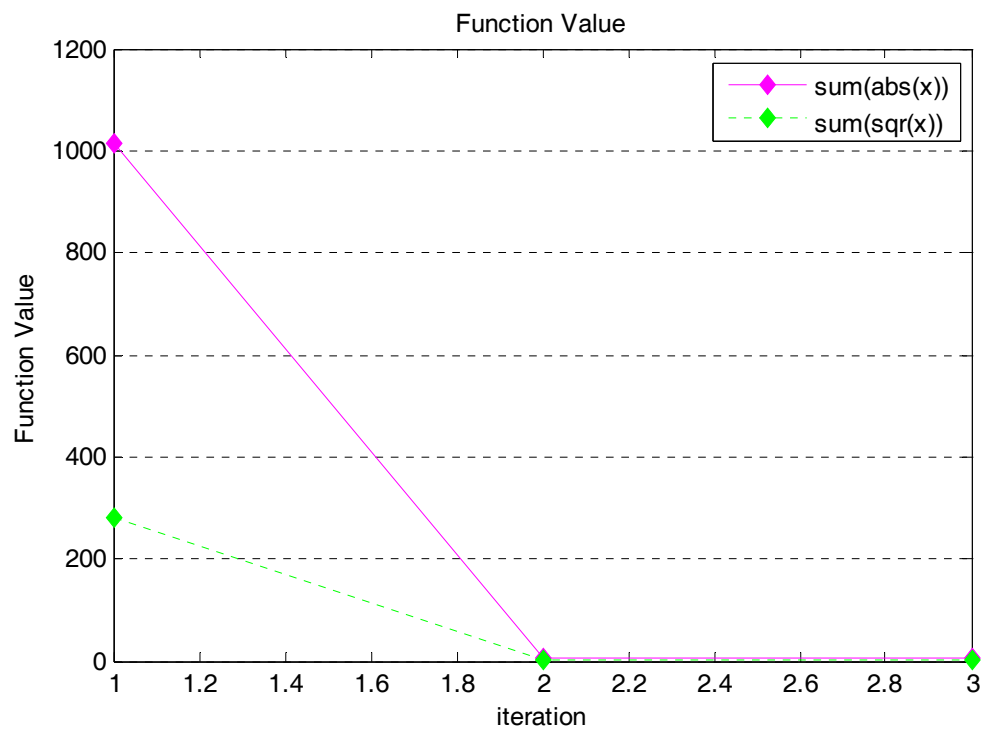
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	280,688	-0,149				
1	12	0,005904	-8,67E-19	1,00E+00	-1,76E+00	1,99E+03	
2	25	0,005904	-8,67E-19	0,00781	1,86E-12	3,27E-05	

Πίνακας 3.11: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή Gilroy και αντικειμενική $\text{sum}(\text{sqr}(\text{acc}))$





Σχ. 3.27: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή Gilroy χωρίς τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις



Σχ. 3.28: Πρόοδος βελτιστοποίησης σε τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης

ChiChi – TCU129

Καταγραφή	ChiChi129	ChiChi129
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	1,20	1,20
k _{spx} (kN/m)	4,0861	0,0250
a	0,0010	0,0445
b	0,0010	0,2543
C _{dx1} (kNsec/m)	0,7178	0,2631
C _{dx2} (kNsec/m)	0,1961	0,1799
maxreldis (m)	0,24	0,24
maxrelvel (m/s)	0,83	0,83
maxabsacc (m/sec ²)	1,37	1,38
PGA (m/sec ²)	11,89	11,89
μείωση PGA στο	11,56%	11,61%

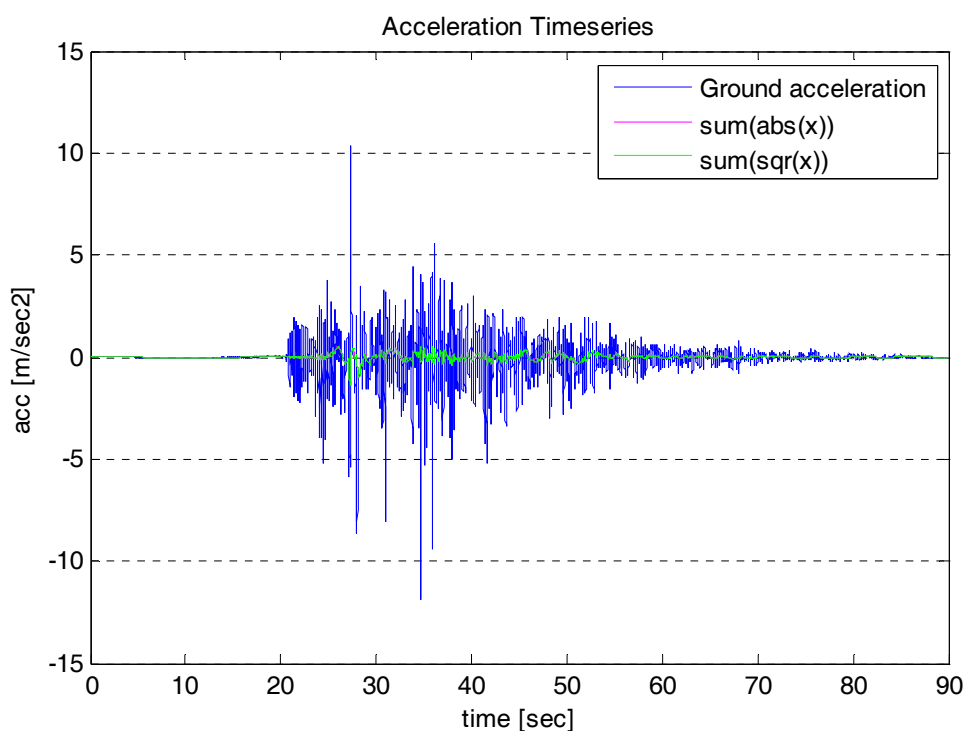
Πίνακας 3.12: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi129

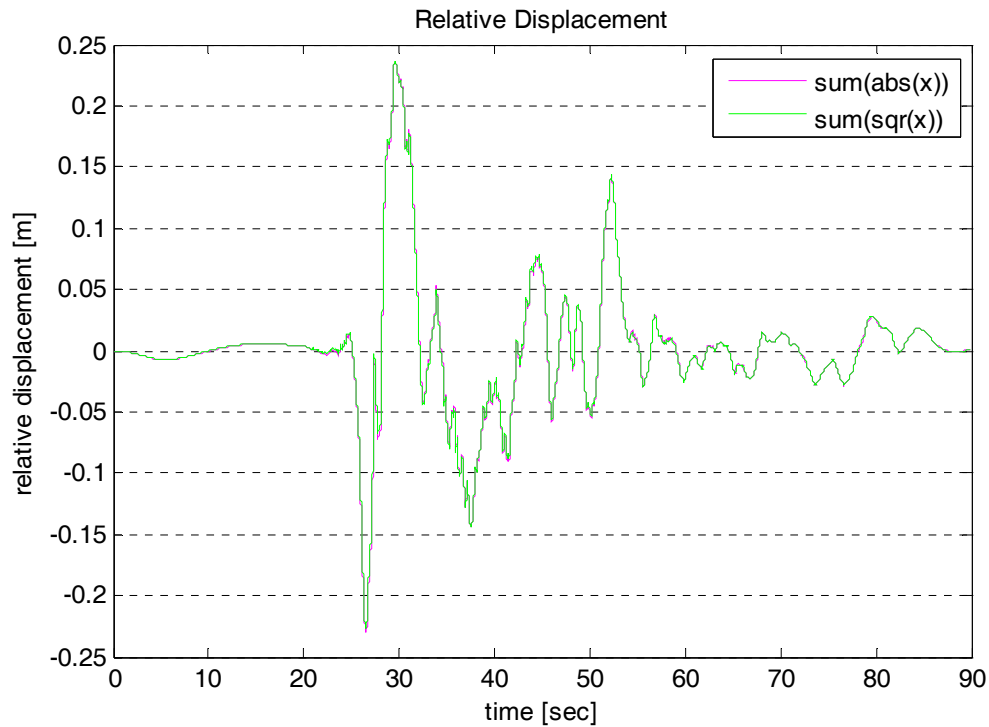
sum(abs(acc))							
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	1906,22	1,092				Infeasible start point
1	22	2825,43	1,17E+00	0,000977	-8,77E+08	1,92E+06	
2	28	1645,09	2,52E-01	1	-1,55E+03	1,00E+07	Hessian modified
3	35	1005,48	0,1995	0,5	-1,49E+03	4,91E+03	Hessian modified
4	41	1208,26	0,02062	1	194	568	Hessian modified
5	47	1231,42	0,001415	1	35,1	465	
6	54	1232,77	0,0002895	0,5	4,71E+04	2,52E+05	
7	60	1232,46	-8,67E-19	1	-3,64E+03	4,49E+05	
8	80	1232,45	-8,67E-19	-6,10E-05	-3,95E+03	8,67E+05	
9	103	1232,45	-9,32E-18	7,63E-06	-1,76E+03	1,00E+06	Hessian modified
10	123	1232,45	-9,32E-18	-6,10E-05	1,47E+03	3,11E+06	
11	129	1232,44	0	1	0,291	2,25E+06	Hessian modified

Πίνακας 3.13: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi129 και αντικειμενική sum(abs(acc))

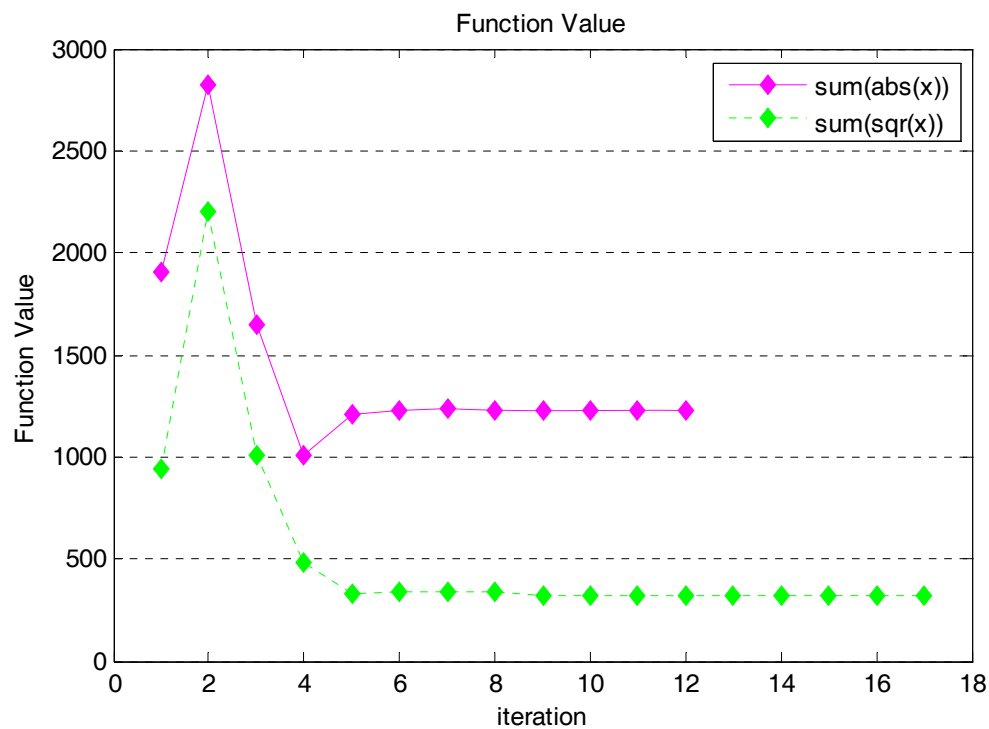
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	939,984	1,092				Infeasible start point
1	24	2199,39	1,33E+00	0,000244	7,89E+06	1,54E+05	
2	31	1010,77	6,91E-01	0,5	3,36E+05	6,86E+06	
3	38	478,92	0,07111	0,5	-1,14E+03	1,67E+03	
4	44	325,764	1,10E-16	1	-4,69E+03	2,64E+05	Hessian modified
5	50	338,933	0	1	-11,1	2,77E+03	Hessian modified
6	73	338,926	0	7,63E-06	6,47E+01	1,32E+04	
7	108	338,926	-2,75E-10	1,86E-09	7,40E+01	2,77E+03	
8	117	323,075	-0,0001664	0,125	-1,20E+02	1,30E+04	
9	128	323,058	-0,0001592	0,0313	-7,75E-01	1,25E+03	
10	135	322,845	-0,0002885	0,5	-3,80E-01	1,87E+03	Hessian modified twice
11	153	322,831	-0,0002885	0,000244	2,66E+02	1,10E+05	
12	170	322,829	-0,0002883	0,000488	-3,15E+00	1,11E+05	
13	203	322,829	-0,0002883	7,45E-09	2,78E+01	1,12E+05	Hessian modified
14	238	322,829	-0,0002883	1,86E-09	8,44E+01	1,13E+05	
15	273	322,829	-0,0002883	1,86E-09	-9,22E+00	1,11E+05	
16	320	322,829	-0,0002883	4,55E-13	-2,10E-01	1,11E+05	

Πίνακας 3.14: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi129 και αντικειμενική sum(sqr(acc))





Σχ. 3.29: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή ChiChi129 χωρίς τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις



Σχ. 3.30: Πρόοδος βελτιστοποίησης σε τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης

ChiChi – TCU075

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης για την καταγραφή που εξετάζουμε δεν κατέστη δυνατό να ολοκληρωθεί. Ο υπολογιστικός χρόνος ήταν υπερβολικός. Πιθανότατα λόγω σφαλμάτων στην αριθμητική ολοκλήρωση.

Παρουσιάζονται τα βήματα που ολοκληρώθηκαν έως ότου διεκόπη η επαναληπτική διαδικασία.

Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	1436,67	0,4486				Infeasible start point
1	12	2647,19	3,15E-01	1	2,19E+06	3,28E+06	
2	20	2645,49	3,14E-01	0,25	-4,89E+03	1,75E+05	
3	34	2646,07	0,313	0,00391	6,41E+04	1,89E+04	
4	40	2646,52	0,313	1	2,12E+05	3,56E+05	
5	67	2646,86	0,313	4,77E-07	-1,03E+07	4,27E+06	
6	82	2646,55	0,313	0,00195	-1,20E+06	4,42E+06	

Πίνακας 3.15: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi075 και αντικειμενική sum(abs(acc))

Loma Prieta – Corralitos

Καταγραφή	Corralitos	Corralitos
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	2,30	2,30
k _{spx} (kN/m)	3,9358	1,2094
a	0,2221	0,0010
b	0,0020	0,0957
C _{dx1} (kNsec/m)	0,0010	0,0028
C _{dx2} (kNsec/m)	0,0089	0,0051
maxreldis (m)	0,24	0,24
maxrelvel (m/s)	1,29	1,29
maxabsacc (m/sec ²)	0,09	0,05
PGA (m/sec ²)	14,52	14,52
μείωση PGA στο	0,63%	0,33%

Πίνακας 3.16: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή Corralitos

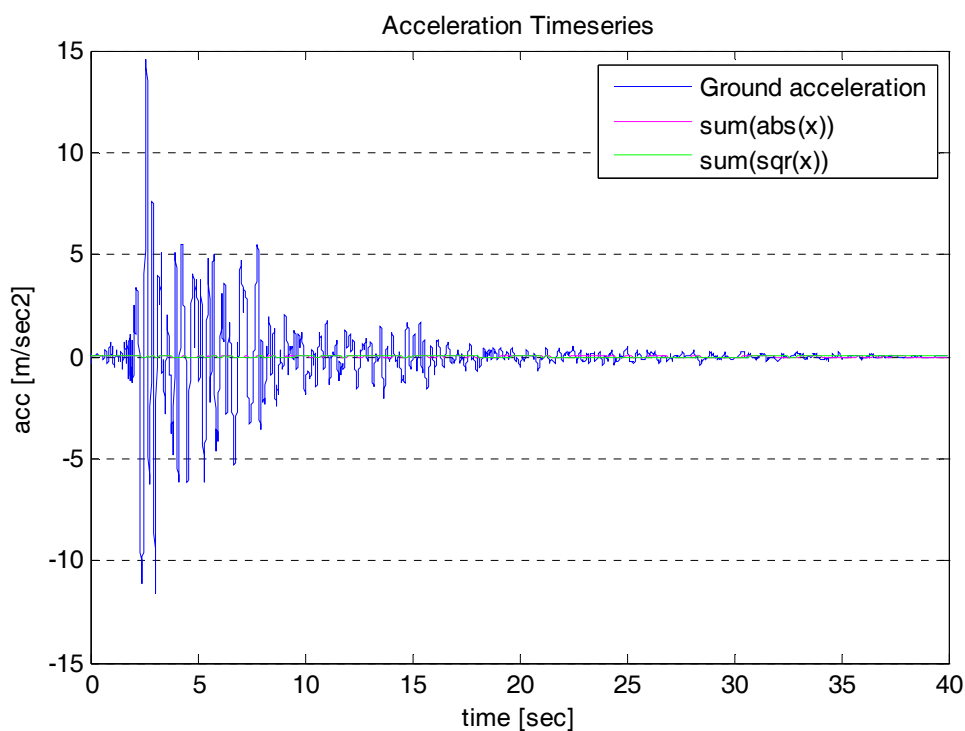
sum(abs(acc))							
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	1220,32	0,5528				Infeasible start point
1	29	1215,94	5,21E-01	7,63E-06	-2,80E+06	3,00E+03	
2	54	1214,69	5,04E-01	1,91E-06	-2,98E+05	3,85E+05	Hessian modified twice
3	60	565,364	0,213	1	1,86E+03	1,50E+04	
4	66	427,799	1,10E-16	1	4,17E+02	4,05E+02	
5	73	381,087	0	5,00E-01	-9,06E+01	6,19E+02	
6	79	315,5	0	1	-7,21E+01	2,42E+03	Hessian modified
7	85	110,764	-8,67E-19	1	-184	1,72E+03	Hessian modified
8	91	54,4299	0,001755	1	-76,3	3,71E+05	
9	104	54,0375	0,0005462	0,00781	-49	1,78E+03	Hessian modified
10	110	54,3986	0,0004593	1	2,8	2,22E+05	
11	119	52,9608	0,0004298	0,125	-10,8	4,38E+03	
12	126	51,8399	0,0002135	0,5	-2,25	1,67E+03	
13	132	50,5054	-2,86E-17	1	-0,0144	964	
14	138	49,4272	4,34E-19	1	-0,605	222	
15	144	49,4111	0	1	-0,0161	247	
16	150	49,4105	6,12E-08	1	-0,000611	251	Hessian modified
17	156	49,4104	1,54E-08	1	-9,02E-05	281	Hessian modified
18	162	49,4084	2,80E-08	1	-0,002	445	Hessian modified
19	172	49,4075	0	0,0625	-0,0137	267	Hessian modified
20	186	49,4072	0	0,00391	-0,0671	4,99E+03	Hessian modified twice
21	198	49,4071	-3,70E-08	0,0156	-0,00927	2,70E+03	Hessian modified twice
22	208	49,407	-2,82E-08	0,0625	-0,0016	491	
23	219	49,4069	-1,89E-08	0,0313	-0,00184	264	Hessian modified twice
24	231	49,4069	-1,84E-08	0,0156	-0,00072	268	
25	242	49,4069	-1,82E-08	0,0313	-0,000602	247	Hessian modified twice

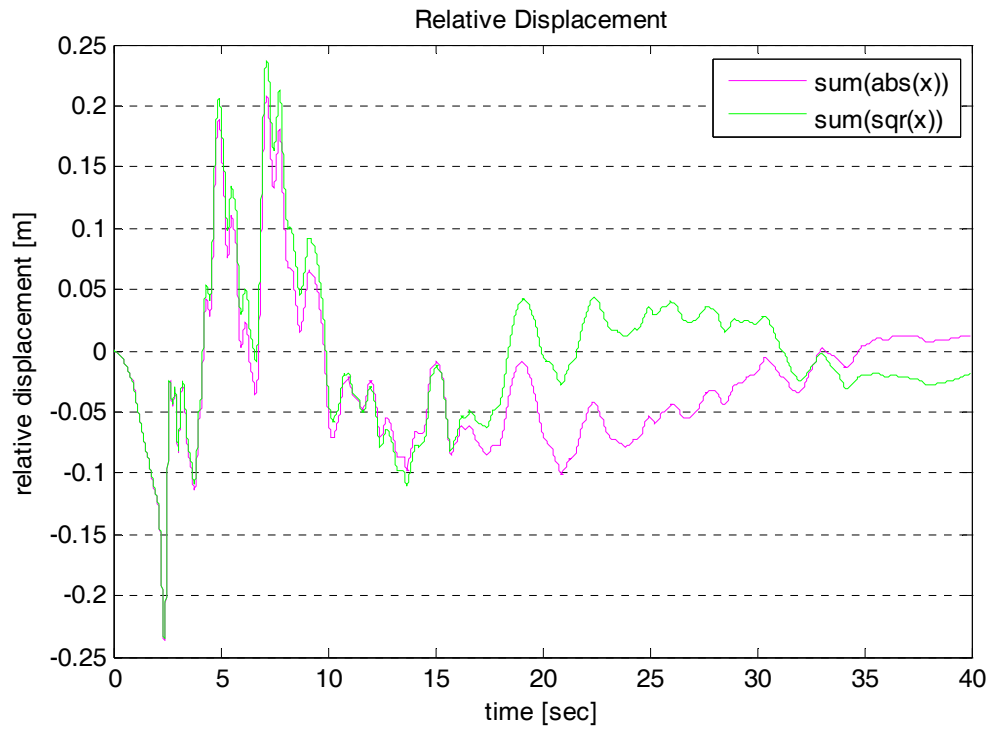
Πίνακας 3.17: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή Corralitos και αντικειμενική sum(abs(acc))

sum(sqr(acc))							
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	866,699	0,5521				Infeasible start point
1	29	848,495	4,87E-01	7,63E-06	-1,59E+05	1,74E+03	
2	35	0,013417	5,51E-02	1,00E+00	-4,42E+00	7,87E+03	
3	41	1,52274	2,32E-03	1,00E+00	2,76E+00	2,16E+02	
4	52	1,4446	2,31E-03	3,13E-02	-2,36E+00	2,33E+02	
5	58	1,12985	1,03E-04	1,00E+00	-2,93E-01	1,77E+01	
6	64	0,748323	-8,67E-19	1,00E+00	-3,32E-01	4,37E+01	Hessian modified
7	71	0,695889	-1,30E-18	5,00E-01	-1,01E-01	1,36E+01	Hessian modified
8	78	0,655884	-6,51E-19	5,00E-01	-7,54E-02	1,01E+01	
9	85	0,629096	-2,17E-19	5,00E-01	-4,16E-02	1,75E+01	
10	92	0,618195	0,00E+00	5,00E-01	-2,67E-02	1,46E+01	

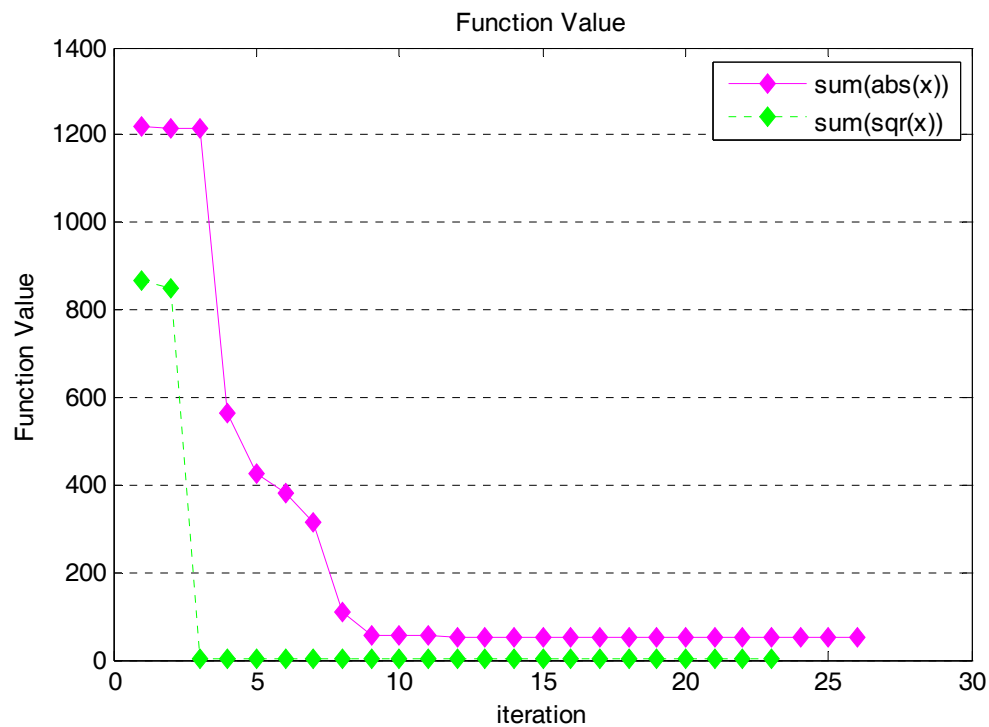
11	103	0,617818	0,00E+00	3,13E-02	-1,19E-02	9,34E+00	
12	110	0,608683	0	0,5	-8,60E-03	3,31E+00	
13	120	0,608405	0,00E+00	0,0625	-4,36E-03	6,17E+00	
14	132	0,608345	0	1,56E-02	-3,82E-03	7,07E+00	
15	146	0,608334	0	0,00391	-2,67E-03	2,94E+00	
16	165	0,608333	0,00E+00	0,000122	254	1,70E+07	Hessian modified twice
17	180	0,607673	-8,57E-06	0,00195	-0,338	7,79E+01	
18	197	0,60766	-8,56E-06	0,000488	-0,0252	1,97E+01	
19	212	0,607651	-8,54E-06	0,00195	-0,00456	8,29E+00	
20	228	0,60765	-8,54E-06	0,000977	-0,00104	4,79E+00	
21	234	0,607355	0	1	-0,000295	1,92E+00	Hessian modified twice
22	240	0,607355	0,00E+00	1	-4,11E-08	2,17	Hessian modified twice

Πίνακας 3.18: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή Corralitos και αντικειμενική $\text{sum}(\text{sqr}(\text{acc}))$





Σχ. 3.31: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή Corralitos χωρίς τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις



Σχ. 3.32: Πρόοδος βελτιστοποίησης σε τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης

ChiChi – TCU074

Καταγραφή	ChiChi074	ChiChi074
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	1,00	1,00
k _{spx} (kN/m)	3,1865	0,0010
a	0,9553	0,0466
b	0,0010	0,0010
C _{dx1} (kNsec/m)	1,3981	1,0977
C _{dx2} (kNsec/m)	0,0767	0,0010
maxreldis (m)	0,23	0,21
maxrelvel (m/s)	0,72	0,74
maxabsacc (m/sec ²)	1,50	0,01
PGA (m/sec ²)	5,86	5,86
μείωση PGA στο	25,57%	0,11%

Πίνακας 3.19: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi074

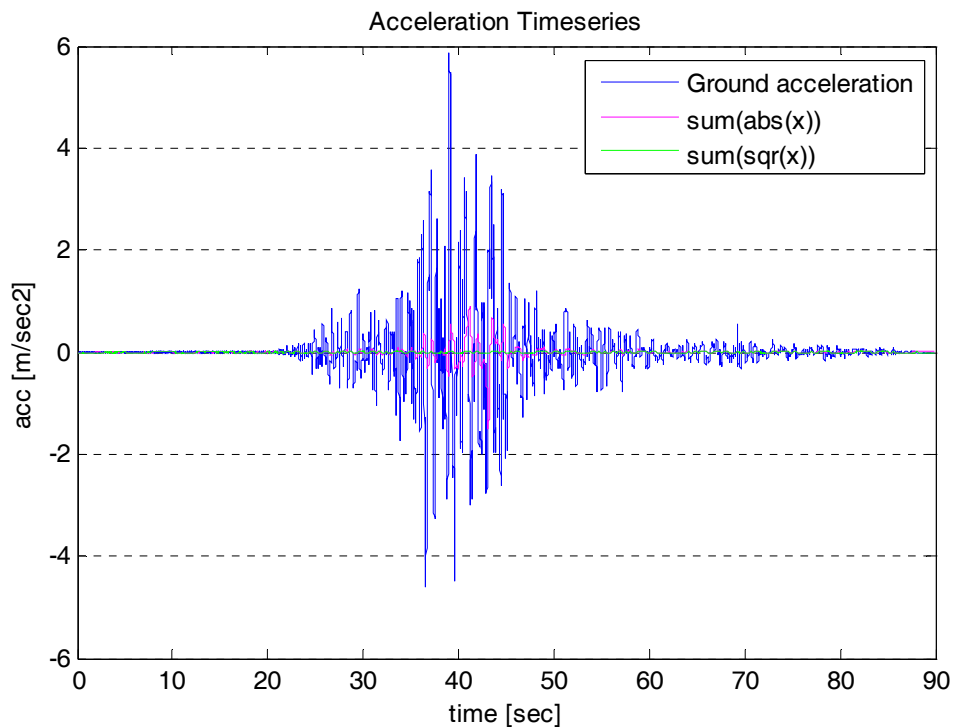
sum(abs(acc))							
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	1786,36	0,5828				Infeasible start point
1	27	2085,86	3,00E-01	3,05E-05	1,66E+07	7,19E+06	
2	35	1808,86	2,35E-01	2,50E-01	-2,12E+05	1,46E+05	
3	43	1659,67	0,2341	0,25	-5,17E+02	1,07E+06	Hessian modified
4	55	1669,55	2,31E-01	0,0156	-3,08E+04	1,43E+06	
5	77	1669,56	0,2313	-1,53E-05	-1,14E+02	1,82E+03	Hessian modified
6	88	1660,75	0,2316	0,0313	-2,53E+02	2,29E+03	Hessian modified
7	98	1702,77	2,26E-01	0,0625	764	3,19E+05	
8	105	1947,67	0,2201	0,5	570	5,66E+04	
9	113	1777,02	0,1967	0,25	-716	5,04E+02	
10	120	1808,19	0,1548	0,5	131	4,14E+03	
11	126	1602	0,01607	1	-206	1,27E+04	
12	132	1560,22	0	1	-42,1	4,00E+03	
13	138	1134,41	2,32E-01	1	-284	2,93E+03	Hessian modified
14	144	1244,28	3,60E-02	1	132	3,21E+03	
15	150	1285,23	0,003749	1	44,9	3,22E+03	
16	156	1292,83	0,00E+00	1	6,84	4,21E+03	
17	162	1291,72	0,00E+00	1	-1,14E+00	2,34E+03	Hessian modified twice
18	168	734,737	-6,78E-04	1	-1,91E+06	1,13E+07	Hessian modified twice
19	176	645,395	0,05175	0,25	-341	3,86E+03	
20	182	704,17	0,009609	1	60,5	1,11E+04	
21	188	708,654	2,03E-03	1	4,07	3,30E+03	
22	194	711,889	2,19E-04	1	26,4	2,24E+05	
23	200	711,419	0,0002377	1	-0,535	4,62E+03	
24	206	711,778	5,64E-05	1	0,35	3,73E+04	

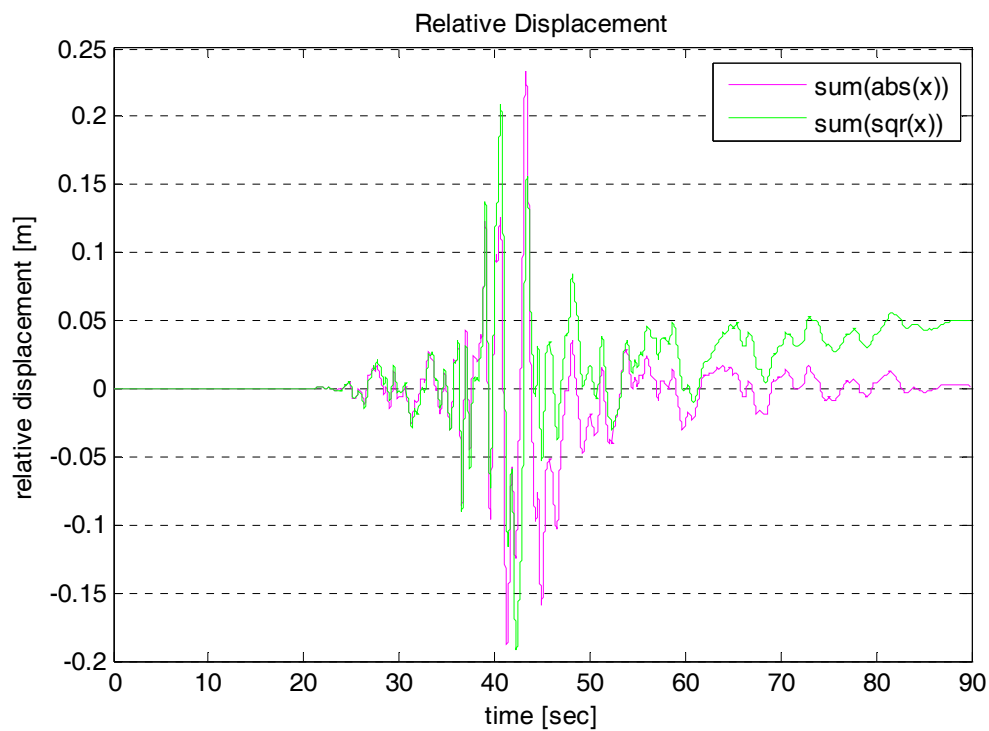
25	215	711,785	5,24E-05	0,125	0,0511	2,12E+03	Hessian modified
26	226	711,787	5,02E-05	0,0313	0,0467	2,33E+04	
27	236	711,811	8,95E-06	0,0625	0,095	2,12E+04	Hessian modified
28	246	711,812	7,71E-06	0,0625	0,0273	4,44E+05	

Πίνακας 3.20: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi074 και αντικειμενική $\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$

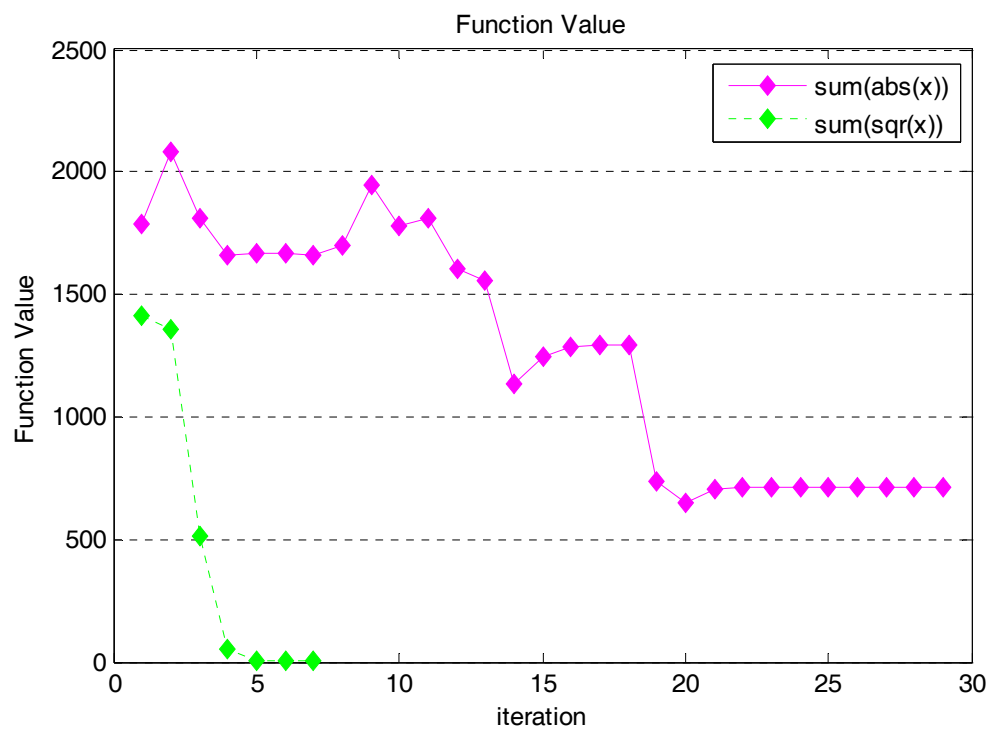
sum(sqr(acc))							
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	1409,27	0,5829				Infeasible start point
1	27	1357,86	2,75E-01	3,05E-05	8,90E+06	2,66E+03	
2	33	514,251	-8,67E-19	1,00E+00	-1,50E+02	7,14E+02	
3	39	52,8434	-4,99E-18	1	-1,64E+02	5,83E+03	Hessian modified
4	45	7,64941	1,10E-16	1	-1,72E+01	5,13E+02	
5	51	0,015496	1,10E-16	1,00E+00	-5,69E-02	1,23E+02	
6	57	0,015463	0	1	-3,29E-05	7,90E-01	

Πίνακας 3.21: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi074 και αντικειμενική $\text{sum}(\text{sqr}(\text{acc}))$





Σχ. 3.33: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή ChiChi074 χωρίς τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις



Σχ. 3.34: Πρόοδος βελτιστοποίησης σε τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης

Loma Prieta – Saratoga

Καταγραφή	Saratoga	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	1,60	1,60
k _{spx} (kN/m)	0,9080	1,0622
a	0,4969	0,4646
b	0,0215	0,0264
C _{dx1} (kNsec/m)	1,0295	0,3827
C _{dx2} (kNsec/m)	0,0121	0,0208
maxreldis (m)	0,23	0,23
maxrelvel (m/s)	0,69	0,70
maxabsacc (m/sec ²)	0,24	0,17
PGA (m/sec ²)	8,04	8,04
μείωση PGA στο	3,03%	2,08%

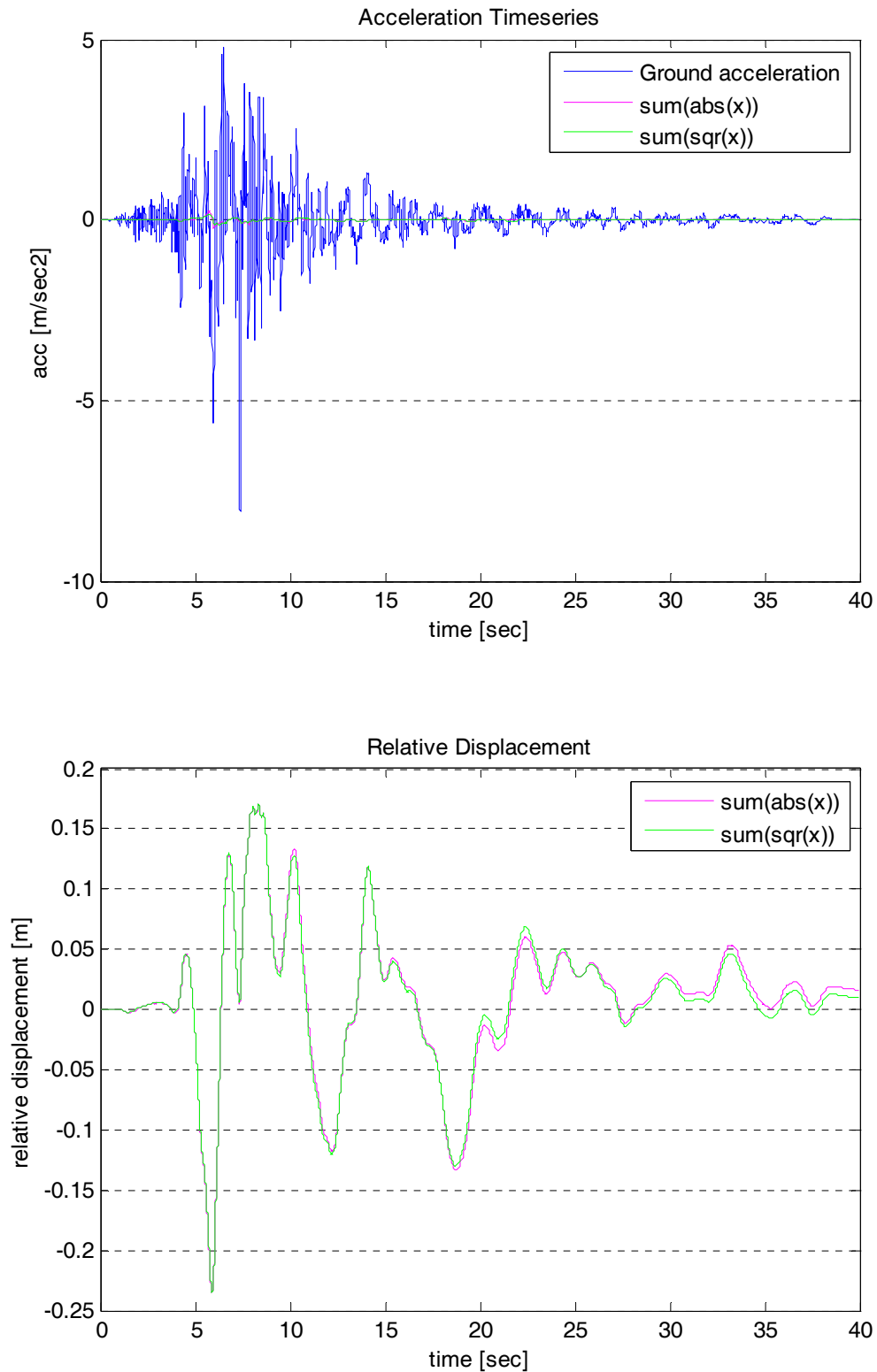
Πίνακας 3.22: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή Saratoga

sum(abs(acc))							
Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	1197,51	0,553				Infeasible start point
1	25	1359,93	4,21E-01	1,22E-04	2,32E+06	5,63E+03	
2	31	4,75794	1,09E-01	1,00E+00	-1,89E+03	2,79E+03	
3	39	111,946	0,08321	0,25	-4,76E+03	1,56E+04	Hessian modified
4	45	454,382	1,10E-16	1	3,74E+02	5,31E+04	Hessian modified
5	51	421,952	1,10E-16	1,00E+00	-3,18E+01	3,57E+03	
6	58	254,74	5,51E-17	0,5	-3,53E+02	1,74E+03	
7	64	126,481	-2,17E-17	1	-124	4,62E+02	Hessian modified
8	71	122,143	-8,67E-18	0,5	39	7,18E+02	Hessian modified
9	79	117,234	-0,0003432	0,25	-22	5,11E+02	
10	86	109,168	-5,17E-05	0,5	-25,8	7,17E+03	
11	102	109,134	-5,09E-05	0,000977	-8,44	1,90E+03	
12	116	108,799	7,94E-05	0,00391	-15,9	3,12E+03	Hessian modified
13	127	108,529	3,36E-05	0,0313	-13	6,54E+04	
14	139	108,519	3,13E-05	0,0156	-0,613	6,28E+04	
15	151	108,227	0,0001043	0,0156	-14,2	4,71E+03	Hessian modified
16	162	108,229	0,0001002	0,0313	16,3	8,54E+07	
17	171	108,203	0,0001391	0,125	-0,215	4,34E+03	Hessian modified
18	179	108,22	0,0001113	0,25	0,0686	4,03E+03	
19	196	108,22	0,0001112	0,000488	-0,0584	3,26E+06	
20	205	107,765	0,001821	0,125	-0,0575	3,67E+03	
21	211	109,843	-0,0005696	1	1,53	879	
22	222	109,829	-0,0009714	0,0313	0,617	3,26E+03	Hessian modified twice
23	229	109,204	1,53E-05	0,5	-0,764	7,46E+04	Hessian modified twice
24	235	109,216	-5,86E-07	1	0,0118	1,35E+05	Hessian modified twice
25	241	109,216	-4,86E-07	1	-7,30E-05	4,30E+03	Hessian modified twice

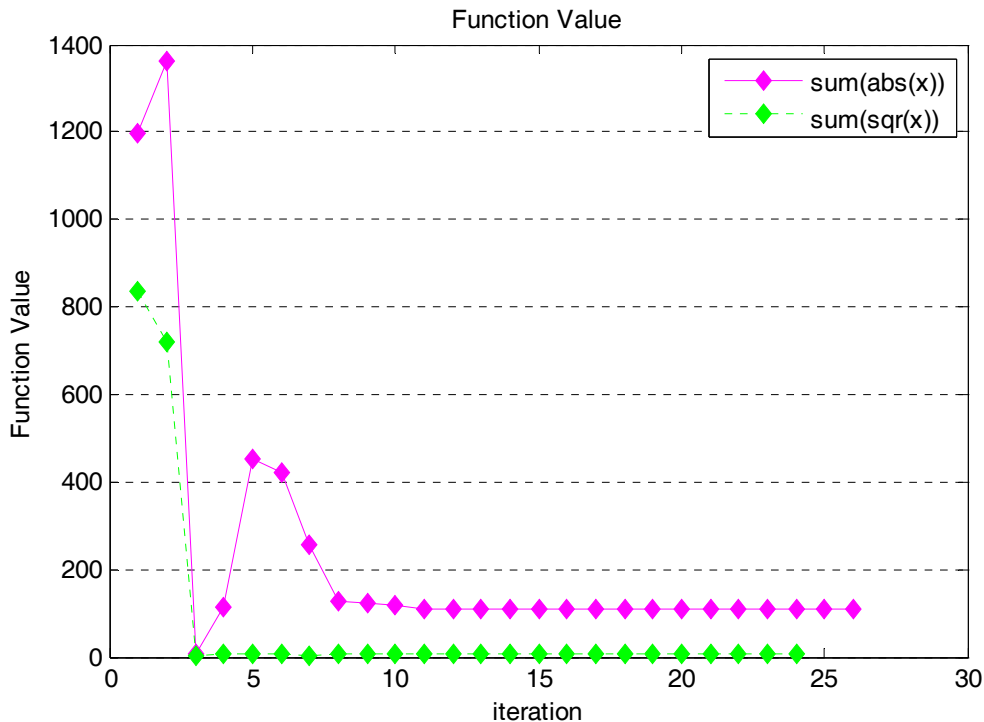
Πίνακας 3.23: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή Saratoga και αντικειμενική sum(abs(acc))

Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	837,143	0,553				Infeasible start point
1	27	720,092	2,53E-01	3,05E-05	3,56E+06	5,75E+03	
2	33	0,008378	1,09E-01	1,00E+00	-4,79E+00	2,64E+03	
3	41	6,45191	0,08459	0,25	-1,22E+02	1,15E+03	
4	47	4,79602	2,73E-02	1	5,21E-01	2,18E+03	Hessian modified
5	53	5,58236	2,45E-02	1,00E+00	6,19E-01	8,91E+01	
6	59	4,38884	2,29E-02	1	2,12E+03	4,91E+04	
7	67	4,90929	2,29E-02	0,25	1,44	3,61E+02	
8	76	4,69458	2,28E-02	0,125	6,3	2,25E+02	
9	82	7,42268	-0,01275	1	4,18	3,42E+02	
10	90	6,15905	-1,27E-03	0,25	-4,41	3,78E+02	
11	98	6,0754	-9,49E-04	0,25	1,28	1,10E+02	
12	104	5,91711	-4,34E-05	1	-0,0978	2,65E+01	
13	110	5,91166	9,97E-08	1	-0,00532	5,30E+00	
14	118	5,91151	1,69E-07	0,25	-0,000669	2,64E+00	Hessian modified
15	130	5,91134	3,55E-07	0,0156	-0,0119	5,56E+00	Hessian modified
16	142	5,91122	5,53E-07	0,0156	-0,00858	1,41E+01	Hessian modified twice
17	148	5,91087	3,03E-07	1	-0,000252	4,13E+00	
18	160	5,90882	4,51E-06	0,0156	-0,0834	2,01E+01	Hessian modified twice
19	167	5,89123	0,0001117	0,5	-0,0322	1,90E+01	
20	173	5,91178	-1,07E-05	1	0,00831	3,14E+00	
21	179	5,91039	4,49E-07	1	-0,00159	3,06	
22	187	5,90935	4,70E-06	0,25	0,0161	1,31E+01	Hessian modified
23	193	5,90998	3,52E-06	1	-0,000131	3,85E+00	

Πίνακας 3.24: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την καταγραφή Saratoga και αντικειμενική sum(sqr(acc))



Σχ. 3.35: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή Saratoga χωρίς τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις



Σχ. 3.36: Πρόοδος βελτιστοποίησης σε τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης

3.4.1.2 Σεισμική μόνωση αγάλματος

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύνταξη κώδικα βελτιστοποίησης του συγκεκριμένου συστήματος σεισμικής μόνωσης για οποιοδήποτε έκθεμα τοποθετηθεί σε αυτό. Κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η συμπεριφορά του κώδικα και για διαφορετικό έκθεμα ή με τη γλώσσα του μελετητή για διαφορετική σεισμικά μονωμένη μάζα.

Επιλέχθηκε ένα σημαντικά βαρύτερο έκθεμα, το άγαλμα «Κούρος» το οποίο έχει επίσης μονωθεί στο μουσείο J. P. Getty και για το οποίο υπήρχαν δεδομένα.

Για το συγκεκριμένο έκθεμα έγιναν αναλύσεις μόνο με την μία αντικειμενική συνάρτηση, καθώς δεν προκύπτει σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δύο, και δεν λήφθηκε υπόψη η επιρροή της τριβής.

Για το άγαλμα «Κούρος» το βάρος που αντιστοιχεί στο κινούμενο πλαίσιο είναι $w_x = 7,1214\text{kN}$ και το μήκος του μονωτήρα $0,60\text{m}$.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων:

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
k _{spx} (kN/m)	4,8742	0,0010	0,0010		0,0010	0,0010	0,4910
a	0,0010	0,0010	0,0010		0,0010	0,0010	0,0056
b	0,0010	0,0010	0,0010		0,0010	0,0010	0,0022
C _{dx1} (kNsec/m)	0,0010	0,0010	0,2158		2,8658	2,3159	0,0011
C _{dx2} (kNsec/m)	0,0010	0,0010	1,3453		0,0010	0,0010	0,0010
maxreldis (m)	0,17	0,14	0,05		0,25	0,21	0,26
maxrelvel (m/s)	1,00	0,53	0,39		1,27	0,74	0,66
maxabsacc (m/sec ²)	0,01	0,00	4,44		0,01	0,01	0,01
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89		14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	0,17%	0,07%	37,38%		0,07%	0,11%	0,07%

Πίνακας 3.25: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για κάθε καταγραφή με αντικειμενική sum(abs(acc))

3.4.2 Με την επιρροή της τριβής

Γενικά όλες οι προσομοιώσεις φυσικών συστημάτων αντιμετωπίζουν ιδιαίτερη δυσκολία κατά την προσομοίωση της τριβής. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται στην έλλειψη αποδοτικών αριθμητικών εργαλείων για την προσομοίωση της ταχύτατα εναλλασσόμενης φοράς της. Η δυσκολία αυτή εισάγει έναν σημαντικό βαθμό σφάλματος στις αναλύσεις.

Χαρακτηριστικό σημείο εντοπισμού του αριθμητικού σφάλματος είναι οι παραμένουσες απόλυτες επιταχύνσεις και σχετικές μετατοπίσεις κατά την ελεύθερη ταλάντωση μετά την ολοκλήρωση της σεισμικής διέγερσης. Στα διαγράμματα αποτυπώνεται το παραπάνω με μια συνεχόμενη «λωρίδα».

Εντούτοις για λόγους πληρότητας της εργασίας και για λόγους σύγκρισης με τα αποτελέσματα προηγούμενων εργασιών πραγματοποιήθηκε μια σειρά αναλύσεων με την επιρροή της τριβής. Οι συγκεκριμένες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν μόνο με τον αμοφορέα.

Στις παρακάτω διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν θεωρήθηκε μάζα αμοφορέα,

$$m = \frac{w}{9.81} \left[\frac{kN}{m/sec^2} \right] = \frac{1,1612kN}{9,81m/sec^2}$$

καθώς επίσης συντελεστής τριβής $\mu=0,025$, μήκος

μονωτήρα $l = 43,50m$, σταθερός συντελεστής καμπύλης κύλισης $c = 0$.

Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία από τη διαδικασία βελτιστοποίησης για τις επτά σεισμικές καταγραφές και για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
k _{spx} (kN/m)	0,0010	0,0010	0,0478	0,0010	5,1139	0,0000	0,6448
a	0,0010	0,0010	8,2731	0,0234	0,1408	0,0000	0,3092
b	0,0010	0,0010	0,0010	0,0210	0,1055	0,0000	0,0010
C _{dx1} (kNsec/m)	0,3524	6,2697	0,0053	0,4848	1,4449	0,0000	0,0815
C _{dx2} (kNsec/m)	0,1626	0,0010	0,1824	0,4255	0,0527	0,0000	0,0439
maxreldis (m)	0,24	0,14	0,21	0,12	0,22	0,39	0,23
maxrelvel (m/s)	0,75	0,56	0,76	0,25	1,36	0,76	0,71
maxabsacc (m/sec ²)	1,28	0,25	1,47	1,13	1,13	0,25	0,51
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	25,96%	4,05%	12,32%	57,74%	7,76%	4,19%	6,36%

Πίνακας 3.26: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για κάθε καταγραφή με αντικειμενική sum(abs(acc))

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
k _{spx} (kN/m)	7,1181	0,0010	0,0053	4,9951	4,8404	0,0000	2,6319
a	0,0010	0,0010	1,9775	0,7992	0,3242	0,0000	0,1707
b	0,0017	0,0010	6,8398	0,1998	0,0643	0,0000	0,0427
C _{dx1} (kNsec/m)	0,0181	5,4882	0,0010	0,2219	1,5242	0,0000	0,1936
C _{dx2} (kNsec/m)	0,1638	0,0010	0,0591	0,6349	0,0438	0,0000	0,0333
maxreldis (m)	0,23	0,14	0,23	0,08	0,23	0,39	0,24
maxrelvel (m/s)	0,75	0,56	0,85	0,19	1,36	0,76	0,73
maxabsacc (m/sec ²)	1,29	0,25	1,38	1,38	0,98	0,25	0,46
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	26,07%	4,05%	11,59%	70,19%	6,72%	4,19%	5,77%

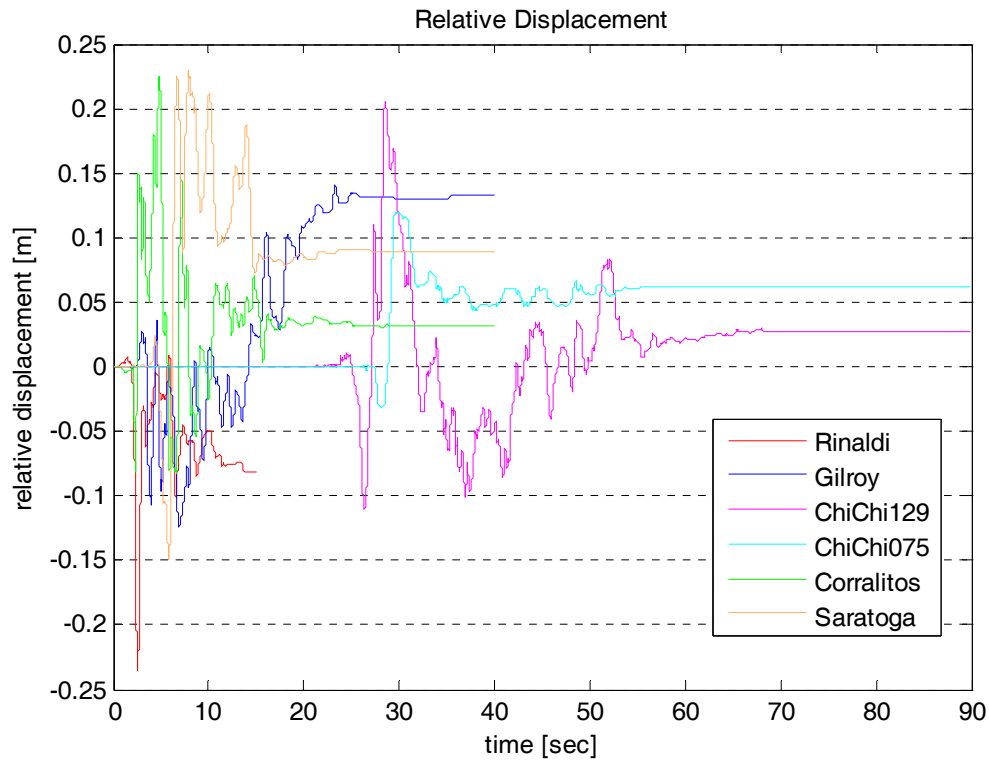
Πίνακας 3.27: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για κάθε καταγραφή με αντικειμενική sum(sqr(acc))

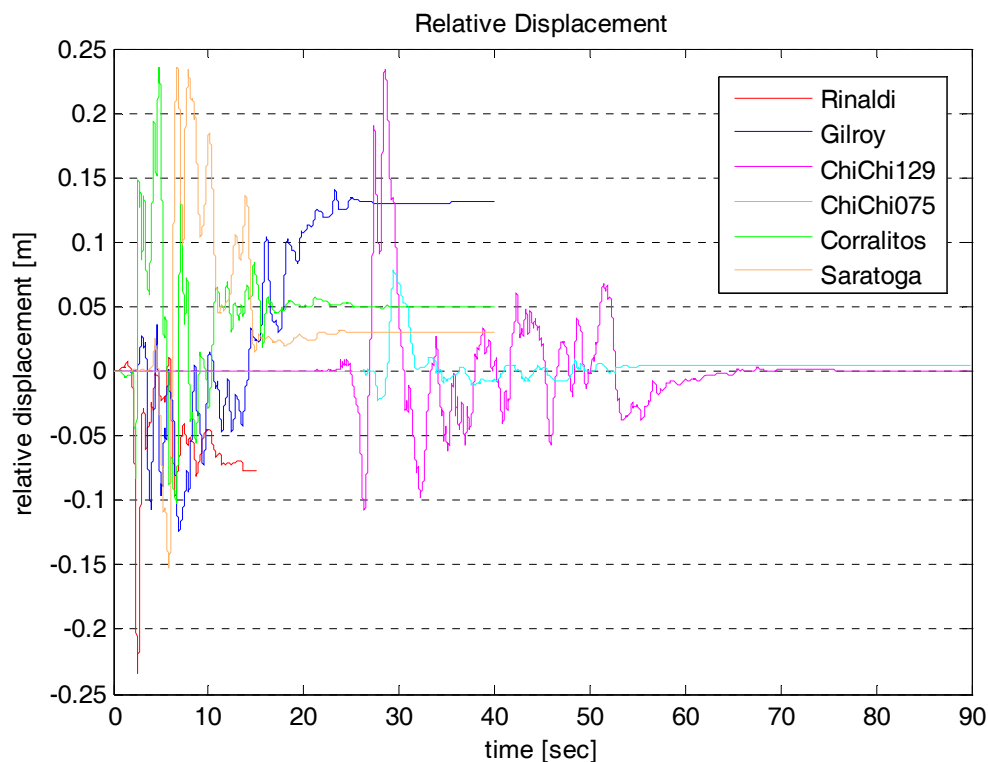
Από τους παραπάνω πίνακες μπορεί κανείς εύκολα να διακρίνει:

- Δεν ολοκληρώθηκε η διαδικασία βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi074. Υπήρξε αριθμητικό σφάλμα κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης.
- Σε όλες τις υπόλοιπες καταγραφές ολοκληρώθηκε με επιτυχία η διαδικασία βελτιστοποίησης.

- Παρατηρείται σημαντική μείωση των απόλυτων επιταχύνσεων με περιορισμό των σχετικών μετατοπίσεων εντός των επιτρεπτών ορίων.
- Για όλες τις καταγραφές χρησιμοποιήθηκε ίδιο επίπεδο ακρίβειας κατά την αριθμητική ολοκλήρωση της δυναμικής εξίσωσης.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν δίνουν την περιβάλλουσα σχετικών μετατοπίσεων από όλες τις σεισμικές καταγραφές για τις δύο επιλύσεις.





Σχ. 3.37: Απόκριση του συστήματος σε σχετικές μετατοπίσεις για το σύνολο των καταγραφών με τριβή i) αντικειμενική $\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$ ii) αντικειμενική $\text{sum}(\text{sqr}(\text{acc}))$

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε όλες τις καταγραφές ο σχεδιασμός εκμεταλλεύεται όλο το περιθώριο μετατοπίσεων χωρίς να υπερβαίνει το όριο που έχει ληφθεί υπόψη.

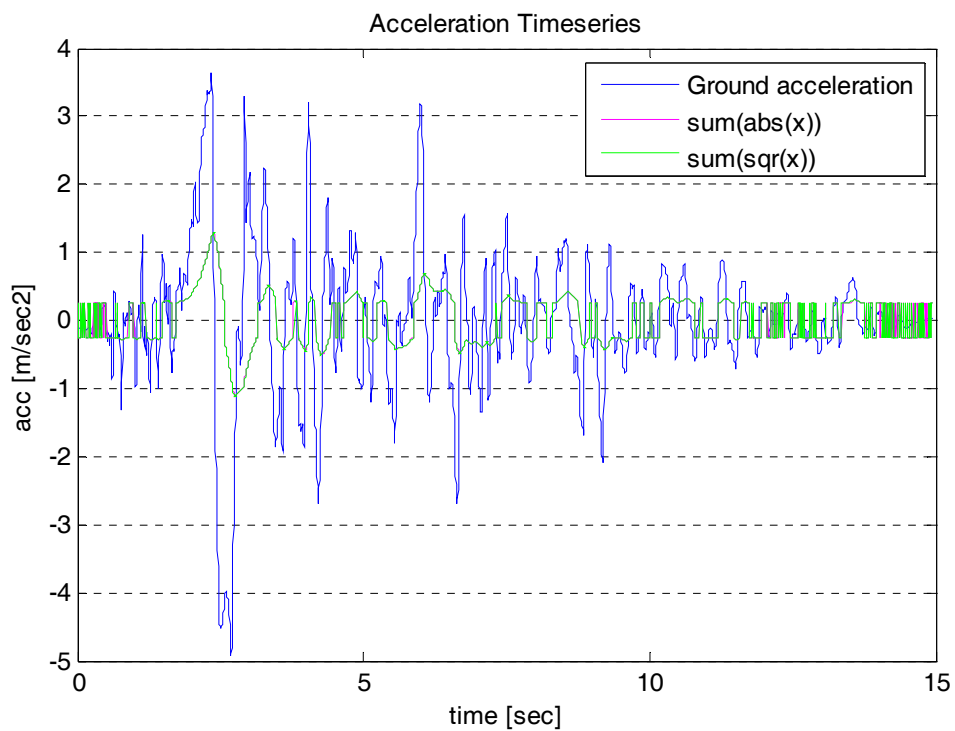
Λόγω των παραμενουσών επιταχύνσεων, τα αντίστοιχα διαγράμματα απόλυτων επιταχύνσεων δεν είναι ευκρινή. Από αυτά προκύπτει το επιτυχές του σχεδιασμού για όλες τις καταγραφές.

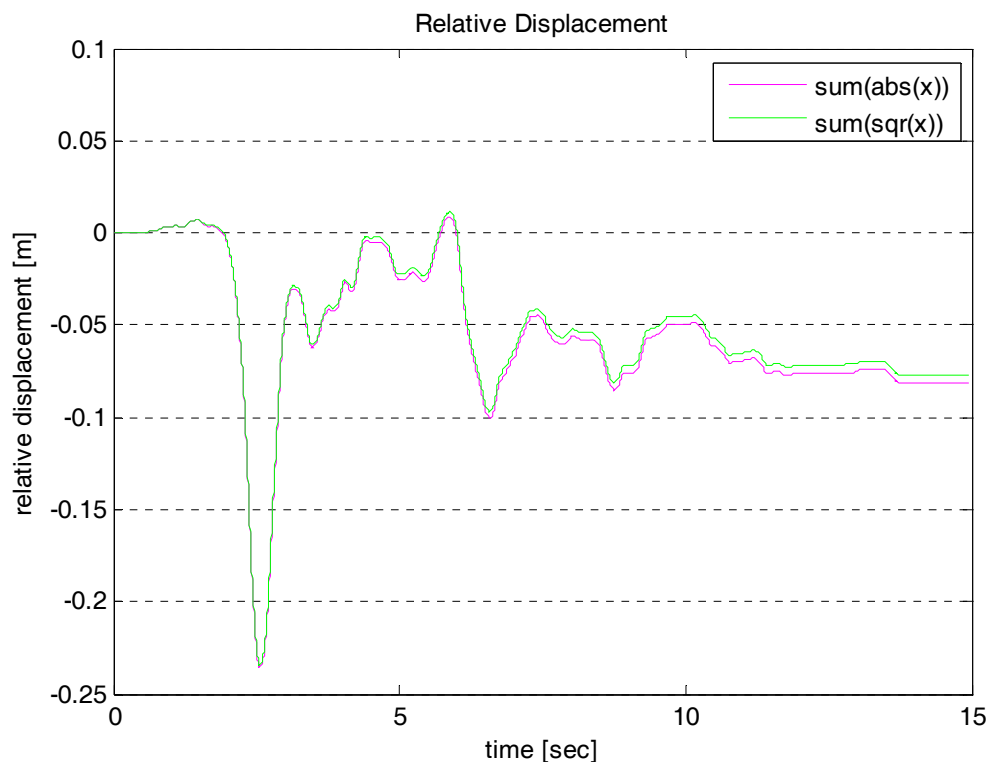
Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά διαγράμματα και σχήματα για την συμπεριφορά του συστήματος για κάθε καταγραφή ταυτόχρονα και για τους δύο σχεδιασμούς που προκύπτουν από τις διαφορετικές επιλύσεις από τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.

Northridge-Rinaldi

Καταγραφή	Rinaldi	Rinaldi
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	0,60
k _{sp} x (kN/m)	0,0010	7,1181
a	0,0010	0,0010
b	0,0010	0,0017
C _{dx1} (kNsec/m)	0,3524	0,0181
C _{dx2} (kNsec/m)	0,1626	0,1638
maxreldis (m)	0,24	0,23
maxrelvel (m/s)	0,75	0,75
maxabsacc (m/sec ²)	1,28	1,29
PGA (m/sec ²)	4,93	4,93
μείωση PGA στο	25,96%	26,07%

Πίνακας 3.28: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή Rinaldi



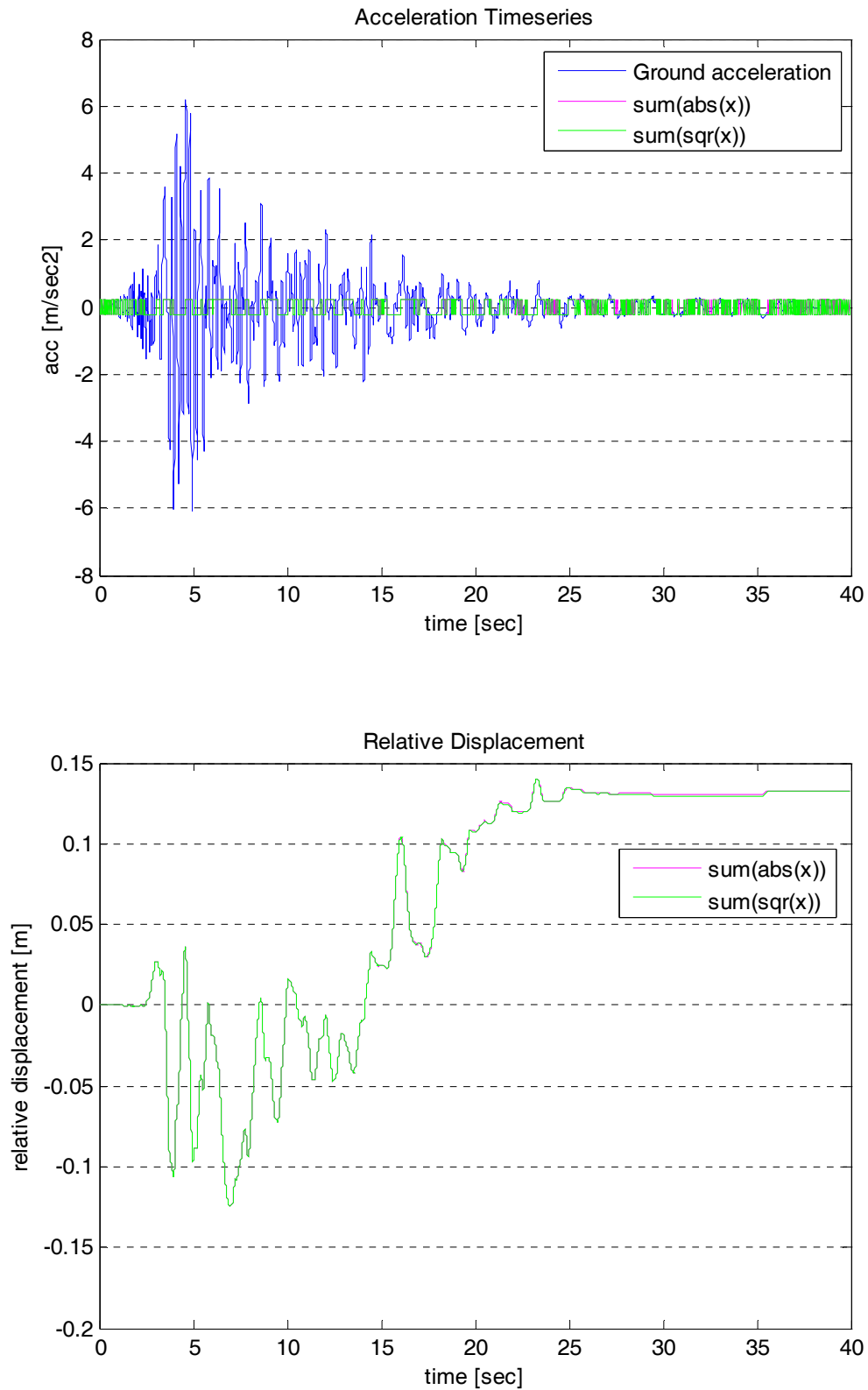


Σχ. 3.38: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή Rinaldi με τριβή
 i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

Loma Prieta – Gilroy

Καταγραφή	Gilroy	Gilroy
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	3,70	3,70
k _{spx} (kN/m)	0,0010	0,0010
a	0,0010	0,0010
b	0,0010	0,0010
C _{dx1} (kNsec/m)	6,2697	5,4882
C _{dx2} (kNsec/m)	0,0010	0,0010
maxreldis (m)	0,14	0,14
maxrelvel (m/s)	0,56	0,56
maxabsacc (m/sec ²)	0,25	0,25
PGA (m/sec ²)	6,18	6,18
μείωση PGA στο	4,05%	4,05%

Πίνακας 3.29: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή Gilroy

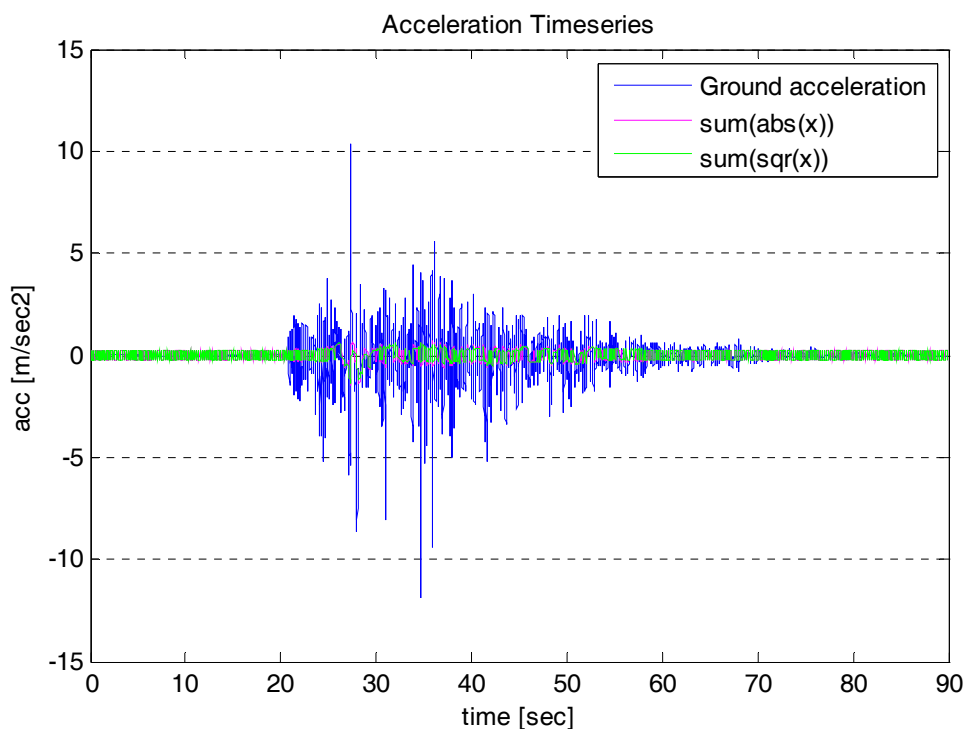


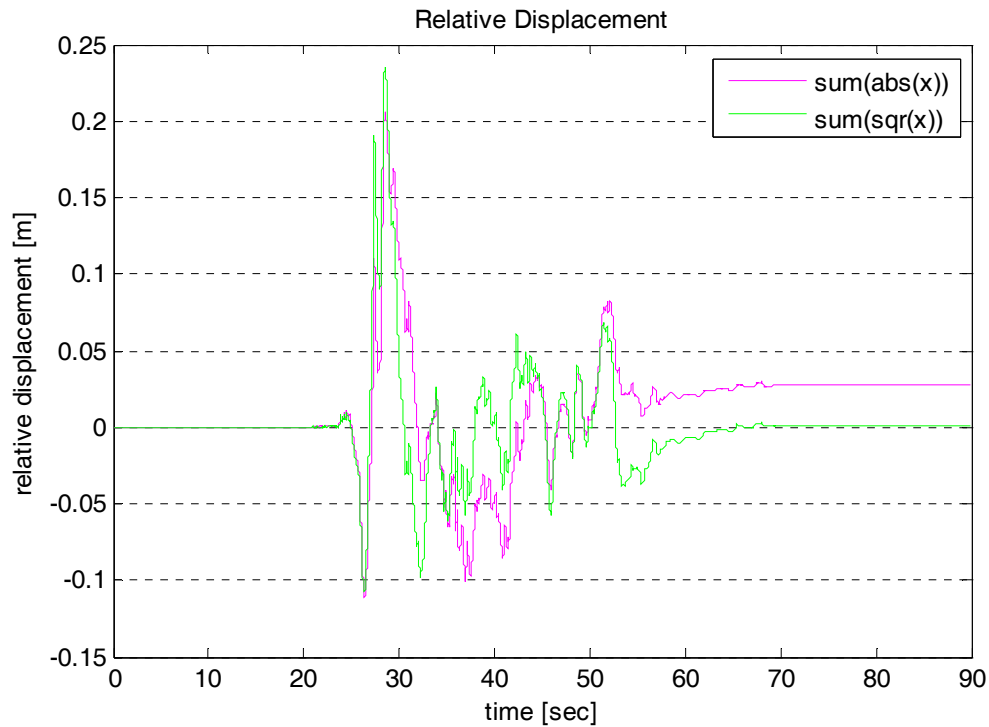
Σχ. 3.39: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή Gilroy με τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

ChiChi – TCU129

Καταγραφή	ChiChi129	ChiChi129
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	1,20	1,20
k _{spx} (kN/m)	0,0478	0,0053
a	8,2731	1,9775
b	0,0010	6,8398
C _{dx1} (kNsec/m)	0,0053	0,0010
C _{dx2} (kNsec/m)	0,1824	0,0591
maxreldis (m)	0,21	0,23
maxrelvel (m/s)	0,76	0,85
maxabsacc (m/sec ²)	1,47	1,38
PGA (m/sec ²)	11,89	11,89
μείωση PGA στο	12,32%	11,59%

Πίνακας 3.30: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi129



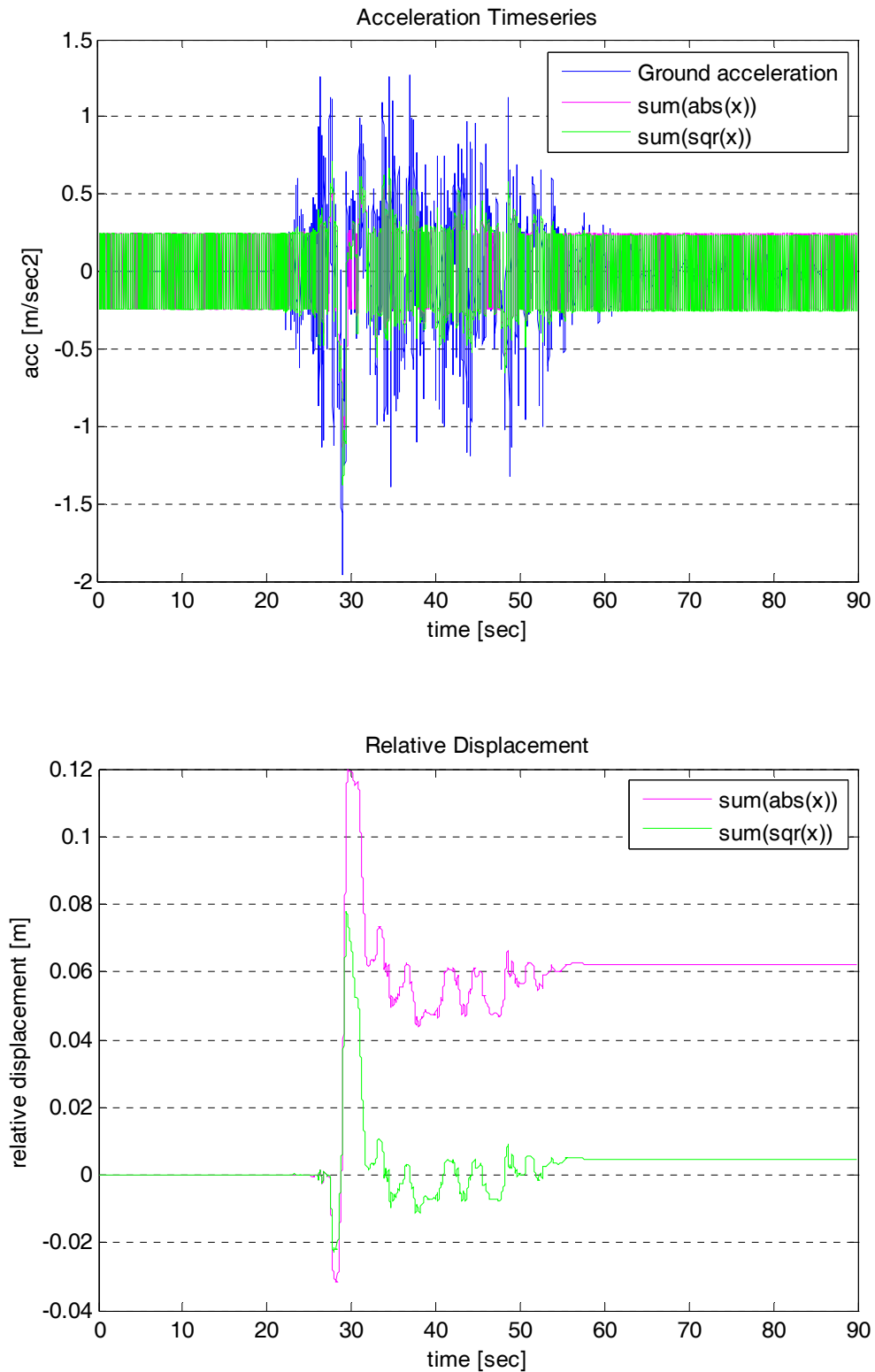


Σχ. 3.40: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή ChiChi129 με τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

ChiChi – TCU075

Καταγραφή	ChiChi075	ChiChi075
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqrt(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	0,60
k _{sp} x (kN/m)	0,0010	4,9951
a	0,0234	0,7992
b	0,0210	0,1998
C _{dx1} (kNsec/m)	0,4848	0,2219
C _{dx2} (kNsec/m)	0,4255	0,6349
maxreldis (m)	0,12	0,08
maxrelvel (m/s)	0,25	0,19
maxabsacc (m/sec ²)	1,13	1,38
PGA (m/sec ²)	1,96	1,96
μείωση PGA στο	57,74%	70,19%

Πίνακας 3.31: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή ChiChi075

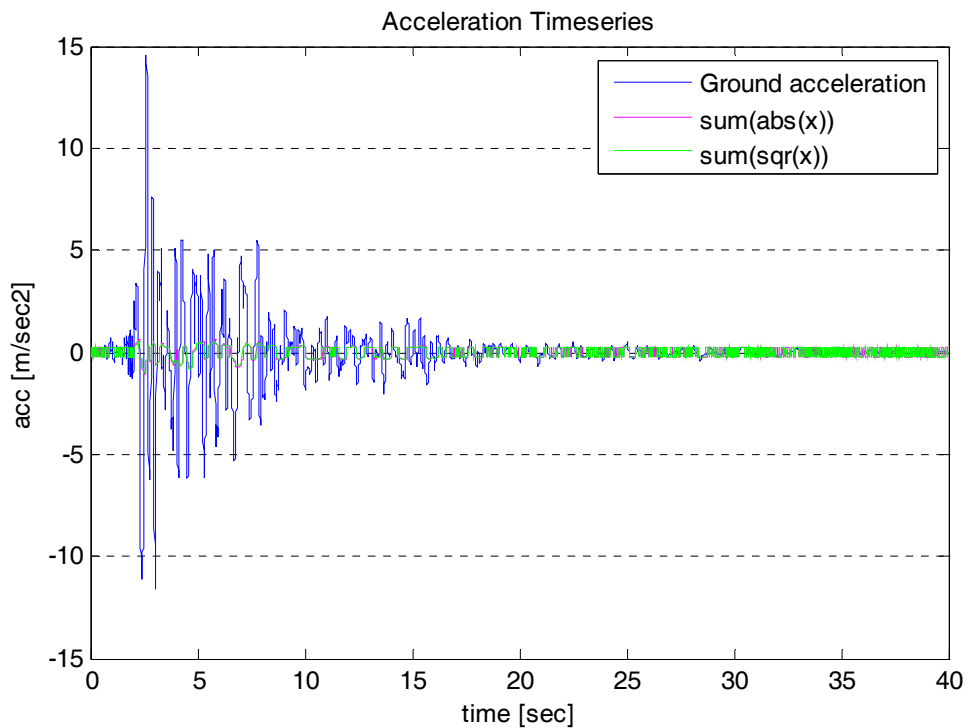


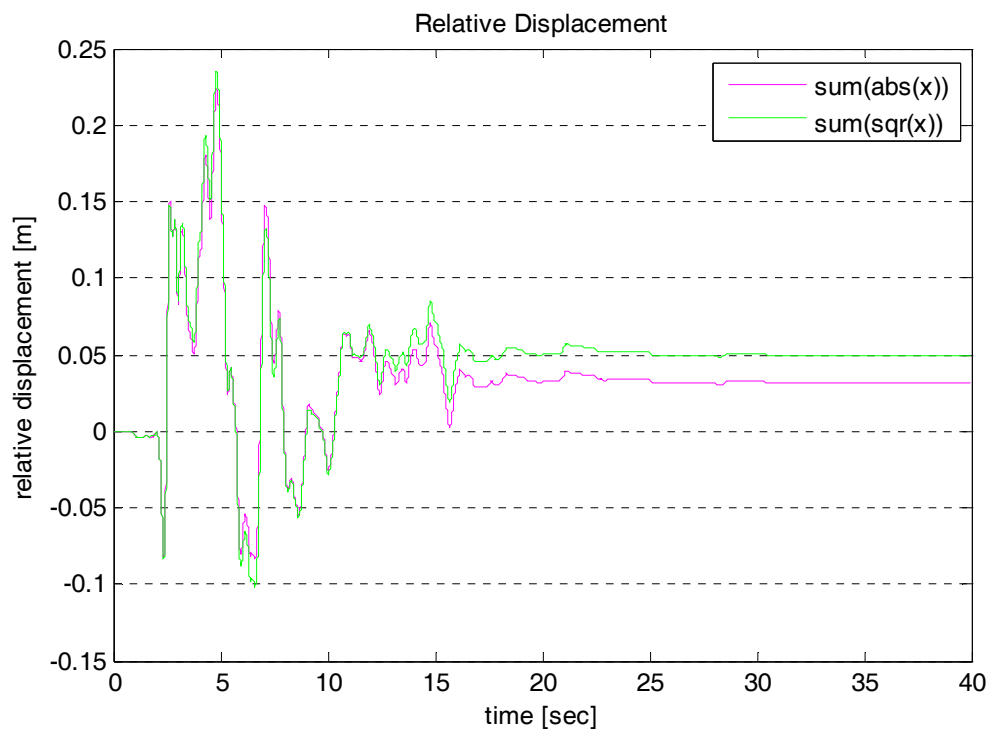
Σχ. 3.41: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή ChiChi075 με τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

Loma Prieta – Corralitos

Καταγραφή	Corralitos	Corralitos
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqr(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	2,30	2,30
k _{spx} (kN/m)	5,1139	4,8404
a	0,1408	0,3242
b	0,1055	0,0643
C _{dx1} (kNsec/m)	1,4449	1,5242
C _{dx2} (kNsec/m)	0,0527	0,0438
maxreldis (m)	0,22	0,23
maxrelvel (m/s)	1,36	1,36
maxabsacc (m/sec ²)	1,13	0,98
PGA (m/sec ²)	14,52	14,52
μείωση PGA στο	7,76%	6,72%

Πίνακας 3.32: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή Corralitos





Σχ. 3.42: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή Corralitos με τριβή
 i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

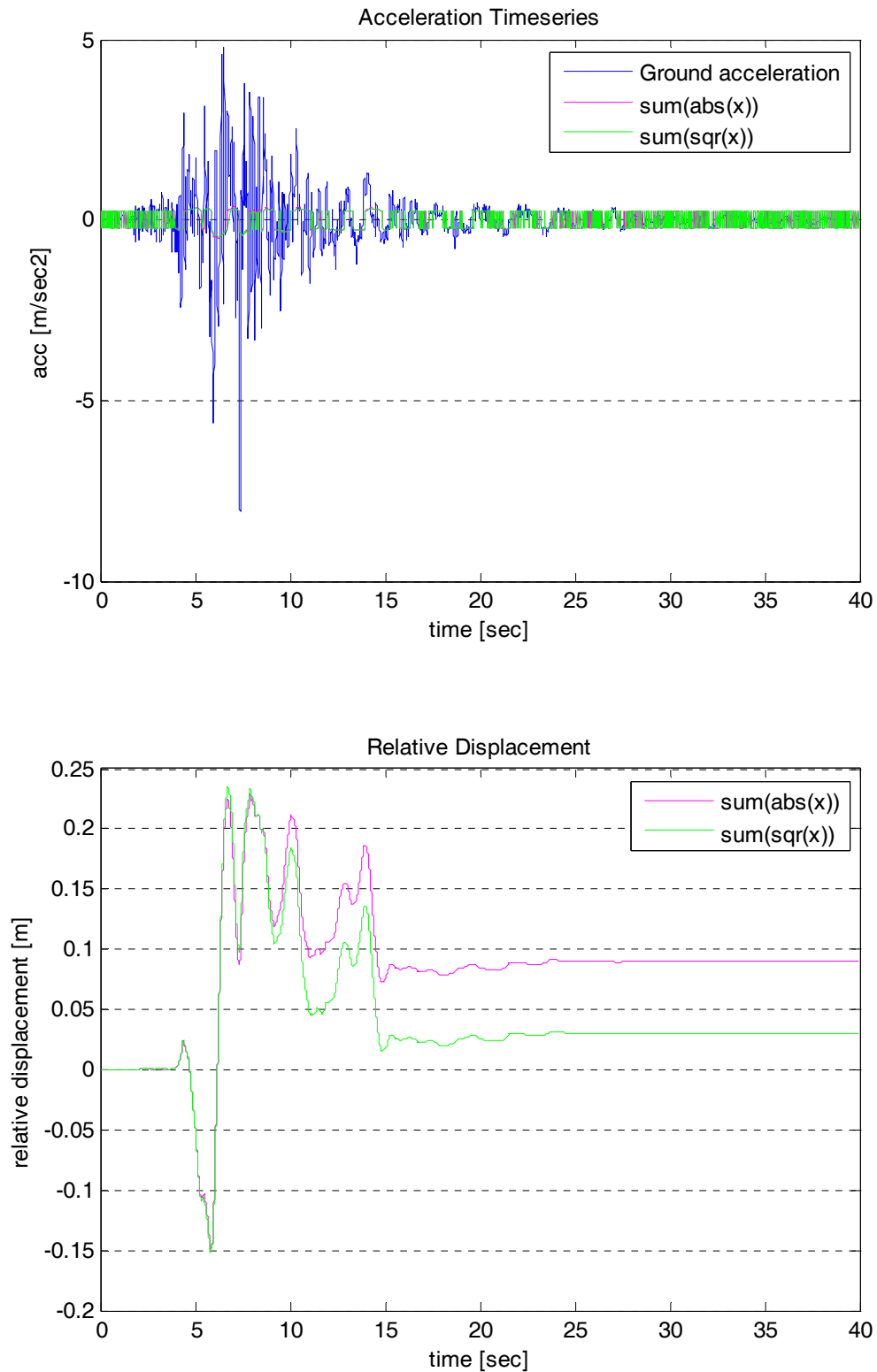
ChiChi – TCU074

Δεν ολοκληρώθηκε η διαδικασία βελτιστοποίησης

Loma Prieta – Saratoga

Καταγραφή	Saratoga	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(sqrt(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	1,60	1,60
k _{spx} (kN/m)	0,6448	2,6319
a	0,3092	0,1707
b	0,0010	0,0427
C _{dx1} (kNsec/m)	0,0815	0,1936
C _{dx2} (kNsec/m)	0,0439	0,0333
maxreldis (m)	0,23	0,24
maxrelvel (m/s)	0,71	0,73
maxabsacc (m/sec ²)	0,51	0,46
PGA (m/sec ²)	8,04	8,04
μείωση PGA στο	6,36%	5,77%

Πίνακας 3.33: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την καταγραφή Saratoga



Σχ. 3.43: Απόκριση του συστήματος για την καταγραφή Saratoga με τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

3.5 ΚΑΘΟΛΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Οι παραπάνω αναλύσεις στόχο είχαν κυρίως την αρχική σύνταξη του κώδικα και τον προκαταρκτικό έλεγχο επιτυχούς λειτουργίας του. Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος σεισμικής μόνωσης όμως δεν μας ενδιαφέρει η βέλτιστη απόκριση για κάποια μεμονωμένη σεισμική καταγραφή, όσο σύνθετη αυτή και να είναι, αλλά η αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος για κάθε πιθανό σεισμικό γεγονός.

Ο καθολικός σχεδιασμός προϋποθέτει την εύρεση των τιμών εκείνων των μεταβλητών σχεδιασμού για τις οποίες οι περιορισμοί δεν καταστρατηγούνται για καμία καταγραφή. Από τις παραπάνω αναλύσεις δεν προέκυψε κάποια συσχέτιση ανάμεσα στα διάφορα αποτελέσματα. Προφανώς μέχρι τώρα ο κώδικας προσάρμοζε το σύστημα στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε σεισμού.

Στη συγκεκριμένη φάση αναζητείται μέθοδος κατάλληλη ώστε να αντιμετωπίζεται με επιτυχία όλο το «καλάθι των σεισμών» από μια διάταξη. Ακολουθήθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες που αναλύονται στη συνέχεια.

3.5.1 Μέθοδος του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος

Ο σχεδιασμός μας απαιτεί από το σύστημα να αντιμετωπίσει ενιαία όλους τους σεισμούς «σαν ένα σύνολο». Η ίδια λογική χρειάζεται να διέπει και την κατάστροψη του προβλήματος. Η ιδέα είναι απλή. Συνθέτουμε ένα επιταχυνσιογράφημα από τα περιεχόμενα του καλαθιού των σεισμών. Δημιουργούμε μια αλληλουχία των σεισμικών καταγραφών και περιμένουμε ο κώδικας της βελτιστοποίησης να αντιμετωπίσει το σύνθετο αυτό επιταχυνσιογράφημα.

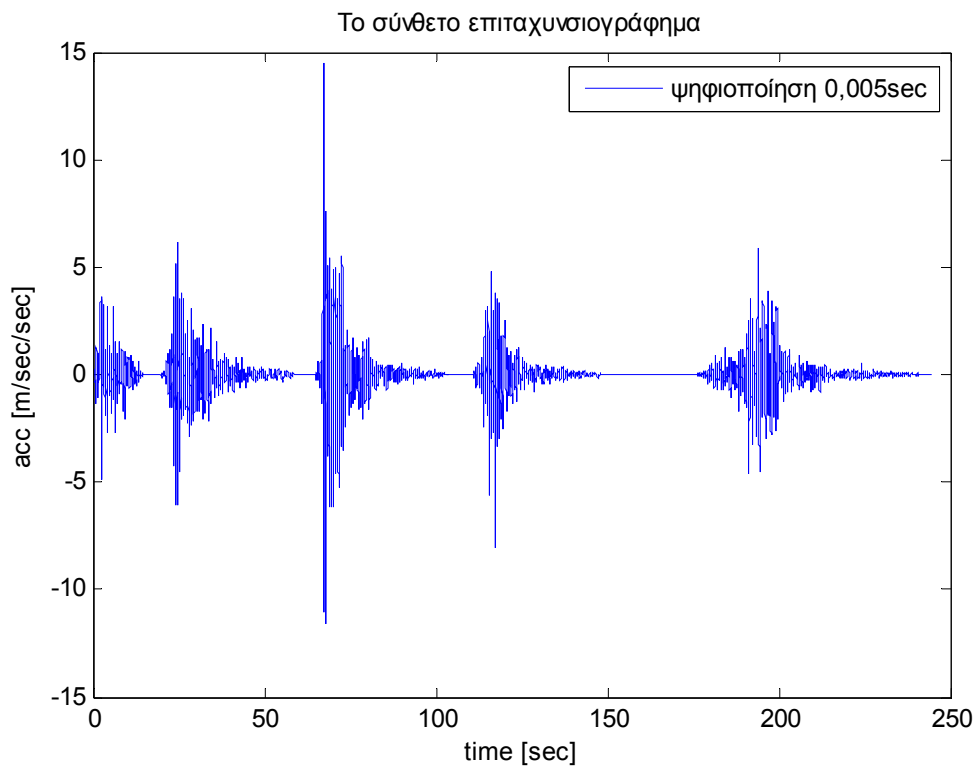
Η παραπάνω ιδέα προσκρούει στο μεγάλο όγκο υπολογιστικών δεδομένων που συνεπάγεται η δημιουργία του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος. Για το λόγο αυτό υιοθετούνται δύο παραδοχές που περιορίζουν τον όγκο των προς μελέτη δεδομένων.

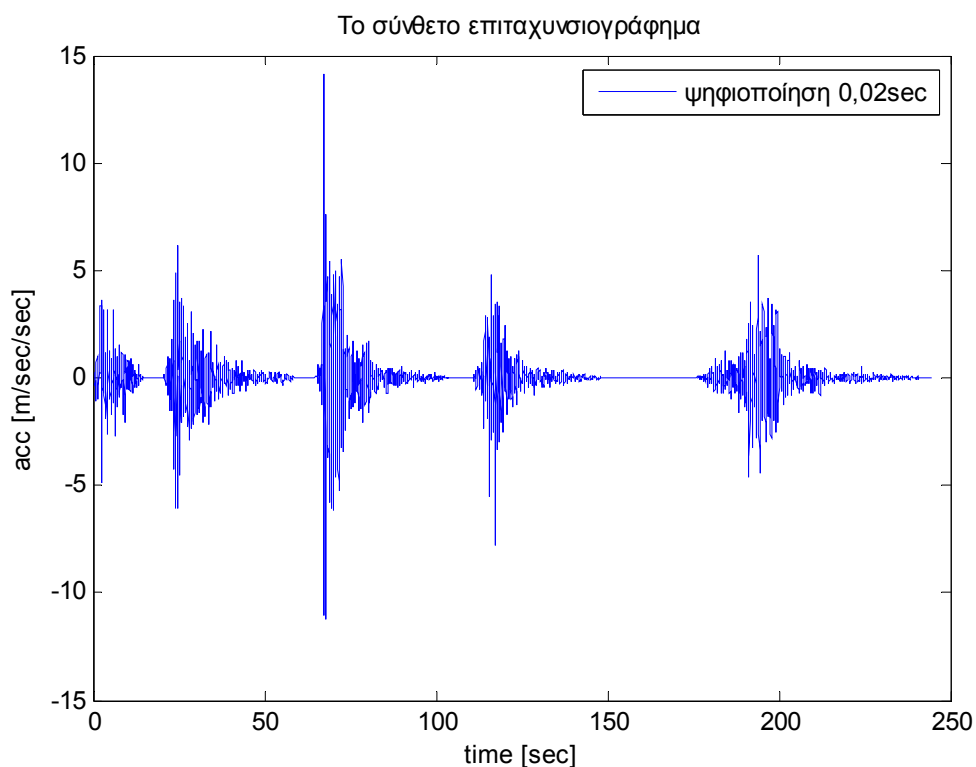
Κατ' αρχήν περιορίζεται η ψηφιοποίηση των σεισμικών καταγραφών στο όριο που επιτρέπει ο ΕΑΚ2000. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται δραστικά τα δεδομένα των καταγραφών. Ταυτόχρονα όμως μέρος της σεισμικής πληροφορίας, του φασματικού περιεχομένου του σεισμού δεν λαμβάνεται υπόψη. Θεωρούμε ότι ο παραπάνω συμβιβασμός, στο όριο που επιτρέπει ο κανονισμός, δεν επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της προσομοίωσης.

Δεύτερον στο σύνθετο επιταχυνσιογράφημα δεν χρησιμοποιούνται όλες οι καταγραφές από τον σεισμό ChiChi. Η μεγάλη χρονική διάρκειά τους καθιστά

ανέφικτη την όποια σκέψη συμμετοχής τους. Διαδοχικά διατηρείται μία από αυτές στο καλάθι των σεισμών.

Συγκεκριμένα οι επικλιμακομένες καταγραφές δημιουργούν μια αλληλουχία σεισμικών γεγονότων. Ένα συρμό από καταγραφές. Μεταξύ των σεισμών διατηρείται επαρκές χρονικό διάστημα ώστε το σύστημα να ηρεμεί και να μην επηρεάζεται κάθε καταγραφή από παραμένουσες επιταχύνσεις και μετατοπίσεις της προηγούμενης. Η ψηφιοποίηση γίνεται με βήμα 0,02sec.





Σχ. 3.44: Το σύνθετο επιταχυνσιογράφημα με ψηφιοποίηση i) 0,005sec ii) 0,02sec

Από τη διαδικασία βελτιστοποίησης προκύπτει ως βέλτιστη λύση

ksp _x (kN/m)	a	b	Cdx1 (kNsec/m)	Cdx2 (kNsec/m)
3,6724	0,6321	0,1536	0,1176	0,1337

Πίνακας 3.34: Βέλτιστη λύση μεθόδου σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος

Η επαλήθευση πραγματοποιήθηκε με την αρχική ψηφιοποίηση. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

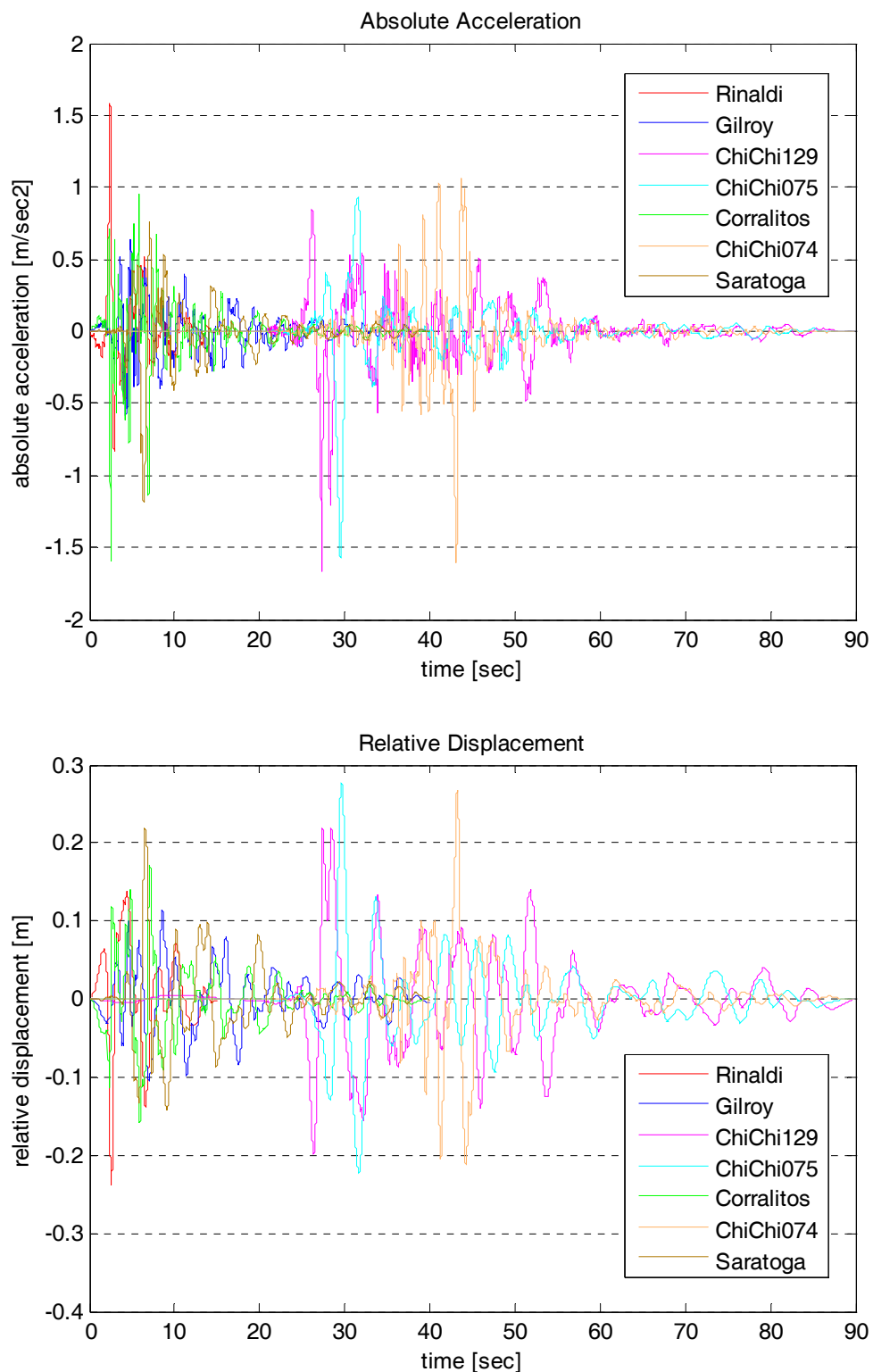
Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
xmax	0,14	0,11	0,22	0,28	0,17	0,27	0,22
xmin	-0,24	-0,10	-0,20	-0,22	-0,16	-0,21	-0,14
frxmax	0,10	0,07	0,20	0,19	0,19	0,19	0,14
frxmin	-0,19	-0,08	-0,10	-0,11	-0,11	-0,13	-0,09
absaccxmax	1,58	0,64	0,85	0,93	0,96	1,06	0,77
absaccxmin	-0,83	-0,58	-1,67	-1,57	-1,59	-1,61	-1,19
xdotmax	0,81	0,48	1,00	0,54	1,36	0,55	0,77
xdotmin	-0,88	-0,55	-0,40	-0,41	-0,64	-0,92	-0,67
maxreldis (m)	0,24	0,11	0,22	0,28	0,17	0,27	0,22
maxrelvel (m/s)	0,88	0,55	1,00	0,54	1,36	0,92	0,77
maxabsacc (m/sec ²)	1,58	0,64	1,67	1,57	1,59	1,61	1,19
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	32,05%	10,31%	14,05%	79,96%	10,97%	27,41%	14,76%

Πίνακας 3.35: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σύνολο των καταγραφών με τη βέλτιστη λύση της μεθόδου του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος

Από τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι:

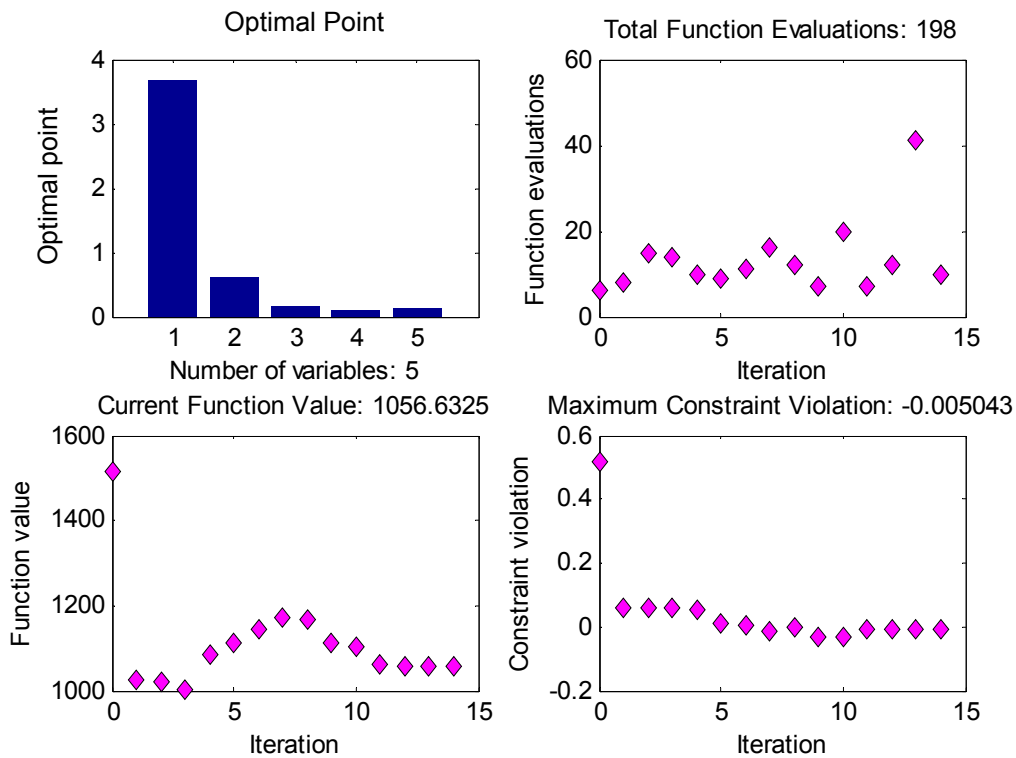
- Για όλες τις καταγραφές παρατηρείται σημαντική μείωση των επιταχύνσεων κάτω από το όριο των 2,00m/sec². Στις περισσότερες περιορίζεται γύρω από την τιμή 1,50m/sec².
- Οι σχετικές μετατοπίσεις διατηρούνται εντός ορίων για τις καταγραφές που συμπεριλήφθηκαν στο σύνθετο επιταχυνσιογράφημα.
- Παρατηρείται μικρή υπέρβαση των σχετικών μετατοπίσεων για τις καταγραφές ChiChi075 και ChiChi074.
- Η παραπάνω μέθοδος μπορεί να δώσει λύσεις καθολικού σχεδιασμού, αλλά χρειάζεται ιδιαίτερη φροντίδα κατά την επιλογή των επιταχυνσιογραφημάτων που δημιουργούν το σύνθετο επιταχυνσιογράφημα.

Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα απόλυτων επιταχύνσεων και σχετικών μετατοπίσεων.



Σχ. 3.45: Απόκριση του συστήματος με τη βέλτιστη λύση του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος για το σύνολο των καταγραφών χωρίς τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

Στοιχεία από την διαδικασία βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στα κάτωθι γραφήματα και πίνακα.



Σχ 3.46: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την μέθοδο του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος

Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	6	1514,91	0,5181				Infeasible start point
1	14	1025,76	0,05861	0,25	-8,86E+08	5,86E+08	
2	29	1020,19	0,05875	0,00195	-1,42E+09	4,66E+08	Hessian modified
3	43	1001,65	0,05896	0,00391	-2,25E+09	1,24E+09	Hessian modified
4	53	1083,87	0,05282	0,0625	1,19E+08	1,71E+09	Hessian modified
5	62	1110,82	0,01253	0,125	6,64E+08	9,24E+08	
6	73	1143,72	0,006016	0,0313	-7,75E+08	2,56E+09	
7	89	1173,69	-0,01567	0,000977	2,20E+10	2,18E+09	
8	101	1164,95	0,0008622	0,0156	-2,92E+08	4,49E+08	
9	108	1110,34	-0,03511	0,5	-2,96E+07	2,23E+15	Hessian modified
10	128	1104,41	-0,03454	-6,10E-05	5,52E+09	4,79E+10	
11	135	1060,45	-0,005225	0,5	-4,81E+07	3,36E+14	Hessian modified
12	147	1059,38	-0,005042	0,0156	-1,49E+08	1,36E+09	Hessian modified
13	188	1058,57	-0,005042	2,91E-11	-9,30E+07	1,37E+09	
14	198	1056,63	-0,005043	0,0625	-3,37E+04	9,12E+08	Hessian modified twice

Πίνακας 3.36: Στοιχεία βελτιστοποίησης για την μέθοδο του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος

3.5.2 Μέθοδος της επικεφαλής σεισμικής καταγραφής

Για να αποφύγει κανείς το μεγάλο υπολογιστικό φόρτο που συνεπάγεται το σύνθετο επιταχυνσιογράφημα μπορεί να ακολουθήσει μια μέθοδο «ημικαθολικού» σχεδιασμού. Δεν αντιμετωπίζει το «καλάθι των σεισμών» ως σύνολο, αλλά χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη λύση που προκύπτει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης για κάθε μεμονωμένη καταγραφή, ελέγχει εάν πληρούνται οι απαιτήσεις και για τις υπόλοιπες.

Ουσιαστικά γίνεται βελτιστοποίηση για κάποια καταγραφή, την επικεφαλής σεισμική καταγραφή, και οι υπόλοιπες χρησιμοποιούνται για έλεγχο. Δεν μπορεί να χαρακτηριστεί καθολικός σχεδιασμός, όπως παρουσιάστηκε στην αρχή της παραγράφου αλλά μπορεί υπό προϋποθέσεις να καλύψει τις ανάγκες του σχεδιασμού. Με τη μέθοδο αυτή δεν εξασφαλίζεται ότι θα προκύψει απάντηση στο ερώτημα της βέλτιστης λύσης. Αλλά πολύ γρήγορα μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση, χωρίς συμβιβασμούς ως προς την ακρίβεια της προσομοίωσης του σεισμικού γεγονότος. Χωρίς να παραβλέπουμε συνειδητά μέρος του φασματικού περιεχομένου του σεισμού.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν δύο διερευνήσεις με τη μέθοδο της επικεφαλής σεισμικής καταγραφής. Η πρώτη αναφέρεται στην μελέτη χωρίς τριβή και ως στοιχεία εισόδου χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από την βελτιστοποίηση του συστήματος με αντικειμενική συνάρτηση την $\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$. Η δεύτερη αναφέρεται στη μελέτη με τριβή και χρησιμοποιούνται τα ανάλογα δεδομένα.

3.5.2.1 Χωρίς τριβή

Στην πρώτη διερεύνηση οι τιμές βελτιστοποίησης από δύο σεισμικές καταγραφές, ChiChi129 και ChiChi074 κρίνεται ότι καλύπτουν τις απαιτήσεις για το σύνολο των καταγραφών.

Βέλτιστες τιμές για τον σχεδιασμό βάσει της καταγραφής ChiChi129 είναι

ksp _x (kN/m)	a	b	Cdx1 (kNsec/m)	Cdx2 (kNsec/m)
4,0861	0,0010	0,0010	0,7178	0,1961

Πίνακας 3.37: Βέλτιστη λύση με επικεφαλής καταγραφή ChiChi129

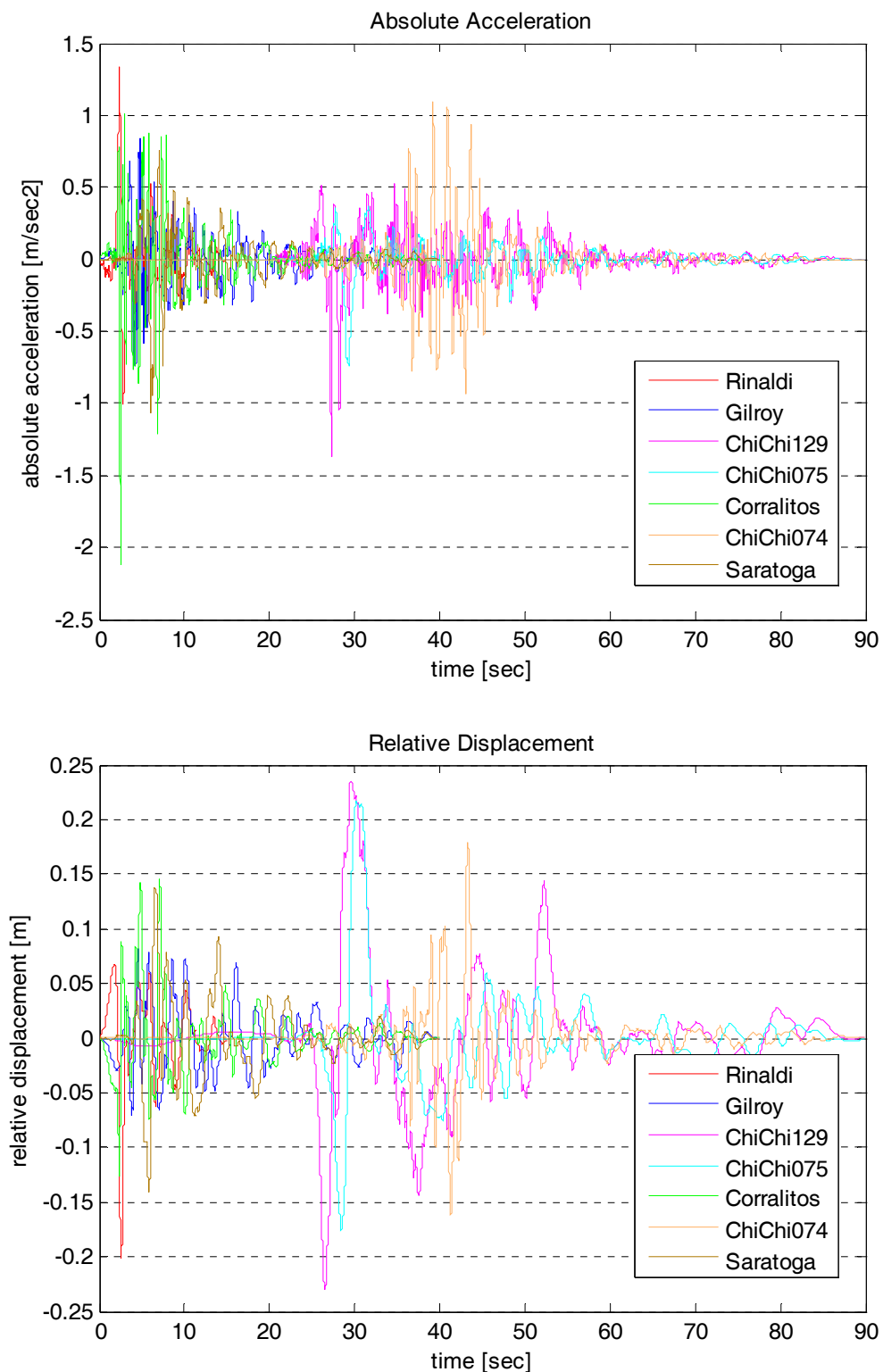
και τα αποτελέσματα για το σύνολο των καταγραφών

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
xmax	0,07	0,08	0,24	0,22	0,15	0,18	0,14
xmin	-0,20	-0,07	-0,23	-0,18	-0,13	-0,16	-0,14
frxmax	0,12	0,09	0,16	0,09	0,25	0,11	0,13
frxmin	-0,16	-0,10	-0,06	-0,04	-0,12	-0,13	-0,09
absaccxmax	1,33	0,84	0,53	0,37	1,01	1,09	0,75
absaccxmin	-1,01	-0,74	-1,37	-0,75	-2,12	-0,94	-1,07
xdotmax	0,61	0,45	0,83	0,45	1,28	0,57	0,64
xdotmin	-0,80	-0,51	-0,32	-0,23	-0,61	-0,66	-0,45
maxreldis (m)	0,20	0,08	0,24	0,22	0,15	0,18	0,14
maxrelvel (m/s)	0,80	0,51	0,83	0,45	1,28	0,66	0,64
maxabsacc (m/sec ²)	1,33	0,84	1,37	0,75	2,12	1,09	1,07
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	27,04%	13,59%	11,53%	38,00%	14,58%	18,66%	13,26%

Πίνακας 3.38: Συγκενρωτικά αποτελέσματα για όλες τις καταγραφές με επικεφαλής καταγραφή ChiChi129

Από τον πίνακα προκύπτει:

- Οι τιμές των σχετικών μετατοπίσεων είναι για όλες τις καταγραφές εντός του ορίου
- Μόνο για μία καταγραφή, Corralitos, υπάρχει υπέρβαση του ορίου για τις απόλυτες επιταχύνσεις. Η υπέρβαση είναι κατά 5,5% τιμή που δεν θεωρείται απαγορευτική.



Σχ. 3.47: Απόκριση του συστήματος με τη βέλτιστη λύση της επικεφαλής καταγραφής ChiChi129 για το σύνολο των καταγραφών χωρίς τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

Οι βέλτιστες τιμές για τον σχεδιασμό βάσει της καταγραφής ChiChi074 είναι

ksp (kN/m)	a	b	Cdx1 (kNsec/m)	Cdx2 (kNsec/m)
3,1865	0,9553	0,0010	1,3981	0,0767

Πίνακας 3.39: Βέλτιστη λύση με επικεφαλής καταγραφή ChiChi074

και τα αποτελέσματα για το σύνολο των καταγραφών

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
xmax	0,14	0,10	0,28	0,27	0,20	0,23	0,19
xmin	-0,21	-0,09	-0,23	-0,23	-0,16	-0,19	-0,17
frxmax	0,10	0,04	0,28	0,20	0,13	0,18	0,11
frxmin	-0,18	-0,04	-0,12	-0,11	-0,10	-0,11	-0,06
absaccxmax	1,53	0,34	1,04	0,94	0,85	0,89	0,54
absaccxmin	-0,84	-0,33	-2,35	-1,67	-1,11	-1,50	-0,92
xdotmax	0,62	0,49	1,03	0,63	1,34	0,69	0,72
xdotmin	-0,94	-0,52	-0,35	-0,35	-0,65	-0,72	-0,51
maxreldis (m)	0,21	0,10	0,28	0,27	0,20	0,23	0,19
maxrelvel (m/s)	0,94	0,52	1,03	0,63	1,34	0,72	0,72
maxabsacc (m/sec ²)	1,53	0,34	2,35	1,67	1,11	1,50	0,92
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	31,00%	5,50%	19,77%	84,93%	7,62%	25,52%	11,48%

Πίνακας 3.40: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις καταγραφές με επικεφαλής καταγραφή ChiChi074

Από τον πίνακα προκύπτει:

- Ο σχεδιασμός δεν καλύπτει τις απαιτήσεις για την καταγραφή ChiChi129, αλλά με μικρή υπέρβαση των ορίων που δεν κρίνεται απαγορευτική.
- Για τις υπόλοιπες καταγραφές τα αποτελέσματα είναι εντός των ορίων.

3.5.2.2 Με τριβή

Στην δεύτερη διερεύνηση οι τιμές βελτιστοποίησης από δύο σεισμικές καταγραφές, Rinaldi και ChiChi129 κρίνεται ότι καλύπτουν τις απαιτήσεις για το σύνολο των καταγραφών.

Βέλτιστες τιμές για τον σχεδιασμό βάσει της καταγραφής Rinaldi είναι

ksp _x (kN/m)	a	b	Cdx1 (kNsec/m)	Cdx2 (kNsec/m)
7,1181	0,0010	0,0017	0,0181	0,1638

Πίνακας 3.41: Βέλτιστη λύση με επικεφαλής καταγραφή Rinaldi

και τα αποτελέσματα για το σύνολο των καταγραφών

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
x _{max}	0,01	0,05	0,26	0,25	0,26	0,10	0,18
x _{min}	-0,23	-0,08	-0,12	-0,05	-0,08	-0,19	-0,10
frx _{max}	0,13	0,10	0,16	0,09	0,24	0,11	0,14
frx _{min}	-0,15	-0,11	-0,08	-0,05	-0,12	-0,14	-0,10
absaccx _{max}	1,29	0,95	0,65	0,45	1,05	1,18	0,81
absaccx _{min}	-1,12	-0,81	-1,31	-0,78	-2,04	-0,92	-1,16
xdot _{max}	0,63	0,41	0,77	0,38	1,30	0,49	0,66
xdot _{min}	-0,75	-0,51	-0,29	-0,15	-0,58	-0,68	-0,41
maxreldis (m)	0,23	0,08	0,26	0,25	0,26	0,19	0,18
maxrelvel (m/s)	0,75	0,51	0,77	0,38	1,30	0,68	0,66
maxabsacc (m/sec ²)	1,29	0,95	1,31	0,78	2,04	1,18	1,16
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	26,07%	15,38%	11,02%	39,64%	14,07%	20,17%	14,39%

Πίνακας 3.42: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις καταγραφές με επικεφαλής καταγραφή Rinaldi

Από τον πίνακα προκύπτει:

- Οι τιμές των σχετικών μετατοπίσεων είναι για όλες τις καταγραφές εντός του ορίου ή ελαφρώς αυξημένες.
- Για όλες τις καταγραφές οι απόλυτες επιταχύνσεις που καταγράφονται είναι σημαντικά μειωμένες.

Οι βέλτιστες τιμές για τον σχεδιασμό βάσει της καταγραφής ChiChi129 είναι

ksp _x (kN/m)	a	b	Cdx1 (kNsec/m)	Cdx2 (kNsec/m)
0,0053	1,9775	6,8398	0,0010	0,0591

Πίνακας 3.43: Βέλτιστη λύση με επικεφαλής καταγραφή ChiChi129

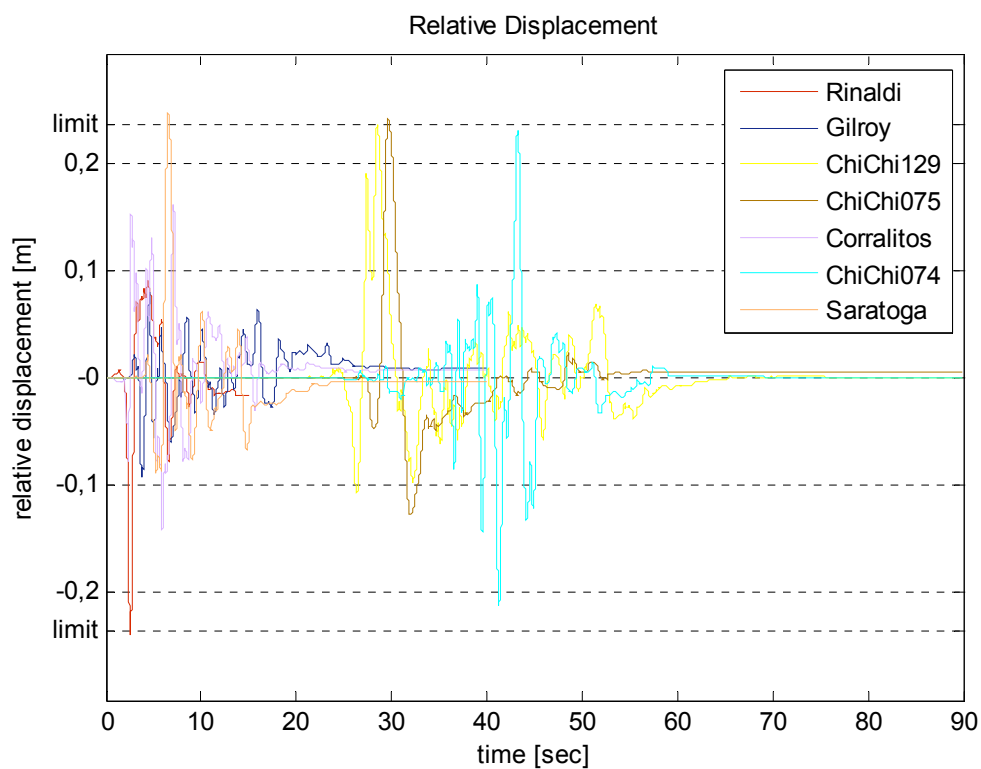
και τα αποτελέσματα για το σύνολο των καταγραφών

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
xmax	0,09	0,08	0,23	0,24	0,16	0,23	0,25
xmin	-0,24	-0,09	-0,11	-0,13	-0,14	-0,21	-0,09
frxmax	0,10	0,08	0,16	0,13	0,19	0,14	0,15
frxmin	-0,17	-0,09	-0,07	-0,08	-0,12	-0,13	-0,09
absaccxmax	1,40	0,79	0,61	0,65	0,97	1,08	0,74
absaccxmin	-0,82	-0,71	-1,38	-1,06	-1,63	-1,17	-1,27
xdotmax	0,79	0,48	0,85	0,40	1,36	0,53	0,76
xdotmin	-0,77	-0,54	-0,30	-0,25	-0,64	-0,79	-0,64
maxreldis (m)	0,24	0,09	0,23	0,24	0,16	0,23	0,25
maxrelvel (m/s)	0,79	0,54	0,85	0,40	1,36	0,79	0,76
maxabsacc (m/sec ²)	1,40	0,79	1,38	1,06	1,63	1,17	1,27
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	28,42%	12,75%	11,59%	54,23%	11,23%	19,99%	15,81%

Πίνακας 3.44: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις καταγραφές με επικεφαλής καταγραφή ChiChi129

Από τον πίνακα προκύπτει:

- Οι τιμές των σχετικών μετατοπίσεων είναι για όλες τις καταγραφές εντός του ορίου ή ελαφρώς αυξημένες.
- Για όλες τις καταγραφές οι απόλυτες επιταχύνσεις που καταγράφονται είναι σημαντικά μειωμένες.



Σχ. 3.48: Απόκριση του συστήματος σε σχετικές μετατοπίσεις με τη βέλτιστη λύση της επικεφαλής καταγραφής ChiChi129 για το σύνολο των καταγραφών με τριβή

Κεφάλαιο 4

Μελέτη συμπεριφοράς εξεταζόμενου συστήματος σεισμικής μόνωσης

4.1 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΚΥΛΙΣΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΩΝ – ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο προτείνεται η διαφοροποίηση των καμπυλών κύλισης των ελατηρίων και των αποσβεστήρων και εξετάζεται η πιθανή βελτίωση της συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος σεισμικής μόνωσης για την προαναφερθείσα αλλαγή.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η γενική συμμετρική μορφή της δευτεροβάθμιας καμπύλης κύλισης μπορεί να εκφραστεί για τα ελατήρια και τους αποσβεστήρες αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$y_s(x) = a_s x^2 + b_s |x| + c_s$$

$$y_d(x) = a_d x^2 + b_d |x| + c_d$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω και όσα αναπτύχθηκαν αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο η δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου ορίζεται πλέον ως:

$$F_s = k_{sp} (a_s x^2 + b_s |x| + c_s) (2a_s x + b_s \text{sign}(x)) \Leftrightarrow$$

$$F_s = k_{sp} [2a_s^2 x^3 + 3a_s x^2 b_s \text{sign}(x) + b_s^2 x + 2a_s c_s x + b_s c_s \text{sign}(x)]$$

Η δύναμη απόσβεσης των ιξωδών αποσβεστήρων που εισάγονται στο σύστημα κατά τη διεύθυνση κίνησης παίρνει τη μορφή:

$$F_c = F_{c1} + F_{c2} = c_{d1} [4a_d^2 x^2 + 4a_d b_d x \text{sign}(x) + b_d^2] \dot{x} + c_{d2} \dot{x}$$

Η δύναμη τριβής επί των τροχιών προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_f = \mu mg \cdot \text{sign}(\dot{x})$$

Η γενική εξίσωση κίνησης δίνεται από τη σχέση:

$$m\ddot{u}(t) + F_s + F_c + F_f = f(t)$$

Οι δύο πρωτοβάθμιες εξισώσεις κατάστασης (state space) παίρνουν τη μορφή

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -a_g - \frac{k_{sp}}{m} [2a_s^2 x_1^3 + 3a_s b_s x_1^2 \text{sign}(x_1) + b_s^2 x_1 + 2a_s c_s x_1 + b_s c_s \text{sign}(x_1)] - \frac{c_{d1}}{m} [4a_d^2 x_1^2 + 4a_d b_d x_1 \text{sign}(x_1) + b_d^2] x_2 - \frac{c_{d2}}{m} x_2 - \mu g \cdot \text{sign}(x_2)$$

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.2.1 Μεμονωμένες σεισμικές καταγραφές

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ένα πρώτο συμπέρασμα είναι ότι αυξάνονται σημαντικά οι αριθμητικές αστάθειες κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Αποκτά πολύ σημαντικό ρόλο για την δυνατότητα επίλυσης το αρχικό σημείο που θα δοθεί να αποτελεί αποδεκτή λύση. Για τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ως αρχική τιμή αυτή που προέκυψε από τον σχεδιασμό με τη μέθοδο της επικεφαλής σεισμικής καταγραφής με επικεφαλής την καταγραφή ChiChi129.

Στην παρούσα ομάδα αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε ως αντικειμενική συνάρτηση η $\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$. Δεν λήφθηκε υπόψη η επιρροή της τριβής. Επιλέχθηκε ακρίβεια ολοκλήρωσης της τάξης του 10^{-7} και ακρίβεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης της τάξης του 10^{-3} . Περιορισμοί του προβλήματος είναι οι ίδιοι όπως και στην υπόλοιπη εργασία.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τη βελτιστοποίηση για κάθε σεισμική καταγραφή.

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	$\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$	$\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$	$\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$	$\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$	$\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$	$\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$	$\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
kspx (kN/m)	3,8577	4,0878	0,0010	3,7618	4,2981	4,0822	0,0698
as	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,7864
bs	0,0019	0,0010	0,0010	0,0010	0,0461	0,0010	0,0497
ad	0,0010	0,0010	0,0010	0,0590	0,0010	0,0010	0,1443
bd	0,0010	0,0010	4,1311	0,0010	0,0189	0,0010	0,0014
Cdx1 (kNsec/m)	0,0010	0,7310	0,0010	0,5242	0,8412	0,6833	27,9612
Cdx2 (kNsec/m)	0,0010	0,0010	0,1790	0,1750	0,0059	0,0010	0,0010
maxreldis (m)	0,17	0,14	0,24	0,23	0,24	0,21	0,23
maxrelvel (m/s)	1,00	0,53	0,83	0,47	1,29	0,74	0,67
maxabsacc (m/sec ²)	0,01	0,00	1,37	0,70	0,06	0,01	0,44

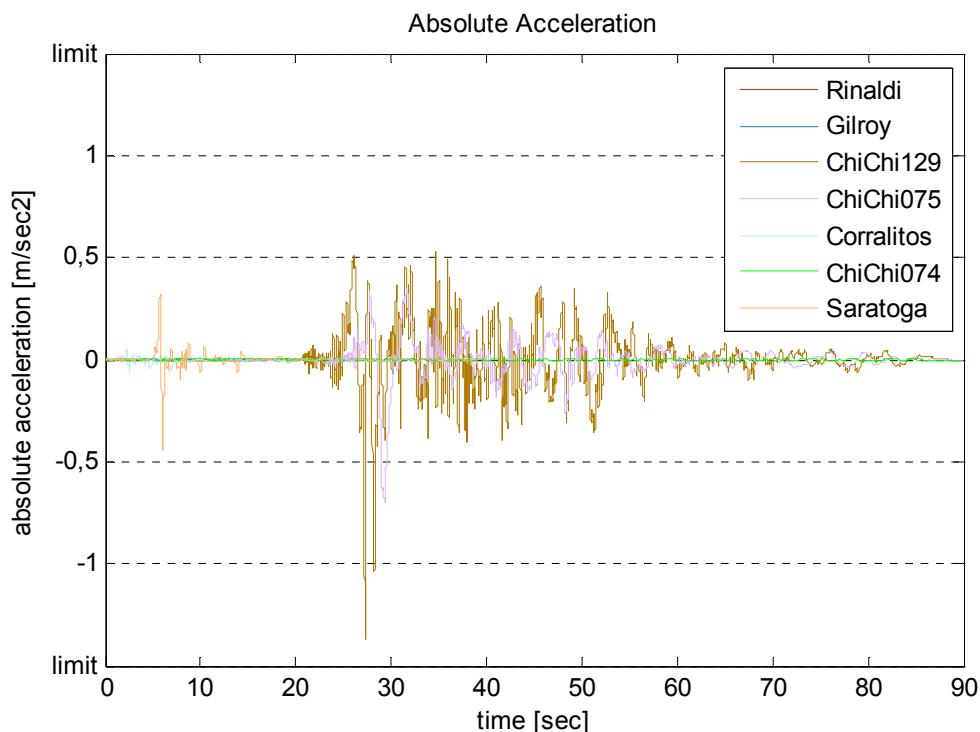
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	0,17%	0,07%	11,52%	35,60%	0,40%	0,11%	5,53%

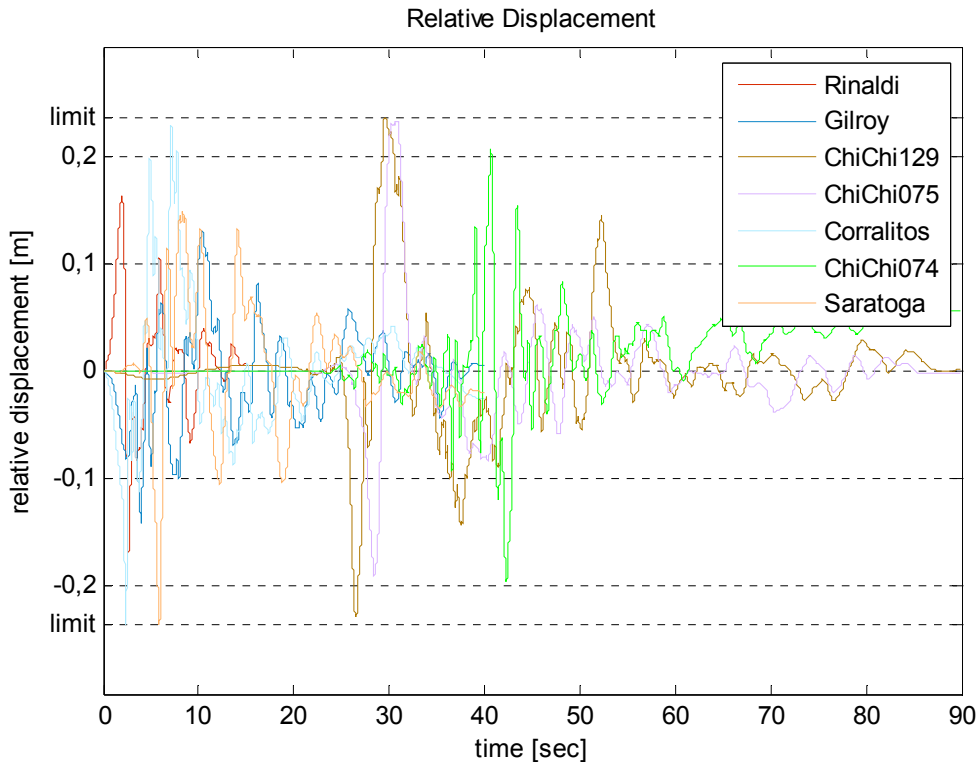
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για κάθε καταγραφή με αντικειμενική $\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$ και διαχωρισμό καμπυλών κύλισης

Από τον παραπάνω πίνακα και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα από τις προηγούμενες αναλύσεις προκύπτει:

- Ολοκληρώθηκε η διαδικασία βελτιστοποίησης για όλες τις καταγραφές.
- Για όλες τις καταγραφές τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια (Rinaldi, Gilroy, ChiChi129, Corralitos, Saratoga) ή σημαντικά βελτιωμένα (ChiChi074) σε σχέση με τα αντίστοιχα χωρίς των διαχωρισμό των καμπυλών κύλισης.
- Όσον αφορά την διαδικασία βελτιστοποίησης αυτή καθεαυτή, πλην της καταγραφής Saratoga, συγκλίνει ταχύτερα (δηλ. με λιγότερες επαναλήψεις) στη βέλτιστη λύση.
- Επαναλαμβάνεται ότι η αρχική τιμή αποτελεί αποδεκτή λύση για όλες τις καταγραφές πλην Corralitos.

Ακολουθούν σχετικά διαγράμματα.





Σχ. 4.1: Απόκριση του συστήματος με διαχωρισμό των καμπυλών κύλισης για το σύνολο των καταγραφών χωρίς τριβή
i) απόλυτες επιταχύνσεις ii) σχετικές μετατοπίσεις

4.2.2 Καθολικός σχεδιασμός

Επιχειρήθηκε να επιλυθεί το πρόβλημα του καθολικού σχεδιασμού με βάση τη μέθοδο του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος. Για το συνδυασμό των πέντε επιταχυνσιογραφημάτων που χρησιμοποιήθηκαν και σε προηγούμενο κεφάλαιο ο κώδικας δεν κατάφερε να συγκλίνει σε καμία επανάληψη, ανεξάρτητα από την αντικειμενική, την ακρίβεια ολοκλήρωσης, τον αλγόριθμο επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης της δυναμικής κίνησης, το αρχικό σημείο διερεύνησης που επιλέχθηκε. Οι αριθμητικές αστάθειες γίνονται σημαντικές. Παρουσιάζεται η βέλτιστη λύση που προέκυψε από το σχεδιασμό για τη σύνθεση των σεισμικών καταγραφών Rinaldi, Gilroy, Corralitos και Saratoga. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με διαφορετικό αρχικό σημείο διερεύνησης (w_0).

	kspx (kN/m)	as	bs	ad	bd	Cdx1 (kNsec/m)	Cdx2 (kNsec/m)
Βέλτιστη λύση =	1,1886	0,3039	0,0010	0,0031	0,0019	0,0010	0,0383
w_0 =	4,0861	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,7178	0,1961

Πίνακας 4.2: Αρχικό σημείο διερεύνησης και βέλτιστη λύση για μέθοδο σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος με διαχωρισμό καμπυλών κύλισης

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
maxreldis (m)	0,20	0,13	0,59	0,49	0,21	0,20	0,23
maxrelvel (m/s)	0,98	0,52	0,93	0,65	1,30	0,73	0,68
maxabsacc (m/sec ²)	0,32	0,17	0,41	0,26	0,42	0,24	0,22
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
μείωση PGA στο	6,44%	2,73%	3,46%	13,13%	2,89%	4,04%	2,74%

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για κάθε καταγραφή με αντικειμενική sum(abs(acc)) και διαχωρισμό καμπυλών κύλισης

	ksp _x (kN/m)	as	bs	ad	bd	Cdx1 (kNsec/m)	Cdx2 (kNsec/m)
Βέλτιστη λύση =	0,8702	0,1911	0,0402	0,0010	0,0803	0,0010	0,0281
w0 =	3,6724	0,6321	0,1536	0,6321	0,1536	0,1176	0,1337

Πίνακας 4.4: Αρχικό σημείο διερεύνησης και βέλτιστη λύση για μέθοδο σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος με διαχωρισμό καμπυλών κύλισης

Καταγραφή	Rinaldi	Gilroy	ChiChi129	ChiChi075	Corralitos	ChiChi074	Saratoga
Αντικειμενική συνάρτηση	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))	sum(abs(acc))
Συντελεστής επικλιμάκωσης	0,60	3,70	1,20	0,60	2,30	1,00	1,60
maxreldis (m)	0,19	0,15	0,67	0,50	0,21	0,21	0,23
maxrelvel (m/s)	0,99	0,52	0,88	0,63	1,30	0,74	0,68
maxabsacc (m/sec ²)	0,24	0,12	0,30	0,16	0,31	0,18	0,16
PGA (m/sec ²)	4,93	6,18	11,89	1,96	14,52	5,86	8,04
Μείωση PGA στο	4,78%	2,00%	2,50%	7,92%	2,11%	3,00%	2,00%

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για κάθε καταγραφή με αντικειμενική sum(abs(acc)) και διαχωρισμό καμπυλών κύλισης

Από τους παραπάνω πίνακες είναι προφανές ότι ο σχεδιασμός δεν είναι επιτυχημένος όσον αφορά τον περιορισμό των μετακινήσεων. Συγκεκριμένα δεν καλύπτονται τα όρια για τις καταγραφές ChiChi129 και ChiChi075. Για τις καταγραφές που περιλαμβάνονται στο σύνθετο επιταχυνσιογράφημα και την καταγραφή ChiChi074 πληρούνται οι περιορισμοί σχεδιασμού.

4.3 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

4.3.1 Διαγράμματα προσφερόμενης - καταναλισκόμενης ενέργειας

Για την πιο ολοκληρωμένη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος σεισμικής μόνωσης και για να εξακριβωθεί η συνεισφορά της προσθήκης των αποσβεστήρων στο σύστημα παρουσιάζονται στη συνέχεια μια σειρά από διαγράμματα που δείχνουν την κατανομή της σεισμικής ενέργειας στα διάφορα τμήματα του μονοβάθμιου συστήματος που εξετάζεται στη διάρκεια του χρόνου.

Παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις βέλτιστες τιμές που προέκυψαν από την ανάλυση με διαχωρισμό των καμπυλών κύλισης στα οποία είναι διαχωρισμένη πλήρως η συνεισφορά του κάθε μέρους του συστήματος. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα για τους ίδιους συντελεστές δυσκαμψίας και καμπυλών κύλισης αλλά με μηδενικούς συντελεστές απόσβεσης.

Από την σύγκριση των παρακάτω προκύπτει η ταχύτερη κατανάλωση της σεισμικής ενέργειας με την προσθήκη των αποσβεστήρων. Η κατανάλωση αυτή συνεπάγεται την ταχύτερη ηρεμία του συστήματος και τον περιορισμό των επιταχύνσεων.

Η ενέργεια υπολογίζεται με την αριθμητική ολοκλήρωση του διαγράμματος δύναμης – σχετικής μετατόπισης. Ακολουθούν τα διαγράμματα. Το διάγραμμα $\text{int}(m \cdot \text{absacc})$ πρακτικά είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Για τους συμβολισμούς όπου

int : ολοκλήρωμα της εν λόγω δύναμης ως προς την σχετική μετατόπιση

m : η μάζα του εκθέματος,

fsx : η ελαστική δύναμη του ελατηρίου,

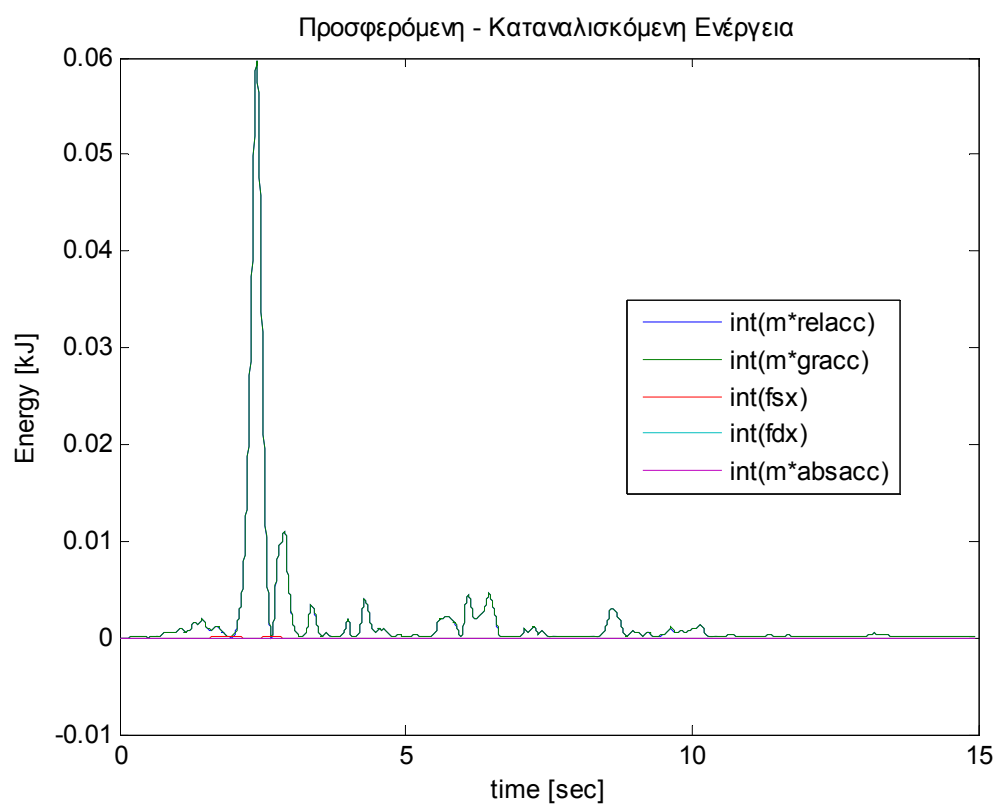
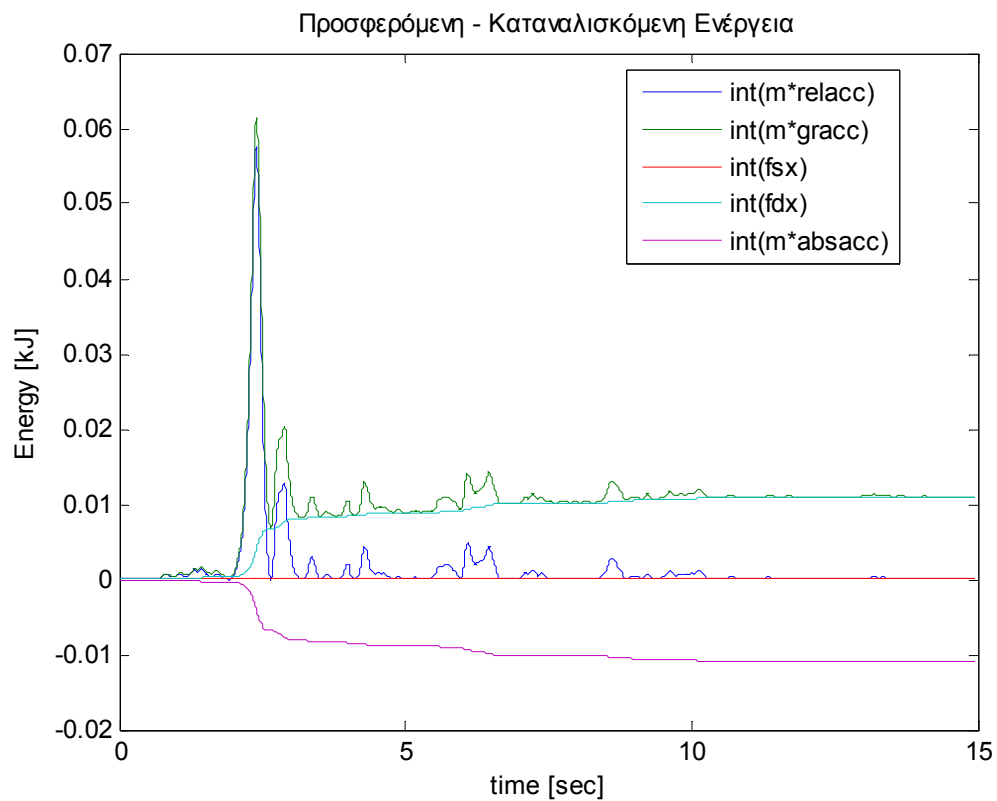
fdx : η δύναμη απόσβεσης του συστήματος,

relacc : η σχετική επιτάχυνση,

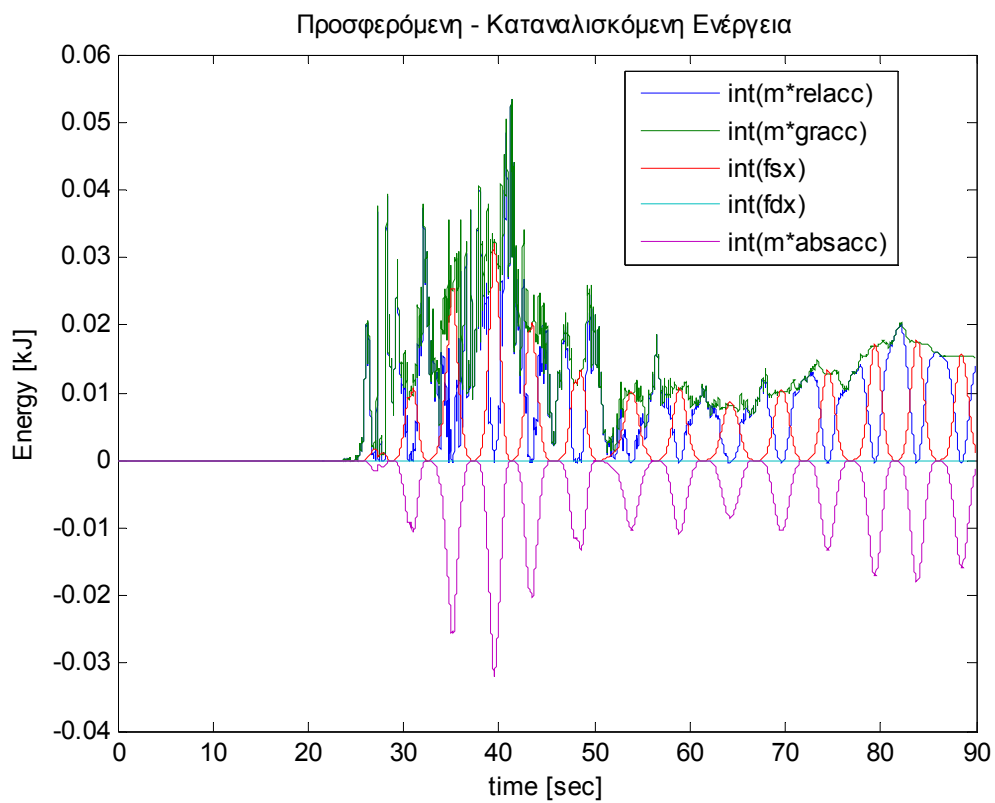
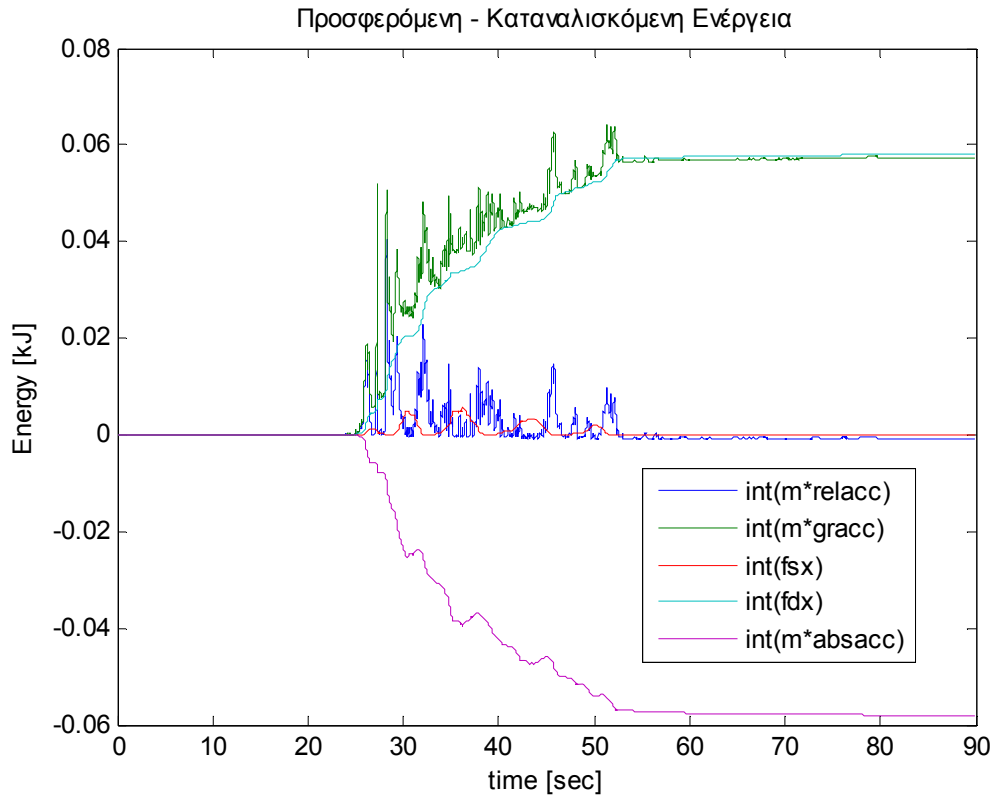
absacc : η απόλυτη επιτάχυνση και

gracc : η εδαφική επιτάχυνση.

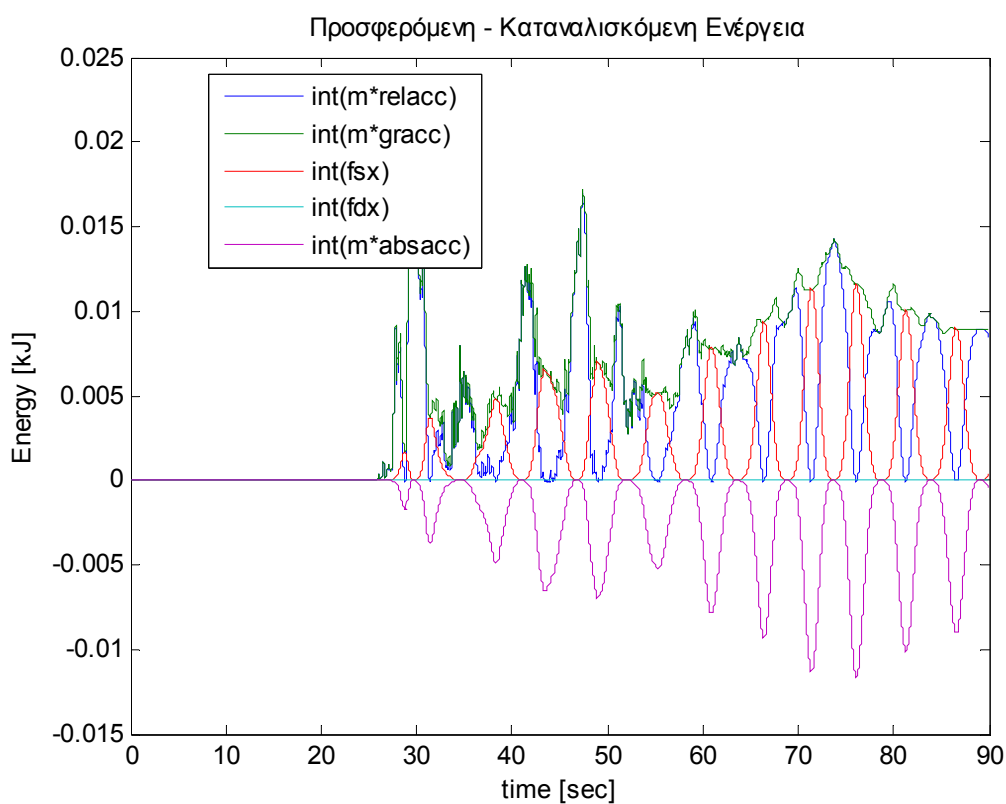
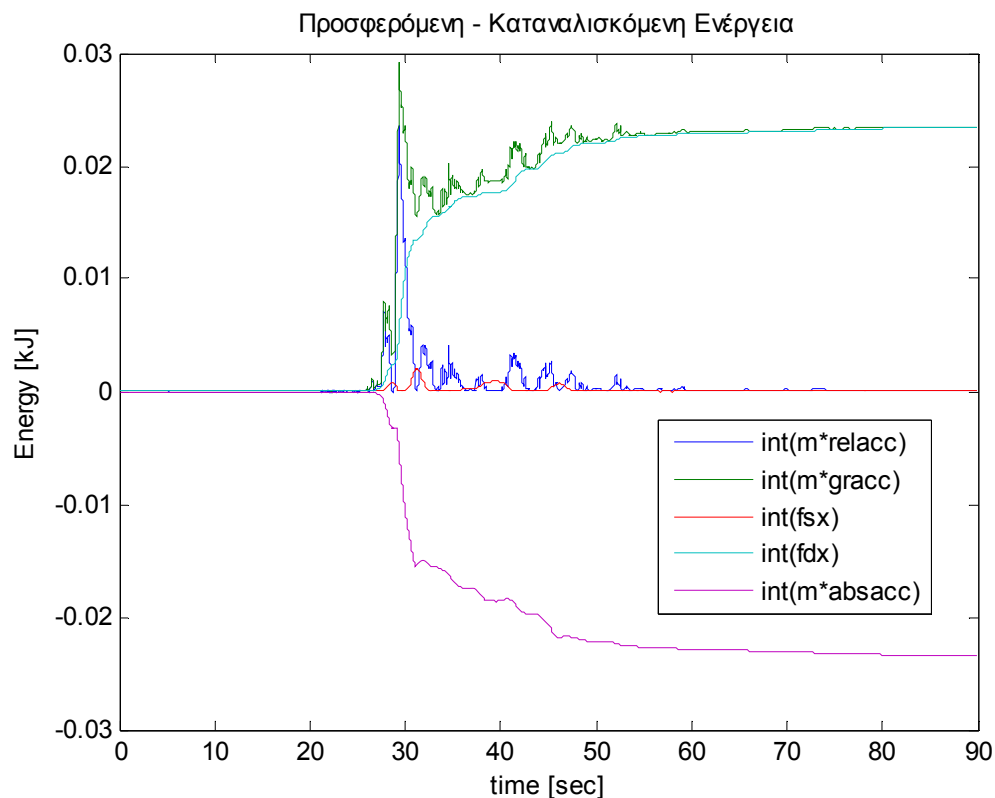
Παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα από τις καταγραφές Rinaldi, ChiChi129 και ChiChi075. Στην καταγραφή Rinaldi, όπως και στις υπόλοιπες που δεν παρουσιάζονται, η διαδικασία της βελτιστοποίησης οδήγησε σε πολύ μικρές τιμές για τους συντελεστές της παραβολής και τον συντελεστή δυσκαμψίας. Αποτέλεσμα η καμπύλη για την ελαστική ενέργεια να παρουσιάζεται με ευθεία γραμμή.



Σχ. 4.2: Προσφερόμενη – Καταναλισκόμενη ενέργεια για την καταγραφή Rinaldi
i) με απόσβεση ii) χωρίς απόσβεση



Σχ. 4.3: Προσφερόμενη – Καταναλισκόμενη ενέργεια για την καταγραφή ChiChi129
i) με απόσβεση ii) χωρίς απόσβεση



Σχ. 4.4: Προσφερόμενη – Καταναλισκόμενη ενέργεια για την καταγραφή ChiChi075
i) με απόσβεση ii) χωρίς απόσβεση

4.3.2 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης δυσκαμψίας – απόσβεσης και συντελεστή παραβολής α – συντελεστή παραβολής β

Προσπαθώντας να μελετήσουμε καλύτερα την επιρροή κάθε μεταβλητής σχεδιασμού στην συμπεριφορά του συστήματος και να επιβεβαιώσουμε την επιτυχία της διαδικασίας βελτιστοποίησης κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα αλληλεπίδρασης. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζεται η διακύμανση της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών σε σχέση με την μεταβολή δύο μεταβλητών σχεδιασμού. Επιλέγονται οι συνδυασμοί συντελεστών δυσκαμψίας – απόσβεσης και συντελεστών παραβολής $\alpha - \beta$.

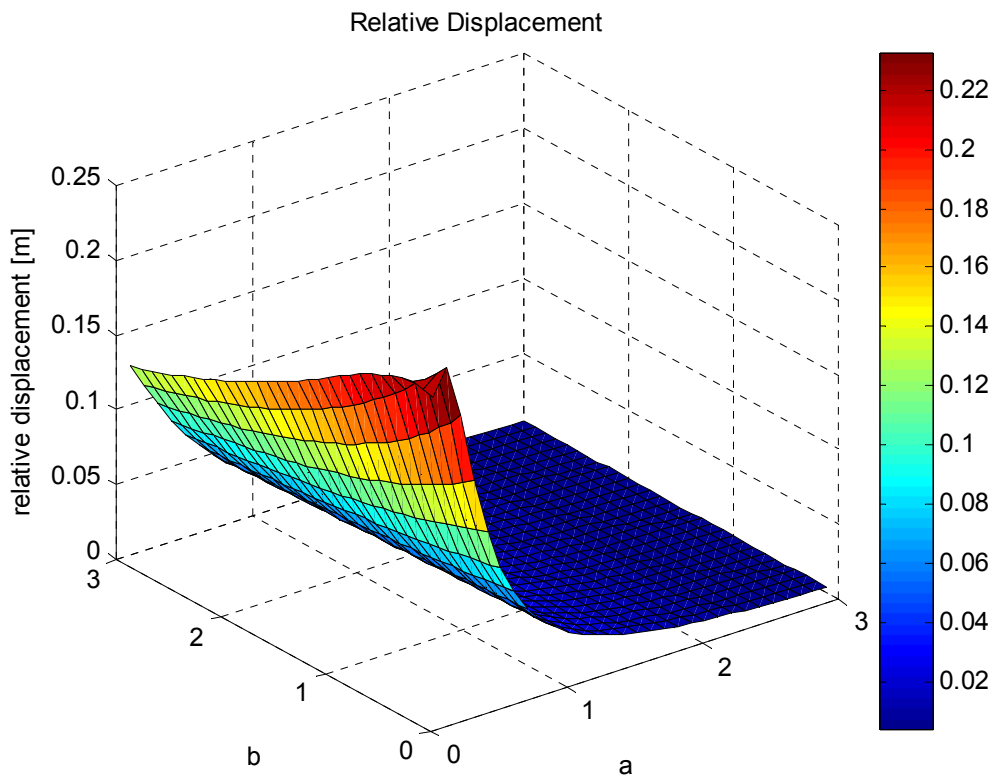
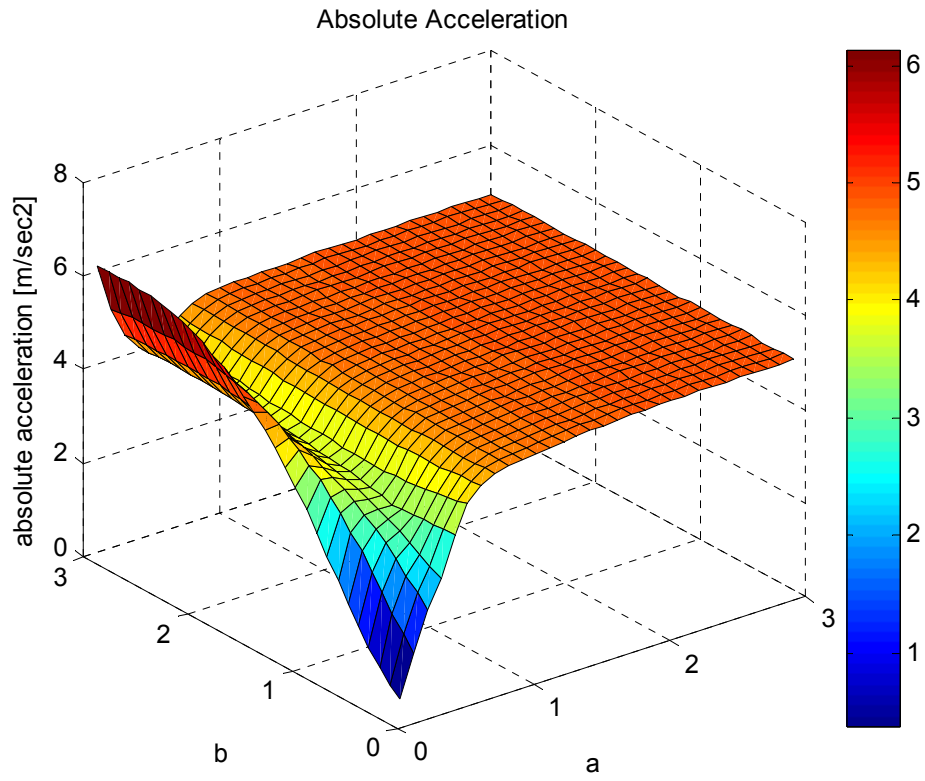
Από τη διαδικασία βελτιστοποίησης για όλες τις αναλύσεις προέκυψε ότι το εύρος διακύμανσης των μεταβλητών σχεδιασμού είναι μεταξύ μηδέν και πέντε. Για αυτές τις τιμές και βήμα 0,1 υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η μέγιστη απόλυτη επιτάχυνση και η μέγιστη σχετική μετατόπιση. Οι υπόλοιποι όροι διατηρούνται σταθεροί και ίσοι με τις τιμές που προέκυψαν από τη μέθοδο του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος για πέντε καταγραφές. Στις αναλύσεις αυτές η τιμή του συντελεστή $Cdx2$ (αποσβεστήρας παράλληλα στη διεύθυνση κίνησης) μηδενίζεται ώστε να είναι πιο εποπτική η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

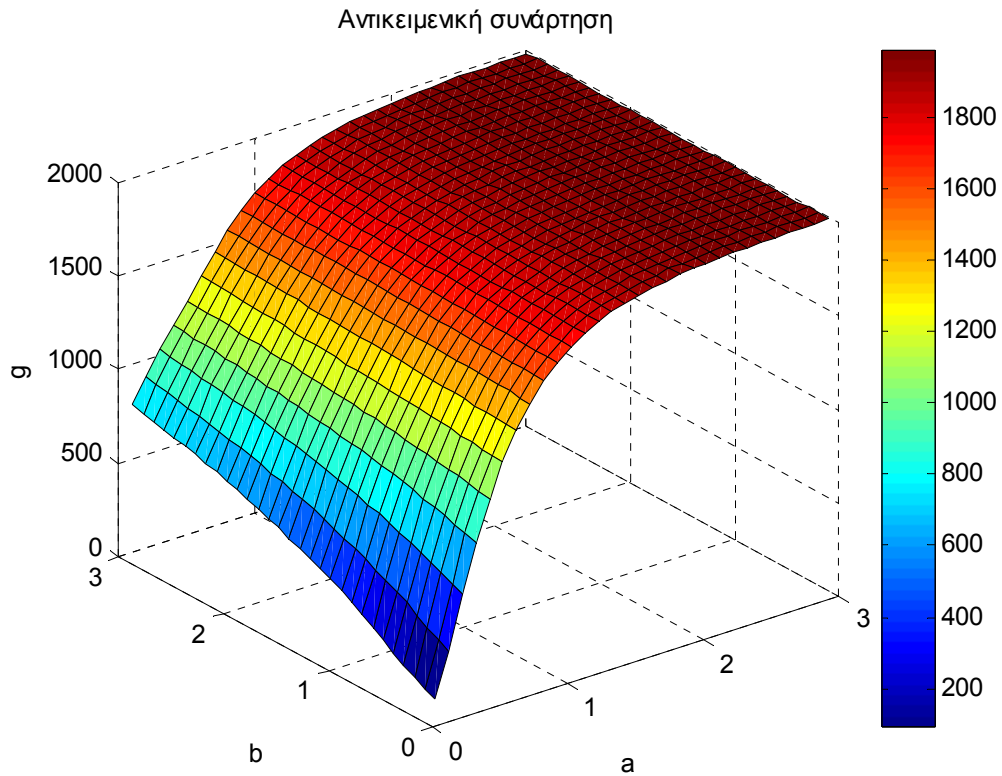
Από τα διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή του συνδυασμού των μεταβλητών σχεδιασμού σε αυτόν. Ακολουθούν οι τιμές για τις μεταβλητές σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν:

ksp _x (kN/m)	a	b	Cdx1 (kNsec/m)	Cdx2 (kNsec/m)
1,8958	0,2999	0,2020	3,0045	0,00

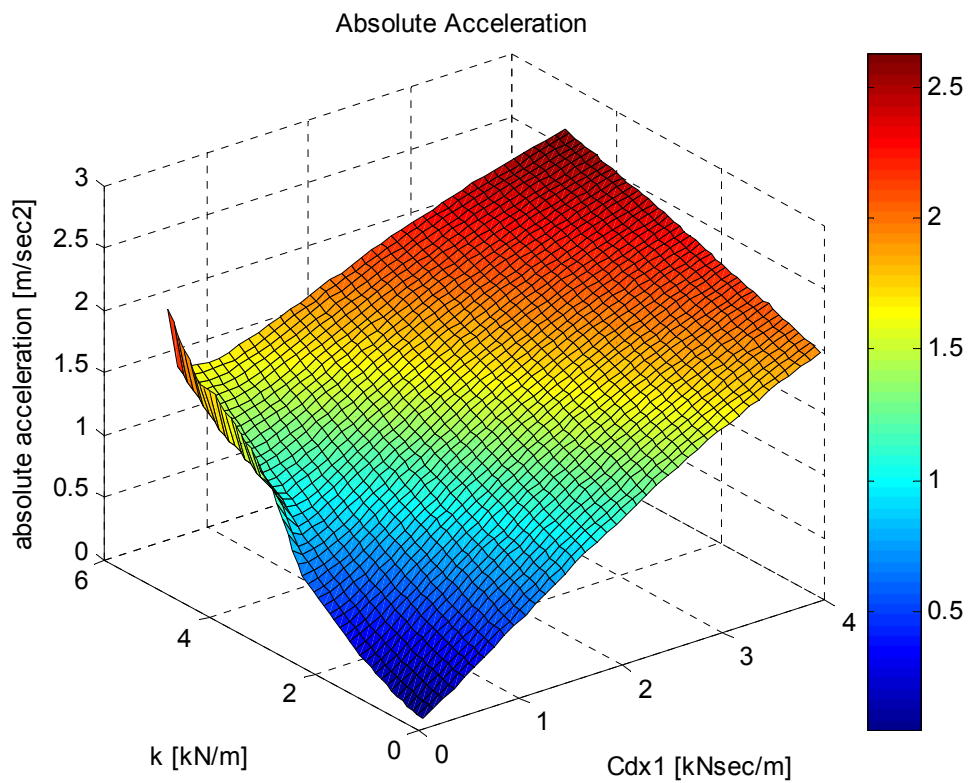
Πίνακας 4.6: Βέλτιστη λύση μεθόδου σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος

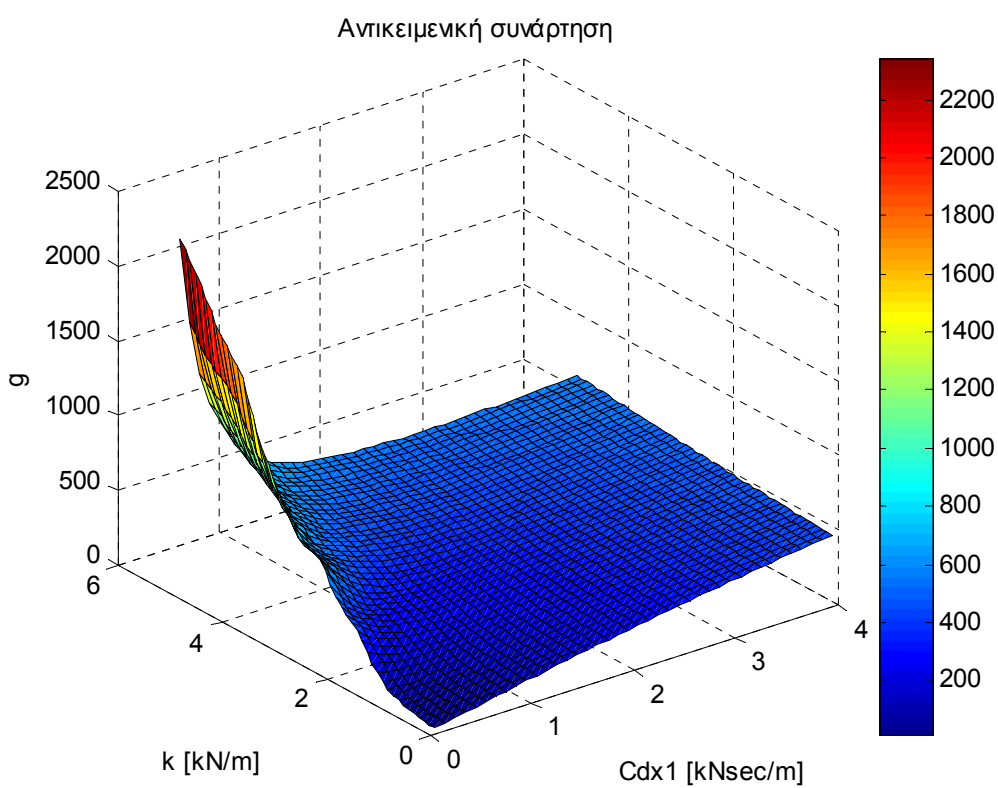
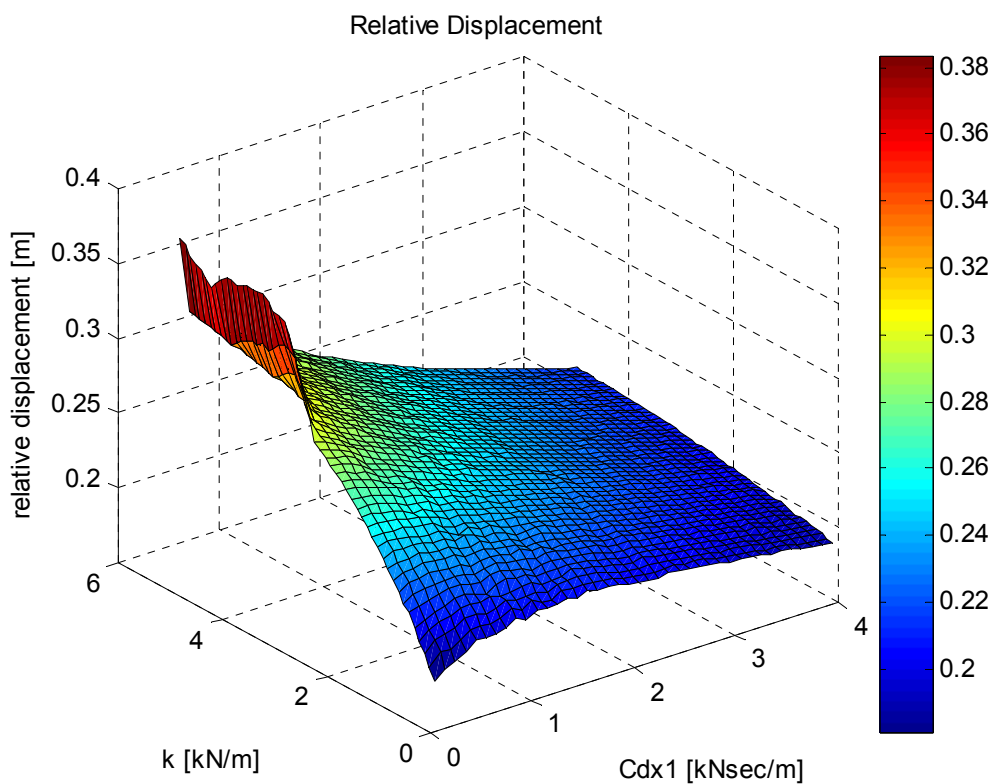
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο από τις καταγραφές Rinaldi και ChiChi129 ως αντιπροσωπευτικοί των σεισμικών καταγραφών που χρησιμοποιούνται.



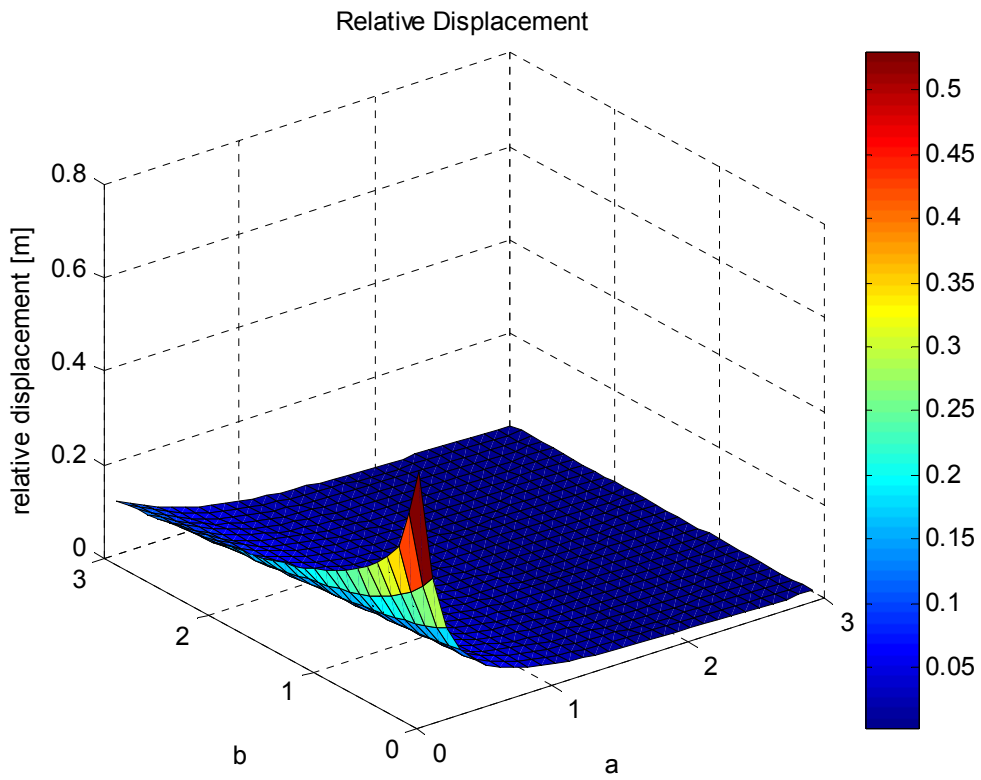
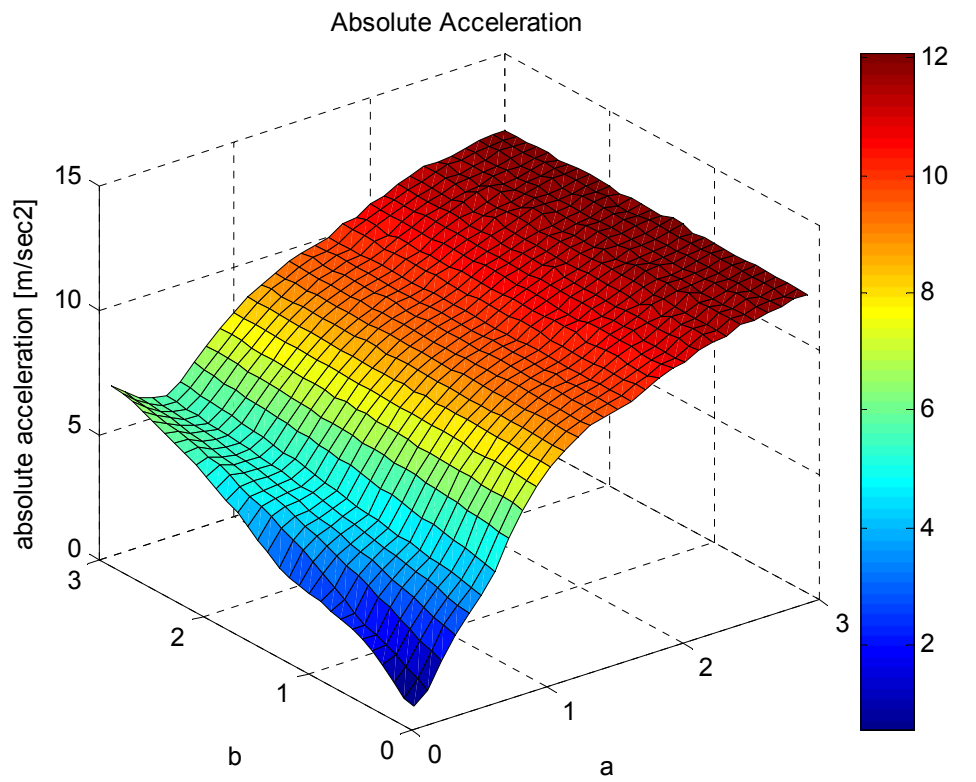


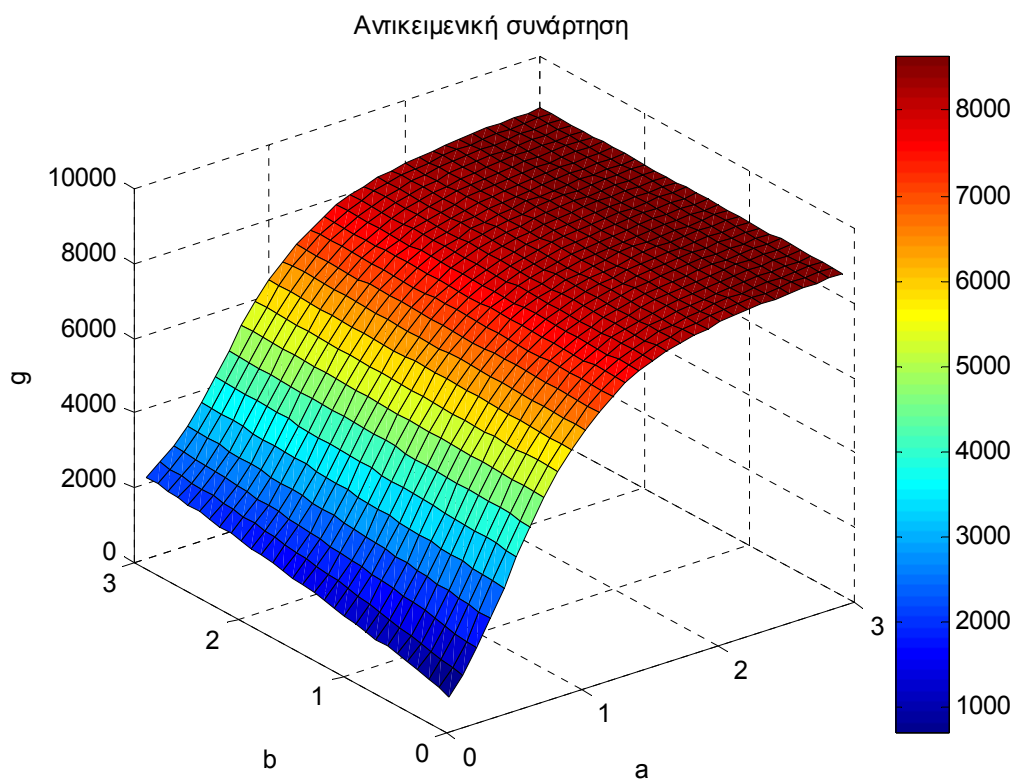
Σχ. 4.5: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης $a - b$ για την καταγραφή Rinaldi
 i) απόλυτη επιτάχυνση ii) σχετική μετατόπιση iii) αντικειμενική συνάρτηση



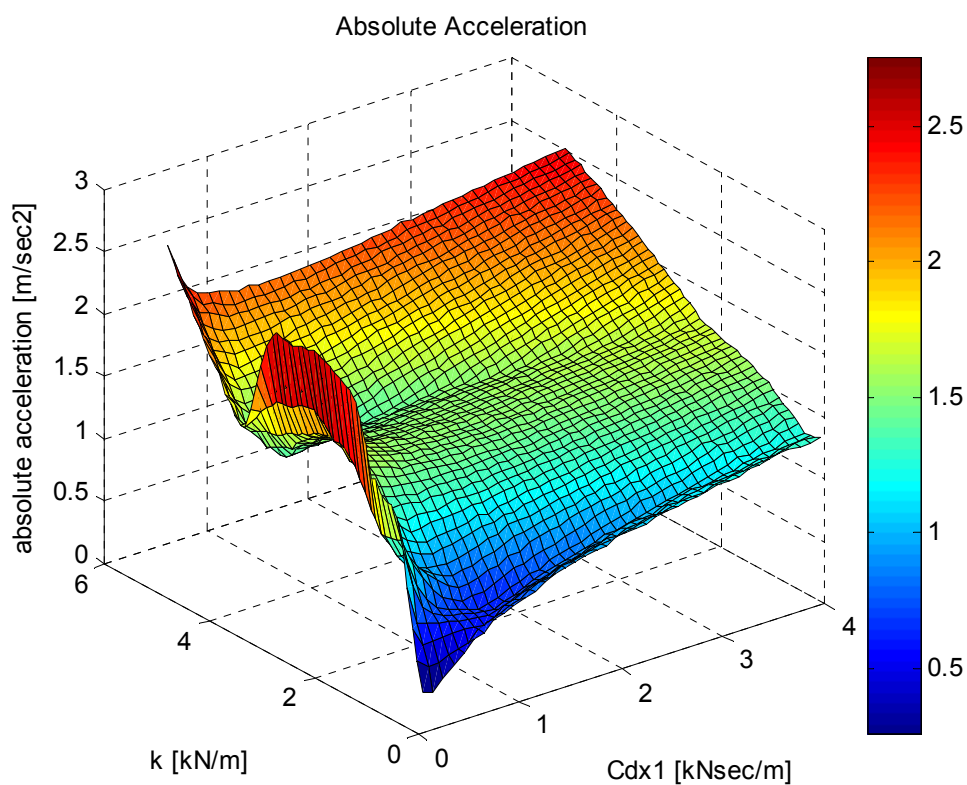


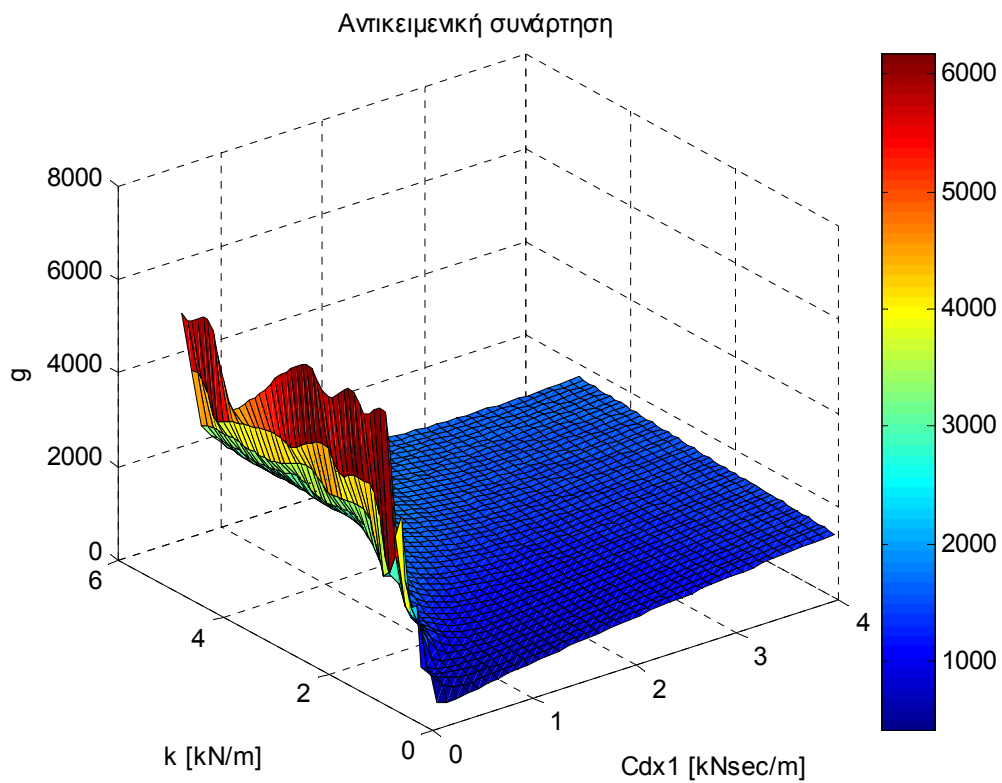
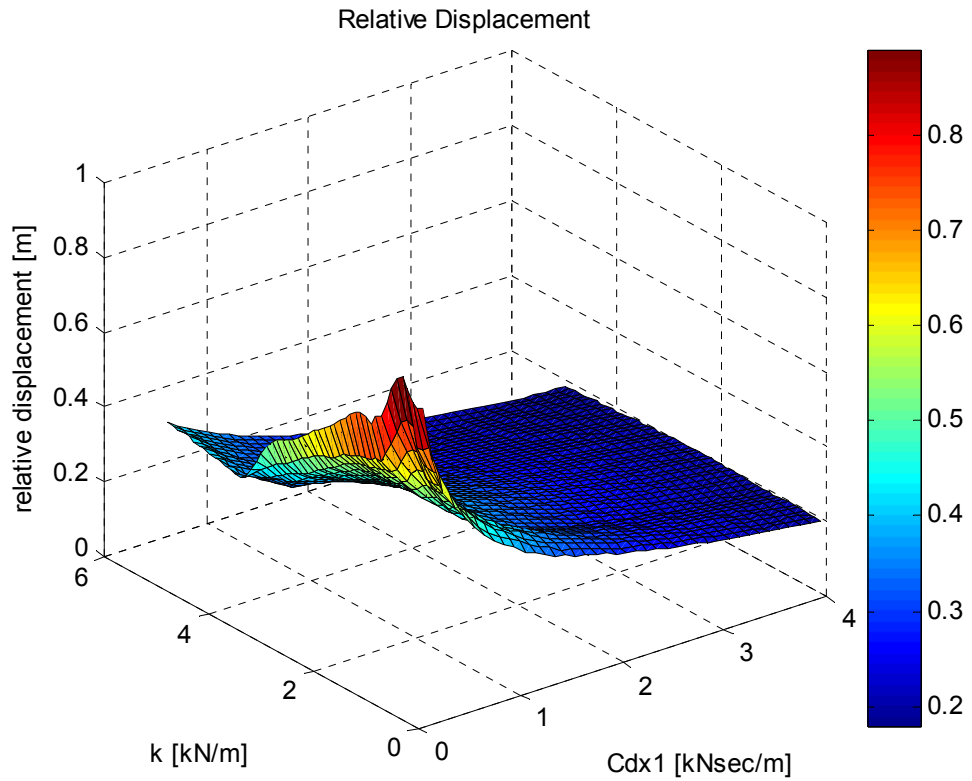
Σχ. 4.6: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης $k - Cdx1$ για την καταγραφή Rinaldi
 i) απόλυτη επιτάχυνση ii) σχετική μετατόπιση iii) αντικειμενική συνάρτηση





Σχ. 4.7: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης a – b για την καταγραφή ChiChi129
 i) απόλυτη επιτάχυνση ii) σχετική μετατόπιση iii) αντικειμενική συνάρτηση





Σχ. 4.8: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης $k - Cdx1$ για την καταγραφή ChiChi129
 i) απόλυτη επιτάχυνση ii) σχετική μετατόπιση iii) αντικειμενική συνάρτηση

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι προφανές ότι το εύρος διακύμανσης των μεταβλητών σχεδιασμού για το οποίο ο σχεδιασμός είναι αποδεκτός περιορίζεται όντως στο διάστημα που επιλέχθηκε και στο οποίο κινούνται οι λύσεις από την διαδικασία βελτιστοποίησης.

Ακόμη μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μεταβολή του συντελεστή της παραβολής a , του συντελεστή του δευτεροβάθμιου όρου, έχει σημαντικότερη επίδραση από την μεταβολή του συντελεστή του γραμμικού όρου και στις αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις και τις μετατοπίσεις.

Αντίστοιχα για πολύ μικρές τιμές του συντελεστή απόσβεσης έχει σημαντική επίδραση η μεταβολή του συντελεστή δυσκαμψίας στις τιμές που παρατηρούνται. Από κάποιο όριο του συντελεστή απόσβεσης και πάνω ουσιαστικά η απόκριση του συστήματος είναι σταθερή.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΝΟΨΗ

Επιβεβαίωση πρώτη, καθήκον της επιστήμης είναι η αποκάλυψη της πραγματικής εσωτερικής κίνησης των φυσικών και κοινωνικών φαινομένων, η κατανόηση των νόμων με τους οποίους λειτουργεί η φύση και η αποτελεσματική χρησιμοποίησή τους για την βελτίωση της ποιότητας της ζωής του ανθρώπου. Και οι δύο έννοιες που συνδέονται με την παρούσα εργασία, τόσο αυτή της σεισμικής μόνωσης όσο και της βελτιστοποίησης, συχνά παρερμηνεύονται και παραβλέπονται τα όριά τους. Κατά την διάρκεια της εργασίας αυτής ξεπρόβαλε με καταλυτικό τρόπο η ανάγκη βαθύτερης γνώσης των νόμων που διέπουν τα παραπάνω φαινόμενα για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος. Στο βαθμό που αυτή προχωρούσε μπορούσαν να δοθούν και απαντήσεις σε δυσκολίες που προέκυψαν.

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε, σε όλες τις φάσεις τις βελτιστοποίησης και διερεύνησης της συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος σεισμικής μόνωσης, να αντιμετωπιστεί αυτό ως καταναλωτής ενέργειας. Η παραπάνω θεώρηση κρίνεται επιτυχής και μπορεί να δώσει αποτελέσματα κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Όσον αφορά την επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης διερευνήθηκαν διεξοδικά δύο επιλογές, το άθροισμα των απόλυτων τιμών των απόλυτων επιταχύνσεων ($\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$) που σημειώνονται στο έκθεμα και το άθροισμα των τετραγώνων των απόλυτων επιταχύνσεων ($\text{sum}(\text{sq}(\text{acc}))$). Οι δύο επιλογές δεν δείχνουν σημαντικές διαφορές στην αποτελεσματικότητα εξεύρεσης βέλτιστης λύσης. Συγκλίνουν στις ίδιες τιμές μέγιστων τιμών απόλυτων επιταχύνσεων και μέγιστων μετατοπίσεων. Στις αναλύσεις «δύσκολων» καταγραφών το άθροισμα των τετραγώνων των απόλυτων επιταχύνσεων δείχνει να έχει καλύτερα αποτελέσματα. Στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων για τη βέλτιστη λύση το σύστημα εκμεταλλεύεται όλο το περιθώριο μετατόπισης. Εντούτοις υπάρχουν περιπτώσεις που αυτό δεν συμβαίνει, ενδεικτικό ότι υπάρχουν περιθώρια για σκέψεις εισαγωγής κάποιας συνάρτησης ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση.

Κατά την ανάλυση μεμονωμένων σεισμικών καταγραφών η διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθήθηκε κατάφερε να δώσει λύση στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων. Σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την ταχύτητα και την ακρίβεια της σύγκλισης αποτελεί το αρχικό σημείο διερεύνησης. Πραγματοποιήθηκε έρευνα και για διαφορετική σεισμικά μονωμένη μάζα που επίσης ολοκληρώθηκε με επιτυχία. Από τις παραπάνω αναλύσεις προέκυψε ότι επαρκεί διαφορετικός βαθμός ακρίβειας ολοκλήρωσης ανάλογα την καταγραφή και την μάζα του εκθέματος γεγονός που επιδρά καταλυτικά στον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο. Για τις καταγραφές που στην παραπάνω παρουσίαση των αποτελεσμάτων δεν δίνονται αποτελέσματα, η διαδικασία δεν ολοκληρώθηκε για αρχικό σημείο διερεύνησης σταθερό καθ' όλη την ανάλυση για όλες τις καταγραφές. Η αλλαγή του αρχικού σημείου οδηγεί σε λύσεις και για αυτές τις καταγραφές.

Για τον καθολικό σχεδιασμό η μέθοδος του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος μπορεί να οδηγήσει σε βέλτιστη λύση. Χρειάζεται προσοχή κατά την επιλογή των επιταχυνσιογραφημάτων που θα συνθέσουν το νέο σύνθετο. Σε περιπτώσεις που λόγω μεγάλου όγκου υπολογιστικών δεδομένων ή/και αριθμητικών ασταθειών δεν μπορεί να ολοκληρωθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης με τη παραπάνω μέθοδο μια καλή προσέγγιση μπορεί να βρεθεί ακολουθώντας τη μέθοδο της επικεφαλής σεισμικής καταγραφής. Εντούτοις αξίζει να διερευνηθεί η δυνατότητα λειτουργίας της μεθόδου του σύνθετου με κάποια καλύτερη επιλογή του αρχικού σημείου διερεύνησης.

Όσον αφορά την βελτίωση που προτείνεται χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση για να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα. Η αρχική εντύπωση είναι ότι στο βαθμό που ξεπερνιούνται οι πρόσθετες αριθμητικές αστάθειες μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα. Η βελτίωση είναι σημαντικότερη στις «δυσκολότερες» καταγραφές, όπου υπάρχουν και μεγαλύτερα περιθώρια βελτίωσης της συμπεριφοράς.

Η γενική εικόνα για τις βέλτιστες λύσεις που επιλέγονται είναι ότι υπάρχει έντονη συσχέτιση ανάμεσα στις μεταβλητές σχεδιασμού. Η λύση δεν εξαρτάται από την απόλυτη τιμή κάθε μεταβλητής όσο από τον συνδυασμό τους. Γενικά προτιμάται να δίνονται πολύ μικρές τιμές στους συντελεστές της παραβολής και η όποια δυσκαμψία και απόσβεση να εξασφαλίζεται μέσω των αντίστοιχων συντελεστών. Όπου διατηρείται κάποια τιμή για τους συντελεστές της παραβολής παρουσιάζεται να προτιμάται ο συντελεστής του δευτεροβάθμιου όρου. Γεγονός που συνδυάζεται με το χαρακτήρα των διαφορικών εξισώσεων Duffing και van der Pol.

Από τα διαγράμματα ενέργειας αλλά και από το γεγονός ότι σε όλες τις λύσεις διατηρείται ο όρος της απόσβεσης επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα που προέκυψε από προηγούμενες εργασίες ότι η προσθήκη αποσβεστήρων βελτιώνει την συμπεριφορά του συστήματος.

Τέλος είναι σημαντικό να τονιστεί το υπολογιστικό όφελος από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Ενδεικτικά για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης απαιτούνται μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες επαναλήψεις ενώ για την εξαγωγή ενός και μόνο διαγράμματος αλληλεπίδρασης απαιτούνται μερικές χιλιάδες. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας σε έναν υπολογιστή με επεξεργαστή Intel® Core™2Duo E8400 @3,00GHz, 3,00GHz και 2,00GB RAM, επίπεδο ακρίβειας ολοκλήρωσης 10^{-7} και ακρίβειας βελτιστοποίησης 10^{-3} , σημείο εκκίνησης $w_0 = [k_{spx}, a, b, C_{dx1}, C_{dx2}] = [5,00; 0,80; 0,20; 0,15; 0,15]$ και αντικειμενική συνάρτηση $\text{sum}(\text{abs}(\text{acc}))$ απαιτείται ενδεικτικά: για την καταγραφή Rinaldi 4min, για την καταγραφή Gilroy 7min και για την καταγραφή ChiChi129 50min. Οι χρόνοι που απαιτούνται για την μέθοδο του σύνθετου επιταχυνσιογραφήματος είναι ίδιας τάξης με τις καταγραφές ChiChi.

5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας απαιτήθηκε η σύνθεση στοιχείων από διαφορετικά επιστημονικά αντικείμενα. Ο μικρός σχετικά χρόνος που προσφέρεται για τις ανάγκες μιας διπλωματικής εργασίας δεν επέτρεψε την σε βάθος αντιμετώπιση όλων των στοιχείων που συνθέτουν την εργασία. Σε καμία περίπτωση η έρευνα που πραγματοποιήθηκε δεν φιλοδοξεί να θεωρηθεί πλήρης και τα συμπεράσματά της απόλυτα. Αποτελεί περισσότερο μια πρώτη προσέγγιση της βελτιστοποίησης του εξεταζόμενου συστήματος σεισμικής μόνωσης, με αποτελέσματα που δείχνουν μια κατεύθυνση για επόμενες εργασίες.

Στον τομέα της δυναμικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος θα είχε ενδιαφέρον μια βαθύτερη μελέτη της σχέσης του συγκεκριμένου συστήματος και των διαφορικών εξισώσεων Duffing και van der Pol. Ακόμη πολύ σημαντικά συμπεράσματα και επιβεβαίωση ή απόρριψη όλων των προηγούμενων θα μπορούσαν να προκύψουν από την πειραματική προσομοίωση του συστήματος.

Όσον αφορά την βελτιστοποίηση θα μπορούσαν να δοκιμαστούν η εισαγωγή συναρτήσεων ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση ή μέθοδοι πολυκριτηριακού σχεδιασμού με μία διαφορετική ανάγνωση του προβλήματος. Ακόμη παραμένει

ανοιχτό το πεδίο χρησιμοποίησης μεθόδων γενετικών αλγορίθμων ή κάποιας συνδυαστικής μεθόδου μαθηματικού προγραμματισμού και γενετικών αλγορίθμων συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων.

Κατά την ανάλυση παρουσιάστηκαν αρκετές αριθμητικές αστάθειες κυρίως κατά την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης της δυναμικής στις περιπτώσεις σύνθετων επιταχυνσιογραφημάτων. Η αναζήτηση καταλληλότερων για το συγκεκριμένο πρόβλημα μεθόδων και της αναγκαίας ακρίβειας μπορεί να βελτιώσει κατά πολύ την σταθερότητα του κώδικα.

Τέλος ο προγραμματιστικά ορθότερος τρόπος κωδικοποίησης της όλης διαδικασίας μπορεί να μειώσει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται. Κυρίως προς την κατεύθυνση ενοποίησης των αρχείων υπολογισμού της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών καθώς χρησιμοποιείται κοινός κώδικας ανάμεσα στα δύο αρχεία.

Βιβλιογραφία

1. ΚΑΤΣΙΚΑΔΕΛΗΣ Ι.Θ., *Δυναμική των Κατασκευών Τόμος I*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2002, Κεφάλαια 1 έως και 7
2. ΚΑΤΣΙΚΑΔΕΛΗΣ Ι.Θ., *Δυναμική των Κατασκευών Τόμος II*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2004, Κεφάλαιο 16
3. CHOPRA A.K., *Dynamics of Structures*, Έκδοση δεύτερη, Prentice-Hall, New Jersey, 2001, Κεφάλαια 5 και 20
4. INMAN D.J., *Engineering Vibration*, Έκδοση δεύτερη, Prentice-Hall, New Jersey, 2001
5. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Αθήνα, 2000
6. NAEIM F. & KELLY J.M., *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*, John Willey & Sons Inc., New York, 1999
7. KELLY T.E., *Base Isolation of Structures - Design Guidelines*, Holmes Consulting Group Ltd, Wellington, 2001
8. ARORA J.S., *Introduction to optimum design*, McGraw-Hill, 1989
9. ΚΟΥΜΟΥΣΗΣ Β.Κ., *Βέλτιστος σχεδιασμός των κατασκευών*, Σημειώσεις μαθήματος, Αθήνα, 1998
10. ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ Μ. & ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ Σ., *Επιχειρησιακή έρευνα*, Σημειώσεις μαθήματος, Αθήνα, 2002, Κεφάλαια 1 έως και 5, 9
11. MATLAB Optimization Toolbox User's Guide, The MathWorks Inc., 2007
12. ΚΕΦΑΛΑ Γ., *Σεισμική μόνωση εκθεμάτων μουσείων*, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2007
13. ΛΑΓΑΡΟΣ Ν.Δ., *Βελτιστοποίηση κατασκευών με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων και νευρωνικών δικτύων*, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2000